

استفاده از دستگاه تست هاپکینسون در تعیین رفتار دینامیکی

مواد سرامیکی

بهنام داودی، سمیه نیکمردان

دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

s.nikmardan86@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده: سرامیک‌ها موادی سخت و شکننده بوده و معمولاً استحکام فشاری بیشتری نسبت به فلزات دارند. از آنجایی که در اکثر سرامیک‌ها قبل از شکست تنها کرنش الاستیکی ایجاد می‌شود، اندازه‌گیری دقیق این کرنش‌ها با استفاده از دستگاه تست هاپکینسون مرسوم کار ساده‌ای نیست. در این مقاله محدودیت‌های این روش در تست سرامیک‌ها و اصلاحات لازم از قبیل نصب کرنش‌سنج‌ها بر روی نمونه، قرار دادن نمونه مابین اینسرت‌هایی با استحکام بالا و دارای امپدانس مشابه با امپدانس میله‌های فشار برای جلوگیری از تورفتگی در آن‌ها و نیز استفاده از مجموعه‌ی "سد مومنتم" به منظور عدم بارگذاری مجدد نمونه بیان شده است. سایر موارد بحث شده در این مقاله شامل حداکثر نرخ کرنش قابل دستیابی در سرامیک‌ها با استفاده از دستگاه تست هاپکینسون دو میله‌ای، لزوم استفاده از شکل‌دهنده‌ی موج ورودی، استفاده از ضربه‌زن مخروطی شکل، نکات قابل توجه در طراحی نمونه و تأثیر اصلاحات پیشنهادی بر روی امواج ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌ها با استفاده از شبیه‌سازی در کد تجاری اجزای محدود ABAQUS/Explicit می‌باشد.

کلید واژه: مواد سرامیکی، دستگاه تست هاپکینسون نوع فشاری، رفتار دینامیکی، نرخ کرنش بالا.

۱- مقدمه

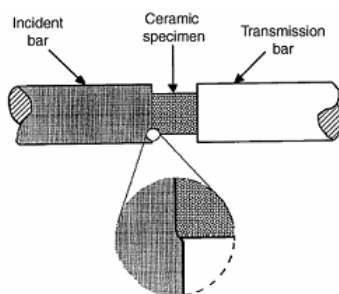
برای طراحی مهندسی اغلب اجزا و قطعات مورد استفاده در صنایع مختلف، نیاز به بررسی خواص مکانیکی آن‌ها می‌باشد که معمولاً این کار با استفاده از منحنی‌های تنش-کرنش انجام می‌گیرد. از آنجایی که رفتار دینامیکی یک ماده می‌تواند کاملاً متفاوت از رفتار استاتیکی آن باشد، در گستره‌ی وسیعی از کاربردهای مهندسی (صنایع حمل و نقل، صنایع دفاعی، جوشکاری انفجاری و دیگر زمینه‌های مشابه) پیش بینی رفتار مواد به هنگام بارگذاری دینامیکی لازم و ضروری است. دستگاه تست هاپکینسون دو میله‌ای نوع فشاری^۱ (SHPB) که برای اولین بار توسط کولسکی [۱] ساخته شد، ابزاری بسیار مناسب برای مطالعه‌ی رفتار دینامیکی مواد در کرنش‌های زیاد و نرخ کرنش‌های بالا (در محدوده‌ی بین $10^2 s^{-1}$ تا $10^4 s^{-1}$) در مقایسه با نرخ بارگذاری شبه استاتیکی ($10^{-3} s^{-1}$) می‌باشد. این دستگاه ابتدا به صورت فشاری و سپس در انواع کششی [۲] و پیچشی [۳] مورد استفاده قرار گرفت. اخیراً انواع ترکیبی کششی-پیچشی و یا فشاری-پیچشی نیز کاربرد وسیعی پیدا کرده است.

موادی که در دهه‌های گذشته توسط دستگاه‌های تست هاپکینسون مورد بررسی قرار گرفته‌اند اغلب فلزات بودند. روند افزایش استفاده از این دستگاه‌ها بخصوص نوع فشاری آن باعث شده است تا مواد غیر فلزی از قبیل بتون، سنگ، کامپوزیت‌ها و مواد

^۱ Split Hopkinson Pressure Bar

بیومکانیک نیز مورد آزمایش قرار گیرند. حالت‌های خاص در تست این مواد تکنیک‌های جدیدی را به وجود آورده است. به عنوان مثال در تست مواد با امیدانس کم از آنجایی که مقدار قابل توجهی از پالس منتقل شده، مستهلک می‌شود و نسبت سیگنال به نویز کاهش می‌یابد، به منظور تقویت سیگنال انتقالی به میله‌ی دوم می‌توان سطح مقطع میله را کم و یا مقدار امیدانس ماده‌ی آن را کاهش داد. همچنین می‌توان سیگنال را توسط ابزارهای بسیار حساس‌تر از کرنش‌سنج‌ها مانند یک کریستال کوآرتز اندازه‌گیری کرد.

در یک سیستم هاپکینسون کلاسیک، تنش تسلیم نمونه باید به مقدار قابل توجهی کمتر از تنش تسلیم میله‌های فشار باشد؛ در این صورت انتهای میله‌های اول و دوم که در تماس با نمونه هستند به هنگام تغییر شکل نمونه مسطح باقی می‌مانند. همچنین باید امیدانس نمونه در مدت زمان بارگذاری کمتر از امیدانس میله‌ها باشد. در چنین شرایطی پالس کششی که از نمونه به داخل میله‌ی اول منعکس می‌شود مولفه‌ی خوبی برای تعیین سرعت در وجه انتهایی نمونه در طرف میله‌ی اول (نسبت به تعیین سرعت در وجه دیگر آن که در طرف میله‌ی دوم قرار دارد) می‌باشد. اما هنگامی که مواد خیلی سخت از قبیل سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های سرامیکی در دستگاه هاپکینسون فشاری تست شوند از پالس برگشتی برای تعیین دقیق مقدار نرخ کرنش در نمونه نمی‌توان استفاده کرد. در واقع اگر قطر نمونه به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر از قطر میله‌ها نباشد، ممکن است امیدانس نمونه نزدیک به مقدار امیدانس میله‌ی اول و یا حتی در مواردی بیشتر از آن شود که نتیجه یک پالس برگشتی کششی بسیار کوچک و یا حتی یک پالس برگشتی فشاری خواهد بود. از طرف دیگر در حالتی که قطر نمونه کوچک‌تر از قطر میله‌ها است، نمونه‌ی سخت باعث ایجاد تورفتگی در انتهای میله‌ها می‌شود (شکل ۱) که چون کل کرنش بوجود آمده تا زمان شکست برای سرامیک‌های سخت و یا کامپوزیت‌های آن‌ها بسیار کم است (۱ یا ۲٪) در صورت استفاده از پالس انعکاس یافته برای محاسبه‌ی کرنش در نمونه، این تورفتگی خطای قابل توجهی را در نتایج به دست آمده بوجود خواهد آورد؛ در حالی که پالس انتقالی همچنان برای تعیین دقیق تنش در نمونه قابل استفاده می‌باشد [۴].



