مدلسازی عددی تراکم دینامیکی خاک با استفاده از روش تفاضل محدود

احسان کمال‌پور
دانش آموخته مهندسی سواحل، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
مرتضی بختیاری
استادیار گروه سازه های دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
جواد احدیان
دانشیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۳ *تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳*

mortezabakhtiari62@gmail.com

چکیده

تراکم دینامیکی یکی از روش های دینامیکی بهسازی خاکهای سست می باشد. در این روش با اعمال ضربات سنگین بر سطح خاک میزان تراکم و درنتیجه ظرفیت باربری آن افزایش می یابد. این موضوع از طریق انتقال انرژی بوسیله امواج صورت می‌پذیرد که موجب تغییر مکان ذرات و افزایش تراکم می شود. در این تحقیق ابتدا اقدام به انجام آزمایش‌های میدانی گردید سپس با استفاده از نتایج بدست آمده در این بخش مدل عددی تراکم دینامیکی خاک تهیه و اجرا گردید. به منظور انجام مدلسازی تحقیق حاضر از نرم‌افزار FLAC استفاده گردید. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر ابتدا منطقه آبادان به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب و پس از آزمایش‌های میدانی مشخصات مکانیکی خاک استخراج و سپس با تعریف الگوهای آزمایش مدل‌سازی انجام پذیرفت. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد برای کلیه شرایط مدلسازی با افزایش ارتفاع سقوط و همچنین افزایش وزن کوبه عمق تأثیر افزایش یافته است. همچنین حداکثر تنش تماسی در سطح خاک در محل تماس با کوبه رخ داد و این پارامتر با عمق خاک به شدت کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: *تراکم دینامیکی، بهسازی خاک، نرم افزار FLAC، مدلسازی عددی*

مقدمه

تراکم دینامیکی یکی از روش‌های دینامیکی بهسازی خاک‌های سست می باشد. در این روش با اعمال ضربات سنگین بر سطح خاک میزان تراکم و درنتیجه ظرفیت باربری آن افزایش می یابد. این امر از طریق انتقال انرژی بوسیله امواج صورت می پذیرد. انرژی ناشی از این برخورد از طریق امواج حجمی به اعماق خاک منتقل شده و با تغییر نحوه قرارگیری دانه ها نسبت به هم، توده متراکم تری را ایجاد می کند. عوامل گوناگونی بر میزان تأثیرگذاری این روش در بهسازی خاک دخیل هستند. نوع خاک، وزن و ارتفاع سقوط کوبه، فواصل کوبش و سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد کوبش از جمله مهمترین عوامل تأثیر گذار هستند.

تراکم دینامیکی تکنیکی است که به وسیله آن مشخصات خاک مورد نظر بهبود می یابد و می‌تواند در خاک های دانه ای سست و غیر اشباع موثر می‌باشد. همچنین این روش بر روی خاک‌های چسبنده با تخلخل بالا موفقیت آمیز می‌باشد ولی میرایی انرژی در اینجا زیاد و به پر کننده ها نیاز باشد (چو و همکاران،۱۹۹۰). در این روش با پرتاپ وزنه‌هایی به وزن ۵ تا ۳۵ تن از ارتفاع ۱۰ تا ۴۰ متر بر روی یک سطح مشخص زمین، مشخصات خاک بهبود را بهبود می-دهند. که در این روند چگالی خاک با کاهش تخلخل، افزایش می‌یابد و حجم سیال از منافذ خاک خارج می‌گردد. بعضی از نخستین استفاده‌های ضربه برای متراکم کردن خاک در زمان روم باستان بوده با این هدف که به میزان معینی از نشست دست یابند. اسنادی نیز راجع به استفاده‌ی چینی‌ها از وزنه‌های افتان برای متراکم نمودن زمین موجود است. در خصوص تراکم دینامیکی خاک تاکنون تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد برخی از محققین مدلسازی عددی و برخی دیگر مطالعات میدانی را جهت انجام تحقیق در خصوص تراکم دینامیکی مورد توجه قرار داده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(چو و همکاران،۱۹۹۰) با بکار بردن روش کاربردی(لی و همکاران، ۱۹۸۸) که برای محاسبه نیروهای ایجاد شده در حین شمع کوبی، به مطالعه کاهش شتاب کوبه حین ضربه پرداختند. در مطالعات بعدی، این محققین موفق شدند با کمک مدل یک بعدی خود، عمق و درجه بهبود خاک را پیش بینی کنند.

(پارن و رودریگز، ۱۹۹۲) با استفاده از روش المان محدود آثار ضربه بر روی خاک‌های ماسه‌ای، را با فرض فرمولاسیون تغییر مکان های بزرگ و با دو مدل رفتاری الاستوپلاستیک مختلف بررسی کردند. نتایج به دست آمده حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده دقت بالای مدل عددی و مطابقت نزدیک با داده‌های میدانی دارد.

www.SID.ir

(پن و صلبی، ۲۰۰۲) با استفاده از نرم افزار ABAQUS پاسخ خاک به ضربه جسم صلب را به صورت عددی تحلیل نمودند.

(گو و لی ،۲۰۰۲) رفتار ماسه خشک تحت اثر بار ضربه را با استفاده از برنامه المان محدود CRISDYN تشریح نمودند.

(حمیدی و همکاران،۲۰۱۰) روشی نوین را برای پیش‌بینی پروفیل فشار حدی پس از تراکم دینامیکی ارائه دادند با این فرض که نشست القاء شده به زمین، مجموع کرنش‌های قائم مطابق توزیع رایلی است.

(حمیدی و همکاران، ۲۰۱۰) رابطه‌ای را بین نشست زمین و فشار حدی حاصل از داده‌های آزمون فشار سنجی (PMT) را ارائه دادند تا بتوان پارامترهای خاک را بر اساس نشست سطحی خاک پیش‌بینی نمود.

(نیکراز و همکاران، ۲۰۱۱) نیز در آزمایش‌های پس از تراکم دینامیکی نتیجه گرفتند که نتایج آزمون فشار سنجی (PMT) بهتر از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) نشانگر رفتار خاک است (Hamidi, 2010).

