



مطالعه آزمایشگاهی تاثیر تعداد و آرایش سوراخ های کوبه مشبک بر تراکم دینامیکی فراساحلی

محمد حسین تقی زاده ولدی^۱، محمد رضا عطرچیان^{۲*}، عطا جعفری شالکوهی^۳، سید احمد حسینی^۴

^۱ دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندر انزلی، بندر انزلی، ایران

^۴ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۱۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۱۹

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

کلمات کلیدی:

تراکم دینامیکی فراساحلی

کوبه مشبک

استهلاک سرعت

آرایش سوراخ ها

عمق حفره

خلاصه: در تراکم دینامیکی فراساحلی، به منظور کاهش اثر آب بر استهلاک سرعت برخورد کوبه با بستر دریا از کوبه های مشبک استفاده می گردد. لذا در طراحی این کوبه های فراساحلی، تعداد و ابعاد سوراخ ها و مساحت آنها باید متناسب با ابعاد و مساحت کوبه و جان مشبک آن باشد. به طوری که علاوه بر برخورداری از کمترین استهلاک سرعت در هنگام حرکت در عمق آب و دستیابی به بیشترین سرعت در لحظه برخورد با بستر دریا، نفوذ قابل قبولی به خاک داشته و با ایجاد عمق حفره مناسب در آن، منجر به حداکثر شعاع و عمق بهبود خاک بستر دریا گردد. در این مقاله ورود کوبه های مشبک ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ به آب و تاثیر تعداد، ابعاد و آرایش سوراخ های کوبه، بر سرعت برخورد با خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و عمق حفره ایجاد شده در آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرعت برخورد کوبه های مشبک وابسته به مساحت سوراخ های آن و عمق حفره ایجاد شده در خاک، میزان انرژی انتقال یافته از کوبه به خاک و شعاع و عمق بهبود آن وابسته به مساحت جان مشبک کوبه می باشد. لذا در تراکم دینامیکی بستر دریا، افزایش جرم کوبه بدون مشبک نمودن آن نمی تواند راهکار مناسبی جهت افزایش سرعت برخورد کوبه با بستر دریا و عامل تاثیرگذاری در نشست و تراکم خاک محسوب شود. همچنین افزایش جرم کوبه و ارتفاع سقوط آن بیش از ارتفاع بهینه سقوط علاوه بر افزایش هزینه های اجرایی، مستلزم استفاده از شناور های بزرگ و جرقیل های طولیل و با ظرفیت باربری زیاد است.

۱- مقدمه

مورد استفاده قرار گرفت [۲-۵]. در سال ۱۹۷۵ در پوینت نویر^۲ در کشور گابن، تراکم دینامیکی به منظور بهبود مقاومت غیر فعال ماسه سست بستر دریا، مورد استفاده قرار گرفت. وزن کوبه مخصوص طراحی شده برای این پروژه ۱۲ تن بود. قبل از بهسازی زمین یک لایه به ضخامت ۰/۴ متر از ماسه حاوی سنگریزه بر روی بستر دریا و در عمق ۱۳/۵ متری از سطح آب ریخته شد. به طور کلی تراکم دینامیکی این پروژه ۱۴۰۰۰ متر مربعی در دو فاز با شدت tm/m^2 ۴۰۰ به منظور دستیابی به ظرفیت باربری مجاز ۴۰۰ کیلوپاسکال

اولین کاربرد بهسازی خاک در بستر دریا به سال ۱۹۷۰ بر می گردد. لوئی منارد اولین پروژه تراکم دینامیکی بستر دریا را در سال ۱۹۷۳ به عنوان بخشی از احداث پایگاه نظامی بریست^۱ در فرانسه پیش از ساخت اسکله آن انجام داد [۱]. در این پروژه یک کوبه ۱۱ تنی به طور ویژه طراحی شد که به منظور تراکم ۳ متر از آبرفت سست بستر دریا در منطقه ای به مساحت ۴۵۰۰ متر مربع

1 . Brest

* نویسنده عهده دار مکاتبات: atrechian@iauz.ac.ir

2 . Pointe Noire



انجام شد [۶]. در سال ۱۹۷۵ در پروژه آدوالا^۱ در کشور سوئد به مساحت ۵۰۰۰۰ متر مربع از تراکم دینامیکی بستر دریا به منظور بهسازی یک لایه موج شکن که در بستر دریا و در زیر محفظه پیش ساخته قرار دارد استفاده گردید. با توجه به اندازه سنگ های ریخته شده، تراکم دینامیکی با استفاده از کوبه های ۴۰ تنی انجام شد که از ارتفاع ۴۰ متری توسط ابرماشین های منارد رها می شدند [۶]. در سال ۱۹۷۷ از یک کوبه ۳۲ تنی به منظور تراکم لایه ای از ماسه لای دار به ضخامت ۵ متر و یک لایه رویه از خاکریز سنگی به ضخامت ۱/۵ تا ۲ متر که در عمق ۱۰ متری زیر سطح آب دریا قرار داشت استفاده گردید که در این لایه رویه، خاکریز سنگی به منظور کاهش خطر روانگرایی فونداسیون موج شکن در پایگاه دریایی کویت تعبیه شده بود. بهسازی بستر دریا در منطقه ای به وسعت تقریبی ۳۶۰۰۰ مترمربع انجام شد [۵ - ۷]. در سال ۱۹۷۷، تراکم دینامیکی جهت بهسازی بستر دریا در محل اسکله صید ماهی اس فکس^۲ در کشور تونس انجام شد. در این پروژه عمق آب در حدود یک متر و بستر دریا از یک لایه رس بسیار نرم به ضخامت ۵ متر تشکیل شده بود. پس از آن ماسه لای دار به ضخامت ۲ متر و ماسه رسی متراکم به ضخامت ۳ متر و رس سفت قرار داشت. تراکم دینامیکی با سقوط یک کوبه ۱۷ تنی به صورت یک مربع شبکه بندی شده به فاصله ۲ متر انجام شد. عملیات تراکم در ۳ تا ۵ فاز و با ۲ تا ۱۰ ضربه در هر نوبت صورت گرفت [۵ و ۸]. در سال ۱۹۷۹، تراکم دینامیکی در منطقه ای به وسعت ۱۳۸۰۰ متر مربع قبل از قرار دادن قسمت های پیش ساخته در اسکله لاگوس^۳ در نیجریه انجام شد. در ابتدا بستر دریا به اندازه ۱۵ متر حفاری شد و کاهش سطح پیدا کرد. سپس خاکریز سنگی به ضخامت یک متر احداث شد. بهسازی خاک با استفاده از کوبه ای به وزن ۴۰ تن به منظور بهسازی خاکی به ضخامت ۱۵ متر انجام گرفت و بیش از ۵ مرحله تراکم دینامیکی در مناطق مختلف اعمال شد [۵]. در سال ۱۹۸۰، یک کارخانه آب شیرین کن که در ژاپن مونتاژ شده بود توسط یدک کش به منطقه یانبو^۴ در عربستان سعودی انتقال یافت و بر روی یک فونداسیون که در بستر دریا با استفاده از تراکم دینامیکی آماده شده بود قرار گرفت. بستر دریا از یک لایه ماسه لای دار سست به ضخامت ۸ متر تشکیل

