



## استفاده از تحلیل موجک برای اندازه‌گیری انرژی شکست نمونه ضربه سقوطی در فولاد ایکس شصت و پنج

جواد مظلوم اردکانی<sup>۱</sup> و سیدحجت هاشمی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

### چکیده

تعیین انرژی شکست یکی از اهداف مهم در آزمایش ضربه سقوطی برای ارزیابی بهتر خواص ماده آزمایش شده است. هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی راه جدیدی برای تعیین انرژی شکست فولاد در آزمایش ضربه بصورت تجربی است. به این منظور در زمینه تحقیقاتی فولادهای API برای اولین بار از تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال (موج) شتاب استفاده شده است. سیگنال شتاب حین شکست نمونه فولادی API X65 بوسیله 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 (از نوع شیار شورون) انجام گردید. پس از آزمایش ضربه، سیگنال شتاب مربوط به هر نمونه که دارای نوسان زیادی بود بوسیله تبدیل موجک گسسته هموار شد. در ادامه منحنی نیرو - جابجایی برای هر نمونه به دست آمد و سطح زیر منحنی (انرژی شکست) محاسبه شد. مقادیر ۶۳۲۶ ژول بعنوان میانگین انرژی شکست و ۲۱۹ کیلو نیوتن نیروی بیشینه اندازه‌گیری شد. هم‌چنین مشخص شد ۳۹ درصد انرژی کل شکست صرف شروع ترک و ۶۱ درصد صرف رشد ترک شده است. مقایسه نتایج با تحقیقات مشابه گذشته قابلیت مناسب روش تبدیل موجک برای اندازه‌گیری دقیق انرژی شکست با استفاده از آزمایش ضربه سقوطی را نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** آزمایش ضربه سقوطی؛ شتاب‌سنج؛ تبدیل موجک گسسته؛ انرژی شکست؛ فولاد API X65.

## Application of Wavelet Analysis for Measurement of Fracture Energy in Drop Weight Tear Testing of API X65 Steel

J. Mazloum-Ardakani<sup>1</sup>, S. H. Hashemi<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D Student, Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

<sup>2</sup> Prof. Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

### Abstract

Determination of fracture energy is one of the most important aims in drop weight tear testing (DWTT) for assessment of material properties. The purpose of this study is to investigate a new experimental method for measuring fracture energy of tested steel. In doing so, the wavelet transformation was applied for API steel for the first time to analyze acceleration signals from impact tests. The acceleration signal from DWTT on API X65 steel was captured and studied using wavelet transformation. The DWT tests were conducted on three specimens with chevron notch according to API 5L standard. After impact test, noisy acceleration signal from each specimen was smoothed using discrete wavelet transformation. Then, force-displacement response was derived for each specimen from which fracture energy was calculated using the area under each plot. The obtained average fracture energy was 6326 J and the peak load was 219 kN. It was found that about 39% of the total fracture energy was used in crack initiation while 61% used in crack propagation. The comparison of the obtained results with previous data from similar research showed the effectiveness of wavelet transformation for accurate measurement of fracture energy using DWTT.

**Keywords:** Drop Weight Tear Test; Accelerometer; Discrete Wavelet Transform; Fracture Energy; API X65 Steel.

## ۱- مقدمه

افزایش تقاضا برای منابع گاز طبیعی باعث پیشرفت‌های زیادی در توسعه و بکارگیری خطوط لوله پرفشار فولادی با درجه بالا شده است. این پیشرفت‌ها کمک شایانی به کاهش هزینه‌های انتقال و افزایش کارایی خطوط انتقال گاز طبیعی نموده است [۱]. فولاد مورد استفاده در خطوط انتقال گاز باید دارای استحکام و چقرمگی بالا و مقاومت زیاد در مقابل رشد ترک و شکست باشد. عمده لوله‌های قطور و پرفشار استفاده شده در خطوط انتقال گاز طبیعی در ایران از جنس فولاد API X65 است [۲].

آزمایش ضربه سقوطی<sup>۱</sup> یکی از آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی ماده است که برای تعیین انرژی شکست و تعیین ویژگی‌های سطح شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. البته قابل ذکر است که آزمایش ضربه شاریپی<sup>۲</sup> هم یک آزمایش ضربه پرکاربرد محسوب می‌شود. در آزمایش ضربه سقوطی ابعاد نمونه آزمایشگاهی بزرگ‌تر از نمونه ضربه شاریپی و نزدیک به ضخامت کامل لوله است. این ویژگی باعث می‌شود نتایج آزمایش ضربه سقوطی به واقعیت نزدیک‌تر باشد [۴].

عموماً کاربرد شتاب‌سنج در آزمایش‌های ضربه برای اندازه‌گیری غیرمستقیم نیروی ضربه، جابجایی و سرعت چکش، میدان کرنش و تنش‌های ایجاد شده [۵-۸] است. از جمله تحقیقات صورت گرفته داخلی در زمینه آزمایش ضربه می‌توان به ساخت دستگاه ضربه سقوطی مجهز به شتاب‌سنج و استفاده از آن برای بررسی اثر تقویت‌کننده‌های عرضی روی ورق‌های فولادی تخت و انحنا دار [۹] و همچنین بررسی تجربی اثر بارگذاری دینامیکی روی پنل‌های مسلح مستطیلی ساخته شده با ورق‌های کامپوزیت سیمانی خودتراکم الیافی و ورق‌های مشبک اشاره کرد [۱۰].

پنین و همکاران [۱۱، ۱۲] تاثیر دما و نوع شیار را در لوله فولادی کربنی ساده 17Mn1Si روی انرژی شکست و انرژی شروع و رشد ترک با استفاده از آزمایش ضربه شاریپی مجهز به کرنش‌سنج و حسگر نشر آوایی<sup>۳</sup> بررسی و با نتایج حاصل از شکست‌نگاری<sup>۴</sup> 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. ارمین و همکاران [۱۳] آلیاژ آلومینیوم AA8090 و نمونه جوشکاری شده رفتار شکست تحت ضربه شاریپی مجهز به حسگر نشر آوایی را بررسی کردند. از داده‌های حسگر نشر آوایی تبدیل موجک گرفته شد. تشکیل سطح وسیعی از مرزدها در نمونه جوش داده شده منجر به افزایش زیاد در انرژی شروع و انتشار یک ترک تحت بارگذاری ضربه شد در حالی که آلیاژ اولیه چقرمگی ضربه کمی را نشان می‌داد. با مقایسه منحنی نیرو-زمان، به‌خاطر روند گذار از مرحله شروع ترک به رشد ترک در تبدیل موجک افت فرکانس (انرژی) دیده می‌شود.

