



## مطالعه تجربی و عددی اعتبار نتایج در آزمایش میله فشاری هایپکینسون با در نظر گرفتن اصطکاک و ابعاد نمونه

سید محمد عرفان موسوی<sup>۱</sup>، محمدجواد اشرفی<sup>۲\*</sup>، سعید میر شفیعی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

### چکیده

در این مقاله اثر ابعاد نمونه آزمایش و همچنین اصطکاک بر نتایج آزمایش هایپکینسون فشاری به روش عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام شبیه‌سازی، سیگنال‌هایی که در محل کرنش سنج هستند استخراج شده و با تئوری انتشار موج به منحنی تنش-کرنش تبدیل می‌گردند. با مقایسه این نمودارها با نمودار تنش-کرنش برای حالت‌های مختلف اصطکاک و ابعاد، اعتبار آزمایش و نتایج آن بررسی می‌شود. افزایش اصطکاک باعث افزایش تنش و کاهش کرنش در نمودار تنش-کرنش خروجی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی می‌شود و بهترین نتیجه در حالتی که اصطکاک صفر باشد حاصل می‌شود. مشاهده گردید با افزایش نسبت طول به قطر، اختلاف نتایج برای ضرایب اصطکاک مختلف کاهش می‌یابد. به طور مشخص در نتایج شبیه سازی اختلاف بیشینه تنش با فرض با و بدون روانکاری برای نسبت طول به قطر ۰/۲۵، ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ بترتیب ۵۸٪، ۱۸٪، ۹٪ و ۵٪ می‌باشد و روند مشابهی در نتایج تجربی مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر با تغییر ابعاد نمونه آزمایش در حضور اصطکاک، تغییر در نمودار تنش-کرنش مشابه اثر افزایش نرخ کرنش مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از اثر متقابل اندازه نمونه و اصطکاک باشد و با افزایش اصطکاک، خطای ایجاد شده، کرنش کلی نمونه را کاهش و تنش تسلیم افزایش خواهد داد.

**کلمات کلیدی:** آزمایش هایپکینسون فشاری؛ ابعاد نمونه آزمایش؛ اصطکاک؛ نرخ کرنش.

## Experimental and numerical study on the effects of friction and specimen dimension in split Hopkinson pressure bar

Seyed Mohamad Erfan Mousavi<sup>1</sup>, Mohammad Javad Ashrafi<sup>2,\*</sup>, Saeed Mir Shafiee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MSc, Mech. Eng., Iran Univ. Sci. Tech., Tehran, Iran

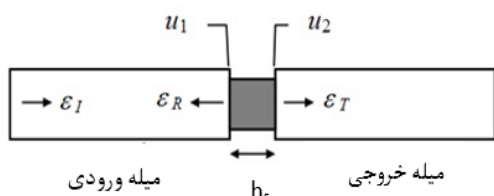
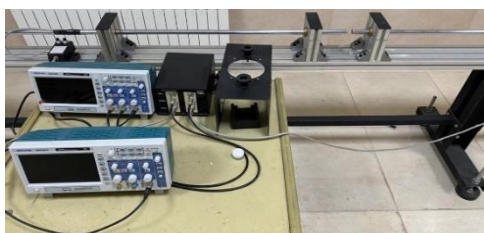
<sup>2</sup>Assist. Prof., Mech. Eng., Iran Univ. Sci. Tech., Tehran, Iran

### Abstract

In this paper, the effects of specimen dimension (aspect ratio) as well as friction on Hopkinson test results are studied both numerically and experimentally. To this end, the signals at strain gage positions (on input and out bars) are extracted and stress-strain curve of the specimen is determined using wave propagation analysis. By comparing these stress-strain curves for different states of friction and specimen dimensions, the validity of the experimental and numerical results are checked. By increasing friction, the stress increase and strain decrease in the output stress-strain curve and the best result is for no friction condition. By increasing the aspect ratio, the discrepancy of the results for different friction conditions decreases. Specifically, in simulation results, the difference between maximum stresses of with and without lubrication for aspect ratios 0.25, 0.5, 1.0 and 1.5 are 58%, 18%, 9% and 5%, respectively which is in agreement with experimental trends. In other words, different stress-strain curves are obtained for different aspect ratios in the presence of friction which is mainly due to the friction effect rather than strain rate effect and as the friction increases, the error will reduce the overall strain of the sample and increase the yield stress.

**Keywords:** Split Hopkinson pressure bar; Specimen dimension; friction; strain rate.

## ۱- مقدمه



شکل ۱- دستگاه آزمایش میله فشاری هاپکینسون و انتشار موج یک‌بعدی در آن

از زمانی که روش میله‌های فشاری هاپکینسون (SHPB) برای اولین بار برای آزمایش خواص مکانیکی مواد در سال ۱۹۴۹ استفاده شد، اعتبار این آزمایش به صورت مداوم مورد بحث بوده است زیرا در مورد آزمایش میله فشاری هاپکینسون هیچ‌گونه استاندارد مورد توافقی در رابطه با عملکرد یا طراحی دستگاه نیست. این مسئله منجر به وجود اختلاف در نتایج به دست آمده در آزمایشگاه‌های مختلف می شود. همیشه امکان پذیر نیست که علت این تفاوت‌ها را دلایل فیزیکی و یا روش‌های سیستم‌های اندازه‌گیری و تحلیلی هر آزمایشگاه دانست. در میان عوامل متنوعی که دو فرض اساسی انتشار موج تنش یک‌بعدی در میله‌ها و یکنواختی تنش در نمونه آزمایش را تغییر می‌دهد و در اعتبار نتایج تأثیرگذار است می‌توان به دو عامل مهم اشاره کرد. عامل اول اندازه نمونه و نسبت طول به قطر نمونه [۴] و عامل دوم اصطکاک بین سطوح نمونه و میله‌های فشار می‌باشد. این موضوع سبب ایجاد مدل رفتاری غیردقیق برای ماده آزمایش شده و اطلاعات تنش- کرنش غیردقیق می‌شود. علاوه بر اینکه اثر اصطکاک می‌تواند با اثر حساسیت نرخ کرنش اشتباه گرفته شده و سبب اشتباهات بیشتری نیز شود. در ابتدا بل (۱۹۶۶) [۵] در موضوع تصحیح اصطکاک در آزمایش میله فشاری هاپکینسون پیش قدم شد. آن‌ها همچنین اثرات اینرسی جانبی را مورد توجه قرار دادند. بعدها در دهه ۱۹۷۰ مقاله‌هایی با موضوع اثرات اصطکاک توسط سماتی و همکاران، برتولف و همکاران و مالیونسکی و

خواص مکانیکی مواد مانند تنش تسلیم، کار سختی و شکل‌پذیری در بارگذاری دینامیکی (نرخ کرنش بالا) متفاوت از بارگذاری استاتیکی می‌باشد. برای به دست آوردن مدل ساختاری وابسته به نرخ کرنش بایستی آزمایش در نرخ کرنش‌های مختلف انجام پذیرد و در هر آزمایش نرخ کرنش تقریباً ثابت باشد. در محدوده‌های مختلف نرخ کرنش آزمایش‌های متفاوتی انجام می‌شود. یکی از روش‌های متداول برای به دست آوردن رفتار دینامیکی مواد در نرخ کرنش بالاتر از  $10^3 \text{ s}^{-1}$ ، آزمایش میله فشاری هاپکینسون<sup>۱</sup> می‌باشد [۱-۳].