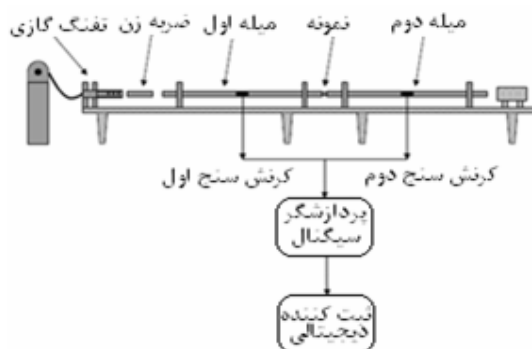
شکل ۱- تغییر شکل بوجود آمده در انتهای میله توسط یک نمونه‌ی سخت سرامیکی [۴]

در تست مواد ترد برای به دست آوردن داده‌های دقیق و قابل قبول نیاز به میله‌هایی با قطر بزرگ‌تر می‌باشد [۵]. متأسفانه در تست نمونه‌های با قطر زیاد توسط دستگاه هاپکینسون، مشکلاتی رخ می‌دهد از جمله نوسان و غیر یکنواختی در تنش و کرنش نمونه که بر روی نتایج تأثیرگذار است. بعلاوه مواد ترد استحکام نسبتاً پایینی داشته و بسیار زودتر از اینکه حالت تنش یکنواخت در نمونه برقرار شود می‌شکنند [۶]. معمولاً تکنیک‌های زیر در تست مواد سخت کاربرد دارند:

- اندازه‌گیری کرنش توسط کرنش‌سنجی که به طور مستقیم به نمونه متصل شده است. در نمونه‌های با سطح مقطع مربعی از دو کرنش‌سنج برای اندازه‌گیری کرنش محوری و نیز کرنش جانبی استفاده می‌شود.
 - استفاده از یک بالشتک فلزی با ضخامت کم بین میله‌ی اول و ضربه‌زن به عنوان شکل دهنده‌ی موج به منظور ایجاد پالس تنشی شیب‌دار. شکل پالس به هندسه‌ی بالشتک، ضخامت آن و همچنین به سرعت ضربه‌زن بستگی دارد.
 - برای جلوگیری از تغییر شکل میله توسط نمونه‌های سخت سرامیکی می‌توان از یک صفحه‌ی کوچک صیقلی از جنس کاربید تنگستن بین میله‌ی اول و نمونه استفاده کرد. تطابق امپدانسی بین اینسرت و میله در چنین ساختارهایی ضروریست.
- در این مقاله روش‌های ممکن در اجرای تغییرات بر روی یک دستگاه هاپکینسون فشاری برای تعیین دقیق رفتار مواد سرامیکی ارائه شده است. ابتدا دستگاه هاپکینسون کلاسیک به طور خلاصه معرفی و اصول آزمایش با استفاده از آن آورده شده است. سپس محدودیت‌های دستگاه هاپکینسون مرسوم در تست مواد سرامیکی بررسی و در مورد روش‌های ممکن برای غلبه بر این محدودیت‌ها بحث شده است. نتایج شبیه‌سازی برای روش تغییر شکل پالس ورودی با استفاده از شکل دهنده‌ی موج و نیز با استفاده از تغییر شکل هندسی میله‌ی ضربه‌زن به منظور تست مواد سرامیکی در بخش شبیه‌سازی اجزای محدود آورده شده است.

۲- دستگاه تست هاپکینسون

تمامی دستگاه‌های هاپکینسون دو میله‌ای نوع فشاری دارای اجزای اصلی یکسانی می‌باشند. این اجزا شامل یک میله‌ی ضربه‌زن، یک میله‌ی ورودی (میله‌ی اول)، یک میله‌ی خروجی (میله‌ی دوم) و نیز سیستمی برای ثبت کرنش‌های بوجود آمده در میله‌های فشار (میله‌های اول و دوم) و یا در نمونه‌ی مورد آزمایش می‌باشد. نمایش شماتیکی یک دستگاه هاپکینسون نوع فشاری در شکل ۲ آورده شده است. نمونه بین میله‌های اول و دوم قرار داده می‌شود. روش آزمایش به این صورت است که یک ضربه‌زن الاستیکی از داخل یک میله‌ی استوانه‌ای توخالی و بلند توسط هوای فشرده به سمت میله‌ی الاستیکی اول پرتاب می‌شود. در انتهای مسیر هنگامی که میله‌ی ضربه‌زن به میله‌ی اول ضربه می‌زند، یک موج تنش در سطح مشترک میله‌ی ضربه‌زن و میله‌ی اول ایجاد می‌شود که این موج در داخل هر دو میله در جهت‌های مخالف و با سرعت c که از ثابت‌های ماده است منتشر می‌شود.



شکل ۲- نمایش شماتیکی یک دستگاه SHPB [۷].

موج تنش ایجاد شده در سطح مشترک به صورت فشاری می‌باشد. موجی که در طول میله‌ی ضربه‌زن به طرف سطح عقب آن حرکت می‌کند از آن سطح به صورت کششی منعکس و به سطح مشترک برمی‌گردد. چون کشش نمی‌تواند از سطح مشترک منتقل شود ضربه پایان می‌یابد. طول موج فشاری ایجاد شده در اثر ضربه با دو برابر طول ضربه‌زن به کار رفته و دامنه‌ی آن نیز با سرعت ضربه‌زن متناسب می‌باشد. این موج در طول میله‌ی اول و به طرف نمونه حرکت می‌کند.

اگر امیدانس مکانیکی نمونه کمتر از امیدانس مکانیکی میله‌ها باشد (که باید باشد)، قسمتی از این موج ایجاد شده به صورت یک موج الاستیک کششی در میله‌ی اول منعکس شده و بقیه به صورت یک موج الاستیک فشاری از طریق نمونه به میله‌ی دوم منتقل می‌شود. معمولاً از پالس‌های ضربه‌ی نسبتاً کوتاه استفاده می‌شود تا یک فاصله‌ی زمانی بین انتهای پالس ضربه (پالس ورودی) و شروع پالس برگشتی در مقطع اندازه‌گیری وجود داشته باشد. برای اینکه نمونه‌ی مورد آزمایش به صورت پلاستیکی تغییر شکل دهد، لازم است دامنه‌ی پالس بارگذاری بیشتر از استحکام تسلیم نمونه باشد. در صورتی که جنس نمونه از مواد صلب تراکم ناپذیر (حجم ثابت) باشد و به طور یکنواخت تغییر شکل دهد، نرخ کرنش در نمونه با دامنه‌ی موج انعکاس یافته و تنش حقیقی در آن با دامنه‌ی موج انتقال یافته نسبت مستقیم خواهد داشت. کرنش حقیقی در نمونه را نیز با انتگرال‌گیری از موج انعکاس یافته می‌توان به دست آورد که با رسم آن برحسب تنش، منحنی تنش - کرنش نمونه در حالت دینامیکی مشخص می‌شود (در موادی که دارای حجم ثابتی نمی‌باشند تنش و کرنش حقیقی در نمونه را با استفاده از آزمایش هاپکینسون نمی‌توان تعیین کرد).

