



کد مقاله: ۱۳۷-۲

## بررسی تاثیر برخورد موضعی گلوله صلب بر روی اهداف بتنی

صادق ولی پور الماسی<sup>۱</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، [sadeghvalipour@yahoo.com](mailto:sadeghvalipour@yahoo.com)

### چکیده

در متن حاضر فرمول‌ها و مدل‌هایی از تاثیر برخورد گلوله در هدف بتنی توسط گلوله‌های صلب جمع‌آوری شده است که مجموعه‌ای از نتایج تحقیقات صورت گرفته محققان در این بخش می‌باشد. در ابتدا با استفاده از فرمولهای تجربی گردآوری شده در خصوص محاسبه عمق نفوذ و با استفاده از پارامترهای موثر در آن نتایج تجربی بدست آمده با یکدیگر مقایسه می‌شوند و سپس مدلسازی عددی گلوله در دو شکل دماغه تخت و مخروطی با سرعت‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مبنای تحلیل‌ها شامل پارامترهای بی بعد حاکم بر روابط برخورد گلوله در اهداف بتنی می‌باشد که در تست‌های عددی استفاده شده است و مدل‌های تحلیلی و شیوه‌های حل عددی برای نفوذ به صورت مختصر بیان می‌شود. نتایج آورده شده برای درک تاثیر نرخ کرنش با مقاومت فشاری محوری بتن و مصالح شبه بتن به وسیله سنجش تکنیک‌های فشار هاپکینسون بیان شده است.

**کلمات کلیدی:** گلوله صلب، نفوذ، سوراخ شدگی، ضرایب شکل دماغه، AUTODYN

### ۱- مقدمه

در گذشته موارد بسیاری از کاربرد بتن توسط نظامیان و مهندسين عمران در طراحی و حفاظت سازه‌ای از ساختمانها در برابر برخورد گلوله و بارهای انفجاری وجود داشته است. پتانسیل گلوله‌ها شامل انرژی جنبشی مهمات، برخورد هواپیما یا انواع خودرو، ترکشهای ایجاد شده توسط بمب‌های ارتش و یا حملات تروریستی، ترکشهای ایجاد شده بر اثر انفجارات تصادفی و دیگر وقایع، پرتاب اشیا به علت نیروهای موجود در طبیعت از جمله آتشفشان، طوفان و شهاب سنگ و ... بوده که این اجسام دارای متغیرهای بسیاری در اندازه، شکل، سرعت برخورد، سختی، صلیبیت و وضعیت برخورد می‌باشند که طیف وسیعی از خسارت را ایجاد می‌کنند. در بیان مطالب ذیل به طور عمده بر تاثیر برخورد گلوله‌های صلب متقارن محور با وضعیت نرمال در اهداف بتنی پرداخته شده است. بیشترین تاثیر زاویه برخورد در بزرگ شدن نتایج برخورد می‌باشد و سرعت برخورد مربوط به مطالب آورده شده در محدوده حداقل سرعت برخورد  $10\text{m/s}$  و حداکثر سرعت برخورد  $1000\text{m/s}$  برای گلوله‌های صلب می‌باشد. در این مطالعه از هر دو نوع تست آزمایشگاهی با مقیاس کوچک و واقعی در بحث برخورد پرتابه به اهداف بتنی استفاده شده است.

یکی از عبارات هایی که در این مقاله برای بیان اثر برخورد گلوله به دفعات استفاده خواهد شد عبارت است از: Penetration depth (x) (عمق نفوذ): عمقی که یک گلوله با نفوذ کردن به یک هدف بتنی بزرگ بدون ایجاد سوراخ شدگی بدست آید. برای مطالعه اثر موضعی پرتابه در هدف بتنی می توان بوسیله دو روش مهم شامل شیوه های تجربی و عددی عمل نمود. همیشه داده های تجربی در درک پدیده های برخورد و صحت سنجی شیوه های عددی و تحلیلی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است. در این مقاله مقایسه ای بین نتایج تجربی مختلف با محاسبات عددی صورت می گیرد.

