

Original Research Paper

Identification of Crack Defect in Additively Manufactured Steel Plates Using Modal Analysis

A. Mirmohamadkhanivz , R. Azarafza *, R. Shoja Razavi  and M. Barkat 

Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 04 Juli 2025

Revised 04 July 2025

Accepted 09 November 2025

Available Online 02 December 2025

Keywords:

Additive manufacturing

Selective laser melting

Modal analysis

Defect evaluation

Mode shape curvature

ABSTRACT

Evaluation of defects in parts made by additive manufacturing methods such as selective laser melting is always one of the important issues for manufacturers of these types of parts. Along with the development of their manufacturing methods, the defect inspection methods in such parts are also being developed and completed. Previously, researchers have shown the effectiveness of modal tests, which are vibration-based methods, to identify defects in parts and structures made of metal, plastic, composite, and concrete. But for additive manufacturing parts, the development of modal methods with the application of defect detection is in the early stages of research. The first research in this field has been done with an additively manufactured part in the shape of a beam. The smallness of additive manufacturing parts and structures, due to the limitation of the build chamber of the printing machine, brings the challenge of high frequency excitation of the part in the modal test. In this article, in a step forward, by modal analysis and comparing the modal properties of healthy and defective steel plates made by selective laser melting, defect identification from one-dimensional space to two-dimensional space has been done, up to the level of defect locating and severity assessment. The defect in the defective plate is intentionally created in the form of a crack on the surface of the plate, and methods based on frequency change and mode shape change including mode shape curvature and modal strain energy have been used to identify and locate the defect

* Corresponding Author's E-mail: azarmut@mut.ac.ir

How to Cite this Article:

A. Mirmohamadkhani, R. Azarafza, R. Shoja Razavi and M. Barkat, Identification of Crack Defect in Additively Manufactured Steel Plates Using Modal Analysis," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-16, 2026, <https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.2.1>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by ARI. This article is an open access article licensed under [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



شناسایی عیب ترک در صفحه فولادی ساخت افزایشی با استفاده از آنالیز مودال

علیرضا میرمحمدخانی^۱، رضا آذر افزا^۲، رضا شجاع رضوی^۳ و مسعود برکت^۴

۱- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

ارزیابی عیوب در قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی مانند ذوب انتخابی لیزری همواره جزء مسائل مهم برای سازندگان این نوع قطعات است. همگام با توسعه روش‌های ساخت آن‌ها، روش‌های بازرسی عیوب در اینگونه قطعات نیز در حال توسعه و تکمیل هستند. پیش از این محققان کارایی آزمون‌های مودال را که مبتنی بر روش‌های ارتعاش پایه هستند، برای شناسایی عیوب در قطعات و سازه‌های ساخته شده از فلز، پلاستیک، کامپوزیت و بتن نشان داده‌اند. اما برای قطعات ساخت افزایشی، توسعه روش‌های مودال با کاربرد شناسایی عیوب در مراحل اولیه تحقیق می‌باشد. اولین تحقیقات این حوزه با یک قطعه ساخت افزایشی به شکل تیر انجام شده‌است. کوچک بودن قطعات و سازه‌های ساخت افزایشی با توجه به محدودیت محفظه ساخت دستگاه چاپ، چالش تحریک فرکانس بالای قطعه در آزمون مودال را به همراه دارد. در مقاله حاضر در یک گام رو به جلو با تحلیل مودال و مقایسه خواص مودال صفحات سالم و معیوب فولادی ساخت شده به روش ذوب انتخابی لیزری، شناسایی عیب از فضای تک بعدی در فضای دوبعدی تا سطح مکان یابی و بررسی شدت عیب انجام شده‌است. عیب در صفحه معیوب به‌صورت تعمیدی به شکل ترک در سطح صفحه ایجاد گردیده و از روش‌های مبتنی بر تغییر فرکانس و تغییر شکل مود از جمله انحنای شکل مود و انرژی کرنشی مودال برای شناسایی و مکان‌یابی عیب استفاده شده‌است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳ تیر ۱۴۰۴
بازنگری ۱۳ تیر ۱۴۰۴
پذیرش ۱۸ آبان ۱۴۰۴
اولین انتشار ۱۱ آذر ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

ساخت افزایشی
ذوب انتخابی لیزری
آنالیز مودال
ارزیابی عیب
انحنای شکل مود

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: azarmut@mut.ac.ir

How to Cite this Article:

A. Mirmohamadzkhani, R. Azarafza, R. Shoja Razavi and M. Barkat, Identification of Crack Defect in Additively Manufactured Steel Plates Using Modal Analysis," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-16, 2026, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.2.1>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by ARI. This article is an open access article licensed under [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱ مقدمه

ساخت افزایشی یک تکنولوژی نوین ساخت است که جایگزین فرایندهای ساخت سنتی شده است. بر اساس تعریف ارائه شده در استاندارد بین المللی ISO/ASTM 52900 ساخت افزایشی، فرایند اتصال مواد برای ساخت قطعه با استفاده از اطلاعات مدل سه بعدی است که این اتصال معمولاً به صورت لایه به لایه می باشد [۱]. به عبارتی در ساخت افزایشی به کمک لیزر با استفاده از یک سامانه لیزری کنترل شده و به کمک کامپیوتر مواد اولیه بصورت لایه به لایه به هم متصل می گردند. ساخت افزایشی به کمک لیزر دارای مزیت هایی مانند: جلوگیری از هدر رفت ماده، قابلیت سفارشی سازی، توانایی ساخت هندسه های پیچیده که دستیابی به آن ها با روش های سنتی ساخت دشوار یا غیرممکن است، می باشد. به همین دلیل تمایل به ساخت قطعات با این روش در صنایع مختلفی مانند پزشکی، هوافضا و خودروسازی افزایش یافته است [۲، ۳]. همچنان که این تکنولوژی نوین به طور چشمگیری در حال رشد می باشد، کنترل کیفی قطعات ساخت افزایشی بخصوص برای صنایعی که نیازمند محصولات با کیفیت بالا هستند کاملاً ضروری و حیاتی است تا با اطمینان بتوان آن ها را در محصول نهایی مورد استفاده قرار داد [۴].

ذوب انتخابی لیزری یکی از روش های ساخت افزایشی برای قطعات فلزی می باشد. دستگاه ذوب انتخابی لیزری از پودر فلز به عنوان ماده اولیه و از پرتو لیزر به عنوان منبع انرژی برای ذوب کردن فلز استفاده می کند. در این روش تولید محصولاتی با چگالی نسبی ۹۹/۹ درصد به اثبات رسیده است [۵]. پارامترهای فرایندی زیادی مانند توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله هاشور، ضخامت لایه، جنس پودر، محیط محفظه ساخت و ... در قطعات ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزری نقش دارند که انتخاب نامناسب و غیر بهینه آن ها منجر به شکل گیری عیوب در آنان می گردد. بنابراین وجود عیوبی مانند تخلخل ها، سوراخ های ذوب ناقص و ترک ها در این قطعات بدلیل ماهیت تولیدشان اجتناب ناپذیر است [۶]. همه این موضوعات اهمیت و ضرورت کنترل کیفی این قطعات را نشان می دهد.

تاکنون روش های غیرمخربی برای ارزیابی عیوب در قطعات فلزی ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزری مورد استفاده قرار گرفته اند. این روش ها شامل روبش میکروسیتی با اشعه ایکس، آزمون آکوستیک، آزمون آلتراسونیک و آزمون جریان گردابی است. روشی مانند روبش میکروسیتی با اشعه ایکس که در آن برای ارزیابی عیب، سطح مقطع های مختلف و متعددی از قطعه روبش شده و تصاویر سه بعدی از قطعه تهیه می گردد، روش موثری برای شناسایی عیوب می باشد. با این وجود این روش در اجرا بسیار زمان بر و پرهزینه می باشد. [۷، ۸]. آزمون آکوستیک که در آن ارزیابی عیب از طریق تحلیل

پالس های فراصوتی منتشر شده ناشی از تحریک منابع درون ماده انجام می گردد، اگرچه کم هزینه می باشد اما دقت پایینی دارد و نیاز به فیلتر کردن فزاینده برای ایزوله کردن سیگنالی دارد که احتمالاً نشان دهنده قطعی عیب است [۹]. در آزمون آلتراسونیک امواج فراصوت توسط فرستنده ها به قطعه اعمال شده و پس از برخورد به عیوب احتمالی، امواج بازتاب شده دریافت و بصورت یک سیگنال در صفحه نمایش ظاهر می گردد. از مزایای این آزمون قدرت نفوذ بالای آن برای شناسایی عیب می باشد اما اگر عیب کوچک و نزدیک به سطح باشد، ممکن است تشخیص داده نشود [۱۰]. آزمون جریان گردابی برای ارزیابی عیب قطعات رسانا می باشد و به علت عمق نفوذ محدود آن برای ارزیابی عیب در لایه های عمیق قابل استفاده نمی باشد [۱۱]. علاوه بر این ها آزمون هایی مانند آزمون آکوستیک، آلتراسونیک و جریان گردابی بعضاً می تواند منجر به تغییر مشخصات مواد شود. همچنین در برخی از این روش ها دسترسی به محل آسیب ضروری است.

به عنوان یک روش جایگزین می توان از روش تحلیل مودال برای ارزیابی عیب استفاده نمود. این روش یک روش ارتعاش پایه است که در آن تشخیص عیب بصورت سراسری انجام می گیرد، در روش مودال، عیب یابی سازه بدون تمرکز بر روی نواحی خاصی از سازه انجام می گیرد، بنابراین در قطعات و سازه هایی که شامل بخش هایی با عدم امکان دسترسی است، سراسری بودن تشخیص عیب در روش مودال یک مزیت به حساب می آید [۱۲].

