

پیشنهاد کنترل ضخامت مترس برای جلوگیری از فرورفت سنگدانه‌های موج‌شکن در بستر لجنی

رسول مبرز^۱، علی فاخر^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

تهران، صندوق پستی ۳۴۶۵-۱۶۷۶۵*

afakher@ut.ac.ir

(دریافت مقاله، خرداد ۱۳۸۳، پذیرش مقاله: دی ۱۳۸۴)

چکیده - فرورفت سنگدانه‌های موج‌شکن در بسترهای سست در دریا، یکی از مشکلات عمده اجرای موج‌شکن‌ها در مناطق دارای بستر لجنی است. فرورفت انفرادی سنگدانه‌ها باعث عدم تشکیل پی شده و در این حالت، حجم زیادی از مصالح موج‌شکن در بستر فرو می‌رود. کنترل "فرورفت موضعی دانه‌ها" در طراحی، باید علاوه بر کنترل‌های متداول مانند کنترل ظرفیت باربری و نشست، مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله با استفاده از یک روش آزمایشگاهی پیشنهادی، پدیده فرورفت سنگدانه‌های موج‌شکن (به طور خاص لایه مترس در کف موج‌شکن) در بسترهای لجنی بررسی و اثر عوامل مختلف مانند اندازه سنگدانه‌ها و خصوصیات خاک لجنی مطالعه شده است. در کنار مطالعه آزمایشگاهی، مطالعه موردی برخی موج‌شکن‌های اجرا شده بر روی بسترهای سست در ایران انجام شده که نشان‌دهنده نقش مؤثر لایه ماسه‌ای قرار گرفته بر روی رس سست بر ممانعت از فرورفت است. در انتها چنین نتیجه‌گیری می‌شود که می‌توان با تغییر مصالح خاکریز در نزدیکی بستر (مترس)، باعث کاهش نفوذ و فرورفت سنگدانه‌ها شده و یک بستر اولیه مناسب ایجاد کرد. رابطه‌ای هم برای تعیین ضخامت لایه مترس پیشنهاد شده است.

کلید واژگان: خاک لجنی، نفوذ، موج‌شکن، مطالعه موردی.

۱- مقدمه

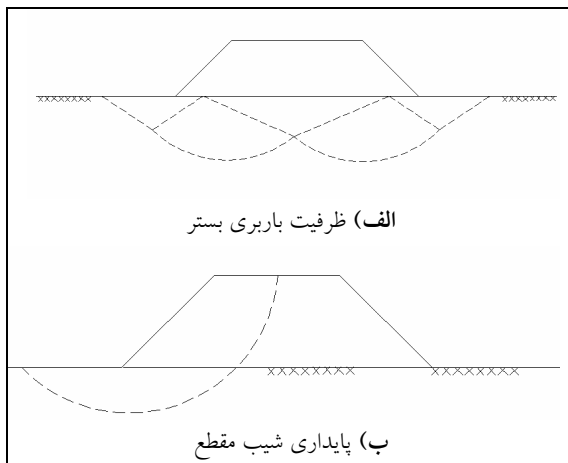
دریاها به صورت گسترده‌ای یافت می‌شوند و با توجه به اهمیت این مناطق و نیاز به اجرای خاکریز راه و احداث موج‌شکن، بررسی احداث این قبیل سازه‌ها بر روی بسترهای لجنی اهمیت دارد. حجم زیادی از مصالح خاکریزهای (موج‌شکنهای) اجرا شده بر روی این قبیل خاکها به داخل خاک لجنی فرو می‌رود [۲]. لایه لجنی ممکن است نازک یا بسیار ضخیم باشد. در احداث خاکریز بر روی این بسترهای سست لازم است ظرفیت باربری و

خاکهای لجنی معمولاً از مصالح ریزدانه (رس و لای) با درصد بالای رطوبت (نزدیک حد روانی و بالاتر از آن) تشکیل شده است [۱]. این خاکها حالتی بین جامد و مایع داشته و مقاومت برشی و ظرفیت باربری بسیار پایینی دارند. این عوامل احداث هرگونه سازه‌ای را بر روی این خاکها با مشکلات فراوان اجرایی روبرو می‌سازد. این قبیل خاکها در مناطق ساحلی و بستر

سنگدانه‌ها در خاک لجنی بررسی نشده است. در این تحقیق نفوذ سنگدانه‌های موج‌شکن به داخل خاک لجنی، بررسی و تجزیه و تحلیل شده [۹،۶] و سپس یک رابطه طراحی برای آن ارائه شده است.

۳- مطالعات موردی چند پروژه در ایران

برای بررسی بیشتر پدیده فرورفت، تعدادی از موج‌شکنها یا جتی‌هایی که در سواحل ایران بر روی بسترهای لجنی احداث شده، مطالعه شده است. این پروژه‌ها مربوط به بنادر دیلم، گناوه، هندیجان، شناس و محمد عامری است. بنادر مورد بررسی، کاربریهای متفاوتی از قبیل ماهیگیری، تجاری و نظامی داشته و ساخت برخی از آنها به اتمام رسیده و تعدادی نیز در زمان تألیف مقاله حاضر در حال اجرا است. در هر مورد وضعیت ژئوتکنیکی بستر بررسی و کنترل‌های متداول ژئوتکنیکی نیز انجام و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱ مود گسیختگی را در دو حالت متداول نشان می‌دهد.



شکل ۱ مودهای گسیختگی در کنترل‌های متداول ژئوتکنیکی

از نتایج به دست آمده و مقایسه مقادیر جدول ۱ ملاحظه می‌شود که ظرفیت باربری و پایداری شیروانی، تنها عامل تعیین کننده در پدیده فرورفت نبوده است.

نشست بستر بررسی و ضمناً باید شرایط تشکیل پی به وجود آید یعنی به نحوی از فرورفت موضعی سنگدانه‌های خاکریز جلوگیری شود [۳]، معمولاً بهسازی بستر سست به منظور افزایش پارامترهای مقاومتی بستر انجام می‌شود [۵،۴]. اگر چه تأثیر وجود لایه ماسه‌ای بر روی بستر سست لجنی در کاهش فرورفت سنگدانه‌های موج‌شکن، به صورت کیفی برای مهندسان شناخته شده است، لیکن نتایج تحقیقات قبلی در خصوص مقدار کمی این تأثیر و نحوه محاسبه ضخامت مورد نیاز لایه مترس در دسترس نیست. مطالعه دقیق فرورفت موضعی دانه‌ها توسط احمدی [۶] انجام شد و سپس معیار اولیه‌ای برای کنترل آن توسط احمدی و فاخر [۷،۳] پیشنهاد گردید. تحقیق حاضر با هدف تکمیل مطالعات قبلی در این زمینه و ارائه معیارهایی دقیق‌تر انجام شده است.