1 . Udevalla
2 . Sfax
3 . Lagos
4 . Yanbu

شده بود که ۴ متر فوقانی آن بسیار ناهمگن بود. از این رو ۴ متر فوقانی بستر دریا برداشته شده و مرجان های خرد شده جایگزین آن شد. سپس تراکم دینامیکی با استفاده از کوبه ای به وزن ۱۷ تن که در یک مربع شبکه بندی شده به فاصله ۸ متر سقوط می نماید انجام شد. تعداد ضربات در هر نوبت از فازهای تراکم بین ۱۰ تا ۱۲ بار متغیر بود [۵]. در سال ۲۰۱۰، تراکم دینامیکی به منظور بهسازی خاک بستر دریا در جنوب شرق آسیا مورد استفاده قرار گرفت. کوبه مشبک با سطح کوبش مربع شکل به ابعاد ۱/۱×۷/۷ متر و با وزن ۳۸/۵ تن، طوری طراحی شد که در هنگام حرکت در عمق آب، استهلاک سرعت کوبه توسط آب به حداقل رسد و پس از رها شدن از ارتفاع ۵ متری بالای سطح آزاد آب، با حداکثر سرعت ۴۳۰ متر بر دقیقه به سطح خاک بستر دریا برخورد نماید [۹]. فنگ و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی روش تراکم دینامیکی با انرژی زیاد برای بهسازی خاک یک منطقه ساحلی پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که روش ابر تراکم دینامیکی خاک یک راه موثر جهت بهسازی خاک درشت دانه در مناطق ساحلی است. این روش کمک می کند تا بتوان به عمق بهبود بیشتر خاک و ظرفیت باربری بالاتر زمین در مقایسه با روش تراکم دینامیکی با انرژی کم دست یافت [۱۰]. عبدی زاده (۲۰۱۱)، با بررسی نتایج یک سری آزمون های مدل سازی شده آزمایشگاهی بر روی خاک دانه ای نشان داد که هر چقدر قطر کوبه ها افزایش یابد جهت بالا بردن راندمان کوبش باید از کوبه های با وزن بیشتر استفاده نمود. نتایج نشان داد که کوبه های با انرژی یکسان ولی با وزن و ارتفاع سقوط متفاوت، نمی توانند منجر به ظرفیت باربری یکسان در خاک گردند زیرا نیروی محرک های آنها با یکدیگر برابر نیست. همچنین علی رغم افزایش تعداد کوبش ها، انرژی حاصل از کوبش با کوبه های کوچک، برای متراکم کردن لایه های بالایی صرف می شود و نمی تواند به لایه های پایین تر برسد [۱۱]. میچلین و همکاران (۲۰۱۵)، عملیات بهبود خاک را که برای پی عمیق کارخانه تبدیل انرژی التاس در آلیاگا ترکیه انجام شده بود، در قالب یک مطالعه موردی بررسی کردند. به منظور افزایش ظرفیت باربری پی های عمق و همچنین تنظیم نشست های کلی و جزئی در کل منطقه، تراکم دینامیکی همراه با جایگزینی دینامیکی انجام شد. نتایج نشان داد که با توجه به شرایط بحرانی پس از بهبود، ظرفیت باربری خاک

جدول ۱: مشخصات ژئوتکنیکی ماسه بندر انزلی

Table 1. Geotechnical properties of Anzali Port sand

G_s	e_{max}	e_{min}	$\gamma_{d_{min}}$ (kN/m^3)	$\gamma_{d_{max}}$ (kN/m^3)	C_c	C_u	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	USCS
۲/۶۷	۰/۷۱	۰/۵۷	۱۵/۶	۱۶/۹	۱/۲	۲/۴	۱/۱۸	۰/۲۱	SP-SM



شکل ۲: خاک اشباع و ارتفاع آب روی آن
Fig. 2. Saturated soil and water height on it



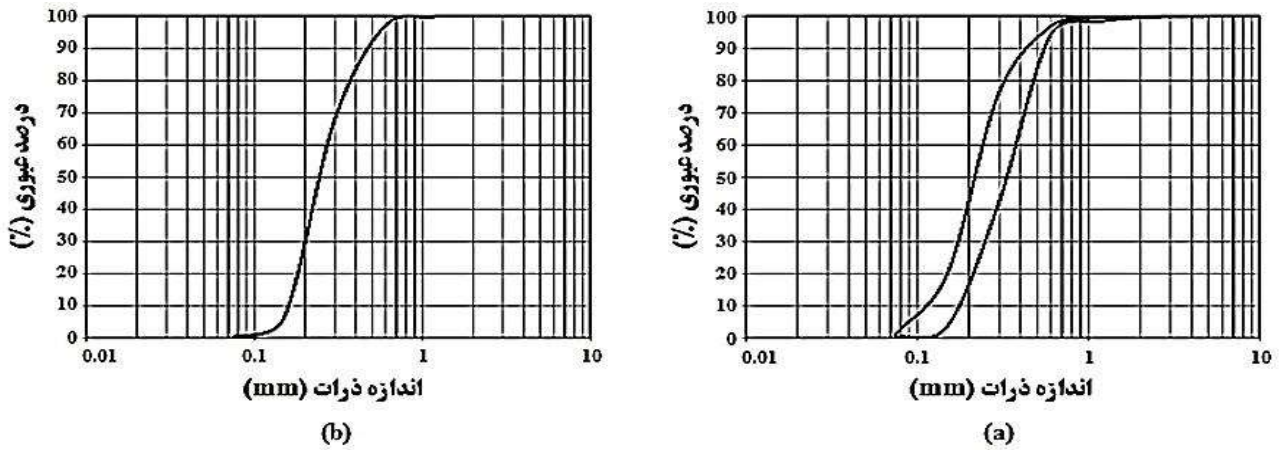
شکل ۱: تانک آزمایش
Fig. 1. Test tank

آرایش سوراخ های کوبه، بر سرعت برخورد با خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و عمق حفره ایجاد شده در آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- مصالح و روش ها

مطابق شکل ۱، یک تانک آزمایش به شکل مکعب و با ابعاد $100 \times 100 \times 80$ سانتی متر طوری طراحی شده است که اثر جداره ها بر نتایج ناچیز باشد. جداره های طرفین و کف تانک از ورق فولادی ۲ میلی متری با جوشکاری دوطرفه و جدار پیشانی آن از شیشه ۱۰ میلی متری تشکیل شده است. جهت اطمینان از عدم نشست آب درون تانک، محل جوشکاری ورق های فولادی و اتصال شیشه به آنها توسط چسب آب بندی به طور مناسب پوشش داده می شود و در سمت چپ تانک، یک شیر جهت تخلیه آب درون تانک در مواقع ضروری تعبیه شده است. به منظور جذب امواج ناشی از برخورد کوبه با سطح خاک توسط جداره های تانک و عدم بازگشت آن به دامنه محاسباتی پس از برخورد به مرزهای طرفین، جداره های اطراف تانک آزمایش را با ورق

