

## بررسی رفتار بیرون کشش مهاری ال شکل ژئوگرید تحت بارگذاری سیکلی و استاتیکی

علی ملکی<sup>۱\*</sup>، آرش نیری<sup>۲</sup>، سید حمید لاجوردی<sup>۳</sup>، حمید رضا صبا<sup>۴</sup>، لوران بریانسون<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، Maleki.ali.3@gmail.com

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. با توجه به محدودیت فضا، در برخی از موارد نمی‌توان مسلح کننده را بصورت افقی اجرا نموده و بایستی از مهاری با اشکال مختلف استفاده کرد که مهاری ساده و ال شکل از رایج ترین آنها می‌باشد. علاوه بر این ژئوگریدهای مورد استفاده در خاک مسلح در طول دوره بهره برداری ممکن است علاوه بر بارهای ماندگار و دائمی، تحت سربارهای سیکلی نیز قرار بگیرند. بنابراین، در مطالعه حاضر به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف از جمله دامنه بارگذاری و تعداد سیکل بارگذاری، نتایج آزمایش‌های بیرون کشش بر روی ژئوگرید دفن شده در خاک ماسه‌ای با مهاری ال شکل تحت شرایط استاتیکی و سیکلی ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش دامنه بارگذاری سیکلی باعث ایجاد نیروی بیرون کشش بیشتر در مقایسه با شرایط استاتیکی و افزایش جابجایی‌های تجمعی در طول نمونه ژئوگرید گردیده است. علاوه بر این، افزایش تعداد سیکل بارگذاری منجر به کاهش نیروی بیرون کشش مهاری ژئوگرید و حاشیه ایمنی بهره برداری از سازه تحت شرایط کنترل جابجایی شده است.

**کلمات کلیدی:** آزمایش بیرون کشش، ژئوگرید، مهاری ال شکل، بارگذاری سیکلی، بارگذاری استاتیکی.

### ۱- مقدمه

یکی از اصلی ترین معیارها برای بررسی پایداری داخلی سازه‌های خاکی، مقدار مقاومت مسلح کننده خاک در مقابل بیرون کشیده شدن از داخل خاک که به نیروی بیرون کشش مرسوم است می‌باشد. 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 می‌گردد. از طرفی در ژئوگریدها در محل چشمه‌های بزرگ، آرایش ذرات خاک و قفل بست بین دانه‌های خاک نقش پر رنگی در تأمین مقاومت در مقابل بیرون کشش را دارند. محققین نشان داده‌اند تحت تنش‌های مختلف سربار و به منظور بررسی اندرکنش خاک - ژئوسینتتیک آزمایش بیرون کشش بهترین ابزار برای اینکار می‌باشد. (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]،

<sup>1</sup> Chang

<sup>2</sup> Palmeira

<sup>3</sup> Milligan

موراچی<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 سازه‌های مسلح شده می‌توانند رفتارهای مختلف را با توجه به نوع مسلح‌کننده، نوع خاک و نوع سیستم مهاری نشان دهند. جهت بررسی رفتار سیستم‌های مهاری ژئوسینتتیک 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 شیروانی‌های مختلف نشان می‌دهد 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].

با مطالعه دو نوع سیستم مهاری مختلف (ساده و برگشتی) در آزمایش بیرون‌کشش، مشاهده گردیده که نحوه بسیج‌شدگی برای هر دو حالت بسیار شبیه بوده و مهاری برگشتی نسبت به حالت ساده از خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهد [۱۸-۲۱]. طراحی مهاری ژئوسینتتیک بر اساس آزمایش آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نشان داده که اصطکاک در سطح مشترک خاک و ژئوسینتتیک زمانی بسیج می‌شود که گسیختگی در خاک اتفاق بیافتد [۲۲].

در قالب انجام تعداد محدودی آزمایش بیرون‌کشش سیکلی، مشاهده شد که با افزایش دامنه بارگذاری، تغییرمکان‌های نسبی در نزدیک محل اعمال بار کششی افزایش یافته و توزیع یکسانی در طول مدفون نمونه ندارد. علاوه بر این وقوع گسیختگی بیرون‌کشش با تجمع کرنشهای جزئی در نمونه همراه بوده است [۲۳].

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 بیرون‌کشش سیکلی بررسی شده است [۲۴]. 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 بیرون‌کشش سیکلی بوده است [۲۳، ۲۴].

