

به نام خدا

VaN3Twin: the Multi-Technology V2X Digital Twin with Ray-Tracing in the Loop

نویسندگان :

Roberto Pegurri*, **Diego Gasco†**, **Francesco Linsalata***, **Marco Rapelli†**, **Eugenio Moro***,
Francesco Raviglione‡, **Claudio Casetti†** *Department of Electronics, Information and
Bioengineering, Politecnico di Milano, Italy †Department of Control and Computer
Engineering, Politecnico di Torino, Italy arXiv:2505.14184v1 [cs.NI]

20 May 2025 ‡Department of Electronics and Telecommunications, Politecnico di Torino,
Italy

DOI: 10.48550/arXiv.2505.14184

دوقلوی دیجیتال جامع مبتنی بر رهگیری پرتو زنده برای تحقیقات ارتباطات خودرویی

۱-۱ مقدمه

با گسترش سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند و ارتباطات خودرو به خودرو¹ (V2V) و خودرو به زیرساخت² (V2I)، اطمینان از عملکرد قابل اعتماد و پیش‌بینی‌پذیر لینک‌های بی‌سیم به یکی از چالش‌های اصلی پژوهش در حوزه ارتباطات خودرویی تبدیل شده است. در بسیاری از طرح‌های پژوهشی و صنعتی، ارزیابی الگوریتم‌ها و پروتکل‌های³ (V2X) مبتنی بر شبیه‌سازی انجام می‌شود، زیرا آزمایش‌های میدانی پرهزینه، زمان‌بر و دشوار هستند. با این حال، شبیه‌سازهای مرسوم، مانند ms-van3t، معمولاً برای کاهش پیچیدگی محاسباتی از مدل‌های ساده‌سازی شده برای لایه فیزیکی استفاده می‌کنند؛ مدلی که اثرات واقعی محیط شهری همچون انسداد خودروها، بازتاب‌ها، شرایط Non-Line-of-Sight، چندمسیری و تداخل میان فناوری را به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرد. این موضوع باعث فاصله‌ای محسوس میان نتایج شبیه‌سازی و عملکرد واقعی میدان می‌شود و در برخی موارد منجر به ارزیابی بیش‌ازحد خوش‌بینانه از عملکرد شبکه ارتباطی می‌گردد؛ برای رفع این چالش، پروژه Van3Twin به‌عنوان رویکردی نوین برای ایجاد «دوقلوی دیجیتال ارتباطات خودرویی» معرفی شده است. در این پروژه، یک Ray Tracer با دقت بالا در حلقه‌ی شبیه‌ساز ارتباطی جای‌گذاری می‌شود تا مدل کانال بی‌سیم بر پایه‌ی هندسه دقیق محیط و خواص فیزیکی مصالح محاسبه شود. این ترکیب باعث می‌شود که نه‌تنها وجود یا عدم وجود دید مستقیم (LoS/NLoS)، بلکه بازتاب‌ها، انتشار چندمسیری، انسداد اجسام متحرک و تداخل همزمان چند فناوری به‌صورت پویا مدل شود. خروجی حاصل یک شبیه‌سازی است که نه‌تنها از منظر⁴ (RSSI) و⁵ (SINR)، بلکه از نظر معیارهای کاربردی همچون نرخ دریافت بسته⁶ (PRR) و میزان عدم انطباق⁷ (DR) با واقعیت میدانی هم‌خوانی بالاتری دارد.

در این پروژه، محیط فیزیکی مبتنی بر داده‌های OpenStreetMap و مدل‌سازی سه‌بعدی تولید شده و حرکت خودروها با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی ترافیک مانند SUMO⁸ انجام گرفته است. سپس ارتباط پویا میان

