

بهسازی زمین به روش تراکم دینامیکی با استفاده از مدل سازی عددی به روش تفاضل محدود در ماسه خشک

سمیه افتخاری^۱، سید شهاب الدین یثربی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

yasrobis@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۴/۱۰

چکیده- در این مقاله استفاده از تراکم دینامیکی به عنوان یکی از روش های بهسازی زمین بررسی شده است. با وجود کاربرد گسترده این روش، اساس طراحی آن هنوز تجربی یا نیمه تجربی است و فرایندهای درگیر در مسئله به طور کامل مشخص نیست. در این پژوهش برای روشن کردن ابهامات پروسه تراکم دینامیکی، مدل سازی عددی عملیات تراکم دینامیکی در خاک های دانه ای با نرم افزار FLAC و با روش تفاضل محدود انجام شده است. مدل رفتاری خاک، مدل پلاستیک موهر کولمب غیرهمراه در نظر گرفته شده است و برای مدل سازی اثر ضربه بر سطح خاک از روش اعمال سرعت اولیه به گره های کوبه استفاده شده است. با استفاده از نتایج مدل سازی می توان میزان بهسازی در اعماق مختلف را تخمین زد و نیز تعداد ضربات مورد نیاز برای رسیدن به حد بهینه بهسازی را تعیین کرد. این مدل می تواند به عنوان ابزاری برای طراحی پروژه های بهسازی به روش تراکم دینامیکی به کار رود.

کلیدواژگان: تراکم دینامیکی^۱، تحلیل عددی^۲، ضربه^۳، خاک های دانه ای

۱- مقدمه

بهسازی استفاده شده در کشور است. اما چون اساس طراحی آن هنوز تجربی است و تعداد پارامترهای متغیر در این روش زیاد است؛ برای رسیدن به یک الگوی بهینه کوبش، در چند ناحیه، تراکم آزمایشی همراه تعدادی آزمایش، قبل و بعد از کوبش انجام می شود. با توجه به هزینه قابل توجه تراکم آزمایشی و آزمایش های مورد نیاز، می توان با مدل سازی عددی این عملیات، کارایی و دقت این روش را بالاتر برد و هزینه ها را کاهش داد.

در سالیان اخیر چندین مطالعه عددی در زمینه مدل سازی

یکی از روش های بهسازی، روش تراکم دینامیکی است. این روش شامل اعمال ضربات تکراری با انرژی زیاد بر سطح خاک با استفاده از کوبه هایی با وزن ۵ تا ۴۰ تن از ارتفاع ۱۰ تا ۳۰ متر است. از آنجا که تجهیزات و تکنولوژی مورد نیاز این روش، ساده و در دسترس است در حال حاضر این روش یکی از متداول ترین روش های

1- Dynamic Compaction
2- Numerical Analysis
3- Impact

تقارن محوری، تنها نیمی از توده خاک و کوبه به صورت دوبعدی مدل شده است.

۲- برنامه تفاضل محدود FLAC [۷]

FLAC یک برنامه‌ی تفاضل محدود صریح^۸ برای محاسبات مکانیکی مهندسی است. این برنامه قابلیت شبیه سازی رفتار سازه های بنا شده در خاک، سنگ و سایر مصالحی را که با رسیدن به حد تسلیم، جریان خمیری پیدا می کنند؛ دارد. به این دلیل که در این کد محاسباتی، ماتریسی تشکیل نمی شود؛ محاسبات دوبعدی وسیعی را می توان بدون نیاز به حافظه‌ی اضافی انجام داد. البته در ساختار برنامه، سختی محیط برای شناسایی و محاسبه‌ی گام های زمانی مورد نیاز، معرفی می شود؛ ولی دسترسی به مفهومی با نام ماتریس سختی و یا جرم برای کاربر امکان پذیر نیست.

در این نرم افزار چندین مدل رفتاری تعیبه 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.

۳- انتخاب محدوده‌ی مناسب مدل و تشکیل شبکه‌ی المان ها

در انتخاب محدوده مناسب مدل باید توجه شود؛ ابعاد مدل به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا تأثیر مرزها بر روی رفتار مدل، به میزان کمینه برسد. مرزهای مدل باید به مقدار کافی دور انتخاب گردند؛ به طوری که وضعیت تنش ها و تغییر شکل ها در این نقاط مرزی قبل و بعد از اعمال تغییرات در مدل تفاوت چندانی نداشته باشد.

در ساخت شبکه‌ی المان ها باید توجه شود؛ در مناطق حساس (نقاط بارگذاری و غیره) تعداد کافی المان برای

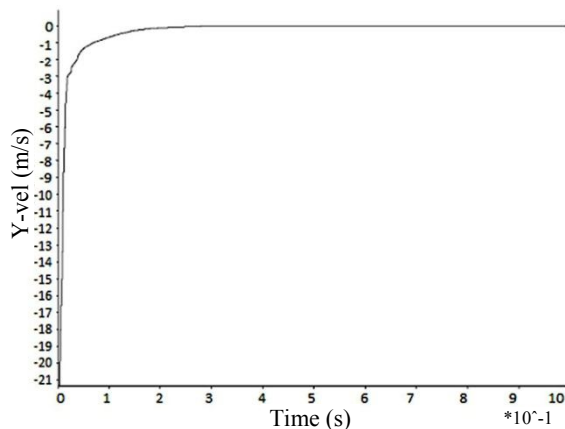
عددی تراکم دینامیکی و تهیه روش طراحی تئوری ارائه شده است. چو^۱ و همکاران (۱۹۹۰) با به کارگیری روش پیشنهادی لی^۲ و همکاران (۱۹۸۸) که برای محاسبه نیروهای ایجاد شده در حین شمع کوبی بود، به مطالعه کاهش شتاب کوبه حین ضربه پرداختند [۱]. در مطالعات بعدی، این محققین موفق شدند با کمک مدل یک بعدی خود، عمق و درجه بهبود خاک را پیش بینی کنند.