(آل لیلا و آل صفار ، ۲۰۱۴) دو محقق عراقی اصلاح رفتار خاک ژیپسی را با روش تراکم دینامیکی بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که این روش می‌تواند ابزار بسیار مناسبی برای اصلاح این نوع خاک باشد. معیار بررسی ایشان افزایش تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) مورد نیاز برای تراکم خاک قبل و بعد از تراکم دینامیکی بود. ایشان این معیار را برای خاک ژیپس سست مناسب‌ترین معیار تشخیص رفتار دانستند. بررسی مطالعات پیشین صورت گرفته شده نشان می‌دهد تحقیقات انجام شده عمدتاً به صورت میدانی و آزمایشگاهی بوده است لذا در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های میدانی اقدام به مدلسازی عددی تراکم دینامیکی شده است لذا در تحقیق حاضر از نرم‌افزار المان محدود FLAC به منظور مدلسازی عددی استفاده شده است. نظر به اهمیت استحصال اراضی ساحلی جهت بهره‌برداری مطالعه حاضر بر روی خاک منطقه آبادان صورت گرفته است.

(پیشرو و همکاران، ۱۳۹۶)، در یک تحقیق آزمایشگاهی، به مطالعه نفوذپذیری ناهمسانگرد خاک‌های درشت دانه در سواحل جنوب خوزستان پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که نفوذپذیری در جهت افقی اغلب، بیشتر از نفوذپذیری در جهت قائم است. همچنین میزان ناهمسانی نفوذپذیری بدست آمده در محدوده ۱/۳۲ تا ۳/۵ قرار دارد.

برنامه تفاضل محدودFLAC

نرم افزارهای مختلفی به منظور بررسی مسائل خاک وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به ABAQUSE و FLAC اشاره نمود. تحلیل‌های نرم افزار ABAQUSE با استفاده از روش المان محدود در حالیکه در نرم‌افزار FLAC از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود همچنین در نرم‌افزار ABAQUSE شبکه بندی به صورت المان‌های مثلثی و در نرم‌افزار FLAC شبکه بندی به صورت مربعی انجام می‌شود. در واقع با یک بیان کلی نمی‌توان نسبت به قوی‌تر بودن این دو نرم‌افزار اظهار نظر نمود زیرا روش‌های حل در آن‌ها با یکدیگر متفاوت است ولی در یک موضوع خاص می‌توان دقت دو نرم افزار را با یکدیگر مقایسه نمود که چه بسا در مسئله دیگری این موضوع تغییر پیدا نماید. با توجه به کارآیی این دو نرم‌افزار در دو تحقیق جداگانه از این دو نرم‌افزار استفاده گردید که در تحقیق حاضر از نرم‌افزار FLAC استفاده شده است.

نرم‌افزار FLAC یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم‌افزارهای Itasca بوده است. که برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. FLAC بر اساس تحلیل محاسباتی لاگرانژی استوار است که برای مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ نیز مناسب هست. با این نرم‌افزار می‌تواند مدل رفتاری سازه‌های خاکی، سنگی و یا سایر مواد را که دارای جریان پلاستیک در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه‌سازی کرد. این مدل‌های رفتاری که از پیش تعریف‌شده می‌باشند، مدل‌های متنوعی را در برمی‌گیرند که شامل مدل تهی (فضای خالی) برای نمایش حفاری‌ها در شبکه، تا مدل‌های تسلیم برشی در و حجمی برای نمایش رفتار کرنش سختی و کرنش نرمی و نمایش گسیختگی برشی غیرقابل‌برگشت و غیرخطی است. برای آنالیز تنش‌ها و تغییر مکان‌ها، مواد را به‌صورت شبکه‌های دو بعدی که از المان‌های چندوجهی تشکیل‌شده است، تعریف می‌کنند.

این برنامه از قابلیت‌های زیادی برای تحلیل مسائل برخوردار است که عمده‌ترین کاربرد آن در مسائل ژئوتکنیک هست. با استفاده از این نرم‌افزار می‌تواند مسائل مربوط به سازه‌های زیرزمینی و سطحی مانند طراحی تونل‌ها، پی‌ها و شمع‌ها، شیروانی‌های معدنی و عمرانی و نیروگاه‌هایی که در اعماق زمین قرار دارند را مدل‌سازی کرد. علاوه بر این می‌تواند اندرکنش سازه‌هایی مانند پوشش تونل، پیچ سنگ‌ها (بولت‌ها)، قطعات تسلیم‌پذیر شمع‌های صفحه‌ای با سنگ یا خاک درون‌گیر را به کمک این نرم‌افزار شبیه‌سازی کرد و اثرات آن‌ها را بر روی پایداری سازه‌های زیرزمینی یا سطحی بررسی نمود.

در این نرم افزار چندین مدل رفتاری تعبیه شده است که امکان شبیه سازی رفتار غیرخطی مصالح را فراهم می کند. علاوه بر این مدل ها، کاربر می تواند خود، مدل رفتاری دلخواه را در این نرم افزار تعریف کند.

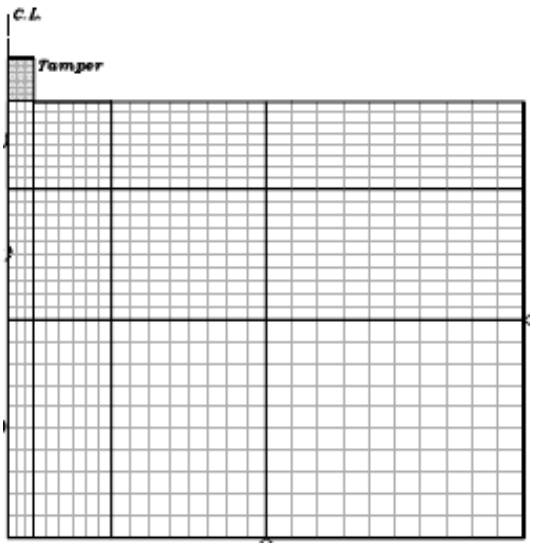
مراحل حل مسئله در FLAC

مراحل حل در این نرم‌افزار به‌صورت زیر است:

- ساخت مدل و هندسه اولیه مدل
- انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده
- اعمال شرایط مرزی و اولیه
- حل و بررسی مدل ساخته‌شده و اصلاح آن در صورت نیاز
- تفسیر نتایج

اولین گام در اجرای یک مدل ساخت هندسه آن است. زون بندی در این نرم‌افزار همزمان با هندسه سازی انجام می‌گیرد. برای ساخت هندسه از دستور GEN با کلمات کلیدی متفاوت استفاده می‌شود. هندسه ساخته‌شده و شبکه‌بندی آن در شکل (۱) نشان داده‌شده است. به خاطر تقارن حاکم بر مسئله، می‌توان تنها نصف یا یک‌چهارم مدل را در نظر گرفت. این کار باعث افزایش سرعت تحلیل‌ها خواهد شد.

