

## تأثیر انفجار بر روی ظرفیت باربری پی های سطحی

مصطفی امینی مزرعه نو<sup>۱\*</sup>، اشکان روانبخش<sup>۲</sup>، غلامعلی دهقان نیری<sup>۲</sup>

۱- مربی و ۲- کارشناس ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۲/۰۲/۰۱، پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۲)

### چکیده

ظرفیت باربری پی های سطحی تحت انفجار، وابسته به عوامل مختلفی مانند شدت انفجار، عمق مدفون شدگی پی و جنس مصالح می باشد، ولی تاکنون مطالعه جامعی درباره کم و کیف تأثیر این عوامل بر روی ظرفیت باربری این نوع پی ها صورت نگرفته است. روش حل برای محاسبه ظرفیت باربری پی های سطحی تحت انفجار بدین صورت است که بعد از اعمال تنش اولیه که ناشی از وزن خاک می باشد، طی گام های بارگذاری مختلف در هر مرحله، پی را تحت تنش یکنواختی قرار داده و پس از تحلیل مدل در حالت ایستای، دوباره مدل تحت انفجار آنالیز شده و میانگین نشست نقاط زیر شالوده محاسبه می شود. این روند برای تنش های مختلف وارد به پی انجام شده و در نهایت نمودار نشست-تنش مربوط رسم می شود. این افزایش تنش مرحله ای تا آنجا ادامه پیدا می کند که خاک زیر پی حین اعمال تنش انفجاری دچار گسیختگی شود. سپس با استفاده از روش مماس متقاطع می توان ظرفیت باربری انفجاری پی را برآورد نمود. نتایج تحقیق حاکی از کاهش ظرفیت باربری شالوده تحت بار انفجار و وقوع نشست نامتقارن در شالوده می باشد، همچنین، همانند شرایط ایستای، با افزایش عمق مدفون شدگی شالوده ظرفیت باربری انفجاری پی افزایش می یابد.

**کلید واژه ها:** ظرفیت باربری، انفجار، مدل سازی عددی، پی های سطحی.

## Blast Loading Effect on the Bearing Capacity of Shallow Foundations

M. Amini Mazraeno, A. Ravanbakhsh, Gh. Dehghan Niri

Imam Hossein University

(Received: 21/04/2013; Accepted: 03/12/2013)

### Abstract

*Bearing capacity of shallow foundations under blast loading depends on various factors such as the severity of the explosion, buried depth of the foundation and its materials, but comprehensive study hasn't been done on the impact of these factors on the bearing capacity of this kind of foundations. The method of calculating bearing capacity of foundations under blast loading follows that after applying initial stress due to the soil gravity, during different loading in each step, the foundation will be placed by uniform stress. After analysis of the model in the static mode, the model will be analyzed under the blast loading again, and then the average settlement of points below the foundation is calculated. This procedure is performed for various stress levels and finally the settlement-stress graphs are plotted. This stress increasing continues until the soil failed under the blast loading. Then bearing capacity of the foundation under the blast loading is estimated by the cross-tangent method on the settlement-stress graph. The results indicate reduction of the bearing capacity and the asymmetrical settlement of the foundation under blast loading. Also under the blast loading like the static condition, bearing capacity is increased by increasing the buried depth.*

**Keywords:** Bearing Capacity, Explosion, Numerical Modeling, Shallow Foundation.

\* Corresponding Author E-Mail: maminimz@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

تاکنون تحقیقات متعددی درباره تأثیر انفجار در خاک انجام گرفته است. بیشتر مطالعات در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه‌ها به سال‌های ۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵ (زمان جنگ جهانی) بر می‌گردد. می‌توان گفت جنگ جهانی دوم منبعی از آزمایش‌های ارزشمند (بدون در نظر گرفتن خسارت‌های جانی) به‌شمار می‌آید که از ساده‌ترین سازه‌ها مانند دیوار و پناهگاه تا سازه‌های سنگین مانند پل، تونل و پناهگاه‌های زیر دریا تحت تأثیر انفجار قرار گرفتند. به‌همین دلیل در سال ۱۹۳۸ کمیته‌ای به‌نام تحقیقات دفاع ملی تشکیل شد و باکر به بررسی اثر انفجار بر سازه‌های مختلف پرداخت و میزان خرابی وارد بر سازه‌ها نسبت به نوع سازه، ضخامت سطح برخورد، نوع و وزن ماده منفجره و میزان فاصله از محل انفجار را بررسی کرد [۱].

با نگاهی به مقالات موجود در زمینه مباحث مرتبط با انفجار مشخص می‌شود که تاکنون عمده فعالیت‌های صورت گرفته در این زمینه، در دو بخش آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی و توسعه روش‌های تحلیلی و عددی متمرکز شده است [۲].

آزمایش‌های بزرگ مقیاس و آزمایشگاهی به‌علت صرف هزینه و زمان زیاد و مشکلات زیست‌محیطی، بسیار کم و محدود به کشورهای دارای تجهیزات مانند روسیه، آمریکا و ژاپن است. در سال ۱۹۸۶ آزمایش‌هایی توسط دالریو بر روی قوس بتنی مدفون در خاک که تحت بار انفجاری سطحی قرار داشت انجام شد و میزان ترک‌خوردگی و کرنش قوس در نقاط و زوایای مختلف به‌صورت نمودارهایی ارائه شد [۲].

اوین [۳] با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ، اثرات انفجار بر سازه‌های زیرزمینی را بررسی کرد. هدف از انجام این آزمایش، بررسی میزان خطرپذیری سازه‌های مختلف در برابر انواع انفجارها بود. این آزمایش برای پناهگاه زیرزمینی مدفون در خاک انجام شد و فشار ناشی از انفجار در فواصل مختلف از محل انفجار به‌دست آمد که نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی، نزدیکی بسیار زیادی را نشان می‌داد.

انو چند آزمایش کوچک مقیاس را در ژاپن انجام داد و با انفجارهای مختلف درون خاک، اثر ضخامت خاک در گسترش موج انفجار و فشار وارد بر سازه‌های زیرزمینی را بررسی کرد. در این آزمایش‌ها، اثر کاهندگی خاک در نتایج به‌وضوح دیده شده و روابطی برای مشخصات پالس انفجار ارائه شده است [۴].

با توجه به توسعه قابل توجه روش‌های عددی در دهه‌های اخیر، امکان بررسی عددی اثرات انفجار بر سازه‌ها با دقت بالا فراهم آمده است. در میان مطالعات عددی، روش‌های المان محدود و تفاضل محدود نسبت به سایر روش‌ها توسعه بیشتری داشته و روش‌هایی ارزان و با هزینه محاسباتی کمتر به‌شمار می‌روند.

استیونس [۵] برای تحلیل دو قوس بتنی مدفون در عمق کم، تحت انفجار سطحی از ترکیب روش المان محدود و تفاضل محدود

استفاده کرد. نتایج عددی نزدیکی خوبی با نتایج آزمایش‌ها داشت ولی در مورد پدیده کمانش، نتایج همسویی نداشته و مدل نتوانست خرابی‌های قوس بتنی را در زوایای ۷۰ تا ۹۰ درجه نسبت به سطح زمین به‌خوبی نشان دهد.

زنگونج [۴] با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS پاسخ سازه زیرزمینی تحت بار انفجاری سطحی را در برابر افزایش عمق سازه و اندازه آن بررسی کرد و فشار و تنش ناشی از موج انفجار بر روی سازه به‌صورت نمودار استخراج شد. نتایج نشان داد که هر چه سازه در عمق بیشتری ساخته شود، پایدارتر خواهد بود.

گوی [۵] با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D، اثر انفجار بر روی تونلی که در زیر فرودگاه در تایوان ساخته شده را بررسی کرد و تأثیر ویژگی‌های خاک از جمله سختی دینامیکی خاک، مقاومت برشی زهکشی نشده، نسبت استهلاک خاک، شدت بار انفجاری و گودال ایجاد شده بر روی تونل را در پاسخ سازه مورد بررسی قرار داد و در انتها نتایج خروجی از نرم‌افزار، به صورت نمودارهایی ارائه گردید. نتایج نشان می‌داد که شدت انفجار از عوامل مؤثر بر میزان افزایش ممان خمشی و تنش وارد بر تونل است و استهلاک خاک اثر فاحشی در پاسخ تونل نخواهد گذاشت.