یو و همکاران [۱۴] با استفاده از مدل اجزاء محدود و ناحیه چسبیده به بررسی انرژی جذب‌شده در نمونه‌های استاندارد آزمایش ضربه سقوطی از جنس API X80 پرداختند. انرژی لازم برای شکست نمونه با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان ۵۰۸۲ ژول به‌دست آمد. در نمونه‌های با چقرمگی بالا حدوداً ۶۰ درصد انرژی جذب‌شده صرف رشد ترک می‌شود و بخش زیادی از انرژی صرف تغییر شکل پلاستیک در نواحی اطراف تکیه‌گاه و ناحیه برخورد چکش با نمونه شده است. اسشاید و همکاران [۱۵] مقاومت در برابر شکست دینامیکی سه فولاد API با گرید X65، X80 و X100 را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش انجام شده در گرید X65 روی نمونه‌ای با ضخامت ۱۹ میلی‌متر با شیار پرسی صورت گرفت. مقدار انرژی شکست تجربی و عددی در این آزمایش به ترتیب ۱۳۲۷۰ و ۱۱۹۸۰ ژول حاصل شد. اشترنلیخت و همکاران [۱۶] دستگاه آزمون ضربه شاریپی مجهز به شتاب‌سنج، کرنش‌سنج و موقعیت‌سنج دورانی همراه با شبیه‌سازی کامپیوتری ارزیابی کردند. نمونه آزمایش شده از نوع فولاد API X80 بود. همچنین تعدادی آزمایش شاریپی کم‌سرعت علاوه بر آزمایش با ظرفیت کامل انجام شد. در این پژوهش با استفاده از حسگر شتاب‌سنج فرکانس طبیعی نمونه و با حسگر کرنش‌سنج و موقعیت‌سنج دورانی انرژی شکست نمونه به‌دست آمد. هاشمی [۱۷] در آزمایش شاریپی مجهز به کرنش‌سنج مقدار انرژی مربوط به شروع و رشد ترک را برای فولاد API X70 محاسبه کرد. ابتدا انرژی شکست فولاد API X70 با استفاده از آزمایش شاریپی به‌صورت تجربی به‌دست آمد. نتایج این پژوهش

<sup>3</sup> Acoustic emission sensor

<sup>4</sup> Fractography

<sup>1</sup> Drop weight tear test

<sup>2</sup> Charpy impact test

فرکانس طبیعی در نمونه نامتجانس کمتر از نمونه متجانس به دست آمد. خسروی‌خور و همکاران [۲۱] انرژی شکست نمونه فولادی API X65 در آزمایش ضربه سقوطی مجهز به شتاب سنج را به دست آوردند. داده‌های شتاب - زمان با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل و با در نظر گرفتن فرکانس طبیعی نمونه و فیلتر پایین‌گذر باترورت نوسان‌های اضافی از سیگنال فرکانسی حذف گردید و منحنی بدون نوسان شتاب - زمان با تبدیل فوریه معکوس به دست آمد. انرژی شکست نمونه به اندازه ۶۷۹۱ ژول به دست آمد.

همان‌طور که در بررسی مقالات تحقیقی گذشته دیده شد، در تحقیقات بسیار کمی از تبدیل موجک<sup>۱</sup> برای تحلیل سیگنال ضربه استفاده شده است. در این تحقیقات اندک هم، تبدیل موجک روی حسگر نشر آوایی و آزمایش ضربه شارپی اعمال شده است و شتاب‌سنج نقشی در آن‌ها نداشته است. تاکنون روی آزمایش ضربه سقوطی روش تبدیل موجک تحت هیچ شرایطی و روی هیچ حسگری اعمال نشده است. همان‌طور که مشاهده شد جدیدترین پژوهشی که روی سیگنال شتاب ناشی از ضربه صورت گرفته است، پژوهش خسروی و همکاران در مرجع [۲۱] بوده است. این پژوهش دو کاستی دارد که در این تحقیق سعی شده این کاستی‌ها مرتفع شود. واضح است که تکرارپذیری مسئله‌ای مهم در تحقیقات تجربی محسوب می‌شود. خسروی و همکاران در کار خود بدلیل محدودیت در ساخت نمونه حاوی درز جوش تنها از یک نمونه آزمایشگاهی استفاده کردند. موضوع بعد، استفاده از تبدیل فوریه برای تحلیل سیگنال شتاب است که این تحلیل معمولاً برای سیگنال‌های ایستا مناسب است [۲۲]. در پژوهش حاضر برای رفع ایرادات بیان شده، از سه نمونه برای انجام آزمایش تجربی استفاده شده است. همچنین برای تحلیل سیگنال شتاب از تبدیل موجک استفاده شده است که ابزاری موثر جهت تحلیل این‌گونه سیگنال‌ها است. با استفاده از تبدیل موجک و حسگر شتاب‌سنج در آزمایش ضربه، می‌توان این آزمایش را به مراتب دقیق‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر نسبت به گذشته به انجام رساند. در این پژوهش برای اولین بار امکان تعیین انرژی شکست فولاد API X65 در آزمایش ضربه سقوطی مجهز به شتاب‌سنج با استفاده از روش تبدیل موجک بررسی می‌شود.

نشان داد که بخش زیادی از انرژی جذب‌شده توسط نمونه مربوط به فرایند شروع ترک است. حدود ۷۰ درصد انرژی اندازه‌گیری شده مربوط به فرایند شکست تخت و برشی است. فتحی و هاشمی [۱۸] به صورت تجربی و عددی به محاسبه انرژی جذب‌شده نمونه‌های استاندارد از جنس فولاد API X65 در آزمایش ضربه سقوطی مجهز به کرنش‌سنج پرداختند. سه نمونه استاندارد تحت آزمایش ضربه سقوطی قرار گرفت و میانگین انرژی شکست فولاد API X65 برابر ۶۱۸۷ ژول به دست آمد. از آنجا که تمامی انرژی جذب‌شده داخل نمونه منجر به رشد ترک نشده و بخشی از آن صرف تغییر شکل پلاستیک در نواحی تکیه‌گاه‌ها و چکش می‌شود، با محاسبه این انرژی می‌توان درصد نواحی پلاستیک ایجاد شده در بخش‌های مختلف نمونه را به دست آورد. لازم به ذکر است در مرجع [۱۸] تمامی آزمایش‌ها با دو حسگر کرنش‌سنج و شتاب‌سنج انجام شده است که در این تحقیق از نتایج حسگر شتاب‌سنج جهت تحلیل استفاده شده است. فتحی و هاشمی [۱۹] اثر ضربه کم‌سرعت بر انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار شورون در فولاد API X65 را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش انجام شده در دو مرحله روی ۱۸ نمونه و در ۶ گروه سه‌تایی انجام شد. مرحله اول آزمایش ارتفاع سقوط چکش طوری در نظر گرفته شد که فقط ناحیه مجاور نوک ترک وارد منطقه پلاستیک شود. در ادامه با اعمال ضربه دوم از ارتفاع دو متری تمامی نمونه‌ها شکسته شدند. با ترسیم انرژی شکست بر حسب انرژی منتقل شده به نمونه (در مرحله اول) مشاهده شد، افزایش انرژی در مرحله اول آزمایش، انرژی شکست نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین یک رابطه خطی برای کاهش انرژی به دست آمد که رابطه مستقیم بین انرژی شکست با انرژی ضربه اولیه را نشان می‌دهد. خسروی‌خور و همکاران [۲۰] به بررسی فرکانس‌های طبیعی نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس با درز جوش افقی از جنس فولاد API X65 در آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت مجهز به شتاب‌سنج پرداختند. در این تحقیق نمونه‌های مورد آزمایش تحت ضربه کم‌سرعت قرار گرفتند به طوری که بخش میانی آن‌ها دچار تغییر شکل پلاستیک نشد. داده‌های آزمایشگاهی با تبدیل فوریه از حوزه زمان به فرکانس منتقل شد. با افزایش ارتفاع سقوط چکش، فرکانس طبیعی نمونه‌ها تقریباً ثابت بود.

