

تحلیل تجربی و عددی اثر زاویه برخورد پرتابه‌های صلب اجایو بر عمق نفوذ و میزان انحراف در اهداف بتنی نیمه بی‌نهایت

حسن آخانی سنجانی^۱، حسین خدارحمی^{۲*}، میلاد صادق یزدی^۳، مجتبی ضیاء شمامی^۴، صفا پیمان^۵

^۱دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

^۲استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

^۳دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

^۴دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

چکیده

نفوذ پرتابه‌ها در اهداف بتنی به دلایل مختلفی ممکن است بصورت مایل صورت پذیرد که علاوه بر پیچیده‌تر شدن تحلیل آن، بر میزان عمق و نفوذ عملکرد پرتابه‌ها تأثیر می‌گذارد؛ لذا مطالعه مسیر نفوذ و در نهایت عمق نفوذ پرتابه‌ها در اهداف ضرورت می‌یابد. در این تحقیق به بررسی و مقایسه نتایج عددی و تجربی مسیر و عمق نفوذ مایل یک پرتابه صلب اجایو در هدف بتنی با مقاومت فشاری ۳۵MPa پرداخته شده‌است. برای شبیه‌سازی عددی از نرم افزار ال اس داینایا و از مدل RHT برای بیان رفتار بتن استفاده شده‌است. ضرایب مورد نیاز برای این مدل رفتاری با انجام تست‌های سه محوره و برازیلیا و تک محوره در نهایت کالیبره و استخراج شده‌است. پرتابه از جنس فولاد سخت در نظر گرفته شده تا کمترین تغییر شکل را داشته باشد، لذا عملیات حرارتی روی آن‌ها انجام شد که در نتیجه سختی آن‌ها به ۴۰HRC و مقاومت تسلیم آن‌ها به ۱۰۰۰ MPa افزایش یافت. بعلاوه تست‌های تجربی بالستیکی در سرعت‌ها و زوایای مختلف انجام شده و پس از آن نمونه‌های بتنی اسکن شده‌است تا مسیر نفوذ پرتابه تعیین شود. نتایج نشان از تطابق خوب بین روش عددی و تجربی است و روش عددی به خوبی توانسته است، رفتار نفوذ پرتابه در هدف بتنی را تخمین بزند.

کلمات کلیدی: نفوذ مایل؛ مسیر نفوذ؛ اسکن بتن؛ مدل RHT.

Experimental and numerical analysis of the effect of the angle of impact of rigid projectiles on the depth of penetration and the amount of deflection in semi-infinite concrete targets

Hasan Akhane Senejani¹, Hossein Khodarahmi^{2*}, Milad Sadegh-Yazdi³, Mojtaba zia- Shemami⁴, Safa Peyman⁵

²Prof., Faculty of Mech Eng, Imam Hossein Univ, Iran ¹Ph.D. Student, Mech. Eng., Imam Hossein Univ, Tehran, Iran

^{3,4}Assist. Prof., Faculty of Mech Eng, Imam Hossein Univ, Tehran, Iran

⁵Assoc. Prof., Faculty of civil Eng, Imam Hossein Univ, Tehran, Iran

Abstract

Penetration of projectiles in concrete targets may be oblique for various reasons, which, in addition to making its analysis more complicated, affects the penetration depth of projectiles. Therefore, it is necessary to study the penetration path and finally the penetration depth of the projectiles in the targets. In this article, numerical and experimental results have been investigated and compared for the oblique penetration path of a rigid projectile in concrete with compressive strength properties of 35MPa. LS Dyna software is used for numerical simulation and RHT model is used to express the behavior of concrete. The required coefficients for this behavioral model have been finally calibrated and extracted by performing Triaxial and Brasilia and Uniaxial tests. The projectile is made of hard steel to have the least deformation, so heat treatment was performed on them, as a result of which their hardness increased to 40 HRC and their yield strength increased to 1000 MPa. In addition, experimental ballistic tests have been performed at different speeds and angles, and after the test, the samples have been scanned to determine the penetration path of the projectile. The results show a good agreement between the numerical and experimental methods and the numerical method has been able to estimate the penetration behavior of the projectile in concrete.

Keywords: Oblique penetration; Path of penetratin; Concrete scan; RHT model.

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت موضوع طراحی سازه‌های مقاوم، اثر برخورد و نفوذ پرتابه‌های صلب در سازه‌های بتنی از اواسط قرن ۱۱ میلادی مورد توجه بوده است. ضرورت دستیابی به نتایج مطالعات و تحقیقات علمی انجام شده در جهان از اهم نیازهای گسترش دفاع غیرعامل و فرهنگ علمی آن در سطح جامعه است. گستردگی این نیاز بیشتر در ارتباط با مقوله‌های خاص از دفاع غیر عامل از جمله مقوله سازه‌های امن است. در میادین نبرد مدرن، بسیاری از اهداف با ارزش مانند مراکز فرماندهی و کنترل، ذخیره‌سازی مهمات، سیلوه‌های نگهداری و غیره، توسط ساختارهای بتنی محافظت می‌شوند.

برای نفوذ نرمال در اهداف بتنی مطالعات زیادی صورت گرفته است که از مهمترین آنها می‌توان به مطالعه فوراستال^۱ و همکاران [۱] در سال ۱۹۹۲ برای پیش بینی عمق نفوذ پرتابه در خاک انجام دادند. برای این کار از یک تفنگ گازی به خاک شلیک شد و نتایج تست تجربی و تحلیلی و عددی با یکدیگر مقایسه شدند.

به موازات مطالعات تجربی و تحلیلی انجام شده برای نفوذ نرمال در بتن همزمان با پیشرفت و توسعه کامپیوترها و قابلیت‌های نرم افزاری شبیه سازی باکدهای کامپیوتری مورد توجه محققان قرار گرفته است. در سال ۱۹۸۹ یونگ^۲ و همکاران [۲] به کمک روش عددی به مطالعه نفوذ پرتابه در خاک و سنگ پرداختند.

واحدی و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۹ به ارائه یک مدل اصلاحی و بررسی تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک-فلز پرداختند.

با پیشرفت قابلیت‌های نرم افزاری و سخت افزاری، نرم افزارهای جدیدی مثل LS-DYNA و AUTODYN گسترش یافت که دقت نتایج را به طور قابل ملاحظه‌ای بالا برده است. هوانگ^۳ و همکارانش [۴] با کمک نرم‌افزار LS-DYNA نفوذ کامل و عبور پرتابه از یک هدف بتنی مسلح را شبیه‌سازی و نتایج را با نتایج تجربی مقایسه کردند که نتایج قابل قبولی به دست آوردند.

واحدی و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۰ یک مدل تحلیلی به همراه تست تجربی برای عمق نفوذ پرتابه سر تخت تغییر شکل‌پذیر در صفحه سوراخ دار فلزی نازک که به صورت مایل برخورد می‌کند را ارائه کردند و مقدار زاویه انحراف پرتابه را پس از برخورد به دست آوردند.

مسئله برخورد مایل پرتابه و نفوذ آن در هدف که کاربردهای واقعی بسیاری دارد، مورد توجه محققان بسیاری بوده است.

در سال ۲۰۰۲ چن^۴ و همکاران [۶] به بررسی روش تحلیلی نفوذ مایل و عمود یک پرتابه اجایو در بتن نازک و نیمه بی‌نهایت پرداختند و برای حالت مایل برای بتن نازک سرعت و زاویه خروج را استخراج و مقایسه کردند و برای حالت بتن نیمه بی‌نهایت با فرض اینکه بعد از نفوذ کامل قسمت دماغه پرتابه، زاویه نفوذ تا انتها ثابت باشد، روابطی را برای مقدار عمق نفوذ استخراج کردند. با توجه با فرض اولیه و ثابت فرض کردن مقدار زاویه انحراف، خطای زیادی در مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی وجود داشت.

لیاقت و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۹ نفوذ پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی نازک تحت برخورد با زاویه مایل را مورد بررسی تحلیلی قرار دادند و یک مدل تحلیلی برای آن پیشنهاد دادند.

