

بررسی تحلیلی رفتار فشار - نشست پی واقع بر بستر مسلح با ژئوسل

طاهره شقاقی (کارشناس ارشد)

سید ناصر مقدس تفرشی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۱/۳، ص. ۷۳-۶۳

امروزه بررسی رفتار پی واقع بر بستر مسلح با انواع ژئوسنتتیک‌ها نظیر ژئوتکستایل، ژئوگرید و ژئوسل مورد توجه پژوهشگران است. از این رو، این نوشتار یک روش تحلیلی بر مبنای تئوری روسازی لایه‌ها و تئوری خاک‌های چند لایه برای تخمین تغییرات فشار - نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌یی غیرمسلح و مسلح با ژئوسل ارائه کرده است. مدول کشسانی لایه‌های غیرمسلح و لایه‌ی مسلح با ژئوسل (ژئوسل و خاک داخل سلول‌های لایه‌ی ژئوسل) به صورت یک ماده‌ی مرکب، با استفاده از نتایج آزمایش سه محوری روی نمونه‌های خاک غیرمسلح و خاک مسلح به دست آمده است. تطبیق قابل قبول نتایج حاصل از روش تحلیلی موردنظر با نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌یی، مبین دقت و عملکرد مناسب روش تحلیلی موردنظر است. همچنین تأثیر پارامترهایی نظیر: مدول سختی بدون بعد خاک، سختی مصالح مصرفی در ساخت ژئوسل، ارتفاع لایه‌ی ژئوسل و قطر صفحه‌ی بارگذاری در رفتار فشار - نشست بستر مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری، ژئوسل، نشست، روش تحلیلی، مدول کشسان.

tahereh.shaghghi@gmail.com
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر تسلیح خاک با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها نظیر: ژئوتکستایل، ژئوگرید و ژئوسل به طور چشم‌گیری در ساخت جاده‌ها، پایداری شیب‌ها، بهبود بستر نرم پی‌ها توسعه یافته است. از بین انواع ژئوسنتتیک‌ها، ژئوسل به دلیل ساختار سلولی و قابلیت محصورکردن مصالح داخل سلول‌های خود موجب افزایش مقاومت برشی بیشتر خاک مسلح در مقایسه با تسلیح با انواع دیگر مسلح‌کننده‌ها می‌شود. علاوه بر این، مقاومت حاصل از اندرکنش ژئوسل با خاک بالا و پایین موجب افزایش محصورشدگی جانبی، کاهش کرنش جانبی، افزایش سختی، کاهش فشار توزیع شده در بستر و در نهایت، کاهش نشست و افزایش باربری بستر می‌شود. در خصوص تسلیح با ژئوسل، مطالعات آزمایشگاهی فراوانی انجام شده است.^[۱-۴] در پژوهشی در سال ۱۹۹۹، رفتار ماسه‌ی محصورشده با ژئوسل تک سلولی و چند سلولی را با انجام آزمایش سه محوری مورد مطالعه قرار داده‌اند.^[۵] پژوهشگرانی نیز با استفاده از یک مدل فیزیکی، ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر بستر ماسه‌یی مسلح با ژئوسل را بررسی کرده‌اند.^[۶] همچنین در یک سری مطالعات آزمایشگاهی و نظری، باربری خاکریزهای مسلح با ژئوسل مورد بررسی قرار گرفته است.^[۸-۹] در پژوهش‌های دیگری نیز با استفاده از یک مدل فیزیکی رفتار بستر ماسه‌یی مسلح با ژئوسل تحت بارهای استاتیکی و سیکلی بررسی شده است.^[۱۰-۱۲] تمامی پژوهشگران در مطالعات خود تأثیر مثبت و قابل توجه ژئوسل را در بهبود عملکرد خاکریز مسلح با

ژئوسل عنوان کرده‌اند. در مطالعه‌ی دیگری با انجام ارزیابی میدانی به بررسی تأثیر ژئوسل در افزایش باربری و کاهش نشست بستر راه پرداخته و گزارش شده است که تحت اثر عبور بار ترافیک، برای بستر غیرمسلح پس از فقط ۷ روز از ساخت جاده، حدود ۱۰۰ میلی‌متر گودافتادگی مشاهده شده است، در حالی که با تسلیح بستر راه با یک لایه‌ی ژئوسل به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر هیچ‌گونه گودافتادگی محسوسی حتی پس از ۳ سال نیز مشاهده نشده است.^[۱۳] همچنین پژوهشگران دیگری نیز با برداشتن ضخامتی حدود ۲۰ سانتی‌متر از بستر یک جاده‌ی قدیمی، اقدام به خاکریزی مجدد در حالت وجود و عدم وجود یک لایه‌ی ژئوسل تا تراز اولیه‌ی خاک کرده‌اند و با انجام آزمایش بارگذاری صفحه روی دو مقطع غیرمسلح و مسلح با ژئوسل دریافته‌اند که در بستر مسلح نسبت به بستر غیرمسلح ضمن کاهش چشم‌گیر نشست صفحه‌ی بارگذاری، مقدار تنش در تراز زیر لایه‌ی ژئوسل حدود ۵۰٪ کمتر از بستر غیرمسلح است.^[۱۴] پژوهشگرانی نیز مدلی برای شبیه‌سازی رفتار تغییرشکل بستر خاکی مسلح با ژئوسل با در نظر گرفتن اثر مقاومت اصطکاکی بین خاک بستر و ژئوسل ارائه کرده‌اند و راه حل آن‌ها بر تئوری تیر بر بستر کشسان و ینکلر استوار است.^[۱۵] در مطالعه‌ی دیگری نیز با در نظر گرفتن ۳ عامل مقاومت جانبی، توزیع تنش قائم و اثر غشایی به بررسی تحلیلی عملکرد ژئوسل در تسلیح خاک پرداخته شده است.^[۱۶] همچنین پژوهشگرانی به ارائه‌ی یک مدل عددی برای بررسی اثر ژئوسل در بهبود باربری خاک پرداخته‌اند، که در آن ارتباط تنش - کرنش جزئی برای سیستم مرکب ماسه‌ی محصورشده در سلول‌های ژئوسل بر حسب مدول مماسی بانگ (E_t) و مدول مماسی بالک (B_t) بیان شده است.^[۱۷]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۳، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۱۶.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عمده‌ی مطالعات پژوهشگران بر روی عملکرد ژئوسل، مبتنی بر مطالعات آزمایشگاهی و یا عددی است، به طوری که بررسی‌های تحلیلی اندکی بر روی عملکرد ژئوسل در بستر مسلح با ژئوسل انجام شده است. بنابراین با توجه به کاربرد رو به گسترش ژئوسل در تسلیح خاک، ارائه‌ی یک روش تحلیلی در خصوص باربری پی‌های سطحی واقع بر بستر مسلح با ژئوسل و تعیین رفتار فشار - نشست آن‌ها بسیار سودمند خواهد بود. از این رو هدف از این مطالعه، ارائه‌ی یک روش تحلیلی جهت ارزیابی رفتار بار - نشست پی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ژئوسل است، به طوری که جهت استفاده از این روش، فقط نیاز به داشتن نتایج آزمایش سه‌محوری بر روی خاک غیرمسلح و خاک مسلح از بستر موردنظر است.

