Archive of SID

مطالعه تجربی و عددی پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی موج ورودی در آزمایش میله فشاری هاپکینسون

رضا نقدآبادی[۱]، محمد جواد اشرفی[۲] و سعید سهراب‌پور[۳]

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی شریف
(تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۱۴)

چکیده

در این مقاله، با استفاده از شکل‌دهنده موج، اثر پارامترهای هندسی مختلف بر شکل موج ورودی و برقراری شرط نرخ کرنش ثابت در آزمایش میله فشاری هاپکینسون بررسی شده است. برای این منظور، شکل‌دهنده موج دیسکی از جنس مس با ضخامت‌ها و قطرهای مختلف استفاده شده است. با انجام آزمایش و شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA، اثر پارامترهای ضخامت و قطر شکل‌دهنده موج، سرعت میله ضربه‌زن و طول آن بر شکل موج ورودی بررسی و ابعاد مناسب شکل‌دهنده موج برای نمونه‌های ترد و سخت‌شونده مشخص شده است. همچنین، آزمایش میله فشاری هاپکینسون برای نمونه‌های چدنی GGG-60 با شکل‌دهنده موج با ابعاد مختلف و بدون آن انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات نرخ کرنش در نمونه چدنی با استفاده از شکل‌دهنده موج با ابعاد مناسب تا چند برابر کاهش یافته که این امر بر اعتبار نتایج آزمایش میله فشاری هاپکینسون می‌افزاید.

واژه‌های کلیدی: آزمایش میله فشاری هاپکینسون، شکل‌دهنده موج، نرخ کرنش بالا، انتشار موج

Experimental and Numerical Study of Parameters Shaping the Incident Pulse in Split Hopkinson Pressure Bar Test

R. Naghdabadi, M.J. Ashrafi and S. Sohrabpour

Mech. Eng. Dep't.
Sharif Univ. of Tech.

(Received: 24 May 2010, Accepted: 5 Sep. 2010)

ABSTRACT

In this paper, using a pulse shaper, different geometric parameters affecting the incident pulse shape and achieving a constant strain rate condition are studied. To this end, pulse shapers in different thicknesses and diameters were made from copper. Based on wave propagation analysis, proper incident pulse shape for testing brittle and hardening materials were determined. In addition, performing experiments and simulations in LS-DYNA, the effects of pulse shaper thickness, its diameter, striker velocity, and its length on incident pulse were studied. Moreover, several Hopkinson tests for cast iron (GGG-60) specimens with and without pulse shaper were carried out. The results show that using pulse shaper with proper dimensions helps to achieve constant strain rate condition which is highly desirable in split Hopkinson pressure bar testing.

Keywords: Split Hopkinson Pressure Bar, Pulse Shaper, High Strain Rate, Wave Propagation

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): naghdabd@shaif.edu
۲- کارشناس ارشد: ashrafi@mech.sharif.edu
۳- استاد: saeed@sharif.edu

www.SID.ir

Archive of SID

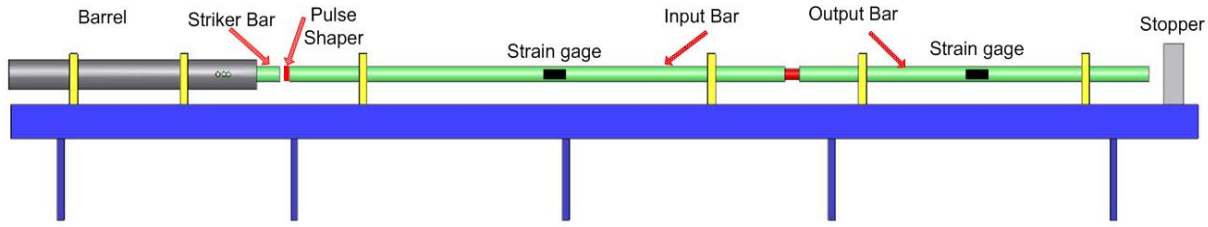
۱- مقدمه

آزمایش میله فشاری هاپکینسون[1] از جمله آزمایش‌هایی است که به‌منظور شناسایی رفتار وابسته به نرخ کرنش مواد در محدوده وسیعی از نرخ کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به طول نمونه و خواص الاستیک میله‌ها می‌توان مواد مختلف را از نرخ کرنش 10^{2} بر ثانیه تا 10^{4} بر ثانیه آزمایش نمود[۱]. هدف از انجام این آزمایش، استخراج منحنی تنش-کرنش در یک نرخ کرنش ثابت می‌باشد تا بتوان ضرایب مدل‌های ساختاری وابسته به نرخ کرنش مواد را به‌دست آورد. دستگاه این آزمایش، که به صورت شماتیک در شکل **۱** نشان داده شده است، از میله ضربه‌زن، میله ورودی و میله خروجی تشکیل شده است. نمونه آزمایش بین دو میله ورودی و خروجی قرار گرفته و با برخورد میله ضربه‌زن به میله ورودی، میله ورودی به حرکت درآمده و نمونه فشرده می‌شود. با انجام آزمایش، امواج منتشر شده در میله‌های ورودی و خروجی توسط کرنش‌سنج‌های نصب شده روی این میله‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سپس با پردازش سیگنال‌ها و استفاده از روابط انتشار موج، منحنی تنش-کرنش ماده به‌دست می‌آید.

ضرورت شکل‌دهی موج[2] ورودی برای اولین بار توسط فرنز[3] و همکاران[۲] و همچنین فولانسبی[4] [۳] مطرح گردید. موج ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم میله ضربه‌زن به میله ورودی مستطیل شکل بوده و برای آزمایش مواد دارای رفتار پلاستیک کامل، مناسب می‌باشد. ولی برای مواد دارای سخت شوندگی و همچنین مواد ترد که منحنی تنش-کرنش آنها شیب مخالف صفر دارد، موج مستطیلی مناسب نبوده و نرخ کرنش در طول زمان ضربه کاهش می‌یابد. کاربردهای دیگر شکل‌دهی موج ورودی، برقراری تعادل دینامیکی با افزایش زمان اوج[5] موج ورودی و همچنین حذف نوسانات موج ورودی می‌باشد. وجود نوسانات در موج ورودی که دارای فرکانس‌های بالا می‌باشد، اثرات پراکندگی[6] موج را افزایش می‌دهد.

