

ارزیابی عددی تأثیر اساس مسلح شده با ژئوسل بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی با روش المان محدود غیرخطی

علیرضا غنی زاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

فرهاد قادری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

حکیمه عباسلو، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۷

چکیده

در چند سال اخیر با پیشرفت‌های صورت گرفته در تولید محصولات زمین‌پارچه‌ای، استفاده از این محصولات در مسلح سازی روسازی افزایش چشم‌گیری داشته است. در بین این محصولات، ژئوسل به سبب محصورکنندگی مناسب سنگ‌دانه‌ها ناشی از هندسه سه‌بعدی باعث افزایش سختی مصالح سنگدانه‌ای می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر مسلح سازی لایه اساس با ژئوسل، شش هندسه مختلف در حالت اساس مسلح و غیرمسلح در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی گردید و رفتار مصالح سنگدانه‌ای لایه‌های اساس و زیراساس با سابروتین نویسی به زبان فرترن به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته شد. در مرحله بعد نتایج حاصل از برنامه ABAQUS با استفاده از نتایج حاصل از دو برنامه KENLAYER و MICHPAVE و همچنین یک مقطع آزمایش تمام مقیاس اعتبار سنجی شد که نتایج نشان‌دهنده انطباق بسیار خوب نتایج حاصل از برنامه ABAQUS با نتایج سایر برنامه‌ها و همچنین نتایج آزمایش‌های میدانی بود. بر اساس نتایج مدل‌سازی با مسلح سازی لایه اساس سنگدانه‌ای، پاسخ‌های افت‌وخیز سطح ۱۰/۲۸-۵ درصد، پاسخ‌های کرنش کششی تار پایین آسفالت ۱۲/۲۴-۷/۱۵ درصد و کرنش فشاری قائم روی خاک بستر ۹/۱۹-۵/۱ درصد کاهش می‌یابند. همچنین تحلیل خرابی با روابط انستیتو آسفالت بر روی نتایج مدل‌سازی انجام گرفت و مشخص گردید که مسلح سازی عمر خستگی آسفالت را ۳۴/۹۴-۲۱/۶۸ درصد و عمر شیارشدگی بستر را ۳۵-۲۰/۸۹ درصد افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مسلح سازی، ژئوسل، اساس سنگدانه‌ای، المان محدود غیرخطی، عمر خستگی، عمر شیارشدگی

۱. مقدمه

زمین پارچه‌ها^۱ صفحات نازک و انعطاف‌پذیر هستند که می‌توانند به‌عنوان مسلح کننده در بخش‌های مختلف روسازی بکار روند. نوع، ویژگی و محل قرارگیری زمین‌پارچه از جمله عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آن در مسلح‌سازی روسازی هستند [Taherkhani, Moradlou and Jalali, 2017]. از اتصال نوارهای ژئوممبرین یا ژئوتکتستایل ساختاری لانه‌زنبوری به وجود می‌آید که بسته به ضخامت نوارهای تشکیل‌دهنده می‌تواند ضخامت مشخصی از خاک، شن، ماسه و حتی بتن را از طریق محدود کردن حرکت جانبی در خانه‌های خود نگه دارد. این ساختار که در مقایسه با غشاء نازک ژئوممبرین یا شبکه نازک ژئوگرید، سه‌بعدی محسوب می‌شود، ژئوسل نامیده می‌شود [Niazkhani, 2011]. به علت انعطاف مناسب ژئوسل‌ها و دامنه نرمی بالا می‌توان از آن‌ها در اغلب مکان‌ها استفاده نمود. اغلب کاربرد ژئوسل در روسازی مربوط به خاک بستر است، اما با توجه به ظرفیت بالای این محصول می‌توان از آن در لایه اساس سنگ‌دانه‌ای نیز استفاده نمود و در عوض از مصالحی با سختی و مرغوبیت کمتر در لایه اساس سنگ‌دانه‌ای استفاده نمود [Sadrianzadeh, 2004]. مقاومت بالای ژئوسل‌ها در کشش به‌خوبی اثبات گردیده است و مقاومت فشاری آن تحت تأثیر مکان استفاده و مصالحی که برای پوشش آن استفاده می‌شود، قرار می‌گیرد. از دیگر مزیت‌های بسیار مناسب ژئوسل اندازه‌های مختلف تولید آن برحسب نیاز در مکان‌های مورد استفاده است که برای لایه‌های روسازی از اندازه‌های مختلف می‌توان استفاده نمود. مکانیسم عملکرد ژئوسل از طریق محدود کردن حرکت جانبی در لایه‌ای از خاک، شن و حتی بتن (قبل از گیرش) اتفاق می‌افتد. محدود کردن حرکت جانبی در صورتی که در سطوح افقی اتفاق بیفتد منجر به افزایش ظرفیت باربری قشر خاکی محدوده شده می‌شود [Hegde, 2017]. ژئوسل‌ها از انواع زمین‌پارچه‌ها هستند که اخیراً جهت تسلیح خاک بکار برده شده‌اند. با توجه به عملکرد منحصر به فرد این نوع سیستم تسلیح

(محصورکنندگی بالا ناشی از هندسه سه‌بعدی) استفاده از آن‌ها در حال توسعه بوده و پژوهش‌های وسیعی روی آن‌ها در حال شکل‌گیری است. مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً وسیعی روی سیستم تسلیح با ژئوسل صورت گرفته است، اما مطالعه عددی عملکرد آن‌ها، که برای درک رفتار دقیقشان لازم است بندرت انجام شده است. به همین دلیل روش‌های تئوری و طراحی موجود برای این سیستم بسیار عقب‌تر از کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف از جمله در راه‌سازی است [Kozegaran and Oliaei, 2016]. با توجه به هزینه‌های زیاد انجام آزمایش‌های میدانی در زمینه مسلح‌سازی روسازی با ژئوسل، استفاده از مدل‌سازی عددی راهکاری بسیار مناسب به‌عنوان جایگزینی کم‌هزینه‌تر به شمار می‌رود. در مسلح‌سازی روسازی عمدتاً از سه نوع زمین‌پارچه شامل ژئوسل، ژئوگرید و ژئوتکتستایل استفاده می‌شود. در این میان ژئوسل به علت هندسه خاص خود که در نوع سنگ‌دانه مصرفی (مرغوب یا غیر مرغوب) نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این مطالعه، به بررسی شش هندسه مختلف روسازی‌های آسفالتی در حالت اساس مسلح شده با ژئوسل و اساس غیرمسلح شده با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی غیرخطی پرداخته شده است و تأثیر مسلح‌سازی بر سه پارامتر افت‌وخیز سطح، کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت و کرنش فشاری قائم روی خاک بستر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، تأثیر مسلح‌سازی بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی بر اساس روابط تجربی انستیتو آسفالت^۲ بررسی شده است.

۲. مروری بر مطالعات انجام شده

زمین‌پارچه‌ها به‌عنوان بخش جدید و کاربردی کارهای عمرانی شناخته می‌شوند و به علت مزایای آن جزء اولویت‌های استفاده به‌عنوان مسلح کننده هستند. موارد گسترده استفاده از آن‌ها در راه‌سازی نیز به علت کاربرد مناسب رو به افزایش است. استفاده

ارزیابی عددی تأثیر اساس مسلح شده با ژئوسل بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی ...

مقابل بار ترافیکی را بهبود بخشید. همچنین این تحقیق نشان داد که با مسلح‌سازی روسازی، مدول لایه‌های نرم روسازی افزایش یافته و عملکرد بلندمدت آن بهبود خواهد یافت [Rajagopal et al. 2014].

مسلح‌سازی لایه اساس سنگدانه‌ای با ژئوسل سبب بهبود عملکرد شیارشدگی روسازی می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده که حاصل از مشاهدات انجام گرفته بر روی یک نمونه آزمایشگاهی است که تحت بارهای محوری مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد مشخص شد که مسلح‌سازی لایه اساس سنگدانه‌ای سبب بهبود شیارشدگی روسازی تا حدود ۲۲ درصد می‌شود. با مسلح‌سازی، شیارشدگی بستر بیشتر از شیارشدگی کلی بهبود می‌یابد. همچنین سایر بررسی‌های انجام گرفته بر روی مقطع مورد آزمایش مشخص نمود که افت و خیز سطح روسازی در نمونه مورد بررسی در حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد [Kumar and Saride, 2016].

در یک مطالعه تأثیر مسلح‌سازی بستر رسی در روسازی با ژئوسل بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های انجام گرفته مشخص گردید که مسلح‌سازی لایه بستر رسی با ژئوسل سبب کاهش تنش‌های روی بستر تا ۵۰ درصد می‌شود و در صورت مسلح‌سازی لایه بستر با ژئوسل و ژئوگرید به‌طور هم‌زمان سبب کاهش تنش‌های روی بستر تا ۷۰ درصد می‌شود. همچنین مشخص گردید که مسلح‌سازی لایه بستر روسازی با زمین‌پارچه‌ها به‌صورت تکی یا ترکیبی عملکرد شبیه تیر روسازی را بهبود می‌بخشد [Hegde and Sitharam, 2015].

مسلح‌سازی روسازی علاوه بر کاهش پاسخ‌های بحرانی کاربردهای دیگری نیز به همراه خواهد داشت. با مسلح‌سازی لایه اساس سنگدانه‌ای با ژئوسل زهکشی در لایه اساس بهتر صورت می‌گیرد و با استفاده ترکیبی از ژئوسل و ژئوتکتایل این عملکرد بهتر خواهد شد [Maheshwari and Babu, 2016].

از ژئوسل در کارهای راه‌سازی به‌طور خلاصه شامل سه مورد زیر است [Maheshwari and Babu, 2016]:

۱. تسلیح لایه‌های اساس، زیراساس و بستر روسازی
 ۲. پایدارسازی شیروانی‌ها برای جلوگیری از ریزش
 ۳. ایجاد محل مناسب در شیروانی‌ها کناری برای ایجاد فضای سبز
- القادی^۳ و هیوز^۴ تحقیقاتی را در زمینه تأثیر مسلح‌سازی بستر ضعیف و لایه‌های اساس و زیراساس یک مقطع روسازی با ژئوسل انجام داده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق که همراه با بررسی میدانی صورت گرفته است، مشخص گردید که مسلح‌سازی بستر ضعیف با محدود کردن حرکت جانبی مصالح، سختی بستر را تا دو برابر افزایش می‌دهد. همچنین با استفاده ترکیبی از ژئوسل و ژئوتکتایل می‌توان سختی لایه‌های سنگدانه‌ای اساس و زیراساس را نیز تا دو برابر افزایش داد [AI-Qadi and Hughes, 2000].

امرزلبن^۵ و مایر^۶ در یک مطالعه آزمایشگاهی تأثیرات مسلح‌سازی لایه اساس با ژئوسل را بر پاسخ‌های بحرانی یک نمونه روسازی با بستر نرم بررسی نمودند. بر اساس نتایج این مطالعه مشخص گردید که با مسلح‌سازی روسازی، تنش‌های حاصل از بار ترافیکی در لایه‌های اساس، زیراساس و بستر در سطح بزرگ‌تری پخش می‌شود و عملکردی بهتر از حالت غیرمسلح دارد. همچنین با بررسی‌های صورت گرفته بر روی بستر با بارگذاری‌های مختلف مشخص گردید که مسلح‌سازی سبب کاهش حدود ۳۰ درصدی تنش‌های قائم روی خاک بستر می‌شود. با بررسی سلول‌های ژئوسل در نمونه آزمایشگاهی مشخص شد که ظرفیت باربری سنگدانه‌های مسلح شده با ژئوسل ۱/۷-۱/۱ برابر از حالت غیرمسلح بالاتر است [Emersleben and Meyer, 2014].

مطالعه انجام شده توسط راجاگوپال^۷ و همکاران در خصوص تأثیر مسلح‌سازی روسازی با ژئوسل بر رفتار بلندمدت روسازی مشخص نمود که با مسلح‌سازی روسازی با ژئوسل و سایر محصولات زمین‌پارچه‌ای می‌توان عملکرد بلندمدت روسازی در

همراه خواهد داشت. نشست در مقطع روسازی با لایه اساس و زیراساس ضعیف مسلح شده با ژئوسل بهتر از مقطع مسلح نشده با لایه‌های اساس و زیراساس قوی است. به این ترتیب می‌توان در مکان‌هایی که دسترسی به مصالح مناسب برای لایه‌های سنگدانه‌ای امکان‌پذیر نیست از ایده مسلح‌سازی استفاده نمود [Kozegaran and Oliaei, 2016].

