Archive of SID

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۸۹-۹۶، (یادداشت فنّی)

Research Note

بررسی پارامترهای تعیین‌کننده در افزایش ضخامت لایه‌های خاکریز مهندسی

ابوالفضل اسلامی* (دانشیار)
پرنا یاربختی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر

یکی از مهم‌ترین عوامل در بحث متراکم‌سازی خاکریزها، تعیین ضخامت لایه‌های خاکریزی است، که با توجه به تأثیر مستقیم در میزان هزینه و زمان انجام پروژه، همواره مورد توجه کارشناسان امر بوده است. در این نوشتار به منظور بررسی پارامترهای مؤثر در ضخامت لایه‌های خاکریز مهندسی، از جمله شرایط بستر و انرژی غلتک، از مدل‌سازی عددی دو بُعدی در شرایط کرنش صفحه‌یی استفاده شده است. در این راستا از ۴ نوع غلتک چرخ فلزی، چرخ لاستیکی، پاچه‌بزی، و چرخ فلزی ارتعاشی جهت متراکم‌سازی تک‌لایه‌ی خاکریز به ضخامت‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متر استفاده شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده در صورت استفاده از بسترهای تقویت‌شده به‌دلیل سختی بالا و افزایش انرژی اعمالی غلتک، امکان افزایش ضخامت لایه‌های خاکریز به میزان تقریبی ۲ برابر ضخامت‌های ۲۰-۲۵ سانتی‌متر کنونی وجود دارد.

واژگان کلیدی: افزایش ضخامت، خاکریز مهندسی، متراکم‌سازی، سختی بستر، انرژی غلتک، مدل‌سازی عددی.

afeslami@aut.ac.ir
parna.yarbakhti@aut.ac.ir

۱. مقدمه

در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مانند: جاده‌ها، خطوط راه‌آهن و سدهای خاکی، خاکریزها به‌عنوان بستر راه و بدنه‌ی باربر اصلی محسوب می‌شوند. بنابراین باید خواص مهندسی ویژه و نیز پایداری در برابر بارهای وارده داشته باشند. اثر نوع خاک، دانه‌بندی، میزان رطوبت و تراکم خاک، ویژگی‌های مربوط به نشست‌پذیری و غیره در ظرفیت باربری خاکریزها، وجود ضوابطی در طراحی و ساخت آنها را ضروری می‌سازد.

خاکریزها را می‌توان به دو دسته خاکریزهای مهندسی و غیرمهندسی تقسیم‌بندی کرد. خاکریزی جهت پُرکردن حفره‌ها و فضاهای خالی پشت دیوارها، دپوکردن خاک دستی و دیگر مواردی که خاکریزها به‌عنوان عنصر باربر شناخته نمی‌شوند، در دسته‌ی خاکریزهای غیر مهندسی قرار می‌گیرند. بسیاری از خاکریزها و یا خاک‌های دستی تحت وزن خود، تحکیم و فشرده می‌شوند. در این میان نشست خاکریزهای شنی به حدود ۲/۵٪، نشست خاکریزهای ماسه‌یی به حدود ۵٪ و نشست مصالح رسی و ریزدانه به حدود ۱۰٪ ارتفاع اولیه‌ی خاکریز ممکن است برسد. مقدار نشست با گذشت زمان کاهش می‌یابد، ولی عموماً بین ۱۰ تا ۲۰ سال طول می‌کشد. برای خاکریزهای درشت‌دانه، بیشتر جابه‌جایی‌ها در دو سال اول اتفاق افتاده و بعد از ۵ سال، مقدار نشست‌خیلی کم شده است.[۱]

جهت احداث خاکریز، خاک به‌صورت لایه‌لایه با ضخامت مشخص ریخته می‌شود. قبل از قرارگیری هر لایه از مصالح، لایه‌ی قبل باید تا مقدار موردنظر متراکم شود. این ضخامت بسته به نوع خاک، موقعیت اجرای لایه‌ها و نوع غلتک مورد استفاده متفاوت خواهد بود. معمولاً ضخامت لایه‌های خاکریزی به ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر محدود می‌شود. آیین‌نامه‌های گوناگون ضوابطی را برای ضخامت لایه‌های خاکریزی در کاربردهای متفاوت (سدهای خاکی، جاده‌ها و خطوط راه‌آهن) ارائه می‌دهند.

۲. عوامل تأثیرگذار در افزایش ضخامت لایه‌ی خاکریز

به‌طورکلی ۳ مرحله‌ی اساسی در اجرای خاکریزها متصور است. در مرحله‌ی اول، بستر اولیه جهت خاکریزی مهیا می‌شود، سپس مصالح مناسب خاکریزی در لایه‌های با ضخامت مناسب روی بستر موردنظر قرار می‌گیرد و در نهایت، عملیات متراکم‌سازی توسط غلتک‌های مکانیکی انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین مسائل، تعیین ضخامت لایه‌ی خاکریز است، که به عواملی از جمله: موقعیت لایه، نوع غلتک مورد استفاده، نوع پروژه، و غیره بستگی دارد. ضخامت لایه‌ی خاکریزی برای تراکم مناسب توسط غلتک‌ها به طور غیرمستقیم مقدار فشار لازم جهت تراکم کامل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این عامل را می‌توان تابعی از جنس خاک نیز به حساب آورد. جهت تراکم ارتعاشی یک لایه‌ی ماسه‌یی، فشاری به اندازه‌ی ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال کافی است. در حالی که این میزان برای لایه‌ی رسی حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ کیلوپاسکال خواهد بود. با استفاده از لرزش می‌توان ذرات ماسه را به حرکت در آورد، تا آرایشی متراکم‌تر به خود بگیرند. اما تأثیرپذیری رس‌ها از ارتعاش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۱۴، پذیرش ۱۳۹۳/۹/۴.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. استاندارد تراکم مصالح سدهای خاکی.[۵]

نوع مصالح	ضخامت لایه در حالت سُست (cm)	غلتک مناسب
رس و سیلت با خاصیت خمیری زیاد	۱۵-۲۵	پاچه‌بزی
رس و سیلت با خاصیت خمیری کم	۲۰-۳۰	پاچه‌بزی استاتیکی و ارتعاشی
ماسه و شن رس‌دار	۲۰-۳۰	پاچه‌بزی استاتیکی و ارتعاشی

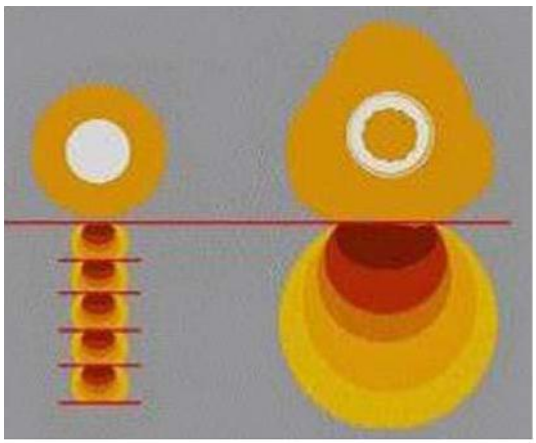
شکل ۱. غلتک HEIC سه‌وجهی.