## ۲- فرمولهای تجربی

در این بخش مجموعه ای از فرمول های تجربی برای محاسبه عمق نفوذ قرار داده شده است. فرمولهای جمع آوری شده بر مبنای مقالات منتشر شده تهیه شده است بطوریکه واحد فرمولها در سیستم SI تنظیم شده است. علامتگذاری مورد استفاده برای علائم مهم بطور کلی در سیستم دستگاه SI در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱: کمیت فیزیکی و واحد های مورد استفاده آنها در فرمولهای تجربی

واحد (SI)	کمیت فیزیکی	علائم
m	عمق نفوذ	x
Kg	جرم گلوله	M
m	قطر گلوله	d
m/s	سرعت برخورد گلوله	$V_0$
Pa	مقاومت فشاری بتن	$f_c$
-	ضریب شکل دماغه	$N^*$
m	اندازه حداکثر قطر دانه بندی	a
Pa	مدول یانگ پرتابه	E
Pa	مدول یانگ فولاد	$E_s$
m	ضخامت بتن هدف	$H_0$

۲-۱- فرمول اصلاح شده Petry [۱،۷۸]

در سیستم SI فرمول اصلاح شده Petry به صورت زیر می باشد:

$$\frac{x}{d} = k \frac{M}{d^3} \log \left( 1 + \frac{V_0^2}{19974} \right) \quad (2)$$

- 1)

که در آن مقدار K برای بتن غیر مسلح حجیم برابر  $6/36 \times 10^{-4}$ ، برای بتن مسلح معمولی  $3/39 \times 10^{-4}$  و برای بتن مسلح خاص  $2/26 \times 10^{-4}$  در فرمول اول اصلاح شده Petry پیشنهاد شده است.

۲-۲- فرمول آزمایشگاه پژوهشی بالستیک (BRL) برای نفوذ [1,9-11]

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

- 2)

۲-۳ فرمول مهندسی نیروی زمینی (ACE)، [1,13,15]

$$\frac{x}{d} = \frac{3.5 \times 10^{-4}}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{M}{d^3}\right) d^{0.215} V_0^{1.5} + 0.5 \quad (SI) \quad (2)$$

- 3)

فرمول نفوذ فوق بر مبنای داده های تحلیلی که از تست های بالستیک با گلوله های فولادی استوانه ای  $76/2.37, 75$  و  $155$  تهیه شده، استوار می باشد.

۲-۴ اصلاح شده فرمول NDRC [1,16,17]

$$\frac{x}{d} = 2G^{0.5} \quad \text{for } G \geq 1 \quad (2-4a)$$

$$\frac{x}{d} = G + 1 \quad \text{for } G < 1 \quad (2-4b)$$

$N^*$  ضریب شکل دماغه می باشد (برای دماغه تخت، نیم کره، محدب و خیلی تیز به ترتیب برابر است با  $0.72$ ،  $0.84$ ،  $1$  و  $1.14$ )

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{N^* M}{d \sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{d}\right)^{1.8} \quad (SI) \quad (2)$$

- 4c)

۲-۵- فرمول Ammann و Whitney

این فرمول جهت محاسبه نفوذ ترکش های کوچک ایجاد شده ناشی از انفجار در سرعت نسبتا بالا به کار می رود. در واحد SI این رابطه به صورت زیر بیان می شود.

$$\frac{x}{d} = \frac{6 \times 10^{-4}}{\sqrt{f_c}} N^* \left(\frac{M}{d^3}\right) d^{0.2} V_0^{1.8} \quad (2-5)$$

بهرحال در این فرمول نفوذ ترکش های پرتاب شده حاصل از انفجار در سرعت هایی بیش از  $300$  m/s توسط Kennedy [1] محاسبه می گردد. ضمنا  $N^*$  همانند فرمول NDRC تعریف می گردد.

