

تحلیل تجربی سرعت حد بالستیک اهداف بتنی هوادار سبک اتوکلاو شده تحت نفوذ پرتابه صلب

عمار بیات^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، هادی صبوری^۳، احسان پدرام^۴، شیرعلی فارسوانی محمدی^۵

۱- دانشجوی دکتری ۲- استاد ۳- کارشناس ارشد ۴- دانشجوی کارشناس ارشد دانشگاه تربیت مدرس - تهران ۳- استادبار دانشگاه خوارزمی - تهران
(تاریخ وصول: ۹۵/۴/۲۱، تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۰)

چکیده

در این مقاله سرعت حد بالستیک بتن هوادار سبک اتوکلاو شده تحت نفوذ پرتابه‌های صلب مختلف به صورت تجربی به دست آمده است. برای این کار ابتدا بلوک‌های صنعتی موجود در ابعاد $600 \times 250 \times 200$ میلی‌متر، به نمونه‌های $125 \times 125 \times 50$ میلی‌متر برش داده شدند. پس از آن با استفاده از دستگاه آزمون شلیک، نمونه‌ها تحت شلیک سه نوع پرتابه با دماغه‌ها و سرعت‌های متفاوت قرار داده شدند. این سه نوع پرتابه شامل پرتابه‌های با دماغه سر تخت، اجابو و مخروطی است. در این پژوهش الگوی تخریب و عمق نفوذ بررسی و با بتن کلاسیک مقایسه شد که تفاوت آشکاری در مرحله اولیه نفوذ و شکل‌گیری حفره مربوطه دارند. به دلیل متفاوت بودن وزن پرتابه‌ها و همچنین یکسان نبودن سرعت‌های ورودی، انرژی اولیه برای سه دماغه محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌های پایین با انرژی‌های برابر، عمق نفوذ ارتباط مستقیم با دماغه پرتابه دارد ولی هر چه انرژی افزایش می‌یابد این ارتباط کم می‌شود که می‌توان به این علت دانست که با افزایش سرعت، مد غالب مد برش دیواره است. در نهایت، نتایج به دست آمده با هم مقایسه و پیرامون علل تفاوت‌ها در مکانیزم نفوذ و شکل‌گیری حفره‌ها بحث و دلیل تفاوت‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: سرعت حد بالستیک، بتن هوادار سبک اتوکلاو شده، عمق نفوذ، پرتابه صلب.

Experimental Analysis of Ballistic Limit Velocity of Autoclaved Aerated Concrete Targets under Rigid Projectile Penetration

A. Bayat¹, G. H. Liaghat^{2*}, H. Sabouri³, E. Pedram⁴, S. A. Farsavani Mahamadi⁵

1,2,4,5-Tarbiat Modares University, Tehran

3-Kharazmi University, Tehran

(Received: 7/11/2016, Accepted: 10/1/2016)

Abstract

In this paper, experimental analysis of ballistic limit velocity of autoclaved aerated concrete (AAC) targets under rigid projectile penetration is presented. Industrial blocks with dimension of $600 \times 250 \times 200$ (mm) were cut into $125 \times 125 \times 50$ (mm) samples, impacted by gas gun using three different nose shaped projectiles (flat, ogive and conic). In this study damage mechanism and penetration depth were investigated and compared with conventional concrete which revealed significant difference in the initial penetration and cratering phase. Due to difference of weight and initial velocity of the projectiles, initial energy for three- nose shape was measured. The results show that in low velocity with equal energy, deep penetration has a direct relation with nose shape, but as energy increased, this relation decline which could be found that by rising velocity, shearing mode become dominant. Finally, the result compared and the difference between penetration mechanisms and cratering were discussed and investigated.

Keywords: Ballistic Limit Velocity, Autoclaved Aerated Concrete, Penetration Depth, Rigid Projectile.

۱- مقدمه

با دماغه نیمه‌کروی ارائه دادند. در این تحلیل آن‌ها از نظریه انبساط حفره کروی استفاده کردند و اثر اصطکاک را نیز لحاظ کردند و در نهایت مسئله مورد نظر را در نرم‌افزار LS-DYNA مدل‌سازی کرده و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند. محققین زیادی انرژی ضربه را به عنوان دلیل اصلی خرابی موضعی در پدیده دینامیکی ضربه معرفی کرده‌اند [۹]. یکی از مزیت‌های بتن این است که به آسانی به هر شکل دلخواه مورد نیاز تولید می‌شوند، بتن به عنوان ماده ساختمانی در گستره عظیمی از ساختمان‌ها، پل‌ها، و سازه‌های مهندسی استفاده می‌گردد. این ماده دومین ماده پر مصرف در دنیا بعد از آب است، بنابراین در سازه‌های بتنی، وزن نشان‌دهنده سهم بزرگی از بارگذاری در سازه است و مزیت‌های زیادی در پایین آوردن چگالی بتن وجود دارد. علاوه بر این با بتن سبک کار فرم‌دهی نیاز به فشار کمتری در مقایسه با بتن معمولی دارد و همچنین وزن کل مواد به کار گرفته‌شده کاهش می‌یابد در حالی که کاربری افزایش می‌یابد. بتن سبک همچنین عایق حرارتی بهتری نسبت به بتن معمولی است. با روش‌های مناسب تولید بتن‌های سبک در گستره زیادی از چگالی ۳۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قابل دستیابی است [۱۰].

