

## بررسی عددی اثر مسلح کننده ها در افزایش ظرفیت باربری بدست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه در خاک های دولایه

سید حسین خطیبی<sup>۱</sup>، وحید بیرجندی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> مربی گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

### چکیده

در این تحقیق اثر خاک‌های لایه‌ای در آزمایش بارگذاری صفحه منظور گردیده است به طوری که با افزایش ضخامت خاک ماسه نتایج به مدل واقعی آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌گردد. اثر قرارگیری لایه‌های ژئوتکستایل و همچنین تعداد آن‌ها نیز در تحقیق زیر بررسی شده است چراکه با افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده از حدی به بعد تأثیری در افزایش ظرفیت باربری ندارد. هدف اصلی تحقیق بررسی ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای با لایه‌بندی متفاوت و همچنین تأثیر مسلح کننده‌ها بر روی نتایج به دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه است. این آزمایش را با نرم‌افزار عددی آباکوس مدل کرده و نتایج بدست آمده از آزمایشگاه را با نتایج بدست آمده با نرم‌افزار مقایسه کرده تا همگرایی جواب‌های فوق با جواب‌های آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی در این پژوهش بررسی رفتار خاک‌های لایه‌ای در آزمایش بارگذاری صفحه می‌باشد. به منظور بررسی اثر خاک‌های لایه‌ای بر نتایج بارگذاری صفحه به ترکیبات مختلفی از خاک‌های لایه‌ای پرداخته شده است و به ترتیب یک لایه خاک شنی و در زیر آن خاک ماسه‌ای قرار گرفته است. میزان ضخامت لایه شن که در بالا قرار گرفته، با توجه به ابعاد صفحه تغییر می‌کند. در انتها نیز به بررسی اثر مسلح کننده‌ها بر روی افزایش ظرفیت باربری در خاک‌های لایه‌ای پرداخته می‌شود و اثر تعداد لایه‌ها در بهبود ظرفیت باربری آورده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آزمایش بارگذاری صفحه، خاک‌های لایه‌بندی شده، اثر مسلح کننده‌ها

## ۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت نرم‌افزارهای مهندسی و توانایی در ساخت مدل‌هایی شبیه به مدل‌های واقعی با رفتارهای نزدیک به رفتار واقعی خاک و همچنین با توجه به هزینه روزافزون آزمایشات ژئوتکنیکی امید است با مدل‌سازی‌هایی نزدیک به واقعیت و انتخاب شرایط انتهایی و تکیه‌گاهی مانند شرایط طبیعی و اصلی خاک، انتخاب مدل‌های رفتاری صحیح و با توجه به اطلاعات در دسترس خاک، جواب‌های بدست آمده از نرم‌افزارهای عددی به جواب‌های حاصل از آزمایش‌ها بر روی خاک نزدیک گردد. یکی از آزمایش‌ها مهم و موردنیاز برای بررسی رفتار خاک در اثر بارهای وارد بر آن آزمایش بارگذاری صفحه بوده که امروزه به‌طور گسترده توسط مهندسیین خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بدست آوردن این پارامترهای مکانیک خاک آزمایشات و روابط بسیاری اعم از روابط تئوری و راه‌های آزمایشگاهی وجود دارد، ولی همواره یکی از مؤثرترین و مستقیم‌ترین راه‌های بدست آوردن این پارامتر استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه می‌باشد. امروزه آزمایش بارگذاری صفحه به‌عنوان یکی از متداول‌ترین آزمایشات در محل برای بدست آوردن پارامترهای مقاومتی خاک از جمله ضریب بستر خاک مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به مدل رفتاری خاک‌ها ایده آل‌ترین روش‌ها برای بررسی ظرفیت باربری شالوده‌ها استفاده از نتایج با مقیاس واقعی است که این روش بررسی هم بسیار هزینه‌بر است و هم این‌که اجرای این آزمایش‌ها مشکلات اجرایی زیادی دارد. روش دیگر استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی با مقیاس کوچک‌تر هستند که این آزمایش‌ها نیز مشکلاتی از جمله شرایط مرزی، دست‌خوردگی آزمایش و ... دارند.