پس از بهسازی ۳۲۱ کیلوپاسکال بود و ضوابط پروژه که ۳۰۰ کیلو پاسکال است را رعایت می کند [۱۲]. شن و همکاران (۲۰۱۸)، یک مطالعه موردی در مورد اثر تراکم دینامیکی بر پتانسیل روانگرایی خاک ارائه کردند. نتایج نشان داد که پتانسیل روانگرایی در لایه بحرانی زمین بهسازی شده می تواند توسط تراکم دینامیکی کاهش یابد [۱۳]. در پژوهش های انجام شده، به منظور کاهش اثر آب بر استهلاک سرعت برخورد کوبه با بستر دریا از کوبه های مشبک استفاده شده است؛ اما تعداد و ابعاد سوراخ ها و مساحت آنها که باید متناسب با ابعاد و مساحت کوبه و جان مشبک آن باشد، کمتر مورد پژوهش قرار گرفته است. زیرا کوبه های فراساحلی باید طوری طراحی گردد که علاوه بر برخورداری از کمترین استهلاک سرعت در هنگام حرکت در عمق آب و دستیابی به بیشترین سرعت در لحظه برخورد با بستر دریا، نفوذ قابل قبولی به خاک داشته و با ایجاد عمق حفره مناسب در آن، منجر به حداکثر شعاع و عمق بهبود خاک بستر دریا گردد. در این مقاله، ورود کوبه های مشبک ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی 3×3 ، 4×4 و 5×5 به آب و تاثیر تعداد، ابعاد و

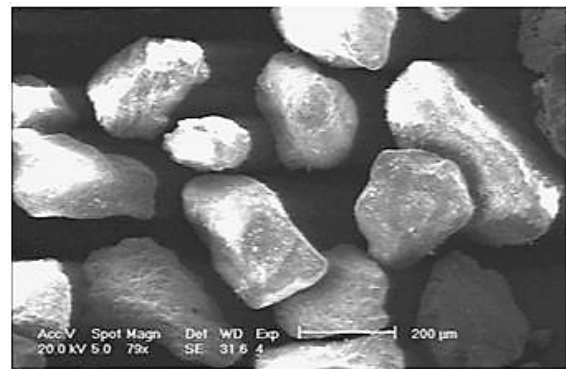


شکل ۳: (a) دامنه توزیع و (b) شاخص دانه بندی نمونه ماسه بندر انزلی

Fig. 3. (a) Amplitude distribution and (b) aggregation index for Anzali Port sand samples

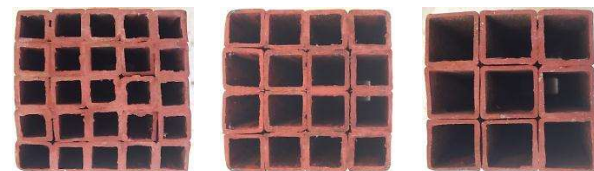
پلی استایرن به ضخامت ۵ سانتی متر پوشش داده می شود. سپس مطابق شکل ۲، مقادیر مناسب از ماسه لای دار بدانه بندی شده که از بستر دریا خزر در بندر انزلی تهیه و مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است، در سه لایه ۱۰ سانتی متری در داخل تانک آزمایش ریخته و کوبیده می شود تا به ضخامت ۳۰ سانتی متر و درجه تراکم ۴۰٪ برسد. زیرا خاک بستر دریا به دلیل رسوبگذاری و تحکیم رسوبات در اثر موج و بارگذاری طولانی مدت ناشی از وزن آب روی آن، از تراکم نسبی برخوردار است. سپس تانک آزمایش تا ارتفاع ۴۰ سانتی متر بالای سطح خاک به آرامی با آب پر می شود تا تراکم اولیه خاک دستخوش تغییر نگردد. پس از آن کوبه های مشبک از ارتفاع ۵۰ سانتی متری بالای سطح آزاد آب از حالت سکون رها می گردد و مسیر حرکت آنها در عمق آب از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا لحظه برخورد با سطح خاک توسط دوربین پرسرعت ثبت می گردد. پس از برخورد کوبه با سطح خاک، عمق حفره ایجاد شده در آن بعد از هر ضربه اندازه گیری می شود.

در شکل های ۳ و ۴، به ترتیب دامنه توزیع و شاخص دانه بندی نمونه ماسه بندر انزلی و تصویر میکروسکوپی آن نشان داده شده است. در شکل ۵، شکل هندسی کوبه های مذکور نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد سه نوع کوبه مشبک با تعداد سوراخ های متغیر ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ برای تراکم دینامیکی خاک شبیه سازی شده از بستر دریا به روش آزمایشگاهی ساخته شده است. ارتفاع کوبه ها طوری در نظر گرفته شده است که با توجه به مصالح به کار رفته در



شکل ۴: تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه بندر انزلی

Fig. 4. Microscopic image of Anzali Port sand sample



سوراخ ۲۵
آرایش: ۵×۵

سوراخ ۱۶
آرایش: ۴×۴

سوراخ ۹
آرایش: ۳×۳



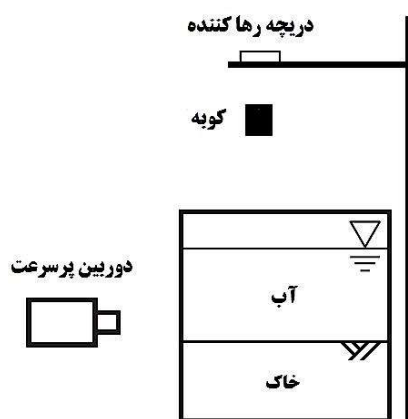
شکل ۵: کوبه های مشبک با آرایش ماتریسی

Fig. 5. Lattice pounders with matrix arrangement

جدول ۲: مشخصات هندسی کوبه های مشبک

Table 2. Geometric properties of lattice pounders

تعداد سوراخ	آرایش سوراخ	ابعاد بیرونی کوبه (cm)	ابعاد سوراخ (cm)	ضخامت جدار (cm)	فاصله بین سوراخ‌ها (cm)	مساحت سوراخ‌ها (cm ^۲)	مساحت جان مشبک کوبه (cm ^۲)	مساحت دیواره سوراخ‌ها (cm ^۲)	ممان اینرسی (cm ^۴)
۹	۳×۳	۱۰×۱۰×۲۲/۵	۲/۸۳	۰/۲۵	۰/۵	۷۵/۲۵	۲۴/۷۵	۲۲۹۵	۱۹
۱۶	۴×۴	۱۰×۱۰×۱۶/۵	۲	۰/۲۵	۰/۵	۶۴	۳۶	۲۱۱۲	۲۴
۲۵	۵×۵	۱۰×۱۰×۱۴/۵	۱/۵	۰/۲۵	۰/۵	۵۶/۲۵	۴۳/۷۵	۲۱۷۵	۲۹/۱۶