بتن سبک را می‌توان نوعی از بتن دانست که شامل عامل گسترش افزایش حجم مخلوط است، در حالی که ویژگی‌هایی مانند افزایش توانایی و کاهش وزن مرده را باعث می‌شود که سبک‌تر از بتن معمولی است. بتن سبک را می‌توان با تزریق هوا در ترکیب، حذف کردن سنگدانه‌های ریز یا با جایگذاری آن‌ها با سنگدانه‌های متخلخل، سلولار^۱ و تو خالی به دست آورد [۱۱ و ۱۲]. مبشر و همکارانش [۱۳]، برخی از خواص مکانیکی و فیزیکی از جمله اندازه‌گیری تخلخل سازه، تغییرات چگالی، مقاومت فشاری؛ خواص خمشی، فشاری و کششی؛ هدایت گرمایی و مقاومت به ضربه سقوط وزنه^۲ را برای بلوک‌های بتنی هوادار سبک اتوکلاو شده و بلوک‌های بتنی سبک هوادار تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن بدون پدیده اتوکلاو به دست آوردند. ون و یانگ [۱۴]، به ارائه فرمولی برای پیش‌بینی عمق نفوذ در اهداف بتنی برای پرتابه با دماغه‌های متفاوت پرداختند. دماغه پرتابه‌ها در فرمول به صورت مخروطی، اجایو، سرتخت و نیم کروی در نظر گرفته شده است. فرمول ارائه‌شده بیان می‌کند که رفتار دماغه سرتخت و مخروطی با زاویه راس بیشتر از ۹۰ درجه را تقریباً می‌توان یکسان دانست.

از آنجا که تحقیقات انجام‌شده بر روی بتن‌های سبک هوادار اتوکلاو شده در بحث ضربه و نفوذ کم است، آزمایش تعیین سرعت حد بالستیک برای این محصول انجام نشده است که می‌تواند به دلیل جدید بودن این محصول نسبت داده شود. بنابراین این نیاز وجود دارد تا این کمبودها جبران شود. برای این مهم نیاز است تا نظریه‌های تعیین سرعت حد بالستیک به طور خلاصه بیان شود. سرعت حد بالستیک در

بتن همواره به عنوان ماده‌ای مقاوم و مناسب در طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر نفوذ و انفجار مانند پناهگاه‌ها، تأسیسات هسته‌ای و نظامی مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی‌های گوناگون این ماده مانند ارزان بودن، قابلیت ارتقای استحکام فشاری، راحتی تهیه و غیره موجب شده تا نه تنها با گذشت زمان از ارزش این ماده کاسته نشود، بلکه با توجه به کاربردهای اخیر بتن در ساخت محفظه بتنی راکتورهای هسته‌ای توجه به تحقیق در خصوص رفتار بتن در مقابل نفوذ و برخورد بیش از پیش تشدید گردد [۱]. هنجاک و همکارانش [۲]، نفوذ در اهداف بتنی با استحکام فشاری ۴۸ و ۱۴۰ مگاپاسکال را مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش پرتابه با دماغه اجایو به قطر ۲۵،۴ میلی‌متر و جرم ۰/۵ کیلوگرم است، شعاع کالیبر سر پرتابه ۳ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این ضخامت هدف ۱۷۸ میلی‌متر و سرعت پرتابه ۳۰۰ و ۱۱۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. برای این سرعت نتایج نشان داد که سرعت باقیمانده برای بتن ۱۴۰ مگاپاسکال ۲۰٪ کمتر از بتن ۴۸ مگا پاسکال است.

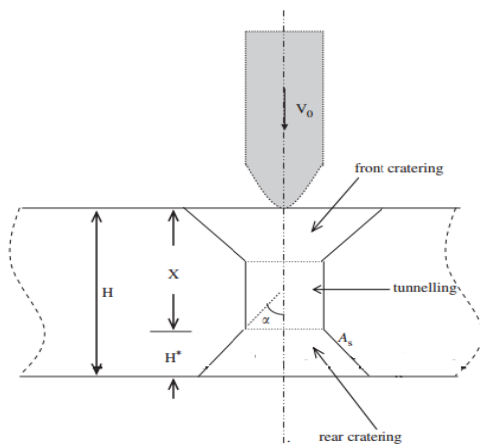
فورستال و همکارانش [۳]، به ارائه فرمول تجربی برای پیش‌بینی عمق نفوذ هدف‌های بتنی با استحکام فشاری ۱۴، ۳۵ و ۹۷ مگا پاسکال تحت برخورد پرتابه با دماغه اجایو پرداختند. فرمول ارائه‌شده شامل یک ثابت بی‌بعد است که به استحکام فشاری محصور نشده وابسته است. فورستال و همکاران [۴]، همچنین به ارائه فرمولی بر اساس مدل انبساط حفره کروی پرداختند که بهترین فرمول ارائه‌شده برای نفوذ در اهداف بتنی نیز است چرا که بعد از آن بسیاری از محققین از این رابطه استفاده کرده و سعی در بهبود آن داشته‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی نشان‌دهنده تطابق خوب آن‌ها و درستی فرمول ارائه شده است. واحدی و همکاران [۵]، با استفاده از نظریه انبساط حفره کروی ارائه‌شده توسط فورستال برای نفوذ پرتابه در خاک و بتن، یک فرمول تحلیلی به منظور محاسبه عمق نفوذ نهایی پرتابه در هدف بتنی پوشش‌دار ارائه دادند و با مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزا محدود LS-DYNA نتایج به دست آمده را مقایسه کردند که تطبیق خوبی نشان داده شده است.