اثرات انفجار بر سازه‌های زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار دو بعدی و سه بعدی اتوداین توسط لو مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی دو بعدی، بارگذاری انفجاری و پاسخ دیوارهای سازه را با دقت بیشتری نسبت به مدل‌سازی سه‌بعدی پیش‌بینی می‌کند. در صورتی که شرایط بارگذاری در گوشه‌ها و نیز پاسخ سازه باقیمانده در مدل دو بعدی نسبت به مدل سه‌بعدی از دقت کمتری برخوردار است، در نتیجه اگر پاسخ بحرانی سازه، مورد نظر باشد، نتایج مدل‌سازی دوبعدی رضایت‌بخش خواهد بود.

ناگی و همکاران [۶] با استفاده از روش المان محدود تأثیر عمق انفجار بر روی سازه‌های مدفون در خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشانگر تأثیر بیشتر انفجار در عمق نسبت به انفجار در سطح با شرایط یکسان بر روی سازه‌های مدفون می‌باشد.

در سال‌های اخیر نیز مطالعات عددی زیادی در رابطه با تعیین فشار و ابعاد چاله ناشی از انفجار در خاک‌های مختلف صورت پذیرفته که می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط آبسیل، ویلیامس و پون، ونگ، الفسون و نیرومند اشاره کرد. این تحقیقات به‌صورت خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است. مسئله مهم در بررسی اندرکنش بین انفجار و خاک، تأثیر سازه‌های مختلف واقع در خاک همانند تونل، سنگ‌های زیرزمینی و یا پی می‌باشد، که موجب تغییر در رفتار خاک و نتایج حاصل می‌گردد.

رفتار پی شمعی در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، تحت انفجار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع با استفاده از روش آنالیز المان محدود توسط جایاسینگ مورد بررسی قرار گرفته است [۷ و ۸].

حل مسئله بدین صورت است که پس از مدل‌سازی شالوده و محیط خاک در نرم‌افزار، شوک ناشی از انفجار به کمک روابط تئوری موجود و با توجه به جنس و وزن ماده منفجره محاسبه شده و به‌صورت بار دینامیکی به مدل اعمال می‌شود و پس از انجام آنالیز دینامیکی، نشست شالوده به‌دست می‌آید. این روند برای سربارهای مختلف انجام شده و در نهایت با روش مماس متقاطع، ظرفیت باربری شالوده به‌دست می‌آید. شایان ذکر است که انجام شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند موجب کم کردن تعداد آزمایش‌های انجام شده در محل و در نتیجه باعث صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه‌ای در هزینه و زمان گردد.

توزیع انفجار در خاک، تغییر شکل قائم شمع و تنش مؤثر در شمع نیز بررسی شده است. نتایج نشان داده که قسمت فوقانی شمع نسبت به انفجار آسیب‌پذیرتر بوده و با افزایش فاصله انفجار از شمع، تأثیر انفجار بر روی شمع کاهش می‌یابد.

علی‌رغم مطالعات متعدد انجام شده در زمینه ظرفیت باربری ایستای و لرزه‌ای شالوده‌ها، تاکنون مطالعه جامعی در رابطه با ظرفیت باربری شالوده تحت بار انفجار انجام نشده است. بنابراین، هدف تحقیق حاضر این است که با استفاده از نرم‌افزار FLAC رفتار پی نواری تحت انفجار بررسی شده و تأثیر عواملی مانند شدت انفجار، عمق مدفون‌شدگی پی و جنس مصالح مورد بررسی قرار گیرد. روش

جدول ۱. مطالعات بر روی انفجار در خاک‌های غیر چسبنده [۹]

Researcher	Code/software	Cell size (mm)	Explosive	Soil
Polyak and Sher (1978)	Mathematical model	-	Solid-liquid model	Rigid surface
Rodinnov and Terentev (1985)	Mathematical model	-	Solid-liquid model	Rigid surface
Absil et al. (1997)	AUTODYN	2	475 g composition B	-
Dorn et al. (1999)	FLUENT and LS-DYNA	-	-	-
Williams and Poon (2000)	LS-DYNA	-	7.5 kg C4	Cohesion less soil
Laine and Sandvik (2001)	AUTODYN	8	10.4 kg composition B	Cohesion less soil
Niekerk (2001)	MSC. Dytran	-	800 g Pentolite	-
Wang (2001)	LS-DYNA	-	100 g C4	Cohesion less soil
Cheng et al. (2002)	AUTODYN and MSC. Dytran	10	5 kg TNT	-
Fairlie and Bergeron, (2002)	AUTODYN	25	1 kg C4	Cohesion less soil
Gupta (2002)	LS-DYNA	-	907.2 g Pentolite	-
Jacko et al. (2002)	AUTODYN	-	500 gr TNT	-
Persson et al. (2003)	AUTODYN	-	0.125/0.5/1/4 kg PETN	-
Rhijnsburger (2003)	LS-DYNA	-	10 kg TNT	Rigid surface
Fiserova et al. (2004)	AUTODYN	-	100 g TNT	Cohesion less soil
Olofsson (2007)	FLAC	-	-	-
Niroumand and Kassim (2009)	AUTODYN	10	100 g TNT	Cohesion less soil

تحلیلی- تجربی ارائه شده توسط سایر محققین، بر اساس نوع و میزان ماده منفجره و همچنین فاصله مرکز خرج از سطح آزاد گودال برآورد می‌شود. همچنین فرض می‌شود که بار دینامیکی اعمال شده به سطح آزاد گودال به‌صورت یکنواخت در طول مرز توزیع می‌شود.

## ۲-۱. انتخاب ابعاد مدل و شرایط مرزی

در شبیه‌سازی‌های عددی می‌بایست ابعاد مرزهای مدل موردنظر به‌گونه‌ای انتخاب شود که شرایط مرزی محدوده نزدیک<sup>۳</sup> تأثیری بر روی نتایج نداشته باشد. برای نیل به این هدف، می‌بایست ابعاد مدل را تا اندازه‌ای بزرگ در نظر گرفت که با بزرگ‌تر کردن ابعاد مرزها بیش از آن، تغییری در نتایج آنالیز حاصل نشود. در این تحقیق، مدل‌های مختلف که همه شرایط در آنها یکسان و تنها ابعاد آنها متفاوت بوده، ساخته شده و نشست گوشه پی به‌عنوان معیاری جهت بررسی وضعیت ابعاد برای مدل‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج این تحلیل‌ها حاکی از آن است که با افزایش بعد افقی مدل از ۵۰ به ۵۴ متر، تغییر چندانی در مقادیر نشست گوشه پی حاصل نشده است. از سوی دیگر با توجه به اینکه در این مدل، عمق سنگ بستر لرزه‌ای تقریباً در فاصله ۲۰ متری از سطح خاک فرض شده بنابراین، ابعاد ۵۰×۲۰ متر برای انجام آنالیزها انتخاب گردیده است.

