



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۴۹ تا ۶۳  
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 49-63



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## نشست حاصل از بهسازی انفجاری در نهشته‌های شل و اشباع؛ کاربرد برای ۱۸ مورد عملی

مهدی شاکران<sup>۱</sup>، ابوالفضل اسلامی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
۲- دانشیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۹۱/۷/۲۰، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۱۲)

### چکیده

در میان شیوه‌های گوناگون برای اصلاح رفتار نهشته‌های شل و اشباع، تراکم انفجاری به عنوان یکی از روش‌های موثر بهسازی خاک در عمق، مطرح و قابل ملاحظه است. در این مقاله ۱۸ سایت مختلف از کشورهای آمریکا، کانادا، هند، نیجریه، لهستان و غیره جمع‌آوری شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تراکم انفجاری در یک یا چند مرحله برای بهسازی نهشته‌های شل و اشباع با ضخامت متنوع در محدوده‌ی ۵ تا ۴۰ متر در این سایت‌ها با موفقیت بکار گرفته شده است. پس از اجرای موفق تراکم انفجاری در این سایت‌ها، لایه‌های مورد بهسازی به اندازه‌ی ۲ تا ۱۰٪ ضخامت خود دچار نشست شدند. با تحلیل داده‌های حاصل از بانک اطلاعاتی، روابط موجود تخمین نشست مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از بهینه‌سازی غیر خطی، رابطه‌ای دقیق‌تر نسبت به روابط موجود جهت تخمین نشست حاصل از بهسازی انفجاری با در نظر گرفتن اثر همزمان فاکتور پودر مصرفی، عمق متوسط قرارگیری مواد منفجره و تعداد فازهای اجرای بهسازی انفجاری، پیشنهاد شد. وضعیت قرارگیری عوامل مربوط به عمق متوسط قرارگیری ماده‌ی منفجره و تعداد مراحل انفجار نشان داد که لازم است با افزایش عمق متوسط قرارگیری ماده‌ی منفجره، میزان فاکتور پودر مصرفی جهت دستیابی به تراکم مطلوب افزایش یابد همچنین تاثیر فازهای انفجار اول و دوم در نشست نهایی به مراتب بیشتر از فازهای انفجاری بعدی خواهد بود.

### کلمات کلیدی

بهسازی عمیق، تراکم انفجاری، نشست، فاکتور پودر، چینش مواد منفجره.

\* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: afeslami@aut.ac.ir

۱- مقدمه

(۱) بهسازی انفجاری از نظر عمق عملکرد و هزینهی نسبی با شیوه‌های متداول بهسازی عمیق مقایسه شده است. بهسازی انفجاری قادر است لایه‌ی مورد نظر بهسازی را به‌طور مستقیم هدف قرار داده و به بیان دیگر بهسازی خاک را برخلاف روش‌های دیگر از پایین به بالا انجام دهد.

جدول (۱): بررسی عمق موثر و هزینهی نسبی روش‌های متداول بهسازی خاک در عمق [۱]

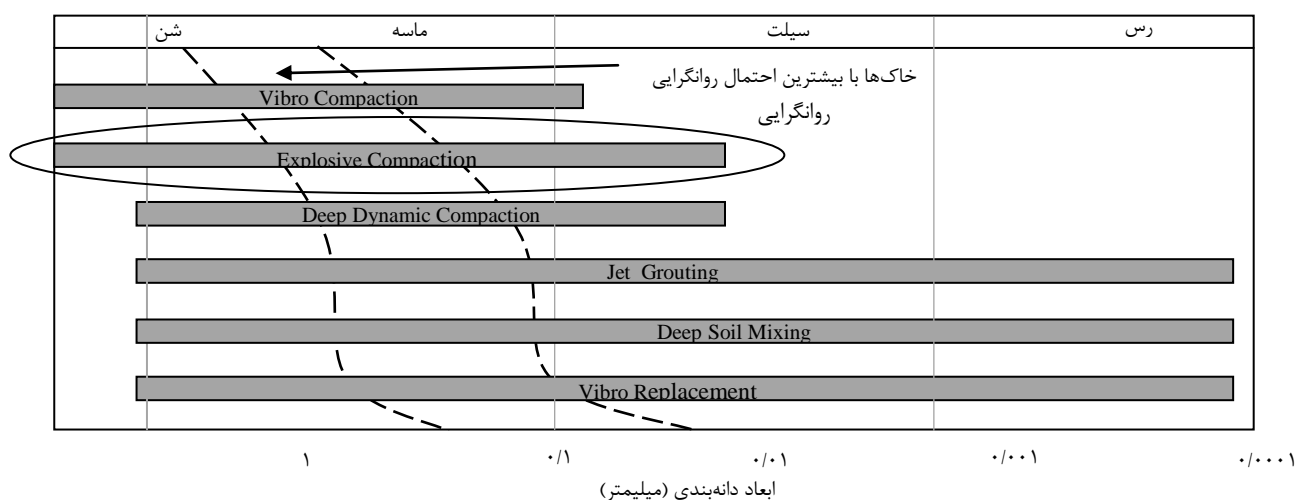
روش بهسازی عمیق	عمق موثر	هزینه نسبی
تراکم ویبره‌ای	تا حدود ۳۰ متر	متوسط
ویبره جایگزینی	تا حدود ۳۰ متر	متوسط
تراکم دینامیکی	۱۵ متر با تجهیزات معمولی	کم
تراکم انفجاری	محدودیتی ندارد (تا ۵۰ متر) از پایین به بالا	متوسط
تزریق با فشار بالا	محدودیتی ندارد	زیاد
اختلاط در عمق	تا حدود ۲۰ متر	زیاد تا بسیار زیاد

توسعه‌ی ساخت و سازها، سنگینی، اهمیت سازه‌ها و در عین حال مواجهه با ساختارهای ضعیف و مشکل‌دار، گزینه‌ی بهسازی خاک را به عنوان یک راه حل جهت بهینه‌سازی فونداسیون پروژه‌ها مطرح می‌سازد. گزینه‌های معمول جهت بهسازی لایه‌های ضعیف خاک در عمق مشتمل بر: روش‌های لرزشی<sup>۱</sup>، اختلاط خاک در عمق<sup>۲</sup>، تراکم دینامیکی عمیق<sup>۳</sup>، تزریق با فشار بالا<sup>۴</sup>، و تراکم انفجاری<sup>۵</sup> هستند.

اصلاح نهشته‌های شل و اشباع در عمق توسط روش‌هایی مانند اختلاط خاک در عمق و تزریق، از نظر اقتصادی هزینه‌بر خواهد بود. در تراکم دینامیکی از سقوط وزنه‌های سنگین برای بهسازی خاک استفاده می‌شود، این شیوه لایه‌های خاک تا عمق حداکثر ۱۵ متر را تحت تاثیر قرار داده و با کاهش نفوذپذیری خاک اثربخشی آن کاهش می‌یابد. استفاده از لرزاننده‌ها در اصلاح خاک‌های دانه‌ای شل در عمق، تجهیزات ویژه‌ای را می‌طلبد؛ کاهش بازده شیوه بر اثر افزایش درصد سیلت و رس، همچنین محدودیت عمق بکارگیری (حداکثر ۳۰ متر) از دیگر معضلات این روش است [۱].

بهسازی انفجاری روشی است که در آن از انرژی آزاد شده بر اثر انفجار مواد منفجره در خاک‌های شل و اشباع غیر چسبنده برای ایجاد ساختار متراکم‌تر از دانه‌های خاک و همچنین بیرون راندن و خروج آب از درون آن استفاده می‌شود. این شیوه، ماشین‌آلات و تجهیزات خاصی نیاز نداشته و در میان روش‌های مختلف بهسازی خاک در عمق، می‌تواند به عنوان یک روش سریع، آسان و اقتصادی مورد توجه قرار گیرد. حمل و نقل آسان و قیمت پایین منبع انرژی، تجهیزات ساده و کم ابعاد، امکان کارکرد در شرایط محدود و انواع شرایط جوی، این روش بهسازی عمیق را به یکی از شیوه‌های جذاب تبدیل می‌نماید. در جدول

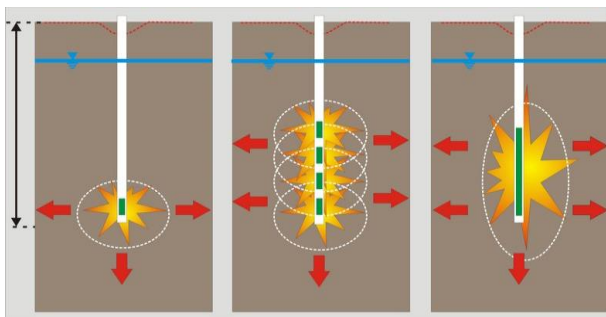
شکل (۱) مقایسه‌ی محدوده‌ی عملکرد تراکم انفجاری را در برابر دیگر روش‌های معمول بهسازی عمیق خاک نشان می‌دهد.



