

# شبیه سازی عددی اثر مسلح سازی بستر راه با ژئوگرید در آزمایش میدانی

عبدالحسین حداد<sup>۱\*</sup>، حامد خاکپورمقدم<sup>۲</sup>، محمدایمان خداکریمی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
- ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
- ۳- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

\*haddad@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۷/۰۳]

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۱/۲۴]

## چکیده

یکی از روش های مناسب برای احداث سریع راه ها روی بسترهای ضعیف، استفاده از مسلح کننده های ژئوستتیکی با هدف بهسازی خاک است که در حال حاضر به آن بسیار توجه شده است. به منظور شناخت هرچه بیشتر رفتار بسترهای مسلح شده و تبیین روش های طراحی مناسب برای آنها، تاکنون آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی محدودی تحت شرایط بارگذاری ترافیکی واقعی برنامه ریزی و اجرا شده است. اما به علل مختلف از جمله هزینه های زیاد آزمون های صحرایی و مشکلات اجرایی، انجام آنها با محدودیت هایی همراه است. به کمک روش های شبیه سازی عددی می توان مطالعات پارامتریک جامعی را روی عملکرد این گونه راه ها در حالات با و بدون رویه به انجام رساند و تاثیر عوامل مهم را ارزیابی کرد. در این پژوهش با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی، عملکرد بستر راه مسلح شده با لایه های ژئوستتیک تحت اثر بارترافیک عبوری بررسی شد و نتایج آن به کمک داده های مطالعات میدانی اعتبار سنجی شد. مقایسه بین نتایج حاصل از مدل سازی عددی و مطالعات میدانی نشان می دهد که مدل عددی قابلیت پیش بینی رفتار یک سیستم مسلح شده با ژئوگرید را دارد و هماهنگی مناسبی بین نتایج حاصل از آزمایش های صحرایی و پاسخ های مدلسازی عددی وجود دارد. نتایج بررسی های عددی نشان می دهد نشست راه با بستر مسلح شده به شدت تحت تاثیر خصوصیات مکانیکی مسلح کننده ها از جمله سختی ژئوگرید و ضریب پواسون آن است به گونه ای که با کاهش سختی ژئوگرید در حدود ۵۰ درصد، نشست سطح راه حدود ۶۱ درصد افزایش می یابد. همچنین تاثیر سختی مصالح اساس و بستر بر میزان نشست سطح راه در حالت بستر مسلح شده به میزان ۵۰ درصد نسبت به بستر مسلح نشده کاهش می یابد.

**واژگان کلیدی:** ژئوگرید، راه با بستر مسلح، روش اجزا محدود، نشست.

## ۱- مقدمه

نرم و خاک های مسئله دار است. یکی از روش های مناسب برای مقابله با این مشکل، استفاده از روش بهسازی از طریق نصب لایه های مسلح کننده ژئوستتیکی روی بستر نرم است [1]. در

یکی از مهمترین مشکلاتی که امروزه بیشتر مهندسين در پروژه های راه سازی با آن مواجه هستند، احداث راه روی بستر

سازی با استفاده از روش اجزاء محدود و بارگذاری سیکلیک بررسی کردند. نتایج نشان داد بعد از ۱۰۰۰ بار سیکل بارگذاری در بستر مسلح نسبت به بستر غیر مسلح مقادیر ظرفیت باربری ۲۷ درصد افزایش و تغییر شکل سطح رویه ۱۸ درصد کاهش داشته است [8]. مطالعه آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی به وسیله بیابانی و همکاران روی مسلح سازی بستر مسیر راه آهن با ژئوسل به روش اجزاء محدود انجام شد. در این پژوهش بارگذاری به صورت سیکلیک اعمال شد و همخوانی مناسبی بین پاسخ آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی ارائه شد. نتایج نشان داد با افزایش سختی مسلح کننده میزان کرنش جانبی کاهش یافته و همچنین بیشینه مقاومت کششی بسیج شده مسلح کننده در شرایطی رخ می دهد که بستر ضعیف بوده و سختی کمی دارد [22]. براساس مطالعات پیشین استفاده از تحلیل های شبه استاتیکی و یا دینامیکی کامل در شبیه سازی عددی نتایج نزدیکتری نسبت به پاسخ های آزمایشگاهی یا آزمون های میدانی ارائه می دهد.

### ۳- مطالعه موردی

دپارتمان حمل و نقل مونتانا<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹ پروژه بهسازی بستر راه با دو محصول ژئوتکستایل و ژئوگرید را به وسیله پرکینز و همکاران در دستور کار خود قرار داد. مطابق شکل (۱ و ۲) در این پروژه یک ترانشه به طول ۱۹۵ متر، عرض ۴ متر و عمق ۱ متر، برای اجرای مقاطع آزمایش ایجاد شد. در طول آزمایش نیز تنها یک کامیون با سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت و فشار چرخ ۶۹۰ کیلوپاسکال برای اعمال بار ترافیکی استفاده شد. ۱۲ مقطع آزمایش ساخته شد که در ۱۰ مقطع ۱۰ محصول ژئوستتیک مورد آزمایش و دو مقطع غیر مسلح به عنوان مقاطع کنترل در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد نسبی مسلح سازی، استفاده شد [23]. در این پژوهش دو مقطع غیر مسلح و مسلح شبیه سازی می شود. مشخصات الاستیک و پلاستیک لایه های راه و همچنین ویژگی های الاستیک ژئوگرید شبیه سازی شده در جدول های (۱ و ۲) ارائه شده است.

دو دهه اخیر با افزایش محصولات و ایجاد تنوع، مسلح کننده های ژئوستتیک با ویژگی های بهتری تولید شده اند که تغییر شکل پذیری بالا، مقاومت در برابر خوردگی و عوامل شیمیایی و دوام زیاد از مزایای این محصولات است. در مقابل یکی از نقاط ضعف این محصولات خزش زیاد در طی زمان است [2]. آزمایش های متعددی شامل مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی برای بررسی رفتار ژئوستتیک ها در بستر راه ها انجام شده است [12-3]. انجام آزمایش های صحرایی و همچنین بازسازی رفتار راه به ویژه تحت اثر بار ترافیکی در آزمایشگاه کار بسیار دشوار و پرهزینه است. در همین راستا امروزه به استفاده از شبیه سازی عددی به منظور مطالعات پارامتریک و بررسی بهتر رفتار راه مسلح شده، بسیار توجه شده است. یک ابزار مناسب و قوی برای مطالعه رفتار راه های مسلح شده به وسیله ژئوستتیک ها (به ویژه ژئوگرید)، مدل سازی این سیستم مرکب در محیط اجزاء محدود است [13].

