

تعیین محل تغذیه و شکل دهی الگوی میدان در آنتن هم‌موقعیت MIMO با استفاده از تئوری مود مشخصه

مصطفی پروین، جواد احمدی شکوه و حمیده دشتی خویدکی

تحریک هر مود، المان‌های ICE در موقعیت‌هایی که جریان آن مود حداکثر است، قرار می‌گیرند. در [۵]، مودهای مشخصه یک آنتن MIMO بزرگ بر اساس تقارن جریان‌های مشخصه حول محورهای x ، y یا تقارن نقطه‌ای دسته‌بندی شده و سپس محل‌های مناسب تغذیه با عناصر ICE برای تحریک هر دسته از مودها تعیین می‌شود. در [۶]، تحلیل مود مشخصه آنتنی که دارای یک محور تقارن است، انجام شده است. جریان‌های مشخصه بر اساس هم‌جهت بودن یا خلاف جهت بودن نسبت به محور تقارن، به دو دسته زوج و فرد تقسیم شده و سپس تغذیه ICE به منظور تحریک هر دسته از این مودها معرفی می‌شود. همچنین یک شبکه تزویج برای تحریک جداگانه مودهایی که به یک دسته تعلق دارند، معرفی می‌شود. در [۷]، مودهای مشخصه یک آنتن MIMO به دو دسته هم‌فاز و غیر هم‌فاز تقسیم شده و نوع و محل مناسب تغذیه برای تحریک این مودها تعیین می‌شود. در [۸]، محل مناسب تغذیه برای چند نوع آنتن سیمی معرفی می‌شود. با استفاده از تئوری مود مشخصه، رابطه‌ای برای توان تشعشعی آنتن تعریف شده و بر اساس حداکثر شدن میزان توان تشعشعی، محل بهینه تغذیه، تعیین می‌شود. در [۹]، محل‌هایی برای تغذیه آنتن دوقطبی سیمی معرفی شده و سپس با استفاده از معیار ضریب وزن دهی مودال^۲ (MWC)، صحت این محل‌ها بررسی می‌شود. در [۱۰]، تحلیل مود مشخصه برای آنتن مسطح مثلثی انجام شده و محل تغذیه مایکرواستریپ برای تحریک دو مود اول مشخص می‌شود. در [۱۱]، با استفاده از تحلیل مود مشخصه و به کمک تفاضل جریان‌های مشخصه دو مود متعامد، محل تغذیه در یک آنتن با اسلات U شکل به منظور تحریک هم‌زمان دو مود مذکور برای ایجاد قطبش دایروی تعیین می‌شود.

شکل دهی و تغییر جهت الگوی میدان دور آنتن با تغییر فاز منابع تحریک، در مقالات متعددی مورد بحث قرار گرفته است. در [۱۲]، یک آنتن مایکرواستریپ دایروی متحدالمرکز با سه المان، معرفی می‌شود. محل‌های تغذیه برای تحریک مودهای مربوط به هر یک از این المان‌ها بر اساس سعی و خطا معرفی شده و سپس با تغییر فاز این منابع تحریک، جهت الگوی میدان آنتن تغییر می‌کند. در [۱۳] و [۱۴]، یک آنتن صفحه‌ای مستطیلی با ساختار بسیار ساده معرفی شده، تحلیل مود مشخصه بر روی آن انجام شده و سپس با قراردادن المان تغذیه‌خازنی^۳ (CCE) و تغییر فاز این منابع تحریک، جهت صفر الگوی میدان آنتن، تغییر می‌کند. در [۱۵]، با قراردادن تغذیه‌های ICE در محل‌های مناسب بر روی یک ساختار و تغییر فاز این منابع تحریک، الگوی میدان آنتن و خواص تشعشعی آن تغییر می‌کند. در [۱۶]، آنتنی مستطیل شکل معرفی

چکیده: در این مقاله روشی برای تعیین محل تغذیه در یک آنتن هم‌موقعیت چندورودی- چندخروجی (MIMO) بر مبنای تئوری مود مشخصه ارائه می‌شود. از خاصیت تعامد جریان‌های مشخصه برای تعیین محل‌های بهینه تغذیه در آنتن مورد نظر استفاده می‌شود. ابتدا تحلیل مود مشخصه برای تعیین مودهای رزونانسی متعامد آنتن، انجام و سپس محل‌های بهینه تغذیه برای تحریک این مودها، تعیین می‌شود. همچنین با تغییر دامنه تحریک این مودها، شکل الگوی میدان دور آنتن را تغییر می‌دهیم. مشاهده می‌شود که تنها با تغییر دامنه تحریک مودهای متعامد آنتن و ترکیب آنها در فرکانس مورد نظر، شکل و پهنای پرتوی آنتن تغییر می‌کند.

کلیدواژه: تعیین محل تغذیه، مودهای مشخصه، دامنه تحریک، الگوی میدان دور.

۱- مقدمه

امروزه با گسترش سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، نیاز به انتقال اطلاعات با سرعت بالا به یک مسئله حیاتی تبدیل شده است. استفاده از آنتن‌های MIMO انتخاب مناسبی برای افزایش سرعت انتقال اطلاعات است [۱]. معمولاً در آنتن‌های MIMO از چند المان آنتن در کنار یکدیگر استفاده می‌شود که در این صورت، آنتن مورد نظر را آنتن هم‌موقعیت MIMO می‌نامند [۱]. به منظور کاهش ابعاد آنتن، المان‌های آن باید تا حد امکان به یکدیگر نزدیک باشند [۲]. از طرفی نزدیکی المان‌های آنتن به یکدیگر، سبب افزایش همبستگی و تزویج بین پورت‌های آنتن می‌شود [۱]. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای کاهش همبستگی بین پورت‌های آنتن هم‌موقعیت MIMO، استفاده از تعامد الگوهای میدان دور آنتن است [۱] و [۲]. برای این امر باید تغذیه‌های آنتن در محل‌هایی قرار گیرند که بتوانند الگوهای میدان مورد نظر را ایجاد کنند.

