

توسعه مدل جانسون هولمکوئیست جهت شبیه‌سازی برخورد پرتابه‌های هواپایه به سازه‌های بتنی

علی نگهبان برون^{۱*}، رسول مرادی^۲

۱- استادیار- دانشکده هوافضا- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی سهند- تبریز- ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱)

چکیده

جهت حفاظت از تجهیزات و سازه‌های دفاعی در مقابل بارهای ضربه‌ای و انفجاری، بتن مسلح به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه، آسیب بتن در اثر برخورد پرتابه بررسی شده و مدل آسیب ترد جانسون-هولمکوئیست برای مدل‌سازی پدیده نفوذ به‌عنوان مدل پایه انتخاب شده است. به‌منظور پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار ماده، رابطه جدیدی برای اثر نرخ کرنش بر استحکام مدل ساختاری پایه، پیشنهاد گردید. ابتدا مفاهیم مدل پایه بیان گردیده و مدل آسیب استخراج شد و در ادامه الگوریتم مدل برای شبیه‌سازی عددی ارائه گردید. به‌منظور پیاده‌سازی و اعتبارسنجی الگوریتم، زیربرنامه‌ای به زبان برنامه‌نویسی فرترن بر اساس روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی فرایند آسیب نوشته و با استفاده از مدل ماده توسعه داده شده برخورد پرتابه به بتن مسلح بررسی گردید. بعد از اطمینان از همخوانی کد با نرم‌افزار آباکوس، نتایج تست‌های تجربی و پژوهش‌های سایر محققین با استفاده از شبیه‌سازی با کد توسعه‌یافته بررسی و صحت شبیه‌سازی تأیید گردید. مدل پیشنهادی ترکیب خوبی بین سادگی و دقت در محاسبات پاسخ صفحات بتنی تحت تأثیر برخورد پرتابه در زوایای مختلف را نشان می‌دهد. در ضمن کد آماده شده از هزینه محاسباتی بسیار کمتری نسبت به نرم‌افزار ال‌اس‌داینای برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: آسیب ترد، آباکوس، روش اجزاء محدود، ضربه، زیربرنامه.

Development of Johnson Holmquist model to simulate the impact of airborne projectiles on concrete structures

A. Negahban, B. R. Moradi

Abstract

In this study, the damage behavior of concrete under projectile impact is investigated. Thus, Johnson Holmquist brittle damage model, which is widely used to model penetration phenomenon, is chosen as the basic model. In order to more accurately predict the behavior of the material, a modified model is proposed by considering the new relationship for the effect of rate on the strength of the basic structural model. In the first step, the concepts of the basic model are expressed. Then, the formulation of the damage model is extracted and algorithm of the model for numerical simulation to solve it are presented. In order to implement and validate the algorithm, a subroutine is written in Fortran programming language based on the finite element method to simulate the damage process. In the following, using the developed model, the impact of the projectile on reinforced concrete is investigated. The model is verified by comparing the numerical and experimental results in the literatures. Numerical simulations using the proposed model show a good compatibility between simplicity and accuracy for calculations of concrete slabs under the impact of airborne projectile. Also, the prepared code has a lower computational cost than the Ls-Dyna software.

Key words: Brittle damage, Abaqus, Finite element method, Impact, Subroutine.

مقدمه

در طی سال‌های متمادی بتن در طراحی و ساخت سازه‌های دفاعی جهت مقابله با بارهای ضربه‌ای و انفجاری مورد استفاده گسترده قرار گرفته است. به عنوان مثال، سازه‌های محافظ نیروگاه‌های هسته‌ای برای مقاومت در برابر بار ضربه‌ای عمدی و تصادفی یا سازه‌های دفاعی تأسیسات نظامی تحت بارگذاری دینامیکی ناشی از برخورد موشک یا انفجار هوایی غیرتماسی طراحی می‌شوند. بر این اساس، درک دقیق رفتار سازه اهداف بتنی که در معرض ضربه پرتابه قرار می‌گیرد، برای اثربخشی حفاظت ارائه شده توسط استحکامات ضروری است.

از آنجایی که انجام آزمایش‌های ضربه دشوار و پرهزینه است، نقش شبیه‌سازی عددی امروزه پراهمیت‌تر شده است. روش شبیه‌سازی عددی نه تنها می‌تواند پدیده‌های مختلف برخورد پرتابه و سازه هدف را بازسازی کند، بلکه راه‌حل‌های عددی را برای کل فرایند برخورد فراهم می‌کند. علاوه بر این، مدل‌های نیمه تحلیلی می‌تواند پشتوانه و شواهدی را برای توسعه مدل‌های تحلیلی و فرمول‌های تجربی ایجاد کنند.

آگارد و لاین از نرم‌افزار المان محدود LS-Dyna برای تعیین عددی عملکرد صفحه‌های بتنی مسلح تحت برخورد قطعات با سرعت بالا استفاده کردند. آن‌ها از مدل ماده شماره ۷۸ نرم‌افزار یعنی مدل خاک/بتن برای مدل‌سازی رفتار بتن استفاده کردند که این مدل از فشار محدود برای شبیه‌سازی واکنش‌های مشابه در بتن و خاک استفاده می‌کند. اگرچه آن‌ها توانستند ثابت کنند که نوع مدل خاک/بتن می‌تواند شکست ناشی از ضربه را شبیه‌سازی کند، اما در این شبیه‌سازی تماس بین بتن و فولاد غیرواقعی بود. علاوه بر این، آن‌ها از یک المان سیلندر جامد برای مدل‌سازی آرماتور فولادی استفاده کردند که این المان توانایی شبیه‌سازی آرماتور در معرض بار ضربه‌ای را ندارد [۱]. زین‌الدین پاسخ صفحه‌های بتنی مسلح تحت بارگذاری ضربه‌ای را به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داد. وی صفحات متفاوتی را تحت بارهای ضربه‌ای ایجاد کرد و نتایج را به صورت مقایسه با نتایج تجربی صحنه‌سنجی کرد. برای این شبیه‌سازی از مدل بتن دراکر-پراگر استفاده شده است. در این مطالعه، نتیجه خوبی از پارامترهای صفحه و همچنین شبیه‌سازی حالت خرابی به دست آمد، اما با توجه به اینکه در شبیه‌سازی از تکنیک تقویت مجزا استفاده شده بود تماس بین آرماتور فولادی و بتن ضعیف بود. علاوه بر این، انتشار و توزیع

ترک‌خوردگی در ناحیه کششی از بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار نگرفته است [۲]. لی و همکارانش یک تابع هندسه تعمیم‌یافته پرتابه را با در نظر گرفتن فاز ورود پرتابه تعریف کردند و یک مدل سوراخ‌شدگی برای برخورد پرتابه صلب به صفحه هدف با ضخامت متوسط ایجاد کردند. در این تحقیق، هدف بتنی به عنوان ماده الاستوپلاستیک تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود و فاز خروجی و اثر سطح آزاد صفحه هدف در مدل آنها در نظر گرفته نمی‌شود [۳]. سهیل و همکارانش رفتار صفحات ساندویچی تحت بار ضربه‌ای را تحلیل کردند. صفحات ساندویچی از یک هسته بتنی سبک تشکیل شده است که در بین دو صفحه فولادی تحت اتصال جی‌هوک قرار گرفته است. در این مقاله، اثربخشی بتن با افزودن الیاف به بتن به منظور درک ضرورت کاهش ماهیت شکننده مواد تحت بارگذاری دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت. آنها تجزیه و تحلیل الاستوپلاستیک را برای به دست آوردن یک عبارت تحلیلی برای یافتن فرورفتگی بار روی پانل‌های ساندویچ انجام داده‌اند. نتایج پیش‌بینی شده با نتایج آزمایش مقایسه شد تا بتوان مدل را برای استفاده برای ارزیابی عملکرد ضربه‌ای صفحه‌های ساندویچی کامپوزیت تأیید کرد [۴]. هونگ و همکارانش یک معیار شکست کششی مبتنی بر آسیب را برای حل منطقی مسائل برخورد پیشنهاد کردند. بر اساس این مدل، هنگامی که متغیر مشخص یک المان مورد استفاده برای بیان شکست فشاری یا شکست کششی به مقدار بحرانی خود می‌رسد، المان بلافاصله حذف می‌شود. در این مطالعه، خواص مکانیکی بتن با وزن معمولی شبیه‌سازی شده توسط مدل اصلاح شده توسط یک سری آزمایش‌های عددی تک المان، از جمله آزمون‌های فشرده‌سازی تک‌محوری، کشش سه‌محوری و آزمون‌های کشش دینامیکی تأیید شد [۵]. گوا و همکارانش یک بررسی تجربی در مورد پاسخ فشاری دینامیکی برای بتن با سه مقاومت مختلف ۶۰ مگاپاسکال (C60)، ۸۰ مگاپاسکال (C80) و ۱۱۰ مگاپاسکال (C110) انجام دادند. نمونه‌های بتنی با استفاده از دستگاه تست جهانی دنیسون و دستگاه میله فشار اسپلیت هاپکینسون تحت فشرده‌سازی شبه‌استاتیکی و دینامیکی قرار گرفتند و اثرات نرخ کرنش بر روی خواص مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده، مقاومت فشاری با نرخ کرنش افزایش می‌یابد و افزایش مقاومت دینامیکی بسیار بالاتر از مقدار استاتیکی است. حساسیت نرخ از طریق ضریب

