

# اعتبار سنجی روابط تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع تحت مسیرهای آزمایشگاهی با نگرش ویژه به مکانیک خاک حالت بحرانی

الهام جدیدی<sup>۱</sup> محمد ملکی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد عمران خاک و پی، گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

maleki@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۲/۱۰]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱۲/۲]

**چکیده** - پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش خاک‌های غیراشباع منوط به، به‌کارگیری متغیرهای تنش مناسب در روابط رفتاری است. در این خصوص اغلب دو گروه از متغیرهای تنش مبنای مدل‌سازی رفتاری برای خاک‌های غیر اشباع بوده است. در گروه اول تنش خالص و مکش بافتی و در گروه دوم تنش مؤثر و مکش متغیرهای تنش را شامل می‌شوند. با توجه به آنکه متغیرهای تنش گروه دوم بیشتر مورد توجه پژوهشگران است در این مقاله تعدادی از روابط پیشنهادی معروف برای متغیر تنش مؤثر خاک غیراشباع بررسی شده است. برای این منظور نتایج آزمایش های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده با مقدار آب ثابت، در تغییر شکل‌های بزرگ (در حالت بحرانی) برای اعتبارسنجی این روابط استفاده شد. نتایج نشان داد روابط تنش مؤثر پیش‌بینی‌هایی از موقعیت خط حالت بحرانی در فضای  $(q - p')$  ارائه می‌دهند که در تعدادی از آنها اختلاف با نتایج تجربی قابل توجه است. همچنین رابطه پیشنهادی خلیلی-خباز در مقایسه با نتایج تجربی هماهنگی بهتری از خود نشان داد.

**واژگان کلیدی:** تنش مؤثر، خاک غیر اشباع، خط حالت بحرانی، اعتبار سنجی، متغیرهای مستقل تنش.

## ۱- مقدمه

است. علاوه بر این در سازه‌های نگهبان طراحی شده با فرضیات شرایط خشکی کامل خاک به ویژه برای خاک‌های دانه‌ای، ممکن است با خیس شدن و جذب رطوبت در پایان مراحل ساخت و ساز، سازه با کاهش ضرایب ایمنی مواجه شود. هم‌چنین از آنجا که مقاومت برشی خاک نیز به شدت تحت تأثیر درجه اشباع خاک تغییر می‌کند، بنابراین در نظر گرفتن شرایط صحیحی از اشباع یا غیراشباع بودن خاک در بررسی رفتار خاک‌ها حائز اهمیت است. در واقع طراحی در مهندسی ژئوتکنیک بدون در نظر گرفتن شرایط خاک غیراشباع گرچه ساده‌تر است اما بیشتر هزینه‌های ساخت و ساز را افزایش می‌دهد [۲]. رفتار تنش-کرنش خاک غیراشباع هم پیچیده است و هم از عوامل زیادی از جمله؛ تنش‌های اعمالی خارجی، نوع خاک، اسکلت خاک، دانسیته و مکش ناشی از کشش سطحی در سطوح تماس آب و هوا تأثیر می‌پذیرد. بر این اساس به کارگیری متغیرهای تنش و نیز چارچوب مدل‌سازی رفتاری مناسبی که بتواند به

خاک غیراشباع نوع خاصی از خاک نیست بلکه حالتی از خاک است که برای انواع خاک‌ها با توجه به شرایط سیال پرکننده حفره‌های آن‌ها ممکن است رخ دهد. اشباع یا غیراشباع بودن خاک در هر ناحیه از زمین متأثر از عوامل زیست‌محیطی مانند باران یا تبخیر و یا بالا آمدن سطح سفره آب زیرزمینی است. به عبارت دیگر، همه خاک‌ها در معرض خشک شدگی یا ترشدگی قرار دارند. بنابراین تغییر در وضعیت فشار آب حفره‌ای و بروز شرایط غیر اشباع برای همه خاک‌ها محتمل است [۱]. از این رو لزوم تسلط بر مکانیک خاک غیر اشباع برای پیش‌بینی درست از رفتار مهندسی خاک‌ها برای مهندسی ژئوتکنیک اجتناب ناپذیر است. یکی از مشکلاتی که همواره برای مهندسی جایگاه ویژه‌ای داشته است شکست شیروانی‌های خاکی است. این در حالی است که سطوح لغزش بحرانی شیروانی‌های خاکی اغلب در لایه‌های سطحی و در بالای سطح آب زیرزمینی

این مقاله به پنج رابطه شرفلر<sup>۳</sup>، آیتچیسون<sup>۴</sup>، کوهگو<sup>۵</sup>، خلیلی-خجاز<sup>۶</sup> و دانگلا-کوزی<sup>۷</sup> که تلاش‌هایی برای ارائه رابطه مناسبی برای پارامتر تنش مؤثر بیشاپ داشته‌اند، پرداخته شده‌است. روابط استفاده شده در بخش بعدی به تفصیل شرح داده شده‌اند. در ادامه این مقاله علاوه بر بررسی مفهوم حالت بحرانی در خاک غیراشباع، از نتایج گزارش شده در مراجع [۷ و ۸] برای اعتبار سنجی روابط گفته شده با نگرش ویژه به مکانیک خاک حالت بحرانی استفاده شده است و برای خاک غیراشباع خط واحدی در حالت بحرانی در فضای  $(q - p')$  در مکش‌های مختلف ارائه شده‌است. بر این اساس توانایی روابط مختلف برای هماهنگی با نتایج تجربی ارائه شده در ادبیات مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- روابط تنش مؤثر خاک غیراشباع

