



بررسی عددی و آزمایشگاهی ضریب میرایی وابسته به دما در تیر آلومینیومی

حسین صفایی فرا^{۱*}، امیرمحمد روشن^{۲،۳}

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قائنات، ایران.

^۲ فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قائنات، ایران.

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راکتور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹

چکیده

میرایی به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل و کنترل ارتعاشات سازه‌ها، نقش تعیین کننده‌ای در پایداری، عمر خستگی و عملکرد دینامیکی سیستم‌های مکانیکی دارد. در این پژوهش، رفتار ضریب میرایی تیرهای آلومینیومی (T6-6160) تحت تغییرات دمایی در بازه ۶۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به صورت تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها بر روی تیرهای یکسر گیردار آلومینیومی با طول‌های متفاوت (۱۵، ۱۶/۵، ۱۸، ۱۹/۵ و ۲۱ سانتی‌متر) انجام شده‌اند. برای ایجاد شرایط حرارتی یکنواخت، از سشوار صنعتی و محیط عایق استفاده گردید و داده‌های ارتعاش آزاد با نرم‌افزار Tracker از روی فیلم‌های ثبت شده استخراج شدند. سپس با استفاده از روش کاهش لگاریتمی (Logarithmic Decrement)، ضریب میرایی آزمایشی تعیین و با مقادیر تئوری حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار MATLAB مقایسه شد. نتایج نشان داد که در تیرهای کوتاه‌تر، افزایش دما موجب کاهش قابل توجه ضریب میرایی می‌شود، در حالی که در تیرهای بلندتر، روندی افزایشی مشاهده گردید. این رفتار متناقض ناشی از ترکیب اثرات ترموالاستیک، کاهش مدول یانگ، گرادیان حرارتی موضعی، و فعال شدن مکانیزم‌های لغزش میکروسکوپی در دماهای بالا است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که ضریب میرایی تیرهای آلومینیومی رفتاری غیرخطی و وابسته به دما دارد و در طراحی سازه‌های حساس به ارتعاش مانند پل‌ها، هواپیماها و اجزای مکانیکی، باید اثرات حرارتی در تحلیل دینامیکی لحاظ شود.

کلمات کلیدی: ضریب میرایی؛ ارتعاش آزاد؛ آلومینیوم؛ وابستگی دما؛ تحلیل عددی؛ آزمایش تجربی.

Numerical and Experimental Investigation of Temperature-Dependent Damping Ratio in an Aluminum Beam

Hossein Safaeifar^{1,*}, Amir Mohammad Roshan^{2,3}

¹ Assist. Prof., Mechanical engineering Department, Bozorgmehr University of Qaen, Iran.

² B.Sc. Graduate in Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaen, Iran.

³ M.Sc Student in Reactor Engineering, Kerman Graduate University of Technology, Iran.

Abstract

As one of the key parameters in the analysis and control of structural vibrations, damping plays a decisive role in the stability, fatigue life and dynamic performance of mechanical systems. In this research, the behavior of the damping coefficient of aluminum beams (T6-6160) under temperature changes in the range of 60 to 100 °C has been investigated experimentally and analytically. The experiments were performed on cantilever aluminum beams with different lengths (15, 16.5, 18, 19.5 and 21 cm). To create uniform thermal conditions, an industrial hair dryer and an insulating environment were used, and free vibration data were extracted from recorded videos with Tracker software. Then, using the logarithmic decrement method, the experimental damping coefficient was determined and compared with the theoretical values where obtained from modeling in MATLAB software. The results showed that in shorter beams, an increase in temperature causes a significant decrease in the damping coefficient, while in longer beams, an increasing trend was observed. This paradoxical behavior is caused by a combination of thermoelastic effects, reduction of Young's modulus, local thermal gradient, and activation of microscopic slip mechanisms at high temperatures. In general, the results show that the damping coefficient of aluminum beams has a non-linear and temperature-dependent behavior. So the thermal effects should be considered in dynamic analysis in the design of vibration-sensitive structures such as bridges, airplanes and mechanical components.

Keywords: Damping ratio; Free vibration; Aluminum beam; Temperature-dependent damping; Experimental test; Numerical analysis.

۱- مقدمه

ارتعاش و میرایی از بنیادی‌ترین مفاهیم در علم دینامیک سازه‌ها و سیستم‌های مکانیکی محسوب می‌شوند. میرایی فرآیندی است که در آن بخشی از انرژی ارتعاشی به گرما یا سایر اشکال انرژی غیرقابل بازیافت تبدیل می‌شود و در نتیجه، دامنه‌ی نوسان با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در مهندسی سازه و مکانیک، میزان میرایی نقش مستقیمی در پایداری دینامیکی، کنترل رزونانس و کاهش نویز و خستگی دارد. نبود میرایی کافی می‌تواند منجر به بروز ارتعاشات شدید، افزایش تنش‌های سیکلی، و در نهایت شکست سازه گردد [۱-۶].

یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر رفتار دینامیکی مواد، تغییرات دما است. افزایش دما معمولاً موجب کاهش مدول الاستیسیته و تغییر در خواص ویسکوالاستیک مواد می‌شود. در نتیجه، ویژگی‌های ارتعاشی سازه از جمله فرکانس طبیعی و ضریب میرایی دچار تغییر می‌گردند [۷-۱۵]. این موضوع در سیستم‌هایی نظیر پل‌ها، پره‌های توربین، قطعات هواپیما، و اجزای موتور خودرو اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تغییر دما می‌تواند پاسخ دینامیکی سازه را از حالت طراحی شده منحرف سازد [۱۴].

اگرچه تحقیقات متعددی درباره‌ی تأثیر دما بر فرکانس طبیعی تیرها انجام شده است [۱۳-۲۰]، اما بررسی مستقیم اثر دما بر ضریب میرایی ذاتی تیرهای فلزی ساده (بدون دمپر یا لایه‌های مرکب) هنوز محدود است. بیشتر پژوهش‌ها به مطالعه‌ی کامپوزیت‌ها، پلیمرها یا تیرهای با دمپرهای لایه‌ای پرداخته‌اند [۱۵ و ۱۸-۲۴]، در حالی که در کاربردهای صنعتی بسیاری، تیرهای آلومینیومی ساده و سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این پژوهش، هدف بررسی هم‌زمان رفتار تئوری و آزمایشگاهی ضریب میرایی تیر آلومینیومی (T6-6160) تحت شرایط دمایی مختلف است. برای این منظور، تیرهایی با طول‌های مختلف تحت ارتعاش آزاد قرار گرفتند و ضریب میرایی آنها با روش کاهش لگاریتمی محاسبه گردید [۶]. سپس مدل نظری متناظر با سیستم یک درجه آزادی در نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد تا مقادیر تئوری استخراج شود و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردد [۱ و ۲]. اهمیت این مطالعه در آن است که نشان می‌دهد تأثیر دما بر میرایی صرفاً یکنواخت یا خطی نیست، بلکه به ویژگی‌های

هندسی تیر و توزیع گرادیان حرارتی بستگی دارد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند در تحلیل رفتار ارتعاشی سازه‌های سبک در صنایع هوافضا، خودروسازی و عمران مورد استفاده قرار گیرد و مبنایی برای طراحی سیستم‌های مقاوم‌تر در برابر اثرات حرارتی فراهم سازد [۱۴].