۲- ساخت بر روی خاکهای لجنی

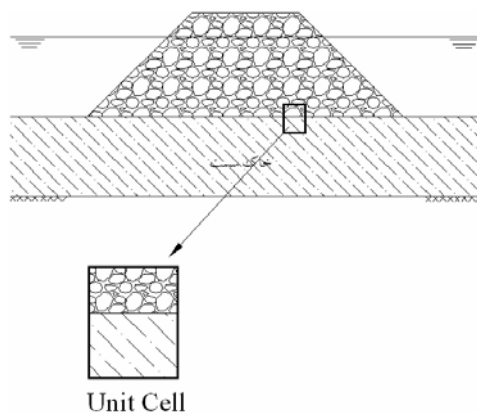
وجود خاکهای سست لجنی و مناطق باتلاقی در محل احداث پروژه‌ها، همواره عامل ایجاد مشکلات بسیار زیاد و دربرگیرنده هزینه‌های بالا است. اما وجود مناطقی وسیع با خاکهای سست لجنی و باتلاقی در دنیا و اهمیت آنها باعث شده که اجرای پروژه‌های عمرانی در این مناطق اجتناب‌ناپذیر گردد [۸]. برخی روشهای ساخت بر روی این خاکها عبارت از: ساخت مرحله‌ای، پیش‌بارگذاری با استفاده از زهکش‌های قائم، تراکم دینامیکی، برداشت خاک لجنی، استفاده از شمع، استفاده از مصالح سبک با وزن مخصوص کم برای کاهش سربار و استفاده از ژئوسنتتیک. روشهای بالا به تنهایی یا به صورت ترکیبی استفاده می‌شوند. بیشتر روشهای فوق گران بوده یا مشکلات اجرایی خاصی را در دریا به همراه دارند.

نکته حائز اهمیت در روشهای فعلی طراحی این است که در هیچ‌یک از روشهای طراحی، نفوذ موضعی

جدول ۱ نتایج مطالعات موردی برخی موج شکنها و خاکریزهای سنگریزه‌ای

نام پروژه	جنس لایه سطحی بستر دریا	ضریب اطمینان پایداری شیب مقطع (سطح گسیختگی از بستر عبور می‌کند)	ضریب اطمینان باربری بستر (با فرمول مایر هوف)	وضعیت فرورفت دانه‌ها در بستر لجنی
بندر دیلم	الف) یک لایه نازک ماسه روی رس سست لجنی ب) رس سست لجنی	۱/۳	۱/۱	الف) نداشته است ب) داشته است
بندر هندیجان	رس سست لجنی	۱	۱	داشته است
بندر محمد عامری	رس سست لجنی	۰/۷	۱/۵	داشته است
بندر گناوه	ماسه به ضخامت حدود یک متر روی رس سست لجنی	۱	۱/۲	نداشته است
بندر شناس	رس سست لجنی	۰/۴	۰/۵	داشته است

جدیدی به نام آزمایش نفوذ انجام شده و در آن نفوذ سنگدانه‌های خاکریز (موج شکن) به داخل بستر لجنی با مدلسازی یک جزء واحد از محل تماس خاکریز با خاک لجنی بررسی شده است (شکل ۲).



شکل ۲ جزء واحد مورد بررسی در این تحقیق

چنانچه در پروژه بندر دیلم در قسمتهایی که لایه ماسه‌ای در روی سطح بستر وجود داشته، هیچگونه فرورفتی مشاهده نشده، اما در قسمتهایی که لایه ماسه‌ای در روی بستر نبوده، حجم زیادی از مصالح موج شکن در بستر فرو رفته است. در صورتی که هر دو قسمت وضعیت تقریباً مشابهی از نظر ضریب اطمینان برای ظرفیت باربری و پایداری شیروانی داشته‌اند. علاوه بر این در پروژه بندر گناوه، یک لایه ماسه‌ای نازک بر روی لایه رسی سست به صورت طبیعی وجود داشت. در این پروژه ضرایب اطمینان ظرفیت باربری و پایداری شیروانی کمتر از مقادیر مجاز (اما بزرگتر از ۱) بوده و هیچگونه فرورفتی مشاهده نشده است.

۴- آزمایش نفوذ

استفاده از جزء واحد برای بررسی و تحقیق مسائل ژئوتکنیکی سابقه‌ای طولانی دارد و به صورت گسترده‌ای استفاده شده است [۱۰]. بررسی پدیده نفوذ سنگدانه‌ها در خاکهای لجنی در این تحقیق با آزمایش ساده

نکته قابل توجه این است که آزمایش پیشنهادی، مشابه مطالعه ظرفیت باربری با مدل‌های فیزیکی نیست و به همین دلیل قطر صفحه بارگذاری و قطر قالب استوانه‌ای محتوی خاک لجنی تقریباً یکسان است [۳]. آزمایش نفوذ،

قطرهای متفاوت استفاده شده است. مشخصات مصالح درشت دانه در جدول ۲ ارائه شده است.