دستگاه آزمایش میله فشاری هاپکینسون از سه بخش گان گازی<sup>۲</sup>، مجموعه میله‌ها و سیستم اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها تشکیل شده است. در گان گازی، گاز با فشار مورد نظر در مخزن‌های کوچکی ذخیره شده و با عمل کردن شیر برقی، انرژی پتانسیل گاز به انرژی جنبشی میله ضربه زن تبدیل می‌گردد. میله ضربه زن با سرعت گرفتن در بارل به میله ورودی برخورد می‌کند. میله ورودی و میله خروجی توسط تکیه‌گاه‌هایی نگه‌داشته می‌شوند به طوری که در جهت طولی آزادانه حرکت می‌کنند. نمونه مورد آزمایش نیز طبق شکل ۱ بین میله ورودی و میله خروجی قرار می‌گیرد.

سیستم اندازه‌گیری این آزمایش از سه بخش کرنش‌سنج، آمپلی‌فایر و اسیلوسکوپ تشکیل شده است. کرنش‌سنج‌ها معمولاً در وسط میله‌های ورودی و خروجی و در جهت طولی نصب می‌گردند سیگنال ثبت شده توسط دو کرنش‌سنج در برنامه کامپیوتری پردازش شده و منحنی تنش-کرنش به دست می‌آید.

<sup>2</sup> Gas gun

<sup>1</sup> Split Hopkinson pressure bar

داودی (۲۰۲۱) [۱۳] به شبیه سازی عددی آزمایش هایپکینسون مواد کامپوزیتی و بررسی اثر تغییر شکل دهنده موج پرداختند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۱۴] اثرات اصطکاک تماسی و شکل نمونه را در آزمایش هایپکینسون فشاری مورد بررسی قرار دادند. اصطکاک بین میله ورودی/خروجی و نمونه آزمایش به صورت قابل توجهی بر نتایج آزمایش دستگاه هایپکینسون تأثیر می گذارد. درصد خطا در نتایج شبیه سازی با افزایش مقدار ضریب اصطکاک، افزایش پیدا می کند. نتایج تجربی برای نمونه های استوانه ای و ورق های استوانه ای پاسخ دینامیکی مشابهی را نشان می دهد؛ بنابراین نمونه های بالا به های استوانه ای چسبیده به یکدیگر می تواند به عنوان یک روش جایگزین معتبر برای موادی که به صورت صفحات نازک ساخته می شوند به کار برده شود. سیویور و والی (۲۰۱۸) [۱۵] یک بررسی از اثرات اصطکاک و اینرسی بر روی آزمایش هایپکینسون ارائه کرده اند. قطر و طول میله نیز مهم است زیرا موج فشاری دچار پراکندگی می شود و به این ترتیب اجزای مختلف فرکانسی صوت، سرعت انتشار متفاوتی از خود نشان می دهند در نتیجه شکل موج فشاری نسبت به زمان در حال تغییر است [۱۶؛ ۱۷]. مجذوبی و همکارانش (۲۰۱۸) [۱۸] به بررسی تجربی مقاومت به سایش مواد نانو کامپوزیت در حالت های مختلف اصطکاک پرداختند که با کاهش اصطکاک مقاومت به سایش در این مواد افزایش پیدا کرده است.

همچنین کوپین و ژانگ (۲۰۲۰) [۱۹] به بررسی و اعتبار سنجی آزمایش فشار هایپکینسون برای مواد رادیواکتیو پرداختند که از جمله موادی هستند که هیچ گونه استاندارد خاصی برای انجام این گونه آزمایش ها وجود ندارد. در این مقاله روشی برای تشخیص مواد رادیواکتیو با استفاده از آزمایش فشار هایپکینسون ارائه داده اند. برای آزمایش هایپکینسون مواد ویسکوالاستیک<sup>۱</sup> نرم با استفاده از میله های پلیمری، شکل دهنده موج مناسب را با بهینه سازی در نرم افزار آباکوس انتخاب نمودند. بررسی اثر ضخامت نمونه های کامپوزیتی کولار/پروپیلن توسط چوهان و همکاران (۲۰۱۷) [۲۰] مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که نمونه های کامپوزیتی در ضخامتهای کم ساخته می شوند، نمونه های آزمایش فشاری دارای ضخامت کمی می باشند. پی دانگ و همکارانش (۲۰۲۲)

همکاران نوشته شدند که بیشتر مورد استناد قرار گرفتند [۵]. لیفشیتز و لبر (۱۹۹۴) [۶] به بررسی و تجزیه و تحلیل داده ها در حوزه فرکانس و زمان پرداختند. نتایج به دست آمده بر این قرار است که تجزیه و تحلیل در حوزه فرکانس راحت تر و کارآمدتر از حوزه زمان است. تأثیرات سرعت انتقال موج در میله های دستگاه خطاهایی در تغییر موجها در امتداد محور زمان به وجود می آورد. به منظور کاهش اثرات پراکندگی موج، برقراری نرخ کرنش ثابت و برقراری تعادل دینامیکی، سیگنال ضربه منتقل شده به میله ورودی را می توان به کمک شکل دهنده موج اصلاح کرد. پراکندگی موج زمانی اتفاق می افتد که طیف فرکانسی موج ورودی دارای فرکانس های بالا باشد. این فرکانس های بالا در اثر برخورد مستقیم میله ضربه زن با میله ورودی ایجاد می گردد. شکل دهنده های موج معمولاً دیسک های نازکی از جنس مواد شکل پذیر مانند مس و آلومینیوم بوده که بین میله ضربه زن و میله ورودی قرار گرفته و با تغییر شکل پلاستیک، شکل موج ورودی را تغییر می دهند [۷؛ ۲].