در سال ۲۰۱۴ چن^۵ و همکاران [۸] به بررسی روش تحلیلی برای نفوذ در بتن در حالت عمود ولی دارای زاویه گاما (زاویه بین بردار سرعت و راستای پرتابه) پرداختند. سپس نتایج را با روش تجربی مقایسه کردند که اختلاف زیادی در نتایج وجود داشت، البته به جز حالتی که مقدار گاما کمتر از ۰/۲ درجه بود که این اختلاف کمتر می‌شد.

در سال ۲۰۱۵ علوی‌نیا^۶ و همکاران [۹] به بررسی ضربه سرعت بالا روی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی و هسته فومی در برخورد قائم با یک پرتابه استوانه‌ای را به روش تحلیلی بررسی کردند. آنها برای ارزیابی صحت روش تحلیلی پیشنهادی از آزمایش‌های تجربی صورت گرفته روی دو نوع پانل با هسته‌های فوم پلیمری و فلزی و رویه‌های آلومینیومی بهره گرفتند و نشان دادند که روش تحلیلی ارائه شده، دقت

⁵ CHEN⁶ ALAVI NIA¹ FORRESTAL² YOUNG³ HUANG⁴ CHEN

شکل دماغه پرتابه بر آسیب سوراخ شدن بتن مسلح نازک و همچنین سرعت باقیمانده پرتابه استخراج شد.

در سال ۲۰۲۰ ژو^۵ و همکاران [۱۴] به بررسی حل عددی با استفاده از نرم افزار ANSYS بر خورد مایل چندین پرتابه با شکل های سرتخت و کروی و اجایو به هدف بتنی پرداختند. نتایج نشان می داد که زاویه انحراف با افزایش زاویه برخورد زیاد می شود و همچنین انحراف با افزایش سرعت کمتر می شود.

در سال ۲۰۲۱ ژیاو جینگ^۶ و همکاران [۱۵] به مطالعه و بررسی عددی انحراف مسیر پرتابه اجایو در اثر برخورد مایل با زاویه ۷۰ درجه برای دو نوع هدف بتن و خاک با استفاده از نرم افزار ال اس داینایا پرداختند و منحنی های عمق نفوذ و سرعت نفوذ و تغییرات انرژی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می داد که در فرآیند نفوذ مایل پرتابه در هدف بتنی در ابتدای نفوذ انحراف پرتابه بیشتر است و در ادامه انحراف کمتر می شود، ولی در نفوذ مایل پرتابه در هدف خاکی در ابتدای نفوذ انحراف کمتر و در ادامه انحراف بیشتر می شود.

در سال ۲۰۲۲ هان^۷ و همکاران [۱۶] به بررسی عددی کمانش یک پرتابه اجایو با نسبت L/D و R/D های مختلف پرداختند که به صورت مایل به یک هدف بتنی نیمه بی نهایت برخورد می کند و برای سرعت های مختلف زاویه کمانش را پیدا کردند. نتایج نشان داد که حداقل زاویه برخورد که در آن کمانش رخ می دهد متناسب با تیزی، لاغری (L/D) و سرعت برخورد افزایش می یابد؛ همچنین حداکثر سرعت ضربه ای که تا آن کمانش رخ می دهد، با افزایش تیزی نوک و لاغری کاهش می یابد.

هنگامی که یک پرتابه با یک زاویه مایل به یک هدف نفوذ می کند، بارگذاری نامتقارن وارد بر سطح پرتابه منجر به انحراف پرتابه در طی نفوذ می شود؛ بنابراین پیش بینی دقیق مسیر نفوذ یک مسئله مهم در طول نفوذ عمیق است. انحراف پرتابه در طول فرآیند نفوذ می تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله زاویه برخورد مایل، سرعت برخورد، شکل و مشخصات هندسی پرتابه و مقاومت ماده هدف باشد. اکثر کارهای انجام شده در زمینه نفوذ مایل برای هدف های نازک که پرتابه آن را سوراخ و به طور کامل از آن عبور می کند بوده است و بررسی مسیر

قابل قبولی در تعیین سرعت باقیمانده پرتابه در برخورد با پانل هایی با هسته فوم پلیمری و فلزی و با نسبت چگالی های مختلف دارا است.

در سال ۲۰۱۹ کاظمی^۱ و همکاران [۱۰] مقاومت بالستیکی سازه های ساندویچی ساخته شده از رویه های آلومینیومی AI-۱۰۵۰ و هسته فوم پلی یورتان با نسبت چگالی متغیر (لایه لایه) را به صورت تجربی و عددی با استفاده از نرم افزار ال اس داینایا مورد بررسی قرار دادند که با مقایسه انجام شده بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی مشخص شد که تطابق خوبی بین آن ها برقرار است.

در سال ۲۰۱۸ ژانگ^۲ و همکاران [۱۱] مجموعه ای از آزمایش های نفوذ با پرتابه های فولادی با دماغه اجایو به اهداف بتنی استوانه ای با ضخامت کم و مقاومت متوسط انجام دادند. در این آزمایش ها سرعت برخورد بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ متر بر ثانیه در یک زاویه مشخص بود. وضعیت پرواز سه بعدی پرتابه با یک سیستم انجام می شد که از چندین دوربین دوربین با قابلیت ثبت سرعت بالا بود. همه پرتابه ها بین ۳ تا ۶ درصد کاهش جرم داشتند؛ همچنین شبیه سازی با نرم افزار ال اس داینایا انجام شد که نفوذ سه بعدی را به خوبی نشان داد. به دلیل انتشار موج از جلو و عقب پدیده اسپالینگ قابل مشاهده بود.

در سال ۲۰۱۹ نیشیدا^۳ و همکاران [۱۲] به بررسی آسیب های محلی در پانل های بتن آرمه ناشی از برخورد مایل با پرتابه های نرم پرداختند. در این مطالعه، از پرتابه های نرم و سرتخت با سرعت های مختلف برای بررسی رفتار آسیب در پانل های بتن مسلح استفاده شده است و در نهایت فرمول جدیدی برای ارزیابی آسیب موضعی ناشی از ضربه مایل بر اساس نتایج تجربی و شبیه سازی عددی ارائه شد.

در سال ۲۰۲۰ کانگ^۴ و همکاران [۱۳] فرمول جدیدی برای ارزیابی آسیب موضعی به سازه های بتنی نازک مسلح ناشی از برخورد مایل بر اساس نتایج تجربی و مقایسه نتایج با شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار ال اس داینایا ارائه کردند. برای ارزیابی برخورد مایل روی بتن مسلح از پرتابه هایی با شکل دماغه مسطح و دماغه نیم کره ای استفاده شد. تأثیر

⁵ XUE

⁶ ZHANG

⁷ HAN

¹ KAZEEMI

² ZIAOJING

³ NISHIDA

⁴ KANG

برای تست مقاومت فشاری و کششی بتن از دستگاه تست مقاومت فشاری آنالوگ مطابق شکل (۲) استفاده شده است. این دستگاه مقدار نیرو نهایی را نشان می‌دهد که هر نمونه می‌تواند تحمل کند که از تقسیم این نیرو بر سطح مقطع موثر در هر نمونه مقدار تنش حد تحمل به دست خواهد آمد.



شکل ۲- دستگاه تست مقاومت فشاری آنالوگ

برای نمونه بتن نهایی مقدار تنش و چگالی در جدول (۲) داده شده است. همانطور که در جدول (۲) مشخص است با توجه به نزدیک بودن دو مقدار تنش ردیف دوم و سوم، مقدار مقاومت نهایی و چگالی نهایی میانگین دو مقدار فوق در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲- مقدار تنش فشاری و چگالی نمونه بتن

ارتفاع (mm)	شعاع (mm)	وزن (g)	مساحت (mm ²)	چگالی (kg/m ³)	نیرو (kg)	مقاومت (MPa)
۲۰/۵	۵۱/۵	۴۰۰	۸۳۲	۲۳۷	۲۲۲۰	۲/۱۵
۲	۵۱/۵	۰	۸	۲	۰	۶
۲۰۰	۵/۲۵	۳۸۰	۷۹۲	۲۳۹	۲۶۰۰	۳۲/۷
۲۰/۵	۵/۳۵	۳۸۰	۲۳۸	۲۹۱۰	۰	۳۵/۹
۰	۰	۰	۷۹۶۰	۱	۰	

۲-۲- تهیه نمونه‌های پرتابه

نمونه‌ها با دماغه به شکل اجایو با قطر ۸ میلی‌متر و طول ۳۱/۲۷ میلی‌متر و نسبت شعاع انحناء دماغه به قطر (R/d) برابر با ۴ مطابق با شکل (۳) ساخته شده است.

