

به نام خدا

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

نویسنده‌گان :

**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 حمل و نقل هوشمند و ارتباطات خودرو به خودرو^۱ (V2V) و خودرو به زیرساخت^۲ (V2I)، اطمینان از عملکرد قابل اعتماد و پیش‌بینی پذیر 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 پروتکل‌های^۳ (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 لایه‌ی فیزیکی استفاده می‌کنند؛ مدلی که اثرات واقعی محیط شهری همچون انسداد خودروها، بازتاب‌ها، شرایط Non-Line-of-Sight، چندمسیری و تداخل میان‌فناوری 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 بیش از حد خوش‌بینانه از عملکرد شبکه ارتباطی می‌گردد؛ برای رفع این چالش، پروژه VaN3Twin به عنوان رویکردی نوین برای ایجاد «دوقلوی دیجیتال ارتباطات خودرویی» معرفی شده است. در این پژوهه، یک Ray Tracer با دقت بالا در حلقه‌ی شبیه‌ساز ارتباطی جای‌گذاری می‌شود تا مدل کanal بی‌سیم بر پایه‌ی هندسه دقیق محیط و خواص فیزیکی مصالح محاسبه شود. این ترکیب باعث می‌شود که نه تنها وجود یا عدم وجود دید مستقیم (LoS/NLoS)، بلکه بازتاب‌ها، انتشار چندمسیری، انسداد اجسام متحرک و تداخل همزمان چند فناوری به صورت پویا مدل شود. خروجی حاصل یک شبیه‌سازی است که نه تنها از منظر (RSSI)^۴ و (SINR)^۵، بلکه از نظر معیارهای کاربردی همچون نرخ دریافت بسته^۶ (PRR) و میزان عدم‌انطباق (DR)^۷ با واقعیت میدانی هم‌خوانی بالاتری دارد.

در این پژوهه، محیط فیزیکی مبتنی بر داده‌های OpenStreetMap و مدل‌سازی سه‌بعدی تولید شده و حرکت خودروها با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی ترافیک مانند^۸ (SUMO) 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

سونا برقرار شده تا برای هر فریم زمانی و برای هر لینک رادیویی، پارامترهای دقیق کanal استخراج شوند. علاوه بر این، یک مازول 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 Van3t Twin 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 دو قلوبی دیجیتال مبتنی بر Ray Tracing می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تحلیل کارایی پروتکل‌های V2X، ارزیابی سناریوهای ایمنی حمل و نقل و طراحی نسل‌های آینده ارتباطات خودرویی باشد.

۱-۲ روش شبیه‌سازی (Simulation Methodology)

الف. هدف کلی شبیه‌سازی

هدف از شبیه‌سازی ایجاد یک دو قلوبی 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 کanal رادیویی را بر پایه هندسه‌ی دقیق محیط و خواص مصالح محاسبه کند). خروجی این شبیه‌سازی باید معیارهایی مثل SINR، RSSI، نرخ خطای 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 غیرثابت) که از داده‌های استخراج و با ابزارهایی مانند Blender / Blosm / OBJ/PLY / OpenStreetMap تولید می‌شود.

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

Mobility Engine .۲

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

Network Simulator (ms-van3t) .۳

- 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.

(Sionna RT / RT service آنلاین Ray Tracer .۴

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

Module Coexistence / Interference .۵

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

Cache و منطق بهروزرسانی .۶

- نتایج محاسبه کانال را برای جفت‌های (vi,vj) کش می‌کند و تنها در صورت تغییر قلب‌توجه 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 کanal

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

- محاسبه مسیرهای LOS و NLOS، ضرایب مسیر (α_i)، تأخیر τ ، زاویه ورود/خروج و Doppler.

- کلی G معمولاً به صورت جمع انرژی مسیرها (یا جمع مربعات ضرایب) محاسبه می‌شود:

$$G_{\text{lin}} = \sum_i |\alpha_i|^2 \quad \text{یا} \quad G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(G_{\text{lin}}) \quad (1-1)$$

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

۶. ماژول — Coexistence مدل تداخل و محاسبه SINR

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

(الف) تفکیک منابع (Resource grid)

سیستم کل پهنانی 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 $[freq_start, freq_end]$ و $[time_start, time_end]$ بررسی می‌شود.

ج) فیلتر مسیرهای 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

$$P_{rx} = P_{tx} \times G_{lin} \quad (1-2)$$

واحدها: وات یا dBm تبدیل شود

۵. محاسبه نویز حرارتی برای هر block

$$N = k_B T B_{block} \quad (1-3)$$

که ثابت بولتزمن و B_{block} پهنه‌ای باند بلوك است.

