

# بررسی عددی تأثیر سیستم کیسه-خاک در بهبود ظرفیت باربری ژئوتکنیکی خاک بستر

علی لکی روحانی<sup>۱\*</sup>، محمد بهره‌دار<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

۲- دانشجوی دکترا مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

rou001@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۲/۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۹/۱۶]

**چکیده-** به کارگیری عناصر تسلیح کننده در بهسازی و اصلاح خواص مهندسی خاک از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های فراوانی در زمینه استحصال زمین‌های غیرمرغوب و تقویت آن‌ها صورت پذیرفته است. تسلیح خاک به عنوان روشی کارآمد در بهسازی لایه‌های خاک به منظور افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌های آن استفاده می‌شود. سیستم کیسه-خاک یکی از مصنوعات پلیمری نوین است، که می‌تواند به عنوان عنصر تقویت کننده‌ی خاک در پروژه‌های مختلف عمرانی استفاده شود. در راستای افزایش ظرفیت باربری خاک و کاهش نشست‌های آن، سیستم کیسه-خاک ابداع شده است. در این نوشتار با استفاده از روش عددی، مدل خاک بستر در شرایط مسلح و غیرمسلح بررسی شده است. بررسی عددی با استفاده از روش اجزای محدود در حالت سه بعدی انجام شده است. در این روش رفتار خاک و کیسه پلیمری، به ترتیب با استفاده از مدل موهر کلمب و مدل الاستو پلاستیک کامل تعریف شده است. همچنین در این نوشتار، تأثیر سیستم کیسه خاک در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست مورد ارزیابی قرار گرفت. هماهنگی مناسبی میان نتایج به دست آمده از بررسی‌های عددی و پژوهش‌های میدانی پژوهشگران دیگر وجود دارد. افزون بر آن نتایج مطالعات میدانی و عددی نشان می‌دهد ظرفیت باربری بستر تسلیح شده با سیستم کیسه-خاک تقریباً ۲ برابر بیشتر از بستر غیرمسلح است.

**واژگان کلیدی:** سیستم کیسه-خاک، ظرفیت باربری، خاک بستر.

## ۱- مقدمه

میزان می‌رساند و در این فرآیند، خاک تنش‌های فشاری و المان تسلیح کننده (کیسه‌ی پلیمری) تنش‌های کششی را تحمل می‌کند. سیستم کیسه-خاک، در برگزیده‌ی خاک محصور شده در یک کیسه‌ی پلیمری است که براساس مقاومت کششی، اندازه، شکل کیسه‌ی پلیمری و خواص مصالح پرکننده‌ی درون آن که به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بستگی دارد، تعریف می‌شوند. کیسه‌های پلیمری خاک از مقاومت بالایی در برابر بارهای قائم و بُرشی برخوردارند، هنگامی که نیروی فشاری روی سیستم کیسه-خاک اعمال می‌شود، نیروی کششی در لفاف (تاروپود) کیسه پلیمری رُخ می‌دهد، نیروی کششی ایجاد شده در کیسه پلیمری باعث اعمال تنش محدود کننده‌ای بر مصالح درون آن می‌شود، این امر موجب افزایش نیروی تماسی

خاک یکی از کهن‌ترین مصالح ساختمانی و اصلی‌ترین تکیه‌گاه سازه است که به دلیل فراوانی آن در طبیعت از دیرباز در ساخت‌وساز مورد توجه بشر بوده است. با این وجود، به سبب ضعف مقاومت برشی و عدم مقاومت در برابر نیروهای کششی، پژوهشگران پیوسته درصدد افزایش ظرفیت باربری و بهبود خواص مکانیکی آن برآمده و استفاده از ایده خاک مسلح را به کار گرفته‌اند. روش تسلیح خاک به دلیل اجرای آسان و تأثیر فراوان آن در بهبود خواص خاک، به عنوان یک روش مناسب برای بهسازی و اصلاح خواص خاک شناخته شده است. سیستم کیسه-خاک ساختاری متشکل از دو نوع ماده مختلف است که عملکرد هم‌زمان آن‌ها ضعف هر کدام را به کمترین

◆ تسلیح لایه‌های خاکریز در ابنیه‌ی فنی شامل دیوارحائل و شیروانی‌ها [۵].

در سال ۲۰۰۸ یانگفو و همکاران<sup>۳</sup> در بررسی‌های میدانی خود، تأثیر تسلیح خاکِ بستر را با استفاده از سیستم کیسه-خاک بررسی کردند، [۲]. ماتسوکا و لیو<sup>۴</sup> در پژوهش‌ها و آزمایش‌هایی نشان دادند که می‌توان با تسلیح فونداسیون‌ها با عناصر انعطاف‌پذیر (سیستم کیسه-خاک) ظرفیت باربری را افزایش داد [۶].

در سال ۲۰۰۸ ناکاگاوا و همکاران<sup>۵</sup> به انجام آزمایش‌هایی که موجب کاهش لرزه‌های ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین می‌شوند، پرداخته‌اند [۴]. درحقیقت این آزمایش‌ها، راهی را برمی‌گزیند تا به وسیله‌ی آن اثر لرزه‌های ناشی از ترافیک بر منازل مسکونی کاهش یابد. روش آزمایش به این صورت بوده که زیراساس پیاده‌رو به وسیله‌ی سه تا چهار لایه کیسه‌ی خاک تسلیح شده و در زمان عبور وسایل نقلیه سنگین با سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت از کنار پیاده‌رو، اثر لرزه‌های ناشی از آن‌ها بر منازل مسکونی به وسیله‌ی سنسورهای ثبت شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در استفاده از کیسه‌های خاک در زیراساس پیاده‌رو در مقایسه باحالت دست‌نخورده، از مقدار شدت نوسانات به مقدار ۱۰ دسی‌بل کاسته می‌شود و با افزایش لایه‌های سیستم کیسه-خاک این کاهش نوسانات بیشتر خواهد شد و هرچه مکان قرارگیری سازه مورد نظر از کناره پیاده‌رو دورتر باشد مقدار شدت نوسان دریافتی کمتر خواهد بود.

