

EXTENDED ABSTRACTS

Development of a Laboratory Apparatus for Tensile Testing of Geosynthetics at Elevated Temperatures under Confined and Unconfined Conditions

Hooshang Katebi^{a,*}, Masood Ranjbarniya^b, Khalil Kheradmand^c

^a PhD, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

^b PhD, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

^c Ph.D Candidate of Geotechnical Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 13 May 2026; **Reviewed:** 15 August 2016; **Accepted:** 25 August 2016

Keywords:

Integrated behavior monitoring, Thermo-mechanical behavior, Geogrid, Geometric compatibility, Back analysis.

1. Introduction

Geosynthetics are among the most widely used materials in reinforced soil structures, embankments, pavements, and retaining walls. Owing to their polymeric nature, the mechanical behavior of these materials is highly sensitive to temperature variations, as the thermomechanical response of polymer chains directly influences their stiffness, strength, strain at failure, and creep. Although numerous studies have investigated the tensile response of geosynthetics at ambient temperature, only a limited number have addressed their performance at elevated temperatures under confining stress. Conventional testing methods, such as ASTM D6637, are conducted under unconfined laboratory conditions, whereas in the field, geosynthetics are buried within soil and subjected to confinement. Neglecting the realistic soil and geogrid interaction leads to overly conservative predictions and uneconomical designs. Elevated service temperatures significantly reduce the stiffness and ultimate strength of geosynthetics; therefore, investigating the thermomechanical behavior of these materials under conditions more representative of field conditions is essential. The objective of the present study is to design and develop a novel apparatus for evaluating the tensile behavior of geogrids at elevated temperatures, which is a system capable of performing tests under both confined and unconfined conditions with precise control of temperature and confinement. Data obtained from confined tests, which more closely represent field behavior, can be employed in back-analysis procedures and the calibration of predictive models.

2. Methodology

To simulate the real in-situ performance conditions of geogrids, a novel laboratory apparatus was designed and constructed based on the following design principles, functional requirements, and components:

2.1. Main design requirements

- Ability to maintain uniform temperature throughout the test duration.
- Full compatibility with a Universal Testing Machine (UTM).
- Capability to perform tests under both confined and unconfined conditions.
- Prevention of stress concentration at the clamping zones.
- Accurate temperature monitoring with a precision of $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.
- Precise measurement of load and strain values.

2.2. Main components of the apparatus

- A double-walled insulated chamber providing uniform heating and housing the specimen embedded in compacted granular soil.
- A heating and circulating system using heat-resistant oil to maintain thermal stability and uniform heat distribution.
- Temperature sensors, strain gauges, and thermostatic controllers for instant and precise monitoring and control of temperature and strain.
- A hydraulic confinement system for applying lateral pressure and thus enhancing test realism.
- A safe electrical section containing SSR, contactor, bimetal, and protective fuses.
- A specialized clamping system designed for direct connection to the UTM to ensure effective force transmission.

The thermal chamber was carefully designed to guarantee uniform temperature distribution along the entire specimen length. Additionally, the clamping system was modified to prevent stress concentration and localized tearing. This setup enabled tensile testing of geosynthetics under controlled and realistic laboratory conditions.

2.3. Materials

Two types of dry granular materials were used to provide lateral confinement: washed sand (SW) and base course aggregate (GW). The particle-size distribution and physical indices of these materials were determined in accordance with ASTM C125, ASTM C127, ASTM D4253, and ASTM D4254 standards. The geogrid used was a polyester geogrid coated with PVC, type (80-20), with a nominal ultimate tensile strength of 80kN/m. The dimensions and effective gauge length of samples were set according to ASTM D6637.

2.4. Experimental procedure

Tensile tests were conducted at four target temperatures (20, 40, 60, and 80°C) in accordance with ASTM D6637 standard and at a constant strain rate of 5% per minute. Under unconfined conditions, the geogrid specimen was fixed within a thermal chamber. After reaching the target temperature and maintaining it for one-hour, tensile loading was applied, and the stress–strain curves were recorded. In the confined condition, the geogrid was first secured in place, followed by the placement of the confining material (sand or sub-base aggregate) with a specified weight around it using the raining down method. Subsequently, a constant vertical stress (80 or 120kPa) was applied and maintained by a hydraulic jack. Finally, the entire assembly was heated to the target temperature, and after a one-hour soak at that temperature, the tensile test was performed under the same specified conditions.

3. Results and discussion

3.1. Effect of temperature under unconfined conditions

Increasing temperature caused a significant reduction in the geogrid's initial stiffness and ultimate tensile strength, together with an increase in the failure strain. The degradation intensified at higher temperatures at an approximate rate of 0.35% per $^{\circ}\text{C}$, which is consistent with the viscoelastic behavior of polymers (Table 1).

Table 1. Effect of temperature on the tensile strength and failure strain of geogrid under free-tension conditions

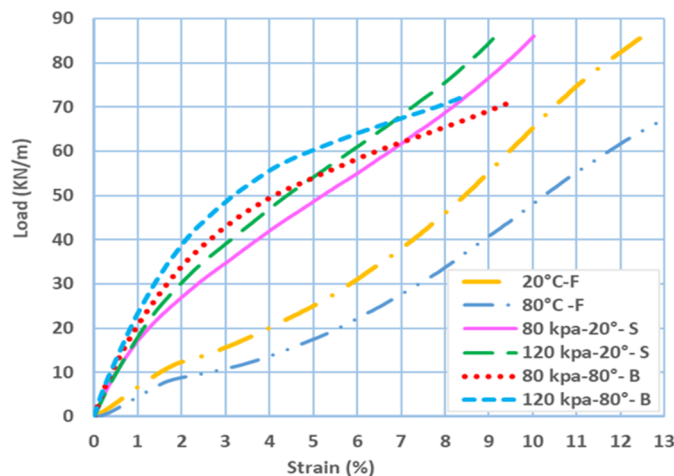
$t (^{\circ}\text{C})$	40	60	80
T_{nt}/T_{n20}	0.95	0.87	0.79
$\%(T_{nt}-T_{n20})/T_{n20}$	5.2	13.3	21.4
$\epsilon_{nt}/\epsilon_{20}$	1.4	1.06	1.05
$\%\Delta T_n 1^{\circ}\text{C}$	0.26	0.33	0.35
T_{n20} and T_{nt} : Failure strength in 20°C and $t^{\circ}\text{C}$			
ϵ_{n20} and ϵ_{nt} : failure strain in 20°C and $t^{\circ}\text{C}$			

3.2. Effect of confinement in soil

Introducing confinement by embedding the geogrid within compacted granular materials resulted in a pronounced change in its mechanical response. Confinement led to a notable increase in tensile modulus, particularly at low strain levels. In confined conditions, the effective resistance and stiffness were higher than in the unconfined case, mainly due to frictional and mechanical interaction between the geogrid and the surrounding soil. However, the negative influence of elevated temperature persisted even under confinement.

3.3. Temperature-confinement interaction

In the confined tensile testing of the geogrid, increasing the temperature from 40 to 80°C , in conjunction with a 50% increase in vertical confining stress and the substitution of sand with base-layer material, resulted in a pronounced increase in tensile stiffness at low strain levels (up to 3%), with enhancements of approximately 40%. This response is primarily attributed to improved interfacial contact and more effective stress transfer under elevated thermal conditions. Conversely, at higher strain levels, an increase in temperature led to a reduction in the ultimate tensile capacity of the geogrid, with failure occurring at lower strain values (Fig. 1).

**Fig. 1.** Effect of temperature increase and confinement condition (free, sand, and base course)

3.4. Value of the developed apparatus

The newly developed testing device provides accurate temperature control, ensures uniform thermal distribution, and enables tensile testing under conditions that closely replicate field-relevant behavior.

Therefore, it can be used as an effective tool for future research and for the development of new laboratory testing standards.

Results showed that increasing temperature led to a significant reduction in the initial stiffness and ultimate tensile strength of the geogrid. This trend was especially pronounced at temperatures above 40°C, indicating the onset of polymer thermal softening. Under confined conditions, the apparent strength increased due to the soil–geogrid interaction and restriction of lateral deformation. However, the overall tendency of strength reduction with increasing temperature still persisted. The thermal sensitivity of the unconfined specimens was higher, since the surrounding soil under confinement partially mitigates thermal effects.

4. Conclusions

This study demonstrated that the mechanical behavior of geogrids arises from the complex interaction between the viscoelastic characteristics of the polymer and the interaction mechanisms mobilized within the surrounding medium. Confinement, through the development of mechanical interlocking, compensates for thermally induced stiffness degradation at low strain levels, and this compensatory effect is further enhanced by increasing confining pressure and the surface roughness of the granular material. Despite the limitation imposed by stress concentration at the grips under high strain levels, conventional design approaches based on unconfined tests by neglecting the realistic soil–geogrid interaction lead to overly conservative and economically inefficient predictions. Therefore, shifting from idealized laboratory properties toward data obtained from confined tests (which more closely represent field behavior) and incorporating such data into back-analysis procedures is essential for optimizing geotechnical designs.

بررسی رفتار کششی ژئوگریدها تحت شرایط محصور و غیرمحصور در دماهای مختلف با استفاده از دستگاه ابداعی

هوشنگ کاتبی^{1*}، مسعود رنجبرنیا²، خلیل خردمند³

¹ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

² دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

³ دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: 1405/2/23، بازنگری: 1405/5/24، پذیرش: 1405/6/3، نشر آنلاین: 1405/6/3

چکیده

این پژوهش، به معرفی و تحلیل عملکرد دستگاه آزمایشگاهی نوآورانه‌ای می‌پردازد که با هدف پایش رفتار تلفیقی خاک و ژئوگرید تحت شرایط بارگذاری مکانیکی و ترمومکانیکی طراحی و ساخته شده است. این سامانه، با قابلیت اعمال تنش‌های محصورکننده تا 300 کیلوپاسکال، نیروهای کششی بیش از 20 تن، تأمین و کنترل دقیق دما تا 300 درجه سانتی‌گراد، امکان ارزیابی هم‌زمان اثرات دما و محصورشدگی بر عملکرد ژئوسنتتیک‌ها را فراهم می‌کند. در این مطالعه، پاسخ کششی ژئوگرید در دو حالت آزاد و محصور در مصالح پیرامون، شامل ماسه و مصالح شکسته لایه اساس راهسازی، تحت تنش‌های قائم 80 و 120 کیلوپاسکال و دماهای حداکثر 80 درجه سانتی‌گراد، تا مرحله گسیختگی بررسی شد. نتایج نشان داد که اعمال تنش محصورکننده، حتی در دمای محیط، موجب افزایش معنادار مدول کششی نسبت به حالت آزاد می‌شود. این افزایش صرفاً ناشی از تغییر خواص ذاتی پلیمر نبود، بلکه عمدتاً ناشی از محدودشدن تغییر شکل‌های جانبی تارها، پودها و گره‌ها، بهبود انطباق هندسی و تقویت درگیری مکانیکی میان ژئوگرید و مصالح پیرامون بود. در حالت آزاد، افزایش دما با ایجاد نرم‌شوندگی حرارتی، کاهش مدول و افت مقاومت کششی را به دنبال دارد؛ با این حال، در شرایط محصور، افزایش دما با افزایش انعطاف‌پذیری شبکه، انطباق بهتر با ساختار دانه‌ای و توسعه قفل‌وبست هندسی را امکان‌پذیر می‌سازد و بخشی از آثار نامطلوب حرارتی، به‌ویژه در محدوده کرنش‌های پایین، جبران می‌شود. یافته‌ها بر ضرورت استفاده از نتایج آزمون‌های محصورشده در کالیبراسیون مدل‌های پیش‌بین و تحلیل‌های بازگشتی در طراحی بهینه سازه‌های خاک مسلح تأکید می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: پایش رفتار تلفیقی، رفتار ترمومکانیکی، ژئوگرید، انطباق هندسی، تحلیل بازگشتی.

