

## Optimal Frequency Selection for Surface Crack Detection in Metals Using a Flanged Open-Ended Rectangular Waveguide Based on Minimizing Signal Variations Caused by Liftoff Distance Changes

Farhad Mazlumi<sup>1</sup> 

1. Aeronautical Telecommunications Dept., Civil Aviation Technology College, Tehran, Iran. E-mail: [mazlumi@catc.ac.ir](mailto:mazlumi@catc.ac.ir)

### Article Information:

#### Research Article

Received 29 July 2025

Revised 23 August 2025

Accepted 19 Feb. 2026

### Keywords:

Microwave testing,  
Open-ended waveguide,  
Flange,  
Optimal frequency,  
Liftoff.

### ABSTRACT

One of the common non-destructive testing (NDT) techniques for detecting surface cracks in metallic structures involves the use of microwave signals and an open-ended rectangular waveguide with a standard flange as the probing device. In this method, the presence of a surface defect is identified by observing variations in the detector voltage, which corresponds to the total electric field at a specific point inside the waveguide. To facilitate and accelerate the inspection process in practical applications, a finite air gap — referred to as the liftoff distance — is typically maintained between the waveguide aperture and the metal surface. This paper, through detailed and systematic simulations using ANSYS HFSS, demonstrates that at certain frequencies, even minor changes in the liftoff distance can lead to significant variations in detector voltage. These changes may be mistakenly interpreted as defect indications, potentially leading to false alarms and unnecessary inspections. To validate the simulation-based findings, experimental measurements were also performed using a Vector Network Analyzer, specifically the Keysight Technologies N9952A model. The paper presents a comprehensive study of optimal frequencies for a WR-90 waveguide with a standard square flange in the frequency range of 8 GHz to 12.5 GHz, focusing on minimizing sensitivity to liftoff distance variations. Simulation results show that when the liftoff distance varies between 0 mm and 0.5 mm, the detector voltage exhibits the lowest sensitivity at 8 GHz, 10.495 GHz, and 12.5 GHz. Furthermore, when the liftoff variation extends up to 1 mm, the optimal frequency slightly shifts from 10.495 GHz to 10.240 GHz. To further confirm the proposed optimal frequency, a measurement at 10.5 GHz was carried out using LabVolt microwave laboratory equipment from Festo Didactic. The experimental results show a good agreement with simulation predictions, supporting the validity of the selected frequency range for reliable surface crack detection with minimal liftoff sensitivity. In order to investigate the sensitivity of the proposed frequencies in crack detection, simulation results for two slots with different depths are presented and analyzed.

**Cite this article:** Mazlumi, F. (2026). Optimal Frequency Selection for Surface Crack Detection in Metals Using a Flanged Open-Ended Rectangular Waveguide Based on Minimizing Signal Variations Caused by Liftoff Distance Changes. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 30-38.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.537813.1165>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

## انتخاب فرکانس بهینه در آزمایش غیرمخرب کشف ترک در سطح فلز بوسیله‌ی موجبر مستطیلی دهانه‌باز دارای فلنج با معیار کاهش تغییرات سیگنال ناشی از تغییرات فاصله‌ی هوایی

فرهاد مظلومی<sup>۱</sup> ✉

۱. گروه مخابرات هواپیمایی، دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری، تهران، ایران، رایانامه: [mazlumi@catc.ac.ir](mailto:mazlumi@catc.ac.ir)

### چکیده:

یکی از آزمون‌های غیرمخرب جهت کشف ترک در سطح فلزات، استفاده از امواج مایکروویو و بهره‌گیری از موجبر دهانه باز با فلنج استاندارد به عنوان پروب آزمایش است. در این روش با مشاهده‌ی تغییرات ولتاژ آشکارساز (که میدان الکتریکی کل را در یک نقطه از موجبر را سنجش می‌کند) وجود عیب در سطح فلز تشخیص داده می‌شود. جهت سهولت و افزایش سرعت در انجام آزمایش، نیاز است که یک فاصله‌ی هوایی بین دهانه‌ی موجبر و سطح فلز وجود داشته باشد. با ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار ANSYS HFSS، این مقاله نشان می‌دهد که در بعضی از فرکانس‌ها، تغییرات کم در فاصله‌ی هوایی موجب تغییرات زیادی در ولتاژ آشکارساز می‌گردد که ممکن است به اشتباه به وجود عیب تعبیر شود. جهت تأیید این دریافت از نتایج شبیه‌سازی، اندازه‌گیری با استفاده از یک تحلیل‌گر شبکه انجام شده است که نتایج آن نیز ارائه می‌گردد. در این مقله، برای یک موجبر WR-90 با فلنج استاندارد مربعی، فرکانس‌های بهینه در بازه‌ی 8GHz تا 12.5GHz به لحاظ کمترین حساسیت به تغییرات فاصله‌ی هوایی ارائه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار ANSYS HFSS نشان می‌دهند در صورتی که محدوده‌ی تغییرات فاصله‌ی هوایی از صفر تا 0.5mm باشد، ولتاژ آشکارساز در فرکانس‌های 8GHz، 10.495GHz و 12.5GHz کمترین حساسیت را نسبت تغییرات فاصله‌ی هوایی دارد. همچنین، در صورتی که حداکثر تغییرات فاصله‌ی هوایی تا 1mm مد نظر باشد فرکانس‌های بهینه 10.495GHz به 10.240GHz کاهش می‌یابد. جهت تأیید فرکانس بهینه‌ی پیشنهادی، اندازه‌گیری با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی شرکت LabVolt در فرکانس 10.5GHz نیز انجام شده است که تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشاهده می‌گردد. به منظور بررسی حساسیت فرکانس‌های پیشنهادی در کشف ترک، نتایج شبیه‌سازی برای دو شکاف با عمق مختلف ارائه و نتایج آن تحلیل می‌شود.

### اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۳۰

### کلیدواژگان:

آزمایش مایکروویو،  
موجبر دهانه‌باز،  
فلنج،  
فرکانس بهینه،  
فاصله‌ی هوایی.

استناد: مظلومی، فرهاد. (۱۴۰۴). انتخاب فرکانس بهینه در آزمایش غیرمخرب کشف ترک در سطح فلز بوسیله‌ی موجبر مستطیلی دهانه‌باز دارای فلنج با معیار کاهش تغییرات سیگنال ناشی از تغییرات فاصله‌ی هوایی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۳۰-۳۸.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.537813.1165>



## ۱- مقدمه

[۸-۹]. اثر مثبت آن علاوه بر سهولت حرکت پروب این است که محدوده‌ی دید پروب جهت کشف عیب بیشتر می‌گردد. دلیل آن هم این است که نشت امواج از فاصله‌ی هوایی، توزیع جریان در محدوده‌ی وسیع‌تری از سطح فلز ایجاد می‌گردد و بنابراین، اگر عیب قدری از دهانه‌ی موجبر هم فاصله داشته باشد احتمال آشکارسازی آن وجود دارد. اثر منفی آن این است که مقداری از توان امواج رفت و برگشت از طریق فاصله‌ی هوایی به بیرون از موجبر نشت می‌کند و این امر موجب می‌شود دامنه‌ی تغییرات سیگنال دریافتی توسط آشکارساز هنگام عبور دهانه‌ی پروب از روی عیب کاهش یابد. با افزایش فاصله‌ی هوایی مقدار تغییرات ناشی از وجود عیب نیز کاهش می‌یابد. لذا فاصله‌ی هوایی در طول آزمایش باید به گونه‌ای کنترل شود تا دامنه‌ی تغییرات ناشی از عیب بخوبی از نویز قابل تشخیص باشد.

فاصله گرفتن دهانه موجبر از سطح فلز موجب می‌شود که وجود فلنج و ابعاد آن بر مقدار سیگنال دریافتی توسط آشکارساز اثر داشته باشد. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که هنگام عبور فلنج از روی عیب نیز تغییراتی در سیگنال آشکارساز ملاحظه می‌شود که این امر احتمال کشف عیب را افزایش می‌دهد [۸-۹].

یکی از مشکلات آزمایش غیرمخرب با استفاده از موجبر دهانه باز، کنترل فاصله‌ی هوایی است. تغییرات فاصله‌ی هوایی نیز می‌تواند موجب تغییر سیگنال دریافتی توسط آشکارساز گردد؛ به طوری که ممکن است به رغم عدم وجود عیب در سطح فلز، تغییرات سیگنال دریافتی ناشی از تغییرات فاصله‌ی هوایی به وجود عیب در سطح فلز تعبیر گردد.

در این مقاله یک فرکانس بهینه برای آزمایش غیرمخرب کشف ترک سطحی در سطح فلز با استفاده از یک موجبر مستطیلی دهانه باز دارای فلنج ارائه می‌شود. معیار انتخاب این فرکانس بهینه کم کردن تغییرات سیگنال دریافتی توسط آشکارساز به ازای تغییرات فاصله‌ی هوایی است.

ساختار مقاله به این صورت است که ابتدا در بخش بعدی علت و انگیزه‌ی انجام این تحقیق با ارائه‌ی مشاهدات تجربی و شبیه‌سازی ارائه می‌گردد. سپس، نحوه‌ی تعیین فرکانس بهینه برای انجام آزمایش غیرمخرب با استفاده از موجبر دهانه‌باز دارای فلنج ارائه می‌شود. در نهایت نیز خلاصه‌ای از

در دهه‌های اخیر روش آزمون غیرمخرب مایکروویوی به عنوان یکی از شاخه‌های روش‌های الکترومغناطیسی مورد توجه محققان بوده است [۱-۳]. در این میان، استفاده از موجبر دهانه‌باز به عنوان پروب برای تشخیص و اندازه‌گیری ترک در سطح فلزات کارایی خود را نشان داده است [۴-۶]. در این روش، امواج مایکروویو (مطابق شکل ۱) توسط یک ژنراتور ایجاد و از طریق یک موجبر دهانه‌باز به سطح فلز مورد آزمایش تابانده می‌شود [۷]. با برخورد امواج مایکروویو با سطح فلز، یک توزیع جریان الکتریکی سطحی برای ارضاء شرایط مرزی ایجاد می‌گردد. در صورت وجود عیب در سطح فلز، توزیع جریان ایجاد شده مغشوش می‌گردد که در پی آن، موج برگشتی از سطح فلز نیز تغییر می‌کند. کل یا بخشی از موج برگشتی از داخل موجبر عبور می‌کند و با رصد تغییرات سیگنال برگشتی از سطح فلز در درون موجبر می‌توان به وجود عیب در سطح فلز پی برد.

