مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۶۷-۷۵

Original Article

ارزیابی عددی و تحلیلی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک با مقطع نیم‌بیضی تحت بارگذاری قائم

عبدالحسین حداد* **(دانشیار)**
محمد بهره‌دار (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

هدف اصلی این نوشتار، بررسی تأثیر فرم هندسی سیستم کیسه ـ خاک با مقطع نیم‌بیضی در بیشینه‌ی ظرفیت باربری، تحت بارگذاری قائم است. در این مطالعه، در ابتدا با استفاده از روش تحلیلی، بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک، تحت فرم هندسی نیم‌دایره مورد بررسی قرار گرفته و سپس مقدار بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک، با فرم هندسی جدیدی به شکل نیم‌بیضی ارائه شده است. در ادامه، شبیه‌سازی رفتار مکانیکی سیستم کیسه ـ خاک، با مقاطع نیم‌بیضی و نیم‌دایره، با استفاده از روش المان محدود در حالت سه بعدی مورد توجه قرارگرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش پارامتر هندسی خروج از مرکزیت در کیسه با مقطع نیم‌بیضی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه، ظرفیت باربری قائم سیستم کیسه ـ خاک تحت بارهای خارجی افزایش می‌یابد. از این رو، انتخاب فرم هندسی مناسب برای مقطع کیسه می‌تواند ظرفیت باربری آن را تا حد قابل توجهی تقویت کند.

واژگان کلیدی: سیستم کیسه ـ خاک، ظرفیت باربری، مقطع نیم‌بیضی، خروج از مرکزیت مقطع کیسه.

ahadad@semnan.ac.ir
mbahrehdar@students.semnan.ac.ir

۱. مقدمه

سیستم کیسه ـ خاک یکی از مصنوعات پلیمری نوین به شمار می‌آید، که از آن می‌توان در جهت تقویت و تسلیح بستر و یا حفاظت خاک در مقابل فرسایش در پروژه‌های مختلف عمرانی استفاده کرد. سیستم کیسه ـ خاک، شامل خاک محصورشده در یک کیسه‌ی پلیمری است، که ویژگی‌های آن براساس مقاومت کششی، اندازه و فرم هندسی کیسه‌ی پلیمری و خواص مصالح پرکننده‌ی درون آن، که به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بستگی دارد، تعریف می‌شود. هنگامی که سیستم کیسه ـ خاک تحت بارگذاری قائم قرار می‌گیرد، نیروی کششی به‌وجودآمده در لفاف کیسه موجب افزایش فشار بین ذرات خاک (N) می‌شود. نتیجه‌ی مستقیم این امر افزایش نیروی اصطکاک بین ذرات خاک (μ ضریب اصطکاک خاک و $F = \mu.N$) است.[۱]

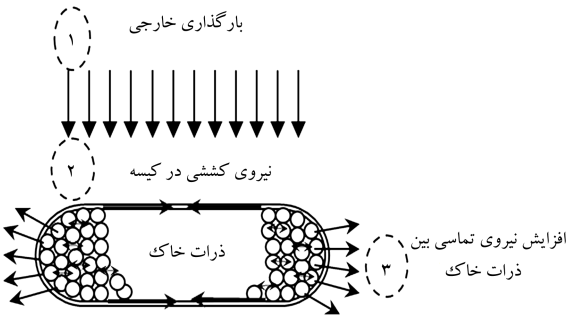
نوع مصالح پُرکننده در سیستم کیسه ـ خاک بیشتر به نوع کاربرد آن و قابلیت در دسترس‌بودن مصالح بستگی دارد. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های به‌کار رفته در ساختار سیستم کیسه ـ خاک، مقاومت کششی پلیمر به‌کار رفته در کیسه است. کیسه‌های به‌کار رفته در سیستم کیسه ـ خاک، عموماً از پلیمرهای پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن تهیه می‌شوند. سازه‌های تسلیح‌شده با سیستم کیسه ـ خاک نیز مزایای فنی و اقتصادی فراوانی نسبت به سازه‌های مشابه بتنی و سنگی دارند. از جمله کاربردهای این سیستم می‌توان به ساخت سازه‌های اضطراری به‌صورت موقت، تسلیح در بستر راه‌های درون‌شهری به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از ترافیک،[۲] تسلیح لایه‌های خاکریز در ابنیه‌ی فنی شامل دیوار حائل و شیروانی‌ها،[۳] و همچنین افزایش ظرفیت باربری پی‌های سطحی اشاره کرد.[۴]

کیسه‌های پلیمری پُرشده از خاک، مقاومت بالایی در برابر بارهای قائم و برشی دارند. نیروی فشاری روی سیستم کیسه ـ خاک، موجب بروز نیروی کششی در لفاف (تار و پود) کیسه می‌شود. نیروی کششی ایجادشده در کیسه‌ی پلیمری باعث اعمال تنش محدودکننده‌یی بر مصالح درون آن می‌شود. این امر موجب افزایش نیروی تماسی بین ذرات خاک نیز می‌شود. ظرفیت باربری نهایی کیسه‌های خاک به‌طورکلی تابعی از مقاومت برشی مصالح پُرشده‌ی درون کیسه، مقاومت، ضخامت کیسه‌ی پلیمری و شکل سطح مقطع آن است. در شکل ۱، فرایند بارگذاری خارجی روی سیستم کیسه ـ خاک به تصویر کشیده شده است.

با توجه به مطالب مذکور و به دلیل بارگذاری‌هایی که منجر به توزیع تنش در لفاف کیسه‌ی پلیمری و مصالح درون کیسه‌ی پلیمری می‌شود، بررسی نحوه‌ی توزیع تنش‌های کششی، کرنش محیطی در لفاف کیسه‌ی پلیمری و تعیین مناطق بحرانی تحت این بارگذاری‌ها، از نظر طراحی حائز اهمیت است. برای رسیدن به این هدف در این نوشتار، با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی به ارزیابی و مدل‌سازی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۶/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۲۵، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۲۰.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱. فرایند بارگذاری خارجی روی سیستم کیسه ـ خاک.

سیستم کیسه ـ خاک منفرد با شرایط مرزی جدیدی به فرم هندسی نیم‌بیضی تحت بارهای قائم پرداخته شده است.

احداث و نگهداری تأسیسات زیربنایی از قبیل بستر راه‌ها، خاکریزها و دیوارهای حائل مستلزم به‌کارگیری روش‌هایی هستند که علاوه بر صرفه‌ی اقتصادی، به محیط زیست پیرامون آسیب وارد نکنند. با بهره‌گیری از سیستم کیسه ـ خاک می‌توان به این هدف رسید. یکی از عوامل مهم انتخاب این طرح را می‌توان به سرعت عمل ساخت آن نسبت به سایر سیستم‌ها در احداث سازه‌های اضطراری و نقش آن در پدافند غیرعامل نیز اشاره کرد. در مواقعی که نیاز مبرم به ساخت جان‌پناه درکمترین زمان ممکن باشد، سیستم کیسه ـ خاک می‌تواند گزینه‌یی مناسب برای این منظور باشد.