اولین مدل‌های رفتاری ارائه شده برای خاک غیر اشباع، دو متغیر تنش خالص و مکش را به عنوان متغیرهای حالت تنش انتخاب می‌کردند. در طول سال‌ها پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که استفاده از یک متغیر مستقل منفرد مشابه مفهوم تنش مؤثر در خاک‌های اشباع، می‌تواند گذار از حالت غیر اشباع به اشباع را ساده‌تر کند. هنگامی که در مورد خاک‌های غیر اشباع بحث می‌شود، به دلیل چهار فازی بودن آن‌ها، با استفاده از یک متغیر حالت تنش، نمی‌توان رفتار مکانیکی آن‌ها را بیان کرد. مفهوم تنش مؤثر برای هر محیط متخلخلی که ممکن است آثار توأم بارگذاری خارجی و فشار آب حفره‌ای داخلی را متحمل شود، قابل اطلاق است. زیرا تنش مؤثر قادر است یک فضای متخلخل چند فازه را به طور مکانیکی به محیط پیوسته تک فاز معادل تبدیل کند [۹]. از آن جا که تنش مؤثر ترازقی فقط برای حالات خاصی از اشباع کامل منافذ با یک سیال به تنهایی معتبر است، پس نیاز به توسعه اصل تنش مؤثر برای حالات غیر اشباع خاک کاملاً محسوس است. انتخاب متغیرهای تنش مناسب برای خاک‌های غیراشباع همواره مورد بحث بوده است و اغلب همراه با امکان تعریف یک تنش مؤثر منفرد بررسی شده‌است. به جای در نظر گرفتن خاک غیراشباع به عنوان یک طبقه و کلاس جداگانه برای خاک، باید بتوان با درک خوب و اثبات شده از رفتار خاک غیراشباع، یک

شکل مطلوبی ویژگی‌های رفتاری خاک غیراشباع و تفاوت آن با خاک اشباع را در خود بگنجانند همواره مورد توجه بوده است [۳]. فردلاندر و مورگنشترن [۴] در سال ۱۹۷۷ با استفاده از مکانیک محیط‌های پیوسته چندفازی، حالت تنش در خاک‌های غیراشباع را بررسی کردند. آنها اظهار داشتند که هر دوتایی از سه متغیر حالت ممکن  $\sigma$ ،  $U_a$  و  $U_w$  می‌تواند برای تعریف حالت تنش به کار رود که ترکیبات ممکن به شرح رابطه (۱) است:

$$(1) \quad (U_a - U_w) \text{ و } (\sigma - U_a)$$

$$(U_a - U_w) \text{ و } (\sigma - U_w)$$

$$(\sigma - U_w) \text{ و } (\sigma - U_a)$$

به‌هر حال با چشم‌پوشی از ترکیب انتخاب شده از رابطه (۱)، استفاده از دو متغیر حالت تنش مستقل، امکان تجزیه جزء کرنش به دو جزء مکانیکی و هیدرولیکی را فراهم می‌کند.

انتخاب متغیرهای تنش مناسب برای خاک‌های غیراشباع همواره حائز اهمیت بوده است. انتخاب تنش خالص اگرچه ساده‌ترین و عملی‌ترین انتخاب از لحاظ اثر دادن مسیر تنش است اما زمانی که سعی در مدل کردن آثار پسماند هیدرولیکی داریم، با مشکلاتی مواجه می‌شود [۳]. از سوی دیگر نشان داده شده‌است که استفاده از تنش خالص و مکش در انتقال ساده از حالت اشباع به غیر اشباع، در محدوده مکش-هایی که تمایل به تغییر حجم و یا تغییر درجه اشباع در سراسر حجم نمونه ندارند و اصطلاحاً به مکش‌های بی‌اثر<sup>۱</sup> معروفند، ناموفق عمل می‌کند [۵]. هم‌چنین یکی از اهداف نهایی از مدل‌سازی رفتاری خاک‌ها توسعه روابط تنش-کرنش جزئی<sup>۲</sup> است به طوری که بتوانند در یک روش عددی برای حل مسائل مقدار مرزی پیاده‌سازی شوند. مدل‌هایی که از ترکیب اول استفاده می‌کنند، برای اجرا شدن در کد-های اجزاء محدود موجود برای خاک اشباع، دچار مشکلاتی بودند. زیرا اغلب روابط خاک اشباع در عبارت‌هایی از تنش مؤثر تعریف شده‌اند [۶]. برای غلبه بر این نقایص ضعف، جایگزین کردن تنش خالص با تنش مؤثر پیشنهاد شد که بر این اساس توانایی گذار طبیعی از اشباع جزئی تا اشباع کامل فراهم می‌شود. با عنایت به مزیت‌های استفاده از تنش مؤثر به عنوان متغیر مستقل تنش برای بیان رفتار خاک‌های غیراشباع، از میان روابط مختلف ارائه شده در ادبیات، در

3 Schrefler

4 Aitchison

5 Kohgo

6 Khalili-Khabbaz

7 Dangla-Coussy

1 Null Suction

2 Incremental

خاک‌های خیلی خشک یا خیلی خیس، معادله (۳) مناسب نیست. بنابراین آیتچیسون [۱۴]، بیان مناسبی برای پارامتر تنش مؤثر به صورت زیر ارائه داد:

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{if } Sr = 1 \\ \left(\frac{\alpha}{s}\right) s_e & \text{if } Sr < 1 \end{cases} \quad (4)$$

در این رابطه  $s_e$  مکش ورودی هوا<sup>۲</sup> و  $\alpha$  ضریبی متغیر از ۰/۳ تا ۰/۳۵ است.

مدل‌های رفتاری برای خاک‌ها باید بتوانند رفتار خاک را در تمام محدوده ممکن برای فشار آب و هوای حفره‌ای و مقادیر تنش ارائه دهند. متغیرهای تنش- کرنش به کار رفته در اغلب مدل‌های خاک-های غیر اشباع تنش خالص و مکش است. در مدل‌های اولیه، حالت غیر اشباع فقط در عبارت‌هایی از مکش بیان می‌شد و درجه اشباع از روی مکش محاسبه می‌شد. بنابراین به نظر می‌رسد که چنین مدل‌هایی که در فرمول‌بندی روابط خود تنها از مکش استفاده می‌کنند، کامل نیستند. مدل‌هایی که فقط مکش را به عنوان متغیر غیر اشباع می‌شناسند، در توصیف ویژگی‌های مهمی از رفتار خاک‌های غیر اشباع متفاوت است هم‌چنین سنگ و همکارانش [۱۵] بیان کرده‌اند که استفاده از تنش خالص برای مدل‌سازی خاک غیر اشباع اغلب به مدل‌های ناپوسته در انتقال بین حالت اشباع و غیر اشباع منجر می‌شود. بنابراین دسته دیگری از مدل‌های کشسان-خمیری برای خاک‌های غیر اشباع در عبارت‌هایی از متغیرهای ساختاری که مشخصاً شامل درجه اشباع در تعریف روابط خود می‌شوند، بیان شده‌اند. در این مدل‌ها متغیر تنش به نوعی شکل خاصی از تنش مؤثر بیشاپ به همراه اصلاحاتی است.

