
	فصلنامه علمی ((دفاع هوفضایی))	
دوره ۲، شماره ۱، خرداد ۱۴۰۲		
مقاله پژوهشی		

مطالعه آزمایشگاهی و عددی مقاوم‌سازی بستر خاکی در مقابل انفجار با استفاده از لایه‌های ژئوگرید برای مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی بر مبنای اصول پدافند

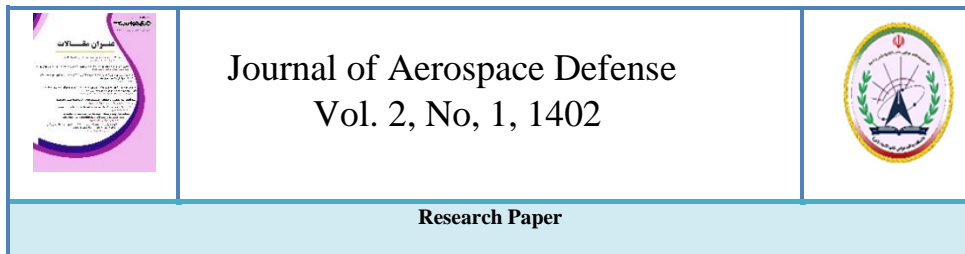
غیرعامل

حسن صالحی^۱

۱- مدیر گروه مواد و پدافند غیرعامل، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مطالعه، عملکرد لایه‌های مختلف ژئوگرید در مقاوم‌سازی خاک‌هایی با مدول الاستیسیته و زاویه‌های اصطکاکی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ضمن انجام مطالعه آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس در دو حالت استاتیکی و انفجاری روی بستر غیرمسلح و مسلح به ژئوگرید انجام شد. نتایج مطالعات انجام شده بر روی خاک‌هایی با مشخصات متفاوت نشان می‌دهد که در درصد تراکم ثابت، با کاهش چسبندگی خاک عملکرد ژئوگرید بهبود می‌یابد. برای بستر خاکی با مدول الاستیسیته‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ مگا پاسکال، در حالت بارگذاری استاتیکی تأثیر لایه‌های ژئوگرید در بهبود میزان نشست پی به ترتیب حدود ۷۵٪، ۶۵٪ و ۵۴٪ است. در بارگذاری انفجاری نیز عملکرد لایه‌های تسلیح نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته و میزان بهبود نشست پی به ترتیب به حدود ۷۹٪، ۷۲٪ و ۵۴٪ می‌رسد. همچنین در خاک‌هایی با مدول الاستیسیته یکسان، با افزایش ضریب اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست آن کاهش می‌یابد.</p>	پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶
	دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۳
	کلمات کلیدی:
	بارگذاری انفجار، نشست، تسلیح خاک، ژئوگرید، روش اجزای محدود
	نویسنده مسئول:
	حسن صالحی
	ایمیل:
	hsalehi1362@yahoo.com

استناد به مقاله: حسن صالحی. مطالعه آزمایشگاهی و عددی مقاوم‌سازی بستر خاکی در مقابل انفجار با استفاده از لایه‌های ژئوگرید. مجله علمی پژوهشی دفاع هوفضایی دوره ۲، شماره ۱، خرداد ۱۴۰۲.



Laboratory and numerical study of strengthening soil bed against explosion using geogrid layers to strengthen underground structures based on the principles of passive defense

Hasan Salehi ¹

1- Assistant Professor of Department of Mechanical Engineering, Khatam Ol Anbia

Article Information	Abstract
<p>Accepted: 1402-02-16</p>	<p>In this paper, the efficiency of the bedrock grain's characteristics on the performance of its layers was investigated. For this purpose, experimental and numerical studies were performed using ABAQUS software in both static and dynamic conditions. The performances of the geogrid layers in various types of soils by different values of elastic modulus and frictional angles were investigated. It was observed that increasing soil adhesion at a constant concentration, enhanced loading capacity, and reduced the reinforcing efficiency. Study on different soil types by various specifications showed that for soil substrates by values of elastic modulus of 10, 50 and 100 MPa, the effects of the layers of the reinforcement on improving the Settlement were about 75%, 65% and 54%, respectively. In dynamic loading mode, the performance of the reinforcement layers increased compared to static loading, and the improvements of the Settlement were 79%, 72% and 54%, respectively.</p>
<p>Received: 1401-07-03</p>	
<p>Keywords: BlastLoading,Soil Settlement,Soil Reinforcement, Geogrid,Finite Element Method.</p>	
<p>Corresponding author:</p>	
<p>Hasan Salehi Email: hsalehi1362@yahoo.com</p>	
<p>HOW TO CITE: Hasan Salehi.Experimental and Numerical studies of Reinforcing Soil Substrate Against Explosion Loads Using Geogrid Layered. Journal of Aerospace Defense, Vol. 2, No, 1, 1402.</p>	

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر زندگی انسان‌ها در نقاط مختلف جهان به دلیل وجود تهدید جنگ و به‌خصوص شیوع حملات تروریستی، بیش از گذشته تهدید می‌شود که لزوم ایمن‌سازی سازه‌های مختلف در مقابل این تهدیدها را نمایان می‌سازد. به همین دلیل تحلیل و طراحی سازه‌های مختلف عمرانی تحت بار انفجار به‌خصوص برای سازه‌های استراتژیک نظیر فرودگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، بنادر، مراکز عمده فرماندهی و تصمیم‌گیری، مراکز اصلی مخابراتی و ارتباطی، پل‌های استراتژیک، سایت‌های موشکی و غیره دیگر نه یک امر محافظه کارانه هزینه‌بر که یک اصل و ضرورت اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید. بهبود مقاومت و باربری خاک تحت اثر انواع بارهای وارده، همواره به‌عنوان یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک مطرح بوده است. زیرا خاک عضو باربر غالب پروژه‌های عمرانی بوده و در بسیاری از مواقع احداث یک سازه به دلیل باربری کم خاک بستر یا نشست زیاد آن، غیر ممکن خواهد بود. از سوی دیگر از دیدگاه پدافند غیرعامل، درک رفتار خاک تحت بار انفجار برای مهندسان ژئوتکنیک، معدن و طراحان سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

صالحی و همکاران [۱] نفوذ بمب‌های سنگرشکن را در سازه‌های زیر زمینی بررسی کرده و برای محیط‌های بتنی و خاکی مقادیر نفوذ این تسلیحات را برآورد نمودند. آنها هم‌چنین ثابت نمودند که با مسلح کردن خاک با لایه‌های بتنی، نفوذ این سلاح تا حدود ۵۰ درصد نسبت به حالت غیرمسلح، کاهش می‌یابد. از دیگر مطالعات صورت گرفته توسط صالحی و همکاران [۲] که در راستای بررسی سازه‌ها در مقابل بار انفجار است می‌توان به مقاله تعیین شکل بهینه آشیانه هواپیما برای مقابله با بار انفجار اشاره نمود. در مطالعه‌ای دیگر برای کاهش تأثیر انفجار بر خاک، از ستون‌های سنگریزه‌ای کوبشی و غیرکوبشی استفاده شد [۳]. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش قطر ستون سنگریزه‌ای کوبشی و طول ستون سنگریزه‌ای غیرکوبشی کارایی بهتری در بهبود ظرفیت باربری و نشست شالوده دارند به‌طوری‌که با ستون سنگریزه‌ای غیر کوبشی می‌توان تا ۴۲ درصد نشست پی را کاهش داد.

۲. پیشینه تحقیق

در دهه‌های اخیر، در میان شیوه‌های مختلف تثبیت و بهسازی خاک، استفاده از مواد مصنوعی با دوام و قابل اطمینان به‌عنوان راه‌حلی اساسی جهت بهبود باربری خاک و پی مطرح شده است. به‌تدریج با گسترش صنعت پلیمر و با پذیرش نقش کاربردی این قبیل تولیدات، طرح و ساخت این مصنوعات نظیر ژئوسنتتیک‌ها جهت استفاده در پی‌سازی، محوطه‌سازی و نیز در پروژه‌های راه‌سازی توسعه یافته است [۴]. مهم‌ترین عضو خانواده ژئوسنتتیک‌ها، ژئوسل، ژئوگرید و ژئوتکتایل‌ها هستند که با ارتقا کیفیت خاک، در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی و مکانیک خاک نقش مؤثری ایفا می‌کنند [۴]. ژئوگریدها به‌عنوان یکی از انواع ژئوسنتتیک‌ها، جهت تسلیح خاک‌های سست استفاده می‌شوند. مطالعات

دینامیکی صورت گرفته در زمینه خاک مسلح به ژئوگرید بسیار محدود است که از آن جمله می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی داس و همکارانش [۵] اشاره نمود. آن‌ها رفتار خاک مسلح شده با ژئوگرید بر روی پی نواری را تحت بار سیکلی بررسی کرده و نتیجه گرفتند که وجود ژئوگرید حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد نشست دائمی خاک را کاهش می‌دهد. عسکری و همکاران [۶] نیز به مطالعه رفتار خاک مسلح به ژئوگرید تحت اثر بار سیکلی وارد به شالوده سطحی پرداخته و نتیجه گرفتند که حداکثر ظرفیت باربری زمانی به دست می‌آید که عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید نسبت به عرض پی کمتر از ۰/۳۵ باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که در خاک‌های مسلح شده با ژئوگرید، تحت تنش محوری ثابت، با تغییر جهت برش، مقاومت برشی مقطع نیز تغییر می‌کند [۷]. این تغییرات در حالت مسلح نمودن دو محوری خاک با ژئوگرید بسیار محسوس‌تر از حالت سه محوری است. البته در این میان اندازه ذرات خاک نیز از عوامل بسیار تأثیرگذار بر مقاومت برشی خاک مسلح شده با ژئوگرید عنوان می‌گردد [۷].