شکل ۷: تصویر شماتیک از تجهیزات آزمایش

Fig. 7. Schematic image of the test equipment



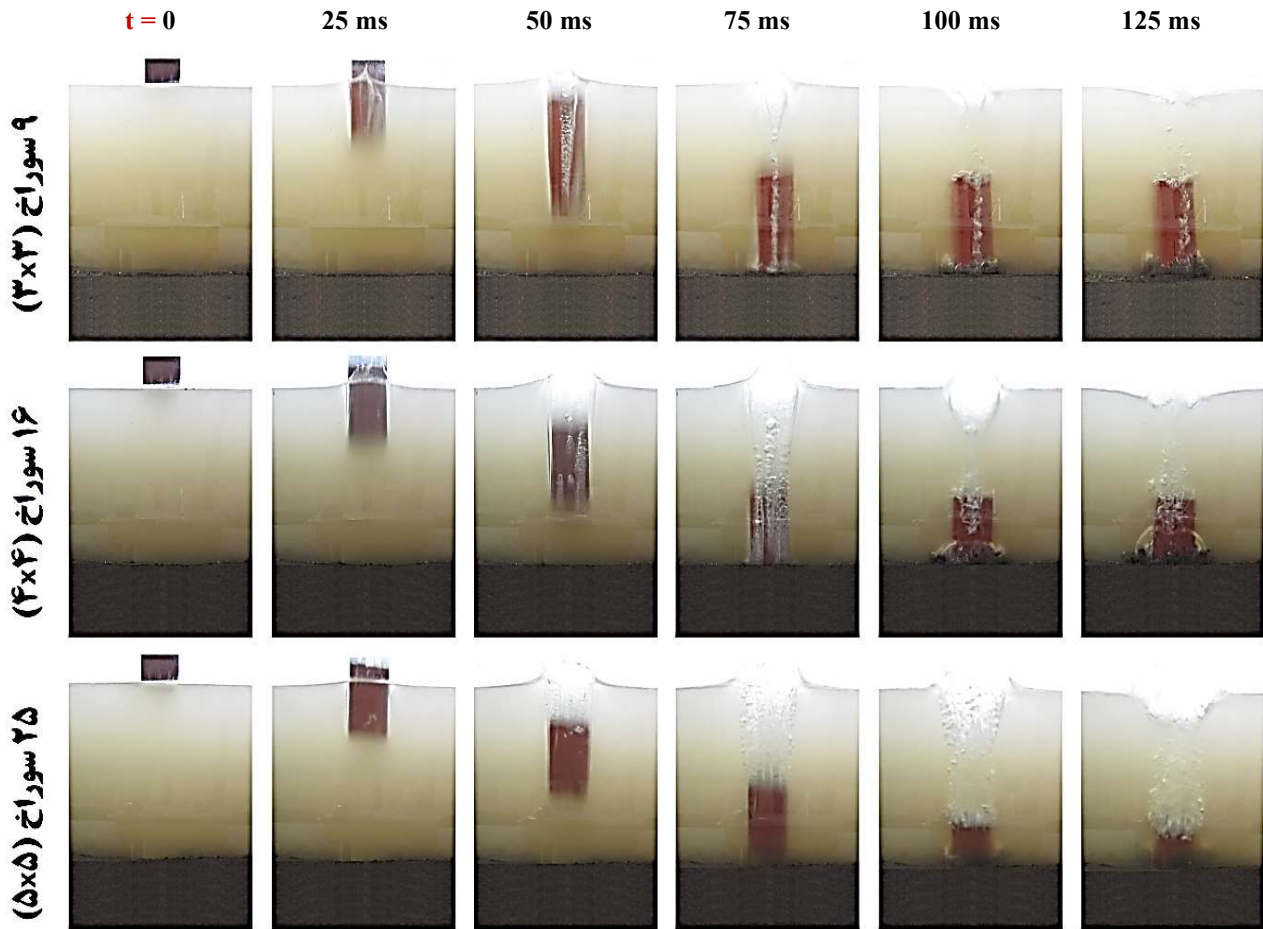
شکل ۶: دوربین فیلمبرداری پرسرعت

Fig. 6. High-speed camera

حرکت در عمق آن تا لحظه برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش مورد استفاده قرار می گیرد. دوربین فیلم برداری پرسرعت در فاصله مناسب از جداره شیشه ای تانک قرار گرفته و حالت ضبط فیلم فعال می گردد. پس از برطرف شدن تلاطم آب داخل تانک و رسیدن به حالت ساکن، کوبه از دریچه رها کننده که در ارتفاع ۵۰ سانتی متری بالای سطح آزاد آب قرار دارد، با سرعت اولیه صفر متر بر ثانیه سقوط می نماید. بر طبق رابطه سقوط آزاد اجسام، کوبه در هنگام برخورد با سطح آزاد آب به سرعت ۴/۴۳ متر بر ثانیه می رسد. لحظه ورود کوبه به داخل آب و حرکت در عمق آن تا برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش، توسط دوربین فیلم برداری ضبط می گردد و پس از اتمام آزمایش، تصاویر ضبط شده جهت پردازش به کامپیوتر منتقل می گردد. سپس فریم های مربوط به حرکت کوبه های مشبک در عمق آب در زمان های مختلف، به صورت تصاویر جداگانه تهیه شده

هر کوبه، وزن یکسان برابر با ۳/۸۵ کیلوگرم داشته باشند. مشخصات هندسی این کوبه های مشبک مطابق جدول ۲ می باشد. مشاهدات آزمایشگاهی شامل حرکت کوبه در عمق آب و برخورد با سطح خاک بستر مدل و ایجاد حفره در آن است. محل رها شدن کوبه طوری تنظیم می شود که کوبه پس از هر بار رها شدن در یک ناحیه مشخص از خاک ضربه وارد نماید. پس از هر کوبش، مقدار نفوذ کوبه در خاک و به عبارتی عمق حفره اندازه گیری و ثبت می گردد. عملیات کوبش تا توقف نفوذ کوبه در خاک ادامه می یابد و پس از آن که عمق حفره در اثر برخورد کوبه، تغییر چشمگیری نداشت، مقدار نشست خاک در آن ناحیه اندازه گیری می شود.