۶. محاسبه SINR بلوك-به-بلوك

$$\text{SINR}_z = \frac{P_{rx,desired,z}}{N_z + \sum_{\text{interferers}} P_{rx,interf,z}} \quad (1-4)$$

که Z شاخص بلوك است.

۷. میانگین‌گیری وزن دار SINR الگوریتم مقاله

برای بسته‌ای که شامل چند بلوك است، میانگین وزن دار با وزن w_z (نسبت پهنه‌ای باند بلوك به پهنه‌ای باند کل بسته) محاسبه می‌شود:

$$\bar{\text{SINR}} = 10 \log_{10} \left(\sum_z w_z \cdot 10^{\text{SINR}_z / 10} \right) \quad (1-5)$$

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

۸. تصمیم Packet Reception

- با داشتن $\text{SI}\bar{\text{N}}\text{R}$ و شناسه MCS یا نرخ مدولاسیون، از جدول BLER/FER مربوطه یا مدل‌سازی شبیه‌سازی ساده: آستانه SINR برای تعیین اینکه بسته قابل دیکد هست یا نه استفاده کنید. مثال:

$$\rightarrow \text{ReceivedSI}\bar{\text{N}}\text{R} \geq \text{SINR}_{\text{req}}(\text{MCS}) \quad \circ \quad \text{اگر}$$

و گرنه Lost \circ

- برای دقیق‌تر شدن، از منحنی‌های BLER بر پایه شبیه‌سازی فیزیکی (PHY simulations) یا نتایج آزمایشگاهی استفاده کنید.

۷. معیارها و روش‌های ارزیابی

در خروجی شبیه‌سازی معیارهای زیر محاسبه و گزارش می‌شود:

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/شبیه‌ساز مقایسه توزیع‌ها نشان‌دهنده دقیق مدل‌سازی تداخل است.

۳. PRR (Packet Reception Ratio)

نسبت بسته‌های با موفقیت دریافت‌شده روی کل بسته‌ها، معمولاً بر حسب فاصله یا شرایط کanal.

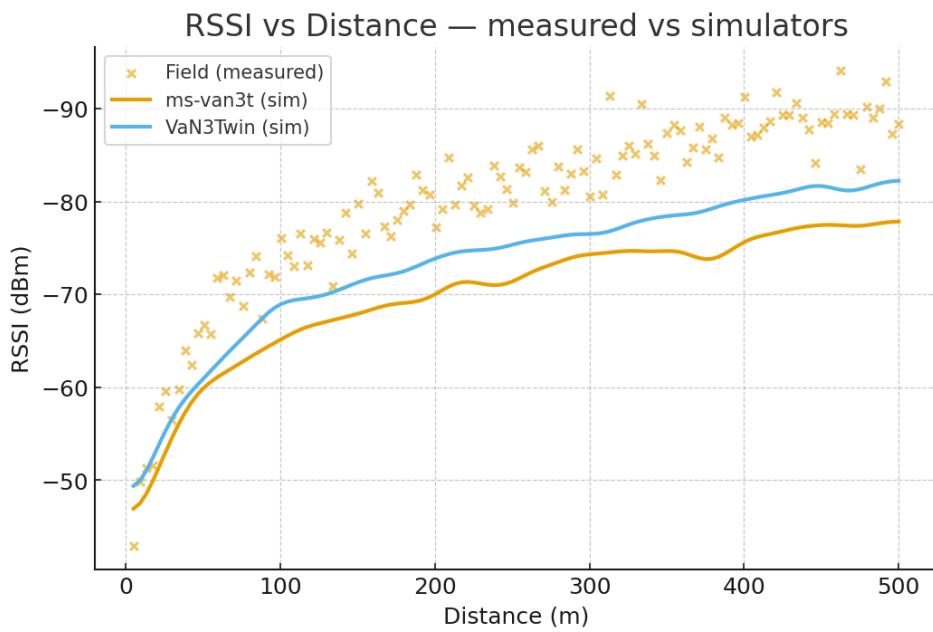
۴. DR (Disagreement Ratio)

نسبتی از بسته‌ها که بین شبیه‌ساز و داده مرجع (یا بین دو شبیه‌ساز) درباره نتیجه دریافت اختلاف وجود دارد. اگر K مجموعه همه بسته‌ها و $\{0,1\}$ تصمیم برای بسته i :

