

معرفی یک مدل فیزیکی آماری جدید جهت محاسبه ظرفیت کانال انتشار ارتباطات بی سیم در محیط‌های شهری متحرک با استفاده از روش تئوری یکنواخت پراش

علی تجویدی

افراد اشاره کرد. در این مقاله می‌خواهیم مدلی ترکیبی را معرفی کنیم که مزایای هر دو گروه از مدل‌ها را داشته باشد و از مشکلات آنها دوری کند، به این مدل، مدل فیزیکی آماری گفته می‌شود. در این مدل دانش الکترومغناطیسی بر روی داده‌های آماری اجرا می‌شود که این امر منجر به یک توزیع از پیش‌بینی خروجی مدل می‌شود. خروجی می‌تواند به صورت نقطه به نقطه باشد، هرچند که دیگر پیش‌بینی مرتبط با یک مکان خاص نیست. به طور مثال یک مدل آماری معین می‌تواند توزیع سایه را پیش‌بینی کند و از خطاهای یک مدل تجربی اجتناب کند، هرچند که نمی‌تواند مقدار سایه در یک مکان خاص را پیش‌بینی کند.

از سویی دیگر به علت مزایای بسیار سیستم‌های MIMO^۱ استفاده از آن در بسیاری از سیستم‌های مخابراتی افزایش یافته است. در سیستم‌های ۴GPP^۲ و LTE^۳ می‌بایست کیفیت خدمات بسیار بالا باشد تا بتواند ارتباطات ویدئویی را در هر کجا که لازم باشد برقرار سازد. برای این که این سیستم‌ها بتوانند به این نیاز پاسخ دهند، از فناوری MIMO استفاده می‌کنند. عملکرد سیستم‌های مخابراتی سیار، بسیار به کانال رادیویی آن وابسته است، در نتیجه پیش‌بینی مشخصات انتشار بین دو آنتن اهمیت زیادی در طراحی شبکه‌های LTE دارد [۲] و [۳]. بنابراین به دست آوردن تخمین مناسبی از چگونگی انتشار امواج در محیط‌های شهری نیاز اصلی طراحان این سیستم‌ها است. به بیان دیگر، یک طراح برای تعیین مناسب‌ترین مکان برای هر ایستگاه اصلی، توان ارسالی بهینه این ایستگاه‌ها، مناسب‌ترین آرایش برای سلول‌های پوشیده محیط و عرض باند سیستم باید بداند که برای موقعیت‌های مختلف هر آنتن، شدت میدان دریافتی در نقاط مختلف محیط چه خصوصیات آماری و مقادیر مطلق می‌تواند داشته باشد. با توجه به فرکانس سیستم‌های مخابراتی سیار و پیچیدگی زیاد هندسی محیط‌های شهری به دلیل وجود موانع ثابت و متحرک مختلف، پیش‌بینی انتشار امواج در این گونه محیط‌ها با استفاده از روش‌های دقیق مانند حل مستقیم معادله موج، روش‌های عددی مثل FDTD^۴ روش ممان و روش تفاضل محدود ممکن نیست و از این رو استفاده از روش‌های مجانبی مانند تئوری یکنواخت پراش^۵ UTD که خود نگارش بهبودیافته‌ای از تئوری هندسی پراش GTD^۶ است، بهترین راه حل برای پیش‌بینی انتشار امواج در محیط‌های شهری است [۴] و [۵].

چکیده: در نواحی شهری، ارتباطات بی‌سیم به علت انعکاس و پراش امواج از ساختمان‌ها و متحرک‌بودن گیرنده‌ها، دچار محوشدگی‌های شدید می‌شوند. از این رو در طراحی شبکه‌های بی‌سیم نیاز به مدلی داریم که بتواند پدیده انتشار امواج در کانال انتشار را به خوبی پیش‌بینی کند تا روش‌های ارتباطی بین فرستنده و گیرنده بر اساس کانال انتشار تعیین شوند. اکثر مدل‌های کانال انتشار بی‌سیم متحرک بر پایه اندازه‌گیری بوده‌اند. در این مقاله می‌خواهیم یک مدل فیزیکی آماری جدید معرفی کنیم که در آن ساختمان‌ها به صورت بخش ثابت مدل در نظر گرفته شده‌اند و پدیده‌های پراش و انعکاس پرتوها با استفاده از روش تئوری یکنواخت پراش مدل شده‌اند. از سوی دیگر گیرنده در این مدل به صورت یک خودرو در نظر گرفته شده و با استفاده از فرایند نقطه‌ای پواسن مکان خودرو پیش‌بینی شده است. به وسیله این مدل می‌توانیم ظرفیت کانال را در محیط‌های شهری با توجه به تراکم خودرو و ترافیک شهری پیش‌بینی کنیم. همچنین به منظور تأیید مدل پیشنهادی نتایج این مدل را با یک مدل آماری بر پایه اندازه‌گیری مقایسه کردیم و تطابق خوبی بین آنها دیده شد.

کلیدواژه: انتشار امواج، تئوری یکنواخت پراش، سیستم‌های چندرودی و چندخروجی، ظرفیت کانال، محیط شهری.

۱- مقدمه

به طور کلی برای مدل‌کردن کانال انتشار دو دسته مدل وجود دارند: مدل‌های آماری و مدل‌های معین یا فیزیکی. مدل‌های آماری به سهولت قابل استفاده‌اند اما پارامترهای آنها اغلب با داده‌های اندازه‌گیری، بدون هیچ پیش‌زمینه‌ای از مشخصات فیزیکی محیط انتشار، تطبیق داده می‌شوند. بنابراین تنها در محیط‌هایی قابلیت اجرا دارند که داده‌های اندازه‌گیری از همان محیط استخراج شده باشند [۱]. مدل‌های معین وابستگی شدیدی به پارامترهای فیزیکی محیط انتشار دارند. در گذشته، مشکل اصلی این مدل‌ها را در این می‌دانستند که باید اطلاعات دقیقی از محیط انتشار داشته باشند و با توجه به معادلات پیچیده روش‌های الکترومغناطیسی، زمان اجرای آنها طولانی است. در حال حاضر با توجه به تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات دقیقی از محیط انتشار داریم و از سویی دیگر با معرفی روش تئوری یکنواخت پراش و الگوریتم‌های جدید ردیابی پرتو، سرعت اجرای مدل‌های معین افزایش یافته است [۲]. اما بعضی موانع در محیط وجود دارند که ثابت نیستند و متحرکند و به صورت تصادفی بر محیط انتشار تأثیر می‌گذارند. از جمله این موانع می‌توان به خودروها و

1. Multiple Input Multiple Output
2. Fourth Generation Partnership Project
3. Long Term Evolution
4. Finite Difference Time Domain
5. Uniform Theory of Diffraction
6. Geometrical Theory of Diffraction

این مقاله در تاریخ ۱۰ مرداد ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

علی تجویدی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران، (email: tajvidy@iauba.ac.ir).