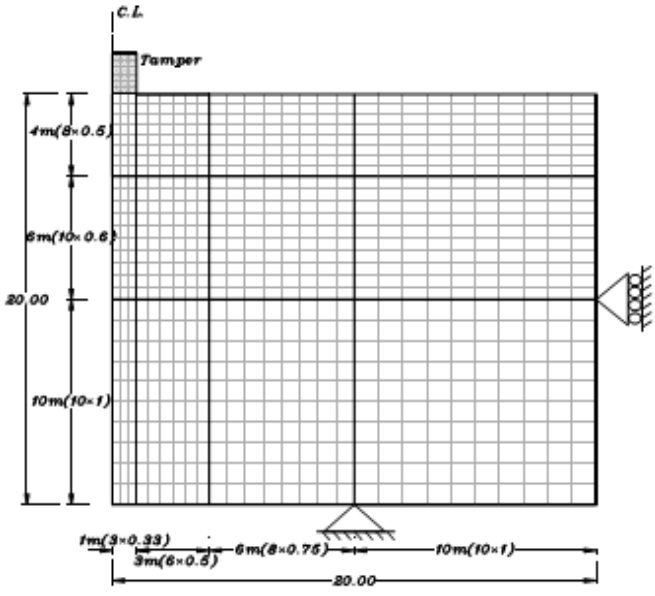
www.SID.ir



شکل۱. هندسه مدل.

پس از ساخت هندسه مدل، باید یک مدل رفتاری مناسب با ماده آن اختصاص یابد. مدل‌های رفتاری متفاوتی در این نرم‌افزار پیش‌بینی‌شده است. یکی از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری در مسائل ژئوتکنیک و مکانیک سنگ، مدل موهر-کلمب است. در ادامه با استفاده از دستور PROPERTY خصوصیات مرتبط با مدل رفتاری از قبیل مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک و ..... به زون‌های مدل اعمال می‌شود.

در مرحله بعد شرایط مرزی و اولیه در مدل اعمال‌شده و مدل برای رسیدن به تعادل اجرا می‌شود. مرزهای اطراف و پایین به‌صورت غلتکی ثابت در نظر گرفته می‌شوند و مرز فوقانی باید آزاد باشد تا مدل بتواند نشست کند (شکل ۲).



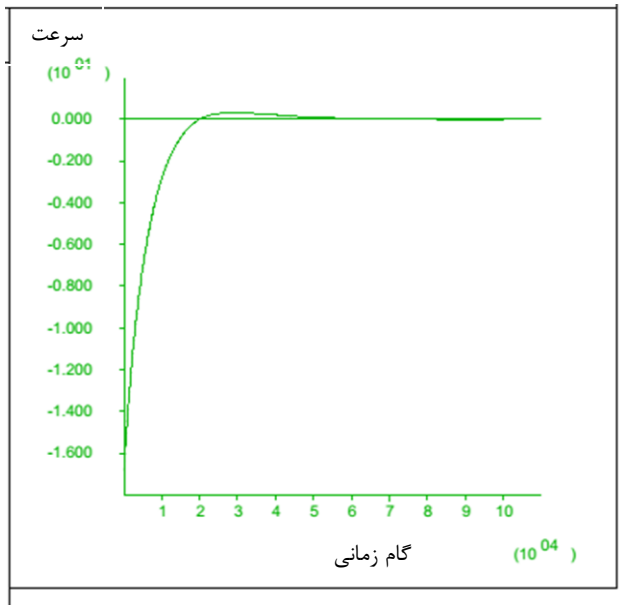
شکل۲. شرایط مرزی مدل.

در گام بعدی به بررسی تعادل مدل پرداخته می‌شود. به‌منظور بررسی وضعیت تعادل مدل عددی می‌توان از شاخص‌هایی مانند نیروهای نامتعادل و سرعت گره‌ها و همچنین جابجایی مدل استفاده کرد. نیروهای نامتعادل مدل ساخته‌شده بعد از گام زمانی مشخصی به صفر میل کرده و مدل به‌درستی به تعادل رسیده است. و در آخرین مرحله با توجه به نوع مسئله تعریف‌شده، تغییرات لازم به مدل اعمال می‌شود.

مدل سازی ضربه و تعیین زمان تحلیل دینامیکی

دقیق ترین پروسه برای مدل سازی، استفاده از فرمولاسیون تماس بین دو یا چند جسم در حال حرکت است. در این جا برای سادگی، از روش جسم صلب برای مدل سازی ضربه استفاده می شود؛ به این معنا که ورودی برنامه سرعت اولیه گره‌های کوبه است که از معادله سقوط آزاد محاسبه می شود. بعد از تماس کوبه با سطح زمین، شتاب کوبه به سرعت کاهش می‌یابد تا زمانی که وزنه می‌ایستد و به سمت بالا حرکت می‌کند. این موضوع باعث می‌شود که شتاب کوبه تغییرعلامت دهد و در نتیجه المان‌های وزنه، المان‌های خاک را به سمت بالا بکشد و در آن‌ها تنش کششی ایجاد شود. برای جلوگیری از وقوع این کشش غیرواقعی در خاک، ابتدا آنالیز در مدت زمانی طولانی‌تر انجام می‌شود. سپس با بررسی نمودار تغییرات سرعت المان های کوبه با زمان، مشاهده می‌شود سرعت پس از مدتی صفر و سپس منفی می‌شود. به این ترتیب مدت زمان صفر شدن سرعت به عنوان زمان تحلیل انتخاب می‌شود.