ماتسوکا و لیو<sup>۶</sup> در سال (۲۰۰۳) برای نخستین بار رفتار مکانیکی سیستم کیسه-خاک منفرد با شرایط مرزی مستطیلی را به منظور تعیین بیشینه ظرفیت باربری تحت بارگذاری قائم، با استفاده از روش تحلیلی بررسی کردند [۷].

پس از آن در سال ۲۰۰۸ فرم هندسی نیم‌دایره برای شرایط مرزی سیستم کیسه-خاک به وسیله‌ی تانتونو و باور<sup>۷</sup> تعریف شده است [۸]. در مطالعات انجام شده به وسیله‌ی آن‌ها رفتار

بین ذرات خاک نیز می‌شود. سیستم کیسه-خاک دارای سازوکاری است که با گذشت زمان، بر اثر بارگذاری خارجی مقاومت آن افزایش می‌یابد. همچنین مقاومت کیسه‌های خاک می‌تواند به وسیله‌ی مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح پرشده‌ی درون آن و ضخامت کیسه پلیمری تعیین شود. در شکل (۱) فرآیند بارگذاری خارجی روی سیستم کیسه-خاک به تصویر کشیده شده است.

شکل ۱ فرآیند بارگذاری خارجی روی سیستم کیسه-خاک

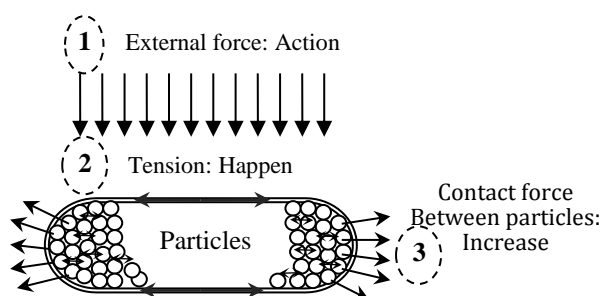


Figure 1. External loading process on soilbag

نوع مصالح پرکننده بیشتر به کاربرد سیستم کیسه-خاک و قابل دسترس بودن مصالح بستگی دارد. یکی از برجسته‌ترین مشخصه‌های به کار رفته در ساختار سیستم کیسه-خاک، مقاومت کششی پلیمر به کار رفته در کیسه است. کیسه‌های به کار رفته در سیستم کیسه-خاک، بیشتر از پلیمرهای پلی‌اتیلن<sup>۱</sup> یا پلی‌پروپیلن<sup>۲</sup> ساخته می‌شوند.

سازه‌های تسلیح شده با سیستم کیسه-خاک نیز از مزایای فنی و اقتصادی فراوانی نسبت به سازه‌های مشابه بتنی و سنگی برخوردارند، [۱].

از جمله کاربردهای سیستم کیسه-خاک می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

◆ افزایش ظرفیت باربری پی‌های سطحی در زمین‌های سست و باتلاقی [۲].

◆ جلوگیری از تورم بستر بزرگراه‌ها در برابر یخبندان [۳]

◆ تسلیح در بستر راه‌های درون شهری به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از ترافیک [۴].

3 Yongfu et al

4 Matsuoka and Liu

5 Nakagawa et al

6 Matsuoka and Liu

7 Tanton and Bauer

1 Poly-ethylene

2 Poly-propylene

فشار قائم یکنواخت بر اساس مدل ساده شده تانتونو و باور<sup>۳</sup> نشان داده شده است. فرضیه‌های زیر به منظور حل ریاضی مسئله در نظر گرفته شده است [۸]:

نوع مصالح پرکننده‌ی درون کیسه، دانه‌ای است.

شرایط کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است.

از تغییر ضخامت کیسه، بعد از اعمال بارگذاری صرف نظر شده است.

از تماس اصطکاکی بین کیسه - خاک و صفحه‌ی بارگذاری - کیسه چشم‌پوشی شده است.

سپس با در نظر گرفتن فشار قائم روی سیستم کیسه - خاک  $(P_V)$ ، تنش قائم و افقی بین ذرات خاک  $(\sigma_V$  و  $\sigma_H$ ) و نیروهای نشان داده شده در برش‌های ۱-۱ و ۲-۲ در سیستم کیسه - خاک که در شکل (۲. ب) نشان داده شده است، بیشینه ظرفیت باربری سیستم کیسه - خاک را تعیین کرده است. در ادامه با در نظر گرفتن مقطع عرضی سیستم کیسه - خاک با عرض اولیه  $B_0$ ، ارتفاع اولیه  $H_0$  و طول  $l$  و نیم دایره‌ای به شعاع  $H_0/2$  برای شرایط مرزی، حجم اولیه  $(V_0)$  و محیط اولیه  $(L_0)$  به صورت زیر تعیین شده است.

$$L_0 = 2B_0 + \pi H_0 \quad (1)$$

$$V_0 = B_0 \cdot H_0 \cdot l + \pi \times \left(\frac{H_0}{2}\right)^2 \quad (2)$$

اکنون اگر سیستم کیسه - خاک متحمل تغییر شکل قائم  $\delta_V$  شود، محیط ثانویه و عرض ثانویه بعد از بارگذاری سیستم کیسه - خاک برابر است با:

$$H = H_0 - \delta_V \quad (3)$$

$$V = V_0 \rightarrow B = \frac{B_0 H_0 + \frac{\pi H_0 \delta_V}{2} - \frac{\pi (\delta_V)^2}{4}}{(H_0 - \delta_V)} \quad (4)$$

$$L = \frac{2B_0 H_0 - \pi H_0 \delta_V + \frac{\pi (\delta_V)^2}{2} + \pi H_0^2}{(H_0 - \delta_V)} \quad (5)$$

