

## بهبود پهنای باند و کاهش پلاریزاسیون متقاطع آنتن پچ مستطیلی با ساختار DGS بیضوی

مهدی اصلی نژاد<sup>۱\*</sup>

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

تاریخ دریافت:

۱ بهمن ماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۷ اسفند ماه ۱۴۰۳

### چکیده

در این مقاله، یک آنتن پچ میکرواستریپ جدید با پهنای باند بهبود یافته و کاهش سطح پلاریزاسیون متقاطع ارائه شده است. طراحی پیشنهادی برای دستیابی به سطح پلاریزاسیون متقاطع پایین و پهنای باند بهینه شده شامل ایجاد شکاف‌های بیضوی در صفحه زمین است. این روش‌ها شدت میدان‌های ناخواسته تابشی آنتن پچ میکرواستریپ را کاهش داده و در نتیجه منجر به کاهش سطح پلاریزاسیون متقاطع و بهبود پهنای باند آنتن می‌شوند. برای ارزیابی عملکرد، یک آنتن پچ مرجع با صفحه زمین متداول طراحی و با آنتن پیشنهادی مقایسه شده است. آنتن پیشنهادی بهبود قابل توجهی در سطح پلاریزاسیون متقاطع (حدود ۲۰ دسی‌بل) و پهنای باند (تقریباً ۱۵٪) نسبت به آنتن میکرواستریپ پچ با صفحه زمین متداول نشان داده است. آنتن پیشنهادی همچنین بهبود چشمگیری در نسبت پلاریزاسیون متقاطع در پهنای باند امیدانسی، از ۳.۷ گیگاهرتز تا ۴.۵ گیگاهرتز، ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پلاریزاسیون متقاطع پایین، ساختار صفحه زمین نقص‌دار، آنتن پچ میکرواستریپ.

## Improvement of Bandwidth and Reduction of X-Pol in Rectangular Patch Antenna with Elliptical DGS

Mehdi Aslinezhad<sup>1\*</sup>

1. Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

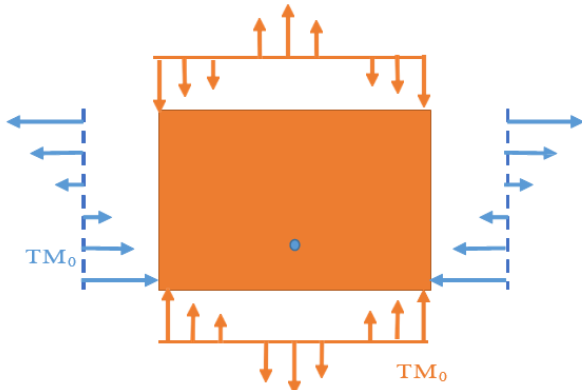
In this paper A novel microstrip patch antenna with band width improvement and low cross polarization level is presented. The proposed design for the low cross polarization level and band width improved patch antenna consist of elliptical-slots on ground. These practices reduce the strength of unwanted radiated fields of microstrip patch antenna that results low cross polarization level and improve band width of antenna. To validate the result a reference patch antenna with conventional ground plane is designed and compared with proposed antenna. The designed antenna cross polarization level and band width are improved about 20dB and 15% respectively compared with microstrip patch antenna with conventional ground plane. The purposed antenna XP (cross-polarized) ratio has remarkable improvement in impedance bandwidth that is from 3.7GHz to 4.5GHz.

**Key words:** Low cross polarization, Defect ground structure, Microstrip patch antenna

طراحی آنتن پیشنهادی شرح داده شده و در بخش ۳، نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شوند.

## ۲- تئوری و طراحی آنتن

ساختارهای با زمین ناقص (DGS) به عنوان یک راه‌حل شناخته شده برای کاهش تابش تقاطع، عمدتاً در صفحه H، مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمانی که اولین حالت تابشی تحریک می‌شود، حالت‌های مرتبه بالاتر که منابع میدان‌های پلاریزاسیون متعامد هستند تحریک می‌شوند و بر تابش تقاطع تأثیر می‌گذارند. دو حالت اول به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. میدان‌های ناخواسته‌ای که توسط حالت‌های مرتبه بالاتر تحریک می‌شوند، به صورت تک‌قطبی در سراسر صفحه H ظاهر شده و میدان‌های زیرین در امتداد لبه‌های غیر تابشی باعث ایجاد تقاطع در صفحه H تشعشعی می‌شوند.