<sup>۱</sup> Wavelet transform

برداری آزمایش انجام می‌شود. این دستگاه دارای چکشی به جرم ۷۰۰ کیلوگرم است که حداکثر ارتفاع سقوط آن ۳ متر است. با توجه به جرم چکش و ارتفاع سقوط، ظرفیت این دستگاه برابر با ۲۱ کیلوژول است. نمونه قرار گرفته در دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۲- نمونه آزمایشگاهی قرار داده شده در کارگیر ماشین ضربه سقوطی

در این تحقیق از داده‌های حسگر شتاب‌سنج استفاده شده است. مدل این حسگر 8742A5 از جنس کوارتز و متعلق شرکت کیستلر است که مخصوص اندازه‌گیری ارتعاشات ضربه طراحی شده‌است. حساسیت آن ۱ میلی‌ولت بر شتاب گرانش زمین ( $g=9.80665$  متر بر مجذور ثانیه) است [۲۵].

### ۲-۳- انجام آزمایش

ابتدا نمونه روی تکیه‌گاه‌های دستگاه قرار می‌گیرد (در شرایطی که شیار نمونه دقیقاً زیر مرکز چکش قرار گیرد). چکش تا ارتفاع ۲ متر بالا می‌رود. چکش از ارتفاع مورد نظر رها شده و با نمونه برخورد کرده و آن را به‌طور کامل می‌شکند. سرعت چکش در لحظه برخورد حدوداً ۶/۳ متر بر ثانیه است. قابل ذکر است طبق استاندارد API آزمایش ضربه سقوطی وقتی سرعت چکش بین ۵ تا ۹ متر بر ثانیه باشد، معتبر است [۳].

### ۳- تبدیل موجک

تبدیل موجک از مزایای زیادی نسبت به تبدیل‌های فرکانسی و زمان - فرکانسی دیگر مثل تبدیل فوریه و تبدیل فوریه زمان کوتاه برخوردار است. یکی از روش‌های مرسوم تحلیل فرکانس استفاده از تبدیل فوریه می‌باشد. تبدیل فوریه میزان شباهت سیگنال با مجموعه‌ای از خانواده توابع سینوسی و

## ۲- آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش

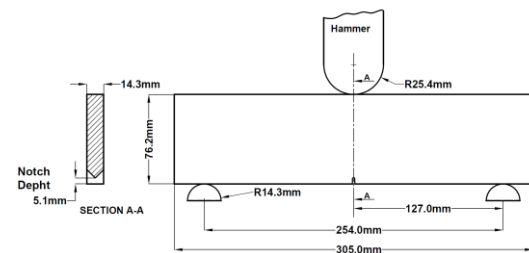
### ۲-۱- معرفی نمونه آزمایش

در این تحقیق از فولاد API X65 برای ساخت نمونه آزمایش ضربه سقوطی طبق استاندارد موسسه نفت آمریکا<sup>۱</sup> (API) استفاده شده‌است [۲۳]. این نمونه از یک لوله انتقال گاز طبیعی استخراج شده است. قطر خارجی لوله ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۴/۳ میلی‌متر است. خواص مکانیکی فولاد در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۴].

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد API X65 [۲۴]

مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	چگالی ( $Kg/m^3$ )	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۲۱۰	۰/۳	۷۸۰۰	۵۰۵	۵۵۲

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی ابتدا ورق اولیه از لوله جدا شده و با کمک دستگاه پرس مطابق توصیه استاندارد مسطح گردید. سپس ابعاد نمونه‌ها توسط عملیات ماشین‌کاری مطابق ابعاد توصیه شده در استاندارد تنظیم شد. در نهایت با استفاده از وایرکات شیار ماشین‌کاری شده (شورون) در نمونه‌ها ایجاد گردید. هندسه نمونه طبق استاندارد API در شکل ۱ مشخص شده است [۲۳].



شکل ۱- ابعاد هندسی نمونه آزمایش ضربه سقوطی [۲۳]

### ۲-۲- معرفی دستگاه آزمایش ضربه

برای انجام آزمایش از دستگاه ضربه سقوطی مجهز شده در آزمایشگاه ضربه دانشگاه بیرجند استفاده شد. این دستگاه به حسگرهای شتاب‌سنج و کرنش‌سنج تجهیز شده است و با کمک یک دستگاه کامپیوتر، اسیلوسکوپ و آمپلی‌فایر داده

<sup>۱</sup> American Petroleum Institute (API)

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

اگر تابعی دو مشخصه بالا را داشته باشد یک موجک مادر<sup>۵</sup> یا موجک نامیده می‌شود [۳۰]. تابع  $\psi$  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 داراست. به این ترتیب  $\psi_{a,b}(t)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

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

$$W_x^\psi = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (4)$$

که در آن  $\psi^*$  مزدوج مختلط  $\psi$  است [۳۰]. حساسیت به تعیین تابع موجک مادر یکی از اشکالات مهم آن 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 و تا حد امکان از محاسبات غیرضروری کاسته شود. برای تبدیل موجک پیوسته باید به این نکته توجه داشت که موجک پیوسته در تغییرات مقیاس و انتقال بصورت پیوسته عمل می‌کند [۳۱].

### ۳-۲- تبدیل موجک گسسته

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد تغییرات مقیاس و انتقال پیوسته هستند که حاوی حجم زیادی اطلاعات است که احتیاجی به همه آن‌ها در بازسازی تابع و تحلیل ناپیوستگی‌ها نیست. در صورتی که به جای پیوسته در نظر گرفتن  $a$  و  $b$  از آن‌ها نمونه برداری گردد به عبارتی یک تعداد معین مقیاس و انتقال وجود داشته باشد، می‌توان ضرایب موجک را به نحوی به دست آورد

کسینوسی با فرکانس‌های مختلف سنجیده، وزن هر یک از این توابع را در تشکیل سیگنال مورد نظر تعیین می‌کند. تبدیل فوریه دارای محدودیت‌هایی از جمله، ناتوانی در تحلیل سیگنال‌های غیرایستا<sup>۱</sup> و نداشتن شفافیت زمانی است [۲۶]. یکی از روش‌های رایج تحلیل سیگنال غیرایستا استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه است. قدرت تفکیک یکسان در حوزه زمان و فرکانس ایراد بزرگ این روش است، در صورتی که برای تحلیل سیگنال غیرایستا تفکیک متغیر مورد نیاز است [۲۷].