شکل (۱): مقایسه محدوده‌ی عملکرد روش‌های متداول بهسازی عمیق با تراکم انفجاری

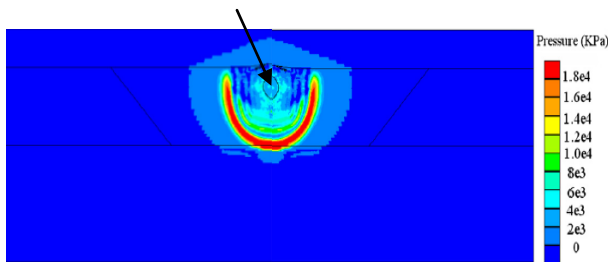
## ۲- بهسازی انفجاری

رسی در ماسه، زهکشی خاک را با مشکل مواجه نموده و باعث کاهش بازده تراکم انفجاری می‌گردد. به عنوان معیاری دیگر می‌توان گفت در خاک‌هایی با مقاومت نوک CPT ( $q_t$ ) کم‌تر از ۱۰ مگاپاسکال، تراکم حاصل از بهسازی انفجاری رضایت بخش خواهد بود. تراکم متوسط در خاک‌هایی با  $q_t$  کم‌تر از ۱۵ مگاپاسکال بدست می‌آید. اما، در خاک‌هایی با مقاومت نوک CPT بیش‌تر از ۲۰ مگاپاسکال، انفجار به سست‌تر شدن نهشته‌ها منجر خواهد شد.



(الف)

محل قرارگیری و انفجار ماده‌ی منفجره



(ب)

شکل (۲): (الف) نحوه‌ی انتشار امواج انفجار مربوط به حالت‌های مختلف بارگذاری مواد منفجره در چاهک انفجار، (ب) انتشار امواج ناشی از انفجار در محیط دوفازی خاک و آب

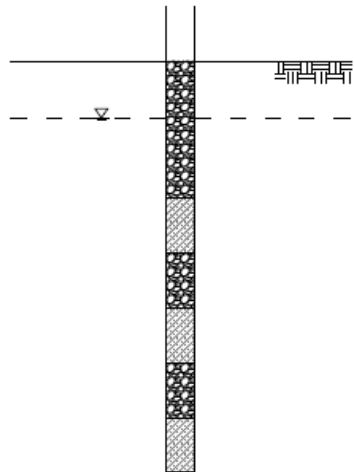
در تراکم انفجاری، با توزیع و چینش صحیح چاه‌های انفجاری در پلان (مربعی و یا مثلثی شکل)، انتخاب مقدار صحیح ماده منفجره و توزیع درست ماده در طول ضخامت لایه موردنظر، انرژی کافی را جهت تراکم به تمام توده خاک رسانده و می‌توان به یک تراکم مناسب دست یافت. پارامترهای موثر در طراحی تراکم انفجاری در شش عنوان شامل: وزن ماده منفجره در هر چاهک، عمق قرارگیری ماده منفجره، نحوه‌ی توزیع ماده منفجره در ارتفاع، فواصل چاهک‌های انفجار، فزبنندی و تعیین تعداد مراحل انفجار، ترتیب انفجاری چاه‌ها و زمان‌بندی انفجار در هر فاز دسته‌بندی می‌شود. طراحی هریک از پارامترهای فوق با در نظر گرفتن نتیجه‌ی نهایی مطلوب، محدودیت‌های موجود برای

تراکم انفجاری از حدود ۸۰ سال قبل تاکنون به عنوان یکی از روش‌های بهسازی عمیق مطرح است. با استفاده از تراکم انفجاری می‌توان تغییرات حجمی به اندازه ۲ تا ۳ برابر یک زلزله بزرگ در خاک ایجاد نمود و دانسیته نسبی در خاک‌های ماسه‌ای شل را به بالای ۷۰٪ رساند. تراکم انفجاری برای اصلاح خاک‌های ماسه‌ای شل و اشباع تا عمق ۴۰ متر به صورت موثر بکارگرفته شده و هیچگونه محدودیتی از لحاظ عمق بکارگیری این شیوه وجود ندارد [۵].

برای نخستین بار، تراکم انفجاری در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی برای متراکم‌سازی خاکریزهای خط آهن در شهر اسوریسک<sup>۶</sup> شوروی سابق مورد استفاده قرار گرفت. با وجود نشستی در حدود ۴۴ سانتی‌متر ولی به علت گسترش ترک‌ها در ناحیه غیر اشباع خاک، استفاده از این تکنیک، چندان موفقیت‌آمیز نبود. عملیات متراکم‌سازی شالوده‌ی سد آبشار فرانکلین<sup>۷</sup> در نیوهمپشیر<sup>۸</sup> اولین تجربه موفق تراکم انفجاری به شمار می‌رود. کاربرد بهسازی انفجاری در سایت سدها در کشورهای کانادا، آمریکا، هند، پاکستان و نیجریه، متراکم‌سازی پسماندهای نیروگاه‌های حرارتی، پروژه‌های مربوط فرودگاه‌ها و بنادر، جزایر مصنوعی در دریا و همچنین آزمایش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی گزارش شده است [۶]-[۱۴].

تراکم خاک‌های دانه‌ای بر اثر انفجار نتیجه ضربات ناشی از انفجار به خاک اطراف، روانگرایی خاک و در نهایت نشست مجدد خاک است. در خاک روانگرا شده، دانه‌ها به راحتی بر روی یکدیگر می‌لغزند و همزمان با مستهلک شدن اضافه فشار آب حفره‌ای تحت وزن خود و وزن لایه‌های بالایی متراکم می‌شوند [۱۵]. شکل (۲) انتشار امواج ناشی از شوک انفجار در جهت‌های مختلف به همراه انتقال امواج فشاری و برشی در توده‌ی خاک را نشان می‌دهد. با انجام اولین مرحله انفجار و استهلاک بخش عمده‌ی اضافه فشار حفره‌ای، تکرار عمل انفجار در فازهای بعدی باعث نشست اضافی خاک می‌گردد؛ مقدار نشست نهایی علاوه بر نحوه‌ی اجرای انفجار به سختی و دانسیته اولیه خاک نیز وابسته است. به بیان دقیق‌تر فاز اول انفجار، همه‌ی پیوندهای موجود در بین دانه‌های خاک (ناشی از سیمانتاسیون<sup>۹</sup> و یا سالخوردگی<sup>۱۰</sup>) را گسسته و فازهای بعدی، نشست بیشتر خاک را منجر خواهند شد.

بهسازی انفجاری در خاک‌های دانه‌ای اشباع با دانسیته‌ی نسبی کمتر از ۵۰٪ و درصد رس و سیلت به ترتیب کمتر از ۱۰٪ و ۷۰٪ نتایج مطلوب را در بر خواهد داشت. وجود ذرات ریزدانه

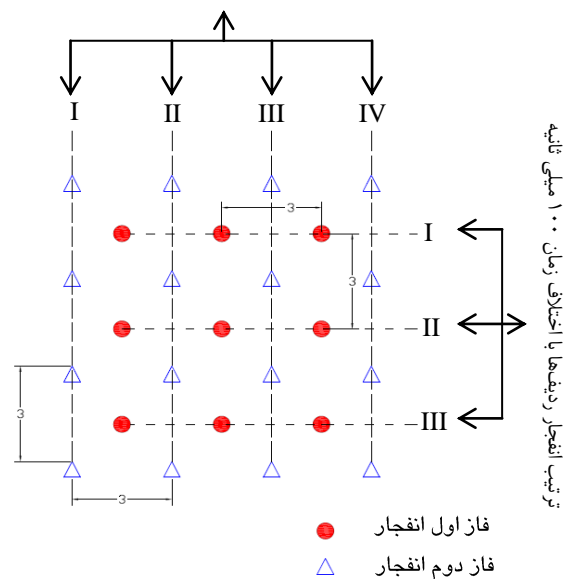


دیگر پارامترها و اثرات زیست محیطی انجام می‌پذیرد. شکل (۳) نمونه‌ای از پلان و مقطع چینش چاه‌های انفجاری را به همراه زمان‌بندی انفجار نشان می‌دهد.