هم‌چنین یکی از اهداف نهایی از مدل‌سازی رفتاری خاک‌ها توسعه روابط تنش-کرنش جزئی است به طوری که بتوانند در یک روش عددی برای حل مسائل مقدار مرزی پیاده‌سازی شوند [۱۵]. مدل‌هایی که از ترکیب اول استفاده می‌کنند، برای اجرا شدن در کدهای اجزاء-محدود موجود برای خاک اشباع، دچار مشکلاتی بودند. زیرا اغلب روابط خاک اشباع در عبارت‌هایی از تنش مؤثر تعریف شده‌اند [۱۶]. به این ترتیب در سال‌های اخیر بیشتر پژوهشگران استفاده از ترکیب دوم (تنش مؤثر و مکش) را برای مدل‌های رفتاری خاک غیر اشباع

پیوستگی منطقی در توجیه ویژگی‌های رفتاری خاک ایجاد کرد [۱۰]. بر این اساس بیشاپ [۱۱] در سال ۱۹۵۹، تنش مؤثر در خاک‌های غیر اشباع را مستقیماً به عنوان تابعی از تنش کل و فشار آب حفره‌ای که آثار مکانیکی تغییر در تنش را کنترل می‌کند، تعریف کرد.

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - U_a \delta_{ij}) + \chi (U_a - U_w) \delta_{ij} \quad (2)$$

$\sigma_{ij} - U_a \delta_{ij}$  تنش خالص،  $U_a - U_w$  مکش بافتی و  $\chi$  پارامتر تنش مؤثر بیشاپ است. پس از ارائه رابطه بیشاپ، ابتدا برای اعتبار سنجی این رابطه تلاش‌هایی به صورت تجربی صورت گرفته است. در طول سال‌ها سعی شده است نتایج تلاش‌های مختلف برای تعیین پارامتر تنش مؤثر بیشاپ جمع‌آوری شود. در سال ۱۹۹۱ این نتایج بر پایه مطالعات آزمایشگاهی که با استفاده از دستگاه سه محوری بر روی خاک‌های مختلف صورت گرفت، به وسیله زرهونی<sup>۱</sup> [۱۲] به‌روزرسانی شده که نتایج به صورت گرافیکی در شکل (۱) ارائه شده است.

شکل (۱) پارامتر تنش مؤثر در برابر درجه اشباع برای تعدادی از خاک‌های

مختلف [۱۲]

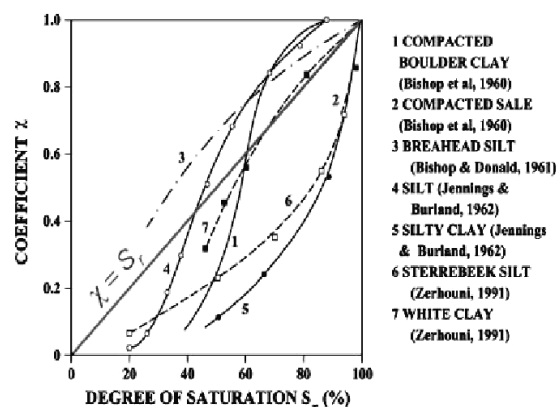


Fig. 1. effective stress parameter versus degree of saturation for different type of soils

با توجه به شکل (۱)، پارامتر  $\chi$  تابعی از تغییرات درجه اشباع است. در سال ۱۹۸۴، شرفلر رابطه (۳) را به عنوان یک رابطه محتمل پیشنهاد کرد [۱۳].

$$\chi = Sr \quad (3)$$

پژوهشگران با قضاوت از روی شکل (۱) چنین استدلال کردند که؛ برای درجه اشباع خارج از محدوده ۲۰ تا ۸۰ درصد، یعنی برای

2 Air entry suction

1 Zerhouni

پیشنهاد کرده‌اند.

با در نظر گرفتن سابقه اثر دوگانه هیدرومکانیکی داخلی برای رفتار غیر اشباع، پژوهشگران برای ایجاد چارچوب تنشی جامع و مناسب، دوباره روی اشکال متحدی از تنش مؤثر نوع بیشاپ که با سایر متغیر-های تنش ترکیب شده باشد، تمرکز کردند. بر این اساس متغیرهای حالت شناخته شده به وسیله‌ی فردلانند و مورگنشترن [۴] می‌توانند به روش‌های مختلفی برای تولید تنش مؤثر با یکدیگر ترکیب شوند و با یک تنش ثانویه ( $\xi$ ) کامل شوند. بیشتر چارچوب‌های تنش برای مدل‌های رفتاری اخیر تحت این گروه از تنش‌های ترکیبی دسته‌بندی شده‌اند.

دسته اول  $C_1$  شامل زوج متغیرهای تنش زیر است:

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma_{net} + \tilde{\mu}(s) \\ \xi = \tilde{\xi}(s, Sr) \end{cases} \quad (5)$$

دسته دوم  $C_2$  شامل زوج متغیرهای تنش زیر است:

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma_{net} + \tilde{\mu}(s, Sr) \\ \xi = \tilde{\xi}(s, Sr) \end{cases} \quad (6)$$

در سال ۱۹۹۳ کوهگو [۱۷]، اولین تعریف از تنش مؤثر دسته اول را ارائه داد. بدین ترتیب اولین تعریف از تنش مؤثر دسته اول چنین بیان می‌شود:

$$\sigma' = \sigma - U_{eq} \quad (7)$$

در این رابطه  $U_{eq}$  فشار منفذی معادل نامیده می‌شود که بر مبنای مطالعات تجربی به صورت رابطه زیر ارائه شده است.

$$U_{eq} = \begin{cases} U_a - s & \text{if } s \leq s_e \\ U_a - (s_e + \frac{s_c - s}{(s - s_e) + a_e}(s - s_e)) & \text{if } s > s_e \end{cases} \quad (8)$$

