

ساختار تار عنکبوتی به عنوان سطوح امپدانس بالا

محمد جهاندار لاشکی^۱، پژمان رضائی^{۱*} و محمد مهدی فخاریان^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: تار عنکبوتی، جابجایی فرکانسی، سطوح امپدانس بالا، هادی مغناطیسی مصنوعی.</p>	<p>در این مقاله با توجه به اهمیت ساختار سطوح امپدانس بالا (HIS) به عنوان هادی مغناطیسی مصنوعی (AMC)، ساختارهای جدیدی به عنوان سلول واحد با الهام از طبیعت و تارهای عنکبوت ارائه شده است. برای مقایسه عملکرد، ساختار متداول قارچی شکل با و بدون خط اتصال به زمین نیز (با ابعاد یکسان) طراحی و نتایج آن با ساختارهای پیشنهادی، مقایسه شده است. در ابتدا چندین ساختار رشته‌ای با قابلیت جابجایی فرکانس فاز صفر طراحی شده است. اهداف طراحی، کاهش فرکانس فاز صفر با داشتن پهنای باند قابل قبول و نیز جابجایی فرکانسی فاز صفر با تغییر ضخامت تارها است. طراحی در محدوده‌ی فرکانسی ۲ تا ۳ گیگاهرتز و با نرم‌افزار HFSS صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار جدید معرفی شده تار عنکبوتی هشت ضلعی در فرکانس‌های پایین با پهنای باند ۵/۶۲ درصد و داشتن دو پارامتر طراحی برای جابجایی فرکانسی به عنوان ساختاری کارآمد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.</p>

۱- مقدمه

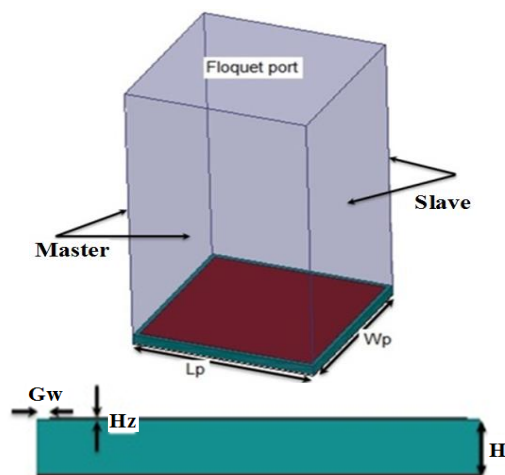
زمانی که یک موج صفحه‌ای به یک سطح امپدانس بالا می‌تابد، فاز انعکاسی بطور پیوسته از $+180^\circ$ تا -180° درجه با افزایش فرکانس تغییر می‌کند. زمانی که فاز انعکاس برابر صفر درجه است، متناظر با فرکانس تشدید ساختار می‌باشد. در این حالت سطح مانند یک رسانای مغناطیسی کامل عمل می‌کند. رفتار سطوح امپدانس بالا در حالت تشدید مانند آن است که از ترکیب سلف و خازن تشکیل شده باشند [۱۵].

در مراجع بسیاری از سطوح امپدانس بالا براساس پیکربندی قارچی شکل (sevenpiper mushroom) ساده طراحی شده است [۹ و ۱۰]. مشکل عملی طرح‌های اولیه ساختارهای فرامواد، انطباق اندازه فیزیکی آنها از تناوب یک شبکه از این ساختارها در نیم طول موج در باند قطع

در دو دهه اخیر تلاش‌هایی در زمینه معرفی موادی مصنوعی موسوم به فرامواد با ویژگی‌های الکترومغناطیسی جدید انجام شده است. برای مثال فرامادهای میکروویوی همچون محیط‌های چپگرد [۱-۵] و باند ممنوعه الکترومغناطیسی [۶-۱۳] معرفی شده است.

