



استفاده از تبدیل موجک برای تعیین تجربی فرکانس طبیعی نمونه شیاردار از جنس فولاد لوله انتقال گاز به وسیله آزمایش ضربه سقوطی

جواد مظلوم اردکانی، دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

سید حجت هاشمی^{*}، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

چکیده

یکی از قابلیت‌های مهم آزمایش ضربه که تاکنون کمتر استفاده شده است، تعیین تجربی فرکانس طبیعی نمونه می‌باشد. هدف از انجام پژوهش حاضر اندازه‌گیری تجربی فرکانس طبیعی فولاد حین آزمایش ضربه سقوطی است. به این منظور در این پژوهش برای اولین بار (در حوزه مطالعات فولاد لوله‌های پرفشار انتقال گاز طبیعی) از تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال شتاب استفاده شده است. سیگنال شتاب حین شکست نمونه فولادی API X65 به وسیله شتاب‌سنج ذخیره و با استفاده از روش تبدیل موجک بررسی شد. آزمایش ضربه سقوطی طبق استاندارد API 5L با استفاده از سه نمونه آزمایشگاهی شیاردار انجام شد. نمونه‌ها از یک لوله فولادی با درزجوش مارپیچ جداسازی شد و با ماشین کاری به ابعاد استاندارد رسید. پس از آزمایش ضربه، سیگنال شتاب مربوطه به هر نمونه که دارای نوسان زیادی بود به وسیله تبدیل موجک گسسته به محدوده‌های کم فرکانس و پرفرکانس تجزیه گردید و ضرایب موجک به دست آمد. در ادامه، با روش حد آستانه سراسری روی ضرایب جزئیات، از سیگنال شتاب نوفه‌زدایی شد. در نهایت با اعمال تبدیل موجک پیوسته روی سیگنال شتاب نوفه‌زدایی شده، فرکانس طبیعی نمونه محاسبه گردید. میانگین فرکانس طبیعی به دست آمده از سه نمونه برای فولاد API X65 برابر ۲/۵۹۸ کیلوهرتز به دست آمد. هم‌چنین بازه زمانی وقوع فرکانس طبیعی نیز به دست آمد که در این آزمایش در محدوده یک میلی‌ثانیه اول آزمایش اتفاق افتاد. مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات مشابه کارایی مناسب روش تبدیل موجک را برای اندازه‌گیری دقیق فرکانس طبیعی طی آزمایش ضربه سقوطی نشان داد.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

کلیدواژه‌ها:

آزمایش ضربه سقوطی،

فرکانس طبیعی،

تبدیل موجک،

آستانه‌گذاری،

فولاد API X65

۱- مقدمه

تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص فولاد خطوط انتقال گاز جهت تعیین ویژگی‌های مختلف آن‌ها صورت گرفته است. فولاد مورد استفاده در این خطوط باید دارای استحکام و چقرمگی بالایی باشد و مقاومت زیادی در مقابل رشد ترک و شکست داشته باشد. عمده لوله‌های قطور و پرفشار استفاده شده در خطوط انتقال گاز طبیعی در ایران از جنس فولاد API X65 می‌باشد [۱]. آزمایش ضربه سقوطی یک آزمایش استاندارد صنعتی است که برای تعیین انرژی شکست و تعیین ویژگی‌های سطح شکست این دسته از فولادها استفاده می‌شود [۲]. در ادامه، بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه خواص فولادهای گروه API ارائه می‌شود.

هاری و همکاران در مقاله‌ای با اصلاح مدل ژو-ویرزیکتی اثرات نرخ کرنش در نمونه فولادی API X70 در کد اجزاء محدود پیاده‌سازی کردند. سپس به بررسی پاسخ حاصل از بارگذاری دینامیکی و استاتیکی این فولاد با استفاده از نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی پرداختند [۳و۴]. پنین و همکاران تاثیر دما و نوع شیار را در لوله فولادی کربنی ساده 17Mn1Si بر انرژی شکست و انرژی شروع و رشد ترک با استفاده از آزمایش ضربه شاری مجیز به کرنش سنج و حسگر نشر آوایی بررسی نمودند و نتایج به‌دست آمده را با نتایج حاصل از شکست‌نگاری و شبیه‌سازی مقایسه کردند. تبدیل موجک روی داده‌های حسگر نشر آوایی اعمال شد و نسبت انرژی شروع ترک به انرژی رشد ترک بر اثر تغییر دما و نوع شیار بررسی گردید [۵و۶]. آرمین و همکاران آلیاژ آلومینیوم AA8090 و نمونه جوش‌کاری‌شده را به منظور بررسی رفتار شکست تحت ضربه شاری مجیز شده به همراه حسگر نشر آوایی قرار دادند. از داده‌های حسگر نشر آوایی تبدیل موجک گرفته شد. تشکیل سطح وسیعی از مرزدهانه‌ها در نمونه جوش داده شده منجر به افزایش قابل توجهی در انرژی مورد نیاز برای شروع و انتشار ترک تحت بارگذاری ضربه گردید [۷].

فتحی و هاشمی به ارائه روش‌های تجربی و عددی جهت محاسبه انرژی جذب‌شده نمونه‌های استاندارد از جنس فولاد API X65 در آزمایش ضربه سقوطی مجیز به کرنش سنج پرداختند. سه نمونه استاندارد تحت آزمایش ضربه سقوطی قرار گرفت و انرژی شکست فولاد API X65 برابر ۶۱۸۷ ژول به‌دست آمد. با ترسیم و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی یک رابطه خطی بین انرژی جذب‌شده توسط نمونه و سرعت چکش به‌دست آمد [۸]. فتحی و هاشمی اثر ضربه کم‌سرعت بر انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار شورون در فولاد API X65 را بررسی کردند. آزمایش انجام شده در دو مرحله روی ۱۸ نمونه و در شش گروه سه‌تایی انجام شد. مرحله اول آزمایش ارتفاع سقوط چکش طوری در نظر گرفته شد که نمونه‌ها شکسته نشده و فقط ناحیه مجاور نوک ترک وارد منطقه پلاستیک شود. در ادامه با اعمال ضربه دوم از ارتفاع دو متری تمامی نمونه‌ها شکسته شدند. رابطه خطی بین انرژی ضربه کم‌سرعت و انرژی شکست به‌دست آمد [۹]. نوآوی و همکاران آزمایش ضربه شاری و کم‌سرعت را روی فولاد کربنی S45C جهت بررسی پاسخ دینامیکی انجام دادند. با بررسی منحنی چگالی طیف توان ضربه کامل و کم‌سرعت دیده می‌شود که الگوی هر دو یکسان است و فرکانس غالب هر دو منحنی یکی است ولی اندازه فرکانس غالب در ضربه کامل بیشتر از ضربه کم‌سرعت می‌باشد [۱۰]. استاپاسولا و همکاران فولاد API X65 را به‌صورت تمام مقیاس تحت آزمایش خستگی رزونانسی و شبیه‌سازی اجزاء محدود قرار دادند. برای این تحقیق از پنج حسگر کرنش سنج و یک حسگر شتاب‌سنج استفاده شد. نتایج این حسگرها باهم مقایسه و امکان جایگزینی حسگر شتاب‌سنج به جای کرنش سنج بررسی شد. رابطه خطی بین نتایج کرنش سنج و شتاب‌سنج برقرار شد. این نتایج نشان می‌دهد می‌توان از شتاب‌سنج به جای کرنش سنج استفاده کرد و این کار باعث کاهش هزینه حسگرها و کیفیت بهتر منحنی نیرو-زمان خواهد شد. فرکانس طبیعی اول لوله از روش

تحلیل مودال ۲۰/۸۳ هرتز، اجزاء محدود ۲۰/۳۸ هرتز و تجربی ۲۰/۷ هرتز به دست آمد [۱۱].

