



Semnan University



Research Article

Numerical Modeling of Using Geosynthetics in Improving the Behavior of Subgrade Soil

Sayed Hossain Khatami^{a*}, Iman Golpazir^b, Mohammad Javad Malekpour^c

^a Graduated MSc., Highway Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran.

^b Department of Civil Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, I. R. Iran.

^c Graduated MSc., Civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-05-05

Revised: 2024-06-11

Accepted: 2024-06-12

Keywords:

Flexible pavement,
Plaxis,
Numerical modeling,
Parametric study,
Soil bed sand.

ABSTRACT

In this research, numerical simulation using the finite element method and PLAXIS numerical software (version 8.2) were used. Also, calculation point of the road settlement, which is the criterion for comparing different models, is selected in the loading center on the road, which is considered as representative of the road settlement in the output results of the vertical displacement. Results of the numerical investigation of the effect of tensile strength of geosynthetics on the road settlement show that this parameter did not have significant effect on the road settlement. Also, from the numerical modeling of the effect of the length of geosynthetics on the road body, it is determined that the vertical settlement in modeling with geogrid of the same size as the width of the road (which is equal to 7 meters in this model) is 3.65 mm and with 9 meters wide geogrid it is equal to 3.5 mm. Results showed that if the amount of friction between geosynthetic element and soil is considered equal to the internal friction angle of the soil, the road settlement at the loading center of the model has decreased by 12%. Finally, investigation of the effect of geosynthetic element placement on the road settlement shows that by moving the geosynthetic layer from the sub-base-substrate boundary to the top-base boundary, the road settlement is decreased by 0.9 mm.

* Corresponding author.

E-mail address: hosein.katami@yahoo.com

How to cite this article: Khatami, S. H., Golpazir, I., & malekpour, M. J. (2024). Numerical modeling of the use of geosynthetics in improving the behavior of subgrade soil. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(1), 127-140. <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33951.1672>



مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در بهبود رفتار خاک بستر راه

سید حسین خاتمی^{۱*}، ایمان گلپذیر^۲، محمد جواد ملک‌پور^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، راه و ترابری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
^۲گروه عمران، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران.
^۳دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، زلزله، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش، از شبیه‌سازی عددی به روش اجزای محدود و نرم‌افزار عددی PLAXIS (نسخه ۸/۲) استفاده گردید. همچنین، نقطه محاسبه نشست جاده که معیار مقایسه مدل‌های مختلف است، در مرکز بارگذاری روی جاده انتخاب شده که در نتایج خروجی جابجایی قائم این نقطه به عنوان نماینده نشست جاده در نظر گرفته می‌شود. نتایج بررسی عددی اثر مقاومت کششی ژئوسنتتیک‌ها بر نشست جسم راه نشان می‌دهد که این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر نشست جاده نداشته است. همچنین، از مدل‌سازی عددی اثر طول ژئوسنتتیک‌ها بر جسم راه مشخص شد که نشست قائم جاده در مدل‌سازی با ژئوگرید هم‌اندازه با عرض جاده (که در این مدل برابر ۷ متر می‌باشد) برابر ۳/۶۵ میلی‌متر و با ژئوگرید به عرض ۹ متر، برابر با ۳/۵ میلی‌متر می‌باشد. نتایج نشان داد که چنانچه میزان اصطکاک بین المان ژئوسنتتیک با خاک معادل زاویه اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شود، نشست جاده در مرکز بارگذاری مدل، ۱۲ درصد کاهش داشته است. در نهایت، بررسی تأثیر مکان استقرار المان ژئوسنتتیک بر نشست جاده نشان می‌دهد که با جابجایی لایه ژئوسنتتیک از مرز زیراساس - بستر به مرز رویه - اساس، نشست جاده به میزان ۰/۹ میلی‌متر کاهش یافت.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

واژگان کلیدی:

روسازی انعطاف‌پذیر،
پلکسیز،
مدل‌سازی عددی،
مطالعه پارامتریک،
خاک بستر ماسه‌ای.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hosein.katami@yahoo.com

استناد به این مقاله: خاتمی، سید حسین، گلپذیر، ایمان & ملک‌پور، محمدجواد. (۱۴۰۳). مدل‌سازی عددی استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در بهبود رفتار خاک بستر راه. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۱)، ۱۲۷-۱۴۰. <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33951.1672>

۱. مقدمه

از دهه ۸۰ میلادی به بعد، استفاده از الیاف مصنوعی به نام ژئوتکتایل و نیز از شبکه‌های پلاستیکی به نام ژئوگرید به عنوان مصالح تسلیح یا عضو تقویت‌کننده به طور گسترده‌ای متداول گردید. دلیل این مسئله می‌تواند ناشی از عملکرد بهتر پارچه‌ها با سختی نسبی کم که هماهنگی بهتری با خاک دارند، نسبت به مصالح تسلیح-کننده فلزی با سختی زیاد باشد. این منسوجات پلیمری یا مصنوعی، به دلیل سختی نسبی کم، از نظر تغییرشکل-پذیری با خاک‌ها سازگارتر می‌باشند. علاوه بر این، منسوجات در مقابل خوردگی مقاوم هستند و بعضی از انواع آنها در برابر حملات باکتری‌ها و اسیدها پایدار بوده و همچنین غیرسمی اند (بکهم و همکاران، ۱۹۳۵).

در این پژوهش، ابتدا خاک بستر از نوع ریزدانه، با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس^۱ که بر پایه روش اجزای محدود فرمول‌بندی شده است مدل‌سازی می‌گردد. شایان ذکر است که این نرم‌افزار علاوه بر در دسترس بودن و سهولت نسبی در کار با آن، به دلیل دقت زیاد خود، به‌طور فزاینده‌ای در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شود. در مرحله بعد، فشار استاتیک ناشی از ترافیک به خاکریز مورد نظر اعمال شده و جابجایی آن محاسبه خواهد شد. در مرحله بعد، با استفاده از المان ژئوگرید موجود در این نرم‌افزار، چند لایه ژئوسنتتیک در زیر بستر مورد نظر اضافه خواهد شد. سپس، تأثیر مسلح کردن خاک بستر توسط ژئوسنتتیک‌ها بر جابجایی و نشست بستر اندازه-گیری خواهد شد.

