

بررسی و واسنجی مدل‌های رفتاری پرتابه و هدف در مدل‌سازی برخورد پرتابه‌ی فولادی با هدف بتنی

طیب علیزاده (کارشناس ارشد)

جواد مرادلو* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (۱۳۹۳)
دوری ۲ - ۳۰، شماره ۲/۴، ص. ۱۱۵-۱۰۱ (پادداشت فنی)

در این نوشتار، بررسی پارامتریک مدل RHT و واسنجی پارامترهای آن در شبیه‌سازی مسائل ضربه‌ی بتن در نرم‌افزار اتوداین^۱ ارائه شده است. این مقادیر به عوامل معادله‌ی حالت و مدل‌های مقاومت، شکست و فرسایش آنها نسبت داده می‌شوند. در این نوشتار، با توجه به نیاز به مدل‌سازی پرتابه، مدل جانسون - کوک معرفی شده است. بعد از معرفی مدل‌ها و زیرمدل‌های آن، تحلیل یک نمونه‌ی تجربی ارائه و مطالعات پارامتریک بر روی پارامترهای مدل‌ها ارائه شده است. موارد بررسی‌شده شامل: شبکه‌بندی، مقاومت پسماند، توان مقاومت شکست، توان نرخ کرنش کششی، توان نرخ کرنش فشاری، ثابت سطح شکست سالم، توان سطح شکست سالم، معیار فرسایش، خطای انرژی، اصطکاک، سرعت پرتابه و شکل پرتابه است. نتایج مطالعات نشان داده است که مدل رفتار بتن RHT با واسنجی مناسب پارامترها به خوبی قادر به تحلیل مسائل ضربه در نمونه‌های بتنی است.

واژگان کلیدی: مدل رفتاری، پرتابه‌ی فولادی، هدف بتنی، ضربه، مدل RHT.

۱. مقدمه

بررسی رفتار سازه‌های بتنی تحت بارگذاری شدید انفجاری (و یا ضربه‌یی) در سال‌های اخیر با شدت بیشتری مد نظر پژوهشگران قرار گرفته است. انجام مطالعات آزمایشگاهی و تجربی، بررسی رفتار غیرخطی وابسته به زمان بتن را ممکن ساخته است، ولی انجام آزمایش‌ها، به‌خصوص برای مقیاس‌های بزرگ، مستلزم صرف زمان بسیار زیاد، پرهزینه و حتی غیرممکن است. از این رو در سال‌های اخیر، ابزار مدل‌سازی عددی رفتار مصالح تَرْد و نیمه تَرْد همچون سنگ و بتن پیشرفت‌های چشمگیری کرده است.

در سال‌های اخیر، مدل‌های پیچیده‌ی چندی برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن تحت بارگذاری‌های ضربه‌یی شدید با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی کرنشی، نرم‌شوندگی و وابستگی به نرخ بارگذاری توسعه یافته است. از این میان می‌توان به مدل‌های: RHT^۲، K&C^۳، گِیکِن^۴، و مدل اصلاح‌شده‌ی دراگر پراگر^۵، که همگی براساس تئوری آسیب خمیری بنا شده‌اند، اشاره کرد.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۱^۶، مدل‌های رفتاری پرتابه‌ی فولادی و هدف سرامیکی و بتنی بررسی شده است، که در آن رفتار پرتابه با مدل جانسون کوک، و هدف‌های سرامیکی و بتنی با مدل غیرخطی جانسون هلمکوپیست مدل شده‌اند. همچنین در پژوهشی دیگر، مجموعه‌ی سازگار برای پارامترهای مدل بتن در نرم‌افزار LS Dyna برای مسئله‌ی نفوذ پرتابه در هدف بتنی بررسی شده است.^۷ پژوهشگران دیگری نیز در مطالعات خود نتایج مطلوبی در شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌یی بتن با کاربرد مدل RHT ارائه کرده‌اند.^{۸-۱۳}

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۷/۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۱۰، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۵.

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹، مدل‌های رفتاری غیرخطی بتن در نرم‌افزارهای تجاری همچون LS Dyna و Autodyn با یکدیگر مقایسه شده‌اند، به گونه‌ی که مدل RHT در نرم‌افزار Autodyn و مدل آسیب در نرم‌افزار LS Dyna بررسی شده‌اند. در ادامه‌ی پژوهش پیشین، در پژوهش دیگری به بررسی و اصلاح پارامترهای مدل RHT در مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن پرداخته شده است،^۹ که آن اصلاحات شامل: وابستگی سطح مقاومت تسلیم به زاویه‌ی بارگذاری، رابطه‌ی نرم‌شوندگی کششی و تابع مقاومت کششی دینامیک بوده و آثار مثبت اصلاحات مذکور با دو آزمایش تجربی و چند نمونه‌ی شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گرفته است.^۹

مدل RHT اخیراً در نرم‌افزار LS Dyna (نسخه‌ی ۹۷۱) معرفی و به کار گرفته شده است،^{۱۴} که با این روند، این مدل در ۲ نرم‌افزار کاربردی تحلیل دینامیکی غیرخطی Autodyn و LS Dyna استفاده شده است. از آنجایی که بتن یکی از مصالح رایج در ساخت انواع سازه‌ها به‌خصوص سازه‌های حفاظتی است و این مدل هم رفتار بتن را با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند، لذا با توجه به موارد عنوان‌شده، این مدل مصالح، یک مدل جامع و کاربردی خواهد بود. بنابراین، پژوهش درخصوص چگونگی عملکرد پارامترهای این مدل امری ضروری است، زیرا که این امر در روند صحت‌سنجی و تدقیق شبیه‌سازی بارگذاری‌های دینامیکی غیرخطی همچون بارگذاری ضربه‌یی و انفجاری اجتناب‌ناپذیر است.

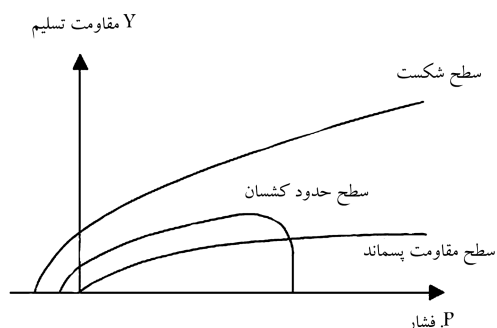
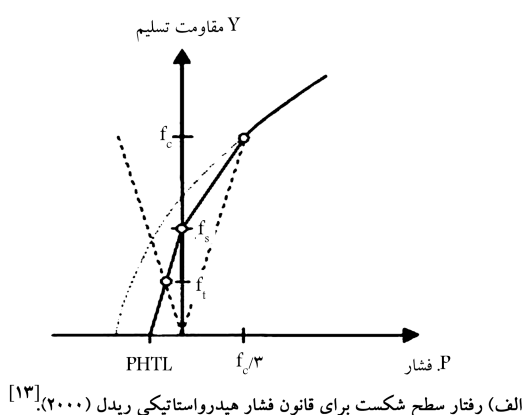
پژوهش‌های انجام‌شده‌ی مذکور، مطالعات پارامتریک در سطح گسترده‌ی نیست و فقط یک سری پژوهش‌های جزئی برای برخی از پارامترها انجام شده است.^{۱۵-۱۱} در این نوشتار، بررسی پارامتریک مدل RHT برای شبیه‌سازی مسائل ضربه‌یی بتن در حد وسیعی با نرم‌افزار اتوداین ارائه شده است، که نتایج آن با نتایج مشابه موجود

کششی و فشاری در نظر گرفته شده است و رفتار نرم‌شدگی توسط سطح مقاومت شکست غیروابسته مدل شده است. مقاومت کششی هیدرواستاتیکی بتن وابسته به نرخ در آن لحاظ شده است و مدل خسارت برشی ناشی از تنش انحرافی مصالح محدود شده در یک سطح گسیختگی کلی است.^[۸] 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 ۱ نشان داده شده است.^[۱۳] مقاومت تسلیم (Y) با افزایش فشار هیدرواستاتیکی (p) افزایش پیدا می‌کند. Y_{TXC} یک تابع برای بیان فشار هیدرواستاتیکی وابسته به نصف‌النهار فشاری است. برای فشارهای هیدرواستاتیکی پایین‌تر از $f_c/3$ نصف‌النهار فشاری توسط یک خط راست همانند شکل ۱ الف ارائه شده است. اما برای فشار هیدرواستاتیکی بیشتر از $f_c/3$ معادله‌ی ۱ برای محاسبه‌ی Y_{TXC} به کار برده می‌شود.^[۱۳]

$$Y_{TXC}(p) = f_c \left[A \cdot \left[\frac{p}{f_c} - \frac{PHTL}{f_c} \cdot FRate \right]^N \right] \quad \text{for } p \geq f_c/3 \quad (1)$$

که در آن، N و A ضرایب ثابت هستند که شکل منحنی را مشخص می‌کنند و توسط کاربر تعیین می‌شوند، f_c مقاومت فشاری تک‌محوری و $PHTL$ حدکشش هیدرواستاتیکی نامیده می‌شود (شکل ۱)، $FRate$ تابعی از نرخ کرنش وابسته ($\dot{\epsilon}$) و نمایانگر ضریب افزایش دینامیکی (DIF) است.

علاوه بر اینکه سطح شکست به فشار هیدرواستاتیکی و نرخ کرنش وابسته است، افزایش تدریجی در برش و کشش نیز با فشار متناسب است، این وابستگی با اضافه‌کردن عاملی بنام $R_r(\theta)$ تأمین می‌شود، که سومین ثابت وابسته‌ی مقطع



شکل ۱. شکل شماتیک سطوح به کار رفته در مدل RHT.

(بررسی‌های جزئی دیگر پژوهشگران) مقایسه شده است، که صحت روند این پژوهش تأیید شده است. در این نوشتار، بعد از معرفی مدل رفتاری بتن همین‌طور مدل رفتاری پرتابه، پارامترهای مدل به صورت عددی بررسی شده است و تأثیر این پارامترها در عمق نفوذ و دیگر عوامل خسارت همچون ابعاد قله‌کشی و روند ایجاد ترک‌ها ارائه شده است، به گونه‌ای که با مقادیر کوچک‌تر و بزرگ‌تر از ارقام پیشنهادی بنیانگذاران این مدل و دیگر پژوهشگران، که این اعداد را از طریق تطابق نتایج آزمایش‌های تجربی و آزمایشگاهی با شبیه‌سازی و یا با برقراری معادلات این مدل به دست آورده‌اند، بررسی شده و واسنجی آنها مورد سنجش و اندازه‌گیری قرار گرفته است، که این امر در دقت صحت‌سنجی و تدقیق (کالیبراسیون) شبیه‌سازی این مدل کاربرد اساسی دارد. بنابراین آثار تغییر مقادیر پارامترها در پاسخ غیرخطی نمونه‌های بتنی سنجیده شده است. در انتها، بعد از واسنجی پارامترها و مشخص شدن تأثیرهای پارامترها، یک نمونه‌ی تجربی به صورت دوبعدی شبیه‌سازی و ارائه شده است.

۲. مدل‌های رفتاری هدف و پرتابه

با توجه به جنس متفاوت هدف بتنی و پرتابه‌ی فولادی نیاز به مدل‌های رفتاری متفاوتی برای شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌یی خواهد بود. مشخصات و خصوصیات رفتاری هر دو مصالح توسط معادله‌ی حالت، مدل مقاومت، شکست و فرسایش معرفی می‌شوند. برخی پژوهشگران از مدل‌های متفاوتی برای این مصالح استفاده کرده‌اند،^[۱۳-۸] که در آنها برای هدف بتنی از معادله‌ی حالت $P - \alpha$ مدل مقاومت و مدل شکست RHT و مدل فرسایش کرنش هندسی استفاده شده است. برخی از آنها برای پرتابه‌ی فولادی،^[۱۳ و ۱۲، ۹، ۸] و برخی دیگر از مدل مقاومت فون میسز و معادله‌ی حالت خطی استفاده کرده‌اند،^[۱۳ و ۱۲، ۹، ۸] در حالی که برخی دیگر نیز از مدل مقاومت جانسون - کوک و معادله‌ی حالت شوک استفاده کرده‌اند.^[۱۱ و ۱۰] تقریباً در تمامی مطالعات، چون پرتابه به صورت صلب و سخت در نظر گرفته شده است، مدل شکست و فرسایش استفاده نشده است و از آنجائی که هدف چگونگی شبیه‌سازی عکس‌العمل و پاسخ بتن در برابر بارگذاری دینامیکی غیرخطی پرتابه‌ی صلب است، لذا در عمل تفاوت چندانی بین این دو انتخاب نیست. لذا در این نوشتار برای پرتابه از مدل مقاومت جانسون کوک و معادله‌ی حالت شوک استفاده شده است.