خسروی خور و همکاران انرژی شکست نمونه فولادی API X65 در آزمایش ضربه سقوطی مجهز به شتاب سنج را به دست آوردند. داده های شتاب- زمان با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل و با اعمال فیلتر باترورث منحنی بدون نوسان شتاب- زمان با تبدیل فوریه معکوس به دست آمد. با محاسبه مساحت زیر منحنی نیرو- جابه جایی، انرژی شکست نمونه ۶۷۹۱ ژول حاصل شد [۱۲].

اشترنلیخت و همکاران دستگاه آزمون ضربه شارپی مجهز به شتاب سنج، کرنش سنج و موقعیت سنج دورانی همراه با شبیه سازی رایانه ای ارزیابی کردند. نمونه مورد آزمایش از نوع فولاد API X80 بود. در این پژوهش با استفاده از حسگر شتاب سنج فرکانس طبیعی نمونه و با حسگر کرنش سنج و موقعیت سنج دورانی انرژی شکست نمونه فولادی با دقت خوب حاصل شد. فرکانس طبیعی حاصله از رابطه تئوری و حسگر شتاب سنج حدوداً ۱۳ کیلوهرتز به دست آمد [۱۳].

خسروی خور و همکاران به بررسی فرکانس های طبیعی نمونه های شیاردار متجانس و نامتجانس با درز جوش افقی از جنس فولاد API X65 در آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت مجهز به شتاب سنج پرداختند. در این تحقیق نمونه های مورد آزمایش تحت ضربه کم سرعت قرار گرفتند به طوری که بخش میانی آن ها دچار تغییر شکل پلاستیک نشد. داده های آزمایشگاهی با کمک تبدیل فوریه از حوزه زمان به فرکانس منتقل شد. با افزایش ارتفاع سقوط چکش، فرکانس طبیعی نمونه ها تقریباً ثابت بود. فرکانس طبیعی در نمونه نامتجانس کمتر از نمونه متجانس به دست آمد. فرکانس طبیعی نمونه متجانس به ترتیب به صورت تجربی و تحلیلی ۲/۰۸ و ۲/۴۳ کیلوهرتز به دست آمد [۱۴].

سقوطی مجهز به شتاب سنج روی سه نمونه آزمایشگاهی استاندارد انجام شد. استفاده از حسگر شتاب سنج و روش تبدیل موجک به خوبی توانست انرژی شکست نمونه در آزمایش ضربه سقوطی را تعیین کند. با استفاده از تبدیل موجک گسسته و موجک مادر سیملت سیگنال شتاب- زمان تجزیه و انرژی شکست ۶۳۲۶ ژول برای نمونه به دست آمد [۱۵].

در پژوهش حاضر فرکانس طبیعی نمونه شیاردار فولادی از جنس API X65 در آزمایش ضربه سقوطی مجهز به شتاب سنج با استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته و گسسته به دست آمده است. از مزایای تعیین فرکانس طبیعی نمونه با آزمایش ضربه می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- با توجه به این که آزمایش ضربه یک آزمایش ساده، سریع و در دسترس است اگر بتوان با این آزمایش، فرکانس طبیعی نمونه را مشخص کرد یک راه جدید و آسان برای تعیین این پارامتر به صورت تجربی معرفی شده است. همچنین یک قابلیت جدید و تاثیرگذار به آزمون ضربه اضافه شده است که تاکنون از سوی محققین به آن توجهی نشده بود. از گذشته تا حال، آزمایش ضربه برای یافتن انرژی شکست و متغیرهای مربوط به آن به کار گرفته می شد، حال با افزودن شتاب سنج به دستگاه ضربه و با کمک تبدیل موجک، علاوه بر تعیین دقیق انرژی شکست و متغیرهای مربوطه، می توان فرکانس طبیعی نمونه را نیز به دست آورد.

- ضریب شدت تنش دینامیکی یکی از پارامترهای مهم برای بررسی و پیش بینی رفتار شکست در مواد می باشد. ضریب شدت تنش دینامیکی $K_I(t)$ نمونه شیاردار روی تکیه گاه ساده از رابطه ۱ به دست می آید [۱۶]:

$$K_I(t) = \frac{3S\sqrt{a}}{2BW^2} Y\left(\frac{a}{W}\right) \cdot f \cdot \int_0^x P(\tau) \sin \omega_1(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

f فرکانس طبیعی نمونه، S فاصله بین دو تکیه گاه، a عمق شیار، W پهنای نمونه، B ضخامت نمونه، $Y(a/W)$

مظلوم و هاشمی برای اولین بار (در زمینه مطالعات فولادهای لوله گاز) از تبدیل موجک برای استخراج انرژی شکست فولاد API X65 استفاده کردند. آزمایش ضربه

رفع ایرادات بیان شده، از سه نمونه برای انجام آزمایش تجربی و برای تحلیل سیگنال شتاب از تبدیل موجک که ابزاری موثر جهت تحلیل سیگنال‌های غیرایستا است، استفاده شده است. به این منظور برای اولین بار از تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال شتاب در آزمون ضربه جهت تعیین فرکانس طبیعی استفاده شده است. در این پژوهش، فرکانس طبیعی فولاد API X65 در آزمایش ضربه سقوطی مجهز به شتاب‌سنج با استفاده از روش تبدیل موجک بررسی شده است. ابتدا با استفاده از تبدیل موجک گسسته برای تجزیه سیگنال شتاب استفاده شده و در ادامه با آستانه‌گذاری روی ضرایب موجک، سیگنال نوفه‌زدایی شده و در نهایت، با کمک تبدیل موجک پیوسته محدوده فرکانس طبیعی و بازه زمانی وقوع آن حاصل می‌شود. با مقایسه داده‌های به‌دست آمده با نتایج پیشینان، صحت و کارایی روش تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال‌های شتاب حاصل از ضربه تایید شد.