۲. پیشینه تحقیق

در سال ۲۰۱۷، آهیروار و مندال در مقاله‌ای تحت عنوان "آنالیز اجزای محدود روسازی انعطاف‌پذیر مسلح‌شده با

ژئوگرید" به مدل‌سازی روسازی با نرم‌افزار پلکسیس دو-بعدی پرداختند. بدین صورت که جهت مدل‌سازی رفتار مصالح بستر، اساس و زیراساس از مدل موهر-کولمب و ژئوگرید بین‌لایه‌ای استفاده شده است. المان مثلثی با ۱۵ گره برای لایه‌های روسازی به کار رفته است. همچنین، مشخصات ترافیک و ضخامت لایه‌های روسازی بر اساس استاندارد هندوستان به شماره: IRC: 37-2012 استفاده شده است (آهیروار و مندال، ۲۰۱۷). در این نمونه، مدل متقارن محوری جهت شبیه‌سازی مقاومت ژئوگرید با ضخامت‌های متفاوت اساس صورت پذیرفته است. نتایج آنالیز اجزای محدود نشان داد که اضافه کردن لایه ژئوگرید بین لایه‌های روسازی باعث کاهش تغییرشکل رویه می‌گردد.

سیواکومار بابو (۲۰۱۶) در تحقیقی تحت عنوان "استفاده از ژئوسنتتیک در روسازی" به بررسی نمونه‌های روسازی مسلح‌شده با ژئوسنتتیک‌ها پرداخت و نتایج حاصل از کار وی که عمدتاً آزمایشگاهی بود به همراه مزایای استفاده از ژئوسنتتیک‌ها ارائه شده است.

کاظمیان و همکاران (۲۰۱۰) در مقاله‌ای به بررسی اثر استفاده از ژئوگرید در ترمیم نوار حفاری تأسیسات شهری با استفاده از پلکسیس پرداختند. نتایج کار آنها به همراه مدل‌سازی اجزای محدود و نمونه میدانی نشان داد که تغییرشکل قائم روسازی با استفاده از ژئوگرید کاهش چشمگیری خواهد داشت. همچنین، ژئوگرید باعث افزایش سختی و مقاومت و کاهش شیارشدگی رویه‌های آسفالتی می‌گردد.

الجُمیلی (۲۰۱۶) در مقاله‌ای، به تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی روسازی آسفالتی مسلح‌شده با ژئوگرید پرداخت. در این مقاله، بارگذاری به صورت دینامیک و در راستای تعیین مقادیر بحرانی تنش کل و جابجایی رویه صورت پذیرفته است. مقادیر بار تایر از ۵۰ تا ۶۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است و ژئوگرید در دو

^۱- PLAXIS

آزادی از پیش تعیین شده وجود دارد (کلر، ۲۰۱۶). سپس، با استفاده از شرایط مرزی و مشخصات هندسی و مقاومتی مسئله مورد نظر، این روش بر پایه حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی به حل مجهولات موجود در هر گره می‌پردازد. همچنین، ارتباط و تأثیر هر گره بر گره‌های مجاور توسط یک معادله انتگرال میانابایی چندنقطه‌ای تعیین و محاسبه می‌گردد. پلکسیس یک برنامه اجزای محدود پیشرفته و دقیق می‌باشد که بر پایه روش اجزای محدود به گونه‌ای فرمول‌بندی شده است که برای کاربردهای عمرانی ایده‌آل می‌باشد (کورنر، ۲۰۰۵). از آنجا که مدل‌سازی رفتار بارگذاری راه در خاک یک مسأله اندرکنش خاک-سازه پیچیده می‌باشد، نرم‌افزار پلکسیس به این منظور مناسب خواهد بود.

۴. مش‌بندی و شرایط مرزی

تأثیر تعداد و اندازه المان‌ها بر نتایج اجزای محدود توسط آنالیز حساسیت مش^۱ انجام گرفت. در این آنالیزها پنج اندازه مختلف المان در نظر گرفته شد. سپس، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از اندازه مش بسیار ریز که دقیق‌ترین حالت است مقایسه شد. شایان ذکر است که در این آنالیزها دو خروجی جایجایی و تنش مؤثر به عنوان معیار دقت در نظر گرفته شد. در نهایت، نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که کمترین خطا در حالت اندازه مش متوسط به دست می‌آید. ذکر این نکته لازم است که کوچک کردن اندازه المان‌ها و افزایش تعداد آنها علیرغم افزایش دقت نتایج خروجی، موجب افزایش زمان محاسبه نیز خواهد شد و از آنجا که در این پژوهش باید چندین تحلیل انجام شود که خود این تحلیل بسیار وقت‌گیر است، اثر مدت زمان تحلیل بسیار مهم می‌باشد. در نهایت، برای تحلیل‌های عددی در این پژوهش، المان‌ها از نوع مثلثی ۱۵ گره‌ای و اندازه آنها در حد متوسط

موقعیت، یکبار زیر لایه رویه و یکبار هم در بالای زیراساس، قرار گرفته است. نتایج تحلیل نشان داد که تحت بارگذاری با مقادیر مختلف فشار تایلر، رفتار روسازی که از ژئوگرید در زیر لایه رویه استفاده شده بود دارای تغییرات چشمگیری می‌باشد. نتایج خروجی-های مدل‌سازی نشان داد که زمانی که ژئوگرید در بالای زیراساس قرار دارد، تغییرات کمتر می‌باشد.

حمدی و حسن (۲۰۱۴) در مقاله‌ای، به تحلیل روسازی آسفالتی مسلح شده با ژئوگرید پرداختند. مدل‌سازی آنها تحت بارگذاری دینامیک انجام شد و پاسخ‌های بحرانی روسازی نظیر تنش مؤثر و تغییرشکل قائم برای دو نوع روسازی مسلح و غیرمسلح به دست آمده است. نتایج حاصل نشان داد که در طول بارگذاری استاتیکی، تأثیر متوسط بین رفتار روسازی مسلح و غیرمسلح مشاهده گردید. اما این تأثیر در بارگذاری دینامیک و در زمان اعمال بارهای بزرگتر، بیشتر به چشم آمده است.

در تحقیقات دیگری هم به بررسی و تحلیل اثرات ژئوگرید بر تغییرشکل بستر پرداخته شده است (راجش و همکاران، ۲۰۱۶؛ گوناسکارا جایالات و همکاران، ۲۰۱۸؛ علیمحمدی و همکاران، ۲۰۲۱).

۳. روش تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، بررسی مزایای محتمل استفاده از ژئوستنتیک‌ها برای بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست راه‌های واقع بر خاک بستر ماسه‌ای است. بدین منظور، تحلیل‌های عددی گسترده‌ای روی این موضوع توسط نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس انجام پذیرفته است (کورنر و دانیل، ۱۹۹۷). به این منظور، در این روش، ابتدا محیط به بخش‌های کوچکتر یا همان المان‌ها تقسیم شد که در هر المان چند گره مشخص با درجه

^۱- Mesh

با تولید تنش‌های اولیه، شرایط اولیه مدل را تعریف نموده و مدل اجزای محدود کامل می‌گردد.