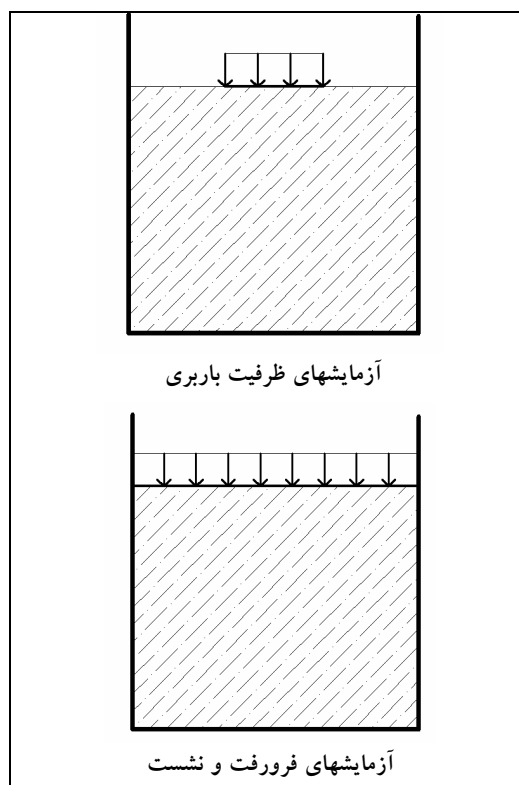
جدول ۲ مشخصات مصالح درشت دانه

شماره سگدانه‌ها	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)
۱	۱۹/۶	۲۱/۷	۲۲	۲۲/۶
۲	۱۶/۱	۱۶/۷	۴۷/۴	۱۷/۶۵
۳	۵/۶	۷/۲	۱۰	۱۱/۳
۴	۴/۰۷	۴/۲۱	۴/۴	۴/۴۳
۵	۳/۴۲	۳/۵۷	۳/۶۷	۳/۷۳
۶	۲/۸۸	۲/۹۵	۳	۳/۱۳
۷	۲/۰۷	۲/۲	۲/۳۸	۲/۴۶

۴-۲- چگونگی آزمایش

روش انجام آزمایشها در این تحقیق مشابه روش احمدی [۶] است. برای انجام آزمایشها نخست خاک ریزدانه در داخل همزن به مدت ۲۰ دقیقه با آب مخلوط می‌گردد. سپس برای تعیین درصد رطوبت دو نمونه از آن مخلوط برداشته می‌شود. همچنین دو نمونه برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده توسط دستگاه برش پره، مورد آزمایش قرار گرفته و مقاومت برشی زهکشی نشده تعیین می‌شود. خاک لجنی (مخلوط خاک ریز دانه با آب) تهیه شده به ضخامت ۱۱ سانتی‌متر در داخل استوانه آزمایش تراکم ریخته و سپس مصالح درشت دانه به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر بر روی خاک لجنی ریخته می‌شود. برای اینکه چگونگی ریختن مصالح درشت‌دانه (سنگدانه‌ها) در همه آزمایشها یکسان باشد، ابتدا از مصالح درشت‌دانه مورد نظر یک حجم معین با تراکم کم - به طوری که اگر در استوانه‌ای به قطر قالب تراکم ریخته شود فضایی به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر را اشغال کند- جدا می‌شود. سپس برای ریختن آنها بر روی خاک لجنی، دو صفحه فیلم رادیوگرافی در کنار هم و بر روی بدنه اصلی قالب تراکم قرار داده می‌شود، به نحوی که به طور کامل دهانه قالب را

نشان‌دهنده نیروی لازم برای فرو راندن مجموعه مصالح درشت دانه در خاک لجنی است. آزمایش تحکیم نیز از همین دسته آزمایشها بوده و قطر صفحه بارگذاری و استوانه حاوی خاک در آن تقریباً یکسان است (شکل ۳).



شکل ۳ مقایسه آزمونهای ظرفیت باربری و

آزمونهای نشست یا فرورفت [۳]

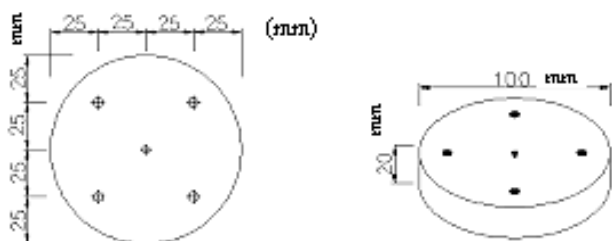
۴-۱- مصالح خاکی مورد استفاده

برای انجام آزمایشها از دو نوع خاک ریزدانه با حدود اتربرگ متفاوت استفاده شده است، زیرا مقاومت برشی تابع نسبت رطوبت به حد روانی است [۱]: مشخصات دو نوع خاک ریز دانه به صورت زیر است:

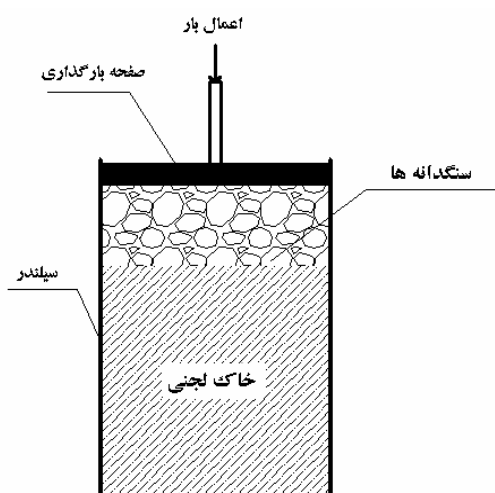
- خاک نوع اول: ۲۰ = حد خمیری ۴۲ = حد روانی
- خاک نوع دوم: ۱۹ = حد خمیری ۳۴ = حد روانی

از آنجا که اندازه سنگدانه‌های خاکریز (یا ابعاد ذرات لایه مترس در زیر موج‌شکن) در فرورفت مؤثر است، [۱۱] برای بررسی این موضوع در آزمایشها از مصالح با

نتایج کلیه آزمایشهای ارائه شده در این مقاله توسط مبرز [۹] گزارش شده است.



شکل ۴ صفحه بارگذاری



شکل ۵ نحوه اعمال بار بر روی نمونه

۵-۱- تکرارپذیری نتایج

تکرارپذیری آزمایشها با بررسی نتایج آزمایشهای کاملاً مشابه از نظر نوع مصالح و روش کار، بررسی قرار شد. درصد خطا در تکرار آزمایشها از ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد متغیر بود. شکل ۶ نتایج تکرار آزمایش را برای نمونه‌های ۳ و ۴ (بر طبق جدول ۲) بر روی خاک ریزدانه نوع اول (۴۲= حد روانی) نشان می‌دهد.

محور افقی و قائم در شکل ۶ به ترتیب نشان‌دهنده تغییر مکان قائم صفحه بارگذاری و فشار قائم وارد بر صفحه است. (لازم است ذکر شود که منظور از آزمون ۱ و ۲ در شکل ۶، انجام آزمایشهای تکراری است).

