

## مطالعه عددی اثر مسلح‌سازی بستر بر رفتار مقاطع تسلیح شده آزمایشی

### به روش اجزای محدود

عبدالحسین حداد\*، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

حامد خاکپور مقدم، دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه سمنان

Email: haddad@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۸/۰۵ - پذیرش: ۹۶/۰۲/۲۹

چکیده

یکی از روش‌های مناسب احداث سریع راه‌ها روی بسترهای ضعیف، استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک با هدف بهسازی خاک می‌باشد که در حال حاضر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به منظور شناخت هرچه بیشتر رفتار بسترهای مسلح شده و تبیین روش‌های طراحی مناسب برای آن‌ها، تاکنون آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی محدودی تحت شرایط بارگذاری ترافیکی واقعی برنامه‌ریزی و اجرا گردیده است. اما به علل مختلف، از جمله هزینه‌های زیاد آزمون‌های صحرایی و مشکلات اجرایی، انجام آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه است. به کمک روش‌های شبیه‌سازی عددی می‌توان مطالعات پارامتریک جامعی را در مورد عملکرد این‌گونه راه‌ها به انجام رساند و تأثیر عوامل مهم را مورد ارزیابی قرار داد. در این تحقیق، با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، عملکرد بستر راه مسلح‌شده با لایه‌های ژئوسنتتیک تحت اثر بار ترافیک عبوری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن به کمک داده‌های مطالعات میدانی اعتبارسنجی شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و مطالعات میدانی نشان می‌دهد که مدل عددی قابلیت پیش‌بینی رفتار یک سیستم مسلح شده با ژئوگرید را دارا می‌باشد و انطباق مناسبی بین نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی و پاسخ‌های مدل‌سازی عددی وجود دارد. نتایج بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که نشست راه با بستر مسلح شده به شدت تحت تأثیر خصوصیات مکانیکی مسلح‌کننده‌ها، از جمله سختی ژئوگرید، می‌باشد. به نحوی که با کاهش سختی ژئوگرید در حدود ۵۰٪، نشست سطح راه حدود ۶۱٪ افزایش می‌یابد. همچنین، تأثیر سختی مصالح اساس و بستر بر میزان نشست سطح راه در حالت بستر مسلح شده به میزان ۵۰٪ نسبت به بستر مسلح نشده کاهش می‌یابد. نتایج، افزایش ظرفیت ترافیک (TBR) به میزان ۲۶/۱۱ برابر را بر اثر تسلیح و تقویت مقطع با مسلح‌کننده قوی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ژئوگرید، راه با بستر مسلح، روش اجزای محدود، نشست

## ۱. مقدمه

دقیق رفتار و مکانیزم مسلح سازی پرداخته شود. استفاده از تحلیل شبه استاتیک در بارگذاری ترافیکی و جایگزین کردن آن به جای بارگذاری دینامیک کامل و اعمال اندرکنش دقیق با در نظر گرفتن پارامترهای مرتبط با آن که نزدیک به واقعیت بوده، برای خاک و مسلح کننده، از نوآوری های این تحقیق می باشد. در همین راستا، ابتدا مطالعات انجام شده و یک آزمون صحرایی در خصوص تأثیر مسلح سازی بر عملکرد راه احداث شده بر بستر نرم مورد بررسی قرار می گیرد. سپس، با شبیه سازی رفتار مقطع مسلح و غیر مسلح به روش اجزای محدود، مطالعات پارامتریک روی عواملی نظیر خصوصیات مکانیکی مسلح کننده، سختی لایه اساس و بستر و تأثیر آن در کاهش نشست و افزایش ظرفیت ترافیکی مقاطع راه انجام می گیرد.

## ۲. مروری بر مطالعات پیشین

آزمایش های مقیاس کامل شامل مطالعات صحرایی و میدانی می باشد که رفتار واقعی راه را شبیه سازی می کند. محققین زیادی در چند دهه اخیر با انجام آزمایش های میدانی اثر مسلح سازی در راه احداث شده بر بستر نرم را مورد بررسی قرار داده اند (پرکینز، ۲۰۰۲؛ القادی و همکاران، ۲۰۰۸؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۲؛ نیر و لاتا، ۲۰۱۵؛ هیلتون، ۲۰۱۷). برخی دیگر از محققین نیز به علت محدودیت های انجام آزمایش میدانی، به شبیه سازی عددی و گسترش مطالعه پارامتریک بستر مسلح پرداختند (پرکینز و همکاران، ۲۰۰۴؛ مقدس نژاد، ۲۰۰۴؛ لنگ و گبر، ۲۰۰۵؛ عبدالصمد و همکاران، ۲۰۱۵؛ نگی و همکاران، ۲۰۱۷). هوانگ (۲۰۱۴) اثر مسلح سازی بستر با ژئوگرید را با نرم افزار آباکوس و مدل دوبعدی، تقارن محور و بارگذاری شبه استاتیک مورد مطالعه قرار داد. به علت استفاده از ژئوگرید، اندرکنش بین مسلح کننده و خاک به صورت اتصال کامل در نظر گرفته شد. نتایج

یکی از مهمترین مشکلاتی که امروزه اکثر مهندسين در پروژه های راه سازی با آن مواجه می باشند، احداث راه روی بستر نرم و خاک های مسئله دار می باشد. یکی از روش های مناسب برای مقابله با این مشکل، استفاده از روش بهسازی از طریق نصب لایه های مسلح کننده ژئوستتیک روی بستر نرم می باشد (هوانگ، ۲۰۱۴؛ لئوناردی و پالامارا، ۲۰۱۷). در دو دهه اخیر، مسلح کننده های ژئوستتیک با خصوصیات بهتری تولید شده اند که تغییر شکل پذیری مناسب، مقاومت در برابر خوردگی و دوام زیاد از مزایای این محصولات می باشد. در مقابل، یکی از نقاط ضعف این محصولات، خزش زیاد طی زمان است (مصلی نژاد و همکاران، ۱۳۹۳؛ نگی و همکاران، ۲۰۱۷). آزمون های متعددی شامل مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی برای بررسی رفتار ژئوستتیک ها در بستر راه ها انجام شده است (تینگل و وبستر، ۲۰۰۳؛ ماکسول و همکاران، ۲۰۰۵؛ هوفینوس و همکاران، ۲۰۰۶؛ هان و همکاران، ۲۰۱۱؛ ثاقب فر، ۲۰۱۴؛ وو و همکاران، ۲۰۱۵؛ تنگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۶). انجام آزمایش های صحرایی و همچنین بازسازی رفتار راه، به ویژه تحت اثر بار ترافیکی، در آزمایشگاه کار بسیار دشوار و پرهزینه ای می باشد. در همین راستا، امروزه، استفاده از شبیه سازی عددی به منظور مطالعات پارامتریک و بررسی بهتر رفتار راه مسلح شده، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یک ابزار مناسب برای مطالعه رفتار راه های مسلح شده به وسیله ژئوستتیک ها (به ویژه ژئوگرید)، مدل سازی این سیستم مرکب در محیط اجزای محدود می باشد (زورنبرگ و گوپتا، ۲۰۱۰؛ حسین و مجید، ۲۰۱۶).

