

تعیین پارامترهای مدل حالت حد برای ناحیه‌ای از خاک جنوب تهران و بررسی تغییرات آنها در مقاومت خاک

سید مجدالدین میرمحمد حسینی

استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

محمد ملکی

مریی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی همدان

چکیده:

مدل حد در مکانیک خاک (Critical state soil Mechanics) از جمله مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک با سطح تسلیم (Yield surface) بسته بیضوی می‌باشد که قابلیت نسبتاً خوبی جهت ارزیابی رفتار خاکهای تحکیم یافته نرمال و پیش تحکیم یافته با نسبت بیش تحکیم یافتگی کم را دارا می‌باشد. به همین دلیل امروزه در اغلب مطالعات پژوهشی و پروژه‌های ژئوتکنیکی از این مدل استفاده می‌شود. ثوابت و پارامترهای این مدل از آزمایشات معمول در آزمایشگاه قابل تعیین بوده و به لحاظ داشتن سطح تسلیم بسته استفاده از این مدل در برنامه‌های اجزاء محدود (Finite element) براحتی امکان پذیر می‌باشد. با توجه به اهمیت استفاده از مدل‌های الاستوپلاستیک در طراحی سازه‌های خاکی و مسائل پی‌سازی جهت ارزیابی دقیقتر رفتار خاک، آشنائی، بررسی و بکارگیری چنین مدل‌هایی برای محققین و مهندسين ژئوتکنیک امری ضروری به نظر می‌رسد. در مقاله حاضر ضمن معرفی و بررسی کلی مدل حالت حد خاکها به چگونگی تعیین پارامترهای آن برای خاک ناحیه‌ای از جنوب تهران پرداخته و سپس با استفاده از برنامه اجزاء محدود یک مطالعه پارامتریک جهت بررسی و تعیین نحوه تأثیر تغییرات هر یک از پارامترها بر روی مقاومت یک نمونه از خاک در شرایط سه‌محوری (Triaxial Condition) صورت گرفته است.

The Parameters Of critical State Model for Tehran Clay And Evaluation Of Their Changes In The Soil Strength

S.M.Mir Mohammad Hosseini, ph.D.

Assistant Prof. Of Civil Eng. Dept. Amirkabir Univ. Of Technology

M.Maleki, M.sc.

Civil Eng. Dept. Booali (Hamedan) University

ABSTRACT

The critical state model in soil mechanics is an elasto - plastic model with a closed

elliptical yield surface which can predict the behaviour of normally consolidated and slightly over consolidated soils appropriately. Hence it is now widely used in geotechnical projects and research programmes. The parameters of the model can be obtained from standard tests in the Laboratory, and due to having closed yield surface it can be easily coupled with finite element programmes. In this paper the general aspect of the critical state model is first described. Then the method of determining parameters of the model for cohesive soils in a southern part of Tehran is presented. Finally a parametric study has been carried out, using finite element method, to evaluate the influence of the changes of parameters on the strength of the soil samples in triaxial conditions.

مقدمه :

از رفتار خاکها نسبت به مدل‌های الاستیک خطی و حتی غیرخطی می‌باشند. در این مدلها با استفاده از سطح تسلیم (Yield surface)، قانون جریان (Flow rule) و قانون سخت‌شوندگی (Hardening) قادر به کنترل تغییر شکل‌های حجمی و رفتار بارگذاری-باربرداری و نیز بارگذاری مجدد خواهیم بود. از جمله مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک که در بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی مطالعات پژوهشی امروز مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل حالت حد (Critical state) می‌باشد که ذیلاً اشاره مختصری به آن می‌شود:

خاکها از جمله مصالح مهندسی هستند که رفتار پیچیده‌ای از خود در زیر بار نشان می‌دهند. پوشش وسیع سطح زمین از این مصالح از یک طرف و پیچیدگی رفتاری از طرف دیگر موجب شده است که رفتار تنش-تغییر شکل خاکها از دیر باز مورد مطالعه قرار گرفته و تا به امروز نیز ادامه پیدا کند. یکی از عوامل اصلی این پیچیدگی چند فاز بودن خاکها (ذرات جامد، آب و هوا) در مقایسه با سایر مصالح مهندسی و تغییر شکل پذیری زیاد آن می‌باشد. رابطه تنش-تغییر شکل خاکها بستگی به عوامل متعددی منجمله، شکل و اندازه ذرات، تخلخل، چسبندگی و اصطکاک دانه‌ها، درصد رطوبت، درجه اشباع، شرایط زهکشی تقید جانبی (Constraint Conditions)، مسیر تنش (Stress Path)، تاریخچه تنش (Stress History)، سرعت بارگذاری، وضعیت همگنی و ایزوتروپی مصالح داشته و به همین دلیل بدون کمک گرفتن از مدل‌های ریاضی پیش‌بینی رفتار و یا تغییر شکل آنها زیر بارهای مختلف امری دشوار خواهد بود. تعدادی از ویژگی‌های مهمی که یک مدل رفتاری بایستی دارا باشد چنین می‌باشد.

۱- کلیات و تايخچه مدل حالت حد

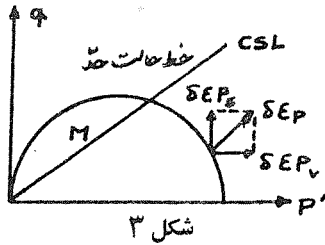
در سال ۱۹۵۸ اهمیت خط حالت بحرانی (Critical State Line-CSL) در تشریح رفتار خاکها توسط Roscoe مورد بررسی قرار گرفت و در سال ۱۹۶۳ روسکو و Schofield یک مدل رفتاری کامل که موفقیت زیادی در بیان جنبه‌های مختلف رفتاری خاک داشت بنام Cam clay ارائه دادند. نقاط ضعف و قوت این مدل بعدها توسط اسکوفیلد و wrogh مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به نتایج حاصله در سال ۱۹۶۸ با انجام اصلاحاتی توسط روسکو و Burland مدل فوق بنام Modified com clay که بیشتر مدل حالت حد (Critical State model) گفته می‌شود، معرفی گردید. جهت آشنائی با این مدل ابتدا روابط اساسی مکانیک خاک حالت حد را معرفی می‌نمائیم ؟

- چند فازه عمل کردن مدل
- غیرخطی بودن رابطه تنش - تغییر شکل و برگشت‌ناپذیری بخشی از تغییر شکلها (پلاستیک)
- در نظر گرفتن پدیده‌های اتساع (dilation) یا انقباض (Contraction)
- در نظر گرفتن شرایط گسیختگی و کاهش تدریجی مقاومت زیر حد مقاومت ماکزیم (softening).
- منظور کردن سوابق تنش، تغییر شکل و تحکیم یافتگی
- غیر ایزوتروپی و وجود حلقه هیستریزس در سیکل‌های بارگذاری و بار برداری
- مدل‌های الاستوپلاستیک که تمامی و یا برخی از ویژگی‌های فوق را دارند با کمک تئوری پلاستیسته قادر به پیش‌بینی بهتری

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad \text{تنش موثر متوسط (ایزوتروپ)}$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad \text{تنش موثر انحرافی (در شرایط سه محوری)}$$

$$v = 1 + c \quad \text{حجم مخصوص}$$



شکل ۳

کارگیری تئوری پلاستیسته معادله سطح تسلیم برای مدل حالت حد در فضای دوبعدی به صورت زیر در می آید:

$$q^2 + M^2 p'^2 = p' p'_c M^2 \quad (5)$$

که معرف یک بیضی مطابق شکل ۳ می باشد. برای یک حجم مخصوص دلخواه از معادله خط تحکیم نرمال (ایزوتروپ) و حذف p'_c از رابطه ۵ معادله سطح مرزی حالت پایدار در مدل حالت حد به صورت زیر در می آید:

$$V\lambda = \Gamma + (\lambda - k) \{ \ln(2) - \ln[1 + (\eta/M^2)] \} \quad (6)$$

در معادلات فوق p'_c فشار پیش تحکیمی و $\eta = q/p'$ می باشد. سطح تسلیم فوق با قانون جریان به صورت زیر متحد می باشد؛

$$\frac{\delta \epsilon_{p_v}}{\delta \epsilon_s} = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta} \quad (7)$$

پارامترهای λ ، Γ ، M ، N و ν_k همگی ثابتهای مدل حالت حد بوده که برای پیش بینی رفتار خاک بوسیله این مدل می توان از طریق آزمایشات به دست آورد. ذیلاً نحوه تعیین این پارامترها جهت خاک ناحیه ای از جنوب تهران توضیح داده می شود.