کرنش محیطی کیسه پلیمری برابر است با:

$$\epsilon_{\text{bag}} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\delta_V (\pi \delta_V + 4B_0)}{2(H_0 - \delta_V)(2B_0 + \pi H_0)} \quad (6)$$

در شکل (۲. ب)، با برابر قرار دادن تنش‌ها در جهت قائم و افقی معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$\Sigma F_x = 0 : \sigma_H \times H \times l - 2T = 0 \quad (7)$$

سیستم کیسه - خاک منفرد با استفاده از روش عددی در حالت دوبعدی بررسی شده است. در این بررسی رفتار مکانیکی مصالح خاک و کیسه‌ی پلیمری به ترتیب با معیار گسیختگی هیبو پلاستیک میکرو قطبی و مدل الاستو-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. انصاری و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۱، رفتار مکانیکی سیستم کیسه - خاک منفرد را با شرایط مرزی نیم‌دایره و در حالت سه‌بعدی تحت بارگذاری قائم و برشی بررسی کردند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در یک بارگذاری ثابت با افزایش زاویه‌ی اتساع و با ثابت فرض کردن زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه، نشست قائم سیستم کیسه - خاک تحت بارگذاری قائم کاهش خواهد یافت [۹].

## ۲. اهداف پژوهش

در این مقاله، رفتار خاک بستر در حالت مسلح<sup>۲</sup> و غیرمسلح با به کارگیری روش عددی و میدانی بررسی شده که مطالعات میدانی با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه و مطالعات عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus انجام شده است. لازم به یادآوری است در این پژوهش تأثیر سیستم کیسه - خاک در بهبود ظرفیت باربری ژئوتکنیکی خاک بستر و کاهش نشست مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت کیسه و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در بهبود ظرفیت باربری بستر مسلح نیز بررسی خواهد شد.

## ۳. ارزیابی تحلیلی ظرفیت باربری سیستم

### کیسه - خاک منفرد

در مطالعه به روش تحلیلی، رفتار مکانیکی یک سیستم کیسه - خاک منفرد، تحت فشار قائم یکنواخت و با شرایط مقطع مرزی نیم‌دایره در گوشه‌های آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی ظرفیت باربری سیستم و کرنش محیطی شکل گرفته در کیسه‌ی پلیمری مورد توجه بوده است.

در شکل ۲، رفتار مکانیکی سیستم کیسه - خاک منفرد تحت

<sup>1</sup> Ansari et al  
2 Reinforcement

#### ۴. ارزیابی عددی رفتار خاک بستر مسلح و غیرمسلح

مدل یک سیستم در واقع نشانگر یا توصیف‌کننده‌ی آن پدیده است که قادر است اجزای آن سیستم و یا روش کار آن را بیان نماید. این توصیف‌کننده می‌تواند به شکل فیزیکی یعنی با ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی آن سیستم انجام شده و یا به صورت عددی و تحلیلی بررسی شود. در این بخش رفتار مکانیکی خاک بستر مسلح و غیرمسلح، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus به صورت سه‌بعدی تحلیل شده است. همان‌گونه که می‌دانیم، رفتار مدل‌هایی که تحت تحلیل قرار می‌گیرند، باید برای برنامه تعریف شوند. مدلی که در این مقاله طراحی شده است در برگیرنده‌ی صفحه‌ی صلبی است که روی خاک بستر مسلح و غیرمسلح قرار گرفته است.

#### ۴-۱- سطح اشتراک و رفتار مصالح بکار رفته در سیستم کیسه-خاک

در نرم‌افزار Abaqus تماس مکانیکی بین سطح‌ها، با استفاده از سطوحی که با یکدیگر اندرکنش دارند تعریف می‌شود. Abaqus دو نوع رفتار تماسی برای شیوه‌ی تماس بر اساس سطح ارائه می‌دهد، که تحت عناوین رفتار مماسی و رفتار قائم نامیده می‌شوند [۱۰].

در Abaqus/Standard برای رفتار مماسی از قانون اصطکاک کولمب استفاده می‌شود در این حالت تنش اصطکاکی با فشار بین دو سطح نیز ارتباط داشته و اگر به مقدار بحرانی زیر برسد، دو سطح نسبت به هم خواهند لغزید:

$$\tau_{(critical)} = \mu F_v \quad (13)$$

همچنین می‌توان برای  $\tau_{critical}$ ، حدی تعریف کرد که با افزایش تنش برشی سطوح روی هم بلغزند. مشخصات سطوح اشتراک بکار رفته برای سیستم کیسه-خاک و صفحه‌ی بارگذاری در جدول (۱) نشان داده شده است.

مدل رفتاری مورد نظر برای تبیین پاسخ کیسه پلیمری و خاک، به ترتیب مدل الاستیک-پلاستیک کامل<sup>۱</sup> و معیار گسیختگی

$$\Sigma F_y = 0 : \sigma_v \times B \times l + \sigma_v \times \frac{H}{2} \times l - 2T - p_v \times B \times l = 0 \quad (8)$$

که برای خاک دانه‌ای با زاویه‌ی اصطکاک  $\phi$  ضریب فشار جانبی خاک برابر است با:

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن ضریب فشار جانبی خاک و تنش‌های قائم و افقی می‌توان نوشت:

$$\sigma_v = K_p \cdot \sigma_h \quad (10)$$

بیشینه ظرفیت باربری سیستم کیسه-خاک با مقطع نیم‌دایره برابر است با [۷]:

$$F_{limit} = 2(\sigma_y)_{bag} \times t \times \left[ \frac{B \cdot K_p}{H} + \frac{K_p}{2} - 1 \right] \times l \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)،  $t$  و  $\sigma_y$  به ترتیب ضخامت و تنش تسلیم کیسه‌ی پلیمری است.

$$\sigma_y = E \times \epsilon_{bag} \quad (12)$$

در معادله‌ی (۱۲)،  $E$  مدول یانگ کیسه‌ی پلیمری و  $\epsilon_{bag}$  کرنش محیطی کیسه است.