یکی از روش‌های شکل‌دهی موج ورودی، استفاده از میله پیش‌بار می‌باشد. الوود[7] و همکاران[۴] برای کاهش اثرات پراکندگی و برقراری نرخ کرنش ثابت، یک میله پیش‌بار و یک نمونه اضافی برای شکل دهی موج به مجموعه آزمایش میله فشاری هاپکینسون اضافه نمودند. همچنین پری[8] و همکاران[۵] برای کاهش اثرات پراکندگی از سیستم سه میله‌ای مشابه مرجع[۴] استفاده کردند با این تفاوت که در این سیستم نمونه اضافی وجود ندارد و میله پیش‌بار نیز از جنسی با مقاومت کمتر نسبت به میله‌های اصلی می‌باشد. روش دیگر شکل‌دهی موج ورودی، تغییر هندسه میله ضربه‌زن می‌باشد. لی و همکاران[۶-۷] با تغییر پروفیل میله ضربه‌زن و استفاده از میله ضربه‌زن دو سر مخروطی توانستند شکل موج سینوسی که پراکندگی موج در آن اتفاق نمی‌افتد را ایجاد کنند. این محققان از این روش برای آزمایش انواع نمونه‌های سنگی در نرخ کرنش‌های پایین استفاده نمودند.

پرکاربردترین روش شکل‌دهی موج ورودی استفاده از شکل‌دهنده موج[1] می‌باشد. این شکل‌دهنده‌های موج معمولاً دیسک‌های نازکی از جنس مواد شکل‌پذیر مانند مس و آلومینیوم بوده که بین میله ضربه‌زن و میله ورودی قرار گرفته و با تغییر شکل پلاستیک، شکل موج ورودی را تغییر می‌دهند. چن و همکاران[۸] به‌منظور برقراری تعادل دینامیکی در لحظات اولیه آزمایش و همچنین ثابت بودن نرخ کرنش در نمونه‌های الاستوپلاستیک از شکل‌دهنده موج



شکل(۱): شماتیک دستگاه آزمایش میله فشاری هاپکینسون.

1- Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Test
2- Pulse Shaping
3- Franz
4- Follansbee

5- Rise Time
6- Dispersion
7- Ellwood
8- Parry

www.SID.ir

Archive of SID

کامپوزیتی استفاده کردند. این شکل‌دهنده موج، از دو استوانه با ابعاد و جنس متفاوت (مس و فولاد ۴۳۴۰) تشکیل شده که به‌وسیله یک استوانه صلب به هم متصل شده‌اند. همچنین وچیو و جیانگ[۹] از یک ماده دارای مقاومت بالا و نرخ کارسختی بالا (آلیاژ نیکل- مولیبدن) به‌عنوان شکل‌دهنده موج استفاده نموده و نمونه‌های مختلفی که محدوده وسیعی از مقاومت و کارسختی را شامل می‌شوند آزمایش کردند. این محققان ابعاد شکل‌دهنده مناسب را با سعی و خطای تجربی به‌دست آوردند. در زمینه مدل‌سازی اثر شکل‌دهنده موج، نعمت- ناصر و همکاران[۱۰] تغییر شکل پلاستیک مس OFHC را شبیه‌سازی کرده و شکل موج ورودی را پیش‌بینی نمودند. در این روش از انتشار موج یک‌بعدی و رابطه $\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n$ برای رفتار پلاستیک شکل‌دهنده موج استفاده شده است. در ادامه فریو و همکاران [۱۲-۱۱] با تکمیل این مدل، مدلی برای تعیین شکل موج ورودی برای شکل‌دهنده موج از جنس مس C11000 ارائه نمودند. هم‌چنین اشرفی و همکاران[۱۳] با شبیه‌سازی اثر شکل‌دهنده موج مسی در نرم‌افزار LS-DYNA اثر ضخامت شکل‌دهنده موج و سرعت میله ضربه‌زن را بر شکل موج ورودی بررسی نمودند.

با وجود مدل‌هایی برای پیش‌بینی موج ورودی، تاکنون مطالعه کاملی بر روی پارامترهای مؤثر بر شکل موج ورودی و همچنین تعیین کمی و کیفی شکل موج ورودی مورد نیاز برای آزمایش مواد مختلف ارائه نشده و در نتیجه انتخاب شکل‌دهنده موج مناسب، با سعی و خطای تجربی همراه بوده است. در این مقاله، از دیسک‌های مسی به‌عنوان شکل‌دهنده موج استفاده می‌شود. به منظور مطالعه پارامتری، این دیسک‌ها با ضخامت‌ها و قطرهای مختلف ساخته شده است. بدین ترتیب با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار LS-DYNA و همچنین انجام آزمایش هاپکینسون با شکل‌دهنده-های موج ساخته شده، مطالعه کاملی بر روی عوامل تأثیرگذار بر شکل موج ورودی شامل ضخامت شکل‌دهنده موج، قطر شکل‌دهنده موج و سرعت و طول میله ضربه‌زن انجام می‌شود و راهکارهای انتخاب شکل‌دهنده موج مناسب برای آزمایش مواد ترد و سخت شونده ارائه می‌گردد. همچنین برقراری شرط نرخ کرنش ثابت و حذف نوسانات در آزمایش کامل هاپکینسون برای نمونه‌های چدنی بررسی می‌شود. بدین ترتیب آزمایش میله فشاری هاپکینسون برای هر نمونه با شکل‌دهنده موج و بدون آن انجام شده و نتایج آن بررسی و مقایسه می‌گردد.