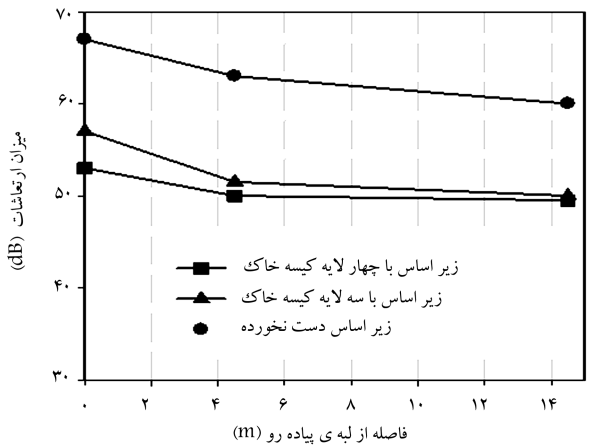
از ویژگی‌های خاص این سیستم انعطاف‌پذیری در ساخت دیوارهای حائل با انعطاف‌پذیری بالا در مناطق کوهستانی و قابلیت همسانی با بافت موجود و مقاومت در برابر تنش‌های ناشی از زلزله و برقراری توازن و تعادل در انواع خاک بدون به‌کارگیری مواد و مصالح سخت از قبیل فولاد و بتن است. گاهی اوقات تثبیت خاک‌های سُست در پروژه‌های عمرانی با استفاده از ماشین‌آلات مکانیکی به علت صعب‌العبوربودن مسیر و یا شرایط اجرایی سخت پروژه (مانند تثبیت خاک‌های کنار رودخانه‌ها یا خاکریزهایی با شیب تند) میسر نخواهد بود. برای حل مشکل مذکور، استفاده از کیسه‌های پلیمری پُرشده با خاک‌های سُست محل پروژه می‌تواند گزینه‌یی مناسب باشد.

بنابراین بحث پایدارسازی خاکریزها و شیب‌ها درکمینه‌ی زمان درمواقع اضطراری با توجه به مباحث مطرح‌شده توسط کیسه‌هایی که ظرفیت باربری مناسبی در برابر بارگذاری خارجی داشته باشند، می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد. از این رو، در این پژوهش شرایط مرزی گوشه‌های سیستم کیسه ـ خاک، که یکی از عوامل مؤثر در ظرفیت باربری است، مورد بررسی قرار گرفته است.

در مطالعاتی در سال ۲۰۰۸، تأثیر تسلیح فونداسیون با استفاده از سیستم کیسه ـ خاک در برابر بارگذاری خارجی مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج آن مطالعات نشان داد که:[۵]

۱. نیروی بین ذرات داخل کیسه‌ها به مراتب بزرگ‌تر از نیروهای خارجی وارد بر کیسه‌هاست. زیرا 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.

۲. ظرفیت باربری پی تسلیح‌شده با سیستم کیسه ـ خاک، ۲ تا ۳ برابر بیشتر از پی تسلیح‌نشده است.



شکل ۲. مقادیر شدت نوسانات عبوری بر حسب فاصله‌ی مناطق مسکونی از لبه‌ی پیاده‌رو.[۲]

۳. ظرفیت باربری کیسه‌هایی که حاوی شن هستند، بیشتر از کیسه‌های پُرشده با ماسه هستند.

۴. رابطه‌ی بین تنش ـ کرنش کیسه‌ها با رابطه‌ی بین تنش ـ کرنش خاک متفاوت است.

۵. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، درنقاطی مانند نقاط تماس کیسه با صفحه‌ی بارگذاری و نقاط درز دوخت پارگی رخ داده است.

۶. ظرفیت باربری کیسه‌ها به مقاومت کششی لفاف کیسه‌ها و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح بستگی دارد و با افزایش مقاومت کششی لفاف کیسه‌ها و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح افزایش می‌یابد.

همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۰۸)، به انجام آزمایش‌هایی که موجب کاهش لرزه‌های ناشی از عبور و مرور وسایط نقلیه‌ی سنگین می‌شوند، پرداخته شده است.[۲] در حقیقت، این روش، راهی را بر می‌گزینند تا توسط آن اثر لرزه‌های ناشی از ترافیک در منازل مسکونی کاهش یابد. روش آزمایش به این صورت بوده است که زیر اساس پیاده‌رو توسط ۳ تا ۴ لایه کیسه‌ی خاک تسلیح و در زمان عبور وسایط نقلیه‌ی سنگین با سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت از کنار پیاده‌رو، اثر لرزه‌های ناشی از آنها در منازل مسکونی توسط حس‌گرهایی ثبت شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در استفاده از کیسه‌های خاک در زیر اساس پیاده‌رو در مقایسه با حالت دست‌نخورده، از مقدار شدت نوسانات به مقدار ۱۰ دسی‌بل کاسته و با افزایش لایه‌های سیستم کیسه ـ خاک این کاهش نوسانات بیشتر شده است و هر چه مکان قرارگیری سازه‌ی موردنظر از کناره‌ی پیاده‌رو دورتر باشد، مقدار شدت نوسان دریافتی کمتر خواهد بود (شکل ۲).[۲]

در سال ۲۰۰۳ نیز برای نخستین بار رفتار مکانیکی سیستم کیسه ـ خاک منفرد با شرایط مرزی مستطیلی به منظور تعیین بیشینه‌ی ظرفیت باربری تحت بارگذاری قائم مورد بررسی قرار گرفته است.[۶]

پس از آن در سال ۲۰۰۸ فرم هندسی نیم‌دایره برای شرایط مرزی سیستم کیسه ـ خاک توسط برخی پژوهشگران دیگر تعریف شده و سپس رفتار سیستم کیسه ـ خاک منفرد با استفاده از روش‌های عددی در حالت دو بُعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، رفتار مکانیکی مصالح خاک و کیسه‌ی پلیمری به ترتیب به‌صورت مدل‌های هیپو خمیری میکروقطبی و کشسان ـ خمیری

Archive of SID
www.SID.ir

کامل در نظر گرفته شده است.[۷] همچنین در پژوهش دیگری رفتار مکانیکی سیستم کیسه ـ خاک منفرد با شرایط مرزی نیم‌دایره و در حالت سه بُعدی تحت بارگذاری قائم و برشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در یک بارگذاری ثابت، با افزایش زاویه‌ی اتساع و با ثابت فرض‌کردن زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه، جابجایی قائم سیستم کیسه ـ خاک تحت بارگذاری قائم کاهش خواهد یافت.[۸] با توجه به مرور مطالعات انجام‌شده روی سیستم کیسه ـ خاک، تاکنون مطالعاتی به منظور بررسی تأثیر شرایط مرزی نیم‌بیضی در ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک صورت نگرفته است. این در حالی است که این موضوع پیش‌تر برای شرایط مرزی نیم‌دایره مطالعه شده است.