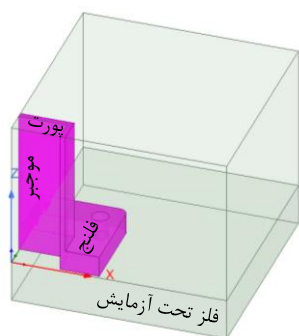
لازم به ذکر است به جای اندازه‌گیری دامنه و فاز موج برگشتی که اندازه‌گیری آن نیازمند ادوات پیچیده‌تری است معمولاً میدان کل ناشی از امواج تابشی و بازگشتی با استفاده از یک آشکارساز اندازه‌گیری می‌گردد. در واقع تغییر موج برگشتی موجب تغییر میدان کل در محل آشکارساز می‌گردد و از تغییرات آن می‌توان به وجود عیب در سطح فلز پی برد. برای این که اثر عیب در موج برگشتی دیده شود باید عیب در محدوده دید دهانه موجبر قرار داشته باشد. در حالتی که دهانه‌ی موجبر کاملاً با سطح فلز در تماس باشد (یعنی فاصله‌ی هوایی بین موجبر و سطح فلز وجود نداشته باشد) باید کل عیب یا بخشی از آن در دهانه موجبر قرار گرفته باشد. از آن جایی که محل عیب از قبل معلوم نیست باید دهانه‌ی موجبر نقاط مختلف سطح فلز را آزمایش نماید. آزمایش سطح فلز در حالتی که دهانه‌ی موجبر با سطح فلز در تماس باشد کار سخت و زمان‌بر است. به همین دلیل برای افزایش سرعت آزمایش و سهولت حرکت پروب در روی سطح فلز معمولاً باید یک فاصله‌ی هوایی کم بین دهانه‌ی موجبر و سطح فلز وجود داشته باشد.

وجود فاصله‌ی هوایی بین دهانه‌ی موجبر و سطح فلز آثار مثبت و منفی از لحاظ کشف عیب در سطح فلز دارد

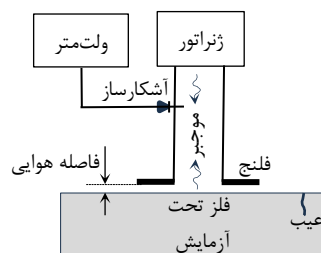
نتایج تحقیق جمع‌بندی می‌گردد.

$$V_n(f, offset) = \frac{|1 - \Gamma(f, offset)|^2}{4} \quad (1)$$

نتایج شبیه‌سازی در فرکانس 9.5GHz برای ولتاژ نرمالیزه آشکارساز بر حسب فاصله‌ی هوایی (Offset) در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طوری که در این شکل ملاحظه می‌شود تغییر فاصله‌ی هوایی از صفر تا 0.5mm می‌تواند تا حدود ۵۰ درصد سیگنال آشکارساز را تغییر دهد. برای بررسی بیشتر این امر، ضریب بازگشت از دهانه‌ی موجبر بر حسب فرکانس ( $f$ ) به ازای مقادیر مختلف فاصله‌ی هوایی شبیه‌سازی گردید که نتایج آن برای چند فاصله‌ی هوایی بین دهانه‌ی موجبر و سطح فلز در شکل ۵ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در بازه‌ی فرکانسی 8GHz تا 12.5GHz، دو دره‌ی عمیق در دو فرکانس متفاوت وجود دارد. فرکانس این دره‌ها به فاصله‌ی هوایی وابسته است و با افزایش فاصله‌ی هوایی، فرکانس دره کاهش می‌یابد. در واقع شکل ۵ نشان می‌دهد که علت تغییرات سیگنال آشکارساز به ازای تغییرات ناچیز فاصله‌ی هوایی این است که در بعضی از فرکانس‌ها، دره‌های عمیقی در موج برگشتی از موجبر وجود دارد. هنگامی که فرکانس کار آزمایش نزدیک به این دره‌ها باشد ممکن است که تغییرات ناچیز فاصله‌ی هوایی منجر به تغییرات زیاد سیگنال دریافتی توسط آشکارساز گردد. در واقع در فرکانس‌های نزدیک به رخ دادن دره‌ها، کاهش دامنه‌ی ضریب بازگشت منجر به کاهش سیگنال آشکار ساز بر اساس رابطه (۱) می‌گردد.



شکل ۲) ساختار شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ANSYS HFSS (موجبر مستطیلی WR-90 دهانه‌باز دارای فلنج استاندارد که در یک فاصله از فلز مسطح قرار گرفته است).



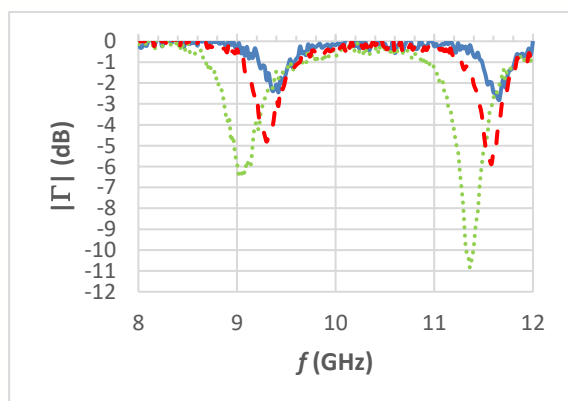
شکل ۱) موجبر مستطیلی دهانه‌باز دارای فلنج در مقابل یک فلز دارای عیب سطحی