شکل ۱- پیکربندی‌های میدان (مدها) برای آنتن پیچ میکرواستریپ مستطیلی

طبق توسعه بوکر که در [۱۶] عنوان شده است، اگر یک صفحه و مکمل آن در محیطی با امپدانس ذاتی قرار داده شوند و امپدانس‌های پایانه‌ای آن‌ها به ترتیب  $Z_s$  و  $Z_c$  باشند، این امپدانس‌ها به صورت زیر به هم مرتبط هستند:

$$Z_s Z_c = \frac{\eta^2}{4} \quad (1)$$

این بدان معناست که ایجاد شکاف‌ها در صفحه زمین می‌تواند میدان‌های تابشی ناخواسته‌ای را که بر تابش‌های تقاطع تأثیر می‌گذارند، کنترل کند. نقص‌ها در لبه‌های غیر تابشی، ساختار میدان حالت غالب را به طور قابل توجهی تغییر نمی‌دهند در حالی که بر میدان‌های  $TM_{02}$  تأثیر می‌گذارند. در حالت  $TM_{02}$  میدان‌ها در جهت عمودی پیچ نوسان می‌کنند. همانطور که توضیح داده شد، نقص‌ها در نزدیکی لبه‌های غیر تابشی آنتن پیچ ایجاد می‌شوند که کوپلینگ بین میکرواستریپ و شکاف در صفحه زمین در [۱۷] توسط رابطه زیر داده شده است:

$$n = \sqrt{\frac{Z_{0\text{microstrip}}}{Z_{0\text{slot}}}} \quad (2)$$

آنتن میکرواستریپ مستطیلی متداول‌ترین شکل هندسی در میان آنتن‌های چاپی است که تاکنون بررسی شده است. این آنتن‌ها به دلیل ویژگی‌هایی مانند طراحی کم‌حجم، وزن سبک، ساخت آسان و کم‌هزینه، ساختار انعطاف‌پذیر و سازگاری با فناوری مدارهای مجتمع، به طور گسترده در کاربردهای ارتباطات ماهواره‌ای و بی‌سیم با عملکرد بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. در آنتن میکرواستریپ پیچ مستطیلی، حالت  $TM_{10}$  به صورت عمودی نسبت به سطح آنتن تابش می‌کند. میدان‌های تولیدشده در این آنتن دارای پلاریزاسیون خطی هستند که به آن تابش هم‌جهت (Co-Polarized) گفته می‌شود. با این حال، مقداری تابش با پلاریزاسیون متعامد نیز وجود دارد که به آن تابش متقاطع (Cross-Polarized) گفته می‌شود. میدان‌های هم‌جهت و متقاطع به صورت تئوری در منابع [۲] تا [۵] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرجع [۵] نشان داده شده است که سطح متقاطع در یک ناحیه باریک اطراف محور تابش اصلی در صفحه H، ۲۰ دسی‌بل کمتر از سطح هم‌جهت است. در واقع، جداسازی بین پلاریزاسیون هم‌جهت و متقاطع در زوایای وسیع اطراف محور تابش اصلی پایین است. این موضوع بدون شک یکی از محدودیت‌های کلیدی در کاربردهایی است که هم‌جهتی بالای پلاریزاسیون در یک بازه زاویه‌ای وسیع مورد نیاز است [۶]. نتایج برخی تحقیقات گزارش شده در منابع [۷] و [۸] نشان می‌دهند که با تغییر ساختار تغذیه می‌توان نسبت پلاریزاسیون متقاطع پایینی را به دست آورد و این تکنیک حدود ۲۵ دسی‌بل جداسازی بین پلاریزاسیون هم‌سو (CO) و متقاطع فراهم می‌کند. ایجاد تغییرات در صفحه زمین برای کاهش سطح تقاطع در منابع [۹] و [۱۰] ارائه شده است که جداسازی ۱۰ تا ۱۵ دسی‌بل بین تابش‌های هم‌سو و متقاطع حاصل شده است. علاقه‌مندی به استفاده از ساختارهای نقص‌دار در صفحه زمین (Defected Ground Structures - DGS) برای کاربردهای مختلف به طور چشمگیری افزایش یافته است [۱۱]. استفاده از DGS به منظور بهبود جداسازی بین نسبت پلاریزاسیون هم‌سو و متقاطع در تحقیقات متعددی اثبات شده است. پیکربندی‌های مختلفی از DGS برای ساختارهای گوناگون پیچ مانند دایره‌ای، مستطیلی و مثلثی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۲-۱۴]. این طراحی‌ها نسبت پلاریزاسیون متقاطع را حدود ۱۰ تا ۱۵ دسی‌بل نسبت به سطح پلاریزاسیون هم‌سو کاهش می‌دهند.