۲. روش پژوهش

مدل یک پدیده در واقع نشانگر یا توصیف‌کننده‌ی آن است، که قادر به بیان اجزاء سیستم مذکور و یا روش کار آن است. این توصیف‌کننده می‌تواند به شکل فیزیکی یعنی با ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی آن سیستم انجام شود و یا به‌صورت عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرارگیرد. در ابتدای این نوشتار، با استفاده از روش تحلیلی به بررسی و مقایسه‌ی مطالعات انجام‌شده توسط دیگر پژوهشگران و مطالعات جدید انجام‌شده روی ظرفیت باربری فشاری سیستم کیسه ـ خاک تحت شرایط مرزی نیم‌بیضی پرداخته شده است. سپس در ادامه، مطالعات عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS (ver ۱۰/۶)،[۹] روی رفتار مکانیکی سیستم کیسه ـ خاک منفرد در حالت سه بُعدی تحت بارهای قائم انجام شده و با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی مورد مقایسه قرارگرفته است.

۱.۲. روش تحلیلی

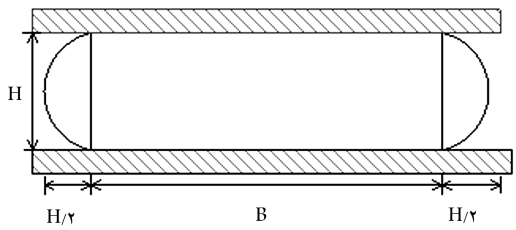
در مطالعه به روش تحلیلی، رفتار مکانیکی یک سیستم کیسه ـ خاک منفرد، تحت فشار قائم یکنواخت و با شرایط مقطع مرزی نیم‌دایره در گوشه‌های آن مورد بررسی قرارگرفته است. در این بررسی، ظرفیت باربری سیستم و کرنش محیطی شکل‌گرفته در کیسه‌ی پلیمری مورد توجه بوده است. در ادامه، فرم هندسی جدیدی به شکل نیم‌بیضی برای شرایط مرزی سیستم کیسه ـ خاک به منظور افزایش ظرفیت باربری ارائه شده و در نهایت، نتایج حاصله با نتایج دیگر پژوهشگران مورد مقایسه قرارگرفته است.

۱.۱.۲. ارزیابی سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مرزی نیم‌دایره

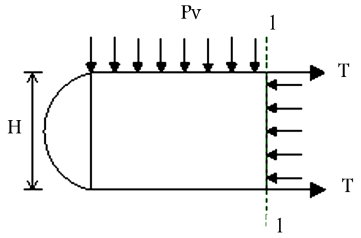
در شکل ۳الف، رفتار مکانیکی سیستم کیسه ـ خاک منفرد تحت فشار قائم یکنواخت براساس مدل ساده‌شده‌ی تانتونو،[۷] نشان داده شده است. این فرضیات به منظور حل ریاضی مسئله در نظر گرفته شده است:

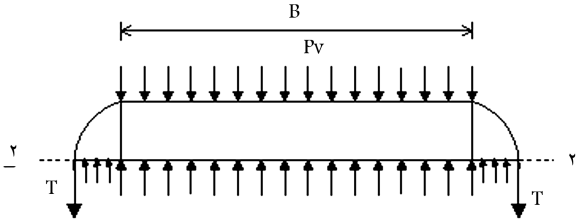
- نوع مصالح پُرکننده‌ی درون کیسه، دانه‌یی است.
- شرایط کرنش صفحه‌یی در نظر گرفته شده است.
- از تغییر ضخامت کیسه، بعد از اعمال بارگذاری صرف‌نظر شده است.
- از تماس اصطکاکی بین کیسه ـ خاک و صفحه‌ی بارگذاری کیسه صرف‌نظر شده است.

سپس با درنظرگرفتن فشار قائم بر سیستم کیسه ـ خاک (p_v)، تنش قائم و افقی بین ذرات خاک (σ_v و σ_h)، و نیروهای نشان داده‌شده در برش‌های ۱-۱ و ۲-۲ در



الف) فرم هندسی سیستم کیسه - خاک با شرایط مرزی نیم دایره؛





ب) سیستم کیسه - خاک تحت فشار Pv و کشش T در برش های ۱-۱ و ۲-۲.

شکل ۳. رفتار مکانیکی و ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مقطع مرزی نیم دایره[۷].

سیستم کیسه ـ خاک (شکل ۳ب)، بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک تعیین شده است. در ادامه، با درنظرگرفتن مقطع عرضی سیستم کیسه ـ خاک با عرض اولیه‌ی $B_\circ$، ارتفاع اولیه‌ی $H_\circ$ و طول l و نیم‌دایره‌یی به شعاع $H_\circ/۲$ برای شرایط مرزی، حجم و محیط اولیه به‌صورت روابط ۱ و ۲ تعیین شده است:

$$L_\circ = ۲B_\circ + \pi H_\circ \qquad (۱)$$

$$V_\circ = B_\circ.H_\circ.l + \pi.\left(\frac{H_\circ}{۲}\right)^۲.l \qquad (۲)$$

همچنین اگر سیستم کیسه ـ خاک متحمل تغییرشکل قائم δv شود، با برابر قراردادن حجم اولیه و ثانویه‌ی سیستم کیسه ـ خاک ($V, V_\circ$)، تغییرات محیط (L) و عرض آن (B) از روابط ۳ الی ۵ به‌دست می‌آید:

$$H = H_\circ - \delta_V \qquad (۳)$$

$$V = V_\circ \rightarrow B = \frac{B_\circ H_\circ + \frac{\pi H_\circ \delta_v}{۲} - \frac{\pi(\delta_v)^۲}{۴}}{(H_\circ - \delta_v)} \qquad (۴)$$

$$L = \frac{۲B_\circ H_\circ - \pi H_\circ \delta_V + \frac{\pi(\delta_V)^۲}{۲} + \pi H_\circ^۲}{(H_\circ - \delta_V)} \qquad (۵)$$

کرنش محیطی کیسه‌ی پلیمری نیز از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{bag} = \frac{L - L_\circ}{L_\circ} = \frac{\delta_V\,(\pi\delta_V + ۴B_\circ)}{۲(H_\circ - \delta_V)\,(۲B_\circ + \pi H_\circ)} \qquad (۶)$$

Archive of SID
www.SID.ir

در شکل ۳ب، با برابر قراردادن تنش‌ها در جهات قائم و افقی معادلات ۷ و ۸ حاصل می‌شود:

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

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

با درنظرگرفتن ضریب فشار جانبی خاک (K_P) و تنش‌های قائم و افقی می‌توان رابطه‌ی ۹ را نوشت:

$$\sigma_h = K_p.\sigma_v \qquad (9)$$

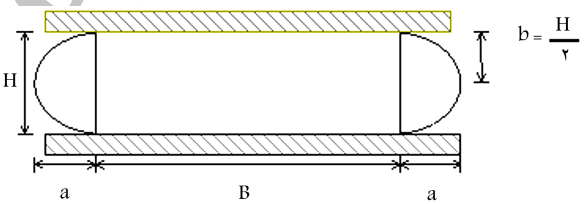
بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک با مقطع نیم‌دایره از رابطه‌ی ۱۰ به‌دست می‌آید:

$$F_{limit} = 2\,(\sigma_y)_{bag} \times t \times \left[\frac{B.K_P}{H} + \frac{K_P}{2} - 1\right] \times l \qquad (10)$$