بررسی مطالعات پیشین بر روی مسلح‌سازی روسازی با ژئوسل مشخص می‌کند که تاکنون مطالعات عددی مشخصی در این زمینه وجود ندارد و بیشتر مطالعات انجام گرفته حاصل کارهای آزمایشگاهی است. اندک مطالعات عددی انجام گرفته نیز جهت تکمیل مطالعات آزمایشگاهی است. از طرف دیگر مسلح‌سازی لایه‌های روسازی با ژئوسل نیازمند مدلسازی لایه مسلح شده بصورت غیر خطی است که در بیشتر مطالعات انجام گرفته مدلسازی غیرخطی برای مصالح در نظر گرفته نشده است. در این مطالعه با بررسی ۶ هندسه مختلف در کنار مدلسازی غیرخطی لایه‌های اساس و زیراساس به بررسی عمر خستگی آسفالت و شیارشدگی بستر بر مبنای روابط موجود جهت تخمین عمر روسازی پرداخته می‌شود.

۳. مدل‌های غیرخطی مصالح سنگدانه‌ای

تحت تکرار بار ناشی از ترافیک، اکثر تغییر شکل‌های روسازی برگشت‌پذیر بوده و این تغییر شکل‌ها را می‌توان به صورت ارتجاعی در نظر گرفت. علت این موضوع اعمال بار سنگین ناشی از غلتک زنی روسازی در مرحله ساخت است که سبب کاهش تغییر شکل‌های دائمی روسازی به حداقل مقدار خود در آینده می‌شود. در تحلیل روسازی معمولاً از مدول برجهنگی^۹ (M_R) برای بیان سختی ارتجاعی مصالح استفاده می‌شود. M_R به صورت زیر قابل تعریف است:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

که در این رابطه σ_d تنش انحرافی ناشی از بارگذاری ($\sigma_1 - \sigma_3$) و ϵ_r کرنش برگشت‌پذیر است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

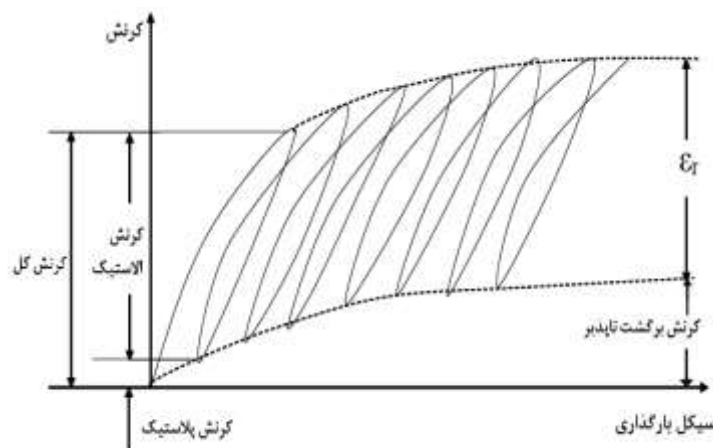
مسلح‌سازی با ژئوسل در سازه‌های ریلی نیز مورد بررسی قرار گرفته است که به نتایج بسیار مناسبی دست یافته‌اند. در یک مقطع راه‌آهن با شبیه‌سازی سه‌بعدی به شیوه المان محدود ژئوسل در نرم‌افزار آباکوس نتایج بدین ترتیب بودند که مقاومت جانبی سطح بالاست راه‌آهن به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد و نیز مقاومت بستر حدود دو برابر می‌گردد [Leshchinsky and Ling, 2013].

مسلح‌سازی روسازی با ژئوسل به مصالح ریزدانه بستر و مصالح درشت‌دانه لایه‌های اساس و زیراساس محدود نمی‌شود و می‌توان از مصالحی دیگر نظیر خرده آسفالت بازیافتی^۸ نیز در لایه‌های اساس و زیراساس همراه با مسلح‌سازی با ژئوسل استفاده نمود. در یک تحقیق صورت گرفته بر روی دو مقطع روسازی یکی با خرده آسفالت بازیافتی مسلح شده با ژئوسل و دیگری با مصالح سنگدانه‌ای معمولی غیرمسلح در لایه اساس پرداخته شده است که نتایج به دست آمده نشان‌دهنده عملکرد بهتر خرده آسفالت بازیافتی در مقایسه با مصالح سنگدانه‌ای معمولی با توجه به کاهش پاسخ‌های بحرانی در حدود ۲۰ درصد است. علاوه بر آن مسلح‌سازی لایه اساس با آسفالت بازیافتی سبب کاهش افت و خیز نسبت به نمونه غیرمسلح با مصالح سنگدانه‌ای معمولی می‌شود. همچنین تنش‌های روی سطح بستر در خرده آسفالت بازیافتی مسلح شده نسبت به مصالح سنگدانه‌ای معمولی در سطح بزرگ‌تری پخش می‌شوند و مقدار کمتری دارند [Thakur et al. 2012].

مطالعات آزمایشگاهی دیگری بر روی مسلح‌سازی ژئوسل مشخص نمود که در صورت مسلح‌سازی لایه اساس با ژئوسل تحت بارگذاری این لایه بصورت دال‌های کوچک کنار هم عمل کرده و ظرفیت باربری لایه مسلح شده بالا می‌رود. ابعاد سلول‌ها و ارتفاع ژئوسل نیز بر پاسخ‌ها تاثیر گذار است [FHWA, 2015].

مسلح‌سازی لایه زیراساس با ژئوسل به همراه بستر و بدون لایه اساس عملکردی بهتر از لایه‌های اساس، زیراساس و بستر به

ارزیابی عددی تأثیر اساس مسلح شده با ژئوسل بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی ...



شکل ۱. وضعیت کرنش‌های مصالح سنگ‌دانه‌ای در سیکل‌های بارگذاری (Huang, 2004)

افزایش می‌یابد. برعکس مصالح درشت‌دانه، مدول برجهندگی مصالح ریزدانه با افزایش تنش، کاهش می‌یابد. این کاهش تنش ناشی از رفتار نرم شوندگی مصالح ریزدانه است. مدل رفتاری مصالح ریزدانه برای پیش‌بینی مقادیر مدول برجهندگی به صورت تابعی از تنش انحرافی بیان می‌شود [Kim, 2007].

در سال ۱۹۷۹ مدلی مشابه این مدل برای مصالح ریزدانه ارائه شد که این مدل به مدل دوخطی معروف است. شکل مدل دوخطی به صورت زیر است:

$$M_R = K_2 + K_3 [K_1 - (\sigma_1 - \sigma_3)] \text{ if } (\sigma_1 - \sigma_3) \leq K_1 \quad (3)$$

$$M_R = K_2 + K_4 [(\sigma_1 - \sigma_3) - K_1] \text{ if } (\sigma_1 - \sigma_3) > K_1$$

که در این رابطه مقادیر K_1 ، K_2 ، K_3 و K_4 ثابت‌های مصالح هستند که از آزمایش سه محوری تکراری به دست می‌آیند و مقدار $(\sigma_1 - \sigma_3)$ تنش انحرافی ناشی از بارگذاری است [Thompson and Robnett, 1979]. بر اساس تحقیقات

براون^۱ و پاپین^{۱۱} در سال ۱۹۸۱ مدل $K-\Theta$ به دلیل در نظر نگرفتن کرنش‌های حجمی دارای محدودیت است و قادر به پاسخ‌گویی بر اساس تغییرات تنش حجمی مصالح نیست؛ بنابراین این مدل فقط قادر است در محدوده کوچکی از دامنه تنش‌ها کاربرد داشته باشد. دامنه کاربرد این مدل در محدوده‌ای است که تنش محدودکننده (σ_3) کمتر از تنش انحرافی ($\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$) است [Brown and Pappin, 1981]. در سال

به‌منظور تعیین مدول برجهندگی مصالح سنگ‌دانه‌ای درشت‌دانه و ریزدانه لایه‌های اساس، زیراساس و خاک بستر معمولاً از آزمایش بارگذاری سه محوری تکراری استفاده می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی گذشته نشان می‌دهند که مدول برجهندگی مصالح سنگ‌دانه‌ای ریزدانه و درشت‌دانه تابعی از حالت تنش است؛ بنابراین به‌منظور تحلیل روسازی و تعیین پاسخ‌های روسازی لازم است که رفتار مصالح سنگ‌دانه‌ای به صورت غیرخطی در نظر گرفته شود [Uzan, 1985].

یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های ارائه‌شده برای مصالح سنگ‌دانه‌ای که در سال ۱۹۷۱ ارائه شد، مدل معروف $K-\Theta$ است. این مدل از نخستین مدل‌های ارائه‌شده برای بیان مدول برجهندگی مصالح سنگ‌دانه‌ای به‌عنوان تابعی از تنش وارده از بارگذاری است. این مدل به صورت زیر است:

$$M_R = K_1 \Theta^{K_2} \quad (2)$$

که در این رابطه K_1 و K_2 ثابت‌هایی هستند که برای انواع مختلف مصالح سنگ‌دانه‌ای از طریق آزمایش سه محوری تکراری به دست می‌آیند و Θ مستقل اول تنش است و به صورت $\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ تعریف می‌شود [Hicks and Monismith, 1971].

مدل $K-\Theta$ برای مصالح درشت‌دانه اساس و زیراساس استفاده می‌شود. در مصالح درشت‌دانه با افزایش تنش، مدول برجهندگی

۴. تحلیل روسازی به روش المان محدود

غیرخطی

هوانگ^{۱۳} در مطالعات خود به این نتیجه رسید که تحلیل غیرخطی به روش چندلایه‌ای در مقایسه با روش المان محدود دارای دقت کمتری است [Huang, 2004]. محدودیت بزرگ برنامه‌های المان محدود مخصوص تحلیل روسازی از جمله ILLIPAVE و MICHPAVE در این است که بارگذاری یک محور دارای زوج چرخ را با یک چرخ منفرد مدل‌سازی کرد. استفاده از یک چرخ منفرد معادل با یک زوج چرخ بخصوص در روسازی‌های با رویه آسفالتی نازک، صحیح نیست. زیرا به علت شعاع بسیار زیاد چرخ منفرد معادل، مقدار معادل کرنشی کششی ایجادشده در تار پایین لایه آسفالتی در حالت چرخ منفرد کوچک‌تر از زوج چرخ محاسبه می‌شود. در این حالت بهره‌گیری از نرم‌افزارهایی که امکان مدل‌سازی زوج چرخ را داشته باشند الزامی است [Huang, 2004]. همچنین این برنامه‌ها امکان مدل‌سازی سه‌بعدی روسازی و اضافه نمودن المان‌های سازه‌ای (مانند ژئوسل یا ژئوگرید) را فراهم نمی‌سازند. نرم‌افزار ABAQUS به‌عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند المان محدود قابلیت مدل‌سازی انواع مدل‌های رفتاری پیچیده در مصالح اعم از خطی، غیرخطی و ویسکوالاستیک را دارا است. در مواردی نیز که بعضی مدل‌های رفتاری در آن موجود نباشد نیز می‌توان با استفاده از قابلیت سابروتین نویسی مدل رفتاری موردنظر را شبیه‌سازی نمود. خصوصیات قابل‌توجه نرم‌افزارهای المان محدود منجر به تبدیل این نرم‌افزارها به ابزاری معتبر برای تحلیل روسازی شده است. بزرگ‌ترین مشکل پیش رو در استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود زمان بالای تحلیل است که با ظهور ابررایانه‌ها این مشکلات تا حد زیادی حل شده است و زمان تحلیل‌ها به حداقل ممکن تقلیل یافته است. از نرم‌افزار آباکوس امروزه به‌طور گسترده در تحلیل المان محدود روسازی‌ها استفاده می‌شود [Kim, Tutumluer and Kwon, 2009, Wang and Al-Qadi, 2009, Kim et al. 2012, Al-Qadi et al. 2015, Hernandez, Gamez and Al-Qadi,

۱۹۸۵ نیز ازان^{۱۴} با آزمایش‌هایی بر روی مصالح سنگ‌دانه‌ای مشاهده نمود در مواقعی که مقدار تنش‌های برشی قابل‌ملاحظه باشند مدل $K-\Theta$ نمی‌تواند به‌خوبی مدول ارتجاعی مصالح را برآورد کند [Uzan, 1985]. محدودیت‌های مدل $K-\Theta$ در بیان رفتار برشی مصالح سنگ‌دانه‌ای باعث شد ازان با انجام آزمایش‌های متعدد و سپس با تغییراتی بر روی این مدل، مدلی جدید و سه پارامتری را ارائه دهد. در این مدل برای بدون بعد سازی پارامترها از فشار واحد (P_0) برابر با یک کیلو پاسکال استفاده شده است. مدل Uzan به‌صورت زیر است:

$$M_R = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0}\right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_0}\right)^{K_3} \quad (4)$$

که در این رابطه K_1 ، K_2 و K_3 ثابت‌های مصالح سنگ‌دانه‌ای هستند که از آزمایش فشاری سه محوری به دست می‌آیند. همچنین تنش انحرافی و به‌صورت $\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$ است. P_0 فشار واحد و برابر با یک کیلو پاسکال جهت بدون بعد سازی در نظر گرفته می‌شود. Θ تنش حجمی (توده ای) است و به‌صورت $\Theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ یا $\Theta = \sigma_d + 3\sigma_3$ است [Uzan, 1985].