۲- نحوه تعیین پارامترهای مدل حالت حد

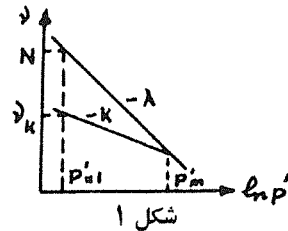
به منظور تعیین پارامترهای مدل یک سری آزمایش توسط دستگاه سه محوری در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده (CD) و همچنین تعدادی آزمایش تحکیم یک بعدی بوسیله دستگاه تحکیم (odeometer) در آزمایشگاه بر روی نمونه های خاک مورد مطالعه انجام گرفت. خاک مورد نظر متعلق به منطقه ای در جنوب تهران بوده که مشخصات اولیه آن مطابق جدول ذیل

بارگذاری و باربرداری نمونه های به صورت نرمال تحکیم یافته در محورهای مختصات $\nu - \ln p'$ تشکیل خطوطی با شیبهای λ و k به صورت زیر می دهند:

$$\nu = N - \lambda \ln p' \quad (1) \quad \text{معادله خط تحکیم نرمال (Normal Consolidated Line - NCL)}$$

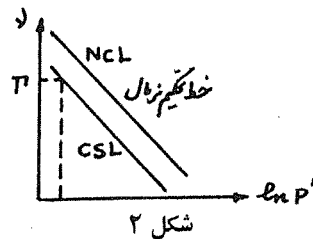
$$\nu = V_k - k \ln p' \quad (2) \quad \text{معادله خط تورم}$$

پارامترهای N و V_k مشخص کننده موقعیت خطوط فوق (شکل ۱) می باشند.



شکل ۱

اگر نمونه هایی که به صورت ایزوتروپ تحکیم یافته در شرایط زهکشی شده یا زهکشی نشده در اثر بارگذاری محوری به گسیختگی برسند، در محورهای مختصات ν و $\ln p'$ تشکیل خطی با شیب λ که بنام خط حالت حد (CSL) نامیده می شود را می دهند (شکل ۲). این خط در محورهای مختصات p' و q با شیب M از مرکز می گذرد.



شکل ۲

$$V = \Gamma - \lambda \ln p' \quad (3) \quad \text{معادله خط حالت حد (CSL)}$$

$$q = Mp' \quad (4) \quad \text{معادله خط حالت حد (CSL)}$$

پارامتر Γ حجم مخصوص خاک به ازای $p' = 1 \text{ KPa}$ روی خط حالت حد می باشد. حال با استفاده از مفاهیم پایه ای فوق و

وزن مخصوص طبیعی	وزن مخصوص خشک	درصد رطوبت	درجه اشباع	توده ویژه (چگالی)	تحلیل اولیه	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
$1/89 \text{ (t/m}^3\text{)}$	$1/535 \text{ (t/m}^3\text{)}$	۲۳ (%)	۷۹ (%)	۲/۷۴	۰/۷۸	۳۲/۵ (%)	۱۹ (%)	۱۳/۵ (%)

می‌باشد:

$$\lambda = 0.096, K = 0.018 \text{ و } N = 2/148$$

با استفاده از نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی روی نمونه‌های خاک و نمایش آنها در سیستم محورهای مختصات $e:lgp'$ تعیین ضرائب فشردگی (Cc) و تورم (Ce) و با فرض ثابت بودن K_0 (ضریب رانش خاک در حالت سکون) مقادیر λ و K از روابط ذیل قابل تعیین می‌باشند:

$$\lambda = \frac{C_c}{2/3.03} = \frac{0.2}{2/3.03} = 0.0867$$

$$K = \frac{C_e}{2/3.03} = \frac{0.039}{2/3.03} = 0.0169$$

در روش سوم فقط پارامتر λ را می‌توان تعیین نمود. به موجب بررسیهای انجام شده توسط Skempton و Northy در سال ۱۹۵۳ مقاومت برشی زهکشی نشده خاکهای چسبنده در حد خمیری حدود ۱۰۰ برابر مقاومت آنها در حدروانی می‌باشد یعنی:

$$q_{PL} = 100 q_{LL}$$

از ترکیب رابطه فوق با معادله خط حالت حد برای دو نقطه حد روانی و حد خمیری در سیستم مختصات $v:lnp'$ و همچنین از

منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل ۴ نشان داده شده و گروه خاک در سیستم طبقه‌بندی یکنواخت (Unified), CL-ML, می‌باشد.

۲-۱- تعیین λ , K و N

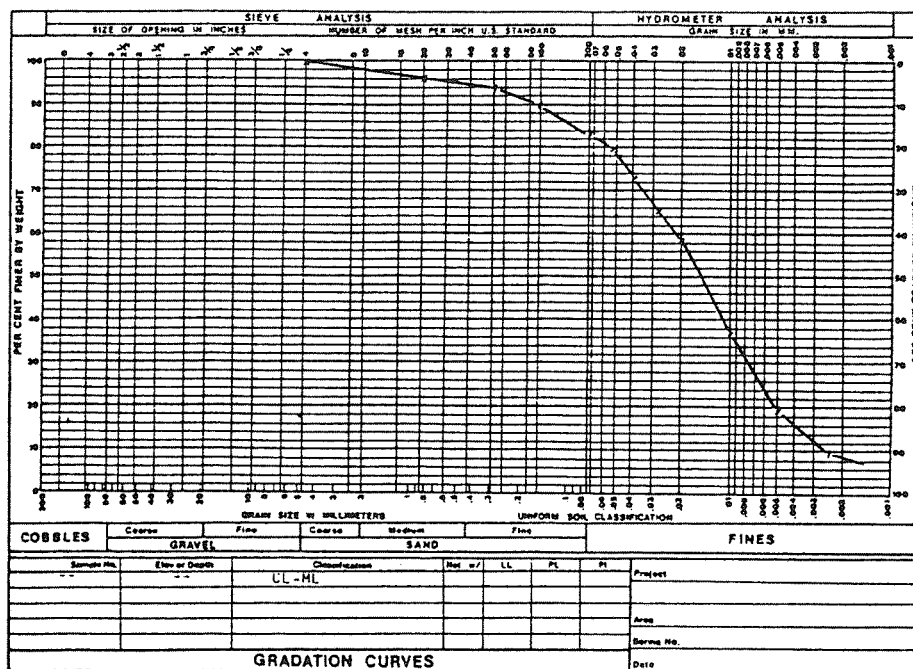
تعیین همگی و یا تعدادی از پارامترهای فوق از روشهای مختلفی امکان پذیر است که البته بسته به دقت انجام آزمایش ممکن است اختلاف کمی بین مقادیر اندازه‌گیری شده ملاحظه شود. عمده‌ترین طرق تعیین پارامترها چنین می‌باشد.