## ۲. مدل‌سازی عددی اثر انفجار

FLAC یک نرم‌افزار تفاضل محدود صریح است. این نرم‌افزار توانایی مدل کردن رفتار خاک، سنگ و دیگر مصالحی که بعد از رسیدن به حد تسلیم خود جریان خمیری پیدا می‌کنند را دارا می‌باشد. مصالح به‌وسیله المان‌ها یا نواحی که یک شبکه را تشکیل می‌دهند، مدل‌سازی می‌شود. هر المان از قوانین خطی یا غیرخطی تنش- کرنش در مقابل نیروهای اعمال شده و شرایط مرزی تبعیت می‌نماید. استفاده از سیستم مختصات لاگرانژی این امکان را فراهم می‌سازد که در صورت تسلیم مصالح، مختصات گره‌های شبکه در هر فاصله زمانی  $\Delta t$  جین فرایند حل مسئله، تغییر کرده و برای گام زمانی بعدی، مختصات گره‌ها اصلاح و به‌هنگام<sup>۱</sup> می‌گردند. محاسبات لاگرانژی برای محاسبه تغییر شکل‌های بزرگ مناسب خواهد بود. در نرم‌افزارهای محیط پیوسته همانند FLAC، انفجار بمب به‌صورت مستقیم شبیه‌سازی نمی‌گردد، ولی به‌جای آن بار دینامیکی به‌صورت تاریخچه تنش بر روی مرز چاله انفجار<sup>۲</sup> اعمال خواهد شد. بار اعمالی (شامل شدت تنش و مدت تداوم آن) و نیز ابعاد چاله انفجار با استفاده از سایر نرم‌افزارها همانند CONWEP و اتوداین و یا روابط

<sup>۱</sup> Update

<sup>۲</sup> Crater

<sup>۳</sup> Near-field

$$\phi_{int} = \phi_{soil} \times \frac{2}{3} \quad (۲)$$

$$C_{int} = C_{soil} \times \frac{2}{3} \quad (۳)$$

$$\psi_{int} = \psi_{soil} \times \frac{2}{3} \quad (۴)$$

$$k_s = k_n = 10 \left[ \frac{k_{soil} + 1.333G_{soil}}{0.16667} \right] \quad (۵)$$

#### ۲-۴. اعمال شرایط نیرویی

اصولاً مدل‌های عددی، شبیه‌سازی از مدل‌های واقعی می‌باشند. در مدل‌های واقعی جهت اعمال بار (بر روی سطح شالوده) از دو شیوه استفاده می‌شود. رویکرد اول روش کنترل کرنش یا تغییر مکان می‌باشد. در این شیوه تغییر مکان قائم وارد بر سطح شالوده با نرخ ثابتی افزایش یافته و در مقابل آن، نیروی وارد بر اهرم بارگذاری از طرف شالوده اندازه‌گیری، سپس نمودار تنش در مقابل تغییر مکان رسم شده و نتایج لازم از آن استخراج می‌شود. رویکرد دیگر، روش کنترل تنش می‌باشد که در این روش، تنش وارد شده به سطح با نرخ ثابتی افزایش می‌یابد و در مقابل آن کرنش یا تغییر مکان نقاط زیر پی ثبت می‌گردد و در ادامه نمودار تغییرات تنش در مقابل تغییر مکان رسم می‌شود. برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌ها در حالت ایستای، روش کنترل کرنش متداول‌تر می‌باشد ولی با توجه به عدم توانایی نرم‌افزار FLAC در انجام همزمان آنالیز ایستای و دینامیکی، در آنالیزهای دینامیکی از روش کنترل تنش استفاده می‌شود.

#### ۲-۵. کنترل انتقال موج در مدل و اعمال گام زمانی دینامیکی

محتوای فرکانسی و مشخصات سرعت موج ورودی در سیستم بر روی دقت عددی انتقال موج تأثیرگذار است. کوهلمیر و لیزمر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۳ ثابت کردند که برای نشان دادن صحیح انتقال موج در یک مدل عددی، بزرگ‌ترین اندازه المان ( $\Delta L$ ) نباید از یک دهم تا یک هشتم طول موج بالاترین مؤلفه فرکانسی موج ورودی، بزرگ‌تر باشد [۱۱]:

$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \quad (۶)$$

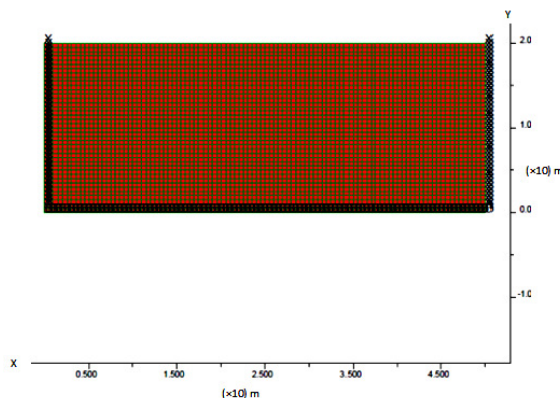
که در رابطه فوق،  $\lambda$  طول موج بزرگ‌ترین مؤلفه فرکانسی می‌باشد. در مدل استفاده شده در این تحقیق، بعد بزرگ‌ترین المان به کار رفته در مدل ۰/۵ متر است که در نتیجه:

$$\begin{cases} \Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \\ T = \frac{\lambda}{c} \end{cases} \Rightarrow T_{min} = \frac{10\Delta L}{c} \quad (۷)$$

در روابط فوق،  $c$  سرعت موج برشی در خاک و  $T$  پریود آن است. به‌عنوان مثال برای خاک با سرعت موج برشی ۱۰۰۰ m/s، حداقل پریود قابل اعمال به مدل برابر با ۰/۰۵ s می‌باشد. گام زمانی<sup>۳</sup> دینامیکی در نرم‌افزار FLAC، هم توسط کاربر و هم به صوت خودکار توسط نرم‌افزار، قابل اعمال است. گام زمانی محاسبه شده توسط نرم‌افزار برای هر المان در یک مش‌بندی با المان‌های مستطیلی شکل از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta t_{crit} = \frac{A_z}{L_d} \sqrt{\frac{\rho}{K + \frac{4}{3}G}} \quad (۸)$$

شرایط مرزی نیز باید به‌گونه‌ای معین گردد که با شرایط واقعی زمین قبل از اعمال بار مطابقت داشته باشد. در مدل‌سازی شالوده‌های سطحی مرسوم است که مرزهای قائم موجود در دو طرف مدل را در مقابل تغییر مکان افقی ( $x$ ) و مرز تحتانی را در مقابل هر دو تغییر مکان افقی و قائم ( $x, y$ ) مهار می‌کنند (شکل ۱) [۱۰].



شکل ۱. نمایی از مدل انتخاب شده و شرایط مرزی ایستای

#### ۲-۲. انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای آن

در نرم‌افزار FLAC مدل‌های رفتاری مختلفی به‌صورت پیش‌فرض موجود است که بسته به شرایط مسئله می‌توان از آنها استفاده کرد. با توجه به سادگی و در دسترس بودن پارامترهای مدل رفتاری مور-کلمب در تحقیق حاضر از این مدل برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز برای معرفی مدل مور-کلمب شامل دانسیته ( $\gamma$ )، مدول حجمی ( $K$ )، مدول برشی ( $G$ )، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )، چسبندگی ( $c$ )، زاویه اتساع ( $\psi$ ) و مقاومت کششی می‌باشد.

#### ۲-۳. مدل‌سازی شالوده سطحی نواری

برای مدل‌سازی شالوده نواری از المان‌های تیر استفاده شده است. شالوده مدل شده، شامل یک صفحه بتنی به عرض ۲ و ضخامت ۰/۵ متر می‌باشد. مدول الاستیسیته بتن مورد استفاده در این شالوده نواری برابر  $2.5 \times 10^4$  Pa و ضریب پواسون آن ۰/۲ در نظر گرفته شده که با توجه به شرایط کرنش مسطح برای مدل‌های دو بعدی FLAC،

مقدار مدول الاستیسیته‌ی اعمالی به نرم‌افزار برابر است با:

$$E_{in} = \frac{E}{1-\phi^2} = \frac{2.5e10}{1-0.2^2} = 2.60e10 \text{ Pa} \quad (۱)$$

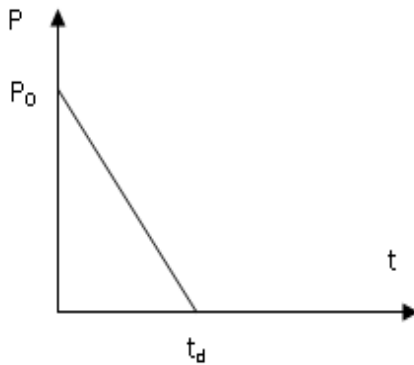
سطح مشترک<sup>۱</sup> موجود در نرم‌افزار FLAC بر اساس لغزش کلمب یا جداشدگی کششی فرموله شده است. مشخصات سطح مشترک شامل اصطکاک، چسبندگی، زاویه اتساع، سختی نرمال، سختی برشی و مقاومت کششی می‌باشد. برای تعیین مشخصات سطح مشترک از روابط زیر استفاده شده است [۱۱].