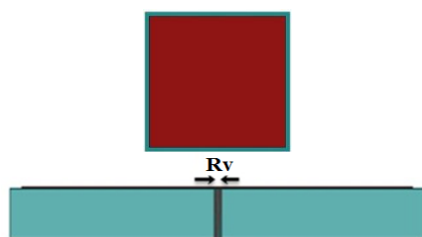
سطوح امپدانس بالا به عنوان هادی مصنوعی مغناطیسی در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. این سطوح زمانی که امواج صفحه‌ای به آنها بتابند دارای ضریب انعکاس $\Gamma \approx +1$ می‌باشد، برخلاف هادی الکتریکی معمول که دارای $\Gamma \approx -1$ هستند [۱۴].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: prezaei@semnan.ac.ir
۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان



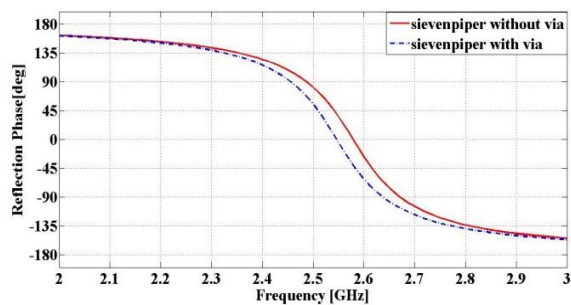
شکل (۱): دو نما از ساختار قارچی شکل در حالت بدون via

شکل ۲ ساختار قارچی شکل با خط اتصال به زمین را نشان می‌دهد. شعاع این خط $Rv=0.25\text{mm}$ می‌باشد. در ادامه مقاله به غیر از موارد ذکر شده، تمامی ساختارهای طراحی شده با خط اتصال به زمین و با شعاع مذکور می‌باشند.



شکل (۲): دو نما از ساختار قارچی شکل در حالت با via

در شکل ۳ انعکاس فاز دو ساختار قارچی شکل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزودن خط اتصال به زمین فاز صفر به سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابجا می‌شود. البته این مقدار جابجایی فرکانسی فاز صفر اندک می‌باشد.



شکل (۳): انعکاس فاز ساختار قارچی شکل با و بدون via

بود. بنابراین بسیاری از ساختارهای کوچک و فشرده فرامواد برای حل این مشکل به فرمهایی نظیر قارچی شکل شکافدار [۱۷]، یکپارچه UC-PBG [۸]، چنگالی شکل [۱۸] و مارپیچی شکل [۱۹] ارائه شده است.

در این مقاله ابتدا ساختار سلول واحد متداول قارچی شکل طراحی شده که با استفاده از شرایط مرزی نرم‌افزار تا بینهایت تکرار شده است. سپس در بخش سوم انواع ساختارهای پیشنهادی بر اساس سلول واحد تار عنکبوتی معرفی شده است. همچنین ساختار تار عنکبوتی بدون خط اتصال به زمین (Via) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز نتایج بدست آمده از ساختارهای شبکه‌ای مختلف با هم مقایسه شده است. در انتها نیز نتایج بدست آمده از ساختارهای شبکه‌ای مختلف با هم مقایسه شده است.

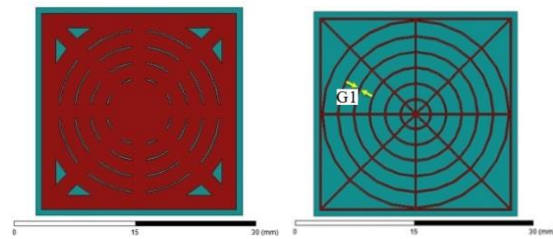
۲- شبیه‌سازی ساختار قارچی

ابتدا دو ساختار قارچی شکل بدون خط اتصال به زمین (مطابق شکل ۱) و با خط اتصال به زمین (مطابق شکل ۲) طراحی شده‌اند. در این مقاله برای مقایسه بهتر نتایج، تمامی ساختارها از لحاظ ابعاد و جنس زیرلایه و همچنین ضخامت پیچ‌ها و زمین یکسان در نظر گرفته شده است. برای ابعاد زیرلایه $Wp=Lp=26\text{mm}$ و ارتفاع آن $H=1.58\text{mm}$ و جنس آن FR4 و دارای $\epsilon_r=4/4$ می‌باشند. زمین و پیچ از جنس مس بوده و دارای ضخامت $H_z=0.5\text{mm}$ می‌باشند. همچنین فاصله‌های بین لبه زیرلایه و لبه پیچ از طرفین $Gw=Gl=0.75\text{mm}$ می‌باشند. این ساختارها متناوب و نامحدود می‌باشند. یک سلول واحد طراحی شده، با در نظر گرفتن شرایط مرزی شکل ۱، تا بی‌نهایت تکرار می‌شود. ساختار شکل ۱ ساختار قارچی شکل بدون خط اتصال به زمین را نشان می‌دهد.