در مطالعه حاضر، در ادامه روند تحقیقات مفید گذشته در بررسی رفتار خاک مسلح، تلاش شده تا با گسترش مطالعه پارامتریک و ساخت مدل سه بعدی با تعداد المان بیشتر جهت افزایش دقت نتایج، به بررسی

عددی سیستم راه مسلح، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳. مطالعه موردی

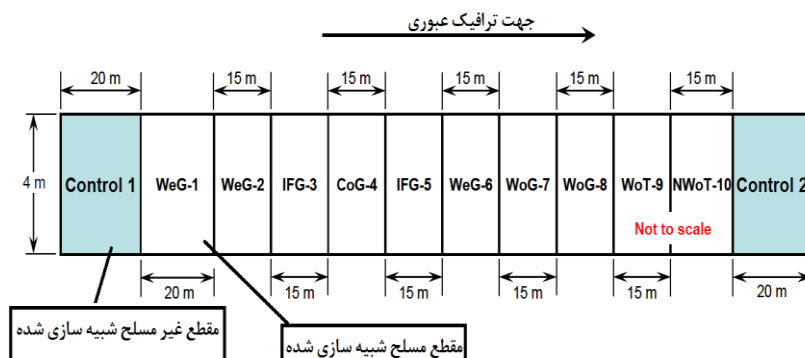
دپارتمان حمل و نقل مونتانا<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۹ پروژه بهسازی بستر راه با دو محصول ژئوتکستایل و ژئوگرید را توسط پرکینز و همکاران در دستور کار خود قرار داد. در این پروژه، یک ترانشه به طول ۱۹۵ متر، عرض ۴ متر و عمق ۱ متر، جهت اجرای مقاطع آزمایش ایجاد شد. در طول آزمایش نیز تنها یک کامیون با سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت و فشار چرخ ۶۹۰ کیلوپاسکال جهت اعمال بار ترافیکی استفاده شد. دوازده مقطع آزمایش ساخته شد که در ۱۰ مقطع ۱۰ محصول ژئوستتیک مورد آزمایش و دو مقطع غیر مسلح به عنوان مقاطع کنترل در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد نسبی مسلح‌سازی مورد استفاده قرار گرفت (کوالهو و پرکینز، ۲۰۰۹). مطابق شکل ۱، در این تحقیق دو مقطع غیر مسلح و مسلح شبیه‌سازی می‌گردد. بر اساس بررسی به‌عمل آمده، روابط تجربی هوکلوم و کلومپ (۱۹۶۲) برای مدول الاستیسیته بستر و همچنین مدول برجهندگی (روابط ۱ و ۲) برای خصوصیت الاستیک لایه اساس (آشتو، ۱۹۹۳) محاسبه می‌گردد. در این تحقیق، از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر- کولمب شامل پارامترهای مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چسبندگی و اصطکاک برای خاک استفاده گردید و با توجه به CBR خاک بستر که ۱/۷ بوده، مقدار مدول الاستیسیته لایه بستر ۱۷/۵۹۵ مگاپاسکال و برای لایه اساس ۳۱۰ MPa می‌باشد. در مقطع آزمایش، از ژئوگرید با رفتار الاستیک خطی و مدول الاستیسیته ۲۷۵ MPa استفاده گردید. مشخصات لایه‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است. در روابط ۱ و ۲، مدول الاستیسیته و برجهندگی، E و MR می‌باشند.

بررسی نشان داد که وقتی ضخامت لایه‌های سنگدانه زیاد است محیط سنگدانه‌ای بیشترین نقش را در بهبود ظرفیت و تقویت CBR داشته، اما وقتی ضخامت لایه اساس کم و بستر ضعیف باشد حضور مسلح کننده، بیشترین نقش را در افزایش ظرفیت باربری، توزیع مناسب‌تر بار چرخ، کاهش نشست و بهبود CBR دارد. ابراهیم و همکاران (۲۰۱۶) اثر مسلح‌سازی با ژئوگرید در راه احداث شده بر بستر ضعیف را از طریق مطالعه آزمایشگاهی و همچنین شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزای محدود و بارگذاری سیکلیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بعد از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری در بستر مسلح نسبت به بستر غیر مسلح، مقادیر ظرفیت باربری ۲۷٪ افزایش و تغییر شکل سطح رویه ۱۸٪ کاهش داشته است. مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی توسط بیابانی و همکاران (۲۰۱۶) روی مسلح‌سازی بستر مسیر راه آهن با ژئوسل به روش اجزای محدود انجام شد. بارگذاری به صورت سیکلیک اعمال و همخوانی مناسبی بین پاسخ آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی ارائه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سختی مسلح کننده، میزان کرنش جانبی کاهش یافته و همچنین بیشینه مقاومت کششی بسیج شده مسلح کننده در شرایطی رخ می‌دهد که بستر ضعیف باشد. توجه به مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در تحقیقات قبلی، از روش‌های مختلف تحلیل و بارگذاری استفاده شده است. شبیه‌سازی بارگذاری بستر راه و تحلیل به روش شبه‌استاتیک و دینامیک نتایج نزدیک‌تری نسبت به پاسخ‌های آزمایشگاهی یا آزمون‌های میدانی ارائه می‌دهد. روش استاتیک نسبت به واقعیت دور بوده و همچنین روش دینامیک کامل زمان تحلیل را بسیار افزایش داده و در اغلب مطالعات به علت عدم دسترسی به پارامترهای دینامیک مورد نیاز در شبیه‌سازی، روند کار را با مشکل مواجه می‌کند. اما تحلیل‌های شبه‌استاتیک و شبیه‌سازی روش بارگذاری مرتبط با آن، در مدل‌سازی

<sup>۱</sup>- Montana Department of Transportation

مطالعه عددی اثر مسلح سازی بستر بر رفتار مقاطع تسلیح شده آزمایشی به روش اجزای محدود

$$M_R(kPa) = 2060 \times CBR^{0.65} \quad (2) \quad E(kPa) = 10350 \times CBR \quad (1)$$



شکل ۱. مقاطع آزمایش (کوالهو و پرکینز، ۲۰۰۹)