تبدیل موجک در حال حاضر یکی از روش‌های کارآمد در پردازش سیگنال‌های ارتعاشی است. این تبدیل از توابع موجک به جای توابع سینوسی استفاده می‌کند. از تبدیل موجک در موارد بسیاری می‌توان استفاده کرد. از آن جمله می‌توان به نوفه‌زدایی<sup>۲</sup> سیگنال، تحلیل زمان-فرکانس، تحلیل غیرایستا، فشرده‌سازی داده، یافتن ناپیوستگی و تشخیص عیوب اشاره کرد [۲۸]. در روش تبدیل موجک از روش پنجره‌گذاری متغیر استفاده می‌شود که از پیشرفته‌ترین روش‌های پنجره‌گذاری است. این مهم‌ترین مزیت روش تبدیل موجک به تبدیل فوریه زمان کوتاه است. تبدیل موجک این قابلیت را دارد که در فرکانس‌های پایین که رفتار فرکانسی اهمیت زیادی دارد، دارای وضوح فرکانسی بالا و زمانی پایین است. بالعکس در فرکانس‌های بالا که زمان و محل وقوع فرکانس اهمیت دارد دارای وضوح زمانی بالا و فرکانسی پایین است [۲۹]. در ادامه توضیحات مختصری در مورد دو روش پرکاربرد تبدیل موجک پیوسته<sup>۳</sup> و گسسته<sup>۴</sup> ارائه شده است.

### ۳-۱- تبدیل موجک پیوسته

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

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

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

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

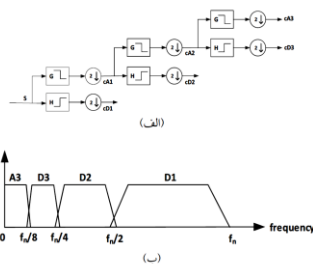
<sup>4</sup> Discrete wavelet transform (DWT)

<sup>5</sup> Mother wavelet

<sup>1</sup> Nonstationary

<sup>2</sup> Denoising

<sup>3</sup> Continuous wavelet transform (CWT)



شکل ۳- الف. اعمال تبدیل موجک گسسته روی سیگنال تا سه سطح تجزیه، ب. تفکیک محتوای فرکانسی در چهار باند [۳۰]

ارتباط فیلترهای پایین‌گذر با تابع مقیاس  $\phi$  و فیلترهای بالاگذر با تابع موجک در روابط ۵ تا ۷ نشان داده شده‌است.

$$H(n) = (-1)^n G(1 - n) \quad (5)$$

$$\phi(x) = \sum_n G(n) \sqrt{2} \phi(2x - n) \quad (6)$$

$$\psi(x) = \sum_n H(n) \sqrt{2} \phi(2x - n) \quad (7)$$

فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر متغیرهایی متمایز برای هر تابع موجک مادر هستند. از آنجایی که انتخاب تابع موجک مادر و سطح تجزیه<sup>۸</sup> بر عملکرد کاهش نوفه تأثیر می‌گذارد، تابع موجک مادر و سطح تجزیه مناسب می‌تواند عملکرد روش های پردازش مبتنی بر تبدیل موجک را بهینه کند [۳۰].

#### ۴- مراحل استخراج داده‌ها

با سقوط چکش از ارتفاع ۲ متری و برخورد با نمونه، شکست کامل در نمونه اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، آزمایش روی سه نمونه با شرایط یکسان انجام شد. شکل ۴ تصویر نمونه بعد از اعمال ضربه و شکست کامل را نشان می‌دهد.

که بتوان تابع اصلی را از روی آن‌ها بازسازی کرد. تبدیل حاصل از نمونه‌گیری گسسته  $a$  و  $b$  را تبدیل موجک گسسته می‌نامند.

$$a = 2^{-j}, \quad b = k 2^{-j}$$

که در آن  $k$  و  $j$  اعداد صحیح هستند که مجموعه جابه‌جایی‌های گسسته در محور زمان و مقیاس‌های گسسته را نشان می‌دهند [۳۲].

یکی از رایج‌ترین راه‌های پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته، تفکیک چندگانه<sup>۱</sup> (MRA) است [۳۰]. در این روش، پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته به کمک تعدادی عملیات متوالی صورت می‌پذیرد که هر مرحله از این عملیات، شامل فیلتر کردن سیگنال و نمونه‌گهی<sup>۲</sup> است. در هر مرحله از فرآیند تبدیل موجک گسسته، محتوای سیگنال داخل دو زیرفضای متعامد تجزیه می‌شود. نشان داده می‌شود که در یک شاخه ابتدا یک فیلتر پایین‌گذر<sup>۳</sup> ( $G$ ) بر روی سیگنال گسسته اثر کرده و سپس تعداد نمونه‌های سیگنال به نصف کاهش می‌یابد. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرائب تقریب<sup>۴</sup> سیگنال در سطح اول تجزیه نامیده می‌شود. به‌طور موازی، یک فیلتر بالاگذر<sup>۵</sup> ( $H$ ) بر روی سیگنال گسسته موجود اثر کرده، سپس تعداد نمونه‌های سیگنال به نصف کاهش می‌یابد. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرائب جزئیات<sup>۶</sup> سیگنال در سطح اول تجزیه نامیده می‌شود. ضرائب جزئیات، محتوای فرکانس بالا و ضرائب تقریب، محتوای فرکانس پایین سیگنال را دربردارند. منظور از  $f_n$  در این شکل، نصف فرکانس نمونه‌برداری اولیه است.

ادامه روند تجزیه سیگنال به سطوح بعدی، با فیلتر کردن ضرائب تقریب سطح اول تجزیه و کاهش تعداد نمونه‌ها صورت می‌پذیرد. این فرآیند به‌طور مشابه و تا سطح دلخواه از تجزیه ادامه می‌یابد. شکل ۳-الف، فرآیند تبدیل موجک گسسته را تا سه سطح تجزیه و شکل ۳-ب، باندهای فرکانسی مربوط به هر سطح از تجزیه را نشان می‌دهد.

<sup>5</sup> Highpass filter  
<sup>6</sup> Detail coefficients  
<sup>7</sup> Scaling function  
<sup>8</sup> Level of decomposition

<sup>1</sup> Multiresolution analysis (MRA)  
<sup>2</sup> Downsampling  
<sup>3</sup> Lowpass filter  
<sup>4</sup> Approximation coefficients

مراحل تجزیه بسته به شرایط داده برداری سیگنال، کاربرد سیگنال و این که هدف از انجام تحقیق چه باشد متفاوت است. با توجه به این که ماهیت نوفه‌هایی که در این آزمایش انتظار می‌رود وجود داشته باشند (مثل نوفه ناشی از روان کاری و اصطکاک، نوفه ناشی از سیستم اندازه‌گیری، نوفه ناشی از وقوع تشدید در اجزای مختلف دستگاه) همگی در فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتد، روند اصلی سیگنال را بایست در قسمت کم فرکانس جستجو کرد. لازم به ذکر است اعمال تبدیل موجک روی سیگنال در محیط برنامه متلب انجام شده است.