شکل ۲. الف) فرم هندسی سیستم کیسه-خاک با شرایط مرزی نیم‌دایره،

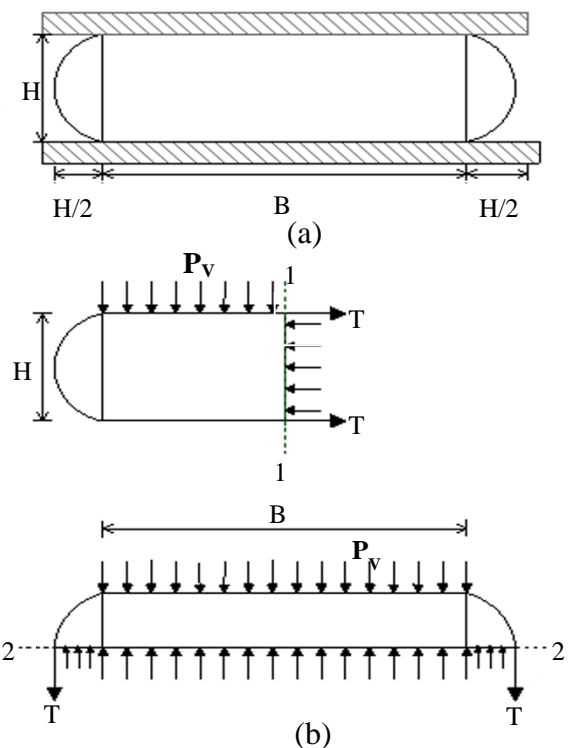
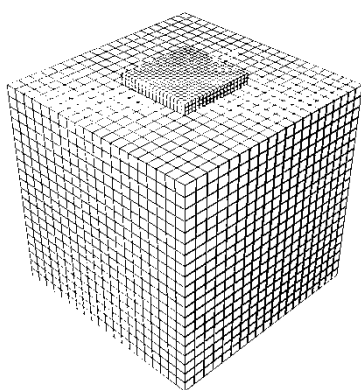


Figure 2. Geometrical form of soilbag with semi-circular boundary conditions, b) soilbag under the pressure  $P_v$  and tensile force  $T$  in cross-section 1 and 2, [8].

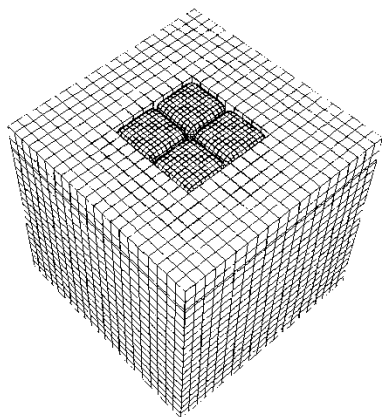
<sup>1</sup> Elastic-Perfect Plastic

است. مدل ساخته شده سیستم کیسه-خاک با انجام مش بندی، در شکل (۵) به تصویر کشیده شده است. شرایط مرزی، برای ایجاد قیود در بخش هایی از مدل به کار گرفته می شوند تا مدل، ثابت باقی مانده یا به مقدار از پیش تعیین شده ای حرکت کند. ۱۳ عدد کیسه پلیمری پر شده، در بستر مدفون شده است. شرایط مرزی برای مدل ها به گونه ای است که در هر دو گام، سطح زیرین نمونه خاک در جهت قائم، حرکتی ندارد. در گام اول کل نمونه تحت وزن خود قرار دارد و در گام دوم، صفحه ی بارگذاری تحت بار فشاری قرار گرفته است.

شکل ۵ مدل نهایی مش بندی خاک بستر (الف) غیر مسلح و (ب) تسلیح شده با کیسه های پلیمری



(a) non-reinforced



(b) reinforced with polymeric bags

Figure 5. Final meshes for (a) non-reinforced (b) reinforced with polymeric bags

موهر-کلمب<sup>۱</sup> است که در شکل های (۳ و ۴) سطح گسیختگی به تصویر کشیده شده است. خاک به کار رفته در این پژوهش، ماسه است. پوسته خارجی مورد استفاده برای مدل فیزیکی، از جنس پلی اتیلن<sup>۲</sup> است. پارامترهای مورد نیاز برای خواص مصالح (خاک و کیسه پلیمری) در جدول (۲) نشان داده شده است. قابل گفتن است ابعاد کیسه ها یکسان است و طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۴۰، ۴۰ و ۱۰ سانتی متر است. [۲]

شکل ۳. رابطه ی بین تنش- کرنش برای مصالح کیسه ی پلیمری

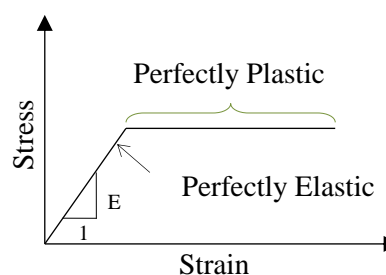


Figure 3. Ideal stress-strain relationship assumed for most structural materials

شکل ۴. معیار گسیختگی مدل موهر-کلمب

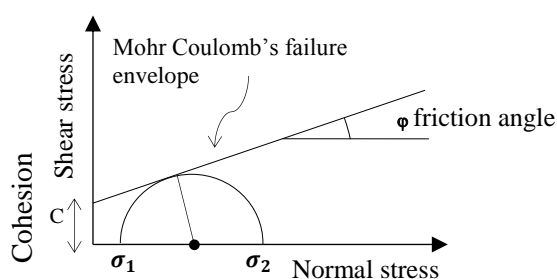


Figure 4. Mohr Coulomb's failure surface

#### ۴-۲- المان بندی و شرایط مرزی

نرم افزار استفاده شده در این پژوهش دارای المان های متعددی است که بسته به مدل و نوع آنالیز می تواند استفاده شود. در این تحلیل از المان C3D8 برای مدل سازی المان های خاک استفاده شده است که یک المان سه بعدی ۸ گرهی با ۳ درجه آزادی انتقالی در هر گره است. برای مدل سازی کیسه های پلیمری از المان M3D4 استفاده شده است که یک المان غشایی ۴ گرهی