### ۳- پارامترهای موثر در عملکرد بهسازی انفجاری

ایوانف در سال ۱۹۶۷ دستورالعملی را شامل تاریخچه مختصری از تراکم انفجاری، نحوه تراکم و تحقیقات قبل از خود پیرامون این موضوع، ارائه و همچنین دستورالعملی مبنی بر وضعیت قرارگیری چاه‌های انفجار و همچنین مقدار خرج‌های انفجاری ارائه نمود.

ترتیب انفجار ردیف‌ها با اختلاف زمان ۲۰۰ میلی‌ثانیه



(ب)

شکل (۳): (الف) نمایش چینش، فازبندی، ترتیب و زمان‌بندی چاه‌های انفجاری در پلان، (ب) نمایش چینش مواد منفجره و زمان‌بندی انفجار در مقطع

ایوانف فرض نمود که بر اثر انفجار یک تک چاه، حفره‌ای در سطح زمین ایجاد می‌شود و بر اساس این فرض پارامتری به نام شعاع موثر (Reff) را تعریف نمود. ایوانف شعاع موثر را فاصله‌ی افقی بین مرکز انفجار و نقطه‌ای دانست که مقدار نشست در آن کمتر از ۱ سانتیمتر است.

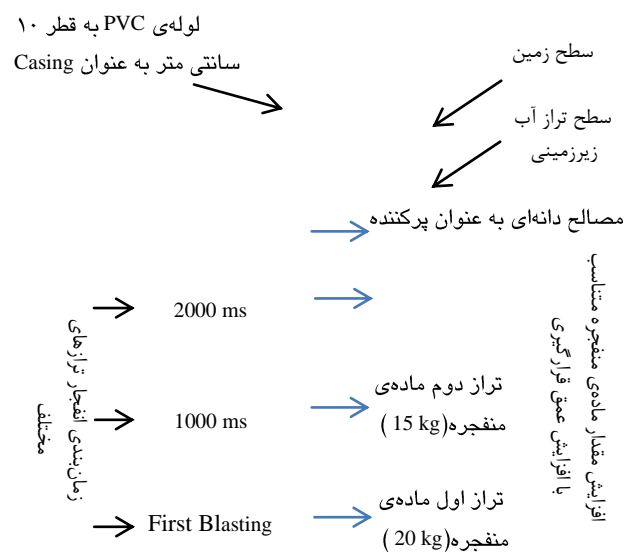
پس از وقوع انفجار، انرژی بین نقطه‌ی انفجار و نقطه‌ی مورد نظر از خاک مستهلک می‌شود. مقدار استهلاک انرژی به عوامل مختلفی مربوط شده که اغلب فاصله‌ی نقطه تا محل انفجار مهمترین معیار است. به‌طور کلی در مسائل انفجار، تابعی که استهلاک انرژی را توصیف می‌نماید به صورت  $R_h/W_m$  بیان می‌شود. که در آن  $R_h$  معرف فاصله از مرکز چاهک انفجار،  $W$  معرف مقدار ماده منفجره و  $m$  یک عدد ثابت است. محققین مختلف روابطی را برای استهلاک انرژی حاصل از انفجار در خاک ارائه نموده‌اند:

در تراکم انفجاری، عدد هاپکینسون ۱۱ (HN) متداول‌ترین روش برای توصیف استهلاک انرژی است. که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$HN = \frac{W^{1/3}}{R_h} \quad (1)$$

ایوانف در دستورالعمل خود عدد هاپکینسون را برای طراحی اولیه تراکم انفجاری مورد استفاده قرار داد. او برای تک چاه،  $R_{eff}$  را به عنوان  $R_h$  در نظر گرفت و هنگامی که چاه‌های انفجاری به

(الف)



حجم خاک مورد نظر در چینش مربعی پیشنهاد می‌گردد:

$$V = h_0(S)^2 \quad (5)$$

#### ۴- عوارض ژئوتکنیکی بهسازی انفجاری

نشست سریع سطح زمین پس از وقوع انفجار، ناشی از قرارگیری خاک در اسکلت فشرده‌تر و متراکم‌تری است. فوران آب ناشی از اضافه فشار آب ایجاد شده بر اثر جابه‌جایی ذرات و فشار گازهای انفجار در حدود چند دقیقه به طول می‌انجامد پس از آن جریان خروج آب به صورت آرام تا چندین ساعت ادامه خواهد داشت. در اطراف محل‌های فوران آب، اغلب پدیده‌ی جوشش ماسه رویت می‌شود و بعد از ۲۴ ساعت رخداد خاصی دیگر به وقوع نخواهد پیوست. مهم‌ترین عوارض ژئوتکنیکی حاصل از تراکم انفجاری شامل افزایش دانسیته نسبی خاک ( $D_r$ )، افزایش مقاومت خاک در برابر نفوذ و تغییر حجم خاک به صورت نشست لایه‌ی مورد نظر برای بهسازی است.

با توجه به قرارگیری خاک در حالت متراکم‌تر پس از بهسازی انفجاری، دانسیته‌ی نسبی خاک افزایش می‌یابد. به طور معمول هرچه خاک از جنبه‌ی مواد ریزدانه تمیزتر و دانسیته‌ی نسبی اولیه کمتری داشته باشد، میزان افزایش  $D_r$  پس از بهسازی انفجاری بیش‌تر خواهد بود. تراکم انفجاری به راحتی دانسیته‌ی نسبی در حدود ۳۰٪-۲۰٪ را در خاک‌های ماسه‌ای شل به بالای ۷۰٪-۶۰٪ می‌رساند. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های نفوذی مانند CPT&SPT قبل و بعد از انفجار، نشان می‌دهد؛ تراکم انفجاری می‌تواند تا حدود زیادی مقاومت خاک در برابر نفوذ و به دنبال آن ظرفیت باربری خاک را افزایش دهد. شکل (۴) نمونه‌ای از نتایج آزمایش CPT قبل و بعد از انجام بهسازی انفجاری را نشان می‌دهد. افزایش مقاومت خاک در برابر نفوذ، بلافاصله پس از انفجار حاصل نشده و تابعی از زمان خواهد بود. با گذشت زمان از رخ دادن انفجار، پیوندهای گسیخته شده بر اثر شوک ناشی از آن دوباره در بین ذرات خاک شکل گرفته و مقاومت خاک افزایش خواهد یافت. این پدیده می‌تواند چندین روز تا چندین ماه به طول انجامد [۶]، [۲۱].

صورت شبکه‌ی مربع شکل چیده شده بودند؛ نصف فاصله چاه‌ها را به عنوان  $R_h$  در نظر گرفت. همچنین معیاری ارائه نمود که بر اساس آن اگر بزرگی HN کمتر از ۰/۰۹ تا ۰/۱۵ (برای ماسه‌های تمیز) باشد؛ روانگرایی موردنظر برای تراکم انفجاری رخ نخواهد داد. جهت وقوع روانگرایی در خاک‌های سیلتی اشباع، چارلی و همکاران [۱۲] مقدار ۰/۳۳ را به عنوان عدد هاپکینسون مناسب گزارش نمودند. عدد هاپکینسون برای مواقعی که ماده انفجاری در یک نقطه متمرکز است، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. اما در مواقعی که یک ستون از مواد منفجره در کل ضخامت لایه مورد نظر بکار می‌رود، رابطه (۲) توسط محققین مختلف به عنوان تابع استهلاک انرژی معرفی شده است:

$$NW = \frac{Q^{1/2}}{R_h} \quad (2)$$

$$Q = \frac{W}{h_0}$$

که در آن  $W$  وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم و  $h_0$  ضخامت لایه مورد نظر بر حسب متر است. در دستورالعمل منتشر شده توسط این محققین برای تک چاه،  $R_{eff}$  را به عنوان  $R_h$  در نظر گرفته و هنگامی که چاه‌های انفجاری به صورت شبکه‌ی مربع شکل چیده شده بودند نصف فاصله چاه‌ها به عنوان  $R_h$  در رابطه وارد خواهد شد.

