

# آنتن موج نشتی با قطبش دایروی مبتنی بر خطوط انتقال راستگرد-چپگرد متعادل

محمد مهدی صباحی<sup>۱</sup>، عباسعلی حیدری<sup>۲</sup> و مسعود موحدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد، mm.sabahi@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد، aheidari@yazd.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد، movahhedi@yazd.ac.ir

جایگزین مناسب و ارزان تری برای آنتن‌های آرایه‌ای هستند. آنتن‌های موج نشتی معمولی از پهلوتاب تا جلوتاب را پوشش می‌کنند. خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی (CRLH-TLs<sup>۲</sup>) همچنین، ساختارهای مایکروویوی مصنوعی هستند که ویژگی‌های منحصر به فرد الکترومغناطیسی مثل انتشار معکوس موج<sup>۳</sup> را از خود نشان می‌دهند. این ساختارها در الکترومغناطیس تحت عنوان گروهی از ساختارهای مهندسی شده با نام فراماده<sup>۴</sup> دسته‌بندی شده و در یک دهه‌ی گذشته کاربردهای متعددی یافته‌اند. ترکیب دو ایده‌ی اخیر یعنی ایجاد یک آنتن موج نشتی مبتنی بر خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی، یک ویژگی ممتاز به آنتن‌های موج نشتی می‌بخشد و آن، پوشش فرکانسی در پشت‌تاب است. این ساختارها، آنتن‌های موج نشتی فراماده نیز نامیده می‌شوند [۲]. برای تحقق چنین ایده‌ای نیاز به یک ساختار برای پیاده‌سازی آنتن داریم. موجبر مجتمع شده در زیرلایه (SIW<sup>۵</sup>) در سال‌های اخیر به عنوان یک میزبان برگزیده برای پیاده‌سازی انواع آنتن‌های موج نشتی مطرح بوده است [۳]. آنتن‌های موج نشتی معمولاً یا روی موجبرهای فلزی و یا با استفاده از خطوط ریزنواری ایجاد می‌شوند. موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه در واقع حد واسطی بین خطوط ریزنواری و موجبرها هستند که علاوه بر حفظ خصوصیات موجبرهای مستطیلی معمولی نظیر داشتن ضریب کیفیت بالا، قابلیت حمل توان بالا و ایزولاسیون بسیار خوب، امکان تجمع با سایر ساختارهای ریزنواری را نیز دارند. همچنین کم‌تلف، کم‌قیمت و کم‌حجم هستند. مهم‌ترین مزیت فناوری SIW امکان تجمع همه اجزاء سیستم شامل ساختارهای غیرفعال، عناصر فعال و حتی آنتن‌ها بر روی یک زیرلایه می‌باشد [۴].

چکیده- در این مقاله یک آنتن موج نشتی جدید با قطبش دایروی با استفاده از موجبر مجتمع شده در زیرلایه (SIW) و بر پایه خط انتقال راستگرد-چپگرد متعادل (Balanced CRLH-TL) ارائه شده است. قطبش دایروی با ایجاد شکاف‌های اینتردیجیتال طولی و عرضی عمود بر هم (به شکل T) بر سطح بالایی SIW طراحی شده است. مزیت اصلی این ساختار، ایجاد و حفظ قطبش دایروی در باند فرکانسی 7.5 تا 10.75 GHz تنها با استفاده از یک آنتن (بدون شبکه‌ی تغذیه‌ی پیچیده) همراه با پوشش فضای وسیع از  $20^\circ$  تا  $84^\circ$  با تغییر فرکانس می‌باشد. به دلیل ماهیت خازنی شکاف‌های اینتردیجیتال و خاصیت سلفی وایا‌های دیواره‌ی SIW امکان ایجاد یک باند چپگرد و پوشش فضا در پشت‌تاب فراهم آمده است. سلول CRLH استفاده شده در آنتن، متعادل بوده و بنابراین امکان پوشش فرکانسی از سمت پشت‌تاب تا جلوتاب بدون باند قطع در پهلوتاب را فراهم می‌کند. قطبش آنتن، دایروی چپگرد (LHCP) و نسبت محوری در باند فرکانسی، بسیار پایین (نزدیک 0 dB) بوده و از این لحاظ نسبت به نمونه‌های اخیر هم‌رده‌ی خود، ممتاز است. بازدهی تشعشعی ساختار، بسیار بالا و به 96% می‌رسد. بیشینه‌ی بهره در اواسط باند فرکانسی 9.06 dB است. این آنتن با نرم‌افزار Ansoft HFSS شبیه‌سازی و تحلیل شده است.