که در معادلات ذیل لحاظ شده است. همچنین زاویه برخوردی α برای تمامی پرتوها محاسبه گردیده و از این رو اگر تنها یک ساختمان میان فرستنده و گیرنده وجود داشته باشد، میدان دریافتی در نقطه مشاهده برابر است با

$$E(\lambda) = E'_0 \left[\frac{r' e^{-jk(r-r')}}{r} + \sqrt{\frac{r'}{v(r'+v)}} D_x e^{-jkv} \right] \quad (2)$$

رابطه فوق از دو مؤلفه تشکیل شده که مؤلفه اول ناشی از میدان مسیر مستقیم و مؤلفه دوم میدان پراش یافته است. r فاصله بین آنتن و لبه دوم ساختمان است [۶]. در این رابطه D_x ضریب پراش به صورت زیر تعریف می‌شود

$$D_x = D(\varphi = \frac{3\pi}{2}, \varphi' = \frac{\pi}{2} + \alpha, L = \frac{r' \cdot v}{r' + v}) \quad (3)$$

که در آن $D(\varphi, \varphi', L)$ ضریب پراش برای یک گوه دی‌الکتریک محدود است [۸]. برای تعداد ساختمان‌ها $n \geq 2$ ، طبق ذیل مشخص می‌شود [۶]

$$E(n) = \frac{1}{2n-1} \left\{ \sum_{m=1}^{n-1} E'_m \left[\frac{r'_m e^{-jk(r_n - r'_m)}}{r_n} + \sqrt{\frac{s'_y}{s_y(s_y + s'_y)}} D_y e^{-jks_y} \right] + \sum_{p=1}^{n-1} E(p) \left[\frac{r'_p e^{-jk(r_n - r'_p)}}{r_n} + \sqrt{\frac{s'_z}{s_z(s_z + s'_z)}} D_z e^{-jks_z} \right] \right\} \quad (4)$$

و E'_m میدان مشخص شده در شکل ۱ است که در اولین گوشه سقف‌ها (سمت چپ گوه در ساختمان‌های مستطیلی شکل) دریافت می‌شود. از این رو برای $m \geq 1$ ، E'_m را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۶]

$$E'_m = \frac{1}{2m} \left\{ \sum_{q=1}^{m-1} E'_q \left[\frac{r'_q e^{-jk(r_m - r'_q)}}{r_m} + \sqrt{\frac{s'_w}{s_w(s_w + s'_w)}} D_w e^{-jks_w} \right] + \sum_{r=1}^m E(r) \left[\frac{r'_r e^{-jk(r_m - r'_r)}}{r_m} + \sqrt{\frac{s'_v}{s_v(s_v + s'_v)}} D_v e^{-jks_v} \right] \right\} \quad (5)$$

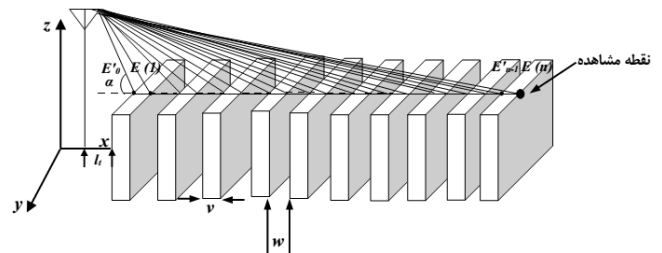
با جایگذاری (۵) در (۴) میدان دریافتی در نقطه مشاهده محاسبه می‌شود.

۲-۲ سیستم MIMO

فرض می‌کنیم یک سیستم MIMO با M آنتن فرستنده و N آنتن گیرنده داریم. هر کدام از زیرکانال‌ها مرتبط با اجزای گیرنده و فرستنده هستند و با h_{nm} نشان داده می‌شود. بنابراین کانال MIMO را با ماتریس کانال انتقال H نشان داده و به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (6)$$

در مواردی که کانال باند باریک باشد یا غیر فرکانس انتخابی h_{nm} به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]



شکل ۱: مدل ارائه شده برای پراش چندگانه در یک میکروسولول.

بنابراین در این مقاله می‌خواهیم مدلی فیزیکی آماری تحت سیستم MISO^۱ معرفی کنیم که چندین آنتن فرستنده و یک آنتن در گیرنده داشته باشد که بر روی یک خودرو نصب است تا اثر تحرک گیرنده را بررسی کنیم. با توجه به موارد فوق در مدل پیشنهادی با استفاده از روش تئوری یکنواخت، پراش دامنه و فاز پرتوهای دریافت شده توسط آنتن خودرو محاسبه می‌شود. در این فرایند مکان خودرو با توجه به ترافیک، تراکم و سرعت خودرو با استفاده از یک مدل تصادفی محاسبه می‌گردد.

۲- مدل سازی کانال انتشار

۱-۲ مدل SISO

همان طور که گفته شد هدف ما این است که در یک سیستم MIMO بتوانیم کانال انتشار را مدل کنیم. بنابراین در قدم اول نشان می‌دهیم که چگونه می‌توانیم کانال انتشار را در یک سیستم SISO^۲ با استفاده از روش‌های تئوری یکنواخت پراش پیش‌بینی کنیم و سپس معادلات را برای یک سیستم MIMO بسط می‌دهیم. با توجه به این که مدل پیشنهادی یک مدل میکروسولولی است، بر خلاف مدل‌های ماکروسولولی، به جای تقریب موج صفحه‌ای از فرض دقیق موج کروی در معادلات UTD استفاده می‌کنیم [۶] و [۷]. همچنین در این مدل تنها پرتوهای یک بار پراش یافته در نظر گرفته شده‌اند. افت ناشی از پراش‌های چندگانه از ساختمان‌ها با رابطه زیر تعریف می‌شود [۴]

$$L = 20 \log_{10} \frac{E(n)}{E'_0} \quad (1)$$

که E'_0 برابر با E_0/r' ، E میدان ارسال شده توسط فرستنده، r' فاصله بین آنتن و اولین لبه، اولین ساختمان و $E(n)$ میدان دریافتی در نقطه مشاهده و در حضور n ردیف ساختمان است. همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است آخرین لبه‌ای که در مسیر انتشار قرار گرفته به عنوان نقطه مشاهده تعریف می‌شود.