نفوذ پرتابه در برخورد مایل در اهداف نیمه بی‌نهایت به طور دقیق انجام نشده است؛ لذا انجام این تحقیق به‌عنوان یک پژوهش جدید در زمینه بررسی مسیر نفوذ پرتابه مایل در اهداف بتنی ارزیابی می‌گردد.

۲- روش تجربی

۲-۱- روش تهیه بتن

برای انجام تست‌های بالستیکی نیاز به داشتن اهداف بتن با خواص استاندارد است، لذا برای این کار با استفاده از استاندارد موجود مربوط به طرح اختلاط بتن، ابتدا ترکیب مورد نظر جهت اختلاط به دست آمد. سپس نسبت به تهیه نمونه اولیه جهت تست مطابق شکل (۱) برای هر نوع درصد اختلاط نمونه‌هایی برای تست فشار و تست کشش تهیه شد.



شکل ۱- قالب های نمونه ساخته شده

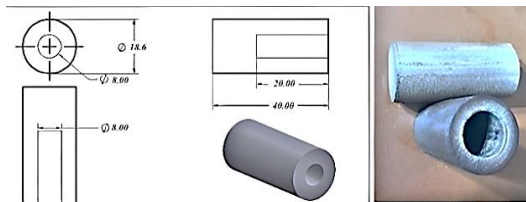
نمونه‌ها می‌بایست یک روز پس از تولید در آب قرار داده شوند. پس از گذشت ۲۸ روز از قرار دادن نمونه‌ها در آب آن‌ها را خارج کرده و تست نمونه‌ها صورت گرفت که در نهایت پس از تهیه چندین طرح اختلاط و انجام تست‌های فشار مختلف، درصد اختلاط ترکیب نهایی بتن با مقاومت مورد نظر مطابق با جدول (۱) به دست آمد.

جدول ۱- ترکیب نهایی بتن

آب (kg)	سیمان (kg)	شن (kg)	شن نخودی (kg)	شادابی (kg)	ماسه (kg)
۲۰۲/۱	۴۳۰	۵۹۵/۲	۴۳۶/۳	۸۴۳/۹	

مقادیر جدول (۱) برای ساخت یک مترمکعب بتن بیان شده است.

پرتابگر داشته باشند و هم اینکه در اثر احتراق دچار آسیب دیدگی و سوختن نشود.



شکل ۴- ابعاد سابوت تفلونی نسوز

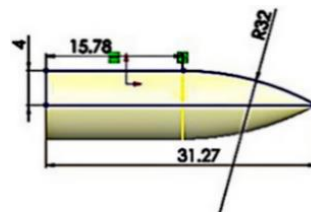
۲-۳- نحوه انجام تست‌های نفوذ

برای انجام تست‌های بالستیکی از دستگاه پرتابگر احتراقی مطابق شکل (۵) استفاده شده است. نحوه کار دستگاه به این گونه است که پرتابه به همراه سابوت در مکان خاصی داخل لوله پرتابه قرار داده می‌شود و سپس مخلوط دو گاز استیلن و اکسیژن وارد محفظه احتراق می‌شوند و عمل انفجار توسط شمع داخل محفظه صورت می‌گیرد و در این لحظه دیافراگمی پاره می‌شود که از قبل در مسیر و قبل از گلوله قرار داده شده است و فشار گاز حاصل از احتراق سبب پرتاب گلوله به سمت جلو و سرعت‌گیری آن درون لوله می‌شود.



شکل ۵- دستگاه پرتابگر احتراقی

پس از خروج گلوله از دهانه لوله پرتاب، سرعت پرتابه توسط یک سرعت‌سنج مغناطیسی مطابق شکل (۶) اندازه‌گیری می‌شود. (لازم به یادآوری است که جهت تطبیق مقدار سرعت گیری شده همزمان از یک دستگاه اسیلوسکوپ نیز استفاده شد تا سرعت توسط آن نیز استخراج شود که نتایج حاصله نشان از نزدیک بودن نتایج بود).



شکل ۳- ابعاد نمونه پرتابه

با توجه به فرض صلب بودن نمونه‌ها، می‌بایست جنس آن‌ها طوری انتخاب شود که هم مقاومت به ضربه بالا و همچنین تنش تسلیم بالایی داشته باشند. نمونه فولادهای تهیه شده از جنس فولاد ۴۲CrMo۴ ابتدا آنالیز موادی شدند. در جدول (۳) نتایج آنالیز آن‌ها آورده شده است. این نوع فولاد از خانواده فولادهای آلیاژی هستند که برای ساخت قطعات بسیار مقاوم و ضربه پذیر استفاده می‌شوند. وزن هر گلوله حدود ۹/۶ گرم و چگالی آن 8000 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه معمولاً نمونه‌های خام فولادی سختی کمتری در مقایسه با نمونه‌های عملیات حرارتی شده می‌باشند، لذا عملیات حرارتی روی نمونه‌ها انجام شد تا هم سختی و هم مقاومت تسلیم آن‌ها افزایش یابد. در نهایت بعد از انجام عملیات حرارتی سختی آن‌ها به ۴۰HRC و مقاومت تسلیم آن‌ها به 1000 MPa رسید.

جدول ۳- نتایج آنالیز موادی نمونه‌های پرتابه

Elem ent	C	Si	Mn	P	S	Cr
%	۰/۴۱۲	۰/۲۷	۰/۷۸۸	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	۱/۰۶۵
Elem ent	Al	Co	Cu	Ti	Nb	Zr
%	-	-	۰/۲۰۶	-	-	-
Elem ent	B	V	W	As	Sn	Fe
%	-	-	-	-	-	۹۶/۹
Elem ent	Ni	Mo	Pb	Sb		
%	۰/۰۸۴	۰/۱۸	-	-		

با توجه به اینکه قطر پرتابه‌ها ۸ میلی‌متر و قطر داخلی لوله پرتاب دستگاه پرتابگر ۱۸/۶ میلی‌متر است، برای پرتاب سابوت‌هایی به شکل (۴) تهیه شد. جنس سابوت‌ها از جنس تفلون نسوز است که هم کمترین اصطکاک را داخل دستگاه

۲-۴- تعیین خواص اهداف بتنی

در این تحقیق همچنین خواص مکانیکی اهداف بتنی تهیه شده نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، مدول یانگ، نسبت پواسون و چسبندگی بتن اندازه‌گیری شده است. به منظور اندازه‌گیری خواص یاد شده، چهار عدد آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، چهار آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری و یک آزمون مقاومت کششی برزیلی انجام شده است. در ادامه روند جزئیات و نتایج هر آزمایش به صورت جداگانه ارائه شده‌است.

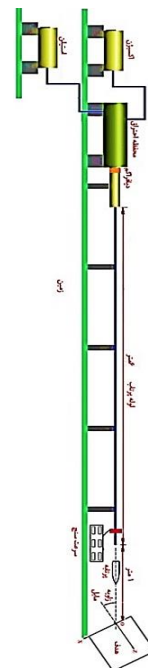


شکل ۶- سرعت‌سنج مغناطیسی

شماتیک نحوه تست و اندازه‌گیری سرعت در شکل (۷) آورده شده است.

۲-۴-۱- آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری

مطابق دستورالعمل آبا (آیین‌نامه بتن ایران) مقاومت فشاری مشخصه بتن می‌بایست روی حداقل دو عدد نمونه با قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر یا سه عدد نمونه با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر تعیین شود. حداقل مجاز نسبت قطر استوانه به حداکثر اندازه اسمی سنگدانه می‌بایست برابر با ۳ در نظر گرفته شود؛ همچنین می‌بایست دقت داشت که سن بتن‌های مورد آزمایش می‌بایست ۲۸ روزه باشد؛ همچنین مدول الاستیسیته بتن نیز می‌بایست با استفاده از انجام آزمون روی نمونه‌های با سن ۲۸ روز تعیین شود. مدول الاستیسیته بتن، برای بتن‌های با جرم مخصوص بین ۱۴۰۰ تا ۲۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب مطابق با ACI ۳۱۸ (آیین‌نامه بتن آمریکا) از رابطه تجربی زیر قابل تخمین است.