۶. تعریف هندسه مدل و فاز محاسبه

هندسه سیستم خاک بستر- ژئوسنتتیک تحلیل شده در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، مدل مورد نظر از یک خاک ماسه متراکم به عنوان خاک بستر مسیر راه و یک زیراساس ماسه‌ای با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر و شیب تقریبی ۱ به ۲ در طرفین به عنوان مصالح زیراساس تشکیل یافته است. روی این خاکریز یک لایه اساس به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و رویه آسفالتی مرغوب به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر ریخته شده است. همچنین، در زیر خاکریز و در خاک بستر، در فواصل متفاوت، لایه‌های ژئوسنتتیک قرار گرفته که هدف از این پژوهش بررسی اثر آنها بر پایداری و نشست این مدل می‌باشد. اضافه می‌شود که برای شبیه‌سازی جسم آسفالتی رویه راه از المان صفحه استفاده شده است که مدل رفتاری آن الاستیک خطی می‌باشد. همچنین، عرض رویه آسفالتی معادل یک راه تک‌باند استاندارد و حدود ۷ متر شبیه‌سازی شده است. همچنین، به منظور مدل‌سازی بار ناشی از وسایل نقلیه و با توجه به متغیر بودن فاصله تایر ماشین‌های مختلف، از دو بار گسترده به عرض حدود ۲ متر و مقدار متوسط ۰/۵ تن بر متر مربع در نظر گرفته شده است. همچنین، نقطه محاسبه نشست جاده که معیار مقایسه مدل‌های مختلف است، در مرکز یکی از دو بار گسترده انتخاب شده که در نتایج خروجی جابجایی قائم این نقطه به عنوان نماینده نشست جاده در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که از مصالح Geogrid موجود در نرم‌افزار پلکسیس به منظور شبیه‌سازی عددی ژئوسنتتیک‌ها استفاده شده است. این مصالح تنها دارای سختی محوری بوده و فاقد سختی برشی می‌باشند. لازم به ذکر است که در اکثر پژوهش‌ها، فشار تایر و

انتخاب شد. البته محل خاکریز (زیراساس) که احتمال تمرکز تنش و جابجایی‌های بیشتری می‌رفت، اندازه المان‌ها به طور دستی کوچکتر انتخاب شد. شبکه‌بندی نهایی مدل، شامل ۶۶۳ المان، ۵۱۵۴ گره و ۷۴۱۲ نقطه تنش می‌باشد.

شرایط مرزی برای حدود سمت چپ و راست مدل طوری در نظر گرفته شده که حرکت در جهت محور X غیرممکن، اما در جهت Y حرکت آزادانه می‌باشد. گره-های موجود در مرز پایینی مدل نیز در هر دو جهت X و Y ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

۵. مدل‌سازی عددی

تحلیل اجزای محدود در این بخش با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس انجام شده است. مسائل مهندسی راه جهت مدل‌سازی عددی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک-های بستر، نیازمند استفاده از مدل‌های رفتاری پیچیده می‌باشند که در این نرم‌افزار موجود است (ویدودو، ۲۰۱۳).

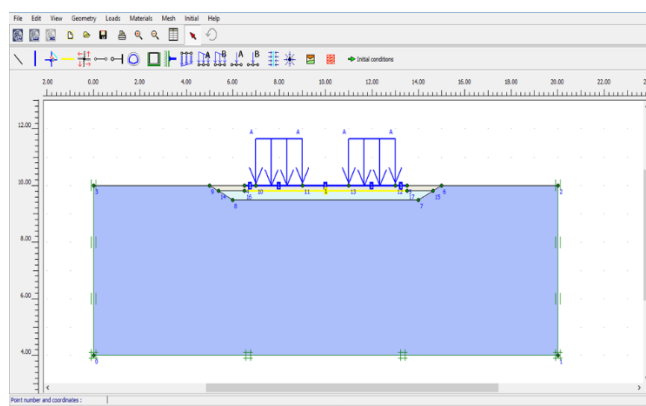
این نرم‌افزار می‌تواند دو نوع تحلیل کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری انجام دهد که در این پژوهش مدل عددی ساخته شده با استفاده از تحلیل کرنش صفحه‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است. المان‌های موجود در این نرم‌افزار از نوع مثلثی بوده که شامل دو نوع ۶ گره‌ای و ۱۵ گره‌ای می‌باشد. المان‌هایی که در این بخش از آنها استفاده شده از یک رابطه درجه چهار برای میانمایی و ۱۲ نقطه انتگرال‌گیری گوس^۱ استفاده می‌کند که اگر چه زمان تحلیل را طولانی کرده، اما دقت آن را می‌افزاید. تولید شبکه برای مدل، به صورت اتوماتیک صورت گرفته، اما این امکان وجود داشت که اطراف نقاط و قسمت‌های دلخواه را به طور دستی تغییر داد. پس از تعریف هندسه مدل و تعیین شرایط مرزی و مشخصات مصالح، نرم‌افزار

^۱- Gauss

است. البته در بخشی از این مدل‌سازی، محل قرارگیری ژئوگریدها متغیر خواهد بود.

نتایج حاصل از تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که مقادیر تغییرشکل‌های بیشینه در اکثر تحقیقات بین ۲ تا ۶ میلی‌متر متغیر بوده است که نتایج این مدل‌سازی نیز در همین محدوده می‌باشد.

مدل‌سازی بارگذاری به صورت سطحی بوده و در محدوده ۵۰ تا ۶۰۰ یا ۴۰ تا ۹۰۰ کیلوپاسکال، بسته به نوع ترافیک محل (سبک و سنگین)، بوده است. همچنین، محل قرارگیری ژئوگریدها در اکثر پژوهش‌ها در زیر لایه رویه آسفالتی بوده و در مواردی که در روی لایه بستر و روی زیراساس قرار گرفته است تغییرات و کاهش تنش‌ها و تغییرشکل‌ها نسبت به حالت غیر مسلح چشمگیر نبوده



شکل ۱. تصویری از مدل عددی همراه با نحوه بارگذاری اجزای محدود

مصر توسط فهیم و همکاران (۲۰۱۴) مورد آزمایش قرار گرفته، برداشت شده که در جدول ۱ خلاصه شده است.