برای پیش‌بینی افت ناشی از پراش‌های چندگانه از ساختمان‌ها باید میدان دریافتی در نقطه مشاهده محاسبه شود. به این منظور، تمام پرتوهایی که فرستنده و نقطه مشاهده را به هم متصل می‌کنند، تعیین می‌شوند و سپس سهم هر پرتو در میدان دریافتی محاسبه گشته و تمام مؤلفه‌ها به صورت برداری مختلط با هم جمع می‌گردند. شکل ۱ تمام پرتوهایی را که می‌توانند در میدان دریافتی در نقطه مشاهده سهمیم باشند نمایش می‌دهد.

به علت این که فاصله فرستنده و گیرنده در میکروسولول‌ها نزدیک است، در این مدل امواج به صورت کروی در نظر گرفته می‌شوند. تفاوت تقریب کروی با صفحه‌ای، در مقادیر پارامتر فاصله و فاکتور و اگرایی است

1. Multiple Input Single Output
2. Single Input Single Output

مرحله دوم میدان پراش یافته از هر نقطه مشاهده برای تک تک گیرنده‌ها محاسبه می‌شود. در مرحله آخر میدان دریافتی ناشی از هر نقطه مشاهده در هر گیرنده با یکدیگر جمع می‌شوند و دامنه و فاز میدان دریافتی به دست می‌آید. بنابراین میدان دریافتی در هر گیرنده به صورت زیر به دست می‌آید

$$E_{Rj} = \sum_{i=1}^M \frac{E(n)_i}{N} \sqrt{\frac{s_i}{s_j^i (s_i + s_j^i)}} D_j^i e^{-jks_j^i} \quad (9)$$

که E_{Rj} میدان دریافتی در j امین گیرنده، $E(n)_i$ میدان دریافتی در نقطه مشاهده i ام، D_j^i ضریب پراش مرتبط با مسیر بین i امین نقطه مشاهده و j امین گیرنده، s_i فاصله بین i امین آنتن فرستنده و i امین نقطه مشاهده و s_j^i فاصله بین i امین نقطه مشاهده و j امین آنتن گیرنده است.

۲-۵ مدل MISO

در این قسمت می‌خواهیم اثر تحرک گیرنده را بر ماتریس‌های کانال و همبستگی و ظرفیت کانال بررسی کنیم. در اینجا ما دو ساختار برای مدل در نظر گرفته‌ایم و در گیرنده تک‌آنتن در نظر گرفته‌ایم. تفاوت ساختارها در این است که در یکی از آنها گیرنده به سمت مانع حرکت می‌کند و پرتوهای انعکاس یافته نیز در مکانیسم پراش لحاظ شده‌اند. معادلات این قسمت مشابه قسمت ۲-۴ می‌باشد با این تفاوت که تعداد آنتن‌های گیرنده N ، یک در نظر گرفته شده است. همچنین ظرفیت کانال طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۲]

$$C_{M \times N} = \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{M} \sum_{i=1}^M |h_i|^2 \right) \quad (10)$$

۲-۶ ساختار مدل پیشنهادی کانال MISO

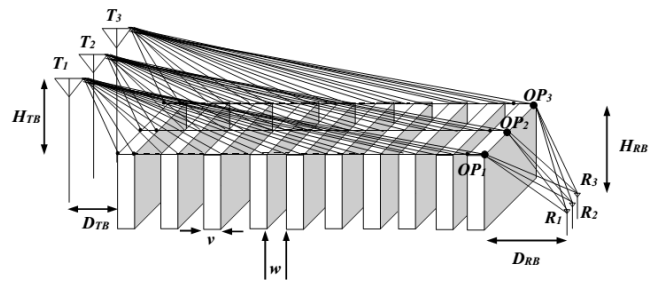
همان طور که ذکر شد ما برای کانال MISO دو ساختار را در نظر گرفته‌ایم. هر دو ساختار مشابه کانال MIMO است با این تفاوت که تعداد گیرنده‌ها یک است و در ساختار دوم گیرنده به سمت دیوار منعکس کننده حرکت می‌کند. فاصله بین این دیوار و نزدیک‌ترین ساختمان به آن را D_{BRef} می‌نامیم. همچنین علاوه بر پرتوهای پراش یافته، پرتوهای پراش یافته انعکاس یافته نیز در مکانیسم انتشار امواج این ساختار لحاظ خواهد شد. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب ساختارهای اول و دوم را نشان می‌دهند. در ادامه از این دو ساختار به عنوان ساختارهای اول و دوم MISO نام می‌بریم و هر دو وضعیت همگن و غیر همگن را بررسی خواهیم کرد.

۲-۷ محاسبه میدان دریافتی و ضرایب کانال تحت

سیستم MISO

محاسبه میدان دریافتی در گیرنده برای ساختار اول MISO مانند سیستم MIMO در سه مرحله انجام می‌پذیرد. در مرحله اول میدان دریافتی در هر سه نقطه مشاهده محاسبه می‌شود. در مرحله دوم میدان پراش یافته از هر نقطه مشاهده برای گیرنده محاسبه می‌شود. در مرحله آخر میدان دریافتی ناشی از هر نقطه مشاهده در گیرنده با یکدیگر جمع می‌شوند و دامنه و فاز میدان دریافتی به دست می‌آید. بنابراین میدان دریافتی در گیرنده به صورت زیر به دست می‌آید

$$E_R = \sum_{i=1}^M \frac{E(n)_i}{N} \sqrt{\frac{s_i}{s_j^i (s_i + s_j^i)}} D_j^i e^{-jks_j^i} \quad (11)$$



