

## کاهش سطح گلبرگ کناری در آنتن موج نشتی متناوب دندانه‌ای فلزی

یعقوب قانع قره‌باغ<sup>۱</sup>، ضرغام رستمی<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.2.5.7>

### چکیده

در این مقاله به بیان کنترل سطح گلبرگ کناری آنتن موج نشتی متناوب دندانه‌ای فلزی توسط امپدانس سطحی آن خواهیم پرداخت. آنتن‌های موج نشتی دارای قابلیت چرخش پرتو توسط اسکن فرکانسی و همچنین چرخش پرتو در فرکانس ثابت توسط کنترل امپدانس سطحی هستند. از آنجایی که سطح گلبرگ کناری این نوع از آنتن‌ها در مقایسه با آنتن‌های دیگر دارای کیفیت بدتری است و اگر مدهای بعدی هم تحریک شود این موضوع تشدید می‌گردد، بنابراین باید بتوان سطح گلبرگ کناری را تا حد امکان پایین آورد. با استفاده از اعمال ضرایب محاسبه شده به روش تیلور در پارامترهای آنتن موج نشتی (M) و به تبع آن با عمق دندانه‌ها، آنتن طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و مورد ارزیابی و تست عملی قرار گرفت. نتیجه کنترل سطح گلبرگ کناری در این مقاله رسیدن به میزان ۱۸dB SLL در شبیه‌سازی است که در عمل به مقدار سطح گلبرگ جانبی ۱۶dB در اندازه‌گیری آنتن ساخته شده در فرکانس ۱۰GHz رسیدیم.

**کلیدواژه‌ها:** امپدانس سطحی، آنتن موج نشتی، ساختار دندانه‌ای، سطح گلبرگ کناری، چرخش پرتو، اسکن فرکانسی

## Side Lobe Level Reduction in Corrugated Metallic Periodic Leaky Wave Antenna

Y. Ganesh Garehbagh, Z. Rostami\*

Imam Hossein University

(Received: 2023/05/21, Revised: 2023/07/26, Accepted: 2023/08/15, Published: 2023/09/08)

### Abstract

In this paper, we discuss how to control the side lobe level of corrugated metallic periodic leaky wave Antenna by its artificial surface impedances. Leaky Wave Antenna have beam steering ability by Frequency Scan or by artificial Surface Impedance control in the constant frequency. Side Lobe Level of Leaky Wave Antenna is Worse level of Antennas Side Lobe Levels and This level worst if other Modes of Leaky wave antennas is activated. Therefore just minimize the Side Lobe Level as well as. By applying the coefficients calculated by Taylor's method to the parameters of the leaky wave antenna (M and, accordingly, the depth of the teeth), the antenna was designed, simulated, built and evaluated and tested. The result of controlling the side lobe level in this article is to reach the SLL of 18dB in the simulation, while in practice we reached the SLL of 16 dB in the measurement of the antenna made at 10 GHz frequency.

**Keywords:** Surface Impedance, Beam Steering, Leaky Wave Antenna, Corrugated Structure, Side Lobe Level, Beam Steering, Frequency Scan

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر ایده چرخش پرتو بدون استفاده از شیفت دهنده‌های فاز و با آنتن‌های سبک، ساده، مسطح و قابل‌نصب بر روی سطوح متفاوت موردتوجه قرار گرفته‌اند. به این منظور آنتن‌های موج نشستی که توانایی انتشار موج از سطح آنها در زاویه موردنظر را دارند مطرح شده‌اند. ایده انتشار موج الکترومغناطیسی از سطح دارای امپدانس با مدولاسیون سینوسی را آقای اولینر در سال ۱۹۵۹ مطرح نمودند [۱].

آقای لی در فصل ۱۷ کتاب خود به معرفی این نوع آنتن پرداخته [۲] و پس از سال ۲۰۰۰ علاقه مندی به این نوع آنتن افزایش یافته و کتاب‌ها [۳-۴] و مقالات متعددی در حوزه آنتن‌های موج نشستی منتشر شده‌اند [۵-۱۱]. بدین ترتیب، امپدانس آنتن توسط کنترل ظرفیت خازن متغیر [۵] و آنتن با ساختار میکرواستریپی [۶ و ۱۰]، آنتن دندان‌های با عمق متغیر و پهنای دندان ثابت برای داشتن پرتو همه جهتی [۸] و آنتن شکافدار [۱۱] معرفی و بررسی شده‌اند. با توجه به ساختار آنتن‌های موج نشستی، چرخش پرتو آنتن علاوه بر تغییر فرکانس توسط کنترل امپدانس سطحی نیز امکان پذیر خواهد بود.

