

مدل سطح مرزی سازوار برای رس آماسی غیر اشباع تحت بار هیدرولیکی تناوبی

محسن ازدری* (دانشیار)

زرگس نظری (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۱، ص. ۱۲۵-۱۳۴، (پادداست نشی)

تغییر رفتار خاک از حالت کشسان - خمیری به حالت کشسان در حین بارگذاری تناوبی را سازواری می‌نامند. در نوشتار حاضر، رخداد سازواری در حین چرخه‌های تر و خشک - سازی رس آماسی غیر اشباع به وسیله‌ی سطح مرزی خمیری شبیه سازی و به منظور دست یابی به هدف مذکور، از تابع پتانسیل خمیری استفاده شده است. به این ترتیب که هرگاه قله‌ی تابع پتانسیل خمیری، یعنی موقعیتی که گرادیان کرنش خمیری به موازات محور تنش انحرافی است، به مسیر تنش افقی موجود در چرخه‌های تر و خشک سازی برسد، کرنش‌های حجمی خمیری از بین می‌رود و رفتار خاک کاملاً کشسان می‌شود. لذا، برای نزدیک کردن قله‌ی تابع پتانسیل خمیری به مسیر تنش از پارامتر شکل تابع پتانسیل خمیری کمک گرفته می‌شود. تغییرات پارامتر مذکور با تعداد چرخه‌های بارگذاری هیدرولیکی به صورت کاهشی است و این امر موجب کاهش اندازه‌ی تابع پتانسیل خمیری و نزدیک شدن قله‌ی تابع پتانسیل خمیری به مسیر تنش می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل، نزدیک بودن مسیر تنش به قله‌ی تابع مذکور، رخداد سازواری را تسریع می‌کند. بنابراین با تغییر تاریخی‌ی تنش خاک مورد بررسی، می‌توان زمان رخداد ذکر شده را تسریع کرد یا به تعویق انداخت.

ajdari@fasau.ac.ir
n.nazari86@gmail.com

واژگان کلیدی: رس آماسی غیر اشباع، سازواری، سطح مرزی.

۱. مقدمه

خاک بر اساس متغیرهای حالت تنش آن بیان می‌شود و با توجه به نظر پژوهشگران مختلف، متغیرهای حالت تنش در خاک‌های غیر اشباع می‌توانند شامل تنش مؤثر، تنش خالص، و مکش باشند.^[۱،۲]

با وجودی که مطالعات آزمایشگاهی بسیاری در سال‌های اخیر با هدف بررسی رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های رسی آماسی صورت گرفته است،^[۳-۹] هنوز اطلاعات کمی در مورد مدل سازی رفتار تغییر حجمی رس‌های آماسی غیر اشباع و همچنین در خصوص شبیه سازی تأثیر چرخه‌های ترساز و خشک اندازی در رفتار تغییر حجمی چنین خاک‌هایی وجود دارد. پژوهش حاضر با هدف مدل سازی رفتار رس آماسی غیر اشباع حین چرخه‌های ترساز و خشک اندازی و شبیه سازی رخداد سازواری در فرایند ذکر شده انجام شده است.

رخداد سازواری، تغییر رفتار مصالح از حالت کشسان - خمیری به حالت کشسان طی چرخه‌های بارگذاری است. به عبارت دیگر، در رخداد سازواری تغییر شکل خمیری بیشتری حین چرخه‌های بارگذاری ایجاد نمی‌شود. مطالعات آزمایشگاهی نیز نشان داده است که در حین بارگذاری تناوبی خاک، برای مقادیر تنش کمتر از تنش بحرانی گسیختگی، یک موقعیت تعادل بدون گسیختگی ایجاد می‌شود که در آن منحنی‌های تنش - کرنش حلقه‌های چرخه‌ی بسته را دنبال می‌کنند و رفتار نهایی خاک کشسان است.

خاک رس آماسی یا متورم شونده از جمله خاک‌های مسئله دار است، که در حین ساخت و ساز سازه‌های سبک مثل روسازی راه‌ها و خانه‌های مسکونی کوچک به وفور با آن برخورد می‌شود. رس‌های آماسی خاک‌هایی را شامل می‌شوند که طی چرخه‌های تر و خشک شدن سالیانه یا فصلی دچار تورم یا انقباض می‌شوند. هر چند سختی خاک‌های آماسی در حالت خشک بسیار زیاد است و به زحمت می‌توان یک کلوخ از این نوع خاک‌ها را در حالت خشک به چند قطعه تقسیم کرد؛ اما فشار تورمی ناشی از ترساز و یا نشست‌های غیر مجاز در حین خشک اندازی آنها می‌تواند موجب خرابی کامل ساختمان‌های سبک، پوشش کانال‌های آبیاری، کف سازی‌ها، ... شود.^[۱]

به علاوه، با توجه به ضریب هدایت هیدرولیکی بسیار کم رس‌های آماسی متراکم شده، از آنها در ساخت لایه‌ی آب بند سدهای خاکی و سنگریزه‌ی و پوشش محل دفن زباله‌های شهری، صنعتی و رادیواکتیو استفاده می‌شود. بنابراین شناخت دقیق رفتار هیدرو مکانیکی خاک‌های رسی آماسی هنگام شبیه سازی‌های عددی و نظری سازه‌های مذکور، ضروری است. شاپان ذکر است که رفتار هیدرو مکانیکی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۶/۱۳۹۴، اصلاحیه ۱۵/۳/۱۳۹۵، پذیرش ۲۹/۴/۱۳۹۵.

DOI:10.24200/J30.2018.1319

این موقعیت را در اصطلاح، رخداد سازواری^۱ می‌نامند. لذا، یک مدل سطح مرزی بر اساس متغیر حالت تنش مؤثر و پارامترهای سخت شوندهگی مکش و کرنش حجمی خمیری ارائه و تابع پتانسیل خمیری مدل با توجه به هدف پژوهش اصلاح و در نهایت، بر روی نتایج مدل بحث شده است.

۲. متغیرهای حالت تنش و رفتار مکانیکی خاک‌های غیر اشباع

منظور از رفتار مکانیکی خاک‌های غیر اشباع، ویژگی‌های تغییر حجمی و مقاومت برشی خاک تحت سطوح مختلف تنش است. همان‌گونه که پیش از این خاطر نشان شده است؛ در پژوهش حاضر، رفتار مکانیکی خاک بر اساس متغیر حالت تنش مؤثر و پارامتر سخت شوندهگی مکش بیان شده است.

۲.۱. متغیر حالت تنش

بیشاب^۲ (۱۹۵۹)، شناخته شده ترین رابطه‌ی تنش مؤثر برای خاک‌های غیر اشباع را پیشنهاد کرده است (رابطه‌ی ۱):^[۱۱]

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) = \sigma_{net} + \chi^s \quad (1)$$

که در آن، χ پارامتر تنش مؤثر، u_a فشار هوای حفره‌یی، u_w فشار آب حفره‌یی، $s = (u_a - u_w)$ مؤلفه‌ی موینگی مکش بافتی، و $\sigma_{net} = (\sigma - u_a)$ تنش خالص است. بیشاب فرض کرد رابطه‌ی مستقیمی بین پارامتر تنش مؤثر و درجه‌ی اشباع وجود دارد. به ازاء حالت‌های خشک و اشباع به ترتیب اعداد ۰ و ۱ را اختیار می‌کند. در ادامه، در سال ۱۹۶۹ پیشنهاد شده است که برای مدل سازی رفتار مکانیکی خاک‌های غیر اشباع، از دو متغیر حالت تنش مستقل استفاده شود.^[۱۲] در مطالعه‌ی در سال ۱۹۷۷، این دو متغیر به صورت $\sigma - u_a$ و $u_a - u_w$ انتخاب شده است.^[۱۳]

اولین بار در سال ۱۹۹۰، مدلی بر اساس حالت بحرانی جهت مدل سازی رفتار مکانیکی خاک غیر اشباع ارائه شده است.^[۱۴] در مدل مذکور، که حالت توسعه یافته‌ی آن مدل «کم کلی»^۳ است؛ رفتار خاک غیر اشباع بر اساس متغیرهای تنش متوسط خالص $P_{net} = p - u_a$ ، تنش انحرافی $\sigma_1 - \sigma_3 = q$ ، و مکش توضیح داده شده است. در طی سال‌های اخیر، پژوهشگران مجدداً به اصل تنش مؤثر، اقبال بیشتری نشان داده و مدل‌هایی بر این اساس ارائه کرده‌اند. در بخش‌های بعدی نوشتار حاضر، به اساس مدل‌های مذکور بیشتر پرداخته شده است.