شکل ۲: مدل پیشنهادی MIMO در حالت همگن.

$$h_{nm} = \sum_{i=1}^L \alpha_i e^{j\theta_i} = \alpha \cdot e^{j\beta} \quad (7)$$

در اینجا L تعداد مسیرهایی است که بین m امین فرستنده و n امین گیرنده توزیع شده و α_i و θ_i به ترتیب ضریب تضعیف و تغییر فاز در طول هر مسیر است. بر خلاف مدل‌های آمارى، مدل پیشنهادی ما مقدار دقیق α_i و θ_i را برای تک‌تک پرتوهای ارسالی از فرستنده با استفاده از روش‌های معین UTD و نور فیزیکی به دقت محاسبه می‌کند و از هیچ فرض آمارى استفاده نمی‌کند و پرتوهای ارسالی را به صورت متغیرهای تصادفی و یا گوسی در نظر نمی‌گیرد. در هر محیط کانال منحصر به فرد است و بنابراین بر خلاف مدل‌های قبلی نیازی به انجام اندازه‌گیری برای اصلاح مدل ندارد. در واقع مدل پیشنهادی ما به طور دقیق ضرایب کانال را محاسبه کرده و خصوصیات آمارى آن را استخراج می‌کند. همچنین به دلیل این که از روش UTD برای محاسبه میدان پرتوهای پراش یافته استفاده می‌کند، بر خلاف مدل‌های ردیابی پرتو دیگر که از معادلات انتگرالی و FDTD استفاده می‌کنند، سرعت پردازش و محاسبات آن بسیار بالاتر است.

همچنین با استفاده از کانال انتشار H می‌توان ظرفیت کانال را طبق رابطه زیر به دست آورد [۱۰]

$$C_{M \times N} = \log_2 \det \left[I + \frac{SNR}{M} HH^H \right] \quad (8)$$

در این رابطه I ماتریس کانال یک و HH^H هرمیتین ماتریس کانال انتشار است.

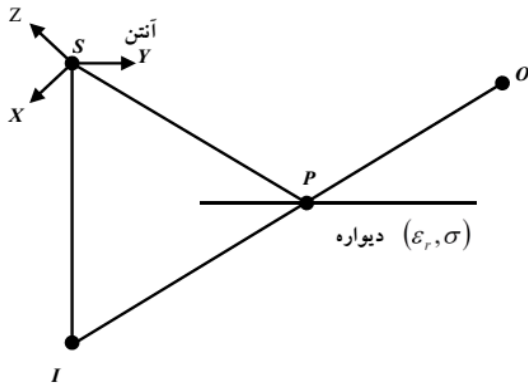
۲-۳ ساختار مدل پیشنهادی کانال MIMO

ساختار مدل پیشنهادی MIMO مشابه مدل SISO است با این تفاوت که ۳ آنتن برای فرستنده و گیرنده در نظر گرفته‌ایم. همچنین این ساختار را به دو صورت همگن و غیر همگن تعریف می‌کنیم. ساختار همگن در شکل ۲ نشان داده شده و همان طور که در این شکل دیده می‌شود، در این ساختار یک ردیف ساختمان با ابعاد و فاصله‌های یکسان داریم. در ساختار غیر همگن سه ردیف ساختمان داریم که کلیه مشخصات هر ردیف ساختمانی همگن با ردیف همگن دیگر تفاوت دارد. پارامترهای مدل به این صورت تعریف می‌شوند: D_{TB} فاصله بین فرستنده و اولین ساختمان، D_{RB} فاصله بین گیرنده و آخرین ساختمان، H_{TB} اختلاف ارتفاع بین فرستنده و اولین ساختمان و H_{RB} اختلاف ارتفاع بین گیرنده و آخرین ساختمان هستند.

۲-۴ محاسبه میدان دریافتی و ضرایب کانال تحت

سیستم MIMO

محاسبه میدان دریافتی در گیرنده‌ها در سه مرحله انجام می‌پذیرد. در مرحله اول میدان دریافتی در هر سه نقطه مشاهده محاسبه می‌شود. در



شکل ۵: آنتن فرستنده در مقابل یک دیواره مسطح و تعریف نقطه تصویر و نقطه انعکاس.

قابلیت گذردهی الکتریکی ϵ^4 ، قابلیت گذردهی مغناطیسی μ^5 و ضریب هدایتی σ^6 است. الگوی تشعشی آنتن $\bar{E}(\theta, \varphi)$ نسبت به محورهای آنتن همان گونه که در شکل ۵ می‌بینیم تعریف می‌شود. مرکز فاز آنتن S در مرکز سیستم مختصات آنتن فرض می‌شود. طبق اصل فرمت^۷، می‌توان با حداقل کردن طول مسیر پرتوی منعکس شده SPO شکل ۵ این مسیر را مشخص کرد.

به بیانی دیگر، پرتوی برخوردی در راستای آینه‌ای^۸ منعکس می‌شود (قانون اسنل^۹) همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌کنیم، نقطه P از قطع‌دادن خط راست IO و دیواره نیز می‌توان به دست آورد که I تصویر منبع S نسبت به دیواره است. نقاط O, P, S, I در صفحه یکسانی که صفحه برخورد^{۱۰} نامیده می‌شود قرار دارند. بر اساس قانون اسنل میدان انعکاس یافته طبق رابطه زیر به دست می‌آید

$$E_R = E \Gamma_{s,h}(\theta) e^{-jk_s r} \quad (12)$$

که E میدان برخوردی در نقطه انعکاس و s_R فاصله بین نقطه انعکاس و گیرنده می‌باشد. ضرایب انعکاس «فرنل» برای قطبش‌های نرم و سخت است [۴]

$$\Gamma_h(\theta) = \frac{\epsilon_c \cos \theta - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}}{\epsilon_c \cos \theta + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}} \quad (13)$$

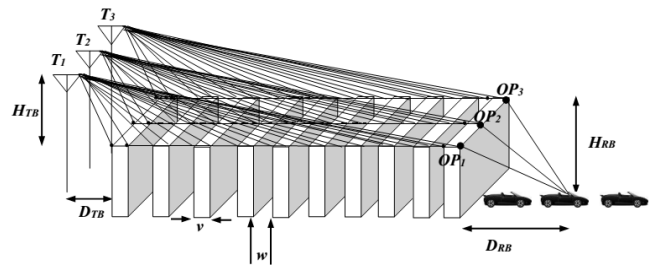
$$\Gamma_s(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}} \quad (14)$$