کلمات کلیدی- آنتن موج نشتی، خط انتقال راستگرد-چپگرد متعادل، قطبش دایروی، موجبر مجتمع شده در زیرلایه

۱- مقدمه

آنتن موج نشتی<sup>۱</sup> یک ساختار موج رونده است که هم‌زمان با انتشار موج در طول ساختار، تشعشع می‌کند [۱]. از این آنتن معمولاً در کاربردهای پوشش فضا با فرکانس استفاده می‌شود. از آن‌جا که این آنتن‌ها بدون نیاز به شبکه‌ی تغذیه‌ی پیچیده، قابلیت پوشش فضا را دارند،

<sup>2</sup> Composite Right/Left Handed Transmission lines

<sup>3</sup> Backward propagation

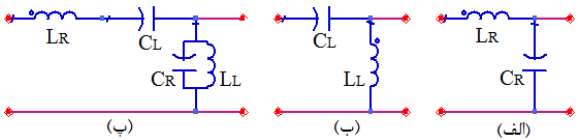
<sup>4</sup> Metamaterial (MTM)

<sup>5</sup> Substrate Integrated Waveguide

<sup>1</sup> Leaky-Wave Antenna (LWA)

۱-۲- خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی

در شکل ۱ مدار معادل خط انتقال راستگرد، خط انتقال چپگرد و خط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی نشان داده شده است. در مدارهای معادل،  $L_L$ ،  $C_L$  و  $L_R$ ،  $C_R$  به ترتیب خازن و سلف در یک سلول LH-TL و RH-TL می‌باشند. طول هر سلول از طول موج خط انتقال بسیار کوچک‌تر است. از روابط (۱-۳) به ترتیب ثابت فاز این خطوط به دست می‌آید [۲ و ۱۰].



شکل ۱: مدار معادل الف (RH-TL ب) LH-TL پ) CRLH-TL

$$\beta_{RH-TL} = \omega \sqrt{L_R C_R} > 0 \quad (1)$$

$$\beta_{LH-TL} = -\frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} < 0 \quad (2)$$

$$\beta_{Balanced-CRLH-TL} = \omega \sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} \quad (3)$$

در این روابط  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای است. با توجه به روابط (۱ و ۲) ثابت فاز در RH-TL مقداری مثبت و در LH-TL مقداری منفی دارد. از روابط (۴) و (۵) به ترتیب سرعت فاز و سرعت گروه را می‌توان به دست آورد.

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (4)$$

$$V_g = \frac{1}{d\beta/d\omega} \quad (5)$$

بر طبق روابط (۴-۵) و با توجه به روابط (۱-۳) سرعت فاز در RH-TL مثبت و در LH-TL، منفی و سرعت گروه در هر سه خط انتقال، مثبت است و بنابراین توان در هر سه خط انتقال از سمت مولد به سمت بار (در آنتن موج نشتی فراماده از دهانه‌ی ورودی به دهانه‌ی خروجی) انتقال می‌یابد. ضریب گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ ) و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) معادل در خط راستگرد، مثبت و در خط چپگرد، منفی می‌باشند. محیطی که هم‌زمان دارای ضریب گذردهی و نفوذپذیری منفی باشد، فراماده‌ی چپگرد<sup>۳</sup> نامیده می‌شود [۲].

در سال‌های اخیر برای رسیدن به قطبش دایروی همراه با پوشش فضا و با استفاده از آنتن‌های موج نشتی کوشش‌هایی صورت گرفته است. در مرجع [۵] برای ایجاد قطبش دایروی، از دو آنتن موج نشتی<sup>۱</sup> HMSIW و شکاف‌های معمولی مورب و یک کوپلر استفاده شده است. این ساختار، قابلیت تشعشع با قطبش خطی را نیز دارد. در مرجع [۶] با دو آنتن موج نشتی SIW و یک کوپلر و استفاده از ساختاری شبیه مرجع [۵] ولی این بار با شکاف‌های اینتردیجیتال<sup>۲</sup> مورب، قطبش دایروی ایجاد شده است. یکی از مزایای این ساختار نسبت به ساختار [۵]، تشعشع در باند چپگرد می‌باشد. در مراجع [۷-۸] از یک آنتن موج نشتی HMSIW و شکاف‌های اینتردیجیتال عرضی روی سطح آن استفاده شده است. ایجاد قطبش دایروی در این دو ساختار بر این واقعیت استوار است که تشعشع از شکاف‌های اینتردیجیتال روی سطح HMSIW و تشعشع از دیواره‌ی باز ساختار HMSIW، تقریباً هم‌اندازه و دارای اختلاف فاز  $90^\circ$  می‌باشند. از نقاط ضعف ساختار [۸]، پوشش در فرکانس ثابت (پهنای باند بسیار محدود) و استفاده از عناصر SMA تلف‌دار را می‌توان بیان نمود. مرجع [۹] برای رسیدن به قطبش دایروی از یک آنتن موج نشتی SIW با شکاف‌های معمولی عمود بر هم (به شکل H) روی سطح آن استفاده کرده است. تشعشع با قطبش دایروی در این ساختار، مبتنی بر این واقعیت است که شکاف‌های عمود بر هم، جریان‌های سطحی موثری از روی موجبر را برش می‌زنند که این جریان‌ها دارای هندسه‌ی عمود بر هم و اختلاف فاز  $90^\circ$  می‌باشند. از نقاط ضعف ساختار [۹]، عدم تشعشع آنتن در نزدیکی پهلوتاب و پشت‌تاب و همچنین بالا نبودن بازدهی تشعشعی را می‌توان بیان کرد.