به اندازه‌ی ماسه نیست، بنابراین فشار و تنش برشی بیشتری برای تراکم آن‌ها لازم است.[۲]

طبق نشریه‌ی شماره‌ی ۱۰۱ ایران (مشخصات فنی عمومی راه‌ها)، ضخامت لایه‌های کوبیده‌شده‌ی خاکریزی باید با درشت‌ترین ابعاد مصالح مصرفی متناسب باشد و از ۲۰ سانتی‌متر در حالت کوبیده تجاوز نکند. استفاده از ضخامت بیشتر مشروط به انجام آزمایش، کاربرد مصالح و غلتک‌های مناسب جهت تأمین تراکم منطبق با مشخصات، دست‌یابی به نتایج قابل قبول و مورد تأیید در کل ضخامت لایه است، که به هر حال نباید از ۳۰ سانتی‌متر تجاوز کند.[۳] ضخامت مجاز طبق نشریه‌ی شماره‌ی ۲۷۹ ایران (مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه‌آهن) نیز مشابه نشریه‌ی شماره‌ی ۱۰۱ است، با این تفاوت که در زیرسازی خطوط راه‌آهن، ارتفاع کل خاکریز هم در ضخامت لایه تأثیرگذار خواهد بود. به‌عبارت دیگر، با آنکه ضخامت لایه‌های کوبیده‌شده‌ی خاکریزی نباید از ۲۰ سانتی‌متر در حالت کوبیده تجاوز کند، هرگاه ارتفاع خاکریز از ۵ متر تجاوز کند، ضخامت لایه‌های کوبیده‌شده کمتر از ارتفاع ۵ متر می‌تواند تا ۳۰ سانتی‌متر افزایش یابد.[۴]

اصول تراکم بدنه‌ی سدهای خاکی نیز تابع قواعد کلی متراکم‌سازی خاکریزهاست. یک نمونه جدول استاندارد متراکم‌سازی مصالح سد خاکی شامل: نوع خاک، نوع غلتک موردنظر، ضخامت لایه‌ها و تعداد دفعات عبوری غلتک در جدول ۱ ارائه شده است.

با پیشرفته‌ترشدن ماشین‌آلات، انتظار اعمال انرژی بیشتر حین عملیات متراکم‌سازی بدیهی است. در این مورد، غلتک‌های با انرژی بالا (HEIC)[۱]، مطابق شکل ۱، تحول عظیمی در زمینه‌ی متراکم‌سازی به وجود آورده‌اند. این غلتک‌ها با قابلیت اعمال انرژی حدود ۱۰ تا ۲۸ کیلوژول بر متر همراه با وزن استاتیکی تا ۲۵ تن، افزایش قابل ملاحظه‌ی ضخامت تک‌لایه‌ی خاکریز را ممکن می‌سازند.[۶]



غلتک های HEIC　　سایر غلتک ها

شکل ۲. افزایش محدوده‌ی نفوذ تنش غلتک‌های HEIC در مقایسه با غلتک‌های معمولی.

همان‌طورکه در شکل ۲ نشان داده شده است، غلتک‌های با انرژی بالا به دلیل سطح تماس زیاد و نیز فشار تماسی بالا، محدوده‌ی نفوذ تنش وسیع‌تری در مقایسه با سایر غلتک‌های متداول خواهند داشت.

۳. مرور برخی موارد عملی

۱.۳. کشور ژاپن (شهر هوکایدو)

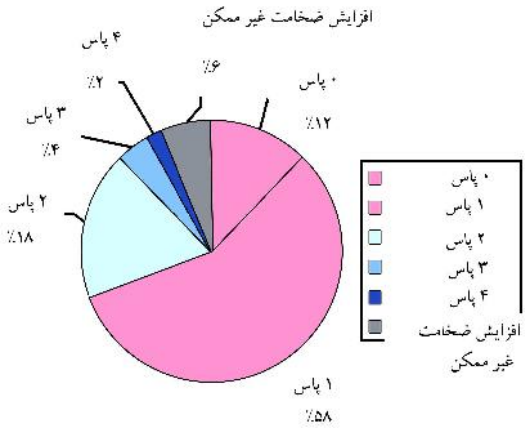
پروژه‌ی افزایش ضخامت در هوکایدوی ژاپن نشان داده است که ضخامت مجاز ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از غلتک چرخ لاستیکی برای خاکریزهای ماسه‌یی و شنی (با شن کمتر از ۶۰٪)، امکان افزایش به ۴۵ سانتی‌متر را خواهد داشت.[۷] این در حالی است که تعداد عبور به ۵ تا ۸ پاس عبوری محدود شده و در صورت استفاده از لایه‌ی ۴۵ سانتی‌متری، فقط یک پاس اضافی در مقایسه با ضخامت استاندارد موردنیاز است. مطابق شکل ۳، در بیشتر موارد (۵۸٪) فقط یک پاس عبوری اضافی جهت تراکم لایه‌های ضخیم موردنیاز است، که اگر نتایج مربوط به تعداد عبور برابر هم به آن اضافه شود، این مقدار به ۷۰٪ افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر در ۷۰٪ موارد، بیشینه‌ی یک پاس عبوری اضافی جهت متراکم‌سازی لایه‌های ضخیم نسبت به لایه‌های استاندارد موردنیاز است.[۸] طبق آیین‌نامه‌ی ژاپن، برای خاکریز بدنه‌ی راه‌ها، هدف دست‌یابی به درصد تراکم ۸۵٪ است.

مقایسه‌ی دو حالت استفاده از ضخامت استاندارد و افزایش‌یافته، جهت ایجاد خاکریز ۹۰ سانتی‌متری مطابق شکل ۴، کاهش تعداد پاس عبوری و در نهایت، کاهش هزینه و انرژی را در پی خواهد داشت. بدیهی است اثربخشی افزایش ضخامت لایه برای خاکریزهای بلندتر، چشم‌گیرتر خواهد بود.

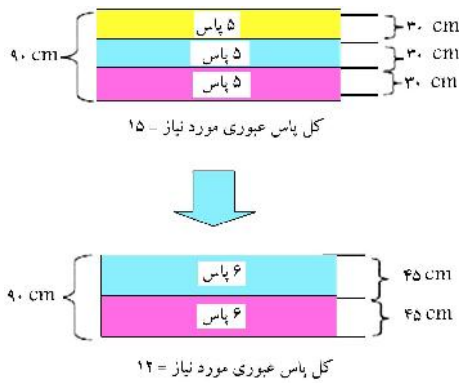
شکل ۵، محدوده‌ی خاکریز با تراکم ۸۵٪ را نشان می‌دهد. بخش‌های بالای این لایه، تراکم ۸۵٪ یا بیشتر دارند. بنابراین ضخامتی که به درصد تراکم موردنظر دست یافته است، ۱۰ سانتی‌متر فوقانی ($\frac{1}{3}$ ضخامت لایه) در حالت ضخامت استاندارد و ۴۰ سانتی‌متر فوقانی ($\frac{8}{9}$ ضخامت لایه) در حالت ضخامت افزایش‌یافته است. به‌عبارت دیگر، با افزایش ضخامت به درصد تراکم بیشتری می‌توان دست یافت (حجم بیشتری از خاک دچار افزایش چگالی می‌شود) و در نتیجه کیفیت کل خاکریز بهبود می‌یابد.[۷]

www.SID.ir

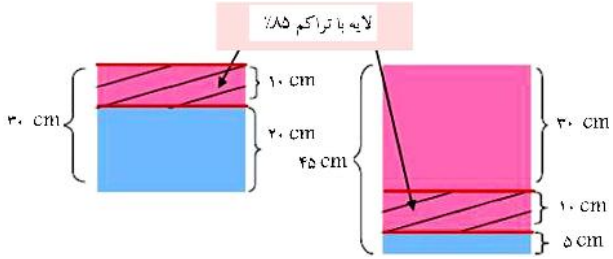
Archive of SID



شکل ۳. تفاوت تعداد عبور موردنیاز برای دو حالت استفاده از ضخامت استاندارد و افزایش‌یافته.[۷]



