

## بررسی رفتار شالوده‌های نیمه عمیق تحت بارگذاری انفجار

وحید کریمی آذر داریانی<sup>۱</sup>، غلامحسین جعفری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی ۲- مربی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت: ۹۶/۰۴/۲۷، پذیرش: ۹۶/۰۸/۰۹)

### چکیده

یکی از روش‌های مناسب برای کاهش اثرات انفجار، بهسازی خاک است. شالوده‌های روی بستر خاک‌های رسی سست و اشباع، مستعد نشست زیاد و گسیختگی بوده و برای بهسازی خاک نیاز به تقویت بعضی از پارامترهای مقاومتی مثل سختی خاک دارند. در این تحقیق برای بهسازی خاک از ستون سنگریزه‌ای کوبشی (RAP) و غیرکوبشی (UAP) استفاده شده است. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS به صورت دو بعدی تقارن محوری انجام شده است. به منظور مدل‌سازی مصالح ستون از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده (Hardening soil) و برای خاک مورد بهسازی از مدل‌های رفتاری خاک سخت‌شونده و کم کلی اصلاح‌شده (Modified cam-clay) استفاده شده است. با توجه به ارزیابی پارامترها، مشاهده گردید که افزایش قطر ستون سنگریزه‌ای کوبشی و طول ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی کارایی بهتری در بهبود ظرفیت باربری و نشست شالوده دارد. در نهایت، نشست پی با ستون سنگریزه‌ای کوبشی تا ۶۶ درصد و با ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی تا ۵۲ درصد کاهش یافت.

**کلیدواژه‌ها:** بارگذاری انفجار، ستون سنگریزه‌ای کوبشی و غیر کوبشی، مدل رفتاری، نشست، روش اجزای محدود.

## Evaluation of Semi-Deeped Foundation under Blast Loading

V. Karimi Azar Daryani, Gh. Jafari\*

Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering

(Received: 18/07/2017; Accepted: 31/10/2017)

### Abstract

One of the suitable methods to reducing explosion effects is soil improvement. The foundations on the ground with loose and saturated clay, are susceptible to large settlement and failure, and for soil improvement, need to reinforce the some resistance parameters such as soil stiffness. In this study, Rammed (RAP) and Un-rammed (UAP) Aggregate Pier are used for the soil improvement. Numerical modeling is carried out using PLAXIS axisymmetry model. To model the pier material, constitutive model of hardening soil (HS) and for improved soil, Modified Cam-Clay (MCC) and HHardening Soil (HS) models are used. According to the assessment of parameters, it was observed that increasing the diameter of rammed aggregate pier and length of un-rammed aggregate pier, has better efficiency to improve the bearing capacity and settlement. Finally, the settlement of foundation is reduced with rammed aggregate pier up to 66 percent, and with un-rammed aggregate pier up to 52 percent.

**Keywords:** Blast Loading, Rammed and Un-Rammed Aggregate Pier, Constitutive Models, Settlement, Finite Element Method

\* Corresponding Author E-mail: Jafari.52@gmail.com

## ۱. مقدمه

رسانده‌اند. بررسی روابط مختلف پیشنهادی جهت محاسبه بارگذاری انفجاری و استفاده از آن‌ها در مدل‌سازی رایانه‌ای یک سازه کامل با اعمال اثر رفتارهای واقعی مصالح از جمله مواردی است که در ادبیات فنی فراوانی اندکی دارد. از آن جمله می‌توان به تحقیقات ارزشمند پاندى و همکاران [۱۴] اشاره نمود که در آن یک پوسته بتن مسلح استوانه‌ای، تحت اثر بارگذاری انفجاری تحلیل شده است. اثر زاویه برخورد موج به سطح هدف موضوع تحقیقات انجام‌گرفته توسط روز و همکاران [۱۵] است. علاوه بر مطالعات انجام‌گرفته در خصوص اثر انفجار بر مصالح ساختمانی، گروه‌هایی از محققان به بررسی اثر بارگذاری انفجاری بر سایر مواد پرداخته‌اند. از آن جمله می‌توان به نتایج مطالعات باترا و همکاران [۱۶] اشاره کرد. مطالعه و بررسی نتایج جنگ جهانی در ژاپن و مشاهده خرابی‌های ناشی از آن به همراه مطالعه اثر سازه‌نگهبان بر سر راه موج، موضوع مطالعات انجام‌گرفته توسط ایشیگاوا و همکاران [۱۷] است.

دولت‌ها بیشتر سازه‌های نظامی و امنیتی خود مانند اتاق‌های جنگ، پناهگاه‌ها و انبار مهمات را به دلیل مصون بودن در برابر انفجار، در زیر سطح زمین (داخل خاک) احداث می‌کنند، به طوری که می‌توان گفت اهمیت سازه‌های زیرزمینی در زمان جنگ به دلیل کارایی در حین جنگ نسبت به سازه‌های زمینی دیگر دارای اهمیت بیشتری است. از آنجا که احتمال وقوع جنگ در هر کشوری می‌رود، بر این اساس یافتن روش‌های کاهش مخاطرات در زمان جنگ بر سازه‌ها از وظایف محققان و جامعه مهندسی کشور است. از مؤثرترین اقدامات در این زمینه کاهش نیروهای وارده ناشی از انفجار به سازه‌های زیرزمینی است. به عبارتی با میرا کردن امواج انفجار قبل از رسیدن به سازه می‌توان به طرحی سبک‌تر و اقتصادی‌تر رسید. نکته قابل‌ذکر در طرح‌های مهندسی، از استفاده از راه‌حل اقتصادی است که این امر در کشورهای در حال توسعه از اهمیت به مراتب بیشتری برخوردار است، زیرا به صرفه بودن طرح از نظر اقتصادی، باعث کاهش هزینه‌های ساخت می‌گردد.

در سال‌های اخیر، ستون‌های سنگریزه‌ای کوبشی<sup>۳</sup> به طور فزاینده‌ای به صورت تک و یا گروهی به عنوان یک راه‌حل مؤثر اقتصادی برای بهسازی خاک‌های نرم قبل از ساخت شالوده‌ها، خاک‌ریزها، پایه‌های پل‌ها، فرودگاه‌ها، راه‌ها استفاده شده‌اند و همچنین می‌توان بر روی کانال‌های زیرزمینی مترو یا تونل‌های نظامی و تأمین امنیت سازه‌های زیرزمینی و ... استفاده شوند. یک RAP معمولاً با حفر یک گودال تا عمق مورد نظر، خاک‌ریزی و تراکم لایه‌های نازک متوالی نصب‌شده (حدود ۳۰ سانتی‌متر در هر لایه) از سنگ‌های خردشده با استفاده از یک چکش

به دلیل خطرات روزافزون و خسارت‌های سنگین جنگ و وقایع تروریستی، شناخت پدیده انفجار و بررسی رفتار خاک و سازه‌های زیرزمینی و راه‌های تأمین پایداری آن‌ها در برابر انفجار، از ضروریات امروز جهان است. 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. آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس و آزمایشگاهی به علت صرف هزینه و زمان زیاد و مشکلات زیست‌محیطی، بسیار کم و محدود به کشورهای دارای تجهیزات نظامی مانند روسیه، آمریکا و ژاپن است [۱]. اولین آیین‌نامه مطرح در بارگذاری انفجاری با نام TM 5-855-1 [۲] توسط بخش تحقیقات نظامی ارتش آمریکا برای سازه‌های مقاوم در برابر انفجارهای غیر اتمی تهیه شد. پس از آن آیین‌نامه TR-87-57 [۳] و آیین‌نامه TM 5-1300 [۴] توسط بخش مهندسی نیروی هوایی آمریکا تهیه شد که جامعیت بیشتری داشته و بسیاری از تحقیقات نظری بعدی بر مبنای آن بوده است.

در ادامه، آیین‌نامه‌های دیگری همچون DOE/TIC-11268 [۵] توسط بخش انرژی آمریکا و آیین‌نامه‌های DAHSCWE-1998 [۶] و FEMA-428 [۷] تهیه شده‌اند. اولین کنفرانس بین‌المللی که با نتایج قابل‌توجهی در بررسی پدیده بارگذاری انفجاری همراه بوده است، در سال ۱۹۸۹ در ماساچوست آمریکا برگزار شده و پس از آن در سال ۱۹۹۲ و در کشور انگلیس کنفرانس مشابهی برگزار شد. پس از آن ارائه نتایج بررسی‌های محققان در سایر نشست‌های علمی و مهندسی رشد روزافزون یافت [۱]. مطالعات نظری اولیه به منظور تعیین روابط بارگذاری انفجاری بر مبنای داده‌های حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به روابط برود<sup>۱</sup> [۸]، نیومارک و هانسن [۹] و میلز [۱۰] اشاره کرد که همگی تابعی از وزن بمب و فاصله هدف از مرکز انفجار هستند. نگو و همکاران [۱۱] با ارائه تحقیقاتی در خصوص کلیات بارگذاری انفجاری و رفتارهای غیرخطی بتن و همچنین معادلات حاکم بر مسئله پرداخته‌اند. در تحقیقات انجام‌گرفته توسط لپانن [۱۲] از بخش مهندسی سازه دانشگاه شالمر<sup>۲</sup> سوئد، اطلاعات کلی در خصوص چگونگی انتشار موج و محاسبات مربوط به بارگذاری انفجاری ارائه شده است. امروزه عکس‌برداری از پدیده‌هایی چون انفجار با کیفیت بسیار بالا مقدور است. کلین و همکاران [۱۳] تحقیقات آزمایشگاهی بسیار ارزشمندی را با انجام آزمایش‌های کوچک‌مقیاس به انجام

<sup>۱</sup> Brode<sup>۲</sup> Chalmers<sup>۳</sup> Ramped Aggregate Piers (RAPs)

حفره) مدل‌سازی و تحلیل شد.