مبانی تئوری آنالیز مودال با کاربرد شناسایی عیب بر اساس این واقعیت است که پاسخ دینامیکی قطعه یا سازه در اثر ایجاد عیب تغییر خواهد کرد. این امر، امکان تعیین عیب را از طریق مقایسه خواص مودال قطعه سالم و معیوب فراهم می آورد. هنگامیکه یک عیب در قطعه ایجاد می گردد سفتی و جرم قطعه و بدنبال آن فرکانس طبیعی قطعه تغییر می کند و البته این همان اصل اساسی است که از آن برای شناسایی عیب استفاده می گردد [۱۳، ۱۴]. ایجاد تعادل بین هزینه و دقت در این روش باعث تمایل به استفاده از آن برای بازرسی و شناسایی عیب شده است.

پیش از این محققان کارایی آزمون ها و تحلیل های مودال را برای شناسایی عیب در قطعات و سازه های ساخته شده از فلز، پلاستیک، کامپوزیت و بتن نشان داده اند. اما برای قطعات ساخت افزایشی، توسعه روش های مودال با کاربرد شناسایی عیب در مراحل اولیه تحقیق می باشد.

تحقیقات برای نشان دادن قابلیت این روش به منظور شناسایی قطعات معیوب فلزی تولید شده با روش ساخت افزایشی از سال ۲۰۱۶ و اولین بار توسط کینزل و همکاران در دپارتمان مکانیک و هوافضای دانشگاه میسوری در ایالات متحده انجام گرفت. آنان در کار تحقیقی

قرار داد. او نشان داد که چه نوع آزمون دینامیکی برای تحریک قطعه و شناسایی عیب مناسب است [۲۱].

سطوح عیب‌یابی در قطعات و سازه‌ها توسط محققان به نام ریتز در چهار سطح تعریف گردیده است [۲۲]. سطح اول، تشخیص وجود یا عدم وجود عیب در قطعه است. سطح دوم، مکان‌یابی یا تعیین موقعیت محل عیب است. سطح سوم، تعیین شدت عیب یا بررسی گسترش عیب است و سطح چهارم نیز که دشوارترین سطح عیب‌یابی است، تخمین عمر باقیمانده می‌باشد. در حوزه عیب‌یابی قطعات ساخت افزایشی با استفاده از آنالیز مودال در عمده کارهای تحقیقاتی انجام شده، سطح عیب‌یابی محدود به سطح اول یعنی تشخیص وجود یا عدم وجود عیب در قطعه بوده است.

در مقاله حاضر در یک گام رو به جلو با تحلیل مودال که شامل شبیه‌سازی المان محدود و آزمون‌های مودال تجربی می‌باشد، عیب‌یابی در یک صفحه ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزری تا سطح دوم و سوم یعنی مکان‌یابی و تعیین شدت عیب انجام شده است و علاوه بر آن شناسایی عیب از فضای تک بعدی در فضای دوبعدی انجام شده است. عیب در صفحه معیوب به صورت تعمیدی به شکل ترک در سطح صفحه ایجاد گردیده و از روش‌های مبتنی بر تغییر فرکانس و تغییر شکل مود از جمله انحنای شکل مود و انرژی کرنشی مودال برای شناسایی و مکان‌یابی عیب استفاده شده است. در صفحه معیوب، ترک با سه عمق مختلف ایجاد شده است تا شدت آن نیز مورد بررسی قرار گیرد. از ویژگی‌های صفحات مورد تحقیق، کوچک بودن ابعاد آن است. کوچک بودن قطعات و سازه‌های ساخت افزایشی با توجه به محدودیت محفظه ساخت دستگاه چاپ، چالش تحریک فرکانس بالای قطعه در آزمون مودال را برای شناسایی عیب به همراه دارد. در این تحقیق قبل از انجام آزمون‌های مودال جهت کاهش تعداد آزمون‌ها، از طریق طراحی آزمایش محل قرارگیری عیوب در صفحات مورد تجزیه و تحلیل فرکانسی قرار می‌گیرد و از طریق شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود در نرم افزار ANSYS مودهای فرکانسی مطلوب جهت شناسایی عیب مشخص می‌شوند. صفحات با شرایط مرزی آزاد تحت آزمون مودال قرار می‌گیرند تا فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مربوط به خود صفحه بوده و شرایط مرزی آن را تحت تاثیر قرار ندهد.

۲ تعیین روش‌های شناسایی عیب، مدل

هندسی و خواص ماده

برای شناسایی و مکان‌یابی عیب از دو روش تحلیل عددی و روش تجربی مبتنی بر آزمون مودال استفاده گردید. در روش عددی به منظور ارزیابی پارامترهای مودال مانند شکل مودها و فرکانس‌های

خود در جستجوی یافتن ارتباط بین تابع پاسخ فرکانسی و خواص مکانیکی قطعه فلزی ساخت شده افزایشی بودند. ایده اصلی، بکارگیری اندازه‌گیری‌های تابع پاسخ فرکانسی بود که به مانند اثر انگشت برای هر قطعه منحصر بفرد می‌باشد. آنان مطالعات خود را بر روی قطعات ساخته شده با فرایند ذوب انتخابی لیزری که به شکل تیر بودند انجام دادند [۱۵]. کینزل و همکاران در دومین کار تحقیقی خود تعدادی نمونه تست کشش از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را با روش ذوب انتخابی لیزری تولید کردند. سپس با غیربهرینه کردن پارامتر فرایندی فاصله هاشور، نمونه‌های معیوب را که دارای تخلخل بودند، تولید کردند و در ادامه تکمیل نتایج قبل، ارتباط بین فرکانس طبیعی قطعه با استحکام تسلیم و استحکام نهایی را به صورت یک رابطه ریاضی نشان دادند [۱۶]. کینزل و همکاران در سومین کار تحقیقی خود جهت نشان دادن قابلیت روش مودال در شناسایی عیب برای قطعات فلزی ساخت افزایشی، یک قطعه صنعتی را مورد ارزیابی قرار دادند. این قطعه صنعتی یک نشیمنگاه حفاظتی بود. ویژگی این قطعه آن بود که از صلبیت پایینی برخوردار بود و تحریک آن به خوبی در فرکانس‌های پایین قابل انجام بود. هدف آنان پیدا کردن قطعه معیوب از قطعات سالم از طریق انجام آزمون مودال بود. آنان از طریق مشاهده جابجایی قله‌های تابع پاسخ فرکانسی توانستند قطعه معیوب را از قطعه سالم متمایز کنند [۱۷]. جانسون و آلن عیوب داخلی دو نوع قطعه فلزی ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزری که یکی میله تست کشش و دیگری قطعه چکش مانند بود و عیب داخلی تعمداً در آن‌ها ایجاد شده بود را مورد تحلیل مودال با روش‌های شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمون مودال قرار دادند [۱۸]. آن‌ها بیشترین اختلاف فرکانسی قطعه سالم و معیوب را از شبیه‌سازی‌ها استخراج کردند و در آزمون مودال، مودهای فرکانسی مدنظر خود را که بیشترین اختلاف فرکانس در آن‌ها رخ می‌داد جهت شناسایی عیب، تحریک کردند. در فعالیت تحقیقاتی دیگری، آلن و جانسون تعداد زیادی از قطعات فلزی سالم و معیوب ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزری را که به شکل تیرهای استاندارد کششی بودند بر روی پلیت ساخت و در فواصل نزدیک به هم قرار دادند. آنان با بررسی گراف‌های پاسخ فرکانسی از طریق مشاهده جابجایی قله‌های فرکانسی نتوانستند تمایز بین گروه‌های سالم و معیوب را تشخیص دهند [۱۹]. کولوم و همکاران بر روی محل قرارگیری قطعات فلزی چاپ شده بر روی پلیت ساخت، تحقیق کردند. این قطعات به شکل تیر بودند. هدف آنان بررسی اثر پلیت ساخت بر روی پاسخ فرکانسی قطعات چاپ شده بود [۲۰]. در فعالیتی دیگر، آلن تعدادی قطعه فلزی ساخت افزایشی را به منظور شناسایی عیب آن‌ها تحت آزمون‌های دینامیکی مانند آزمون مودال، آزمون آکوستیک و آزمون پیزوالکتریک

در صفحه تصمیم گیری کرد و تعداد آزمون های تجربی مودال را نیز کاهش داد.

در روش تجربی با توجه به محدودیت فضای محفظه ساخت، صفحات ساخت افزایشی به روش ذوب انتخابی لیزری با دستگاه SLM شرکت نورا مدل M100P چاپ گردید. جنس پودر فلزی 316L و ضخامت لایه ها ۶۰ میکرون بوده است. به منظور جلوگیری از اعوجاج و به حداقل رساندن تنش های پسماند، صفحات عمود بر بستر ساخت چاپ گردید. جدول ۲ ابعاد صفحه ساخته شده را نشان می دهد.

جدول ۲- ابعاد صفحه ساخته شده.

Table 2. Dimensions of the manufactured plate.

Part Dimensions	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]
Value	140	60	3

پس از شبیه سازی عددی و تست تجربی، داده های هر دو روش عددی و تجربی بر اساس روش های تغییر فرکانس، تغییر شکل مود از جمله انحنای شکل مود و انرژی کرنشی مودال برای شناسایی و مکان یابی عیب مورد استفاده قرار گرفت و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت.