آزمایش‌ها مبنای گسترش روش کلاسیک ظرفیت باربری پی‌های سطحی هستند. در نتیجه، روش‌های متنوع تئوری و آزمایشگاهی متفاوتی در این رابطه وجود دارد. یکی از ابتدائی‌ترین معادلات ظرفیت باربری برای پی سطحی توسط ترزاقی پیشنهاد گردید، که براساس نظریه ظرفیت باربری پراندل (۱۹۲۰) با اندکی اصلاح بدست آمده است. در این تحلیل از نظریه خمیری برای تحلیل سوراخ‌کنندگی یک پایه ی صلب به داخل مصالح نرمتر (خاک) استفاده شده است. معادلات ظرفیت باربری ترزاقی برای پی‌های سطحی با نسبت  $D \leq B$  به دست آمده اند بطوریکه بتوان از مقاومت برشی در خاک سربرابر صرف نظر کرد. روابط ترزاقی اغلب نتایج محافظه کارانه بدست می‌دهد و شاید از همین جهت است که سابقه ی کاربرد موفقیت آمیزی دارد. کمبود تحلیل ترزاقی عدم توانائی در تعیین ظرفیت باربری شالوده‌های تحت سربراهای مایل و برون مرکزی می‌باشد. برای شالوده‌های حامل لنگر یا نیروهای افقی و یا پی‌های کج واقع بر زمینهای شیبدار نباید از این روش استفاده کرد (Terzaghi, K, 1943:130). اما روش دیگر، معادله ظرفیت باربری هنسن برای هر نسبت  $D/B$  قابل کاربرد است بنابراین می‌توان آنرا هم برای پی‌های سطحی (شالوده‌ها) و هم برای پی‌های عمیق (شمع‌ها و پی‌های صندوقه‌ای) بکار برد. همچنین در بسط بیشتر معادله ی کلی ظرفیت باربری شامل ضرائب کجی پی ( $b_i$ ) برای موقعیت‌هایی که در آن شالوده نسبت به افق انحراف دارد و ضرائب شیب زمین ( $g_i$ ) برای در نظر گرفتن شیب احتمالی زمینی که شالوده را نگه می‌دارد می‌باشد (Hansen, J.B, 1970:54). روش وسیع اساساً همان روش هنسن همراه با برخی تغییرات در محاسبه ی ضرائب می‌باشد و بطور کلی کاربرد معادله ی وسیع تاحدودی آسانتر از معادله ی هنسن می‌باشد، و در مواردی که پی کج است، یا هنگامی که شالوده بر یک شیب قرار می‌گیرد یا در موارد  $B/D > 1$  کاربرد دارد. وسیع (۱۹۷۳) توصیه می‌نماید که ضرائب عمق برای پی‌های سطحی  $D/B \leq 1$  بکار برده نشود زیرا در این موارد برای مقدار سربرابر اطمینان کافی وجود ندارد (Vesic, A.S, 1973:25). میرهوف یک معادله ی ظرفیت باربری شبیه معادله ی ترزاقی پیشنهاد نمود اما ضریب شکل ( $S_q$ ) و همچنین ضرائب عمق ( $d_i$ ) و ضرائب تمایل ( $i_i$ ) برای حالتیکه بار نسبت به قائم انحراف دارد منظور نمود. ظرفیت باربری نهائی حاصل از معادله ی میرهوف برای عمقی در حدود  $D \approx B$  تفاوت چندانی با مقدار حاصل از معادله ی ترزاقی ندارد. تفاوت بین مقادیر حاصل از این دو معادله در اعماق بزرگتر آشکار می‌شود. حال توجه ما در این تحقیق بر روی پی‌هایی متمرکز است که بر روی دولایه خاک قرار دارند که لایه بالایی شن ولایه ی پایینی ماسه هستند. (Meyerhof, G.G et al, 1978:86)

در این زمینه بولز مطرح می‌کند که ظرفیت برشی خاک دولایه را با یک خاک تک لایه با مشخصات میانگین می‌توان جایگزین کرد. مقادیر  $c$  چسبندگی و  $\phi$  اصطکاک از رابطه زیر به دست می‌آید: (Bowles J.E,1988)

$$\phi_{ave} = \tan^{-1} \frac{h_1 \tan^{-1} \phi_1 + h_2 \tan^{-1} \phi_2 + h_3 \tan^{-1} \phi_3 + \dots}{\sum h_i} \quad \text{و} \quad c_{ave} = \frac{c_1 h_1 + c_2 h_2 + c_3 h_3 + \dots}{\sum h_i}$$

کارامیتروس و همکاران مطالعه‌ای در دانشگاه یونان انجام دادند. این مقاله تأثیر روانگرایی بر روی کاهش ظرفیت باربری پی‌های قرار گرفته روی دولایه رس را بررسی می‌کند. جهت تحلیل از نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. در این مقاله ضخامت لازم برای رویه رسی به دست آمده و ابعاد آن مورد تحلیل قرار گرفته است. تأثیر نواری یا دایره‌ای بودن در تحلیل دیده شده و شکست قبل از زلزله و در هنگام زلزله با مدل‌های مایرهورف و همکاران بررسی شده است. (D.L.Karamitros et al,2013:1)

مقاله‌ای توسط آناستاسپولوس و همکاران در دانشگاه یونان انجام شده است. این مقاله مدل ساده شده‌ای جهت شبیه‌سازی پاسخ سبکی پی‌های نواری و صحت سنجی آن با کمک نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. این آنالیز برای ماسه متراکم و ماسه سست با زوایای اصطکاک مختلف انجام شده است و برای خاک رس نیز صحت سنجی شده است. (Anastasopoulos et al,2011:1)

مطالعه‌ای توسط کلزی و همکاران در دانشگاه اسکاتلند، نتیجه بررسی آزمایشگاهی و مقایسه عددی دوبعدی و سه‌بعدی روی اسکله ساحلی است که انواع بارهای افقی و قائم و لنگر و ترکیبات مختلف آن‌ها در شرایط پی روی دولایه خاک که بالای ماسه متراکم و دومی رس متراکم می‌باشد، انجام شده است. در این مطالعه مقادیر مختلف نیروی افقی و عمودی با تغییر در پارامترهای مختلف خاک روی یک پی نواری دیده شده است. آنالیز اجزا محدود توسط 2D & 3D FE انجام شده است. (LKellezi et al,2008:1)

دایره‌ای بر روی خاک دو لایه که لایه بالا رس و لایه پایین ماسه متراکم است انجام شده است. در این مقایسه اثر ابعاد پی و ضخامت لایه خاک بر روی نشست پی رینگی تحلیل شده است. (R.Ziaie Moayed et al,2012:2)

در مقاله‌ای که در دانشگاه نیوکاسل توسط کیو انجام شده است با استفاده از روش ANN و نوشتن رگرسیون چند متغیره روی خاک‌های چسبنده که حداکثر ده لایه است با استفاده از روش مرز بالا و پایین (upper bound lower bound) و حل رگرسیون‌های چند متغیره، موفق در بدست آوردن رابطه‌ای جهت پیش‌بینی ظرفیت باربری شده‌اند که سپس با معادلات کلاسیک مقایسه شده است. (Y.L.Kuo et al,2009:1)

از اواسط دهه ۱۹۸۰ تعداد زیادی مطالعه آزمایشگاهی برای تخمین ظرفیت باربری نهایی و ظرفیت باربری مجاز پی‌های سطحی قرار گرفته بر روی خاک مسلح شده با چند لایه ژئوگرید گزارش شده است. نتایج به دست آمده حاکی از اثربخش بودن این نوع تسلیح است (Chen et al,2009)