پوشاند. سپس سر قالب بر روی این صفحه‌ها قرار داده شده و سنگدانه‌ها با دست و از ارتفاع ۵ سانتیمتری بالای سر قالب به داخل آن ریخته می‌شود. پس از آن صفحات رادیوگرافی از دوطرف کشیده می‌شوند که با این کار سنگدانه‌ها بر روی خاک لجنی قرار گرفته و سر قالب با بدنه اصلی درگیر می‌شود. برای بارگذاری سیستم، صفحه‌ای به ضخامت ۲ سانتیمتر و با قطری در حدود قطر قالب تراکم به طوری که در قالب به راحتی حرکت نماید، به دستگاه C.B.R. متصل شده است. توسط این صفحه نیروی اعمال شده از دستگاه C.B.R. بر روی مصالح درشت‌دانه و خاک لجنی منتقل می‌شود. بارگذاری تا زمانی ادامه می‌یابد که خاک لجنی از سوراخهای تعبیه شده در صفحه بارگذاری بیرون بزند. در هنگام آزمایش مقادیر نیرو و تغییر مکان اندازه‌گیری می‌شود. پس از آن سر قالب برداشته شده و فرورفت مصالح در خاک لجنی و تشکیل کیک لجنی مورد بررسی ظاهری قرار می‌گیرد.

صفحه بارگذاری همراه با محل سوراخها در شکل ۴ نشان داده شده است. سوراخ میانی برای اتصال صفحه به دستگاه C.B.R. و بقیه سوراخها برای تشخیص فرورفت مصالح درشت دانه در خاک لجنی در داخل صفحه بارگذاری تعبیه شده است.

چگونگی اعمال بار توسط دستگاه C.B.R. بر روی نمونه آماده شده در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم است ذکر شود که سرعت انجام آزمایش نیز در کلیه آزمایشها یکسان و برابر ۱ میلیمتر بر دقیقه بوده است.

۵- ارائه و تحلیل نتایج

برای این تحقیق آزمایشهای زیادی توسط احمدی [۳] و مبرز [۹] انجام شده است. جزئیات تعدادی از این آزمایشها که نتایج آنها در این مقاله ارائه شده، در جدول ۳ آورده شده است. برای هر آزمایش منحنی "فشار- تغییر مکان" رسم شده است. لازم است ذکر شود که

جدول ۳ جزئیات آزمایشهای ارائه شده در این مقاله

شماره	نوع خاک	درصد	مقاومت برشی زهکشی نشده	قطر متوسط دانه‌ها	ضخامت سنگدانه‌ها
۱	نوع اول	۵۳	۲/۴	۱۷/۴	۲۵
۲	نوع اول	۵۳	۲/۴	۱۷/۴	۲۵
۳	نوع اول	۵۳	۲/۴	۴/۴	۲۵
۴	نوع اول	۵۳	۲/۴	۴/۴	۲۵
۵	نوع دوم	۴۳	۲/۴	۱۷/۴	۲۵
۶	نوع دوم	۴۳	۲/۴	۴/۴	۲۵
۷	نوع اول	۵۳	۲/۴	۲/۴	۲۵
۸	نوع اول	۵۳	۲/۴	۱۰	۲۵
۹	نوع دوم	۴۳	۲/۴	۱۰	۲۵
۱۰	نوع اول	۴۲/۵	۴/۱	۱۷/۴	۲۵
۱۱	نوع اول	۴۹	۳/۲	۱۷/۴	۲۵
۱۲	نوع اول	۴۱/۸	۴/۳	۴/۴	۲۵
۱۳	نوع اول	۶۸/۳	۱/۷	۴/۴	۲۵
۱۴	نوع اول	۵۳	۲/۴	۱۷/۴	۵۰
۱۵	نوع دوم	۴۳	۲/۴	۱۷/۴ & ۴/۴ *	۵۰

* در این آزمایش لایه‌ای به ضخامت ۲۵ میلی‌متر سنگدانه با قطر متوسط ۴/۴ میلی‌متر ریخته شده و بر روی آن نیز لایه‌ای به ضخامت ۲۵ میلی‌متر از مصالح با قطر متوسط ۱۷/۴ میلی‌متر قرار داده شده است.

روانی و مقاومت برشی تقریباً یکسان است لذا منحنی حاصل از آنها مطابق شکل ۷ تقریباً مشابه می‌باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد که مقاومت فرورفت با کم شدن قطر دانه‌ها، (که در اینجا D_{50} به عنوان شاخص قطر مصالح درشت دانه بررسی شده) افزایش یافته است. با کم شدن قطر مصالح درشت دانه، ابعاد و خلل و فرج‌های لایه متشکل از آن نیز کاهش می‌یابد، لذا نیروی بیشتری برای فرورفت خاک لجنی در درون خلل و فرجها مورد نیاز است.

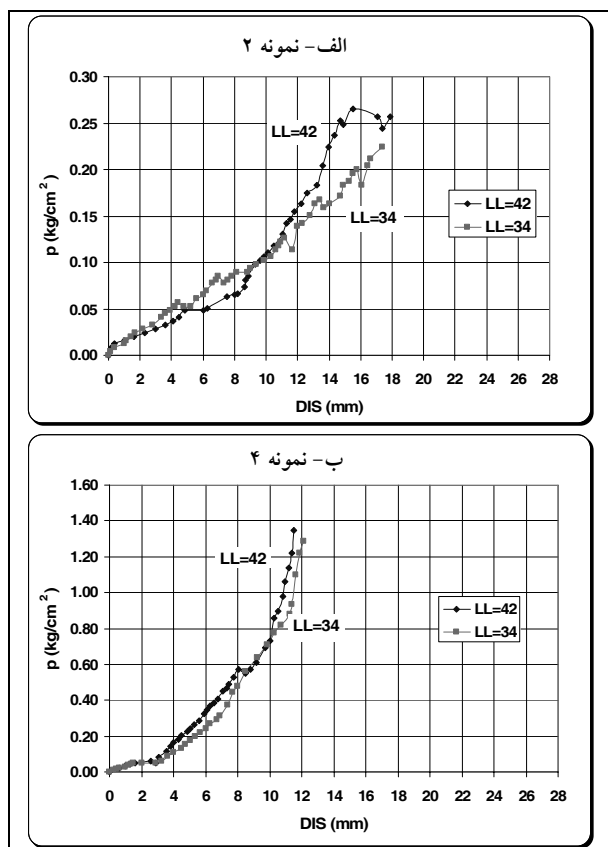
شکل ۹ نشان‌دهنده اثر درصد رطوبت خاک لجنی بر میزان مقاومت فرورفت است. این بررسی نشان می‌دهد که با کاهش درصد رطوبت خاک لجنی، مقاومت فرورفت افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ نشان‌دهنده اثر ضخامت لایه درشت دانه است. برای این بررسی، ضخامت لایه درشت دانه بر روی خاک لجنی تغییر داده شده است.