مطابق شکل ۶، یک دوربین فیلم برداری پرسرعت از نوع Chronos 1.4 با ۱۰۵۰ فریم بر ثانیه و وضوح تصویر ۱۰۲۴×۱۲۸۰ پیکسل جهت تهیه تصاویر حاصل از ورود کوبه های مشبک به آب و

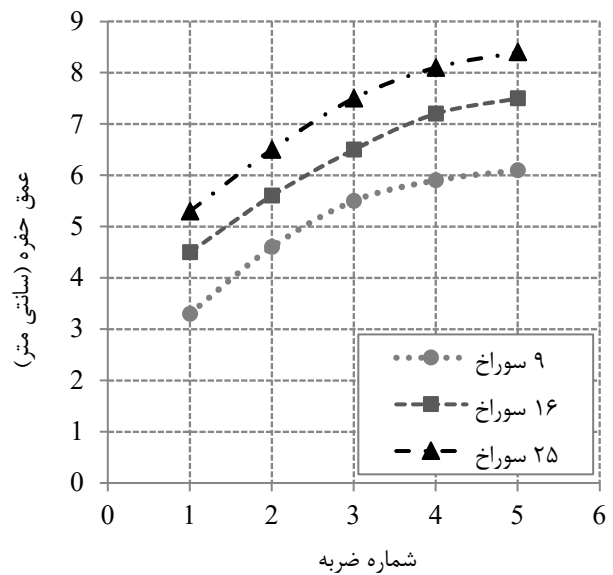


شکل ۸: مشاهدات آزمایشگاهی مسأله ورود کوبه های مشبک به آب و لحظه برخورد آنها با سطح خاک
 Fig. 8. Experimental observations on water entry of lattice pounders and impact on soil surface

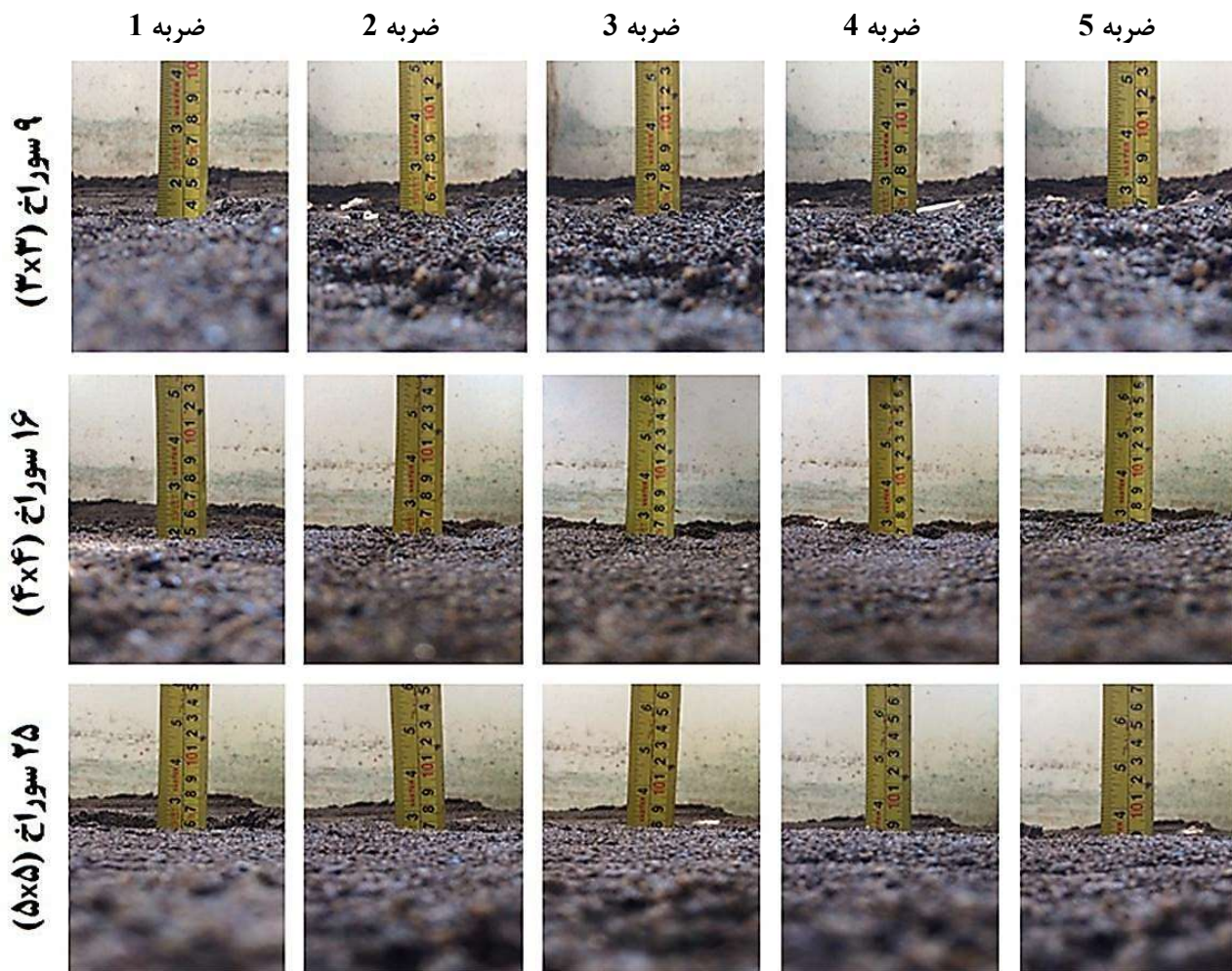
و مورد بحث و تحلیل قرار می گیرد.
 در شکل ۷، تصویر شماتیک از تجهیزات آزمایش نشان داده شده است که شامل تانک آزمایش، کوبه مشبک، دریچه رها کننده و دوربین پرسرعت است.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۸، مشاهدات آزمایشگاهی مسأله ورود کوبه های مشبک ۹ سوراخ، ۱۶ سوراخ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ به آب و لحظه برخورد آنها با سطح خاک پس از رها شدن از ارتفاع ۵۰ سانتی متری بالای سطح آزاد آب نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد، در زمان های مشابه کوبه مشبک ۹ سوراخ که از مساحت سوراخ بیشتری نسبت به سایر کوبه های مشبک برخوردار است، عمق بیشتری از آب را در یک زمان مشخص



شکل ۹: تاثیر تعداد و آرایش سوراخ های کوبه مشبک بر عمق نفوذ آن در خاک پس از هر ضربه
 Fig. 9. The effect of holes number and arrangement of lattice pounders on crater depth after each impact



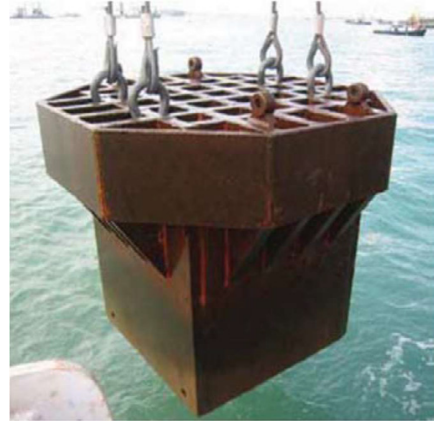
شکل ۱۰: مشاهدات آزمایشگاهی از تاثیر تعداد و آرایش سوراخهای کوبه مشبک بر عمق حفره ایجاد شده در خاک پس از هر ضربه

Fig. 10. Experimental observations of the effect of holes number and arrangement of lattice pounders on crater depth after each impact