با در نظر گرفتن تنش‌های حجمی و تنش‌های برشی به‌طور هم‌زمان در مصالح سنگ‌دانه‌ای مدل Uzan نواقص مدل $K-\Theta$ را مرتفع نمود. تناسب پاسخ‌های این مدل با داده‌های آزمایشگاهی نیز بسیار مناسب است. استفاده از این مدل نیز نیازمند آزمایش بارگذاری سه محوری تکراری است. این مدل هنوز هم به‌صورت گسترده در تحلیل روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [Kim, 2007].

در این مقاله به منظور صحت سنجی از مدل‌های غیرخطی $K-\Theta$ برای لایه اساس و مدل غیر خطی Bilinear برای لایه بستر استفاده شده است و در مدل‌سازی‌های انجام گرفته جهت تحلیل از مدل غیرخطی Uzan در لایه‌های اساس و زیراساس استفاده شده است.

ارزیابی عددی تأثیر اساس مسلح شده با ژئوسل بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی ...

از این مقدار در نظر گرفته شود پاسخ‌های افت‌وخیز سطح روسازی و کرنش فشاری قائم روی خاک بستر به‌درستی محاسبه نمی‌گردد [Kim, Tutumluer and Kwon, 2009, Kim, 2007, Kim et al. 2012]

بعد از مدل‌سازی و انتخاب هندسه دقیق باید شرایط تکیه‌گاهی مناسب به مدل اختصاص یابد. قسمت زیرین روسازی باید به‌صورت مهار کامل باشد و به‌این ترتیب باید برای این قسمت قید گیردار در نظر گرفته شود. در طرفین سطح مدل‌سازی که یک سطح مربعی یا مستطیلی است باید تغییر مکان در راستای ارتفاع آزاد باشد و تغییر مکان‌های جانبی در این سطح به‌صورت مهار شده باشد. بدین ترتیب در چهار طرف مدل‌سازی باید از قید غلنگی با آزادی حرکت در راستای ارتفاع استفاده شود. تصویر شرایط مرزی و تکیه‌گاهی مدل‌سازی المان محدود در نمای دوبعدی در شکل ۲ نشان داده شده است. در صورت آزاد گذاشتن هر یک از قسمت‌های زیرین یا طرفین، پاسخ‌های مدل‌سازی صحیح نخواهد بود [Kim and Tutumluer, 2006, Kim, Tutumluer and Kwon, 2009, Kim, 2007, Kim et al. 2012, Hernandez, Gamez and Al-Qadi, 2017]

برای بارگذاری المان محدود روسازی در حالت استاتیکی معمولاً از بارگذاری دایره‌ای استفاده می‌شود. در برنامه‌های KENLAYER و MICHPAVE نیز از بارگذاری دایره‌ای استفاده می‌شود؛ اما می‌توان بارگذاری دایره‌ای را به بارگذاری مستطیلی معادل نیز تبدیل نمود. بارگذاری مستطیلی در مدل‌سازی المان محدود روسازی نتایج مناسب‌تری با بارگذاری واقعی دارد [Huang, 2004]

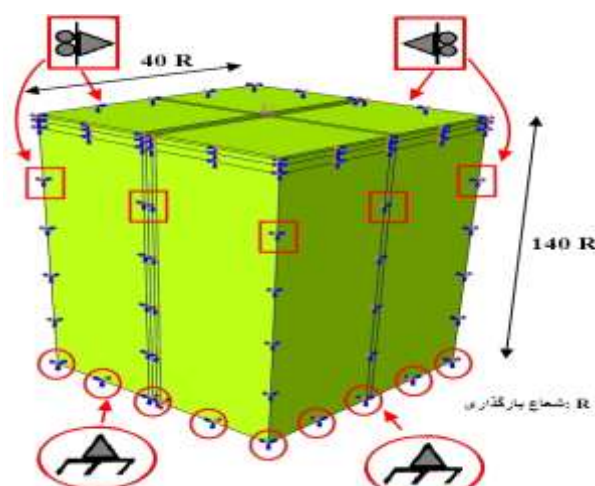
[2017]. در این تحقیق مدل‌سازی روسازی در نرم‌افزار المان - محدود آباکوس انجام گرفته و رفتار لایه آسفالت رویه به‌صورت الاستیک خطی، لایه‌های اساس و زیراساس الاستیک غیرخطی و لایه بستر به‌صورت الاستیک خطی مدل‌سازی شده است. بارگذاری انجام گرفته نیز به‌صورت یکنواخت انجام گرفته است.

۴-۱ هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی در مدل‌سازی

المان محدود روسازی

مهم‌ترین بخش مدل‌سازی روسازی در نرم‌افزار آباکوس تعیین هندسه و شرایط مرزی است. پاسخ‌های نرم‌افزار کاملاً به این شرایط وابسته است. در مطالعات اخیر بر روی مدل‌سازی المان محدود روسازی با آباکوس به همگرایی خوبی برای شرایط مرزی در طول و عرض و ارتفاع رسیده‌اند که نسبت به شعاع معادل دایره‌ای به دست می‌آید. هندسه مدل باید در طول و عرض سطح بارگذاری از هر طرف به اندازه ۴۰-۲۰ برابر شعاع بارگذاری دایره‌ای انتخاب شود. در بارهای سنگین به علت شعاع تأثیر بیشتر این بارها، بهتر است از نسبت ۴۰ برابر استفاده شود [Kim and Tutumluer, 2006, Kim, Tutumluer and Kwon, 2009, Kim, 2007, Kim et al. 2012]

در مقادیر بیشتر از ۴۰ برابر شعاع بارگذاری دایره‌ای اثر شرایط مرزی بسیار کم می‌شود. همچنین در مقادیر کمتر از ۲۰ برابر شعاع بارگذاری دایره‌ای نمی‌توان پاسخ‌های صحیح به دست آورد [Cortes, 2010]. در صورتی که طول و عرض مدل در سطح بارگذاری کمتر از مقدار ۴۰-۲۰ برابر شعاع در نظر گرفته شود، مقادیر کرنش‌های کششی در تار پایین لایه آسفالتی به‌درستی محاسبه نمی‌گردد. حداقل ارتفاع لازم در مدل‌سازی برای دستیابی به پاسخ‌های دقیق ۱۴۰ برابر شعاع بارگذاری دایره‌ای معادل سطح تنش فشاری لاستیک است. در روسازی‌های با بستر نیمه بینهایت در صورتی که ارتفاع مدل کمتر



شکل ۲. شرایط مرزی و تکیه‌گاهی مدل‌سازی المان محدود روسازی در نمای سه بعدی

می‌شود. علاوه بر این، نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که کرنش کششی عرضی نسبت به کرنش کششی طولی حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهد [Al-Qadi, 2011].

۴-۲ تحلیل غیرخطی روسازی از طریق سابروتین نویسی

نرم‌افزار ABAQUS به‌عنوان نرم‌افزاری قدرتمند با روش المان محدود قابلیت مدل‌سازی انواع مدل‌های رفتاری پیچیده در مصالح اعم از خطی، غیرخطی و ویسکوالاستیک را دارا است. در مواردی نیز که بعضی مدل‌های رفتاری در آن موجود نباشد، با قابلیت سابروتین نویسی مدل رفتاری را می‌توان شبیه‌سازی نمود. سابروتین نویسی به زبان فرترن^{۱۴} و بر اساس اصول المان محدود انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی غیرخطی مصالح سنگ‌دانه‌ای اساس و زیراساس در این مقاله از مدل غیرخطی Uzan استفاده شده است. از آنجایی که مدل Uzan به‌صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار ABAQUS وجود ندارد، برای استفاده از این مدل‌های رفتاری باید با استفاده از قابلیت سابروتین نویسی این مدل رفتاری شبیه‌سازی شود. در مدل‌های رفتاری مصالح سنگ‌دانه‌ای که مدول برجهنگی مصالح، تابعی از تنش اعمالی است، در طول مدت‌زمان بارگذاری با تغییر تنش مدول الاستیسیته تغییر می‌کند تا در نهایت لایه سنگ‌دانه‌ای به دامنه‌ای از تغییرات مدول الاستیسیته از مقدار حداقل تا حداکثر برسد. فرآیند مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح اساس سنگ‌دانه‌ای به

از آنجایی که کامیون‌ها سنگین‌ترین بارها را به سطح روسازی وارد می‌کنند، به‌عنوان اصلی‌ترین گروه از کاربران شبکه راه‌ها شناخته می‌شوند. بدین ترتیب در تحلیل‌های روسازی از بارگذاری محور کامیون که بیشترین سهم از خرابی‌ها را دارند، به‌عنوان بحرانی‌ترین نوع بارگذاری استفاده می‌شود [Taherkhani, Moradlou and Jalali, 2017]. در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) نیز از محور استاندارد به وزن ۸/۲ تنی در طراحی روسازی استفاده می‌شود و سایر محورها به بار هم‌ارز با آن تبدیل می‌شوند [Iran Highway Asphalt Paving Code, 2011]. بارگذاری با توزیع فشار یکنواخت متداول‌ترین نوع بارگذاری در تحلیل‌های روسازی است. با این‌وجود مدل‌سازی فشار غیریکنواخت حاصل از سطح تماس چرخ و سطح روسازی نتایج دقیق‌تری را به دست می‌دهد. مدل‌سازی فشار غیریکنواخت سطح تماس چرخ، نیازمند مدل‌سازی پیچیده‌تر و زمان حل بیشتر است. از طرفی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که مدل‌سازی فشار غیریکنواخت چرخ تنها بر روی پاسخ‌های نزدیک به سطح روسازی مؤثر است و با افزایش عمق تأثیر آن کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که در توزیع فشار غیریکنواخت تنش، بسته به میزان بار مورد آزمایش، کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش قائم روی بستر، ۳-۷ درصد بیشتر از حالتی است که توزیع فشار به‌صورت یکنواخت فرض

ارزیابی عددی تأثیر اساس مسلح شده با ژئوسل بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی ...

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} = [D]_{6 \times 6} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

که در این رابطه σ_{ij} و ε_{ij} تنشها و کرنش های تانسور تنش و ماتریس $[D]$ ماتریس سختی است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$D = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix}$$

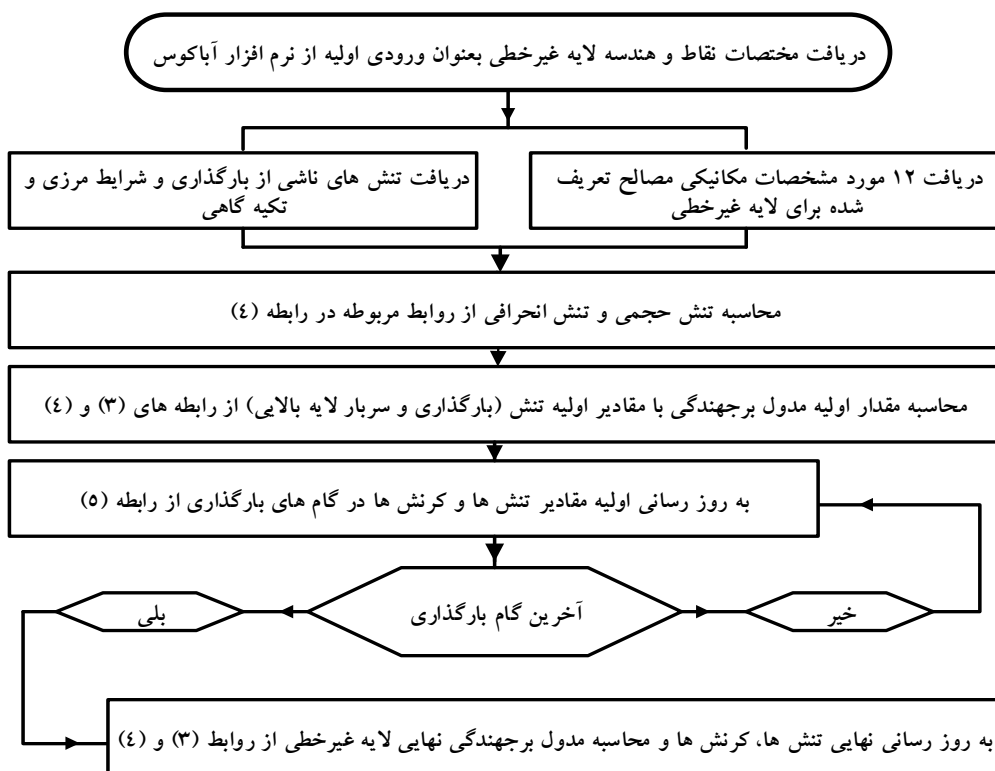
در ماتریس سختی پارامترهای (λ) و (μ) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6)$$