پارن^۳ و رودریگز^۴ (۱۹۹۲) آثار ضربه را با فرض فرمولاسیون تغییر مکان های بزرگ و با دو مدل رفتاری الاستوپلاستیک مختلف بررسی کردند [۲]. پن^۵ و سلبی^۶ (۲۰۰۲) با نرم افزار ABAQUS پاسخ خاک به ضربه جسم صلب را به صورت عددی تحلیل کردند [۳]. گو^۷ و لی (۲۰۰۲) رفتار ماسه خشک تحت اثر بار ضربه را با استفاده از برنامه المان محدود CRISDYN تشریح کردند [۴]. هوشمندان و یثربی (۱۳۸۲) با استفاده از مدل رفتاری الاستیک خطی و غیرخطی، با استفاده از برنامه اجزای محدود ANSYS به تحلیل عددی تراکم دینامیکی در خاک های دانه ای پرداختند [۵]. قاسمی و پاک (۱۳۸۳) با برنامه کامپیوتری تعمیم یافته PISA تراکم دینامیکی در خاک های دانه ای را با دو مدل رفتاری الاستوپلاستیک [از خانواده مدل های کلاسیک دار] و تحلیل تحکیم دینامیکی [با مدل اصلاح شده] Cam-Clay تحلیل کردند [۶].

در این پژوهش، مدل سازی عددی عملیات تراکم دینامیکی در خاک های دانه ای با نرم افزار 4.0 FLAC^{2D}، با روش تفاضل محدود و با مدل رفتاری موهر کولمب غیرهمراه استفاده شده است. در این تحلیل ها با فرض

1- Chow
2- Lee
3- Poran
4- Rodriguez
5- Pan
6- Selby
7- Gu

حرکت می‌کند. این باعث می‌شود که شتاب کوبه تغییر علامت 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 المان‌های 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 مطالعات، مدت زمان تحلیل هر ضربه ۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شد. شکل (۱) تاریخچه سرعت کوبه را نشان می‌دهد.



شکل (۱) تغییرات سرعت کوبه با زمان

۵- مدل سازی عملیات تراکم دینامیکی

این پژوهش بر ارزیابی پروسه تراکم متمرکز شده است؛ تا بتوان به گونه‌ای عمل کرد که عملیات کوبش به محض رسیدن به حالت بهینه مورد نظر در لایه خاک پایان یابد و پروسه تراکم بهینه باشد.

برای بررسی تأثیر ضربات متوالی در تراکم خاک، تحلیل‌هایی انجام شده است. انرژی در این تحلیل‌ها ۱۱۵ تن متر فرض شده است که با پرتاب یک کوبه ۱۰ تنی از ارتفاع سقوط ۱۱/۵ متر اعمال می‌شود. خاک مورد نظر در

رسیدن به جواب با دقت لازم فراهم شود. المان‌ها باید در محل برخورد وزنه به حد کافی ریز باشد تا تغییرات شدید تنش و تغییر مکان را نشان دهد. در عین حال باید سعی شود که حجم محاسبات تا حد امکان کم باشد. همچنین تغییر المان‌ها نباید به صورت ناگهانی در مدل اتفاق بیفتد، چون انتقال داده‌ها را دچار خطا می‌کند.

مسئله دیگری که در مورد شبکه‌بندی آنالیزهای دینامیکی مطرح می‌شود؛ تأمین ابعاد مناسب زون‌ها برای کنترل گذردهی امواج است. در اثر شرایط مدل‌سازی ممکن است، انحراف عددی در انتشار امواج ایجاد شود.

کولمیر و لایسمر^[۸] نشان دادند که برای اطمینان پیدا کردن از انتقال صحیح امواج، اندازه‌ی مخصوص زون (بزرگ‌ترین ابعاد زون)، باید کوچک‌تر یا مساوی $\frac{1}{8} \Delta l$ تا $\frac{1}{10}$ طول موج ایجاد شده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به سیستم باشد؛ به عبارتی:

$$\Delta l \leq \left(\frac{\lambda}{8} - \frac{\lambda}{10} \right) \quad (۱)$$

λ طول موج ایجادشده به وسیله‌ی بزرگ‌ترین مؤلفه‌ی فرکانس امواج ورودی به سیستم است که قادر به تولید انرژی است.

۴- مدل سازی ضربه

دقیق‌ترین پروسه برای مدل‌سازی، استفاده از فرمولاسیون تماس بین دو یا چند جسم در حال حرکت است. در این‌جا برای سادگی، از روش جسم صلب برای مدل‌سازی ضربه استفاده می‌شود؛ به این معنا که ورودی برنامه سرعت اولیه گره‌های کوبه است که از معادله سقوط آزاد محاسبه می‌شود. بعد از تماس کوبه با سطح زمین، شتاب کوبه به سرعت کاهش می‌یابد تا زمانی که وزنه می‌ایستد و به سمت بالا

1- Kuhlemeyer, R. L., and J. Lysmer

پذیری خاک در عمق با استفاده از رابطه (۳) با نرم افزار، محاسبه و اعمال می شود [۹].

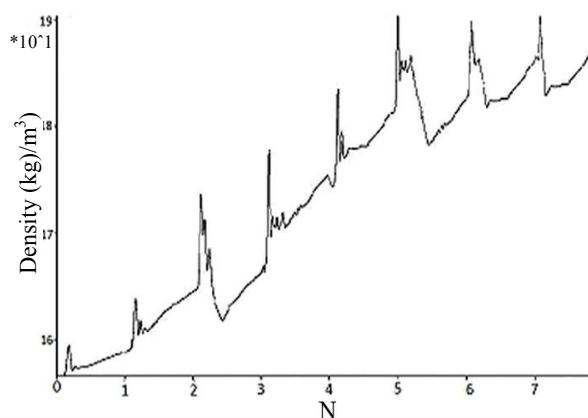
$$D_r = \frac{\rho_{d \max}}{\rho_d} \times \frac{\rho_d - \rho_{d \min}}{\rho_{d \max} - \rho_{d \min}} \quad (2)$$

$$E = 1200 \{ D_r^2 (0.234 \sigma'_v + 16) + 6 \} \quad (3)$$

که در آن σ'_v تنش موثر خاک در عمق مورد نظر است.