طی نموده و در زمان کمتر و با سرعت بیشتری به سطح خاک بستر مدل آزمایشگاهی برخورد می نماید. همچنین کوبه مشبک ۲۵ سوراخ که از مساحت سوراخ کمتر و مساحت جان مشبک بیشتری برخوردار است، عمق کمتری از آب را در یک زمان مشخص طی نموده و در زمان بیشتر و با سرعت کمتری به سطح خاک بستر مدل آزمایشگاهی برخورد می نماید. پس از برخورد کوبه های مشبک با آرایش متفاوت سوراخ ها با سطح خاک، کوبه مشبک ۲۵ سوراخ علی رغم اینکه از کمترین سرعت در لحظه برخورد با سطح خاک برخوردار است، به علت مساحت بیشتر جان مشبک کوبه و انتقال انرژی بیشتری به خاک نسبت به سایر کوبه ها، منجر به افزایش نشست آن می گردد. همچنین کوبه مشبک ۹ سوراخ علی رغم برخورداری از بیشترین سرعت در لحظه برخورد با سطح خاک، به علت اینکه از کمترین

مساحت جان مشبک نسبت به سایر کوبه ها برخوردار است، با انتقال انرژی به مراتب کمتری به خاک، منجر به نشست کمتر آن می شود. لذا می توان نتیجه گرفت که جان مشبک کوبه تاثیر بسزایی در سرعت برخورد کوبه با سطح خاک و به تبع آن نشست خاک و شعاع و عمق بهبود آن دارد. به طوری که افزایش مساحت جان مشبک از یک طرف منجر به کاهش سرعت کوبه در لحظه برخورد با بستر دریا و از طرف دیگر منجر به انتقال انرژی بیشتری به خاک و افزایش نشست و شعاع و عمق بهبود آن می شود.

لذا مطابق شکل ۹ که بیانگر تاثیر تعداد و آرایش سوراخ های کوبه مشبک بر عمق نفوذ آن در خاک پس از هر ضربه است، ملاحظه می گردد که کوبه مشبک ۲۵ سوراخ به علت برخورداری از بیشترین مساحت جان مشبک نسبت به سایر کوبه های مشبک، پس از برخورد



شکل ۱۱: کوبه مورد استفاده در عملیات تراکم دینامیکی فراساحلی با طراحی ویژه [۱]

Fig. 11. Lattice pounder used in offshore dynamic compaction with special design [1]

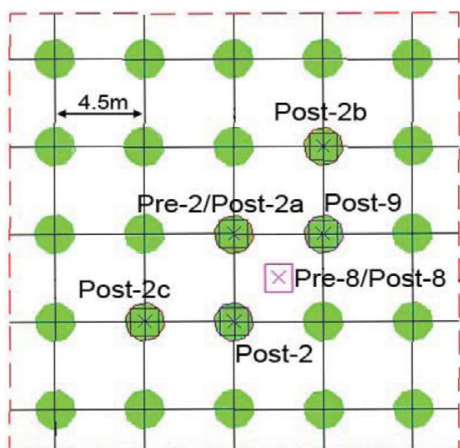
علاوه بر برخورداری از کمترین استهلاک سرعت در هنگام حرکت در عمق آب و دستیابی به بیشترین سرعت در لحظه برخورد با بستر دریا، نفوذ قابل قبولی به خاک داشته و در عین حال به علت برخورداری از مساحت مناسب جان مشبک، با انتقال بیشترین انرژی به سطح خاک، منجر به ایجاد نشست مورد نظر در خاک بستر دریا و دستیابی به حداکثر شعاع و عمق بهبود آن گردد.

۴- مقایسه موردی روند نتایج آزمایشگاهی و محلی

با توجه به وجود برخی مشکلات در انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس و واقعی، به لحاظ تجهیزات آزمایش و هزینه اجرایی زیاد، معمولاً از مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک استفاده می‌شود. ولی به علت وجود اثر مقیاس و تاثیر احتمالی بر نتایج، مدل آزمایشگاهی نمی‌تواند دقیقاً همان رفتار مدل اصلی را منعکس نماید. اثر مقیاس به ویژه در خاک‌های دانه‌ای بیشتر اهمیت دارد. در طراحی تراکم دینامیکی بستر دریا، به علت حجم وسیع عملیات اجرایی که نیازمند تجهیزات ویژه و هزینه‌های زیاد است، از مدل فیزیکی در مقیاس کوچک بهره‌گرفته می‌شود و نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی با نتایج عددی صحت‌سنجی می‌گردد. با توجه به اینکه در بررسی اثر مقیاس، پارامترهایی مانند جنس و سستی خاک، عمق آب، وزن کوبه، ارتفاع سقوط و ... نقش تعیین‌کننده‌ای در نتایج حاصله دارد؛ لذا هدف از این مقایسه، فقط تطبیق روند نتایج آزمایشگاهی موجود با روند نتایج بهسازی بستر دریا به روش تراکم دینامیکی در یک مطالعه موردی می‌باشد و از مقایسه دقیق اثر

با سطح خاک بستر تانک آزمایش، با انتقال انرژی بیشتری به خاک، منجر به ایجاد حفره عمیق‌تری در خاک می‌شود. همچنین کمترین عمق حفره ایجاد شده در خاک مربوط به کوبه مشبک ۹ سوراخ با کمترین مساحت جان مشبک و انتقال کمتر انرژی به خاک است. به طوری که کوبه‌های ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ پس از برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش، در اولین ضربه به ترتیب منجر به ایجاد حفره به عمق ۳/۳، ۴/۵ و ۵/۳ سانتی‌متر و در ضربه پنجم منجر به ایجاد حفره به عمق ۶/۱، ۷/۵ و ۸/۴ سانتی‌متر می‌شوند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که میزان انرژی انتقال یافته از کوبه به سطح مشخصی از خاک و نشست آن وابسته به مساحت جان مشبک کوبه است. بنابراین هر چه مساحت جان مشبک کوبه بیشتر باشد، انرژی بیشتری از کوبه به خاک منتقل می‌گردد و نشست خاک افزایش می‌یابد [۱۴].