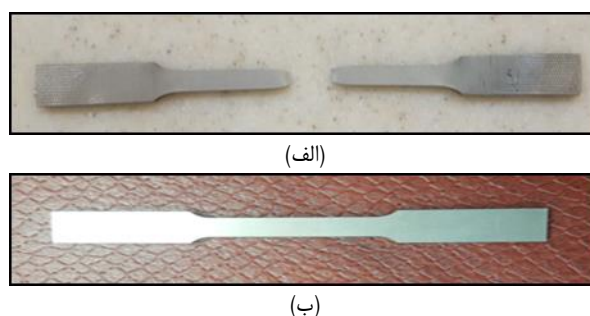
۳ روش شناسایی آسیب بر مبنای شکل مودها

شکل مودها اطلاعات سه بعدی در مورد سازه می دهند که می توانند برای ارزیابی عیب مورد استفاده قرار گیرند. به کمک اطلاعات حاصل از آن می توان عیب را شناسایی و محل آن را نیز پیدا کرد. این روش عیب یابی بر این فرض استوار است که عیب در محلی رخ می دهد که تابع شکل مود یعنی اختلاف شکل مود سازه سالم و آسیب دیده، بیشترین مقدار خود را دارا می باشد. اختلاف شکل مودها به تنهایی از قدرت کافی برای شناسایی عیب برخوردار نیستند. برای قدرتمند کردن آن، روش های دیگری توسعه داده شده اند که از جمله آن ها می توان به روش تغییر در انحنای شکل مود و روش تغییر در انرژی کرنشی مودال اشاره کرد. این روش ها، همگی بر مبنای تغییر در شکل مود هستند.

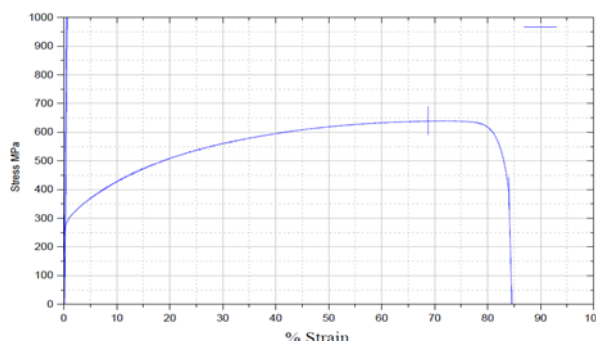
۳.۱ روش تغییر در انحنای شکل مود

این روش توسط پاندی و همکاران برای شناسایی عیب در یک تیر مورد استفاده قرار گرفت. در این روش محل عیب توسط بیشینه تفاضل مطلق بین انحنای شکل مودهای حالت سالم و معیوب به دست می آید [۲۴]. شکل ۳، المان سازه ای یک صفحه نازک یکنواخت را نشان می دهد. انحناء مرتبط با سفتی خمشی می باشد. مشابه یک تیر برای یک صفحه نازک یکنواخت، رابطه بین انحنا و سفتی خمشی مطابق روابط (۱)، (۲) و (۳) نوشته می شود.

طبیعی، تحلیل اجزاء محدود صفحات با خواص به دست آمده از آزمایش انجام گرفت. چگالی، مدول یانگ و ضریب پواسن به صورت آزمایشگاهی تعیین گردید. از صفحات تحت آزمون، نمونه های استاندارد کشش مطابق استاندارد ASTM E8 تهیه شد و آزمون کشش مکانیکی با اکستنسومتر برای به دست آوردن منحنی تنش-کرنش و تعیین مدول یانگ بر روی نمونه ها انجام گردید. شکل ۱ (الف) و (ب) به ترتیب نمونه سالم و نمونه بعد از آزمایش، شکل ۲ منحنی تنش-کرنش و جدول ۱ خواص به دست آمده از آزمایش را نشان می دهند.



شکل ۱- نمونه تست کشش: (الف) قطعه سالم، (ب) قطعه شکسته شده.
Fig. 1. Tensile test sample: a) Healthy part b) Broken part.



شکل ۲- نمودار تنش-کرنش به دست آمده با روش تجربی برای نمونه.
Fig. 2. Stress-strain diagram obtained by the experimental method for the sample.

جدول ۱- خواص مکانیکی صفحه.

Table 1. Mechanical Properties of plate.

Property	Young's modulus[Gpa]	Density [kg/m ³]	Poisson's Ratio
	218	7889	0.3

در روش تحلیل عددی پس از تعیین خواص مکانیکی، یک روش طراحی آزمایش مبتنی بر فرکانس از طریق تعیین رویه پاسخ انجام گردید تا پس از بررسی اثر دو عامل موقعیت عیب و عمق عیب بر روی فرکانس طبیعی صفحه بتوان نسبت به چگونگی ایجاد عیب

$$w''_{xx}(x_i, y_j) = \frac{w(x_{i+1}, y_j) - 2w(x_i, y_j) + w(x_{i-1}, y_j))}{l_x^2} \quad (5)$$

$$w''_{yy}(x_i, y_j) = \frac{w(x_i, y_{j+1}) - 2w(x_i, y_j) + w(x_i, y_{j-1}))}{l_y^2} \quad (6)$$

که در آن $w(x_i, y_j)$ مقدار جابجایی شکل مود در گره (x_i, y_j) ، l_x و l_y به ترتیب طول ثابت المان در راستای x و y می باشند. مقدار انحنای کلی در گره به صورت زیر محاسبه می شود.

$$w''(x_i, y_j) = \sqrt{w''_{xx}(x_i, y_j)^2 + w''_{yy}(x_i, y_j)^2} \quad (7)$$

شاخص آسیب صفحه برای شکل مود k ام به صورت اختلاف بین انحنای صفحه سالم و معیوب در همه گره ها به صورت زیر توصیف می شود.

$$DI_k = w''_{h,k} - w''_{d,k} \quad (8)$$

که در آن $w''_{h,k}$ و $w''_{d,k}$ به ترتیب انحنای شکل مود صفحه سالم و صفحه معیوب می باشد.

۳.۲ روش تغییر در انرژی کرنشی مودال

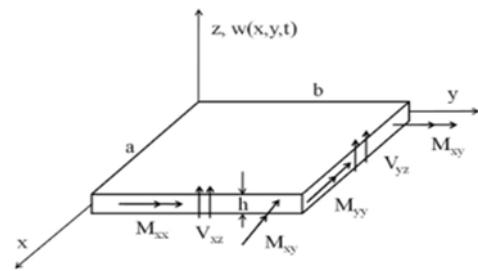
انرژی کرنشی، نوعی انرژی پتانسیل است که در اثر تغییر شکل الاستیک در یک مود خاص در سازه ذخیره می شود. شناسایی عیب از طریق مشاهده کاهش در کرنش مودال تعیین می شود. به عبارتی سازه بخاطر افت سفتی، مقداری از انرژی خود را از دست می دهد. این روش بر مبنای مقادیر انحنای شکل مود سازه سالم و خراب محاسبه می شود و تاثیر شکل مودهای مختلف با هم جمع می شوند. همچنین این روش یکی از قویترین روش های عیب یابی ارتعاشی بوده و حتی قابلیت شناسایی چند عیب بطور همزمان در سازه را دارد. از این روش برای شناسایی و مکان یابی آسیب در سازه های تیر، صفحه و خرپا استفاده می شود. این روش توسط کیم و استابس توسعه یافت [۲۵]. برای یک صفحه که مطابق شکل ۴ المان بندی شده است، برای شکل مود k ام، $w_k(x, y)$ ، انرژی کرنشی مودال برای المان (i, j) به صورت زیر تعیین می شود.

$$U_{k,ij} = \frac{D_{ij}}{2} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \left(\left(\frac{\partial^2 w_k}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w_k}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 w_k}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w_k}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) dx dy \quad (9)$$

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

$$M_{xy} = M_{yx} = -(1-\nu)D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3)$$



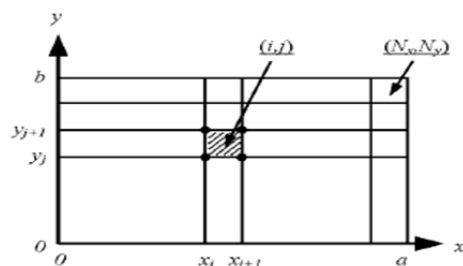
شکل ۳- نمایش المان یک صفحه مستطیل شکل و نیروهای وارده بر آن.

Fig. 3. Showing the element of a rectangular plate and the forces acting on it.

که در آن $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ ، $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ و $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$ به ترتیب انحنای طولی، انحنای عرضی و انحنای پیچشی صفحه می باشند که در اثر ممان های M_x ، M_y و M_{xy} ایجاد شده اند. در روابط فوق، پارامتر ν ضریب پواسان و D سفتی خمشی است. اگر ضخامت صفحه h در نظر گرفته شود، سفتی خمشی از رابطه زیر به دست می آید.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

هنگامیکه ترک یا عیب دیگری در صفحه اتفاق می افتد، سفتی خمشی در مقطع آسیب دیده کاهش می یابد و در نتیجه انحنا در آن افزایش می یابد. این موضوع از روابط فوق قابل اثبات است. شکل ۴ یک صفحه را نشان می دهد که به تعدادی ناحیه تقسیم شده است و محل هر ناحیه یا المان بوسیله هر نقطه (x_i, y_j) مشخص می شود. برای سازه دو بعدی مانند صفحه، انحنا در دو راستای طولی و عرضی با استفاده از تقریب تفاضل مرکزی از روابط زیر به دست می آید.



شکل ۴- شماتیک المان بندی یک صفحه.

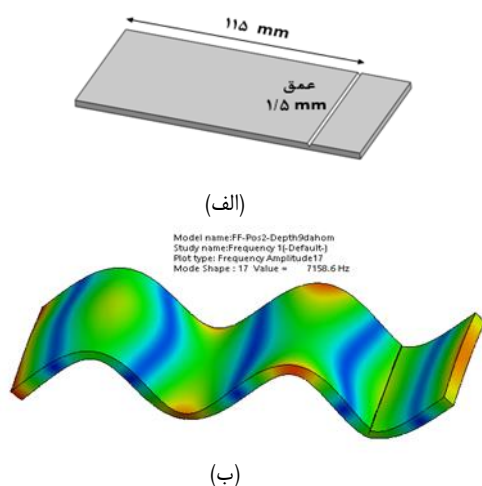
Fig. 4. Schematic of the elements of a rectangular plate.