در دهه‌های گذشته، با بررسی ارتعاش صفحات نازک، نشان داد که مشخصات دینامیکی سازه‌ها به شدت تحت تأثیر سختی خمشی، شرایط مرزی و خواص الاستیک ماده قرار دارد. این نتایج بیانگر اهمیت تغییرات خواص مکانیکی مواد در تحلیل رفتار ارتعاشی سازه‌های انعطاف‌پذیر مانند تیرها است [۱۱]. بررسی رفتار سیستم‌های مکانیکی دارای میرایی نشان داد که اتلاف انرژی ارتعاشی در مواد جامد ناشی از مکانیزم‌هایی مانند میرایی داخلی، اصطکاک میکروسکوپی و تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر در ساختار ماده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ضریب میرایی یک پارامتر ثابت نبوده و می‌تواند تحت تأثیر شرایط محیطی، ویژگی‌های ماده و تغییرات دمایی تغییر کند. بنابراین، برای تعیین دقیق ضریب میرایی تیرهای آلومینیومی، بررسی اثر دما بر مکانیزم‌های اتلاف انرژی ضروری است [۱۲].

ذیبدی و همکاران مدلی ریاضی برای تیر یک‌سر گیردار آلومینیومی تحت شرایط دمایی مختلف ارائه کردند. آنها از معادلات اویلر-برنولی و تغییرات مدول الاستیسیته با دما استفاده نمودند. بازه دمایی آزمایش بین ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد بود؛ نتایج نشان داد که با افزایش دما، فرکانس طبیعی تیر حدود ۱۰ تا ۱۵٪ کاهش می‌یابد و میرایی مؤثر به شرایط مرزی حساسیت بالایی دارد. این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن اثر دما در طراحی و تحلیل ارتعاشی تیرها را برجسته ساخت [۱۳].

ژبا و همکاران مروری جامع بر اثرات دما بر خواص ارتعاشی سازه‌های عمرانی انجام دادند. آنها علاوه بر تیرها، پل‌ها و سازه‌های بزرگ را بررسی کردند. روش آنها ترکیبی از تحلیل عددی و جمع‌آوری داده‌های میدانی بود. یافته‌ها نشان داد که تغییر دما موجب جابه‌جایی مدهای ارتعاشی می‌شود و در برخی موارد می‌تواند باعث خطای جدی در شناسایی آسیب سازه گردد. آنها تأکید کردند که در پایش سلامت سازه (Structural health monitoring)، باید اثر دما به‌صورت یک پارامتر تصحیحی لحاظ شود [۱۴].

نشان داد که اثر دما بر رفتار ترکیبی آلومینیوم و لایه‌های دمپ بسیار مهم است [۱۹].

سان و همکاران با استفاده از آزمایش‌های ارتعاشی بر روی تیرهای فلزی گرم‌شده و به‌روزرسانی مدل اجزای محدود، رفتار آنها را تحلیل کردند. آنها دما را از طریق اعمال گرمایش کنترل‌شده تغییر داده و پاسخ مودال را ثبت کردند؛ نتایج نشان داد که مدل‌سازی عددی بدون در نظر گرفتن تغییرات دما انحراف زیادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد. با به‌روزرسانی مدل، دقت پیش‌بینی‌ها به‌شدت افزایش یافت. این پژوهش بر اهمیت استفاده از ترکیب روش‌های عددی و آزمایشگاهی تأکید کرد [۲۰].

در مطالعه‌ای بر اثر دما بر خواص مکانیکی و میرایی کامپوزیت‌های آلومینیوم تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی (الهام‌گرفته از ساختار الماس)، نشان داده شد که ساختار اسکلت نانولوله‌ای وابسته به دما، میرایی را افزایش می‌دهد در حالی که مدول الاستیک حفظ می‌شود. روش‌ها شامل ریخته‌گری و آزمون‌های DMA در دماهای اتاق تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. یافته‌ها حاکی از افزایش ۳۰٪ در ضریب میرایی بدون کاهش قابل توجه مدول است، به دلیل اتلاف انرژی در مرزهای نانویی. نتیجه‌گیری بر کاربرد در تیرهای ارتعاشی آلومینیومی تأکید دارد [۲۱].

تحقیق دیگری بر عملکرد میرایی و پاسخ مکانیکی آلیاژ AlSiMg تولیدشده با روش‌های افزودنی و پردازش ترمو-مکانیکی تمرکز دارد. روش‌ها شامل آزمون‌های فشاری دینامیکی و DMA در دماهای ۲۵ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است. یافته‌ها نشان می‌دهد که عملیات حرارتی میرایی را تا ۲۵٪ افزایش می‌دهد، اما در دماهای بالا کاهش مدول غالب می‌شود. نتیجه‌گیری بر بهینه‌سازی برای تیرهای آلومینیومی در محیط‌های حرارتی تأکید دارد [۲۲].

در پژوهشی با عنوان تأثیر عملیات حرارتی بر microstructure، خواص مکانیکی، و رفتار میرایی کامپوزیت‌های ماتریس آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت‌شده با نانوذرات کربن، نشان داده شده است که نانوذرات میرایی را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد. روش‌ها شامل آزمون‌های فشاری، سختی، و DMA در دماهای ۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. یافته‌ها حاکی از افزایش ۲۸٪ در استحکام تسلیم و ۴۵٪ در استحکام نهایی با وجود ۵٪ نانوذرات است [۲۳].

لایدکر در پژوهش خود تیرهای کامپوزیتی آلومینیوم SiC را بررسی کرد. او از مدل ریاضی برای پیش‌بینی تغییرات مدول و میرایی در دماهای مختلف استفاده نمود؛ نتایج نشان داد که افزایش دما باعث کاهش مدول الاستیسیته و تغییر رفتار میرایی می‌شود. او به این نتیجه رسید که سازه‌های ساخته‌شده از این مواد باید برای عملکرد در دماهای بالا به‌طور ویژه طراحی شوند [۱۵].