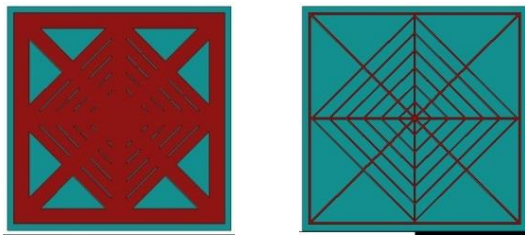
۳- معرفی ساختارهای تار عنکبوتی

۳-۱- ساختار دایروی

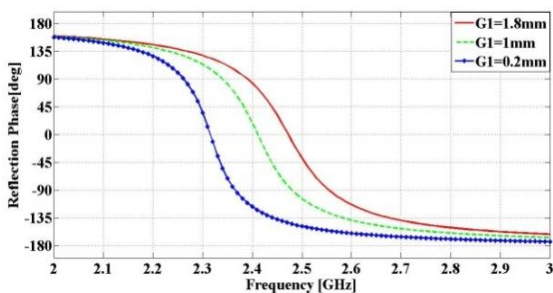
بررسی ساختار تار عنکبوتی از ساختارهای دایروی ساده مطابق شکل ۴ شروع می‌شود. تنها پارامتر طراحی این ساختار ضخامت تار می‌باشد. بنابراین در تمامی ساختارها، ابعاد کل ساختار و فواصل بین تارها یکسان در نظر گرفته شده است. لذا در ادامه از ذکر مجدد ابعاد خودداری شده است.



شکل (۴): ساختار دایروی با حداقل و حداکثر ضخامت

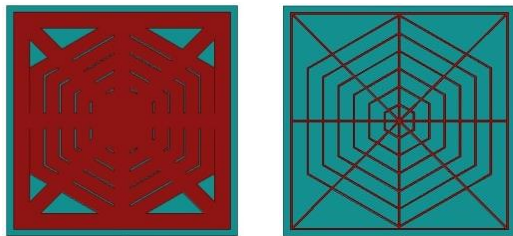


شکل (۶): ساختار تار عنکبوتی لوزی شکل با حداقل و حداکثر ضخامت تار

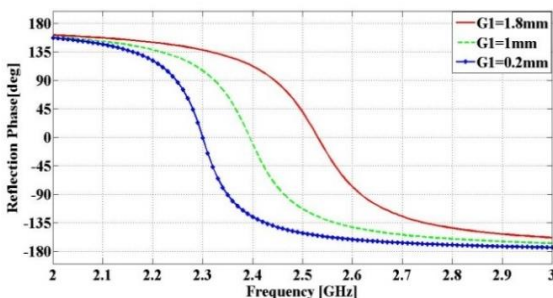


شکل (۷): نمودار انعکاس فاز ساختار عنکبوتی لوزی در سه اندازه مختلف از ضخامت تارها ($G1$)

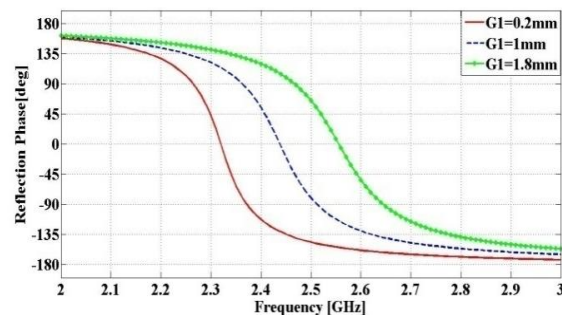
طرح سوم ساختار تار عنکبوتی شش ضلعی منظم مطابق شکل ۸ می‌باشد. نتایج شکل ۹ بیانگر افزایش محدوده جابجایی به بازه $2/30$ تا $2/53$ گیگاهرتز می‌باشد.