لیاقت و همکاران [۶]، به بررسی عددی و ارائه مدل ترکیبی برای بتن تحت تأثیر بارگذاری با نرخ کرنش بالا پرداختند. آن‌ها رفتار پیشنهادی را به صورت یک زیر برنامه در نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی و برای شبیه‌سازی رفتار بتنی از آزمایش میله هاپکینسون استفاده کردند. سیفوری و لیاقت [۷] با بهبود روابط فورستال حل نیمه تحلیلی و عددی برای نفوذ پرتابه‌های با دماغه اجایو در هدف‌های بتنی را ارائه دادند. علاوه بر این آن‌ها با استفاده از نظریه پلاگ برشی به محاسبه سرعت باقیمانده و سرعت حد بالستیک نیز پرداختند. مقایسه یافته‌ها با نتایج تجربی نشان‌دهنده ارائه صحیح فرمول است. خضرائیان و همکاران [۸]، مدل تحلیلی برای هدف‌های بتنی تحت نفوذ پرتابه تغییر شکل ناپذیر

1- Cellular
2- Drop Weight

است که از مخلوط سیمان پرتلند، خاکستر بادی یا دیگر منابع سیلیسی، گچ، آب، آهک زنده و پودر آلومینیوم همان طور که در استاندارد ACI 523.2R آمده است، تولید می‌شود. محصولات بتن هوادار به صورت سنتی جهت تسریع در رسیدن به مقاومت مشخصه اتوکلاو می‌شوند و به همین دلیل از آن‌ها به عنوان بتن هوادار سبک اتوکلاو شده^۶ یاد می‌شود. حفرات هوا در بتن هوادار معمولاً دارای قطری در حدود ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر هستند که با افزودن پودر آلومینیوم با درصد وزنی ۰/۲ تا ۰/۵ درصد وزن سیمان تشکیل می‌شوند [۱۱].

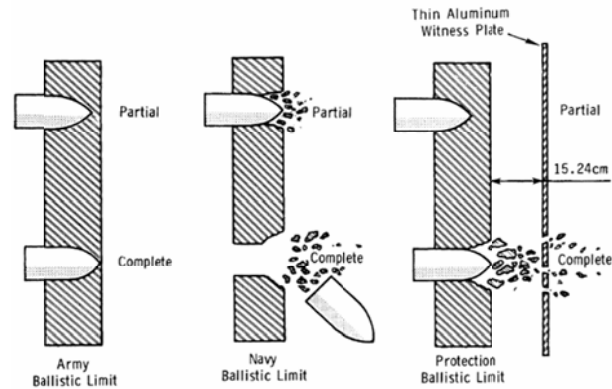
بارزترین خصوصیت بتن هوادار، تخلخل بالای آن است که سبب چگالی و مقاومت فشاری پایین آن در مقایسه با بتن معمولی است. بر اساس استاندارد ASTM C-1693 بتن هوادار بر اساس چگالی خشک بین مقادیر ۴۰۰-۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب رده‌بندی می‌شود [۱۷]. سازه متخلخل این محصول شامل حفرات با اندازه میکرو تا ماکرو و حفرات هوا است [۱۸]. خواص مکانیکی بتن سبک هوادار شامل مقاومت فشاری، خمشی و انرژی شکست در مقالات پیشین گزارش شده است که حاکی از این است رابطه خطی با چگالی ۶۰۰-۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب دارد [۱۹ و ۲۰]. محصولات بتنی هوادار مقادیر قابل توجهی مقاومت فشاری باقیمانده پس از رسیدن به مقاومت حداکثر از خود نمایش می‌دهند. در شکل (۴) رفتار این مواد در فشار نشان داده شده است، که پس از پاسخ اولیه خطی، مرحله خردشدگی حفرات و حوزه یکنواخت غیرعادی^۷ از خود نشان می‌دهد. مکانیزم ظرفیت باربری پس از بار حداکثر می‌تواند به خردشدگی متوالی حفرات و گسیختگی دیواره‌های سلول‌ها پس از اعمال فشار نسبت داده شود. از نقطه نظر مقاومت نهایی این رفتار می‌تواند با استفاده از مدل الاستو-پلاستیک که شامل استحکام باقیمانده ماده متخلخل پس از ایجاد ترک است، مدل شود [۱۲].



شکل ۲- مکانیزم تخریب بتن [۱۶].

ادبیات، نظریه‌های متفاوتی دارد که می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۵].

- ۱- حد بالستیک ارتش^۱
- ۲- حد بالستیک محافظتی^۲
- ۳- حد بالستیک نیروی دریایی^۳.



شکل ۱- نظریه‌های حد بالستیک [۱۵].

در این تحقیق بر اساس نظریه حد بالستیک نیروی دریایی، سرعت حد بالستیک برای اهداف بتنی هوادار سبک اتوکلاو شده به صورت تجربی به دست آمده است. علاوه بر این استحکام فشاری، عمق نفوذ تا ایجاد پلاگ مخروطی پشت نمونه نیز بررسی شده‌اند.

۱-۲- مکانیزم تخریب

پروسه نفوذ کامل در بتن شامل ایجاد تو رفتگی با حفره اولیه^۴ در صفحه رویی، تونلینگ^۵ و ایجاد حفره ثانویه در صفحه پشتی است. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، شکل و عمق این حفرات بستگی به خصوصیات ماده هدف و پرتابه، شکل دماغه و سرعت پرتابه دارد.

در شکل ۲، H ، H^* ، α و A_s به ترتیب بیانگر عمق نفوذ تا ایجاد پلاگ مخروطی، ضخامت نمونه، ارتفاع پلاگ مخروطی ناقص، زاویه مخروط ناحیه پشتی و سطح جانبی پلاگ مخروطی ناقص هستند. در مورد اهداف بتنی که در شکل (۳) نشان داده شده است، پس از نفوذ کامل پرتابه سطح پشتی هدف دچار آسیب بیشتری نسبت به سطح جلویی می‌شود که این سطح به صورت مخروطی است، بنابراین می‌توان فرض کرد که در نفوذ کامل یک پلاگ برشی از هدف جدا می‌شود.