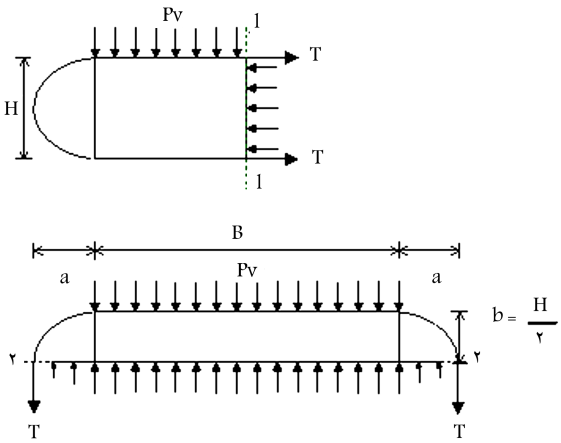
که در آن، t و σ_y به ترتیب ضخامت و تنش تسلیم کیسه‌ی پلیمری هستند.

۲.۱.۲. ارزیابی سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مرزی نیم‌بیضی

مشاهدات انجام‌شده نشان می‌دهد فرم هندسی شرایط مرزی کیسه تحت تأثیر بارگذاری تغییر می‌کند.[10] با تغییر شعاع انحنای شرایط مرزی مشاهده می‌شود که فقط شرایط مرزی نیم‌دایره حاصل نخواهد شد. بلکه با تغییر خروج از مرکزیت می‌توان شرایط مرزی نیم‌بیضی را نیز مورد مطالعه قرار داد. بنابراین در این نوشتار، با ارائه‌ی شرایط مرزی جدیدی به فرم هندسی نیم‌بیضی (شکل ۴الف)، به تعیین



الف) فرم هندسی سیستم کیسه - خاک با شرایط مرزی نیم بیضی؛



ب) سیستم کیسه - خاک تحت فشار Pv و کشش T در برش های ۱-۱ و ۲-۲.

شکل ۴. فرم هندسی و ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مقطع مرزی نیم بیضی.

بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک منفرد تحت بارگذاری قائم پرداخته شده است. در شکل ۴الف، فشار قائم P_V بر سیستم کیسه ـ خاک وارد شده است. a_0 و b_0 به ترتیب نصف قطر اولیه‌ی بزرگ و کوچک نیم‌بیضی، H_0 و B_0، ارتفاع و عرض اولیه‌ی سیستم کیسه ـ خاک است. کشیدگی بیضی با خروج از مرکزیت e به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:[11]

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}, \qquad 0 < e < 1 \qquad (11)$$

با میل e به سمت عدد صفر، بیضی به شکل دایره تبدیل و با میل آن به سمت عدد ۱، بیضی کشیده‌تر خواهد شد. با حل معادله‌ی ۱۱، a به‌دست خواهد آمد (رابطه‌ی ۱۲):

$$a = \frac{b}{\sqrt{1-e^2}} = \frac{H}{2\sqrt{1-e^2}} \qquad (12)$$

با صفرشدن مقدار e، بیضی تبدیل به دایره می‌شود. در نتیجه روابط ارائه‌شده برای شرایط نیم‌بیضی، تبدیل به روابط ارائه‌شده‌ی تانتونو[7] (شرایط نیم‌دایره) خواهد شد. اما اگر مقدار e غیرصفر باشد، بیضی کشیده‌تر خواهد شد و همچنین بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک متفاوت خواهد بود. در ادامه، با درنظرگرفتن ابعاد اولیه‌ی $B_0 \times H_0$، طول l و فرم هندسی نیم‌بیضی برای شرایط مرزی، محیط و حجم اولیه به‌صورت رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ به‌دست می‌آیند:

$$L_0 = 2B_0 + \left(\frac{\pi.H_0}{\sqrt{2}}.\sqrt{\frac{2-e^2}{1-e^2}}\right) \qquad (13)$$

$$V_0 = B_0.H_0.l + \frac{\pi.H_0^2}{4}.\frac{1}{\sqrt{1-e^2}}.l \qquad (14)$$

اکنون اگر سیستم کیسه ـ خاک متحمل تغییرشکل‌های δv شود، با درنظرگرفتن اینکه حجم سیستم کیسه ـ خاک ثابت فرض شده است، محیط ثانویه، تغییرات کرنش محیطی و عرض کیسه‌ی پلیمری از طریق روابط ۱۵ الی ۱۸ به‌دست خواهند آمد:

$$H = H_0 - \delta_V \qquad (15)$$

$$V = V_0 \rightarrow B = \frac{B_0 H_0 + \frac{1}{\sqrt{1-e^2}}.\left(\frac{\pi H.\delta_v}{2} - \frac{\pi(\delta_v)^2}{4}\right)}{(H_0 - \delta_v)} \qquad (16)$$

$$L = 2B + \left(\frac{\pi.H}{\sqrt{2}}.\sqrt{\frac{2-e^2}{1-e^2}}\right) \qquad (17)$$

$$\varepsilon_{bag} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\delta_v\left(4B_0 + \pi\delta_v.\sqrt{\frac{2-e^2}{2(1-e^2)}}\right)}{2(H_0 - \delta_v)\left(2B_0 + \pi H_0\sqrt{\frac{2-e^2}{2(1-e^2)}}\right)} \qquad (18)$$

حال با درنظرگرفتن P_V فشار قائم بر سیستم کیسه ـ خاک، σv و σh تنش قائم و افقی بین ذرات خاک و برش‌های ۱-۱ و ۲-۲ در سیستم کیسه ـ خاک (شکل ۴ب)، بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک به‌دست می‌آید. با برابر قراردادن تنش‌ها در جهات قائم و افقی معادلات ۱۹ و ۲۰ حاصل می‌شود:

$$\sum F_x = 0 : \sigma_h \times H \times l - 2T = 0 \qquad (19)$$

$$\sum F_y = 0 : \sigma_v \times B \times l - 2T - p_v \times B \times l + \sigma_v \times \frac{H}{2.\sqrt{1-e^2}} \times l = 0 \qquad (20)$$

Archive of SID
www.SID.ir

با درنظرگرفتن ضریب فشار جانبی خاک (K_P) و تنش‌های قائم و افقی می‌توان رابطه‌ی ۲۱ را نوشت:

$$\sigma_h = K_p.\sigma_v \tag{۲۱}$$

که برای خاک دانه‌یی با زاویه‌ی اصطکاک ϕ، ضریب فشار جانبی خاک از روابط ۲۲ و ۲۳ به‌دست می‌آید:

$$K_P = \frac{۱ + sin\phi}{۱ - sin\phi} \tag{۲۲}$$

$$F_v = p_v \times B \times l \tag{۲۳}$$

ظرفیت باربری حدی سیستم کیسه ـ خاک با مقطع نیم‌بیضی از رابطه‌ی ۲۴ به‌دست می‌آید:[۱۱]

