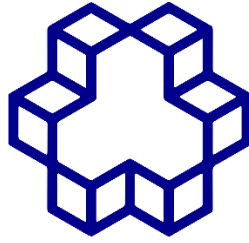


با نام و یاد خدا



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

عنوان پژوهش:

بررسی شبکه‌های مش بی‌سیم مبتنی بر MIMO

توسط: محمد میار

استاد: دکتر محامدپور

درس مخابرات بی‌سیم

بهمن ماه ۱۴۰۴

چکیده:

شبکه‌های مش بی سیم، به‌عنوان یک معماری کلیدی در ارتباطات بی‌سیم چنددهایی مطرح شده‌اند. با این حال، محدودیت‌های ذاتی لایه فیزیکی و دسترسی به رسانه، مقیاس‌پذیری و توان عملیاتی این شبکه‌ها را محدود می‌کنند. فناوری MIMO با بهره‌گیری از چند آنتن، امکان افزایش ظرفیت لینک را فراهم می‌سازد. این پژوهش به بررسی شبکه‌های MIMO Mesh می‌پردازد و سه رویکرد اصلی را بررسی می‌کند: بهینه‌سازی میان‌لایه‌ای با روش‌های عددی، حداکثرسازی توان عملیاتی کل شبکه و مسیریابی آگاه. در این راستا شبکه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند مقدار زیادی بهبود در توان عملیاتی و کاهش قابل توجه در تراکم لینک‌ها داشته باشد.

۱- مقدمه:

شبکه‌های مش بی‌سیم (Wireless Mesh Networks – WMN) طی دو دهه اخیر به‌عنوان یکی از معماری‌های مهم در توسعه سامانه‌های ارتباطی بی‌سیم چنددهایی مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. ویژگی‌هایی نظیر خودسازمان‌دهی، خودترمیمی، عدم وابستگی به زیرساخت متمرکز و هزینه نسبتاً پایین پیاده‌سازی، این شبکه‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله شبکه‌های شهری، دسترسی پهن‌بند در مناطق کم‌برخوردار، ارتباطات اضطراری و سامانه‌های نظامی تبدیل کرده است. در یک WMN، گره‌ها علاوه بر ایفای نقش کاربر نهایی، وظیفه رو به جلو انتقال داده سایر گره‌ها را نیز بر عهده دارند و بدین ترتیب، ارتباطات به‌صورت چنددهایی و خودپیکربندی‌شده برقرار می‌شود.

با وجود مزایای معماری مش، عملکرد این شبکه‌ها به‌طور ذاتی تحت تأثیر محدودیت‌های لایه فیزیکی و لایه دسترسی به رسانه قرار دارد. در شبکه‌های مش تک‌آنتنه، ظرفیت لینک‌ها به عواملی نظیر تداخل هم‌کاناله، افت مسیر، محوشدگی و محدودیت بازاستفاده مکانی طیف وابسته است. با افزایش چگالی گره‌ها، تداخل تجمعی افزایش یافته و در بسیاری از سناریوها، توان عملیاتی کل شبکه نه‌تنها بهبود نمی‌یابد، بلکه کاهش پیدا می‌کند. این پدیده به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی مقیاس‌پذیری شبکه‌های مش بی‌سیم شناخته می‌شود.

در این میان، فناوری چند ورودی/چند خروجی (Multiple-Input Multiple-Output – MIMO) به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای ارتقای ظرفیت و قابلیت اطمینان در لایه فیزیکی شبکه‌های بی‌سیم مطرح شده است. سیستم‌های MIMO با بهره‌گیری از چندین آنتن در فرستنده و گیرنده، امکان استفاده از بعد مکانی کانال رادیویی را فراهم می‌کنند. برخلاف سیستم‌های تک‌آنتنه، کانال‌های MIMO قادر به پشتیبانی از ارسال هم‌زمان چند جریان داده مستقل در همان پهنای باند هستند که این امر منجر به افزایش ظرفیت لینک و همچنین بهبود عملکرد از طریق تنوع فضایی می‌شود. اهمیت این فناوری به‌گونه‌ای است که MIMO

به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی در استانداردهای نوین بی‌سیم، از جمله IEEE 802.11n و اصلاحیه‌های بعدی آن، مورد استفاده قرار گرفته است.

