طراحی، شبیه سازی و ساخت موجبر انعطاف پذیر باند X برای کاربردهای راداری و ماهواره ای

تاریخ دریافت:
۲۱ آبان ماه ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:
۵ دیماه ۱۴۰۲

محمد علیزادگان[۱]، داوود ظریفی*[۲]
۱. دانشجوی مهندسی مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، ایران، کاشان
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، ایران، کاشان

چکیده

در این مقاله به طراحی، شبیه سازی و ساخت یک موجبر انعطاف پذیر برای کاربردهای متنوع باند X پرداخته می شود. ساختار موجبر انعطاف پذیر از سطوح چین خورده فلزی تشکیل می شود. تأثیر تغییر ابعاد طولی و عرضی چین خوردگی سطح موجبر به صورت کامل بررسی شده و ساختار بهینه نهایی پیشنهاد شده است. در نهایت، به منظور اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی، یک نمونه موجبر انعطاف پذیر با استفاده از روش هیدروفرمینگ و به صورت کاملاً یکپارچه ساخته شده است. مهم ترین مزیت استفاده از این روش ساخت، قابلیت آن در شکل دهی قطعات پیچیده به صورت یکپارچه و کاهش هزینه و پیچیدگی فرایند ساخت است. نتایج اندازه گیری نشان می دهد که نمونه موجبر انعطاف پذیر ساخته شده در محدوده فرکانس ۱۲-۸ گیگاهرتز دارای تلفات جایگذاری و بازگشتی بهتر از ۰/۳۲dB و ۲۰dB می باشد.

واژه‌های کلیدی: موجبر، انعطاف پذیر، کاربردهای باند X.

Design, Simulation and Fabrication of X-Band Flexible Waveguide for Radar and Satellite Applications

Mohammad Alizadegan[1], Davoud Zarifi[*2]

1. Telecommunication engineering student, Kashan university, Iran, Kashan.
2. Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Kashan university, Iran, Kashan.

Abstract

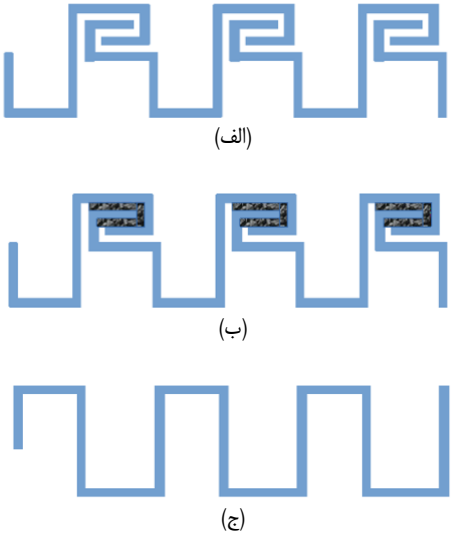
In this paper, the design, simulation and fabrication of a flexible waveguide for various X-band applications is discussed. The flexible waveguide structure consists of folded metal surfaces. The effect of changing the longitudinal and transverse dimensions of the waveguide surfaces has been fully investigated and the final optimal structure has been proposed. Finally, in order to validate the simulation results, a flexible waveguide sample has been fabricated using the hydroforming method. The most important advantage of using this manufacturing method is its ability to shape complex structures in an integrated manner and reduce the cost and complexity of the manufacturing process. The measurement results show that the flexible waveguide sample in the frequency range of 8-12 GHz has insertion and return losses better than 0.32 dB and 20 dB.

Key words: Waveguide, Flexible, X-Band Applications.

ایمیل نویسنده مسئول: zarifi@kashanu.ac.ir

۱-مقدمه

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سیستم‌های انتقال انرژی، خط ارتباطی آن است؛ زیرا نباید هنگام انتقال انرژی الکترومغناطیسی در فرکانس های بالا از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر تشعشعی صورت بگیرد. خطوط انتقال از جمله خطوط دوسیمه و کابل هم‌محور برای انتقال در فرکانس‌های پایین مناسب بوده و مقدار تضعیف آن‌ها در این فرکانس‌ها کم است. اما در فرکانس‌های بالا و فواصل زیاد به دلیل افزایش قابل ملاحظه تضعیف در خطوط انتقال، از نوعی خط موجبری استفاده میشود. موجبر، لوله‌ای توخالی با فلزی سخت یا قابل انعطاف است که موج در عایق داخل آن که اغلب هوا است، منتشر می‌شود. سطح مقطع موجبرها بسته به کاربرد می‌توانند مستطیلی، دایروی و یا بیضوی باشند. برای اولین بار در اواسط دهه ۱۹۳۰، موجبرها به عنوان یک خط ارتباطی به کار گرفته شدند. موجبرها را می‌توان برای فرکانس‌های ۰/۳ گیگاهرتز تا بیش از ۳۰۰ گیگاهرتز به کار برد، اما به علت این‌که در فرکانس‌های پایین ابعاد بزرگ و در فرکانس‌های بالا ابعاد کوچک می شوند، عملاً به جز در موارد خاص و محدود، معمولاً از موجبرهای فلزی برای فرکانس‌های از یک گیگاهرتز تا حدود ۱۰۰ گیگاهرتز می‌توان استفاده نمود. موجبرهای صلب و انعطاف پذیر دو نوع از متداول ترین موجبرهای مورد استفاده در کاربردهای مختلف می‌باشند [۱]. در انتخاب بین موجبر صلب یا انعطاف‌پذیر عوامل متعددی نقش دارند که می‌توان به نوع کاربرد، سطح توان، فرکانس، هزینه، مزایای مکانیکی، طراحی رابط سیستم و جهت اتصالات اشاره کرد. موجبرهای انعطاف پذیر را می‌توان در کاربردهای متنوعی از جمله ارتباطات ماهواره‌ای، سیستمهای رادار، شبکه‌های تغذیه آنتن‌ها، سیستم‌های اندازه‌گیری و غیره استفاده کرد. در بسیاری از کاربردهای مرتبط با ارتباطات ماهواره‌ای، طرح‌های مکانیکی و الکتریکی موجبری باید به صورت بسیار دقیق و در فضای محدود پیاده‌سازی شوند. طبیعتاً موجبرهای انعطاف‌پذیر، انعطاف‌پذیری بیشتری در محدودیت‌های فضا در اختیار قرار می‌دهند. یکی از مزایای استفاده از موجبر انعطاف‌پذیر در مقابل صلب، مزایای مکانیکی قابل توجه آن است. در برخی از مواقع از ویژگی انعطاف‌پذیری برای اجازه دادن به حرکت مکانیکی ناشی از انبساط حرارتی استفاده می‌شود. در برخی موارد دیگر، انعطاف‌پذیری برای جداسازی ارتعاشات خارجی استفاده می‌شود. گاهی ممکن است لازم باشد طول یک بخش از موجبر در مسیر نصب تغییر کند که در چنین حالتی ممکن است طراحی یک بخش موجبر انعطاف‌پذیر در پایان یک مسیر طولانی موجبر مفید باشد. علاوه بر این، مزیت متمایز استفاده از موجبر انعطاف‌پذیر کاهش وزن است. مورد دیگر که در آن موجبر انعطاف پذیر مفید است. اصلاح



شکل ۱- انواع موجبر منعطف بر اساس روش ساخت. الف- موجبر منعطف/قابل چرخش درهم قفل شده. موجبر منعطف/غیرقابل چرخش درهم قفل شده. (ج) موجبر منعطف شیاردار [۱]

ناهماهنگی و ناهم‌راستایی فلنج‌های سیستم چه از نوع طولی و چه از نوع زاویه‌ای است. در چنین حالتی، یک خم از پیش ساخته شده از موجبر انعطاف پذیر کارکرد موثرتری نسبت به موجبر صلب دارد. به طور خلاصه، موجبر انعطاف‌پذیر در شرایطی که موقعیت مکانیکی از اهمیت بالایی برخوردار است، ارزش خود را به بهترین وجه ثابت می‌کند. هر چند که موجبر انعطاف‌پذیر دارای محدودیت‌هایی از نظر عملکرد الکتریکی است، مزایای مکانیکی اغلب این محدودیت‌ها را جبران می‌کند [۲]. از این رو، موجبرهای انعطاف‌پذیر معمولاً فقط در صورت لزوم استفاده می‌شوند؛ زیرا افت توان بیشتری نسبت به موجبر مستطیلی صلب دارند. موجبرهای انعطاف‌پذیر برای ثابت ماندن مشخصات موجبری خود هنگام خم‌شدن، چندین روش طراحی و ساخت دارند که هر یک متناسب با کاربرد استفاده می‌شوند [۳]. یک راه دستیابی به انعطاف‌پذیری، استفاده از یک لوله چین‌دار است که به عنوان موجبر بدون درز شناخته می‌شود. این نام‌گذاری به این علت است که در ساختار موجبر منعطف در هم قفل‌شده، به طور متناوب در هر اتصال درز وجود دارد. یک روش ساخت موجبر بدون درز، ابتدا چین‌دار کردن یک صفحه برنجی و سپس تا کردن آن است تا موجبر با ابعاد موردنظر ساخته شود. سپس درز با استفاده از جوش یا لحیم بسته شده و نهایتاً فلنج نیز به آن لحیم می‌شود و روکش پلاستیکی رو آن پوشانده می‌شود. این روش به طور طبیعی سبب تغییر شکل موجبر شده و اغلب در برآوردن الزامات ابعاد در فرکانس‌های موج میلی‌متری ناتوان است. موجبرهای در هم قفل‌شده دارای هر دو مزیت انعطاف‌پذیری و چرخش هستند. البته بسیاری از موجبرهای منعطف متداول فقط انعطاف‌پذیر بوده و قابلیت چرخش زیاد ندارند. تاجاییکه بررسی های نویسندگان

جدول ۱- مشخصات مورد نظر طراحی

پارامتر	مشخصات
فرکانس (GHz)	۱۲-۸
نوع موجبر	WR-90
حداقل شعاع خم صفحه E (cm)	۳
حداقل شعاع خم صفحه H (cm)	۵
حداقل شعاع خم تکرارشده صفحه E (cm)	۱۱
حداقل شعاع خم تکرارشده صفحه H (cm)	۲۲
تلفات جایگذاری (dB/m)	۰/۴
سطح توان (kW)	۱
VSWR	< ۲
S_{11} (dB)	< -۲۰

نشان می‌دهد، تاکنون اطلاعات زیادی در مورد تحلیل و شبیه‌سازی موجبرهای انعطاف‌پذیر در حالت های خمش مختلف در مقالات و گزارش‌های علمی ارائه نشده است. در برخی مراجع مانند [۶-۴] تنها به صورت مختصر به معرفی ساختار موجبر پرداخته شده است. در این مقاله، نمونه‌ای از موجبرهای انعطاف‌پذیر در باند X طراحی شده و با شبیه‌سازی تمام‌موج ساختار طراحی شده در موقعیت‌های فیزیکی مختلف، عملکرد آن بررسی می شود. نتایج اندازه‌گیری عملی نشان می‌دهد که نمونه موجبر انعطاف پذیر ساخته‌شده، در محدوده فرکانسی ۱۲-۸ گیگاهرتز دارای تلفات جایگذاری و بازگشتی بهتر از ۰/۴ dB و ۲۰ dB می‌باشد.

۲-طراحی موجبر انعطاف پذیر

در این قسمت می‌خواهیم با توجه به مطالب مطرح‌شده در قسمت قبل، نمونه‌ای از موجبرهای انعطاف‌پذیر را طراحی کرده و با شبیه‌سازی تمام‌موج ساختار طراحی شده در موقعیت‌های فیزیکی مختلف، عملکرد آن را بررسی کنیم. در ابتدای این قسمت ذکر این نکته را ضروری می‌دانیم که طرح انتخاب شده برای دستیابی به یک موجبر انعطاف‌پذیر کاملاً با یک رویکرد عملی صورت گرفته است. به عبارت دیگر، با توجه به تجربیات موجود در زمینه ساخت و تحقق فیزیکی ساختارهای مختلف مایکروویو و بررسی روش‌های مختلف طراحی و ساخت مکانیکی، طرح پیشنهادی ارائه شده است تا بتوان در مرحله بعدی کار، به راحتی و بدون هیچ مشکلی نمونه‌های عملی آن برای کاربردهای مختلف را ساخت.

۲-۱-مشخصات مورد نظر در طراحی

در این قسمت، با توجه به مطالب مطرح‌شده، نمونه‌ای از موجبرهای انعطاف‌پذیر طراحی می‌شود. مشخصات مورد نظر در طراحی در جدول۱ خلاصه شده است.

H-bend E-bend

شکل ۲- دو نوع خم متداول در موجبرهای مستطیلی [۱]

۲-۲-موجبر مستطیلی

همان‌طور که بیان شد، موجبرهای انعطاف‌پذیر نوعی از موجبرها هستند که ساختار آنها قابلیت خم‌شدن در شعاع‌های مختلف را دارند و در عین حال می‌توانند مشخصات موجبری مناسبی داشته باشند. در حالت کلی برای انتشار بدون انعکاس امواج در داخل موجبر لازم است ابعاد، سطح مقطع و ماده دی الکتریک ثابت بمانند. بنابراین در خم‌های تدریجی مانند خم های صفحه E و H باید شعاع خم از دو برابر طول‌موج بزرگ‌تر باشد تا انعکاسی نداشته باشیم [۷]. چرخش موجبر می‌تولند برای چرخاندن میدان الکتریکی به کار گرفته شود. اندازه‌ی چرخش باید بیشتر از دو برابر طول‌موج باشد تا انعکاس موج کاهش یابد. در موقعیت‌هایی که شعاع خم مشخص نیست و یا زاویه پیچش نامعلوم است، استفاده از موجبرهای صلب ناکارآمد است. بنابراین موجبر باید اجازه انتخاب صفحه خم، تنظیم شعاع خم و تنظیم میزان پیچش را بدهد. فرکانس قطع کلیه مودهای موجبر مستطیلی را می‌توان به کمک روابط زیر محاسبه نمود [۸]:

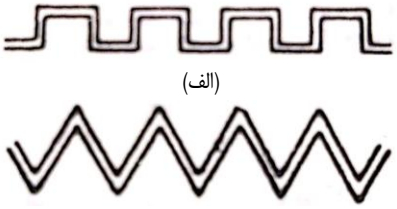
$$(f_c)_{m,n} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2+\left(\frac{n}{b}\right)^2} \qquad (۱)$$

که در آن‌ها a و b به ترتیب عرض و ارتفاع موجبر مستطیلی هستند. در صورتی که نسبت $\frac{b}{a} \le \frac{1}{2}$ باشد بیش‌ترین پهنای باند تک مد موجبر ایجاد می‌شود. این پهنای باند از فرکانس قطع مود اصلی (TE_{10}) شروع و تا دو برابر آن یعنی فرکانس قطع مد دوم ادامه دارد. اما از طرفی با کاهش این نسبت میزان تضعیف موج در اثر افت در بدنه موجبر بالا می‌رود [۹]. بنابراین حالت مناسب زمانی است که $\frac{b}{a} = \frac{1}{2}$ باشد. در این حالت:

$$a \le \lambda \le 2a \quad , \quad \frac{15}{a} \le f \le \frac{30}{a}\,\text{GHz} \qquad (۲)$$

که در آن a برحسب سانتی متر می‌باشد. در واقع هر چه نسبت ارتفاع به عرض موجبر از نصف کمتر شود پهنای باند وسیع تر می شود. اما از طرفی با کاهش این نسبت، میزان تضعیف موج در اثر افت در بدنه موجبر بالا می رود. عملاً استفاده از تمامی باند تک مد موجبر امکان پذیر نیست، زیرا هر چه به فرکانس قطع مد اصلی نزدیک می‌شویم، مقدار تضعیف بر اثر بدنه موجبر بالا می رود. در عمل باند تک مود

مناسب موجبر را بین ۱/۲۵ تا ۱/۹ فرکانس قطع مد اصلی در نظر می گیرند.



(الف)

(ب)

شکل ۳- ناصافی متقارن سطح داخلی موجبر

اثر افت در بدنه موجبر بالا می‌رود. عملاً استفاده از تمامی باند تک مد موجبر امکان‌پذیر نیست، زیرا هر چه به فرکانس قطع مد اصلی نزدیک می‌شویم، مقدار تضعیف بر اثر بدنه موجبر بالا می‌رود. در عمل باند تک مود مناسب موجبر را بین ۱/۲۵ تا ۱/۹ فرکانس قطع مد اصلی در نظر می‌گیرند. شکل داخلی موجبرها عموماً باعث انعکاس موج و برخی تلفات قابل‌توجه توان می‌شود و تغییر اندک و ناگهانی در ابعاد داخلی موجبر باعث تراکم میدان های مغناطیسی و الکتریکی می‌شوند. به ویژه این موضوع برای موجبرهای شیاردار و انعطاف‌پذیز صادق است. تغییر در ارتفاع دیواره‌ی پهن (صفحه H) معادل با قرار دادن یک سلف است در حالی که تغییر در ارتفاع دیواره باریک (صفحه E) معادل با قراردادن یک خازن است و تمام این تغییرات باعث کاهش توان و افزایش انعکاس موج می‌شود. علاوه بر مقاومت هادی بدنه موجبر، ناصافی سطح آن نیز باعث افزایش تضعیف می‌شود. وقتی که عمق ناصافی‌های سطح، در مقایسه با عمق پوستی کوچک باشد سطح جلا داده شده تلفات کمتری دارد و اگر ناصافی‌های سطح ابعادی قابل مقایسه با عمق پوستی داشته باشد اثر آن‌ها روی تلفات قابل مقایسه است و از طرفی بستگی به جهت ناصافی‌ها پیدا می‌کند. شیارهایی که موازی با جریان، القاء شده‌اند اثر خیلی کمتری نسبت به شیارهای عرضی هم‌اندازه، روی تلفات می‌گذارند، البته شکل دقیق شیارها بحرانی نیست و در حقیقت ناهمواری سطح، مقاومت سطحی را بیشتر از مقدار ذاتی به دست آمده برای سطوح فلزی خاص و صاف افزایش می‌دهد. ثابت تضعیف α در یک موجبر مستطیلی معمولی که مد غالب TE_{10} را انتشار می‌دهد و دارای ناصافی سطح بیشتر از عمق پوستی است با رابطه زیر بیان می‌شود [۹]:

$$\alpha = 2R\sqrt{\mu_{res}}\,\frac{\lambda_g}{a\lambda_0}\left[\frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2}\left(k_1+\frac{a}{2b}k_2\right)+\frac{a}{2b}\left(1-\frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2}\right)k_3\right] \qquad (۳)$$

که در آن μ_{res} ضریب گذردهی مغناطیسی مقاومتی نسبی دیواره فلزی موجبر، R_s مقاومت سطحی آن است. k_1، k_2 و k_3 ضرایب ناهمواری سطح هستند که به میزان ناهمواری ارتباط دارد و مقدار آن‌ها در حدود ۰/۸ تا ۱ می‌باشد. مقادیر معمولی ناهمواری‌های سطح، در محدوده‌ی میکرومتر، یعنی از مرتبه‌ی عمق پوستی‌اند که رابطه عمق پوستی به صورت زیر است:

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\sigma\mu c}} \qquad (۴)$$

که در آن λ طول موج در هوا، σ ضریب هدایت هادی، μ ضریب نفوذ مغناطیسی هادی و c سرعت نور است. افزایش جریان در رأس برجستگی‌های داخل موجبر باعث افزایش مقاومت سطح، و در نتیجه افزایش تضعیف می‌شود؛ زیرا وجود ناهمواری‌ها به شکل شیار، مانعی را در مقابل شار جریان‌های القاءشده ایجاد کرده و باعث افزایش مقاومت سطحی می‌گردد. محاسبه افزایش طول موجبر فقط در حالتی امکان دارد که ناصافی‌ها مشخص باشند. اگر ناصافی‌ها را به صورت شکل ۴ در نظر بگیریم، طول مؤثر دیواره موجبر تقریباً دو برابر می‌شود.

۲-۳- حداکثر توان قابل انتقال توسط موجبر مستطیلی

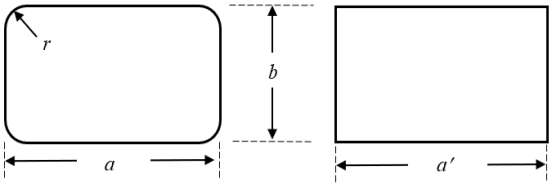
در موجبرهای مستطیلی دو نوع توان از اهمیت برخوردار هستند: یکی حداکثر توانی که توسط ولتاژ شکست موجبر مشخص می‌شود و دیگری توانی که افزایش دمای ناشی از رسانایی و تلفات دی‌الکتریک آن را محدود می‌کند. حداکثر توان قابل تحمل موجبرهای فلزی که از هادی‌های خوب ساخته‌می‌شوند و با توجه به حداکثر ولتاژ شکست هوا تعیین می‌شوند، در موجبرهای مستطیلی تک‌مود باند X در حدود ۳۰۰-۲۰۰ کیلووات است [۱۰]. این مقادیر برای حالت معینی از دما و فشار هوا صادق است، به طور کلی عوامل مختلفی وجود دارد که حداکثر توان موجبر را تغییر می‌دهند. این عوامل عبارتند از میزان انعکاس داخلی موجبر، ارتفاع موجبر از سطح دریا، وجود ناصافی و ناخالصی روی سطح داخلی، رطوبت و دمای هوای داخل موجبر، عرض پالس و فرکانس تکرار آن در صورتی که توان از نوع پالسی باشد، و در نهایت ضریب اطمینان برای ولتاژ شکست هوای آزاد.

۲-٤-شعاع انحناء گوشه‌های داخلی موجبر

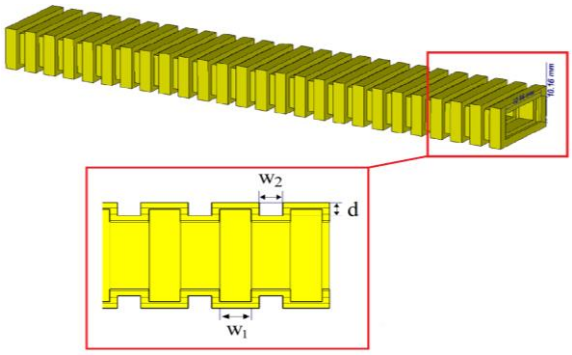
در عمل، ساخت موجبر با گوشه‌های قائم مشکل است. از طرفی هم انحنای گوشه‌های داخلی موجبر باعث تغییر طول موج و در نتیجه تغییر امپدانس مشخصه، افزایش انعکاس و تضعیف می‌شود [۱۳-۱۰]. در موجبری که گوشه‌های داخلی آن مطابق شکل ۴ شعاع انحناء r دارد، طول موج داخل موجبر برابر است با:

$$\lambda_g' = \lambda_g \left[1+\left(\lambda_g/2a\right)^2 \left(r^2/ab\right)(4-\pi)\right] \quad (۵)$$

که λ_g طول موج موجبر کاملاً مستطیلی به ابعاد a و b است.



شکل ٤- موجبر با گوشه‌های انحناءدار و موجبر معادل



شکل۵- طرح اولیه موجبر انعطاف‌پذیر

اثر را می‌توان به این صورت بررسی کرد که موجبر با گوشه‌های انحنادار را به صورت موجبری کاملاً مستطیلی فرض کنیم که سطح مقطع آن با موجبر اصلی مساوی باشد، در این صورت موجبر معادل، عرضی مانند a' دارد که مقدار آن برابر با:

$$a' = a - \frac{(4-\pi)r^2}{b} \quad (۶)$$

همچنین طول موج قطع در این حالت برابر است با:

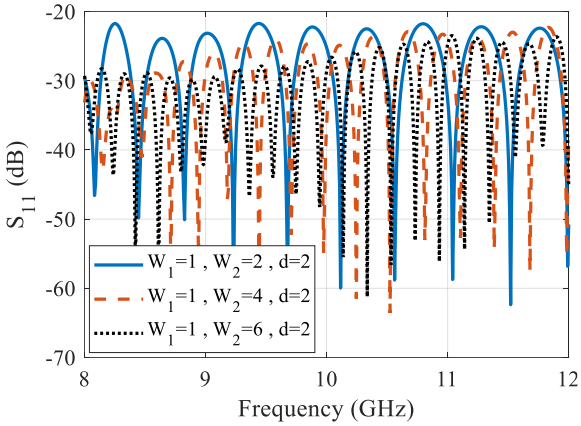
$$\lambda_c' = 2a' = \lambda_c - \frac{2r^2}{b}(4-\pi) \quad (۷)$$

۲-۵-ساختار موجبر انعطاف‌پذیر

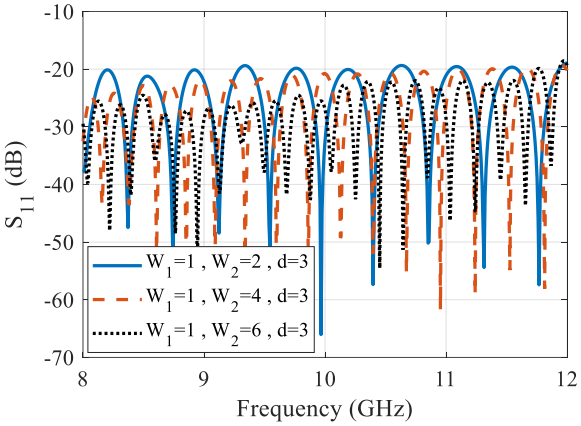
شکل ۵ ساختار ابتدایی یک موجبر انعطاف‌پذیر در باند X را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این ساختار بر پایه موجبر مستطیلی استاندارد WR-90 می‌باشد که در دیواره‌های آن به صورت متناوب چین‌خوردگی‌هایی ایجاد شده‌است. این چین‌خوردگی‌ها کمک می‌کند که موجبر را بتوان به راحتی و در جهت‌های مختلف خم کرد. البته باید توجه داشته باشیم که اگر دامنه این چین خوردگی‌ها از حدی بیشتر شود مشخصات الکترومغناطیسی موجبر کاملاً مختل خواهدشد.

۳-بررسی مشخصات موجبر انعطاف‌پذیر در شرایط فیزیکی مختلف بر اساس شبیه‌سازی

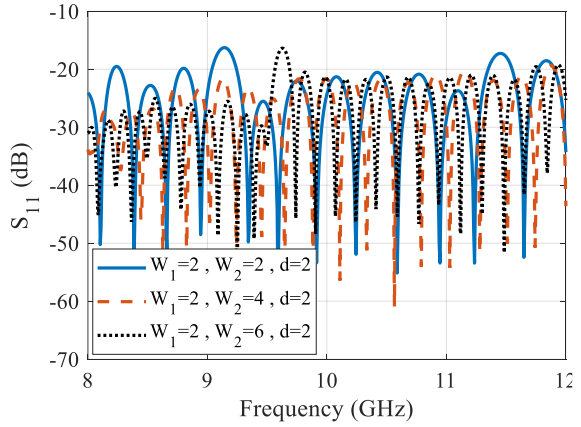
به منظور بررسی و ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف چین‌خوردگی‌ها بر عملکرد موجبر، شبیه‌سازی‌های متعددی صورت گرفته است که نمونه‌هایی از نتایج آنها در شکل ۶ ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شبیه‌سازی ساختار به صورت تمام‌موج و با امکانات حوزه زمان نرم‌افزار CST انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد همان‌طور که انتظار می‌رود در حالتی که موجبر به صورت مستقیم و بدون خم است، با افزایش دامنه چین‌خوردگی‌ها مشخصات انتشاری موجبر مختل شده و S_{11} > -20 dB می‌شود. چنین ساختاری با این مشخصات را دیگر نمی‌توان به عنوان یک موجبر مناسب و قابل اطمینان به کار برد.

ابعاد ساختار برای عملکرد مناسب در حالت مستقیم و بدون خم بر حسب میلی‌متر عبارتند از: $w_1 = 1$، $w_2 = 1$ و $d = 1$.

جدول۲- شعاع پیچش موجبر انعطاف‌پذیر در شرایط مختلف بر حسب cm

Freq.	R_{CE}	R_{CH}	R_{1SE}	R_{2SE}	R_{1SH}	R_{2SH}
X-band	5	4	5	5	5	5
Freq.	R_{1UE}	R_{2UE}	R_{3UE}	R_{1UH}	R_{2UH}	R_{3UH}
X-band	2.5	2.5	1.7	1.5	1.5	1.7

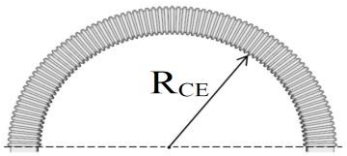
برای اطمینان از عملکرد مناسب ساختار موجبر انعطاف‌پذیر، پس از انجام بهینه‌سازی در نرم‌افزار CST و به دست آوردن مقادیر بهینه برای پارامترهای هندسی ساختار، مشخصات الکترومغناطیسی موجبر انعطاف‌پذیر در ۷ حالت مختلف مطابق شکل را بررسی می‌کنیم. همان‌طور که در شکل مشخص است، شرایط فیزیکی انتخاب‌شده بسیار متنوع است تا بتوان اطمینان حاصل کرد که ساختار موجبر انعطاف‌پذیر طراحی‌شده تحت شرایط خم‌های مختلف همچنان قابل‌اطمینان باشد. ابعاد بهینه موجبر در باند X با توجه به شرایط و محدودیت‌های فرایند پیاده‌سازی عملی و ساخت تعیین‌شده و در جدول (۲) ارائه شده است. این ابعاد ابتدا در موجبر مستقیم بدون خم درنظرگرفته‌شده و پس از اطمینان از عملکرد مناسب موجبر در این شرایط، کلیه حالت‌های دیگر شامل انواع خم‌ها نیز شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در همه حالت‌های خمش مورد نظر، ضریب انعکاس ورودی موجبر در بازه فرکانسی ۱۲-۸ گیگاهرتز کمتر از dB ۲۰- است. همچنین به منظور مقایسه تلفات جایگذاری در حالت‌های مختلف خمش، مقادیر S_{21} ساختار در حالت‌های مختلف خمش در شکل ۱۰ مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در همه حالت‌های خمش مورد نظر، ضریب S_{21} موجبر در بازه فرکانسی ۱۲-۸ گیگاهرتز کمتر از dB ۰/۱۸- است.

٤- ساخت و اندازه‌گیری

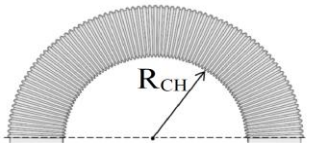
٤-١-روش ساخت

در گذشته، موجبرهای انعطاف‌پذیر با استفاده از ترکیب مس-بریلیم ساخته می‌شدند. در این روش، یک نوار فلزی پیچیده شده و سپس خم می‌شود تا به شکل مستطیل در بیاید. سپس، این ساختار برای ایجاد یک لوله موجبر مستطیلی انعطاف‌پذیر لحیم‌کاری می‌شود. در کاربردهای با سطح توان بالا، درز لحیم‌کاری روی دیواره موجبر چندان مطلوب نیست و مشکل‌ساز می‌شود. امروزه از ترکیب‌های فلزی دیگری نظیر برنز- فسفر نیز برای ساخت موجبرهای انعطاف‌پذیر استفاده می شود.

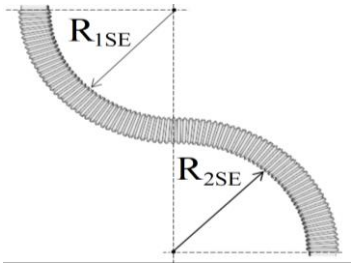
(الف)- حالت ۱ (مستقیم)



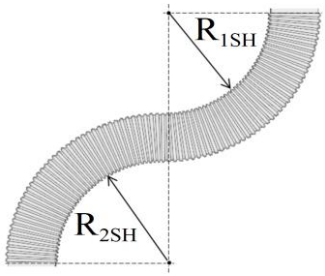
(ب)- حالت ۲ (خم نیم دایره در صفحه E)



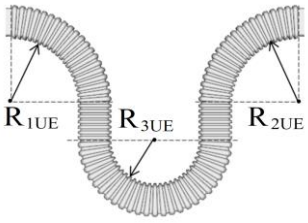
(ج)- حالت ۲ (خم نیم دایره در صفحه H)



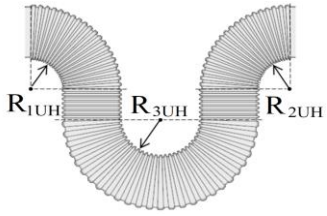
(د)- حالت ٤ (خم سینوسی در صفحه E)



(ه)- حالت ٥ (خم سینوسی در صفحه H)

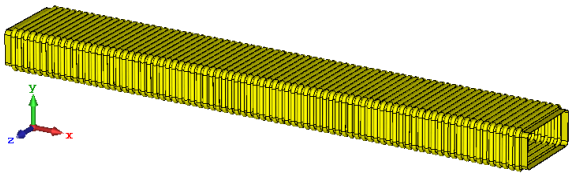


(و)- حالت ٦ (خم U شکل صفحه E)

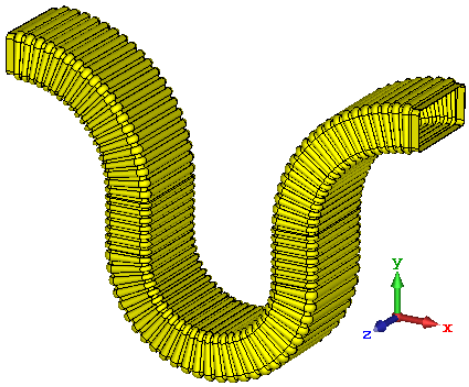


(ز)- حالت ۷ (خم U شکل صفحه H)

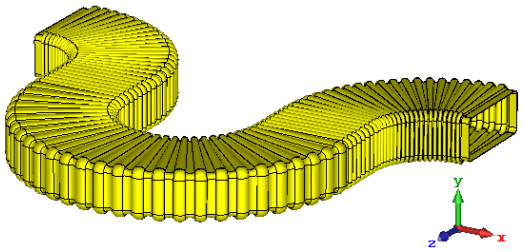
شکل ۷- شرایط فیزیکی مختلف موجبر انعطاف‌پذیر



(الف)



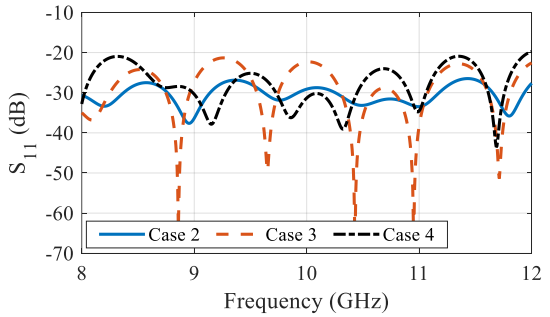
(ب)



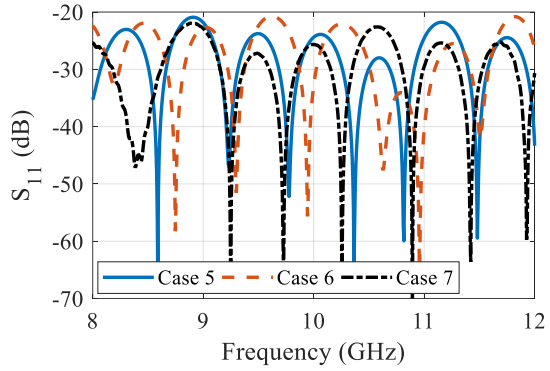
(ج)

شکل ۸- ساختار موجبر انعطاف‌پذیر در سه حالت مستقیم و خم U شکل در صفحات E و H در نرم‌افزار CST

در اینجا، ساختار طراحی‌شده با استفاده از آلیاژ خاصی از برنج و مس و با تکنیک هیدروفرمینگ ساخته می‌شود. هیدروفرمینگ یا شکل‌دهی به کمک فشار آب، تکنیکی جدید در ساخت و شکل‌دهی قطعاتی است که قبلاً به صورت پرسی ساخته می‌شدند [۱۴]. در روش سنتی، برای شکل‌دهی ورقه‌ای فلزی ورق را درون قالب مربوطه قرار داده و به کمک فشار دستگاه‌های پرس سنگین ورق شکل قالب را به خود می‌گیرد. در این روش، به سبب اعمال فشار مکانیکی و در اثر کشش ورق، گوشه‌های ورق موقع شکل‌دهی ضخامتی کمتر از قسمت مرکزی آن پیدا می‌کند. به همین دلیل طراحان ورق را با ضخامتی بیشتر از ضخامت اصلی مورد نیاز در نظر می‌گیرند که جبران کاهش ضخامت به دلیل کشش به وسیله پرس را در نظر گرفته باشند. همچنین شکل‌دهی ورق‌ها به سبب خاصیت ارتجاعی فلز باید با زوایایی تیزتر از زاویه مورد نیاز پرس شوند تا خاصیت ارتجاعی ورق هم لحاظ شده باشد. ضمناً در روش سنتی پرس احتمال پارگی ورق در اثر کشش و ایجاد ترک‌های موئی و ظریف در هنگام پرس وجود دارد.

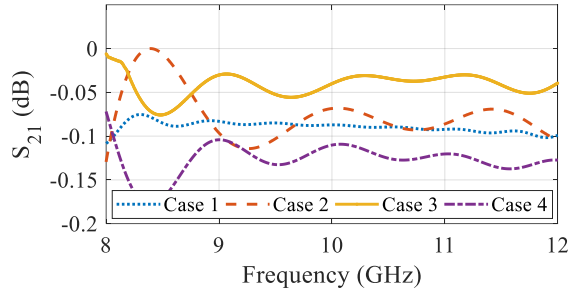


(الف)

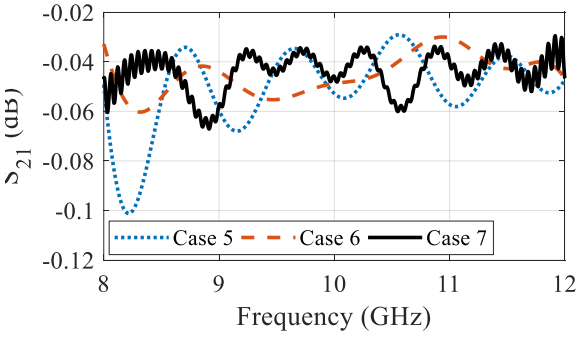


(ب)

شکل ۹- نمودار S_{11} موجبر انعطاف‌پذیر در حالت‌های مختلف خمش



(الف)



(ب)

شکل ۱۰-نمودار S_{21} موجبر انعطاف‌پذیر در حالت‌های مختلف خمش

در مورد روش هیدروفرمینگ، طریقه شکل گیری به صورت کلی با روش های سنتی متفاوت است. در این روش به جای استفاده از ورق فلزی معمولی، ماده اولیه لوله های باریک فلزی می باشد. لوله فلزی مورد نظر که قرار است تبدیل به یک قطعه فرم دهی شده شود، درون

قالب مخصوص قطعه که فرم قطعه مورد نظر را دارد قرار می گیرد و سپس آب با فشار بسیار زیاد درون این لوله پمپ می شود و فشار بالای آب موجب پهن شدن و گسترش لوله فلزی درون قالب می شود تا شکل درون قالب را به خود بگیرد. به سبب اینکه فشار آب درون لوله در همه جای آن یکنواخت است ضخامت ورق حاصل از این کار نیز در همه جای آن یکنواخت خواهد بود. همچنین مشکل پارگی ورق در اثر شکل دهی و همچنین ترکهای موئی نیز از بین رفته و ضمناً فرم قطعه پس از خروج از درون قالب دقیقاً به شکل قالب می باشد و حالت فنری نیز ندارد. به این ترتیب طراحان می توانند از نازک ترین ورق ممکن جهت کاهش وزن و حداکثر استحکام بهره بگیرند.

(الف)

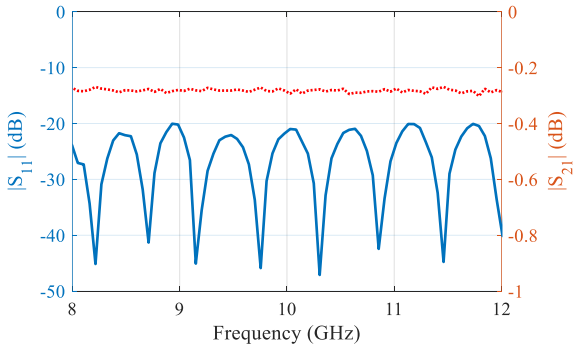
(ب)

شکل ۱۱- تصاویر نمونه موجبر انعطاف‌پذیر ساخته‌شده

در روش هیدروفرمینگ، برای شروع کار، ابتدا مواد اولیه ورق یا پروفیل با ابعاد مورد نیاز بریده شده و در محل از قبل تعیین‌شده در قالب، قرار می‌گیرد. سپس طرف دیگر قالب که در واقع نگهدارنده مواد اولیه است، روی ورق یا پروفیل نشسته و عمل تزریق صورت می‌گیرد. بعد از بسته شدن قالب، مایعی با دبی و فشار زیاد اما کنترل‌شده، به فضای قالب تزریق شده و ورق یا پروفیل را به دیواره طرف دیگر قالب فشرده و شکل قالب را به آن می‌دهد. در این دستگاه، برای ایجاد فشار زیاد، از دو مایع روغن و آب استفاده می‌شود. روش هیدروفرمینگ، به دو دسته هیدروفرمینگ لوله‌ای و ورقی، قابل تقسیم‌بندی است. به طور خلاصه مزایای روش هیدروفرمینگ عبارتند از: شکل‌دهی قطعات پیچیده با سطح مقطع‌های متفاوت در یک قطعه یکپارچه، کاهش مراحل تولید، کاهش زمان تولید، کاهش هزینه‌های تولید، عدم نیاز به قالب‌های متعدد، کاهش وزن قطعات تولید شده، حذف فرایند جوشکاری در تولید قطعات حساس و غیره.

٤-۲- نتایج ساخت و اندازه‌گیری

پس از طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار پیشنهادی در نرم افزار CST و دستیابی به نتایج مطلوب، نمونه عملی موجبر انعطاف‌پذیر با استفاده از روش هیدروفرمینگ و طول ۱ متر ساخته شده و مورد اندازه‌گیری آزمایشگاهی قرار گرفته است. تصویر نمونه موجبر ساخته‌شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای S ساختار برای حالت خم موجبری در شکل‌های ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در بازه فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز دارای ضریب انعکاس کمتر از ۲۰ dB- و تلفات جایگذاری کمتر از ۰/۳۲ dB است.



شکل ۱۲- نتایج اندازه‌گیری پارامترهای S_{11} و S_{21} موجبر انعطاف پذیر خم‌شده

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک نمونه موجبر انعطاف‌پذیر بر مبنای سطوح فلزی چین‌خورده، طراحی و ساخته شده است. نتایج اندازه‌گیری نشان داده است که موجبر مورد نظر در محدوده فرکانسی ۸ GHz تا ۱۲ GHz دارای مشخصات عملکردی مناسب و ضریب انعکاس ورودی بهتر از ۲۰ dB- است. روند طراحی ارائه‌شده می‌تواند در طراحی موجبرهای انعطاف‌پذیر و همچنین قطعات مایکروویو مبتنی بر این موجبرها در باندهای فرکانسی مختلف مورد استفاده قرار بگیرد.

۶-مراجع

[1] IEC, Flexible waveguide assembly performance, IEC, Geneve, Switzerland, 2003.

[2] M. Hakak and N. Geranpayeh, Waveguides Technologies, Behnashr Publication, Iran, 1992 (in Persian)

[3] S.G. Russo, M.J. Henderson, B.R.W. Hinton, "Corrosion of flexible waveguides," Failure Analysis Case Studies II, pp. 313–316, 2001.

[4] A. Mitsumasa, S. Sumio, S. Toru, "Method of manufacturing flexible waveguide," US Patent, 1964.

[5] D. Sun, Z. Chen, C. Yao and J. Xu, "Flexible rectangular waveguide based on cylindrical contactless flange", Electron. Lett., vol. 52, no. 25, pp. 2042-2044, Dec. 2016.

[6] X. He, J.-S. Cao, B.-L. Deng, J.-D. Liu and N. Gan, "Radio-frequency design and commissioning of a flexible waveguide for high-vacuum S-band applications", Radiat. Detection Technol. Methods, vol. 4, no. 2, pp. 250-254, Jun. 2020.

[7] Rizzi, P.A, "Microwave engineering: passive circuits" Prentice-Hall, 1988.

[8] D. M. Pozar, Microwave Engineering. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
[9] G. Southworth, Principles and Applications of Wave-Guide Transmission, New York, NY, USA: Van Nostrand, 1966.
[10] P. Bhartia and I.J. Bahl, Millimeter Wave Engineering and Applications, New York, Wiley, 1984.
[11] P. K. Chaturvedi, "Microwave Radar and RF Engineering", Springer Nature Singapore Pte Ltd, pp. 356-370, 2018.
[12] P. Lagasse and J. Van Bladel, “Square and Rectangular Waveguides with Rounded Corners,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, no. 5, pp. 331-337, May 1972.
[13] Z. Shen, X. Lu, "Modal analysis of a rectangular waveguide with rounded sides", Microwave and Optical Technology Letters, vol.33, no.5, pp.365, 2002.
[14] C. Hartl, “Review on advances in metal micro-tube forming,” Metals, vol. 9, no. 5, pp. 542-568, 2019.