



## مطالعه تئوریک رفتار مکانیکی خاک‌های ریزشی با مدل Structured Cam Clay

علی مسعودی<sup>۱\*</sup>، مریم هدهدی<sup>۲</sup>، بهرام نادی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، alimasoudi۷۰۸۲@yahoo.com

۲- دکتری، استادیار دانشکده عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، hodhodi۱۳۵۵@gmail.com

۳- دکتری، استادیار دانشکده عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، bmn.nadi@yahoo.com

### چکیده

در این پژوهش رفتار خاک‌های ریزشی یا لسی (Loess) مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های رفتار تنش و کرنش خاک، بصورت تئوری و در چهارچوب مدل Structured Cam Clay (SCC) صورت گرفت. در طول این بررسی پارامتر چسبندگی برای مدل کردن تأثیر سیمانی شدن مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، توانایی و ظرفیت مدل برای ارائه و بررسی رفتار خاک‌های ریزشی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت و نتیجه‌های مربوط به آن ارائه گردید.

واژگان کلیدی: مدل SCC، خاک‌های ریزشی، رفتار مکانیکی

### Theoretical study of Mechanical Behavior of Loess Soils by Structural Cam Clay Model

#### Abstract

The behavior of collapsible soils (loess) is studied in this paper. Simulations of the stress and strain behavior of the soil are made via the theoretical framework of Structured Cam Clay, with the effect of glutinous ingredient in loess suggested to be modelled as cementation effect. Based on the simulations, the capacity of the model for representing the behavior loess is investigated, and discussions on modelling the behavior of collapsible soil in general are given.

**Keywords:** SCC model, Loess soils, Mechanical behavior

#### ۱- مقدمه

خاک‌های ریزشی که در بسیاری از نقاط دنیا یافت می‌شود، به عنوان چالشی برای مهندسين است و این امر به علت حالت ریزشی طبیعی ساختار این نوع خاک‌ها می‌باشد. این نوع خاک شامل مشخصه‌هایی از نظر ساختاری می‌باشد که در حین مرطوب شدن و بارگذاری، نتایج مخربی را به بار می‌آورند. در مقایسه با خاک‌های رسی طبیعی، مطالعه بر روی مشخصات مکانیکی خاک‌هایی که از نظر طبیعی ریزشی هستند، هم در حالت تئوری و هم در حالت آزمایشگاهی، به تعداد کمی صورت پذیرفته است، اما اخیراً مزایای مفیدی از مدلسازی ترکیبی از خاک‌هایی که به حالت طبیعی نرم هستند، مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، مشخصات مکانیکی خاک‌های ریزشی مورد ارزیابی و تحقیق قرار گرفت. یک مطالعه ثانویه نیز جهت بررسی توانایی مدل SCC در تأثیرات سیمانی شدن، انجام گردید.



## ۲- مدل SCC توسعه یافته برای بررسی تأثیر سیمانی شدن خاکها

بدلیل آنکه خاکهای ریزشی دارای هر دو ساختار سیمانی و دانه‌ای هستند، مدل SCC برای بررسی تأثیر سیمانی شدن و بر پایه پارامترهای مربوط به خاک باید اصلاح و توسعه یابد. در بخش‌های بعد مختصر توضیحی در مورد مدل توسعه یافته SCC ارائه گردیده است که جزئیات کامل مربوط به این مدل را می‌توان از پژوهش‌هایی که توسط Liu و Carter (۲۰۰۰) و Horpibulsuk و همکاران (۲۰۱۰) انجام گرفته، مورد مطالعه قرار داد.