- استفاده از نتایج آزمایش فشار سه محوری

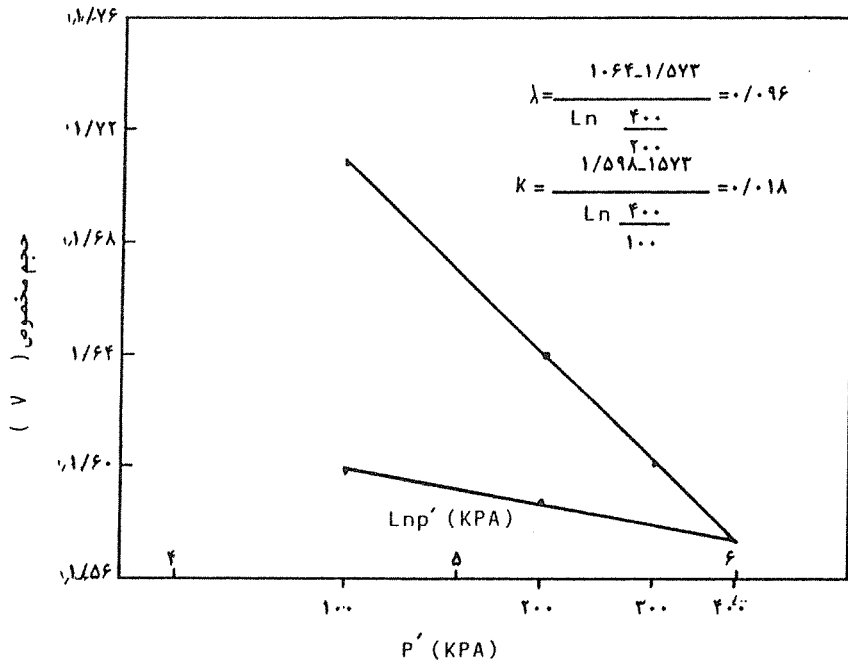
- استفاده از نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی

- استفاده از دامنه خمیری مصالح

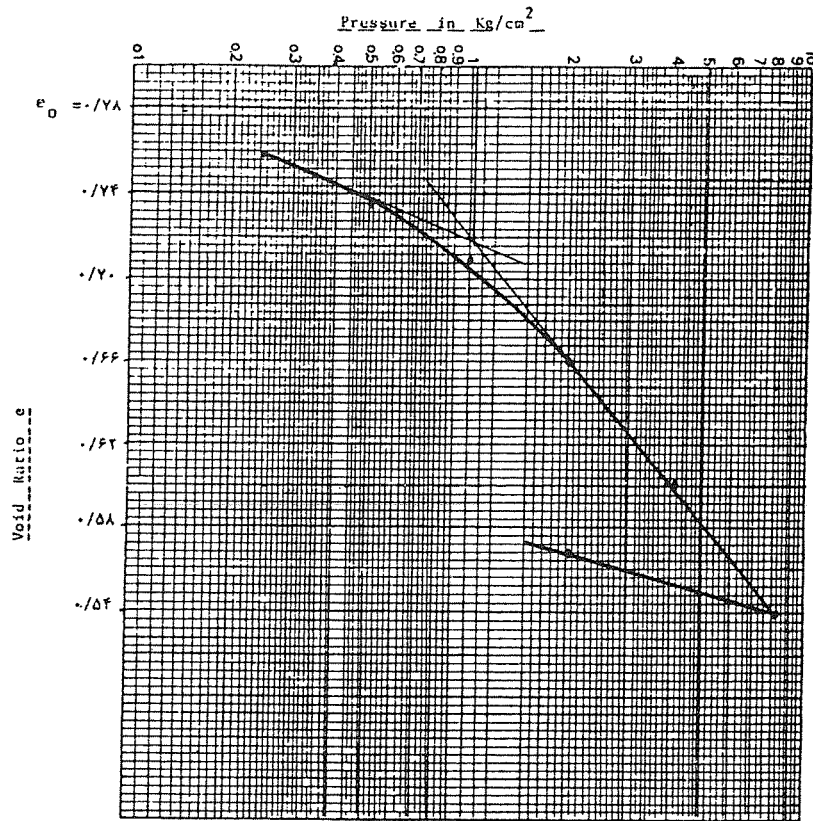
جهت تعیین پارامترها از روش اول نمونه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر در دستگاه فشار ۳ محوری پس از اشباع شدن کامل تحت فشار ایزوتروپ تا ۴۰۰ KPa و باربرداری تا ۱۰۰ KPa قرار گرفته و در مراحل مختلف تغییر حجم نمونه قرائت گردیده است. نتایج آن در محورهای مختصات $v:lnp'$ مطابق شکل ۵ رسم گردیده که از روی آن پارامترهای فوق چنین به دست می‌آیند:



شکل ۴ منحنی دانه‌بندی خاک



شکل ۵ نتایج آزمایش تحکیم ایزوتروپ



شکل ۶ نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی

رابطه مقابل برای یک خاک اشباع :

$$M = \frac{q}{p'} = \frac{3(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{\sigma'_1 + 2\sigma'_3} = \frac{3(1 + \sin\phi' - 1 + \sin\phi')}{1 + \sin\phi' + 2 - 2\sin\phi'}$$

$$= \frac{6\sin\phi'}{3 - \sin\phi'}$$

$$V-1 = G_s \omega$$

مقدار λ را می توان از رابطه ذیل به دست آورد:

$$\lambda = G_s \cdot PI / 461$$

با توجه به مقادیر $PI = 13/5$ و $G_s = 2/74$ برای خاک مورد مطالعه $\lambda = 0/0802 = 8.02\%$ به دست می آید که با مقادیر قبلی فاصله زیادی ندارد.

۲-۲- تعیین پارامتر M

جهت تعیین M شیب خط حالت حد در سیستم مختصات $q:p'$ می توان از آزمایشات فشار سه محوری در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده (CD) و یا تحکیم یافته و زهکشی نشده (CU) با اندازه گیری فشار آب حفره ای (u) استفاده نمود.

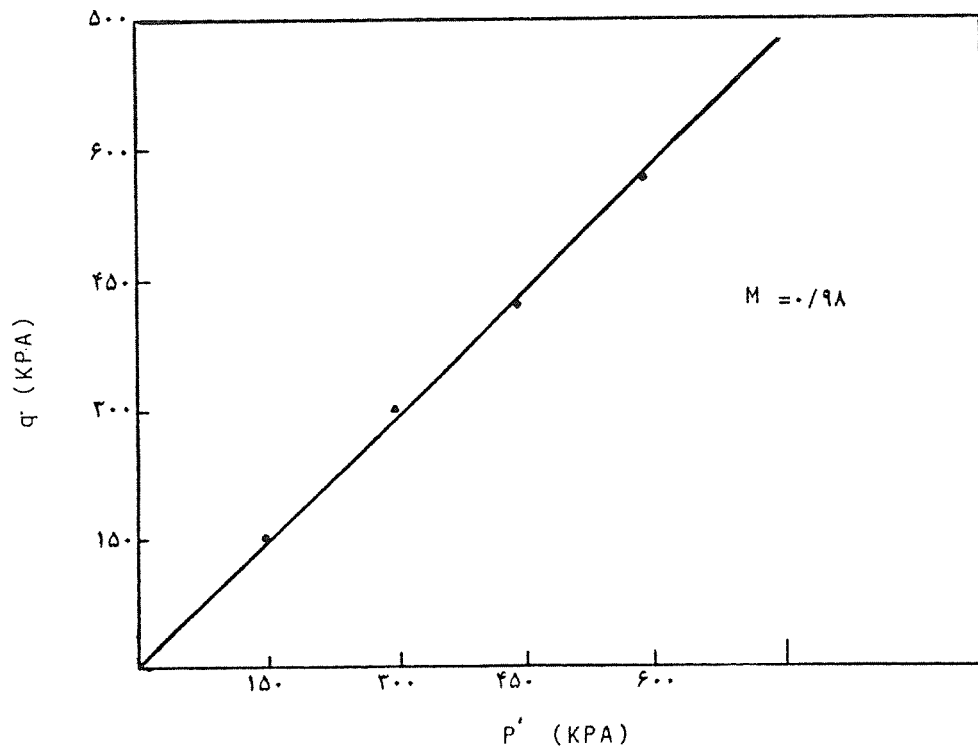
در هر کدام از آزمایشات فوق لازمست تغییر شکل نمونه به اندازه کافی باشد تا اطمینان از رسیدن نمونه به حالت حدی حاصل شود. ارتباط بین ϕ (زاویه اصطکاک داخلی مؤثر) و M را با داشتن تنش های اصلی مؤثر در لحظه گسیختگی به صورت ذیل می توان تعیین نمود:

به منظور تعیین M یک سری آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی شده با فشارهای پیش تحکیمی ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ KPa روی نمونه هایی از خاک مورد مطالعه به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر انجام گرفت. در این آزمایشات ϵ_a از طریق اندازه گیری تغییر شکل محوری ϵ_v توسط اندازه گیری تغییر حجم و سطح مقطع نمونه در حین آزمایش از رابطه ذیل:

$$A = A_0[(1 - \epsilon_v)/(1 - \epsilon_a)]$$

تعیین و تنش های اصلی گسیختگی σ'_1 و σ'_3 با اصلاحات لازم به صورت دقیق اندازه گیری و از روی آنها مقادیر p' و q تعیین و شیب خط برازش شده در محورهای مختصات $q:p'$ به دست آمد (شکل ۷) که مقدار آن چنین می باشد:

$$M = 0.98$$



شکل ۷ تعیین شیب خط حالت حد در فضای

۳-۲- تعیین پارامترهای Γ و p'_c

همانطور که ملاحظه شد حجم مخصوص روی خط حالت حد به ازای $P=1$ (KPa) بوده و رابطه آن با تخلخل بحرانی $e_{cs}=\Gamma-1$ می باشد. اندازه گیری Γ از دو طریق امکان پذیر است. در روش اول با اندازه گیری درصد آب در لحظه گسیختگی برای چند نمونه در آزمایش سه محوری و سپس رسم خط حالت حد در فضای $e: \lg p'$ می توان مقدار e_{cs} را به دست آورد. این روش به لحاظ مشکلات عملی کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. در روش دوم با داشتن مقادیر λ و K و یک مقدار تخلخل در هر نقطه روی سطح مرزی حالت پایدار، با استفاده از معادله زیر مقدار Γ بدست می آید:

$$\nu_{\lambda} = \Gamma + (\lambda - K) \{ \ln(2) - \ln(1) + \eta/M \}$$

$$\nu_{\lambda} = N, \eta = 0 \Rightarrow N = \Gamma + (\lambda - K) \ln(2)$$

$$N = 2.148 \Rightarrow \Gamma = 2.148 - (0.096 - 0.018) \ln(2) = 2.094$$

تعیین مقدار دقیق p'_c فشار پیش تحکیمی از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا با p'_c موقعیت سطح تسلیم اولیه روی محور p' مشخص شده و رفتار خاک داخل این سطح الاستیک می باشد. ارتباط تنش های اولیه با فشار پیش تحکیمی با داشتن

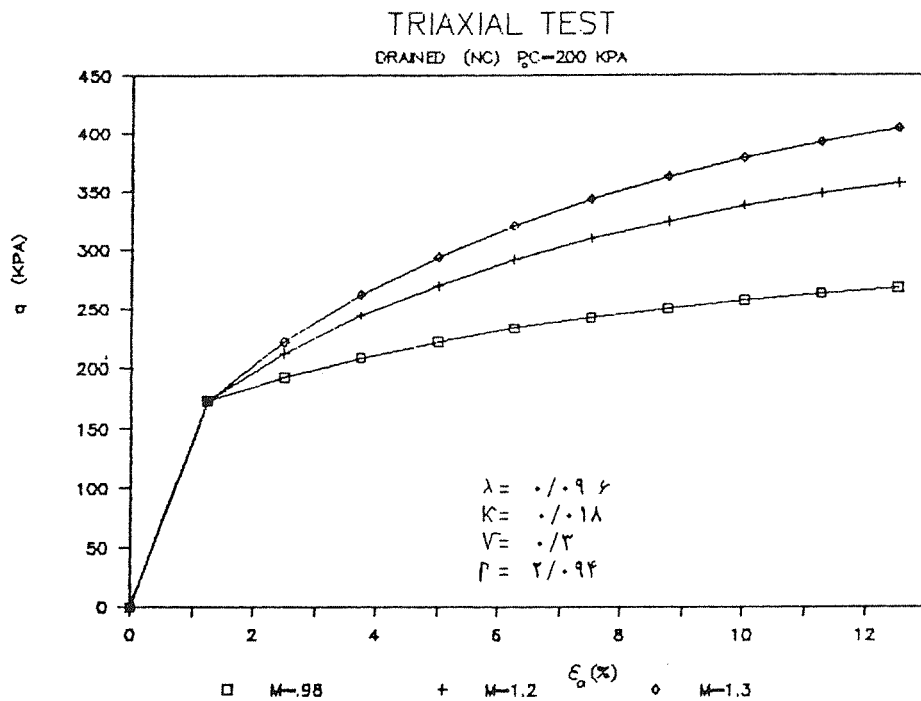
پارامترهای مدل و همچنین $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ و تعیین p' و q و سپس استفاده از معادله سطح تسلیم مدل مطابق رابطه ذیل امکان پذیر می باشد.

$$p'_c = \frac{q^2 + M^2 p'^2}{M^2 p'^2}$$

۳- مطالعه پارامتریک مدل حالت حد و بررسی رفتار خاک مورد آزمایش با استفاده از روش اجزا محدود

جهت بررسی اثر تغییرات پارامترهای مدل روی نتایج به دست آمده، برای نمونه ای از خاک تحت شرایط بارگذاری سه محوری با استفاده از روش اجزا محدود آنالیزی انجام گرفته است. برای تمامی حالات فرض شده که نمونه به صورت عادی تحکیم یافته، دارای فشار پیش تحکیمی 200 KPa و در شرایط زهکشی می باشد.

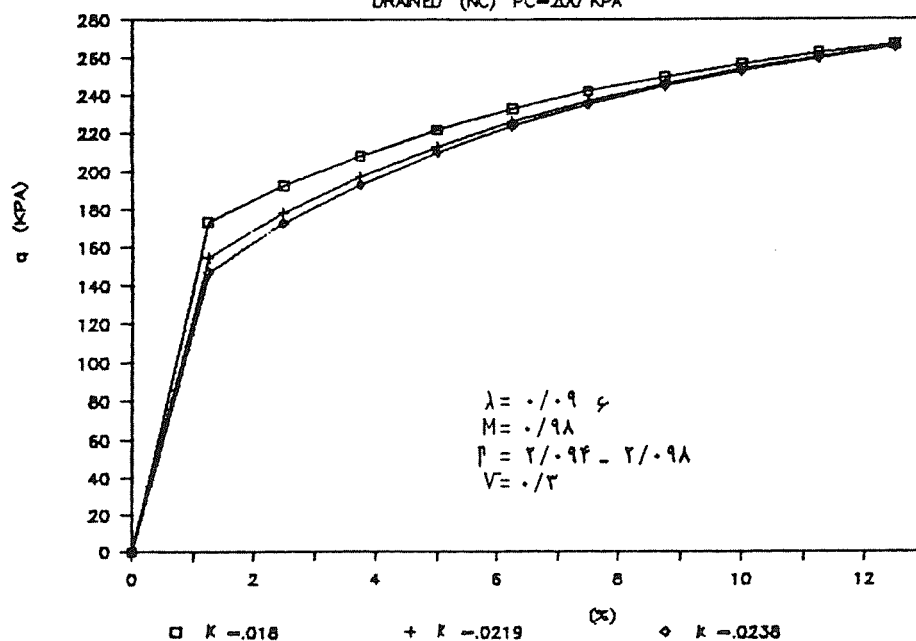
نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل فوق در شکل های ۸ الی ۱۱ آورده شده است. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می شود، ۳۰ درصد افزایش در پارامتر M در تغییر شکل نسبی محوری ۱۲٪ نمونه، افزایشی حدود ۵۰ درصد در مقاومت برشی خاک را موجب می شود. همچنین به خوبی مشهود است که افزایش M تأثیری بر رفتار الاستیک خاک نداشته و در ناحیه پلاستیک