۲. طرح موضوع و فرضیات

شکل ۱، تصویر شماتیک یک پی دایره‌یی با قطر $2a$ ($D = 2a$) واقع بر بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل را نشان می‌دهد. لایه‌ی ژئوسل به ضخامت h_g در عمق u از سطح بستر قرار گرفته است. هدف کلی، ارائه‌ی یک روش تحلیلی برای ارزیابی رفتار فشار - نشست پی دایره‌یی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل (مطابق شکل ۱) است. روش تحلیلی و روابط موردنظر بر مبنای تئوری سیستم خاک‌های n لایه،^[۱۸] و تئوری روسازی لایه‌ها،^[۱۹] استوار است.

این فرضیات در این روش تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند:

- بستر پی از نوع خاک دانه‌بی، همگن و ایزوتروپ است.
- لایه‌های غیرمسلح و مسلح فقط تغییر شکل قائم می‌دهند.
- بار قائم وارد بر پی به صورت یکنواخت در لایه‌ها توزیع می‌شود.
- پی دایره‌یی و فاقد عمق مدفون ($D_f = 0$) است.
- ارتباط فشار - نشست در لایه‌های خاک غیرمسلح و خاک مسلح با ژئوسل به صورت کشسان فرض شده است، اما با تغییر سختی لایه‌های بستر در هر نماز تنش، رفتار غیرخطی فشار - نشست پی قابل ارائه است.

فرمولاسیون مورد استفاده در تحلیل رفتار تنش - نشست پی واقع بر بستر مسلح و غیرمسلح، بر پایه‌ی روابط هیرای برای خاک‌های چند لایه،^[۱۸] و وکیلی و همکاران در خصوص تئوری لایه‌های روسازی،^[۱۹] استوار است. هیرای با توسعه‌ی روابط مربوط به بررسی کشسان خاک‌های چند لایه که قبلاً توسط پژوهشگران دیگری بررسی شده بود،^{[۲۰][۲۱]} روابط جدیدی در این زمینه ارائه کرد. او با در نظر گرفتن

یک سیستم متشکل از n لایه خاک با مدول کشسان E_m ، نسبت پواسون ν_m و ضخامت H_m برای هر لایه ($m = 1, 2, \dots, n$) تحت بار قائم q ، ضخامت معادل (H_{me}) لایه‌ی m ام را برای هر یک از لایه‌ها (با فرض یکسان بودن مدول کشسانی تمامی لایه‌ها برابر E_n) به دست آورد. همچنین وی رابطه‌یی را برای محاسبه‌ی مدول کشسان معادل E_h یک سیستم n لایه نیز ارائه کرده است. وکیلی و همکاران نیز برای یافتن نشست سطح خاک، روش مبتنی بر تئوری لایه‌های روسازی را پیشنهاد و با در نظر گرفتن یک سیستم خاک سه لایه تحت بار یکنواخت q وارد بر یک سطح دایره‌یی با شعاع a و روابط تئوری خاک‌های n لایه، تئوری لایه‌های روسازی را ارائه کرده‌اند.^[۱۹]

۳. فرمولاسیون تغییرات فشار - نشست پی واقع بر بستر

غیرمسلح

برای یک پی دایره‌یی با قطر $2a$ ($D = 2a$) تحت تنش قائم و یکنواخت q واقع بر یک لایه خاک نیمه بی‌نهایت با مدول کشسان E_n و نسبت پواسون ν_n (شکل ۲)، تغییرات نشست بستر در مقابل تنش q در هر نقطه واقع در عمق z ، واقع در زیر مرکز پی طبق رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:^[۱۸]

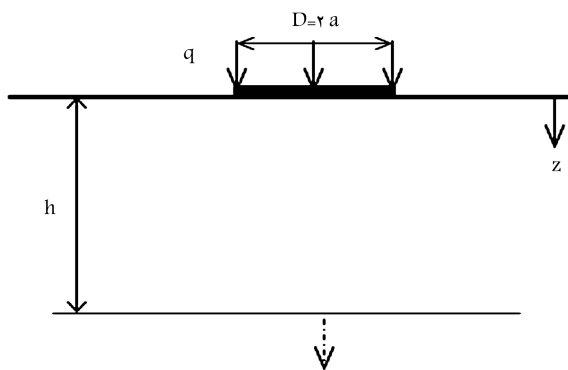
$$w(z) = \frac{2aq(1-\nu_n^2)}{E_n} \left(\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}} - \frac{z}{a} \right) \left\{ 1 + \frac{z/a}{2(1-\nu_n)\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}}} \right\} \quad (1)$$

که در آن، E_n و ν_n به ترتیب مدول کشسانی و ضریب پواسون لایه‌ی خاک، a شعاع پی دایره‌یی ($D = 2a$)، z عمق نقطه‌ی موردنظر و q تنش یکنواخت وارد بر پی هستند.

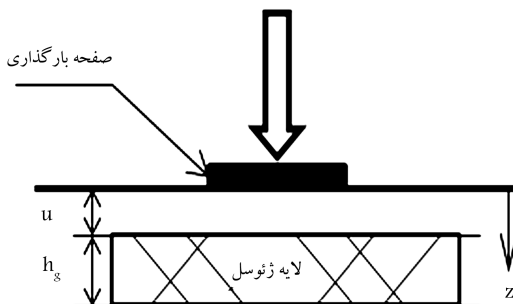
۴. فرمولاسیون تغییرات فشار - نشست پی واقع بر بستر

مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل

شکل ۳ الف، یک پی دایره‌یی با قطر $2a$ ($D = 2a$) بر روی بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل به ضخامت $h_g = H_1$ واقع در عمق $u = H_2$ از سطح بستر را نشان می‌دهد. به منظور ارائه‌ی رابطه‌ی فشار - نشست پی بستر مسلح، روش ارائه شده توسط وکیلی و همکاران،^[۱۹] در خصوص تئوری خاک‌های چند لایه استفاده شده



شکل ۲. پی دایره‌یی واقع بر بستر خاک غیرمسلح.



شکل ۱. طرح شماتیک نحوه‌ی قرارگیری پی دایره‌یی واقع بر بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل.

می‌آید:

$$w_1 = \frac{\gamma a q (\lambda - \nu^2)}{E_r} \left(\sqrt{\lambda + \left(\frac{H_e}{a}\right)^2} - \frac{H_e}{a} \right) \left(1 + \frac{H_e}{\gamma a (\lambda - \nu) \sqrt{\lambda + \left(\frac{H_e}{a}\right)^2}} \right) \quad (5)$$

$$w_0 = \frac{\gamma a (\lambda - \nu^2) q}{E_r} \quad (6)$$

$$w_r = \frac{E_r}{E_h} (w_0 - w_1) \quad (7)$$

$$w = w_1 + w_r \quad (8)$$

در روابط مذکور، مقدار جابجایی لایه‌ی معادل در عمق $z = H_e$ ، w_0 جابجایی لایه‌ی معادل در عمق $z = 0$ و w_r نیز میزان تغییر شکل لایه‌ی معادل خاک هستند. مدول سختی لایه‌ها در مراحل مختلف بارگذاری با توجه به روابط بخش ۱.۵ و کرنش زامین لایه $(j = 1, 2, 3)$ در شکل ۳ الف با توجه به روابط ۹ الی ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$h_{e_j} = (E_j/E_r)^{\frac{1}{2}} H_j \quad (9)$$

$$w_j = \frac{\gamma a q (\lambda - \nu^2)}{E_r} \left(\sqrt{\lambda + \left(\frac{\sum_{k=1}^j h_{e_k}}{a}\right)^2} - \frac{\sum_{k=1}^j h_{e_k}}{a} \right) \left(1 + \frac{\sum_{k=1}^j h_{e_k}}{\gamma a (\lambda - \nu) \sqrt{\lambda + \left(\frac{\sum_{k=1}^j h_{e_k}}{a}\right)^2}} \right) \quad (10)$$

$$w_{pj} = \frac{E_r}{E_j} (w_{j-1} - w_j) \quad (11)$$

$$\varepsilon_j = \frac{w_{pj}}{H_j} \quad (12)$$

در روابط مذکور، پارامترهای w_j ، w_{pj} ، ε_j به ترتیب ارتفاع معادل زامین لایه با لایه‌ی چهارم سیستم، جابجایی در عمق $\sum_{k=1}^j h_{e_k}$ ، میزان تغییر شکل واقعی لایه با ضخامت H_j و کرنش زامین لایه هستند. نشست سطح خاک در زامین مرحله‌ی بارگذاری (w^i) از طریق رابطه‌های ۱۳ الی ۱۶ محاسبه می‌شود:

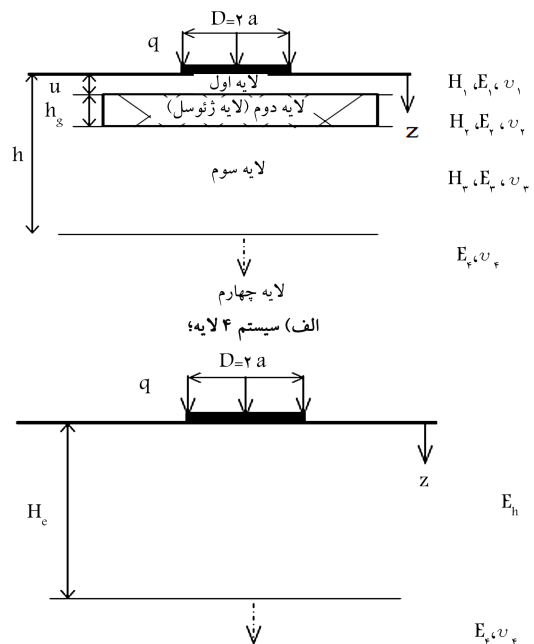
$$\Delta w_1 = \frac{\gamma a (q_i - q_{i-1}) (\lambda - \nu^2)}{E_r} \left(\sqrt{\lambda + \left(\frac{H_e}{a}\right)^2} - \frac{H_e}{a} \right) \left(1 + \frac{H_e}{\gamma a (\lambda - \nu) \sqrt{\lambda + \left(\frac{H_e}{a}\right)^2}} \right) \quad (13)$$

$$\Delta w_0 = \frac{\gamma a (\lambda - \nu^2) (q_i - q_{i-1})}{E_r} \quad (14)$$

$$\Delta w_r = \frac{E_r}{E_h} (\Delta w_0 - \Delta w_1) \quad (15)$$

$$w^i = w^{i-1} + \Delta w_1 + \Delta w_r \quad (16)$$

که در روابط مذکور، Δw_1 ، Δw_0 ، Δw_r و w^i به ترتیب نمو جابجایی در عمق H_e از لایه‌ی معادل به ازاا نمو بار $q_i - q_{i-1}$ ، نمو جابجایی در سطح لایه‌ی معادل به ازاا نمو بار $q_i - q_{i-1}$ ، نمو تغییر شکل لایه به عمق h و نمو جابجایی سطح لایه به ضخامت h در بار q_i هستند. همچنین برای محاسبه‌ی میزان جزء کرنش زامین



ب) سیستم ۲ لایه‌ی معادل با سیستم ۴ لایه. شکل ۳. سیستم خاک مسلح با ژئوسل.

است. بر این اساس مطابق شکل ۳ الف، بستر مورد نظر به ۴ لایه تقسیم و ضخامت لایه‌ی سوم (H_r) با در نظر گرفتن عمق مؤثر h از سطح بستر تعیین شده است:

$$H_r = h - u - h_g \quad (2)$$

ملاک تعیین عمق مؤثر (h) در زیر پی در هر مرحله از بارگذاری در دو حالت بستر غیرمسلح و بستر مسلح عمقی است که فقط 10% از تنش وارد بر پی به آن منتقل می‌شود.

مدول کشسانی و ضریب پواسون لایه‌ی اول (لایه‌ی خاک غیرمسلح با ضخامت H_1)، لایه‌ی دوم (لایه‌ی ژئوسل و خاک درون چشمه‌های آن با ضخامت H_2) و لایه‌ی سوم (لایه‌ی خاک غیرمسلح محدود با ضخامت H_r) به ترتیب E_1, E_2, E_r ، ν_1, ν_2 و ν_r هستند. همچنین لایه‌ی چهارم با مدول کشسانی E_4 ، ضریب پواسون ν_4 و ضخامت نامحدود فرض می‌شود.

با استفاده از تئوری لایه‌های روسازی، سیستم ۴ لایه‌ی شکل ۳ الف تحت بارگذاری یکنواخت روی پی دایره‌ی به یک سیستم ۲ لایه‌ی مطابق شکل ۳ ب قابل تبدیل است. مطابق با این تئوری مدول کشسانی معادل (E_h) و ضخامت لایه‌ی معادل (H_e) برای سیستم مورد نظر در شکل ۳ ب به ترتیب مطابق روابط ۳ و ۴ قابل محاسبه است:

$$E_h = \left(E_1^{\frac{1}{2}} \frac{H_1}{H_1 + H_r + H_r} + E_r^{\frac{1}{2}} \frac{H_r}{H_1 + H_r + H_r} + E_r^{\frac{1}{2}} \frac{H_r}{H_1 + H_r + H_r} \right)^2 \quad (3)$$

$$H_e = \left(\frac{E_h}{E_r} \right)^{\frac{1}{2}} (H_1 + H_r + H_r) \quad (4)$$

با توجه به سیستم معادل در شکل ۳ ب و با استفاده از تئوری لایه‌های روسازی نشست در سطح خاک (نشست پی)، w با استفاده از روابط ۵ الی ۸ به دست



شکل ۴. تصویری از آزمایش بارگذاری صفحه.^[۱۱]

جدول ۱. جزئیات آزمایش‌های بارگذاری صفحه،^[۱۱] جهت مقایسه با نتایج تحلیل‌ها.

نوع آزمایش	تعداد لایه‌ی ژئوسل	تعداد آزمایش
غیرمسلح	—	۱
غیرمسلح	۱	۱

جدول ۲. جزئیات آزمایش‌های سه محوری،^[۱۲] جهت تخمین مدول کشسان لایه‌های مسلح و غیرمسلح.

نوع آزمایش	تنش همه‌جانبه (کیلوپاسکال)	تعداد لایه‌ی ژئوسل	تعداد آزمایش
غیر مسلح	۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰	—	۳
غیر مسلح	۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰	۱	۳

مورد استفاده دقیقاً مشابه خاک و ژئوسل موردنظر در آزمایش‌های مقدس تفرشی و همکاران،^[۱۱] هستند. جدول ۲، جزئیات آزمایش‌های سه محوری را نشان می‌دهد. برای جزئیات بیشتر از آزمایش‌های بارگذاری صفحه و آزمایش‌های سه محوری می‌توان به مراجع مذکور،^{[۱۱]، [۱۲]} مراجعه کرد.

۱.۵. محاسبه‌ی مدول کشسانی لایه‌های غیرمسلح و مسلح

مدول کشسان لایه‌های غیرمسلح و مسلح بر حسب کرنش و فشار همه‌جانبه ($E = f(\sigma_3, \varepsilon)$) در هر مرحله از بارگذاری با انجام رگرسیون غیرخطی روی نتایج ۶ آزمایش سه‌محوری،^[۱۲] (شکل ۵) مربوط به نمونه‌ی خاک غیرمسلح و نمونه‌ی خاک مسلح در فشارهای همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به‌دست آمده است. شکل ۵الف و ۵ب به ترتیب نتایج آزمایش‌های سه‌محوری روی نمونه‌های غیرمسلح و نمونه‌های مسلح را نشان می‌دهند.