کرنش و لغزش فولاد و بتن، یک مدل عددی برای مطالعه مقاومت ضربه‌ای دیوارهای برشی بتن مسلح ایجاد کردند. این مدل عددی با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج مشاهده شده در طول آزمایش ضربه سقوط چکش اعتبارسنجی شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مکانیسم شکست دیوارهای برشی بتن مسلح تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و تأثیر سرعت ضربه و اعضای لبه بر مقاومت ضربه‌ای دیوارهای برشی بتن مسلح آشکار شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی دیوار به‌وضوح از لحظه اوج ضربه به نیروی واکنش اوج تغییر می‌کند. تغییر در سرعت ضربه بر توزیع انرژی در فولاد و بتن در هنگام ضربه تأثیر می‌گذارد. پیکربندی اعضای لبه می‌تواند به طور مؤثر مقاومت ضربه‌ای دیوار را به دلیل بهبود سختی جهانی افزایش دهد. جابه‌جایی وسط دهانه دیوار و مدت‌زمان نیروی ضربه کاهش می‌یابد و ظرفیت اتلاف انرژی بتن بهبود می‌یابد. [۹].

هدف مطالعه حاضر توسعه مدل جانسون هولمکوئیست (JH-2) برای شبیه‌سازی سازه‌های بتنی تحت بارگذاری ضربه‌ای است.

به دلیل اینکه در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا که جهت شبیه‌سازی ضربه توسعه یافته است کمبودهایی در خصوص نوع المان و شکل‌های پیچیده وجود دارد از نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید. در نرم‌افزار آباکوس مدل ماده مناسبی برای بتن مسلح در هنگام برخورد پرتابه وجود نداشت لذا مدل ماده مناسب با کد فرتن در سابروتین VUMAT آماده گردید و برخورد پرتابه با بتن مسلح شبیه‌سازی شد. به این منظور مدل آسیب جهت مدل‌سازی المان محدود ارائه و پیش‌بینی‌های مدل حاضر با داده‌های تجربی موجود برای نفوذ و سوراخ‌شدن اهداف بتنی در معرض ضربه پرتابه‌های اوجیوال مقایسه گردید. نتایج از دقت و سرعت بالای حل نسبت به نرم‌افزار ال‌اس‌داینا حکایت دارد.

رفتار ضربه‌ای بتن

در بارگذاری ضربه‌ای، یک پرتابه با سرعت مشخص با سازه هدف برخورد می‌کند که منجر به بروز پدیده‌های گوناگونی می‌شود. ایجاد هر یک از این پدیده‌ها به مشخصات سازه هدف و پرتابه مرتبط است. خصوصیات پرتابه مانند کالیبر یا قطر (d)، وزن (w)، شرایط برخورد پرتابه شامل سرعت برخورد (v_0)، شکل، مقاومت و نهایتاً ویژگی‌های مواد به‌کار

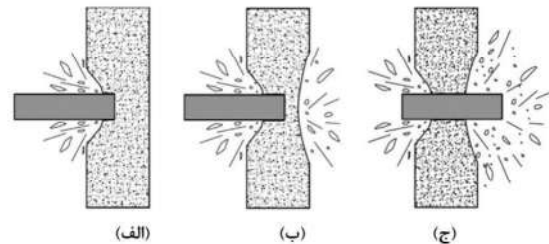
افزایش دینامیکی اندازه‌گیری شد و با پیش‌بینی‌های معادله مدل CEB-FIP 2010، که معمولاً برای تخمین حساسیت نرخ برای بتن با مقاومت معمولی استفاده می‌شود، مقایسه شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که این مدل برای بتن با مقاومت بالا مناسب نیست، زیرا افزایش شدیدتر حساسیت به سرعت را پیش‌بینی می‌کند. همچنین، تحلیل وابستگی به سرعت مواد بتن بر اساس نتایج آزمایش SHPB در مورد اینکه آیا این یک ویژگی ماده ذاتی است یا عمدتاً توسط اینرسی شعاعی ایجاد می‌شود، با مدل‌سازی المان محدود آزمایش‌های SHPB مورد بررسی قرار گرفت. خواص مواد بتن مطابق با مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن در نظر گرفته شد و پاسخ تنش-کرنش شبه‌استاتیک، همراه با ضریب افزایش دینامیکی تعیین شده از آزمایش‌های دینامیکی، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای محدوده نرخ کرنش، اینرسی شعاعی بررسی شده قابل توجه نیست و وابستگی نرخ مشاهده شده به پاسخ مواد مربوط می‌باشد [۶]. قلی‌پور و همکارانش، تأثیرات نرخ بارگذاری ضربه‌ای بر ظرفیت‌های باقیمانده و رفتارهای آسیب تیرهای بتن مسلح دوسر مفصل را در معرض ترکیبی از ضربات با نرخ متفاوت تجزیه و تحلیل کردند. این مطالعه برای درک رفتار با تغییر توالی بارگذاری و فاصله زمانی انجام شد. آنالیز تیر با محاسبه رفتار خمشی و برشی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که شاخص‌های آسیب مبتنی بر حالت برشی و خمشی نسبت به افزایش سرعت ضربه برای حالت‌های بارگذاری ترکیبی حساس تر هستند [۷]. چاهمی اوسیف^۸ و همکارانش شبیه‌سازی عددی از نفوذ بالستیک و رفتار صفحات بتن مسلح و ساده را تحت برخورد سرعت بالا با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس ارائه و توانایی مدل پلاستیسیته آسیب بتن (CDP) و مدل جانسون هولمکوئیست (JH-2) برای توصیف رفتار صفحات بتنی تحت بارهای ضربه‌ای را مقایسه کردند. در قسمت دوم این مطالعه، نتایج مقایسه به‌صورت کانتورهای آسیب، انرژی جنبشی پرتابه و انرژی داخلی بتن ارائه شده است. در ادامه، مقایسه فشار تماس و زمان لازم برای نفوذ به جسم با استفاده از هر دو مدل با یکدیگر مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل پلاستیسیته آسیب بتن (CDP) تنها برای شبیه‌سازی برخورد با سرعت پایین مناسب است [۸]. جیان هونگ و همکارانش در سال ۲۰۲۳، با در نظر گرفتن اثرات افزایش نرخ

رفته در سازه بتن هدف از نسبت تراکم، مقاومت فشاری، سختی، نرمی و خلل و فرج بتن بر روی رفتار مصالح تحت بارگذاری ضربه‌ای موثر است [۱۰-۱۱].