شکل ۸ تأثیر تغییرات پارامتر M روی مقاومت برشی

TRIAxIAL TEST

DRAINED (NC) PC=200 KPA



شکل ۹ تأثیر تغییرات پارامتر K روی مقاومت خاک

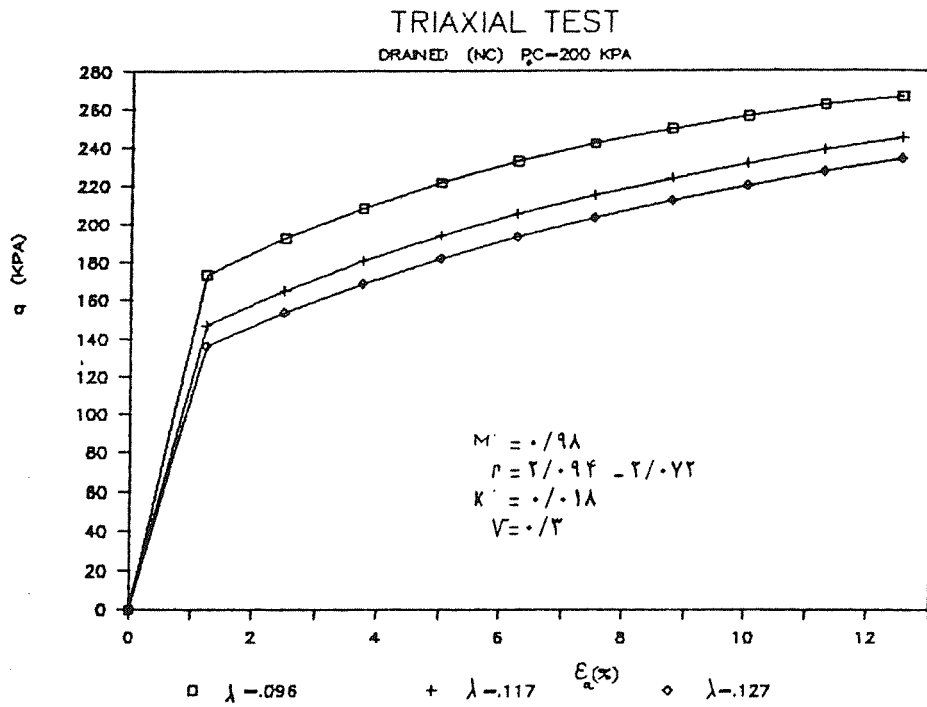
ارزیابی عملیات حفاری در محل داشته است که تشریح جزئیات آن از حوصله این مقاله خارج می‌باشد.

۴- خلاصه و نتیجه گیری

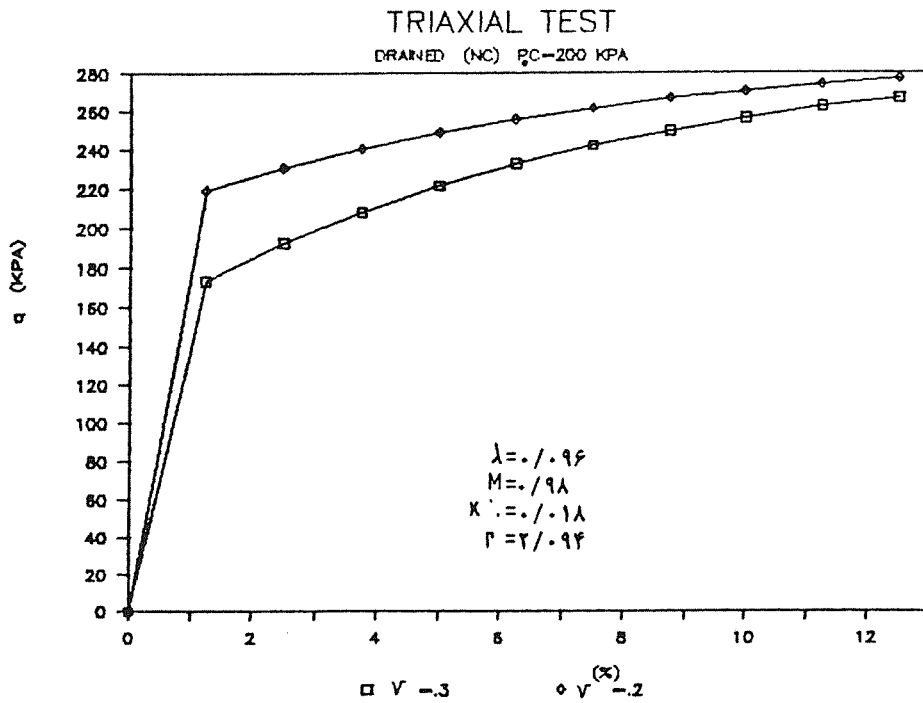
مدل حالت حد در مکانیک خاک که یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک می‌باشد قابلیت نسبتاً خوبی جهت پیش‌بینی و ارزیابی رفتار خاکها تحت شرایط مختلف تنش تغییر شکل رادارا می‌باشد. پارامترها و یا ثوابت این مدل در آزمایشگاه با انجام آزمایشات معمول (فشار سه‌محوری و تحکیم یک‌بعدی) قابل تعیین بوده و برای ارزیابی‌های با دقت کمتر می‌توان از روابط بین آنها با مشخصات فیزیکی خاکها چون ϕ ، PI ، Cc و Ce استفاده نمود و بدون انجام آزمایش پارامترهای مدل را تعیین نمود. به موجب مطالعه پارامتریک انجام شده روی این مدل ملاحظه می‌شود که چنانچه تعیین رفتار دقیق خاک مدنظر باشد، بایستی دقت کافی در تعیین مقادیر پارامترها اعمال گردد. با توجه به آنالیز انجام شده روی یک نمونه واقعی خاک در شرایط مرزی سه‌محوری می‌توان به قابلیت این مدل در پیش‌بینی رفتار خاکها پی برد. سازگاری بسیار خوب نتایج آزمایشگاه و آنالیز اجزاء محدود همانگونه که در مجموعه اشکال ارائه شده دیده می‌شود دلیلی بر این مدعا می‌باشد.

مقاومت را افزایش خواهد داد. افزایش پارامتر K موجب کاهش مقاومت خاک در محدوده الاستیک (شکل ۹) گردیده در حالی‌که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت خاک در ناحیه پلاستیک نخواهد داشت. همچنین با توجه به شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود افزایش λ مقاومت برشی خاک را در تمام نواحی کاهش می‌دهد. افزایش ضریب پواسون مقاومت برشی خاک را خصوصاً در ناحیه الاستیک کاهش می‌دهد (شکل ۱۱).

نتایج تجزیه و تحلیل به‌عمل آمده بر روی نمونه‌های سه‌محوری خاک جنوب تهران با استفاده از مدل حالت حد و به‌روش اجزاء محدود در شرایط مختلف تحکیم یافتگی (به‌صورت نرمال و همچنین پیش تحکیم یافته) و شرایط مختلف زهکشی در شکلهای ۱۲ الی ۲۱ ارائه شده است. در این اشکال ϵ_a تغییر شکل نسبی محوری، OCR ضریب بیش تحکیمی، p_{oc} فشار جانبی (ایزوتروپ) و u فشار آب حفره‌ای می‌باشد. با داشتن پارامترهای مدل حالت حد این خاک همانگونه که از اشکال فوق پیداست نه تنها تغییرات تمامی عوامل بر یکدیگر را می‌توان مورد ارزیابی قرار داد بلکه با دقت بسیار خوبی می‌توان تغییرات رفتاری خاک در شرایط مختلف بارگذاری در سطح زمین را بررسی و در انواع پروژه‌های ژئوتکنیکی در محل مورد استفاده قرار داد. کاربرد مدل حالت حد با پارامترهای تعیین شده در آزمایشگاه متعلق به خاک مذکور نتایج بسیار خوبی در رابطه با