یکی دیگر از روش‌ها برای توصیف استهلاک انرژی ناشی از انفجار استفاده از فاکتور پودر است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$PF = \frac{1000W}{V} \quad (3)$$

که در آن، PF: فاکتور پودر بر حسب گرم بر متر مکعب  $W$ : وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم  $V$ : حجمی از خاک، بر حسب متر مکعب، که با مقدار ماده منفجره مشخص بهسازی می‌شود

حجم خاک بکار رفته در این رابطه تابعی از  $R_h$  (فاصله مواد منفجره تا نقطه‌ی مورد نظر) و ضخامت لایه مورد بهسازی برای مقدار معینی از ماده‌ی منفجره است. به عنوان مثال برای یک تک چاه انفجاری با فرض آن‌که حجم خاک مورد نظر را به صورت استوانه‌ای در اطراف چاه در نظر بگیریم؛ خواهیم داشت:

$$V = \pi R_h h_0 \quad (4)$$

که در آن،  $R_h$ : فاصله افقی از مرکز ستون مواد منفجره و یا چاهک حاوی مواد منفجره بر حسب متر

$h_0$ : ضخامت لایه خاک مورد بهسازی بر حسب متر

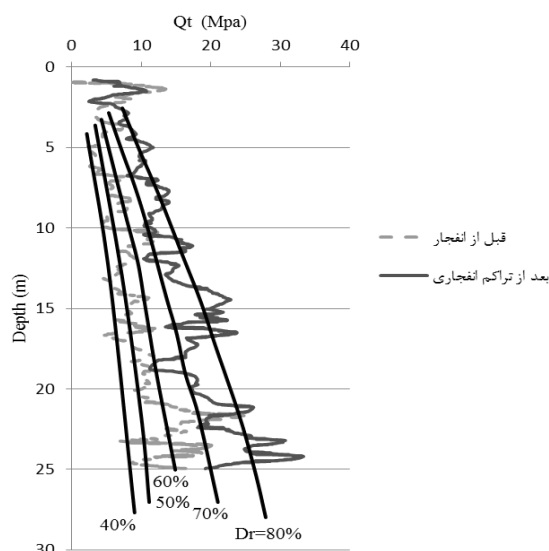
به طور کلی عامل ( $V$ ) را می‌توان وابسته به طرح چینش چاه‌ها و فاصله بین آن‌ها ( $S$ ) دانست. رابطه (۵) برای محاسبه

پارامتر فاکتور پودر، با توصیف فیزیکی مناسب تر و در نظر گرفتن ضخامت لایه‌ی مورد بهسازی، معیار بهتری نسبت به دو پارامتر قبلی محسوب می‌شود. علاوه بر متغیرهای ذکر شده، عواملی همچون: عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره، تعداد فازهای اجرای تراکم انفجاری، نوع خاک، دانسیته‌ی اولیه‌ی خاک و همچنین زمان‌بندی انفجار نیز در میزان نشست نهایی موثر است که در روابط موجود تاثیر آن‌ها دیده نشده است. به همین دلیل رابطه‌ای مطلوب است که با استفاده از پارامتر مناسبی مانند فاکتور پودر (PF) و در نظر گرفتن اثر متغیرهای دیگری که در بالا به آن‌ها اشاره شد، میزان نشست نهایی را با دقت مناسبی پیش‌بینی نماید.

#### ۵- بانک اطلاعاتی و موارد عملی

برای بررسی تاثیر عوامل مختلف در میزان نشست نهایی حاصل از بهسازی انفجاری، ۱۸ سایت از کشورهای گوناگون انتخاب شد، شش سایت از ایالات متحده، از کشورهای هلند، فرانسه، کانادا، لهستان، برزیل، بلژیک و نیجریه هر کدام یک سایت، دو سایت از روسیه و در نهایت سه سایت نیز در هندوستان، خاک موجود در سایت‌ها گستره‌ی ماسه‌های آبرفتی ریز تا شن و قلوه سنگ را در بر می‌گیرد. حداکثر تراز آب زیرزمینی در عمق ۱ متری از سطح زمین قرار گرفته است. ضخامت لایه‌های مورد نظر جهت بهسازی در اغلب سایت‌ها بین ۳ تا ۱۰ متر قرار دارد ولی در تعدادی از موارد عملی این ضخامت فراتر رفته و به ۴۰ متر نیز می‌رسد.

طراحی تراکم انفجاری به صورت شبکه‌هایی با چینش مربعی و یا مثلثی در یک یا چندین فاز (حداکثر ۴ فاز) انجام شده است. فاصله‌ی چاه‌های انفجار با توجه به محدودیت‌های هر سایت از نظر بکارگیری مقدار ماده‌ی منفجره، متغیر است. در برخی از سایت‌ها از شبکه چاه‌هایی با فواصل کم در حدود ۳ تا ۶ متر و در بعضی دیگر فواصل چاه‌ها تا حد ۱۵ متر نیز افزایش یافته و در عوض هر چاه با مقدار ماده‌ی منفجره‌ی بیشتری بارگذاری شده است. نوع مواد منفجره بسیار متنوع بوده و در هر کشوری با توجه به میزان دسترسی به هر یک از مواد از آن استفاده شده است. خلاصه‌ای از اطلاعات مربوط به بهسازی انفجاری اجرا شده در هر مورد عملی در ضمیمه (۱) آورده شده است.



شکل (۴): تاثیر تراکم انفجاری در افزایش مقاومت نوک CPT و افزایش دانسیته‌ی نسبی (مربوط به مورد عملی شماره‌ی (۱) داده‌های CPT اقتباس از روگرس و همکاران<sup>۱۳</sup> (۱۹۹۰))

نشست سطحی حاصل از تراکم انفجاری موفق، بین ۲ تا ۱۰ درصد از ضخامت لایه مورد بهسازی متغیر است. این در حالی است که نشست حاصل از روانگرایی بعد از زلزله چیزی در حدود ۳/۵ تا ۴/۵٪ از ضخامت لایه ماسه‌ای را شامل می‌شود.

اندازه‌گیری نشست، سطحی یک راه معمول برای سنجش عملکرد تراکم انفجاری است، زیرا این سنجش ارزان و سریع اتفاق می‌افتد. در برخی موارد که لایه مورد نظر در عمق قرار گرفته است، وجود پدیده‌ی طاق‌زدگی در لایه‌های بالایی، مانع از بروز نشست سطحی می‌گردد. در این مواقع باید با استفاده از سنجش نشست در عمق و همچنین همراه نمودن EC با روش‌های دیگر بهسازی نیمه عمیق (مثلا DC) مانع از تاثیر طاق‌زدگی در محاسبه‌ی مقدار دقیق نشست شد

محققین مختلفی تاکنون با بررسی موارد تجربی روابطی را جهت پیش‌بینی مقدار نشست نهایی حاصل از تراکم انفجاری، ارائه نموده‌اند. در جدول (۲) به تعدادی از این روابط اشاره شده است. در تمامی معادلات سعی شده که نشست نهایی به کل مقدار ماده‌ی منفجره و فواصل چاه‌های انفجاری مرتبط شود. پارامترهای عددی هاپکینسون (HN)، وزن نرمال (NW) و فاکتور پودر (PF)، متغیرهای گفته شده شامل ماده‌ی منفجره مصرفی و فواصل چاه‌ها، را دربر دارند و در روابط پیش‌بینی نشست از آن‌ها استفاده می‌شود.