در این پژوهش ابتدا مطالعات انجام شده و یک آزمون صحرایی در خصوص تاثیر مسلح سازی بر عملکرد راه احداث شده بر بستر نرم بررسی می شود. در ادامه با شبیه سازی رفتار مقطع مسلح و غیر مسلح به روش اجزای محدود، مطالعات پارامتریک روی عواملی مانند ویژگی های مکانیکی مسلح کننده، سختی لایه اساس و بستر و تاثیر آن در کاهش نشست و کرنش جانبی مقاطع راه انجام می شود.

### ۲- مطالعات پیشین

آزمایش های مقیاس کامل شامل مطالعات صحرایی و میدانی است 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 دادند [14-17]. برخی دیگر از پژوهشگران نیز به علت محدودیت های انجام آزمایش میدانی به شبیه سازی عددی و گسترش مطالعه پارامتریک بستر مسلح پرداختند [18-21]. سعد ابراهیم و همکاران<sup>۱</sup> اثر مسلح سازی با ژئوگرید در راه احداث شده بر بستر ضعیف را از طریق مطالعه آزمایشگاهی و همچنین شبیه-

برای انتگرال‌گیری کمیت‌های مختلف در حجم یک المان استفاده می‌شود. المان‌هایی که انتگرال‌گیری آنها از نوع کاهش- یافته است در انتهای نام خود دارای حرف R و بسیار انعطاف پذیر است. میزان خطایی که در این نوع المان‌ها مشاهده می- شود در اکثر کاربردها در محدوده قابل قبولی قرار دارد [26]. مطابق شکل (۳)، المان استفاده شده در شبیه سازی لایه‌های خاک در مدل از خانواده 3D Stress و المان C3D8R سه بعدی ۸ گرهی انتگرال کاهش‌یافته خطی است. در این مطالعه برای دقت بیشتر و نزدیک شدن به رفتار واقعی ژئوگرید برای داشتن ضخامت کم نسبت به دو بعد دیگر و همچنین خاصیت کشش درون صفحه‌ای، از المان پوسته<sup>۲</sup> هشت گرهی SC8R از نوع پوسته پیوسته<sup>۳</sup> با ضخامت ۲ میلی‌متر، برای مدل‌سازی ژئوگرید استفاده شده است.

شکل ۳. المان‌های استفاده شده در مدل‌سازی [۲۶]

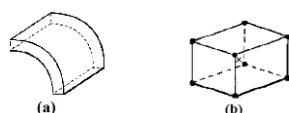


Fig. 3. Type of Elements in 3D Simulation: (a) shell element, (b) continuum element [26]

شبیه‌سازی چگونگی بارگذاری در مدل‌سازی به روش اجزا محدود دارای روند پیچیده و زمانبری است. برای مدل نمودن این بارگذاری روش ساده دیگری نیز وجود دارد که به وسیله هوآنگ<sup>۴</sup> [27] معرفی شده و متعاقباً هوآ [28]، وایت<sup>۵</sup> [29] و یوزاروسکی<sup>۶</sup> [30] استفاده کردند. در این بارگذاری ساده بار به صورت آنی به نمونه اعمال شده و مدت زمان بارگذاری با استفاده از طول تماس چرخ با سطح خاک و سرعت چرخ برای یک بار عبور، اعمال شده و سپس برای تعداد عبورها به صورت تجمعی، زمان نهایی محاسبه و اعمال شده است [31]. در این پژوهش نیز از بارگذاری شبه‌استاتیکی با اعمال فشار چرخ ۶۹۰ kPa استفاده شده است. در این نوع بارگذاری، در

2 Shell  
3 Cntinium Shell  
4Huang  
5White  
6 Uzarowski

شکل ۱. ترانشه آزمایش صحرایی [۲۳]



Fig. 1. The filed test trench [23]

شکل ۲. مقاطع آزمایش [۲۳]

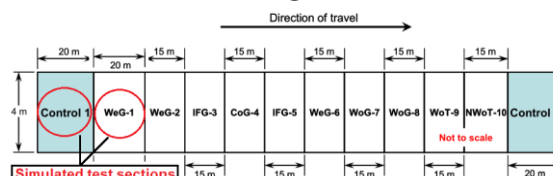


Fig. 2. The test sections [23]

جدول ۱. ویژگی‌های الاستیک و پلاستیک لایه‌ها [۲۳]

Layers	Soil classification (USCS)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Cohesion (kPa)	Friction angle
subgrade	SC	17	0.4	5000	30
base	GW-GM	310	0.4	1000	45

Table 1. Elastic and plastic properties of layers [23]

جدول ۲. مقاومت کششی ژئوگرید (kN/m) [۲۳]

Strength @ 2%	Strength @ 2%	Strength @ 5%	Strength @ 5%	Strength	Strength
MD	XMD	MD	XMD	MD	XMD
11	NP	22	NP	30	NP

Table 2. Tensile strength of geogrid [23]

## ۴- شبیه‌سازی عددی

### ۴-۱- المان‌های مدل‌سازی

استفاده از مدل دو بعدی کرنش مسطح یا تقارن محور، منجر به کاهش زمان و فضای حافظه نسبت به مدل سه بعدی می‌شود اما در مدل دو بعدی امکان بارگذاری ترافیکی نزدیک به واقعیت وجود ندارد. در مدل سه بعدی می‌توان سطح تماس بار چرخ را نزدیک به واقعیت مدل نمود که در ادامه به آن اشاره شده- است [24]. نرم‌افزار مدل‌سازی آباکوس<sup>۱</sup> ابزار قدرتمندی است که با روش اجزا محدود برای تحلیل تنش و کرنش در لایه‌های روسازی مناسب است [25]. در این نرم‌افزار روش‌های عددی

1 Abaqus

شبیه سازی شده را نشان می دهد.