که θ زاویه برخورد بین پرتوی برخوردی و بردار نرمال دیوار و همچنین ϵ_c ثابت دی‌الکتریک نسبی مختلط است [۴]

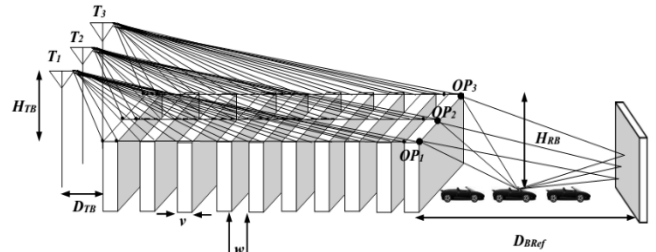
$$\epsilon_c = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad (15)$$

بنابراین میدان دریافتی در گیرنده برای کانال MISO با دیوار منعکس کننده به صورت زیر به دست می‌آید

4. Permittivity
5. Permeability
6. Conductivity
7. Fermat
8. Specular Direction
9. Snell
10. Incidence Plane



شکل ۳: مدل پیشنهادی MISO ۳×۱ در حالت همگن.



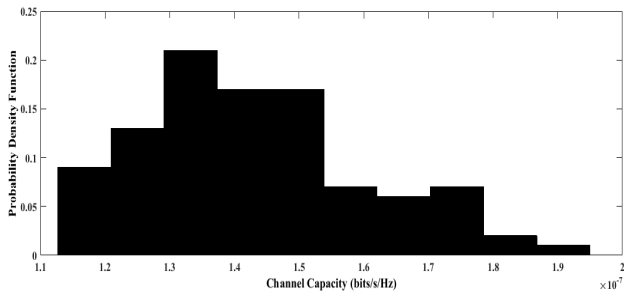
شکل ۴: مدل پیشنهادی MISO ۳×۱ در حالت همگن با دیوار منعکس کننده.

که E_R میدان دریافتی در گیرنده، $E(n)_i$ میدان دریافتی در نقطه مشاهده i ام، D_i^j ضریب پراش مرتبط با مسیر بین i امین نقطه مشاهده و s_i^j فاصله بین i امین آنتن فرستنده و i امین نقطه مشاهده و s_i^j فاصله بین i امین نقطه مشاهده و آنتن گیرنده است. با توجه به این که s_i^j وابسته به موقعیت گیرنده است، متغیر با زمان می‌باشد.

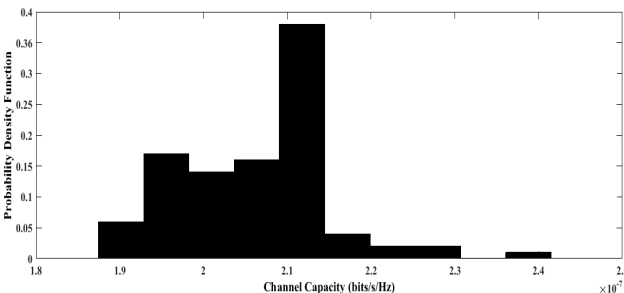
همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است ما پرتوهای پراش یافته انعکاس یافته را در مکانیسم انتشار امواج لحاظ کرده‌ایم و بنابراین میدان دریافتی در گیرنده مجموع میدان‌های پراش یافته و پراش یافته انعکاس یافته است. محاسبه میدان‌های پراش یافته انعکاس یافته پیچیده‌تر از میدان‌های پراش یافته است زیرا نقطه‌های انعکاس به فاصله بین گیرنده و ساختمان‌ها و دیوار منعکس کننده بستگی دارد. همچنین زمانی که گیرنده حرکت می‌کند، نقاط انعکاس نیز با زمان تغییر می‌کنند، در حالی که نقاط پراش ثابت می‌مانند، چون آنها به شکل ساختمان‌ها وابسته و ثابتند.

هنگامی که پرتویی به مانعی برخورد می‌کند برای به دست آوردن میدان انعکاس یافته از روابط عمومی^۱ GO می‌توان استفاده نمود. البته باید توجه داشت که این قوانین زمانی کاربردی هستند که تمام دیواره‌های منعکس شده بر حسب طول موج به اندازه کافی بزرگ بوده، آنتن فرستنده از سطح مورد نظر دور باشد و شعاع انحنای سطوح در نقطه انعکاس در مقیاس طول موج بزرگ باشد. روابط GO در میکروسولول‌ها برای هر دو سطوح انحنادار و مسطح معتبرند. با فرض این که موانع موجود در محیط هیچ سطح انحناداری نداشته باشند و GO قابل استفاده باشد، مناسب‌ترین روش برای محاسبه میدان پرتوهای انعکاس یافته، استفاده از تئوری تصویر^۲ و ضرایب انعکاس فرنل^۳ به جای استفاده از روابط رایج GO است [۴]. با فرض این که سطوح منعکس کننده به صورت صفحه باشند، تئوری تصویر را می‌توان از روابط GO به دست آورد. بنابراین هر دو روش به جواب یکسانی منجر می‌شوند. به همین دلیل در این بخش به کاربرد تئوری تصویر در مسئله انعکاس پرداخته می‌شود. شکل ۵ هندسه یک انعکاس را نشان می‌دهد. دیواره نشان داده شده در شکل، سطحی با

1. Geometrical Optic
2. Image Theory
3. Fresnel



شکل ۷: تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال در ساختار اول MISO به ازای $\lambda = 100$.



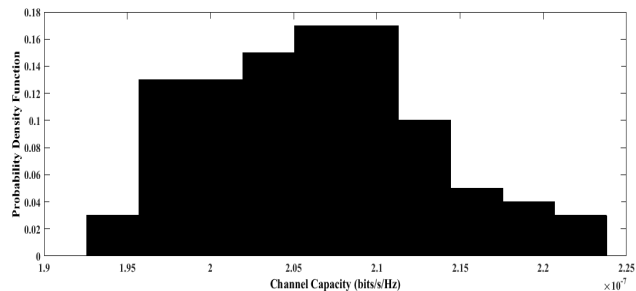
شکل ۸: تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال در ساختار دوم MISO به ازای $\lambda = 5$.