همچنین مطالعات پارامتریک برای بررسی اثر طول‌ها و قطرهای مختلف ستون سنگریزه‌ای و نحوه ساخت ستون سنگریزه‌ای (کوبشی و غیر کوبشی) بر روی رفتار ستون‌های سنگریزه‌ای انجام شد. در مدل‌سازی عددی برای ایجاد تنش‌های اولیه در خاک از فرآیند  $K_0$  استفاده شد که در آن تنش‌های افقی برجا، به صورت نتیجه‌ای از تنش‌های مؤثر قائم و  $K_0$  از پیش تعریف‌شده، محاسبه شدند. برای خاک رس نرم آبرفتی،  $K_0$  برابر  $1 - \sin \phi$  فرض شد، درحالی‌که برای خاک خشک دستی  $K_0=1$  اختصاص داده شد. شرایط مرزی بدین صورت است که کف مدل به صورت تکیه‌گاه ثابت و در مرزهای جانبی مطابق شکل (۱) به صورت غلتکی است.

برای از بین بردن اثرات بازتاب و موج از مرزهای جاذب<sup>۳</sup> استفاده شده است و همچنین ابعاد مدل به اندازه‌ای دورتر از محل انفجار در نظر گرفته شده است که اثرات بازتاب و موج به حداقل برسد. محل تراز آب زیرزمینی، در ۲ متری زیر سطح زمین و به دلیل نفوذپذیری بالای مصالح سنگریزه‌ای، تحلیل‌ها به صورت زهکشی‌شده در نظر گرفته شد [۲۳].

فرآیند ساخت ستون RAP با غیرفعال کردن المان RAP و به‌طور هم‌زمان با اعمال جابجایی یکنواخت به اندازه ۰/۵ قطر اسمی ستون به سمت خارج جداره گمانه در امتداد محور ستون و جابجایی یکنواخت به اندازه ۰/۱۰ قطر اسمی ستون به سمت پایین در انتهای حفره، مدل‌سازی شد [۲۴]. سپس حفره انبساط یافته با لایه‌هایی از سنگریزه و یا شن فشرده‌شده پر شده و بر بالای سیستم ستون-خاک، یک شالوده بتنی مسلح قرار گرفت. در این تحقیق برای بررسی اثر کوبش در بهسازی خاک و نشست پی، عملکرد ستون RAP با UAP مقایسه شد. برای مدل‌سازی ستون غیر کوبشی، به جز در اعمال جابجایی یکنواخت افقی و قائم، مشابه RAP عمل می‌کنیم. المان Interface<sup>۴</sup> با ضریب کاهش مقاومت ۰/۵ در امتداد سطح تماس قائم خاک-شالوده برای مدل کردن شرایط واقعی تماس بین شالوده و خاک خشک دستی معرفی شد. از المان‌های جامد نازک پیوسته<sup>۵</sup> دارای پارامترهای مقاومت برشی مؤثر همان خاک میزبان در امتداد سطح تماس ستون-خاک به جای المان‌های Interface استفاده شده است [۱۸]. مدل عددی دو بعدی همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، دارای عرض ۳۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر است.

هیدرولیکی با انرژی بالا، نصب می‌شود. این نیروهای تراکمی، سنگریزه‌ها را رو به پایین و رو به بیرون از حفره حرکت می‌دهد، به طوری که خاک اطراف متراکم و پیش‌تنیده می‌شود و در نتیجه تنش‌های افقی در خاک را افزایش می‌دهد. اغلب مطالعات صورت گرفته تا کنون بر روی ظرفیت باربری و نشست سیستم ستون‌ها بعد از نصب ستون، متمرکز شده است و اثرات نصب کمتر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مطالعات محدودی بر روی اندرکنش بین ستون سنگریزه‌ای و خاک اطراف آن انجام گرفته است [۱۸]. آقایان وایت و فام [۱۹] در تحقیقشان به مدل‌سازی عددی مراحل ساخت و بارگذاری ستون‌های سنگریزه‌ای کوبشی پرداختند و نتایج را با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی مقایسه کردند، و داشتار [۲۰] مدل‌سازی مراحل ساخت و بارگذاری ستون سنگریزه‌ای کوبشی را به صورت مرحله‌ای متناظر با حالت واقعی آن و به صورت دینامیکی انجام داد و شرافینا [۲۱] مراحل ساخت و کوبش مصالح ستون سنگریزه‌ای کوبشی را به صورت استاتیکی معادل مدل‌سازی کردند. همه محققین مذکور از مدل خاک سخت‌شونده در نرم‌افزار PLAXIS برای خاک مورد بهسازی و مصالح سنگریزه‌ای استفاده کردند. درحالی‌که در تحقیق چن و همکاران [۱۸] از مدل کم کلی اصلاح‌شده و مورکولمب در نرم‌افزار FLAC 3D، به ترتیب برای خاک مورد بهسازی و مصالح ستون سنگریزه‌ای استفاده شد.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. مدل‌سازی عددی

با توجه به تأثیر کوبش مصالح بر عملکرد ستون سنگریزه‌ای کوبشی و مکانیزم پیچیده انتقال تنش میان شالوده سطحی، ستون سنگریزه‌ای کوبشی و خاک پس از بارگذاری، استفاده از روابط نظری برای محاسبه ظرفیت باربری و نشست پی متکی بر ستون سنگریزه‌ای تطابق مناسبی با نتایج آزمایش‌های بارگذاری واقعی ندارد [۱۸ و ۲۲]. در این شرایط استفاده از مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن مراحل ساخت ستون منجر به تحلیل دقیق‌تری از رفتار این شالوده‌ها می‌شود. در این مقاله، مدل‌سازی عددی ساخت و اعمال بارگذاری انفجار انجام‌شده بر روی ستون سنگریزه‌ای کوبشی و غیر کوبشی تکی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS به صورت تقارن محوری<sup>۱</sup> انجام‌شده است. روش عددی با مقایسه ظرفیت باربری و نشست محاسبه‌شده با مقدار اندازه‌گیری‌شده در سایت، صحت‌سنجی شده است. یک ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی<sup>۲</sup> با همان قطر و طول برای نشان دادن اثر نصب و ساخت (به عبارت دیگر، انبساط

<sup>۳</sup> Absorbent Boundaries

<sup>۴</sup> سطح تماس

<sup>۵</sup> Thin Solid Continuum Elements

<sup>۱</sup> Axisymmetry

<sup>۲</sup> Un-Rammed Aggregate Pier (Uap)

که در آن  $i_0$  اندازه حرکت ویژه است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_0 = \rho C X_r^{\max} \quad (۴)$$

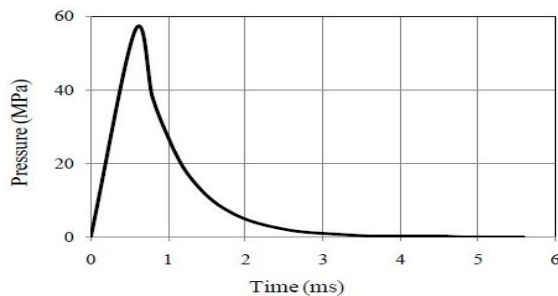
که در آن  $X_r^{\max}$  حداکثر جابجایی ذرات خاک برای سازه‌های مدفون و نیمه مدفون که مربوط می‌شود به:

$$\frac{X_r^{\max}}{w^{\frac{1}{3}}} = 60 \times \frac{f_c}{c} \times \left( \frac{2.52R}{w^{\frac{1}{3}}} \right)^{1-n} \quad (۵)$$

روابط بالا برای بار مثلی معادل برای فشارهای انفجار بازتاب یافته همچنین فشارهای تصادفی [۲] قابل اجرا هستند. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی، قطر حفره انفجار ( $d$ ) با استفاده از معادله زیر به دست آمده است [۲۸]:

$$d = 0.65w^{\frac{1}{3}} \pm 5\% \quad (۶)$$

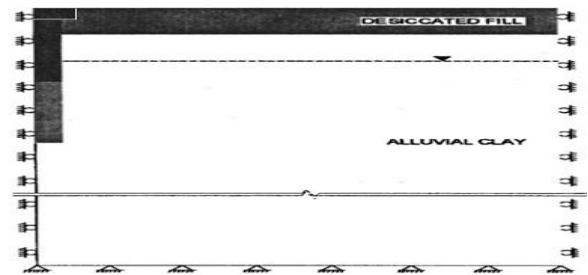
در این تحقیق، ۱۱۰ کیلوگرم TNT برای محاسبه استفاده شده است. شکل (۳) نمودار بارگذاری انفجار اعمال شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تغییرات فشار ناشی از انفجار در برابر زمان

### ۳-۲. مدل‌های رفتاری و مشخصات مصالح

در این مطالعه برای مصالح ستون سنگریزه‌ای از مدل خاک سخت‌شونده و برای خاک مورد بهسازی از دو مدل رفتاری کم کلی اصلاح‌شده و خاک سخت‌شونده استفاده شد. دلیل استفاده از مدل خاک سخت‌شونده، تابع تنش بودن سختی خاک است که در این تحقیق در اثر افزایش تنش‌های افقی در خاک رس، سختی خاک افزایش می‌یابد. پی بتنی به ضخامت ۰/۴۶ و قطر ۱/۲۹۲ متر در بالای ستون سنگریزه‌ای به عنوان یک جسم صلب با رفتار الاستیک خطی با مدول بالک ۱۴/۲ گیگا پاسکال و مدول برشی ۱۳ گیگا پاسکال مدل شد. جدول (۱) پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده برای مصالح سنگریزه‌ای ستون و جدول (۲) پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده برای خاک مورد بهسازی که با استفاده از نتایج وایت و همکاران [۲۲] به دست آمده را فراهم می‌کند. در جدول (۳) پارامترهای کم کلی اصلاح‌شده برای خاک مورد بهسازی با استفاده از روابط پارامترهای خاک ارائه شده است [۲۹].



