

بررسی میزان نفوذ یک پرتابه در محیط های خاکی و تحلیل دینامیکی حساسیت سازه پناهگاهی به هندسه، خرج پرتابه و نوع مصالح محیط در اثر انفجار خرج پرتابه

عمار اسدی^۱، سعید شجاعی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آزاد اسلامی کرمان

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

Amasys2020@gmail.com

خلاصه

برآورد و ارزیابی دقیق از اثر انفجارهای زیرزمینی برای طراحی سازه های امن پناهگاهی و مباحث پدافند غیر عامل بسیار پراهمیت می باشد، اثری که انفجار بر محیط پیرامون خود خواهد داشت و در نتیجه بر سازه ها، این پدیده را به پدیده بسیار پیچیده تبدیل می کند. نتایج به دست آمده در این مرحله به طور قابل ملاحظه ای به پارامترهایی از قبیل مقدار ماده منفجره، هندسه سازه، شکل بار انفجاری، نوع و خواص خاک وابسته است. در این میان پیشرفت های اخیر در شبیه سازی عددی، امکان مدلسازی انفجار را فراهم ساخته است. در این مقاله مدلسازی نفوذ و انفجار و سازه با نرم افزارهای Flac و Autodyn انجام و نتایج بر اساس تنش و جابجایی مورد راستی آزمایی و بررسی قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: انفجار زیرزمینی، سازه امن، پدافند غیر عامل، Flac، Autodyn

۱. مقدمه

وضعیتی را در نظر بگیرید که بارگذاری های متعدد با شدت بالای انفجاری در یک محیط اتفاق بیفتد. این بارگذاری ها به صورت پیوسته و یا منقطع و نامنظم ایجاد می شوند. این چنین حالتی در وضعیت های جنگی و حملات هوایی دشمن به یک نقطه شهری و یا نظامی (مانند پادگان) بسیار محتمل است و باید برای رویارویی با این وضعیت چاره ای اندیشید. بی شک طراحی یک سازه با مشخصاتی که بتواند در برابر بارگذاری های متعدد مقاومت مناسب داشته باشد، غیر ممکن نیست. ولی چنین طراحی دارای هزینه های اجرایی بسیار بالا و غیر معقول است. مضاف بر اینکه سازه ای با چنین مشخصاتی، بسیار دست بالا طراحی شده و شاید برای زیست طولانی مدت انسان مناسب نباشد. برای غلبه بر این مشکل علوم مهندسی ما را به سمت سازه های پناهگاهی رهنمون می سازند. چنین سازه هایی معمولاً در مکانهای غیر مرسوم مانند زیرزمین و خاک تعبیه می شوند. دلیل انتخاب چنین مکانهایی نیز استفاده هر چه بیشتر از خاصیت تکیه گاهی خاک اطراف سازه و همچنین به حداقل رساندن اثر نیروی وزن سازه و در نتیجه آن کاهش محسوس نیروی لختی است. پارامتر دیگری که شاید اهمیت آن از مورد قبلی نیز بیشتر باشد، مربوط به استفاده از خاصیت میرایی و ویسکوالاستوپلاستیک خاک باشد که با شدت هر چه تمام تر، دامنه موج شوک ناشی از انفجار سطحی و زیر سطحی را به حداقل می رساند در چنین مکانی امکان صرفه جویی های موثر در زمینه طراحی و اجرای مقاوم در برابر انفجار وجود دارد [1].

۲. پیش بینی فشار ناشی از انفجار

در رابطه فشار ایجاد شده ناشی از انفجار مدت زمان، t_r از موقع رسیدن شوک زمین تا مقدار بیشینه آن کمابیش برابر است با

$$t_r = 0.1t_a \quad (1)$$

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آزاد اسلامی کرمان amasys2020@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان saeedshojaee@gmail.com

