

Investigation (numerical and experimental modeling) of the performance of Geogrid reinforced asphalt

Seyed Ramtin Hashemi¹, Babak Aminnejad^{2✉}, Vahid Rostami³

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Hamadan, Iran. E-mail: ramtin.h98@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
E-mail: babak.aminnejad@iau.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail: rostami.vahid@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-04-09

Received in revised form

2025-05-17

Accepted

2025-06-20

Available online

2025-07-01

Keywords:

Reinforcement,
Geogrid,
Asphalt,
Bearing Capacity,
Settlement

ABSTRACT

One of the most prominent problems in the use of a cover layer is the formation of reflective cracks after the implementation of this layer. The results of the research show that reflective cracks are a very complex and variable phenomenon. This problem mainly occurs in the form of crack propagation from the underlying pavement layer to the cover layer. The use of Geogrids has been considered in recent years due to their role in increasing the bearing capacity and reducing the settlement of the reinforced base. Therefore, in this study, using numerical modeling and laboratory studies, Geogrids were placed under the pavement layers and the effect of using Geogrids was investigated by loading. One of the objectives of this study is to evaluate cracking in asphalt and investigate the effect of using Geogrids in improving the pavement resistance to cracking. After numerical modeling and laboratory studies, it was observed that the presence of Geogrids reduced cracking in asphalt pavements. PLAXIS 2D finite element software was used to simulate and analyze pavement behavior.

Cite this article: Hashemi, Seyed Ramtin., Aminnejad, Babak., & Rostami, Vahid. (2025). Investigation (numerical and experimental modeling) of the performance of Geogrid reinforced asphalt. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 137-184. DOI: 10.22126/amcen.2025.12106.1040



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.12106.1040

Publisher: Razi University

Introduction

Numerical modeling for the use of Geogrids in road pavement layers has been considered as an advanced method for analyzing and optimizing the performance of reinforced pavements. With the increase in traffic loads and stresses on pavements, the need to use reinforcing materials such as Geogrids to improve the strength and extend the life of road structures is increasingly felt. Geogrids reduce permanent deformation and cracking in pavement layers by limiting the movement of soil materials and distributing stresses appropriately. One of the most important issues in this field is the correct simulation of friction between the Geogrid and the surrounding materials, which has a direct impact on load transfer and stress distribution. In addition, the selection of an appropriate numerical method, such as the finite element method, to analyze the interaction of Geogrids with different pavement layers is of particular importance, because these methods must be able to predict complex phenomena such as tensile failure of the Geogrid or separation between layers. Also, modeling the effect of Geogrids on reducing the thickness of pavement layers and increasing the bearing capacity requires considering accurate material parameters and realistic boundary conditions. Finally, the development of accurate and efficient numerical models can lead to optimization of the design of Geogrid-reinforced pavements and reduction of implementation costs. The research conducted by Noor Sadeq et al. (2021) developed a finite element model to evaluate the dynamic loading behavior of both unreinforced and Geogrid-reinforced pavements. The study simulated the effects of truck loading on these pavements to determine vertical stress and surface deflection. The findings highlighted that permanent deformation often occurs in pavement layers with low strength, particularly under high temperatures. Significant cracking is more likely in hot weather, especially when the surface temperature of flexible pavements reaches 60°C or higher. The modeling approach assumed linear elastic behavior for all materials, with the pavement structure consisting of a surface layer, base, subbase, and an infinitely deep bed layer. By increasing the load on the model, critical pavement responses, such as vertical stress, were analyzed for both unreinforced and Geogrid-reinforced pavements. The results demonstrated a noticeable reduction in displacement when Geogrid reinforcement was added, indicating a significant improvement in pavement performance. Additionally, it was observed that higher temperatures led to greater displacement, while increasing the thickness of the flexible pavement reduced cracking and subsequently decreased the displacement of asphalt layers. In a related study, Chen et al. (2012) conducted cyclic plate load tests on Geogrid-reinforced pavement sections to integrate the benefits of Geogrids into the framework of the new AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. The study quantified the contribution of Geogrids in terms of increasing the elastic modulus of the base layer and/or reducing the required thickness of the base aggregate layer. The effective elastic modulus of the base layer was calculated to assess the performance improvement provided by Geogrid reinforcement. The results indicated that the elastic modulus of the base layer could be increased by 10% to 90%, and the base layer thickness could be reduced by 12% to 49% in Geogrid-reinforced sections. Furthermore, Geogrids with higher tensile modulus were found to deliver better performance.

Method

In this research, the effect of using Geogrid has been investigated. In this case, simulated road pavement layers were used, where the Geogrid is placed between the asphalt layer and the base layer of the asphalt pavement. For problems that exhibit symmetry, computational speed and cost can be reduced by modeling only one part of the problem that repeats due to symmetry. In the model analysis, due to the presence of axial symmetry in the geometry, boundary conditions, and applied forces, axisymmetric analysis has been employed. Utilizing this analysis method has led to increased speed and accuracy in the evaluation process.

Results

By dividing and considering three different scenarios, the aim is to examine the amount of settlement. It should be noted that these three scenarios include the following: the unreinforced case, the case with one layer of Geogrid, and the case with two layers of Geogrid. Subsequently, the results related to each of these scenarios will be analyzed.

Conclusions

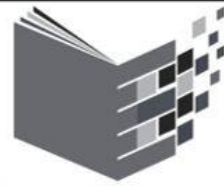
- 1 -The use of Geogrid increased the flexural strength by 24.82% compared to the sample without Geogrid.
- 2 -The use of Geogrid in asphalt samples reduced the deformation deviation and a 37.89% reduction in deformation was observed.
- 3 -Increasing the elastic modulus increased the settlement.
- 4- Increasing the number of Geogrid layers reduced the settlement.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی (مدل سازی عددی و آزمایشگاهی) عملکرد آسفالت مسلح شده با ژئوگرید

سید رامتین هاشمی^۱، بابک امین نژاد^۲✉، وحید رستمی^۳

۱. گروه مهندسی محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: ramtin.h98@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران. رایانامه: babak.aminnejad@iau.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: Rostami.vahid@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰ کلیدواژه‌ها: مسلح سازی، ژئوگرید، آسفالت، ظرفیت باربری، نشست	یکی از برجسته ترین مشکلات در استفاده از لایه روکش، ایجاد ترک های انعکاسی پس از اجرای این لایه است. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می دهد که ترک های انعکاسی پدیده ای بسیار پیچیده و متغیر هستند. این مشکل عمدتاً به صورت گسترش ترک از لایه زیرین روسازی به لایه روکش رخ می دهد. استفاده از ژئوگریدها به دلیل نقش آن ها در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر تقویت شده، طی سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، در این پژوهش با استفاده از مدل سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی ژئوگرید را در زیر لایه های روسازی راه قرار داده و با انجام بارگذاری تاثیر استفاده از ژئوگرید بررسی شد. یکی از اهداف این پژوهش، ارزیابی ترک خوردگی در آسفالت و بررسی تاثیر استفاده از ژئوگرید در بهبود مقاومت روسازی در برابر ترک خوردگی است. پس از انجام مدل سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی مشاهده شد که وجود ژئوگرید باعث کاهش ترک خوردگی در روسازی های آسفالتی شد. برای شبیه سازی و تحلیل رفتار روسازی، از نرم افزار المان محدود PLAXIS 2D استفاده شده است.

استناد: هاشمی، سید رامتین؛ امین نژاد، بابک؛ رستمی، وحید. (۱۴۰۴). بررسی (مدل سازی عددی و آزمایشگاهی) عملکرد آسفالت مسلح شده با ژئوگرید.

مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۱)، ۱۸۴-۱۷۰. DOI: 10.22126/amcen.2025.12106.1040



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

مدل سازی عددی برای استفاده از ژئوگرید در لایه های روسازی راه به عنوان یک روش پیشرفته برای تحلیل و بهینه سازی عملکرد روسازی های تقویت شده مورد توجه قرار گرفته است. با افزایش بارهای ترافیکی و تنش های وارده بر روسازی ها، نیاز به استفاده از مصالح تقویت کننده مانند ژئوگرید برای بهبود مقاومت و افزایش طول عمر سازه های راه سازی بیش از پیش احساس می شود. ژئوگریدها با ایجاد محدودیت در جابجایی مصالح خاکی و توزیع مناسب تنش ها، باعث کاهش تغییر شکل های دائمی و ترک خوردگی در لایه های روسازی می شوند. یکی از مهم ترین مسائل در این زمینه، شبیه سازی صحیح اصطکاک بین ژئوگرید و مصالح اطراف است که تأثیر مستقیمی بر انتقال بار و توزیع تنش دارد. علاوه بر این، انتخاب روش عددی مناسب مانند روش المان محدود برای تحلیل تعامل ژئوگرید با لایه های مختلف روسازی از اهمیت ویژه ای برخوردار است، چرا که این روش ها باید قادر به پیش بینی پدیده های پیچیده ای مانند گسیختگی کششی ژئوگرید یا جدایش بین لایه ها باشند. همچنین، مدل سازی تأثیر ژئوگرید بر کاهش ضخامت لایه های روسازی و افزایش ظرفیت باربری نیاز به در نظر گرفتن پارامترهای دقیق مصالح و شرایط مرزی واقع گرایانه دارد. در نهایت، توسعه مدل های عددی دقیق و کارآمد می تواند به بهینه سازی طراحی روسازی های تقویت شده با ژئوگرید و کاهش هزینه های اجرایی منجر شود. موقعیت ژئوگرید در سازه روسازی به دلیل تأثیرات مهمی که از نظر کاهش ترک ها ایجاد می کند یکی از موضوعاتی است که به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش ترک خوردگی تحت دوره های بارگذاری مکرر از مسائل پر اهمیت استفاده از ژئوگرید می باشد [۱،۲]. به طور خاص، قرار گرفتن ژئوگرید در اعماق مختلف در روسازی جاده، اثرات مفید متفاوتی بر عملکرد ایجاد می کند [۳،۴،۵]. گنجاندن ژئوگرید در مخلوط آسفالت برای افزایش طول عمر بتن آسفالتی، بر اساس یافته های محققان، بسیار مؤثر است [۱،۲،۶،۷]. استفاده از ژئوسنتتیک در سازه روسازی را می توان برای سیستم ضد ترک خوردگی در نظر گرفت [۸]. مطالعه نور صادق و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل المان محدود برای تحلیل رفتار بارگذاری دینامیکی روسازی تقویت نشده و تقویت شده با ژئوگرید ارائه داده است و با شبیه سازی یک کامیون بر روی روسازی

تقویت شده و تقویت نشده تنش عمودی و انحراف سطح عمودی تعیین شده است. در دماهای بالا تغییر شکل دائمی در لایه های روسازی که مقاومت کمی دارند رخ می دهد. ترک های قابل توجه معمولاً در هوای گرم رخ می دهند بخصوص زمانی که دمای سطح روسازی انعطاف پذیر ۶۰ درجه سانتی گراد یا بالاتر باشد. در روش مدل سازی فرض شده است که عملکرد تمام مواد الاستیک خطی بوده است. لایه های آن شامل لایه سطحی، اساس، زیر اساس و لایه بستر می باشند، لایه بستر قرار است که عمق بی نهایت داشته باشد. با افزایش بارگذاری مدل، پاسخ های حیاتی روسازی برای روسازی تقویت نشده یا تقویت شده با ژئوگرید، مانند تنش عمودی تعیین شد. نتایج نشان دهنده تفاوت در جابجایی هنگام اضافه کردن لایه ژئوگرید بود و نتایج، بهبود قابل توجهی را در رفتار سیستم روسازی نشان داده است و مشخص شد که هر چه دما بیشتر بوده باشد، جابجایی نیز بیشتر است و افزایش ضخامت روسازی انعطاف پذیر باعث ایجاد ترک شده است که منجر به کاهش جابجایی لایه های آسفالت شده است. مقایسه عملکرد روسازی های تقویت شده با ژئوگرید و تقویت نشده تحت بار تیر عریض و محوری با دو تیر نشان داد که نسل جدید تایرهای عریض و محورهایی با دو تیر، انواع اصلی پیکربندی تایرهای مورد استفاده در محوره های محرک و عقب کامیون ها بوده اند [۹]. لاستیک های عریض اثرات مخرب بیشتری بر عملکرد روسازی و تأثیر کمتری بر محیط زیست داشته اند. استفاده از ژئوسنتتیک ها برای تقویت عملکرد روسازی می تواند در برابر اثرات مضر لاستیک ها مؤثر بوده باشد و از بروز آسیب های زودرس جلوگیری کند. تحلیل ویسکوالاستیک با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی در نرم افزار آباکوس انجام شده است. در تمامی تحلیل ها از یک ساختار روسازی انعطاف پذیر معمولی در ایران استفاده شده است. یک نوع ژئوگرید با مدول بالا در پایین لایه آسفالتی برای تقویت استفاده شده و همچنین توزیع کرنش های کششی طولی و عرضی و کرنش های برشی قائم در سراسر ضخامت لایه آسفالتی تعیین شده است. نتایج نشان داده که به طور کلی، تحت بار محوری یکسان، تیر عریض کرنش های قابل توجهی بیشتری نسبت به تایرهای دوگانه ایجاد کرده است. همچنین مشخص شده که تحت شرایط یکسان، حداکثر کرنش کششی عرضی در زیر تیر عریض تقریباً دو برابر در محورهایی با دو تیر بود. علاوه بر

روسازی تقویت شده با ژئوگرید کاهش داد. نتایج همچنین نشان داد که ژئوگریدهای مدول کششی بالاتر معمولاً عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند. بررسی یک مدل المان محدود متقارن محوری دو بعدی نشان داد که رفتار روسازی قیری تقویت نشده و تقویت شده با ژئوگرید را تحت شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی تحلیل می‌کند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند هنگامی که ژئوگرید در پایین لایه بتن قیری قرار می‌گیرد، منجر به بیشترین کاهش کرنش کششی افقی به میزان $96\%/14$ تا $35\%/22$ در شرایط بارگذاری دینامیکی و استاتیکی می‌شود؛ بنابراین تقویت ژئوسنتتیک پتانسیل خوبی برای کاهش کرنش خستگی در روسازی نشان می‌دهد و همچنین روسازی دارای ژئوگرید در پایین لایه بتن قیری بهبود قابل توجهی در طول عمر روسازی در بارهای مختلف نشان داد که در آن عمر خستگی معیارهای حاکم در پیش‌بینی عمر مفید است [۱۲]. تبرئی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای واقع بر سطح خاک دانه‌ای مسلح به ژئوگرید پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از ژئوگرید، سبب افزایش ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای می‌شود و با افزایش فاصله از مرکز شالوده مقادیر فشار نرمال وارده بر کف شالوده کاهش می‌یابد [۱۳].

صادقی و همکاران (۲۰۲۰) به مطالعه اثربخشی ژئوگرید در بهبود رفتار مکانیکی بالاست ماسه دار پرداختند. آن‌ها یک مطالعه آزمایشگاهی در مورد تأثیر ژئوگرید در جهت بهبود خواص مکانیکی بالاست ماسه دار انجام دادند. به این منظور، آزمون برش مستقیم در مقیاس بزرگ و همچنین آزمون بارگذاری صفحه بر روی نمونه‌های بالاست تقویت شده با که با درصد‌های مختلف ماسه آماده شده بودند، انجام شد. نمونه‌های بالاست با درصد‌های مختلف ماسه برای آزمایش‌ها آماده شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که ژئوگرید به‌طور قابل توجهی مقاومت برشی و سختی عمودی بالاست ماسه دار را بهبود می‌بخشد. همچنین زاویه اصطکاک تا ۲۳ درصد کاهش و مدول کرنشی تا ۵۷ درصد کاهش در لایه‌های بالاست ایجاد می‌کند. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که تقویت بالاست توسط ژئوگرید نشست آن را کاهش می‌دهد و مقاومت برشی بالاست را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد [۱۴].

مطالعه‌ای با هدف بررسی و ارزیابی عددی رفتار زباله‌های ساختمانی بازیافتی تقویت شده با ژئوگرید در هنگام استفاده به عنوان جایگزین

این، نتایج نشان داد که در زیر تاپیرهای دوگانه، توزیع خرابی‌ها در سراسر عمق لایه آسفالتی یکنواخت‌تر از زیر تاپیر عریض بود. همچنین مشخص شد که تقویت با ژئوگرید به‌طور قابل توجهی در کاهش کرنش‌های بحرانی مؤثر بوده است. با این حال، مشاهده شد که تقویت کننده در کاهش کرنش‌های کششی مؤثرتر از کرنش‌های برشی بوده است. در پایان مطالعه مدل‌های سه بعدی روسازی آسفالتی معمولی در دو حالت تقویت شده توسط ژئوگرید با مدول بالا و تقویت نشده ساخته شدند. سپس مدل‌ها در معرض دو نوع پیکربندی تاپیر قرار گرفتند، نسل جدیدی از تاپیر با پایه عریض و تاپیر دوتایی و پاسخ‌های بحرانی مورد بررسی قرار داده شدند. به‌طور کلی، تقویت با ژئوگرید منجر به توزیع یکنواخت‌تر کرنش‌های کششی و برشی در لایه آسفالتی نسبت به روسازی‌های تقویت نشده شد. علاوه بر این، تقویت باعث کاهش اختلاف بین کرنش‌ها در سطح و پایین لایه آسفالتی شد. مطالعه لئوناردی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی مدل‌سازی المان محدود روسازی تقویت شده با ژئوگرید و روسازی تقویت نشده پرداختند و از الیاف شیشه به‌عنوان تقویت کننده استفاده کردند [۱۰]. تحلیل مدل‌های عددی جاده‌های مختلف با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که از شبکه‌های الیاف شیشه می‌توان برای بهبود عملکرد روسازی‌های انعطاف‌پذیر استفاده کرد و می‌تواند سهم مرتبطی در مقاومت در برابر انتشار ترک و کاهش تغییر شکل‌های دائمی داشته باشد. نتایج مجموعه‌ای از آزمایش‌های بار صفحه چرخه‌ای بر روی مقاطع روسازی تقویت شده با ژئوگرید برای گنجاندن مزایای ژئوگرید در چارچوب راهنمای جدید طراحی مکانیکی-تجربی روسازی آشتو مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۱]. سهم ژئوگرید از نظر افزایش مدول ارتجاعی لایه اساس و/یا کاهش ضخامت لایه سنگ‌دانه اساس در سازه روسازی اندازه‌گیری شده و با توجه به افزایش مدول ارتجاعی، مدول ارتجاعی مؤثر لایه اساس برای بهبود عملکرد در بخش روسازی ارائه شده توسط ژئوگرید محاسبه و سپس افزایش در مدول ارتجاعی دوره پایه اندازه‌گیری شد. مزیت تقویت اساس با ژئوگرید با میزان کاهش ضخامت لایه سنگ دانه اساس عملکرد موردنیاز تعریف شده بر اساس ضریب کاهش مسیر پایه ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار مدول ارتجاعی لایه اساس را می‌توان به میزان ۱۰ تا ۹۰ درصد افزایش داد و ضخامت لایه اساس را می‌توان بین ۱۲ تا ۴۹ درصد برای مقاطع

راه‌ها یک نوآوری مهندسی مهم محسوب می‌شود که تحولی اساسی در افزایش کارایی و دوام سازه‌های راه‌سازی ایجاد کرده است. برخلاف روش‌های سنتی که صرفاً بر افزایش ضخامت لایه‌های روسازی برای تحمل بارهای ترافیکی تکیه داشتند، ژئوگرید با مکانیزم‌های مهندسی پیشرفته، امکان تقویت مصالح خاکی را بدون نیاز به حجم زیاد مصالح فراهم می‌کند. این فناوری با توزیع مؤثرتر تنش‌های عمودی و افقی، از تمرکز تنش در نقاط ضعیف جلوگیری کرده و پدیده‌های مخربی مانند تغییر شکل دائمی، ترک‌خوردگی و نشست را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. یکی از جنبه‌های نوآورانه ژئوگرید، قابلیت آن در مسلح کردن لایه‌های خاکی با استفاده از خاصیت کشسانی و چسبندگی است که منجر به ایجاد یک سیستم کامپوزیتی یکپارچه می‌شود. این ویژگی نه تنها باعث افزایش مقاومت برشی و کششی لایه‌های اساس و زیر اساس می‌شود، بلکه انعطاف‌پذیری بالایی در برابر بارهای دینامیکی ناشی از ترافیک ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، استفاده از ژئوگرید امکان کاهش ضخامت لایه‌های روسازی را فراهم می‌کند که این امر علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، باعث کاهش مصرف منابع طبیعی و کاهش اثرات زیست محیطی پروژه‌های راه‌سازی می‌شود. به‌ویژه در مناطق با خاک‌های سست یا شرایط ژئوتکنیکی نامناسب، ژئوگرید راه‌حلی کارآمد برای بهبود عملکرد روسازی محسوب می‌شود. همچنین، این فناوری با قابلیت اجرای سریع و سهولت نصب، زمان اجرای پروژه‌ها را کاهش داده و امکان بهره‌برداری زودتر از راه‌ها را فراهم می‌کند. در مجموع، ژئوگرید با ترکیب اصول مهندسی ژئوتکنیک و علم مواد، رویکردی نوین در طراحی روسازی‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه ارائه داده است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار پلکسیس ۲ بعدی و مدل‌سازی عددی اقدام به ایجاد شرایط استفاده از ژئوگرید در روسازی راه‌ها با هدف بهبود عملکرد سازه‌ای و افزایش دوام روسازی تحت بارهای ترافیکی و شرایط محیطی مختلف صورت می‌گیرد. این فناوری با تقویت لایه‌های خاکی از طریق ایجاد پیوند مؤثر بین ذرات، مقاومت کششی و برشی لایه‌های اساس و زیراساس را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد و از تغییر شکل‌های مضر جلوگیری می‌کند. یکی از اهداف کلیدی ژئوگرید، توزیع یکنواخت تنش‌های ناشی از بار ترافیکی در سطح وسیع‌تری از روسازی است که این کار از تمرکز تنش در نقاط خاص و ایجاد ترک‌های زودرس

در لایه اساس و زیر اساس جاده‌ها برای اعمال توسعه پایدار از طریق حفظ مصالح خام و منابع برای نسل‌های آینده انجام شد. این مطالعه نشان داد که مواد بازیافتی تقویت شده منجر به نتایج تغییر شکل بهتری در مقایسه با سنگدانه‌های خام می‌شود. این مطالعه به این نتیجه رسید که استفاده از ژئوگرید تغییر شکل‌ها را کاهش می‌دهد و این کاهش به محل شبکه در لایه‌ها بستگی دارد. بهترین موقعیت در وسط لایه اساس بود [۱۵].

عبداله و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای اعلام کردند وزن کالاهای حمل شده در جاده‌های مصر به سرعت افزایش یافته است که این امر مستلزم بهبود زیرساخت‌ها است. با این حال، طراحی بزرگراه‌ها بر روی خاک رسی نرم همچنان یک موضوع چالش برانگیز است که منجر به ایجاد بسترهای جاده‌ای ناپایدار و نشست بیش از حد می‌شود. بنابراین، درمان بسترهای راه با خاک نرم بسیار مهم شده است. برای حمایت از روسازی مناسب و بارهای ترافیکی آن، این مطالعه در نظر دارد با استفاده از تکنیک‌های مختلف خاک رسی را اصلاح کند. در این تحقیق از آهک زنده برای تثبیت خاک رسی نرم استفاده شده است. از لایه‌های ژئوگرید نیز برای تقویت لایه‌های پایه و زیر پایه استفاده می‌شود که باعث افزایش مقاومت کلی مقطع روسازی می‌شود. یک برنامه المان محدود (PLAXIS 2D) برای شبیه سازی این تکنیک‌های بهبود برای شناسایی بهترین راه حل‌ها برای مشکل استفاده شد. نتایج نشان داد که اصلاح یک لایه ۶۰ سانتی‌متری خاک زیرپایه با آهک زنده همراه با افزودن یک لایه ژئوگرید در وسط لایه زیر پایه بهترین نتیجه را به همراه دارد. مدل انتخاب شده در این مطالعه برای شبیه‌سازی بارهای شدید که بیش از محدودیت‌های اعلام شده توسط دولت مصر است و برای یافتن راه حل بهینه برای مشکل با استفاده از تکنیک‌های بهبود آهک زنده و ژئوگرید توسعه داده شد. یک لایه زیر پایه به مدل اضافه شد و لایه سنگ آهک به ۶۰ سانتی‌متر کاهش یافت تا کارایی مدل ما بهبود یابد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ژئوگرید برای تقویت مقاطع روسازی روشی منصفانه‌ای است و در کاهش مقادیر نشست، کرنش‌های جانبی و تنش‌های عمودی مؤثر است. بهترین مکان برای استفاده از ژئوگریدها در وسط لایه زیراساس است، از ژئوگریدها در کاهش نشست، جذب کرنش‌های جانبی و کاهش تنش‌های عمودی رسیدن به خاک زیرین استفاده می‌شود. استفاده از ژئوگرید در روسازی

جدول ۱. مشخصات آسفالت طراحی شده

مواد	بستر	زیراساس	اساس	آسفالت
مدل	موهر کلمب	موهر کلمب	موهر کلمب	الاستیک
ضخامت (متر)	۱/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۱
مدول یانگ (کیلو پاسکال)	۲۰۰۰۰	۵۲۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰۰
نسبت پواسون	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۴۵
چگالی غیر اشباع (کیلونیوتن بر متر مکعب)	۱۷	۱۸	۲۰	۲۰
چگالی اشباع (کیلونیوتن بر متر مکعب)	۱۸	۲۰	۲۲	-
پیوستگی (کیلونیوتن بر متر مربع)	۱	۲۰	۳۰	-
زاویه اصطکاک (درجه)	۳۷	۳۹	۴۱	-
زاویه اتساع (درجه)	۷	۹	۱۱	-
Kx	۱	۱	۱	-
Ky	۱	۱	۱	-

۲-۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مسلح کننده و نحوه ساخت مدل

جهت تسلیح خاک در آزمایشگاه

در این پژوهش از ژئوگرید راک شیلد بهره گرفته شده است، زیرا این محصول به واسطه ویژگی های فنی مناسب، انعطاف پذیری بالا در شرایط آب و هوایی متنوع و قابلیت تطابق با محیط های گوناگون، انتخابی مطلوب محسوب می شود. ژئوگرید راک شیلد از پلی اتیلن ساخته شده و مقاومت چشمگیری در برابر فشار و گسیختگی ناشی

جلوگیری می کند. از دیگر اهداف مهم آن می توان به کاهش ضخامت لایه های روسازی اشاره کرد که منجر به صرفه جویی قابل توجه در هزینه های اجرایی و مصرف مصالح می شود. این ویژگی به ویژه در پروژه های بزرگ راه سازی که با محدودیت بودجه و منابع طبیعی مواجه هستند، اهمیت ویژه ای پیدا می کند. ژئوگرید همچنین با محدود کردن جابجایی جانبی مصالح خاکی، پایداری کلی سازه روسازی را افزایش داده و از تخریب زودرس آن جلوگیری می کند. در مناطقی با خاک های سست یا مقاومت کم، استفاده از ژئوگرید می تواند به عنوان راه حلی کارآمد برای جبران ضعف های ژئوتکنیکی به کار رود. افزایش عمر خدمت دهی راه ها، کاهش نیاز به تعمیرات و نگهداری مکرر و در نهایت کاهش هزینه های بلند مدت از دیگر اهدافی است که با بکارگیری این فناوری نوین محقق می شود. در مجموع، ژئوگرید با ترکیب مزایای فنی و اقتصادی، راه حلی بهینه برای بسیاری از چالش های روسازی راه ها ارائه می دهد.

۲. مواد و روش ها

در این تحقیق، تأثیر استفاده از ژئوگرید مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت از لایه های روسازی جاده شبیه سازی شده که در آن ژئوگرید میان لایه آسفالت و لایه اساس روسازی آسفالتی قرار گرفته است. برای مسائلی که دارای تقارن هستند، می توان با مدل سازی تنها یک بخش از مسئله که در اثر تقارن تکرار می شود، سرعت و هزینه محاسبات را کاهش داد. در تحلیل مدل، به دلیل وجود تقارن محوری در هندسه، شرایط مرزی و نیروهای وارده، از تحلیل محوری (Axisymmetric) استفاده شده است. بهره گیری از این روش تحلیل موجب افزایش سرعت و دقت در فرایند ارزیابی شده است.

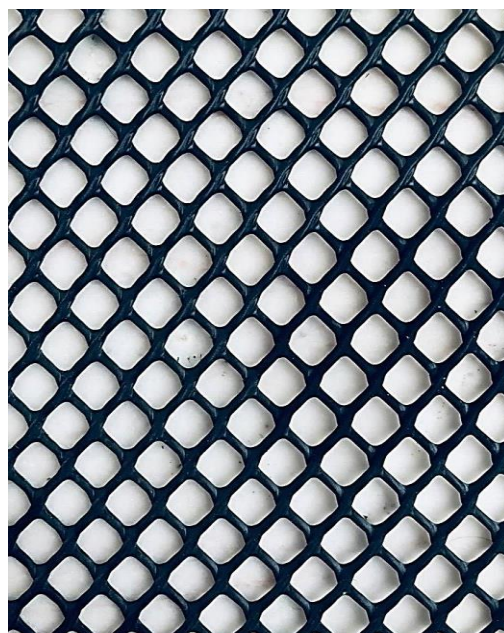
۲-۱. مشخصات مدل استفاده از ژئوگرید در زیر لایه آسفالت

در این بخش، مشخصات مورد استفاده برای تحلیل جاده آسفالت تقویت شده با ژئوگرید ارائه شده اند. بررسی ها برای دو حالت جاده مسلح شده با ژئوگرید و جاده غیرمسلح صورت گرفته است. واحدهای به کار رفته شامل متر، کیلوگرم، ثانیه و فشار بر حسب پاسکال هستند. مدل ایجاد شده از پایین به بالا شامل لایه های Sub, Sub Grade, Base و Asphalt است. مشخصات آسفالت طراحی شده در جدول (۱) مشخص شده است.

جدول ۳. مشخصات نمونه

No	Characteristics	Unit	Results	Requirement
1	Bitumen content	%	5.32	-
2	Compressive strength	KN/cm ²		
	t = 20°C		51.44	-
	t = 50°C		21.54	-
3	Marshall stability	KN	11.96	8.0
4	Flow measurement	mm	3.62	2-4
5	Voids in the total mix	%	4.42	3-6
6	Voids in mineral aggregates	%	16.70	min 15

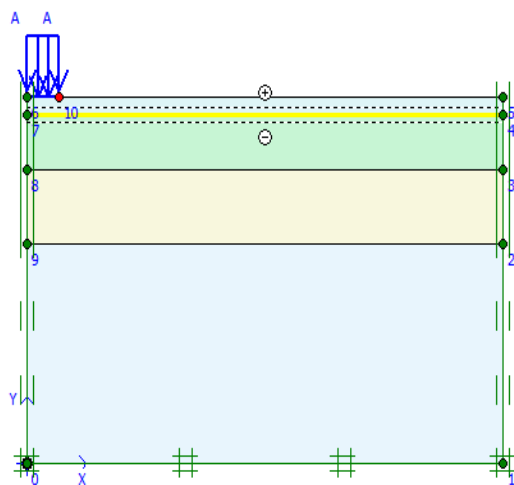
از آن از خود نشان می دهد. جزئیات فنی این ژئوگرید در جدول (۲) ارائه گردیده است. ساختار شبکه ای این ژئوگرید به صورت هندسی چهارضلعی طراحی شده است و به دلیل ساختار فیزیکی منحصربه فرد خود، برای استفاده در نواحی سنگلاخی و زمین های لغزنده بسیار مناسب می باشد. این محصول توانایی ایجاد سطح تماس قابل قبول با خاک منطقه را دارد. شکل (۱) نوع بافت و تصویر این ژئوگرید را به نمایش می گذارد.



شکل ۱. بافت ژئوگرید راک شیلد

۳. نتایج و بحث

۳-۱. استفاده از ژئوگرید در زیر لایه آسفالت با استفاده از مدل سازی عددی



شکل ۲. مدل سازی استفاده از ژئوگرید در زیر لایه آسفالت

۳-۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک در آزمایش

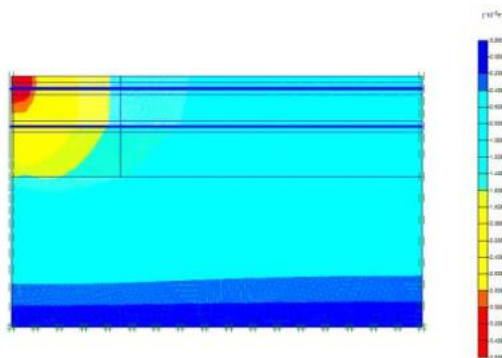
در مطالعات آزمایشگاهی کوچک مقیاس، معمولاً برای کنترل دقیق ویژگی های محیط خاکی مورد بررسی از نظر همگنی و ایزوتروپ بودن، از نمونه هایی با دانه بندی یکنواخت استفاده می شود. به همین ترتیب، ابعاد دانه ها نیز باید به گونه ای انتخاب شوند که نسبت اندازه دانه ها به ابعاد مدل پی، شرایط طبیعی را بازتاب دهد. ویژگی های نمونه ساخته شده در جدول شماره (۳) ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات فنی ژئوگرید راک شیلد

Sample	No.	Property	Unit	Test method	Value	
Rock shield	MD	Max load at yield point	KN/M	ASTM D6637	9.83	
		Extension at Max Load	%	ASTM D6637	34.4	
		Load at Ten precent Extension of Gauge Length	KN/M	ASTM D6637	3.125	
		Extension at 1/2 Max Load	%	ASTM D6637	0.05	
	TD	Max load at yield point	KN/M	ASTM D6637	6.54	
		Extension at Max Load	%	ASTM D6637	65	
		Load at Ten precent Extension of Gauge Length	KN/M	ASTM D6637	3.14	
		Extension at 1/2 Max Load	%	ASTM D6637	11	
		Water absorption	%wt	ASTM D570	0	
		Mass Per Unit Are	Gr/ <i>m</i> ²	ISO 9864	878±12	
		MFI(Rate 190°C, 5kg)	Gr/10min	ASTM D1238	1.05	
		Thickness	mm	-	3.7±1	
		Mesh aperture size	mm	-	10*10	
		Impact Strength (again)	KJ/ <i>m</i> ²	ASTM D256	38.5	
		Heat Reversion	%	IPS-M-TP-316(SUB CLUSE 7.5)	0.7	میانگین 0.59
					0.48	
Injection		Vicar Softening Point	°C	ASTM D1525	130°C Rate(120°C/h)	
		Tensile Strength	MPA	ASTM D638	26.2	
	Elongation at break	%	ASTM D638	283٪		
	Density	Gr/ <i>cm</i> ³	ASTM D1505	0.947		
	Extension at Max Load	%	ASTM D638	12.82		
	Extension at 1/2 Max Load	%	ASTM D638	1.75		
	Hardness	Shore D	ASTM D2240	60±2		

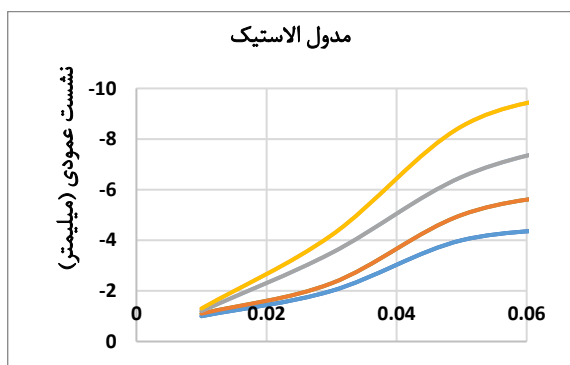
شکل (۴) حالت مسلح با یک لایه ژئوگرید را نشان می دهد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از یک لایه ژئوگرید موجب کاهش میزانشست تا ۴۵ درصد در مقایسه با حالت غیرمسلح شده است و مقدار نشست نسبت به حالت اولیه کمتر شده است. در این شکل، رنگ آبی بیانگر تنش کم و رنگ قرمز نمایانگر تنش بالا و مناطق بحرانی است.

۳-۱-۳. حالت در نظر گرفته با دو لایه ژئوگرید



شکل ۵. حالت دو لایه ژئوگرید

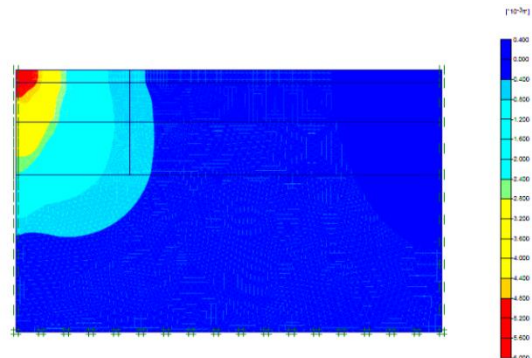
شکل (۵) نتایج حاصل از مسلح سازی با دو لایه ژئوگرید را نمایش می دهد. براساس این نتایج، استفاده از دو لایه ژئوگرید موجب شده است که میزان نشست نسبت به حالت غیرمسلح ۶۲ درصد و نسبت به حالت مسلح با یک لایه ژئوگرید ۳۰ درصد کاهش یابد. این کاهش نشان می دهد که فشار و نشست در مقایسه با دو حالت پیشین به طور قابل توجهی کمتر شده است. در این شکل، رنگ آبی بیانگر تنش کم و رنگ قرمز نشان دهنده تنش بالا و مناطق بحرانی است.



شکل ۶. نشست عمودی روسازی مسلح در مدول الاستیک مختلف

در این شرایط، با تقسیم بندی و در نظر گرفتن سه حالت مختلف، تلاش می شود میزان نشست بررسی شود. لازم به ذکر است که این سه حالت شامل موارد زیر هستند: حالت غیرمسلح، حالت دارای یک لایه ژئوگرید، و حالت دارای دو لایه ژئوگرید در ادامه، نتایج مربوط به هر یک از این حالات مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

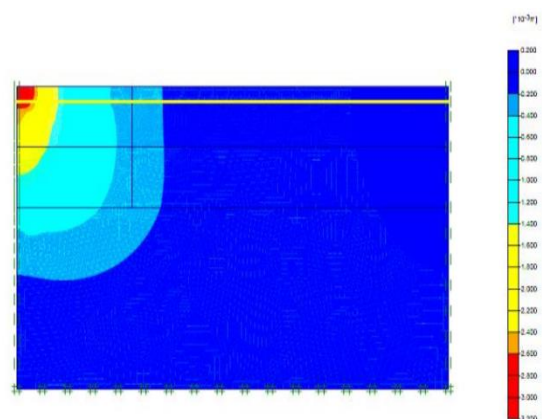
۳-۱-۱. حالت غیرمسلح



شکل ۳. پروفیل جابجایی عمودی برای روسازی غیرمسلح (فشار اعمالی = ۴۰۰ کیلو پاسکال)

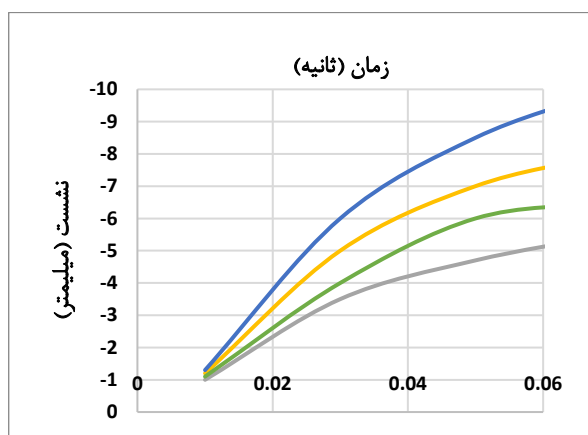
می توان گفت که در حالت غیرمسلح شکل (۳)، میزان نشست به بیشترین حد خود می رسد. در شکل ۳، رنگ آبی نشان دهنده تنش پایین و رنگ قرمز نشان دهنده تنش بالا و منطقه بحرانی است.

۳-۱-۲. حالت در نظر گرفته شده با یک لایه ژئوگرید



شکل ۴. پروفیل جابجایی عمودی برای روسازی تقویت شده یک لایه (فشار اعمالی = ۴۰۰ کیلو پاسکال)

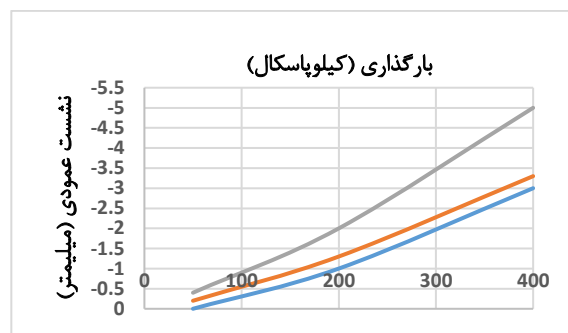
تحلیل دینامیکی با استفاده از نرم افزار پلکسیس انجام شده است. در این تحلیل، بار دینامیکی به شکل پالس نیمه سینوسی با دامنه های مختلف ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلو پاسکال مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۸) یک نمونه از پالس بار دینامیکی را برای شرایطی با مدت زمان ۰/۱۰ ثانیه، فرکانس ۵ هرتز و دامنه بار ۵۵۰ کیلو پاسکال نمایش می دهد. به طور کلی، بزرگی، شکل و مدت این نوع پالس می توانند متناسب با سفتی روسازی، میزان بار چرخ، سرعت آن و عمق مکان مطالعه تغییر کنند. از پالس نیمه سینوسی به طور گسترده توسط پژوهشگران برای شبیه سازی بار متحرک بر روی سطح روسازی استفاده شده است.



شکل ۹. جابجایی عمودی بارگذاری دینامیکی برای روسازی تقویت نشده

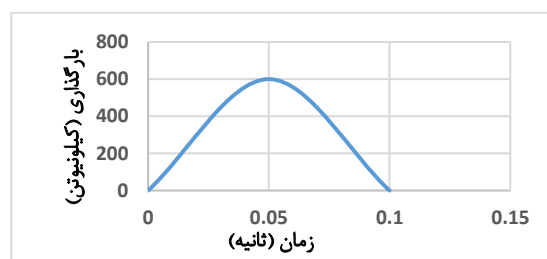
شکل (۹) میزان جابه جایی عمودی ناشی از اعمال بار دینامیکی بر روسازی تقویت نشده را نشان می دهد. در این شکل، محور افقی نمایانگر فرکانس و محور عمودی بیانگر میزان نشست است. نمودار طوسی مربوط به بار اعمال شده ۳۰۰ کیلو پاسکال، نمودار سبز مربوط به بار ۴۰۰ کیلو پاسکال، نمودار زرد مربوط به بار ۵۰۰ کیلو پاسکال، و نمودار آبی مربوط به بار ۶۰۰ کیلو پاسکال می باشد. مشاهده می شود که با افزایش مقادیر دامنه تنش، میزان نشست عمودی نیز افزایش پیدا می کند.

شکل (۶) نشست عمودی روسازی در حالت غیر مسلح و تقویت شده را با مقادیر مختلف مدول الاستیک نمایش می دهد. در این شکل، خط آبی نشان دهنده بارگذاری ۳۰۰ کیلو پاسکال، خط نارنجی مرتبط با ۴۰۰ کیلو پاسکال، خط طوسی مربوط به ۵۰۰ کیلو پاسکال و خط زرد نمایانگر بارگذاری ۶۰۰ کیلو پاسکال است.

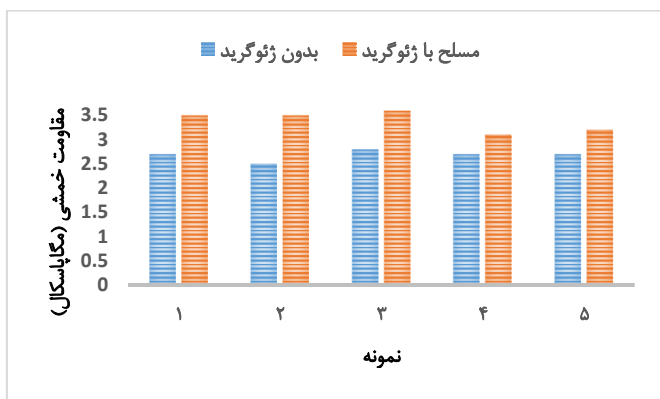


شکل ۷. نشست عمودی روسازی تقویت نشده و تقویت شده

شکل (۷) میزان نشست در حالت های مختلف شامل غیر مسلح، مسلح شده با یک لایه ژئوگرید، و مسلح شده با دو لایه ژئوگرید را به تصویر می کشد. در این شکل، خط آبی نشان دهنده نشست عمودی در حالت مسلح شده با دو لایه ژئوگرید است، خط نارنجی میزان نشست عمودی مربوط به حالت مسلح شده با یک لایه ژئوگرید را نمایش می دهد، و خط طوسی میزان نشست عمودی در حالت غیر مسلح را نشان می دهد. بارگذاری از مقدار اولیه ۵۰ کیلو پاسکال شروع شده و تا ۴۰۰ کیلو پاسکال افزایش یافته است. نتایج نشان می دهند که با افزایش بارگذاری، میزان نشست بیشتر می شود، اما استفاده از لایه های ژئوگرید منجر به کاهش نشست در شرایط مختلف می گردد. در نهایت، محور افقی نشان دهنده مقدار بارگذاری و محور عمودی بیانگر میزان نشست است.



شکل ۸. بارگذاری دینامیکی

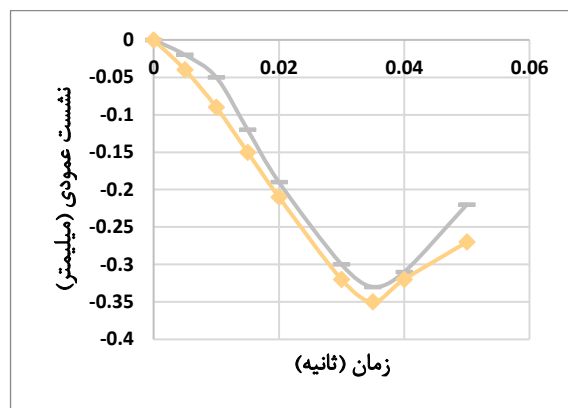


شکل ۱۲. مقادیر مقاومت خمشی در نمونه مسلح و غیر مسلح

شکل (۱۲) نشان می‌دهد که مقاومت خمشی بتن آسفالتی در نمونه‌های بدون آرماتور ژئوگرید فایبرگلاس برابر با ۲/۴۸ مگاپاسکال و در نمونه‌های تقویت‌شده با آن برابر با ۳/۰۸ مگاپاسکال بوده است که بیانگر افزایش ۲۴/۸۲ درصدی است. این موضوع را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، بتن آسفالتی تحت تأثیر بارگذاری دچار سختی شده و ترک‌ها و تخریب‌هایی در آن ایجاد می‌شود. در این نمودار، محور قائم بیانگر میزان مقاومت خمشی نمونه‌هاست. ژئوگرید فایبرگلاس در بتن آسفالتی بخشی از بار وارده را جذب کرده و آن را روی سطح گسترده‌تری توزیع می‌کند. علاوه بر این، استحکام کششی در بتن آسفالتی تقویت‌شده با ژئوگرید فایبرگلاس افزایش یافته و در نتیجه، تغییر شکل و شکست نمونه کاهش می‌یابد. به همین دلیل، نمونه‌های بتن آسفالتی تقویت‌شده با ژئوگرید فایبرگلاس در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح در مقابل خمش از مقاومت کششی بالاتری برخوردار هستند.



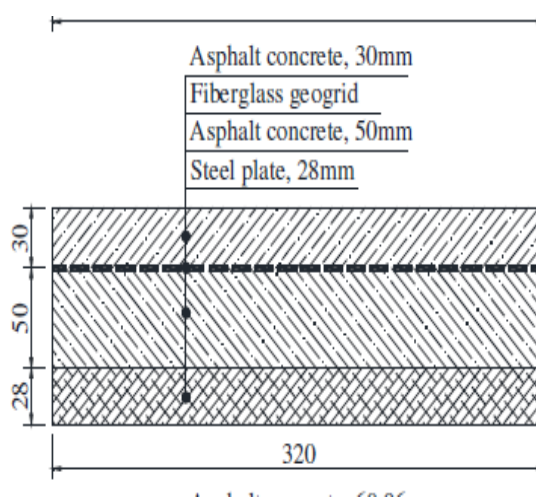
شکل ۱۳. تغییر شکل در نمونه مسلح و غیر مسلح



شکل ۱۰. اثر تاریخچه پاسخ نشست عمودی تقویت ژئوگرید

شکل (۱۰) پاسخ نشست را برای روسازی تقویت‌شده تک‌لایه و سیستم غیرمسلح نمایش می‌دهد. تفاوت قابل‌توجهی میان این دو مورد مشاهده نمی‌شود. تأثیر فرکانس بارگذاری بر پاسخ نشست عمودی تنها در محدوده تنش‌های بالا قابل تشخیص است.

۲-۳. استفاده از ژئوگرید در زیر لایه آسفالت با استفاده از ساخت نمونه آزمایشگاهی



شکل ۱۱. مشخصات لایه بندی نمونه

- [3] Brown, S.F., Thom, N.H., Sanders, P.J., 2001. A study of grid reinforced asphalt to combat reflection cracking. *J. Assoc. Asphalt Pav* 70, 543e569
- [4] Grabowski, W., Pozarycki, A., 2009. Energy absorption in large dimension asphalt pavement samples reinforced with geosynthetics. *Foundations Civil Environ. Eng.* 11, 17e28
- [5] Khodaii, A., Fallah, Sh, 2009. Effects of geosynthetic reinforcement on the propagation of reflection cracking in asphalt overlays. *Int. J. Civil Eng.* 7 (2), 131e140
- [6] Abd El Halim, A.O., Haas, R., Hozayen, H., Gervais, M., 1991. Effective reinforcement of asphalt pavements. In: *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*, pp. 171e192
- [7] Komatsu, T., Kikuta, H., Tuji, Y., Muramatsu, E., 1998. Durability assessment of Geogrid-reinforced asphalt concrete. *Geotext. Geomembranes* 16 (5), 257e271
- [8] Zamora-Barraza, D., Calzada-Peréz, M., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., 2011. Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone. *Geotext. Geomembranes* 29 (2), 130e136.
- [9] Taherkhani, H., & Jalali, M. (2018). Viscoelastic analysis of Geogrid-reinforced asphaltic pavement under different tire configurations. *International Journal of Geomechanics*, 18(7), 04018060.
- [10] Leonardi, G., Palamara, R., & Calvarano, L. S. (2017). Numerical analysis of flexible pavement reinforced with Geogrids. In *Airfield and Highway Pavements 2017* (pp. 416-427).
- [11] Chen, Q., & Farsakh, M. A. (2012). Structural contribution of Geogrid reinforcement in pavement. In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering* (pp. 1468-1475).
- [12] Pandey, S., Rao, K. R., & Tiwari, D. (2012, September). Effect of Geogrid reinforcement on critical responses of bituminous pavements. In *ARRB Conference, 25th, 2012, Perth, Western Australia, Australia*.

[13] تبرئی، عبدالله، ابریشمی، سعید، حسینی نیا، سید احسان و گنجیان، نوید (۱۳۹۷) مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری شالوده دایره ای واقع بر سطح خاک دانه ای مسلح به ژئوگرید. مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس

همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده می شود، نمونه های بتن آسفالتی بدون تقویت ژئوگرید فایبرگلاس هنگام مواجهه با حداکثر بار، انحراف کمتری نسبت به نمونه های مسلح داشتند. در این نمودار، محور عمودی میزان تغییر شکل هر نمونه را نشان می دهد. میانگین انحراف در نمونه های تقویت نشده برابر با ۱/۷ میلی متر بوده، در حالی که میانگین انحراف در نمونه های تقویت شده به ۲/۳۲ میلی متر رسیده است، که افزایش معادل ۳۷/۸۹ درصد را نشان می دهد. این موضوع را می توان با این واقعیت توضیح داد که ژئوگرید فایبرگلاس در ترکیب با بتن آسفالتی در فرآیند خمش مشارکت می کند و در نتیجه، انحراف نمونه را افزایش می دهد. این بدان معناست که شکست در نمونه های تقویت شده با سرعت کمتری رخ داده و ترک های بتن کاهش می یابد. همچنین، مشخص شد که رفتار خمشی انواع مختلف ژئوگریدها (مانند ژئوگریدهای فایبرگلاس، پلی استر و ژئوممبران) مقاومت قابل توجهی در برابر بارگذاری چرخه ای از ۶۶ تا ۱۰۰ درصد بهبود یافته است.

۴. نتیجه گیری

- ۱- استفاده از ژئوگرید باعث افزایش ۲۴/۸۲ درصدی مقاومت خمشی در برابر نمونه بدون ژئوگرید شد.
- ۲- استفاده از ژئوگرید در نمونه های آسفالتی باعث کاهش انحراف تغییر شکل شد و ۳۷/۸۹ درصد کاهش تغییر شکل مشاهده شد.
- ۳- افزایش مدول الاستیک سبب افزایش نشست شد.
- ۴- افزایش تعداد لایه ژئوگرید سبب کاهش نشست شد.

منابع

- [1] Al-Qadi, I.L., Tutumler, E., Dessouky, S., Kwon, J., 2007. Responses of Geogridreinforced flexible pavement to accelerated loading. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, Athens*, pp. 1437e1445
- [2] Brown, S.F., Brunton, J.M., Hughes, D.A.B., Brodrick, B.V., 1985. Polymer grid reinforcement of asphalt. *J. Assoc. Asphalt Pav* 54, 18e44.

- [14] Sadeghi, J., Tolou Kian, A. R., Ghiasinejad, H., Fallah Moqaddam, M., & Motevalli, S. (2020). Effectiveness of Geogrid reinforcement in improvement of mechanical behavior of sand-contaminated ballast. *Geotextiles and Geomembranes*, 48, 768-779
- [15] Aboubakr, Y., Gaber, E. K., & Abu El-Maaty, A. E. (2023). Analysis of flexible pavement reinforced with Geogrid and containing recycled materials. *ERJ. Engineering Research Journal*, 46(2), 225-232.
- [16] Mohamdy, A., Badra, M. H., & Turk, A. A. (2023). Enhancement of pavement sections on soft clay soils to sustain overloading. *Port-Said Engineering Research Journal*, 27(3), 25-31.