در این مقاله یک آنتن موج نشتی SIW با شکاف‌های اینتردیجیتال عمود بر هم (به شکل T) به منظور رسیدن به قطبش دایروی ارائه شده است. در این ساختار، امکان پوشش فرکانسی با قطبش دایروی مناسب از سمت پشت‌تاب تا جلوتاب بدون باند قطع در پهلوتاب فراهم آمده است. ابعاد و پیچیدگی طراحی به دلیل استفاده از تنها یک آنتن کاهش، و بازدهی تشعشعی افزایش یافته است.

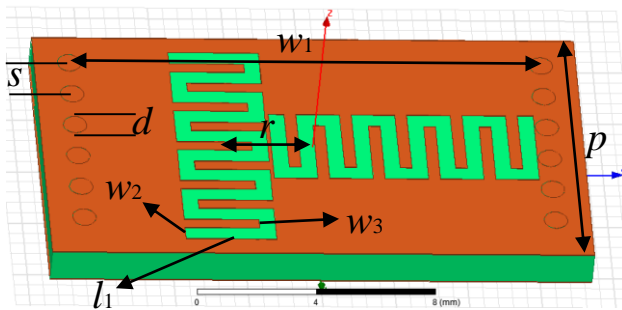
سازماندهی مقاله به این شکل است: در بخش ۲ مبانی تئوری خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی و آنتن موج نشتی بیان می‌گردد. در بخش ۳ به ساختار آنتن پیشنهادی و شرح عملکرد آن پرداخته می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ساختار، ارائه شده و نهایتاً در بخش ۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

<sup>1</sup> Half-Mode Substrate Integrated Waveguide

<sup>2</sup> Interdigital Slot (ID slot)

<sup>3</sup> Left-Handed Metamaterial \ DNG

مشابه و عمود برهم (به شکل T) بر سطح آن می‌باشد. نمایی از سلول واحد و ابعاد فیزیکی آن در شکل ۲ آمده است. زیرلایه‌ی استفاده شده، Rogers RT/duroid 5880 با ضریب گذرده‌ی  $2/2$  و با ضخامت 50 mil است. شکاف اینتردیجیتال طولی برای تشعشع موثر، باید یک عدم تقارن مطلوب ( $r$ ) نسبت به محور طولی داشته باشد [۹]. مطابق دستورالعمل‌های اصلی برای طراحی آنتن‌های موج نشتی فراماده، مسئله‌ی اساسی برای ساختار سلول واحد آنتن، به دست آوردن نمودار Dispersion است. تعداد انگشت‌ها ( $N$ )، طول، پهنا و محل قرار گرفتن شکاف‌های اینتردیجیتال به گونه‌ای انتخاب شده است که علاوه بر به دست آوردن یک نمودار Dispersion مطلوب برای سلول واحد، قطبش دایروی برای آنتن نهایی (که از کنار هم قرار گرفتن سلول‌های واحد شکل می‌گیرد) در باند فرکانسی تشعشعی، تضمین شود.



شکل ۲: نمایی از سلول واحد آنتن و ابعاد فیزیکی آن بر حسب mm  
 $(w_1=16.1, s=1.5, d=0.8, p=9.1, r=3.1, N=9)$

### ۲-۳- ساختار آرایه‌ی شکاف‌دار نهایی آنتن

ساختار آنتن نهایی، آرایه‌ای از ۱۴ سلول واحد است که در راستای طولی (طول موجبر - راستای  $p$ ) کنار هم قرار گرفته‌اند. همچنین دو خط ریزنوازی باریک‌شونده در دو سمت و به منظور تطبیق امپدانس با دهانه‌ی ورودی ۵۰ اهم به این ساختار اضافه شده است. نمایی از ساختار آنتن نهایی و ابعاد فیزیکی آن در شکل ۵ آمده است. شکاف‌های اینتردیجیتال عرضی و طولی، برای تشعشع با قطبش دایروی در کل باند پوشش فرکانسی، طراحی شده‌اند. تصور کنید یک موجبر فقط با شکاف‌های معمولی و در جهت عرضی داریم. این شکاف‌های عرضی، فقط برشی موثر از جریان‌های طولی روی موجبر دارند. حال آن که یک موجبر با شکاف‌های طولی، فقط برش موثری از جریان‌های عرضی روی موجبر را دارا می‌باشد. این جریان‌های طولی و عرضی روی موجبر با یکدیگر  $90^\circ$  اختلاف فاز دارند [۹]. همچنین هندسه‌ی دو شکاف طولی و عرضی نیز عمود بر هم است و بنابراین میدان‌های الکتریکی عمود بر هم ایجاد می‌کنند (میدان الکتریکی راه دور یک شکاف طولی، در جهت عرضی است و برعکس [۶]). پس انتظار می‌رود که اگر هر دو این شکاف‌ها بر سطح بالای SIW ایجاد شوند، به شرط ایجاد اندازه‌ی