شکل ۷- شماتیک دستگاه و نحوه انجام تست

$$E_c = 0.43 w_c^{1/5} \sqrt{f_c} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، E_c ، w_c و f_c به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته، جرم مخصوص یا چگالی و مقاومت فشاری بتن هستند؛ بنابراین به منظور تعیین مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون بتن، آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از دستگاه SANTAM SAF-۲۰۰۰ بر روی چهار نمونه بتن انجام شده‌است. دستگاه مذکور دستگاه خودکنترل است و مقادیر نرخ جابه‌جایی در طول آزمون ثابت نگاه داشته شده‌است؛ همچنین دقت شده‌است که نرخ جابه‌جایی به قدری پایین در نظر گرفته شود که نمونه در حالت

بعد از انجام تست‌های تجربی نفوذ پرتابه در هدف بتنی نیاز به بررسی مسیر نفوذ پرتابه در هدف است. برای این منظور از روش عکسبرداری x-ray استفاده شد، بدین صورت که چندین روش متداول عکس برداری مورد ارزیابی قرار گرفت تا در نهایت با استفاده از یکی از روش‌های مرسوم، عکس برداری مورد نظر انجام و نتایج مورد نظر استخراج شد. سپس برای همه نمونه‌های تست شده، هدف بتنی عکس برداری انجام شد تا مسیر نفوذ، نقطه توقف پرتابه و عمق نفوذ در تمام تست‌ها مشخص شد.

همچنین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون نیز برای بتن C۳۵، به ترتیب برابر با ۲۲/۷۸ و ۰/۱۳۷ اندازه‌گیری شده است.

۲-۴-۲- آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری

چهار عدد آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری مطابق شکل (۱۰) نیز در این پژوهش انجام شده است. نمونه‌های مورد استفاده برای انجام آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری با قطر ۷۲/۶۴ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر حداقل ۲ مغزه‌گیری و آماده‌سازی شده‌اند. مقادیر فشار جانبی و تنش محصورکننده برابر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ مگاپاسکال تنظیم شده است.



شکل ۱۰- نمای دستگاه مورد استفاده در آزمون‌های مقاومت فشاری سه‌محوری

یک نمونه مورد استفاده برای آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری مطابق شکل (۱۱) نشان داده شده است.



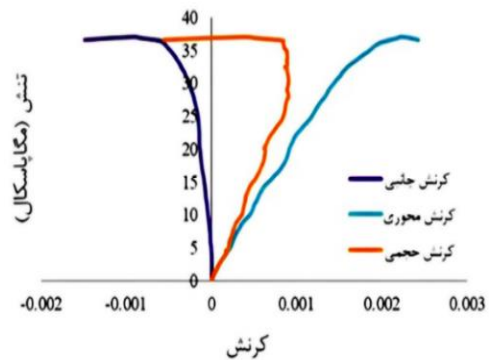
شکل ۱۱- یکی از نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌های مقاومت فشاری سه‌محوری

بارگذاری استاتیکی قرار بگیرد. نمایی از دستگاه مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸- نمای دستگاه مورد استفاده در تعیین مقاومت مشخصه بتن

نمودار مقاومت فشاری بتن و کرنش‌های محوری، جانبی و حجمی مطابق شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۹- نمودار تنش کرنش حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری بتن C۳۵

مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری بتن طی ۴ عدد آزمون مطابق جدول (۴) ارائه شده است.

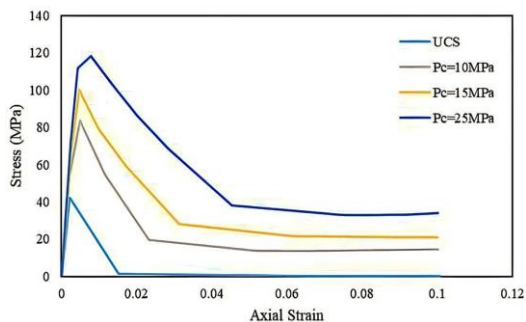
جدول ۴- مقادیر بدست آمده مقاومت مشخصه بتن C۳۵

بر حسب MPa				
میانگین	نمونه ۴	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱
۳۵/۳	۳۵/۱	۳۵/۳	۳۴/۲	۳۶/۵۰



شکل ۱۳- (الف) نحوه آزمون و (ب) نمونه برزیلی مورد استفاده در آزمون مقاومت کششی برزیلی

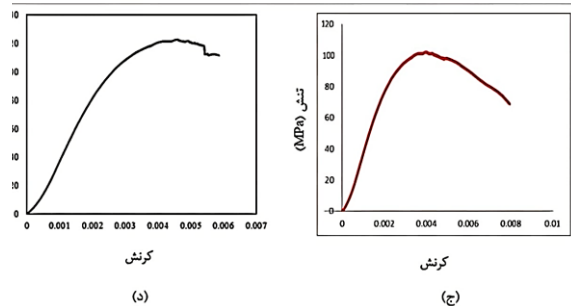
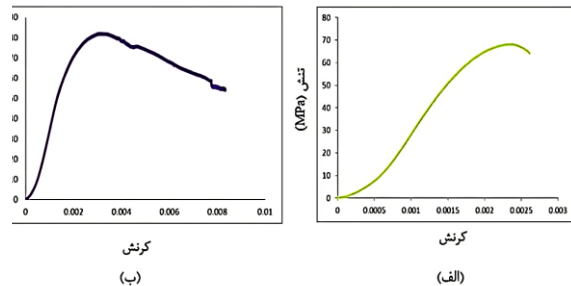
از نتایج به دست آمده از تست‌های فوق، ابتدا کمیت‌های مربوط به مدل رفتاری حاصل شده‌است. سپس برخی از کمیت‌ها که به صورت تحلیلی و تجربی قابل محاسبه و اندازه‌گیری نیستند، به روش کالیبراسیون و با مقایسه کیفی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با مشاهدات تجربی و یا استفاده از نتایج مقالات معتبر حاصل شده‌اند. برای تصدیق کالیبراسیون کمیت‌ها نتایج شبیه‌سازی عددی آزمون‌های مقاومت فشاری سه‌محوری و تک‌محوری مطابق شکل (۱۴) نمایش داده شده است.



شکل ۱۴- نمودار تنش کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری

مطابق شکل فوق مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت متناسب با افزایش فشار جانبی به خوبی توسط مدل رفتاری RHT شبیه‌سازی و حاصل شده‌است؛ همچنین مشاهده می‌شود که رفتار پس از شکست بتن نیز توسط مدل حاصل شده‌است. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقدار مقاومت

همچنین نمودارهای تنش کرنش حاصل از انجام این آزمون‌ها نیز مطابق شکل (۱۲) نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۲- نمودارهای تنش کرنش آزمون‌های مقاومت فشاری سه‌محوری با مقادیر فشارهای جانبی (الف) ۵ مگاپاسکال؛ (ب) ۱۰ مگاپاسکال؛ (ج) ۱۵ مگاپاسکال؛ (د) ۲۰ مگاپاسکال

۲-۴-۳- آزمون مقاومت کششی برزیلی

یک عدد آزمون مقاومت کششی برزیلی نیز در این پژوهش به منظور تعیین مقاومت کششی بتن C۳۵ انجام شده‌است و مطابق نتایج این آزمون، مقدار مقاومت کششی برابر با ۳/۴۲ مگاپاسکال تعیین شده‌است. نحوه انجام آزمون روی نمونه استوانه‌ای با قطر ۷۲/۶ میلی‌متر و نسبت ضخامت به قطر ۱، مطابق شکل (۱۳) نمایش داده شده‌است.

