



ارزیابی مدل های رفتاری خاک های دانه ای سیمانی شده با نگرشی به آبرفت درشت دانه تهران

فرید فلاحی طرقي^۱، سید شهاب الدین یثربی^۲، ابراهیم اصغری^۳

۱- کارشناس ارشد مکانیک خاک و پی - دانشگاه تربیت مدرس

۲- دکتری مکانیک خاک و پی - دانشگاه تربیت مدرس

۳- دکتری زمین شناسی مهندسی - دانشگاه تبریز

farid.fallahi@gmail.com

چکیده

پدیده سیمانی شدن که در بسیاری از خاک ها در سطح کره زمین به انواع گوناگون قابل مشاهده است، دارای تاثیراتی بر رفتار و مقاومت برشی خاک ها است که برای مدل کردن این اثرات باید تغییرات و اصلاحاتی در مدل های رفتاری مرسوم و شناخته شده خاک های معمولی داده شود. در این مقاله میزان کارایی چند مدل رفتاری مبتنی بر مکانیک خاک حالت بحرانی در شبیه سازی رفتار واقعی خاک های دانه ای سیمانی شده با نگاه ویژه به آبرفت درشت دانه سیمانی شده تهران مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی افزایش درجه سیمانی شدن باعث کاهش انطباق مدل های رفتاری با رفتار واقعی نمونه ها می شود. اگر سطح تسلیم به نحو مناسبی مرز بین رفتار الاستیک و پلاستیک در نمونه های واقعی را مدل نماید، عملکرد مدل رفتاری به میزان بسیار زیادی ارتقا می یابد. از بررسی مدل های رفتاری مختلف ملاحظه می شود که مدل رفتاری Cam-Clay ساختاری (SCC)، دارای روابط رفتاری مناسبی جهت مدل کردن رفتار آبرفت سیمانی شده تهران است. این مدل که یک مدل طبقاتی است، در مورد خاک های غیر سیمانی به مدل Cam-Clay اصلاح شده تبدیل می شود و همین مساله باعث می شود که بتوان از این مدل هم در خاک های غیر سیمانی و هم در خاک های سیمانی شده استفاده نمود. نقطه ضعف این مدل در سطح تسلیم آن است که می توان این ضعف را با ترکیب کردن این مدل با مدل رفتاری (Lagioia & Nova (1995 تا حدود زیادی مرتفع نمود.

واژه های کلیدی: آبرفت سیمانی شده، مکانیک خاک حالت بحرانی، مدل سازی رفتاری، رفتار پلاستیک، اتساع.

مقدمه

امروزه تمایل زیادی به استفاده از چهارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی برای مدل سازی رفتار خاک های دانه ای سیمانی شده وجود دارد. زیرا مدل های رفتاری مبتنی بر مکانیک خاک حالت بحرانی پارامتر های ورودی کمی دارند و پارامتر های آنها از طریق آزمایش های سه محوری معمولی قابل تعیین هستند. در مورد خاک های درشت دانه سیمانی شده معمولاً با افزودن چند پارامتر اضافی به مدل های رفتاری مرسوم، اثرات ساختار سیمانی نیز در مدل وارد می شود.

مطالعه های انجام شده بر روی پدیده سیمانی شدن در خاک ها و بررسی رفتار مکانیکی خاک های سیمانی شده را می توان به دو گروه اصلی تقسیم بندی نمود. گروه اول مربوط است به پژوهشهای آزمایشگاهی و تجربی در جهت شناخت پدیده سیمانی شدن و تاثیر آن بر پارامترهای مقاومت برشی و رفتار مکانیکی خاک ها اعم از درشت دانه یا ریز دانه. گروه دوم مربوط است به مطالعات نظری یا تئوریک که بیشتر مطالعه مدل های رفتاری خاک های سیمانی شده را در بر می گیرد. در زمینه مطالعات نظری میتوان به پژوهش های (Lagioia & Nova (1994)، (Gens & Nova (1993)، (Liu & Carter (2002)، (Kavvas & Amorosi (1998) و (Liu & Cheng (2004) اشاره نمود.

۱- مدرس دانشگاه آزاد اسلامی قزوین

۲- استادیار بخش مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار دانشکده علوم پایه دانشگاه تبریز

**ویژگی های آبرفت درشت دانه تهران :**

بخش بزرگی از شهر تهران (پایتخت ایران) بر روی آبرفت های درشت دانه سیمانی شده قرار گرفته است. سیمانی شدن پدیده ایست که معمولاً در اثر رسوب مواد شیمیایی در بین ذرات خاک پدید می آید. این پدیده تاثیر شگرفی بر پارامترهای مقاومت برشی و مدول های تغییر شکل خاک های درشت دانه می گذارد. در اثر سیمانی شدن چسبندگی و سختی خاک افزایش یافته و پاسخ مکانیکی خاک به بارگذاری به شدت تغییر می کند. آبرفت درشت دانه تهران عموماً یک آبرفت شنی سیمانی شده با سیمان آهکی می باشد. آبرفت های درشت دانه تهران را به چهار ناحیه تقسیم می کنند که در آن طبقه بندی خاک از GW و GW-GM تا SM و SC متغیر است. وزن مخصوص خشک طبیعی آبرفت های تهران بین 16.5 تا 20.5 کیلو نیوتن بر متر مکعب می باشد.