در این نوشتار، برای بتن از مدل مقاومت و مدل شکست RHT و معادله‌ی حالت $(P - \alpha)$ و مدل فرسایش کرنش هندسی استفاده شده است، که در ادامه، ویژگی‌های مدل مقاومت، شکست و معادله‌ی حالت و فرسایش توضیح داده شده‌اند.

۲.۱. مدل رفتاری بتن

مدل RHT، مدل خمیری پیشرفته‌یی است که در ابتدا توسط ریدل، هابرمایر و توما در بنیاد علمی ارنست ماخ تهیه و در ادامه ریدل در سال ۲۰۰۰ آن را توسعه دادند. این مدل در شبیه‌سازی بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک، که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته‌اند، بسیار کارآمد است. عملکرد و رفتار این مدل براساس مقادیر نسبت داده شده به پارامترها و ثابت‌های عددی در معادلات مدل قابل تنظیم است، که این مقادیر به عوامل معادله‌ی حالت و مدل‌های مقاومت، شکست و فرسایش آنها نسبت داده می‌شود. کاربردهای پیشین این مدل، تا حدودی نشانگر توانایی مناسب آن در شبیه‌سازی مسائل ضربه بوده است،^[۲] که البته باید صحت‌سنجی برای هر مسئله‌یی انجام پذیرد، تا نتایج شبیه‌سازی قابل اطمینان شود. در این مدل، سخت‌شدگی کرنشی و وابستگی به نامتغیر سوم برای نصف‌النهار

می‌شوند. D_1 حد پایین خسارت و D_2 حد بالای خسارت است، که معمولاً عدد ۱ در نظر گرفته می‌شود. در معادله‌ی ۶ نیز، B ثابت مقاومت پسماند و M توان مقاومت پسماند است، که هر دو ثابت‌های عددی هستند و توسط کاربر تعیین می‌شوند. این تذکر لازم است که برخلاف سطح گسیختگی، مقاومت پسماند نمی‌تواند توسط ثابت سوم و یا نرخ کرنش به دست آید.^[۱۳]

در مدل مصالح RHT از معیار شکست کششی هیدرودینامیکی به صورت پیش فرض استفاده می شود. در این مدل تعیین انرژی شکست و یا اصلاح نرمی ترک برای شکست کششی دقیقاً ممکن نیست. در برنامه ای اتوداین می توان به همراه مدل مقاومت RHT از یک تنش اصلی شکست کششی استفاده کرد، که باعث می شود نرخ کرنش وابسته از مقاومت کششی تعریف شده در مدل مقاومت RHT عملاً بیشتر نشود.

۱.۱.۲. نصف النهار کششی و فشاری

مدل تفاوت بین نصف‌النهار فشاری و کششی را با استفاده از ثابت سوم وابسته R_r معرفی می‌کند. این عامل می‌تواند برای بیان کاهش مقاومت بتن تحت انبساط سه محوری متناسب با فشار سه محوری به کار برود. شرط ثابت سوم وابسته به صورت رابطه‌ی ۷ ارائه شده است: [۸]

$$R_{\mathbf{r}} = \frac{r}{r_C} = \frac{\mathfrak{r}(\mathfrak{l} - \psi^{\mathfrak{r}})\cos\theta + (\mathfrak{r}\psi - \mathfrak{l})\sqrt{\mathfrak{r}(\mathfrak{l} - \psi^{\mathfrak{r}})\cos^{\mathfrak{r}}\theta + \Delta\psi^{\mathfrak{r}} - \mathfrak{r}Q_{\mathfrak{r}}}}{\mathfrak{r}(\mathfrak{l} - \psi^{\mathfrak{r}})\cos^{\mathfrak{r}}\theta + (\mathfrak{l} - \mathfrak{r}\psi^{\mathfrak{r}})^{\mathfrak{r}}} \quad (\mathfrak{Y})$$

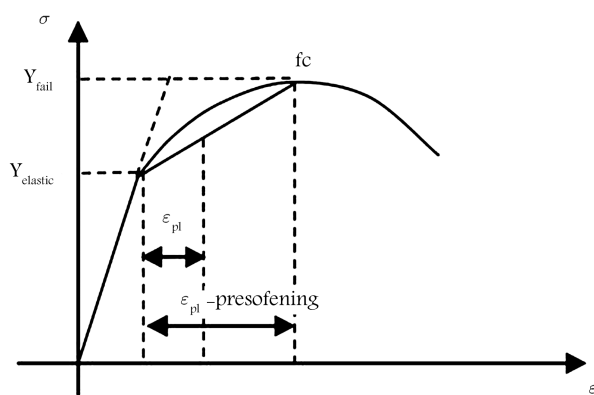
که در آن، $\psi = \frac{r_t}{r_c}$ نسبت نصف النهار کششی و فشاری و وابسته به فشار است (شکا، ۲).

۲.۱.۲. سطوح بارگذاری ویس از شکست

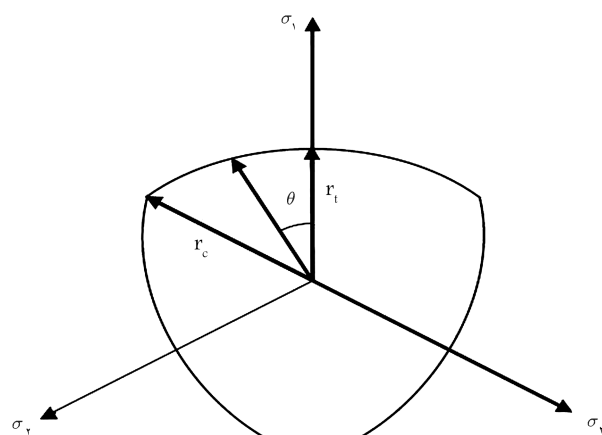
در این مدل سخت‌شدگی کرنشی از طریق سطح محدود کشسان و یک شیب سخت‌شدگی مشخص می‌شود (شکل ۳). سطح محدود کشسان در مقیاس کوچک‌تری از سطح شکست است و توسط کاربرد از طریق نسبت مقاومت کشسان در مقاومت فشاری و مقاومت کششی تعیین می‌شود.^[A]

سطوح بارگذاری فراتر از سطح مقاومت کشسان توسط میان‌یابی بین $Y_{elastic}$ و Y_{fail} و از طریق رابطه‌ی ۸ به‌دست می‌آید:^[۸]

$$Y_{LOADING} = Y_{Elastic} \times \left(\frac{\varepsilon^{Pl}}{\varepsilon^{Pl-Presofteninge}} \right) * (Y_{fail} - Y_{Elastic}) \quad (\text{A})$$



شکل ۳. سخت‌شدگی کرنشی در مدل RHT.^[۸]



شکل ۲. شکل سطح تسلیم در صفحات اصلی. [۸]

انحراف می‌است. بنابراین برای معادله‌ی سطح گسیختگی، خواهیم داشت: [۱۳]

$$Y_{F_{ail}} = Y_{T_{xc}}(p) R_r(\theta) F_{Rate}(\dot{\epsilon}) \quad (2)$$

سطح شکست این مدل در مختصات اصلی، تطابق خوبی با نتایج تجربی و آزمایشگاهی دارد. برای بتن، مقطع انحرافی معمولاً از مثلی در فشارهای پایین به شکل دایروی در فشارهای بالا تغییر می‌کند (شکل ۲).^[۸]

همان‌گونه که از معادله‌های ۱ و ۲ استنباط می‌شود، در مدل RHT وابستگی به نرخ مقاومت کششی هیدرواستاتیک ماده در نظر گرفته شده است. الگوی نرخ افزایش منطبق بر این مدل را می‌توان بدین صورت عنوان کرد که مقاومت کششی هیدرواستاتیک مصالح در ابتدا با ضریبی برابر (DIF) افزایش می‌یابد و سپس سطح گسیختگی در امتداد جهت محور فشار هیدرواستاتیک به موقعیت جدید قطع فشار کششی منتقل می‌شود و در نهایت سطح گسیختگی انتقال یافته در فشار یکسان با ضریبی از F_{Rate} (معادله‌ی ۳) توسعه می‌یابد:^[۸]

$$Y_{fail}(p^\bullet, \theta, \dot{\varepsilon}) = F_{Rate}^{N+1} \times Y_{Original}(p/F_{Rate}, \theta) \quad (3)$$

در این معادله، $p^\bullet$ فشار نرمال شده و θ زاویه ی بارگذاری است.

بعد از شروع شکست، از مدل خسارت استفاده می‌شود. ظرفیت باربری بتن بعد از رسیدن به مقاومت کششی و با فشاری به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. این عمل توسط کاهش خطی مقاومت مصالح و با استفاده از پارامتر خسارت D انجام می‌شود. خسارت مصالح به وسیله‌ی مشخصات کرنش خمیری (ε_{pl}) و کرنش شکست خمیری ($\varepsilon_{pl, failure}$)، از طریق معادله‌ی ۴ تعریف می‌شود: [۱۳]

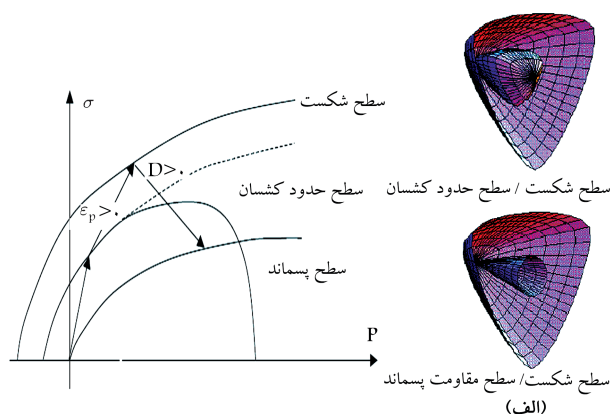
$$D = \sum \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{pl, failure}} \quad (4)$$

گرنش شکست خمیری از طریق معادله‌ی ۵ محاسبه می‌شود، مقاومت پسماند توسط سطح مقاومت بسماند (Y_{fric}) و با رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_{pl, failure}(p) = D_1 \left(\frac{P}{f_c} - \frac{P_{HTL}}{f_c} \right)^{D_2} \quad (5)$$

$$Y_{f_{ric}} = f_c \cdot B \left(\frac{P}{f_c} \right)^M \quad (9)$$

در معادله‌ی ۵، D_1 و D_2 ثابت‌های خسارت مصالح هستند، که جهت اثر کرنش در شکست به کار می‌روند؛ به گونه‌ای که متأثر از فشار هستند و توسط کاربر تعیین



شکل ۴. سطوح کشسان، شکست، باقیمانده در مدل RHT. [۱۵]

۴.۱.۲. خسارت خرابی تخلخل

این مدل شامل گزینه‌یی برای انتخاب یک کلاهک برای حدود تنش انحرافی کشسان تحت فشارهای بالا است، که این به طور مؤثر منجر به در نظر گرفتن نتایج مترکام تخلخل در کاهش مقاومت انحرافی می‌شود. در شکل ۴، ترکیب نهایی از سطوح کشسان، شکست و گسیختگی، باقیمانده در دو حالت دو بعدی (شکل ۴ب) و سه بعدی (شکل ۴الف) نشان داده شده است. در حالت دو بعدی منحنی سه سطحی، که در طول نصف النهار فشاری ایجاد می‌شوند، نشان داده شده است و در حالت سه بعدی سطح حدود کشسان و سطح مقاومت پسماند ارائه شده است. [۱۵]

۵.۱.۲. تأثیرات نرخ کرنش

تأثیرات نرخ کرنش توسط افزایش مقاومت شکست با نرخ کرنش خمیری نشان داده می‌شود، که از دو شرط مختلف برای فشار و کشش با میان‌بایی خطی و از طریق رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید: [۱۵]

$$DIF = \begin{cases} 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{\alpha} & \text{for } P \succ 1/3 f_c \text{ (compression)} \\ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{\delta} & \text{for } P \prec 1/3 f_t \text{ (tension)} \end{cases} \quad (16)$$

α توان نرخ کرنش فشاری، δ توان نرخ کرنش کششی و $\dot{\epsilon}_0$ مقادیر نرخ کرنش اولیه است، که برای حالت فشاری $3 \times 10^{-5} S^{-1}$ و برای حالت کششی $3 \times 10^{-6} S^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود.