شکل ۴. مقایسه‌ی تعداد کل عبور موردنیاز جهت ساخت خاکریز ۹۰ سانتی‌متری.[۷]



شکل ۵. محدوده‌ی با تراکم ۸۵٪ برای دو ضخامت ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متری.[۷]

۲.۳. ایالات تگزاس، جورجیا، و تنسی

به‌منظور بررسی امکان افزایش ضخامت لایه‌ی خاکریز از میزان مجاز ۸ اینچ (۲۰ سانتی‌متر)، ۲ پروژه در ایالت تگزاس، ۳ پروژه به‌عنوان بخشی از تعریض جاده در جورجیا و ۲ پروژه در تنسی با این مشخصات مورد آزمایش قرارگرفته است.[۹]

- در پروژه‌ی آزادراه جورجیا از لایه‌ی ۱۳ اینچی (۳۳ سانتی‌متر) شامل مصالح گرانیت سنگ شکسته با دانه‌بندی متراکم در ۳ بخش مختلف استفاده شده است. در بخش اول، مصالح در محل با آب فراوان غوطه‌ور و سپس توسط گریدر مخلوط می‌شوند. در بخش دوم، مصالح با رطوبت مطلوب به سایت آورده و بدون افزودن آب اضافی متراکم می‌شوند. به منظور مقایسه، بخش سوم از ضخامت ۱۳ اینچی در دو لایه‌به ترتیب ۷ و ۶ اینچی ساخته شده است.
- در تگزاس از سنگ‌آهک شکسته با دانه‌بندی متراکم به همراه غلتک‌های چرخ فلزی و پاچه‌بزی ارتعاشی استفاده شده است. خاکریز در لایه‌های ۱۲ و ۲۱ اینچی (۳۰/۵ و ۵۳/۴ سانتی‌متر) ساخته و اثرات درصد رطوبت ارزیابی شده است.
- در تنسی از شن شکسته‌نشده با دانه‌بندی میان‌تهی و در بخش‌هایی شن شکسته به همراه ریزدانه‌ی لوس در تک‌لایه با ضخامت ۱۲ و ۱۴/۵ اینچ (۳۰/۵ و ۳۶/۸ سانتی‌متر) استفاده شده است.

به‌منظور ارزیابی کیفیت تراکم از آزمایش هسته‌یی، چگالی و آزمایش لرزه‌یی به روش تحلیل طیفی موج سطحی[۲] استفاده و این نتایج حاصل شده است:

- درصد تراکم بالای ۱۰۰ برای بخش‌های ۱ و ۲ با ضخامت تک‌لایه‌ی ۱۳ اینچی (۳۳ سانتی‌متر) در کل ضخامت لایه قابل دست‌یابی است.
- کمینه‌ی درصد تراکم ۹۳ و ۱۰۰ به ترتیب برای سنگ آهک شکسته در پروژه‌ی تگزاس و تراکم شن شکسته‌نشده در پروژه‌ی تنسی به‌دست آمده است.
- درصد رطوبت در قابلیت دست‌یابی به سطح تراکم به همراه سختی لایه‌ی متراکم اثر می‌گذارد. بخش ۲ که با رطوبت مناسب به محل آورده شده است، بیشترین سختی را دارد. مقایسه‌ی بخش‌های ۱ و ۳ که به هر دو در محل آب اضافه شده است، نشان می‌دهد بخش ۱، که کمی متراکم‌تر است، سختی کمتری دارد. این اختلاف می‌تواند به دلیل رطوبت بیشتر بخش ۱ باشد. بنابراین با کنترل پارامترهای تأثیرگذار در مدول و وزن مخصوص (مانند درصد رطوبت)، می‌توان اجرای لایه‌های ضخیم‌تر را عملی کرد.

۴. مدل‌سازی

به‌منظور بررسی عوامل تأثیرگذار در میزان جابه‌جایی و در نهایت تراکم لایه‌ی خاکریز، از مدل‌سازی عددی دو بُعدی با نرم‌افزار Plaxis نسخه‌ی ۸/۵ در شرایط کرنش صفحه‌یی استفاده شده است. در این راستا از مدل کرنش صفحه‌یی و المان ۱۵ گره‌یی جهت دقت بیشتر استفاده شده است. در بررسی اثر هر یک از پارامترها، سایر عوامل ثابت فرض شده‌اند. به‌عبارت دیگر، به‌منظور افزایش دقت در بررسی، از تغییر هم‌زمان دو یا چند پارامتر جلوگیری شده است.

مدل‌سازی با فرضیاتی همراه است، از جمله اینکه مصالح خاکریز و بستر در درصد رطوبت بهینه‌ی مربوطه قرار داشته و سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از محدوده‌ی موردنظر بستر است، به گونه‌یی که در اثر بارگذاری، اضافه فشار آب حفره‌یی به مدل وارد نمی‌شود.

اثر شرایط بستر و انرژی غلتک برای ۴ ضخامت ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متری تک‌لایه‌ی خاکریز مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا ۴ نوع غلتک چرخ فلزی، چرخ لاستیکی، پاچه‌بزی و چرخ فلزی ارتعاشی مدل شده است، که از این میان تحلیل دینامیکی فقط برای غلتک چرخ فلزی ارتعاشی صورت گرفته و در سایر حالات به‌دلیل سرعت پایین حرکت، تحلیل استاتیکی انجام شده است.[۱۰]

مدل شامل قرارگیری یک لایه‌ی خاکریز روی بستری همگن با عمق محدود است. از آنجا که محدوده‌ی توزیع تنش در عمق حدود ۳B (B عرض پی) است، با فرض مقدار B به‌عنوان عرض صفحه‌ی بارگذاری‌شده (عرض تماس غلتک) در تحلیل استاتیکی، ضخامت ۷ متر برای بستر کفایت می‌کند. در نهایت ابعاد مدل ۷ × ۷ متر انتخاب شده است. مرزهای چپ و راست امکان جابه‌جایی در راستای قائم را دارند، در حالی که مرز کف مدل در هر دو جهت افقی و قائم مقید شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

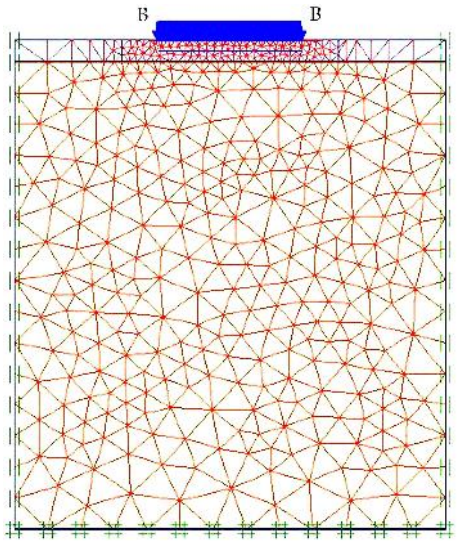
ایجاد شبکه‌بندی مناسب جهت بررسی رفتار دقیق خاک در برابر بارهای وارده ضروری است. در این راستا برای کل مدل، شبکه‌بندی با درشتی ریز و نواحی بحرانی (محدوده‌ی زیر محل بارگذاری) جهت ارزیابی دقیق‌تر توسط ناحیه‌بندی، شبکه‌بندی ریزتر انتخاب شده است. شکل ۶، مدل در تحلیل استاتیکی را نشان می‌دهد.

