



روشی سیستماتیک برای تعیین پارامترهای مدل مادی RHT برای بتن به کمک آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

داود لطفی^۱، حسین خدارحمی^{۲*}، علیرضا نداف اسکوئی^۳، سید محمدوهاب موسوی^۴ و توحید میرزابابایی مستوفی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

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

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

^۴ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

^۵ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

چکیده

این مقاله یک روش سیستماتیک و جامع برای تعیین، کالیبراسیون و اعتبارسنجی پارامترهای مدل رفتاری RHT برای بتن ارائه می‌دهد. روش پیشنهادی مبتنی بر تلفیق داده‌های تجربی گسترده شامل آزمایش‌های فشاری تک‌محوره، سه‌محوره، برزیلی و دینامیکی با شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته در نرم‌افزار ال اس داینا توسعه یافته است. پارامترهای کلیدی مدل، به‌ویژه پارامترهای آسیب نظیر D_1 ، D_2 و EPM که تعیین تحلیلی آنها بسیار چالش‌برانگیز است، از طریق یک فرآیند کالیبراسیون تکراری و سیستماتیک بهینه‌سازی شدند. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با استفاده از حل گر لاگرانژی، با المان‌های مکعبی و مدل رفتاری RHT با پارامترهای بدست آمده انجام شد. اختلاف نتایج حاصل از آزمون‌ها و شبیه‌سازی‌ها نشان داد که همبستگی خوبی بین آن‌ها وجود دارد بطوریکه اختلاف نتایج در آزمون فشاری تک‌محوره برای منحنی تنش-کرنش محوری و جانبی به ترتیب زیر ۳ درصد و ۷ درصد، در آزمون فشاری سه‌محوره حدود ۱۰ درصد و آزمون کششی برزیلی ۳/۲۶ درصد است.

کلمات کلیدی: مدل مادی RHT؛ بتن؛ کالیبراسیون؛ شبیه‌سازی عددی؛ اعتبارسنجی.

A systematic method for determining RHT material model parameters for concrete using experimental tests and numerical simulations

Davood Lotfi¹, Hossein Khodarahmi^{2,*}, Ali Reza Naddaf Oskouei³, Syed Mohammad Vahab Mousavi³
Tohid Mirzababaei Mostofi⁵

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

⁴ Assist. Prof., Mech. Eng., Ivanki Univ., Tehran, Iran.

Abstract

This study presents a systematic and comprehensive method for determining, calibrating, and validating the parameters of the RHT material model for concrete. The proposed method is based on the integration of extensive experimental data including uniaxial, triaxial, Brazilian, and dynamic compression tests with advanced numerical simulations developed in LS-DYNA software. Key model parameters, especially damage parameters such as D_1 , D_2 , and EPM, which are very challenging to determine analytically, were optimized through an iterative and systematic calibration process. The simulations were performed using the Lagrangian solver, with cubic elements and the RHT behavioral model with the obtained parameters. The difference in the results from the tests and simulations showed that there is a good correlation between them, such that the difference in the results in the uniaxial compression test for the axial and lateral stress-strain curves was below 3% and 7%, respectively, in the triaxial compression test it was about 10%, and in the Brazilian tensile test it was 3.26%.

Keywords: RHT material model; Concrete; Calibration; Numerical Simulation; Validation.

۱- مقدمه

بتن به عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی، دارای رفتار مکانیکی پیچیده‌ای تحت بارگذاری‌های مختلف است. درک دقیق رفتار غیرخطی بتن تحت چنین بارگذاری‌هایی برای طراحی ایمن سازه‌ها در برابر انفجار، ضربه و نفوذ لازم است. این رفتار غیرخطی ناشی از عوامل متعددی همچون ناهمگونی ساختار، تشکیل ترک‌های ریز، اثرات نرخ کرنش و آسیب‌پذیری پیش‌رونده است. مدل‌های رفتاری بتن، رابطه بین تنش و کرنش، آسیب‌پذیری، ترک‌خوردگی و گسیختگی را توصیف می‌کنند. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در توسعه مدل‌های رفتاری بتن صورت گرفته است، از مدل‌های کلاسیک مانند مدل الاستوپلاستیک تا مدل‌های پیشرفته مبتنی بر آسیب^۱ و ریزساختار^۲. با این حال چالش اصلی، تعیین پارامترهای صحیح برای این مدل‌هاست که معمولاً از آزمایش‌های تجربی، روش‌های عددی یا ترکیبی از هر دو به دست می‌آیند. عوامل مختلفی از جمله مشخصات مصالح، شرایط محیطی و نوع بارگذاری بر این پارامترها تأثیر می‌گذارند. برای مدل‌سازی دقیق رفتار مواد، مصالح و سازه‌های مهندسی، به مدل‌های دقیق و صحیح در بازه گسترده‌ای از نرخ کرنش‌ها نیاز است [۱]. به همین منظور مدلی برای مواد ترد و نیمه ترد نظیر سنگ، بتن و سرامیک توسعه یافته‌اند.

در سال ۱۹۹۹ ریدل و همکاران مدل رفتاری RHT^۳ را برای بتن ارائه نموده‌اند. مدل RHT قادر است رفتار بتن و مصالح مشابه را تحت نرخ کرنش‌های مختلف، فشارهای محصور کننده زیاد و همچنین تحت حالت تنش سه‌محوری واقعی به خوبی مدل نماید. همچنین مقدار مقاومت مصالح پس از مقاومت حداکثر^۴ نیز در این مدل با استفاده از درون‌یابی بین مقادیر مختلف مقاومت و متناظر با میزان خرابی مصالح و حالت تنش در هر لحظه قابل محاسبه و پیش‌بینی است [۲].

دینگ در سال ۲۰۱۳ روشی برای بدست آوردن پارامترهای شکست مدل رفتاری RHT، معرفی نمود. این روش می‌تواند پارامترهای شکست را با دقت بهتری ارائه دهد [۳]. همان‌گونه که اشاره شد، مدل‌های رفتاری یاد شده قادر به در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش و فشار همه‌جانبه در افزایش مقاومت مصالح ترد

و نیمه ترد نظیر سنگ و بتن هستند اما در تمامی مدل‌های یاد شده، رویه مقاومت حداکثر سنگ و بتن، به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده و از اثر تنش اصلی میانی بر مقاومت سنگ و بتن صرف نظر شده است. بنابراین مدل‌های یاد شده در مدل‌سازی حالت تنش سه محوری واقعی^۵ ناتوان هستند. کوسویکز و همکاران در سال ۲۰۲۰ مدل رفتاری KCC^۶ برای بتن را تشریح کردند که این مدل قادر به در نظر گرفتن حالت تنش سه محوری واقعی و پیش‌بینی مقدار مقاومت سنگ یا بتن با استفاده از رویه سه بعدی است [۴]. مدل کاراگوزیان و همکاران نیز به مانند مدل جانسون هولمکوئیست، ابتدا برای بتن و بعدها برای سنگ تعیین و ارائه شد. هانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱، مدل رفتاری JH-1^۷ را به منظور شبیه‌سازی رفتار مواد ترد نظیر سنگ و بتن با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش^۸ و فشار همه‌جانبه بر روی مقدار مقاومت ارائه نمودند [۵]. تیان در سال ۲۰۲۲ با تغییراتی در مدل RHT، اصلاحاتی که عمدتاً مربوط به ضریب نرخ کرنش بود، انجام داد. همچنین پارامترهای مربوط به سنگ آهک در مدل RHT را تعیین نمود [۶]. وانگ در سال ۲۰۲۲، پارامترهای شکست مربوط به سنگ سخت را در مدل RHT بدست آورد [۷]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۳، مسائل مختلفی را در زمینه مهندسی سنگ و بتن با تغییر پارامترهای مدل رفتاری RHT انجام دادند [۸].

به منظور شبیه‌سازی دقیق پاسخ بتن تحت بارهای استاتیکی، دینامیکی و ضربه‌ای، استفاده از مدل‌های مادی پیشرفته مانند جانسون هالکوئیست، کاراگوزیان و کیس و ریدل و همکاران ضروری است. با این حال، دقت این مدل‌ها به شدت وابسته به تعیین صحیح پارامترهای مدل رفتاری از طریق آزمایش‌های تجربی و روش‌های کالیبراسیون عددی است. مدل رفتاری RHT با در نظر گرفتن اثرات تراکم‌پذیری، آسیب‌پذیری و اثرات نرخ کرنش قابلیت پیش‌بینی دقیق پاسخ بتن را در شرایط بارگذاری شدید دارد. در این تحقیق، هدف ارائه روشی برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری RHT برای شبیه‌سازی مسائل مهندسی بتن، به ویژه مسائل شامل آسیب، نرخ کرنش بالا و فشارهای بالا است. تعیین پارامترهای مدل رفتاری RHT برای بتن یک کار چالش برانگیز است. این کار

^۵ True-Triaxial Stress State^۶ Karagozian & Case of Concrete^۷ Johnson-Holmquist^۸ Strain Rate^۱ Damage Models^۲ Micromechanical Models^۳ Riedel, Hiermaier and Thoma^۴ Peak Strength

$$c \cos \theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (6)$$

P فشار، σ_{eff} تنش موثر و θ زاویه لود است. معادله استحکامی مدل رفتاری RHT، از سه رویه تشکیل شده است که عبارتند از رویه حد الاستیک^۳، رویه شکست^۴ و رویه مقاومت باقی‌مانده^۵. این رویه‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. همچنین روابط این رویه‌ها بر اساس تانسورهای اول و دوم تنش که تانسور دوم مربوط به تنش انحرافی است، توسعه یافته‌اند. تانسور اول تنش مطابق رابطه (۷) تعریف شده است [۱۰].

$$\sigma_f = \sigma_f(p, \theta, \varepsilon_p) = f_c \sigma_f^* \left(p^*, F_R(\dot{\varepsilon}_p, p^*) \right) R_3(\theta, p^*) \quad (7)$$

در اینجا ضریب زاویه لود و F_R ضریب افزایش مقاومت دینامیکی است. در این تابع σ_f^* بیانگر تنش شکست مقیاس‌بندی شده نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری است که در رابطه (۸) تشریح می‌گردد [۱۰].

$$\sigma_f^* = \begin{cases} A(P^* - \frac{F_R}{3} + (\frac{A}{F_R})^{-\frac{1}{n}})^n \rightarrow 3p^* \geq F_R \\ \frac{F_R f_s^*}{Q_1} + 3P^* \left(1 - \frac{f_s^*}{Q_1}\right) \rightarrow F_R > 3p^* \geq 0 \\ \frac{F_R f_s^*}{Q_1} - 3P^* \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{f_s^*}{Q_1 f_t^*}\right) \rightarrow 0 > 3p^* \geq 3p_t^* \\ 0 \rightarrow 3p_t^* > 3p^* \end{cases} \quad (8)$$

A و n ثابت‌های مربوط به رویه شکست مدل رفتاری RHT، f_t^* و f_s^* به ترتیب بیانگر مقاومت‌های کششی و برشی مقیاس‌بندی شده نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری بتن و p_t^* فشار حد شکست مقیاس‌بندی شده نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشد. کمیت Q_1 بیانگر نسبت فاصله محور تنش هیدرواستاتیک تا صفحه نصف‌النهاری کششی و برشی و کمیت Q_2 بیانگر نسبت فاصله محور تنش هیدرواستاتیک تا صفحه نصف‌النهاری فشاری در صفحه انحرافی می‌باشند. شکل (۲) نشان می‌دهد که رویه شکست مدل رفتاری RHT در صفحه انحرافی، در فشارهای کم به شکل مثلث و بیانگر رفتار ترد و در فشارهای بالا به شکل دایره و بیانگر رفتار شکل‌پذیر می‌باشد. همچنین نسبت فاصله محور تنش هیدرواستاتیک تا هر نصف‌النهاری با زاویه لود θ و فاصله محور تنش

نیاز به آزمایش‌های تجربی متعدد دارد. تعیین برخی از پارامترها تنها از طریق آزمایش، اگر غیرممکن نباشد، دشوار است. این مقاله یک فرآیند کامل مبتنی بر داده‌های تجربی، آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی را برای به حداقل رساندن فرضیات و تقریب‌ها معرفی می‌کند. علاوه بر این، کالیبراسیون تکراری امکان استنتاج پارامترهای آسیب را فراهم می‌کند. سپس دقت و اعتبار این پارامترها با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا^۱ تحت شرایط بارگذاری و نرخ کرنش‌های مختلف تأیید می‌شود.

۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- مدل رفتاری RHT

مدل رفتاری RHT برای جامدات ترد و نیمه ترد همچون بتن توسعه داده شده است. این مدل ساختاری در نرم‌افزارهایی همچون ال اس داینا پیاده‌سازی شده و شامل سه معادله: استحکامی، حالت^۲ و معادله آسیب می‌باشد. مدل رفتاری RHT یک مدل ساختاری وابسته به نرخ کرنش است [۹].

۲-۱-۱- معادله استحکامی

اثرات اولین ثابت تانسور تنش، دومین و سومین ثابت تانسور تنش انحرافی و نرخ کرنش در خواص مکانیکی ماده در مدل RHT در نظر گرفته شده است. مؤلفه‌های ذکر شده در بالا از تانسور تنش و تانسور تنش انحرافی S در معادلات (۱) تا (۳) نشان داده شده‌اند [۱۰]:

$$I_1 = tr(\sigma) = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (1)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} tr(s^2) = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2)$$

$$J_3 = det(s) \quad (3)$$

σ_1 ، σ_2 و σ_3 تنش‌های اصلی هستند. این معادلات را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۱۰]:

$$P = I_1/3 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3/3 \quad (4)$$

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5)$$

⁴ Failure Surface

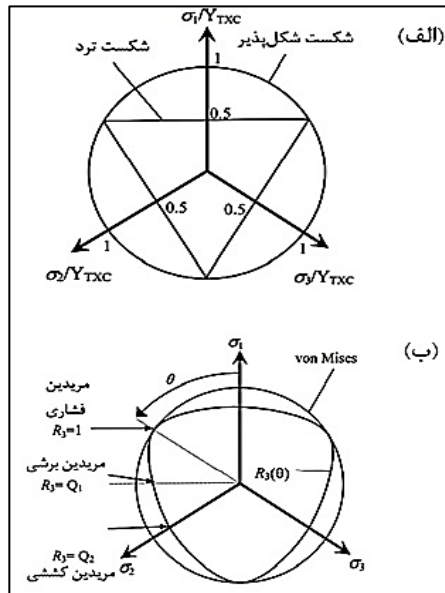
⁵ Residual Friction Surface

¹ Ls-Dyna

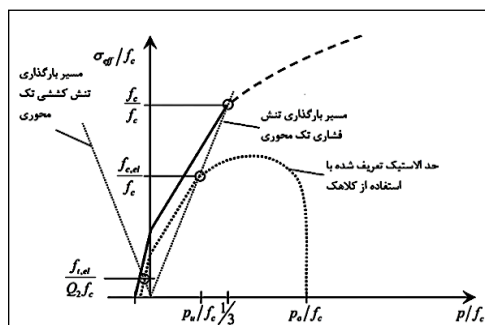
² Equation of State

³ Elastic Limit Surface

در رابطه فوق، σ_r^* سطح گسیختگی مقاومت باقیمانده که به فشار بستگی دارد و پارامترهای A_f و Π_f ثابت‌های ماده در رویه مقاومت باقیمانده است.



شکل ۲- صفحه انحرافی رویه شکست مدل RHT، (الف) انتقال از حالت ترد به شکل‌پذیر متناسب با تنش هیدرواستاتیک، (ب) حالت بین تردی و شکل‌پذیری در مقایسه با رویه فون میسز [۱۱]



شکل ۳- رویه حد الاستیک مدل رفتاری RHT [۱۱]

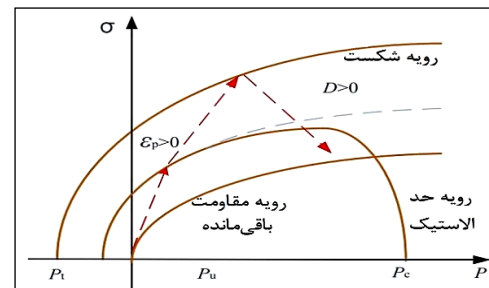
هیدرواستاتیک تا نصف‌النهار فشاری در صفحه انحرافی با کمیت R_3 بیان می‌شود. مقدار R_3 مطابق با رابطه (۹) بیان می‌شود [۱۰].

$$R_3(\theta, Q(P^*)) = \frac{2(1-Q^2)\cos\theta + (2Q-1)\sqrt{4(1-Q^2)\cos^2\theta + (1-2Q)^2}}{4(1-Q^2)\cos^2\theta + (1-2Q)^2} \quad (9)$$

رویه حد الاستیک مدل رفتاری RHT مطابق رابطه (۱۰) است که در این معادله Q متغیری است که به صورت خطی با فشار نرمال شده افزایش می‌یابد [۷].

$$\frac{1}{2} < Q = Q_0 + Bp^* \leq 1 \quad (10)$$

Q_0 و B پارامترهای مدل رفتاری هستند.



شکل ۴- نمای مدل مقاومتی مدل ساختاری RHT [۱۱]

این رویه به شکل یک رویه کلاهی‌دار و ضربی از رویه شکست است که بصورت رابطه زیر نشان داده می‌شود [۱۰].

$$\sigma_{el} = \sigma_{el}(p, \theta, \epsilon_p) = f_c \sigma_f \left(\frac{p^*}{F_e}, F_R(\epsilon_p, p^*) \right) R_3(\theta, p^*) F_e(p^*) F_c(p^*) \quad (11)$$

که $F_e(p^*)$ و $F_c(p^*)$ به ترتیب تابع مربوط به کلاهی^۱ و فاکتور مقیاس حد الاستیک هستند. شکل (۳) نمایی از رویه حد الاستیک مدل رفتاری RHT را نشان می‌دهد.

رویه مقاومت باقیمانده مدل رفتاری RHT مطابق رابطه (۱۲) می‌باشد [۱۱].

$$\sigma_r^*(p^*) = \begin{cases} A_f p^{*nf} \rightarrow (p^* > 0) \\ 0 \rightarrow (p \leq 0) \end{cases} \quad (12)$$

^۱ Cap Function

که $\mu(\rho) = \frac{\alpha\rho}{(\alpha_0\rho_0)} - 1$ و $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1$ و T_2 پارامترهای مادی و ضرائب چندجمله‌ای مدل رفتاری RHT هستند و می‌توانند از روابط زیر محاسبه گردند.

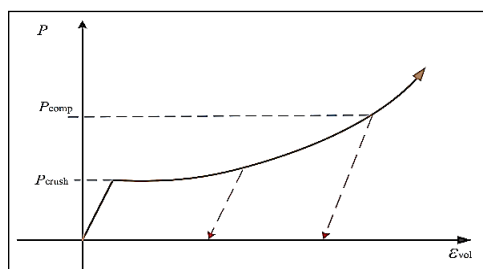
$$\begin{cases} A_1 = T_1 = \rho_0 c_0^2 \\ A_2 = \rho_0 c_0^2 (1 + s(s-1)) \\ A_3 = \rho_0 c_0^2 (2(s-1) + 3(s-1)^2) \\ B_0 = B_1 = \gamma = 2s - 1 \\ T_2 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

۲-۲-۲- توصیف نمونه و آزمایش تجربی

نمونه‌ها از یک بلوک بزرگ بتن تولید شده مغزه‌گیری شدند و سپس با توجه به روش‌های پیشنهادی ISRM و استانداردهای ASTM آماده شدند. نمونه‌های آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مقاومت فشاری سه‌محوری (TCS) و مقاومت کششی برزیلی (BTS) به قطر ۵۴ میلی‌متر و به ترتیب با نسبت‌های لاغری (L/D)، ۲/۵، ۲ و ۰/۵ هستند [۱۲].

۲-۲-۱- نمونه بتنی با استحکام ۳۵ مگاپاسکال

نمونه‌های بتنی در دانشکده عمران دانشگاه جامع امام حسین (ع) با استحکام ۳۵ مگاپاسکال تهیه شد. این نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب با دمای بالای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. جدول (۱) درصد ترکیبات بتن تولیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- معادله حالت مدل رفتاری RHT [۱۱]

جدول ۱- درصد مواد بتن ۳۵ مگاپاسکال تولیدی [۱۲]

ماده	مقدار (درصد)
ماسه	۳۳/۶۵
شن بادامی	۱۷/۴۰
شن نخودی	۲۲/۷۴

² Hugoniot Tensile Limit (HTL)

۲-۱-۲- معادله آسیب

مطابق رابطه (۱۳)، کمیت آسیب یا خرابی، با استفاده از کرنش پلاستیک انباشته شده نسبت به کرنش پلاستیک مجاز وابسته به فشار^۱ قابل محاسبه است [۱۱]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (13)$$

که D بیانگر کمیت آسیب است که مقادیر این کمیت بین مقدار صفر (حالت شکست) و ۱ (حالت سطح باقیمانده) تغییر می‌نماید. همچنین ε_p^f در رابطه فوق، مطابق رابطه (۱۴) قابل محاسبه است [۱۱]:

$$\varepsilon_p^f = \max(D_1(p^* - (1 - D)p_t^*)^{D_2}, \varepsilon_p^m) \quad (14)$$

که ε_p^m حداقل کرنش پلاستیک، p_t^* حد کشش هوگونیوت^۲، D_1 و D_2 پارامترهای آسیب هستند. رویه آسیب بین دو رویه شکست و رویه مقاومت باقی‌مانده است. کمیت میزان خرابی با درونیایی بین دو رویه شکست و رویه مقاومت باقی‌مانده بدست می‌آید. درونیایی بین این دو رویه با میزان خرابی، از رابطه (۱۵) بدست می‌آید [۱۱]:

$$\begin{aligned} \sigma_d(p^*, s, \varepsilon_p) &= \sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, 1)(1 - D) \\ &+ D f_c \sigma_r^*(p^*) \rightarrow p^* \geq 0 \\ \sigma_d(p^*, s, \varepsilon_p) &= \sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, 1) \left(1 - D - \frac{p^*}{p_t^*}\right) \\ &\rightarrow (1 - D)p_t^* \leq p^* < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

که σ_d معرف رویه آسیب درونیایی شده بین دو رویه شکست و رویه مقاومت باقی‌مانده است.

۲-۱-۳- معادله حالت

معادله حالت مدل رفتاری RHT در شکل (۴) رسم شده است. این معادله حالت شامل دو فرمول کلی برای توصیف رفتار موادی مانند بتن در کشش و فشار در طیف وسیعی از مقادیر فشار است [۱۱].

$$p = \frac{1}{\alpha} [B_0 \alpha p e + T_1 \mu + T_2 \mu^2] \quad (16)$$

$$p = \frac{1}{\alpha} \left[(B_0 + B_1 \mu) \alpha p e + A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 \right] \quad (17)$$

¹ Pressure-dependent Allowable Plastic Strain

۲-۲-۲- خواص فیزیکی بتن تولید شده

خواص فیزیکی بتن تولیدی در جدول (۲) آمده است. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در فر قرار داده شدند تا مقادیر چگالی خشک محاسبه شود. تلاش شد تا دما دقیقاً در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد حفظ گردد، طبق روش‌های پیشنهادی ISRM. چگالی اشباع نیز پس از خارج کردن نمونه‌ها از حالت اشباع آب و پاک کردن سطوح آنها از آب اندازه‌گیری شد. مقادیر گزارش شده سرعت موج فشاری و برشی از میانگین مقادیر اندازه‌گیری زمان انتشار موج توسط سه نمونه در امتداد نمونه‌های بتن محاسبه شده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی بتن تولید شده

مقدار	خواص
۲/۳۲	چگالی (gr/cm^3)
۲/۳۰	چگالی خشک (gr/cm^3)
۴۱۲۲/۱	سرعت موج فشاری (m/s)
۲۴۰۰/۸	سرعت موج برشی (m/s)
۳۵/۳۳	میانگین استحکام فشاری (MPa)

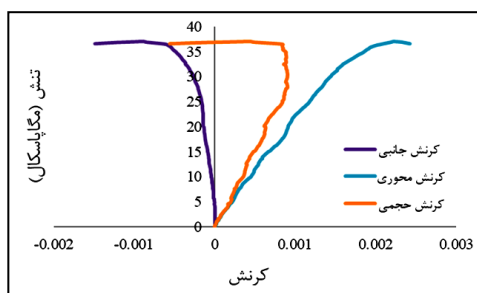
۳-۲-۲- آزمایش‌های مقاومت فشاری تک و سه محوره

تمام نمونه‌ها استوانه‌ای شکل و مطابق با شکل (۵) ساخته شده است. برای آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره و سه محوره تحت مقادیر مختلف فشار محصورکننده استفاده شدند.



شکل ۵- نمونه‌های بتن تولیدی برای آزمون‌ها

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق SANTAM SAF-2000 است و مقادیر کرنش محوری و شعاعی به ترتیب توسط یک پتانسیومتر^۱ و یک اکستنسومتر^۲ اندازه‌گیری شدند دستگاه مورد استفاده در این مطالعه یک سیستم سروو کنترل است و نرخ جابجایی برای آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و سه‌محوری به ترتیب ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۱ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شد. سه آزمایش مقاومت فشاری غیرمحصور که تحت شرایط شبه‌استاتیکی انجام شد، منجر به مقدار میانگین ۳۵/۲ مگاپاسکال شد. بتن ۳۵ مگاپاسکال دارای مدول الاستیک ۲۲/۸ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۱۴ است. منحنی تنش-کرنش آزمون استحکامی تک محوره در شکل (۶) رسم شده است. نتایج دستگاه آزمایش‌های استحکامی سه محوره تحت چهار فشار محصورکننده در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش آزمون‌های تک و سه محوره

جدول ۳- خواص فیزیکی بتن تولید شده

نمونه	$\sigma_1 (\text{MPa})$	$\sigma_3 (\text{MPa})$	Strain Rate (10^{-6}s^{-1})
۱	۰	۳۶/۲	۲/۱
۲	۵	۶۸/۳	۲/۵
۳	۱۰	۸۲/۲	۲/۹
۴	۱۵	۱۰۲/۳	۳/۵
۵	۲۰	۱۲۲/۷	۴/۵

۴-۲-۲- آزمون مقاومت کششی برزیلی

در این مطالعه، سه آزمایش برزیلی با استفاده از نمونه‌های بتن دیسکی شکل (اندازه مغزه NX) انجام شد.

^۲ extensometer^۱ Potentiometer

پالس، می‌توان یک موج پالس مستطیلی را به یک پالس رمپ تبدیل کرد.



شکل ۸- دستگاه آزمایش هاپکینسون برزیلی

و P_1 و P_2 به ترتیب نیروهای وارد بر دو انتهای نمونه و A_b و E_b نشان دهنده سطح مقطع و مدول یانگ میله هستند. ϵ_{In} ، ϵ_{Re} و ϵ_{Tr} به ترتیب کرنش‌های ورودی، انعکاسی و انتقالی می‌باشند. مقدار میانگین نیروها در دو طرف نمونه از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود [۱۳]. سطوح مشترک بین میله‌ها و نمونه با گریس روغن کاری شدند تا اثر اصطکاک به حداقل برسد. با فرض انتشار موج تنش یک بعدی، نیروهای دینامیکی وارد بر دو طرف نمونه با استفاده از معادله (۱۹) محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$P_1 = A_b E_b (\epsilon_{In} + \epsilon_{Re}) \quad (19)$$

$$P_2 = A_b E_b \epsilon_{Tr}$$

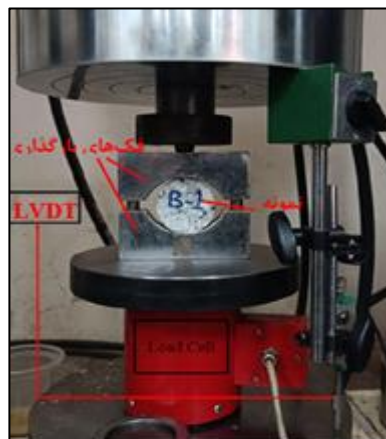
$$P_{ave} = A_b E_b (\epsilon_{In} + \epsilon_{Re} + \epsilon_{Tr}) / 2 \quad (20)$$

جدول ۴- مشخصات دستگاه هاپکینسون برزیلی

مقدار	خواص
۸/۱	چگالی میله (gr/cm^3)
۲۰۰	طول میله ورودی/ انتقالی (cm)
۲۰	قطر میله ورودی/ انتقالی (mm)
۲۰۰	مدول یانگ میله‌ها (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون میله‌ها

با فرض نبود کرنش‌های انعکاسی و انتقالی معادله (۲۰) به معادله (۲۱) ساده‌سازی می‌گردد:

$$P_{ave} = A_b E_b \epsilon_{Tr} \quad (21)$$



شکل ۷- دستگاه آزمایش کشش برزیلی

مطابق شکل (۷)، دو فک منحنی فولادی، که به ترتیب تقریباً $1/5$ و $1/1$ برابر شعاع و ضخامت نمونه‌ها طراحی شده، برای فرآیند بارگذاری استفاده گردیدند. بعلاوه دو سنسور تعیین جابجایی برای ثبت مقادیر جابجایی بکارگرفته شدند.

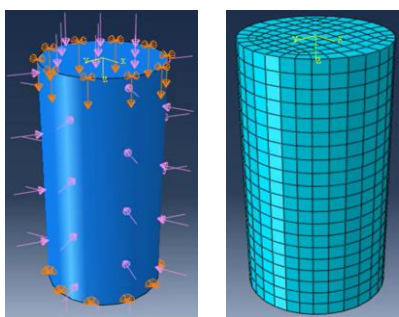
۲-۲-۵- آزمون دینامیک برزیلی با میله فشار هاپکینسون^۱

میله فشار هاپکینسون، سیستمی برای اندازه‌گیری رفتار دینامیکی مواد است. ISRM پیشنهاد می‌کند که مقاومت کششی دینامیکی مواد معدنی با استفاده از روش برزیلی با دستگاه هاپکینسون بدست آید. دستگاه هاپکینسون شامل سه میله فولادی است: میله ضربه زننده، میله ورودی و میله انتقالی [۱۳]. در روش هاپکینسون برزیلی، نمونه بتن به صورت قطری بین میله ورودی و میله انتقالی قرار می‌گیرد، شکل (۸). دو کرنش‌سنج به وسط میله برخورد کننده و میله عبوری متصل شده‌اند تا کرنش‌ها را ثبت کنند. مشخصات دستگاه هاپکینسون مورد استفاده در جدول (۴) آمده است. در این مطالعه سه آزمایش هاپکینسون برزیلی با سه نمونه استوانه‌ای با قطر ۳۷ میلی‌متر و ضخامت ۱۸ میلی‌متر انجام گردید. از شکل‌دهنده‌های پالس دیسکی مسی برای کاهش شیب موج برخوردی و افزایش زمان برخورد استفاده شد. نمونه آماده شده در شکل (۹) مشخص شده است. با استفاده از روش شکل‌دهی

^۱ Hopkinson Pressure Bar

۲-۲-۶- شبیه‌سازی‌های عددی روی نمونه‌های بتنی

در این پژوهش از نرم‌افزار ال اس داینبا با روش حل صریح^۱ و لاگرانژی در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. شکل (۱۱) نحوه مدل‌سازی، المان‌بندی و اعمال شرایط اولیه و مرزی را در نمونه‌های بتنی با استحکام ۳۵ مگاپاسکال به ابعاد قطر ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر برای شبیه‌سازی آزمون تک و سه محوره را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است برای شبیه‌سازی آزمون برزلی از نمونه‌های بتنی به قطر ۳۷ میلیمتر و ضخامت ۱۸ میلیمتر استفاده گردید.



شکل ۱۱- نحوه مدل‌سازی نمونه‌های بتنی در نرم‌افزار ال اس داینبا

از المان‌های مکعبی در المان‌بندی مدل‌ها بکار گرفته شد. شرایط اولیه و مرزی اعمال شده روی نمونه‌ها برای انجام شبیه‌سازی آزمون‌های تک و سه‌محوره مطابق با بخش (۲-۲-۳) و برای شبیه‌سازی آزمون برزلی مطابق با بخش (۲-۲-۴) انجام شد. از مدل رفتاری RHT با ضرائبی که در این مقاله استخراج گردید در انجام شبیه‌سازی‌ها بکار گرفته شد.

۳- نتایج

۳-۱- تعیین پارامترهای RHT برای بتن تولید شده

پارامترهای زیادی در مدل رفتاری RHT وجود دارد و تعیین همه این پارامترها به صورت تجربی امکان‌پذیر نیست. بنابراین، متغیرهای مدل رفتاری RHT برای بتن با سه روش تعیین شده‌اند. برخی از ضرائب در بخش قبلی به صورت تجربی و گروه دوم متغیرها با استفاده از داده‌های تجربی مقالات مختلف

استحکام کششی دینامیکی از رابطه (۲۲) بدست می‌آید [۱۳]:

$$\sigma_t = \frac{2(P_{ave})_{max}}{\pi D t} \quad (22)$$

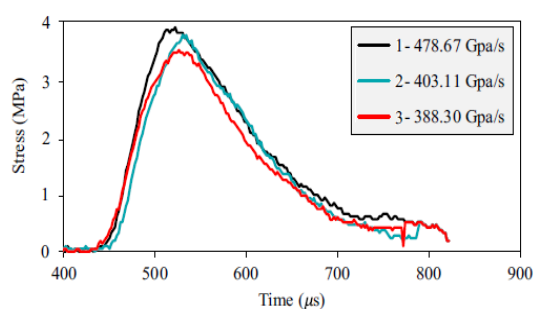


شکل ۹- نمونه آزمایش هایکینسون برزلی

جدول ۵- خواص فیزیکی بتن تولید شده

نمونه	سرعت ضربه (m/s)	نرخ تنش (GPa/s)	کشش (GPa)	فاکتور افزایش
۱	۱۳/۳۷۸	۴۷۸/۶۷	۳/۸	۳/۴۷
۲	۹/۹۹۶	۴۰۳/۱۱	۳/۶	۲/۳۹
۳	۹/۰۶	۳۸۸/۳۰	۳/۳	۲/۲۲

که σ_t ، $(P_{ave})_{max}$ ، D و t به ترتیب استحکام کششی دینامیکی، بار متوسط شکست، قطر و ضخامت نمونه هستند. امواج تنش عبوری برای سه آزمایش در شکل (۱۰) رسم شده‌اند. شیب بخش خطی موج تنش عبوری به عنوان نرخ کرنش در نظر گرفته شده است. نتایج سه آزمایش دینامیکی برزلی بر روی بتن تولیدی در جدول (۵) فهرست شده است.



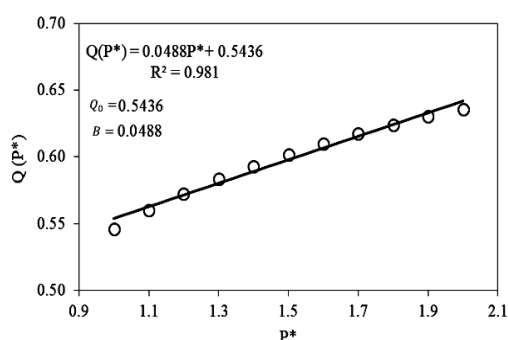
شکل ۱۰- تحلیل موج عبوری دینامیکی سه آزمایش هایکینسون برزلی

^۱ Explicit

۳-۱-۲- پارامترهای معادله استحکامی

پارامترهای استحکامی مدل رفتاری RHT از نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری قابل استخراج هستند. از نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری با مقادیر مختلف نرخ کرنش اندازه‌گیری شده می‌توان برای تعیین ضرائب وابسته به کمیت زاویه لود در معادله سطح آسیب مدل رفتاری RHT (معادله ۷) استفاده کرد. مدل رفتاری RHT رفتار گذار از حالت شکننده به شکل‌پذیر بتن را با استفاده از معادله (۱۰) در نظر می‌گیرد. بنابراین با توجه نتایج آزمون سه محوره بتن، نسبت نصف‌النهار فشاری و کششی سطح شکست برای بتن برای مقادیر مختلف فشار در شکل (۱۴) محاسبه شده است تا مقادیر $Q_0 = 0.5436$ و $B = 0.0488$ تعیین شوند.

مدل رفتاری RHT از معادله (۱۲) برای تعیین ثابت‌های رویه شکست (n و A) در فشارهای مختلف استفاده می‌کند. این ثابت‌ها از آزمون فشاری سه محوره بدست می‌آیند اما در این مقاله از داده‌های مقالات مختلف و برازش منحنی روی این داده‌ها این ثابت‌ها بدست آمده‌اند.



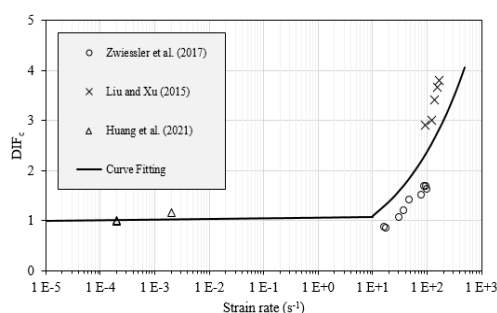
شکل ۱۴- نصف‌النهار فشاری سطح شکست مدل RHT بتن

این پارامترها بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های فشاری سه محوره بتن که در شکل (۱۵) نشان داده شده به ترتیب $A = 2.236$ و $n = 0.481$ تعیین شده‌اند. شکل (۱۶) نحوه بدست آوردن ضرائب رویه باقی‌مانده (n_f و A_f) با روش کالیبراسیون به روش شبیه‌سازی‌های عددی را نشان می‌دهد. در این روش با ثابت نگه داشتن یکی از این پارامترها و تغییر دیگری می‌توان بصورت کیفی به الگوی شکست متناسب با آزمون‌های آزمایشگاهی مطابق با شکل (۲۰) رسید.

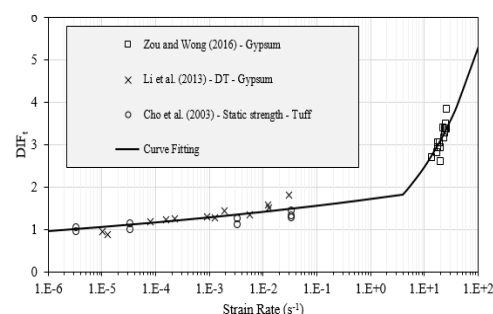
در این بخش تعیین و بقیه پارامترها در بخش بعدی با کالیبراسیون بررسی می‌گردند.

۳-۱-۱- تعیین ضرائب نرخ کرنش پارامترهای مدل RHT برای بتن

بر اساس معادله (۷)، مدل رفتاری RHT نسبت مقاومت فشاری دینامیکی به استاتیکی را برای هر نرخ کرنش پیش‌بینی می‌کند. داده‌های مقاومت فشاری آزمون هاپکینسون مقالات مختلف برای بررسی پارامترهای وابسته به نرخ کرنش مدل رفتاری RHT نسبت به مقاومت فشاری دینامیکی فشاری و کششی به استاتیکی بتن جمع‌آوری شده‌اند، شکل‌های (۱۲) و (۱۳). با برازش منحنی روی این داده‌ها، از شکل (۱۲) ضرائب نرخ کرنش فشاری $\beta_c = 0.01696$ و $\gamma_c = 0.3213$ و از شکل (۱۳) ضرائب نرخ کرنش کششی $\beta_t = 0.0379$ و $\gamma_t = 1.551$ بدست می‌آیند.



شکل ۱۲- تعیین کمیت‌های DIF_c بتن به روش عبور منحنی و با استفاده از داده‌های مقالات [۱۴، ۱۵ و ۱۶]



شکل ۱۳- تعیین کمیت‌های DIF_t بتن به روش عبور منحنی و با استفاده از داده‌های مقالات [۱۷، ۱۸ و ۱۹]

جرم، انرژی و ممنتوم را برای یک سیستم موج شوک یک بعدی در معادلات (۲۳) الی (۲۵) توصیف می‌کنند [۲۸].

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{V}{V_0} = \frac{u_s - u_p}{u_s} \quad (23)$$

$$e - e_0 = \frac{Pu_p}{\rho_0 u_s} - \frac{1}{2} u_p^2 \quad (24)$$

$$P - P_0 = \rho_0 u_p u_s \quad (25)$$

که P ، V ، ρ ، u_s ، u_p و e به ترتیب فشار، حجم، چگالی، سرعت موج شوک، سرعت ذره‌ای و انرژی داخلی ویژه هستند. برای تعیین پنج متغیر مجهول، سه معادله (۲۳) الی (۲۵) وجود دارد. رابطه بین u_p و u_s به عنوان یک معادله مستقل عمل و به حل معادلات رانکین-هوگونیوت کمک می‌کند. در بسیاری از مواد، این رابطه به شکل یک معادله خطی در می‌آید که می‌توان آن را به صورت معادله (۲۶) نوشت [۲۸].

$$u_s = c_0 + s u_p \quad (26)$$

که C_0 و S ضرایب تجربی‌اند. با ترکیب معادلات بقاء جرم، ممنتوم و معادله (۲۶)، رابطه بین فشار و کرنش حجمی برای ماده‌ای با سرعت صوت حجمی C_0 ، چگالی اولیه ρ_0 و شیب S را می‌توان به صورت معادله (۲۷) بازنویسی کرد [۲۸].

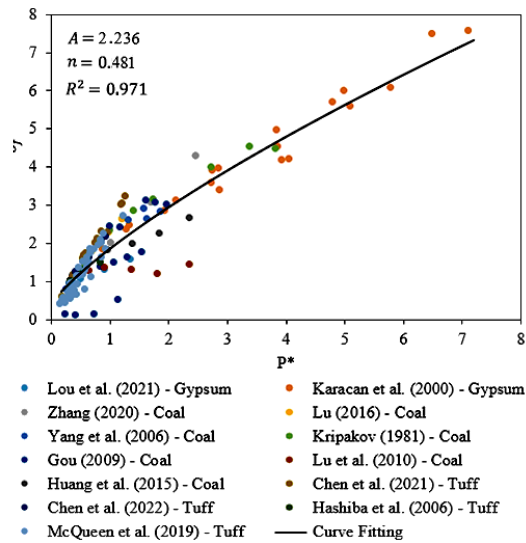
$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{(1 - (s - 1)\mu)^2} \quad (27)$$

بنابراین، طبق شکل (۱۷)، مقادیر C_0 و S برای بتن با برازش یک منحنی بین داده‌های شوک با استفاده از معادله (۲۶) تعیین شدند. در مطالعه حاضر، مقادیر منحنی برازش شده برای بتن برابر با $C_0 = 4.770$ km/s و $S = 2.81$ است. ضرایب چندجمله‌ای معادله حالت مدل رفتاری RHT بر اساس روابط ارائه شده در معادله (۱۸) محاسبه می‌شوند.

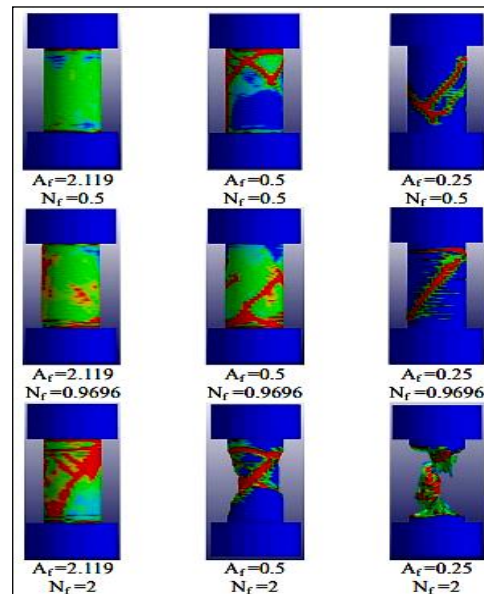
۳-۲- کالیبراسیون و صحت‌سنجی پارامترهای RHT

۳-۲-۱- کالیبراسیون پارامترهای RHT برای بتن تولیدی

برخی از پارامترهای مدل رفتاری RHT همچون ضرایب شکست D_1 ، D_2 و حداقل کرنش باقی‌مانده شکست (EPM) به سادگی از طریق روش‌های تحلیلی یا تجربی قابل تعیین نیستند. در نتیجه، برای بدست آوردن این پارامترها از کالیبراسیون به روش شبیه‌سازی عددی استفاده شد.



شکل ۱۵- تعیین ثابت‌های رویه شکست به روش عبور منحنی و با استفاده از داده‌های مقالات [۲۰ الی ۲۷]



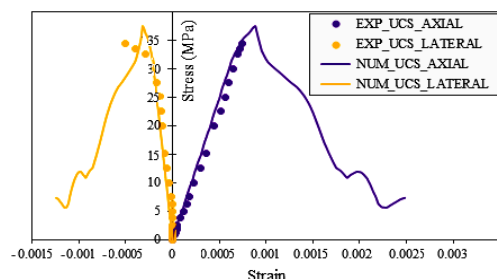
شکل ۱۶- کالیبراسیون مقاومت باقیمانده

۳-۱-۳- پارامترهای معادله حالت

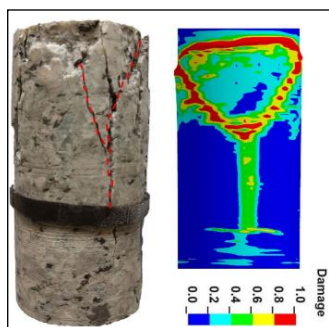
مطابق معادله (۲۳)، تمام ضرایب چندجمله‌ای را می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش برخورد صفحات استخراج کرد. برای تعیین دقیق پارامترهای معادله حالت برای بتن، درک کاملی از معادلات رانکین-هوگونیوت ضروری است. این معادلات بقاء

۳-۲-۲- صحت‌سنجی آزمایش فشاری تک‌محوره

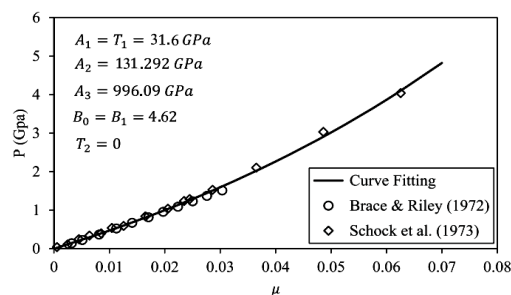
آزمایش استحکامی فشاری تک‌محوره در نرم‌افزار ال اس دینا شبیه‌سازی شد تا پارامترهای مدل رفتاری RHT برای بتن تحت شرایط تنش فشاری استاتیک و شبه استاتیک بررسی شود. نتایج عددی از نظر کمی و کیفی با هم مقایسه شدند. منحنی تنش-کرنش محوری و جانبی بدست‌آمده از نتایج عددی و آزمایشگاهی با توجه به شکل (۱۹) مقایسه شد. مطابق شکل منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی در آزمایش تک‌محوره تطابق خوبی با نتایج عددی دارد بطوریکه حداکثر اختلاف نتایج در منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی به ترتیب زیر ۳ درصد و ۷ درصد گردید. علاوه بر این، نتایج مدل عددی و آزمایش تجربی با بررسی الگوهای شکست، همانطور که در شکل (۲۰) نشان داده شده است، به صورت کیفی مقایسه شدند. مطابق شکل الگوهای شکست در مدل عددی و آزمایش تجربی تقریباً مشابه هم هستند. بطوریکه در مدل آزمایشگاهی یک ترک سرتاسر مرکزی با دو ترک جانبی ایجاد شده اما در شبیه‌سازی عددی دو ترک جانبی به وضوح مشخص است اما ترک مرکزی از وسط به سمت پایین کشیده شده است.



شکل ۱۹- مقایسه نتایج عددی و تجربی آزمایش تک‌محوره

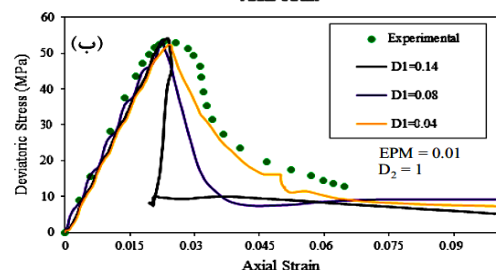
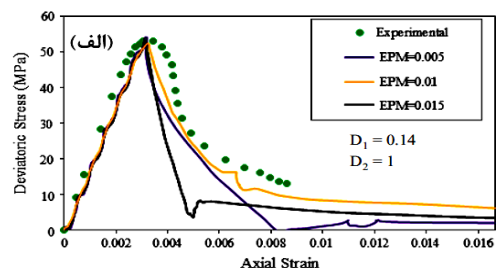


شکل ۲۰- مقایسه الگوی شکست مدل عددی و آزمایش تجربی



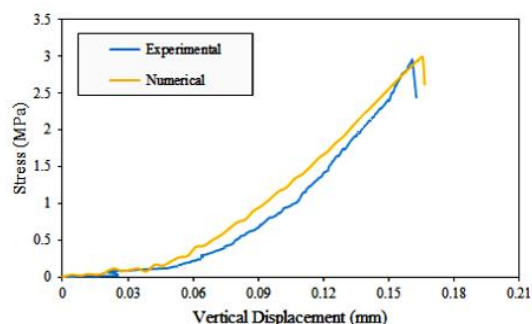
شکل ۱۷- منحنی برازش شده برای داده‌های شوک بتن

بوروال و همکاران در سال ۲۰۱۱ پیشنهاد می‌کنند که برای بتن با استحکام ۳۵ مگاپاسکال، مقادیر $D_1 = 0.04$ و $D_2 = 1$ و $EPM = 0.01$ در نظر گرفته شود [۸]. در مطالعه حاضر، کالیبراسیون برای تعیین مقادیر پارامترهای آسیب انجام شد. طبق شکل (۱۸)، مقدار D_2 روی ۱ ثابت و کالیبراسیون با تغییر مقادیر D_1 (با مقادیر ۰/۰۸، ۰/۱۴ و ۰/۰۴) و EPM (با مقادیر ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۱۵) انجام گردید. با توجه به شکل (۱۸) منحنی زرد رنگ (شکل الف: $EPM=0.01$ و شکل ب: $D_1=0.04$) با نتایج تجربی که با دایره‌های کوچک سبز رنگ مشخص شده، تطابق خوبی دارد. بنابراین داده‌های بورل و همکاران هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد.

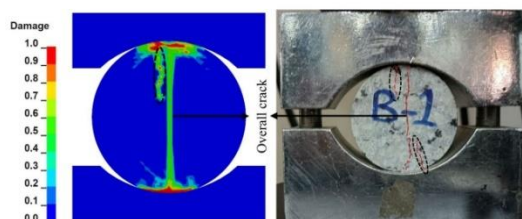


شکل ۱۸- کالیبراسیون پارامترهای آسیب، الف: EPM و ب: D_1 برای مدل RHT بتن

به سمت مرکز دیسک امتداد یافته بودند. با این حال تنها یک ترک فرعی در مدل المان محدود تشکیل شد. بطور کلی نتایج در الگوهای شکست بصورت کیفی قابل قبول است.



شکل ۲۲- منحنی‌های تنش-جابجایی عمودی برای مدل عددی و آزمایش تجربی آزمون کشش برزیلی

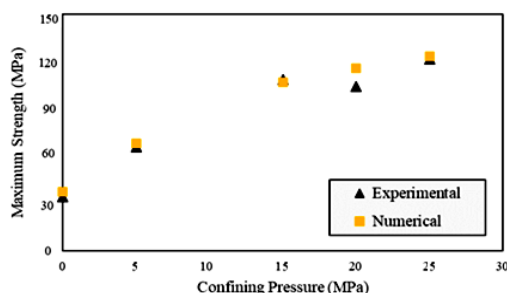


شکل ۲۳- مقایسه الگوی شکست در آزمایش کشش برزیلی و شبیه‌سازی عددی

بطور کلی روند بدست آوردن پارامترهای مدل رفتاری RHT بدین صورت است که خواص فیزیکی مدل همچون چگالی، تخلخل و سرعت صوت با آزمون‌های اندازه‌گیری چگالی، تخلخل و صوت و مدول برشی بصورت تحلیلی، مقاومت فشاری تک محوره و منحنی تنش- کرنش جانبی و محوری با آزمون فشاری تک‌محوره، مقاومت برشی و پارامترهای وابسته به زاویه لود (Q_0 و B)، ضرائب رویه شکست (A و n) با آزمون فشاری سه‌محوره، پارامترهای نرخ کرنش (β_c ، γ_c و β_t و γ_t) از آزمون هاپکینسون که در این مقاله از داده‌های مقالات مختلف استفاده شده، ضرائب رویه مقاومت باقیمانده (A_f و N_f) و ضرائب مدل شکست (D_1 و D_2) با کالیبراسیون شبیه‌سازی عددی و ضرائب معادله حالت (A_1 ، A_2 ، A_3 ، T_1 ، T_2 ، B_0 ، B_1 و γ) به روش روابط تحلیلی- تجربی بدست می‌آیند.

۳-۲-۳- صحت‌سنجی آزمایش فشاری سه‌محوره

فشار محصورکننده به طور قابل توجهی بر رفتار مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارد. مقاومت فشاری سه محوری بتن یک ویژگی کلیدی است که نقش مهمی در تحلیل مکانیک این گونه مواد ایفا می‌کند. با افزایش فشار محصورکننده، مقاومت بتن افزایش می‌یابد. بنابراین، ارزیابی و اعتبارسنجی پارامترهای تعیین شده برای مدل رفتاری RHT برای بتن تحت شرایط بارگذاری سه محوری ضروری است. برای دستیابی به این هدف، پنج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری بر روی بتن انجام شد و نتایج این آزمایش‌ها با شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته، مقایسه شد (شکل ۲۱). همانگونه که در شکل مشخص است تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی در نمودار تنش محصورکننده نسبت به تنش فشاری وارد به نمونه‌های بتنی وجود دارد و بیشترین اختلاف نتایج در نمونه چهارم حدود ۱۰ درصد و در بقیه نمونه‌ها زیر ۳ درصد می‌باشد.



شکل ۲۱- مقایسه روش‌های عددی و تجربی آزمایش فشاری سه‌محوره

۳-۲-۴- صحت‌سنجی آزمایش کششی برزیلی

منحنی‌های تنش-جابجایی عمودی بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی بتن در آزمون برزیلی در شکل (۲۲) ارائه شده است. مقاومت کششی بتن برزیلی به صورت تجربی $3/05$ مگاپاسکال اندازه‌گیری و در مدل عددی $3/15$ مگاپاسکال شبیه‌سازی شد. بنابراین اختلاف نتایج عددی و تجربی $3/2$ درصد می‌باشد. الگوهای شکست نیز همانطور که در شکل (۲۳) نشان داده شده، مقایسه شدند.

در هر دو مدل تحلیل المان محدود و مشاهده تجربی، تشکیل ترک غالب در امتداد محور بارگذاری مشاهده شد. علاوه بر این، دو ترک فرعی در دو طرف ترک اصلی مشاهده شد که از محیط

طراحی‌های مهندسی بتن عمل می‌کند و تعیین، تأیید و کالیبراسیون موفقیت‌آمیزی را ارائه می‌دهد. این یافته‌ها درک ما از مدل رفتاری RHT را افزایش و یک چارچوب قوی برای شبیه‌سازی کاربردهای مختلف مهندسی بتن فراهم می‌کند.

مراجع

- [1] Liu, S., Xu, J. (2015). Effect of strain rate on the dynamic compressive mechanical behaviors of rock material subjected to high temperatures. *Mech Mater*, 82, 28–38.
- [2] Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S. (1999). Penetration of reinforced Concrete by BETA-B500, numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydro codes. In *Proceedings of the 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures*, Berlin.
- [3] Ding, Y. (2013). Determination and validation of parameters for Riedel-Hiermaier-Thoma concrete model. *Defence Sci. J.* 63(5), 524–530.
- [4] Kuczewicz, M., Baranowski, P., Małachowski, J. (2020). Determination and validation of Karagozian-case concrete constitutive model parameters for numerical modeling of dolomite rock. *Int. J. Rock Mech Min Sci.* 129, 104–117.
- [5] Huang, H., Li, W., Lu, Z. (2021). Determination of parameters of Johnson-Holmquist-I (JH-1) constitutive model for red sandstone. *J. Phys. Conf.* 8, 120–138.
- [6] Tian, H. (2022). Determination of constitutive parameters of crystalline limestone based on improved RHT model. *Adv Mater Sci Eng.*
- [7] Wang, Z. (2022). Investigation of the influence of cutting parameters on pick cutting performance and rock damage. *Machines*, 10, 11–34.
- [8] Li, Z. (2023). Study on cyclic blasting failure characteristics and cumulative damage evolution law of tunnel rock mass under initial in-situ stress. *Eng Fail Anal.* 150:107310.
- [9] Borrvall, T., Riedel, W. (2011). The RHT concrete model in LSDYNA. *Proceedings of the 8th Euro LS-DYNA user conf.*
- [10] Rouhani, H., Farrokhi, E. (2024). Failure analysis of Nehbandan granite under various stress states and strain rates using a calibrated Riedel-Hiermaier-Thoma constitutive model. *Geo-energy*, 10, 156–179.
- [11] Fatahi, D., Farrokhi, E., Lotfi, D. (2023). Study of the effect of penetration depth and disc speed on cutting forces using LS-DYNA simulations. *Amirkabir J. Civil. Eng.*

همچنین ضرائب دیگر مدل ضرائب ثابتی هستند که برای هر ماده مقادیر مشخص دارند.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش جامع برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری RHT برای بتن ارائه می‌دهد. این روش شامل انجام آزمایش‌های تجربی، استفاده از داده‌های موجود در منابع علمی و کالیبراسیون به روش عددی برای تعیین خواص فیزیکی، مقاومت‌های فشاری و برشی و پارامترهای وابسته به زاویه لود، پارامترهای نرخ کرنش و ضرائب رویه شکست و پارامترهای معادله حالت است. همچنین پارامترهای مقاومت باقیمانده و آسیب مدل از طریق یک فرآیند تکراری با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی کالیبره می‌شوند. این کالیبراسیون با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی، اطمینان از دقت مدل را تضمین می‌کند. برای تأیید مدل، مقایسه‌ای بین داده‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های مختلف انجام شده، از جمله مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت فشاری سه محوری، مقاومت کششی برزلی و آزمایش‌های دینامیکی برزلی و داده‌های شبیه‌سازی عددی تولید شده با استفاده از کد ال اس داینا انجام شده می‌گردد. نتایج این مقایسه‌ها، توانایی مدل را در پیش‌بینی دقیق رفتار بتن تحت فشار و کشش، برای هر دو شرایط بارگذاری دینامیکی و استاتیکی تأیید می‌کند. یافته‌ها همچنین اثربخشی مدل رفتاری RHT را در پیش‌بینی رفتار بتن تحت شرایط بارگذاری مختلف برجسته می‌کند و تطبیق‌پذیری آن را در کاربردهای عملی نشان می‌دهد. منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی بدست آمده از نتایج عددی و آزمایشگاهی در آزمون فشاری تک محوره تطابق خوبی با نتایج عددی دارد بطوریکه حداکثر اختلاف نتایج در منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی به ترتیب ۳ و ۷ درصد گردید. بیشترین اختلاف نتایج آزمون فشاری سه‌محوره با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی حدود ۱۰ درصد شد. از طرفی مشخص گردید، مقاومت کششی بتن به صورت تجربی ۳/۰۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری و در مدل عددی ۳/۱۵ مگاپاسکال شبیه‌سازی شد. بنابراین اختلاف نتایج عددی و تجربی ۳/۲ درصد است. مدل رفتاری RHT توانایی استثنایی در پیش‌بینی دقیق شکستگی‌های کششی و برشی در بتن نشان می‌دهد. در نتیجه، روش پیشنهادی به عنوان یک راهنمای مفید برای

- Zhang, H. (2020). Theoretical and numerical investigation of deep-hole cut blasting based on cavity cutting and fragment throwing. *Tunn Undergr Space Technol*, 111:103854.
- [21] Luo, Y., Wang, G., Li, X., Liu, T., Qu, D., Huang, J. (2022). Research on triaxial compression failure characteristics and meso-simulation of brittle gypsum material. *Euro J. Environ Civil Eng*, 11, 5241–5258.
- [22] Liu, Q. (2022). Residual Strength Estimation Method of Soft Coal Based on Equivalent Residual Strain Ratio. *Geofluids*, 1, 567-588.
- [23] Chen, X., Feng, L., Wang, J., Guo, S., Xu, L. (2022). Cyclic triaxial test investigation on tuffs with different water content at Badantoru Hydropower Station in Indonesia. *Eng. Geol*, 554-567.
- [24] Li, H., Li, J., Liu, B., Li, J., Li, S., Xia, X. (2013). Direct tension test for rock material under different strain rates at quasi-static loads. *Rock Mech*, 46(5), 1247–1254.
- [25] Cho, S., Ogata, Y., Kaneko, K. (2003). Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock. *Int. J. Rock Mech*, 40(5), 763–777.
- [26] Karacan, E., Yilmaz, I. (2000). Geotechnical evaluation of Miocene gypsum from Sivas (Turkey). *Geotech Geol Eng*, 18, 79–90.
- [27] Gebbeken, N., Greulich, S., Pietzsch, A. (2006). Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests. *Int. J. Impact Eng*, 32(12), 2017–2031.
- [12] Akdag, S. (2021). Evaluation of the propensity of strain burst in brittle granite based on post-peak energy analysis. *Underground Space*, 21, 1-11.
- [13] Xie, B. (2020). Numerical simulation of split-Hopkinson pressure bar tests for the combined coal-rock by using the Holmquist–Johnson–Cook model and case analysis of outburst. *Adv. Civil. Eng*, 1–14.
- [14] Zhou, ZL. (2017). Dynamic behavior of rock during its post failure stage in SHPB tests. *Trans Nonferrous Metals Soc China (English Edition)*, 27(1), 184–196.
- [15] XB Liu XB, TS Lok, J Zhao (2015) Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate. *Rock Mech Rock Eng* 38(1):21–39.
- [16] Bian, YL. (2021). Compression and spallation properties of polyethylene terephthalate under plate impact loading. *Int. J. Mech Sci*, 211:106736.
- [17] Zou, Z. (2016). Rock fracture and blasting: theory and applications. Butterworth-Heinemann.
- [18] Li, H. (2013). Direct tension test for rock material under different strain rates at quasi-static loads. *Rock Mech Rock Eng*, 46(5), 1247–1254.
- [19] Cho, SH., Ogata, Y., Kaneko, K. (2003). Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock. *Int. J. Rock Mech Min Sci*, 40(5), 763–777.
- [20] Lou, C. (2023). Dynamic mechanical characteristics of deep Jinping marble in complex stress environments. *J. Rock Mech Geotech Eng* (Preprint).