در جدول‌های ۱ و ۲ مقادیر مختلف مدل مقاومت و شکست RHT برای بتن با مقاومت‌های فشاری ۳۵ و ۱۴۰ مگاپاسکال که در پیش‌فرض نرم‌افزار وجود دارد، [۱۵] و نیز مقادیر پیشنهادی لیانن، [۱] برای بتن با مقاومت فشاری ۳۳/۸ مگاپاسکال ارائه شده است.

۲.۲. مدل رفتاری جانسون کوک برای مدل‌سازی پرتابه

مدل فون میسر، که در برخی مطالعات برای پرتابه به کار رفته است، مدل ساده‌یی است؛ در حالی که مدل جانسون کوک مدل کاملی برای پرتابه است، که می‌تواند علاوه بر آثار نرخ کرنش و کرنش سختی، درجه‌ی حرارت را نیز در روند نفوذ در بتن مد نظر قرار دهد. این مدل مقاومت برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی فلزات تحت اثر نرخ کرنش‌های بزرگ و حرارت شدید استفاده می‌شود. از آنجا که پرتابه به صورت صلب در نظر گرفته شده است، لذا نیازی به مدل شکست و فرسایش نیست. در این مدل تنش جاری‌شدن وابسته به متغیرهای کرنش، نرخ کرنش و حرارت است.

تعریف ϵ_{pl} و $\epsilon_{pl-prefortening}$ در شکل ۳ نشان داده شده است و به صورت رابطه‌ی ۹ بیان می‌شود: [۱۵]

$$\epsilon_{pl-prefortening} = \frac{Y_{fail} - Y_{elastic}}{3G} \times \left(\frac{G_{elastic}}{G_{elastic} - G_{plastic}} \right) \quad (9)$$

سطوح پس از شکست $Y_{fracture}$ از طریق میان‌بایی بین سطح شکست و سطح پسماند (مطابق رابطه ۱۰) و با پارامتر خسارت D محاسبه می‌شوند: [۸]

$$Y_{fracture} = D \times Y_{residual} + (1 - D) \times Y_{fail} \quad (10)$$

در حالت کلی D به صورت رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود: [۸]

$$D = \begin{cases} \int_0^{\epsilon_p} \frac{d\epsilon_p}{D_1(p^* + p_{spall}^*)^{D_2}} \text{ for } D_1(p^* + p_{spall}^*)^{D_2} \succ \epsilon_f^{\min} \\ \int_0^{\epsilon_p} \frac{d\epsilon_p}{\epsilon_f^{\min}} \text{ for } D_1(p^* + p_{spall}^*)^{D_2} \prec \epsilon_f^{\min} \end{cases} \quad (11)$$

انتخاب مناسب پارامترهای D_1 و D_2 و $\epsilon_f^{\min}$ (کمترین کرنش شکست خمیری) تأثیر به‌سزایی در تعیین نرم‌شدگی مصالح که منطبق بر واقعیت باشد، دارند. مقادیر پیش‌فرض ارائه‌شده در برنامه‌ی اتوداین در برخی از موارد مشکل‌ساز می‌شوند و باید در مقادیر آن اصلاحاتی انجام شود. [۱۵]

۳.۱.۲. خسارت برشی

خسارت در نظر گرفته‌شده طی انباشته‌شدن کرنش‌های انحرافی غیرکشسان (برش ناشی از ترک‌خوردگی) از طریق معادله‌ی ۱۲ به دست می‌آید. کرنش شکست خمیری را نیز می‌توان همین معادله به دست آورد: [۱۵]

$$\epsilon_{pl, failure}(p) = D_1(p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \quad (12)$$

خسارت تجمعی، دو تأثیر در مدل خواهد داشت، که عبارت‌اند از: نرم‌شدگی کرنش و کاهش سختی برشی. [۱۵]

۱. نرم‌شدگی کرنش: سطح شکست موجود (برای مقدار معینی از خسارت) از رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ قابل محاسبه است:

$$Y_{fractured} = (1 - D)Y_{fail} + DY_{residual} \quad (13)$$

$$Y_{residual} = \min[B\dot{P}^M, Y_{XTC1} * SFMAX] \quad (14)$$

که در آن، $SFMAX$ نسبت بیشینه‌ی مقاومت شکست است. عبارت $Y_{XTC1} * SFMAX$ برای بیشینه‌ی محدوده‌ی مقاومت برشی باقیمانده (برای مصالح کاملاً خسارت‌دیده) کسری از مقاومت شکست موجود است.

۲. کاهش سختی برشی: ضریب برشی جاری (موجود) از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$G_{fractured} = (1 - D)G_{elastic} + DG_{residual} \quad (15)$$

جدول ۱. مقادیر مدل مقاومت RHT بتن.

عنوان	نماد	واحد	لیپان	۳۵ Mpa	۱۴۰ Mpa
مدول برشی	—	kpa	1.433×10^7	1.67×10^7	2.206×10^7
مقاومت فشاری	f_c	kpa	3.38×10^7	3.5×10^7	1.4×10^8
مقاومت کششی	f_t	—	0.78	0.1	0.1
مقاومت برشی	$\frac{f_s}{f_c}$	—	0.18	0.18	0.18
ثابت سطح شکست	A	—	۲	۱/۶	۱/۶
توان سطح شکست	N	—	0.7	0.61	0.61
نسبت نصف‌النهار کششی به فشاری	Q	—	0.6805	0.6805	0.6805
ضریب انتقال ترد به شکل‌پذیری	—	—	0.105	0.105	0.105
نسبت مدول برشی کشسان به مدول برشی کشسان - خمیری	—	—	۲	۲	۲
نسبت مقاومت کشسان به مقاومت کششی	—	—	0.7	0.7	0.7
نسبت مقاومت کشسان به مقاومت فشاری	—	—	0.53	0.53	0.53
ثابت مقاومت شکستگی	B	—	۱/۵	۱/۶	۱/۶
توان مقاومت شکستگی	M	—	0.7	0.61	0.61
توان نرخ کرنش فشاری	α	—	0.32	0.32	0.009909
توان نرخ کرنش کششی	δ	—	0.25	0.36	0.125
نسبت پیش‌بینی مقاومت شکست	—	—	1×10^2	1×10^2	1×10^2

جدول ۳. مقادیر مدل مقاومت جانسون کوک برای پرتابه.^[۱۱]

عنوان	نماد	واحد	مقادیر
مدول کششی	—	GPa	۱۵۹
مدول برشی	—	GPa	۸۱/۸
تنش جاری شدن	A	MPa	۱۵۳۹
ثابت سخت‌شدگی	B	MPa	۴۷۷
توان سخت‌شدگی	n	—	0.18
ثابت نرخ کرنش	c	—	0.12
توان نرم‌شدگی حرارتی	m	—	۱
دمای ذوب‌شدگی	T_m	k	۱۷۶۳
نرخ کرنش مرجع	—	—	۱

جدول ۲. مقادیر مدل شکست RHT بتن.

عنوان	نماد	لیپان	۳۵ Mpa	۱۴۰ Mpa
ثابت خسارت ۱	D_1	0.4	0.4	0.4
ثابت خسارت ۲	D_2	۱	۱	۱
کمینه‌ی کرنش شکست	—	0.1	0.1	0.1
مدول برشی باقیمانده	—	0.13	0.13	0.13
مدول گسیختگی کششی	—	Hydro	Hydro	Hydro

تنش جاری‌شدن از طریق رابطه‌ی ۱۷ مشخص می‌شود:^[۱۵]

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n] [1 + c \ln \varepsilon_p] [1 - T_H^m] \quad (۱۷)$$

ε_p^n اثر کرنش خمیری، ε_p^* حدود نرمال تأثیر کرنش خمیری، T_H^m حرارت همسان که از رابطه‌ی ۱۸ به دست می‌آید:

$$T_H^m = (T - T_{room})(T_{melt} - T_{room}) \quad (۱۸)$$

که در آن، T_{room} دمای استاندارد محیط، T_{melt} دمای ذوب فاز مربوط، T دمای محل انجام بارگذاری هستند.

در رابطه‌ی ۱۷، عبارت اول نشان می‌دهد که تنش، تابعی از کرنش است. ثابت A مبنای تنش جاری‌شدن برای کرنش‌های پایین، B و n نیز معرف سخت‌شدگی کرنش هستند. همچنین دومین بَرکت در عبارت فوق نمایانگر تأثیر نرخ کرنش در مقاومت جاری‌شدن مصالح است. به طور پیش فرض نرخ کرنش اولیه، عکس یک

ثانیه در نظر گرفته می‌شود، که قابل تغییر است. سومین بَرکت در عبارت ۱۸، افت تنش جاری‌شدن برای دمای ذوب T_{melt} است.

ثابت‌های موجود در عبارت ۱۸، از طریق آزمایش‌های جانسون و کوک و همچنین آزمایش‌های دینامیکی کشش میله‌ی هاپکینسون و در محدوده‌های مختلف گرمایی و توسط محاسبات آزمایش‌های تیاور براساس برخورد استوانه‌ی فازی به هدف صلب فازی به دست آمده است. هر مدل مصالحی که در فهرست نرم‌افزار اتوداین وجود دارد، از جمله برای مدل جانسون کوک، پارامترهایی همانند A ، B ، C ، n ، m دارند، که به صورت پیش فرض مقادیری برای آنها تعریف شده‌اند، که می‌توان بنابر نیاز تغییر داد.^[۱۵] در جدول ۳، مقادیر مدل مقاومت جانسون کوک، که در شبیه‌سازی عددی از آن استفاده شده^[۱۱] ارائه شده است.

۳.۲. معادله‌ی حالت

۱.۳.۲. معادله‌ی حالت بتن

معادله‌ی حالت، به بررسی رابطه‌ی بین فشار و حجم و دما می‌پردازد و حالات مختلف ماده را در وضعیت‌های فیزیکی گوناگون توصیف می‌کند.

رفتار یک مصالح کشسان خطی می‌تواند مطابق شکل ۵، تا حد کشش هیدروپنایمیک PHTL، برای فشار متراکم اولیه ($p_{compaction}$) خطی فرض شود. برای فشارهای بالاتر مصالح تخریب می‌شود، به نحوی که با افزایش فشار تراکمی، حفره‌های ابتدایی تخریب و ماده وارد فاز تراکم خمیری خواهد شد. این تخریب‌های حفره‌ای و تراکم‌های بعدی نسبت به افزایش فشار هیدرواستاتیک تا زمانی که تمامی حفره‌ها تخریب شوند و فشار به p_{solid} برسد و مصالح دوباره تقریباً به رفتار کشسان نزدیک شود، ادامه خواهد داشت. در شکل ۵، چگالی اولیه ρ و چگالی مصالح متراکم‌شده در فشار صفر ρ_{solid} است. [۱۳]

از معادله‌ی حالت $(P - \alpha)$ برای مصالحی که دارای خلل و فرج هستند، همانند بتن استفاده می‌شود.