## ۲- مشاهدات تجربی و شبیه‌سازی

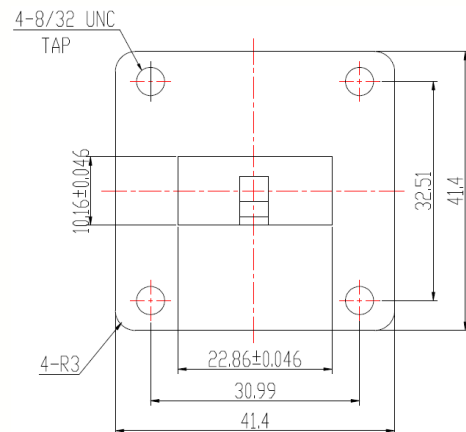
همان طوری که قبلاً ذکر شد برای سهولت حرکت پروب در سطح فلز برای یافتن عیب باید یک فاصله‌ی هوایی بین دهانه‌ی پروب و سطح فلز موجود باشد. بنا بر تجربه، قبلاً دیده شده بود که هنگام تنظیم این فاصله‌ی هوایی گاهی تغییرات نسبتاً زیادی در سیگنال آشکارساز صرفاً با تغییر ناچیز در این فاصله‌ی هوایی مشاهده می‌شد. تصور می‌شد که این تغییرات زیاد ناشی از اشکال در قرائت دستگاه است؛ لذا برای بررسی بیشتر، شبیه‌سازی در نرم‌افزار ANSYS HFSS [۱۰] با ساختار نشان داده شده در شکل ۲ انجام گردید. همان طوری که در این شکل ملاحظه می‌شود یک موجبر مستطیلی WR-90 دهانه‌باز با یک فلنج استاندارد مربعی [۱۱] (شکل ۳) در مقابل یک فلز مسطح قرار گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به تقارن مسأله، فقط یک چهارم ساختار با در نظر گرفتن شرایط مرزی تقارن مناسب تحلیل شده است. در ضمن، پورت ورودی تا دهانه‌ی موجبر De-embed شده است تا دهانه‌ی موجبر، مرجع فاز ضریب بازگشت محاسبه شده باشد. با فرض این‌که موجبر از جنس مس و فلز تحت آزمایش از آلومینیوم است. شبیه‌سازی در بازه‌ی فرکانسی 8GHz تا 12.5GHz انجام شده است. فرض بر این است که آشکارساز در محل شکم موج ایستای تشکیل شده در موجبر قرار دارد. با توجه به این که ولتاژ آشکارساز متناسب با مربع شدت میدان الکریکی است، مقدار ولتاژ نرمالیزه آشکارساز ( $V_n$ ) بر حسب ضریب بازگشت از دهانه‌ی موجبر ( $\Gamma$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

تحلیل گر شبکه مدل Keysight Technologies N9952A [۱۲] انجام گردید. قبل از انجام آزمایش، این دستگاه از سر کابل متصل به آن توسط ادوات مناسب در بازه‌ی فرکانسی 8GHz تا 12GHz کالیبره گردید. سپس، یک پورت دستگاه به یک آداپتور تجاری SMA به موجبر WR-90 با فلنج استاندارد مربعی متصل گردید. دهانه‌ی موجبری آداپتور در فواصل مختلفی از سطح یک قطعه آلومینیومی مسطح قرار گرفت و ضریب بازگشت به ازای مقادیر مختلف فاصله‌ی هوایی اندازه‌گیری گردید. نظر به این که تنظیم دستی دقیق فاصله‌ی دهانه‌ی موجبری آداپتور از سطح فلز مشکل بود از تکه‌های کوچک کاغذ A4 جهت تنظیم فاصله‌ی هوایی بین دهانه‌ی موجبری آداپتور و سطح فلز استفاده گردید. تکه‌های کوچک کاغذ بگونه‌ای در چهار طرف لبه مربعی سطح فلنج بین سطح فلنج و سطح فلز قرار داده شد که کمترین تأثیر را روی اندازه‌گیری داشته باشند. نظر به این که ضخامت کاغذ مورد استفاده حدوداً 0.1mm بود با قرار دادن تعداد لایه‌های مختلف کاغذ، فواصل هوایی مختلف قابل تنظیم بود.

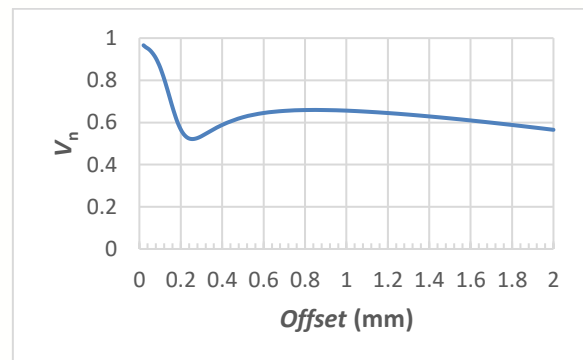
نتایج اندازه‌گیری برای سه فاصله‌ی هوایی یک لایه، دو لایه و چهار لایه کاغذ (با ضخامت‌های کلی تقریبی 0.1mm، 0.2mm و 0.4mm) در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طوری که در این شکل مشاهده می‌شود دره‌های نسبتاً عمیق در اندازه‌گیری نیز مشاهده می‌گردد. هم‌چنین اندازه‌گیری نیز تأیید می‌کند که در بازه‌ی فرکانسی مورد آزمایش، دو دره قابل مشاهده است و با افزایش فاصله‌ی هوایی، فرکانس رخ دادن دره‌ها کاهش می‌یابد.