معادلات مربوط به محاسبه‌ی تنش، کرنش و نرخ کرنش در نمونه عبارتند از:

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0 E_0}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2c_0}{l_s} \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2c_0}{l_s} \varepsilon_R(t) \quad (3)$$

که در آن A سطح مقطع، E مدول یانگ، l طول، σ تنش، ε کرنش، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش و t زمان می‌باشد. زیر نویس‌های 0 ، s ، T و R به ترتیب مربوط به میله‌های فشار، نمونه، پالس انتقالی و پالس برگشتی است. c_0 ، سرعت موج طولی در میله‌های فشار از رابطه‌ی $c_0 = \sqrt{E_0 / \rho_0}$ به دست می‌آید که در این رابطه، ρ چگالی است. این معادلات بر اساس فرضیات زیر ارائه شده‌اند:

۱. نمونه‌ی مورد آزمایش به هنگام تغییر شکل تحت تنش یکنواخت و تک محوری قرار دارد.
۲. تغییر شکل میله‌های اول و دوم در طول آزمایش همواره به صورت الاستیک بوده و سطوح انتهایی میله‌ها که در تماس با نمونه قرار دارند به هنگام تغییر شکل نمونه‌ی مورد آزمایش تخت و موازی باقی می‌مانند.
۳. پراکندگی در پالس‌های ورودی، انتقالی و برگشتی به هنگام انتشار در طول میله‌ها حداقل می‌باشد.
۴. توزیع تنش در سطح مقطع میله‌های فشار در یک لحظه‌ی معین کاملاً یکنواخت می‌باشد (بدین معنی که کرنش‌های

اندازه‌گیری شده بر روی سطح میله‌ها با استفاده از کرنش‌سنج‌ها، معرف تنش در نقاط داخلی میله‌های الاستیک است).
 ۵. کرنش در نمونه (که طبق معادله‌ی (۳) با استفاده از موج برگشتی تعیین می‌شود) فقط با یک پالس ورودی فشاری که به نمونه می‌رسد ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر نمونه تنها در معرض یک پالس تنشی واحد تغییر شکل می‌دهد.
 این فرضیات (به جز مورد شماره‌ی ۵) به سادگی در تست فلزات که تغییر شکل پلاستیکی مد نظر است برقرار می‌شوند؛ در صورتی که اکثر آن‌ها در تست سرامیک‌ها که موادی سخت و شکننده با استحکام بالا بوده و قبل از شکست بیشتر از ۱ تا ۲٪ کرنش از خود نشان نمی‌دهند، به هنگام استفاده از روش SHPB مرسوم نقض می‌شوند. توضیح هر یک از ۵ فرض ذکر شده در بالا همراه با نکات قابل توجه در تست سرامیک‌ها در بخش بعدی آورده شده است.

۳- محدودیت‌های دستگاه‌های پکینسون کلاسیک برای تست مواد سرامیکی

فرض اول تضمین می‌کند که قبل از به دست آوردن اطلاعات خواسته شده در مورد رفتار ماده (مانند استحکام شکست) با استفاده از سیگنال‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌ها، تنش در نمونه به حالت تعادل رسیده است. تعادل تنش در کل نمونه هنگامی به دست می‌آید که زمان دوام پالس ورودی به مقدار لازم بزرگتر از زمان حرکت موج طولی در داخل نمونه باشد. در چنین حالتی انعکاس موج کافی در نمونه اتفاق می‌افتد؛ به طوری که پس از آن تنش در نمونه را می‌توان یکنواخت و تک محور فرض کرد. به هنگام تست فلزات، نمونه در زمان چند انعکاس اول موج ورودی در آن که حالت تنش غیریکنواخت است، تغییر شکل الاستیکی می‌دهد. به این دلیل است که اغلب تغییر شکل الاستیکی به دست آمده برای فلزات با استفاده از آزمایش SHPB نادیده گرفته و تنها کرنش‌های پلاستیکی رسم می‌شود. در سرامیک‌ها (که کرنش‌های الاستیکی بخش مهمی از رفتار کلی ماده را تشکیل می‌دهند) شکست نمونه می‌تواند قبل از زمان لازم برای انجام انعکاس موج کافی در داخل نمونه اتفاق افتد. بنابراین استحکام شکست به دست آمده در چنین شرایطی استحکام فشاری تک محور و حقیقی سرامیک را نشان نخواهد داد. چن و همکاران [۸] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود نشان دادند که اگر رابطه‌ی زیر بین حداکثر طول یک نمونه‌ی سرامیکی (l_s)، سرعت موج در داخل آن (C_s) و زمان دوام یک پالس ورودی معین (T) برقرار باشد، داده‌های به دست آمده از آزمایش SHPB را می‌توان قابل قبول فرض کرد.

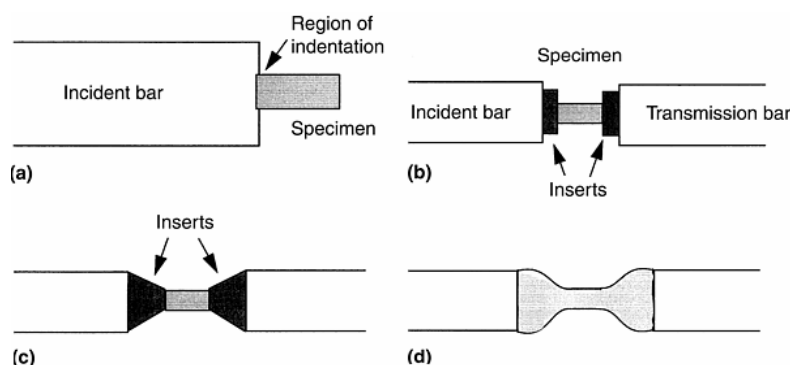
$$l_s = \frac{Tc_s}{8} \quad (۴)$$

رابطه‌ی بالا نشان می‌دهد که زمان لازم برای برقراری تعادل تنش با افزایش طول نمونه افزایش می‌یابد.
فرض دوم معمولاً با انتخاب جنس میله‌های اول و دوم از یک ماده‌ی با استحکام بالا مانند فولاد ماراجینگ برقرار می‌شود. در معادله‌ی مربوط به محاسبه‌ی تنش در نمونه (معادله‌ی (۱)) سطح مقطع میله در صورت کسر و سطح مقطع نمونه در مخرج کسر است؛ بنابراین در تست سرامیک‌ها با کاهش قطر نمونه (یا افزایش قطر میله) می‌توان سطح تنش کافی برای شکست یک نمونه‌ی سرامیکی با استحکام بالا اعمال کرد؛ در حالی که تنش در میله‌های فشار در محدوده‌ی الاستیک جنس میله باقی بماند. ولی چون سرامیک‌ها سخت‌تر از فولاد می‌باشند، می‌توانند در میله‌های فولادی تورفتگی ایجاد کنند (شکل (a) - ۳)؛ در نتیجه