پس از رسیدن به نقطه بیشینه فشار، پالس افت می کند تا به فشار یا سرعت محیط برسد (فرض می شود تا صفر برسد) و شدت و سرعت آن از عبارت های زیر به دست می آید:

$$p(t) = p_0 e^{-\alpha t / t_a} \geq 0 \quad (2)$$

$$V(t) = V_0 (1 - \beta t / t_a) e^{-\beta t / t_a} \geq 0 \quad (3)$$

که در آن $p(t)$ فشار، $V(t)$ سرعت ذره ای، p_0 و V_0 بیشینه فشار و سرعت ذره ای مربوطه مطابق شکل (۱) هستند α و β نیز ثابت های زمانی به شرح زیرند:

$$\beta = \frac{1}{2.5} \quad \alpha = 1.0 \quad (4)$$

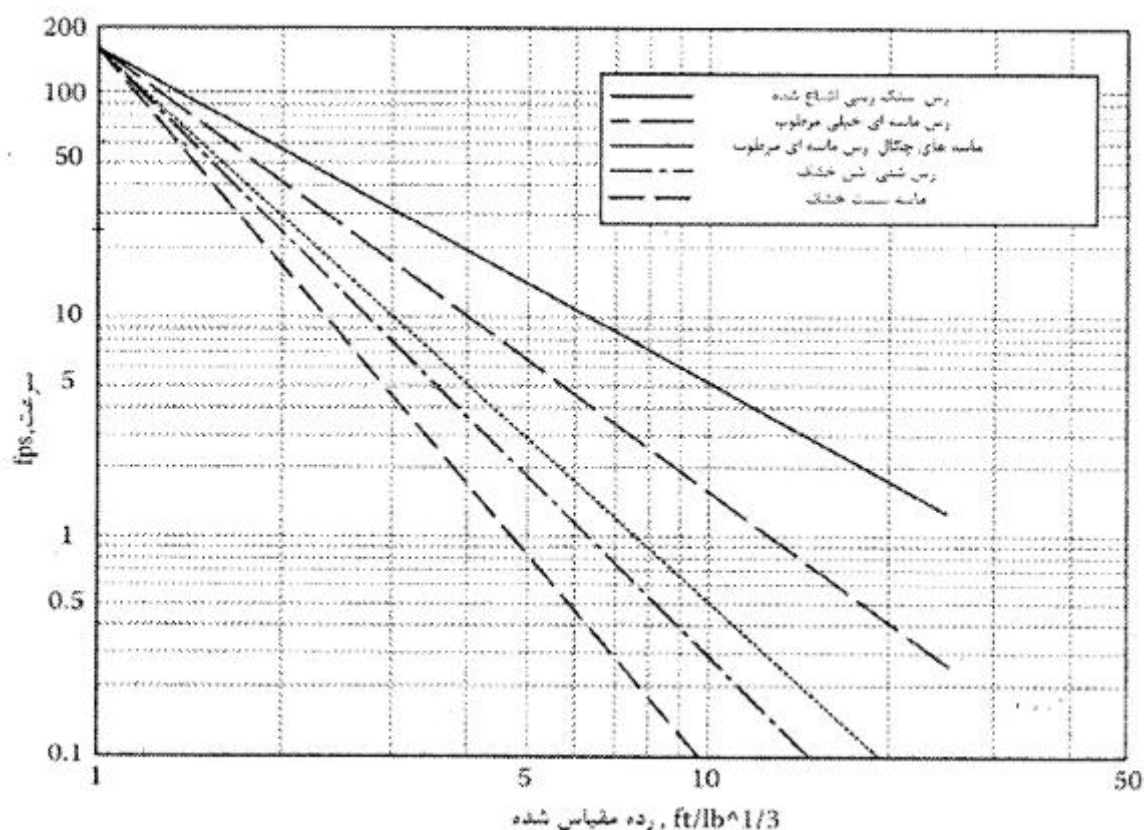
در خاک های سخت که پالس ها کوتاه ترند، فرکانس و شتاب ها بالاترند و تغییر مکان های کمتری نسبت به خاک های نرم تر (روان تر) رخ می دهد. رابطه بین بیشینه سرعت ذره ای و بیشینه فشار (تنش) مانند قبل، برای انتشار موج؛ به صورت زیر هستند

$$p_0 = \rho c V_0 \quad (5)$$

که در آن p_0 بیشینه تنش در خاک؛ ρ چگالی جرم خاک؛ c سرعت لرزه ای به دست آمده برپایه مدل انتشار موج تک بعدی

$$c = \left(\frac{M}{\rho} \right)^{0.5}$$

[2],[8]، V_0 بیشینه سرعت ذره ای است



شکل ۱- حداکثر سرعت ذره ناشی از انفجار محصور در خاکهای مختلف، [8]

روابط زیر را می‌توان برای بمب‌هایی به کار برد که در داخل و یا روی دال‌های فدا شونده و یا در داخل خاک نزدیک به هدف منجر

می‌شوند، [2],[8].