ادغام فناوری MIMO با معماری شبکه‌های مش، منجر به شکل‌گیری نسل جدیدی از شبکه‌ها تحت عنوان شبکه‌های مش مبتنی بر MIMO Mesh Networks (MIMO Mesh Networks) شده است. در این شبکه‌ها، لینک‌های بی‌سیم دیگر صرفاً مسیرهای ارتباطی ساده محسوب نمی‌شوند، بلکه به‌صورت کانال‌های چندبعدی با درجات آزادی محدود مدل می‌گردند که ظرفیت آن‌ها به عواملی نظیر تعداد آنتن‌ها، ماتریس کانال، توان ارسالی و استراتژی انتقال وابسته است. این ویژگی‌ها، به‌ویژه در ستون فقرات بی‌سیم میان گره‌های مش، پتانسیل قابل توجهی برای افزایش توان عملیاتی کل شبکه فراهم می‌آورند.

با این حال، اگرچه از منظر معماری پشته پروتکل OSI/ISO، ترکیب پیشرفت‌های لایه فیزیکی (MIMO) با قابلیت‌های لایه شبکه (شبکه) رو به جلو انتقال داده در WMN ها (به‌صورت مفهومی سراسر به نظر می‌رسد، پیامدهای کمی این ادغام همچنان به‌طور کامل روشن نشده است. به‌طور خاص، مشخص نیست چه میزان از افزایش ظرفیت لینک ناشی از به‌کارگیری MIMO، در عمل به افزایش ظرفیت سیستم WMN منجر می‌شود. افزون بر این، طراحی مستقل لایه‌ها در معماری‌های کلاسیک می‌تواند در شبکه‌های MIMO Mesh به تصمیمات زیربهبینه بیانجامد؛ برای مثال، انتخاب مسیر در لایه شبکه بدون در نظر گرفتن درجات آزادی لینک‌های MIMO یا شرایط تداخل، ممکن است به اشباع منابع آنتنی در گره‌های میانی منجر شود. از این رو، رویکردهای میان‌لایه‌ای که به‌صورت هم‌زمان لایه‌های فیزیکی، MAC و شبکه را در نظر می‌گیرند، به‌عنوان یک ضرورت پژوهشی مطرح شده‌اند.

در همین راستا، پژوهش‌های متعددی شبکه‌های MIMO Mesh را از دیدگاه حداکثرسازی توان عملیاتی کل شبکه مورد بررسی قرار داده‌اند که در آن‌ها، شبکه به‌صورت یک مسئله جریان چندگانه مدل شده و قیود ناشی از چندآنتنی بودن لینک‌ها و محدودیت‌های تداخلی به‌طور صریح لحاظ می‌شود. این مطالعات عموماً کران‌های بالای ظرفیت شبکه را ارائه می‌دهند، اما فاصله میان این کران‌های تئوریک و عملکرد قابل دستیابی در سامانه‌های واقعی همچنان به‌عنوان یک چالش باز باقی مانده است.

هدف این مقاله، ارائه یک تحلیل جامع و ساخت‌یافته از شبکه‌های مش مبتنی بر MIMO و بررسی تأثیر این فناوری بر ظرفیت و عملکرد کلی WMN ها است. بدین منظور، ابتدا معماری و مدل سیستم این شبکه‌ها معرفی می‌شود، سپس مدل ظرفیت مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در ادامه، رویکردهای مختلف شامل بهینه‌سازی میان‌لایه‌ای، حداکثرسازی توان عملیاتی و مسیریابی آگاه به MIMO به‌صورت تحلیلی مقایسه شده و در نهایت، چالش‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲- معماری و مدل شبکه‌های MIMO Mesh

مدل سیستم به‌طور ویژه با ویژگی‌های یک شبکه بی‌سیم، یعنی کانال بی‌سیم و توانایی عملکرد لایه فیزیکی (PHY) برای انتقال اطلاعات با استفاده از کانال بی‌سیم، سر و کار دارد. مطابق با موضوع مقاله، توجه ویژه‌ای برای مدل‌سازی انتقال‌های MIMO صورت گرفته است. کانال بی‌سیم، توان سیگنال دریافتی از یک انتقال بین گره‌های N_i و N_j ، که به ترتیب در موقعیت‌های p_i و p_j قرار دارند، را مشخص می‌کند. به‌طور معمول، مدل کانال بی‌سیم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P(N_i, N_j) [\text{dBm}] = P_i + g_i + g_j - pl(p_i, p_j) - s(p_i, p_j)$$

که در آن:

- P_i توان ارسال گره N_i است.
- g_i و z_i بهره‌های آنتن فرستنده و گیرنده هستند.
- $pl(p_i, p_j)$ تابع تضعیف مسیر است که کاهش توان سیگنال ناشی از فاصله بین N_i و N_j را مدل می‌کند.
- $s(p_i, p_j)$ مؤلفه محوشدگی است که معمولاً با توزیع لگ‌نرمال مدل می‌شود.