مدل رفتاری خاک به صورت مدل غیرخطی الاستیک-پلاستیک مور-کولمب در نظر گرفته شده که قبلاً جزئیات آن شرح داده شده است. مشخصات خاک مورد استفاده در این بخش از یک خاک واقعی که در

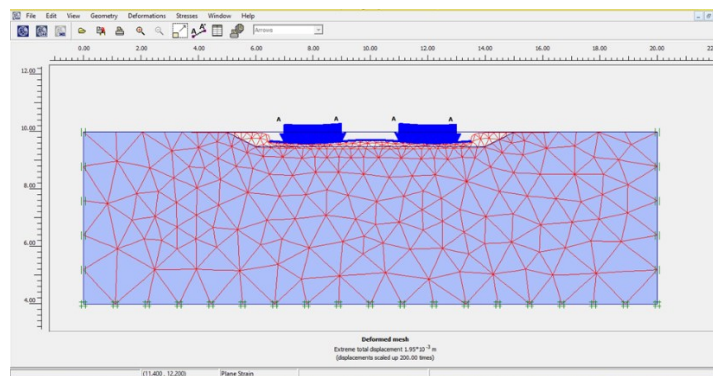
جدول ۱. مشخصات خاک بستر و خاکریز استفاده شده در مدل عددی

پارامتر	علامت	خاک بستر	زیراساس	اساس	رویه	واحد
مدل رفتاری	-	مور-کولمب	مور-کولمب	مور-کولمب	الاستیک خطی	-
زهکشی	-	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی شده	-
وزن واحد حجم خشک	γ_{unsat}	17	18	20	20	KN/m ³
وزن واحد حجم مرطوب	γ_{sat}	18	20	22	20	KN/m ³
نفوذپذیری افقی	K_x	1	1	1	-	m/day
نفوذپذیری قائم	K_y	1	1	1	-	m/day
مدول الاستیک متقاطع سه محوری	E_{ref50}	20000	50000	100000	2100000	KN/m ²
نسبت پواسون	ν_{ur}	0.3	0.3	0.35	0.45	-
چسبندگی	C	1	20	30	-	KN/m ²
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	35	40	43	-	Degree
زاویه اتساع	ψ	5	14	13	-	Degree
فاکتور کاهش سطح مشترک	R_{inter}	1	1	1	-	Degree

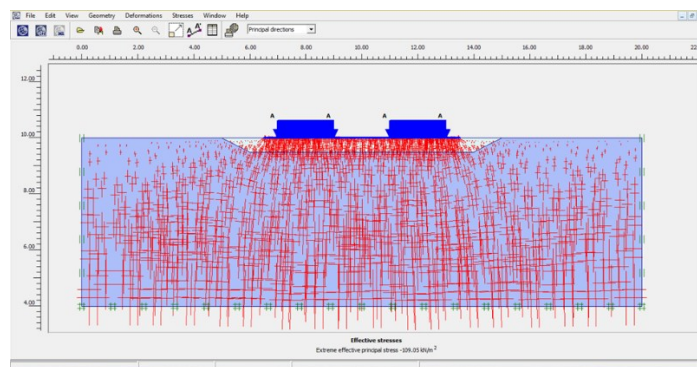
روش بارگذاری ورودی از نوع ساخت مرحله‌ای در نظر گرفته شد که در این نوع بارگذاری می‌توان در هر مرحله، هر بخش از هندسه ورودی را فعال و یا غیرفعال کرد (نظیر سطوح مشترک، جسم راه و...) و یا مقادیر نیروها و جابجایی را تغییر داد.

در ادامه و طی شکل‌های ۲ و ۳، مش تغییرشکل یافته مدل راه بدون استفاده از مسلح‌کننده‌ها و همچنین تنش مؤثر ایجاد شده بر اثر بارگذاری نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل کوچک بودن جابجایی‌ها، تغییرشکل مش ۲۰۰ برابر بزرگنمایی شده است.

در بخش شرایط اولیه نیز فقط شیب اولیه زمین، بدون جسم جاده (المان پلیت) و خاکریز، در نظر گرفته شد و تنش‌های اولیه ایجاد گشت. فاز محاسبه، شامل دو مرحله است. در مرحله اول، یک محاسبه از نوع پلاستیک با در نظر گرفتن تنها زمین اولیه و جسم راه استفاده شد که دارای حداکثر ۲۵۰ زیرمرحله تکراری به منظور رسیدن به جواب همگرا بود. بدیهی است که هرگاه جواب‌ها قبل از این زیرمراحل همگرا شود، محاسبه پایان می‌یابد. در مرحله دوم، بارگذاری ناشی از وسایل نقلیه توسط دو سری بار گسترده شبیه‌سازی گشت. لازم به ذکر است که



شکل ۲. مش تغییرشکل یافته پس از اعمال بارگذاری عبور ترافیک



شکل ۳. تنش مؤثر ناشی از عبور ترافیک در خاک بستر بدون مسلح‌کننده ژئوسنتتیک

شد، در این مطالعه، ابتدا یک خاک بستر از نوع ماسه‌ای با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس مدل‌سازی می‌گردد. در مرحله بعد، فشار استاتیک ناشی از ترافیک به خاکریز مورد نظر اعمال شده و جابجایی آن محاسبه شد. در

۷. تحلیل تأثیر ژئوسنتتیک‌ها

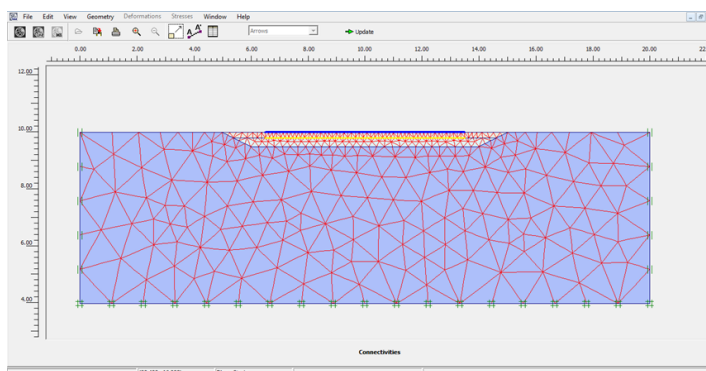
در این مرحله، پس از تحلیل پایداری شیب بدون مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک به مطالعه تأثیر این مصالح بر پایداری شیب مورد مطالعه پرداخته شد. همانطور که گفته

مرحله بعد، با استفاده از المان ژئوگرید موجود در نرم افزار پلکسیس، در زیر بستر مورد نظر چند لایه ژئوستتیک اضافه شد. سپس، تأثیر مسلح کردن خاک بستر توسط ژئوستتیک‌ها بر جابجایی و نشست بستر اندازه‌گیری گردید. قابل ذکر است که در این پژوهش، یک مطالعه پارامتریک کامل در مورد عوامل مؤثر بر پایداری سیستم خاک-ژئوستتیک انجام شد که از مهمترین متغیرهای مورد مطالعه می‌توان به سختی کششی ژئوستتیک‌ها، تغییر عمق ژئوستتیک‌ها، تغییر طول آنها و اصطکاک بین ژئوستتیک‌ها و خاک اشاره نمود.

