

# بهبود عملکرد آنتن های میدان نزدیک رزنانسی پارازیتیک Z شکل با تغییر در ساختار عنصر پارازیتیک و استفاده از عنصر فشرده خازنی به عنوان جایگزین مدار تطبیق فعال غیر فاستری

محمد جواد حسنی<sup>۱</sup>، امیر جعفرقلی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- پژوهشکده علوم و فناوری فضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۳

## چکیده

یکی از کاربردهای مهم فرامواد، کوچک سازی آنتن است. در این مقاله ایده تغییر در ساختار بخش پارازیتیک و استفاده از عناصر فشرده به منظور جبران سازی ادمیتانس آنتن های کوچک در پهنای باند وسیع به عنوان یک راه حل اساسی در افزایش پهنای باند آنتن، مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی و ساخت نشان می دهد که درصد پهنای باند نسبی آنتن در حالت عادی چیزی در حدود ۵٪ می باشد. با استفاده از تغییر در ساختار جز پارازیتیکی آنتن و استفاده از تکنیک پورت دوم به جای عنصر سلفی، درصد پهنای باند نسبی آنتن به نزدیک به ۱۸٪ افزایش می یابد. در ادامه و با استفاده از عنصر فشرده خازنی متصل به آنتن مونوپول و ساختار پارازیتیک، پهنای باند آنتن به شدت افزایش یافته و به بیش از ۸۱٪ رسیده است. آنتن در هر سه حالت پیاده سازی شده و نتایج شبیه سازی و تست مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## واژگان کلیدی

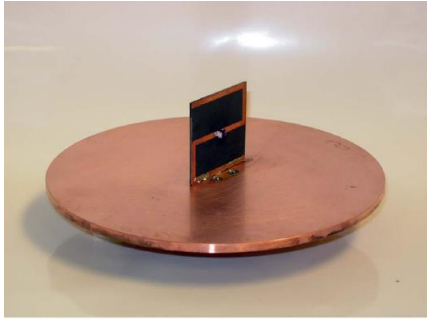
آنتن الکتریکی کوچک، پهن باند، ساختار پارازیتیک، عنصر فشرده.

## مقدمه

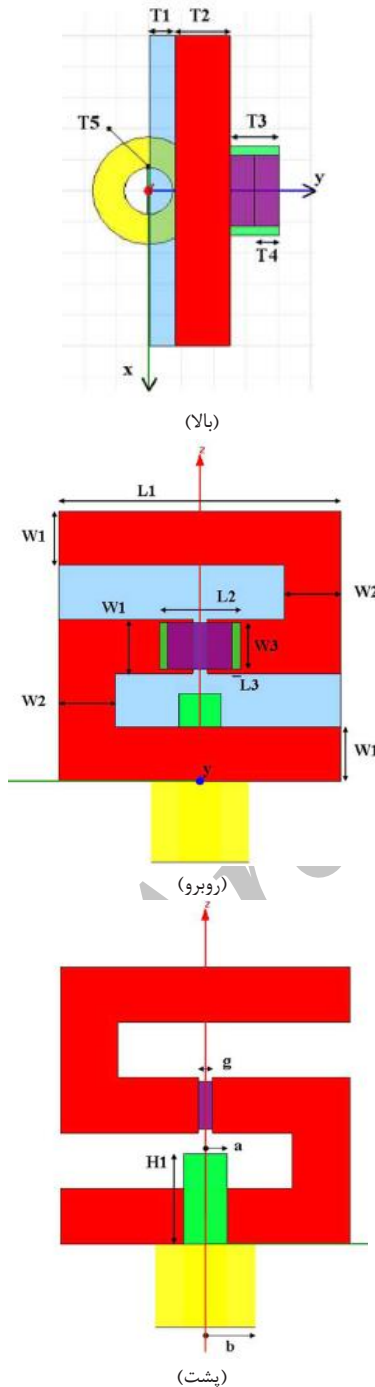
منظور کوچک سازی آنتن ها اولین بار در [۱۶-۸] مطرح شد. مشکلات پیش روی روش پوشش، موجب گردید تا نحوه تاثیر عناصر پارازیتیک فراماده بر تطبیق آنتن های کوچک، در [۱۷-۲۳]، مورد بررسی و به عنوان جایگزین روش پوشش مطرح گردد. ارائه طرح اولیه از آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل باند پهن (Near-Filed Resonant Parasitic Antennas)، در [۱۹] منتج به ارائه این آنتن با استفاده از عناصر فشرده در [۲۰] و [۲۱] و عناصر فعال غیر فاستری به عنوان معادل این ساختار پارازیتیک در [۲۲ و ۲۳] شد. در [۲۰ و ۲۱]، آنتن از سه جز اصلی تشکیل شده است: آنتن مونوپول بسیار کوچک؛ ساختار پارازیتیک Z شکل؛ بار سلفی بین دو جزء ساختار پارازیتیک. در این ساختار بخش پارازیتیک و بار سلفی درست مثل تطبیق غیرفاستری عمل می کنند. در تطبیق غیرفاستری، با استفاده از مدار ترانزیستوری به پیاده سازی خازن منفی در جهت جبران خازن بسیار بزرگ آنتن پرداخته و آنتن را در پهنای باند بسیار وسیع تطبیق می نماییم. از جمله مزایای مهم روش پیشنهادی این است که با استفاده از سلف و ساختار پارازیتیک نیاز به پیاده سازی مدار فعال غیرفاستری از بین رفته و عملاً یک آنتن پسیو اما با استفاده از تکنیک حذف خازن در پهنای باند وسیع پیشنهاد شده است. در [۲۴] نویسندگان مقاله به بررسی روند کلی تکنیک مورد بحث پرداخته و برای اولین بار به تفکیک عناصر پارازیتیک الکتریکی و مغناطیسی پرداخته اند. علاوه بر این، در این مقاله نویسندگان بر خلاف مقالات پیشین به ارائه نتایج ساخت اولین

گسترش روز افزون سیستم های مخابراتی و در عین حال افزایش تقاضا برای سیستم های سبک، قابل حمل و کوچک، یکی از مسائل پیش روی مهندسين می باشد. یکی از اجزاء مهم چنین سیستم هایی، آنتن به عنوان آخرین جزء سیستم بی سیم است. آنتن های میکرواستریپی از گذشته یکی از آنتن های مورد توجه در این زمینه بوده اند. خصوصیات چون سطح پایین، هزینه و وزن کم، قابلیت کوچک سازی با استفاده از تغییر ضریب گذردهی و ضخامت بسیار کم در مقایسه با طول موج و همچنین سطح مقطع راداری کوچک از جمله خصوصیات مهمی است که موجب شده تا پژوهشگران این آنتن ها را بیش از دیگر انواع آنتن مورد بررسی قرار دهند.

