

شبیه‌سازی عددی تراکم دینامیکی خاک با استفاده از مدل ABAQUS

متین هواخور^۱ و مرتضی بختیاری^{۲*}

(۱) کارشناس ارشد، مهندسی سواحل بنادر و سازه‌های دریایی دانشگاه علوم و فنون دریایی، خرمشهر، ایران.

(۲) استادیار، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه علوم و فنون دریایی، خرمشهر، ایران.

* نویسنده مسئول: mortezabakhtiari@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۱۸

چکیده

یکی از مهم‌ترین روش‌های تراکم خاک، تراکم دینامیکی می‌باشد که یکی از قدیمی‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های بهبود خاک تا اعماق زیاد است. این روش به دلیل مزایای بسیارش از جمله اقتصادی بودن آن برای اصلاح بسیاری از خاکها به کار گرفته می‌شود. یکی از مهمترین مسائل مؤثر بر استفاده از روش‌های بهبود خاک، اقتصادی بودن روش است. زمان ارائه یک پروژه بهسازی سه روش عمده استفاده از شمع، اصلاح شیمیایی، استفاده از ابزارهای ارتعاشی و تراکم منارد برای تراکم خاک استفاده می‌شود. در این میان روش منارد به دلیل هزینه بسیار کمتر آن نسبت به دیگر روش‌ها از گستردگی کاربرد بیشتری برخوردار است. با توجه به اهمیت عامل اقتصاد در پروژه‌های عمرانی کشور، ضرورت شبیه‌سازی سه‌بعدی و توانایی نرم افزار ABAQUS در ارائه نتایج این تحقیق برای رسیدن به مدلی عددی که قابلیت کاربرد در پروژه‌های عمرانی را داشته باشد اهمیتی دوچندان می‌یابد. در این مقاله، مدل‌سازی عددی تراکم دینامیکی با استفاده از روش اجزای محدود و با بکارگیری نرم افزار ABAQUS برای بهسازی پی با اعمال تغییرات ارتفاع و وزن کوبه به روش منارد برای سه شهر اهواز، آبادان و ماهشهر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق نشان داد که 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.

کلمات کلیدی: ارتفاع کوبه، وزن کوبه، تراکم دینامیکی، روش منارد، ABAQUS.

مقدمه

یکی از روش‌های بهسازی، روش تراکم دینامیکی است. این روش شامل اعمال ضربات تکراری با انرژی زیاد بر سطح خاک با استفاده از کوبه‌هایی 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 متداول‌ترین روش‌های 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 میشود. با توجه به هزینه قابل توجه تراکم آزمایشی و آزمایشهای مورد نیاز، میتوان با مدلسازی عددی این عملیات، کارایی و دقت این روش را بالاتر برد و هزینه‌ها را کاهش داد. در سالیان اخیر چندین مطالعه عددی در زمینه مدل‌سازی عددی تراکم دینامیکی و تهیه روش طراحی تئوری ارائه شده است. منارد^۱ و همکاران (۱۹۷۵) تراکم دینامیکی و همچنین ابزار و آزمون فشار سنجی (PMT) را به جامعه‌ی ژئوتکنیکی معرفی کردند. روش منارد روشی برای اصلاح ویژگی‌های مهندسی خاک‌های درجا در عمق زمین می‌باشد. گزارش‌ها حاکی از آن است که رومیان باستان گونه‌ای از این روش را به کار می‌گرفتند و همچنین این روش در سال ۱۸۷۱ در ایالات متحده، ۱۹۳۳ در آلمان و در اوایل دهه ی ۱۹۴۰ در کشور چین استفاده شده است. اولین منبع درباره‌ی تراکم دینامیکی برای محلی در کشور آلمان در سال ۱۹۳۶ توسط لوس^۲ (۱۹۳۶) گزارش و منتشر گردید. چو و همکاران (۱۹۹۰) با به کارگیری روش پیشنهادی لی و همکاران (۱۹۹۸) که برای محاسبه نیروهای ایجاد شده در حین شمع کوبی بود، 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 پیش‌بینی کنند. مین و همکاران (۱۹۸۴) به ترتیب گزارش کردند که طبق مطالب ارائه شده گامبین (۱۹۸۳) و گایوت^۳ و واراکسین^۴ (۱۹۸۰)، فشار حدی بالای عمق بحرانی (عموماً برای نصف عمق موثر، عمق بحرانی نامیده می‌شود) با سطح انرژی کاربردی در واحد سطح افزایش می‌یابد. از خلاصه‌ی داده‌های حاصل از PMT در محل‌های مختلف مشخص شد که فشار حدی آغازین برای خاک‌های شنی نوعاً بین ۴ تا ۸ بار و برای رس‌ها بین ۱ تا ۳ بار متغیر است. پارت و رودریگز (۱۹۹۲) آثار ضربه را با فرض فرمولاسیون تغییر مکان‌های بزرگ و با دو مدل رفتاری الاستوپلاستیک مختلف بررسی کردند. سلبی و همکاران (۲۰۰۲) با نرم افزار آباکوس پاسخ خاک به ضربه جسم صلب را به صورت عددی تحلیل کردند. یشربی و همکاران (۱۳۸۴) با استفاده از مدل رفتاری الاستیک خطی و غیرخطی، با استفاده از برنامه اجزای محدود انسیس به تحلیل عددی تراکم دینامیکی در خاک‌های دانه‌ای پرداختند. آل لیلیا و آل صفار (۲۰۱۴) اصلاح رفتار خاک ژئوپس را با روش تراکم