در ایران در چند سال اخیر پژوهش های آزمایشگاهی درباره تاثیر سیمانی شدن بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک های درشت دانه انجام گرفته است [۶]، [۱] و [۴]. یثربی و همکاران (۱۳۸۰) و اصغری، ا. (۱۳۸۱) در پژوهش های خود برای بررسی دقیق تاثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی و رفتار خاک های درشت دانه تهران از آزمایشهای سه محوری بر روی نمونه های غیر سیمانی (uncemented)، سیمانی شده (cemented) و بی ساختار شده (destructured) استفاده نمودند. اصغری، ا. (۱۳۸۱) مشاهده نمود که به طور کلی رفتار نمونه های غیر سیمانی، سخت شونده با کرنش می باشد. به عکس در نمونه های سیمانی شده، منحنی تنش-کرنش با شیب تندی صعود کرده و بعد از رسیدن به نقطه اوج دچار افت می شود. رفتار نرم شونده با کرنش بعد از نقطه اوج، در همه نمونه های سیمانی شده کم و بیش دیده می شود ولی مقدار آن با ازدیاد سیمانی شدن افزایش یافته و با ازدیاد فشار همه جانبه کاهش می یابد.

ارزیابی کارایی مدل های مختلف:

هدف از این پژوهش ارزیابی کارایی چند مدل رفتاری ارایه شده برای خاک های درشت دانه سیمانی شده در مدل کردن رفتار آبرفت درشت دانه سیمانی تهران می باشد. عمده ترین وجه اختلاف آبرفت درشت دانه تهران با سایر خاک های دانه ای سیمانی شده که قبلاً مورد مطالعه قرار گرفته اند سختی بسیار قابل توجه این آبرفت شنی و اثر زیاد بافت خاک بر رفتار آن می باشد.

مدل هایی که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار می گیرند ۱- مدل Cam-Clay ساختاری که با علامت اختصاری SCC نمایش داده می شود و توسط Liu & Carter (2002) برای مصالح کالکرنایت استرالیا ارایه شده است و ۲- مدل Lagioia-SCC که در واقع ترکیبی است از مدل های رفتاری Lagioia & Nova (1994) با مدل Cam-Clay ساختاری Liu & Carter (2002) که توسط نگارندگان پیشنهاد شده است.

مدل Cam - Clay ساختاری (SCC)

این مدل در سال 2002 توسط Liu & Carter پیشنهاد گردد. این مدل مبتنی بر مدل Cam-Clay اصلاح شده است که برای منظور کردن اثر ساختار بر رفتار خاک پارامترهایی به آن اضافه شده است. این مدل یک مدل طبقه ای (hierarchical) است. یعنی در مورد خاک بدون ساختار، این مدل همان مدل Cam-Clay اصلاح شده می باشد ولی در مورد خاک های دارای ساختار با افزوده شدن سه پارامتر اضافی به آن، به مدل Cam-Clay ساختاری (SCC) تبدیل می شود.

تابع تسلیم مدل SCC مطابق معادله (۱) به شکل زیر می باشد :

$$f = \left(\frac{q}{0.5 \times M^* \times p'_s} \right)^2 + \left(\frac{p' - 0.5 p'_s}{0.5 p'_s} \right)^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

در این معادله، پارامتر M^* عبارت است از نسبت تنش بحرانی برای خاک بازسازی شده و بدون ساختار. اصغری (۱۳۸۱) با انجام آزمایش های سه محوری بر روی نمونه های غیر سیمانی و سیمانی شده با درصد سیمان های مختلف و معدل گیری از نتایج به دست آمده نشان داده است که برای نمونه های بی ساختار شده و همه نمونه های سیمانی شده $M^* = 1.65$ است.