مدل $(P - \alpha)$ ، یک روش ساختاری است که برای توصیف رفتار مصالح متخلخل در تنش‌های شدید به کار می‌رود و در عین حال می‌تواند به صورت منطقی و دقیق جزئیات روند فشار در تراز تنش پایین را نیز ارائه کند. فرض اساسی آن است که میزان انرژی مخصوص داخلی برای مصالح متخلخل و مصالح در چگالی غیرمتخلخل (توپر) در شرایط یکسان فشار و دما برابر است. عامل α نشان‌دهنده‌ی ضریب تخلخل است، که از طریق رابطه‌ی ۱۹ معرفی می‌شود: [۱۵]

$$\alpha = \frac{V}{V_S} \quad (۱۹)$$

که در آن، V حجم مخصوص مصالح متخلخل و V_S حجم مخصوص مصالح در حالت جامد (توپر) و در فشار و حرارت متعارف است و V_S معادل $\frac{1}{\rho_{ref}}$ در فشار صفر (ρ_{ref} چگالی مرجع) است. وقتی که مصالح مانند یک جسم جامد و سخت کاملاً فشرده باشند، α برابر ۱ است. معادله‌ی حالت مصالح متخلخل به سادگی به صورت رابطه‌ی ۲۰ است: [۱۵]

$$p = f\left(\frac{V}{\alpha}, e\right) \quad (۲۰)$$

این تابع می‌تواند معادلات حالت‌های مصالح متراکم یعنی خطی و یا چند جمله‌یی و یا شوک را توصیف کند. برای توصیف صحیح و کامل، ضریب تخلخل α باید

همانند یک تابع معین از حالت ترمودینامیکی مصالح بیان شود (رابطه‌ی ۲۱).

$$\alpha = g(p, e) \quad (۲۱)$$

معمولاً این اطلاعات برای تعیین تابع $g(p, e)$ کافی و مناسب نیست، اما خوشبختانه بیشتر مسائل ناشی از شوک‌های فشاری در مصالح متخلخل شامل نواحی مستقر و یا نزدیک هوگونیوت (منطقه‌یی که بعد از بارگذاری ضربه‌یی به فشار و حجم معمولی قبل از بارگذاری می‌رسند) است، که در هوگونیوت فشار و انرژی داخلی به شرایط رانکین - هوگونیوت وابسته‌اند، از این رو می‌توان معادله‌ی ۲۱ را به صورت کلی ۲۲ بیان کرد: [۱۵]

$$\alpha = g(p) \quad (۲۲)$$

روند تراکم و تغییرات فشار و ضریب تخلخل در شکل ۶ به صورت شماتیک نشان داده شده است. گسیختگی کشسانی مصالح در حدود فشار p_e روی می‌دهد و سپس با اعمال فشار بیشتر، مصالح کاملاً متراکم می‌شود؛ که در نهایت فشار به p_s می‌رسد و گسیختگی خمیری انجام می‌شود. [۱۵]

شکل‌های مختلف تابع $g(p)$ توسط پژوهشگران استفاده شده است. یک شکل ساده‌ی مناسب توسط بوچر و کارنر مطابق رابطه‌ی ۲۳ برای فولاد متخلخل ارائه شده است: [۱۵]

$$\alpha = 1 + (\alpha_p - 1) \left[\frac{p_1 - p}{p_s - p_e} \right]^2 \quad (۲۳)$$

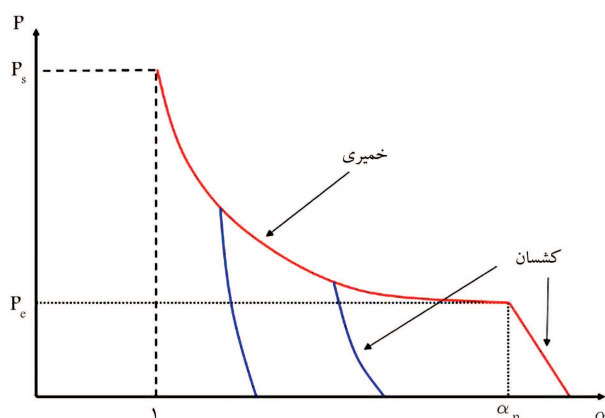
پارامترهای p_e ، p_s ، α_p در شکل ۶ تعریف شده‌اند. در اتوداین توان دوم معادله‌ی ۲۳ می‌تواند برای مقادیری بالاتری از انعطاف‌پذیری در یک روند مناسب عمل کند. شکل نمایی و مکعبی این رابطه نیز پیشنهاد شده است.

کارول و هولت (۱۹۷۲) معادله‌ی ۲۰ را به شرح معادله‌ی ۲۴ اصلاح کرده‌اند: [۱۵]

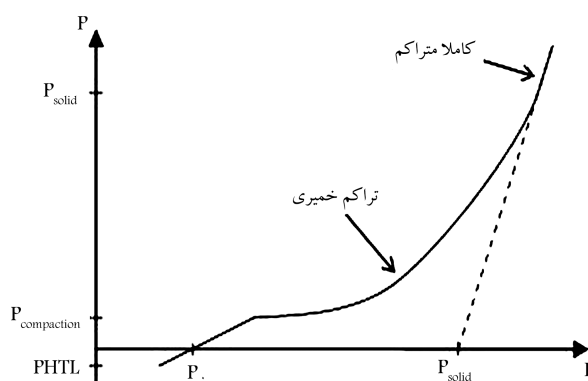
$$p = \left(\frac{1}{\alpha}\right) f\left(\frac{V}{\alpha}, e\right) \quad (۲۴)$$

عامل $\frac{1}{\alpha}$ به این دلیل اعمال شده است که فشار در مصالح متخلخل در زمان‌های کوتاه نزدیک به $\frac{1}{\alpha}$ برابر متوسط فشار در ماتریس مصالح است. این شکل از مدل، در اتوداین استفاده می‌شود. [۱۵]

در مدل مصالح RHT معادله‌ی حالت $P - \alpha$ به کار می‌رود که رابطه‌ی آن به صورت شکل عمومی در معادله‌ی ۲۵ برای تشریح تغییرات حالت بتن به کار برده شده است. ضریب تخلخل موجود α مطابق رابطه‌ی ۲۸ وابسته به عوامل



شکل ۶. تغییرات فشار و ضریب تخلخل در معادله‌ی حالت $(P - \alpha)$. [۱۵]



شکل ۵. معادله‌ی حالت بتن. [۱۳]

جدول ۴. مقادیر معادله‌ی حالت $P - \alpha$.

عنوان	نماد	واحد	لیپان	۳۵ Mpa	۱۴۰ Mpa
چگالی مرجع	ρ_0	g/cm ^۳	۲٫۷۵	۲٫۷۵	۲٫۷۵
چگالی متخلخل	—	g/cm ^۳	۲٫۴	۲٫۳۱۴	۲٫۵۲
سرعت صوت در حالت متخلخل	—	m/s	۲۹۲۰	۲۹۲۰	۳۲۴۲
فشار تراکم اولیه	—	kPa	$۲٫۳۳ \times 10^۴$	$۲٫۳۳ \times 10^۴$	$۹٫۳۳ \times 10^۴$
فشار تراکم جامد	—	kPa	۶×10^۶	۶×10^۶	۶×10^۶
توان تراکم	—	—	۳	۳	۳
معادله حالت جامد	—	—	چند جمله‌یی	چند جمله‌یی	چند جمله‌یی
مدول کششی	A_1	kPa	$۳٫۵۲۷ \times 10^۷$	$۳٫۵۲۷ \times 10^۷$	$۳٫۵۲۷ \times 10^۷$
پارامتر A_2	A_2	kPa	$۳٫۹۵۸ \times 10^۷$	$۳٫۹۵۸ \times 10^۷$	$۳٫۹۵۸ \times 10^۷$
پارامتر A_3	A_3	kPa	$۹٫۰۴ \times 10^۶$	$۹٫۰۴ \times 10^۶$	$۹٫۰۴ \times 10^۶$
پارامتر B_0	B_0	—	۱٫۲۲	۱٫۲۲	۱٫۲۲
پارامتر B_1	B_1	—	۱٫۲۲	۱٫۲۲	۱٫۲۲
پارامتر T_1	T_1	kPa	$۳٫۵۲۷ \times 10^۷$	$۳٫۵۲۷ \times 10^۷$	$۳٫۵۲۷ \times 10^۷$
پارامتر T_2	T_2	kPa	۰	۰	۰
دمای مرجع	—	k	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
حرارت ویژه	—	J/kgk	۶۵۴	۶۵۴	۶۵۴

تخلخل خسارت‌نیده‌ی بتن α_{porous} ، فشار هیدرواستاتیکی p و ضریب شکل n U_p (در ادامه) و سرعت شوک U وجود دارد که در رابطه‌ی ۲۹ ارائه شده است: [۱۵]

$$U = C_0 + SU_P \quad (29)$$

در این رابطه، C_0 سرعت صوت اولیه و S آنتروپی ویژه است. بیشینه‌ی چگالی به اِزاء $\rho = s\rho_0(s-1)$ حاصل می‌شود. در شوک‌های شدید مقاومت تقریباً به‌صورت غیرخطی است، که این امر در غیرفلزات مشهود است. به‌علاوه فرض تغییر خطی بین سرعت شوک و سرعت ذرات مانع تراکم‌های خیلی شدید نمی‌شود.

در معادله‌ی ۲۹، رابطه‌ی بین سرعت ذرات و سرعت شوک به‌صورت خطی است، ولی می‌توان به‌صورت اختیاری رابطه‌ی بین سرعت شوک و سرعت ذرات را از حالت درجه‌ی دوم انتخاب کرد، که شکل درجه‌ی دوم معادله‌ی شوک به‌صورت معادله‌ی ۳۰ است: [۱۵]

$$U_s = C_0 + S_1 u_P + S_2 u_P^2 \quad (30)$$

پارامترورودی S_2 می‌تواند یک مقدار غیر صفر باشد، تا به‌صورت مناسب و غیرخطی مقادیر U_p و U_s را به یکدیگر تبدیل کند. در جدول ۵، مقادیر مختلف معادله‌ی

جدول ۵. مقادیر معادله‌ی حالت شوک پرتابه. [۱۱]

عنوان	نماد	واحد	مقادیر
چگالی مرجع	ρ_0	g/cm ^۳	۷٫۷۵
ضریب گروانیزم	—	—	۲٫۱۷
سرعت صوت	C_1	m/s	۴۵۶۹
آنتروپی ویژه	S_1	—	۱٫۴۹
دمای مرجع	—	k	۳۰۰
حرارت ویژه	—	J/kgk	۴۷۷

$$p = \frac{1}{\alpha} f(\alpha, \rho, e) \quad (25)$$

$$f(p, e) = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e \quad (26)$$

$$\mu = \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (27)$$

$$\alpha = 1 + (\alpha_{porous} - 1) \left[\frac{p_{solid} - p}{p_{solid} - p_{compaction}} \right]^n \quad (28)$$

که در آن، μ ضریب تراکم، e انرژی مخصوص داخلی، ρ_0 چگالی اولیه، ضریب عددی A_1, A_2, A_3, B_0 و B_1 ثابت‌های عددی معادله‌ی حالت هستند، که کاربر آنها را تعیین می‌کند.