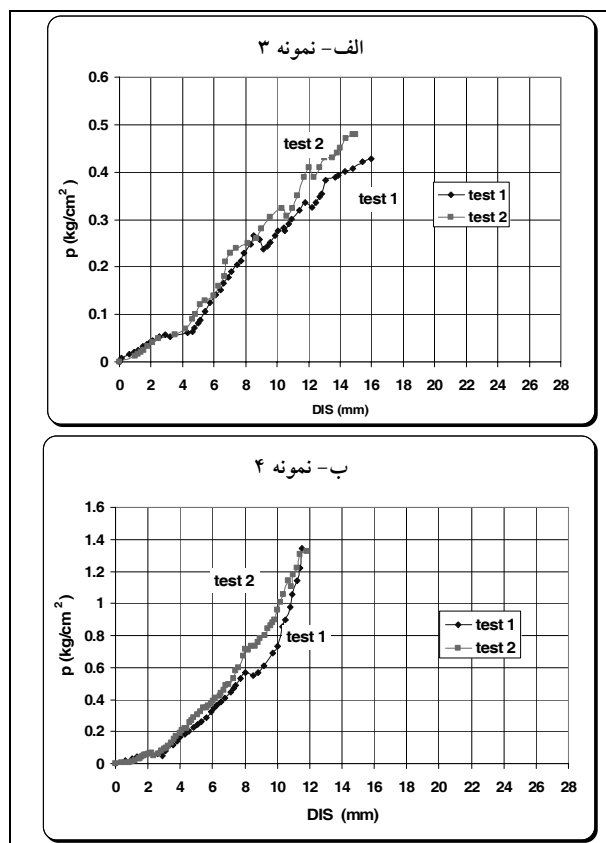
در ادامه با مقایسه نمودارهای "فشار- تغییرمکان" حاصل از آزمایشها، به بررسی اثر عوامل مؤثر بر فرورفت مصالح خاکریز در بسترهای لجنی شامل نوع خاک لجنی، اندازه مصالح درشت‌دانه، درصد رطوبت خاک لجنی و ضخامت لایه درشت‌دانه نزدیک بستر (مترس) پرداخته می‌شود.

۵-۲- تأثیر عوامل مختلف

با توجه به تفاوت خواص خمیری خاکها، درصد رطوبت آنها طوری انتخاب شده که نسبت رطوبت به حد روانی آنها یکسان باشد و در نتیجه مقاومت برشی آنها تقریباً مساوی باشند [۱]. لذا درصد رطوبت خاکها برای آزمایش در حدود ۱/۳ برابر حد روانی آنها انتخاب شد. شکل ۷ نشان‌دهنده نتایج آزمایشها با سنگدانه نمونه ۲ و ۴ بر روی دو خاک با حد روانی متفاوت است. با توجه به اینکه رطوبت دو نمونه خاک با حد روانی ۴۲ و ۳۴ به ترتیب ۵۳ و ۴۳ درصد بوده است اما نسبت رطوبت به حد



شکل ۷ بررسی اثر خاک لجنی



شکل ۶ بررسی تکرارپذیری آزمایشها

سپس مطالعات تجربی بیشتری انجام [۹] و نتیجه‌گیری شد که معیار نیروی لازم برای بیرون‌زدگی، به دلایل زیر مناسب و مستقل از بقیه پارامترها نیست [۱۲]:

اولاً وقتی اندازه مدل تغییر می‌کند، تغییر در مقدار تغییر مکان لازم برای بیرون‌زدگی پیش می‌آید.

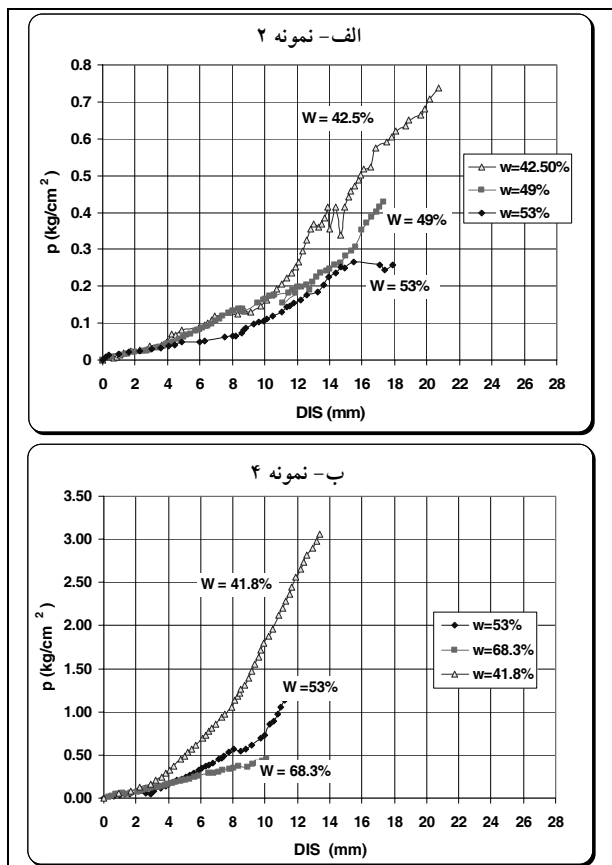
ثانیاً وقتی جزئیات صفحه بارگذاری مدل تغییر کند- مثلاً تعداد و قطر سوراخها تغییر کند- باز هم تغییر در مقدار تغییر مکان لازم برای بیرون‌زدگی پیش می‌آید. یعنی بخش‌هایی منحنی تحت تأثیر جزئیات صفحه بارگذاری است.