یک آنتن موج نشتی، ساختاری دو دهانه است که موج در طول حرکت در داخل ساختار از دهانه‌ی ورودی به دهانه‌ی خروجی، به بیرون نشت می‌کند و الگوی پرتو آنتن را شکل می‌دهد. از مزایای این آنتن‌ها، تغذیه‌ی ساده، پهنای باند باریک و پوشش فضا با تغییرات فرکانس است. دسته‌ای از این آنتن‌ها پوشش فضا را در فرکانس ثابت و به صورت الکترونیکی انجام می‌دهند (مانند [۸] و [۱۱]). آنتن‌های موج نشتی ایجاد شده بر SIW، دارای شکاف‌هایی بر سطح بالایی هستند که با قطع مسیر جریان، موج را به بیرون نشت می‌دهند. زاویه‌ی پوشش در آنتن‌های موج نشتی معمولی از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید [۲ و ۱۰].

$$\theta = \arcsin(\beta(\omega)/k_0) \quad (6)$$

که  $\theta$  زاویه‌ی پرتو اصلی آنتن و  $k_0$  عدد موج فضای آزاد است. مطابق روابط (۱-۳) و (۶) پرتو آنتن در باند چپگرد از پشت‌تاب تا پهلوتاب ( $-90 \leq \theta < 0$ ) و در باند راستگرد از پهلوتاب تا جلوتاب ( $0 < \theta \leq 90$ ) را پوشش می‌کند. در هر دو حالت باند چپگرد و راستگرد، باید شرط  $|\beta| \leq k_0$  برقرار باشد تا موج به بیرون نشت کند و ساختار به آنتن تبدیل شود. ناحیه‌ی  $|\beta| \leq k_0$  ناحیه‌ی موج سریع (مُد نشتی یا آنتنی) و خارج از این ناحیه، ناحیه‌ی موج آهسته (مُد هدایتی یا موجبری) می‌باشد. یکی از چالش‌های طراحی آنتن‌های موج نشتی، نزدیک شدن هر چه بیشتر پرتو آنتن به جلوتاب یا پشت‌تاب است. از پارامترهای مهم آنتن‌های موج نشتی، بازدهی تشعشعی آن‌ها می‌باشد که به لحاظ تئوری از رابطه‌ی (۷) به دست می‌آید.

$$e_r = \frac{\alpha_l}{\alpha_l + \alpha_c + \alpha_d} \quad (7)$$

در این رابطه،  $\alpha_l$  تلفات نشتی،  $\alpha_c$  تلفات هادی و  $\alpha_d$  تلفات دی‌الکتریک است.

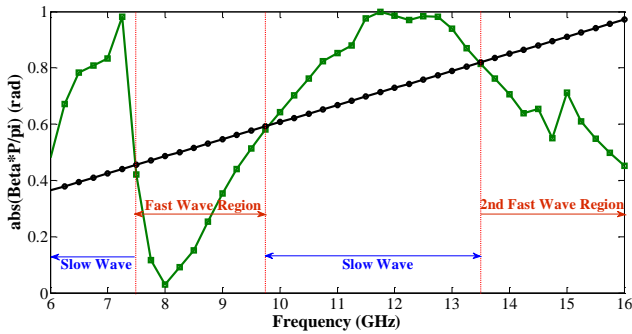
### ۳- ساختار آنتن پیشنهادی و شرح عملکرد آن

آنتن پیشنهادی، یک آنتن موج نشتی ایجاد شده روی موجبر مجتمع شده در زیرلایه و مبتنی بر خط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی<sup>۱</sup> می‌باشد. ساختار این آنتن را در دو مرحله می‌توان مورد بررسی و تحلیل قرار داد:

#### ۳-۱- ساختار سلول واحد آنتن

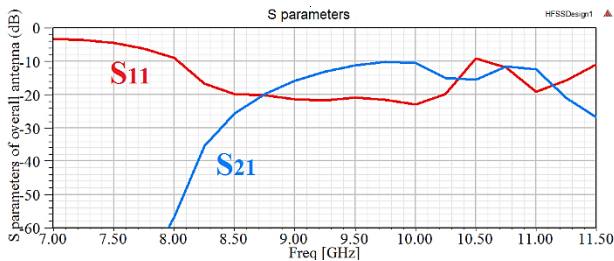
سلول واحد به کار گرفته شده در ساختار آنتن، یک سلول CRLH متعادل، ایجاد شده بر یک SIW به طول محدود ( $p$ ) همراه با یک شکاف اینتردیجیتال طولی و یک شکاف اینتردیجیتال عرضی کاملاً