شکل (۸): ساختار تار عنکبوتی شش ضلعی با حداقل و حداکثر ضخامت تار



شکل (۹): نمودار انعکاس فاز ساختار عنکبوتی شش ضلعی در سه اندازه مختلف از ضخامت تارها ($G1$)



شکل (۵): نمودار انعکاس فاز در سه اندازه مختلف $G1$

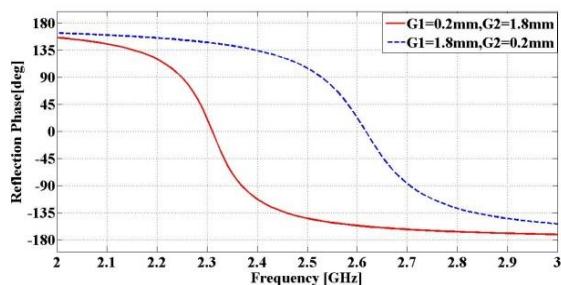
در این ساختار مطابق شکل ۵ جابجایی فرکانس فاز صفر متناسب با اندازه ضخامت تار می‌باشد. به عبارتی با انتخاب ضخامت مناسب می‌توان فرکانس فاز صفر را در فرکانس مورد نظر در بازه $2/32$ تا $2/56$ گیگاهرتز تنظیم نمود.

۳-۲- ساختارهای چندضلعی منظم

طرح دوم ساختار ابتدایی تار عنکبوتی چند ضلعی را به صورت لوزی شکل مطابق شکل ۶ نشان می‌دهد. نمودار فاز شکل ۷ بیانگر کاهش بازه تغییر فرکانسی به $2/31$ تا $2/47$ گیگاهرتز با تغییر ضخامت تار می‌باشد.

مطابق شکل ۱۲ این دو پارامتر طراحی ساختار $G1$ (ضخامت تارهای داخلی) و نیز $G2$ (ضخامت تارهای نگه دارنده بیرونی) می باشند.

در این ساختار، همانطور که در منحنی فاز شکل ۱۳ مشاهده می شود، نمودار فاز برای دو اندازه از دو پارامتر طراحی ترسیم شده است.



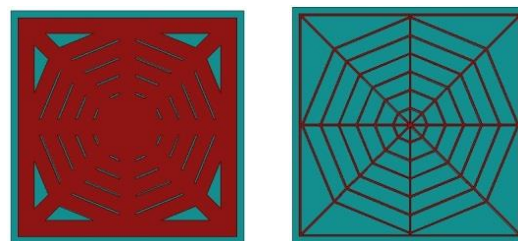
شکل (۱۳): نمودار انعکاس فاز ساختار عنکبوتی هشت ضلعی با دو پارامتر طراحی برای جابجایی فرکانس فاز صفر با نرم افزار HFSS

در حالت اول و با در نظر گرفتن $G1=0.2mm$ و $G2=1.8mm$ فرکانس فاز صفر در فرکانس 2.31 گیگاهرتز و برای $G1=1.8mm$ و $G2=0.2mm$ فرکانس فاز صفر در فرکانس 2.57 گیگاهرتز قرار می گیرد. این ساختار با حدود 12.57% جابجایی فرکانسی می تواند بسیار کارآمد و سودمند باشد.

در شکل ۱۴ نمودار انعکاس فاز برای ساختار پنجم بدست آمده از نرم افزار CST Microwave Studio بر مبنای روش عددی متفاوت، نیز برای کسب اطمینان از نتایج بدست آمده از HFSS قرار داده شده است.