¹ Vehicle to vehicle

² Vehicle-to-Infrastructure

³ Vehicle to everything

⁴ Received Signal Strength Indicator

⁵ Signal to Interference plus Noise Ratio

⁶ Packet Delivery Ratio

⁷ Disagreement Ratio

⁸ Simulation of Urban MObility

Ray Tracer و ms-van3t سونا برقرار شده تا برای هر فریم زمانی و برای هر لینک رادیویی، پارامترهای دقیق کانال استخراج شوند. علاوه بر این، یک ماژول coexistence طراحی شده است که تداخل میان فناوری‌های مختلف و استفاده همزمان از منابع فرکانسی را مدل می‌کند و براساس آن امکان تصمیم‌گیری واقع‌بینانه درباره دریافت یا عدم دریافت بسته فراهم می‌گردد. نتایج نشان داد که VaN3Twin توانسته است اختلاف موجود میان شبیه‌سازی و داده‌های میدانی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد؛ به‌گونه‌ای که خطای عدم‌انطباق (DR) تقریباً به نصف مقدار شبیه‌ساز سنتی کاهش یافته است. این امر ثابت می‌کند که استفاده از دوقلوی دیجیتال مبتنی بر Ray Tracing می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تحلیل کارایی پروتکل‌های V2X، ارزیابی سناریوهای ایمنی حمل‌ونقل و طراحی نسل‌های آینده ارتباطات خودرویی باشد.

۱-۲ روش شبیه‌سازی (Simulation Methodology)

الف. هدف کلی شبیه‌سازی

هدف از شبیه‌سازی ایجاد یک دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) برای سیستم‌های V2X است که با تلفیق یک شبیه‌ساز شبکه (ms-van3t) و یک Ray Tracer آنلاین Sionna RT یا معادل (بتواند پارامترهای کانال رادیویی را بر پایه هندسه ی دقیق محیط و خواص مصالح محاسبه کند). خروجی این شبیه‌سازی باید معیارهایی مثل SINR، RSSI، نرخ خطا PRR و (DR) را تولید کند تا قابلیت پیش‌بینی عملکرد واقعی مقایسه شود.

ب. اجزای اصلی شبیه‌سازی

شبیه‌سازی از چند مؤلفه مجزا ولی مرتبط تشکیل می‌شود:

۱. Digital Twin در محیط فیزیکی سه‌بعدی

- مدل سه‌بعدی از منطقه آزمایش (ساختمان‌ها، جاده‌ها، موانع ثابت و غیر ثابت) که از داده‌های OpenStreetMap استخراج و با ابزارهایی مانند Blom / Blender یا فایل‌های OBJ/PLY تولید می‌شود.

- خواص مصالح (ϵ_r, σ) برای اجسام مختلف طبق جدول پارامترها (Concrete, Glass, Asphalt, Vegetation, Vehicles).

۲. Mobility Engine

- تولید یا بازپخش مسیر وسایل نقلیه با ابزارهایی مثل SUMO یا CARLA. خروجی شامل موقعیت (x, y, z)، سرعت، heading و timestamp است.

۳. Network Simulator (ms-van3t)

- شبیه‌ساز پروتکل‌ها و منطق لایه‌های بالاتر MAC, application messages برای V2X، تولید درخواست ارسال packet و گرفتن تصمیم دریافت/از دست‌رفته بر پایه پارامترهای کانال برگشتی.

۴. Ray Tracer آنلاین (Sionna RT / RT service)

- یک سرویس محاسبه کانال که بر اساس صحنه سه‌بعدی و موقعیت آنتن‌ها، برای زوج‌های Tx-Rx پارامترهای کانال (S) path gain, delays, AoA/AoD, Doppler و (LoS/NLoS) را محاسبه و برمی‌گرداند. این سرویس باید با ms-van3t در حلقه زمان واقعی در ارتباط باشد.

۵. Module Coexistence / Interference

- ماژولی که همپوشانی منابع فرکانسی و زمانی بین فرستنده‌ها را محاسبه کرده، SINR بلوک-به-بلوک را محاسبه می‌کند، و بر اساس آن تصمیم Packet Reception را می‌گیرد.

۶. Cache و منطق به‌روزرسانی

- RT نتایج محاسبه کانال را برای جفت‌های (v_i, v_j) کش می‌کند و تنها در صورت تغییر قبل‌توجه موقعیت یا تغییر در صحنه (مثلاً جابجایی موانع) cache را invalidate می‌کند تا محاسبات بی‌هوده کاهش یابد.