<sup>۱</sup> SIW CRLH LWA

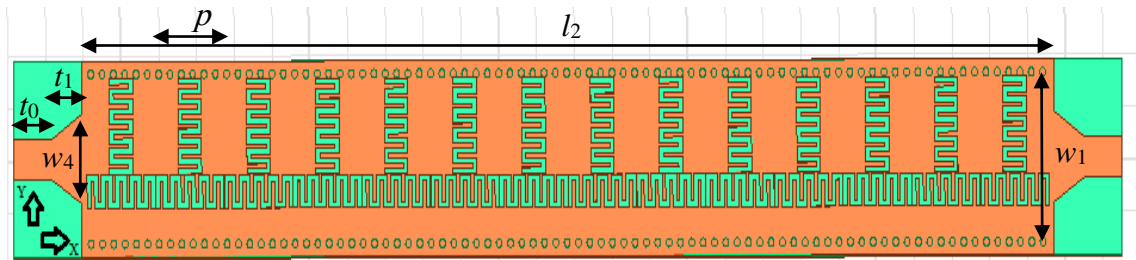


شکل ۳: نمودار Dispersion برای سلول واحد (نمودار سبزرنگ)، قطع داده شده با خط نوری (نمودار مشکی رنگ).

در شکل ۴ نمودار پارامترهای پراکندگی آنتن برای ساختار آرایه‌ی شکاف‌دار نهایی نشان داده شده است.  $S_{11}$ ، به میزان خوبی کمتر از -10 dB بوده و بنابراین آنتن از تطبیق مناسبی برخوردار است. همچنین  $S_{21}$  در کل باند تشعشی آنتن، بسیار پایین می‌باشد و نشانگر این است که بیش از ۹۰٪ توان داخل SIW از شکاف‌های اینتردیجیتال، تشعشع می‌شود. پایین بودن هم‌زمان مقادیر  $S_{11}$  و  $S_{21}$  در کنار ناچیز بودن مقادیر تلفات هدایتی و دی‌الکتریک، سبب شده تا بازدهی تشعشی آنتن، بسیار بالا و به ۹۶٪ برسد (به خاطر مُد انتشاری ساختار، ضخیم بودن نسبی زیرلایه و کمی ثابت دی‌الکتریک، تلفات عایقی و هدایتی ساختار، بسیار ناچیز می‌باشد). بنابراین اختلاف بسیار ناچیزی بین مقادیر سمت‌گرایی و بهره وجود دارد. بازدهی تشعشی آنتن نسبت به مراجع [۶] و [۹] به میزان بسیار خوبی بهبود یافته است.



شکل ۴: نمودار پارامترهای پراکندگی آنتن نهایی.



شکل ۵: نمای بالا از ساختار آنتن نهایی و ابعاد فیزیکی آن بر حسب  $(w_1=16.1, w_4=8.5, p=9.1, l_2=128.7, t_0=5, t_1=4)$  mm (آنتن از سمت چپ تغذیه شده است).

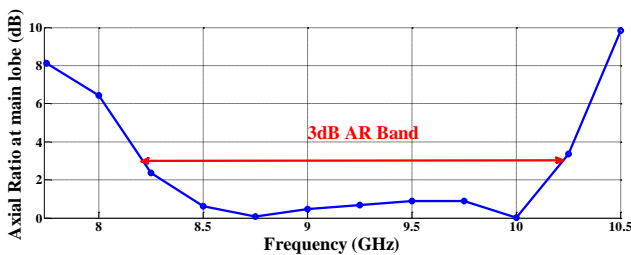
تشعشع یکسان از آن‌ها، مجموع دو شکاف، مثل یک آنتن با قطبش دایروی عمل کند. استفاده از شکاف‌های اینتردیجیتال و ماهیت خازنی آن‌ها باعث شده تا این شکاف‌ها علاوه بر تشعشع، نقش خازن سری برای خط انتقال چپگرد را هم بازی کنند. وایاهای دیواره‌ی SIW نیز همان‌طور که در فرکانس‌های راستگرد، نقش دیواره‌ی موجبری را ایفا می‌کنند، در فرکانس‌های چپگرد، نقش سلف موازی برای خط انتقال چپگرد را بر عهده می‌گیرند [۶]. به این ترتیب امکان ایجاد یک باند چپگرد و تشعشع در پشت‌تاب فراهم می‌آید. بنابراین آنتن نهایی طراحی شده، یک آنتن موج نشی SIW با قطبش دایروی، مبتنی بر CRLH-TL و با قابلیت پوشش فرکانسی از سمت پشت‌تاب تا جلو‌تاب است.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