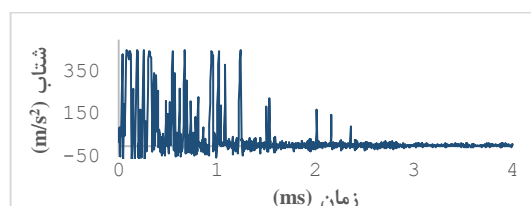
همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد در روش تبدیل موجک می‌توان از موجک‌های مختلفی استفاده کرد. معیار انتخاب موجک مادر برای تبدیل موجک به کار برده شده در این تحقیق در کنار سادگی تحلیل و وضوح نتایج حاصل از آن، در نهایت استخراج منحنی نیرو - جابه‌جایی بوده است. به این دلیل موجک‌های کوپفلت<sup>۱</sup>، بای‌اورتوگونال<sup>۲</sup>، ریورس بای‌اورتوگونال<sup>۳</sup>، دوپچیز<sup>۴</sup>، سیملت<sup>۵</sup>، هار<sup>۶</sup> و میر<sup>۷</sup> و سطوح تجزیه ۵، ۶، ۷ و ۸ بررسی شدند. همان‌طور که اشاره شد معیار تعیین موجک و سطح تجزیه بر اساس قابلیت رسم منحنی نیرو - جابه‌جایی، عدم نوسان و متغیرهای استخراج شده از آن مثل انرژی شکست، انرژی شروع و رشد ترک در نظر گرفته شده است. معیار قبولی موجک به کار رفته، مقایسه نتایج با پژوهش فتحی و هاشمی [۱۸] است. از این رو طبق بررسی نویسندگان موجک سیملت مرتبه ۸ (sym8) و ۷ مرحله تجزیه سیگنال بهترین انتخاب برای مسئله حاضر است. مرتبه تابع موجک نشان‌دهنده می‌زان مشتق‌پذیری و نرمی تابع است [۳۰]. با افزایش مراحل تجزیه، بازه فرکانسی سیگنال به سمت فرکانس‌های پایین محدودتر می‌شود. بنابراین با توجه به این که سیگنال شتاب اندازه‌گیری شده نوسان بسیاری دارد، مرتبه موجک بالاتر به سبب نرمی بیشتر تابع و مرحله تجزیه بالاتر به علت کاهش محدوده فرکانسی بهتر می‌تواند سیگنال را تحلیل کند و در نهایت انرژی شکست را تقریب بزند.

پس از تجزیه سیگنال، منحنی تقریب‌های سیگنال در مرحله هفتم (a7) که نشان‌دهنده روند کلی سیگنال است به عنوان منحنی شتاب هموار شده در نظر گرفته می‌شود. همان



شکل ۴- نمونه شکسته شده بعد از انجام آزمایش

بعد از انجام آزمایش منحنی شتاب - زمان نمونه حاصل شد. داده‌های شتاب به دست آمده از شتاب‌سنج بدلیل شدت ضربه و نوسان نمونه به شدت پرنوفه (مغشوش) است. در شکل ۵ منحنی شتاب - زمان یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی شتاب - زمان حاصل از آزمایش ضربه سقوطی

با توجه به این که هدف از انجام این تحقیق به دست آوردن انرژی شکست است. در ابتدا باید سیگنال شتاب عاری از هرگونه نوفه اضافی شود. یکی از روش‌های پرکاربرد نوفه‌زدایی استفاده از روش تبدیل موجک گسسته است که به روش بانک فیلتر هم معروف است. این روش در هر مرحله تجزیه سیگنال را از فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر عبور داده و آن را به دو قسمت پرفرکانس و کم‌فرکانس تقسیم می‌کند. به بخش کم‌فرکانس، تقریب‌ها و به بخش پرفرکانس، جزئیات گفته می‌شود. در مرحله بعد مجدداً فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر روی قسمت کم فرکانس سیگنال اعمال می‌شوند. این مراحل تجزیه سیگنال تا رسیدن به هدف نهایی (پاسخ واقعی نمونه) ادامه می‌یابد. تعداد

<sup>5</sup> Symlet

<sup>6</sup> Haar

<sup>7</sup> Meyer

<sup>1</sup> Coiflet

<sup>2</sup> Biorthogonal

<sup>3</sup> Revese Biorthogonal

<sup>4</sup> Daubechies

M جرم چکش (۷۰۰ کیلوگرم)، g شتاب گرانش و P(t) نیروی وارده از چکش به نمونه است. با به‌دست آوردن جابه‌جایی و نیرو می‌توان منحنی نیرو - جابه‌جایی را ترسیم کرده و با محاسبه مساحت زیر منحنی به روش دوزنقه‌ای انرژی شکست نمونه را محاسبه کرد. به جهت سادگی و درک بهتر مراحل انجام کار از منحنی ولتاژ - زمان تا رسیدن به انرژی شکست بصورت نمودار گردشی در شکل ۷ ارائه شده‌است.

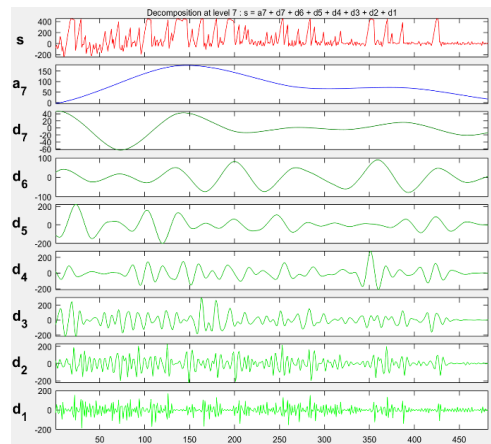


شکل ۷- فرایند استخراج انرژی شکست نمونه از سیگنال شتاب

### ۵- تحلیل نتایج تجربی

در قسمت قبل مراحل رسیدن از منحنی ولتاژ - زمان حاصله از شتاب‌سنج تا رسیدن به منحنی نیرو - جابه‌جایی شرح داده شد. حال در این قسمت با انتگرال‌گیری از منحنی نیرو - جابه‌جایی، انرژی شکست برای هر سه نمونه مورد آزمایش به‌دست آمد. نمونه‌ها به ترتیب G1، G2 و G3 نام‌گذاری شدند. منحنی نیرو - جابه‌جایی سه نمونه به همراه مقدار میانگین در شکل

طور که در شکل ۶ مشخص است از سطح یک که پرفرکانس ترین سطح است تا سطح هفتم، با حذف بخش‌های پرفرکانس سیگنال، بازه فرکانسی سیگنال بسیار محدود شده است. این محدودیت بالا به‌خاطر تلاش برای تعیین انرژی شکست و حذف تمامی نوسانات سیگنال است. به نظر نمی‌رسد برای تعیین فرکانس طبیعی نمونه با کمک تبدیل موجک به این تعداد سطح تجزیه و حذف نوسانات نیاز باشد. این موضوع در مقالات آتی بصورت کامل بررسی خواهد شد.