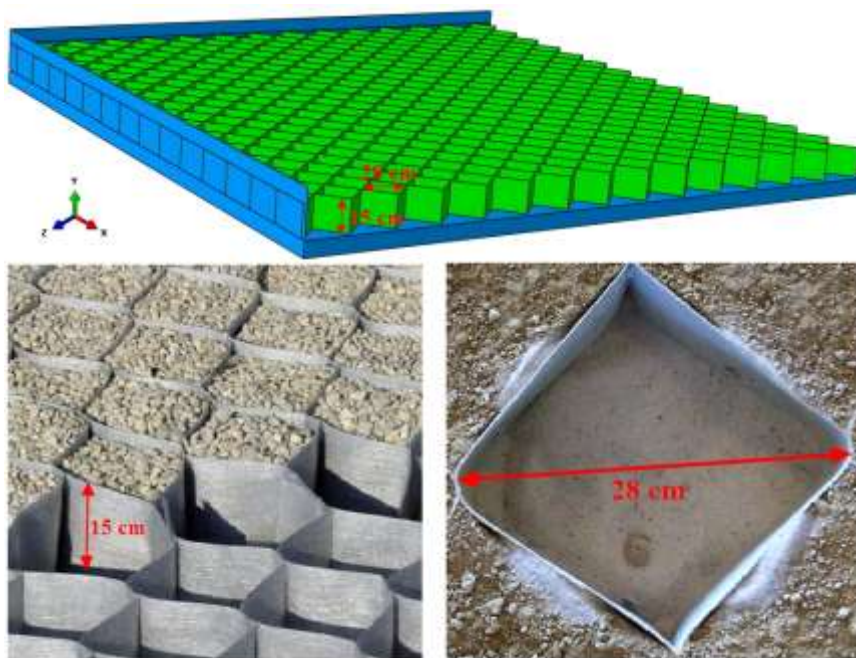
$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G \quad (7)$$

که در این روابط E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسن و G مدول برشی است.

کمک ساپروتین در شکل ۳ نشان داده شده است. عملکرد ساپروتین در دو قسمت خلاصه می شود. در قسمت اول مقادیر اولیه ورودی‌ها از نرم افزار گرفته می شود. در مرحله دوم مقادیر اولیه در کد قرار می گیرند و متغیرهای مربوطه در صورت نیاز اصلاح می شوند؛ و در نهایت بعد از همگرایی پاسخهای نهایی محاسبه خواهند شد. برای مدلسازی رفتار غیرخطی مصالح نیاز است تا ۱۲ ورودی به برنامه معرفی شوند. ورودی اول نوع مدل مصالح سنگدانه‌ای است که می تواند به صورت مدل دوخطی یا مدل آزان باشد. ورودی دوم ضریب پواسن مصالح سنگدانه‌ای است. ورودی سوم، چهارم و پنجم به ترتیب ضرایب K_2 ، K_1 و K_3 مربوط به مصالح سنگدانه‌ای هستند. ورودی ششم تنش ناشی از وزن سربار^{۱۵} لایه‌های فوقانی است که برابر با مجموع حاصل ضرب وزن مخصوص لایه‌های فوقانی در ضخامت هر یک از این لایه‌ها است. ورودی هفتم ضریب K_0 یا ضریب فشار خاک در حالت سکون است. ورودی هشتم وزن مخصوص مصالح لایه با رفتار غیرخطی است. ورودی نهم و دهم به ترتیب حد پایین و مقدار اولیه برای مدول برجهنگی لایه با رفتار غیرخطی است. ورودی یازدهم مختصات بالاترین نقطه لایه با رفتار غیرخطی است و ورودی دوازدهم ضریب K_4 برای مدل سازی مدل دوخطی در صورت استفاده است. رابطه بین تنش و کرنش در مصالح سنگدانه‌ای در مدل سازی المان محدود به صورت رابطه (۵) بیان می گردد.



شکل ۳. فرایند مدل سازی رفتار غیر خطی مصالح سنگدانه ای از طریق سابروتین توسعه داده شده.



شکل ۴. تصویر مدفون شدگی ژئوسل در لایه اساس سنگدانه ای با ابعاد مورد استفاده در مدل سازی ژئوسل بر اساس ابعاد واقعی.

محاسبه شده و همچنین ثابت های روابط **Uzan** و **Bilinear** مدول برجهندگی مصالح غیرخطی اساس و بستر در اولین گام بارگذاری، به کمک روابط (۳) و (۴) محاسبه می شود. در گام

در محاسبه مدول برجهندگی از طریق سابروتین نویسی ابتدا مقادیر تنش و کرنش در یک گام بارگذاری از رابطه (۵) محاسبه می گردد و پس از محاسبه σ_d و θ با مقادیر تنش و کرنش

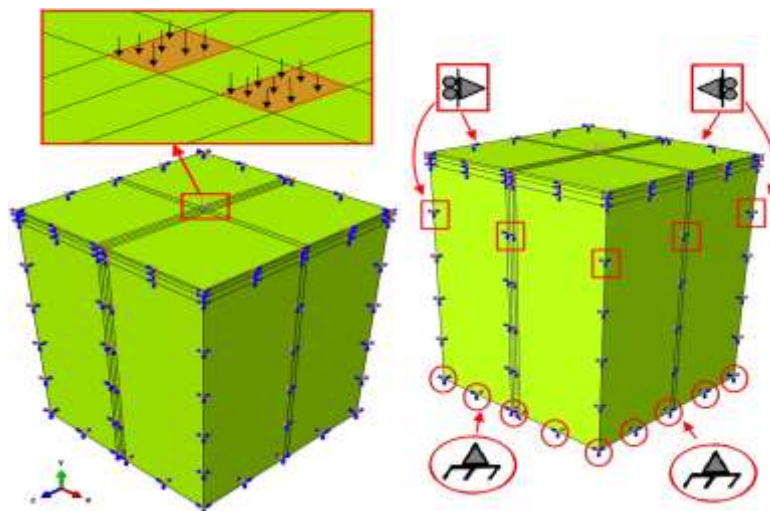
۴-۴ بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی

بارگذاری انجام شده از نوع بار محور هم‌ارز استاندارد ۸/۲ تنی در نظر گرفته شد. بارگذاری محور استاندارد در دو سطح با طول ۲۳ سانتیمتر و عرض ۱۶ سانتیمتر بافاصله مرکز به مرکز دو سطح به فاصله ۳۴/۲۹ سانتیمتر انجام گرفته است. بر اساس محور ۸/۲ تنی استاندارد هر یک از دو سطح دارای تنش معادل ۵۵۷ کیلو پاسکال خواهد بود. تنش‌های وارده به صورت بارگذاری یکنواخت استاتیکی به سطوح وارد شده است. بارگذاری وارده در پانزده گام زمانی و در زمان کل یک ثانیه اعمال گردید. حداکثر گام زمانی برابر با ۰/۱ ثانیه و حداقل گام زمانی برابر با ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. ابعاد سطح بالایی و زیرین مدل روسازی با رعایت اصول مدل‌سازی یک مربع به ضلع ۹ متر انتخاب شد. ارتفاع مدل نیز ۱۵/۱۲ متر در نظر گرفته شد. شرایط تکیه‌گاهی در نظر گرفته شده در قسمت زیرین مدل روسازی به صورت گیردار و در چهار طرف جانبی مدل به صورت تکیه‌گاه غلتکی باقابلیت حرکت در راستای قائم است. تصویر بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی در نظر گرفته شده در شکل ۵ ملاحظه می‌گردد.

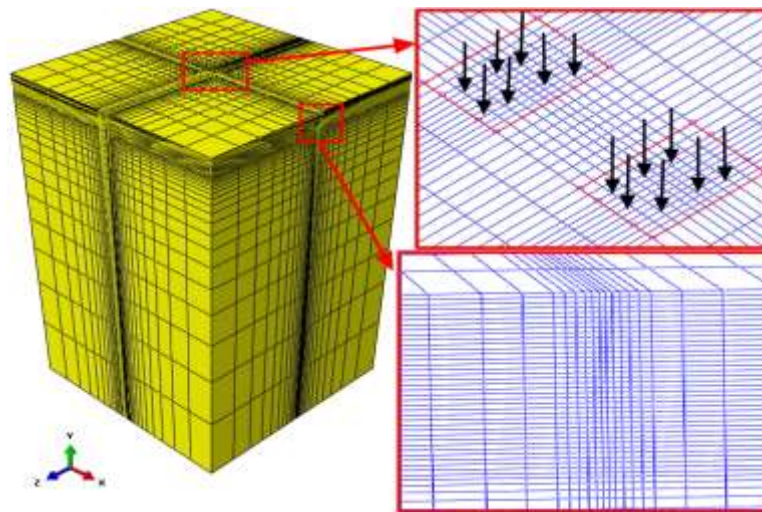
دوم بارگذاری مدوله‌ای محاسبه شده در مرحله اول در روابط (۶) و (۷) جایگزین می‌گردد و این فرایند تا گام ۱۵ بارگذاری انجام می‌گیرد و در پایان مدول برجهندگی و تنش و کرنش‌های نهایی با همگرایی پاسخ‌ها محاسبه می‌شود.

۴-۳ اندرکنش بین ژئوسل و مصالح سنگدانه‌ای

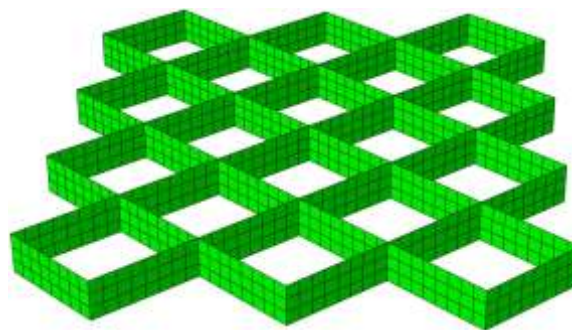
در این تحقیق اندرکنش بین ژئوسل و مصالح سنگدانه‌ای اساس به صورت مدفون^{۱۶} در نظر گرفته شد که با ابعاد واقعی مدل‌سازی انجام گرفته در شکل ۴ نشان داده شده است. در حقیقت ژئوسل در داخل مصالح سنگدانه‌ای مدفون می‌شود و با لایه‌های بالا و پایین ارتباط مدفون‌شدگی نخواهد داشت. عملکرد مدفون‌شدگی بدین صورت است که ژئوسل به عنوان جسم مدفون و لایه اساس سنگدانه‌ای نیز به عنوان لایه میزبان^{۱۷} در نظر گرفته می‌شود. این عملکرد با انجام آزمایش میدانی بر روی ژئوسل به اثبات رسیده است، به طوری که نتایج میدانی و مدل‌سازی عددی ژئوسل در لایه اساس سنگدانه‌ای به عنوان جسم مدفون باهم کاملاً تطابق داشتند. همچنین مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای ژئوسل به صورت الاستیک خطی است [FHWA, 2015].



شکل ۵. تصویر بارگذاری و شرایط مرزی و تکیه‌گاهی مدل‌سازی روسازی در آباکوس



شکل ۶. مش بندی انجام شده در مدل سازی روسازی



شکل ۷. مش بندی انجام شده در مدل سازی ژئوسل

مدل ادامه پیدا می کند. ابعاد بزرگترین چشمه مش بندی ۱۹۰ برابر ابعاد کوچکترین چشمه مش بندی در نظر گرفته شد. چشمه های مش بندی در ژئوسل دارای ابعاد ۳/۵ سانتیمتری در طول و عرض و ۵ سانتیمتری در ارتفاع هستند. در مدل سازی روسازی تعداد المان های مش بندی ۱۸۵-۱۶۵ هزار المان و در مدل سازی ژئوسل تعداد المان ۳۶-۳۲ هزار المان در نظر گرفته شد. در شکل های ۶ و ۷ نمونه ای از مش بندی مدل روسازی و ژئوسل ملاحظه می گردد.