قسمت آخر فرض دوم نقض می‌شود. همچنین این تورفتگی در میله‌های فولادی باعث ایجاد تمرکز تنش پیرامون سطوح انتهایی نمونه و بالطبع حالت تنش غیریکنواخت در داخل نمونه می‌شود که باعث نقض فرض اول نیز می‌شود. تمرکز تنش می‌تواند منجر به شکست زودرس در سرامیک با ایجاد ترک‌های ریز در این نقاط شود. این مشکل با قرار دادن نمونه‌ی سرامیکی مابین دو اینسرت از جنس کاربید تنگستن با استحکام بالا و گذاشتن کل مجموعه در دستگاه هاپکینسون کاهش می‌یابد (شکل (b) - ۳). شرط مهم در این روش این است که اینسرت‌ها نباید مشخصات موج تنش ورودی، برگشتی و انتقالی را به هنگام عبور امواج از سطوح مشترک میله و نمونه تغییر دهند تا مقادیر کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌های واقع بر روی میله‌ها صحیح باشند. این شرط با انتخاب امیدانس برابر با امیدانس میله برای اینسرت‌های کاربید تنگستن به دست می‌آید؛ یعنی:

$$(\rho c A)_{WC} = \rho_0 c_0 A_0 \quad (5)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان قطر اینسرت‌ها را مشخص کرد. طول آن‌ها معمولاً $1/4$ طول نمونه انتخاب می‌شود. تغییر شکل هندسی اینسرت برای کاهش تورفتگی میله‌ها توسط آندرسون و همکاران [۹] پیشنهاد شده است. در این طرح از اینسرت‌های مخروطی شکل سرامیکی با قطر قاعده‌ی برابر با قطر میله‌ها استفاده شده است (شکل (c) - ۳).



شکل ۳- مشکل ایجاد شده به دلیل سختی نمونه‌های سرامیکی و روش‌های پیشنهادی برای حل آن،

(a) نمایش شماتیکی تورفتگی سرامیک سخت در میله‌ها،

(b) مجموعه‌ی اینسرت - نمونه شامل اینسرت‌های کاربید تنگستن با امیدانس برابر با امیدانس میله‌ها،

(c) مجموعه‌ی اینسرت - نمونه شامل اینسرت‌های مخروطی با قطر قاعده‌ی برابر با قطر میله‌ها،

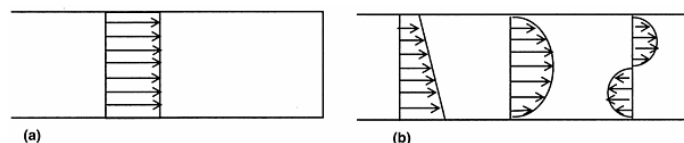
(d) نمونه‌ی سرامیکی استخوانی شکل با قطر انتهایی برابر با قطر میله [۷]

آنالیز اجزای محدود بر روی ساختارهای مختلف اینسرت- نمونه تأیید کرده است که تورفتگی میله‌های فولادی و تمرکز تنش در نمونه می‌تواند با استفاده از اینسرت‌های مخروطی شکل حذف شود [۷]. از طرفی با استفاده از این آنالیز مشخص شد که این نوع از اینسرت‌ها مشخصات امواج منعکس شده و انتقال یافته را به دلیل عدم تطابق امیدانسی با میله‌های فولادی تغییر می‌دهند. معایب دیگر اینسرت‌های سرامیکی مخروطی شکل در مقایسه با اینسرت‌های کاربید تنگستن با قطر ثابت و امیدانس برابر با جنس میله، هزینه‌ی بالای ساخت و نیاز به تغییر قطر داخلی مخروط به هنگام تغییر ابعاد نمونه می‌باشد. نمونه‌ی سرامیکی استخوانی شکل با قطر انتهایی برابر با قطر میله (شکل (d) - ۳) برای کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از تورفتگی

میل‌ها در برخی منابع استفاده شده است [۱۰ و ۱۱]، ولی هزینه‌ی ساخت چنین شکل هندسی از یک ماده‌ی سرامیکی برای نمونه نیز بالاست.

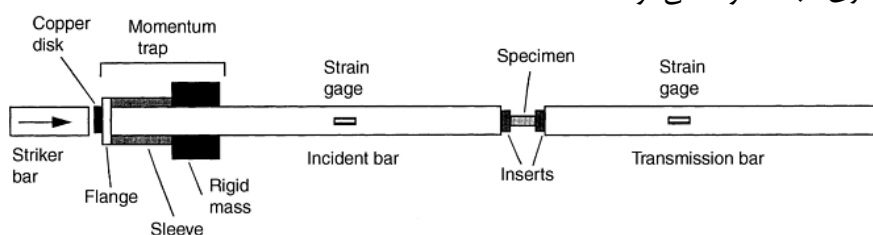
فرض سوم به این نکته اشاره می‌کند که پاسخ تنش - کرنش سرامیک بر روی نمونه‌ی در حال تغییر شکل اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه در فاصله‌ای دورتر از نمونه (و زمانی متفاوت از زمان تغییر شکل نمونه) با استفاده از کرنش‌سنج‌های واقع بر سطح میل‌ی اول و دوم به دست می‌آید (شکل ۲). به عبارت دیگر موج برگشتی (که در تعیین کرنش در نمونه استفاده می‌شود) رفتار نمونه را مشخص می‌کنند. اگر پراکندگی در پالس‌های منتشر شده وجود داشته باشد، دامنه و زمان دوام پالس‌ها با توجه به زمان رسیدن موج به کرنش‌سنج تغییر می‌کند و در نتیجه مقادیر نادرست تنش و کرنش در سرامیک به دست می‌آید. مقدار پراکندگی به اجزای فرکانسی موجود در پالس تنشی منتشر شده بستگی دارد. زمانی که مقدار قطر میل‌ه نزدیک به مقدار طول موج اجزای فرکانسی اصلی پالس باشد (یا هنگامی که زمان دوام پالس در حدود زمان انتقال موج در عرض قطر میل‌ه باشد)، اثرات پراکندگی بسیار شدیدتر می‌شود و استفاده از اندازه‌گیری‌های سطحی در فاصله‌ای دور از نمونه منجر به نتایج غلط از رفتار تنش - کرنش خواهد شد. پیشنهاد شده است که زمان دوام موج حداقل باید از ۱۰ برابر زمان انتقال موج طولی در عرض قطر میل‌ها بزرگ‌تر باشد تا پراکندگی در پالس تنشی منتشر شده به کمترین مقدار برسد [۷]. بنابراین چون حداقل زمان دوام پالس تنشی ورودی و حداکثر کرنش قابل دستیابی در سرامیک محدود است، حداکثر نرخ کرنشی که می‌توان توسط آزمایش SHPB در یک نمونه‌ی سرامیکی به دست آورد نیز محدود می‌شود. به عبارت دیگر حداکثر نرخ کرنش قابل دستیابی در یک نمونه‌ی سرامیکی توسط آزمایش هاپکینسون از دو روش تعیین می‌شود. روش اول بر اساس زمان لازم برای به تعادل رسیدن تنش در نمونه و مقدار کرنش ایجاد شده در آن و روش دیگر بر اساس اثرات پراکندگی در پالس منتشر شده می‌باشد. هر دو روش حداکثر نرخ کرنش را تقریباً بین 2000 s^{-1} و 2600 s^{-1} محدود می‌کنند؛ اگر چه این مقدار می‌تواند با کاهش طول نمونه، کاهش قطر میل‌ه یا افزایش کرنش شکست ماده‌ی سرامیکی (تحت کنترل ریز ساختار) افزایش یابد [۷]. یک روش برای جلوگیری از مشکلات مربوط به پراکندگی، نصب مستقیم کرنش‌سنج‌ها بر روی نمونه‌ی سرامیکی و ثبت کرنش‌های محوری و عرضی در محل به هنگام تغییر شکل نمونه می‌باشد [۱۲ و ۱۳]. از آنجا که اکثر سرامیک‌ها تا مرحله‌ی شکست رفتار الاستیک خطی دارند، تنش شکست را می‌توان از کرنش شکست اندازه‌گیری شده توسط قانون هوک تعیین کرد.

