

## تاثیر بارگذاری سیکلی بر نیروی بیرون کشیدگی مهاری ژئوگرید برگشتی

### شیب‌دار

نورالدین زارعی<sup>۱\*</sup>، آرش نیری<sup>۲</sup>، سید حمید لاجوردی<sup>۳</sup>، حمید رضا صبا<sup>۴</sup>، لوران برینسون<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، N.Zarei92@iau-arak.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، Arash.nayeri@gmail.com

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، Sh-lajevardi@iau-arak.ac.ir

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، Hr.saba@aut.ac.ir

۵- استادیار، موسسه ملی علوم کاربردی لیون، فرانسه، Laurent.briancon@insa-lyon.fr

### چکیده

در بسیاری از سازه‌های خاکی مانند خاکریزها، لایه‌های خاک زیر سازه‌ها، لایه‌های خاک اطراف لوله‌های مدفون، لایه‌های زیرسازی راه و راه‌آهن، دیوارهای حایل از ژئوگریدها به منظور افزایش مقاومت کششی خاک به عنوان مسلح کننده استفاده می‌گردد. بیشتر مواقع فضای لازم برای تامین طول مورد نیاز مسلح کننده در دسترس نمی‌باشد. برای رفع این مشکل به جای استفاده از ژئوگرید به شکل افقی و مستقیم از شکل‌های دیگر هندسی مانند U, V و L و ... به منظور افزایش طول ژئوگرید و جبران نیروی بیرون کشش لازم استفاده می‌شود. طراحی این نوع مهاری‌ها نیاز به مطالعه وسیع‌تری دارد. به منظور بررسی اثر شکل قرارگیری مهاری در خاک ابتدا چندین شکل هندسی قرارگیری مختلف تحت بارگذاری استاتیکی بوسیله دستگاه آزمایش بیرون کشش مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفته است. مهاری شیب‌دار برگشتی که نسبت به سایر مهاری‌ها، نیروی بیرون کشش حداکثر بیشتری از خود نشان داد برای بررسی اثر بارگذاری سیکلی انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مقایسه اثر بارگذاری استاتیکی و سیکلی، نیروی بیرون کشش حداکثر به عنوان معیار استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در نبود سربار اضافی نیروی بیرون کشش حداکثر در بارگذاری سیکلی نسبت به بارگذاری استاتیکی بیشتر است. در مهاری شیب‌دار برگشتی تحت بارگذاری سیکلی، با افزایش دامنه بار سیکلی نیروی بیرون کشش حداکثر و نهایی بعد از مرحله سیکلی نسبت به بارگذاری استاتیکی افزایش می‌یابد. افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری سبب می‌شود نیروی بیرون کشش حداکثر کاهش یابد و به نیروی بیرون کشش حداکثر در حالت استاتیکی نزدیک شود.

**کلمات کلیدی:** آزمایش بیرون کشش، ژئوگرید، مهاری برگشتی شیب‌دار، بارگذاری سیکلی.

## ۱- مقدمه

یکی از اصلی ترین معیارها برای بررسی پایداری داخلی سازه های خاکی، مقدار مقاومت مسلح کننده خاک در مقابل بیرون کشیده شدن از داخل خاک که به نیروی بیرون کشش مرسوم است می باشد. مقاومت بیرون کشش ژئوگریدها از دو قسمت مقاومت اصطکاکی بین ذرات خاک و نوارهای طولی ژئوگرید و دیگری مقاومت گوه خاک جلوی نوارهای عرضی ژئوگرید تشکیل می گردد. از طرفی در ژئوگریدها در محل چشمه های بزرگ، آرایش ذرات خاک و قفل بست بین دانه های خاک نقش پر رنگی در تامین مقاومت در مقابل بیرون کشش را دارند. محققین نشان داده اند تحت تنش های مختلف سربار و به منظور بررسی اندرکنش خاک - ژئوسنتتیک آزمایش بیرون کشش بهترین ابزار برای اینکار می باشد. (چانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱]، پالمیرا<sup>۲</sup> و میلیگان<sup>۳</sup> [۲]، اوچیای<sup>۴</sup> و همکاران [۳]، آلفارو<sup>۵</sup> و همکاران [۴]، راجو<sup>۶</sup> [۵]، لویز<sup>۷</sup> و لادیرا<sup>۸</sup> [۶]، سوگیمتو<sup>۹</sup> و همکاران [۷]، مورچی<sup>۱۰</sup> و همکاران [۸، ۹]، پالمیرا [۱۰]، عبدالوهاب<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۱]، بریانسون<sup>۱۲</sup> [۱۲]، بریانسون و همکاران [۱۳]، شاری<sup>۱۳</sup> [۱۴]، عبدی و زندیه [۱۵]، هاریپرسد<sup>۱۴</sup> و اوماشانکار<sup>۱۵</sup> [۱۶]).

بسیاری از این سازه های مسلح شده می توانند رفتارهای مختلف را با توجه به نوع مسلح کننده، نوع خاک و نوع سیستم مهاری نشان دهند. جهت بررسی رفتار سیستم های مهاری ژئوسنتتیک و تعیین ظرفیت آنها، تحقیقات مختلفی تحت بارگذاری استاتیکی انجام شده است. تجزیه و تحلیل نتایج عددی و آزمایشگاهی در مورد ظرفیت مهاری ژئوتکستایل در شیروانی های مختلف نشان می دهد که نوع خاک در مکانسیم گسیختگی نقش اساسی داشته و بایستی در زمان طراحی مهاری، علاوه بر هندسه آن به مشخصات خاک نیز توجه داشت [۱۷].

چگالی دانه ها، اندازه ذرات و زاویه اصطکاک آنها با ژئوسنتتیک در مقدار نیروی بیرون کشش موثر می باشند [۱۸-۲۱]. تنش های طبیعی اولیه که بر روی سطوح داخلی وجود دارند در مقایسه با تنش های اولیه در زمان گسیختگی می توانند متفاوت باشند. در هنگام طراحی مهاری، صرفاً در نظر گرفتن هندسه مسئله و خصوصیات مهاری کافی نیست: خصوصیات مکانیکی خاک نیز باید در نظر گرفته شود [۲۳].

طراحی مهاری ژئوسنتتیک بر اساس آزمایش آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نشان داده که اصطکاک در سطح مشترک خاک و ژئوسنتتیک زمانی بسیج می شود که گسیختگی در خاک اتفاق بیافتد [۲۴].

لایه های تسلیح در انواع مختلف سازه های خاک مسلح گاهی تحت کشش سیکلی و تکراری ناشی از سربارهایی با ماهیت سیکلی و تکراری نظیر عبور ترافیک و قطار، ارتعاش ماشین آلات صنعتی، ضربه ناشی از پهلوگیری شناورها، اثر موج و یا لرزشهای ناشی از زلزله قرار می گیرند. در غیاب مطالعات جامع آزمایشگاهی، برخی از محققان اعمال ضریب ۰/۸ را جهت کاهش مقاومت بیرون کشش در قبال بارهای دینامیکی پیشنهاد نموده اند [۲۵].

