



Experimental Study of Natural Frequencies of Notched Homogeneous and Inhomogeneous Specimens Made of API X65 Steel in Low-Blow Drop Weight Test

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khosravi Khor H.¹ MSc,
Hashemi S.H.^{1*} PhD,
Raghebi M.¹ PhD

How to cite this article

Khosravi Khor H, Hashemi S H, Raghebi M. 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):2721-2731.

¹Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
Phone: +98 56-32202142
Fax: -
shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: August 26, 2020
Accepted: October 26, 2020
ePublished: December 20, 2020

ABSTRACT

The purpose of this paper is to experimentally investigate the natural frequencies of notched homogeneous and inhomogeneous specimen made from API X65 steel. The specimens cut from spiral welded pipe, tested on an equipped low blow drop weight tester with accelerometer. The tests were performed according to the API 5L standard. The homogeneous specimen was seamless and included only the base metal, while the inhomogeneous specimen included the weld seam and three zones of base metal, heat affected zone and weld. In the present study the specimens were subjected to hammer low blow in the middle without plastic deformation. The laboratory data (voltage-time) were transferred from time to frequency domain using Fourier transformation and the imposed oscillations were removed from the frequency signal by the Butterworth low pass filter. As the hammer drop height increased, the natural frequency in the specimens was almost constant. The natural frequency in the inhomogeneous specimen was less than the homogeneous specimen. Having information about the natural frequency, it is possible to prevent the destructive phenomenon of resonance in the main test (complete fracture of the specimen). Also, using the results of equipped low blow drop weight test and knowing the natural frequency, the dynamic stress intensity factor of the test specimen can be determined.

Keywords Low Blow Drop Weight Test; Natural Frequency; API X65 Steel; Low Pass Butterworth Filter

CITATION LINKS

[1] Correction factor for safe performance of API X65 pipeline steel [2] Characterisation of weldment hadness, impact energy and microstructure in API X65steel [3] Standard Test Method for Drop-Weight Tear Tests of Ferritic Steels [4] Experimental investigation of CTOA in linepipe steels [5] Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel [6] Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel [7] Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT specimens [8] Assessment of An Instrumented Charpy Impact Machine [9] Bending deflections and moments in a notched beam [10] Design and Manufacture of Drop Weight Tear Testing Machine Equipped with Accelerometer for Measurement of Fracture Energy in High-strength Gas Pipeline Steels [11] Experimental measurement and numerical evaluation of fracture energy in drop weight tear test specimen with chevron notch on API X65 steel [12] Investigation of Seam Weld and Steel Base Metal Fracture Energy of API X65 Pipe Using Three-Point Bending Experimental [13] Experimental and Numerical Evaluation of Momentum Variations Effect of Striker on Fracture Energy in Charpy [14] Experimental Study of Fracture Surface Thickness Variation of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen Made from API X65 Steel [15] Analysis of the dynamic responses for a pre-cracked three-point bend specimen [16] Simple Formula for Dynamic Stress Intensity Factor of Pre-Cracked Charpy Specimen [17] Natural Frequencies for Bending Vibrations of Timoshenko Cracked Beams [18] A First Course in Fourier Analysis [19] specifications for line pipe [20] Recommended Practice Conducting Drop-Weight Tear Test on Line Pipe [21] KISTLER K-Shear Accelerator Catalogue [22] Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test

بررسی تجربی فرکانس‌های طبیعی نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس از جنس فولاد ای‌پی‌آی ایکس شصت و پنج در آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت

حامد خسروی خور MSc

دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سید حجت هاشمی * Phd

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مهدی راغبی Phd

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

هدف این مقاله بررسی تجربی فرکانس‌های طبیعی نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس ماشین‌کاری شده از لوله واقعی با جوشکاری مارپیچ از جنس فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ (API X65) با استفاده از آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت مجهز به شتاب‌سنج است. آزمایش طبق استاندارد ای‌پی‌آی ال ۵ (API 5L) انجام شد. نمونه متجانس، بدون درز جوش و فقط شامل فلز پایه است در حالی که نمونه نامتجانس شامل درز جوش طولی بوده و در مقطع عرضی نمونه سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش وجود دارد. نمونه‌های مورد آزمایش در پژوهش حاضر تحت ضربه کم‌سرعت چکش، در بخش میانی آنها بدون تغییر شکل پلاستیک قرار گرفت. داده‌های آزمایشگاهی (ولتاژ-زمان) با استفاده از تبدیل فوری از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل و با فیلتر پایین‌گذر باتروث نوسان‌های اضافی از سیگنال فرکانسی حذف شد. با افزایش ارتفاع سقوط چکش، فرکانس طبیعی در نمونه‌ها تقریباً ثابت است. فرکانس طبیعی در نمونه نامتجانس کمتر از نمونه متجانس می‌باشد. با داشتن اطلاعات در مورد فرکانس طبیعی می‌توان از پدیده مخرب تشدید در آزمایش اصلی (شکست کامل نمونه) جلوگیری کرد. همچنین با استفاده از نتایج آزمایش تجهیز شده ضربه سقوطی کم‌سرعت و دانستن فرکانس طبیعی، می‌توان ضریب شدت تنش دینامیکی نمونه را تعیین نمود.

کلیدواژه‌ها: آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت، فرکانس طبیعی، فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵، فیلتر پایین‌گذر باتروث.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵

*نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

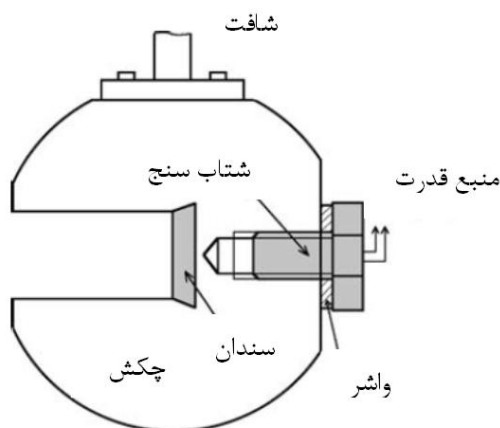
۱- مقدمه

با توجه به اهمیت گاز طبیعی در زندگی بشر، محققین بسیاری در سال‌های اخیر راه‌های انتقال اقتصادی و مطمئن آن را بررسی کرده‌اند. یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین روش‌های انتقال، استفاده از خطوط لوله فولادی می‌باشد. تحقیقات بسیاری روی خطوط لوله انتقال نفت و گاز جهت تعیین ویژگی‌های مختلف آنها انجام شده است. فولاد مورد استفاده در تولید این خطوط باید دارای استحکام و چقرمگی بالایی بوده و همچنین در مقابل رشد ترک و شکست مقاوم باشد. لوله‌های قطور و پر فشار انتقال گاز طبیعی در ایران عمدتاً از جنس فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ (API

X65) می‌باشد که به روش جوشکاری مارپیچ تولید می‌شود^[1]. در دهه‌های اخیر، مشخص شد که آزمایش ضربه سقوطی به شکل بهتری مقاومت شکست نرم را نسبت به آزمایش شاری نشان می‌دهد^[2,3]. در این شیوه از نمونه‌ای با ضخامت لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود که مسیر شکستی به طول کافی برای رسیدن به مقاومت پایدار شکست دارد و مقاومت شکست لوله در برابر بارهای دینامیکی را تعیین می‌کند. در بررسی چقرمگی شکست لوله‌های انتقال گاز پارامترهای مختلفی بررسی می‌شود. این پارامترها شامل دمای انتقال شکست نرم به ترد، زاویه بازشدگی دهانه ترک، فاصله باز شدگی دهانه ترک، ضریب شدت تنش، انتگرال جی، مقاومت شکست، انرژی و نیروی شکست می‌باشد که توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش‌ها از آزمایش شاری و ضربه سقوطی مجهز به کرنش‌سنج استفاده شده است^[4-7]. برای اولین بار اشتربیلخت و همکارانش در سال ۲۰۰۵ پاسخ دینامیکی شکست فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۸۰ (API X80) را در آزمایش ضربه شاری مجهز به شتاب‌سنج بررسی کردند^[8]. در این پژوهش آزمایش شاری کم‌سرعت، علاوه بر آزمایش شاری با ظرفیت کامل انجام شد. شکل ۱ طرح شماتیک چکش مجهز به شتاب‌سنج را در این آزمایش نشان می‌دهد.