فرض چهارم بر این نکته اشاره دارد که مقادیر به دست آمده از کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی سطح میل‌ها معرف تنش در هر نقطه‌ی داخل آن سطح مقطع است (مانند توزیع تنش نشان داده شده در شکل (a)-۴)، در صورتی که برای توزیع تنش‌های نشان داده شده در شکل (b)-۴ این موضوع صادق نیست و اندازه‌گیری‌های سطحی بی‌معنی می‌باشند. توزیع تنش غیریکنواخت در حالتی که ضربه‌ی بین میل‌ه و ضربه‌زن و میل‌ه‌ی اول به صورت صفحه‌ای نبوده و یا زمان دوام پالس تنشی ورودی نزدیک به زمان انتقال موج طولی در عرض قطر میل‌ه باشد (که در آن صورت اثرات پراکندگی بیشتر می‌شود) اتفاق می‌افتد.



شکل ۴- مثال‌هایی از توزیع (a) تنش یکنواخت و (b) تنش غیر یکنواخت در آزمایش هاپکینسون [۷]

فرض پنجم بر این حقیقت تأکید می‌کند که در آزمایش هاپکینسون مرسوم نمونه‌ی سرامیکی تحت بارگذاری پی در پی (به دلیل انعکاس موج در داخل میله‌ی اول) قرار می‌گیرد، مگر در حالتی که نمونه به هنگام اولین بارگذاری فشاری بشکند. در طراحی کلاسیک دستگاه هاپکینسون (شکل ۲) پالس منعکس شده از نمونه در حالت طبیعی به صورت کششی می‌باشد. هنگامی که این پالس به انتهای میله‌ی اول در طرف میله‌ی ضربه‌زن رسید به صورت یک پالس فشاری به عقب منعکس می‌شود و با حرکت دوباره به طرف نمونه باعث بارگذاری مجدد آن خواهد شد. این فرآیند چندین بار تکرار می‌شود. باید توجه داشت که منحنی تنش - کرنش توسط اولین پالس کرنش انتقالی (معادله‌ی (۱)) و برگشتی (معادله‌ی (۳)) به دست می‌آید و برای کرنش انباشته شده در نمونه (به دلیل بارگذاری‌های پی در پی) محاسبه نمی‌شود. در مورد سرامیک‌ها اگر فرض شود که مقدار دامنه‌ی پالس تنشی ورودی اندکی پایین سطح تنش لازم برای شکست کامل و به مقدار کافی بالای سطح لازم برای ایجاد ترک‌های ریز در نمونه‌ی سرامیکی باشد، آنگاه بارگذاری مجدد توسط پالس‌های برگشتی می‌تواند باعث شکست کامل نمونه‌ی شامل ریز ترک‌ها شود. این مشکل را می‌توان با استفاده از روش هاپکینسون اصلاح شده که در شکل ۵ نشان داده شده است برطرف کرد [۱۴]. در این طراحی پالس کششی برگشتی از نمونه به داخل میله‌ی اول با نصب مجموعه‌ی "سد مومنتم" در انتهای میله‌ی اول در طرف میله‌ی ضربه‌زن حبس می‌شود. این مجموعه به محض ایجاد ضربه توسط ضربه‌زن یک پالس کششی در داخل میله‌ی اول به دنبال پالس فشاری معمول ایجاد می‌کند. همین که نمونه تحت بارگذاری پالس فشاری اولیه قرار گرفت، این پالس کششی میله‌ی اول را از نمونه دور می‌کند و در نتیجه پالس‌های دیگری که به سمت انتهای نمونه حرکت می‌کنند باعث بارگذاری مجدد نمونه نمی‌شوند.

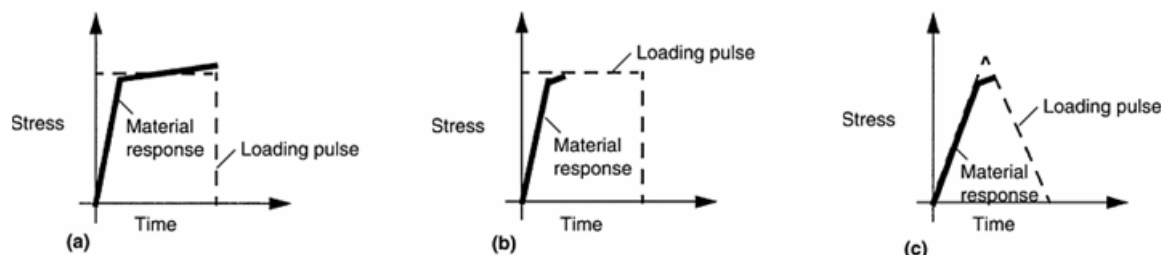


شکل ۵- شکل شماتیکی آزمایش SHPB اصلاح شده با نصب مجموعه‌ی "سد مومنتم" [۱۴]

۴- تغییر شکل پالس ورودی با استفاده از شکل دهنده‌ی موج

در دستگاه هاپکینسون کلاسیک هنگامی که میله‌ی ضربه‌زن به میله‌ی اول در صفحه‌ای عمود بر جهت انتشار موج ورودی ضربه می‌زند، یک پالس مستطیلی شکل در میله‌ی اول ایجاد می‌شود. این شکل موج برای نمونه‌های فلزی مناسب می‌باشد؛ زیرا فلزات کرنش‌های زیادی را تحمل می‌کنند و پالس مستطیلی شکل ظاهراً نرخ کرنش یکنواختی را حین تغییر شکل پلاستیکی اعمال می‌کند (شکل (a)-۶). در نمونه‌های سرامیکی استفاده از پالس مستطیلی شکل پیشنهاد نمی‌شود؛ زیرا سرامیک‌ها قبل از شکست تنها کرنش الاستیکی را تحمل می‌کنند و چون یک پالس مستطیلی شکل حاوی انرژی کل بسیار زیادی می‌باشد، باعث تکه تکه شدن سرامیک شده و انجام تحلیل‌های بعد از آزمایش را غیرممکن می‌سازد. علاوه بر این پالس مستطیلی شکل که در آن سطح تنش با شیب تندی افزایش می‌یابد، به دلیل اختلاف بین شیب نرخ بارگذاری و