در تحلیل دینامیکی، مرزهای مدل عموماً دورتر از تحلیل استاتیکی قرار داده می‌شوند، چرا که مرزها باید به اندازه‌ی کافی از منطقه‌ی موردنظر (منطقه‌ی اعمال بار) دور باشند، تا از ناهنجاری‌های ناشی از بازتاب‌های ممکن جلوگیری شود. بدین ترتیب ابعاد مدل ۳۰ × ۱۵متر (عرض × ارتفاع) انتخاب شده است. مدل جهت تحلیل دینامیکی در شکل ۷ نشان داده شده است.

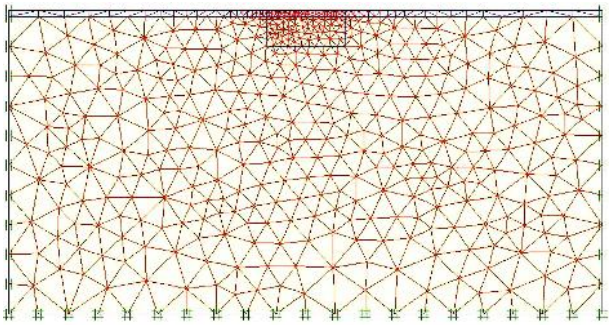
۱.۴. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح

مشخصات ژئوتکنیکی مصالح خاکریز و بستر به‌عنوان پارامترهای ورودی نرم‌افزار مطابق جدول ۲ است، این تذکر لازم است که وزن مخصوص خشک اولیه‌ی خاکریز برابر ۱۵ کیلونیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. انتخاب این مقدار، که نشان‌دهنده‌ی خاک نسبتاً سُست است، به منظور مشاهده‌ی تغییرات محسوس در اثر متراکم‌سازی است. مدول کشسانی لایه‌ی تحتانی (بستر) در محدوده‌ی بسیار سُست تا بسیار سخت متغیر است، در حالی که سختی لایه‌ی خاکریز ثابت است.

که در آن γ_{unsat}، وزن مخصوص غیراشباع (ظاهری)، γ_{sat} وزن مخصوص



شکل ۶. شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل استاتیکی.



شکل ۷. شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل دینامیکی.

اشباع $e_\circ$، نسبت تخلخل اولیه E_{MC}، مدول کشسانی مدل موهر ـ کولمب، c چسبندگی، φ زاویه‌ی اصطکاک، ψ زاویه‌ی اتساع و ν نسبت پواسون خاک است.

از آنجا که در روند بارگذاری ـ باربرداری، میزان نشست پس از باربرداری جهت ارزیابی میزان تراکم ملاک عمل قرار می‌گیرد، مدل رفتاری خاک سخت‌شونده برای مصالح خاکریز و بستر انتخاب شده است. مدل مذکور با تفاوتی که برای سختی بارگذاری و باربرداری قائل می‌شود، رفتار واقعی‌تری از خاک را نشان می‌دهد. همچنین قابلیت تطبیق میزان مدول کشسانی خاک با سطح تنش را دارد، به‌عبارت دیگر، حین مدل‌سازی به ماتریس سختی خاک اجازه داده می‌شود تا با هر گام بارگذاری خود را تطبیق دهد. با فرض مدول کشسانی ۶۰ و ۳۰ مگاپاسکال به ترتیب برای بستر و خاکریز و استفاده از روابط موجود، پارامتر سختی مدل سخت‌شونده در وسط هر لایه، امکان محاسبه دارد.[۱۱]

مشخصات مصالح خاکریز و بستر در تحلیل دینامیکی نیز مطابق جدول ۲ است. تفاوت آن با حالت استاتیکی، فقط در مقدار مدول کشسانی (به دلیل محدوده‌ی کوچک کرنش‌ها) و تعریف پارامترهای میرایی خاک (α و β) به ترتیب برابر ۰٫۰۰۱ و ۰٫۰۱ است.[۱۲] در واقع، ابتدا بیشینه‌ی مدول برشی تحت بار دینامیکی (G_{max}) با استفاده از رابطه‌ی ۱ و سپس مدول کشسانی بیشینه‌ی موردنیاز تحلیل دینامیکی ($E_{\max}$)، طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است:

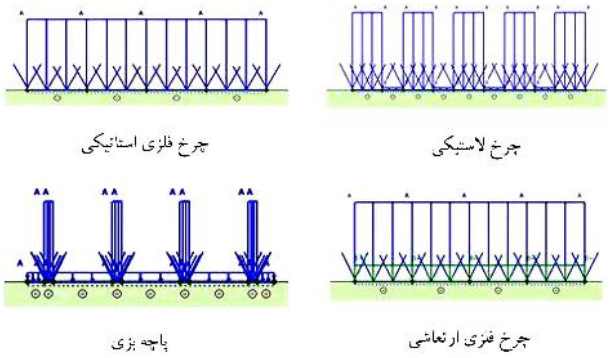
$$G_{\max} = ۳۲۳۰ \times \frac{(۲٫۹۷۳ - e)^۲}{۱ + e} (OCR)^k \left(\sigma'_\circ\right)^{۱/۲} \qquad (۱)$$

$$E_{\max} = ۲(۱ + \nu).G_{\max} \qquad (۲)$$

که در آن‌ها، e نسبت تخلخل، OCR نسبت بیش تحکیمی (مقدار برابر ۱ فرض شده است)، k مقدار ثابت تابعی از شاخص خمیری (در شرایط PI برابر صفر، این مقدار نیز صفر است)، $\sigma'_\circ$ میانگین تنش‌های مؤثر اصلی، و ν نسبت پواسون خاک است.

۲.۴. سیستم بارگذاری

سیستم بارگذاری به‌صورت بارگسترده‌ی یکنواخت به میزان فشار تماسی هر نوع غلتک، مطابق جدول ۳ است. این تذکر لازم است که فشار تماسی غلتک چرخ لاستیکی و پاچه‌بزی، به ترتیب فشار تماسی زیر چرخ‌ها و محل زائده‌هاست.[۱۳] نحوه‌ی مدل‌سازی غلتک‌های مورد استفاده نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. مدل‌سازی فقط برای یک پاس عبوری غلتک، به‌صورت بارگذاری ـ باربرداری انجام شده است. به طوری که در قسمت محاسبات پس از ایجاد خاکریز و صفرکردن



شکل ۸. غلتک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی عددی.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح خاکریز و بستر.