اسفرجانی و همکاران اثر هم‌زمان آسیب‌های موضعی و تغییرات دما را بر فرکانس طبیعی تیر بررسی کردند. آنها با استفاده از تحلیل اجزای محدود، مدل‌هایی از تیر آسیب‌دیده را تحت شرایط دمایی مختلف شبیه‌سازی کردند؛ یافته‌ها نشان داد که حتی بدون وجود آسیب، تغییر دما می‌تواند منجر به انحراف ۵ تا ۱۰ درصدی در فرکانس طبیعی شود. در حضور آسیب، این انحراف تشدید می‌شود. این پژوهش اهمیت تفکیک اثر دما از آسیب را در تشخیص سلامت سازه نشان داد [۱۶]. زالتجی و همکاران با استفاده از اصل ترموالاستیک، میرایی تیر اویلر-برنولی را در شرایط آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها تغییرات دما را به‌طور کنترل‌شده اعمال و پاسخ‌های ارتعاشی را ثبت کردند؛ نتایج نشان داد که با افزایش دما، ضریب میرایی به‌طور غیرخطی تغییر می‌کند. به‌ویژه در محدوده دمایی نزدیک به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش چشمگیری در میرایی مشاهده شد که ناشی از فعال‌شدن مکانیزم‌های داخلی ماده بود [۱۷].

ویتک و همکاران میرایی مواد پلیمری را تحت شرایط دمایی مختلف آزمایش کردند. آنها نمونه‌هایی از پلیمرهای صنعتی را تحت ارتعاش آزاد قرار دادند و زمان میرایی آنها را اندازه گرفتند؛ یافته‌ها نشان داد که مواد پلیمری رفتار وابسته به دمای بسیار شدیدی دارند و ضریب میرایی در بازه‌های دمایی مشخصی به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند. اگرچه این نتایج مستقیماً بر آلومینیوم متمرکز نبود، اما اهمیت وابستگی دما را در طراحی سازه‌های سبک نشان داد [۱۸].

ژانگ و همکاران پروفیل‌های آلومینیومی را که با لایه‌های ویسکوالاستیک دمپ شده بودند آزمایش کردند. آنها پاسخ ویبروآکوستیک نمونه‌ها را در بازه دمایی ۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که در دماهای پایین، عملکرد لایه دمپ‌کننده کاهش می‌یابد، در حالی که در دماهای بالا، افزایش اتلاف انرژی مشاهده می‌شود. این مطالعه

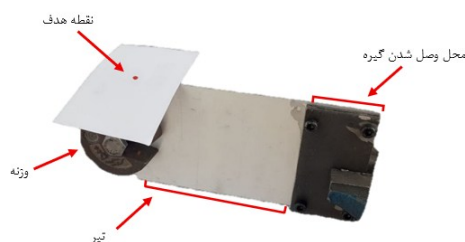
برای بررسی رفتار ضریب میرایی تیرهای آلومینیومی (T6-6160) در اثر تغییرات دمایی، این پژوهش به صورت ترکیبی از دو بخش تجربی و تحلیلی انجام گرفته است. در بخش تجربی، ضریب میرایی با استفاده از داده‌های ارتعاش آزاد و روش کاهش لگاریتمی محاسبه شد، و در بخش تحلیلی، مدل دینامیکی متناظر در محیط MATLAB توسعه داده شد تا امکان مقایسه بین نتایج تئوری و عملی فراهم شود. در ادامه، جزئیات مراحل آزمایش، مدل ریاضی و روند تحلیل عددی آورده شده است.

۲- بررسی آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات تیر و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای انجام آزمایش، از تیرهای آلومینیومی (T6-6160) با خواصی که در جدول ۱ آورده شده است با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و طول‌های متفاوت استفاده شد تا تأثیر هندسه نیز بر رفتار میرایی بررسی گردد. طول تیرها به ترتیب برابر با ۱۵، ۱۶/۵، ۱۸، ۱۹/۵ و ۲۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر تیر از آلیاژ آلومینیوم خالص با درصد خلوص بالا ساخته شده تا اثرات مواد ترکیبی یا ناخالصی‌ها در نتایج حذف شود.

نمونه‌ها به صورت تیر یک سر گیردار (Cantilever Beam) در گیره‌ی فولادی محکم شده (شکل ۱) و انتهای آزاد تیر جهت اعمال ارتعاش، آزاد باقی ماند. برای تحریک اولیه، انتهای آزاد تیر با جابجایی کوچک دستی منحرف و سپس رها گردید تا ارتعاش آزاد آغاز شود.



شکل ۱- شکل نمونه از تیر مورد آزمایش

جدول ۱- خواص تیر آلومینیومی (T6-6160)

$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	ν	$C \left(\frac{J}{kg.K} \right)$	E (GPa)	G (GPa)
۲۷۰۰	۰٫۳۳	۸۹۶	۶۸٫۹	۲۶

دلگرم و همکاران در آلیاژهای منیزیم با میرایی بالا (با ارتباط به آلومینیوم)، مکانیسم‌های وابسته به دما مانند لغزش دانه را بررسی کردند. روش‌ها شامل مرور ادبیات و آزمون‌های DMA در دماهای ۳۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. یافته‌ها نشان می‌دهد که عناصر آلیاژی مانند Nb و Ag میرایی را تا ۱۶۷٪ افزایش می‌دهند. نتیجه‌گیری بر مدل‌های ترکیبی برای مواد با میرایی بالا تأکید دارد، که برای تیرهای آلومینیومی قابل تعمیم است [۲۴].

پژوهشی بر اثرات دما بر خواص باند بتن-میلگرد در تیرهای بتنی، با تمرکز بر رفتار دینامیکی، نشان داد که دما میرایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. روش‌ها شامل آزمون‌های عددی و تجربی در دماهای ۲۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. یافته‌ها حاکی از کاهش ۲۰-۳۰٪ در میرایی با افزایش دما است، مشابه رفتار آلومینیوم. نتیجه‌گیری بر طراحی تیرهای هیبریدی تأکید دارد [۲۵].

با وجود این مطالعات، اغلب پژوهش‌ها بر مواد مرکب، کامپوزیت‌ها یا تیرهای چندلایه متمرکز بوده‌اند، در حالی که داده‌های تجربی مربوط به تیرهای آلومینیومی ساده و همگن بسیار محدود است. به‌ویژه در محدوده‌ی دمایی متوسط (۶۰ تا ۱۰۰°C)، اطلاعات کمی درباره‌ی تغییرات دقیق ضریب میرایی وجود دارد. از این رو، بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار میرایی در چنین شرایطی می‌تواند شکاف دانشی موجود را پر کند.