N	۰/۴۸۱	G*T	۱
FC	۳۵ MPa	X1	۰/۵
F*s	۰/۴۴۷	D1	۰/۰۴
F*T	۰/۹۰۷	D2	۱
Q0	۰/۶۸	EPM	۰/۰۱
B	۰/۰۱۰۵	AF	۱/۵
T2	.	NF	۱/۶
E0c	3×10^{-8} 1/s	γ	۴/۶۲
A1	۲۱/۶ GPa	PEL	۲۵/۱ MPa
A2	۱۳۱ GPa	NP	۳
A3	۲۹۰ GPa	α	۱/۱۹

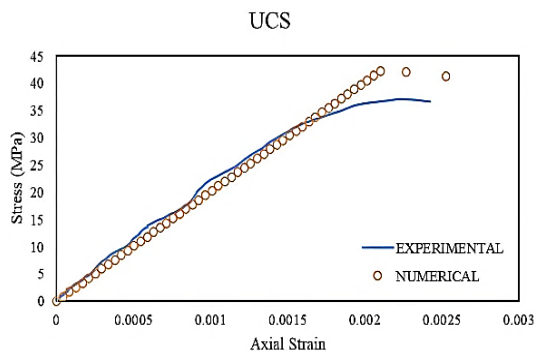
۳- روش عددی

راه‌حل‌های عددی و شبیه‌سازی‌ها جایگزین بهتری برای حل محدودیت‌های مدل‌های تحلیلی و هزینه‌های زیاد آزمون‌های تجربی هستند. کدهای اجزاء محدود در طی سال‌ها در سطح خوبی تکامل یافته‌اند که تغییر شکل‌های پیچیده و الگوهای شکست را برای انواع مسائل ضربه و نفوذ می‌توانند با دقت تحلیل کنند. AUTODYN، ABAQUS، LS-DYNA چند کد اجزاء محدود تجاری محاسباتی و شبیه‌سازی ضربه هستند. در تکنیک‌های حل عددی بطور سنتی از دو روش اصلی لاگرانژی و اویلری استفاده می‌شود که هر یک از آن دو را می‌توان با توجه به رفتاری که برای مواد مورد استفاده در تحلیل پیش بینی می‌شود، با در نظر گرفتن مزایا و معایب این روش‌ها برگزید. در روش عددی مدل‌سازی پرتابه و هدف بتنی جهت تحلیل در خود نرم‌افزار انجام شده‌است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار ال اس دایناس استفاده شده‌است. برای حل از روش صریح^۱ و لاگرانژی استفاده شده‌است. برای مدلسازی مدل آسیب بتن نیز مدل‌های رفتاری مختلفی از جمله Concrete damage، JHC و JH-2 و RHT وجود دارد که در این مقاله از روش RHT استفاده شده‌است.

۳-۱- مدل RHT

برای مدل‌سازی دقیق رفتار بتن هنگام ضربه و ترک‌خوردگی سطحی، مدل RHT جزء بهترین گزینه‌ها هست. این مدل قادر هست که رفتار ترک‌ها و شکست سطحی بتن تحت بارهای دینامیکی شدید را به خوبی شبیه‌سازی کند. مدل RHT به

باقی‌مانده در حالت تک‌محوری و محصور نشده برابر صفر پیش‌بینی شده است و مقادیر مقاومت باقی‌مانده با افزایش فشار جانبی افزایش یافته‌اند. در ادامه مقایسه نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، فرایند صحت‌سنجی انجام شده‌است که مطابق با شکل (۱۵)، نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده‌است.



شکل ۱۵- مقایسه نمودار تنش کرنش حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری

مطابق شکل (۱۵)، مشاهده می‌شود که شیب منحنی تنش کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی در نقطه پیش از شکست، مطابقت قابل قبولی با مشاهدات تجربی دارد؛ همچنین مشاهده می‌شود که مدل عددی مقدار مقاومت را کمی بیش از مقدار تجربی برآورد نموده است. در نهایت ضرایب مورد نیاز برای مدل رفتاری RHT مطابق جدول (۵) به دست آمده است.

جدول ۵- پارامترهای استخراج شده مدل رفتاری RHT برای بتن C۳۵

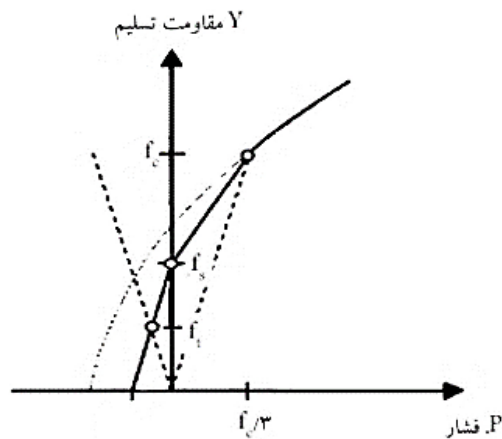
ρ_0	۲/۴۴ gr/cm ³	E0T	1×10^{-6} 1/s
shear	۹/۲۴ GPa	EC	$3 \times 10^{+22}$
EPSF	۲/۰	ET	$3 \times 10^{+22}$
B0	۴/۶۲	β_c	۰/۰۳۲
B1	۴/۶۲	β_t	۰/۰۳۶
T1	۲۱/۶ GPa	PTF	1×10^{-3}
A	۱/۶	G*C	۱

¹ explicit

هیدرواستاتیکی پایین‌تر از $f_c/3$ نصف النهار فشاری توسط یک خط راست همانند شکل (۱۶) ارائه شده‌است؛ اما برای فشار هیدرواستاتیکی بیشتر از $f_c/3$ معادله‌ی زیر برای محاسبه به کار برده می‌شود [۱۹].

$$\sigma_f^* = A(p^* - \frac{F_{RATE}(\dot{\epsilon})}{3}) + (\frac{A}{F_{RATE}(\dot{\epsilon})})^{\frac{1}{N}})^N, p \geq f_c/3 \quad (2)$$

که در آن N و A به ترتیب ثابت توان سطح شکست و ثابت سطح شکست هستند. f_c مقاومت فشاری تک محوره و $P^* = P/f_c$ فشار نرمالایز شده نامیده می‌شود.



شکل ۱۶- رفتار سطح شکست بر مبنای قانون فشار هیدرواستاتیکی (ریدل) [۱۷]

F_r تابعی از نرخ کرنش وابسته ($\dot{\epsilon}$) و نمایانگر فاکتور سخت شوندگی کرنش و با سه شرط در رابطه زیر آورده شده‌است.

$$F_r(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} (\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0^c})^{\beta_c}, & p \geq f_c/3 \\ \frac{p + f_c/3}{f_c/3 + f_c/3} (\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0^c})^{\beta_c} - \frac{p - f_c/3}{f_c/3 + f_c/3} (\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0^c})^{\beta_t}, & f_c/3 \leq p \leq -f_c/3 \\ (\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0^t})^{\beta_t}, & p \leq -f_c/3 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن p مطابق شکل (۱۷) فشار هیدرواستاتیکی، $\dot{\epsilon}_0^c$ نرخ کرنش مرجع فشاری و برابر با $3 \times 10^{-1} S^{-1}$ و $\dot{\epsilon}_0^t$ نرخ

دلیل دقت بالاتر در چندمرحله‌ای مدل‌سازی کردن شکست‌ها و قابل تنظیم بودن برای شرایط مختلف، در بسیاری از مطالعات پیشرفته‌تر ترجیح داده می‌شود؛ بنابراین برای مدل‌سازی رفتار بتن تحت ضربه و شکست سطحی آن مدل RHT گزینه مناسبی خواهد بود [۱۷]. مدل RHT مدل خمیری پیشرفته‌ای است که در ابتدا توسط ریدل^۱، هایرمایر^۲ و توما^۳ در بنیاد علمی ارنست ماخ تهیه و در ادامه توسط ریدل در سال ۲۰۰۰ توسعه داده شد. این مدل برای شبیه‌سازی بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته‌اند، بسیار کارآمد است. از مدل مادی RHT برای توصیف رفتار مواد ترد مثل بتن تحت بارهای دینامیکی استفاده می‌شود که با مشخصه‌هایی از قبیل سختی کرنشی، سختی فشاری، سخت‌شدگی در اثر نرخ کرنش، سه ثابت وابسته (محصول سه تنش اصلی، سطح شکست، حد الاستیک و مقاومت باقیمانده) و شاخص آسیب (کرنش نرمی) و در نظر گرفتن کاهش استحکام در اثر رشد ترک‌ها قابل بیان است. عملکرد و رفتار مناسب این مدل در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن بر اساس مقادیر نسبت داده شده به پارامترها و ثابت‌های عددی در معادلات مدل وابسته است که این مقادیر به عوامل معادله‌ی حالت $(p - \alpha)$ و مدل‌های مقاومت، شکست و فرسایش آنها ارتباط دارد. در این مدل سخت‌شوندگی کرنشی و وابستگی به نام نامتغیر سوم برای نصف‌النهار کششی و فشاری در نظر گرفته شده‌است و رفتار نرم‌شدگی توسط سطح مقاومت شکست غیر وابسته مدل شده‌است. مقاومت کششی هیدرواستاتیکی بتن وابسته به نرخ کرنش نیز در آن لحاظ شده است [۱۸].