جدول (۲): روابط ارائه شده برای تخمین میزان نشست نهشته‌های بهسازی شده با روش تراکم انفجاری ××

توضیحات	را بطة پیشنهادی	مرجع
مربوط به نتایج تراکم انفجاری در بندر آمستردام هلند	$\Delta h = 2.73 + 0.9 \ln(HN)$	
مربوط به نتایج حدود ۳۰ تراکم انفجاری به صورت گروهی و یا تک چاه	$\Delta h = 7.54 + 6.87 \log(HN)$	
مربوط به نتایج حدود ۳۰ تراکم انفجاری به صورت گروهی و یا تک چاه	$\Delta h = 8.89(HN)^{0.816}$	
مربوط به نتایج حدود ۳۰ تراکم انفجاری به صورت گروهی و یا تک چاه	$\Delta h = 10.19 + 7.22 \log(NW)$	
مربوط به نتایج حدود ۳۰ تراکم انفجاری به صورت گروهی و یا تک چاه	$\Delta h = 18.52(NW)^{0.862}$	
مربوط به نتایج حدود ۳۰ تراکم انفجاری به صورت گروهی و یا تک چاه	$\Delta h = -1.02 + 3.96 \log(PF)$	
مربوط به نتایج حدود ۳۰ تراکم انفجاری به صورت گروهی و یا تک چاه	$\Delta h = 0.843(PF)^{0.476}$	
W وزن ماده منفجره، $\rho$ چگالی جرمی ماده منفجر شونده، h ضخامت لایه مورد بهسازی به متر و R نصف فاصله چاهک‌های انفجاری، K یک ضریب تجربی که برای ۹ سایت بررسی شده بین ۸۰ تا ۱۲۰ را شامل می‌شود. هرچه خاک درشت دانه‌تر باشد K مقادیر بزرگتری را شامل می‌شود.	$\Delta h = K(w/\rho)^{0.5} h^{-0.5} R^{-1}$	

\*\*\*  $\Delta h$  موجود در روابط، درصد نشست نسبت به ضخامت لایه‌ی مورد بهسازی را بیان می‌نماید

انرژی، با قرار دادن فاصله‌ی چاه‌ها در رابطه (۵) و قرار دادن نتیجه‌ی حاصل به همراه وزن ماده‌ی منفجره در رابطه (۳)، این پارامتر برای تمام سایت‌ها و در هر فاز انفجار به صورت جداگانه محاسبه شده است. پس از محاسبه‌ی فاکتور پودر در هر فاز، مجموع فاکتور پودرهای کلیه فازها در ستون فاکتور پودر کل و میانگین فاکتور پودر مربوط به فازهای انفجار در ستون فاکتور پودر متوسط آمده است. هدف از این پژوهش ارزیابی روابط ارائه شده (بر مبنای فاکتور پودر) توسط محققین مختلف و ارائه‌ی رابطه‌ی جدیدی با شمول فاکتورهای دیگر است. رابطه‌ی جدید ارائه شده با وارد ساختن همزمان تاثیر فاکتور پودر متوسط، تعداد مراحل انفجار و عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره در نشست نهایی، ارزیابی کامل‌تری را نسبت به روابط جاری در تخمین نشست‌ها ارائه می‌دهد.

## ۶- ارزیابی نشست حاصل از انفجار

بر اساس داده‌های بانک اطلاعاتی جمع‌آوری شده، روابط موجود پیش‌بینی مقدار نشست بر مبنای فاکتور پودر، مورد بررسی قرار گرفته و شکل بهینه‌تر آن ارائه می‌شود. به‌منظور بهینه‌سازی و بدست آوردن ضرائب جدید برای این روابط از برنامه‌ی لینگو<sup>۴</sup> استفاده شده است. لینگو برنامه‌ی جامعی است که به زبان قدرتمندی برای بهینه‌سازی مدل‌ها مجهز است. محیط کاملاً گرافیکی برای ساخت، اصلاح و تنظیم سریع جهت حل مسئله از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد این برنامه است.

خلاصه‌ی اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی مندرج در شامل نام پروژه، نوع خاک، ضخامت لایه‌ی مورد بهسازی، تعداد مراحل انفجار، فواصل چاه‌های انفجار، وزن ماده‌ی منفجره در هر چاهک انفجار در هر فاز به صورت جداگانه، عمق قرارگیری مرکز جرم ماده‌ی انفجاری در هر فاز به صورت جداگانه، نوع ماده‌ی منفجره و میزان نشست حاصل از بهسازی انفجاری است. با تحلیل بر روی داده‌های بانک اطلاعاتی پارامترهای: متوسط عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره، فاکتور پودر مصرفی در هر فاز انفجاری، کل فاکتور پودر مصرفی، فاکتور پودر متوسط و درصد نشست لایه مورد بهسازی، محاسبه و درج گردیده است. در ادامه به طور کلی نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای

نشست ناشی از تراکم انفجاری در موارد عملی جمع‌آوری شده مورد توجه قرار گرفت. جهت برآورد دقیق‌تر از میزان نشست نهایی، نشست گزارش شده بر ضخامت لایه مورد بهسازی تقسیم شده و نتیجه به صورت درصد نشست ارائه شد. در مواردی که ماده‌ی منفجره به صورت ستونی و یا در چندین تراز بکار رفته بود؛ با میانگین‌گیری وزنی، عمق قرارگیری مرکز جرم ماده‌ی منفجره محاسبه و برای هر فاز جداگانه وارد گردید.

با میانگین‌گیری وزنی از عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره در هر فاز، مقدار متوسط عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره برای آن سایت محاسبه و در ستون مربوط به آن ثبت شده است. با توجه به مزیت فاکتور پودر (PF) نسبت به دیگر پارامترهای استهلاک

جدول (۳): مقادیر ثابت مربوط به روابط تخمین نشست بر مبنای فاکتور پودر

مقادیر ثابت	رابطه توانی (Narin, 1997)	رابطه لگاریتمی بهینه شده	رابطه توانی (Narin, 1997)	رابطه توانی بهینه
a <sub>1</sub>	-1.02	0.166	-	-
a <sub>2</sub>	3.96	2.248	-	-
b <sub>1</sub>	-	-	0	0.726
b <sub>2</sub>	-	-	0.843	0.175
b <sub>3</sub>	-	-	0.476	0.755

### ۷- اعتبارسنجی روابط پیشنهادی

در این بخش، دقت روابط ارائه شده قبلی، روابط بهینه شده و فرمولاسیون جدید مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور پارامترهای، میانگین قدر مطلق خطای نسبی (AARE) و انحراف معیار استاندارد (SD) را طبق روابط (۱۰) و (۱۱) داریم:

$$AARE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{i,cal} - X_{i,exp}}{X_{i,exp}} \right| \quad (10)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \left| \frac{X_{i,cal} - X_{i,exp}}{X_{i,exp}} \right| - AARE \right)^2} \quad (11)$$

مقادیر پارامترهای مذکور برای روابط قبلی، بهینه سازی شده و همچنین رابطه‌ی جدید در جدول (۴) آورده شده است:

جدول (۴): دقت روابط مورد بررسی برای داده‌های بانک اطلاعاتی مورد مطالعه

رابطه‌ی پیشنهادی	AARE	SD
Narin, van Court, 1997 [I] (رابطه ی لگاریتمی)	48%	0.53
Narin, van Court, 1997 [II] (رابطه توانی)	38%	0.44
رابطه‌ی لگاریتمی بهینه شده	32%	0.38
رابطه‌ی توانی بهینه شده	28%	0.27
رابطه‌ی پیشنهادی (۹)	25%	0.24

شکل (۵) نمودارهایی را جهت مقایسه‌ی میزان دقت و پراکندگی روابط مورد بررسی ارائه می‌دهد. محور افقی این نمودارها نشانگر درصد نشست واقعی اندازه‌گیری شده در موارد عملی، و محور قائم آن نشانگر مقدار درصد نشست پیش‌بینی شده توسط هر رابطه است. جهت بررسی میزان تطبیق نتایج

در برنامه‌ی نوشته شده جهت دستیابی به فرمولاسیون بهینه با استفاده از داده‌های بانک اطلاعاتی، کمینه شدن مجموع خطاهای نسبی به عنوان مبنای بهینه‌سازی قرار گرفت.

