

# بررسی پارامترهای تعیین‌کننده در افزایش ضخامت لایه‌های خاکریز مهندسی

ابوالفضل اسلامی\* (دانشیار)

پرونا باربختی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر

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

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 صفحه‌ی استفاده شده است. در این راستا از ۴ نوع غلتک چرخ فلزی، چرخ لاستیکی، پاجه‌بزی، و چرخ فلزی ارتعاشی جهت متراکم‌سازی تک‌لایه‌ی خاکریز به ضخامت‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متر استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده در صورت استفاده از بسترهای تقویت شده به دلیل 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.

## ۱. مقدمه

در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مانند: جاده‌ها، خطوط راه‌آهن و سدهای خاکی، خاکریزها به عنوان 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 غیر مهندسی تقسیم‌بندی کرد. خاکریزی جهت پرکردن حفره‌ها و فضاهای خالی پشت دیوارها، دیوکردن خاک دستی و دیگر مواردی که خاکریزها به عنوان 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 نشست خیلی کم شده است.<sup>[۱]</sup>

جهت احداث خاکریز، خاک به صورت لایه‌لایه با ضخامت مشخص ریخته می‌شود. قبل از قرارگیری هر لایه از مصالح، لایه‌ی قبل باید تا مقدار موردنظر

\* نویسنده مسئول

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

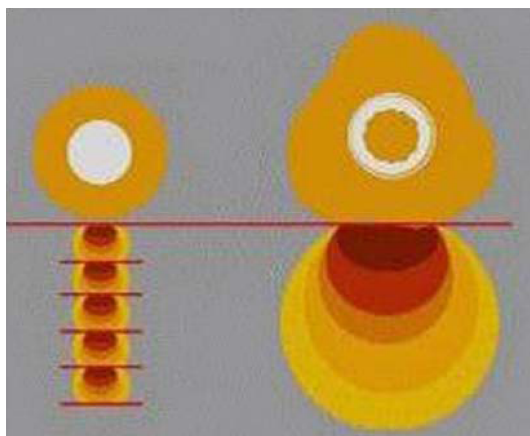
متراکم شود. این ضخامت بسته به نوع خاک، موقعیت اجرای لایه‌ها و نوع غلتک مورد استفاده متفاوت خواهد بود. معمولاً ضخامت لایه‌های خاکریزی به ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر محدود می‌شود. آیین‌نامه‌های گوناگون ضوابطی را برای ضخامت لایه‌های خاکریزی در کاربردهای متفاوت (سدهای خاکی، جاده‌ها و خطوط راه‌آهن) ارائه می‌دهند.

## 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

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

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



گلنک های HEIC      سایر گلنک ها

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

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



شکل ۱. گلنک HEIC سه‌وجهی.

به اندازه‌ی ماسه نیست، بنابراین فشار و تنش برشی بیشتری برای تراکم آن‌ها لازم است. [۱]

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 گلنک‌های 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. [۲] 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. به عبارت 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 گلنک موردنظر، ضخامت لایه‌ها و تعداد دفعات عبوری گلنک در جدول ۱ ارائه شده است.

با پیشرفته‌تر شدن ماشین‌آلات، انتظار اعمال انرژی بیشتر حین عملیات متراکم‌سازی بدیهی است. در این مورد، گلنک‌های با انرژی بالا (HEIC) [۱]، مطابق شکل ۱، تحول عظیمی در زمینه‌ی متراکم‌سازی به وجود آورده‌اند. این گلنک‌ها 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]

### ۳. مرور برخی موارد عملی

#### ۱.۳. کشور ژاپن (شهر هوکایدو)

پروژه‌ی افزایش ضخامت در هوکایدو ژاپن نشان داده است که ضخامت مجاز ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از گلنک 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. به عبارت 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 (۱/۳ ضخامت لایه) در حالت ضخامت استاندارد و ۴۰ سانتی‌متر فوقانی (۱/۹ ضخامت لایه) در حالت ضخامت افزایش‌یافته است. به عبارت 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]

فلزی و پاچه‌بری 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.

به منظور ارزیابی کیفیت تراکم از آزمایش هسته‌بی، چگالی و آزمایش لرزه‌بی به روش تحلیل طیفی موج سطحی<sup>۲</sup> 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 تگراس و تراکم شن شکسته‌نشده در پروژه‌ی تنسی به دست 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.

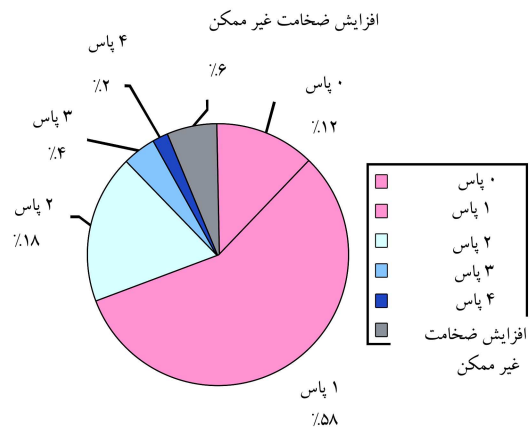
#### ۴. مدل سازی

به منظور 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. به عبارت دیگر، به منظور افزایش دقت در بررسی، از تغییر هم‌زمان دو یا چند پارامتر جلوگیری شده است.

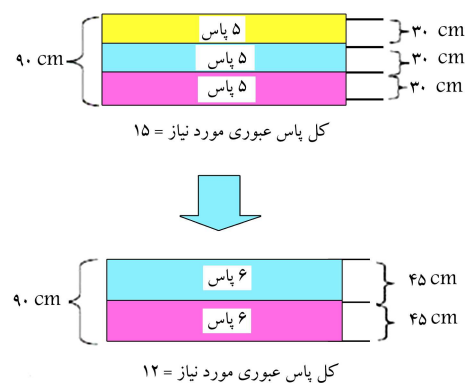
مدل‌سازی با فرضیاتی همراه است، از جمله اینکه مصالح خاکریز و بستر در درصد رطوبت بهینه‌ی مربوطه قرار داشته و سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از محدوده‌ی موردنظر بستر است، به گونه‌یی که در اثر بارگذاری، اضافه فشار آب حفره‌یی به مدل وارد نمی‌شود.

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، پاچه‌بری 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 به دلیل سرعت پایین حرکت، تحلیل استاتیکی انجام شده است.<sup>[۱۰]</sup>

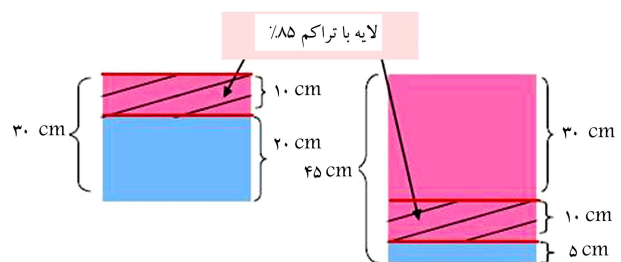
مدل شامل قرارگیری یک لایه‌ی خاکریز روی بستری همگن با عمق محدود است. از آنجا که محدوده‌ی توزیع تنش در عمق حدود ۲B (عرض پی) است، با فرض مقدار 2B به عنوان عرض صفحه‌ی بارگذاری شده (عرض تماس غلتک) در تحلیل استاتیکی، ضخامت ۷ متر برای بستر کفایت می‌کند. در نهایت ابعاد مدل ۷ × ۷ متر انتخاب شده است. مرزهای چپ 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.



شکل ۳. تفاوت تعداد عبور موردنیاز برای دو حالت استفاده از ضخامت استاندارد و افزایش یافته.<sup>[۷]</sup>



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



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

#### ۲.۳. ایالات تگراس، جورجیا، و تنسی

به منظور بررسی امکان افزایش ضخامت لایه‌ی خاکریز از میزان مجاز ۸ اینچ (۲۰ سانتی‌متر)، پروژه در ایالت تگراس، ۳ پروژه به عنوان بخشی از تعریض جاده در جورجیا و ۲ پروژه در تنسی با این مشخصات مورد آزمایش قرار گرفته است.<sup>[۹]</sup>

• 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 لایه به ترتیب ۷ و ۶ اینچی ساخته شده است.

• در تگراس از سنگ آهک شکسته با دانه‌بندی متراکم به همراه غلتک‌های چرخ

اشباع  $e_0$ ، نسبت تخلخل اولیه  $EMC$ ، مدول کشسانی مدل موهر - کولمب،  $c$  چسبندگی،  $\varphi$  زاویه اصطکاک،  $\psi$  زاویه اتساع و  $\nu$  نسبت پواسون خاک است. از آنجا که در روند بارگذاری - 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، به عبارت دیگر، حین مدل‌سازی به ماتریس سختی خاک اجازه داده می‌شود تا با هر گام بارگذاری خود را تطبیق دهد. با فرض مدول کشسانی  $60^\circ$  و  $30^\circ$  مگاپاسکال به ترتیب برای بستر و خاکریز و استفاده از روابط موجود، پارامتر سختی مدل سخت‌شونده در وسط هر لایه، امکان محاسبه دارد.<sup>[۱۱]</sup>

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 ( $\alpha$  و  $\beta$ ) به ترتیب برابر  $0.1$  و  $0.1$  است.<sup>[۱۲]</sup> در واقع، ابتدا بیشینه‌ی مدول برشی تحت بار دینامیکی ( $G_{max}$ ) با استفاده از رابطه‌ی ۱ و سپس مدول کشسانی بیشینه‌ی مورد نیاز تحلیل دینامیکی ( $E_{max}$ )، طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است:

$$G_{max} = 3230 \times \frac{(27973 - e)^2}{1 + e} (OCR)^k (\sigma'_v)^{1/2} \quad (1)$$

$$E_{max} = 2(1 + \nu) \cdot G_{max} \quad (2)$$

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)،  $\sigma'_v$  میانگین تنش‌های مؤثر اصلی، و  $\nu$  نسبت پواسون خاک است.

#### ۲.۴. سیستم بارگذاری

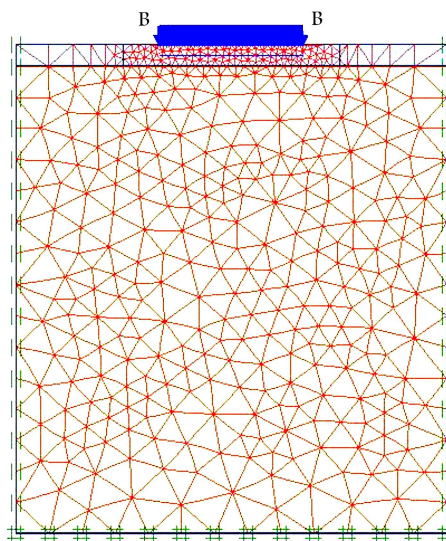
سیستم بارگذاری به صورت بارگسترده‌ی یکنواخت به میزان فشار تماسی هر نوع غلتک، مطابق جدول ۳ است. این تذکر لازم است که فشار تماسی غلتک چرخ لاستیکی و پاچه‌بزی، به ترتیب فشار تماسی زیر چرخ‌ها و محل زانده‌هاست.<sup>[۱۳]</sup> نحوه‌ی مدل‌سازی غلتک‌های مورد استفاده نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. مدل‌سازی فقط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

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.

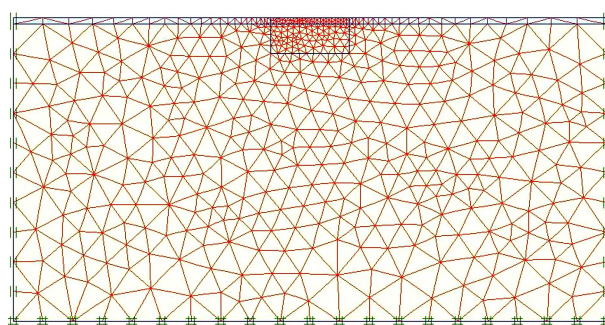
در تحلیل دینامیکی، مرزهای مدل عموماً دورتر از تحلیل استاتیکی قرار داده می‌شوند، چرا که مرزها باید به اندازه‌ی کافی از منطقه‌ی موردنظر (منطقه‌ی اعمال بار) دور باشند، تا از ناهنجاری‌های ناشی از بازتاب‌های ممکن جلوگیری شود. بدین ترتیب ابعاد مدل  $30 \times 15$  متر (عرض  $\times$  ارتفاع) انتخاب شده است. مدل جهت تحلیل دینامیکی در شکل ۷ نشان داده شده است.

#### ۱.۴. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح

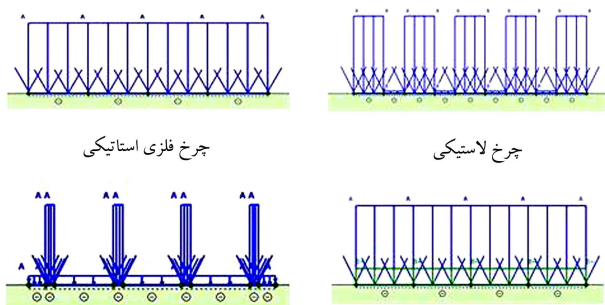
مشخصات ژئوتکنیکی مصالح خاکریز و بستر به عنوان پارامترهای ورودی نرم‌افزار مطابق جدول ۲ است، این تذکر لازم است که وزن مخصوص خشک اولیه‌ی خاکریز برابر  $15$  کیلو نیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. انتخاب این مقدار، که نشان‌دهنده‌ی خاک نسبتاً سست است، به منظور مشاهده‌ی تغییرات محسوس در اثر متراکم‌سازی است. مدول کشسانی لایه‌ی تحتانی (بستر) در محدوده‌ی بسیار سست تا بسیار سخت متغیر است، در حالی که سختی لایه‌ی خاکریز ثابت است. که در آن  $\gamma_{unsat}$ ، وزن مخصوص غیراشباع (ظاهری)،  $\gamma_{sat}$  وزن مخصوص



شکل ۶. شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل استاتیکی.



شکل ۷. شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل دینامیکی.



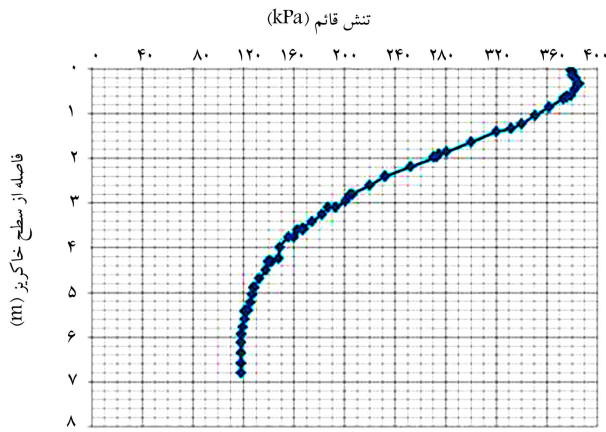
شکل ۸. غلتک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی عددی.

جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکى مصالح خاکریز و بستر.

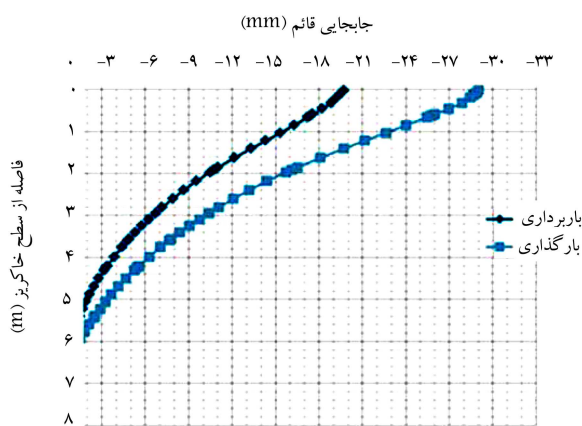
$\nu$	$\psi$ (درجه)	$\varphi$ (درجه)	$c$ (kPa)	$E_{MC}$ (MPa)	$e_o$	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	
۰٫۳۵	۶	۳۶	۱۰	۳۰	۰٫۷۷	۱۹٫۳	۱۶٫۵	خاکریز ماسه‌یى
۰٫۳۵	۰	۲۴	۵۰	۳۰	۰٫۷۷	۱۹٫۳	۱۶٫۵	خاکریز رسی
۰٫۳۰	۶	۳۶	۸	۶۰	۰٫۷۷	۲۰٫۶	۱۸٫۷	بستر

جدول ۳. مشخصات غلتک‌هاى مورد استفاده.

پاچه‌بزی	چرخ لاستیکى	چرخ فلزى	
۴۰۰۰	۷۰۰	۳۸۰	فشار تماسى (kPa)
۲٫۱	۲٫۱	۲	عرض تماس (m)



شکل ۹. توزیع تنش در عمق ناشى از بارگذاری خاکریز ماسه‌یى - غلتک چرخ فلزى.



شکل ۱۰. میزان نشست ناشى از بارگذاری و باربرداری خاکریز ماسه‌یى - غلتک چرخ فلزى.

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:

$$\frac{e_i - e_f}{1 + e_i} = \frac{\Delta H}{H_o} \quad (3)$$

$$\gamma_{df} = \frac{1 + e_i}{1 + e_f} \times \gamma_{di} \quad (4)$$

که در آن‌ها،  $e_i$  و  $e_f$  به ترتیب نسبت تخلخل اولیه و نهایی،  $H_o$  ضخامت لایه‌ی خاکریز،  $\gamma_{di}$  و  $\gamma_{df}$  به ترتیب وزن مخصوص خشک اولیه و نهایی خاک هستند. میزان نشست و در نهایت درصد تراکم ضخامت‌های مختلف لایه‌ی خاکریز ناشی از تغییرات مدول بستر به‌عنوان نمونه برای غلتک پاچه‌بزی در جدول ۴ ارائه شده

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 فلزى 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 کیلو نیوتن ایجاد می‌کند.<sup>[۱۴]</sup>

## ۵. نتایج مدل‌سازی

به‌عنوان نمونه‌یى از کل خروجی‌ها، نمودار توزیع تنش ناشی از بارگذاری خاکریز توسط غلتک چرخ فلزى 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 کیلو پاسکال برای غلتک چرخ فلزى) نهایتاً به ۱ متر فوقانی سطح خاکریز اعمال می‌شود.

شکل ۱۰، تغییرات جابه‌جایی قائم خاک در عمق را به‌عنوان نمونه برای غلتک چرخ فلزى 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 قرار گرفته است. با فرض سختی اولیه برابر  $E_o$ ، در کل ۶ سختی مختلف ( $۰٫۵E_o$ ،  $۱E_o$ ،  $۲E_o$ ،  $۳E_o$ ،  $۴E_o$  و  $۱۰E_o$ ) برای بستر در نظر گرفته شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، با افزایش سختی بستر، میزان نشست خاکریز کاهش یافته است، تا

است. مطابق جدول مذکور، بیشترین افزایش وزن مخصوص مربوط به لایه‌ی ۱۵ سانتی‌متری در سست‌ترین حالت ( $0.5E$ ) 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  $q_0$ ، سطوح مختلف انرژی ( $q_0$ ،  $2q_0$  و  $3q_0$ ) 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 - خاکریز رسی، غلتک چرخ پاچه‌بزی.

$(\gamma_{df} - \gamma_{di}) / \gamma_{di}$ (%)	$\Delta H$ (cm)	$H_0$ (cm)	$E$
۴۷/۴۷-۲/۳۳	۴/۸۶-۰/۳۲	۱۵	
۲۰/۴۰-۱/۷۳	۵/۰۵-۰/۴۷	۳۰	$0.5E - 1.0E$
۱۲/۷۳-۱/۱۳	۵/۲۰-۰/۴۹	۴۵	$(E_{MC} = 30 - 60 \text{ MPa})$
۹/۲۷-۱/۱۳	۵/۰۹-۰/۷۵	۶۰	

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

$(\gamma_{df} - \gamma_{di}) / \gamma_{di}$ (%)	$\Delta H$ (cm)	غلطک	انرژی
۱۰/۶۰-۲/۲۵	۴/۲۹-۰/۹۹	چرخ فلزی استاتیکی	$1q - 4q$
۱۲/۰۰-۲/۹۳	۴/۷۵-۱/۲۰	چرخ لاستیکی	$1q - 4q$
۱۳/۴۰-۶/۶۷	۵/۳۹-۲/۶۸	پاچه‌بزی	$1q - 2q$
۶/۰۰-۵/۳۳	۲/۶۳-۲/۳۱	چرخ فلزی ارتعاشی	$1F - 2F$

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. به عبارت 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.

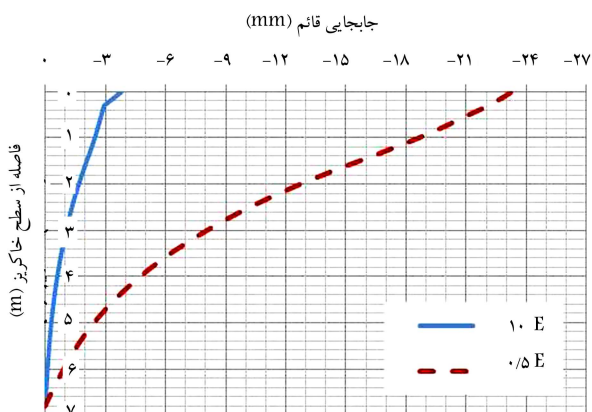
اثر تغییرات مدول کشسانی (سختی) بستر به‌عنوان نمونه برای غلتک چرخ فلزی استاتیکی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، بیشترین اختلاف در سطح خاکریز رخ می‌دهد و با افزایش عمق، دو نمودار به یکدیگر نزدیک می‌شوند. این تذکر لازم است که نمودار مذکور برای غلتک‌های متفاوت از نظر کیفی مشابه است و فقط با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

غلطک	$E$	$\Delta H$ (cm)	$(\gamma_{df} - \gamma_{di}) / \gamma_{di}$ (%)
چرخ فلزی	$1.0E - 0.5E$	۱/۹۵-۰/۱۴	۷/۲۷-۰/۵۳
چرخ لاستیکی	$1.0E - 0.5E$	۲/۲۹-۰/۱۹	۸/۶۰-۰/۵۳
پاچه‌بزی	$1.0E - 0.5E$	۵/۰۵-۰/۴۷	۲۰/۴۰-۱/۷۳
چرخ فلزی ارتعاشی	$1.0E - 0.5E$	۲/۴۹-۰/۴۶	۹/۲۰-۱/۷۳



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

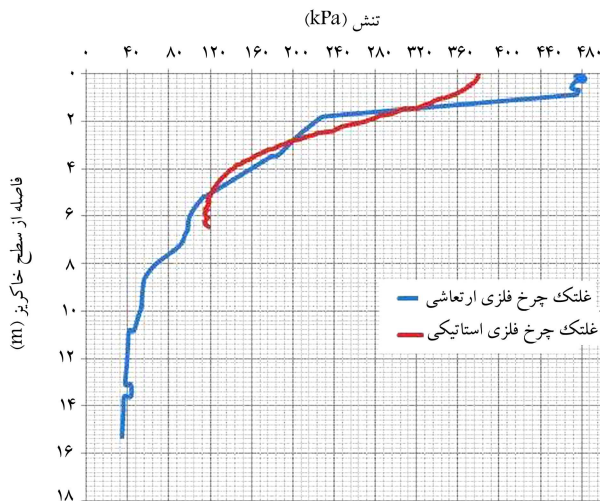
نشان می دهد. مطابق شکل مذکور، غلتک پاچه بزی به علت فشار تماسی بالا (میانگین ۴ مگاپاسکال در محل زانده ها) اختلاف چشم گیری در میزان تنش انتقالی نسبت به غلتک های چرخ فلزی و چرخ لاستیکی دارد، که این اختلاف در سطح بیشینه است، و با فاصله از سطح خاکریز کاهش می یابد و در کف بستر به میزان کمینه می رسد.

در مورد غلتک های ارتعاشی، استفاده از ترکیب بسامد ( $f$ ) پایین تر و دامنه ی بیشتر، که منجر به اعمال نیروی گریز از مرکز ( $F$ ) بزرگ تری می شود، ارجحیت دارد. با مقایسه ی نتایج حاصل از مدل سازی دینامیکی و استاتیکی هر یک از غلتک ها مشاهده می شود که با اعمال ارتعاش، میزان جابه جایی و درصد تراکم تا بیش از ۲ برابر افزایش می یابد. در صورت استفاده از غلتک های استاتیکی، حصول به این میزان نشست و تراکم مستلزم افزایش تقریبی ۳ برابری انرژی غلتک است. بنابراین علت لزوم و گستردگی استفاده از غلتک های ارتعاشی کاملاً مشهود است.

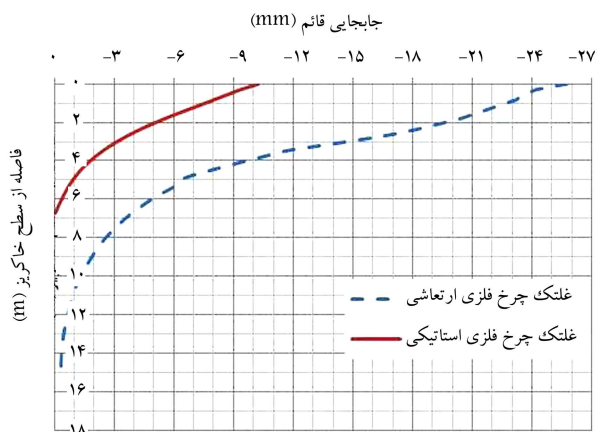
جدول ۸، تغییرات فشردگی و چگالی خاکریز ماسه یی را در ۳ حالت استفاده از غلتک های چرخ لاستیکی، چرخ فلزی استاتیکی، و چرخ فلزی ارتعاشی نشان می دهد. اثر مطلوب استفاده از مکانیزم ارتعاشی غلتک ها به وضوح در نتایج مشاهده می شود. شکل ۱۳، توزیع تنش در عمق را برای غلتک چرخ فلزی در دو حالت استاتیکی و ارتعاشی نشان می دهد. مطابق شکل، تنش انتقالی در حدود ۱/۵ متر فوقانی از

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

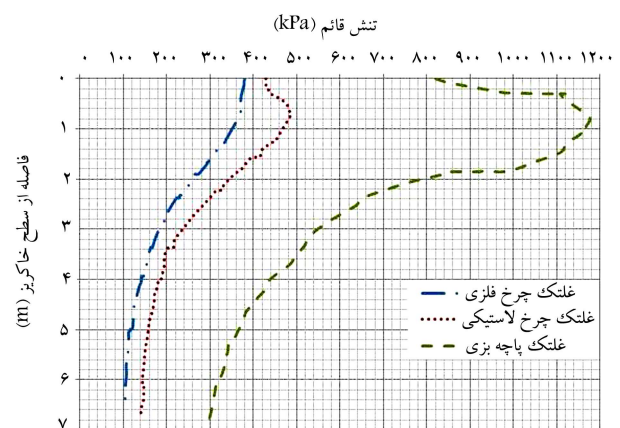
غلتک	$q$	$\Delta H$ (cm)	$(\gamma_{d_f} - \gamma_{d_i}) / \gamma_{d_i}$ (%)
چرخ فلزی	$4q - 1q$	۴,۲۹-۱,۰۷	۱۶,۴۷-۳,۵۳
چرخ لاستیکی	$4q - 1q$	۵,۱۲-۱,۲۵	۲۰,۴۰-۴,۱۳
پاچه بزی	$2q - 1q$	۴,۹۴-۲,۶۳	۱۹,۶۰-۱۰,۰۰



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



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



شکل ۱۲. مقایسه ی توزیع تنش میان غلتک های استاتیکی.

جدول ۸. مقایسه ی تغییرات چگالی خاکریز ماسه یی در اثر عبور غلتک های مختلف.

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

- 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 به دست آمده، 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. به منظور بررسی عملکرد و تأثیر تراکم ارتعاشی خاکریز دانه‌پی، 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.

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 کمیته 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 ماسه‌پی 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 دو بُعدی به منظور بررسی اثر شرایط بستر و انرژی غلتک در افزایش ضخامت لایه‌ی خاکریز، این نتایج را در برداشته است:

## پانویس‌ها

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

## منابع (References)

1. Eslami, A., *Foundation Engineering*, 4th Edition, Building 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 Post-graduate Students*, JUNIORSTAV- Brno (2011).
13. Bomag Company, *Compactors Specifications*, [Brochure] (March 2013).
14. Ammann Group Company, *Compactors Specifications*, [Brochure] (March 2013).