در ادامه این مقاله، ابتدا روش تحقیق به تفصیل توصیف می‌گردد که شامل بخش‌های آزمایشگاهی (مانند مشخصات نمونه‌ها، ایجاد شرایط حرارتی، برداشت داده‌های ارتعاش و محاسبه ضریب میرایی تجربی) و تحلیلی (مدل دینامیکی تیر، تحلیل عددی با MATLAB و صحت‌سنجی مدل) است. پس از آن، نتایج و بحث بر روی داده‌های به‌دست‌آمده تمرکز دارد، جایی که نمودارهای ارتعاشی، خطاها و ناپایداری‌های مشاهده‌شده، تحلیل روند تغییرات میرایی بر حسب دما، مقایسه داده‌های نظری و تجربی، و بررسی فیزیکی و ترموالاستیک رفتار مشاهده‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، نتیجه‌گیری کلی از یافته‌ها ارائه شده و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده در زمینه‌های گسترش مدل‌سازی، بررسی مواد دیگر و شرایط بارگذاری ترکیبی بیان می‌گردد.

۲-۲- ایجاد شرایط حرارتی

برای بررسی وابستگی دما، آزمایش‌ها در پنج دمای مختلف شامل ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. به‌منظور حفظ پایداری حرارتی، از محیط عایق‌بندی‌شده استفاده گردید که در آن، دما با استفاده از سخوار صنعتی و کنترل حرارتی دستی ثابت نگه داشته شد. دمای سطح تیر در هر آزمایش با دوربین حرارتی اندازه‌گیری و تا رسیدن به تعادل حرارتی پایدار (اختلاف کمتر از 1°C در مدت ۱ دقیقه) حفظ گردید.

۳-۲- برداشت داده‌های ارتعاش

برای ثبت ارتعاشات، از دوربین دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری 60 fps استفاده شد و فیلم‌ها توسط نرم‌افزار Tracker پردازش گردیدند. در نرم‌افزار، نقطه‌ای مشخص در انتهای تیر به عنوان نقطه هدف (Tracking Point) تعیین شد تا تغییر مکان آن در هر فریم استخراج شود. خروجی نرم‌افزار شامل دو ستون داده، یعنی زمان (بر حسب ثانیه) و دامنه جابجایی (بر حسب میلی‌متر) بود.

۴-۲- محاسبه ضریب میرایی تجربی

ضریب میرایی از طریق روش کاهش لگاریتمی (Logarithmic Decrement) مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$\delta = \ln \left(\frac{x(t)}{x(t + T_d)} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه $x(t)$ و $x(t + T_d)$ به ترتیب دامنه دو پیک متوالی می‌باشند و T_d دوره‌ی میرایی نوسان است. با توجه به رابطه δ و ζ داریم:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (2)$$

برای هر آزمایش، دامنه‌ی پیک‌ها با استفاده از توابع پردازش داده در MATLAB استخراج شد و میانگین چندین مقدار ζ محاسبه گردید تا دقت افزایش یابد. این روش امکان حذف نویز و افزایش تکرارپذیری را فراهم ساخت.

۳- بررسی تحلیلی

۳-۱- مدل دینامیکی تیر

رفتار دینامیکی تیر به‌صورت یک سیستم یک درجه آزادی با جرم m ، سختی k و ضریب میرایی c مدل شد. معادله‌ی حرکت سیستم به‌صورت زیر است:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3)$$

و ضریب میرایی بحرانی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_c = 2\sqrt{km} \quad (4)$$

با استفاده از این معادلات، پاسخ میرای سیستم در حالت آزاد (Free Damped Vibration) به‌شکل زیر بیان می‌شود:

$$x(t) = Ae^{-\xi\omega_n t} \cos(\omega_d t + \phi) \quad (5)$$

که در آن $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ فرکانس طبیعی بدون میرایی، $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ فرکانس میرایی سیستم است.

۲-۳- تحلیل عددی با متلب

برای محاسبه‌ی دقیق ζ ، فرکانس طبیعی و مقایسه‌ی داده‌ها، کدی در MATLAB توسعه داده شد که این کد قابلیت‌های زیر را دارد:

۱. ورود خودکار پنج فایل داده‌ی آزمایشی مربوط به دماهای مختلف.
۲. حذف نویز و نرمال‌سازی سیگنال‌ها با استفاده از میانگین و انحراف معیار.
۳. استخراج پیک‌های اصلی با الگوریتم یافتن پیک‌ها.
۴. محاسبه‌ی ضریب میرایی برای هر جفت پیک متوالی و میانگین‌گیری از نتایج.
۵. رسم نمودارهای مقایسه‌ای بین داده‌های نظری و تجربی در قالب چهار زیرنمودار:
 - ارتعاش عملی
 - ارتعاش نظری
 - مقایسه‌ی هم‌زمان دو پاسخ
 - مسیر کاهش دامنه‌ی پیک‌ها
۶. ذخیره‌ی خودکار نمودارها برای هر آزمایش و تولید نمودار کلی مقایسه بین تمام تیرها.

۳-۳- صحت‌سنجی مدل

برای اطمینان از صحت محاسبات، سه مرحله‌ی اعتبارسنجی انجام شد:

۱. مقایسه‌ی دامنه‌های تئوری با داده‌های آزمایشگاهی در بازه‌ی زمانی اولیه (انحراف کمتر از ۰.۵٪).

۲. بررسی تطابق روند کاهش لگاریتمی با داده‌های واقعی (پراکندگی تصادفی کمتر از ۰/۰۰۲).
۳. ارزیابی پایداری ζ در تکرارهای مختلف آزمایش که انحراف معیار آن کمتر از ۷٪ به دست آمد.

۴- نتایج و بحث

در این پژوهش، داده‌های ارتعاش آزاد تیرها از فیلم‌های آزمایشی استخراج و با نرم‌افزار Tracker پردازش شدند تا پاسخ رفتاری انتهای آزاد هر تیر برحسب زمان به دست آید. برای هر آزمایش یک نقطه‌ی مرجع در انتهای آزاد تیر (tracking point) تعیین شد و مسیر جابجایی آن در هر فریم ثبت گردید؛ سپس سیگنال‌های موقعیت زمانی به دست آمده در محیط MATLAB فیلتر، نرمال‌سازی و برای استخراج پیک‌ها و محاسبه‌ی پارامترهای دینامیکی آماده شدند. نمودارهای ارتعاش آزاد که در این روند حاصل می‌شوند، شامل اطلاعات زمانی-دامنه‌ای لازم برای تعیین دوره‌ی میرایی T_d ، مقادیر دامنه پیک‌ها و الگوی کاهش دامنه (log-decrement) هستند و بنابراین پایه محاسبات تجربی ضریب میرایی ζ را تشکیل می‌دهند.