شکل ۲ چگالی طیف توان سیگنال شتاب را برای آزمایش شاری و همچنین آزمایش‌های کم‌سرعت شاری با ۳ تا ۵ درصد ظرفیت دستگاه نشان می‌دهد. تمام سیگنال‌های کم‌سرعت مقدار زیادی انرژی در فرکانس صفر دارند و همچنین دارای مقدار بیشینه در حدود فرکانس ۱۵ کیلوهرتز است. مقدار فرکانس بیشینه برای آزمایش‌های کم‌سرعت حدود ۲-۳ کیلوهرتز بیشتر از مقدار تحلیلی فرکانس طبیعی اول نمونه شاری (۱۳ کیلوهرتز) می‌باشد^[9]. همچنین مقدار عددی فرکانس طبیعی نمونه شاری با استفاده از روش اجزاء محدود حدود ۲۰ کیلوهرتز به دست آمد^[8].

این پژوهش نشان می‌دهد که سیگنال‌های شتاب‌سنج و کرنش‌سنج نه تنها در آزمایش شاری بلکه در آزمایش‌های



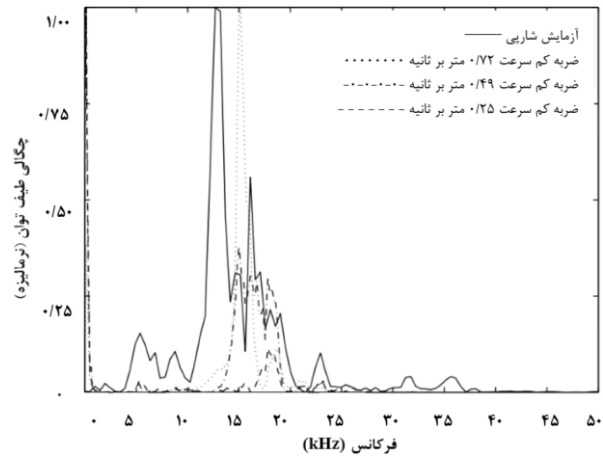
شکل ۱) طرح شماتیک نصب شتاب‌سنج روی چکش در آزمایش شاری^[8]

زیاد بوده و از این فولاد می‌توان در خطوط انتقال نفت و گاز که در آن چقرمگی شکست ماده اهمیت زیادی دارد استفاده نمود. در تحقیق مشابه هاشمی و همکارش انرژی شکست نمونه حاوی درز جوش عمودی را به کمک آزمایش خمش سه نقطه‌ای به دست آورده‌اند. در این پژوهش چکش آزمایش مجهز به کرنش‌سنج است [12]. همچنین محیط‌زاده و هاشمی در آزمایش ضربه شارپی با چکش مجهز به کرنش‌سنج، تاثیر تغییرات تکانه بر انرژی شکست نمونه فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ را مورد بررسی قرار داده‌اند [13].

اگر یک سیستم، پس از آشفتگی اولیه بدون دخالت نیروهای خارجی به نوسان درآید، فرکانس حرکت آن، فرکانس طبیعی است. اعمال نیرو با فرکانسی برابر یا خیلی نزدیک به فرکانس طبیعی باعث افزایش دامنه ارتعاشات نسبت به حالت‌های بالاتر و پایین تر از فرکانس طبیعی می‌شود که این پدیده اثر تشدید فرکانس طبیعی است. چنانچه فرکانس ضربه به نمونه با فرکانس طبیعی آن برابر شود باعث ایجاد تنش چند برابری در آن می‌شود که نتیجه آن مخرب است. در نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه سقوطی مجهز به کرنش‌سنج تاثیر عوامل ناخواسته مانند اثر تشدید فرکانس طبیعی نمونه، فیلتر نشده است. با بررسی منابع موجود مشخص گردید که هیچ گونه تحلیل فرکانسی بر روی نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی لوله‌های انتقال گاز انجام نشده است. از طرفی آزمایش ضربه شارپی مجهز به شتاب‌سنج انجام شده است [8]، اما به دلیل کوچک بودن ابعاد نمونه، نتایج به واقعیت نزدیک نمی‌باشد. در این پژوهش برای اولین بار آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت مجهز به شتاب‌سنج الکتریکی به منظور بررسی فرکانس طبیعی نمونه‌های ماشین‌کاری شده از لوله انتقال گاز طبیعی با جوشکاری ماریپیج از جنس فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ انجام شده است. داشتن اطلاعات مفید در مورد فرکانس طبیعی در تعیین ضریب شدت تنش دینامیکی نمونه شیاردار، همانطور که در بخش ۲ اشاره می‌شود، موثر می‌باشد. همچنین دیگر نوآوری این پژوهش تحلیل فرکانسی نمونه نامتجانس (با درز جوش افقی) می‌باشد که هم‌زمان سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش در مقطع نمونه وجود دارد. به دلیل تفاوت خواص مکانیکی و ریزساختار نمونه نامتجانس [14]، نتایج حاصل از آن با نمونه متجانس متفاوت می‌باشد.

۲- مدل خمش سه نقطه‌ای نمونه شیاردار در آزمایش ضربه سقوطی

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، جایجایی وسط نمونه شیاردار بین دو تکیه‌گاه ساده در خمش سه نقطه‌ای تحت بار دینامیکی با استفاده از مدل جرم و فنر تحلیل شده است [15].



شکل ۲) چگالی طیف توان سیگنال شتاب در آزمایش شارپی و آزمایش‌های کم‌سرعت شارپی با ۳ تا ۵ درصد ظرفیت دستگاه [8]

کم‌سرعت شارپی نیز مطابقت ندارد. همچنین مشاهده شد که فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی اول نمونه شارپی، تاثیر زیادی در موج شتاب دارد. سیگنال‌های کرنش‌سنج در آزمایش شارپی و آزمایش‌های کم‌سرعت شارپی بطور موثر بدون نوسان است. در مورد آزمایش شارپی این به دلیل تغییر شکل پلاستیک نمونه می‌باشد. اما در مورد آزمایش‌های کم‌سرعت شارپی، اتلاف انرژی دیگری باید در کار باشد.

هاشمی در سال ۲۰۱۱ برای اولین بار داده‌های اولیه آزمایشگاهی حاصل از آزمایش ضربه سقوطی تجهیز شده روی فولادهای ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ و ای‌پی‌آی ایکس ۷۰ (API X70) را گزارش کرد [10]. انجام این آزمایش با دستگاه ضربه سقوطی تجهیز شده با مدار نیروسنج (طراحی و ساخته شده در گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته دانشگاه بیرجند) انجام گردید. مطابق اطلاع نویسندگان تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده از شتاب‌سنج برای تحلیل ضربه فولادهای ای‌پی‌آی (API) در آزمایش ضربه سقوطی تجهیز شده ارائه نشده است.

فتحی و هاشمی [11] در سال ۲۰۱۹ به بررسی انرژی شکست نمونه فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ با شیار ماشین‌کاری شده در آزمایش ضربه سقوطی مجهز به کرنش‌سنج پرداختند. در این پژوهش اندازه‌گیری تجربی و برآورد عددی انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار ماشین‌کاری شده در فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ انجام شد. مقدار انرژی شکست حاصل از آزمایش تجربی و مدلسازی کامپیوتری به ترتیب ۷۰۸۵ و ۶۸۰۰ ژول است. این اختلاف حدود ۴ درصد است که با توجه به فرضیات انجام شده در مدل سازی کامپیوتری و نوع تحلیل، که دینامیکی است اختلاف قابل قبولی است. از این انرژی حدود ۵۹ درصد صرف رشد ترک و مابقی صرف شروع ترک و تغییر شکل پلاستیک نمونه در محل سندان‌ها و چکش می‌شود. هر چه میزان انرژی لازم برای رشد ترک بیشتر باشد، می‌توان نتیجه گرفت مقاومت ماده در برابر رشد ترک

$$K_I(t) = \frac{3S\sqrt{a}}{2BW^2} Y\left(\frac{a}{W}\right) \cdot \omega_1 \int_0^t P(\tau) \sin\omega_1(t - \tau) d\tau \quad (7)$$

در این رابطه $Y(a/W)$ تابع کالیبراسیون می‌باشد. بنابراین رابطه (۷) یک راه آسان برای تعیین ضریب شدت تنش دینامیکی نمونه شیاردار در خمش سه نقطه‌ای با داشتن اطلاعات در مورد فرکانس طبیعی و بارگذاری دینامیکی نمونه معرفی می‌کند.