کنترل مدولاسیون امپدانس سطحی در آنتن‌های موج نشستی، یکی از تکنیک‌های مورد استفاده به منظور ایجاد قابلیت انتشار موج از سطح آنتن به فضای آزاد در زاویه انتشار دلخواه است. در این مقاله نحوه محاسبه و ایجاد امپدانس سطحی آنتن موج نشستی متناوب دندان‌های با عمق متغیر و پهنای دندان ثابت به منظور تشعشع پرتو در زاویه موردنظر را بررسی خواهیم کرد.

آنتن دندان‌های با قابلیت ایجاد پرتو در راستای عمود بر آنتن [۱۲] و مدهای انتشاری امپدانس سطحی [۱۳] نیز معرفی شده‌اند. کنترل امپدانس سطحی دارای کاربردهای متنوع دیگری است که برای تحقق آن از ساختارهای متناوب یک بعدی مبتنی بر گرافین استفاده شده است [۱۴]. آنتن موج نشستی دندان‌های با عمق ثابت نیز بررسی شده و نتیجه آن چرخش پرتو توسط اسکن فرکانسی و سطح گلبیگ جانبی حدود ۵ الی ۱۰ دسیبل در فرکانس‌ها و زوایای مختلف است [۱۵]. چرخش پرتو با تغییر مقدار عمق دندان نیز صورت پذیرفته؛ ولی همچنان مشکل سطح گلبیگ جانبی حل نشده و مطلوب نیست [۱۶].

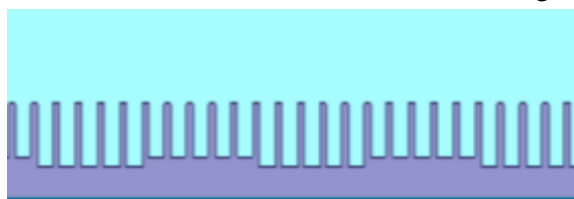
در این مقاله ما قصد داریم برای ساختار آنتن موج نشستی دندان‌های که در گزارشات [۱۵] و [۱۶] ارائه شده، راه‌حلی پیشنهاد دهیم که با حفظ ساختار و مقادیر طراحی شده در این گزارشات، بتوانیم سطح گلبیگ جانبی را کاهش دهیم.

## ۲. کاهش سطح گلبیگ جانبی

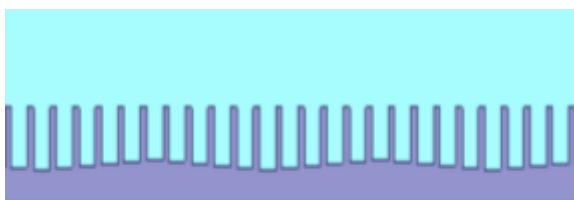
همان‌طور می‌دانیم با افزایش طول آنتن موج نشستی، هم‌پهنای پرتو و هم توان رسیده به انتهای آنتن کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه میزان توان انعکاسی از پورت دوم (انتهای آنتن) کم شده و گین آنتن افزایش می‌یابد؛ بنابراین تغییر پارامترهای طول آنتن، عمق سلول‌ها (دندان‌ها) و پیوند دندان‌ها فقط تأثیر در زاویه تشعشع، پهنای پرتو و بازده آنتن داشته و بر روی سطح گلبیگ جانبی مؤثر نخواهند بود. اقدام اساسی برای کاهش سطح گلبیگ جانبی در آرایه‌ها، استفاده از وزن‌دهی عناصر توسط روش‌های بانومیمال، چپی‌شف، تیلور و ... است. در آنتن موج نشستی باید بتوانیم آنتن را شبیه آرایه فرض نموده و ضرایب وزنی عناصر آرایه را مدیریت کنیم تا سطح گلبیگ جانبی را کنترل نماییم.