با دقت در رابطه (۸) می‌توان دید که این رابطه همان تنش مؤثر بیشاپ است که در آن  $\chi = a_e \frac{s_c - s_e}{(s - s_e + a_e)^2}$  است و برای شرایط اشباع  $\chi = 1$  است. برای کامل کردن این نوع چارچوب تنش، یک متغیر تنش ثانوی  $\xi = s^* = s - s_e$  به نام مکش مؤثر تعریف شده است.  $a_e$  پارامتر ماده و  $s_c$  مکش بحرانی و حد مجانب  $U_{eq}$  است. هم‌چنین در این دسته می‌توان به چارچوب ساختاری خلیلی-خیزاز [۱۸] نیز اشاره نمود که عیناً بیان بیشاپ است با تابعی خاص از مکش

برای پارامتر تنش مؤثر به صورت  $\chi = \tilde{\chi}(s)$ . این شکل از ضریب تنش مؤثر بر مبنای آزمایش‌های مقاومت برشی و داده‌های تغییر حجم تعیین شده است. آن‌ها هم‌چنین بیان کردند که تعیین  $\chi$  به صورت تابعی از درجه اشباع با محدودیت‌هایی مواجه است. دلایل آن‌ها برای تمایز قائل شدن بین  $\chi$  و  $Sr$  به شرح زیر است:

۱- به دلیل وجود وابستگی از طریق رابطه ساختاری، تغییر  $Sr$  هم‌زمان بر تنش مؤثر و حجم مایع هر دو اثر می‌گذارد. پس تعیین  $\chi$  با  $Sr$  با استفاده از حجم مایع به عنوان متغیر مستقل ناسازگار است.

۲- در مکش‌های بالا که درجه اشباع ثابت می‌ماند، فرض  $\chi = Sr$  به یک نسبت تناسب بین مکش و مقاومت برشی منجر می‌شود که این مورد در آزمایش‌ها مشاهده نشده است [۱۹] و [۲۰].

بنابراین روابط خود را با منطبق کردن به مدل کم-کلی اصلاح شده چنین بیان کردند:

$$\forall s \geq 0 \quad U_{eq} = -U_a + s\chi \quad (9)$$

$$\chi(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s \leq s_e \\ (\frac{s}{s_e})^{-0.55} & \text{if } s > s_e \end{cases} \quad (10)$$

در یک دهه اخیر بیشتر مدل‌سازی‌های پیشرفته خاک‌های غیر اشباع در چارچوب تنش مؤثر دسته دوم ارائه شده‌اند.

پیشنهاد دیگری وجود دارد که تمایل دارند آثار سطوح مشترک را با تنش مؤثر مکانیکی دربرگیرند که به محتوای متفاوتی برای توابع  $\tilde{\mu}_2(s, Sr)$  در رابطه (۶) در مقایسه با تنش مؤثر کلی بیشاپ منجر می‌شود. در این زمینه می‌توان به کار دانگلا و کوزی [۲۱] اشاره کرد.

و دانگلا کوزی دیدگاهی ترمودینامیکی را بر مبنای تئوری تخلخل پیوسته توسعه دادند. بر این اساس فشار حفره‌ای معادل در محدوده غیر اشباع مطابق رابطه (۱۱) بیان می‌شود. پارامتر  $U$  تغییرات انرژی در سطح مشترک در اشاره به حالت اشباع را نشان می‌دهد و فرض شده که تابعی از تغییر شکل اسکلت و درجه اشباع باشد.

$$U_{eq} = -U_a + sSr + \frac{2}{3}(U) \quad (11)$$

تغییرات انرژی سطوح با توجه به منحنی فشار موئینه چنین محاسبه می‌شود:

است و در واقع موقعیت CSL وابسته به سطح مکش است که این حالت مقایسه را در برخی موارد پیچیده می‌کند. بر این اساس در کار حاضر سعی شده است مجموعه نتایج آزمایشگاهی حاصل از دو دسته آزمایش‌های CD و CW غیر اشباع انجام شده روی خاک معرفی شده در مراجع ۷ و ۸ که در عبارتهایی از متغیرهای کلاسیک تنش خالص و مکش ارائه شده‌اند، در فضای تنش مؤثر جدید در برابر مکش، بازتعریف و ارائه شوند و یکتایی خط حالت بحرانی برای مکش‌های مختلف بررسی شود.

در ادامه روابط تنش مؤثر فوق با استفاده از نتایج تجربی اعتبارسنجی شده‌اند و توانایی روابط مختلف در توصیف حالت بحرانی در خاک غیر اشباع مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### ۴- اعتبارسنجی روابط تنش مؤثر خاک غیر اشباع

در این بخش مجموعه نتایج آزمایشگاهی سه محوری تقارن محوری حاصل از دو دسته آزمایش‌های CD و CW (مقدار آب ثابت) اشباع و غیر اشباع انجام شده روی خاک ماسه لای دار ارائه شده در مراجع ۷ و ۸ برای اعتبارسنجی روابط تنش مؤثر استفاده شده است. با توجه به آنکه برای یک خاک داده شده موقعیت خط حالت بحرانی در فضای  $(q - p')$  مستقل از شرایط مختلف زهکشی و در حالات اشباع و غیر اشباع یکتا فرض می‌شود، پس این خط مبنای اعتبارسنجی روابط تنش مؤثر قرار گرفت. بدین ترتیب که ابتدا با توجه به مقادیر تنش متوسط مؤثر  $p'$  و تنش انحرافی  $q$  به دست آمده از منحنی‌های تنش- کرنش آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های اشباع خط حالت بحرانی ترسیم شده و سپس با داشتن  $q_{cr}$  برای آزمایش‌های غیر اشباع و محاسبه  $p'_{cr}$  بر اساس روابط تنش مؤثر خطوط دیگری مربوط به این روابط در فضای  $(q - p')$  ترسیم و با خط حالت بحرانی مقایسه شده است.