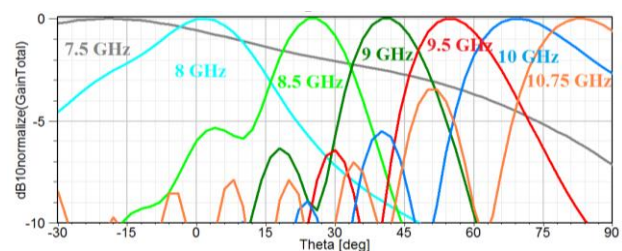
شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آنتن پیشنهادی با نرم‌افزار Ansoft HFSS انجام شده است. نمودار Dispersion همان نمودار ثابت فاز سلول واحد CRLH-TL بر حسب فرکانس است که قدرمطلق (ضریبی از) آن و بر حسب رادیان رسم شده است. از قطع نمودار Dispersion با خط نوری، ناحیه‌ی موج سریع (مُد تشعشی یا آنتنی) و ناحیه‌ی موج آهسته (مُد هدایتی یا موجبری) برای ساختار نهایی پیش‌بینی می‌شود. همچنین از متعادل بودن ساختار CRLH-TL یعنی عدم وجود فاصله بین باند راستگرد و چپگرد و در نتیجه داشتن تشعشع در پهلو‌تاب (در فرکانس 8 GHz)، اطمینان حاصل می‌شود. این نمودار از پارامترهای پراکندگی حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار HFSS به دو روش Driven-mode و Eigen-mode به دست می‌آید. تحلیل دوم اگرچه دقیق‌تر اما مستلزم صرف زمان بیشتر و با نتایجی سازگار با تحلیل اول می‌باشد [۶-۷]. نتایج شبیه‌سازی برای آنتن نهایی نشان می‌دهد که باند راستگرد و به تبع آن کل باند تشعشی، نسبت به نتایج نمودار Dispersion برای سلول واحد، افزایش یافته است. با رجوع به شکل‌های ۶ و ۷-ب، کل باند فرکانسی ساختار در مُد تشعشی از 7.5 تا 10.75 GHz به دست می‌آید.

باند 3 dB آنتن برای قطبش دایروی، از 8.2 تا 10.2 GHz و حدود 2 GHz است که در مقایسه با [۸-۹] بهبود یافته است. آنتن موج نشستی ارائه شده، فضایی از نزدیک پهلوتاب تا جلوتاب را با یک قطبش دایروی بسیار مناسب پوشش می‌کند. هرچه به پشت‌تاب و جلوتاب آنتن نزدیک می‌شویم، قطبش آنتن از حالت دایره‌ای ایده‌آل، خارج شده و به یک قطبش بیضوی نزدیک به دایروی تبدیل می‌شود. این نتیجه با نتایج مقاله‌ی [۹] سازگار است. از منطبق شدن نمودار بهره‌ی کل با بهره‌ی قطبش دایروی چپگرد در نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌شود که قطبش آنتن، دایروی چپگرد (LHCP) است.

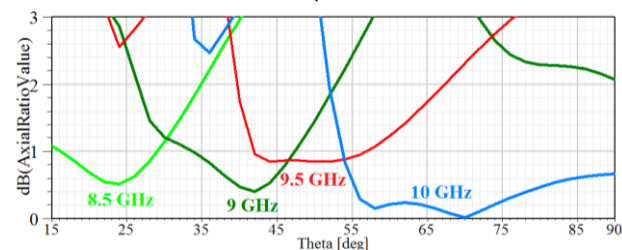
نمودارهای بهره‌ی نرمالیزه شده و نسبت محوری در صفحه‌ی اصلی تشعشع آنتن (XOZ) به ترتیب در شکل‌های ۷-ب و ۷-پ برای چند فرکانس دلخواه رسم شده است. پرتو اصلی با افزایش فرکانس از  $20^\circ$  تا  $84^\circ$  را پوشش و در حین آن قطبش دایروی خود را حفظ می‌کند. همان‌طور که در این دو شکل مشاهده می‌شود، نسبت محوری در کمترین میزان خود، منطبق با بیشترین میزان تشعشع (زاویه‌ی پرتو اصلی) است و این یک نتیجه‌ی ایده‌آل به شمار می‌رود.



الف



ب

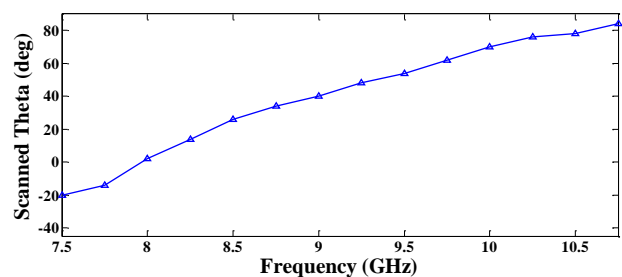


پ

شکل ۷: الف- نمودار نسبت محوری در پرتو اصلی بر حسب فرکانس.

ب و پ- به ترتیب نمودار بهره‌ی نرمالیزه شده و نسبت محوری برای چند فرکانس دلخواه در صفحه‌ی اصلی تشعشع آنتن (XOZ).