سیریش و همکاران رفتار پی دایره‌ای را بر روی ماسه مسلح شده با ژئوسل در خاک رس لای دار را بررسی نمودند. پی دایره‌ای به قطر ۰/۱۵ متر و ضخامت ۰/۳ متر و مخزن خاک به ابعاد ۰/۹×۰/۹×۰/۹ متر انتخاب شده است. یک حفره به قطر ۰/۰۹۵ متر توسط لوله PVC در رس ایجاد شده است. ژئوسل و ژئوگرید به شکل مربع و مقادیر  $u/D = ۰/۰۷۵$  و  $t/D = ۰/۰۵$  است. ماسه یکنواخت با سه دانسیته ۴۸٪، ۵۹٪ و ۷۰٪ در مخزن به روش بارش آماده شده و بارگذاری به روش کرنش کنترل و با سرعت ۲ میلیمتر بر دقیقه انجام می‌شود. (Sireesh et al,2009:2)

## ۲- صحت سنجی انجام شده

در این تحقیق به بررسی آزمایش بارگذاری صفحه بر روی خاک‌های لایه‌ای پرداخته می‌شود، مشخصات مصالح مدل شده مطابق جدول ۱ است. لازم به ذکر است از مدل رفتاری دراگر-پراگر نیز استفاده شده است. برای صحت سنجی از کار صورت گرفته توسط ورما و همکاران استفاده شده است (Verma, A. and Bhatt, R,2013:5)

## جدول ۱- مشخصات خاک‌های مورد استفاده در صحت سنجی و تحلیل‌ها

نوع خاک	$E \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$	$\nu$	$\gamma \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	$\phi$	$C \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$	زاویه اتساع $\psi$
ماسه	$5e^5$	0.35	1820	32	0	2
شن	$1e^6$	0.3	1950	39	0	5

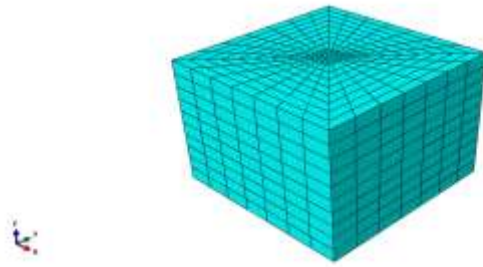
## ۳- مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی بررسی شده در این تحقیق مربوط به نتایج کار ورما می‌باشد، که در آن آزمایش بارگذاری صفحه بر روی خاک تک لایه شنی و ماسه‌ای و ترکیبی از خاک دولایه شنی و ماسه‌ای با ضخامت‌های متفاوت در محفظه‌ای فولادی انجام شده است. نمودارهای بار نشست برای خاک در حالت‌های تک لایه و دولایه بدست آمده است. خاک دو لایه از یک لایه شن در قسمت فوقانی و یک لایه ماسه‌ای در قسمت تحتانی تشکیل شده است. محفظه و جعبه آزمایش دارای ابعادی به طول و عرض ۲ متر و ارتفاعی برابر ۱/۵ متر می‌باشد. شکل ۱ محفظه آزمایش را نشان می‌دهد. ضخامت لایه شنی فوقانی در چهار حالت مختلف که عبارت است از ۰، ۰/۵، ۱، ۱ و ۱/۵ برابر عرض صفحه بارگذاری، مورد بررسی قرار گرفته است. صفحه بارگذاری مربعی به طول ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد و به منظور دست یابی به تراکم یکسان، لایه‌های خاک به صورت سقوط آزاد از ارتفاع یک متری رها شده و این عمل تا رسیدن ضخامت هر لایه به ۱۰ سانتی‌متر ادامه می‌یابد. شرایط مرزی برای مدل سازی بدین صورت می‌باشد که مرزهای کناری مدل را در راستای افقی به صورت گیردار و در راستای قائم به صورت آزاد در نظر می‌گیریم. کف مدل را هم در دو جهت قائم و افقی به صورت گیردار اعمال می‌کنیم.

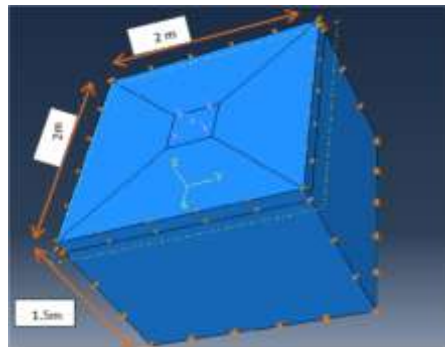


شکل ۱- محفظه و جعبه آزمایش بارگذاری صفحه

در بخش صحت سنجی برای مقایسه روش عددی با آزمایشگاهی به مدل‌سازی آزمایش بارگذاری صفحه در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. که با همان ابعاد ساخته شده در آزمایشگاه، مدل‌سازی عددی صورت گرفته است. (شکل ۳ و ۲)

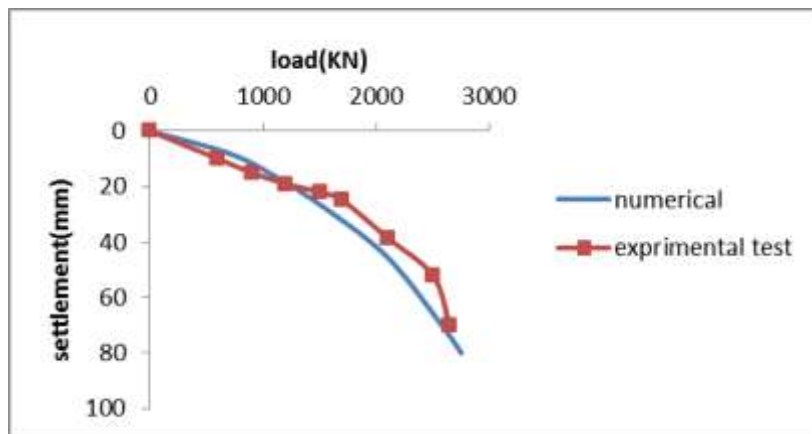


شکل ۲- ابعاد و شرایط مرزی مدل سازی



شکل ۳- محفظه‌ای که بر روی آن آزمایش بارگذاری صفحه انجام می‌گیرد.

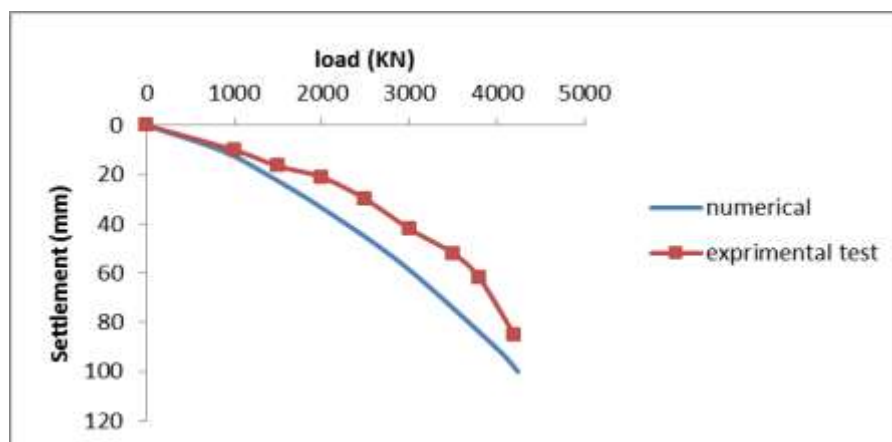
در ابتدا به مقایسه نمودارهای آزمایشگاهی انجام شده توسط ورما و همکاران با نمودارهای عددی در خاک تک لایه می‌پردازیم. هدف از این کار به دست آوردن پارامترهای مقاومتی خاک در مدل سازی عددی می‌باشد. به طوری که بتواند بهترین انطباق را با مدل آزمایشگاهی داشته باشد ( شکل ۴ ).



شکل ۴ : مقایسه بین نمودار آزمایشگاهی و عددی در خاک تک لایه ماسه‌ای

در ادامه تحقیق به منظور تکمیل کار صحت سنجی به بررسی آزمایش بارگذاری صفحه بر روی خاک‌های لایه پرداخته شده است. به این صورت که یک لایه شن در بالا و یک لایه ماسه در زیر آن قرار دارد. ضخامت لایه شن دارای مقادیر ۰/۵ برابر ابعاد

صفحه بارگذاری می‌باشد، و با توجه به ثابت بودن عمق محفظه یا باکس مورد استفاده ضخامت لایه ماسه‌ای که در زیر قرار گرفته بدست می‌آید. (شکل ۵)



شکل ۵: مقایسه بین نمودار آزمایشگاهی و عددی در خاک دو لایه ماسه‌ای و شنی

با توجه به نمودارهای بدست آمده به این نتیجه می‌رسیم که صحت سنجی نتایج آزمون آزمایشگاهی با مدل‌سازی عددی در حد قابل قبول انطباق دارند. به طوری که حداکثر این اختلاف در حالتی است که مقطع خاک به صورت دو لایه شنی و ماسه‌ای بوده و از صفحه بارگذاری با عرض ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است که نتایج حاکی از اختلاف ناچیز نشست در خاک تک لایه و اختلاف ۱۰ درصدی نشست در حالت خاک لایه‌بندی شده می‌باشد.

### ۳- مشخصات مصالح استفاده شده در تحلیل‌ها :

مشخصات مصالح مصرفی برای مدل‌سازی مطابق جدول ۱ می‌باشد. همچنین از نوعی ژئوتکستایل بافته نشده ساخته شده در ایران به نام N400۲ به عنوان مسلح کننده استفاده کرده‌اند. مشخصات این نوع ژئوتکستایل نیز در جدول ۲ زیر قابل مشاهده می‌باشد:

جدول ۲- مشخصات لایه‌های ژئوتکستایل (ASTM D5321,2002:93)

Fabric Properties	Test Method (ASTM)	Unite	
Polymer Type			PET
Unite Weight	D-5261	gr / m <sup>2</sup>	400
Thickness	D-5199	Mm	1.60
Grab Tensile Strength	D-4632	N	1750
Grab Elongation	D-4632	%	>50
Trapezoidal Tear	D-4833	N	595
Puncture Strength	D-4533	N	930
Wide With Tensile	D-4595	KN / m	23.1

## ۴- نحوه مدل سازی و تحلیل‌ها:

در این تحقیق اثر خاک‌های لایه‌ای در آزمایش بارگذاری صفحه در نرم‌افزار آباکوس مدل کرده، به طوری که با افزایش تعداد لایه مسلح کننده با فاصله‌های مشخص شاهد بهبود ظرفیت باربری خاک باشیم. اثر قرارگیری لایه‌های ژئوتکستایل و همچنین تعداد آن‌ها نیز در تحقیق زیر بررسی شده است. در این پژوهش به بررسی رفتار خاک‌های لایه‌ای در آزمایش بارگذاری صفحه می‌پردازیم. ابعاد صفحه‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت است از  $30 \times 30$  سانتی‌متر مربع می‌باشند. به منظور بررسی اثر خاک‌های لایه‌ای بر نتایج آزمایش بارگذاری صفحه به ترکیبات مختلفی از خاک‌های لایه‌ای پرداخته شده است و به ترتیب یک لایه خاک شنی و در زیر آن خاک ماسه‌ای قرار گرفته است. میزان ضخامت لایه شن که در بالا قرار گرفته، با توجه به ابعاد صفحه تغییر می‌کند. چهار حالت برای ضخامت لایه شن در نظر گرفته شده است:  $0/5$ ،  $1$ ،  $1/5$  و  $2$  برابر عرض صفحات، میزان ضخامت لایه شن می‌باشد. در یک تقسیم بندی کلی می‌توان چهار حالت را در نظر گرفت:

حالت اول: لایه شن معادل  $0/5$  برابر عرض صفحات می‌باشد.

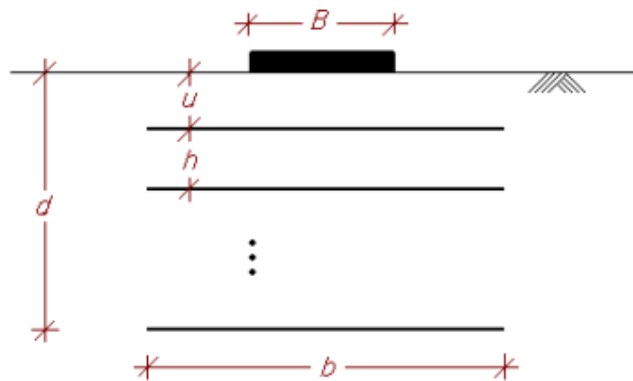
حالت دوم: لایه شن معادل  $1$  برابر عرض صفحات می‌باشد.

حالت سوم: لایه شن معادل  $1/5$  برابر عرض صفحات می‌باشد.

حالت چهارم: لایه شن معادل  $2$  برابر عرض صفحات می‌باشد.

همچنین میزان ضخامت مجموع لایه شن و ماسه  $1$  متر می‌باشد. در انتها نیز به بررسی اثر مسلح کننده‌ها بر روی افزایش ظرفیت باربری در خاک‌های لایه‌ای پرداخته می‌شود و اثر تعداد لایه‌ها در بهبود ظرفیت باربری آورده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نسبت فاصله مسلح کننده قرار گرفته در لایه اول به عرض صفحه بارگذاری در حدود  $0/3$  می‌باشد ( $U/B=0.3$ ) که با توجه به ابعاد صفحه بارگذاری که  $0/3$  می‌باشد مقدار  $U$  در حالت اول  $0/09$  متر است و به همین ترتیب فاصله قرارگیری لایه دوم و سوم از همدیگر به همین میزان می‌باشد.



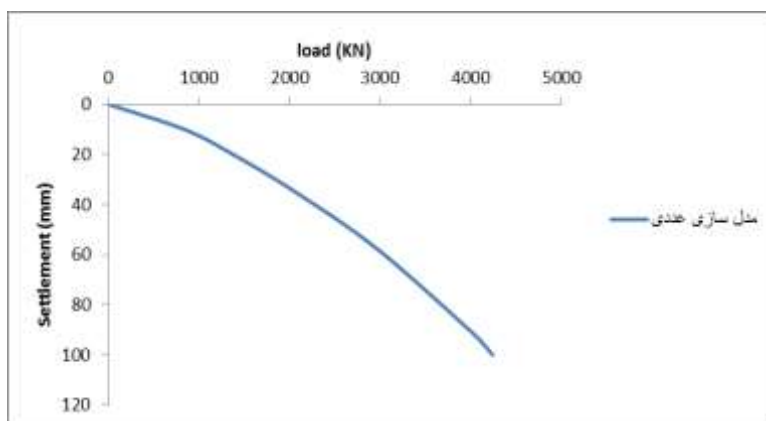
شکل ۶- نمای شماتیک از فونداسیون و نحوه قرارگیری لایه‌های مسلح کننده

اثر وجود مسلح کننده‌ها و همچنین تعداد آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. چراکه با افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده از حدی به بعد تأثیری در افزایش ظرفیت باربری ندارد. در این تحقیق اثر پارامترهای زیر بررسی می‌شود:

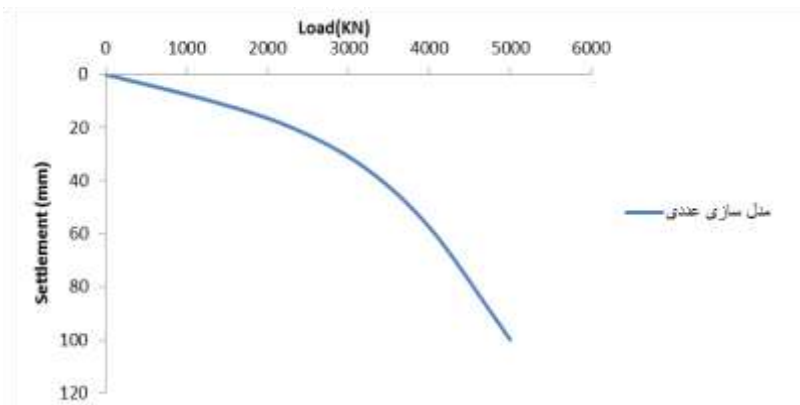
- اثر لایه‌بندی خاک
- اثر تعداد لایه‌های مسلح کننده
- اثر وجود مسلح کننده

#### ۴-۱- اثر لایه بندی خاک :

در این مرحله به اثر لایه بندی خاک پرداخته شده است. به این صورت که در مدل سازی یک خاک دو لایه ساختیم. لایه بالایی از جنس شن و لایه پایینی از جنس ماسه است و اثر افزایش ضخامت لایه شن را به نسبت عرض صفحه بارگذاری مدل شده، بررسی کردیم.



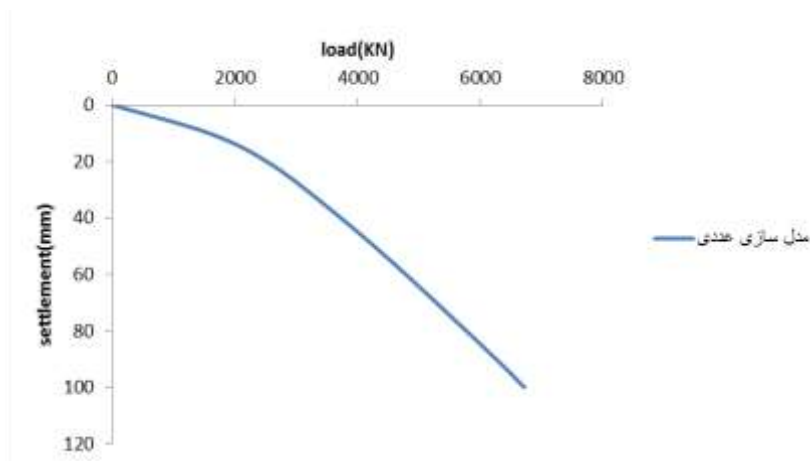
شکل ۷- بررسی نمودار بار-نشست در خاک دو لایه با ضخامت لایه فوقانی (شن) به ضخامت 0.5b



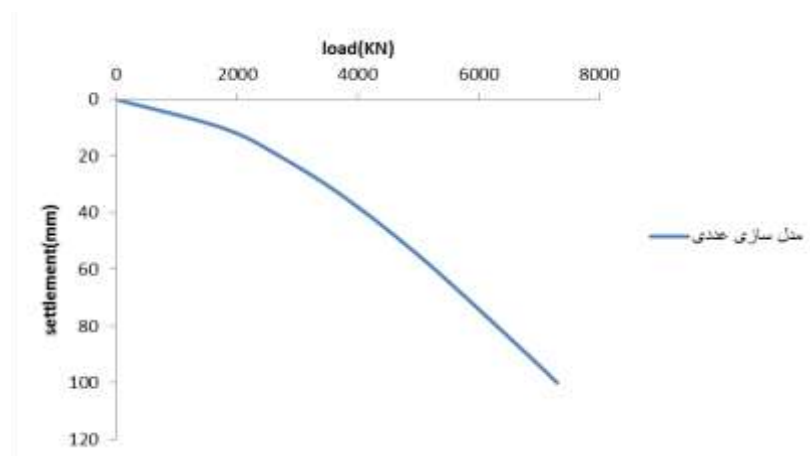
شکل ۸- بررسی نمودار بار-نشست در خاک دو لایه با ضخامت لایه فوقانی (شن) به ضخامت b

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود تا بار اعمالی ۳۰۰۰ کیلو نیوتن شاهد یک روند کاهشی با شیب ملایم می باشیم. اما با افزایش بار اعمالی، نشست بطور ناگهانی افزایش می یابد و شیب نمودار تندتر می شود. که این روال در نمودارهای ۹ و ۱۰ در بارهای کمتر از ۳۰۰۰ کیلو نیوتن قابل مشاهده است.





شکل ۹- بررسی نمودار بار- نشست در خاک دو لایه با ضخامت لایه فوقانی (شن) به ضخامت 1.5b

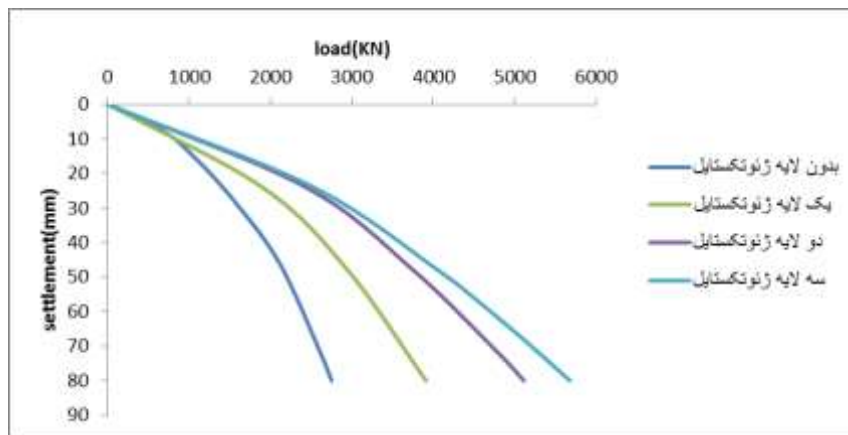


شکل ۱۰- بررسی نمودار بار- نشست در خاک دو لایه با ضخامت لایه فوقانی (شن) به ضخامت 2b

با توجه به اشکال (۷-۱۰) بالا مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه شن شاهد کاهش نشست در برابر بارهای اعمالی به خاک هستیم. با به عبارت دیگر این افزایش ضخامت باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. نکته قابل توجه این است که این کاهش نشست در ضخامت‌های پایین لایه شن مشهودتر است.

#### ۴-۲- اثر وجود لایه‌های مسلح کننده:

آنچه به وضوح نشان می‌دهد این است که بهبود عملکرد پایه‌های خاک مسلح به تعدادی از عوامل بستگی دارد و همان‌طور که در مطالعات مختلف بیان شده تسلیح خاک مسلح به کمک لایه‌های ژئوسنتتیک ظرفیت باربری آن‌ها را افزایش می‌دهد. یکی از این عوامل عمق و شرایط بهینه تسلیح برای رسیدن به بیشترین باربری می‌باشد.



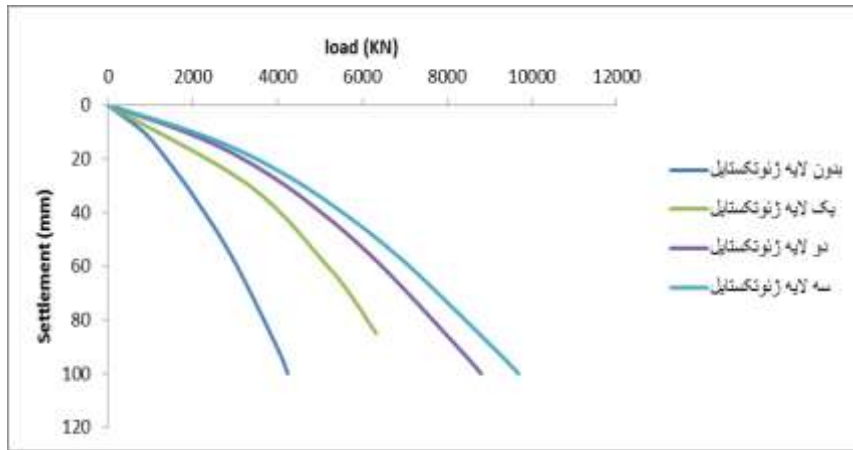
شکل ۱۱- بررسی اثر تعداد لایه‌های ژئوتکستایل در یک خاک تک لایه ماسه‌ای

در این بخش به بررسی اثر وجود لایه ژئوتکستایل در یک خاک تک لایه ماسه‌ای پرداخته شده است. همان‌طور که مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، وجود لایه ژئوتکستایل باعث افزایش چشمگیر ظرفیت باربری در آزمایش بارگذاری صفحه می‌شود. به این صورت که هر چه قدر بار وارد به خاک افزایش می‌یابد، شاهد کاهش نشست بیشتری در خاک زیر صفحه بارگذاری هستیم. اما با افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده درون خاک با فاصله  $0/5b$  از یکدیگر شاهد کاهش تأثیر مسلح کننده‌ها هستیم. در واقع روند کاهشی نشست و یا به عبارتی روند کاهشی ظرفیت باربری کم می‌شود.

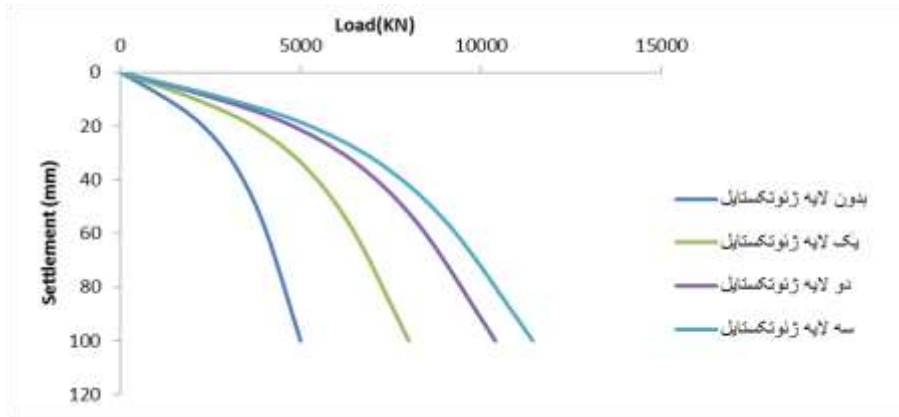
با توجه به شکل ۱۱ می‌توان به این نتیجه رسید که در حالت‌های ۲ و ۳ لایه مسلح کننده نمودار بار-نشست تا میزان معینی بر روی هم منطبق است. با افزایش ضخامت لایه فوقانی میزان باری که این دو نمودار بر روی هم منطبق می‌شوند، افزایش می‌یابد. در نمودار بالا می‌توان دریافت که تا بار ۱۰۰۰ کیلو نیوتن شاهد نشست‌های یکسان در خاک با تعداد لایه‌های مختلف مسلح کننده هستیم.

#### ۴-۳- اثر تعداد لایه‌های مسلح کننده:

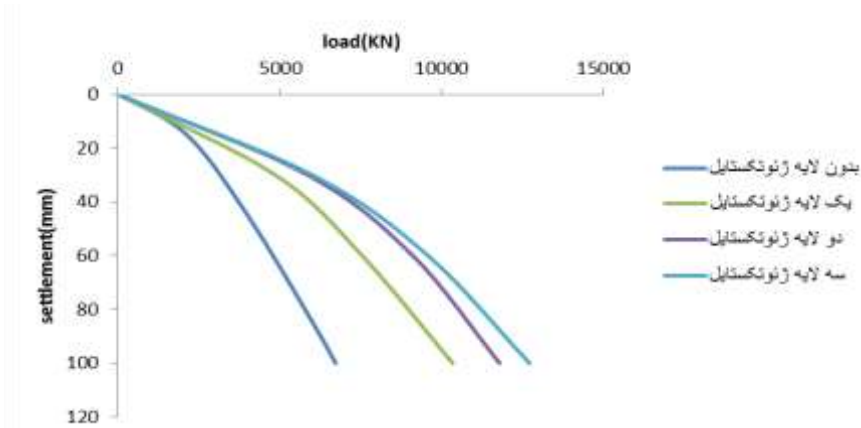
در این بخش به بررسی اثر تعداد لایه‌های مسلح کننده در افزایش ظرفیت باربری می‌پردازیم. همان‌طور که در اشکال ۱۲ تا ۱۵ مشاهده می‌شود، کاهش فاصله قائم از مسلح کننده منجر به افزایش در ظرفیت باربری خاک می‌شود. در واقع هرچه لایه ژئوتکستایل در عمق کمتری جایگذاری شود، ظرفیت باربری خاک افزایش یافته و خاک نشست کمتری خواهد داشت.



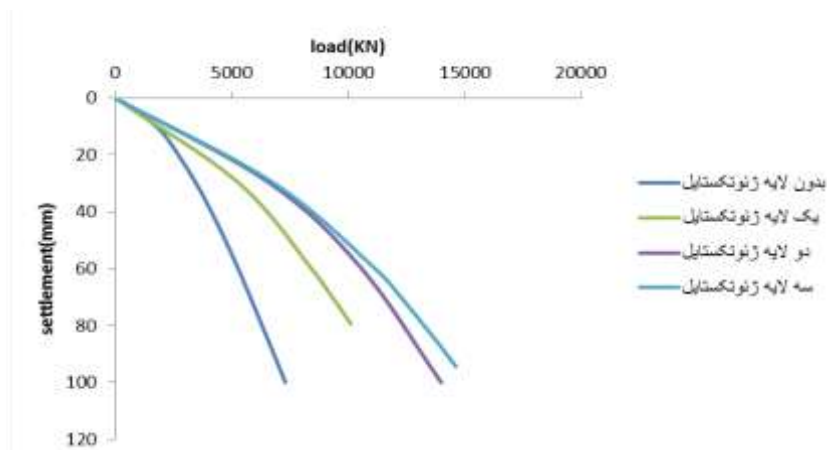
شکل ۱۲- بررسی اثر تعداد لایه ژئوتکستایل با فاصله ۰/۵ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر



شکل ۱۳- بررسی اثر تعداد لایه ژئوتکستایل با فاصله ۱ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر



شکل ۱۴- بررسی اثر تعداد لایه ژئوتکستایل با فاصله ۱/۵ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر



شکل ۱۵- بررسی اثر تعداد لایه ژئوتکستایل با فاصله ۲ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر

با توجه به نمودارهای بالا می‌توان دریافت که افزایش فاصله قائم لایه‌های مسلح کننده از اثر آن بر کاهش نشست می‌کاهد. با توجه به اشکال ۱۴ و ۱۵، تا بار ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن در صورتی که فاصله لایه ژئوتکستایل بیشتر از ۱/۵ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر باشد شاهد نشست یکسان هستیم. در اشکال ۱۲ و ۱۳ به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش فاصله لایه‌های ژئوتکستایل از ۰/۵ به ۱ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر، باعث کاهش ناگهانی نشست می‌شود.

#### ۵- نتیجه گیری:

در بررسی نمودار بار-نشست در خاک دولایه با ضخامت لایه فوقانی (شن) به ضخامت  $b$  همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تا بار اعمالی ۳۰۰۰ کیلو نیوتن شاهد یک‌روند کاهشی با شیب ملایم می‌باشیم. اما با افزایش بار اعمالی، نشست به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد و شیب نمودار تندتر می‌شود که این روال در نمودارهای بار-نشست در خاک دو لایه با ضخامت لایه فوقانی (شن) به ضخامت بیش از  $b$  در بارهای کمتر از ۳۰۰۰ کیلو نیوتن قابل مشاهده است. با افزایش ضخامت لایه شن شاهد کاهش نشست در برابر بارهای اعمالی به خاک هستیم. نکته قابل توجه این است که این کاهش نشست در ضخامت‌های پایین لایه شن مشهودتر است. وجود لایه ژئوتکستایل باعث افزایش چشمگیر ظرفیت باربری در آزمایش بارگذاری صفحه می‌شود. اما با افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده درون خاک با فاصله  $b$  از ۰/۵ یکدیگر شاهد کاهش تأثیر مسلح کننده‌ها هستیم. در بررسی اثر وجود لایه مسلح کننده در حالت‌های ۲ و ۳ لایه، به ازای بارهای اعمالی مختلف شاهد نشست یکسان هستیم. با افزایش ضخامت لایه فوقانی در تا بارهای اعمالی بزرگتری شاهد نشست یکسان هستیم. بار ۱۰۰۰ کیلو نیوتن شاهد نشست‌های یکسان در خاک با تعداد لایه‌های مختلف مسلح کننده هستیم. هرچه لایه ژئوتکستایل در عمق کمتری جایگذاری شود، ظرفیت باربری خاک افزایش یافته و خاک نشست کمتری خواهد داشت. تا بار ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن در صورتی که فاصله لایه ژئوتکستایل بیشتر از ۱/۵ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر باشد شاهد نشست یکسان هستیم. با افزایش فاصله لایه‌های ژئوتکستایل از ۰/۵ به ۱ برابر عرض صفحه بارگذاری از یکدیگر، باعث کاهش ناگهانی نشست می‌شود.

#### منابع:

1. Anastasopoulos, F., Gelagoti, R., Kourkoulis, G., Gazetas, (2011), "Simplified constitutive model for simulation of cyclic response of shallow foundations: validation against laboratory tests", DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000534.

2. ASTM D5321, 2002- Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method, American Society for Testing and Material, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
3. Bowles J.E. (1988). Foundation analysis and design, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, New York, N.Y.
4. D.L.Karamitros ,G.D. Bouckovalas, Y.K. Chaloulos ,K.I.Andrianopoulos ,2013"Numerical analysis of liquefaction-induced bearing capacity degradation of shallow foundation on two-layered soil profile" ,Soil dynamics and earth quake engineering 44 (2013) 90-101
5. Hansen,J.B.(1970),”A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity” Danish Geotechnical Institute, Copenhagen,Bul.No.28,21pp.
6. L Kellezi ,G.Kudsk ,H hofstede ,(2008),”Skirted footings capacity for combined loads and layered soil condinations” ,International conference on foundations ,Dundee ,Scotland
7. Meyerhof, G.G. and Hanna, A. M. (1978), “Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load”, Can. Geotech. J., Vol.15, pp. 565- 572.
8. R.Ziaie Moayed ,V.Rashidian ,E.Izadi ,(2012),”Evaluation on bearing capacity of ring foundations on twolayered soil” ,World academy of science engineering and technology 61(2012).
9. Sharma, R., Chen, Q., Abu-Farsakh, M. and Yoon, S. (2009), Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation, *Geotextile and Geomembranes*, Vol. 27, pp. 63-72.
10. Sireesh, S., Sitharam, T. and Kumar Dash, S. (2009), Bearing capacity of circular footing on geocell- sand mattress overlying clay bed with void, *Geotextile and Geomembranes*, Vol. 27, pp. 89-98.
11. Terzaghi, K. (1943). “Bearing capacity.” *Theoretical soil mechanics*, Chap. 8, 118–143.
12. Verma, A. and Bhatt, R. (2013), Surface foundations on reinforced sand-An experimental study, *EJGE*, Vol. 13, Bund. F, pp. 59-63
13. Vesic,A.S.(1973)”Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations’ *JSMFD*, ASCE, Vol,99, SM 1,jan, pp,45-73.
14. Y.L.Kuo ,M.B.Jaksa ,A.V.Lyamin ,W.S.Kagwwa, (2009)"ANN-based model for predicting the bearing capacity of strip footing on multi-layered cohesive soil",*Computers and Geotechnics* 36(2009) 503-516.