باتوجه به مقاله‌های [۱۵] و [۱۶] تعداد ۴۰ پیوند ۱۰ سلولی (طول هر سلول  $p = 2.825mm$ ) برای آنتن موج نشستی در نظر گرفته شده است. وزن‌دهی و تغییر دامنه ۴۰۰ عنصر در ساختار آنتن (۴۰ پیوند ۱۰ عنصری) از نظر ایجاد نقشه ساخت و اجرا کار مشکلی خواهد بود، جهت ساده‌سازی ساخت، به جای تغییر امپدانس سطحی با مدولاسیون سینوسی، از مدولاسیون امپدانس سطحی مربعی استفاده می‌کنیم تا با تغییر دامنه ۴۰ عنصر در ساختار آنتن موج نشستی سطح گلبیگ کناری را کنترل نماییم.

مدولاسیون امپدانس سطحی مربعی و سینوسی در شکل (۱) نشان داده شده است.



(الف)



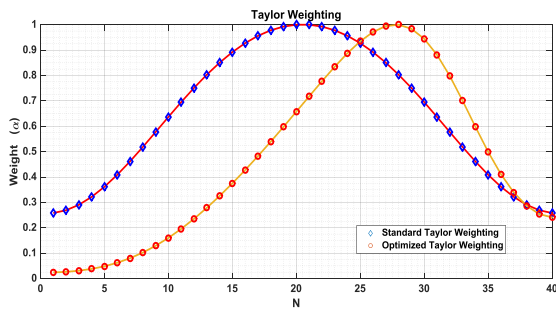
(ب)

شکل ۱. عمق متناسب با (الف) امپدانس سطحی مربعی (ب) امپدانس سطحی سینوسی

با استفاده از مدولاسیون امپدانس سطحی مربعی، سطح گلبیگ کناری تغییر می‌یابد که در شکل (۲) نشان داده شده است.

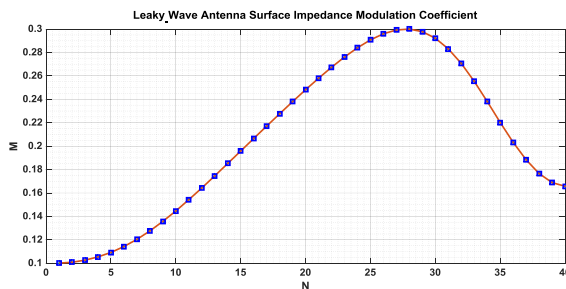
نباشیم، لذا ضرایب تیلور را طوری انتخاب نمودیم تا شرط داشتن ۱۰٪ توان در خروجی آنتن تامین گردد که این به معنی داشتن بازده آنتن برابر ۹۰ درصد خواهد بود.

نتیجه طراحی آرایه ۴۰ عنصری با وزن دهی تیلور ایده‌ال و تیلور بهبود یافته در شکل (۳) نشان داده شده است.



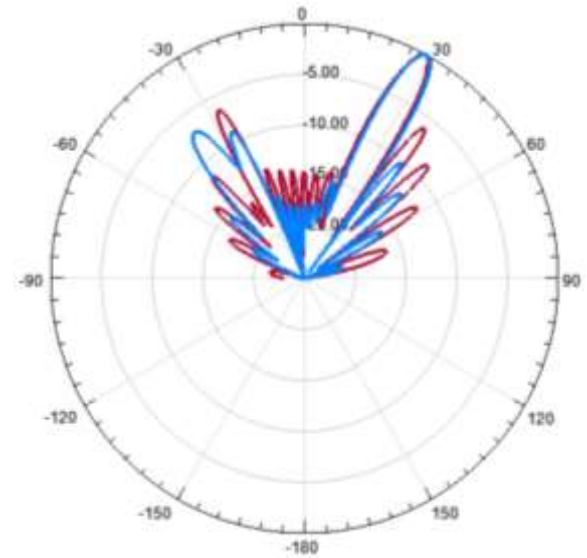
شکل ۳. نمودار ضرایب وزن دهی تیلور ایده‌ال و تیلور بهبود یافته برای آرایه ۴۰ عنصری

برای اعمال ضرایب وزنی حاصله از وزن‌دهی تیلور بهبود یافته شکل (۳)، باید از پارامتر  $M$  آنتن موج نشستی استفاده نماییم. از طرفی  $M$  های بزرگ مانع نشت موج به عناصر بعدی آرایه خواهند بود و در نتیجه عناصر بعدی آرایه تحریک نشده و بی‌تأثیر خواهند بود. همچنین  $M$  های کوچک تأثیری در دامنه موج نمی‌گذارند. در نتیجه محدوده  $M$  انتخابی ما از 0.1 الی 0.3 بوده و باید ضرایب دامنه را به این محدوده الصاق نماییم. نتیجه الصاق وزن دهی تیلور بهبود یافته شکل (۳) برای آرایه ۴۰ عنصری در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار الصاق ضرایب وزن‌دهی تیلور بهبود یافته به  $M$

نتیجه این تغییر  $M$ ، تغییر امپدانس سطحی آنتن موج نشستی و در نتیجه تغییر ارتفاع عناصر آرایه آنتن موج نشستی با پهنای دندان ثابت خواهد بود. از طرفی باتوجه به این که می‌خواهیم تأثیر کنترل دامنه عناصر را در حین چرخش پرتو نیز بررسی کنیم، برای دو مقدار  $X'$  برابر  $1/8$  و  $1/4$  محاسبات ارائه می‌شود. تغییرات حداقل و حداکثر امپدانس سطحی موردنیاز هر پرتو در شکل (۵) نشان داده شده است (در شکل به جای  $X'$  از عبارت  $X_p$  استفاده شده است).



شکل ۲. نمودار تشعشی حاصل از امپدانس سطحی مربعی (آبی) و امپدانس سطحی سینوسی (قرمز)

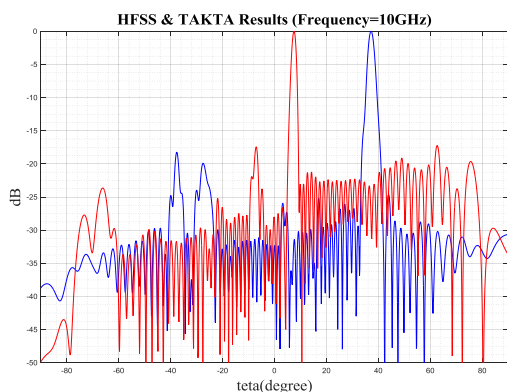
باتوجه به این که وزن‌دهی تیلور برای کنترل سطح گلبرگ‌های جانبی کناری، عقبی، فرعی و کنترل پهنای پرتو بهتر از وزن‌دهی‌های دیگر (چپی‌شف، باینومیال و ...) است، انتظار داریم که در ساختار با مدولاسیون مربعی، موضوع سطح گلبرگ کناری کنترل شود.

البته باید توجه داشته باشیم که به دلیل خطاهای ساخت باید وزن‌دهی تیلور را باید برای کنترل سطح گلبرگ کناری بیشتر طراحی نماییم تا بتوانیم در عمل سطح گلبرگ کناری قابل‌قبولی را به دست آوریم.

در این مقاله سطح گلبرگ کناری برای وزن‌دهی تیلور را ۱۸dB فرض نموده و طراحی کرده‌ایم تا در نهایت بتوانیم به ازاء تمام چرخش‌های پرتو مورد انتظار و خطاهای ناشی از ساخت، حداقل به سطح گلبرگ کناری 15dB برسیم. در نتیجه با ۴۰ دامنه وزنی متفاوت برای ۴۰ پرتو از آنتن موج نشستی، کاهش سطح گلبرگ کناری را انجام خواهیم داد.

باتوجه به نوع تغذیه آنتن موج نشستی که از کنار آنتن است، اول عناصر ابتدای آنتن شروع به تشعشع می‌کنند و بنابراین دامنه توان رسیده از یک عنصر به عنصر بعدی کاهش می‌یابد. در نهایت نوع وزن‌دهی باید طوری طراحی شود که علاوه بر کنترل سطح گلبرگ کناری، بتواند دامنه وزنی موردنیاز وزن‌دهی تیلور را تأمین نماید؛ لذا نیاز به شیفت دادن پیک وزنی از وسط آرایه به اواخر آن خواهیم داشت.

به لحاظ این که آنتن را طوری طراحی کردیم تا حداکثر ۱۰٪ توان ورودی به انتهای آنتن برسد تا نیازمند بار تطبیق



شکل ۸. نمودار تشعشعی حاصل از امپدانس سطحی مربعی ( $X_p=0.8$ ) قرمز و  $X_p=1.4$  آبی)

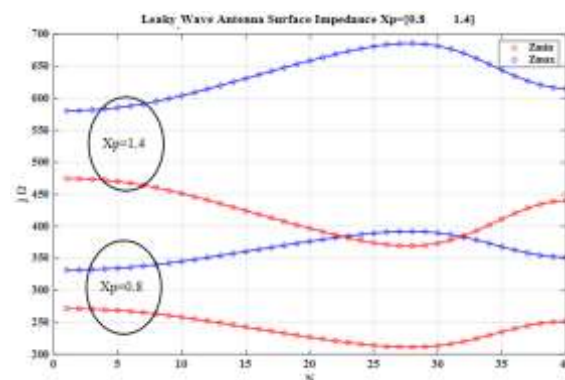
### ۳. ساخت و تست آنتن

باتوجه به هزینه ساخت آنتن با ۴۰۰ آرایه، فقط آنتن موج نشستی با  $x'=0.8$  ساخته شده و برای اندازه‌گیری آماده کردیم. بنابراین آنتن ساخته شده، آرایه ۴۰۰ عنصری متشکل از ۴۰ پریود دارای مدولاسیون مربعی و اعمال ضرایب وزنی تیلور بهبود یافته در عمق عناصر آنتن موج نشستی به ازاء هر پریود و مقدار  $X'$  برابر ۰/۸ است.

در شکل (۹) نمای کلی آنتن ساخته شده به همراه نحوه نصب آنتن در آزمایشگاه آنتن تکتا جهت تست و اندازه‌گیری ارائه شده است.

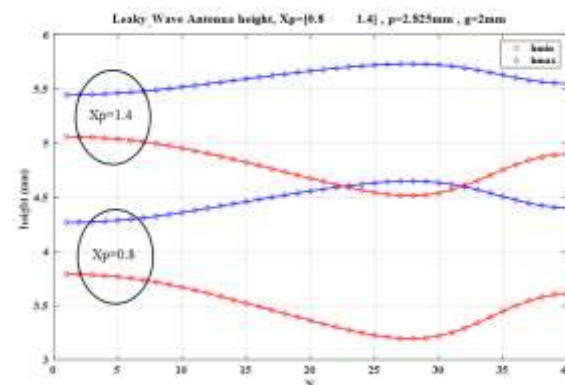


شکل ۹. نمای کلی آنتن ساخته شده و نحوه نصب آن در آزمایشگاه آنتن تکتا (از دو جهت متفاوت)



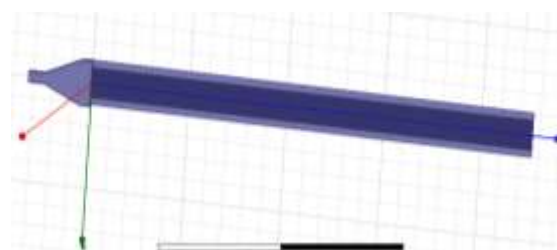
شکل ۵. نمودار حداقل و حداکثر امپدانس سطحی مورد نیاز در هر پریود

نتیجه حداقل و حداکثر عمق‌های مورد نیاز در پریودهای مختلف، باتوجه به امپدانس سطحی مربعی و تأثیر ضرایب دامنه در شکل ۶ نشان داده شده است



شکل ۶. نمودار حداقل و حداکثر عمق‌های مورد نیاز در هر پریود

آنتن موج نشستی نهایی با ۴۰۰ آرایه که متشکل از ۴۰ پریود آنتن موج نشستی با مدولاسیون مربعی است در نرم‌افزار HFSS ایجاد گردید که نمای کلی آن در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷. نمای کلی آنتن موج نشستی نهایی

نتیجه شبیه‌سازی با نرم‌افزار HFSS ساختار پیشنهادی با عمق دندانه‌های نشان داده شده در شکل (۶) به منظور داشتن سطح گلبزرگ جانبی برابر ۱۸dB در شکل (۸) نشان داده شده است. باتوجه به شکل (۸)، حداکثر مقدار سطح گلبزرگ‌های جانبی در شبیه‌سازی انجام شده برای هر دو حالت  $X'$  برابر مقدار طراحی شده ۱۸dB است.

فرستنده، فاصله بین فرستنده و گیرنده، افت فضای آزاد در فرکانس ارزیابی و ... است ولی پهنای پرتو گلبرگ اصلی و زاویه تشعشع گلبرگ اصلی کاملاً مطابقت داشته و سطح گلبرگ جانبی ۱۶dB اندازه‌گیری شده با سطح گلبرگ جانبی ۱۸dB شبیه‌سازی تأییدکننده هم هستند و نتیجه کاهش سطح گلبرگ جانبی پرتو آنتن موج نشستی که بر اساس آن طراحی انجام شده قابل قبول است.