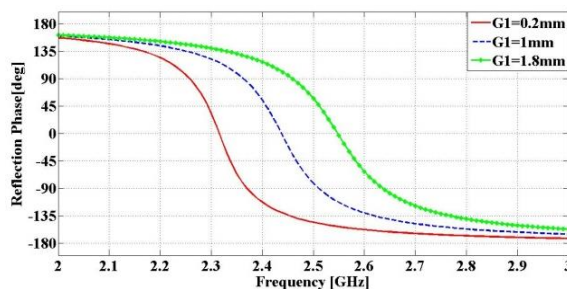
در این ساختار پهنای باند در فرکانس های پایین 5.62% می باشد که نسبت به ساختارهای قبل افزایش یافته است. افزایش پهنای باند یکی از مزایای این نوع ساختار می باشد.

در ادامه بررسی شبکه های مختلف و به منظور نزدیک شدن به فرم طبیعی آن، طرح چهارم به صورت نشان داده شده در شکل ۱۰، ساختار تار عنکبوتی هشت ضلعی بررسی شده است.



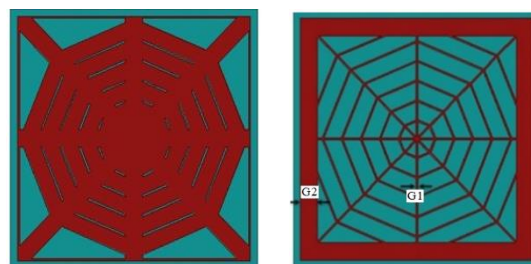
شکل (۱۰): ساختار تار عنکبوتی هشت ضلعی با حداقل و حداکثر ضخامت تار

نتایج شکل ۱۱ نشان دهنده افزایش پهنای باند در فرکانس 2.55 به میزان 7.05% می باشد. در این ساختار نیز مشابه ساختار شکل ۴ جابجایی فرکانس فاز صفر متناسب با اندازه ضخامت تار می باشد.



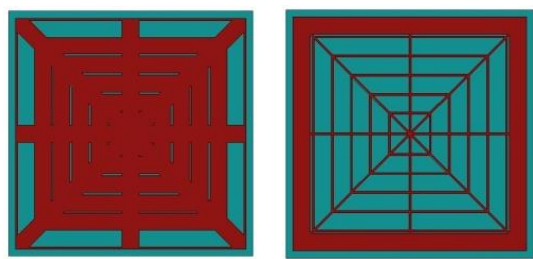
شکل (۱۱): نمودار انعکاس فاز ساختار عنکبوتی هشت ضلعی در سه اندازه مختلف از ضخامت تارها ($G1$)

طرح پنجم ساختار تار عنکبوتی هشت ضلعی منتظم، با دو پارامتر طراحی برای جابجایی فرکانس فاز صفر می باشد.

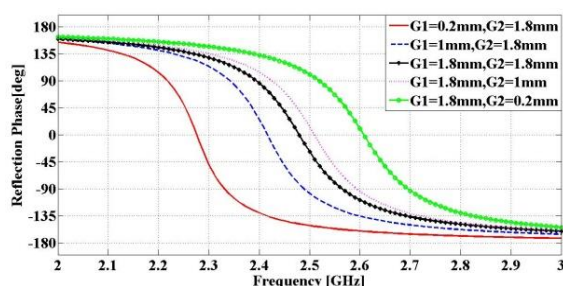


شکل (۱۲): ساختار تار عنکبوتی هشت ضلعی با دو پارامتر طراحی برای جابجایی فرکانس فاز صفر

در این ساختار پهنای باند در فرکانس‌های پایین ۵/۲۸٪ می‌باشد که نسبت به ساختار قبل افزایش یافته است.



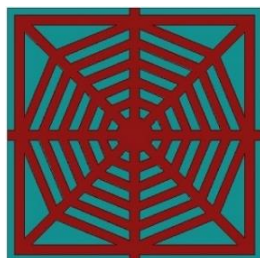
شکل (۱۷): ساختارهای شبکه‌ای مربعی با دو پارامتر طراحی



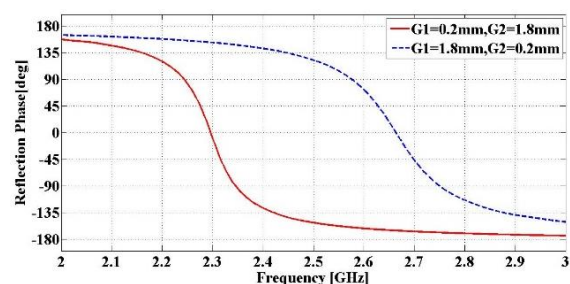
شکل (۱۸): نمودار انعکاس فاز ساختار شبکه‌ای مربعی با دو پارامتر طراحی