شکل ۶- تجزیه سیگنال شتاب حاصل از آزمایش ضربه سقوطی در ۷ مرحله با موجک سیملت

در ادامه با دوبار انتگرال‌گیری از منحنی شتاب، منحنی جابه‌جایی حاصل می‌شود. در مرحله اول با یکبار انتگرال‌گیری از شتاب، سرعت (رابطه ۸) و در مرحله دوم جابه‌جایی (رابطه ۹) حاصل می‌شود.

$$V(t) = \int a dt = \sum_{i=1}^n 0.5(a_i + a_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (8)$$

$$X(t) = \int V dt = \sum_{i=1}^n 0.5(V_i + V_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (9)$$

که  $a(t)$  شتاب چکش،  $V(t)$  سرعت چکش،  $X(t)$  جابه‌جایی چکش و  $t$  زمان برخورد است.

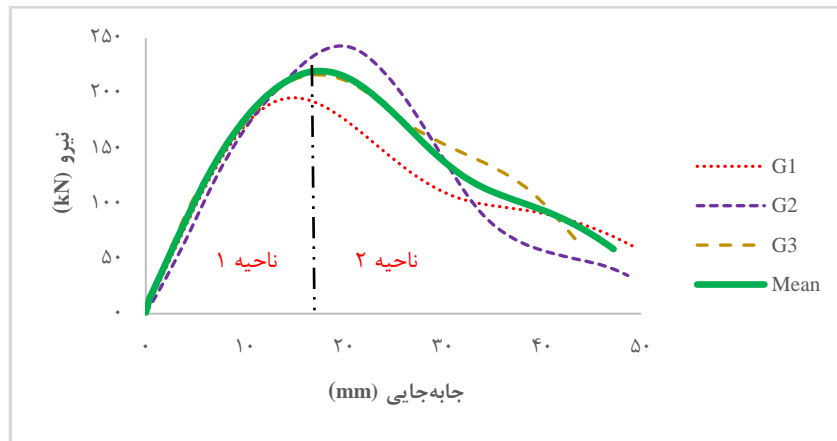
با کمک قانون دوم نیوتن (رابطه ۱۰) منحنی نیرو نیز به دست آمد:

$$P(t) = M(g - a(t)) \quad (10)$$



نیروی بیشینه وارد بر نمونه و جابه‌جایی چکش در حین ضربه ارائه می‌دهد.

۸ قابل مشاهده است. منحنی نیرو - جابه‌جایی اطلاعات بسیار مهمی در مورد میزان جذب انرژی نمونه (انرژی شکست)،



شکل ۸- منحنی نیرو - جابه‌جایی حاصل از آزمایش روی سه نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی

با توجه به این که افت نیرو، زمانی است که ترک شروع به رشد کند، می‌توان شروع رشد ترک را در لحظه وقوع نیروی بیشینه در نظر گرفت. مساحت زیر منحنی قبل از جابه‌جایی صفر تا نیروی بیشینه (ناحیه ۱) مقدار انرژی لازم برای شروع ترک و مساحت زیر منحنی بعد از نیروی بیشینه (ناحیه ۲) انرژی لازم برای رشد ترک را فراهم می‌آورد. با توجه به شکل ۸ نیروی بیشینه نمونه‌های G1، G2 و G3 به ترتیب برابر ۱۹۶، ۲۴۳ و ۲۱۷ کیلونیوتن و میانگین نیروی بیشینه این سه نمونه ۲۱۹ کیلونیوتن به دست آمد.

جدول ۳- محاسبه نیروی بیشینه و جابه‌جایی چکش در آزمایش ضربه سقوطی

کمیت	نمونه G1	نمونه G2	نمونه G3	انحراف معیار ± میانگین
نیروی بیشینه (kN)	۱۹۶	۲۴۳	۲۱۷	۲۱۹ ± ۱۹
جابه‌جایی در لحظه رشد ترک (mm)	۱۴/۹۷	۱۹/۷۴	۱۷/۲۸	۱۷ ± ۱۷/۳۳
جابه‌جایی چکش تا شکست کامل (mm)	۵۰/۰۴	۴۹/۱۶	۴۶/۷۳	۴۸/۱۶۴ ± ۳۹/۱۱
درصد جابه‌جایی چکش در لحظه رشد (%)	۳۰	۴۰	۳۷	۳۵/۶۶

با توجه به شکل ۸ مقدار انرژی شکست برای نمونه‌های G1، G2 و G3 به ترتیب ۵۹۹۴، ۶۳۳۹ و ۶۶۴۶ ژول به دست آمد. میانگین انرژی شکست سه نمونه برابر ۶۳۲۶ ژول به دست آمد. میانگین جذب انرژی شروع ترک ۳۹ درصد و جذب انرژی رشد ترک ۶۱ درصد به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد ۶۱ درصد انرژی کل شکست صرف رشد ترک می‌شود. این مهم، نشان از چقرمه بودن نمونه و مقاومت بالای آن در برابر رشد ترک دارد که ویژگی مهمی برای فولادهای مورد استفاده در خطوط انتقال نفت و گاز محسوب می‌شود. در جدول ۲ و ۳ جزئیات بیشتری در خصوص این منحنی ارائه شده است.

جدول ۲- محاسبه میانگین انرژی شکست، انرژی شروع و رشد ترک (بر حسب ژول)

کمیت	نمونه G1	نمونه G2	نمونه G3	انحراف معیار ± میانگین
انرژی کل شکست	۵۹۹۴	۶۳۳۹	۶۶۴۶	۶۳۲۶ ± ۲۶۶
انرژی شروع ترک	۱۸۷۱	۳۰۸۶	۲۴۶۷	۲۴۷۵ ± ۴۹۶
انرژی رشد ترک	۴۱۲۳	۳۲۵۳	۴۱۷۹	۳۸۵۲ ± ۴۲۳
نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل (%)	۳۱	۴۸	۳۷	۳۹

[۱۸] و درصد اختلاف تحقیق حاضر با [۱۸] حداقل اختلاف ۵ برابری مشاهده می‌شود. این مقایسه کارآمدی تبدیل موجک در تحلیل سیگنال شتاب حاصل از ضربه را نشان می‌دهد. متغیرهای نیروی بیشینه و جابه‌جایی چکش نقش مهمی در تعیین چقرمگی و میزان جذب انرژی و مقاومت ماده در برابر رشد ترک نمونه دارند. با مقایسه نتایج تحقیق حاضر و [۱۸] در ستون چهارم جدول ۴ بیشترین اختلاف برای درصد جابه‌جایی چکش در لحظه رشد ترک ۳/۶ درصد مشاهده شد. در صورتی که ستون پنجم جدول ۴ مقادیر بزرگ اختلاف را نشان می‌دهد. همچنین با این‌که در روش تبدیل موجک برای برآورد جابه‌جایی چکش نسبت به انرژی شاهد افت هستیم، این افت در تبدیل فوریه به مراتب بیشتر خود را نشان می‌دهد. به‌نظر نتایج تبدیل فوریه در قسمت برآورد جابه‌جایی چکش، دقت لازم را نداشته و مناسب تحلیل نیست. برای ملاحظه جزئیات بیشتر و مقایسه نتایج به جدول ۴ مراجعه شود. در نهایت می‌توان گفت، با بررسی و مقایسه تمامی پارامترهای تعیین‌کننده در آزمایش ضربه (جدول ۴)، تبدیل موجک نسبت به تبدیل فوریه، بهتر و دقیق‌تر می‌تواند داده‌های شتاب‌سنج را تحلیل کند. با توجه به قابلیت تبدیل موجک در نوفه‌زدایی و تنوع موجک‌های مادر، این روش می‌تواند تحولی در تحلیل داده‌های آزمایش ضربه مجهز به شتاب‌سنج ایجاد کند.