در زمینه کوچک سازی آنتن های میکرواستریپی مقالات زیادی منتشر شده است. از جمله اقداماتی که در زمینه کوچک سازی آنتن های میکرواستریپ برداشته شده است، استفاده از ضریب گذردهی بزرگ [۳-۱]، اسلات در پچ آنتن [۴] و پین های اتصال کوتاه [۵] در این آنتن ها است. استفاده از این روش ها به دلیل کاهش بهره و افزایش تلفات و پلاریزاسیون متقابل موجب ایجاد محدودیت در استفاده از این روشها شده است. استفاده از فرامواد از مباحث تحقیقاتی در زمینه کوچک سازی آنتن های سیمی و میکرواستریپی است [۱۶-۶]. استفاده از روش پوشش فراماده به



(نمونه ساخته شده)



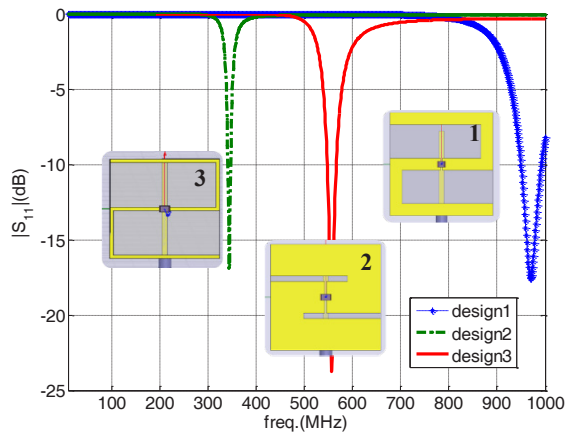
شکل ۱. آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل، نمونه ساخته شده [۲۴]، و مدل شبیه سازی [۱۷]

نمونه از این آنتن پرداخته اند. اگرچه نتایج ساخت و شبیه سازی های ارائه شده در این مقالات افزایش پهنای باند نسبی قابل قبولی را نشان می دهد، اما همچنان مقدار پهنای باند ایجاد شده تا شرایط مناسب برای استفاده در سیستم های عملی فاصله زیادی دارد [۲۷-۲۵].

در مقاله حاضر، ابتدا به منظور ایجاد شرایط یکسان جهت انجام مقایسه با مقالات مورد اشاره، به شبیه سازی مجدد آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل و بررسی اثر پارامترهای طراحی بر امپدانس و پهنای باند فرکانسی آنتن خواهیم پرداخت. تغییر در فاصله، تعداد، پهنای و طول نوارهای افقی (عنصر پارازیتیک الکتریکی) از جمله پارامترهایی هستند که در گام اول بررسی شده اند. در گام بعدی سعی شد تا نمونه آنتن طراحی شده پس از انجام شبیه سازی، مورد پیاده سازی قرار گیرد. اندازه گیری ها نتایج یکسانی با شبیه سازی های انجام شده نشان می دهد. در ادامه استفاده از پورت تطبیق شده در ساختار پارازیتیک به عنوان تکنیکی برای تغییر رفتار آنتن و بهبود عملکرد آنتن پیشنهاد شده است. نتایج شبیه سازی و اندازه گیری نشان می دهند که درصد پهنای باند نسبی آنتن در حالت عادی چیزی در حدود ۵٪ می باشد که با استفاده از تغییر در ساختار جز پارازیتیکی آنتن و استفاده از تکنیک پورت دوم به جای عنصر سلفی موفق به افزایش درصد پهنای باند نسبی آنتن از حدود ۵٪ به نزدیک به ۱۸٪ شده است. در نهایت استفاده از عنصر فشرده خازنی نیز به عنوان عامل کاهش دهنده خازن و به عنوان بهترین شیوه برای افزایش پهنای باند آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل پیشنهاد می شود. به منظور اثبات کارایی روش پیشنهادی، آنتن طراحی شده شبیه سازی و پیاده سازی گردید. اگرچه پیاده سازی و تست نمونه آنتن با استفاده از عناصر فشرده از جمله نکات و مشکلات بسیار مهم این گونه آنتن ها محسوب می شود؛ نتایج تست تطابق بسیار خوبی با شبیه سازی های انجام شده نشان می دهد. از جمله نتایج مهم این مقاله ارائه آنتن بسیار کوچک با پهنای باند بسیار وسیع تر از نمونه های پیشنهادی در تحقیقات قبلی می باشد. نتایج اندازه گیری های انجام شده نشان می دهد که پهنای باند نسبی آنتن با ایجاد تغییرات پیشنهادی به بیش از ۸۱٪ رسیده است.

### آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل

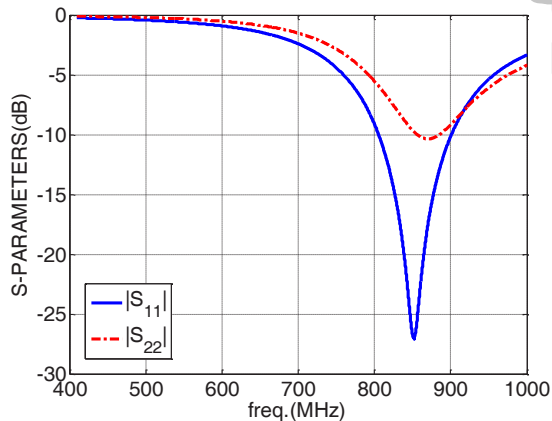
چنانچه در شکل ۱ مشاهده می شود، آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل، شامل آنتنی تک قطبی است که توسط کابل کوکسیال تغذیه می شود. این ساختار در کنار ساختار پارازیتیک الکتریکی به شکل Z، قرار گرفته است که از دو قسمت J شکل و سلفی که بین آن ها است تشکیل شده است.



شکل ۲. ساختار ۱، ساختار ۲، ساختار ۳، نتایج شبیه سازی  $|S_{11}|$  ساختارها



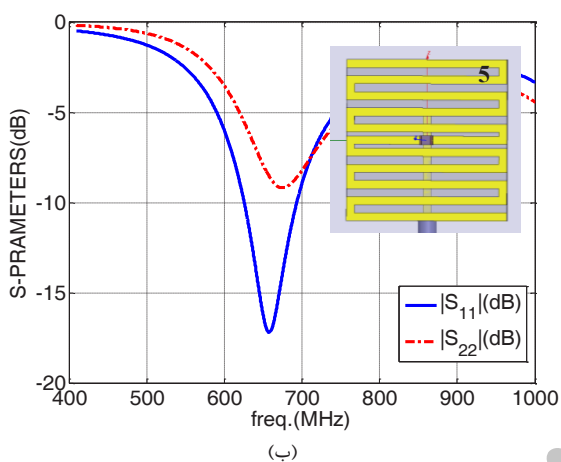
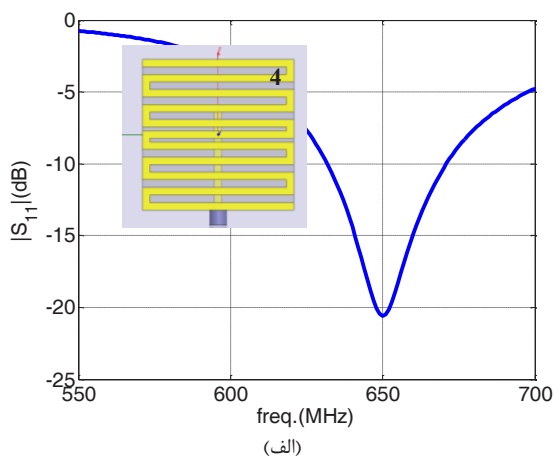
شکل ۳. نحوه اتصال کابل کوکسیال به آنتن به منظور پیاده سازی پورت تطبیق شده روی آن



شکل ۴. نتایج حاصل از شبیه سازی  $|S_{11}|$  و  $|S_{22}|$  آنتن ساختار ۳ در حالت دوپورتی

این رزونانس با پهنای باند 95.5MHz مگاهرتز و فرکانس مرکزی 825.1MHz درصد پهنای باند نسبی 11.2% دارد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که آنتن دو پورتی در این مدل آنتن، ممکن است پاسخ های مناسب تری داشته باشد. بنابراین این نکته را در مورد ساختار زیگزاگی ارائه شده در [۱۶] بررسی می کنیم که آنتن رزنانشی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل بر اساس آن ارائه شده است.

این سلف به همراه خازن آنتن (همانطور که می دانیم آنتن های بسیار کوچک خاصیت خازنی قوی از خود نشان می دهند)، یک مجموعه رزونانسی را تشکیل می دهند. بدیهی است که در این ساختار تغییر سلف سبب تغییر فرکانس رزونانس می شود. باید به این نکته توجه داشت که در صورت تغییر قابل توجه در مقدار سلف و جابجایی فرکانس رزونانس آنتن باید در ساختار آنتن نیز تغییرات متناظری انجام شود تا قسمت حقیقی امپدانس آنتن هم در این فرکانس تطبیق شود. شایان ذکر است که در این آنتن فاصله بین آنتن و ساختار پارازیتیک در مقاومت تشعشی تاثیر گذار است. نحوه این تاثیر گذاری در [۲۴] مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. ارتفاع آنتن مونوپل (که مقدار خازن آنتن را تغییر می دهد) و ساختار پارازیتیک (که مقدار سلف را تغییر می دهد) می توانند فرکانس رزونانس آنتن را جابجا کنند. ادامه، اثر این پارامترها و برخی پارامترهای دیگر در این آنتن را مورد بررسی قرار می دهیم. ابتدا نمونه ای از مقادیر پیشنهادی برای ابعاد این نوع آنتن [۱۷] در جدول ۱ آورده شده است. در این مورد، ساختار با سلف 34nH در فرکانس 1015.19MHz و با سلف 8000nH در 67.4MHz رزونانس می کند [۱۷]. ساختارهای ۱، ۲ و ۳ که ابعاد آنها در جدول ۲ آورده شده اند نمونه هایی از آنتن رزنانشی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل هستند که در طراحی آنها تلاش شده است تاثیر ارتفاع آنتن و پهنای نوار ساختار پارازیتیک بر فرکانس رزونانس نمایش داده شود. در شکل ۲ تصویر آنتن ها و نتیجه شبیه سازی آنها توسط نرم افزار تجاری HFSS دیده می شود. مقایسه پهنای باند و کارایی این سه ساختار، عملکرد مناسب ساختار ۱ را با کارایی 90.82% درصد و پهنای باند 48MHz نشان می دهد. نکته دیگری که در مورد شبیه سازی آنتن مورد نظر است، امپدانس آنتن در حالتی است که به جای سلف پسیور روی ساختار پارازیتیک یک پورت در نظر گرفته می شود. این مسئله در [۲۳] به این منظور پیشنهاد شده کرد. در شبیه سازی توسط نرم افزار HFSS می توان با تعریف Lumped Port به جای Lumped Element و تطبیق آن با امپدانس ۵۰ اهم، پارامترهای S آنتن را به دست آورده و در تحلیل مدار از آن بهره برد. در عمل نیز مشابه شکل ۳ کابل کوکسیال به ساختار Z متصل می شود و پارامترهای S آنتن به عنوان یک عنصر دو پورتی اندازه گیری می شود. از بین ساختارهای شکل ۲، ساختار ۳، در وضعیت دو پورتی، مشخصه  $|S_{11}|$  جالبی دارد که در شکل ۴ به همراه امپدانس این آنتن در حالت دو پورتی نشان داده شده است. شکل ۴ این واقعیت را نشان می دهد که این ساختار در حالت دو پورتی و در حالتی که سلف در روی ساختار نیست نیز رزونانس می کند.



شکل ۵. (الف) ساختار ۴ و  $|S_{11}|$  حاصل از شبیه سازی آنتن، (ب) ساختار ۵،  $|S_{11}|$  حاصل از شبیه سازی آنتن

در شکل ۵ ساختار ۴ و نتیجه شبیه سازی آن و ساختار ۵ که همان ساختار ۴ به همراه پورت روی ساختار پارازیتیکی است، به همراه پاسخ آن دیده می شوند. مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ۵ نشان می دهد، وقتی از پورت تطبیق شده در ساختار استفاده می شود امیدانس به گونه ای تغییر می کند که تطبیق با پهنای باند بسیار بزرگتری اتفاق می افتد. درصد پهنای باند نسبی ساختار ۴، 6% و درصد پهنای باند نسبی ساختار ۵، 10.24% است. بنابراین استفاده از پورت تطبیق شده روی ساختار پارازیتیکی، می تواند اقدام موثری برای غلبه به مشکل پهنای باند و کارایی که مهمترین مشکلات آنتن های کوچک الکتریکی هستند، باشد.

در ادامه بررسی آنتن، تغییراتی در ساختار در نظر گرفته می شود تا تاثیر آن ها بر امیدانس آنتن روشن تر شود. در ساختار ۶ عرض مونوپل در یک سر آن افزایش یافته است. مقدار متناظر با بیشترین پهنای باند برای این ساختار در شکل ۶ گزارش شده است. پارامترهای این ساختار همان مقادیر ارائه شده در مورد ساختار ۱ است با این تفاوت که ارتفاع مونوپل در اینجا 24mm و عرض بالای مونوپل معادل 3mm است (آنتن مونوپل در این حالت تیپر شده است). تصویر ساختار ۶ در شکل (۶-الف) دیده می شود. این آنتن با پهنای باند 27MHz و فرکانس رزونانس 732MHz، درصد پهنای باند نسبی 3.69% دارد که بهبود عملکردی نسبت به ساختار ۱ از خود نشان نمی دهد.

جدول ۱. ابعاد آنتن Z مربوط به شکل (۱). (۱۷)

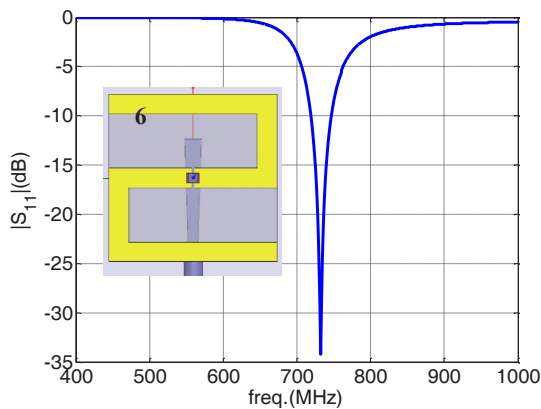
H1	b	a	g	W3	W2	W1	L3	L2	L1	T5	T4	T3	T2	T1
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
۲/۹	۱/۷۲۶	۰/۷۵	۰/۵	۱/۷۲	۲	۲	۰/۳	۲/۲۹	۱۰	۰/۰۶۸	T3/2	۱/۵۲	۱/۷	۰/۷۸۷

جدول ۲. اطلاعات مربوط به ساختارهای شبیه سازی شده. با توجه به نامگذاری شکل (۱).

Eff.	FBW	$f_r$	BW	$Im(Z(f_r))$	$Re(Z(f_r))$	$ S_{11} $	L	W2	W1	H1	ساختار
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(ohm)	(ohm)	(dB)	(nH)	(mm)	(mm)	(mm)	
۹۰/۸۲	۴/۹۴	۹۷۰	۴۸	۹/۳	۴۲	۱۷/۵۶	۱۰	۳/۵	۳/۵	۲۴/۶	۱
۸۲/۸۸	۱/۷۴	۳۴۴	۶	-۱۱	۶۱	۱۶/۹	۱۰۰	۹	۹	۲۴/۶	۲
۸۲	۳/۳۹	۵۵۴	۱۸/۸	-۱۱	۶۱	۲۴	۶۰	۱	۱	۳۰	۳

جدول ۲. خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی آنتن‌ها بر اساس نرم افزار HFSS، شامل درصد پهنای باند نسبی آنتن با سلف و در حالت دو پورته

آنتن دو پورته				به همراه سلف پسیو				
مدل آنتن	پهنای باند (مگاهرتز)	فرکانس رزونانس (مگاهرتز)	درصد پهنای باند نسبی (%)	کارایی (%)	پهنای باند (مگاهرتز)	فرکانس رزونانس (مگاهرتز)	درصد پهنای باند نسبی (%)	کارایی (%)
ساختار ۱	۴۸	۹۷۰	۴/۹۴	۹۰/۸۲	---	---	---	---
ساختار ۲	۶	۳۴۴	۱/۷۴	۸۲/۸۸	---	---	---	---
ساختار ۳	۱۸/۸	۵۵۴	۳/۳۹	۸۲	۸۵/۵	۸۵۲/۱	۱۱/۲	۸۱/۲
ساختار ۵	۳۴	۶۱۵	۵.۵۲	۸۵/۹۷	۶۷/۵	۶۵۸/۷	۱۰/۲۴	۸۹/۶۵
ساختار ۶	۲۷	۷۳۲	۳.۶۹	۷۷/۵	---	---	---	---
ساختار ۷	۲۵/۵	۶۷۵	۳/۷۸	۸۶/۴۹	۱۶۴	۸۹۴/۹	۱۸/۳۲	۱۰۰
ساختار ۸	۱۶	۵۰۸	۳/۱۵	۸۴/۷۸	۱۴۷/۶	۸۲۰/۶	۱۷/۹۸	۱۰۰
ساختار ۹	۱۶	۴۸۸	۳/۲۸	۸۳/۲۴	۱۵۱	۸۴۱/۳	۱۷/۹۴	۱۰۰
ساختار ۱۰	۲۲	۵۹۸	۳/۶۸	۸۳/۵۵	۱۷۰	۹۲۲	۱۸/۴۴	۱۰۰
ساختار ۱۱	۱۹	۵۰۴	۳/۷۷	۸۶/۶۹	۹۷	۷۹۷/۷	۱۲/۱۶	۹۷/۹۷
ساختار ۱۲	۲۰/۵	۵۲۶	۳/۹	۷۷/۳۴	۱۱۷	۷۷۷	۱۵/۰۶	۹۷/۷۵
ساختار ۱۳	۴۱.۵	۹۶۲	۴/۳۲	۸۱/۴۱	---	---	---	---
ساختار ۱۴	۴۲	۹۷۶	۴/۳	۸۳/۲۱	---	---	---	---



شکل ۶. ساختار ۶، (الف) ساختار، (ب)  $|S_{11}|$  حاصل از شبیه‌سازی آنتن

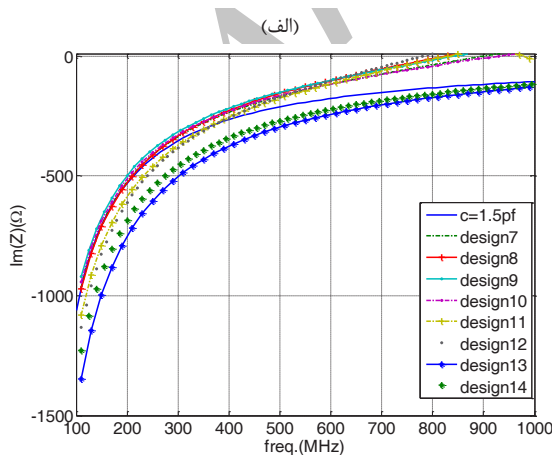
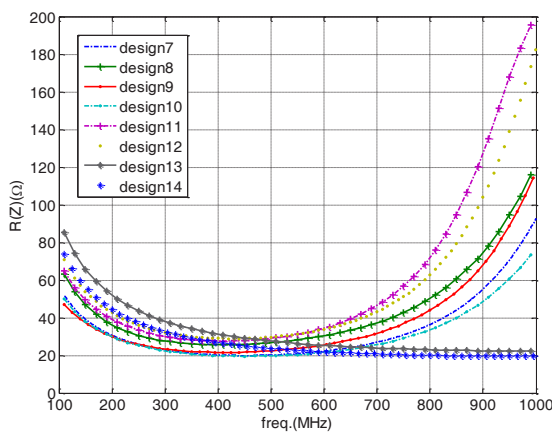
در ساختار ۹ فاصله بین نوارها تصاعدی افزایش می‌یابد. طول مونوپل و مقدار سلف هم مشابه ساختار ۸ است. در ساختار ۱۰ پهنای نوارها افزایش می‌یابند. برای ساختار ۱۰ مقدار سلف 30nH و ارتفاع مونوپل را 22mm باید قرار داد تا بیشترین پهنای باند را از خود نشان دهد. در ساختار ۱۱ تعداد نوارها افزایش و پهنای فاصله آن‌ها کاهش یافته است تا با ارتفاع مونوپل 22mm و سلف 55nH رزونانس خوبی داشته باشد.

شایان ذکر است قرار دادن پورت در بین ساختار پارازیتیکی این ساختار، رزونانس زیر 1GHz را نتیجه نمی‌دهد. بنابراین تغییر کردن مونوپل بر مقاومت تشعشعی و راکتانس آنتن تاثیر مطلوبی نداشته است.

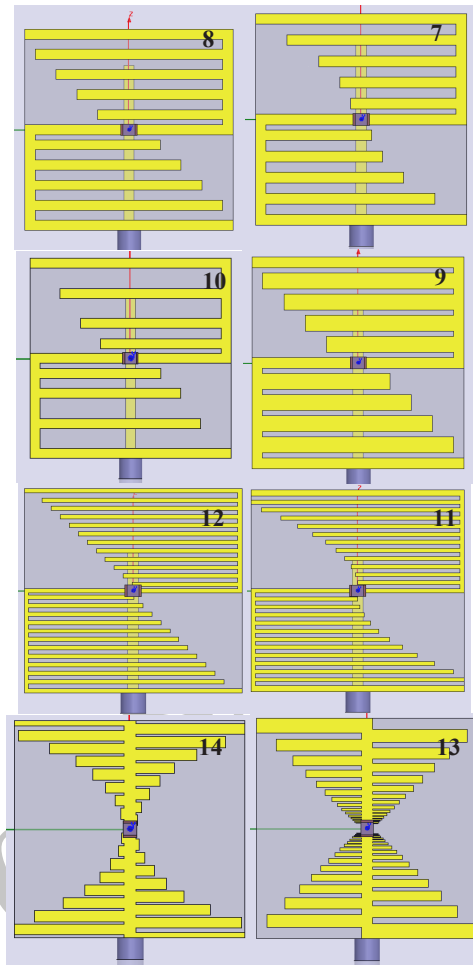
در نوع دیگری از تغییرات، خصوطی به موازات خطوط افقی Z به ساختار اضافه شد. تا تاثیر آن بر روی امپدانس آنتن بررسی شود. تغییر امپدانس آنتن از این رو مورد توجه است که از یک سو پهنای باند و کارایی را می‌تواند تغییر دهد و از سوی دیگر معیار طراحی مدار تطبیق است. بنابراین ساختارهای ۷ تا ۱۴ نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تصویر این ساختارها در شکل ۷ نشان داده شده‌است. ساختار ۷، با خطوط موازی خطوط اصلی عنصر پارازیتیکی الکتریکی Z شکل، مطابق شکل (الف-۷) طراحی شد. در این ساختار ارتفاع مونوپل 22mm و عرض خطوط 1.5mm است. این ساختار با سلف 20nH پهنای باند بیشتری از خود نشان می‌دهد. اساس ساختارهای ۸ تا ۱۳، همان ساختار ۷ است که پارامترهای آن تغییر کرده است. در ساختار ۸ طول نوارها به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. مقدار سلف برای این ساختار 47nH و ارتفاع مونوپل 24.6mm در نظر گرفته شده است.

این شکل علاوه راکتانس آنتن ها، راکتانس یک خازن 1.5pF نیز نشان داده شده است تا معیاری برای مقایسه به دست بدهد. مقایسه نمودارها نشان می دهد، راکتانس آنتن ها در فرکانس های پایین کاملاً خازنی است و در فرکانس های بالاتر مقدار سلفی نیز پیدا می کند که منحنی را به سمت محور فرکانس ها متمایل می کند. نکته قابل توجه دیگر، تغییر مقدار این امپدانس سلفی و خازنی در ساختارهای مختلف است.

بررسی شکل (۸-ب) در فرکانس های زیر 200MHz نشان می دهد کمترین خازن مربوط به ساختارهای لگپریودیکی (ساختارهای ۱۳ و ۱۴) و بیشترین خازن مربوط به ساختار ۹ است. باید توجه داشت، خازن ها بزرگتر (راکتانس های کوچکتر) از نظر تامین شبکه تطبیق مطلوب ترند. شبیه سازی های دو پورتی در این قسمت به منظور بررسی برای استفاده در طراحی مدار تطبیق انجام شده اند. اما می توان با تغییر پارامترهای آن همین ساختارها را کارتر و پهن باندتر کرد تا بتوان از آن ها بدون مدار تطبیق پسیو یا اکتیو استفاده کرد. به طور خلاصه پهنای باند و درصد پهنای باند نسبی ساختارهای مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۸. نتایج شبیه سازی ساختارهای ۷ تا ۱۴ برای امپدانس ساختار دو پورتی، بخش حقیقی (بالا) و بخش موهومی (پایین)

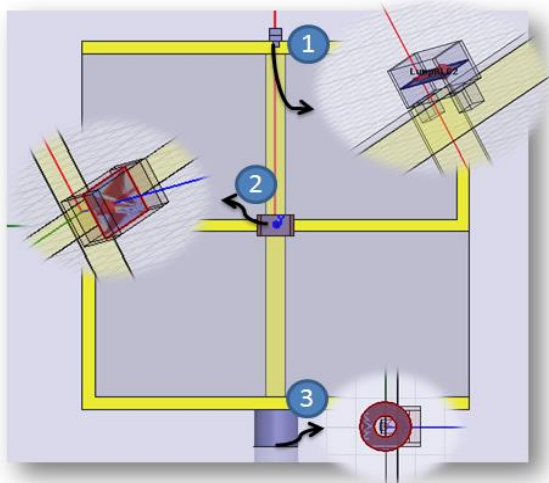


شکل ۷. ساختار ۷، ساختار ۸، ساختار ۹، ساختار ۱۰، ساختار ۱۱، ساختار ۱۲، ساختار ۱۳، ساختار ۱۴

در ساختار ۱۲ مشابه ساختار ۱۱ است، طول نوارها به صورت تصاعدی افزایش یافته است. در این ساختار مقدار سلف 47nH برای رزونانس پهن باند مناسب است. ساختار ۱۳ و ساختار ۱۴ ساختارهای لگپریودیکی هستند. در ساختار ۱۳، فاصله و پهنای نوارها ثابت است ولی در ساختار ۱۴ هم فواصل، هم طول و هم پهنای نوارها با ضریب 0.9 تغییر می کنند. ارتفاع مونوپل در ساختار ۱۳ و ساختار ۱۴، 22mm و مقدار سلف برای هر دو ساختار 20nH در نظر گرفته شده است.

خلاصه ای از نتایج همه شبیه سازی ها در جدول ۳ و امپدانس های دوپورتی ساختارهای ۷ تا ۱۴ نیز در شکل ۸ قابل مشاهده هستند. بررسی شکل (۸-الف)، نشان می دهد مقاومت در ساختار ۱۱ بزرگتر از ساختار ۹ است و این درحالتی است که در شکل (۸-ب) راکتانس نزدیک به هم دارند. بنابراین می توان نتیجه گرفت اضافه کردن خطوط می تواند مقاومت دیده شده از پورت آنتن را افزایش دهد. شکل (۸-ب) که راکتانس آنتن ها را در حالت دوپورتی نشان می دهد نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در

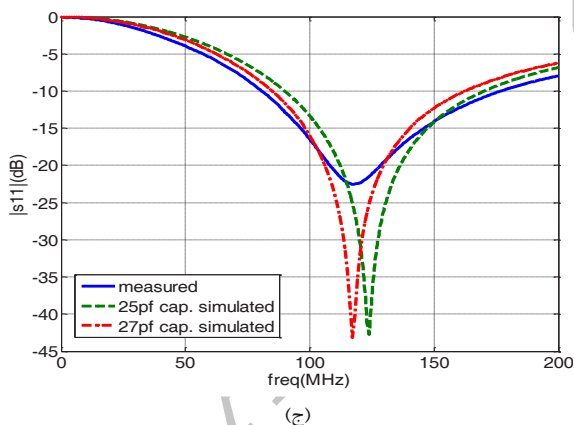
## عنصر فشره خازنی متصل به آنتن تک قطبی و ساختار پارازیتیک Z شکل



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. استفاده از خازن موازی با آنتن، (الف) ساختار آنتن که محل تعریف پورت های تحریک و عناصر فشرده در آن مشخص شده است، (ب) نمونه پیاده سازی شده، (ج) مقایسه نتایج شبیه سازی و ساخت، (د) E-plane، (ه) H-plane

طول حجمی که خازن را مدل می کند 1.4mm و نفوذپذیری الکتریکی دی الکتریک مدل سازی شده 5.2 در نظر گرفته شده است. ضخامت لبه های فلزی نیز 0.1mm در نظر گرفته شده است. صفحه های در وسط این حجم در نظر گرفته شده و عنصر فشرده خازنی با مقدار 25pF بر روی آن تعریف می شود.

نتایج شبیه سازی در بخش قبل نشان داد (جدول ۳) که اولاً ایجاد تغییر در ساختار رزوناتور و عنصر پارازیتیک اگرچه باعث ایجاد تغییر در درصد پهنای باند نسبی آنتن می گردد اما تغییرات ایجاد شده چشمگیر نمی باشد. نکته دوم اینکه با ایجاد پورت دوم در آنتن (به جای عنصر سلفی در بخش پارازیتیک Z شکل)، می توان به پهنای باند بالاتری دست پیدا نمود. در این بخش می خواهیم تا با استفاده از این خاصیت به بررسی چگونگی تغییرات ایجاد شده در درصد پهنای باند نسبی آنتن بپردازیم. برای این منظور ابتدا به بیان مقدمه ای در چگونگی این مهم می پردازیم.

در جدول ۳ مشاهده می شود که المانهای ضخیم در افزایش درصد پهنای باند نسبی آنتن موثر بوده اند و بعکس استفاده از تعداد بیشتری خط با ضخامت کم موجب کاهش پهنای باند آنتن شده است. (این نکته مهم نمی بایست فراموش شود که در حالت عادی و تک پورته دقیقاً عکس این رفتار مشاهده می شود و علت استفاده از سلف نیز به همین منظور و در جهت افزایش پهنای باند نسبی بوده است). بنابراین در حالت دوپورته می بایست به هر روش ممکن مقادیر خازن سری را افزایش دهیم تا با مقدار بزرگ خازنی آنتن قابل مقایسه شده و بتواند موجب کاهش آن گردد. (به همان ترتیبی که در شکل ۸ و جدول ۳ ارائه شد). یکی از این روش ها استفاده از عناصر فشرده است. ایده استفاده از عنصر فشرده خازنی مبتنی بر اصل کاهش امپدانس خازنی دو خازن سری بنا نهاده شده است.

راکتانس آنتن مونوپل به شدت خازنی است. بنابراین با قرار دادن عنصر فشرده خازنی بین آنتن و ساختار پارازیتیکی، می توان خازن مونوپل را کاهش داده و در نتیجه فرکانس رزونانس آنتن را کاهش داد. این ایده توسط نرم افزار HFSS، پیاده سازی شده است. برای این منظور خازنی به ساختار آنتن اضافه شد تا اثر آن بر عملکرد آنتن بررسی شود. شکل (۹-الف) ساختار آنتن را نشان می دهد. برای این منظور، عنصر فشرده خازنی، مشابه شکل (۹-الف)، به گونه ای روی آنتن قرار می گیرد که یک لبه آن به مونوپل و لبه دیگر آن به نوار Z شکل متصل شود. به این ترتیب خازن اضافه شده با خازن مونوپل سری شده و مجموعاً با سلف ساختار پارازیتیک Z شکل رزونانس می کنند. برای شبیه سازی این ایده ساختار ۳ انتخاب شد. خازن روی آنتن هم مشابه سلفی که روی ساختار پارازیتیک قرار می گرفت مدل می شود. برای این منظور، عرض و ارتفاع عنصر فشرده 1mm در نظر گرفته شده است.

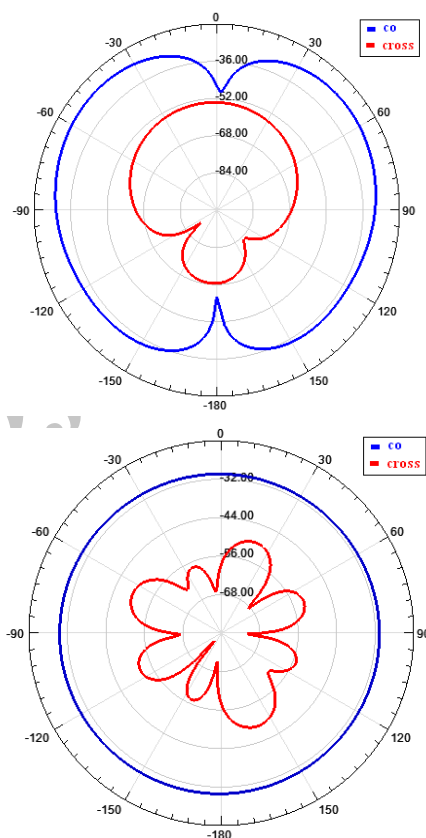
## نتیجه گیری

در گام نخست نمونه ای از آنتن کوچک سازی شده به روش پارازیتیک طراحی شده و پس از انجام شبیه سازی، مورد پیاده سازی قرار گرفت. اندازه گیری ها نتایج یکسانی با شبیه سازی های انجام شده نشان داد. در ادامه استفاده از پورت تطبیق شده در ساختار پارازیتیک به عنوان تکنیکی برای تغییر رفتار آنتن و بهبود عملکرد آنتن معرفی گردید و در نهایت استفاده از عنصر فشرده خازنی نیز به عنوان عامل کاهش دهنده خازن و کاهش فرکانس رزونانس آنتن، به عنوان بهترین شیوه برای افزایش پهنای باند آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل، پیشنهاد شد. در این راستا، آنتن به روش پیشنهادی مورد طراحی، شبیه سازی و پیاده سازی قرار گرفت. اگرچه پیاده سازی و تست نمونه آنتن با استفاده از عناصر فشرده از جمله مشکلات بسیار مهم این گونه آنتن ها محسوب می شود؛ نتایج تست تطابق بسیار خوبی با شبیه سازی های انجام شده نشان می دهد. نتایج شبیه سازی و اندازه گیری نشان می دهند که درصد پهنای باند نسبی آنتن در حالت عادی چیزی در حدود ۵٪ می باشد که با استفاده از تغییر در ساختار جز پارازیتیکی آنتن و استفاده از تکنیک پورت دوم به جای عنصر سلفی موفق به افزایش درصد پهنای باند نسبی آنتن از حدود ۵٪ به نزدیک ۱۸٪ خواهیم شد. بعلاوه اینکه استفاده از عنصر فشرده خازنی با طول ۳۰ میلی متر در آنتن رزنانسی میدان نزدیک پارازیتیک Z شکل دو پورتی، موجب رزونانس آنتن در فرکانس ۱۱۸ مگاهرتز و با پهنای باند ۹۶ مگاهرتز می شود که پهنای باند نسبی آنتن در این حالت معادل با ۸۱/۳۵٪ است. این نتایج سه نکته مهم را نشان می دهند. اول اینکه قرار دادن پورت تطبیق شده روی ساختار پارازیتیکی امیدانس ساختار را به گونه ای تغییر می دهد که سبب بهبود قابل توجه در پهنای باند و کارایی بعضی از ساختارها می شود. از سوی دیگر تغییر ساختار قسمت پارازیتیک می تواند امیدانس ساختار دو پورتی را به گونه ای تغییر دهد که طراحی شبکه تطبیق را تسهیل بخشد. در نهایت نکته قابل توجه این است که استفاده از عنصر فشرده خازنی روی آنتن می تواند سبب تغییر امیدانس آنتن و در نتیجه فرکانس رزونانس آنتن شود و به شدت آن را کاهش دهد.

## مراجع

- [1] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*. New York: IEEE Press, 1995.
- [2] J. R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*. London, U.K.: Peter Peregrinus, 1989.

شکل (۹-ب) نتایج شبیه سازی و اندازه گیری نمونه پیاده سازی شده آنتن را نشان می دهد. همانطور که در شکل نیز مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی پس از اندازه گیری تایید می گردد. در شکل (۹-ج) مشاهده می شود که شبیه سازی آنتن دو پورتی با خازن 25pF در فرکانس 125MHz، پهنای باند 80MHz که معادل 64.5% پهنای باند نسبی است را نشان می دهد. اندازه گیری انجام شده نشان می دهد که آنتن در فرکانس 118MHz رزونانس می نماید و پهنای باند آن در حدود 96MHz می باشد که این مقادیر معادل با درصد پهنای باند نسبی 81.35% است. کارایی آنتن نیز در فرکانس تشدید نزدیک به 40% است.



شکل ۱۰ پترن تشعشی آنتن، (بالا) E-plane، (پایین) H-plane

پترن تشعشی E plane و H plane آنتن در شکل ۱۰ نشان داده شده اند که تشابه الگوی انتشاری آنتن را با آنتن مونوپل به خوبی نشان می دهد. بهره پایین آنتن، استفاده از آن را به عنوان آنتن گیرنده محدود می کند. باید توجه داشت که بهره بیشینه بر اساس حد Chu برای آنتن در این بازه فرکانسی 11dB تا 14dB- است. مشاهده می شود که افزایش پهنای باند، کاهش بهره را در پی داشته است که مهمترین مشکل این آنتن است. البته می بایست خاطر نشان کرد که بهره و کارایی یاد شده به همراه پهنای باند آنتن، در مقایسه با دیگر گزارشات ارائه شده در مراجع قابل ملاحظه می باشد.



- [16] A. Erentok and R. W. Ziolkowski, "metamaterial-inspired efficient electrically-small antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 3, pp. 691–707, Mar. 2008.
- [17] R. W. Ziolkowski, "An efficient, electrically small antenna designed for VHF and UHF applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 217–220, 2008.
- [18] R. W. Ziolkowski, "Efficient Electrically Small Antenna Facilitated by a Near-Field Resonant Parasitic," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 581–584, 2008.
- [19] R. W. Ziolkowski, C.-C. Lin, J. A. Nielsen, M. H. Tanielian, and C. L. Holloway, "Design and experimental verification of a 3D magnetic EZ antenna at 300 MHz," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 989–993, 2009.
- [20] R. W. Ziolkowski and P. Jin, "Introduction of internal matching circuit to increase the bandwidth of a metamaterial-inspired efficient electrically- small antenna," *IEEE Int. Symp. Antennas Propag.*, San Diego, CA, Jul. 2008.
- [21] P. Jin and R. W. Ziolkowski, "Low-profile, electrically small, efficient nearfield resonant parasitic antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, pp. 2548–2563, 2009.
- [22] R. W. Ziolkowski, P. Jin, J. A. Nielsen, M. H. Tanielian, and C. L. Holloway, "Design and experimental verification of Z antennas at UHF frequencies," *Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1329–1333, 2009.
- [23] P. Jin and R. W. Ziolkowski, "Broadband, Efficient, Electrically Small Metamaterial-Inspired Antennas Facilitated by Active Near-Field Resonant Parasitic Elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, No. 2, pp. 318–327, 2010.
- [24] R. W. Ziolkowski, P. Jin and C.-C. Lin, "Metamaterial-Inspired Engineering of Antennas," *IEEE Proceeding*, Oct. 2011.
- [25] J. Long, D. Sievenpiper, "Stable Multiple Non-Foster Circuits Loaded Waveguide for Broadband Non-Dispersive Fast-Wave Propagation", *Elect. Lett.*, vol. 50, no. 23, pp. 1708-1710, 2014.
- [26] M. Jacob, J. Long, D. Sievenpiper, "Non-Foster Loaded Parasitic Array for Broadband Steerable Patterns", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 12, pp. 6081 - 6090, 2014.
- [27] J. Long and D. F. Sievenpiper, "Low-Profile and Low-Dispersion Artificial Impedance Surface in the UHF Band Based on Non-Foster Circuit Loading," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 7, pp. 3003-3010, July 2016
- [3] S. Maci, G. Biffi Gentili, P. Piazzesi, and C. Salvador, "Dual-band slot-loaded patch antenna," *Proc. Inst. Elect. Eng. Microw. Antennas Propag.*, vol. 142, no. 3, pp. 225–232, Jun. 1995.
- [4] R. Porath, "Theory of miniaturized shorting-post microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 1, pp. 41–47, Jan. 2000.
- [5] S.-S. Zhong and J.-H. Cui, "Compact circularly polarized microstrip antenna with magnetic substrate," *Proc. IEEE AP-S Int. Symp.*, Jun. 2002, vol. 1, pp. 793–796.
- [6] D. Psychoudakis, Y. H. Koh, J. L. Volakis, and J. H. Halloran, "Design method for aperture-coupled microstrip patch antennas on textured dielectric substrates," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 10, pp. 2763–2766, Oct. 2004.
- [7] C. Reilly, W. J. Chappell, J. Halloran, K. Sarabandi, J. Volakis, N. Kikuchi, and L. P. B. Katchi, "New fabrication technology for ceramic metamaterials," *Proc. IEEE AP-S Int. Symp.*, Jun. 16–21, 2002, vol. 2, pp. 376–379.
- [8] R. W. Ziolkowski and A. D. Kipple, "Reciprocity between the effects of resonant scattering and enhanced radiated power by electrically small antennas in the presence of nested metamaterial shells," *Phys. Rev. E.*, vol. 72, Sep. 2005.
- [9] A. Erentok, P. Luljak, and R. W. Ziolkowski, "Antenna performance near a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, pp. 160–172, Jan. 2005.
- [10] R. W. Ziolkowski and A. Erentok, "Metamaterial-based efficient electrically small antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, pp. 2113–2130, Jul. 2006.
- [11] R. W. Ziolkowski and A. Erentok, "At and beyond the chu limit: Passive and active broad bandwidth metamaterial-based efficient electrically small antennas," *IET Microw., Antennas Propag.*, vol. 1, pp. 116–128, 2007.
- [12] A. Erentok and R. W. Ziolkowski, "A hybrid optimization method to analyze metamaterial-based electrically small antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, pp. 731–741, Mar. 2007.
- [13] A. Erentok, D. Lee, and R. W. Ziolkowski, "Numerical analysis of a printed dipole antenna integrated with a 3D AMC block," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 134–136, 2007.
- [14] A. Erentok and R. W. Ziolkowski, "An efficient metamaterial-inspired electrically-small antenna," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 49, no. 6, pp. 1287–1290, 2007.
- [15] A. Erentok and R. W. Ziolkowski, "Two-dimensional efficient metamaterial-inspired electrically-small antenna," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 49, no. 7, pp. 1669–1673, 2007.