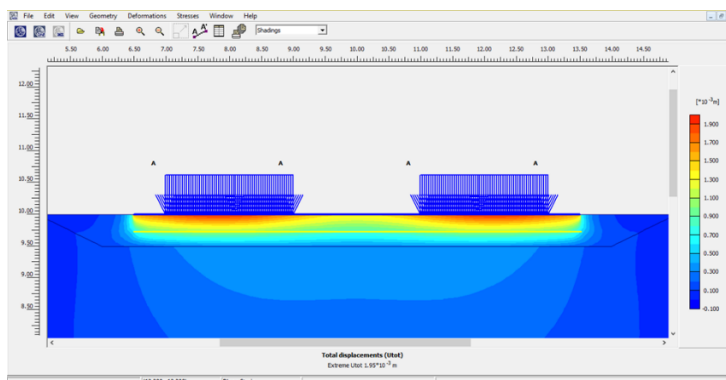
۱-۷. تأثیر سختی کششی ژئوستتیک‌ها

در این قسمت، به منظور مطالعه تأثیر افزایش مقاومت کششی ژئوستتیک‌ها بر پایداری کلی جاده مورد مطالعه و جابجایی قائم مرکز جاده، چندین مقاومت کششی مختلف برای مسلح‌کننده‌ها شامل مقادیر ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. طول ژئوستتیک‌ها مقدار ثابت ۷ متر و برابر با عرض رویه آسفالتی، تعداد لایه‌ها یک لایه و عمق استقرار آنها در مرکز خاکریز در نظر گرفته شد و در هر مرحله فقط مقدار پارامتر مقاومت کششی ژئوستتیک‌ها تغییر داده شد. در شکل ۴، نمونه‌ای از مدل عددی ساخته شده به همراه ژئوستتیک‌های ۷ متری به عنوان مثال نشان داده شده است. همانطور که گفته شد، از مصالح Geogrid استفاده شده است. همانطور که در شکل ۴، استفاده شده است. این مصالح تنها دارای سختی محوری بوده و فاقد سختی برشی می‌باشند. همچنین، در شکل ۴، نمونه‌ای از خروجی تغییر شکل کلی راه پس از اعمال بارگذاری در حضور مسلح‌کننده ژئوستتیک با مقاومت کششی ۳۰۰۰ کیلوپاسکال برای مثال نشان داده شده است.

شکل ۴. هندسه مدل ورودی برای خاک بستر مسلح شده با ژئوستتیک ۷ متری به همراه مش بندی اجزای محدود

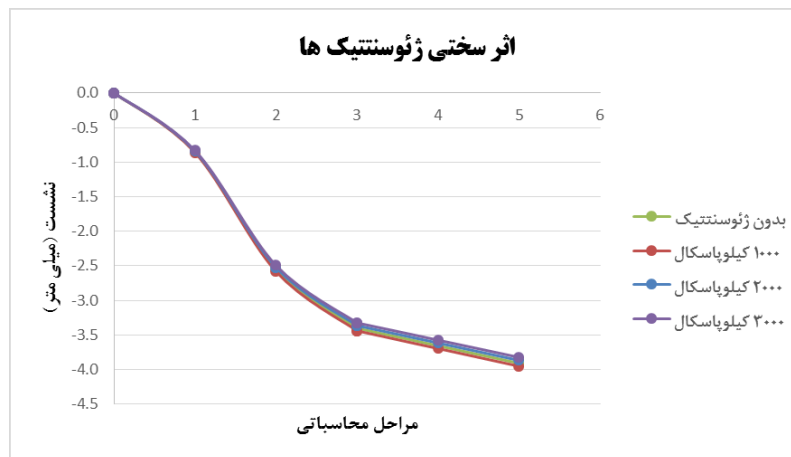


شکل ۴. هندسه مدل ورودی برای خاک بستر مسلح شده با ژئوستتیک ۷ متری به همراه مش بندی اجزای محدود



شکل ۵. جابجایی کلی مدل پس از اعمال بارگذاری همراه با ژئوستتیک با سختی کششی ۳۰۰۰ مگاپاسکال

در ادامه و در نمودار شکل ۶، نشست قائم نقطه مرکز بار گسترده به‌عنوان نقطه نماینده برای مقاومت‌های کششی مختلف مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک نشان داده شده است تا علاوه بر آسان نمودن بررسی تأثیر مقاومت کششی ژئوسنتتیک‌ها بر نشست راه، مقادیر خروجی‌ها را نیز خلاصه نماید.



شکل ۶. نمودار تأثیر مقاومت کششی مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک بر نشست نقطه مرکزی جسم جاده

اعداد به علت میزان نسبتاً کم بار استاتیک ناشی از عبور ترافیک می‌باشد. ولی همین مقدار ناچیز می‌تواند با عبور دفعات متعدد اتومبیل‌ها در بلندمدت موجب گسیختگی و نشست بیش از حد جسم جاده گردد.

۷-۲. بررسی تأثیر عمق قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها

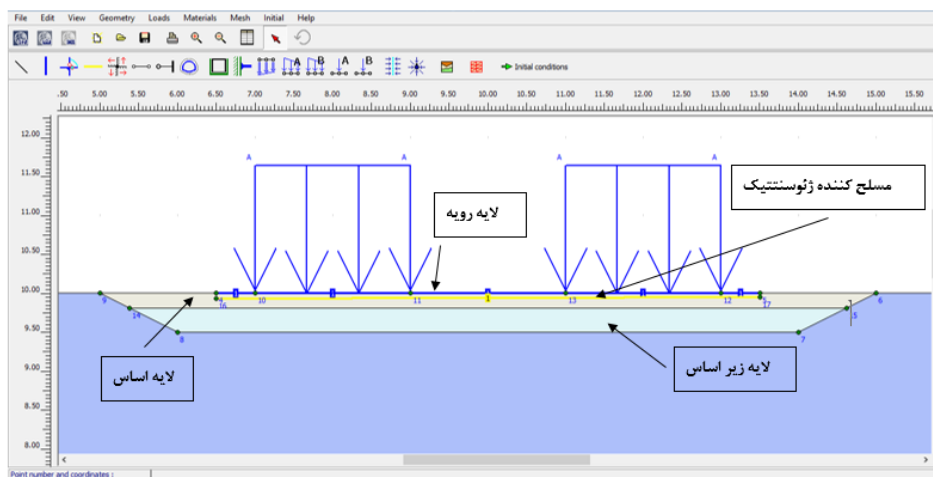
در این قسمت، به منظور مطالعه تأثیر افزایش عمق قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها بر پایداری کلی جاده مورد مطالعه و جابجایی قائم مرکز جاده، چندین محل مختلف برای مسلح‌کننده‌ها شامل زیر رویه، مرز اساس و زیراساس و همچنین مرز زیراساس و خاک بستر در نظر گرفته شد. در این قسمت، طول ژئوسنتتیک‌ها مقدار ثابت ۷ متر، برابر با عرض رویه آسفالتی، تعداد لایه‌ها یک لایه و مقاومت کششی ۱۰۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد و در هر مرحله فقط مقدار پارامتر عمق استقرار ژئوسنتتیک‌ها تغییر داده شد. در شکل ۷، نمونه‌ای از مدل

همانطور که در شکل ۵ نیز به وضوح قابل مشاهده می‌باشد، بیشترین تغییر شکل‌ها مربوط به ناحیه بارگذاری ناشی از عبور ترافیک می‌باشد. علاوه بر این، با نگاهی دقیق‌تر به این شکل می‌توان دید که حضور مسلح‌کننده ژئوسنتتیک اثر قابل مشاهده‌ای بر کانتورهای تغییر شکل داشته و به عبارت دیگر الگوی تغییر شکل‌ها در حضور این مسلح‌کننده‌ها تغییر یافته است.