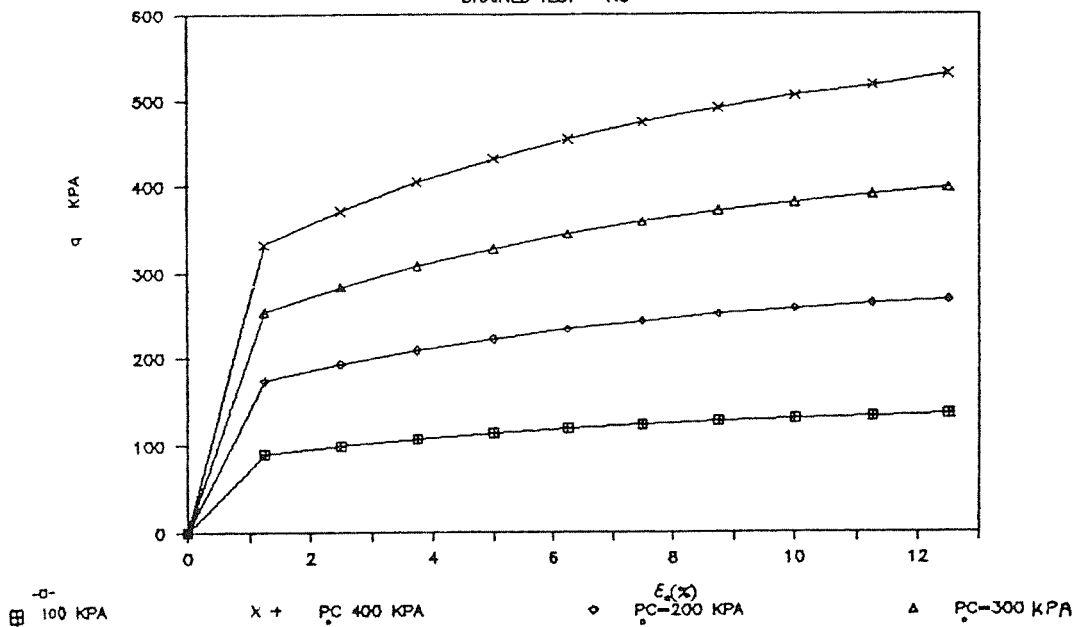
شکل ۱۰ تأثیر تغییرات پارامتر λ روی مقاومت خاک



شکل ۱۱ تأثیر تغییرات ضریب پواسون روی مقاومت خاک

TRIAXIAL TEST

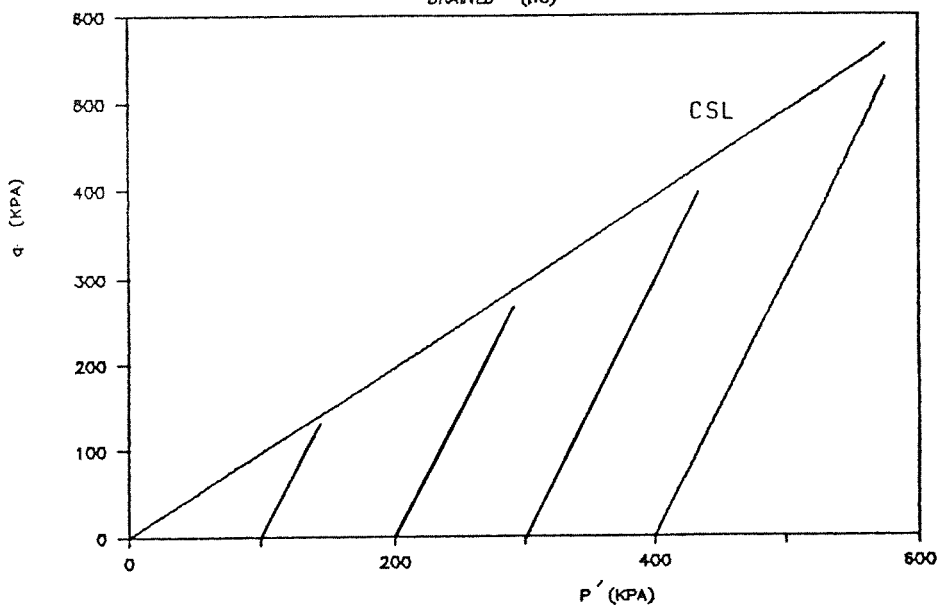
DRAINED TEST -NC-



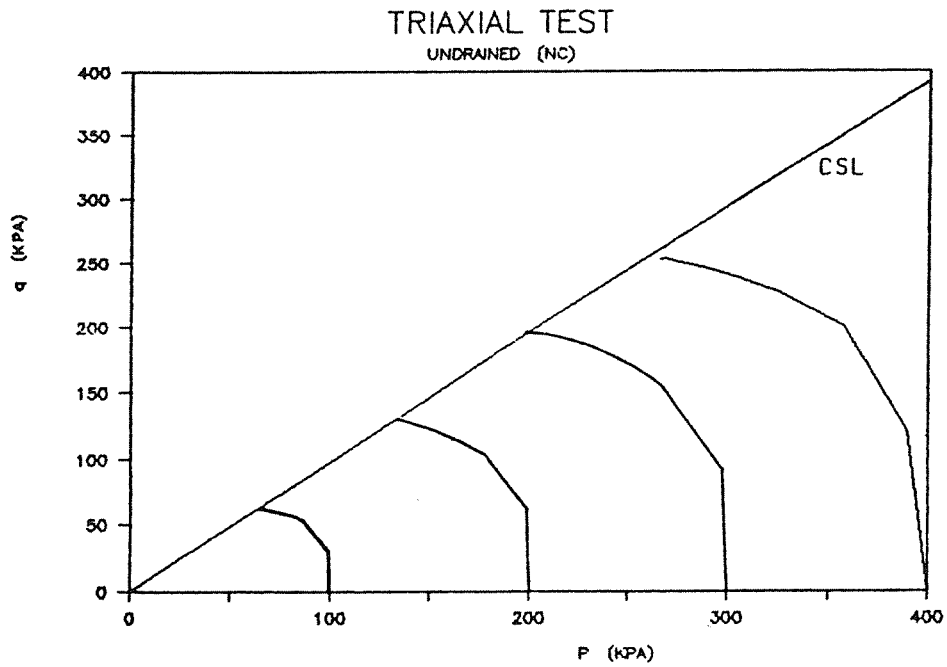
شکل ۱۲ تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری برای حالت عادی تحکیم یافتگی در شرایط زهکشی شده

TRIAXIAL TEST

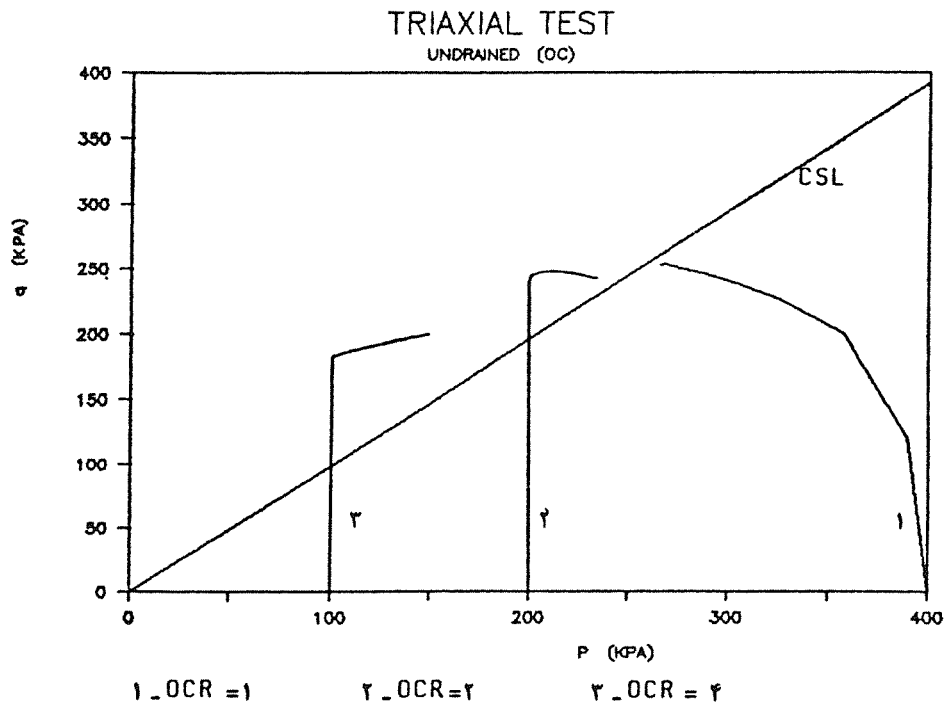
DRAINED (NC)