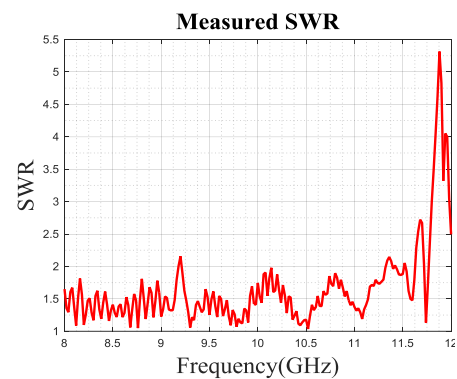
#### ۴. نتیجه‌گیری

باتوجه به بررسی تأثیرگذاری پارامترهای قابل تغییر و هدف مقاله مبنی بر کاهش سطح گلبرگ جانبی پرتو آنتن موج نشستی با کنترل امپدانس سطحی پیوندهای آنتن موج نشستی، می‌توان از تغییر مقدار  $M$  به منظور کنترل سطح گلبرگ جانبی پرتو استفاده نمود. این تغییرات در امپدانس سطحی آنتن موج نشستی تأثیرگذار هستند. در این مقاله با توجه به انتخاب ساختار دندانه‌ای برای آنتن موج نشستی و تعداد ۴۰۰ عنصر آرایه برای پاسخ به نیاز، به دلیل سختی ساخت آنتن نمی‌توان از کنترل دامنه تمام ۴۰۰ عنصر برای کاهش سطح گلبرگ کناری بهره برد برای همین تغییر دامنه ۴۰۰ عنصر را به کنترل دامنه ۴۰ پیوند از آنتن کاهش دادیم. نتیجه حاصل از این تغییرات امپدانس سطحی آنتن موج نشستی دندانه‌ای، کاهش سطح گلبرگ کناری پرتو آنتن به میزان ۱۸dB در شبیه‌سازی و ۱۶dB در مقدار اندازه‌گیری و آنتن ساخته شده است. در آنتن ساخته شده پهنای پرتو و زاویه تشعشع پرتو اصلی مطابقت کامل به طراحی و شبیه‌سازی داشت که بیانگر تأیید روش طراحی آنتن موج نشستی متناوب فلزی است.

#### ۵. مراجع

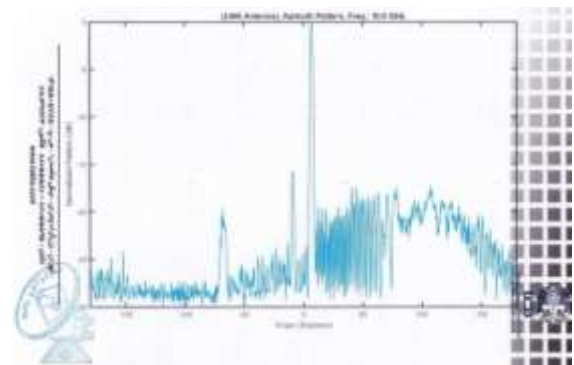
- [1] Oliner, A.; Hessel, A. "Guided Waves on Sinusoidally-Modulated Reactance Surface"; IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1959, 7, 201-208. <https://doi.org/DOI:10.1109/TAP.1959.1144771>
- [2] Lo, Y. T.; Lee, S. W. "Antenna Handbook"; Chapman & Hall, 1993, 1189-1204.
- [3] Balanis, C. A. "Modern Antenna Handbook"; John Wiley and Sons, 2008, 325-368,
- [4] Chen, Z. N.; Liu, D.; Qing, X. "Handbook of Antenna Technologies"; Springer, 2016, 1697-1736.
- [5] Guo, Y. J.; Gomez, J. L.; Guzman, R.; Weily, A. R. "Reconfigurable Leaky Wave Antennas"; Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies, 2014.
- [6] Patel, A. M.; Grbic, A. "A Printed Leaky-Wave Antenna Based on a Sinusoidally-Modulated Reactance Surface"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2011, 59, 2078-2095. <https://doi.org/10.1109/APS.2009.5171767>
- [7] Burghignoli, P.; Lovat, G.; Jackson, D. R. "Analysis and Optimization of Leaky-Wave Radiation at Broadside from a Class of 1-D Periodic Structures"; IEEE Trans. Antennas

در شکل (۱۰) نتیجه اندازه‌گیری SWR آنتن ساخته شده ارائه شده است.