۱-۳- خواص مکانیکی بتن هوادار

بتن هوادار ماده‌ای بر پایه سیمان است که سبک‌وزن و غیرقابل اشتعال

6- Autoclaved Aerated Concrete(AAC)
7- Uneven Plateau Region

1- Army Ballistic Limit
2- Protection Ballistic Limit
3- Navy Ballistic Limit
4- Initial Cratering
5- Tunneling

پس از این فرآیند کیک سبز رنگ تبدیل به کیک تقریباً سفید رنگ می‌شود که نشان از تکمیل فرآیند کریستالیزاسیون هیدروسیلیکات‌ها است. شکل (۵) تصویر نهایی ACC را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تصویر نهایی AAC تولیدشده.

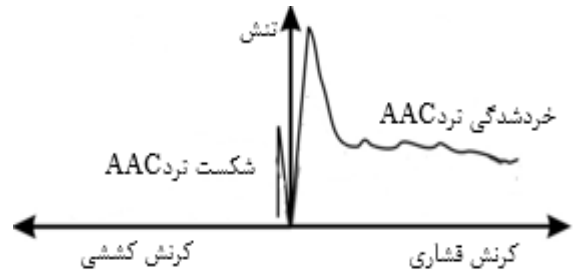
آزمایش‌های مربوط به خواص مکانیکی اولیه در کارخانه بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۸۵۹۳ تحت نظارت نماینده مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شد و نتایج آن در جدول (۱) آمده است.

۲-۱- هدف بتنی سبک هوادار اتوکلاو شده

در مرحله اول جهت آماده‌سازی اهدافی که بتوان در دستگاه تفنگ‌گازی مورد آزمایش قرار داد، بلوک‌های موجود در ابعاد ۶۰۰×۲۵۰×۲۰۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه برش به قطعات ۵۰×۱۲۵×۱۲۵ میلی‌متر بریده شدند. نمونه‌ای از قطعات در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۳- نفوذ کامل در هدف بتنی الف- نمای روی، ب- نمای پشتی [۷].



شکل ۴- شماتیک پاسخ تنش-گرنش برای بتن هوادار سبک اتوکلاو شده [۱۲].

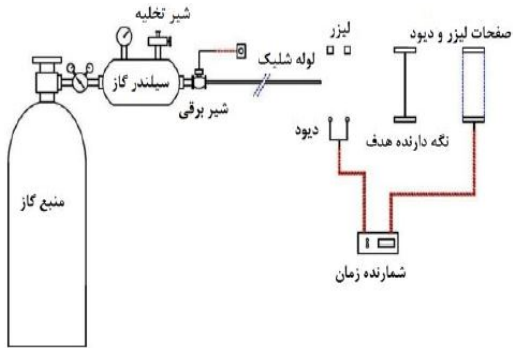
۲- بخش تجربی

برای انجام آزمایش از بلوک‌های ساخته‌شده توسط کارخانه پترین بتن آمود استفاده شده است. مواد اولیه پس از پروسه اختلاط در قالب ریخته شده و پس از ۲ تا ۳ ساعت در دمای محیط، به کیک سبز رنگی تبدیل می‌شود. سپس کیک حاصل در اندازه‌های دلخواه برش خورده و به دستگاه اتوکلاو جهت پخت و عمل‌آوری تحت فشار ۱۰ تا ۱۲ بار و دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ ساعت انتقال داده می‌شود.

جدول ۱- نتایج آزمون‌ها و بررسی انطباق با الزامات AAC.

شرح آزمون	استاندارد مرجع	الزامات استاندارد برای رده AAC	نتیجه آزمون
ابعاد - اندازه ابعادی (mm) - کنترل رواداری‌ها (mm)	ISIRI 8596 ISIRI 8593 ISIRI 8593	حداکثر ۱۵۰۰×۵۰۰×۱۰۰۰ طول (۵-،+۳) ارتفاع (۵-،+۳) عرض (±۳)	۶۰۰×۲۵۰×۱۵۰ ۶۰۰×۲۵۰×۲۰۰ مورد قبول
جرم حجمی خشک - جرم حجمی خشک (kg/m³) - کنترل رواداری‌ها (kg/m³)	ISIRI 8594 ISIRI 8593	۴۰۰-۵۰۰ ±۵۰	۵۴۷
مقاومت فشاری - میانگین مقاومت فشاری (MPa) - حداقل مقاومت فشاری (MPa) - کنترل رواداری و انطباق با رده مقاومتی	ISIRI 8593 ISIRI 8593 ISIRI 8593	۲/۵ ۲/۰ حداکثر ۲۵٪	۳/۰۲ ۲/۹۴ مورد قبول
جمع شدگی ناشی از تغییرات رطوبت - تغییر طول ناشی از تغییرات رطوبت	ISIRI 8592 ISIRI 8593	حداکثر ۰/۰۲ درصد	مورد قبول ۰/۰۱۳ درصد

بالا تغذیه می‌شود که سرعت‌های در محدوده ۵۰ تا ۶۰۰ متر بر ثانیه را تولید می‌کند. شکل (۷ب) نشان‌دهنده نحوه قرارگیری هدف در فیکسچر است.