در یک عضو بتنی تحت برخورد پرتابه احتمال ایجاد پدیده‌های گوناگونی وجود دارد که وقوع این پدیده‌ها به خواص بتن، خصوصیات هندسی و فیزیکی و شکل پرتابه، ضخامت و هندسه عضو بتنی، سرعت و زاویه برخورد و... بستگی دارد. این پدیده‌ها شامل نفوذ قلوله‌کن شدن، سوراخ شدن می‌باشند. شکل ۱ یک نمونه بتنی تحت برخورد پرتابه را نشان می‌دهد.

مدل جانسون هولمکوئیست (jh-2)

مدل جانسون هولمکوئیست (jh-2) یک مدل ساختاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار مواد ترد تحت بارگذاری شدید است. از ویژگی‌های اصلی این مدل می‌توان به استحکام وابسته به فشار، آسیب و شکست، استحکام قابل توجه پس از شکست، حجیم‌شدگی و اثرات نرخ کرنش اشاره کرد. یک نمای کلی از مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس فرمول‌بندی این مدل، با شروع انباشتگی آسیب ($D > 0$) ماده شروع به نرم‌شدگی می‌کند. در نتیجه، امکان نرم‌شوندگی تدریجی ماده با افزایش کرنش پلاستیک فراهم می‌شود. استحکام و فشار به‌وسیله مولفه‌های HEL و فشار و استحکام نرمال می‌شوند، که به بسیاری از پارامترهای ماده اجازه می‌دهد بی‌بعد باشند. در این مدل، استحکام و آسیب توابع تحلیلی از فشار و سایر متغیرها هستند که امکان تغییر پارامتری ثابت‌ها را به‌صورت سیستماتیک فراهم می‌کنند. استحکام به‌طور کلی یک تابع هموار و متغیر از استحکام دست‌نخورده، استحکام شکست، نرخ کرنش و آسیب است [۱۲].

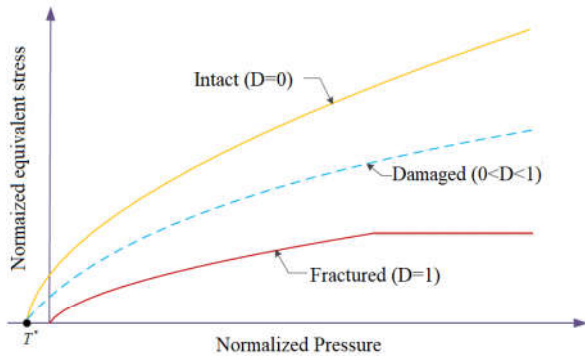


شکل ۱- عضو بتنی تحت برخورد پرتابه [۱۰].

(الف) نفوذ (ب) قلوله‌کن شدن (ج) سوراخ شدن

تنش معادل نرمال شده در شکل ۲ در رابطه (۱) تعریف شده است. [۱۱]

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (1)$$



شکل ۲- نمای کلی مدل جانسون هولمکوئیست (jh-2)

که در آن، σ_i^* تنش معادل دست‌نخورده نرمال شده، σ_f^* تنش معادل شکست نرمال شده و D آسیب می‌باشد. ($0 \leq D \leq 1$)
 تنش‌های معادل نرمال شده (σ_i^* ، σ_f^* ، σ^*) به فرم کلی در رابطه (۲) بیان شده است [۱۱].

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sigma_{HEL}} \quad (2)$$

که در آن، σ تنش معادل واقعی و σ_{HEL} تنش در HEL که مربوط به موج ضربه‌ای است یک‌بعدی است که از ناحیه الاستیک عبور می‌کند و به صورت زیر بیان می‌شود: [۱۱]

$$\sigma_{HEL} = \frac{3}{2}(HEL - P_{HEL}) \quad (3)$$

که در آن، P_{HEL} فشار در HEL می‌باشد.

بر اساس مدل JH-2، فرض بر این است که معادله تنش به‌صورت تابعی از فشار و نرخ کرنش در حالت‌های ماده بدون آسیب و کاملاً آسیب‌دیده می‌تواند به ترتیب به شرح زیر بیان شود: [۱۱]

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)) \quad (4)$$

و

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)) \leq \sigma_{fmax}^* \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵) A ، B ، C ، M ، N و σ_{fmax}^* ثوابت ماده می‌باشند. فشار نرمال شده به‌صورت زیر تعریف می‌شود: [۱۱]

با شروع انباشتگی آسیب ($D > 0$)، حجم‌شدگی اتفاق می‌افتد. در این حالت یک گام افزایشی فشار ΔP اضافه می‌شود و معادله فشار به شکل زیر بیان می‌شود: [۱۱]

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad (12)$$

گام فشار بر اساس ملاحظات انرژی تعیین می‌شود که از $\Delta P = 0$ در $D = 0$ به $\Delta P = 1$ در $D = 1$ تغییر می‌کند.

اثر نرخ کرنش

خواص دینامیکی مواد به طور قابل توجهی تحت تأثیر نرخ بارگذاری قرار دارد. در حالت انفجار و ضربه با سرعت بالا، افزایش مقاومت می‌تواند بیش از ۵۰٪ برای فولاد تقویت‌کننده، بیش از ۱۰۰٪ برای بتن معمولی در فشار، و بیش از ۶۰٪ برای بتن معمولی در کشش به دست آید [۱۳].

در این مطالعه، افزایش مقاومت دینامیکی (DIF) بهبود یافته برای بتن مسلح در حالت فشاری بر اساس مدل لی وانگ و همکارانش [۱۴] توسعه یافته است.

همان‌طور که در معادلات (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، مدل جانسون هولمکوئیست (2-jh) از یک رابطه لگاریتمی برای توصیف اثر نرخ کرنش در معادلات استحکام دست‌نخورده و استحکام شکست استفاده می‌کند. بر اساس مطالعات قبلی، اثر نرخ کرنش در حالت کشش بسیار بیشتر از حالت فشار است.

در مدل جدید، اثرات شکل تقویت‌کننده، نسبت حجمی تقویت‌کننده و استحکام بتن در یک فرمول در نظر گرفته شده است که در رابطه (۱۳) بیان شده است. به طور معمول، یک ناحیه گذار در فرایند افزایش مقاومت دینامیکی ماده وجود دارد که به‌عنوان نرخ کرنش انتقالی بیان می‌شود. در ناحیه قبل از نرخ کرنش انتقالی، هیچ افزایش مقاومت دینامیکی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. هنگامی که نرخ اعمال شده از نرخ کرنش انتقالی بیشتر شود، مقاومت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مدل پیشنهادی، دو پارامتر K و i برای حالتی که نرخ کرنش از نرخ انتقال بیشتر شود اعمال شده‌اند تا اثرات شکل تقویت‌کننده و نسبت حجمی آن را در نظر بگیرند [۱۴].

$$P^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad (6)$$

که در آن P فشار واقعی می‌باشد. تنش هیدرواستاتیک کششی حداکثر به صورت زیر تعریف می‌شود: [۱۱]

$$T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (7)$$

که در آن، T حداکثر فشار هیدرواستاتیک کششی است که ماده می‌تواند تحمل کند. همچنین، نرخ کرنش بی‌بعد $\dot{\epsilon}^*$ به صورت زیر تعریف می‌شود: [۱۱]

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (8)$$

که در آن، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش واقعی و $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع است.