۲.۲. نقش پارامتر تنش مؤثر (χ)

مکش یک مفهوم ریز مقیاس است. لذا، به عنوان تنش بر روی سطح حجم نماینده‌ی توده‌ی خاک (REV)^۴ قابل اعمال نیست.^[۱۵] بنابراین مکش بافتی، متغیر تنش نیست.^[۱۳] لذا، به منظور تغییر مقیاس مکش، باید ابتدا در پارامتری که نماینده‌ی ساختار خاک، خواص فیزیکی آن و حالت تنش، مقدار مکش، و تنش خالص است، ضرب شود و سپس به عنوان تنش اعمالی به سطح توده‌ی خاک غیر اشباع و در کنار تنش خالص، متغیر حالت تنش را تشکیل دهد. بنابراین نقش پارامتر تنش مؤثر، انتقال مکش بر روی سطح حجم نماینده‌ی توده‌ی خاک است. با توجه به اینکه اعمال مکش‌های بزرگ‌تر از مکش ورود هوا، باعث رخداد

حالت خمیری بر روی آب حفره‌یی خاک می‌شود؛ مکش می‌تواند به عنوان یک اسکالر، به صورت پارامتر سخت شوندهگی هم استفاده شود.

۳. پاسخ سازوار مصالح دانه‌یی به بارهای تناوبی

در بارگذاری تناوبی مصالح، اگر مقدار بار از اولین مرز بارگذاری که بار تسلیم یا بار حدی کشسان (P_y) است، بیشتر شود؛ به گونه‌یی که مقدار آن در نزدیکی سطح تسلیم باشد، تغییر شکل خمیری مصالح آغاز می‌شود. اگر مقدار بار از حد کشسان عبور کند و در عین حال کمتر از دومین مرز بارگذاری (بار سازواری (P_{sd})) باشد ($P_y < P < P_{sd}$)، کرنش‌های دائمی اتفاق می‌افتد و پاسخ مصالح در بارگذاری بعدی با قبلی متفاوت خواهد بود.

بعد از تعداد چرخه‌های بارگذاری معین، تجمع افزایشی تنش‌های پسماند موجب از بین رفتن کرنش‌های دائمی می‌شود و مصالح رفتاری کشسان خواهند داشت. چنین موقعیتی رخداد سازواری نامیده می‌شود. مقدار بحرانی باری که مصالح همچنان سازوار رفتار کنند و برای مقادیر بیش از آن دچار گسیختگی شوند، بار سازواری و تنش ناشی از آن، تنش بحرانی سازواری نامیده می‌شود.

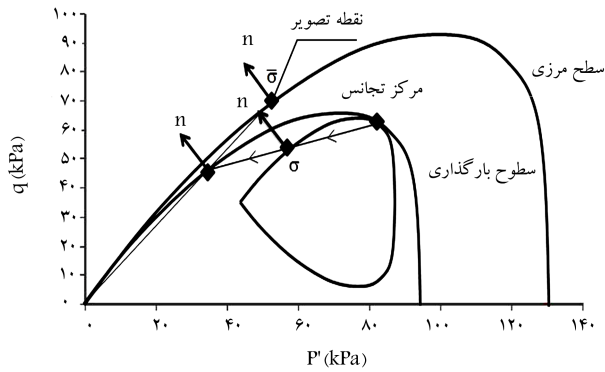
بنابراین دو مشخصه‌ی مهم رخداد سازواری، پایدار شدن مسیر تنش و رسیدن به رفتار کشسانی در منحنی تنش - کرنش یا بار - تغییر شکل است. رفتار سازوار در منحنی تنش - کرنش یا بار - تغییر شکل می‌تواند به دو طریق مشاهده شود: (۱) سازواری کشسان یا رسیدن به موقعیت کشسان ثابت و (۲) سازواری خمیری یا رسیدن به حلقه‌های چرخه‌یی بسته. تاکنون در مطالعات آزمایشگاهی مختلف انجام شده بر روی خاک‌های اشباع مشاهده شده است که مسیر تنش خاک تحت بارگذاری مکانیکی تناوبی پس از انجام چند چرخه‌ی بارگذاری، به حالت پایدار نزدیک شده و تغییر شکل بیشتری در خاک به وجود نیامده است.^[۱۶]

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی خاک‌های غیر اشباع تحت بارگذاری هیدرولیکی تناوبی نیز رخداد سازواری را تأیید می‌کند، و نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک سازی، پتانسیل تورم خاک کاهش می‌یابد.^[۱۷،۱۸] قابل ذکر است، از آنجایی که نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات خاک‌های غیر اشباع حاکی از رخداد سازواری کشسان است،^[۱۷،۱۸] از طرفی برخی از پژوهشگران معتقدند که سازواری خمیری نوعی از گسیختگی مصالح است و آن را حلقه‌ی تناوبی خمیری می‌نامند؛^[۱۸] لذا منظور از رخداد سازواری در پژوهش حاضر، سازواری کشسان است.

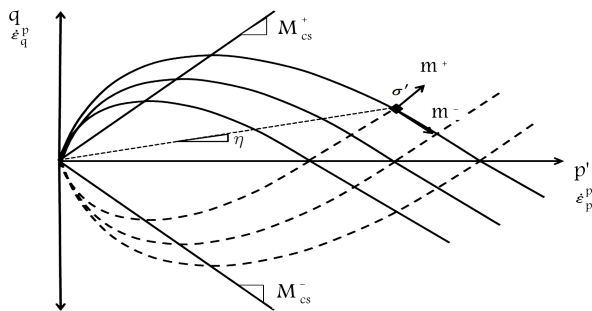
سازواری تحت مسیر تنش‌های مختلف روی می‌دهد و یک تعریف عمومی برای آن قابل ارائه است. در پژوهش حاضر، با توجه به نوع خاک و مسئله‌ی مورد مطالعه، سازواری بر اساس مکش و تحت چرخه‌های تر و خشک سازی خاک مدل سازی شده است، که سازواری هیدرولیکی نیز نامیده می‌شود.

۴. مدل‌های رفتاری خاک‌های غیر اشباع

منظور از یک مدل رفتاری، مجموعه‌ی روابطی است که به منظور پیش بینی و شبیه سازی رفتار مکانیکی ماده‌ی مورد مطالعه به کار می‌رود. هر مدل رفتاری کشسان - خمیری با ۴ مشخصه‌ی اصلی تابع تسلیم، تابع پتانسیل خمیری، قانون سخت شوندهگی و معادلات رفتاری توصیف‌گر رفتار کشسان خاک تعریف می‌شود.



شکل ۱. سطح مرزی، سطوح بارگذاری، مرکز تجانس و قانون نگاشت شعاعی [۲۲]
($R = 1/5$ و $N = 3/5$, $p'_c = 130$, KPa)



شکل ۲. خانواده منحنی‌های تابع پتانسیل خمیری و بردار واحد عمود بر تابع پتانسیل خمیری برای بارگذاری فشاری و کششی. [۲۲]

هستند و فقط از نظر اندازه متفاوت هستند، تابع سطح مرزی (F) و سطح بارگذاری (f) اتخاذ شده در پژوهش حاضر به صورت رابطه‌های ۲ و ۳ تعریف می‌شوند: [۲۲]

$$F(\bar{p}', \bar{q}, \bar{p}'_c) = \left(\frac{\bar{q}}{M_{cs} \bar{p}'} \right)^N - \frac{\ln\left(\frac{\bar{p}'_c}{\bar{p}'}\right)}{\ln R} = 0 \quad (2)$$

$$f(p', q, p'_c) = \left(\frac{q}{M_{cs} p'} \right)^N - \frac{\ln\left(\frac{p'_c}{p'}\right)}{\ln R} = 0 \quad (3)$$

که در آنها، \bar{p}' ، \bar{q} ، \bar{p}'_c ، p' ، q ، p'_c به ترتیب تنش مؤثر میانگین، تنش انحرافی و تنش پیش تحکیمی بر روی سطح مرزی و سطح بارگذاری و M_{cs} شیب خط حالت بحرانی است. R نسبت بین \bar{p}'_c و p'_c در مکان برخورد سطح مرزی و خط وضعیت بحرانی در فضای $q - p'$ است. پارامتر N انحناى سطح مرزی را کنترل می‌کند (شکل ۱).