در این مقاله، از یک ساختار نقص‌دار با شکل بیضوی در صفحه زمین برای کاهش پلاریزاسیون متقاطع و بهبود پهنای باند استفاده شده است. در کارهای پیشین، نقص‌ها تنها در نزدیکی لبه غیر تشعشعی ایجاد می‌شدند تا سطح تقاطع کنترل شود. اما در این پژوهش نقص‌ها در صفحه زمین و در نزدیکی هر دو لبه ایجاد شده‌اند. در ادامه نشان داده خواهد شد که سطح پلاریزاسیون متقاطع ۲۰ دسی‌بل کاهش یافته و پهنای باند آنتن پیشنهادی حدود ۱۷٪ افزایش یافته است. ساختار مقاله شامل دو بخش است: در بخش ۲، ساختار هندسی و جزئیات

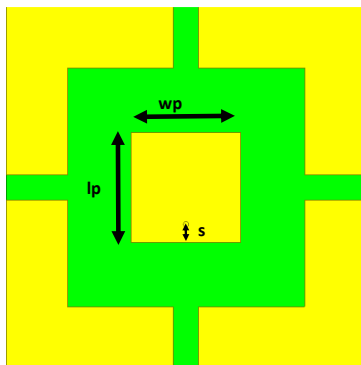
پیشنهادی، ابعاد بهینه برای به دست آوردن بهترین نتیجه تعیین شده‌اند.

### ۳- طراحی و نتایج شبیه‌سازی

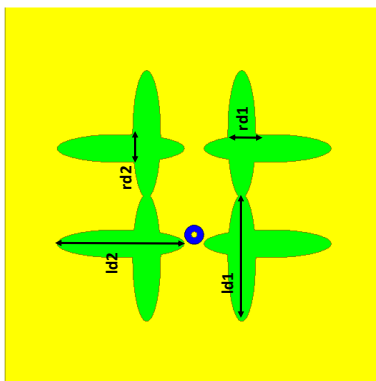
نتایج شبیه‌سازی شده برای ساختار متداول و ساختار پیشنهادی با صفحه زمین نقص‌دار ارائه شده است. آنتن پیشنهادی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی ساختار فرکانس بالا (HFSS) شبیه‌سازی شده است. شکل ۳ ضریب انعکاس شبیه‌سازی شده برای آنتن پچ با و بدون DGS را نشان می‌دهد. پهنای باند عملیاتی ۱۰- دسی‌بل برای آنتن پیشنهادی حدود ۱۹.۵٪ (از ۳.۷ گیگاهرتز تا ۴.۵ گیگاهرتز) است. ویژگی‌های تشعشی طرح پیشنهادی از طریق شکل‌های ۴ و ۵ برای الگوهای تشعشی در صفحات H و E به ترتیب بررسی شده‌اند.

جدول ۱- جزئیات آنتن پیشنهادی

پارامتر	اندازه (mm)
$L_p$	۲۴
$W_p$	۲۴
$s$	۴
$ld1$	۲۶.۵
$rd1$	۱۱
$Ld2$	۱۱
$rd2$	۵.۸۸



(الف)



(ب)