رابطه‌ی (۶) تابع هدف جهت کمینه‌سازی را نشان می‌دهد:

$$\text{Min} \left( \sum \frac{\Delta h_{\text{measured}} - \Delta h_{\text{predicted}}}{\Delta h_{\text{measured}}} \right) \quad (6)$$

که در آن  $\Delta h_{\text{measured}}$  درصد نشست واقعی لایه‌ی مورد بهسازی نسبت به ضخامت اولیه و  $\Delta h_{\text{predicted}}$  درصد نشست تخمینی توسط هر رابطه است. صورت کلی روابط تخمین نشست بر مبنای کل فاکتور پودر مصرفی در طی چندین فاز تراکم انفجاری در یک سایت را می‌توان به صورت روابط (۷) و (۸) نوشت. با استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی، ضرائب جدیدی برای روابط زیر بدست می‌آید که در

جدول (۳) نمایش داده شده است:

$$\Delta h = a_1 + a_2 \log(PF) \quad (7)$$

$$\Delta h = b_1 + b_2 (PF)^{b_3} \quad (8)$$

در مرحله‌ی دوم با استفاده از داده‌های جدول (۳)، روابط مختلف و حالت‌های متعدد قرارگیری فاکتور پودر متوسط، تعداد فاز انفجار و عمق متوسط قرارگیری مرکز جرم ماده‌ی منفجره در کنار هم مورد بررسی قرار گرفت. ضرائب و توان‌های مربوط به هریک از پارامترها با استفاده از رگرسیون غیر خطی بدست آمده و در پایان رابطه‌ی انتخاب گردید که مقادیر AARE<sup>۱۵</sup> و SD<sup>۱۶</sup> حداقلی را نسبت به دیگر روابط داراست. رابطه‌ی جدید (رابطه‌ی (۹)) که در آن تاثیر عمق مرکز جرم قرارگیری ماده‌ی منفجره و تعداد فازهای انفجار، وارد شده در زیر آمده است. در این رابطه به جای استفاده از کل فاکتور پودر مصرفی، همانطور که عنوان شد، از متوسط فاکتور پودر مصرفی در فازهای مختلف تراکم انفجاری استفاده شده است.

$$\Delta h = \frac{1.0735(\overline{PF})^{0.57}(1.52^{\log(N)})}{D^{0.205}} \quad (9)$$

که در آن  $\Delta h$ : درصد نشست لایه مورد بهسازی نسبت به ضخامت اولیه

$\overline{PF}$ : فاکتور پودر متوسط بین فازهای تراکم انفجاری

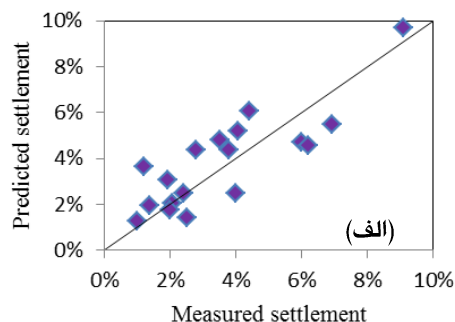
N: تعداد فاز تراکم انفجاری

D: عمق متوسط مرکز جرم قرارگیری ماده منفجره، بر

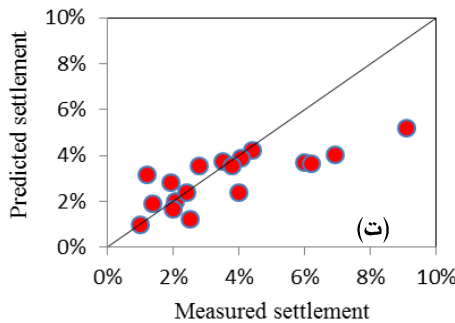
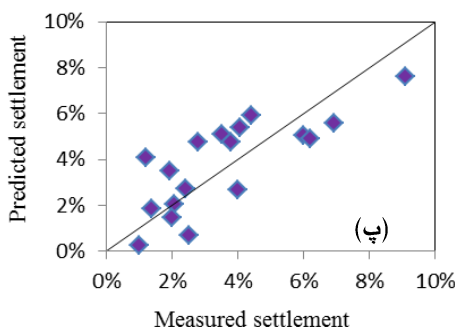
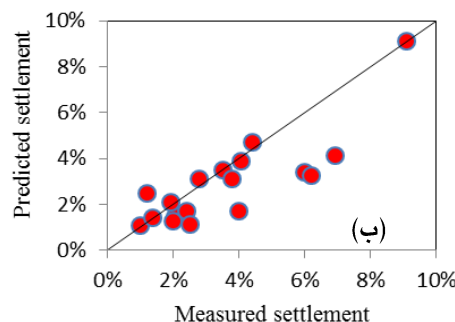
حساب متر، در بین فازهای تراکم انفجاری



روی خط ۴۵ درجه، بیانگر دقت بیشتر هر رابطه در تخمین صحیح میزان نشست حاصل از تراکم انفجاری می‌باشد.



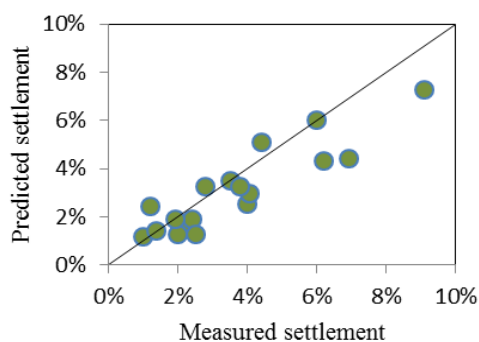
حاصل از روابط با مقادیر واقعی، خط ۴۵ درجه در هر نمودار رسم گردید (برابری و نزدیکی هرچه بیشتر نقاط دایره‌ای بر



شکل (۵) : میزان برابری نتایج روابط پ تخمین نشست بر مبنای فاکتور پودر، با نتایج حاصل از موارد عملی: الف) نارین ۱۷ (۱۹۹۷) | رابطه‌ی توانی، ب) رابطه‌ی توانی بهینه شده، پ) نارین (۱۹۹۷) (رابطه‌ی لگاریتمی)، ت) رابطه‌ی لگاریتمی بهینه شده.

مورد نمودار (ت) به وضوح دیده می‌شود. کمبود تعداد داده‌ها در درصد نشست‌های بالای ۶٪ باعث شده که پیش‌بینی روابط دقت مناسبی نداشته باشد.

شکل (۶) میزان برابری مقادیر تخمینی توسط رابطه‌ی پیشنهادی را با موارد واقعی حاصل از بانک اطلاعاتی به خوبی نشان می‌دهد.



شکل (۶): میزان تطبیق نتایج حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی با نتایج حاصل از مواد عملی

با توجه به جدول (۴) و شکل (۶)، کم‌ترین مقادیر AARE و SD مربوط به رابطه‌ی پیشنهادی می‌باشد. بنابراین، دقت این رابطه نسبت به روابط پیشین بیشتر بوده و میزان پراکندگی داده‌ها کاهش یافته است. با توجه به شکل (۶) در می‌یابیم که

رابطه‌ای که به صورت لگاریتمی توسط نارین (۱۹۹۷) ارائه شده، AARE بیش‌تری را نشان می‌دهد. مقادیر تخمین زده توسط این رابطه تنها در یک مورد با موارد عملی سازگاری نشان می‌داد و همانطور که در نمودار رسم شده برای این رابطه (شکل (۵) نمودار (پ)) پیداست، پراکندگی نتایج تخمینی زیاد بوده که مقدار SD برابر با ۰/۵۳ نیز بیانگر همین مطلب است. رابطه‌ای که به صورت توانی توسط این محقق ارائه شده نسبت به رابطه‌ی لگاریتمی، خطا و پراکندگی کم‌تری را شامل می‌شود اما، با توجه به نمودار رسم شده برای این رابطه (شکل (۵) نمودار (الف)) در بسیاری از موارد میزان مقادیر حاصل از این رابطه بیش‌تر از مقدار واقعی است.

در روابط بازنگری شده با استفاده از ثابت‌های جدید که شکل کلی آن‌ها شبیه روابط ارائه شده توسط نارین (۱۹۹۷) است، پراکندگی مقادیر تخمینی نسبت به مقادیر واقعی کم‌تر شده و با توجه به مقادیر AARE مندرج در جدول (۴) دقت بیش‌تری را بدست می‌دهند. با توجه به نمودارهای رسم شده برای این روابط (شکل (۵) نمودارهای (ب) و (ت)) می‌توان دریافت که هرچند تعداد بیش‌تری از تطبیق نقاط بر خط ۴۵ درجه دیده می‌شود ولی در برخی از نقاط، مقادیر درصد نشست پیش‌بینی شده به مقدار قابل توجهی کم‌تر از مقادیر واقعی است که این مطلب در

بر مبنای رابطه‌ی پیشنهادی برای تخمین نشست، ارتباط عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره و فاکتور پودر به صورت معکوس است. با افزایش عمق قرارگیری (D) لایه‌ی بهسازی، مقدار فاکتور پودر نیز به نسبت مشخصی افزایش می‌یابد. همچنین باتوجه به وضعیت قرارگیری تعداد فازهای انفجار (N) در رابطه‌ی پیشنهادی، این نتیجه حاصل می‌شود که تاثیر فازهای اول و دوم انفجار در نشست نهایی به مراتب بیش‌تر از فازهای بعدی است.