۳- تعیین تحلیلی فرکانس طبیعی نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی
فرکانس طبیعی نمونه متجانس بدون شیار در آزمایش ضربه سقوطی روی دو تکیه‌گاه ساده از رابطه زیر به دست می‌آید [16]:

$$f = (\pi/S)^2 \sqrt{EI/\rho A} \quad (8)$$

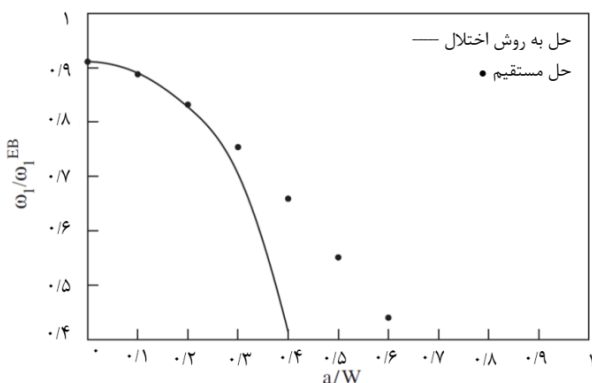
در این رابطه f فرکانس طبیعی، S فاصله بین دو تکیه‌گاه، A سطح مقطع، E مدول یانگ، I ممان اینرسی مقطع و ρ چگالی نمونه است. بنابراین فرکانس طبیعی تابعی از مشخصات هندسی، چگالی و مدول الاستیک ماده می‌باشد. مقادیر مربوط به این کمیت‌ها با توجه به استاندارد API 5L در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱) مقدار پارامترهای رابطه (۸) از استاندارد ای‌پی‌آی ۵ ال

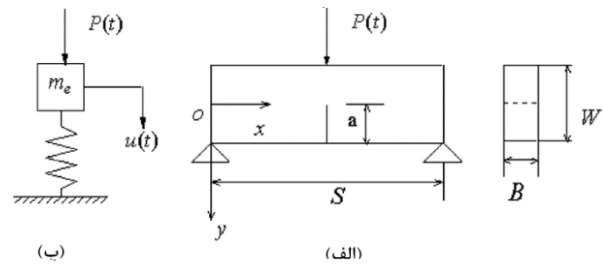
S	E(GPa)	$\rho(kg/m^3)$	A(m ²)	I(m ⁴)
۰/۲۵۴	۲۱۰	۷۸۷۰	۱/۰۹×۳-۱۰	۵/۲۷×۷-۱۰

مقدار فرکانس طبیعی نمونه متجانس بدون شیار با استفاده از مقادیر جدول ۱، ۲/۷۰ کیلوهرتز برای فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ به دست می‌آید. رابطه بین فرکانس طبیعی نمونه متجانس بدون شیار و شیاردار در شکل ۴ نشان داده شده است [17].

محور عمودی در شکل ۴ نسبت فرکانس طبیعی نمونه متجانس شیاردار به نمونه بدون شیار را نشان می‌دهد. این نسبت فرکانس به دو روش حل مستقیم (Direct Solution) و حل به روش اختلال (Perturbation Solution) به دست آمده است. در حل مستقیم، فرکانس‌های طبیعی با تعیین ریشه‌های معادله دیفرانسیل تیر تیموشنکو ترک‌دار با اعمال شرایط مرزی تیر حاصل می‌شود. روش اختلال شامل روش‌های ریاضی است که برای یافتن پاسخ تقریبی



شکل ۴) تغییرات نسبت فرکانس طبیعی نمونه متجانس شیاردار به نمونه بدون شیار بر حسب نسبت عمق شیار به ارتفاع نمونه [17]



شکل ۳) الف) هندسه نمونه شیاردار در خمش سه نقطه‌ای تحت بارگذاری دینامیکی، ب) معادل جرم و فنر نمونه [15]

در شکل (۳-الف)، x و y نشان‌دهنده محورهای مختصات، S فاصله بین دو تکیه‌گاه، B ضخامت نمونه، W پهنای نمونه، a عمق شیار و $P(t)$ بار دینامیکی وارد به نمونه در زمان t است. در شکل (۳-ب)، نمونه با جرم m_e که تحت جابجایی u_t قرار دارد جایگزین شده است. اگر سفتی نمونه شیاردار $K(a)$ (تابعی از عمق شیار) باشد، معادله حرکت برای سیستم نامیرا به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$m_e \ddot{u}(t) + K(a)u(t) = P(t) \quad (1)$$

شرایط اولیه برای معادله (۱) به شکل زیر است:

$$u_{t=0} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{u}_{t=0} = 0$$

حل معادله (۱) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$u(t) = \frac{1}{\omega_1} \int_0^t P(\tau) \sin\omega_1(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

که ω_1 فرکانس طبیعی نمونه است و در بخش بعد محاسبه شده است. ضریب شدت تنش دینامیکی برای نمونه شیاردار، $K_I(t)$ ، را می‌توان بدین شکل نوشت:

$$K_I(t) = \lim_{r \rightarrow 0} [\sqrt{2\pi r} \sigma_{22}(r, \theta = 0, t)] \quad (4)$$

که σ_{22} تنش عمود بر جهت رشد ترک و r و θ مختصات قطبی در صفحه عمود بر لبه ترک می‌باشد. برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای، کمتر از یک درصد از انرژی در مد دوم قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان از تاثیر شکل مدهای بالاتر در تحلیل جواب دینامیکی چشم‌پوشی کرد. در شرایط اولین مد ارتعاشی، ضریب شدت تنش نمونه شیاردار متناسب با ممان خمشی در وسط دو تکیه‌گاه است که این یعنی:

$$K_I(t) = Cu(t) \quad (5)$$

که C ثابت تناسب می‌باشد. بر اساس مکانیک شکست استاتیک، C را می‌توان بدین شکل نوشت:

$$C = \frac{3S\sqrt{a}}{2BW^2} Y\left(\frac{a}{W}\right) K(a) \quad (6)$$

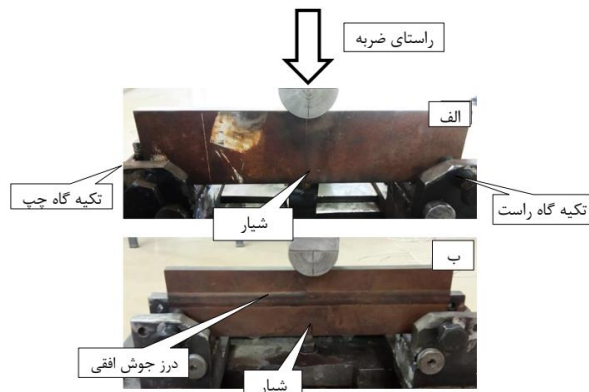
با این فرض که C برای حالت دینامیکی نیز صحیح باشد و جایگزین کردن معادلات (۳) و (۶) در معادله (۵)، ضریب شدت تنش دینامیکی بدین شکل نوشته می‌شود:

دو نمونه آزمایشگاهی متجانس و نامتجانس طبق استاندارد ای‌پی‌آی ۵۱ دارای طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۳۰۵، ۷۶/۲ و ۱۴/۳ میلی‌متر است [19,20]. نمونه متجانس از راستای محیطی لوله جدا شده و مقطع آن شامل فلز پایه است و ۲۶۲۵ گرم جرم دارد. نمونه نامتجانس از راستای درز جوش جدا شده و مقطع آن شامل فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت (Heat Affected Zone) و ناحیه جوش می‌باشد که به این ترتیب تاثیر ناحیه جوش بر فرکانس طبیعی نمونه بررسی می‌شود. عرض ناحیه جوش ۲۰ میلی‌متر و بیشترین ارتفاع کلاهدک جوش (Weld Cap) ۷/۱ میلی‌متر است که جرم آن ۱۷۴ گرم از نمونه متجانس سنگین‌تر و برابر با ۲۷۹۹ گرم می‌باشد.