با استفاده از فرایند نقطه‌ای پواسن^۱ (PPP) مدل شود. کل این فرایند، فرایند کوکس^۲ ψ با تراکم خودروی $\Lambda(x)$ نامیده می‌شود. ما در اینجا فرایند کوکس را ساده و مقادیر $\Lambda(x)$ را به صورت متغیرهای تصادفی غیر منفی در نظر می‌گیریم. اگر مقادیر $\Lambda(x)$ معین باشد، فرایند ψ به یک تابع پواسن همگن تبدیل می‌شود. یکی از رایج‌ترین توابع توزیعی که برای توصیف $\Lambda(x)$ استفاده می‌شود، تابع گاما است که به صورت $\Lambda(x) = \text{Gamma}(\alpha, \beta)$ تعریف می‌شود. در این حالت فرایند نقطه‌ای پواسن به توزیع دو جمله منفی^۳ $NB(\alpha, \beta)$ تبدیل می‌شود [۱۱].

۳- شبیه‌سازی

با توجه به روابط مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار Matlab یک سیستم MISO 3×1 در فرکانس ۹۰۰ MHz با قطبش عمودی و برای هر دو کانال همگن و غیر همگن برای هر دو ساختار معرفی شده در بخش ۲-۶ در حضور هفت ساختمان شبیه‌سازی شد. همان طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌کنید، سه مسیر بین نقاط مشاهده و گیرنده در ساختار اول و شش مسیر بین نقاط مشاهده و انعکاس و گیرنده در ساختار دوم وجود دارد. دامنه و فاز امواج منتشرشده در این مسیرها به ترتیب با استفاده از (۱۱) و (۱۶) برای هر دو ساختار به دست می‌آید. در این محاسبات فرض شده که ساختمان‌ها دارای مشخصات الکتریکی و مغناطیسی $\epsilon_r = 5/5$ و $\sigma = 0.23 \text{ S/m}$ هستند که شبیه به ساختمان‌های از جنس بتون است. مقادیر پارامترهای به کار رفته در این شبیه‌سازی در جدول ۱ داده شده و در تمامی شبیه‌سازی‌ها D_{BRef} برابر با ۱۰۰۰ m است. شکل‌های ۶ تا ۱۱ تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال را تحت شرایط مختلف نشان می‌دهد. واحد ظرفیت کانال bits/s/Hz است که به معنای آن می‌باشد که با توجه به پهنای باند تخصیص یافته برای ارسال داده، حداکثر با چه سرعتی می‌توان در این کانال داده‌ها را ارسال کرد. شکل‌های ۶ و ۷ تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال را به ازای مقادیر

1. Poisson Point Process
2. Cox Process
3. Negative Binomial



شکل ۶: تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال در ساختار اول MISO به ازای $\lambda = 5$.

جدول ۱: جزئیات داده‌های شبیه‌سازی.

جدول ۱	D_{TB}	D_{RB}	H_{TB}	H_{RB}	V	W
کانال همگن	۳۰ m	۵ m	۱۰ m	۵ m	۱۰ m	۱۰ m
کانال غیر همگن	$\begin{bmatrix} ۳۰ \\ ۶۰ \end{bmatrix} m$	$\begin{bmatrix} ۲۰.۵ \\ ۱۰.۵ \\ ۵ \end{bmatrix} m$	$\begin{bmatrix} ۱۰ \\ ۲۰ \\ ۳۰ \end{bmatrix} m$	$\begin{bmatrix} ۵ \\ ۱۵ \\ ۲۵ \end{bmatrix} m$	$\begin{bmatrix} ۱۰ \\ ۲۰ \\ ۳۰ \end{bmatrix} m$	$\begin{bmatrix} ۱۰ \\ ۲۰ \\ ۳۰ \end{bmatrix} m$

$$E_R = \sum_{i=1}^M \frac{E(n)_i}{2} \sqrt{\frac{s_i}{s_i^M (s_M + s_i^i)}} D_i^M e^{-jks_i^M} + \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^p E(D)_j \Gamma_{s,h,j}(\theta_j) e^{-jks_j^i}$$

که در آن p تعداد نقاط انعکاس و $E(D)_j$ میدان پراش یافته در j امین نقطه انعکاس است که طبق رابطه زیر به دست می‌آید

$$E(D)_j = \frac{E(n)_j}{2} \sqrt{\frac{s_j}{s_j^i (s_j + s_j^i)}} D_j^i e^{-jks_j^i} \quad (17)$$

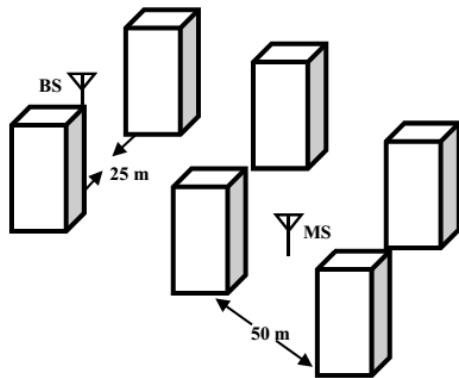
در این رابطه فاصله بین نقاط مشاهده و انعکاس j ام است و فاصله بین نقاط انعکاس و گیرنده است.

۸-۲ مدل سازی موقعیت خودرو

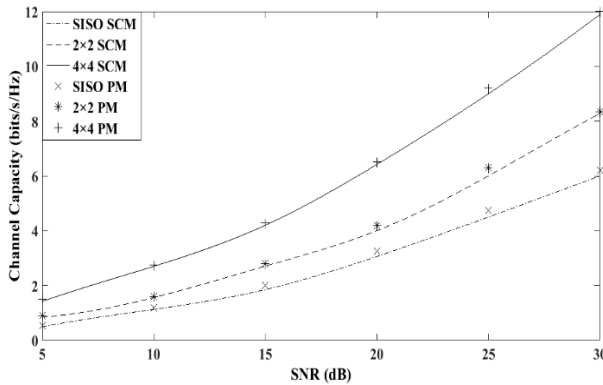
همان طور که گفته شد در حال حاضر با در دست داشتن نقشه‌های ماهواره‌ای ما اطلاعات دقیقی از ساختمان‌ها داریم و بنابراین دیگر خصوصیات ساختمان‌ها را به صورت آماری در نظر نمی‌گیریم. اما با توجه به تصادفی بودن حرکت خودرو مسیر حرکت آن را به صورت تصادفی در نظر می‌گیریم. بنابراین در این مدل محاسبه ضرایب کانال برای ساختمان‌ها به صورت معین محاسبه و حرکت خودرو به صورت تصادفی و آماری بررسی می‌شود. در اینجا با استفاده از توزیع‌های آماری موقعیت خودرو را به صورت تصادفی در نظر می‌گیریم و ظرفیت کانال را محاسبه خواهیم کرد.