۲- انتشار موج در آزمایش میله فشاری هاپکینسون

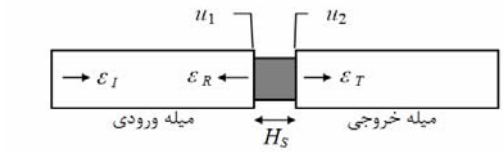
دستگاه آزمایش میله فشاری هاپکینسون از میله‌های ضربه‌زن، ورودی و خروجی تشکیل شده است. قطر و جنس تمامی میله‌ها یکسان می‌باشد. با صرف‌نظر کردن از انتشار موج در نمونه، نرخ کرنش از رابطه زیر به‌دست می‌آید[۱۴]:

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{(u_1 - u_2)}{H_s} \quad . \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، u_1 و u_2، جابه‌جایی سطح تماس نمونه با میله ورودی و خروجی و H_s طول نمونه می‌باشد که در شکل **۲** نشان داده شده است. بر اساس روابط انتشار موج یک‌بعدی، نرخ کرنش در نمونه از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_b}{H_s}(\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad . \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، C_b سرعت انتشار موج در میله‌ها، ε_I موج کرنش ورودی، ε_R موج کرنش برگشتی و ε_T موج کرنش انتقالی می‌باشند.



شکل (۲): نحوه انتشار موج در آزمایش میله فشاری هاپکینسون.

با فرض تعادل دینامیکی در نمونه ($\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T$) تنش و کرنش در نمونه از روابط (۴-۳) به‌دست می‌آید.

$$\sigma_s(t) = \frac{A_b E_b \varepsilon_T}{A_s} \quad , \qquad (۳)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{-2C_b}{H_s}\int_0^t \varepsilon_R(t)dt \quad , \qquad (۴)$$

1- Pulse Shaper

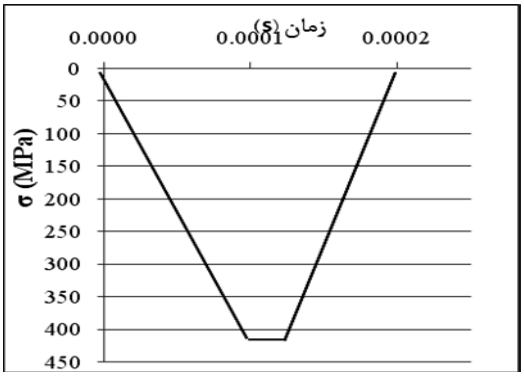
www.SID.ir

Archive of SID

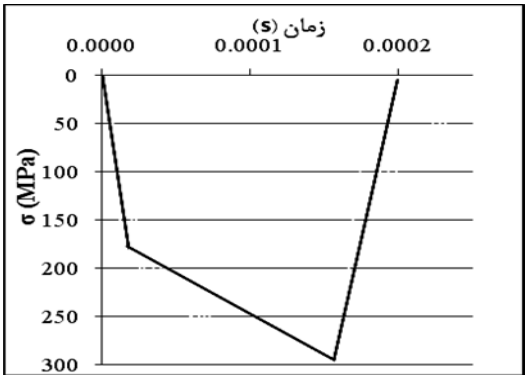
در روابط (۴-۳)، A_b و E_b به ترتیب سطح مقطع میله و مدول یانگ آن و A_s سطح مقطع نمونه می‌باشد. با فرض تعادل نیرویی و استفاده از روابط (۳-۲) خواهیم داشت:

$$E_b A_b \varepsilon_I(t) - A_s \sigma_s(t) = \frac{H_s E_b A_b}{2C_b} \dot{\varepsilon}_s(t). \qquad (۵)$$

با توجه به رابطه (۵) برای ثابت بودن نرخ کرنش در نمونه (سمت راست رابطه (۵)) بایستی اختلاف دو جمله سمت چپ رابطه ثابت باشد. به عبارت دیگر بایستی تغییرات نیروی اعمالی از طرف میله ورودی ($E_b A_b \varepsilon_I(t)$) از نیرویی که نمونه آزمایش تحمل می‌کند ($A_s \sigma_s(t)$) تبعیت کند. بنابراین برای آزمایش مواد ترد که رفتار خطی دارند، موج مثلثی یا ذوزنقه‌ای (مشابه شکل **۳- الف**) که بخش بارگذاری آن خطی است مناسب می‌باشد. همچنین برای مواد سخت‌شونده، موجی با همین ویژگی (شکل **۳- ب**) مورد نیاز است.



(الف)



(ب)

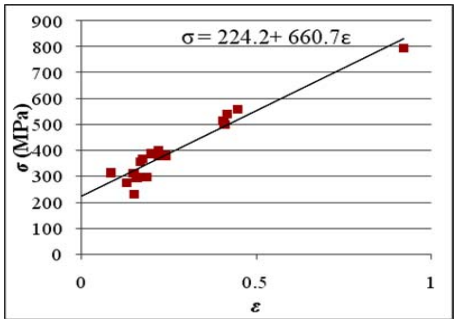
شکل (۳): موج ورودی مناسب برای نمونه‌های مختلف، (الف) ماده ترد، (ب) ماده سخت‌شونده.

۳-ساخت شکل‌دهنده موج و انجام آزمایش

به‌منظور مطالعه پارامتری اثر شکل‌دهنده موج، این شکل‌دهنده‌ها در قطرها و ضخامت‌های مختلف از جنس مس ساخته شده‌اند. با توجه به ابعاد میله‌ها و پیشنهادهای موجود در مراجع [۳و۹] که ضخامت شکل‌دهنده موج را بین ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر و قطر آن را نصف قطر میله‌های فشاری و یا بیشتر توصیه نموده‌اند، این شکل‌دهنده‌های دیسکی در چهار ضخامت ۰/۵، ۱/۰، ۱/۳ و ۲/۰ میلی‌متر و چهار قطر ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر توسط دستگاه پانچ از ورقه مسی تهیه گردید و صافی سطح و موازی بودن سطوح آنها با سمباده‌زنی حاصل گردید.

از آنجا که میله خروجی و نمونه مورد آزمایش تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شکل موج ورودی ندارند[۱۱]، برای بررسی اثر شکل‌دهنده موج، تنها میله‌های ضربه‌زن و ورودی مدل‌سازی می‌شود. با برخورد میله ضربه‌زن به میله ورودی، سیگنال کرنش میله ورودی اندازه‌گیری می‌شود. سرعت میله ضربه‌زن نیز توسط دستگاه اندازه‌گیری سرعت، ثبت می‌شود.