شین و همکاران [۸] برای تخمین مدول برشی خاک، به انجام آزمایش‌های بارگذاری سیکلی بر روی خاک‌های دانه‌ای و لایه‌ای مسلح به ژئوگرید پرداختند. نتایج نشان دهنده افزایش مدول برشی به دلیل وجود لایه‌های ژئوگرید بود که این افزایش ناشی از سختی ژئوگرید، فاصله بین لایه‌ها و همچنین عرض لایه‌ها نسبت به عرض صفحه بارگذاری بود. نوری و هاشمی [۹] پایداری دیوارهای مسلح ژئوگریدی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی را بررسی کرده و سپس تغییر شکل افقی، قائم و میزان کرنش پلاستیک دیوار خاک مسلح پس از انفجار را در حالت بدون شاتکریت و با شاتکریت به کمک نرم‌افزار آباکوس ۱ بررسی نمودند. طبق نتایج بررسی آن‌ها، تغییر مکان حداکثر افقی و قائم و نیز کرنش پلاستیک سطح دیوار در حالت با شاتکریت نسبت به حالت بدون شاتکریت کاهش قابل توجهی داشت.

چیو و همکاران [۱۰] دیوارهای خاکی مسلح به ژئوسنتتیک را تحت مجموعه‌ای از انفجارات قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که دیوارهای مسلح مانع انتشار فشار ناشی از امواج انفجار شده و با جذب انرژی به هنگام تغییر شکل، میزان تخریب را کاهش می‌دهند. همچنین آن‌ها دریافتند که دیوارهای خاکی مسلح به ژئوسنتتیک نه تنها ترکش‌های ناشی از انفجارات سلاح را در خود نگه می‌دارند بلکه همانند دیوارهای بتنی در مقابل ترک خوردگی از خود مقاومت نشان می‌دهند. در همین راستا، حضوری [۱۱] به ارزیابی پاسخ خاک‌ریز مسلح (به پانل‌های بتنی) در مقابل فشارهای ناشی از انفجارهای مدفون پرداخته و با انجام آزمایش‌هایی در مقیاس واقعی، پاسخ دیوارها به فشارهای حاصل از انفجار را بررسی نمود. نتایج نشان داد که بارگذاری غالب در حین انفجار، تنش‌های پسماندی هستند که در پروسه تشکیل گودال انفجار در خاک ایجاد می‌شود.

۳. روش تحقیق و روش محاسبات

۳-۱. ضرورت و روش انجام تحقیق

بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که رفتار خاک متأثر از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ذرات تشکیل دهنده آن بوده و با توجه به تفاوت در ویژگی‌های این ذرات، باربری و رفتار آن دچار تغییر می‌گردد. مطالعاتی که تاکنون انجام شده غالباً در یک نوع خاک انجام گرفته و به بررسی تأثیر شرایط مختلف ژئوگرید مورد استفاده از قبیل طول و عرض، عمق قرارگیری، سختی مسلح کننده‌ها و سایر موارد پرداخته‌اند. در موارد متعددی از این مطالعات، حتی مشخصات خاک مربوطه نیز گزارش نشده است. از طرفی بررسی عملکرد لایه‌های ژئوگرید در بسترهای خاکی مختلف که هر یک مشخصات فیزیکی و مکانیکی متفاوتی دارند، در مطالعات پیشین بررسی نشده است. لذا علیرغم ارزشمند بودن این تحقیقات، به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی متفاوت انواع بسترهای خاکی نمی‌توان نتایج حاصل از آن‌ها را معیاری برای عملکرد ژئوگریدها در همه‌ی خاک‌ها دانست. بنابراین در این مطالعه رفتار خاک‌های مختلف، تحت شرایط بارگذاری استاتیکی و انفجاری در حالت خاک مسلح و غیرمسلح با ژئوگرید مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله به منظور شناخت بهتر عملکرد لایه‌های ژئوگرید در بهبود باربری انواع مختلف خاک بستر، تأثیر عواملی همچون تغییرات چسبندگی، مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی ذرات خاک با بهره‌گیری از نرم‌افزار آباکوس در حالت بارگذاری دینامیکی و استاتیکی بررسی شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی سه نوع خاک با چسبندگی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. بعد از انجام مطالعه میدانی، بر اساس آن‌ها صحت‌سنجی نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. سپس نه نوع خاک با مدول الاستیسیته و زوایای اصطکاک داخلی مختلف مدنظر قرار گرفته و مدل‌سازی‌های مربوطه با استفاده از آن‌ها انجام و مقایسه نتایج صورت پذیرفت. از طرف دیگر، این مطالعه بر گسترش دانش جامعه علمی در زمینه افزایش مقاومت بستر خاکی در مقابل انفجار با استفاده از لایه‌های ژئوگرید تأکید دارد، بنابراین می‌توان آن را یک تحقیق بنیادی دانست. اما از آنجایی که از نتایج این مطالعه می‌توان برای یافتن راه‌حلی برای رفع مشکلات حاضر استفاده نمود قابلیت کاربردی شدن را نیز دارا است.

۳-۲. فشار انفجار

با توجه به این‌که در بین انواع انفجارها، انفجار سطحی بیشترین احتمال وقوع را داشته و نیروی انفجاری آن نیز بیشتر است [۱۲]، از مفروضات این نوع انفجار جهت تحلیل استفاده شده است. به‌منظور مدل‌سازی دقیق و درست انفجار TNT از معادله حالت JWL در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. این معادله حالت، رابطه‌ای بین فشار ماده منفجره و چگالی آن در هر لحظه برقرار می‌کند که پارامترهای آن از آزمایش به دست می‌آید. فرم عمومی این معادله به‌صورت رابطه (۱) است.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \cdot e^{\left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right)} + B \left(1 - \frac{\rho}{R_2 \rho_0} \right) \cdot e^{\left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right)} + \frac{\omega \rho^2}{\rho_0} E_{m0} \quad (1)$$

که در آن A، B، R1 و R2 ثابت‌های معادله، Em0 معادله ویژه اولیه، ρ_0 چگالی اولیه ماده منفجره و

ρ چگالی محصولات حاصل از فرآیند انفجار هستند. لازم به ذکر است که مقدار چگالی اولیه و چگالی محصولات حاصل از انفجار در لحظه اول انفجار با هم برابر است. زمان انفجار برابر ۱۵ میلی‌ثانیه محاسبه شده است. وزن ماده انفجاری TNT برابر ۶۲ کیلوگرم و محل در فاصله ۵ متری از پی در نظر گرفته شده است [۱۳]. سایر مشخصات مربوط به ماده منفجره استاندارد در جدول (۱) بیان شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مدل انفجار

پارامتر	مقدار
ماده انفجاری	TNT
تراکم انرژی انفجار	۳۶۸۰
چگالی (kg/m ³)	۱۶۳۰
سرعت موج انفجار (m/s)	۶۹۳۰
A (MPa)	۳۷۳۸۰۰
B (MPa)	۳۷۴۷
W	۰/۳۵
R ₁	۴/۱۵
R ₂	۰/۹

در پدیده انفجار، امواجی در محیط خاک تولید می‌شود که به صورت کروی انتشار می‌یابند. در صورتی که سازه‌ای در خاک مدفون نباشد، فشار حاصل از این امواج را فشار میدان آزاد می‌نامند. زمانی که موج به یک سازه برخورد کند، تغییراتی در مقدار آن اتفاق می‌افتد. دستورالعمل طراحی ایمن بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی، رابطه تجربی زیر را برای توزیع فشار میدان آزاد بر حسب فاصله و زمان ارائه می‌دهد [۱۴].

$$P = P_a e^{-\frac{t}{t_a}} = f \beta \rho c \left(\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n} e^{-\frac{t}{t_a}} \quad (2)$$

که در آن P فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در طول زمان، f ضریب هم‌بستگی انرژی انفجار ۱، ۰/۴۷ $\beta = \rho$ وزن واحد حجم خاک بر حسب lb/ft^3 ، c سرعت موج در خاک بر حسب fps، R_i فاصله از نقطه انفجار بر حسب فوت و W وزن معادل TNT بر حسب پوند، n ضریب کاهش دامنه (برابر ۲/۷۵)، t زمان (که از لحظه رسیدن موج محاسبه می‌شود) و $t_a = \frac{R}{c}$ مدت زمان رسیدن موج است که در آن c سرعت انتشار موج است.

