

بررسی رفتار خاک - مسلح شده تحت بار ترافیک

مجید طایفه^{1*}، مهدی سیاوش نیا²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

2- استاد یار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

*md.tayefeh@gmail.com

ارسال: دی ماه 97 پذیرش: بهمن ماه 97

چکیده

عدم مناسب بودن تعداد زیادی از راههای کشور به علت افزایش سرعت در حجم ترافیک، یکی از فاکتورهایی است که زمینه استفاده از روشهای نوین برای ایجاد افزایش ظرفیت باربری، راه ها می باشد. در این تحقیق با استفاده از فرض تقارن محوری برای تحلیل حدى توسط نرم افزار Plaxis 2D، بر روی رفتار خاک مسلح نشده و مسلح شده با ژئوگرید را تحت بار ترافیکی نشان می دهد. همچنین در این تحقیق مقرر است از مدل رفتاری موهر - کولمب برای لایه اساس و زیر اساس راه استفاده شود. در ابتدا خاک بدون ژئوگرید مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس همین مصالح تشکیل دهنده با مصالح کننده از نوع ژئوگرید دوباره بررسی و تحلیل شده است. نتایج حاصل از این تحلیل در راه مسلح نشده، نشانگر عدم تحمل رویه آسفالتی راه تحت بار ترافیکی است که با جایگزین کردن ژئوگرید در لایه اساس و زیر اساس راه، باعث بهتر شدن عملکرد رویه با کاهش توزیع بار بر روی بستر می گردد.

کلمات کلیدی: اساس و زیر اساس راه، ژئوگرید، تحلیل حدى، بار ترافیکی.

1- مقدمه

راهها از زمان دیرین احداث شده اند. برای مثال، خیابانهای سنگفرش در شهر UR در خاورمیانه یافت می شوند که به 4000 سال پیش از میلاد برمی گردند و خیابانهای آجرفرش شده در هند به 3000 سال پیش از میلاد برمی گردند (لی، 1992). پیش از 2000 سال گذشته، سلسله کین در چین، راههایی را از پایتخت خود به سراسر کشور احداث کرد. در سال 1879، اسکاتلند جاده ای از جنس سیمان پرتلند احداث کرد (پاسکو، 1998) که می توان آن را به عنوان نخستین جاده بتنی در جهان به شمار آورد. نخستین جاده آسفالت در ایالات متحده در سال 1870 در نیوآرک، نیوجرسی، (هوآنگ، 1993) و اولین روسازی بتنی در ایالات متحده در سال 1893 در بل فونتین، اوهایو، احداث شد (دلات، 2014). تا پیش از اوایل دهه 20 میلادی، ضخامت روسازی تنها بر اساس تجربه طراحی می شد. علیرغم اینکه روش طراحی کنونی به تدریج از هنر به یک علم تکامل یافته است، تجربه هنوز نقش قابل توجهی در طراحی روسازی های کنونی دارد (هوآنگ، 1993) [1].

2- مروری بر مطالعات انجام شده

در دهه‌های پیشین، محققین آزمایش‌های متفاوت آزمایشگاهی و میدانی را جهت بررسی راه‌های فاقد رویه پایدارشده با ژئوسینتتیک انجام داده‌اند. عملکرد بخش‌های پایدارشده با ژئوسینتتیک، اساساً از نظر توزیع بار بهبودیافته و کاهش تغییر شکل‌های دائمی مربوطه ارزشیابی شده‌اند. در کل، جهت شبیه‌سازی بار حاصل از یک چرخ در شرایط ترافیک واقعی، 40 کیلونیوتن بار دینامیک بر صفحه‌ای با قطر 300 میلی‌متر اعمال شد. جهت بررسی راه‌های تقویت‌شده با ژئوگرید، هاس و همکاران (1988)، آزمایش‌های صفحه دینامیک را در جعبه‌ای با ابعاد $4/5$ متر \times $1/8$ متر \times $0/9$ متر انجام دادند. ضخامت لایه اصلی، استحکام بستر، و محل ژئوگرید به عنوان متغیرهای مطالعه تعیین شده بودند. انحناء رویه، فشار عمودی بر روی بستر، و فشارها بر ژئوگرید در طول آزمایش اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمایش نشان داد که تقویت با ژئوگرید، تعداد سیکل بارها را در مقایسه با بخش تقویت‌نشده افزایش داده است [2].

القادی و همکاران (1994) یک راه فرعی معمولی در ویرجینیا را در جعبه‌ای به ابعاد 3 متر \times $2/1$ متر \times $1/8$ متر را تحت بار دینامیک اعمال‌شده توسط یک صفحه فولادی به قطر $0/3$ متر را شبیه‌سازی کردند. انحناء رویه بخش‌های راه به وسیله حسگرهای جابجایی دیفرانسیلی متغیر خطی (LVDTs) بررسی شد. نتایج آزمایش نشان داد که ژئوگرید به صورت قابل توجهی انحناء بخش‌های رویه بر روی بستر ضعیف را کاهش داده است [3]. پرکینز (1999) آزمایش‌های بار صفحه بر بخش‌های راه را در جعبه‌ای به ابعاد 2 متر \times $2x$ متر \times $1/5x$ متر انجام داد. بار دینامیک 40 کیلونیوتنی جهت شبیه‌سازی بار ترافیک به وسیله یک صفحه فولادی به قطر $0/305$ میلی‌متر اعمال شد. از ابزارهای متفاوتی برای بررسی انحناء رویه، فشار ژئوسینتتیک و بار وارد بر خاک استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد که ژئوگرید عملکرد بخش‌های راه با $1/5$ CBR بستر را بهبود بخشید. هرچند، بهبود اندکی برای بخش‌های راه با 20% CBR بستر مشاهده شد [4].

کوون و توتوملویر¹ (2009) مدلی مکانیکی برای تحلیل رویه‌های انعطاف‌پذیر تقویت‌شده با ژئوگرید بر اساس روش تحلیل حدی (FEM) ایجاد کردند [5]. آنها لایه سخت‌تر نزدیک به ژئوگرید را به دلیل به هم پیوستگی مصالح که ناشی از تنش‌های باقی‌مانده از تراکم مصالح است، به عنوان شرایط آغازین در تحلیل حدی مدل‌سازی کردند. آنها آزمون‌های نفوذ دینامیکی مخروط (DCP) را بر بخش‌های تقویت‌شده با ژئوگرید در کالیفرنیا، را انجام داده و افزایش استحکام و سختی را مشاهده کردند. آنها همچنین آزمون‌های کششی متعددی با استفاده از روش المان گسسته (DEM) را انجام دادند که نشان‌دهنده منطقه سخت‌شده در 10 تا 25 سانتی‌متر بالا و پایین ژئوگرید، نیروهای تماسی بیشتری را پس از برداشتن مصالح متراکم تحمل کرده است.

توتوملویر و همکاران² (2012) مکانیزم‌های به هم پیوسته مصالح ژئوگرید را با استفاده از روش المان گسسته (DEM) تصویر محور بررسی کردند. آنها از این رویکرد برای سنجش بهتر عوامل تاثیرگذار بر تعامل مکانیزم‌های به هم پیوسته بین ژئوگریدها و مصالح استفاده کردند [6]. توتوملویر و همکاران (2012) اثرگذاری مدل المان گسسته به کمک تصویر خود را از طریق آزمون‌های کششی مستقیم انجام‌شده در نمونه مصالح دولومیتی بازسازی‌شده تمیز در دو نمونه تقویت‌شده و تقویت‌نشده نشان دادند. بر اساس بررسی مطالعات مذکور در بالا، خصوصیات ژئوگرید که در مطالعات پیشین مورد تمرکز بودند با خصوصیتی که مورد تمرکز مطالعه حاضر هستند در جدول 1 مقایسه شده‌اند.

¹ Kwon and Tutumluer

² Tutumluer et al.

جدول 1- فهرست خصوصیات بررسی شده ژئوگرید برای کاربردهای تقویت اساس در مطالعه حاضر و مطالعات پیشین [7]

| Mechanical Properties (MD and XD) | Webster (1992) | Giroud and Hann (2004) | Chehab et al (2007) | Tang et al (2008) | Christopher et al (2008) | Cuelho and Perkins (2009) | Tingle and Jersey (2009) | Abu-Farsakh and Chen (2011) | Current Study |
|-----------------------------------|----------------|------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|
| Ultimate Rib Strength | | | √ | √ | | √ | | | √ |
| Rib Strength at 2% Elongation | | | √ | √ | √ | √ | | | √ |
| Rib Strength at 5% Elongation | | | | | | √ | √ | | √ |
| Junction Strength | √ | | √ | √ | √ | | | | √ |
| Tensile Modulus | | √ | | | | | | | |
| Aperture Size | √ | | √ | √ | | | √ | √ | |
| Flexural Rigidity | | | √ | √ | | | | | |
| Aperture Stability Modulus | | √ | | | | √ | | √ | |
| Rib Thickness | √ | | | | | | | | |
| Rib Cross-Section Shape | √ | | | | | | | | |

رفتار ارتجاعی بسترهای پایدارشده با ژئوسینتتیک هنوز به صورت کامل درک نشده است. مطالعات پیشین برخی تناقضات را نشان می‌دهند. رحمان و همکاران (2013) ضرایب ارتجاعی و خصوصیات تغییرشکل دائمی ساخت و تخریب (D&C) مواد پایدارشده با ژئوگریدهای دومحوره و سه‌محوره را مطالعه کردند [8]. تجهیزات تکرار سه‌محوری بار (RLT) جهت تعیین مدول ارتجاعی گونه‌های ساخت و تخریب پایدارشده مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر مدول ارتجاعی مصالح مسلح شده با ژئوگرید با مقاومت بالاتر از مصالح مسلح نشده مشابه بود. تغییرشکل دائمی مصالح مسلح شده با ژئوگرید کمتر از مصالح مسلح نشده مشابه بود. ابوفرسخ و همکاران (2007)، یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی سه‌محوری را انجام داده و آثار خواص، محل و تعداد لایه‌های ژئوگرید را بر تغییر شکل های ارتجاعی و دائمی (پلاستیک) نمونه‌های تحت بار دینامیک ارزشیابی کردند. نتایج آزمایش نشان داد که نوع ژئوگرید و نحوه قرارگیری ژئوگرید اثر معناداری بر ارزش فشار ارتجاعی نداشتند [9].

3- مدلسازی عددی

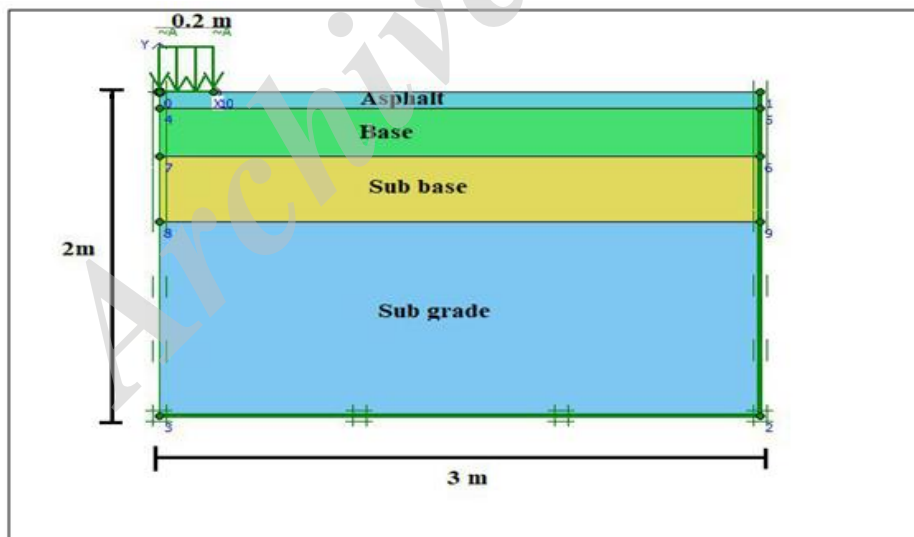
3-1- مدلسازی و مقادیر پارامترها

یک جاده معمولی مسلح شده شامل یک لایه مخلوط گرم آسفالت - بتنی، اساس، زیر اساس و بستر و همچنین لایه های مسلح کننده می باشد. این سیستم مسلح شده به عنوان یک ساختار چند لایه تحت بارگذاری دینامیکی مدل سازی شده است. این مدل توسط نرم افزار Plaxis 2D تحلیل حدی بر روی جاده مسلح نشده و مسلح شده با ژئوگرید تجزیه و تحلیل شده است. بار به عنوان فشار یکنواخت بر روی یک منطقه دایره ای با شعاع 0.2 متر اعمال می شود. مقادیر فشار اعمال شده عبارت بودند از: 1100 kPa , 550. در ادامه به آسفالت و ژئوگرید مدل رفتاری الاستیک خطی و در ادامه به اساس، زیر اساس و

همچنین به بستر جاده مدل رفتاری موهر - کولمب اختصاص داده شده است. مدل تحلیلی متقارن در تجزیه و تحلیل با استفاده از المان 15 گره ای برای بالا بردن دقت عملیات نسبت به حالت 6 گره ای مثلثی، انتخاب گردید. در ادامه نوع مش بندی برای تحلیل دقیق تر برای لایه های بستر و زیر اساس از نوع ریز¹ و برای آسفالت، ژئوگرید و اساس راه از نوع خیلی ریز انتخاب شد. مدل سازی تقارن محوری در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شده است زیرا می توان بار گذاری دایره ای را شبیه سازی کند و زمان محاسباتی کوتاه تر تحت بار دینامیکی وارده، میشود. مشخصات مصالح بر گرفته از مقاله Faheem and Ahmed Hassan در سال 2014 برای بار ترافیک بر روی روسازی بتن - آسفالت ارائه شده در جدول 2 مورد استفاده قرار گرفت [10]. پایین مدل در هر دو جهت عمودی و افقی ثابت است. دو لبه خاک از حرکت در جهت افقی محدود شده است (شکل 1).

جدول 2 - مشخصات لایه های مختلف روسازی در مدلسازی

| Material | Asphalt Concrete | Base (Crushed Stone) | Sub-base (Crushed Stone) | Sub-grade (Sand) |
|--------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|------------------|
| Model | Linear-elastic | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |
| Thickness (m) | 0.10 | 0.30 | 0.40 | 1.20 |
| Young's modulus (KPa) | 2100×10^3 | 100×10^3 | 50×10^3 | 20×10^3 |
| Poisson's Ratio | 0.45 | 0.35 | 0.30 | 0.30 |
| Dry density (kN/m^3) | 20.0 | 20.0 | 18.0 | 17.0 |
| Saturated density (kN/m^3) | - | 22.00 | 20.0 | 18.0 |
| Cohesion (kN/m^2) | - | 30 | 20 | 0 |
| Friction angle (degree) | - | 43 | 40 | 35 |
| Dilatation angle (degree) | - | 13 | 14 | 5 |
| k_x [m/day] | - | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_y [m/day] | - | 1.000 | 1.000 | 1.000 |



شکل 1- نمایش مقطع خاک برای تحقیق حاضر


ژئوگریدها، مسلح کننده هایی با ضخامت نازک می باشند که دارای مقاومت محوری خوبی در تحمل نیروهای محوری کششی هستند. از این المانها در مدل سازی ابنیه های خاک مسلح استفاده می شود. المانها مرتبط با این عناصر دارای دو درجه

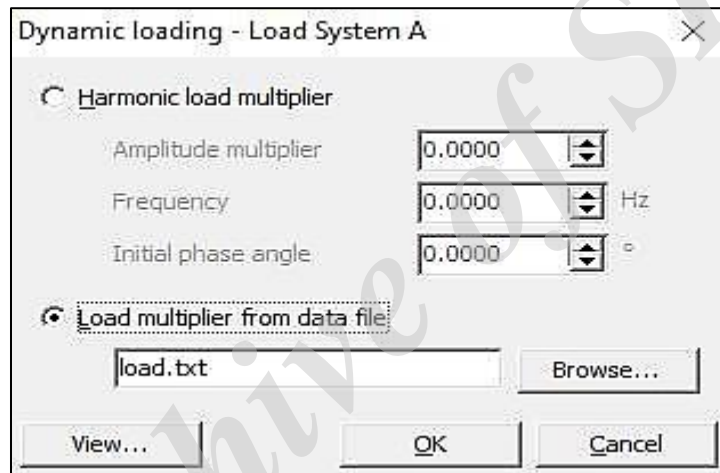
¹ Fine

آزادی انتقالی در هر گره بوده به طوری که در صورت انتخاب المانهای 15 گرهی برای مصالح خاکی، هر المان ژئوگرید به وسیله 5 گره و در حالیکه المانهای 6 گرهی انتخاب شوند هر المان ژئوگرید به وسیله 3 گره تعریف می شود. خصوصیات مکانیکی ژئوگریدهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول 3 ارائه شده است.

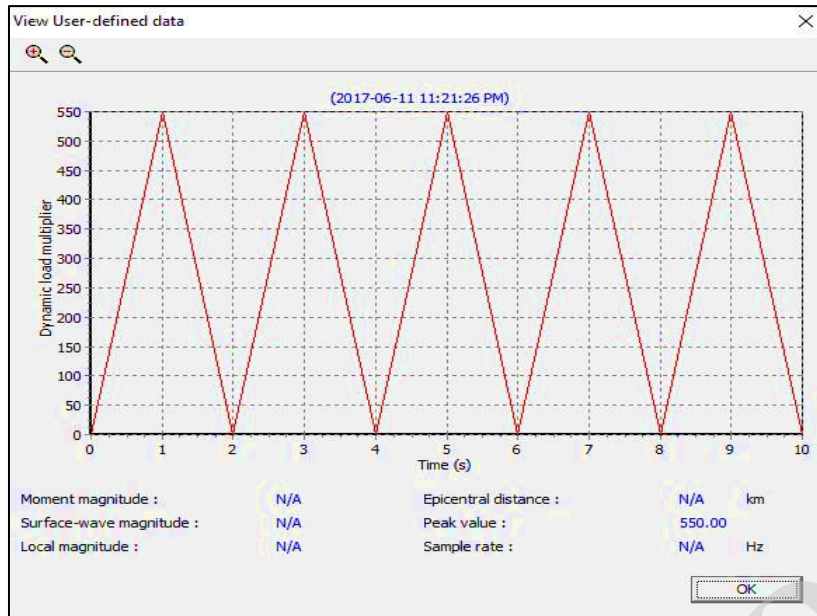
جدول 3- خصوصیات فیزیکی ژئوگریدها

| انواع ژئوگرید | سختی محوری KN/m | نسبت پواسون |
|---------------|-----------------|-------------|
| Geogrid 1 | 1000 | 0.25 |
| Geogrid 2 | 2500 | 0.25 |
| Geogrid 3 | 5000 | 0.25 |

فشارهای دینامیکی را با استفاده از ضرایب فشار دینامیکی پنجره ورودی در زیر گزینه Multipliers فعال نمایید و دگمه  فعال برای هر فشار ظاهر خواهد شد. در این حالت برای ایجاد فشارگذاری از منوی فشارگذاری گسترده استفاده کرده و برای تبدیل آن به فشارگذاری دینامیکی از گزینه Loads زیر گزینه Set Dynamic Load System را انتخاب و گزینه Load System A را فعال می کنیم (شکل 2). در پایان روی Load multiplier from data file در پنجره Dynamic loading-Load system A کلیک نماید. فشارگذاری در تحقیق حاضر به صورت ارتعاش یا فشار سیکلی قائم می باشد (شکل 3).



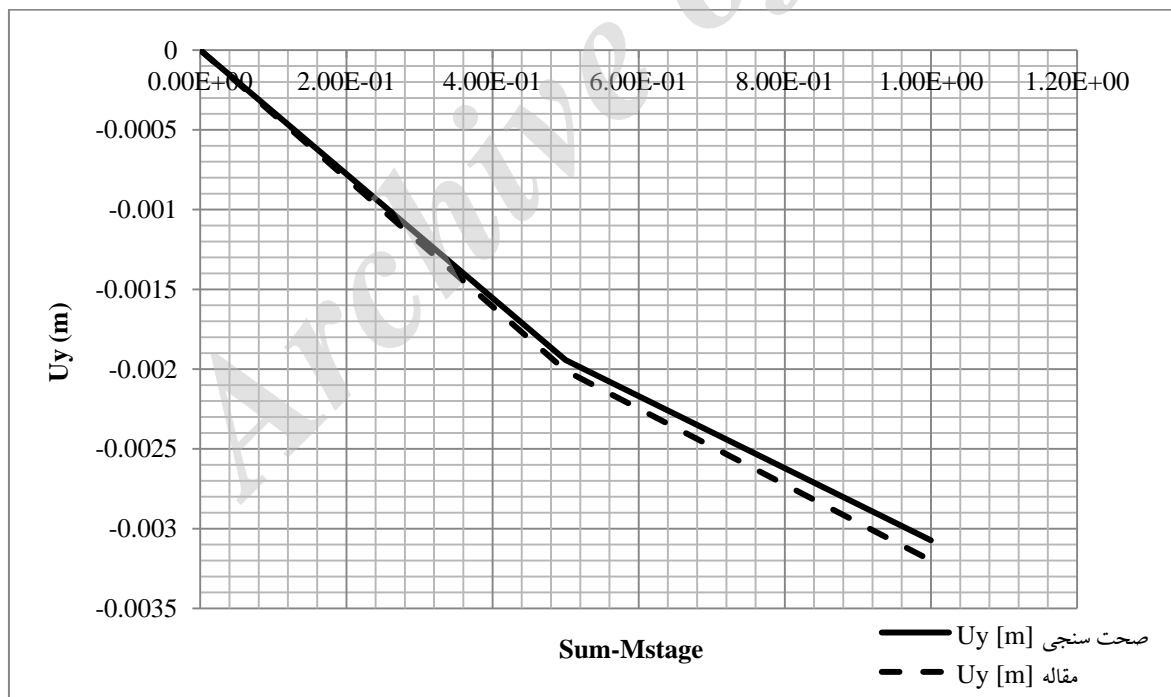
شکل 2- فشار دینامیکی



شکل 3- نحوه توزیع فشار سیکی

3-2- صحت سنجی مدل

جهت اعتبار سنجی و سنجش درستی مدل‌سازی، نیاز به مدل مرجعی می باشد تا از صحت نتایج بدست آمده اطمینان حاصل شود. برای این منظور از مدل‌سازی (Faheem et al. 2014) که با استفاده از نرم افزار Plaxis و به صورت دو بعدی برای بهسازی جاده نوع درجه یک انجام شده، به عنوان مدل مرجع استفاده گردیده است [10]. در شکل 4 نتایج حاصل از مدل سازی و مدل مرجع جهت مقایسه نشان داده شده است.

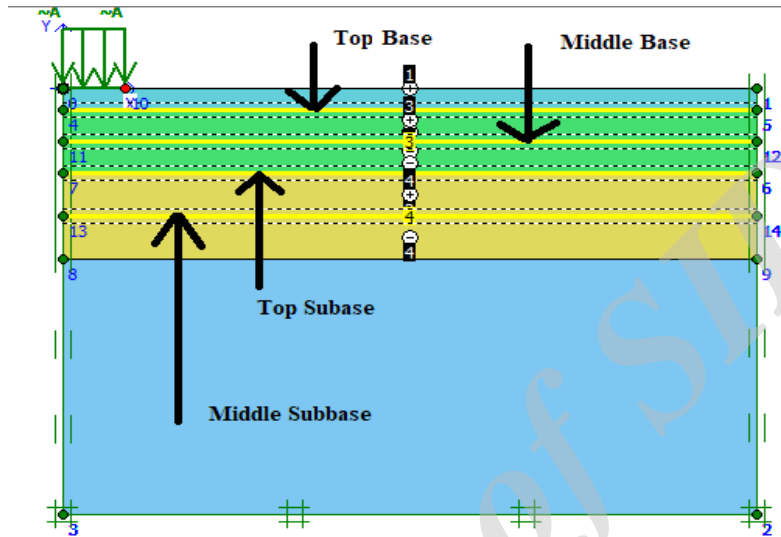


شکل 4- مقایسه نتایج تغییرات نشست (Uy) - گام های محاسباتی (Sum-Mstage)

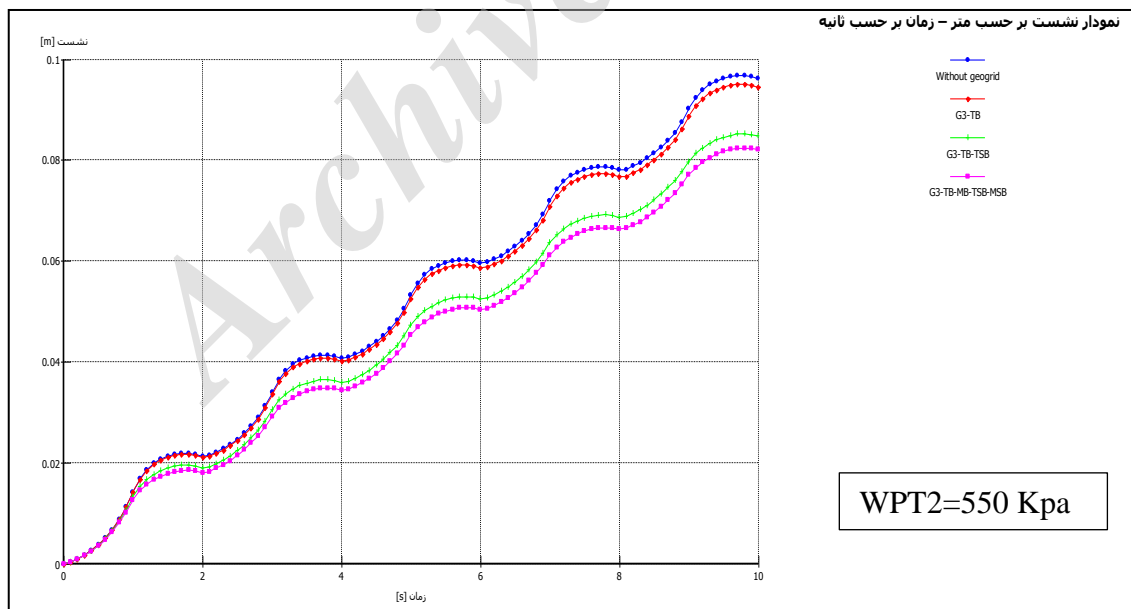
همانطور که در شکل 4 ملاحظه می شود، نتایج حاصل از مدل سازی انجام شده با مدل مرجع تطابق قابل قبولی داشته است. با این کار از نحوه مدل سازی و شبکه بندی برای مدل های بعدی اطمینان حاصل شده است.

3-3 - بررسی افزایش تعداد لایه ژئوگرید ها تحت فشار چرخ 550 کیلو پاسکال

شکل 6 نمودار نشست-زمان را برای فشار سیکلی چرخ WPT2 برابر با 550 کیلو پاسکال، اعمالی در 5 سیکل در بازه زمانی 10 ثانیه و قرارگیری مسلح کننده نوع G3 با سختی محوری 5000 KN/m و تعداد لایه ها در قسمت ¹TB-TSB و ²TB-MB-TSB-MSB (شکل 5) همراه با بدون ژئو گرید را نشان می دهد. همانطور که از روند تغییرات منحنی ها در شکل 6 می توان مشاهده نمود، با افزایش تعداد سیکل اعمال فشار چرخ مقادیر نشست افزایش می یابد و حداکثر مقادیر حداکثر نشست (S_{max-m}) در حداکثر زمان ده ثانیه به ازای اعمال 5 سیکل فشار چرخ به وقوع می پیوندد.



شکل 5- جانمایی قرارگیری ژئو گرید ها



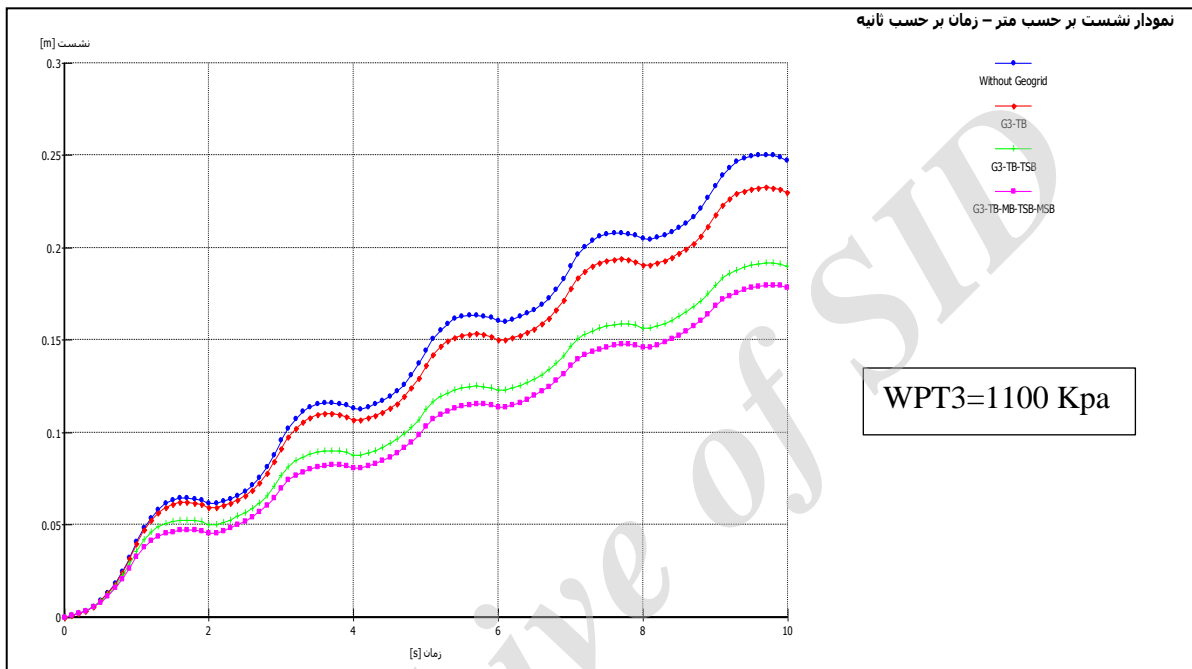
شکل 6- نمودار نشست بر حسب متر - زمان بر حسب ثانیه (فشار چرخ 550 کیلو پاسکال) برای حالت بدون ژئوگرید و تعداد لایه ها با شرایط قرار گیری ژئوگرید TB-MB-TSB-MSB و TB-TSB ، TB در G3

- ¹ Top Base
- ² Top Base-Top Sub Base
- ³ Top Base-Middle Base-Top Sub Base-Middle Sub Base

با توجه به شکل 6 با افزایش تعداد لایه های ژئو گرید در این مدل مشاهده می شود که مقدار S_{max-m} به مقدار 19 درصد با قرار گیری ژئو گرید به صورت دو لایه ایی همزمان در لایه های اساس و زیراساس نسبت به حالت غیر مسلح، کاهش پیدا می کند که از حالت یک لایه ژئو گرید در لایه اساس 15/5 درصد بیشتر است و همچنین 6 درصد عملکرد بهتری نسبت به حالتی که ژئو گرید به صورت تک لایه ایی همزمان در لایه های اساس و زیراساس قرار گرفته است.

3-4- بررسی افزایش تعداد لایه ژئو گرید ها تحت فشار چرخ 1100 کیلو پاسکال

شکل 7 نمودار نشست-زمان را برای فشار سیکلی چرخ WPT3 برابر با 1100 کیلو پاسکال و قرار گیری مسلح کننده نوع G3 با سختی محوری 5000 KN/m و تعداد لایه ها در قسمت TB، TB-TSB، TB-MB-TSB-MSB همراه با بدون ژئو گرید را نشان می دهد.



شکل 7- نمودار نشست بر حسب متر - زمان بر حسب ثانیه (فشار چرخ 1100 کیلو پاسکال) برای حالت بدون ژئو گرید و تعداد لایه ها با شرایط قرار گیری ژئو گرید TB، TB-TSB، TB-MB-TSB-MSB در G3

با توجه به شکل 7، با افزایش تعداد لایه های ژئو گرید در این مدل ها مشاهده می شود که مقدار S_{max-m} به مقدار 33 درصد با قرار گیری ژئو گرید به صورت دو لایه ایی همزمان در لایه های اساس و زیراساس نسبت به حالت غیر مسلح، کاهش پیدا می کند که از حالت یک لایه ژئو گرید در لایه اساس 25 درصد بیشتر است و همچنین 9 درصد عملکرد بهتری نسبت به حالتی که ژئو گرید به صورت تک لایه ایی همزمان در لایه های اساس و زیراساس قرار گرفته است.

4- نتیجه گیری

- در فشار های دینامیکی کم با توجه به، عدم به کشش افتادن ژئو گریدها با افزایش تعداد لایه ها، تغییر محسوسی نسبت به حالت بدون ژئو گرید بدست نمی آید.
- با افزایش تعداد لایه ژئو گرید با سختی محوری 1000، 2500 و 5000 کیلو نیوتن بر متر، در حالت یک لایه ژئو گرید در اساس و یک لایه ژئو گرید در زیر اساس به حالت بدون ژئو گرید نشست به ترتیب 5، 19 و 25 درصد کاهش پیدا می کند.

- با افزایش تعداد ژئوگرید به 4 لایه ژئوگرید با سختی محوری 1000 ، 2500 و 5000 کیلو نیوتن بر متر، در حالت دو لایه ژئوگرید در اساس و دو لایه ژئوگرید در زیر اساس نشست به ترتیب 8 ، 24 و 33 درصد نسبت به حالت بدون ژئوگرید کاهش پیدا می کند .
- حالت بهینه، زمانی بدست می آید که ژئوگرید ها به صورت تک لایه ای همزمان در اساس و زیر اساس قرار می گیرد.

5- مراجع

1. Sun, X. (2015). "Resilient Behavior and Permanent Deformations of Triaxle Geogrid Stabilized Bases over Weak Subgrade", Doctor of Philosophy. Thesis, The University of Kansas, Lawrence, USA.
2. Haas, R., Walls, J., Carroll, R., 1988. Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavements.
3. Al-Qadi, I.L., Brandon, T.L., Valentine, R.J., Lacina, B.A., Smith, T.E., 1994. Laboratory evaluation of geosynthetic-reinforced pavement sections.
4. Perkins, S.W., 1999. Geosynthetic reinforcement of flexible pavements: laboratory based pavement test sections.
5. Kwon, J., and Tutumluer, E.(2009)."Geogrid base reinforcement with aggregate interlock and modeling of the associated stiffness enhancement in mechanistic pavement analysis", 88th annual conference of Transportation Research Board, 85-95, Washington, D.C., 2012.
6. Tutumluer, E., Huang, H., and Bian, X. (2012). "Geogrid-aggregate interlock mechanism investigated through aggregate Imaging-Based Discrete Element Modeling Approach", International Journal of Geomechanics, 12 (4):391-398 August, 2012.
7. Tahsina, M. (2013). "A study on the influence of selected geogrid index properties on their in-aggregate performance", Doctor of Philosophy. Thesis, The University of Oklahoma, Norman, USA.
8. Rahman, M., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M., Imteaz, M., 2013. Resilient modulus and permanent deformation responses of geogrid-reinforced construction and demolition materials. Journal of Materials in Civil Engineering 26, 512-519.
9. Abu-Farsakh, M., Nazzal, M., Mohammad, L., 2007. Effect of Reinforcement on Resilient and Permanent Deformations of Base Course Material. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2004, 120-131.
10. Faheem, H. and Hassan, A. M. (2014). "2D Plaxis Finite Element Modeling Of Asphalt-Concrete Pavement Reinforced With GeoGrid", Journal of Engineering Sciences, Vol. 42, No. 6, pp. 1336-1348.