الف

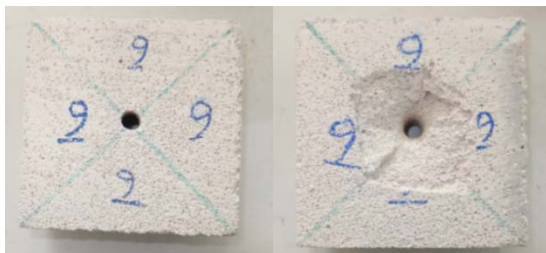


ب

شکل ۷- الف- شماتیک کلی از دستگاه آزمون شلیک ب- نمایی از فیکسچر و نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه آزمون شلیک.

۳- نتایج و بحث

برای به دست آوردن سرعت حد بالستیک، برای هر دماغه تعداد ۵ آزمایش با سرعت‌های متفاوت انجام گرفت. در شکل‌های (۸ تا ۱۰) نحوه خرابی سه نمونه از بتن هوادار سبک اتوکلاو شده تحت پرتابه با دماغه‌های متفاوت مشاهده می‌گردد.



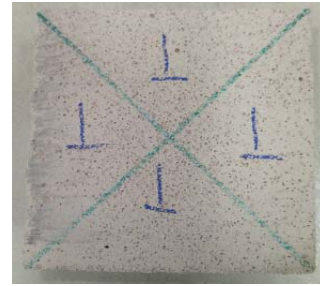
ب

الف

شکل ۸ - خرابی بتن برای پرتابه با دماغه سر تخت الف- رویه جلویی ب- رویه پشتی.



الف



ب

شکل ۶- الف- بلوک‌های موجود در ابعاد ۶۰۰×۲۵۰×۲۰۰ میلی‌متر ب- نمونه‌های برش خورده در ابعاد ۱۲۵×۱۲۵×۵۰ میلی‌متر.

۲-۲- پرتابه

در این تحقیق پرتابه صلب از جنس فولاد سخت شده با سه نوع دماغه‌های سر تخت، اجایو و مخروطی استفاده شده که خواص هندسی مربوط به پرتابه‌ها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- مشخصات مربوط به پرتابه‌ها.

دیگر خصوصیات (mm)	وزن پرتابه (gr)	قطر پرتابه (mm)	شکل دماغه پرتابه
h=۱۵	۸/۹۴	۱۰	سر تخت
h=۸ , s=۲۰	۹/۲۱	۱۰	اجایو
h=۱۴ , s=۸	۹/۹۲	۱۰	مخروطی

۳-۲- تجهیزات آزمون شلیک

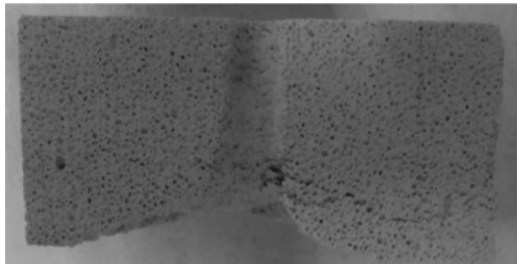
در این تحقیق از دستگاه شلیک گازی آزمایشگاه مکانیک ضربه واقع در دانشگاه تربیت مدرس برای انجام آزمایش‌های مورد نظر استفاده شد. شماتیکی کلی از این دستگاه در شکل (۷ الف) مشاهده می‌شود. این دستگاه از دو نوع گاز هوا و هلیوم به ترتیب، برای سرعت‌های پایین و



الف



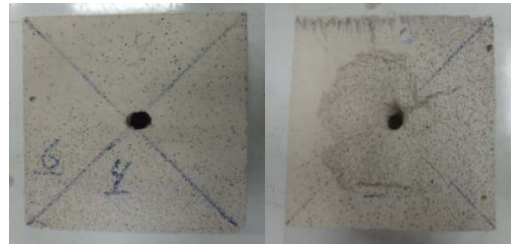
ب



ج

شکل ۱۱- نمونه برش خورده هدف پس از برخورد پرتابه
الف- پرتابه با دماغه سر تخت ب- پرتابه با دماغه اجایو
ج- پرتابه با دماغه مخروطی.

در شکل (۱۱) نمونه برش خورده با تحت نفوذ پرتابه با دماغه‌های متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند تخریب برای هر سه نمونه دارای دو مرحله تولدینگ و ایجاد پلاگ برشی مخروطی است. تفاوت در عمق نفوذ و اندازه پلاگ مخروطی است که به دلیل یکسان نبودن جرم و سرعت نمی‌توان اظهار نظر قطعی در این مورد کرد، بنابراین نیاز به پارامتری است که با توجه به شرایط مساوی بتوان نتیجه‌گیری کرد که در بخش بعدی با استفاده از انرژی اولیه این بحث انجام شده است. جدول (۳) نشان‌دهنده عمق نفوذ برای پرتابه‌های متفاوت با سرعت‌های مختلف است. برعکس عمق نفوذ، پلاگ برشی مخروطی ایجاد شده توسط پرتابه با دماغه مخروطی بیشتر از اجایو و اجایو بیشتر از مخروطی است. در شکل (۱۱) الف مود خرابی غالب، پلاگ برشی است در حالی که برای دماغه مخروطی مود غالب، شکستگی مخروطی است^۱. دماغه اجایو نیز حد وسط دو دماغه دیگر است به این معنی که مود برشی غالب ترکیبی از مود پلاگ برشی و شکستگی



الف

ب

شکل ۹ - خرابی بتن برای پرتابه با دماغه اجیول
الف- رویه جلویی ب- رویه پشتی.