^۱Menard^۲Loos^۳Guyot^۴Varaksin

منارد بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که این روش می تواند ابزار بسیار مناسبی برای اصلاح این نوع خاک باشد. معیار بررسی ایشان افزایش تعداد ضربات SPT مورد نیاز برای تراکم خاک قبل و بعد از تراکم منارد بود. ایشان این معیار را برای خاک ژئوپس سست مناسب ترین معیار تشخیص رفتار دانستند. ژوسف^۵ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تحلیلی اثر فشار بر تراکم خاک در سازه های بلند پرداختند. ایشان با استفاده از روش اجزا محدود اثر روابطی میان نیروی وارده به خاک با جابجایی آن بیان کرد .

در این مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود و با بکار گیری نرم افزار آباکوس، اثر برخورد کوبه با وزن و ارتفاع های سقوط مختلف بر روی خاک های سه شهر اهواز، آبادان و ماهشهر مورد ارزیابی قرار میگیرد. همچنین این تکنیک های مدل سازی عددی به صورت مفصل و با جزییات شرح داده می شود و نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی مقایسه و کالیبره شد.

مدل سازی اجزای محدود

در تحقیقاتی که به صورت تحلیل های کامپیوتری صورت می گیرد، برای اینکه بتوان نتایج به دست آمده را مبنایی برای نتیجه گیری ها و مقایسه های بعدی قرار داد لازم است ابتدا از صحت و دقت مدلسازی و نتایج به دست آمده اطمینان حاصل گردد. یکی از مناسب ترین روش ها برای رسیدن به این هدف این است که نتایج حاصله از تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده را با نتایج مدلسازی و تحلیل های کامپیوتری مورد مقایسه و دقت سنجی قرار گیرد. نتایجی که از تحقیقات آزمایشگاهی بر روی نمونه های مشابه مورد تحلیل به دست می آید می تواند به عنوان مبنایی برای استنتاج های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه روش مدل سازی با جزییات ارائه میگرد. همچنین برای بررسی اثر وزن و ارتفاع کوبه بر خاک به ترتیب ۵ ارتفاع (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر) و ۵ وزن کوبه (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ تن) مختلف در نظر گرفته شد. همچنین برای این مطالعه سه خاک اهواز (A)، آبادان (B) و ماهشهر (C) در نظر گرفته شده است. ابعاد خاک و کوبه در کلیه مدل ها بترتیب به صورت یک مکعب مربع ۲۰*۲۰*۲۰ و ۱*۱*۱ فرض شده است. جزییات مدل ها برای خاک شهر اهواز (A) در جدول ۱ به طور کامل آمده است.

جدول ۱: مدل های مورد بررسی برای خاک شهر اهواز

نام مدل	ارتفاع کوبه (متر)	وزن کوبه (تن)	شهر
A-H5-W5	۵	۵	اهواز
A-H10-W5	۱۰	۵	اهواز
A-H15-W5	۱۵	۵	اهواز
A-H20-W5	۲۰	۵	اهواز
A-H25-W5	۲۵	۵	اهواز
A-H5-W10	۵	۱۰	اهواز
A-H10-W10	۱۰	۱۰	اهواز
A-H15-W10	۱۵	۱۰	اهواز
A-H20-W10	۲۰	۱۰	اهواز
A-H25-W10	۲۵	۱۰	اهواز
A-H5-W15	۵	۱۵	اهواز
A-H10-W15	۱۰	۱۵	اهواز
A-H15-W15	۱۵	۱۵	اهواز
A-H20-W15	۲۰	۱۵	اهواز
A-H25-W15	۲۵	۱۵	اهواز
A-H5-W20	۵	۲۰	اهواز
A-H10-W20	۱۰	۲۰	اهواز
A-H15-W20	۱۵	۲۰	اهواز
A-H20-W20	۲۰	۲۰	اهواز
A-H25-W20	۲۵	۲۰	اهواز
A-H5-W25	۵	۲۵	اهواز
A-H10-W25	۱۰	۲۵	اهواز
A-H15-W25	۱۵	۲۵	اهواز
A-H20-W25	۲۰	۲۵	اهواز
A-H25-W25	۲۵	۲۵	اهواز

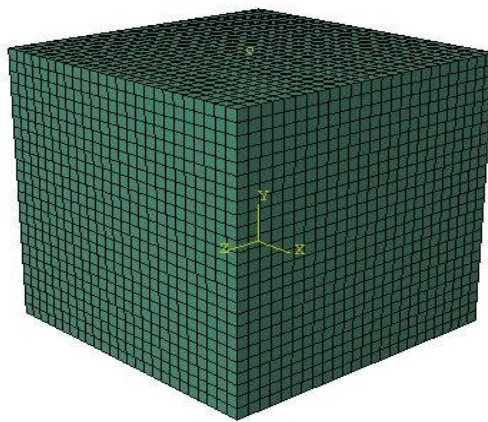
۲-۱- جزییات مدل سازی

در تمامی مدل ها، خاک با استفاده از المان هشت گره ای C3D8R مدلسازی شده اند. این المان دارای ۸ گره بوده و هر گره سه درجه آزادی انتقالی دارد. در این المان برای محاسبه احجام ریاضیاتی و سطوح هندسی از روش انتگرال کاهش یافته استفاده می شود. هم چنین از المان R3D4 برای مدل سازی کوبه استفاده شده است. این المان صلب بوده و گره های آن درجه آزادی ندارد.

۲-۲- خصوصیات مصالح

خصوصیات مدل شامل خاصیت غیر خطی مصالح، رفتار غیر خطی هندسی و تحلیل غیر خطی می باشد. در استفاده از تمام اجزاء خاک از خاصیت الاستو پلاستیک مصالح استفاده شده است. خاصیت غیر خطی مصالح در ABAQUS مستلزم بهره گیری از تنش واقعی متناظر با کرنش حد پلاستیک از رابطه تنش-کرنش مهندسی است. رابطه تنش و کرنش در نرم افزار ABAQUS یکسان فرض شده اند. برای تعریف نمودار تنش کرنش هر تعداد نقطه می تواند استفاده شود. بنابراین می توان با

تقریب خوبی به رفتار واقعی مصالح دست یافت. رفتار مصالح تا حد تنش تسلیم به صورت الاستیک است. پس از آن وارد فاز سخت شدگی کرنشی تا حد رسیدن به تنش نهایی می شوند. چگالی اعضاء هنگام استفاده از تحلیل دینامیکی مدل بایستی تعریف شود. چگالی از طریق منوی Mass Density به مقدار ۱۶۴۲ کیلوگرم بر متر مکعب تعریف می شود. حد مرحله الاستیک نمودار تنش-کرنش از طریق منوی Elastic تعریف می شود. که در آن مدول یانگ برابر است با ۱۵۶ نیوتن بر میلی متر مربع و ضریب پواسون برابر است با ۰/۳ است. برای تعریف رفتار پلاستیک از تئوری دراگر-پراگر استفاده شده است. در این مطالعه برای نمونه صحت سنجی از خاک با تنش نهایی ۰/۱۶۱ نیوتن بر میلی متر مربع اختیار شده است.



شکل ۱: نمونه مدل عددی

۳-۲- شرایط مرزی، تماس و مش بندی

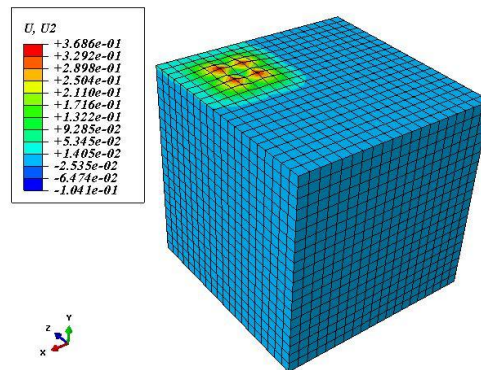
در این مطالعه برای تعریف شرایط مرزی، انتهای خاک به صورت گیردار تعریف شده است. همچنین حرکت صفحات پیرامون خاک در جهت عمود بر صفحه محدود شده است. مش بندی مدل نیز مطابق المان های گفته شده در قسمت قبل انجام گردید. اندازه مش ها به نحوی تعیین شد که نرم افزار بتواند جواب مناسب را محاسبه کند. برای معرفی تماس میان خاک و کوبه از گزینه تماس سطح به سطح (Surface to surface) استفاده شده است. همچنین برای معرفی رفتار بین خاک و کوبه، دو رفتار تماسی عمودی و مماسی تعریف گردید.

۳- بررسی نتایج

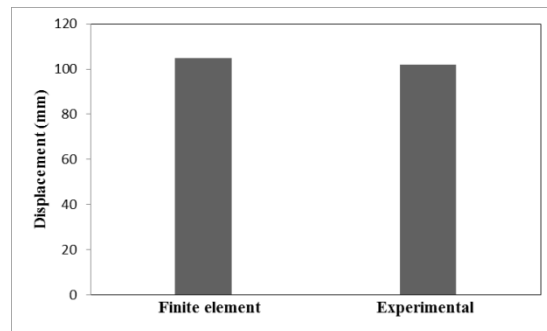
۳-۱- صحت سنجی

انجام مدل های آزمایشگاهی با مقیاس واقعی جهت مطالعه اثر کوبش بر خاک اندکی مشکل و هزینه بر است. روش اجزای محدود یک گزینه ی مناسب جهت بررسی اثر کوبش بر خاک است که با استفاده از آن می توان انواع مدل ها را تحت اثر وزن و ارتفاع سقوط متفاوت کوبه بررسی کرد. از این رو برای صحت سنجی مدل های مورد نظر در این مطالعه،

دو نمونه آزمایشگاهی مطابق روشی که پیش تر گفته شد در نرم افزار ABAQUS مدل سازی گردید. این مدل بر اساس نمونه مورد استفاده در آزمایش مدل افتخاری و یثربی (۱۳۹۰) که در منطقه عسلویه اجرا شده [۱۳] مدل گردیده است. در این مدل کوبه با وزن ۱۸ تن از ارتفاع ۱۵ متری رها شده است. در نمونه آزمایشگاهی میزان نفوذ ۱۰۰ میلی متر بدست آمده است. با توجه به شکل ۲ و ۳ مشاهده می شود در مدل عددی جابجایی ۱۰۴ میلی متر بدست آمده است که مدل عددی مطابقت مناسبی با نمونه آزمایشگاهی دارد و این اختلاف کمتر از ۴ درصد است.

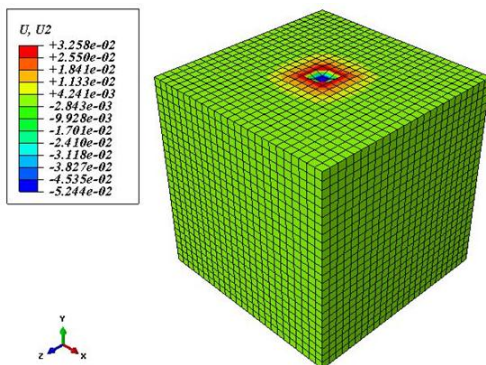


شکل ۲: نتیجه مدل عددی

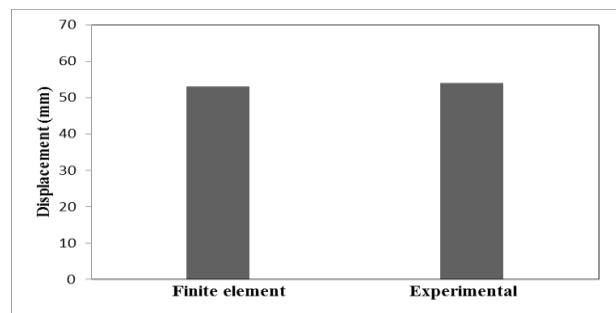


شکل ۳: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی

همچنین به منظور بیشتر صحت‌سنجی مدل تهیه شده از نتایج تحقیق نزهت و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شده است.



شکل ۴: نتیجه مدل عددی براساس مدل هنزت



شکل ۵: مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی [۱]

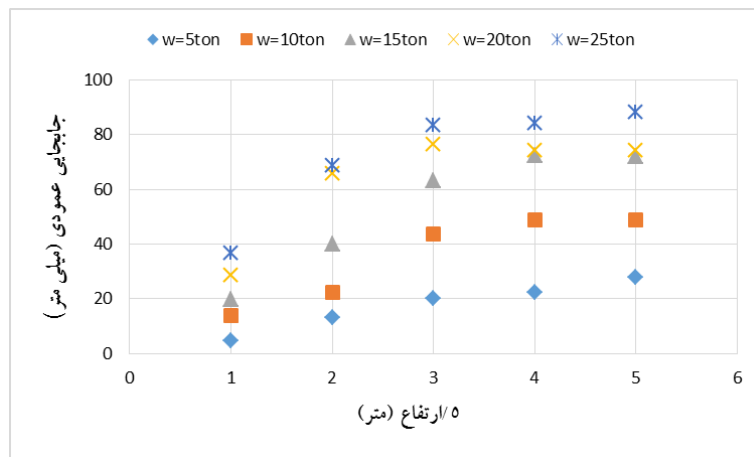
با توجه به صحت سنجی ارائه شده در بخش پیشین، ۷۵ نمونه عددی مدل سازی گردید (جدول ۱) تا تأثیر دو پارامتر ارتفاع سقوط و وزن کوبه مورد بررسی قرار گیرد. نظر به اینکه پارامتر خاک موضوع اساسی مورد بحث تحقیق حاضر می- باشد لذا در این مقاله سه شهر اهواز، آبادان و ماهشهر در استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفته است. نظر به اینکه در رابطه تراکم منارد عمق تأثیر تراکم تحت اثر سه پارامتر زبری دو سطح، وزن کوبه و ارتفاع سقوط می-باشد. لذا چون زبری بین وزنه و سطح خاک با توجه به ماسه‌ای بودن خاک این پژوهش مقداری ثابت است، فقط اثر دو پارامتر ارتفاع سقوط و وزن کوبه مورد مطالعه قرار گرفت.

جدول ۲: مشخصات سه نوع خاک مختلف مورد بررسی

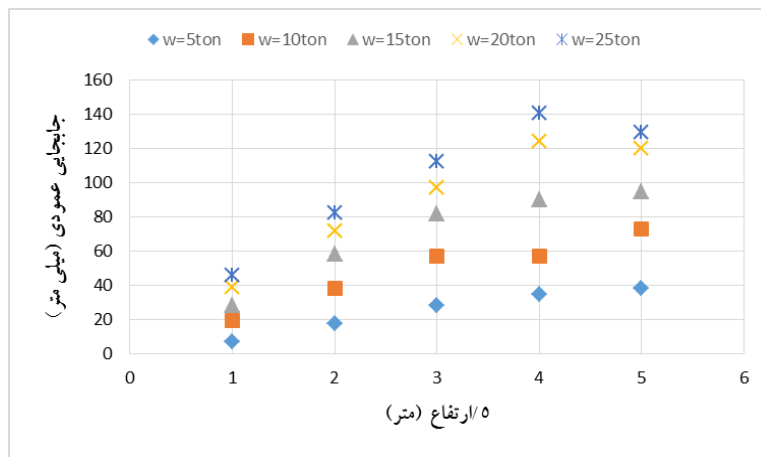
نام شهر	ρ (gr/cm ³)	W_n (%)	ϕ_u (Degree)	ϕ_D (Degree)	C_u (Degree)	C_D (Degree)
اهواز	۱.۶۵-۱.۷۶	۱۹-۲۵	۲۵-۲۸	۲۷-۳۰	۰-۰.۰۵	۱۳۰-۱۵۰
آبادان	۱۱.۴۳-۱.۵۱	۲۹-۳۴	۵-۸	۲۵-۲۸	۰.۲-۰.۳	۰-۰.۰۶
ماهشهر	۱.۸۶	۱۲-۱۴	۳۱-۳۴	۳۲-۳۵	۰-۰.۰۸	۰

۲-۳- اثرات تغییر ارتفاع سقوط کوبه

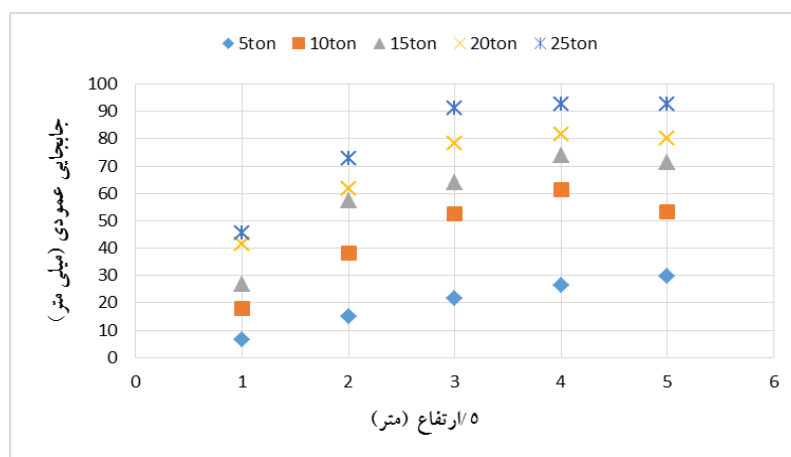
شکل های ۶، ۷ و ۸ اثرات ارتفاع سقوط کوبه بر جابجایی خاک را به ترتیب برای سه شهر اهواز، آبادان و ماهشهر نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود در هر سه منطقه مورد مطالعه با افزایش ارتفاع میزان جابجایی ها افزایش یافته است. هم چنین مشاهده می شود که ارتفاع کوبه رابطه مستقیم با جابجایی دارد بگونه ای که برای هر سه دسته کوبه با اوزان مختلف، افزایش ارتفاع سقوط منجر به افزایش عمق تأثیر شده است. نکته دیگری که مشاهده می شود آن است که در ارتفاع های زیاد، اختلاف عمق تأثیر کمتر شده است و نشان می دهد تنها استفاده از افزایش وزن کوبه نمی تواند عاملی برای افزایش تأثیر تراکم بر خاک باشد و افزایش این مقدار دارای محدودیت تئوری نیز هست. با مقایسه جابجایی سه شهر مشاهده می شود که خاک اهواز، ماهشهر و آبادان با جابجایی به ترتیب ۴/۸۴۹ و ۶/۳۳۲ و ۶/۹۶ میلی متر جابجایی را دارد که نشان دهنده این است که خاک اهواز نسبت به ماهشهر و آبادان دارای پارامترهای مقاومتری می باشد که در اکثر موارد این موضوع را مشاهده می گردد.



شکل ۶: رابطه ارتفاع-جابجایی برای شهر اهواز



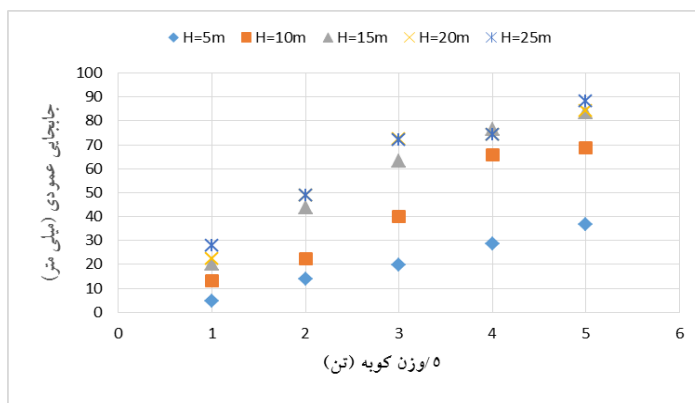
شکل ۷: رابطه ارتفاع-جابجایی برای شهر آبادان



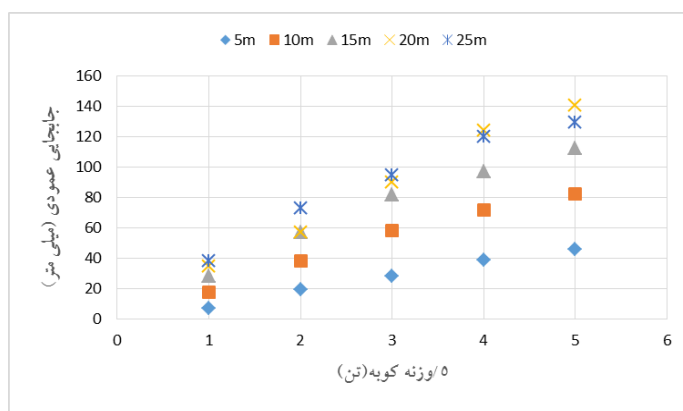
شکل ۸: رابطه ارتفاع-جابجایی برای شهر ماهشهر

۳-۳- اثرات تغییر وزن کوبه

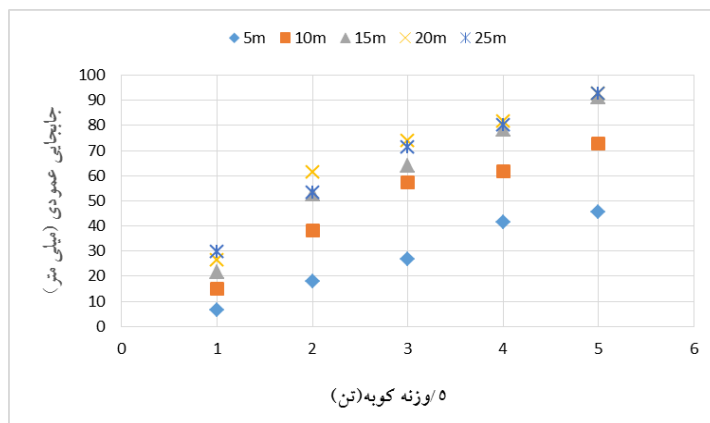
شکل های ۶، ۷ و ۸ اثرات وزن کوبه بر جابجایی خاک را به ترتیب برای سه شهر اهواز، آبادان و ماهشهر نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود در هر سه منطقه مورد مطالعه با افزایش وزن میزان جابجایی ها افزایش یافته است. هم چنین مشاهده می شود که وزن کوبه رابطه مستقیم با جابجایی دارد بگونه ای که برای هر سه دسته کوبه با اوزان مختلف، افزایش ارتفاع سقوط منجر به افزایش عمق تأثیر شده است. نکته دیگری که مشاهده می شود آن است که در اوزان زیاد، اختلاف عمق تأثیر کمتر شده است و نشان می دهد تنها استفاده از افزایش وزن کوبه نمی تواند عاملی برای افزایش تأثیر تراکم بر خاک باشد و افزایش این مقدار دارای محدودیت تئوری نیز هست. با مقایسه جابجایی سه شهر مشاهده می شود که خاک اهواز، ماهشهر و آبادان با جابجایی به ترتیب $4/849$ و $7/5$ و 8 میلی متر جابجایی را دارد که نشان دهنده این است که خاک اهواز نسبت به ماهشهر و آبادان دارای پارامترهای مقاومتری می باشد که در اکثر موارد این موضوع را مشاهده می گردد.



شکل ۹: رابطه ارتفاع-جابجایی برای شهر اهواز



شکل ۱۰: رابطه ارتفاع-جابجایی برای شهر آبادان



شکل ۱۱: رابطه ارتفاع-جابجایی برای شهر ماهشهر

۳-۴- اثر وزن و ارتفاع سقوط کوبه بر عمق تاثیر

جدول ۳ عمق تاثیر را برای کلیه مدل‌ها نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده و محاسبات انجام شده، مشاهده می‌گردد که در شهر اهواز هنگامی که وزن کوبه ثابت می‌باشد و ارتفاع از ۵ متر به ۱۰ متر افزایش پیدا میکند میزان جابجایی ۵۷/۱۷۰ درصد بوده و افزایش وزن کوبه به این میزان جابجایی افزایش می‌یابد و هنگامی که ارتفاع از ۲۰ به ۲۵ متر افزایش می‌یابد میزان جابجایی ۲۳/۰۷ درصد افزایش یافته است.

با توجه به نتایج بدست آمده و محاسبات انجام شده مشاهده می‌گردد که در شهر آبادان هنگامی که وزن کوبه ثابت می‌باشد و ارتفاع از ۵ متر به ۱۰ متر افزایش پیدا میکند میزان جابجایی ۴۲/۱۴۹ درصد بوده و افزایش وزن کوبه به این میزان جابجایی افزایش میابد و هنگامی که ارتفاع از ۲۰ به ۲۵ متر افزایش میابد میزان جابجایی ۱۰٫۵۶ درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که در شهر ماهشهر هنگامی که وزن کوبه ثابت می‌باشد و ارتفاع از ۵ متر به ۱۰ متر افزایش پیدا میکند میزان جابجایی ۷۴/۱۳۲ درصد بوده و افزایش وزن کوبه به این میزان جابجایی افزایش میابد و هنگامی که ارتفاع از ۲۰ به ۲۵ متر افزایش میابد میزان جابجایی ۰/۷۹ درصد افزایش یافته است.

جدول ۳ : عمق تاثیر در شهرهای مختلف

وزن کوبه (T)	ارتفاع سقوط (m)	عمق تاثیر (m) در اهواز	عمق تاثیر (m) در آبادان	عمق تاثیر (m) در ماهشهر
۵	۵	۴٫۸۴۹	۶٫۹۶	۶٫۳۳۲
۱۰	۵	۱۳٫۹۷	۱۹٫۳۱	۱۸٫۰۴
۱۵	۵	۱۹٫۷۸	۲۸٫۳۵	۲۶٫۶۷
۲۰	۵	۲۸٫۷۴	۳۸٫۹۲	۴۱٫۴۶
۲۵	۵	۳۶٫۸۱	۴۵٫۹۸	۴۵٫۴۷
۵	۱۰	۱۳٫۱۲	۱۷٫۳۶	۱۴٫۹۷
۱۰	۱۰	۳۲٫۵۰	۳۸٫۳۸	۳۸٫۲۷
۱۵	۱۰	۳۹٫۹۷	۵۷٫۹۷	۵۷٫۵۰
۲۰	۱۰	۶۵٫۸۳	۷۱٫۶۷	۶۱٫۶۵
۲۵	۱۰	۶۸٫۵۸	۸۲٫۰۴	۷۲٫۶۶
۵	۱۵	۲۰٫۱۳	۲۷٫۹۲	۲۱٫۵۷
۱۰	۱۵	۱۴٫۳۷	۵۶٫۹۳	۵۲٫۶۶
۱۵	۱۵	۶۳٫۱۷	۸۱٫۴۲	۶۳٫۸۵
۲۰	۱۵	۷۶٫۴۱	۹۷٫۰۲	۷۸٫۱۶
۲۵	۱۵	۸۳٫۶۱	۱۱۲٫۳	۹۱٫۳۳
۵	۲۰	۲۲٫۴۳	۳۴٫۷۳	۲۶٫۲۴
۱۰	۲۰	۴۹٫۰۴	۶۷٫۸۳	۶۱٫۴۳
۱۵	۲۰	۷۲٫۴۴	۸۹٫۷۲	۷۳٫۸۶
۲۰	۲۰	۷۴٫۱۳	۱۲۴	۸۱٫۸۷
۲۵	۲۰	۸۴٫۱۹	۱۴۰٫۵	۹۲٫۵۱
۵	۲۵	۲۷٫۷۸	۳۸٫۰۴	۲۹٫۷۰
۱۰	۲۵	۴۹٫۰۴	۷۲٫۷۲	۵۳٫۳۹
۱۵	۲۵	۷۲٫۱۹	۹۴٫۹۴	۷۱٫۲۳
۲۰	۲۵	۷۴٫۱۳	۱۱۹٫۷	۸۰٫۳۰
۲۵	۲۵	۸۸٫۲۶	۱۲۹٫۲	۹۴٫۸۴

بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه مدل سه بعدی عددی برای تراکم ارائه شد و توزیع تنش مؤثر تحت اثر کوبه‌های با اوزان مختلف و ارتفاع سقوط‌های متفاوت در خاک تحت تراکم بررسی گردید. برای مدلسازی فرآیند تراکم به روش منارد از روش عددی اجزا محدود استفاده شد. نرم افزار ABAQUS که به روش اجزا محدود برنامه‌نویسی شده به عنوان نرم افزار شبیه‌سازی انتخاب شد. تحلیل توزیع تنش کل، توزیع فشار حفره‌ای و در نتیجه توزیع تنش مؤثر بر مدلها انجام پذیرفت تا اثر این پارامترها بر رفتار خاک متراکم بررسی گردد. برای صحت سنجی نتایج مدل ABAQUS از مقایسه با نتایج پژوهش

آزمایشگاهی نزهت و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام شده به عنوان تز مقطع دکترا انجام شده استفاده شد. سپس مطالعه‌ای پارامتریک با در نظر گرفتن پارامترهای اوزان مختلف کوبه و ارتفاع سقوط‌های متفاوت انجام شد و نتایج زیر حاصل گردید: میزان نفوذ کوبه در خاک به ازای مش‌های ۵ سانتی‌متری خاک، ۵۸ میلی‌متر و اتساع خاک ۵۵ میلی‌متر به دست آمده که دقت بالای نتایج ABAQUS و همچنین توانایی مدل‌سازی اتساع خاک را نشان می‌دهد (نتایج آزمایشگاهی تغییر شکل خاک به میزان ۵۴ میلی‌متر را نشان داد). ضمن این که مدل عددی نزهت و همکاران در سال ۲۰۱۳، که در نرم‌افزار LS-DYNA فرآیند تراکم دینامیکی منارد را به صورت دو بعدی شبیه‌سازی نموده بود، توانایی مدل‌سازی اتساع خاک را نداشت (اتساع در خاک‌های ماسه‌ای عاملی تعیین‌کننده است). میزان نفوذ کوبه در خاک به ازای مش‌های ۷ سانتی‌متری ۶۴/۲ میلی‌متر، به ازای مش‌های ۴ سانتی‌متری ۵۴ میلی‌متر و به ازای مش‌های ۳ سانتی‌متری ۵۳/۳ میلی‌متر به دست آمد. لذا مش ۴ سانتی‌متری برای خاک به عنوان مش بهینه به دلیل انطباق پاسخ‌ها با نتایج آزمایشگاهی انتخاب گردید. حداکثر تغییر شکل خاک در محل ضربه کوبه مشاهده شد، این میزان در عمق خاک کاهش یافت. حداکثر تنش تماسی در سطح خاک در محل تماس با کوبه رخ داد و این پارامتر با عمق خاک به شدت کاهش یافت. مقایسه نمودارها نشان داد که تنش مؤثر در خاک تحت تراکم منارد با افزایش عمق کاهش می‌یابد. علت موضوع را می‌توان در متراکم بودن لایه‌های بالایی خاک و در نتیجه تحمل بالاتر بار توسط آنها در لایه‌های متراکم فوقانی دانست که باعث افزایش تنش مؤثر در لایه‌های فوقانی و کاهش آن با حرکت به سمت عمق خاک می‌گردد. 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.

منابع

- Lee, F. H., and Gu, Q. (2004).** Method for estimating dynamic compaction effect on sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(2), 139-152.
- Vardhanabhuti, B., and Mesri, G. (2007).** Coefficient of earth pressure at rest for sands subjected to vibration. *Canadian geotechnical journal*, 44(10), 1242-1263.
- 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.
- Pan, J. L., and Selby, A. R. (2002).** Simulation of dynamic compaction of loose granular soils. *Advances in engineering software*, 33(7), 631-640.
- Martin, G. R., Nashed, R., Shenthan, T., Kanagalingam, T., and Ecemis, N. (2006).** Liquefaction Remediation in Silty Soils Using Dynamic Compaction and Stone Columns (No. MCEER-06-0009). Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Parvizi, M. (1999).** Centrifuge modelling of low energy dynamic compaction (Doctoral dissertation, University of Manchester).
- Lukas, R. G. (1986).** Dynamic compaction for highway construction, volume 1: design and construction guidelines.
- Feng, S. J., Tan, K., and Shui, W. H. (2013).** Dynamic Compaction of Ultra-High Energy in Combination with Ground Replacement in Coastal Reclamation Areas. *Marine Georesources & Geotechnology*,
- WWW.Simulia.com Visited at: 2014-08-17.**
- Mayne, P. W., Jones Jr, J. S., and Dumas, J. C. (1984).** Ground response to dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6), 757-774.
- Hamidi, B., Varaksin, S. and Nikraz, H. (2010).** "Predicting Soil Parameters by Modelling Dynamic Compaction Induced Subsidence", 6th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM6), Perth, Australia, paper 1150.
- Hamidi, B., Varaksin, S., and Nikraz, H. (2011).** The application of dynamic compaction to HFO tanks. In *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE)*, Perth (pp. 7-9).
- Hamidi, B., Nikraz, H., and 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
- Leonards, G. A., Holtz, R. D., and Cutter, W. A. (1980).** Dynamic compaction of granular soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(1), 35-44.

-
- Al-Layla, M. T., and Al-Saffar, Q. N. (2014).** Improving The Engineering Properties of The Gypseous Soil Using Dynamic Compaction Method. *Al-Rafidain Engineering Journal*, 22(2).
- Thilakasiri, H. S., Gunaratne, M., Mullins, G., Stinnette, P., and Jory, B. (1996).** Investigation of impact stresses induced in laboratory dynamic compaction of soft soils. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 20(10), 753-767.
- Nazhat, Y. N. Y. (2013).** Behaviour of sandy soil subjected to dynamic loading. Ph.D. Thesis, The University of Sydney.
- Jozef Vlcek, Terezie Vondráčková(۲۰۱۶).** Comparative Analysis of Dynamic Methods for Earthwork Controlling, Volume 161, *Procedia Engineering*, 2016, Pages 483-488.