رابطه‌ی پیشنهادی در مقادیر درصد نشست بالای ۶٪ نیز با دقت بهتری نسبت به دیگر روابط عمل نموده است. در نهایت می‌توان گفت این رابطه با واردکردن پارامترهای موثر عمق قرارگیری خرج انفجاری و تعداد فازهای انفجار درکنار بکارگیری فاکتور پودر متوسط، جهت پیش‌بینی درصد نشست نهایی حاصل از تراکم انفجاری رابطه‌ی مناسب‌تری است.

## ۷- نتیجه‌گیری

عوامل عمده از قبیل نوع خاک، دانسیته‌ی اولیه، چینش چاه‌های انفجار، مقدار و عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره، تعداد فازها و زمان‌بندی انفجار، در عملکرد بهسازی انفجاری به‌عنوان یک تکنیک اصلاح خاک در عمق موثر می‌باشد که نتیجه‌ی این تکنیک بهسازی نشست لایه‌ها در گستره‌ی کار، افزایش ظرفیت باربری و همچنین دانسیته‌ی نسبی خاک است. در میان عوارض ژئوتکنیکی ناشی از بهسازی انفجاری، اندازه‌گیری نشست سطحی، یک راه معمول برای سنجش عملکرد این شیوه و ارزیابی کفایت آن است. علاوه بر سادگی، ارزانی و سرعت اندازه‌گیری تغییرات حجمی، فاکتور نشست در میان شاخص‌های ژئوتکنیکی عاملی عمده در طراحی زیرسازی‌ها محسوب می‌شود. معیارهای مختلفی برای بیان میزان انرژی مصرفی در تراکم انفجاری ارائه شده است. در این میان فاکتور پودر به علت در برداشتن همزمان فاصله‌ی چاه‌ها، ضخامت لایه مورد بهسازی و مقدار ماده‌ی منفجره، معیار مناسب‌تری است. در این پژوهش نتایج حاصل از تراکم انفجاری در ۱۸ سایت مختلف از کشورهای آمریکا، کانادا، برزیل، هند و غیره، گستره‌ی بهسازی در اعماق، وضعیت چینش چاه‌های انفجار و عوامل موثر در طراحی بهسازی انفجاری، مورد بررسی قرار گرفت. بهسازی انفجاری در این سایت‌ها نشستی در حدود ۲ تا ۱۰٪ ضخامت لایه مورد بهسازی ایجاد کرده بود. با تحلیل این نتایج، ضمن ارزیابی و بهینه‌سازی روابط موجود برای پیش‌بینی نشست نهایی در اثر بهسازی انفجاری، رابطه‌ی جامع‌تر ارائه شد.

استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی در ارائه‌ی روابط با استفاده از داده‌های تجربی منجر به افزایش دقت روابط نهایی می‌گردد. در راستای مطالعات، رابطه‌ی جهت تخمین نشست ارائه شد که ضمن تاثیر همزمان، عمق متوسط خرج انفجاری، تعداد فازهای انفجار و متوسط فاکتور پودر مصرفی، تطابق خوبی را با نتایج واقعی نشان می‌دهد. برای اعتبارسنجی رابطه‌ی ارائه شده از دو پارامتر AARE (میانگین قدر مطلق خطای نسبی) و SD (انحراف معیار استاندارد) استفاده گردید. مقدار این دو پارامتر برای این رابطه به ترتیب ۲۵٪ و ۰/۲۴ بود که نشان از دقت قابل قبول رابطه‌ی ارائه شده است.

## ۸-مراجع

- [۱] Narsilio. Guillermo A.; Carlos Santamarina. J.; Hebler. T.; and Bachus. R.; "Blast Densification: Multi-Instrumented Case History", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE, pp 723-734, JUNE, 2009.
- [۲] Gohl. W. B.; Jefferies M. G. and Jefferies, M. G., [4]Howie. J. A.; Digge. D.; "Explosive Compaction: design, implementation and effectiveness", Geotechnique, pp. 657-667, 2000.
- [۳] Narin van Court, W. A.; Mitchell, J. K.; "Soil improvement by blasting", J. Explosives Eng, 12 3 ,pp. 34-41, 1995.
- [۴] Gnadhi, S.; Dey, A.; Selvam, S.; "Densification of pond ash by blasting", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 125 10, pp. 889-899, 1999.
- [۵] Solymar, Z. V.; "Compaction of alluvial sands by deep blasting", Can. Geotech. J., 21, pp. 305-321, 1984.
- [۶] Murray. P.; Singh. N. k.; Huber. F.; Siu. D.; "Explosive Compaction for the Seymour Falls Dam Seismic Upgrade", Proc. on the 59th Canadian Geotechnical Conference, 2006.
- [۷] Van Impe, W. F.; "Soil improvement techniques and their evolution", Brookfield Publishers, Rotterdam, The Netherlands, 1989.
- [۸] La Fosse, U.; "Improvements by deep blasting: Marine Corps Reserve Training Center ", Westover Air Reserve Base, 2002.

- Imiolek, R.; "Compaction of water-saturated soils by blasts from elongated charges translated from Russian", Osnovaniya, Fundamenty Mekhanika Gruntov, 29 4 , pp. 24-26, 1992.
- Mitchell, J. K.; "Soil improvement: State-of-the-Art", Proc, 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10th IC- SMFE, pp. 509-565, 1981.
- Ishihara, k.; M. Y.; "Evaluation of settlements In sand deposits following liquefaction during earthquakes", Soils and foundation. Vol , pp. 173-188, 1992.
- Kok, L., "Explosion-densification and vertical drainage as soil consolidation Techniques for Harbour Building", Proc. on 7th International Harbour Congress, Antwerp, pp. 1.04/01-07, 1978.
- LINDO Systems Inc.; LINGO manual, 2011.
- Dembicki, E.; Kisielowa. N.; "Technology of Soil Compaction by Means of Explosion", Proc. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol 1, pp 229-230, 1983.
- Minaev. O. P.; "Effective compaction of water-saturated soils by blasting translated from Russian", Osnovaniya, Fundamenty Mekhanika Gruntov, pp.17-19, 1993.
- Hachey, Joseph E.; Plum, Robert L.; Byrne, R.John.; Kilian, Alan P.; Jenkins.; "Blast densification of a thick, loose debris flow at Mt. St. Helen's, Washington", Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, TX, USA. pp. 502-512, 1994.
- Rogers, B. T.; Graham, C. A.; and Jefferies, M. G.; "Compaction of hydraulic fill sand in Molikpaq core", Proc., Prediction and Performance in Geotechnique, 43rd Canadian Geotechnical Conf. pp. 567-575, 1990.
- Ashford, S. A.; Rollins, K. M.; and Lane, D.; "Blast-induced liquefaction for fullscale foundation testing", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 130 8 .pp.798-806, 2004.
- Al-Qasimi, E. M. A.; Charlie, W. A.; and Woeller, D. J.; "Canadian liquefaction experiment CANLEX : Blast-induced ground motion and pore pressure experiments", Geotech. Test. J., 28 1. pp .9-2, 2005.
- Dowding, C. H.; and Hryciw, R. D.; "A laboratory study of blast densification.", J. Geotech. Eng., 112 2 , pp.187-199, 1986.
- Narin van Court, W. A.; "Explosive compaction revisited: New guidance for performing blast densification", Proc,12th Pan-American Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 39th U. S. Rock Mechanics Symp, pp. 1725-1730, SARA, 2003.
- Ivanov, P. L.; "Compaction of Noncohesive Soil by Explosion", National Technical Information Service Report No. TT 70-57221, US. Dept. of Commerce, Springfield, VA, 211P, 1967.
- Ivanov, P. L.; "Prediction and control techniques to compact loose soils by explosions", Proc. 8th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 253-254, 1983.
- Charlie, W. A.; Rwebyogo, M. F. J.; Doehring, D. O.; "Time- dependent cone penetration resistance due to blasting", J. Geotech. Engrg., 1188 , pp.1200-1215, 1992.
- Dembicki, E.; Imiolek, R.; and Kisielowa, N.; "Soil compaction with the blasting method", Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 599-622, 1992.