<sup>1</sup> Mohr-coulomb

<sup>2</sup> Poly-ethylene

جدول (۱) مشخصات سطح اشتراک سیستم کیسه-خاک و صفحه‌ی بارگذاری، [۹].

| Separation allowed? | Friction angle | Friction coefficient | Interface         |
|---------------------|----------------|----------------------|-------------------|
| Yes                 | 40             | 0.84                 | Soil-bag          |
| No                  | 26             | 0.5                  | Bag-loading panel |

Table1. Soil-bag-loading panel interface properties [9].

جدول (۲) مشخصات مکانیکی خاک و کیسه‌ی پلیمری از جنس پلی اتیلن، [۹ و ۲].

| Parameter | t (mm)        | C (kPa)  | $\nu$           | $\psi$ (درجه) | $\phi$ (درجه)  | $\sigma_{y(bag)}$ (MPa) | E (MPa)         |
|-----------|---------------|----------|-----------------|---------------|----------------|-------------------------|-----------------|
| Indicate  | Bag Thickness | Cohesion | Poisson's Ratio | dilation      | Friction angle | Yield Stress            | Young's modulus |
| Soil      | -             | 1        | 0.33            | 1             | 40             | -                       | 3.1             |
| Bag       | 1             | -        | 0.33            | -             | -              | 21.5                    | 172             |

Table 2. Mechanical properties of soil and polymeric bag [2,9].

شکل ۷ نمودار تغییرات نشست به ظرفیت باربری بستر، به ازای زوایای

اصطکاک داخلی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه

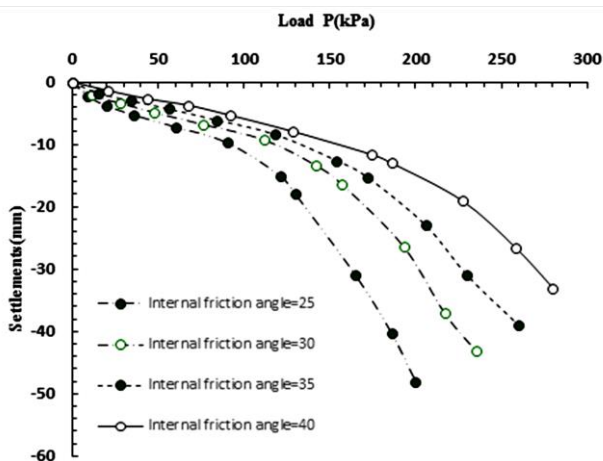


Figure7. Variation of compression capacity with settlement for  $\phi=25, 30, 35, 40$

شکل (۷) ظرفیت باربری بستر خاکی مسلح شده را به ازای تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک از ۲۵ تا ۴۰ درجه نشان می‌دهد. از شکل این گونه استنتاج می‌شود که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، ظرفیت باربری بستر مسلح شده با دو لایه سیستم کیسه-خاک افزایش خواهد یافت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه‌ی اصطکاک از ۲۵ درجه به ۴۰ درجه، ظرفیت باربری بستر مسلح شده تا ۴۳ درصد افزایش خواهد یافت. در جدول (۳) تغییرات ظرفیت باربری به ازای زوایای اصطکاک داخلی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه نشان داده شده است.

## ۵- نتایج مطالعات عددی

### ۵-۱- ظرفیت باربری خاک بستر مسلح و غیرمسلح

برای بررسی عددی تأثیر سیستم کیسه-خاک در ظرفیت باربری، بستر مسلح و غیرمسلح در شرایطی مشابه شرایط میدانی مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد هنگامی که خاک بستر تحت بارگذاری قائم صفحه قرار می‌گیرد، متحمل تغییر مکان در جهت قائم خواهد شد. شکل (۶)، تغییرات جابه‌جایی سیستم کیسه-خاک در برابر بارگذاری را نشان می‌دهد. از بررسی‌های به عمل آمده این‌گونه نتیجه می‌شود که بیشینه ظرفیت باربری خاک بستر مسلح شده با دو لایه سیستم کیسه-خاک در برابر بارگذاری قائم، ۱۷۴ کیلوپاسکال در بیشینه نشست ۱۱/۶ میلی‌متر است. چنانچه خاک بستر غیرمسلح در نظر گرفته شود، بیشینه ظرفیت باربری آن ۸۲ کیلوپاسکال در بیشینه نشست ۸/۴ میلی‌متر خواهد شد.

شکل ۶ تغییرات جابه‌جایی \_ بارگذاری قائم بستر مسلح و غیر مسلح

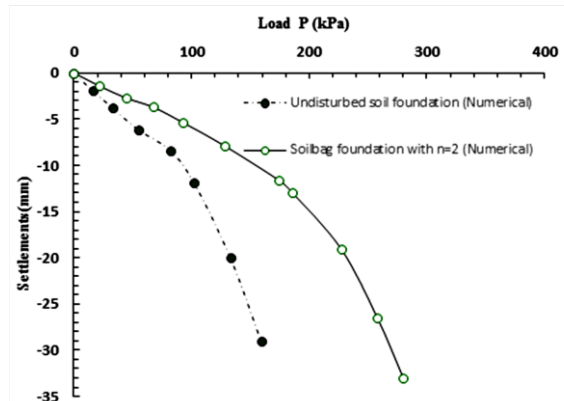


Figure6. Load-Settlement relationship for reinforced and non-reinforced conditions