همچنین تابع پتانسیل خمیری به شکل رابطه‌ی ۴-۱ و ۴-۲ قابل ارائه است:

$$g(p', q, p'_c) = \tilde{t} \left[q + \frac{A M_{cs} p'_c}{A - 1} \left(\left(\frac{p'}{p'_c} \right)^{A-1} - 1 \right) \right] \quad A \neq 1 \quad (1-4)$$

$$g(p', q, p'_c) = \tilde{t} \left[q + M_{cs} p'_c \ln \left(\frac{p'}{p'_c} \right) \right] \quad A = 1 \quad (2-4)$$

که در آن، p'_c متغیری است که اندازه‌ی تابع پتانسیل خمیری را کنترل می‌کند. $\tilde{t} = +1$ برای مد فشاری و $\tilde{t} = -1$ برای مد کششی هستند (شکل ۲). مؤلفه‌های بردار واحد عمود بر تابع پتانسیل خمیری ($m = (m_{p'}, m_q)$) در هر نقطه‌ی تنش از

در حالتی که تابع پتانسیل خمیری منطبق بر تابع تسلیم باشد، رفتار خاک از نوع مرتبط^۵ و در غیر این صورت، از نوع غیر مرتبط^۶ در نظر گرفته می‌شود.

۱.۴. مدل سطح مرزی خمیری برای رس‌های آماسی غیر اشباع

چنان که پیش از این ذکر شد، سازه‌های بنا شده بر روی خاک‌های آماسی در طی چرخه‌های تر و خشک سازی، متحمل خسارت‌هایی از جمله: ترک خوردگی روسازی‌ها، پرداخت داخلی ساختمان‌ها، و جابه‌جایی جبران ناپذیر شالوده‌ها و بخش‌های فوقانی سازه می‌شود. بنابراین درک رفتار رس‌های آماسی غیر اشباع تحت بارهای تناوبی هیدرولیکی برای طراحی و اجرای سازه‌های سبک، خاکریزها، و جاده‌ها حائز اهمیت است.

مدل‌های رفتاری سنتی مثل کم کلی، [۱۹] معمولاً سطح تسلیمی با شکل ثابت را در نظر می‌گیرند، که تا قبل از درگیر شدن با سطح تنش، اندازه‌ی آن ثابت می‌ماند و پس از رخداد تسلیم، کرنش‌های خمیری فرایند ایجاد می‌شود و اندازه‌ی سطح تسلیم نیز با توجه به میزان کرنش خمیری افزایش یا کاهش می‌یابد. این در حالی است که رفتار واقعی خاک، انتقالی آرام از رفتار کشسان به کشسان - خمیری را نشان می‌دهد. همچنین مدل‌های خمیری که بر پایه‌ی کم کلی بنا می‌شوند، [۲۰] قادر نیستند تغییر شکل خمیری بارگذاری تناوبی را حین مراحل بار برداری و بارگذاری مجدد نشان دهند.

لذا تاکنون چندین مدل خمیری دینامیکی جهت توضیح رفتار تناوبی خاک‌ها ارائه شده است، که از جمله‌ی آنها می‌توان به مدل سطح مرزی خمیری اشاره کرد، که بزرگ‌ترین مزیتش آن است که در انتقال ناگهانی^۷ از رفتار کشسان به کشسان - خمیری، که به عنوان یک نقطه ضعف بزرگ در سایر مدل‌های خمیری سنتی وجود دارد، به صورت یک انتقال تدریجی و آرام تصحیح شده است. همچنین، مدل مذکور به خوبی قادر است که کرنش‌های خمیری ناشی از بارگذاری‌های مکانیکی و هیدرولیکی تناوبی را شبیه سازی کند.

۲.۴. خصوصیات پایه‌ی مدل سطح مرزی

خصوصیات پایه‌ی مدل سطح مرزی ارائه شده‌ی خلیلی و همکاران، [۲۲-۲۳] در ادامه به طور مختصر ارائه شده است. مدل مذکور برای توصیف رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های دانه‌ی ارائه و در پژوهش حاضر، نیز از آن برای شبیه سازی رفتار مخلوط ماسه - بنتونیت استفاده شده است. مدل سطح مرزی در قالب حالت بحرانی فرمول بندی و چرخه‌ی هیدرولیکی^۸ به واسطه‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک در نظر گرفته می‌شود.

یک ناحیه‌ی کاملاً کشسان به وسیله‌ی سطح بارگذاری^۹ مرز بندی می‌شود. نقاط تنش فعلی، همواره داخل و یا روی سطح بارگذاری قرار دارند. سطح بارگذاری می‌تواند بزرگ یا کوچک شود، و یا در امتداد محورها در فضای $q - p'$ انتقال یابد. شکل‌های سطح بارگذاری و سطح مرزی از نظر هندسی مشابه هستند و مبدأ بارگذاری اولیه، مرکز تشابه هر دو است و سطح مرزی، همواره بر سطح بارگذاری محیط است. این سطوح می‌توانند به یکدیگر مماس یا در بعضی موارد بر یکدیگر منطبق شوند. قانون سخت شوندگی به گونه‌ی است که سطح بارگذاری با سطح مرزی تقاطع نداشته باشد. در نزدیکی سطح مرزی، نرخ کرنش خمیری افزایش و سختی خاک کاهش می‌یابد. این مورد با تعریف مدول سخت شوندگی، که تابعی نزولی از فاصله‌ی بین موقعیت تنش فعلی σ' و نقطه‌ی تصویر $\bar{\sigma}'$ روی سطح مرزی است، محقق می‌شود (شکل ۱). از آنجایی که سطوح بارگذاری و مرزی، مشابه هندسی

رابطه ۱-۵ و ۲-۵ به دست می‌آیند:

$$m_p = \frac{d\tilde{t}}{\sqrt{1+d^2}} \quad (1-5)$$

$$m_q = \frac{\tilde{t}}{\sqrt{1+d^2}} \quad (2-5)$$

تابع پتانسیل خمیری، جهت تغییرات کرنش خمیری را نشان می‌دهد. از آنجایی که رفتار خمیری را در صورت مشخص بودن ارتباط بین تغییرات کرنش و تغییرات تنش می‌توان بررسی کرد؛ لذا برای تحلیل آن از تابع پتانسیل خمیری و قانون جریان خمیری استفاده می‌شود. تابع پتانسیل خمیری، اتساع خمیری $d = \frac{\epsilon_p^p}{\epsilon_q^p}$ ، که نسبت کرنش حجمی خمیری به کرنش حجمی انحرافی است، را به نسبت تنش $\eta = \frac{q}{p'}$ ارتباط می‌دهد. از آنجایی که پارامتر d معرف شیب خط عمود بر تابع پتانسیل خمیری است، با مشتق‌گیری از تابع پتانسیل خمیری نسبت به تنش مؤثر میانگین و معکوس و قرینه کردن آن؛ می‌توان پارامتر مذکور را به شکل کلی رابطه‌ی ۶ نوشت:

$$d = A \left(M_{cs} - \frac{q}{p'} \right) \quad (6)$$

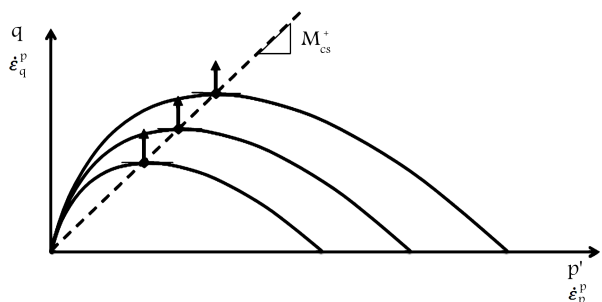
پارامتر A از مشخصات خاک محسوب می‌شود که به مکانیزم و مقدار استهلاک انرژی وابسته است. q و p' به ترتیب تنش مؤثر میانگین و تنش انحرافی و M_{cs} شیب خط حالت بحرانی هستند.