عملکرد سیستم به شدت به ویژگی‌های این مدل، به‌ویژه پارامترهای $pl(p_i, p_j)$ و $s(p_i, p_j)$ وابسته است. بنابراین، انتخاب مدل مناسب بر اساس اندازه‌گیری گسترده و داده‌های دنیای واقعی امری حیاتی محسوب می‌شود. علاوه بر این، استفاده از یک مدل استاندارد شده امکان مقایسه مستقیم با نتایج پژوهش‌های دیگر را که از همان فرضیات بهره می‌برند، فراهم می‌آورد.

با توجه به این ملاحظات و سناریوی کاربرد معمول شبکه‌های مش بی‌سیم (WMN)، ما مدل کانال ریزشهری (UMi) را انتخاب می‌کنیم. این مدل برای ارزیابی فناوری‌های رابط رادیویی در فرآیند IMT-Advanced طراحی شده و توابع تضعیف مسیر را برای لینک‌های دید مستقیم (LOS)، غیر دید مستقیم (NLOS) ارائه می‌دهد. همچنین، این مدل محوشدگی را با یک فرآیند تصادفی همبسته و توزیع لگ‌نرمال توصیف می‌کند.

شبکه‌های MIMO Mesh از مجموعه‌ای از گره‌های ثابت یا نیمه‌ثابت تشکیل شده‌اند که هر یک مجهز به یک آرایه آنتن برای پشتیبانی از فناوری MIMO هستند. این شبکه‌ها را می‌توان به صورت یک گراف جهت‌دار وزن‌دار $G=(N,L,C)$ مدل کرد که در آن $N = \{1,2,\dots,n\}$ مجموعه گره‌های شبکه، $L \subseteq N \times N$ مجموعه لینک‌های ارتباطی ممکن بین گره‌ها و $C : L \rightarrow R^+$ تابع ظرفیت که به هر لینک یک ظرفیت حداکثر اختصاص می‌دهد.

هر گره $i \in N$ در شبکه MIMO Mesh مجهز به N_i آنتن است که می‌تواند به صورت مستقل یا ترکیبی مورد استفاده قرار گیرند. برای یک لینک بین گره فرستنده t با n_t آنتن و گره گیرنده r با n_r آنتن، ماتریس کانال نشان‌دهنده بهره کانال بین هر جفت آنتن فرستنده-گیرنده است. که در آن h_{ij} نشان‌دهنده بهره کانال بین آنتن j فرستنده و آنتن i گیرنده است.

$$\mathbf{H}_l = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_r 1} & h_{n_r 2} & \dots & h_{n_r n_t} \end{bmatrix}$$

سیگنال دریافتی در گره گیرنده لینک l به صورت زیر مدل می‌شود: [1]

$$\mathbf{y}_l = \sqrt{\rho_l} \mathbf{H}_l \mathbf{x}_l + \mathbf{n}_l + \sum_{k \in I(l)} \sqrt{\rho_{kl}} \mathbf{H}_{kl} \mathbf{x}_k$$

که در آن:

- Yl بردار سیگنال دریافتی
- Xl بردار سیگنال ارسالی
- ρl تضعیف مسیر (Path Loss) برای لینک l
- nl نویز گوسی سفید افزودنی
- $I(l)$ مجموعه لینک‌های تداخل‌کننده با لینک l
- H_{kl} ماتریس کانال بین فرستنده لینک k و گیرنده لینک l

البته هر گره آدارای محدودیت توان کل است که باید بین تمام لینک‌های خروجی آن توزیع شود.

در شبکه برای هر جریان با نرخ r_f که از گره مبدأ به گره مقصد ارسال می‌شود، باید در هر گره میانی قانون بقای جریان داده برقرار باشد:

$$\sum_{l \in O(i)} x_l^f - \sum_{l \in I(i)} x_l^f = \begin{cases} r_f & \text{if } i = s_f \\ -r_f & \text{if } i = d_f \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

که x_l^f نشان‌دهنده نرخ جریان f در لینک l است و $I(i)$ مجموعه لینک‌های ورودی به گره i است.