شکل ۶ نمودار زاویه‌ی پوشش شده توسط پرتو اصلی آنتن را بر حسب فرکانس نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پرتو اصلی آنتن با افزایش فرکانس از سمت پشت‌تاب به سمت پهلوتاب و سپس به سمت جلوتاب حرکت می‌کند. زاویه‌ی پوشش پرتو اصلی از  $20^\circ$  تا  $84^\circ$  به صورت پیوسته بدون باند قطع در صفر درجه و در باند فرکانسی 7.5 تا 10.75 GHz می‌باشد. حداکثر زاویه‌ی پوشش آنتن در جلوتاب، بسیار خوب و از مراجع [۵-۸] بیشتر است. همچنین داشتن تشعشع در پهلوتاب و پشت‌تاب، امتیازی نسبت به ساختار [۹] محسوب می‌شود. پهنای باند مُد تشعشعی حدود 3.25 GHz و نسبت به ساختارهای [۸-۹] بهبود یافته است.



شکل ۶: نمودار زاویه‌ی پوشش شده توسط پرتو اصلی آنتن بر حسب فرکانس.

یکی از مزیت‌های ساختار نهایی، به دست آوردن یک قطبش دایروی بسیار مناسب فقط با استفاده از یک آنتن در باند فرکانسی پوشش فضا است. ایده‌ی معروف در برخی از ساختارهای با قطبش دایروی، استفاده از دو آنتن با تحریک‌های یکسان در اندازه و اختلاف فاز  $90^\circ$  است که مشکلاتی نظیر طراحی یک شبکه‌ی تغذیه (کوپلر) مناسب، افزایش ابعاد ساختار، طراحی ایزولاسیون مناسب و غیره را دارد. ساختار پیشنهادی در مقاله از این لحاظ نسبت به ساختارهای مراجع [۵-۶] برتری دارد.

ابعاد الکتریکی (ابعاد، نسبت به طول موج، در فرکانس کاری مرکزی) آنتن نسبت به ساختارهای [۵-۶] و [۹] به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. به عنوان مثال، ابعاد الکتریکی آنتن، نسبت به ساختار [۹]، از طول و عرض، بیش از ۶۰٪ کاهش دارد. به طور کلی مصالحه‌ای بین بهره و ابعاد یک آنتن وجود دارد. بهره‌ی آنتن در اواسط باند فرکانسی، 9.06 dB است و با افزایش طول آنتن و تعداد شکاف‌ها به بیشتر از 10 dB می‌رسد.

حفظ قطبش دایروی در حین پوشش فرکانسی از مزیت‌های دیگر آنتن نهایی است. قطبش دایروی مناسب، با میزان نسبت محوری کمتر از 3 dB (در برخی مراجع مثل [۹]، 6 dB) ارزیابی می‌شود. نمودار نسبت محوری (در جهت پرتو اصلی) بر حسب فرکانس در شکل ۷-الف نمایش داده شده است. از این نمودار به دست می‌آید که سطح نسبت محوری در اکثر نقاط باند فرکانسی، بسیار پایین و نزدیک 0 dB است و این به معنای طراحی بسیار مناسب آنتن برای قطبش دایروی است.

جدول ۱ مقایسه‌ی مفصلی بین پارامترهای اساسی ساختار پیشنهادی با پنج ساختار ارائه شده در مقالات معتبر سال‌های اخیر فراهم آورده است. این ساختارها همگی آنتن‌های موج نشتی ایجاد شده بر SIW و با قطبش دایروی هستند. نتایج شبیه‌سازی این مقاله حتی الامکان با نتایج شبیه‌سازی (و نه اندازه گیری) مقالات دیگر مقایسه شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن موج نشتی جدید با قطبش دایروی، ایجاد شده بر SIW و مبتنی بر CRLH-TL متعادل ارائه شد. این آنتن در باند فرکانسی 7.5 تا 10.75 GHz، فضایی وسیع از سمت پشت‌تاب تا

جلوتاب ( $-20^\circ$  تا  $+84^\circ$ ) را بدون باند قطع در پهلو تاب (صفر درجه) پوشش می‌کند. آنتن از نزدیک پهلو تاب تا جلوتاب، قطبش دایروی چپگرد و بسیار مناسب (نسبت محوری نزدیک به 0 dB در تمام باند فرکانسی) و در پشت‌تاب و انتهای جلوتاب، یک قطبش بیضوی نزدیک به دایروی دارد. پهنای باند مُد تشعشعی، پهنای باند 3 dB برای قطبش دایروی، متوسط مقادیر نسبت محوری، تشعشع در پهلو تاب و پشت‌تاب، حداکثر زاویه‌ی پوشش در جلوتاب و بازدهی تشعشعی، هر کدام در مقایسه با ساختاری از ساختارهای هم‌رده‌ی اخیر بهبود یافته است. همچنین برای ایجاد قطبش دایروی به جای استفاده از دو آنتن و کوپلر و پیچیدگی‌های دیگر، از یک آنتن استفاده شده که باعث شده ابعاد آنتن کاهش یابد.