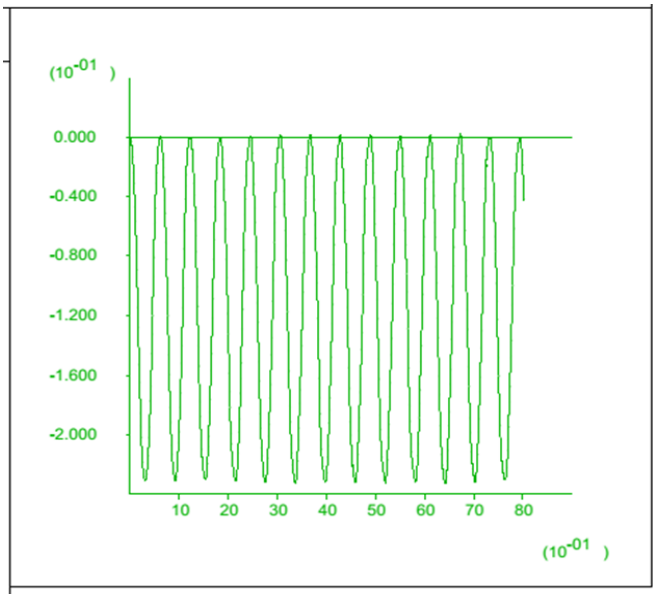
در این تحقیق پس از انجام آزمایش‌های مختلف بر روی پایداری مدل بر مبنای کمترین خطای بدست آمده در مرحله صحت سنجی و کالیبراسیون مدت زمان تحلیل هر ضربه ۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. (شکل۳) تاریخچه سرعت کوبه را نشان می‌دهد.



شکل۳. تاریخچه سرعت کوبه با زمان.

www.SID.ir

جهت در نظر گرفتن میرایی در این تحلیل از مدل میرایی رایلی استفاده‌شده است. مطالعات داوینگ نشان داد که برخلاف بار ضربه ناشی از انفجار که باعث ایجاد ارتعاش با فرکانس‌های بالا می‌شود، ضربه ناشی از سقوط کوبه ارتعاشی با فرکانس بین ۶ هرتز تا ۳۰ هرتز ایجاد می‌کند. در این تحقیق برای محاسبه مقدار فرکانس طبیعی از روش پیشنهادی توسط نرم‌افزار استفاده‌شده است. شکل (۴) تغییرات تغییر شکل قائم بالاترین نقطه از مدل را تحت اثر نیروی وزن نشان می‌دهد. در این تحقیق مقدار میرایی ۵ درصد و فرکانس ۱۰ هرتز فرض شده است. همچنین مشخصات تحلیل دینامیکی مطابق جدول (۱) فرض شده است.



شکل۴. تغییرات تغییر مکان قائم بالاترین نقطه از مدل تحت اثر نیروی وزن سیستم.

جدول ۱. مشخصات تحلیل دینامیکی.

پارامتر	توضیحات	مقدار در تحلیل عددی
t(s)	زمان تحلیل برای هر ضربه	۰/۲
$\Delta t(s)$	گام زمانی تحلیل	۰/۰۰۰۰۰۱
f, §	ضرایب میرایی رایلی	۱۰و ۰/۰۵

مدل رفتاری استفاده شده در تحقیق حاضر

در نرم افزار FLAC- به روش‌های مختلفی می‌توان مدل رفتاری را به زون‌های مورد نظر اعمال کرد. روش استاندارد، به کارگیری مدل‌های از پیش تعریف شده با دستور MODEL است. گاهی اوقات لازم است که مدل رفتاری موجود برای وابسته ساختن خصوصیات ماده به سایر پارامترهای مدل، تصحیح شود. با سه روشی که در ادامه بیان می‌شود می‌توان این کار انجام داد:

- تغییر خصوصیات مدل موجود با استفاده از تابع FISH به ازای هر چند تعداد گام محاسباتی.

-تغییر خصوصیات در تابع مدل تعریف شده توسط کاربر در هر گام، به وسیله رجوع به رابطه.

-تغییر خصوصیات با استفاده از جدول‌های ارجاع (با دستور TABLE). به عنوان نمونه خصوصیات مقاومتی به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک، برای مدل‌های Strain-softening و double-yield اصلاح می‌شود.

روش آخر، مناسب‌ترین شیوه برای تغییر خصوصیات در یک مدل FLAC- است و روش اول، کمترین کارایی را دارد. در تحقیق حاضر از مدل موهر – کلمب استفاده شده است. این مدل رایجی برای نشان دادن گسیختگی برشی در خاک و سنگ است. در این مدل، تنش تسلیم تابع تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم است. پارامترهای لازم برای این مدل چسبندگی و زاویه اصطکاک است که با آزمایش‌های نسبتاً ساده‌ای به دست می‌آیند.

مشخصات خاک منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه اراضی شهرستان آبادان استان خوزستان می‌باشد. به‌منظور شناسایی لایه‌های خاک و بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها، عملیات صحرایی شامل سه گمانه، جمعاً به عمق ۶۰ متر بوده است. حفاری توسط دستگاه دورانی XY2B و نمونه‌گیری، به‌صورت مغزگیری ممتد (Continuos Coring) انجام‌شده است. در حین حفاری، ثبت تغییرات لایه‌های خاک، اخذ نمونه دست‌خورده و دست‌نخورده، آزمایش نفوذ استاندارد (Standard penetration test) و تعیین تراز آب زیرزمینی، انجام‌شده است. نمونه‌های دست‌خورده، توسط نمونه‌گیر دوکفه‌ای و نمونه‌های دست‌نخورده، توسط نمونه‌گیر شلبی در اعماق مختلف گرفته‌شده است. در (جدول۲) به مشخصات خام مورد مطالعه تحقیق حاضر اشاره شده است.

جدول ۲. مشخصات خام مورد مطالعه.

پارامتر	مقدار
مدول بالک K	۴۱۶۰۰۰۰
مدول برشی G (kg/cm2)	۴۳۱۰۰۰
زاویه اصطکاک	۲۷
دانسیته P(kg/m3)	۱۹۰۰
چسبندگی C	۲۵۰۰

ارزیابی صحت نتایج مدل عددی

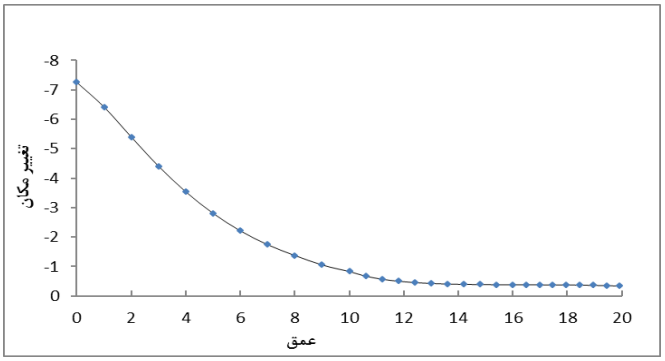
مدل‌سازی دقیق فرآیند تراکم دینامیکی در خاک‌ها وابسته به تعیین پارامترهای گوناگون از قبیل پارامترهای تحلیل دینامیکی، پارامترهای مدل رفتاری خاک و پارامترهای محاسباتی است. ازآنجاکه فرضیات موجود در بسیاری از موارد شبیه عملیات تراکم دینامیکی در مناطق پتروشیمی عسلویه است. بنابراین بررسی صحت مدل با عملیات تراکم دینامیکی در این منطقه انجام می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در منطقه عسلویه، پارامترهای مصالح ریخته شده به‌صورت زیر فرض شده است. وزن کوبه ۱۸ تن و ارتفاع سقوط ۱۵ متر است.