۵. اعتبارسنجی مدل سازی روسازی

۱-۵ اعتبارسنجی مدل سازی با برنامه های
KENLAYER و MICHPAVE

۴-۵ مش بندی مدل سازی روسازی و ژئوسل

در مدل سازی صورت گرفته در طول و عرض سطوح محل بارگذاری و نیز فاصله بین دو سطح بارگذاری، ابعاد چشمه مش ها ۲/۵-۱/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در سطح بالایی و زیرین مدل که به صورت سطوح مربعی هستند ۱۲ چشمه مش بندی در نظر گرفته شده است که از لبه های سطح بارگذاری تا نقاط انتهایی مدل ادامه دارند. ابعاد چشمه ها در این قسمت بدین صورت است که اندازه بزرگترین چشمه در نقاط انتهایی ۳۰ برابر ابعاد کوچکترین اندازه چشمه در لبه کناری بارگذاری است. در مش بندی لایه های رویه آسفالتی، اساس و زیراساس، چشمه های مش بندی در راستای ارتفاع مدل دارای ابعاد ۱/۶۶ سانتیمتری است. مش بندی لایه خاک بستر شامل ۳۰ چشمه است که از سطح زیرین لایه زیراساس تا نقطه انتهایی

۲-۵ اعتبارسنجی مدل‌سازی با نتایج میدانی

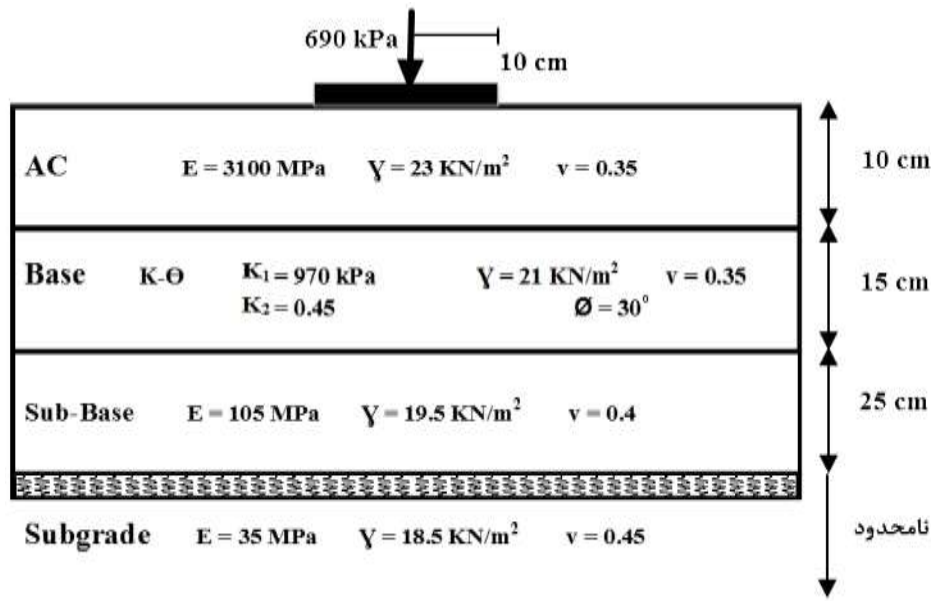
در ادامه صحت سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با یک نمونه روسازی اجرا شده در ایالت جورجیای آمریکا در شهر آتلانتا^{۱۸} که در شرایط آزمایشگاهی ساخته شده است، مقایسه می‌گردد. نمونه آزمایشگاهی ساخته شده توسط توتاملار در دانشگاه تکنولوژی جورجیا^{۱۹} در سال ۱۹۹۵ است.

مقطع ساخته شده تحت اثر بار دایره‌ای با تنش یکنواخت ۶۹۰ کیلو پاسکال به شعاع تماس ۱۱/۶ سانتیمتری قرار گرفته است. مقطع ساخته شده توسط توتاملار دارای سه لایه رویه آسفالتی با ضخامت ۸/۹ سانتیمتر، اساس سنگدانه‌ای با ضخامت ۲۰/۳ سانتیمتر و بستری با ضخامت ۱۲۷ سانتیمتر بود. مقادیر پاسخ‌های بحرانی در سطح روسازی، زیر لایه آسفالتی و روی خاک بستر به صورت میدانی و نصب کرنش سنج در بدنه روسازی اندازه‌گیری شد [Tutumluer, 1995].

جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS بار دایره‌ای به سطح معادل مستطیلی به طول ۲۴ سانتیمتر و عرض ۱۷ سانتیمتر تبدیل گردید. محور شبیه‌سازی شده دارای وزن ۵/۸ تن است. ضخامت‌های لایه‌های مقطع به ترتیب شامل ۸/۹ سانتیمتر رویه آسفالتی، ۲۰/۳ سانتیمتر اساس سنگدانه‌ای و ۱۲۷ سانتیمتر خاک بستر است که بر روی سطح صلب بتنی اجرا شده‌اند. ابعاد مدل مورد نظر در سطح به صورت یک مربع با اضلاع ۹/۲۸ متر و ارتفاع ۱۵۳/۲ سانتیمتر است. همچنین جهت مدل‌سازی عددی، رفتار لایه آسفالت به صورت الاستیک خطی، اساس سنگدانه‌ای به صورت الاستیک غیرخطی با مدل Uzan و خاک بستر به صورت الاستیک غیرخطی با مدل Bilinear در نظر گرفته شد. مقطع روسازی به همراه مشخصات مصالح در شکل ۹ داده شده است. مقادیر پارامترها همانند آنچه در تحقیق توتاملار برای اعتبارسنجی نتایج برنامه GTPAVE بکار رفته بودند، انتخاب شد [Tutumluer, 1995]. مش‌بندی انجام شده نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی در جدول ۲ آورده شده است.

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی‌های انجام گرفته ابتدا یک نمونه از روسازی در سه نرم‌افزار ABAQUS، KENLAYER و MICHPAVE مدل‌سازی و نتایج آن‌ها باهم مقایسه شد. همچنین برنامه MICHPAVE جزو نرم‌افزارهایی است که امکان تحلیل غیرخطی روسازی به روش المان محدود با تقارن محوری را فراهم می‌سازد. به منظور اعتبارسنجی تحلیل غیرخطی روسازی در نرم‌افزار ABAQUS، یک مقطع روسازی مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شد و در سه نرم‌افزار مدل‌سازی گردید. ابعاد مدل در سطح یک مربع با طول ضلع ۸ متر و ارتفاع ۱۴ متر است و ارتفاع لایه‌ها مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شده است. لایه بستر به صورت نامحدود در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی لایه اساس سنگدانه‌ای از مدل $K-\Theta$ با ضرایب K_1 و K_2 به ترتیب ۹۷۰ کیلو پاسکال و ۰/۴۵ استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های صورت گرفته در سه نرم‌افزار ذکر شده برای سه پارامتر مهم افت و خیز سطح روسازی (Δ)، کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی (ϵ_f) و کرنش قائم روی بستر (ϵ_z) در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به جدول ۱ و محدوده مناسب مقادیر به دست آمده برای هر پارامتر در سه نرم‌افزار می‌توان به این نتیجه رسید که مدل‌سازی به درستی انجام گرفته است. اندازه اختلاف مقادیر محاسبه شده در ABAQUS نسبت به KENLAYER و MICHPAVE در افت و خیز سطح روسازی به ترتیب ۳/۹ و ۰/۹ درصد، برای کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی به ترتیب ۳/۵ و ۰/۱ درصد و برای کرنش قائم روی بستر به ترتیب ۲/۷ و ۱/۹ درصد محاسبه شده است. همچنین از نکات قابل توجه در مقادیر این جدول مطابقت مناسب پاسخ‌های دو نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و MICHPAVE است. نزدیکی پاسخ‌های این دو نرم‌افزار به نحوی تأییدکننده صحت شرایط در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی و صحت مدل‌سازی غیرخطی مصالح اساس سنگدانه‌ای با استفاده از سابروتین توسعه داده شده است. مش‌بندی مدل ساخته شده نیز طبق الگوی معرفی شده در قسمت (۴-۵) انجام گرفته است.

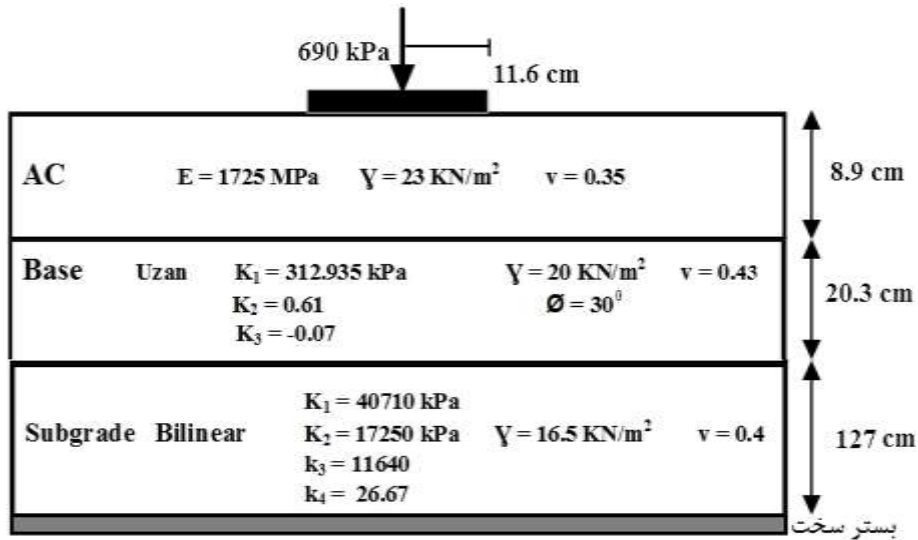
علیرضا غنی زاده، فرهاد قادری، حکیمه عباسلو



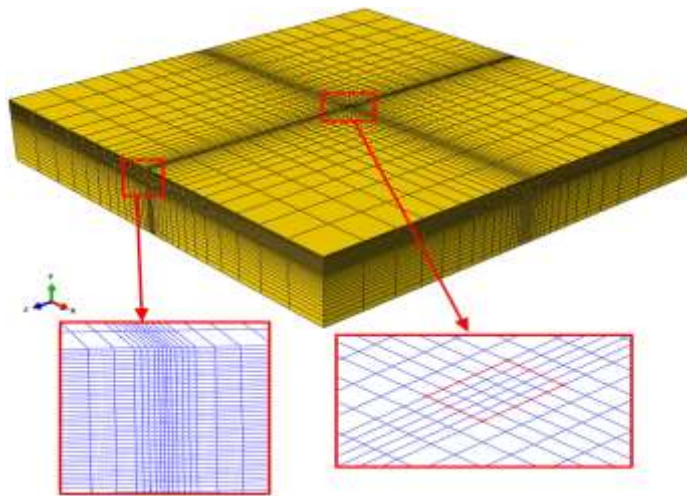
شکل ۸. مقطع روسازی مورد استفاده جهت اعتبارسنجی با برنامه‌های MICHPAVE و KANLAYER

جدول ۱. نتایج اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده با برنامه‌های MICHPAVE و KENLAYER

برنامه / پارامتر	Δ (mm)	ϵ_r (micro)	ϵ_z (micro)
ABAQUS	۰/۰۵۵۳	۲۸۴/۶	۴۴۰/۳
KENLAYER	۰/۰۵۳۱	۲۷۴/۴	۴۲۸
MICHPAVE	۰/۰۵۵۸	۲۸۵	۴۴۹



شکل ۹. مقطع و مشخصات مکانیکی روسازی مورد استفاده در اعتبارسنجی میدانی [Tutumluer, 1995].



شکل ۱۰. مش بندی انجام گرفته در مدل سازی جهت اعتبارسنجی

جدول ۲. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل سازی المان محدود روسازی با داده‌های میدانی.

ϵ_z (micro)	ϵ_r (micro)	Δ (mm)	پاسخ / پارامتر
۹۳۶	۳۳۰	۰/۰۷۱۱۲	نتایج میدانی (Tutumluuer, 1995)
۹۹۴/۱	۳۵۷	۰/۰۶۲۹۱	ABAQUS
۵/۸۴	۷/۵۶	۱۱/۵	درصد خطا

زیراساس با H_{SB} نشان داده شده است. مدل‌های اول، دوم و سوم غیرمسلح و مدل‌های چهارم، پنجم و ششم با اساس مسلح شده با ژئوسل هستند. لایه‌های اساس و زیراساس به صورت غیرخطی با مدل غیرخطی Uzan مدل سازی شده‌اند. ضرایب مربوط به مدل سازی غیرخطی لایه اساس و زیراساس که بر اساس آزمایش سه محوری تکراری به دست آمده است که بر اساس تحقیق (Kim, Tutumluuer and Kwon, 2009) در نظر

گرفته شده است در جدول ۵ نشان داده شده است.

ژئوسل به صورت الاستیک خطی مدل سازی شده است. مشخصات هندسی ژئوسل بر اساس محصولات تولیدی دارای ارتفاع ۱۵ سانتیمتر و با قطر چشمه ۲۸ سانتیمتری به صورت مربعی است. ضخامت دیواره‌های ژئوسل نیز ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [Leshchinsky and Ling, 2013, Emersleben and Meyer, 2014, FHWA, 2015].