از آنجا بیشینه ی اصلاح معمولاً در $\frac{1}{2}$ تا $\frac{1}{3}$ عمق تأثیر تراکم دینامیکی حاصل می شود [۱۰]؛ باید با اعمال ضربات بیشتر، میزان انرژی کافی برای رسیدن به وزن مخصوص کمینه ی مورد نظر در تمام سطح عمق مورد نظر را به خاک اعمال کرد.

با توجه به نتایج اندازه گیری های شیب سنجی که در فاصله سه متری از نقطه ضربه به وسیله ی گرین^۱ (۲۰۰۱) خوانده شده است [۱۱]؛ این اعماق ($\frac{1}{3}$ تا $\frac{1}{2}$ عمق مؤثر) در بازه بیشینه ی تغییر شکل افقی قرار می گیرد. بنابر این در این پژوهش با بررسی نمودار تغییر شکل افقی در عمق، پس از هر ضربه، تعداد ضربه ای که منجر به ایجاد بیشینه ی تغییر شکل افقی در عمق بهبود مورد نظر می شود، به عنوان تعداد ضربه بهینه انتخاب می شود.



شکل (۲) تغییرات چگالی در عمق بهبود، در ضربات متوالی

این پژوهش ماسه خشک نرم ($Dr = 40\%$) است، لذا هیچ فشار آب حفره ای به وجود نمی آید.

در این تحلیل ها پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به صورت زیر فرض شد:

مدول الاستیک (E): 200 Kg/cm^2

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ): 30° درجه

چگالی (ρ): 1565 Kg/m^3

ضریب پواسون (ν): $\nu = 0.3$

همچنین شعاع وزنه یک متر است. پس از اعمال هر ضربه، با توجه به ایجاد تغییر شکل های بزرگ در محل برخورد کوبه باید تغییراتی شامل حذف یا اضافه کردن المان ها و اصلاح مختصات گره ها در مدل ایجاد کرد.

با بررسی تغییرات چگالی در عمق بهبود، در ضربات پیاپی می توان تعداد ضربات لازم برای رسیدن به تراکم نسبی را تعیین کرد و عملیات کوبش را به محض رسیدن به بهبود مورد نظر در لایه خاک پایان داد. در تحلیل انجام شده در این بخش، عمق بهبود $3/5$ متر است. عمق بهبود، عمقی از ستون خاک است که پس از اعمال ضربه اول، افزایش تراکم نسبی خاک پایین تر از آن کمتر از 5% درصد است [۳].

همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود در این عمق چگالی خاک با افزایش تعداد ضربات افزایش یافته است. با توجه به مقادیر چگالی خشک بیشینه ی و کمینه ی خاک که به ترتیب 1900 و 1400 کیلوگرم بر مترمکعب فرض شده است؛ مقادیر چگالی نسبی با استفاده از رابطه (۲) به ترتیب پس از ضربه اول، 45% درصد و در ضربات بعد به ترتیب 58% درصد، 62% درصد، 75% درصد و 87% درصد به دست می آید؛ لذا در صورتی که هدف از تراکم، رسیدن به تراکم نسبی 87% درصد باشد؛ اعمال 5 ضربه مطلوب است. لازم به ذکر است که در هر مرحله تغییرات مدول تغییر شکل

شکل (۳) توزیع تغییر مکان‌های افقی در عمق، در فاصله سه‌متری از مرکز کوبش را در ضربات اول، سوم و هشتم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این تحلیل، بیشینه‌ی تغییر شکل افقی در عمق موردنظر در ضربه هشتم ایجاد شده است.

۶- بررسی درستی عملکرد نرم‌افزار FLAC با مدل‌سازی عملیات تراکم دینامیکی در مناطق پتروشیمی عسلویه

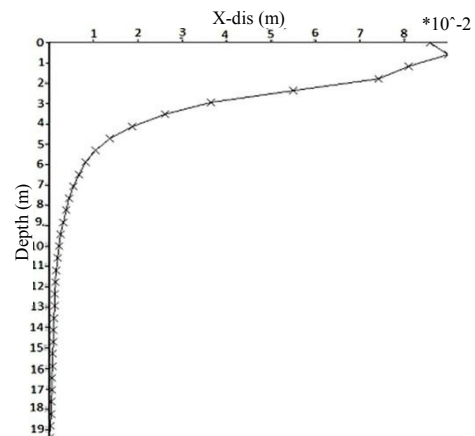
مجتمع پتروشیمی عسلویه در فاصله ۲۹۰ کیلومتری بندر بوشهر قرار گرفته است. با توجه به شرایط خاص توپوگرافی و محدودیت زمین، بخشی از اراضی مورد نیاز (بیش از ۲۰۰ هکتار)، به صورت اراضی استحصال از دریا پیش‌بینی شده است. در این سایت براساس بررسی‌های انجام‌شده با توجه به جنس مصالح، سطح آب زیرزمینی، ضخامت خاک‌ریزی و امکانات موجود در کشور، روش تراکم دینامیکی به عنوان روش بهسازی انتخاب شده است. مصالح مصرف شده برای خاک‌ریزی شامل شن ماسه‌دار همراه با مقداری قلوه سنگ با میزان بیشینه ۱۵ درصد ریزدانه است.

منطقه استحصال شده از لحاظ عمق بهسازی به چهار بخش تقسیم شده است. در این پژوهش، نتایج مدل‌سازی عددی عملیات تراکم دینامیکی در ناحیه سوم ارائه و با نتایج آزمایش‌های کنترلی موجود مقایسه می‌شود.

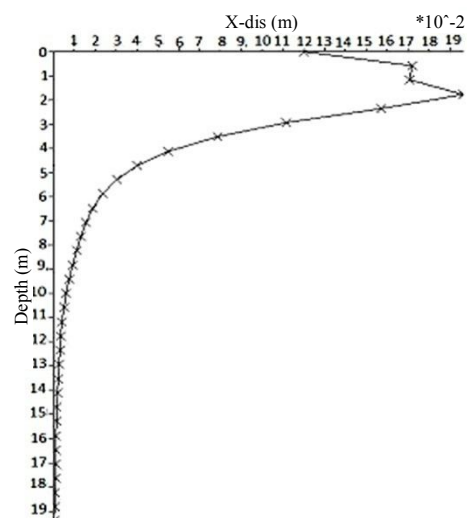
۶-۱- تعیین پارامترهای خاک برای مدل‌سازی

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در منطقه‌ی عسلویه، پارامترهای مصالح ریخته شده به صورت زیر فرض شد:

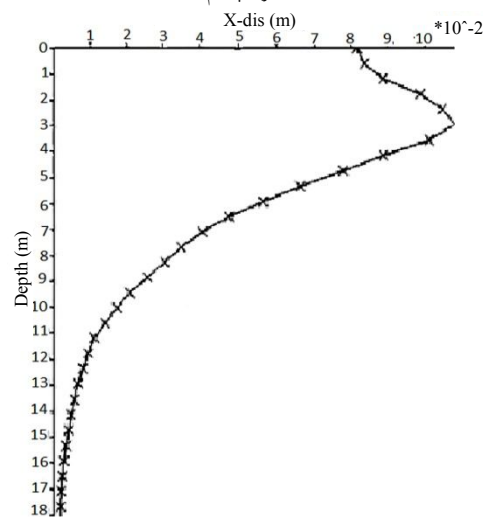
مدول الاستیک خاک



ضربه اول

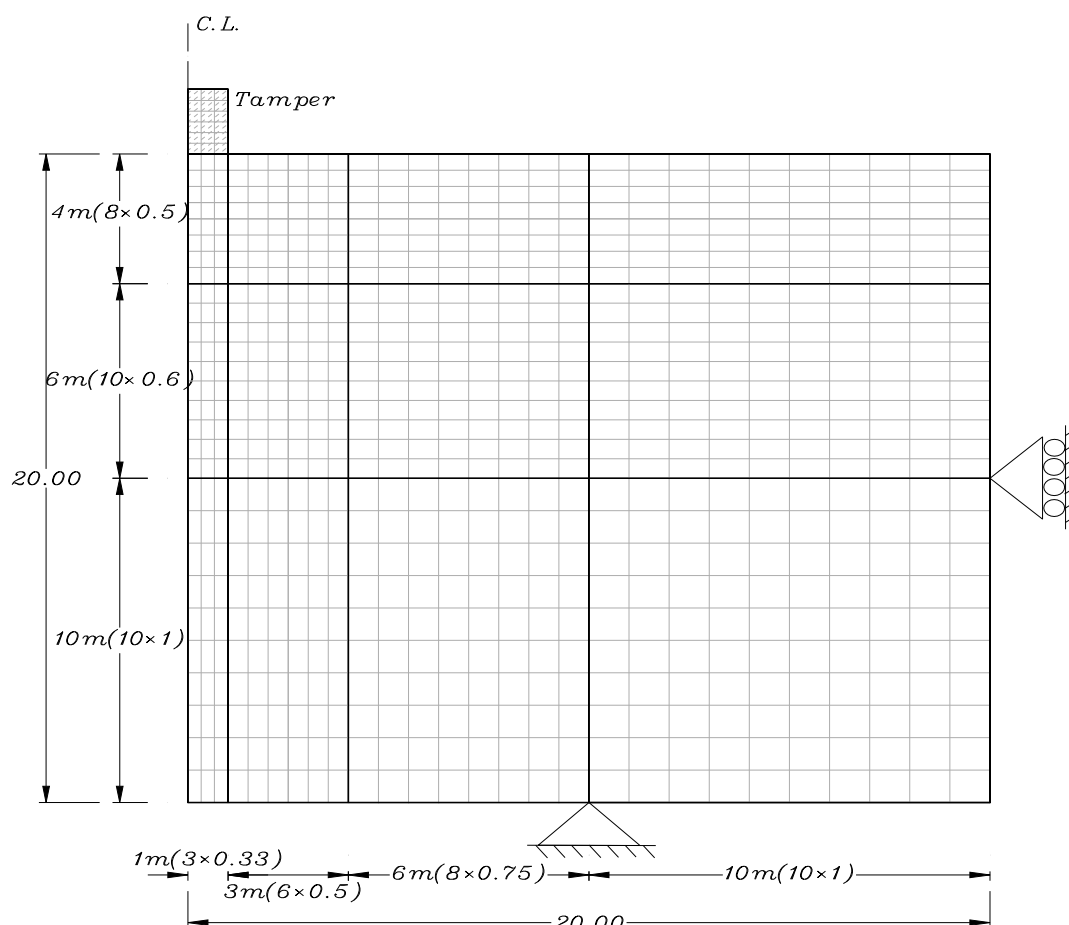


ضربه پنجم



ضربه هشتم

شکل (۳) توزیع تغییر مکان‌های افقی در عمق، در فاصله سه‌متری از مرکز



شکل (۴) هندسه و نحوه المان بندی مدل ساخته شده با نرم افزار

 FLAC^{2D}

می شود. برای مدل کردن ضربه از اعمال سرعت اولیه

$$V_0 = \sqrt{2gh}$$

استفاده می شود.

شکل (۵) نتایج محاسبه شده برای عمق چاله را در کنار نتایج اندازه گیری شده در سایت برای چند نقطه کوبش در ناحیه سوم را نشان می دهد. نتایج محاسباتی تطابق قابل قبولی با مقادیر اندازه گیری شده در منطقه دارد. هر چند به نظر می رسد با دقتی کردن مقادیر پارامترهای خاک در مدل رفتاری و همچنین اصلاح پارامترهای الاستیک خاک پس از هر ضربه بتوان نتایج مدل سازی عددی را به مقادیر واقعی نزدیک تر کرد.

 عمق ۰ تا ۵/۰ : ۴۸۰ Kg/cm²

 عمق ۵/۰ تا ۱۰/۰ : ۲۴۰ Kg/cm²

 مدول الاستیک کوبه: ۲۱/۵ × ۱۰^۴ Kg/cm²

زاویه اصطکاک داخلی خاک

عمق ۰ تا ۵/۰ : ۳۲ درجه

عمق ۵/۰ تا ۱۰/۰ : ۳۰ درجه

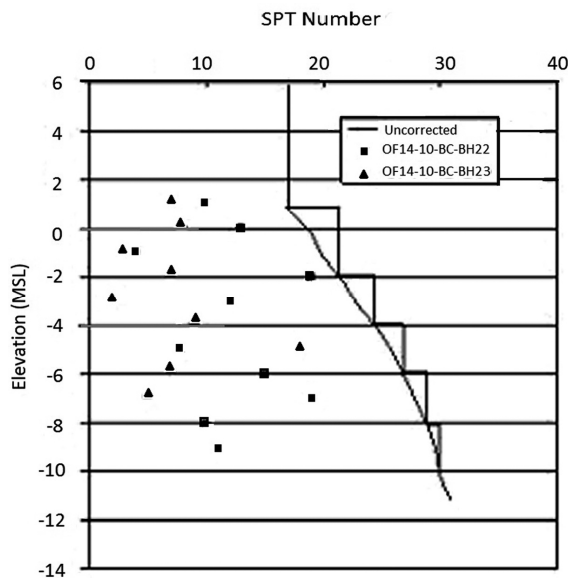
ضریب پواسون خاک = ۰/۳

ضریب پواسون کوبه = ۰/۱۵

۶-۲- مدل سازی تراکم دینامیکی عسلویه

مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC در شکل (۴) مشاهده

روانگرایی در اعماق مختلف و در هر ۲ متر ارائه شده است. تحلیل‌های روانگرایی با استفاده از روش سید^۱ و ایدریس^۲ برای زلزله‌ای به بزرگی ۷ و شتاب پیشینه‌ی ۰/۳ انجام شده است.

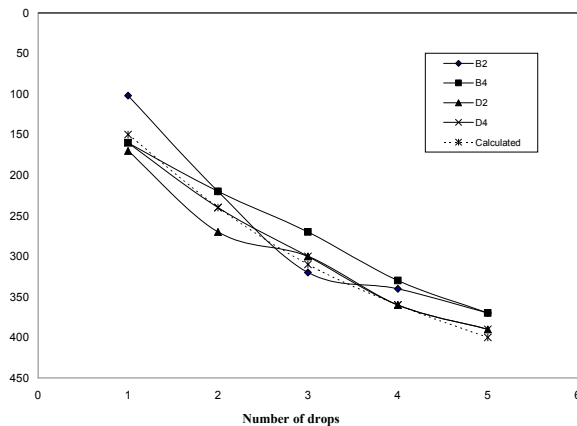
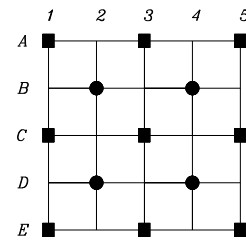


شکل (۶) کمترین عدد SPT مورد نیاز در اعماق مختلف و در هر ۲ متر

با توجه به ضخامت زیاد لایه روانگرا (۱۰ متر)، عملیات تراکم دینامیکی در سه مرحله طراحی می‌شود؛ تراکم سنگین (تا عمق ۱۰ متر)، تراکم متوسط (تا عمق ۶ متر)، تراکم سبک (تا عمق ۴ متر). در هر مرحله، ابتدا با استفاده از رابطه (۵) و نیز میزان عمق بهبود مورد نیاز، جرم و ارتفاع سقوط کوبه را فرض کرده و و ضربه اول را تحلیل می‌کنیم.

$$DI = n\sqrt{WH} \quad (5)$$

که W وزن کوبه بر حسب تن، H ارتفاع سقوط کوبه بر حسب متر، DI عمق تأثیر بر حسب متر و n ضریب تجربی می‌باشد که با توجه به نتایج کوبش‌های انجام‌شده در منطقه عسلویه در محدوده ۰/۳-۰/۳۵ است.



شکل (۵) مقایسه نتایج محاسبه‌شده عمق چاله در برابر تعداد ضربات

با نتایج اندازه‌گیری شده

$$(W=18 \text{ ton}, H=15 \text{ m})$$

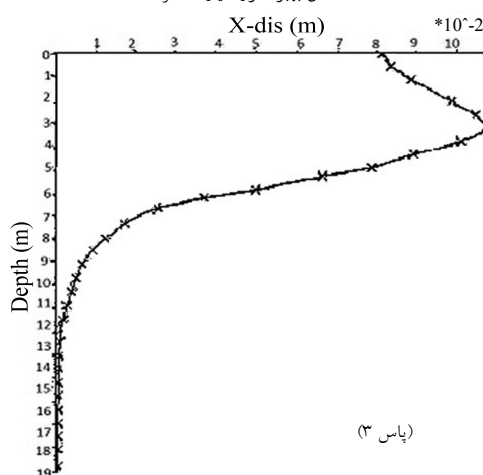
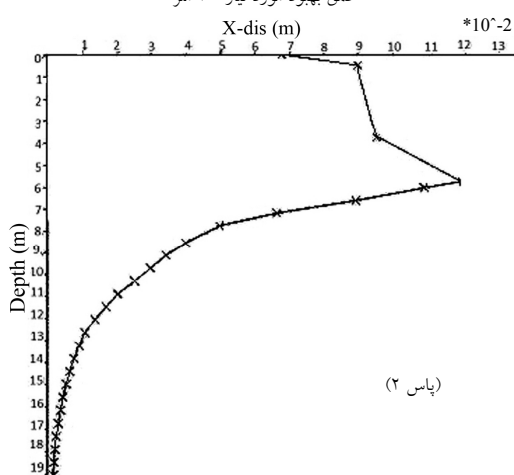
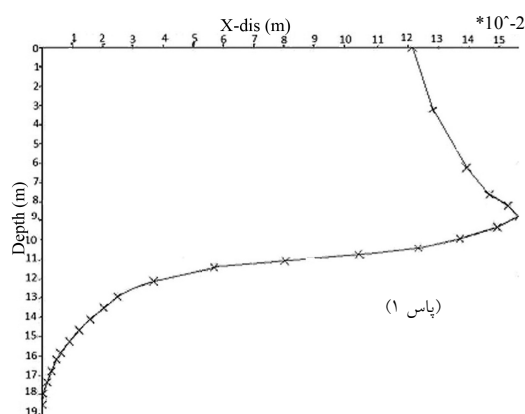
۳-۶ طراحی عملیات تراکم دینامیکی عسلویه با

نرم افزار ۲D 4.0 FLAC

در این بخش با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از منطقه‌ی عسلویه و نتایج حاصل از این پژوهش، به طراحی عملیات تراکم دینامیکی می‌پردازیم. در ابتدا با توجه به این‌که هدف اصلی از عملیات تراکم دینامیکی در این منطقه، حذف پتانسیل روانگرایی است؛ کمینه‌ی عدد SPT مورد نیاز برای حذف پتانسیل روانگرایی، در عمق محاسبه شده؛ سپس با رابطه (۴)، چگالی نسبی مورد نیاز در اعماق مختلف به‌دست می‌آید [۹].

$$D_r = \left[\frac{N_{60}}{0.3\sigma'_v + 30} \right]^{0.5} \quad (4)$$

شکل (۶) عدد SPT کمینه‌ی مورد نیاز برای حذف پتانسیل



شکل (۷) توزیع تغییر مکان های افقی در عمق

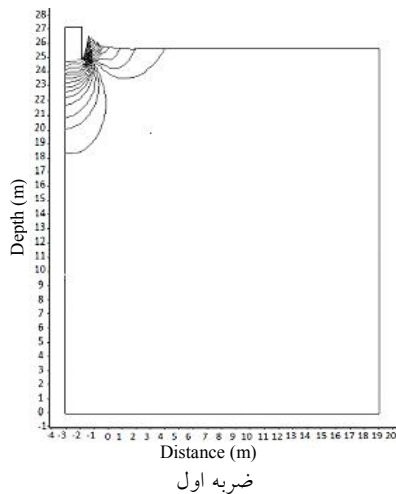
حال با استفاده از رابطه (۵) و با توجه به تجهیزات موجود، جرم و ارتفاع کوبه را آن قدر تغییر می دهیم تا افزایش تراکم نسبی خاک در عمق بهبود مورد نظر طبق تعریف، حدود ۵ درصد شود. قابل ذکر است برای یک انرژی مشخص، استفاده از وزنه ی سنگین تر و ارتفاع سقوط کمتر باعث افزایش کارایی انرژی انتقال یافته به زمین می شود.

بدین ترتیب جرم و ارتفاع مناسب سقوط کوبه برای هر مرحله تعیین می شود. در این پژوهش مقدار $n = 0.3$ به دست آمد. پس از تعیین جرم و ارتفاع سقوط کوبه، ضربات بعدی را اعمال می کنیم.

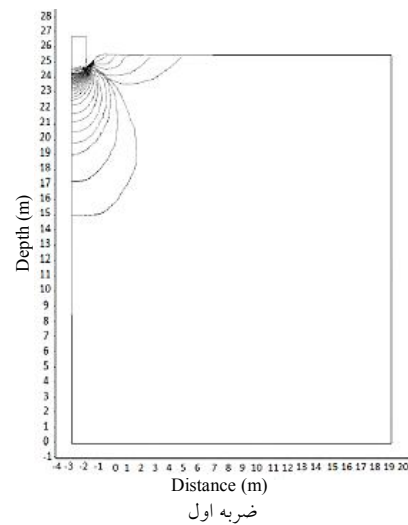
در هر مرحله با بررسی نمودار تغییر شکل افقی در عمق، پس از هر ضربه، تعداد ضربه ای که منجر به ایجاد بیشینه ی تغییر شکل افقی در عمق مورد نظر می شود، به عنوان تعداد ضربه بهینه انتخاب می شود [۱۱]. توزیع تغییر مکان های افقی در عمق در پایان هر مرحله در شکل (۷) ارائه شده است.

گسترش افقی ناحیه بهبود یافته نیز در پایان هر مرحله با استفاده از کنتورهای نظیر چگالی نسبی تعیین می شود. معیار در نظر گرفته شده برای گسترش افقی تراکم، کنتور افزایش تراکم نسبی به میزان ۵ درصد است. بنابراین می توان با بررسی گسترش افقی ناحیه بهبود یافته، فاصله بین نقاط کوبش را تخمین زد.

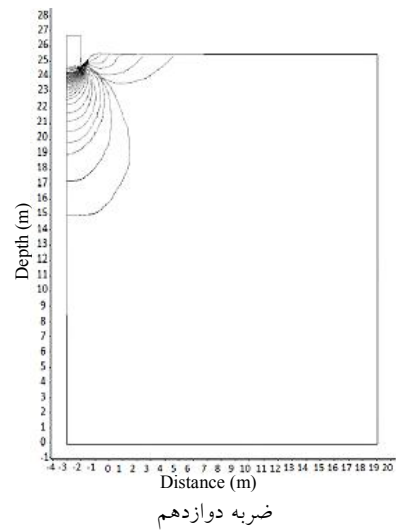
شکل های (۸) تا (۱۰) کنتورهای چگالی نسبی را در هر سه مرحله کوبش برای ضربه اول و آخر نشان می دهند. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می شود در مرحله اول پس از اعمال اولین ضربه، گسترش افقی تراکم حدود ۳ متر است که پس از اعمال ضربه بیستم به ۶ متر افزایش می یابد. بنابراین بیشینه ی فاصله افقی بین نقاط کوبش مرحله اول را می توان ۱۲ متر در نظر گرفت.



ضربه اول



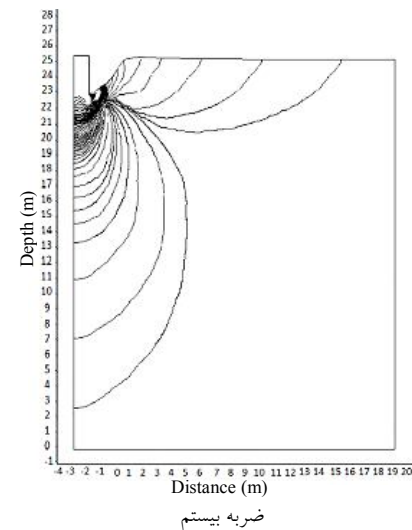
ضربه اول



ضربه دوازدهم

شکل (۹) کنتورهای نظیر دانسیته نسبی- پاس ۲

(W=۲۵ ton , H= ۲۰ m)



ضربه بیستم

شکل (۸) کنتورهای نظیر دانسیته نسبی- پاس ۱

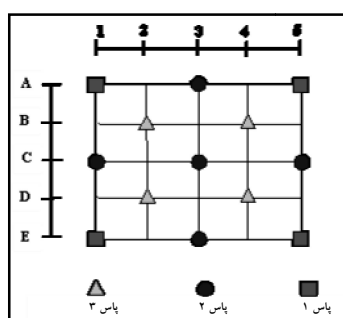
(W=۳۵ ton , H= ۳۰ m)

۶-۴- الگوی کوبش طراحی شده برای ناحیه سوم عسلویه با مدل سازی عددی

الگوی کوبش طراحی شده در جدول (۱) و نمایش نقاط کوبش در شکل (۱۱) ارائه شده است. معیار طراحی عملیات تراکم دینامیکی، حذف پتانسیل روان گرایی برای زلزله ای به بزرگی ۷ و شتاب بیشینه ی ۰/۳ بوده است. با توجه به ضخامت لایه روانگرا (حدود ۱۰ متر) عملیات تراکم دینامیکی در سه مرحله طراحی شد. همچنین در پایان عملیات تراکم، لایه سطحی ضعیف شده، طی یک

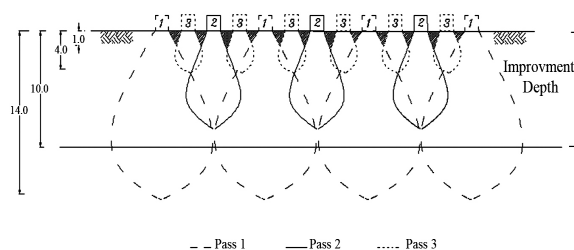
در مرحله دوم کوبش، گسترش افقی تراکم پس از اعمال ضربه اول حدود ۲ متر و پس از اعمال ضربه دوازدهم، ۳ متر است و در مرحله سوم نیز گسترش افقی ناحیه بهبود یافته حدود ۱/۵ متر پس از ضربه اول و ۲ متر پس از ضربه هشتم است.

از مقایسه کنتورهای نظیر دانسیته نسبی لایه خاک پس از ضربه اول و پس از اعمال ضربه آخر مشاهده می شود؛ که با افزایش تعداد ضربات، ناحیه بهبود یافته گسترش پیدا می کند.



شکل (۱۱) نمایش نقاط کوبش الگوی کوبش طراحی شده

سطح متراکم شده پس از اجرای عملیات تراکم دینامیکی در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. تعداد ضربات کوبش در هر مرحله به گونه ای انتخاب شده است که کنتورهای نظیر دانسیته نسبی معادل دانسیته نسبی مورد نیاز دارای همپوشانی بوده و کل ناحیه متراکم شده باشد.



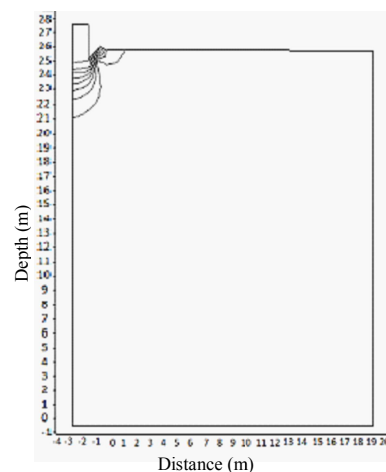
شکل (۱۲) نمایش سطح متراکم شده پس از پایان عملیات تراکم دینامیکی

۷- نتیجه گیری

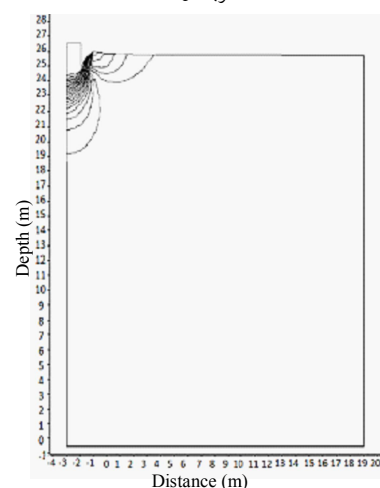
در این مقاله، نحوه مدل سازی عملیات تراکم دینامیکی در خاک های دانه ای خشک به روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم افزار ۲D 4.0 FLAC ارائه شد.

در این پژوهش، برای مدل سازی ضربه از روش جسم صلب استفاده شد و برای جلوگیری از وقوع کشش غیرواقعی در خاک، ابتدا تحلیل ها در مدت زمانی طولانی تر انجام شد؛ سپس با بررسی نمودار تغییرات سرعت المان های کوبه با زمان، مدت زمان صفر شدن سرعت به عنوان زمان تحلیل انتخاب شد. پس از اعمال هر ضربه، با توجه به ایجاد تغییر شکل های بزرگ در محل برخورد

مرحله اتوکشی با یک کوبه سبک، با ارتفاع سقوط کم که در نقاط مجاور هم انجام می شود؛ متراکم می شود.