آسیب برای شکست به روشی مشابه روش به‌کاررفته در مدل شکست جانسون-کوک، انباشته می‌شود. بر اساس این روش، آسیب همراه با کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد که به صورت زیر بیان می‌شود: [۱۱]

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f^p} \quad (9)$$

و

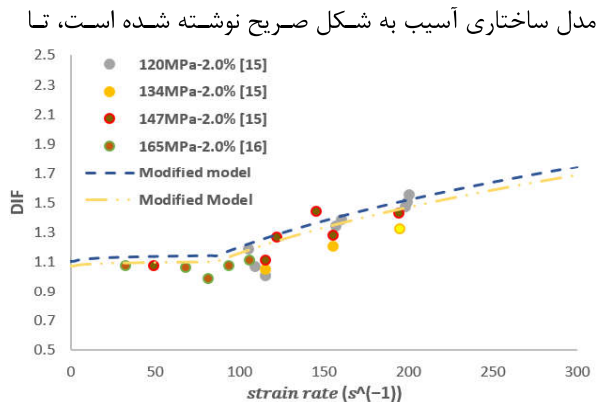
$$\epsilon_f^p = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، $\Delta \epsilon_p$ گام کرنش پلاستیک معادل، ϵ_f^p نرخ کرنش پلاستیک معادل در شکست تحت فشار ثابت و D_1 و D_2 ثوابت ماده می‌باشند.

در این مدل، تنش‌های هیدرواستاتیک در ترم‌های فشار-حجم در یک معادله حالت تعریف می‌شوند که به صورت زیر بیان می‌شود: [۱۱]

$$\begin{cases} P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \\ \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \end{cases} \quad (11)$$

که در آن، K_1 مدول بالک و K_2 و K_3 ثوابت ماده می‌باشند. همچنین، ρ و ρ_0 به ترتیب چگالی فعلی و چگالی مرجع می‌باشند.



شکل ۳- مقایسه DIF به دست آمده از آزمایشات انجام در مطالعات پیشین و مدل جدید

تانسور تنش از تانسور کرنش داده شده برای هر نقطه انتگرال-گیری در گام زمانی به دست آید. نمودار چرخه‌ای شکل ۴ نشان‌دهنده مراحل اصلی است که در زیر برنامه VUMAT انجام می‌شود.

تماس سطح به سطح، تماس با خود و تماس عمومی در سه نوع حالت تماس اصلی موجود در مازول نرم افزار است. برای اعمال دقیق تعامل بین پرتابه و هدف در هنگام برخورد، از مدل برخورد سطح به سطح استفاده می‌شود، به طوری که سطح و گره‌های داخلی هدف در منطقه بالقوه تماس با پرتابه در نظر گرفته می‌شوند.

در مسائلی که هندسه و شرایط بارگذاری مسئله نسبت به دو محور متقارن باشد، در نرم افزار آباکوس می‌توان مسئله را به صورت متقارن محوری مدل سازی نمود که این حالت موجب کاهش هزینه محاسباتی می‌گردد. همچنین همگرایی شبکه المان بندی مش مدل اجزاء محدود برای تعیین مش بندی مناسب بررسی می‌شود.

حذف المان لیک روش تقریبی برای شبیه سازی ساده شکست المان است که از تغییر شکل شدید و غیرمنطقی المان-ها جلوگیری می‌کند. از دست دادن جرم، تکانه و انرژی در اثر حذف المان می‌تواند یکی از دلایل ایجاد خطا در برخی مقادیر پیش بینی شده عددی عمق نفوذ، سرعت‌های باقیمانده و... باشد. باین حال، اعمال الگوریتم حذف المان به وسیله تعیین یک مقدار برای کرنش پلاستیک معادل، یک امر متداول است. ارزیابی تأثیر اندازه المان و کرنش معادل پلاستیک بر پاسخ ضربه پرتابه به اهداف بتنی انجام می‌شود.

$$DIF = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{1.02\delta}, & \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_s s^{-1} \\ 0.6608\beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_t}\right)^{\frac{1+0.05i}{3}}, & \dot{\epsilon} \geq \dot{\epsilon}_t s^{-1} \end{cases} \quad (13)$$

$$\log \beta = 6.156k\delta - 2.33, \quad \delta = \frac{1}{5+9\frac{f_c}{f_{c,0}}}$$

که در آن، $\dot{\epsilon}_s = 3 * 10^5 s^{-1}$ و $f_{c,0} = 10 Mpa$ است. همچنین، $\dot{\epsilon}_t$ نرخ کرنش انتقالی و f_c مقاومت فشاری استاتیک است.

مقادیر DIF به دست آمده از آزمایشات انجام شده در مطالعات پیشین برای بتن مسلح دارای تقویت کننده فولادی صاف با نسبت حجمی ۲ درصد در شکل ۳ آورده شده است. استحکام بتن در این آزمایش‌ها از ۱۲۰ مگاپاسکال تا ۱۶۵ مگاپاسکال متغیر است. اگرچه به سختی می‌توان یک روند مشهود را مستقیماً از شکل مشاهده کرد، اما مقادیر DIF گزارش شده نشان می‌دهد که حساسیت نرخ با مقاومت بتن افزایش می‌یابد.

تعیین پارامتر

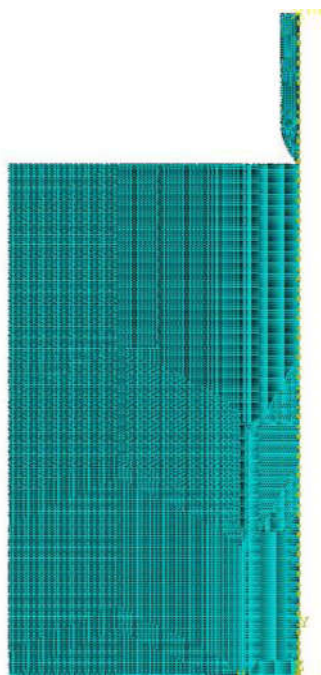
پارامترهای مدل آسیب با استفاده از داده‌های تجربی موجود در مطالعات پیشین استخراج می‌شود. برای تعیین ثوابت استحکام ماده از داده‌های تست تراکم سه محوره توسط هانچاک و همکارانش [۱۷] و روهر و همکارانش [۱۸] برای تعیین ثوابت استحکام مدل A, B, M و N به کار برده شد. برای محاسبه آسیب مدل پارامترهای توصیه شده توسط پولانکو لوریا انتخاب شده است [۱۹]. برای محدوده کرنش پلاستیک شکست به ترتیب ۰/۰۱ و ۱ فرض شده است. ثوابت فشار نیز با روش تطابق منحنی از نتایج تجربی فشار-حجم بتن ۴۸ مگاپاسکال هانچاک و همکارانش تعیین می‌شود.

مدل سازی عددی

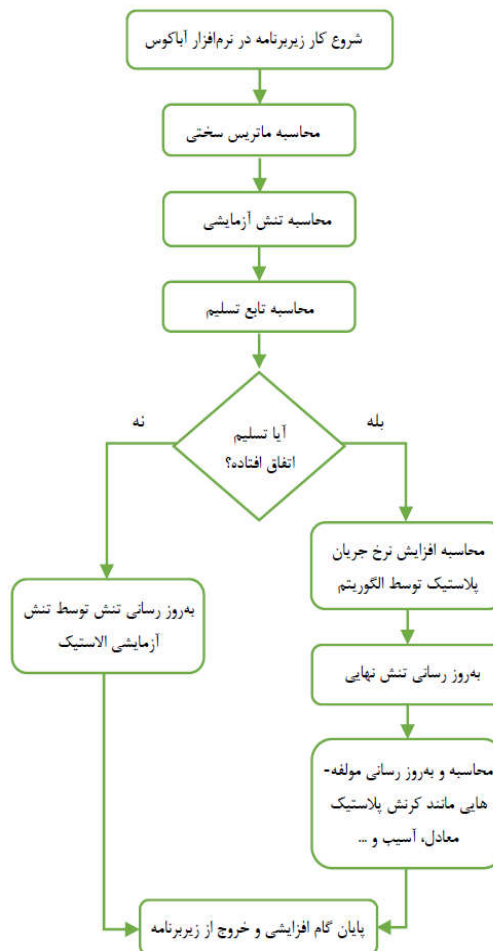
در این مطالعه، برای مدل سازی برخورد پرتابه به سازه‌های هدف بتنی از نرم افزار المان محدود تجاری ABAQUS/CAE استفاده شده است. برای پیاده سازی مدل ساختاری در این نرم افزار می‌توان از زیر برنامه VUMAT استفاده کرد. الگوریتم

است. به دلیل تقارن محوری مسئله نسبت به محور عمودی تنها یک‌دوم پرتابه و هدف بتنی مدل‌سازی می‌شود. پس از بررسی تأثیر اندازه المان بر پاسخ شبیه‌سازی، شبکه المان‌بندی یکنواخت ۴ میلی‌متر در نزدیکی ناحیه برخورد پرتابه بر روی هدف در نظر گرفته شده است و در بقیه قسمت‌های هدف بتنی، سایز المان به‌صورت افزایشی تا ۶ میلی‌متر در نزدیکی مرز می‌رسد. شکل ۵ مدل المان محدود هدف بتنی و پرتابه را نشان می‌دهد. همچنین فرض می‌شود هیچ انتقال حرارتی بین پرتابه و هدف بتنی در مسائل عبوری با سرعت بالا رخ نمی‌دهد. شرایط مرزی مناسب برای صفحه هدف که در لبه بیرونی بسته شده است اعمال می‌شود. علاوه بر این، مشخصات مکانیکی ماده مورد استفاده (بتن ۳۹ مگاپاسکال) در جدول ۱ ذکر گردیده است.