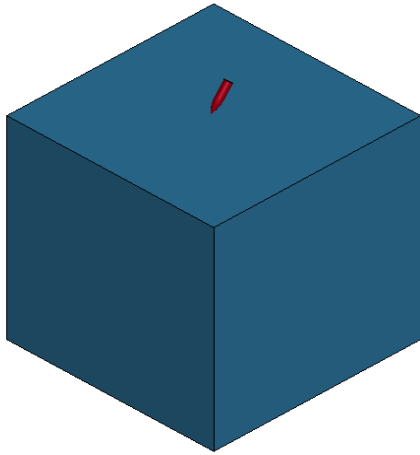
مدل شامل ۳ سطح وابسته به فشار است که عبارت‌اند از: سطح حدود کشسان (Y_{el})، سطح گسیختگی (Y_{fail}) و سطح مقاومت پسماند (Y_{fric}) که در شکل (۹) نشان داده شده‌است؛ همچنین سخت شوندگی فشاری، سخت‌شوندگی کرنشی و مسیر بارگذاری هم نشان داده شده‌است. مقاومت تسلیم (Y) با افزایش فشار هیدرواستاتیکی (p) افزایش پیدا می‌کند. σ_f^* یک تابع برای بیان فشار هیدرواستاتیکی وابسته به نصف‌النهار فشاری است که خود تابع مسیر بارگذاری فشاری و ضریب نرخ کرنش و نسبت مسیرهای بارگذاری است. برای فشارهای

³ TOMA

¹ Riedel

² Hiermaier

سه بعدی انجام شده است. در شکل (۱۸) مدلسازی هدف و پرتابه و نیز زاویه پرتابه نشان داده شده است.



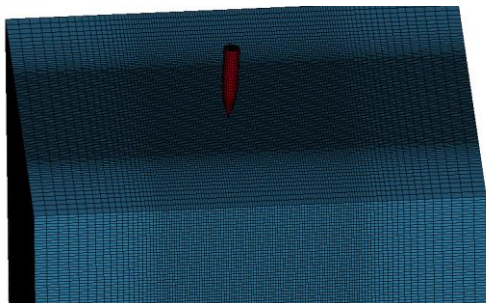
شکل ۱۸- مدلسازی هدف و پرتابه در نرم افزار ال اس داینا

همچنین پارامترهای مربوط به خواص مکانیکی پرتابه در جدول شماره (۶) آورده شده است.

جدول ۶- پارامترهای مکانیکی پرتابه فولادی صلب

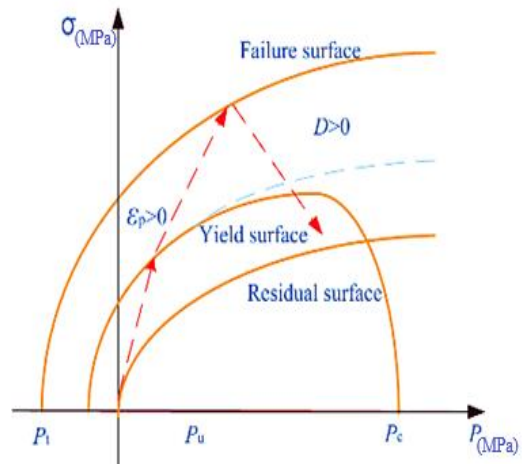
ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/m ³)
۰/۳	۲۰۶	۷۹۰۰

مدل مش بندی شده در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۹- مدل مش بندی شده هدف و پرتابه

کرنش مرجع فشاری و برابر با $\epsilon_0^t = 3 \times 10^{-1}$ و β_c ثابت نرخ کرنش فشاری و از رابطه $(\beta_c = 4 / (20 + 3f_c))$ و β_t ثابت نرخ کرنش کششی و از رابطه $(\beta_t = 2 / (20 + f_c))$ به دست می آیند. لازم به یادآوری است که f_t و f_c مقادیر مقاومت فشاری و کششی بتن هستند.



شکل ۱۷- تنش تسلیم بر حسب فشار هیدرواستاتیک در مدل رفتاری RHT

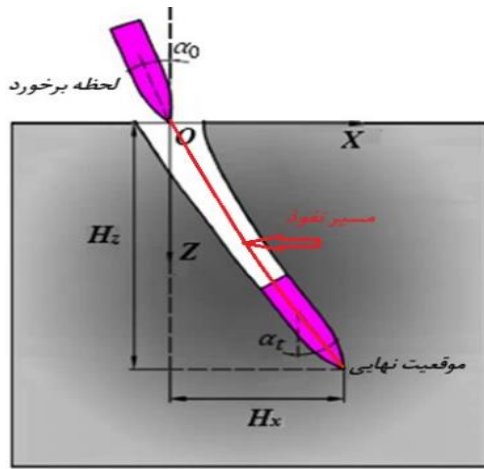
آسیب در نظر گرفته شده طی انباشت شدن کرنش های انحرافی غیرکشسان (برش ناشی از ترک خوردگی) از طریق معادله ی زیر به دست می آید. کرنش خمیری را نیز می توان از رابطه (۳) دست آورد.

$$\epsilon_{pl.failure}(p) = D_1(P^* - P_{spall}^*)^{D2} \quad (4)$$

در معادله فوق $P^* = P/f_c$ و $P_{spall}^* = f_c/f_t$ فشار و کنش نرمالایز شده در بتن هستند. آسیب تجمعی دو تأثیر در مدل خواهد داشت که عبارت اند از: نرم شدگی کرنش و کاهش سختی برشی [۱۸].

۲-۳- روش مدلسازی عددی

برای شبیه سازی عددی از نرم افزار ال اس داینا استفاده شده است. همچنین برای تخمین رفتار بتن از مدل مادی RHT استفاده شده که ضرایب آن برای اهداف بتنی مورد استفاده در قسمت (۲-۴) استخراج شده است. مدلسازی به صورت کاملاً



شکل ۲۱- شماتیک دیاگرام اندازه‌گیری عمق نفوذ

ابعاد اهداف بتنی مطابق با نمونه‌ها از مکعب به ابعاد ۲۵۰ میلیمتر و ۳۰۰ میلیمتر شبیه‌سازی شده‌است. شرایط مرزی مطابق با شرایط تست در نظر گرفته شده‌است و از پنج وجه کاملاً مقید شده‌است.

۴- نتایج و بحث

برای اسکن نمونه‌های هدف بتنی از دستگاه سی‌تی‌اسکن با ظرفیت‌های مختلف با توجه به ابعاد نمونه‌های هدف بتنی استفاده شده‌است، در شکل (۲۰) یک نمونه دستگاه سی‌تی اسکن به همراه نمونه هدف بتنی که روی آن قرار گرفته است، نشان داده شده‌است. دستگاه با عبور اشعه ایکس از هدف قادر هست، تصویری دقیق از داخل هدف را نشان دهد و مکان و موقعیت هرگونه سوراخ یا فلز داخل هدف بتنی را در صورت وجود نشان دهد؛ همچنین دستگاه با حرکت روی هدف و گرفتن تصویر در مقاطع دلخواه در طول هدف قادر به شبیه‌سازی سه بعدی از هدف بتنی است.