پاسخ تنش - کرنش مواد سرامیکی، نرخ کرنش غیریکنواخت به هنگام تغییر شکل الاستیکی در نمونه ایجاد می کند (شکل (b) ۶-). بنابراین در چنین مواردی تغییر شکل پالس ورودی، به طوری که با شیب رفتار الاستیک سرامیک مطابقت کند، پیشنهاد می شود [۷]. شکل (c) ۶- مزیت استفاده از یک پالس شیب دار در تست سرامیک ها را نشان می دهد. در مواردی که دامنه ی پالس تنشی شیب دار بیشتر از تنش لازم برای ایجاد ترک های ریز در سرامیک است، محتوی کل انرژی آن بسیار کمتر از پالس مستطیلی شکل با زمان دوام مشابه می باشد. با تطابق شیب های پالس ورودی و پاسخ تنش - کرنش می توان به نرخ کرنش ثابت حین تغییر شکل الاستیکی سرامیک رسید.



شکل ۶- نمایش شماتیکی تأثیر شکل پالس ورودی بر روی پاسخ تنش - کرنش نمونه ی سرامیکی،
 (a) پالس مستطیلی شکل روی یک نمونه ی شکل پذیر، (b) پالس مستطیلی شکل روی یک نمونه ی سرامیکی،
 (c) پالس شیب دار روی یک نمونه ی سرامیکی [۷]

پالس شیب دار را می توان با قرار دادن یک دیسک فلزی نرم و نازک به ضخامت 0.5 تا 1 میلی متر در انتهای میله ی اول در طرف ضربه زن (همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است) به دست آورد. به هنگام ضربه ی ضربه زن، تغییر شکل پلاستیکی دیسک باعث ایجاد یک پالس شیب دار در میله ی اول می شود. زمان خیز پالس و نیز زمان افت آن را می توان با تغییر جنس شکل دهنده کنترل کرد [۱۴]. نمونه ای از پالس شیب دار به دست آمده از یک دیسک مسی به ضخامت 1 میلی متر و قطر 20 میلی متر به عنوان شکل دهنده ی موج در بخش شبیه سازی اجزای محدود آورده شده است (شکل (b) ۷-). اگرچه شکل دهنده امکان کنترل شکست در نمونه ی سرامیکی با نرخ کرنش ثابت را فراهم می نماید، ولی استفاده از یک دستگاه هاپکینسون کلاسیک مانع از بارگذاری مجدد نمونه به دلیل موج های برگشتی در میله ی اول و شکست کامل آن نمی شود. در نتیجه برای به دست آوردن دقیق منحنی های تنش - کرنش باید از شکل دهنده ی موج در دستگاه اصلاح شده ی شکل ۵ استفاده کرد.

۵- تغییر شکل پالس ورودی با استفاده از تغییر شکل هندسی میله ی ضربه زن

به منظور افزایش زمان دوام پالس ورودی برای رسیدن به حالت تنش یکنواخت در نمونه ی سرامیکی قبل از شکست، می توان شکل هندسی ضربه زن را تغییر داد [۱۵]. اگرچه ضربه زن استوانه ای معمول در دستگاه هاپکینسون کلاسیک برای سرعت های پایین در تست مواد ترد قابل استفاده می باشد [۱۶]، ولی تحقیقات صورت گرفته تأیید کرده است که سرعت کم ضربه برای شکست نمونه ها کافی نیست. علاوه بر آن استفاده از ضربه زن استوانه ای در تست مواد سرامیکی باعث به وجود آمدن نوسان های شدیدی در پالس تنشی مستطیلی شکل به هنگام انتشار در میله ها خواهد شد. محققان روش هایی را برای کاهش

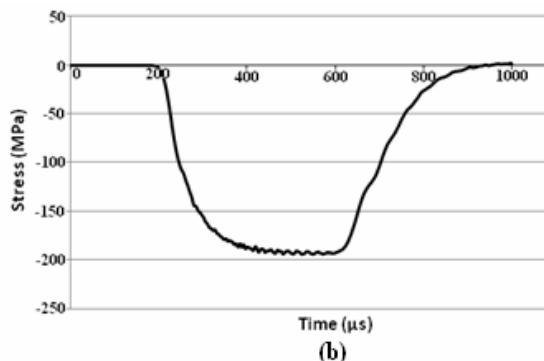
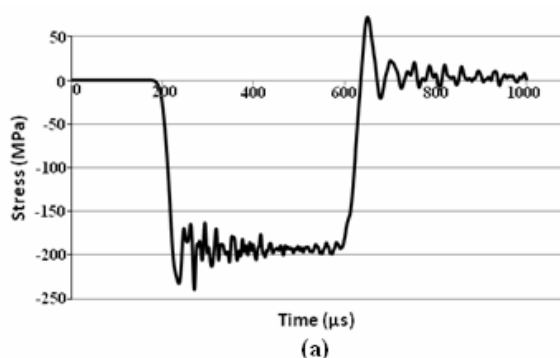
این نوسانات ارائه کرده‌اند [۱۷ و ۱۸]، ولی چنین روش‌هایی قابل استفاده برای تمام مواد نبوده و فقط در میله‌های فشار با قطر کم موثر می‌باشد (در تست مواد ترد برای به دست آوردن داده‌های قابل قبول با استفاده از دستگاه هاپکینسون نیاز به میله‌هایی با قطر بزرگ‌تر می‌باشد). بعلاوه همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، زمان رسیدن به تنش حداکثر در پالس مستطیلی شکل که توسط ضربه‌زن استوانه‌ای ایجاد می‌شود نسبت به زمان لازم برای ایجاد حالت تنش یکنواخت در نمونه بسیار کم است. در نتیجه باید شکل ضربه‌زن طوری تغییر داده شود که بیشترین زمان را در پالس تنشی برای رسیدن به مقدار حداکثر ایجاد کند. در بخش شبیه‌سازی اجزای محدود تعدادی شکل مفروض برای ضربه‌زن در نظر گرفته و با استفاده از نرم افزار Abaqus مدل‌سازی شده‌اند. موج‌های الاستیک به دست آمده از شبیه‌سازی با هم مقایسه و مناسب‌ترین شکل برای ضربه‌زن انتخاب شده است.