اندازه اختلاف مقادیر محاسبه شده در نرم افزار ABAQUS نسبت به نتایج میدانی در افت و خیز سطح روسازی ۱۱/۵ درصد، در کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی ۷/۵۶ درصد و در کرنش قائم روی بستر ۵/۸۴ درصد محاسبه شده است. اختلاف ۱۱/۵ درصدی در نتایج پارامتر افت و خیز سطح نیز مربوط به تفاوت بارگذاری مورد آزمایش با بارگذاری مورد استفاده در مدل سازی است (بارگذاری دایره‌ای در مقایسه با بارگذاری مستطیلی).

۶. مشخصات هندسی و فیزیکی مصالح بکار

رفته در مدل سازی

در مدل سازی روسازی سه هندسه مختلف در حالت مسلح شده و غیرمسلح بکار رفته است. مشخصات فیزیکی و رفتاری مصالح بکار رفته در مدل سازی در جدول ۳ و مشخصات هندسی مقاطع در جدول ۴ قابل ملاحظه است. در این جدول‌ها ضخامت رویه آسفالتی با H_{AC} ، ضخامت اساس سنگ‌دانه‌ای با H_{BS} و ضخامت

جدول ۳ مشخصات فیزیکی و رفتاری مصالح بکار رفته در مدل‌سازی روسازی

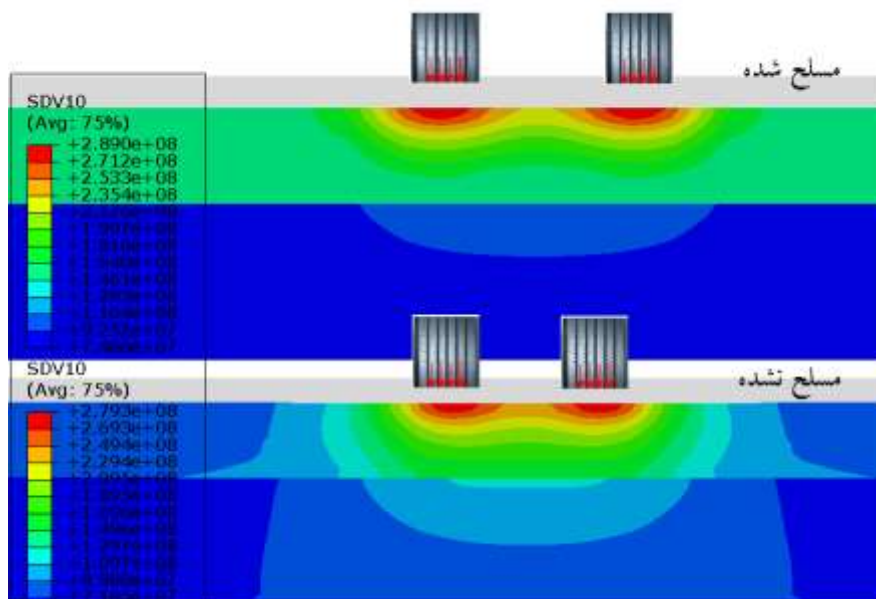
مدل رفتاری	وزن مخصوص kg/m^3	ضریب پواسن	مدول الاستیسیته MPa	لایه
الاستیک خطی	۲۳۲۵	۰/۳۵	۳۱۰۰	رویه آسفالتی
الاستیک غیرخطی	۲۱۶۰	۰/۳۵	Uzan	اساس سنگدانه‌ای
الاستیک غیرخطی	۲۰۰۰	۰/۴	Uzan	زیراساس
الاستیک خطی	۱۸۲۵	۰/۴	۴۰	بستر
الاستیک خطی	۲۰۰۰	۰/۴۵	۵۰۰	ژئوسل

جدول ۴. مشخصات هندسی بکار رفته در مدل‌سازی روسازی

مدل / ضخامت	H_{CTB} (cm)	H_{BS} (cm)	H_{AC} (cm)
1	۲۵	۱۵	۵
2	۲۵	۱۵	۱۰
3	۲۵	۱۵	۱۵
1-geocell	۲۵	۱۵	۵
2-geocell	۲۵	۱۵	۱۰
3-geocell	۲۵	۱۵	۱۵

جدول ۵. ضرایب مدل Uzan برای مدل‌سازی غیرخطی مصالح سنگدانه‌ای (Kim, Tutumluer & Kwon, 2009)

مصالح / ضریب	K_1 (kPa)	K_2	K_3
اساس	۲۰۰	۰/۶۴	-۰/۰۶۵
زیراساس	۶۰۰	۰/۴۵	۰



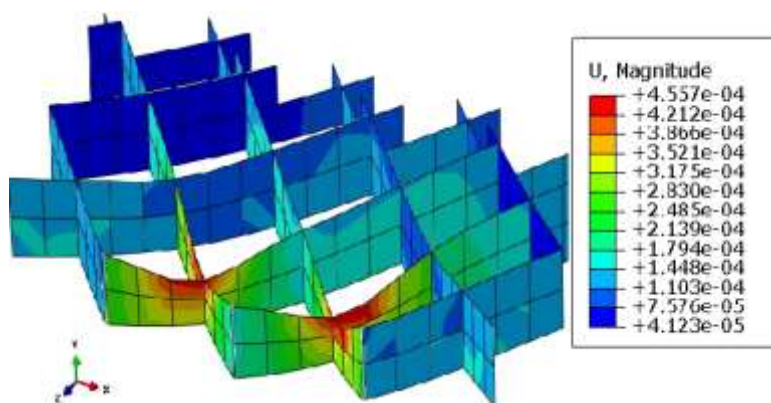
شکل ۱۱. تأثیر مسلح‌سازی بر مدول برجهنگی در لایه اساس در مدل ۱ با رویه آسفالتی به ضخامت ۵ سانتیمتر.

۷. نتایج و تفسیر آن‌ها

سنگ‌دانه‌ای افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش یافتن مدول لایه اساس سبب بهبود توزیع تنش قائم وارده به بستر روسازی و کاهش متناظر کرنش قائم در سطح بستر می‌شود. همچنین با بالا رفتن سختی لایه اساس و کاهش افت‌وخیز در سطح روسازی کرنش کششی در تار پایین لایه آسفالتی کاهش می‌یابد که در نتیجه آن ترک‌خوردگی رویه آسفالتی کاهش می‌یابد. تأثیر دیگر ژئوسل بهبود عملکرد لایه اساس سنگ‌دانه‌ای در حالتی است که این لایه در کشش قرار می‌گیرد. ژئوسل ظرفیت کششی بسیار بالایی دارد و مصالح سنگ‌دانه‌ای با قرار گرفتن در داخل سلول‌های آن در کشش عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

با مدل‌سازی صحیح در نرم‌افزار، رفتار ژئوسل در لایه اساس سنگ‌دانه‌ای باید به‌گونه‌ای باشد که در هنگام اعمال بارگذاری در داخل لایه‌های بالا و پایین فرو نرود. در مدل‌سازی ژئوسل به‌صورت مدفون در لایه اساس سنگ‌دانه‌ای از لغزش بین ژئوسل و لایه اساس صرف‌نظر شده است. در واقع رفتار ژئوسل باید تابع رفتار لایه اساس سنگ‌دانه‌ای باشد. بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی، ژئوسل در پارامترهای بررسی‌شده رفتاری قابل توجهی در لایه اساس سنگ‌دانه‌ای دارد. به‌عنوان نمونه، رفتار ژئوسل در افت و خیز سطح در شکل ۱۲ نشان داده شده است. قسمت‌های با تغییر مکان زیاد که با رنگ قرمز مشخص شده است نواحی زیر قسمت بارگذاری است. عملکرد مدفون‌شدگی ژئوسل باید تابع لایه میزبان باشد. تغییر مکان‌های ژئوسل تابع لایه اساس سنگ‌دانه‌ای است. در این پژوهش تأثیر مسلح‌سازی بر پاسخ‌های بحرانی سه پارامتر اصلی افت‌وخیز سطح روسازی، کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی و کرنش فشاری قائم روی خاک بستر بررسی می‌گردد. افت‌وخیز سطح مجموع کرنش‌های الاستیک لایه‌های روسازی است. با مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای پاسخ‌های حداکثر افت‌وخیز سطح روسازی در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت رویه در مدل اول ۱۰/۲۸ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت در مدل دوم ۵/۸ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت در مدل سوم ۵ درصد کاهش

اولین تأثیر ژئوسل در مسلح‌سازی روسازی بالا بردن مدول برجهنگی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای است. تأثیر مسلح‌سازی در افزایش مدول برجهنگی در لایه اساس سنگ‌دانه‌ای در شکل ۱۱ برای مدل ۱ (مسلح نشده) و 1-geocell (مسلح شده) نشان داده شده است. همچنین با توجه به شکل ۱۱ ناحیه با بیشترین مدول برجهنگی که با رنگ قرمز مشخص است در حالت وجود ژئوسل سطح بیشتری را به خود اختصاص داده است. بیشترین مقدار محاسبه‌شده برای مدول برجهنگی در حالت مسلح شده ۳/۳۵ درصد و کمترین مقدار محاسبه‌شده ۳/۷۶ درصد بالاتر از حالت مسلح نشده است. در حالت مسلح شده تأثیر تنش فشاری چرخ در لایه زیراساس به علت مسلح‌سازی لایه اساس کمتر می‌شود. ناحیه تأثیر تنش‌های بارگذاری در مقطع عرضی روسازی در حالت مسلح شده به علت بالا رفتن تحمل لایه اساس که در نتیجه افزایش سختی این لایه است کمتر از حالت غیرمسلح است. با مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای، این لایه به‌صورت یکپارچه عمل می‌کند و به علت بالا رفتن ظرفیت کششی این لایه، مدول برجهنگی در کل ناحیه مسلح شده بیشتر از حالت غیرمسلح است. عمق تأثیر تنش‌های بارگذاری در حالت غیرمسلح بیشتر از حالت مسلح است. با مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای تنش‌های وارده لایه‌های زیرین را کمتر تحت تأثیر قرار داده و بدین ترتیب تمرکز تنش در لایه‌های زیرین نسبت به حالت غیرمسلح کمتر است. سختی مصالح لایه اساس سنگ‌دانه‌ای وابسته به تنش اعمالی است. این ویژگی مصالح سنگ‌دانه‌ای باعث می‌شود که با اعمال بار قائم بر سطح مصالح سنگ‌دانه‌ای فرار جانبی رخ دهد. اولین و اصلی‌ترین سازوکار ژئوسل محدود کردن مصالح دانه‌ای در طی بارگذاری است که فرار جانبی مصالح از زیر بارگذاری را محدود می‌کند. با کنترل فرار جانبی مصالح از آنجایی که سختی مصالح سنگ‌دانه‌ای وابسته به تنش اعمالی است، مدول برجهنگی مصالح لایه اساس



شکل ۱۲. رفتار ژئوسل در افت و خیز سطح تحت بارگذاری در لایه اساس سنگ‌دانه‌ای با بزرگنمایی ۶۰۰ برابری تغییر شکل‌ها.

به شکل در این پارامتر نیز تأثیر مسلح‌سازی در مقاطع ضعیف‌تر بیشتر است.

در ادامه با روابط تجربی ارائه‌شده توسط انستیتو آسفالت تأثیر مسلح‌سازی در افزایش عمر خستگی آسفالت و شیارشدگی بستر بررسی می‌شود. رابطه تجربی ارائه‌شده توسط انستیتو آسفالت برای خستگی لایه آسفالتی به شکل زیر است [Asphalt Institute, 1982]

$$N_f = 0.0796(\epsilon_t)^{-3.291}(E^*)^{-0.851} \quad (8)$$

که در رابطه N_f تعداد محور $8/2$ تنی استاندارد عبوری تا خرابی خستگی، E^* مدول دینامیک لایه آسفالت برحسب ϵ_t و ψ کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی است.

رابطه تجربی ارائه‌شده توسط انستیتو آسفالت برای شیارشدگی به شکل زیر است [Asphalt Institute, 1982]

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9}(\epsilon_c)^{-4.477} \quad (9)$$

که در این رابطه N_d تعداد محور $8/2$ تنی استاندارد عبوری تا خرابی شیارشدگی بستر و ϵ_c کرنش فشاری قائم روی خاک بستر است. برای بررسی تأثیر مسلح‌سازی ژئوسل در افزایش عمر روسازی، پاسخ‌های حداکثر کرنش‌ها در تار پایین لایه آسفالتی و روی خاک بستر جهت انجام محاسبات در روابط ۸ و ۹ استفاده می‌شود و مقادیر N_d و N_f در مقاطع باهم مقایسه گردید.