شکل ۱. هندسه مدل [۱۹]

### ۲-۲. مشخصات بار انفجار

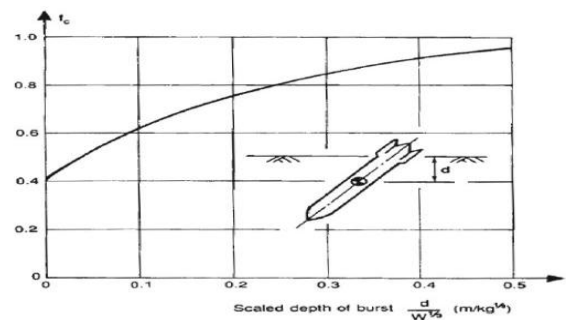
نرم‌افزار PLAXIS به طور مستقیم نمی‌تواند انفجار را شبیه‌سازی کند. با این حال، بار دینامیکی به صورت تاریخچه تنش مطابق نمودار شکل (۳) و فراخوانی آن در فاز بارگذاری انفجار بر روی شالوده بتنی به صورت قائم اعمال می‌شود. برای محاسبه ابعاد حفره، انفجار و تنش به مرزهای مدل، با استفاده از روابط تجربی ارائه‌شده توسط ارتش آمریکا (TM 5-855, 1986) اعمال شدند. سرعت ذرات اوج و تنش اوج به صورت زیر مرتبط هستند [۲۵ و ۲۶]:

$$P_0 = \rho C V_r^{\max} \quad (۱)$$

که در آن،  $C$  سرعت لرزه‌ای (m/s)،  $\rho$  چگالی خاک  $\frac{kg}{m^3}$  است و  $V_r^{\max}$  حداکثر سرعت ذرات (m/s) است. سرعت ذرات حداکثر محاسبه شده است با:

$$V_r^{\max} = 4.8f_c \left( \frac{2.52R}{w^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n} \quad (۲)$$

که در آن،  $f_c$  ضریب کوپل،  $R$  فاصله از مرکز انفجار و  $n$  ضریب میرایی موج است.  $f_c$  با توجه به شکل (۲)، ۰/۴ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. وابستگی ضریب کوپل به عمق مقیاس شده انفجار [۲۷]

مدت زمان تعهدی فاز فشار مثبت توسط یک مدت زمان مثبت ساختگی  $t_d$  جایگزین شده است که یک تابعی از ضربه مثبت کل و فشار اوج است:

$$t_d = \frac{2i_0}{P_0} \quad (۳)$$

جدول ۱. پارامترهای مدل HS برای مصالح شنی ستون سنگریزه‌ای

نوع مصالح	ستون سنگریزه‌ای (GP)
$E_{50}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۶۵۰۰۰
$E_{oed}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۵۵۰۰۰
$E_{ur}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۱۹۵۰۰۰
m (power)	۰/۴۸
$R_f$	۰/۸۸
$p_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۳۴/۵
$K_0^{NC}$	۰/۲۷
$\Phi$ (°)	۴۷
$\Psi$ (°)	۱۲

۴-۲. محاسبات اضافی با میرایی

مسائل ارتعاشات تک منشأ اغلب به وسیله مدل‌های تقارن محوری مدل می‌شود، حتی اگر کسی به طور معمول از مدل کرنش صفحه‌ای برای تغییر شکل‌های استاتیکی استفاده نماید. این به خاطر آن است که موج‌ها در سیستم تقارن محوری مشابه سیستم سه‌بعدی پراکنده می‌شوند. در این حالت انرژی به سوی رقیق‌شدگی با فاصله پراکنده می‌شوند. این گونه اثرات می‌تواند به میرایی هندسه نسبت داده شود که قابل تعریف کردن در مدل تقارن محوری است؛ بنابراین برای مسائل ارتعاشات تک منشأ لازم است از مدل تقارن محوری استفاده شود [۳۰].

میرایی مصالح در خاک عموماً از مشخصات گرانروی، اصطکاک و توسعه پلاستیسیته ناشی می‌شوند. با این وجود در PLAXIS مدل‌های خاک شامل گرانروی نیست. در عوض عبارت میرایی فرض می‌شود که متناسب با جرم و سختی سیستم است (میرایی رایلی) به صورت زیر:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (V)$$

به طوری که،  $C$  میرایی،  $M$  جرم،  $K$  سختی و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب رایلی را نشان می‌دهند. در نسخه ۸ نرم‌افزار، میرایی رایلی جزئی در نظر گرفته می‌شود که به  $\alpha$  و  $\beta$  وابسته هستند؛ بنابراین  $\alpha$  و  $\beta$  مشمول مجموعه داده‌های مصالح هستند؛ بنابراین تفاوتی بین لایه‌های خاک مختلف همانند اجزای سازه‌ای تشکیل‌دهنده توده‌های حجمی و صفحات قائل شد. تنظیمات پیش‌فرض در PLAXIS میرایی رایلی ( $\alpha$  و  $\beta$ ) را برابر صفر در نظر می‌گیرد. با این وجود میرایی رایلی می‌تواند در مجموعه داده‌های مصالح خاک، صفحات و سطوح مشترک تعریف شود [۳۰]. در مسائل از نوع تک منشأ استفاده شده از مدل تقارن محوری، ممکن است نیاز به میرایی رایلی نباشد، چون بسیاری از میرایی‌ها به علت توزیع شدن شعاعی موج‌ها است (میرایی هندسی)، با این وجود در مدل‌های کرنش صفحه‌ای مانند مسائل زلزله، میرایی رایلی برای به دست آوردن نتایج واقع‌بینانه لازم است [۳۰]. در این تحقیق نیز با توجه به مشخصات مصالح به کاررفته از نسبت میرایی ( $\xi$ ) ۰/۰۵ و ضرایب میرایی  $\alpha = 0.001$  و  $\beta = 0.01$  استفاده شده است.

۵-۲. بررسی صحت نتایج مدل‌سازی

به منظور صحت‌سنجی، نتایج آزمایشگاهی و نتایج آزمون‌های صحرایی انجام‌شده با نتایج مدل‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی نتایج شامل مقایسه نتایج آزمایش‌های سه محوری در خاک ناحیه Neola در منطقه Iowa، ایالات‌متحده و نتایج آزمایش‌های بارگذاری بر روی ستونی به طول ۵/۱ متر در همین

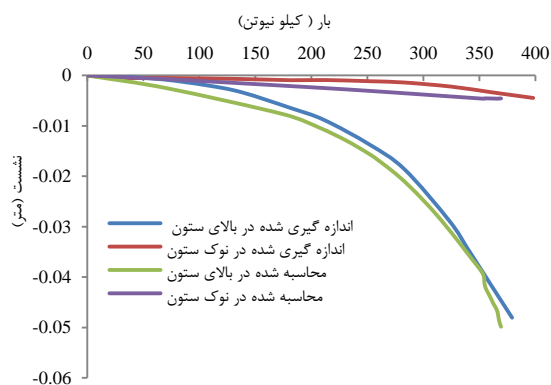
جدول ۲. پارامترهای مدل HS برای خاک خشک دستی و خاک رس نرم آبرفتی

نوع مصالح	خاک رس نرم آبرفتی (CL)	خاک خشک دستی (CL)
$E_{50}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۲۷۷۳	۵۱۰۰
$E_{oed}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۱۳۶۰	۲۵۵۰
$E_{ur}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۹۷۶۵	۱۸۳۶۰
m (power)	۱	۱
$R_f$	۰/۹۶	۰/۹۶
$p_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	۲۵/۵	۲۵/۵
$K_0^{NC}$	۰/۵۹	۰/۴۳
$\Phi$ (°)	۲۴	۳۵
$\Psi$ (°)	۰	۰

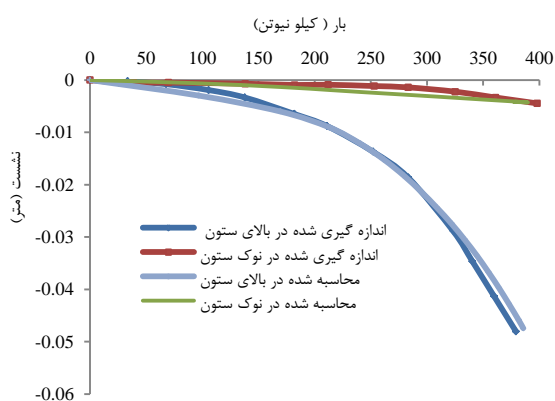
جدول ۳. پارامترهای مدل MCC برای خاک مورد بهسازی

نوع مصالح	خاک رس نرم آبرفتی (CL)	خاک خشک دستی (CL)
$e_0$	۱	۱
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	۱۸/۹	۱۸/۹
$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	۱۸/۹	۱۸/۹
$v_{ur}$	۰/۲	۰/۲
$C$ (kN/m <sup>2</sup> )	۲	۲
$\Phi$ (°)	۲۴	۳۵
$\Psi$ (°)	۰	۰
$M$	۰/۹۴	۱/۴۲
$\lambda$	۰/۰۳۷۵	۰/۰۲
$\kappa$	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۵

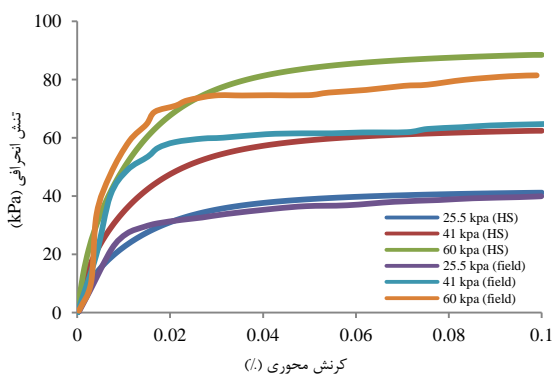
<sup>۱</sup> فشار مرجع یا محدودکننده مطابق با نتایج شکل (۶)



شکل ۴. نتایج صحت‌سنجی برای مدل خاک سخت‌شونده



شکل ۵. نتایج صحت‌سنجی برای مدل کم کلی اصلاح‌شده



شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایش‌های سه محوری و آنالیز عددی

جدول ۵. سرعت شعاعی بیشینه به‌دست‌آمده از CONWEP [۱۶]

نام نقاط	مختصات در محور (m) X	مختصات در محور (m) Y	m/s
P1	۰	-۴	۳/۹۳
P2	۰	-۸	۰/۶۲

ناحیه است [۲۲]. در شکل (۴) نتایج آزمایش بارگذاری و نتایج آنالیز عددی، برای ستونی به طول ۵/۱ متر در دو نقطه بالای ستون و در انتهای ستون، برای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده و در شکل (۵) برای مدل رفتاری کم کلی اصلاح‌شده مقایسه شده است که تطابق بسیار خوبی بین تحلیل عددی و نتایج میدانی، مشاهده می‌شود. در شکل (۶) نتایج آزمایش‌های سه محوری و نتایج آنالیز عددی برای سه فشار محصورکننده ۲۵/۵، ۴۱ و ۶۰ کیلو پاسکال برای خاک رس نرم آبرفتی ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نتایج آزمایشگاهی و عددی در فشار مرجع ۲۵/۵ کیلو پاسکال تا حد زیادی بر هم منطبق است.