۲- تعیین تحلیلی فرکانس طبیعی نمونه

برای تعیین فرکانس طبیعی نمونه ضربه سقوطی شیاردار با شرایط مرزی دو تکیه‌گاه ساده، قدم اول تعیین فرکانس طبیعی نمونه بدون شیار است که از رابطه ۲ به‌دست می‌آید [۱۶]:

$$f = \left(\frac{\pi}{S}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

در این رابطه f فرکانس طبیعی، S فاصله بین دو تکیه‌گاه، A سطح مقطع عرضی نمونه، E مدول یانگ، I ممان اینرسی مقطع و ρ چگالی نمونه می‌باشد. مقدار عددی این کمیت‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

تابع کالیبراسیون و $P(t)$ بار دینامیکی وارد بر نمونه در لحظه t می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این رابطه وابسته به فرکانس طبیعی نمونه است. با داشتن این فرکانس از آزمایش ضربه سقوطی، به راحتی می‌توان ضریب شدت تنش دینامیکی برای نمونه شیاردار تحت خمش سه‌نقطه‌ای را تعیین کرد.

- با داشتن فرکانس طبیعی نمونه و حذف آن از محدوده فرکانسی داده‌های آزمایش، می‌توان دقت نتایج آزمایش ضربه مجهز به شتاب‌سنج را جهت تعیین پارامترهای مهمی چون انرژی شکست و نیروی بیشینه نمونه بالاتر برد.

با مرور مقالات تحقیقی گذشته دیده شد، پژوهش‌های بسیار کمی روی تحلیل سیگنال ضربه با استفاده از تبدیل موجک انجام شده است. در همین تحقیقات اندک هم، تبدیل موجک روی حسگر نشر آوایی و آزمایش ضربه شارپی اعمال شده است و شتاب‌سنج نقشی در آن‌ها نداشته است. در آزمایش‌های ضربه، نصب شتاب‌سنج روی دستگاه آزمون برای اندازه‌گیری غیرمستقیم نیرو، سرعت، جابه‌جایی و تنش انجام شده است [۱۷-۲۰].

طبق بررسی نویسنده‌گان تنها در دو تحقیق [۱۴ و ۱۳] فرکانس طبیعی حاصل از سیگنال شتاب در آزمایش ضربه بررسی شده است. در این دو پژوهش از روش تبدیل فوریه سریع برای انتقال سیگنال از حوزه زمان به فرکانس استفاده شد. در صورتی که سیگنال شتاب حاصل از ضربه به شدت غیرایستا است و روش تبدیل فوریه سریع که برای سیگنال‌های ایستا طراحی شده، نمی‌تواند روش مناسبی برای سیگنال‌های غیرایستا باشد. مورد دیگر این دو پژوهش استفاده از تنها یک نمونه برای آزمایش است که تکرارپذیری نتایج را دشوار می‌کند. در پژوهش حاضر برای

جدول ۱- مقادیر عددی کمیت‌های استفاده شده در رابطه ۲

S(m)	E(GPa)	I(m ⁴)	ρ (kg/m ³)	A(m ²)
۰٫۲۵۴	۲۱۰	$۱٫۰۹ \times ۱۰^{-۳}$	۷۸۰۰	$۵٫۲۷ \times ۱۰^{-۷}$



شکل ۱- دستگاه ضربه سقوطی مجهز به شتاب‌سنج در آزمایشگاه ضربه دانشگاه بیرجند.

در این تحقیق از داده‌های حسگر شتاب‌سنج استفاده شده است. مدل این حسگر 8742A5 متعلق شرکت کیستلر و از جنس کوارتز است. دامنه اندازه‌گیری آن $\pm 5000 \text{ g}$ است (g شتاب گرانش زمین که برابر با 9.80665 متر بر مجذور ثانیه می‌باشد) و مخصوص اندازه‌گیری ارتعاشات ضربه طراحی شده است [۲۳].

۴-۲- انجام آزمایش

ابتدا نمونه روی تکیه‌گاه‌های دستگاه در شرایطی که شیار نمونه دقیقاً زیر چکش است قرار می‌گیرد. چکش تا ارتفاع دو متر بالا رفته، پس از رها شدن با برخورد به نمونه آن را به‌طور کامل می‌شکند. سرعت چکش در لحظه برخورد حدوداً 6.3 متر بر ثانیه می‌باشد. طبق استاندارد API آزمایش ضربه سقوطی وقتی معتبر است که سرعت چکش بین پنج تا نه متر بر ثانیه باشد [۲].

۵- تبدیل موجک

یکی از روش‌های رایج تحلیل فرکانس، تبدیل فوریه می‌باشد. تبدیل فوریه علی‌رغم مزایای زیاد محدودیت‌هایی

با استفاده از رابطه (۱) فرکانس طبیعی نمونه ضربه سقوطی فولادی بدون شیار برابر $2/70$ کیلوهرتز به‌دست می‌آید. در پژوهشی که توسط لویا و همکاران انجام شد رابطه بین فرکانس طبیعی نمونه بدون شیار و شیاردار به‌دست آمد [۲۱]. با توجه به ابعاد نمونه مورد آزمایش نسبت عمق شیار به ارتفاع نمونه اندازه کوچکی برابر 0.06 به‌دست می‌آید. نسبت فرکانس طبیعی نمونه شیاردار به بدون شیار برابر 0.9 به‌دست می‌آید. در نهایت، با ضرب این نسبت در فرکانس طبیعی نمونه بدون شیار، فرکانس طبیعی نمونه شیاردار $2/43$ کیلوهرتز حاصل می‌شود [۲۱].

۳- نمونه آزمایشگاهی

در این تحقیق از فولاد API X65 برای ساخت نمونه آزمایش ضربه سقوطی طبق استاندارد موسسه نفت آمریکا (API) استفاده شده است [۲۲]. این نمونه از یک لوله انتقال گاز طبیعی با قطر خارجی 1219 میلی‌متر و ضخامت 14.3 میلی‌متر گرفته شده است. استحکام تسلیم و استحکام نهایی فولاد به ترتیب 505 و 552 مگاپاسکال است. هندسه نمونه طبق استاندارد API دارای طول، عرض و ضخامت به ترتیب 305 ، 76.2 و 14.3 میلی‌متر و عمق شیار 5.1 میلی‌متر ساخته شد.

۴- آزمایش ضربه سقوطی

۴-۱- معرفی دستگاه

برای انجام آزمایش از دستگاه ضربه سقوطی مجهز شده دانشگاه بیرجند استفاده شد. این دستگاه به حسگرهای شتاب‌سنج و کرنش‌سنج مجهز است و با کمک یک دستگاه رایانه، اسیلوسکوپ و آمپلی‌فایر داده‌برداری انجام می‌شود. این دستگاه دارای چکشی به جرم 700 کیلوگرم با حداکثر ارتفاع سقوط سه متر و ظرفیت 21 کیلوژول می‌باشد. تصویر آن در شکل ۱ قابل مشاهده است.