در ابتدا پیش‌بینی عددی عمق نفوذ برای سرعت اولیه پرتابه بین ۱۴۰ متر بر ثانیه تا ۴۶۰ متر بر ثانیه انجام گرفته است.



شکل ۵- هندسه و المان‌بندی پرتابه و هدف استوانه‌ای

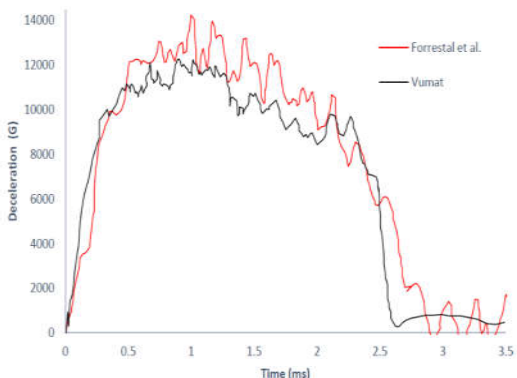


شکل ۴- روند نما زیربرنامه VUMAT

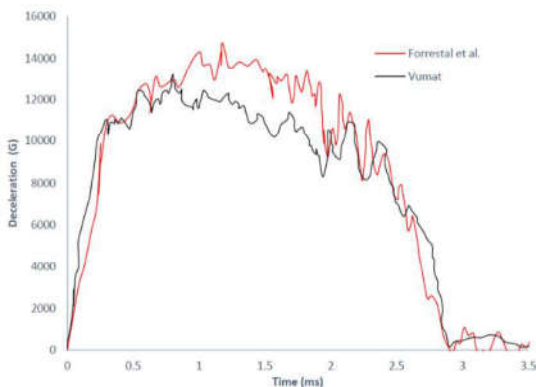
آزمون نفوذ پرتابه با سرعت بالا

تست آزمایشگاهی نفوذ پرتابه با سرعت بالا برای بتن ۳۹ مگاپاسکال غیرمسلح را می‌توان در کار فورستال و همکارانش در سال ۲۰۰۳ مشاهده نمود. برای انجام این آزمایش‌ها از اهداف بتنی استوانه‌ای با قطر ۱،۸۳ متر و ضخامت ۱،۸۳ متر تحت برخورد پرتابه فولادی با طول ۵۳،۷ میلی‌متر استفاده شده است. برای شبیه‌سازی عددی مدل مورد نظر با استفاده از روش المان محدود، از المان‌های مکعبی هشت‌گره‌ای C3D8 با نقاط انتگرال‌گیری گوسی برای پرتابه و هدف بتنی استفاده شده است. همچنین با توجه به هندسه مدل و برخورد پرتابه به هدف با زاویه ۹۰ شرایط تقارن برای مدل‌سازی لحاظ شده

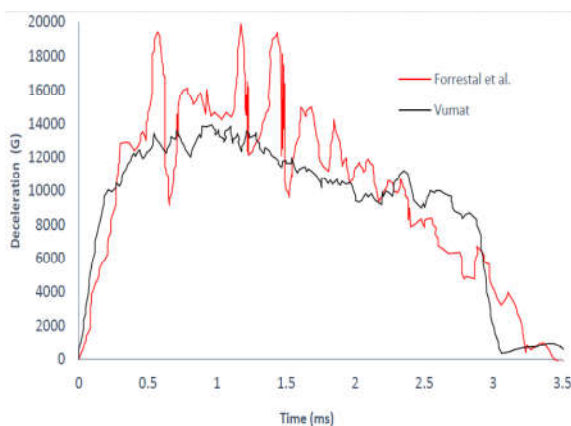
کمتری رشد می کند تا به نقطه اوج برسد. پس از آن، با کاهش نفوذ به آرامی کاهش می یابد و در نهایت با توقف پرتابه به سرعت به صفر می رسد.



شکل ۷- نمودار کاهش شتاب-زمان پرتابه تحت سرعت برخورد ۲۳۸ متر بر ثانیه



شکل ۸- نمودار کاهش شتاب-زمان پرتابه تحت سرعت برخورد ۲۷۶ متر بر ثانیه



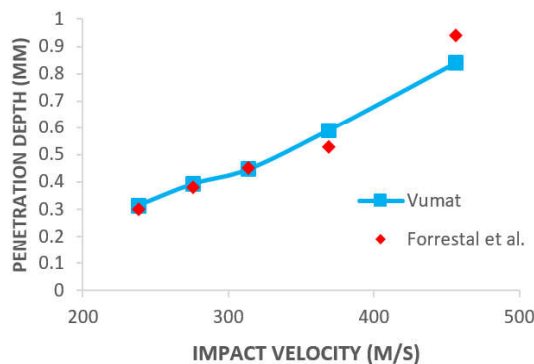
شکل ۹- نمودار کاهش شتاب-زمان پرتابه تحت سرعت برخورد ۳۱۴ متر بر ثانیه

جدول ۱- خواص مکانیکی بتن ۳۹ مگاپاسکال

$G(GPa)$	β	$\rho(kg/m^3)$	A	B
۱۱,۵	۱	۲۱۹۰	۰,۷۹	۱,۸۲
m	n	$T(MPa)$	$Si_{max}(MPa)$	$Sf_{max}(MPa)$
۰,۶۱	۰	۳,۴	۶۲۴	۵۰۷
$\epsilon_{f,min}^{pl}$	$\epsilon_{f,max}^{pl}$	D_1	D_2	C
۰,۰۰۵	۱,۲	۰,۰۲	۱	۰,۰۰۷
$K_1(GPa)$	$K_2(GPa)$	$K_3(GPa)$	$HEL(MPa)$	$P_{HEL}(MPa)$
۸۵	-۱۹۵	۲۰۸	۸۰	۴۸

مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی گزارش شده در فورستال و همکارانش را می توان در شکل ۶ مشاهده نمود. همان طور که در این شکل نمایان است، نتایج عددی با داده های تجربی برای سرعت های برخورد کمتر از ۳۵۰ متر بر به خوبی مطابقت دارد. همچنین از شکل ۶ واضح است که با افزایش بیشتر سرعت، تفاوت روش عددی با داده های تجربی بیشتر می شود و در بدترین حالت در حدود ۱۲ درصد اختلاف وجود دارد که همانطور که قبلاً توضیح داده شد با حذف المان و ازدست دادن جرم، تکانه و انرژی، اختلاف در مقادیر پیش بینی شده عددی در عمق نفوذ رخ می دهد.