یکی از روش‌هایی که اخیراً در حوزه طراحی آنتن مورد توجه محققان قرار گرفته است، روش تحلیل مود مشخصه [۳] است. در [۴]، از تحلیل مود مشخصه برای تحریک مودهای متعامد یک آنتن دو پورتی MIMO با استفاده از المان‌های تزویج سلفی^۱ (ICE) استفاده می‌شود. برای

این مقاله در تاریخ ۲۸ مرداد ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۱۵ آبان ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

مصطفی پروین، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: mostafaparvin06@gmail.com).

جواد احمدی شکوه (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: shokouh@ece.usb.ac.ir).

حمیده دشتی خویدکی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: h.dashti@ece.usb.ac.ir).

1. Inductive Coupling Element

2. Modal Weighting Coefficient

3. Capacitive Coupling Element

$$MS = \left| \frac{1}{1 + j\lambda_n} \right| \quad (2)$$

با توجه به (۲)، دامنه تغییرات پارامتر MS بین ۰ تا ۱ است. با در نظر گرفتن توضیحات فوق، هرچه مقدار MS به یک نزدیکتر باشد، توان تشعشی مود مربوط بیشتر خواهد بود.

بر اساس تئوری مود مشخصه، جریان ایجادشده بر روی سطح یک رسانای الکتریکی، حاصل جمع جریان‌های مشخصه وزن‌دار شده است [۱۹]

$$J = \sum_n \alpha_n J_n \quad (3)$$

همچنین میدان الکتریکی و مغناطیسی راه دور، به ترتیب حاصل جمع وزن‌دارشده‌ای از میدان‌های مشخصه الکتریکی و مغناطیسی هستند که این میدان‌ها نیز متعامد هستند [۳]

$$E = \sum_n \alpha_n E_n \quad (4)$$

$$H = \sum_n \alpha_n H_n \quad (5)$$

در (۳) تا (۵)، α_n ضریب وزن‌دهی مودال مربوط به مود n ام است و میزان مشارکت (وزن) جریان مود n ام را در جریان کل نشان می‌دهد و از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]

$$\alpha_n = \frac{\langle E_{\tan}^i(r), J_n \rangle}{1 + j\lambda_n} \quad (6)$$

در (۶)، $E_{\tan}^i(r)$ مؤلفه مماسی میدان الکتریکی ناشی از تغذیه آنتن و نماد $\langle \cdot \rangle$ نشان‌دهنده ضرب نقطه‌ای برداری است.

با توجه به (۶)، اگر مؤلفه مماسی میدان الکتریکی تغذیه و جریان مشخصه مود n ام همسو باشند، حاصل صورت کسر این رابطه حداکثر شده و در صورتی که λ_n حداقل باشد (مود رزونانسی)، مقدار ضریب وزن‌دهی مودال حداکثر خواهد شد. در این صورت می‌توان گفت سهم مود n ام در جریان کل، حداکثر خواهد بود.

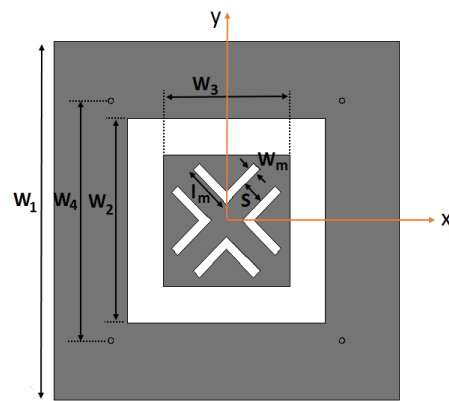
۳- تعیین محل تغذیه

تعیین محل تغذیه در یک آنتن از اهمیت بالایی برخوردار است. تغذیه آنتن باید در محلی قرار گیرد که بیشترین توان ورودی به آنتن در فضا منتشر شود یا به عبارت دیگر تطبیق امپدانس برقرار شود. از متداول‌ترین روش‌های تغذیه در آنتن‌های میکرواستریپ، تغذیه با استفاده از کابل کوکسیال (هم‌محور) است. روشی که معمولاً برای تعیین محل تغذیه در آنتن استفاده می‌شود، مبتنی بر سعی و خطا است. همچنین روشی که تا کنون در مقالات برای تحریک یک مود مشخصه به تنهایی استفاده شده، تحریک با استفاده از المان‌های تزویج سلفی (ICE) و یا تزویج خازنی (CCE) بوده است. در [۱۱] محل تغذیه در یک آنتن میکرواستریپ برای تحریک هم‌زمان دو مود مشخصه و ایجاد قطبش دایروی، با استفاده از تحلیل مود مشخصه تعیین شده است. ما در این بخش قصد داریم محل‌های بهینه تغذیه با کابل هم‌محور را برای یک آنتن هم‌موقعیت MIMO برای اولین بار با استفاده از تحلیل مود مشخصه تعیین کنیم.

۳-۱ تعیین محل‌های بهینه تغذیه

آنتن مورد نظر آنتنی است که در [۱۷] و [۱۸] ارائه شده است. شکل ۱ پیکربندی آنتن و جدول ۱ مقادیر پارامترهای آنتن را نشان می‌دهد.

البته در آنتن ارائه‌شده در [۱۷] و [۱۸] جنس دی‌الکتریک، از تفلون با



شکل ۱: پیکربندی آنتن [۱۷] و [۱۸].

شده و با قراردادن تحریک‌های CCE و تغییر فاز این منابع تحریک، شکل الگوی میدان دور آنتن مورد نظر تغییر می‌کند.