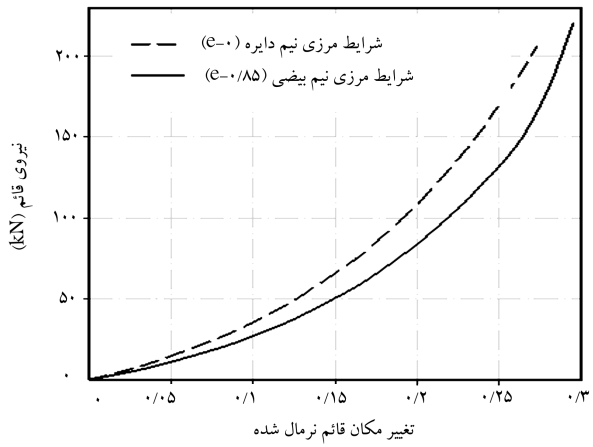
$$F_{v,limit} = ۲\,(\sigma_y)_{bag} \times t \times \left[\frac{B.K_P}{H} + \frac{K_P}{۲.\sqrt{۱ - e^۲}} - ۱\right] \times l \tag{۲۴}$$

که در آن، t و $\sigma_y = (E \times \varepsilon_{bag})$ به ترتیب ضخامت و تنش تسلیم کیسه‌ی پلیمری هستند.

۳.۱.۲. مقایسه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مرزی نیم‌دایره و نیم‌بیضی

در این بخش به مقایسه‌ی ظرفیت باربری نهایی سیستم کیسه ـ خاک پرداخته شده است. بدین منظور، دو سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مرزی نیم‌دایره و نیم‌بیضی در نظر گرفته شده و مشخصات مکانیکی و هندسی آن‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

مقادیر ابعاد اولیه‌ی سیستم کیسه ـ خاک، بیشینه‌ی ظرفیت باربری و بیشینه‌ی نشست برای مقاطع نیم‌بیضی و نیم‌دایره در جدول ۱ ارائه شده است. با اعمال تغییرمکان قائم (δv) متغیر روی سیستم کیسه ـ خاک، نیروی قائم قابل تحمل سیستم با استفاده از روابط ۱۰ و ۲۴ به‌دست خواهد آمد. شکل ۵، شامل دو منحنی بار ـ تغییرمکان نرمال‌شده (تغییرمکان قائم تقسیم بر ارتفاع اولیه‌ی کیسه) است، که نشانگر رفتار سیستم کیسه ـ خاک است. برای تعیین ظرفیت باربری سیستم کیسه‌ی خاک با دو مقطع مختلف به این روش عمل شده است:



شکل ۵. نمودار بار ـ نشست سیستم کیسه ـ خاک.

در ابتدا کرنش نهایی محیطی برای جدار کیسه، معادل ۲۵٪ انتخاب شده است. این مقدار از کرنش برای دستیابی به شرایط گسیختگی در اغلب کیسه‌هایی از جنس ژئوتکستایل کافی است. سپس به کمک روابط ۶ و ۱۸ مقدار تغییرمکان بیشینه‌ی قائم متناظر با این کرنش محیطی تعیین شده است. برای کیسه با مقطع نیم‌دایره این مقدار در حدود ۱۹/۱ و برای مقطع نیم‌بیضی این مقدار حدود ۲۱ میلی‌متر است. حال با استفاده از روابط ۱۰ و ۲۴، ظرفیت باربری نهایی کیسه با مقطع نیم‌دایره و نیم‌بیضی بر حسب تغییرمکان بیشینه‌ی قائم به ترتیب معادل ۲۰۵/۸ و ۲۲۰/۵ کیلونیوتن محاسبه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که با تغییر مقطع از نیم‌دایره به نیم‌بیضی، ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک ۱۴/۷ کیلونیوتن افزایش یافته است. همچنین، در مدل ارائه‌شده با مقطع نیم‌بیضی با افزایش مقدار خروج از مرکزیت، فرم هندسی بیضی کشیده‌تر شده است. تغییرات غیرخطی خروج از مرکزیت نیم‌بیضی نسبت به ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک در نمودار شکل ۶ به تصویر کشیده شده است.

۴.۱.۲. ارزیابی عددی سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مرزی نیم دایره و نیم بیضی

در این بخش، رفتار مکانیکی سیستم کیسه ـ خاک به منظور تعیین بیشینه‌ی ظرفیت باربری آن، با استفاده از مقاطع نیم‌بیضی و نیم‌دایره، در نرم‌افزار المان محدود آباکوس[۲] به‌صورت سه بُعدی مورد تحلیل قرار گرفته است. آباکوس یک

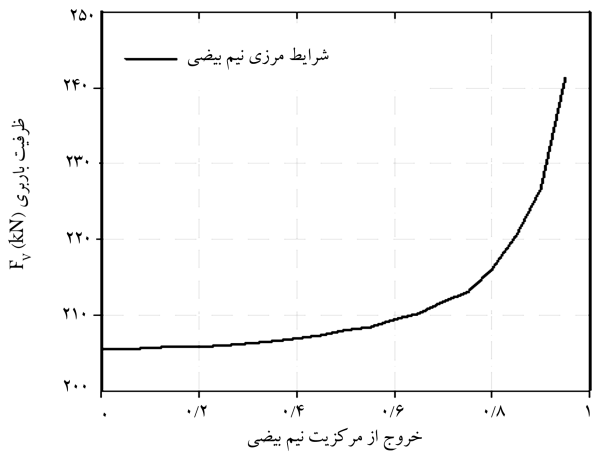
جدول ۱. مشخصات هندسی سیستم کیسه ـ خاک در روش‌های تحلیلی و عددی.

نمایه	$H_۰$ (cm)	$B_۰$ (cm)	l (cm)	$V_۰$ (cm۳)	e	δ_{v-peak} (mm)	$F_{V-limit}$ (kN)
پارامتر	ارتفاع اولیه	عرض اولیه	طول	حجم	خروج از مرکز	بیشینه‌ی نشست	ظرفیت باربری نهایی
شرایط مرزی نیم‌دایره	۷	۱۷/۵۵	۱۷/۵	۲۸۱۷/۵	۰	۱۹/۱	۲۰۵/۸
شرایط مرزی نیم‌بیضی	۷	۱۷/۵	۱۴/۵	۲۸۱۷/۵	۰/۸۵	۲۱	۲۲۰/۵

جدول ۲. مشخصات مکانیکی خاک و کیسه‌ی پلیمری از جنس پلی اتیلن.

نمایه	E (MPa)	$\sigma_{y(bag)}$ (MPa)	φ (°)	ψ (°)	ν	C (kPa)	t (mm)
پارامتر	مدول کشسانی	تنش تسلیم	زاویه‌ی اصطکاک	زاویه‌ی اتساع	ضریب پواسون	چسبندگی	ضخامت کیسه
مشخصات خاک	۴۰	—	۳۰	۳	۰/۳۳	۱	—
مشخصات کیسه	۱۴۰	۳۵	—	--	۰/۳۳	--	۱

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۶. تغییرات ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک به ازاء مقادیر متغیر خروج از مرکزیت.