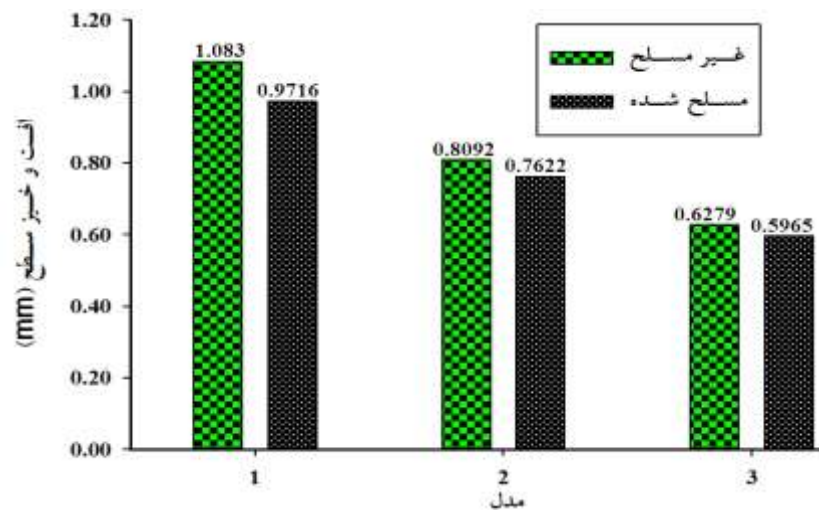
می‌یابد. پاسخ‌های حداکثر افت و خیز سطح در حالت مسلح و غیرمسلح در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد

با توجه به شکل ۱۳ مشخص می‌شود که تأثیر مسلح‌سازی در مقاطع ضعیف‌تر که ضخامت آسفالت کمتری دارند بیشتر از مقاطع قوی‌تر با ضخامت آسفالت بالاتر است.

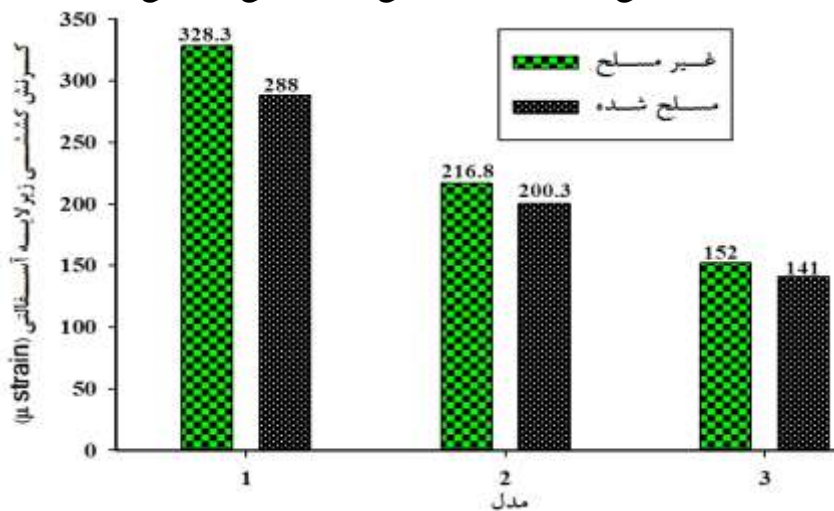
کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی به‌عنوان معیاری جهت کنترل ترک خستگی در نظر گرفته می‌شود. با مسلح‌سازی لایه اساس در روسازی، حداکثر کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت ۱۲/۲۴ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت ۷/۶۱ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۷/۱۵ درصد کاهش می‌یابد. پاسخ‌های حداکثر کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت در حالت‌های مسلح شده و مسلح نشده در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل تأثیر بیشتر مسلح‌سازی در مقاطع ضعیف‌تر بیشتر است.

کرنش فشاری قائم روی خاک بستر به‌عنوان معیار شیارشدگی بستر در نظر گرفته می‌شود. اهمیت این پارامتر قابلیت تبدیل آن به کرنش پلاستیک جهت بررسی شیارشدگی مقطع روسازی است. با مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای پاسخ‌های حداکثر کرنش فشاری قائم روی خاک بستر در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت رویه ۹/۱۹ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت رویه ۵/۷۴ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۵/۱ درصد کاهش می‌یابد. پاسخ‌های حداکثر کرنش فشاری قائم در حالت مسلح و غیرمسلح در شکل ۱۵ قابل ملاحظه است. با توجه

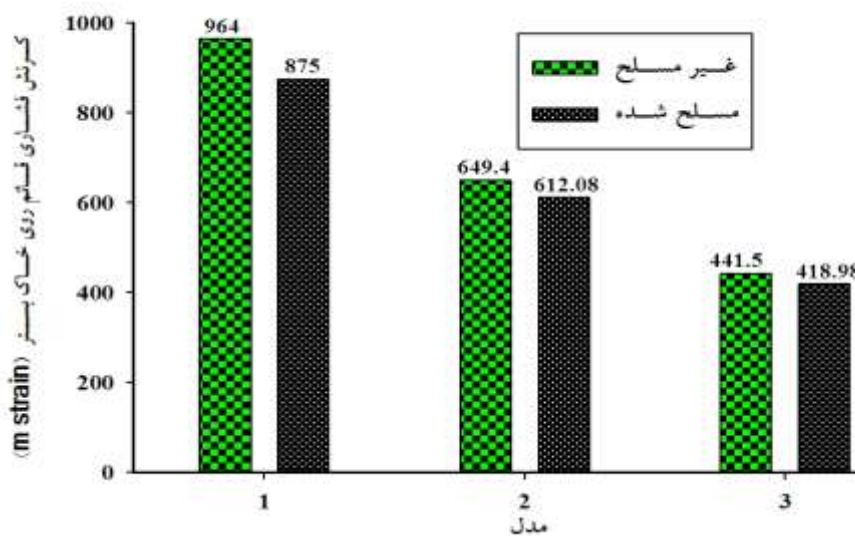
ارزیابی عددی تأثیر اساس مسلح شده با ژئوسل بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی ...



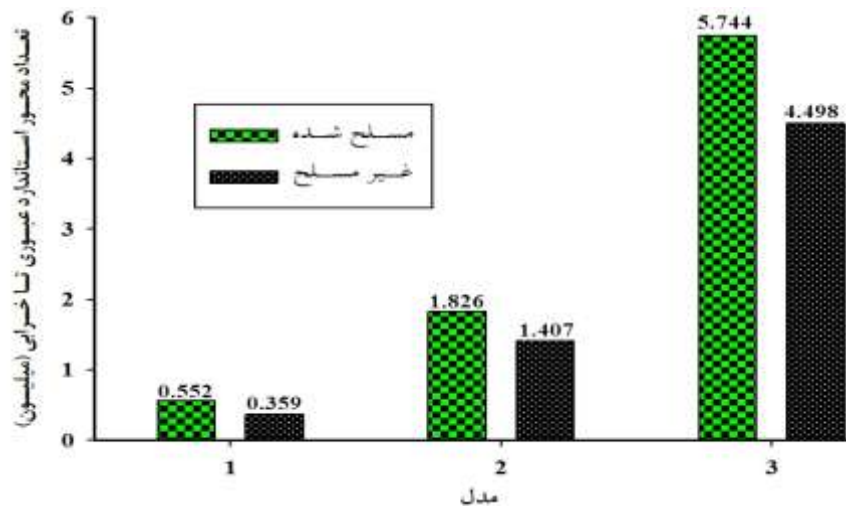
شکل ۱۳. پاسخ‌های حداکثر افت و خیز سطح در حالت مسلح و غیرمسلح



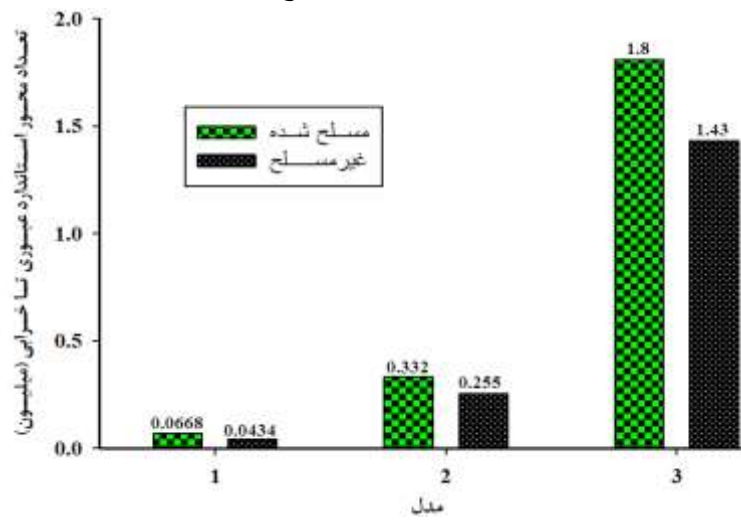
شکل ۱۴. پاسخ‌های حداکثر کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی در حالت مسلح و غیرمسلح



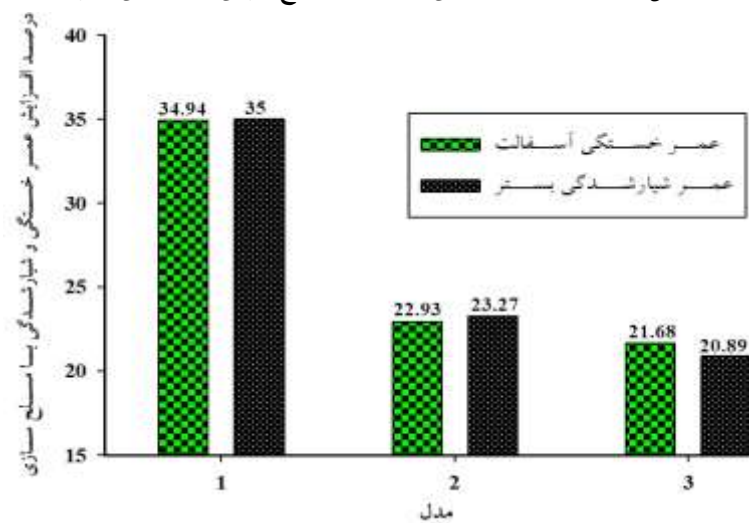
شکل ۱۵. پاسخ‌های حداکثر کرنش فشاری قائم روی خاک بستر در حالت مسلح و غیرمسلح



شکل ۱۶. تعداد محور ۸/۲ تنی استاندارد تا وقوع خرابی خستگی آسفالت



شکل ۱۷. تعداد محور ۸/۲ تنی استاندارد تا وقوع خرابی شیارشدگی بستر



شکل ۱۸. درصد افزایش عمر خستگی آسفالت و شیارشدگی بستر با مسلح سازی لایه اساس با ژنوسل

ارزیابی عددی تأثیر اساس مسلح شده با ژئوسل بر افزایش عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی ...

۱- اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار المان محدود ABAQUS با دو برنامه KENLAYER و MICHPAVE نشان داد که نتایج افت‌وخیز سطح روسازی با نتایج این دو برنامه به ترتیب برابر با ۳/۹ و ۰/۹ درصد، اختلاف کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی با نتایج این دو برنامه به ترتیب برابر با ۳/۵ و ۰/۱ درصد و اختلاف کرنش فشاری قائم روی خاک بستر با نتایج این دو برنامه به ترتیب ۲/۷ و ۱/۹ درصد اختلاف دارد. پاسخ‌های به‌دست‌آمده تأیید کننده شرایط مناسب مدل‌سازی و سابروتین توسعه داده‌شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده پاسخ‌های برنامه المان محدود MICHPAVE با نرم‌افزار ABAQUS مطابقت بهتری نسبت به KENLAYER دارد.

۲- اندازه اختلاف مقادیر محاسبه‌شده در نرم‌افزار ABAQUS نسبت به نتایج میدانی در افت‌وخیز سطح روسازی ۱۱/۵ درصد، در کرنش قائم روی بستر ۷/۵۶ درصد و در تنش فشاری روی خاک بستر ۵/۸۴ درصد محاسبه شد.

۳- با توجه به رفتار لایه اساس سنگ‌دانه‌ای که به‌صورت غیرخطی است در صورت مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای، به دلیل محصورشدگی مصالح سنگ‌دانه‌ای و افزایش تنش‌های همه‌جانبه، سختی (مدول برجهنگی) این لایه نسبت به حالت غیرمسلح بیشتر خواهد بود،

۴- در صورت مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای، پاسخ‌های افت‌وخیز سطح روسازی در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت رویه در مدل اول ۱۰/۲۸ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت در مدل دوم ۵/۸ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت در مدل سوم ۵ درصد کاهش می‌یابد. تأثیر مسلح‌سازی در مقاطع ضعیف‌تر که ضخامت آسفالت کمتری دارند بیشتر از مقاطع قوی‌تر با ضخامت آسفالت بالاتر است.