شکل ۲- هندسه آنتن میکرواستریپ پیشنهادی با DGS بیضوی

و  $Z_0^{slot} = \frac{\eta^2}{4Z_0}$  که در آن  $Z_0$  امپدانس ورودی رزوناتور دایبل مکمل شکاف زمین است و عرض مؤثر پچ به صورت زیر می‌شود:

$$W_1 = W + 2\Delta W \quad (۳)$$

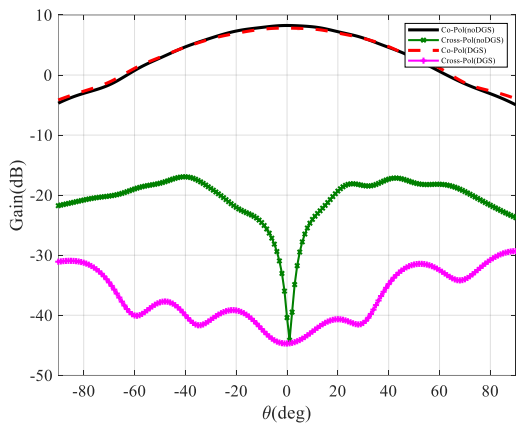
امپدانس مشخصه میکرواستریپ را می‌توان از [۱۸] به صورت زیر به دست آورد:

$$Z_{0n}^{microstrip} = \frac{120\pi \left[ \frac{W_1}{h} + 1.393 + 6.67 \ln \left( \frac{W_1}{h} + 1.44 \right) \right]^{-1}}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (۴)$$

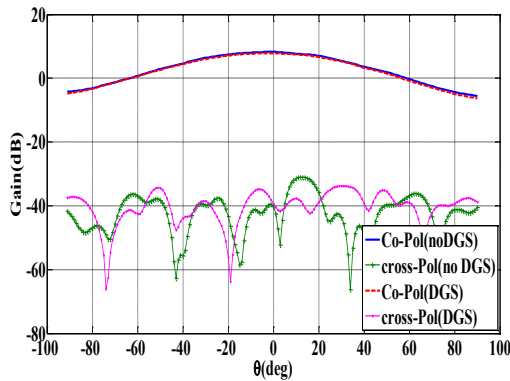
کوپلینگ بین میکرواستریپ و نقص شکاف را می‌توان با استفاده از معادله (۱) به دست آورد، جایی که  $Z_0^{microstrip}$  ثابت دی‌الکتریک مؤثر برای مود  $TM_{mn}$  را می‌توان بر اساس ظرفیت استاتیک و دینامیک محاسبه کرد [۱۹].

$$\epsilon_{eff} = \frac{4\epsilon_r \epsilon_{rdyn}}{(\sqrt{\epsilon_r} + \sqrt{\epsilon_{rdyn}})^2} \quad (۵)$$

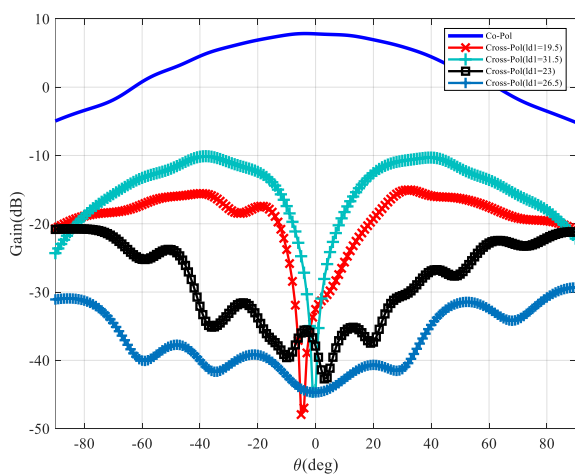
به دلیل موقعیت شکاف‌ها که نزدیک لبه‌های غیر تشعشی قرار دارند، با کاهش عرض مؤثر، امپدانس آنتن پچ میکرواستریپ افزایش می‌یابد. این نیز از کوپلینگ بیشتر میدان‌های آنتن میکرواستریپ به نقص ایجاد شده در صفحه زمین قبل مشاهده می‌باشد و همان‌طور که از معادله (۲) مشخص است با تشعشع متقاطع قابل کنترل می‌باشد. بنابراین، در ساختار فعلی آنتن دو شکاف (شکاف‌های عمودی) نزدیک لبه‌های غیر تشعشی قرار گرفته‌اند تا میدان‌هایی را که در این نواحی قرار دارند تحت تأثیر قرار داده و شکاف‌های دیگر (افقی) نیز که نزدیک لبه تشعشی قرار دارند بتوانند پهنای باند را بهبود ببخشند. اثرات هر یک از شکاف‌های عمودی و افقی در بخش بعدی گزارش شده است و شماتیک آنتن میکرواستریپ پچ با DGS بیضوی در شکل ۲ نشان داده شده است. تحقیقات با استفاده از زیرلایه RT5880 که به راحتی در دسترس است دارای  $\epsilon_r = 2.33$  و تانژانت تلفات  $0.0009$  و ضخامت  $h = 1.575$  mm انجام شده است. اندازه صفحه زمین به اندازه  $\lambda_0 \times \lambda_0$  انتخاب شده است که  $\lambda_0$  طول موج فضای آزاد مربوط به فرکانس عملیاتی پچ برای عملکرد در حدود ۴.۱ گیگاهرتز است. دو پچ یکسان، یکی با DGS و دیگری با صفحه زمین متداول، برای بررسی بهبود نسبی در سطح تابش XP مطالعه شده‌اند و هر دوی آن‌ها حتی اگر با پروب تغذیه دچار مشکل شوند، مکان تغذیه‌ای منحصر به فردی دارند تا از هرگونه تغییر در تشعشع متقاطع جلوگیری کنند. جزئیات ابعادی آنتن پیشنهادی در جدول ۱ گزارش شده است. ابعاد نقص‌ها با استفاده از دو شعاع  $rd1$  و  $rd2$  و نیز  $ld1$  و  $ld2$  برای نقص‌های عمودی و افقی به ترتیب تعیین شده است. برای ساختار نقص