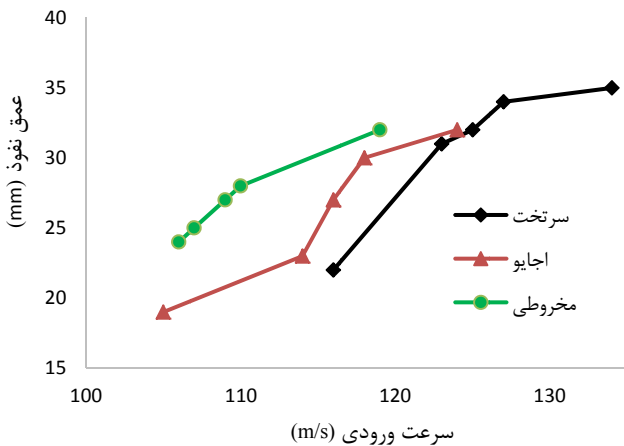
الف

ب

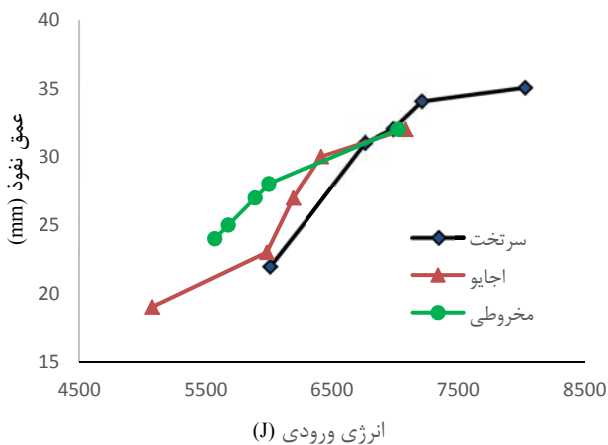
شکل ۱۰- خرابی بتن برای پرتابه با دماغه مخروطی
الف- رویه جلویی ب- رویه پشتی.

خرابی بتن سبک هوادار اتوکلاو شده تحت نفوذ پرتابه با دماغه سر تخت و سرعت ورودی (m/s) ۱۲۵ با سطح رویی و پشتی هدف به ترتیب در شکل (۸ الف و ب) نشان داده شده است. بتن سبک هوادار اتوکلاو شده نسبت به بتن کلاسیک، در سطح رویی فقط مود برش دیده می‌شود یعنی مرحله اول ایجاد حفره و تکه‌تکه شدگی^۱ وجود ندارد که برای فوم بتن‌ها نیز چنین گزارشی توسط مرجع [۲۰] داده شده است. گلوله بدون ایجاد حفره مرحله تولدینگ را به وجود می‌آورد که بعد از آن نیز باعث پلاگ مخروطی می‌گردد. دلیل ایجاد پلاگ مخروطی این است که در اثر برخورد گلوله موج فشاری ایجاد می‌شود که به صورت موج کششی از پشت هدف بازمی‌گردد که بازگشت این موج باعث پشت‌کن شدن و ایجاد پلاگ مخروطی ناقص می‌گردد. در شکل (۸ الف) مشاهده می‌شود که برخلاف آنچه که در مراجع متعددی برای بتن کلاسیک گزارش شده است [۲۱]، ترک عرضی در سطح رویی بتن سبک هوادار وجود ندارد که به دلیل ناپیوسته بودن محیط موج عرضی در اثر برخورد با حباب‌ها انرژی خود را از دست می‌دهد و اجازه انتشار نمی‌یابد. شکل‌های (۹ و ۱۰) به ترتیب خرابی موضعی در سطح رویی و پلاگ برشی ایجاد شده در سطح پشتی هدف برای پرتابه با دماغه‌های اجایو و مخروطی و به ترتیب با سرعت‌های (m/s) ۱۲۴ و (m/s) ۱۱۹ نشان می‌دهند. مود خرابی در سطح رویی و پشتی هدف همانند پرتابه با دماغه سر تخت است. تنها تفاوت در عمق نفوذ و پلاگ مخروطی ایجاد شده هستند. شکل (۱۱) نمونه برش خورده از نمای روبرو نشان می‌دهند که تفاوت ذکر شده مشاهده می‌شود.

قرار می‌گیرد به طوری که در سرعت‌های بالاتر می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.



شکل ۱۲- عمق نفوذ بر حسب سرعت ورودی با دماغه‌های متفاوت.



شکل ۱۳- عمق نفوذ بر حسب انرژی ورودی با دماغه‌های متفاوت.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام شده و مشاهدات و نتایج تجربی به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که هنگام برخورد پرتابه به هدف، به دلیل وجود حباب‌های هوا در نمونه‌ها انحراف در مسیر پرتابه ایجاد می‌شود به طوری که اگر دماغه پرتابه تیزتر باشد این انحراف بیشتر است که علت آن توزیع غیریکنواخت حباب‌های هوا است و آن هم به دلیل نبودن کنترل در توزیع یکدست آن‌ها در پروسه تولید است، چرا که در هنگام تولید حباب‌ها از سطح پایین به سمت بالا حرکت کرده و در سطح بالایی، محصولات دارای چگالی کمتری نسبت به سطح پایینی است. از طرف دیگر، هنگامی که پرتابه به هدف برخورد می‌کند، به دلیل وجود حباب‌های هوا در نمونه‌ها انحراف در مسیر پرتابه ایجاد می‌شود به طوری که اگر دماغه پرتابه تیزتر باشد این انحراف بیشتر

مخروطی است. علاوه بر این در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که گلوله پس از برخورد دچار انحراف می‌شود که این انحراف برای دماغه مخروطی بیشتر از اجایو است و برای دماغه سرتخت تقریباً قابل صرف‌نظر است. دلیل این انحراف ممکن است اولاً به توزیع غیریکنواخت حباب‌های که سبب یکدست نبودن چگالی نمونه مرتبط دانست، ثانیاً عامل دیگر اثر دماغه پرتابه است که هر چه دماغه پرتابه تیزتر باشد، سطح تماس کمتر و در نتیجه انحراف بیشتر خواهد شد.