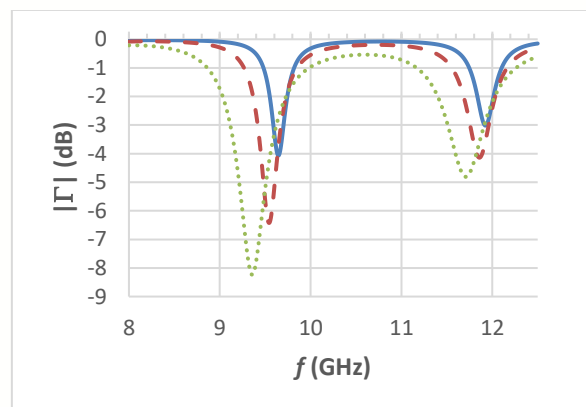
شکل ۶) نتایج اندازه‌گیری ضریب بازگشت از دهانه یک موجبر WR-90 با فلنج استاندارد مربعی به ازای فاصله هوایی 0.1mm (خط پیوسته)، 0.2mm (خط چین) و 0.4mm (نقطه چین)



شکل ۳) شکل و ابعاد فلنج مربعی موجبر WR-90 [۱۱]

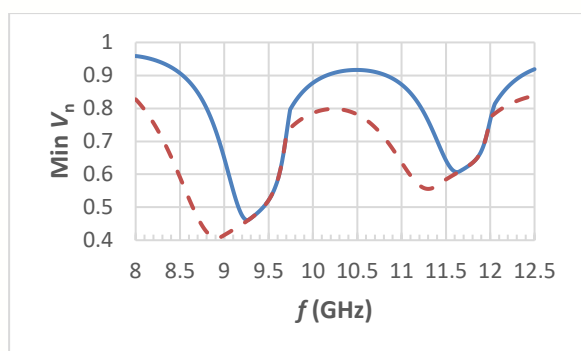


شکل ۴) نتایج شبیه‌سازی برای محاسبه‌ی ولتاژ نرمالیزه آشکار ساز بر حسب فاصله هوایی در فرکانس 9.5GHz



شکل ۵) نتایج شبیه‌سازی ضریب بازگشت از دهانه یک موجبر WR-90 با فلنج استاندارد مربعی به ازای فاصله هوایی 0.1mm (خط پیوسته)، 0.2mm (خط چین) و 0.4mm (نقطه چین) جهت تأیید نتایج شبیه‌سازی، آزمایشی با استفاده از یک

فرکانس‌های مجاور دارد. مقادیر  $\text{Min } V_n$  در این فرکانس‌های بهینه ( $f_{\text{opt}}$ ) در جدول ۱ آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای حداقل ولتاژ نرمالیزه آشکارساز به ازای تغییر فاصله‌ی هوایی از صفر تا 1mm ( $MO = 1\text{mm}$ ) در شکل ۷ (خط چین) نشان داده شده است. همان طوری که در این شکل ملاحظه می‌شود در سه فرکانس 8GHz، 10.240GHz و 12.5GHz، ولتاژ آشکارساز کمترین حساسیت را به تغییرات فاصله‌ی هوایی نسبت به فرکانس‌های مجاور دارد. مقادیر  $\text{Min } V_n$  در این فرکانس‌ها نیز مجدداً در جدول ۱ ذکر شده است. لازم به ذکر است هر چند بر اساس این جدول، فرکانس 8GHz حساسیت کمتری نسبت به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارد، اما بر اساس تحقیقات قبلی [۱۴]، فرکانس بالاتر (یعنی 12.5GHz) حساسیت بهتری در کشف ترک دارد.



شکل ۷) نتایج شبیه‌سازی حداقل ولتاژ نرمالیزه آشکارساز برای تغییرات فاصله‌ی هوایی از 0mm تا 0.5mm (خط پیوسته) و برای تغییرات فاصله‌ی هوایی از صفر تا 1mm (خط چین)

جدول ۱) مقادیر  $\text{Min } V_n$  در فرکانس‌های بهینه به ازای مقادیر مختلف  $MO$

$MO$	$f_{\text{opt}}$	$\text{Min } V_n$
	8GHz	0.9588
0.5mm	10.495GHz	0.9166
	12.5GHz	0.9189
1mm	8GHz	0.8275
	10.240GHz	0.7984
	12.5GHz	0.8386

دلیل وجود این دره‌ها در برگشتی از دهانه‌ی موجبر، نوسانی است که در کاواک تشکیل شده از فضای بین فلنج و سطح هادی ایجاد می‌شود. در واقع، پدیده‌ی نوسانی در این کاواک نظیر آن چیزی است که در یک آنتن Patch مستطیلی مایکرواستریپ مشاهده می‌گردد [۱۳].

### ۳- تعیین فرکانس بهینه‌ی آزمایش

همان طوری که در بخش قبل ذکر گردید در آزمایش غیرمخرب مایکروویوی با استفاده موجبر دهانه‌باز دارای فلنج، گاهی به ازای تغییر کم فاصله‌ی هوایی، تغییر زیادی در سیگنال آشکارساز مشاهده می‌شود. علت این امر هم دره‌های عمیقی است که در بعضی از فرکانس‌ها در سیگنال دریافتی از آشکارساز دره‌های عمیقی مشاهده می‌شود. لذا اگر آزمایش در فرکانسی انجام شود که فاصله‌ی خوبی از این دره‌های سیگنال داشته باشد تغییرات ناشی از فاصله‌ی هوایی، کمینه خواهد شد.