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

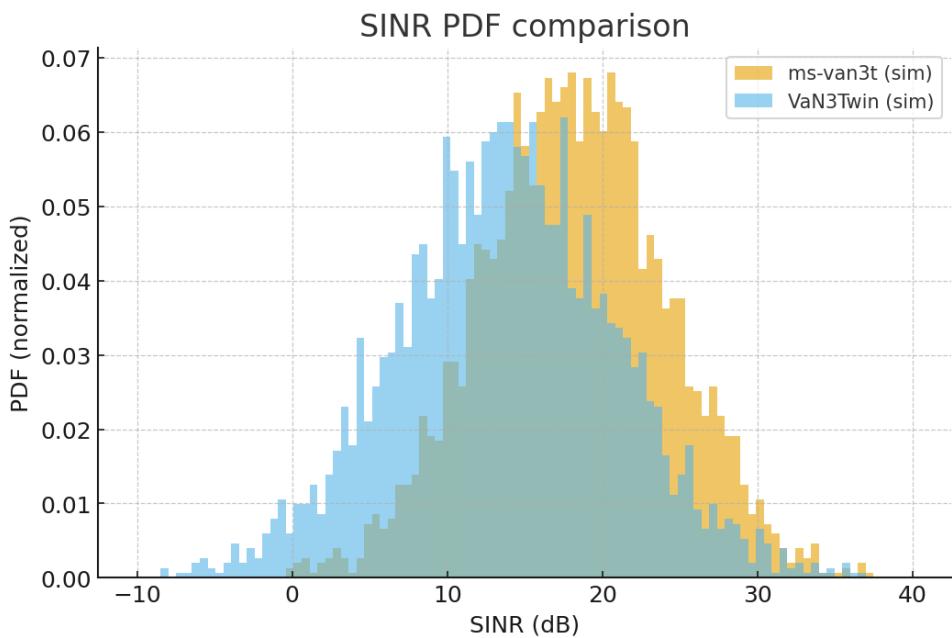
۵. مأخذ خطا (Error Sources)

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



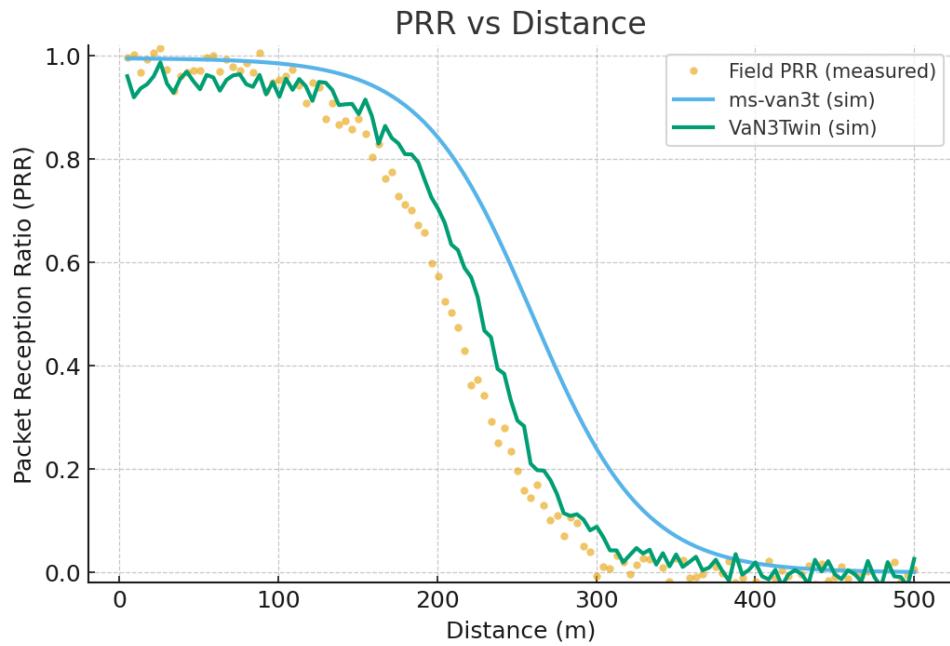
شکل ۱) RSSI بر حسب فاصله

RSSI بیانگر توان سیگنال دریافتی در گیرنده است و به طور طبیعی با افزایش فاصله میان فرستنده و گیرنده کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که مقدار آن منفی تر می‌شود. در نمودار RSSI بر حسب فاصله، سه سری داده نمایش داده شده است: داده‌های میدانی که به صورت نقاط پراکنده نشان داده شده و معیار واقعیت بهشمار می‌روند، خروجی شبیه‌ساز ms-van3t که به صورت خط نمایش یافته و مقدار RSSI را خوش‌بینانه‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند، و خروجی شبیه‌ساز VaN3Twin که رفتار دقیق‌تری از کاهش توان سیگنال را ارائه می‌دهد. مشاهده نمودار نشان می‌دهد که ms-van3t میزان سیگنال دریافتی را بیش از حد تخمین می‌زند و عملکرد شبکه را بهتر از آنچه در میدان رخ می‌دهد نشان می‌دهد، در حالی که VaN3Twin با در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی محیط، بازتاب‌ها، انسدادهای شرایط خط دید و غیرخط دید و مسیرهای چندگانه، روند افت RSSI را بسیار نزدیک‌تر به داده‌های واقعی مدل می‌کند. این دقت در فاصله‌های دور، به‌ویژه فراتر از حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر، برجسته‌تر می‌شود، جایی که رفتار VaN3Twin بالاترین میزان انطباق را با اندازه‌گیری‌های میدانی دارد.



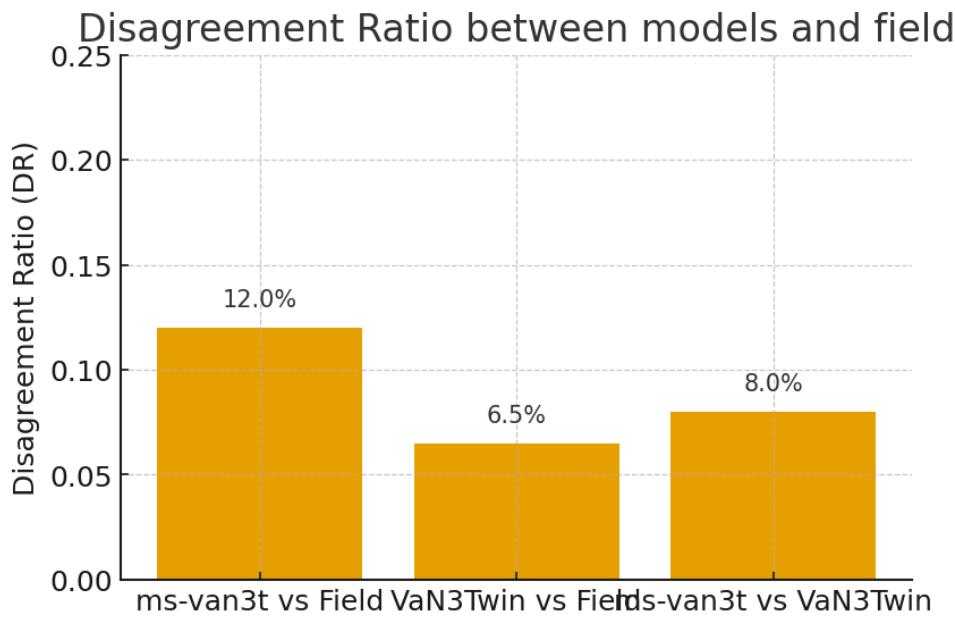
شکل ۲) تابع چگالی احتمال SINR

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 کanal رادیویی را بیش از حد مطلوب در نظر می‌گیرد و تداخل را کمتر از واقعیت تخمین می‌زنند. در مقابل، قله را در VaN3Twin 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 در مقایسه با ms-van3t رفتار واقعی کanal 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 محاسبه 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 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

با 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 درصد تقریبی ۱۲٪ به داده‌های میدانی دارای خطای قابل توجهی حدود ۱۲ درصد است، در حالی که VaN3Twin با مقدار تقریبی ۸٪ درصد تقریباً نصف خطای 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 می‌شده 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.

۱-۳ نتیجه گیری

نتایج این پژوهش 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 درنظرگرفتن تداخل همزمان فرستنده‌ها، روند افت RSSI و PRR را دقیقاً مطابق اندازه‌گیری‌های میدانی بازتولید کرده و مقادیر Disagreement Ratio کاملاً واقع‌گرایلنه ارائه می‌دهد. مهم‌ترین شاخص این برتری کاهش قابل توجه SINR است؛ به‌گونه‌ای که خطای Van3Twin تقریباً نصف شبیه‌ساز پایه است. این نتایج اثبات می‌کند که استفاده از دو قلوی دیجیتال تمام‌پشته مبتنی بر Ray-Tracing می‌تواند رویکردی قدرتمند و قابل اتكا برای تحلیل عملکرد واقعی سامانه‌های ارتباطی خودرویی و ارزیابی طرح‌های ایمنی و ارتباطی آینده باشد.

تمام نتایج و نمودارهای ارائه شده در این پژوهه بر اساس داده‌های شبیه‌سازی به‌دست آمده‌اند و پس از اجرای کامل سناریوی طراحی شده 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 پژوهه 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 پژوهه است.