برای تعیین خواص مکانیکی شکل‌دهنده موج مسی از نتایج آزمایش هاپکینسون استفاده می‌شود. در این مقاله، از روش فریو و همکاران[۱۱] برای تعیین این خواص استفاده شده است. در این روش، کرنش مهندسی ε در نمونه از روی ابعاد نهایی شکل‌دهنده موج و ماکزیمم تنش با استفاده از موج ورودی ثبت شده به‌دست می‌آید.



شکل(۴): نمودار تنش-کرنش شکل‌دهنده موج (نتایج تجربی).

با انجام چند آزمایش در کرنش‌های مختلف، رفتار شکل‌دهنده موج به‌دست آمده است (شکل **۴**). رفتار شکل‌دهنده موج، سخت شونده خطی در نظر گرفته شده و

www.SID.ir

Archive of SID

تنش تسلیم و ثابت سخت شوندگی با برازش خطی به‌دست آمده است. با توجه به شکل **۴** و خواص عمومی مس، خواص مکانیکی شکل‌دهنده موج در شبیه‌سازی مطابق جدول **۱** در نظر گرفته شده است.

جدول(۱): خواص مکانیکی مس C10200 .

تنش تسلیم (MPa)	**۲۲۴**
چگالی (kg/m^3)	**۸۹۶**
مدول الاستیک(GPa)	**۱۲۹**
مدول مماسی (MPa)	**۶۶۱**
ضریب پواسون	**۰/۳**

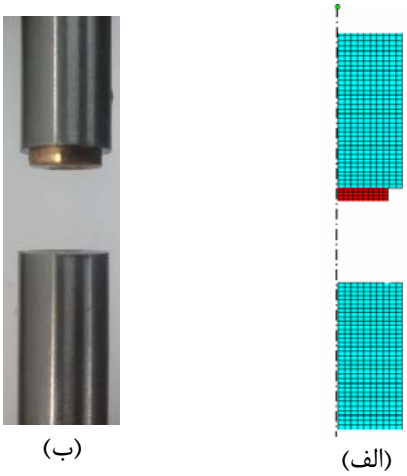
۴-شبیه‌سازی شکل‌دهنده موج و انجام آزمایش

به‌منظور شبیه‌سازی اثر شکل‌دهنده موج در آزمایش میله فشاری هاپکینسون، از نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد، میله خروجی و نمونه مورد آزمایش، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شکل موج ورودی ندارند، لذا مدل ایجاد شده از میله ضربه‌زن، شکل‌دهنده موج و میله ورودی تشکیل شده است. با برخورد میله ضربه‌زن به میله ورودی در حضور شکل‌دهنده موج، امکان شکل دهی موج ورودی فراهم می‌گردد.

برای کاهش محاسبات، یک چهارم میله‌ها مدل شده به نحوی که محور میله‌ها منطبق بر محور z می‌باشد. این مدل با المان هشت گرهی Solid162 مش‌بندی شده است به نحوی که المان‌های نزدیک به سطوح انتهایی میله‌ها ریزتر از دیگر قسمت‌ها باشد تا تماس بین میله‌ها بهتر مدل شود. شرایط مرزی متقارن نیز به صفحات برش خورده مدل یک چهارم اعمال می‌شود. به این ترتیب که سطوح موجود در صفحه x-z در جهت y و سطوح موجود در صفحه y-z در جهت x مقید می‌گردد. جدول **۲** جنس و ابعاد میله‌های ضربه‌زن، ورودی و خروجی را نشان می‌دهد.

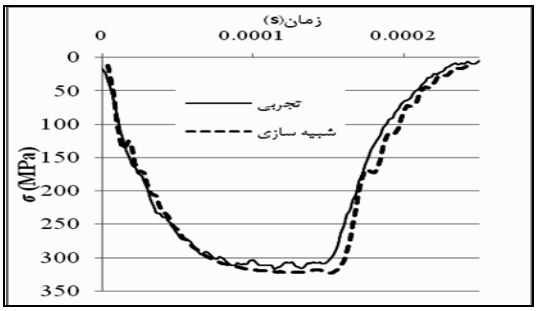
جدول (۲): جنس و ابعاد میله‌ها در آزمایش هاپکینسون.

میله فشاری	جنس	قطر (mm)	طول (mm)
میله ضربه‌زن	فولاد 4340	12.8	150, 400
میله ورودی	فولاد 4340	12.8	1700
میله خروجی	فولاد 4340	12.8	1200

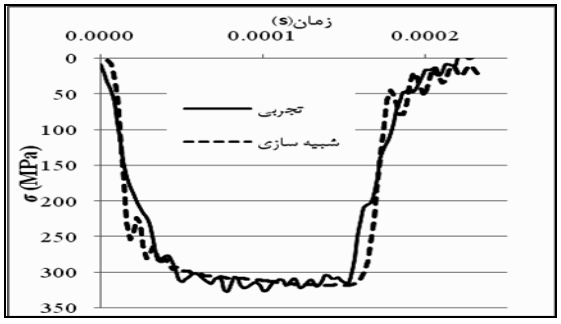


(ب) (الف)

شکل (۵): میله‌های ضربه‌زن و ورودی به همراه شکل‌دهنده موج، (الف)- قسمتی از مدل المان محدود، (ب)- نمای واقعی.



(الف)



(ب)

شکل (۶): مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش با شکل‌دهنده موج با میله ضربه‌زن به طول ۴۰ سانتیمتر (الف) : ضخامت ۱ و قطر ۸/۲۵ میلی‌متر و سرعت ضربه ۱۶ متر بر ثانیه، (ب) ضخامت ۰/۵ و قطر ۱۰ میلی‌متر و سرعت ضربه ۱۵ متر بر ثانیه.

www.SID.ir

Archive of SID

میله‌ها در جهت طولی آزادانه حرکت می‌کنند. با تعیین سرعت اولیه میله ضربه‌زن و همچنین تعریف تماس صفحه به صفحه بین میله ضربه‌زن و شکل‌دهنده موج از یک طرف و میله ورودی و شکل‌دهنده موج از طرف دیگر شبیه‌سازی انجام می‌پذیرد. سطوح تماس نیز بدون اصطکاک در نظر گرفته می‌شوند. بخشی از مدل ایجاد شده نیز در شکل **۵** نشان داده شده است. به‌منظور بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، نتایج انجام آزمایش با نتایج شبیه‌سازی در شکل **۶** برای نمونه در دو مورد مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی برای ابعاد مختلف شکل‌دهنده موج معتبر بوده و ضرایب در نظر گرفته شده در مدل‌سازی دقت کافی را دارند.