www.SID.ir

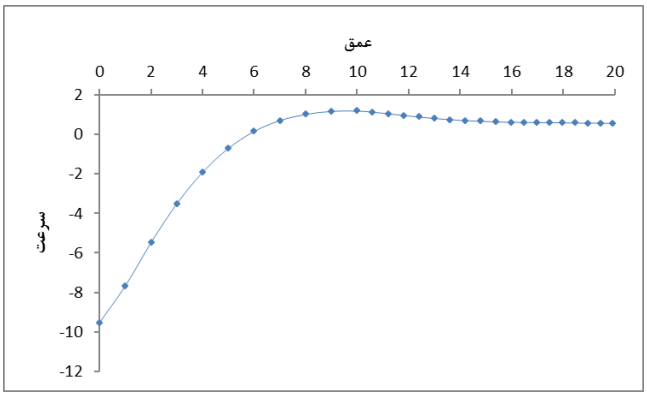
جدول ۳. مشخصات خاک و کوبه.

شرح	مدول الاستیسیته (kg/cm2)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ضریب پواسون
عمق ۰تا ۵ متر	۴۸۰	۳۲	۰/۳ – ۰/۲۵
عمق ۵ تا ۱۰ متر	۲۴۰	۳۰	۰/۳ – ۰/۲۵
کوبه	۲۱۵۰۰۰		۰/۱۵

برای تعیین ابعاد مدل، اندازه المان‌ها، مدت‌زمان تحلیل و ضرایب میرایی تحلیل‌هایی با استفاده از نرم‌افزار FLAC انجام شد و نتایج تحلیل و بررسی شد. با فرض سطح مقطع دایره‌ای برای کوبه و با استفاده از خاصیت تقارن محوری، نصف سیستم کوبه و خاک به‌صورت دوبعدی مدل شده است. نتایج مدلی با ابعاد یکنواخت نسبت به مدلی که در آن اندازه المان‌ها بافاصله گرفتن از منبع موج به‌صورت تدریجی افزایش یابد، از دقت کمتری برخوردار است. لذا در مدل‌سازی عددی تراکم دینامیکی، می‌بایست با دور شدن از کوبه، اندازه المان‌ها به‌تدریج افزایش یابند. این شبکه در پایین در هر دو جهت مقید بوده ولی در سمت راست شبکه و در محور تقارن فقط اجازه تغییر مکان افقی داده نشده است. مدل رفتاری خاک، مدل پلاستیک در نظر گرفته‌شده است. جهت تعیین ابعاد مناسب مدل، با در نظر گرفتن حداکثر انرژی که در این تحقیق توسط کوبه به خاک اعمال می‌شود، مدل‌هایی با ابعاد مختلف تحلیل‌شده و با مقایسه نمودارهای تغییرات سرعت و تغییر مکان ابعاد مناسب مدل تعیین‌شده است. (شکل۴و ۵) حداکثر تغییرات سرعت و تغییر مکان را در راستای افق و قائم نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود مقادیر سرعت و تغییر مکان در مرزهای مدل برابر صفر می‌باشد. لذا محدودیت ابعاد مدل باعث تغییر نتایج مدل نمی‌شود.



شکل ۵. تغییرات تغییر مکان قائم در عمق زیر کوبه (W=20 TON, H=15).



شکل۶. تغییرات سرعت در عمق زیر کوبه (W=20 TON, H=15).

(جدول۴) نتایج محاسبه‌شده برای عمق چاله در سه ضربه را در کنار نتایج اندازه‌گیری شده در سایت برای چند نقطه کوبش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که نتایج محاسباتی تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در منطقه‌های ۲، ۳ و ۴ دارد ولی در منطقه ۱ به دلیل اینکه مدل هنوز شرایط مرزی مناسب خود را پیدا نکرده است لذا نتایج مدل با داده‌های میدانی تفاوت بیشتری دارد که این موضوع با آزمون و خطاهای صورت گرفته برای سایر مناطق نتایج بهتری ارائه می‌دهد. قابل‌ذکر است که (پن و سلبی، ۲۰۰۲)، در مطالعات خود ابراز کرده‌اند که در مورد عمق چاله نتایج حاصل از تحقیق مقادیر کمتری نسبت به مشاهدات در عمل نشان داده است. لذا می‌توان افزایش مقادیر عمق چاله را در مدل حاضر مطلوب دانست. هرچند به نظر می‌رسد با دقیق کردن مقدار پارامترهای خاک در مدل رفتاری و همچنین اصلاح پارامترهای الاستیک خاک پس از هر ضربه بتوان نتایج مدل‌سازی عددی را به مقادیر واقعی نزدیک‌تر کرد.

جدول ۴. مقایسه نتایج محاسبه‌شده عمق چاله توسط FLAC با نتایج اندازه‌گیری شده در محل(سانتی‌متر).

	سایت۱	سایت ۲	سایت ۳	سایت ۴	FLAC
نتایج در محل ضربه اول	۱۰۵	۱۶۰	۱۶۵	۱۵۰	۱۵۵
نتایج در محل ضربه دوم	۲۲۵	۲۲۵	۲۷۵	۲۴۵	۲۶۰
نتایج در محل ضربه سوم	۳۱۵	۲۷۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۵

www.SID.ir

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

همانگونه که بیان گردید هدف از تحقیق حاضر، مدلسازی عددی تراکم دینامکی خاک با استفاده از روش تفاضل محدود می‌باشد. بدین منظور مطابق اهداف مورد نظر در تحقیق حاضر، الگوهای مدلسازی تعریف گردید. الگوهای مورد نظر به گونه‌ای طراحی گردیده است تا بتوان تأثیر پارامتر ارتفاع سقوط، وزن کوبه، انرژی سقوط و اندازه حرکت سقوط مشخص گردد. زیرا در رابطه تراکم دینامیکی عمق تأثیر تراکم بیشتر تحت اثر این پارامترها می‌باشد. متغیرهای در نظر گرفته شده شامل ۳ ارتفاع سقوط ۵، ۱۰ و ۱۵ متر و ۳ وزن کوبه شامل ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن بوده است.