ثالثاً با توجه به نوع قرارگیری سنگدانه‌ها بر روی خاک سست ممکن است بخش کم شیب منحنی در ابتدا به وجود آید. یعنی نیروی لازم در مراحل ابتدایی آزمایش صرف جاگیری صفحه بارگذاری و خاک درشت دانه شود. لذا بهتر است که معیار دیگری- که متأثر از موارد ذکر شده نباشد- برای این موضوع انتخاب شود.

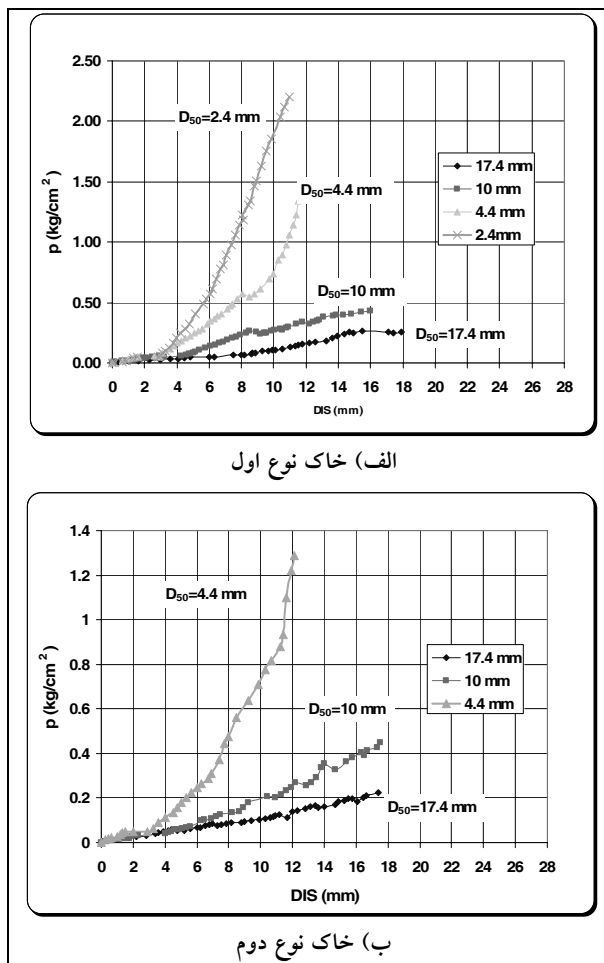
با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه درشت‌دانه، شیب بخش میانی منحنی فشار در مقابل فرورفت تقریباً یکسان است اما نیروی لازم برای فرو بردن کل لایه مترس در خاک لجنی افزایش یافته است. یعنی با افزایش ضخامت لایه درشت‌دانه، نیروی بیشتری برای بیرون‌زدگی خاک لجنی از تراز فوقانی لایه درشت دانه لازم است.

۶- مبانی برای تهیه نمودار طراحی

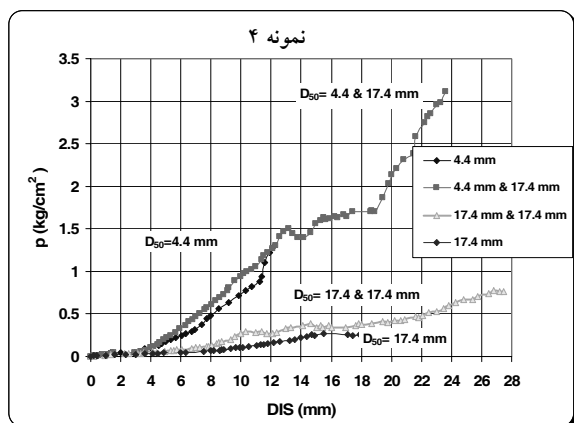
به دنبال مطالعه آزمایشگاهی پدیده فرورفت مصالح خاکریز در خاکهای لجنی توسط احمدی [۶]، ایده نوعی نمودار برای طراحی لایه مترس جهت اجرای خاکریز درشت دانه بر روی خاکهای سست توسط احمدی و فاخر مطرح شد [۳] که در این نمودار طراحی پیشنهادی [۳]، مقاومت به ازای لحظه بیرون‌زدگی خاک لجنی از سوراخهای صفحه بارگذاری ملاک قرار گرفته بود.



شکل ۹ بررسی اثر درصد رطوبت خاک لجنی



شکل ۸ بررسی اثر اندازه مصالح درشت دانه



شکل ۱۰ بررسی اثر ضخامت لایه‌ها

چنانچه در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود تطابق نسبی قابل ملاحظه‌ای بین نتایج آزمایشهای احمدی [۶] و مبرز [۹] در این نمودار مشاهده می‌شود. البته اختلاف اندک موجود ممکن است ناشی از انتخاب نادرست معیار قرائت مقاومت فرورفت (به ازای ۲۵ درصد فرورفت لایه مترس) باشد.

بنابراین تصمیم گرفته شد که نمودارهایی براساس مقادیر مقاومت فرورفت به ازای ۲۵ درصد فرورفت ضخامت لایه مترس رسم شود. در این صورت احتمال دارد که تأثیر شرایط مرزی ابتدایی و انتهایی آزمایش در پاسخها کمتر باشد. این نمودار با توجه به داده‌های آزمایشهای احمدی [۶] و نتایج آزمایشهای مبرز [۹] رسم و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

به بیان بهتر می‌توان گفت که معیار ۲۵ درصد ضخامت لایه به صورت دلخواه انتخاب شده است. در شکل ۱۱، P تنش وارد بر لایه مترس زیر خاکریز، C_{II} مقاومت برشی زهکشی نشده خاک لجنی، D ضخامت لایه مترس، D_{50} قطر متوسط سنگدانه‌ها، W درصد رطوبت خاک لجنی و LL حد روانی خاک لجنی است.

سوراخها و ابعاد آنها و اصطکاک میان خاک و صفحه باشد. احمدی [۶] از صفحه فولادی و کاملاً صیقلی استفاده کرد اما مبرز [۹] صفحه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با سطح اندکی ناصاف را بکار برده است. لذا تأثیر صفحه در بخش ۳ نمودارهای حاصل از آزمایشهای مبرز آشکارتر است.