در این پژوهش پنج رابطه تنش مؤثر مربوط به شرفلر، آیتچیسون، خلیلی-خیز، کوهگو و دانگلا-کوزی بررسی شده‌اند. در جدول (۱) مقادیر  $q_{cr}$  و  $p_{cr}$  (تنش متوسط خالص بحرانی) برای هر یک از آزمایش‌ها ارائه شده است. در این جدول اعدادی که بعد از نام آزمایش آمده‌اند به ترتیب مکش اعمالی و تنش محصور کننده در آزمایش است.

$$U(\phi, s) = \int_{S_r}^1 s(\phi, S_r) dS_r \quad (12)$$

در این رابطه  $\phi$  پارامتر تخلخل (لاگرانژی) است.

شکل (۲) منحنی فشار مؤثر و انرژی سطوح مشترک [۲۱]

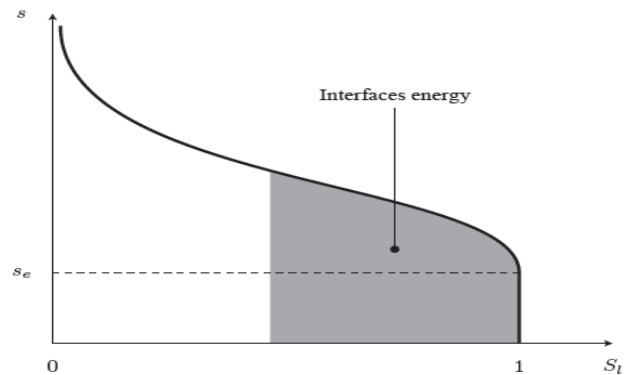


Fig. 2. Capillary pressure curve and energy of interfaces

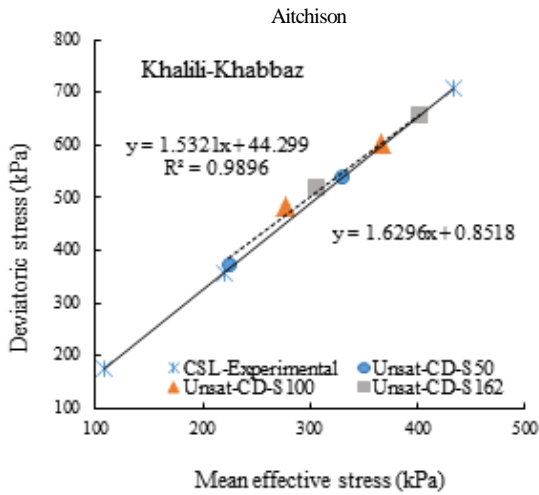
و همچنین فشار حفره‌ای معادل با رابطه (۱۳) قابل بیان است:

$$U_{eq} = \begin{cases} -U_a + s & \text{if } s \leq s_e \\ -U_a + sS_r + \frac{2}{3} \int_{S_r}^1 (sS_r) dS_r & \text{if } s > s_e \end{cases} \quad (13)$$

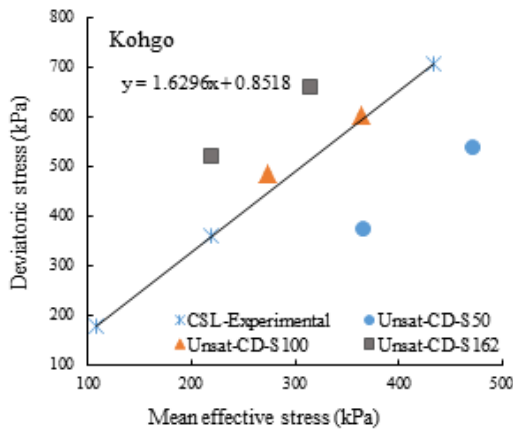
#### ۳- مفهوم حالت بحرانی در خاک غیر اشباع

کاربرد مفهوم حالت بحرانی در مدل‌های رفتاری در خاک‌های غیر اشباع از جمله مباحث علمی مطرح و جدید در حیطه مکانیک خاک غیر اشباع است. بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه مربوط به دو دهه اخیر است. برخلاف حالت اشباع، در خاک‌های غیر اشباع خط حالت بحرانی در فضای  $(q - p_{net})$ ، یکتا نیست و به عواملی همچون دانسیته، سطح مکش بافتی و تنش‌های همه جانبه بستگی دارد [۲۲]. این مطلب مهم باعث می‌شود که مکانیک خاک حالت بحرانی برای خاک‌های غیر اشباع در نمودار تنش انحرافی در مقابل تنش خالص عملاً کاربرد چندانی نداشته باشد. از سوی دیگر در ادبیات خاک غیر اشباع بیشتر مطالعات رفتاری آزمایشگاهی این دسته از خاک‌ها نتایج را در فضای مرسوم  $(q - p_{net})$  گزارش کرده‌اند. در این فضا، تعدد خطوط حالت بحرانی بیان می‌کند که تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی ظاهری در سطوح مختلف مکش متفاوت

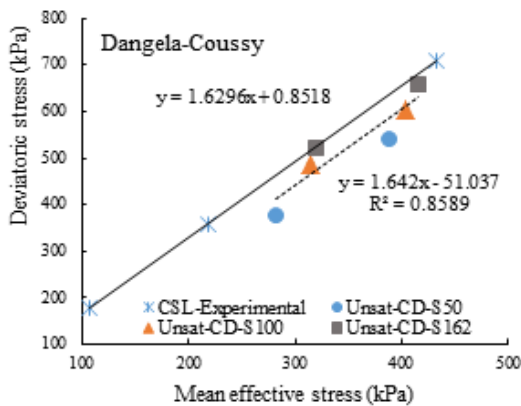
ب) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه



پ) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Khalili-Khabbaz



ت) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Kohgo



ث) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Dangela-Coussy

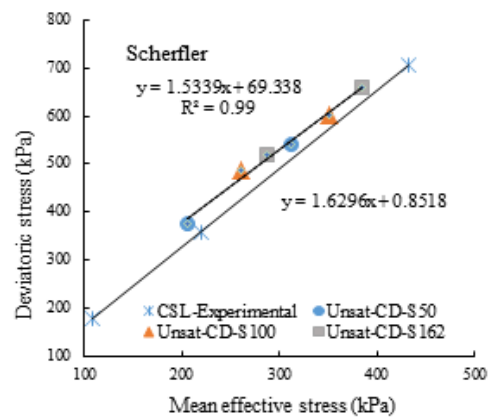
نتایج اعتبارسنجی‌ها در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده‌اند.