۹- ضمیمه (۱): بانک اطلاعاتی و آنالیز داده

ردیف	نام پروژه	موقعیت	ضخامت لایه (m)	نوع خاک	تعداد مراحل انفجاری	فاصله چاه‌ها (m)	وزن خرج انفجاری در هر مرحله در هر چاه (kg)	عمق مرکز جرم ماده منفجره (m)	متوسط قرارگیری خرج انفجار (m)	نوع ماده منفجره	فاکتور پودر (gr/m <sup>3</sup> )	کل فاکتور پودر (gr/m <sup>3</sup> )	فاکتور پودر متوسط (gr/m <sup>3</sup> )	درصد نشست لایه	
1	پلیت فرم سکوی نفتی Molikpaq I	[۱۲]	13	ماسه ریز تا متوسط، آبرفتی	2	6	11.64	16.67	15.80	Nitropel	24.87	51.37	25.86	6.9%	
			13			6	12.57	15	26.86						
2	بندر Sete در فرانسه	[۳]	13	ماسه انباشته شده، آبرفتی	1	4	2	8.67	8.67	Gelatine Dynamite	9.62	9.62	9.62	4%	
3	بندر Gdansk در لهستان	[۲۶]	7	ماسه ریز تا متوسط	2	7	7	6	6.1	safety powder	20.41	34.99	17.49	6.2%	
			7			7	5	5	14.58						
4	برج نیروگاه در ماساچوست	[۳]	6.1	ماسه ریز تا بسیار ریز و یکنواخت	4	6.1	1.8	3.66	3.55		Dynamite 60%	7.93	62.69	15.67	4.4%
			6.1			1.8	3.66	15.96							
			6.1			1.8	3.66	32.79							
			6.1			0.33	1.82	6.01							
5	پروژه شماره ۷ فلوریدا	[۳]	3	ماسه ریز، آبرفتی	1	4.6	2.27	5.56	5.56	؟	37.53	37.53	37.53	6%	
6	بندر آمستردام در کشور هلند (۱)	[۲۴]	15	نهشته‌های آبرفتی و شل با دانه‌بندی یکنواخت	1	16	10	8.75	8.75	؟	3	3	3	2.5%	
7	سد Rio Casca در برزیل	[۳]	17	ماسه ریز به همراه قلوه سنگ	1	10	4	7.5	7.5	Dynamite 60%	2.35	2.35	2.35	1%	
8	تراکم پسماندهای نیروگاه حرارتی در ایالت نانومی هند (Part A)	[۷]	12	ماسه وسیلت بسیار سست	2	26	16.7	9	9	سدیم نیترات + آمونیوم نیترات + پودر آلومینیوم	2.36	4.72	2.36	2%	
			12			26	16.7	9			2.36				

۹-ادامه ضمیمه (۲): بانک اطلاعاتی و آنالیز داده ها

ردیف	نام پروژه	موقع	ضخامت لایه (m)	نوع خاک	تعداد مراحل انفجاری	فاصله چاه‌ها (m)	وزن خرج انفجاری در هر مرحله در هر چاه (kg)	عمق مرکز جرم ماده منفجره (m)	معمق انفجار (m)	نوع ماده منفجره	فاکتور پودر (gr/m <sup>3</sup> )	کل فاکتور پودر (gr/m <sup>3</sup> )	فاکتور پودر متوسط (gr/m <sup>3</sup> )	درصد نشست لایه
9	تراکم پسماندهای نیروگاه حرارتی در ایالت نائومی هند (Part B)	[۷]	12	ماسه و سیلت بسیار ریز	2	2 2	16.7	9	9	سدیم نیترات+ آمونیوم نیترات+ پودر آلومینوم	3.3	6.6	3.3	2.1%
			12			2 2	16.7	9		3.3	3.3			
10	تراکم پسماندهای نیروگاه حرارتی در ایالت نائومی هند (Part C)	[۷]	12	ماسه و سیلت سست	2	1 8	16.7	9	9	سدیم نیترات+ پودر آلومینوم	4.93	9.86	4.93	2.4%
			12			1 8	16.68	9		4.93	4.93			
11	سیل شکن St.Petersburg روسیه (۱)	[۲۷]	7.5	ماسه درشت تا متوسط	4	1 0	6	5	5	?	8	32	8	2.8%
12	سیل شکن St.Petersburg روسیه (۲)	[۲۷]	7.5	ماسه درشت تا متوسط	4	1 0	6	5	5	?	8	32	8	3.1%
13	پروژه Chicopee I	[۱۱]	9.1	ماسه ریز تا متوسط آبرفتی	2	1 5 8	6.8	10.6 5	10.65	Dynami <sup>e</sup>	3	6	3	1.4%
			9.1			9.1	3	3						
14	سد جبا Zone1	[۸]	15	شن، ماسه درشت و سست	3	1 0	25	39	39	Gelatine80%	16.6 7	46	15.33	4.1%

۹- ادامه ضمیمه (۳): بانک اطلاعاتی و آنالیز داده ها

درصد نشست لایه	فاکتور پودر متوسط (gr/m <sup>3</sup> )	کل فاکتور پودر (gr/m <sup>3</sup> )	فاکتور پودر (gr/m <sup>3</sup> )	نوع ماده منفجره	متوسط عمق خراج انفجار (m)	عمق مرکز چرم ماده منفجره (m)	وزن خراج انفجاری در هر مرحله در هر چاه (kg)	فاصله چاه ها (m)	تعداد مراحل انفجاری	نوع خاک	ضخامت لایه (m)	نوع	نام پروژه	ردیف
9.1 %	42.08	168.35	42.65	Hydromit 860	10	10	19	9	4	ماسه ریز و سست با درصد اندک سیلت و رس (SP)	5.5	[۴]	سایت آزمایشی واقع در کارولینای جنوبی	15
			76.32			10	34	9			5.5			
			24.69			10	11	9			5.5			
			24.69			10	11	9			5.5			
1.9 %	3.81	15.24	3.65	Blastogel	8.65	8.65	11.5	15	4	ماسه انباشته به وسیله آب با یک متر رویی از شن	14	[۱۰]	بندر Zebrug در بلژیک منطقه A	16
			3.65			8.65	11.5	15			14			
			3.97			8.65	12.5	15			14			
			3.97			8.65	12.5	15			14			
3.5 %	19.48	38.96	18.53	(Pellitized TNT) Nitropel	22.7	22.7	81.7	10.5	2	نهشت های آتشفشانی ، ماسه ریز تا درشت به همراه قلوه سنگ	40	[۲۸]	فونداسیون پل South Cold Water Creek در ایالت واشنگتن آمریکا (مرحله اصلی)	17
			20.43			22.7	81.7	10						
1.2 %	10.	21.4	10.7	(Pellitized TNT) Nitropel	23.9	23.9	47.2	10.5	2	نهشت های آتشفشانی ، ماسه ریز تا درشت به همراه قلوه سنگ	40	[۲۸]	فونداسیون پل South Cold Water Creek در ایالت واشنگتن آمریکا (تست)	18

۱۰- زیر نویس‌ها

- 
- <sup>۱</sup> Vibro methods
  - <sup>۲</sup> Deep Soil Mixing (DSM)
  - <sup>۳</sup> Deep Dynamic Compaction
  - <sup>۴</sup> Jet Grouting
  - <sup>۵</sup> Blast Densification or Explosive Compaction
  - <sup>۶</sup> Svrisk
  - <sup>۷</sup> Franklin Fall Dam
  - <sup>۸</sup> New Hampshir
  - <sup>۹</sup> Cementation
  - <sup>۱۰</sup> Aging
  - <sup>۱۱</sup> Hopkinson's Number
  - <sup>۱۲</sup> Charlies et al.
  - <sup>۱۳</sup> Rogres et al.
  - <sup>۱۴</sup> LINGO
  - <sup>۱۵</sup> Average Absolute Relative Error
  - <sup>۱۶</sup> Standard Deviation
  - <sup>۱۷</sup> Narin van Court