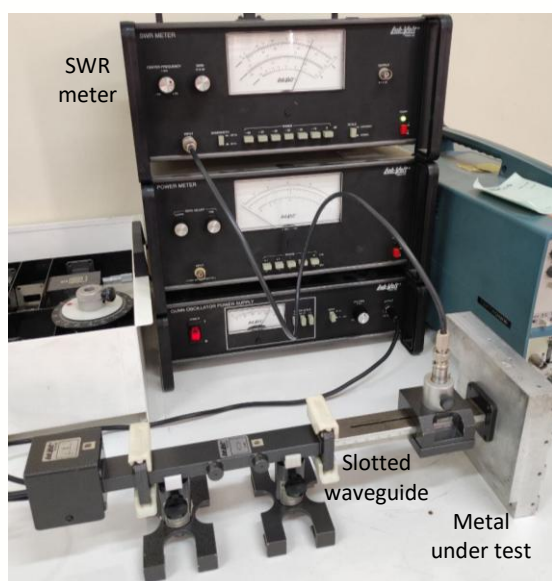
به منظور استخراج فرکانس بهینه‌ی آزمایش که کمترین تغییرات را در ازای تغییرات فاصله‌ی هوایی داشته باشد سیگنال برگشتی از دهانه‌ی موجبر به ازای فواصل مختلف هوایی (با گام‌های  $10\mu\text{m}$ ) در بازه‌ی فرکانسی 8GHz تا 12.5GHz با استفاده از ساختار شکل ۲ در نرم‌افزار ANSYS HFSS شبیه‌سازی گردید. در این شبیه‌سازی، ابعاد مورد استفاده همان ابعاد مذکور در شکل ۳ و جنس موجبر و فلز مورد آزمایش، آلومینیوم است. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و رابطه‌ی (۱)، سیگنال نرمالیزه‌ی ولتاژ آشکارساز با فرض این که آشکارساز در محل شکم الگوی موج ایستای تشکیل شده درون موجبر قرار دارد محاسبه گردید. حداقل ولتاژ نرمالیزه‌ی آشکارساز ( $\text{Min } V_n$ ) به ازای تغییر فاصله‌ی هوایی از صفر تا  $MO$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min } V_n(f, MO) = \min \{V_n(f, \text{offset}) | 0 \leq \text{Offset} \leq MO\} \quad (2)$$

نتایج شبیه‌سازی برای حداقل ولتاژ نرمالیزه‌ی آشکارساز به ازای تغییر فاصله‌ی هوایی از صفر تا 0.5mm ( $MO = 0.5\text{mm}$ ) در شکل ۷ (خط پیوسته) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در سه فرکانس 8GHz، 10.495GHz و 12.5GHz، ولتاژ آشکارساز کمترین حساسیت را به تغییرات فاصله‌ی هوایی نسبت به

برای شبیه‌سازی، فرکانس‌های 8GHz، 10.495GHz و 12.5GHz (سه فرکانس دارای کمترین حساسیت تا فاصله‌ی هوایی 0.5mm) و هم چنین فرکانس 9.26GHz که دارای بیشترین حساسیت به فاصله‌ی هوایی است می‌باشند.

نتایج شبیه‌سازی برای دو عمق شکاف 5mm و 9mm به ترتیب در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ آورده شده است. همان طوری که در این دو شکل مشاهده می‌شود: الف) فرکانس 9.26GHz که حساسیت زیادی به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارد حساسیت خوبی نیز برای کشف شکاف دارد؛ ب) بعضی از فرکانس‌هایی که حساسیت کمی به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارند (نظیر 8GHz و 10.495GHz) حساسیت کمی نیز در کشف شکاف دارند؛ ج) فرکانس 12.5GHz به رغم این که حساسیت کمی به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارد حساسیت نسبتاً خوبی برای کشف شکاف دارد.

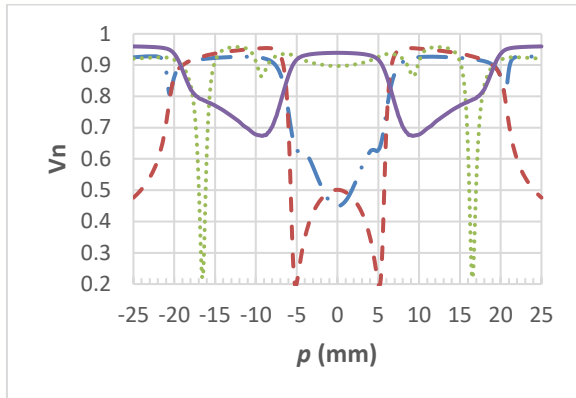


شکل ۸) مجموعه‌ی آزمایش برپا شده با استفاده از ادوات میکروویو شرکت LabVolt

نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل ۷ نشان می‌دهد در صورتی که فاصله‌ی هوایی تا 1mm تغییرات داشته باشد (یعنی  $MO = 1mm$ ) ولتاژ نرمالیزه‌ی آشکارساز در فرکانس 8.9GHz می‌تواند تا 0.4 کاهش یابد. علاوه بر این، بازه‌ی فرکانسی 8.5GHz تا 9.7GHz و هم چنین، بازه‌ی فرکانسی 11.1GHz تا 11.7GHz انتخاب خوبی برای انجام آزمایش غیرمخرب با استفاده از موجبر WR-90 با فلنج استاندارد مربعی نیست.