جدول ۵. الگوی مدلسازی (ارتفاع سقوط ۵ متر).

شماره مدل	۱	۲	۳
ارتفاع سقوط(متر)	۵	۵	۵
وزن کوبه(تن)	۱۰	۱۵	۲۰
انرژی	۵۰	۷۵	۱۰۰
اندازه حرکت	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰

جدول ۶. الگوی مدلسازی (ارتفاع سقوط ۱۰ متر).

شماره مدل	۴	۵	۶
ارتفاع سقوط(متر)	۱۰	۱۰	۱۰
وزن کوبه(تن)	۱۰	۱۵	۲۰
انرژی	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
اندازه حرکت	۱۴۱	۲۱۲	۲۸۳

جدول ۷. الگوی مدلسازی (ارتفاع سقوط ۱۵ متر).

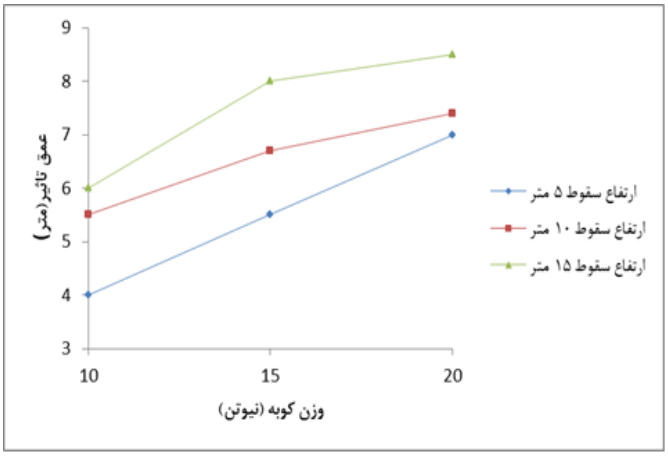
شماره مدل	۷	۸	۹
ارتفاع سقوط(متر)	۱۵	۱۵	۱۵
وزن کوبه(تن)	۱۰	۱۵	۲۰
انرژی	۱۵۰	۲۲۵	۳۰۰
اندازه حرکت	۱۷۳	۲۶۰	۳۴۶

در این بخش نتایج بدست آمده در دو بخش ارائه و تفسیر گردیده است. در گروه اول، تغییرات عمق تأثیر در مقابل ارتفاع سقوط برای سه دسته کوبه با اوزان مختلف ترسیم شد تا اثر تغییرات ارتفاع سقوط مشخص گردد.

در گروه دوم، تغییرات عمق تأثیر در مقابل وزن کوبه برای سه دسته کوبه با ارتفاع‌های سقوط مختلف ترسیم شد تا اثر تغییرات وزن کوبه را بتوان مشاهده نمود.

تأثیر ارتفاع سقوط کوبه بر عمق تأثیر

در(شکل۶) به بررسی تأثیر ارتفاع سقوط کوبه بر عمق تأثیر پرداخته شده است.

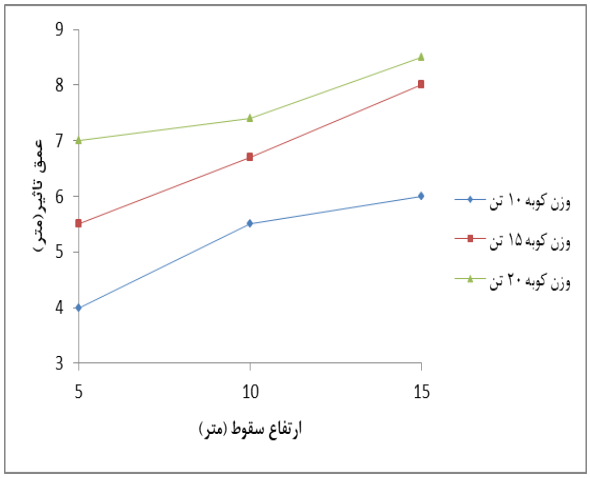


شکل ۶. بررسی تغییرات ارتفاع سقوط بر عمق تأثیر.

برای هر سه دسته کوبه با اوزان مختلف، افزایش ارتفاع سقوط منجر به افزایش عمق تأثیر شده است. با افزایش وزن کوبه نیز این عمق افزایش داشته است. نکته این‌که در اوزان زیاد، اختلاف عمق تأثیر کمتر شده است و نشان می‌دهد تنها استفاده از افزایش وزن کوبه نمی‌تواند عاملی برای افزایش تأثیر تراکم بر خاک باشد.

بررسی تأثیر وزن کوبه بر عمق تأثیر

در شکل (۷) به بررسی تأثیر وزن کوبه بر عمق تأثیر پرداخته شده است.



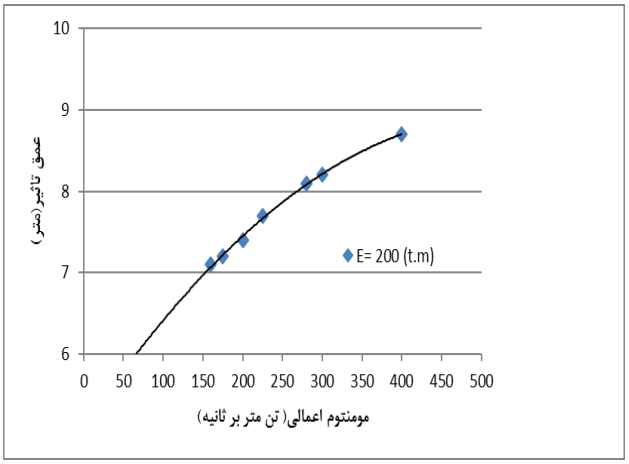
شکل ۷. بررسی تغییرات وزن کوبه بر عمق تأثیر.

www.SID.ir

تأثیر افزایش وزن کوبه بر افزایش میزان بهبود خاک را می‌توان با تشریح افزایش اندازه حرکت بر افزایش کارایی انرژی انتقال‌یافته به زمین بیان کرد. برای یک انرژی مشخص در هر ضربه، استفاده از وزنه‌ی سنگین‌تر و ارتفاع سقوط کمتر باعث افزایش ممنتوم می‌شود. نتایج تجربی (اوشیما و تاکادا، ۱۹۹۴) نشان داد که عمق ناحیه بهبودیافته معمولاً بین ۱۰ تا ۱۲ متر و شعاع این ناحیه عموماً بین ۵ تا ۷ متر است. با ایده‌آل در نظر گرفتن جرم خاک به‌عنوان جسمی که کوبه به آن برخورد می‌کند، به‌آسانی مشخص می‌شود که اگر ممنتوم ضربه بیشتر باشد، انرژی بیشتری به زمین منتقل می‌شود. بنابراین در یک سطح انرژی در هر ضربه مشخص، افزایش وزن کوبه باعث افزایش ممنتوم و درنتیجه بیشتر شدن کارایی عملیات تراکم دینامیکی خواهد شد.