Test	$q_{cr}$ (kPa)	$P_{cr}$ (kPa)
CD-S 50-50	375.5	175.1
CD-S 50-100	540	280
CD-S 100-50	485.2	211.75
CD-S 100-100	603	301
CD-S 162-50	520.3	223.43
CD-S 162-100	658	319.33
CW-S 50-50	236	128
CW-S 50-100	367	222.3
CW-S 100-50	277	142.3
CW-S 100-100	410.5	237.3
CW-S 162-50	315	155
CW-S 162-100	420	240

جدول (۱) مقادیر بحرانی برای آزمایش‌های غیراشباع

Table (1) Stresses at critical states for unsaturated tests

شکل (۳) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک بر اساس نتایج آزمایش‌های CD غیر اشباع در حالت بحرانی در فضای  $(q - p')$



الف) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Scherfler

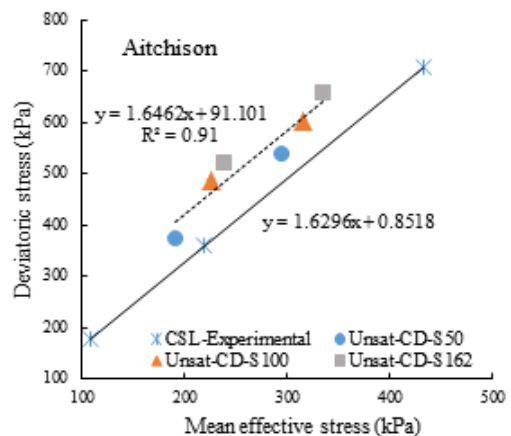
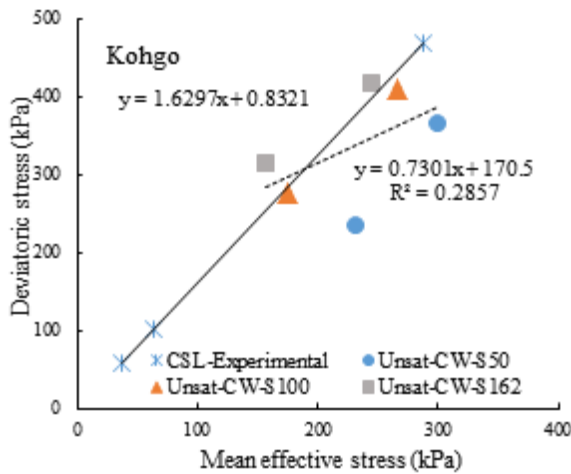
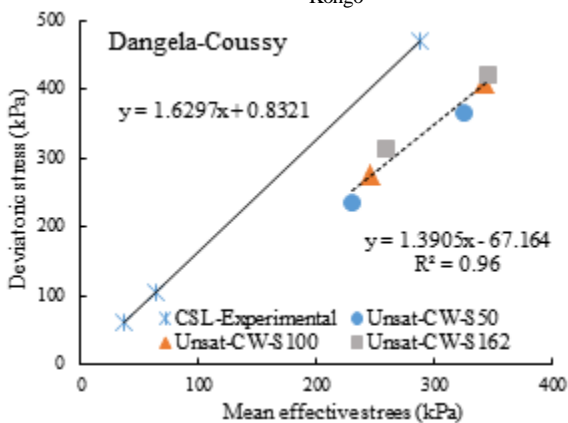


Fig. 3: Prediction of drained shear strength based on different effective stress relations in comparison with experimental results.



ت) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Kohgo

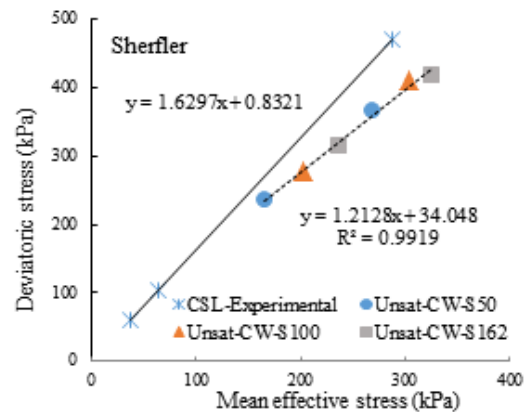


ث) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Dangla-Coussy

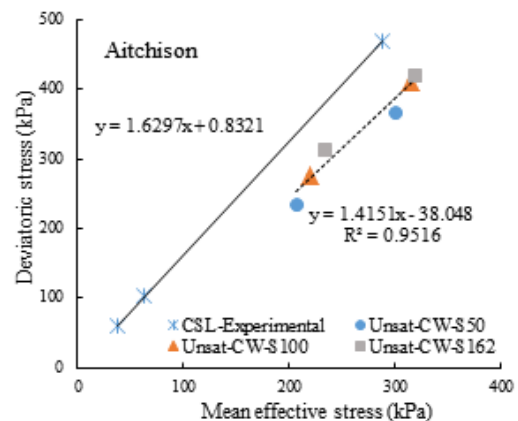
Fig. 4: Prediction of undrained (CW) shear strength, based on different effective stress relations in comparison with experimental results.