۴. مشخصات مصالح

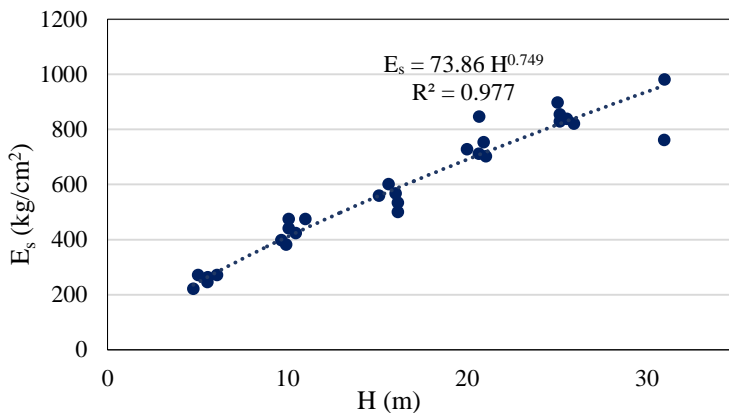
۴-۱. خاک

پرواضح است که خاک مناطق مختلف خصوصیات متفاوتی دارند. در این پژوهش برای داشتن دید بهتر از عملکرد مسلح کننده ژئوگرید در شرایط مختلف خاک بستر، ۹ نوع خاک مورد بررسی قرار گرفته است. معیار تقسیم‌بندی خاک‌ها در این بررسی، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته ذرات خاک بوده است. البته قابل ذکر است که چسبندگی خاک نیز در مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

در منابع و گزارش‌های مهندسی ژئوتکنیک عموماً برای خاک‌های غیر آلی، زاویه اصطکاک داخلی خاک در محدوده‌ی ۲۲ تا ۴۷ درجه و مقادیر مدول الاستیسیته آن، طبق جدول (۲) در حدود ۱۰ تا MPa ۱۷۲ ذکر شده است. البته زوایای کمتر از ۲۸ درجه و بیشتر از ۴۰ درجه بسیار نادر عنوان شده‌اند، لذا در این مطالعه برای عامل زاویه اصطکاک مقادیر ۲۸، ۳۴ و ۴۰ درجه مدنظر قرار گرفت. در این خصوص طالبی و موسیوند [۱۵] با استفاده از آزمایش پرسیمتری، مدول الاستیسیته مناطق مختلف شهر تهران را بررسی کرده و مقدار آن را فقط در اعماق بیش از ۳۰ متر بیش از ۱۰۰ مگا پاسکال گزارش نمودند (شکل ۱). لذا به دلیل قرار گرفتن لایه‌های تسلیح در اعماق کم، در این مطالعه از مقادیر بیشتر از MPa ۱۰۰ صرف‌نظر شده و برای مدول الاستیسیته مقادیر ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات کلی خاک در جدول (۳) ذکر شده است.

جدول ۲: مقادیر مدول الاستیسیته خاک

$E (MPa)$	نوع خاک
۱۰/۳۵ - ۲۴/۱۵	ماسه‌ی سست
۱۰/۳۵ - ۱۷/۲۵	ماسه‌ی سیلتی
۱۷/۲۵ - ۲۷/۶	ماسه با تراکم متوسط
۳۴/۵ - ۵۵/۲	ماسه متراکم
۶۹/۰ - ۱۷۲/۵	ماسه و شن



شکل ۱: نمودار مقادیر مدول الاستیسیته در عمق‌های مختلف خاک [۱۵]

۲-۴. ژئوگرید و پی

ژئوگریدها به دلیل مصارف متنوع، دارای انواع مختلفی هستند. در مطالعه حاضر از چهار لایه ژئوگرید با مشخصات فنی ذکر شده در جدول (۳) برای تسلیح بستر خاک استفاده شده است. در مورد ابعاد بهینه ژئوگرید مورد استفاده، تحقیقات انجام شده مقادیر مختلفی را گزارش نموده‌اند [۱۶]. طبق نتایج مطالعات پیشین، عرض بهینه لایه‌ی ژئوگرید حدود ۳ برابر بعد کوچک پی است و با تغییر این نسبت عملکرد تسلیح کاهش می‌یابد. از آنجائی که در این مطالعه پی بتنی به صورت مربعی با ابعاد ۲ متر مدل شده است، بنابراین مدل لایه‌های ژئوگرید نیز به صورت مربعی به ابعاد سه برابر عرض پی (۶ متر) لحاظ شده است. سایر مشخصات مدل پی، ژئوگرید و خاک در جدول (۳) ذکر شده است. ابعاد بستر نیز برای مدل‌سازی ۵×۱۲×۱۲ مترمکعب در نظر گرفته شد.

جدول ۳: مشخصات مصالح

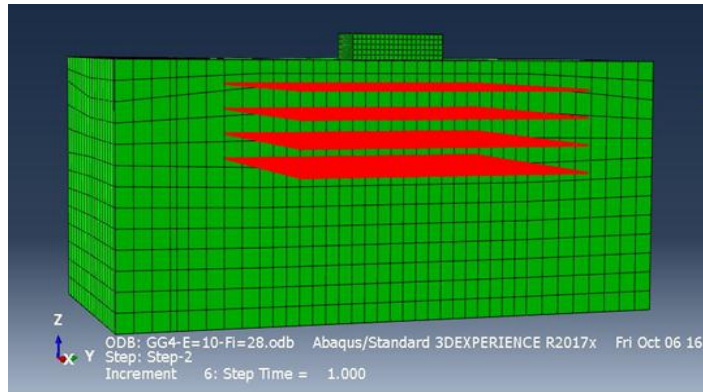
مشخصات		نوع
۰/۳	ضریب پواسون	خاک
۱۹۰۰	وزن واحد حجم	
۱۲×۱۲×۵	ابعاد بستر (m3)	
Mohr-Columb	مدل رفتاری	
۵۰۰	چسبندگی (Pa)	
۴۰°-۲۸°	زاویه اصطکاک (ϕ)	
۱۰-۱۰۰	مدول الاستیسیته	
۶×۶	ابعاد (m2)	
۵۰	مدول الاستیسیته	
۰/۳	ضریب پواسون	

۵	ضخامت معادل	پی
۶	مقاومت کششی	
۱۳۱CE	نوع ژئوگرید	
شش ضلعی	نوع چشمه	
۱۰۰	وزن واحد سطح	
۲۱	مدول الاستیسیته	
۰/۲	ضریب پواسون	
۲۴۰۰	وزن واحد حجم	
۲×۲×۰/۵	ابعاد (m ³)	

در کلیه مدل‌سازی‌های بستر مسلح با لایه ژئوگرید، پارامتر u/B (پوشش خاک روی اولین لایه ژئوگرید به بعد کوچک پی) برابر ۰/۲۵ لحاظ گردید. مقدار بهینه این پارامتر توسط محققین مختلف در محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ گزارش شده است؛ همچنین فاصله لایه‌های ژئوگرید از همدیگر برابر ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد [۱۶]. برای ارائه بهتر نتایج، خاک‌های مورد بررسی طبق جدول (۴) شماره‌گذاری شدند. در شکل (۲) نیز المان‌های بستر خاکی و لایه‌های تسلیح نشان داده شده است.

جدول ۴: نام‌گذاری انواع خاک‌های بررسی شده

مدول الاستیسیته (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه	نوع خاک
۱۰	۲۸	شماره ۱
	۳۴	شماره ۲
	۴۰	شماره ۳
۵۰	۲۸	شماره ۴
	۳۴	شماره ۵
	۴۰	شماره ۶
۱۰۰	۲۸	شماره ۷
	۳۴	شماره ۸
	۴۰	شماره ۹



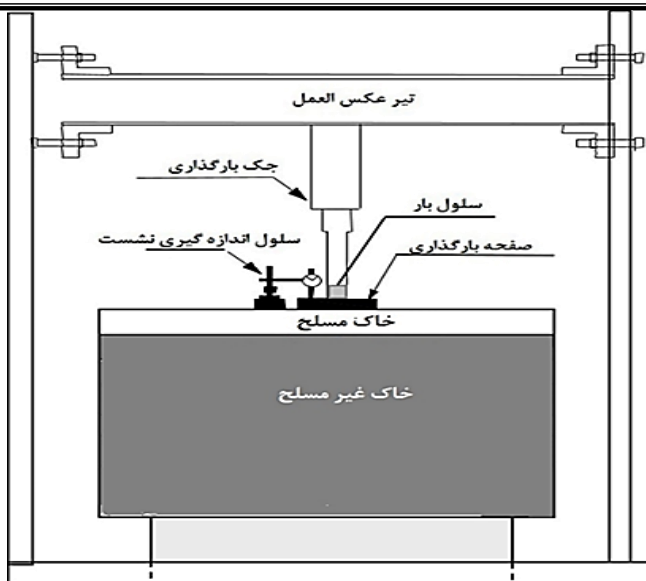
شکل ۲: المان‌های بستر خاکی، پی و لایه‌های تسلیح

۵. بحث و نتایج

۵-۱. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

به منظور بررسی تأثیر میزان چسبندگی خاک بر عملکرد بستر مسلح تحت بارگذاری استاتیکی، از تجهیزات موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بهره گرفته شد. سیستم مورد استفاده شامل مجموعه مخزن خاک، مدل پی، سیستم بارگذاری، دستگاه بارش خاک و سازه نگهدارنده بوده و قابلیت بررسی گسیختگی مدل پی نواری سطحی به صورت کرنش مسطح را دارد.

مخزن مورد نظر جهت اجرای آزمایش‌ها دارای ابعاد $100 \times 100 \times 100$ سانتی‌متر مکعب است. این مخزن شامل یک اسکلت فولادی است که سه وجه جانبی آن برای سبکی و سهولت در جابجایی تانک از MDF سیار با ضخامت کلی ۳۰ میلی‌متر ساخته شد. به منظور مشاهده و عکس‌برداری رفتار و تغییر شکل‌های حاصل در خاک و نظارت بر درستی پر شدن آن، یک وجه مخزن به صورت شفاف و از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بارهای اعمالی توسط بلوک‌های بتنی بر روی هشت نبشی شماره ۱۰ متصل به پایه‌های قاب، بر آن اعمال شد. شکل (۳) تصویر مخزن آزمایش، سیستم‌های بارگذاری و قرائت و نیز سایر تجهیزات را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمایی شماتیک از تجهیزات و ساختار آزمایش

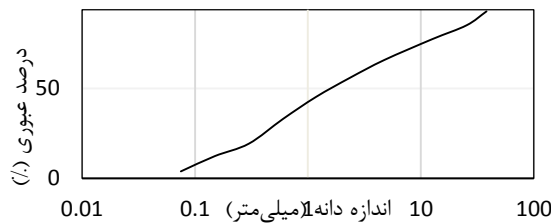
برای آماده‌سازی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه روش‌های مختلفی از قبیل تراکم، ویبره و بارش وجود دارد. نکته حائز اهمیت در این تحقیق انتخاب روشی مناسب به منظور ایجاد یک خاک یکنواخت، با تخلخل مشخص و تکرارپذیری مناسب برای شرایط آزمایشگاهی بود. با توجه به مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها و نیز نوع خاک مورد آزمایش، از روش تراکم برای آماده‌سازی بسترها در مخزن آزمایش استفاده شد. برای آماده‌سازی لایه‌های خاک، با در نظر گرفتن دانسیته مدنظر، وزن مورد نیاز از خاک برای هر لایه به ضخامت ۵۰ میلی‌متر توزین و درون مخزن آزمایش پخش گردید. پس از صاف کردن سطح خاک، عمل تراکم خاک با رها کردن وزنه مشخص انجام شده و با تکرار این کار برای لایه‌های بعدی، مخزن تا عمق ۸۰۰ میلی‌متر از خاک پر شد. در نمونه‌های مسلح نیز لایه‌ی ژئوگرید در عمق مدنظر قرار گرفت. نهایتاً مدل پی دایره‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر روی سطح بستر قرار گرفته و سلول‌های اندازه‌گیری بار و نشست نصب شدند.

از پارامترهای مهم خاک میزان چسبندگی آن است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک چسبنده اصطکاکی، آزمایش‌هایی بر روی خاک دانه‌ای با افزودن میزان متفاوتی خاک رس انجام شد. بدین منظور علاوه بر خاک‌های ذکر شده در جدول (۴)، سه نوع خاک دیگر نیز مطابق جدول (۵) مدنظر قرار گرفت.

جدول ۵: مشخصات خاک‌های بررسی تأثیر چسبندگی

نوع خاک	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
شماره ۱*	۱/۵	۳۸
شماره ۲*	۳/۲	۳۲
شماره ۳*	۴/۱	۳۰

خاک ۱* از نوع ماسه‌ای بوده و چسبندگی پایینی داشت. نمودار دانه‌بندی این خاک در شکل (۴) آورده شده و در طبقه‌بندی استاندارد خاک SP قرار دارد. جهت بررسی تأثیر چسبندگی بر عملکرد تسلیح با ژئوگرید، دو نوع خاک رس به خاک ۱* افزوده شد که مشخصات خمیری دو نوع خاک رس نیز در جدول (۶) آورده شده است. بدین منظور خاک رس نوع اول را با خاک ۱* به میزان ۱۲٪ وزنی مخلوط کرده و خاک نوع ۲* حاصل شد. هم‌چنین جهت بررسی تأثیر نوع خاک چسبنده بر ظرفیت باربری پی، رس نوع دوم به میزان ۱۲٪ وزنی به خاک نوع ۱* اضافه شده و خاک نوع ۳* حاصل شد.



شکل ۴: نمودار دانه‌بندی خاک ۱*

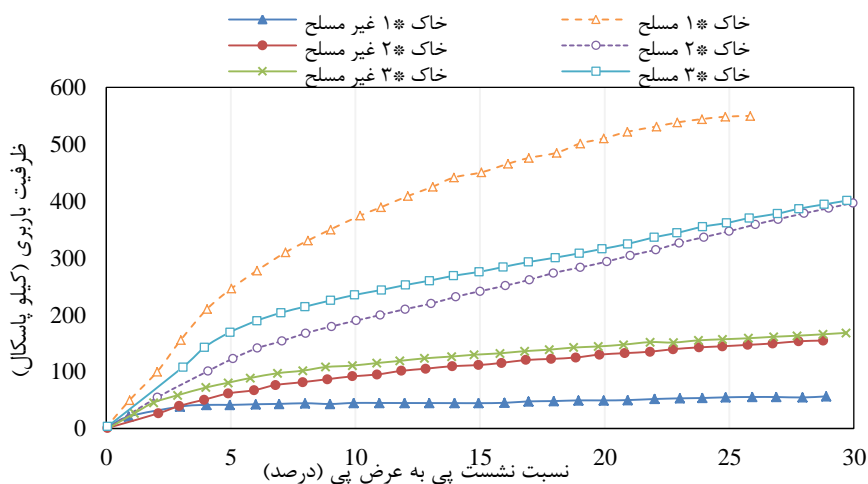
جدول ۶: مشخصات خاک‌های رس اضافه شده

نوع رس	LL	PL	PI	Gs	طبقه‌بندی
کائولن	۳۶	۲۱	۱۷	۲/۶۰	CL
محلّی تهران	۴۵	۲۰	۲۵	۲/۶۴	CH

نمودار باربری پی واقع بر سه نوع خاک ۱*، ۲* و ۳* در شکل (۵) آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، خاک‌های نوع ۲* و ۳* که میزان خاک رس بیشتری نسبت به خاک نوع ۱* دارند، در حالت غیرمسلح باربری بیشتری از خود نشان داده‌اند ولی باربری این دو نوع خاک در حالت مسلح شده، نسبت به حالت مسلح خاک نوع ۱* کمتر است. در واقع قرار دادن ژئوگرید در خاک، باعث

می شود تنش از خاک به مسلح کننده منتقل شده و بخشی از باربری خاک به وسیله اصطکاک بین مسلح کننده و خاک و یا مقاومت آن تحمل شود. در خاک‌های چسبنده اصطکاک کافی بین ذرات خاک و هم‌چنین بین ذرات خاک با لایه تسلیح به وجود نیامده و انتقال تنش از خاک به مسلح کننده به خوبی انجام نمی‌شود، بدین ترتیب نهایتاً لایه تسلیح کارایی لازم را ایفا نمی‌کند. در واقع در خاک‌های چسبنده، گسیختگی در سطح تماس قبل از رسیدن به مقاومت نهایی مسلح کننده اتفاق می‌افتد. هم‌چنین افزودن رس به خاک دانه‌ای باعث افزایش باربری خاک در حالت غیرمسلح شده و یا به عبارت دیگر افزایش چسبندگی خاک در یک درصد تراکم ثابت، ظرفیت باربری را افزایش داده و بازدهی تسلیح را کاهش داده است. در نتیجه بازدهی تسلیح در خاک دانه‌ای نسبت به خاک چسبنده اصطکاکی بیشتر است.

مقایسه نتایج خاک *۲ و *۳ نشان می‌دهد که تغییر نوع رس افزوده شده به ماسه یا به عبارتی تغییرات محدود چسبندگی خاک تأثیر چندانی بر بازدهی تسلیح ایجاد نمی‌نماید و عمده عامل مؤثر بر کارایی تسلیح، میزان اصطکاک بین ذرات خاک و لایه‌ی تسلیح جهت انتقال تنش‌های پی به آن است. با توجه به نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و به منظور ارائه مطلوب‌تر نتایج، از بررسی پارامتر چسبندگی در مدل‌سازی‌های عددی چشم‌پوشی خواهد شد. در واقع مقدار چسبندگی در تمام مدل‌ها به صورت ثابت برابر ۱/۵ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد تا لایه‌های تسلیح حداکثر میزان کارایی خود را داشته باشند.



شکل ۵: تغییرات بار-نشست خاک‌های *۱، *۲ و *۳ حاصل از مطالعه آزمایشگاهی

۵-۲. صحت‌سنجی مدل

با توجه به این که تمرکز اصلی مطالعه حاضر بررسی تأثیر مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک بستر بر عملکرد بستر مسلح با ژئوگرید است، در ادامه پس از انجام صحت‌سنجی، مطالعه عددی کاملی در این خصوص انجام شده است. در تمامی مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری، برای حصول اطمینان از عملکرد صحیح نرم‌افزار و مدل ساخته‌شده، جواب‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار باید با نتایج آزمایش‌های میدانی و یا آزمایش‌های کوچک مقیاس مقایسه گردند. بدین منظور با هدف کالیبراسیون مدل عددی، صحت آن‌ها توسط نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده در این پژوهش بررسی شده است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی خاک از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است [۱۷]. در مهندسی خاک، از این مدل برای تعیین مقاومت برشی خاک در سطوح مختلف تنش بهره برده می‌شود. بر اساس تئوری موهر-کولمب، گسیختگی یک ماده به سبب حداکثر تنش‌های برشی یا محوری به تنهایی رخ نمی‌دهد، بلکه گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که ترکیب خاصی از تنش‌های برشی و محوری اتفاق بیفتد. این مدل رفتاری دارای پنج پارامتر کلیدی است که بر اساس آن‌ها ترکیب تنش عمودی و برشی به وجود آورنده شکست ماده تعیین می‌گردد [۱۸]. دو پارامتر الاستیک مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) از قانون هوک، دو پارامتر زاویه اصطکاک (φ) و چسبندگی (c) از معیار شکست شکست و نیز پارامتر زاویه اتساع (ψ) از قانون جریان مطابق معادله (۳) بر معادله سطح تسلیم مدل موهر-کولمب تأثیر گذار هستند [۱۸].

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi - 2cc\cos\phi \leq 0 \quad (3)$$

که در آن مقادیر σ_1 و σ_3 بیان‌کننده تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه هستند. پارامترهای مورد نظر برای صحت‌سنجی مدل‌ها در جدول (۷) ارائه شده است.

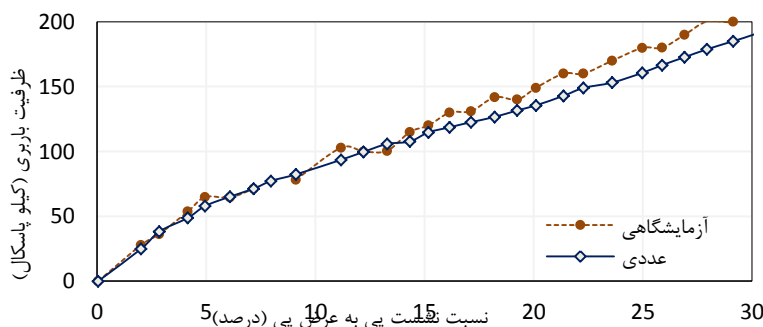
جدول ۷: مشخصات مصالح آزمایش‌های صحت‌سنجی

نوع مصالح	γ (KN/m ³)	E (Mpa)	ν	ϕ	ψ
خاک	۱۷	۷۴	۰/۳	۳۶	۷
پی	۲۷	۶۰۰۰۰	۰/۲	-	-
ژئوگرید	۰/۵	۸۰۰۰	۰/۲	-	-

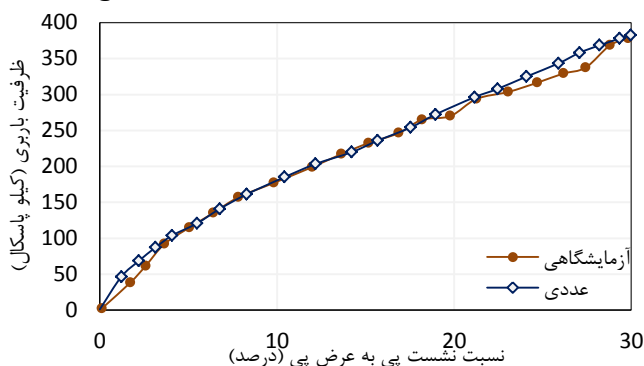
با توجه به اینکه صحت‌سنجی برای اطمینان از صحت نتایج خروجی نرم‌افزار انجام می‌شود؛ هدف از انجام صحت‌سنجی در این مطالعه، مدل‌سازی دقیق مدل آزمایشگاهی توضیح داده شده در بخش قبل در محیط اجزا محدود آباکوس، تحلیل آن و به‌دست آوردن نتایج مشابه نتایج آزمایشگاهی است. بدین منظور لازم است مدل‌هایی مشابه مدل آزمایشگاهی مذکور ساخته شده و بر اساس آن صحت‌سنجی

انجام شود. مدل‌های ساخته شده مشابهت کاملی از نظر هندسه مدل، تماس بین اجزا، روش بارگذاری و غیره با نمونه‌های میدانی داشتند.

مقایسه نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی برای نسبت‌های مختلف عمق قرارگیری لایه ژئوگرید به عرض پی (u/B) در شکل‌های (۶) تا (۸) آورده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها برداشت می‌شود اختلاف میان نتایج آزمایشگاهی و عددی برای خاک غیر مسلح، خاک مسلح با نسبت u/B برابر 0.25 و نیز خاک مسلح با نسبت u/B برابر 0.5 به ترتیب حدود $6/5$ ، 4 و 3 درصد است. بنابراین در میان حدود 60 نمونه مورد بررسی، اختلاف مابین نتایج مدل‌سازی عددی با نمونه واقعی به طور میانگین حدود $4/5$ درصد است که نشان می‌دهد نتایج مدل‌سازی با اطمینان مناسبی در محدوده قابل قبول قرار دارد. البته وجود این اختلاف کم بین نتایج می‌تواند مربوط به خطاهای انسانی یا تجهیزات موجود در محیط آزمایشگاه باشد، مشکلاتی از قبیل عدم وجود تراکم مناسب در نمونه‌های آزمایشگاهی، وجود خطا و تلورانس در بار اعمالی توسط جک هیدرولیکی، دقت تجهیزات قرائت و ثبت داده و یا مسائلی از این دست که می‌تواند سبب کاهش دقت در حصول پاسخ‌ها شوند.



شکل ۶: نمودار تنش-نشست برای خاک غیرمسلح



شکل ۷: نمودار تنش-نشست برای خاک مسلح $u/B=0.25$

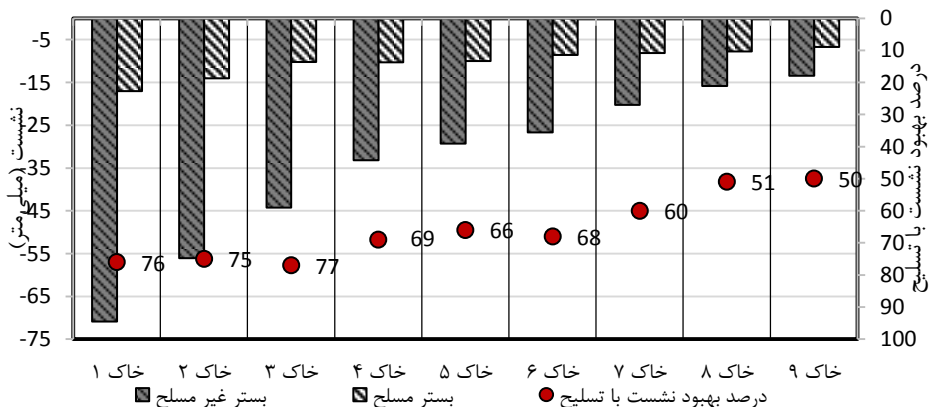
۳-۵. مدل‌سازی عددی

هدف اصلی این پژوهش، بررسی عملکرد ژئوگرید در مقاوم‌سازی بسترهای خاکی تحت بارهای استاتیکی و انفجاری است و این در حالی است که انجام آزمایش‌های میدانی در حوزه انفجار با محدودیت‌های گسترده‌ای مواجه است. بنابراین برای غلبه بر این مشکل از مطالعه عددی و نرم‌افزار المان محدود آباکوس بهره برده شد.

۳-۵-۱. بارگذاری استاتیکی

میزان نشست پی سطحی بر روی انواع خاک‌ها تحت بارگذاری استاتیکی در شرایط مسلح و غیرمسلح در شکل (۹) نشان داده شده است. مطابق شکل (۹) خاک‌های نوع اول تا سوم در حالت غیرمسلح دارای بیشترین میزان نشست شده‌اند. مقادیر این نشست‌ها به نحوی است که حتی در سازه‌های متداول نیز قابلیت بهره‌برداری سازه را مختل می‌کنند [۱۹]. این نوع خاک‌ها که بیشتر در زمین‌های باتلاقی مشاهده می‌شوند، با توجه به ماهیت خود، عملاً برای اکثر پروژه‌ها مسئله‌ساز بوده و غالباً تنها راه برای حل این مشکل، جایگزینی آن‌ها با مصالح مرغوب است. البته بدیهی است که از نظر اقتصادی جایگزینی خاک هزینه‌های زیادی را بر پروژه تحمیل می‌نماید، ولی تسلیح با ژئوگرید توانسته عملکرد آن‌ها را در محدوده قابل قبولی کنترل نماید. در این دسته از خاک‌ها با تسلیح، مقدار نشست تا حدود ۱۷ میلی‌متر محدود شده و عملکرد لایه‌های تسلیح در بهبود میزان نشست پی به‌طور متوسط در حدود ۷۶٪ بوده است.

مطابق شکل (۹)، با افزایش مدول الاستیسیته میزان نشست خاک‌های غیرمسلح نوع چهار تا ششم نسبت به حالت غیرمسلح در خاک‌های نوع اول تا سوم، کاهش یافته است. اما همین مقادیر نشست برای سازه‌هایی با درجه‌ی اهمیت بالا همچنان می‌تواند مسئله‌ساز باشد [۲۰]. در این خاک‌ها نیز تسلیح با ژئوگرید توانسته میزان نشست‌ها را تا حدود ۱۰ میلی‌متر کاهش دهد و عملکرد لایه‌های تسلیح در بهبود نشست پی به‌طور متوسط حدود ۶۷٪ بوده است.



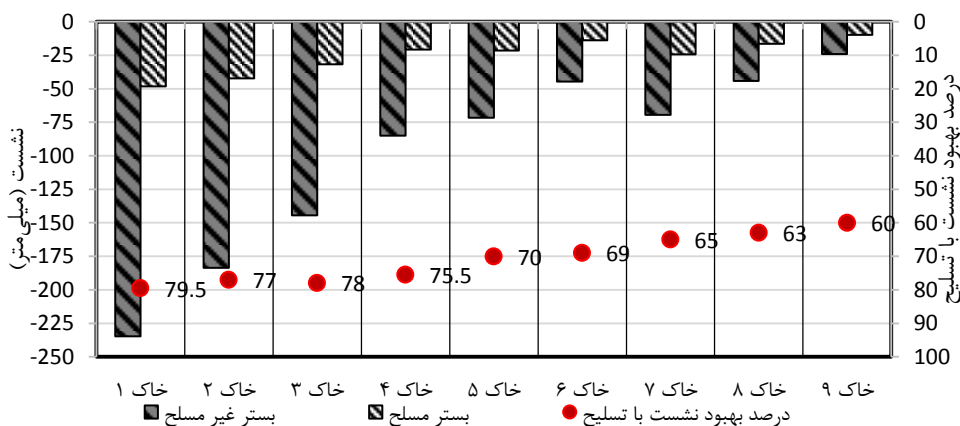
شکل ۹: عملکرد پی در بسترهای مسلح و غیرمسلح در حالت بارگذاری استاتیکی

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، به دلیل ظرفیت باربری بالای خاک‌های نوع هفتم تا نهم، در این خاک‌ها مقدار نشست‌ها نسبت به خاک‌های قبلی کاهش یافته است. علیرغم این‌که میزان نشست در این خاک‌ها برای پروژه‌های متداول می‌تواند قابل قبول باشد، ولی برای سازه‌های خاص که میزان نشست بسیار حائز اهمیت است (نظیر باند فرودگاه‌ها، ساخت‌گاه نیروگاه‌های هسته‌ای و غیره)، همچنان می‌تواند مخاطره‌آمیز باشد. در خاک‌های نوع هفتم تا نهم، بهبود میزان نشست پی توسط لایه‌های تسلیح به‌طور متوسط حدود ۵۴٪ بوده و میزان نشست‌ها در حالت بستر مسلح با ژئوگرید تا حدود ۸ میلی‌متر کنترل شده است.

نکته‌ی حائز اهمیت این است که در خاک‌هایی با ظرفیت باربری پایین‌تر میزان عملکرد ژئوگرید در بهبود نشست خاک به مراتب بیش از خاک‌های متراکم و دج است. همچنین تسلیح با ژئوگرید در هر گروه سه‌گانه‌ی مذکور فارغ از میزان نشست در حالت غیرمسلح، مقادیر نشست‌ها را در محدوده‌ی مشخص و مطمئنی کنترل کرده است که این موضوع می‌تواند موجب افزایش ضریب اطمینان طراحی گردیده و بار اقتصادی سایر مراحل ساخت سازه را نیز تعدیل نماید.

۴-۵. بارگذاری دینامیکی

نمودارهای مربوط به نشست پی در حالت بارگذاری انفجاری در شکل (۱۰) نشان داده شده است. روند کلی نشست‌ها مطابق حالت بارگذاری استاتیکی است ولی مقادیر نشست به خاطر اعمال بار عظیم ناشی از انفجار بر مجموعه بسیار زیادتر شده است. مطابق شکل (۱۰) در خاک‌های نوع اول تا سوم نشست‌های منتج از انفجار به نحوی است که عملاً گسیختگی کامل سیستم خاک و پی، خرابی کامل سازه‌ی مستقر بر پی را به دنبال خواهد شد. عملکرد لایه‌های تسلیح در بهبود نشست پی واقع بر این خاک‌ها تحت بار دینامیکی حدود ۷۸٪ است. البته لازم به ذکر است حتی در حالات تسلیح نیز نشست رخ داده بسیار زیاد بوده و باعث تخریب سازه می‌شود.



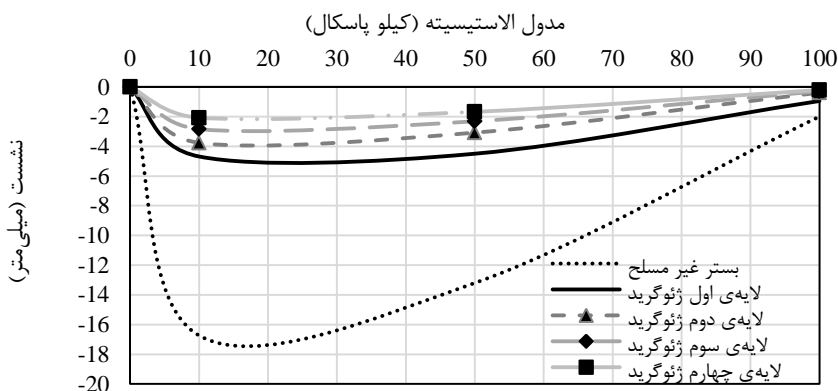
شکل ۱۰: عملکرد پی در بسترهای مسلح و غیرمسلح در حالت بارگذاری دینامیکی

در خاک‌های چهارم تا ششم علی‌رغم این‌که مقدار نشست‌ها نسبت به خاک‌های اول تا سوم کاهش

یافته است؛ با این وجود مقادیر نشست می‌تواند اختلال جدی در عملکرد و بهره‌برداری از سازه ایجاد نماید. تسلیح با ژئوگرید میزان نشست پی در این خاک‌ها را حدود ۷۲٪ بهبود بخشیده و به حدود ۲۰ میلی‌متر رسانده است. همچنین در خاک‌های هفتم تا نهم که ماهیتاً جز مصالح با باربری بالا می‌باشند، نشست‌ها بسیار بیشتر از حالت بارگذاری استاتیکی بوده و استفاده از آن‌ها در سازه‌های با کاربری‌های خاص و استراتژیک مخاطره‌آمیز خواهد بود. عملکرد لایه‌های تسلیح در بهبود نشست پی واقع بر این خاک‌ها حدود ۶۳٪ بوده است.

طبق نتایج به‌دست‌آمده، در همه‌ی خاک‌ها، تسلیح با ژئوگرید توانسته نشست بستر پی را کاهش دهد. همچنین در گروه‌های بررسی‌شده میزان نشست‌های خاک مسلح در محدوده‌ای خاص قرار گرفته است که این امر اطمینان طراحی را بالا برده و در نتیجه هزینه‌های ناشی از اعمال ضرایب اطمینان بزرگ‌تر بر طرح را کاهش می‌دهد. در مجموع می‌توان بیان نمود که میزان مدول الاستیسیته خاک بر میزان نشست آن بسیار مؤثر بوده و با کاهش آن نشست خاک به‌شدت افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش مدول الاستیسیته از میزان تأثیر مثبت ژئوگرید در تسلیح خاک کاسته می‌شود. در واقع لایه تسلیح در خاک‌های مسئله‌دار عملکرد بهتری از خود نشان داده و در خاک‌هایی که خود مقاومت بالایی دارند، با وجود بهبود رفتار خاک، میزان کارایی تسلیح نسبت به سایر خاک‌ها کمتر می‌گردد. زیرا در خاک‌هایی با نشست کم، میزان خیز لازم برای بسیج نیروهای کششی در ژئوگرید ایجاد نشده و در نتیجه عملکرد پوسته‌ای لایه‌ی تسلیح بسیج نمی‌گردد. به‌طوری‌که مطابق نتایج، با افزایش مدول الاستیسیته از ۱۰ به ۱۰۰ مگا پاسکال عملکرد آن از ۷۹٪ به ۶۰٪ کاهش می‌یابد.

میزان بهبود نشست توسط لایه‌های چهارگانه تسلیح برای حالت بارگذاری استاتیکی و در زاویه اصطکاک ۳۴ درجه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تأثیر لایه‌های مختلف ژئوگرید در کاهش نشست خاک به یک مقدار نبوده و بهبود در لایه‌های فوقانی بیشتر از لایه‌های پایینی است. این موضوع به این دلیل است که برای ایجاد نیروی کششی در لایه‌های تسلیح به میزان خاصی از جابجایی ذرات نیاز است. در واقع با کنترل بخشی از نشست توسط لایه‌های تسلیح فوقانی، جابجایی لازم ذرات خاک به‌منظور درگیر شدن با مسلح‌کننده‌های لایه‌های تحتانی رخ نداده و در نتیجه این لایه‌های تسلیح کمتر دچار کشش شده و عملکرد کمتری نسبت به لایه‌های تسلیح بالاتر از خود نشان داده‌اند.

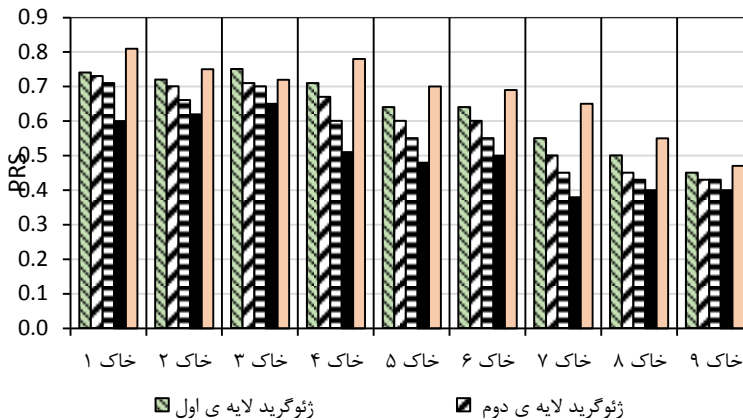


شکل ۱۱: تغییرات میزان نشست برای مدول الاستیسیته‌های-زاویه اصطکاک داخلی خاک ۳۴ درجه

از طرف دیگر در بارگذاری انفجاری، در همه‌ی خاک‌ها به دلیل اعوجاج شدید لایه‌های تسلیح، میزان بهبود نشست نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی بهتر بوده است. در واقع به دلیل نیروی شدید دینامیکی، جابجایی لازم برای درگیری ذرات خاک با لایه‌های تسلیح ایجاد شده و از سوی دیگر وضعیت گسیختگی به سوراخ‌کنندگی سوق پیدا کرده است که نهایتاً منجر به عملکرد بهتر لایه‌های تسلیح نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی شده است. همچنین از بررسی نتایج می‌توان دریافت که با افزایش مدول الاستیسیته خاک‌ها نیز تأثیر لایه‌ی اول و دوم تسلیح به مراتب بیشتر از لایه‌های دیگر خواهد بود. به‌منظور ارائه بهتر عملکرد تسلیح خاک با ژئوگرید تحت اثر انواع بارگذاری، پارامتر بدون بعد $PRSi$ (نسبت کاهش نشست در عمق i در حالت بستر مسلح به بستر غیرمسلح) مطابق رابطه (۴) تعریف شده است.

$$PRSi = \left(1 - \frac{S_{rein}}{S_{unrein}}\right) \quad (4)$$

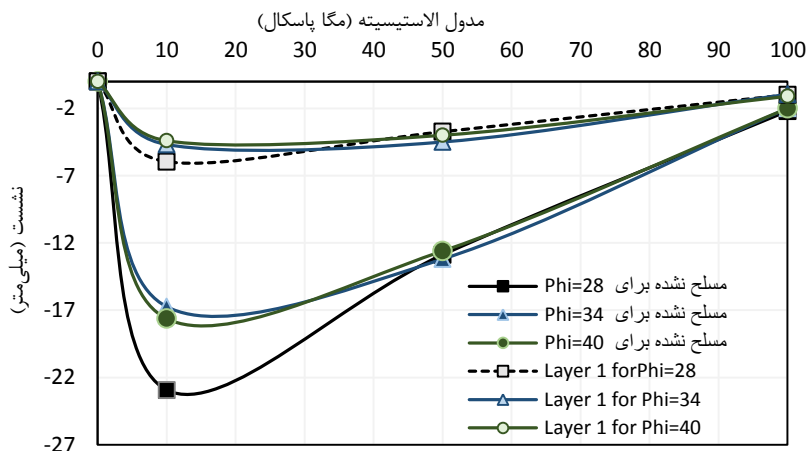
در این رابطه s_{rein} و s_{unrein} به ترتیب مقادیر نشست بستر برای بستر مسلح و غیرمسلح با نوع یکسان از مصالح هستند. شکل (۱۲) مقادیر $PRSi$ خاک‌های مختلف را برای نشست لایه‌های مختلف پی و ژئوگرید نشان می‌دهد. در انواع خاک با مدول الاستیسیته‌های ۱۰، ۵۰، و ۱۰۰ MN/m^2 میزان کاهش نشست در تراز لایه‌های تسلیح در حالت بارگذاری استاتیکی به ترتیب حدود ۷۰٪، ۶۳٪ و ۵۰٪ و در حالت بارگذاری دینامیکی به ترتیب حدود ۸۰٪، ۷۳٪ و ۵۴٪ بوده است. در خاک‌های غیرمسلح نوع اول تا سوم که نشست پی در حالات بار استاتیکی و دینامیکی بیشتر از سایر انواع خاک بود، کارایی لایه تسلیح نیز بیشتر بوده است. در واقع با نشست بیشتر خاک، لایه ژئوگرید دچار خیز بیشتری شده و عملکرد غشا و پوسته‌ای لایه تسلیح که به‌صورت نیروی کششی-اصطکاکی است، نمایان می‌گردد.



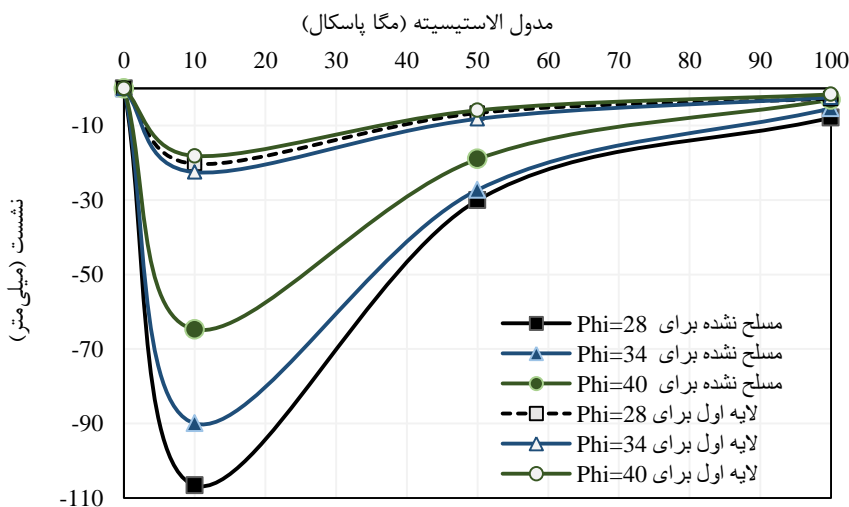
شکل ۱۲: مقادیر PRS خاک‌های مختلف

از طرف دیگر در تمامی انواع خاک، در حالت بارگذاری دینامیکی میزان بهبود نشست پی بیشتر از حالت استاتیکی بوده است. در واقع با اعمال بار شدید دینامیکی بر مجموعه، میزان نشست و تنش کششی در لایه‌ی تسلیح افزایش یافته و نهایتاً عملکرد لایه تسلیح بهتر شده است. در خاک نوع هفتم تا نهم که باربری بالایی داشته‌اند، میزان بهبود نشست نسبت به سایر انواع خاک کمتر شده و به مقادیر حدودی ۵۴٪ رسیده است. لازم به توضیح است که به دلیل اعوجاج لایه‌های تسلیح در حالت بارگذاری انفجاری، بیشینه تغییرات هر یک از این لایه‌ها در نمودارها گزارش شده است.

شکل‌های (۱۳) و (۱۴) میزان تغییرات نشست خاک مسلح برای حالت‌های مختلف بارگذاری استاتیکی و دینامیکی در زاویه‌های اصطکاک مختلف و با تغییر مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها در غالب حالت‌های بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، در خاک‌های با مدول الاستیسیته یکسان با افزایش ضریب اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست آن کاهش می‌یابد. البته مقدار تغییرات آن در خاک‌های ضعیف‌تر با مدول الاستیسیته پایین‌تر به مراتب بیشتر بوده و با بالاتر رفتن مدول الاستیسیته میزان تغییرات آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر هرچند در حالت تسلیح مقدار تغییرات نشست در مدول‌های مختلف به نسبت کم است، ولی در مجموع می‌توان بیان نمود که با افزایش ضریب اصطکاک میزان عملکرد تسلیح کاهش می‌یابد، به طوری که در حالت بارگذاری دینامیکی، در ضریب اصطکاک ۲۸ درجه مقدار حداقل و حداکثر بهبود ۶۵ و ۸۱ درصد بوده و در ضریب اصطکاک ۴۰ درجه این مقادیر به ترتیب به ۴۷ و ۷۲ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۳: تغییرات میزان نشست برای زاویه اصطکاک‌های داخلی مختلف در حالت بارگذاری استاتیکی



شکل ۱۴: تغییرات میزان نشست برای زاویه اصطکاک‌های داخلی مختلف در حالت بارگذاری دینامیکی

۶. نتیجه‌گیری

نیروهای وارد بر هر سازه‌ای از قبیل ساختمان، سد، راه و غیره نهایتاً به خاک بستر منتقل می‌گردد و ناپایداری خاک بستر می‌تواند به خرابی کل سازه منجر شود. بروز ناامنی‌ها و انفجارهای متعدد در کشورهای مختلف، بررسی و تحلیل رفتار خاک‌های مختلف تحت بار انفجار را ضروری می‌سازد. بنابراین

پایدارسازی خاک هم به‌عنوان بستری برای احداث ابنیه عمرانی حائز اهمیت بوده و از طرف دیگر، از نظر پدافند غیرعامل می‌تواند برای احداث خاک‌ریزها و سطوح بالایی سازه‌های مدفون بسیار حائز اهمیت باشد. هم‌چنین علاوه بر حفاظت از سازه‌های متداول، حفظ شریان‌های حیاتی مدفون در خاک از قبیل خطوط انتقال آب، نفت و گاز منوط به پایدارسازی بستر خاک است. نتایج حاصل از مطالعه رفتار بسترهای خاکی با مدول الاستیسیته و زاویه‌های اصطکاک داخلی متفاوت در حالت بارگذاری استاتیکی و انفجاری را می‌توان به‌صورت خلاصه به شرح زیر بیان نمود:

۱- استفاده از لایه‌های ژئوگرید سبب بهبود عملکرد خاک در انواع بسترهای مورد مطالعه شده و عملکرد تسلیح خاک زیر پی به‌صورت عمده تحت تأثیر مدول الاستیسیته دانه‌های خاک بستر است. در خاک‌هایی با مدول الاستیسیته ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ مگا پاسکال عملکرد لایه‌های تسلیح در بهبود نشست پی در حالت بارگذاری استاتیکی به ترتیب حدود ۷۵٪، ۶۵٪ و ۵۴٪ بوده است. این روند نشان می‌دهد که در خاک‌هایی که دارای نشست‌های زیادتری هستند (مدول الاستیسیته پایین‌تر)، عملکرد لایه‌های ژئوگرید در بهبود نشست پی بسیار بهتر بوده است. زیرا به دلیل باربری کم این نوع مصالح، قسمت میانی لایه‌ی تسلیح دچار خیز بیشتری شده و لبه‌های لایه‌ی تسلیح به‌صورت عضو کششی عمل نموده و به خاطر قفل و بست با خاک پیرامون مانع از ادامه‌ی نشست‌ها شده است.

۲- بهبود نشست پی در بارگذاری دینامیکی نسبت به بارگذاری استاتیکی افزایش یافته و این میزان بهبود در مدول الاستیسیته‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ مگا پاسکال به ترتیب حدود ۷۹٪، ۷۲٪ و ۵۴٪ است.

۳- در مطالعه صورت گرفته، عملکرد لایه‌ی تسلیح در حالت بارگذاری دینامیکی به‌طور متوسط حدود ۶۰٪ بیشتر از حالت بارگذاری استاتیکی بوده است. زیرا در حالت دینامیکی بار بسیار بیشتری نسبت به حالت استاتیکی بر مجموعه خاک-ژئوگرید وارد شده و باعث ایجاد خیز در لایه‌ی تسلیح و ایجاد یک نیروی کششی اضافی در آن می‌گردد و کارایی ژئوگرید بیشتر نمایان می‌گردد.

۴- در غالب خاک‌های با مدول الاستیسیته یکسان با افزایش ضریب اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست آن کاهش می‌یابد. البته مقدار تغییرات آن در خاک‌های ضعیف‌تر با مدول الاستیسیته پایین‌تر به‌مراتب بیشتر بوده و با بالاتر رفتن مدول الاستیسیته میزان تغییرات آن کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش ضریب اصطکاک میزان عملکرد تسلیح کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در حالت بارگذاری دینامیکی، در ضریب اصطکاک ۲۸ درجه مقدار حداقل و حداکثر بهبود ۶۵ و ۸۱ درصد بوده و در ضریب اصطکاک ۴۰ درجه این مقادیر به ترتیب به ۴۷ و ۷۲ درصد کاهش یافته است. در واقع در این موارد اصطکاک بین ذرات خاک بیشتر از اصطکاک ناشی از قفل و بست لایه تسلیح با ذرات خاک بوده و عملکرد لایه تسلیح کمتر می‌شود.

۷- بهبود نشست در خاک با افزایش لایه‌های تسلیح رابطه خطی ندارد. در واقع لایه‌های مختلف تسلیح عملکرد یکسانی در بهبود نشست در خاک ندارند و لایه‌های اولیه تسلیح نقش بیشتری از لایه‌های زیرین در این خصوص دارند.

۸- افزایش چسبندگی خاک در درصد تراکم ثابت، ظرفیت باربری را افزایش داده و بازدهی تسلیح را کاهش می‌دهد. هم‌چنین تغییر نوع رس افزوده شده به ماسه تأثیر چندانی بر بازدهی تسلیح ایجاد نمی‌نماید و عمده عامل مؤثر بر کارایی تسلیح، میزان اصطکاک بین ذرات خاک و لایه تسلیح جهت انتقال تنش‌های پی به آن است.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تشکر و قدردانی

از تمامی دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه پدافند هوایی خاتم النبیه(ص) که در این پژوهش به عنوان نمونه پژوهش حضورداشتند، تشکر و قدردانی مینماییم.

۷. منابع

[1] H. Salehi, M. Heshmati rad and M. Vaseli khabbaz, “Numerical analysis of the penetrating of non-nuclear bunker buster bombs in underground structures and the changes of the energy in the projectile” *Journal of Aeronautical Engineering*, (2015), **17** (2), pp. 23-43 (In persian).

[2] H. Sahehi, G. Jafari and E. Barzegar Babayi, “Determine the optimum airplane hangar shape to maintain stability against explosive loads” *Asas Journal*, (2018), **20** (52), pp. 34-51 (In persian).

[3] A.D.V. Karimi and G. Jafari, “Evaluation of Semi-Deeped Foundation under Blast Loading” *Passive Defence Sci. Tech*, (2019), **9** (4), pp. 415-28 (In persian).

[4] P. Sinha, K. Anusha Raj, S. Kumar and D. Singh, “Mechanical Behavior of Geotextile and Geogrids on Soil Stabilization: A Review” *Recent Advances in Mechanical Engineering*, (2023), pp. 299-308.

[5] B.M. Das, E.C. Shin and M.T. Omar, “The bearing capacity of surface strip foundations on geogrid-reinforced sand and clay—a comparative study” *Geotechnical & Geological Engineering*, (1994), **12** (1), pp. 1-14.

[6] M. Askari, H.R. Razeghi and J. Mamaghanian, “Numerical study of

geosynthetic reinforced soil bridge abutment performance under static and seismic loading considering effects of bridge deck” *Geotextiles and Geomembranes*, (2021), **49** (5), pp. 1339-54.

[7] J. Zhang, M. Ji, Y. Jia, C. Miao, C. Wang, Z. Zhao and Y. Zheng, “Anisotropic Shear Strength Behavior of Soil–Geogrid Interfaces” *Applied Sciences*, (2021), **11** (23), pp. 11387.

[8] E.C. Shin, H.H. Kang and J.J. Park, “Reinforcement efficiency of bearing capacity with geocell shape and filling materials” *KSCCE Journal of Civil Engineering*, (2017), **21** (5), pp. 1648-56.

[9] G.R. Nouri and R. Hashemi “Effect of Shotcrete on the performance of arched soil walls against explosive load”, *1st Intl. Conf. Soil Mech Eng*, (2014) (In persian).

[10] S.H. Chew, S.A. Tan, G.P. Karunaratne and C.C. Ng, “Performance of geosynthetic reinforced soil wall and reinforced earth wall subject to blast loading: experimental and numerical study” *Reinforced Soil Engineering: Advances in Research and Practice*, (2003), pp. 359.

[11] A. Hozuri, “Effects of conventional weapons on armed soil walls”, University of Malek Ashtar, Tehran, (2010) (In persian).

[12] J. Khosropour and K. Vahedi, “Analysis of the explosion, its types, tensile waves and impact of it”, *Proc. Int. Conf. new Horiz. Basic Tech. Sci. Eng.*, Tehran, (2017).

[13] T. Chakraborty, “Analysis of hollow steel piles subjected to buried blast loading” *Computers and Geotechnics*, (2016), **78**, pp. 194-202.

[14] US Department of the Army Technical Manual “TM5-855-1: Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons”, Washington D.C, (1986).

[15] H. Talebi and M. Musivand “ Study of Tehran's Soil Elastic Modulus using a Pressuremeter Test”, *Proc. 1st Intl. Conf. Geotech. Eng.*, (2014) (In persian).

[16] A. Kumar and S. Saran, “Bearing capacity of rectangular footing on

reinforced soil” *Geotechnical & Geological Engineering*, (2003), **21** (3), pp. 201-24.

[17] M. Firoj and A. Bahuguna, “Evaluation of liquefaction potential using ground response analysis incorporating mohr–coulomb model” *Innovative Infrastructure Solutions*, (2022), **7** (3), pp. 1-20.

[18] M. Javadi, S. Sayadi, M. Sharifzadeh and K. Shahriar, “Evaluation of Soil Constitutive Model Effects on Numerical Modeling of Settlement Induced by Tunneling in Urban Area, Case Study of the Amirkabir Tunnel” *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, (2020), **10** (24), pp. 119-36.

[19] Office of the building national code, “Seventh the building national code: pavement and pavement development”, Iran development Publisher, first edition (2014).

[20] Adjutancy of Engineering & Technology “Issue 037: Guidance for Geotechnical Studies and Designing of Oil Industry in Pars Special Economic Zone”, Tehran Ministry of Oil, (2005) (In persian).