جدول (۳) نشان‌دهنده عمق نفوذ، سرعت‌های ورودی متفاوت برای به دست آوردن سرعت حد بالستیک و تعداد آزمایش‌ها است. بیان این نکته حائز اهمیت است که عمق نفوذ همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است مجموع مرحله اول و دوم است. برای بتن سبک هوادار چون مرحله اول وجود ندارد، فقط مرحله تونلینگ بیان‌کننده عمق نفوذ است. به دلیل عدم قطعیتی که در خود مسئله وجود دارد که ناشی از بارگذاری و خواص ماده هدف است، باعث می‌شود یک عدد ثابتی برای سرعت حد بالستیک وجود نداشته باشد، بنابراین محدوده‌ای برای سرعت حد بالستیک وجود دارد. برای به دست آوردن سرعت حد بالستیک از روش براکتینگ استفاده شده است به طوری که سرعت‌هایی که نفوذ و نفوذ کامل اتفاق بیافتد، انتخاب می‌شوند و انتخاب‌های بعدی سرعتی بین این دو سرعت خواهد بود.

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب عمق نفوذ بر حسب سرعت ورودی و انرژی ورودی را برای پرتابه با دماغه‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان طور که از شکل (۱۲) مشخص است روند کلی سه پرتابه مشابه است اگر چه شکستگی‌هایی در نمودارها مشاهده می‌شود که به دلیل توزیع سرعت ورودی‌ها در هنگام آزمون و همچنین ماهیت احتمالی حد بالستیک است. علاوه بر این با افزایش سرعت در هر پرتابه عمق نفوذ افزایش و در نتیجه سایز پلاگ برشی مخروطی کاهش خواهد یافت که دلیل آن را می‌توان این چنین بیان کرد که با افزایش سرعت مود خرابی در زمان کوتاه‌تر بیشتر موضعی می‌شود. با توجه به این که جرم پرتابه‌ها متفاوت بوده و همچنین سرعت‌های پرتابه‌ها مشابه یکدیگر نیست، این نیاز وجود دارد تا از پارامتر انرژی برای بررسی اثر دماغه استفاده شود. بدین منظور با در نظر گرفتن شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که در انرژی‌های اولیه که هنوز سرعت پرتابه به سرعت حد بالستیک نرسیده است با تیزتر شدن دماغه عمق نفوذ افزایش می‌یابد به طوری که در انرژی برابر بیش‌ترین عمق نفوذ مربوط به پرتابه مخروطی و پس از آن دماغه اجایو و سپس پرتابه با دماغه سرتخت در رتبه آخر قرار می‌گیرد. با افزایش سرعت (نزدیک شدن آن به سرعت حد بالستیک و پس از آن) و در نتیجه افزایش انرژی ورودی، عمق نفوذ برای هر سه دماغه افزایش می‌یابد به طوری که در انرژی‌های بالا این عمق برای سه پرتابه تقریباً برابر می‌شود. علت این پدیده را می‌توان بدین صورت توجیه کرد که با افزایش سرعت مود برش دیواره مود غالب می‌شود و در نتیجه ایجاد پلاگ مخروطی که با دماغه پرتابه ارتباط مستقیم دارد، در مرحله بعدی

خرابی در پدیده دینامیکی موضعی است، انرژی جنبشی پرتابه را جذب کرده و بر خلاف دیگر مواد سیمانی، ترکش در محل برخورد وجود ندارد. این پدیده می‌تواند دلیل استفاده این مواد در حوزه‌های نظامی گردد.

تشکر و قدردانی

از مدیرعامل محترم شرکت پیرین بتن آمود نیشابور، جناب آقای مهندس احمدی بابت همکاری‌های بی‌دریغ ایشان و در اختیار گذاشتن مواد اولیه کمال تشکر و قدردانی را داریم.

است که علت آن توزیع غیریکنواخت حباب‌های هوا است و آن هم به دلیل نبودن کنترل در توزیع یکدست آن‌ها در پروسه تولید است، چرا که در هنگام تولید حباب‌ها از سطح پایین به سمت بالا حرکت کرده و در سطح بالایی، محصولات دارای چگالی کمتری نسبت به سطح پایینی است. برای نمونه‌ها با سرعت پس از سرعت حد بالستیک شاخه‌شدگی ترک و پل‌زنی مشاهده شد که ممکن است تحت بارگذاری شبه استاتیکی وجود نداشته باشد که بررسی این موضوع در کارهای آتی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، بتن سبک هوادار اتوکلاو شده به علت ظرفیت مناسب جذب انرژی در لحظه برخورد که دلیل اصلی

جدول ۳- عمق نفوذ و سرعت‌های ورودی متفاوت برای به دست آوردن سرعت حد بالستیک.