جدول ۳. مشخصات سطح اشتراک سیستم کیسه ـ خاک و صفحه‌ی بارگذاری.

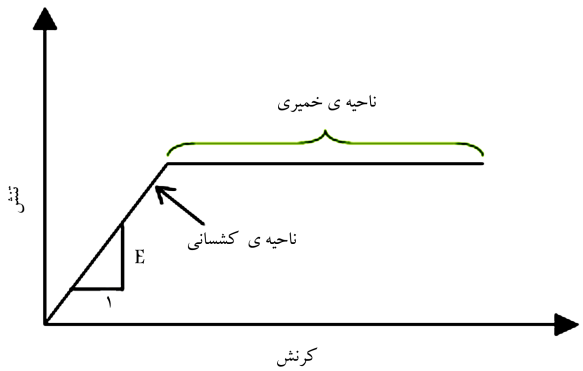
سطح اشتراک	ضریب اصطکاک	زاویه‌ی اصطکاک	اجازه‌ی جدایش دو سطح داده شود؟
کیسه ـ خاک	۰/۵۷	۳۰	بله
کیسه ـ صفحه‌ی بارگذاری	۰/۵	۲۶	خیر

برنامه‌ی شبیه‌سازی قدرتمند مهندسی است، که اساس آن روش المان محدود است. از مزایای روش تحلیل مذکور نسبت به روش سنتی می‌توان به امکان مدل‌کردن هندسه و شرایط مرزی پیچیده، تعیین توزیع تنش و تغییرشکل در نقاط مختلف سازه، پیش‌بینی مناسب رفتار سازه تحت مسیرهای مختلف بارگذاری و امکان مدل‌کردن مراحل و نحوه‌ی بارگذاری اشاره کرد. در این نوشتار، از روش استاندارد برای بررسی مدل استفاده شده است. همان‌گونه که می‌دانیم، رفتار مدل‌هایی که تحت تحلیل قرار می‌گیرند، باید برای برنامه تعریف شوند. مدلی که در این نوشتار طراحی شده است، شامل صفحه‌ی صلبی است، که روی کیسه‌ی پلیمری پُرشده از خاک قرار گرفته است. رفتار مکانیکی کیسه پلیمری و خاک به ترتیب با مدل رفتاری کشسان ـ خمیری مطابق شکل ۷ و مدل رفتاری موهر ـ کلمب، شکل ۸ تعریف شده‌اند. فرم هندسی قطعات به‌کار رفته در مدل شامل کیسه‌ی پلیمری، خاک و صفحه‌ی بارگذاری در شکل ۹ نشان داده شده است.

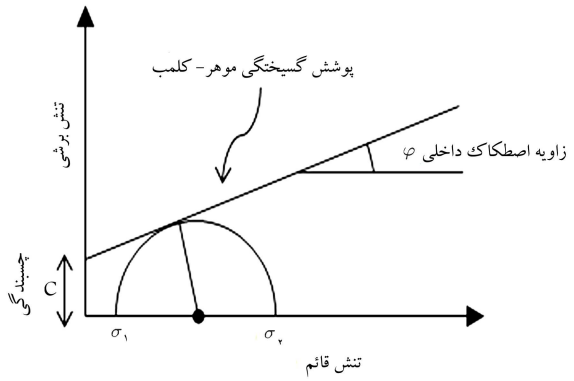
۵.۱.۲. سطح اشتراک و رفتار مصالح به‌کار رفته در سیستم کیسه ـ خاک

درنرم‌افزار آباکوس، تماس مکانیکی بین سطوح با استفاده از سطوحی که با یکدیگر اندرکنش دارند، تعریف می‌شود. نرم‌افزار آباکوس دو نوع رفتار تماسی برای شیوه‌ی تماس براساس سطح ارائه می‌دهد، که رفتار مماسی و رفتار قائم نامیده می‌شوند. مشخصات سطوح اشتراک به‌کاررفته برای سیستم کیسه ـ خاک و صفحه‌ی بارگذاری در جدول ۳ نشان داده شده است.

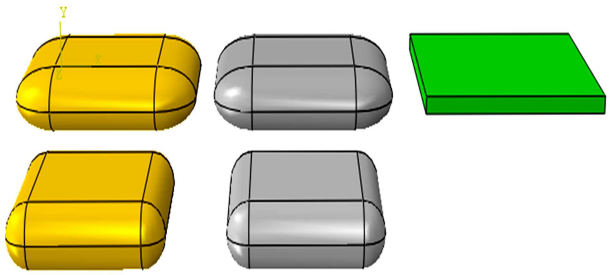
مدل فیزیکی که در این نوشتار به‌صورت سه بُعدی شبیه‌سازی شده است، شامل صفحه‌ی صلبی است که روی کیسه‌ی پلیمری پُر شده از خاک ماسه‌یی قرارگرفته است. مدل رفتاری موردنظر برای تبیین پاسخ کیسه‌ی پلیمری و خاک، به ترتیب مدل کشسان ـ خمیری کامل و موهر ـ کلمب هستند.[۱۱] خاک مورد استفاده در این پژوهش، ماسه است. پوسته‌ی خارجی مورد استفاده برای مدل فیزیکی،



شکل ۷. رابطه‌ی بین تنش ـ کرنش برای مصالح کیسه‌ی پلیمری.



شکل ۸. سطح گسیختگی مدل موهر ـ کلمب.



الف) صفحه ی بارگذاری؛ ب) کیسه ی پلیمری تو خالی؛ ج) خاک.

شکل ۹. بخش‌های مدل، به منظور مونتاژ سیستم کیسه ـ خاک.

از جنس ژئوسینتتیک[۳] است. پارامترهای موردنیاز برای خواص مصالح (خاک و کیسه‌ی پلیمری) در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

۶.۱.۲. شرایط مرزی و المان‌بندی

شرایط مرزی، برای ایجاد قیود در بخش‌هایی از مدل به‌کارگرفته می‌شوند تا مدل ثابت باقی بماند، یا به مقدار از پیش تعیین‌شده‌یی حرکت کند. در تحلیل‌های استاتیک، شرایط مرزی کافی باید فراهم شود تا از حرکت مدل به‌صورت جسم صلب جلوگیری شود. در غیر این‌صورت، حرکت جسم صلب مقید نمی‌شود و باعث معکوس‌ناپذیری ماتریس سختی می‌شود و این امر سبب می‌شود که تحلیل سازه به طور کامل انجام نگیرد. شرایط مرزی برای مدل‌ها به‌گونه‌یی است که در هر دو گام، سطح زیرین کیسه‌ی پلیمری در جهت قائم حرکتی ندارد.[۱۱]

نوع المان: نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش دارای المان‌های متعددی است که بسته به مدل و نوع آنالیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای المان مذکور از