۶-۲ فرمول whiffen [12,14]

محاسبه نفوذ در زمان جنگ در کار whiffen تاثیر گذاشت و بر مبنای محدوده وسیعی از داده های زمان جنگ ، مطالعات نفوذ ترکش ها در تعدادی از انواع بمب ها در بتن های مسلح بدست آمد و تحقیقات در ارتباط با محدوده بزرگی از قطر پرتابها و اندازه دانه بندی مصالح بتن به عمل آمده است . که توسط آزمایشگاه تحقیقاتی راه بریتانیا پیشنهاد گردید.

$$\frac{x}{d} = \left( \frac{2.61}{f_c^{0.5}} \right) \left( \frac{M}{d^3} \right) \left( \frac{d}{a} \right)^{0.1} \left( \frac{V_0}{533.4} \right)^n \quad \text{with } n = \frac{97.51}{f_c^{0.25}} \quad (SI) \quad (2-6)$$

که  $a$  اندازه حداکثر قطر دانه بندی است . این رابطه در محدوده زیر با گلوله هایی با شکل دماغه او جابو به کار می رود.

$$0 < V_0 < 1127/8 \text{ m/s}, \quad 12/7 < d < 965/2 \text{ mm}, \quad 0/136 < M < 9979/2 \text{ kg}, \quad 5/5 < f_c < 68/95 \text{ MPa}$$

۷-۲ فرمول kar [11,6]

نتایج به بدست آمده در برخورد پرتابه به بتن به یک مسئله اساسی در طراحی کارگاه های هسته ای ایمن در زمان جنگ ها تبدیل شد .  $kar$  برای بدست آوردن یک رابطه تجربی با تجدید نظر در رابطه  $NDRC$  و با استفاده از تحلیل رگرسیون جهت بیان مدلی از پرتابه ها بر مبنای مصالح و مشخصات بکاررفته در پرتابه بر حسب مدول یانگ  $E$  به صورت زیر پرداخت .

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \left( \frac{E}{E_s} \right)^{1.25} \frac{N^* M}{d \sqrt{f_c}} \left( \frac{V_0}{d} \right)^{1.8} \quad (SI) \quad (2-7a)$$

که

$$\frac{x}{d} = 2G^{0.5} \quad \text{for } G \geq 1 \quad (2-7b)$$

$$\frac{x}{d} = G + 1 \quad \text{for } G < 1 \quad (2-7c)$$

که  $E$  و  $E_s$  به ترتیب مدول یانگ پرتابه و فولاد می باشند.

۸-۲ فرمول UKAEA [18]

بر اساس مطالعات وسیعی که برای محافظت از ساختمان تاسیسات انرژی هسته ای در  $UK$  صورت گرفت  $Barr$  [18] تغییراتی را به  $NDRC$  پیشنهاد کرد که در آن به سرعت های پایین برخورد به صنایع هسته ای پرداخته شده است.

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{N^* M}{d \sqrt{f_c}} \left( \frac{V_0}{d} \right)^{1.8} \quad (SI) \quad (2-8a)$$

$$\frac{x}{d} = 0.275 - [0.0756 - G]^{0.5} \quad \text{for } G \leq 0.0726 \quad (2-8b)$$

$$\frac{x}{d} = [4G - 0.242]^{0.5} \quad \text{for } 0.0726 \leq G \leq 1.0605 \quad (2-8c)$$

$$\frac{x}{d} = G + 0.9395 \quad \text{for } G \geq 1.065$$

(2-8d)

Haldar-Hamieh [3]-فرمول ۹-۲

Haldar-Hamieh ضریب برخورد  $I_a$  را پیشنهاد و آن را به صورت زیر تعریف کرد:

$$I_a = \frac{MN \cdot V_o^2}{d^3 f_c} \quad (2) \quad - 9a)$$

جهت محاسبه عمق نفوذ به صورت زیر عمل می شود:

$$\frac{x}{d} = -0.0308 + 0.2251 I_a \quad \text{for } 0.3 \leq I_a \leq 4 \quad (2-9b)$$

$$\frac{x}{d} = 0.674 + 0.0567 I_a \quad \text{for } 4 < I_a \leq 21 \quad (2-9c)$$

$$\frac{x}{d} = 1.1875 + 0.0299 I_a \quad \text{for } 21 < I_a \leq 445 \quad (2-9d)$$

۱۰-۲. فرمول عادللی-امین [10]