زنگر و کلوس (۱۹۹۹) [۸] با مدل سازی عددی به بررسی عوامل مؤثر بر دقت نتایج نمونه های (الاستیک-پلاستیک کامل) با ضخامت کم پرداختند و نشان دادند در ضخامت های کمتر از نصف قطر، عدم وجود اصطکاک اهمیت زیادی دارد و با افزایش ضخامت اثر اصطکاک کاهش می یابد. هارتلی و همکاران (۲۰۰۷) [۹] به بررسی تجربی اثر اصطکاک در آزمایش هایپکینسون با استفاده از آزمایش رینگ فشاری پرداختند و روش هایی جهت تخمین خطای ناشی از اصطکاک و کمینه کردن آن ارائه نمودند. همچنین منگ و لی (۲۰۰۳) [۱۰] به بررسی عددی اصطکاک و ضریب رعنایی نمونه در آزمایش هایپکینسون پرداختند و اعتبار نتایج و همچنین توزیع یکنواخت تنش در نمونه را مطالعه نمودند و در این راستا ضریب اصلاحی نمودار تنش-کرنش در حالت های مختلف پیشنهاد شده است. نقدآبادی و همکاران به بررسی تجربی و عددی قرارگیری تغییر شکل دهنده موج با قطر و ضخامت های مختلف و تغییر شکل موج ورودی آزمایش فشار هایپکینسون پرداختند [۱۱؛ ۱۲] و اثر وجود تغییر شکل دهنده موج بر منحنی تنش-کرنش را بررسی نمودند. همچنین محمد زاده و

<sup>۱</sup> Viscoelastic

مانند برخورد و انفجار مناسب می‌باشد. در واقع یک فرایند آزمایش مجازی در این مقاله ایجاد شده است که با انجام شبیه‌سازی، سیگنال‌هایی که در محل کرنش‌سنج هستند استخراج‌شده و با تئوری انتشار موج به منحنی تنش-کرنش تبدیل می‌گردند. به این ترتیب می‌توان با مقایسه این نمودار با نمودار تنش-کرنش ورودی به نرم‌افزار برای نمونه، اعتبار آزمایش مجازی را تعیین نمود که در طراحی آزمایش بسیار مفید خواهد بود. در این راستا جهت سهولت مقایسه از مدل رفتاری مستقل از نرخ کرنش استفاده می‌گردد. همچنین نتایج شبیه‌سازی با انجام آزمایش صحت سنجی می‌شود.

## ۲- معرفی دستگاه آزمایش فشاری هاپکینسون

به‌منظور مطالعه پارامتری اثر اصطکاک و نسبت طول به قطر نمونه در نتایج آزمایش فشاری هاپکینسون نمونه از جنس آلومینیوم با طول‌های مختلف ساخته‌شده‌اند. با توجه به ابعاد میله‌های دستگاه آزمایش فشاری هاپکینسون دانشگاه علم و صنعت ابعاد نمونه‌ها با قطرهای ۱۰ میلی‌متر در سه طول مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر ساخته‌شده‌اند. دستگاه آزمایش فشار هاپکینسون استفاده‌شده در این مطالعه شامل دو میله ورودی و خروجی با طول‌های ۲ متر و قطر ۱۹/۹ میلی‌متر و میله ضربه زن به طول ۲۷ سانتی‌متر از جنس فولاد تشکیل شده است. محل نصب کرنش‌سنج‌ها در فاصله یک متری از سر هر میله می‌باشد. مدول یانگ میله‌ها از سرعت موج الاستیک و چگالی به دست می‌آید. سرعت موج از طریق کالیبراسیون میله‌ها و با استفاده از فاصله بین کرنش‌سنج‌ها و فاصله زمانی بین پالس‌ها با استفاده از رابطه ۱ تعیین می‌شود.

$$c_0 = \frac{\delta}{\tau} \quad (1)$$

$\delta$  فاصله بین دو کرنش‌سنج و  $\tau$  فاصله زمانی بین پالس‌ها می‌باشد. برای دستگاه هاپکینسون مورد آزمایش، فاصله بین کرنش‌سنج‌های میله‌ها، ۲۰۰ سانتی‌متر بوده که پالس موج این مسافت را در زمان ۴۰۴ میکروثانیه طی می‌کند و سرعت موج در میله‌های دستگاه برابر ۴۹۵۰ متر بر ثانیه به دست می‌آید. چگالی میله‌های دستگاه ۷۸۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد و مدول یانگ میله‌ها از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$E = (c_0)^2 \times \rho \quad (2)$$

[۲۱] به بررسی خواص مواد فوق نرم در محیط محلول پرداختند و این خواص را توسط دستگاه آزمایش فشاری هاپکینسون به دست آوردند. اخیراً کیم و کیم (۲۰۲۱) [۲۲] به بررسی تجربی و عددی اثر ضخامت نمونه در آزمایش هاپکینسون نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند. از آنجاکه با ثابت بودن سرعت ضربه زن و تغییر ضخامت نمونه، نرخ کرنش نیز تغییر می‌کند، آن‌ها تفاوت در نمودارهای تنش-کرنش را به وابستگی رفتار به نرخ کرنش مرتبط دانسته‌اند. البته در این پژوهش از اثر اصطکاک صرف‌نظر شده است. همچنین اسدی و همکاران (۲۰۲۲) [۲۳] به بررسی اثر اندازه نمونه دیسکی شیاردار ساخته شده مواد ساخته شده از گچ در آزمایش میله فشاری هاپکینسون پرداختند. در آخرین تحقیقات انجام شده برای بررسی دقت دستگاه آزمایش فشاری هاپکینسون بر اساس انتشار یک بعدی موج جیونگ وانگ و همکارانش (۲۰۲۲) [۲۴] به مقایسه نتایج حاصل از شرط انتشار یک بعدی موج و نتایج حاصل داده برداری سه بعدی برای مواد گرانیته پرداختند.

همانطور که بررسی گردید، انجام آزمایش بر روی نمونه‌های فشاری فلزی و غیر فلزی با ضخامت کم اجتناب ناپذیر است و در تحقیقات انجام شده با نمونه‌های با ضخامت کم، طبق معادلات آزمایش هاپکینسون نرخ کرنش افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود اثرات افزایش نرخ کرنش (افزایش استحکام و تنش تسلیم) مشاهده شود. با این وجود کاهش ضخامت نمونه آزمایش فشاری می‌تواند خطای قابل توجهی را در منحنی تنش-کرنش بدست آمده منجر شود که در بررسی نتایج بایستی لحاظ شود. در این مقاله سعی شده است که از طریق شبیه‌سازی آزمایش هاپکینسون فشاری و آزمایش تجربی بر روی دستگاه آزمایش فشاری هاپکینسون، اثر اصطکاک و ابعاد نمونه بر اعتبار نتایج آزمایش به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت نتیجه‌گیری جامعی در این خصوص صورت پذیرد. در مقایسه با مقالات بررسی شده، در کار حاضر مطالعه تجربی و عددی صورت می‌پذیرد و اثر اصطکاک و ابعاد نمونه به طور همزمان بر اعتبار نتایج بررسی می‌گردد و با رفتار وابسته به نرخ کرنش مواد مقایسه می‌گردد. به همین منظور از نرم‌افزار آباکوس (Abaqus/Explicit) استفاده شده است که از فرمول‌بندی المان محدود دینامیکی صریح استفاده می‌کند و برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا

ورودی و همچنین همراستا نبودن میله ورودی و خروجی اشاره کرد. وجود این گونه نا همراستایی‌ها باعث به وجود آمدن اثر خمش در نتایج آزمایش می‌شود که استفاده از تغییر شکل دهنده موجهای دایره‌ای به‌طور قابل توجهی اثر خمش را در انتشار امواج کاهش می‌دهد. قابل به ذکر است که اثرگذاری این نا همراستایی‌ها وابسته به محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها نیز می‌باشد [۲۶].