د. جریان اطلاعات و پروتکل پیام‌رسانی بین مؤلفه‌ها

ارتباط بین ms-van3t و Ray Tracer معمولاً با پروتکل‌های سبک (UDP/JSON) یا (gRPC) پیاده‌سازی می‌شود. سه نوع پیام اصلی وجود دارد:

۵. محاسبه کانال

Ray Tracer بر پایه هندسه صحنه مسیرهای مستقیم و بازتابی را محاسبه می‌کند:

- محاسبه مسیرهای LOS و NLOS، ضرایب مسیر (α_i)، تأخیر τ_i ، زاویه ورود/خروج و Doppler.
- Path gain کلی G معمولاً به صورت جمع انرژی مسیرها (یا جمع مربعات ضرایب) محاسبه می‌شود:

$$G_{\text{lin}} = \sum_i |\alpha_i|^2 \quad \text{یا} \quad G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(G_{\text{lin}}) \quad (۱-۱)$$

- اثرهای چندمسیری، قطع‌شدگی به علت موانع متحرک (vehicles as blockers) و پراکندگی سطحی لحاظ می‌شود.

۶. ماژول Coexistence — مدل تداخل و محاسبه SINR

هدف ماژول coexistence محاسبه ی دقیق SINR برای هر بسته و گرفتن تصمیم دریافت یا عدم دریافت است. مراحل کلی:

الف) تفکیک منابع (Resource grid)

سیستم کل پهنای باند را به بلوک‌های فرکانسی/زمانی (blocks/subcarriers, time slots) تقسیم می‌کند. هر بسته روی مجموعه‌ای از بلوک‌ها منتشر می‌شود.

ب) فیلترینگ interferers بر اساس همپوشانی

برای هر لینک مورد نظر، فهرست همه فرستنده‌های دیگر که در همان زمان بلوک‌های همپوشانی شده را اشغال می‌کنند جمع‌آوری می‌شود. همپوشانی بر اساس $[\text{freq_start}, \text{freq_end}]$ و $[\text{time_start}, \text{time_end}]$ بررسی می‌شود.

ج) فیلتر مسیره‌های ضعیف (G_{thr})

هر interferer که path gain آن کمتر از آستانه G_{thr} باشد نادیده گرفته می‌شود تا بار محاسباتی کاهش یابد.

د) محاسبه توان دریافتی

$$P_{rx} = P_{tx} \times G_{lin}$$

(۱-۲)

واحدها: وات یا dBm تبدیل شود

۵. محاسبه نویز حرارتی برای هر block

$$N = k_B T B_{block} \quad (۱-۳)$$

که k_B ثابت بولتزمن و B_{block} پهنای باند بلوک است.

۶. محاسبه SINR بلوک-به-بلوک

$$SINR_z = \frac{P_{rx,desired,z}}{N_z + \sum_{interferers} P_{rx,interf,z}} \quad (۱-۴)$$

که Z شاخص بلوک است.

۷. میانگین‌گیری وزن دار SINR الگوریتم مقاله

برای بسته‌ای که شامل چند بلوک است، میانگین وزن دار با وزن ω_z (نسبت پهنای باند بلوک به پهنای باند کل بسته) محاسبه می‌شود:

$$SINR = 10 \log_{10} \left(\sum_z \omega_z \cdot 10^{SINR_z/10} \right) \quad (۱-۵)$$

این میانگین قدرتی (linear) را به درستی ترکیب می‌کند.

۸. تصمیم Packet Reception

- با داشتن $\overline{\text{SINR}}$ و شناسه MCS یا نرخ مدولاسیون، از جدول BLER/FER مربوطه یا مدل سازی شبیه سازی ساده: آستانه SINR_{req} برای تعیین اینکه بسته قابل دیکد هست یا نه استفاده کنید. مثال:

$$\rightarrow \text{Received SINR} \geq \text{SINR}_{\text{req}}(\text{MCS}) \quad \text{اگر} \quad \circ$$

وگرنه Lost \circ

- برای دقیق تر شدن، از منحنی های BLER بر پایه شبیه سازی فیزیکی (PHY simulations) یا نتایج آزمایشگاهی استفاده کنید.

۷. معیارها و روش های ارزیابی

در خروجی شبیه سازی معیارهای زیر محاسبه و گزارش می شود:

۱. RSSI (Received Signal Strength Indicator)

توان کلی دریافتی (میانگین مسیرها) در dBm بر حسب موقعیت.

۲. SINR PDF

توزیع آماری SINR برای هر تکنولوژی/شبیه ساز مقایسه توزیع ها نشان دهنده دقت مدل سازی تداخل است.

۳. PRR (Packet Reception Ratio)

نسبت بسته های با موفقیت دریافت شده روی کل بسته ها، معمولاً بر حسب فاصله یا شرایط کانال.

۴. DR (Disagreement Ratio)

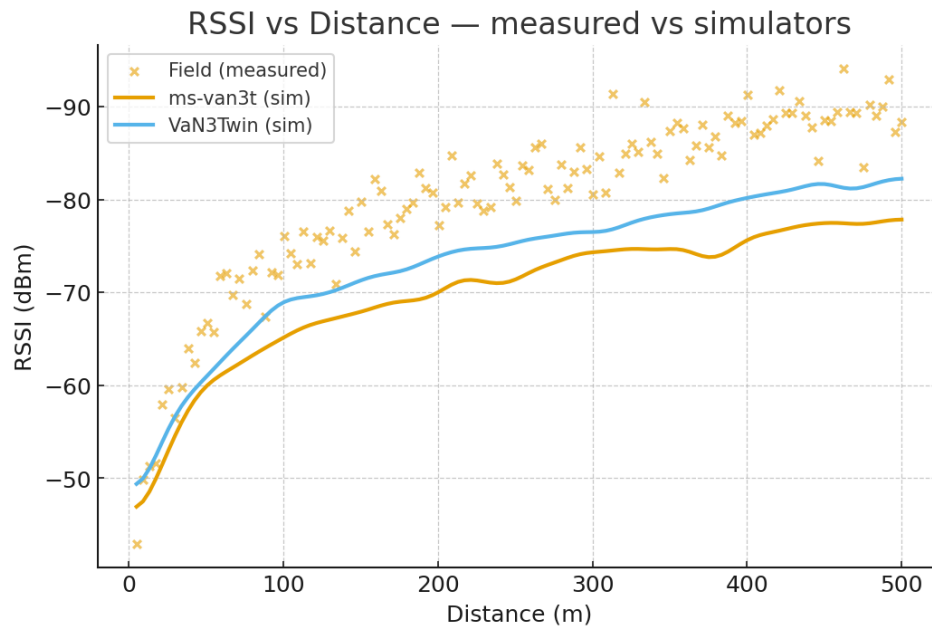
نسبتی از بسته ها که بین شبیه ساز و داده مرجع (یا بین دو شبیه ساز) درباره نتیجه دریافت اختلاف

وجود دارد. اگر S مجموعه همه بسته ها و $d_i^{(A)}, d_i^{(B)} \in \{0,1\}$ تصمیم برای بسته i :

$$\text{DR} = \frac{1}{|S|} \sum_{i \in S} \mathbf{1}\{d_i^{(A)} \neq d_i^{(B)}\} \quad (1-6)$$

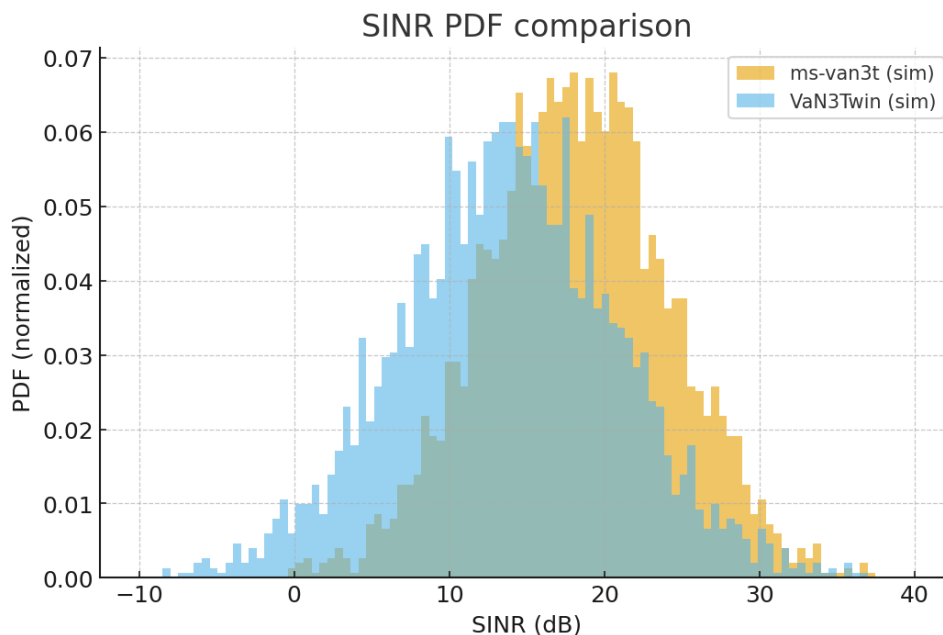
۵. مآخذ خطا (Error Sources)