ضریب برخورد  $I_a$  تعریف شده توسط Haldar-Hamieh [3]، بوسیله عادللی و امین [10] با مجموعه داده های مربوط به نفوذ، سوراخ شدگی و اسکینینگ بدست آمده توسط Sliter [4] ترکیب و به صورت زیر ارائه شد:

$$\frac{x}{d} = 0.0416 + 0.1698 I_a - 0.0045 I_a^2 \quad \text{for } 0.3 < I_a < 4 \quad (2-10a)$$

$$\frac{x}{d} = 0.0123 + 0.196 I_a - 0.008 I_a^2 + 0.0001 I_a^3 \quad \text{for } 4 \leq I_a < 21 \quad (2-10b)$$

که فرمول های فوق دارای محدودیت های زیر می باشند:

$$x/d \leq 2 \quad \text{و} \quad d \leq 0/3 \text{ m} \quad , \quad 0/11 < M < 343 \text{ kg} \quad , \quad 0/7 < H_o/d < 18 \quad , \quad 27 < V_o < 312 \text{ m/s}$$

۱۱-۲. فرمول Hughes[2]

Hughes[2] با فرض اینکه مقاومت نفوذ ابتدا به صورت خطی افزایش می یابد (مشابه فرض به کار رفته در فرمول NDRC) و سپس عمق نفوذ به صورت سهمی کاهش می یابد که فرمول زیر برای عمق نفوذ پیشنهاد می شود:

$$\frac{x}{d} = 0.19 \frac{N_h I_h}{S} \quad (2) \quad - 11a)$$

$N_h$  ضریب شکل دماغه است که بترتیب برابر ۱، ۱/۱، ۲۶/۱۲، و ۱/۳۹ برای دماغه تخت، نوک پهن، کروی و خیلی تیز می باشد.

این مقادیر با جا گذاری در معادله 2-11a جهت محاسبه فرمول نفوذ NDRC برای شکل های دماغه داده شده و در تمام دامنه ها قابل استفاده می باشد.  $I_h$  ضریب برخورد بی بعد می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد.

$$I_h = \frac{MV_0^2}{d^3 f_t} \quad (2-11b)$$

$I_h$  با استفاده از تحلیل ابعادی بدست آمده و در هر واحدی قابل استفاده می باشد. Hughes از مقاومت کششی بتن بجای مقاومت فشاری بتن استفاده کرده است که بنظر نامناسب می باشد چراکه مقاومت در برابر نفوذ به مقاومت فشاری هدف بتنی بستگی دارد. بهر حال نسبت بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن بطور نرمال یک مقدار عددی می باشد پس استفاده از هر کدام برای ضریب برخورد منجر به مقادیر مختلف می گردد. Hughes همچنین تاثیر تغییر شکل نسبی بتن را با معرفی ضریب افزایش دینامیکی  $S(DIF)$  بیان می کند بطوری که مقاومت کششی  $f_t$  با  $Sf_t$  جایگزین می گردد. مقاومت دینامیکی کششی با ضرب کردن یک ضریب ثابت به مقاومت فشاری دینامیکی تبدیل می شود. لذا باید این مطلب مد نظر قرار گیرد که تاثیر نرخ کرنش مقاومت کششی بتن متفاوت از اثر نرخ کرنش فشاری بتن می باشد. بنابراین اگر ضریب  $S$  در تمام تست های کششی دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد، ممکن است به نتایج نادرستی منجر گردد

$$s = 1 + 12.3 \ln(1 + 0.03I_h) - 11c \quad (2)$$

فرمول مقادیر داده های در دسترس تست را برای  $I_h < 3500$  تایید می کند. بهر حال وقتی  $I_h < 40$  و  $H_0/d < 3/5$  فرمول فوق محافظه کارانه خواهد بود.

## ۲-۱۲. فرمول Wessman Healey [11]

این فرمول برای محاسبه عمق نفوذ پیشنهاد شد که خیلی به فرمول NDRC اصلاح شده و فرمول kar شباهت دارد.

$$G = 4.36 \times 10^{-5} \left( \frac{E}{E_s} \right) \frac{N^* M}{d \sqrt{f_c}} \left( \frac{V_0}{d} \right)^{1.8} \quad (SI) \quad (2)$$