شکل ۴- الگوهای شبیه‌سازی شده صفحه H برای آنتن پچ مستطیلی با و بدون DGS در فرکانس  $f=4.1\text{GHz}$

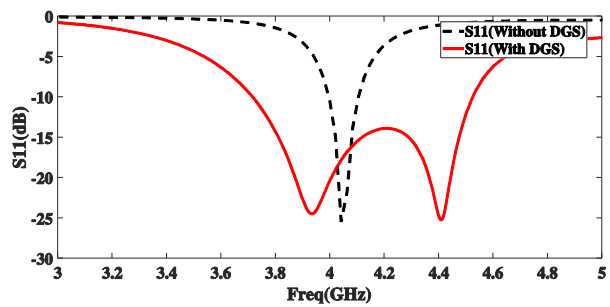


شکل ۵- الگوهای شبیه‌سازی شده صفحه E برای آنتن پچ مستطیلی با و بدون DGS در فرکانس  $f=4.1\text{GHz}$



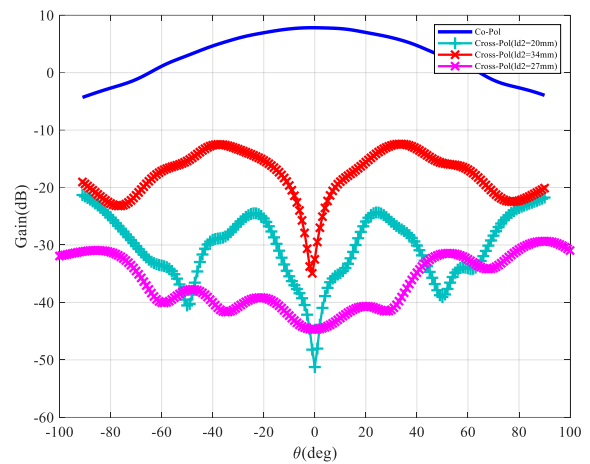
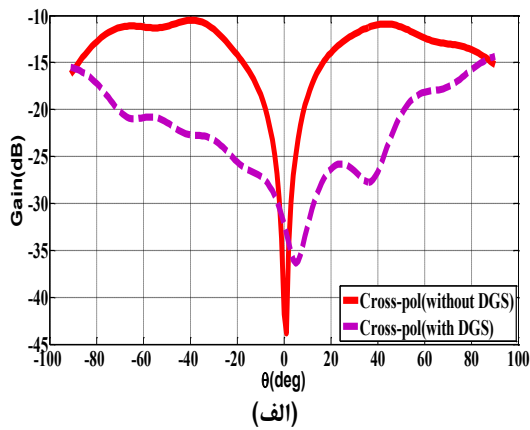
شکل ۶- الگوهای شبیه‌سازی شده صفحه H برای آنتن پچ مستطیلی با DGS برای مقادیر مختلف  $ld1$  در فرکانس  $f=4.1\text{GHz}$

نکته مهم این است که DGS به طور مؤثری قادر به کاهش سطح XP در سراسر پهنای باند امپدانس است. برای روشن کردن مزایای تکنیک پیشنهادی نسبت به تکنیک‌های قبلی، یک مطالعه تطبیقی انجام شده و در جدول ۲ خلاصه شده است. تحلیل دقیق جدول ۱ نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی بسیار ساده بوده و توانایی دستیابی به کاهش بالاتر سطح XP همراه با تطبیق امپدانس بهتر را دارد.