پلیمری، به ترتیب نشست بستر مسلح کاهش و ظرفیت باربری آن افزایش می‌یابد. هنگامی که ضخامت کیسه پلیمری ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شود، نشست بیشینه به ۱۳/۱ میلی‌متر و ظرفیت باربری به ۱۲۵ کیلوپاسکال خواهند رسید؛ اما چنانچه ضخامت کیسه پلیمری را ۲ برابر کنیم یعنی ۱ میلی‌متر در نظر بگیریم، نشست بیشینه به ۱۱/۶ میلی‌متر و ظرفیت باربری به ۱۷۴ کیلوپاسکال محدود خواهند شد. بنابراین با دو برابر کردن ضخامت کیسه پلیمری، نشست و ظرفیت باربری به ترتیب ۱۱/۴٪ کاهش و ۳۹٪ افزایش خواهند یافت. در شکل (۱۰)، فرم هندسی سیستم‌های کیسه-خاک قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است.

با افزایش بارگذاری قائم بر بستر مسلح شده با سیستم کیسه-خاک، نیروی کششی کیسه پلیمری افزایش می‌یابد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده دیده شد نیروی کششی لایه‌ی زیرین بیشتر از لایه‌ی بالایی است.

شکل ۱۰ مقطع هندسی الف) قبل و ب) بعد از بارگذاری سیستم کیسه-خاک در بستر تسلیح شده

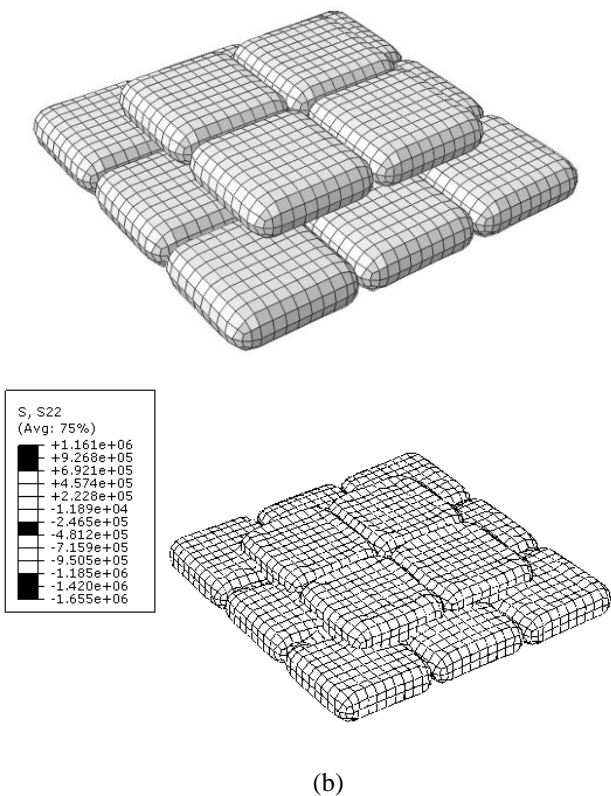


Figure 10. Geometrical form of soilbag (a) after, (b) before in reinforced bed

جدول (۳) تغییرات ظرفیت باربری به ازای زوایای اصطکاک داخلی

| Friction angle   | 25  | 30  | 35  | 40  |
|------------------|-----|-----|-----|-----|
| Bearing capacity | 121 | 137 | 163 | 174 |

Table3. Bearing capacity changes for internal friction angles

شکل ۸ تغییرات ضخامت به نشست قائم بستر مسلح

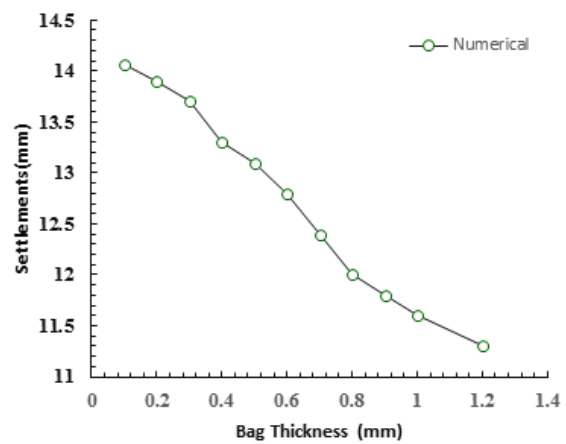


Figure 8. Variation of thickness with vertical settlement of reinforcement bed

شکل ۹ تغییرات ضخامت به ظرفیت باربری بستر مسلح

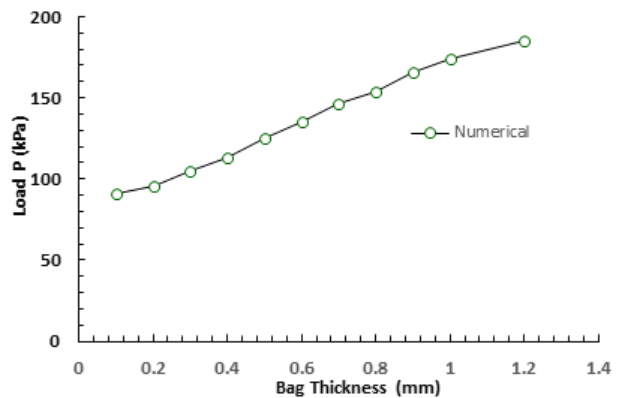


Figure9. Variation of bag thickness with compression capacity

شکل‌های (۹،۸)، به ترتیب نمودار تغییرات ضخامت کیسه پلیمری را در جابه‌جایی‌ها و بارگذاری‌های مختلف با ضخامت‌های متغیر ۰/۱ تا ۱/۲ میلی‌متر نشان می‌دهد، از این شکل این گونه نتیجه می‌شود که با افزایش ضخامت کیسه



همچنین آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی یانگفو و همکاران نشان می‌دهد نیروی بین ذرات داخل کیسه‌ها به مراتب بزرگ‌تر از نیروهای خارجی بر کیسه‌ها است. علت این مسئله آن است، هنگامی که نیروی خارجی بر کیسه‌ها وارد می‌شود یک نیروی کششی در لفاف کیسه‌ها ایجاد می‌شود و نیروی کششی از آن پس روی مصالح درون کیسه‌ها اثر می‌کند. در این آزمایش، بارگذاری صفحه روی پی تسلیح شده با کیسه‌ی پر شده از ماسه در دولایه روی هم انجام شده است. مشخصات مکانیکی و هندسی کیسه خاک به کار رفته در آزمایش، در جدول (۲) نشان داده شده است.