پس از جدا کردن نمونه از لوله انتقال گاز طبیعی، به کمک پرس، انحنای آن گرفته شده و به وسیله دستگاه برش با آب تا ابعاد استاندارد ماشین‌کاری شده است. برش در دستگاه برش با آب به دلیل آنکه سرد است، ریزساختار فولاد نمونه را تغییر نمی‌دهد. سپس با استفاده از دستگاه برش با سیم، شیار ماشین‌کاری شده از نوع شورون به عمق ۵/۱ میلی‌متر در وسط نمونه ایجاد می‌شود. بر اساس استاندارد به دلیل اینکه نسبت قطر به ضخامت بیشتر از ۴۰ می‌باشد، پرس انحنای نمونه تأثیری در نتایج ندارد. شکل ۵ نمونه‌های آزمایشگاهی متجانس و نامتجانس را که در گیره دستگاه نصب شده‌اند، نمایش می‌دهد.

۲-۵- مراحل انجام آزمایش

آزمایش ضربه سقوطی در این پژوهش بصورت کم‌سرعت انجام شده است. در آزمایش کم‌سرعت، چکش و متعلقات آن با وزن حدود ۲۶/۵ کیلوگرم از ارتفاع‌های ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر (با افزایش ارتفاع سقوط ۱ سانتی‌متر در هر آزمایش) بر روی نمونه، رها شده است. در شکل ۶، دستگاه آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه ضربه دانشگاه بیرجند را نشان می‌دهد. این دستگاه شامل چکش مجهز به شتاب‌سنج، تقویت‌کننده سیگنال، اسیلوسکوپ و رایانه است. در این دستگاه ولتاژ آزاد شده توسط شتاب‌سنج بر حسب زمان در رایانه ذخیره می‌شود.



شکل ۵ نمونه‌های آزمایشگاهی ضربه سقوطی نصب شده در گیره دستگاه (الف) نمونه شیاردار متجانس (ب) نمونه شیاردار نامتجانس حاوی درز جوش که بصورت افقی قرار گرفته است.

برای مسئله‌ای که پاسخ دقیق آن قابل دسترس نیست، به کار می‌رود. یافتن این جواب تقریبی با یک پاسخ دقیق در یک مسئله مرتبط آغاز می‌شود. نظریه اختلال را زمانی می‌توان به کار برد که بتوان مسئله را با افزودن یک عبارت کوچک به توصیف ریاضی مسئله‌ای که قابل حل دقیق است، فرمول‌بندی نمود.

محور افقی در شکل ۴ نیز نسبت عمق شیار (a) به ارتفاع نمونه (w) را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود دو حل برای نسبت‌های زیاد a/w اختلاف قابل توجهی نشان می‌دهد. در نمونه مورد استفاده در پژوهش حاضر این نسبت بسیار کم (برابر ۰/۰۶) و نسبت فرکانس طبیعی نمونه شیاردار به نمونه بدون شیار برابر ۰/۹۰ می‌باشد. از ضرب این عدد در فرکانس طبیعی نمونه بدون شیار (۲/۷۰ کیلوهرتز)، مقدار فرکانس طبیعی نمونه شیاردار ۲/۴۳ کیلوهرتز به دست می‌آید.

۴- تبدیل فوریه

برای توصیف توابع متناوب می‌توان از سری فوریه استفاده کرد، اما ارتعاشات تصادفی معمولاً متناوب نمی‌باشد و برای تعیین طیف فرکانس پیوسته آن باید از انتگرال فوریه استفاده نمود. انتگرال فوریه در واقع حالت حدی سری فوریه است، وقتی که دوره تناوب به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. علی‌رغم جمع‌زنی طیف گسسته سینوسی در سری فوریه، انتگرال فوریه را می‌توان به عنوان جمع‌زنی طیف پیوسته سینوسی در نظر گرفت. تبدیل فوریه تابع $x(t)$ که در حوزه زمان تعریف شده است بصورت $X(f)$ نمایش داده می‌شود که تابعی از فرکانس می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید [18]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (9)$$

$X(f)$ یک کمیت مختلط است که از $-\infty$ تا $+\infty$ یک تابع پیوسته است. تبدیل فوریه تابع $x(t)$ را به مؤلفه‌های هارمونیک $X(f)$ تجزیه می‌کند. در این پژوهش موج شتاب در حوزه زمان با تبدیل فوریه و با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب به حوزه فرکانس منتقل می‌شود.

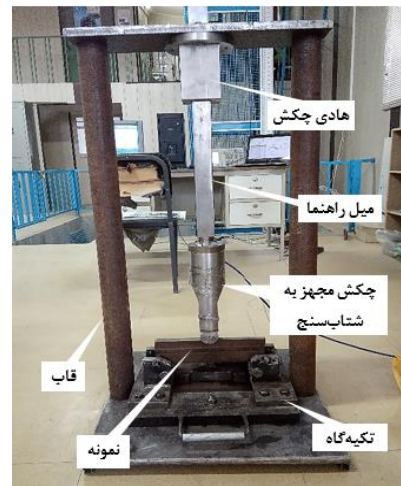
۵- مراحل پژوهش و انجام آزمایش

۱-۱- مشخصات و آماده‌سازی نمونه

لوله استفاده شده در این آزمایش با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر از جنس فولاد ای‌پی‌آی ایکس ۶۵ به روش جوشکاری ماریپج تولید می‌شود. به منظور دستیابی به استحکام و چقرمگی بالا در تولید ورق مورد استفاده، از فرآیند خنک‌کاری سریع و نورد کنترل شده ترمومکانیکال (Termo Mechanical Controlled Rolling (TMCR) استفاده می‌شود [2]. استحکام تسلیم و استحکام کششی این فولاد در جهت محیطی لوله به ترتیب ۴۹۰ و ۵۵۲ مگاپاسکال و سختی آن ۲۱۱ ویکرز است [2]. هر



شکل ۸) نحوه نصب شتابسنج روی چکش با استفاده از قطعه واسطه

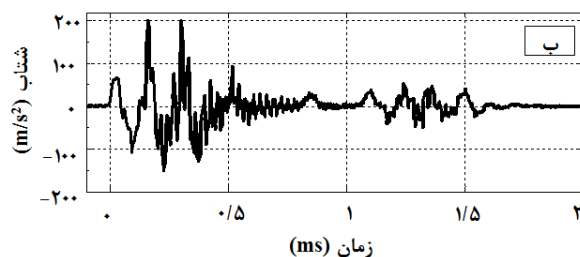
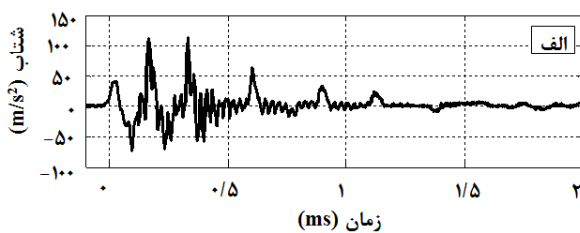


شکل ۶) دستگاه آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت

۶- تحلیل نتایج آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت

داده‌های حاصل از آزمایش بصورت دو پارامتر ولتاژ-زمان ذخیره شده است. با در نظر گرفتن پارامتر حساسیت شتابسنج [21]، مقدار شتاب بر حسب زمان به دست آمده است. شکل ۹ و ۱۰ سیگنال شتاب-زمان را برای دو ارتفاع سقوط ۴ و ۱۰ سانتی‌متر از این آزمایش به ترتیب برای نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود سیگنال شتاب، ماهیت بسیار نوسانی دارد و با افزایش ارتفاع سقوط چکش، این نوسان‌ها دامنه بیشتری پیدا می‌کند. در ارتفاع بالاتر، زمان بیشتری طول می‌کشد که سیگنال میرا شود. این نوسان‌ها را می‌توان به اصطکاک و برهم‌کنش پیچیده اجزاء دستگاه نسبت داد. بلافاصله پس از شروع ضربه، چکش دارای شتاب مثبت است که در ادامه به صورت متناوب مثبت و منفی می‌شود. افزایش شتاب می‌تواند به دلیل ارتعاش عرضی نمونه و ارتعاش طولی چکش با فرکانسی منطبق بر فرکانس طبیعی این اجزاء و وقوع تشدید در موج شتاب باشد.