شکل ۵. الف) ابعاد مقطع آزمایش، ب) ابعاد و فواصل چرخ ها، ج) تصویر سه بعدی مقطع آزمایش

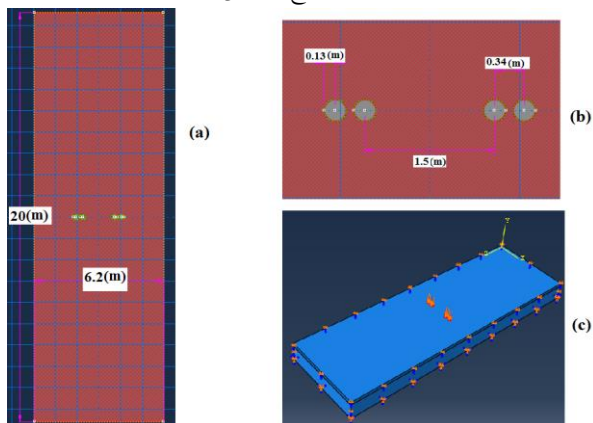


Fig. 5. 3D Finite Element Model: (a) Test Section Geometry, (b) Tire Contact Area Geometry and Distance, (c) Three-dimensional view

### ۴-۳- پارامترهای اندرکنش خاک و

#### ژئوگرید

یکی از فاکتورهای مهم و موثر در تغییر شکل و مقاومت خاک مسلح، مقاومت برشی اندرکنش یا اصطکاک خاک و مسلح کننده ژئوستتیکی است. بر اساس پژوهشی که لوپس و لوپس<sup>۳</sup> انجام دادند، دریافتند که پارامترهای اندازه چشمه ژئوگرید، ضخامت نوار ژئوگرید و ابعاد ذرات خاک در مقاومت برشی سطوح اندرکنش بسیار موثر است [34]. اصطکاک سطوح اندرکنش معمولاً شامل دو پارامتر، ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) و ضریب لغزش الاستیک (Eslip) است. ضریب اصطکاک، نسبت تنش برشی به تنش نرمال بوده و ضریب لغزش الاستیک حدی از جابه جایی برشی الاستیک بوده، که مقاومت برشی الاستیک سطوح اندرکنش به تنش برشی بحرانی در سطح اندرکنش می رسد. با بررسی های بعمل آمده، آنالیز معکوس در این پژوهش و بر اساس نتایج آزمایش های بیرون کشیدگی در پژوهش های مشابه گذشته، محدوده بررسی ضریب لغزش بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۵ و ضریب اصطکاک بین ۰/۵ تا ۱ است [7, 35-37].

نرم افزار آباکوس، بر اساس سرعت کامیون (۱۵km/h) زمان ماندگاری<sup>۱</sup> به بار اختصاص داده شده است و از قابلیت دینامیک صریح<sup>۲</sup> در نرم افزار استفاده شده است، به گونه ای که بدترین حالت ممکن که منجر به بیشترین نشست (نشست نهایی) شده، حاصل می شود. سطح بارگذاری نیز به صورت دایره معادل چرخ با شعاع ۱۳ سانتی متر محاسبه شده است. با توجه به سرعت کامیون و طول بارگذاری که قطر دایره معادل سطح بار است زمانی معادل ۰/۰۶۲۵ ثانیه برای بارگذاری در نظر گرفته شده است. برای سه بار عبور و ۳ محور عبوری و نه step با مشخصاتی که ذکر شد، وارد شده است. طبق پیشنهاد هواآنگ سطح معادل ساده ای برای سطح تماس چرخ می توان در نظر گرفت که در شکل (۴) ارائه شده است. پارامتر (L) مطابق شکل (۴) بر اساس نیرو و فشار چرخ حاصل می شود [32]. تصویر کردن سطح تماس چرخ ها و رویه، برای شبیه سازی بارگذاری ترافیکی بسیار حائز اهمیت است، سطح تماس حقیقی نزدیک به واقعیت را می توان یک مستطیل و دو نیم دایره در لبه ها فرض کرد، البته این سطح تماس فعال و حقیقی را می توان به سطح مستطیل معادل، تبدیل کرد [33].

شکل ۴. سطح معادل بارگذاری [۳۳]

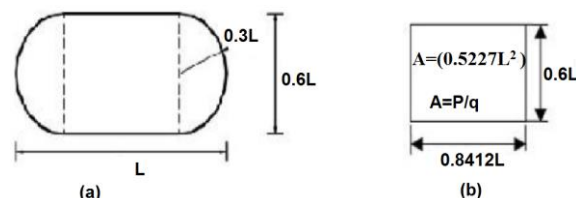


Fig. 4. Equivalent Contact surface between tire and pavement surface [33]

در این پژوهش از سطح معادل دایره ای هم سطح با مستطیل معادل استفاده شده است که شعاع دایره بر اساس نسبت نیروی وارد بر چرخ و فشار باد چرخ بدست می آید. در نرم افزار اجزا محدود، شرایط مرزی در نتیجه بسیار موثر است. برای شرایط مرزی در این پژوهش، در قسمت کف مدل از حرکت در تمام جهات جلوگیری شده و در نواحی کناری مدل، فقط حرکت در جهت قائم آزاد است. شکل (۵) ابعاد و فواصل چرخ ها و مقطع

## ۶- نتایج تحلیل عددی

در شکل (۸) کانتورهای نشست سطح راه شبیه‌سازی شده مقاطع غیر مسلح و مسلح در آنالیز اجزا محدود ارائه شده است. در قسمت (a) از شکل (۸) کانتور نشست در مقطع غیر مسلح تحت بار ترافیکی برای سه بار عبور کامیون را نشان می‌دهد. بیشینه نشست حدود ۱۰۷ میلی‌متر بوده و کانتور نشست تا عمق لایه بستر ادامه داشته است. قسمت (b) از شکل (۸) کانتور نشست مقطع مسلح شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸) حضور مسلح کننده منجر به کاهش ۸۴ درصد بیشینه نشست شده که می‌توان گفت عامل مقاومت کششی موجود در مسلح کننده 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 شده‌است.

شکل ۸. کانتور نشست در مقطع شبیه سازی شده، (a) مقطع غیرمسلح، (b) مقطع مسلح

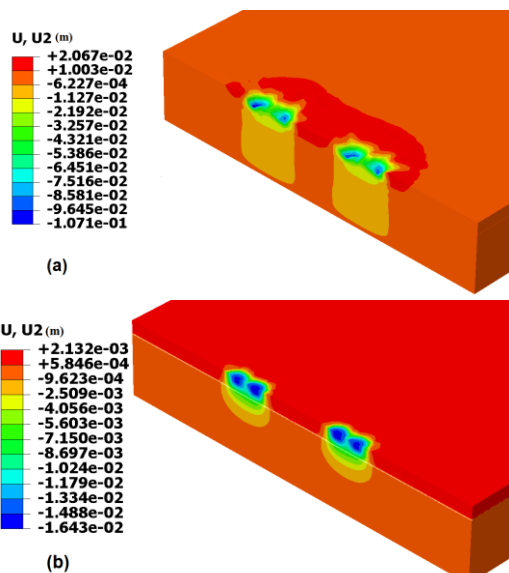


Fig. 8. (a) Settlement Contour in Unreinforced Section, (b) Settlement Contour in Reinforced Section

شکل (۹) نمودار هماهنگی نشست مقاطع مسلح در شبیه‌سازی و آزمایش صحرایی همچنین مقطع غیر مسلح در شبیه سازی عددی (برای سه بار عبور) را نشان می‌دهد. هماهنگی خوبی

پارامترهای اندرکنش بین خاک و مسلح کننده که در این پژوهش استفاده شده، به شرح جدول (۳) است.