- 12a)

$$\frac{x}{d} = 2G^{0.5} \quad \text{for } G \geq 1 \quad (2-12b)$$

$$\frac{x}{d} = G + 1 \quad \text{for } G < 1 \quad (2-12c)$$

## ۳. مدل سازی به کمک نرم افزار Autodyn

در مدل سازی عددی نفوذ، نرم افزار های مختلفی مانند AUTODYN, ABAQUS, LS-DYNA و نرم افزار های مشابه دیگر جهت حل عددی پدیده نفوذ با روش FEM وجود دارد. در این بخش تعدادی از فرمول های تجربی ارائه شده در بخش ۲ با نتایج حاصل از مدل سازی

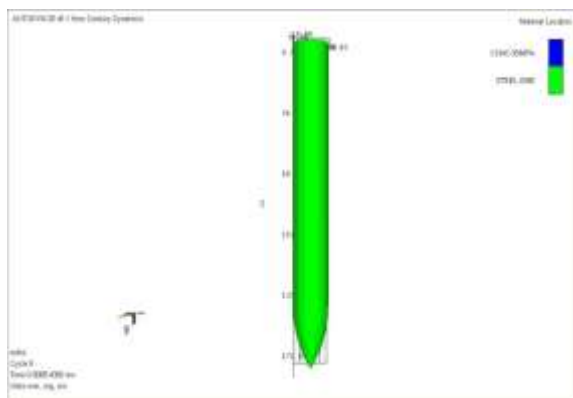
عددی با نرم افزار AUTODYN مقایسه می شود. بدین منظور جهت مدلسازی گلوله طویل و دال بتنی از مشخصات جدول ۲ و ۳ و همچنین شکل های ۱ و ۲ استفاده می گردد.

جدول ۲: مشخصات گلوله ها جهت مدلسازی

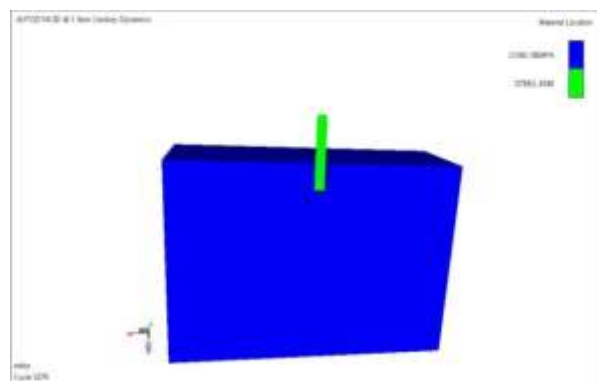
مشخصات	ابعاد بدنه (cm)	ابعاد دماغه (cm)	حجم (cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	M(gr)	زاویه برخورد	آلیاژ	Strength	Failure
گلوله با دماغه تخت	d=2 h=13/79	-	43/32	7/83	339/21	نرمال	CrMnSiA35	Johnson cook	Johnson cook
گلوله با دماغه اوجایو	d=2 h=13/79	H=3/41	46/89	7/83	367	نرمال	CrMnSiA35	Johnson cook	Johnson cook

جدول ۳: مشخصات دال بتنی هدف با مقاومت ۳۵Mpa

طول (cm)	عرض (cm)	ضخامت (cm)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (Mpa)	Strength	Failure
60	20	40	2/52	35	RHT concrete	RHT concrete