#### ۴- شبیه‌سازی عددی

هدف از این بخش بررسی روند آزمایش هایپکینسون و مقایسه مقادیر تنش یا کرنش حاصل از اندازه‌گیری در محل کرنش سنجه‌ها در دستگاه واقعی با نمودار تنش-کرنش واقعی نمونه است. از آنجا که در شبیه‌سازی، رفتار نمونه ورودی مسئله است، انجام این مقایسه با دقت و سهولت بهتری انجام می‌گردد و می‌تواند اعتبار نتایج آزمایش هایپکینسون در شرایط مختلف را بیان کند. در این مقاله از مشخصات و ابعاد دقیق دستگاه آزمایش فشار هایپکینسون دانشگاه علم و صنعت ایران به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی آزمایش هایپکینسون فشاری استفاده شده است. مشخصات این دستگاه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات دستگاه هایپکینسون فشاری

میله	طول (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)	ماده
میله ضربه زن	۲۷۰	۱۹/۹	فولاد
میله ورودی	۲۰۰۰	۱۹/۹	فولاد
میله خروجی	۲۰۰۰	۱۹/۹	فولاد

جنس نمونه آزمایش آلومینیوم سری ۶۰۰۰ می‌باشد و رفتار آن از طریق مدل رفتاری سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیرخطی در نرم‌افزار تعریف شده است که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. علت استفاده از آلومینیوم در شبیه‌سازی و همچنین آزمایش تجربی وابستگی کم آن به نرخ کرنش در محدوده مورد بررسی می‌باشد. لازم به ذکر است رفتار مواد در حالت کلی وابسته به نرخ کرنش است و در آزمایش ضربه هایپکینسون با افزایش سرعت میله ضربه زن و یا کاهش طول نمونه می‌توان نرخ کرنش را افزایش داد. با این وجود نرخ کرنش در حین آزمایش کاملاً ثابت نیست. در نتیجه اگر نمودار

$\rho$  چگالی میله‌ها می‌باشد و مدول یانگ میله‌ها برابر ۱۹۲ گیگا پاسکال می‌باشد.

دوره‌ی نمونه‌برداری در آزمایش از لحظه عبور میله ضربه زن از سرعت‌سنج شروع می‌شود و کل دوره برابر با ۰/۰۱ ثانیه و دقت ۲۰۰۰۰ نمونه و فاصله زمانی ۰/۵ میکروثانیه می‌باشد. خروجی کرنش‌سنج‌های متصل شده به میله‌ها بر حسب ولت می‌باشد که با ضریب کالیبراسیون به دست آمده به کرنش تبدیل می‌شود. برای به دست آوردن نمودار تنش کرنش از اولین پالس عبوری از میله دوم و اولین پالس برگشت در میله اول استفاده شده است. به علت تقارن در قرارگیری کرنش‌سنج‌ها بر روی میله اول و دوم زمان شروع پالس رفت و برگشت در میله اول و دوم یکسان می‌باشد. در شکل ۱ بخشی از دستگاه مورد آزمایش نمایش داده شده است.

#### ۳- انتشار موج در آزمایش فشاری هایپکینسون

پس از برخورد میله ضربه زن با میله ورودی، موج فشاری تشکیل شده از میله ورودی عبور می‌کند و پس از رسیدن به نمونه آزمایش، به دلیل اختلاف امپدانس بین دو ماده یک موج کششی در میله ورودی منعکس می‌شود و یک موج فشاری به میله خروجی منتقل می‌شود. با نصب گیج کرنش‌سنج بر روی میله ورودی می‌توان کرنش اولیه  $\epsilon_I$  و کرنش منعکس شده  $\epsilon_R$  را اندازه‌گیری کرد و با نصب یک کرنش‌سنج بر روی میله خروجی می‌توان کرنش منتقل شده  $\epsilon_T$  را اندازه‌گیری کرد.

با استفاده از مقادیر فوق و به‌وسیله روابط زیر می‌توان کرنش، نرخ کرنش و تنش در نمونه آزمایش را با فرض تعادل دینامیکی نمونه محاسبه کرد.

$$\sigma_s(t) = \frac{A_b E_b}{A_s} \epsilon_T \quad (3)$$

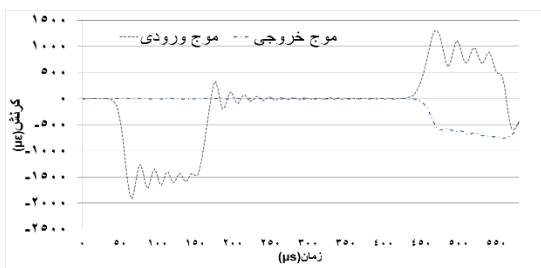
$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{-2c_b}{h_s} \int_0^t \epsilon_R(t) dt \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{-2c_b}{h_s} \epsilon_R(t) \quad (5)$$

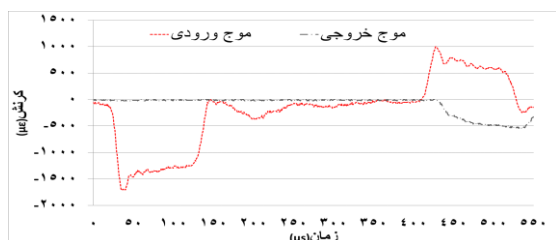
$c_b$  سرعت انتشار موج،  $E_b$  و  $A_b$  به ترتیب مدول یانگ و سطح مقطع میله‌های فشاری می‌باشد.  $A_s$  و  $h_s$  سطح مقطع و طول نمونه آزمایش می‌باشد [۲۵].