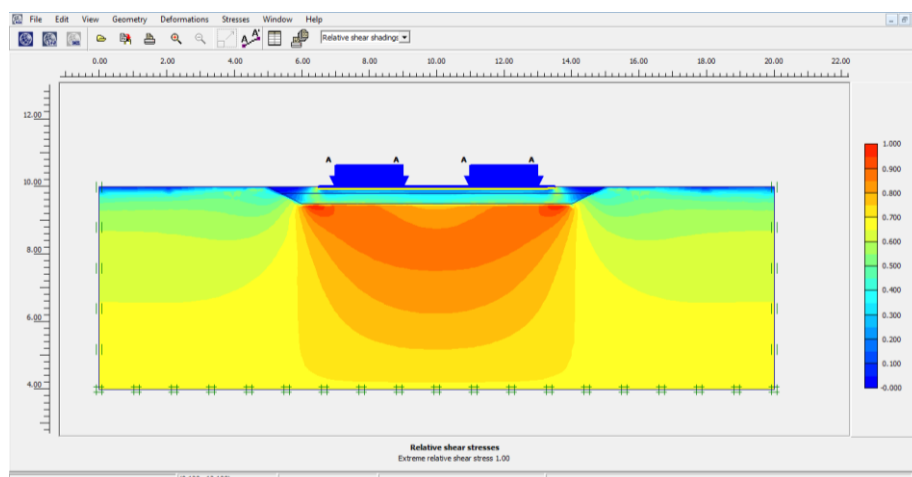
در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در حالت بدون استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک، میزان جابجایی قائم (نشست) نقطه مرکزی جسم راه حدود ۴ میلی‌متر می‌باشد که این میزان با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش نیافته است. همانطور که در این شکل نیز قابل ملاحظه می‌باشد، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها با مقاومت ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوپاسکال به دلیل عدم جابجایی قائم در بدنه جاده مورد مطالعه تأثیر چشمگیری بر نشست جسم راه نداشته است. لازم به ذکر است که تغییر سختی کششی ژئوسنتتیک‌ها از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ کیلوپاسکال تقریباً اثر ناچیزی بر نتایج داشته است؛ در حالی که افزایش مقاومت کششی از ۲۰۰۰ به ۳۰۰۰ کیلوپاسکال اثر قابل ملاحظه‌تری داشته است. شایان ذکر است که همانگونه که در شکل ۶ نیز دیده می‌شود، افزایش مقاومت کششی ژئوسنتتیک‌ها تأثیر کمی بر کاهش جابجایی داشته است. دقت شود که کوچک بودن

مؤثر راه پس از اعمال بارگذاری در حضور مسلح‌کننده ژئوستتیک در این عمق برای مثال نشان داده شده است.

عددی ساخته شده به همراه ژئوستتیک‌های ۷ متری قرار گرفته در زیر رویه آسفالتی به عنوان مثال نشان داده شده است. همچنین، در شکل ۸، نمونه‌ای از خروجی تنش



شکل ۷. تصویری از هندسه مدل ورودی برای خاک بستر مسلح‌شده با ژئوستتیک قرار گرفته در زیر لایه رویه



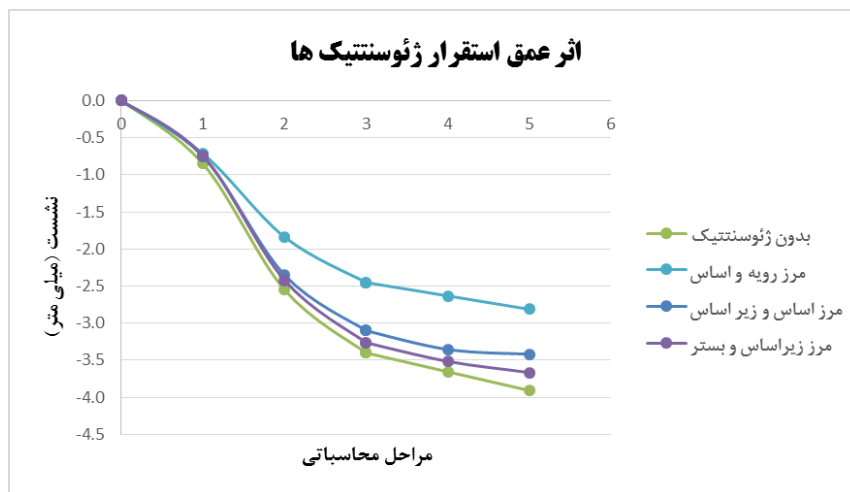
شکل ۸. تصویری از تنش برشی مؤثر مدل پس از اعمال بارگذاری همراه با ژئوستتیک در زیر لایه رویه

تنش برشی در چنین مسأله پیچیده‌ای نیاز به استفاده از ابزار دقیق، نظیر سلول فشار و انجام آزمایش‌های بزرگ-مقیاس محلی دارد، مقدار عدد تنش برشی نسبی به دست آمده از نرم‌افزار قابل صحت‌سنجی دقیق نمی‌باشد. اما می‌توان از الگوی کانتورهای تنش برشی به صحت مدل‌سازی پی برد. لازم به یادآوری است که در این شکل، مقدار تنش برشی نسبی نشان داده شده که بیانگر اختلاف تنش برشی در نقاط مختلف مدل است و نه عدد مطلق

در شکل ۸، به وضوح قابل مشاهده است که بیشترین تمرکز تنش برشی در خاک بستر که ضعیف‌ترین خاک از نظر مقاومتی است رخ داده که نشان می‌دهد جسم جاده و لایه‌های روسازی به‌خوبی وظیفه انتقال تنش خود را به خاک بستر انجام داده‌اند. همچنین، مقداری تمرکز تنش در گوشه‌های جسم جاده دیده می‌شود که به دلیل مدل رفتاری الاستیک خطی جسم راه و انعطاف‌پذیری آن، این موضوع انتظار هم می‌رفت. از آنجا که تعیین مقدار دقیق

در ادامه، در شکل ۹، نشست قائم نقطه مرکز بار گسترده به عنوان نقطه نماینده برای اعماق استقرار مختلف مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک نشان داده شده است تا علاوه بر آسان نمودن بررسی اثر عمق استقرار ژئوسنتتیک‌ها بر نشست راه، مقادیر خروجی را نیز خلاصه نماید.