<sup>۲</sup> Kuhlemeyer and Lysmer

<sup>۳</sup> Time step

<sup>۱</sup> Interface

مدت زمانی که فشار از مقدار پیک به صفر می‌رسد یا همان مدت زمان فاز مثبت ( $t_d$ ) محاسبه می‌گردد که با استفاده از این دو مقدار، نمودار تنش - زمان اعمالی به مرز گودال به دست می‌آید (شکل ۳).



شکل ۳. پالس تنش اعمالی بر روی مرز چاله انفجار

$$P_0 = \rho C V_r^{max} \quad (10)$$

$$t_d = 2i_0/P_0 \quad (11)$$

در روابط فوق،  $C$  سرعت لرزه‌ای بر حسب  $m/s$ ،  $\rho$  وزن مخصوص خاک بر حسب  $kg/m^3$  و حداکثر سرعت ذره‌ای خاک بر حسب  $m/s$  می‌باشد که از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$V_r^{max} = 4.8 f_c \left( \frac{2.52R}{w^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n} \quad (12)$$

در رابطه فوق،  $f_c$  ضریب جفت‌شدگی می‌باشد که از شکل (۴) به دست می‌آید.  $R$  فاصله از مرکز انفجار به متر و  $n$  ضریب تضعیف موج است که برای خاک‌های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. در روابط فوق  $i_0$  تکانه ویژه می‌باشد و از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$i_0 = \rho C X_r^{max} \quad (13)$$

$X_r^{max}$  حداکثر جابه‌جایی ذرات خاک بر حسب متر برای انفجار مدفون یا نیمه مدفون می‌باشد و با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\frac{X_r^{max}}{w^{\frac{1}{3}}} = 60 \times \frac{f_c}{C} \times \left( \frac{2.52R}{w^{\frac{1}{3}}} \right)^{1-n} \quad (14)$$

جدول ۲. ضرایب تضعیف ( $n$ ) چند نمونه خاک [۱۳]

ضریب تضعیف ( $n$ )	نوع خاک
۱/۵	رس اشباع
۲/۵	رس نیمه اشباع و سیلت
۲/۵	ماسه خیلی متراکم (خشک یا مرطوب)
۲/۷۵	ماسه متراکم (خشک یا مرطوب)
۳	ماسه سست (خشک یا مرطوب)
۳/۲۵	ماسه خیلی سست (خشک یا مرطوب)

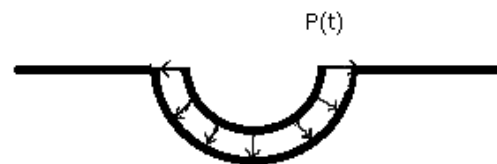
که در آن،  $A_z$  مساحت المان مستطیلی و  $L_d$  اندازه قطر این المان می‌باشد. همچنین  $\rho$  جرم مخصوص،  $K$  مدول بالک و  $G$  مدول برشی محیط خواهد بود. نرم‌افزار به صورت خودکار با محاسبه  $\Delta t_{crit}$  برای تمامی المان‌ها، کوچک‌ترین مقدار  $\Delta t_{crit}$  را به عنوان گام زمانی دینامیکی انتخاب می‌کند. در صورت انتخاب گام زمانی توسط خود کاربر، باید به این مسئله توجه کرد که گام زمانی اعمالی نباید از مقدار محاسبه شده توسط نرم‌افزار بزرگ‌تر باشد.

## ۲-۶. اعمال خواص میرایی مکانیکی و شرایط مرزی دینامیکی

میرایی مکانیکی در مواد، معمولاً ناشی از اصطکاک داخلی و همچنین لغزش در سطوح مشترک است. در خاک و سنگ، میرایی طبیعی اساساً هیستریزیس<sup>۱</sup> یعنی مستقل از فرکانس می‌باشد، ولی مدل‌سازی عددی این نوع میرایی مشکل است. در آنالیزهای حوزه زمانی معمولاً از میرایی رایلی به جای میرایی هیستریزیس استفاده می‌شود. میرایی رایلی در یک محدوده فرکانسی مشخص، تقریباً مستقل از فرکانس می‌باشد [۱۲]. میرایی رایلی در FLAC با استفاده از پارامترهای  $f_{min}$  (فرکانس حداقل با واحد هرتز) و  $\xi_{min}$  (نسبت میرایی بحرانی حداقل)، تعیین می‌شود. جهت محاسبه فرکانس طبیعی، مدل قبل از اعمال بار انفجاری بر روی بستر سخت رها می‌شود و با شمارش تعداد نوسانات در نقاط شاهد می‌توان فرکانس طبیعی مدل را برآورد نمود [۱۱]. برای جلوگیری از انعکاس امواج از مرزهای مدل، از قابلیت مرزهای جاذب موجود در نرم‌افزار استفاده شده است.

## ۲-۷. اعمال بار انفجاری

همان‌گونه که بیان شد، نرم‌افزار FLAC توانایی مدل‌سازی مستقیم بمب را ندارد، ولی به جای آن بار دینامیکی به صورت تاریخچه تنش بر روی مرز چاله انفجار اعمال می‌گردد (شکل ۲).



شکل ۲. نحوه توزیع تاریخچه تنش بر روی مرز چاله انفجار

برای محاسبه ابعاد گودال انفجار و پالس تنش اعمالی به مرزهای آن، از روابط تجربی ارائه شده توسط ارتش آمریکا استفاده شده است. عمق گودال ایجاد شده ناشی از انفجار سطحی ماده منفجره TNT را می‌توان از رابطه (۹) تخمین زد [۱۳]:

$$D = 0.65 w^{1/3} \quad (9)$$

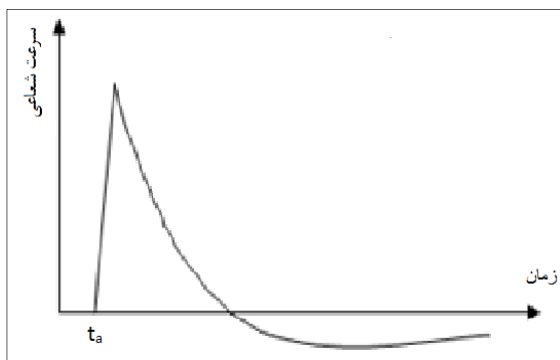
که در این رابطه،  $D$  قطر گودال انفجار بر حسب متر و  $w$  وزن خرج انفجاری TNT بر حسب کیلوگرم است. با استفاده از روابط (۱۰ و ۱۱) به ترتیب حداکثر فشار در میدان آزاد خاک ( $P_0$ ) بر حسب پاسکال و

<sup>1</sup> Hysteretic

از خاک با استفاده از نرم‌افزار FLAC ترسیم شده و با نتایج آزمایش‌های صورت گرفته مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

جهت دسترسی به نتایج آزمایش‌های صورت گرفته از برنامه کامپیوتری CONWEP استفاده شده است. این نرم‌افزار مبتنی بر اطلاعات حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته توسط ارتش آمریکا می‌باشد. ورودی نرم‌افزار شامل نوع بمب و موقعیت آن نسبت به سطح آزاد خاک و همچنین مشخصات خاک شامل دانسیته و سرعت لرزه‌ای می‌باشد. سپس نرم‌افزار بر اساس اطلاعات ورودی، ابعاد چاله انفجار و حداکثر سرعت شعاعی را در نقاط انتخابی برآورد می‌کند.

برای ترسیم تاریخچه زمانی سرعت شعاعی ذرات در هر نقطه از خاک، بیشینه سرعت شعاعی به دست آمده از نرم‌افزار برای آن نقطه را در روابط تئوری ارائه شده جایگزین کرده و نمودار سرعت شعاعی در برابر زمان برای آن نقطه از خاک به دست می‌آید [۱۵]. تاریخچه زمانی سرعت شعاعی، شامل یک بازه زمانی کوتاه صعودی و بازه زمانی طولانی‌تر برای افت آن است (شکل ۶).