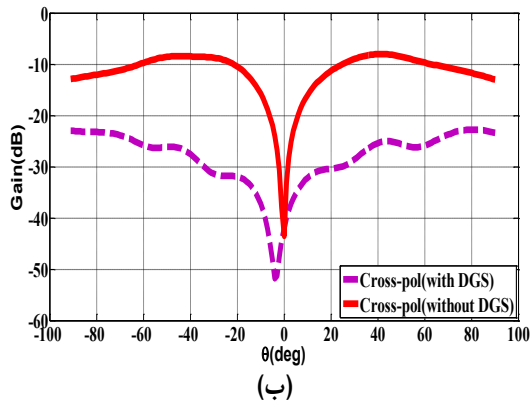


شکل ۳-  $S_{11}$  شبیه‌سازی شده برای آنتن پچ با و بدون DGS

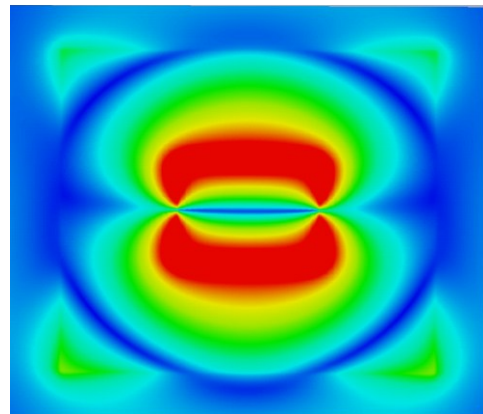
این نمودارها الگوی تابش نسبی آنتن پچ مستطیلی با و بدون DGS را مقایسه می‌کنند. بهبود تشعشع XP در صفحه H چشمگیر است، در حالی که تغییر قابل توجهی در تابش XP در صفحه E مشاهده نمی‌شود. بنابراین، تمرکز اصلی ما بر الگوی تابش در صفحه H است. شکل ۴ الگوی تابش در صفحه H را برای آنتن پچ با و بدون DGS نشان می‌دهد. برای آنتن پچ مستطیلی با صفحه زمین متداول، تشعشع XP در صفحه H بیشتر از  $-25$  دسی‌بل در بازه  $\pm 18^\circ$  تا  $\pm 10^\circ$  درجه است. این موضوع باعث کاهش نسبت پلاریزاسیون Co- Cross در بازه زاویه‌ای وسیعی در هر دو سمت انتشار می‌شود. در مقابل در آنتن پچ با نقص در زمین همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود تشعشعات XP در هر دو سمت انتشار سرکوب می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نسبت پلاریزاسیون Co-Cross برای آنتن پچ با نقص زمین در نیم‌عرض پرتو کمتر از  $-40$  دسی‌بل است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که نسبت XP در ناحیه نیم‌عرض پرتو حدود  $20$  دسی‌بل بهبود یافته است. DGS تأثیر قابل توجهی بر الگوهای تشعشعی پلاریزاسیون هم‌جهت (Co-Polarized) در جهت انتشار در صفحات H و E ندارد. برای اثبات اینکه این آنتن یک طراحی بهینه است سطح پلاریزاسیون متقابل برای مقادیر مختلف پارامترهای  $ld_1$  و  $ld_2$  شبیه‌سازی و در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نسبت پلاریزاسیون متقاطع برای  $ld_1 = 27\text{mm}$  و  $ld_2 = 26.5\text{mm}$  نیز مقداری حداقل است. به عبارت دیگر، طبق نتایج به دست آمده، حداقل نسبت XP ناشی از سرکوب میدان‌های تشعشعی ناخواسته با شکاف‌های عمودی بیضوی می‌باشد که در این حالت پهنای باند آنتن با شکاف افقی بهبود می‌یابد. میدان‌های مربوط به زیرلایه در شکل ۸ نشان داده شده که نشان می‌دهد توزیع میدان در لبه غیر تشعشعی آنتن پچ مایکرواستریپی با DGS کاهش یافته است که منجر به کاهش نرخ XP می‌شود. شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که نرخ XP در پهنای باند امپدانس آنتن پچ مستطیلی با نقص در صفحه زمین بهبود یافته است. در این شکل مقادیر XP صفحه H که نزدیک به دو لبه باند فرکانسی برای آنتن پچ با DGS شبیه‌سازی شده‌اند، با مقدار XP آنتن پچ مستطیلی با صفحه زمین معمولی مقایسه شده‌اند.