شکل ۹) مقایسه سیگنال شتاب نمونه آزمایشگاهی شیاردار متجانس در آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت با ارتفاع سقوط چکش (الف) ۴ سانتی‌متر (ب) ۱۰ سانتی‌متر

شتابسنج از نوع کیستلر 8742A5 با دامنه شتاب $5000 \pm$ گرم و حساسیت یک میلی‌ولت بر گرم (۷ ولتاژ شتابسنج بر حسب میلی‌ولت و g شتاب جاذبه بر حسب متر بر مجذور ثانیه) می‌باشد. این شتابسنج نسبت به ارتعاشات عرضی حساسیت کمتری (حداکثر ۵ درصد) داشته و آستانه شروع تحریک نسبت به شتاب-های نمونه بسیار پایین (۱۳ صدم گرم) است. همچنین بدنه آن از جنس کوارتز بوده که ضریب حساسیت حرارتی کمی (منهای ۶ صدم درصد بر گرم) داشته و بازه دمایی عملکرد آن ۵۰- تا ۱۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد [21]. شکل ۷ شتابسنج و شکل ۸ محل نصب آن بر روی چکش را نشان می‌دهد.

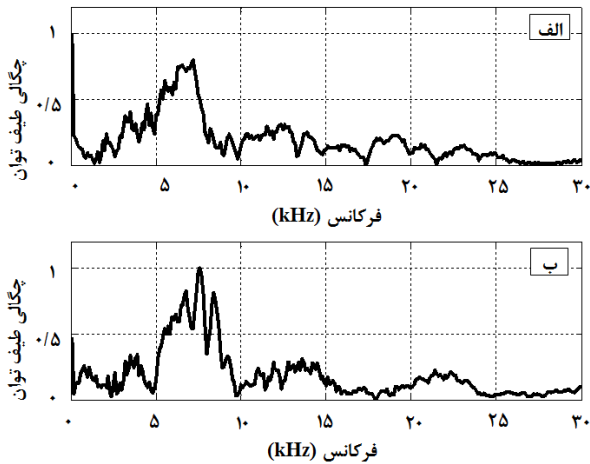
مطابق شکل ۸، شتابسنج در قطعه واسطه بین قسمت انحنا دار سر چکش و بدنه اصلی پیچ شده است. این سه قسمت با دو پیچ پراستحکام به هم متصل شده است. علت این کار جلوگیری از ضربه خوردن احتمالی شتابسنج حین ضربه می‌باشد.

۶- تحلیل نتایج آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت

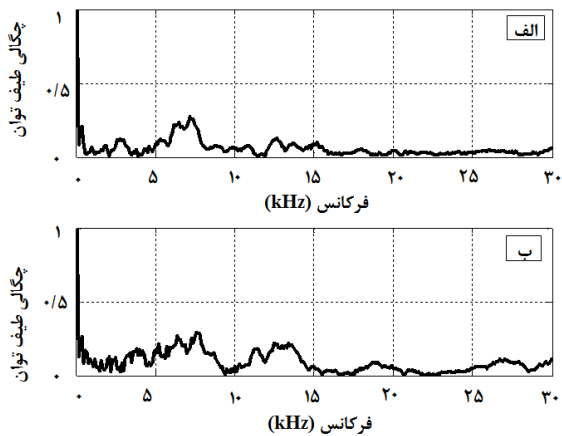
داده‌های حاصل از آزمایش بصورت دو پارامتر ولتاژ-زمان ذخیره شده است. با در نظر گرفتن پارامتر حساسیت شتابسنج [21]، مقدار شتاب بر حسب زمان به دست آمده است. شکل ۹ و ۱۰ سیگنال شتاب-زمان را برای دو ارتفاع سقوط ۴ و ۱۰ سانتی‌متر از این آزمایش به ترتیب برای نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس نشان می‌دهد.



شکل ۷) شتابسنج کیستلر نصب شده روی چکش دستگاه



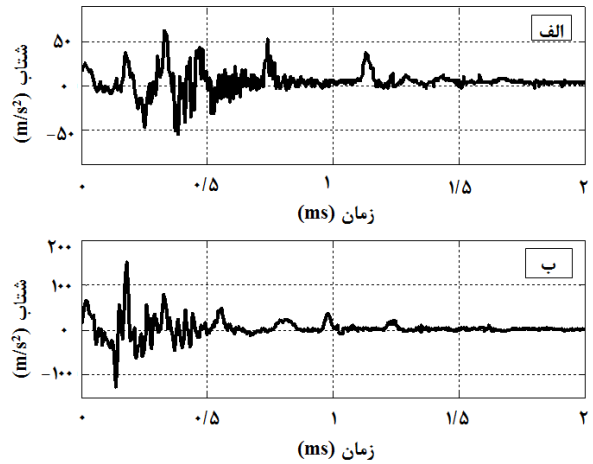
شکل ۱۱) مقایسه نمودار چگالی طیف توان در حوزه فرکانس نمونه آزمایشگاهی متجانس در آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت با ارتفاع سقوط چکش (الف) ۴ سانتی‌متر (ب) ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۱۲) مقایسه نمودار چگالی طیف توان در حوزه فرکانس نمونه آزمایشگاهی نامتجانس در آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت با ارتفاع سقوط چکش (الف) ۴ سانتی‌متر (ب) ۱۰ سانتی‌متر

بیشینه چگالی طیف توان در فرکانس $7/2$ کیلوهرتز دیده می‌شود (شکل ۱۱ و ۱۲).

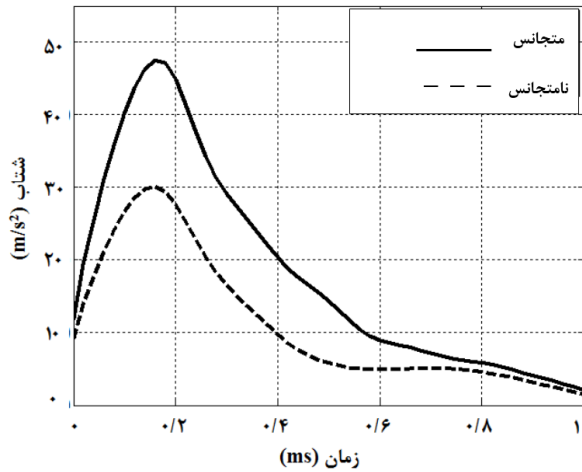
در شکل ۱۳، بزرگ‌نمایی فرکانس‌های نقاط اوج شکل‌های (۱۱) - الف و (۱۲) - الف، در بازه فرکانسی ۰ تا ۸ کیلوهرتز نشان داده شده است. پنج فرکانس اول پراورزی موج شتاب در حوزه فرکانس، برای نمونه متجانس به ترتیب $2/1$ ، $3/5$ ، $4/5$ ، $5/5$ و $7/2$ کیلوهرتز می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۳) - الف مشاهده می‌شود چگالی طیف توان در نمونه متجانس با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. فرکانس طبیعی اول در چگالی طیف توان ($2/1$ کیلوهرتز) به فرکانس طبیعی به‌دست آمده به روش تحلیلی ($2/43$ کیلوهرتز) نزدیک است. در این نمودار بیشترین انرژی مربوط به فرکانس $7/2$ کیلوهرتز می‌باشد. با توجه به شکل (۱۳) - ب در نمونه نامتجانس مقدار فرکانس‌های طبیعی و همچنین چگالی طیف توان نسبت به نمونه متجانس کمتر می‌باشد. همچنین در بازه فرکانسی $3/5$ - $4/8$ کیلوهرتز چگالی طیف توان نزدیک به صفر می‌شود که می‌تواند به دلیل وجود درز جوش در مقطع نمونه باشد. پس از این



شکل ۱۰) مقایسه سیگنال شتاب نمونه آزمایشگاهی شیاردار نامتجانس در آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت با ارتفاع سقوط چکش (الف) ۴ سانتی‌متر (ب) ۱۰ سانتی‌متر

بیشترین مقدار شتاب در نمونه متجانس از ارتفاع سقوط ۴ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۱۱۲ و ۲۰۰ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد و به ترتیب پس از زمان $1/2$ و $1/6$ میلی‌ثانیه چکش از نمونه جدا شده و نمودار شتاب-زمان میرا می‌شود. همچنین بیشترین مقدار شتاب در نمونه نامتجانس از ارتفاع سقوط ۴ و ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۶۳ و ۱۵۱ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد و به ترتیب پس از زمان $1/2$ و $1/3$ میلی‌ثانیه چکش از نمونه جدا شده و نمودار شتاب-زمان میرا می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود زمان میرایی و بیشینه شتاب در نمونه نامتجانس از نمونه متجانس کمتر است که می‌تواند به دلیل پایین‌تر بودن چقرمگی شکست نمونه نامتجانس نسبت به نمونه متجانس باشد [22]. پس‌ضربه بعدی باعث تغییر با دامنه نوسانی کمتر در شتاب می‌شود. نوسان موج شتاب پس از سقوط چکش و پس از چند نوسان کم‌دامنه با فرکانس بالا میرا می‌شود.