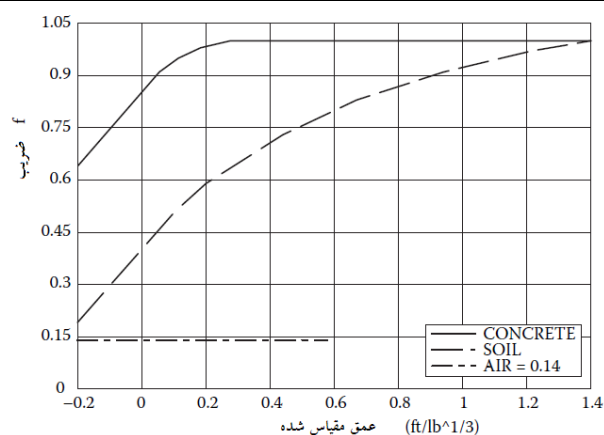
$$p_0 = f \cdot (\rho c) \cdot 160 \lambda^{-n} \quad (6)$$

$$V_0 = f \cdot 160 \cdot \lambda^{-n} \quad (7)$$

که در آن λ (عمق مقیاس شده) برابر $R/W^{1/3}$ ، f ضریب اتصال؛ ρc امپدانس صوتی (lb/in²/ft/sec) شعاع محدوده (فوت) W وزن خرج (پوند) n ضریب افت، V_0 بیشینه سرعت ذره ای (فوت بر ثانیه). C سرعت لرزه ای (فوت بر ثانیه)، ρ_0 چگالی جرم (lb-sec²/ft⁴) می‌باشند که از روی مقادیر ρc در جدول ۱ یا γ/g محاسبه می‌شوند. فهرست جزئیات بیشتر پارامترها بر پایه آزمایش‌های انفجاری مطابق جدول (۱) تهیه شده است. در تمام حالات، ضریب اتصال (f) مناسب باید انتخاب شود. این ضریب درجه انرژی منتقل شده به داخل محیط را در مقایسه با محیط با یک انفجار کامل بیان می‌کند. ضریب اتصال باید از شکل (۲) انتخاب گردد، [2].

جدول ۱- خواص خاک برای محاسبه پارامترهای شوک زمین، [2].

Soil description	Dry unit weight (pcf)	Total weight (pcf)	Air-filled voids %	Seismic velocity c (fps)	Acoustic impedance c (psi/fps)	Attenuation Coefficient (n)
Dry desert alluvium and playa, partially cemented	87	93-100	>25	2100-4200	40	3-3.25
Loos, dry poorly graded sand	80	90	>30	600	11.6	3-3.5
Loos, wet poorly graded sand with freestanding water	97	116	10	500-600	12.5-15	3
Dense dry sand, poorly graded	99	104	32	900-1300	25	2.5-2.75
Dense wet sand, poorly graded with freestanding water	108	124	9	1000	22	2.75
Very dense dry sand, relative density 100%	105	109	30	1600	44	2.5
Silty clay, wet	95-100	120-125	9	700-900	18-25	2.75-3
Moist loess, clayey sand	100	122	5-10	1000	25	2.75-3
Wet sandy clay above water table	95	120-125	4	1800	48	2.5
Saturated sand, below water table in marsh	-	-	1-4	4900	125	2.25-2.5



شکل ۲- ضریب اتصال شوک زمین، [2]

۳. بررسی نفوذ پرتابه در خاک

نفوذ در مصالح دانه ای به خوبی نفوذ در مواد دیگر قابل فهم نیست. اما به طور کلی، نتایج زیر در مورد نفوذ در مصالح دانه ای مشاهده شده است:

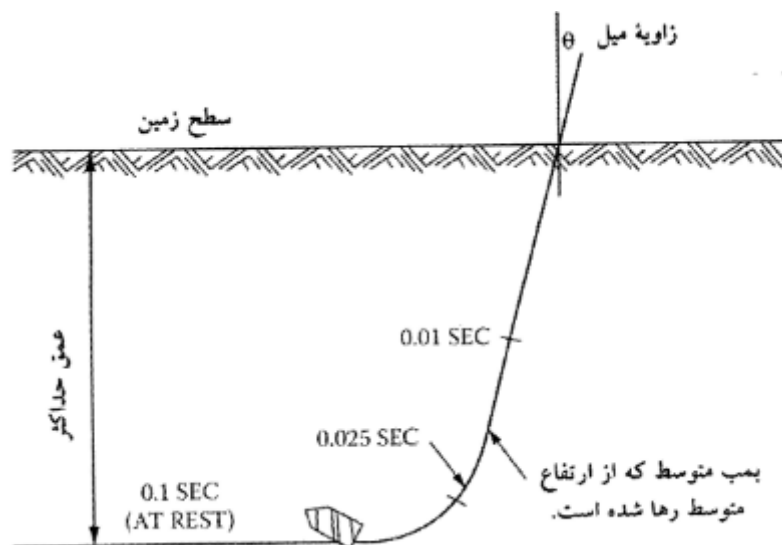
- * نفوذ هنگامی کاهش می یابد که چگالی مصالح افزایش یابد.
- * نفوذ هنگامی افزایش می یابد که رطوبت مصالح افزایش یابد.
- * برای مصالح با چگالی های مساوی، اگر ذرات تشکیل دهنده ریزتر باشند، حفره ایجاد شده و مقدار نفوذ بزرگ تر است.

همان گونه که در شکل (۳) نشان داده شده، مسیر نفوذ در داخل زمین، شکلی مانند حرف J دارد. بخش مستقیم این شکل کمابیش ۲/۳ از طول کل آن را تشکیل می دهد و بخش غیر مستقیم آن ۱/۵ تا ۱/۳ کل طول است. از شکل ۷.۳ نیز می توان برای برآورد عمق نفوذ استفاده کرد. بیش تر بمب های استاندارد، نسبت های لاغری (طول به قطر) ۳ تا ۶ دارند. این بمب ها از نظر دینامیکی بی ثبات و مسیر نفوذ J شکل تشکیل می دهند. اما برای نسبت های لاغری ۱۰ یا بیش تر، مسیر نفوذ کمابیش مستقیم است و مقدار نفوذ آن ها در زمین را می توان با استفاده از معادله تجربی زیر حساب کرد:

$$X_f = 0.0031 S_i N_s (W_T / A_m)^{0.5} (V_s - 100) \quad (8)$$

که در آن X_f عمق نهایی نفوذ (فوت)، S_i شاخص نفوذ خاک (آزمایش یا جدول ۲)، N_s ضریب شکل دماغه (0.56-1.33)، W_T وزن پرتابه (پوند)، A_m بیشینه سطح مقطع پرتابه (اینچ مربع) و V_s سرعت برخورد (فوت بر ثانیه) می باشند. معادله فوق دارای محدودیت های زیر است:

۱. برای $200 < V_s < 3000$ fps معتبر است؛
۲. برای $60 < W_T < 5700$ fps معتبر است؛
۳. نسبت های لاغری باید بیش تر از ۱۰ باشند؛
۴. برای نفوذهای کم عمق (کمتر از ۳ برابر قطر بمب به علاوه یک طول دماغه آن) معتبر نیست؛
۵. در بهترین حالت، دقت آن ۲۰٪+ است؛
۶. برای بمب های با انحنای تند یا بمب های شکسته معتبر نیست، [2].



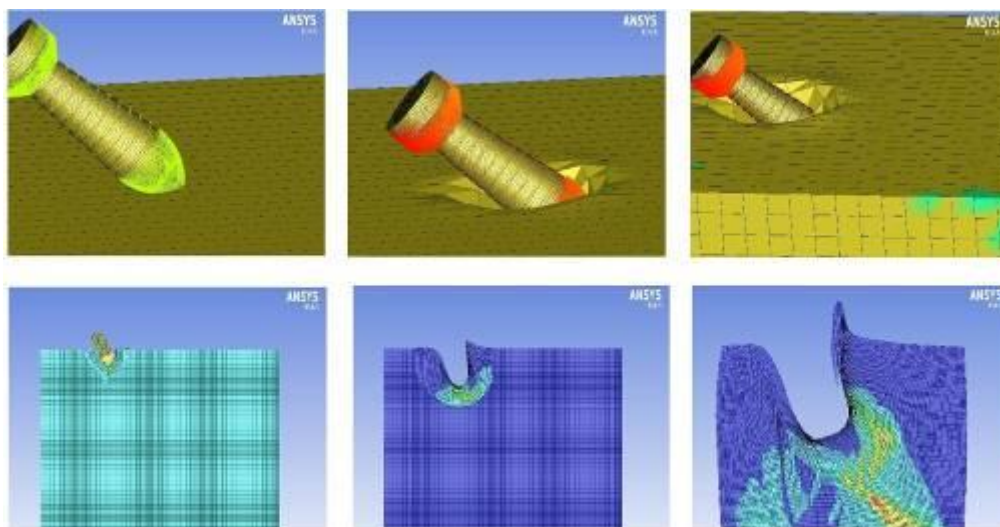
شکل ۳- نفوذ بمب های بزرگ که مسیرهای J شکل در زمین تشکیل می دهند، [8]