جدول ۳. پارامترهای ورودی برای اندرکنش سطح خاک و ژئوگرید

	$\mu$	Eslip
Tangential Behavior	0.5	0.005
Normal Behavior	Hard contact	

Table 3. Soil-Geogrid Interface Parameters

## ۵- مقایسه نتایج اجزا محدود و آزمایش میدانی (آنالیز حساسیت)

به منظور کاهش خطا در مدلسازی مرزهای مدل در جهت عمودی کمینه ۵۰ برابر و در جهت افقی ۱۲ برابر شعاع دایره معادل سطح چرخ گسترده شود. همچنین شبکه‌بندی، باید گونه‌ای انتخاب شود که انسجام بین لایه‌ها حفظ شود [38]. شکل‌های (۶ و ۷) نمودارهای آنالیز حساسیت برای ابعاد مقطع و اندازه شبکه را نشان می‌دهد. درصد خطا بر اساس اختلاف نشست بیشینه، در شبیه‌سازی و آزمایش صحرایی است.

شکل ۶. نمودار آنالیز حساسیت تغییر ابعاد مقطع

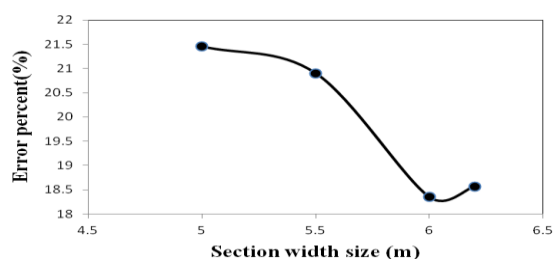


Fig. 6. Sensitivity analysis Diagram for optimum section width size

شکل ۷. نمودار آنالیز حساسیت تغییر ابعاد المان

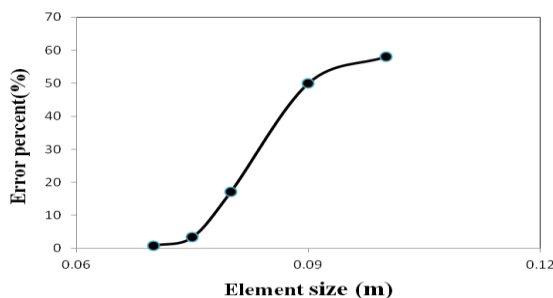


Fig. 7. Sensitivity analysis Diagram for optimum mesh size

کردن حرکت جانبی سنگدانه ها یا همان محصور کنندگی است و در اثر مسلح سازی کرنش جانبی نیز با نسبت مستقیم نسبت به نشست مقطع کاهش داشته است. البته یکی از علت های کاهش زیاد کرنش و جابه جایی در مقطع مسلح، استفاده از ژئوگرید قوی در این مقطع آزمایش است.

۶-۱- بررسی تاثیر سختی ژئوگرید در نشست سطح رویه و بستر تاثیر تغییرات پارامترهای مکانیکی شامل مدول الاستیسیته که بر اساس ژئوگریدها با سختی های مختلف مطابق جدول (۴) ارائه شده و همچنین ضریب پواسون ژئوگرید در نشست سطح راه و همچنین نشست سطح بستر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل های (۱۱، ۱۲ و ۱۳) ارائه شده است.

در این نمودارها میزان نشست بیشینه سطح رویه و همچنین بستر در مقابل تغییرات سختی ژئوگرید و ضریب پواسون مسلح کننده نشان داده شد. تغییر شکل در مقاطع مسلح به شدت تحت تاثیر حضور مسلح کننده و همچنین ویژگی های مکانیکی آن است به گونه ای که در مقطع مسلح با حضور ژئوگرید نشست حدود ۸۴ درصد کاهش داشته است و با کاهش سختی ژئوگرید از ۲۷۵ به ۱۰۲/۵ مگاپاسکال (بیش از ۶۰ درصد) نشست سطح رویه و بستر ۶۱ درصد افزایش داشته است. شکل (۱۱) نیز نمودار تغییرات ضریب پواسون مسلح کننده را نشان می دهد. با افزایش ۳۳ درصدی ضریب پواسون نشست ۲۰ درصد افزایش یافته که البته تغییرات نشست بسیار اندک است. به نظر می رسد با افزایش ضریب پواسون مسلح کننده مقاومت کششی که عامل مهمی در سازوکار تسلیح غشائی بوده را از دست داده است. نتایج سازگاری مناسبی با پژوهش های در مراجع [7, 35] دارد.

جدول ۴. مدول الاستیسیته ژئوگریدها در تحلیل عددی

Geogrid type	Biaxial welded geogrid	Vibrator y-welded geogrid	Integrally y-formed biaxial geogrid	Integrally formed biaxial geogrid
Elastic Modulus (MPa)	275	200	150	102.5

Table 4. Geogrid Types Elastic Modulus in Numerical study (Used in This research)

بین نمودارهای نشست در شبیه سازی عددی و آزمایش صحرایی وجود داشته و کاهش ۸۴ درصدی نشست زیر سطح بار چرخ و تورم نقاط بیرونی سطح بار چرخ کاملاً مشهود است.