Archive of SID
www.SID.ir

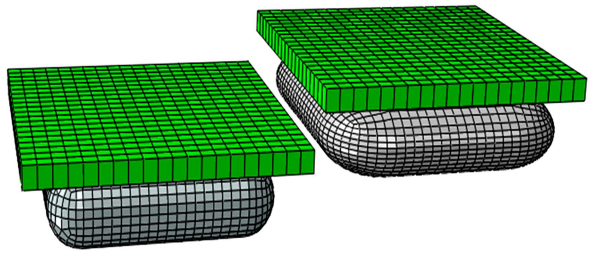
چند المان خاص استفاده شده است. نوع المان‌های به‌کار رفته برای مدل خاک به‌صورت المان‌های حجمی مکعبی ۸ گره‌یی (C۳D۸) است. در حالی که برای کیسه‌ی پلیمری، المان سه بُعدی (غشایی) ۴ گره‌یی (M۳D۴) در نظر گرفته شده است. مدل مونتاژ شده‌ی سیستم کیسه ـ خاک با انجام مش‌بندی، در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است.

۳. نتایج عددی

۱.۳. رفتار مکانیکی سیستم کیسه ـ خاک تحت بارگذاری قائم

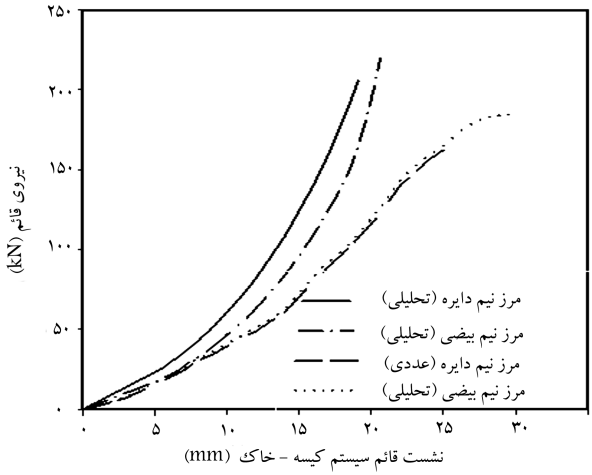
نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد هنگامی که سیستم کیسه ـ خاک تحت فشار قائم P_V قرار می‌گیرد، متحمل تغییرمکان δv درجهت قائم خواهد شد. شکل ۱۱، تغییرات جابجایی قائم سیستم کیسه ـ خاک در برابر بارگذاری قائم را نشان می‌دهد، که مطابق آن بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک با مقطع نیم‌دایره در برابر بارگذاری قائم ۱۶۲٫۳۱۲ کیلونیوتن در بیشینه‌ی نشست ۲۵٫۲ میلی‌متر است. چنانچه مقطع نیم‌بیضی در نظر گرفته شود، بیشینه‌ی ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک ۱۸۷٫۳۶ کیلونیوتن در بیشینه‌ی نشست ۲۹٫۴ میلی‌متر خواهد شد. شکل ۱۲، ظرفیت باربری نهایی سیستم کیسه ـ خاک را به ازاء تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک از ۲۵ تا ۴۵ درجه نشان می‌دهد، که مطابق آن با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، ظرفیت باربری نهایی سیستم کیسه ـ خاک افزایش یافته است.

شکل ۱۳، نمودار تغییرات کرنش محیطی کیسه‌ی پلیمری را در جابجایی‌های

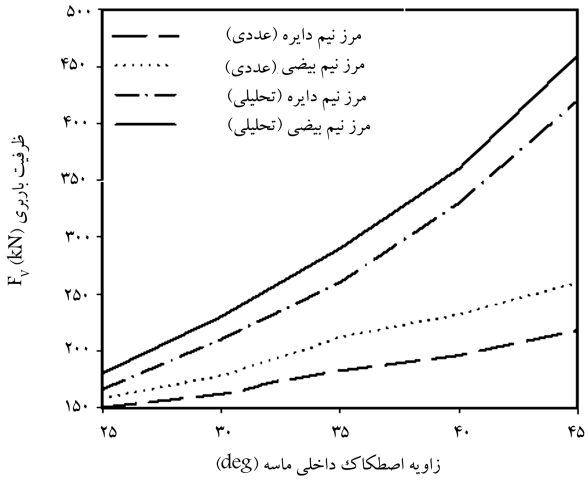


الف) نیم بیضی؛ ب) نیم دایره.

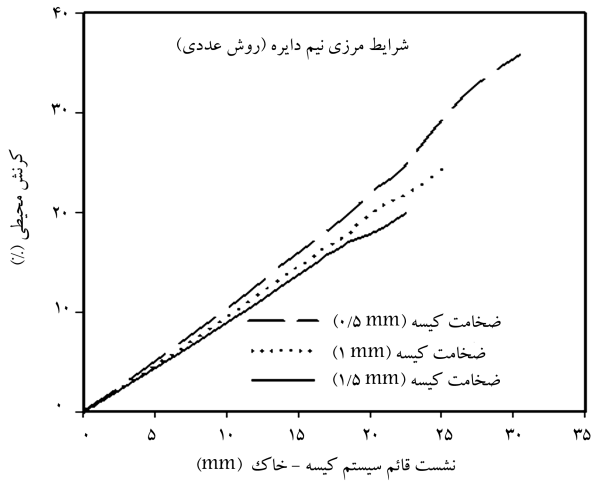
شکل ۱۰. مدل نهایی شبکه‌بندی سیستم کیسه ـ خاک با شرایط مرزی.



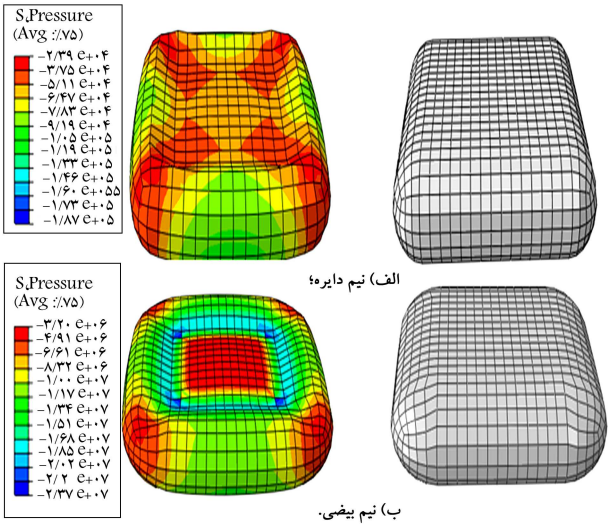
شکل ۱۱. تغییرات جابجایی سیستم کیسه ـ خاک به بارگذاری قائم.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک به ظرفیت باربری نهایی سیستم کیسه ـ خاک.



شکل ۱۳. جابجایی قائم سیستم کیسه ـ خاک به کرنش محیطی کیسه.