جدول ۲- شاخص قابلیت نفوذ معمول خاک برای مصالح خاکی، [2]

شاخص خاک Si	نوع مصالح
2-3	نهشته های گچ حجیم، شن و ماسه درشت خوب سیمانته شده، کالیچ خشک، رس و سیلت مرطوب یخ زده
4-6	ماسه درشت با تراکم متوسط یا متراکم، بدون سیمانتگی، خشک یا مرطوب، رس و سیلت خشک سخت، آبرفت بیابان
8-12	ماسه ریز خیلی سست غیر از خاکهای دست ریز، رس یا سیلت سفت مرطوب، توده ماسه ای نیمه متراکم با کمتر از ۵۰٪ ماسه
10-15	خاک دست ریز مرطوب و سست با مقداری رس و سیلت، رس نیمه سفت مرطوب و ماسه مرطوب نیمه متراکم
20-30	خاک دست ریز سست مرطوب که غالباً از ماسه و سیلت تشکیل شده است. رس مرطوب خیس، نرم و کم مقاومت
40-50	خاک دست ریز ماسه ای بسیار سست، رس و سیلت خیلی نرم اشباع با خاصیت پلاستیک بسیار بالا و مقاومت خیلی کم (همچون دریاچه نمک بزرگ و گل های در جزیره اسکاجس)

۴. مدل سازی عددی نفوذ پرتابه

برای مدل سازی میزان نفوذ پرتابه از تحلیلگر لاگراژی در نرم افزار Autodyn استفاده شده است [4]. برای این منظور پرتابه Gp2000 با ابعاد موجود و با صرف نظر کردن از جزئیات مربوطه و با سرعت اولیه 1500 fps و نیز از مصالح موجود در کتابخانه نرم افزار جهت مدل سازی خاک استفاده شد. برای مدل سازی پرتابه از مدل Steel4340 با مقاومت از نوع Johnson Cook استفاده شد. شکل (۴) مراحل نفوذ را که در نرم افزار مدل شده است، نشان می دهد.



شکل ۴- مدل مورد استفاده جهت بررسی میزان نفوذ پرتابه در Autodyn

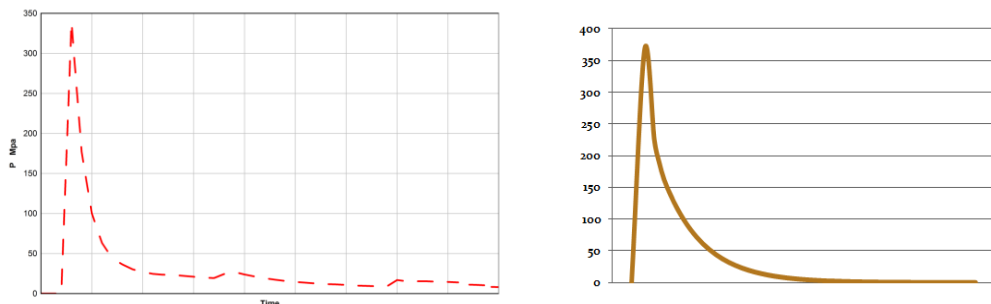
بعد از گذشت تنها ۳۰ میلی ثانیه از زمان برخورد پرتابه به خاک میزان نفوذ بیش از هفت متر می باشد. با توجه به فرمولهای تجربی میتوان میزان نفوذ یک بمب در خاک را تعیین کرد. با توجه به نتایج تحلیل حاصل از نرم افزار و نیز این نتایج حاصل از فرمولهای تجربی برگرفته از مراجع [6],[7],[8] می توان نفوذ یک بمب را در عمق 10 متر فرض کرد و با فرض میزان نفوذ در عمق مورد بحث و سپس انفجار خرج پرتابه در این عمق تحلیل متغیرهای فرض شده مورد نظر را انجام داد، که در ادامه به آنها پرداخته می شود.