مقایسه نمودارهای کاهش شتاب-زمان پرتابه تحت سرعت برخورد ۲۳۸، ۲۷۹ و ۳۱۴ متر بر ثانیه را با نتایج تجربی فورستال و همکارانش به ترتیب در شکل های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است. در این نمودارها ناحیه صعودی تقریباً خطی، مربوط به نفوذ دماغه اوجیوال پرتابه به هدف بتنی است. در ادامه نمودار به دلیل تشکیل دهانه برخوردی با شیب



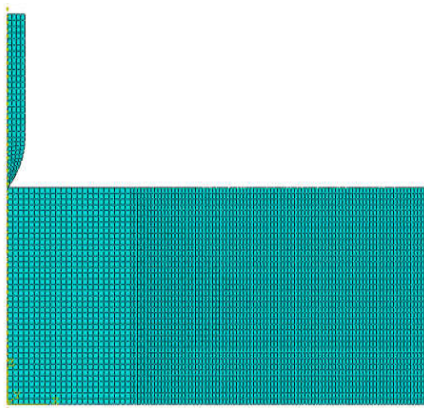
شکل ۶- مقایسه نمودار پارامتر عمق نفوذ با نتایج تجربی فورستال و همکارانش

آزمایشی برای پدیده سوراخ‌شدگی بتن مسلح ۴۸ مگاپاسکال در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، سرعت‌های باقیمانده به دست آمده به صورت عددی از توافق خوبی با نتایج تجربی برخوردار است. با توجه به شکل و افزایش سرعت، اختلاف نتایج زیادتر شده و بیشترین اختلاف در حدود ۳ درصد است. یکی از مهمترین پارامترهای کنترل حذف المان، کرنش نهایی شکست بتن می‌باشد که به صورت تجربی و در نرخ کرنش‌های معین تعیین شده است. با تغییر سرعت، نرخ کرنش با نرخ کرنش تست‌های تجربی متفاوت شده و کرنش نهایی شکست بتن که تعیین کننده حذف المان می‌باشد با مقدار واقعی تفاوت داشته و این اختلاف از این موضوع ناشی می‌شود.

جدول ۲- خواص مکانیکی بتن ۴۸ مگاپاسکال

$G(GPa)$	β	$\rho(kg/m^3)$	A	B
۱۲,۵	۱	۲۴۴۰	۰,۷۹	۱,۸۲
m	n	$T(MPa)$	$Si_{max}(MPa)$	$Sf_{max}(MPa)$
۰,۶۱	۰	۴	۶۲۴	۵۰۷
$\epsilon_{f,min}^{pl}$	$\epsilon_{f,max}^{pl}$	D_1	D_2	C
۰,۰۱	۱	۰,۰۴	۱	۰,۰۰۷
$K_1(GPa)$	$K_2(GPa)$	$K_3(GPa)$	$HEL(MPa)$	$P_{HEL}(MPa)$
۸۵	-۱۷۱	۲۰۸	۸۰	۴۸



شکل ۱۰- هندسه و المان‌بندی پرتابه و هدف بتن مسلح.

آزمون سوراخ‌شدگی صفحه بتن مسلح

تست آزمایشگاهی پدیده سوراخ‌شدگی صفحه بتنی برای بتن مسلح ۴۸ مگاپاسکال توسط هانچاک و همکارانش در سال ۱۹۹۲ انجام شده است. مقادیر مقاومت فشاری و کششی بتن به ترتیب ۴۸ مگاپاسکال و ۴ مگاپاسکال می‌باشد. در این مسئله نیز باتوجه به برقراری شرایط تقارن محوری، یک‌دوم مدل به طور صریح مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

سازه هدف بتن مسلح دارای ابعاد طول و عرض ۶۱۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۷۸ میلی‌متر است و از سه لایه میل‌گرد فولادی تقویت‌کننده با قطر ۵,۶ میلی‌متر با الگوی مربعی در آن‌ها استفاده شد. پرتابه‌های فولادی دارای دماغه‌ای با کالیبر شعاع سر ۳، طول ۱۴۴ میلی‌متر، قطر ۲۵,۴ میلی‌متر و جرم ۰,۵ کیلوگرم هستند. در آزمایش‌ها، سرعت باقیمانده اندازه‌گیری شده بر اساس سرعت اولیه مختلف پرتابه ثبت شده است. از این مقادیر برای ساخت منحنی‌های سرعت اولیه در برابر سرعت باقیمانده بتن استفاده شد و همچنین حدود بالستیک برخورد استنباط شد.

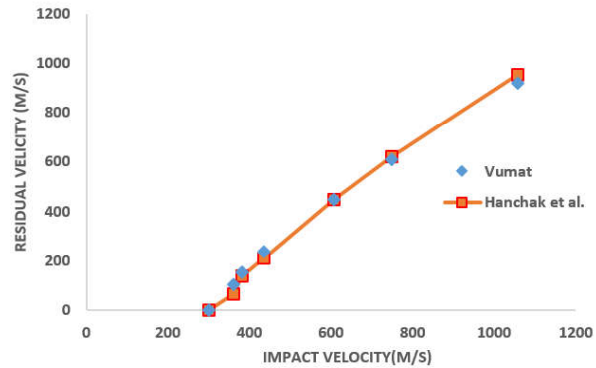
برای شبکه المان‌بندی هدف بتنی حداقل اندازه المان ۲/۵ میلی‌متر در نزدیکی محل برخورد در نظر گرفته می‌شود که برای نواحی دورتر این اندازه بزرگ‌تر شده و برای ناحیه نزدیک مرز سطح برخورد به ۴ میلی‌متر می‌رسد. مدل المان محدود این شبیه‌سازی برای صفحه بتنی مسلح که تحت برخورد پرتابه دماغه اوجیوال با زاویه ۹۰ درجه قرار می‌گیرد در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

باتوجه به اینکه عرض هدف بیش از بیست برابر بزرگ‌تر از قطر پرتابه است، تأثیر مرز بر روی شبیه‌سازی نادیده گرفته می‌شود. میل‌گردهای تقویت‌کننده فولادی با استفاده از مدل مواد فون میزز با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک خطی با مدول الاستیک ۲۱۰ گیگاپاسکال و تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال مدل‌سازی شده‌اند. برای مصالح بتن، ثابت‌های سطح تسلیم بر اساس نتایج حاصل از تست فشاری ایزوتروپیک ارائه شده به دست آمده‌اند. ثابت‌های آسیب فشاری D_1 ، D_2 همانند بخش قبل تعیین می‌شود. جدول ۲ تمام پارامترهای مدل h_2 را برای ماده بتن در این شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

در این آزمون، پرتابه به صورت عمودی برخورد کرده است. مقایسه سرعت‌های باقیمانده پیش‌بینی شده عددی و داده‌های

همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، هنگامی که زاویه برخورد ۳۰ درجه نسبت به عمود است، نفوذ کامل در سازه هدف بتنی بعد از برخورد اتفاق می‌افتد. در مقایسه با برخورد عمودی پرتابه، سازه هدف تغییر شکل بزرگ‌تری را تولید می‌کند و فرایند شکست بر روی سطح آزاد هدف شدیدتر است. باتوجه به شکل ۱۴، زمانی که زاویه برخورد ۴۵ درجه است پرتابه به صورت کامل در سازه هدف بتنی نفوذ نمی‌کند و فرایند شکست بر روی سطح آزاد بدون سوراخ‌شدگی مشاهده می‌شود.

شکل ۱۵ نمودارهای تغییر انرژی جنبشی پرتابه با زمان را برای زاویه‌های برخورد مختلف نشان می‌دهد. مقایسه نمودارها بیان می‌کند که افت انرژی جنبشی پرتابه با سرعت برخورد ۳۰۰ متر بر ثانیه برابر ۱۱,۳ کیلوژول، ۱۳,۱ کیلوژول و ۱۴,۳ کیلوژول به ترتیب برای زاویه برخورد ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به عمود است. با افزایش زاویه برخورد، مسیرهای نفوذ پرتابه طولانی‌تر می‌شود و در نتیجه پرتابه انرژی جنبشی بیشتری را تحت نفوذ از دست می‌دهد. در مرحله ابتدایی برخورد، منحنی کاهش شتاب برخورد با زوایای ۰، ۳۰ و ۴۵ یکسان هستند. با ادامه نفوذ پرتابه، در حالت زاویه برخورد ۴۵ درجه پرتابه مسیر نفوذ طولانی‌تری را طی می‌کند، به طوری که کاهش شیب منحنی برای زاویه برخورد ۴۵ درجه بیشتر از زاویه برخورد ۳۰ درجه است و هنگامی که زاویه ضربه ۴۵ درجه است پرتابه صفحه بتنی را سوراخ نمی‌کند. از نتایج شبیه‌سازی، می‌توان



شکل ۱۱ - مقایسه نمودار پارامتر سرعت باقیمانده با نتایج تجربی هانچاک و همکارانش

شکل ۱۲ نمای مقطعی الگوی شکست پیش‌بینی شده عددی صفحه‌های بتنی مسلح در اثر برخورد پرتابه با سرعت‌های ۷۴۹ متر بر ثانیه برخورد را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۱۲ مشخص است پدیده‌های خردشدگی و قلوه‌کن شدن به وضوح قابل مشاهده است.