بررسی نتایج بدست آمده همچنین نشان می‌دهد که در ارتفاع سقوط‌های زیاد، اختلاف عمق تأثیر کمتر شده است و همچنین نتایج نشان می‌دهند تنها استفاده از افزایش ارتفاع سقوط نمی‌تواند عاملی برای افزایش تأثیر تراکم بر خاک باشد.

در (شکل۸) به بررسی تأثیر افزایش مومنتوم بر عمق بهبود مشخصات خاک پرداخته شده است. (اوشیما و تاکادا، ۱۹۹۴) در آزمایشات خود مشاهده کردند که عمق چاله و گسترش ناحیه بهبود یافته با افزایش مومنتوم بیشتر می‌شود حتی اگر تراز انرژی اعمالی ثابت باشد. لذا اثر مومنتوم به طور مستقل از انرژی بررسی می‌شود.

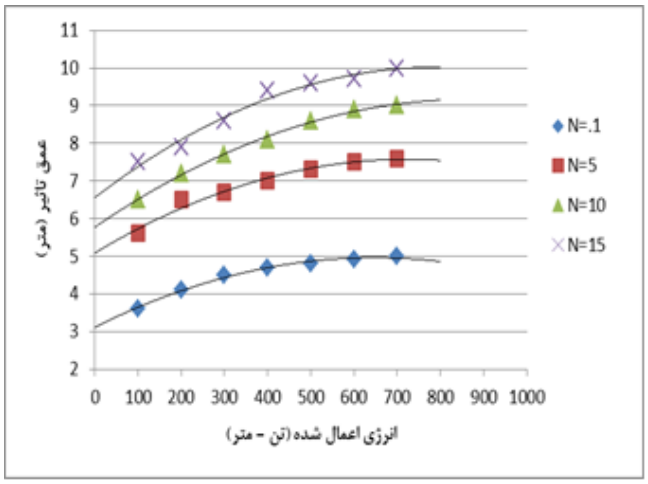


شکل۸ . تاثیر مومنتوم اعمالی بر عمق بهبود.

در این آنالیزها انرژی اعمالی ۲۰۰ تن متر و شعاع کوبه یک متر است. همانطور که از نمودار مشخص است افزایش مومنتوم باعث افزایش عمق بهبود می‌شود. بنابراین اگر محدودیت های اجرایی اجازه دهد در یک انرژی اعمالی مشخص، به کار گیری کوبه های سنگین تر بازده بیشتری خواهد داشت. مورد اول ارتفاع ۲۰ متر و وزن ۱۰ تن و مورد دوم ارتفاع ۵ متر و وزن ۴۰ تن می باشد. مومنتوم مورد اول ۲۰۰ تن متر بر ثانیه است و مومنتوم مورد دوم ۴۰۰ تن متر بر ثانیه می باشد. همانطور که از نمودار مشخص است عمق بهبود یافته برای مورد اول ۷/۶ و برای مورد دوم ۸/۷ متر است.

بررسی تأثیر افزایش تعداد ضربات بر عمق بهبود

در (شکل۹) به بررسی تأثیر افزایش انرژی اعمالی بر عمق بهبود مشخصات مکانیکی خاک پرداخته شده است.



شکل ۹. بررسی تغییرات انرژی اعمال شده بر عمق تأثیر.

نتایج نشان می دهد که شیب منحنی عمق بهبود – انرژی تدریجا کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نمی‌توان با افزایش انرژی اعمالی عمق بهبود را تا هر میزان دلخواه زیاد کرد. این نمودار می‌تواند توجیه کننده این مطلب باشد که چرا در بسیاری از پروژه‌های تراکم دینامیکی انجام شده، انرژی اعمالی در بازه ۴۰۰-۳۰۰ تن متر قرار دارد (Mayne et al.,1984). و همچنین در یک انرژی ثابت با افزایش تعداد ضربات شدت افزایش عمق بهبود کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر اختلاف عمق بهبود در ضربه های ۱۰و۱۵ کمتر از اختلاف بین ضربه ۱و۵ است. علت را می‌توان به تشکیل توده سخت زیر کوبه مربوط دانست که انرژی را در مساحت بزرگتری پخش می‌کند. این مطلب توجیه کننده این است که چرا در اکثر پروژه ها تعداد ضربه کمتر از ۲۵ توصیه شده است.

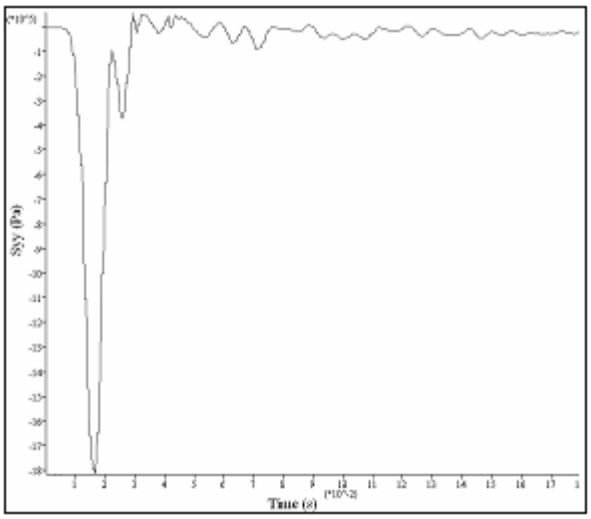
در شرایط یکسان اعمال انرژی، بالا بردن تعداد ضربات بهتر از بالا بردن ارتفاع سقوط است.