از عوامل تأثیرگذار بر انتشار موج در آزمایش فشاری هایپکینسون می‌توان به همراستا نبودن میله‌ی ضربه و میله

در شکل ۲ یک نمونه از پالس کرنش ثبت شده توسط کرنش سنج‌های نصب شده بر روی میله ورودی و خروجی در شبیه‌سازی و همچنین آزمایش تجربی نشان داده شده است. در نمودار شبیه‌سازی، خروجی کرنش و در نمودار تجربی نیز خروجی کرنش رسم شده است. نوسانات موجود ناشی از برخورد مستقیم میله ضربه زن و میله ورودی و همچنین انتشار موج سه بعدی موج بوده و اختلاف زمانی بین سیگنال‌های رفت و برگشت و انتقالی با موقعیت مکانی نصب کرنش سنج‌ها تطابق دارد. همچنین هم از لحاظ شکل سیگنال‌ها و هم فاصله زمانی تطابق مناسبی بین نمودارهای عددی و تجربی وجود دارد به طوری که فاصله بین شروع سیگنال ورودی و پایان سیگنال بازگشتی در هر دو شکل حدود ۵۵۰ میکروثانیه می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۲- یک نمونه از پالس کرنش سنج‌های نصب شده در میله ورودی و خروجی، (الف) نتایج شبیه‌سازی، (ب) نتایج تجربی

### ۵-۱- اثر اصطکاک و ابعاد نمونه در نتایج شبیه‌سازی

به منظور درک بهتر اثر اصطکاک و ابعاد نمونه بر نتایج آزمایش هاپکینسون، در شکل ۳ نحوه تغییر شکل نمونه و توزیع تنش سر میله‌های ورودی و خروجی در لحظه ورود موج به نمونه و لحظه بیشترین تنش در نمونه نشان داده شده است. این شکل

تنش-کرنش ماده را در شبیه‌سازی وابسته به نرخ کرنش در نظر بگیریم، نمی‌توان انتظار داشت نمودارهای حاصله از شرایط مختلف (اصطکاک و ابعاد نمونه) یکسان باشد چرا که نرخ کرنش در شرایط مختلف متفاوت خواهد بود. بر این اساس چون تمرکز کار حاضر بررسی اثر اصطکاک و ابعاد نمونه است، رفتار ماده در شبیه‌سازی را مستقل از نرخ کرنش در نظر گرفتیم.

### جدول ۲- مشخصات نمونه آزمایش [۲۷]

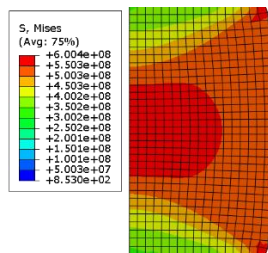
چگالی	۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
مدول یانگ	۷۱۷ گیگا پاسکال
ضریب پواسون	۰/۳۳
تنش تسلیم	۳۵۰ مگا پاسکال

سرعت اولیه میله ضربه زن ۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد که پس از برخورد با میله ورودی سرعت آن کاهش پیدا می‌کند. مدل‌سازی به صورت دوبعدی تقارن محوری انجام شده است. در شکل ۳ مدل اجزا محدود بخشی از میله ورودی، نمونه و بخشی از میله خروجی نشان داده شده است. مش بندی میله در نزدیکی سطوح تماس بین میله‌ها نسبت به جاهای دیگر ریزتر می‌باشد. اندازه مش در میله‌ها در نزدیکی سطوح تماس ۰/۶ میلی‌متر و در وسط میله اندازه مش ۱۵ میلی‌متر می‌باشد و از المان تقارن محوری CAX4R استفاده شده است.

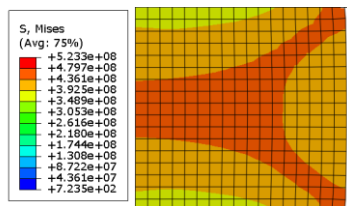
### ۵- نتایج آزمایش و شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه می‌گردد و اثر هر یک از پارامترها بر اعتبار نتایج بررسی می‌شود. سپس جهت تأیید این اثرات نتایج آزمایش‌های انجام شده ارائه خواهد شد.

از آنجا که اصطکاک فلز با فلز بدون روانکاری تا حدود ۰/۵ می‌باشد و با روانکاری تا حدود ۰/۱ و یا کمتر قابل کاهش است، اثر اصطکاک در این محدوده بررسی می‌گردد. همچنین نسبت طول به قطر در نمونه آزمایش هاپکینسون معمولاً نزدیک به یک در نظر گرفته می‌شود ولی بسته به محدودیت‌های تهیه نمونه ممکن است آزمایش بر روی نمونه‌های با نسبت طول به قطر کوچک (ضخامت کم) نیز انجام شود. بر این اساس نتایج برای نسبت طول به قطرهای ۰/۲۵ تا ۱/۵ ارائه خواهد شد.



(الف)



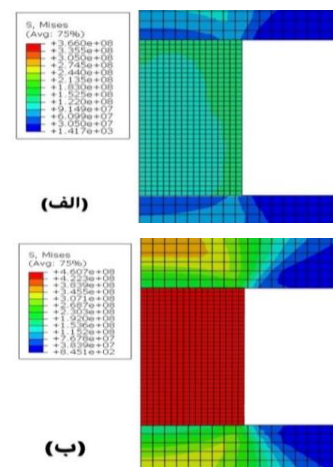
(ب)

شکل ۴- توزیع تنش در نمونه در لحظه آخر بارگذاری برای دو نسبت طول به قطر مختلف و ضریب اصطکاک ۰/۵ (الف نسبت ۱، ب نسبت ۰/۵)

شکل ۵ نمودار تنش- کرنش حاصل از شبیه‌سازی برای نمونه با نسبت طول به قطر ۰/۲۵ و حالات مختلف اصطکاک را نشان می‌دهد و منحنی تنش-کرنش ورودی به نرم‌افزار مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب اصطکاک، نمودار تنش-کرنش نمونه با نسبت طول به قطر ۰/۲۵ از نمودار بدون اصطکاک و همچنین منحنی تنش-کرنش ورودی فاصله می‌گیرد و به‌ظاهر تنش تسلیم افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع ایجاد تنش سه‌بعدی و غیریکنواخت در نمونه (شکل ۴) و از بین رفتن فرض تنش یک‌بعدی در نمونه آزمایش می‌باشد. به عبارت دقیقتر چون تنش اندازه‌گیری شده توسط میله‌های فشاری تنها تنش محوری در راستای میله‌ها است و همچنین وجود تنش سه بعدی که در راستای جانبی نیز فشاری است، مقادیر تنش محوری در حالت با اصطکاک مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در مقایسه با حالت بدون اصطکاک نتایج تا حدود ۵۸٪ در گزارش بیشینه تنش، برای نمونه با نسبت طول به قطر ۰/۲۵ خطا دارد. لازم به ذکر این نتایج موید نتایج ارائه شده توسط منگ و لی [۱۰] می‌باشد. علاوه بر این با افزایش ضریب اصطکاک از مقدار کرنش کلی کاسته می‌شود که دلیل این موضوع نیز صرف انرژی ضربه توسط اصطکاک و در نتیجه

مربوط به نمونه با نسبت طول به قطر ۱/۵ و بدون اصطکاک می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پس از برخورد، طول نمونه کاهش می‌یابد و قطر نمونه افزایش پیدا می‌کند و نمونه با گذشتن از محدوده الاستیک دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. در لحظات ابتدایی توزیع یکنواخت تنش وجود ندارد ولی با گذر زمان و تغییر شکل نمونه توزیع تنش به‌صورت یکنواخت‌تر می‌شود.