پارامتر P'_s در معادله (۱) عبارت است از اندازه سطح تسلیم یا به عبارت دیگر نقطه تسلیم تحت فشار همسانگرد. همچنین نمو کرنش های حجمی پلاستیک در این مدل به صورت معادله (۲) می باشد.

$$\delta \varepsilon_p^p = (\lambda^* - \kappa^*) \frac{\delta p'_s}{v p'_s} + b \Delta e \left(\frac{M^*}{M^* - \eta} \right) \frac{\delta p'_s}{v p'_s} \quad (2)$$

پارامتر $\delta p'_s$ عبارتست از تغییرات اندازه سطح تسلیم در مرحله الاستو پلاستیک. برای محاسبه این پارامتر از معادله سطح تسلیم که بر اساس P'_s مرتب شده است، معادله (۸) حاصل می شود.

$$p'_s = \frac{0.25q^2 + 0.68p'^2}{0.68p'} \quad (3)$$



برای نمونه های بی ساختار شده $\lambda^* = 0.0531$ اندازه گیری شده است. پارامتر Δe در معادله (۲) عبارتست از تفاضل حجم مخصوص نمونه سیمانی شده و سیمانی نشده در فشار همه جانبه مساوی. مقدار اولیه این پارامتر بر اساس شکل $\Delta e = 0.07$ می باشد. با فرض موازی بودن خطوط NCL برای نمونه های سیمانی شده و بی ساختار شده مقدار Δe را در کل آزمایش ثابت در نظر می گیریم.

پارامتر b که شاخص بی ساختار شدن نام دارد برای رس های دارای ساختار $0 \leq b \leq 1$ است. (Liu & Carter (2002) مقدار این پارامتر را برای کالکرنیت $b = 30$ انتخاب نمودند. بر اساس محاسبات انجام گرفته در این پژوهش $b = 0.1$ برای مصالح درشت دانه تهران مناسب است.

نمو کرنش برشی پلاستیک بر اساس معادله (۴) عبارتست از

$$\delta \varepsilon_q^p = 2(1 - \omega \Delta e) \left[(\lambda^* - \kappa^*) - b \Delta e \left(\frac{M^*}{M^* - \eta} \right) \right] \left(\frac{\eta}{M^{*2} - \eta^2} \right) \frac{\delta p'_s}{v p'_s} \quad (4)$$

برای محاسبه پارامتر ω بر اساس پیشنهاد (Liu & Carter (2002) می توان از رابطه (۱۰) استفاده نمود.

$$1 - \omega \Delta e_i = 0.5 \quad (5)$$

بر این اساس داریم $\omega = 7.14$.

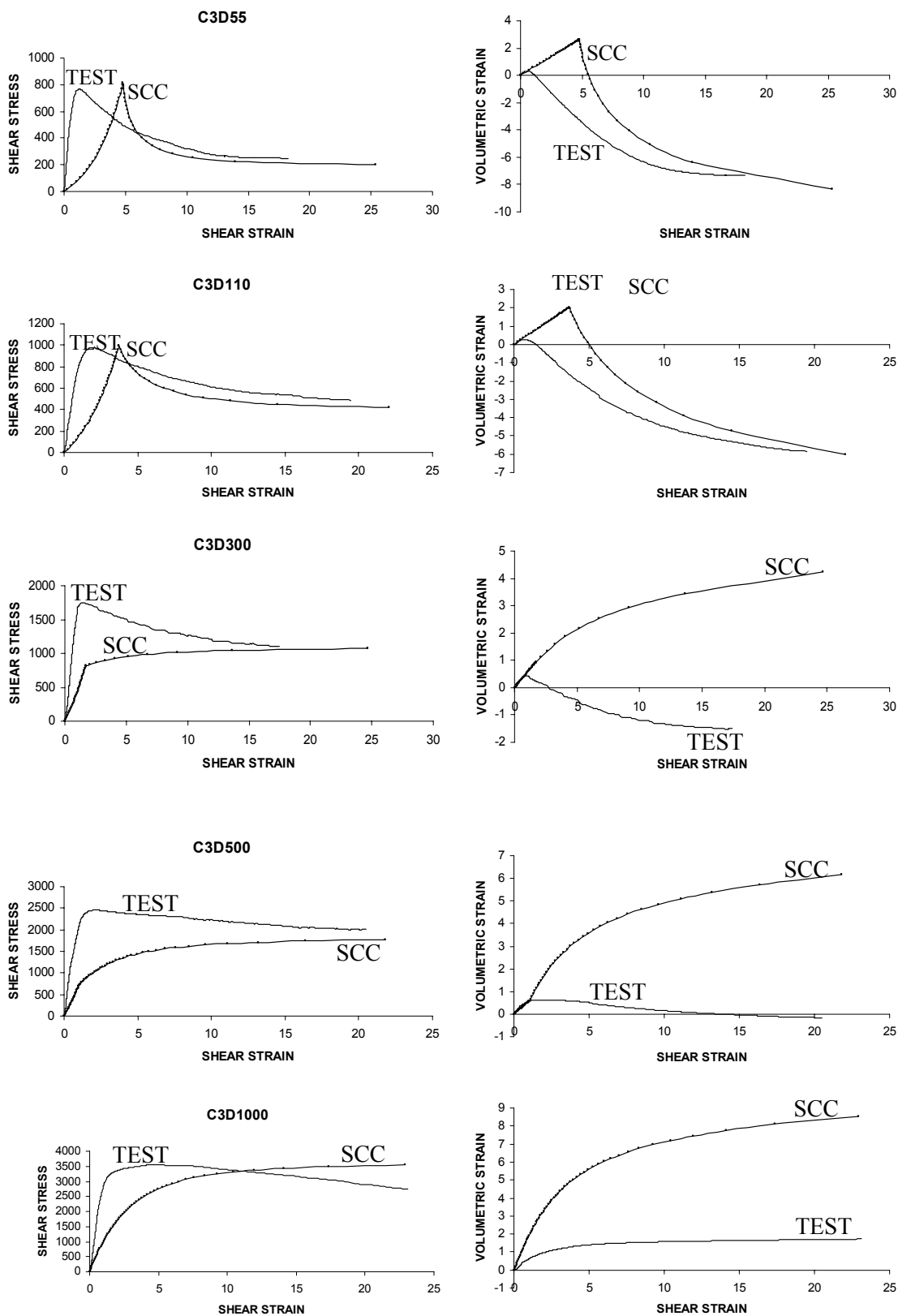
در شکل (۱) عملکرد مدل SCC در پیش بینی رفتار واقعی نمونه ها در دو نمودار تنش انحرافی- کرنش برشی (εq : εq) و کرنش حجمی- کرنش برشی (εp : εq) مورد بررسی قرار می گیرد. ملاحظه می شود که در نمونه های سیمانی شده ۳ درصد با فشار همه جانبه تا ۱۱۰ کیلوپاسکال آزمایش شده اند، تطابق پیشبینی های مدل و نتایج آزمایش ها در هر دو نمودار εq : εq و εp : εq بسیار خوب است. روند تغییرات به خوبی توسط مدل پیشبینی شده است و تطابق عددی پیشبینی های مدل با نتایج آزمایش کاملاً رضایت بخش است. البته سختی واقعی نمونه ها در مرحله رفتار الاستیک بیش از مقدار پیش بینی شده در مدل است. یعنی کرنش های برشی و حجمی پیش بینی شده توسط مدل، بیش از مقادیر واقعی هستند ولی به طور کلی تطابق کیفی و کمی مدل با واقعیت راضی کننده است.