تحلیل این نمودارها نشان‌دهنده رفتار غیرخطی و وابسته به هندسه است: در تیرهای کوتاه‌تر الگوی کلی کاهش ζ با افزایش دما دیده می‌شود، در تیرهای میان‌طول یک رفتار دومرحله‌ای (کاهش تا محدوده میانی و سپس افزایش جزئی در دماهای بالا) مشاهده می‌گردد و در تیرهای بلندتر روند افزایشی ζ با دما غالب است. این روندها بازتاب هم‌زمان چند مکانیسم فیزیکی شامل تغییر مدول الاستیسیته با دما، توزیع غیرهمگن دما در طول تیر (گرادیان موضعی)، و فعال شدن مکانیزم‌های اصطکاک داخلی و لغزش دانه‌ای در دماهای بالاتر هستند.

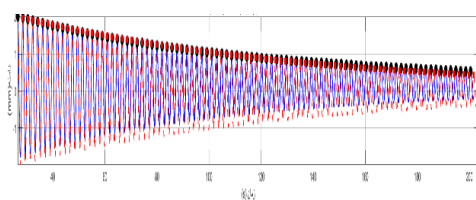
در کنار تحلیل کلی روند ζ ، برخی از نمودارهای ارتعاشی نشان‌دهنده انحرافات یا بی‌نظمی‌هایی بودند که نمی‌توانستند مستقیماً به رفتار فیزیکی مورد انتظار نسبت داده شوند؛ بنابراین در این فصل علاوه بر ارائه نتایج معتبر، به صورت مجزا داده‌هایی که دچار خطا یا ناپایداری شده‌اند نیز تحلیل و علل احتمالی هر نوع خطا تشریح شده است. در ادامه، ابتدا خلاصه‌ای فنی از چگونگی استخراج نمودارهای ارتعاشی آورده می‌شود، سپس الگوی تغییر ζ برحسب دما تشریح می‌گردد و نهایتاً انواع خطاهای مشاهده‌شده در نمودارها، نشانه‌های

آماري/گرافيكي هر خطا و راهکارهای تصحيح يا کاهش آنها بيان مي‌شود.

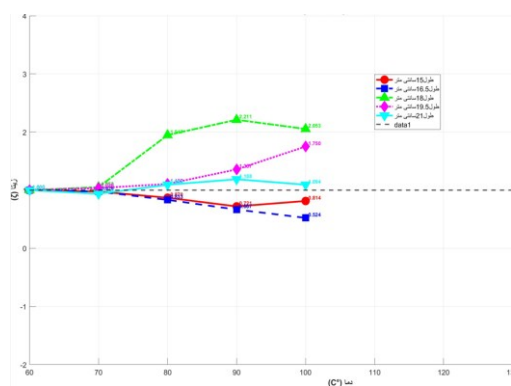
۴-۱- خطاها و نمودار ارتعاش تیرهای مد نظر

خطاهایی که منجر به ایجاد ناهنجاری در روند نمودار ارتعاشی در آزمایش شدند به شرح زیر می‌باشند:

- از دست رفتن پیک‌ها (missing/dropped peaks)
- پریدگی (jumps) یا نوسان پایه (baseline drift)
- نویز فرکانس بالا و پیک‌های کاذب
- آلیاسینگ زمانی (aliasing)
- خطای تبدیل پیکسل به واحد طول (کالیبراسیون فضایی نادرست)
- نحوه برخورد تحلیلی با داده‌های دارای خطا به شرح زیر است:
- داده‌های دارای نشانه‌های واضح خطا ابتدا بررسی و طبقه‌بندی می‌شوند (قابل بازسازی با تصحیح یا غیرقابل اعتماد).
- برای محاسبه ζ فقط از پیک‌های معتبر و پایدار (بعد از پرئود گذرا) استفاده شد و میانگین چند جفت پیک متوالی گزارش گردید تا اثر پیک‌های منفرد حذف شود.
- مواردی که ناپایداری مرتبط با گرمایش یا شرایط مرزی بودند، در گزارش جداگانه تشریح و در تحلیل نهایی یا حذف شدند یا به عنوان داده‌های جداگانه با تفسیر گزارش گردیدند.
- پیشنهاد عملی برای بهبود تکرارپذیری: تثبیت دمایی طولانی‌تر، افزایش نرخ نمونه‌برداری و بهبود نشانگر تصویربرداری.



(الف)



شکل ۳- نمودار مقایسه زیتاها بر حسب دما

در تمامی نمونه‌ها، تغییر دما منجر به تغییر قابل توجه در میزان میرایی شد، اما روند این تغییرات در تیرهای کوتاه و بلند متفاوت بود که در ادامه بررسی شده‌اند.

۴-۲-۱- تیرهای کوتاه (۱۵ و ۱۶/۵ سانتی‌متر)

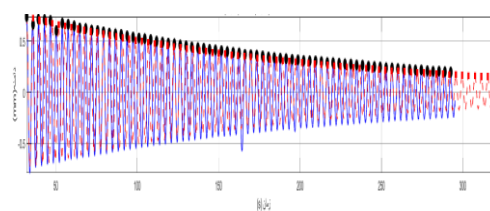
در تیرهای کوتاه‌تر، روندی کاهشی در ζ با افزایش دما مشاهده شد. به عنوان نمونه، برای تیر ۱۵ و ۱۶/۵ سانتی‌متر همانطور که در (جدول ۲ و ۳) آورده شده‌است، اگرچه در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۰ مقدار میرایی کمی افزایش یافت، روند کلی نشان‌دهنده کاهش ζ تا حدود ۰،۰۰۳ است. این پدیده ناشی از کاهش مدول یانگ و کاهش اصطکاک در توده‌ی ماده در اثر گرم‌شدن یکنواخت است که باعث کاهش انرژی اتلافی در چرخه‌های نوسان می‌شود.