۴-۱-اثر پارامترهای هندسی بر شکل‌دهی موج ورودی

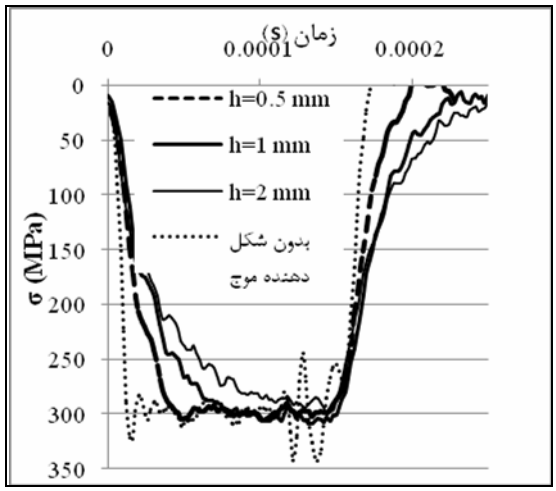
در این بخش اثر پارامترهای مختلف بر شکل موج ورودی به صورت تجربی و عددی بررسی می‌گردد. موج ورودی در وسط میله ورودی و بر روی سطح خارجی آن اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مؤثر بر شکل موج ورودی عبارتند از: ضخامت اولیه شکل‌دهنده موج (h)، قطر اولیه شکل‌دهنده موج (D)، سرعت میله ضربه‌زن (V_{st}) و طول میله ضربه‌زن (L_{st}).

۴-۲-ضخامت شکل‌دهنده موج

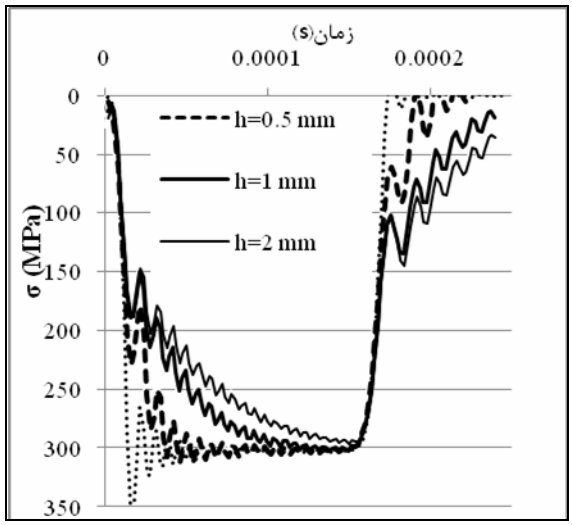
در شکل **۷** که مربوط به نتایج شبیه‌سازی و انجام آزمایش می‌باشد، اثر ضخامت شکل‌دهنده دیسکی بر شکل موج ورودی در آزمایش میله فشاری هاپکینسون نشان داده شده است. در این نمودارها سرعت میله ضربه‌زن ۱۵ متر بر ثانیه و طول آن ۴۰ سانتی‌متر بوده و از شکل‌دهنده‌های دیسکی با قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت، زمان اوج موج ورودی و طول موج ورودی افزایش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش ضخامت، تغییر شکل در شکل‌دهنده موج در زمان بیشتری انجام می‌شود. همچنین اگر ضخامت شکل‌دهنده موج از حد معینی بیشتر گردد دامنه موج ورودی به مقدار بیشینه تئوری($0.5\rho_b C_b V_{st}$) خود نمی‌رسد. زیرا در این حالت، طول میله ضربه‌زن برای ایجاد مدت زمان ضربه لازم جهت تغییر شکل پلاستیک کامل شکل‌دهنده موج و رسیدن به مقدار بیشینه تئوری، کافی نمی‌باشد.

۴-۳-قطر شکل‌دهنده موج

در شکل **۸** که مربوط به نتایج شبیه‌سازی و انجام آزمایش می‌باشد، اثر قطر شکل‌دهنده دیسکی بر شکل موج ورودی در آزمایش میله فشاری هاپکینسون نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

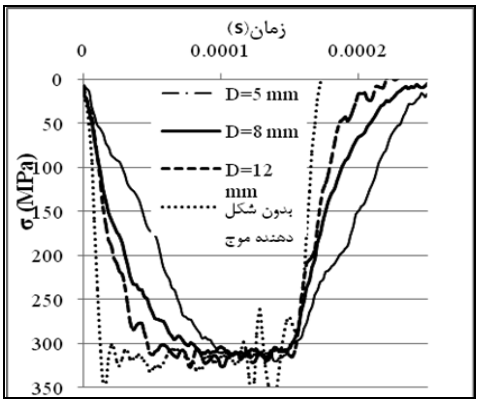
شکل (۷): اثر ضخامت شکل‌دهنده دیسکی (قطر ۱۰ میلی‌متر) بر شکل موج ورودی در آزمایش هاپکینسون، (الف)- نتایج آزمایش، (ب)- نتایج شبیه‌سازی.

در این نمودارها سرعت میله ضربه‌زن ۱۶ متر بر ثانیه و طول آن ۴۰ سانتی‌متر بوده و از شکل‌دهنده‌های دیسکی با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. مشاهده می‌شود با

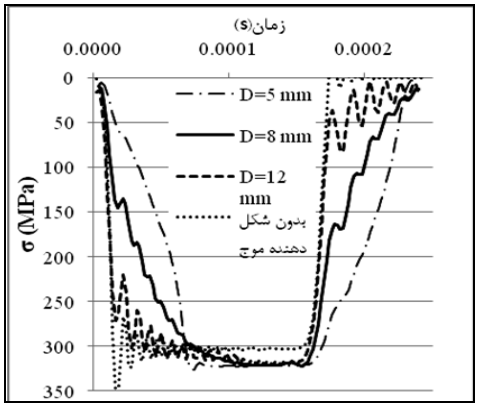
www.SID.ir

Archive of SID

کاهش قطر، شیب موج ورودی کاهش (زمان اوج افزایش می‌یابد) و طول موج افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش قطر، نوسانات موج ورودی کاهش می‌یابد. در واقع هر چه تغییر شکل پلاستیک بیشتری در شکل‌دهنده موج رخ دهد، فرکانس‌های بالا کمتر تولید می‌شوند. نکته دیگر اینکه با افزایش قطر، تغییر شکل پلاستیک در تنش بزرگتری شروع می‌گردد. با مقایسه اثر ضخامت و قطر شکل‌دهنده موج می‌توان نتیجه گرفت که قطر شکل‌دهنده موج بیشتر در شروع تغییر شکل پلاستیک و ضخامت آن بیشتر در پایان تغییر شکل پلاستیک تأثیرگذار می‌باشد.