و در بالاترین سطح ۱/۵ میلیمتر تعریف گردید. همچنین α مقدار ۱/۴ تعریف گردید. آزمایش با ۱۳ اجرا تعریف گردید. همچنین پاسخ‌های فرکانسی با نرم افزار اجزا محدود ANSYS تا محدوده ۱۰ کیلوهرتز با شرایط مرزی آزاد برای حالت‌های مختلف موقعیت قرارگیری و عمق عیب استخراج گردید. در جدول ۳ پاسخ فرکانسی در هفدهمین شکل مود حاصل از طرح مرکب مرکزی نشان داده شده است. شکل ۵ نیز این شکل مود را نشان می‌دهد. این شکل مود، یک شکل مود خمشی خالص صفحه است که تا محدوده ۱۰ کیلوهرتز بیشترین تعداد برآمدگی و فرورفتگی را دارد. همچنین این شکل مود یکی از شکل مودهایی است که بین فرکانس‌های صفحه سالم و صفحات معیوب اختلاف زیادی وجود دارد. این احتمال وجود دارد که شناس شناسایی عیب در این شکل مود بیشتر از سایر مودها باشد.

جدول ۳- پاسخ فرکانسی در هفدهمین شکل مود حاصل از طرح مرکب مرکزی.

Table 3. Frequency response in the 17th mode shape resulting from the central composite design.

Standard Order	Run Order	Point Type	Depth	Position	17 th frequency
6	1	-1	1.74	67.5	7465.0
10	2	0	0.90	67.5	7494.3
11	3	0	0.90	67.5	7494.3
1	4	1	0.30	20.0	7492.8
3	5	1	0.30	115.0	7491.9
8	6	-1	0.90	134.0	7499.7
9	7	0	0.90	67.5	7494.3
2	8	1	1.50	20.0	7118.8
4	9	1	1.50	115.0	7158.6
13	10	0	0.90	67.5	7494.3
5	11	-1	0.06	67.5	7502.3
12	12	0	0.90	67.5	7494.3
7	13	-1	0.90	1.0	7515.1



شکل ۵- (الف) قطعه معیوب، (ب) هفدهمین شکل مود خمشی خالص قطعه معیوب در تحلیل فرکانسی.

Fig. 5. a) Defective Part, b) The 17th pure bending mode shape in the frequency analysis of the defective part

که در آن D_{ij} سفتی خمشی المان (i, j) و ν ضریب پواسون می باشد. همچنین برای شکل مود k ام، انرژی کرنشی مودال برای کل صفحه که دارای تعداد N_x المان در راستای x و N_y المان در راستای y می باشد، به صورت زیر تعیین می شود.

$$U_k = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} U_{k,ij} \quad (10)$$

پس از پیدایش عیب که بدنبال آن سفتی خمشی کاهش پیدا می کند، شکل مود k ام صفحه معیوب به صورت $W_k^*(x, y)$ تغییر می کند. برای وضعیت معیوب، انرژی کرنشی مودال برای المان (i, j) با $U_{k,ij}^*$ و انرژی کرنشی مودال برای کل صفحه با U_k^* مشخص می شود که مشابه روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می گردد. نسبت انرژی کرنشی هر المان به انرژی کرنشی مودال کل صفحه در حالت سالم با $F_{k,ij}$ و در حالت معیوب با $F_{k,ij}^*$ مشخص می شود و به صورت زیر تعیین می گردد.

$$F_{k,ij} = \frac{U_{k,ij}}{U_k} \quad (11)$$

$$F_{k,ij}^* = \frac{U_{k,ij}^*}{U_k^*} \quad (12)$$

در نهایت شاخص عیب انرژی کرنشی مودال به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}^*}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}} \quad (13)$$

که در آن m تعداد شکل مودهایی استفاده شده است. مشتق دوم شکل مودهایی ارتعاشی یا همان انحنای مودال به کمک روش‌های عددی مانند تقریب تفاضل مرکزی قابل محاسبه است.

۴ طراحی آزمایش

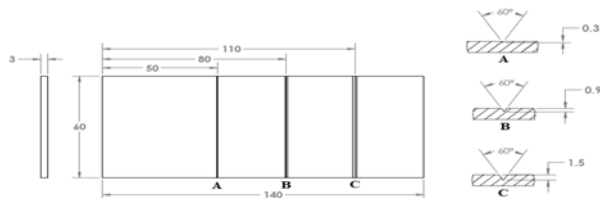
برای بررسی اثر دو عامل موقعیت عیب و عمق عیب بر فرکانس طبیعی صفحه، از روش طراحی مرکب مرکزی که معتبرترین روش سطح پاسخ می باشد استفاده شده است. این روش فضای آزمایش‌ها را به یک نقطه مرکزی، تعدادی نقاط عاملی و تعدادی نقاط محوری افزاز می کند. فاصله نقاط محوری از نقطه مرکزی برابر با $\pm \alpha$ است. مزیت روش طرح مرکب مرکزی نسبت به روش‌های فاکتوریل کامل و جزئی این است که با وجود داشتن دقت مناسب، نیازمند آزمایش‌های کمتری است [۲۳]. در اینجا دو عامل موقعیت و عمق عیب در بالاترین و پایین‌ترین سطح تعریف شده است. طراحی آزمایش با نرم افزار Minitab برای صفحه انتخابی انجام شده است که در آن محل قرارگیری عیب به صورت یک ترک سراسری عمود بر لبه طولی صفحه تغییر می کند. عمق عیب در پایین ترین سطح خود ۰/۳ میلیمتر

۵ شناسایی و مکان یابی عیب از طریق تحلیل مودال عددی و آزمایشگاهی

روش‌های عیب‌یابی بیان شده یعنی انحنای شکل مود و انرژی کرنشی مودال را می‌توان برای تحلیل داده‌های مودال عددی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار داد و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمود

۵.۱ استفاده از تحلیل مودال عددی برای شناسایی و مکان یابی عیب

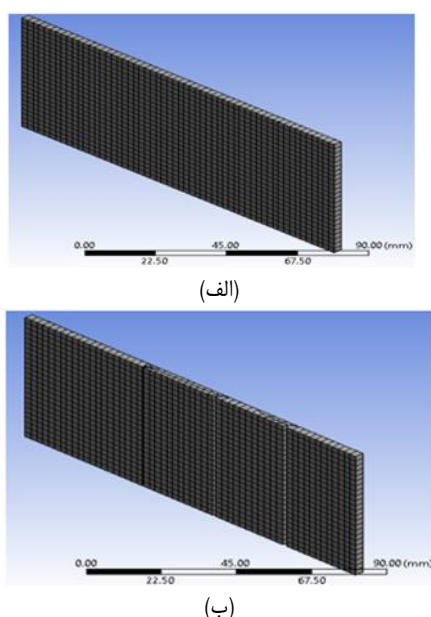
بر اساس نتایج طراحی آزمایش هر سه عیب ترک سراسری، عمود بر راستای طولی که دارای شدت عیب مختلف بودند در یک مدل شبیه‌سازی قرار داده شدند و برای مکان یابی عیب از طریق تحلیل عددی، از نرم افزار ANSYS استفاده گردید. مطابق ابعاد جدول ۲، مدل هندسی صفحه معیوب با ابعاد عیبها در شکل ۸ نشان داده شده‌است.



شکل ۸- مدل هندسی صفحه معیوب.

Fig. 8. Geometric model of the defective plat.

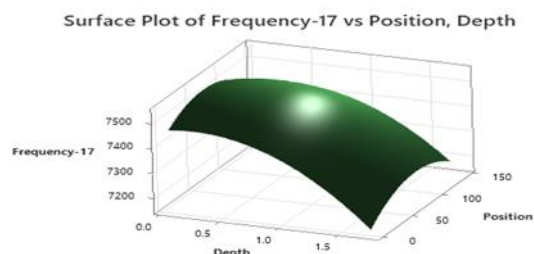
پس از مدل‌سازی صفحات سالم و معیوب، برای خواص مکانیکی از مقایسه جدول ۱ استفاده گردید. در شکل ۹ مش بندی صفحه سالم و معیوب نشان داده شده‌است.



شکل ۹- مش بندی صفحه، (الف) صفحه سالم، (ب) صفحه معیوب.

Fig. 9. Plate Meshing: a) Healthy Plate , b) defective plate.

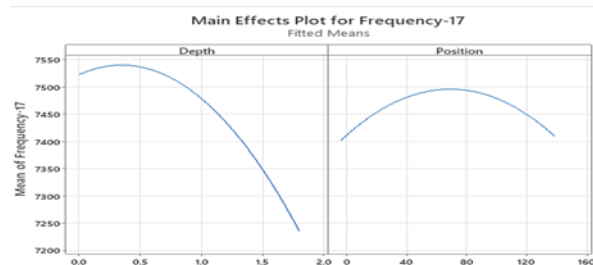
در شکل ۶ نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی که تاثیر دو عامل موقعیت و عمق عیب را بر روی پاسخ فرکانسی در هفدهمین شکل مود نشان می‌دهد، ترسیم شده‌است.



شکل ۶- تاثیر عمق و موقعیت عیب بر پاسخ فرکانسی هفدهمین شکل مود با استفاده از نمودار سطح پاسخ سه بعدی معیوب در تحلیل فرکانسی.

Fig. 6. Effect of depth and position of defect on frequency response of 17th mode shape using 3D response surface plot.