در این مقاله یک ساختار آنتن هم‌موقعیت که برای کاربردهای MIMO طرح شده [۱۷] و [۱۸] معرفی می‌شود. محل‌های بهینه تغذیه با کابل کوکسیال برای تحریک مودهای متعامد با استفاده از تئوری مود مشخصه تعیین می‌شوند. سپس با تغییر دامنه تحریک پورت‌های آنتن، شکل الگوی میدان تغذیه تغییر می‌کند.

این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده است: در بخش ۲، مروری بر روش تحلیل مود مشخصه ارائه می‌شود. تعاریف و روابط مورد نیاز در این مقاله، در این بخش ارائه می‌گردد. در بخش ۳، تحلیل مود مشخصه آنتن مورد نظر انجام شده و محل‌های بهینه تغذیه آنتن با استفاده از روش تحلیل مود مشخصه تعیین می‌شود. در بخش ۴، با تغییر دامنه تحریک پورت‌های آنتن، شکل الگوی میدان آنتن را تغییر می‌دهیم. نهایتاً مقاله با نتیجه‌گیری در بخش ۵ خاتمه می‌یابد.

۲- مروری بر تحلیل مود مشخصه

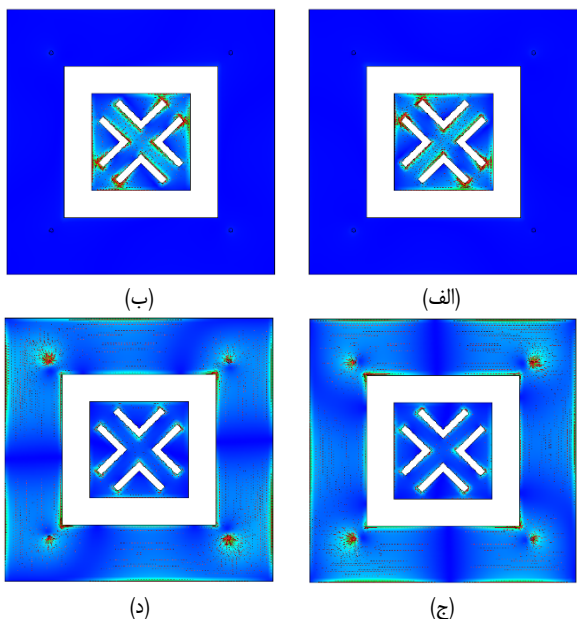
تئوری مود مشخصه و روابط آن برای اولین بار توسط هرینگتون و ماتز در سال ۱۹۷۱ معرفی شد [۳]. نقطه شروع این تئوری، معادله مقدار ویژه زیر است [۱۹]

$$XJ_n = \lambda_n R J_n \quad (1)$$

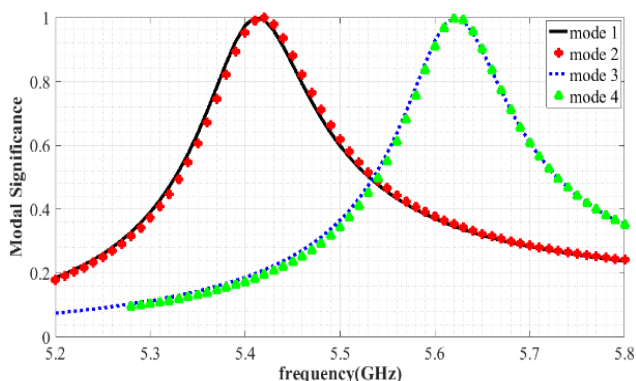
در (۱)، X و R هر کدام ماتریس بوده و به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی ماتریس امپدانس MOM ساختار هستند. بردارهای ویژه‌ای که از حل (۱) حاصل می‌شوند (J_n)، جریان‌های مشخصه نام دارند و λ_n ها، مقادیر ویژه مرتبط با این بردارهای ویژه هستند. اثبات شده است که جریان‌های مشخصه در یک فرکانس خاص، نسبت به ماتریس R متعامد هستند [۳].

صفر بودن یک مقدار ویژه در (۱) نشان‌دهنده وجود رزونانس در فرکانس مورد نظر است. در این صورت آن مود خاص را مود رزونانسی می‌نامیم. هرچه مقدار ویژه یک مود به صفر نزدیکتر باشد، توان تشعشی حاصل از آن مود بیشتر است.

با توجه به این که مقادیر ویژه می‌توانند دامنه تغییراتی از $-\infty$ تا $+\infty$ اختیار کنند، پارامتر دیگری به نام MS^1 به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]



شکل ۳: جریان‌های مشخصه در فرکانس ۵٫۵۵ GHz، (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم و (د) مود چهارم.



شکل ۴: نمودار MS آنتن برای چهار مود اول.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای آنتن.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
W_1	۳۹٫۵ mm	ϵ_r	۲٫۲
W_2	۲۲٫۶ mm	h	۱٫۵۸ mm
W_3	۱۴٫۵ mm	S	۲٫۵ mm
W_4	۲۶٫۴۴ mm	l_m	۵٫۳۸ mm
W_m	۱ mm	Φ_{vias}	۰٫۶ mm

۲٫۵۵ $\epsilon_r =$ برای فرکانس تشدید ۵٫۲ GHz است که ما در این مقاله، جنس دی‌الکتریک را از راجرز با $\epsilon_r = ۲٫۲$ در نظر گرفته‌ایم. همچنین viasهایی که برای کاهش تزویج بین المان داخلی و خارجی آنتن در [۱۷] و [۱۸] معرفی شده بودند، در اینجا حذف شده‌اند.