قابل توجه است که آنچه به دنبال آن هستیم، تعیین فشار لازم برای فرورفت خاک لجنی در داخل خلل و فرج سنگدانه‌ها است و این مقدار نباید تحت تأثیر شرایط ابتدایی و انتهایی آزمایش باشد. بنابراین بخش میانی منحنیهای حاصل از آزمایشها بیشتر مورد اعتماد است. شیب متوسط نمودار "فشار- تغییر مکان" را در قسمت میانی نمودارهای آزمایش یعنی قسمت ۲ در شکل ۱۲ را می‌توان معیار قرار داد. با توجه به مطالب ذکر شده، قسمت اول و سوم نمودار نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و فقط قسمت ۲ که کمتر تحت تأثیر شرایط اولیه آزمایش یا صفحه بارگذاری است به کار می‌رود. شیب این قسمت را α می‌نامیم.

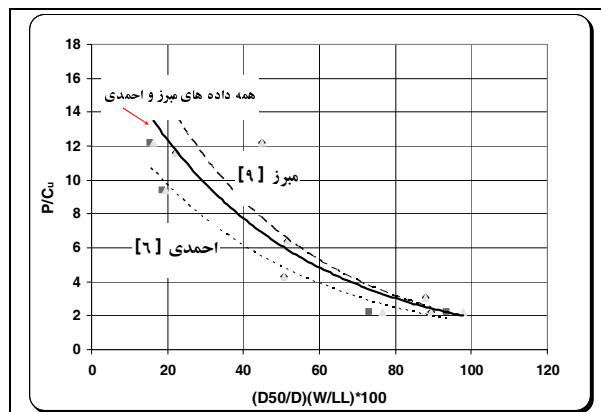
$$\alpha = \tan \beta \quad (1)$$

با توجه به اینکه شیب مذکور از نمودار "فشار- تغییر مکان" به دست می‌آید، رابطه (۲) را می‌توان بین تغییرات تنش وارد به بستر خاکریز و تغییرات تغییر مکان (فرورفت قائم) یا ضخامت لایه مترس ارائه کرد.

اگر تغییرات فشار (p) و تغییر مکان (dis) را به ترتیب با Δp و Δdis نشان دهیم، داریم:

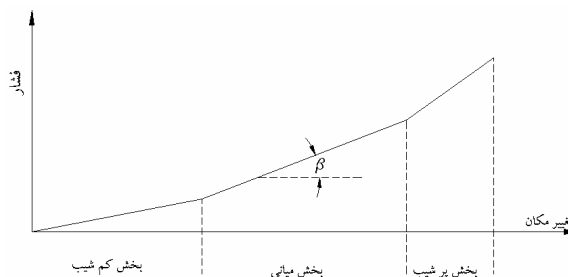
$$\alpha = \frac{\Delta p}{\Delta dis} \rightarrow \Delta p = \alpha \cdot \Delta dis \quad (2)$$

در لایه مترس در زیر موج شکن مطابق شکل ۱۳، فشار روی لایه مترس از صفر شروع شده و با پیشرفت عملیات احداث موج شکن، حداکثر به وزن لایه‌های فوقانی و سربار موج شکن (p) می‌رسد. وقتی فشار از صفر تا p تغییر کند، مقدار تغییر مکان یا فرورفت مترس از صفر تا t می‌تواند تغییر کند. به بیان دیگر حداکثر فرورفت مترس یا حداکثر dis ، در اثر فشار (p) باید برابر با حداقل



شکل ۱۱ ایده استفاده از مقادیر فرورفت به ازای ۲۵ درصد ضخامت لایه درشت دانه برای ارائه نمودار طراحی

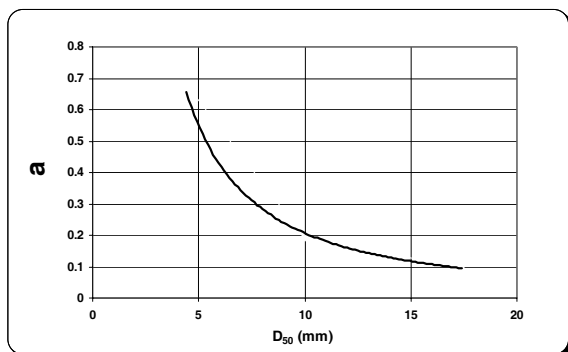
در هر صورت از شکل ۱۱ به عنوان مبنایی برای ارائه نمودار طراحی استفاده نشد و ایده مربوط به شکل ۱۱ رها شد. لذا بررسیهای بیشتری در نتایج آزمایشها به عمل آمد. با دقت در نتایج کلیه آزمایشها از جمله شکل‌های ۶ تا ۱۰ می‌توان تشخیص داد که بیشتر نمودارها شامل سه مرحله با بخش "کم شیب اولیه"، "میانی" و "پرشیب انتهایی" می‌باشند. (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ مراحل مختلف در هر آزمایش نفوذ

بخش کم شیب اولیه منحنی می‌تواند به دلیل جاگیری اولیه سنگدانه‌ها در درون یکدیگر و در درون خاک سست و همچنین جاگیری صفحه اعمال بار بر روی سنگدانه‌ها در ابتدای آزمایش باشد. به طور کلی "جاگیری" را می‌توان پدیده‌ای بسیار مؤثر در مرحله اولیه آزمایش در نظر گرفت. بخش پر شیب انتهایی (قسمت سوم نمودارها) نیز می‌تواند متأثر از جزئیات صفحه بارگذاری، تعداد

کرد، بررسی و تحقیق بیشتری ضروری است. نکته قابل تأکید این است که در مقاله حاضر پیشنهاد می‌شود که نمودار طراحی، مطابق شکل ۱۴ به جای نمودارهای مشابه شکل ۱۱ مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۴ مقادیر پیشنهادی برای (α)

۷- نتیجه‌گیری

پدیده فرورفت مصالح موج‌شکن و عدم تشکیل پی، همواره یکی از مشکلات عمده در اجرای خاکریزها و موج‌شکنها روی بسترهای سست بوده است. در این مقاله، با استفاده از آزمایش پیشنهادی، فرورفت سنگدانه‌ها به داخل بستر لجنی بررسی و چنین عنوان شد که می‌توان با اجرای یک لایه مترس در زیر خاکریز (یا موج‌شکن)، باعث کاهش یا ممانعت از فرورفت شد. در مطالعه موردی برخی از موج‌شکنهایی که در ایران بر روی بسترهای لجنی اجرا شده، نیز مشاهده شده است که لایه ماسه‌ای قرار گرفته بر روی سطح بستر، عامل مهمی در ممانعت از فرورفت است. رابطه (۴) برای طراحی لایه مترس پیشنهاد می‌شود.