باتوجه به نتایج موجود در مراجع و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر می‌توان دریافت که مدل ارائه شده علاوه بر پیش‌بینی پارامترهای عددی، توانایی شبیه‌سازی بتن تحت برخورد پرتابه سرعت بالا را دارد و آن را با کیفیت خوبی مدل‌سازی می‌کند. یکی دیگر از دستاوردهای این پژوهش را می‌توان سرعت بالای تحلیل و کاهش قابل ملاحظه هزینه محاسباتی عنوان نمود.

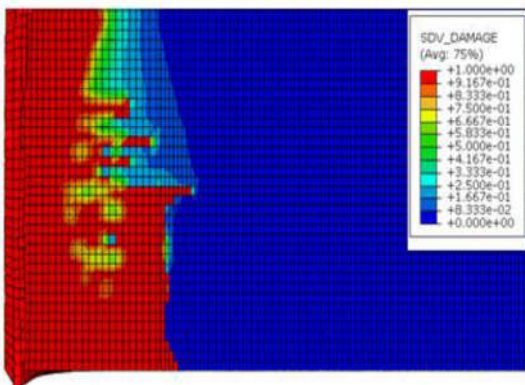
اثر زاویه برخورد

در این بخش طی یک فرایند واقعی برخورد، صفحات بتن مسلح ۴۸ مگاپاسکال با مشخصات ارائه شده در بخش قبل تحت برخورد پرتابه تحت زاویه‌های برخورد مختلف با سرعت اولیه ۳۵۰ متر بر ثانیه قرار می‌گیرند. این شبیه‌سازی می‌بایست به صورت سه‌بعدی انجام شود و فرضیات دوبعدی کاربردی ندارد. زمان محاسباتی حل این مسئله با نرم‌افزار ال‌اس‌داینما و کامپیوتری با مشخصات:

(CPU: Intel(R) Core i7-9700k @ 4.9GHz
& RAM:64GB)

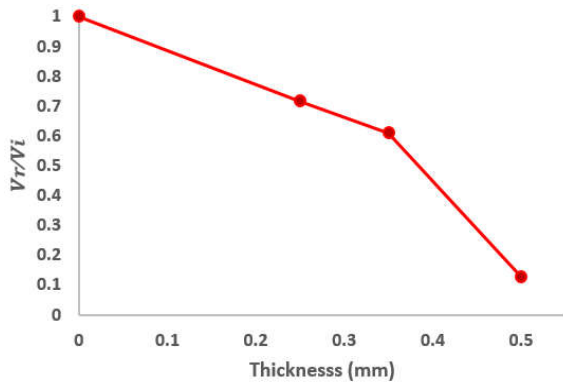
در حدود ۳ روز بود در حالی که با کد نوشته شده در نرم‌افزار آباکوس در کمتر از ۱۲ ساعت شبیه‌سازی انجام گردید.

فرایند شکست صفحات تحت زاویه‌های برخورد مختلف در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نشان داده شده است.

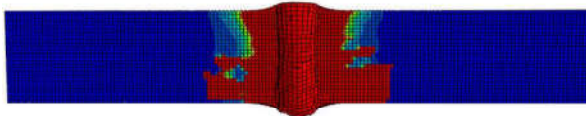


شکل ۱۲ - نمای مقطعی الگوی شکست پیش‌بینی شده عددی

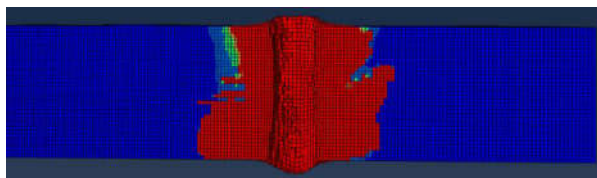
سرعت ۳۰۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. از شکل ۱۶ مشخص است که سرعت باقیمانده بدون بعد با افزایش ضخامت سازه هدف کاهش می‌یابد. هنگامی که ضخامت سازه هدف به مقدار معینی می‌رسد، سرعت باقیمانده پرتابه برابر با صفر است. ضخامت سازه هدف به عنوان ضخامت بحرانی سوراخ‌شدگی تعریف می‌شود. در نمونه مورد بررسی (سرعت برخورد ۳۰۰ متر بر ثانیه) ضخامت بحرانی سوراخ‌شدگی بر اساس شبیه‌سازی عددی در حدود ۰٫۶۵ متر تعیین شده است. در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ شکست پس از برخورد در اهداف بتنی با ضخامت‌های مختلف به ترتیب ۰٫۲۵ متر، ۰٫۳۵ متر و ۰٫۵ متر نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌ها مشخص است، اندازه دهانه و ناحیه قله‌کن شدن با افزایش ضخامت سازه هدف افزایش می‌یابد.



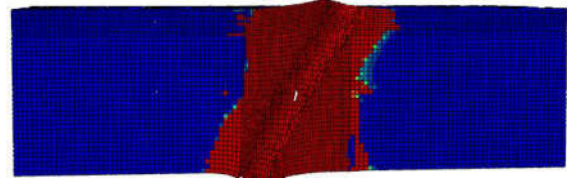
شکل ۱۶ - رابطه بین نسبت سرعت باقیمانده به سرعت برخورد مختلف



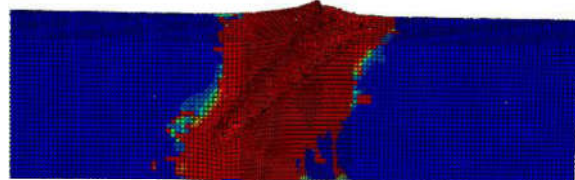
شکل ۱۷ - الگو شکست در اهداف بتنی با ضخامت ۰٫۲۵ متر



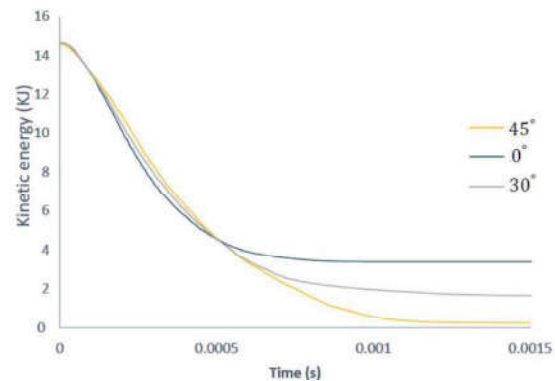
شکل ۱۸ - الگو شکست در اهداف بتنی با ضخامت ۰٫۳۵ متر



شکل ۱۳ - نمای نفوذ کامل در سازه هدف بتنی بعد از برخورد تحت زاویه 30 درجه



شکل ۱۴ - نمای نفوذ کامل در سازه هدف بتنی بعد از برخورد تحت زاویه 45 درجه



شکل ۱۵ - مقایسه نمودار پارامتر انرژی جنبشی تحت زوایای برخورد مختلف

دریافت که عملکرد حفاظتی سازه تحت ضربه مایل قوی‌تر از عملکرد محافظتی در اثر ضربه عمودی است. با افزایش زوایای برخورد پرتابه نسبت به عمود، عملکرد حفاظتی سازه به تدریج افزایش می‌یابد.