این مساله به خصوص از مقایسه مدل MCC با مدل SCC در مورد نمونه های سیمانی شده ۳٪ که در فشار همه جانبه کم آزمایش شده اند روشن می شود. ملاحظه می شود که از نمونه C3D300 (نمونه سیمانی شده ۳ درصد با فشار همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال) به بعد تطابق روند پیش بینی مدل و نتایج آزمایش مناسب نیست. به این صورت که در نمونه های C3D300 و C3D500 رفتار نمونه نرم شونده است، حال آنکه سطح تسلیم و خط حالت بحرانی در مدل به گونه ای قرار دارند که رفتار نمونه را سخت شونده پیش بینی می کنند. بدیهی است که در این حالت، همانگونه که در شکل ها قابل ملاحظه است مدل از پیش بینی رفتار اتساعی نمونه ناتوان است. میزان اختلاف پیش بینی مدل و واقعیت در نمونه C3D1000 کم می شود. در این نمونه روند تغییرات نسبتاً به خوبی توسط مدل پیشبینی شده است. یعنی در نمودار کرنش حجمی در مقابل کرنش برشی (εp : εq)، روند مدل و آزمایش کاملاً شبیه است و اختلاف فقط در مقادیر است که پیش بینی کرنش های حجمی در مدل بیش از واقعیت است.

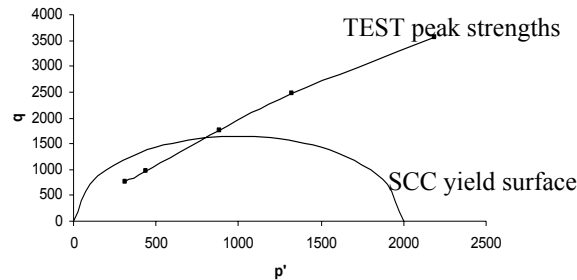
عدم تطابق پیش بینی مدل و واقعیت در نمونه های C3D300 و C3D500 ناشی از عدم تطابق سطح تسلیم مدل SCC و واقعیت است. رفتار نمونه های C3D300 و C3D500 در آزمایش، نرم شونده با کرنش است یعنی نقطه تسلیم در این نمونه ها بالاتر از خط حالت بحرانی قرار دارد حال آنکه مدل SCC و سطح تسلیم نظیر آن در زیر خط NCL قرار دارد و رفتار نمونه را سخت شونده با کرنش پیش بینی می کند. بنا بر این برای بهبود پیش بینی مدل، سطح تسلیم مدل باید به گونه ای باشد که در این فشار های همه جانبه، سطح تسلیم بالاتر از خط حالت بحرانی قرار گیرد.