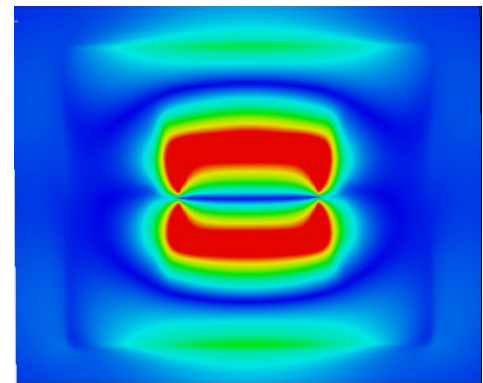
شکل ۷- الگوهای شبیه‌سازی شده صفحه H برای آنتن پچ مستطیلی با مقادیر مختلف DGS برای فرکانس  $f=4.1\text{GHz}$



شکل ۹- الگوهای شبیه‌سازی شده صفحه H برای آنتن پچ مستطیلی با ساختار زمین ناقص (DGS) در فرکانس  $f=3.75\text{GHz}$  (ب) در فرکانس  $f=4.5\text{GHz}$  (الف)



(الف)



(ب)

جدول ۲-مقایسه آنتن پیشنهادی با سایر آنتن‌های با پلاریزاسیون

کاهش XP (dB)	پهنای باند (%)	اندازه پچ (میلی متر مربع)	روش استفاده شده	مرجع
۲۲	۱۰	$0.3\lambda_0 \times 0.37\lambda_0$	Z-shaped DGS	[20]
۱۲-۷	۳.۳	$1.0\lambda_0 \times 1.0\lambda_0$	DGS	[22]
۱۵	۹	$2\lambda_0 \times 2\lambda_0$	Asymmetric DGS	[23]
۲۰	۱۹	$0.33\lambda_0 \times 0.33\lambda_0$	Elliptical DGS	روش پیشنهادی

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله آنتن پچ میکرواستریپ مستطیلی با مزید نمودن DGS بیضوی برای کاهش سطح پلاریزاسیون متقاطع تشعشع XP در جهت انتشار و بهبود پهنای باند امپدانس طراحی شده است. بهبود چشمگیری در جداسازی پلاریزاسیون CO-XP و نیز پهنای باند برای آنتن پیشنهادی حاصل شده است و این دستاورد برای کاربردهایی که به پلاریزاسیون خوب و پهنای باند امپدانس بالا نیاز دارند، بسیار موثر است. بهبود سطح پلاریزاسیون متقاطع آنتن پیشنهادی در حدود ۲۰ دسی بل و پهنای باند (تقریباً ۱۵٪) نسبت به آنتن میکرواستریپ پچ با صفحه زمین متداول ارائه شده است که قابل توجه می‌باشد.

شکل ۸- توزیع میدان الکتریکی بر روی زیرلایه آنتن پچ میکرواستریپ در دو حالت (الف) طراحی معمولی (ب) با ساختار زمین ناقص (DGS)

در شکل ۹ بهبود پارامتر گین آنتن در فرکانس ۴.۵ گیگاهرتز نسبت به فرکانس ۳.۷۵ گیگاهرتز به وضوح دیده می‌شود که بیانگر اثر DGS در پارامتر پهنای باند بوده و در هر دو قسمت (الف) و (ب) نیز اثر کاهش میزان XP و افزایش پهنای باند قابل مشاهده هست.