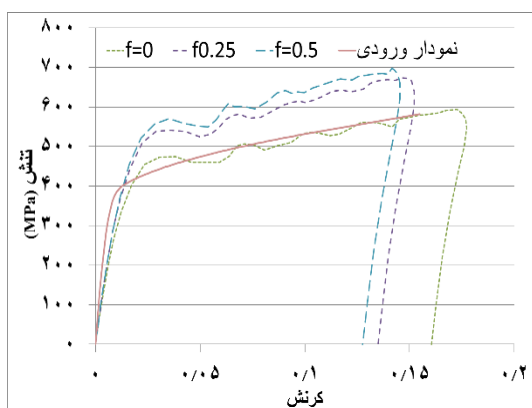
به‌منظور مقایسه بهتر، توزیع تنش در نمونه برای دو نسبت طول به قطر مختلف و ضریب اصطکاک یکسان ۰/۵ در شکل ۴ مقایسه شده‌اند. این نتایج مربوط به لحظه آخر بارگذاری (ماکزیمم مقدار تنش) می‌باشند. مشاهده می‌شود برخلاف حالت بدون اصطکاک (شکل ۳)، در هر دو نمونه با نسبت طول به قطرهای ۰/۵ و ۱/۰ و وجود اصطکاک، توزیع تنش غیریکنواخت خواهد بود و هرچه نسبت طول به قطر کوچک‌تر باشد این مسئله تشدید می‌گردد. همین غیریکنواختی توزیع تنش موجب خطا در نتایج آزمایش‌ها پکینسون خواهد شد که در ادامه ارائه خواهد گردید.



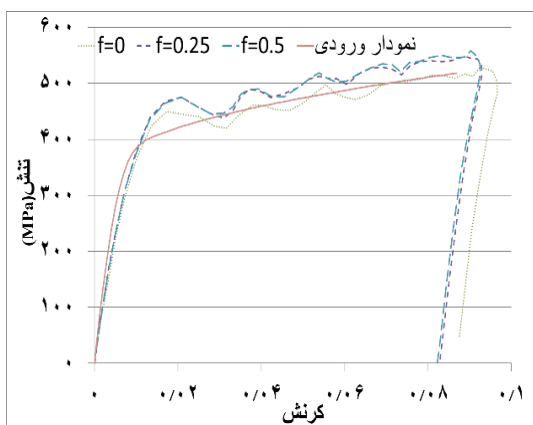
شکل ۳- تغییر شکل و توزیع تنش در نمونه با نسبت طول به قطر ۱/۵ و بدون اصطکاک

(الف) لحظه برخورد، (ب) لحظه بیشترین تنش در نمونه

در نتیجه هر چه نسبت طول به قطر کاهش پیدا کند اصطکاک تأثیر بیشتری بر نتایج آزمایش فشاری هاپکینسون می‌گذارد. مقایسه ناحیه الاستیک شکل‌های ۵ تا ۸ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت طول به قطر، تطابق نتایج با منحنی تنش-کرنش ورودی افزایش می‌یابد. همچنین هر چه طول نمونه کوچک‌تر شود در سرعت و شرایط اصطکاکی برابر مقدار تنش و کرنش نهایی افزایش پیدا خواهد کرد. به‌طور کلی اصطکاک تأثیر بسیار زیادی بر نتایج آزمایش هاپکینسون فشاری می‌گذارد و همواره مقدار آن باید تحت کنترل باشد.



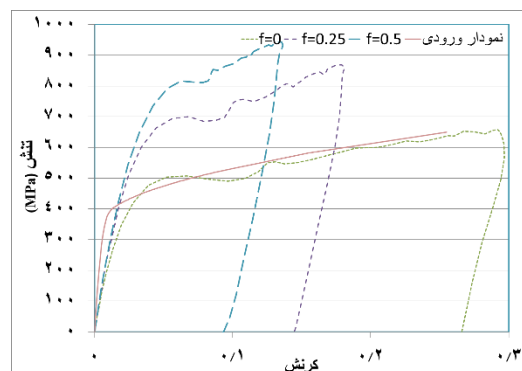
شکل ۶- اثر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش نمونه آزمایش با نسبت طول به قطر ۰/۵ (شبیه‌سازی)



شکل ۷- اثر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش نمونه آزمایش با نسبت طول به قطر ۱ (شبیه‌سازی)

کاهش تغییر شکل کلی نمونه آزمایش می‌باشد. این افزایش تنش و کاهش کرنش نهایی با افزایش اصطکاک به نحوی است که مساحت زیر نمودار تنش-کرنش در مجموع کاهش می‌یابد که مؤید اتلاف انرژی اصطکاکی می‌باشد.

به‌طور کلی اثر افزایش اصطکاک به‌ظاهر مشابه با اثر افزایش نرخ کرنش می‌باشد (افزایش استحکام و کاهش کرنش کلی). این در حالی است که در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، مدل ساختاری نمونه وابسته به نرخ کرنش نیست. به همین دلیل عدم کنترل اصطکاک سبب نتیجه‌گیری غلط از آزمایش هاپکینسون فشاری می‌شود. به همین دلیل سطوح تماسی در آزمایش هاپکینسون فشاری همواره باید توسط مواد مناسب روان کاری گردد و یا با دانستن ضریب اصطکاک اثرات آن اصلاح شود.

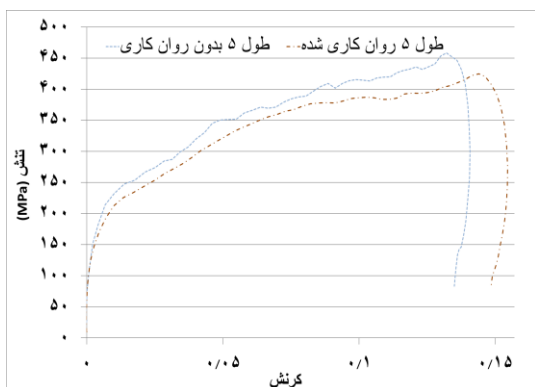


شکل ۸- اثر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش نمونه آزمایش با نسبت طول به قطر ۰/۲۵ (شبیه‌سازی)

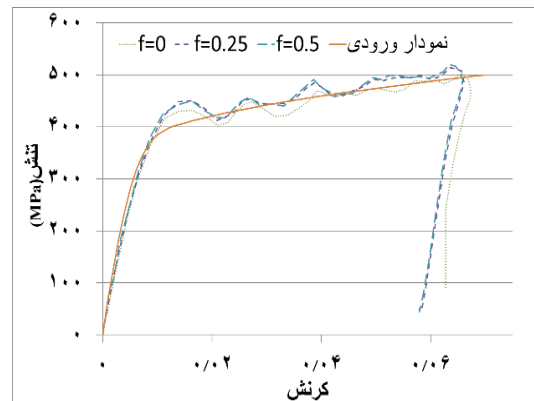
به‌طور مشابه در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نمودارهای تنش-کرنش حالت‌های مختلف اصطکاک در محل تماس نمونه با میله برای نمونه با نسبت طول به قطرهای مختلف ارائه شده است و با نمودار مرجع ورودی به نرم‌افزار مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طول به قطر نمونه اثرگذاری اصطکاک بر نتایج آزمایش فشاری هاپکینسون کاهش می‌یابد. به‌طور مشخص با نسبت طول به قطر ۱ و ۱/۵ نتایج مربوط به اصطکاک ۰/۲۵ و ۰/۵ تقریباً یکسان می‌باشد و دقت قابل قبولی دارد. مشاهده می‌شود در مقایسه با حالت بدون اصطکاک نتایج مربوط به نمونه با نسبت طول به قطر ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ بترتیب تا حدود ۰/۱۸، ۰/۹ و ۰/۵ در گزارش بیشینه تنش، خطا دارد.