1- مقدمه

(Kasozhi و همکاران، 2015؛ Helwany و همکاران، 2012).

عواملی که می‌تواند دمای درون سازه‌های خاک مسلح را به‌مقداری فراتر از دمای استاندارد آزمون‌های کششی برساند، عبارت‌اند از:

(1) حرارت ناشی از تشعشعات رادیواکتیو در محل دفن زباله‌های هسته‌ای (Pepper و همکاران، 2015)؛

(2) گرمای حاصل از واکنش‌های تجزیه و تخمیر در لندفیل‌های بهداشتی (تا 70 درجه سلسیوس) (Karademir و همکاران، 2011)؛

(3) حرارت ناشی از ولتاژ بالای خطوط برق فشارقوی در مجاورت کانال‌ها و تونل‌های انتقال نیرو (Mitchell و همکاران،

امروزه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها به دلیل سرعت بالای اجرا و قیمت مناسب، به شدت در حال رشد است. خواص فیزیکی و مکانیکی این مواد، مانند استحکام، نفوذناپذیری، قابلیت زهکشی، مقاومت در برابر فرسایش و به‌ویژه نسبت بالای مقاومت کششی به وزن، کاربرد گسترده‌ای را در طرح‌های عمرانی برای آن‌ها به ارمغان آورده است (Koerner، 2005).

یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر مصالح ژئوسنتتیکی، حرارت و تابش فرابنفش (UV) است (Tseng و Hsieh، 2008). خواص ژئوسنتتیک‌ها از جمله خزش، مقاومت کششی، مدول کشسانی، سختی سطحی به شدت تحت تأثیر تغییرات دما قرار دارند



(1982)؛

(4) انتقال حرارت از کوره‌های صنعتی به پی‌های تقویت‌شده؛
 (5) حرارت ناشی از آتش‌سوزی‌های غیرمترقبه (نظیر واژگونی تانکرهای سوخت در جوار کوله‌پل‌ها یا مخازن نفتی)، برای نمونه، در سال 1982 میلادی در اثر انفجار یک مخزن ذخیره سوخت در نیروگاه تاکوا¹ در کاراکاس ونزوئلا، آتش‌سوزی با دمای 1100 درجه سلسیوس به مدت 4 روز ادامه یافت و محققان دریافتند که با وجود تخریب پانل‌های بتنی نما، پایداری کلی دیوار حفظ شده است (Yarivand و همکاران، 2017).

دمای استاندارد برای تعیین مقاومت کششی ژئوسنتتیک‌ها طبق استاندارد (ASTM D6637، 2015)، معادل 21 درجه و بر اساس استاندارد (AASHTO-LRFD، 2011)، معادل 30 درجه سلسیوس تعیین شده است؛ این درحالی است که دمای محیط خاک مسلح در بسیاری از سازه‌ها بالاتر از این مقادیر است. در بیشتر مطالعات، تأثیر افزایش دما در بازه تغییرات دمای جوی بر رفتار خاک مسلح و نیز خواص خود مسلح‌کننده (نظیر مقاومت کششی، خزش و زوال)، صرفاً در حالت آزاد بررسی شده است که نتایج نشان‌دهنده افزایش غیرخطی خزش، کاهش محسوس مقاومت کششی و مدول کشسانی، افت سختی سطحی و نیز تسریع فرایندهای زوال در پلیمرهاست (Yarivand و همکاران، 2017؛ Karademir، 2011؛ Zornberg و همکاران، 2004). رفتار و مقاومت داخلی خاک مسلح به اندرکنش میان خاک و عناصر مسلح‌کننده، شامل اصطکاک سطح مشترک و مقاومت منفعل، وابسته است، در این سازوکار، تنش‌های افقی ایجادشده در توده خاک از طریق اندرکنش خاک و مسلح‌کننده به عناصر مسلح‌کننده منتقل شده و در آن‌ها نیروی کششی ایجاد می‌کنند، مقدار این نیروی کششی به توزیع تنش‌های برشی در امتداد طول عناصر مسلح‌کننده وابسته است (Behnia، 1970 و 1975). بنابراین، افزایش دما می‌تواند آثار متضادی بر مقاومت داخلی خاک مسلح داشته باشد. از یک‌سو، افزایش دما ممکن است موجب افزایش اصطکاک میان خاک و عنصر مسلح‌کننده و در نتیجه، افزایش مقاومت بیرون کشیدگی شود؛ از سوی دیگر، افزایش دما معمولاً با کاهش مدول کشسانی و مقاومت کششی عناصر مسلح‌کننده ژئوسنتتیکی همراه است. افزون بر این، افزایش انتقال تنش برشی در سطح مشترک خاک و مسلح‌کننده، نیروی کششی بیشتری را در عنصر مسلح‌کننده ایجاد می‌کند؛ درحالی‌که حرکت آن در داخل توده خاک، به دلیل شرایط محصورشدگی، محدود است. برهم‌کنش این عوامل سبب می‌شود ارزیابی اثر افزایش دما بر رفتار خاک مسلح پیچیده باشد؛ زیرا افزایش دما می‌تواند به‌طور هم‌زمان مقاومت بیرون کشیدگی را افزایش و ظرفیت کششی عنصر

مسلح‌کننده را کاهش دهد. از این‌رو، استفاده از مقاومت کششی عناصر مسلح‌کننده در شرایط آزاد، بدون در نظر گرفتن اثر دما، محصورشدگی و اندرکنش خاک-مسلح‌کننده، ممکن است به برآورد نامتناسب ظرفیت واقعی سازه‌های خاک مسلح و در برخی موارد، به طراحی غیراقتصادی آن‌ها منجر شود. در مطالعات پیشین، بررسی مقاومت کششی ژئوسنتتیک‌ها عمدتاً محدود به شرایط آزمایشگاهی آزاد و اغلب به‌صورت کشش تک‌تار بوده است. با وجود این، تاکنون پژوهش جامعی در زمینه ارزیابی رفتار کششی شبکه‌های ژئوسنتتیک در شرایط محصورشدگی (درون مصالح) و به‌ویژه در محیط‌های با دمای بالا صورت نگرفته است. از این‌رو، در این پژوهش با طراحی و ساخت دستگاهی جدید، مقاومت کششی چند نمونه ژئوگرید در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در دو شرایط آزاد و محصور در دو نوع مصالح (لایه اساس راهسازی و ماسه شسته) و تحت دو سطح تنش قائم محصورکننده انجام گرفت؛ سپس نتایج حاصل، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

Hsieh و Tseng (2008) نشان دادند که مقاومت کششی ژئوگرید پلی‌استر با افزایش دما از 0 تا 60 درجه به‌صورت خطی با نرخ 0/33 درصد بر درجه کاهش می‌یابد.

Kongkitkul و همکاران (2012) رفتار ویسکوالاستیک ژئوگریدهای پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن و پلی‌استر را در حالت آزاد بررسی کردند و دریافتند که با افزایش دما از 30 به 50 درجه، مقاومت گسیختگی آن‌ها به‌ترتیب 9/2، 26/7 و 4/5 درصد کاهش می‌یابد.

Karademir و Frost (2013) نیز نشان دادند که با افزایش دما، سختی سطحی ژئوممبرین کاهش و نفوذ ذرات ماسه در آن افزایش می‌یابد که به افزایش مقاومت برشی درزه‌ها می‌انجامد، (شکل 1).

Yarivand و همکاران (2017) بر اساس آزمایش کشش آزاد یک رشته ژئوگرید تا دمای 140 درجه، کاهش مقاومت پلی‌اتیلن را بیش از 3 برابر پلی‌استر گزارش کردند.

Liu و همکاران (2024) در یک مطالعه آزمایشگاهی، اثر نرخ کرنش و دما را بر رفتار کششی آزاد ژئوگریدهای پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) بررسی کردند، نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش یا کاهش دما، سختی و مقاومت کششی ژئوگرید افزایش، اما کرنش گسیختگی آن کاهش می‌یابد.

Górszczyk و Malicki (2025) با به‌کارگیری روش همبستگی دیجیتال تصاویر (DIC) در آزمایش کشش عرض عریض ژئوگریدها، دقت بالای این فناوری را در پایش توزیع کرنش و شناسایی رفتار موضعی نمونه تا لحظه گسیختگی به اثبات رساندند.

Wang و همکاران (2025) با آزمایش‌های سه‌محوری، رفتار بلندمدت مصالح دانه‌ای تقویت شده با ژئوگرید را تحت بار ثابت و سیکلی بررسی و دریافتند که گنجاندن ژئوگرید، تحت بارهای سیکلی، مدول ارتجاعی خاک را افزایش داده و تحت بارهای ثابت با کاستن از کرنش شعاعی و افزایش تنش محصور کننده، موجب کاهش تغییر شکل دائمی خاک می‌شود.

در نهایت، Nafei و همکاران (2026) دوام کششی کامپوزیت متشکل از ژئوگرید دومحوره و ژئوگرید جاذب رطوبت را تحت چرخه‌های یخ‌زدگی- ذوب بررسی کردند، نتایج نشان داد که ارزیابی دوام آن در شرایط سردسیر برای پیش‌بینی عملکرد بلندمدت ضروری است.

بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که ارزیابی رفتار مکانیکی ژئوسنتتیک‌ها در شرایط عملیاتی با چالش‌های روش‌شناختی متعددی مواجه است. در بخش عمده‌ای از پژوهش‌های پیشین، ارزیابی رفتار کششی ژئوگرید صرفاً بر آزمون‌های کشش یک تار منفرد (ریپ) متمرکز بوده است. رویکردی که اثر هندسه شبکه، اندرکنش میان‌گره‌ها، پیوستگی سازه‌ای و سازوکار انتقال بار میان اعضای طولی و عرضی را در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده لحاظ نمی‌کند. این درحالی است که عملکرد باربر ژئوگرید درون توده خاک، ماهیتی سامانه‌ای داشته و برخاسته از رفتار توأم و پیوستگی ساختاری تمامی این اجزاست. دامنه بارگذاری در بسیاری از این پژوهش‌ها غالباً به شمار محدودی نمونه و سطوح پایین نیروی کششی و تنش محصورکننده محدود شده و بدین‌ترتیب، گستره تنش‌های حاکم بر شرایط بهره‌برداری به‌طور جامع پوشش داده نشده است. افزون بر این، اغلب آزمون‌های پیشین در دمای محیط و تحت شرایط کشش نامحصور انجام یافته‌اند؛ حال آنکه ژئوگرید در کاربردهای میدانی درون توده خاک مدفون بوده و تحت اثر توأم دما و تنش‌های محصورکننده قرار دارد. غفلت از اعمال هم‌زمان این متغیرها، انحراف معنادار پاسخ‌های آزمایشگاهی از عملکرد واقعی ژئوگرید در شرایط میدانی را به‌دنبال داشته است. در معدود پژوهش‌هایی نیز که به آزمون‌های محصور پرداخته‌اند، عدم کنترل دقیق و یکنواخت میدان حرارتی، نوسان در نرخ بارگذاری و محدودیت‌های ثبت هم‌گام و پیوسته داده‌های بار، جابه‌جایی و دما، از دقت استخراج منحنی‌های رفتاری کاسته و به تجمع کرنش‌های ناخواسته خزشی و خطا در تفکیک مؤلفه‌های تغییرشکل منجر شده است. علاوه بر این، محدودیت شمار تکرار آزمون‌ها و فقدان پروتکلی استاندارد و یکپارچه برای اعمال شرایط مرزی، بارگذاری و پایش حرارتی، تکرارپذیری داده‌ها و به تبع آن قابلیت تعمیم یافته‌های حاصل را با چالش جدی روبه‌رو ساخته است. به‌منظور رفع این کاستی‌ها و اصلاح انحرافات نتایج آزمایش‌های گذشته، در پژوهش حاضر سامانه آزمایشگاهی نوینی برای پایش رفتار تلفیقی خاک- ژئوگرید با هدف شبیه‌سازی دقیق

شرایط درجا طراحی و ساخته شد. وجه تمایز بنیادین این سامانه، امکان بارگذاری و اعمال تنش محصورکننده بر کل شبکه ژئوگرید است؛ به‌گونه‌ای که اندرکنش میان‌گره‌ها، پیوستگی سازه‌ای شبکه و سازوکار انتقال نیرو میان اعضای طولی و عرضی در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده منعکس می‌شود. این سامانه، قابلیت اعمال هم‌زمان تنش محصورکننده تا 300 کیلوپاسکال، نیروی کششی بیش از 20 تن و دمای کنترل شده تا 300 درجه سلسیوس را فراهم می‌آورد که دامنه بارگذاری را به شرایط واقعی بهره‌برداری نزدیک می‌سازد. یکنواختی میدان حرارتی در محفظه آزمون از طریق کنترل مبتنی بر منطق فازی و پایش دما توسط 5 حسگر Pt-100 صحت‌سنجی شده در برابر دماسنج لیزری استاندارد تضمین شده و کنترل میدان تنش نیز با بهره‌گیری از سامانه هیدرولیک کالیبره شده، شامل فشارسنج دقیق، شیر فشارشکن و جک دوطرفه، به‌صورت پایدار و بدون شوک انجام می‌پذیرد. اتصال سامانه به دستگاه کشش تک‌محوری (UTM) نیز با رفع ناپایداری نرخ بارگذاری، امکان اعمال نرخ‌های دلخواه بارگذاری، ثبت لحظه‌ای نیرو و جابه‌جایی و رسم خودکار منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی را فراهم کرده است. این قابلیت، تفکیک سهم کرنش‌های فوری و خزشی و مطالعه رفتار ویسکوالاستیک ژئوگرید را در گستره وسیعی از شرایط دمایی و در حالت‌های آزاد و محصور میسر می‌سازد.

نوآوری اصلی این پژوهش نه در یک جزء منفرد، بلکه در تکامل روش‌شناختی آزمون ژئوگرید از رویکرد تک‌ریپ به ارزیابی تلفیقی رفتار ترمومکانیکی کل شبکه نهفته است. در این سامانه، بار از طریق صفحات صلب به مصالح دانه‌ای محصورکننده منتقل می‌شود و اثرات گیرداری مکانیکی و رفتار ویسکوالاستیک نمونه تحت اثر توأم فشار و حرارت به‌صورت هم‌زمان ارزیابی می‌گردد. استفاده از صفحات پلی‌اورتان در فک‌های گیرش نیز با کاهش لغزش و آسیب‌دیدن نمونه و جلوگیری از تمرکز تنش موضعی در ناحیه گیرش، انتقال نیروی کششی را یکنواخت‌تر و داده‌های ثبت شده را معتبرتر می‌سازد. حفظ یکنواختی میدان تنش و حرارت در محفظه آزمون، همراه با کالیبراسیون دوره‌ای حسگرها و اجرای آزمون‌های تکراری تحت شرایط یکسان، تکرارپذیری و اتکاپذیری نتایج را از طریق ارزیابی ضریب تغییرات (CV) تضمین می‌کند. بدین‌ترتیب، تحلیل رفتار ژئوگرید از سطح تک‌بعدی و ساده‌شده به سطحی تلفیقی و واقع‌بینانه ارتقا یافته و چارچوبی دقیق‌تر، تکرارپذیرتر و نزدیک‌تر به شرایط عملیاتی برای مطالعه اندرکنش خاک- ژئوگرید و تغییرشکل‌های وابسته به زمان فراهم شده است. در بخش‌های بعدی، ابتدا اجزای سامانه و فرایند ساخت آن تشریح می‌شود، سپس روش آزمون و اعتبارسنجی نتایج ارائه می‌گردد و در پایان، رفتار ترمومکانیکی ژئوگرید در شرایط آزاد و محصور مورد تحلیل و بحث قرار می‌گیرد.

برش کاری، فرز کاری، سوراخ کاری و کف تراشی با بهره گیری از ماشین آلات دقیق کارگاهی انجام پذیرفت. به منظور دستیابی به صافی سطح مطلوب و کاهش مقاومت های اصطکاکی ناشی از زبری جدار، سطوح داخلی محفظه تحت عملیات صیقل کاری قرار گرفت. پس از اطمینان از دقت ابعادی و کیفیت سطوح، عملیات جوشکاری، دوجداره سازی، بوش زنی و پرداخت نهایی انجام شد تا هسته اولیه محفظه در محدوده رواداری های مجاز مهندسی ساخته و آماده مونتاژ گردد. این محفظه دوجداره، مطابق شکل (3)، از دو شاسی ثابت و متحرک فلزی تشکیل شده است. فضای دوجداره محفظه بستر مناسبی را برای گردش روغن حرارتی فراهم می آورد تا از این طریق، گرمایش غیرمستقیم و یکنواخت مصالح دانه ای و نمونه ژئوگرید محصور در دمای مورد نظر تأمین شود. همزمان با شبیه سازی شرایط دمایی، مصالح دانه ای و نمونه ژئوگرید درون محفظه قرار گرفته و نیروی اعمالی از سوی جک هیدرولیکی، شرایط مرزی تنش محصورکننده و فشرده سازی بستر خاکی را برقرار می سازد. این پیکربندی یکپارچه، امکان ارزیابی دقیق رفتار کششی ژئوگرید را تحت اثر همزمان تنش محصورکننده و دمای کنترل شده فراهم می آورد.

2-1-2- سیستم هیدرولیکی جهت تأمین و اعمال نیروی

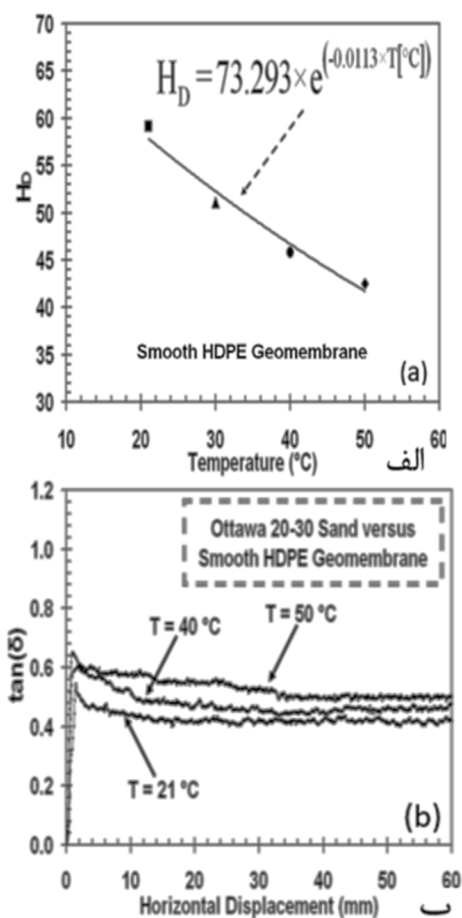
محصورسازی ژئوگرید

این قسمت شامل: الف) جک هیدرولیکی دوطرفه؛ ب) پمپ هیدرولیک جهت تأمین فشار؛ پ) شیر کنترل جهت اهرمی؛ ت) فشارسنج (مانومتر) 400 بار؛ ث) شیر کنترل فشار جهت تثبیت فشار محصورکننده و سایر اتصالات مربوطه می باشد. به منظور حصول دقت حداکثری در اعمال و پایش تنش محصورکننده، فشارسنجی با دقت بالا در حد فاصل جک هیدرولیکی و صفحات صلب بارگذاری نصب شده است. این پیکربندی، اعمال دقیق تنش هدف و پایش مستمر آن را در طول آزمایش میسر می سازد. افزون بر این، به کارگیری یک شیر فشارشکن در مدار ورودی، پایداری تنش اعمالی را به ویژه در دماهای بالا تضمین نموده و از بروز نوسانات احتمالی ناشی از تغییرات حرارتی یا خزش مصالح در فرایند بارگذاری جلوگیری می کند. در نهایت، استفاده از جک هیدرولیکی دوطرفه در کنار شیر کنترل جهت اهرمی، امکان بارگذاری و باربرداری پیوسته و کنترل شده را بدون ایجاد شوک های مکانیکی در سامانه فراهم می آورد.