۱.۱.۵. مدول کشسانی لایه‌ی غیرمسلح

با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از شکل ۵الف، تغییرات تنش قائم (σ_1) بر حسب کرنش (ε) و فشار همه‌جانبه (σ_3) مطابق رابطه‌ی ۲۲ برای نمونه‌های غیرمسلح به‌دست آمده است:

$$\sigma_1 = 61.47 \sigma_3^{0.73} \varepsilon^{0.24} e^{-2.17\varepsilon} \quad (22)$$

لایه در زامین مرحله‌ی بارگذاری برای سیستم ۴ لایه از روابط ۱۷ الی ۲۰ استفاده می‌شود.

$$h_{ej} = (E_j / E_\tau)^{1/2} H_j \quad (17)$$

$$\Delta w_j = \frac{\gamma a (q_i - q_{i-1}) (1 - v^*)}{E_\tau} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sum_{k=1}^j h_{ek}}{a} \right)^2} - \frac{\sum_{k=1}^j h_{ek}}{a} \right) \left(1 + \frac{\sum_{k=1}^j h_{ek}}{\gamma a (1 - v) \sqrt{1 + \left(\frac{\sum_{k=1}^j h_{ek}}{a} \right)^2}} \right) \quad (18)$$

$$\Delta w_{pj} = \frac{E_\tau}{E_j} (\Delta w_{j-1} - \Delta w_j) \quad (19)$$

$$\varepsilon_j^i = \varepsilon_j^{i-1} + \frac{\Delta w_{pj}}{H_j} \quad (20)$$

پارامترهای Δw_j ، ε_j^i به ترتیب نموجابجایی زامین لایه در عمق h_{ej} به ازاء نمو بار $q_i - q_{i-1}$ ، نمو تغییرشکل زامین لایه به عمق H_j و کرنش زامین لایه به ضخامت H_j در بار q_i هستند.

با افزودن میزان جزء نشست Δw_i برای هر جزء بارگذاری ($\Delta q = q_i - q_{i-1}$)، به نشست مرحله‌ی $(i - 1)$ ام یعنی w_{i-1} ، نشست مرحله‌ی i ام (w_i) مطابق رابطه‌ی ۲۱ به‌دست می‌آید:

$$w_i = w_{i-1} + \Delta w_i \quad (21)$$

از آنجا که زاویه‌ی توزیع بار در لایه‌های مسلح و غیرمسلح متفاوت است، این مقدار در لایه‌های مسلح برابر با ۴۰ درجه و در لایه‌های غیرمسلح برابر با ۲۷ درجه در نظر گرفته شده است.^[۲۲]

۵. نتایج

به منظور بررسی نحوه‌ی کاربرد و همچنین بررسی صحت و عملکرد فرمولاسیون ارائه‌شده در محاسبه‌ی تغییرات فشار- نشست بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ژئوسل، نتایج حاصل از روش تحلیلی با نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ی استاتیکی مقدس تفرشی و همکاران،^[۱۱] مقایسه شده است. آزمایش‌های بارگذاری صفحه روی یک مدل پی دایره‌یی به قطر ۳۰ سانتی‌متر واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح (شکل ۱) انجام شده‌اند. ژئوسل مورد استفاده در این آزمایش‌ها به شکل لانه زنبوری از اتصال نوارهای بریده‌شده از یک نوع ژئوتکستایل بافته‌نشده با مقاومت کششی نهایی ۱۳/۱ کیلو نیوتن بر متر، ابعاد سلول 110×110 میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. خاک دانه‌یی مورد استفاده در آزمایش‌ها، ماسه‌ی خوب دانه‌بندی‌شده‌ی (SW) عبوری از الک ۳۸ میلی‌متر با توده‌ی ویژه‌ی ۲/۶۸ است. شکل ۴، تصویری از آزمایش‌های بارگذاری صفحه و جدول ۱، جزئیات این آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.

همچنین جهت تخمین مدول کشسان لایه‌های مختلف بستر (مسلح و غیرمسلح) در حین مراحل مختلف بارگذاری (مطابق بخش ۱.۵)، از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری انجام‌شده توسط مقدس تفرشی و نوری،^[۱۲] روی نمونه‌ی خاک غیرمسلح و خاک مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌های سه‌محوری به ترتیب دارای قطر و ارتفاع ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر و خاک و ژئوسل

کیلو پاسکال هستند. K_u عدد مدول بدون بدون بعد از مدل هایبربولیک پیشنهادی توسط دانکن و چنگ،^[۲۲] و مقدار M از نمودار بار - تغییر طول مصالح تشکیل دهندهی ژئوسل در مقدار متوسط ۲٫۵٪ به دست می آید.

رابطه ی پیشنهادی لاتا مقدار مدول کشسانی را به تراز کرنش وابسته نمی کند،^[۲۳] لذا به منظور اصلاح این رابطه، مقدار مدول کشسانی (E_g) در حالت کلی مطابق رابطه ی ۲۵ توسط مؤلفان پیشنهاد شده است:

$$E_g = a_1 \sigma_p^{b_1} (K_u + a_2 M^{b_2}) * f(\varepsilon) \quad (25)$$

که در آن، a_1 ، a_2 ، b_1 و b_2 پارامترهای مدل هستند که از نتایج آزمایش سه محوری به دست می آید. تابع $f(\varepsilon)$ نیز در رابطه ی ۲۳ ب تعریف شده است. پارامترهای a_1 و b_1 با قراردادن $M = 0$ در رابطه ی ۲۵ و تطبیق با منحنی تنش - کرنش نمونه های غیرمسلح در شکل ۵ الف و پارامترهای a_2 و b_2 نیز با استفاده از منحنی تنش - کرنش نمونه های مسلح در (شکل ۵ ب) به دست می آید. در نهایت، رابطه ی مدول کشسان لایه ی مسلح با ژئوسل بر حسب σ_3 ، ε ، K_u و M مطابق رابطه ی ۲۶ بیان می شود:

$$E_g = 0.12 \sigma_p^{0.73} (K_u + 100 M^{0.1}) * f(\varepsilon) \quad (26)$$

جهت محاسبه ی فشار همه جانبه در وسط هر لایه، نیاز به مقدار ضریب فشار جانبی لایه در حالت غیرمسلح (k_{un}) و حالت مسلح (k_r) است. مقدار k_{un} با توجه به توصیه ی لاتا برابر $0.75^{[۲۲]}$ و مقدار k_r نیز طبق رابطه ی ۲۷ (توسط مؤلفان) توصیه می شود:

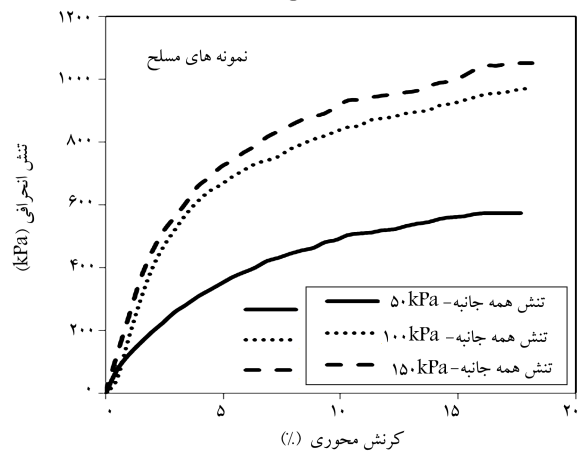
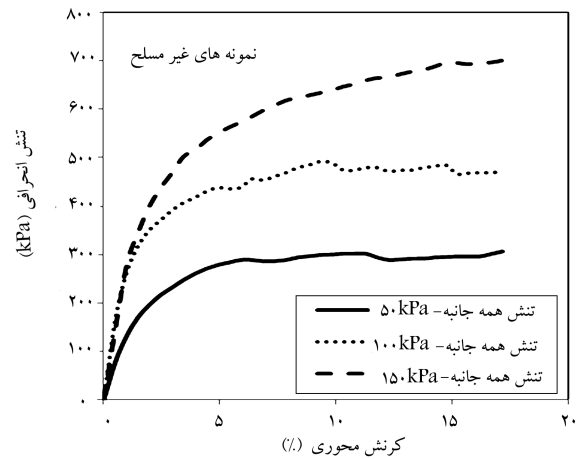
$$k_r = k_{un} (K_u + 100 M^{0.1}) / K_u \quad (27)$$

در هر مرحله از بارگذاری، مدول کشسان لایه های غیرمسلح و مسلح با محاسبه ی فشار همه جانبه در وسط هر لایه و کرنش مرحله ی قبل به ترتیب از رابطه های ۲۳ و ۲۶ به دست خواهند آمد. فشار همه جانبه در وسط هر لایه با ضرب تنش قائم توزیع شده در وسط لایه در ضریب فشار جانبی محاسبه می شود. جهت شروع مراحل محاسبه، مقدار کرنش در اولین مرحله از بارگذاری برابر 0.001 لحاظ شده است.

همان طور که ملاحظه می شود، با استفاده از نتایج آزمایش های سه محوری روی نمونه های غیرمسلح و نمونه های مسلح با ژئوسل، رابطه یی برای محاسبه ی مدول سختی لایه ی موردنظر بر حسب تنش همه جانبه و کرنش به دست آمده است، به طوری که با توجه به میزان تنش همه جانبه و تراز کرنش لایه ی موردنظر می توان به تخمینی از مدول سختی آن لایه دست یافت. بنابراین با انجام تعدادی آزمایش سه محوری روی هر نوع خاک (خاک بستر مورد مطالعه) در حالت های غیرمسلح و مسلح و طی روند مذکور می توان ضمن محاسبه ی مدول بدون بدون بعد خاک غیرمسلح (K_u)، روابطی مشابه روابط ۲۳ و ۲۶ به دست آورد. همچنین از آنجا که مدول مماسی کششی هر نوع مسلح کننده (M) توسط شرکت سازنده ی ژئوسل تعیین و ارائه می شود، مدول سختی لایه ی مسلح با توجه به نوع مسلح کننده به سهولت قابل تعیین است.

۲.۵. بررسی صحت روش ارائه شده

به منظور بررسی عملکرد و دقت روش تحلیلی موردنظر، تغییرات فشار - نشست پی دایره یی حاصل از روش تحلیلی و مدل آزمایشی،^[۱۱] برای پی واقع بر بستر غیرمسلح



شکل ۵. تغییرات تنش نفاذی با کرنش محوری برای نمونه های غیرمسلح و مسلح با ژئوسل در فشارهای همه جانبه ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال.

با توجه به رابطه ی مذکور، تغییرات مدول کشسانی بر حسب فشار همه جانبه در هر نقطه از منحنی تنش - کرنش حاصل از آزمایش سه محوری طبق رابطه ی ۲۳ الف به دست می آید:

$$E = 61.47 \sigma_p^{0.73} * f(\varepsilon) \quad (23 \text{ الف})$$

تابع $f(\varepsilon)$ در رابطه ی ۲۳ الف مطابق رابطه ی ۲۳ ب تعریف می شود:

$$f(\varepsilon) = (-3.17e^{-2.17\varepsilon} e^{0.22} + \frac{0.34\varepsilon^{0.22}}{\varepsilon} e^{-2.17\varepsilon}) \quad (23 \text{ ب})$$

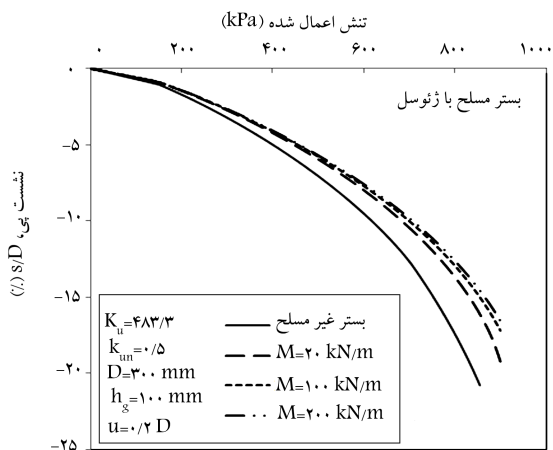
رابطه ی ۲۳ الف، امکان محاسبه ی مدول کشسانی E در تراز کرنش و فشار همه جانبه ی موردنظر را فراهم می سازد.

۲.۱.۵. مدول کشسانی لایه ی مسلح

لاتا براساس آزمایش های سه محوری فشاری بر نمونه ماسه ی مسلح با ژئوسل، یک معادله ی تجربی طبق رابطه ی ۲۴ را برای بیان مدول کشسان ماسه ی مسلح با ژئوسل پیشنهاد کرده است:^[۲۳]

$$E_g = 4 \sigma_p^{0.7} (K_u + 200 M^{0.16}) \quad (24)$$

که در آن، K_u مدول بدون بعد ماسه ی غیرمسلح، M مدول مماسی کششی ژئوسل بر حسب کیلونیوتن بر متر و σ_3 فشار همه جانبه در وسط لایه ی موردنظر بر حسب



شکل ۸. تأثیر مدول مماسی مصالح ژئوسل (M) در تغییرات فشار-نشست پی واقع بر بستر مسلح با ژئوسل.

پاسخ فشار-نشست پی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح، مطالعات پارامتری به منظور بررسی اثر پارامترهایی نظیر مدول مماسی مصالح ژئوسل (M)، مدول سختی بدون بعد خاک (K_u)، ضخامت لایه ژئوسل (h_g) و قطر صفحه ی بارگذاری (D) انجام شده است.

۳.۵. تأثیر مدول مماسی مصالح ژئوسل (M) در رفتار فشار-نشست پی

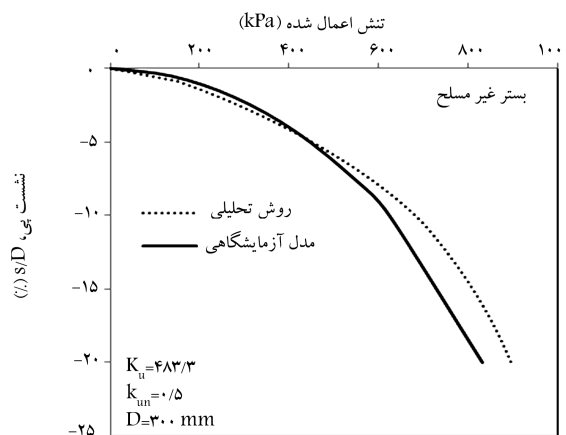
به منظور بررسی اثر پارامتر مدول مماسی مصالح ژئوسل در رفتار بستر مسلح تغییرات فشار-نشست پی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح با یک لایه ژئوسل برای مقادیر مختلف M (۲۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو نیوتن بر متر) و مقدار $K_u = 483/3$ در شکل ۸ ارائه شده است.

این شکل نشان می دهد که با افزایش مقدار M (سختی لایه مسلح) باربری پی در یک میزان مشخص از نشست افزایش می یابد. این امر به علت افزایش سختی لایه مسلح (طبق رابطه ی ۲۶) و همچنین افزایش ضریب رانش لایه مسلح با ژئوسل (طبق رابطه ی ۲۷) است. اگر چه با افزایش مقدار M نرخ بهبود در رفتار بستر کاهش می یابد، اما به هر حال تأثیر افزایش در باربری با افزایش M در ترازهای بالای بار قابل انتظار است.

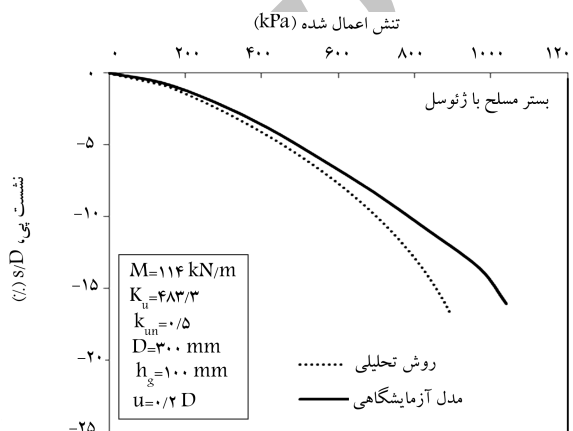
۴.۵. تأثیر مدول سختی بدون بعد خاک (K_u) در رفتار فشار-نشست پی

پارامتر بدون بعد مدول سختی خاک (K_u) تابع عوامل مختلف نظیر نوع خاک و تراکم آن است، از این رو این پارامتر می تواند نقش مؤثری در کنترل رفتار فشار-نشست پی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح داشته باشد. بدین منظور تأثیر این پارامتر برای پی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح با در نظر گرفتن مقادیر K_u برابر ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ و همچنین $M = 100 \text{ kN/m}$ به ترتیب در شکل های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

ملاحظه می شود که افزایش مقدار پارامتر K_u تأثیر به سزایی در بهبود رفتار پی صرف نظر از تسلیح یا عدم تسلیح بستر دارد. این تذکر لازم است که افزایش مقدار K_u نه فقط موجب افزایش سختی لایه غیرمسلح می شود،



شکل ۶. مقایسه ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار فشار-نشست پی واقع بر بستر غیرمسلح.

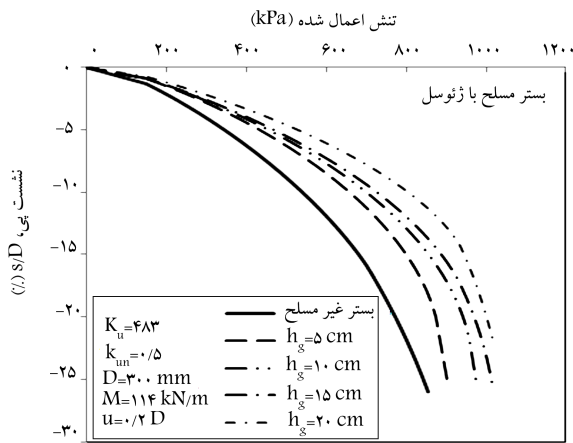


شکل ۷. مقایسه ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار فشار-نشست پی واقع بر بستر مسلح با ژئوسل.

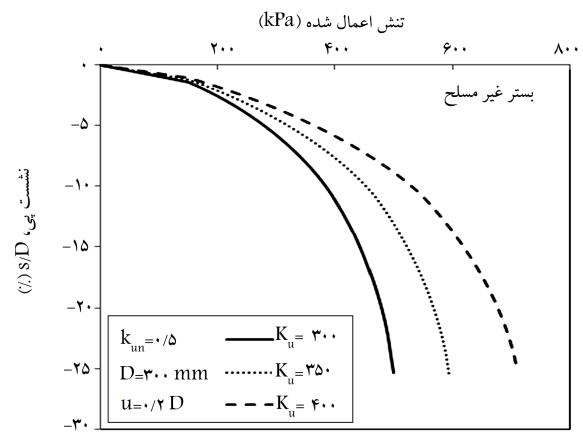
و بستر مسلح با ژئوسل به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ ارائه شده است. مقادیر K_u و M با توجه به نوع خاک و ژئوسل مورد استفاده در آزمایش ها، [۱۱، ۱۲] به ترتیب برابر $483/3$ (با توجه به نوع خاک بستر) و 114 کیلو نیوتن بر متر (با توجه به جنس ژئوتکستایل مصرفی در ساخت ژئوسل) به دست آمده اند، که جزئیات محاسبه ی آن ها به منظور اختصار ارائه نشده است. مقدار ضریب پواسون لایه های غیرمسلح و مسلح در نظر گرفته شده است.

شکل های ۶ و ۷ نشان می دهند که نتایج حاصل از روش تحلیلی و مدل آزمایشگاهی، تطبیق قابل قبولی به خصوص در ترازهای نشست پایین (مورد نظر در طراحی) دارند؛ که این امر مبین عملکرد مناسب روش تحلیلی مورد نظر است. این تذکر لازم است که روش ارائه شده برای تخمین رفتار تنش-نشست پی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح بسیار وابسته به روابط مورد نظر جهت محاسبه ی مدول کشسان لایه ها (روابط ۲۳ و ۲۶) است.

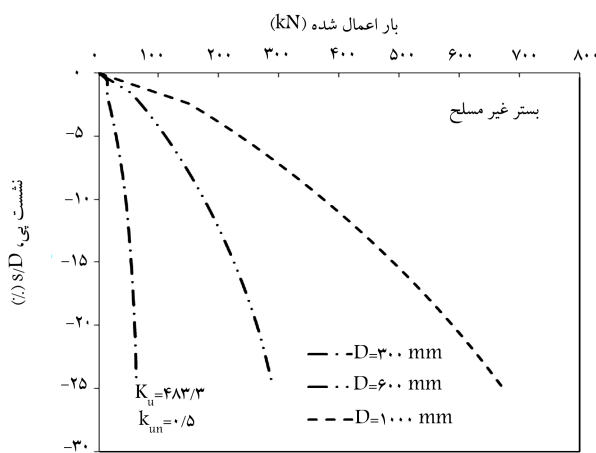
بدیهی است هر چه تعداد آزمایش های سه محوری در فشارهای هم جاذبه مختلف بیشتر باشد، دقت تخمین مدل برای مدول سختی افزایش می یابد و این انتظار وجود خواهد داشت که نتایج روش تحلیلی، تطبیق بهتری در مقایسه با نتایج آزمایش ها دارند. در ادامه، با توجه به دقت مناسب روش تحلیلی مورد نظر در تعیین



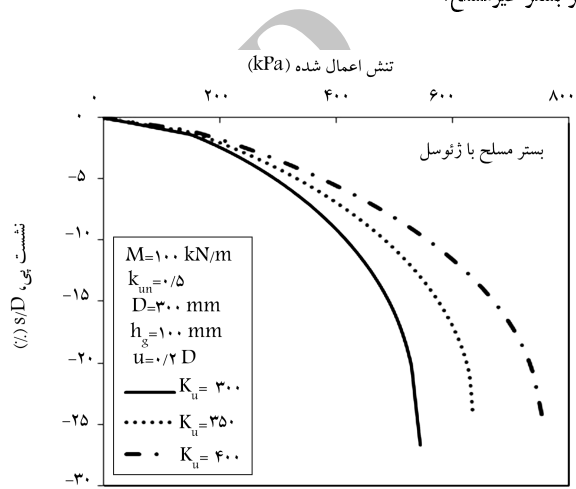
شکل ۹. تأثیر مدول سختی بدون بعد خاک (K_u) در تغییرات فشار - نشست بی واقع بر بستر غیرمسلح.



شکل ۱۰. تأثیر ارتفاع لایه‌ی ژئوسل (h_g) در تغییرات فشار - نشست بی واقع بر بستر غیرمسلح.



شکل ۱۱. تأثیر قطر صفحه‌ی بارگذاری (D) در تغییرات فشار - نشست بی واقع بر بستر غیرمسلح.



شکل ۱۲. تأثیر قطر لایه‌ی ژئوسل (h_g) در تغییرات فشار - نشست بی واقع بر بستر غیرمسلح.

۶.۵. تأثیر قطر پی (D) در رفتار بار - نشست بی

سطح یک پی تأثیر به‌سزایی در ظرفیت باربری و در نتیجه میزان بار قابل تحمل توسط آن دارد. با توجه به انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه براساس استاندارد قابل قبول^[۱۱] و قابل اعتماد بودن نتایج این نوع آزمایش جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌ها با ابعاد بزرگ‌تر، اثر مقیاس مشکل جدی به‌نظر نمی‌رسد. از این‌رو با توجه به تطبیق نسبتاً مناسب نتایج روش تحلیلی ارائه‌شده با نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه می‌توان این روش تحلیلی را نیز برای پی‌ها با ابعاد بزرگ‌تر، البته با کمی احتیاط، به‌کار برد. به‌منظور بررسی تأثیر قطر پی (D) در رفتار آن، تغییرات بار - نشست بی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح برای مقادیر مختلف از قطر پی ($D = 300, 600, 1000$ mm)، $M = 114$ kN/m و $K_u = 483/3$ به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود با افزایش قطر پی، میزان بار قابل تحمل پی به‌ازاء یک مقدار درصد نشست (s/D)، صرف‌نظر از تسلیح یا عدم تسلیح بستر، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، برای پی واقع بر بستر مسلح با ژئوسل در میزان نشست ۵٪،

بلکه افزایش سختی لایه‌ی مسلح با ژئوسل (به علت افزایش سختی خاک داخل چشمه‌های ژئوسل) را نیز در بر دارد. از این رو باید دقت لازم در انتخاب نوع خاک و تراکم آن جهت افزایش باربری لایه‌های غیرمسلح و مسلح صورت گیرد.

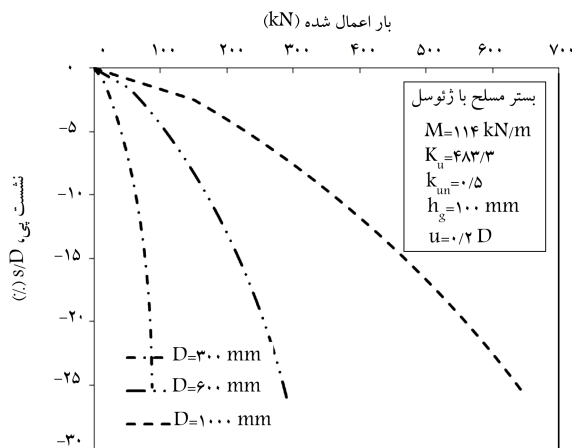
۵.۵. تأثیر ارتفاع لایه‌ی ژئوسل (h_g) در رفتار فشار - نشست بی

ضخامت لایه‌ی ژئوسل یکی از پارامترهای مؤثر در میزان باربری پی است.^[۱۱-۱۲] به‌منظور بررسی اثر این پارامتر، منحنی تغییرات فشار - نشست بی برای بستر مسلح با ژئوسل با در نظر گرفتن ژئوسل با ضخامت‌های مختلف $h_g = 5, 10, 15, 20$ cm در شکل ۱۱ ارائه شده است.

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، اگر چه افزایش ضخامت ژئوسل موجب افزایش باربری پی در یک میزان مشخص از تراز نشست می‌شود، اما نرخ افزایش در باربری با افزایش ضخامت ژئوسل کاهش می‌یابد، که این امر با نتایج حاصل از مطالعه‌ی آزمایشگاهی دیگر پژوهشگران^[۱۱، ۱۰، ۲۱] تطابق دارد.

خاک غیرمسلح و مسلح با ژئوسل است، لذا استفاده‌ی عملی و کاربردی از روش تحلیلی ارائه‌شده ساده خواهد بود. با این روش می‌توان نشست پی تحت بار وارده و همچنین با تعریف نشست مجاز پی، می‌توان ظرفیت باربری مجاز بستر غیرمسلح یا مسلح با ژئوسل را تعیین و در طراحی‌ها استفاده کرد. در صورت عدم کفایت باربری بستر، می‌توان با تغییر نوع ژئوسل یا ضخامت آن بدون تکرار آزمایش‌های سه‌محوری، ظرفیت باربری مجاز بستر را تخمین زد.

- این تذکر لازم است که به منظور حذف اثر مقیاس و جلوگیری از هرگونه خطا در تعیین پارامترهای موردنیاز در روابط تحلیلی، باید با رعایت نسبت پیشینه‌ی بعد ذرات خاک به قطر نمونه در آزمایش سه محوری براساس استاندارد موردنظر،^[۲۵] نسبت به انتخاب قطر نمونه‌ی سه محوری اقدام کرد.



شکل ۱۳. تأثیر قطر صفحه‌ی بارگذاری (D) در تغییرات فشار - نشست پی واقع بر بستر مسلح با ژئوسل.

میزان بار قابل تحمل برای پی با سه قطر ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۳۸، ۱۱۰ و ۲۳۵ کیلو نیوتن است.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار یک روش تحلیلی با استفاده از تئوری سیستم خاک چند لایه،^[۱۸] و تئوری روسازی لایه‌ها،^[۱۹] برای تخمین تغییرات فشار - نشست پی دایره‌یی واقع بر بستر غیرمسلح و مسلح با ژئوسل ارائه شده است. در این خصوص این نتایج قابل بیان است:

- روش تحلیلی موردنظر، عملکرد و دقت مطلوبی برای تخمین تغییرات فشار - نشست پی واقع بر بستر غیرمسلح و بستر مسلح در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارد. از این رو می‌تواند در تخمین تغییرات فشار - نشست پی دایره‌یی واقع بر بستر غیرمسلح و مسلح با یک لایه‌ی ژئوسل مورد استفاده قرار گیرد.
- دقت روش تحلیلی موردنظر مبین عملکرد مناسب روش ارائه‌شده در تخمین مدول کشسانی لایه‌های خاک غیرمسلح و مسلح با ژئوسل از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری است.
- با توجه به در نظر گرفتن تغییرات مدول کشسانی لایه‌ها به صورت غیرخطی و امکان تخمین مدول کشسانی در هر نماز تنش و تراز کرنش موردنظر، استفاده از رابطه‌ی خطی بین تنش و نشست قادر به تخمین مناسب تغییرات فشار - نشست پی است.
- افزایش مدول سختی بدون بعد خاک (K_u) و مدول مماسی مصالح ژئوسل (M) موجب افزایش باربری پی و کاهش نشست آن می‌شود.
- افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوسل (h_g) موجب افزایش سختی بستر و در نتیجه بهبود رفتار پی واقع بر بستر مسلح می‌شود. نرخ بهبود در باربری پی با افزایش ضخامت لایه‌ی ژئوسل کاهش می‌یابد.
- افزایش قطر صفحه‌ی بارگذاری (D) موجب افزایش بار قابل تحمل پی در یک درصد نشست مشخص (S/D) می‌شود.
- از آنجا که برای تعیین مدول سختی بستر مسلح و غیرمسلح و در نهایت تعیین رفتار تنش - نشست پی، فقط نیاز به انجام تعدادی آزمایش سه محوری روی نمونه‌های