همچنین در نمودارهای تنش- کرنش این شکل‌ها مشاهده می‌شود همانند نتیجه‌ای که در شبیه‌سازی‌ها به دست آمد، اثر افزایش اصطکاک ظاهراً مشابه با اثر افزایش نرخ کرنش می‌باشد (افزایش استحکام و کاهش کرنش کلی) و هر چه اصطکاک کمتر باشد اتلاف انرژی کمتر شده و کرنش نمونه بیشتر می‌شود. در سرعت‌های تقریباً برابر در نمونه‌های آزمایشگاهی با افزایش طول نمونه نتایج دقیق‌تری به دست می‌آید و اثر روانکاری کمتر می‌شود؛ به عبارت دیگر در آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه با نسبت طول به قطر ۱/۵، نتایج با و بدون روانکاری به هم نزدیک‌تر از نتایج با و بدون روانکاری برای نمونه با نسبت طول به قطر ۰/۵ می‌باشد. به طور کلی ارتباط بین آزمایش‌های تجربی در کنار نتایج شبیه‌سازی مقایسه روند کلی تغییرات میزان خطای ایجاد شده بر اثر وجود اصطکاک در نسبت طول به قطرهای مختلف می‌باشد. همانطور که مشاهده شده است خطای حاصل در هر دو حالت روند مشابهی را نشان می‌دهد. ضرایب اصطکاک انتخاب شده در شبیه‌سازی برای بازه صفر تا نیم تقریباً مشابه شرایط اصطکاک تماسی بین دو فلز در حالت‌های با و بدون اصطکاک می‌باشد. مشاهده می‌شود اختلاف بین نمودارهای تنش-کرنش تجربی برای نسبت منظر ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ بترتیب حدود ۱۰٪، ۵٪ و ۲٪ می‌باشد که روندی مشابه نتایج شبیه‌سازی دارد.



شکل ۹- اثر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش نمونه آلومینیوم با نسبت طول به قطر ۰/۵ در آزمایش تجربی



شکل ۸- اثر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش نمونه آزمایش با نسبت طول به قطر ۱/۵ (شبیه‌سازی)

لازم به ذکر است در صورت استفاده از مدل‌های وابسته به نرخ کرنش مانند جانسون-کوک، روندی مشابه با شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که با تغییر ضریب اصطکاک و نسبت طول به قطر نمودار تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی تغییر می‌کند. با این وجود به دلیل تغییر نرخ کرنش مقایسه با نمودار ورودی به راحتی میسر نیست، لذا این نتایج جهت رعایت اختصار ارائه نشده‌اند.

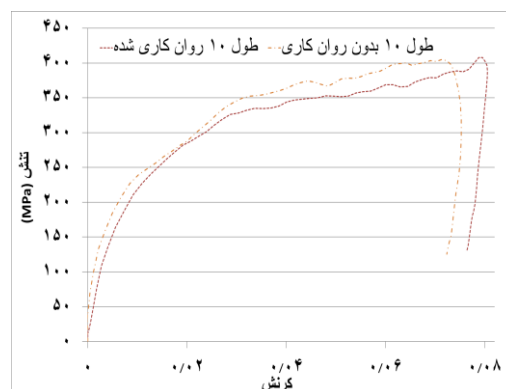
#### ۵-۲- اثر اصطکاک و ابعاد نمونه در نتایج آزمایشگاهی

آزمایش فشار هاپکینسون با دستگاه دانشگاه علم و صنعت برای ماده آلومینیوم در دو حالت اصطکاک تماس عادی و تماس با استفاده از روان‌کننده‌ها برای سه حالت مختلف نسبت طول به قطر نمونه‌ها با قطر ۱۰ میلی‌متر و طول‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر انجام شده است که معادل نسبت طول به قطرهای ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ می‌باشد. در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ تأثیر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش برای این نمونه‌های آلومینیومی آورده شده است. همه آزمایش‌ها در سرعت تقریباً یکسان انجام شده است و طبق روابط، نرخ کرنش در نمونه با طول کمتر بیشتر و در نتیجه کرنش نهایی آن نیز بیشتر است. باین‌وجود اختلاف نمودار تنش-کرنش بر اساس آنچه در بخش نتایج شبیه‌سازی ذکر گردید- برای نسبت طول به قطرهای مختلف بیشتر ناشی از اثرات اصطکاک می‌باشد و وابستگی به نرخ کرنش در محدوده موردبررسی برای نمونه آلومینیوم ناچیز می‌باشد.

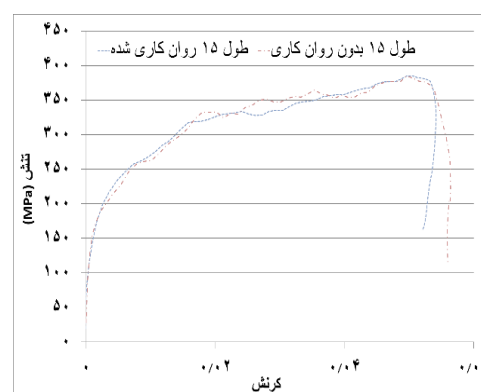
می‌گردد؛ بنابراین در آزمایش‌های هاپکینسون فشاری همیشه باید از مواد روان کار استفاده کرد. عامل تأثیرگذار دیگر بر نتایج آزمایش هاپکینسون نسبت طول به قطر نمونه است که در این تحقیق با ثابت نگه‌داشتن قطر نمونه این نسبت با افزایش طول نمونه تغییر می‌کند. از طرف دیگر با کاهش طول نمونه یا کاهش نسبت طول به قطر نمونه اثرگذاری اصطکاک بر نتایج آزمایش بیشتر می‌شود و نتیجه از مقدار واقعی خود فاصله می‌گیرد. توزیع غیریکنواخت تنش یکی از دلایل اصلی این مسئله می‌باشد. همچنین مقداری از انرژی با اصطکاک تلف می‌شود و کرنش کمتری در نمونه حاصل می‌شود. به‌طور خلاصه می‌توان گفت با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله می‌توان قبل از انجام آزمایش تجربی، شرایط واقعی را تا حد خوبی شبیه‌سازی نموده و از اعتبار آزمایش‌ها تحت شرایط موردنظر اطلاع یافت.