در شکل (۳) نتایج حاصل از روابط تنش مؤثر در مقایسه با خط حالت بحرانی حاصل از نتایج آزمایش‌های اشباع در شرایط CD نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود روابط شرفر و آیتچیسون مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی را بیش از واقعیت گزارش می‌کنند. این در حالی است که رابطه دانگلا-کوزی مقاومت کمتری را نسبت به واقعیت پیش‌بینی می‌کند. با این همه روابط برخلاف رابطه کوهگو خطی بودن ارتباط  $p'_{cr}$  و  $q_{cr}$  به شکل مناسبی ارائه می‌کند. در این میان رابطه خلیلی‌سباز بهترین نتایج را در هماهنگی با نتایج تجربی به دست می‌دهد. در جدول (۲) تغییرات شیب خطوط نسبت به CSL اشباع برای مقایسه کمی نتایج حاصل از روابط مختلف ارائه شده‌است. در شکل (۴) اعتبار سنجی روابط تنش مؤثر بر اساس آزمایش‌های با حجم آب ثابت (CW) ارائه شده‌اند. در

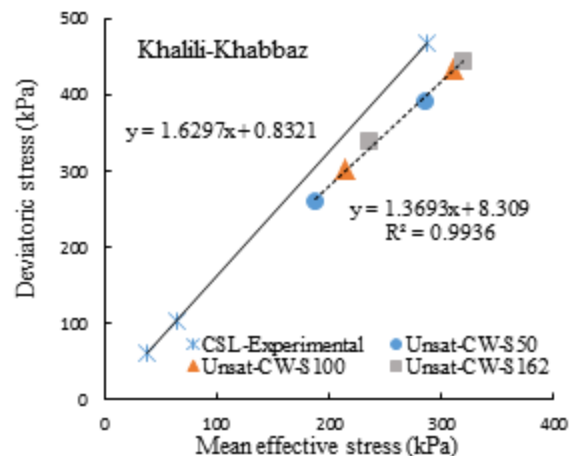
شکل (۴) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک بر اساس نتایج آزمایش‌های CW غیر اشباع در حالت بحرانی در فضای  $(q - p')$



الف) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Schrefler



ب) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Aitchison



پ) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی بر اساس رابطه Khalili-Khabbaz

این نوع آزمایش برخلاف آزمایش زهکشی شده مکش بافتی در مدت برش تغییر می‌کند و به همین دلیل پیش‌بینی رفتار خاک در این شرایط دارای پیچیدگی بیشتری است. لازم به گفتن است که در عمل رفتار خاک غیر اشباع در طرح سازه‌های ژئوتکنیکی منطبق با این شرایط است. مطابق آنچه در شکل (۴) به نمایش گذاشته شده است همه روابط تنش مؤثر، ضمن آنکه مقاومت برشی کمتری در محدوده تنش متوسط مؤثر بیشتر از حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال، نسبت به واقعیت گزارش می‌کنند، تغییرات قابل توجهی در شیب خطوط نسبت به خط حالت بحرانی را نیز به نمایش می‌گذارند (جدول ۲). با این همه رابطه خلیلی-خباز بهترین نتیجه را ارائه داده و پراکندگی در رابطه کوهگو قابل توجه است. در (شکل‌های ۵ و ۶) نتایج حاصل از این روابط به ترتیب در شرایط CD و CW با هم مقایسه شده‌اند.

این نوع آزمایش برخلاف آزمایش زهکشی شده مکش بافتی در مدت برش تغییر می‌کند و به همین دلیل پیش‌بینی رفتار خاک در این شرایط دارای پیچیدگی بیشتری است. لازم به گفتن است که در عمل رفتار خاک غیر اشباع در طرح سازه‌های ژئوتکنیکی منطبق با این شرایط است. مطابق آنچه در شکل (۴) به نمایش گذاشته شده است همه روابط تنش مؤثر، ضمن آنکه مقاومت برشی کمتری در محدوده تنش متوسط مؤثر بیشتر از حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال، نسبت به واقعیت گزارش می‌کنند، تغییرات قابل توجهی در شیب خطوط نسبت به خط حالت بحرانی را نیز به نمایش می‌گذارند (جدول ۲). با این همه رابطه خلیلی-خباز بهترین نتیجه را ارائه داده و پراکندگی در رابطه کوهگو قابل توجه است. در (شکل‌های ۵ و ۶) نتایج حاصل از این روابط به ترتیب در شرایط CD و CW با هم مقایسه شده‌اند.

شکل (۶) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی براساس روابط مختلف تنش مؤثر برای آزمایش CW

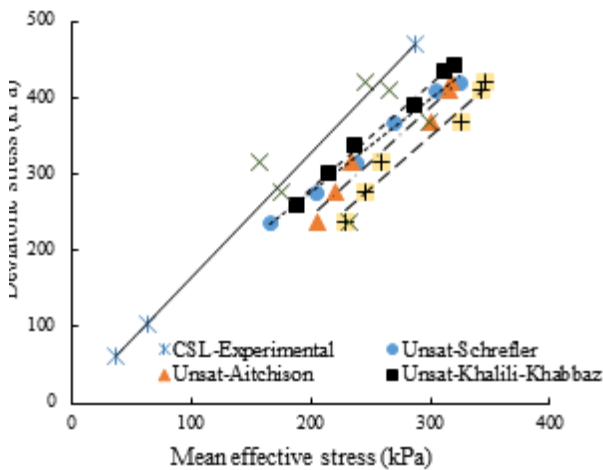


Fig. 6. Comparing different effective stress relationships in estimating drained shear strength of unsaturated soil.

شکل (۵) پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در حالت بحرانی براساس روابط مختلف تنش مؤثر برای آزمایش CD

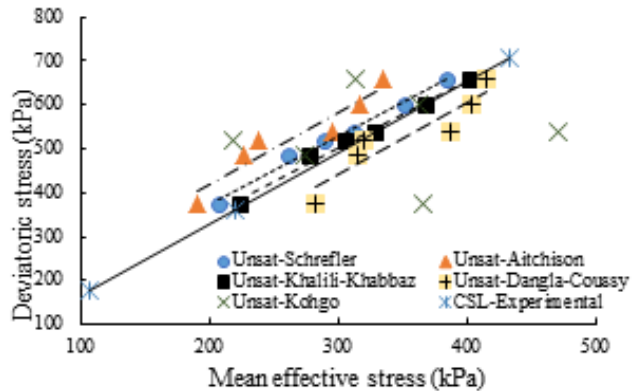


Fig. 5. Comparing different effective stress relationships in estimating drained shear strength of unsaturated soil