جدول ۱: مقایسه‌ی پارامترهای اساسی ساختار پیشنهادی با پنج ساختار ارائه شده در سال‌های اخیر.

(\*: ابعاد الکترونیکی، از تقسیم ابعاد فیزیکی به طول موج، در فرکانس کاری مرکزی هر ساختار به دست آمده است.)

ساختار	نوع آنتن موج نشتی	حدود زاویه پوشش (deg)	تشعشع پهلو تاب	پهنای باند مُد تشعشعی (GHz)	نوع پوشش فضا	قطبش	پهنای باند 3 dB قطبش دایروی (GHz)	استفاده از	ایده ایجاد قطبش دایروی	حدود ابعاد الکترونیکی *	بیشینه بهره	بیشینه بازدهی تشعشعی (%)
[۵]	2-HMSIW with 45° inclined typical slots	(3, 30)	نزدیک	(33 - 39)	فرکانسی	LP-CP	(34 - 39)	دو آنتن و کوپلر	تشعشع دو آنتن شکاف‌دار	1.1 * 18.4	گزارش نشده	گزارش نشده
[۶]	2-SIW CRLH with 45° inclined ID slots	(-35, +60)	دارد	(7.4 - 11.8)	فرکانسی	LP-CP	(7.5 - 10)	دو آنتن و کوپلر	تشعشع دو آنتن شکاف‌دار	1.9 * 11.7	حدود 12 dBi	80
[۷]	HMSIW CRLH with Ramp-shaped ID slots	(-70, +70)	دارد	(7.4 - 13.5)	فرکانسی	CP	(7.4 - 13)	یک آنتن	تشعشع شکاف و دیواره‌ی باز HMSIW	0.3 * 9	12.01 dBi	گزارش نشده
[۸]	HMSIW with varactor diodes & ID slots	(-39, +53)	دارد	بسیار محدود	الکترونیکی با فرکانس ثابت	CP	بسیار محدود	یک آنتن	تشعشع شکاف و دیواره‌ی باز HMSIW	? * 6.1	11.3 dBi	گزارش نشده
[۹]	SIW with H-shaped typical slots	(+15, +85)	ندارد	(9.9 - 12.2)	فرکانسی	CP	(10.7 - 11.3)	یک آنتن	تشعشع دو شکاف	2.8 * 17.1	13 dB	60
این مقاله	SIW CRLH with T-shaped ID slots	(-20, +84)	دارد	(7.5 - 10.75)	فرکانسی	CP	(8.2 - 10.2)	یک آنتن	تشعشع دو شکاف	0.8 * 6.6	9.06 dB	96

Application," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 2, pp. 760-771, Feb. 2012.

- [7] A. Pourghorban Saghati, M. M. Mirsalehi, and M. H. Neshati, "A HMSIW Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna With Backward, Broadside, and Forward Radiation," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 451-454, 2014.
- [8] A. Suntives and S. V. Hum, "A Fixed-Frequency Beam-Steerable Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 5, pp. 2540-2544, May 2012.
- [9] J. Liu, X. Tang, Y. Li, and Y. Long, "Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna With H-Shaped Slots," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 8, pp. 3962-3967, Aug. 2012.
- [۱۰] سیل‌سازان حقیقی، عباسعلی حیلری، مسعود موحدی "آنتن موج نشتی ایجاد شده روی موجبر مجتمع شده در زیرلا‌یه چپگرد با استفاده از شکاف‌های دایره‌ای." بیست و دومین کنفرانس

مهندسی برق ایران، دانشگاه شهید بهشتی، بهار ۱۳۹۳.

- [11] S. Lim, C. Caloz, and T. Itoh, "Metamaterial-Based Electronically Controlled Transmission-Line Structure as a Novel Leaky-Wave Antenna With Tunable Radiation Angle and Beamwidth," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no. 12, pp. 2678-2690, Dec. 2004.

#### مراجع

- [1] A. Oliner, *Antenna Engineering Handbook*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1993, ch. 10.
- [2] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials Transmission Line Theory and Microwave Applications*. New York: Wiley-IEEE Press, 2005.
- [3] Y. Dong and T. Itoh, "Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide and Half Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Structures," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 3, pp. 767-775, Mar. 2011.
- [4] M. Bozzi, A. Georgiadis, and K. Wu, "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 5, no. 8, p. 909, 2011.
- [5] Y. J. Cheng, W. Hong, and K. Wu, "Millimeter-Wave Half Mode Substrate Integrated Waveguide Frequency Scanning Antenna With Quadri-Polarization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 6, pp. 1848-1855, Jun. 2010.
- [6] Y. Dong and T. Itoh, "Substrate Integrated Composite Right-/Left-Handed Leaky-Wave Structure for Polarization-Flexible Antenna