در جدول ۴، مقادیر مختلف معادله‌ی حالت $P - \alpha$ برای بتن با مقاومت‌های فشاری ۳۵ و ۱۴۰ مگاپاسکال، که در پیش‌فرض نرم‌افزار وجود دارد، [۱۵] و نیز مقادیر پیشنهادی لیپان بتن با مقاومت فشاری ۳۳٫۸ مگاپاسکال ارائه شده است. [۱]

۲.۳.۲. معالیه‌ی حالت فولاد (معادله‌ی حالت شوک)

معادله‌ی حالتی که در شبیه‌سازی مسائل ضربه‌یی برای پرتابه به‌کار می‌رود، معادله‌ی حالت شوک است. طی تحقیقات برخی پژوهشگران، این معادله‌ی حالت، نتایج مناسبی در شبیه‌سازی پرتابه داشته است. در این معادله‌ی حالت برای شرایط شوک می‌توان رابطه‌ی ریاضی بین هر یک از متغیرهای چگالی (ρ)، فشار هیدرواستاتیکی (p)، انرژی داخلی اولیه (e)، سرعت ذرات مصالح که شوک را دنبال می‌کنند U_P و سرعت شوک (U) برقرار کرد. طی پژوهش‌هایی که توسط آزمایش‌های تجربی دینامیکی انجام شده مشخص شده است که برای بیشتر جامدات و مایعات در محدوده‌ی وسیعی از فشار اعمال‌شده یک رابطه‌ی دو متغیر سرعت ذرات شوک

حالت شوک برای فولادی که هانسون برای شبیه‌سازی پرتابه به‌کار برده است،^[۱۱] ارائه شده است.

۴.۲. مدل فرسایش

مدل فرسایش نسبت به معادله‌ی حالت و مدل‌های مقاومت و شکست کاربرد کمتری دارد و معمولاً در حل‌های لاگرانژی به کار می‌رود و نحوه‌ی فرسایش المان‌ها را در روند تحلیل، کنترل و تعیین می‌کند.^[۱۱] اگر مقادیر پاسخ المان‌ها از این حد از پیش تعریف‌شده بیشتر شود، آن المان فرسوده فرض می‌شود. یکی از حالات کرنش هندسی لحظه‌ی یا کرنش هندسی افزایشی و یا کرنش مؤثر خمیری برای این حدود از پیش تعریف‌شده در نظر گرفته می‌شود. معمولاً برای فرسایش نوع کرنش هندسی لحظه‌ی، عددی بین ۱/۵ الی ۲ در نظر گرفته می‌شود.

۳. بررسی پارامتریک مدل RHT

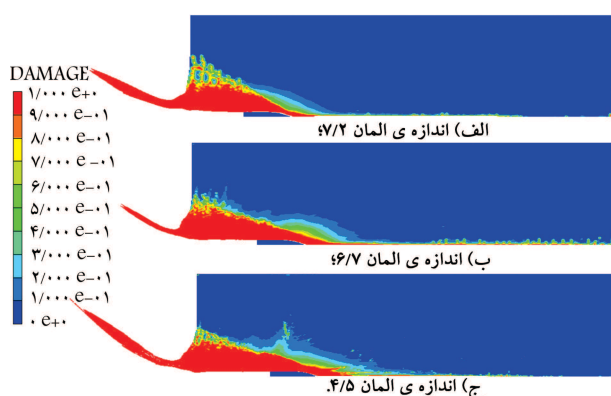
در مسائل بارگذاری ضربه‌یی، مهم‌ترین موارد مقدار نفوذ و خسارت ایجادشده است، که ۲ عامل عمق نفوذ و قطر حفره‌ی نفوذی ایجادشده (ابعاد قلوه‌کنی) قابل اهمیت هستند. با توجه به ویژگی‌های ارائه‌شده برای مدل RHT در بندهای پیشین، موارد مؤثر در این ۲ عامل که بالغ بر ۱۳ پارامتر شامل: شبکه‌بندی، مقاومت پسماند، توان مقاومت شکست، توان نرخ کرنش کششی، توان نرخ کرنش فشاری، ثابت سطح شکست سالم، توان سطح شکست سالم، معیار فرسایش، خطای انرژی، اصطکاک، سرعت پرتابه، شکل پرتابه، وزن مخصوص پرتابه هستند، در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این بخش از نتایج آزمایش‌های تجربی هانسون (۱۹۹۸)، جهت مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج واقعی آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مشخصات و نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به اینکه مدل آزمایشگاهی هدف به‌صورت استوانه‌یی است، لذا می‌توان این آزمایش را به‌صورت دوبعدی و تقارن محوری شبیه‌سازی کرد. علت این تصمیم صرف زمان محاسباتی کمتر و دقت کافی این نوع از شبیه‌سازی است.

۱.۳. شبکه‌بندی

ابعاد شبکه‌ی المان محدود مسئله هم در زمان و هم در دقت تحلیل و نیز در چگونگی ایجاد و گسترش خسارت تأثیر به‌سزایی دارد. براساس پژوهش‌های انجام شده در سال ۲۰۰۸،^[۱۳] مشخص شده است که برای پرتابه‌یی که به هدف بتنی برخورد می‌کند، دست‌کم باید ۳ المان در طول شعاع پرتابه در نظر گرفته شود، تا شبیه‌سازی دقت مناسبی داشته باشد. با توجه به محدودیت اندازه‌ی المان‌ها در شعاع پرتابه و نیز رعایت هم‌گرایی در طی روند تحلیل، شبکه‌بندی‌هایی با ابعاد مختلف ۴/۵، ۶/۷ و ۷/۲ میلی‌متر جهت شبیه‌سازی آزمایش هانسون به‌کار گرفته شده است. نتایج حاصل از انجام تحلیل برای اندازه‌های عنوان‌شده، در شکل ۷ ارائه شده است. با کوچک‌تر شدن ابعاد المان‌ها زمان تحلیل شدیداً افزایش و عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد. با توجه به تحلیل‌های صورت‌گرفته واضح است که دقت این مدل بسیار وابسته به اندازه‌ی شبکه‌ی المان است و لذا برای حصول به نتایج دقیق، نیاز به بررسی پارامتریک اندازه‌ی شبکه‌ی المان محدود و تعیین اندازه‌ی مناسب است.

جدول ۶. مشخصات آزمایش‌های تجربی.^[۱۰]

عنوان	واحد	مقادیر و مشخصات
مشخصات هدف		
جنس	—	بتن
شکل	—	استوانه‌یی
طول	m	۲
قطر	m	۱/۶
چگالی	kg/m ^۳	۲۴۰۰
مقاومت فشاری f_c	MPa	۳۲
پیشینه‌ی اندازه‌ی سنگدانه	m	۰/۰۳
مشخصات پرتابه		
جنس	—	فولاد
شکل	—	اجایو
طول	m	۰/۲۲۵
قطر	m	۰/۰۷۵
سرعت برخورد V_i	m/s	۴۸۵
جرم M	kg	۶/۲۸
طول دماغه h	m	۰/۰۹
ضریب شکل دماغه N	—	۱/۱۴
شعاع قوس دماغه R	m	۰/۲۸
تنش جاری‌شدن	MPa	۷۹۲
عمق نفوذ x	m	۰/۶۵۵
وضعیت هدف	—	فقط نفوذ
وضعیت پرتابه (سرعت خروجی)	m/s	۰ (درهدف مانده)



شکل ۷. تأثیر اندازه‌ی المان‌ها در نتایج تحلیل.

۲.۳. ثابت مقاومت پسماند (شکسته)

ثابت مقاومت پسماند به مقاومتی اطلاق می‌شود، که بعد از نفوذ پرتابه و لهیده‌شدن بتن بر اثر فشار پرتابه، از بتن لهیده‌شده انتظار می‌رود. مقاومت پسماند در حالت تنش تک محوری صفر است، ولی در حالت بارگذاری چندمحوری سازه‌های واقعی بتن لهیده‌شده، در مقاومت کلی بتن تأثیرگذار است. در طی نفوذ پرتابه‌ی بتن لهیده‌شده در جهات طولی و پیرامونی در اثر نیروی فشاری حاصل از عبور پرتابه به جلو و موج ایجادشده‌ی آن در سازه متراکم می‌شود و بدین‌گونه بتن لهیده‌شده، که خود باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود، در مقاومت کلی تأثیرگذار است. این عامل به‌وسیله‌ی پارامترهای B و M (توان مقاومت شکست) تأثیرگذار هستند، که هر دو ثابت‌های

از حالت صاف خارج می‌شود و یک حالت حفره‌ی در انتهای تونل نفوذ به وجود می‌آید که تمامی موارد فوق حاکی از این است که این عامل یک جاذب انرژی است.

۴.۳. توان نرخ کرنش کششی

این عامل در نرم‌افزار اتوداین با نماد δ نمایش داده می‌شود. بتن در بارگذاری ضربه‌ی تحت تأثیر نرخ کرنش، افزایش مقاومت کششی و فشاری خواهد داشت. در هنگام نفوذ پرتابه به عمق بتن در امتداد طولی و پیرامونی (شعاعی) ناحیه‌ی نفوذ، بتن فشرده می‌شود که در اثر آن در ناحیه‌ی شعاعی یک حلقه‌ی کششی در اطراف پرتابه ایجاد می‌شود. در مدل RHT افزایش مقاومت کششی متأثر از نرخ کرنش، شبیه افزایش در سطح تسلیم شده است، که به وسیله‌ی ضریب F_{RATE} محاسبه می‌شود. این افزایش به نرخ کرنش مصالح و پارامتر δ وابسته است (رابطه‌ی ۳)، که بر اثر تغییرات مقادیر δ عمق و قطر دهانه‌ی ایجاد شده در اثر نفوذ و نیز تعداد و آمایش ترک‌ها تغییر می‌کند (شکل ۱۰). با افزایش مقدار این پارامتر، مقدار ضریب نرخ کرنش بیشتر می‌شود و لذا مقاومت بتن نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه از مقدار عمق نفوذ و نیز تعداد ترک و قطر حفره‌ی نفوذی کاسته و با افزایش مقدار δ زمان نفوذ نیز کاسته می‌شود.

۵.۳. توان نرخ کرنش فشاری

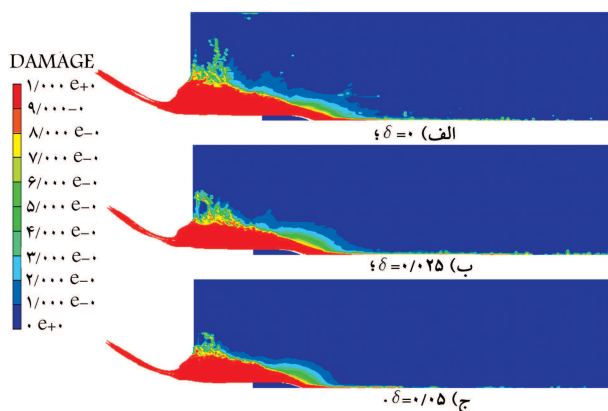
برای بررسی این پارامتر با توجه به مقادیر پیش فرض مدل، مقادیر ۱۲، ۰/۳۲ و ۰/۵۲ در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که از شکل ۱۱ مشهود است، با افزایش

عددی هستند و بیشترین تأثیر را مقادیر ثابت مقاومت پسماند B خواهند داشت (رابطه‌ی ۶). ترکیبی از مقادیر مقاومت پسماند و معیار فرسایش، بیشینه‌ی جذب انرژی بالاتری را نسبت به ترکیب مقادیر مقاومت پسماند و معیار فرسایش کمینه خواهند داشت.^[۱] با تغییر دادن مقادیر آنها می‌توان تأثیر مقاومت پسماند، که منتج به جذب انرژی بتن می‌شود، را در مقاومت کلی آن تأثیر داد.

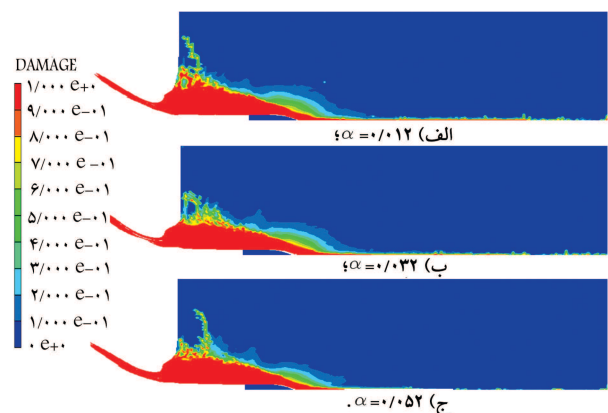
طی بررسی‌های انجام شده، ۳ شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف مقاومت پسماند به قرار ۱/۲، ۱/۵ و ۱/۷ انجام گرفت. از نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در شکل ۸ مشهود است که با افزایش مقدار B مستقیماً مقدار نفوذ کاهش می‌یابد. مشخص است که افزایش این عامل، اثرات کاهنده‌ی در قطر دهانه و نیز تعداد و طول ترک‌ها خواهد داشت، که این موارد نشان‌دهنده‌ی جاذب انرژی بودن این پارامتر است.

۳.۳. توان مقاومت پسماند (شکستگی)

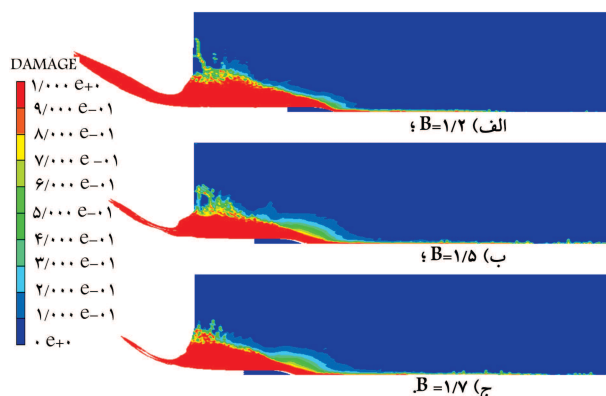
این پارامتر یکی از عوامل مؤثر در عملکرد مدل مقاومتی RHT است، که عملکرد مشابهی با پارامتر ثابت مقاومت پسماند دارد، که در نرم‌افزار اتوداین با M علامت‌گذاری شده است. برای بررسی آن ۳ مقدار ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است و این مقادیر براساس مقدار پیش فرض ارائه شده در نرم‌افزار اتوداین، که ۰/۶۱ و مقدار ارائه شده توسط لیانن و همکاران او که مقدار ۰/۷ است، در نظر گرفته شده است. از شکل ۹ استنباط می‌شود که مقدار توان مقاومت شکست، تأثیر عمده‌ی در ابعاد خسارت ایجاد شده دارد. با افزایش این پارامتر ابعاد خسارت کاهش خواهد داشت و نیز تونل نفوذ هم متأثر از این مقدار است به گونه‌ی که با افزایش این مقدار تونل نفوذ



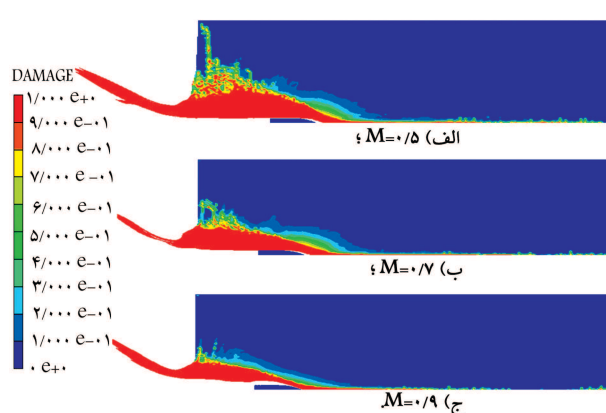
شکل ۱۰. تأثیر مقادیر توان نرخ کرنش کششی در نتایج تحلیل.



شکل ۱۱. تأثیر مقادیر توان نرخ کرنش فشاری در نتایج تحلیل.



شکل ۸. تأثیر مقادیر ثابت مقاومت پسماند در نتایج تحلیل.



شکل ۹. تأثیر مقادیر توان مقاومت پسماند در نتایج تحلیل.

۸.۳. معیار فرسایش

زمانی که در شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌یی روش لاگرانژی به‌کار گرفته می‌شود، برای جلوگیری از نتایج غیرفیزیکی نادرست باید از یک روش فرسایش استفاده شود؛ زیرا که توسط حذف المان‌ها در طی فرایند تحلیل جرم، انرژی و کرنش از سیستم پاک می‌شود و لذا نتایج نادرستی حاصل خواهد شد. این امر استفاده از یک روش فرسایش را اجباری می‌کند.^[۱] طی پژوهش‌های انجام‌شده ملاحظه شده است که مقادیر در نظر گرفته‌شده برای فرسایش تأثیر به‌سزایی در قطر دهانه‌ی ایجادشده و آمایش ترک‌ها و مخصوصاً در عمق نفوذ دارند. با افزایش مقدار فرسایش جذب انرژی بیشتر می‌شود و دهانه‌ی ایجادشده و تعداد ترک‌ها کمتر می‌شود و عمق نفوذ نیز شدیداً کاهش می‌یابد (شکل ۱۴). در تحلیل‌های حاضر، معیار فرسایش کرنش هندسی لحظه‌یی است و مقادیر آن ۱/۲، ۱/۵ و ۱/۸ در نظر گرفته شده است.

۹.۳. خطای انرژی

این عامل یکی از موارد کنترل‌کننده در انجام تحلیل‌های غیرخطی است. در مواردی که از روش اولبری، SPH^۴ یا ALE^۵ استفاده می‌شود، نسبت به روش لاگرانژی، به دلیل نبودن یک روش فرسایش، مقدار خطای انرژی محسوس‌تر خواهد بود و لذا در شرایط یکسان باید عدد مناسبی در نظر گرفته شود تا نتیجه‌ی مناسب حاصل شود.^[۱۱] جهت بررسی این عامل، ۳ مقدار ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ در نظر گرفته شده است، که طبق پیش‌فرض اتوداین که عدد ۰/۰۵ است، این ارقام در نظر گرفته شده‌اند. براساس نتایج و شکل ۱۵ مشخص است که این عامل در ابعاد خسارت و

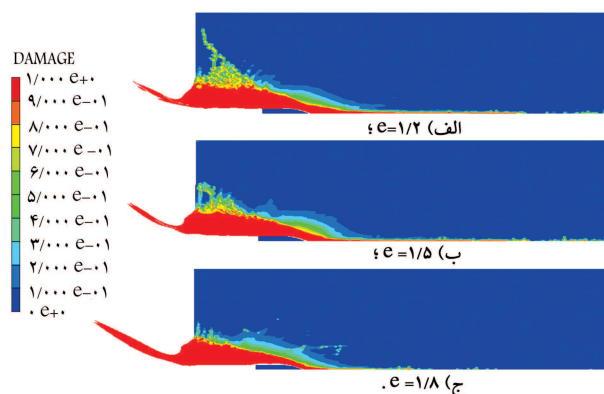
مقدار این پارامتر، ابعاد خسارت و عمق نفوذ نیز کاهش می‌یابد. این عامل در نرم‌افزار اتوداین با α علامت‌گذاری شده است. با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی این دو عامل ملاحظه می‌شود که عامل توان نرخ کرنش کششی تأثیرگذارتر و مهم‌تر از عامل توان نرخ کرنش فشاری است، که دلیل آن تأثیرگذار بودن عامل مقاومت کششی در مسائل نفوذ پرتابه‌ها نسبت به مقاومت فشاری است.

۶.۳. ثابت سطح شکستگی سالم

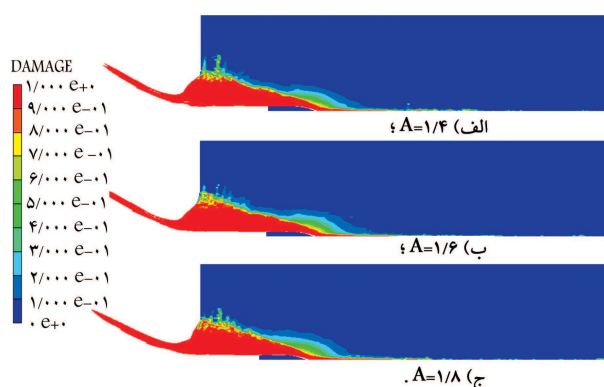
برای بررسی این پارامتر با توجه به مقادیر پیش‌فرض مدل ($A = 1/6$) مقدار ۱/۴، ۱/۶ و ۱/۸ در نظر گرفته شده است. با افزایش مقادیر این پارامتر ابعاد خسارت کاهش داشته است (شکل ۱۲).

۷.۳. توان سطح شکست سالم

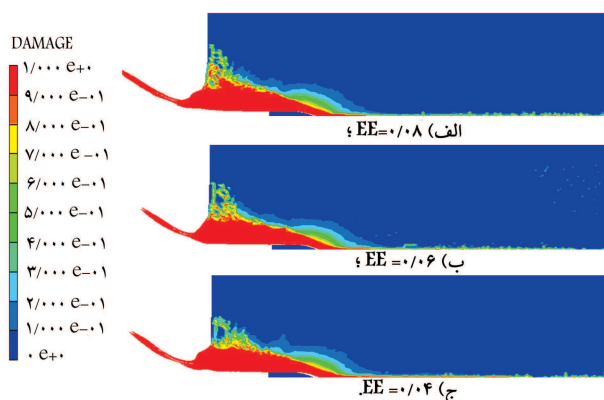
برای بررسی آن با توجه به مقادیر پیش‌فرض مدل ($N = 0/61$)، مقدار ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است و مقدار استفاده‌شده توسط لیپان و همکاران ۰/۷ است. مشخص است که مقدار توان سطح شکست سالم تأثیر خاصی در ابعاد خسارت ایجادشده دارد. هرگاه مقدار این پارامتر افزایش داده شود، ابعاد خسارت و عمق نفوذ کاهش می‌یابد. تونل نفوذ متأثر از این عامل نیست، اما این عامل تأثیرات محسوسی در چگونگی ایجاد ترک دارد (شکل ۱۳).



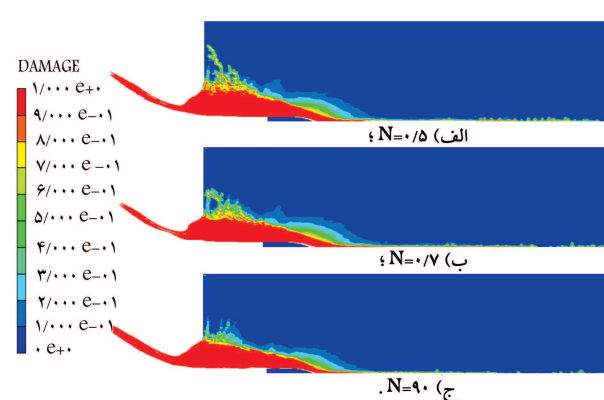
شکل ۱۴. تأثیر مقادیر معیار فرسایش در نتایج تحلیل.



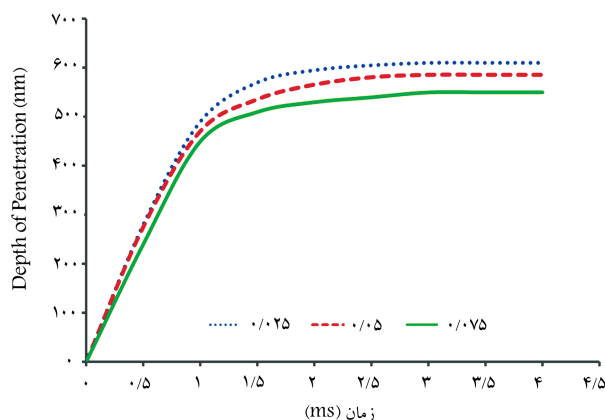
شکل ۱۲. تأثیر مقادیر ثابت سطح شکستگی سالم در نتایج تحلیل.



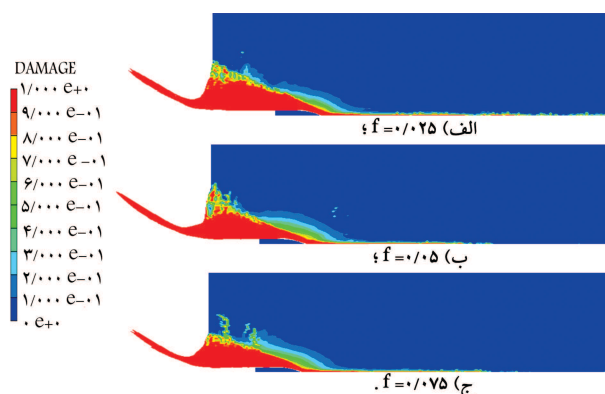
شکل ۱۵. تأثیر مقادیر انرژی خطا در نتایج تحلیل.



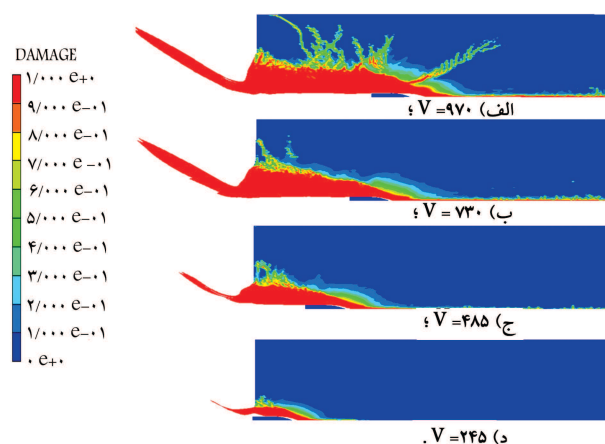
شکل ۱۳. تأثیر مقادیر توان سطح شکستگی سالم در نتایج تحلیل.



شکل ۱۷. تاریخیچه‌ی زمانی عمق نفوذ برای مقادیر مختلف پارامتر اصطکاک (f).



شکل ۱۸. تأثیر مقادیر اصطکاک در نتایج تحلیل.



شکل ۱۹. تأثیر مقادیر سرعت در نتایج تحلیل.

نفوذ بیشتر ولی ابعاد خسارت کمتر خواهد شد. این نتایج، حاصل شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای ۶ پرتابه‌ی میله‌یی با شکل‌های مختلف نوک پرتابه است. طی نتایج شبیه‌سازی‌هایی که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ ارائه شده است، ۳ پرتابه‌ی لوله‌یی شکل با مقاومت مختلف یعنی یکی تغییرشکل‌پذیر و دو پرتابه‌ی دیگر کاملاً صلب شبیه‌سازی شده است، که یکی از این دو با نوک تیز و دیگری با نوک تخت در نظر گرفته شده است. در پرتابه‌ی تغییرشکل‌پذیر مشخص است که وقتی پرتابه تغییرشکل می‌دهد، نفوذ آن کمتر و ابعاد خسارت ایجادشده هم کمتر می‌شود. در پرتابه‌ی



قبل از استفاده در آزمایش

بعد از استفاده در آزمایش

شکل ۱۶. تأثیر اصطکاک در پرتابه. [۱۱]

عمق نفوذ تأثیرگذار است، به‌گونه‌یی که در عمق نفوذ تأثیر جزئی دارد، ولی در ایجاد ترک و گسترش آن تأثیر عمده‌یی دارد.

۱۰.۳. اصطکاک

این عامل یکی از پارامترهای اندرکنش بین اجسام است. در شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌یی پرتابه در بتن با توجه به آزمایش‌های تجربی انجام‌شده و مشاهدات به‌دست‌آمده که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، آثاری حاکی از وجود اصطکاک بین بتن و پرتابه وجود دارد و لذا باید عامل اصطکاک برای رسیدن به نتایج مناسب و منطبق با واقعیت در نظر گرفته شود. طی شبیه‌سازی‌هایی که توسط برخی پژوهشگران انجام شده است، [۱۱، ۱۰، ۱] توصیه‌ی خاصی به در نظر گرفتن پارامتر اصطکاک صورت نگرفته است، اما از شواهد به نظر می‌رسد که این عامل نیز در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی انجام‌شده در پژوهش هانسون، [۱۱] زمانی که مقادیری مناسبی از اصطکاک در نظر گرفته شده است، نتایج شبیه‌سازی به نتایج آزمایش‌های تجربی نزدیک‌تر شده است.

جهت بررسی این عامل، ۳ مقدار ۰.۰۲۵، ۰.۰۵ و ۰.۰۷۵ در نظر گرفته شده است. براساس نتایجی که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است، مشخص می‌شود که این عامل در ابعاد خسارت و عمق نفوذ تأثیرگذار است، به‌گونه‌یی که در محدوده‌ی مناسب با افزایش مقادیر آن عمق نفوذ کاهش خواهد داشت.

۱۱.۳. سرعت پرتابه

واضح است که با افزایش سرعت، انرژی پرتابه افزایش و متقابلاً مقدار عمق نفوذ، قطر حفره‌ی ایجادشده و نیز تعداد ترک‌ها و عمق آنها نیز افزایش می‌یابد. براساس نتایج و شکل ۱۹ مشخص است که این عامل نه فقط در ابعاد خسارت و عمق نفوذ تأثیر به‌سزایی دارد، بلکه مطابق این شکل، ترک‌ها و نحوه‌ی آمایش آنها نیز به مقادیر سرعت بستگی دارد، به نحوی که با افزایش سرعت تعداد ترک‌ها و عمق و محل قرارگیری آنها و مقدار تأثیر در انتهای راستای نفوذ افزایش می‌یابد و نیز شکل تونل نفوذ در سرعت‌های پایین به‌صورت موجی شکل است، ولی در سرعت‌های بالاتر به‌صورت صاف و هموار است.

۱۲.۳. شکل پرتابه

شکل هندسی پرتابه، مخصوصاً شکل قسمت نفوذی، عامل بسیار مهمی در فرآیند نفوذ است، به‌گونه‌یی که هر چقدر شکل پرتابه به حالت نوک‌تیز نزدیک‌تر باشد،

۴. شبیه‌سازی نمونه‌ی آزمایش تجربی با مدل

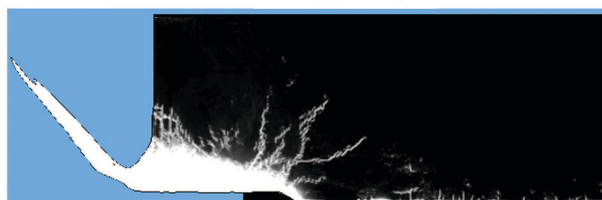
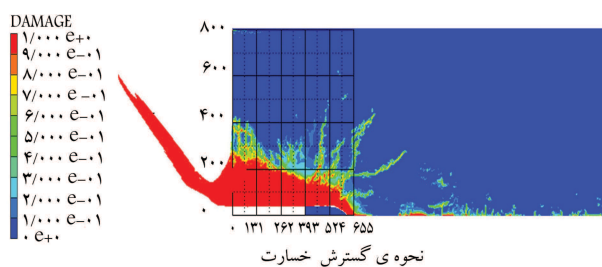
واسنجی شده

بعد از بررسی تأثیرات پارامترهای مؤثر مدل RHT طی شبیه‌سازی دو بعدی، شبیه‌سازی یک آزمایش تجربی که در سال ۱۹۹۸ انجام شده است، جهت محک‌کاری این مدل مد نظر قرار گرفته است. اطلاعات این آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است. در این شبیه‌سازی از جزئیات و مشخصات حقیقی که در جدول مذکور عنوان شده استفاده شده است. هدف از این شبیه‌سازی رسیدن به عمق نفوذی در حدود ۶۵۵ میلی‌متری و قطر دهانه‌ی ایجادشده (قلوه‌کنی) در حدود ۸۰ میلی‌متر است. از آنجایی که گلوله به وسط هدف اصابت کرده است، می‌توان نمونه را به صورت متقارن محوری شبیه‌سازی کرد که شبیه‌سازی مدل هندسی به صورت قرینه‌ی دوبعدی انجام شده است. لذا نتایجی برای قلوه‌کنی در حدود ۴۰ میلی‌متر و عمق نفوذی در حدود ۶۵۵ میلی‌متر مطابق با نتیجه‌ی آزمایشگاهی خواهد بود.

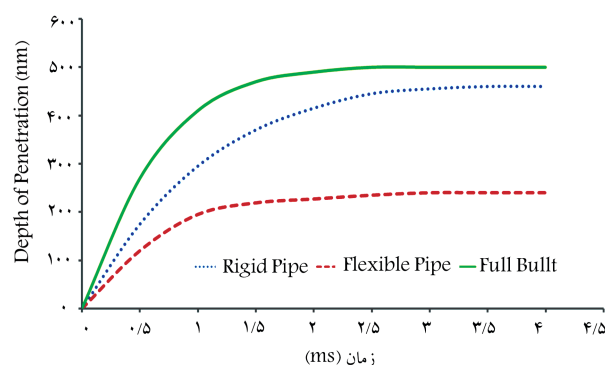
طی شبیه‌سازی‌هایی که پژوهشگرانی چون لیان، نیستروم و ژنگو انجام داده‌اند، در بهترین شرایط نتایج جدول ۷ گزارش شده است.

جدول ۷. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی برخی پژوهشگران.

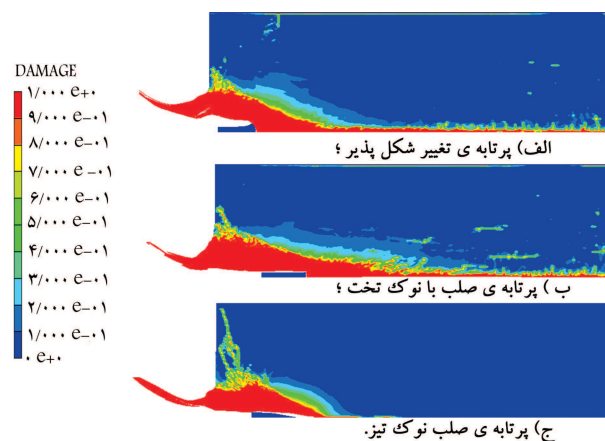
مرجع	سال	عمق نفوذ (m)	دهانه‌ی ایجادشده (m)
آزمایش تجربی [۱۰]	۱۹۹۸	۰/۶۵۵	۰/۸
[۱]	۲۰۰۲	۰/۶۲۷	—
[۱۲]	۲۰۰۶	۰/۶۵۴	۰/۵۸
		۰/۶۴۳	۰/۷۸
[۹]	۲۰۱۰	۰/۶۲۲	۰/۵۲
		۰/۶۸۵	۰/۷۲
پژوهش حاضر	۲۰۱۱	۰/۶۵۵	۰/۸



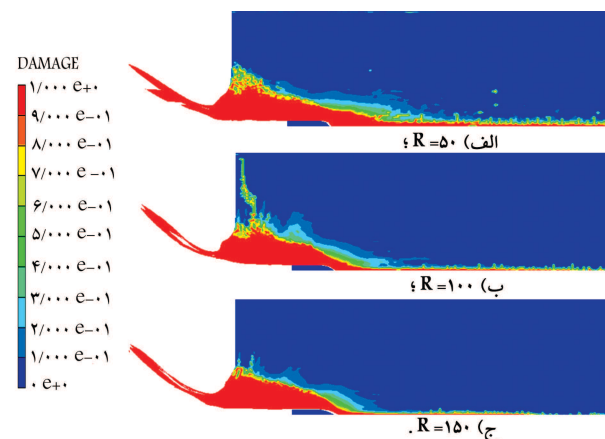
شکل ۲۳. نتیجه‌ی شبیه‌سازی دوبعدی.



شکل ۲۰. تاریخچه‌ی زمانی عمق نفوذ برای شکل‌های مختلف پرتابه.



شکل ۲۱. بررسی عملکرد شکل‌پذیری پرتابه در نتایج تحلیل.



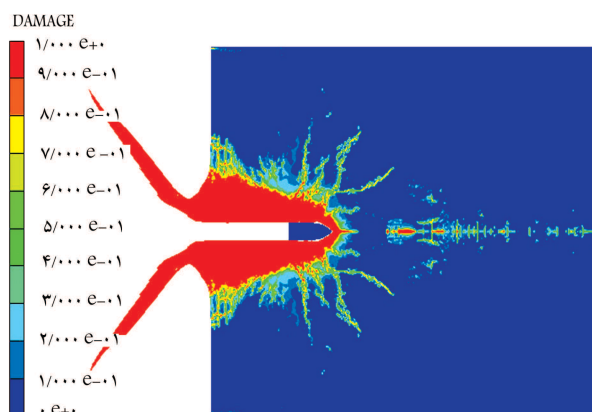
شکل ۲۲. تأثیر مقادیر شعاع نوک پرتابه در ابعاد خسارت.

صلب شبیه‌سازی شده، عمق نفوذ و ابعاد خسارت شدت بیشتری دارد و نیز در پرتابه‌ی کاملاً گلوله‌یی شکل (نوک تیز) ابعاد خسارت کمتر، ولی عمق نفوذ بیشتر شده است.

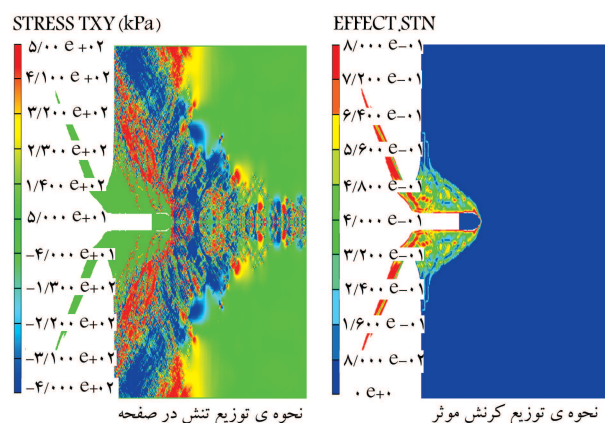
طی شبیه‌سازی دیگری، ۳ شعاع قوس (R) مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر برای نوک پرتابه‌ی اجابوشکل در نظر گرفته شده است، که مطابق شکل ۲۲ با کاهش شعاع قوس نوک پرتابه، ابعاد خسارت بیشتر ولی عمق نفوذ کمتر می‌شود.

جدول ۸. مقادیر معادله‌ی حالت $P - \alpha$.

عنوان	نماد	واحد	مقادیر
چگالی مرجع	ρ_0	g/cm^3	۲/۷۵
چگالی متخلخل	—	g/cm^3	۲/۴
سرعت صوت در حالت متخلخل	—	m/s	۲۹۲۰
فشار تراکم اولیه	—	kPa	$۲/۳۳ e^4$
فشار تراکم جامد	—	kPa	$۶ e^6$
توان تراکم	—	—	۳
معادله‌ی حالت جامد	—	—	Polynomial
مدول کششی	A_1	kPa	$۳/۵۲۷ e^7$
پارامتر A_2	A_2	kPa	$۳/۹۵۸ e^7$
پارامتر A_3	A_3	kPa	$۹/۰۴ e^6$
پارامتر B_0	B_0	—	۱/۲۲
پارامتر B_1	B_1	—	۱/۲۲
پارامتر T_1	T_1	kPa	$۳/۵۲۷ e^7$
پارامتر T_2	T_2	kPa	۰
دمای مرجع	—	k	۳۰۰
حرارت ویژه	—	J/kgk	۶۵۴



شکل ۲۴. شکل کامل شبیه‌سازی دوبعدی.

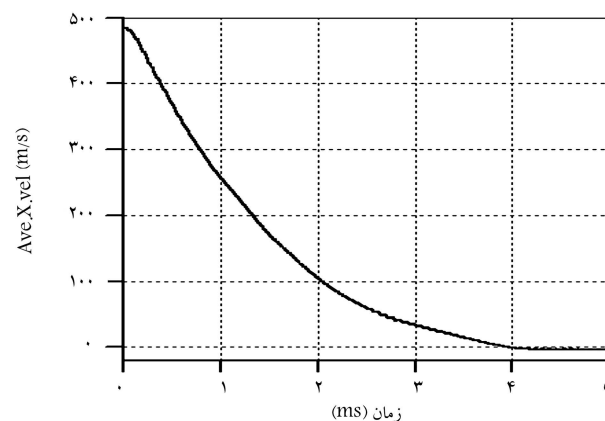


شکل ۲۵. توزیع تنش و کرنش.

به‌کاررفته در مدل مقاومت و مدل شکست RHT، که جهت شبیه‌سازی دوبعدی به‌کار رفته‌اند، ارائه شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده و نیز مقادیر استفاده‌شده می‌توان عنوان کرد که مدل RHT یک مدل کارآمد جهت شبیه‌سازی است.

۵. نتیجه‌گیری

- در این نوشتار، بررسی مدل‌های مناسب برای مدل‌سازی تحلیل برخورد پرتابه‌ی فولادی با هدف بتنی ارائه شده است.
- بعد از بررسی‌های به‌عمل‌آمده، مدل مقاومت جانسون کوک و معادله‌ی حالت شوک جهت مدل‌سازی پرتابه و مدل مقاومت و شکست RHT و معادله‌ی حالت $(P - \alpha)$ برای بتن در نظر گرفته شده است.
- مدل RHT یک مدل رفتاری برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن تحت بارگذاری‌های شدید دینامیکی غیرخطی همچون ضربه و انفجار است. مدل جانسون - کوک، مدل مقاومت برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی فلزات تحت اثر نرخ کرنش‌های بزرگ و حرارت شدید است.
- بررسی پارامتریک مدل RHT و جوانب مرتبط تحلیل پدیده‌ی برخورد ارائه‌شده و واسنجی پارامترهای مدل که شامل: شبکه‌بندی، مقاومت پسماند، توان مقاومت



شکل ۲۶. منحنی کاهش سرعت پرتابه.

طی شبیه‌سازی که بعد از بررسی پارامترهای تأثیرگذار انجام شد، نتایج مطلوبی که کاملاً منطبق بر نتایج تجربی بود حاصل شد که در شکل ۲۳ ارائه شده است. شکل کامل شبیه‌سازی دوبعدی انجام‌شده در شکل ۲۴ ارائه شده است. توزیع تنش و کرنش مؤثر در شکل ۲۵ ارائه شده است. منحنی چگونگی کاهش سرعت پرتابه نسبت به زمان نفوذ در شکل ۲۶ ارائه شده است. بعد از ۴ میلی ثانیه، پرتابه در هدف متوقف شده است.

در جدول ۸، مقادیر معادله‌ی حالت پی - آلفا و در جدول‌های ۹ و ۱۰، مقادیر

جدول ۹. مقادیر مدل مقاومت RHT بتن.

عنوان	نماد	واحد	مقادیر
مدول برشی	--	kpa	1.433×10^7
مقاومت فشاری	f_c	kpa	3.38×10^2
مقاومت کششی	$\frac{f_t}{f_c}$	--	۰.۰۷۸
مقاومت برشی	$\frac{f_s}{f_c}$	--	۰.۱۸
ثابت سطح شکست	A	--	۱/۸
توان سطح شکست	N	--	۰.۷
نسبت نصف‌النهار کششی به فشاری	Q	--	۰.۶۸۰۵
ضریب انتقال ترد به شکل‌پذیری	--	--	۰.۱۰۵
نسبت مدول برشی کشسان به مدول برشی کشسان - خمیری	--	--	۲
نسبت مقاومت کشسان به مقاومت کششی	--	--	۰.۷
نسبت مقاومت کشسان به مقاومت فشاری	--	--	۰.۵۳
ثابت مقاومت شکست	B	--	۱/۳
توان مقاومت شکست	M	--	۰.۷۵
توان نرخ کرنش فشاری	α	--	۰.۳۲
توان نرخ کرنش کششی	δ	--	۰.۱
نسبت پیشینه‌ی مقاومت شکست	--	--	1×10^2

جدول ۱۰. مقادیر مدل شکست RHT بتن.

عنوان	نماد	واحد	مقادیر
ثابت خسارت ۱	D_1	--	۰.۰۴
ثابت خسارت ۲	D_2	--	۱
کمینه‌ی کرنش شکست	--	--	۰.۰۱
کسر مدول برشی باقیمانده	--	--	۰.۱۳
مدول گسیختگی کششی	--	--	Hydro

شکست، توان نرخ کرنش کششی، توان نرخ کرنش فشاری، ثابت سطح شکست سالم، توان سطح شکست سالم، معیار فرسایش، خطای انرژی، اصطکاک، سرعت پرتابه و شکل پرتابه است، بررسی شده است.

- با استفاده از پارامترهای واسنجی شده، شبیه‌سازی آزمایش‌های تجربی انجام و مشخص شد که مدل RHT با واسنجی مناسب پارامترها، دقت و کارایی لازم جهت شبیه‌سازی مسائل بارگذاری ضربه‌یی در سازه‌های بتنی را دارد.

پانوشته‌ها

1. AUTODYN
2. Riedel Hiermaier Toma (RHT)
3. Karagozian & Case (K&C)
4. smooth particle hydrodynamics (SPH)
5. arbitrary lagrange euler (ALE)

منابع (References)

1. Leppanen, J. "Dynamic behavior of concrete structures subjected to blast and fragment impacts", Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, 71 p. (2002).
2. Nystrom, U. and Gylltoft, K. "Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading", *International Journal of Impact Engineering*, **36**(8), pp. 995-1005 (2009).
3. Malvar, L.J., Crawford, J.E., Wesevich, J.W. and Simons, D. "A plasticity concrete material model for DYNA3D", *International Journal of Impact Engineering*, **19**(9-10), pp. 847-873 (1997).
4. Gebbeken, N. and Ruppert, M. "A new material model for concrete in high-dynamic hydrocode simulations", *Archive of Applied Mechanics*, **70**(7), pp. 463-478 (2000).
5. Katayama, M., Itoh, M., Tamura, S., Beppu, M. and Ohno, T. "Numerical analysis method for the RC and geological structures subjected to extreme loading by energetic materials", *International Journal of Impact Engineering*, **34**(9), pp. 1546-1561 (2007).
6. Johnson, G.R. "Numerical algorithms and material models for high-velocity impact computations", *International Journal of Impact Engineering*, **38**(6), pp. 456-472 (2011).
7. Islam, J. "Numerical study on concrete penetration/perforation under high velocity impact by ogive-nose steel projectile", *Computers and Concrete*, **8**(1), pp. 111-123 (2011).

8. Zhenguo, T. and Yong, L. "Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations", *International Journal of Impact Engineering*, **36**(1), pp. 132-146 (2009).
9. Zhenguo, T. and Yong, L. "Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete", *International Journal of Impact Engineering*, **37**(10), pp. 1072-1082 (2010).
10. Hansson, H. "Numerical simulation of concrete penetration", FOA Report 98-00816-311-SE., National Defence Research Establishment, Tumba Sweden, 17 p. (1998).
11. Hansson, H. and Skoglund, P. "Simulation of concrete penetration in 2D and 3D with the RHT material model", FOI- R- 0720-SE., Swedish Defence Research Agency, 51 p. (2002).
12. Nystrom, U. and Leppanen, J. "Numerical studies of projectile impacts on reinforced concrete", In: Fan SC, Chua HK, editors, *Proceedings of the Second International Conference on Design and Analysis of Protective Structures*, Singapore, pp. 310-319 (2006).
13. Nystrom, U. "Concrete structures subjected to blast and fragment impacts", Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Goteborg, 148 p. (2008).
14. Borrvall, T. and Riedel, W. "The RHT concrete mode in LS-DYNA", *8th European LS-DYNA Users Conference*, Strasbourg (May 2011).
15. AUTODYN. Autodyn Manual, Version13.0. Century Dynamics Inc, USA (2010).