(الف)

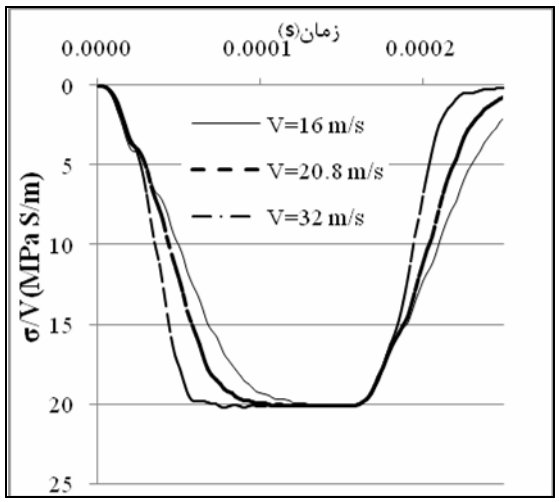


(ب)

شکل (۸): اثر قطر شکل‌دهنده دیسکی(ضخامت ۱ میلی‌متر) بر شکل موج ورودی در آزمایش هاپکینسون (الف) نتایج آزمایش، (ب) نتایج شبیه سازی.

۵-۳- سرعت میله ضربه‌زن

در حالت بدون شکل‌دهنده موج و بر اساس تئوری انتشار موج، شکل موج ورودی در سرعت‌های مختلف مشابه بوده و تنها دامنه آن تغییر می‌کند، چرا که اگر نمودار σ/V رسم شود، برای همه سرعت‌ها یکسان خواهد بود. اما در حالتی که از شکل‌دهنده موج استفاده می‌شود، نمودار σ/V برای یک شکل‌دهنده موج (با ابعاد مشخص) در سرعت‌های مختلف متفاوت خواهد بود. شکل **۹** نشان می‌دهد با افزایش سرعت میله ضربه‌زن، زمان اوج و پهنای موج ورودی کاهش می‌یابد. بنابراین با تغییر سرعت میله ضربه‌زن، بایستی ابعاد شکل‌دهنده موج برای دست‌یابی به زمان اوج مورد نظر تغییر یابد.



شکل (۹): نمودار تنش بر سرعت موج ورودی با شکل‌دهنده موج به قطر ۵ و ضخامت ۱ میلی‌متر در سرعت‌های مختلف میله ضربه‌زن (نتایج شبیه‌سازی).

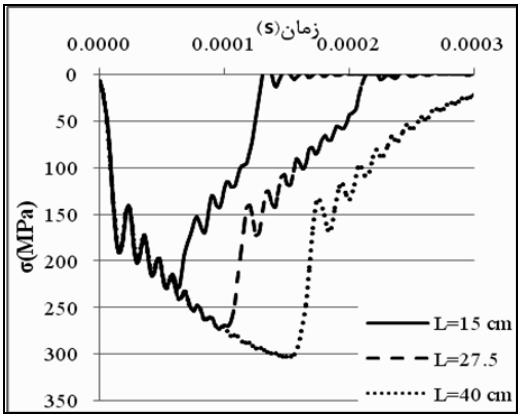
۵-۴- طول میله ضربه‌زن

بر اساس تئوری انتشار موج با افزایش طول میله ضربه‌زن، طول موج ورودی به همان نسبت افزایش می‌یابد. شکل **۱۰** شکل موج ورودی حاصل از شبیه‌سازی را در حضور شکل‌دهنده موج با قطر ۱۰ و ضخامت ۲/۶ میلی‌متر و طول‌های مختلف میله ضربه‌زن نشان می‌دهد. سرعت میله ضربه‌زن در هر سه حالت یکسان و برابر ۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین شکل **۱۱** شکل موج ورودی حاصل از انجام

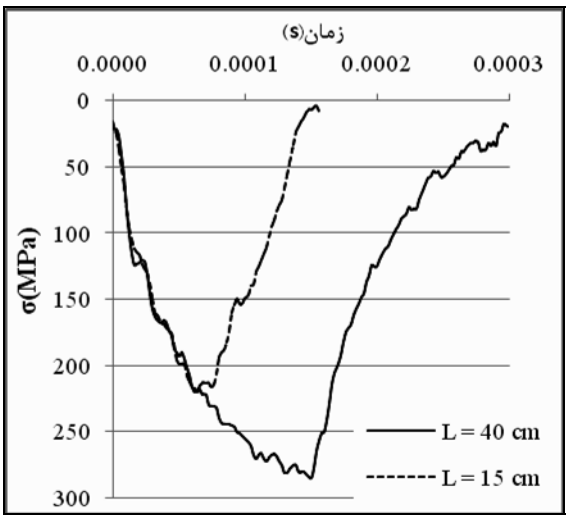
www.SID.ir

Archive of SID

آزمایش را در حضور شکل‌دهنده موج با قطر ۸ و ضخامت ۲ میلی‌متر و طول‌های مختلف میله ضربه‌زن نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش مربوط به اثر ضخامت گفته شد و در شکل‌های **۱۱-۱۰** مشاهده می‌گردد، با تغییر طول میله ضربه‌زن، مقدار بیشینه موج تنش تغییر می‌کند و همواره برابر با مقدار بیشینه تئوری نخواهد بود. همچنین شیب موج ورودی به طول میله ضربه‌زن وابسته نمی‌باشد.



شکل (۱۰): موج تنش ورودی در حضور شکل‌دهنده موج با قطر ۱۰ و ضخامت ۲/۶ میلی‌متر برای میله‌های ضربه‌زن با طول متفاوت (نتایج شبیه‌سازی).