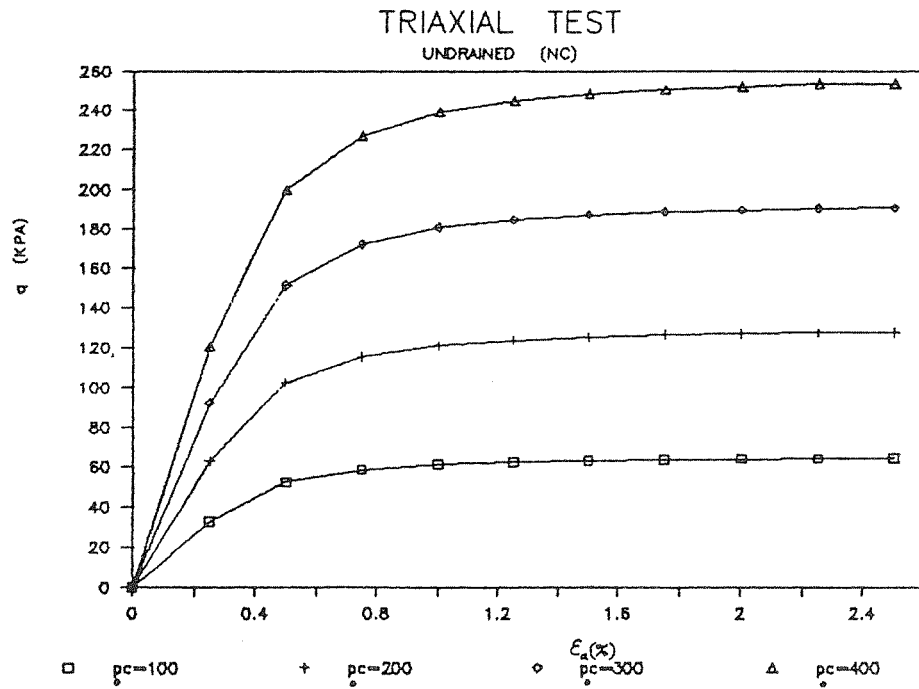
شکل ۱۳ مسیرهای تنش مؤثر برای نمونه‌های عادی تحکیم یافته و موقعیت خط حالت حد در شرایط زهکشی شده.



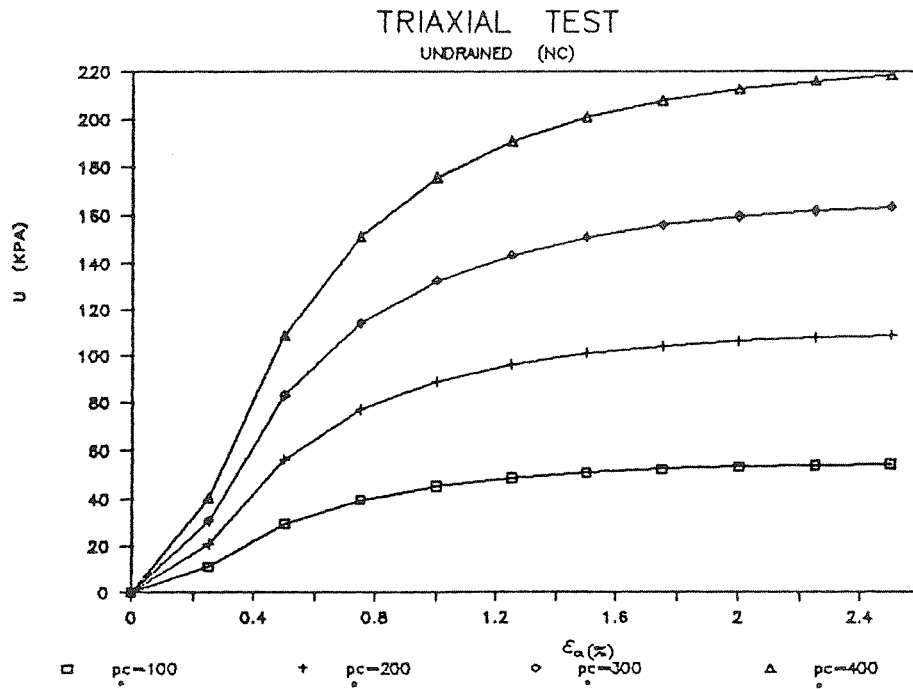
شکل ۱۴ مسیرهای تنش مؤثر زهکشی نشده برای نمونه‌های عادی تحکیم یافته



شکل ۱۵ مسیرهای تنش مؤثر زهکشی نشده برای نمونه‌های عادی و بیش تحکیم یافته

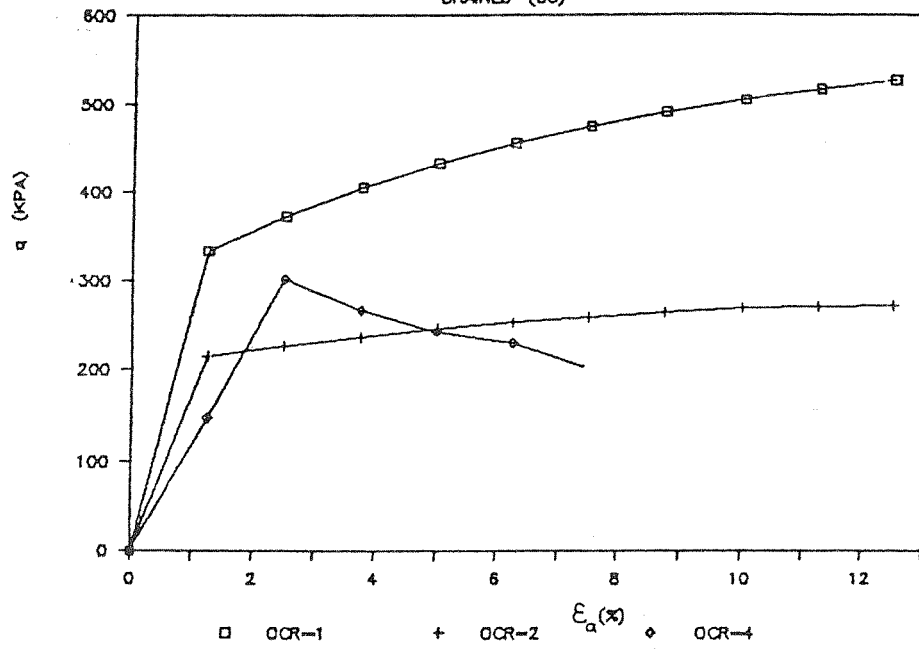


شکل ۱۶ تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در شرایط زهکشی نشده برای نمونه‌های عادی تحکیم یافته



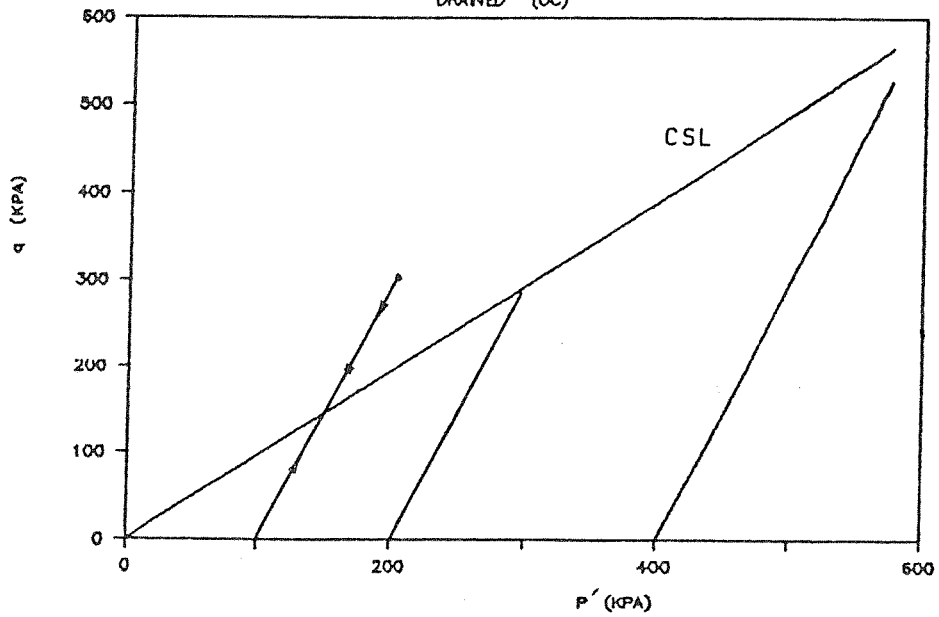
شکل ۱۷ تغییرات فشار منفذی نسبت به کرنش محوری در شرایط زهکشی نشده برای نمونه‌های عادی تحکیم یافته.