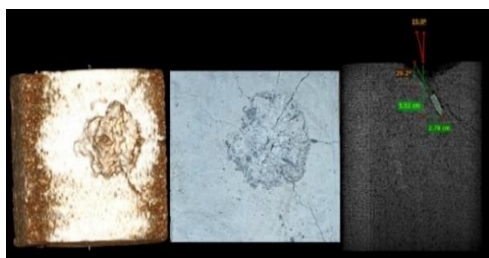
در شکل‌های (۲۲ و ۲۳) دو نمونه هدف بتنی بعد از تست به همراه نتایج اسکن نشان شده‌است.



شکل ۲۲- عکس نمونه بعد از تست و نتایج اسکن برای پرتابه با زاویه برخورد ۵ درجه و سرعت برخورد ۵۵۲ m/s



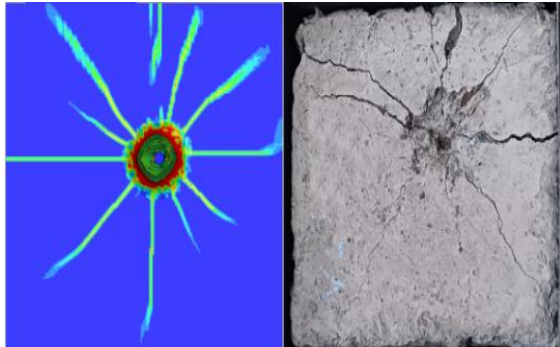
شکل ۲۰- دستگاه سی‌تی‌اسکن به همراه هدف بتنی



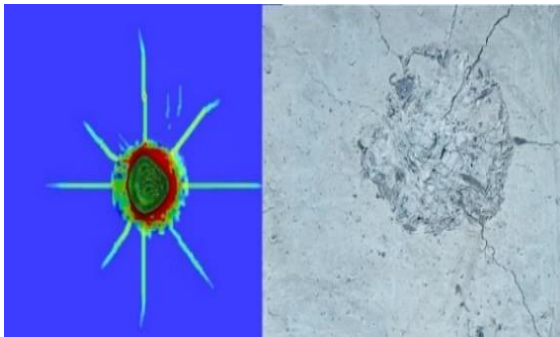
شکل ۲۳- عکس نمونه بعد از تست و نتایج اسکن برای پرتابه با زاویه ۱۵ درجه و سرعت برخورد ۵۵۰ m/s

برای اندازه‌گیری مقدار عمق نفوذ و همچنین مسیر نفوذ مطابق با شکل (۲۱) استفاده شده‌است.

برای اندازه‌گیری مسیر و عمق نفوذ در روش عددی مکان هندسی نوک نمونه پرتابه در هر لحظه محاسبه و در نهایت مسیر نفوذ استخراج می‌شود. در شکل‌های (۲۴ و ۲۵) مکان



شکل ۲۶- مقایسه نتایج آسیب روش عددی و تجربی برای زاویه ۵ درجه و سرعت ۵۵۲m/s



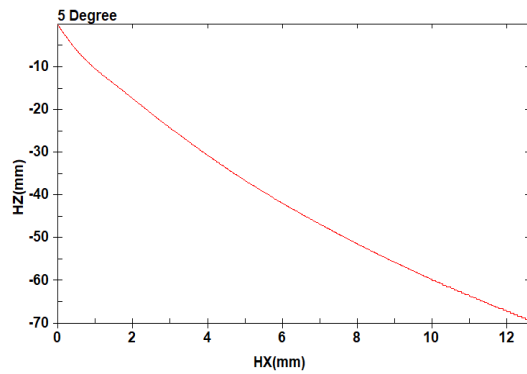
شکل ۲۷- مقایسه نتایج آسیب روش عددی و تجربی برای زاویه ۱۵ درجه و سرعت ۵۵۰m/s

همانطور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، نتایج حاکی از پیش‌بینی دقیق رفتار مدل آسیب بتن و تأیید ضرایب تجربی استخراج شده در مدل رفتاری RHT است. با توجه به اینکه در روش عددی فرض صلب بودن برای پرتابه در نظر گرفته شده است، در شکل (۲۸) مشاهده می‌شود، نمونه‌ها بعد از تست تجربی کمترین تغییر شکل را داشته‌اند؛ بنابراین از سختی و استحکام بالایی برخوردار بوده‌اند.

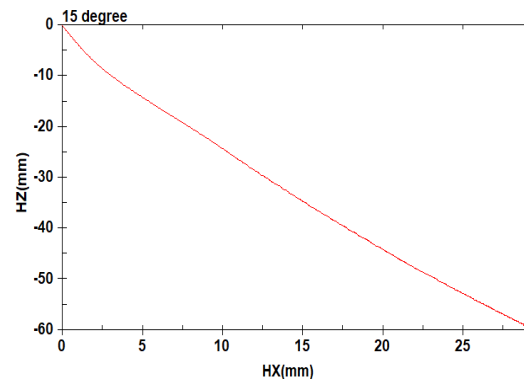


شکل ۲۸- شکل نمونه‌های پرتابه بعد از تست تجربی بالستیکی

هندسی نوک نمونه پرتابه برای زوایای ۵ و ۱۵ درجه نشان داده شده است.



شکل ۲۴- مکان هندسی نوک پرتابه با زاویه برخورد ۵ درجه و سرعت برخورد ۵۵۲m/s در نرم افزار ال اس داین



شکل ۲۵: مکان هندسی نوک پرتابه با زاویه برخورد ۱۵ درجه و سرعت برخورد ۵۵۰m/s در نرم افزار ال اس داین

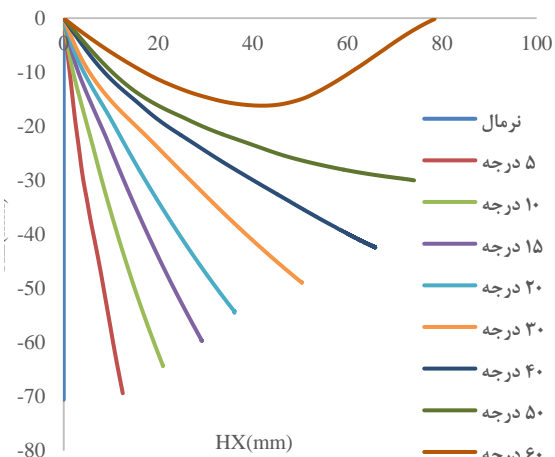
همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی و مقایسه مدل آسیب برای دو حالت زاویه برخورد ۵ و ۱۵ درجه با روش تجربی در اشکال (۲۶) و (۲۷) آورده شده‌است.

پرتابه برای حل عددی و نیز تست تجربی برای زوایا و سرعت‌های مختلف آورده شده‌است.

جدول ۷- مقایسه نتایج حل عددی و روش تجربی مکان هندسی نقطه توقف نوک پرتابه

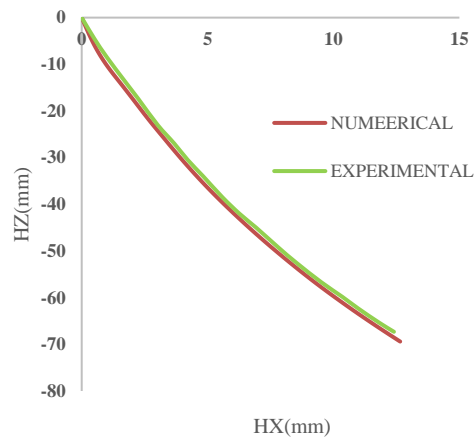
مقدار خطای (Z) %	مقدار خطای (X) %	مقدار عددی (Z)	مقدار عددی (X)	مقدار تجربی (Z)	مقدار تجربی (X)	زاویه برخورد (درجه)	سرعت (m/s)
۲/۲	۰	۷۰/۶	۰	۶۹/۲	۰	۰	۵۴۶
۳/۲	۱/۶	۶۹/۴	۱۲/۶	۶۷/۳	۱۲/۴	۵	۵۵۲
۶/۷	۳/۵	۶۴/۳	۲۰/۹	۶۰/۳	۲۰/۲	۱۰	۵۴۹
۹/۳	۴/۷	۶۰/۳	۲۹/۱	۵۵/۲	۲۷/۸	۱۵	۵۵۰
۱۰/۸	۸/۳	۶۳/۴	۴۵/۵	۵۷	۴۲	۲۰	۶۰۶

همانطور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، نتایج نشان از پیش‌بینی خوب روش عددی با روش تجربی را دارد و مقدار عمق نفوذ با افزایش زاویه برخورد کمتر می‌شود. نتایج حل عددی برای سرعت ۵۵۰m/s و زوایای مختلف در شکل (۳۱) آورده شده‌است که نتایج کاهش عمق نفوذ در اثر افزایش زاویه برخورد را نشان می‌دهد.