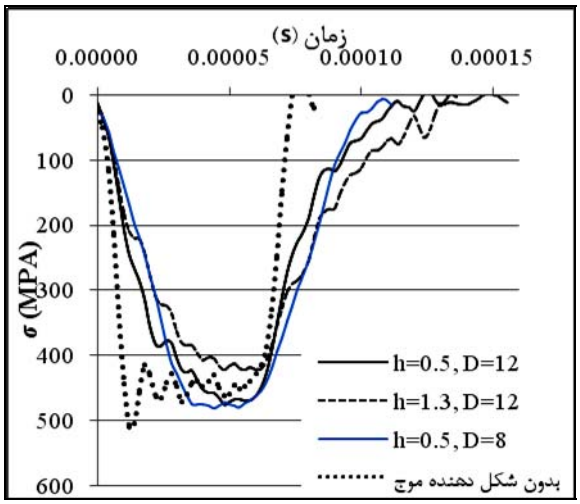


شکل (۱۱): موج تنش ورودی در حضور شکل‌دهنده موج با قطر ۸ و ضخامت ۲ میلی‌متر با میله‌های ضربه‌زن با طول‌های مختلف (نتایج تجربی).

۶- آزمایش هاپکینسون برای نمونه‌های چدنی

در بخش قبل تنها اثر شکل‌دهنده موج بر شکل موج ورودی بررسی شد. در این بخش اثر شکل‌دهنده موج بر نتایج آزمایش میله فشاری هاپکینسون برای نمونه‌های چدن GGG-60 ارائه می‌گردد. این نوع چدن شکل‌پذیر بوده و تنش تسلیم با استفاده از آزمایش استاتیکی انجام شده حدود ۳۴۰ مگاپاسکال به‌دست آمده است. نمونه‌های چدنی به قطر ۱۱ و طول ۱۱ میلی‌متر تهیه گردید. در اینجا آزمایش میله فشاری هاپکینسون در شرایط مشابه (سرعت میله ضربه‌زن ۲۳ متر بر ثانیه) برای نمونه‌های چدنی انجام شد. یک آزمایش بدون شکل‌دهنده موج و سه آزمایش دیگر با شکل‌دهنده موج، انجام گردید.

شکل **۱۲** موج ورودی اندازه‌گیری شده در این چهار آزمایش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود شکل‌دهنده موج با ضخامت ۱/۳ میلی‌متر باعث کاهش دامنه موج می‌شود. از طرف دیگر با توجه به خواص سخت شوندگی چدن، نمودار موج ورودی نیز بایستی همین ویژگی را داشته باشد و در نتیجه شکل‌دهنده موج با قطر ۸ و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر که یک موج ذوزنقه‌ای تولید می‌کند، برای این نمونه مناسب نیست.

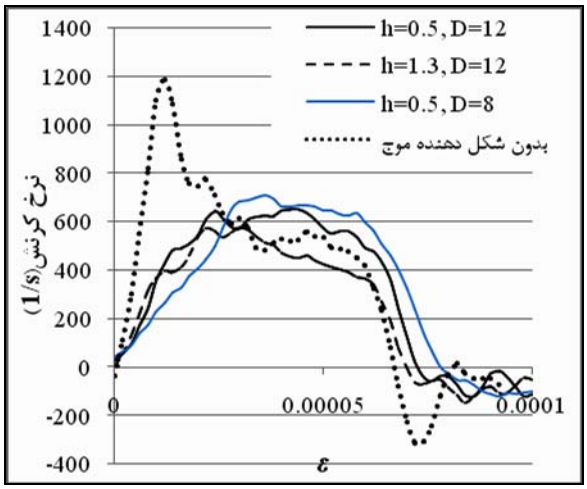


شکل(۱۲): موج ورودی آزمایش میله فشاری هاپکینسون با ابعاد مختلف شکل‌دهنده موج برای نمونه‌های چدنی (نتایج تجربی).

www.SID.ir

Archive of SID

با پردازش سیگنال‌های خروجی از کرنش‌سنج‌ها، نمودار نرخ کرنش-زمان حاصل می‌شود که در شکل **۱۳** ارائه شده است. مشاهده می‌شود با استفاده از شکل‌دهنده موج (در هر سه آزمایش) تغییرات نرخ کرنش کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. به‌طور مثال نرخ کرنش در طول آزمایش بدون شکل‌دهنده موج از 1,200 تا ۵۰۰ بر ثانیه متغیر است. در حالی که نرخ کرنش در طول آزمایش با شکل‌دهنده موج به قطر ۱۲ و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر از ۷۰۰ تا ۶۰۰ بر ثانیه متغیر است. به بیان دیگر با استفاده از شکل‌دهنده موج با ابعاد مناسب، تغییرات نرخ کرنش در نمونه از ۷۰۰ بر ثانیه به ۱۰۰ بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین می‌توان گفت با استفاده از شکل‌دهنده موج با ضخامت ۰/۵ و قطر ۱۲ میلی‌متر، شرط نرخ کرنش ثابت بهتر از سه مورد دیگر ارضاء می‌شود.



شکل (۱۳): نمودار نرخ کرنش-زمان در آزمایش میله فشاری هاپکینسون با ابعاد مختلف شکل‌دهنده موج برای نمونه چدنی (نتایج تجربی)

۷- بحث در نتایج

در این بخش به بحث در مورد چگونگی انتخاب شکل‌دهنده موج با توجه به نتایج بخش‌های قبل پرداخته می‌شود. در صورتی که هدف فقط حذف نوسانات موج ورودی باشد بایستی از شکل‌دهنده با قطر بزرگ و ضخامت کم استفاده نمود (مثلاً ضخامت ۰/۵ و قطر ۱۰ میلی‌متر در شکل **۷**)، چرا که در چنین شرایطی تغییر شکل پلاستیک کمی در شکل‌دهنده موج اتفاق می‌افتد و شکل موج تغییر محسوسی نخواهد داشت. در صورتی که نمونه مورد آزمایش رفتار خطی داشته باشد (مانند مواد ترد) بایستی از شکل‌دهنده موج با قطر کوچک استفاده نمود (مثلاً ضخامت ۱ و قطر ۵ میلی‌متر در شکل **۸**)، چرا که تقریباً از ابتدای ورود موج فشاری به شکل‌دهنده موج تغییر شکل پلاستیک آن شروع شده و شکل موج مثلثی یا ذوزنقه‌ای تولید می‌گردد. در صورتی که نمونه مورد آزمایش سخت شونده باشد بایستی از شکل‌دهنده با قطر بزرگ استفاده نمود تا موج ورودی با سخت‌شوندگی تولید گردد. در این‌گونه موارد برای تبعیت موج ورودی از رفتار ماده بایستی ضخامت شکل‌دهنده موج با توجه به طول میله ضربه‌زن تعیین گردد (مثلا ضخامت ۲ و قطر ۱۰ میلی‌متر در شکل **۷** برای میله ضربه‌زن به طول ۴۰ سانتی‌متر).