## مراجع

- [۱] اعتمادی ا، زمانی اشنی ج، موسوی م، فرانچسکنی ا. (۱۳۹۳) طراحی، ساخت و آزمایش دستگاه میله هاپکینسون برای تعیین تنش جریان در فلز مس در نرخ کرنش های بالا. مواد پیرانرژی. (۲۹ (پیاپی ۲۳)):-
- [2] Gray GT. (2000). Classic split-Hopkinson pressure bar testing. ASM Handbook, Mechanical testing and evaluation. American society for metals.
- [3] Perogamvros N, Mitropoulos T, Lampeas G. (2016). Drop Tower Adaptation for Medium Strain Rate Tensile Testing. Exp Mech. 56(3):419-436.
- [4] Jordan JL, Siviour CR, Sunny G, Bramlette C, Spowart JE. (2013). Strain rate-dependent mechanical properties of OFHC copper. J Mater Sci. 48(20):7134-7141.
- [5] Bell JF. (1966). An experimental diffraction grating study of the quasi-static hypothesis of the split hopkinson bar experiment. J. Mech Phys Sol. 14(6):309-327.
- [6] Lifshitz J, Leber H. (1994). Data processing in the split Hopkinson pressure bar tests. Int J Impact Eng. 15(6):723-733.
- [7] Follansbee PS. (1985). The hopkinson bar. Metals handbook. 8(9):198-217.
- [8] Zencker U, Clos R. (1999). Limiting conditions for compression testing of flat specimens in the split hopkinson pressure bar. Exp Mech. 39(4):343-348.
- [9] Hartley RS, Cloete TJ, Nurick GN. (2007). An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test. Int J Impact Eng. 34(10):1705-1728.



شکل ۱۰- اثر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش نمونه آلومینیوم با نسبت طول به قطر ۱۰/۰ در آزمایش تجربی



شکل ۱۱- اثر اصطکاک بر نمودار تنش-کرنش نمونه آلومینیوم با نسبت طول به قطر ۱۰/۵ در آزمایش تجربی

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با انجام آزمایش میله فشاری هاپکینسون و همچنین شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس مشاهده شد که یکی از عواملی که نتایج آزمایش دستگاه هاپکینسون فشاری را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، اثر اصطکاک بین نمونه آزمایش و میله‌های فشار می‌باشد. اندازه‌گیری مقدار اصطکاک به‌آسانی دیگر عوامل نمی‌باشد، بنابراین آگاهی از مقدار اثر آن و کنترل آن، سبب افزایش دقت نتایج می‌گردد. به همین منظور شبیه‌سازی با مقادیر مختلف ضریب اصطکاک انجام شد و مشاهده گردید که بهترین نتیجه زمانی به دست می‌آید که مقدار ضریب اصطکاک صفر باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک نتایج به‌شدت تغییر پیدا می‌کند و اثر افزایش ضریب اصطکاک مشابه با افزایش نرخ کرنش در نمونه آزمایش می‌باشد و این تشابه اغلب سبب نتیجه‌گیری نادرست

- [19] Quinn R, Zhang L, Cox M, Townsend D, Cartwright T, Aldrich-Smith G, Hooper P, Dear J. (2020). Development and Validation of a Hopkinson Bar for Hazardous Materials. *Exp Mech*. 60(9):1275-1288.
- [20] Chouhan H, Asija N, Gebremeskel SA, Bhatnagar N. (2017). Effect of Specimen Thickness on High Strain Rate Properties of Kevlar/Polypropylene Composite. *Procedia Engineer*. 173:694-701.
- [21] Xu P, Tang L, Zhang Y, Ni P, Liu Z, Jiang Z, Liu Y, Zhou L. (2022). SHPB experimental method for ultra-soft materials in solution environment. *International J. Imp Engng*. 159:104051.
- [22] Kim Y-B, Kim J. (2021). Influence of Specimen Thickness on the Acquisition of Al6061-T6 Material Properties Using SHPB and Verified by FEM. *Mater*. 14(1):205.
- [23] Asadi P, Ashrafi MJ, Fakhimi A. (2021). Physical and numerical evaluation of effect of specimen size on dynamic tensile strength of rock. *Comput Geotech*. 104:538.
- [24] Wang J, Ma L, Zhao F, Lv B, Gong W, He M, Liu P. (2022). Dynamic strain field for granite specimen under SHPB impact tests based on stress wave propagation. *Underground Space*.
- [۲۵] نقدآبادی ر، اشرفی مج، سهراب پور س. (۲۰۱۱). مطالعه تجربی و عددی پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی موج ورودی در آزمایش میله فشاری هایپکینسون. فصلنامه مکانیک هوافضا. ۶:-(4)
- [26] Panowicz R, Konarzewski M. (2020). Influence of imperfect position of a striker and input bar on wave propagation in a split Hopkinson pressure bar (SHPB) setup with a pulse-shape technique. *Appl Sci*. 10(7):2423.
- [27] Fan X, Suo T, Sun Q, Wang T. (2013). Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at elevated temperatures and different strain rates. *Acta Mech Solida Sin*. 26(2):111-120.
- [10] Meng H, Li QM. (2003). Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments. *Int J Impact Eng*. 28(5):537-555.
- [11] Naghdabadi R, Ashrafi M, Arghavani J. (2012). Experimental and numerical investigation of pulse-shaped split Hopkinson pressure bar test. *Mat Sci Eng A-Struct*. 539:285-293.
- [12] Bagher Shemirani A, Naghdabadi R, Ashrafi MJ. (2016). Experimental and numerical study on choosing proper pulse shapers for testing concrete specimens by split Hopkinson pressure bar apparatus. *Constr Build Mater*. 125:326-336.
- [13] Mohamadzadeh M, Davoodi B. (2021). Finite element simulation of Hopkinson compression test to investigate the dynamic behavior of composite materials. *J Sci Tech Comp*. 7(4):1263-1270.
- [14] Zhong WZ, Rusinek A, Jankowiak T, Abed F, Bernier R, Sutter G. (2015). Influence of interfacial friction and specimen configuration in Split Hopkinson Pressure Bar system. *Tribol Int*. 90:1-14.
- [15] Siviour CR, Walley SM. (2018). Inertial and frictional effects in dynamic compression testing. *The Kolsky-Hopkinson Bar Machine*. Springer; p. 205-247.
- [16] Tyas A, Ozdemir Z. (2014). On backward dispersion correction of Hopkinson pressure bar signals. *Philos Trans R Soc A*. 372(2023):20130291.
- [17] Bragov AM, Lomunov AK, Lamzin DA, Konstantinov AY. (2019). Dispersion correction in split-Hopkinson pressure bar: theoretical and experimental analysis. *Continuum Mech Therm*. 1-13.
- [18] Majzoobi GH, Rahmani K, Atrian A. (2018). An Experimental Investigation into Wear Resistance of Mg-SiC Nanocomposite Produced at High Rate of Compaction. *J Stress Anal*. 3(1):35-45.