علامت مشخصه و طبقه بندی	وزن کل Wt lb	قطر d in	طول L in	نسبت خرج به وزن %	نسبت لاغری L/d	فشار مقطعی
GP	2000	23	70	53	3.0	5.0
GP*	2000	18	150	48	8.3	7.9

$$S_i = 4 - 6 \dots N_s = 1.08 \dots A_m = 415 \text{ in}^2 \quad V_s = 1000 - 1500 \text{ fps} \rightarrow X_f \square 10 - 15 \text{ m}$$

۵. مدلسازی عددی موج انفجار در خاک

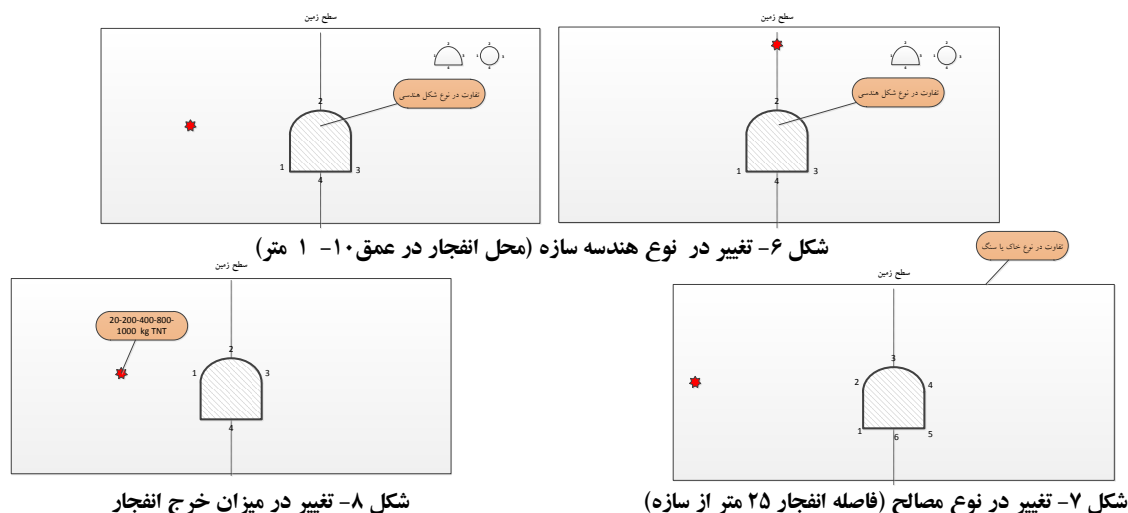
برای مدلسازی عددی انفجار از برنامه Autodyn استفاده شده است، [4]. از تحلیلگر اویلری برای حل مسئله و از خاک و TNT و هوای موجود در کتابخانه نرم افزار به منظور مدلسازی مواد استفاده شده است. برای یک انفجار حاصل از ۴۰۰ کیلوگرم TNT، نمودار فشار-زمان در نزدیک محل وقوع مانند شکل (۵-ب) می باشد:



شکل ۵- فشار حاصل از انفجار (Autodyn(400 kg , TNT) الف-راست: حاصل از روابط تجربی - ب-چپ: حاصل از نرم افزار)

۶. مدلسازی عددی سازه پناهگاهی

برای مدلسازی سازه پناهگاهی و ایجاد انفجار در خاک از نرم افزار Flac استفاده شده است، [5]. بررسی صحت استفاده از این نرم افزار برای مدلسازی انفجار با استفاده از تحلیل نتایج زیمی در Flac انجام شده است [9]. در نرم افزار Flac برای محاسبه فرکانس مدل از مواد الاستیک و برای سایر تحلیل ها از مدل پلاستیک موهر - کلمب استفاده شده است. برای رسیدن به نتایج صحیح، مدلسازی در این نرم افزار طی ۵ مرحله انجام می پذیرد که در طی آن ابتدا فرکانس مدل بدست آمده سپس طی ۴ مرحله تحلیل بدین صورت انجام می گیرد که ابتدا مدل به تعادل رسیده سپس حفره محل سازه حفر و سپس سازه نگهدارنده اعمال و در نهایت موج بدست آمده از نرم افزار Autodyn به مدل اعمال و نتایج از آن بدست می آید. برای مدلسازی مرزها از مرز آرام به منظور عدم انعکاس موج انفجار و از میرایی رایلی برای اعمال میرایی به مدل استفاده شده است. نوع پوشش سازه پناهگاهی از نوع المان های ساختاری تیر (beam structural elements) با ضخامت ۵۰ سانتی متر می باشد. از متغیر مصالح، میزان خرج و هندسه به منظور مقایسه نتایج استفاده شده است. شکل های (۶) تا (۸) نحوه اعمال متغیرها را نشان می دهد:

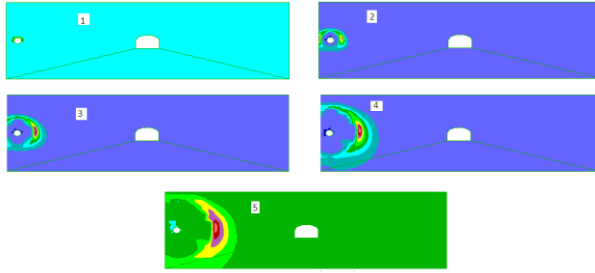


شکل ۶- تغییر در نوع هندسه سازه (محل انفجار در عمق ۱۰- ۱ متر)

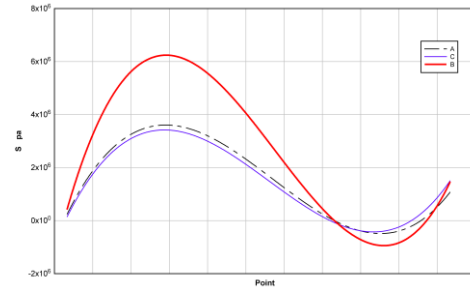
شکل ۸- تغییر در میزان خرج انفجار

شکل ۷- تغییر در نوع مصالح (فاصله انفجار ۲۵ متر از سازه)

با مقایسه تعدادی از نتایج با نتایج حاصل از روابط تجربی، اختلاف از ۳۰٪-۶٪ بسته به نوع خاک بکار رفته حکایت دارد که به دلیل گسترده بودن بازه ثابت های مورد استفاده در روابط می باشد. در ادامه به تعدادی از اشکال، نمودارها و جداول حاصل از تحلیل اشاره می شود:



شکل ۱۰- نحوه انتشار موج در Flac



شکل ۹- مقایسه تنش در نقاط اطراف سازه در مقاطع مختلف

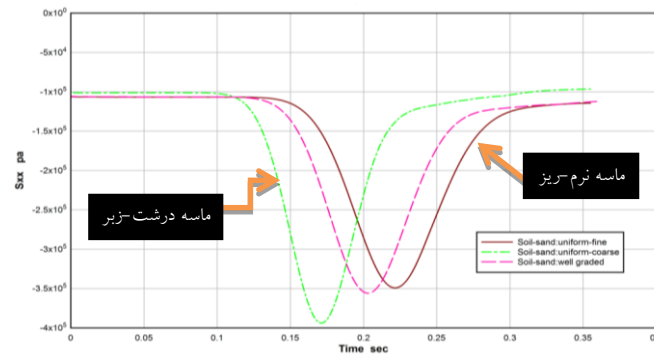
(انفجار در نزدیک سطح) (نیم دایره A- دایره B- نعل اسبی C)

جدول ۳- مقایسه حداکثر فشار ایجاد شده از مقدار خرج انفجار متفاوت در نقاط 1,2,3

مقدار خرج انفجار	فشار ماکزیم Pa		
	Point 1	Point 2	Point 3
20 kg	1.1E5	1.418E5	6.53E4
200 kg	8.47E5	7.24E5	1.53E5
400 kg	1.75E6	1.45E6	2.41E5
800 kg	3.918E6	3.37E6	4.54E5
1 ton	5.018E6	4.257E6	5.84E5

جدول ۴- مقایسه تعدادی از نتایج در مورد حداکثر فشار ایجاد شده در سازه در تغییر در نوع مصالح در جبهه جلوی سازه