۶- شبیه‌سازی اجزای محدود

ابتدا یک دستگاه هاپکینسون نوع فشاری با مشخصات داده شده در جدول شماره ۱ با استفاده از کد تجاری Abaqus مدل‌سازی و موج تنش مستطیلی شکل ایجاد شده در میله‌ی اول توسط ضربه‌زن استوانه‌ای به دست آمد (شکل (a) - ۷). پالس شیب‌دار به وجود آمده در همان دستگاه و در حضور یک دیسک مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر به عنوان شکل دهنده‌ی موج نیز در شکل (b) - ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اگرچه هر دو پالس توسط یک میله‌ی ضربه‌زن مشابه به دست آمده‌اند، ولی زمان دوام پالس شیب‌دار تقریباً ۱/۵ برابر زمان دوام پالس مستطیلی شکل است.

جدول ۱- مشخصات کامل میله‌ی ضربه‌زن و میله‌های فشار

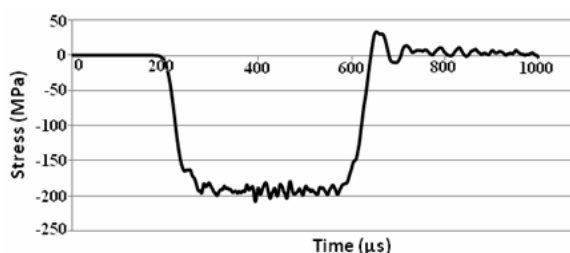
مشخصات	میله‌ی ضربه‌زن	میله‌ی اول	میله‌ی دوم
مدول الاستیکی (GPa)	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۶
سرعت موج (m/s)	۴۸۲۱/۸۲	۴۸۲۱/۸۲	۴۸۲۱/۸۲
چگالی (Kg/m^3)	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰
ضریب پواسون (-)	۰/۳	۰/۳	۰/۳
قطر (mm)	۷۵	۷۵	۷۵
طول (mm)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۳۰۰



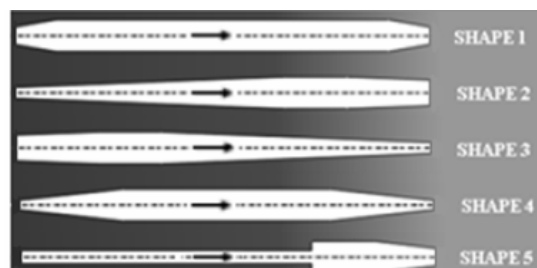
شکل ۷- پالس تنشی ایجاد شده در میله‌ی اول توسط ضربه‌زن استوانه‌ای، (a) پالس مستطیلی شکل بدست آمده بدون وجود شکل دهنده‌ی موج، (b) پالس شیب‌دار به وجود آمده در حضور یک دیسک مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر

سپس تعدادی شکل هندسی دلخواه که در مرجع شماره ۱۵ پیشنهاد شده است، برای ضربه زن در نظر گرفته (شکل ۸) و هر کدام از آن‌ها به ترتیب جایگزین ضربه زن استوانه‌ای شده و شبیه‌سازی تکرار شده است. در تمامی موارد طول کلی ضربه زن برابر ۱ متر و سرعت ضربه ۱۰ m/s می‌باشد. نتایج خروجی در شکل‌های ۹ تا ۱۳ آورده شده است. مشاهده می‌شود که:

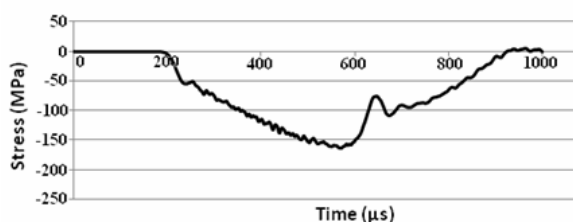
- در تمامی موارد مقدار تنش ورودی در نرخ ثابت و به صورت تدریجی به مقدار حداکثر می‌رسد، ولی مقدار زمان خیز پالس به شکل ضربه زن بستگی دارد.
- در تمامی موارد حداکثر تنش بین ۱۵۰ MPa تا ۲۰۰ MPa می‌باشد که این محدوده برای شکست اکثر نمونه‌های سرامیکی کافی است.



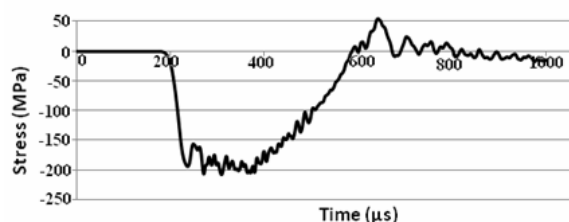
شکل ۹- پالس تنشی ایجاد شده توسط ضربه زن با شکل هندسی ۱



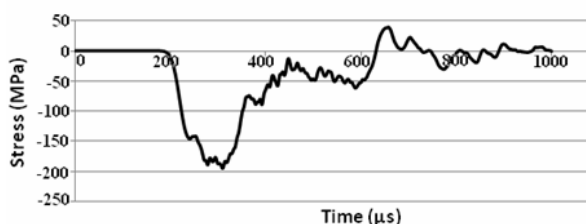
شکل ۸- اشکال هندسی دلخواه برای ضربه زن



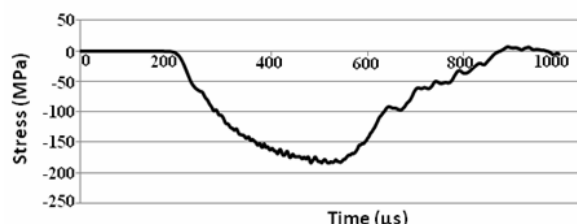
شکل ۱۱- پالس تنشی ایجاد شده توسط ضربه زن با شکل هندسی ۳



شکل ۱۰- پالس تنشی ایجاد شده توسط ضربه زن با شکل هندسی ۲



شکل ۱۳- پالس تنشی ایجاد شده توسط ضربه زن با شکل هندسی ۵



شکل ۱۲- پالس تنشی ایجاد شده توسط ضربه زن با شکل هندسی ۴

با مقایسه‌ی شکل پالس‌های به دست آمده از ضربه زن با اشکال متفاوت، مشاهده می‌شود که پالس مربوط به شکل هندسی ۱ مشابه پالس مستطیلی شکل ایجاد شده توسط ضربه زن استوانه‌ای اما بدون نوسان‌های اصلی است. پالس مربوط به شکل

هندسی ۲ دارای کمترین زمان خیز می‌باشد. پالس مربوط به شکل هندسی ۳ طولانی‌ترین زمان خیز را دارد که علت آن بیشتر بودن طول قسمت مخروطی شکل در انتهای ضربه‌زن در سمت ضربه است. شکل هندسی ۴ برای ایجاد یک پالس مطلوب مناسب به نظر می‌آید، ولی چنین پالسی زمان خیز کافی در نرخ کرنش‌های پایین را تأمین نمی‌کند. شکل هندسی ۵ به دلیل تغییر ناگهانی در قطر طبیعتاً پالسی با نوسان‌های زیاد ایجاد می‌کند. از آنجا که هرچه افزایش تنش تا مقدار لازم برای شکست تدریجی‌تر باشد برای نمونه‌های سرامیکی مناسب‌تر است، می‌توان نتیجه گرفت شکل هندسی ۳ برای ضربه‌زن مورد استفاده در نمونه‌های سرامیکی بهترین گزینه برای انتخاب و ساخت می‌باشد.