به کمک روابط (۸) و (۹) تعداد محورهای استاندارد ۸/۲ تنی عبوری تا خستگی لایه آسفالت و شیارشدگی بستر در ۶ هندسه موجود محاسبه شد. درصد افزایش عمر خستگی آسفالت و شیارشدگی بستر با مقایسه تعداد محورهای ۸/۲ تنی استاندارد صورت گرفت. تعداد محور استاندارد عبوری تا وقوع خرابی خستگی آسفالت و شیارشدگی بستر در شکلهای ۱۶ و ۱۷ نشان داده‌شده است. درصد افزایش عمر خستگی آسفالت و شیارشدگی بستر با مسلح‌سازی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل خرابی در حالت مسلح و غیرمسلح با استفاده از رابطه ۸ مشخص گردید که با مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای با ژئوسل، عمر خستگی آسفالت در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت ۳۴/۹۴ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت ۲۲/۹۳ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۳۴/۹۴ درصد افزایش می‌یابد. درصد افزایش عمر شیارشدگی بستر در صورت مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای با ژئوسل در شکل ۱۸ قابل‌ملاحظه است. با استفاده از رابطه ۹ جهت محاسبه عمر شیارشدگی بستر روسازی مشخص شد که با مسلح‌سازی لایه اساس سنگ‌دانه‌ای با ژئوسل، عمر شیارشدگی بستر در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت ۳۵ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت ۲۳/۲۸ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۲۰/۸۹ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل خرابی مشخص گردید که در مقاطع ضعیف‌تر تأثیر مسلح‌سازی بیشتر است. در مدل اول با ۵ سانتیمتر آسفالت بیشترین مقدار افزایش عمر و در مدل با ۱۵ سانتیمتر آسفالت کمترین مقدار افزایش عمر را شاهد هستیم. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ بحرانی بودن خرابی شیارشدگی در مقابل خرابی خستگی آسفالت در مقاطع مورد بررسی مشخص می‌گردد.

۸. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به‌صورت زیر قابل بیان است:

۹. پی‌نوشت‌ها

- 1- Geosynthetic
- 2- Asphalt Institute
- 3- Al-Qadi
- 4- Hughes
- 5- Emresleben
- 6- Meyer
- 7- Rajagopal
- 8- Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
- 9- Resilient Modulus
- 10- Brown
- 11- Pappin
- 12- Uzan
- 13- Huang
- 14- Fortran
- 15- Overburden Stress
- 16- Embedded
- 17- Host Region
- 18- Atlanta
- 19- Georgia Tech

۱۰. مراجع

- Asphalt Institute. (1982) "Research and development of the asphalt institute's thickness design Manual (MS-1)", 9th ed, Research Report 82-2.
- Al-Qadi, I. and Hughes, J. (2000) "Field evaluation of geocell use in flexible pavements" TRR, Journal of the Transportation Research Board No. 1709, pp. 26-35.
- Al-Qadi, I. and Wang, H. (2011) "Prediction of tire-pavement contact stresses and analysis of asphalt pavement responses: a decoupled approach", Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 80, pp. 289-316.
- Al-Qadi, I. L. and Wang, H. (2009) "Full-depth pavement responses under various tire configurations: accelerated pavement testing and finite element modeling", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 78, pp. 721-760.

- ۵- کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی به‌عنوان معیاری جهت کنترل ترک خستگی بررسی می‌شود. با مسلح‌سازی لایه اساس در روسازی کرنش کششی تار پایین لایه آسفالتی در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت ۱۲/۲۴ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت ۷/۶۱ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۷/۱۵ درصد کاهش می‌یابد.
- ۶- کرنش فشاری قائم روی خاک بستر به‌عنوان معیار شیارشدگی بستر بررسی می‌شود. اهمیت این پارامتر قابلیت تبدیل آن به کرنش پلاستیک جهت بررسی شیارشدگی مقطع روسازی است. با مسلح‌سازی لایه اساس سنگدانه‌ای پاسخ-های کرنش فشاری قائم روی خاک بستر در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت رویه ۹/۱۹ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت رویه ۵/۷۴ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۵/۱ درصد کاهش می‌یابد.
- ۷- در صورت مسلح‌سازی لایه اساس سنگدانه‌ای با ژئوسل، عمر خستگی آسفالت در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت ۲۲/۹۳ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۳۴/۹۴ درصد افزایش می‌یابد.
- ۸- در صورت مسلح‌سازی لایه اساس سنگدانه‌ای با ژئوسل، عمر شیارشدگی بستر در ضخامت ۵ سانتیمتری آسفالت ۳۵ درصد، در ضخامت ۱۰ سانتیمتری آسفالت ۲۳/۲۸ درصد و در ضخامت ۱۵ سانتیمتری آسفالت ۲۰/۸۹ درصد افزایش می‌یابد.
- ۹- در مقاطع مورد بررسی خرابی شیارشدگی در مقابل خرابی خستگی آسفالت بحرانی تر است. بعلت مسلح‌سازی لایه اساس و بالا رفتن سختی این لایه و نرمی خاک بستر عمر خستگی آسفالت از شیارشدگی بستر بالاتر است.
- ۱۰- پاسخ‌های بدست آمده در مقاطع مسلح شده در محدوده پاسخ‌های بدست آمده در کارهای آزمایشگاهی FHWA، Kumar and Saride و Emersleben قرار می‌گیرد. مقایسه پاسخ‌های بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی در این سه مورد صحت مدلسازی انجام شده را نشان می‌دهد.

- Hedge, A. and Sitharam, T. (2015) "3-dimensional numerical analysis of geocell reinforced soft clay beds by considering the actual geometry of geocell pockets", *Geotech Journal of Engineering*, San Francisco (UCSF), pp. 1-37. From: www.nrcresearchpress.com.
- Hedge, A. (2017) "Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: A state-of-the-art review", *Construction and Building Materials*. Vol. 154, No. 17, pp. 658-674.
- Kim, M. (2007) "Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior", Ph. D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kim, M. and Tutumluer, E. (2006) "Modeling nonlinear, stress-dependent pavement foundation behavior using a general-purpose finite element program", *Pavement Mechanics and Performance*, Vol. 154, pp. 29-36.
- Kim, M., Tutumluer, E. and Kwon, J. (2009) "Nonlinear pavement foundation modeling for three-dimensional finite-element analysis of flexible pavements", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 9, No. 5, pp. 195-208.
- Kim, Y.-R., Ban, H. and Im, S. (2012) "Impact of truck loading on design and analysis of asphaltic pavement structures-Phase III", *Final Reports & Technical Briefs from Mid-America Transportation Center*.
- Kumar, V. and Saride, S. (2016) "Rutting behavior of geocell reinforced base layer overlying weak sand subgrades" *advances in transportation geotechnics*", The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, Vol. 143, pp. 1409-1416.
- Leshchinsky, B. and Ling, I. (2013) "Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 36, pp. 33-43.
- Brown, S. and Pappin, W. (1981) "Analysis of pavements with granular bases", *Transportation Research Record 810*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 17-23.
- Cortes, D. (2010) "Inverted base pavement structures", Ph. D. dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- Emersleben, A. and Meyer, M. (2014) "Sustainable pavement construction by the use of recycled glass", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 436-440.
- FHWA (2015) "Accelerated pavement testing of low-volume paved roads with geocell reinforcement", *Kansas State University Transportation Center*, KS-14-14.
- Ghanizadeh, A. R. and Ziaie, A. (2015) "NonPAS: A program for nonlinear analysis of flexible pavements", *International Journal of Integrated Engineering*, Vol. 7, No. 1. ISSN : 2229-838X
- Harichandran, S., Yeh, S. and Baladi, Y. (1990) "MICH-PAVE: A nonlinear finite element program for analysis of flexible pavements", *Transportation Research Record No. 1286*, pp. 123-137
- Hernandez, J. A., Gamez, A. and Al-Qadi, I. L. (2017) "Effect of wide-base tires on nationwide flexible pavement systems Numerical modeling", *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2590, pp. 104-112.
- Hicks, R. and Monismith, C. (1971) "Factors influencing the resilient response of granular materials " , *Highway Research Record*, No. 345, pp. 15-31.
- Huang, Y. H. (2004) "Pavement design and analysis", 2nd. edition, USA, Prentice Hall.

- آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران - نشریه شماره ۲۳۴ (۱۳۹۰) تجدیدنظر اول، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور.
- صدریان زاده، میثم (۱۳۸۳) "معرفی زمین‌پارچه‌ها و کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران"، یازدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، دی‌ماه ۱۳۸۳.
- طاهرخانی، حسن، مرادلو، امیرجواد. و جلالی جیرندهی، مسعود (۱۳۹۵) "بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با زمین‌پارچه با تحلیل ویسکوالاستیک به روش المان‌های محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، سال هشتم، شماره دوم، ص. ۳۴۲-۳۲۳.
- کوزه‌گران، سعید و علیایی، محمد (۱۳۹۴) "تحلیل عددی خاک‌ریزهای راه مسلح به ژئوسل و بررسی پارامترهای مؤثر در عملکرد سیستم تسلیح با ژئوسل"، مجله مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۱، شماره ۲، ص. ۱۳-۲۳.
- نیازخانی، الهه (۱۳۹۰) "نقش صنعت نساجی در کاهش هزینه‌های عمرانی شهرداری"، فصلنامه اقتصاد شهر، شماره ۱۰، ص. ۵۸-۴۷.
- Maheshwari, P. and Babu, S. (2016) "Nonlinear deformation analysis of geocell reinforcement in pavements", International Journal of Geomechanics, Vol. 40. pp. 144-161.
- Monismith, C. L., Hicks, R. G. and Salam, Y. (1971) "Basic properties of pavement components", Atlanta, Georgia.
- National Cooperative Highway Research Program 1-37A. (2014) "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures" Final Report, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Rajagopal, K., Chandramouli, S., Parayil, A., and Iniyan, K. (2014) "Studies on geosynthetic-reinforced road pavement structures", International Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 3, No. 8, pp. 287-298.
- Shifley, L. and Monismith, C. L. (1968) "Test road to determine the influence of subgrade characteristics on the transient deflections of asphalt concrete pavements", A Report of an Investigation, Soil Mechanics and Bituminous Materials Laboratory, University of California.
- Thompson, M. and Robnett, Q. (1979) "Resilient properties of subgrade soils", Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 105, No. TE1.
- Tutumluer, E. (1995) "Predicting behavior of flexible pavements with granular bases", Ph. D. dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Uzan, J. (1985) "Characterization of granular material", Transportation research record, Vol. 1022, No. 1, pp. 52-59.
- Witczak, M. and Uzan, J. (1988) "The universal airport design system," Report I of IV: Granular Material Characterization. Rep. to Department of Civil Engineering.

A Numerical Study on the Effect of Geocell Reinforced Base Layer on the Fatigue and Rutting Life of Flexible Pavements using Nonlinear Finite Element

A. Reza Ghanizadeh (Corresponding author), Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

H. Abbaslou, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

F. Qaderi, MSc. Student, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

Abstract

In the past few years, with the advances made in the production of geosynthetic products, the use of these products in the pavement reinforcement has increased dramatically. Among the geosynthetic products, geocell improves the performance of the pavement due to the proper 3D confining of aggregates materials inside its cells. In order to investigate the effect of base layer reinforced with the geocell, six different geometries with reinforced and unreinforced base layer were simulated in ABAQUS finite element software. The behaviour of aggregate base and subbase layers were considered nonlinear which is implemented in ABAQUS by a FORTRAN subroutine. In the next stage, the results of the ABAQUS program as well as FORTRAN subroutine were validated using the results of KENLAYER and MICHPAVE programs as well as a full scale test. The results showed that the results of the ABAQUS program are consistent with results of other programs and also with the results of the field test. According to this research, by reinforcement of base layer using geocell, the surface deflection responses decreases between 5 to 10.28%, the tensile strain responses at the bottom of the asphalt decreases between 7.15 to 12.24% and the vertical compression strain on the top of subgrade decreases between 5.1 to 9.19%. Also, the damage analysis was conducted based on the Asphalt Institute relations and results showed that the reinforcement of base layer increase asphalt fatigue life by 21.68-34.94% and subgrade rutting life by 20.89-35%.

Keywords: Geocel reinforcement, aggregate base, nonlinear finite element, fatigue life, rutting life

علیرضا غنی زاده، فرهاد قادری، حکیمه عباسلو

علیرضا غنی زاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-نقشه برداری را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران-ژئوتکنیک از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مصالح راهسازی، تحلیل و طراحی روسازی، محاسبات نرم و بهسازی خاک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی سیرجان است.



حکیمه عباسلو، درجه کارشناسی در رشته علوم و مهندسی خاک را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه شیراز و درجه کارشناسی ارشد در رشته علوم و مهندسی خاک در سال ۱۳۸۷ را از دانشگاه شیراز اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته علوم و مهندسی خاک از دانشگاه شیراز گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان کانی شناسی، ژئوشیمی، فیزیک و مکانیک خاک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی سیرجان است.



فرهاد قادری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه صنعتی سیرجان اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی و راه آهن است.