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

## ۲- مطالعه آزمایشگاهی

<sup>4</sup> Ochiai

<sup>5</sup> Alfaro

<sup>6</sup> Raju

<sup>7</sup> Lopes

<sup>8</sup> Ladeira

<sup>9</sup> Sugimoto

<sup>10</sup> Moraci

<sup>11</sup> Abdelouhab

<sup>12</sup> Briançon

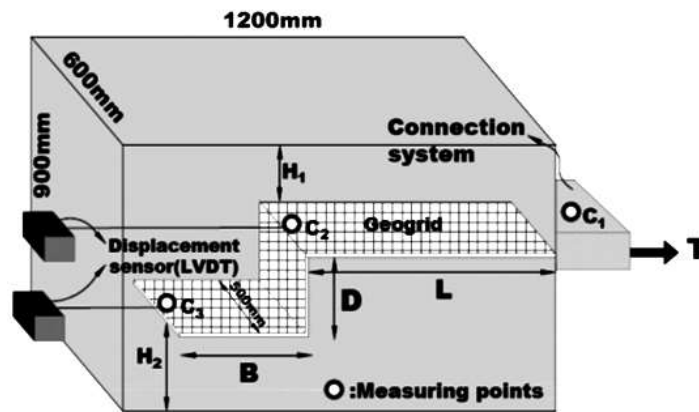
<sup>13</sup> Chareyre

<sup>14</sup> Hariprasad

<sup>15</sup> Umashankar

## ۱-۲- دستگاه آزمایش بیرون کشش

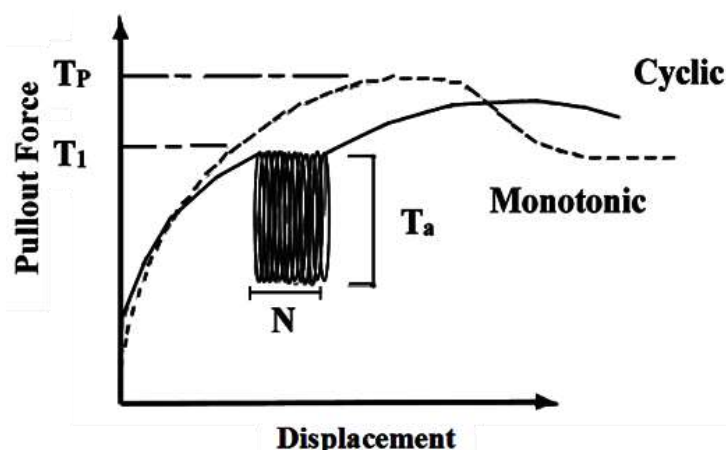
در مطالعه حاضر ، دستگاه آزمایش بیرون کشش بر اساس استاندارد ASTM D6706-01 طراحی و ساخته شد [۲۵]. شکل ۱ مدل فیزیکی دستگاه بیرون کشش و نحوه قرارگیری ژئوگرید را نشان می‌دهد. جعبه دستگاه دارای ۱۲۰۰ میلی‌متر طول، ۶۰۰ میلی‌متر عرض و ۹۰۰ میلی‌متر ارتفاع بوده و بدنه آن از ورقهای فولادی ST-37 به ضخامت ۱۵ میلی‌متر ساخته شده است. وجوه پشت و کناری جعبه دارای سخت کننده‌های عرضی به منظور جلوگیری از کمانش و اعوجاج بدنه دستگاه در اثر فشار جانبی خاک هستند. جهت کاهش اصطکاک، سطوح کلیه قطعات فلزی سندبلاست، پوسته برداری و رنگ آمیزی شده است.



شکل ۱: مدل فیزیکی دستگاه بیرون کشش

## ۱-۱-۲- اعمال نیروی بیرون کشش افقی

نیروی بیرون کشش افقی از طریق جک هیدرولیک با ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن و طول کورس ۱۰۰ میلی‌متر به گیره ژئوگرید اعمال شده و توسط سلول نیرو که حد فاصل جک و نمونه قرار گرفته، اندازه‌گیری می‌شود. جک هیدرولیک از یک سیستم کنترل پیشرفته با قابلیت تعریف مسیرهای متنوع بارگذاری با ماهیت استاتیکی، سیکنی و یا ترکیبی، فرمان دریافت می‌کند. بارگذاری سیکنی در آزمایش‌های بیرون کشش بصورت کنترل نیرو شبیه‌سازی شده، زیرا در شرایط اعمال بارهای قائم با ماهیت تکراری، نیروی کشش افقی ایجاد شده در مسلح‌کننده تناوبی بوده و حد فاصل مقادیر مشخصی که اختلاف آنها همان دامنه بار سیکنی می‌باشد، متغیر است. تعداد تکرار مصادیق واقعی بارگذاری سیکنی نظیر عبور ترافیک یا راه آهن، بسیار زیاد (نزدیک به چند ده میلیون سیکل) بوده و اعمال این تعداد تکرار در محدوده امکانات آزمایشگاهی مقدور نیست. بنابراین تعداد تکرار سیکل بارگذاری در آزمایش‌ها بصورت محدود انتخاب شده است. بارگذاری سیکنی که الگوی عمومی آن در شکل ۲ بطور شماتیک نشان داده شده، در سطح بار  $T_1$ ، معادل درصدی از مقاومت حداکثر بیرون کشش استاتیکی ( $T_p$ )، در شرایط یکسان خاک و فشار سربار آغاز می‌شود. شکل موج با توجه به ماهیت غالب بارهای دینامیکی بصورت سینوسی انتخاب شده و دامنه سیکل‌ها ( $T_a$ )، نیز بسته به سطح نیرو در شروع بارگذاری سیکنی بصورت درصدی از مقاومت  $T_p$  انتخاب می‌شود.



شکل ۲: الگوی بارگذاری سیکلی در آزمایش بیرون کشش

### ۲-۱-۲- غلاف ورودی و گیره نمونه

در طرفین شکاف ورودی نمونه و در وجه داخلی جعبه، از دو عدد ورق به ابعاد  $۶۰۰ \times ۲۰۰ \times ۱۰$  میلیمتر مطابق شکل ۳ استفاده شده است. این دو ورق با عملکرد غلاف گونه، ژئوگرید را در یک طول مشخص (۲۰۰ میلیمتر) در بر گرفته و با ایجاد فاصله بین محل اثر نیروی کششی و محل انتقال نیرو به خاک، باعث کاهش تنش کششی وارد بر ورق جلو، کاهش اثر صلبیت و اثر اصطکاک می‌شوند.

گیره نمونه از دو ورق فولادی به ابعاد  $۱۰۰ \times ۱۰$  میلیمتر طراحی شده که مسلح کننده بین آنها قرار می‌گیرد، ورق‌ها توسط ۶ پیچ بهم متصل شده و از یک سمت مطابق شکل ۴ به تجهیزات اعمال نیروی کششی متصل می‌شوند. عملکرد گیره، اعمال یکنواخت تنش کششی در محل اعمال نیرو به ژئوگرید است.



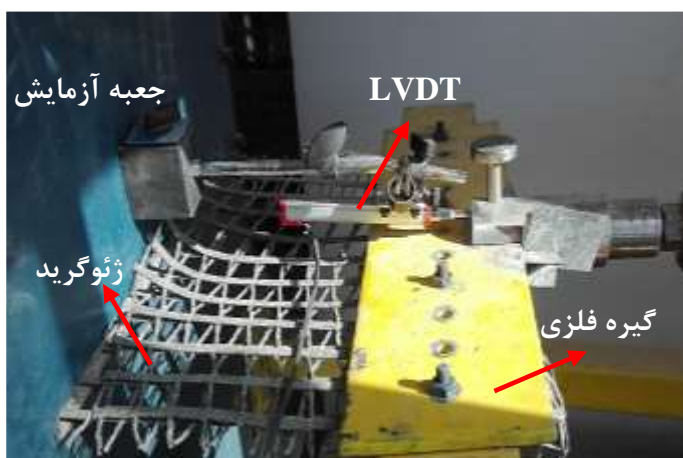
شکل ۳: غلاف نمونه در وجه داخلی دستگاه بیرون کشش



شکل ۴: گیره نمونه در دستگاه بیرون کشش

### ۲-۱-۳- اندازه‌گیری نیرو و جابجایی

در حین آزمایش، جابجایی افقی نمونه در سه نقطه ( $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$ ) توسط سه عدد جابجایی‌سنج<sup>۱۶</sup> قرائت و ثبت شده است. محل این سه نقطه، در ناحیه ابتدای نمونه (نقطه  $C_1$ )، در انتهای ناحیه افقی ابتدایی ژئوگرید (نقطه  $C_2$ ) و در قسمت انتهایی لایه ژئوگرید (نقطه  $C_3$ ) می‌باشد (شکل ۱). جابجایی ابتدای نمونه توسط جابجایی‌سنج نصب شده در کنار جک و متصل به گیره، اندازه‌گیری و ثبت شده است. نقاط دیگر که در انتهای نمونه قرار دارد، توسط سیمی غیرقابل انعطاف که از داخل لوله‌های استیل (فولاد ضدزنگ) عبور داده شده‌اند، به جابجایی‌سنج نصب شده در پشت جعبه متصل هستند. با حرکت ژئوگرید و حرکت سیم، جابجایی لایه ژئوگرید اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. شایان ذکر است که جابجایی‌سنج مورد استفاده از نوع استوانه‌ای با محدوده رفتار خطی ۱۰۰ میلی‌متر و درصد خطای ۰/۲۵ درصد و با ظرفیت ۲۵۰ میلی‌متر بوده است. همچنین برای اندازه‌گیری نیروی بیرون‌کشش از یک نیروسنج بین جک و سیستم اتصال استفاده شده است. این نیروسنج از نوع استوانه‌ای پیزوالتریک با ظرفیت فشاری و بیرون‌کشش ۵۰ کیلو نیوتن و دقت ۰/۱ کیلو نیوتن است (شکل ۵).



شکل ۵: گیره نمونه در دستگاه بیرون کشش جک، گیره فلزی و جابجایی‌سنج (LVDT)

<sup>16</sup> LVDT

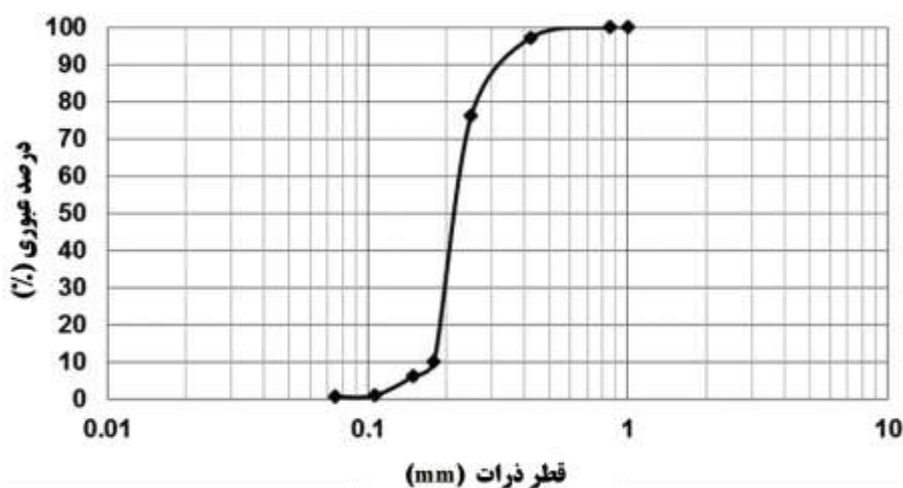
## ۲-۲- مصالغ

### ۲-۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه بوده که بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS) از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) است. مشخصات نمونه خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۱ ذکر شده است. آزمایش‌های برش مستقیم کوچک مقیاس بر روی نمونه‌های خشک ماسه با تراکم نسبی ۸۰ درصد با تنش قائم اعمال شده در محدوده ۲۵ الی ۱۰۰ کیلوپاسکال زاویه اصطکاک داخلی خاک ( $\phi$ ) را معادل ۳۴ درجه را بدست آورده است. همچنین منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات خاک

پارامتر	مشخصه	واحد	استاندارد	مقدار
ضریب یکنواختی	$C_u$	—	ASTM D422	۱/۲۸
ضریب انحناء	$C_c$	—	ASTM D422	۰/۹۲
حداکثر وزن مخصوص خشک	$\gamma_{dmax}$	$\frac{kN}{m^3}$	ASTM D698	۱۵/۲
درصد رطوبت بهینه	$\omega_{opt}$	درصد	ASTM D698	۱۵
درصد تراکم نسبی	$D_r$	درصد	—	۸۰
زاویه اصطکاک داخلی	$\phi$	درجه	ASTM D3080	۳۴
چسبندگی	$C$	$\frac{kN}{m^2}$	ASTM D3080	۶/۴
زاویه اتساع	$\psi$	درجه	—	۴
چگالی ذرات خاک	$G_s$	—	ASTM D854	۲/۶۶



شکل ۶: منحنی دانه بندی خاک ماسه‌ای

در این مطالعه از ژئوگرید پلیمری از جنس پلی استر محصول شرکت ژئوپارسیان استفاده شده است. این نوع ژئوگرید انعطاف پذیر و بسیار سبک بوده و به راحتی بریده شده و جهت نصب و اجرا در محل، نیازی به نیروی متخصص ندارد. مشخصات آن بر مبنای داده های شرکت مذکور در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات ژئوگرید

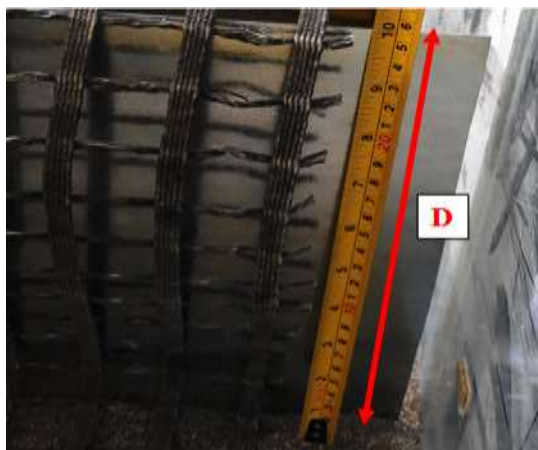
مقدار / نماد	واحد	پارامتر
یکسویه	—	نوع
PET	—	جنس
PVC	—	پوشش
۱۱۰	$\frac{kN}{m}$	مقاومت کششی طولی نهایی
۲۴	$\frac{kN}{m}$	مقاومت کششی در ۲ درصد کرنش
۱۱	درصد	کرنش گسیختگی
۱/۹	mm	ضخامت
۲۵×۳۰	mm	ابعاد چشمه

### ۲-۳- هندسه مهاری

یک سیستم مهاری (ال شکل) برای بررسی رفتار بیرون کشش و ظرفیت مهاری ژئوگرید آزمایش شده است (شکل ۱). برای این منظور، لایه ژئوگرید به صورت ال شکل با ابعاد مختلف (D و B، L) در خاک قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پارامترهای L و D به ترتیب به عنوان طول ابتدایی و عمق مدفون ژئوگرید می باشند. بعلاوه، پارامتر B طول پاشنه ژئوگرید را نشان می دهد. H<sub>1</sub> و H<sub>2</sub> به ترتیب بیانگر ارتفاع خاک بالای ژئوگرید و زیر پاشنه ژئوگرید هستند.

### ۲-۴- آماده سازی نمونه

یک نمونه ال شکل در ابعاد L = ۴۰۰ mm، D = ۳۵۰ mm و B = ۶۰۰ mm در مطالعه حاضر استفاده شده است. در این حالت ابتدا برای ایجاد ارتفاع H<sub>2</sub>، جعبه آزمایش با یک لایه ۱۰۰ میلیمتری از خاک پر و متراکم شده است. سپس لایه ژئوگرید بر روی خاک متراکم شده به اندازه طول پاشنه مورد نظر (B) پهن شده (شکل ۷-الف) و در مرحله بعد، برای اجرای عمق مدفون ژئوگرید (D)، از یک ورق گالوانیزه استفاده می گردید. این ورق را در عمق مورد نظر قرار داده و سپس ژئوگرید در جهت قائم بر روی آن بالا می آید (شکل ۷-ب). با توجه به عمق مورد نیاز، خاک در لایه هایی با ضخامت متفاوت متراکم می - گردید (برای D = ۳۵۰ mm، آن را با سه لایه ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ میلیمتر پر کرد). پس از برداشتن ملایم ورق گالوانیزه، نواحی سست شده بستر خاک دوباره به مقدار کمی متراکم می شد. پس از این مرحله، طول ابتدایی و افقی ژئوگرید (L) اجرا و به گیره دستگاه متصل شده و لایه بالایی خاک (H<sub>1</sub>) در یک لایه به ضخامت ۲۰۰ میلیمتر اجرا و متراکم می گردید. به دنبال اجرای آخرین لایه متراکم، عملیات بیرون کشش شروع شده و بر اساس همان دو معیار قبلی ارائه شده برای مهاری ساده، آزمایش به اتمام می رسید. برای متراکم کردن هر لایه از چکش فولادی استفاده شده است. تراکم نسبی بدست آمده از طریق اندازه گیری ارتفاع پر شدن در هر لایه بررسی شده و این مقدار بین ۷۹ تا ۸۳ درصد متغیر بوده است. ژئوگرید از طریق گیره فلزی به جک و سیستم اعمال نیرو متصل و محکم می گردد. نیرو سنج و جابه جایی سنج بر روی عدد صفر تنظیم شده و سپس آزمایش شروع می گردید.



(ب) اجرای عمق مدفون (D)



(الف) اجرای طول پاشنه (B)

شکل ۷: اجرای مهاري ال شکل

## ۲-۵-۵- الگوی بارگذاری آزمایش بیرون کشش

### ۲-۵-۱- بارگذاری استاتیکی

آزمایش بیرون کشش استاتیکی مطابق توصیه بسیاری از محققان مانند آلفارو و همکاران [۴]، لاجوردی و همکاران [۱۸] 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

### ۲-۵-۲- بارگذاری سیکلی

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.

## ۲-۶- برنامه آزمایش‌ها

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



جدول ۳: آزمایش‌های مربوط به مهارای ال شکل

شکل مهارای	نوع بارگذاری	فرکانس (Hz)	دامنه بارگذاری (%)	تعداد سیکل بار (N)
ال شکل	استاتیکی	—	—	۱۰
				۵۰
				۲۵۰
				۵۰۰
				۷۵۰
سیکلی	۰/۱	—	۴۰	۱۰
				۵۰
				۲۵۰
				۵۰۰
				۷۵۰
—	—	—	۵۰	۱۰
				۵۰
				۲۵۰
				۵۰۰
				۷۵۰

### ۳- نتایج و تحلیل

#### ۳-۱- نتایج مربوط به نیرو

##### ۳-۱-۱- حداکثر نیروی بیرون کشش

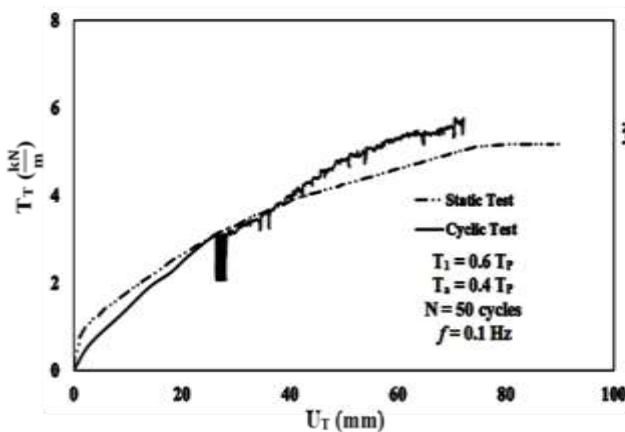
در جدول ۴ حداکثر نیروی بیرون کشش مهارای در دو حالت استاتیکی و سیکلی ارائه گردیده است. مشاهده می‌گردد که نیروی بیرون کشش سیکلی در همه حالات نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته و بیشترین مقدار افزایش مربوط به حالت ۱۰ سیکل با دامنه متوسط ۴۰ درصد بوده است. می‌توان بیان نمود که در حین بارگذاری سیکلی، بهم ریختگی آرایش ذرات ماسه سبب ایجاد مقاومت مجدد در ژئوگرید شده و باعث افزایش نیروی بیرون کشش نمونه نسبت به حالت استاتیکی شده است. شایان ذکر است که در آزمایش‌های سیکلی همانند آزمایش‌های استاتیکی هیچ‌گونه گسیختگی از نوع پارگی در ژئوگرید رخ نداده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج آزمایش های سیکلی و استاتیکی

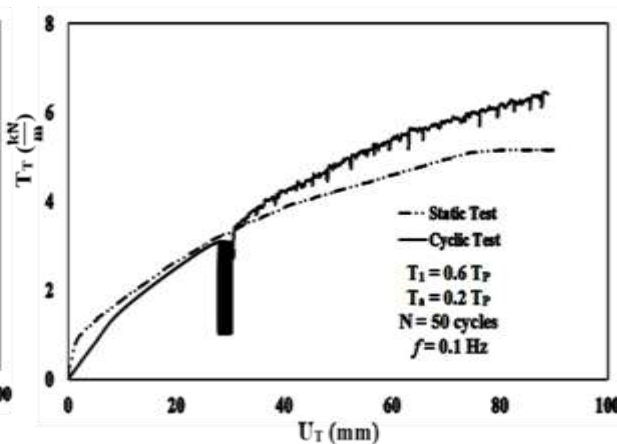
میزان تفاوت برای $T_{Tmax}$ (%)	$T_{Tmax}$ (kN/m)	تعداد سیکل بار (N)	دامنه بارگذاری (%)	فرکانس (Hz)	نوع بارگذاری	شکل مهاری
—	۵/۲۴	—	—	—	استاتیکی	
۱۶	۶/۱۰	۱۰				
۱۰	۵/۷۲	۵۰				
۶	۵/۵۲	۲۵۰	۲۰			
۵	۵/۴۸	۵۰۰				
۲	۵/۳۰	۷۵۰				
۳۴	۷/۰۰	۱۰				
۲۳	۶/۴۵	۵۰				ال شکل
۴	۵/۴۲	۲۵۰	۴۰	۰/۱	سیکلی	
۲	۵/۳۲	۵۰۰				
۱	۵/۲۹	۷۵۰				
۳۰	۶/۸۰	۱۰				
۲۶	۶/۶۰	۵۰				
۱۵	۶/۰۰	۲۵۰	۵۰			
۶	۵/۵۴	۵۰۰				
۲	۵/۳۰	۷۵۰				

### ۳-۱-۲- اثر دامنه بار سیکلی

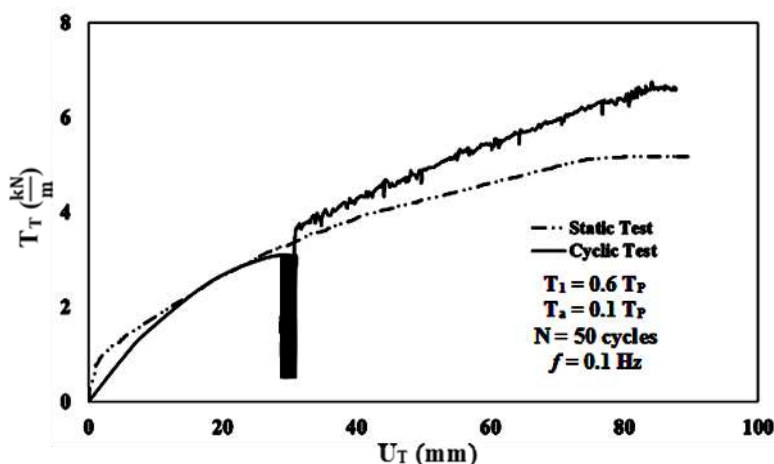
در این حالت جهت بررسی اثر دامنه بار سیکلی بر پاسخ ژئوگرید، چندین بارگذاری سیکلی با دامنه های متفاوت ( $T_a$ ) برابر ۴۰، ۲۰ و ۵۰ درصد حداکثر نیروی بیرون کشش حالت استاتیکی انجام شده است. نتایج بدست آمده در شکل ۸ ارائه گردیده است. مشاهده می گردد که در هر دو حالت مهاری، نیروی بیرون کشش پس از اعمال بار سیکلی، با افزایش مقدار دامنه بارگذاری افزایش یافته است. می توان بیان نمود که اعمال بار با مقدار دامنه بالا و وقوع نمو جابجایی های بزرگ ناشی از آن در حین بارگذاری سیکلی، آرایش دانه های ماسه را چنان بر هم می زند که نوعی قابلیت کسب مقاومت مجدد، معادل ظرفیت بیرون کشش استاتیکی، در ژئوگرید ایجاد می گردد.



(ب)



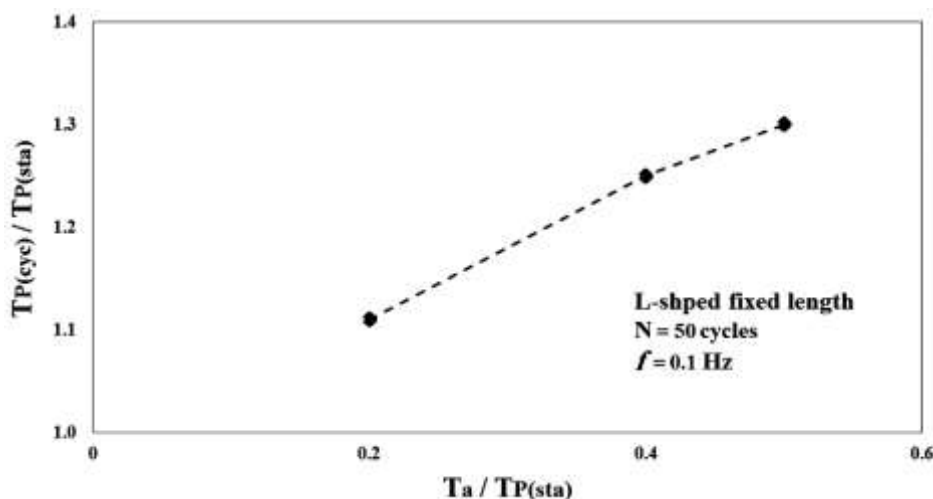
(الف)



(ج)

شکل ۸: منحنی رفتار بیرون کشش سیکلی ژئوگريد ال شکل تحت دامنه‌های مختلف  $T_T$ : نیروی بیرون کشش،  $U_T$ : جابجایی ابتدای ژئوگريد).

همچنین شکل ۹ روند تغییرات مقاومت حداکثر در بارگذاری سیکلی را متناسب با افزایش مقدار دامنه بار سیکلی برای ژئوگريد با مهاري ال شکل نشان می‌دهد. تفسیر دقیق این رفتار در مقیاس حرکت دانه‌ها قدری پیچیده است، ولی می‌توان بیان نمود که در هنگام اعمال بارگذاری سیکلی با افزایش دامنه، افزایش مقاومت حداکثر را مشاهده نمود. بطورکلی می‌توان اثر بارگذاری سیکلی بر روی نمونه ژئوگريد مورد استفاده در مقیاس آزمایش‌های انجام شده و سطوح نیروی اعمال شده را در حاشیه ایمنی مناسب تلقی نمود.



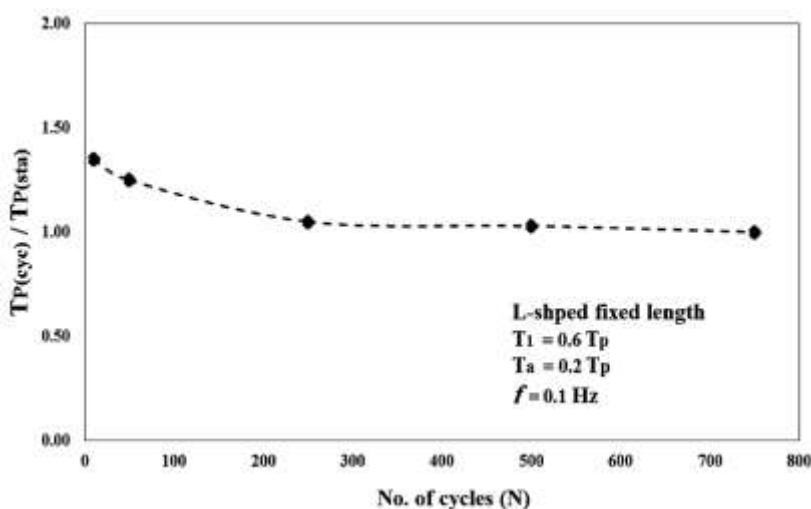
شکل ۹: اثر دامنه بار سیکلی بر نیروی بیرون کشش ژئوگريد با مهاري ال شکل

### ۳-۱-۳- اثر تعداد سیکل بارگذاری

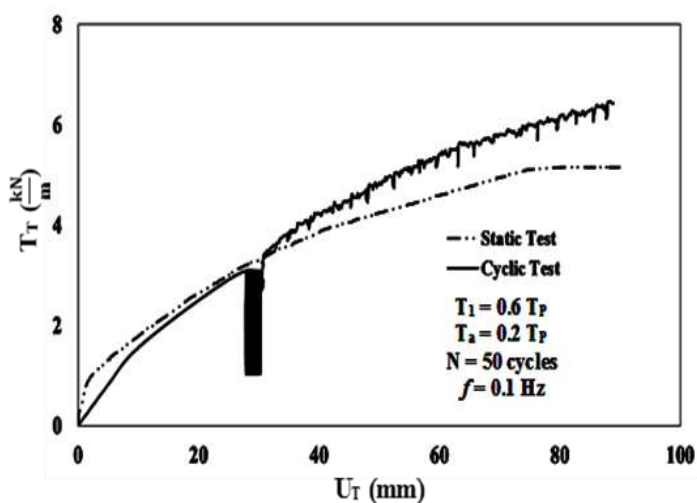
بر اساس نتایج بدست آمده، افزایش تعداد سیکل بارگذاری در سطوح مجاز نیرو باعث گسیختگی ژئوگريد‌های انعطاف‌پذیر نمی‌شود. برای بررسی اثر تعداد سیکل‌های بارگذاری بر حداکثر نیروی بیرون کشش، آزمایش‌های بیرون کشش سیکلی با تعداد سیکل‌های ۱۰، ۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ و با دامنه بارگذاری سیکلی  $T_a$  معادل ۴۰ درصد نیروی حداکثر انجام شده است.

مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که اعمال تعداد تکرار بالای بار سیکلی، باعث کاهش حاشیه ایمنی بهره‌برداری از سازه در شرایط کنترل جابجایی خواهد شد. این مسئله ممکن است در مورد سازه‌های موقت مشکل نداشته باشد، ولی لزوم توجه به آن در طراحی سازه‌های دائم با عمر مفید طولانی، ضروری است.

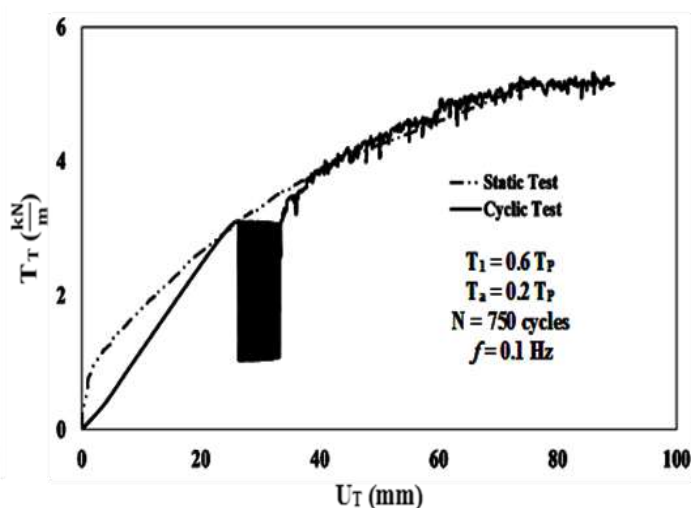
همچنین مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد برای یک دامنه ثابت بارگذاری، با افزایش تعداد تکرار بار سیکلی نیروی بیرون‌کشش حالت سیکلی کاهش یافته و به نیروی حالت استاتیکی نزدیک می‌گردد. می‌توان بیان نمود که هر چه تعداد تکرار بار سیکلی افزایش یابد از آن به هم ریختگی اولیه نمونه کاسته شده و آرایش ذرات به حالت پایدار رسیده و این امر سبب می‌گردد نیروی اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف ژئوگرید مقاومت مجددی کسب نکرده بلکه روند نزولی به خود گرفته و در صورت افزایش تعداد سیکل‌ها حداکثر نیروی بیرون‌کشش بارگذاری سیکلی به سمت نیروی بیرون‌کشش بارگذاری استاتیکی کاهش یابد.



شکل ۱۰: اثر تعداد تکرار بار سیکلی بر نیروی بیرون‌کشش ژئوگرید ال شکل



(ب)

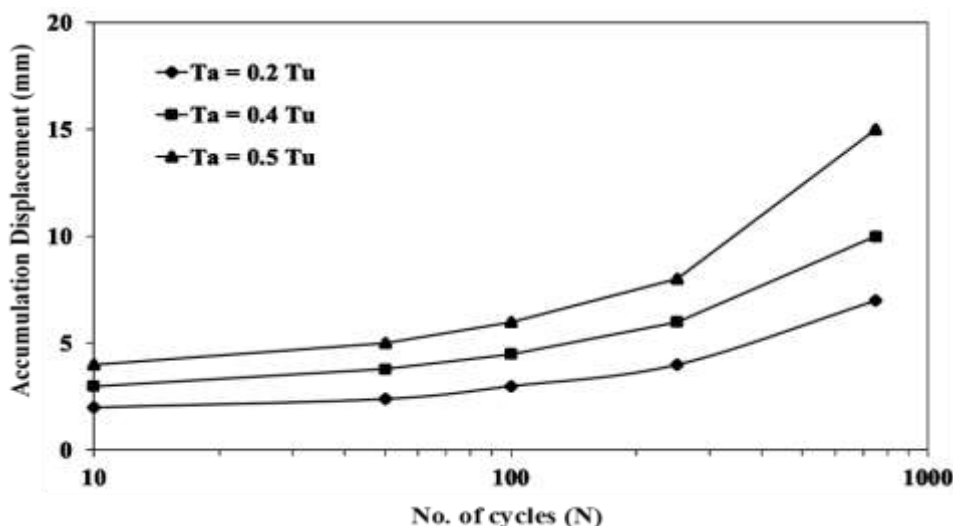


(الف)

شکل ۱۱: منحنی رفتار بیرون‌کشش سیکلی ژئوگرید ال شکل تحت سیکل‌های مختلف

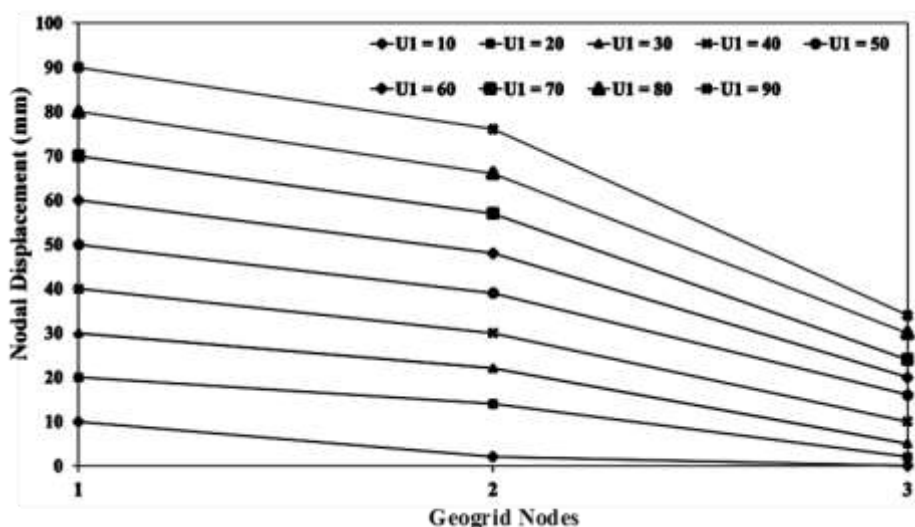
### ۲-۳- رفتار جابجایی ژئوگرید

در ادامه چگونگی توزیع جابجایی در طول ژئوگرید و جابه‌جایی تجمعی سیکلی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد با افزایش تعداد سیکل‌ها، جابجایی تجمعی ناشی از بارگذاری سیکلی افزایش یافته است. مقدار جابجایی اولیه مرحله اول بارگذاری به مقدار نیروی شروع بارگذاری سیکلی یعنی  $T_1$  بستگی دارد. در حالی که جابجایی تجمعی ناشی از بارگذاری سیکلی مرحله دوم بارگذاری به دامنه بارگذاری ( $T_a$ )، تعداد سیکل ( $N$ ) و نیروی بیرون‌کشش شروع بارگذاری سیکلی ( $T_1$ ) بستگی دارد به گونه‌ای که با افزایش دامنه بار سیکلی جابه‌جایی تجمعی، افزایش می‌یابد. 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 جابجایی تجمعی در اثر شرایط بار سیکلی در مقیاس واقعی، می‌تواند عامل ناپایداری تغییرمکانی توده خاک شود. علت این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان نمود که آرایش دانه‌های خاک بعد از تعداد معینی سیکل بارگذاری به یک آرایش نسبتاً پایداری می‌رسند و افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری دیگر تأثیر چندان زیادی در آرایش مجدد دانه‌های خاک نخواهند داشت.



شکل ۱۲: اثر دامنه و تعداد تکرار بار سیکلی بر جابجایی تجمعی ژئوگرید

همانطور که در بخش آماده‌سازی نمونه‌ها بیان شد، جابجایی‌سنج‌ها در سه نقطه از نمونه نصب شده است. در شکل ۱۳ نحوه توزیع جابجایی در امتداد طول ژئوگرید مدفون شده در خاک ماسه‌ای نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌گردد که روند نتایج در آزمایش‌های سیکلی و استاتیکی مشابه یکدیگر است. در علائم اختصاری نشان داده شده در شکل ۱۳،  $U_1$  جابجایی جلو و ۹ منحنی دیگر ۹ سطح یا حالت در طول آزمایش بیرون‌کشش را نشان می‌دهد. به عنوان مثال ۳۰ mm  $U_1 =$  نشان دهنده میزان جابجایی در لحظه‌ای است که جابجایی جلوی ژئوگرید به ۳۰ میلیمتر رسیده باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش فاصله از نقطه اعمال جابجایی، از مقدار جابجایی‌های نقاط در طول نمونه کاسته می‌شود. قابلیت کشش ژئوگرید و شکل‌گیری مکانیزم خرابی پیش‌رونده در طول نمونه ژئوگرید، نقش بسزایی در کاهش مقدار جابجایی نقاط در طول نمونه با افزایش فاصله از نقطه اعمال بار دارد.



شکل ۱۳: جابجایی گره‌ها در امتداد طول ژئوگرید مدفون شده

#### ۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به منظور بررسی رفتار استاتیکی و سیکلی مهاری ال شکل یک نوع ژئوگرید تک‌سویه مدفون در خاک ماسه یکنواخت، آزمایش‌های بیرون‌کشش استاتیکی و سیکلی با استفاده از یک دستگاه آزمایش بیرون‌کشش بزرگ مقیاس انجام گردید. نتایج این مطالعه در محدوده آزمایش‌های انجام شده نشان داده است که:

- حداکثر نیروی بیرون‌کشش سیکلی در همه حالت‌ها بیشتر از شرایط استاتیکی بوده و بیشترین مقدار افزایش مربوط به حالت ۱۰ سیکل با دامنه متوسط ۴۰ درصد بوده است.
- در مهاری ال شکل حداکثر نیروی بیرون‌کشش تحت بارگذاری سیکلی با افزایش مقدار دامنه نیروی سیکلی، نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌یابد.
- افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری سبب کاهش حداکثر نیروی بیرون‌کشش سیکلی ژئوگرید و نزدیک شدن آن به حداکثر نیروی بیرون‌کشش استاتیکی می‌گردد.
- 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

- [1] Chang, J.C., Hannon, J.B., and Forsyth, R.A. 1977. Pullout resistance and interaction of earthwork reinforcement and soil. National Research Council, Washington, DC Transportation Research Record 640. pp. 1-7.
- [2] Palmeira, E.M., and Milligan, G.W.E. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand. Géotechnique, Vol. 39, No. 3, 511-524, 1989a.

- [3] Ochiai, H., Hayashi, S., Otani, J., and Hirai, T. Evaluation of pull-out resistance of geogrid reinforced soils. Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement Practice. Fukuoka, Kyushu, Japan, 1992.
- [4] Alfaro, M.C., Miura, N., and Bergado, D.T. Soil geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests. Geotechnical Testing Journal, Vol. 18, No. 2, 157-167, 1995.
- [5] Raju, M. Monotonic and cyclic pullout resistance of geosynthetics, Thesis, University of British Columbia, 1995.
- [6] Lopes, M.L., and Ladeira, M. Influence of the confinement, soil density and displacement ratio on soil-geogrid interaction. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 14, No. 10, 543-554, 1996.
- [7] Sugimoto, M., Alagiyawanna, A.N.M., and Kadoguchi, K. Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 19, No. 5, 257-277, 2001.
- [8] Moraci, N., and Montanelli, F. Analise di prove di sfilamento di geogriglie estruses installate in terreno graulare compattato. Revista Italiana di Geotecnica, Vol. 4, 5-21, 2000.
- [9] Moraci, N., and Recalcatti, P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 24, No. 4, 220-242, 2006.
- [10] Palmeira, E.M. Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis, MERCER LECTURE 2007-2008. EuroGeo4. Edinburgh Conference Centre Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, 2008.
- [11] Abdelouhab, A., Dias, D., and Freitag, N. Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 29, 116-129, 2010.
- [12] Briançon, L., Girard, H., Poulain, D., and Mazeau, N. Design of anchoring at the top of slopes for geomembrane lining systems." 2nd European geosynthetics conference. Bologna, Italy, 2000.
- [13] Briançon, L., Girard, H., and Villard, P. Geosynthetics anchorage: Experimental and numerical studies. EuroGeo4. Edinburgh, 2008.
- [14] Chareyre, B. Modélisation du comportement d'ouvrages composites sol-geosynthétique par éléments discrets - Application aux ancrages en tranchées en tête de talus (Discrete element modelling of composite soil-geosynthetics structures - Application to anchor trenches at the top of slopes). Ph.D thesis. University of Grenoble I, France. pp. 222 (In French), 2003.
- [15] Abdi, M. and Zandieh, A. Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material, Geotext. Geomembr., 42, 494-504, 2014.
- [16] Chennarapu, H. and Balunaini, U. Transverse Pullout Response of Smooth-Metal-Strip Reinforcements Embedded in Sand," J. Geotech. Geoenviron. Eng., 144, 06017020, 2017.
- [17] Girard, H., Briançon, L., and Rey, E. Experimental tests for geosynthetic anchorage trenches. Proc. of the Eighth International Conference on Geosynthetics, "8th ICG". Yokohama, Japan, 2006.
- [18] Lajevardi, S. H., Briançon, L. and Dias, D. Geosynthetics anchorage: experimental studies, 5th European Geosynthetics Congress Valencia, Spain, 1, 341-349, 2012.
- [19] Lajevardi, S. H., Briançon, L. and Dias, D. Experimental studies of the geosynthetic anchorage-effect of geometric parameters and efficiency of anchorages, Geotext. Geomembr., 42, 505-514, 2014.
- [20] Lajevardi, S. H., Dias, D. and Briançon, L. Experimental studies of the behavior of geosynthetic wrap around anchorage, Geosynth. Int., 22, 249-256, 2015.
- [21] Williams, X. Y. and Serati, D. Influence of anchorage angles on pull-out resistance of geotextile wrap around anchorage, Geosynth. Int., 25, 378-391, 2018.
- [22] Raju, D. and Fannin, R. Load-strain-displacement response of geosynthetics in monotonic and cyclic pullout, Can. Geotech. J., 35, 183-193, 1998.



**7<sup>th</sup>.International Congress on Civil Engineering , Architecture  
and Urban Development / 08-10 March 2021,Tehran , Iran**  
In cooperation with Shiraz University, maraghe University  
And University of Science and Technology of Iran



- [23] Moraci, N. and Cardile, G. Influence of cyclic tensile loading on pullout resistance of geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotext. Geomembr.*, 27, 475-487, 2009.
- [24] Nayeri, A., Fakharian, K. Study on pullout behavior of uniaxial HDPE geogrids under Monotonic and Cyclic, *International Journal of Civil Engineerng*. Vol. 7, 211-223, 2009.
- [25] ASTM D6706-01. 2007. Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. ASTM International 2007.