به‌منظور کنترل صحت عملکرد دینامیکی مدل، با اعمال انفجار در یک از محدوده از خاک، تاریخچه زمانی سرعت ذرات در چند نقطه از خاک با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS ترسیم شده و با آزمایش‌های صورت گرفته، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جهت دسترسی به نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، از برنامه رایانه‌ای CONWEP استفاده شده است. این نرم‌افزار مبتنی بر اطلاعات حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته توسط ارتش ایالات‌متحده آمریکا است. ورودی نرم‌افزار شامل انواع بمب و موقعیت آن نسبت به سطح آزاد خاک، چگالی خاک و سرعت لرزه‌ای لایه خاکی است. سپس نرم‌افزار بر اساس اطلاعات ورودی، ابعاد چاله و حداکثر سرعت شعاعی حاصله را در نقاط انتخابی به دست می‌آورد. برای ترسیم تاریخچه زمانی سرعت شعاعی ذرات در هر نقطه از خاک، بیشینه سرعت شعاعی به دست آمده از نرم‌افزار CONWEP را در روابط نظری ارائه‌شده، جایگزین کرده و تاریخچه زمانی سرعت شعاعی برای آن نقطه از خاک به دست می‌آید [۲].

برای انجام کالیبراسیون، انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT در خاک، در عمق ۰/۶ متری زیر سطح زمین با مشخصات ارائه‌شده در جدول (۴) به‌عنوان ورودی برای نرم‌افزار CONWEP تعریف‌شده و بیشینه سرعت شعاعی ذرات خاک در نقاط P1, P2 که مشخصاتشان در جدول (۵) ارائه‌شده به‌عنوان خروجی از این نرم‌افزار به‌دست می‌آید.

جدول ۴. پارامترهای خاک مورد استفاده [۱۶]

$\psi$ (°)	$\phi$ (°)	C (kPa)	$\gamma$ (kN / m <sup>3</sup> )
۰	۳۰	۰	۱۸

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. بررسی تأثیر قطر و طول ستون RAP بر نشست

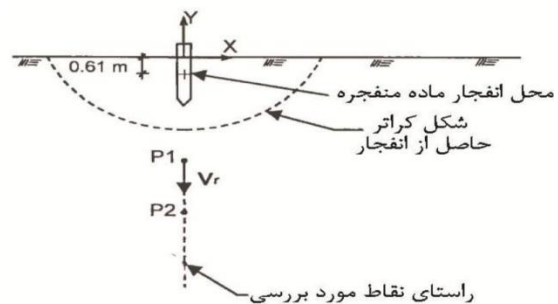
برای بررسی اثر قطر RAP بر روی نشست پی، ۱۸ مدل‌سازی ستون سنگریزه‌ای با سه قطر ۰/۱۶۶، ۰/۱۷۶ و ۰/۱۸۶ متر و سه طول ۱/۵، ۲/۸ و ۵/۱ متر و دو مدل رفتاری MCC و HS برای خاک مورد بهسازی انجام و تحلیل شده است که برای نمونه در شکل (۷) نمودار نشست-زمان سه قطر مختلف ستون RAP با طول ۵/۱ متر برای مدل رفتاری خاک سخت شونده ترسیم شده و بقیه نتایج در جدول‌های (۴) و (۵) به طور خلاصه آورده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر ستون RAP، نشست پی تقریباً به طور یکنواخت کاهش می‌یابد. برای بررسی تأثیر طول ستون بر نشست و مکانیزم گسیختگی، ۹ مدل با طول‌های ۱/۵، ۲/۸ و ۵/۱ متر با سه قطر ۰/۱۶۶، ۰/۱۷۶ و ۰/۱۸۶ متر مقایسه شده است که برای نمونه در شکل (۸) نمودار نشست-زمان سه طول مختلف ستون RAP با قطر ۰/۱۷۶ متر برای مدل رفتاری خاک سخت شونده ترسیم شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش طول ستون، نشست پی کاهش می‌یابد، ولی نرخ کاهش به تدریج کم می‌شود، به طوری که منحنی نشست-زمان ستون ۲/۸ و ۵/۱ متری اختلاف ناچیزی دارند که این امر تأییدکننده وقوع گسیختگی به صورت شکم‌دادگی در هر دو طول ۲/۸ و ۵/۱ متری است. با توجه به نزدیک بودن مکانیزم گسیختگی در طول RAP بیشتر از ۲/۸ متر، استفاده از ستون‌های سنگریزه‌ای کوبشی بلندتر از ۵/۱ متر تأثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی نخواهد داشت. لازم به ذکر است که همه مدل‌ها با مدل مرجع (بدون ستون) هم مقایسه شده است. همچنین در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمودار مدل‌های ساخته‌شده برای مدل MCC برای خاک مورد بهسازی ترسیم شده است.

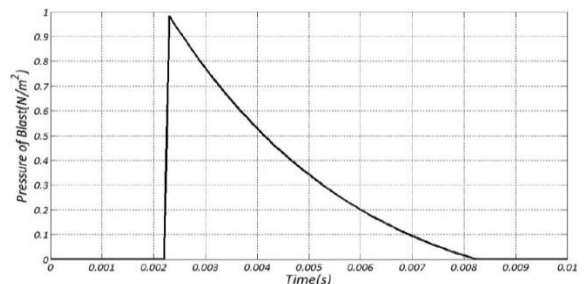
همان طور که در ستون اول جدول‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، منظور از نماد مدل، نوع ساخت ستون (RAP, UAP)، پارامتر دوم طول ستون و پارامتر سوم قطر ستون است که به طور خلاصه برای مقایسه مدل‌های مختلف آورده شده است. نماد مدل در ردیف اول مدل مرجع است که یک پی بدون بهسازی با ستون سنگریزه‌ای در نظر گرفته شده است که حداکثر نشست پی را نشان می‌دهد.

با بررسی جدول‌های (۴-۵) و شکل‌های (۷-۸) یک نکته مهم قابل توجه است: با افزایش طول ستون سنگریزه‌ای کوبشی نشست پی کاهش یافته، ولی جالب این است که ستون با طول ۲/۸ متر و قطر ۰/۱۷۶ متر با ستون به طول ۵/۱ متر و قطر ۰/۱۶۶



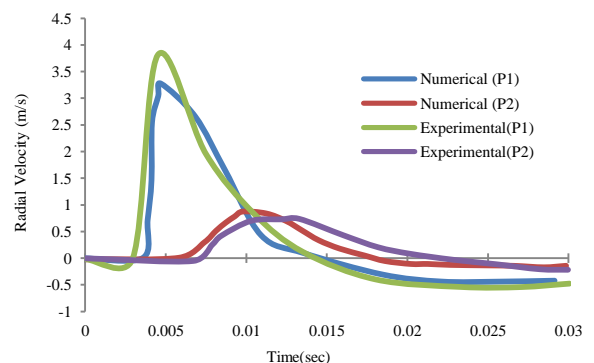
شکل ۷. موقعیت نقاط مختلف نسبت به مرکز خرج انفجار [۱۶]

برای شبیه‌سازی با نرم‌افزار PLAXIS مدلی به ابعاد ۲۰\*۳۰ متر با مشخصات خاک ارائه‌شده در جدول (۴) ساخته شده و پس از ایجاد تعادل استاتیکی در مدل، بار ناشی از انفجار ۲۵۰ کیلوگرم TNT به صورت یک پالس مثلثی فشاری مطابق شکل (۸) به مرزهای گودال انفجاری به شعاع ۲ متر اعمال می‌گردد. لازم به ذکر است که پارامترهای لازم برای ساخت پالس انفجار شکل (۸) از روابط (۱ الی ۵) و ابعاد گودال انفجار نیز از رابطه (۶) به دست آمده است. سپس مدل تحت اثر این بار دینامیکی تحلیل شده و تاریخچه سرعت شعاعی برای نقاط P1 و P2 به عنوان خروجی PLAXIS به دست می‌آید که در شکل (۹) نشان داده شده است.