شکل ۱۴. مقطع هندسی قبل و بعد از بارگذاری در سیستم کیسه ـ خاک و کانتور توزیع تنش با مقاطع (واحد تنش بر حسب پاسکال است).

www.SID.ir

مختلف با ضخامت‌های متغیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ نشان می‌دهد، که مطابق آن با افزایش ضخامت کیسه‌ی پلیمری، کرنش محیطی کیسه کاهش می‌یابد. هنگامی که ضخامت کیسه‌ی پلیمری ۰/۵ میلی‌متر در نظرگرفته شود، نشست بیشینه به ۳۰/۴۸ میلی‌متر و کرنش محیطی بیشینه به ۳۵/۷۸٪ خواهند رسید. اما چنانچه ضخامت کیسه‌ی پلیمری را ۳ برابر کنیم (یعنی ۱/۵ میلی‌متر)، نشست بیشینه به ۲۲/۴۸ میلی‌متر و بیشینه‌ی کرنش محیطی به ۱۹/۹٪ محدود خواهند شد. از این رو با ۳ برابرکردن ضخامت کیسه‌ی پلیمری، نشست و کرنش محیطی به ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۸ برابر کاهش خواهند یافت. در شکل ۱۴، فرم هندسی کیسه‌های پلیمری با مقاطع نیم‌بیضی و نیم‌دایره، قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این نوشتار بررسی رفتار سیستم کیسه ـ خاک تحت بارگذاری قائم، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس در حالت سه بُعدی است. سپس تأثیر شرایط مرزی مقطع، مشخصات مصالح خاک و ضخامت کیسه‌ی پلیمری در ظرفیت باربری نهایی سیستم کیسه ـ خاک بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده عبارت‌اند از:

۱. در این نوشتار، به منظور بررسی تأثیر فرم هندسی در مقاومت فشاری سیستم کیسه ـ خاک، فرم هندسی نیم‌بیضی برای شرایط مرزی سیستم کیسه ـ خاک در نظرگرفته شده است. در مدل جدید، با افزایش مقدار خروج از مرکزیت، فرم هندسی سیستم کیسه ـ خاک کشیده‌تر خواهد شد. این امر موجب افزایش ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک تحت بارهای خارجی می‌شود. در فرم هندسی ارائه‌شده، با صفرشدن مقدار خروج از مرکزیت، نیم‌بیضی تبدیل به نیم‌دایره می‌شود. در نتیجه، روابط ارائه‌شده برای شرایط نیم‌بیضی، تبدیل به روابط ارائه‌شده برای شرایط نیم‌دایره خواهد شد.

۲. شرایط مرزی نیم‌بیضی با خروج از مرکزیت ۰/۸۵ در مقایسه با شرایط مرزی نیم‌دایره قابلیت تحمل بار خارجی بیشتری را دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در روش تحلیلی با تغییر مقطع نیم‌دایره به نیم‌بیضی ظرفیت باربری نهایی سیستم کیسه‌خاک، ۶/۶۸٪ افزایش خواهد یافت.

۳. چنانچه با استفاده از روش عددی، مدل سیستم کیسه ـ خاک مورد تحلیل واقع شود، ظرفیت باربری نهایی آن با تغییر مقطع از نیم‌دایره به نیم‌بیضی، ۱۳/۳۶٪ افزایش خواهد یافت.

۴. نتایج نشان می‌دهد که هر چه زاویه‌ی اصطکاک بین ذرات خاک افزایش یابد، مقاومت سیستم کیسه ـ خاک در برابر بارگذاری خارجی نیز افزایش خواهد یافت. در نشست ۱۵ میلی‌متر، ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک با زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۳۰ درجه، برابر با ۶۵/۶۶ کیلونیوتن است. چنانچه زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در همان نشست ۱۵ میلی‌متر به ۴۰ درجه افزایش یابد، ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک برابر با ۱۰۶/۲۴ کیلونیوتن خواهد شد. از این رو نتیجه می‌شود که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک از ۳۰ درجه به ۴۰ درجه، ظرفیت باربری سیستم کیسه ـ خاک تقریباً ۱/۶ برابر خواهد شد.

۵. در روش عددی، ضخامت کیسه‌ی پلیمری به ترتیب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر برای تحلیل در نظرگرفته شده است. از نتایج این‌گونه استنباط می‌شود که با افزایش ضخامت کیسه‌ی پلیمری، کرنش محیطی آن کاهش می‌یابد.

۶. با توجه به نتایج روش عددی در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی توزیع تنش (تمرکز تنش) در هر دو مدل یادشده در گوشه‌های کیسه‌ی پلیمری است.

۷. همچنین با درنظرگرفتن شرایط مرزی به‌صورت نیم‌بیضی، سطح موردنیاز برای ساخت کیسه‌ی پلیمری به منظور محصورکردن خاک، به مقدار قابل توجهی کاهش خواهد یافت، و بدین لحاظ صرفه‌جویی قابل توجهی در مواد مصرفی رخ خواهد داد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از مسئولان سایت دانشگاه سمنان برای در اختیارگذاشتن نرم‌افزارهای موردنیاز، کمال تشکر و قدرانی را دارند.

پانوشت‌ها

1. Decibel
2. Abaqus
3. Geosynthetic

منابع (References)

1. Matsuoka, H. and Liu, S., *A New Earth Reinforcement Method Using Soil Bags*, London, Taylor & Francis, pp. 14-17 (2006).
2. Nakagawa, Y., Chen, G.L., Tatsui, T. and Chida, S. "Verification of vibration reduction characteristics with soilbag structure", 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai, China, pp. 603-608 (2008).
3. Tatsuoka, F., Tateyama, M., Uchimura, T. and Koseki, J. "Geosynthetic-reinforced soil retaining walls as important permanent structures", *Geosynth. Intl.,* **4**(2), pp. 81-136 (1997).
4. Matsuoka, H. and Liu, S. "New earth reinforcement method by soilbags (donow)", *Soils and Foundations,* **43**(6), pp. 173-88 (2003).
5. Yongfu, X., Jian, H. Yanjun, D. and De'an, S. "Earth reinforcement using soilbags", *Journal of Geotextiles and Geomembranes,* **26**, pp. 279-289 (2008).

Archive of SID
www.SID.ir

6. Matsuoka, H., Hasebe, T., Liu, S. 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, pp. 67-79 (2003).

7. Tantono, 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, pp. 1-5 (2008).

8. Ansari, Y., Merifield, R., Yamamoto, H. and Sheng, D. "Numerical analysis of soilbags under compression and cyclic shear", *Journal of Computers and Geotechnics*, **38**(5), pp. 659-668 (2011).

9. Hibbitt and Sorensen, ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.10 (2010).

10. Haddad, A. and Bahrehdar, M. "Numerical and experimental evaluation of soilbags deformation under vertical loading", 5th European Geosynthetics Congress, Valencia, pp. 2-5 (2012).

11. Bahrehdar, M. "Numerical simulation of a soilbag behavior under vertical and shear compressions", MSc. Thesis, Semnan University, Iran, pp. 32-36 (2012).

Archive of SID

www.SID.ir