برای دستیابی به یک راه حل جامع برای مکان‌یابی خودروها، عوامل گوناگونی باید دخیل شده و به صورت آماری مدل گردند. این عوامل عبارت هستند از تراکم خودروها، سرعت خودرو، ترافیک و رفتار راننده. تصادفی بودن این عوامل موجب می‌شود که مکان خودروها نامشخص باشد [۲] و [۱۱].

با توجه به این که ترافیک جاده به زمان و سرعت خودرو وابسته است و با توجه به قوانین رانندگی جهت حرکت آن در یک مسیر مشخص است، فرض می‌شود که خودرو در یک جهت مشخص توسط فرایند نقطه‌ای تصادفی ψ با فرایند تراکم $\Lambda(x)$ پراکنده شده است. تحت شرایط تابع تصادفی $\Lambda(x)$ ، مکان خودرو می‌تواند به صورت نقاط تصادفی



شکل ۱۲: سناریوی محیط شهری میکروسولولی در SCM.

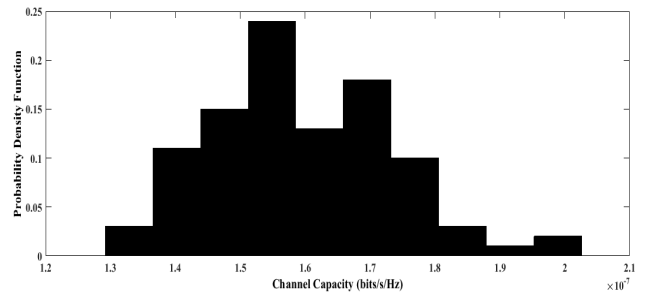


شکل ۱۳: مقایسه مدل پیشنهادی و SCM.

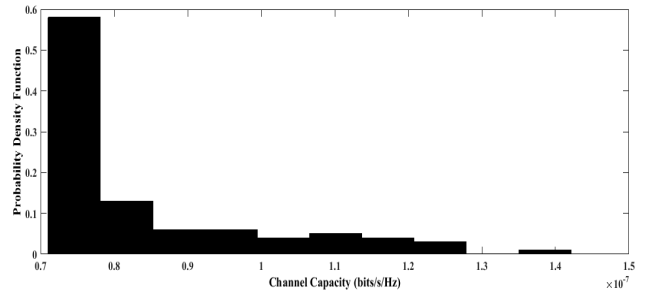
باشد که شبیه‌سازی دقیقاً انجام شود. مدل پیشنهادی با اندازه‌گیری احتمالاتی بر اساس مدل کانال مکانی^۱ (SCM) مقایسه می‌شود [۱۲] و [۱۴]. شبیه‌سازی بر اساس سناریوی شهری نشان داده شده در شکل ۱۲ می‌باشد که همانند ساختار استفاده‌شده در SCM در وضعیت دید مستقیم است. در این ساختار ارتفاع آنتن فرستنده ۱۲/۵ m، ارتفاع ساختمان‌ها ۱۲ m، فاصله بین ساختمان‌ها ۵۰ m، عرض خیابان ۲۵ m، ارتفاع آنتن گیرنده ۱/۵ m و زاویه ارسال پرتوها ۳۰ درجه است. در شکل ۱۳ ظرفیت کانال با توجه به سناریوی فوق با استفاده از مدل پیشنهادی محاسبه شد و با داده‌های SCM مقایسه گردید که نشان می‌دهد تطابق خوبی بین دو مدل وجود دارد. خطای مدل پیشنهادی در حدود ۰/۱ bits/s/Hz است که قابل اغماض بوده و کار تئوریمان را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که مدل SCM چون بر پایه اندازه‌گیری است از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد ولی این دقت تنها در محیطی که در آن اندازه‌گیری شده قابل اعتنا است. با توجه به این که مدل پیشنهادی یک مدل معین است، به شرطی که اطلاعات کاملی از محیط انتشار در دسترس باشد، در هر محیطی قابل اجرا است و دقت آن مناسب است.

۴- نتیجه‌گیری

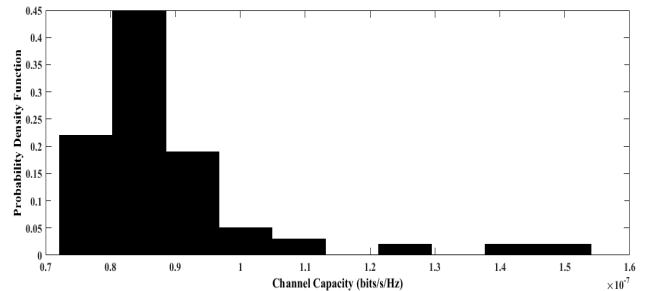
روش‌های معین معمولاً در محیط‌های ثابت کاربردی هستند اما در این مقاله نشان دادیم زمانی که گیرنده حرکت‌های تصادفی دارد، ما می‌توانیم از این روش‌ها برای محاسبه ظرفیت کانال استفاده کنیم. به عبارت دیگر، روش‌های آماری و معین را با یکدیگر ترکیب کردیم تا بتوانیم مدلی کامل برای محیط‌های پیچیده شهری معرفی کنیم. این روش ترکیبی به ما اجازه می‌دهد تا بتوانیم ظرفیت کانال انتشار را در محیط‌های متحرک



شکل ۹: تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال در ساختار دوم MISO به ازای $\lambda = 100$.



شکل ۱۰: تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال در ساختار اول MISO به ازای $\Lambda(x) = \text{Gamma}(51, 9354, 0, 177)$.