### ۲-۱- تنش میانگین مؤثر اصلاح شده، مربوط به حالت سیمانی شدن

یکی از فرض‌های اساسی در توسعه مدل SCC برای بررسی تأثیر سیمانی شدن این است که نیروها را به صورت تنش مؤثر میانگین محدود شده در نظر بگیریم. در این حالت یک پارامتر برای تنش میانگین اصلاح شده ( $\bar{p}'$ ) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

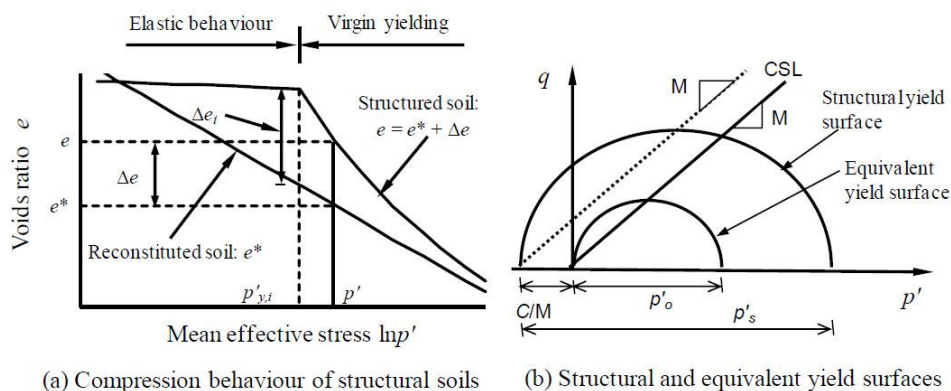
$$\bar{p}' = p' + \frac{C}{M}$$

که در آن  $p'$  تنش میانگین مؤثر،  $M$  شیب توسعه شکست رس سیمانی شده و  $C$  پارامتر مربوط به مقاومت برشی (چسبندگی) ناشی از سیمانی شدن می‌باشد. باید توجه داشت که  $C$  ثابت نمی‌باشد و به عنوان تابعی از ساختار خاک در نظر گرفته می‌شود. مقاومت چسبندگی لس‌ها به طور قابل توجهی وابسته به درجه اشباع خاک هستند.

### ۲-۲- ایده‌آل سازی مواد

در مدل SCC توسعه یافته، خاک سیمانی شده توسط مصالح همگن، رفتارهای الاستیک و نقطه تسلیم ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. صفحه تسلیم بطور همگن و با تغییر شکل‌های حجمی پلاستیک، تغییر پیدا می‌کند. فرض می‌گردد که رفتار خاک برای هر تنشی که در این صفحه تسلیم قرار یگیرد، الاستیک است. تسلیم شدگی برای تغییرات تنش نشأت گرفته از صفحه تسلیم ساختاری رخ می‌دهد و سبب تغییر در آن می‌گردد. در طول تسلیم شدن، تنش‌های یک خاک رس سیمانی شده بر روی صفحه تسلیم ساختاری باقی می‌ماند. ایده‌آل سازی رفتار مکانیکی خاک سیمانی شده در شکل (۱) به نمایش درآمده است. در این شکل،  $e$  بیان کننده نسبت‌های تخلخل برای یک رس سیمانی شده،  $e^*$  نسبت‌های تخلخل خاک چسبیده در حالت تنش یکسان و با صفحه تسلیم یکسان،  $p'_{y,i}$  تنش مؤثر میانگین در زمانیکه تسلیم شدگی خاک سیمانی شده، شروع می‌گردد و  $\Delta e$  افزایش نسبت تخلخل است که تفاضل میان نسبت تخلخل خاک سیمانی و خاک چسبیده در تنش یکسان می‌باشد. رفتار تراکمی خاک سیمانی شده را می‌توان از رابطه زیر که توسط Liu و Carter (۲۰۰۳) ارائه شده است، بیان نمود:

$$e = e^* + \Delta e = e^* + (\Delta e_i - C) \left[ \frac{p'_{y,i} + \frac{C}{M}}{\bar{p}'} \right]^b + C$$



شکل (۱) ایده‌آل سازی رفتار مکانیکی خاک سیمانی شده

### ۲-۳- رفتار الاستیک

برای تنش‌هایی که در صفحه تسلیم قرار دارند، تنها تغییر شکل‌های الاستیک رخ می‌دهد. جهت ساده سازی، تغییر شکل‌های مربوط به خاک‌های لسی را الاستیک فرض می‌کنیم که توسط قانون Hooke و بر اساس رابطه زیر بیان می‌گردد:



$$d\varepsilon_v^e = \frac{\nu(1-\nu)}{E} dp' \quad , \quad d\varepsilon_d^e = \frac{\nu(1+\nu)}{E} dp'$$

که در آن  $\nu$  نسبت پواسن و  $E$  مدول یانگ است.

#### ۴-۲- رفتار نرم شدگی و شکستگی حالت سیمانی شدن

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، رفتار نرم شدگی برای رس سیمانی شده بعد از آنکه به حالت مقاومت نهایی رسید، اتفاق می‌افتد. همچنین شکست ساختار خاک سیمانی شده نیز در طول این مرحله اتفاق می‌افتد. جهت ساده سازی، فرض می‌گردد که شکست ساختار خاک سیمانی شده، بعد از حالت نهایی که تغییر شکل‌ها به حالت بحرانی می‌رسند، شروع می‌گردد. در حین شکست، حالت تنش مؤثر بر روی خطی که توسط  $M$  تعریف می‌گردد، باقی می‌ماند که بسته به حالت سخت شدگی یا نرم شدگی به ترتیب در بالا یا پایین این خط قرار می‌گیرد. بر اساس آزمون‌های صحیح و خطای انجام شده از نمونه‌های آزمایشگاهی، تابع مربوط به ساختار خاک سیمانی شده به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$dC = -\nu \left( \frac{C}{C_{in}} \right) \frac{|dp'_s|}{\sqrt{\frac{q}{p'} - M}}$$

که در آن  $C_{in}$  مقادیر مقاومت سیمانی شدن در حالت اولیه می‌باشد.

#### ۵-۲- رفتار تسلیم شدگی

برای حالات تنش بر روی صفحه تسلیم و برای  $dp'_s$  تسلیم شدگی اتفاق می‌افتد. عناصر کرنش حجمی پلاستیک برای حالت اصلی از مدل SCC با فرض اینکه هر دو حالت سخت شدگی و تخریب شدگی خاک لس وابسته به تغییر شکل‌های حجمی است، بدست آمده است. رابطه میان تنش و کرنش لحظه‌ای مدل SCC بصورت زیر می‌باشد:

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + \left\{ (\lambda^* - \kappa) + b(\Delta e - C) \left[ 1 + \frac{\gamma \bar{\eta}}{M - \eta} \right] \right\} \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s}$$

$$d\varepsilon_d = d\varepsilon_d^e + \frac{\nu \bar{\eta}}{|M^{\nu} - \bar{\eta}^{\nu}| + \omega} \left| 1 - \sqrt{\frac{p'_s}{p'_s}} \right| \times \left\{ (\lambda^* - \kappa) + b(\Delta e - C) \left[ 1 + \frac{\gamma \bar{\eta}}{M - \eta} \right] \right\} \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s}$$

که در آن  $\lambda^*$  و  $\kappa$  اندیس تراکم و تورم خاک رس چسبنده،  $\gamma$  پارامتری از خاک که بیان کننده مقدار تخریب ناشی از نیروهای برشی است،  $\omega$  پارامتر مدل و  $p'_s$  اندازه صفحه تسلیم معادل می‌باشد.

#### ۳- نتیجه‌گیری

خاک‌های ریزشی (لسی) جزء خاک‌های ساختار یافته می‌باشند که متناوباً به حالت مقاومی ساختار می‌یابند. ساختار طبیعی این خاک‌ها در تحمل بارگذاری‌ها حالت فروریزش و تخریب پیدا می‌کنند که این امر به علت کاهش مقاومت و سختی خاک‌ها می‌باشد. بر اساس مطالعاتی که بر روی یک سری نتایج آزمایشگاهی در دسترس صورت گرفت، بعضی از خصوصیات این نوع خاک مشخص گردید:

(۱) مقاومت ساختاری خاک‌های رسی، اساساً تحت تأثیر و مرتبط با مقدار سیمانی شدن خاک می‌باشد. از آنجا که سیمانی شدن در حضور آب

صورت می‌گیرد، بنابراین مقاومت چسبندگی خاک هنگامیکه بطور کامل اشباع شده باشد، کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت ایجاد شده ناشی از سیمانی شدن در حین بارگذاری بطور کامل از بین می‌رود.

(۲) در مشابه‌سازی کیفی رفتار مکانیکی میان خاک‌های ریزشی و رس‌های طبیعی مواردی قابل مشاهده می‌باشد: اولاً نسبت تخلخل برای یک

خاک ریزشی طبیعی، بزرگتر از خاک‌های چسبنده هستند که از نظر کانی شناسی ساختار یکسانی دارند. همچنین تنش گسیختگی این



گونه خاک‌ها نیز در مقایسه با خاک‌های چسبنده، بزرگتر است. دوماً، رفتار تنش و کرنش لس‌های ساختار یافته در منحنی مربوط به تنش-کرنش، حالتی مجانب دارد که نشان‌دهنده اینست که ساختار خاک هنگام بارگذاری تمایل به نزول و کاهش مقاومت دارد. مشخصات اساسی رفتار یک خاک لسی، ناشی از وابستگی آن به درجه اشباع خاک می‌باشد.

#### مراجع

- [۱] Chen C., Zhu Z., and Gao P., "Research on relationship between structure and deformation property of intact loess", *Rock and Soil Mechanics*, Vol. ۲۷, No. ۱۱, (۲۰۰۶), pp. ۱۸۹۲-۱۸۹۶.
- [۲] Shao S., Luo A., Yu Q., and Zhou F., "Structural damage properties of Q<sub>۳</sub> loess under triaxial loading and moistening", *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. ۲۸, No. ۱۲, (۲۰۰۶), pp. ۲۰۷۸-۲۰۸۱.
- [۳] Leroueil S. and Hight D., "Compacted soils: from physics, to mechanics to hydraulic and mechanical behavior". *First Pan-American Conf. on Unsaturated Soils*, Cartagena de Indias, Colombia, (۲۰۱۳).
- [۴] Gens, A. and Nova, R., "Conceptual bases for constitutive model for bonded soil and weak rocks". *Geotechnical Engineering of Hard Soil-Soft Rocks*, Balkema, (۱۹۹۳).
- [۵] Taiebat M., Dafalias Y. F., Peek R., "A destructuration theory and its application to SANICLAY model", *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. Vol. ۳۴, No. ۱۰, (۲۰۱۰), pp. ۱۰۰۹-۱۰۴۰.
- [۶] Horpibulsuk S., Liu M. D., Liyanapathirana S. and Suebsook J., "Behaviour of cemented clay simulated via the theoretical framework of the SCC model", *Computer and Geotechnique*, Vol. ۳۷, No. ۱, (۲۰۱۰), pp. ۱-۹.
- [۷] Hu Z., Shen Z., and Xie D., "Deformation properties of structural loess", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. ۲۳, No. ۲۴, (۲۰۰۴), pp. ۴۱۴۳-۴۱۴۵.
- [۸] Li J. and Yao Y., "Critical state model of Ko consolidated structure loess", *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.* (Natural Science Edition), Vol. ۴۲, No. ۴, (۲۰۰۹), pp. ۵۳۳-۵۳۷.
- [۹] Liu M. D. and Carter J. P., "Structured Cam Clay Model", *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. ۳۹, No. ۶, (۲۰۰۲), pp. ۱۳۱۳-۱۳۲۲.
- [۱۰] Liu M. D. and Carter J. P., "The volumetric deformation of natural clays", *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol. ۳, No. ۳/۴, (۲۰۰۳), pp. ۲۳۶-۲۵۲.
- [۱۱] Liu M. D. and Carter J. P. (۲۰۰۰), "Modelling the destructuring of soils during virgin compression", *Géotechnique*, Vol. ۵۰(۴), pp. ۴۷۹-۴۸۳.