۳.۴. مدل سطح مرزی سازوار

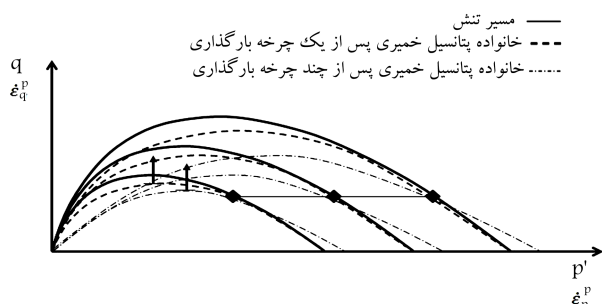
در پژوهش حاضر، بارگذاری به صورت هیدرولیکی تناوبی در نظر گرفته شده و چرخه‌های تر و خشک سازی تحت تنش خالص ثابت بررسی شده‌اند. با توجه به اینکه با تغییر مقدار مکش، مقدار تنش انحرافی ثابت باقی می‌ماند؛ فقط مقدار تنش مؤثر میانگین همراه با مکش اعمالی تغییر می‌کند و مسیر تنش در صفحه‌ی $q - p'$ به صورت افقی است. با در نظر گرفتن کرنش حجمی خمیری و مکش به عنوان پارامترهای سخت شوندگی، می‌توان نتیجه گرفت که سازواری هنگامی روی می‌دهد که کرنش حجمی خمیری بیشتری وجود نداشته باشد و فقط، مؤلفه‌ی کرنش خمیری انحرافی از کرنش خمیری باقی بماند و این امر فقط در نقطه‌ی قله‌ی تابع پتانسیل خمیری اتفاق می‌افتد (شکل ۳). بر اساس رابطه‌ی ۴، دو نوع متغیر برای تابع پتانسیل خمیری قابل تعریف خواهد بود: پارامتر شکل تابع پتانسیل خمیری (A) و پارامتر اندازه‌ی آن (p'). همان گونه که پیش از این ذکر شده است، مسیر تنش در صفحه‌ی $q - p'$ افقی است و امکان رخداد سازواری فقط در قله‌ی تابع پتانسیل خمیری وجود دارد.

بنابراین روند تغییرات پارامترهای تعریف شده‌ی تابع پتانسیل خمیری باید به گونه‌ی باشد که طی چرخه‌های بارگذاری، اندازه‌ی تابع پتانسیل خمیری کاهش یابد، قله‌ی تابع مذکور به نقاط مسیر تنش نزدیک شود (شکل ۴)، و پس از چند چرخه‌ی تر و خشک سازی، قله‌ی آن بر روی مسیر تنش قرارگیرد. به این ترتیب مؤلفه‌ی کرنش حجمی خمیری از میان می‌رود و پس از آن با تغییر شکل تابع پتانسیل خمیری، قله‌ی تابع پتانسیل خمیری بر روی تمامی نقاط مسیر تنش واقع می‌شود و رخداد سازواری به وقوع می‌پیوندد (شکل ۵).

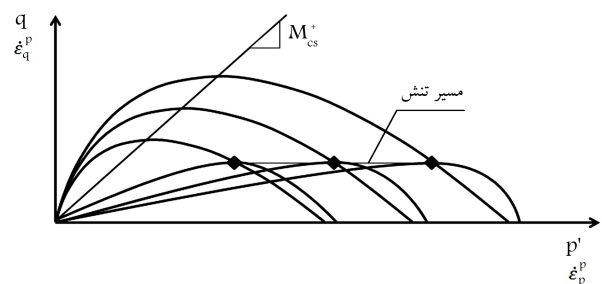
با توجه به قانون جریان، بردار کرنش خمیری همواره عمود بر تابع پتانسیل خمیری است. این بردار از دو مؤلفه تشکیل می‌شود: کرنش انحرافی خمیری و کرنش حجمی خمیری. بنابراین با در دست داشتن مقدار دو مؤلفه‌ی مذکور و موقعیت نقاط مسیر تنش در صفحه‌ی $(q - p')$ ، می‌توان مکان نقطه‌ی مورد نظر را روی تابع پتانسیل



شکل ۳. تابع پتانسیل خمیری و مؤلفه‌ی کرنش حجمی خمیری در نقطه‌ی قله.



شکل ۴. نمایش طرح وار کوچک شدن تابع پتانسیل خمیری طی چرخه‌های تر و خشک سازی و نزدیک شدن قله‌ی خانواده‌ی تابع پتانسیل خمیری به مسیر تنش.



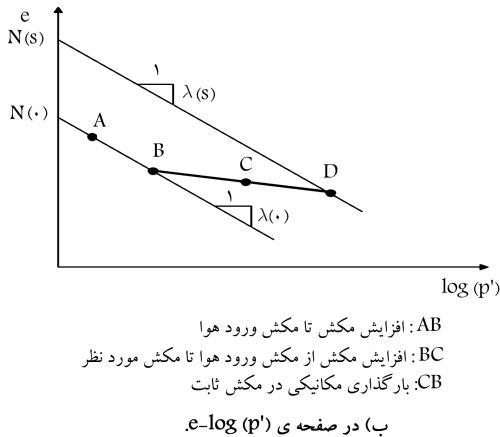
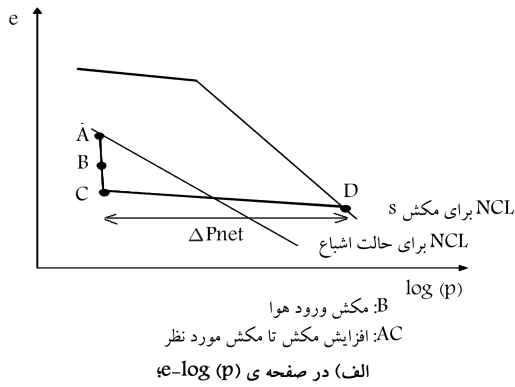
شکل ۵. هم‌گرا شدن قله‌ی تابع پتانسیل خمیری به نقاط مسیر تنش حین رخداد سازواری.

خمیری مشخص کرد. پس از محاسبه‌ی کرنش حجمی خمیری و کرنش انحرافی خمیری، پارامتر شکل A ، با استفاده از رابطه‌ی ۶ از رابطه‌ی ۷ قابل محاسبه است:

$$A = \frac{d}{M_{cs} - \frac{q}{p'}} \quad (7)$$

که در آن، d اتساع خمیری، q تنش انحرافی در موقعیت فعلی، p' تنش مؤثر میانگین در موقعیت فعلی و M_{cs} شیب خط وضعیت بحرانی است. برای به دست آوردن رابطه‌ی میان پارامترهای شکل و اندازه‌ی تابع پتانسیل خمیری با مقدار مکش اعمال شده به خاک و تعداد چرخه‌های بارگذاری، لازم است ابتدا نتایج تجربی که در آنها نشانه‌ی رخداد سازواری وجود دارد، بررسی و داده‌های مورد نیاز از آنها استخراج شوند. داده‌های مذکور از نمودارهای نسبت تخلخل - مکش و یا کرنش حجمی - مکش قابل محاسبه هستند. از منحنی‌های فوق می‌توان مقدار کرنش حجمی را محاسبه کرد.

از آنجایی که کرنش حجمی کل مشتمل از کرنش حجمی خمیری و کرنش حجمی خمیری است، با کم کردن قسمت کرنش حجمی کشسان از کرنش حجمی



شکل ۶. نمایش طرح وار مسیر تنش انتخاب شده.

غیر اشباع به کار برد.

$$C_e = 2.73 \lambda \quad (10)$$

پارامتر تنش مؤثر در شرایط اشباع (مکش های کوچک تر از مکش ورود هوا)، برابر با λ است.^[۲۱] بنابراین با جای گذاری معادله ی ۱، در معادله ی ۸ و استفاده از نتایج اعمال گام های متوالی مکش در معادله ی ۸ و شروع از حالت اشباع، فقط مجهول معادله ی پارامتر تنش مؤثر در مکش های بزرگ تر از مکش ورود هوا خواهد بود. برای محاسبه ی پارامتر تنش مؤثر در حالت عادی تحکیم یافتگی نیز مسیر تنش خاص به این شرح معرفی می شود (شکل ۶): تغییرات نسبت تخلخل در خاک غیر اشباع از معادله ی خط عادی تحکیم یافتگی، که شیب و عرض از مبدا آن تابعی از مکش است، به دست می آید.

افزایش مکش از حالت اشباع (نقطه ی A)، تا مکش ورود هوا (نقطه ی B)، باعث کاهش نسبت تخلخل در امتداد خط عادی تحکیم یافتگی اشباع می شود (شکل ۶-ب). افزایش مکش تا رسیدن به نقطه ی C ادامه می یابد. از این نقطه به بعد، مکش اعمالی ثابت می ماند و تنش مؤثر میانگین تا رسیدن به نقطه ی D افزایش می یابد. بدیهی است با توجه به پدیده ی سخت شونده ی ناشی از مکش، رفتار خاک در طی مسیرهای BC و CD کشسان است و با استفاده از روابط کشسان غیر خطی قابل ارائه است.

با توجه به اینکه نقطه ی C متعلق به خط بار برداری و بارگذاری مجدد است، تمامی مجهولات مسئله و از جمله مقدار پارامتر تنش مؤثر غیر اشباع از طریق پروسه ی آزمون و خطا قابل محاسبه هستند. بر اساس مقدار تنش خالص و مقدار مکش، امکان جدایی نمونه در اثر کاهش حجم حین خشک سازی از حلقه ی آدومتر و

کل، کرنش حجمی خمیری به دست خواهد آمد. برای به دست آوردن موقعیت فعلی در فضای تنش، باید تنش مؤثر میانگین برای نقاط مسیر تنش محاسبه شود. محاسبه ی تنش مؤثر غیر اشباع بر اساس رابطه ی پیشاب انجام می شود و مستلزم دانستن مقدار پارامتر تنش مؤثر (χ)، در مکش های مختلف است.^[۱۱] در پژوهش حاضر، پارامتر تنش مؤثر غیر اشباع با استفاده از رفتار تغییر حجمی خاک و همان گونه که در قسمت بعد توضیح داده شده است؛ محاسبه می شود.

با توجه به مطالب ذکر شده و با استفاده از نرم افزار تهیه شده در محیط برنامه نویسی متلب^{۱۰}، با مشخص بودن موقعیت نقاط مسیر تنش و شیب خط عمود یا مماس بر تابع پتانسیل خمیری، مقدار پارامتر شکل و پارامتر اندازه در هر مرحله ی بارگذاری تناوبی و رابطه ی بین پارامترهای مذکور با مکش و تعداد چرخه های بارگذاری مشخص می شود. پیش از این، پارامتر شکل A در مدل سطح مرزی خمیری به صورت ثابت در نظر گرفته می شد و بنابراین تمامی پتانسیل های خمیری با هم تشابه هندسی داشتند.

در پژوهش حاضر، به این پارامتر اجازه داده شده است تا با مکش های مختلف و در چرخه های بارگذاری متناوب تغییر کند و به این ترتیب، منحنی های تابع پتانسیل خمیری لزوماً با هم تشابه هندسی ندارند و شکل آنها با توجه به موقعیت نقاط مسیر تنش تغییر خواهد کرد. این پارامتر به گونه یی تغییر می کند که هنگام رخداد سازواری، قله ی تابع پتانسیل خمیری به نقاط مسیر تنش نزدیک شود و گرا دیان خمیری به موازات محور q شکل گیرد و کرنش حجمی خمیری بیشتری به وجود نیاید. به این ترتیب رخداد سازواری که به صورت تجربی و آزمایشگاهی مشاهده می شود، توسط مدل سطح مرزی شبیه سازی می شود.

۵. محاسبه ی پارامتر تنش مؤثر با استفاده از رفتار تغییر حجمی خاک

در پژوهش های پیشین،^[۲۹-۲۵] پارامتر تنش مؤثر از طریق مقدار مقاومت برشی خاک در مکش های مختلف محاسبه شده است. در روش مذکور، پارامتر تنش مؤثر به صورت خطی و با توجه به نقطه ی مکش ورود هوا، مکش مربوط به موقعیتی که هوا وارد بزرگ ترین حفره های باز خاک می شود، محاسبه می شود. روش ذکر شده در مورد مسائل غیر خطی تغییر حجم دقیق است. در پژوهش حاضر، پارامتر تنش مؤثر غیر اشباع با استفاده از رفتار تغییر حجمی خاک و به وسیله ی مجموعه نتایج به دست آمده از آزمایش خشک اندازی و آزمایش های تحکیم و به این شرح محاسبه شده است: تغییرات نسبت تخلخل با تنش مؤثر قائم اعمالی در قسمت کشسانی آزمایش خشک اندازی با استفاده از رابطه ی ۸ قابل ارائه است:

$$\delta_e = c_r \log \frac{\sigma'_v \lambda}{\sigma'_{v1}} \quad (8)$$

که در آن، e نسبت تخلخل، σ'_v تنش قائم مؤثر و c_r ضریب فشردگی مجدد خاک است. به علاوه، همان گونه که ذکر شد، تنش مؤثر قائم بر اساس رابطه ی پیشاب،^[۱۱] به صورت رابطه ی ۹ محاسبه می شود:

$$\sigma'_v = (\sigma_v - u_a) + \chi^{\circ} \quad (9)$$

همچنین خط تحکیم یک بعدی و خط تحکیم همسان گرد را می توان با تقریب قابل قبولی موازی فرض کرد (رابطه ی ۱۰)،^[۲۰] بنابراین می توان شیب میانگین قسمت کشسان خط تحکیم عادی در حالت اشباع را برای تعیین تنش مؤثر در خاک های

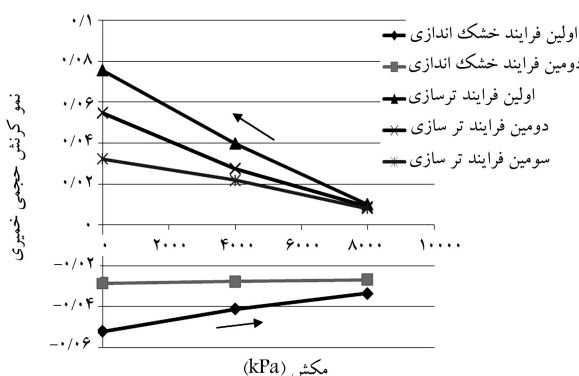
تغییر رفتار از حالت اِدئومتریکی به حالت همسان گرد وجود دارد. تشخیص چنین رخدادی با استفاده از ضریب تراکم پذیری حجمی و نسبت پواسون و در طی یک فرایند آزمون و خطا ممکن است.

۶. نتایج

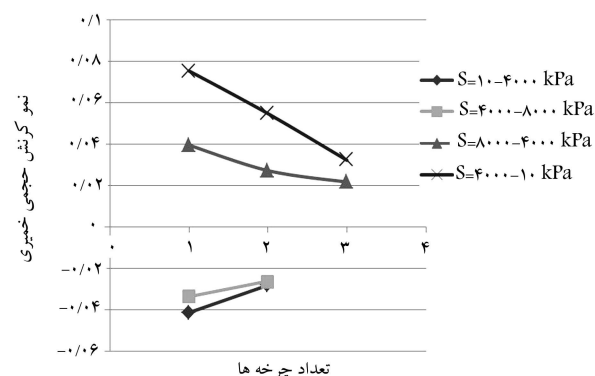
با هدف سنجش قابلیت مدل ارائه شده، از نرم افزار تهیه شده بر اساس سطح مرزی خمیری، برای شبیه سازی رخداد سازواری در ۲ نوع خاک مختلف استفاده شده است. خاک نوع اول مخلوطی از سیلت (۴۰٪) و بنتونیت (۶۰٪) است [۳۱] و حدود اتربرگ آن شامل: حد روانی ۸۷٪، حد خمیری ۶۵٪ و نشانه‌ی خمیری ۲۲٪ است. خاک نوع دوم مخلوطی از ماسه‌ی لای دار (۷۵٪) و بنتونیت (۲۵٪) است، [۳۲] و حدود اتربرگ آن شامل: حد روانی ۴۰٪، حد خمیری ۲۷٪ و نشانه‌ی خمیری ۱۳/۴٪ است. خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده‌است.

بارگذاری در خاک‌های مذکور در شرایط اِدئومتری صورت گرفته است و شکل‌های ۷ و ۸، نتایج آزمایشگاهی تر و خشک سازی آنها را تحت تنش عمودی خالص ثابت نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های مذکور برحسب نرخ کرنش خمیری حجمی در چرخه‌های تر و خشک سازی در شکل ۹ قابل مشاهده است، که مطابق آن در بارگذاری تناوبی هیدرولیکی، تغییر حجم خاک کاهش می‌یابد و با ادامه‌ی روند مذکور، سازواری برای آنها اتفاق خواهد افتاد. نتایج به دست آمده از مدل برای خاک نوع اول در شکل‌های ۱۰ الی ۱۷ قابل مشاهده است.

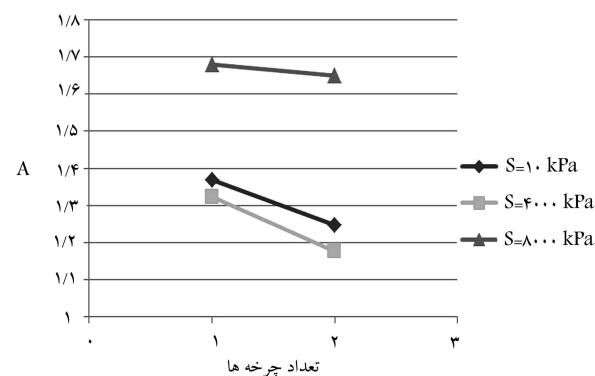
شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ تغییرات پارامتر شکل تابع پتانسیل خمیری را با تعداد



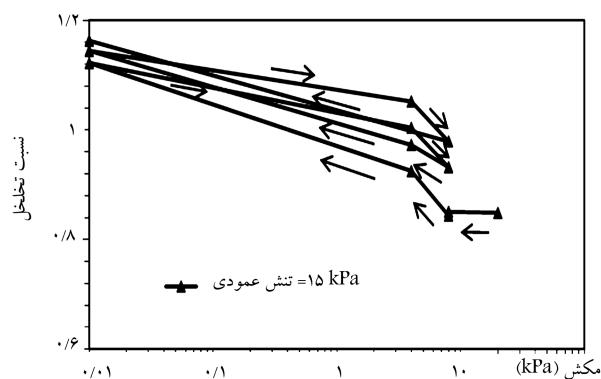
شکل ۹. کاهش نمو کرنش حجمی خمیری با افزایش مکش در فرایندهای خشک اندازی و افزایش نمو کرنش حجمی خمیری با کاهش مکش در فرایندهای ترسازي.



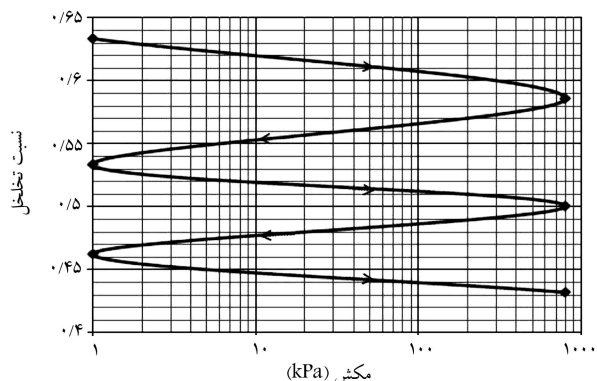
شکل ۱۰. کاهش نمو کرنش حجمی خمیری با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک سازی.



شکل ۱۱. تغییرات پارامتر شکل A با افزایش تعداد چرخه‌های ترسازي.



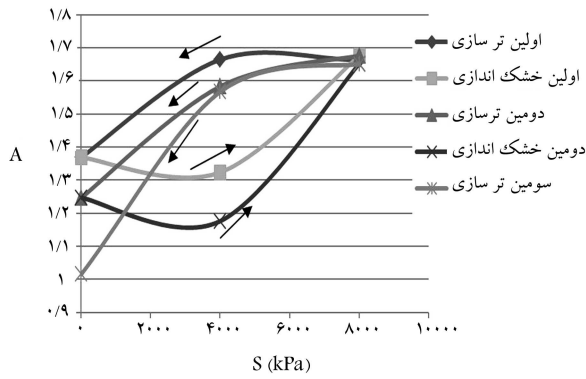
شکل ۷. کاهش تغییرات نسبت تخلخل حین چرخه‌های تر و خشک سازی تحت تنش عمودی خالص ۱۵ کیلو پاسکال. [۳۱]



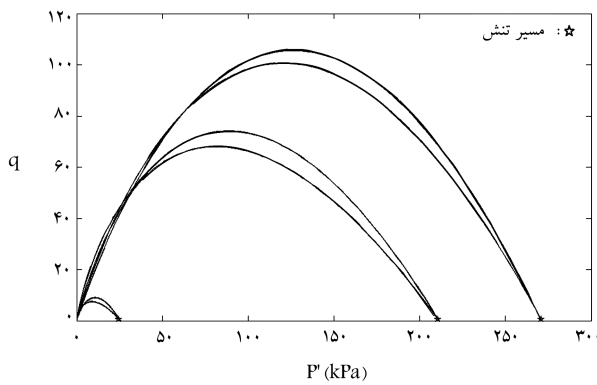
شکل ۸. کاهش تغییرات نسبت تخلخل با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک سازی تحت تنش عمودی خالص ۶ کیلو پاسکال. [۳۲]

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد آزمایش.

نوع خاک	C_s	C_u	C_c	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (gr/cm^3)
اول	۲٫۶۶	-	-	۲۳	۱٫۷۸
دوم	۲٫۷	۱۲	۱٫۳۳	۲۰٫۷۵	۱٫۶۵۳



شکل ۱۶. تغییرات پارامتر شکل A تابع پتانسیل خمیری در هر چرخه‌ی تر و خشک سازی مخلوط سیلت و بنتونیت تحت تنش عمودی خالص ۱۵ کیلو پاسکال.

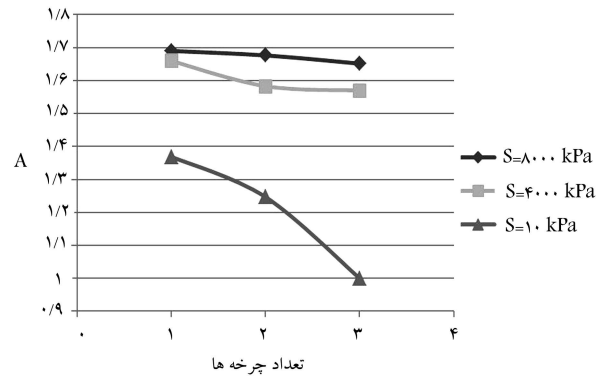


شکل ۱۷. کوچک شدن خانواده‌ی تابع پتانسیل خمیری پس از ۲ چرخه‌ی بارگذاری مخلوط سیلت و بنتونیت تحت تنش عمودی خالص ۱۵ کیلو پاسکال و تنش انحرافی ۵/۶۰۵۵ کیلو پاسکال.

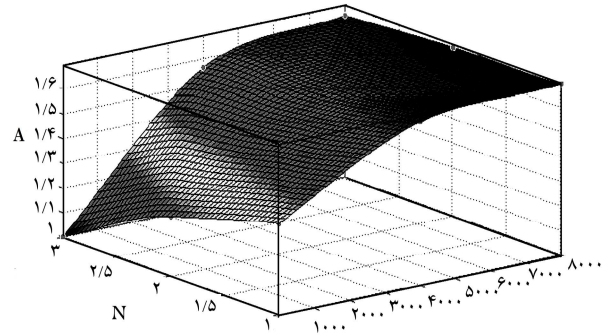
چرخه‌های خشک اندازی و تر سازی و مقدار مکش اعمالی نشان می‌دهند. با توجه به اینکه مقدار پارامتر شکل A در ابتدای آزمایش ۱/۳۶ و در انتهای آزمایش ۱ است، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار این پارامتر با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). بر این اساس با انجام هر چرخه‌ی بارگذاری، اندازه‌ی تابع پتانسیل خمیری کوچک‌تر شده است، که به معنای نزدیک شدن قله‌ی تابع پتانسیل خمیری به مسیر تنش است (شکل ۱۷).

نتایج به دست آمده از مدل برای خاک نوع دوم نیز در شکل‌های ۱۸ الی ۲۲ نشان داده شده است. مقدار پارامتر شکل A به دست آمده در حالت اشباع برای خاک نوع دوم نسبت به مقدار به دست آمده برای خاک نوع اول بزرگ‌تر است. این امر به وقوع پدیده‌ی فروریزش در خاک نوع دوم نسبت داده می‌شود: پدیده‌ی فروریزش عکس تورم و رفتار خاک کشسان - خمیری است. این امر سبب می‌شود تابع پتانسیل خمیری به جای کوچک شدن در فرایندهای تر سازی، بزرگ‌تر شود. با این حال، تغییرات پارامتر شکل تابع پتانسیل خمیری در چرخه‌های بارگذاری روند کاهشی دارد؛ به این ترتیب که مقدار پارامتر شکل A در انتهای اولین خشک اندازی ۱/۶۶ و در انتهای آخرین خشک اندازی، ۱/۴ است و لذا همین امر سبب نزدیک شدن قله‌ی تابع به مسیر تنش می‌شود.

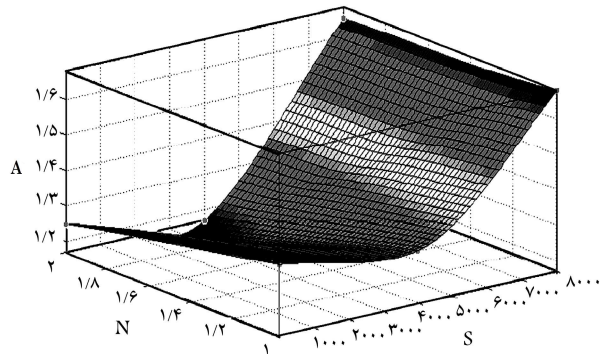
از سوی دیگر، در بارگذاری‌های هیدرولیکی تناوبی، مسیر تنش به صورت افقی است و نزدیک‌تر بودن مسیر تنش اولیه به قله‌ی پتانسیل‌های خمیری، موجب تسریع در رخداد سازواری می‌شود. نزدیک شدن مسیر تنش به قله‌ی تابع پتانسیل خمیری



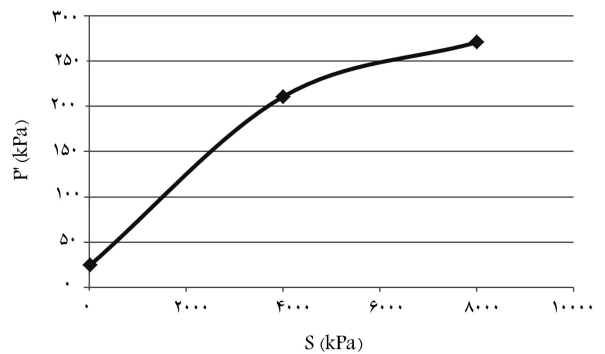
شکل ۱۲. تغییرات پارامتر شکل A با افزایش تعداد چرخه‌های خشک اندازی.



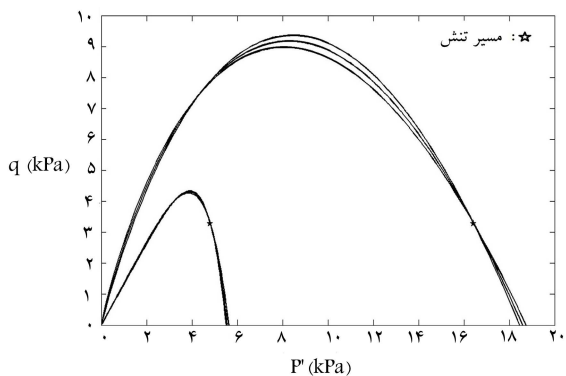
شکل ۱۳. تغییرات پارامتر شکل A با تعداد چرخه‌های تر سازی (N) و مقدار مکش اعمالی (S).



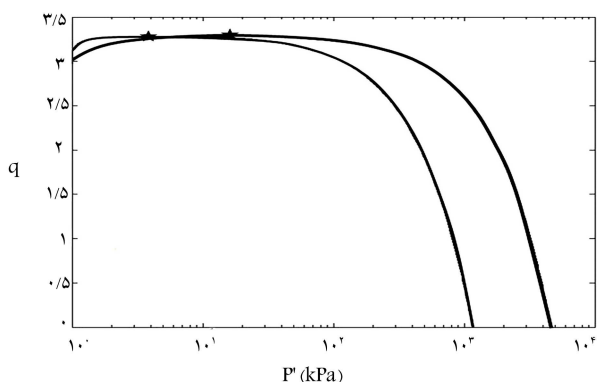
شکل ۱۴. تغییرات پارامتر شکل A با تعداد چرخه‌های خشک اندازی (N) و مقدار مکش اعمالی (s).



شکل ۱۵. تغییرات تنش مؤثر با مکش برای خاک نوع اول.



شکل ۲۲. کوچک شدن خانواده‌ی تابع پتانسیل خمیری پس از ۳ چرخه‌ی بارگذاری مخلوط ماسه - بنتونیت تحت تنش عمودی خالص ۶ کیلو پاسکال و تنش انحرافی ۳٫۲۹ کیلو پاسکال.



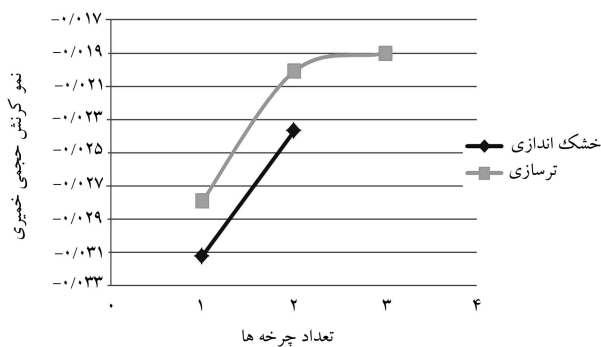
شکل ۲۳. تابع پتانسیل خمیری ایده‌آل برای خاک نوع دوم.

برای تسریع رخداد سازواری، وابسته به مقدار تنش عمودی خالص در چرخه‌های بارگذاری و مقدار مکش‌های اعمالی است؛ به گونه‌ی که افزایش تنش عمودی خالص و کاهش مکش‌های اعمالی در چرخه‌های بارگذاری، سبب نزدیک‌تر شدن مسیر تنش به قله‌ی خانواده‌ی تابع پتانسیل خمیری اولیه می‌شود و با انجام چرخه‌های بارگذاری هیدرولیکی، رخداد سازواری سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد.

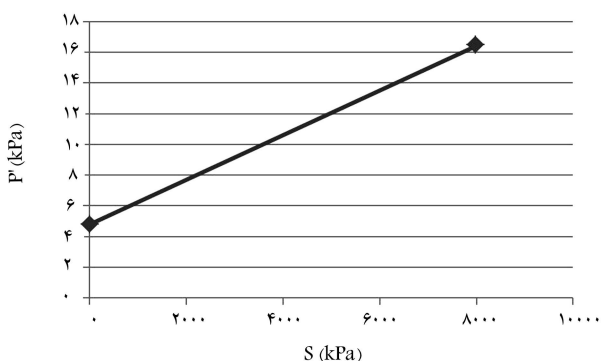
این امر از این جهت حائز اهمیت است که رخداد سازواری مهندسی، در کرنش‌های محدود قابل قبول است و در صورتی که تغییر رفتار به حالت کشسان پس از ایجاد کرنش‌های قابل ملاحظه و غیر مجاز روی دهد، وقوع چنین رخدادی در حل مسائل مهندسی فاقد کاربرد خواهد بود. هر چند که نتایج آزمایشگاهی حاکی از رخداد سازواری ایده‌آل برای دو خاک مورد مطالعه نیستند، تابع پتانسیل خمیری در مقیاس نیمه لگاریتمی هنگام رخداد سازواری ایده‌آل و در آخرین چرخه‌ی تسزای - خشک اندازی تحت تنش عمودی خالص ۶ کیلو پاسکال و تنش انحرافی ۳٫۲۹ کیلو پاسکال برای خاک نوع دوم در شکل ۲۳ نشان داده شده است.

۷. نتیجه گیری

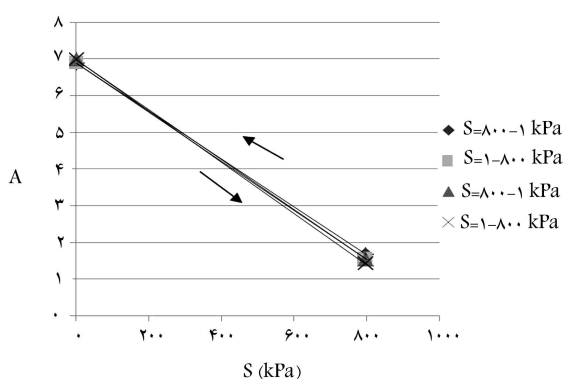
با هدف شبیه سازی رخداد سازواری در حین بارگذاری تناوبی هیدرولیکی رس آماسی، پارامتر شکل A در تابع پتانسیل خمیری به مقدار مکش وابسته و از این طریق، تغییرات اندازه‌ی تابع پتانسیل خمیری موجب نزدیک شدن قله‌ی تابع پتانسیل خمیری به حالت تنش و ایجاد توانایی در سطح مرزی برای شبیه سازی رخداد



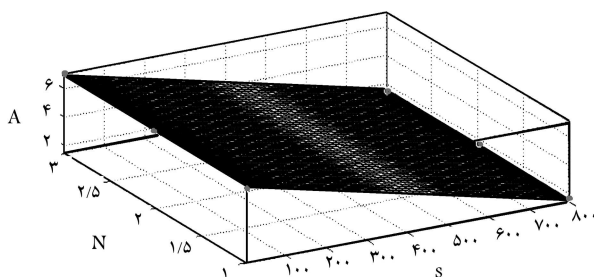
شکل ۱۸. کاهش نمو کرنش حجمی خمیری با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری هیدرولیکی در خاک نوع دوم.



شکل ۱۹. تغییرات تنش مؤثر با مکش برای خاک نوع دوم.



شکل ۲۰. تغییرات پارامتر شکل تابع پتانسیل خمیری A در هر چرخه‌ی تر و خشک سازی مخلوط ماسه و بنتونیت تحت تنش عمودی خالص ۶ کیلو پاسکال.



شکل ۲۱. تغییرات پارامتر شکل A با تعداد چرخه‌های بارگذاری (N) و مقدار مکش اعمالی (s).

شده است. شبیه سازی های انجام شده، توانایی مدل ارائه شده را به خوبی تأیید می کند. همچنین، نتایج بررسی ها نشان می دهد که هر چه متغیر حالت تنش به قله ی تابع پتانسیل خمیری نزدیک تر باشد، سازواری در تعداد چرخه های بارگذاری کمتری به وقوع می پیوندد.

سازواری شده است. به علاوه، روش جدیدی جهت محاسبه ی پارامتر تنش مؤثر غیر اشباع از رفتار تغییر حجمی خاک ارائه شده است.

قابلیت سطح مرزی سازوار پیشنهادی در پژوهش حاضر در پیش بینی رخداد سازواری با بررسی نتایج آزمایش های انجام شده بر روی دو نوع خاک آماسی مطالعه

پانویس ها

1. shakedown
2. Bishop
3. Cam clay
4. representative elementary volume
5. associated flow rule
6. non-associated flow rule
7. sharp
8. hysteresis
9. loading surface
10. MATLAB

منابع (References)

1. Nelson, J.D. and Miller, D.J., *Expansive soils, Problem and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, Wiley, New York (1992).
2. Khalili, N. and Khabbaz, M.H. "A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils", *Geotech*, **48**(5), pp. 1-7 (1998).
3. Ghasemzadeh, H. and Ghoreishian Amiri, S.A. "A hydro-mechanical elastoplastic model for unsaturated soils under isotropic loading conditions", *Computers and Geotechnics*, **51**, pp. 91-100 (2013).
4. Ajdari, M., Habibagahi, G. and Masroui, F. "The role of suction and degree of saturation on the hydro-mechanical response of a dual porosity silt-bentonite mixture", *Applied Clay Science*, **83-84**, pp. 83-90 (2013).
5. Ajdari, M. and Bahmyari, H. "Oedometric response of an artificially prepared sand-bentonite mixture improved by potassium silicate", *Scientia Iranica*, **22**(2), pp. 367-372 (2015).
6. Ajdari, M., Habibagahi, G., Nowamooz, H., Masroui, F. and Ghahramani, A. "Shear strength behavior and soil water retention curve of a dual porosity silt-bentonite mixture", *Scientia Iranica*, **17**(6), pp. 430-440 (2010).
7. Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C. and Garcia-Escudero, E. "Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting", *Engineering Geology*, **81**(3), pp. 213-226 (2005).
8. Dif, A.E. and Bluemed, W.F. "Expansive soils under cyclic drying wetting", *Technical Note Geotech. Testing*, **14**(1), pp. 96-102 (1991).
9. Alonso, E.E., Vaunat, J. and Gens, A. "Modelling the mechanical behavior of expansive clays", *Engineering Geology*, **54**(1-2), pp. 173-183 (1999).
10. Hu, C., Haixiao, L. and Huang, W. "Anisotropic bounding-surface plasticity model for the cyclic shakedown and degradation of , pp. saturated clay", *Computers and Geotechnics*, **44** pp. 34-47 (2012).
11. Bishop, A.W. "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad*, **39**, pp. 859-863 (1959).
12. Matyas, E.L. and Radhakrishna, H.S. "Volume change characteristics of partially saturated soils", *Geotechnique*, **18**(4), pp. 432-448 (1968).
13. Fredlund D.G. and Morgenstern N.R. "Stress state variables for unsaturated soils", *J. Geotech. Eng. Div.*, **103**(5), GT5, pp. 447-466 (1977).
14. Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. "A constitutive model for , partially saturated soils", *Geotechnique*, **40**(3), pp. 405-430 (1990).
15. Lu, N. "Is matric suction a stress variable", *Geotech. Geoenviron. Eng.*, **134**(7), pp. 899-905 (2008).
16. Mroz, Z., Norris, V.A. and Zienkiewicz, O. C. "Application of anisotropic hardening model in the analysis of elasto plastic deformation of soils", *Geotech.*, **29**(1), pp.1-34 (1979).
17. Pousada, E. "Deformabilidad de arcillas expansivas bajo succion controlada", Doctoral Thesis, Universidad Politecnica de Madrid, Spain (1984).
18. Sheng, H.S.H. "Numerical methods for shakedown analysis of pavements under moving surface load", Ph.D. Thesis, the university of Newcastle, pp. 51-52 (2001).
19. Roscoe, K.H. and Burland, J.B. "On the generalized stress-strain behavior of wet clay", In Heyman and Leckie (eds.), Cambridge University Press, pp. 535-609 (1968).
20. Khalili, N., Geiser, F. and Blight, G.E. "Effective stress in unsaturated soils: review with new evidences", *Geomechanics*, **4**(2), pp. 115-126 (2004).
21. Loret, B. and Khalili, N. "An effective stress elasto-plastic model for unsaturated soils", *Mech. Mater.*, **44**, pp. 97-116 (2002).
22. Khalili, N., Habte, M.A. and Valliapan, S. "A bounding surface plasticity model for cyclic loading of granular soils", *Int. J. Numer. Math. Engn.*, **63**(14), pp. 1939-1960 (2005).
23. Khalili, N., Habte, M. and Zargarbashi, S. "A fully coupled flow deformation model for cyclic analysis of unsaturated soils including hydraulic and mechanical hysteresis", *Computers and Geotechnics*, **35**(6), pp. 872-889 (2009).
24. Russell, A.R. and Khalili, N. "A unified bounding surface plasticity for unsaturated soils", *Int. J. Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, **30**(3), pp. 181-212 (2006).
25. Russell, A.R. and Khalili, N. "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing", *Canadian Geotechnical Journal*, **41**(6), pp. 1179-1192 (2004).

26. Khalili, N., Geiser, F. and Blight, G.E. "Effective stress in unsaturated Soils: Review with New Evidences", *Int. J. of Geomechanics*, **4**(2), pp. 115-126 (2004).
27. Rassam, D.W. and Williams, D.J. "A relationship describing the shear strength of unsaturated soils", *Can. Geotech. J.*, **36**(2), pp. 363-368 (1999).
28. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A.W. "Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Matric Suction", *Can. Geol. J.*, **33**(3), pp. 379-392 (1996).
29. Lee, I.M., Sung, S.G. and Cho, G.C. "Effect of Stress State on the unsaturated Shear Strength of a Weathered Granite", *Can. Geotech. J.*, **42**(2), pp. 624-631 (2005).
30. Atkinson J.H. and Bransby P.L., *The Mechanics of Soils, an Introduction to Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London (1978).
31. Ajdari, M., Habibagahi, G. and Ghahramani, A. "Predicting effective stress parameter of unsaturated soils using neural networks", *Computers and Geotechnics*, **40**, pp. 89-96 (2012).
32. Ajdari, M., Monghassem, M. and Lari, H.R. "A modified osmotic diaphragmatic oedometer for investigating the hydro-mechanical response of unsaturated soils", *Geotech. Test. J.*, **39**, pp.101-110 (2012).
33. Ajdari, M., "Application of the effective stress in unsaturated soil mechanics limitations and advantages" 2nd NCSM, Qom, (In Persian)(2015).