شکل ۲: گلوله با دماغه اوجایو

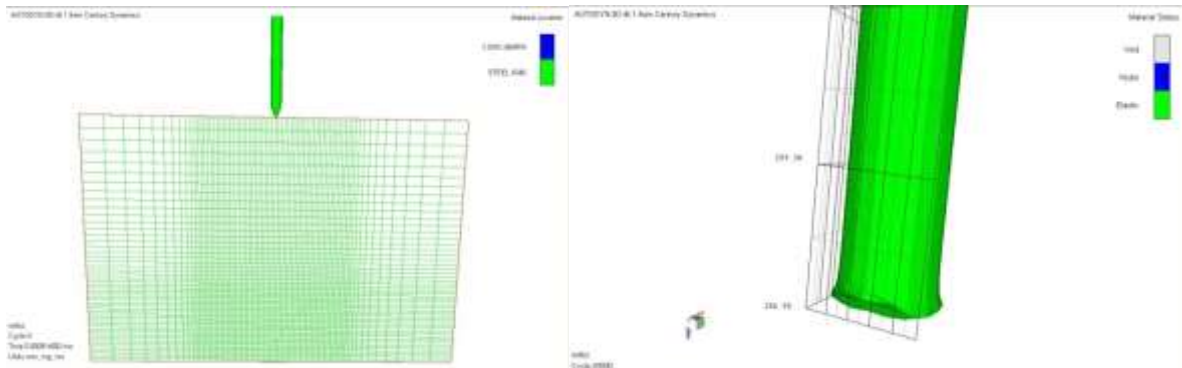


شکل ۱: گلوله با دماغه تخت

در این مدلسازی قسمتهای نزدیک به مسیر حرکت گلوله و همچنین دماغه آن دارای مش بندی ریزتری می باشد. نتایج مدلسازی در نرم افزار AUTODYN به همراه نتایج فرمول های تجربی برای سرعت های مختلف و دو نوع گلوله در جداول ذیل مقایسه شده است.

جدول 4: مقایسه نتایج عددی و تجربی

محاسبه عمق نفوذ (cm)				
دماغه	دماغه تخت		دماغه اوجایو	
سرعت (m/s)	۳۰۰	400	۳۰۰	۴۰۰
نتایج نرم افزار	14/9	۲۱/۹	۱۶/۸۵	۲۳/۶۶
Petry (2-1)	15/9	۲۰/۵۹	۱۷/۲۹	۲۲/۲۹
BRL (2-2)	17/17	۲۵/۱۸	۱۸/۵۹	۲۷/۲۶
ACE (2-3)	12/24	۱۸/۳	۱۳/۱۶	۱۹/۷۳
NDRC (2-4)	6/4	۸/۳۲	۸/۴	۱۰/۸۹
Ammann whitney (2-5)	15/04	۲۵/۲۴	۲۳/۸۱	۳۹/۹۷
Whiffen (2-6)	17/32	۲۴/۹۴	۱۸/۷۵	۲۷/۰۱
Kar (2-7)	5/48	۷	۷/۱۷	۹/۲۹
UKAEA (2-8)	۵/۳۴	۸/۸۴	۹	۱۵
Haldar-Hamieh (2.-9)	۷	۱۰/۷	۱۰/۴	۱۶/۶۷
عادلی - امین (2-10)	-	-	-	-
Hughest(2-11)	۹/۳۵	۱۴/۳۹	۱۳/۷۸	۲۱/۲۵
Wessman Healey(2.-12)	۶/۰۵۹	۷/۸۴	۷/۹	۱۰/۲۷