برای استخراج اطلاعات مفید از سیگنال خام شتاب باید عملیات تحلیلی بیشتری روی آن انجام پذیرد. نمودار چگالی طیف توان (Power Spectral Density) در حوزه فرکانس، از تبدیل فوریه داده‌های شتاب در حوزه زمان به‌دست می‌آید. شکل ۱۱ و ۱۲ نمودار بی‌بعد شده چگالی طیف توان را برای دو ارتفاع سقوط ۴ و ۱۰ سانتی‌متر از این آزمایش به ترتیب برای نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس نشان می‌دهد. به منظور بی‌بعد کردن داده‌ها در محور عمودی، مقدار آنها بر حداکثر مقدار چگالی طیف توان تقسیم شده است. در هر دو نمونه شیاردار متجانس و نامتجانس این سیگنال‌ها مقدار قابل توجهی انرژی در فرکانس صفر داشته و بیشینه آن در فرکانس $7/2$ کیلوهرتز اتفاق می‌افتد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع در ضربه سقوطی کم‌سرعت در ناحیه الاستیک ماده باعث تغییر در فرکانس نقطه اوج نمی‌شود. در هر دو نمونه و در هر دو ارتفاع سقوط چکش مقدار



شکل ۱۵) مقایسه نمودار شتاب-زمان هموار برای سقوط چکش از ارتفاع ۴ سانتی‌متر روی نمونه‌های آزمایشگاهی شیاردار متجانس و نامتجانس

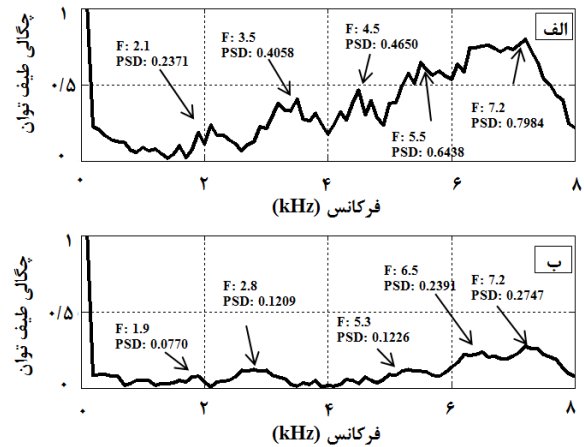
پایین گذر از نوع باترورث (Butterworth) حذف شده است. این فیلتر عبور فرکانس‌های کم‌انرژی را ممکن می‌سازد. پارامترهای اصلی این فیلتر شامل درجه فیلتر، فرکانس جمع‌آوری داده‌ها و فرکانس قطع می‌باشد. افزایش درجه فیلتر باعث هموار شدن بیشتر منحنی، حذف نوسان‌های ناخواسته و کاهش شتاب حداکثر زمان می‌شود. فرکانس جمع‌آوری داده‌ها ثابت بوده و جزء تنظیمات اولیه اسپیلوسکوپ است. فرکانس قطع، برابر اولین فرکانس پرنانژی در چگالی طیف توان است که از شکل (الف-۱۳) مقدار ۲/۱۰ کیلوهرتز برای نمونه نامتجانس و از شکل (ب-۱۳) مقدار ۱/۹۰ کیلوهرتز برای نمونه نامتجانس انتخاب می‌شود. بر این اساس فیلتر انتخاب شده اجازه عبور موج با دامنه سه دسی‌بل (نصف توان پهنای باند) را امکان‌پذیر می‌سازد.

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در لحظه صفر چکش به ترتیب با شتاب ۱۲ و ۱۰ متر بر مجذور ثانیه (حدود شتاب سقوط آزاد چکش) به نمونه شیاردار متجانس و نامتجانس برخورد می‌کند. پس از برخورد تا ۰/۱۶ میلی‌ثانیه، شتاب در جهت مخالف به ترتیب تا ۴۷ و ۳۰ متر بر مجذور ثانیه برای نمونه شیاردار متجانس و نامتجانس افزایش می‌یابد تا چکش در انتهای مسیر خود بصورت لحظه‌ای متوقف شود. پس از آن شتاب تا توقف کامل چکش کاهش می‌یابد.

با استفاده از قانون دوم نیوتن می‌توان نشان داد که نیروی چکش از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F(t) = m[g - a(t)] \quad (10)$$

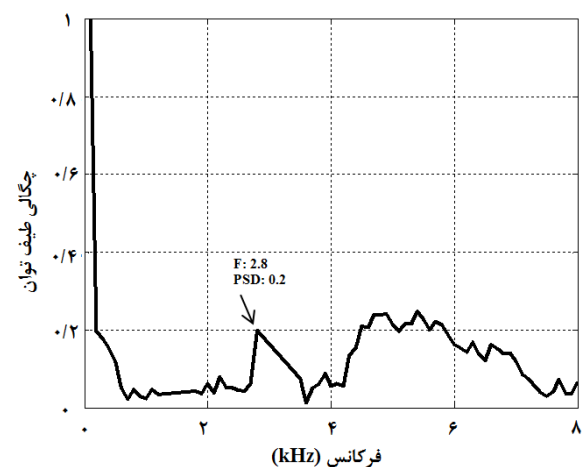
در این رابطه m جرم چکش (۲۶/۵ کیلوگرم)، g شتاب گرانش زمین و $a(t)$ شتاب وابسته به زمان است. با توجه به این رابطه نمودار تغییرات نیرو-زمان در هر دو نمونه شیاردار متجانس و نامتجانس از ارتفاع سقوط ۴ سانتی‌متری چکش در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل حداکثر نیروی ضربه برای نمونه شیاردار



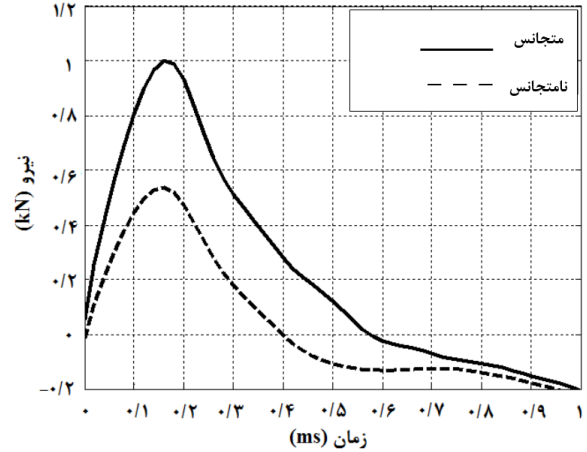
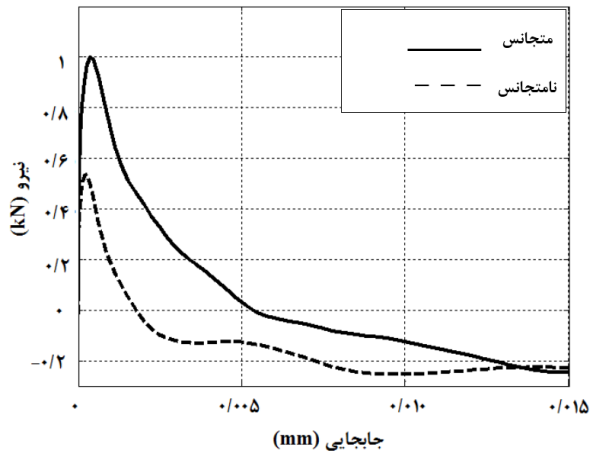
شکل ۱۳) (الف) بزرگ‌نمایی شکل (الف-۱۱) و (ب) بزرگ‌نمایی شکل (الف-۱۲) در بازه فرکانسی ۸ کیلوهرتز و نقاط اوج منحنی

فرکانس و گذر از ناحیه جوش، دوباره نقاط اوج منحنی بصورت پله‌ای در فرکانس‌های ۶/۵، ۷/۲ و ۷/۲ کیلوهرتز افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ نمودار بی‌بعد شده چگالی طیف توان را برای ارتفاع سقوط ۴ سانتی‌متر از این آزمایش برای نمونه بدون شیار متجانس نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود فرکانس طبیعی اول نمونه در اولین قله نمودار مقدار ۲/۸۰ کیلوهرتز است که به مقدار تحلیلی به دست آمده در بخش ۳ (۲/۷۰ کیلوهرتز) برای همین نمونه تقریباً برابری می‌کند. همچنین فرکانس طبیعی برای نمونه نامتجانس شیاردار از شکل (الف-۱۳) مقدار ۲/۱۰ کیلوهرتز به دست آمده است. میزان کاهش فرکانس طبیعی در نمونه شیاردار در مقایسه با نمونه بدون شیار را می‌توان به کاهش سفتی نمونه با وجود شیار نسبت داد.