شکل ۶. نمودار تاریخچه زمانی سرعت شعاعی برای یک نقطه در خاک

معادلات ارائه شده (۱۸-۱۵) که بر اساس اندازه‌گیری‌های تجربی به دست آمده، تاریخچه زمانی سرعت شعاعی ناشی از یک انفجار سطحی را برای نقاط مختلف خاک به دست می‌دهد. این معادلات به سه بخش تقسیم‌بندی شده است [۱۵]:

$$\text{For } 0 \leq t \leq t_a : \quad (15)$$

$$V_r(t) = 0$$

$$\text{For } t_a \leq t \leq 1.1t_a : \quad (16)$$

$$V_r(t) = \frac{V_r^{max}}{0.1t_a} \times (t - t_a)$$

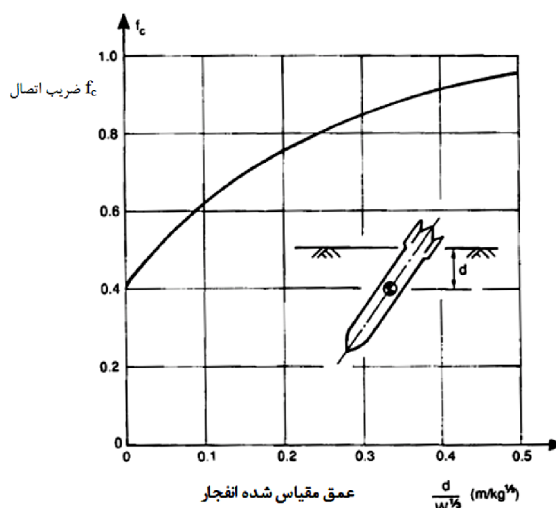
$$\text{For } 1.1t_a \leq t :$$

$$V_r(t) = V_r^{max} \left[ 1 - 0.4 \times \left( \frac{t - 1.1t_a}{t_a} \right) \right] \times \quad (17)$$

$$e^{-0.4 \left( \frac{t - 1.1t_a}{t_a} \right)}$$

$$t_a = R/C \quad (18)$$

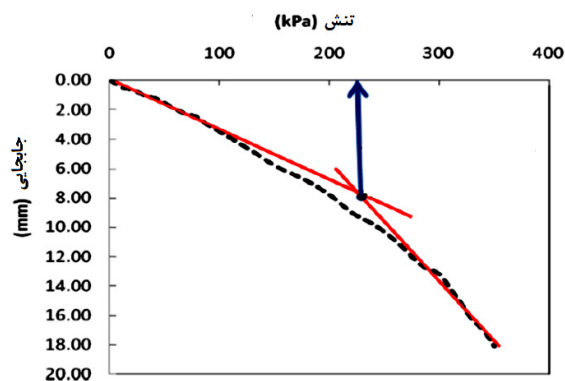
که در آن،  $V_r$  سرعت شعاعی ذرات خاک در یک موقعیت مکانی مشخص،  $V_r^{max}$  سرعت شعاعی حداکثر در همان موقعیت،  $t_a$  زمان رسیدن موج شوک به موقعیت مورد بحث،  $C$  سرعت موج لرزه‌ای و  $R$  فاصله از مرکز خرج می‌باشد.



شکل ۴. تغییرات ضریب جفت‌شدگی بر حسب عمق مقیاس شده انفجار [۱۳]

## ۲-۸. معیار گسیختگی در شرایط بارهای دینامیکی

ظرفیت باربری شالوده تحت انفجار با استفاده از روش مماس متقاطع<sup>۱</sup> محاسبه می‌گردد. در این روش ظرفیت باربری از تقاطع دو مماس رسم شده بر منحنی تنش-جابجایی به دست می‌آید [۱۴]. جهت ترسیم منحنی تنش-جابجایی، پس از اعمال تنش اولیه ناشی از وزن خاک و صفر کردن جابجایی‌ها، طی گام‌های بارگذاری مختلف، در هر مرحله پی را تحت تنش یکنواختی قرار داده و پس از حل مسئله در حالت ایستای مدل را تحت انفجار آنالیز کرده و میانگین نشست نقاط زیر شالوده محاسبه می‌شود. این روند برای تنش‌های مختلف انجام شده و در نهایت نمودار تنش-جابجایی مربوط رسم می‌شود (شکل ۵).

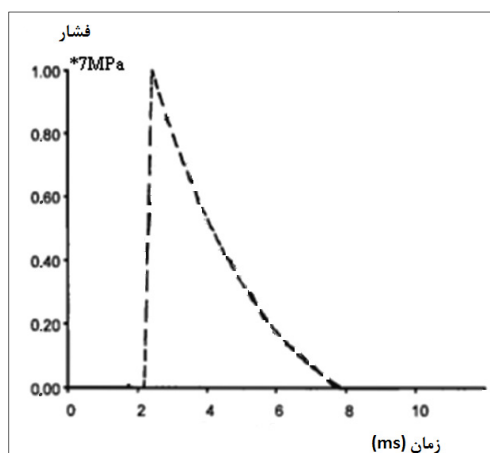


شکل ۵. روش مماس متقاطع [۱۴]

## ۳. صحت‌سنجی مدل

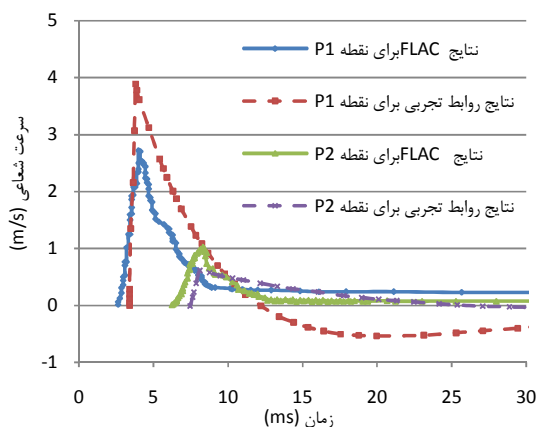
به منظور کنترل صحت عملکرد دینامیکی مدل، با اعمال انفجار در یک محدوده از خاک، تاریخچه زمانی سرعت ذرات در چند نقطه

<sup>۱</sup> Tangent Interaction Method



شکل ۸. نمودار فشار- زمان معادل انفجار [۱۶]

در شکل (۹) تاریخچه تغییرات زمانی سرعت ذرات خاک حاصل از نرم‌افزار FLAC و روابط تجربی (۱۸-۱۵) برای نقاط P1 و P2 ارائه شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار FLAC با مدل ساده مور کلمب توانایی نسبتاً خوبی در مدل کردن اثرات انفجار دارد.



شکل ۹. نمودار سرعت شعاعی در برابر زمان برای نقاط P1 و P2 در اثر انفجار

#### ۴. نتایج مدل‌سازی

در ادامه به بررسی رفتار پی تحت انفجار پرداخته شده و تأثیر مقدار خرج و عمق مدفون‌شدگی پی بر روی ظرفیت باربری آن تحت بار انفجاری بررسی شده است.

##### ۴-۱. بررسی رفتار پی نواری تحت انفجار

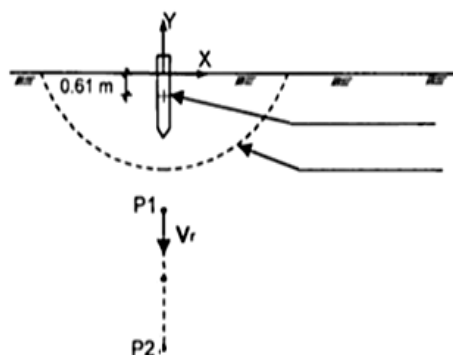
برای بررسی رفتار پی نواری تحت بار انفجار، بر روی خاک با وزن مخصوص  $1500 \text{ kg/m}^3$ ، زاویه اصطکاک  $40^\circ$  و ضریب چسبندگی  $40 \text{ kPa}$  شالوده‌ای نواری به عرض  $2 \text{ m}$  مدل شده است. بر روی شالوده، تنش  $2300 \text{ kPa}$  که در حدود  $50\%$  درصد ظرفیت شالوده (q) از رابطه (۱۸) به دست می‌آید [۱۰]:

برای انجام کالیبراسیون انفجار  $250 \text{ kg}$  کیلوگرم تی ان تی در خاک با مشخصات ارائه شده در جدول (۳) به عنوان ورودی برای نرم‌افزار CONWEP تعریف شده و بیشینه سرعت شعاعی ذرات خاک در نقاط P1 و P2 که در جدول (۴) ارائه شده به عنوان خروجی از این نرم‌افزار به دست می‌آید.