شکل ۱۱: تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال در ساختار دوم MISO به ازای $\Lambda(x) = \text{Gamma}(51, 9354, 0, 177)$.

مختلف Λ در ساختار اول MISO نشان می‌دهند. در این حالت با توجه به این که مقدار Λ معین است، فرایند نقطه‌ای پواسن به پواسن همگن تبدیل می‌شود.

مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که با افزایش Λ احتمال پراکندگی ظرفیت کانال به شدت بیشتر می‌شود. همچنین در حالتی که $\Lambda = 5$ است احتمال این که ظرفیت کانال افزایش یابد بیشتر است. همین رفتار را در شکل‌های ۸ و ۹ برای ساختارهای دوم MISO مشاهده می‌کنیم. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تابع چگالی احتمال ظرفیت کانال را به ترتیب برای ساختارهای اول و دوم MISO نشان می‌دهد با این تفاوت که مقدار Λ به شکل $\Lambda(x) = \text{Gamma}(51, 9354, 0, 177)$ با استفاده از تابع تصادفی گاما انتخاب شده است. مقادیر بر این اساس انتخاب شده‌اند که ترافیک متغیر چرخشی است و برای روان بودن ترافیک سرعت خودروها نباید از ۴۰ Km/h تجاوز کند. در اینجا هم پراکندگی احتمال ظرفیت کانال در ساختار دوم بیشتر از ساختار اول است. لازم به ذکر است با توجه به این که در دو ساختار تعریف‌شده دید مستقیم بین فرستنده و گیرنده وجود ندارد، ظرفیت کانال به شدت کاهش پیدا کرده است.

به منظور این که به مدل پیشنهادی خود اعتبار ببخشیم، نتایج شبیه‌سازی را با نتایج مدل آماری بر پایه اندازه‌گیری در [۱۲] مقایسه کردیم، هرچند که این مدل را برای کانال SISO قبلاً تأیید کرده بودیم [۶] و [۱۳]. به علت این که مدل پیشنهادی معین است، مختصات ساختمان‌ها و مسیر انتشار پرتوها بین فرستنده و گیرنده باید مشخص

- in microcell environments," *Electromagnetics*, vol. 28, no. 5, pp. 375-388, Jun. 2008.
- [7] A. Tajvidy, M. A. Pourmina, M. Nasermoghaddasi, and A. Haghbin, "An improved UTD based model for the multiple building diffraction of plane waves in urban environments by using higher order diffraction coefficients," *Wireless Personal Communications*, vol. 72, no. 4, pp. 2577-2586, Oct. 2013.
- [8] R. J. Luebbers, "Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 1, pp. 70-76, Jan. 1984.
- [9] S. Loredo, A. R. Alonso, and R. P. Torres, "Indoor MIMO channel modeling by rigorous GO/UTD-based ray tracing," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 680-692, Mar. 2008.
- [10] D. S. Shiu, G. J. Foschini, M. J. Gans, et al., "Fading correlation and its effect on the capacity of multi element antenna systems," *IEEE Trans. on Communication*, vol. 48, no. 3, pp. 502-513, Mar. 2000.
- [11] Y. Jeong, J. W. Chong, H. Shin, and Z. Win, "Intervehicle communication: cox-fox modeling," *IEEE J. Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 9, pp. 418-435, Sept. 2013.
- [12] GPP TR, 25.996, v11.0.0. Website: <http://www.3gpp.org/DynaReport/25996.htm>, 2012.
- [13] E. Torabi, A. Ghorbani, and A. Tajvidy, "A modified diffraction coefficient for imperfect conducting wedges and buildings with finite dimensions," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 1197-1207, Apr. 2009.
- [14] A. Shiroom, F. Kohandani, and G. Wen, "Analysis of a MIMO outdoor channel with hybrid EM-based modeling," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, vol. 6, pp. 506-509, 2007.

علی تجویدی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد و مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - مخابرات خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس است. نام‌برده از سال ۱۳۹۶ به مدت یکسال استادیار دانشگاه بریتیش کلمبیا کانادا نیز بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های مخابراتی سیار، مدل‌سازی کانال انتشار، سیستم‌های شناسایی با استفاده از امواج رادیویی و مدارهای مجتمع فرکانسی رادیویی است.

شهری پیش‌بینی کنیم. بنابراین برای انجام این هدف از روش‌های تئوری یکنواخت پراش و فرایند نقطه‌ای پواسن استفاده کردیم که زمان اجرای پایینی دارند. ماهیت معین و آماری بودن روش پیشنهادی این اجازه را به ما می‌دهد که پیش‌بینی دقیق و با سرعت اجرای بالایی در محیط‌های شهری متحرک داشته باشیم. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان داد با افزایش تراکم خودروها ظرفیت کانال کاهش می‌یابد و میزان پراکندگی ظرفیت کانال در ساختار دوم از ساختار اول بیشتر است. در ادامه نتایج مدل را با داده‌های اندازه‌گیری مقایسه کردیم که تطابق خوبی داشتند که دقت بالای مدل را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی یک مدل مناسب برای پیش‌بینی ماتریس کانال انتشار در محیط‌های شهری است و می‌تواند در توسعه سیستم‌های MIMO نقش مناسبی را ایفا کند.

مراجع

- [1] C. Oestges, S. R. Saunders, and D. Vanhoenacker-Janvier, "Physical-statistical modelling of the land mobile satellite channel based on ray-tracing," *IEE Proc. on Microwaves, Antennas, and Propagation*, vol. 146, no. 1, pp. 45-49, Feb. 1999.
- [2] S. R. Saunders and A. Aragon-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Norwood, Wiley Press, 2007. Ch.11.
- [3] G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th Edition, McGraw-Hill, 2007. Ch 13.
- [4] M. F. Catedra and J. Perez-Arriaga, *Cell Planning for Wireless Communication*, Norwood, MA: Artech House Press, 1999. Ch.2.
- [5] M. J. Neve and G. B. Rowe, "Contributions toward the development of a UTD-based model for cellular radio propagation prediction," *IEE Proc. on Microwaves, Antennas, and Propagation*, vol. 141, no. 5, pp. 407-414, Oct. 1994.
- [6] A. Tajvidy and A. Ghorbani, "A new uniform theory-of-diffraction-based model for the multiple building diffraction of spherical waves