جدول ۱. خصوصیات الاستیک و پلاستیک لایه های خاک و مسلح کننده

لایه ها	نام خاک (سیستم یونینفاید)	پسبندگی (Pa)	اصطکای	مدول الاستیسیته (Mpa)	ضریب پواسون
بستر	SC	۵۰۰۰	۳۰	۱۷/۵۹۵	۰/۴
اساس	GW-GM	۱۰۰۰	۴۵	۳۱۰	۰/۴
مسلح کننده	ژئوگرید			۲۷۵	۰/۴

#### ۴. مدل سازی عددی

##### ۴-۱. المان های مدل سازی

تحلیل تنش و کرنش در لایه های روسازی مناسب می باشد (شفابخش و همکاران، ۱۳۹۱). المان مورد استفاده در شبیه سازی لایه های خاک از خانواده 3D Stress و المان C3D8R، سه بعدی ۸ گرهی انتگرال کاهش یافته خطی می باشد. در این مطالعه، برای دقت بیشتر و نزدیک شدن به رفتار واقعی ژئوگرید، به جهت داشتن ضخامت کم نسبت به دو بعد دیگر، و همچنین خاصیت کشش درون صفحه ای، از المان پوسته<sup>۱</sup> ۸ گرهی SC8R از نوع پوسته پیوسته<sup>۲</sup>، برای مدل سازی ژئوگرید استفاده شده است. برخی محققین از المان سه بعدی (C3d) یا از المان میله و یا خرپا و تحقیقات کمی از پوسته استفاده کرده اند

استفاده از مدل دو بعدی کرنش مسطح یا تقارن محور، منجر به کاهش زمان و فضای حافظه نسبت به مدل سه بعدی می گردد. اما در مدل دوبعدی، امکان بارگذاری ترافیکی نزدیک به واقعیت وجود ندارد. در مدل سه بعدی، می توان سطح تماس بار چرخ را نزدیک به واقعیت مدل نمود که در ادامه به آن اشاره می گردد (چو و همکاران، ۲۰۰۰). نرم افزار مدل سازی آباکوس ابزار قدرتمندی است که با روش اجزای محدود برای

<sup>۲</sup>- Continuum shell

<sup>۱</sup>- Shell

(۲۰۰۶) مورد استفاده قرار گرفته است. در این بارگذاری ساده، بار به صورت آنی به نمونه اعمال گردیده و مدت زمان بارگذاری با استفاده از قطر سطح تماس چرخ با سطح خاک تقسیم بر سرعت چرخ برای یک بار عبور، محاسبه و سپس برای تعداد عبورها به صورت تجمعی، زمان نهایی محاسبه و اعمال شده است (فخری و توفیق، ۱۳۸۹). در این تحقیق نیز از بارگذاری شبه‌استاتیک با فشار چرخ ۶۹۰ kPa استفاده شده است. در این نوع بارگذاری، در نرم‌افزار آباکوس، بر اساس سرعت کامیون (۱۵ km/h) زمان ماندگاری<sup>۳</sup> به بار اختصاص داده شد و از قابلیت دینامیک صریح<sup>۴</sup> در نرم‌افزار استفاده گردید. به نحوی که بدترین حالت ممکن که منجر به بیشترین نشست (نشست نهایی) می‌گردد، حاصل می‌شود. سطح بارگذاری نیز به صورت دایره معادل چرخ با شعاع ۱۳ سانتی‌متر محاسبه شده است. با توجه به سرعت کامیون و طول بارگذاری که قطر دایره معادل سطح بار می‌باشد، زمانی معادل ۰/۰۶۲۵ ثانیه برای بارگذاری در نظر گرفته شد. برای سه بار عبور و سه محور عبوری و ۹ گام با مشخصاتی که ذکر گردید، در تحلیل عددی وارد شده است. تصویر کردن سطح تماس چرخ‌ها و رویه، برای شبیه‌سازی بارگذاری ترافیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، طبق پیشنهاد هوانگ (۱۹۹۵) سطح معادل ساده‌ای برای سطح تماس چرخ می‌توان در نظر گرفت که در شکل ۲ ارائه شده است. سطح تماس را می‌توان یک مستطیل و دو نیم دایره در لبه‌ها فرض کرد. البته این سطح تماس فعال و حقیقی را می‌توان به سطح مستطیل معادل تبدیل کرد (هوانگ، ۲۰۰۴). پارامتر  $L$  مطابق شکل ۲ بر اساس نیرو و فشار چرخ حاصل می‌گردد (هادی و بوده‌نیاپاک، ۲۰۰۳). در این تحقیق، از سطح معادل سوم

(یتیم‌آغلو و همکاران، ۱۹۹۴؛ الازوی، ۲۰۱۲؛ ابب و کیو، ۲۰۱۶) به نظر می‌رسد که با توجه به خاصیت ژئوستتیک که یک بعد آن نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچکتر است، المان پوسته به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. در برخی مدل‌سازی‌ها، محققین، مسلح‌کننده ژئوگرید را حالت غشا در نظر گرفته‌اند که حتی همان ضخامت اندک را برای شبیه‌سازی ژئوگرید نداشته و مسطح مدل می‌گردد. در این تحقیق، یک المان پوسته در نظر گرفته شد که سه‌بعدی و دارای ضخامت اندک بوده و به واقعیت نزدیک‌تر است. ژئوگرید به صورت غیر مشبک در نظر گرفته شد. ولی اندرکنش و درگیری بین سنگدانه‌ها و چشمه‌های ژئوگرید به صورت پارامترهای اینترفیس نرمال<sup>۱</sup> و مماسی<sup>۲</sup> شامل ضریب اصطکاک و ضریب لغزش الاستیک تعریف شده که تفاوت شبیه‌سازی ژئوگرید نسبت به ژئوتکستایل، که فقط خاصیت اصطکاک دارد، را نشان می‌دهد (این مدل شبیه‌سازی در بسیاری از مقالات مانند عبدالصمد و همکاران (۲۰۱۵) انجام گردیده است). کلیه مشخصات هندسی و مکانیکی ژئوگرید و لایه‌های خاک در جدول ۱، برگرفته از تحقیق میدانی (کوالهو و پرکینز، ۲۰۰۹) می‌باشد.