جدول ۳. پارامترهای خاک مورد استفاده [۱۶]

$V_{ur}$	$\psi$ ( $^\circ$ )	$\phi'$ ( $^\circ$ )	$c'$ (kPa)	$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )
۰/۲	۰	۳۰	۰	$2/5 \times 10^5$	۱۸

در ادامه با جایگذاری مقادیر این پارامترها در روابط (۱۸-۱۵) تاریخچه تغییرات زمانی سرعت شعاعی برای این نقاط به دست می‌آید که به صورت منحنی‌های نقطه‌چین در شکل (۷) ترسیم شده است.



شکل ۷. موقعیت نقاط مختلف نسبت به مرکز خرج انفجار [۱۶]

جدول ۴. سرعت شعاعی بیشینه به دست آمده از CONWEP [۱۶]

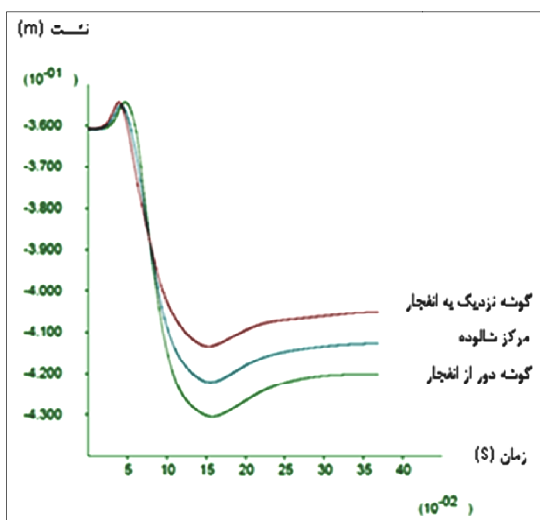
نام نقاط	مختصات در محور X (m)	مختصات در محور Y (m)	(m/s)
P1	۰/۰	-۴/۰	۳/۹۳
P2	۰/۰	-۶/۰	۰/۶۲

برای شبیه‌سازی با نرم‌افزار FLAC، مدلی به ابعاد  $20 \times 20 \text{ m}$  متر با مشخصات خاک ارائه شده در جدول (۴) ساخته شده و پس از ایجاد تعادل استاتیکی در مدل، بار ناشی از انفجار  $250 \text{ kg}$  کیلوگرم تی ان تی به صورت یک پالس مثلثی فشاری مطابق شکل (۸) به مرزهای گودال انفجاری به شعاع  $2 \text{ m}$  اعمال می‌گردد. لازم به ذکر است که پارامترهای لازم برای ساخت پالس انفجار شکل (۸) از روابط (۱۴-۱۰) و ابعاد گودال انفجار نیز از رابطه (۹) به دست آمده است. سپس مدل تحت اثر این بار دینامیکی آنالیز شده و تاریخچه سرعت شعاعی برای نقاط P1 و P2 به عنوان خروجی FLAC به دست می‌آید که در شکل (۹) به صورت منحنی‌های توپر نشان داده شده است.

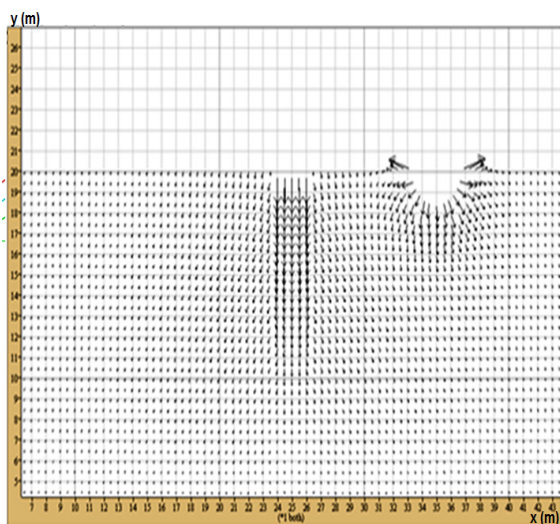
باربری ایستای آن می‌باشد، اعمال شده است. ظرفیت باربری ایستای

ایستای آن است که این حاکی از کاهش ظرفیت باربری شالوده تحت بار انفجار می‌باشد. میزان این کاهش در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

با توجه به شکل (۱۱)، میزان نشست شالوده در گوشه نزدیک به گودال انفجار کمتر از گوشه دیگر آن است که این به معنی وقوع نشست نامتقارن در شالوده می‌باشد. بدیهی است با افزایش عرض شالوده میزان این اختلاف بیشتر می‌گردد. در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) به ترتیب بردارهای جابه‌جایی خاک و کانتور تنش در لحظه انفجار نشان داده شده که حاکی از توزیع شعاعی جابه‌جایی و تنش در اطراف چاله انفجار می‌باشد. در شکل (۱۴) نیز وضعیت تغییر شکل خاک در اطراف چاله انفجار نشان داده شده است که نمایانگر وقوع تغییر شکل‌های بزرگ و پرتاب خاک در اطراف چاله انفجار می‌باشد.



شکل ۱۱. نمودار نشست در گوشه‌ها و مرکز شالوده



شکل ۱۲. بردار جابه‌جایی خاک در لحظه انفجار

$$q = \frac{1}{2} \times \gamma \times B \times N_{\gamma} + C \times N_c \quad (18)$$

که در آن،  $N_c$  و  $N_{\gamma}$  ضرایب ظرفیت باربری پی در حالت ایستای می‌باشند که با استفاده از روابط ارائه شده توسط وسیک به دست خواهند آمد [۱۷]:

$$N_c = 75.25 \quad \text{و} \quad qN_{\gamma} = 109.3$$

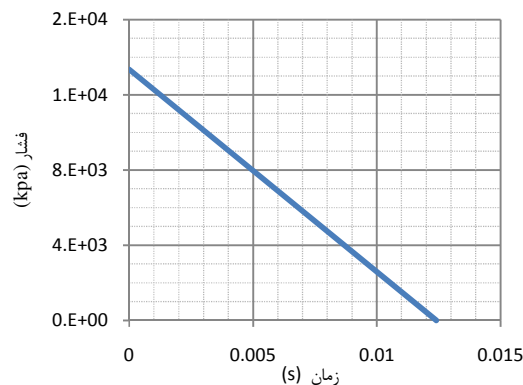
بر اساس مقادیر فوق برای ضرایب ظرفیت باربری، مقدار  $q$  به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$q = \frac{1}{2} \times 1500 \times 9.81 \times 2 \times 109.3 + 40000 \times 75.25$$

$$q = 4618350 \text{ (Pa)}$$

فرض می‌شود که یک انفجار سطحی در فاصله ۱۰ متری از مرکز شالوده روی دهد. وزن ماده منفجره ( $w$ ) معادل ۵۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که انفجار از نوع سطحی می‌باشد، با استفاده از نمودار ارائه شده در شکل (۲) ضریب جفت‌شدگی  $f_c$  برابر با ۰/۴ به دست می‌آید. شعاع گودال انفجار بر اساس رابطه (۹) معادل ۲ متر و سرعت موج لرزه‌ای برابر با ۱۰۰۰ m/s و ضریب تضعیف خاک ( $n$ ) بر اساس نوع خاک و با استفاده از جدول (۲) معادل ۲/۷۵ به دست می‌آید.

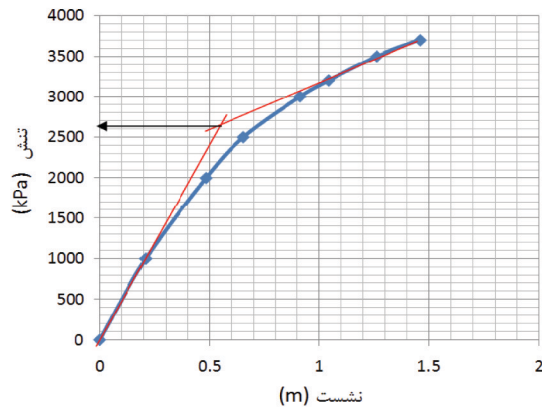
برای به دست آوردن پیک فشار ناشی از انفجار و مدت زمانی که فشار از مقدار پیک به صفر می‌رسد (مدت زمان فاز مثبت) از روابط (۱۴-۱۰) استفاده شده و در نهایت، پالس انفجار اعمال شده به سطح گودال مطابق شکل (۱۰) به دست آمده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، مدت زمان تداوم پالس انفجار بزرگ‌تر از ۰/۰۰۵ ثانیه می‌باشد و در نتیجه شرط لازم برای صحت انتقال موج در این مدل که ابعاد مش آن در حدود ۰/۵ متر می‌باشد، (مطابق مباحث بخش ۲-۵) برآورد شده است.



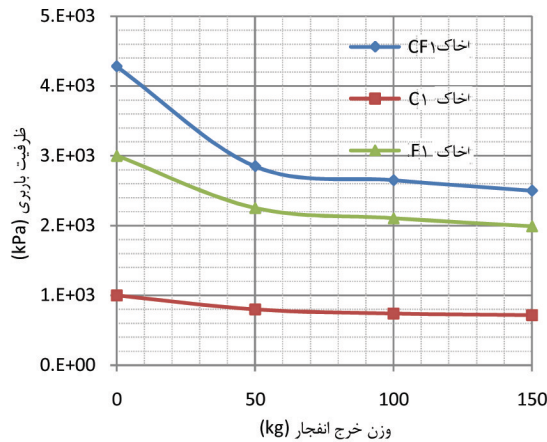
شکل ۱۰. نمودار بارگذاری اعمال شده بر سطح گودال انفجار

در شکل (۱۱) نمودار نشست برای شالوده نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، هم‌زمان با رسیدن پالس انفجار به شالوده، در ابتدا شالوده مقداری به سمت بالا حرکت کرده و سپس به سمت پایین نشست می‌کند. نشست نهایی شالوده بیشتر از نشست





شکل ۱۵. نمودار تنش-نشست برای W=100 kg TNT و نوع خاک CF1

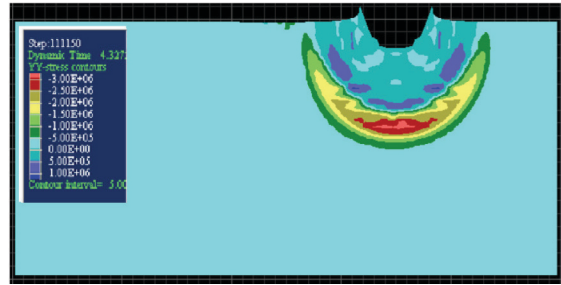


شکل ۱۶. نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر مقدار خرج انفجار

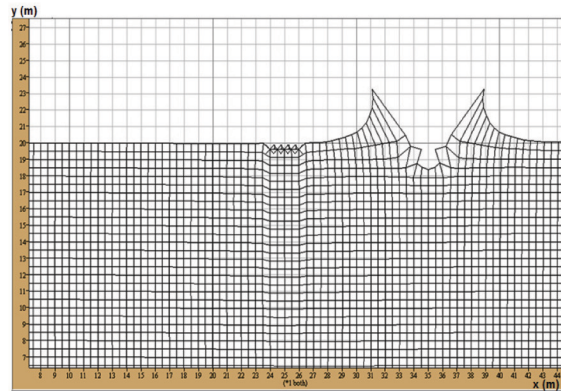
### ۳-۴. بررسی تأثیر عمق مدفون شدگی پی

به منظور بررسی تأثیر عمق مدفون شدگی بر ظرفیت باربری پی، شالوده در عمق‌های ۱، ۱/۵ و ۲ متر از سطح مدل شده و تحت اثر انفجاری سطحی ناشی از خرجی با وزن ۵۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی قرار گرفته است. خاک مدل شده از نوع F2 می‌باشد. در شکل (۱۷) تغییرات ظرفیت باربری این خاک برای عمق‌های مدفون شدگی مختلف برای دو حالت ایستای و تحت انفجار ترسیم شده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۷) مشاهده می‌گردد، در حالت بارگذاری انفجاری همانند شرایط ایستای، با افزایش عمق مدفون شدگی ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که میزان کاهش ظرفیت باربری در حالت انفجار نسبت به حالت ایستای با افزایش عمق مدفون شدگی کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل (۱۸) به تصویر کشیده شده است. به عنوان نمونه میزان کاهش ظرفیت باربری تحت انفجار نسبت به شرایط ایستای برای پی واقع بر روی سطح زمین برابر ۳۳ درصد می‌باشد. این در حالی است که میزان این کاهش در عمق مدفون شدگی ۲ متر برابر ۲۱ درصد می‌باشد.



شکل ۱۳. کانتور تنش در لحظه انفجار



شکل ۱۴. پرتاب خاک به هوا در اثر انفجار

### ۲-۴. تأثیر مقدار خرج انفجار بر ظرفیت باربری

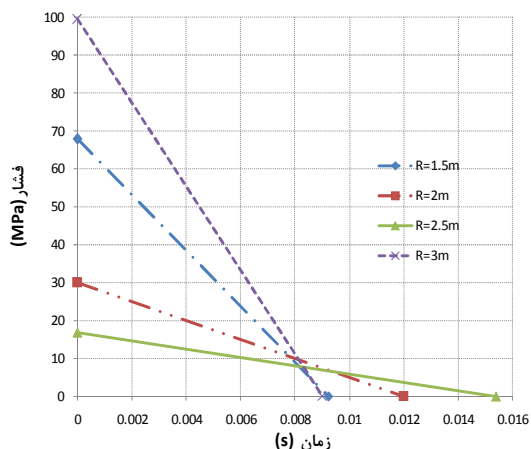
به منظور بررسی تأثیر مقدار خرج بر ظرفیت باربری شالوده، نواری از خرج‌های TNT به وزن ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متری از مرکز شالوده، بر روی خاک‌های مختلف که مشخصات آنها در جدول (۵) ارائه شده، استفاده گردیده است. به عنوان نمونه نمودار تنش-نشست به دست آمده از آنالیزهای مربوط به خرج انفجار ۱۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی و نوع خاک CF1 در شکل (۱۵) ارائه شده است. در این نمودار نحوه تعیین ظرفیت باربری خاک بر اساس روش ماساس متقاطع نشان داده شده است.

در شکل (۱۶) تغییرات ظرفیت باربری در برابر مقدار خرج انفجار برای خاک‌های مختلف رسم شده است. همانگونه که انتظار می‌رود با افزایش مقدار خرج انفجار، از ظرفیت باربری پی کاسته می‌شود. ولی میزان این کاهش در ابتدا بیشتر است. این بدان معناست که با افزایش مقدار خرج (شدت انفجار) از روند کاهش ظرفیت باربری کاسته می‌شود.

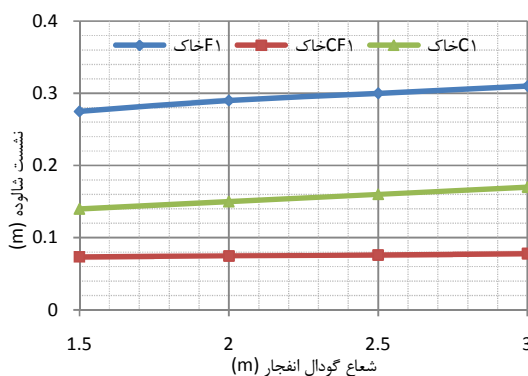
### جدول ۵. مشخصات خاک‌های مورد استفاده

نام خاک	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	زاویه اصطکاک	ضریب چسبندگی (kPa)	مدول الاستیسیته (kPa)	ضریب پواسون
C1	۱۵۰۰	۵	۱۵۰	۴۰۰۰۰	۰/۴
CF1	۱۵۰۰	۴۰	۴۰	۶۰۰۰۰	۰/۳
F1	۱۷۰۰	۳۰	۰	۶۰۰۰۰	۰/۳
F2	۱۵۰۰	۴۵	۰	۴۰۰۰۰	۰/۳

شده در بخش ۲ نتیجه حاصل منطقی به نظر می‌رسد، زیرا در این روابط تغییرات در شعاع گودال انفجار به نوعی در روابط حداکثر  $P_0$  و زمان تداوم  $t_d$  در نظر گرفته شده است.