	Name	فشار Mpa	زمان رسیدن به فشار ماکزیم
ریز	uniform	0.475	0.1359
	sandy with few fines	0.4229	0.153
	sandy with silty or clayey	0.438	0.154
معمولی	uniform - fine	0.349	0.222
	uniform - coarse	0.393	0.1711
	well-graded	0.3556	0.202
ریز	low plasticity	0.2148	0.449
	medium to high plasticity	0.215	0.52
ریز	low plasticity	0.1863	0.658
	high plasticity	0.1612	1.157
سنگ	sandstone	1.175	0.0064
	siltstone	0.791	0.00675
	granite	0.809	0.00399



شکل ۱۱- مقایسه تنش در نقطه جبهه جلو در تنوع نوع خاک از نوع ماسه

۷. بحث و نتیجه گیری

رابطه بین مقدار خرج انفجار و زمان رسیدن به حداکثر تنش در سازه در خرجهای کم و رابطه بین مقدار خرج انفجار و ماکزیمم تنش ایجاد شده در سازه یک رابطه تقریباً خطی است. مقدار تنش ماکزیمم ایجاد شده در سازه، به طور متوسط ۱۶٪ کمتر از مقدار افزایش خرج انفجار می باشد. در محیطهای خاکی بیشترین فشار ایجاد شده در سازه زمانی است که خاک از نوع شن باشد و کمترین فشار ایجاد شده در سازه مربوط به محیطی با خاک رس می باشد، در واقع هر چه اندازه تشکیل دهنده خاک ریزتر (و خاصیت خمیری بیشتر) باشد میرایی بیشتر و در نتیجه به سازه تنش کمتری وارد می شود. در محیط های خاکی زمان رسیدن به ماکزیمم فشار در شن به نسبت سایر خاکها کمتر است در واقع هرچه ریزدانه به خاک اضافه شود زمان رسیدن به ماکزیمم تنش با تاخیر بیشتر به سازه اعمال می شود. تنش ایجاد شده در سازه در یک محیط سنگی تقریباً ۲ برابر تنش ایجاد شده در محیط خاکی است. فشار ماکزیمم در زمانی بسیار کمتر در محیط های سنگی نسبت به محیط خاکی به سازه وارد می شود. حداکثر جابجایی ایجاد شده در سازه در یک محیط خاکی تقریباً ۱۰ برابر جابجایی ایجاد شده در سازه در یک محیط سنگی می باشد.

در مورد نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به هندسه سازه در مدل ۱ (انفجار در فاصله افقی) کمترین تنش ایجاد شده در سازه مربوط به سازه با هندسه دایره می باشد و در مدل ۲ (انفجار در نزدیک سطح زمین)، کمترین تنش ایجاد شده در سازه مربوط به سازه با هندسه نعل اسبی می باشد با توجه به جمع ۲ حالت از نظر جابجایی و تنش، بهترین هندسه با توجه به ثابت بودن مساحت مقطع، مربوط به سازه ای با هندسه نیم دایره می باشد.

۸. مراجع

- [1] - نیری، ا.، ۱۳۹۲، تحلیل و طراحی ساختمانها در برابر اثرات انفجار، چاپ اول، انتشارات دانشگاه مالک اشتر، تهران، صفحات ۳۶-۴۲.
- [2] - Krauthammer, T., 2007, *Modern Protective Structures*, Department of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, pp. 111-140 .
- [3] - Bulson, P.S., 1997, *Explosive Loading of Engineering Structures*, E & FN Spon , pp. 79-105.
- [4] - *AUTODYN Theory Manual, Revision 4.3.*, 2005, Century Dynamics Inc., California.
- [5] - *FLAC : Fast Lagrangian Analysis of Continua , version 7.0 User's manual* , 1999, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN.
- [6] - *TM5-1300*, 1990, Structures to Resist the Effects of Scidental Explosions.
- [7] - *UFC-340-02*, 2012, Unified Facilities Criteria (UFC), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions.
- [8] - *TM5-855*, 1986, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons.
- [9] - De, A. and Zimmie, T. F., 2006, Centrifuge modeling of surface blast effects on underground structures, *Geotechnical Testing Journal*, **30** : 427-431.
- [10] - Ambrosini, R.D., Luccioni, B. and Danesi, R., Riera, J. and Rocha, M, 2002, Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface, *Shock Waves*, **12**: 69-78.