در شکل ۷ نیز منحنی تاثیر این دو عامل بر روی پاسخ فرکانسی نشان داده شده‌است. نمودار سطح پاسخ نشان می‌دهد که تاثیر عمق یا همان شدت عیب بر پاسخ فرکانسی بسیار بیشتر از موقعیت عیب می‌باشد. به عبارت دیگر، محل قرار گیری عیب به اندازه عمق عیب بر روی پاسخ فرکانسی تاثیر نمی‌گذارد. با این وجود مطابق منحنی نشان داده شده در شکل ۷ اگر عیب در فاصله نسبتاً مناسب از لبه عرضی صفحه باشد مثلاً حداقل ۳۰ میلیمتر، شانس شناسایی عیب بازم بیشتر خواهد شد.



شکل ۷- منحنی های تاثیر دو عامل عمق و موقعیت عیب بر پاسخ فرکانسی هفدهمین شکل مود.

Fig. 7. Effect curves of the two factors, depth and position of the defect on the frequency response of the 17th mode shape.

دو نتیجه به دست آمده از طراحی آزمایش یعنی بیشتر بودن تاثیر عمق عیب نسبت به موقعیت آن بر روی پاسخ فرکانسی و همچنین شانس بیشتر شناسایی عیب در فاصله نسبتاً مناسب از لبه عرضی صفحات مثلاً حداقل ۳۰ میلیمتر، سبب گردید تا هر سه عیب ترک سراسری عمود بر راستای طولی که دارای شدت عیب مختلف بودند، در یک مدل شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرند. قرار گیری هر سه عیب در یک نمونه که از نتایج تحلیل طراحی آزمایش بود کاهش تعداد آزمایش ها را به دنبال داشت.

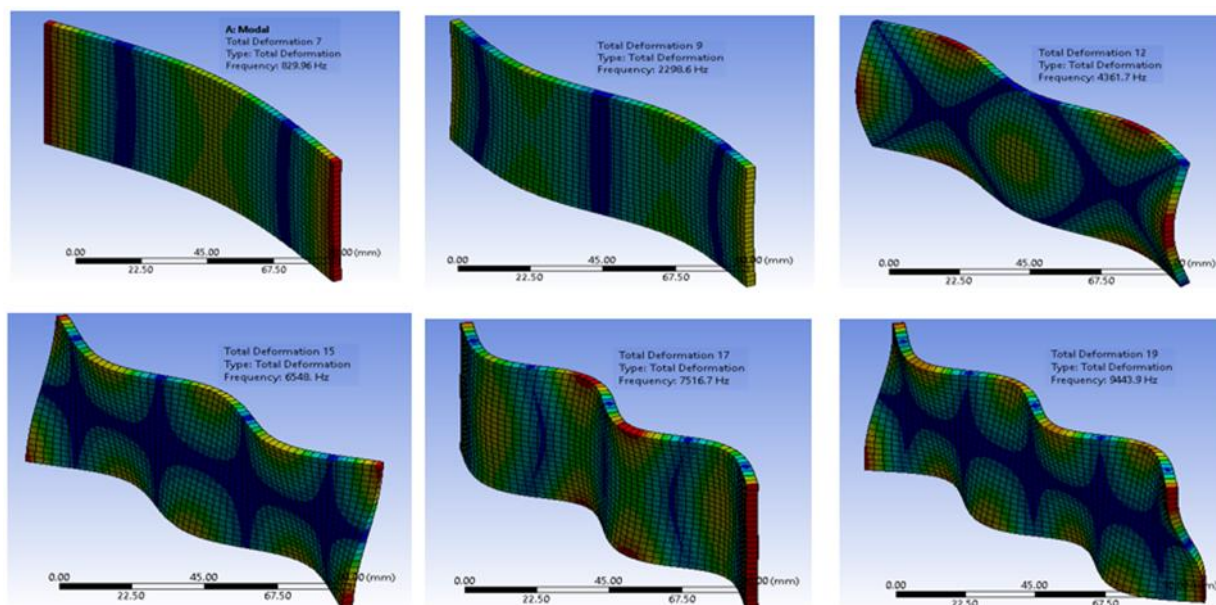
12	one bend in the transvers edge and three bends in the longitudinal edge	4361.7	4040.2	7.4
13		4808.5	4514.6	6.1
14		5172.3	4944	4.4
15	Two bends in the transvers edge and three bends in the longitudinal edge	6548	6119.7	6.5
16		6732.2	6404.4	4.9
17	four bends in the longitudinal edge	7516.7	6973.7	7.2
18		8917.3	8475.6	4.9
19	Two bends in the transvers edge and four bends in the longitudinal edge	9443.9	8844.2	6.3

در نهایت تحلیل فرکانسی صفحات سالم و معیوب با شرایط مرزی آزاد در بازه فرکانسی ۰ تا ۱۰ کیلوهرتز انجام شد و فرکانسها به دست آمدند. در جدول ۴ فرکانسهای صفحات سالم و معیوب و درصد کاهش فرکانس قطعه معیوب نسبت به قطعه سالم نشان داده شده است.

جدول ۴- اختلاف فرکانس صفحات سالم و معیوب.

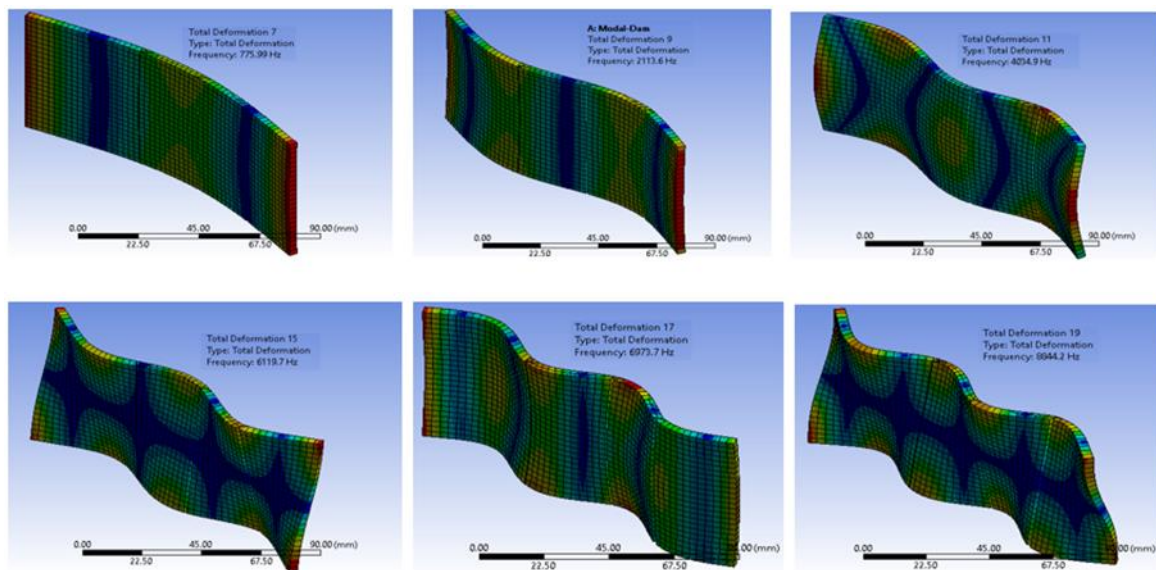
Table 4. Frequency difference of healthy and defective plates.

Mode Number	Mode Shape Status	Natural Frequencies [Hz]		Frequency Difference (%)
		Healthy Plate	Defective Plate	
7	one bend in the longitudinal edge	829.96	775.99	6.5
8		1176	1117.1	5
9	Two bends in the longitudinal edge	2298.6	2113.6	8
10		2537.3	2405.7	5.2
11		4274	4034.9	5.6



شکل ۱۰- شکل مودهای صفحه سالم.

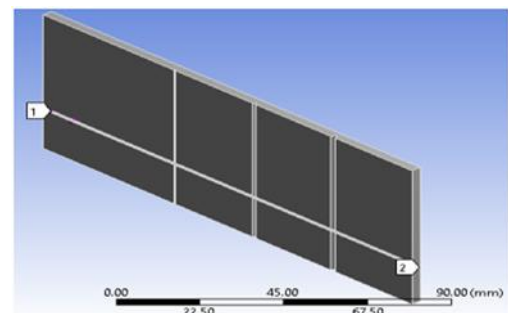
Fig. 10. Mode shapes of the healthy plate



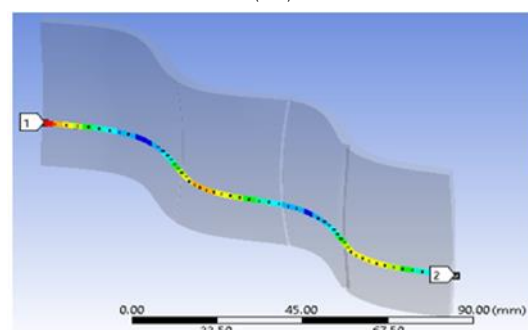
شکل ۱۱- شکل مودهای صفحه معیوب.

Fig. 11. Mode shapes of the defective plate.

صفحه به فواصل $2/5$ میلیمتر از یکدیگر برای هفدهمین شکل مود استخراج گردید که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقادیر جابجایی استخراج شده به عنوان اطلاعات ورودی و نرم افزار MATLAB گردید. این اطلاعات ورودی شامل دو ماتریس از مقادیر جابجایی نسبی برای صفحات سالم و معیوب بود که لازم بود با یکدیگر مقایسه گردند. با استفاده از کد نویسی در این نرم افزار، انحنا نقاط با روش تقریبی تفاضل مرکزی محاسبه گردید. انحنا در لبه های مرزی صفحات با روش برون یابی Spline به دست آمد. در نهایت دو روش تغییر در انحنا شکل مود و روش تغییر در انرژی کرنشی مودال برای شناسایی و مکان یابی عیب مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱۳ تغییر انحنا شکل مود بین صفحات سالم و معیوب را در هفدهمین شکل مود، نشان می دهد. در این شکل به طور واضح محل عیب با عمق های $1/5$ میلیمتر و $0/9$ میلیمتر به ترتیب در فواصل 110 میلیمتر 80 میلیمتر از لبه عرضی به شکل قله هایی قابل مشاهده است. همچنین ملاحظه می گردد هرچه عمق یا شدت عیب بیشتر بوده است، اندازه قله نیز بیشتر شده است. در شکل ۱۴ تصویر آشکارسازی عیب با روش تغییر در انحنا شکل مود از نمای بالا نمایش داده شده است. این شکل نشان می دهد در جاییکه شدت عیب بیشتر بوده، تغییر رنگ ایجاد شده نیز بیشتر بوده است. شبیه سازی نشان می دهد با روش تغییر انحنا شکل مود پیدا کردن مکان عیب با عمق $1/5$ میلیمتر به سهولت و پیدا کردن عیب با عمق $0/9$ میلیمتر با اندکی دشواری امکان پذیر است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- الف) نمونه معیوب، ب) مقادیر جابجایی نسبی در امتداد یک نمونه

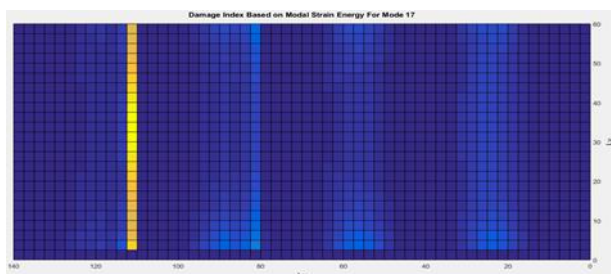
از مسیرها در جهت عمود بر صفحه.

Fig. 12. a) Defective sample b) Extraction of relative displacement values in the direction perpendicular to the plate along a sample of paths.

پس از استخراج شکل مودها، مقادیر جابجایی نسبی در نرم افزار Scooping Method در امتداد مسیرهایی موازی با لبه طولی

این موضوع نشان می‌دهد که عیب کوچک با عمق 0.3 میلیمتر در فاصله 50 میلیمتر از لبه عرضی صفحه، تأثیر خود را بر روی انرژی کرنشی مودال صفحه گذاشته اما این اثر آنقدر ناچیز بوده است که امکان پیدا کردن محل عیب با روش مذکور وجود نداشته است.

در شکل ۱۶ نیز تصویر آشکارسازی عیب با روش تغییر در انرژی کرنشی مودال از نمای بالا نمایش داده شده است. در این شکل تغییر رنگ در موقعیت‌های توضیح داده شده بخصوص برای عیب با عمق بیشتر یعنی $1/5$ میلیمتر به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱۶- تصویر آشکارسازی عیب بر اساس تغییر در انرژی کرنشی مودال در نمای بالا برای هفدهمین شکل مود.

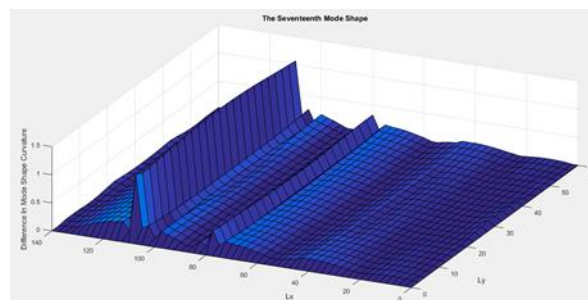
Fig. 16. Defect detection image based on change in modal strain energy in top view for 17th mode shape.

بنابراین، روش‌های مودال عیب‌یابی بر اساس تغییر در انحنای شکل مود و تغییر در انرژی کرنشی مودال قادر به شناسایی و مکان‌یابی عیب ترک با عمق 0.9 میلیمتر در یک صفحه مستطیل شکل چاپ شده با روش ذوب انتخابی لیزری هستند. اما ترک کوچکی با عمق 0.3 میلیمتر با روش‌های مذکور قابل شناسایی و مکان‌یابی نیست.

۲.۵ استفاده از تحلیل مودال آزمایشگاهی برای شناسایی و مکان‌یابی عیب

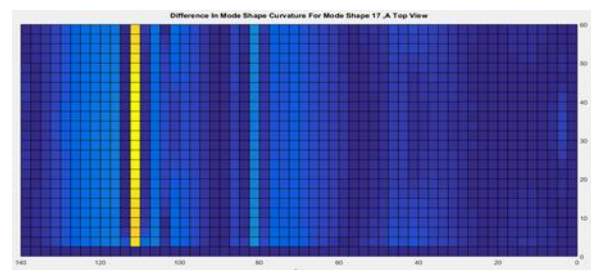
برای تایید نتایج المان محدود، تعدادی صفحه با پودر فلزی 316L به روش ذوب انتخابی لیزری با مشخصات ابعادی جدول ۱ با دستگاه SLM چاپ گردید. همچنین نمونه معیوب پس از چاپ مانند آنچه که در شکل ۸ در بخش تحلیل عددی نشان داده شد با ایجاد سه ترک با عمق‌های مختلف به کمک دستگاه وایرکات آماده گردید و در نهایت آزمون مودال بر روی آن‌ها انجام شد. نمونه صفحه چاپ شده سالم و معیوب در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

شناسایی عیب ترک در صفحه فولادی ساخت افزایشی با استفاده از آنالیز مودال



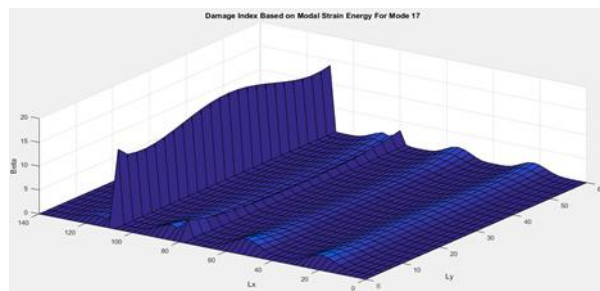
شکل ۱۳- تغییر انحنای شکل مود بین صفحات سالم و معیوب در هفدهمین شکل مود.

Fig. 13. Change in mode shape curvature between healthy and defective plate for 17th mode shape



شکل ۱۴- تصویر آشکارسازی عیب بر اساس تغییر در انحنای شکل مود در نمای بالا برای هفدهمین شکل مود.

Fig. 14. Defect detection image based on the change in the mode shape curvature in the top view for the 17th mode shape



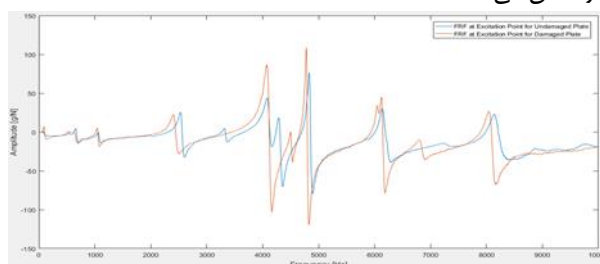
شکل ۱۵- شاخص عیب بر اساس تغییر انرژی کرنشی مودال بین صفحات سالم و معیوب در هفدهمین شکل مود.

Fig. 15. Damage index based on the change of modal strain energy of healthy and defective plates in the 17th mode shape.

شکل ۱۵ شاخص خرابی را بر اساس تغییر در انرژی کرنشی مودال بین صفحات سالم و معیوب، در هفدهمین شکل مود نشان می‌دهد. در این شکل محل عیب با عمق‌های $1/5$ میلیمتر و 0.9 میلیمتر شناسایی شده است، بخصوص عیب با عمق $1/5$ میلیمتر که شدت آن به میزان نصف ضخامت صفحه بوده است. با این وجود مطابق شکل ۱۵ در روش تغییر در انرژی کرنشی مودال، شاهد قله‌های خفیف اضافی نیز در فواصل حدود 20 میلیمتر و 60 میلیمتر از لبه عرضی صفحه هستیم.

۱۶ کاناله انجام و از منحنی‌های پاسخ فرکانسی با روش‌های برازش منحنی، فرکانس‌ها و شکل مودهای صفحات سالم و معیوب استخراج گردید. در شکل ۱۸ چیدمان آزمایشگاهی برای اجرای آزمون مودال نشان داده است.

پس از تست مودال تجربی، به منظور به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی صفحات سالم و معیوب، نمودارتابع پاسخ فرکانسی آن رسم گردید. شکل ۱۹ مقایسه نمودار تابع پاسخ فرکانسی صفحات سالم و معیوب را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- مقایسه نمودار پاسخ فرکانسی صفحات سالم و معیوب.

Fig. 19. Comparison of FRF graphs of healthy and defective plates.

همچنین نتایج فرکانس‌های طبیعی صفحه سالم و معیوب به‌دست آمده و درصد کاهش فرکانس‌های قطعه معیوب نسبت به قطعه سالم در جدول ۵، نشان داده شده‌اند.

جدول ۵- نتایج فرکانس‌های طبیعی صفحه سالم و معیوب حاصل از آزمون تجربی.
Table 5. Results of natural frequencies of healthy and defective plate from experimental test.

Mode Number	Natural Frequencies [Hz]		Discrepancy(%)
	Healthy Plate	Defective Plate	
7	780	490.8	37.1
8	1094	782.5	28.5
9	---	---	---
10	2594	2481	4.3
11	4164	4101	1.5
12	4217	---	---
13	4900	4743	3.2
14	---	---	---
15	6182	5901	4.5
16	---	---	---
17	7244	6796	6.2
18	8291	8165	1.5

همچنین در جدول ۶ فرکانس‌های طبیعی به‌دست آمده از دو روش تجربی و شبیه‌سازی (عددی) برای قطعه سالم مقایسه شده‌اند. همانطوریکه مشاهده می‌شود، نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی تطابق خوبی با هم دارند. باید توجه داشت که اختلاف نتایج دو روش از آنجا ناشی می‌شود که حل شبیه‌سازی، فرکانس‌های طبیعی صفحه را با



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- نمونه صفحه چاپ شده از جنس 316L روش ذوب انتخابی لیزری، (الف) صفحه سالم، (ب) صفحه معیوب.

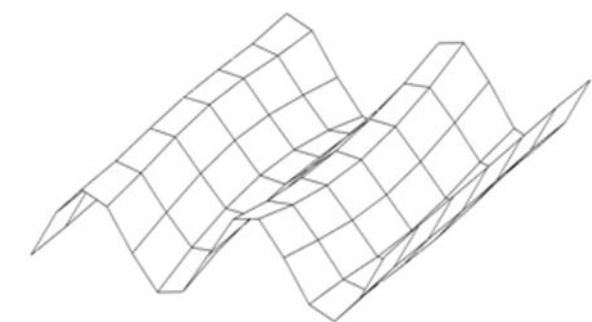
Fig. 17. Sample of a printed plate made of 316L material using selective laser melting : a) Healthy Plate b) Defective Plate.



شکل ۱۸- چیدمان آزمایشگاهی برای اجرای آزمون مودال.

Fig. 18. Experimental setup for performing modal test

برای استخراج مودهای خمشی، صفحه با ابعاد 10×10 میلیمتر مربع شبکه بندی و نشانه گذاری گردید و در مجموع ۱۰۵ نقطه یعنی ۱۵ نقطه به فاصله ۱۰ میلیمتر از یکدیگر در جهت طولی صفحه و ۷ ردیف بر روی صفحه تحت آزمون مشخص گردید. با توجه به آنکه وزن هر صفحه ۱۹۸ گرم بود از شتاب سنج‌های سبک به وزن ۳ گرم استفاده گردید تا اثر وزن شتاب سنج بر روی پاسخ به حداقل برسد. بدلیل زیاد بودن نقاط مشخص شده و کم بودن تعداد شتاب سنج‌ها ناگزیر آزمون‌ها تکرار و شتاب سنج‌ها در هر تکرار آزمون، جابجا گردید. تحریک صفحه با اعمال نیروی رندم توسط شیکر مودال در محدوده فرکانسی صفر تا ۲۰ کیلوهرتز انجام گرفت تا فرکانس‌ها و شکل مودها به‌دست آیند. به منظور فراهم آوردن شرایط تکیه‌گاهی آزاد برای انجام آزمون مودال، صفحات سالم و معیوب با کش لاستیکی نرم که مقدار سفتی آن پایین است به فیکسچر آویزان شد. داده برداری با یک آنالایزر



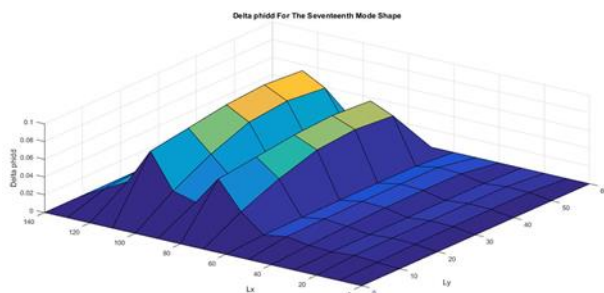
(الف)



(ب)

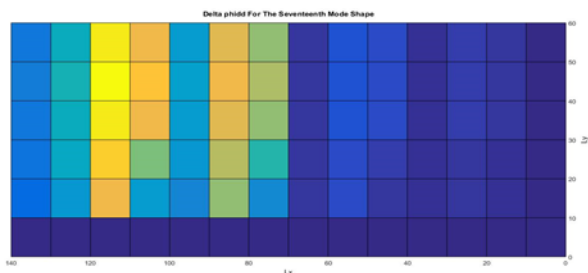
شکل ۲۰- هفدهمین شکل مود فرکانسی در آزمون مودال تجربی، (الف) صفحه سالم، (ب) صفحه معیوب.

Fig. 20. The 17th frequency mode shape in experimental modal test : a) Healthy Plate b) Defective Plate.



شکل ۲۱- تغییر انحنای شکل مود صفحات سالم و معیوب در هفدهمین شکل مود در آزمون مودال تجربی.

Fig. 21. Change in the mode shape curvature of healthy and defective plates in the 17th mode shape in experimental modal test.



شرایط مرزی آزاد در وضعیت ایده آل نشان می‌دهد در حالیکه اتصال شیکر به صفحه برای تحریک، شرایط مرزی آزاد صفحه را در آزمایشگاه تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. همچنین بعضی فرکانسها در روش شبیه‌سازی به‌دست آمده ولی در روش تجربی مشاهده نشده‌اند (ردیف های ۹، ۱۴، ۱۶).

جدول ۶- نتایج فرکانس‌های طبیعی صفحه سالم حاصل از آزمون تجربی و المان محدود.

Table 6. Results of natural frequencies of healthy plate from finite element and experimental tests.

Mode Number	Natural Frequencies of healthy plate [Hz]		Discrepancy(%)
	Experimental test	Finite element	
7	780	829	6.2
8	1094	1176	7.5
9	---	2298.6	--
10	2594	2537.3	2.2
11	4164	4274	2.6
12	4217	4361.7	3.4
13	4900	4808.5	1.9
14	---	5172.3	---
15	6182	6548	5.9
16	---	6732.2	---
17	7244	7516.7	3.7
18	8291	8917.3	7.5

پس از تعیین فرکانس‌های طبیعی در آزمون مودال تجربی، هفدهمین شکل مود فرکانسی صفحات سالم و معیوب استخراج گردید که در شکل ۲۰ نشان داده شده‌است. این مود فرکانسی، مودی بود که در آن بیشترین احتمال شناسایی عیب بواسطه تعداد خمش بیشتر صفحه وجود داشت. به لحاظ ظاهری تفاوتی بین شکل مودهای صفحه سالم و معیوب دیده نمی‌شود که علت آن کوچک بودن ابعاد عیب است. در نهایت داده‌های شکل مود صفحات سالم و معیوب به عنوان ورودی در قالب ماتریس وارد نرم افزار MATLAB گردید و از طریق کد نویسی پس از محاسبه انحنای نقاط، تغییر انحنای شکل مود و تغییر انرژی کرنشی مودال صفحات سالم و معیوب محاسبه گردید که نتایج در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ نشان داده شده‌اند.

تأثیر قرار می گرفت چراکه منجر به اضافه شدن جرم به صفحه می شد. یک راهکار برای غلبه بر این محدودیت می تواند استفاده از ارتعاش سنج لیزری برای ثبت پاسخ نقاط اندازه گیری به منظور حذف اثر وزنی سنسور باشد. همچنین با استفاده از ارتعاش سنج لیزری بدلیل آنکه نقاط بیشتری از صفحه را می توان اسکن نمود، مکان یابی عیب با دقت بیشتر و خطای کمتری می تواند انجام شود که البته می تواند موضوع تحقیق در آینده باشد.

۶ نتیجه گیری

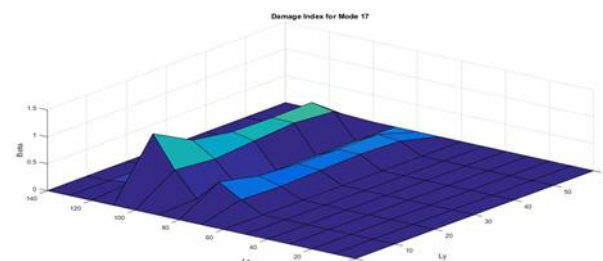
مدل های اجزاء محدود صفحات سالم و معیوب که خواص واقعی آنها با انجام آزمایش هایی مانند آزمون کشش، چگالی و ... تعیین شده بود ایجاد گردید. تحلیل مودال آنها در نرم افزار ANSYS انجام گردید تا شکل مود مطلوب جهت ارزیابی عیب شناسایی گردد. سپس از طریق کد نویسی در نرم افزار MATLAB دو روش عیب یابی مودال یعنی تغییر در انحنای شکل مود و تغییر در انرژی کرنشی مودال برای شناسایی و مکان یابی عیب مورد استفاده قرار گرفت. برای صحت گذاری نتایج و نشان دادن کارآمدی روش های عیب یابی مودال برای صفحات ساخت افزایشی، تعدادی صفحه مستطیل شکل فولادی سالم و معیوب با پودر فلزی 316L به روش ذوب انتخابی لیزری با توجه به محدودیت فضای ساخت دستگاه، چاپ گردید. آزمون های مودال برای استخراج پارامترهای مودال صفحات سالم و معیوب بخصوص شکل مودها انجام گردید. کوچک بودن قطعه، چالش تحریک فرکانس بالای قطعه را در آزمون های مودال بدنبال داشت. از طرفی کوچک بودن عیب نیز باعث می شد که مقایسه پارامترهای خالص مودال مانند فرکانس و شکل مود به تنهایی منجر به شناسایی عیب نگردد. از این رو در نهایت با کد نویسی در نرم افزار MATLAB و بکارگیری دو روش تغییر در انحنای شکل مود و تغییر در انرژی کرنشی مودال، ارزیابی عیب ترک در سه موقعیت مجزا با سه شدت مختلف انجام گرفت. نتایج حاصل از مطالعه حاضر به صورت زیر قابل بیان می باشد:

۱- شبیه سازی حاصل از طراحی آزمایش با روش طراحی مرکب مرکزی و بررسی نمودار سطح پاسخ نشان می دهد شدت عیب ترک بیشتر از محل قرارگیری آن در صفحه بر روی پاسخ فرکانسی تأثیر می گذارد. همچنین مطابق نمودار تأثیر موقعیت بر روی فرکانس، قرارگیری عیب ترک سراسری در فاصله مناسب از لبه ها که همان شرایط مرزی هستند، احتمال شناسایی عیب را افزایش می دهد.