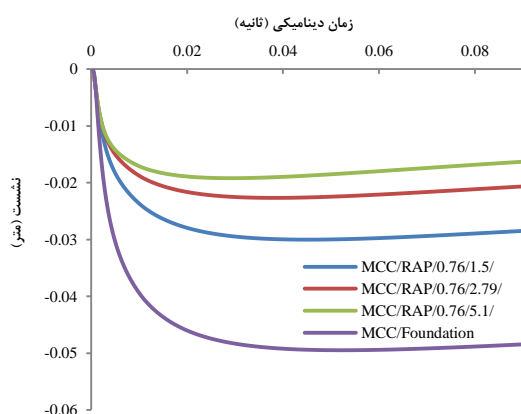


شکل ۸. نمودار فشار-زمان معادل انفجار [۱۶]

در شکل (۹) تاریخچه تغییرات زمانی سرعت ذرات خاک حاصل از نرم‌افزار PLAXIS و روابط تجربی برای نقاط P1 و P2 ارائه شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار PLAXIS 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



شکل ۱۰. نمودار نشست- زمان برای سه طول مختلف RAP برای MCC

جدول ۴. بررسی درصد تغییرات حداکثر نشست مدل های ساخته شده

با مدل رفتاری HS با قطر و طول های مختلف RAP

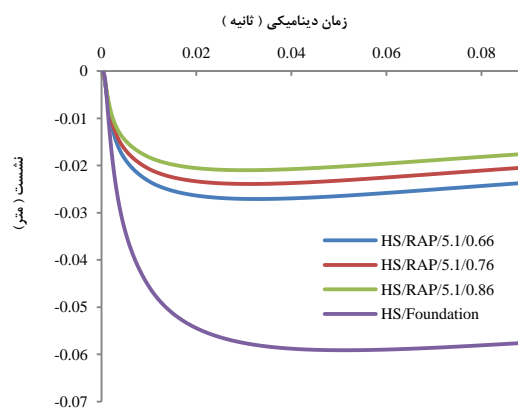
درصد کاهش نشست پی نسبت به مدل مرجع	حداکثر نشست مرکز پی (سانتی متر)	نماد مدل
۰	۵/۹۱	مدل مرجع (بدون ستون)
۲۶	۴/۳۸	RAP-۱/۵-۰/۶۶
۴۵	۳/۲۶	RAP-۲/۷۹-۰/۶۶
۵۴	۲/۷۱	RAP-۵/۱-۰/۶۶
۳۰	۴/۱۲	RAP-۱/۵-۰/۷۶
۵۰	۲/۹۷	RAP-۲/۷۹-۰/۷۶
۶۰	۲/۳۹	RAP-۵/۱-۰/۷۶
۳۴	۳/۸۹	RAP-۱/۵-۰/۸۶
۵۴	۲/۷۱	RAP-۲/۷۹-۰/۸۶
۶۴	۲/۱۰	RAP-۵/۱-۰/۸۶

جدول ۵. بررسی درصد تغییرات حداکثر نشست مدل های ساخته شده با

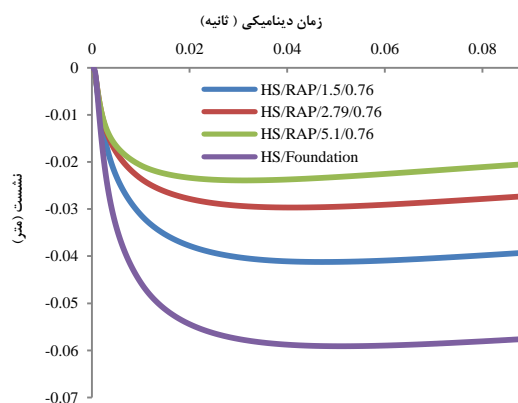
مدل رفتاری MCC با قطر و طول های مختلف RAP

درصد کاهش نشست پی نسبت به مدل مرجع در مرکز پی	حداکثر نشست مرکز پی (سانتی متر)	نماد مدل
۰	۴/۹۵	مدل مرجع (بدون ستون)
۳۴	۳/۲۶	RAP-۱/۵-۰/۶۶
۳۹	۳	RAP-۲/۷۹-۰/۶۶
۴۴	۲/۸۰	RAP-۵/۱-۰/۶۶
۴۹	۲/۵۲	RAP-۱/۵-۰/۷۶
۵۴	۲/۲۷	RAP-۲/۷۹-۰/۷۶
۵۹	۲/۰۶	RAP-۵/۱-۰/۷۶
۵۶	۲/۱۷	RAP-۱/۵-۰/۸۶
۶۱	۱/۹۲	RAP-۲/۷۹-۰/۸۶
۶۶	۱/۷۱	RAP-۵/۱-۰/۸۶

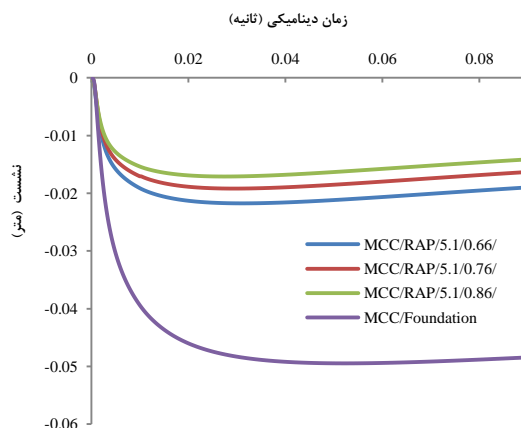
متر اختلاف نشست ناچیزی دارند. همچنین ستون ۲/۸ متری با قطر ۰/۸۶ متر، با ستون ۵/۱ متر به قطر ۰/۷۶ متر اختلاف نشست ناچیزی دارند. علت این امر می تواند تأثیر افزایش قطر ستون و افزایش ناحیه شعاعی تحت تأثیر کوبش باشد که می تواند کمبود طول ستون را با افزایش قطر جبران نماید.



شکل ۷. نمودار نشست- زمان برای سه قطر مختلف RAP برای HS



شکل ۸. نمودار نشست- زمان برای سه طول مختلف RAP برای HS

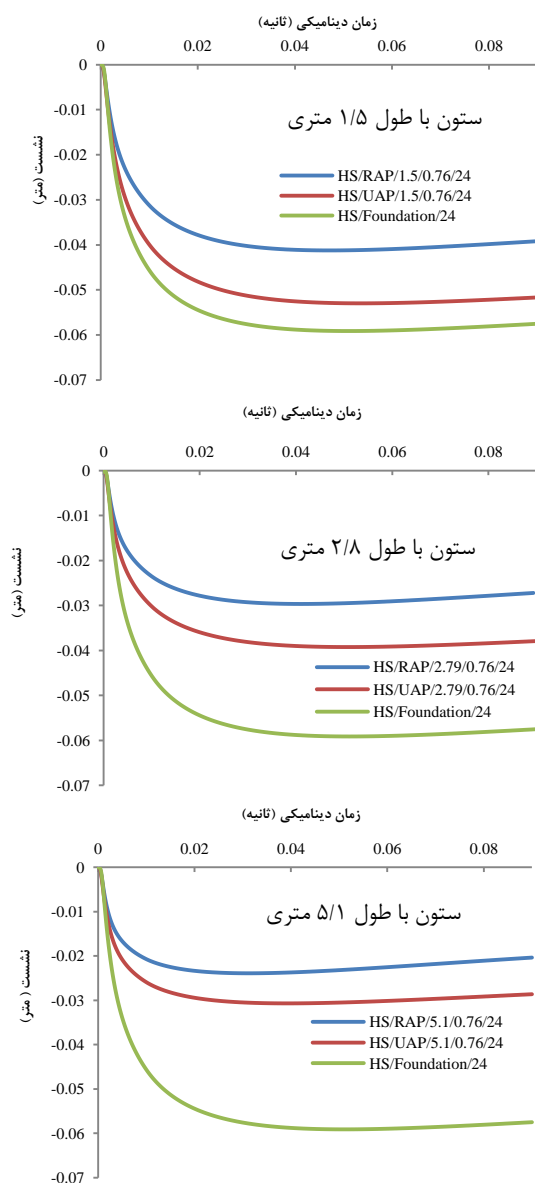


شکل ۹. نمودار نشست- زمان برای سه قطر مختلف RAP برای MCC



### ۲-۳. بررسی اثر نحوه ساخت ستون سنگریزه‌ای

ستون سنگریزه‌ای کوبشی با طول کمتر می‌تواند از ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی با طول بیشتر، کارایی بیشتری داشته باشد و صرفاً افزایش طول ستون سنگریزه‌ای نمی‌تواند بهترین راه‌حل برای افزایش کارایی و کاهش نشست پی باشد. با مقایسه تمام مدل‌های ستون‌های سنگریزه‌ای، می‌توان فهمید که باربری ستون RAP در مقایسه با ستون UAP بیشتر است و ستون RAP سهم بیشتری از بار (نظریه سختی فنر) را بر عهده می‌گیرد، در نتیجه نشست مجموعه خاک-ستون کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که سختی ایجادشده در ستون و خاک اطراف ستون در ستون‌های RAP از ستون UAP بیشتر است.



شکل ۱۱. نمودارهای نشست-زمان برای بالای ستون RAP و UAP با قطر ۰/۷۶ - و برای HS - (φ خاک رس = ۲۴°) با ستون‌های با طول متفاوت

برای بررسی تأثیر نحوه ساخت ستون بر ظرفیت باربری و نشست پی، مدل‌سازی ستون‌ها برای ۳۶ مدل با در نظر گرفتن ۹ حالت مختلف برای قطر و طول ستون سنگریزه‌ای و ۲ حالت مختلف برای نحوه ساخت ستون سنگریزه‌ای و ۲ حالت برای مدل رفتاری خاک مورد بهسازی انجام شده است که برای نمونه در شکل (۱۱-الف) برای طول ۱/۵ متر، در شکل (۱۱-ب) برای طول ۲/۸ متری و در شکل (۱۱-ج) برای طول ۵/۱ متری، برای ستون سنگریزه‌ای کوبشی و غیر کوبشی با قطر ۰/۷۶ و مدل رفتاری خاک سخت شونده و همچنین در شکل (۱۲) برای مدل رفتاری کم کلی اصلاح شده نشان داده شده است و نتایج بقیه مدل‌ها در جدول‌های (۶-۷) به طور خلاصه آورده شده است تا بتوانیم میزان اثر کوبش در ستون سنگریزه‌ای را بررسی کنیم. همان‌طور که از جدول (۶-۷) مشاهده می‌شود اجرای ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی به طول ۱/۵ متر به منظور کاهش نشست، کارایی خوبی ندارد، به این دلیل که حداکثر ۱۳٪ درصد نشست پی را نسبت به مدل مرجع کاهش می‌دهد. درحالی‌که ستون سنگریزه‌ای کوبشی با همین طول، ۳۴٪ نشست پی را کاهش داده است. اجرای ستون سنگریزه‌ای کوبشی ۲/۸ متری به منظور بهبود کاهش نشست، منطقی‌تر از ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی ۵/۱ متری است، به این دلیل که ستون کوبشی ۲/۸ متری ۵۰٪ درصد و ستون غیر کوبشی ۲/۸ متری، ۳۴٪ درصد نشست پی را کاهش می‌دهد. درحالی‌که ستون غیر کوبشی ۵/۱ متری، ۴۸٪ نشست پی را کاهش می‌دهد. اجرای ستون سنگریزه‌ای کوبشی به طول ۵/۱ متر، نشست پی را ۶۴٪ درصد کاهش می‌دهد. درحالی‌که ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی با همین طول، ۵۲٪ و ستون سنگریزه‌ای کوبشی ۲/۸ متری، ۵۴٪ نشست پی را کاهش می‌دهد. با در نظر گرفتن زمان و هزینه‌های حفاری با اعماق بیشتر، ممکن است ساخت ستون سنگریزه‌ای کوبشی ۲/۸ متری از ستون سنگریزه‌ای کوبشی ۵/۱ متری اقتصادی‌تر باشد.