از طرف دیگر، هر چه سخت‌شوندگی در مواد سخت‌شونده و یا مدول مماسی در مواد ترد بیشتر باشد، بر اساس رابطه (۵) ضخامت شکل‌دهنده موج مناسب افزایش می‌یابد چرا که با افزایش ضخامت، زمان اوج موج ورودی افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر طول میله ضربه‌زن در حضور شکل‌دهنده موج، هر چند ممکن است دامنه موج ورودی تغییر کند ولی شیب موج ورودی تغییر نمی‌کند.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با انجام آزمایش میله فشاری هاپکینسون و هم‌چنین شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA، اثر پارامترهای مختلف بر شکل موج ورودی بررسی و مشاهده شد که تنها با تغییر ابعاد شکل‌دهنده موج می‌توان شکل موج‌های متنوعی را ایجاد نمود که برای آزمایش نمونه‌های مختلف مورد نیاز می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که با افزایش ضخامت شکل‌دهنده موج، کاهش قطر شکل‌دهنده موج و افزایش سرعت میله ضربه‌زن، زمان اوج موج ورودی کاهش می‌یابد.

همچنین، مشخص شد می‌توان ابعاد مناسب شکل‌دهنده موج را بدون سعی و خطای تجربی و با مشخص شدن سرعت میله ضربه‌زن و رفتار مکانیکی نمونه مورد آزمایش تعیین کرد. برای این منظور اثر استفاده از شکل‌دهنده موج مناسب در آزمایش میله فشاری هاپکینسون برای نمونه مسی و

www.SID.ir

Archive of SID

چدنی بررسی گردیده و مشاهده شد استفاده از شکل‌دهنده موج باعث برقراری بهتر شرط نرخ کرنش ثابت در نمونه می‌شود. برای مثال استفاده از شکل‌دهنده موج با ابعاد مناسب در نمونه‌های چدنی، تغییرات نرخ کرنش در نمونه را تا چند برابر کاهش می‌دهد که این مسئله بر اعتبار نتایج آزمایش میله فشاری هاپکینسون می‌افزاید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از آزمایشگاه مکانیک ضربه و نفوذ دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف به‌خاطر حمایت‌های فنی و مالی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

1. Gray, G., "Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing", ASM Handbook, American Society for Metals, Vol. 8, 2000.

2. Franz, C.E., Follansbee, P.S., and Wright, J. "New Experimental Techniques with the Split Hopkinson Pressure Bar", Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication.

3. Follansbee, R.S. "The Hopkinson Bar", ASM Handbook, American Society for Metals, 9th Ed., Vol. 8 1985.

4. Ellwood, S., Griffiths L.J. and Parry D.J. "Materials Testing at High Constant Strain Rates", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol.15, No. 3, pp. 280–282, 1982.

5. Parry, D.J., Walker, A.G. and Dixon, P.R. "Hopkinson Bar Pulse Smoothing", Meas. Sci. Tech. Vol. 6, No. 5, pp. 443–446, 1995.

6. Li, X.B., Lok T.S., Zhao J. and Zhao, P.J. "Oscillation Elimination in the Hopkinson Bar Apparatus and the Resultant Complete Dynamic Stress-strain Curves for Rrocks", Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., Vol. 37, No. 7, pp. 1055-1060, 2000.

7. Li, X.B., Lok, T.S. and Zhao, J. "Dynamic Characteristics of Granite Subjected to intermediate loading rate", Rock Mech. Rock Eng., Vol. 38, No. 1, pp. 21-39, 2004.

8. Chen, W., Song, B., Frew, D.J., and Forrestal, M.J. "Dynamic Small Strain Measurements of a Metal Specimen with a Split Hopkinson Pressure Bar", Experimental Mechanics, Vol. 43, No. 1, pp. 20-23, 2003.

9. Vecchio, K.S. and Jiang F. "Improved Pulse Shaping to Achieve Constant Strain Rate and Stress Equilibrium in Split-Hopkinson Pressure Bar Testing, Metallurgical and Materials Trans. A, Vol. 38, No. 11, pp. 2655-2665, 2007.

10. Nemat-Nasser, S., Isaacs, J.B., and Starrett, J.E. "Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments", The Royal Society of London A; Vol. 435, No. 1894, pp. 371-391, 1991.

11. Frew, D.J. , Forrestal, M.J., and Chen, W. "Pulse Shaping Techniques for Testing Elastic-plastic Materials with a Split Hopkinson Pressure Bar", Exp. Mech., Vol. 45, No. 2, pp.186-195, 2005.

12. Frew, D.J., Forrestal, M.J., and Chen, W. "Pulse Shaping Techniques for Testing Brittle Materials with a Split Hopkinson Pressure Bar", Experimental mech., Vol. 42, No. 1, pp. 93-106, 2003.

۱۳- اشرفی، م.ج.، ارغوانی، ج. و نقدآبادی، ر.، "بررسی پارامتری و طراحی شکل‌دهنده موج مناسب در آزمایش میله فشاری هاپکینسون"، هفدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) انجمن مهندسان مکانیک ایران، تهران، ۱۳۸۸.

14. Meyers, M.A. "Dynamic Behavior of Materials", John Wiley & Sons, New York, 1994.

15. ISO 1083, "Spheroidal Graphite Cast Irons-Classification" Int. Org. for Standardization, Geneva, Switzerland, 2004.

www.SID.ir