در شکل ۱۰، مشاهدات آزمایشگاهی از تاثیر تعداد و آرایش سوراخ‌های کوبه مشبک بر عمق حفره ایجاد شده در خاک پس از هر ضربه نشان داده شده است. در اثر برخورد کوبه‌های مشبک با آرایش متفاوت سوراخ‌ها با سطح خاک و اندازه‌گیری مقادیر نفوذ آنها، ملاحظه می‌گردد که عمق حفره ایجاد شده در خاک بعد از هر ضربه، افزایش می‌یابد. اما در تمامی مدل‌های آزمایشگاهی با آرایش متفاوت سوراخ‌های کوبه، این افزایش عمق حفره تا ضربه چهارم به طور چشمگیری ادامه دارد و پس از آن، تغییر کمی را در عمق حفره ایجاد شده در خاک نشان می‌دهد. لذا در طراحی کوبه‌های مشبک جهت تراکم دینامیکی بستر دریا، تعداد و ابعاد سوراخ‌ها و به عبارتی مساحت آنها باید متناسب با ابعاد و مساحت کوبه باشد. به طوری که



شکل ۱۳: نقاط اجرای عملیات تراکم دینامیکی و انجام آزمایش فشارسنجی [۹]

Fig. 13. Trial zone and PMT locations [9]

عملیات تراکم دینامیکی در معرض ۳۰ ضربه قرار گرفت. علاوه بر این، ۳ تا ۶ ضربه به عنوان مرحله اتوکشی در کل منطقه بهسازی اعمال شد. تجربیات و پروژه های قبلی تیم اجرایی منارند نشان داد که مقاومت آب می تواند به طور قابل ملاحظه ای اثر ارتفاع سقوط کوبه را کاهش دهد. از این رو، ارتفاع سقوط کوبه در طی عملیات تراکم دینامیکی فراساحلی، ۵ متر بالاتر از سطح دریا در نظر گرفته شد. سنسورهای ثبت کننده سرعت قرار گرفته بر روی جرثقیل نشان داد که حداکثر سرعت در طول عملیات در محدوده ۴۳۰ متر بر دقیقه (۷/۱ متر بر ثانیه) است. این سرعت معادل سقوط آزاد کوبه از ارتفاع ۲/۶ متر با فرض عدم وجود آب است و این فرضیه بدیع را تایید می کند که بیشتر انرژی های سینماتیکی کوبه به وسیله مقاومت آب از بین می رود [۹].

در این پروژه تراکم دینامیکی بستر دریا، علاوه بر آزمایش های فشارسنجی که به عنوان روش اولیه تایید انجام شد، اندازه گیری ها و مشاهدات بیشتر نیز برای به دست آوردن حداکثر اطلاعات صورت گرفت. همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، نفوذ کوبه به خاک برای هر ضربه اندازه گیری شد. مشاهده شد که کوبه در طول چهار ضربه اول بیشترین نفوذ را به خاک داشت. سپس سرعت نفوذ آن به سرعت کاهش یافت تا جایی که بعد از ضربه ۱۵، عملاً هیچ گونه نفوذی مشاهده نشد. در طول ۱۵ ضربه اول، مقدار نفوذ کوبه به خاک و به عبارتی عمق حفره ایجاد شده در خاک از ۱/۱ تا ۱/۷ متر متغیر بود. از مقایسه این شکل با ضخامت خاک نرم تا قبل

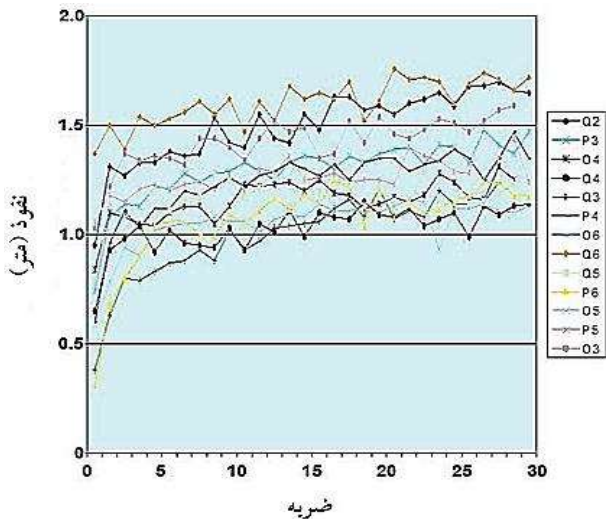


شکل ۱۲: عملیات تراکم دینامیکی فراساحلی با استفاده از جرثقیل با ظرفیت باربری بالا و شناور [۱]

Fig. 12. Offshore dynamic compaction operations using barge and crane with high load capacity [1]

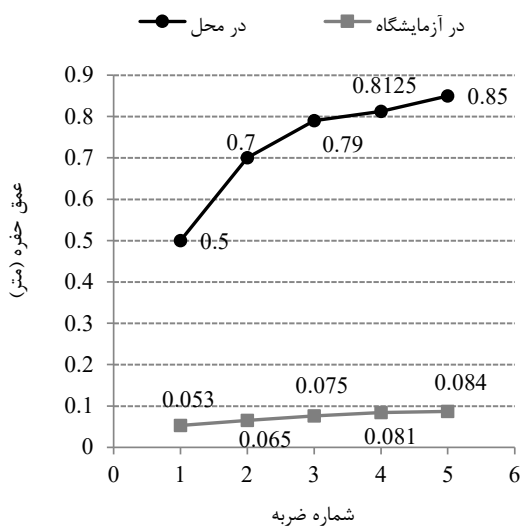
مقیاس صرف نظر شده است. به این منظور ابتدا عمق حفره ایجاد شده در آزمایشگاه توسط کوبه مشبک ۲۵ سوراخ با آرایش ۵x۵ با عمق حفره ایجاد شده در پروژه بهسازی خاک بستر دریا به روش تراکم دینامیکی در منطقه ای به وسعت ۲۲/۲۲x۵/۵ مترمربع در جنوب شرقی آسیا مقایسه می گردد. در این پروژه به منظور بهسازی رسوبات نرم دریایی که در عمق ۳۰ متری از سطح آزاد آب قرار دارد، از روش تراکم دینامیکی استفاده گردید که پروژه مذکور از جمله عمیق ترین پروژه های بهسازی بستر دریا به روش تراکم دینامیکی فراساحلی است [۹]. در این پروژه از یک کوبه فراساحلی ویژه به وزن ۳۸/۵ تن که به صورت مشبک طراحی شده است، به منظور تراکم دینامیکی بستر دریا استفاده شد. شکل خاص این کوبه منجر به حداقل مقاومت آب در طول سقوط کوبه و حرکت در عمق آب دریا می شود. کوبه مورد استفاده در این پروژه با شبکه بندی دو طرفه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ابعاد فوقانی این کوبه ۲/۲x۳/۳ متر و ابعاد تحتانی آن ۱/۱x۷/۷ است. به علت سنگینی نسبی کوبه و وزن نامتعارف آن، یک جرثقیل با ظرفیت باربری بالا و با پایداری کافی برای بالا بردن کوبه مورد نیاز بود. برای این منظور از یک جرثقیل متحرک Liebherr HS895 استفاده شد. مطابق شکل ۱۲، یک شناور به ابعاد ۵۰x۱۵ مترمربع به منظور حمل جرثقیل، کوبه و سایر تجهیزات جهت اجرای عملیات بهسازی بستر دریا مورد استفاده قرار گرفت [۹].

در شکل ۱۳، نقاط اجرای عملیات تراکم دینامیکی و انجام آزمایش فشارسنجی نشان داده شده است. در این پروژه، نقاط اجرای



شکل ۱۴: نفوذ کوبه به خاک در هر ضربه [۹]

Fig. 14. Ponder penetration at several dynamic compaction print locations [9]



شکل ۱۵: مقایسه عمق حفره ایجاد شده در خاک ناشی از برخورد کوبه مشبک ۲۵ سوراخ با آرایش ۵×۵ در محل و آزمایشگاه

Fig. 15. Comparison of crater depth formed in-situ and in laboratory

به کوبه مشبک ۹ سوراخ با کمترین مساحت جان مشبک می باشد. به طوری که کوبه های ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ پس از برخورد با سطح خاک بستر تانک آزمایش، در اولین ضربه به ترتیب منجر به ایجاد حفره به عمق ۳/۳، ۴/۵ و ۵/۳ سانتی متر و در ضربه پنجم منجر به ایجاد حفره به عمق ۶/۱، ۷/۵ و ۸/۴ سانتی متر شدند. از این رو، می توان نتیجه گرفت که سرعت برخورد کوبه های مشبک وابسته به مساحت سوراخ های آن و نشست خاک، میزان انرژی انتقال یافته از

از تراکم دینامیکی می توان دریافت که ضربه کوبه می تواند به طور موثر مصالح درشت دانه ریخته شده را به انتهای لایه خاک نرم با ۴ تا ۱۲ ضربه اول هدایت و سپس تراکم بیشتر لایه درشت دانه صورت گیرد. نشست کل خاک توسط دستگاه انعکاس صدا اندازه گیری شد و بررسی ها نشان داد که به علت تراکم دینامیکی بستر دریا و بهسازی خاک، مصالح درشت دانه ریخته شده ۳۸ سانتی متر کاهش ضخامت یافته است [۹].

در شکل ۱۵، به مقایسه عمق حفره ایجاد شده در خاک ناشی از برخورد کوبه مشبک ۲۵ سوراخ با آرایش ۵×۵ در محل و آزمایشگاه پرداخته شده است. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی تراکم دینامیکی خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و نتایج حاصل از مشاهدات تجربی پروژه بهسازی خاک بستر دریا در جنوب شرقی آسیا ملاحظه گردید که در هر ضربه، عمق حفره ایجاد شده در مدل آزمایشگاهی در حدود ۰/۱ عمق حفره ایجاد شده در مدل درجا می باشد. لازم به ذکر است که مقیاس وزن کوبه در آزمایشگاه به کوبه مورد استفاده در محل برابر با ۱/۱۰۰۰۰ و مقیاس ارتفاع سقوط کوبه از سطح آزاد آب در آزمایشگاه به محل برابر با ۱/۱۰ است. لذا مطابق رابطه ۱ نسبت انرژی حاصل از برخورد کوبه با خاک در مدل آزمایشگاه به پروژه در محل برابر با ۱/۱۰۰۰۰۰ می باشد.

$$EA = \frac{NWH P}{S^2} \quad (1)$$

که در آن N تعداد ضربات در هر مرحله، W جرم کوبه، H ارتفاع سقوط، P تعداد مراحل اعمال ضربه و S فاصله نقاط شبکه کوبش است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ورود کوبه های مشبک ۹، ۱۶ و ۲۵ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ به آب و تاثیر تعداد، ابعاد و آرایش سوراخ های کوبه بر سرعت برخورد آن با خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و عمق حفره ایجاد شده در آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات عمق حفره ایجاد شده در خاک ناشی از برخورد کوبه مشبک ۲۵ سوراخ به علت برخورداری از بیشترین مساحت جان مشبک نسبت به سایر کوبه های مشبک، بیشتر است و کمترین تغییرات عمق حفره ایجاد شده در خاک مربوط

- [7] J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Menge, State of the art report: construction processes, in: 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering: TC17 meeting ground improvement, 2009, pp. 130.
- [8] L. Menard, L'utilisation de la consolidation dynamique pour la réalisation du nouveau port de pêche de Sfax en Tunisie, Navires, Ports et Chantiers, (1981).
- [9] B. Hamidi, H. Nikraz, K. Yee, S. Varaksin, L. Wong, Ground improvement in deep waters using dynamic replacement, in: The Proceedings of The Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2010, pp. 848-853.
- [10] S.-J. Feng, W.-H. Shui, L.-Y. Gao, L.-J. He, Application of high energy dynamic compaction in coastal reclamation areas, Marine Georesources and Geotechnology, 28(2) (2010) 130-142.
- [11] Y. Abdizadeh, Effect of poulder shape and diameter in dynamic compaction of loose granular soils, in: 3rd National Conference on Civil Engineering, Khomeinishahr, Iran, 2012. (in Persian)
- [12] A. Michelin, A. Khatchadourian, H. Durgunoglu, O. Akcakal, A case study on soil improvement with dynamic compaction and dynamic replacement, in, 2015.
- [13] M. Shen, J.R. Martin, C.-S. Ku, Y.-C. Lu, A case study of the effect of dynamic compaction on liquefaction of reclaimed ground, Engineering Geology, 240 (2018) 48-61.
- [14] B. Hamidi, J. Debats, H. Nikraz, S. Varaksin, Offshore ground improvement records, Australian Geomechanics, 48(4) (2013) 111-122.

کوبه به خاک و شعاع و عمق بهبود آن وابسته به مساحت جان مشبک کوبه می باشد. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی تراکم دینامیکی خاک شبیه سازی شده از بستر دریا و نتایج حاصل از مشاهدات تجربی پروژه بهسازی خاک بستر دریا در جنوب شرقی آسیا ملاحظه گردید که در هر ضربه، عمق حفره ایجاد شده در مدل آزمایشگاهی در حدود ۰/۱ عمق حفره ایجاد شده در مدل درجا بود. از این رو، در طراحی عملیات تراکم دینامیکی بستر دریا، می توان یک نمونه از این کار را با مقیاس کوچک در آزمایشگاه و در نرم افزار شبیه سازی کرد و پس از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی و صحت سنجی و کالیبره کردن نرم افزار، عملیات تراکم دینامیکی را در مقیاس واقعی مدل سازی نمود.

مراجع

- [1] B. Hamidi, Distinguished ground improvement projects by dynamic compaction or dynamic replacement, Curtin University, 2014.
- [2] J. Boulard, LA FORME DE RADOUB PREFABRIQUEE NO 10 DU PORT MILITAIRE DE BREST, (1974).
- [3] L. Menard, Fondation d'une cale de radoub à Brest, in: 6th International Harbor Conference, 1974.
- [4] J. Renault, P. Tourneur, La forme de radoub No. 10 à Brest, in: 6th International Harbor Conference, 1974.
- [5] M. Gambin, Menard Dynamic Consolidation, a New Method for Improving Foundation Beds Off-shore, in: International Symposium, Brugge, 1982.
- [6] L. Menard, La consolidation dynamique comme solution aux problemes de fondation: pour la construction de quais, terminaux, reservoirs de stockage et iles artificielles sur ols compressibles, in: 7th International Harbour Conference, 1978.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.H. Taghizadeh Valdi, M.R. Atrechian, A. Jafary Shalkoohy, S.A. Hosseini, Experimental study of the effect of holes number and arrangement of lattice poulder on offshore dynamic compaction, Amirkabir J. Civil Eng., 52(8) (2020) 1923-1934.

DOI: 10.22060/ceej.2019.15732.6014