با توجه به نتایج جدول‌های (۶-۷) اثرات مدل رفتاری کم کلی اصلاح شده (MCC) و خاک سخت‌شونده HS برای خاک مورد بهسازی (CL)، اختلاف نتایج نسبتاً کمی را برای نشست پی ارائه کرده است. طبق نتایج میزان اختلاف نتایج برای درصد نشست نسبت به مدل مرجع برای مدل MCC نسبت به مدل HS به طور میانگین برابر ۴٪ است و حداکثر میزان اختلاف برابر ۲۳٪ است.

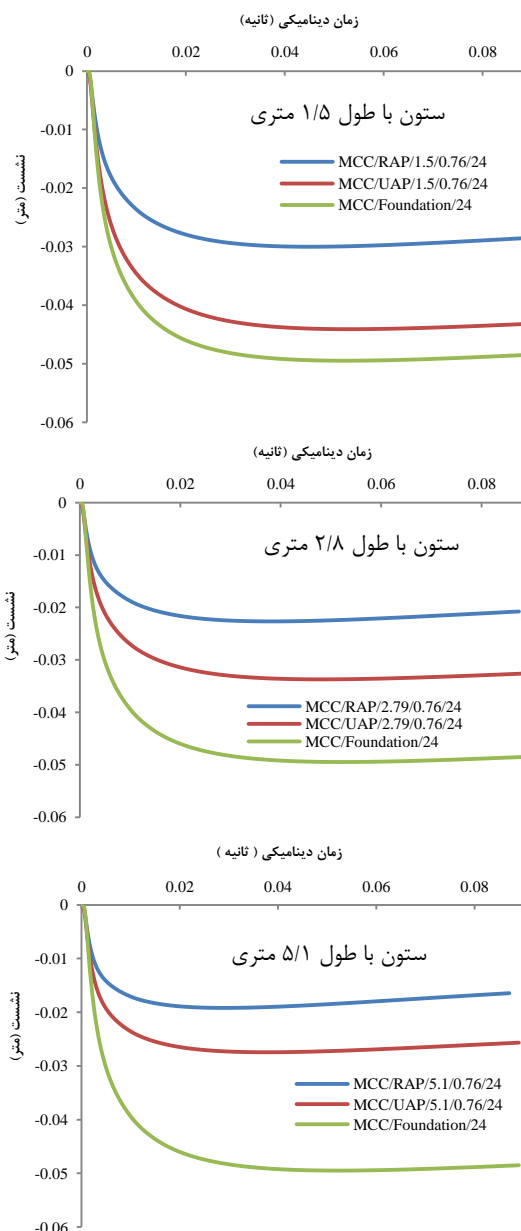
با بررسی جدول‌های (۶-۷) می‌توان فهمید که نحوه ساخت ستون سنگریزه‌ای تأثیر بسزایی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی تحت بارگذاری انفجار دارد، به طوری که حتی

اصطکاکی بهتری نسبت به ستون ۱/۵ متری دارد و ستون به صورت اتکایی - اصطکاکی عمل می کند. مکانیزم گسیختگی ستون سنگریزه ای با طول ۲/۸ متر، هم به صورت لغزش و هم به صورت شکم دادگی خواهد بود، به این دلیل که باربری ستون سنگریزه ای هم به صورت اصطکاکی و هم به صورت اتکایی خواهد بود.

در RAP و UAP ۵/۱ متری، بیشتر بار اعمالی به بالای ستون سنگریزه ای، توسط مقاومت اصطکاکی تحمل می شود و تقریباً نوک ستون باربری زیادی ندارد و ستون سنگریزه ای در این حالت، نسبت به ستون ۱/۵ و ۲/۸ متری، مقاومت اصطکاکی بیشتر و مقاومت اتکایی کمتری دارد و ستون به صورت اصطکاکی عمل می کند. مکانیزم گسیختگی ستون سنگریزه ای با طول ۵/۱ متر، فقط به صورت شکم دادگی خواهد بود، به این دلیل که باربری ستون سنگریزه ای تقریباً فقط به صورت اصطکاکی جداره است.

**جدول ۶.** درصد تغییرات حداکثر نشست مدل های HS ساخته شده برای دو حالت نحوه ساخت ستون، پی بتنی متکی بر RAP و UAP

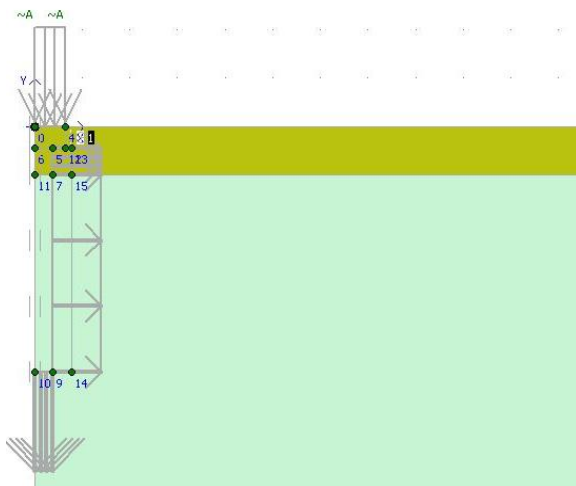
درصد کاهش نشست پی نسبت به مدل مرجع	حداکثر نشست مرکز پی (سانتی متر)	نماد مدل
۰	۵/۹۱	مدل مرجع (بدون ستون)
۲۶	۴/۳۸	RAP-۱/۵-۰/۶۶
۸	۵/۴۴	UAP-۱/۵-۰/۶۶
۳۰	۴/۱۲	RAP-۱/۵-۰/۷۶
۱۰	۵/۳	UAP-۱/۵-۰/۷۶
۳۴	۳/۸۹	RAP-۱/۵-۰/۸۶
۱۳	۵/۱۴	UAP-۱/۵-۰/۸۶
۴۵	۳/۲۶	RAP-۲/۸-۰/۶۶
۲۹	۴/۱۷	UAP-۲/۸-۰/۶۶
۵۰	۲/۹۷	RAP-۲/۸-۰/۷۶
۳۴	۳/۹۲	UAP-۲/۸-۰/۷۶
۵۴	۲/۷۱	RAP-۲/۸-۰/۸۶
۳۸	۳/۶۸	UAP-۲/۸-۰/۸۶
۵۴	۲/۷۱	RAP-۵/۱-۰/۶۶
۴۳	۳/۳۷	UAP-۵/۱-۰/۶۶
۶۰	۲/۳۹	RAP-۵/۱-۰/۷۶
۴۸	۳/۰۷	UAP-۵/۱-۰/۷۶
۶۴	۲/۱۰	RAP-۵/۱-۰/۸۶
۵۲	۲/۸۰	UAP-۵/۱-۰/۸۶



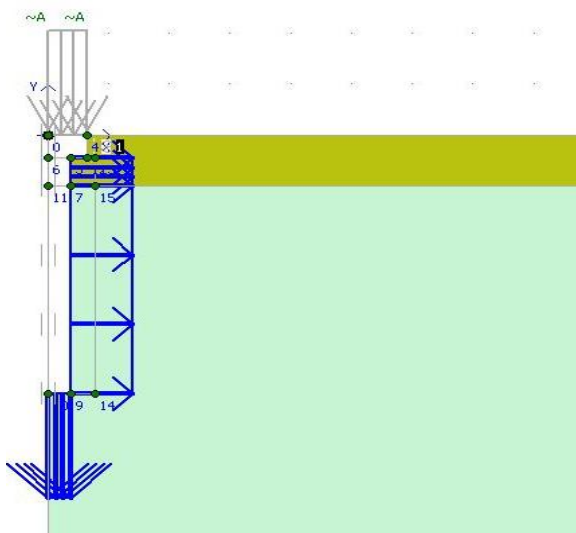
**شکل ۱۲.** نمودارهای نشست- زمان برای بالای ستون RAP و UAP با قطر ۰/۷۶ - و برای MCC - (φ خاک رس = ۲۴°) با ستون های با طول متفاوت

در ستون ۱/۵ متری، چه در RAP و چه در UAP، بیشتر بار اعمالی به نوک ستون انتقال می یابد و ستون سنگریزه ای، مقاومت اصطکاکی کمی دارد و ستون بیشتر به صورت اتکایی عمل می کند. مکانیزم گسیختگی ستون سنگریزه ای با طول ۱/۵ متر، غالباً به صورت لغزش خواهد بود، به این دلیل که مقاومت اصطکاکی ستون جوابگوی نیروی برشی در امتداد جداره ستون نخواهد بود و عملکرد ستون به صورت اتکایی است.