1 Chang  
2 Palmeira  
3 Milligan  
4 Ochiai  
5 Alfaro  
6 Raju  
7 Lopes  
8 Ladeira  
9 Sugimoto  
10 Moraci  
11 Abdelouhab  
12 Briançon  
13 Chareyre  
14 Hariprasad  
15 Umashankar

در قالب انجام تعداد محدودی آزمایش بیرون کشش سیکلی، مشاهده شده که با افزایش دامنه بارگذاری، تغییر مکان‌های نسبی در نزدیک محل اعمال بار کششی افزایش یافته و توزیع یکسانی در طول مدفون نمونه ندارد. علاوه بر این وقوع گسیختگی بیرون کشش با تجمع کرنشهای جزئی در نمونه همراه بوده است [۲۶].  
در مهاری نوار فولادی ممکن است یک گسیختگی ناگهانی بدون اطلاع قبلی رخ دهد. اما گسیختگی در مهاری‌های ژئوگرید ناگهانی نیست [27].

در مطالعات دیگری بر روی ژئوگریدهای پر مقاومت اکستروود شده از نوع یک‌سویه، اثر فشار سربار قائم، ساختار ژئوگرید و همچنین مقدار دامنه بار در قالب تعداد محدودی آزمایش بیرون کشش سیکلی بررسی شده است [۲۸]. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش مقدار دامنه بارهای سیکلی پیوسته در یک آزمایش، مقاومت بسیج شده و ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس پس از اتمام سیکل‌ها کاهش یافته است. مطالعه اثر فرکانس بار بر رفتار مقاومتی ژئوگرید، حاکی از عدم تأثیر این مشخصه بر پاسخ بیرون کشش سیکلی بوده است [۲۶، ۲۸].

در شرایط شن و ماسه شل، جابجایی‌های انباشته چرخه ای در مقایسه با شرایط شن متراکم بسیار کوچکتر در نظر گرفته می شوند. این ممکن است مربوط به سطح بار کمتر تحریک شده در شرایط سست باشد. روند توزیع فشار و تنش کششی در طول نمونه ژئوگرید در بارگذاری استاتیکی و سیکلی مشابه است و به طور غیر خطی در طول جاسازی شده ژئوگرید کاهش می یابد [۲۹].

پس از بررسی و مطالعه در ادبیات فنی مشاهده می‌گردد بررسی عوامل مختلف تحت بارگذاری سیکلی و استاتیکی بر روی رفتار بیرون کشش مهاری ژئوگرید در حالت شیب دار برگشتی، کم بوده و با توجه به اهمیت موضوع مورد اشاره، دستگاه آزمایش بیرون کشش ژئوگرید با قابلیت اعمال بارهای بیرون کشش در دو حالت استاتیکی و سیکلی طراحی و ساخته شده است. در این مقاله پس از معرفی اجزاء و عملکرد دستگاه بیرون کشش، بخشی از نتایج آزمایش‌های استاتیکی و سیکلی بر روی ژئوگرید پلی‌استر با چشمه‌های مربعی، مدفون در خاک ماسه‌ای، ارائه و اثر شکل قرارگیری هندسی بر رفتار مقاومتی مهاری ژئوگرید شیب دار برگشتی بررسی شده است.

## ۲- ابزار و روش تحقیق

### ۲-۱- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش بیرون کشش بر اساس استاندارد های ASTM D6706-01 [۲۵]، ASTM D6706-01 [۳۰] و EN 00189016 [۳۱] طراحی و ساخته شده است (شکل ۱). عرض محفظه ۱/۲۰ متر، عرض آن ۰/۶۰ متر، ارتفاع آن ۰/۹۰ متر و از ورق فولادی ضخیم به ضخامت ۰/۱۵ متر ساخته شده است. به منظور کاهش اصطکاک بین ذرات خاک و سطوح داخلی محفظه، سطوح داخلی با پوششی از رنگ اپوکسی رنگ آمیزی شده است. در وجه جلویی محفظه شکافی به عرض نیم متر برای عبور مسلح کننده و اتصال آن به جک اعمال نیرو ایجاد شده است. برای کاهش اثر صلبیت و اثر اصطکاک در داخل وجه جلویی دو عدد صفحه ضخیم فولادی به ابعاد ۰/۱۰×۰/۲۰×۰/۶۰ متر در بالا و پایین شکاف در قسمت داخلی محفظه تعبیه گردیده است (شکل ۲).



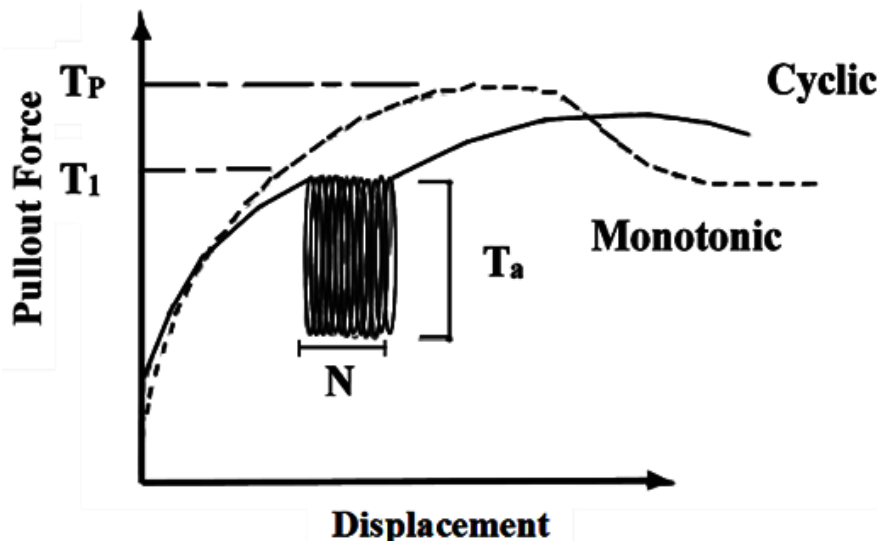
شکل ۱: دستگاه بیرون کشش



شکل ۲: محفظه و شکاف وجه جلویی محل عبور مسلح کننده

مسلح کننده از داخل شکاف به بیرون هدایت و از طریق یک گیره فولادی به عرض ۰/۶۰ متر به جک هیدرولیکی اعمال نیرو با ظرفیت ۵۰ kN متصل می‌گردد. این جک بارگذاری قادر است انواع بارهای استاتیکی و سیکیلی تحت شرایط کنترل تنش و کنترل کرنش را در هنگام آزمایش به نمونه اعمال کند.

شکل عمومی بارگذاری سیکیلی در این آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. نیروی  $T_p$  همان نیروی بیرون کشش حداکثر در حالت بارگذاری استاتیکی می‌باشد.  $T_1$  درصدی از نیروی  $T_p$  است که با رسیدن نیروی بیرون کشش جک به مقدار  $T_1$  حالت سیکیلی آغاز می‌گردد. بار سیکیلی به صورت سینوسی با دامنه  $T_a$  اعمال شده که مقدار آن بسته به سطح نیرو در شروع بارگذاری سیکیلی به صورت درصدی از نیروی بیرون کشش حداکثر حالت استاتیکی می‌باشد.

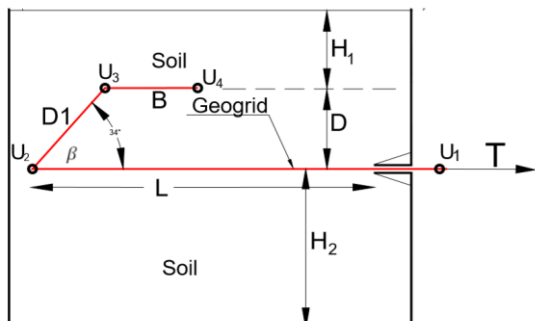


شکل ۳: نمونه بارگذاری سیکیلی در آزمایش بیرون کشش

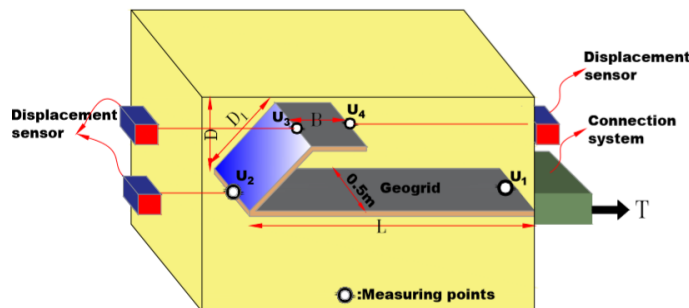
## ۲-۲- شکل قرار گیری مسلح کننده

به منظور بررسی تاثیر شکل قرار گیری مهاري در مقدار نیروی بیرون کشش، مهاري شیب‌دار برگشتی<sup>۱۶</sup> مطابق شکل ۴ داخل محفظه دستگاه آزمایش تحت بارگذاری استاتیکی و سیکیلی قرار گرفت.

<sup>16</sup> Steep back anchorage



(ب)



(الف)

شکل ۴: (الف) شکل سه بعدی دستگاه بیرون کشش و نحوه قرارگیری مسلح کننده (ب) هندسه مهاری شیب دار برگشتی

پارامترهای شکل ۴ عبارتند از:

$H_1$ : ارتفاع خاک روی لایه افقی بالایی ژئوگرید

$H_2$ : ارتفاع خاک زیر لایه افقی پایینی ژئوگرید

$L$ : طول افقی پایینی ژئوگرید

$D$ : فاصله قائم لایه پایین و بالای ژئوگرید

$D_1$ : طول قسمت شیب دار لایه ژئوگرید

$B$ : طول افقی لایه بالایی ژئوگرید

$U_1, U_2, U_3$  و  $U_4$ : نقاط نصب جابجایی سنجها

## ۲-۳- اندازه گیری نیرو و جابه جایی

تغییر مکانها در چهار نقطه توسط جابه جایی سنجهایی<sup>۱۷</sup> که در نقاط  $U_1, U_2, U_3$  و  $U_4$  که در شکل ۴ مشخص شده اند ثبت می گردند. جابه جایی سنجها از نوع استوانه ای با دامنه ۱۰۰ میلی متر استفاده شده است. آنها در خارج از محفظه قرار دارند و بوسیله سیم فولادی غیر قابل انعطاف از داخل یک لوله فولادی باریک به منظور حذف اصطکاک بین ذرات خاک و سیم به نقاط مورد نظر مسلح کننده متصل گردیده اند.

از یک نیروسنج استوانه ای با دقت ۰/۱۰ kN و ظرفیت اندازه گیری ۵۰ kN استفاده شده است. اطلاعات خروجی از جابه جایی سنجها و نیرو سنج از طریق یک سیستم پردازش اطلاعات<sup>۱۸</sup> به نرم افزار رایانه ای منتقل و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

## ۲-۴- مصالح

### ۲-۴-۱- خاک

از خاک ماسه ای که مشخصات آن توسط آزمایش برش مستقیم کوچک تعیین و در جدول ۱ ارایه شده، استفاده شده است.

<sup>17</sup> LvdT

<sup>18</sup> Data logger

جدول ۱: مشخصات خاک

Characteristics	Value	ASTM standard
D <sub>10</sub>	0.18 (mm)	ASTM D422
D <sub>30</sub>	0.195 (mm)	ASTM D422
D <sub>60</sub>	0.23 (mm)	ASTM D422
Uniformity coefficient (C <sub>u</sub> )	1.28	ASTM D422
Coefficient of curvature (C <sub>c</sub> )	0.92	ASTM D422
Maximum dry density (MDD)	15.2 (kN/m <sup>3</sup> )	ASTM D698
Optimum moisture content (OMC)	15%	ASTM D698
Angle of friction (φ)	34 °	ASTM D3080
Cohesion (c)	6.4 (kN/m <sup>2</sup> )	ASTM D3080
Dilatancy angle (ψ)	4 °	-----
Specific gravity (G <sub>s</sub> )	2.66	ASTM D854

#### ۲-۴-۲- مسلح کننده

برای انجام آزمایش‌ها از ژئوگرید پلیمری شرکت ژئوپارسیان استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲: مشخصات ژئوگرید

Properties	Symbol/Value
Ultimate longitudinal tensile strength (T <sub>ult</sub> )	110 (kN/m)
Ultimate lateral tensile strength (T <sub>ult</sub> )	20 (kN/m)
Longitudinal strain at T <sub>ult</sub>	11%
Lateral strain at T <sub>ult</sub>	11%
Tensile strength at 2% strain (kN/m)	24 (kN/m)
Thickness (mm)	1.9
Aperture size, longitudinal	30 (mm)
Aperture size, transverse	25 (mm)
Ratio of geogrid solid area/total area	64%

#### ۲-۵- آماده سازی نمونه

برای اجرای مهاربندی شیب‌دار، ابتدا جعبه آزمایش تا ارتفاع H<sub>2</sub> (H<sub>2</sub> = ۰/۴۵ m) با خاک در سه لایه ۰/۱۵ متری پر و هر لایه با استفاده از چکش همانند مهاربندی ساده به صورت یکنواخت متراکم شده است. سپس لایه ژئوگرید از داخل شکاف وجه جلوی جعبه به داخل جعبه هدایت و بر روی خاک متراکم شده به اندازه طول افقی پایین ژئوگرید (L) پهن می‌شود (شکل ۵-الف). سپس مطابق شکل ۵ از دو شابلون فلزی که زاویه قسمت شیب‌دار آنها برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک مورد استفاده (۳۴ درجه) است استفاده می‌شود. این شابلون‌ها در انتهای پهن شده لایه افقی پایینی ژئوگرید قرار داده شده و خاک

در لایه های حداکثر ۰/۱۵ متری تا ارتفاع مورد نظر (D) به صورت یکنواخت ریخته و متراکم می شود. خاک به کمک شابلون ها، به صورت شیب دار اجرا می شود. سپس شابلون ها از داخل خاک بیرون کشیده شده و ژئوگرید قسمت های D<sub>1</sub> و B روی خاک پهن می گردد. در ادامه خاکریزی در لایه های حداکثر ۰/۱۵ متری تا ارتفاع H<sub>1</sub> به صورت یکنواخت انجام و خاک متراکم می گردد. مقداری از خاک متراکم شده را برداشته، حجم چاله و وزن خاک درون چاله را اندازه گرفته و به کمک آنها تراکم خاک اندازه گیری می شود. تراکم نسبی بدست آمده بین ۷۸ تا ۸۲ درصد متغیر بوده است. ژئوگرید از طریق فک فلزی به جک و سیستم اعمال نیرو متصل و محکم می گردد. نیرو سنج و جابه جایی سنج بر روی عدد صفر تنظیم می شوند.



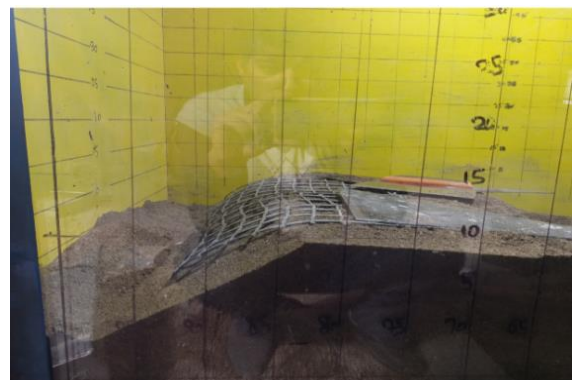
ب: ریختن خاک تا ارتفاع D



الف: اجرای قسمت افقی پایین ژئوگرید



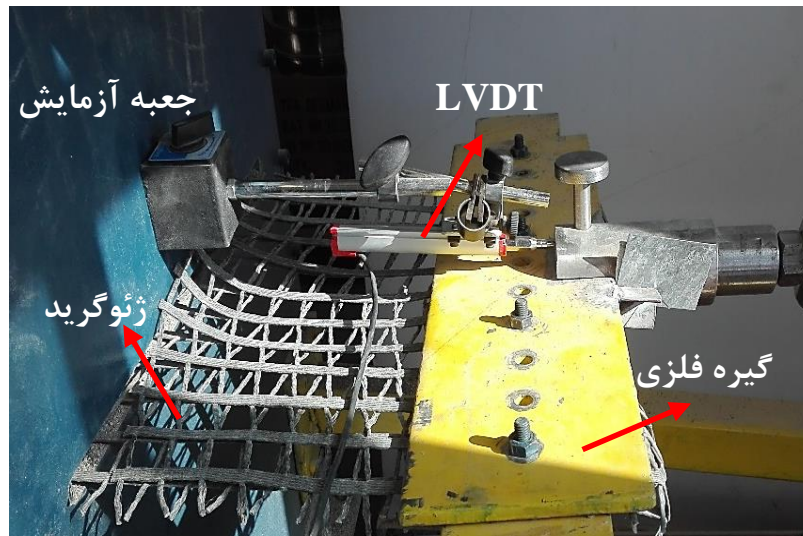
د: پر نمودن قسمت شیب دار با خاک



ج: خارج نمودن شابلون ها و اجرای قسمت شیب دار ژئوگرید

شکل ۵: اجرای مهارت برگشتی شیب دار

در پایان قسمت بیرونی ژئوگرید مطابق شکل ۶ از طریق گیره فلزی به جک اعمال بار وصل می گردد.



شکل ۶: جک، سیستم اتصال و جابجایی سنج (LVDT)

## ۲-۶- بارگذاری آزمایش بیرون کشش

### ۲-۶-۱- آزمایش بیرون کشش استاتیکی

آزمایش بیرون کشش استاتیکی مطابق توصیه بسیاری از محققان مانند آلفارو و همکاران [۴]، لاجوردی و همکاران [۵] تحت شرایط کنترل کرنش و با سرعت ثابت ۱ میلیمتر در دقیقه انجام می‌گردد. آزمایش استاتیکی در صورت وقوع یکی از شرایط زیر به پایان می‌رسد:

- پاره شدن ژئوگرید و عدم انتقال بار
- ۱۰۰ میلیمتر جابه‌جایی ژئوگرید متصل به گیره

### ۲-۶-۲- آزمایش بیرون کشش استاتیکی

آزمایش سیکلی طی سه مرحله زیر اجرا می‌گردد:

- (۱) مرحله اول اعمال نیروی کششی استاتیکی با سرعت ۱ میلیمتر در دقیقه تا رسیدن به مقدار  $T_1$  به روش کنترل نیرو.
- (۲) مرحله دوم اعمال بار سیکلی با فرکانس ۰/۱۰ هرتز، دامنه  $T_a$  و  $N$  سیکل به روش کنترل نیرو.
- (۳) مرحله سوم پس از پایان مرحله دوم، بارگذاری استاتیکی با سرعت ۱ میلیمتر در دقیقه به روش کنترل جابه‌جایی.

## ۲-۷- برنامه آزمایش‌ها

به منظور بررسی اثر دامنه و فرکانس بارگذاری بر مقدار بیرون کشش حالت برگشتی شیب‌دار، ۱۶ آزمایش استاتیکی و سیکلی مطابق جدول ۳ انجام شده است.



جدول ۳: آزمایشات مربوط به مهارى برگشتى شیب‌دار

Anchor shape	Load type	Frequency (Hz)	Amplitude (%)	No. of cycles (N)	T <sub>Tmax</sub> (kN/m)	Difference for T <sub>Tmax</sub> <sup>a</sup> (%)
	Static	—	—	—	7.41	—
Steep back anchorage	Cyclic	0.1	50	10	9.65	30
				50	9.30	25
				250	8.51	15
				500	8.09	9
				750	7.90	6.6
				10	9.30	25
				50	8.90	20
			20	250	8.10	9
				500	7.75	4.5
				750	7.60	2.5
				10	8.80	19
				50	8.15	10
				250	7.97	7.5
				500	7.78	5
750	7.63	3				

<sup>a</sup> Calculated by:  $(T_{cyc} - T_{st} / T_{st})$  in %.

### ۳- نتایج و تحلیل

#### ۳-۱- حداکثر مقاومت بیرون کشش مهارى:

در جدول ۴ حداکثر نیروی بیرون کشش مهارى در دو حالت استاتیکی و سیکی ارایه گردیده است. مطابق نتایج، نیروی بیرون کشش سیکی در اغلب حالات نسبت به حالت استاتیکی بیشتر بوده است. دلیل این افزایش نیرو را می توان ناشی از آرایش مجدد ذرات خاک مجاور ژئوگرید پس از به هم ریختگی آنها در اثر بارگذاری سیکی، دانست که سبب افزایش نیروی حداکثر بیرون کشش نمونه نسبت به حالت استاتیکی شده است.

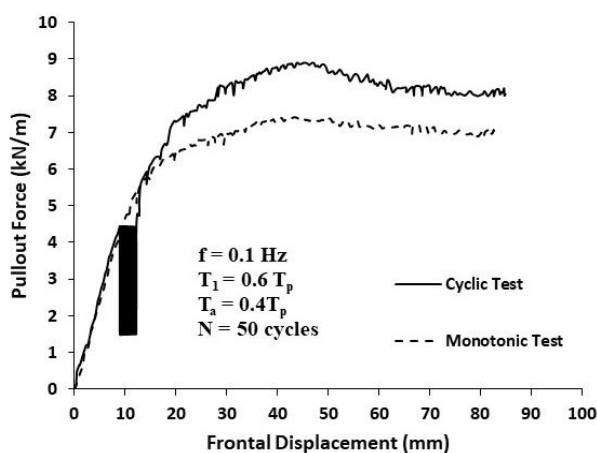
جدول ۴: مقایسه نتایج آزمایشات سیکی و استاتیکی

Anchor shape	Load type	Frequency (Hz)	Amplitude (%)	No. of cycles (N)	T <sub>Tmax</sub> (kN/m)	Difference for T <sub>Tmax</sub> <sup>a</sup> (%)
	Static	—	—	—	7.41	—
Steep back anchorage	Cyclic	0.1	50	10	9.65	30
				50	9.30	25
				250	8.51	15
				500	8.09	9
				750	7.90	6.6
				10	9.30	25
				50	8.90	20
			20	250	8.10	9
				500	7.75	4.5
				750	7.60	2.5
				10	8.80	19
				50	8.15	10
				250	7.97	7.5
				500	7.78	5
750	7.63	3				

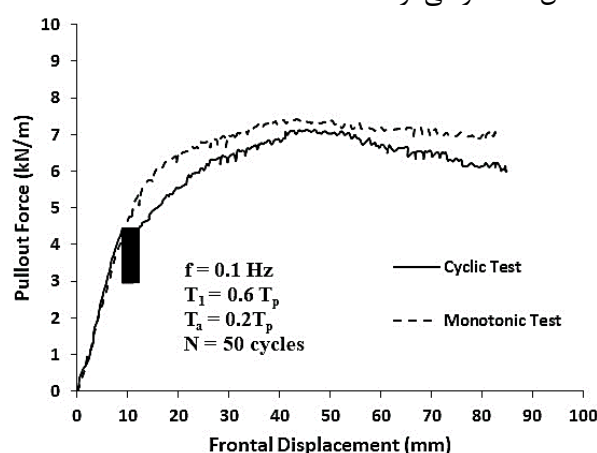
<sup>a</sup> Calculated by:  $(T_{cyc} - T_{st} / T_{st})$  in %.

### ۲-۳- اثر دامنه بار سیکلی

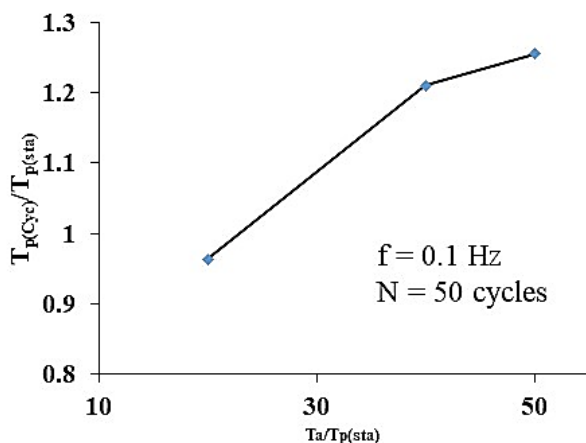
به منظور بررسی اثر دامنه بار سیکلی، چندین بارگذاری سیکلی با دامنه های متفاوت ( $T_a$ ) برابر ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد نیروی حداکثر بیرون کشش حالت استاتیکی انجام شده است. نتایج بدست آمده در شکل ۷ نشان ارائه گردیده است. پس از اعمال بار سیکلی آرایش دانه های ماسه مجاور ژئوگرید به هم خورده و در آرایش مجدد، آرایش درهم تنیده تری ایجاد می کنند که مقاومت برشی خاک را افزایش می دهد. از طرفی آرایش مجدد دانه های خاک سبب درگیری بیشتر بین آنها و الیاف ژئوگرید می گردد که خود باعث افزایش نیروی اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف ژئوگرید می گردد. با افزایش دامنه بار سیکلی این به هم ریختگی و آرایش مجدد ذرات خاک و درگیری ذرات خاک با ژئوگرید افزایش می یابد و سبب افزایش بیشتر نیروی بیرون کشش حداکثر می گردد.



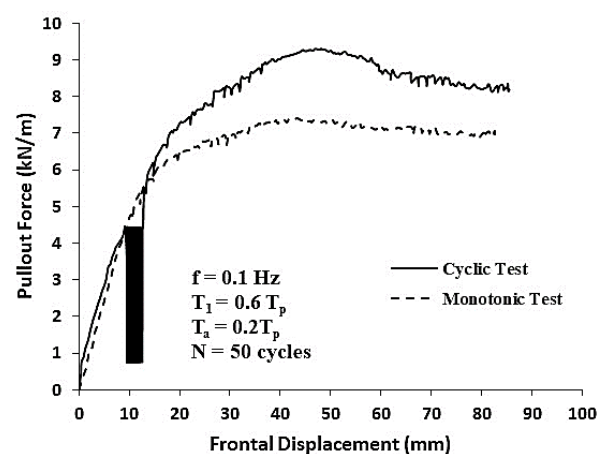
ب



الف



د



ج

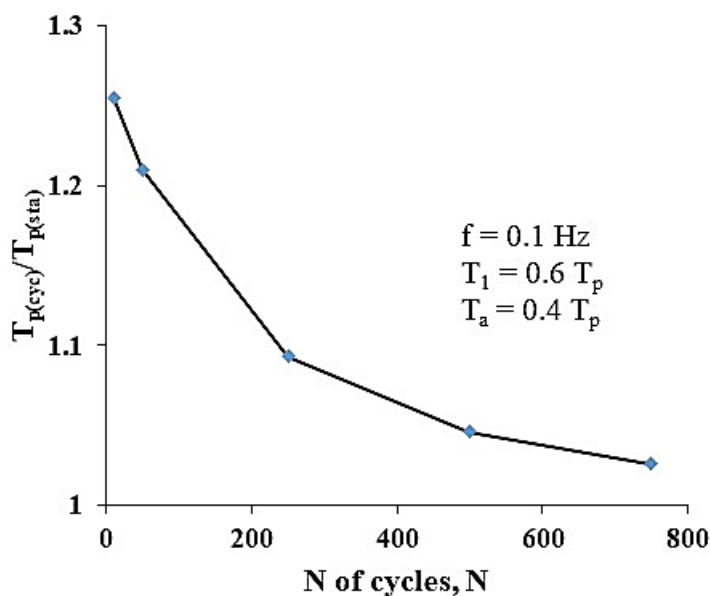
شکل ۷: اثر دامنه بار سیکلی بر مقاومت بیرون کشش ژئوگرید شیب دار برگشتی

شکل (۷-د) روند تغییرات مقاومت حداکثر در بارگذاری بعد از بار سیکلیک را متناسب با افزایش مقدار دامنه بار سیکلی نشان می دهد. تفسیر دقیق این رفتار در مقیاس حرکت دانه ها قدری پیچیده است. ولی در محدوده آزمایش های انجام شده با افزایش مقدار دامنه بار سیکلیک ( $T_a$ ) مقاومت حداکثر و ماندگار نسبت به حالت استاتیکی افزایش می یابد، اما توصیه می گردد در جهت اطمینان از این افزایش مقاومت صرف نظر کرده و در طراحی ها همان مقاومت حداکثر و ماندگار حالت استاتیکی در نظر گرفته شود.

### ۳-۳- اثر تعداد سیکل بارگذاری

ژئوگریدهای انعطاف پذیر در محدوده نیروهای کششی که برای آن طراحی شده اند در اثر بارگذاری سیکلی دچار گسیختگی نمی شوند. برای بررسی اثر تعداد سیکل های بارگذاری در مقدار نیروی بیرون کشش حداکثر، آزمایش های سیکلی با دامنه ۴۰ درصد نیروی بیرون کشش استاتیکی ( $T_a = 40\% T_p$ ) و تعداد سیکل های ۱۰، ۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ بر روی خاک دانه ای اجرا شد. اعمال بار سیکلی باعث افزایش نیروی بیرون کشش حداکثر نسبت به حالت استاتیکی می گردد. با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری (N) نیروی بیرون کشش حداکثر سیکلی در دامنه ثابت کاهش می یابد و به نیروی بیرون کشش حداکثر در حالت استاتیکی نزدیک می شود (شکل ۸).

افزایش تعداد تعداد سیکل های بار سیکلی، باعث کاهش حاشیه ایمنی بهره برداری از سازه، در شرایط کنترل جابجایی می گردد. بنابراین لزوم توجه به آن در طراحی سازه های دائم با عمر مفید طولانی، ضروری است. در محدوده نتایج این آزمایش ها با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری سیکلی، از به هم ریختگی اولیه نمونه کاسته شده و آرایش ذرات به حالت پایدار رسیده و این موضوع سبب می گردد نیروی اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف ژئوگرید مقاومت مجددی کسب نکرده بلکه روند نزولی به خود گرفته و در صورت افزایش تعداد سیکل ها نیروی بیرون کشش حداکثر بارگذاری سیکلی به سمت نیروی بیرون کشش بارگذاری استاتیکی کاهش یابد.

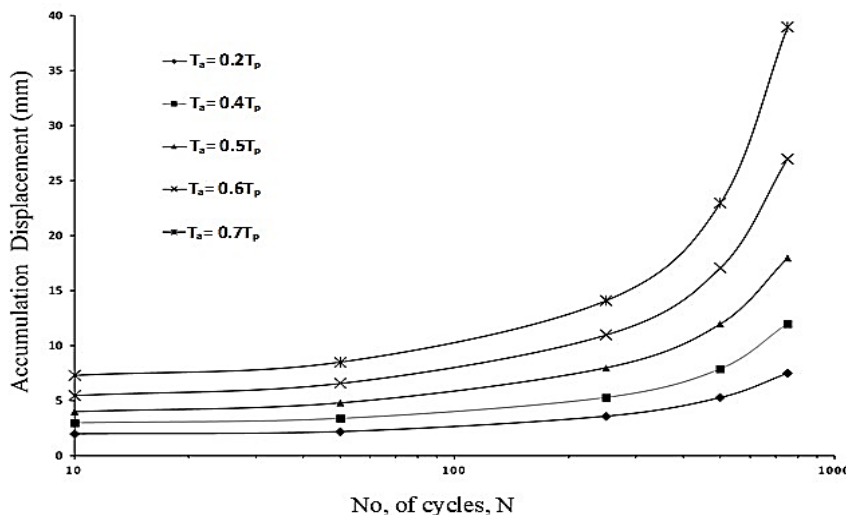


شکل ۸: اثر تعداد تکرار بار سیکلی بر مقاومت بیرون کشش ژئوگرید شیب دار برگشتی

### ۳-۴- رفتار جابجایی ژئوگرید:

در ادامه چگونگی توزیع جابه جایی در طول ژئوگرید و جابه جایی تجمعی سیکلی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ نشان می دهد با افزایش تعداد سیکل ها، جابجایی تجمعی ناشی از بارگذاری سیکلی افزایش یافته است. مقدار جابه جایی اولیه مرحله اول بارگذاری به مقدار نیروی شروع بارگذاری سیکلی یعنی  $T_1$  بستگی دارد. جابه جایی تجمعی ناشی از بارگذاری سیکلی مرحله دوم بارگذاری به دامنه بارگذاری  $T_a$ ، تعداد سیکل N و نیروی بیرون کشش شروع بارگذاری سیکلی  $T_1$  بستگی دارد (شکل ۱۰) با افزایش دامنه بار سیکلی جابه جایی تجمعی، افزایش می یابد. افزایش تعداد سیکل بارگذاری، سبب افزایش جابه جایی تجمعی می گردد و روند افزایش جابه جایی تجمعی نمونه با دامنه بالا نسبت به دامنه پایین تر سریع تر است. افزایش جابه جایی تجمعی در اثر شرایط بار سیکلی در مقیاس واقعی، می تواند عامل ناپایداری تغییرمکانی توده خاک شود. علت این

موضوع را میتوان اینگونه بیان نمود که آرایش دانه‌های خاک بعد از تعداد تقریباً معینی سیکل بارگذاری به یک چیدمان تقریباً پایدار می‌رسند و افزایش تعداد سیکلهای بارگذاری دیگر تاثیر چندانی در آرایش مجدد دانه های خاک نخواهند داشت.

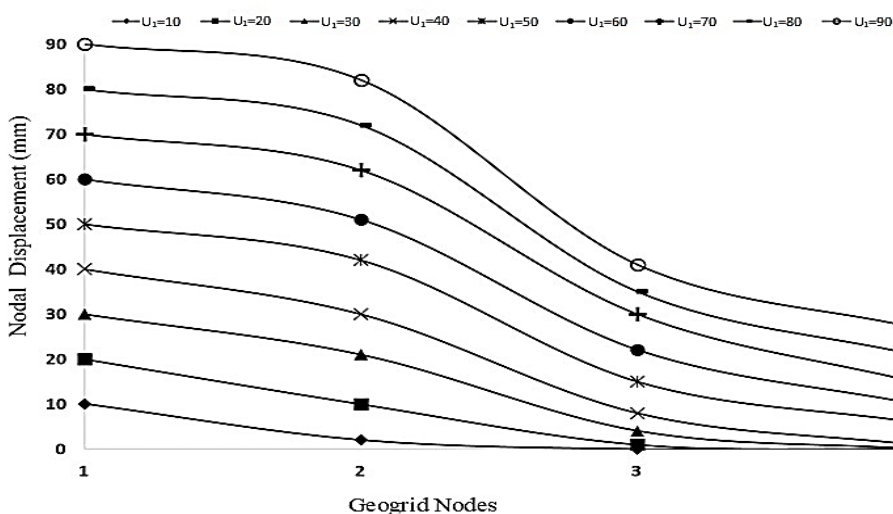


شکل ۹: اثر دامنه و تعداد تکرار بار سیکلی بر جابه‌جایی تجمعی ژئوگرید

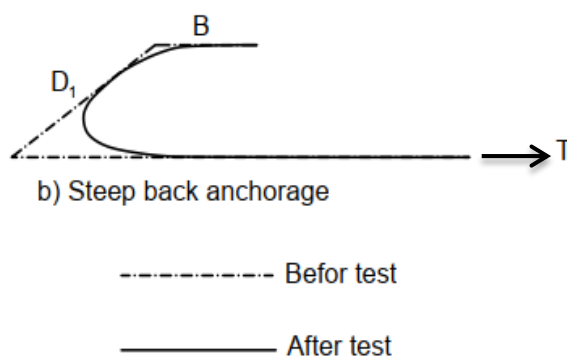
شکل ۱۰ مقدار جابه‌جایی نقاط  $U_1, U_2, U_3$  و  $U_4$  (محل نصب جابه‌جایی سنج‌ها در روی ژئوگرید مطابق شکل ۴) در هنگام اعمال نیروی بیرون کشش را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ منحنی  $U_{10}$  نشان می‌دهد زمانیکه نقطه  $U_1$ ، ۱۰ میلی متر جابه‌جا می‌شود نقاط  $U_1, U_2$  و  $U_4$  چه مقدار جابه‌جا می‌شوند. همینطور منحنی  $U_{20}$  نشان می‌دهد زمانیکه نقطه  $U_1$ ، ۲۰ میلی متر جابه‌جا می‌شود نقاط  $U_1, U_2$  و  $U_4$  چه مقدار جابه‌جا می‌شوند. ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله از نقطه اعمال جابه‌جایی، از مقدار جابه‌جایی‌های نقاط در طول نمونه کاسته می‌شود. بطوریکه نقاط  $U_1, U_2$  و  $U_4$  جابه‌جایی کمتری نسبت  $U_1$  دارند. قابلیت کشش ژئوگرید و شکل‌گیری مکانیزم خرابی پیشرونده در طول نمونه ژئوگرید، نقش بسزایی در کاهش مقدار جابه‌جایی نقاط در طول نمونه با افزایش فاصله از نقطه اعمال بار دارد.

مقایسه جابه‌جایی گیره جلویی مربوط به نقطه  $U_1$  و جابه‌جایی سایر نقاط  $U_2, U_3$  و  $U_4$  این ایده را می‌دهد که مقداری از جابه‌جایی نقاط صرف تغییر مکان ذرات خاک می‌شود.

تغییر مکان ژئوگرید را میتوان به سه مرحله تقسیم کرد. با شروع آزمایش قسمت افقی پایینی ژئوگرید یعنی  $L$  فعال شده و با افزایش نیرو کششی وارده، نیروی اصطکاک بیشتری در اطراف آن بسیج می‌گردد. لایه پایینی ژئوگرید ابتدا عملکرد خود را برای ارائه مقاومت کششی اولیه آغاز می‌نماید. سپس حرکت قسمت شیب دار ژئوگرید همراه با جابه‌جایی قسمتی از توده خاک مقابل ژئوگرید آغاز میگردد که باعث بسیج شدن نیروی اصطکاک این قسمت می‌شود. در مرحله بعدی و با افزایش جابه‌جایی و کشیده شدن ژئوگرید لایه بالایی ژئوگرید در آستانه حرکت قرار گرفته و شروع به حرکت می‌کند. این حرکت سبب فعال شدن نیروی اصطکاک این قسمت نیز می‌گردد. به این ترتیب با فعال شدن حرکت هر قسمت مقاومت کششی افزایش می‌یابد. با بررسی و دنبال نمودن جابه‌جایی نقاط  $U_1, U_2, U_3$  و  $U_4$  هندسه اولیه و نهایی‌های مهری‌های برگشتی قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها ترسیم گردیده است. (شکل ۱۱).



شکل ۱۰: جابجایی گره‌ها در امتداد طول ژئوگرید مدفون شده



شکل ۱۱: نحوه بیرون آمدن ژئوگرید در آزمایش

#### ۴- نتیجه گیری

- در این مطالعه به بررسی رفتار بیرون کشش سیکلی مهارای برگشتی شیب‌دار با استفاده از یک نوع ژئوگرید تک‌سویه مدفون در خاک ماسه یکنواخت با انجام آزمایش بیرون کشش استاتیکی و سیکلی در یک دستگاه آزمایش بیرون کشش بزرگ مقیاس، و مقایسه آن با نتایج استاتیکی پرداخته شد. نتایج این مطالعه در محدوده آزمایش‌های انجام شده نشان داده است که:
- در مهارای برگشتی شیب‌دار نیروی بیرون کشش حداکثر در بارگذاری سیکلی با افزایش مقدار دامنه نیروی سیکلی، نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌یابد.
  - نیروی بیرون کشش حداکثر و نهایی در بارگذاری سیکلی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری کاهش یافته و به نیروی بیرون کشش حداکثر و نهایی حالت استاتیکی نزدیک می‌شود.
  - با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری حاشیه ایمنی بهره‌برداری از سازه در شرایط کنترل جابجایی کاهش می‌یابد.
  - اثر بارگذاری سیکلی بر روی نمونه ژئوگرید مورد استفاده در مقیاس آزمایش‌های انجام شده و سطوح نیروی اعمال شده را در حاشیه ایمنی مناسب تلقی نمود.

- افزایش تعداد سیکل بارگذاری، سبب افزایش جابه‌جایی تجمعی می‌گردد و روند افزایش جابه‌جایی تجمعی نمونه با دامنه بالا نسبت به دامنه پایین‌تر سریع‌تر است.
- افزایش جابه‌جایی تجمعی در اثر شرایط بار سیکلی در مقیاس واقعی، میتواند عامل ناپایداری تغییرمکانی توده خاک شود.

## مراجع

- [<sup>۱</sup>] J.C. Chang, J.B. Hannon, R.A. Forsyth, Pull resistance and interaction of earthwork reinforcement and soil, 1977.
- [<sup>۲</sup>] E. Palmeria, G. Milligan, Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand, *Geotechnique*, 39(3.۵۴۲-۵۱۱) (۱۹۸۹) ( )
- [<sup>۳</sup>] H. Ochiai, S. Hayashi, J. Otani, T. Hirai, Evaluation of pull-out resistance of geogrid reinforced soils, in: *International Symposium on Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japan, 1992, pp. 141-146.
- [<sup>۴</sup>] M.C. Alfaro, N. Miura, D.T. Bergado, Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests, *Geotechnical Testing Journal*, 18(2) (1995) 157-167.
- [<sup>۵</sup>] M. Raju, Monotonic and cyclic pullout resistance of geosynthetics, University of British Columbia, 1995.
- [<sup>۶</sup>] M. Lopes, M. Ladeira, Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction, *Geotextiles and Geomembranes*, 10(14) (1996) 543-554.
- [<sup>۷</sup>] M. Sugimoto, A. Alagiyawanna, K. Kadoguchi, Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 19(5) (2001) 257-277.
- [<sup>۸</sup>] N. Moraci, G. Romano, F. Montanelli, Factors affecting the interface apparent coefficient of friction mobilised in pullout conditions, in: *DGGT, TUM-ZG Third European Geosynthetics Conference*, 2004, pp. 313-318.
- [<sup>۹</sup>] N. Moraci, P. Recalcati, Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4) (2006) 220-242.
- [<sup>۱۰</sup>] E.M. Palmeira, Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5) (2009) 368-390.
- [<sup>۱۱</sup>] A. Abdelouhab, D. Dias, N. Freitag, Physical and analytical modelling of geosynthetic strip pull-out behaviour, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1) (2010) 44-53.
- [<sup>۱۲</sup>] L. Briançon, H. Girard, D. Poulain, N. Mazeau, Design of anchoring at the top of slopes for geomembrane lining systems, in: *2nd european geosynthetics conference*, 2000, pp. 645-650.
- [<sup>۱۳</sup>] L. Briançon, H. Girard, P. Villard, Geosynthetics anchorage: experimental and numerical studies, in: *Proceedings of EuroGeo4—the 4th European Geosynthetics Conference*, 2008.
- [<sup>۱۴</sup>] B. Chareyre, Modelisation du comportement d'ouvrages composites solgeosyntheticque par elements discrets-application aux ancrages en tranches en tete de talus, Thèse de doctorat, Université Grenoble I-Joseph Fourier, 2003.
- [<sup>۱۵</sup>] M. Abdi, A. Zandieh, Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(5) (2014) 494-504.
- [<sup>۱۶</sup>] H. Chennarapu, U. Balunaini, Transverse Pullout Response of Smooth-Metal-Strip Reinforcements Embedded in Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(3) (2017) 06017020.
- [<sup>۱۷</sup>] B. Chareyre, L. Briançon, P. Villard, Theoretical versus experimental modeling of the anchorage capacity of geotextiles in trenches, *Geosynthetics International*, 9(2) (2002) 97-123.
- [<sup>۱۸</sup>] S. Lajevardi, L. Briançon, D. Dias, Geosynthetics anchorage: experimental studies, in: *International Conference of Geo-Environmental Engineering*, 2012.
- [<sup>۱۹</sup>] S. Lajevardi, L. Briançon, D. Dias, Geosynthetics anchorage: experimental studies, in: *5th European Geosynthetics Congress Valencia*, Spain, 2012, pp. 341-349.

- [۲۰]S. Lajevardi, L. Briançon, D. Dias, Experimental studies of the geosynthetic anchorage–Effect of geometric parameters and efficiency of anchorages, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(5) (2014) 505-514.
- [۲۱]S. Lajevardi, D. Dias, L. Briançon, Experimental studies of the behaviour of geosynthetic wrap around anchorage, *Geosynthetics International*, 22(3) (2015) 249-256.
- [۲۲]Y. Xu, D. Williams, M. Serati, Influence of anchorage angles on pull-out resistance of geotextile wrap around anchorage, *Geosynthetics International*, 25(4) (2018) 378-391.
- [۲۳]H. Girard, L. Briançon, E. Rey, Experimental tests for geosynthetic anchorage trenches, in: *Proceedings of the Eighth International Conference on Geosynthetics*, 8th ICG, 2006, pp. 211-216.
- [۲۴]P. Villard, B. Chareyre, Design methods for geosynthetic anchor trenches on the basis of true scale experiments and discrete element modelling, *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6) (2004) 1193-1205.
- [۲۵]B. Christopher, R. Berg, Pullout evaluation of geosynthetics in cohesive soils, *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Den Hoedt (ed.), Balkema Publishers, (1990) 731-736.
- [۲۶]D. Raju, R. Fannin, Load-strain-displacement response of geosynthetics in monotonic and cyclic pullout, *Canadian Geotechnical Journal*. ۱۹۳-۱۸۳ (۱۹۹۸) (۲)۳۵ ,
- [۲۷]A. Nernheim, N. Meyer, Cyclic pull-out test on geogrids, in: *International Conference on Geotechnical Engineering*, October, 2004, pp. 3-6.
- [۲۸]N. Moraci, G. Cardile, Influence of cyclic tensile loading on pullout resistance of geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and geomembranes*, 27(6) (2009) 475-487.
- [۲۹]A. Nayeri, K. Fakharian, Study on pullout behavior of uniaxial HDPE geogrids under monotonic and cyclic loads, *International Journal of Civil Engineering*, 7(4) (2009) 211-223.
- [۳۰]A. D-01, Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil, in, *ASTM International West Conshohoken, PA, USA*, 2013.
- [۳۱]E. 00189016, *Geotextiles and Geotextile Related Products: Determination of Pullout Resistance in Soil*, in, *NORME EUROPEENNE prEN 00189016*, 1998.