- [13] D. Guha, C. Kumar, and S. Pal, "Improved cross-polarization characteristics of circular microstrip antenna employing arc-shaped defected ground structure (dgs)," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1367–1369, 2009.
- [14] A. Ghosh, D. Ghosh, S. Chattopadhyay, and L. L. K. Singh, "Rectangular microstrip antenna on slot-type defected ground for reduced cross-polarized radiation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 321–324, 2014.
- [15] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2016.
- [16] H. G. Booker, "Slot aeriels and their relation to complementary wire aeriels (abinet's principle)," *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIIA: Radiolocation*, vol. 93, no. 4, pp. 620–626, 1946.
- [17] Caloz, C., Okabe, H., Iwai, T., et al.: 'A simple and accurate model for microstrip structures with slotted ground plane', *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, 2004, 14, (4), pp. 133–135
- [18] Chattopadhyay, S., Biswas, M., Siddiqui, J.Y., et al.: 'Input impedance of probe fed rectangular microstrip antenna with variable air-gap and varying aspect ratio', *IET Microw. Antennas. Propag.*, 2009, 3, (8), pp. 1151–1156
- [19] Guha, D.: 'Resonant frequency of circular microstrip antennas with and without air gaps', *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2001, 49, pp. 55–59
- [20] Susamay Samanta, Kaushik Mandal, P. Soni Reddy, Partha P. Sarkar, "Near-field approach towards enhanced suppression of cross-polarized radiation across different elevation planes using novel epsilon-shaped clusters of shorting pins", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019
- [21] KHANDELWAL, M. K., KANAUIA, B. K., DWARI, S., et al. Bandwidth enhancement and cross-polarization suppression in ultrawide band microstrip antenna with defected ground plane. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, vol. 56, no. 9, p. 2141–2146. 10.1002/mop.28499
- [22] GUHA, D., KUMAR, C., PAL, S. Improved cross-polarization characteristics of circular microstrip antenna employing arc shaped defected ground structure (DGS). *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, vol. 8, p. 367–1369.
- [23] KUMAR, C. GUHA, D. Asymmetric geometry of defected ground structure for rectangular microstrip: A new approach to reduce its cross-polarized fields. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 6, p. 2503–2506.
- [1] M. H. Reddy, R. M. Joany, G. Manikandan, and A. S. A. Nisha., "Design of microstrip patch antenna with multiple slots for satellite communication," in *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, April 2017, pp. 0830–0834.
- [2] P Arockia Michael Mercy, Ks Joseph Wilson "Bandwidth Enhancement of Pentagonal & Circular Microstrip Patch Antenna with DGS for Radar & Satellite Applications," *Primer Scientific Publications*, Vol 2, April 2024.
- [3] Poonam A. Kadam, Amit A. Deshmukh, "Designs of rectangular shape microstrip antennas backed by bow-tie shape ground plane for enhanced antenna characteristics," *International journal of electronics and communications*, Vol 137, Jul 2021.
- [4] A. Petosa, A. Ittipiboon, and N. Gagnon, "Suppression of unwanted probe radiation in wideband probe-fed microstrip patches," *Electronics Letters*, vol. 35, no. 5, pp. 355–357, March 1999.
- [5] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, 2001.
- [6] Z. N. Chen and M. Y. Chia, "Broad-band suspended probe-fed plate antenna with low cross-polarization levels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 2, pp. 345–347, 2003.
- [7] T. Milligan, V. Schejbal, and V. Kovarik, "A method of cross-polarization reduction," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 108–111, 2006.
- [8] P. Li, H. Lai, K. Luk, and K. Lau, "A wideband patch antenna with cross-polarization suppression," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 211–214, 2004.
- [9] K.-L. Wong, C.-L. Tang, and J.-Y. Chiou, "Broadband probe-fed patch antenna with a w-shaped ground plane," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 6, pp. 827–831, 2002.
- [10] W.-H. Hsu and K.-L. Wong, "Broadband probe-fed patch antenna with a u-shaped ground plane for cross-polarization reduction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 3, pp. 352–355, 2002.
- [11] D. Guha and Y. M. Antar, *Microstrip and printed antennas: new trends, techniques and applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] F. Y. Zulkifli, E. T. Rahardjo, and D. Hartanto, "Radiation properties enhancement of triangular patch microstrip antenna array using hexagonal defected ground structure," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 5, pp. 101–109, 2008.