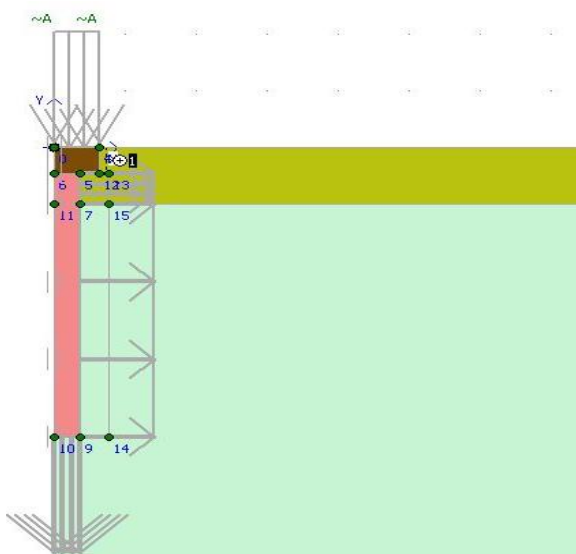
در ستون RAP و UAP ۲/۸ متری، مقداری از بار اعمالی، توسط نوک ستون و مقداری از بار توسط مقاومت اصطکاکی تحمل می شود و ستون سنگریزه ای در این حالت، مقاومت



شکل ۱۳. فاز اول\_ به تعادل رسیدن خاک



شکل ۱۴. فاز دوم \_ حفر چاه و اعمال جابجایی و تراکم خاک



شکل ۱۵. فاز سوم \_ ریختن مصالح ستون سنگریزه‌ای و شالوده بتنی

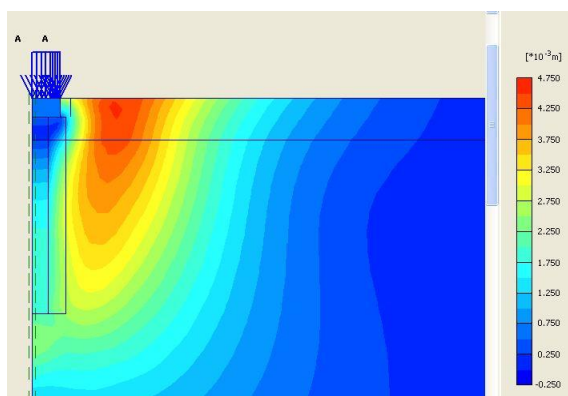
جدول ۷. درصد تغییرات حداکثر نشست مدل‌های MCC ساخته‌شده برای دو حالت نحوه ساخت ستون، پی بتنی متکی بر RAP و UAP

درصد کاهش نشست پی نسبت به مدل مرجع	حداکثر نشست مرکز پی (سانتی‌متر)	نماد مدل
۰	۴/۹۵	مدل مرجع (بدون ستون)
۳۴	۳/۲۶	RAP-۱/۵-۰/۶۶
۸	۴/۵۳	UAP-۱/۵-۰/۶۶
۳۹	۳	RAP-۱/۵-۰/۷۶
۱۱	۴/۴۱	UAP-۱/۵-۰/۷۶
۴۳	۲/۸	RAP-۱/۵-۰/۸۶
۱۳	۴/۲۶	UAP-۱/۵-۰/۸۶
۴۹	۲/۵۲	RAP-۲/۸-۰/۶۶
۲۸	۳/۵۸	UAP-۲/۸-۰/۶۶
۵۴	۲/۲۷	RAP-۲/۸-۰/۷۶
۳۲	۳/۳۷	UAP-۲/۸-۰/۷۶
۵۹	۲/۰۶	RAP-۲/۸-۰/۸۶
۳۵	۳/۱۷	UAP-۲/۸-۰/۸۶
۵۶	۲/۱۷	RAP-۵/۱-۰/۶۶
۳۹	۳	UAP-۵/۱-۰/۶۶
۶۱	۱/۹۲	RAP-۵/۱-۰/۷۶
۴۵	۲/۷۴	UAP-۵/۱-۰/۷۶
۶۶	۱/۷۱	RAP-۵/۱-۰/۸۶
۴۹	۲/۵۱	UAP-۵/۱-۰/۸۶

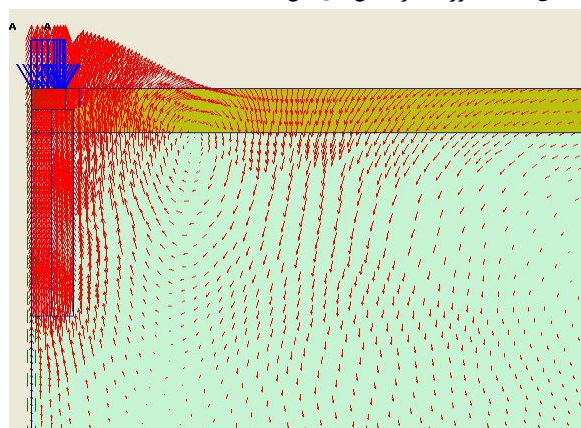
بر اساس تحقیقات گلستانی دریانی [۳۲]، وایت و همکاران [۲۹] به دو علت عمده ظرفیت باربری RAP نسبت به UAP بیشتر است. یکی رسیدن خاک اطراف RAP به حالت مقاوم<sup>۱</sup> است، درحالی‌که ضریب فشار جانبی در خاک اطراف UAP تقریباً عددی بین  $k_0$  و  $k_p$  است. دومین تفاوت شعاع ناحیه تحت تأثیر ساخت RAP و UAP است. به دلیل وجود کوبش در ساخت RAP، شعاع ناحیه‌ای از خاک اطراف که دچار افزایش تنش افقی می‌شود، بزرگ‌تر از شعاع ناحیه مشابه در خاک اطراف UAP خواهد بود. در نتیجه محصورشدگی RAP توسط خاک اطراف بیشتر خواهد بود.

در ادامه مراحل مدل‌سازی و ساخت مرحله‌ای ستون RAP ۵/۱ متری با قطر ۰/۷۶ متر تحت بارگذاری انفجار برای نمونه در شکل‌های (۱۳ تا ۱۶) نشان داده شده است.

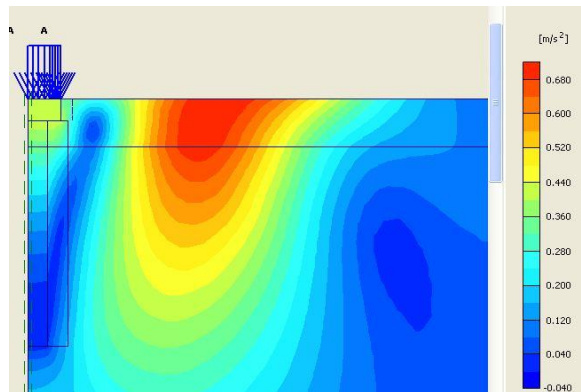
<sup>۱</sup> Passive



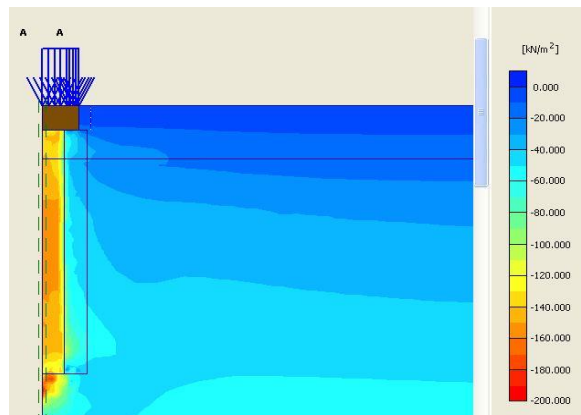
شکل ۱۹. کانتور تغییر شکل‌های کل



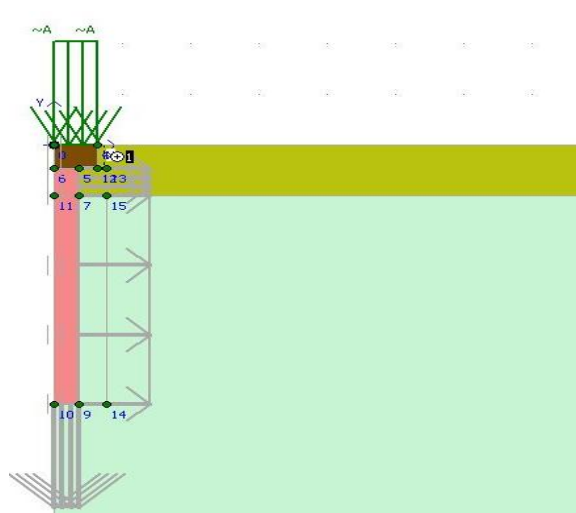
شکل ۲۰. بردارهای تغییرات سرعت کل



شکل ۲۱. کانتورهای تغییرات شتاب کل

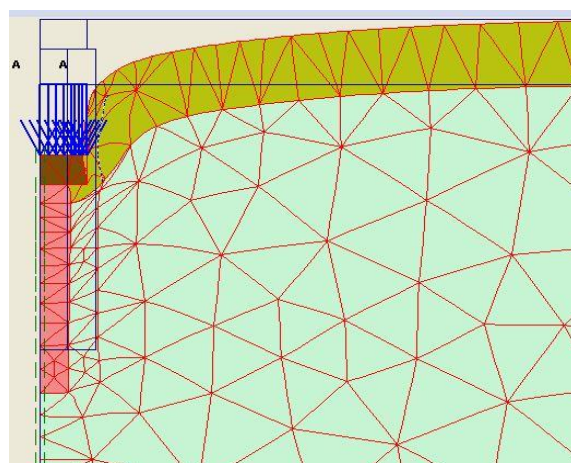


شکل ۲۲. تنش‌های مؤثر میانگین

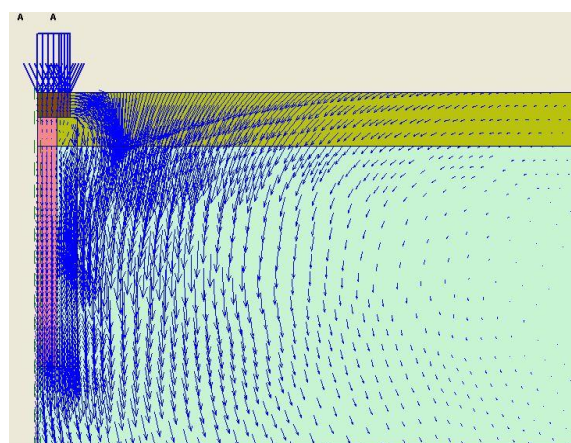


شکل ۱۶. فاز چهارم\_ اعمال بارگذاری دینامیکی انفجار

در ادامه یک نمونه مدل تغییر شکل یافته و خرابی ستون RAP ۵/۱ متری با قطر ۰/۷۶ متر، بردارهای تغییر شکل‌های کل، کانتور تغییر شکل‌های کل، بردارهای تغییرات سرعت کل و کانتورهای تغییرات شتاب کل و تنش‌های مؤثر میانگین، تحت بارگذاری انفجار در شکل‌های (۱۷-۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۷. تغییر شکل یافته مدل



شکل ۱۸. بردار تغییر شکل‌های کل

## ۴. نتیجه‌گیری

پل‌ها، فرودگاه‌ها و راه‌ها و جاده‌ها بر روی خاک‌های رسی سست و ماسه‌ای شل و همچنین بر روی کانال‌های زیرزمینی مترو یا تونل‌های نظامی و تأمین امنیت سازه‌های زیرزمینی، می‌توان تأثیر بار انفجار و نشست‌های زیاد ناشی از آن را تا حدود زیادی کاهش داد، و در نتیجه خرابی‌های ناشی از نشست‌های زیاد را به حداقل رساند.