TRIAXIAL TEST DRAINED (OC)

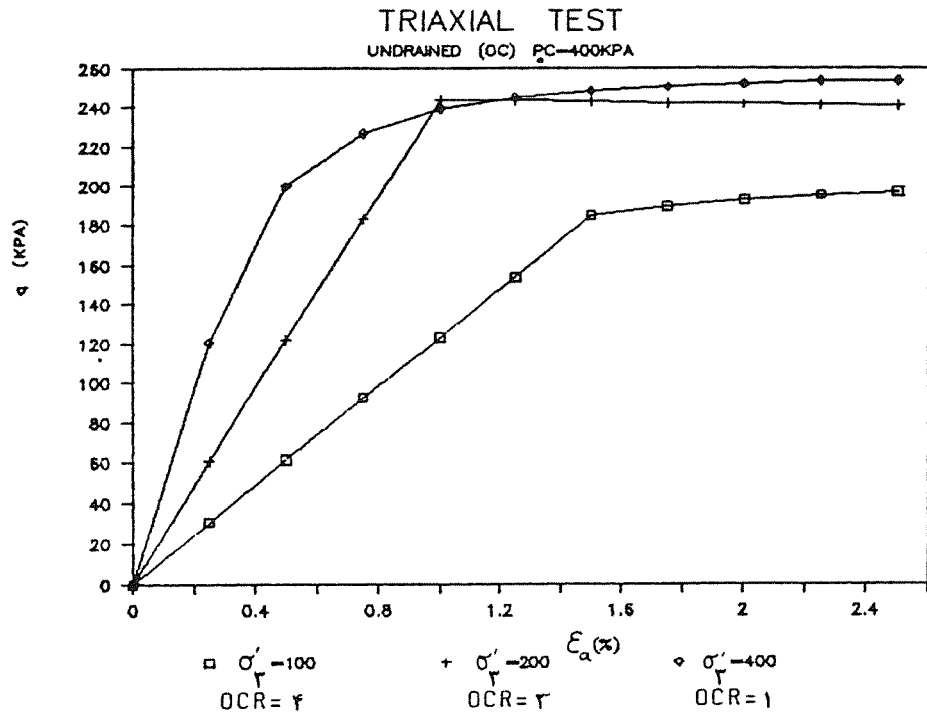


شکل ۱۸ تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری برای نمونه‌های پیش‌تحکیم یافته در شرایط زهکشی

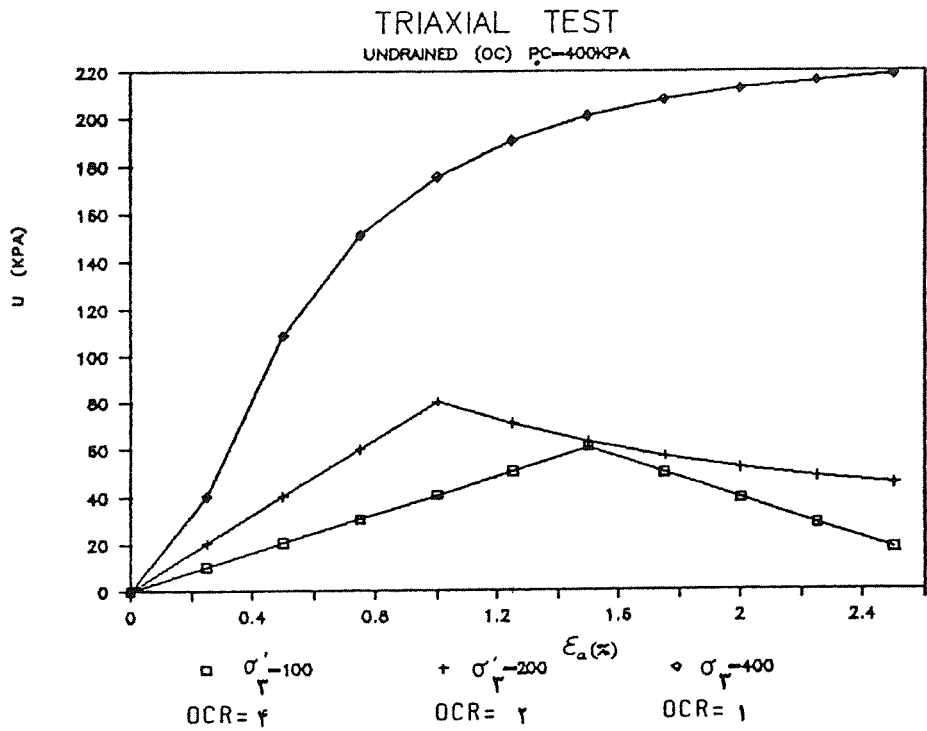
TRIAXIAL TEST DRAINED (OC)



شکل ۱۹ مسیرهای تنش مؤثر برای نمونه‌های پیش‌تحکیم یافته در شرایط زهکشی شده



شکل ۲۰ تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری برای نمونه‌های عادی و پیش تحکیم یافته



شکل ۲۱ تغییرات فشار منفذی نسبت به کرنش محوری برای نمونه‌های عادی و پیش تحکیم یافته

- 1- Atkinson, J.H. and Bransby, P.L. "the Mechanics of soils, an Intorduction to Critical state Soil Mechanics", McGraw-Hill. 1978.
- 2- Britto, A.M. and Gunn, M.J. "Critical State Soil Mechanics Via Finite elements". Ellis Horwood, 1987.
- 3- Bolton. "A Guid to soil Mechanics", Macmillan, 1984.
- 4- Schofield, A. and wrogh, P., " Critical State Soil Mechanics" Mc Graw-Hill, 1968.
- 5- Orr, T.L.L., Atkinson, J.H. and Wrogh .C.P. , Finite element Calculations for the Deformation Around Model Tunnels, in "Computer Methods in tunnel Design", the Institution of Civil Engineers, London, 1978, PP.121-144.
- 6- Gunn, M.J. and Seneviratne, H.N, "Predicted and Observed time-Dependent Deformation around Shallow Model Tunnels in Soft Clay," 5th Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics. Nagoya", 1985, PP. 1135-1140.
- 7- wayne Clough, G., Shira suna, T. and Finno, R.J, "Finite element analysis of advanced Shield Tunneling, Proceeding of 5the int. Conf. on Num. Mothods in Geomechanics, Nagoya, 1985PP. 1167-1174.
- 8- Wayne, G. and Briger, "Design and performance of Excavation and tunneling in Soft Clay", Soft Clay Engineering, 1981. PP.571-634.
- 9- Bishop, A.W. Henkel, D.J. "The Measurement of soil properties in the Triaxial test. Edward. Arnold. 1962.
- ۱۰- بررسی مدل حالت حدود و کاربرد آن در تونلسازی. پروژه کارشناسی ارشد رشته خاک و پی آقای محمد ملکی . بهار ۷۰- دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر