

بررسی عملکرد پی‌های سطحی روی فونداسیون خاکی مسلح شده با ژئوگرید و ژئوسل در معرض گسلش نرمال

نبی اله احمدی^۱، میثم فدایی^{۲*}

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

fadaee@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

چکیده

پدیده گسلش سطحی برای ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی که در مجاورت یا روی گسل فعال قرار دارند بسیار خطرناک است و می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری ایجاد کند، طراحی این سازه‌ها باید با در نظر گرفتن آثار نامطلوب گسلش سطحی صورت گیرد، در این حالت اقدامات ژئوتکنیکی به ویژه ایجاد فونداسیون خاکی مسلح در کاهش آثار نامطلوب گسلش سطحی بسیار مؤثر است. در این مقاله مجموعه‌ای از آزمایش‌ها روی فونداسیون مسلح شده با ژئوگرید، ژئوسل و ترکیب آنها در معرض گسلش نرمال به عنوان یک اقدام برای کاهش خطرهای گسلش سطحی انجام شده است. این آزمایش‌ها رفتار شالوده نواری به عرض ۱/۵ متر واقع بر یک آبرفت به ضخامت ۶ متر تحت جابه‌جایی ۶۰ سانتی‌متری را شبیه‌سازی می‌کند. بر این اساس ۷ آزمایش با شرایط متفاوت از نظر تعداد و نوع تقویت‌کننده‌ها با در نظر گرفتن عدد مقیاس برابر با ۱۰ انجام شده است و به وسیله تحلیل تصاویر تهیه شده، نیمرخ نشست زمین، اعوجاج زاویه و مسیر انتشار گسلش بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده اثرگذاری مطلوب مسلح‌کننده‌ها استفاده شده در فونداسیون خاکی تسلیح شده در راستای کاهش اعوجاج زاویه‌ای، ایجاد نشست یکنواخت و انحراف مسیر گسلش برای محافظت سازه در مقابل گسلش است. در فونداسیون‌های مسلح شده به ترتیب با یک لایه ژئوگرید، یک لایه ژئوسل، یک لایه ژئوگرید و یک لایه ژئوسل توامان، دو لایه ژئوگرید و سه لایه ژئوگرید به ترتیب اعوجاج زاویه‌ای به میزان ۶۰، ۳۰، ۷۰، ۸۰ و ۸۰ درصد کاهش یافته است، بر اساس نتایج حاصل شده افزایش بیش از دو لایه ژئوگرید تأثیری در کاهش اعوجاج زاویه‌ای نداشته است، تأثیر لایه ژئوسل در بهبود رفتار فونداسیون خاکی در معرض گسلش نرمال در کاهش اعوجاج زاویه‌ای ۳۰٪ است که نسبت به بقیه مسلح‌کننده‌ها تأثیر کمتری دارد، هم‌چنین لایه ژئوسل تأثیری ناچیزی در انحراف مسیر گسلش نسبت به بقیه مسلح‌کننده‌های استفاده شده در تحقیق دارد.

واژگان کلیدی: ژئوسل، ژئوگرید، فونداسیون مسلح شده، نشست تفاضلی، اعوجاج زاویه‌ای و انحراف گسلش

۱- مقدمه

در اثر تغییر مکان تفاضلی زمین در طرفین گسل (گسلش) در هنگام زلزله، سطح زمین دچار گسیختگی شده (گسلش سطحی) و چنانچه سازه‌ای در مجاورت یا روی سطح مذکور قرار داشته باشد می‌تواند دچار خسارت اساسی شود [1].

در طول زلزله هم لرزش‌های گذرا و هم تغییر شکل دائمی زمین تولید می‌شود، تاکنون بیشتر پژوهش‌ها روی عملکرد سازه‌ها در طول لرزش‌های گذرا زمین متمرکز شده‌اند، باین حال در زلزله‌های بزرگ ممکن است گسیختگی گسل گسترش یابد و گسلش سطحی رخ دهد که به عنوان یکی از خطرات اصلی زلزله شناخته شده و می‌تواند موجب آسیب شدید به سازه‌ها و تأسیسات شده و به تلفات جانی قابل توجهی منجر شود [2-4]. از مهمترین نمونه‌هایی که می‌توان برای وقوع پدیده گسلش سطحی ناشی از وقوع زلزله بیان نمود، مربوط به زلزله‌های ۱۹۹۹ ترکیه و چی چی ۱ تایوان و ۲۰۰۸ ونچوان ۲، اشاره نمود. در اثر زلزله چی چی تایوان (۷/۶ ریشتر) گسیختگی به طول تقریبی ۹۰ کیلومتر که رخنمون عمودی گسل در برخی نقاط تا ۱۰ متر هم رسیده بود، همچنین در زلزله ونچوان (۷/۸ ریشتر) سه گسل بزرگ به صورت موازی هم‌زمان گسیخته شد و منجر به ایجاد گسل سطحی به طول ۲۸۵ کیلومتر شده است، دریکی از طولانی‌ترین گسل‌های این زلزله جابه‌جایی عمودی دائمی تا ۶ متر ثبت شده است. این گسل از چندین منطقه شهری عبور کرد و به پل‌ها، خطوط حیاتی و ساختمان‌ها آسیب وارد کرد [5, 6]. گسیختگی برشی ناهمسان و اعوجاج زاویه‌ای دو خطر ناشی از گسلش سطحی است [7-8].

توصیه اولیه استاندارد‌های بین‌المللی، اجتناب از احداث ساختمان در مجاورت یا روی گسل‌های فعال که احتمال به وجود آمدن شکستگی در سطح زمین در هنگام وقوع زلزله وجود دارد، است. حتی اگر اجتناب برای سازه‌های جدید گزینه‌ای مناسب باشد، امکان دقیق محل پیدایش گسلش سطحی در مجاورت یا بالای گسل‌های فعال پوشیده از خاک را

نمی‌توان پیشاپیش با دقت شناخت. همچنین رشد فزاینده جمعیت و نیاز به گسترش شهرها، به ویژه در مناطقی که با محدودیت‌های اقتصادی و یا زمین در شهرهای بزرگ مواجه‌اند، امکان‌سنجی احداث ساختمان‌ها در پهنه‌های گسلی فعال را بیش از پیش مورد توجه و علاقه جامعه فنی و مهندسی قرار داده است. بدیهی است که منظور از حرکت در این را ستانفی اولویت نخست در پرهیز از ساخت ابنیه در پهنه‌های گسلی فعال به عنوان ساده‌ترین راه حل نبوده و نیست، بلکه هدف بررسی و ارائه تمهیدات لازم پیرامون ژئوتکنیکی و سازه‌ای برای احداث ساختمان در مناطق با پتانسیل گسلش سطحی قابل کنترل توسط روش‌های مهندسی است. علاوه بر ساختمان‌ها، زیرساخت‌های خطی مانند جاده‌ها، بزرگراه‌ها و تونل‌ها به اجبار باید از مناطقی عبور کنند که ممکن است متحمل گسلش سطحی شوند، پس انجام اقدامات مهندسی سازه‌ای و ژئوتکنیکی برای کاهش آثار نامطلوب ناشی از گسلش سطحی ضروری است، اقدامات سازه‌ای شامل فونداسیون با دال‌های پیش‌تنیده یا تقویت‌شده برای تحمل تنش برشی اضافی و لنگر خمشی ناشی از گسلش سطحی، اقدامات ژئوتکنیکی مثل ساخت فونداسیون خاکی متراکم انعطاف‌پذیر تقویت‌شده با ژئوسنتتیک^۳، برای جذب بخشی از حرکت گسل‌های زیرین و در نتیجه کاهش اعوجاج زاویه‌ای در سطح زمین، و نصب پی‌های خاص برای منحرف کردن گسیختگی گسل و محدود کردن اعوجاج سازه‌ای است [8-14]. در چند دهه اخیر تحقیق در مورد اندرکنش گسیختگی گسل-فونداسیون و شبیه‌سازی گسلش در سه زمینه، بررسی تاریخیچه موردی در زلزله‌های گذشته [15-17, 2]، مطالعات آزمایشگاهی [18-20] و تحلیل عددی [14-15, 21-22]. مورد توجه قرار گرفته است.

برای درستی آزمایشی پژوهش‌های تحلیلی-عددی به مطالعات میدانی، ارزیابی شواهد میدانی گسلش‌های مهم در زلزله‌های گذشته و همچنین نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی در آزمایشگاه با امکان کنترل شرایط مدل‌سازی نیاز است. به همین لحاظ

مدل سازی فیزیکی به صورت ویژه مورد توجه پژوهش های دنیا است.

بخش عمده مطالعات تجربی اولیه تا پیش از دهه ۸۰ میلادی در ارتباط با این پژوهش، معطوف به مطالعات زمین شناسان و در ارتباط با شناخت ساختارهای گسلی بوده است که با استفاده از مدل سازی های تجربی جعبه ماسه انجام شده است که به مطالعات بری و همکاران در سال ۱۹۹۰ می توان اشاره کرد [23]. مطالعات تجربی برنس بی و همکاران در سال ۲۰۰۸ در شبیه سازی گسلش نرمال و با استفاده از تکنیک پردازش تصویر در حالت آزاد و با حضور شالوده نشان داد که برای جابه جایی های متفاوت گسلش، در تغییرات کم جابه جایی، گسلش سطحی اتفاق نمی افتد و یا به صورت موضعی رخ می دهد و به سطح زمین نمی رسد، ولی در جابه جایی های زیاد، گسلش سطحی مشاهده می شود، از سویی دیگر حضور شالوده و تغییرات میزان سربار می تواند باعث انحراف مسیر گسلش شود [24]. احمد و برنس بی (۲۰۰۹)، مدل سازی چگونگی انتشار گسلش سطحی در شرایط حضور شالوده و بدون حضور شالوده در گسلش معکوس با استفاده از سانتریفیوژ را انجام دادند، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که محل قرارگیری شالوده نسبت به موقعیت گسلش سطحی می تواند در میزان اعوجاج زاویه ی بسیار مؤثر باشد [25]. فدایی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از یک دیوار بتونیته بین سازه و مسیر گسلش، باعث انحراف مسیر گسلش شدند و زمینه کاهش خطرهای لرزه ای برای محافظت از فونداسیون های سطحی در مقابل گسلش معکوس را به صورت مدل سازی 1g ارائه کردند [13]. از مواد مصنوعی مانند ژئوتکستایل ها، ژئوگرید ها، ژئوسل ها و غیره که دارای مقاومت کششی مناسبی هستند به عنوان تسلیح کننده برای افزایش مقاومت کششی خاک استفاده می شود. این تسلیح کننده ها باعث بهبود ظرفیت باربری، توزیع تنش برشی ناشی از گسلش، انحراف گسلش، کاهش نشست پی های سطحی، یکنواخت نمودن نشست ناشی از گسلش و کاهش اعوجاج زاویه ای می شوند. پژوهش های گذشته

کارایی مؤثر خاک مسلح شده با ژئوسنتتیک برای کاهش نشست کل یا تفاضلی تحت شرایطی مانند خاک اشباع تحت تحکیم، خاک منبسط شونده با تغییر حجم قابل توجه در طول سیکل های تر و خشک شدن، کاهش نشست ها و حفظ پایداری جاده ها را نشان داده است [26-29]. سازوکار اصلی تقویت کننده، اثر کششی ممبرین است که به موجب آن ژئوسنتتیک و خاک روی آن پی انعطاف پذیر ایجاد کرده و با بسیج کردن نیروی کششی آثار نشست زمین را کم می کنند [30-32]. قلندر زاده و آشتیانی (۲۰۱۷) با استفاده از یک سری آزمایشات سانتریفیوژ به بررسی آثار مسلح کننده ها و برخی اقدامات دیگر بر کاهش خطر گسلش معکوس روی شالوده های سطحی پرداختند، این اقدامات شامل حفر ترانشه های عمودی در مجاورت شالوده برای انحراف گسلش و استفاده از ژئوگرید و توسعه گسلش در محدوده وسیع تر است، نتایج بیانگر آن است که روش چند دیواره ای اثر قابل توجهی بر انحراف گسلش داشته است، همچنین لایه های ژئوگرید عملکرد مناسبی در آثار گسلش معکوس و رفتار شالوده های سطحی نداشته اند [33]. مطالعات عددی بری و همکاران در مورد بررسی کاهش خطرات گسلش سطحی در فونداسیون های تقویت شده با ژئوگرید، نشان داده است که خاکریز تقویت شده با ۲ و ۴ لایه ژئوگرید تحت حرکات کوچک گسلش نرمال اعوجاج زاویه ای خاک در سطح زمین را کاهش می دهد [8].

موسوی و جعفری (۲۰۱۲) به انجام مطالعات فیزیکی و عددی برای بررسی تأثیر ژئوسنتتیک بر کاهش جابه جایی تفاضلی ناشی از یک گسل شیب لغز معکوس پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از یک لایه ژئوگرید در فونداسیون خاک می تواند به شکل مؤثری بزرگی اعوجاج زاویه ای در سطح زمین را کاهش دهد [34]. تالی و همکاران ۲۰۱۹ با استفاده از آزمایش مدل سانتریفیوژ به بررسی الگوی انتشار گسیختگی تحت گسل معکوس در خاک یک و دو لایه پرداختند و مشاهده نمودند که نوع خاک و توالی لایه ها بر الگوی انتشار گسیختگی گسل

۷. Geogrid

۸. Geocell

9. Geosynthetic(GRS)

۴. Bray

۵. Bransby

۶. geotextiles

همچنین ناحیه گسیختگی سطحی تأثیر می‌گذارد از سویی دیگر نتایج بیانگر آن بوده که عرض ناحیه تغییر شکل در خاک سخت‌تر نسبت به خاک ضعیف‌تر تمایل به کاهش دارد [35]. با توجه به پژوهش‌های پیشین، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای کاهش خطرات و آسیب‌های ناشی از گسل سطحی یک راهکار بسیار مناسب است و تاکنون بیشتر مطالعات در زمینه بهبود رفتار فونداسیون‌های تقویت‌شده با ژئوسنتتیک‌ها، تحت گسلش معکوس انجام شده است، همچنین با توجه به توصیه پژوهشگران قبل در این زمینه انجام تحقیقات گسترده‌تر امری ضروری به نظر می‌رسد [33]. در این پژوهش در مرحله اول بررسی بهبود رفتار فونداسیون‌های تقویت‌شده با ژئوسنتتیک‌ها در معرض گسلش نرمال، مورد تأکید قرار گرفته است و با استفاده از مدل‌سازی Ig به بررسی آثار تسلیح فونداسیون خاکی با ژئوسل و ژئوگرید و ترکیب آن دو بر پارامترهایی همچون اعوجاج زاویه‌ای، انحراف مسیر گسلش و کاهش نشست تفاضلی تحت گسلش نرمال، پرداخته می‌شود. و در ادامه تأثیر افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده‌ها مورد مطالعه قذاذ گرفته است، قابل ذکر است که تاکنون آزمایشات محدودی در گسلش نرمال صورت گرفته است، از سویی دیگر، جعبه ماسه با ابعاد بزرگتری نسبت به گذشته ساخته شده است که امکان شبیه‌سازی آبرفت‌هایی با ارتفاع بیشتر را دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مدل و دستگاه آزمایش

آزمایش مدل کاهش یافته کوچک مقیاس (مدل Ig) بر روی فونداسیون‌های خاکی مسلح و غیرمسلح با استفاده از جعبه ماسه ۱۰ انجام شد، ابعاد این جعبه به ترتیب طول، عرض و ارتفاع ۱۹۰، ۸۰ و ۶۰ سانتی‌متر است. در بعد طولی دو دیوار شیشه‌ای شفاف ۱۱ برای مشاهده چشمی و تصویربرداری دیجیتالی تغییرشکل‌های خاک نصب شده است، قسمت زیرین جعبه ماسه شامل قسمت متحرک ۱۲ و قسمت ثابت ۱۳ است، گسلش نرمال و معکوس، با

حرکت دادن دیواره متحرک به پایین یا بالا با استفاده از جک هیدرولیک با فشار ۵۰۰ بار تولید شرکت آزمون کارا صنعت، که در زیر قسمت متحرک نصب شده و توان جابه‌جایی نمونه خاک مذکور تا ۶ سانتی‌متر به صورت قائم را دارد، مدل‌سازی می‌شود، میزان جابه‌جایی به وسیله خط کش اهمی ۴۰ سانتی‌متری میله‌ای مرکز ۱۴ که روی جک هیدرولیک نصب شده در هنگام آزمایش ثبت می‌شود. این خط کش (LVDT) با دقت یک میلی‌متر، جابه‌جایی‌ها را توسط یک نمایشگر نشان می‌دهد، چرخش پی به وسیله یک تراز دیجیتال با دقت ۰٫۱ درجه که روی شالوده نصب شده است اندازه‌گیری می‌شود.

در این تحقیق فونداسیون‌های غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید و ژئوسل تحت گسلش نرمال مورد بررسی قرار گرفته است. محل اولیه نوک گسل در بستر جعبه از $X=60\text{cm}$ از مرز چپ است. در این مطالعه زاویه گسلش ۶۰ درجه تنظیم شده است و به منظور بازسازی فونداسیون‌های خاکی ماسه‌ای دستگاه بارش ماسه ساخته شده است. این دستگاه توانایی بازسازی فونداسیون‌های ماسه‌ای با دامنه گسترده‌ای از تراکم نسبی (ماسه شل تا متراکم)، با عرض پرده‌های متغیر (۱ تا ۳ میلی‌متر)، ارتفاع بارش و ضخامت لایه‌های متفاوت و سرعت حرکت متغیر دستگاه بارش را دارد. جعبه دستگاه بارش حدود ۵۰۰ کیلوگرم ماسه گنجایش دارد، پرده بارش به‌اندازه عرض جعبه ماسه یعنی ۸۰ سانتی‌متر است، شکل (۱) تصویر جعبه ماسه و دستگاه بارش ماسه را به صورت واقعی و شماتیک نشان می‌دهد، این دستگاه برای اجرای سیستم بارش متحرک پرده‌ای، برای نمونه‌های بزرگ خاک ساخته شده است.

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه

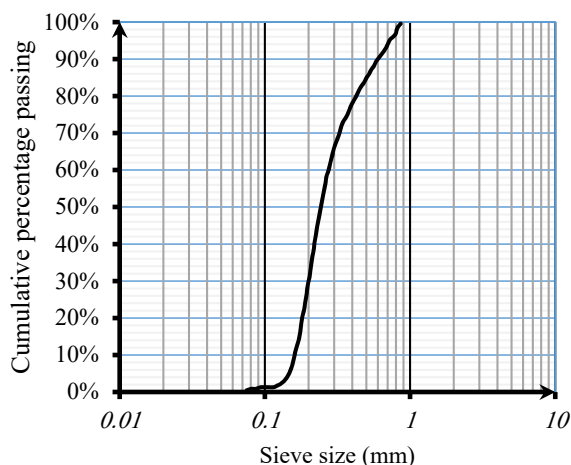


Fig. 2. Grain size distribution curve for sand

جدول ۱. برخی مشخصات ژئوتکنیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

value	symbol	Specifications
-	SP	Soil type
2.61	G_s	Grain density
1.65	γ_{max}	Maximum dry density
1.37	γ_{min}	Minimum dry density
0	C	Cohesion
32°	Φ	internal friction angle

Table 1. Properties of Firuzkuh No.161 Sand

۳-۲- مسلح کننده‌ها

برای تسلیح خاک در مدل‌های آزمایشگاهی از ژئوسل و ژئوگرید به صورت ترکیبی استفاده شده است.

ژئوسل مورد استفاده از نوع سوراخ‌دار و ساخت شرکت انرژی عناصر آینده (ژئوساخت) بوده که مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوسل توسط شرکت سازنده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوسل

Standard	Test result	Description of test	Number
ASTM D45	1.29kN/Strip	tensile strength	1
ASTM D45	138.93%	Percentage of tensile elongation	2
ASTM D45	>1.46kN	Shear resistance	3
ASTM D45	0.72kN	Peel resistance	4

Table 2. Physical and mechanical properties of geocell

آزمایش مقاومت کششی ژئوسل از ۷ نوع ماده که ۵ تای آن از جنس پلاستیک و دو نوع دیگر از جنس کف‌پوش‌های

شکل ۱. جعبه ماسه و دستگاه بارش ماسه

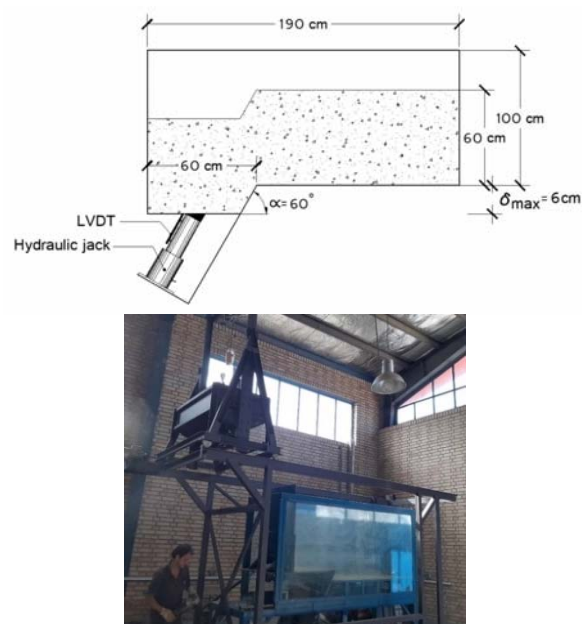


Fig. 1. Sand box and sand rainer

در این پژوهش ابتدا رفتار مکانیکی و اثربخشی مسلح کننده‌ها در فونداسیون‌های مسلح شده با ژئوستتیک‌ها، برای کاهش خطرات گسلش سطحی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در ادامه، مطالعات به صورت پارامتریک همچون تأثیر تعداد لایه‌های تقویت کننده، موقعیت تقویت کننده‌ها و آثار ترکیبی ژئوگرید و ژئوسل در رفتار فونداسیون خاکی در مقابل گسلش سطحی بر اساس نکات مطرح شده در مقدمه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. لایه‌های تقویت کننده در ارتفاع $B/3$ زیر شالوده، با الگو گیری از مطالعات گذشته، قرار گرفته است [4]. در این آزمایش B نشان‌دهنده عرض شالوده است، که در آزمایش‌های این پژوهش ۱۵ سانتی‌متر است و با توجه به اینکه عدد مقیاس ده (N=10) است، فونداسیون‌های نواری با عرض ۱/۵ متر را مدل می‌کند، در صورتی که لایه‌ها بیش از یک لایه باشد، فاصله لایه‌ها از هم $B/3$ در نظر گرفته خواهد شد.

۲-۲- مشخصات خاک

در این پژوهش از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم ۷۰٪ استفاده شده است که منحنی آن در شکل (۲) و برخی ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است.

شکل ۴. نمونه کاهش یافته ژئوگرید مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی

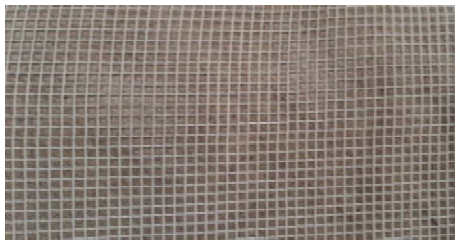


Fig. 4. Sample geogrid used in the laboratory model

جدول ۳. مقادیر فاکتورهای مقیاس بر اساس ناگزیر بودن شبیه‌سازی

Parameters	symbol	Scale Factor	Simulated example	original sample
Geometry	-			
Foundation height	H(m)	1/N	0.6m	6m
Soil	sp			
Specific dry weight of the target	γ_d	1	1.53 gr/cm ³	1.53 gr/cm ³
internal friction angle	ϕ	1	32°	32°
Reinforcement				
Ultimate tensile strength	T_{ult} (kN/m ²)	1/N ²	1.5	150
failure strain	ϵ_f	1	15%	15%

Table 3. Scaling factor values according to the simulation requirements

۳-۲ آماده‌سازی مدل و روش آزمایش

در این مقاله با ایجاد لایه‌های حدود ده سانتی‌متری متوالی خاک روی یکدیگر که در بین آن‌ها برای مشاهده بصری و تحلیل تصویر دیجیتالی از لایه‌های ماسه رنگی برای مدل‌سازی فونداسیون به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از جنس ماسه فیروزکوه و با دانسیته ثابت ۷۰٪ بهره گرفته شده است. همچنین با توجه به اینکه فاکتور مقیاس در این پژوهش ده انتخاب شده است ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری مدل معادل ارتفاع ۶ متر در نمونه اصلی است. در این مدل‌سازی ارتفاع بارش یک متر، عرض پرده بارش ۳ میلی‌متر و سرعت حرکت دستگاه بارش ۰/۳ متر بر ثانیه بوده که همه آن‌ها در طول آزمایش ثابت هستند، پس از اتمام ساخت مدل، جابه‌جایی ناشی از گسلش به وسیله حرکت دیوار متحرک به سمت پایین با سرعت ثابت انجام شده و بیشینه جابه‌جایی عمودی ۶ سانتی‌متر است. بر اساس قوانین شبیه‌سازی جابه‌جایی عمودی تا ۶۰ سانتی‌متر را در نمونه اولیه شبیه‌سازی می‌کند، در

پلاستیکی بودند استفاده شد. آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها توسط دستگاه GEOTECH-AI-3000 و با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. بعد از بررسی نتایج تمامی مواد انتخاب شده نمونه A-۲ که یک نوع کف‌پوش است، به علت نزدیک بودن به یک‌دهم مقاومت کششی ژئوسل اصلی انتخاب شد. نمونه ژئوسل مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳. نمونه ژئوسل مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی



Fig. 3. Sample geocell used in the laboratory model

ژئوگرید مورد استفاده از نوع سوراخ‌دار و ساخت شرکت انرژی عناصر آینده (ژئوساخت) است که در شکل (۴) نشان داده شده است. آزمایش‌های کششی برای ارزیابی خواص مقاومت کششی ژئوگرید انجام شده است. نتایج آزمایش مقاومت نهایی و کرنش شکست برای نمونه مدل به ترتیب $T_{ult}=1.5\text{ kN/m}$ و $\epsilon_f = 15\%$ است. بیشینه زاویه اصطکاک اندرکنش ماسه-ژئوگرید $\delta'=27.4^\circ$ است که به وسیله آزمایش برش مستقیم در تراکم ۷۰٪ مطابق تراکم در آزمایش‌های انجام، و تعیین شده است. ضرایب اندرکنش $E = \tan\delta'/\tan\phi' = 0.83$ محاسبه شد. به منظور برآورده کردن الزامات در شبیه‌سازی مقیاس برای آزمایش مدل 1g بر اساس قوانین مقیاس در مدل آزمایشی، از ژئوگرید با مقاومت کششی کم باید استفاده شود. بنابراین لازم است مقاومت کششی مسلح‌کننده‌ها و سختی آن‌ها نسبت به نمونه اصلی به $1/N^2$ (N=10) کاهش داده شود [36, 37]. جدول (۳) فاکتورهای مقیاس و مقادیر معادل در نمونه اصلی برای هندسه مدل و پارامترهای مسئله در مقاله حاضر و شکل (۴) نمونه ژئوگرید مورد استفاده در آزمایش که یک نوع توری است را نشان می‌دهد.

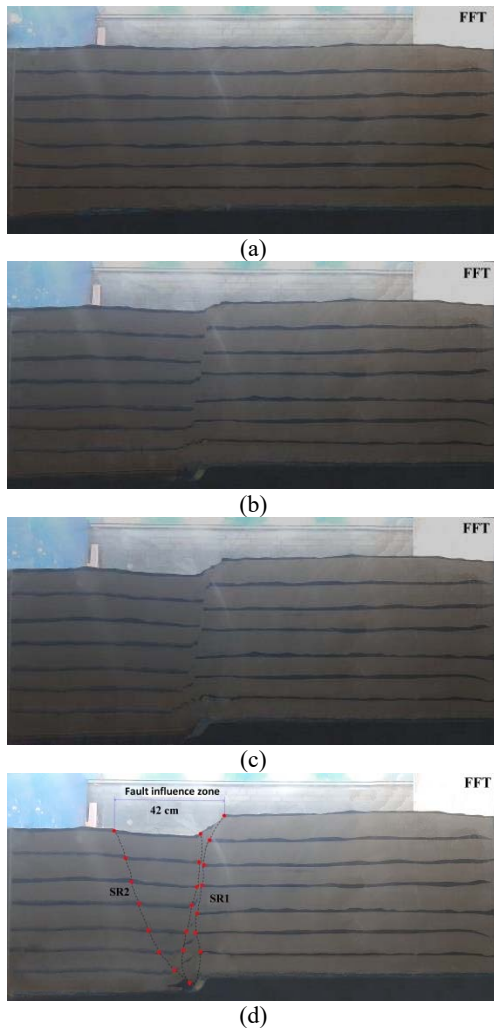
فونداسیون با تعدادی از تصاویر با وضوح بالا در طول آزمایش مشاهده می‌شود، تصاویر دیجیتال متوالی هم برای به دست آوردن نشست‌ها، جابه‌جایی‌ها و چرخش شالوده (اعوجاج زاویه‌ای) استفاده شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج‌ها

۳-۱- آزمایش فونداسیون میدان آزاد

در ابتدا آزمایش فونداسیون میدان آزاد ۱ بدون مسلح کننده، برای بدست آوردن نقطه رخنمون گسلش در سطح زمین انجام شده است، شکل (۶) تصاویر این آزمایش را نشان می‌دهد.

شکل ۶. تصاویر آزمایش فونداسیون میدان آزاد در جابه‌جایی‌های متفاوت: (الف) $s=0\text{cm}$ (ب) $s=2\text{cm}$ (ج) $s=4\text{cm}$ (د) $s=6\text{cm}$ (ه) شماتیک



این آزمایش‌ها از یک دوربین در قسمت جلو جعبه برای تصویربرداری و بررسی مداوم تغییر شکل‌های خاک استفاده شده است، برای تهیه فونداسیون مسلح طبق برنامه آزمایش‌ها، در موقعیت‌های مشخص شده ژئوگرید یا ترکیب ژئوسل-ژئوگرید قرار داده می‌شود. داده‌های تصویری ضبط شده برای بدست آوردن پروفیل نشست زمین، اعوجاج زاویه‌ای، انتشار شکست برشی گسلش در فونداسیون‌های مسلح و غیرمسلح در مقادیر متفاوت جابه‌جایی گسل مورد استفاده قرار می‌گیرد، پس از بدست آوردن پروفیل نشست زمین، اعوجاج زاویه‌ای ناشی از اختلاف نشست به وسیله رابطه (۱) محاسبه خواهد شد. همچنین دو نقطه مبنا روی شالوده به فاصله ۱۰ سانتی‌متر به صورت متقارن مطابق شکل (۵) برای ارزیابی نشست تفاضلی مشخص شده است.

$$\beta_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{l_{ij}} \quad (1)$$

δ_{ij} : اختلاف نشست بین دو نقطه مبنا روی شالوده که در شکل به صورت شماتیک نشان داده شده است.

l_{ij} : فاصله بین نقاط

شکل ۵. شماتیک اختلاف نشست بین دو نقطه مبنا روی شالوده

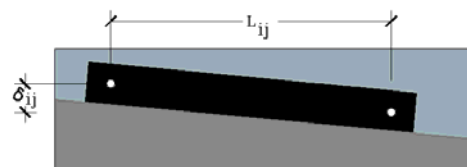


Fig. 5. Schematic of the difference between the two base points on the foundation

بیشینه اعوجاج زاویه $\beta_{\max}$ به عنوان حداکثر β در شیب‌دارترین حالت شالوده است، از آنجا که اعوجاج زاویه به شکل قابل توجهی بر عملکرد و آسیب سازه‌ها اثر می‌گذارد مقدار $\beta_{\max}$ به عنوان یک شاخص کلیدی برای ارزیابی فونداسیون‌های تقویت‌شده است، با جابه‌جایی گسل، شکست برشی از نوک گسل شروع می‌شود و به سمت سطح زمین انتشار می‌یابد و باعث شکست برشی واضح در سطح زمین می‌شود [8]. این جابه‌جایی بیشتر با اعوجاج زاویه قابل توجهی در سطح زمین ظاهر می‌شود، در این مقاله انتشار گسلش در داخل مدل

۲-۳- فونداسیون تقویت نشده با شالوده و بار

شکل (۷) تصاویر فونداسیون تقویت نشده با شالوده و بار معادل را نشان می‌دهد. مرکز شالوده درست در نقطه محل رخنمون سطحی حالت آزاد قرار دارد. مطالعات میدانی نشان داده است که حضور شالوده صلب به خوبی باعث انحراف مسیر گسلش و در نتیجه عدم ایجاد آسیب شدید به سازه شده است، مطالعات تجربی برنس بی و همکاران در سال ۲۰۰۸ بیانگر این است که حضور سربار باعث کاهش اعوجاج زاویه‌ای می‌شود و هر چه میزان سربار افزایش یابد، این درصد کاهش اعوجاج زاویه‌ای بیشتر است [24]. بنابراین حضور شالوده و سربار به‌تنهایی در بهبود رفتار فونداسیون خاکی مؤثر است، شکل (۷) تطابق نتایج بدست آمده با مطالعات مذکور را بیان می‌کند. پارامتر بدون بعد $(q/\rho g B)$ میزان سربار (q) را بیان می‌کند، عدد ۰,۲۵ تا ۰,۴ این پارامتر سربار سبک تا سنگین را تعریف می‌کند [39].

شکل ۷. تصاویر آزمایش فونداسیون تقویت نشده با شالوده و بار در جابه‌جایی‌های متفاوت:

(الف) $s=0\text{cm}$ (ب) $s=1.4\text{cm}$ (ج) $s=3.1\text{cm}$ (د) $s=6\text{cm}$ (ه) شماتیک



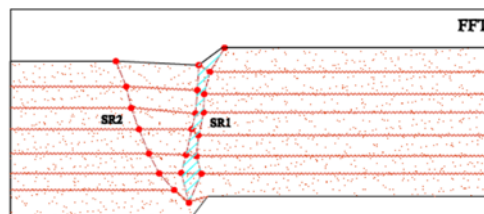
(a)



(b)



(c)



(e)

Fig. 6. Images of free field foundation tests at different displacements:

(a) $s=0\text{cm}$, (b) $s=2\text{cm}$, (c) $s=4\text{cm}$, (d) $s=6\text{cm}$ (e)schematic

اولین شکست برشی از نوک گسل ایجاد شده و در ادامه تغییر شکل سطح زمین با افزایش حرکت گسل ظاهر می‌شود، نتایج نشان داد که محل رخنمون در فاصله $X=65\text{cm}$ از مرز چپ جعبه است. توسعه شکست برشی ناشی از حرکت گسل، به وسیله حرکت نسبی لایه‌های ماسه مشکی رنگ نسبت به یکدیگر به صورت بصری مشاهده می‌شود، گسلش سطحی واضح در سطح زمین با پیشرفت SR1 در یک باند برشی باریک مطابق شکل 6-d رخ می‌دهد، همچنین شکست برشی دوم SR2 در جابه‌جایی $s=4\text{cm}$ شروع می‌شود، با توسعه SR2 یک محدوده اثر مشخص به صورت یک گودال که به دو شکست برشی SR1 و SR2 محدود شده است ایجاد می‌شود. محدوده اثر گسلش در بیشترین جابه‌جایی $s=6\text{cm}$ ، تقریباً 42cm (۷ برابر بیشترین جابه‌جایی) است، همچنین لازم به ذکر است گسلش میدان آزاد با نتایج سانتریفیوژ هماهنگی دارد [7, 14]. و از سویی دیگر مشاهدات میدانی این نتایج را تایید می‌کند [38]. نتایج بیانگر آن است که بیشترین نشست سطحی در محل گودال در بالای نوک گسل رخ می‌دهد، شکل 6-d نشان می‌دهد که با افزایش جابه‌جایی گسلش، باند برشی به صورت باریک تا سطح فونداسیون خاکی (رخنمون سطحی) ایجاد می‌شود، همچنین رخنمون سطحی به صورت تیز است. محل رخنمون گسلش در روی جعبه علامت‌گذاری شد و در آزمایش‌های بعدی که همگی با حضور شالوده‌هاست، وسط شالوده روی محل رخنمون سطحی در حالت میدان آزاد قرار داده می‌شود، شکل 6-e محدوده باند برشی و مسیر گسلش را به صورت شماتیک نشان می‌دهد، که مبنای مقایسه با آزمایش‌های بعدی قرار می‌گیرد.

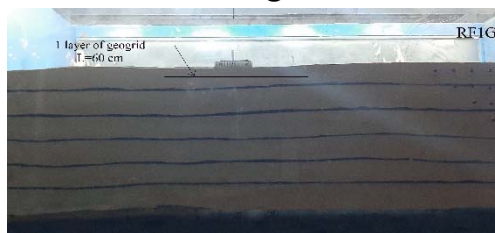
فونداسیون‌های تقویت‌شده با ژئوسل، ژئوگرید و ترکیب این دو است.

۳-۳- فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوگرید

در این آزمایش یک لایه ژئوگرید به عرض ۴ برابر عرض شالوده (4B) در عمق (B/3) زیر شالوده قرار گرفته است [4]. محل قرار گرفتن وسط شالوده روی نقطه رخنمون در حالت میدان آزاد است و بار اعمال شده معادل 0.8kpa مشابه فونداسیون غیرمسلح در نظر گرفته شده است. شکل (۸) تصویر از فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج نمایان است که نشست خاک به ویژه در زیر شالوده و در محدوده ژئوگرید نسبت به حالت غیرمسلح به صورت تقریباً یکنواخت رخ داده است، از سویی دیگر در شکل (۱۳) کاهش اعوجاج زاویه‌ای نمونه مسلح شده نسبت به نمونه غیرمسلح با افزایش جابه‌جایی گسل مشهود است. در این حالت با توجه به اینکه حضور ژئوگرید باعث توزیع گسلش در عرض ژئوگرید در زیر شالوده می‌شود، پس محدوده تأثیر گسلش معادل عرض ژئوگرید است که خود معادل ده برابر بیشینه جابه‌جایی $s=6\text{cm}$ (60cm) است، همچنین حداکثر نشست در انتهای سمت چپ ژئوگرید در محدوده متحرک رخ داده است. نتایج نشان می‌دهد که باند برشی SR1 با افزایش جابه‌جایی از نوک گسل شروع می‌شود و به تدریج به سطح زمین می‌رسد.

شکل ۸. تصاویر آزمایش فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوگرید در جابه‌جایی‌های متفاوت:

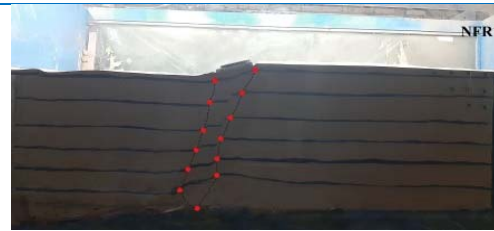
(الف) $s=0\text{cm}$ (ب) $s=1.5\text{cm}$ (ج) $s=3\text{cm}$ (د) $s=6\text{cm}$ (ه) شماتیک



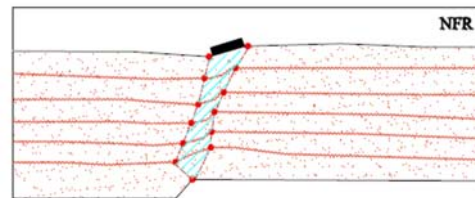
(a)



(b)



(d)



(e)

Fig.7. Images of unreinforced foundation test with structure and overburden pressure at different displacements:

(a) $s=0\text{cm}$, (b) $s=2\text{cm}$, (c) $s=4\text{cm}$, (d) $s=6\text{cm}$, (e)schematic

این پارامتر در این آزمایش و بقیه آزمایش‌ها ۰,۳۵ در نظر گرفته شده است. بر این اساس میزان سربار آزمایش‌ها معادل 0.8kpa لحاظ شده است، با توجه به اینکه فاکتور مقیاس ده است ($N=10$)، سرباری معادل 8kpa در واقعیت را شبیه‌سازی می‌کند. این وزن توسط شالوده و وزنه‌های که به صورت یکنواخت روی شالوده قرار گرفته، تأمین شده است.

نتایج نشان دهنده شروع شکست برشی SR1 با شروع جابه‌جایی (s) است. با توجه به مقایسه نتایج این آزمایش با حالت میدان آزاد، در این حالت نشست یکنواخت‌تر نسبت به حالت میدان آزاد مشاهده می‌شود و همچنین رخنمون گسلش به دلیل وجود شالوده و سربار به صورت تیز نیست از سویی دیگر باند برشی SR1 نیز نسبت به حالت میدان آزاد پهن‌تر است، که این امر نشان‌دهنده اثر شالوده و بار بر افزایش محدوده توزیع تنش و افزایش پهنای باند برشی است. همچنین شکست برشی دوم SR2 رخ نمی‌دهد و بیشترین نشست سطحی در بالای نوک گسلش و انتهای سمت راست شالوده در قسمت متحرک است، به وسیله دو نقطه موجود روی شالوده و همچنین تراز دیجیتالی، میزان اعوجاج زاویه‌ای بیشترین ($\beta_{\max}$) در جابه‌جایی قائم ۶ سانتی‌متر ۰,۳۳ اندازه‌گیری شده است، همچنین نمودار تغییرات کمی اعوجاج زاویه‌ای نسبت به میزان جابه‌جایی قائم در شکل (۱۳) نشان داده شده است که این نمودار مبنای مقایسه

شکست برشی دوم SR2 رخ نمی‌دهد. قلندرزاده و آشتیانی (۲۰۱۷) فونداسیون خاکی مسلح شده با ژئوگرید در معرض گسلش معکوس را مورد آزمایش قرار دادند، به این نتیجه رسیدند که ژئوگرید تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در رفتار بستر مسلح ندارد [33]. این موضوع برخلاف اثر ژئوگرید در فونداسیون خاکی تقویت‌شده با ژئوگرید در معرض گسلش نرمال است، دلیل این تفاوت در این است که در گسلش معکوس ژئوگرید تحت فشار قرار می‌گیرد، عدم مقاومت فشاری ژئوگرید علت عدم تأثیرگذاری ژئوگرید در رفتار بستر مسلح در معرض گسلش معکوس است اما در گسلش نرمال ژئوگرید تحت کشش قرار می‌گیرد و مقاومت کششی مناسب ژئوگرید عامل تأثیری‌گذاری قابل‌ملاحظه در رفتار فونداسیون خاکی تقویت‌شده است. این اثر ژئوگرید باعث می‌شود نشست تفاضلی در طول ژئوگرید (ابتدا، وسط و انتها) توزیع شود به عبارتی محدوده تأثیر گسلش معادل عرض ژئوگرید (۶۰ سانتی‌متر) است که گسترده‌تر از محدوده اثر فونداسیون خاکی غیرمسلح است، که خود عامل توزیع نشست تفاضلی ناشی از گسلش نرمال در یک منطقه وسیع‌تر می‌باشد. گسیختگی سطحی تیز در زمین به دو دلیل، حضور شالوده، سربار و توزیع نشست تفاضلی به دلیل حضور ژئوگرید نسبت به حالت میدان آزاد رخ نداده است. میزان اعوجاج زاویه‌ای حداکثر در جابه‌جایی قائم ۶ سانتی‌متر (β_{max})، ۰٫۱۳، اندازه‌گیری شده است، پس درصد کاهش اعوجاج زاویه‌ای معادل ۶۰٪ رخ می‌دهد. نتایج آزمایش مذکور ضرورت تمهیدات بیشتری برای انحراف گسلش را بیان می‌کند، که در ادامه با انجام آزمایش‌های با دو یا سه لایه ژئوگرید مورد بحث قرار می‌گیرد.

۴-۳- فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوسل:

شکل (۱۰) نشان‌دهنده نتایج آزمایش فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوسل است.

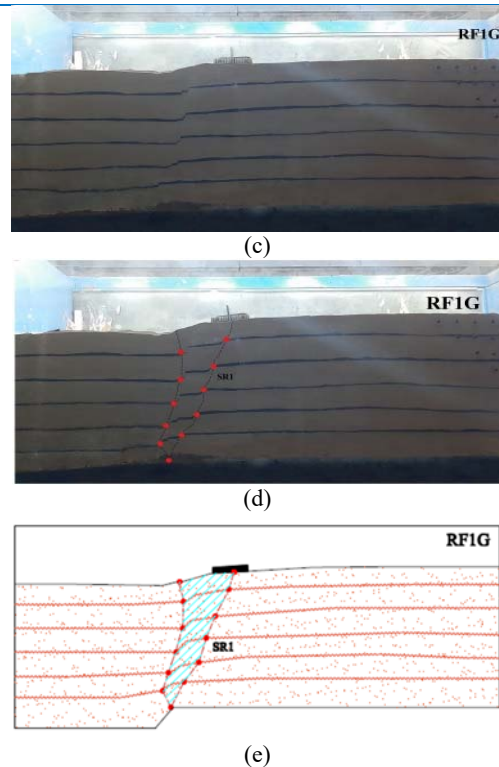


Fig. 8. Images of tests on the foundation reinforced with one layer of geogrid at different displacements: (a)s=0cm, (b)s=2cm, (c)s=4cm, (d)s=6cm, (e)schematic

شکل ۹. فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوگرید



Fig. 9. Foundation reinforced with one layer of geogrid

در این حالت رخنمون سطحی تیز نبوده و باند برشی به‌اندازه عرض شالوده (15cm) به سمت انتهای چپ ژئوگرید منحرف شده است. این موضوع تحت عنوان انحراف گسلش از موقعیت شالوده یا سازه و ایمن‌سازی سازه در مقابل گسلش بسیار با اهمیت است. باند برش SR1 در این آزمایش نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح پهن‌تر بوده و عامل ایجاد نشست یکنواخت‌تر است، بنابراین آثار فوق ناشی از تأثیر ژئوگرید بر بهبود عملکرد فونداسیون است، شکل (۸) بیانگر آن است که سمت راست باند برشی به زیر و وسط شالوده رسیده است که علاوه بر ایجاد اعوجاج زاویه‌ای (بسیار کمتر از حالت فونداسیون غیرمسلح)، باعث ایجاد اختلاف نشست شالوده و ایجاد جدایش شالوده و فونداسیون خاکی در مرکز شالوده شده است، همچنین

میزان اعوجاج زاویه‌ای حداکثر در جابه‌جایی قائم ۶ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است (β_{max}) معادل ۰٫۲۳ است، پس درصد کاهش اعوجاج زاویه‌ای معادل ۳۰٪ نسبت به حالت فونداسیون غیر مسلح رخ می‌دهد. این کاهش به دلیل اندرکنش خاک-ژئوسل است که باعث توزیع گسلش و توسعه باند برشی SR1 در سطح به ویژه بالای مسلح کننده شده است، اما به دلیل سختی کم ژئوسل در مقابل ژئوگرید، مسیر گسلش مطابق مسیر گسلش در حالت میدان آزاد به زیر شالوده می‌رسد، همچنین به خاطر وجود شالوده و اندرکنش خاک ژئوسل رخنمون سطحی به صورت تیز نیست و نشست یکنواخت‌تر نسبت به فونداسیون خاکی غیرمسلح مشاهده می‌شود، در این آزمایش نیز شکست برشی دوم SR2 مشاهده نمی‌شود. در شکل (۱۳) مقایسه نشست تفاضلی نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح به صورت کمی نشان داده شده است و بیشینه نشست در انتهای چپ شالوده به سمت قسمت متحرک رخ می‌دهد.

۵-۳- فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوسل-ژئوگرید

در این آزمایش یک لایه ژئوگرید-ژئوسل در کنار یکدیگر به شکلی که ژئوسل زیر ژئوگرید قرار داده می‌شود، با توجه به اینکه در گسلش نرمال قسمت فوقانی مسلح کننده در کشش و قسمت تحتانی در فشار قرار می‌گیرد، بنابراین پایین بودن ژئوسل می‌تواند تأمین کننده مقاومت فشاری در لایه مرکب مسلح کننده باشد، همچنین لایه ژئوسل-ژئوگرید در عمق $2B/3$ زیر شالوده قرار می‌گیرد. در این حالت شالوده درست در وسط لایه تقویت کننده و وسط شالوده روی نقطه رخنمون سطحی در حالت میدان آزاد است و همچنین بار اعمال شده مشابه فونداسیون غیرمسلح است. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که انحراف مسیر گسلش نسبت به فونداسیون غیرمسلح به سمت چپ مسلح کننده کاملاً مشهود است، البته لازم به ذکر است مسیر گسلش با حالت فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید تقریباً مشابه است. از طرفی دیگر نشست خاک در محدوده زیر شالوده نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح به صورت یکنواخت‌تر رخ داده است، میزان اعوجاج زاویه‌ای حداکثر در جابه‌جایی قائم

شکل ۱۰. تصاویر آزمایش فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوسل در جابه‌جایی‌های متفاوت:

(الف) $s=0\text{cm}$ (ب) $s=1.4\text{cm}$ (ج) $s=3.3\text{cm}$ (د) $s=6\text{cm}$ (ه) شماتیک

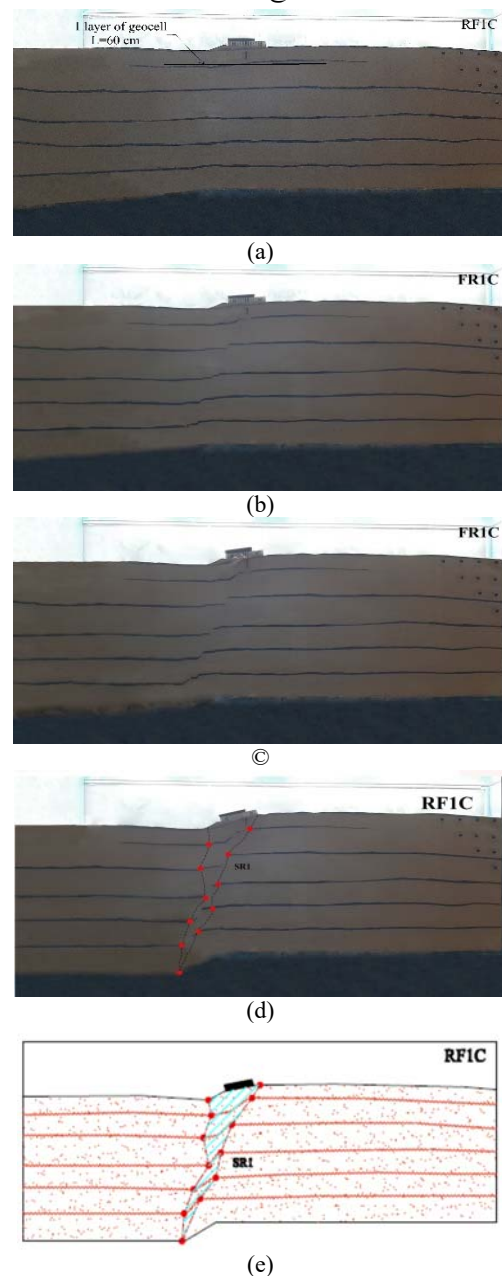


Fig. 10. Images of tests on the foundation reinforced with one layer of geocell at different displacements:

(a) $s=0\text{cm}$, (b) $s=2\text{cm}$, (c) $s=4\text{cm}$, (d) $s=6\text{cm}$, (e)schematic

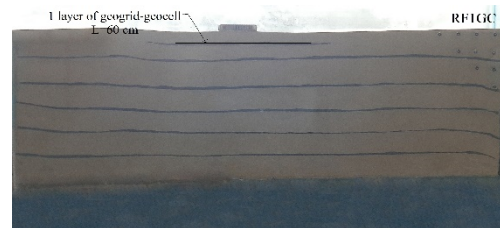
در این آزمایش یک لایه ژئوسل که مطابق مقیاس شبیه‌سازی شده است، به عرض ۴ برابر عرض شالوده ($4B$) در عمق ($B/3$) زیر و وسط شالوده قرار گرفت و محل قرار گرفتن وسط شالوده روی نقطه رخنمون در حالت میدان آزاد است و همچنین بار اعمال شده مشابه فونداسیون غیرمسلح در نظر گرفته شده است.

ژئوگرید و همچنین مقاومت فشاری ژئوسل، باعث صلبیت بیشتر بستر خاکی تقویت‌شده و در انتها انحراف مسیر گسلش به سمت همچنین در مقایسه با فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید کاهش اعوجاج زاویه‌ای معادل ۷۰٪ نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح رخ می‌دهد.

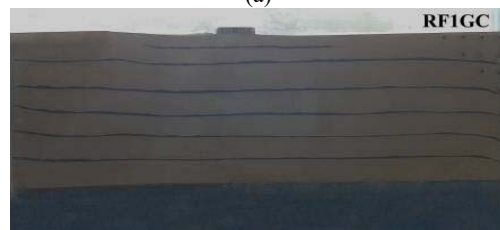
۶ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است ($\beta_{max}=0.1$). پس درصد کاهش اعوجاج زاویه‌ای معادل ۷۰٪ نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح رخ می‌دهد.

شکل ۱۱. تصاویر آزمایش فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوسل-ژئوگرید در جابه‌جایی‌های متفاوت:

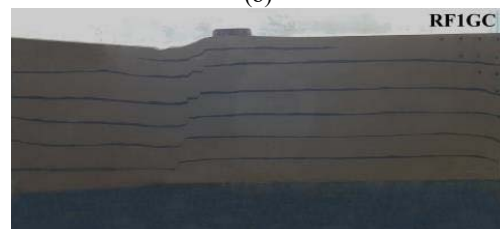
(الف) $s=0\text{cm}$ (ب) $s=2\text{cm}$ (ج) $s=4\text{cm}$ (د) $s=6\text{cm}$ (ه) شماتیک



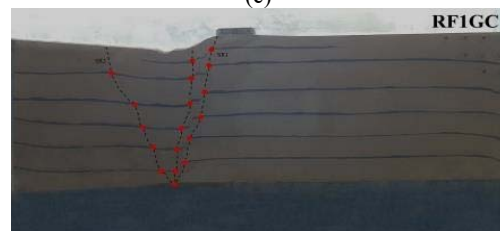
(a)



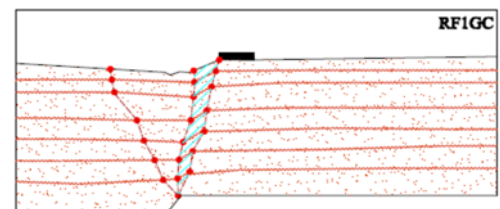
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig.11. Images of tests on the foundation reinforced with one layer of geocell-geogrid at different displacements: (a) $s=0\text{cm}$, (b) $s=2\text{cm}$, (c) $s=4\text{cm}$, (d) $s=6\text{cm}$, (e) schematic

چپ شالوده شده است، که حاصل آن بهبود رفتار فونداسیون خاکی مسلح و افزایش ایمنی سازه است. نشست تفاضلی به سمت چپ لایه ژئوگرید-ژئوسل منتقل شده است. در شکل (۱۳) مقایسه کمی آزمایش‌های مذکور نشان داده شده است، بیشینه نشست در انتهای مسلح کننده در محدوده متحرک رخ داده است، باند برشی به سمت قسمت متحرک نسبت به حالت فونداسیون با یک لایه ژئوگرید منتقل شده است از سویی دیگر در این حالت هر دو مرز باند برشی SR1 در سمت چپ شالوده قرار گرفته و در مقایسه با حالت یک لایه ژئوگرید، مرز سمت راست باند برشی به جای وسط شالوده به گوشه سمت چپ شالوده منتقل شده است و جدایش فونداسیون در وسط شالوده مشاهده نمی‌شود، این جدایش با افزایش جابه‌جایی، در سمت راست شالوده به شکلی که در شکل (۱۲) نشان داده شده است ایجاد می‌شود. در این آزمایش شکست برشی دوم SR2 مشابه حالت میدان آزاد مشاهده می‌شود.

شکل ۱۲. فونداسیون تقویت‌شده با یک لایه ژئوگرید و یک لایه ژئوسل



Fig.12. Reinforced foundation one layer of geocell-geogrid

افزایش سختی بستر خاکی مسلح به دلیل حضور ژئوگرید، افزایش اندرکنش خاک-مسلح کننده ناشی از مجاورت ژئوسل-

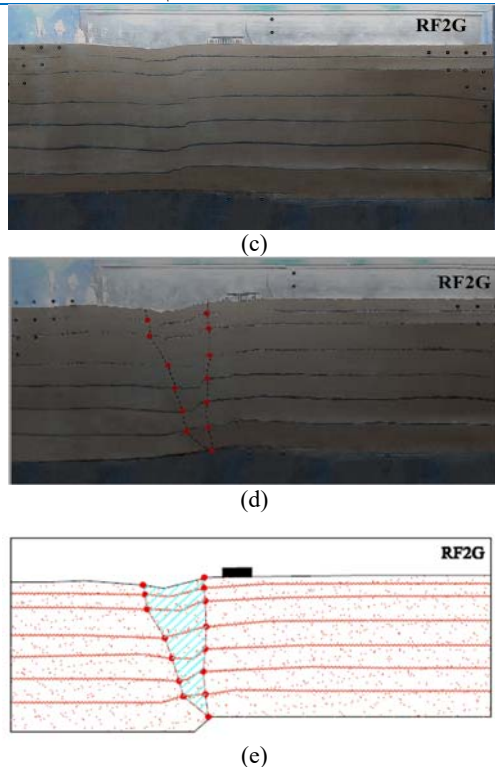


Fig. 14. Images of tests on the foundation reinforced with two layers of geogrid at different displacements: (a)s=0cm (b)s=1.4cm (c)s=2.9cm (d)s=6cm, (e)schematic

بار اعمال شده معادل 0.8kpa مشابه فونداسیون غیر مسلح در نظر گرفته و طبق مقیاس شبیه سازی شده است، با توجه به نتایج مشخص است که نشست خاک نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح به صورت یکنواخت تر است.

مقایسه کمی آزمایش های مذکور در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این حالت بیشترین نشست در سمت چپ در محدوده متحرک رخ داده است که مشابه حالت های متفاوت آزمایش های فونداسیون مسلح شده با ژئوگرید است علت آن به این خاطر است که عرض تمامی تقویت کننده ها 4B است، همچنین محدوده اثر ژئوگرید مطابق اندازه گیری های پس از اتمام آزمایش معادل 4B می باشد، از سویی دیگر عرض باند برشی SR1 نسبت به حالت یک لایه ژئوگرید افزایش یافته است و همچنین مسیر گسلش کاملاً به سمت چپ شالوده منحرف شده است، همچنین شکست برشی دوم SR2 رخ نمی دهد. میزان اعوجاج زاویه ای حداکثر در جابه جایی قائم ۶ سانتی متر اندازه گیری شده است ($\beta_{max}=0.07$). پس درصد کاهش اعوجاج زاویه ای معادل ۸۰٪ نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح رخ می دهد. همچنین

شکل ۱۳. جابه جایی گسل و اعوجاج زاویه ای ماکزیمم فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید و یک لایه ژئوسل و یک لایه ژئوگرید-ژئوسل

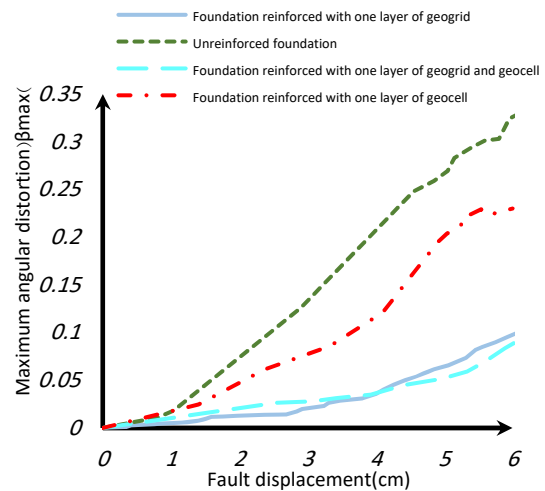


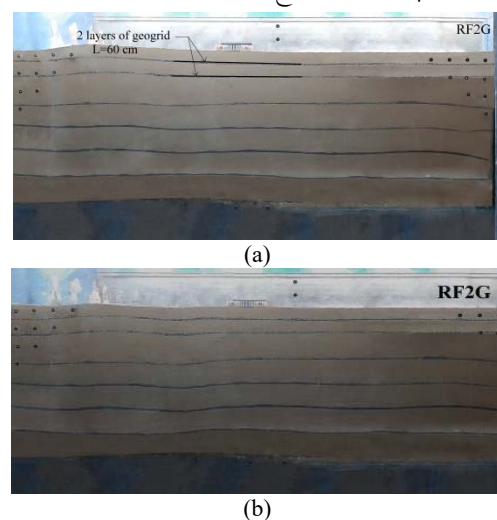
Fig. 13. Fault displacement and maximum angular distortion for foundations reinforced with one layer of geogrid, one layer of geocell, and one layer of geogrid-geocell

۳-۶- فونداسیون تقویت شده با دو لایه ژئوگرید:

شکل (۱۴) تعدادی تصویر از این آزمایش را نشان داده است، در این آزمایش دو لایه ژئوگرید به عرض ۴ برابر عرض شالوده (4B) در عمق (B/3) و (2B/3) زیر شالوده قرار گرفته و مرکز شالوده درست در مرکز ژئوگرید و در نقطه رخنمون گسل در حالت میدان آزاد قرار دارد.

شکل ۱۴. تصاویر آزمایش فونداسیون تقویت شده با دو لایه ژئوگرید در جابه جایی های متفاوت:

(الف) s=0cm (ب) s=1.4cm (ج) s=2.9cm (د) s=6cm (ه) شماتیک



در مقایسه با فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید کاهش اعوجاج زاویه‌ای معادل ۲۰٪ رخ داده است. مقایسه در این حالت مرز راست باند برشی گسلش بر اساس اندازه‌گیری‌های پس از اتمام آزمایش، نسبت به حالت یک لایه ژئوگرید که در وسط شالوده قرار می‌گرفت، تقریباً به اندازه $2B/3$ (۱۰ cm) به قسمت چپ شالوده منتقل شده و انحراف گسلش بیشتری حاصل شده است، این امر سبب شده تا نشست یکنواخت‌تری نسبت به فونداسیون با یک لایه ژئوگرید مشاهده شود. افزایش سختی و اندرکنش ناشی از افزایش لایه‌های ژئوگرید باعث افزایش صلبیت بستر خاکی مسلح و مانع انتشار مسیر گسلش به زیر شالوده شده است، مسیر گسلش چاره‌ای جز انحراف به سمت انتهای لایه‌های ژئوگرید نداشته است، به همین دلیل از شالوده فاصله قابل توجه و اطمینان‌بخش گرفته است، پس تأثیرگذاری افزایش لایه ژئوگرید و کاهش آسیب‌های سازه‌ای به دلیل کاهش اعوجاج زاویه‌ای شالوده، نشست یکنواخت و توزیع باند برشی در محدوده پهن‌تر ناشی از افزایش سختی و اندرکنش خاک-مسلح کننده مشاهده می‌شود، همچنین انحراف گسلش به سمت چپ شالوده، در حدی رخ می‌دهد که شالوده تقریباً بدون نشست و اعوجاج زاویه‌ای در قسمت ثابت فونداسیون به دلیل افزایش صلبیت بستر خاکی ناشی از افزایش لایه‌های ژئوگرید، قرار می‌گیرد و حداکثر نشست خاک به دلیل انحراف گسلش به انتهای سمت چپ ژئوگرید منتقل می‌شود.

۷-۳- فونداسیون تقویت شده با سه لایه ژئوگرید:

در این آزمایش سه لایه ژئوگرید به عرض ۴ برابر عرض شالوده (4B) در عمق $B/3$ ، $2B/3$ و B زیر شالوده قرار گرفته و مرکز شالوده درست در مرکز ژئوگرید و در محل رخنمون سطحی گسل در حالت میدان آزاد قرار دارد. بار اعمال شده در این حالت معادل فونداسیون غیرمسلح در نظر گرفته شده است و طبق مقیاس شبیه‌سازی شده است، نتایج نشان می‌دهد که نشست خاک در مقایسه با آزمایش فونداسیون خاکی مسلح شده با دو لایه ژئوگرید یکنواخت‌تر، اما انحراف گسلش مشابه آزمایش فونداسیون مسلح شده با دو لایه ژئوگرید است، بنابراین تفاوت این آزمایش در مقایسه با فونداسیون مسلح شده با یک و دو لایه‌ای ژئوگرید در این است که در دو حالت مذکور رخنمون

در دو نقطه سمت راست و سمت چپ ژئوگرید رخ داده است، اما در حالت اخیر رخنمون به صورت تجمعی در سمت چپ ژئوگرید است، افزایش سختی و اندرکنش خاک-مسلح کننده به دلیل لایه سوم ژئوگرید باعث صلبیت بیشتر بستر خاکی مسلح نسبت به حالت‌های قبل شده است در نتیجه شالوده کاملاً در قسمت ثابت فونداسیون قرار گرفته و گسلش تقریباً در عملکرد فونداسیون تأثیری نداشته است. میزان اعوجاج زاویه‌ای حداکثر در جابه‌جایی قائم ۶ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است ($\beta_{max}=0.07$). پس درصد کاهش اعوجاج زاویه‌ای معادل ۸۰٪ نسبت به حالت فونداسیون غیرمسلح رخ می‌دهد. مقایسه کاهش اعوجاج زاویه‌ای فونداسیون مسلح شده با یک، دو و سه لایه در شکل (۱۵) نشان داده شده است، همچنین انحراف گسلش به سمت چپ شالوده است به شکلی که شالوده تقریباً بدون نشست و اعوجاج زاویه‌ای در قسمت ثابت فونداسیون قرار می‌گیرد و نشست خاک به دلیل انحراف گسلش به انتهای سمت چپ ژئوگرید منتقل می‌شود. مقایسه نتایج فونداسیون مسلح شده با دو و سه لایه ژئوگرید نشان می‌دهد که افزایش بیش از دو لایه ژئوگرید تأثیر چندانی بر نشست یکنواخت، کاهش و اعوجاج زاویه‌ای و انحراف مسیر گسلش ندارد. جدول (۴) به صورت خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده در این مقاله را نشان می‌دهد، این آزمایش‌ها برای مقایسه عملکرد فونداسیون‌های خاکی در شرایط غیرمسلح و مسلح شده با ژئوگرید و ژئوسل در شرایط گسلش نرمال انجام شده است.

عملکرد فونداسیون مسلح شده در معرض گسلش نرمال در مقایسه با فونداسیون مسلح نشده و تأثیر ژئوگرید، ژئوسل، ژئوسل-ژئوگرید و افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید بر کاهش β_{max} به وسیله رابطه (۲) با عنوان درصد کاهش (R_d %) بیان می‌شود [4].

$$R_d = \frac{\beta_{maxu} - \beta_{maxr}}{\beta_{maxu}} \quad (2)$$

β_{maxu} : بیشترین اعوجاج زاویه‌ای در فونداسیون تقویت نشده

β_{maxr} : بیشترین اعوجاج زاویه‌ای در فونداسیون تقویت شده

کیفی انجام شده است. اعوجاج زاویه‌ای به وسیله یک تراز دیجیتالی که روی شالوده نصب شده در جابه‌جایی‌های متفاوت در هنگام آزمایش ثبت می‌شود. میزان جابه‌جایی متناظر با هر اعوجاج زاویه‌ای به وسیله یک LVDT که روی جک هیدرولیک نصب شده در هنگام آزمایش ثبت می‌شود. در ادامه افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید و اثر آن بر عملکرد فونداسیون تقویت‌شده به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، نتایج زیر ارائه می‌شود:

۱- در حالت فونداسیون میدان آزاد، شکست برشی، به وسیله حرکت گسلش از نوک گسلش شروع شده و شکست برشی واضح در سطح زمین به دلیل پیشرفت گسلش رخ می‌دهد، در ادامه به تدریج شکست برشی ثانویه در قسمت متحرک ایجاد می‌شود و در سطح زمین گودال ایجاد می‌کند، در این حالت منطقه اثر ناشی از گسلش هفت برابر جابه‌جایی حداکثر (42cm) است که پس از آزمایش در نمونه واقعی اندازه‌گیری شده است.

۲- در فونداسیون‌های غیرمسلح، شالوده و سربار موجود باعث کاهش تیزی رخنمون سطحی می‌شود، اما مسیر گسلش همان مسیر فونداسیون میدان آزاد است، در این حالت مرکز شالوده در محل رخنمون سطحی است و مسیر گسلش به مرکز شالوده که در نقطه رخنمون حالت میدان آزاد است می‌رسد، همچنین اثر شالوده و سربار باعث پهن‌تر شدن باند برشی می‌شود و بیشترین اعوجاج زاویه‌ای ($\beta_{max}=0.33$) در بیشترین جابه‌جایی ($s=6cm$) رخ می‌دهد.

۳- در فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید، نشست یکنواخت در جابه‌جایی ناشی از گسلش رخ می‌دهد، در این حالت ژئوگرید تأثیر زیادی در توزیع گسلش، کاهش اعوجاج زاویه‌ای و ایجاد نشست یکنواخت دارد، همچنین نشست در محدوده گسترده‌تری رخ می‌دهد و باعث کاهش ۶۰٪ اعوجاج زاویه‌ای ماکزیمم ($\beta_{max}=0.13$) می‌شود. همچنین به دلیل عدم انحراف کامل گسلش به خارج از محدوده شالوده، جدایش شالوده و فونداسیون در وسط شالوده مشاهده می‌شود.

شکل ۱۵. جابه‌جایی گسل و اعوجاج زاویه‌ای ماکزیمم فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید و دولایه ژئوگرید و سه لایه ژئوگرید

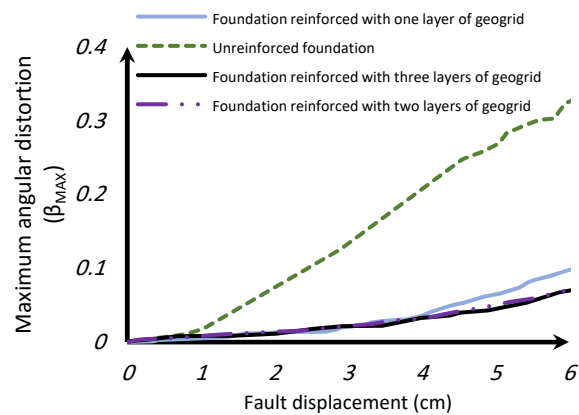


Fig.15. Fault displacement and maximum angular distortion of a foundation reinforced with one layer of geogrid and two layers of geogrid and three layers of geogrid

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های در ماکزیمم جابه‌جایی ($s=6cm$) در مقایسه با فونداسیون غیرمسلح

Number	Type of test	Maximum angular distortion (β_{max})	Maximum angular distortion (Rd(%))
1	Free field foundation	-	-
2	Unreinforced foundation	0.33	-
3	Reinforced Foundation With a layer of geogrid	0.13	60
4	Reinforced Foundation With a geocell layer	0.23	30
5	Reinforced Foundation With a geogrid-geocell layer	0.1	70
6	Reinforced Foundation With two layers of geogrid	0.07	80
7	Reinforced Foundation with three layers of geogrid	0.07	80

Table 4. Test results at maximum displacement ($s=6cm$) compared to the unreinforced foundation

۴- نتایج

یک سری مدل فیزیکی روی فونداسیون غیرمسلح و مسلح در مقابل گسلش نرمال برای ارزیابی عملکرد فونداسیون‌های تقویت‌شده برای کاهش خطر ناشی از گسلش سطحی انجام شده است، تجزیه و تحلیل تصویر دیجیتال برای تعیین پروسه نشست زمین، انتشار گسلش در مقادیر جابه‌جایی‌های مختلف به صورت

- rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), pp.253-275.
- [4] Yang, K.H., Chiang, J., Lai, C.W., Han, J. and Lin, M.L., 2020 Performance of geosynthetic-reinforced soil foundations across a normal fault. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(3), pp.357-373.
- [5] Lin, A., Ren, Z., Jia, D. and Wu, X., 2009 Co-seismic thrusting rupture and slip distribution produced by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, 471(3-4), pp.203-215.
- [6] Yu, G., Xu, X., Klinger, Y., Diao, G., Chen, G., Feng, X., Li, C., Zhu, A., Yuan, R., Guo, T. and Sun, X., 2010 Fault-scarp features and cascading-rupture model for the Mw 7.9 Wenchuan earthquake, eastern Tibetan plateau, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B), pp.2590-2614.
- [7] Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and El Nahas, A., 2007 Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(8), pp.943-958.
- [8] Bray, J.D., 2001, January. Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. In *Workshop on seismic fault-induced failures—possible remedies for damage to urban facilities*. University of Tokyo Press (pp. 55-79).
- [9] Bray, J.D., Ashmawy, A., Mukhopadhyay, G. and Gath, E.M., 1993 Use of geosynthetics to mitigate earthquake fault rupture propagation through compacted fill. In *Proceedings of the Geosynthetics' 93 Conference* (Vol. 1, pp. 379-392).
- [10] Garcia, F.E. and Bray, J.D., 2019a Discrete element analysis of earthquake fault rupture-soil-foundation interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(9), p.04019046.
- [11] Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., Mahdavi, M. and Hedayati, M., 2018 Centrifuge modeling of geotechnical mitigation measures for shallow foundations subjected to reverse faulting. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(8), pp.1130-1143.
- [12] Loli, M., Kourkoulis, R. and Gazetas, G., 2018 Physical and numerical modeling of
- ۴- نتایج مطالعات نشان می‌دهد تاثیر ژئوسل در کاهش اعوجاج زاویه‌ای ماکزیمم ($\beta_{\max}=0.23$) حدود ۳۰٪ است اما در انحراف مسیر گسلش تأثیری ندارد.
- ۵- فونداسیون مسلح شده با یک لایه ترکیبی ژئوسل-ژئوگرید تقریباً مشابه فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید عمل کرده است، و باعث کاهش ۷۰٪ اعوجاج زاویه‌ای ماکزیمم ($\beta_{\max}=0.1$) می‌شود. اما به دلیل افزایش سختی و مقاومت فشاری ژئوسل باند برشی نسبت به حالت فونداسیون مسلح شده با یک لایه ژئوگرید بیشتر به سمت چپ منحرف می‌شود. همچنین مرز سمت راست باند برشی به گوشه سمت چپ شالوده منتقل شده است.
- ۶- نتایج مقاله حاضر با توجه به شکل نشان داده که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید به دو لایه انحراف مسیر گسلش بیشتری رخ می‌دهد و کاهش اعوجاج زاویه‌ای و باعث کاهش ۸۰٪ اعوجاج زاویه‌ای ماکزیمم ($\beta_{\max}=0.07$) می‌شود.
- نتایج فوق نشان می‌دهد افزایش سختی و اندرکنش خاک-مسلح کننده بستر تقویت شده به وسیله ژئوگرید و ژئوسل باعث کاهش نشست تفاضلی، کاهش اعوجاج زاویه‌ای، انحراف مسیر گسلش و توسعه باند برشی می‌شود، افزایش تعداد لایه‌ها تا دو لایه باعث بهبود رفتار بستر خاکی مسلح می‌شود، همچنین افزایش بیشتر از دو لایه تأثیر چندانی بر بهبود عملکرد فونداسیون مسلح شده ندارد، افزایش سختی ناشی از ژئوگرید عامل اصلی انحراف مسیر گسلش است. ژئوسل به عنوان یک مسلح کننده نرم باعث انعطاف پذیری بستر مسلح شده می‌شود، در نتیجه باند برشی پهن تر شده و عامل کاهش اعوجاج زاویه‌ای و توزیع گسلش می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Mosavi, S., Jafari, M., 2014 Physical modeling to reduce the risk of surface fault using geogrid, 8th National Congress of Civil Engineering-Babol (In Persian)
- [2] Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Callerio, A. and Gazetas, G., 2008 Case histories of fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), pp.557-583.
- [3] Anastasopoulos, I. and Gazetas, G., 2007a Foundation-structure systems over a

- [22] Paolucci, R. and Yilmaz, M.T., 2008 Simplified theoretical approaches to earthquake fault rupture-shallow foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), pp.629-644.
- [23] Bray, J.D., 1990 *The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments* (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).
- [24] Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A. and Nagaoka, S., 2008 Centrifuge modelling of reverse fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), pp.607-628.
- [25] Ahmed, W. and Bransby, M.F., 2009 Interaction of shallow foundations with reverse faults. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(7), pp.914-924.
- [26] Ardah, A., Abu-Farsakh, M.Y. and Voyiadjis, G.Z., 2018 Numerical evaluation of the effect of differential settlement on the performance of GRS-IBS. *Geosynthetics International*, 25(4), pp.427-441.
- [27] Sadat, M.R., Huang, J., Bin-Shafique, S. and Rezaeimalek, S., 2018 Study of the behavior of mechanically stabilized earth (MSE) walls subjected to differential settlements. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(1), pp.77-90.
- [28] Huang, C.C., 2017 Failure mechanisms of steep-faced geosynthetic-reinforced retaining walls subjected to toe scouring. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(8), pp.1099-1110.
- [29] Talebi, M., Meehan, C.L. and Leshchinsky, D., 2017 Applied bearing pressure beneath a reinforced soil foundation used in a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6), pp.580-591.
- [30] King, L., Bouazza, A., Gaudin, C., O'Loughlin, C.D. and Bui, H.H., 2019 Behavior of geosynthetic-reinforced piled embankments with defective piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11), p.04019090.
- [31] Holz, R.D., Christopher, B.R. and Berg, R.R., 1998 *Geosynthetic design and construction guidelines* (No. FHWA HI-95-038).
- [32] Giroud, J.P., Bonaparte, R., Beech, J.F. and Gross, B.A., 1990 Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids. hybrid foundations to mitigate seismic fault rupture effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11), p.04018083.
- [13] Fadaee, M., Ezzatyazdi, P., Anastasopoulos, I. and Gazetas, G., 2016 Mitigation of reverse faulting deformation using a soil bentonite wall: Dimensional analysis, parametric study, design implications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, pp.248-261.
- [14] Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C. and El Nahas, A., 2009 Normal fault rupture interaction with strip foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), pp.359-370.
- [15] Anastasopoulos, I. and Gazetas, G., 2007b Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), pp.277-301.
- [16] Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian M., and Shafiee, A. 2010 Experimental Investigation of Reverse Fault Rupture-Rigid Shallow Foundation Interaction, *International Journal of Civil Engineering*, 8(2), 85-98.
- [17] ULUSAY, R., AYDAN, Ö. and HAMADA, M., 2002 The behaviour of structures built on active fault zones: examples from the recent earthquakes of Turkey. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 19(2), pp.149s-167s.
- [18] Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A. and Nagaoka, S., 2008 Centrifuge modelling of reverse fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), pp.607-628.
- [19] Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and Nahas, A.E., 2008 Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(4), pp.585-605.
- [20] Lin, M.L., Chung, C.F., Jeng, F.S. and Yao, T.C., 2007 The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering Geology*, 92(3-4), pp.110-132.
- [21] Anastasopoulos, I., Antonakos, G. and Gazetas, G., 2010 Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), pp.912-924.

- stratified soil. *Engineering Geology*, 249, pp.273-289.
- [36] Viswanadham, B.V.S. and König, D., 2004 Studies on scaling and instrumentation of a geogrid. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(5), pp.307-328.
- [37] Wood, D.M., 2017 *Geotechnical modelling*. CRC press.
- [38] Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S. and Seed, H.B., 1994 Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(3), pp.543-561.
- [39] Anastasopoulos, I., Antonakos, G. and Gazetas, G., 2010. Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), pp.912-924.
- Geotextiles and Geomembranes*, 9(1), pp.11-50.
- [33] GHALANDARZADEH, A. and ASHTIANI, M., 2017 Geotechnical mitigation measures for interaction of reverse faulting and shallow foundations: centrifuge modeling. In *The 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- [34] Moosavi, S.M. and Jafari, M.K., 2012 Investigation of the surface fault rupture hazard mitigation by geosynthetics. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal*.
- [35] Tali, N., Lashkaripour, G.R., Moghadas, N.H. and Ghalandarzadeh, A., 2019. Centrifuge modeling of reverse fault rupture propagation through single-layered and

Examining the Performance of Geogrid- and Geocell-Reinforced Foundations Subjected to Normal Faulting

Nabiollah Ahmadi¹, Meysam Fadaee^{*2}

1. Ph.D. Student in Geotechnics, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University
2. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Science & Research Branch, Islamic Azad University

Abstract

Surface faulting is hazardous for buildings and transportation systems constructed adjacent to or over the active faults, causing irreparable damages. These structures must be designed by taking into account the negative effects of surface faulting. With increasing population growth and the need to expand cities, especially in areas facing economic constraints or land shortages in large cities, the feasibility of constructing in active fault zones has increasingly concerned the attention of the Civil Engineers. Therefore, geotechnical measures, particularly laying reinforced soil foundations, contribute significantly to the reduction of undesirable effects of surface faulting. This research conducted a series of tests on foundations reinforced with geogrid, geocell, and a combination of both, subject to normal faulting, to reduce surface faulting hazards. The research simulated the behavior of a 1.5-m wide strip foundation, placed over 6-m thick alluvium, subjected to a displacement of 60 cm. Seven tests were conducted by different types and numbers of reinforcement, which were scaled to 10. Image analysis was applied to examine the ground settlement profile, angular distortion, and fault propagation path. The results indicated that reinforcements used in the reinforced soil foundation could effectively reduce angular distortion, cause uniform settlement, and divert the fault propagation path to protect the structure against faulting. Moreover, angular distortion was reduced by 60, 30, 70, 80, and 80%, respectively in foundations reinforced with one layer of geogrid, one layer of geocell, a combination of one layer of geogrid and one layer of geocell, two layers of geogrid, and three layers of geogrid. The results also revealed that adding more than three layers of geogrid did not affect angular distortion reduction. Increased stiffness and interaction due to the increase of geogrid layers have increased the rigidity of the reinforced soil bed and prevented the propagation of the fault path below the foundation. The fault path deviates to the end of the geogrid layers, so it has a considerable and reliable distance from the foundation. Therefore, the effect of increasing the geogrid layer and reducing the structural damage due to reducing the angular distortion of the foundation, uniform subsidence, and shear bond distribution in a wider range due to increased stiffness and soil-reinforcement interaction is observed. Meanwhile, the deflection of the fault to the left of the foundation occurs to the extent that the foundation is almost without settlement and angular distortion in the fixed part of the foundation due to the increase in soil stiffness due to the increase of geogrid layers, and maximum soil settlement is transferred to the left end of the geogrid due to fault deflection. According to the results, increasing more than two layers of geogrid does not affect reducing angular distortion. The effect of the geocell layer on improving the behavior of soil foundation subject to normal faulting is to reduce 30% angular distortion, which is less effective than other reinforcements. In addition, the geocell layer has a negligible effect on the deviation of the fault path compared to the other reinforcements used in this study.

Keywords: Geogrid, Geocell, Reinforced Foundation, Angular Distortion, Normal Faulting