تنش برشی در آن نقاط. علاوه بر این، با نگاهی دقیق‌تر به این شکل می‌توان دید که حضور مسلح‌کننده ژئوسنتتیک اثر قابل مشاهده‌ای بر کانتورهای تنش برشی مؤثر داشته است و به عبارت دیگر الگوی تغییر تنش در عمق در حضور این مسلح‌کننده‌ها تغییر یافته است.



شکل ۹. نمودار اثر عمق استقرار مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک بر نشست نقطه مرکز بار گسترده

کاهش عمق استقرار ژئوسنتتیک‌ها تأثیر قابل توجهی بر کاهش جابجایی داشته، به گونه‌ای که با استفاده از ژئوسنتتیک در عمق زیر رویه بیشینه جابجایی قائم نقطه مرکزی جسم جاده به $2/7$ میلی‌متر کاهش یافته که احتمالاً به دلیل افزایش موضوعی مقاومت کششی در این ناحیه می‌باشد. بار دیگر یادآوری می‌شود که کوچک بودن اعداد به علت میزان نسبتاً کم بار استاتیک ناشی از عبور ترافیک می‌باشد. ولی همین مقدار ناچیز می‌تواند با عبور دفعات متعدد اتومبیل‌ها در بلندمدت موجب گسیختگی و نشست بیش از حد جسم جاده گردد.

نتایج بررسی عددی اثر مقاومت کششی ژئوسنتتیک‌ها بر نشست جسم راه نشان می‌دهد که این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر نشست جاده ندارد. همچنین، از مدل‌سازی عددی اثر طول ژئوسنتتیک‌ها بر جسم راه مشخص می‌شود که نشست قائم جاده در مدل‌سازی با ژئوگرید هم‌اندازه با عرض جاده (که در این مدل برابر ۷

همانطور که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود، در حالت بدون استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک، میزان جابجایی قائم (نشست) نقطه مرکزی جسم راه حدود ۴ میلی‌متر می‌باشد که این میزان با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. همانطور که در این شکل نیز قابل ملاحظه می‌باشد، با کاهش عمق استقرار لایه مسلح‌کننده ژئوسنتتیک، نشست جسم راه روند کاهشی نشان داده است. لازم به ذکر است که تغییر عمق استقرار ژئوسنتتیک‌ها از مرز اساس به مرز زیر اساس تقریباً اثر ناچیزی بر نتایج داشته است؛ در حالی که کاهش عمق استقرار از لایه اساس به رویه اثر قابل ملاحظه‌ای داشته است. این موضوع می‌تواند به این علت باشد که با کاهش عمق استقرار به زیر لایه رویه مسلح‌کننده وارد محدوده تغییر شکل‌های جسم جاده شده و از همین رو تأثیر آن بر کاهش نشست افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. علاوه بر این، همانگونه که در شکل ۹ دیده می‌شود،

نشست جاده که معیار مقایسه مدل‌های مختلف است، در مرکز بار گسترده انتخاب شده که در نتایج خروجی، جابجایی قائم این نقطه به عنوان نماینده نشست جاده در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از تحقیقات مشابه در گذشته نشان می‌دهد که مقادیر تغییر شکل‌های بیشینه در اکثر تحقیقات بین ۲ تا ۶ میلی‌متر متغیر بوده است که نتایج این مدل‌سازی نیز در همین محدوده می‌باشد.

شایان ذکر است که از مصالح ژئوگرید موجود در نرم‌افزار پلکسیس به منظور شبیه‌سازی عددی ژئوستنتیک‌ها استفاده شده است. این مصالح تنها دارای سختی محوری بوده و فاقد سختی برشی می‌باشند.

نتایج به دست آمده از این مطالعات را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

نتایج مدل‌سازی عددی اثر مقاومت کششی ژئوستنتیک‌ها بر نشست جسم راه نشان داد که این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر نشست جاده ندارد. در این مطالعه، از سه مقاومت کششی مختلف ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوپاسکالی برای مقاومت کششی ژئوستنتیک‌ها استفاده شد که خروجی مدل‌سازی عددی نشان داد که اثر این پارامتر قابل ملاحظه نمی‌باشد. اما نکته بسیار مهم در این قسمت این بود که با افزایش میزان مقاومت کششی المان‌های ژئوستنتیک، میزان پایداری راه نیز به‌طور مستمر افزایش می‌یابد، با آنکه میزان این افزایش ناچیز است.

از مدل‌سازی عددی اثر طول ژئوستنتیک‌ها بر جسم راه مشخص گردید که این پارامتر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب اطمینان جاده دارد. اما نکته بسیار مهم در این قسمت این بود که چنانچه طول ژئوستنتیک‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که سطح نشست بحرانی را قطع نکند نه تنها تأثیر بر افزایش ضریب اطمینان جاده نداشته بلکه باعث کاهش ناچیز نشست نیز می‌شود. علاوه بر این، نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که پس از عبور اندازه طول ژئوستنتیک‌ها از یک حد مشخص (که در مطالعه موردی

متر می‌باشد) برابر ۳/۶۵ میلی‌متر و با ژئوگرید به عرض ۹ متر، برابر با ۳/۵ میلی‌متر می‌باشد. نکته بسیار مهم در این قسمت این بود که چنانچه طول ژئوستنتیک‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که سطح نشست بحرانی را قطع نکند، نه تنها تأثیری بر افزایش ضریب اطمینان جاده نداشته، بلکه باعث کاهش ناچیز نشست نیز می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اصطکاک خاک-ژئوستنتیک تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضرایب کیفیت راه و بستر ماسه‌ای دارد. نتایج این بخش مشخص می‌کند که چنانچه میزان اصطکاک بین المان ژئوستنتیک با خاک معادل زاویه اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شود، نشست جاده در مرکز بارگذاری مدل، ۱۲ درصد کاهش داشته است. در نهایت، بررسی تأثیر مکان استقرار المان ژئوستنتیک بر نشست جاده نشان داد که با جابجایی لایه ژئوستنتیک از مرز زیراساس-بستر به مرز رویه-اساس، نشست جاده به میزان ۰/۹ میلی‌متر کاهش یافت.

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از نتایج مطالعات یک خاک بستر واقعی که در مصر مورد آزمایش دقیق قرار گرفته استفاده شده است. همچنین، برای شبیه‌سازی جسم آسفالتی رویه راه از المان صفحه استفاده شده که مدل رفتاری آن الاستیک خطی می‌باشد. همچنین، عرض رویه آسفالتی معادل یک راه تک‌باند استاندارد و حدود ۷ متر شبیه‌سازی شده است. به منظور مدل‌سازی بار ناشی از وسایل نقلیه، از دو بار گسترده به عرض حدود ۲ متر و مقدار متوسط ۰/۵ تن بر متر مربع در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در اکثر پژوهش‌هایی که به برخی از آنها در پیشینه این تحقیق نیز اشاره شده، فشار تیر و مدل‌سازی بارگذاری به صورت سطحی بوده و در محدوده ۵۰ تا ۶۰۰ یا ۴۰ تا ۹۰۰ کیلوپاسکال، بسته به نوع ترافیک محل (سبک و سنگین)، بوده است. مقدار بار در نظر گرفته شده در همین محدوده است. همچنین، نقطه محاسبه

به‌منظور مطالعه تأثیر افزایش عمق قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها بر پایداری کلی جاده مورد مطالعه و جابجایی قائم مرکز جاده، چندین محل مختلف برای مسلح‌کننده‌ها شامل زیر رویه، مرز اساس و زیراساس و همچنین مرز زیراساس و خاک بستر در نظر گرفته شد. نتایج این بخش نشان داد با کاهش عمق استقرار لایه مسلح‌کننده ژئوسنتتیک، میزان نشست جسم راه روند کاهشی نشان داده است. لازم به ذکر است که تغییر عمق استقرار ژئوسنتتیک‌ها از مرز اساس به مرز زیراساس تقریباً اثر ناچیزی بر نتایج داشته است؛ در حالی که کاهش عمق استقرار از لایه اساس به رویه اثر قابل ملاحظه‌ای داشته است. این موضوع می‌تواند به این علت باشد که با کاهش عمق استقرار به زیر لایه رویه مسلح‌کننده وارد محدوده تغییرشکل‌های جسم جاده شده و از همین رو تأثیر آن بر کاهش نشست افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. علاوه بر این، کاهش عمق استقرار ژئوسنتتیک‌ها تأثیر قابل توجهی بر کاهش جابجایی داشته، به‌گونه‌ای که با استفاده از ژئوسنتتیک در عمق زیر رویه بیشینه، جابجایی قائم نقطه مرکزی جسم جاده به $2/7$ میلی‌متر کاهش یافته که احتمالاً به دلیل افزایش مقاومت کششی در این ناحیه می‌باشد.

این پژوهش طول ۷ متر می‌باشد) تأثیر افزایش طول بر نشست به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی عددی اثر اصطکاک ژئوسنتتیک‌ها با خاک بر پایداری جسم جاده نشان داد که این پارامتر نیز مانند طول ژئوسنتتیک‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت و عملکرد راه و بستر ماسه‌ای دارد. نتایج این بخش مشخص نمود که چنانچه میزان اصطکاک بین المان ژئوسنتتیک با خاک معادل زاویه اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شود، بیشترین تأثیر بر افزایش مقاومت خاک بستر را داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که اجرای ژئوسنتتیک‌ها به منظور پایدار سازی راه بسیار مهم می‌باشد. شایان ذکر است که هر چه المان‌های ژئوسنتتیک بیشتر کوبیده شوند و چفت و بست بهتری با ذرات خاک ایجاد کنند میزان اصطکاک آن بیشتر خواهد بود. یکی دیگر از نکات بسیار مهم نتایج این بخش این نکته می‌باشد که چنانچه میزان اصطکاک ژئوسنتتیک‌ها و خاک به نصف مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش داده شود میزان نشست جسم راه به میزان حالت بدون استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت میزان اصطکاک بین المان ژئوسنتتیک و خاک می‌باشد.

۹. مراجع

- Abdi, M. R., Sadrnejad, A. and Arjomand, M. A. 2009. "Strength enhancement of clay by encapsulating geogrids in thin layers of sand". *Geotext. Geomembranes*, 27: 447-455.
- Ahirwar, S. K. and Mandal, J. N. 2017. "Finite element analysis of flexible pavement with geogrids". Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai- 400076, India. Available online 26 May 2017.
- Alimohammadi, H., Zheng, J., Schaefer, V. R., Siekmeier, J. and Velasquez, R. 2021. "Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: A review of large-scale laboratory studies". *Transport. Geotech.*, 27: 100471.
- Al-Jumaili, M. 2016. "Finite element modelling of asphalt concrete pavement reinforced with geogrid by using 3-D Plaxis software". *Int. J. Mater. Chem. Phys.*, 2(2): 62-70.
- Beckham, W. K. and Mills, W. H. 1935. "Cotton-fabric reinforced roads". *Eng. News Record*, pp. 453-455.
- Bertram, G. E. 1940. "An experimental investigation of protective filters". Graduate School of Engineering, Harvard University, Publ. 267, January, 140 p.
- Dewar, S. 1962. "The oldest roads in Britain". *Countryman*, 59(3): 547-555.
- Farrag, K. and Morvant, M. 2003. "Evaluation of interaction properties of geosynthetics in cohesive soils, LTRC reinforced-soil test wall". Louisiana Transportation Research Center, Report 379.
- Gunasekara Jayalath, C. P., Gallage, C., Dhanasekar, M., Dareeju, B., Ramanujam, J. and Lee, J. 2018. "Pavement model tests to investigate the effects of geogrid as subgrade reinforcement". In *Proceedings of*

- the 12th Australian and New Zealand young geotechnical professionals conference (pp. 1-8). Australian Geomechanics Society.
- Hamdy, F. and Hassan, A. M. 2014. "2D Plaxis finite element modeling of asphalt-concrete pavement reinforced with geogrid". *J. Eng. Sci. Assiut University Faculty of Engineering*, 42(6): 1336-1348.
- Kays, W. B. 1982. "Construction of linings for reservoirs, tanks, and pollution control facilities". 2nd ed., New York: Wiley.
- Kazemian, S., Barghchi, M. Prasad, A., Moayedi, H. and Huat, B. B. K. 2010. "Reinforced pavement above trench under urban traffic load: Case study and finite element (FE) analysis". *Sci. Res. Essays*, 5(21): 3313-3329.
- Keller, G. R. 2016. "Application of geosynthetics on low-volume roads". *Transport. Geotech*, 8: 119-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.04.002>
- Koerner, R. M. 2005. "Designing with geosynthetics". Fifth edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Koerner, R. M. and Koerner, G. R. 1996. "Geotextiles used as flexible forms". *Geotext. Geomembranes*, 14(5): 301-311.
- Koerner, R. M. and Daniel, D. E. 1997. "Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps". ASCE, 256 p.
- Rajesh, U., Sajja, S. and Chakravarthi, V. K. 2016. "Studies on engineering performance of geogrid reinforced soft subgrade". *Transport. Res. Proc.*, 17: 164-173.
- Shukla, S. K. and Yin, J. H. 2006. "Fundamentals of Geosynthetic Engineering". London: Taylor & Francis.
- Sivakumar Babu, G. L. 2016. Indian Institute of Science Bangalore 560012, December 8-10, Satish Dhawan Auditorium Bengaluru.
- Widodo, S. 2013. "Analysis of dynamic loading behaviour for pavement on soft soil". PhD Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg.