

شبیه سازی عددی نفوذ پرتابه در هدف بتنی و بررسی روابط تجربی نفوذ

طیب علیزاده^۱، جواد مرادلو^{۲*}، کیارش ناصراسدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه زنجان

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه زنجان

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه زنجان

ajmoradloo@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۱۸

چکیده- در این پژوهش رابطه‌ی تجربی و تحلیلی معتبر که برای محاسبه عمق نفوذ ب وسیله‌ی پژوهشگران ارائه شده، به همراه روش شبیه‌سازی عددی به‌وسیله نتایج تعدادی از آزمایش‌های تجربی بررسی و مقایسه شد. با مقایسه نتایج روابط تجربی و آزمایشگاهی می‌توان عنوان کرد که این روابط براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و در محدوده کاربری خاصی نتیجه گیری شده و دارای دقت مناسبی در بیشتر موارد نیست. از میان روابط تجربی ارائه شده رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا دارای عملکرد و دقت مناسبتری نسبت به دیگر روابط است. در بحث شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل آراج تی (RHT)، که یک مدل مقاومت و شکست بتن پلاستیسیته پیشرفته است، دو شبیه سازی عددی انجام شده که نتایج این دو و نتایج حاصل از روابط تجربی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با دقت مناسب پارامترهای مدل ماده استفاده شده در شبیه‌سازی عددی، می‌توان به نتایجی با دقت رسید.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی نفوذ در بتن، روابط تجربی، شبیه سازی عددی، ضربه، تحلیل غیرخطی.

۱- مقدمه

بتن یکی از مصالح رایج در سازه‌های مهم و استراتژیک است که کارآمدی بالا و مزایای فراوان از جمله شکل پذیری و مقاومت مناسب نسبت به دیگر مصالح، در بارگذاری‌های دینامیکی بسیار شدید مانند بارگذاری ضربه‌ای پرتابه یا انفجار که نرخ کرنش بالایی دارند رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهد. یکی از روش‌های بررسی

تأثیر این مسائل به صورت سنتی روابط تجربی و تحلیلی است.

از گذشته پژوهشگران آزمایش‌های میدانی تجربی متعددی را در این زمینه انجام داده‌اند که حاصل آنها ارائه روابط محاسبه عمق نفوذ پرتابه در بتن است که می‌توان به رابطه‌ی ارائه شده توسط پتری^۱، آزمایشگاه تحقیقات

1- Petry

دینامیکی بتن و تخریب آن با استفاده از ترکیب مدل ویسکوپلاستیسیته و تئوری تخریب بوده است.

در مدلسازی عددی علاوه بر عمق نفوذ، ابعاد و جزئیات خسارت ارائه می‌شوند. در این روش با کالیبره نمودن پارامترهای تأثیرگذار دقت نتایج تا حد قابل قبولی بالا می‌رود که می‌توان به عملکرد این روش اطمینان کرد. این پژوهش به بررسی روابط تحلیلی و تجربی نفوذ پرتابه در هدف بتنی و مطالعات عددی روی نمونه‌های تجربی موجود می‌پردازد و عملکرد و دقت دو روش شبیه‌سازی عددی و روابط تجربی مقایسه می‌شود.

۲- ارائه نمونه‌هایی از روابط تجربی

عوامل مختلفی در شرایط و چگونگی نفوذ یک پرتابه در هدف بتنی تأثیرگذار است که موارد مؤثر را می‌توان به صورت رابطه زیر در نظر گرفت:

$$X = f(M, V_0, d, N, f_c, r, E, a, R, \rho, \rho_p, \dots) \quad (1)$$

در این رابطه M جرم پرتابه برحسب کیلوگرم، V_0 سرعت برخورد برحسب متر برثانیه، d قطر پرتابه برحسب متر، N ضریب شکل نوک پرتابه، f_c مقاومت فشاری بتن برحسب پاسکال، r ضریب مسلح شدگی بتن، E ضریب ارتجاعی پرتابه، a اندازه مشخصه سنگ‌دانه بتن برحسب متر، R شعاع قوس دماغه پرتابه برحسب متر و ρ ، ρ_p به ترتیب چگالی بتن و فلز پرتابه برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

روابط متعددی در مورد نفوذ پرتابه در هدف بتنی وجود دارد. در این مطالعه دوازده مورد از این روابط که دارای دقت بالاتر و کاربرد بیشتری است، بررسی شده که در ادامه هفت مورد به تفصیل ارائه می‌شود. پنج مورد دیگر در مراجع مربوطه [۹ و ۱۰] ارائه شده است.

بالستیک^۱، ویفن^۲، برگمن^۳، هیوز^۴، گروه مهندسی ارتش آمریکا^۵ و رابطه تحلیلی تجربی فورستال^۶ اشاره کرد [۱]. محدث^۷ و همکاران [۲] چگونگی محاسبه عمق نفوذ پرتابه صلب در اهداف بتن-خاک را با استفاده از تئوری انبساط حفره کروی و رابطه فورستال ارائه کردند.

روابط تجربی و تحلیلی در اکثر موارد از عدم دقت لازم و محدودیت‌هایی برخوردار است که میزان صحت، دقت و ارزش محاسباتی آنها را کم می‌کند. از طرف دیگر با رشد دانش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری و گسترش مدل‌های غیرخطی بتن، استفاده از روش‌های نوین شبیه‌سازی عددی امکان پذیر شده است.

در زمینه شبیه‌سازی عددی نفوذ در بتن، با تحقیقات و تحلیل‌هایی که پژوهشگرانی مثل لیپانن^۸ [۳] و هانسون^۹ [۴] و نیستروم^{۱۰} [۵] و ژنگو^{۱۱} [۶] انجام داده‌اند نتایج دلخواه در شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌ای بتن ارائه شده است. واحدی^{۱۲} و همکاران [۷] شبیه‌سازی رفتار دینامیکی بتن تحت بارگذاری ضربه‌ای را در نرم‌افزار LS-DYNA انجام دادند. در تحقیق بتن با مدل جانسون هولمکوویست^{۱۳} مدل شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی است. لیاقت^{۱۴} و همکاران [۸] یک مدل ساختاری ترکیبی برای بتن تحت تأثیر بارگذاری با نرخ کرنش نسبتاً بالا را ارائه کردند. روش پیشنهادی برای پیش‌بینی مقاومت

1- Ballistic Research Laboratory

2- Whiffn

3- Bergman

4- Hughes

5- Army Corps of Engineers

6- Forrestal

7- Mohades

8- Leppanen

9- Hansson

10- Nystrom

11- Zhenguo

12- Vahedi

13- Jonson and Holmquist

14- Liaghat

$$x = \frac{3.5 \times 10^{-4}}{\sqrt{f_c}} \times \frac{M}{d^2} \times d^{0.215} \times V_0^{1.5} + 0.5 \quad (5)$$

• **رابطه اصلاح شده کمیته تحقیقات دفاع ملی امریکا**
این رابطه نخستین بار توسط کمیته تحقیق دفاع ملی امریکا در سال ۱۹۴۶ و بر اساس رابطه گروه مهندسی ارتش امریکا ارائه شده است. در این رابطه علاوه بر قطر، جرم، سرعت پرتابه و مقاومت بتن، شکل پرتابه نیز تأثیر داده شده است:

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \times \left(\frac{NM}{d \times \sqrt{f_c}} \right) \times \left(\frac{V_0}{d} \right) 1.8 \quad (6)$$

$$\frac{x}{d} = \begin{cases} 2G^{0.5} & \text{for } G \geq 1 \\ G+1 & \text{for } G < 1 \end{cases} \quad (7)$$

N ضریب دماغه بوده که برای دماغه‌های تخت ۰/۷۲، نیم کره ۰/۸۴، نوک تیز پهن ۱ و خیلی نوک تیز ۱/۱۴ است.

• **رابطه هیوز**

این رابطه توسط هیوز و در سال ۱۹۸۳ و بر اساس فرض‌های رابطه اصلاح شده کمیته تحقیقات دفاع ملی امریکا ارائه شده است [۱۱]:

$$\frac{x}{d} = 0.19 N_h \frac{I}{S} \quad (8)$$

N_h ضریب شکل دماغه بوده که برای دماغه‌های تخت ۱، دماغه‌های لبه دار ۱/۱۲، کروی ۱/۲۶ و برای دماغه‌های خیلی تیز ۱/۳۹ است.

I پارامتر برخورد بوده که از رابطه (۹) بدست می‌آید و دارای محدودیتی با شرط $40 \leq I \leq 3500$ است. S عامل اندازه گیری کرنش از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$I = MV_0^2 / (f_c d^3) \quad (9)$$

$$S = 1 + 12.3 I n(1 + 0.03 I) \quad (10)$$

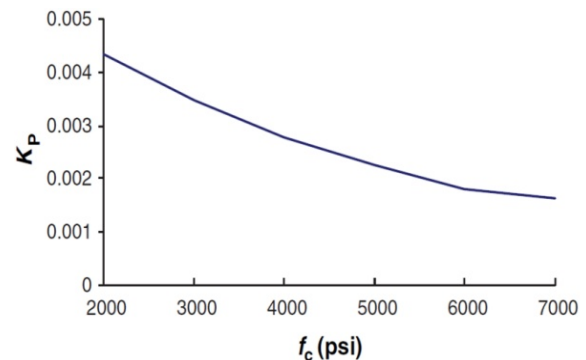
• **رابطه اصلاح شده پتری**

رابطه پتری کاربردی‌ترین و قدیمی‌ترین رابطه مورد استفاده در امریکا برای پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه در یک محیط بی‌نهایت بتنی است. در این رابطه قطر، جرم و سرعت پرتابه و مقاومت بتن در نظر گرفته شده است [۱]:

$$x = k \frac{M}{d^2} \log_{10} \left(1 + \frac{V_0^2}{19974} \right) \quad (2)$$

$$k = 0.0795 k_p \quad (3)$$

ضریب k_p یا ضریب نفوذ پذیری بتن بر حسب مقاومت فشاری بتن از شکل (۱) به دست می‌آید.



شکل (۱) تغییرات نفوذپذیری بتن نسبت به مقاومت فشاری [۱]

• **رابطه آزمایشگاه تحقیقات بالستیک (BRL)**

این رابطه در سال ۱۹۴۱ برای محاسبه عمق نفوذ پرتابه صلب در سازه‌های بتنی و مطابق رابطه (۴) و بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است [۲]:

$$x = \frac{1.33 \times 10^{-3}}{\sqrt{f_c}} \times \frac{M}{d^2} \times d^{0.2} \times V_0^{1.33} \quad (4)$$

• **رابطه گروه مهندسی ارتش (ACE)**

این رابطه بر اساس نتایج آزمایشگاهی و اصلاح رابطه آزمایشگاه تحقیقات بالستیک توسط گروه مهندسی ارتش امریکا و در سال ۱۹۴۳ ارائه شد [۳].

گرفته شوند آنگاه رابطه، یک رابطه جامع و دقیقی خواهد بود. از عوامل بارگذاری ضربه‌ای سازه بتنی، هفت عامل اساسی برای مقایسه در دوازده رابطه در نظر گرفته شده که در جدول (۱) شرایط مقایسه آنها فراهم و نکات زیر قابل ارائه می‌شود:

- تنها چهار عامل سرعت، مقاومت بتن، جرم و قطر پرتابه در تمامی روابط در نظر گرفته شده اند.
- بیشتر روابط ارائه شده مقادیر تسلیح را در نظر نمی‌گیرند. براساس پژوهش‌های انجام شده مشخص شد که میزان ۰/۳ تا ۱/۵ درصد مسلح شدگی اثر اندکی روی نفوذ و پوسته شدگی دارد ولی میزان ۱/۵ تا ۳ درصد فقط مقاومت در برابر سوراخ شدگی را افزایش می‌دهد.
- شکل پرتابه که تأثیر زیادی در فرایند و عمق نفوذ دارد، در بعضی از روابط تأثیر داده نشده است.
- در اکثر روابط اثر اندازه سنگدانه‌ها در اندازه‌گیری تأثیر داده نشده است در حالی که اندازه سنگدانه یکی از عوامل مؤثر در عمق نفوذ است.

- در سرعت‌های برخورد کمتر از ۸۰۰ متر بر ثانیه اثر فرسایش ناشی از سایش در دماغه پرتابه مشاهده شده است ولی اثر سایش در بیشتر روابط نفوذ در نظر گرفته نشده است.

برای اعتبار سنجی روابط تجربی و تحلیلی مشخصات و نتایج تعدادی از آزمایش‌های تجربی در جدول (۲) در نظر گرفته شده است. در انتخاب این آزمایش‌ها سعی شده است که تقریباً محدوده گسترده‌ای از پارامترها، تحت پوشش قرار گیرند تا بررسی انجام شده جامع باشد. جنس اهداف بتنی و به شکل استوانه‌ای و پرتابه‌ها از جنس فولاد و به شکل اجایو (گلوله‌ای شکل) است. نتیجه به دست آمده با روابط بالا استفاده از مقادیر عددی آزمایش‌های تجربی درصد دقت روابط، در جدول (۳) ارائه شده است.

$$f_t = 0.63(f_c)^{1/2} \quad (11)$$

• رابطه هلی و ویزمن^۱

این رابطه مشابه رابطه اصلاح شده کمیته تحقیقات دفاع ملی آمریکا و رابطه کار^۲ است [۱]:

$$G = 4.36 \times 10^{-5} \times \left(\frac{E}{E_S}\right) \times \frac{N M}{d \times \sqrt{f_c}} \times \left(\frac{V_0}{d}\right) 1.8 \quad (12)$$

$$\frac{x}{d} = \begin{cases} 2G^{0.5} & \leftarrow 1 \leq G \\ G+1 & \leftarrow 1 > G \end{cases} \quad (13)$$

• رابطه نیمه تحلیلی فورستال

این رابطه در تحقیقات انجام شده توسط فورستال بر مبنای روابط تحلیلی در سال ۱۹۹۴ به دست آمده است [۳].

$$x = \frac{M}{2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \rho N} \ln\left(1 + \frac{N \rho V_1^2}{S f_c}\right) + 2d \quad \text{for } x > 2d \quad (14)$$

پارامترهای رابطه فوق عبارتند از:

$$S = 82.6 (f_c)^{-0.544} \quad (15)$$

$$\psi = \frac{R}{d} \quad (16)$$

$$N = \frac{8\psi - 1}{24\psi^2} \quad (17)$$

$$V_1^2 = \frac{M V_0^2 - 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 S f_c}{M + 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 N \rho} \quad (18)$$

۳- بررسی و مقایسه روابط تجربی - تحلیلی

عوامل متعددی در فرآیند عمق نفوذ تأثیرگذار است که در هر رابطه تجربی با توجه به برداشت و نحوه آزمایش‌های انجام شده این عوامل در نظر گرفته شده‌اند. اگر تمامی عوامل در یک رابطه با نسبت تأثیر مناسب و واقعی در نظر

1- Healey & Weissman
2- Kar

۳-۱- مقایسه عملکرد روابط نفوذ در بتن

از بین دوازده رابطه عنوان شده در جدول (۱) فقط شش رابطه پتری، آزمایشگاه تحقیقات بالستیک، گروه مهندسی ارتش آمریکا، کمیته تحقیق دفاع ملی آمریکا، هیوز و هیلی و ویزیمن که همگی آزمایش ها را تحت پوشش قرار داده است و نتایج مناسبی را نسبت به دیگر روابط ارائه کرده اند، برای مقایسه عملکرد آنها، در نظر گرفته شده است.

چهار عامل سرعت برخورد، قطر پرتابه، جرم پرتابه و مقاومت فشاری بتن برای این مقایسه نسبت به نتایج آزمایش های تجربی، در نظر گرفته شده که نتایج آن در شکل های (۲) الی (۵) ارائه شده است.

در تفسیر شکل های فوق باید دقت کرد که عوامل تحت بررسی یک جانبه تغییر داده نشده و تغییر یک بعدی نیست بنابراین نباید انتظار داشت به محض افزایش سرعت و یا جرم و.... عمق نفوذ افزایش داشته باشد.

در جدول (۳) مواردی که آزمایش در محدوده کاربری رابطه نبوده به صورت خط تیره نشان داده شده است. همان گونه که در جدول (۳) مشخص است، بعضی از روابط بر اساس محدودیت هایی که دارند حتی یک آزمایش را هم تحت پوشش قرار نداده اند. درصد دقت نتایج محاسباتی در محدوده ۳۰/۲ درصد تا ۱۴۸/۲ درصد (حدود یک و نیم برابر نتیجه واقعی) به دست آمده است. از طرف دیگر درصد دقتی در حدود ۹۹/۸ درصد هم در نتایج دیده می شود. در آزمایش شماره چهار که سوراخ شدگی کامل نتیجه آزمایش تجربی است هیچ کدام از روابط این نتیجه را ارائه نکرده اند با این که نتایج در محدوده کاربری این روابط است ولی بیشتر نتایج به دست آمده ارزش محاسباتی ندارند. رابطه فورستال در چارچوب محدودیت های عنوان شده پاسخ های مناسبی را ارائه کرده است و رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا دقت مناسبی در محدوده کاربری وسیعی دارد.

جدول (۱) پارامترهای مورد استفاده در روابط تجربی و تحلیلی

عنوان رابطه	جرم M	سرعت V ₀	قطر پرتابه D	شکل پرتابه N	اندازه سنگدانه a	ضریب تسلیح K	مقاومت فشاری f _c
برگمن	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
پتری	✓	✓	✓	×	×	✓	✓
تحقیقات بالستیک	✓	✓	✓	×	×	×	✓
گروه مهندسی ارتش آمریکا	✓	✓	✓	×	×	×	✓
ویفن	✓	✓	✓	×	✓	×	✓
کمیته تحقیق دفاع ملی آمریکا	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
کار	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
یوکی	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
هالدروهمیه	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
هیلی و ویزیمن	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
هیوز	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
فورستال	✓	✓	✓	✓	×	×	✓

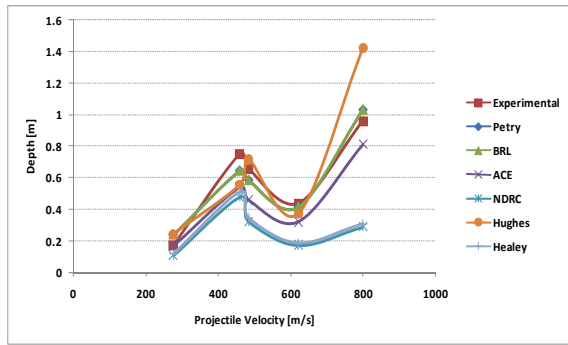
علامت ✓ نشانگر استفاده و علامت × نشانگر عدم استفاده از پارامتر مذکور می باشد.

جدول (۲) مشخصات و نتایج آزمایشات تجربی

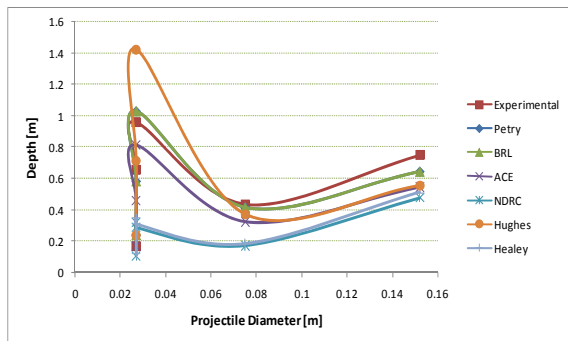
مشخصات	نماد	واحد	[۱۳] ۱	[۱۴] ۲	[۱۴] ۳	[۴] ۴	[۱۴] ۵
مشخصات هدف							
ارتفاع استوانه	H ₀	m	۲	۰/۷۶	۱/۸۳	۲/۴	۱/۲۲
قطر استوانه	D	m	۱/۶	۱/۳۷	۱/۲۲	۰/۷۵	۱/۳۷
چگالی	ρ	Kg/m ³	۲۴۰۰	۲۳۷۰	۲۳۷۰	۲۳۹۰	۲۴۰۰
مقاومت فشاری	f _c	Pa	۳۲	۳۵/۲	۳۲/۴	۹۲	۸۰
اندازه مشخصه سنگدانه بتن	a	m	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴
مشخصات پرتابه							
طول پرتابه	H	m	۰/۲۲۵	۰/۲۴۲۴	۰/۲۴۲۴	۰/۵۵۲	۰/۲۴۲۴
قطر پرتابه	d	m	۰/۰۷۵	۰/۰۲۶۹	۰/۰۲۶۹	۰/۱۵۲	۰/۰۲۶۹
سرعت برخورد	V ₀	m/s	۴۸۵	۲۷۷	۸۰۰	۴۶۰	۶۲۲
جرم پرتابه	M	Kg	۶/۲۸	۰/۹۰۶	۰/۹۰۴	۴۶/۲	۰/۹۰۵
طول دماغه پرتابه	h	m	۰/۰۹	۰/۰۳۵۶	۰/۰۳۵۶	۰/۲۲۸	۰/۰۳۵۶
ضریب شکل دماغه	N*	-	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۱۴
شعاع دماغه پرتابه	R	m	۰/۲۸	۰/۰۵۳۸	۰/۰۵۳۸	۰/۳۸	۰/۰۵۳۸
تنش تسلیم پرتابه	YS	Pa	۷۹۲	۱۴۴۸	۱۴۴۸	۱۵۳۹	۱۴۴۸
نتایج آزمایشگاهی							
عمق نفوذ	x	m	۰/۶۵۵	۰/۱۷۳	۰/۹۵۸	۰/۷۵	۰/۴۳۷

جدول (۳) نتایج حاصل از روابط نفوذ و درصد دقت آنها در مقایسه با نتایج آزمایشات تجربی