۸- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از کارشناسان آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده فنی دانشگاه تهران، آقایان مهندس علیزاده و مهندس علیجانی، شاخه مکانیک جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران برای ساخت تجهیزات، آقای مهندس حسن احمدی

ضخامت لایه مترس (t) باشد تا خاک لجنی به لایه درشت دانه وارد نشود.

$$\int_0^p \Delta p = \alpha \int_0^t \Delta dis \rightarrow p = \alpha.t + c \quad (3)$$

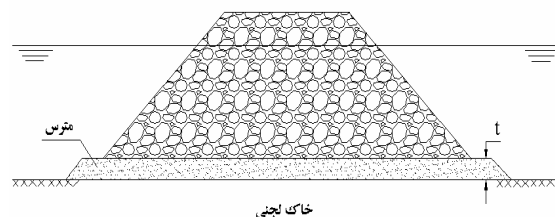
c مقدار ثابت و برابر صفر است زیرا:

$$p = 0 \text{ \& } t = 0 \rightarrow c = 0$$

لذا به سادگی خواهیم داشت:

$$p = \alpha.t \quad (4)$$

در رابطه بالا t ضخامت مترس بر حسب سانتی‌متر، p بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و حداکثر فشار در کف موج‌شکن است، بنابراین در نقطه مرکزی محاسبه می‌شود. α مقداری ثابت و تابع خاک بستر و قطر سنگدانه‌ها است. بر اساس آزمایشهای ارائه شده در این مقاله می‌توان مقدار α را به دست آورد.



شکل ۱۳ لایه مترس پیشنهادی در احداث خاکریز یا موج‌شکن

تنش لازم برای فرورفت سنگدانه‌های لایه مترس در خاک لجنی باید با وزن ناشی از خاکریز روی مترس به تعادل برسد، بنابراین کافی است مقدار α به صورت مناسبی تعیین شود. منحنی α با توجه به قطر متوسط سنگدانه بر اساس نتایج آزمایشهای ارائه شده در این مقاله در نمودار شکل ۱۴ ارائه شده است.

در نمودار شکل ۱۴ محور افقی قطر متوسط سنگدانه‌های مورد نظر برای لایه مترس است. شکل ۱۴ می‌تواند برای انتخاب α در طراحی خاکریز روی خاک سست به عنوان راهنمای اولیه استفاده شود، اما برای ارائه نمودارهایی که بتوان از آنها در شرایط مختلف استفاده

[۶] احمدی-تطفی، حسن؛ "اجرای خاکریز بر روی بسترهای سست لجنی در دریا"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی؛ فاخر، علی (راهنما)؛ گروه مهندسی عمران دانشگاه تهران؛ ۱۳۷۸.

[7] Ahmadi Tatfi, H.; et al.; "Individual penetration of aggregates into soft seabed and the effects of geosynthetics"; Geosynthetics – 7th – Delmas & Girard (eds); 2002; pp. 1379-1381.

[8] Fakher, A.; "Laboratory and analytical investigation into construction over super soft clays"; PhD thesis; university of Newcastle Upon Type; Newcastle Upon Type; U.K.; 1997.

[۹] مبرز، رسول؛ "مطالعه فرورفت موج شکنهای سنگریزه‌ای روی بستر سست"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی؛ فاخر، علی (راهنما)؛ گروه مهندسی عمران دانشگاه تهران؛ ۱۳۸۳.

[۱۰] فاخر، علی؛ "روشهای پژوهش در تحقیق"؛ جزوه درسی دکتری؛ گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ ویرایش اول؛ بهار ۱۳۸۳.

[11] Henderikus, G.B. Allersma; et al. "Centrifuge modeling of embankment construction by the dumping method on soft soil"; Soft Ground Technology; ASCE; Geotechnical Special Publication; no. 112; 2002; pp. 423-434.

[۱۲] مبرز، رسول؛ احمدی-تطفی، حسن؛ فاخر، علی؛ "بررسی آزمایشگاهی فرورفت مصالح خاکریز در بسترهای لجنی"؛ اولین کنگره ملی مهندسی عمران؛ دانشگاه صنعتی شریف؛ تهران؛ ۱۳۸۳.

تطفی برای شروع این کار تحقیقاتی در دانشگاه تهران و همچنین اداره کل شیلات ایران، مؤسسه مهندسی مشاور ساحل، شرکت مهندسی مشاور سازه پردازی، شرکت مهندسی مشاور سکو که در انجام این تحقیق ما را یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

۹- منابع

[1] Fakher, A.; Jones, C.J.F.P.; and Clarke, B.G.; "The yield stress of super soft clays"; Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.; ASCE; vol. 125; 1999; pp. 499-509.

[2] Azaraiah, I.; Dhat, N.R.; Gupta, R.P.; Chhatre, M.V.; "Foundation problems in soft marine clays for breakwater"; GEO shore; Porc. Of Int. Conf. on Offshore and Nearshore Geotechnical Eng.; 1999; pp. 371-376.

[۳] احمدی تطفی، حسن؛ و فاخر، علی؛ "نفوذ مصالح خاکریز در بسترهای سست لجنی و اثر جدا کننده‌ها"؛ نشریه دانشکده فنی؛ جلد ۳۵؛ شماره ۳؛ ۱۳۸۰؛ ص. ۲۲۱-۲۳۴.

[4] Kulkarni, S.P.; Bapaye, D.R.; Paliwal, S.T.; Mokhashi, S.L.; "Breakwater on soft soil at Kakinada-a case study"; Porc. of Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries, Colombo; 1983; pp. 888-902.

[5] Lianqing, S.; "Soft soil basement and its treatment of the coastal levee engineering"; Porc. of Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in developing Countries; Colombo; 1983; pp. 903-909.