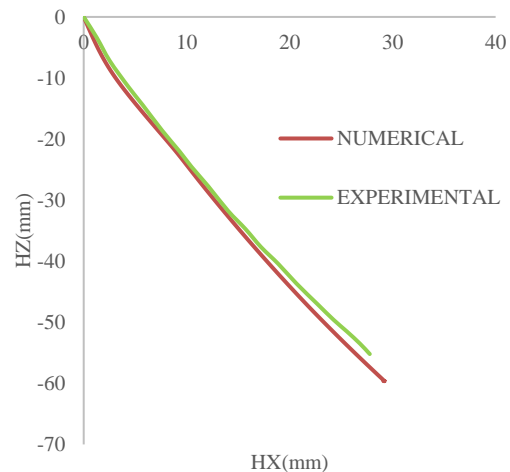


شکل ۳۱- مقایسه مسیر نفوذ پرتابه به روش عددی برای زوایای مختلف برخورد در سرعت ۵۵۰m/s

مکان هندسی مسیر نوک پرتابه در هر حالت شبیه‌سازی استخراج و با مسیر نفوذ در روش تجربی مقایسه شده‌است که در اشکال (۲۹) و (۳۰) دو مورد برای زوایای ۵ و ۱۵ درجه آورده شده‌است که نتایج حاکی از نزدیک بودن نتایج عددی و تجربی است.



شکل ۲۹- مقایسه مسیر نفوذ پرتابه به روش عددی و تجربی برای زاویه ۵ درجه و سرعت برخورد ۵۵۲m/s



شکل ۳۰- مقایسه مسیر نفوذ پرتابه به روش عددی و تجربی برای زاویه ۱۵ درجه و سرعت برخورد ۵۵۰m/s

همانطور که در نمودارهای بالا مشخص است، تطابق خوبی بین روش عددی و تجربی در تخمین مسیر نفوذ پرتابه وجود دارد. در ادامه در جدول (۷) نتایج مکان هندسی نقطه توقف

- and experimental investigation of the penetration depth of the rigid blunt projectile on the perforated metal plate. *J Solid Fluid Mech.*;10(4):241-51. (In Persian)
- [6] Chen XW, Fan SC, Li QM (2004) Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile. *J Imp Eng.* Jul 1;30(6):617-637.
- [7] Liyaghat. G., and Pol, M (2009) H Analysis of the penetration of inclined projectiles in thin metal plates", *Aero Mech*, Vol. 5, No. 2,. (In Persian).
- [8] Wu, Hao, Xiao-Wei Chen(2014) Qin Fang, and Li-Lin He. "Stability analyses of the mass abrasive projectile high-speed penetrating into concrete target. Part II: Struct Stab analyses." *Acta Mechanica Sinica* 30, no. 6 943-955.
- [9] Nia, Ali Alavi, and Mahdi Kazemi. (2015) Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets. *Mod Mech Eng* 15, no. 6. (In Persian).
- [10] Kazemi, M and Nia, Ali Alavi (2019) High velocity impact on sandwich panels with graded foam-cored and aluminum face-sheet: Numerical and experimental assessment. *J Mod Mech Eng*, 19(4), 1039-1047. (In Persian).
- [11] Chen X, Lu F, Zhang D(2018) Penetration trajectory of concrete targets by ogived steel projectiles—Experiments and simulations. *J Imp Eng.* ;120:202
- [12] Nishida A, Kang Z, Nagai M, Tsubota H, Li Y(2019) Evaluation of local damage to reinforced concrete panels subjected to oblique impact by soft missile. *Nuclear Engineering and Design*.350:116-27.
- [13] Kang Z, Okuda Y, Nishida A, Tsubota H, Li Y. (2020) Analytical study of perforation damage in reinforced concrete slabs subjected to oblique impact by projectiles with different nose shapes. *J Mech Eng.* 8(1):20-00331.
- [14] Xue J, Shen P, Wang X(2020) Simulation Analysis on Ballistic Deflection of Projectile Obliquely Penetrating into Concrete. *J Sys Simul.* 29(8):1801-8.
- [15] Zhang X, Yao W, Li W, Wang X, Zhu X (2021) Research on Oblique Penetration of Projectiles into Targets of Different Materials. *J of Physi: (Vol., No. 1, p. 012072)*. IOP Publishing.
- [16] Cho H, Choi MK, Park S, Kim M, Han J, Sohn D (2022) Determination of critical ricochet conditions for oblique impact of ogive-nosed projectiles on concrete targets using semi-empirical model. *J Imp Eng.* 165:104214.
- [17] Grunwald C, Schaufelberger B, Stolz A, Riedel W, Borrwall T(2017) A general concrete model in hydrocodes: verification and validation of the

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی و مقایسه نتایج عددی و تجربی برای مسیر نفوذ مایل پرتابه صلب اجایو در اهداف بتنی با خواص مقاومت فشاری ۳۵MPa پرداخته شده است. برای شبیه سازی عددی از مدل رفتاری RHT استفاده شده است و ضرایب مورد نیاز رفتار مادی بتن با انجام تست‌های مختلف و کالیبره سازی ضرایب استخراج شده و مقایسه کیفی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با مشاهدات تجربی و با استفاده از نتایج مقالات معتبر به دست آمده است. پرتابه از جنس فولاد سخت در نظر گرفته شده تا کمترین تغییر شکل را داشته باشد. تست تجربی برای سرعت‌ها و زوایای مختلف انجام شده و پس از انجام تست‌های بالستیکی نتایج اسکن شده است. نتایج مسیر نفوذ پرتابه نشان از تطابق خوب بین روش عددی و تجربی است و روش عددی به خوبی توانسته است رفتار بتن را تخمین بزند. البته با افزایش زاویه برخورد اختلاف دو روش بیشتر می‌شود که علت آن دور شدن از زاویه نرمال و چرخش و انحراف پرتابه است؛ همچنین در یک سرعت ثابت برای زوایای مختلف عمق نفوذ تا ۷۷ درصد کاهش پیدا می‌کند که علت آن این است که با افزایش زاویه برخورد پرتابه دچار انحراف بیشتری می‌شود که باعث می‌شود، عمق نفوذ کم شود. انحراف پرتابه و در نتیجه مقدار نفوذ پرتابه در طول فرآیند نفوذ تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله زاویه برخورد مایل، سرعت برخورد، شکل هندسی، وزن، طول و قطر پرتابه و همچنین مقاومت ماده هدف است.

۶- مراجع

- [1] Forrestal, M. J, and V. K. Luk. (1992) Penetration into soil targets. *J Imp Eng* 12.3: 427-444.
- [2] Schoof, L. A, F. A. Maestas, and C. W. (1989) Young. Numerical method to predict projectile penetration. No. SAND-89-0266C; CONF-8904119-1. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA),.
- [3] Sayahbadkhor M, Vahedi K, Naddaf Oskouei AR (2019) Presenting a modified theory and analytical investigation of projectile penetration into ceramic-metal semi-infinite targets. *J Solid Fluid Mech.*;9(2):31-45. (In Persian)
- [4] Huang, Fenglei, et al (2005) A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets. *J Imp Eng* 32.1-4: 173-187.
- [5] Farahmand M, Vahedi K, Naddaf Oskouei AR, Hosseini R (2020) An analytical model Presentation

- [19] Nystrom U(2008) Concrete structures subjected to blast and fragment impacts. Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Goteborg.
- Riedel–Hiermaier–Thoma model in LS-DYNA. J Prot Struct.8(1):58-85.
- [18] Tu Z, Lu Y(2009) Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations. J Imp Eng. 36(1):132-146.