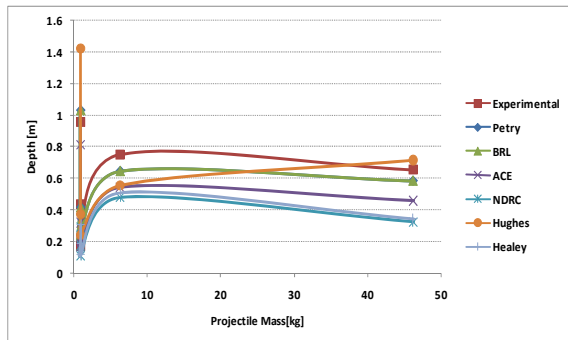
عنوان	شماره آزمایش					عنوان	شماره آزمایش					
	۵	۴	۳	۲	۱		۵	۴	۳	۲	۱	
نتایج تجربی	۰/۴۳۷	۰/۷۵	۰/۹۵۸	۰/۱۷۳	۰/۶۵۲	نتایج تجربی	۰/۴۳۷	۰/۷۵	۰/۹۵۸	۰/۱۷۳	۰/۶۵۲	
رابطه پتری	عمق نفوذ	۰/۲۷	۰/۱۵۷	۰/۳۸۵	۰/۲۷۱	۰/۵۳۴	عمق نفوذ	۰/۲۷	۰/۱۵۷	۰/۳۸۵	۰/۲۷۱	۰/۵۳۴
	درصد دقت	۴۱	۹۰/۶	۴۰/۲	۳۶/۱	۷۷/۸	درصد دقت	۴۱	۹۰/۶	۴۰/۲	۳۶/۱	۷۷/۸
رابطه برگمن	عمق نفوذ	-	-	-	-	-	عمق نفوذ	-	-	-	-	-
	درصد دقت	-	-	-	-	-	درصد دقت	-	-	-	-	-
رابطه تحقیقات بالستیک	عمق نفوذ	۰/۵۸۴	۰/۲۴۱	۱/۰۳	۰/۶۴۵	۰/۴۶۹	عمق نفوذ	۰/۵۸۴	۰/۲۴۱	۱/۰۳	۰/۶۴۵	۰/۴۶۹
	درصد دقت	۸۹/۶	۶۰/۷	۹۲/۵	۸۶	۹۲/۷	درصد دقت	۸۹/۶	۶۰/۷	۹۲/۵	۸۶	۹۲/۷
رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا	عمق نفوذ	۰/۴۶۰	۰/۱۷۰	۰/۸۱۲	۰/۵۴۴	۰/۳۶۲	عمق نفوذ	۰/۴۶۰	۰/۱۷۰	۰/۸۱۲	۰/۵۴۴	۰/۳۶۲
	درصد دقت	۷۰/۶	۹۸/۲	۸۴/۸	۷۲/۵	۸۲/۸	درصد دقت	۷۰/۶	۹۸/۲	۸۴/۸	۷۲/۵	۸۲/۸
رابطه کمیته تحقیق دفاع ملی آمریکا	عمق نفوذ	۰/۳۲۳	۰/۱۰۹	۰/۲۸۹	۰/۴۷۷	۰/۱۸۴	عمق نفوذ	۰/۳۲۳	۰/۱۰۹	۰/۲۸۹	۰/۴۷۷	۰/۱۸۴
	درصد دقت	۴۹/۵	۶۳	۳۰/۲	۶۳/۶	۴۲/۱	درصد دقت	۴۹/۵	۶۳	۳۰/۲	۶۳/۶	۴۲/۱
رابطه ویفن	عمق نفوذ	۰/۴۹۹	۰/۲۳۸	۰/۹۵۷	-	-	عمق نفوذ	۰/۴۹۹	۰/۲۳۸	۰/۹۵۷	-	-
	درصد دقت	۷۶/۵	۶۲/۴	۹۹/۹	-	-	درصد دقت	۷۶/۵	۶۲/۴	۹۹/۹	-	-



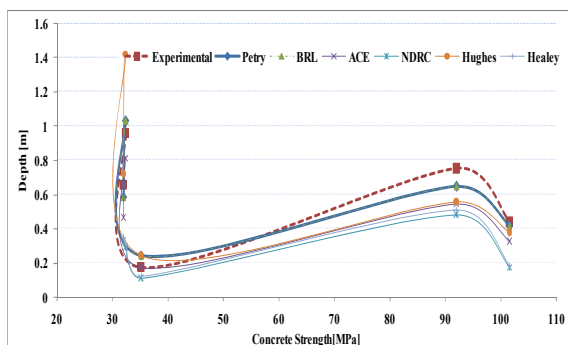
شکل (۲) عملکرد روابط تجربی (عمق نفوذ در برابر سرعت پرتابه)



شکل (۳) عملکرد روابط تجربی (عمق نفوذ در برابر قطر پرتابه)



شکل (۴) عملکرد روابط تجربی (عمق نفوذ در برابر جرم پرتابه)



شکل (۵) عملکرد روابط تجربی (عمق نفوذ در برابر مقاومت بتن)

به عنوان مثال در شکل (۲) وقتی که سرعت از ۴۸۵ به مقدار ۶۲۲ می رسد عمق نفوذ کاهش پیدا می کند در حالی که انتظار می رود عمق نفوذ افزایش داشته باشد ولی با توجه به این که جرم پرتابه کاهش و مقاومت فشاری بتن افزایش داشته که این تغییر در عوامل یاد شده باعث شده که انرژی پرتابه و عکس العمل هدف بر عکس افزایش تناسبی سرعت باشد و در نتیجه عمق نفوذ کاهش داشته باشد.

در شکل (۲) عملکرد نسبت عمق نفوذ به تغییرات سرعت پرتابه، در روابط عنوان شده ارائه شده است که در آن منحنی پاسخ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا نسبت به دیگر روابط دارای هماهنگی و تشابه بیشتری با منحنی حاصل از نتایج آزمایشگاهی دارد.

در شکل (۳) عملکرد روابط تجربی یاد شده، برای نسبت عمق نفوذ به قطر پرتابه ارائه شده است که در آن منحنی پاسخ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا و در محدوده هایی هم رابطه آزمایشگاه تحقیقات بالستیک نسبت به دیگر روابط دارای هماهنگی و تشابه بیشتری با منحنی حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی دارند.

در شکل (۴) عملکرد روابط تجربی برای نسبت عمق نفوذ به جرم پرتابه ارائه شده است که در آن منحنی پاسخ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا و در محدوده هایی هم رابطه آزمایشگاه تحقیقات بالستیک نسبت به دیگر روابط تشابه بیشتری به منحنی نتایج آزمایشگاهی دارند.

در شکل (۵) عملکرد شش رابطه تجربی مورد بحث برای نسبت عمق نفوذ به مقاومت بتن ارائه شده است که در آن منحنی پاسخ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا نسبت به دیگر روابط دارای هماهنگی و تشابه خوبی با منحنی حاصل از نتایج آزمایشگاهی دارد.

دقت مناسبی در مدلسازی رفتار بتن نسبت به دیگر مدل‌ها دارد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی از این مدل استفاده می‌شود.

در بارگذاری ضربه‌ای جنس هدف و پرتابه باید مشخص باشد که در این پژوهش هدف بتن و جنس پرتابه فولاد است. مدل‌های به کار گرفته شده برای این مصالح در جدول (۴) ارائه شده است. این انتخاب براساس ویژگی‌های مصالح پرتابه و هدف [۳ و ۴] در نظر گرفته شده و همانگونه که از جدول (۴) پیدا است پرتابه به دلیل اینکه صلب و سخت در نظر گرفته شده است مدل شکست و مدل فرسایش ندارد.

جدول (۴) مدل‌های به کار گرفته شده برای مصالح

عنوان	جنس	معادله حالت	مدل مقاومت	مدل شکست	مدل فرسایش
هدف	بتن	$P-\alpha$	RHT	RHT	کرنش هندسی
پرتابه	فولاد	جانسون کوک	جانسون کوک	ندارد	ندارد

۴-۱- مدل بتن RHT

مدل آر اچ تی مدل پلاستیسیته پیشرفته‌ای است که اول توسط ریدل^۲، هایرمایر^۳ و توما^۴ پیشنهاد و توسط ریدل توسعه داده شده است. این مدل برای شبیه‌سازی بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته‌اند بسیار کارآمد است [۱۵]. عملکرد و رفتار مناسب این مدل در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن براساس انتخاب صحیح مقادیر ثابتی است که به عوامل و پارامترهای آن اختصاص داده می‌شود. هر قدر انتخاب این مقادیر با منطق و بررسی بیشتری انجام شود نتایج به دست آمده به واقعیت نزدیک‌تر خواهند بود. این مدل همراه با معادله حالت پی - آلفا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه نتایج نهائی بعد از تدقیق پارامترهای

از اشکال (۲) الی (۵) معلوم است که دو رابطه آزمایشگاه تحقیقات بالستیک و گروه مهندسی ارتش آمریکا نسبت به دیگر روابط عملکرد مناسبی دارند. رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا در حدودی منطبق بر نتایج تجربی بوده و در مواردی هم با ضریب ثابتی نسبت به نتایج تجربی تفاوت داشته است که این ضریب تقریباً همواره افزایش یافته است در حالی که در دیگر روابط این ضریب یا خیلی عدد محسوسی است و در محدوده‌ای افزایش یافته و در حدود دیگری کاهش یافته است که عملکرد دوگانه‌ای داشته و بنابراین قابل اطمینان نیست.

۴- مدلسازی عددی آزمایش‌های تجربی

همانگونه که عنوان شد روابط تجربی و تحلیلی روش مناسبی برای محاسبه و تحلیل مسائل بارگذاری‌های شدید نیست. با توجه به پیشرفت‌های گسترده‌ای که در بخش نرم افزاری و سخت افزاری و نیز روش‌های عددی بوجود آمده است امکان استفاده رایج از روش‌های شبیه‌سازی عددی فراهم شده است. روش المان محدود یکی از روش‌های عددی است که کارایی مناسبی در تحلیل مسائل بارگذاری ضربه‌ای و انفجاری داشته است [۱۵].

به علت اینکه شبیه‌سازی عددی حجم محاسبات بالایی دارد، بهترین روش برای کم کردن حجم محاسبات استفاده از روش انتگرال گیری صریح به جای انتگرال گیری ضمنی است. دو نرم افزار کارآمد Ls-Dyna و Autodyn برای انتگرال گیری صریح موجود است. در نرم افزار Ls-Dyna مدل‌های جانسون هلمکوئیست و جیکن روپرت^۱ و در نرم افزار Autodyn مدل RHT برای شبیه‌سازی بتن استفاده می‌شوند. براساس بررسی و تحقیقات پیشین [۶ و ۵ و ۴] و [۳] مشخص شد مدل RHT در نرم افزار اتوداین کارآمدی و

2- Riedel
3- Hiermaier
4- Toma

1- Gebbeken and Ruppert

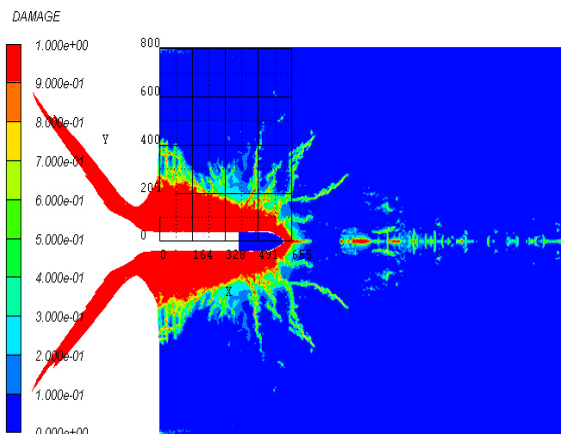
مدل‌های به کار رفته، ارائه شده است. در این مدل رفتار نرم‌شدگی سطح مقاومت شکست غیروابسته و نیز مقاومت کششی هیدرواستاتیکی بتن وابسته به نرخ کرنش ایجاد شده و مدل خسارت برشی ناشی از تنش انحرافی مصالح محدود شده در یک سطح گسیختگی کلی، است [۱۵]. این مدل شامل سه سطح وابسته به فشار است که عبارتند از: سطح حدود الاستیک Y_{el} و سطح گسیختگی Y_{fail} و سطح مقاومت پسماند Y_{fric} [۳].

۴-۲- نتایج شبیه سازی عددی

برای بررسی دقت و اعتبار شبیه سازی عددی آزمایش تجربی شماره یک و چهار به وسیله نرم افزار اتوداین بررسی شد که نتایج آن در شکل‌های (۶ الی ۸) ارائه شده است.

قبل از انجام تحلیل‌ها مطالعات پارامتریک روی پارامترهای انجام شده و تحلیل‌ها با پارامترهای واسنجی شده انجام گرفتند. پارامترهای واسنجی شده شامل: ثابت مقاومت پسماند، توان مقاومت پسماند، توان نرخ کرنش کششی و توان نرخ کرنش فشاری، ثابت سطح شکستگی، توان سطح شکست کامل، معیار فرسایش، خطای انرژی، پارامتر اصطکاک بین بتن و پرتابه و شکل پرتابه است. دقت نتایج به دست آمده بیانگر آن است که برای دیگر مسائل بارگذاری ضربه‌ای اهداف بتنی، مدل RHT با داده‌های واسنجی شده نتایج مناسبی را ارائه خواهد کرد.

با توجه به نتایج مندرج در جدول (۲) عمق نفوذ خسارت ناشی از بارگذاری ضربه‌ای پرتابه در آزمایش تجربی حدود ۶۵۵ میلی‌متر بوده و قطر حفره نفوذی (قلوه کن‌شدگی) در حدود ۸۰۰ میلی‌متر است [۱۳]. همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود این نتایج بعد از شبیه‌سازی حاصل شده است یعنی قطر حفره نفوذی برابر ۸۰۰ و عمق



شکل (۶) نتیجه شبیه سازی دوبعدی آزمایش تجربی شماره یک

در شکل (۷) نحوه خسارت به وجود آمده و سرعت خروج پرتابه به همراه سوراخ شدگی هدف برای آزمایش تجربی شماره (۴) به صورت شبیه‌سازی سه‌بعدی نشان داده شده است. سرعت خروجی پرتابه برابر ۱۹۰ m/s است که برابر با مقدار گزارش شده در آزمایش تجربی است [۴].

هیچ یک از روابط تجربی قادر به محاسبه این پارامتر نیست. در شکل (۸) چگونگی تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان در این شبیه‌سازی ارائه شده است.

۵- نتیجه گیری

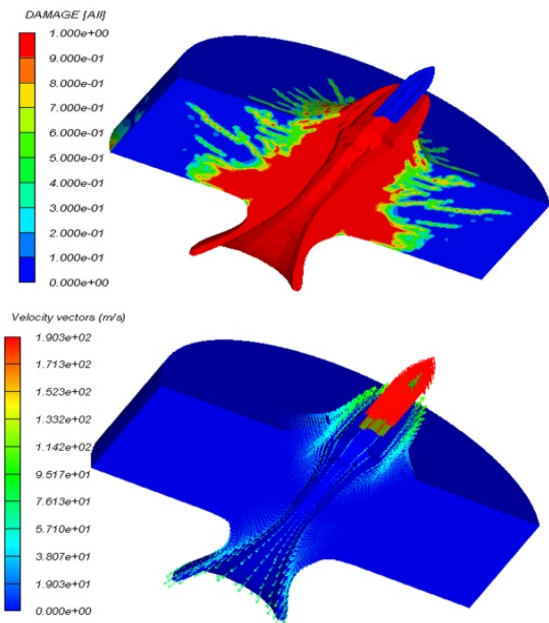
پژوهش روابط تجربی و تحلیل محاسبه عمق نفوذ پرتابه در سازه‌های بتنی ارائه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و مدلسازی عددی برخورد پرتابه فولادی با هدف بتنی با مدل پلاستیسیتی پیشرفته صورت گرفت. نتایج زیر را

می توان از تحلیل های فوق ارائه کرد :

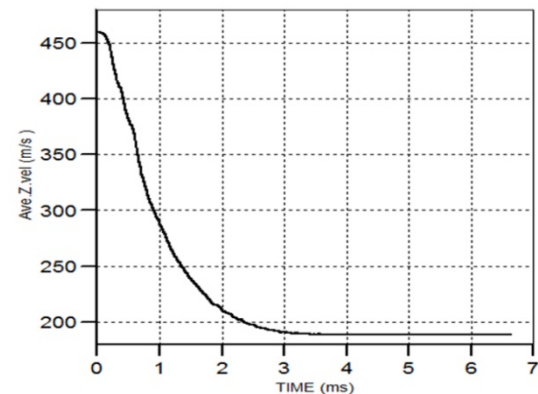
روابط تجربی قادر به این محاسبات نیست.
 ✓ واسنجی برای مدل دوبعدی انجام شده و بدون تغییر برای مدل سه بعدی نیز استفاده شد. برای دیگر مسائل ضربه پرتابه فلزی در هدف بتنی، مدل RHT با داده های واسنجی شده فوق نتایج مناسبی ارائه می کند.
 ✓ مدل پلاستیسیته RHT ضمن واسنجی مناسب کارایی و دقت لازمه برای مدلسازی رفتار بتن تحت بارگذاری بسیار شدید با نرخ کرنش بالا مانند بارگذاری ضربه ای را خواهد داشت.

۶- منابع

- [1] Li Q.M., S.R. Reid, H.M. Wen, A.R. Telford. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *Int J Impact Eng* 2005;32:224-284.
- [۲] محدث، م.، خوگر، و، واحدی، ب.خ. "محاسبه عمق نفوذ پرتابه صلب در اهداف بتن-خاک" نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ۱۳۹۰.
- [3] 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, 2002, 71 pp.
- [4] Hansson, H.Skoglund, P. Simulation of concrete penetration in 2D and 3D with the RHT material model. FOI- R- 0720-SE. Swedish Defence Research Agency, (2002)51 pp.
- [5] Nyström U, Leppänen 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. 2006. pp. 310-319.
- [6] Zhenguo Tu, Yong Lu. Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete. *International Journal of Impact Engineering* 37 (2010) 1072e1082.



شکل (۷) نتیجه شبیه سازی سه بعدی آزمایش تجربی شماره چهار (توزیع خسارت بالا، کانتور سرعت در پائین)



شکل (۸) منحنی کاهش سرعت پرتابه در شبیه سازی سه بعدی

✓ از بین روابط تجربی ارائه شده برای محاسبه عمق نفوذ رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا در محدوده کاربری وسیع تر دارای دقت و اعتبار بالاتری است.
 ✓ روش شبیه سازی عددی علاوه بر عمق نفوذ دیگر ابعاد خسارت از جمله نحوه گسترش ترک ها و قلوه کنی و پوسته شدگی را می تواند محاسبه و نمایش دهد در حالی که

- [11] Hughes G. Hard missile impact on reinforced concrete. Nucl Eng Des 1984;77:23-35.
- [12] Bangash MYH. Concrete and concrete structures: numerical modeling and application. London: Elsevier Applied Science; 1989.
- [13] Hansson, H. Numerical simulation of concrete penetration. FOA Report 98-00816--311--SE. National Defence Research Establishment, Tumba Sweden, (1998)17 pp.,
- [14] Forrestal.M.J, Altmen.B.S, Cargile. J.D and Hanchak. S.J. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete target. Int J Impact Eng 1994;15:395-405.
- [15] AUTODYN. Autodyn User Manual, Version 13.0. Century Dynamics Inc, USA, (2010).
- [7] واحدی،خ. لطیفی،م. خسروی،ف " شبه سازی رفتار دینامیکی بتن تحت بارگذاری ضربه ای " چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران " اردیبهشت ۱۳۸۷.
- [8] لیاقت، غ. احمدی م.ت. و پیرعلی، پ. " بررسی عددی و ارایه یک مدل ساختاری ترکیبی برای بتن تحت تاثیر بارگذاری با نرخ کرنش نسبتا بالا " مواد پرنرژی پاییز و زمستان ۱۳۸۹، ۵(۲) (پیاپی ۱۰): ۴۳-۵۷.
- [9] علیزاده، ط " تحلیل دینامیکی غیر خطی سدهای بتنی قوسی تحت بارگذاری ضربه ای پرتابه " دانشگاه زنجان، پایان نامه کارشناسی ارشد ۱۳۹۰.
- [10] NDRC. Effects of impact and explosion. Summary Technical Report of Division 2, vol. 1, National Defence Research Committee, Washington, DC, 1946.

«Research Note»

Numerical simulation of impact penetration in concrete target and investigating of empirical solution

T. Alizadeh¹, J. Moradloo^{2*}, K. Naserasadi³

1- M.Sc. Student , University of Zanajan

2,3- Assistant Professor , University of Zanajan

ajmoradloo@yahoo.com

Abstract:

Understanding the behavior of concrete at high strain rates loading is a critical issue for theory and applied purposes. The concrete is non-linear, rate-sensitive and pressure-dependent material that will add more difficulties in its modeling at high loading conditions such as impact penetration situations.

In the present study, numerical simulation of penetration in a concrete target using an advanced plasticity concrete model is presented using explicit finite element (FE) analysis. A full 3D FE model of impact on unreinforced concrete specimens is carried out. The analysis includes initiation and progressive damage of the composite during impact and penetration

Also comparison between some empirical solutions is carried out and their accuracy and precision are checked used experimental solution. Concrete nonlinear behavior was modeled using RHT model which is an advanced plasticity model for concrete at high strain rate loading condition.

Two test examples are presented to demonstrate the proposed method. They involve the impact of an ogive-nose projectile on concrete cylinders with variable dimensions. The FEM computational results obtained using RHT plasticity model are very close to the test data, implying that the proposed method will be promising in studies of impact analyses of concrete structures subjected to impact loading.

In using RHT model with the default model parameter values, the experimental results cannot be reproduced satisfactorily. Deduced results having good agreement with experimental ones using suitable calibration of plasticity model parameters value.

The RHT plasticity concrete model was developed as an enhancement to the JH concrete model by the introduction of several new features. In this new model, the strain hardening and the third invariant dependence were considered. An independent fracture strength surface was incorporated to allow for a more appropriate modeling of the material softening response. In addition, the concrete hydrostatic tensile strength was made rate dependent. Using a modified parameter setting, the RHT model implemented in AUTODYN hydrocode exhibits a generally excellent behavior.

In this paper also, a comprehensive evaluation study of several widely used empirical penetration depth relation is presented. The model formulations are scrutinized and numerical tests are carried out to examine their actual performances subjected to various loading conditions. Comments on the limitations and the appropriate use of these models are given. In addition to penetration depth, damage extension, concrete sapling, scabbing and output velocity of missile and other time dependent structural quantities can captures well. This is in contract with imperial relations that have only penetration depth calculation capability for special conditions. On the other hand investigating of empirical relation shown in addition to their finite application ranges, they haven't good results in majority of cases. Among them, US army corps of engineers" experimental based relation have better results compared other empirical relations for calculation of penetration depth.

Keywords: Concrete penetration, empirical relation, numerical solution, impact, nonlinear solution, RHT plasticity model