بررسی تأثیر تنش تماسی در انرژی ثابت جهت انتخاب بهینه ابعاد وزنه

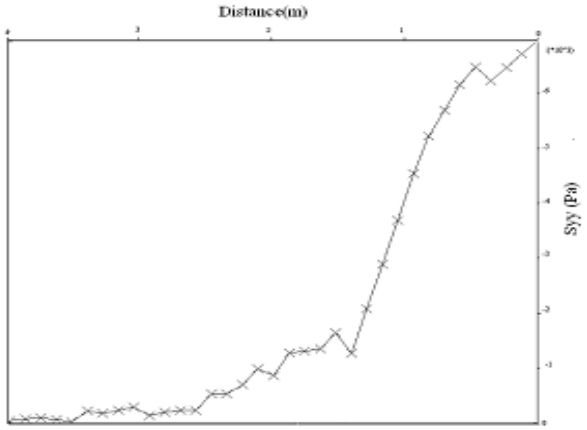
تنش تماسی تابعی از سطح مقطع کوبه و درنتیجه شعاع کوبه می‌باشد. لذا به‌منظور بررسی اثر تنش تماسی در کارایی عملیات تراکم دینامیکی، در یک انرژی ثابت (w=10,h=10) با تغییر شعاع کوبه به بررسی پارامترهای مؤثر در کارایی عملیات تراکم دینامیکی پرداخته شده است.

نمونه تغییرات تنش تماسی در سطح تماس کوبه و خاک در (شکل۱۰) و تغییرات تنش قائم در راستای افق در(شکل۱۰) نشان داده‌شده است.

www.SID.ir



شکل ۱۰. تغییرات تنش تماسی در سطح کوبه و خاک.



شکل ۱۱. تغییرات تنش قائم در راستای افق.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش تماسی در مدت کوتاهی پس از اعمال ضربه به مقدار حداکثر خود می‌رسد و بلافاصله کاهش می‌یابد. و تنش قائم نیز با دور شدن از محور تقارن کاهش می‌یابد.

نتیجه گیری

همانگونه که بیان گردید هدف از تحقیق حاضر، مدلسازی عددی تراکم دینامیکی خاک با استفاده از نرم افزار دو بعدی FLAC بوده است. مطابق اهداف در نظر گرفته شده برای تحقیق منطقه آبادان به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب و پس از آزمایش‌های میدانی و استخراج پارامترهای خاک با در نظر گرفتن الگوهایی مطابق جداول (۵) تا (۷) اقدام به مدلسازی گردید. در این بخش خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده ارائه گردیده است.

-حداکثر تنش تماسی در سطح خاک در محل تماس با کوبه رخ داد و این پارامتر با عمق خاک به شدت کاهش یافت.

-برای هر سه دسته کوبه با ارتفاع سقوط‌های مختلف، افزایش وزن کوبه منجر به افزایش عمق تأثیر شد. ضمن این که با افزایش ارتفاع سقوط در یک کوبه با وزن ثابت، عمق تأثیر افزایش یافت. نکته این که در ارتفاع سقوط‌های زیاد، اختلاف عمق تأثیر کمتر شد که نشان می‌دهد تنها استفاده از افزایش ارتفاع سقوط نمی‌تواند عاملی برای افزایش تأثیر تراکم بر خاک باشد و افزایش این مقدار دارای محدودیت تئوری نیز هست.

-برای هر سه دسته کوبه با اوزان مختلف، افزایش ارتفاع سقوط منجر به افزایش عمق تأثیر شد. ضمن این که با افزایش وزن کوبه، این عمق افزایش داشت. نکته این که در اوزان زیاد، اختلاف عمق تأثیر کمتر شد که نشان می‌دهد تنها استفاده از افزایش وزن کوبه نمی‌تواند عاملی برای افزایش تأثیر تراکم بر خاک باشد.

-با استفاده از نتایج حاصل از تحقیق حاضر و همچنین انجام آن برای مناطق دیگر در کشورمان، می‌توان به یک رابطه کلی برای تراکم دینامیکی جهت بکارگیری در پروژه‌های عمرانی دست یافت.

-با استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی می‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را به طرح-های اجرایی بسط داد و مورد استفاده قرار داد.

قدردانی

بدینوسیله نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر به جهت ایجاد شرایط انجام تحقیق حاضر، سپاسگزاری می‌نمایند.

www.SID.ir

منابع

پیشرو. ف.، بختیاری.م.، شهنی‌کرم زاده.ن، ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی شاخص‌های مکانیک خاک بر نفوذپذیری ناهمسانگرد مصالح درشت‌دانه غیریکنواخت: با تأکید بر دانه‌بندی، فاکتور شکل و تراکم، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته.شماره ۲۴، ص۵۷ ۵۴-۶۴.

Al-Layla, M. T., & Al-Saffar, Q. N. (2014). Improving The Engineering Properties of The Gypseous Soil Using Dynamic Compaction Method. Al-Rafidain Engineering Journal, 22(2).

Chow,Y.K., Yong, D. M., Yong, K. Y., Lee, S. L.(1990).“Monitoring of dynamic compaction by deceleration measurements”, Computers and Geotechnics, Vol.90, No.3, PP.189-209.

FLAC's Manual.(2014).” Itasca Consulting Group, Inc. Thresher Square East, 708 South Third Street, Suite 310, Minneapolis, Minnesota 55415 USA.

Gu, Q., Lee, F.H. (2002). Ground response to dynamiccompaction of dry sand. Geotechnique, Vol 52, No7,481-493.

Hamidi, B., Nikraz, H., & Varaksin, S. (2010). Correlations between CPT and PMT at a Dynamic Compaction Project. In Proceedings of 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, U.S.A.

Hamidi, B., Varaksin, S. & Nikraz, H.(2010). “Predicting Soil Parameters by Modelling Dynamic Compaction Induced Subsidence’, 6th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM6), Perth, Australia, 12-15 December. paper 1150.

Mayne, P.W., Jones, J.S., Dumas, J.C. (1984). “Ground response to dynamic compaction”. Geotechnical
Engineering, Vol. 110, No. 6, pp. 757-774.

Oshima,A,. Takada,N.(1994), Effect of ram momentum on compaction by tamping, XIII ICSMFE, New Delhi.

Pan, J.L., Selby, A.R. (2002). Simulation of dynamic compaction of loose granular soils. Advances in Engineering Software 33, 631-640.

Poran,C.J., Rodriguez,J.A. (1992). Finite Element Analysis of Impact Behavior of Sand. Soils and Foundations, Vol 23, No 4, 68-80.

www.SID.ir