## ۵. مرجع‌ها

- [1] Abroshan, F. "Nonlinear Dynamical Analysis of Composite Shells under Blast Loading"; MSc. thesis, Zanjan University, 2010 (In Persian).
- [2] TM5-855-1 "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; Headquarters. Department of the American Army, 1986.
- [3] ESL-TR-87-57 "Protective Construction Design Manual"; Prepared for Engineering and Services Laboratory, Tyndall Air Force Base, FL, 1989.
- [4] Army TM 5-1300 "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; Navy NAVFAC P-397, AFR 88-2. Washington, DC, Departments of the Army, Navy, and Air Force, 1990.
- [5] DOE/TIC-11268 "A Manual for the prediction of Blast and Fragment Loading on Structures"; Washington, DC, Headquarters, U.S. Department of Energy, 1992.
- [6] DAHSCWE, Technical Manual "Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects"; U.S. Army Corps of Engineers (CEMP-ET), Washington DC, September, 1998.
- [7] FEMA 428 "Primer to Design Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks and School Shootings"; 2<sup>nd</sup> Edition, 2012.
- [8] Brode, H. L. "Numerical Solution of Spherical Blast Waves"; J. Appl. Phys. 1955, 26, 766-775.
- [9] Newmark, N. M.; Hansen, R. J. "Design of Blast Resistant Structures"; Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill university, New York, 1961.
- [10] Mills, C. A. "The Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects"; Proc. Int. Conf. Edinburgh, UK, 1987, 61-73.
- [11] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview"; Electronic J. Struct. Eng. Special Issue: Loading on Structures, 2007, 76-92.
- [12] Leppanen, J. "Dynamic Behavior of Concrete Structures Subjected to Blast and Fragment Impacts"; Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2002.
- [13] Kleine, H.; Hiraki, K. "Supersonic Flows over Double Cone Geometries"; Proc. Int. Symposium on Shock Waves 2005, 101-106.
- [14] Pandey, A. K.; Kumar, R.; Paul, D. K.; Trikha, D. N. "Non-Linear Response of Reinforced Concrete Containment Structure under Blast Loading"; Nuclear Eng. Design 2006, 236, 993-1002.
- [15] Rose, T. A.; Smith, P. D.; May, J. H. "The Interaction of Oblique Blast Waves with Buildings"; Shock Waves 2006, 35-44.

تطابق خوب نتایج تحلیل عددی صورت گرفته در این تحقیق با نتایج آزمون‌های صحرایی، مناسب بودن فرضیات و روش ارائه‌شده برای مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. استفاده از مدل رفتاری الاستوپلاستیک سخت شونده علاوه بر آنکه روند بهبود سختی مصالح در اثر ساخت ستون را به خوبی مدل می‌کند، عدم توانایی مدل برای در نظر گرفتن نرم‌شوندگی کرنشی را تا حدودی جبران کرده است. بر اساس نتایج تحلیل پارامتریک و نتایج مدل‌سازی انجام‌گرفته در PLAXIS، مشاهده گردید که با افزایش طول RAP تا ۵/۱ متر در مدل HS، کارایی ستون در کاهش نشست پی به خوبی افزایش می‌یابد، به طوری که نشست پی متکی بر RAP، برای قطرهای ۰/۶۶ متر، ۰/۵۴ متر، برای ۰/۷۶ متر، ۰/۶۰ و برای ۰/۸۶ متر، ۰/۶۴ نسبت به مدل مرجع کاهش می‌یابد. در حالی که برای ستون ۲/۸ متری با همین قطرها به ترتیب، ۰/۴۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۴ بوده است که در مقایسه با RAP ۵/۱ متری، نشان می‌دهد که می‌توان با طول بهینه ۲/۸ متری در این تحقیق با زمان کمتر و همچنین با افزایش قطر RAP تا ۰/۸۶ متر در این تحقیق می‌توان به نشست بهینه دست یافت. نحوه ساخت ستون سنگریزه‌ای تأثیر چشمگیری در ظرفیت باربری و کاهش نشست پی در ستون‌های کوتاه‌تر از ۵/۱ متر دارد، به طوری که برای UAP ۱/۵ متری در مدل HS، ۰/۱۳، برای UAP ۲/۸ متری، ۰/۳۸ و UAP ۵/۱ متری ۰/۵۲ کاهش نشست به دست آمده است، در حالی که برای RAP با همین طول‌ها به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۵۴ و ۰/۶۴ نشست پی نسبت به مدل مرجع کاهش یافته است که این نشان‌دهنده میزان اثر کوبش بر روی افزایش سختی ستون و خاک اطراف ستون و در نتیجه کاهش نشست پی خواهد بود. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که ساخت ستون‌های غیر کوبشی بلندتر از ۵/۱ متر و همچنین ساخت ستون‌های کوبشی کمتر از ۵/۱ متر کارایی بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها با مشخصات یکسان دارد. اثرات مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح‌شده MCC و الاستوپلاستیک سخت شونده کلاسیک دار HS برای خاک مورد بهسازی (CL)، اختلاف نتایج نسبتاً کمی را برای نشست پی ارائه کرده است. طبق نتایج میزان اختلاف نتایج برای درصد نشست نسبت به مدل مرجع برای مدل MCC نسبت به مدل HS به‌طور میانگین برابر ۰/۴ است و حداکثر میزان اختلاف برابر ۰/۲۳ است. بررسی این روش بهسازی خاک تحت بارهای دینامیکی انفجار نشان داد که با ساخت و اجرای ستون‌های سنگریزه‌ای کوبشی و غیر کوبشی می‌توان در موارد مختلف از جمله تقویت خاک زیر شالوده‌ها، خاک‌ریزها، پایه‌های

- [25] Basirat, R.; Dehghan Niri, G. A.; Izadifard, R. A. "The Effect of Sand Layer Thickness and Moisture Content on Underground Structures Behavior due to Surface Blasting"; *J Eng. Res.* 2015, 31-42.
- [26] Amini Mazraeno, M.; Ravanbakhsh, A.; Dehghan Niri, G. "The Effect of the Explosion on Bearing Capacity of Shallow Foundation"; *Journal of Passive Defence Science and Technology* 2013, 199-209 (In Persian).
- [27] Schmidt, R. M.; Holsapple, K. A. "Theory and Experiments on Centrifuge Cratering"; *J. Geophys. Res.* 1980, 235-252.
- [28] Ambrosini, D.; Luccioni, B.; Danesi, R. "Influence of the Soil properties on Craters Produced by Explosions on the Soil Surface"; *Mecanica Computacional* 2004, 13, 571-590.
- [29] White, D. J.; Gaul, A. J.; Hoevelkamp, K. "Highway Applications for Rammed Aggregate Pier in Iowa Soils"; Final Rep., Iowa DOT TR-443, Ames, Iowa. 2003.
- [30] PLAXIS Scientific Manual Delft University of Technology & PLAXIS bv, the Netherlands, A. A. Balkema Publishers, 2008.
- [31] Olofsson, S. O.; Rosengren, L.; Svedbjörk, G. "Modeling of Ground-Shock Wave Propagation in Soil Using FLAC"; *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* 1999, 21, 401-405.
- [32] Golestani Daryani, A. "Evaluation of the Performance of Stone Columns in Increasing the Bearing Capacity and Settlement Reduction of Soils under the Foundation and Comparing it with Rammed Aggregate Pier (RAP)"; MSc. Thesis, Sharif University, 2010 (In Persian).
- [16] Batra, R. C.; Hassan, N. M. "Blast Resistance of Unidirectional Fiber Reinforced Composites"; *Compos. Part B: Engineering* 2008, 39, 513-536.
- [17] Ishikawa, N. "Lessons from Past Explosive Tests on Protective Structures in Japan"; *Int. J. Impact Eng.* 2007, 1535-1545.
- [18] Chen, J.; Han, J.; Oztoprak, S.; Yang, Y. "Behavior of Single Rammed Aggregate Piers Considering Installation Effects"; *J. Comp. Geotech.* 2009, 36, 1191-1199.
- [19] Pham, H. T. V.; White, D. J. "Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. II: Numerical Analyses"; *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2007, 133, 1512-1521.
- [20] Dashtara, S. "Investigation of Bearing Capacity and Semi-Deep Foundation Settlement"; MSc. thesis, Sharif University, 2008 (In Persian).
- [21] Sharfinia, M. "Investigation of Bearing Capacity the Rammed Aggregate Piers with Numerical Modeling"; MSc. Thesis, Sharif University of Technology, 2006 (In Persian).
- [22] White, D. J.; Pham, H. T. V.; Hoevelkamp, K. K. "Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. I: Experimental Results"; *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2007, 133, 1503-1511.
- [23] Handy, R. L.; White, D. J. "Stress Zones Near Displacement Piers: I. Plastic and Liquefied Behavior"; *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2006, 54-62.
- [24] Pham, H. T. V. "Support Mechanism of Rammed Aggregate Piers"; PhD. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 2005.