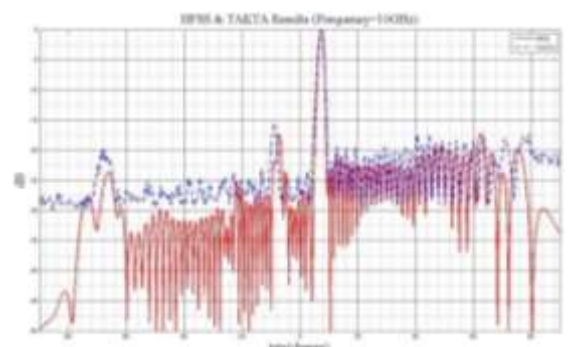
شکل ۱۰. نتیجه اندازه‌گیری SWR

نتیجه تست الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس ۱۰GHz در محیط اندازه‌گیری سایت تکتا در شکل (۱۱) ارائه شده است.



شکل ۱۱. نتیجه تست الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس ۱۰GHz در محیط اندازه‌گیری سایت تکتا

به منظور مقایسه نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی الگوی تشعشعی، نتایج به صورت هم‌زمان در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل (۱۲). نمودار الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده با HFSS و نتیجه اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه آنتن تکتا در فرکانس ۱۰GHz

بادقت در نتایج اندازه‌گیری عملی به این نکته پی می‌بریم که حداقل سیگنال قابل آشکارسازی در مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی محدود بوده و وابسته به شرایط تست (گین آنتن فرستنده، توان

- [13] Sievenpiper, D.; Zhang, L.; Broas, R. F. J.; Alexopolous, N. G.; Yablonovitch, E. "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band"; IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1999, 47, 2059-2074. <https://doi.org/10.1109/22.798001>
- [14] Karimi Yhoozani, P.; khavasi, A. "Analytical Calculation of Dispersion Diagram of 1D Graphene-Based Periodic Structures"; J. Appl. Electromagn. 2016, 3, 39-46 (In Persian). <https://20.1001.1.26455153.1394.3.4.5.6>.
- [15] Ganeh Garehbagh, Y.; Okhovvat, M. "Design of Corrugated Metallic Periodic Leaky Wave Antenna with Constant Depth and Variable Width at X-band Frequency"; J. Appl. Electromagn. 2020, 8, 35-44 (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.26455153.1399.8.1.5.5>
- [16] Ganeh Garehbagh, Y.; Okhovvat, M. "Beam Scanning of Metallic Corrugated Leaky Wave Antenna at Fix Frequency by changing of surface impedance". Iran. J. Electr. Electron. Eng. 2019, 16, 11-16. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.26765810.1398.16.4.18.9>
- Propag. 2006, 54, 2593-2604. <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.880725>
- [8] Panaretos, A. H.; Werner, D. H. "Spoof Plasmon Radiation Using Sinusoidally Modulated Corrugated Reactance Surfaces"; Opt. Express 2016, 24, 2593-2604. <https://doi.org/10.1364/OE.24.002443>
- [9] Panaretos, A. H.; Werner, D. H. "Leaky Wave Antennas Based on Capacitively Tuned Modulated Reactance Surfaces"; IEEE Antennas Wirel. propag. Lett. 2015, 15, 678-681. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2469103>
- [10] Kong, G. Sh.; Ma, H. F.; Cai, B. G.; Cui, T. J. "Continuous Leaky-Wave Scanning using Periodically Modulated Spoof Plasmonic Waveguide"; Sci. Rep. 2016, 6, 29600. <https://doi.org/10.1038/srep29600>.
- [11] Ettorre, M.; Neto, A.; Gerini, G.; Maci, S. "Leaky-Wave Slot Array Antenna Fed by a Dual Reflector System"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2008, 56, 3143-3149.
- [12] Cai, B. G.; Li, Y. B.; Ma, H. F.; Xiang Jiang, W. "Leaky-Wave Radiations by Modulating Surface Impedance on Sub Wavelength Corrugated Metal Structures"; Sci. Rep. 2016, 6, 23974. <https://doi.org/10.1038/srep23974>.