	γ_{unsat} (kN/m³)	γ_{sat} (kN/m³)	e_o	E_{MC} (MPa)	c (kPa)	φ (درجه)	ψ (درجه)	ν
خاکریز ماسه‌یی	۱۶/۵	۱۹/۳	۰/۷۷	۳۰	۱۰	۳۶	۶	۰/۳۵
خاکریز رسی	۱۶/۵	۱۹/۳	۰/۷۷	۳۰	۵۰	۲۴	۰	۰/۳۵
بستر	۱۸/۷	۲۰/۶	۰/۷۷	۶۰	۸	۳۶	۶	۰/۳۰

جدول ۳. مشخصات غلتک‌های مورد استفاده.

	چرخ فلزی	چرخ لاستیکی	پاچه‌بزی
فشار تماسی (kPa)	۳۸۰	۷۰۰	۴۰۰۰
عرض تماس (m)	۲	۲/۱	۲/۱

میزان جابه‌جایی‌ها، در فاز بعدی بارگذاری غلتک اعمال و بارها فعال می‌شوند و در فاز بعدی، بارها غیرفعال و شرایط باربرداری شبیه‌سازی می‌شود.

به‌منظور مقایسه‌ی اثر ارتعاش در تراکم خاک، تمامی مشخصات غلتک‌های چرخ فلزی در حالت استاتیکی و ارتعاشی، از جمله فشار تماسی ناشی از وزن و عرض تماس ثابت فرض شده‌اند و فقط بسامد و نیروی گریز از مرکز به بخش دینامیکی اضافه شده است. از آنجا که وزن غلتک‌های ارتعاشی اغلب بیشتر از غلتک‌های استاتیکی است، این فرض محافظه‌کارانه است.

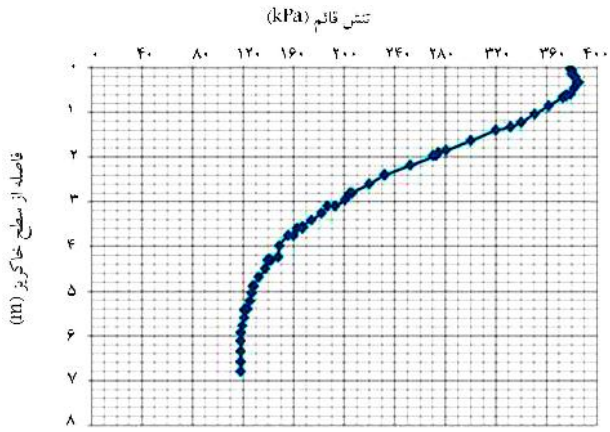
در تحلیل دینامیکی غلتک ارتعاشی از دو سیستم بارگذاری جهت مدل‌کردن تنش دینامیکی و استاتیکی، به‌صورت بارگسترده‌ی یکنواخت استفاده شده است. تنش استاتیکی، فشار تماسی ناشی از وزن و تنش دینامیکی ناشی از نیروی گریز از مرکز تولیدی توسط دوران خلاف جهت دو جرم خارج از مرکز است. در مورد غلتک‌های ارتعاشی، استفاده از ترکیب بسامد پایین‌تر و دامنه‌ی بیشتر، که منجر به اعمال نیروی گریز از مرکز بزرگ‌تری می‌شود، ارجحیت دارد. طبق مشخصات فنی غلتک ارتعاشی انتخابی، غلتک با عرض تماس ۲ متر و بسامد ۲۵ هرتز، با توجه به مشخصات اجرام دورانی داخل درام، نیروی گریز از مرکز حدود ۴۰۰ کیلونیوتن ایجاد می‌کند.[۱۴]

۵. نتایج مدل‌سازی

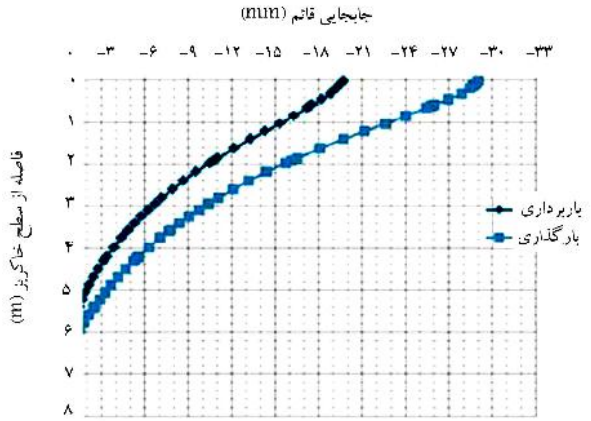
به‌عنوان نمونه‌یی از کل خروجی‌ها، نمودار توزیع تنش ناشی از بارگذاری خاکریز توسط غلتک چرخ فلزی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چه از سطح خاکریز فاصله می‌گیریم، میزان اضافه تنش ناشی از بارگذاری به شدت کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت بیشینه‌ی فشار تماسی غلتک (۳۸۰ کیلوپاسکال برای غلتک چرخ فلزی) نهایتاً به ۱ متر فوقانی سطح خاکریز اعمال می‌شود.

شکل ۱۰، تغییرات جابه‌جایی قائم خاک در عمق را به‌عنوان نمونه برای غلتک چرخ فلزی نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، تفاوت میزان نشست ناشی از بارگذاری و باربرداری در سطح بستر، بیشترین مقدار را داشته و در کف بستر به صفر رسیده است.

اثر شرایط بستر با افزایش و کاهش مدول کشسانی (سختی) آن مورد بررسی قرارگرفته است. با فرض سختی اولیه برابر E_o، در کل ۶ سختی مختلف ($0/5E_o$، $1E_o$، $2E_o$، $3E_o$، $4E_o$ و $10E_o$) برای بستر در نظرگرفته شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش سختی بستر، میزان نشست خاکریز کاهش یافته است، تا



شکل ۹. توزیع تنش در عمق ناشی از بارگذاری خاکریز ماسه‌یی ـ غلتک چرخ فلزی.



شکل ۱۰. میزان نشست ناشی از بارگذاری و باربرداری خاکریز ماسه‌یی ـ غلتک چرخ فلزی.

جایی که در صورت وجود بستر صلب (بستر با مدول کشسانی بسیار بالا)، درصد تراکم به صفر میل کند و عملاً بارگذاری، تأثیری در تراکم لایه‌ی خاکریز ندارد.

میزان تراکم لایه‌ی خاکریز با محاسبه‌ی میزان تخلخل نهایی و در نهایت وزن مخصوص خشک نهایی، مطابق روابط ۳ و ۴ ارزیابی شده است:

$$\frac{e_i - e_f}{1 + e_i} = \frac{\Delta H}{H_o} \qquad (۳)$$

$$\gamma_{d_f} = \frac{1 + e_i}{1 + e_f} \times \gamma_{d_i} \qquad (۴)$$

که در آن‌ها، e_i و e_f به ترتیب نسبت تخلخل اولیه و نهایی، H_o ضخامت لایه‌ی خاکریز، γ_{d_i} و γ_{d_f} به ترتیب وزن مخصوص خشک اولیه و نهایی خاک هستند.

میزان نشست و درنهایت درصد تراکم ضخامت‌های مختلف لایه‌ی خاکریز ناشی از تغییرات مدول بستر به‌عنوان نمونه برای غلتک پاچه‌بزی در جدول ۴ ارائه شده

www.SID.ir

Archive of SID

است. مطابق جدول مذکور، بیشترین افزایش وزن مخصوص مربوط به لایه‌ی ۱۵ سانتی‌متری در سُست‌ترین حالت ($۰/۵E$) است، که تحت فشار ۴ مگاپاسکالی غلتک پاچه‌بزی متراکم شده است.