در همه آزمایش های انجام گرفته بر روی نمونه های سیمانی شده ۳٪، رفتار نمونه ها نرم شونده با کرنش بوده است و نمودار تنش در صفحه $q : p'$ دارای یک نقطه اوج است. بنا بر این مدلی که بخواهد رفتار این نمونه ها را به درستی شبیه سازی نماید باید سطح تسلیمی داشته باشد که تا حد فشار 1000 KPa بر منحنی مقاومت حداکثر در شکل ۱۷ منطبق باشد. ملاحظه می شود که سطح تسلیم مدل SCC چنین توانایی ندارد.

بر خلاف ناکار آمدی سطح تسلیم در مدل SCC، روابط تنش- کرنش این مدل کارایی بسیار خوبی در مورد مصالح سیمانی شده مورد بررسی دارند. این مساله در شکل های ۱۵ و ۱۶ دیده می شود. در مورد نمونه های C3D55 و C3D110 و حتی نمونه C3D1000 ملاحظه می شود که رفتار تغییر شکلی نمونه ها و میزان کرنش های برشی و حجمی به خوبی توسط مدل پیش بینی می شود. به این ترتیب، اگر رابطه مناسبی برای سطح تسلیم، جایگزین رابطه سطح تسلیم مدل SCC شود، می توان انتظار داشت که از این مدل بتوان به خوبی در شبیه سازی و نیز پیش بینی رفتار آبرفت سیمانی شده تهران استفاده نمود.



شکل ۱- مقایسه مدل SCC با مقادیر حاصل از آزمایش برای نمونه های سیمانی شده ۳ درصد تحت فشار های همه جانبه گوناگون



شکل ۲- مقایسه سطح تسلیم مدل SCC به ازای $p'_{y,i} = 2000 \text{ KPa}$ با نقاط مقاومت حداکثر در آزمایش ها بر روی نمونه های سیمانی شده ۳٪

مدل SCC – Lagioia :

Lagioia & Nova (1995) مدل رفتاری برای مصالح کالکارنایت طبیعی که گونه ای از مصالح ماسه ای بد دانه بندی شده و سیمانی شده با آهک می باشد را ارائه نمودند. مشاهدات ایندو از رفتار کالکارنایت شباهت زیادی به جنبه های رفتاری درشت دانه تهران دارد. این مدل یک مدل پلاستیسیته سخت شونده با کرنش می باشد که توانایی های خوبی در پیش بینی رفتار خاک های دانه ای سیمانی شده به ویژه در آزمایش های زهکشی شده دارد. معادله سطح تسلیم در این مدل عبارتست از:

$$f = 3\beta(\gamma - 3) \ln \frac{p^*}{p_s + p_t + p_m} - \gamma J_{3\eta}^* + \frac{9}{4}(\gamma - 1) J_{2\eta}^* = 0 \quad (6)$$

همانگونه که انتظار می رود و نیز در بررسی انجام گرفته توسط نگارندگان مشخص می شود که قانون جریان در آبرفت تهران به ویژه در محدوده فشار های همه جانبه اعمال شده غیر همراه می باشد. بر اساس بررسی های انجام گرفته $\beta = 1.25$ در نظر گرفته شده است. γ در رابطه (۶) مربوط است به شیب خط حالت نهایی.

برای اصلاح سطح تسلیم به عنوان یک عامل اساسی در بهبود عملکرد مدل های رفتاری در پیشبینی رفتار آبرفت سیمانی شده تهران از ایده ترکیب مدل های SCC و Lagioia & Nova (1995) استفاده نموده ایم. یعنی سطح تسلیم مدل Lagioia & Nova را در ترکیب با روابط تنش- کرنش مدل رفتاری SCC مورد استفاده قرار دهیم. نام این مدل را در این پژوهش، مدل Lagioia-SCC گذارده ایم.

با تعیین پارامتر های مدل برای نمونه های سیمانی شده ۳٪، رابطه تابع تسلیم Lagioia به صورت معادله (۱۴) می باشد.

$$P's = \frac{P'}{\exp(0.1446\eta^3 - 0.7831\eta^2)} \quad (7)$$

در رابطه (۷) عبارت است از فشار ایزوتروپیک نظیر حالت تسلیم که با استفاده از رابطه (۷) و به ازای $p'_0 = 4500 \text{ KPa}$ و $\beta = 1.25$ ، سطح تسلیم مدل Lagioia و روابط تنش- کرنش مدل SCC، با هم ترکیب می شوند. نتیجه پیش بینی های مدل حاصل، که آنرا مدل Lagioia – SCC می نامیم در شکل ۳ ارائه شده است.

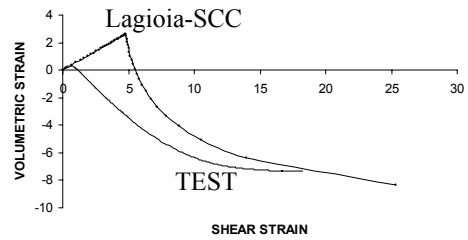
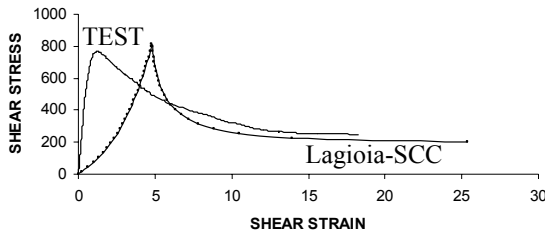
از بررسی نتیجه پیش بینی رفتار نمونه های سیمانی شده ۳٪ با مدل Lagioia – SCC، ملاحظه می شود که کیفیت پیش بینی رفتار نمونه ها در فشار های همه جانبه زیاد نیز به میزان قابل توجهی بهبود می یابد.

در فشار های همه جانبه ۵۵ و ۱۱۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال پیشبینی مدل و نتایج آزمایش در نمودار های ϵ_q : ϵ_p و Q : ϵ_q ، هم از لحاظ روند تغییرات و هم از نظر عددی، تطابق و انطباق بسیار مناسبی دارند. در فشار همه جانبه ۵۰۰ کیلو پاسکال در شرایطی که نمونه همچنان تا حدودی رفتار نرم شونده از خود بروز می دهد، پیش بینی مدل از رفتار نرم شونده به سمت رفتار سخت شونده تغییر می کند

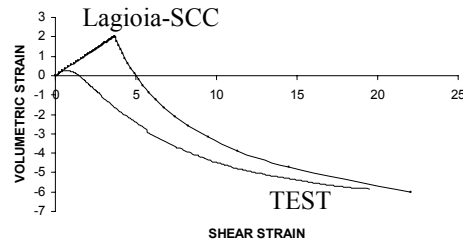
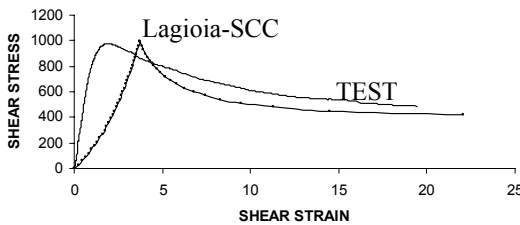


ولی با توجه به اینکه به نظر می رسد که نمونه نیز تقریباً در مرز تبدیل رفتار نرم شونده به رفتار سخت شونده قرار دارد، انطباق پیشبینی مدل و آزمایش در نمودار q : ϵq مناسب و قابل قبول است.
البته در مورد نمودار ϵp : ϵq در نمونه C3D500 عملکرد مدل چندان مناسب نیست. در مورد نمونه C3D1000 هم همین حکم صادق است، یعنی علی رغم اختلاف پیشبینی مدل و نتیجه آزمایش از لحاظ نوع رفتار سخت شونده و نرم شونده، انطباق عددی پیشبینی

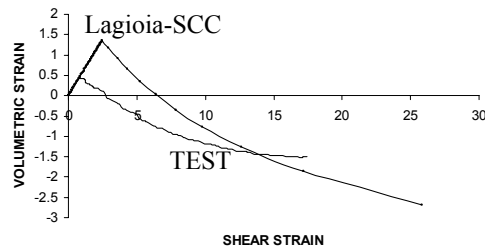
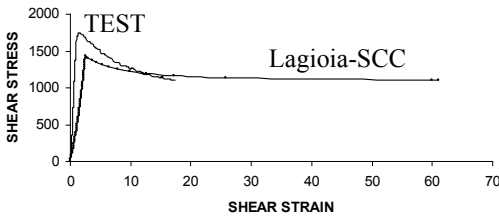
C3D55



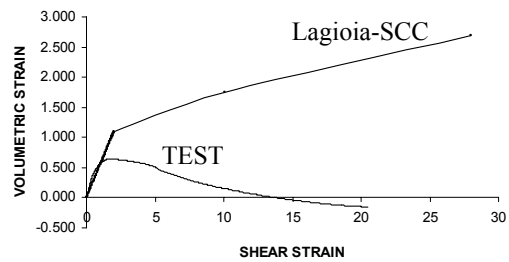
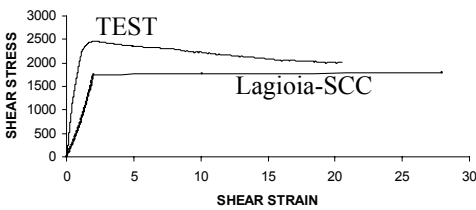
C3D110



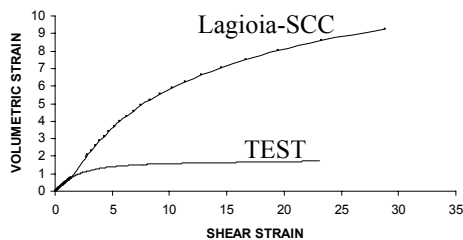
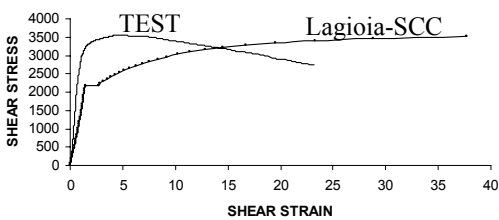
C3D300



C3D500



C3D1000





شکل ۳ - پیشبینی مدل Lagioia-SCC در مقابل نتایج واقعی برای نمونه های سیمانی شده ۳٪ در فشار های همه جانبه ۵۵، ۱۱۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلو پاسکال

مدل و نتایج آزمایش مناسب است. نکته مهمی که در این نمونه وجود دارد این است که در نمودار $\epsilon_p : \epsilon_q$ برای نمونه C3D1000 روند پیشبینی مدل با روند تغییرات آزمایش کاملاً همخوان شده است بنابراین می توان فرض کرد که از حدود فشار های ۱۰۰۰ کیلو پاسکال رفتار نمونه های سیمانی شده ۳٪ از رفتار نرم شونده به رفتار سخت شونده تغییر پیدا می کند. در صورت درست بودن این فرض می توان انتظار داشت که در فشار های همه جانبه بیش از ۱۰۰۰ کیلو پاسکال نیز همانند فشار های همه جانبه کم، کیفیت پیش بینی مدل از رفتار نمونه، مناسب خواهد بود.

نتیجه گیری:

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش، ارزیابی میزان کارایی مدل های رفتاری موجود برای خاک های دارای ساختار، در پیش بینی و مدل سازی رفتار آبرفت درشت دانه سیمانی شده تهران بوده است بر اساس نتایج به دست آمده و در تایید سایر پژوهش های انجام شده می توان نتیجه گیری نمود که مکانیک خاک حالت بحرانی می تواند به عنوان یک چهارچوب واحد برای تفسیر رفتار همه انواع خاک ها به کار رود. بر این اساس می توان یک مدل رفتاری مبتنی بر مکانیک خاک حالت بحرانی را - با افزودن پارامتر های لازم در هر مورد - به شکل قابل قبولی برای انواع مختلف خاک های ریزدانه، درشت دانه و دارای ساختار استفاده نمود. شهر تهران در بخش های شمالی بر روی آبرفت های درشت دانه سیمانی شده و در بخش های جنوبی بر روی آبرفت ریزدانه رسی واقع شده است. بر این اساس یک مدل رفتاری طبقاتی (hierarchical) مناسب که مبتنی بر مکانیک خاک حالت بحرانی است، می تواند در طراحی سازه های ژئوتکنیکی در همه بخش های شهر تهران و نیز در دیگر شهر ها یا بخش هایی که شرایطی همانند تهران دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

عملکرد مدل رفتار Cam-Clay ساختاری یا SCC در پیش بینی رفتار آبرفت سیمانی تهران در نمودار های کرنش برشی - تنش برشی ($\epsilon_q : q$) و نیز کرنش برشی - کرنش حجمی ($\epsilon_p : \epsilon_q$) مورد بررسی قرار گرفته است. مجموع این بررسی ها نشان می دهد که در مورد نمونه های آزمایش شده در فشار های همه جانبه ۵۵ و ۱۱۰ کیلو پاسکال، انطباق کمی و کیفی مدل و نتایج آزمایش در نمودار های $q : \epsilon_q$ و $\epsilon_p : \epsilon_q$ مناسب است. در مورد نمونه های آزمایش شده با فشار های همه جانبه بیشتر انطباق کیفی مدل و واقعیت تا حدودی از بین می رود که این مساله نشانگر نا مناسب بودن شکل سطح تسلیم برای پیش بینی رفتار نمونه ها در فشار های همه جانبه متوسط و زیاد است. در مورد نمونه آزمایش شده در فشار همه جانبه ۱۰۰۰ کیلو پاسکال، تطابق کیفی مدل و واقعیت مجدداً تا حدودی برقرار می شود. از اینجا می توان انتظار داشت که در فشار های همه جانبه زیاد عملکرد مدل SCC بهبود می یابد.

بررسی شکل سطح تسلیم مدل SCC و مقایسه آن با مقادیر مقاومت حداکثر نمونه های سیمانی شده ۳٪ نشان می دهد که سطح تسلیم مدل SCC توانایی مناسبی در مدل کردن رفتار نمونه های سیمانی شده آبرفت تهران ندارد و نمی تواند معیار مناسبی برای مرز رفتار الاستیک و پلاستیک در این خاک ها محسوب شود. غیر از شکل سطح تسلیم، روابط محاسبه تنش ها در مدل SCC عملکرد خوبی در پیش بینی و شبیه سازی رفتار نمونه های سیمانی شده دارند. این مساله در مواردی که سطح تسلیم عملکرد خوبی در پیش بینی حداکثر تنش انحرافی در نمونه هایی که رفتار نرم شونده با کرنش دارند (نمونه های C3D110 و C3D55) دارد، به خوبی دیده می شود. استفاده از معادله سطح تسلیم Lagioia در مدل رفتاری SCC باعث بهبود عملکرد مدل رفتاری SCC در پیش بینی رفتار آبرفت سیمانی شده تهران می شود، به گونه ای که مدل رفتاری جدید که مدل LSCC نام گرفته است، در مقایسه با مدل های رفتاری دیگر، می توان گفت که عملکرد مناسبی در مدل سازی همه وجوه رفتاری آبرفت سیمانی شده تهران دارد.

مدل Lagioia-SCC در مورد نمونه های غیر سیمانی به مدل MCC تبدیل می شود. مدل MCC عملکرد مطلوبی در مورد نمونه های غیر سیمانی دارد. همچنین این مدل در مورد نمونه های سیمانی شده نیز عملکرد مطلوبی دارد. بنا بر این می توان این مدل را به عنوان مدل رفتاری آبرفت درشت دانه سیمانی شده تهران به کار برد.

- :

۱- اصغری، ا. (۱۳۸۱)، تاثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی و تغییر شکل خاک های درشت دانه با نگرشی به آبرفت های تهران، رساله دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- حایری، س. م.، یثربی، س. ش.، ارومیه ای، ع. و اصغری، ا. (۱۳۸۱)، تاثیر سیمانی شدن آهکی بر مقاومت برشی خاک های درشت دانه تهران، فصل نامه پژوهشی علوم زمین، ایران.



- ۳- حسینی، س. م. (۱۳۸۳) تاثیر سیمانی شدن با سیمان پرتلند بر مقاومت خاک های درشت دانه با نگرش به آبرفت های تهران، رساله دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- ۴- یثربی، س. ش.، حایری، س. م.، اصغری، ا. و توفیق ریحانی، م. (۱۳۸۰)، تاثیر سیمان‌تاسیون بر پارامتر های مقاومتی و تغییر شکل خاک های درشت دانه با نگرشی به آبرفت های تهران، گزارش پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- 5- Asghari, E., Toll, D. G. and Haeri, S. M. (2003), Triaxial behavior of a cemented gravelly sand, Tehran alluvium, *Journal of geotechnical and geological engineering*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- 6- Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. and Rad, N. S. (1981), Cemented sands under static loading; *Journal of Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 107(6), 799- 817.
- 7- Coop, M. R. and Atkinson, J. H. (1993), The mechanics of cemented carbonate sands, *Geotechnique* 43(1), London, 53-67.
- 8- Cuccovillo, T. and Coop, M. R. (1993), The influence of bond strength on the mechanics of carbonate soft rocks, *Proc. Geotechnical engineering of hard soils – soft rocks*, Balkema, Rotterdam, 447-455.
- 9- Cuccovillo, T. and Coop, M. R. (1997), Yielding and pre-failure deformation of structured sands, *Geotechnique*, Vol 47(3), 481-508.
- 10- Gens, A. And Nova, R. (1993), Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks, *Proc. Geotechnical engineering of hard soils – soft rocks*, Balkema, Rotterdam, 485-494.
- 11- Islam, M. K., Carter, J. P. and Airey, D. (2004), Comparison of the yield locus and stress – dilatancy function of some critical state constitutive models with experimental data for carbonate sand, *Journal of institution of engineers* Vol 84, February, India.
- 12- Kavvasdas, M. J. (1998), General report: Modelling the soil behaviour – selection of parameters, *Proc. Geotechnical engineering of hard soils – soft rocks*, Balkema, Rotterdam, 1441-1481.
- 13- Lagioia, R. and Nova, R. (1993), A constitutive model for soft rocks, *Proc. Geotechnical engineering of hard soils – soft rocks*, Balkema, Rotterdam, 625-632.
- 14- Lagioia, R. and Nova, R. (1995), An experimental and theoretical study of the behaviour of a calcarenite in triaxial compression, *Geotechnique* 45(4), 633-648.
- 15- Liu, M. D.T Airey, D. W. And Carter, J. P. (1998), Explicit stress-strain relations for an artificially cemented carbonate sand, *Proc. Geotechnical engineering of hard soils – soft rocks*, Balkema, Rotterdam, 475-481.
- 16- Liu, M. D. and Carter, J. P. (2002), A structured Cam Clay model, *Research report*, University of sydney.
- 17- Liu, X. and Cheng, X. H. (2004), numerical modeling of nonlinear response of soil, *Journal of solids and structures*, Elsevier.