۷- نکات قابل توجه در طراحی نمونه‌ی آزمایش

پاسخ تنش-کرنش و استحکام شکست به دست آمده برای سرامیک‌ها از روش هاپکینسون به شدت تحت تأثیر تفرانس‌های ابعاد یک نمونه‌ی استوانه‌ای از قبیل موازی بودن سطوح انتهایی، عمود بودن سطوح انتهایی بر محور نمونه و صافی سطح آن‌ها می‌باشند. همانند تست استاتیکی تک محور برای فلزات و سرامیک‌ها نسبت طول به قطر ۵/۰ تا ۱ برای نمونه در آزمایش‌های با نرخ کرنش بالا پیشنهاد می‌شود. به دلیل اینکه سرامیک‌ها دارای مدول الاستیکی بالا (تقریباً ۱/۵ تا ۲ برابر فولاد) و کرنش شکست کم ($< 1\%$) می‌باشند، کوچک‌ترین تغییر در موازی بودن سطوح انتهایی می‌تواند باعث تمرکز تنش بالایی در این نقاط شود که به ایجاد پلیسه و یا ترک به هنگام تغییر شکل منجر می‌شود. در نتیجه کاملاً ضروریست که سطوح انتهایی نمونه برای رسیدن به درجه‌ی بالایی از تخت بودن (حداقل ۰/۰۱ میلی‌متر) و موازی بودن (در حدود ۰/۰۰۱ میلی‌متر) به منظور جلوگیری از شکست زودرس سنگ‌زنی شوند. با توجه به این که سرامیک‌ها موادی حساس به ترک می‌باشند، بهتر است تمامی سطوح برای کاهش اثرات ماشین‌کاری (که سبب ترک برداشتن سطوح می‌شوند) پرداخت‌کاری شوند.

۸- نتیجه‌گیری

محدودیت‌های موجود در روش SHPB کلاسیک برای تست مواد سرامیکی، ایجاد تغییر در طراحی و روش آزمایش را ضروری می‌نمایاند. برای به دست آوردن داده‌های دقیق و قابل اطمینان در مورد رفتار سرامیک‌ها در نرخ کرنش‌های بالا تغییراتی از قبیل نصب کرنش‌سنج بر روی نمونه، قرار دادن نمونه مابین اینسرت‌هایی با استحکام بالا، سد مومنتم و نیز تغییر شکل پالس تنش‌ی ورودی با استفاده از شکل دهنده‌ی موج و یا تغییر شکل هندسی ضربه‌زن به کار گرفته می‌شود. از آنجایی که در سرامیک‌ها قبل از شکست تنها کرنش الاستیکی ایجاد می‌شود، حداکثر نرخ کرنش قابل دستیابی از روش SHPB محدود می‌باشد که مقدار آن به اندازه‌ی نمونه و خواص الاستیکی آن، زمان دوام پالس ورودی و قطر میله بستگی دارد. به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر کرنش شکست، کنترل مقدار تفرانس تخت و موازی بودن سطوح انتهایی تأکید می‌شود. همچنین نمونه‌ی مورد آزمایش باید به دقت سنگ‌زنی و پرداخت‌کاری شود تا تأثیرات ماشین‌کاری در ترک برداشتن سطوح کاهش یابد.

1. Kolsky H., "An investigation of mechanical properties of materials at very high rates of loading", Proc. Phys. Soc. Lon., B, vol. 62, pp. 676-700, (1949).
2. Harding J., Wood E. D. and Campbell J. D., "Tensile testing of materials at impact rates of strain", J. Mech. Eng. Sci. 2, pp. 88-96, (1960).
3. Duffy J., Campbell J. D. and Hawley R. H., "On the use of a torsional split Hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 aluminium", J. Appl. Mech. 38, pp. 83-91, (1971).
4. Nemat-Nasser Sia., "Recovery Hopkinson Bar Techniques", Mechanical Testing and Evaluation, ASM Handbook, vol. 8, pp. 1068-1093, (2000).
5. Tedesco J. W. and Ross C. A., "Strain-Rate dependent constitutive equations for concrete", Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 120, pp. 398-405, (1989).
6. Zhao H., "A study on testing techniques for concrete-like materials under compressive impact loading", Cement and Concrete Composites, vol. 20, pp. 293-299, (1998).
7. Subhash G. and Ravichandran G., "Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Ceramics", Mechanical Testing and Evaluation, ASM Handbook, vol. 8, pp. 1114-1134, (2000).
8. Chen W., Subhash G. and Ravichandran G., "Evaluation of Ceramic Specimen Geometries Used in Split-Hopkinson Pressure Bar", *Dymat*, vol 1, pp. 191-210, (1994).
9. Anderson C., Jr., O'Donoghue P., Lankford J. and Walker J., "Numerical Simulations of SHPB Experiments for the Dynamic Compressive Strength and Failure of Ceramics", *Int. J. Frac.*, vol 55, pp. 193-2089, (1992).
10. Cosculluela A., Cagnoux J. and Collombet F., "Two Types of Experiments for Studying Uniaxial Dynamic Compression of Alumina", *Shock Compression of Condensed Matter*, S.C. Schmidt, R. D. Dick, J. W. Forbes, and D. G. Tasker, Ed., Elsevier Science Publishers, pp. 951-954, (1991).
11. Blumenthal W. R., "High Strain Rate Compression and Fracture of B4C-Aluminum Cermets", *Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials*, M. A. Meyers, L. E. Murr, and K. P. Staudhmmmer, Ed., Marcel Dekker, pp. 1093-1100, (1992).
12. Subhash G. and Nemat-Nasser S., "Dynamic Stress-Induced Transformation and Texture Formation in Uniaxial Compression of Zirconia Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, vol 76, pp. 153-165, (1993).

13. Subhash G. and Nemat-Nasser S., "Uniaxial Stress Behavior of Y-TZP", *J. Mater. Sci.*, vol 25, pp. 5949–5952, (1993).
14. Nemat-Nasser S., Isaacs J. B. and Starrett J.E., "Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments", *Proc. R. Soc. (London) A*, vol 435, pp. 371–391, (1991).
15. Anil, K., Lok, T. S. and Zhao, P. J., "Design of an Impact Striker for a Split Hopkinson Pressure Bar", *Journal of The Institution of Engineers*, vol. 44, pp. 119-130, (2004).
16. Lok T. S., Li X., Liu D. and Zhao P. J., "Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate", *Jour Mat. Civil Engg, ASCE*, vol. 14, pp. 262-269, (2002).
17. Follansbee P. S. and Frantz C., "Wave propagation in the split Hopkinson pressure bar", *Journal of Engineering Material Technology*, vol. 105, pp. 61-67, (1983).
18. Tyas A. and Waston A. J., "An investigation of frequency domain dispersion correction of pressure bar signals", *Int. Jour. of Impact Engineering*, vol. 25, pp. 87-101, (2001).