شکل ۱۵، منحنی شتاب-زمان را بصورت هموار بعد از فیلتر کردن داده‌ها در حوزه فرکانس و برگشت به حوزه زمان برای دو نمونه آزمایشگاهی شیاردار متجانس و نامتجانس نشان می‌دهد. در این شکل، نوسان‌های ناخواسته موج شتاب با استفاده از دستور فیلتر



شکل ۱۴) نمودار چگالی طیف توان در حوزه فرکانس نمونه آزمایشگاهی بدون شیار متجانس در آزمایش ضربه سقوطی کم‌سرعت با ارتفاع سقوط چکش ۴ سانتی‌متر



شکل ۱۷) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی هموار برای سقوط چکش از ارتفاع ۴ سانتی‌متر روی نمونه‌های آزمایشگاهی شیاردار متجانس و نامتجانس

شکل ۱۶) مقایسه نمودار نیرو-زمان هموار برای سقوط چکش از ارتفاع ۴ سانتی‌متر روی نمونه‌های آزمایشگاهی شیاردار متجانس و نامتجانس

چکش می‌باشد. با مقایسه میزان انرژی جذب شده در هر دو نمونه می‌توان به این نتیجه رسید که نمونه متجانس انرژی شکست بالاتری نسبت به نمونه نامتجانس دارد.

متجانس و نامتجانس به ترتیب برابر ۱ و ۰/۵۵ کیلو نیوتن می‌باشد که در زمان ۰/۱۶ میلی‌ثانیه اتفاق افتاده است. پس از جدایش چکش از نمونه مقدار نیرو با زمان کاهش می‌یابد.

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس را برای ارتفاع‌های سقوط ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر چکش نشان می‌دهد. مقدار متوسط فرکانس طبیعی نمونه متجانس بیشتر از مقدار نمونه نامتجانس است. همچنین مقدار متوسط فرکانس طبیعی اول نمونه متجانس ۱۴/۴۰ درصد از مقدار حاصل از روش تحلیلی کمتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود انرژی جذب شده در نمونه متجانس بیشتر از انرژی جذب شده در نمونه نامتجانس می‌باشد. بطور کلی در هر دو نمونه مقدار انرژی جذب شده در مقایسه با انرژی کل برخورد بسیار کم است. به دلیل انرژی بسیار پایین جذب شده در هر دو نمونه، تغییر شکل پلاستیک در ناحیه نوک ترک ایجاد نمی‌شود.

با دو بار انتگرال‌گیری از شتاب، مقادیر جابجایی به دست می‌آید. با حذف زمان از نمودارهای جابجایی-زمان و نیرو-زمان، نمودار نیرو-جابجایی حاصل می‌شود. این نمودار برای نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس در شکل ۱۷ نشان داده شده است. سطح زیر منحنی شکل ۱۷ میزان انرژی جذب شده در نمونه را مشخص می‌کند.

این مقدار به ترتیب برابر با ۴۱/۸۲ میلی‌ژول برای نمونه متجانس و ۲۸/۱۸ میلی‌ژول برای نمونه نامتجانس است که نسبت به انرژی کل برخورد برای ارتفاع سقوط ۴ سانتی‌متر که طبق رابطه زیر،

$$E = mgh \tag{11}$$

در این رابطه E انرژی کل برخورد، g شتاب جاذبه و h ارتفاع سقوط

جدول ۲) تغییرات فرکانس طبیعی اول، انرژی برخورد و انرژی جذب شده در نمونه آزمایشگاهی شیاردار متجانس و نامتجانس با افزایش ارتفاع سقوط چکش در آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت

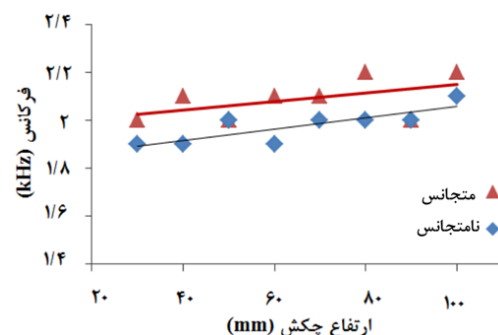
ارتفاع سقوط چکش (mm)	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	مقدار متوسط فرکانس به روش تجربی (kHz)	مقدار فرکانس به روش تحلیلی (kHz)	درصد خطا (%)
فرکانس طبیعی اول نمونه شیاردار متجانس (kHz)	۲/۱۰	۲/۱۰	۲/۱۰	۲/۱۰	۲/۱۰	۲/۲۰	۲/۲۰	۲/۲۰	۲/۰۸	۲/۴۳	-۱۴/۴۰
فرکانس طبیعی اول نمونه شیاردار نامتجانس (kHz)	۱/۹۰	۱/۹۰	۲/۰۰	۱/۹۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۱۰	۱/۹۷	--	--
انرژی برخورد (J)	۷/۱۸۰	۱۰/۳۹	۱۳/۰۰	۱۵/۵۹	۱۸/۱۹	۲۰/۷۹	۲۳/۳۹	۲۶/۰۰	--	--	--
انرژی جذب شده در نمونه شیاردار متجانس (mJ)	۱۶/۹۵	۴۱/۸۲	۴۴/۳۵	۴۴/۹۷	۴۷/۶۲	۵۲/۳۴	۵۵/۶۱	۶۱/۸۳	--	--	--
درصد انرژی جذب شده به انرژی برخورد در نمونه شیاردار متجانس (%)	۰/۲۱	۰/۴۰	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۳	--	--	--
انرژی جذب شده در نمونه شیاردار نامتجانس (mJ)	۲۳/۴۰	۲۸/۱۸	۳۲/۷۱	۳۸/۴۶	۳۹/۴۲	۴۲/۰۹	۴۳/۳۸	۴۹/۲۱	--	--	--
درصد انرژی جذب شده به انرژی برخورد در نمونه نامتجانس (%)	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۸	--	--	--

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس را برای ارتفاع‌های سقوط ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر چکش نشان می‌دهد. مقدار متوسط فرکانس طبیعی نمونه متجانس بیشتر از مقدار نمونه نامتجانس است. همچنین مقدار متوسط فرکانس طبیعی اول نمونه متجانس ۱۴/۴۰ درصد از مقدار حاصل از روش تحلیلی کمتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود انرژی جذب شده در نمونه متجانس بیشتر از انرژی جذب شده در نمونه نامتجانس می‌باشد. بطور کلی در هر دو نمونه مقدار انرژی جذب شده در مقایسه با انرژی کل برخورد بسیار کم است. به دلیل انرژی بسیار پایین جذب شده در هر دو نمونه، تغییر شکل پلاستیک در ناحیه نوک ترک ایجاد نمی‌شود.