ضربه اول



ضربه هشتم

شکل (۱۰) کنتورهای نظیر چگالی نسبی - پاس ۳

(W=۱۵ ton , H= ۱۲ m)

جدول (۱) مشخصات الگوی کوبش طراحی شده

پاس	وزن کوبه (ton)	ارتفاع سقوط کوبه (m)	تعداد ضربات	فاصله ضربات (m)
۱	۳۵	۳۰	۲۰	۱۱
۲	۲۵	۲۰	۱۲	۵/۵-۱۱
۳	۱۵	۱۲	۸	۵/۵
۴	۷	۵	۳	مجاور هم

دینامیکی در خاک‌های خشک و اشباع"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.

- [7] "FLAC's Manual." Itasca Consulting Group, Inc. Thresher Square East, 708 South Third Street, Suite 310, Minneapolis, Minnesota 55415 USA.
- [8] Kuhlemeyer, R. L., and J. Lysmer. "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems," J. Soil Mech. & Foundations, Div. ASCE, 99(SM5), 421-427 (May, 1973).
- [9] Skempton, A.W. 'Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation', Géotechnique, vol 36, 1986, pp 425-447.
- [10] Lukas, R.G., 1995, "Geotechnical Engineering Circular No. 1, DYNAMIC COMPACTION", Federal Highway Report FHWA-SA-95-037.
- [11] Green, R.A., "Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils", PhD Dissertation, Virginia Polytechnic University, 2001.

کوبه، تغییراتی شامل حذف یا اضافه کردن المان‌ها و اصلاح مختصات گره‌ها در مدل ایجاد شد.

با مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی با نتایج اندازه‌گیری شده در پروژه تراکم دینامیکی عسلویه مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده در منطقه با مقادیر به دست آمده از تحلیل‌های عددی وجود دارد.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مدل ارائه شده می‌تواند مطابق مطالعات انجام شده به وسیله‌ی گرین (۲۰۰۱) [۱۱]، با بررسی نمودار تغییر شکل افقی در عمق، پس از هر ضربه، تعداد ضربه‌ای که منجر به ایجاد بیشینه‌ی تغییر شکل افقی در عمق مورد نظر می‌شود را به عنوان تعداد ضربه‌ی مورد نیاز برای رسیدن به حد مطلوب بهسازی ارائه کند. همچنین عمق و درجه بهبود، مقادیر تنش و کرنش در مراحل مختلف تراکم و نیز فاصله بین نقاط کوبش را پیش‌بینی کند.

۸- مراجع

- [1] Chow, Y.K., Yong, D. M., Yong, K. Y., Lee, S. L., "Monitoring of dynamic compaction by deceleration measurements", Computers and Geotechnics, Vol. 90, No. 3, 1990, PP. 189-209.
- [2] Poran, C.J., Rodriguez, J.A. 1992. Finite Element Analysis of Impact Behavior of Sand. Soils and Foundations, Vol 23, No 4, 68-80.
- [3] Pan, J.L., Selby, A.R. 2002. Simulation of dynamic compaction of loose granular soils. Advances in Engineering Software 33, 631-640.
- [4] Gu, Q., Lee, F.H. 2002. Ground response to dynamic compaction of dry sand. Geotechnique, Vol 52, No 7, 481-493.

[۵] هوشمندان، رضا، "تحلیل عددی تراکم دینامیکی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از مدل رفتاری الاستیک خطی و غیر خطی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲.

[۶] قاسمی، علی، "مدل‌سازی عددی خاک به روش تراکم

Design of Ground Improvement with Dynamic Compaction Method for Granular Soil Using Finite Difference Method

S. Eftekhari¹, S.S. Yasrobi^{2*}

1. M.Sc. of Geotechnical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. Associate professor of Civil Engineering Dep., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

yasrobis@modares.ac.ir

Abstract:

Dynamic compaction (DC) method is an effective method in soil improvement, which is widely used in the world. This method includes repeated drops with high energy on the surface of the soil by the tampers weighing 5 to 40 tons. The dampers fall from 10 to 30 m heights.

This method is used to increase the density of soil deposits. The degree of density depends on the weight of the hammer, the height from which the hammer is dropped, and the spacing of the locations at which the hammer is dropped. The initial weight dropping has the most impact, and penetrates into a greater depth. The following drops, if spaced closer to one another, compact the shallower layers and the process is completed by compacting the soil at the surface.

Nowadays, D.C. method is one of the common improvement methods in Iran because the required equipments and technology of D.C. are simple and available. Since the design of this method is empirical and there are a large number of parameters (variables), so to achieve an efficient D.C. pattern, trial D.C. with before and after compaction tests must be carried out in some areas. Considering the cost of the trial D.C. and control tests, numerical D.C. models will increase the efficiency and accuracy of this method and the costs will drop as well.

In this study, numerical D.C. has been modeled for granular soil using finite difference method. According to axis symmetric assumption, just half of the soil mass and tamper has been modeled in 2D. To model the drop effect on soil surface, initial velocity method is used on the tamper nodes. Granular soil D.C. has been analyzed with Mohr Coulomb behavior model using Flac 2D 4.0 software. The results of this study have been compared with those of Pan & Selby (2002) studies. Also final settlement of the tamper has been compared with the results in Assaluyeh D.C. project. In both of the above cases, the results of the numerical models and the real measured values are nearly the same.

Numerical method can estimate improvement degree in different depths as well as the required number of drops to achieve the ideal improvement degree.

Also horizontal extent of the improvement area can be determined at the end of each compaction stage by using relative density contours, Then spacing of impact points can be estimated with reviewing the horizontal extent of the improvement area.

Keywords: Dynamic compaction (D.C.), Numerical analysis, Impact, Granular soil