جهت بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، آزمایشی با استفاده از ادوات میکروویو شرکت LabVolt [۱۵] موجود در آزمایشگاه میکروویو دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری برپا گردید (شکل ۸). این ادوات آزمایشگاهی از موجبر WR-90 با فلنج مربعی استاندارد ساخته شده‌اند. با توجه به ابعاد موجبر و طول موج هدایت شده اندازه‌گیری شده درون موجبر، فرکانس کار مولد مجموعه در حدود 10.5GHz محاسبه گردید که نزدیک به یکی از فرکانس‌های مندرج در جدول ۱ (یعنی 10.495GHz) است. آشکارساز روی موجبر شکاف‌دار در محل بیشینه‌ی الگوی موج ایستا قرار داده شد و سطح سیگنال آن روی دستگاه اندازه‌گیری SWR به ازای فواصل هوایی مختلف از دهانه‌ی موجبر شکاف‌دار تا یک قطعه‌ی مسطح آلومینیومی اندازه‌گیری گردید. این بار هم برای تنظیم فاصله از کاغذهای A4 ولی با ضخامت حدود 0.07mm استفاده گردید. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی وجود دارد. شکل ۹ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی وجود دارد. علاوه بر این، در نتایج شبیه‌سازی مندرج در جدول ۱، حداقل سیگنال آشکارساز به ازای تغییر فاصله‌ی هوایی از صفر تا 0.5mm برابر 0.9166 پیش‌بینی شده بود که اندازه‌گیری نیز با مقدار حدود 0.92 آن را تأیید می‌کند.

در نهایت به منظور بررسی اجمالی حساسیت فرکانس‌های مختلف در تشخیص ترک در سطح فلزات، ولتاژ نرمالیزه‌ی آشکارساز ناشی از یک شکاف مستطیلی با طولی برابر با طول موجبر و پهنای 0.8mm در دو عمق 5mm و 9mm به ازای مکان‌های مختلف در دهانه‌ی موجبر (شکل ۱۰) در فاصله‌ی هوایی 0.5mm شبیه‌سازی گردید. همان طوری که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود،  $p$ ، فاصله‌ی وسط شکاف تا وسط دهانه‌ی موجبر می‌باشد. فرکانس‌های انتخابی

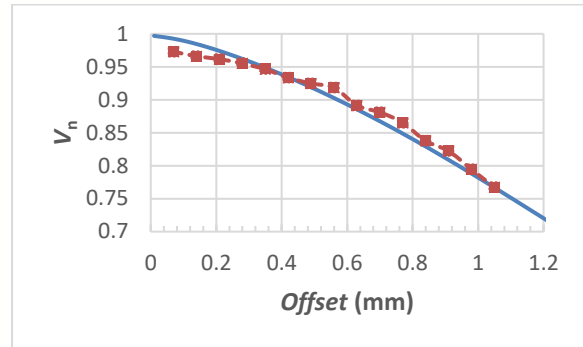


شکل ۱۲) ولتاژ نرمالیزه‌ی آشکارساز بر حسب موقعیت یک شکاف بلند با پهنای 0.8mm و عمق 9mm در فاصله‌ی هوایی 0.5mm در فرکانس‌های 10.495GHz (خط پیوسته)، 9.26GHz (خط چین)، 12.5GHz (نقطه چین) و 8GHz (خط نقطه).

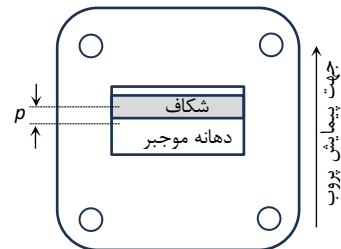
#### ۴- نتیجه‌گیری

جهت سهولت در انجام آزمون غیرمخرب میکروویوی برای کشف عیوب سطحی فلزات با استفاده از موجبر دهانه‌باز دارای فلنج باید یک فاصله‌ی هوایی بین دهانه‌ی موجبر و سطح فلز وجود داشته باشد. در این مقاله نشان داده شد که در بعضی از فرکانس‌ها سیگنال دریافتی توسط آشکارساز به ازای تغییرات ناچیز فاصله‌ی هوایی تغییرات زیادی می‌کند که این تغییرات ممکن است به عنوان وجود عیب در سطح فلز تلقی گردد. با استفاده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نشان داده شد که این تغییرات در بعضی از فرکانس‌ها به دلیل وجود دره‌های عمیق در برگشتی از دهانه‌ی موجبر شدیدتر است.

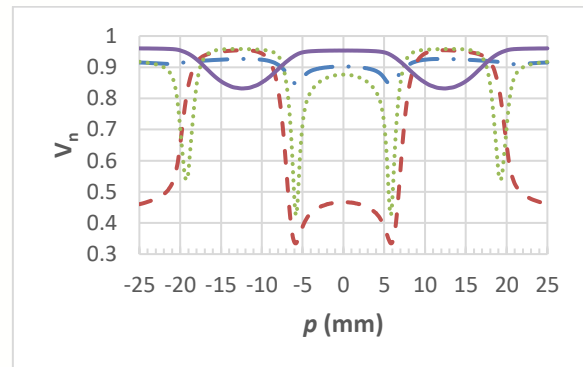
با توجه به مطلب مذکور، این مقله فرکانس بهینه‌ای را پیشنهاد می‌کند که انجام آزمایش در آن فرکانس‌ها حساسیت کمتری نسبت به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارد. بدین منظور نشان داده شد که برای یک موجبر WR-90 دهانه‌باز با فلنج استاندارد مربعی، در صورتی که محدوده‌ی تغییرات فاصله‌ی هوایی از صفر تا 0.5mm باشد، ولتاژ آشکارساز در فرکانس‌های 8GHz، 10.495GHz و 12.5GHz کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارد. در صورتی که حداکثر تغییرات فاصله‌ی هوایی تا 1mm مد نظر باشد فرکانس‌های بهینه 10.495GHz به 10.240GHz کاهش می‌یابد.