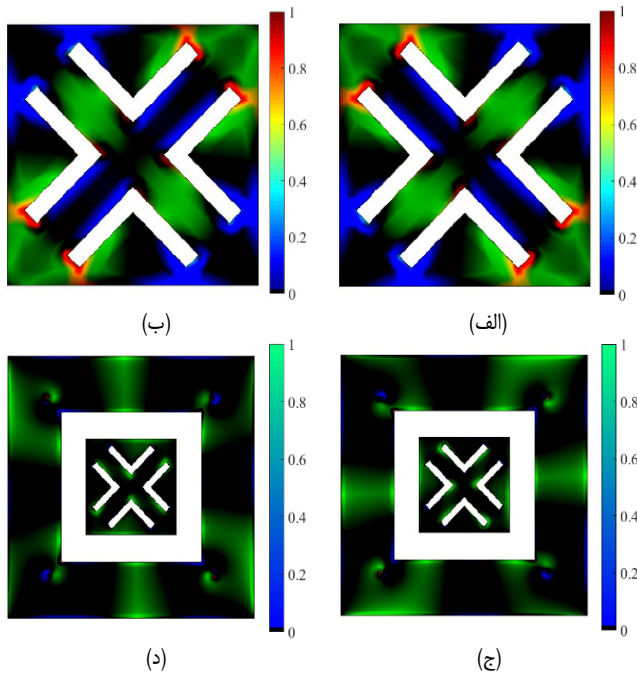
به منظور تعیین محل تغذیه در آنتن مورد نظر، تحلیل مود مشخصه در بازه فرکانسی ۵٫۲-۵٫۸ GHz توسط نرم‌افزار FEKO بر روی آنتن انجام می‌شود. شکل ۲ نمودار MS آنتن را برای چهار مود اول در بازه فرکانسی ذکر شده نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که در بازه فرکانسی ذکر شده، چهار مود غالب وجود دارد که این چهار مود در فرکانس حدود ۵٫۵۵ GHz دارای مقدار MS یکسانی هستند و بنابراین می‌توانیم نتیجه بگیریم که در فرکانس ۵٫۵۵ GHz چهار مود متعامد داریم.

شکل ۳ جریان‌های مشخصه مربوط به این چهار مود را در فرکانس ۵٫۵۵ GHz نشان می‌دهد.

با مشاهده شکل ۳ درمی‌یابیم که برای مدهای اول و دوم فقط المان داخلی آنتن دارای جریان بوده و برای مدهای سوم و چهارم المان خارجی آنتن دارای جریان بوده و جریان داخلی آنتن بسیار ناچیز است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدهای اول و دوم مربوط به المان داخلی آنتن و مدهای سوم و چهارم مربوط به المان خارجی آنتن هستند.

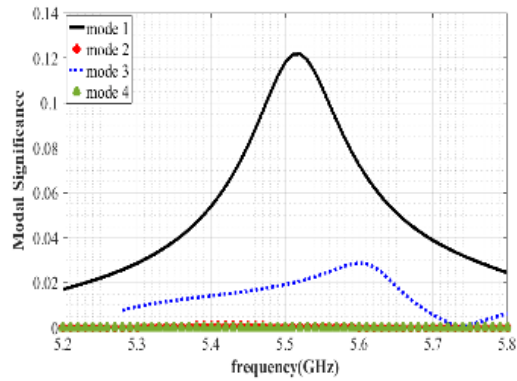
اکنون هدف ما یافتن محل‌های بهینه تغذیه به گونه‌ای است که هر تغذیه بتواند به تنهایی فقط یک مود از این چهار مود را تحریک کند تا بتوانیم چهار الگوی میدان متعامد را با حداقل همبستگی داشته باشیم. برای این امر، باید به این نکته توجه داشته باشیم که در محل تغذیه آنتن، مقدار چگالی جریان حداکثر است. از طرفی با توجه به این که می‌خواهیم هر تغذیه فقط یک مود را تحریک کند، باید جریان مود مورد نظر برای تحریک، در محل تغذیه حداکثر و جریان سایر مودها حداقل باشد. برای رسیدن به این هدف، تفاضل دامنه جریان مودها را به دست می‌آوریم. شکل ۴ تفاضل دامنه جریان این مودها را نشان می‌دهد. البته از آنجایی که مود اول و دوم، مدهای المان داخلی هستند، در این شکل برای این دو مود فقط المان داخلی آنتن نمایش داده شده است.



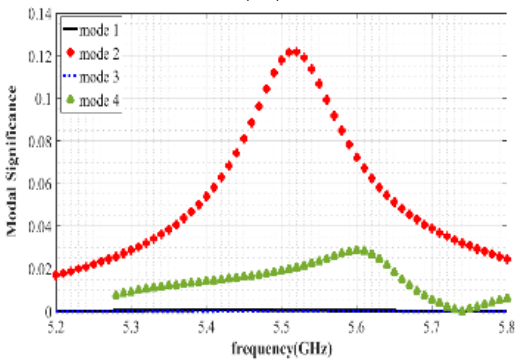
شکل ۴: تفاضل دامنه جریان مدهای مشخصه، (الف) مود اول منهای مود دوم، (ب) مود دوم منهای مود اول، (ج) مود سوم منهای مود چهارم و (د) مود چهارم منهای مود سوم.