#### ۴-۲. بارگذاری و شرایط مرزی

شبیه‌سازی نحوه بارگذاری در مدل‌سازی به روش اجزای محدود دارای روند پیچیده و زمان‌بری می‌باشد (جمشیدی چناری و صادق‌نژاد، ۱۳۹۴). برای مدل نمودن این بارگذاری روش ساده دیگری نیز وجود دارد که به وسیله هوانگ (۱۹۹۵) معرفی شده و متعاقباً توسط هوآ (۲۰۰۰)، وایت و همکاران (۲۰۰۲) و یوزاروسکی

<sup>۳</sup>- Time period  
<sup>۴</sup>- Dynamic/Explicit

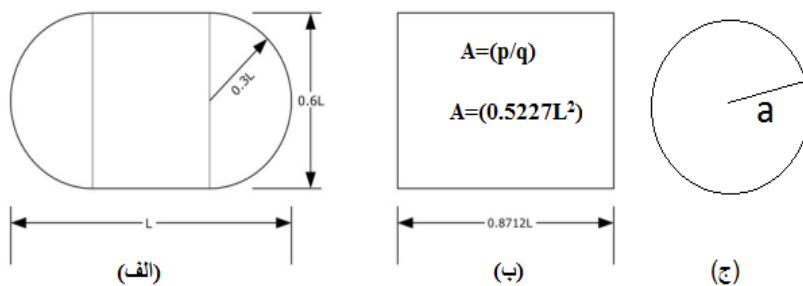
<sup>۱</sup>- Hard contact  
<sup>۲</sup>- Tangential

تغییر شکل و مقاومت خاک مسلح، مقاومت برشی سطوح اندرکنش یا اصطکاک خاک و ژئوگرید می باشد. اصطکاک سطوح اندرکنش معمولاً شامل دو پارامتر ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) و ضریب لغزش الاستیک (Eslip) می باشد. ضریب اصطکاک، نسبت تنش برشی به تنش نرمال بوده و ضریب لغزش الاستیک حدی از جابجایی برشی الاستیک بوده، که مقاومت برشی الاستیک سطوح اندرکنش به تنش برشی بحرانی در سطح اندرکنش می رسد (حسین و مجید، ۲۰۱۳؛ گو، ۲۰۱۱). با بررسی های به عمل آمده در این تحقیق و بر اساس نتایج آزمایش های بیرون کشش، مقادیر ۰/۵ و ۰/۰۰۵ به ترتیب برای اصطکاک و ضریب لغزش مورد استفاده قرار گرفت.

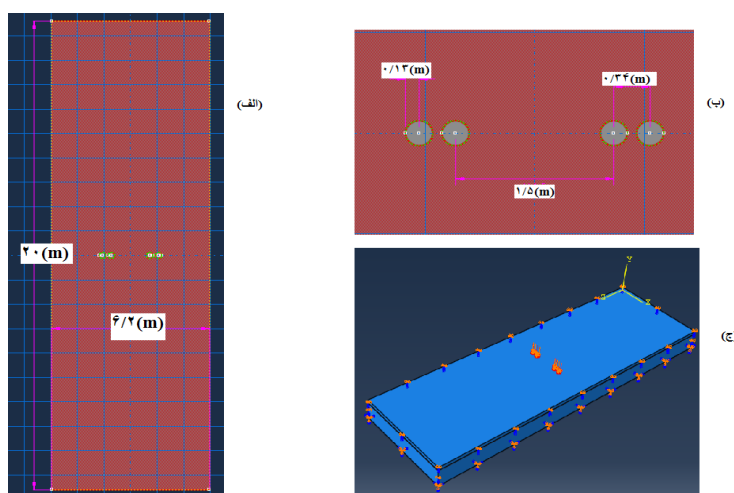
که دایره ای هم سطح با مستطیل معادل بوده استفاده شده است که شعاع دایره (پارامتر  $a$ ) بر اساس نسبت نیروی وارد بر چرخ ( $p$ ) و فشار باد ( $q$ ) چرخ به دست می آید (فرمول ۳). فشار چرخ ۶۹۰ kPa و نیروی وارد بر چرخ تقریباً ۳۶/۵ کیلونیوتن می باشد.

$$a = (P/(\pi q))^{0.5} \quad (3)$$

در نرم افزار اجزای محدود، شرایط مرزی در نتیجه بسیار مؤثر می باشد. برای شرایط مرزی در این تحقیق، در قسمت کف مدل از حرکت در تمام جهات جلوگیری گردیده و در نواحی کناری مدل، فقط حرکت در جهت قائم آزاد می باشد. شکل ۳، ابعاد و فواصل چرخ ها و مقطع شبیه سازی شده را نشان می دهد. از فاکتورهای مؤثر در



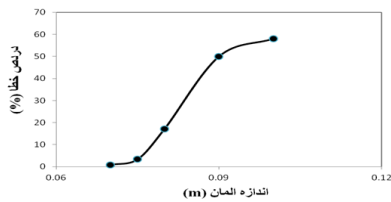
شکل ۲. سطح معادل بارگذاری (هوانگ، ۲۰۰۴)



شکل ۳. الف) ابعاد مقطع آزمایش، ب) ابعاد و فواصل چرخ ها و ج) تصویر سه بعدی مقطع آزمایش

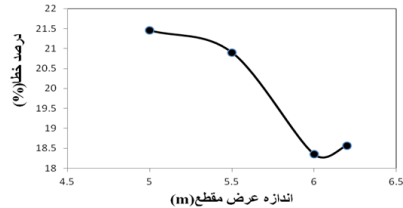
## ۵. نتایج و بحث

انسجام بین لایه‌ها حفظ گردد (دانکن و همکاران، ۱۹۶۸). شکل‌های ۴ و ۵ نمودارهای آنالیز حساسیت برای ابعاد مقطع و اندازه شبکه را نشان می‌دهند. درصد خطا بر اساس اختلاف نشست بیشینه، در شبیه‌سازی و آزمایش صحرائی است. نتایج با تحقیقات کیم (۲۰۰۷) هم‌خوانی مناسبی دارد.