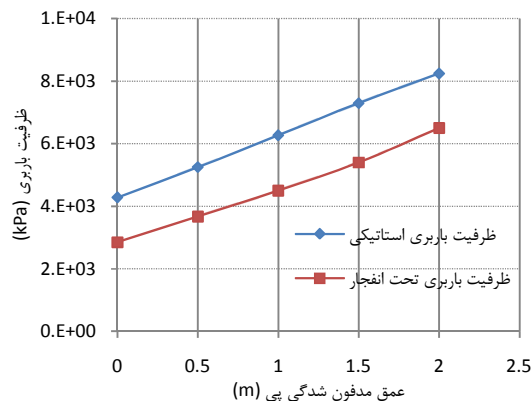
شکل ۱۸. پالس انفجار اعمالی به مرز گودال به شعاع ۱/۵ تا ۳ متر برای خاک F1



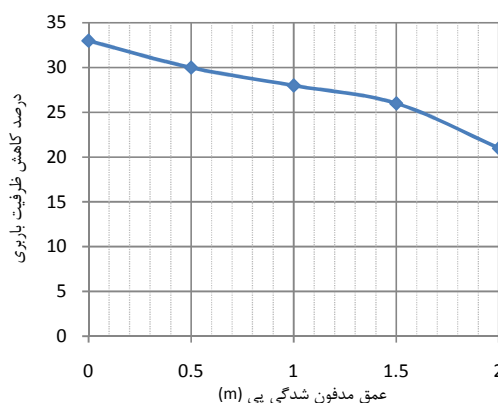
شکل ۱۹. نمودار تغییرات نشست شالوده در برابر شعاع گودال برای خاک‌های مختلف

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار پی‌های سطحی تحت انفجار مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر عواملی مانند شدت انفجار، عمق مدفون‌شدگی پی و جنس مصالح نیز بررسی شد. هم‌زمان با رسیدن پالس انفجار به شالوده، در ابتدا شالوده مقداری به سمت بالا حرکت کرده و سپس به سمت پایین نشست می‌کند و در پایان آنالیز نشست نهایی شالوده بیشتر از نشست ایستای آن به دست می‌آید که این حاکی از کاهش ظرفیت باربری شالوده تحت بار انفجار است. میزان نشست شالوده در گوشه نزدیک به گودال انفجار کمتر از گوشه دیگر آن است که این به معنی وقوع نشست نامتقارن در شالوده می‌باشد. بدیهی است با افزایش عرض شالوده میزان این اختلاف نیز بیشتر می‌گردد. با افزایش مقدار خرج انفجار، از ظرفیت باربری پی کاسته می‌شود. میزان این کاهش



شکل ۲۰. نمودار تغییرات ظرفیت باربری خاک F2 برای عمق‌های مدفون‌شدگی مختلف در دو حالت ایستای و تحت انفجار سطحی با خرج ۵۰ kg تی آن تی



شکل ۲۱. درصد کاهش ظرفیت باربری در شرایط بارگذاری انفجاری برای عمق‌های مدفون‌شدگی مختلف

نتایج حاکی از کاهش تأثیر انفجار سطحی بر روی ظرفیت باربری پی با افزایش عمق مدفون‌شدگی آن است.

## ۴-۴. آنالیز حساسیت شعاع گودال بر روی نشست شالوده

با توجه به تنوع روابط ارائه شده برای شعاع گودال انفجار، در نظر است تا تأثیر این پارامتر بر روی نتایج بررسی شود. جهت بررسی تأثیر شعاع گودال انفجار بر نتایج، با استفاده از روابط (۱۶-۹) برای شعاع‌های ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر فشار حداکثر  $P_0$  و زمان تداوم آن  $t_d$  محاسبه و به مرز گودال انفجار اعمال شده است. عمق انفجار برابر ۵ متر در نظر گرفته شده که با توجه به شکل (۲) مقدار  $f_c$  برابر ۱ و ضریب تضعیف موج (n) نیز از جدول (۲) برابر با ۲/۷۵ به دست خواهد آمد. مقدار وزن ماده منفجره w برابر با ۵۰ کیلوگرم تی آن تی در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۹) نمودار پالس انفجار متناظر با شعاع‌های مختلف گودال برای خاک F1 ارائه شده است.

همچنین در شکل (۲۳) ملاحظه می‌شود که با بزرگ‌تر در نظر گرفتن شعاع گودال انفجار، نشست شالوده نیز افزایش می‌یابد ولی میزان اختلاف اندک بوده، به طوری که میزان اختلاف بین شعاع ۱/۵ و ۳ متر در حدود ۱۰ درصد می‌باشد. با توجه به روابط تئوری ارائه

- [7] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N. "Blast Induced Ground Shock Effects on Pile Foundations"; World Academy of Sci., Eng. & Tech. 2013, 76, 139-143.
- [8] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; Computers and Structures Archive 2013, 120, 86-95.
- [9] Niroumand, H.; Anuar, K. "Simulation Comparison of the Dispersion Behavior of Dry Sand Subjected to Explosion"; Int. J. Phy. Sci. 2011, 6, 1583-1590.
- [10] Bowels, J. E. "Foundation Analysis and Design"; Mc-Graw-Hill, 1996
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. "FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua User Manual"; Minnesota, USA. 2008.
- [12] Das, B. M. "Principles of Soil Dynamics"; PWS-KENT Publishing Company, Boston, Second Ed., Taylor and Francis, 1997.
- [13] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Butterworth-Heinemann, 1994.
- [14] Drescher, A.; Detournay, E. "Limit Load in Translational Failure Mechanisms for Associative and Non-Associative Materials"; Geotechnique 1993, 43, 443-456.
- [15] TM5-855-1. "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; Headquarters, Dep't of the Army, 1986.
- [16] Olofsson, S. O.; Rosengren, L.; Svedbjörk, G. "Modeling of Ground-Shock Wave Propagation in Soil Using FLAC"; In FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics 1999, 21, 401-405.
- [17] Blanchat, T. K. "Development of Explosive Event Scale Model Testing Capability at Sandia's Large Scale Centrifuge Facility"; Sandia National Laboratories, 1998.

در ابتدا بیشتر به نظر می‌رسد. به بیان دیگر با افزایش مقدار خرج (شدت انفجار) از روند کاهش ظرفیت باربری کاسته می‌شود. همانند شرایط ایستای با افزایش عمق مدفون‌شدگی شالوده، ظرفیت باربری پی تحت انفجار سطحی نیز افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که میزان کاهش ظرفیت باربری در حالت دینامیکی نسبت به حالت ایستای با افزایش عمق کمتر می‌شود. با بزرگ‌تر در نظر گرفتن شعاع گودال انفجار، نشست شالوده روند افزایشی خواهد داشت ولی میزان این افزایش اندک می‌باشد، به طوری که می‌توان نتیجه گرفت مقدار شعاع گودال انفجار بر روی میزان نشست شالوده تأثیر چندانی ندارد.

## ۶. مراجع

- [1] Remennikov, A. "A Review of Method for Predicting Bomb Blast Effects on Building"; J. Battlefield Tech. 2003, 6, 5-10.
- [2] Dallriva, F. D. "Data Report for FY 86 Dynamic Shallow - Buried Arch Test"; U.S. Army Eng. Waterways Experiment Station Preliminary Report, Vicksburg, Miss., 1986.
- [3] Ishikawa, N. "Lessons from Past Explosive Tests on Protective Structures in Japan"; Int. J. Impact Eng. 2007, 34, 1535-1545.
- [4] Lu, M.; Wang, Z.; Chong, K. "A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations"; Soil Dynamic and Earthquake Eng. 2005, 25, 275-288.
- [5] GUI, M. W. "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport-a Parametric Study"; Geotech. Geological Eng. 2006, 24, 227-248.
- [6] Nagy, N.; Eltehawy, E. A.; Eldesouky, A. "Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures"; 13th Int. Conf. on Aerospace Sci. & Aviation Tech. 2009.