شماره آزمایش	شماره آزمایش				
	۱	۲	۳	۴	۵
سر تخت	سرعت ورودی (m/s)	۱۳۴	۱۲۲	۱۲۷	۱۲۵
	عمق نفوذ (mm)	۳۵	۳۰	۳۴	۳۲
نوع پرتابه	نتیجه آزمایش	پرتابه عبور کرد	پرتابه عبور نکرد	پرتابه عبور کرد	سرعت حد بالستیک
	سرعت ورودی (m/s)	۱۰۵	۱۱۴	۱۱۶	۱۱۸
	عمق نفوذ (mm)	۱۹	۲۳	۲۷	۳۰
	نتیجه آزمایش	پرتابه عبور نکرد	پرتابه عبور نکرد	پرتابه عبور نکرد	سرعت حد بالستیک
مخروطی	سرعت ورودی (m/s)	۱۱۹	۱۰۶	۱۰۷	۱۱۰
	عمق نفوذ (mm)	۳۲	۲۴	۲۵	۲۸
	نتیجه آزمایش	پرتابه عبور کرد	پرتابه عبور نکرد	پرتابه عبور نکرد	سرعت حد بالستیک

مراجع

- [۱] صالحی، صادق؛ خدارحمی، حسین؛ واحدی، خداداد؛ ذوالفقاری، مجتبی "تحلیل نفوذ پرتابه‌های صلب در اهداف بتنی بر مبنای تئوری انتشار موج شوک"، مجله علمی ترویجی تحقیق و توسعه مواد پراثرزی، سال نهم، شماره ۱، صفحه ۵۲، ۱۳۹۲.
- [2] Hanchak, S. J.; Forrestal, M. J.; Young, E. R.; Ehrigott, J. Q. "Perforation of Concrete Slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) Unconfined Compressive Strengths"; Int. J. Imp. Eng. 1992, 12, 1-7.
- [3] Forrestal, M.; Altman, B.; Cargile, J.; Hanchak, S. "An Empirical Equation for Penetration Depth of Ogive-Nose Projectiles into Concrete Targets"; Int. J. Imp. Eng. 1994, 15, 395-405.
- [4] Forrestal, M.; Tzou, D. "A spherical Cavity-Expansion Penetration Model for Concrete Targets"; Int. J. Solid. Struct. 1997, 34, 4127-4146.
- [۵] واحدی، خداداد؛ لطیفی، محمد؛ خدارحمی، حسین؛ خسروی، فریدون "محاسبه عمق نفوذ پرتابه‌ها در اهداف پوشش دار"، مجله علمی پژوهشی مواد پراثرزی، سال سوم، شماره ۱، صفحه ۳۷، ۱۳۸۷.
- [۶] لیاقت، غلامحسین؛ بهاری، محمد تقی؛ پیرعلی، پویا "بررسی عددی و ارائه یک مدل ساختاری ترکیبی برای بتن تحت تاثیر بارگذاری با نرخ کرنش نسبتا بالا"، مجله علمی پژوهشی مواد پراثرزی، سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۴۳، ۱۳۸۹.
- [7] Seifoori, S.; Liaghat, G. H. "A semianalytical and Numerical Study of Penetration and Perforation of an Ogive-Nose Projectile into Concrete Targets under Normal Impact"; J. Eng. Mech. 2011, 225, 1782-1797.
- [8] Khazraiyani, N.; Liaghat, G. H.; Khodarahmi, H. "Normal Impact of Hard Projectiles on Concrete Targets"; Struct. Conc. 2013, 14, 176-183.
- [9] Rahman, I. A.; Zaidi, A. M. A.; Latif, K. "Critical Impact Energy for Spalling, Tunnelling and Penetration of Concrete Slab Impacted with Hard Projectile"; KSCE J. Civ. Eng. 2015, 19, 265-273.
- [10] Gelim, M.; Ali, K. "Mechanical and Physical Properties of Fly Ash Foamed Concrete"; M.S. Thesis. Tun Hussein University, Malaysia, 2011
- [11] Narayanan, N.; Ramamurthy, K. "Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review"; Cement. Conc. Comp. 2000, 22, 321-29.
- [12] Bonakdar, A.; Babbitt, F.; Mobasher, B. "Physical and Mechanical Characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC)"; Cement Conc. Comp. 2013, 38, 82-91.
- [13] Laible, R. "Ballistic Materials and Penetration Mechanics"; Elsevier, 2012, pp. 56-59.
- [14] Wen, H.; Yang, Y. "A Note on the Deep Penetration of Projectiles into Concrete"; Int. J. Imp. Eng. 2014, 66, 1-4.
- [15] Chen, X.; Li, X.; Huang, F.; Wu, H.; Chen, Y. "Normal Perforation of Reinforced Concrete Target by Rigid Projectile"; Int. J. Imp. Eng. 2008, 35, 1119-1129.
- [16] C-1693 A. "Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Wall Construction Units"; ASTM. Int, PA. 2009.

- [19] Trunk, B.; Schober, G.; Helbling, A.; Wittmann, F. "Fracture Mechanics Parameters of Autoclaved Aerated Concrete"; Cement Conc. R. 1999, 29, 855-859.
- [20] Zaidi, A. A.; Li, Q. "Investigation on Penetration Resistance of Foamed Concrete"; Proc. ICE-Struc. Build. 2009, 162, 77-85.
- [21] Lu, G.; Li, X.; Wang, K. "A Numerical Study on the Damage of Projectile Impact on Concrete Targets"; Comput. Conc. 2012, 9, 21-33.
- [17] Roels, S.; Serrijn, J.; Carmeliet, J. "Modelling Unsaturated Moisture Transport in Autoclaved Aerated Concrete: A Microstructural Approach"; Proc. 6th symposium. Build. Phys. Nord. Count. 2002.
- [18] Eden, N.; Manthorpe, A.; Miell, S.; Szymanek, P.; Watson, K. "Autoclaved Aerated Concrete from Slate Waste Part 1: Some Property/Density Relationships"; Int. J. Cement Comp. Lightweight Conc. 1980, 2, 95-100.