هدف از انجام این آزمایش، اندازه‌گیری ظرفیت باربری بستر تسلیح شده با کیسه‌های ماسه است. در ادامه منحنی نشست-نیرو از آزمایش صفحه بارگذاری برای فونداسیون تسلیح شده با کیسه‌ها، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ظرفیت باربری پی تسلیح شده با سیستم کیسه-خاک در شکل ۱۲، تقریباً ۲ برابر بیشتر از پی تسلیح نشده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود برای بستر مسلح و غیرمسلح هم‌خوانی مناسبی بین نتایج میدانی و عددی وجود دارد. در هر دو بررسی انجام شده مشاهده می‌شود با تسلیح بستر، ظرفیت باربری حداقل دو برابر بستر غیرمسلح خواهد شد.

شکل ۱۲ تغییرات جابه‌جایی - بارگذاری قائم بستر

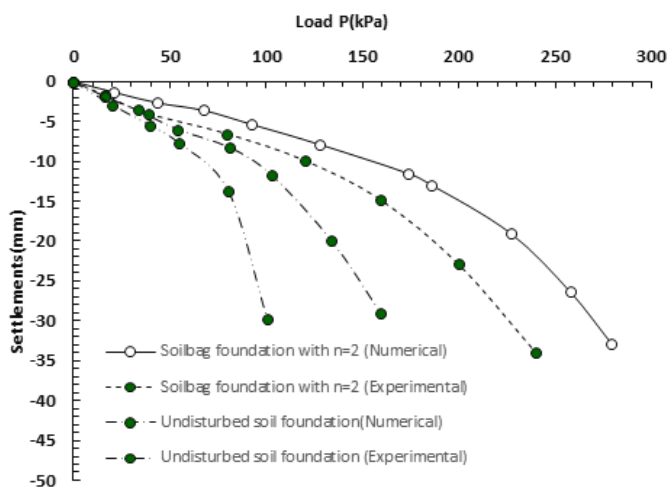


Figure 12. Variation of compression capacity with settlement

در شکل (۱۱) تغییرات نیروی کششی در برابر نشست به تصویر کشیده شده است. از شکل این‌گونه نتیجه می‌شود که با گذشت زمان و افزایش بارگذاری اختلاف نیروی کششی لایه‌ی بالایی و زیرین بیشتر می‌شود. با توجه به نمودار شکل (۱۱)، در نشست یکسان ۱۸ میلی‌متر، نیروی کششی در ردیف زیرین ۸٪ و در نشست ۲۱ میلی‌متر، نیروی کششی در ردیف زیرین ۱۰٪ بیشتر از ردیف بالایی کیسه‌های خاک خواهد شد.

شکل ۱۱ تغییرات نشست بستر به نیروی کششی کیسه‌ها در ردیف بالا و پایین

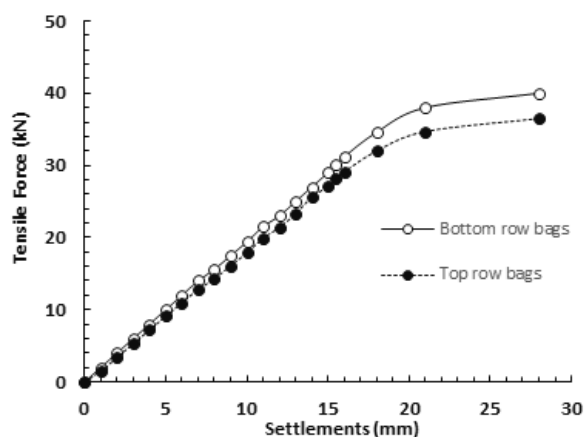


Figure 11. Variation of settlement with tensile force in top and bottom row

## ۵- پژوهش‌های میدانی و راستی آزمایی

سیستم کیسه-خاک یکی از مصنوعات پلیمری جدید است که می‌تواند به عنوان عنصر تقویت‌کننده در پروژه‌های مختلف عمرانی به کار رود. مطالعات انجام شده به وسیله‌ی یانگفو و همکاران نشان می‌دهد هنگامی که کیسه‌ی پلیمری خاک در معرض بار خارجی قرار می‌گیرد مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهد که سهم عمده‌ای از این مقاومت، ناشی از بسیج شدن نیروهای کششی در جدار آن است. آزمایش بارگذاری صفحه به وسیله‌ی یانگفو و همکاران در سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که تسلیح زمین با استفاده از سیستم کیسه-خاک، ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد و باعث به کمینه کردن تغییر شکل بستر، تحت اثر بار اعمالی می‌شود [۲].



## ۶- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که ملاحظه شد استفاده از سیستم کیسه-خاک روشی نوینی در بهسازی و بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها است و سبب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر می‌شود. هدف اصلی این مقاله بررسی رفتار بستر مسلح و غیرمسلح تحت بارگذاری قائم، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus در حالت سه‌بعدی است. سپس تأثیر سیستم کیسه-خاک، ضخامت کیسه و زاویه‌ی اصطکاک مصالح درون کیسه روی ظرفیت باربری بستر مسلح بررسی شده است. نتایج حاصل شده عبارت خواهند بود از:

نتایج نشان می‌دهد در روش عددی، با تسلیح بستر ظرفیت باربری بیشتر از ۲ برابر بستر طبیعی خواهد شد.