برای ارزیابی نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، مرجع [۱۸] به‌عنوان مرجع مقایسه بین داده‌های تحقیق حاضر و مرجع [۲۱] انتخاب گردید. که جزئیات آن در جدول ۴ ارائه شده است. دلیل انتخاب مرجع [۱۸] این است که از سه نمونه برای آزمایش ضربه استفاده کرده و همچنین از روش‌های آزموده‌شده قبلی جهت استخراج انرژی شکست استفاده کرده که نتایج پژوهش‌های گذشته را تایید می‌نماید. در پژوهش مذکور داده‌های آزمایش با کمک حسگر کرنش‌سنج جمع‌آوری گردیده است در حالی که در تحقیق حاضر از شتاب‌سنج برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده است. در مرجع [۲۱] نیز یک نمونه شیاردار فولاد API X65 با ابعاد استاندارد تحت آزمایش ضربه سقوطی مجهز به شتاب‌سنج و از تبدیل فوریه سریع برای انتقال داده‌های زمانی به فرکانس استفاده شده است. داده‌ها با کمک فیلتر باتروث نوفه‌زدایی شدند و از منحنی شتاب - زمان نوفه‌زدایی شده منحنی نیرو - جابه‌جایی به‌دست آمد و در نهایت انرژی شکست حاصل گردید.

در ستون چهارم جدول ۴ مقایسه داده‌های تحقیق حاضر با مرجع [۱۸] مشاهده می‌شود، اختلاف انرژی شکست کل، ۲/۲ شروع ترک ۰/۷ و رشد ترک ۴ درصد است. همچنین نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل ۳۹ درصد گزارش شده که نسبت به ۴۰ درصد مرجع [۱۸] تنها ۲/۵ درصد اختلاف دارند. در صورتی که با مقایسه درصد اختلاف نتایج [۲۱] با

جدول ۴- مقایسه نتایج منحنی نیرو - جابه‌جایی در تحقیق حاضر با پژوهش‌های گذشته

کمیت	تحقیق حاضر	فتحی و هاشمی [۱۸]	خسروی و همکاران [۲۱]	درصد اختلاف تحقیق حاضر با [۱۸]	درصد اختلاف [۲۱] با [۱۸]
انرژی شکست (J)	۶۳۲۶	۶۱۸۷	۶۷۹۱	۲/۲	۹/۷
انرژی شروع ترک (J)	۲۴۷۵	۲۴۹۳	۲۰۳۷	۰/۷	۱۸/۳
انرژی رشد ترک (J)	۳۸۵۲	۳۶۹۴	۴۷۵۴	۴	۲۸/۷
نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل (%)	۳۹	۴۰	۳۰	۲/۵	۲۵
نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل (%)	۶۱	۶۰	۷۰	۱/۶	۱۶/۶
نیروی بیشینه (kN)	۲۱۹	۲۰۲	۲۲۵	۸/۴	۱۱/۴
جابه‌جایی چکش در لحظه رشد ترک (mm)	۱۷/۳۳	۲۰/۱۷	۷/۳	۱۴	۶۳/۸
جابه‌جایی چکش تا شکست کامل (mm)	۴۸/۶۴	۵۳/۳۴	۳۰	۸/۸	۴۳/۸
درصد جابه‌جایی چکش در لحظه رشد (%)	۳۵/۶۶	۳۷	۲۴/۳	۳/۶	۳۴/۳

## ۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر برای نخستین بار از روش تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال شتابسنج که سیگنالی به شدت غیرایستا است، استفاده شد. تحلیل نتایج در قسمت قبل کارایی تبدیل موجک در استخراج انرژی شکست نمونه از سیگنال شتابسنج را به خوبی نشان داد. این پژوهش دو نقطه قوت اصلی دارد، اول استفاده از تبدیل موجک به عنوان روشی نوین، سریع و دقیق جهت تحلیل سیگنال‌های غیرایستا از جمله سیگنال ضربه و دوم، استفاده از شتابسنج به عنوان حسگری که می‌توان به دفعات از آن در آزمایش‌های ضربه استفاده کرد و نصب و کالیبراسیون به مراتب راحت‌تری نسبت به کرنش‌سنج دارد. نتایج این تحقیق روش جدیدی برای تعیین انرژی شکست در آزمایش ضربه سقوطی معرفی کرد که به مراتب نسبت به روش‌های گذشته دقیق‌تر (استفاده از تبدیل موجک)، سریع‌تر و از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر (نصب سریع و راحت شتابسنج و قابلیت استفاده چندباره از آن) است. در نهایت به موارد زیر می‌توان به عنوان نتایج حاصل از تحقیق اشاره کرد:

۱- استفاده از حسگر شتابسنج و بررسی سیگنال آن با روش تبدیل موجک روش جدیدی جهت تحلیل نتایج آزمون ضربه سقوطی است. این روش به خوبی توانست انرژی شکست فولاد API X65 در آزمون ضربه سقوطی را به دست آورد. این نتایج با پژوهش‌های قبلی مطابقت خوبی داشت.

۲- روش تبدیل موجک، در اینجا به طور خاص روش تبدیل موجک گسسته، ابزار مناسبی جهت تحلیل سیگنال شتاب حاصل از شتابسنج می‌باشد. تبدیل موجک گسسته به خوبی قابلیت تحلیل سیگنال شتاب - زمان ناشی از ضربه و حذف اغتشاشات آن را دارد.

۳- موجک سیملت ۸ و سطح تجزیه ۷ برای سیگنال شتاب آزمون ضربه سقوطی، موجک مادر و سطح تجزیه مناسب جهت استخراج انرژی شکست است.

۴- حسگر شتابسنج با توجه به مزایایی که نسبت به کرنش‌سنج دارد مثل آسانی نصب، نسبت سیگنال به نویز پایین تر، قابلیت استفاده مجدد، حساسیت کمتر به عوامل بیرونی (مثل درجه حرارت، رطوبت و ارتعاشات) می‌تواند به خوبی در آزمون ضربه سقوطی عمل کند و پاسخگوی نیاز محققین در این حوزه باشد. در نهایت استفاده از شتابسنج به کاهش زمان

آزمایش به دلیل نصب راحت و کاهش هزینه آزمایش به دلیل قابلیت استفاده مجدد، منجر می‌شود.

۵- میانگین انرژی شکست فولاد API X65 در آزمون ضربه سقوطی مجهز به شتابسنج با روش تبدیل موجک ۶۳۲۶ ژول به دست آمد.