شکل ۱۸ تغییرات فرکانس طبیعی اول نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس آزمایشگاهی را با افزایش ارتفاع سقوط چکش و با بزرگ‌نمایی محور عمودی نشان می‌دهد. معادله خط برازش به نقاط برای نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس آزمایشگاهی به ترتیب $y = 0.0018x + 1.9714$ و $y = 0.0024x + 1.8202$ است که شیب آنها بسیار کم است. بنابراین فرکانس طبیعی تقریباً ثابت و مقدار متوسط آن برای نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس به ترتیب برابر با ۲/۰۸ و ۱/۹۷ کیلوهرتز به دست آمده است. شاخص برازش (Coefficient of Determination) خط به نقاط نیز برای نمونه‌های شیاردار متجانس و نامتجانس به ترتیب $R^2 = 0.2747$ و $R^2 = 0.68030$ به دست آمده است. این شاخص مشخص می‌کند که تا چه حد خط به نقاط مشاهده شده نزدیک می‌باشد یا به عبارتی تا چه حد خط رگرسیون به داده‌ها برازش شده است. این شاخص عددی بین صفر و یک دارد که هرچه این عدد به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده برازش خوب خط به نقاط است.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرکانس‌های طبیعی نمونه‌های آزمایشگاهی شیاردار متجانس و نامتجانس ضربه سقوطی کم سرعت از جنس



شکل ۱۸) مقایسه تغییرات فرکانس طبیعی اول نمونه‌های آزمایشگاهی متجانس و نامتجانس با افزایش ارتفاع سقوط چکش

فولاد ای‌پی‌آی‌ایکس شصت و پنج بررسی شد. با تحلیل فرکانسی نتایج زیر حاصل گردید:

۱- برای هر دو نمونه شیاردار متجانس و نامتجانس با تغییر ارتفاع سقوط چکش از ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر فرکانس طبیعی خطی بوده و با تغییرات ارتفاع تغییر نمی‌کند. مقدار متوسط فرکانس طبیعی اول برای هر دو نمونه به ترتیب ۲/۰۸ و ۱/۹۷ کیلوهرتز به دست آمد.

۲- در نمونه شیاردار متجانس تغییرات چگالی طیف توان مربوط به فرکانس‌های اول تا پنجم بصورت پله‌ای افزایش می‌یابد. در حالیکه در نمونه شیاردار نامتجانس ابتدا افزایش پله‌ای چگالی طیف توان مشاهده می‌شود، اما در محدوده فرکانس ۳/۵-۴/۸ کیلوهرتز چگالی طیف توان نزدیک به صفر می‌شود که می‌تواند به دلیل وجود درز جوش در مقطع نمونه باشد پس از این محدوده فرکانسی دوباره منحنی بصورت پله‌ای رشد می‌کند.

۳- مقدار فرکانس‌های طبیعی نمونه شیاردار نامتجانس از نمونه شیاردار متجانس ۵/۶۰ درصد کمتر است که این می‌تواند به دلیل تفاوت ریز ساختار ناحیه جوش و در نتیجه خواص مکانیکی آن با ناحیه فلز پایه باشد.

۴- انرژی متوسط جذب شده در نمونه نامتجانس و متجانس به ترتیب ۲۲/۸۸ و ۲۷/۵۰ درصد از کل انرژی ضربه می‌باشد. بنابراین نمونه نامتجانس نسبت به نمونه متجانس چقرمگی کمتری دارد.

۵- با افزایش ضخامت نمونه در ناحیه کلاهک جوش و افزایش جرم نمونه شیاردار نامتجانس انتظار می‌رود که درصد انرژی جذب شده به کل انرژی ضربه از نمونه متجانس بیشتر باشد، اما مقایسه نتایج خلاف آن را نشان می‌دهد. بنابراین تفاوت خواص مکانیکی و ریزساختار ناحیه جوش تاثیر قابل توجهی در کاهش انرژی جذب شده دارد.

۶- در هر دو نمونه شیاردار متجانس و نامتجانس با افزایش ارتفاع سقوط چکش فرکانس تقریباً ثابت است. با توجه به اینکه فرکانس تابعی از هندسه و جنس می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که مدول الاستیک تقریباً ثابت است.

۷- مقادیر شتاب، نیرو و چگالی طیف توان در نمونه شیاردار نامتجانس کمتر از مقادیر نمونه متجانس می‌باشد.

۸- با دانستن فرکانس‌های طبیعی نمونه می‌توان با اعمال یک فیلتر مناسب (در این پژوهش پایین گذر باترورث) اثر مخرب تشدید را در آزمایش اصلی (شکست نمونه) از بین برد.

۹- به نظر می‌رسد با توجه به اینکه در آزمایش ضربه سقوطی تجهیز شده به شتاب‌سنج اثر تشدید فرکانس‌های طبیعی فیلتر می‌شود، نتایج حاصل از آن در مقایسه با آزمایش ضربه سقوطی مجهز به کرنش‌سنج از دقت بیشتری برخوردار باشد.

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قراردادن لوله فولادی ای‌پی‌آی‌ایکس شصت و پنج، از آقای مهندس قدیری جهت ساخت دستگاه ضربه سقوطی کم سرعت و از آقای

pipe using three point bending experiment. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(9):2377-2388.

[13] Mohitzadeh SS, Hashemi SH. Experimental and Numerical Evaluation of Momentum Variations Effect of Striker on Fracture Energy in Charpy Impact Testing of API X65 Steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(9):2275-2287.

[14] Tazimi M, Hashemi S, Rahnama S. Experimental Study of Fracture Surface Thickness Variation of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen Made from API X65 Steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(10):2583-2592.

[15] Jiang F, Rohatgi A, Vecchio KS, Cheney JL. Analysis of the dynamic responses for a pre-cracked three-point bend specimen. *International journal of Fracture*. 2004;127(2):147-165.

[16] Kishimoto K, Aoki S, Sakata M. Simple formula for dynamic stress intensity factor of pre-cracked Charpy specimen. *Engineering Fracture Mechanics*. 1980;13(3):501-508.

[17] Loya JA, Rubio L, Fernández-Sáez J. Natural frequencies for bending vibrations of Timoshenko cracked beams. *Journal of Sound and Vibration*. 2006;290(3-5):640-653.

[18] Kammler DW. *A first course in Fourier analysis*. Cambridge University Press; 2007.

[19] American Petroleum Institute API specifications 5L, specifications for line pipe. 43rd ed: 1-192, 2013.

[20] American Petroleum Institute, API RP 5L3 Recommended Practice Conducting Drop-Weight Tear Test on Line Pipe. 3rd ed. Washington DC. 1-9, 1996.

[21] KISTLER K-Shear Accelerator Catalogue, Type 8742A, 2015.

[22] Majidi-Jirandehi AA, Hashemi SH. Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test. *Materials Research Express*. 2018;6(1):016552.

مهندس صادقی (کارگاه مکانیک دانشگاه بیرجند) که در تهیه نمونه و انجام آزمایش همکاری نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی حاصل فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده نویسندگان مقاله است.

تعارض منافع: در فرآیند انجام و گزارش، بی طرفی رعایت شده است.

سهم نویسندگان: حامد خسروی خور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیل‌گر آماری، نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سید حجت هاشمی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیل‌گر آماری، نگارنده بحث (۴۰٪). مهدی راغبی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیل‌گر آماری، نگارنده بحث (۱۰٪).

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- [1] Hashemi SH. Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *International journal of pressure vessels and piping*. 2009;86(8):533-540.
- [2] Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:8-15.
- [3] Standard Test Method for Drop-Weight Tear Tests of Ferritic Steels, ASTM E436-03, 2008.
- [4] Rudland DL, Wilkowski GM, Feng Z, Wang YY, Horsley D, Glover A. Experimental investigation of CTOA in linepipe steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003;70(3-4):567-577.
- [5] Hashemi SH. Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(3):1648-1655.
- [6] Yu PS, Ru CQ. Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016;160:138-146.
- [7] Fang J, Zhang J, Wang L. Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;124:18-29.
- [8] Shterenlikht A, Hashemi SH, Yates JR, Howard IC, Andrews RM. Assessment of an instrumented Charpy impact machine. *International Journal of Fracture*. 2005;132(1):81-97.
- [9] Nash GE. Bending deflections and moments in a notched beam. *Engineering Fracture Mechanics*. 1971;3(2):139-150.
- [10] Hashemi S. H, Design and Manufacture of Drop Weight Tear Testing Machine Equipped with Accelerometer for Measurement of Fracture Energy in High-strength Gas Pipeline Steels. Final Report (Research Project), University of Birjand, Birjand, Iran, 2011.
- [11] Fathi-Asgarabad E, Hashemi SH. Experimental Measurement and Numerical Evaluation of Fracture Energy in Drop Weight Tear Test Specimen with Chevron Notch in API X65 Steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(5):1145-1156.
- [12] Hashemi H, Hashemi SH. Investigation of seam weld and steel base metal fracture energy of API X65