اثر ضخامت

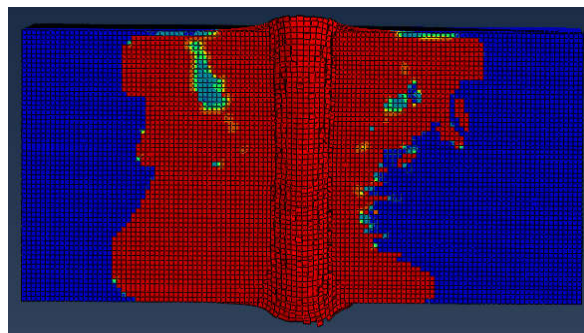
در این بخش هدف از شبیه‌سازی‌ها تعیین تأثیر ضخامت بر عملکرد حفاظتی صفحات بتن مسلح ۴۸ مگاپاسکال با مشخصات ارائه شده در بخش قبل در اثر برخورد پرتابه است. به منظور بررسی تأثیر ضخامت سازه هدف، اهدافی با ضخامت‌های ۰٫۲۵ متر، ۰٫۳۵ متر و ۰٫۵ متر در شبیه‌سازی اجزای محدود پیاده‌سازی شدند.

شکل ۱۶ رابطه بین نسبت سرعت باقیمانده به سرعت برخورد با ضخامت سازه هدف حاصل از شبیه‌سازی را در

- ۳- Discrete Reinforcement
- ۴- Li
- ۵- J-hook
- ۶- Hong
- ۷- Split Hopkinson Pressure Bar
- ۸- Chahmi Oucif
- ۹- Penetration
- ۱۰- Scabbing
- ۱۱- Perforation
- ۱۲- Bulking
- ۱۳- Damage
- ۱۴- Softening
- ۱۵- Hugoniot Elastic Limit
- ۱۶- Johnson Cook
- ۱۷- Element Deletion

منابع و مراجع

- [1]. Agardh, L., Laine, L., "3D FE-simulation of high-velocity fragment perforation of reinforced concrete slabs", International Journal of Impact Engineering, Volume 22, Issues 9-10, 1999.
- [2]. Zineddin, M., Krauthammer, T., "Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading", International Journal of Impact Engineering, Volume 32, Issues 9, 2007.
- [3]. Li, Q.M., Weng, H.J., Chen, X.W. "A modified model for the penetration into moderately-thick plates by a rigid, sharp-nosed projectile", International Journal of Impact Engineering, Volume 30, Issues 193-204, 2004.
- [4]. Teng, T.L., Chub, Y.A., Chang, F. A., Shen, B. C., Cheng, D.S., "Development and Validation of Numerical Model of Steel Fiber Reinforced Concrete for High velocity Impact", Computational Materials Science, Volume 42, Issues 9, 2008.
- [5]. Hong, J., Fang, Q., Chen, L., Kong, X.Z., "Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified K&C material model", Construction and Building Materials, vol. 155, pp. 1013-1024, 2017
- [6]. Guo, Y.B., Gao, G.F., Jing, L., Shim, V.P.W., "Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading", International Journal Of Impact Engineering, vol. 108, pp. 114-135, 2017



شکل ۱۹ - الگو شکست در اهداف بتنی با ضخامت ۰,۵ متر

نتیجه گیری

هدف از انجام این مطالعه توسعه یک مدل آسیب ترد برای بتن مسلح در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری با نرخ بالا بوده است. برای این منظور از بین مدل های آسیب، مدل جانسون هولمکوئیست (jh-2) انتخاب شد. پس از آن فرمول بندی مدل و پیاده سازی الگوریتم مدل آسیب در زیر برنامه ای بر مبنای روش اجزای محدود، در محیط Abaqus/Explicit و برای حل مسائل سه بعدی انجام گرفت. پس از اتمام مرحله برنامه نویسی، آزمایش و اعتبارسنجی زیر برنامه نوشته شده انجام گردید. برای به دست آوردن نتایج عددی صحیح و بررسی وابستگی شبیه سازی های عددی به شبکه بندی المان و همچنین معیار شکست المان بررسی شد. در ادامه، شرایط مختلف به صورت عددی شبیه سازی شده اند و آزمون هایی برای ارزیابی توانایی زیر برنامه در نظر گرفته شد. شبیه سازی بتن با ضخامت زیاد و ضخامت محدود در تحلیل دو بعدی انجام شد و با تحقیقات انجام شده مقایسه گردید. نتایج حکایت از دقت و سرعت بالای شبیه سازی داشت و سرعت تحلیل تقریباً شش برابر نسبت به تحلیل با ال اس دینا است. در ادامه اثر زاویه برخورد و ضخامت در تحلیل سه بعدی بررسی گردید. در برخورد مایل پرتابه با افزایش زاویه برخورد، مولفه سرعت عمودی کاهش یافته و مسیرهای نفوذ پرتابه طولانی تر شده و در نتیجه پرتابه انرژی جنبشی بیشتری را تحت نفوذ از دست می دهد. و عمق نفوذ کاهش می یابد همچنین در شبیه سازی سرعت باقی مانده در حالت سه بعدی کد توسعه یافته از کارایی خوبی برخوردار است.

پی نوشت ها

- ۱- Agardh
- ۲- Laine

- cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact*", Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 17, Issues 2, 2005.
- [14]. Yang, L., Lin, X., Rebecca, J., Gravina, R., "Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete", Construction and Building Materials, vol. 190, pp. 632-644, 2018
- [15]. Hu, Z., Mao, L.X., Xia, J., Liu, J.B., Gao, J., Yang, J., Liu, Q.F., "Five-phase modelling for effective diffusion coefficient of chlorides in recycled concrete", Magazine of Concrete Research, Volume 70, Issues 11, 2018.
- [16]. Thomas, R.J., Andrew, D., "Sorensen, Review of strain rate effects for UHPC in tension", Construction and Building Materials, Volume 153, Issues 1, 2017.
- [17]. Hanchak, S.J., Forrestal, M.J., Young, E.R., Ehrigott, J.Q., "Perforation of concrete slabs with 48MPa (7 ksi) and 140MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths", International Journal Of Impact Engineering, Volume 12, Issues 1-7, 1992.
- [18]. Rowher, T. A., Heise, J. F., & Wilder, D. J., "Waterways Experiment Station Code Validation Tests. Albuquerque", Sandia National Laboratories, 2001.
- [19]. Polanco-Loria, M., Hopperstad, O.S., Borvik, T., Berstad, T. "Numerical Predictions of Ballistic Limits for Concrete Slabs Using a Modified Version of the HJC Concrete Model" vol. 35, pp. 290-303, 208
- [7]. Gholipour, G., Zhang C., Mousavi A.A., "Loading rate effects on the responses of simply supported RC beams subjected to the combination of impact and blast loads", Engineering Structures, vol. 108, pp. 141-159, 2019.
- [8]. Chahmi, O., Kalyana Rama, J.S., Shankar Ram, K., Abed, F., "Damage modeling of ballistic penetration and impact behavior of concrete panel under low and high velocities" Defence Technology, International Journal of Impact Engineering, Volume 17, Issues 1, 2021.
- [9]. Jin, L., Xia, M., Zhang, R., Lin, M., Du, X., "Damage modeling of ballistic penetration and impact behavior of concrete panel under low and high velocities" Defence Technology, International Journal of Impact Engineering, vol. 172, pp. 734-743, 2023.
- [10]. Abrate, S., "Impact on Composite Materials and Structures", Cambridge University Press, 1998.
- [11]. Leppänen, "Concrete Structures Subject to Fragment Impacts", Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2004
- [12]. Johnson, G.R., Holmquist, T. J., "A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates and high pressures." Shock wave and high-strain-rate phenomena in materials, pp. 1013-1024, 1992.
- [13]. Maalej, S.T., Quek, J., Zhang, S., "Behavior of hybrid-fiber engineered