۶- واضح است هر چقدر انرژی بیشتری صرف رشد ترک شود نمونه در برابر رشد ترک مقاوم‌تر و چقرمه‌تر است. مقاومت در برابر ترک و چقرمگی بالا از ویژگی‌های مهم لوله‌های انتقال نفت و گاز محسوب می‌شود. در این پژوهش ۳۹ درصد انرژی کل شکست صرف شروع ترک و ۶۱ درصد آن صرف رشد ترک شد که نشان از چقرمگی بالای فولاد API X65 دارد.

## ۷- تشکر و قدردانی

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

## ۸- فهرست علائم

$\psi$	تابع موجک مادر
$s(t)$	سیگنال شتاب-زمان
$W$	تبدیل موجک پیوسته
$G$	فیلتر پایین‌گذر
$H$	فیلتر بالاگذر
$\phi$	تابع مقیاس
$a$	شتاب چکش، $m/s^2$
$V$	سرعت چکش، $m/s$
$X$	جابه‌جایی چکش، $m$
$t$	زمان برخورد، $s$
$M$	جرم چکش، $kg$
$P$	نیروی وارد به نمونه، $N$
$g$	شتاب گرانش، $m/s^2$

۹- مراجع

- [14] Yu PS, Ru CQ (2016) Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel. *Eng. Fract. Mech.* 160:138–46.
- [15] Scheider I, Nonn A, Völling A, Mondry A, Kalwa C (2014) A Damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines. *Proc. Mat. Sci.* 3:1956–64.
- [16] Shterenlikht A, Hashemi SH, Yates JR, Howard IC, Andrews RM (2005) Assessment of an instrumented Charpy impact machine. *Int. J. Fract.* 132(1):81–97.
- [17] Hashemi SH (2008) Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. *Int. J. Press. Vess. Pipi.* 85(12):879–84.
- [18] Fathi-Asgarabad E, Hashemi SH (2020) Experimental and numerical study of energy absorption in Drop Weight Tear Test specimen with chevron notch on API X65 steel. *J. solid fluid Mech.* 10(2):95–110.
- [19] Fathi-Asgarabad E, Hashemi SH (2021) Experimental study of low velocity impact effect on fracture energy of API X65 steel using Drop Weight Tear Test. *J. solid fluid Mech.* 11(2):57–71.
- [20] Khosravi Khor H, Hashemi SH, Raghebi M (2020) Experimental study of natural frequencies of notched homogeneous and inhomogeneous specimens made of API X65 steel in low-blow Drop Weight Test. *Modares Mech. Eng.* 20(12):2721–31.
- [21] Khosravi Khor H, Hashemi SH, Raghebi M (2021) Experimental measurement of fracture energy of API X65 steel using Drop Weight Tear Test equipped with accelerometer. *J. solid fluid Mech.* 11(1).
- [22] Silik A, Noori M, Altabey WA, Ghiasi R, Wu Z (2021) Comparative analysis of wavelet transform for time-frequency analysis and transient localization in structural health monitoring. *Struct. Dura. Health Monit.* 15(1):1–22.
- [23] Recommended practice for conducting Drop-Weight Tear Tests on line pipe (1996) American Petroleum Institute. 3rd edn. p. 16.
- [24] Gholami Moghaddam S, Hashemi S (2023) Experimental measurement of critical crack tip opening angle in API X65 steel using drop weight tear test specimen. *Modares Mech. Eng.* 23(2):81–91.
- [25] KISTLER K-Shear Accelerometer catalogue (2015) Type 8742A.
- [26] Randall RB (2021) Vibration-based condition monitoring industrial, Auto. Aero. App. 2nd edn. John Wiley & Sons Ltd. 451 p.
- [27] Misiti M, Yves M, Poggi GOJ-M (2007) Wavelets and their applications. ISTE Ltd. 352 p.
- [28] Chakraborty A, Basu B, Mitra M (2006) Identification of modal parameters of a mdof system
- [1] Shibanuma K, Hosoe T, Nakai H, Morita A, Aihara S (2017) A model to evaluate unstable ductile crack arrestability of offshore pipeline. *Eng. Fract. Mech.* 178:126–47.
- [2] Hashemi SH (2009) Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *Int. J. Press. Vess. Pipel.* 86(8):533–40.
- [3] American Petroleum Institute. Line Pipe API specification 5L (2018) - 46th edn. (April):205.
- [4] Dieter GE, Bacon D (1988) Mechanical metallurgy SI metric edition McGraw-Hill Book Company. 289–292 p.
- [5] Máca P, Zatloukal J, Sovják R (2014) Design of a novel horizontal impact machine for testing of concrete specimens. *WIT Trans. Built Env.* 141:149–58.
- [6] Nechita IR, Turtoi P, Cicone T, Puică C (2022) Instrumentation and preliminary evaluation of a drop tower tester for low and medium impact energy. *IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng.* 1262(1):012027.
- [7] Kamal S, Hashemi A (2020) Design and fabrication of a drop tower testing apparatus to investigate the impact behavior of spinal motion segments. *Arch. Bon. Joi. Surg.* 8(6):682–8.
- [8] Zabala-Gualtero LM, Figuero-López U, Guevara-Morales A, Rojo-Valerio A (2020) Modification of Charpy machine for the acquisition of stress-strain curve in thermoplastics. *DYNA.* 87(213):52–60.
- [9] Mousavi Zadeh SA, Hosseini M, Hatami H, Kamalvand M (2021) Studies on the Effect of Reinforcers Types on Flat and Curved Steel Sheets' Performance under Drop Impact. *Mech. Aerosp. J.* 16(4):39–59.
- [10] Dalvand A, Hatami H, Chegini AS (2021) Experimental study of the effect of dynamic loading on rectangular armed panels made of self-compacting composite fiber and lattice sheets. *Mech. Aero. J. Struct. Const. Eng.* 8(1):131–151.
- [11] Panin SV, Moiseenko DD, Maksimov PV, Vlasov IV, Byakov AV, Maruschak PO, et al (2017) Influence of energy dissipation at the interphase boundaries on impact fracture behaviour of a plain carbon steel. *Theori. App. Fract. Mech.* 97:478-499.
- [12] Panin SV, Byakov AV, Vlasov IV, Maruschak PO, Berto F, Vinogradov A (2019) Acoustic emission study on the effect of notch shape and temperature on elastic energy release during impact testing of 17Mn1Si pipe steel. *Eng. Fract. Mech.* 210:288–99.
- [13] Eremin AV, Byakov AV, Kalashnikova TA, Burkov MV, Panin SV (2019) Grain structure and impact toughness of Al-Li alloy joints formed by friction stir welding. *AIP Conf. Proc.* 2141(August).

- [31] Perera R, Bueso-Inchausti D (2010) A unified approach for the static and dynamic analyses of intermediate debonding in FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Comp. Struct.* 92(11):2728–37.
- [32] Mertins A (1999) Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications. *Most.* 327 p.
- by modified L-P wavelet packets. *J. Sound Vib.* 295(3–5):827–37.
- [29] Adams DE (2007) Health monitoring of structural materials and components: methods with applications. *Health Monit. Struct. Mat. Comp. Methods App.* 1–460 p.
- [30] Mallat SA (1999) *Wavelet tour of Signal processing.* 2nd edn. Academic Press. 637 p.