در شبکه‌های MIMO Mesh، تداخل یک پدیده پیچیده است که به عوامل متعددی مثل فاصله بین فرستنده و گیرنده‌های غیرمطلوب، تعداد آنتن‌ها و استراتژی کدگذاری و توان ارسالی وابسته است. لذا می‌توان یک گراف تداخل $GI=(L, EI)$ تعریف کرد که در آن رأس‌ها همان لینک‌های شبکه هستند در سیستم‌های MIMO، به دلیل امکان حذف تداخل، این گراف کامل نیست و برخی لینک‌ها می‌توانند به صورت همزمان فعال باشند. نسبت سیگنال به تداخل و نویز (SINR) در گیرنده لینک l به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{SINR}_{i \rightarrow j} = \frac{P(N_i, N_j) [\text{mW}]}{I_{i \rightarrow j, \text{II}} [\text{mW}] + (N_{th} + N_{rx}) [\text{mW}]}$$

شرط موفقیت‌آمیز بودن دریافت در لینک l این است که $\text{SINR}_l \geq \gamma_{\min}$ که γ_{\min} آستانه SINR مورد نیاز برای مدولاسیون مورد نظر است.

در بسیاری از تحلیل‌های MIMO Mesh، فرض می‌شود که لینک‌ها در کانال‌های متعامد کار می‌کنند. در مدل کانال‌های متعامد، معادله سیگنال دریافتی ساده‌تر می‌شود. زیرا عبارت تداخل حذف می‌شود. این فرض اگرچه تحلیل را ساده می‌کند، اما ممکن است محافظه‌کارانه باشد زیرا امکان استفاده همزمان از طیف را نادیده می‌گیرد.

در تحلیل شبکه‌های MIMO Mesh، فرضیات کلیدی زیر معمولاً در نظر گرفته می‌شوند:

۱. **CSI کامل:** فرض می‌شود که فرستنده‌ها اطلاعات کامل درباره ماتریس کانال دارند.
 ۲. **کانال شبه-ثابت:** ماتریس کانال در طول بازه بهینه‌سازی ثابت فرض می‌شود.
 ۳. **نویز گوسی سفید:** نویز کانال به صورت گوسی سفید با واریانس σ^2 مدل می‌شود.
 ۴. **توزیع یکنواخت گره‌ها:** در تحلیل‌های مجانبی، گره‌ها به صورت یکنواخت در منطقه توزیع شده‌اند.
 ۵. **مدل مسیر-تلفات ساده‌شده:** از مدل مسیر-تلفات توان ثابت استفاده می‌شود.
- در نهایت مدل سیستم شبکه‌های MIMO Mesh یک چارچوب ریاضی جامع ارائه می‌دهد که شامل اجزای زیر است:

- مدل توپولوژیکی مبتنی بر گراف جهت‌دار
- مدل فیزیکی شامل ماتریس کانال MIMO و تضعیف مسیر
- مدل منابع شامل محدودیت‌های توان و آنتن
- مدل ترافیک مبتنی بر جریان‌های چندکالایی
- مدل تداخل مبتنی بر SINR یا گراف تداخل

این مدل جامع پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی شامل بهینه‌سازی میان‌لایه‌ای، حداکثرسازی توان عملیاتی و طراحی الگوریتم‌های مسیریابی فراهم می‌کند.

۳- ظرفیت شبکه‌های MIMO Mesh :

ظرفیت یک لینک MIMO منفرد در محیط کانال گوسی (AWGN) و با فرض CSI کامل در فرستنده، از فرمول معروف شانون-هارتلی بسط یافته به بعد فضایی به دست می‌آید. برای محاسبه ظرفیت کل شبکه MIMO Mesh، باید تداخل بین لینک‌ها را در نظر گرفت. در حالت خاصی که لینک‌ها در کانال‌های فرکانسی متعامد کار می‌کنند (مانند [1])، مسئله ظرفیت شبکه به یک مسئله تخصیص منابع تبدیل می‌شود. بر اساس تحلیل‌های ارائه شده در مقالات، پارامترهای کلیدی زیر بر ظرفیت شبکه MIMO Mesh تأثیر می‌گذارند:

۱. **تعداد آنتن‌ها (N):** ظرفیت ابتدا به صورت خطی با N افزایش می‌یابد، اما پس از رسیدن به آستانه‌ای اشباع می‌شود.
۲. **تعداد باندهای فرکانسی (K):** مشابه آنتن‌ها، افزایش باندهای فرکانسی نیز ابتدا ظرفیت را افزایش می‌دهد اما سپس اشباع می‌شود.

۳. برد ارسال (R): یک برد ارسال بهینه وجود دارد که ظرفیت شبکه را حداکثر می‌کند.

۴. چگالی گره‌ها (ρ): با افزایش چگالی، ظرفیت افزایش می‌یابد تا به یک آستانه برسد.

با ترکیب جنبه‌های مختلف تحلیل‌های فوق، می‌توان یک مدل تلفیقی برای ظرفیت شبکه MIMO Mesh ارائه داد:

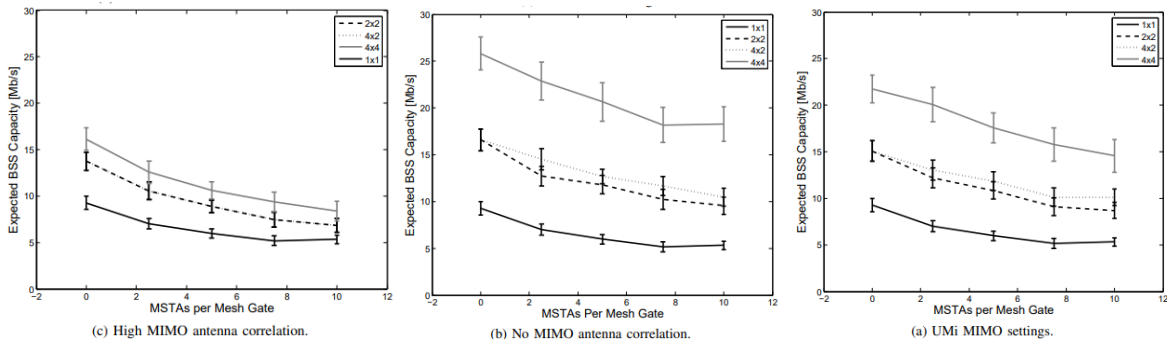
$$C_{\text{MIMO-Mesh}} = \min \{C_{\text{PHY}}, C_{\text{MAC}}, C_{\text{NET}}\}$$

ظرفیت شبکه‌های MIMO Mesh محصول پیچیده‌ای از عوامل مختلف است؛ عوامل فیزیکی شامل تعداد آنتن‌ها، ماتریس کانال، توان ارسال، عوامل دسترسی به رسانه مثل تداخل، بازاستفاده مکانی، برنامه‌ریزی و عوامل شبکه‌ای مثل مسیریابی، توپولوژی، الگوی ترافیک در نهایت تحلیل‌ها نشان می‌دهند که:

- MIMO می‌تواند ظرفیت شبکه‌های Mesh را به طور قابل توجهی افزایش دهد.
- بهبود ظرفیت ابتدا خطی است اما پس از نقطه‌ای اشباع می‌شود
- طراحی بهینه نیاز به هماهنگی میان لایه‌ای دارد
- مسیریابی آگاه از MIMO برای تحقق پتانسیل کامل ظرفیت ضروری است

حداکثر ظرفیت قابل دستیابی برای یک شبکه MIMO Mesh با M گره، هر یک با N آنتن به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$C_{\text{max}} \approx \min \left(\frac{MN}{2}, M \cdot \text{avg-degree} \right) \cdot W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P\rho_0}{N\sigma^2} \right)$$



که نشان می‌دهد ظرفیت شبکه توسط دو عامل محدود می‌شود منابع آنتنی کل شبکه و درجه متوسط گره‌ها که نشان‌دهنده محدودیت‌های توپولوژیکی است.

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

جدول ۱: مقایسه رویکردهای مختلف برای شبکه‌های MIMO Mesh

ویژگی	بهینه‌سازی میان‌لایه‌ای [1]	حداکثرسازی توان عملیاتی [2]	مسیریابی آگاه [3] MIMO
هدف اصلی	بهینه‌سازی Utility شبکه	یافتن کران ظرفیت و نقاط طراحی	بهینه‌سازی جریان
سطح بهینه‌سازی	PHY-MAC-NET یکپارچه	تحلیل شبکه‌ای با قیود PHY/MAC	NET با مدل‌سازی PHY
پیچیدگی زمانی	$O(n^3)$	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$
حافظه مورد نیاز	بالا	متوسط	متوسط
نیاز به CSI	کامل	آماري	آماري
قابلیت توزیع شدگی	محدود	متوسط	بالا
بهبود عملکرد	۳۰-۴۰٪	کران تحلیلی	۲۵-۴۵٪
مناسب برای	شبکه‌های کوچک	مرحله طراحی	شبکه‌های عملیاتی

جدول ۱: نقاط قوت و ضعف رویکردهای مختلف برای شبکه‌های MIMO Mesh

ویژگی	بهینه‌سازی میان‌لایه‌ای [1]	حداکثرسازی توان عملیاتی [2]	مسیریابی آگاه [3] MIMO
نقاط قوت	مدل‌سازی دقیق تعامل لایه‌ها بهینه‌سازی یکپارچه منابع نتایج بهینه از نظر تئوریک	تحلیل‌های مجانبی روشن رهنمودهای طراحی عملی شناسایی نقاط بهینه	بهبود چشمگیر عملکرد قابلیت اجرای توزیع شده انعطاف‌پذیری بالا
نقاط ضعف	پیچیدگی محاسباتی بالا نیاز به اطلاعات کامل مشکل در مقیاس‌پذیری	ساده‌سازی برخی قیود عدم ارائه الگوریتم‌های online	نیاز به اطلاعات کانال پیچیدگی پیاده‌سازی

شبکه‌های MIMO Mesh پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای تحول شبکه‌های بی‌سیم چنددهایی دارند. این پژوهش نشان داد که ظرفیت شبکه می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش یابد، اما این بهبود نامحدود نیست و سه رویکرد وجود دارد:

- بهینه‌سازی یکپارچه [1] برای شبکه‌های کوچک
- تحلیل ظرفیت [2] برای مرحله طراحی
- مسیریابی آگاه [3] برای شبکه‌های عملیاتی

چالش‌های عملی مانند مقیاس‌پذیری، تحرک و محدودیت انرژی هنوز نیاز به پژوهش بیشتر دارند و موفقیت شبکه‌های MIMO Mesh در گرو ادغام هوشمندانه‌ای از بینش‌های تئوریک [2,1] و الگوریتم‌های عملی [3] است.

شبکه‌های مش بی‌سیم (WMN) و سیستم‌های چندآنتنه (MIMO) هر یک به تنهایی حوزه‌های پژوهشی مهم و جذابی محسوب می‌شوند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که ترکیب این دو فناوری می‌تواند بینش‌های ارزشمندی ارائه دهد؛ به گونه‌ای که WMN ها به طور قابل توجهی از افزایش ظرفیت فراهم‌شده توسط MIMO بهره‌مند می‌شوند.

با این حال، نتایج به دست آمده بر پایه یک چارچوب تحلیلی محاسبه ظرفیت بوده و بیانگر کران‌های بالای ظرفیت هستند. هنوز مشخص نیست که در صورت به کارگیری یک پروتکل MAC واقعی با زمان‌بندی توزیع‌شده و غیرایده‌آل، چه میزان از این ظرفیت در عمل قابل دستیابی خواهد بود. افزوده شدن MIMO به WMN ها، امکان استفاده از مدولاسیون و کدگذاری‌های متنوع (MCS) را افزایش می‌دهد، اما در عین حال می‌تواند احتمال بروز خطا در الگوریتم‌های تطبیق نرخ و تصمیم‌گیری زمان‌بند را نیز بیشتر کند؛ مسئله‌ای که ممکن است به انتقال‌های همزمان و غیرهماهنگ منجر شود.

بر این اساس، طراحی و تحلیل الگوریتم‌های زمان‌بندی توزیع‌شده در شبکه‌های مش بی‌سیم تقویت‌شده با MIMO ، به عنوان یک مسیر پژوهشی چالش‌برانگیز و در عین حال امیدوارکننده برای تحقیقات آینده مطرح می‌شود.

۵- مراجع

[1] J. Liu, T. Y. Park, Y. T. Hou, Y. Shi, and H. D. Sherali, "Cross-layer optimization of MIMO-based mesh networks under orthogonal channels," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2007.

[2] B. Hamdaoui and K. G. Shin, "Maximum achievable throughput in multi-band multi-antenna wireless mesh networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, no. 3, pp. 301–312, Mar. 2010.

[3] S. Chu and X. Wang, "MIMO-aware routing in wireless mesh networks," in *Proc. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2010.

[4] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 684–702, Jun. 2003.

[5] S. Max and B. Walke, "MIMO Capacity of Wireless Mesh Networks," in Proc. European Wireless Conf. (EW), Lucca, Italy, 2010, pp. 53–60, Springer, doi: 10.1007/978-3-642-16644-0_6.