فهرست علائم

E_t : مدول مماسی بانگ؛

B_t : مدول مماسی بالک؛

D : قطر صفحه‌ی بارگذاری؛

a : شعاع صفحه‌ی بارگذاری؛

h_g : ضخامت لایه‌ی ژئوسل؛

u : عمق قرارگیری ژئوسل؛

D_f : عمق مدفون؛

E_m : مدول کشسان لایه‌ی m ؛

H_m : ضخامت لایه‌ی m ؛

ν_m : نسبت پواسون لایه‌ی m ؛

q : تنش قائم اعمال‌شده؛

H_{me} : ضخامت معادل لایه‌ی m ؛

E_h : مدول کشسان معادل؛

H_e : ضخامت معادل لایه‌ی معادل؛

S, W : نشست پی؛

w_1 : مقدار جابجایی لایه‌ی معادل در عمق $H_e = z$ ؛

w_0 : جابجایی لایه‌ی معادل در عمق $z = 0$ ؛

w_2 : میزان تغییرشکل لایه‌ی معادل خاک؛

h_{ej} : ارتفاع معادل زامین لایه با لایه‌ی چهارم سیستم؛

w_j : جابجایی عمق $\sum_{k=1}^j h_{ek}$ ؛

w_{pj} : میزان تغییرشکل واقعی لایه با ضخامت H_j ؛

w^1 : نشست سطح خاک در زامین مرحله‌ی بارگذاری؛

Δw_1 : نمو جابجایی در عمق H_e از لایه‌ی معادل به ازاء نمو بار $q_i - q_{i-1}$ ؛

Δw_0 : نمو جابجایی در سطح لایه‌ی معادل به ازاء نمو بار $q_i - q_{i-1}$ ؛

Δw_2 : نمو تغییرشکل لایه به عمق h ؛

ε_j : کرنش زامین لایه؛

Δw_j : نمو جابجایی زامین لایه در عمق h_{ej} به ازاء نمو بار $q_i - q_{i-1}$ ؛

Δw_{pj} : نمو تغییرشکل زامین لایه به عمق H_j ؛

ε_j^2 : کرنش زامین لایه به ضخامت H_j در بار q_i ؛

Δw_i : جزء نشست؛

$\Delta q = q_i - q_{i-1}$: جزء بارگذاری؛

K_a : مدول بدون بعد ماسه‌ی غیرمسلح؛
 M : مدول مماسی کششی ژئوسل؛
 k_{un} : ضریب فشار جانبی لایه در حالت غیرمسلح؛
 k_r : ضریب فشار جانبی لایه در حالت مسلح.

w_i : نشست مرحله‌ی i ام؛
 σ_1 : تنش قائم؛
 σ_3 : فشار همه‌جانبه؛
 E_g : مدول کشسان ماسه‌ی مسلح با ژئوسل؛

منابع (References)

1. Dash, S.K., Sireesh, S. and Sitharam, T.G. "Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, **21**(4), pp. 197-219 (2003).
2. Sitharam, T.G., Sireesh, S. and Dash, S.K. "Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds", *Geotechnical and Geological Engineering*, **25**(5), pp. 509-524 (2007).
3. Sireesh, S., Sitharam, T.G. and Dash, S.K. "Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(2), pp. 89-98 (2009).
4. Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K. and Madhavi, L.G. "Model studies on Geocel supported embankments constructed over soft clay foundation", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, **23**(1), pp. 45-54 (2000).
5. Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R. and Madhavi Latha, G. "Behavior of sand confined with single and multiple Geocells", *Geotextiles and Geomembranes*, **17**(3), pp. 171-184 (1999).
6. Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R. and Rajagopal, K. "Bearing capacity of strip footings supported on Geocell-Reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(4), pp. 235-256 (May 2001a).
7. Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R. and Rajagopal, K. "Strip footing on Geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(8), pp. 529-538 (December 2001b).
8. Latha, G.M., Rajagopal, K. and Krishnaswamy, N.R. "Experimental and theoretical investigations on geocell-supported embankments", *International Journal of Geomechanics*, ASCE, **6**(1), pp. 30-35 (2006).
9. Zhou, H.B. and Wen, X.J. "Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand mattress on soft soil", *Geotextile and Geomembranes*, **26**(3), pp. 231-238 (2008).
10. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Behavior of footings on reinforced sand subjected to repeated loading – comparing use of 3D and planar geotextile", *Geotextiles and Geomembranes, Elsevier*, **28**(5), pp. 434-447 (October 2010a).
11. Moghaddas Tafreshi, S.N., Khalaj, O. and Dawson, A.R. "Pilot-scale load tests of a combined multi-layered geocell and rubber-reinforced foundation", *Geosynthetics International*, **20**(3), pp.143-161 (2013a).
12. Moghaddas Tafreshi, S.N., Nouri, B. and Khalaj, O. "Stress-strain response of multi-layered geocell reinforced soil by triaxial test", International Symposium on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures, Italy (2013b).
13. Al-Qadi, I.L. and Hughes, J.J. "Field evaluation of geocell use in flexible pavements", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1709**(1), pp. 26-35 (2000).
14. Emersleben, A. and Meyer, N. "The use of geocells in road construction over soft soil: Vertical stress and falling weight deflectometer measurements", *The Fourth Geosynthetics Conference (EuroGeo4)*, **132**, pp. 1-8 (2008).
15. Ming-Hua, Z., Zhang, L., Heng, Z. and Caijun, S. "Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **28**(5), pp. 475-482 (2009).
16. Zhao, M.H., Zhang, L., Zou, X.J. and Zhao, H. "Research progress in two-direction composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles", *Chinese Journal of Highway and Transport*, **22**(1), pp. 1-10 (2009).
17. Dash, S.K., Rajagopal, K. and Krishnaswamy, N.R. "Behavior of geocell reinforced sand beds under strip loading", *Canadian Geotechnical Journal*, **44**(7), pp. 905-916 (2007).
18. Hirai, H. "Settlements and stresses of multi-layered grounds and improved grounds by equivalent elastic method", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **32**(5), pp. 523-557 (2007).
19. Vakili, J. "A simplified method for evaluation of pavement layers moduli using surface deflection data", The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) (1-6 October 2008).
20. Palmer, L.A. and Barber, E.S. "Soil displacement under a circular loaded area", *Proceedings of the Highway Research Board*, **20**, pp. 279-286 (1940).
21. Odemark, N. "Investigations as to the elastic properties of soils and design of pavements according to the theory of elasticity", *Statens Vaginstutute: Meddelande*, **77**, Stockholm, Sweden (1949).
22. Avesani, J.O., Bueno, B.S. and Futai, M.M. "A bearing capacity calculation method for soil reinforced with a geocell", *Geosynthetics International*, **20**(3), pp. 129-142 (2013).

23. Latha, G.M. "Investigation on the behavior of geocell supported embankments", Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai (2000).
24. Duncan, j.M. and Chang, C.Y. "Non-linear analysis of stress and strain in soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **96**(5), pp. 1629-1653 (1970).
25. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture*, ASTM, D 3398 (2000).

Archive of SID