۲- تجزیه و تحلیل شکل مودهای صفحه در شبیه سازی عددی نشان می دهد با افزایش تعداد خمش های صفحه خصوصاً خمش های لبه

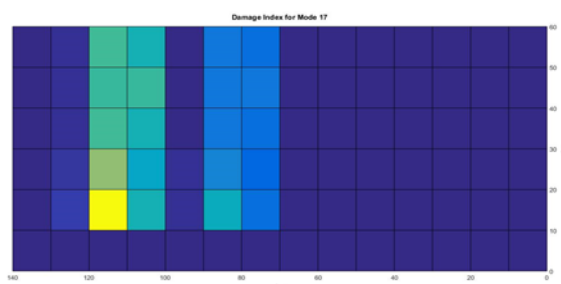
شکل ۲۲- تصویر آشکارسازی عیب براساس تغییر در انحنای شکل مود در نمای بالا برای هفدهمین شکل مود در آزمون مودال تجربی.

Fig. 22. Defect detection image based on the change in mode shape curvature in top view for the 17th mode shape in experimental modal test.



شکل ۲۳- شاخص عیب بر اساس تغییر انرژی کرنشی مودال صفحات سالم و معیوب در هفدهمین شکل مود در آزمون مودال تجربی.

Fig. 23. Damage index based on the change in modal strain energy of healthy and defective plates in the 17th mode shape in experimental modal test.



شکل ۲۴- تصویر آشکارسازی عیب براساس تغییر انرژی کرنشی مودال در نمای بالا برای هفدهمین شکل مود در آزمون مودال تجربی.

Fig. 24. Defect detection image based on change in modal strain energy in top view for the 17th mode shape in experimental modal test.

همانگونه که ملاحظه می شود در آزمون مودال تجربی، محل تقریبی عیوب با عمق های ۰/۹ میلیمتر و ۱/۵ میلیمتر به ترتیب در فواصل ۸۰ میلیمتر و ۱۱۰ میلیمتر با هر دو روش تغییر در انحنای شکل مود و تغییر در انرژی کرنشی مودال شناسایی گردید اما امکان شناسایی عیب با عمق ۰/۳ میلیمتر وجود نداشت. همچنین هرچه عمق یا شدت عیب بیشتر بوده است، اندازه قله نیز بیشتر شده است. باید توجه داشت که اگر محدودیت های آزمون مودال وجود نداشت، مکان یابی عیوب می توانست با دقت بیشتری انجام گیرد.

از جمله این محدودیت ها می توان به این موضوع اشاره کرد که در آزمون مودال ناگزیر بودیم برای تحریک فرکانس بالای صفحه، سطح انرژی تحریک را تا حدی که مقادیر نویز کاهش یابد به مقادیر پایین تر تنظیم نماییم. اگر از سنسورهای با حساسیت بالاتر استفاده می شد به دلیل جرم بالاتر و ابعاد بزرگتر سنسور، داده های تست تحت

- [6] B. Zhang, Y. Li and Q. Bai, "Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 30, pp. 515-52, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>.
- [7] M. Khosravani and T. Reinicke, "On the use of x-ray computed tomography in assesment of 3d-printed components," *Nondestructive Evaluation Journal*, vol. 1 pp. 1-17, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10921-020-00721-1>.
- [8] H. Villaraga, S. Smith and E. Herazo, "X-ray computed tomograpy: from medical imaging to dimensional metrology," *Precision Engineering*, vol. 60, pp. 544-569, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.06.007>.
- [9] S. Gholizadeh, Z. Leman and B. Baharudin, "A review of the application of acoustic emission technique in engineering," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 54, no. 6, pp. 1075-1095, 2015, <https://doi.org/10.12989/sem.2015.54.6.1075>
- [10] M. Bihi, "Ultrasonic testing training handbook," *Ultrasonic testing handbook* 222, 2013.
- [11] S. Udpa and L. Udpa, "Eddy current testing-are we at the limits," in *Proceedings of 16th World Conference on NDT - Montreal (Canada)*, vol. 43, pp. 1-5, 2004
- [12] X. Sun, S. Ilanko, Y. Mochida and R. C. Tighe, "A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures," *Vibration*, vol. 6, no. 4, pp. 843-875, 2023, <https://doi.org/10.3390/vibration6040051>.
- [13] G. Hearn and R. B. Testa, "Modal analysis for damage detection in structures," *Journal of structural engineering*, vol. 117, no. 10, pp. 3042-3063, 1991, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:10\(3042\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:10(3042)).
- [14] W. Fan and P. Qiao, "Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study," *Structural health monitoring*, vol. 10, no. 1, pp. 83-111, 2011, <https://doi.org/10.1177/1475921710365419>.
- [15] E. Kinzel, B.M. West, N. Capps, J.S. Urban, R. Landers, D. Bristow and T. Hartwig, "Modal response as a validation technique for metal parts fabricated with selective Laser Melting," *27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Department of Energy's Kansas City National Security Campus*, pp. 151-174, 2016,
- [16] B. M. West, N. E. Capps, J. S. Urban, J. D. Pribe, T. J. Hartwig, T. D. Lunn, B. Brown, D. A. Bristow, R. G. Lander and E. C. Kinzel, "Modal analysis of metal additive manufactured parts," *Manufacturing Letters*,

طولی در مودهای فرکانسی بالاتر احتمال شناسایی عیب ترک افزایش می‌یابد. این موضوع در آزمون مودال تجربی نیز صحت‌گذاری گردید.

۳- شبیه‌سازی عددی و آزمون مودال تجربی نشان می‌دهد که امکان شناسایی چند عیب ترک که همزمان در یک صفحه ساخت افزایشی رخ داده است با هر دو روش تغییر در انحنای شکل مود و تغییر در انرژی کرنشی مودال وجود دارد.

۴- شبیه‌سازی عددی و آزمون مودال تجربی نشان می‌دهد که برای یک نمونه صفحه ساخت افزایشی، مکان یابی عیب ترک به کمک روش‌های تغییر در انحنای شکل مود و تغییر در انرژی کرنشی مودال تا عمق ۰/۹ میلیمتر امکان پذیر است اما برای مکان‌یابی عیب ترک با عمق‌های کوچک‌تر مانند ۰/۳ میلیمتر باید سایر روش‌های عیب‌یابی مودال مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد.

۵- در آزمون مودال تجربی انجام شده با حذف اثر وزنی سنسور و بکارگیری ارتعاش سنج لیزری و افزایش نقاط اسکن مکان یابی عیب می‌تواند با دقت بیشتر و خطای کمتری صورت گیرد که البته این موضوع قابل بررسی می‌باشد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] A. Paolini, S. Kollmannsberger, and E. Rank, "Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods," *Additive Manufacturing*, vol. 30, pp. 1-13, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>.
- [2] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials Today*, vol. 21, no. 1, pp. 22-37, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- [3] L. Zhou et al., "Additive manufacturing: A comprehensive review," *Sensors*, vol. 24, no. 9, pp.1-44, 2024, 1-44, <https://doi.org/10.3390/s24092668>.
- [4] H. Kim, Y. Lin and T. L. B. Tseng, "A review on quality control in additive manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 645-669, 2018, <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2017-0048>.
- [5] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh and S. L. Sing, "Review of selective laser melting, Materials and applications," *Applied Physics Reviews*, vol. 2, no. 4, pp. 1-21, 2015, <https://doi.org/10.1063/1.4935926>.

- metal," in *the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 2254-2266, 2018, <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/TOC2018>.
- [21] A. Allen, R. Blough and R. Barnard, "Dynamic testing: an experimental approach to defect identification in additive manufactured parts," Master Thesis in Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Department, Michigan Technological University, 2020, <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etr/1004>.
- [22] A. Rytter, "Vibrational based inspection of civil engineering structures," Phd Thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993.
- [23] GE. Box, KB. Wilson, "On the experimental attainment of optimum conditions. In Break throughs in Statistics," Springer New York, pp. 270-310, 1992, <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9-23>.
- [24] A. Pandey, M. Biswas and M. Samman, "Damage detection from changes in curvature mode shapes," *Journal of Sound Vibration*, vol. 1, pp. 321-332, 1991, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B).
- [25] N. Stubbs and J.T. Kim, "Damage localization in structures without baseline modal parameter," *AIAA Journal*, vol. 34, pp. 1644-1649, 1996, <https://doi.org/10.2514/3.13284>.
- vol. 13 pp. 30-33, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.06.001>.
- [17] B. M. West, N. E. Capps, J. S. Urban, J. D. Pribe, T. J. Hartwig, T. D. Lunn, B. Brown, D. A. Bristow, R. G. Lander and E. C. Kinzel, "Towards defect detection in metal slm parts using modal analysis: fingerprinting," in *28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 2504-2515, 2017, <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/16969>.
- [18] K. Johnson, A. Allen and E. Kinzel, "Dynamic defect detection in additively manufactured parts using FEA solution," in *30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Department of Energy's Kansas City National Security Campus*, pp. 1281-1296, 2019, <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/17359>.
- [19] A. Allen, K. Johnson, J. Blough, A. Barnard, T. Hartwig, B. Brown, D. Soine, T. Cullom, D. Bristow, R. Landers and E. Kinzel, "Frequency inspection of additively manufactured parts for layer defect identification," in *30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Department of Energy's Kansas City National Security Campus*, pp. 1400-1410, 2019, <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/17370>.
- [20] T. Cullom, T. Hartwig, B. Brown, K. Johnson, J. R. Blough and A. Barnard, "Effects of identical parts on a common build plate on the modal analysis of slm created