با دقت در شکل ۴ می‌توان دریافت با توجه به این که در هر شکل چندین محل وجود دارد که حاصل تفاضل حداکثر شده است، برای تعیین موقعیت تغذیه برای هر مود چندین محل می‌توان در نظر گرفت. برای تعیین محل دقیق تغذیه، معیار دیگری به نام همبستگی نقطه‌ای جریان‌های مشخصه^۱ را در نظر می‌گیریم که به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]

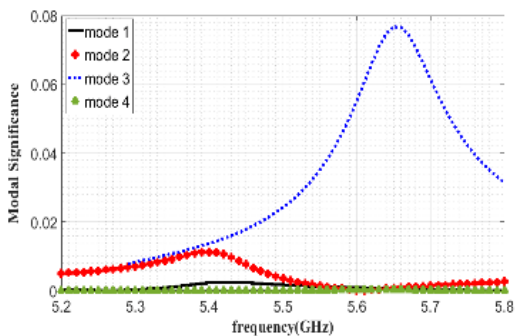
$$\rho_{mn}^{(p)} = \frac{\langle J_m^{(p)}, J_n^{(p)} \rangle}{\|J_m^{(p)}\| \cdot \|J_n^{(p)}\|} \quad (7)$$



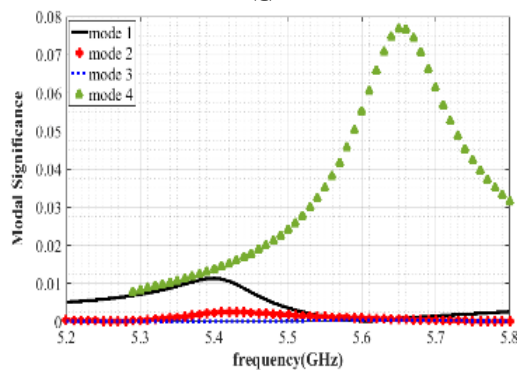
(الف)



(ب)



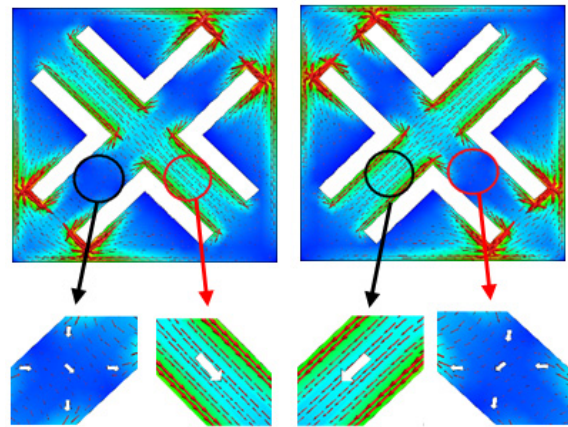
(ج)



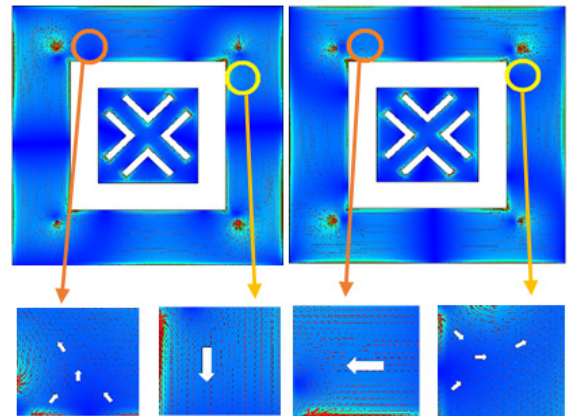
(د)

شکل ۶: ضرایب وزن‌دهی مودال به ازای تحریک، (الف) تغذیه ۱، (ب) تغذیه ۲، (ج) تغذیه ۳ و (د) تغذیه ۴.

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب پارامترهای پراکندگی شبیه‌سازی شده آنتن HFSS و پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده آنتن ساخته شده را نشان می‌دهند. نمودار ضرایب همبستگی بین پورت‌های آنتن [۲۰] نیز در شکل ۹ ارائه شده است. مشاهده پارامترهای پراکندگی و نمودار ضرایب همبستگی بین پورت‌های آنتن که مقادیر ضرایب همبستگی در بازه فرکانسی مورد نظر کمتر از ۰/۲ را ارائه می‌کند، نیز محل‌های پیشنهادی تغذیه را تأیید می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۵: محل‌های مناسب تغذیه آنتن برای تحریک، (الف) مود اول (دایره مشکی) و مود دوم (دایره قرمز) و (ب) مود سوم (دایره نارنجی) و مود چهارم (دایره زرد).

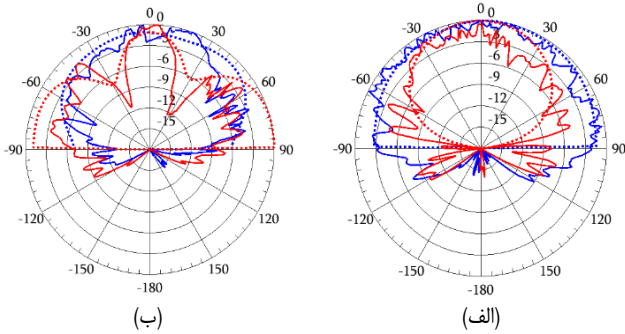
در (Y) ، جریان مشخصه مود m ام و $J_n^{(p)}$ جریان مشخصه مود n ام در نقطه p هستند. نماد $\langle \cdot \rangle$ نشان‌دهنده ضرب داخلی و نماد $\|\cdot\|$ نرم برداری است. صفر بودن مقدار همبستگی نقطه‌ای جریان‌های مشخصه، نشان‌دهنده عدم وابستگی مودهای m و n است. با توجه به این مطلب، برای یافتن محل دقیق تغذیه از بین محل‌های نامزد بر روی آنتن مورد نظر باید به دنبال محلی باشیم که بردارهای جریان‌های مشخصه بر هم عمود باشند تا حاصل ضرب داخلی دو بردار و در نتیجه مقدار همبستگی نقطه‌ای جریان‌های مشخصه صفر باشد.

شکل ۵ محل‌هایی از آنتن را که در آنها حاصل تفاضل مودها بر اساس شکل ۴ حداکثر بوده و جریان مودها بر هم عمودند، نشان می‌دهد. در این شکل، محل مناسب تغذیه برای تحریک مودهای اول تا چهارم به ترتیب با دایره مشکی، قرمز، نارنجی و زرد نشان داده شده است.