جدول ۲- مقدار ضریب میرایی تیر ۱۵ سانتی‌متری در

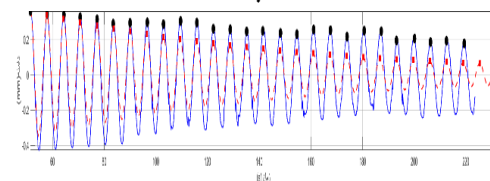
دماهای مختلف					
($^{\circ}\text{C}$) دما	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
ζ	۰،۰۰۴۳	۰،۰۰۴۲	۰،۰۰۳۷۴	۰،۰۰۳۱	۰،۰۰۳۵

جدول ۳- مقدار ضریب میرایی تیر ۱۶/۵ سانتی‌متری در

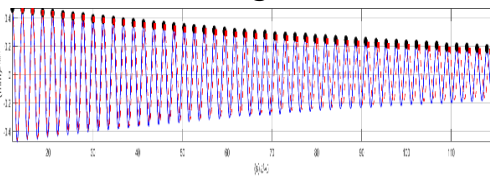
دماهای مختلف					
($^{\circ}\text{C}$) دما	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
ζ	۰،۰۰۴۲	۰،۰۰۴۱	۰،۰۰۳۵	۰،۰۰۲۸	۰،۰۰۲۲



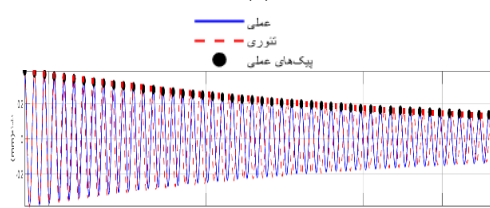
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۲- نمودار ارتعاشی تیر در دمای ۸۰ درجه

سانتی‌گراد، (الف) طول ۱۵ سانتی‌متر، (ب) طول ۱۶/۵

سانتی‌متر، (ج) طول ۱۸ سانتی‌متر، (د) طول ۱۹/۵

سانتی‌متر، (ه) طول ۲۱ سانتی‌متر

(محور افقی جابجایی نقطه انتهای تیر بر حسب میلی‌متر

و محور عمودی زمان بر حسب ثانیه می‌باشد).

۴-۲- تحلیل روند تغییرات میرایی بر حسب دما

نمودار تغییرات زیتا برای طولهای مختلف به شرح شکل ۳ می‌باشد.

جدول ۶- مقدار ضریب میرایی تیر ۲۱ سانتی متری در

دماهای مختلف					
(°C)	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
دما					
ζ	۰,۰۰۳۲	۰,۰۰۳۰	۰,۰۰۳۵	۰,۰۰۳۸	۰,۰۰۳۵

۴-۳- مقایسه داده‌های نظری و تجربی

برای هر نمونه، پاسخ ارتعاش آزاد به صورت نمودار دامنه-زمان از داده‌های آزمایشگاهی و مدل تحلیلی استخراج شد. مقایسه بین آن‌ها نشان می‌دهد که انحراف بین مقادیر تجربی و تئوری در محدوده‌ی کمتر از ۵٪ قرار دارد که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل عددی است.

به‌طور خاص:

- در دماهای پایین (۶۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد)، نتایج تئوری و عملی هم‌خوانی بالایی داشتند.
- در دماهای بالا (۹۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، اختلاف کمی مشاهده شد که ناشی از تأخیر حرارتی و تغییر موضعی خواص ماده است.
- کد MATLAB با استفاده از محاسبه‌ی چند پیک متوالی، میانگین میرایی را با دقت بالاتری نسبت به روش تک‌پیک به‌دست آورده است.

۴-۴- بررسی فیزیکی و ترموالاستیک رفتار تیرها

رفتار ضریب میرایی به‌دما وابسته از ترکیب چند عامل اصلی ناشی می‌شود:

- کاهش مدول ینگ (E)
- گرادیان حرارتی موضعی
- در تیرهای بلندتر، دما به‌صورت یکنواخت پخش نمی‌شود و نواحی نزدیک گیره دمای پایین‌تری نسبت به انتهای آزاد دارند. این گرادیان حرارتی منجر به پدید آمدن اتلاف انرژی ترموالاستیک در ناحیه‌ی میانی تیر می‌شود.
- لغزش میکروسکوپی بین دانه‌های آلیاژی
- در دماهای بالا، لغزش‌های بین‌دانه‌ای فعال می‌شوند و انرژی ارتعاشی به صورت اصطکاک داخلی از بین می‌رود. این پدیده موجب افزایش ضریب میرایی در دماهای بیش از ۸۰ °C می‌گردد.
- ناهمگنی حرارتی و انحراف از شرایط مرزی ایده‌آل

۴-۲-۲- تیرهای میان طول (۱۸ و ۱۹/۵ سانتی متر)

در این تیرها طبق (جدول ۴ و ۵)، ضریب میرایی ابتدا کاهش یافته و سپس در دماهای بالاتر مجدداً افزایش پیدا کرده است. این رفتار غیرخطی و دومرحله‌ای نشان می‌دهد که در بازه‌ی میانی (۷۰ تا ۸۰ درجه)، اثر کاهش مدول غالب است؛ اما در دماهای بالاتر (۹۰ و ۱۰۰ درجه)، فعال شدن مکانیزم‌های میکروسکوپی مانند لغزش بین دانه‌ها، تغییر در خواص ترموالاستیک و ناهمگنی گرمایی، باعث افزایش نسبی میرایی می‌شود.

به طور میانگین، ζ از حدود ۰,۰۰۳۵ در دمای ۸۰ °C به ۰,۰۰۴۵ در دمای ۱۰۰ °C افزایش یافته است.

جدول ۴- مقدار ضریب میرایی تیر ۱۸ سانتی متری در

دماهای مختلف					
(°C)	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
دما					
ζ	۰,۰۰۱۹	۰,۰۰۲۰	۰,۰۰۳۷	۰,۰۰۴۲	۰,۰۰۳۹

جدول ۵- مقدار ضریب میرایی تیر ۱۹/۵ سانتی متری در

دماهای مختلف					
(°C)	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
دما					
ζ	۰,۰۰۲۸	۰,۰۰۲۹	۰,۰۰۳۱	۰,۰۰۳۸	۰,۰۰۴۹

۴-۲-۳- تیرهای بلند (۲۱ سانتی متر)

رفتار تیرهای بلند کاملاً متفاوت از تیرهای کوتاه است. در این حالت، با افزایش دما، میرایی روندی افزایشی یکنواخت نشان می‌دهد. در این نوع تیرها، به علت افزایش سطح تماس با محیط و تمرکز گرمای موضعی در ناحیه‌ی گیره، گرادیان حرارتی قابل توجهی ایجاد می‌شود که منجر به اتلاف انرژی بیشتر از طریق پدیده‌ی همرفت موضعی (Localized Convective Dissipation) و نیز چرخش میکروسکوپی دانه‌های آلیاژی می‌گردد. بنابراین طبق (جدول ۶)، افزایش دما موجب افزایش میرایی از حدود ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۴ شده است و این نتیجه بیانگر نقش مهم طول تیر در نحوه‌ی توزیع گرمایی و انرژی اتلافی است.

۴-۵- تحلیل مدل یک درجه آزادی و وابستگی حرارتی

پارامترها

ارتباط پارامترهای مدل یک درجه آزادی (m, k, c) با ویژگی‌های فیزیکی تیر (مدول یانگ، ممان اینرسی، چگالی) و وابستگی آن‌ها به دما به شرح ذیل قابل بیان می‌باشد. معادله‌ی حاکم بر ارتعاش آزاد تیر به صورت رابطه (۳) می‌باشد که پارامترهای مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$m_{eff} = \eta \rho A L \quad (۶)$$

$$K_{eff} = \beta \frac{E(T)I}{L^3} \quad (۷)$$

$$c = 2\zeta \sqrt{m_{eff}K_{eff}} \quad (۸)$$

که در آن:

- η (eta) و β (beta) ضرایب هندسی وابسته به شرایط مرزی و مود ارتعاشی هستند.

- برای تیر یک‌سرگیردار (cantilever beam)، سختی مؤثر طبق تئوری تیر تیموشنکو به صورت زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$K = \frac{3E(T)I}{L^3} \quad (۹)$$

این رابطه اثرات برشی را در حالتی که نسبت L/h کوچک است لحاظ می‌کند.

مدول یانگ وابسته به دما برای آلیاژ T6-6061 به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$E(T) = 68.9[1 - 0.0013(T - 25)] \quad (۱۰)$$

کاهش $E(T)$ باعث کاهش سختی k_{eff} و در نتیجه کاهش فرکانس طبیعی سیستم می‌شود:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{eff}}{m_{eff}}} \quad (۱۱)$$

با افزایش دما، مقدار ω_n کاهش یافته و دوره‌ی ارتعاش افزایش می‌یابد و نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱. بین ویژگی‌های ترمو-مکانیکی ماده و پارامترهای دینامیکی مدل یک درجه آزادی ارتباط مستقیم وجود دارد.
۲. سختی مؤثر k_{eff} تابعی از $E(T)$ بوده و کاهش مدول یانگ در اثر افزایش دما، عامل اصلی افت فرکانس طبیعی است.
۳. ضریب میرایی c و نسبت میرایی ζ رفتار غیرخطی وابسته به دما دارند و در دماهای بالا افزایش می‌یابند.
۴. مدل SDOF بر پایه‌ی معادلات تیر تیموشنکو می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل‌های عددی پیچیده در تحلیل ارتعاش حرارتی تیرهای آلومینیومی باشد.
۵. در محدوده‌ی دمایی $60-100^\circ\text{C}$ ، اثر جرم (به دلیل تغییر ناچیز چگالی) قابل اغماض است و رفتار سیستم عمدتاً توسط تغییرات $E(T)$ و $\zeta(T)$ کنترل می‌شود.

۴-۶- جمع‌بندی تحلیلی نتایج

تحلیل داده‌های ارتعاش آزاد حاصل از نرم‌افزار Tracker و پردازش‌های عددی انجام‌شده در MATLAB نشان داد که رفتار ضریب میرایی تیرهای آلومینیومی در برابر تغییرات دما غیرخطی، چندعاملی و وابسته به هندسه تیر است. روند تغییرات ζ برحسب دما به صورت مجزا برای هر طول تیر نشان داد که با افزایش دما، پاسخ میرایی از یک الگوی ساده‌ی خطی فاصله گرفته و تحت تأثیر هم‌زمان عوامل مکانیکی و حرارتی قرار می‌گیرد.

در تیرهای کوتاه‌تر (۱۵ و ۱۶/۵ سانتی‌متر)، افزایش دما سبب کاهش محسوس ζ شد. این رفتار ناشی از کاهش مدول یانگ در اثر گرمایش یکنواخت و در نتیجه کاهش انرژی اتلافی ناشی از تغییرشکل‌های میکروسکوپی در ماده است. در مقابل، تیرهای بلندتر (۱۸ تا ۲۱ سانتی‌متر) روندی معکوس نشان دادند و با افزایش دما، مقدار ζ افزایش یافت. این پدیده به حضور گرادیان حرارتی در طول تیر، افزایش تنش‌های موضعی و اتلاف انرژی ترموالاستیک نسبت داده می‌شود که در تیرهای بلندتر اثرگذاری بیشتری دارد.

است. اما در دماهای بالاتر، روندی معکوس رخ داد و ضریب میرایی مجدداً افزایش یافت. این پدیده ناشی از فعال شدن مکانیزم‌های اتلاف ترموالاستیک، لغزش بین‌دانه‌ای، و اصطکاک داخلی است که با افزایش دما شدت می‌یابند.

بررسی‌های تحلیلی نشان داد که دمای بحرانی حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد مرز گذار میان دو ناحیه رفتار است:

- در ناحیه‌ی زیر 80°C ، رفتار ماده غالباً الاستیک بوده و میرایی تحت تأثیر افت سختی کاهش می‌یابد.
- در ناحیه‌ی بالای 80°C ، ماده وارد محدوده‌ی نیمه‌پلاستیک شده و لغزش‌های میکروسکوپی موجب افزایش اتلاف انرژی و رشد ϵ می‌گردند.

اختلاف میان نتایج تجربی و مدل تئوری عموماً کمتر از ۵ درصد بود که بیانگر دقت مناسب مدل ارائه‌شده است. باین‌حال، در دماهای بالا به دلیل ناپایداری حرارتی، تغییر شرایط مرزی و اثرات گرادیان دما، انحراف‌های جزئی مشاهده شد. تحلیل خطاها نشان داد که کنترل دقیق شرایط حرارتی، تثبیت گیره و بهبود نرخ تصویربرداری می‌تواند پایداری نتایج را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. به‌صورت کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب میرایی در تیرهای فلزی ساده یک پارامتر ثابت نیست، بلکه تحت تأثیر هم‌زمان رفتار ترموالاستیک، ساختار بلوری ماده، توزیع دما و ویژگی‌های هندسی تیر قرار دارد. این یافته‌ها برای طراحی سیستم‌های مکانیکی در شرایط دمای متغیر - نظیر اجزای هواپیما، سازه‌های آلومینیومی سبک و قطعات صنعتی در مجاورت منابع حرارتی - اهمیت ویژه‌ای دارد.

در ادامه پیشنهاد می‌شود همین مطالعه برای مواد با ساختارهای متفاوت (مانند فولاد، برنج، یا آلیاژهای آلومینیوم-منیزیم) انجام گیرد تا نقش ساختار کریستالی و ضریب انبساط حرارتی در تغییر میرایی مشخص شود و استفاده از شبیه‌سازی تحلیل اجزای محدود (FEM) همراه با مدلسازی وابسته به دما برای مدول یانگ و چگالی، می‌تواند دقت پیش‌بینی رفتار میرایی را افزایش دهد. همچنین بررسی میرایی در حضور جریان هوای گرم، خنک‌سازی تدریجی یا شرایط خلأ، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی نقش همرفت و اتلاف حرارتی در مکانیزم میرایی ارائه دهد.