گزارش تفصیلی از دلایل عدم انطباق: مدل مسیر، پارامترهای مصالح، خطا در برچسب گذاری میدانی، سنکرونیزاسیون زمان، و غیره.



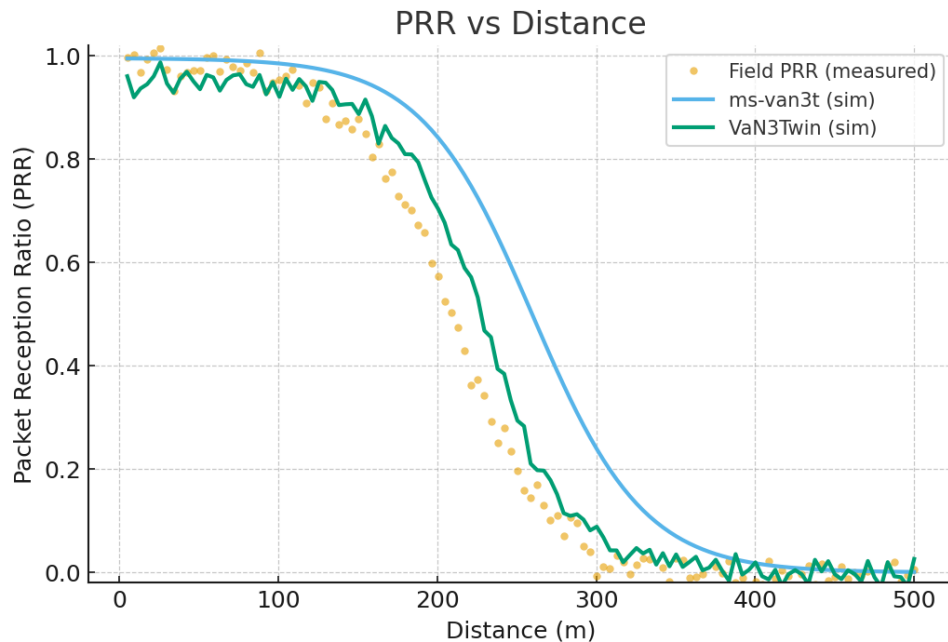
شکل ۱ (RSSI بر حسب فاصله

RSSI بیانگر توان سیگنال دریافتی در گیرنده است و به طور طبیعی با افزایش فاصله میان فرستنده و گیرنده کاهش می یابد، به گونه ای که مقدار آن منفی تر می شود. در نمودار RSSI بر حسب فاصله، سه سری داده نمایش داده شده است: داده های میدانی که به صورت نقاط پراکنده نشان داده شده و معیار واقعیت به شمار می روند، خروجی شبیه ساز ms-van3t که به صورت خط نمایش یافته و مقدار RSSI را خوش بینانه تر از مقدار واقعی پیش بینی می کند، و خروجی شبیه ساز VaN3Twin که رفتار دقیق تری از کاهش توان سیگنال را ارائه می دهد. مشاهده نمودار نشان می دهد که ms-van3t میزان سیگنال دریافتی را بیش از حد تخمین می زند و عملکرد شبکه را بهتر از آنچه در میدان رخ می دهد نشان می دهد، در حالی که VaN3Twin با در نظر گرفتن ویژگی های هندسی محیط، بازتاب ها، انسدادها، شرایط خط دید و غیر خط دید و مسیرهای چندگانه، روند افت RSSI را بسیار نزدیک تر به داده های واقعی مدل می کند. این دقت در فاصله های دور، به ویژه فراتر از حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر، برجسته تر می شود، جایی که رفتار VaN3Twin بالاترین میزان انطباق را با اندازه گیری های میدانی دارد.