شکل ۹. هماهنگی نمودار نشست ناشی از سه بار عبور کامیون- مقطع مسلح (شبیه سازی عددی و آزمایش صحرایی)

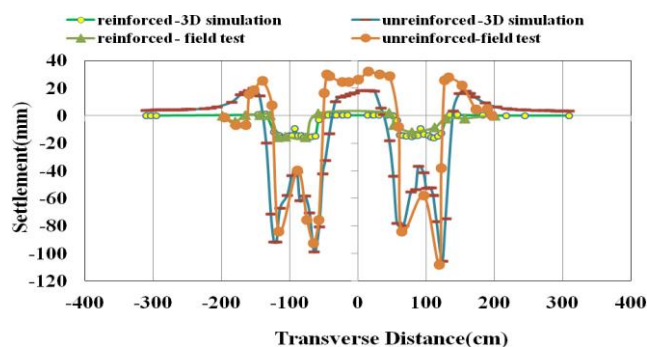


Fig. 9. Settlement Diagram Caused by Three Passes on Unreinforced & Reinforced test section

شکل ۱۰. کرنش افقی در جهت فرعی (مقابل حرکت ماشین) (a) مقطع غیرمسلح، (b) مقطع مسلح

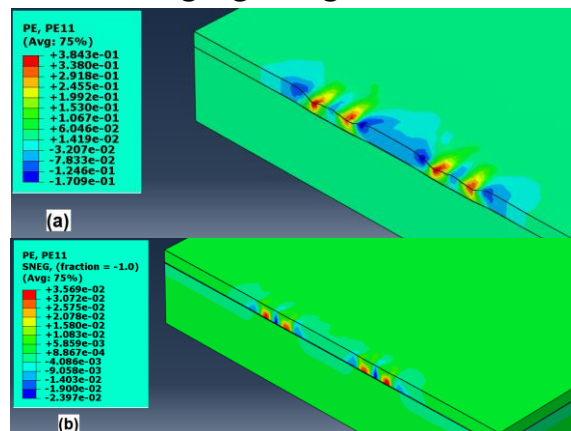


Fig. 10. (a) Lateral Strain (cross-machine direction) Unreinforced Section

(b) Lateral Strain (cross-machine direction) Reinforced Section

در شکل (۱۰) کرنش افقی در جهت فرعی در مقاطع غیر مسلح و مسلح در شبیه سازی عددی نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۰) در مقطع مسلح میزان کرنش فشاری جانبی به میزان ۸۶ درصد و کرنش کششی جانبی ۹۰ درصد کاهش یافته است. با توجه به کاهش شدید کرنش جانبی می توان گفت یکی از سازوکارهای مهم مسلح سازی در ژئوگرید محدود

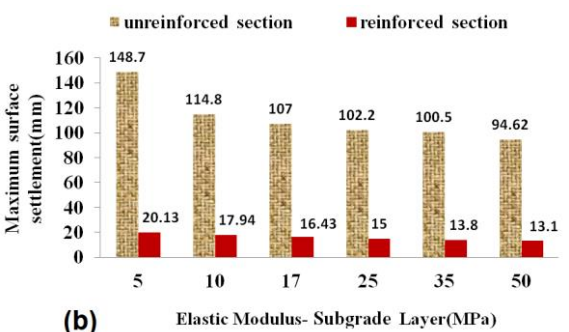
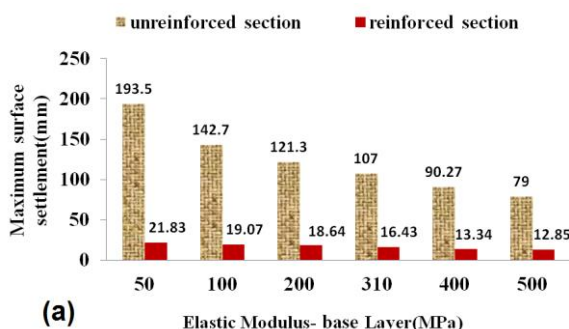


۳۰ درصد افزایش داشته است. اما شیب افزایش نشست با حضور مسلح کننده میزان قابل توجهی ملایم و کم است. در صورت عدم حضور ژئوگرید در اثر کاهش سختی اساس (کاهش ۸۰ درصد) نشست مقطع غیر مسلح از ۱۰۷ میلی متر به ۱۹۳/۵ میلی متر (۸۰ درصد افزایش) می رسد و میزان افزایش نشست در اثر کاهش سختی لایه اساس به صورت چشمگیر، بیشتر شد. شکل (۱۴) قسمت (b) تاثیر مدول الاستیسیته لایه بستر در نشست پیشینه سطح راه مسلح را نشان می دهد.

شکل ۱۴. نمودار مقایسه ای تاثیر تغییرات سختی لایه در نشست پیشینه

سطحی مقطع مسلح و غیر مسلح، (الف) تغییرات سختی اساس، (ب)

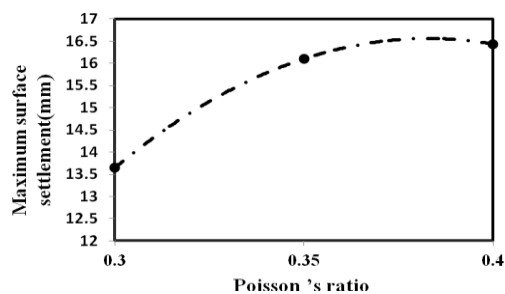
تغییرات سختی بستر



**Fig. 14.** (a) Variation of Base Layer Elastic Modulus Versus Maximum Surface Settlement for Reinforced & Unreinforced section. (b) Variation of Subgrade Layer Elastic Module Versus Maximum Surface settlement for Reinforced & Unreinforced section

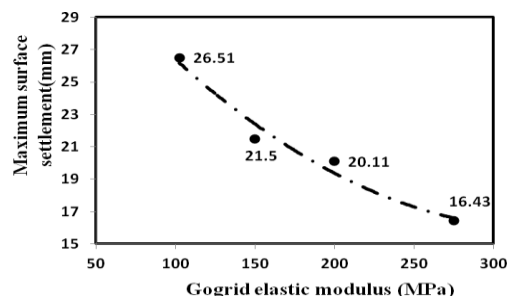
نتایج تحلیل عددی نشان می دهد سختی بستر در نشست رویه تاثیر زیادی دارد، به گونه ای که با کاهش سختی لایه بستر به میزان ۷۰ درصد (۱۷MPa به ۵MPa) نشست با حضور مسلح کننده میزان ۲۳ درصد افزایش داشته است. آشکار است، کاهش قابل توجه سختی بستر در مقطع غیر مسلح منجر به افزایش

شکل ۱۱. تاثیر تغییرات ضریب پواسون ژئوگرید در نشست سطح رویه



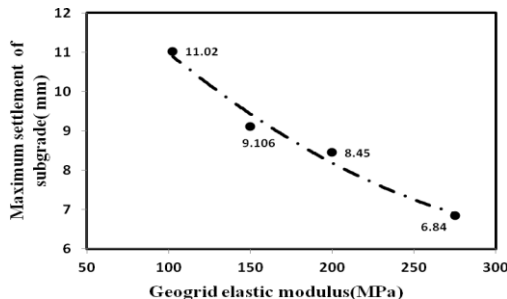
**Fig. 11.** Effect of Poisson's Ratio Variation on the Surface Maximum Settlement