شکل ۹) ولتاژ نرمالیزه‌ی آشکارساز به ازای مقادیر مختلف فاصله‌ی هوایی؛ نتایج شبیه‌سازی در فرکانس 10.495GHz (خط پیوسته) و نتایج اندازه‌گیری در فرکانس 10.5GHz (خط چین).



شکل ۱۰) موقعیت نسبی شکاف در دهانه‌ی موجبر.



شکل ۱۱) ولتاژ نرمالیزه‌ی آشکارساز بر حسب موقعیت یک شکاف بلند با پهنای 0.8mm و عمق 5mm در فاصله‌ی هوایی 0.5mm در فرکانس‌های 10.495GHz (خط پیوسته)، 9.26GHz (خط چین)، 12.5GHz (نقطه چین) و 8GHz (خط نقطه).

- ARBITRARY-SHAPE SURFACE CRACK IN A LOSSY CONDUCTOR. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(10), 3706–3711.
- [8] Zoughi, R., & Kharkovsky, S. (2008). MICROWAVE AND MILLIMETRE WAVE SENSORS FOR CRACK DETECTION. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31(8), 695–713.
- [9] Yadegari, A. M., Moini, R., Sadeghi, S. H. H., & Mazlumi, F. (2010). OUTPUT SIGNAL PREDICTION OF AN OPEN-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE PROBE WHEN SCANNING CRACKS AT A NON-ZERO LIFT-OFF. *NDT & E International*, 43(1), 1–7.
- [10] Ansys. (2023). *ANSYS HFSS (Version 2024 R2) [Computer Software]*. ANSYS, Inc.
- [11] Xi'an HengDa Microwave Technology Development Co. (2023). *WR90 WAVEGUIDE TO COAXIAL ADAPTER (END-LAUNCH) DATASHEET (Part No. HD-100WECASKPC) [Technical Datasheet]*. Xi'an HengDa Microwave Technology Development Co.
- [12] Keysight Technologies. (2019). *N9952A FIELDFOX HANDHELD VECTOR NETWORK ANALYZER USER'S GUIDE [User Manual]*. Keysight Technologies.
- [13] Balanis, C. A. (2016). *ANTENNA THEORY: ANALYSIS AND DESIGN* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [14] Zoughi, R., Ganchev, S. I., & Huber, C. (1996). MEASUREMENT PARAMETER OPTIMIZATION FOR SURFACE CRACK DETECTION IN METALS USING AN OPEN-ENDED WAVEGUIDE PROBE. In *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 1996)* (Vol. 2, pp. 1391–1394). IEEE.
- [15] Lab-Volt Ltd. (2000). *MICROWAVE TRAINING SYSTEMS* (3rd ed.). Lab-Volt Ltd.
- در نهایت با ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای دو شکاف در فرکانس‌های مختلف نشان داده شد که بعضی از فرکانس‌هایی که حساسیت کمی به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارند حساسیت کمی نیز برای کشف شکاف دارند. هم‌چنین نتایج برای شکاف‌های بررسی شده نشان می‌دهند که فرکانس 12.5GHz به رغم این که حساسیت کمی به تغییرات فاصله‌ی هوایی دارد حساسیت نسبتاً خوبی برای کشف شکاف دارد.
- ۵- تعارض منافع**  
هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.
- ۶- منابع**
- [1] Abou-Khousa, M. A., Rahman, M. S. U., Donnell, K. M., & Al Qaseer, M. T. (2023). DETECTION OF SURFACE CRACKS IN METALS USING MICROWAVE AND MILLIMETER-WAVE NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES: A REVIEW. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, 1–18.
- [2] ur Rahman, M. S., Abou-Khousa, M. A., & Akbar, M. F. (2024). A REVIEW ON MICROWAVE NON-DESTRUCTIVE TESTING (NDT) OF COMPOSITES. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 58, 101848.
- [3] Ghattas, A., Al-Sharawi, R., Zakaria, A., & Qaddoumi, N. (2025). DETECTING DEFECTS IN MATERIALS USING NONDESTRUCTIVE MICROWAVE TESTING TECHNIQUES: A COMPREHENSIVE REVIEW. *Applied Sciences*, 15(6), 3274.
- [4] Huber, C., Abiri, H., Ganchev, S. I., & Zoughi, R. (2002). MODELING OF SURFACE HAIRLINE-CRACK DETECTION IN METALS UNDER COATINGS USING AN OPEN-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45(11), 2049–2057.
- [5] Ramzi, M. R., Abou-Khousa, M., & Prayudi, I. (2017). NEAR-FIELD MICROWAVE IMAGING USING OPEN-ENDED CIRCULAR WAVEGUIDE PROBES. *IEEE Sensors Journal*, 17(8), 2359–2366.
- [6] Ahanian, I., & Sadeghi, S. H. H. (2024). AN EFFICIENT METHOD FOR OUTPUT PREDICTION OF AN ARRAY WAVEGUIDE PROBE WHEN SCANNING A SURFACE-BREAKING CRACK IN A METAL. *Sensing and Imaging*, 25(1), 56.
- [7] Mazlumi, F., Sadeghi, S. H. H., & Moini, R. (2006). INTERACTION OF AN OPEN-ENDED RECTANGULAR WAVEGUIDE PROBE WITH AN