۵-۱- تبدیل موجک پیوسته

یک تابع پیوسته زمانی با مقدار حقیقی یا مختلط $\psi(t)$ را در نظر بگیرید که دارای ویژگی های زیر باشد:

۱- انتگرال تابع در بازه $(-\infty, \infty)$ مساوی صفر باشد.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

۲- تابع متعلق به مجموعه توابع L^2 باشد.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (4)$$

اگر تابعی دو مشخصه بالا را داشته باشد یک موجک

مادر یا موجک نامیده می شود [۲۹].

تابع ψ در هر دو حوزه زمان و فرکانس محدود شده و قابلیت اعمال انتقال به میزان b در حوزه زمان و مقیاس کردن به میزان a در حوزه فرکانس را دارا است. به این ترتیب $\psi_{a,b}(t)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

اگر $s(t)$ یک سیگنال حوزه زمان باشد، تبدیل موجک پیوسته این سیگنال به صورت زیر بیان می شود:

$$W_x^\psi = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (6)$$

که در آن ψ^* مزدوج مختلط ψ است.

برای محاسبه تبدیل موجک پیوسته یک سیگنال، محاسبات ریاضی مربوطه به ترتیب زیر انجام می شود:

۱- ابتدا موجک مادر در ابتدای سیگنال مربوطه قرار گرفته و $a=1$ اعمال می شود.

۲- تابع موجک با اندازه مقیاس یک، در سیگنال مورد نظر ضرب می شود و در همه ی بازه های مکانی از آن انتگرال گرفته و سپس حاصل در $\frac{1}{\sqrt{a}}$ ضرب می گردد.

۳- موجک به مکان $t=b$ منتقل شده و مقدار این تبدیل را در مکان $t=b$ و در $a=1$ به دست آورده می گردد.

۴- این فرآیند تا زمانی که موجک به انتهای تابع اصلی نرسیده است تکرار می گردد.

۵- مقدار a کمی افزایش داده می شود و فرآیند بالا

نیز دارد که مهم ترین آن ناتوانی در تحلیل سیگنال های غیرایستا و عدم تعیین زمان وقایع فرکانسی موجود در طیف سیگنال می باشد [۲۴]. در گذشته برای حل این مشکل از تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده می شد. ایراد بزرگ این روش، قدرت تفکیک یکسان در کل حوزه زمان و فرکانس است در حالی که برای بررسی فرکانس های پایین، قدرت تفکیک بالاتری نسبت به فرکانس های بالاتر مورد نیاز است [۲۵].

تبدیل موجک در حال حاضر یکی از روش های کارآمد در پردازش سیگنال های ارتعاشی می باشد. این تبدیل از توابع موجک به جای توابع سینوسی (تبدیل فوریه) استفاده می کند. از تبدیل موجک در موارد بسیاری می توان استفاده کرد. از آن جمله می توان به نوفه زدایی سیگنال، تحلیل گذرا، تحلیل زمان-فرکانس، تحلیل غیرایستا، فشرده کردن داده، یافتن ناپیوستگی و تشخیص عیوب اشاره کرد [۲۶].

مهم ترین مزیت روش تبدیل موجک به تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده از پنجره گذاری متغیر است. تبدیل موجک این قابلیت را دارد که در فرکانس های پایین که رفتار فرکانسی اهمیت زیادی دارد دارای وضوح فرکانسی بالا و در فرکانس های بالا که زمان وقوع فرکانس اهمیت دارد دارای وضوح زمانی بالا می باشد [۲۷]. یک اشکال مهم تبدیل موجک حساسیت به انتخاب تابع موجک مادر است. برای تعیین تابع موجک مادر مناسب در هر کاربرد نیاز به آزمون و خطاهای بسیار است. در بحث پردازش سیگنال تابع موجک مادر باید طوری انتخاب شود تا خطای کمتری داشته باشد و تا حد امکان از محاسبات غیرضروری کاسته شود [۲۸].

برای استفاده از تحلیل موجک در مسائل گوناگون و دست یابی به نتایج بهتر خانواده های موجک بسیاری تاکنون معرفی شده اند. برخی از پرکاربردترین آن ها، موجک هار، موجک دوبجیز، موجک سیملت، موجک مورلت و موجک بای اورتوگونال است. در ادامه شرح مختصری برای دو روش پرکاربرد تبدیل موجک پیوسته و گسسته آورده شده است.

برای همه مقادیر a تکرار می‌گردد.

- ۶- هر کدام از محاسبات بالا به ازای هر یک از مقادیر a ، یک ردیف یکتا برای حوزه‌ی مکانی به‌دست می‌دهد.
- ۷- اگر همه‌ی مقادیر a در فرآیندهای بالا منظور شود، تبدیل موجک پیوسته به‌صورت کامل به‌دست می‌آید [۳۰].

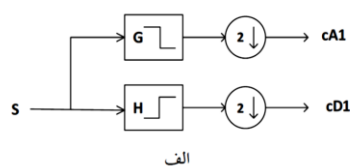
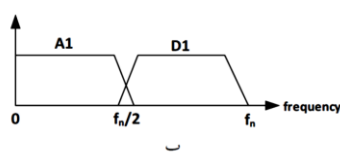
۵-۲- تبدیل موجک گسسته

با توجه به این‌که بازه تغییرات متغیر مقیاس، اعداد حقیقی مثبت و بازه تغییرات متغیر انتقال، کل دامنه اعداد حقیقی می‌باشند، تبدیل موجک پیوسته حاوی حجم زیادی اطلاعات است که احتیاجی به همه آن‌ها در بازسازی تابع نیست. در صورتی‌که به جای پیوسته در نظر گرفتن a و b از آن‌ها نمونه‌برداری گردد می‌توان ضرایب موجک را به نحوی به‌دست آورد که بتوان تابع اصلی را از روی آن‌ها بازسازی کرد. تبدیل حاصل از نمونه‌گیری گسسته از a و b را تبدیل موجک گسسته می‌نامند.

$a = 2^{-j}$, $b = k 2^{-j}$ که در آن k و j اعداد صحیح هستند که مجموعه جابه‌جایی‌های گسسته در محور زمان و مقیاس‌های گسسته را نشان می‌دهند.

برای پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته، راهکارهای مختلفی وجود دارد که یکی از رایج‌ترین آنها، پیاده‌سازی به

کمک تفکیک چندگانه است [۲۹]. در این روش، پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته به کمک یکسری عملیات متوالی صورت می‌پذیرد که هر مرحله از این عملیات، شامل فیلتر کردن سیگنال و نمونه‌کاهی می‌باشد. در هر مرحله از فرآیند تبدیل موجک گسسته، محتوای سیگنال در داخل دو زیرفضای متعامد تجزیه می‌شود. نشان داده می‌شود که در یک شاخه ابتدا یک فیلتر پایین‌گذر (G) بر روی سیگنال گسسته اثر کرده است. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرایب تقریب سیگنال در سطح اول تجزیه نامیده می‌شود. به‌طور موازی، یک فیلتر بالاگذر (H) بر روی سیگنال گسسته موجود اثر کرده است. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرایب جزئیات سیگنال در سطح اول تجزیه نامیده می‌شود. ضرایب جزئیات، محتوای فرکانس بالا و ضرایب تقریب، محتوای فرکانس پایین سیگنال را دربردارند. شکل ۲- الف، فرایند تبدیل موجک گسسته را برای سطح اول از تجزیه سیگنال و شکل ۲- ب، باندهای فرکانسی مربوطه را نشان می‌دهد. منظور از f_n در این شکل، نصف فرکانس نمونه‌برداری اولیه است. ادامه روند تجزیه سیگنال به سطوح بعدی، با فیلتر کردن ضرایب تقریب سطح اول تجزیه صورت می‌پذیرد. این فرایند به‌طور مشابه و تا سطح دلخواه از تجزیه ادامه می‌یابد.



شکل ۲- الف. پیاده‌سازی تبدیل گسسته موجک به روش MRA ب. تفکیک محتوای فرکانسی در دو باند [۲۹].

مرحله می‌شود:

- ۱- تجزیه: تجزیه سیگنال تا سطح مورد نظر و محاسبه ضرایب تبدیل موجک در این سطوح.
- ۲- آستانه‌گذاری: انتخاب روش آستانه‌گذاری و انجام عملیات کاهش مقادیر ضرایب تبدیل موجک در سطوح

۶- نوفه‌زدایی از سیگنال شتاب

اولین قدم برای تحلیل دقیق‌تر سیگنال مغشوش، حذف نوفه‌ها از آن می‌باشد. در این پژوهش از تبدیل موجک گسسته برای نوفه‌زدایی استفاده شد. به‌طور کلی فرآیند نوفه‌زدایی از سیگنال با تبدیل موجک گسسته شامل سه

موجک و $\hat{\sigma}$ تخمین انحراف معیار نوفه می‌باشد [۲۶].

۷- فرایند استخراج داده‌ها

با سقوط چکش از ارتفاع دو متری و برخورد با نمونه، شکست کامل اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، آزمایش روی سه نمونه با شرایط یکسان انجام شد. این سه نمونه با عناوین G1، G2 و G3 نام‌گذاری شدند. شکل ۳ تصویر نمونه بعد از اعمال ضربه و شکست کامل را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمونه شکسته شده

بعد از انجام آزمایش ضربه سقوطی.

بعد از انجام آزمایش منحنی شتاب- زمان ناشی از اندازه‌گیری شتاب‌سنج به‌دست آمد. منحنی به‌دست آمده به‌شدت مغشوش بود. قدم اول برای تحلیل یک سیگنال مغشوش، نوفه‌زدایی از آن است. ابتدا با اعمال تبدیل موجک گسسته روی سیگنال، ضرایب تقریب و جزئیات به‌دست آمدند.

ضرایب جزئیات مربوط به قسمت پرفرکانس سیگنال بوده و حد آستانه برای حذف نوفه از سیگنال روی این ضرایب اعمال می‌گردد. در این تحقیق برای سادگی تحلیل و وضوح نتایج از موجک مادر سیملت مرتبه ۸ (sym8) و پنج مرحله تجزیه سیگنال استفاده شد. مرتبه تابع موجک نشان‌دهنده میزان مشتق‌پذیری و نرمی تابع است [۲۹]. بنابراین با توجه به این‌که سیگنال شتاب اندازه‌گیری‌شده نوسان بسیاری دارد، مرتبه موجک بالاتر به سبب نرمی بیشتر، بهتر می‌تواند این سیگنال مغشوش را تحلیل کند.

مورد نظر، با مقایسه با مقدار آستانه انتخاب شده.

۳- بازسازی: فرایند تبدیل موجک معکوس با استفاده

از ضرایب تبدیل موجک.

آستانه‌گذاری مهم‌ترین قسمت نوفه‌زدایی با استفاده از تبدیل موجک است و شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله‌ی اول، انتخاب روش آستانه‌گذاری و مرحله‌ی دوم تعیین مقدار آستانه است. دو روش اعمال حد آستانه وجود دارد: - آستانه‌گذاری سخت: ضرایب بزرگتر از مقدار آستانه را حفظ کرده و ضرایب کوچک‌تر از آن را صفر می‌کند.

- آستانه‌گذاری نرم: ضرایب زیر مقدار آستانه صفر قرار داده می‌شوند و ضرایب باقی‌مانده، معادل اختلاف آن با مقدار آستانه منظور می‌شوند.

در این مقاله از آستانه‌گذاری نرم به دلیل عملکرد بهتر نسبت به آستانه‌گذاری سخت مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱].

انتخاب مناسب مقدار آستانه تاثیر بسزایی در کیفیت فرایند نوفه‌زدایی از سیگنال دارد. مقدار آستانه با تخمین دامنه‌ی نوفه در ضرایب تبدیل موجک به گونه‌ای تعیین می‌شود تا احتمال وجود نوفه در آن‌ها به حداقل برسد [۲۵]. روش‌های آستانه‌گذاری مختلفی برای تخمین نوفه وجود دارند مثل بیز تجربی، بلوک جیمز- استین، تخمین FDR، حد آستانه سراسری، تخمین مینیماکس و تخمین سور. در این مقاله حد آستانه سراسری به دلیل عملکرد ساده و قدرتمند انتخاب شده است. رابطه آستانه‌گذاری نرم و حد آستانه سراسری به شرح زیر در روابط ۷ تا ۹ آورده شده است:

$$y_s(c) = \begin{cases} \text{sgn}(c) \cdot (|c| - T) & |c| > T \\ 0 & |c| \leq T \end{cases} \quad (7)$$

$$T = \hat{\sigma} \sqrt{2 \log N} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{M}{0.6745} \quad (9)$$

c ضریب موجک سیگنال پرنوفه تجزیه‌شده، T اندازه آستانه سراسری، N طول سیگنال، M میانه قدرمطلق ضرایب

شده است. فرکانس نمونه برداری در این آزمایش ۲۵۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است.

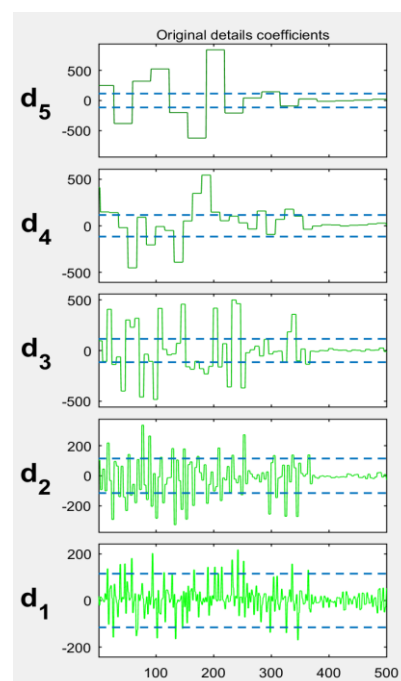
اندازه متغیرهای آن طبق سیگنال‌های شتاب به دست آمده در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است اعمال تبدیل موجک روی سیگنال در محیط برنامه متلب انجام

جدول ۲- متغیرهای حد آستانه سراسری برای سیگنال‌های شتاب سنج.

نمونه‌ها	N	M	$\hat{\sigma}$	T	موجک مادر
نمونه G1	۵۵۰	۲۶/۹۳	۳۹/۹۳	۱۴۱/۸۵	sym8
نمونه G2	۵۰۰	۲۵/۶۳	۳۸/۰۲	۱۳۳/۹۷	sym8
نمونه G3	۵۰۰	۲۱/۴۵	۳۱/۸۱	۱۱۲/۱۱	sym8

شدند. حد آستانه به صورت نرم اعمال گردید. با ضرایب جزئیات جدید و ضرایب تقریب که از قبل موجود بود با تبدیل موجک معکوس سیگنال جدید نوفه‌زدایی شده تشکیل شد. به عنوان نمونه سیگنال خام و سیگنال نوفه‌زدایی شده در شکل ۵ قابل مشاهده است. در نهایت، از سیگنال نوفه‌زدایی شده تبدیل موجک پیوسته گرفته شد. فرآیند انجام تحقیق در شکل ۶ به صورت نمودار گردشی نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشخص است بیشترین سطح نوفه در سطوح اولیه‌ی جزئیات شناسایی شده و در سطوح بالاتر، اثر نوفه بر باندهای فرکانسی کاهش می‌یابد. مطابق انتظار بیشترین حذفیات از سطح یک اتفاق افتاده است.



شکل ۴- آستانه‌گذاری روی ضرایب جزئیات سیگنال شتاب.

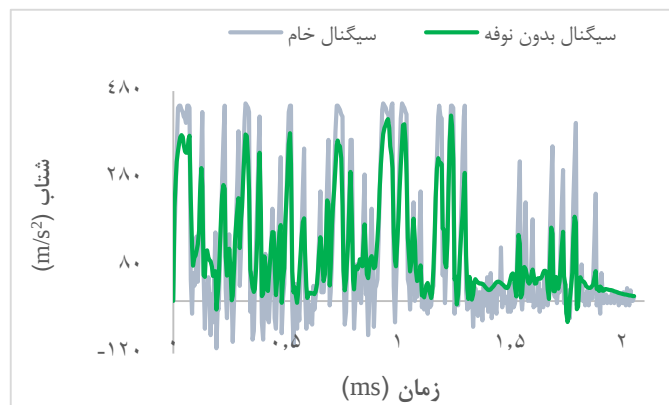
۸- نتایج
با انجام آزمون ضربه سقوطی و به دست آوردن سیگنال شتاب- زمان و در ادامه استفاده از تبدیل موجک برای نوفه‌زدایی، در نهایت مقیاس‌نما (scalogram) تبدیل موجک پیوسته روی سیگنال نوفه‌زدا شده به دست آمد. مقیاس‌نما برای سه نمونه G1، G2 و G3 به ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. مقیاس‌نما، اندازه‌ی قدرمطلق تبدیل موجک پیوسته سیگنال است که به صورت تابعی از زمان و فرکانس بیان می‌شود.

همان‌طور که در کادر قرمز رنگ نیز در شکل‌های ۷ تا ۹ مشخص شده، محدوده وقوع فرکانس طبیعی که بزرگ‌ترین اندازه را دارد قابل مشاهده است. بیشترین اندازه در هر مقیاس‌نما به عنوان فرکانس طبیعی نمونه در نظر گرفته شد. فرکانس طبیعی برای نمونه G1، G2 و G3

پس از اعمال حد آستانه روی ضرایب جزئیات موجک، فرکانس‌هایی که دامنه بزرگتری نسبت به حد آستانه داشتند نگه داشته شدند و فرکانس‌های با دامنه کوچک‌تر حذف

سه نمونه آزمایش، فرکانس طبیعی در یک میلی ثانیه اول اتفاق افتاده داده است. جزئیات بیشتر در جدول ۳ نشان داده شده است.

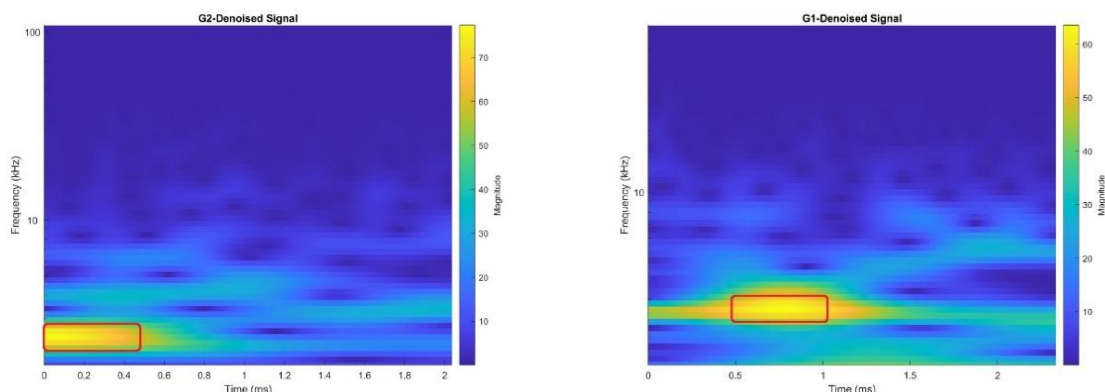
به ترتیب برابر ۲/۶۸۵، ۲/۳۹۸ و ۲/۷۱۳ کیلوهرتز حاصل شد. میانگین فرکانس طبیعی برای سه نمونه ۲/۵۹۸ کیلوهرتز به دست آمد. در مورد محدوده زمانی وقوع فرکانس طبیعی می توان گفت با در نظر گرفتن مقیاس نمای



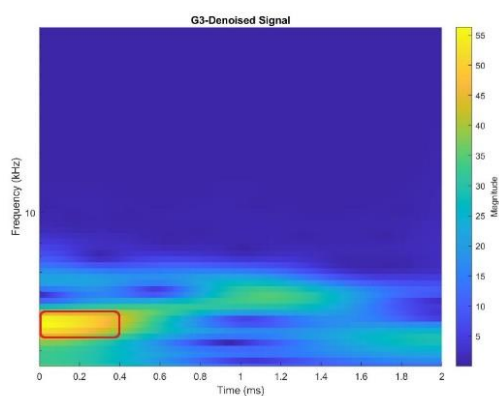
شکل ۵- مقایسه سیگنال شتاب زمان اولیه و نوفه زدایی شده.



شکل ۶- فرآیند استخراج فرکانس طبیعی نمونه از سیگنال شتاب سنج.



شکل ۷- تبدیل موجک پیوسته روی سیگنال بدون نوفه G1. شکل ۸- تبدیل موجک پیوسته روی سیگنال بدون نوفه G2.



شکل ۹- تبدیل موجک پیوسته روی سیگنال بدون نوفه G3.

جدول ۳- فرکانس طبیعی نمونه‌ها با استفاده تبدیل موجک پیوسته.

میانگین	نمونه G3	نمونه G2	نمونه G1	
۲/۵۹۸	۲/۷۱۳	۲/۳۹۸	۲/۶۸۵	فرکانس طبیعی (kHz)
در بازه ۱ میلی ثانیه اول	۰ تا ۰/۴	۰ تا ۰/۵	۰/۵ تا ۱	بازه زمانی وقوع فرکانس طبیعی (ms)

سیگنال‌های غیرایستا است و روش تبدیل فوریه علی‌رغم رواج فراوان در فرآیند انتقال حوزه زمان به فرکانس برای سیگنال‌های ایستا، دقت لازم را برای سیگنال‌های غیرایستا ندارد. یکی دیگر از قابلیت‌های تبدیل موجک وضوح هم‌زمان زمان و فرکانس است که تبدیل فوریه از این قابلیت بی‌بهره بوده و صرفاً وضوح فرکانسی دارد. برای

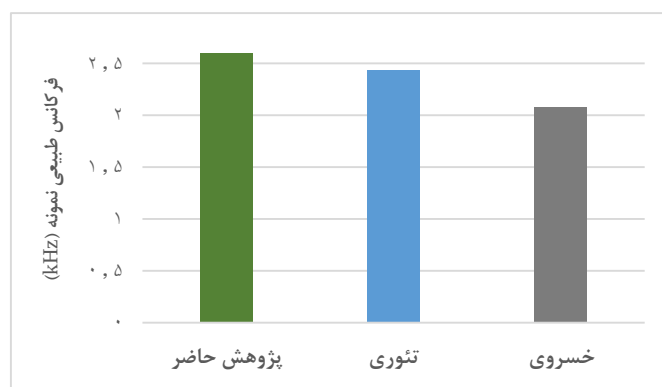
با مقایسه نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر و تحقیق خسروی و همکاران [۱۴] با رابطه تحلیلی فرکانس طبیعی، خطای تحقیق حاضر ۶/۹ درصد می‌باشد. در صورتی‌که میزان خطا برای مرجع [۱۴] برابر ۱۴/۴ درصد به‌دست آمده است که خطای بیش از دو برابری را نشان می‌دهد. این نتیجه نشان‌دهنده قابلیت و کارایی تبدیل موجک در تحلیل

فرآیند برخورد و شکست نمونه تقریباً دو میلی‌ثانیه است. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با دیگر منابع در جدول ۴ و شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

اولین بار بازه زمانی وقوع فرکانس طبیعی در آزمایش ضربه به‌دست آمد. این بازه زمانی برای آزمایش ضربه سقوطی و نمونه استاندارد فولاد API X65 در یک میلی‌ثانیه اول برخورد اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است بازه زمانی کل

جدول ۴- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با دیگر نتایج معتبر.

پژوهش حاضر	تئوری	خسروی [۱۴]	درصد خطای پژوهش حاضر با تئوری	درصد خطای [۱۴] با تئوری
۲/۵۹۸	۲/۴۳	۲/۰۸	۶/۹	۱۴/۴



شکل ۱۰- مقایسه فرکانس طبیعی نمونه تحقیق حاضر با مرجع ۱۴ و رابطه تئوری.

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای نخستین بار از روش تبدیل موجک برای تحلیل فرکانسی سیگنال شتاب‌سنج که سیگنالی به شدت غیرایستا بود، استفاده شد. تحلیل نتایج در قسمت قبل کارایی تبدیل موجک در استخراج فرکانس طبیعی نمونه را به‌خوبی نشان داد. از نقاط قوت این پژوهش می‌توان به استفاده از تبدیل موجک به‌عنوان یک روش تخصصی و به‌روز برای تحلیل سیگنال‌های غیرایستا مثل سیگنال ضربه و همچنین استفاده از شتاب‌سنج در آزمایش ضربه اشاره کرد. شتاب‌سنج به خاطر دقت کاری، استحکام، نصب و کالیبراسیون راحت‌تر و همچنین قابلیت استفاده‌های مکرر از آن، می‌تواند نتایج آزمون ضربه را با دقت به مراتب بیشتر و زمان و هزینه آزمایش به مراتب

کمتر نسبت به حسگری مثل کرنش‌سنج همراه کند. هم‌چنین می‌توان به موارد زیر به‌عنوان نتایج حاصل از تحقیق اشاره کرد:

۱- استفاده از حسگر شتاب‌سنج و بررسی سیگنال آن با روش تبدیل موجک می‌تواند روش جدیدی جهت تحلیل نتایج آزمون ضربه سقوطی باشد. این روش به‌خوبی توانست فرکانس طبیعی فولاد API X65 در آزمون ضربه سقوطی را به‌دست آورد. این نتایج با پژوهش‌های قبلی مطابقت خوبی داشت.

۲- فرکانس طبیعی فولاد API X65 در آزمون ضربه سقوطی مجهز به شتاب‌سنج با روش تبدیل موجک ۲/۵۹۸ کیلوهرتز و بازه زمانی وقوع فرکانس طبیعی در یک میلی‌ثانیه اول برخورد به‌دست آمد.

آزمایش ضربه سقوطی تشکر می‌نماید.

۱۰- مراجع

- [1] S. H. Hashemi, Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel, International Journal of Pressure Vessels and Pipeline. 2009;86(8):533-40.
- [2] American Petroleum Institute. Line Pipe API Specification 5L - Forty-Sixth Edition. 2018;(April):205.
- [3] C. M. Simha, S. Xu, W. R. Tyson, Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the Drop-Weight Tear Test, Engineering Fracture Mechanics. 2014;118:66-82.
- [4] C. Simha, S. Xu, W. R. Tyson, Computational modeling of the drop-weight tear test: A comparison of two failure modeling approaches, Engineering Fracture Mechanics. 2015;148:304-23.
- [5] S. V. Panin, D. D. Moiseenko, P. V. Maksimov, I. V. Vlasov, A. V. Byakov, P. O. Maruschak, et al., Influence of Energy Dissipation at the Interphase Boundaries on Impact Fracture Behaviour of a Plain Carbon Steel, Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2017.
- [6] S. V. Panin, A. V. Byakov, I. V. Vlasov, P. O. Maruschak, F. Berto, A. Vinogradov, Acoustic emission study on the effect of notch shape and temperature on elastic energy release during impact testing of 17Mn1Si pipe steel, Engineering Fracture Mechanics. 2019;210:288-99.
- [7] A. V. Eremin, A. V. Byakov, T. A. Kalashnikova, M. V. Burkov, S. V. Panin, Grain structure and impact toughness of Al-Li alloy joints formed by friction stir welding, AIP Conference Proceedings. 2019;2141(August).
- [8] E. Fathi-Asgarabad, S. H. Hashemi, Experimental and Numerical Study of Energy Absorption in Drop Weight Tear Test Specimen with Chevron Notch on API X65 Steel, Journal of solid and fluid Mechanics. 2020;10(2):95-110.
- [9] E. Fathi-Asgarabad, S. H. Hashemi, Experimental Study of Low Velocity Impact Effect on Fracture Energy of API X65 Steel Using Drop Weight Tear Test, Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2021;11(2):57-71.
- [10] M. Z. Nuawi, A. R. Bahari, S. Abdullah, Impact test on steel structures - An experimental investigation. Advanced Materials Research. 2011;146-147:1514-8.
- [11] T. Stapasolla, O. Pinto, A. Mosquen, Borges MF, Eduardo C. OTC-28032-MS Mechanical Behavior of X-65 Seamless Rigid Pipe During Resonant Fatigue Testing: A Numerical and Experimental Approach, Offshore Technology Conference. 2017.

۳- روش تبدیل موجک گسسته در تفکیک فرکانس‌ها و تبدیل موجک پیوسته در استخراج فرکانس طبیعی از مقیاس‌نما عملکرد مناسبی داشتند. تبدیل موجک به‌خوبی قابلیت تحلیل سیگنال شتاب- زمان ناشی از ضربه را دارد در حالی‌که تبدیل فوریه ابزار مناسبی برای تحلیل سیگنال مغشوش شتاب- زمان نیست.

۴- موجک سیملت ۸ و سطح تجزیه ۵ برای سیگنال پرنوفه شتاب آزمون ضربه سقوطی، موجک مادر و سطح تجزیه مناسب جهت استخراج فرکانس طبیعی نمونه هستند.

۵- استفاده از روش حد آستانه سراسری و اعمال این حد آستانه به‌صورت نرم توانست به‌خوبی در حذف نوفه‌ها عمل کند.

۶- حسگر شتاب‌سنج با توجه به مزایایی که نسبت به کرنش‌سنج دارد مثل دقت کاری، استحکام، آسانی نصب، نسبت سیگنال به نویز پایین‌تر، قابلیت استفاده مجدد و حساسیت کمتر به عوامل بیرونی (مثل درجه حرارت، رطوبت و ارتعاشات) می‌تواند به‌خوبی در آزمون ضربه سقوطی عمل کند و پاسخگوی نیاز محققین در این حوزه باشد.

۷- با دانستن فرکانس طبیعی نمونه در آزمایش ضربه سقوطی می‌توان اثر مخرب تشدید و فرکانس مربوطه را از سیگنال شتاب‌سنج حذف کرد. این کار برای استخراج دقیق‌تر انرژی شکست از سیگنال شتاب می‌تواند حائز اهمیت باشد.

۸- با داشتن فرکانس طبیعی نمونه می‌توان ضریب شدت تنش دینامیکی نمونه شیاردار تحت خمش سه‌نقطه‌ای را به‌دست آورد.

تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید برای در اختیار قرار دادن فولاد API X65 جهت آزمایش قدردانی می‌شود. هم‌چنین نویسندگان از شرکت گاز استان خراسان جنوبی جهت حمایت مالی در بخشی از طرح پژوهشی ساخت دستگاه

- [12] H. Khosravi Khor, S. H. Hashemi, M. Raghebi, Experimental Measurement of Fracture Energy of API X65 Steel Using Drop Weight Tear Test Equipped with Accelerometer, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2021;11(1).
- [13] A. Shterenlikht, S. H. Hashemi, J. R. Yates, I. C. Howard, R. M. Andrews, Assessment of an instrumented Charpy impact machine, *International Journal of Fracture*. 2005;132(1):81–97.
- [14] H. Khosravi Khor, S. H. Hashemi, M. Raghebi, Experimental Study of Natural Frequencies of Notched Homogeneous and Inhomogeneous Specimens Made of API X65 Steel in Low-Blow Drop Weight Test, *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(12):2721–31.
- [15] J Mazloum-Ardakani, S. H. Hashemi, Application of Wavelet Analysis for Measurement of Fracture Energy in Drop Weight Tear Testing of API X65 Steel, Accepted for Publication to *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, April 2024.
- [16] F. Jiang, A. Rohatgi, K. S. Vecchio, J. L. Cheney, Analysis of the dynamic responses for a pre-cracked three-point bend specimen, *International Journal of Fracture*. 2004;127(2):147–65.
- [17] P. Máca, J. Zatloukal, R. Sovják, Design of a novel horizontal impact machine for testing of concrete specimens, *WIT Transactions on the Built Environment*. 2014;141:149–58.
- [18] I. R. Nechita, P. Turtoi, T. Cicone, C. Puică, Instrumentation and preliminary evaluation of a drop tower tester for low and medium impact energy, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2022;1262(1):012027.
- [19] S. Kamal, A. Hashemi, Design and fabrication of a drop tower testing apparatus to investigate the impact behavior of spinal motion segments, *Archives of Bone and Joint Surgery*. 2020;8(6):682–8.
- [20] L. M. Zabala-Gualtero, U. Figuero-López, A. Guevara-Morales, A. Rojo-Valerio, Modification of Charpy machine for the acquisition of stress-strain curve in thermoplastics, *DYNA*. 2020;87(213):52–60.
- [21] J. A. Loya, L. Rubio, J. Fernández-Sáez, Natural frequencies for bending vibrations of Timoshenko cracked beams, *Journal of Sound and Vibration*. 2006;290(3–5):640–53.
- [22] Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe. In: American Petroleum Institute. Third Edit. 1996. p. 16.
- [23] KISTLER K-Shear Accelerometer Catalogue, Type 8742A. 2015;
- [24] R. B. Randall, *Vibration-Based Condition Monitoring Industrial, Automotive And Aerospace Applications*. Second Edition. John Wiley & Sons Ltd; 2021. 451 p.
- [25] M. Misiti, M. Yves, M. Poggi, *Wavelets and their Applications*. ISTE Ltd. 2007. 352 p.
- [26] A. Chakraborty, B. Basu, M. Mitra, Identification of modal parameters of a mdof system by modified L-P wavelet packets, *Journal of Sound and Vibration*. 2006;295(3–5):827–37.
- [27] D. E. Adams, *Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications*, *Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications*. 2007. 1–460 p.
- [28] R. Perera, D. Bueso-Inchausti, A unified approach for the static and dynamic analyses of intermediate debonding in FRP-strengthened reinforced concrete beams, *Composite Structures*. 2010;92(11):2728–37.
- [29] S. A. Mallat, *Wavelet Tour of Signal Processing*. Second Editon. Academic Press; 1999. 637 p.
- [30] A. Mertins, *Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications*. Most. 1999. 327 p.
- [31] Y. I. Jang, J. Y. Sim, J. R. Yang, N. K. Kwon, The optimal selection of mother wavelet function and decomposition level for denoising of dcg signal, *Sensors*. 2021;21(5):1–17