شکل ۱۲. تاثیر تغییرات سختی ژئوگرید در نشست سطح رویه



**Fig. 12.** Effect of Geogrid Elastic Modulus Variation on the Surface Maximum Settlement

شکل ۱۳. تاثیر تغییرات سختی ژئوگرید در نشست سطح بستر



**Fig. 13.** Effect of Geogrid Elastic Modulus Variation on the Subgrade Maximum Settlement

۶-۲- بررسی تاثیر سختی اساس و بستر در نشست رویه مقطع مسلح

شکل (۱۴) قسمت (a) تاثیر تغییرات مدول الاستیسیته لایه اساس (رویه شنی) در نشست پیشینه سطح راه مقطع مسلح و غیر مسلح را نشان می دهد. کاهش مدول الاستیسیته یا به عبارتی سختی لایه اساس منجر به افزایش نشست گردیده است. به نحویکه با کاهش ۸۰ درصدی سختی لایه اساس (۳۱۰MPa به ۵۰MPa) میزان تغییر شکل و نشست سطح راه

درصد) و بعد از آن تقریباً ثابت می شود. این بدان معناست که با افزایش سختی بستر از مقدار مشخصی تاثیر کاهش نشست با حضور مسلح کننده کاهش می یابد و نقش ژئوگرید در کاهش تغییر شکل کم رنگ تر می شود. این نتیجه با نتایج پژوهش در مراجع [20, 22] سازگار است. مطابق شکل (۱۵) قسمت (b) نیز ضریب کاهش نشست برای لایه اساس که نسبت به بستر سخت تر بوده کلاً روند یکنواختی داشته است. با افزایش سختی لایه های روسازی، کاهش نشست تحت تاثیر حضور مسلح کننده تغییرات چشمگیری نداشته به گونه ای که برای لایه اساس که نسبت به لایه بستر سخت تر شده است تغییرات کاهش نشست در مقطع مسلح چشمگیر نبوده است.

## ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش اجزا محدود رفتار راه مسلح شده با ژئوگرید بررسی شد. به همین منظور دو مقطع غیر مسلح و مسلح شامل دولایه اساس و بستر و یک لایه مسلح-کننده ژئوگرید از یک آزمایش صحرایی در دانشگاه مونتانا شبیه سازی شد. نتایج حاصل از مطالعه عددی با نتایج آزمایش صحرایی مقایسه شد، سپس تاثیر ویژگی های مکانیکی مسلح کننده، تغییرات سختی لایه رویه و بستر مسلح شده در نشست سطح راه ارزیابی شد. در این پژوهش نرم افزار اجزا محدود عملکرد خوب و مطلوبی در شبیه سازی راه مسلح تحت بار ترافیکی داشته و نتایج شبیه سازی عددی به روش اجزا محدود همخوانی مناسبی با پاسخ های مطالعه صحرایی داشته است. با توجه به شبیه سازی در این پژوهش، بارگذاری شبه استاتیکی نتایج نسبتاً مطلوب و نزدیک به واقعیت با کمینه خطا را، نشان می دهد. نتایج کلی حاصل از این تحقیق به شرح ذیل ارائه می شود:

۱. حضور مسلح کننده قوی منجر به کاهش ۸۴ درصد در نشست بیشینه رویه شنی شده است و بهبود خواص مکانیکی ژئوستنتیک به ویژه افزایش مدول الاستیسیته ژئوگرید منجر به کاهش نشست سطح راه و بستر می شود. کاهش نشست ناشی از حضور مسلح کننده بیش از تغییرات سختی لایه ها موثر بوده است.

نشست سطح رویه (۳۹ درصد) در راه می شود ولی در مقطع مسلح حضور مسلح کننده می تواند این نشست را کنترل کرده و با سازوکار تسلیح غشائی، توزیع مناسب بار و کاهش اثر تنش روی بستر نرم، با وجود کاهش سختی یا ظرفیت باربری بستر مانع نشست و تغییر شکل های زیاد در سطح رویه و بستر شود. در مقاطع مسلح تغییرات سختی لایه ها تاثیر کمتری در نشست نسبت به مقاطع غیر مسلح دارد (بر اساس نتایج این بررسی تاثیر تغییرات سختی و شرایط لایه های اساس و بستر در مقاطع غیر مسلح ۲ برابر مقاطع مسلح است). شکل (۱۵) نیز تغییرات نسبت کاهش نشست در مقطع مسلح به مقطع غیر مسلح را بر اساس تغییرات سختی بستر و اساس، نشان می دهد.

شکل ۱۵. نمودار نسبت کاهش نشست بیشینه سطحی، (a) برای تغییرات سختی لایه بستر، (b) برای تغییرات سختی لایه اساس

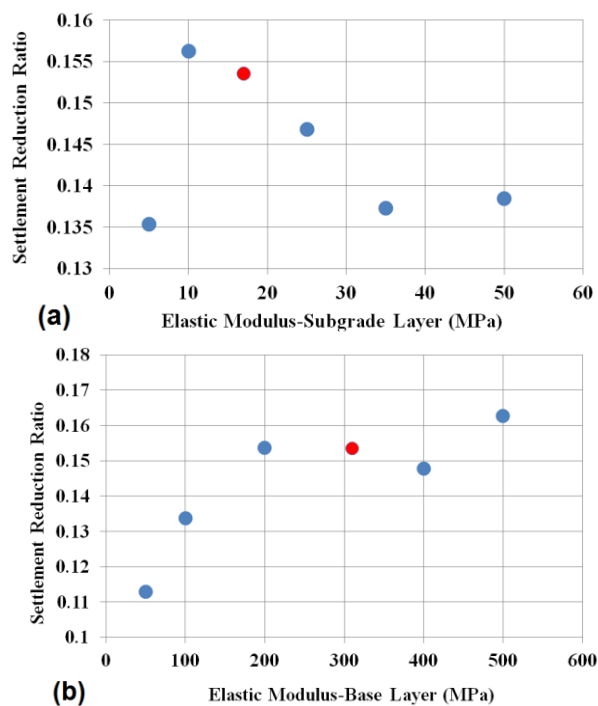


Fig. 15. Variation Settlement Reduction Ratio versus Elastic Module: (a) Subgrade Layer, (b) Base Layer

ضریب کاهش نشست، نسبت نشست در مقطع مسلح به میزان نشست در مقطع غیر مسلح، و بیانگر تاثیر حضور مسلح کننده در تغییرات نشست است. مطابق شکل (۱۵) قسمت (الف) با افزایش سختی لایه بستر در محدوده ۱۰MPa تا ۴۰MPa ضریب کاهش نشست روند نزولی منظمی داشته (حدود ۱۳



## References

## ۸- مراجع

- [1]Huang,W.C."Improvement evaluation of subgrade layer under geogrid-reinforced aggregate layer by finite element method", International Journal of Civil Engineering, Vol. 12, No. 3 (2014), pp 204-205.
- [2]Mosalenezhad, M., Baziyar, M. H., Amini, F. "Numerical study of increasing bearing capacity of cylindrical and circular foundation based on reinforced grain soils using a network restraint system", Modares Civil Engineering Journal, Volume 4, Number 4, Winter 2014.(In Persian).
- [3] Han J., Pokharel S., Yang X., Manandhar C., Leshchinsky D., Halahmi I., and Parsons R.."Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads." *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000286,(2011), pp 1525-1534.
- [4]Tingle, J. and Webster, S. Corps of Engineers Design of Geosynthetic-Reinforced Unpaved Roads, Transportation Research Record 1849,(2003), pp193-201.
- [5] Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S.M., and Bronnimann, R. "Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade".*Geotextiles and Geomembranes*. vol. 24, no. 1,(2006),pp 21-37.
- [6] Maxwell, S., W.-H., Edil, T.B., and Benson, C.H."Geosynthetics in roadways and pavements " geosynthetics engineering, national highway institute, Report No. FHWA-NHI-07-092,(2005).
- [7] Saghebfar M. " Performance of geotextile -reinforced Bases for Paved Roads". Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy Department of Civil Engineering College of Engineering Kansas State University Manhattan, Kansas (2014).
- [8]Ibrahim S.I. ,Ahmed N.G. ,Mohammed D. E. "Effect of Reinforcement on Improve Surface pavement for weak subgrade conditions", International Journal of GEOMATE, July, Vol. 11, Issue 23,(2016), pp 2188-2193.
- [9] Inti S., Sharma M., Tirado, C., Tandon,V. Base Course Geocell Reinforcement Evaluation by comparing 3-D FEM and Laboratory Evaluation" 6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management 2015,PP 49-57.
- [10] Tang X ., Stoffels S.M., Palomino A.M."Mechanistic-empirical approach to characterizing permanent deformation of reinforced soft soil subgrade" *Geotextiles and Geomembranes* 44 (2016) ,PP 429e441.
- [11] Wu H , Huang B , Shu X , Zhao S." Evaluation of geogrid reinforcement effects on unbound granular pavement base courses using loaded wheel tester".*Geotextiles and Geomembranes*,Volume 43, Issue 5, ( 2015), pp 462-469
- [12]Jersey S. R., Tingle J.S., Norwood G. J., Kwon J .,and Wayne M. "Full-Scale Evaluation of Geogrid-Reinforced Thin Flexible Pavements". In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2310, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., (2012), pp 61-71.
- [13]Zornberg, J.G. ,Gupta, R."Geosynthetics in pavements:

۲. با عبور کامیون و ایجاد شیارشدگی، ژئوسنتتیک تمایل دارد به سمت پایین و کناره‌های مقطع آزمایش جابه‌جا شود در نتیجه ابتدا سازوکار محصورکنندگی مانع افزایش عمق شیار شده سپس با افزایش تعداد عبور و برای تکمیل فرآیند مسلح-سازی، سازوکار تسلیح غشائی ژئوگرید فعال می‌شود.
۳. نتایج بررسی عددی نشان داد کاهش ۸۰ درصدی مدول الاستیسیته لایه اساس منجر به افزایش ۳۰ درصدی نشست با وجود مسلح کننده شده‌است، اما برای مقطع غیر مسلح کاهش سختی لایه اساس (به میزان ۸۰ درصد) منجر به ۸۰ درصد افزایش نشست شده و میزان افزایش نشست در اثر کاهش سختی لایه اساس در مقطع غیر مسلح به صورت چشمگی، بیشتر می‌شود.
۴. سختی بستر در نشست رویه تاثیر زیادی دارد، به گونه‌ای که با کاهش سختی لایه بستر به میزان ۷۰ درصد (۱۷MPa) به ۵MPa) نشست با حضور مسلح کننده میزان ۲۳ درصد افزایش داشته است، کاهش سختی لایه بستر (به میزان ۷۰ درصد) منجر به ۳۹ درصد افزایش نشست شده و میزان افزایش نشست در اثر کاهش سختی لایه اساس، بیشتر می‌شود.
۵. نتایج مطالعه عددی نشان داد، اگر لایه اساس و بستر دارای سختی کمی باشد حضور مسلح کننده تاثیر بیشتری در کاهش نشست و کرنش داشته‌است، در حالیکه 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.
۶. نتایج نشان داد کرنش‌های فشاری و کششی جانبی در مقطع مسلح در اثر حضور ژئوگرید کاهش خوبی داشته است پس سازوکار محصورکنندگی و تسلیح غشایی از سازوکارهای اصلی عملکرد ژئوگرید به عنوان مسلح کننده در بستر مسلح است.
۷. در مقاطع مسلح تغییرات سختی لایه‌ها تاثیر کمتری در نشست (۵۰ درصد) نسبت به مقاطع غیرمسلح دارد.

- [26] Sourgi M. H., Hadid, S. "Launching and preparing the ABAQUS / CAE Application Programming Practices" (2005). (In Persian).
- [27] Huang, H. "Analysis of Accelerated Pavement Tests and Finite element Modeling of Rutting Phenomenon". Ph.D. Thesis, Purdue University. (1995).
- [28] Hua, J. "Finite Element Modeling and Analysis of Accelerated Pavement Testing Devices and Rutting Phenomenon". Ph.D. Thesis, Purdue University. (2000).
- [29] White T.D., Haddock J.E., Hand A. J. T. and Fang H., "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., (2002).
- [30] Uzarowski, L. "The development of asphalt mix creep parameters and finite element modeling of asphalt rutting", A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering Waterloo, Ontario, Canada, (2006).
- [31] Fakhri, M., Toufiqh, A. "Evaluation of rutting in asphalt mixes using ABAQUS finite element software". 5th National Congress on Civil Engineering. 2010. (In Persian)
- [32] Hadi, M.N.S., Bodhinayake, B.C. " Non-linear finite element analysis of flexible pavements". Advances in Engineering Software, 34:, (2003), pp 657-662.
- [33] Huang, Y. "Pavement Analysis and Design". 2nd edition. New Jersey: Pearson Education. (2004).
- [34] Lopes, M. J., Lopes, M. L. "Soil-geosynthetic Interface – Influence of soil particle size and geosynthetic structure". Geosynthetics International, Vol. 6, No.4, (1987), pp 261-282.
- [35] Leng, J. " characteristics and behavior of geogrid-reinforced aggregate under cyclic Load" A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirement for the Degree of Doctor of Philosophy. (2002), pp 10-92.
- [36] Mahmoud G. Hussein, M.G., Meguid, M.A., " Three-dimensional finite element analysis of soil-geogrid Interaction under Pull-out loading condition", Geo Montreal, (2013).
- [37] Gu, J. "Computational modeling of geogrid reinforced soil foundation and geogrid reinforced base in flexible pavement", submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College for the degree of Doctor of Philosophy, (2011).
- [38] Duncan, J.M., Monismith, C.L., Wilson, E.L. "Finite Element Analyse Of Pavement ". Highway Research Record, NO, 228, TRB, Washington, D.C., (1968) pp 18-3.
- North American contributions". 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, (2010), pp 379-398.
- [14] Perkins, S. S. "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. (2002).
- [15] Al-Qadi, I. L., Dessouky, S. H., Kwon, J., and Tutumluer, E. "Geogrid in flexible pavements: validated mechanism". Transportation Research Record 2045, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. (2008), pp 102-109.
- [16] Farhan Ibrahim, S., Sofia, G. G., Inayah Kareem, A. "Experimental Study on geogrid-reinforced Subbase over Soft Subgrade Soil under repeated loading", Journal of Engineering and Development, Vol. 16, No.3, Sep. 2012 ISSN 1813- 7822. (2012). pp 218-240.
- [17] Nair, A., Latha, G. "Large Diameter Triaxial Tests on Geosynthetic-Reinforced Granular Subbases". J. of Materials in Civil Eng, (2014), pp 1-8.
- [18] Khodakarami, M.I., Khakpour Moghaddam, H. "Evaluating the Performance of rehabilitated roadway base with geogrid reinforcement in the presence of soil-geogrid-interaction" Journal of Rehabilitation in Civil Engineering 5-2 (2017) 32-45.
- [19] Perkins, S. W., Christopher, B.R., Cuelho, E.L. "Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements." Report No. DTFH61-01-X-00068, Federal Highway Administration, 400 Seventh Street, S.W. Room 4410, Washington D.C. 20590, (2004).
- [20] Leng, J., Gabr, M. "Numerical analysis of stress-deformation response in reinforced unpaved road sections". Geosynthetics International, Vol.12, (2005). pp 111-119.
- [21] Abdessemed, M., Kenai, S., Bali, A. "Experimental and numerical analysis of the behavior of an airport pavement reinforced by geogrids", Construction and Building Materials 94, (2015), pp 547-554.
- [22] Biabani M.M., Indraratna B., Trung Ngo N. "Modelling of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading". Geotextiles and Geomembranes 44 (2016), pp 489-503.
- [23] Cuelho, E., Perkins, S. "Field investigation of geosynthetics used for subgrade stabilization". FHWA/MT-09-003/8193 - Western Transportation Institute Montana State University - Bozeman, (2009), pp 5-80.
- [24] Cho, Y., McCullough, B. F., and Weissmann, J., "Consideration on finite-element method application in pavement structural analysis". Transportation Research Record 1539, TRB national Research Council, Washington, DC, (2000), pp 96-101.
- [25] Shafabakhsh, G., Akbari, A., Kashi, E. "Numerical analysis of the effect of wheels of different types of airplanes on determining the critical areas of the rigid pavement of airport", Journal of Numerical Modeling, No. 29, Semnan University Press, 2011. (In Persian).

# Numerical simulation reinforcing subgrade by geogrid in field test

A. Haddad<sup>1\*</sup>, H.Khakpour Moghaddam<sup>2</sup>, M.I.Khodakarami<sup>3</sup>

1. Associate Professor, Faculty of Civil Eng., Semnan University, Semnan, 35131-19111, Iran

2. M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3. Assistant Professor, Faculty of Civil Eng., Semnan University, Semnan, 35131-19111, Iran

\* haddad@semnan.ac.ir

## Abstract:

One of the appropriate methods to improve the roadway that is built on the weak subgrade is use of geosynthetic reinforcement that was already highly regarded. Nowadays, using new materials such as gesynthetic Polymer in the pavement layers, is highly regarded due to technical specifications and better distribution of traffic loads and prevents local settlement. Existence of the reinforcement layer at the base-subgrade interface results in lower vertical pressure on the underlying layer (subgrade) due to wider distribution of load from truck traffic.

Many field and laboratory test conducted to investigate the behavior of reinforced subgrade and achieve to the suitable design methodology has been implemented. However, due to limitations such as high cost of laboratory or field test, evaluate the performance of reinforced roads under traffic loads by numerical simulation methods have been developed. Numerical analysis are capable that with simulation of paved and unpaved road, develop the parametric studies for complex structures such as reinforced subgrade. In this study, the finite element method (FEM) is used to investigate the behavior of the geosynthetic reinforced roads. Finite Element Method is able to analyze stability, time- dependent problems and those problems with non- linear properties for the material. The simulation procedure is done in several steps. First the exact geometry and dimensions and other data of field test were extracted to produce the numerical model, then the Elastoplastic behavior is used to introduce materials behavior of pavement structure. Third, quasi static loading is also performing to acquire real simulation of experimental model. Therefore, the three-dimensional model in ABAQUS that has several advantages compared to the two-dimensional model conducted and the results of the 3d numerical study with field tests results in Montana university - Bazmn, is compared, then the effect of reinforcing mechanical properties, elastic module of base layer and reinforced subgrade on settlement was evaluated. The results showed that the simulation by finite element method, according to the assumptions used in three-dimensional modeling includes the quasi-static loading and frictional interaction parameters in terms of the contact surfaces, have a good agreement with the results of field test. FE analysis indicated that geogrid improves pavement life in terms of rutting. The numerical study results also show that the settlement of reinforced road strongly influenced by the mechanical properties of reinforcement. So with the existence of reinforcements, the section settlement will reduce up to 84 percent. FE analysis showed that benefits of reinforcement are more noticeable when stiffer geogrid are used .With reduce the elastic module of geogrid (about 50%) the surface settlement about 61% increased. If the base layer has a low stiffness, Existence of the reinforcement has more effect on reducing the settlement and the strain. Whereas increasing in the base layer stiffness, indicates the larger amounts of reduction on surface settlement with the existence of geogrid at the interface of base layers and subgrade and also effect the stiffness of subgrade and base layer in reinforced test section on the surface settlement compared to unreinforced test section about 50% reduced.

**Keywords:** geogrid, Reinforced subgrade, Finite element method, settlement