مقایسه‌ی داده‌های تجربی با مدل تحلیلی نشان داد که اختلاف بین دو مجموعه نتایج در اغلب موارد کمتر از ۵ درصد است، که بیانگر دقت بالای مدل ریاضی معرفی‌شده برای پیش‌بینی رفتار میرایی در دماهای مختلف است. در دماهای بالا (۹۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) اختلاف‌ها اندکی افزایش یافت که علت آن می‌تواند تغییر جزئی در شرایط مرزی، انبساط گیره و ناپایداری حرارتی موضعی باشد.

بررسی خطاهای نمودارهای ارتعاشی نشان داد که مهم‌ترین منابع خطا عبارت‌اند از: نویز حرارتی، ناپایداری شرایط مرزی، افت کیفیت تصویربرداری، و خطای کالیبراسیون فضایی. با وجود این، با اعمال فیلترگذاری، حذف پیک‌های ناسازگار و میانگین‌گیری از چندین نوسان متوالی، تأثیر این خطاها تا حد زیادی کاهش یافت و داده‌های نهایی از پایداری و تکرارپذیری قابل قبولی برخوردار شدند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب میرایی در تیرهای فلزی نه تنها تابع دما، بلکه تابع مستقیم طول مؤثر، شرایط مرزی، و یکنواختی گرمایش است. در دماهای پایین، کاهش مدول یانگ عامل غالب و کاهنده‌ی میرایی است، درحالی‌که در دماهای بالا، مکانیزم‌های اتلاف انرژی ناشی از لغزش بین‌دانه‌ای، اصطکاک داخلی و تغییرات ترموالاستیک موجب افزایش مجدد میرایی می‌شوند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب میرایی در تیرهای آلومینیومی وابستگی دوگانه به دما و ابعاد هندسی دارد و مدل‌سازی آن باید با در نظر گرفتن اثرات ترموالاستیک و تغییرات موضعی دما انجام گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار ضریب میرایی تیرهای آلومینیومی تحت تغییرات دمایی به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های ارتعاش آزاد با استفاده از نرم‌افزار Tracker استخراج و در محیط MATLAB تحلیل شدند. با محاسبه‌ی ضریب میرایی به روش کاهش لگاریتمی، تغییرات ϵ در بازه‌ی دمایی ۶۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای پنج طول مختلف تیر تعیین و با مقادیر تئوری حاصل از مدل تحلیلی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که میرایی در تیرهای آلومینیومی تابعی غیرخطی از دما و هندسه‌ی تیر است. در دماهای پایین، کاهش میرایی با افزایش دما مشاهده شد که ناشی از افت مدول الاستیسیته و کاهش انرژی ذخیره‌شده‌ی ارتجاعی در ماده

- [17] Zaletelj J, et al. (2023) Experimental investigation of thermoelastic damping in Euler-Bernoulli beams. *Appl. Sci.*
- [18] Labuński A, Witek L (2024) Temperature-dependent damping behavior of polymers under free vibration. *Polymers*.
- [19] Zhang H, et al. (2021) Viscoelastic layered damping of aluminum beams under thermal excitation. *Composite Struct.*
- [20] Sun Y, et al. (2015) Experimental and numerical analysis of heated metallic beams under vibration. *J. Sound Vib.*
- [21] Liu S, Zheng W, Hou X, Su Z, Li S (2024) Investigation of the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams at Elevated Temperatures, *ACS Omega*, vol. 9, pp. 120825–120840.
- [22] Rativa-Parada W, Nilufar S (2024) On the damping performance and mechanical response of additive-manufactured and thermo-mechanical processed AlSiMg alloy. *J. Alloy. Compd.* 945: 169315–169330.
- [23] Rativa-Parada W, Sirikumara HI, Karunanithy R, Sivakumar P, Jayasekera T, Nilufar S (2024) Influence of heat treatment on microstructure, mechanical properties, and damping behavior of 2024 aluminum matrix composites reinforced by carbon nanoparticles. *Nanomaterials* 14: 1342–1360.
- [24] Batessova F, Omirbay R, Sattarova G, Zholmagambetov N, Zholmagambetov S, Dostayeva A, Suleimenov N, Medeubayev N (2023) Research progress and the prospect of damping magnesium alloys. *Heliyon* 9: e17152–e17170.
- [25] Guo Y, Chen C, Wang L, Li M, Zhang Q (2023) High damping and modulus of aluminum matrix composites reinforced with carbon nanotube skeleton inspired by diamond lattice. *Eng. Struct.* 292: 116520–116535.
- [26] Beer FP, Johnston ER, DeWolf JT, Mazurek DF (2020) *Mechanics of Materials*. 8rd edn. McGraw-Hill, New York.

۶- تقدیر و تشکر

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۳۹۴۰۰ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بزرگمهر قانات انجام شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

- [1] Rayleigh JW (1877) *The theory of sound*.
- [2] Timoshenko S (1937) *Vibration problems in engineering*.
- [3] Clough RW, Penzien J (1975) *Dynamics of structures*. McGraw-Hill.
- [4] Chopra AK (1995) *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall.
- [5] Craig RR, Kurdila AJ (2006) *Fundamentals of structural dynamics*. Wiley.
- [6] Meirovitch L (1986) *Elements of vibration analysis*. McGraw-Hill.
- [7] Humar JL (2002) *Dynamics of structures*. Balkema.
- [8] Fung YC (1965) *Foundations of solid mechanics*. Prentice-Hall.
- [9] Newmark NM (1959) A method of computation for structural dynamics. *ASCE J. Eng. Mech. Division*.
- [10] Caughey TK (1960) Classical normal modes in damped linear dynamic systems. *J. Appl. Mech.*, ASME.
- [11] Warburton GB (1954) The vibration of thin plates. *Proc. Inst. Mech. Eng.*
- [12] Snowdon JC (1968) *Vibration and shock in damped mechanical systems*. Wiley.
- [13] Al-Zubaidi A, Sarhan H (2005) Mathematical modeling of aluminum cantilever beams under thermal conditions. *Journal of Mechanical Science*.
- [14] Xia Y, et al. (2012) Temperature effects on structural vibration characteristics and SHM. *Eng. Struct.*
- [15] Leidecker H (1996) Temperature dependence of elastic modulus and damping of SiC/aluminum composites. *NASA Tech. Rep.*
- [16] Mohammadi Esfarjani R, et al. (2017) Finite element modeling of temperature effect on aluminum beams with damage. *J. Vib. Control*.