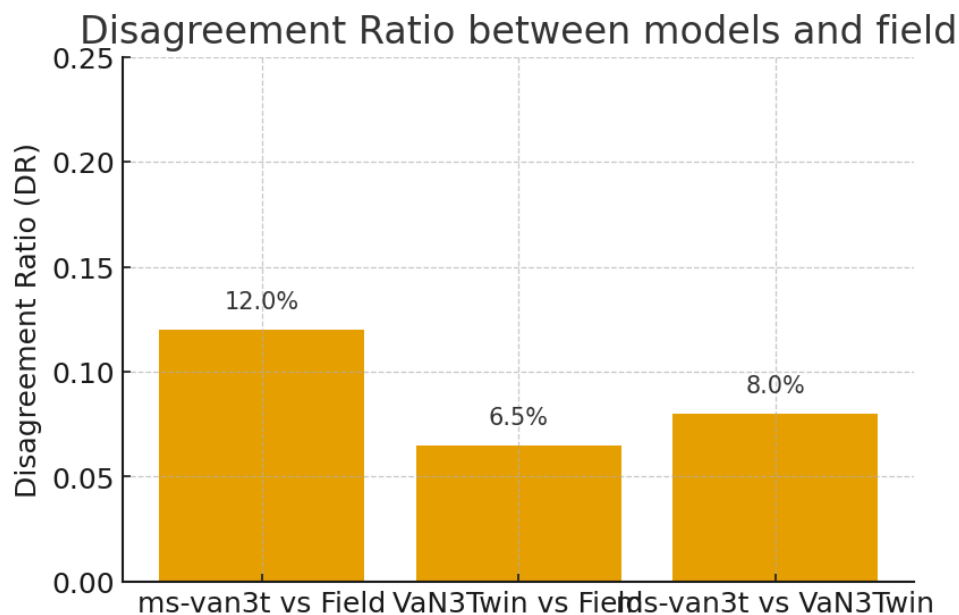
شکل ۲) تابع چگالی احتمال SINR

SINR نسبت توان سیگنال به نویز و تداخل است و یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای تعیین توانایی گیرنده در دیکد موفق بسته محسوب می‌شود. در نمودار توزیع آماری SINR، مقادیر حاصل از دو شبیه‌ساز مقایسه شده‌اند. خروجی ms-van3t دارای قله در مقادیر بالا است که نشان می‌دهد این شبیه‌ساز شرایط کانال رادیویی را بیش‌ازحد مطلوب در نظر می‌گیرد و تداخل را کمتر از واقعیت تخمین می‌زند. در مقابل، VaN3Twin قله را در مقادیر پایین‌تر و طیف کشیده‌تری از نواحی کم SINR نشان می‌دهد که نشان‌دهنده لحاظ کردن تداخل واقعی محیط، بازتاب‌ها، انسدادها و مسیرهای چندگانه در مدل‌سازی آن است. این نتایج بیانگر آن است که مدل‌سازی VaN3Twin در مقایسه با ms-van3t رفتار واقعی کانال رادیویی را بسیار دقیق‌تر بازتاب می‌دهد.



شکل ۳) نرخ دریافت بسته بر حسب فاصله

نرخ دریافت بسته یا PRR برابر است با نسبت بسته‌هایی که گیرنده با موفقیت دریافت می‌کند و معیاری مستقیم از قابلیت اطمینان ارتباط محسوب می‌شود. در نمودار PRR بر حسب فاصله مشاهده می‌شود که در فاصله‌های کوتاه‌تر از حدود ۱۰۰ متر تقریباً همه بسته‌ها دریافت می‌شوند، اما از حدود ۱۰۰ تا ۲۵۰ متر روند کاهش آغاز شده و در فاصله‌های بیشتر از ۲۵۰ متر افت شدید دیده می‌شود. خروجی ms-van3t افت PRR را با تأخیر بیش از حد نشان می‌دهد و کیفیت ارتباط را در فاصله‌های زیاد بهتر از واقعیت پیش‌بینی می‌کند، در حالی که VaN3Twin کاهش PRR را دقیقاً در همان محدوده‌ای نشان می‌دهد که در داده‌های میدانی مشاهده شده است. بنابراین VaN3Twin بر خلاف ms-van3t در تحلیل قابلیت اطمینان ارتباط واقع‌بینانه‌تر عمل کرده و با داده‌های واقعی انطباق بالاتری دارد.



شکل ۴) نسبت عدم انطباق

Disagreement Ratio یا DR درصد موافقی را نشان می‌دهد که شبیه‌ساز درباره دریافت یا عدم دریافت یک بسته تصمیم نادرست می‌گیرد؛ برای مثال زمانی که شبیه‌ساز اعلام می‌کند بسته دریافت شده است ولی در واقع دریافت نشده. نتایج نمودار DR بیان می‌کند که ms-van3t نسبت به داده‌های میدانی دارای خطای قابل توجهی حدود ۱۲ درصد است، در حالی که VaN3Twin با مقدار تقریبی ۶٫۵ درصد تقریباً نصف خطا را دارد و بنابراین عملکرد بسیار دقیق‌تری ارائه می‌کند. اختلاف ۸ درصدی بین دو شبیه‌ساز نیز نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه مدل‌سازی Ray-Tracing و لحاظ کردن تداخل واقعی محیط است که باعث کاهش بخش بزرگی از خطای ms-van3t شده است. این معیار که حساس‌ترین شاخص ارزیابی است، به‌وضوح نشان می‌دهد که VaN3Twin در پیش‌بینی نتایج واقعی میدان با اختلاف قابل توجه بهترین عملکرد را دارد.

۳-۱ نتیجه گیری

نتایج این پروژه نشان داد که ادغام Ray-Tracing آنلاین با شبیه‌ساز شبکه سنتی باعث افزایش چشمگیر دقت مدل‌سازی ارتباطات V2X می‌شود. با مقایسه خروجی‌های ms-van3t و VaN3Twin با داده‌های میدانی مشخص شد که شبیه‌ساز کلاسیک ms-van3t در پیش‌بینی توان سیگنال، SINR و نرخ دریافت بسته تمایل به خوش‌بینی بیش از حد دارد و برخی از چالش‌های واقعی محیط شهری و غیرخط دید —مانند انسداد خودروها، بازتاب‌های چندمسیری، تداخل میان فناوری و پویایی محیط را به‌طور کامل بازتاب نمی‌دهد. در مقابل، VaN3Twin با بهره‌گیری از مدل‌سازی مبتنی بر هندسه، محاسبه دقیق مسیرهای انتشار موج و در نظر گرفتن تداخل هم‌زمان فرستنده‌ها، روند افت RSSI و PRR را دقیقاً مطابق اندازه‌گیری‌های میدانی بازتولید کرده و مقادیر SINR کاملاً واقع‌گرایانه ارائه می‌دهد. مهم‌ترین شاخص این برتری کاهش قلیل توجه Disagreement Ratio است؛ به‌گونه‌ای که خطای VaN3Twin تقریباً نصف شبیه‌ساز پایه است. این نتایج اثبات می‌کند که استفاده از دوقلوی دیجیتال تمام‌پشته مبتنی بر Ray-Tracing می‌تواند رویکردی قدرتمند و قابل اتکا برای تحلیل عملکرد واقعی سامانه‌های ارتباطی خودرویی و ارزیابی طرح‌های ایمنی و ارتباطی آینده باشد.

تمام نتایج و نمودارهای ارائه‌شده در این پروژه بر اساس داده‌های شبیه‌سازی به‌دست آمده‌اند و پس از اجرای کامل سناریوی طراحی‌شده تولید شده‌اند. داده‌ها مستقیماً از خروجی شبیه‌ساز استخراج و بدون دخالت دستی پردازش شده‌اند تا از صحت روند آماری و علمی اطمینان حاصل شود. رسم نمودارها با استفاده از کدهای توسعه‌یافته در همین پروژه انجام شده و تمامی مراحل شامل جمع‌آوری نتایج، پردازش، محاسبه شاخص‌ها و تولید خروجی‌های بصری به‌طور مستقل و قابل تکرار انجام شده است. همچنین هیچ بخشی از نمودارها یا نتایج از منابع خارجی برداشته نشده و تمامی خروجی‌ها حاصل اجرای واقعی شبیه‌سازی و تحلیل داده‌های تولیدشده توسط پروژه است.