با افزایش انرژی اعمالی، میزان تنش اضافی در عمق نیز افزایش می‌یابد. با افزایش تنش انتقالی به عمق می‌توان ضخامت بیشتری از لایه را متراکم کرد، چرا که عمق نفوذ تنش افزایش یافته است. این شرایط در عمل می‌تواند با افزایش وزن درام غلتک (از طریق افزودن آب یا ماسه به درون درام)، منجر به افزایش فشار تماسی شود و یا تغییرات بسامد ارتعاش صورت گیرد. برای غلتک‌های استاتیکی، با فرض انرژی اولیه برابر q_o، سطوح مختلف انرژی (q_o، $۲q_o$ و $۳q_o$) در نظر گرفته شده است. در مورد غلتک‌های ارتعاشی، تغییرات انرژی وارده از طریق تغییرات میزان بسامد بار و در نتیجه‌ی آن، تغییرات نیروی گریز از مرکز لحاظ شده است. طبق مشخصات فنی غلتک‌های ارتعاشی برای بسامدهای ۲۵، ۳۰ و ۳۵، نیروی گریز از مرکز به ترتیب برابر ۴۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰ کیلونیوتن است. نتایج حاصل از تغییرات انرژی اعمالی بر تراکم لایه‌ی خاکریز، به‌عنوان نمونه برای ضخامت ۴۵ سانتی‌متر در جدول ۵ ارائه شده است. به منظور مقایسه‌ی عملکرد نوع غلتک بر متراکم‌سازی هر یک از خاکریزهای رسی و ماسه‌یی، مقادیر مربوط به غلتک‌های چرخ فلزی استاتیکی و ارتعاشی برای خاکریز ماسه‌یی، و مقادیر مربوط به غلتک‌های چرخ لاستیکی و پاچه‌بزی برای خاکریز رسی است.

۶. بحث در نتایج و اعتبارسنجی

در بررسی اثر شرایط بستر، طبق نتایج حاصل با کاهش سختی میزان نشست افزایش می‌یابد، که عمده‌ی آن ناشی از جابه‌جایی بستر ضعیف تحت اثر بارگذاری است. از آنجا که افزایش سختی منجر به کاهش نشست آن می‌شود، در صورت استفاده از بستر سخت‌تر، میزان جابه‌جایی به جابه‌جایی لایه‌ی خاکریز محدود و امکان افزایش ضخامت این لایه فراهم می‌شود. چرا که مطابق نتایج به‌دست‌آمده با افزایش سختی بستر، میزان تغییرات جابه‌جایی، تخلخل، و چگالی لایه‌ی خاکریز با ضخامت‌های

جدول ۴. نتایج مربوط به تغییرات سختی بستر ـ خاکریز رسی، غلتک چرخ پاچه‌بزی.

E	H_o (cm)	ΔH (cm)	$\left(\gamma_{d_f}-\gamma_{d_i}\right)/\gamma_{d_i}$ (٪)
	۱۵	۴/۸۶-۰/۳۲	۴۷/۴۷-۲/۳۳
$۰/۵E-۱۰E$	۳۰	۵/۰۵-۰/۴۷	۲۰/۴۰-۱/۷۳
$(E_{MC}=۳۰-۶۰۰\ \mathrm{MPa})$	۴۵	۵/۲۰-۰/۴۹	۱۲/۷۳-۱/۱۳
	۶۰	۵/۰۹-۰/۷۵	۹/۲۷-۱/۱۳

جدول ۵. اثر تغییرات انرژی غلتک در تراکم لایه‌ی خاکریز.

انرژی	غلتک	ΔH (cm)	$\left(\gamma_{d_f}-\gamma_{d_i}\right)/\gamma_{d_i}$ (٪)
$۱q-۴q$	چرخ فلزی استاتیکی	۴/۲۹-۰/۹۹	۱۰/۶۰-۲/۲۵
$۱q-۴q$	چرخ لاستیکی	۴/۷۵-۱/۲۰	۱۲/۰۰-۲/۹۳
$۱q-۲q$	پاچه‌بزی	۵/۳۹-۲/۶۸	۱۳/۴۰-۶/۶۷
$۱F-۲F$	چرخ فلزی ارتعاشی	۲/۶۳-۲/۳۱	۶/۰۰-۵/۳۳

مختلف به یکدیگر نزدیک است. با توجه به اثر سختی بستر در میزان تراکم لایه‌ی خاکریز، بسترهای تقویت‌شده نیز به دلیل مدول کشسانی (سختی) بالا می‌توانند به افزایش ضخامت لایه‌ی خاکریز کمک کنند.

این وضعیت برای تمامی غلتک‌ها مشابه است. به‌عبارت دیگر، اثر سختی بستر در میزان تراکم لایه‌ی خاکریز، مستقل از میزان انرژی غلتک و نوع بارگذاری (استاتیکی، دینامیکی) است. نتایج حاصل به‌عنوان نمونه برای لایه‌ی خاکریز ۳۰ سانتی‌متری در جدول ۶ ارائه شده است. به استثناء غلتک پاچه‌بزی، سایر نتایج مربوط به خاکریز ماسه‌یی است.

اثر تغییرات مدول کشسانی (سختی) بستر به‌عنوان نمونه برای غلتک چرخ فلزی استاتیکی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، بیشترین اختلاف در سطح خاکریز رخ می‌دهد و با افزایش عمق، دو نمودار به یکدیگر نزدیک می‌شوند. این تذکر لازم است که نمودار مذکور برای غلتک‌های متفاوت از نظر کیفی مشابه است و فقط با توجه به شدت تنش اعمالی، مقادیر جابه‌جایی‌ها تغییر خواهند داشت.

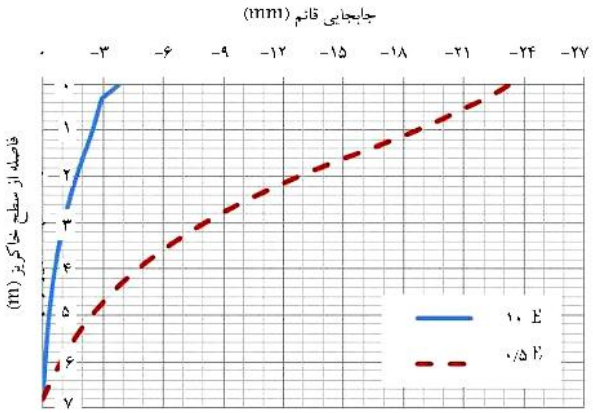
در مورد انرژی اعمالی، با افزایش تنش وارده، میزان فشردگی و در نهایت درصد تراکم لایه خاکریز افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش عمق مؤثر و محدوده‌ی تنش انتقالی است. بنابراین با افزایش انرژی غلتک، ضخامت بیشتری را می‌توان تحت تأثیر تنش و در نهایت جابه‌جایی و تراکم قرار داد.

مطابق جدول ۷، استفاده از غلتک پاچه‌بزی به دلیل اعمال فشار بالا در سطح کم (زیر زائده‌ها) با اختلاف قابل توجهی منجر به نتایج بهتری نسبت به سایر غلتک‌ها می‌شود. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، روند کلی افزایش چگالی در تمامی غلتک‌ها مشابه است.

شکل ۱۲، توزیع تنش در عمق را برای غلتک‌های قابل کاربرد در خاک رسی

جدول ۶. اثر تغییرات سختی بستر در تراکم لایه‌ی خاکریز.

غلتک	E	ΔH (cm)	$\left(\gamma_{d_f}-\gamma_{d_i}\right)/\gamma_{d_i}$ (٪)
چرخ فلزی	$۱۰E-۰/۵E$	۱/۹۵-۰/۱۴	۷/۲۷-۰/۵۳
چرخ لاستیکی	$۱۰E-۰/۵E$	۲/۲۹-۰/۱۹	۸/۶۰-۰/۵۳
پاچه‌بزی	$۱۰E-۰/۵E$	۵/۰۵-۰/۴۷	۲۰/۴۰-۱/۷۳
چرخ فلزی ارتعاشی	$۱۰E-۰/۵E$	۲/۴۹-۰/۴۶	۹/۲۰-۱/۷۳



شکل ۱۱. اثر تغییرات سختی بستر در تراکم لایه‌ی خاکریز ـ غلتک چرخ فلزی استاتیکی.

www.SID.ir

Archive of SID

نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، غلتک پاچه‌بزی به علت فشار تماسی بالا (میانگین ۴ مگاپاسکال در محل زائده‌ها) اختلاف چشم‌گیری در میزان تنش انتقالی نسبت به غلتک‌های چرخ فلزی و چرخ لاستیکی دارد، که این اختلاف در سطح بیشینه است، و با فاصله از سطح خاکریز کاهش می‌یابد و در کف بستر به میزان کمینه می‌رسد.

در مورد غلتک‌های ارتعاشی، استفاده از ترکیب بسامد (f) پایین‌تر و دامنه‌ی بیشتر، که منجر به اعمال نیروی گریز از مرکز (F) بزرگ‌تری می‌شود، ارجحیت دارد. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی دینامیکی و استاتیکی هر یک از غلتک‌ها مشاهده می‌شود که با اعمال ارتعاش، میزان جابه‌جایی و درصد تراکم تا بیش از ۲ برابر افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از غلتک‌های استاتیکی، حصول به این میزان نشست و تراکم مستلزم افزایش تقریبی ۳ برابری انرژی غلتک است. بنابراین علت لزوم و گستردگی استفاده از غلتک‌های ارتعاشی کاملاً مشهود است.

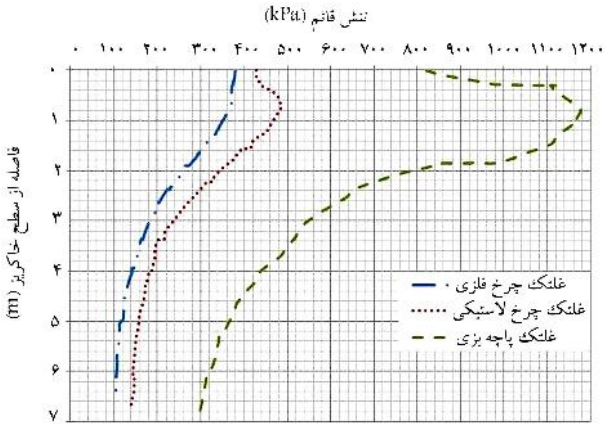
جدول ۸، تغییرات فشردگی و چگالی خاکریز ماسه‌یی را در ۳ حالت استفاده از غلتک‌های چرخ لاستیکی، چرخ فلزی استاتیکی، و چرخ فلزی ارتعاشی نشان می‌دهد. اثر مطلوب استفاده از مکانیزم ارتعاشی غلتک‌ها به وضوح در نتایج مشاهده می‌شود.

شکل ۱۳، توزیع تنش در عمق را برای غلتک چرخ فلزی در دو حالت استاتیکی و ارتعاشی نشان می‌دهد. مطابق شکل، تنش انتقالی در حدود ۱/۵ متر فوقانی از سطح خاکریز، در صورت استفاده از غلتک ارتعاشی به میزان قابل توجهی بیش از غلتک استاتیکی است. از این عمق به بعد، میانگین تنش انتقالی در دو حالت تقریباً یکسان است.

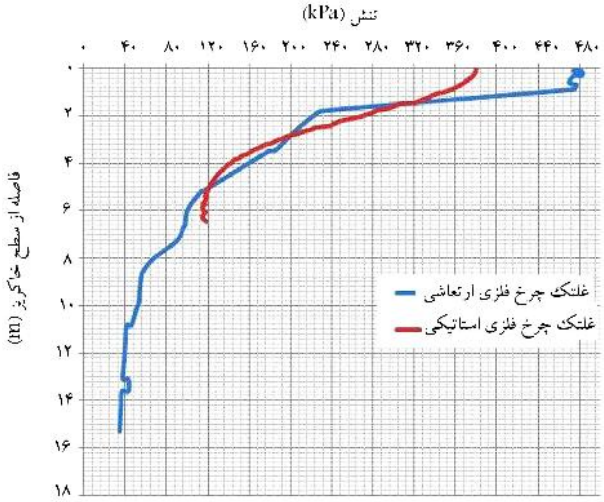
شکل ۱۴، میزان فشردگی خاکریز ماسه‌یی را برای غلتک چرخ فلزی در دو حالت استاتیکی و ارتعاشی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی اختلاف میزان فشردگی در سطح است، که با فاصله از سطح خاکریز به تدریج کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، امکان افزایش بیش از ۲ برابری میزان جابه‌جایی در صورت استفاده از غلتک چرخ فلزی ارتعاشی در مقایسه با نوع استاتیکی آن وجود

جدول ۷. اثر تغییرات فشار تماسی غلتک در میزان چگالی خاکریز رسی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر.

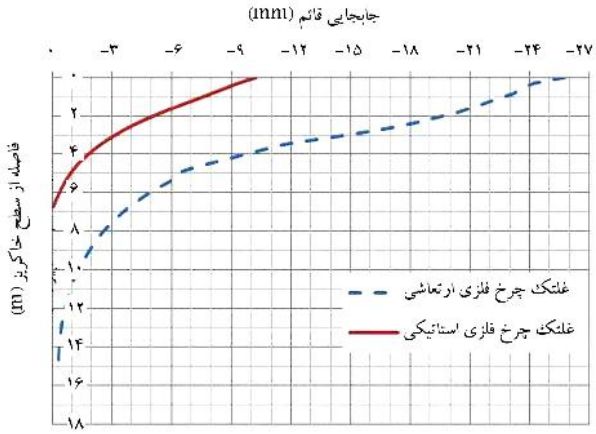
غلتک	q	ΔH (cm)	$\left(\gamma_{d_f}-\gamma_{d_i}\right)/\gamma_{d_i}$ (٪)
چرخ فلزی	$4q-1q$	۴/۲۹-۱/۰۷	۱۶/۴۷-۳/۵۳
چرخ لاستیکی	$4q-1q$	۵/۱۲-۱/۲۵	۲۰/۴۰-۴/۱۳
پاچه‌بزی	$2q-1q$	۴/۹۴-۲/۶۳	۱۹/۶۰-۱۰/۰۰



شکل ۱۲. مقایسه‌ی توزیع تنش میان غلتک‌های استاتیکی.



شکل ۱۳. توزیع تنش در عمق برای غلتک چرخ فلزی در دو حالت استاتیکی و ارتعاشی.



شکل ۱۴. میزان فشردگی خاکریز ماسه‌یی برای غلتک چرخ فلزی در دو حالت استاتیکی و ارتعاشی.

جدول ۸. مقایسه‌ی تغییرات چگالی خاکریز ماسه‌یی در اثر عبور غلتک‌های مختلف.

غلتک	q	H_o (cm)	ΔH (cm)	$\left(\gamma_{d_f}-\gamma_{d_i}\right)/\gamma_{d_i}$ (٪)
چرخ فلزی	$q=380$ kPa	۱۵-۶۰	۰/۹۸-۰/۹۹	۱/۶۸-۷/۳۳
چرخ لاستیکی	$q=700$ kPa	۱۵-۶۰	۱/۱۸-۱/۲۰	۲/۳۳-۸/۶۰
چرخ فلزی ارتعاشی	$q_{st}=380$ kPa, $f=30$ Hz, $F=300$ kN	۱۵-۶۰	۲/۲۵-۲/۳۷	۴/۰۷-۱۸/۰۰

www.SID.ir

Archive of SID

دارد. لازم به یادآوری است که عمق بستر در تحلیل استاتیکی ۷ متر و در تحلیل دینامیکی ۱۵ متر است.

در نهایت با توجه به موارد ذکرشده و مدل‌سازی، فقط یک پاس عبوری غلتک، در صورت وجود بستر با سختی مناسب و اعمال انرژی کافی، امکان افزایش ضخامت تک‌لایه‌ی خاکریز تا ۴۵ سانتی‌متر وجود خواهد داشت. قابل ذکر است که این ضخامت کمینه است، چراکه با لحاظ تعداد پاس عبوری غلتک، که تغییرات بیشتر فشردگی، تخلخل و چگالی را به همراه خواهد داشت، این مقدار قابل افزایش خواهد بود. این ضخامت با توجه به مطالعات موردی معرفی‌شده، دور از ذهن نیست. چرا که در ساده‌ترین حالت، بررسی‌های انجام‌شده در هوکایدوی ژاپن نشان داده است که در صورت استفاده از غلتک چرخ لاستیکی، ضخامت تک‌لایه‌ی خاکریز ماسه‌یی و شنی (حاوی کمتر از ۶۰٪ شن)، از ۳۰ سانتی‌متر به ۴۵ سانتی‌متر قابل افزایش است. این در حالی است که تعداد عبور به ۵ پاس عبوری بهینه محدود و در صورت استفاده از لایه‌ی ۴۵ سانتی‌متری فقط یک پاس اضافی موردنیاز است. با تعداد عبور بهینه‌ی غلتک، درصد تراکم ۸۵٪ موردنیاز نیز تأمین و حتی بخش بیشتری از لایه دچار افزایش درصد تراکم می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی دوبُعدی به منظور بررسی اثر شرایط بستر و انرژی غلتک در افزایش ضخامت لایه‌ی خاکریز، این نتایج را در برداشته است:

- با کاهش سختی بستر، میزان نشست افزایش می‌یابد که عمده‌ی آن ناشی از جابه‌جایی بستر ضعیف تحت اثر بارگذاری است. از آنجا که افزایش سختی بستر منجر به کاهش نشست آن می‌شود، در صورت استفاده از بستر سخت‌تر، میزان جابه‌جایی به جابه‌جایی لایه‌ی خاکریز محدود و امکان افزایش ضخامت این لایه فراهم می‌شود. در نتیجه بسترهای تقویت‌شده نیز به دلیل مدول کشسانی (سختی) بالا می‌توانند به افزایش ضخامت لایه‌ی خاکریز کمک کنند.
- با افزایش تنش وارده، به دلیل افزایش عمق مؤثر، میزان فشردگی و در نهایت درصد تراکم لایه‌ی خاکریز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب در صورت افزایش انرژی اعمالی، ضخامت بیشتری را می‌توان تحت تأثیر تنش و در نهایت تراکم قرار داد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از غلتک‌های پاچه‌بزی به دلیل اعمال فشار بالا در سطح کم (زیر زائده‌ها) و استفاده از غلتک‌های ارتعاشی به دلیل مکانیزم عملکردی خاص، منجر به نتایج بهتر با اختلاف قابل توجه نسبت به سایر غلتک‌ها می‌شوند.
- در مورد غلتک‌های ارتعاشی، استفاده از ترکیب بسامد پایین‌تر و دامنه‌ی بیشتر، که منجر به اعمال نیروی گریز از مرکز بزرگ‌تری می‌شود، ارجحیت دارد. به‌منظور بررسی عملکرد و تأثیر تراکم ارتعاشی خاکریز دانه‌یی، مدل‌سازی غلتک چرخ فلزی ارتعاشی با مشخصاتی (فشار تماسی و عرض تماس) مشابه غلتک چرخ فلزی استاتیکی انجام شده است. نتایج نشان داده است که میزان تغییرات جابه‌جایی و چگالی لایه‌ی خاکریز با به‌کارگیری ارتعاش به بیش از ۲ برابر نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌یابد.

پانوشت‌ها

1. high energy impact compaction (HEIC)
2. spectral analysis of surface waves (SASW) testing

منابع (References)

1. Eslami, A., *Founadtion Engineering*, 4th Edition, Buidling and Housing Research Center, Iran (2011).
2. Forssblad, L., *Vibratory Soil and Rock Fill Compaction*, Department of the Environment, Old Wokingham Road crow Thorne RG11 6AUm Berkshire England (1998).
3. Technical Specification of Road, *Vice-Presidency for Strategic Planning and Supervision*, Publication 101, Iran (2003).
4. Technical Specification of Railway Substructure, *Vice-Presidency for Strategic Planning and Supervision*, Publication 279, Iran (2004).
5. Kutzner, Ch., *Earth and Rockfill Dams*, Taylor and Francis Inc. (1997).
6. Kelly, D. "Deep in-situ ground improvement using high energy impact compaction (HEIC) technology", Geotechnical Master of Engineering Research Thesis, University of Sydney, NSW, Australia (2000).
7. Adachi, T., Nishimoto, S. and Sato, A. "Improving embankment construction efficiency by increasing the lift thickness", Public Works Research Institute Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Public Works Research Institute, Japan (2008).
8. Adachi, T., Nishimoto, S. and Sato, A. "A Study for efficient earthworks using embankment thickening", 51st Hokkaido Regional Development Bureau Technical Research Presentation Meeting (2008).
9. Allen, J.J., Stokoe, K.H. and Kalinski, M.E., *Density and Stiffness Results for Thick Single Lifts of Uncrushed and Partially Crushed Gravel*, ICAR Report 501-4, The University of Texas at Austin (1998).
10. Yarbakhti, P. and Eslami, A. "Evaluation of determinant parameters for thickening the engineered fills layers", *International Conference on New Trends in Transport Phenomena*, NTTP-Ottawa (2014).
11. PLAXIS 2D: Reference Manual, Version 8.0, Plaxis BV, Delft, The Netherlands (2012).
12. Petřík, T. "The analysis of technical seismicity induced by vibrating roller", *International Conference of Postgraduate Students*, JUNIORSTAV- Brno (2011).
13. Bomag Company, Compactors Specifications, [Brochure] (March 2013).
14. Ammann Group Company, Compactors Specifications, [Brochure] (March 2013).

www.SID.ir