2-1-3- سیستم گرمایش و سیرکولاسیون روغن نسوز

برای تأمین گرمایش

به منظور فراهم سازی شرایط حرارتی پایدار در محیط آزمون، سامانه ای متشکل از مخزن ذخیره، واحد گرمایش و پمپ



شکل 1: الف) رابطه سختی سطحی ژئوممبرین پلی اتیلن با دما،
ب) ارتباط تانژانت زاویه اصطکاک ژئوممبرین پلی اتیلن
محصور شده در ماسه گردگوشه با دما
(Karademir و Frost, 2013).

2- روش تحقیق

2-1-2- قسمت های مختلف دستگاه ابداعی

دستگاه کشش خودکار ژئوگرید در قالب چهار بخش اصلی و به صورت یک سامانه یکپارچه طراحی و ساخته شد. این بخش ها شامل زیرسامانه های مکانیکی، هیدرولیکی، گرمایشی و ابزارگذاری دقیق هستند که هر یک متناسب با نیازهای آزمون و الزامات طراحی، به صورت هماهنگ در ساختار کلی دستگاه ادغام شدند. در ادامه، هر یک از این بخش ها به تفکیک معرفی می شوند.

2-1-1- محفظه دوجداره برای گرمایش و محصورسازی

نمونه ژئوگرید در مصالح دانه ای

فرآیند ساخت هسته اصلی دستگاه، یعنی محفظه محصورسازی، بر اساس نقشه های دقیق مهندسی و مدل سه بعدی ارائه شده در شکل (2) به عنوان مرجع ساخت آغاز گردید. قطعات اصلی شامل ورق ها، شفت ها و بوش ها بر اساس مشخصات فنی و متریکال توصیه شده تهیه شدند. عملیات ماشین کاری قطعات شامل

حسگرها شماره گذاری و سپس کالیبره شدند و جهت کنترل آنی دما و صحت سنجی کارکرد حسگرها و ترموستات ها از دماسنج لبریزی دستی مدل WT323E، استفاده گردید.

2-4-1-2- ترموستات (کنترلر دما)، رله حالت جامد (SSR)، فن هوا و سایر تجهیزات الکتریکی مانند کنتاکتور، بیمتال و فیوز مینیاتوری تک فاز و سه فاز

ترموستات، دمای سامانه را در مقدار تنظیم شده یا در محدوده دمایی تعیین شده ثابت نگه می دارد و افزون بر نمایش دما، امکاناتی همچون برنامه ریزی فرایند، تنظیم زمان و دما، کنترل و اعلام هشدار را نیز فراهم می کند. در این پژوهش، برای ثبت، نمایش و کنترل دمای روغن حرارتی از ترموستات دیجیتالی سری AX7 شرکت هانیانگ² استفاده شد. دوره نمونه برداری این کنترلر دما 0/1 ثانیه و قابلیت کنترل، برنامه دهی و نمایش ورودی انواع سنسورهای دمایی را دارد. همچنین، برای کنترل دمای مصالح داخل محفظه از دو ترموستات دیجیتالی تیپ STC-100A بهره گرفته شد و برای ثابت نگه داشتن دما در یک بازه باریک، از رله های حالت جامد (SSR) استفاده گردید که دما را به طور خودکار تنظیم می کردند. در آزمایش های غیرمحصور نیز، جهت به گردش درآوردن و یکنواخت کردن هوای داخل محفظه کشش ژئوگرید، از دو فن هوای 220 ولت استفاده شد.

2-4-1-3- کرنش سنج و اتصالات مربوطه

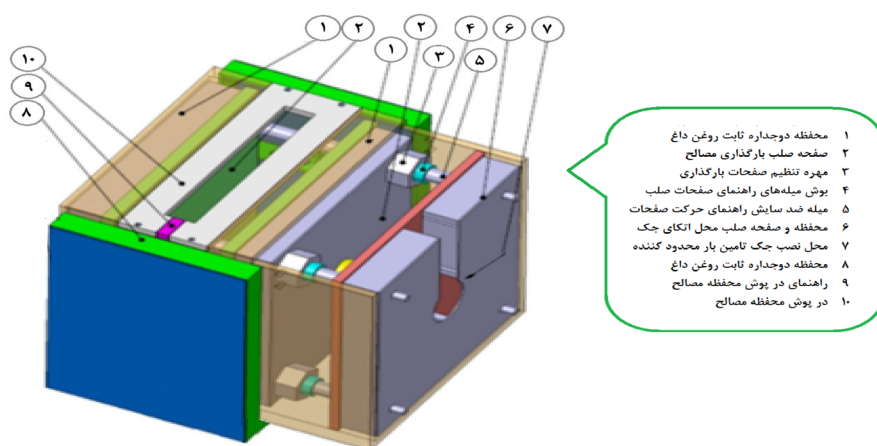
به منظور پایش دقیق پارامترهای کششی، داده های مربوط به تغییر شکل نمونه، هم از طریق کرنش سنج های دستگاه کششی UTM و هم به واسطه یک مبدل LVDT مستقر در داخل محفظه، به صورت موازی ثبت و گردآوری می گردند.

سیرکولاسیون طراحی و ساخته شد. مخزن اصلی از آلیاژ آلومینیوم ساخته شده و برای نصب ترمومتر و اتصالات مربوط به مدار رفت و برگشت روغن حرارتی، تحت عملیات ماشین کاری دقیق شامل فرز کاری، سوراخ کاری و رزوه زنی قرار گرفت. گرمایش سیال به وسیله یک المنت فولاد زنگ نزن با توان 2000 وات تأمین می شود. به منظور جلوگیری از نشت جریان الکتریکی به بدنه دستگاه و سیال، اتصالات المنت با استفاده از عایق های سرامیکی و پلیمری به طور کامل ایزوله شدند. انتقال حرارت به محفظه دوجداره از طریق گردش روغن حرارتی در یک مدار بسته انجام می گیرد. این گردش به وسیله یک الکتروموتور سه فاز با توان یک کیلووات و پمپ آلومینیومی کوپل شده با آن، با دبی یک لیتر بر دقیقه، تأمین می شود (شکل 4). در این چرخه، روغن پس از رسیدن به دمای هدف در مخزن اصلی، به فضای دوجداره پیرامون نمونه ژئوگرید هدایت می شود. پایش و کنترل دما بر مبنای منطق فازی و با استفاده از کنترل کننده های برنامه پذیر انجام می شود. حسگرهای دمای نصب شده در دو سوی نمونه، تغییرات دما را به صورت پیوسته ثبت و به واحد کنترل ارسال می کنند؛ واحد کنترل نیز بر اساس داده های دریافتی، عملکرد المنت و پمپ را تنظیم می نماید. سازوکاری مشابهی برای تثبیت دمای سیال در مخزن ذخیره پیش بینی شده است؛ به طوری که پس از دستیابی سیال به دمای تنظیم شده، المنت به طور خودکار خاموش می شود. در نهایت، به منظور اطمینان از برقراری تعادل حرارتی در سامانه، تمامی آزمون ها یک ساعت پس از تثبیت دما آغاز شدند.

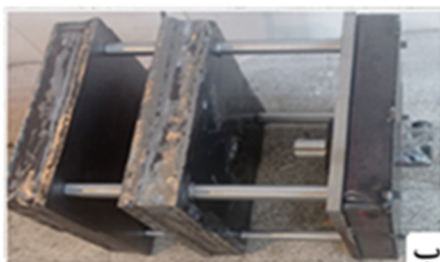
2-4-1-4- سیستم اندازه گیری و کنترل دما و کرنش

2-4-1-1- حسگرهای دما

برای اندازه گیری دما از پنج حسگر نوع Pt-100 مدل قلمی که به سنسورهای مقاومتی معروفند استفاده گردید. تمامی



شکل 2- نمای کلی محفظه اعمال تنش محصورکننده برای نمونه ژئوگرید در بستر خاکی



ب



الف



ت



پ

شکل 3- الف) اجزای شفت‌های کشش، کفه‌ها و جک بارگذاری، ب) ترکیب شفت‌ها و کفه‌های دوجداره در محفظه، پ) و ت) سیستم هیدرولیکی برای بارگذاری محصورکننده

2-1-5- سیستم کشش نمونه‌های ژئوگرید

جهت ارزیابی رفتار ترمومکانیکی ژئوگریدها در توده خاک‌های گرم، سامانه آزمایشگاهی مطابق شکل (5) طراحی و ساخته شد. این سامانه از بخش‌های زیر تشکیل یافته است: سیستم بارگذاری هیدرولیکی جهت اعمال تنش محصورکننده، واحد گرمایش محفظه، مدار هیدرولیکی برای چرخش روغن حرارتی در دیواره‌های دوجداره پیرامون محفظه، ادوات ابزار دقیق برای اندازه‌گیری و ثبت پیوسته پارامترهای تنش- کرنش و کنترل خودکار دما در بازه‌ای از پیش تعیین شده.

محفظه محصورسازی، شکل (5-ت)، با استفاده از چهار عدد پیچ نمره 25 بر روی فک پایینی دستگاه آزمون کشش (UTM) موجود در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز نصب شد. این دستگاه کشش، مجهز به سامانه‌های داده‌بردار (دیتالاگر) و رایانه، از قابلیت اعمال بارگذاری کششی با نرخ‌های متغیر و استخراج منحنی‌های تنش- کرنش برخوردار است. با توجه به این‌که عرض فک‌های متداول دستگاه کشش (حداکثر 15 سانتی‌متر) کمتر از پهنای نمونه‌های ژئوگرید بود، گیره‌های صلبی با ابعاد مناسب طراحی و ساخته شد. همچنین به منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی موضعی یا لغزش نمونه‌ها در حین آزمایش، سطوح داخلی گیره‌ها با صفحات پلی‌اورتان (با ضخامت بهینه‌شده مبتنی بر روش آزمون و خطا) پوشش داده شد. در نهایت، سامانه توسعه‌یافته قادر است تاریخچه بارگذاری و تغییرات دما را به‌صورت خودکار پایش و کنترل کرده و مقاومت کششی، رفتار بیرون‌کشیدگی و پاسخ خزشی انواع ژئوسنتتیک‌ها را در شرایط محیطی گوناگون (اعم از محصور در خاک یا در شرایط نامحصور و آزاد) ارزیابی کند.

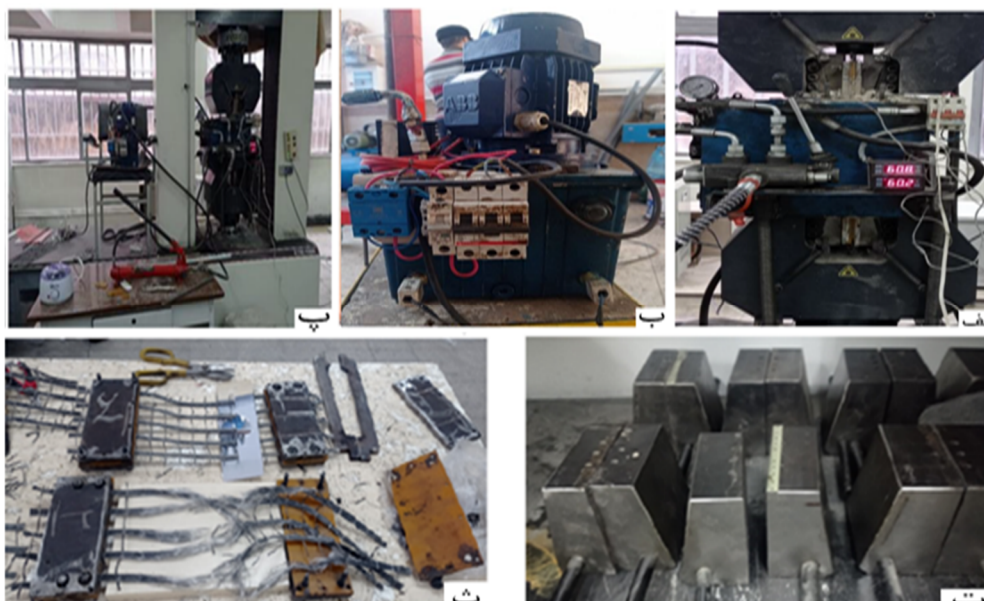


الف



ب

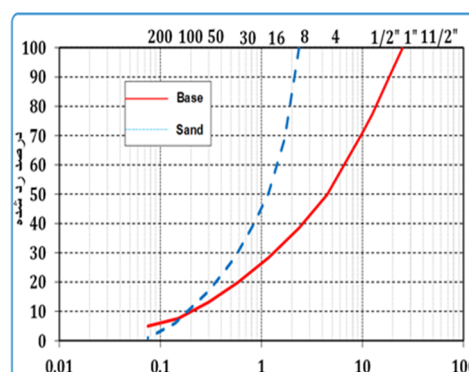
شکل 4- الف) مخزن ذخیره و گرمایش روغن حرارتی (نسوز) با المنت برقی و پمپ روغن کوپل شده، ب) الکتروموتور پمپ روغن همراه با ترموکوپل‌ها، ترموستات و رله SSR



شکل 5- الف) محفظه دوجداره متصل به UTM، ب) پمپ سیرکولاسیون، مخزن گرمایش و رله SSR، پ) مجموعه کامل متصل به UTM. (ت) بلوک‌های فلزی داخل فک‌ها با ابعاد مختلف، ث) گیره‌های فلزی پوشیده‌شده با پلی‌اورتان

2-2- مواد و مصالح مورد استفاده

در این پژوهش، جهت محصورسازی ژئوگرید از دو نوع مصالح درشت‌دانه خشک (ماسه شسته و مصالح لایه اساس راه‌سازی) استفاده شد. مشخصات فیزیکی این مصالح، شامل چگالی نسبی (مطابق استانداردهای ASTM C125 و ASTM C127)، حداکثر و حداقل وزن مخصوص خشک (به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D4253 و ASTM D4254) و دانه‌بندی (بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک، USCS) تعیین گردید. منحنی دانه‌بندی و نتایج مشخصات فیزیکی این مصالح در شکل (6) و جدول (1) ارائه شده است. جهت آماده‌سازی نمونه‌های مسلح‌کننده، از ژئوگریدهای پلی‌استری با پوشش PVC (تیپ 80-20، تولید شرکت ژئوپارسیان) با مقاومت کششی اسمی 80 کیلونیوتن بر متر استفاده شد.



شکل 6- منحنی دانه‌بندی ماسه شسته و مصالح لایه اساس

جدول 1- مشخصات ماسه شسته و مصالح لایه اساس

مورد استفاده در تحقیق حاضر

پارامتر	تعریف	ماسه شسته	مصالح لایه اساس
D_{max}	حداکثر سایز دانه‌ها (mm)	2	25
d_{10}	اندازه مؤثر دانه‌بندی (mm)	0/21	1/86
d_{50}	اندازه متوسط دانه‌بندی (mm)	1/2	4/6
C_u	ضریب یکپوشی	7/9	29/8
C_c	ضریب دانه‌بندی	1/2	1/34
G_s	چگالی نسبی	2/6	2/84
Y_{dmin}	حداقل وزن مخصوص (KN/m ³)	16/27	16/32
Y_{dmax}	حداکثر وزن مخصوص (KN/m ³)	18/24	18/93
R	رده خاک	SW	GW

نمونه‌ها در راستای محور کشش به ابعاد 20×60 سانتی‌متر برش داده شدند و از دو انتها به گیره‌های ارتقایافته متصل گردیدند؛ به‌طوری که طول خالص نمونه (فاصله بین دو گیره) مطابق با استاندارد، معادل 30 سانتی‌متر حفظ شود.

3-2- صحت‌سنجی عملکرد سامانه و تحلیل آماری

تکرارپذیری نتایج

به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد مکانیکی دستگاه، ابتدا آزمون‌های کشش ژئوگرید مطابق با استاندارد ASTM D6637 در دمای 20 درجه سلسیوس و در حالت آزاد انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر اعلام‌شده در کاتالوگ سازنده و نتایج آزمایشگاه‌های مرجع مقایسه گردید و اختلاف آن‌ها کمتر از 1

درصد بود. همچنین، به منظور کاهش خطای ناشی از لغزش نمونه در فک‌ها، از صفحات پلی‌یورتان استفاده شد. به‌کارگیری این صفحات، ضمن افزایش یکنواختی انتقال نیرو و جلوگیری از تمرکز تنش در محل مهار، انطباق مناسبی میان نتایج آزمون و مقادیر مرجع فراهم کرد؛ به‌طوری‌که ضریب تغییرات (CV) نتایج آزمون‌های کالیبراسیون برابر $1/2$ درصد به‌دست آمد. با توجه به هدف پژوهش و نبود مرجع استاندارد مشخص برای ترکیب هم‌زمان دمای بالا و محصورشدگی در مصالح، ارزیابی عملکرد سامانه در بازه توسعه‌یافته بر پایه تحلیل آماری تکرارپذیری نتایج انجام شد. در این راستا، حدود 250 آزمون کشش در حالت‌های آزاد و محصور و در دماهای 20، 40، 60 و 80 درجه سلسیوس انجام گرفت. دمای سامانه علاوه بر کنترل به‌وسیله ترموستات‌های برنامه‌پذیر، با دماسنج لیزری مدل WT323E پایش و صحت‌سنجی شد. همچنین، در همه آزمون‌ها، پس از رسیدن دما به مقدار هدف، سامانه به‌مدت یک ساعت در شرایط تعادل حرارتی نگهداری شد تا اختلاف دمای احتمالی میان روغن حرارتی، مصالح محصورکننده و ناحیه مرکزی نمونه حذف شود. برای هر ترکیب دما و شرایط محیطی، حداقل 6 آزمون مستقل انجام شد. سپس، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات نتایج کشش، در کرنش‌های هدف، محاسبه گردید.

نتایج تحلیل آماری نشان داد که ضریب تغییرات در تمامی حالت‌های آزمایش کمتر از 3 درصد است. این میزان پراکندگی محدود، ضمن نشان‌دادن یکنواختی نمونه‌گیری و پایداری شرایط آزمایش، بیانگر تکرارپذیری مناسب نتایج در بازه‌های مختلف دما و در هر دو حالت آزاد و محصور است. از این‌رو، تغییرات مشاهده‌شده در پاسخ کششی ژئوگریدها را می‌توان عمدتاً به اثر متغیرهای آزمایش، شامل دما و تنش محصورکننده، نسبت داد و نه به نوسانات تصادفی عملکرد سامانه. به‌منظور اطمینان از دقت اعمال تنش محصورکننده نیز، گیج فشار پشت صفحات بارگذاری به‌صورت درجا و با استفاده از لودسل مرجع در مسیر انتقال نیرو کالیبره شد. این فرایند در سه چرخه بارگذاری و باربرداری پلکانی انجام گرفت و خطای اندازه‌گیری کمتر از 1 درصد و ضریب تعیین (R^2) عدد 0/999 به‌دست آمد. افزون‌براین، پایداری قرائت گیج فشار در بازه دمایی 20 تا 80 درجه سلسیوس بررسی شد و رانش حرارتی معنی‌داری مشاهده نگردید. بنابراین، کنترل دما، اعمال تنش محصورکننده و ثبت پاسخ کششی در سامانه حاضر از دقت و تکرارپذیری کافی برخوردار است.

2-4- روش آزمایش

2-4-1- آزمایش‌های حالت آزاد

دو انتهای نمونه‌های ژئوگرید، پس از قرارگیری میان ورق‌های پلی‌اورتان، به گیره‌های بهینه‌سازی‌شده متصل و سپس با دقت در

فک‌های دستگاه آزمون کشش تثبیت شدند. در آزمایش‌های انجام‌شده در دماهای بالاتر از دمای محیط، درپوش‌های عایق طرفین محفظه بسته شدند. روغن نسوز موجود در مخزن، توسط گرم‌کن برقی تعبیه شده، تا رسیدن به دماهای هدف (20، 40، 60 و 80 درجه سلسیوس) گرم گردید و سپس از طریق یک الکتروپمپ، در سیستم دوجداره پیرامون محفظه به گردش درآمد تا دمای هوای داخل محفظه به مقدار مطلوب برسد. جهت گردش هوا و توزیع یکنواخت دما در درون محفظه، دو عدد فن تعبیه شده بود و دمای محیط نیز توسط ترموکوپل‌ها و ترموستات‌های نصب‌شده به‌صورت خودکار کنترل می‌شد. یکی از شروط آغاز آزمون کشش، یک ساعت ماندگاری نمونه در دمای ثابت هدف بود. پس از فراهم شدن شرایط لازم، نمونه ژئوگرید مطابق با استاندارد ASTM D6637، با نرخ کرنش 5% بر دقیقه تحت کشش قرار گرفت و نمودار نیرو-افزایش طول توسط سیستم رایانه‌ای متصل به دستگاه، به‌صورت خودکار ترسیم و ثبت شد. از میان آزمون‌های انجام‌شده بر روی هر نمونه، 6 منحنی که بیشترین شباهت را به یکدیگر داشتند، به‌عنوان نتایج آزمون در آن دما انتخاب شدند و سپس از میان آن‌ها، یک منحنی به‌عنوان منحنی تیپ برگزیده شد. این روش پیش‌تر توسط Hsieh و Tseng (2008) به‌کار گرفته شده بود. در شکل‌های (7-الف) و (7-ب)، تصاویری از سامانه در حین کشش آزاد نمونه در دمای اتاق و همچنین فرآیند ترسیم خودکار منحنی نیرو-افزایش طول ارائه شده است.

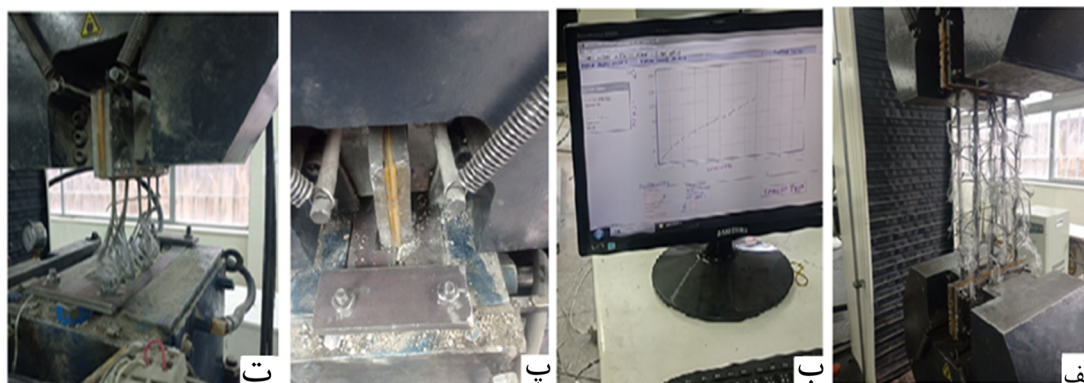
2-4-2- آزمایش‌های حالت محدود شده

این آزمایش‌ها مشابه حالت آزاد انجام شدند، با این تفاوت که پس از تثبیت نمونه‌ی ژئوگرید در فک‌های دستگاه کشش تک‌محوری، مصالح محصورکننده (ماسه یا مصالح لایه اساس راه‌سازی) طی سه مرحله و با وزن مشخص، به‌صورت بارشی در اطراف نمونه درون محفظه محصورکننده ریخته شدند. پس از تکمیل این فرآیند، درپوش محفظه با پیچ و مهره به‌طور کامل بسته شد و تنش قائم محصورکننده، که توسط یک جک هیدرولیکی تأمین می‌گردید، از دو طرف به مصالح اعمال شد. جهت حفظ این تنش در مقادیر ثابت 80 یا 120 کیلوپاسکال، بلافاصله شیر فشارقوی برگشت روغن هیدرولیک بسته شد؛ به‌گونه‌ای که با پایش مستمر فشارسنج (مانومتر)، مقدار تنش محدودکننده تا پایان آزمایش ثابت نگاه داشته شد.

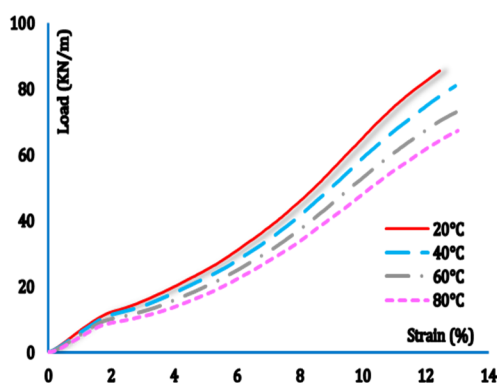
در ادامه، روغن نسوز موجود در مخزن که پیش‌تر تا دمای هدف گرم شده بود، توسط الکتروپمپ در سیستم دوجداره‌ی پیرامون محفظه به گردش درآمد تا دمای کل مصالح درون محفظه به مقدار مطلوب برسد. دو عدد سنسور دما در دو طرف نمونه تعبیه

گردید. این آزمایش‌ها در چهار دمای 20، 40، 60 و 80 درجه سلسیوس، تحت دو سطح تنش محدودکننده 80 و 120 کیلوپاسکال و با استفاده از دو نوع مصالح (ماسه طبیعی شسته شده خشک و مصالح لایه اساس 100 درصد شکسته) انجام پذیرفت. در شکل‌های (7-پ) و (7-ت)، تصاویری از گیره‌ها، فک‌ها و محفظه آزمایش پیش از شروع بارگذاری کششی در حالت محصور ارائه شده است.

شده بودند که هر یک به یک ترموستات دیجیتالی قابل برنامه‌ریزی متصل بودند و دما را به‌طور خودکار در بازه‌ای بسیار محدود ثابت نگه می‌داشتند. پس از یک ساعت ماندگاری نمونه در دمای ثابت و تحت فشار جانبی مشخص، آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D6637 و با نرخ کرنش 5 درصد بر دقیقه انجام شد و نمودار نیرو- تغییرشکل توسط سیستم رایانه‌ای ثبت و ترسیم



شکل 7- الف) سیستم در حالت کشش ژئوگرید در شرایط آزاد در دمای محیط تا حد گسیختگی، ب) رایانه متصل به سیستم در حال ترسیم خودکار منحنی نیرو- تغییر مکان، پ) وضعیت گیره‌ها، فک‌ها و درپوش محفظه در شروع آزمایش کشش نمونه در حالت محصور شده، ت) گسیختگی نمونه در آزمایش محصور شده



شکل 8- منحنی‌های نیرو- کرنش نمونه‌های ژئوگرید در دماهای 20، 40، 60 و 80 درجه سلسیوس در حالت آزاد

جدول 2- تأثیر افزایش دما بر مقاومت و کرنش گسیختگی ژئوگرید در حالت کشش آزاد

80	60	40	t (°C)
0/79	0/87	0/95	T_{nt}/T_{n20}
21/3	13/3	5/2	$\% (T_{nt} - T_{n20})/T_{n20}$
1/05	1/06	1/04	$\epsilon_{nt}/\epsilon_{n20}$
0/35	0/33	0/26	$\% \Delta T_{n1^\circ C}$
T_{nt} & T_{n20} : مقاومت گسیختگی در $t^\circ C$ و $20^\circ C$			
ϵ_{nt} & ϵ_{n20} : کرنش گسیختگی در $t^\circ C$ و $20^\circ C$			

3- نتایج

3-1- نتایج آزمایش کشش ژئوگرید در حالت آزاد

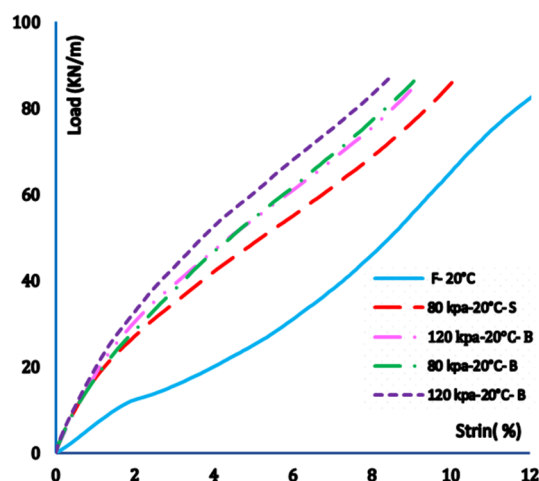
نتایج آزمایش‌های کشش آزاد ژئوگرید پلی‌استر در دماهای مختلف، مطابق شکل (8) و جدول (3)، حاکی از آن است که افزایش دما منجر به کاهش مقاومت و مدول کششی ژئوگرید می‌شود.

در بازه دمایی 20 تا 80 درجه سلسیوس، نرخ متوسط افت مقاومت نهایی 0/35 درصد به‌ازای هر درجه سلسیوس محاسبه شد. این مقدار در بازه‌های دمایی 20 تا 40 و 40 تا 60 درجه سلسیوس، به‌ترتیب برابر با 0/26 و 0/33 درصد به‌ازای هر درجه سلسیوس است.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که روند افت مقاومت با افزایش دما تشدید می‌شود؛ به‌طوری‌که میزان کاهش مقاومت در بازه‌های دمایی 20-40، 40-60 و 60-80 درجه سلسیوس، به‌ترتیب برابر با 5/2، 8/1 و 9/1 درصد گزارش شد. کرنش گسیختگی ژئوگرید تا دمای 60 درجه سلسیوس روند افزایشی داشت، اما در دمای 80 درجه سلسیوس کاهش یافت و در دماهای بالاتر، رفتاری نوسانی از خود بروز داد.

2-3- نتایج آزمایش کشش نمونه ژئوگرید در حالت محصورسازی شده در دمای اتاق (20 درجه سلسیوس)

نتایج آزمایش کشش ژئوگرید در حالت محصورسازی شده درون مصالح لایه اساس راهسازی و ماسه، مطابق شکل (9) و جدول (4)، بیانگر افزایش قابل توجه مدول کششی و افزایش اندک مقاومت کششی نهایی نسبت به حالت آزاد است. محصورسازی ژئوگرید تحت تنش قائم 120 کیلوپاسکال در مصالح لایه اساس، موجب افزایش 176 درصدی مدول کششی متناظر با کرنش 3 درصد و افزایش 50 درصدی مدول کششی نهایی شد. در مقابل، مقاومت کششی نهایی ژئوگرید در حالت محصورسازی شده تنها حدود 2 درصد افزایش نشان داد. این نتایج حاکی از آن است که اثر اصلی محصورسازی، بیش از آن که بر مقاومت نهایی مؤثر باشد، بر سختی و مدول کششی ژئوگرید متمرکز است.



شکل 9- تأثیر محصورشدگی در مصالح لایه زیراساس (Base) و ماسه بر مقاومت کششی نمونه‌های ژئوگرید

جدول 3- تأثیر میزان تنش محصورکننده و جنس مصالح بر مدول کششی نمونه‌های ژئوگرید در حالت محصوردشده

شرایط	محصور شده در ماسه شسته	محصور شده در مصالح اساس	میزان تنش محصورکننده (kpa)	درصد افزایش مدول کششی نظیر کرنش 3%	درصد افزایش مدول کششی نهایی
میزان تنش محصورکننده (kpa)	80	120	80	120	
درصد افزایش مدول کششی نظیر کرنش 3%	123	142	151	176	
درصد افزایش مدول کششی نهایی	25	39	37	50	

3-3- نتایج آزمایش‌های کشش نمونه‌های ژئوگرید در دمای 40، 60 و 80 درجه سلسیوس در حالت محصورسازی شده

نتایج آزمایش‌های کشش ژئوگرید در حالت محصورسازی شده درون مصالح، در دماهای 40، 60 و 80 درجه سلسیوس، نشان می‌دهد که برخلاف حالت آزاد، در مراحل اولیه بارگذاری (کرنش‌های کمتر از حدود 5/5 درصد)، مدول و مقاومت کششی ژئوگرید با افزایش دما افزایش می‌یابد. با این حال، در کرنش‌های بالاتر و با افزایش نیروی کششی، مقاومت کاهش یافته و گسیختگی در کرنش‌هایی کمتر از حالت آزاد رخ می‌دهد. این رفتار به محدودیت‌های آزمایشگاهی، از جمله ابعاد محدود نمونه، عدم محصورسازی کامل در ناحیه‌ی گیره‌ها و تمرکز تنش نسبت داده می‌شود. نمونه‌ای منحنی‌های نیرو- تغییر شکل (تنش- کرنش) حاصل از این آزمایش‌ها در شکل (10) ارائه شده است.

3-3-1- تأثیر افزایش تنش قائم و تغییر نوع مصالح محصورکننده

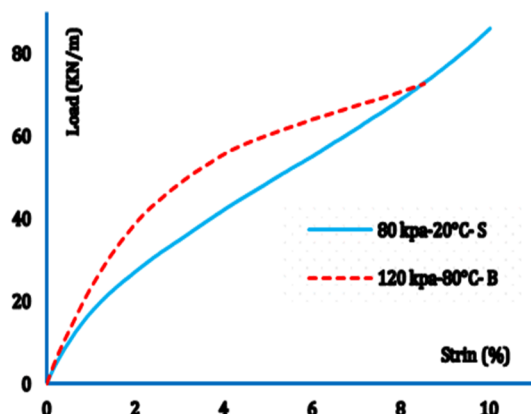
مطابق شکل (11)، در دمای 80 درجه سلسیوس، افزایش همزمان تنش قائم از 80 به 120 کیلوپاسکال و تغییر نوع مصالح محصورکننده از ماسه به مصالح لایه اساس راهسازی، منجر به افزایش 2/28 درصدی مدول کششی در کرنش 3 درصد شد. همچنین، مدول نهایی و مقاومت گسیختگی به ترتیب 7/26 و 5/2 درصد افزایش یافتند.

3-3-2- تأثیر همزمان افزایش دما و تغییر نوع مصالح محصورکننده بر رفتار ژئوگرید

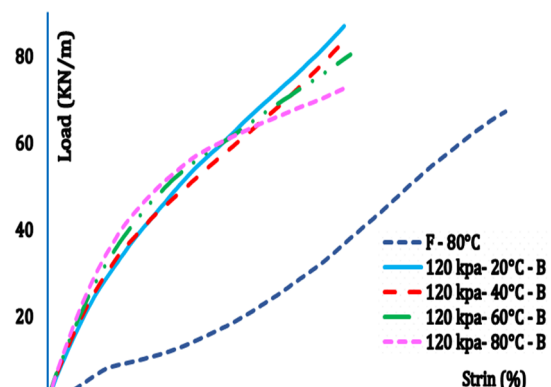
مطابق شکل (12)، افزایش همزمان دما به میزان 60 درجه سلسیوس و تغییر نوع مصالح محصورکننده (جایگزینی مصالح لایه اساس با ماسه) تحت تنش قائم 80 کیلوپاسکال، منجر به افزایش 24 درصدی مدول کششی در کرنش 3 درصد شد؛ این در حالی است که مدول نهایی و مقاومت گسیختگی کاهش یافتند. این روند در تنش قائم 120 کیلوپاسکال نیز مشاهده شد.

3-3-3- تأثیر توأم افزایش دما، تنش محصورسازی و تغییر نوع مصالح بر رفتار ژئوگرید

مطابق شکل (13)، افزایش همزمان دما، تنش قائم و استفاده از مصالح لایه اساس (به جای ماسه) به عنوان مصالح محصورکننده، منجر به افزایش حدود 40 درصدی مدول کششی در کرنش 3 درصد شد؛ این در حالی است که مدول نهایی و مقاومت گسیختگی، کاهش جزئی نشان دادند.



شکل 13- تأثیر افزایش همزمان دما، زبری مصالح و تنش محصورکننده بر مقاومت کششی نمونه‌های ژئوگرید

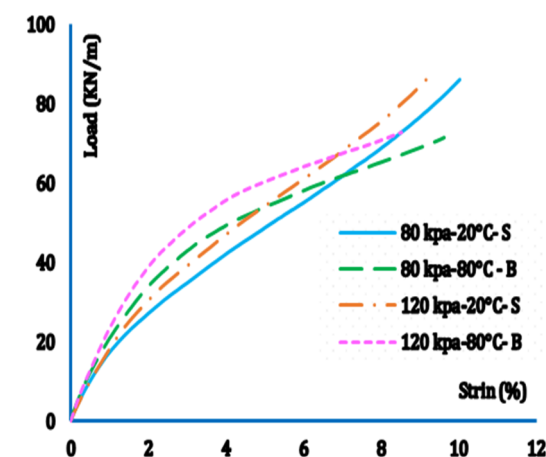


شکل 10- تأثیر افزایش دما و محصورشدگی در مصالح لایه زیراساس (Base) راهسازی بر مقاومت کششی نمونه‌های ژئوگرید

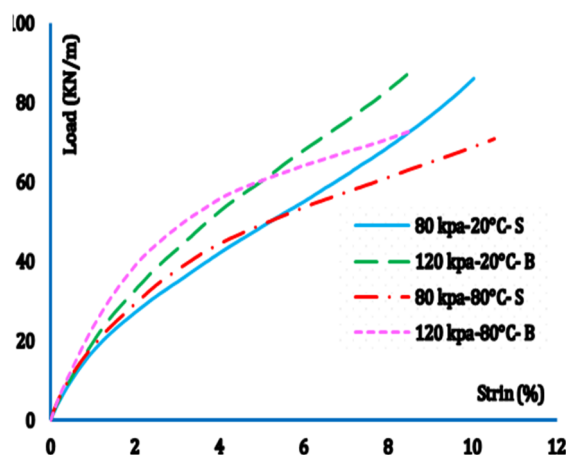
4- بحث

تفاوت رفتار سامانه خاک- ژئوگرید در حالت‌های آزاد و محصور را می‌توان ناشی از اثر هم‌زمان ویژگی‌های ذاتی پلیمر و اندرکنش مکانیکی آن با مصالح پیرامونی دانست. در حالت محصور، مصالح اطراف با محدودکردن تغییرشکل جانبی ریب‌ها و گره‌های ژئوگرید، جابه‌جایی آزادانه آن‌ها را کاهش می‌دهند. در نتیجه، بخشی از نیروی کششی از طریق اصطکاک، درگیری مکانیکی و قفل‌وبست هندسی به مصالح منتقل می‌شود. بنابراین، مدول کششی اندازه‌گیری‌شده در این حالت تنها بیانگر سختی ذاتی ژئوگرید نیست، بلکه تحت تأثیر سختی و اندرکنش مشترک خاک و ژئوگرید قرار دارد. همچنین، ایجاد وضعیت تنش چندمحوری با کاهش تمرکز تغییرشکل در اجزای منفرد، پاسخ ویسکوالاستیک ژئوگرید را تا حدودی تعدیل می‌کند؛ هرچند این اثر نمی‌تواند رفتار ویسکوالاستیک پلیمر را به‌طور کامل حذف نماید. اثر افزایش دما بر رفتار ژئوگرید در حالت‌های آزاد و محصور یکسان نیست. در حالت آزاد، افزایش دما موجب افزایش تحرک زنجیره‌های پلیمری و نرم‌شدگی حرارتی ژئوگرید می‌شود. از این‌رو، کاهش مدول کششی و مقاومت نهایی در این شرایط عمدتاً به تغییر خواص ذاتی پلیمر مربوط است. در مقابل، در حالت محصور، نرم‌شدن نسبی ژئوگرید انعطاف‌پذیری شبکه را افزایش داده و امکان انطباق بهتر آن با شکل و ناهمواری‌های ذرات مصالح را فراهم می‌کند. در این شرایط، ذرات مصالح با سهولت بیشتری در چشمه‌ها و پیرامون ریب‌ها و گره‌های ژئوگرید مستقر می‌شوند و سطح تماس مؤثر میان دو ماده افزایش می‌یابد. پیامد این فرایند، تقویت قفل‌وبست هندسی، اصطکاک میان‌سطحی و مقاومت در برابر لغزش نسبی است.

برهم‌کنش میان کاهش سختی پلیمر و افزایش درگیری مکانیکی، رفتار متفاوت سامانه محصور را در دماهای بالا توضیح می‌دهد. در کرنش‌های پایین، به‌ویژه در کرنش هدف 3 درصد،



شکل 11- تأثیر افزایش همزمان دما و تنش محصورکننده بر مقاومت کششی نمونه‌های ژئوگرید



شکل 12- تأثیر افزایش همزمان دما و زبری مصالح بر مقاومت کششی نمونه‌های ژئوگرید در حالت محصورشده

اندرکنش خاک- ژئوگرید، کالیبراسیون مدل‌های پیش‌بینی و ارزیابی واقعی‌پنانه‌تر تغییر شکل سازه‌های خاک مسلح باشند.

5- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی رفتار مکانیکی و ترمومکانیکی ژئوگرید پلی‌استر در شرایط آزاد و محصور، با بهره‌گیری از یک سامانه پایش رفتار تلفیقی انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده پیچیدگی تعاملات میان مصالح و ژئوگرید در شرایط محیطی متغیر است و جمع‌بندی‌های زیر از آن حاصل می‌شود:

تمایز رفتاری در شرایط آزاد و محصور آزمایش‌ها نشان دادند که اعمال تنش محصورکننده حتی در دمای محیط، منجر به افزایش معنادار مدول کششی نسبت به حالت آزاد شد؛ چراکه محدود شدن تغییر شکل‌های جانبی و درگیری فیزیکی میان ژئوگرید و مصالح، سختی سیستم را به‌شکلی فراتر از رفتار ذاتی پلیمر ارتقا داد. در شرایط آزاد، افزایش دما موجب نرم‌شوندگی حرارتی و افت شدید مدول گردید، اما در شرایط محصور، دما به‌عنوان یک متغیر کنترلی عمل کرد و با تسهیل «انطباق هندسی» و «درگیری مکانیکی»، اثرات مخرب حرارتی بر مدول کششی را در کرنش‌های پایین جبران نمود.

تأثیر متغیرهای محیطی افزایش تنش قائم و به‌کارگیری مصالح با زبری و سختی بالاتر، نقش عامل تشدیدکننده را در تقویت اثر محصورسازی ایفا کرد و به افزایش قابل‌توجه مدول کششی سیستم منجر شد؛ اثری که در دماهای بالاتر به وضوح تشدید گردید.

محدودیت سامانه ابداعی با توجه به کوتاه بودن طول نمونه درمقایسه با ابعاد واقعی ژئوگرید در کاربردهای میدانی، افزایش بارگذاری و به تبع آن رشد کرنش، منجر به تشدید تمرکز تنش در مجاورت گیره‌ها می‌شود. این پدیده، توزیع یکنواخت تنش در طول شبکه را مختل کرده و موجب کاهش اثرات محصورشدگی در مقیاس‌های بزرگ‌تر می‌گردد. به‌گونه‌ای که مقاومت نهایی در کرنش‌های بالا به‌مقدار متناظر در حالت آزاد (بدون محصورشدگی) همگرا می‌شود.

اهمیت کاربردی در طراحی نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان داد که سازوکار تعیین‌کننده سختی در ژئوگرید محصور، اندرکنش مکانیکی و هندسی مجموعه ژئوگرید و خاک است و رویکردهای متداول طراحی که صرفاً بر مبنای خواص کششی در حالت آزاد (دمای استاندارد) استوارند، منجر به پیش‌بینی غیرواقعی و محافظه‌کارانه از تغییر شکل سازه می‌گردند. این برآورد بیش از حد، عامل مستقیم غیر اقتصادی بودن طرح‌هاست.

لزوم تحلیل بازگشتی و رویکرد نوین طراحی با توجه به انطباق بالای داده‌های محصور با شرایط واقعی، آگاهی دقیق از

بهبود تماس و قفل‌وبست میان ژئوگرید و مصالح می‌تواند بخشی از اثر تضعیف‌کننده نرم‌شدگی پلیمر را جبران کند و موجب افزایش مدول کششی مؤثر سامانه شود. بنابراین، این افزایش مدول را نباید به افزایش مقاومت ذاتی پلیمر نسبت داد؛ بلکه باید آن را نتیجه پاسخ مرکب سامانه خاک- ژئوگرید و فعال‌شدن سازوکارهای مقاومتی ناشی از محصورشدگی دانست. به بیان دیگر، دما در حالت آزاد عمدتاً عامل کاهش‌دهنده سختی است، اما در حالت محصور می‌تواند از طریق بهبود انطباق هندسی و تقویت درگیری مکانیکی، آثار جبرانی ایجاد کند.

در کرنش‌های بالاتر، روند مذکور تداوم نمی‌یابد و رفتار سامانه به‌سمت غیرخطی شدن و کاهش مدول مؤثر تغییر می‌کند. افزایش بارگذاری، تغییر شکل ریب‌ها و گره‌های ژئوگرید را افزایش داده و احتمال تمرکز تنش را در نواحی نزدیک به گیره‌ها بیشتر می‌کند. از آنجاکه طول نمونه آزمایشگاهی محدود است، توزیع تنش در تمام طول ژئوگرید الزاماً یکنواخت باقی نمی‌ماند و بخشی از ظرفیت درگیری مکانیکی در نواحی موضعی مصرف می‌شود. در نتیجه، اثر محصورشدگی نمی‌تواند به‌طور کامل در سراسر نمونه توسعه یابد. بنابراین، کاهش مدول در کرنش‌های بالا را می‌توان حاصل ترکیب رفتار غیرخطی پلیمر، محدودیت طول مؤثر نمونه، تمرکز تنش و کاهش یکنواختی انتقال نیرو دانست.

در مقایسه با آزمون‌های پیشین، سامانه حاضر امکان بررسی هم‌زمان اثر دما و تنش محصورکننده را فراهم می‌کند؛ درحالی‌که در بسیاری از مطالعات گذشته، این عوامل به‌صورت جداگانه یا تنها در شرایط آزاد بررسی شده‌اند. از این‌رو، اثر رقابتی میان نرم‌شدگی پلیمر و تقویت اندرکنش خاک- ژئوگرید به‌طور مستقیم مشخص نشده بود. افزون‌براین، در برخی روش‌های آزمایشگاهی، ناپایداری دما، طولانی‌شدن زمان رسیدن نمونه به دمای هدف و تغییر شکل‌های وابسته به زمان، از جمله خزش، می‌توانست بر نتایج اثر بگذارد. در سامانه حاضر، گردش پیوسته روغن حرارتی در محفظه دوجداره، پایش دما در نقاط مختلف با حسگرهای کالیبره‌شده، کنترل برنامه‌پذیر دما و آغاز آزمون پس از تثبیت شرایط حرارتی، امکان ارزیابی دقیق‌تر پاسخ کششی ژئوگرید را در شرایط نزدیک‌تر به وضعیت واقعی میدانی فراهم می‌سازد.

از دیدگاه طراحی، استفاده مستقیم از مشخصات کششی ژئوگرید در حالت آزاد، به‌ویژه در دماهای بالا، لزوماً بیانگر عملکرد واقعی آن در سازه خاک‌مسلح نیست. این رویکرد کاهش سختی پلیمر را در نظر می‌گیرد، اما سهم محصورشدگی، افزایش سطح تماس و تقویت قفل‌وبست مکانیکی را نادیده می‌گیرد. در نتیجه، ممکن است تغییر شکل سازه بیش از مقدار واقعی برآورد شده و برای کنترل آن، مقدار بیشتری مسلح‌کننده در نظر گرفته شود. از این‌رو، منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از آزمون‌های محصور با دمای کنترل‌شده می‌توانند مبنای مناسب‌تری برای تحلیل

- Kongkitkul W, Tabsombut W, Jaturapitakkul C, Tatsuoka F, "Effects of temperature on the rupture strength and elastic stiffness of geogrids", *Geosynthetics International*, 2012, 19 (2), 106-123. <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.106>
- Liu H, Yan J, Wang Z, Zhang F, "Influence of strain rate and temperature on the tensile behavior of HDPE geogrids", *Construction and Building Materials*, 2024, 411, 134582. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134582>
- Mitchell JK, McMillan JC, Green SL, Sisson RC, "Field testing of cable backfills systems", In: *Underground Cable Thermal Backfill*, Oxford: Pergamon, 1982, 19-33. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-025387-9.50007-5>
- Nafei MM, Bartz JR, Alfaro M, Ghazy A, "Tensile strength freeze-thaw durability of a biaxial geogrid and wicking geogrid composite", *Geosynthetics International*, 2026, 33 (4), 380-392. <https://doi.org/10.1680/jgein.25.00152>
- Pepper DW, Chen Y, "Heat transfer analysis of nuclear waste casks stored in the Yucca Mountain repository", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2005, 47 (7), 671-690. <https://doi.org/10.1080/10407780590945177>
- Wang Z, Chen Y, Xie Y, Xue J, "Investigation of geogrid-reinforced unbound granular material behavior using constant radial stiffness triaxial tests", *Geotextiles and Geomembranes*, 2025, 53 (3), 728-743. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2025.01.007>
- Yarivand A, Behnia C, Bakhtiyari S, Ghalandarzadeh A, "Performance of geosynthetic reinforced soil bridge abutments with modular block facing under fire scenarios", *Computers and Geotechnics*, 2017, 85, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.12.021>
- Zornberg JG, Byler BR, Knudsen JW, "Creep of geotextiles using time-temperature superposition methods", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130 (11), 1158-1168. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:11\(1158\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:11(1158))

رفتار سیستم در حالت محصور، برای انجام تحلیل‌های بازگشتی و کالیبراسیون مدل‌های پیش‌بین ضروری است. لذا پیشنهاد می‌شود به‌منظور بهینه‌سازی طرح‌ها و کاهش اتلاف منابع، مبنای طراحی از خواص آزمایشگاهی ایده‌آل به‌سمت رفتار میدانی واقعی سوق یابد.

6- مراجع

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "LRFD bridge design specifications", 4th ed., Washington, DC: AASHTO, 2011. <https://searchworks.stanford.edu/view/12366149>
- ASTM International, "ASTM D6637/D6637M-15: Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method", West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015. <https://www.astm.org/d6637-11.html>
- Behnia K, "Application of reinforced soil in the construction of ground shelters and protection of fuel tanks", *Technical Faculty Journal*, 1970, 42 (In Persian).
- Behnia K, "Reinforced soil", *Technical Faculty Publication*, 1975, 31 (In Persian).
- órszczyk J, Malicki K, "Application of the digital image correlation technique in wide width tensile testing of geogrids", *Geotextiles and Geomembranes*, 2024, 52 (6), 1087-1098. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.07.012>
- Helwany S, Wu J, Meinholz P, "Seismic design of geosynthetic-reinforced soil bridge abutments with modular block facing", NCHRP Project 12-59 (01), Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2012. <https://doi.org/10.17226/17649>
- Hsieh C, Tseng YC, "Tensile creep behavior of a PVC-coated polyester geogrid at different temperatures", *Journal of Geoengineering*, 2008, 3 (3), 113-119. <http://yo.1.ct.ntust.edu.tw/jge/files/articlefiles/v3i3200904281767809864.pdf>
- Karademir T, "Elevated temperature effects on interface shear behavior", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2011. <https://repository.gatech.edu/bitstreams/f2c2e384-6526-4ac2-a37b-5a335db75c17/download>
- Karademir T, Frost JD, "Apparatus for geosynthetic interface testing and evaluation under elevated temperature conditions", *Journal of Testing and Evaluation*, 2013, 41 (2), 313-323. <https://doi.org/10.1520/JTE20120153>
- Kasozi AM, Siddharthan RV, Mahamud R, "Temperature distribution in mechanically stabilized earth wall soil backfills for design under elevated temperature conditions", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2015, 7 (2), 021004. <https://doi.org/10.1115/1.4029354>
- Koerner RM, "Designing with geosynthetics", 5th ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. <https://openlibrary.org/books/OL7336510M>