۳-۴- ساختار تار عنکبوتی بدون Via

در ادامه ساختار تار عنکبوتی بدون خط اتصال به زمین بررسی شده است. حذف این اتصال کاهش زمان شبیه سازی در طراحی و نیز کاهش هزینه ساخت را در پی دارد. بدین ترتیب، در این ساختار برای ایجاد خاصیت سلفی در سلول‌های واحد سطوح امپدانس بالا، از پیچ‌های اتصال از کنار سلول‌های واحد بهره گرفته شده است.



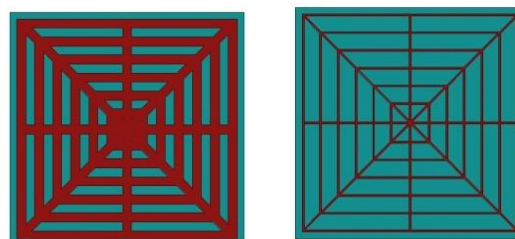
شکل (۱۹): ساختار تار عنکبوتی بدون Via و با اتصال از طرفین



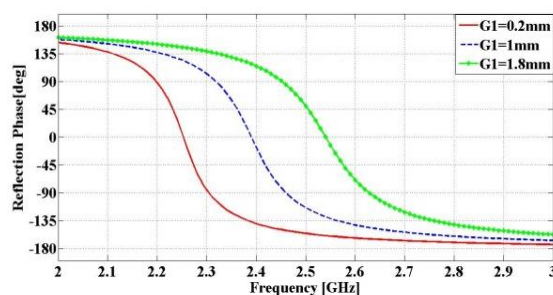
شکل (۱۴): نمودار انعکاس فاز ساختار عنکبوتی هشت ضلعی با دو پارامتر تنظیم برای جابجایی فرکانس فاز صفر با نرم افزار CST

۳-۳- بررسی ساختارهای شبکه‌ای مربعی

ساختار شبکه‌ای مربعی با دو ضخامت تار متفاوت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نمودار فاز آن نیز در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. در این ساختار فرکانس فاز صفر تا ۲/۲۵ گیگاهرتز کاهش یافته است.



شکل (۱۵): ساختارهای شبکه‌ای مربعی با یک پارامتر طراحی



شکل (۱۶): نمودار انعکاس فاز ساختار شبکه‌ای مربعی در سه اندازه مختلف از ضخامت تارها (G_1)

ساختار شبکه‌ای مربعی دوم، با دو پارامتر طراحی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این ساختار با تغییر G_1 و G_2 محدوده فرکانسی فاز صفر ۱۵/۶۷٪ جابجا می‌شود.

۷/۰۸	۶/۲۷	۴/۸۸	۱۲/۱۰	تار مربعی
۶/۵۳	۶/۲۲	۵/۲۸	۱۵/۶۷	تار مربعی ۲ پارامتری
۲/۱۸	---	---	۱/۳۸	تار ۸ ضلعی بدون Via

ستون مقایسه نتایج بدست آمده از جدول ۱ نشان می‌دهد که ساختارهای ۱۴ و ۱۸ به ترتیب با ۱۲/۵۷٪ و ۱۵/۶۷٪ بهترین قابلیت جابجایی فرکانسی را نسبت به ساختارهای دیگر دارند. همچنین ساختار شکل ۱۴ با ۵/۶۲٪ بهترین پهنای باند را در فرکانسهای پایین دارد.

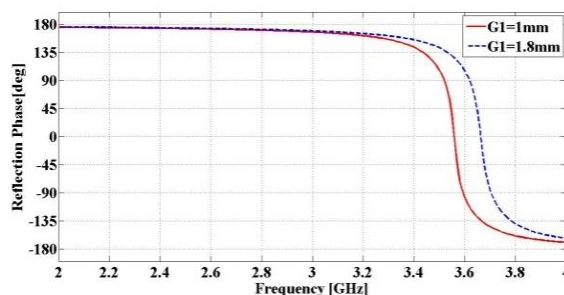
با توجه به نتایج بدست آمده در محاسبات و از روی نمودارهای ارائه شده ساختار شکل ۱۶ فرکانس فاز صفر را تا ۲/۲۵ گیگاهرتز با حفظ پهنای باند مناسب کاهش می‌دهد. ساختار شکل ۱۴ فرکانس فاز صفر را تا ۲/۶۲ گیگاهرتز با حفظ پهنای باند مناسب افزایش می‌دهد.

با توجه به عدم امکان جابجایی فرکانسی در ساختارهای سنتی همچون قارچی شکل، امکان تعریف پهنای باند و فرکانس بالا و پایین وجود ندارد. لذا ستونهای مربوطه در سطر اول و دوم خالی مانده است. در سطر آخر نیز ساختار تار عنکبوتی بدون Via در فرکانسهای پایین و میانی پاسخی ندارد چراکه فرکانس فاز صفر با تغییر ضخامت تارها در این محدوده قرار نمی‌گیرد.

۵- نتیجه

در این مقاله سطوح الکترومغناطیسی امپدانس بالا بر پایه هندسه تار عنکبوت پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده است. این ساختار دارای قابلیت حفظ پهنای باند در فرکانسهای پایین است. همچنین در این ساختارها پارامتر ضخامت تار مطرح شده است که با تغییر آن می‌توان فرکانس فاز صفر را در محدوده قابل قبولی جابجا کرد. به عبارتی جابجایی فرکانس مرکزی باند ممنوعه، مزیت اصلی ساختار پیشنهادی می‌باشد. در بین ساختارهای معرفی شده، ساختار تار عنکبوتی هشت ضلعی با باند ۵/۵۶٪ دارای وسیع‌ترین پهنای باند در

نتایج شکل ۲۰ بیانگر آنست که در این ساختار فرکانس فاز صفر به حدود ۳/۶ گیگاهرتز افزایش یافته و پهنای باند آن نیز نامناسب می‌باشد. به عبارتی این ساختار تنها به منظور ایجاد مقایسه‌ای با ساختارهای طراحی شده قبلی آورده شده است.



شکل (۲۰): نمودار انعکاس فاز ساختار تار عنکبوتی بدون Via در دو اندازه متفاوت از تارها

۴- بحث و مقایسه نتایج

در این بخش جدولی برای مقایسه بهتر نتایج کلی ساختارها از لحاظ درصد پهنای باند و نیز قابلیت جابجایی فرکانسی آنها در نظر گرفته شده است. این قابلیت جابجایی فرکانسی مزیت اصلی ساختار پیشنهادی در این مقاله و ناشی از تغییر ضخامت تار در شبکه های معرفی شده می‌باشد. نتایج به ازای تغییر ضخامت در باندهای پایین، میانی و بالا به تفکیک ارائه شده است.

جدول (۱): مقایسه نتایج ساختارهای ارائه شده

پارامترها ساختار	درصد جابجایی فرکانسی	درصد پهنای باند	
		فرکانس پایین	فرکانس میانی بالا
قارچی شکل	---	---	۶/۹۷
قارچی شکل با Via	محدود با قطر Via	---	۷/۴۵
تار دایروی	۹/۴۴	۴/۷۴	۶/۱۷
تار لوزی شکل	۶/۹۶	۴/۳۳	۶/۲۲
تار ۶ ضلعی	۹/۹۶	۴/۸۰	۵/۸۵
تار ۸ ضلعی	۹/۸۷	۴/۷۶	۵/۷۳
تار ۸ ضلعی ۲ پارامتری HFSS	۱۲/۵۷	۵/۶۲	---
تار ۸ ضلعی ۲ پارامتری CST	۱۴/۹۵	۴/۳۷	---

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت دانشگاه سمنان صورت گرفته است. نویسندگان مقاله قدردانی خود را از دقت نظر داوران در ارتقای مقاله را ابراز می‌دارند.

فرکانس‌های پایین می‌باشد. همچنین ساختار شبکه‌ای مربعی با جابجایی فرکانسی ۱۵/۶۷٪ بهترین ساختار پیشنهادی از لحاظ قابلیت جابجایی فرکانسی می‌باشد.

مراجع

- [1] Veselago, V. (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability," *Soviet Physics USPEKHI*, Vol. 10, p. 509.
- [2] Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 85, No. 18, pp. 3966–3969.
- [3] Smith, D., Padilla, W., Vier, D., Nemat-Nasser, S., and Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 84, No. 18, pp. 4184–4187.
- [4] Mosallaei, H., and Rahmat-Samii, Y. (2001). "Composite materials with negative permittivity and permeability properties: Concept, analysis, and characterization," *IEEE AP-S Symp. Dig.*, Vol. 4, pp. 378–381.
- [5] Yang, F., and Rahmat-Samii, Y., (2008). "Electromagnetic Band-gap Structures in Antenna Engineering," Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [6] Yang, F., Ma, K., Qian, Y., and Itoh, T. (1999). "A uniplanar compact photonic- bandgap (UC-PBG) structure and its applications for microwave circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 47, No. 8, pp. 1509–1514.
- [7] Yang, F., Ma, K., Qian, Y., and Itoh, T. (1999). "A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic- bandgap (UC-PBG) structure," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 47, No. 11, pp. 2092–2098.
- [8] Coccioli, R., Yang, F., Ma, K., and Itoh, T. (1999). "Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 47, No. 11, pp. 2123–2130.
- [9] Sievenpiper, D., Zhang, L., Broas, R., Alexopolous, N., and Yablonovitch, E. (1999). High-impedance frequency selective surfaces with a forbidden frequency band, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 47, No. 11, pp. 2059–2074.
- [10] Sievenpiper, D. (1999). "High-impedance electromagnetic surfaces," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. California at Los Angeles, Los Angeles, CA.
- [11] Arghand Lafmajani, I., Rezaei, P. (2012). A Novel Frequency-Selective Metamaterial to Improve Helix Antenna, *Journal of Zhejiang University Science C*, Vol. 13, No. 5, pp. 365-375.
- [12] Arghand Lafmajani, I., Rezaei, P. (2011). "Miniaturized Rectangular Patch Antenna Loaded with Spiral/Wires Metamaterial," *European Journal of Scientific Research*, Vol. 65, No. 1, pp. 121-130.
- [13] Fakharian, M. M., and Rezaei, P. (2012). Parametric Study of UC-PBG Structure in Terms of Simultaneous AMC and EBG Properties and its Applications in Proximity-coupled Fractal Patch Antenna, *IJE TRANSACTIONS A: Basics* Vol. 25, No. 4, 347-354.
- [14] Fakharian, M. M., and Rezaei, P. (2012). Numerical Analysis of Mushroom-Like and Uniplanar EBG Structures Utilizing Spin Sprayed Ni (-Zn)-Co Ferrite Films for Planar Antenna, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 73 No. 1, pp. 41-51.
- [15] Kern, J., and Werner, H. (2005). The Design Synthesis of Multiband Artificial Magnetic Conductors Using High Impedance Frequency Selective Surfaces, *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, Vol. 53, No. 1, pp. 8-17.
- [16] Bellion A., and Cable, M. (2012). "A New Wideband and Compact High Impedance Surface" *IEEE International Sym on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, pp. 1-5.

- [17] Rezaei Abkenar, M., and Rezaei, P. (2010). "Design of a Compact Slot-Loaded EBG Surface and its application in a Low-Profile Antenna," Fourth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Karlsruhe, Germany, pp. 800-802.
- [18] Li, Y., Fan, M., Chen, F., She, J., and Feng, Z., (2005). "A novel compact electromagnetic-bandgap (EBG) structure and its applications for microwave circuits," IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. 53, pp. 183-190.
- [19] Zheng, Q. R., Lin, B. Q., Fu, Y. Q. and Yuan, N. C., (2007). "Characteristics and applications of a novel compact spiral electromagnetic band-gap (EBG) structure," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 21, No. 2, pp. 199-213.