شکل ۵. نمودار آنالیز حساسیت تغییر ابعاد المان

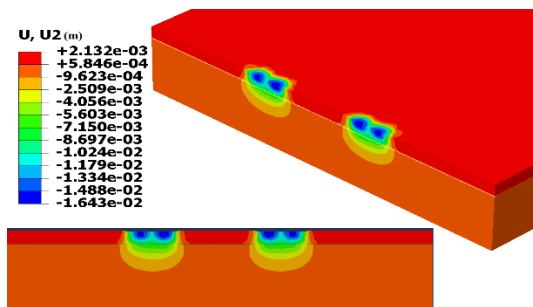
به منظور کاهش خطا در مدل‌سازی، باید مرزهای مدل در جهت عمودی حداقل ۵۰ برابر و در جهت افقی ۱۲ برابر شعاع دایره معادل سطح چرخ گسترده شود. همچنین، باید شبکه‌بندی به‌گونه‌ای انتخاب شود که



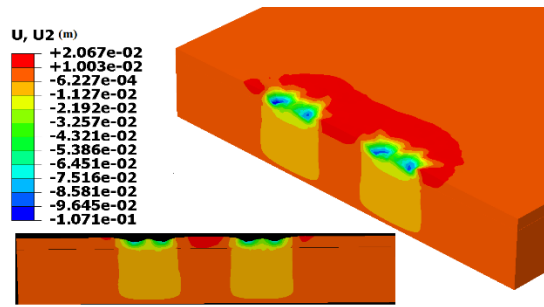
شکل ۴. نمودار آنالیز حساسیت تغییر ابعاد مقطع

نشان می‌دهد. با حضور مسلح‌کننده، مقدار نشست بیشینه خروجی، ۸۴٪ کاهش داشته است. می‌توان گفت که عامل مقاومت کششی موجود در مسلح‌کننده و همچنین قفل و بست بین سنگدانه‌ها، مانع حرکت جانبی شده و از طرفی تنش فعال قائم (رو به بالا) ناشی از خاصیت تسلیح غشایی در ژئوگرید، منجر به تقویت بستر و جلوگیری از نشست تحت بار چرخ گردیده است.

در شکل ۶، کانتورهای نشست مقاطع غیرمسلح و مسلح در آنالیز اجزای محدود ارائه شده است. شکل ۶-الف، کانتور نشست در مقطع غیر مسلح، تحت بار ترافیکی برای سه بار عبور کامیون را نشان می‌دهد. بیشینه خروجی نشست حدود ۱۰۷ میلی‌متر بوده و کانتور نشست تا عمق لایه بستر ادامه داشته است. شکل ۶-ب، کانتور نشست مقطع مسلح شبیه‌سازی شده را



(ب)

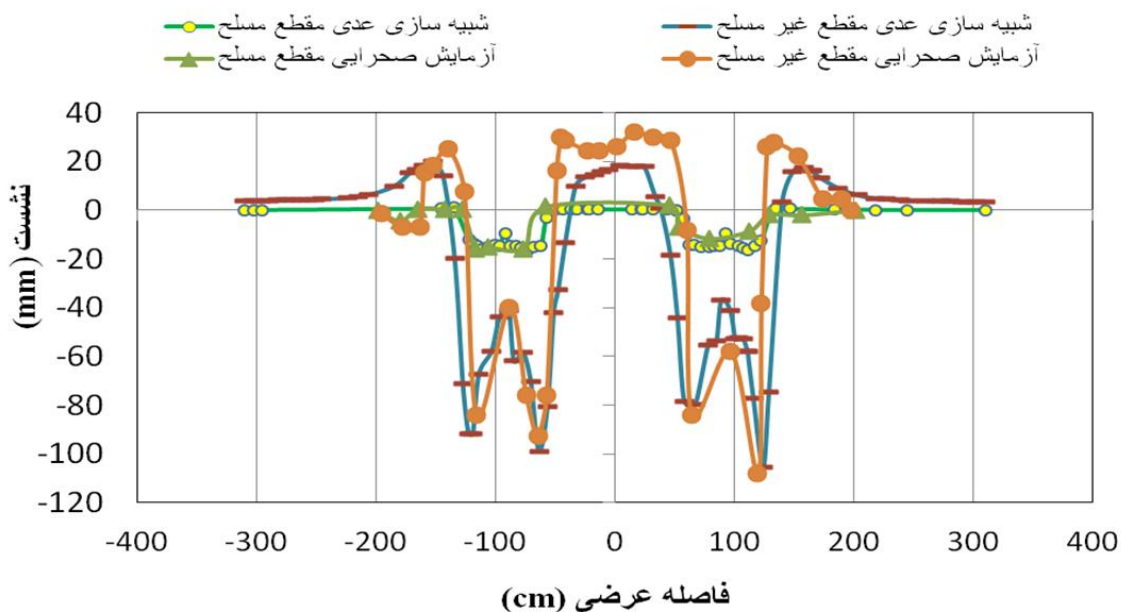


(الف)

شکل ۶. کانتور نشست در مقطع شبیه‌سازی شده: الف) مقطع غیر مسلح و ب) مقطع مسلح

عددی و آزمایش صحرائی وجود داشته و کاهش نشست به میزان ۸۴٪ زیر سطح بار چرخ و تورم نقاط بیرونی سطح بار چرخ کاملاً مشهود می‌باشد.

شکل ۷، نمودار نشست مقطع مسلح در شبیه‌سازی و آزمایش صحرائی و همچنین مقطع غیر مسلح در شبیه‌سازی عددی (برای سه بار عبور) را نشان می‌دهد. انطباق خوبی بین نمودارهای نشست در شبیه‌سازی

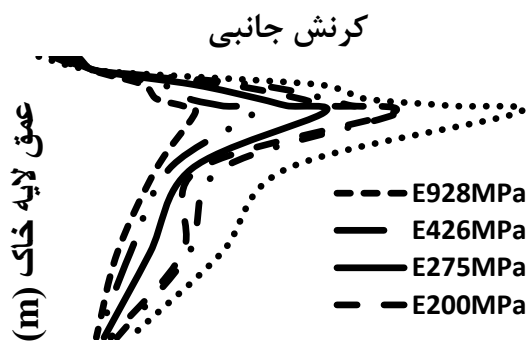


شکل ۷. انطباق نمودار نشست ناشی از سه بار عبور کامیون- مقطع مسلح (شبییه سازی عددی و آزمایش صحرایی)

۱۰۲/۵ به ۹۲۸ مگاپاسکال (بیش از ۹ برابر) نشست سطح رویه و بستر ۶۴٪ افزایش داشته است. نتایج، سازگاری مناسبی با تحقیقات لنگ (۲۰۰۲) و گو (۲۰۱۱) دارد. در شکل ۸، اثر تغییر سختی ژئوگرید بر کرنش جانبی مقطع مسلح در عمق مقطع مورد بررسی و ارائه گردیده است. با افزایش سختی مسلح کننده از ۱۰۲/۵ به ۹۲۸ مگاپاسکال، بیشینه کرنش جانبی زیر چرخ در سطح بستر از ۰/۰۶۵۵ به ۰/۰۱۶ رسیده و به میزان ۷۷٪ کاهش داشته است.

#### ۱-۵. تأثیر سختی ژئوگرید در کرنش و نشست سطح رویه و بستر

تأثیر تغییرات پارامتر مکانیکی مدول الاستیسیته (بر اساس ژئوگریدهای با سختی های مختلف) بر نشست بررسی و مطابق جدول ۲ ارائه شده است. تغییر شکل در مقاطع مسلح به شدت تحت تأثیر حضور مسلح کننده و همچنین خصوصیات مکانیکی آن می باشد. به نحوی که در مقطع مسلح با حضور ژئوگرید (۲۷۵ MPa) نشست رویه حدود ۸۴٪ کاهش داشته و با افزایش سختی ژئوگرید از



شکل ۸. تغییرات کرنش جانبی در عمق بر اساس سختی مسلح کننده (زیر چرخ)



جدول ۲. مدول الاستیسیته ژئوگریدهای مورد استفاده در تحلیل عددی

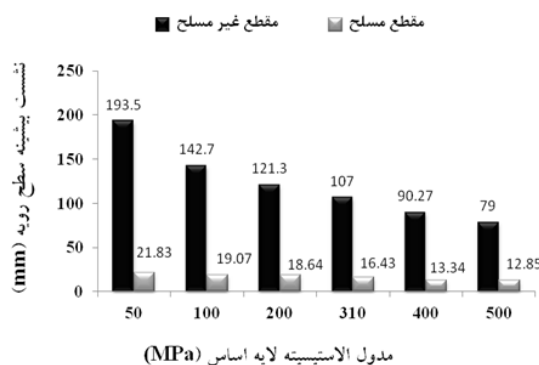
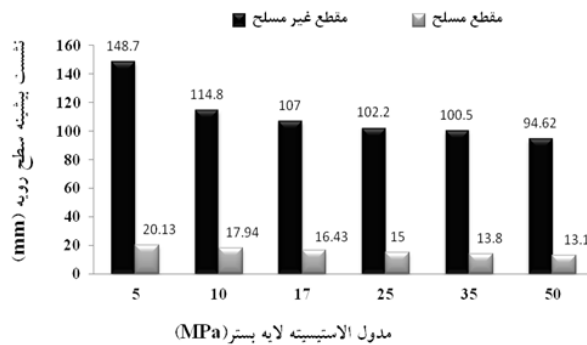
۱۰۲/۵	۱۵۰	۲۰۰	۲۷۵	۴۲۶	۹۲۸	مدول الاستیسیته ژئوگرید (MPa)
۱۱/۰۲	۹/۱۰۶	۸/۴۵	۶/۸۴	۵/۵۶	۳/۸۹	نشست بیشینه سطح بستر (mm)
۲۶/۵۱	۲۱/۵	۲۰/۱۱	۱۶/۴۳	۱۵/۴	۱۰/۲	نشست بیشینه سطح رویه (mm)

## ۵-۲. تأثیر سختی اساس و بستر در نشست رویه مقطع مسلح

شکل ۹- الف تأثیر تغییرات مدول الاستیسیته لایه اساس (رویه شنی) بر نشست بیشینه سطح راه مقطع مسلح و غیر مسلح را نشان می‌دهد. کاهش مدول الاستیسیته، یا به عبارتی سختی لایه اساس، منجر به افزایش نشست گردیده است. به نحوی که با کاهش سختی لایه اساس به میزان ۸۰٪ (۳۱۰ MPa به ۵۰ MPa) تغییر شکل و نشست سطح راه ۳۰٪ افزایش داشته است. اما شیب تغییرات یا افزایش نشست با حضور مسلح‌کننده، به میزان قابل توجهی ملایم و کم می‌باشد. در صورت عدم حضور ژئوگرید، در اثر کاهش سختی اساس (کاهش ۸۰٪ نشست مقطع غیر مسلح از ۱۰۷ میلی‌متر به ۱۹۳/۵ میلی‌متر (۸۰٪ افزایش) می‌رسید و میزان افزایش نشست در اثر کاهش سختی لایه اساس به صورت چشمگیر، بیشتر می‌گردید. شکل ۹- ب تأثیر مدول الاستیسیته لایه بستر در نشست بیشینه سطح راه مسلح را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که سختی بستر در نشست رویه تأثیر به‌سزایی دارد. به نحوی که با کاهش سختی لایه بستر به میزان ۷۰٪ (۱۷ MPa به ۵ MPa) نشست با حضور مسلح‌کننده به میزان ۲۳٪ افزایش داشته است. آشکار است که کاهش قابل توجه سختی بستر در

مقطع غیر مسلح منجر به افزایش نشست سطح رویه (۳۹٪) در راه می‌گردد. ولی در مقطع مسلح، حضور مسلح‌کننده می‌تواند این نشست را کنترل کرده و با مکانیزم تسلیح غشایی، توزیع مناسب بار و کاهش اثر تنش روی بستر نرم، علی‌رغم کاهش سختی یا ظرفیت باربری بستر مانع نشست و تغییر شکل‌های زیاد در سطح رویه و بستر گردد. در مقاطع مسلح، تغییرات سختی لایه-ها تأثیر کمتری بر نشست نسبت به مقاطع غیر مسلح دارد (بر اساس نتایج این بررسی، تأثیر تغییرات سختی و شرایط لایه‌های اساس و بستر در مقاطع غیر مسلح دو برابر مقاطع مسلح است). همانطوری که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، خطی از نمودار که شیب بیشتری دارد برای مقطع غیر مسلح بوده، که عملکرد خوبی در انتقال بار نداشته، خطی که شیب کمتری دارد برای مقطع مسلح، عملکرد بهتری در کاهش نشست داشته، خطی که دارای تقعر به سمت بالا بوده مربوط به مقطع غیر مسلح عملکرد خوبی در کاهش نشست نداشته و خطی از نمودار که تقعر به سمت پایین داشته عملکرد بهتری دارد و تعداد عبور کامیون و ظرفیت ترافیک را افزایش داده است. این کاهش نشست برای مقطع با مسلح‌کننده ۲۷۵ مگاپاسکالی در یک بار عبور (برای کامیون با سه محور) نزدیک به ۹۱٪ و برای ۶ بار عبور ۶۸٪ بوده که مطلوب است.

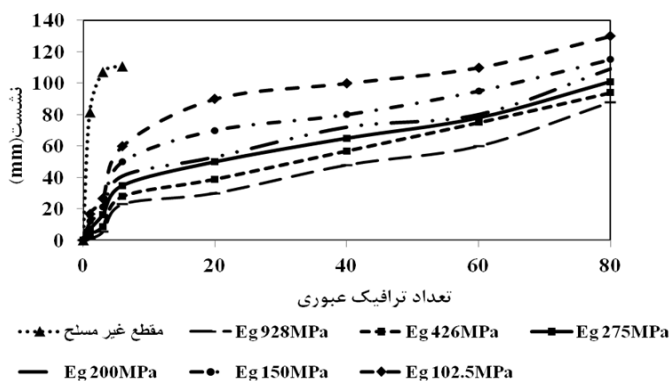
مطالعه عددی اثر مسلح سازی بستر بر رفتار مقاطع تسلیح شده آزمایشی به روش اجزای محدود



(ب)

(الف)

شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای تأثیر تغییرات سختی لایه در نشست بیشینه سطحی مقطع مسلح و غیر مسلح: الف) تغییرات سختی اساس و ب) تغییرات سختی بستر



شکل ۱۰. تغییرات نشست بیشینه سطحی مقطع مسلح با سختی مختلف ژئوگرید و غیر مسلح در مقابل تعداد عبور بار ترافیک

داشته است. روند نمودار و TBR در دو مقطع با مسلح-کننده ۲۷۵ مگاپاسکال و ۲۰۰ مگاپاسکال تقریباً مشابه بوده و برای مقطع با مسلح‌کننده ضعیف ۱۰۲/۵ مگاپاسکال، برای رسیدن به ۱۰۰ میلی‌متر شیارشدگی ۴۰

ضریب TBR نسبت ترافیک عبوری در مقطع مسلح به غیر مسلح تعریف می‌گردد. مقطع مسلح با ژئوگرید ۱۰۲/۵ مگاپاسکال ضعیف‌ترین و با سختی ۹۲۸ مگاپاسکال بهترین عملکرد در افزایش ظرفیت ترافیک را

داد که کاهش ۸۰ درصدی مدول الاستیسیته لایه اساس منجر به افزایش ۳۰ درصدی نشست سطح راه با وجود مسلح‌کننده شده است. اما برای مقطع غیر مسلح، کاهش سختی لایه اساس (به میزان ۸۰٪) منجر به ۸۰٪ افزایش نشست سطحی گردیده است. به همین جهت، میزان افزایش نشست در اثر کاهش سختی لایه اساس (در مقطع غیر مسلح) به صورت چشمگیر، بیشتر می‌گردد. سختی بستر در نشست رویه تأثیر به‌سزایی دارد. به نحوی که با کاهش سختی لایه بستر به میزان ۷۰٪ (۱۷ MPa به ۵ MPa) نشست مقطع با حضور مسلح‌کننده، میزان ۲۳٪ افزایش داشته است. کاهش سختی لایه بستر (به میزان ۷۰٪) منجر به ۳۹٪ افزایش نشست رویه گردیده است. میزان افزایش نشست در اثر کاهش سختی لایه اساس، بیشتر می‌گردد. نتایج مطالعه عددی نشان داد که اگر لایه اساس و بستر دارای سختی کمی باشند، حضور مسلح‌کننده تأثیر بیشتری در کاهش نشست و کرنش دارد. در حالی که با افزایش سختی لایه اساس و بستر، تغییرات شاخص و چشمگیری در کاهش نشست سطح رویه ناشی از حضور ژئوگرید در سطح مشترک لایه اساس و بستر مشاهده نخواهد شد. در مقاطع مسلح، تغییرات سختی لایه‌ها تأثیر کمتری در نشست (۵۰٪) نسبت به مقاطع غیر مسلح دارد. نتایج، افزایش ظرفیت ترافیک (TBR) بر اثر تسلیح و تقویت مقطع با مسلح‌کننده قوی را نشان می‌دهد. با افزایش مقاومت مسلح‌کننده، میزان TBR مقطع نیز افزایش داشته است.

بار عبور ترافیک لازم بوده و ضریب TBR حدود ۱۳/۳ می‌باشد و همچنین نمودار افزایش ظرفیت ترافیک TBR به میزان ۲۶/۱۱ برابر، بر اثر تسلیح و تقویت مقطع با مسلح‌کننده قوی تر (با سختی ۲۷۵ MPa) را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد عبور ترافیک، اختلاف در میزان شیارشدگی در مقاطع با مسلح‌کننده‌های مختلف ضعیف و قوی کاهش می‌یابد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش اجزای محدود، دو مقطع غیر مسلح و مسلح شامل دو لایه اساس و بستر و یک لایه مسلح‌کننده ژئوگرید از یک آزمایش صحرایی در دانشگاه مونتانا شبیه‌سازی گردید. نرم‌افزار اجزای محدود عملکرد خوب و مطلوبی در شبیه‌سازی راه مسلح تحت بار ترافیکی داشته و نتایج شبیه‌سازی عددی به روش اجزای محدود هم‌خوانی مناسبی با پاسخ‌های مطالعه صحرایی داشته است. با توجه به شبیه‌سازی در این تحقیق، بارگذاری شبه‌استاتیک نتایج نسبتاً مطلوب و نزدیک به واقعیت با حداقل خطا را نشان می‌دهد. با حضور مسلح‌کننده قوی، مقدار نشست بیشینه خروجی ۸۴٪ کاهش داشته است و بهبود خواص مکانیکی ژئوستتیک، به‌ویژه افزایش مدول الاستیسیته ژئوگرید، منجر به کاهش نشست سطح راه و بستر می‌گردد. کاهش نشست ناشی از حضور مسلح‌کننده بیش از تغییرات سختی لایه‌ها مؤثر بوده است. نتایج بررسی عددی نشان

## ۷. مراجع

- جمشیدی چناری، ر. و صادق‌نژاد، م. ۱۳۹۴. "ارزیابی عددی تأثیر خرده شیشه ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۲): ۲۱-۳۱.
- شفابخش، غ.، اکبری، ع. و کاشی، ا. ۱۳۹۱. "تحلیل عددی اثر مجموعه چرخ‌های انواع هواپیماها در تعیین نواحی بحرانی روسازی صلب باند فرودگاه". مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۱۰(۲۹): ۶۱-۷۰.
- مصلی‌نژاد، م.، بازیار، م. ح. و امینی، ف. ۱۳۹۳. "مطالعه عددی افزایش ظرفیت باربری پی‌های حلقوی و دایره‌ای مستقر بر خاک‌های

دانه‌ای مسلح شده به وسیله‌ی سامانه مهار شبکه". مجله عمران مدرس، ۱۴(۴): ۱۲۷-۱۳۶.

فخری، م. و توفیق، ع. ۱۳۸۹. "ارزیابی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS". پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران.

AASHTO. 1993. "Guide for Design of Pavement Structures". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.

Abdessemed, M., Kenai, S. and Bali, A. 2015. "Experimental and numerical analysis of the behavior of an airport pavement reinforced by geogrids". *Constr. Build. Mater.*, 94: 547-554.

Abebe, M. S. and Qiu, H. S. 2016. "Numerical modeling of geotextile reinforcement of soft subgrade ballasted railway under high speed train". *EJGE*, 21: 4327-4343.

Al-Azzawi, A. A. 2012. "Finite element analysis of flexible pavements strengthened with geogrid". *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, 7(10): 1295-1299.

Al-Qadi, I. L., Dessouky, S. H., Kwon, J. and Tutumluer, E. 2008. "Geogrid in Flexible Pavements: Validated Mechanism". *Transportation Research Record 2045*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D. C., pp. 102-109.

Biabani, M. M., Indraratna, B. and Ngo, N. T. 2016. "Modelling of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading". *Geotextiles Geomembranes*, 44: 489-503.

Cho, Y., McCullough, B. F. and Weissmann, J. 2000. Consideration on finite-element method application in pavement structural analysis. *Transportation Research Record 1539*, TRB National Research Council, Washington, D. C., pp. 96-101.

Cuelho, E. and Perkins, S. 2009. "Field Investigation of Geosynthetics Used for Subgrade Stabilization". FHWA/MT-09-003/8193, Western Transportation Institute, Montana State University, Bozeman, pp. 5-80.

Duncan, J. M., Monismith, C. L. and Wilson, E. L. 1968. "Finite Element Analysis of Pavement". *Highway Research Record*, No. 228, TRB, Washington, D. C.

Gu, J. 2011. "Computational modeling of geogrid reinforced soil foundation and geogrid reinforced base in flexible pavement". PhD Dissertation, Louisiana State University.

Hadi, M. N. S. and Bodhinayake, B. C. 2003. "Non-linear finite element analysis of flexible pavements". *Adv. Eng. Software*, 34: 657-662.

Han, J., Pokharel, S., Yang, X., Manandhar, C., Leshchinsky, D., Halahmi I. and Parsons, R. 2011. "Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads". *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(11): 1525-1534.

Hilton, S. T. 2017. "Full-scale pavement testing of aggregate base material stabilized with triaxial geogrid". MS Thesis, Brigham Young University.

Hua, J. 2000. "Finite element modeling and analysis of accelerated pavement testing devices and rutting phenomenon". PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

Huang, H. 1995. "Analysis of accelerated pavement tests and finite element modeling of rutting phenomenon". PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

Huang, W. C. 2014. "Improvement evaluation of subgrade layer under geogrid-reinforced aggregate layer by finite element method". *Int. J. Civ. Eng.*, 12(3): 204-215.

Huang, Y. 2004. "Pavement Analysis and Design". 2<sup>nd</sup> Edition, Pearson Education, New Jersey.

Huekelom, W. and Klomp, A. J. G. 1962. "Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction". *Proceedings of the First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Michigan, pp. 667-685.

Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S. M. and Bronnimann, R. 2006. "Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade". *Geotextiles Geomembranes*, 24(1): 21-37.

- Hussein, M. G. and Meguid, M. A. 2013. "Three-dimensional Finite Element Analysis of Soil-geogrid Interaction under Pull-out Loading Condition". GeoMontreal 2013, the 66<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, Montreal, Quebec, Canada, Paper No. 260, pp. 452-458.
- Hussein, M. G., Meguid, M. A. 2016. "A three-dimensional finite element approach for modeling biaxial geogrid with application to geogrid-reinforced soils". Geotextiles Geomembranes, 44: 295-307.
- Ibrahim, S. F., Sofia, G. G. and Kareem, A. I. 2012. "Experimental study on geogrid-reinforced subbase over soft subgrade soil under repeated loading". J. Eng. Dev., 16(3): 218-240.
- Ibrahim S. I., Ahmed, N. G. and Mohammed, D. E. 2016. "Effect of reinforcement on improve surface pavement for weak subgrade conditions". Int. J. Geomate, 11(23): 2188-2193.
- Kim, M. 2007. "Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior". PhD Dissertation, University of Illinois, Urbana, Champaign.
- Leng, J. and Gabr, M. 2005. "Numerical analysis of stress-deformation response in reinforced unpaved road sections". Geosynth. Int., 12: 111-119.
- 1-1- Leonardi, G. and Palamara, R. 2017. "Finite Element Modelling of Flexible Pavement Reinforced with Geogrid". Proceedings of the International Congress on Transport Infrastructure and Systems, Rome, Italy, pp. 477-484.
- Maxwell, S., W. H., Edil, T. B. and Benson, C. H. 2005. "Geosynthetics in Roadways and Pavements". National Highway Institute, Report No. FHWA-NHI-07-092.
- Moghadas Nejad, F. 2004. "Non linear finite element analysis of reinforced and unreinforced pavements". Int. J. Eng., Trans. A: Basics, 17: 214-226.
- Nagy, A. C., Moldovan, D. V., Ciotlaus, M. and Muntean, L. E. 2017. "Evaluation of experimental and numerical simulation of triaxial geogrid reinforcement on strength of road structures". Proc. Eng., 181: 472-479.
- Nair, A. M. and Latha, G. M. 2015. "Large diameter triaxial tests on geosynthetic-reinforced granular subbases". J. Mater. Civ. Eng., 27(4): 1-8.
- Perkins, S. S. 2002. "Evaluation of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavement Systems Using Two Pavement Test Facilities". Report No. FHWA/MT-02-008/20040, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Perkins, S. W., Christopher, B. R. and Cuelho, E. L. 2004. "Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements". Report No. DTFH61- 01-X-00068, Federal Highway Administration, Washington, D. C.
- Saghebfar, M. 2014. "Performance of geotextile-reinforced bases for paved roads". PhD Dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Tang, X., Stoffels, S. M. and Palomino, A. M. 2016. "Mechanistic-empirical approach to characterizing permanent deformation of reinforced soft soil subgrade". Geotextiles Geomembranes, 44: 429-441.
- Tingle, J. and Webster, S. 2003. "Corps of Engineers design of geosynthetic-reinforced unpaved roads". Transport. Res. Record, 1849: 193-201.
- Uzarowski, L. 2006. "The development of asphalt mix creep parameters and finite element modeling of asphalt rutting". PhD Dissertation, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- White, T. D., Haddock, J. E., Hand, A. J. T. and Fang, H. 2002. "Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements". Transportation Research Board, National Research Council, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 468, Washington, D.C.

- Wu, H., Huang, B., Shu, X. and Zhao, S. 2015. "Evaluation of geogrid reinforcement effects on unbound granular pavement base courses using loaded wheel tester". Geotextiles Geomembranes, 43(5): 462-469.
- Yetimoglu, T., Wu, J. T. H. and Saglamer, A. 1994. "Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand". *J. Geotech. Eng.*, 120(12): 2083-2099.
- Zornberg, J. G. and Gupta, R. 2010. "Geosynthetics in Pavements: North American Contributions". 9<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 379-398.