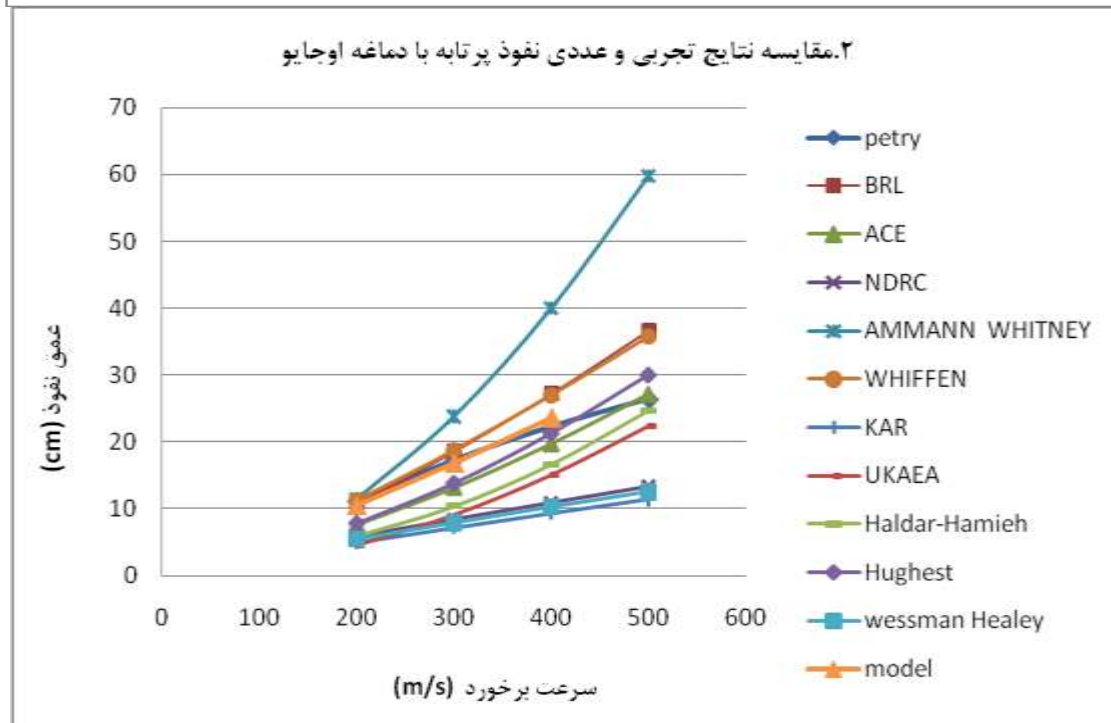
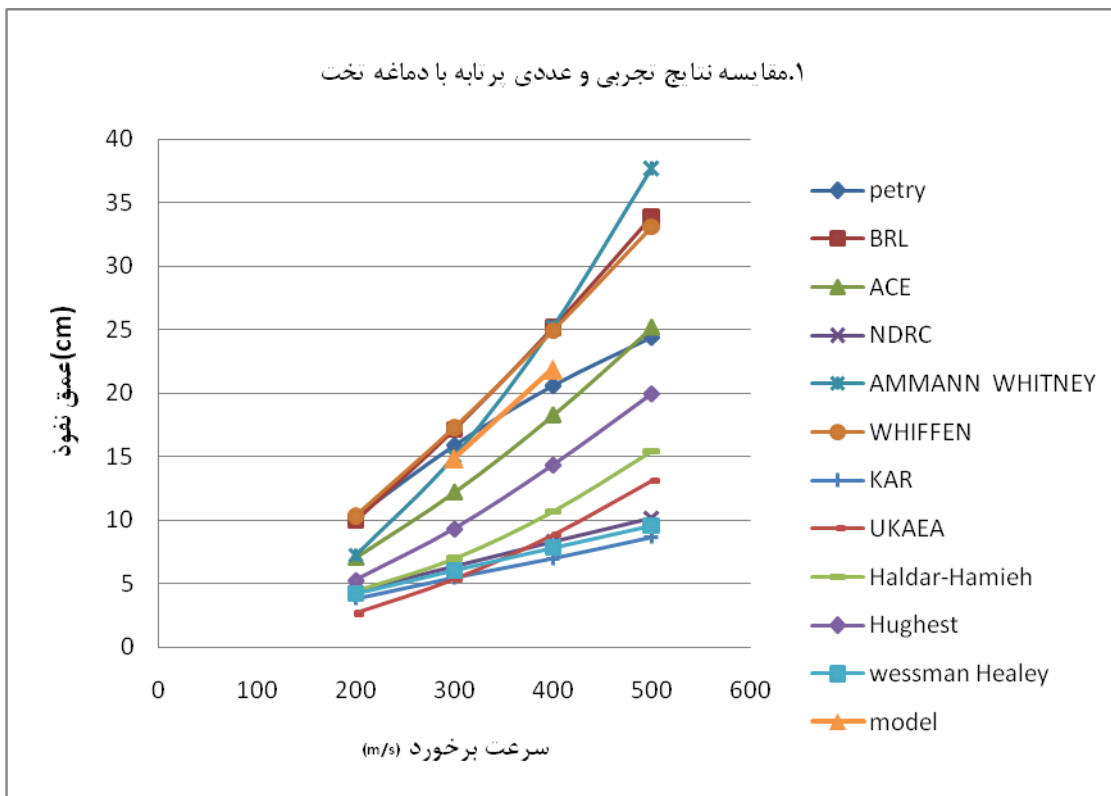


شکل ۴: گلوله با دماغه تخت

شکل ۳: گلوله با دماغه اوجایو



در نمودار های ارائه شده ذیل مقایسه ای بین نتایج حاصل از داده های تجربی فرمول های ارائه شده و نتایج عددی حاصل از مدلسازی در نمودار ۱ برای گلوله با دماغه تخت و در نمودار ۲ برای گلوله با دماغه اوجایو در اهداف بتنی صورت گرفته است.



## ۴. نتیجه گیری

در این مقاله اثر برخورد گلوله سخت بر روی اهداف بتنی مورد بحث قرار گرفت که شامل دو بخش فرمول های تجربی و مدلسازی عددی می باشد. جدا از بررسی صورت گرفته نتایج جدیدی به شرح ذیل حاصل گردید :

- ۱- فرمول های تجربی مرتبط با عمق نفوذ در دامنه مورد استفاده در واحد SI داده شده است.
- ۲- در اکثر فرمول های تجربی بررسی شده تعریف مناسبی از ضریب شکل دماغه وجود ندارد و بصورت مبهم بیان شده است و نیاز به مطالعات بیشتر برای دستیابی به یک تعریف منطقی از ضریب شکل دماغه احساس می گردد.
- ۳- در بین فرمول های تجربی ارایه شده دامنه مقادیر حاصل از نتایج بدست آمده در سرعت ثابت بیانگر دقت کم در برخی فرمول ها می باشد.
- ۴- در برخورد گلوله به اهداف بتنی فرمول Wessman Healey از دقت پایینی نسبت به سایر فرمول ها در محاسبه عمق نفوذ برخوردار است.
- ۵- از بین فرمول های ارایه شده ، فرمول petry و BRL و ACE و Ammann Whitney و Whiffen با نتایج عددی حاصل از مدلسازی هم خوانی بیشتری دارد .
- ۶- هر چه سرعت برخورد پرتابه بیشتر می شود نتایج حاصل از فرمول های تجربی اختلاف بیشتری نسبت به هم دارند.

## ۱. مراجع

- [1] Kennedy RP. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. Nucl Eng Des 1976;37:183-203.
- [2] Hughes G. Hard missile impact on reinforced concrete. Nucl Eng Des 1984;77:23-35.
- [3] Haldar A, Hamieh H. Local effect of solid missiles on concrete structures. ASCE J Struct Div 1984;110(5):948-60.
- [4] Sliter GE. Assessment of empirical concrete impact formulas. ASCE J Struct Div 1980;106(ST5):1023-45.
- [5] Barr P. Guidelines for the design and assessment of concrete structures subjected to impact. Report, UK Atomic Energy Authority, Safety and Reliability Directorate, HMSO, London, 1990.
- [6] Kar AK. Local effects of tornado generated missiles. ASCE J Struct Div 1978;104(ST5):809-16.
- [7] Samuely FJ, Hamann CW. Civil protection. The Architectural Press; ۱۹۳۹.
- [8] Amirikian A. Design of protective structures. Report NT-۳۷۲۶, Bureau of Yards and Docks, Department of the Navy, 1950.
- [9] Gwaltney RC. Missile generation and protection in light water-cooled reactor power plants, ORNL NSIC-۲۲. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory; ۱۹۶۸.
- [10] Adeli H, Amin AM. Local effects of impactors on concrete structures. Nucl Eng Des 1985;88:301-17.
- [11] Bangash MYH. Concrete and concrete structures: numerical modelling and application. London: Elsevier Applied Science; 1989.
- [12] Bulson PS. Explosive loading of engineering structures. London: E & FN Spon; 1997.
- [13] Chelapati CV, Kennedy RP, Wall IB. Probabilistic assessment of hazard for nuclear structures. Nucl Eng Des 1972;19:333-64.
- [14] Whiffen P. UK Road Research Laboratory Note No. MOS/311, 1943.
- [15] ACE. Fundamentals of protective structures. Report AT120 AT1207821, Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, 1946.
- [16] NDRC. Effects of impact and explosion. Summary Technical Report of Division 2, vol. 1, National Defence Research Committee, Washington, DC, 1946.
- [17] Kennedy RP. Effects of an aircraft crash into a concrete reactor containment building. Anaheim, CA: Holmes & Narver Inc. ۱۹۶۶ .
- [18] Barr P. Guidelines for the design and assessment of concrete structures subjected to impact. Report, UK Atomic Energy Authority, Safety and Reliability Directorate, HMSO, London, 1990.