با دو برابر کردن ضخامت کیسه پلیمری، نشست و ظرفیت باربری به ترتیب  $1/4$ ٪ کاهش و  $39$ ٪ افزایش خواهند یافت.

نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه‌ی اصطکاک از  $25$  درجه به  $40$  درجه، ظرفیت باربری بستر مسلح تا  $43$  درصد افزایش خواهد یافت.

با افزایش جابه‌جایی نیروی کششی در ردیف پایین کیسه‌های خاک بیشتر از ردیف بالایی خواهد شد. در نشست یکسان  $18$  میلی‌متر، نیروی کششی در ردیف زیرین  $8$ ٪ و در نشست  $21$  میلی‌متر نیروی کششی در ردیف زیرین  $10$ ٪، بیشتر از ردیف بالایی کیسه‌های خاک خواهد شد.

هم‌خوانی و هماهنگی مناسبی بین نتایج بررسی‌های میدانی و عددی وجود داشته و نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus برآورد مناسبی از رفتار بستر مسلح تحت بارگذاری را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان از سیستم کیسه-خاک به منظور تقویت بستر راه‌ها و بهسازی بستر سازه‌ها در زمین‌های باتلاقی و سست استفاده نمود.

## ۷- مراجع

- [1] Matsuoka, H., Liu, S., "A new earth reinforcement method using soil bags", London, Taylor & Francis, (2006), pp.14-17.
- [2] Yongfu, X., Jian, H., Yanjun, D. and De'an, S., "Earth reinforcement using soilbags", journal of Geotextiles and Geomembranes., 26, (2008), pp.279-289.
- [3] Li, Z., Liu, S., Wang, L. and Zhang, C., "Experimental study on the effect of frost heave prevention using soilbags", Cold Regions Science and Technology (2013), 85, p109-116.
- [4] Nakagawa, Y., Chen, G.L., Tatsui, T. and Chida, S., "Verification of vibration reduction characteristics with soilbag structure", 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics in Shanghai, China, (2008), pp.603-608.
- [5] Tatsuoka, F., Tateyama, M., Uchimura, T. and Koseki, J., "Geosynthetic-reinforced soil retaining walls as important permanent structures", Geosynth Int, 4(2), (1997), pp.81-136.
- [6] Matsuoka, H., Liu, S.H., "New earth reinforcement method by soilbags ("donow")", Soils and Foundations, (2003), 43(6), pp.173-88.
- [7] Matsuoka, H., Hasebe, T., Liu, S.H. and Shimao R., "Friction property of soilbags and some measures to increase soil bag resistances against sliding", In: Proceedings of the 38th annual symposium on geotechnical engineering, Akita, Japan, (2003), pp. 67-79.
- [8] Tanton, S.F., and Bauer, E., "Numerical simulation of a soilbag under vertical compression", In: The 12th international conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, (2008), pp.1-5.
- [9] Ansari, Y., Merifield, R., Yamamoto, H. and Sheng, D., (2011), "Numerical analysis of soilbags under compression and cyclic shear", journal of Computers and Geotechnics, (2011), 38, pp.659-668.
- [10] Hibbitt, Sorensen "ABAQUS/standard user's manual", Version 6.10. (2010).

# Numerical Study of the Effect of Soil-Bag System to Improve Geotechnical Bearing Capacity of the Bed Soil

A. Lakirouhani<sup>1\*</sup>, M. Bahrehdar<sup>2</sup>

1- Assist. Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Iran

Rou001@znu.ac.ir

## Abstract:

Using reinforced elements to improve geotechnical properties of soil, has been considered by researchers for many years. In recent years, significant progress has been made in the field of improving poor soils and reinforcing them. Soil reinforcement is used as an effective method to improve the soil layers in order to increase the bearing capacity and reduce settlement. Soil-bag system is one of the new polymer products that can be used as a soil reinforcing element in various projects. Soil-bag system was developed in order to increase the bearing capacity of the soil and reduce its settlement. In this study, bed soil models in reinforced and non-reinforced conditions have been investigated using a numerical method. Numerical studies have been carried out in 3 dimensional cases using finite element method. In this method, sand and polymer bag behavior were defined by using Mohr–Coulomb and Elastic-Perfect Plastic models. Also, the effects of soil-bag system in increasing the bearing capacity and reducing settlement were evaluated. The results properly correspond to the ones obtained from numerical studies and field studies carried out by other researchers. The results show that the bearing capacity of the reinforced bed is almost 2 times bigger than that of the non-reinforced bed.

One of the resistance-based parameters of soil-bag system is the thickness of polymeric bag. When the thickness of polymeric bag is considered to be 0.5mm, the maximum displacement will reach to 13.1 mm. While if the thickness of polymeric bag becomes double, i.e. if it is considered as 1 mm, the maximum displacement will reach to 11.6 mm. Another resistance-based parameter of soil-bag system, which was examined in this research, is the effect of internal friction angle of soil on the bearing capacity of soil-bag system. The results show that the more the friction angle between soil particles is, the more the resistance of soil-bag system against the external loading will be.

The type of filling material mostly depends on the application of soil-bag system and the availability of material. The most important characteristic of soil-bag system is the tension strength of the polymer in the bags. The bags are generally made of polyethylene or polypropylene polymers. Earth reinforcement using soil-bag system causes to increase soil bearing capacity and to minimize the transformation of foundation bed due to the imposed load. The results of simple pressure test on the foundation reinforced by soil-bag system show that when soil-bag system is subject to external load, it exhibits high strength a great portion of which is resulted from the tension force generated in the cover of the polymeric bag.

**Keywords:** soil-bag system, bearing capacity, bed soil.