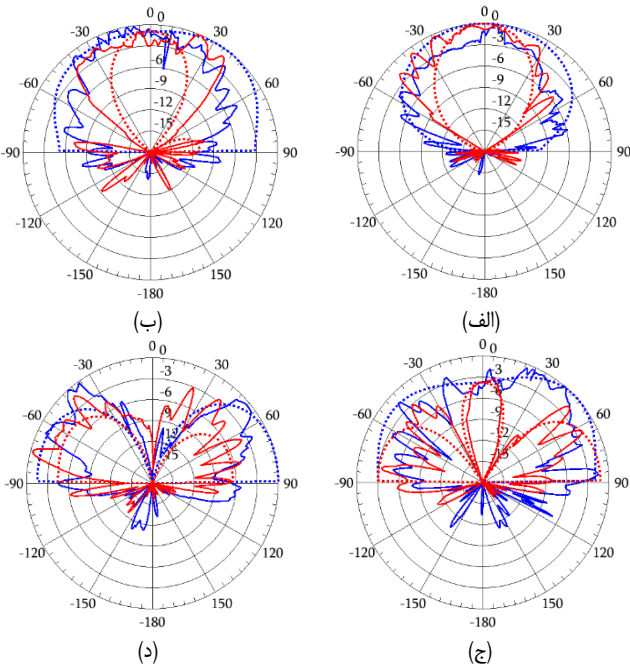
۳-۲ بررسی صحت نتایج تعیین محل تغذیه

پس از تعیین محل‌های بهینه تغذیه برای تحریک منفرد هر مود، صحت محل‌های پیشنهادی تغذیه را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این کار با ارزیابی پارامتر ضرایب وزن‌دهی مودال و پارامترهای پراکندگی و نیز ضرایب همبستگی بین پورت‌های آنتن انجام می‌شود.

شکل ۶ ضرایب وزن‌دهی مودال را به ازای قرارگیری تغذیه در محل‌های پیشنهادی، در نرم‌افزار FEKO ارائه می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که به ازای تحریک هر محل تغذیه، ضرایب وزن‌دهی مودال مود مربوط نسبت به سایر مودها بسیار بیشتر است و بنابراین می‌توان گفت محل پیشنهادی برای هر مود، توانسته به خوبی مود مورد نظر را تحریک کند.



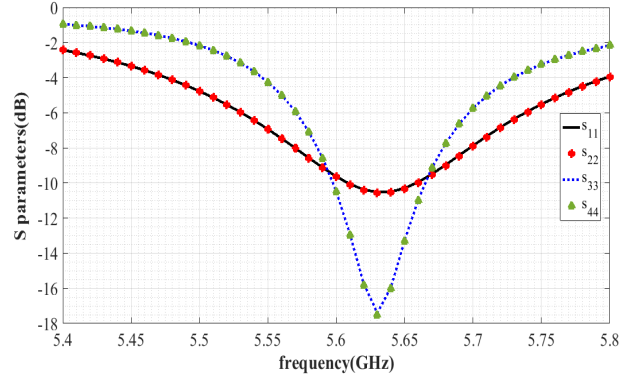
شکل ۱۰: الگوی میدان شبیه سازی (خطچین) و اندازه گیری شده (خط پر) آنتن به ازای تحریک، (الف) مود دوم و (ب) مود سوم برای زوایای $\varphi = -45^\circ$ (آبی) و $\varphi = 45^\circ$ (قرمز).



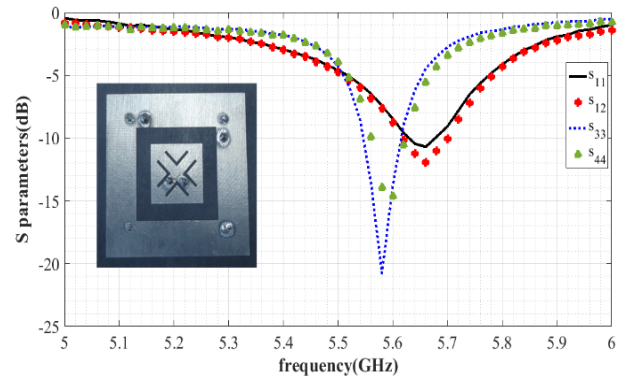
شکل ۱۱: نتایج شبیه سازی (خطچین) و اندازه گیری (خط پر) الگوی میدان آنتن به ازای تغییر در دامنه تحریک مودها، (الف) $F_1 = 1W$ و $F_3 = 0.5W$ ، (ب) $F_1 = F_2 = F_3 = 1W$ ، (ج) $F_2 = 0.5W$ و $F_3 = 1W$ و (د) $F_1 = 0.5W$ و $F_2 = F_4 = 1W$ برای زوایای $\varphi = -45^\circ$ (آبی) و $\varphi = 45^\circ$ (قرمز).

استفاده نماییم. همچنین در این بخش به جای تغییر در فاز منابع تغذیه، با تغییر دامنه تحریک منابع تغذیه، الگوی میدان آنتن را تغییر می دهیم. شکل ۱۰ الگوی میدان نرمالیزه شده شبیه سازی شده (خطچین) و اندازه گیری شده آنتن (خط پر) را بر حسب دسی بل به ازای تحریک مودهای دوم و سوم برای زوایای $\varphi = -45^\circ$ (آبی) و $\varphi = 45^\circ$ (قرمز) به ازای زوایای مختلف θ نشان می دهد. با توجه به مقارن بودن شکل آنتن، به ازای تحریک مودهای اول و چهارم نیز نتایج مشابهی حاصل می شود. شکل ۱۱ نتایج شبیه سازی و اندازه گیری الگوی میدان آنتن را به ازای تغییر در دامنه تحریک مودهای مشخصه آنتن، نشان می دهد. با توجه شکل ۱۱ و مقایسه آن با شکل ۱۰ می توان مطالب زیر را بیان کرد:

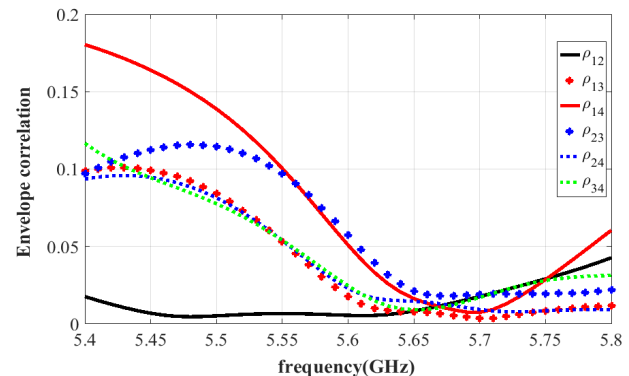
در شکل ۱۱-الف پورت های ۱ و ۳ آنتن هم زمان تغذیه شده اند به گونه ای که پورت ۳ با نصف توان پورت ۱ تحریک شده است. با مقایسه الگوی میدان حاصل با الگوی میدان ناشی از تغذیه پورت ۲ به تنهایی (شکل ۱۰-الف) می توان گفت به ازای زاویه $\varphi = 45^\circ$ پهنای پرتوی نصف توان آنتن، به اندازه ۳۰ درجه کمتر شده یا به عبارتی الگوی



شکل ۷: پارامترهای پراکندگی شبیه سازی شده در HFSS.



شکل ۸: پارامترهای پراکندگی اندازه گیری شده.



شکل ۹: نمودار ضرایب همبستگی بین پورت های آنتن.

۴- شکل دهی الگوی میدان آنتن

هدف از این بخش، تغییر دامنه های تحریک مودهای آنتن ارائه شده و ترکیب آنها با یکدیگر به منظور تغییر شکل الگوی میدان آنتن است. در واقع در این بخش قصد داریم از آنتنی که برای کاربردهای MIMO طراحی شده، به عنوان آنتنی با قابلیت تغییر شکل الگوی میدان استفاده نماییم. این امر می تواند مقدمه ای برای ایجاد آنتن آرایه ای بدون استفاده از روش مرسوم در طراحی آنتن های آرایه ای (استفاده از تعداد زیادی المان آنتن) باشد.

در [۱۲] یک آنتن دایروی متحدالمرکز با سه المان ارائه شده است. در این آنتن تعداد تغذیه هایی که برای تحریک این سه المان استفاده شده، به ترتیب برابر با ۱، ۲ و ۳ پورت است. تعیین محل این تغذیه ها بر اساس سعی و خطا انجام شده است. علاوه بر این در [۱۲]، تغییر فاز منابع تغذیه منجر به تغییر جهت الگوی میدان آنتن شده است.

در قسمت های قبیل توانستیم بر روی هر المان آنتن، دو مود مشخصه بیابیم و برای تحریک هر مود، برخلاف [۱۲] از یک تغذیه کواکسیال

- [8] I. Brinster, J. Lohn, and D. Linden, "Antenna feed placement based on theory of characteristic modes," *IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp., APSURSI'14*, pp. 2012-2013, Memphis, TN, USA, 6-11 Jul. 2014.
- [9] B. D. Raines, Systematic Design of Multiple Antenna Systems Using Characteristic Modes, Ph.D Thesis, Ohio State University, 2011.
- [10] A. Araghi and G. Dadashzadeh, "Oriented design of an antenna for MIMO applications using theory of characteristic modes," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1040-1043, 20 Aug. 2012.
- [11] Y. Chen and C. F. Wang, "Characteristic-mode-based improvement of circularly polarized U-slot and E-shaped patch antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1474-1477, 30 Nov. 2012.
- [12] T. Q. Tran and S. K. Sharma, "Radiation characteristics of multimode concentric circular microstrip patch antenna by controlling amplitude and phase of modes," *IEEE Trans. on Antenna and Propag.*, vol. 60, no. 3, pp. 1601-1605, Mar. 2012.
- [13] F. A. Dicannidia, S. Genovesi, and A. Monorchio, "Null-steering antenna design using phase-shifted characteristic modes," *IEEE Trans. on Antenna and Propag.*, vol. 64, no. 7, pp. 2698-2706, Jul. 2016.
- [14] F. A. Dicannidia, S. Genovesi, and A. Monorchio, "Advantageous exploitation of characteristic modes analysis for the design of 3-D null-scanning antennas," *IEEE Trans. on Antenna and Propag.*, vol. 65, no. 8, pp. 3924-3934, Aug. 2017.
- [15] F. A. Dicannidia, S. Genovesi, and A. Monorchio, "Efficient excitation of characteristic modes for radiation pattern control by using a novel balanced inductive coupling element," *IEEE Trans. on Antenna and Propag.*, vol. 66, no. 3, pp. 1102-1113, Mar. 2018.
- [16] K. Li and Y. Shi, "A pattern reconfigurable MIMO antenna design using characteristic modes," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43526-43534, 6 Aug. 2018.
- [17] J. Sarrazin, Y. Mahe, S. Avrillon, and S. Toutain, "Four co-located antennas for MIMO systems with a low mutual coupling using mode confinement," in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp.*, 4 pp., San Diego, CA, USA, 5-11 Jul. 2008.
- [18] J. Sarrazin, Y. Mahe, S. Avrillon, and S. Toutain, "Collocated microstrip antennas for MIMO systems with a low mutual coupling using mode confinement," *IEEE Trans. on Antenna and Propag.*, vol. 58, no. 2, pp. 589-592, Feb. 2010.
- [19] Y. Chen and C. F. Wang, *Characteristic Modes Theory and Applications in Antenna Engineering*, Temasek Laboratories, National University of Singapore, 2015.
- [20] B. Rembold, "Relation between diagram correlation factors and s-parameters of multiport antenna with arbitrary feeding network," *Electronic Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 5-7, 3 Jan. 2008.

مصطفی پروین تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه سیستان و بلوچستان و در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق- مخابرات (میدان) به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۹ از دانشگاه سیستان و بلوچستان به پایان رسانده است و هم‌اکنون به عنوان هئرانموز در آموزش و پرورش زاهدان مشغول به کار است. زمینه تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارت است از: تئوری مود مشخصه در تحلیل و طراحی آنتن.

جواد احمدی شکوه تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه فردوسی مشهد و در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه تهران به پایان رسانده است. ایشان در سال ۱۳۸۸ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق- مخابرات (میدان) از دانشگاه واترلو کانادا شده‌اند. نامبرده هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تئوری مود مشخصه در تحلیل و طراحی آنتن، طراحی مدارهای مایکروویو.

حمیده دشتی خویدکی در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات خود را از دانشگاه سیستان و بلوچستان و در سال ۱۳۹۳ مدرک دکتری مهندسی برق- مخابرات خود را از دانشگاه فردوسی مشهد دریافت نمود. ایشان هم‌اکنون به عنوان استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سیستان و بلوچستان فعالیت دارند. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده روش‌های عددی در الکترومغناطیس، سازگاری الکترومغناطیسی، تئوری مود مشخصه در تحلیل و طراحی آنتن می‌باشد.

میدان در راستای زاویه $\theta = 0^\circ$ متمرکزتر شده است. در حالت تغذیه منفرد پورت ۲، پهنای پرتوی نصف توان، 80° درجه و در حالت تغذیه هم‌زمان پورت‌های ۱ و ۳، پهنای پرتو، 50° درجه است.

در شکل ۱۱-ب، پورت‌های ۱ تا ۳ به صورت هم‌زمان و با توان‌های یکسان تحریک شده‌اند. مقایسه الگوی میدان حاصل با الگوی میدان ناشی از شکل‌های ۱۰-الف و ۱۱-الف، متمرکز شدن بیشتر الگوی میدان به ازای زاویه $\theta = 45^\circ$ را در راستای زاویه $\theta = 0^\circ$ نشان می‌دهد. در این حالت، پهنای پرتوی نصف توان برابر با 40° درجه است.

در شکل ۱۱-ج، پورت‌های ۲ و ۳ به صورت هم‌زمان و پورت ۲ با نصف توان پورت ۳ تحریک شده است. مقایسه الگوی میدان حاصل با الگوی میدان ناشی از تغذیه منفرد پورت ۳ (شکل ۱۰-ب) نشان می‌دهد که به ازای زاویه $\theta = 45^\circ$ پرتو در راستای $\theta = 0^\circ$ متمرکزتر شده است. همچنین در این حالت، عمق صفرهای الگوی میدان آنتن که در راستای زوایای $\theta = \pm 30^\circ$ قرار دارند، نسبت به شکل ۹-ب بیشتر شده است.

در شکل ۱۱-د، پورت‌های ۲ و ۴ با توان‌های یکسان و پورت ۱ با توانی برابر با نصف توان پورت‌های ۲ و ۴ و به صورت هم‌زمان تحریک شده‌اند. مشاهده می‌شود که در این حالت، الگوی میدان آنتن برخلاف حالات تغذیه منفرد پورت‌های ۲ و ۳، هیچ توانی در راستای زاویه $\theta = 0^\circ$ منتشر نمی‌کند. به عبارت دیگر، الگوی میدان آنتن در این راستا دارای صفر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله توانستیم با استفاده از روش تحلیل مود مشخصه، فرکانس‌های تشدید یک آنتن هم‌موقعیت را که برای کاربردهای MIMO طراحی شده، مشخص کنیم. سپس با استفاده از تفاضل جریان‌های مشخصه مودهای متعامد و نیز جهت برداری جریان‌های مشخصه نسبت به یکدیگر، موقعیت بهینه تغذیه برای تحریک هر یک از مودهای مشخصه با استفاده از کابل کوکسیال را تعیین نمودیم. با تغییر دامنه تحریک مودهای مشخصه و ترکیب آنها با یکدیگر توانستیم شکل و پهنای پرتوی نصف توان الگوی میدان دور آنتن را تغییر دهیم.

مراجع

- [1] A. Ramachandran, S. V. Pushpakaran, M. Pezhoolil, and V. Kesavath, "A four-port MIMO antenna using concentric square-ring patches loaded with CSRR for high isolation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1196-1199, 10 Nov. 2016.
- [2] R. Anitha, P. V. Vinesh, S. Mathew, P. Mohanan, and K. Vasudevan, "Collocated MIMO antenna with reduced mutual coupling using ring DGS," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 53, pp. 119-125, 2014.
- [3] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Theory of characteristic modes for conducting bodies," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 19, no. 5, pp. 622-628, Sept. 1971.
- [4] R. Martens and D. Manteuffel, "2-port antenna based on selective excitation of characteristic modes," in *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation*, 2 pp., Chicago, IL, USA, 8-11 Jul. 2012.
- [5] N. Peitzmeier and D. Manteuffel, "Selective excitation of characteristic modes on an electrically large antenna for MIMO applications," in *Proc. of 12th European Conf. on Antenna and Propagation*, 5 pp., London, UK, 9-13 Apr. 2018.
- [6] D. W. Kim and S. Nam, "Systematic design of a multiport MIMO antenna with bilateral symmetry based on characteristic mode analysis," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 66, no. 3, pp. 1076-1088, Mar. 2018.
- [7] Y. Liu, A. Ren, H. Liu, H. Wang, and C. Y. D. Sim, "8-port MIMO array using characteristic mode theory for 5G smartphone applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 45679-45693, 3 Apr. 2019.