## ۵- نتیجه‌گیری

در ادبیات خاک غیراشباع انتخاب متغیرهای تنش مناسب همواره مورد بحث بوده‌است. در حال حاضر، متغیرهای تنش مؤثر و مکش در مقایسه با تنش خالص و مکش بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و در سطح وسیعی استفاده شده‌اند در ارائه مدل‌های رفتاری برای خاک‌های غیر اشباع بوده‌است. به جهت مدل کردن توأم هر دو رفتار مکانیکی و هیدرولیکی، انتخاب تنش مؤثر به صورت تابعی که هم‌زمان آثار مکش و درجه اشباع را در نظر بگیرد، اجتناب ناپذیر است. اهمیت تنش مؤثر در خاک غیر اشباع منجر به ارائه روابط مختلف شده‌است. با توجه به تنوع روابط، اعتبار سنجی آنها براساس نتایج آزمایش‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس در این کار، پس از بررسی اصل تنش مؤثر برای این حالت از خاک، اعتبار برخی از برجسته‌ترین این روابط از جمله روابط شرفلر، آیتچیسون، خلیلی-خباز، کوهگو و دانگلا-کوزی در چارچوب مکانیک حالت بحرانی با استفاده از نتایج تجربی موجود در ادبیات مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول (۲) مقادیر بحرانی برای آزمایش‌های غیراشباع

Type of test and equation	Unsaturated CSL equation	( $\Delta M/M$ )
CD-R1	$q = 1.5339M + 69.338$	-0.08
CD-R2	$q = 1.6296M + 91.101$	+0.01
CD-R3	$q = 1.5321M + 44.299$	-0.06
CD-R4	-	-
CD-R5	$q = 1.642M - 51.037$	+0.15
CW-R1	$q = 1.2128M + 34.048$	+0.26
CW-R2	$q = 1.4151M - 38.048$	-0.14
CW-R3	$q = 1.3693M + 8.309$	-0.16
CW-R4	$q = 0.7301M + 170.5$	-0.66
CW-R5	$q = 1.3905M - 67.164$	-0.15

Table (2) Critical states lines for unsaturated tests

از این اشکال چنین بر می‌آید که روابط تنش مؤثر در شرایط زهکشی شده که در آن مکش بافتی طی برش ثابت است نتایج بهتری نسبت به



- [9]. Laloui; Lyesse; and Nuth; Mathieu; "On the Use of the Generalized Effective Stress in the Constitutive Modelling of Unsaturated Soils"; *Computers and Geotechnics*; 36.1, (2009), 20-23.
- [10]. Gen, Antonio; Sánchez; Marcelo; and Sheng; Daichao; "On Constitutive Modelling of Unsaturated Soils"; *Acta Geotechnica*; 1.3, (2006), 137-47.
- [11] Bishop; AW; "The Effective Stress Principle"; *Teknisk Ukeblad*; 39, (1959), 859-63.
- [12]. Zerhouni; Moulay Idriss; "Rôle De La Pression Interstielle Négative Dans Le Comportement Des Sols. Application Au Calcul Des Routes-Thèse."; (1991).
- [13]. Schrefler; B. A; "The finite element method in soil consolidation (with applications to surface subsidence)." Ph.D. thesis; University College of Swansea, (1984).
- [14]. Aitchison; GD; "Relationships of Moisture Stress and Effective Stress Functions in Unsaturated Soils"; *Golden Jubilee of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering; Commemorative Volume 20*; (1985).
- [15]. Sheng; Daichao; *et al.* "Unsaturated Soils: From Constitutive Modelling to Numerical Algorithms"; *Computers and Geotechnics*; 35, 6, (2008), 810-24.
- [16]. Sun; De'an; Sheng; Daichao and Sloan; Scott W; "Elastoplastic Modelling of Hydraulic and Stress-Strain Behaviour of Unsaturated Soils"; *Mechanics of Materials*; 39, 3, (2007), 212-21.
- [17]. Kohgo; Yugi; Nakano; Masashi; Miyazaki; Tsuyushi; "Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils. "; *Soils and Foundations*; 33(4), (1993), 49-63.
- [18]. Khalili; N; and Khabbaz; MH; "A Unique Relationship of Chi for the Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soils"; *Geotechnique*; 48.5, (1998).
- [19]. Li; XS; "Thermodynamics-Based Constitutive Framework for Unsaturated Soils. 1: Theory"; *Geotechnique*; 57.5, (2007), 411-22.
- [20]. Loret; Benjamin; and Khalili; Nasser; "An Effective Stress Elastic-Plastic Model for Unsaturated Porous Media"; *Mechanics of Materials* 34.2, (2002), 97-116.
- [21]. Dangla; P; Coussy; O; " Approche énergétique du comportement des sols non saturés. "; In *Mécanique des sols nonsaturés*, Coussy O, Fleureau J-M (eds); *Hermes Science Publications*, Paris, (2002)
- [22]. Khalili; N; Geiser; F and Blight; GE; "Effective Stress in Unsaturated Soils: Review with New Evidence"; *International Journal of Geomechanics*; 4.2, (2004), 115-26.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روابط تنش موثر جواب‌های پراکنده‌ای نسبت به هم ارائه می‌دهند. در شرایط زهکشی شده روابط شرفلر و آیتچیسون مقاومت برشی را در حالت بحرانی بیشتر از واقعیت نشان دادند. هرچند که شیب خط تغییرات تنش انحرافی برحسب تنش متوسط موثر در حالت بحرانی را مطابق با واقعیت گزارش می‌کنند که این خود منجر به ظهور یک عرض از مبدا در فضای  $(q - p')$  می‌شود که واقعیت فیزیکی ندارد. رابطه دانگلا-کوزی برخلاف دو رابطه فوق مقاومت کمتری را گزارش می‌کند ولی از حیث میزان اختلاف در شرایط بهتری است. رابطه خلیلی - خباز نسبت به سایرین بهترین هماهنگی را با نتایج تجربی را از خود نشان داد.

## References

## ۶- مراجع

- [1]. Sheng; Daichao; "Constitutive Modelling of Unsaturated Soils: Discussion of Fundamental Principles."; *Unsaturated soils*; 1, (2011), 91-112.
- [2] Uchaipichat; Anuchit "Effective stress parameter of unsaturated granular soils"; *International Conference on Mechanical, Automobile and Robotics Engineering (ICMAR'2011)*.
- [3]. Russell; AR; and Khalili; N; "A Unified Bounding Surface Plasticity Model for Unsaturated Soils"; *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*; 30.3, (2006), 181-212.
- [4]. Fredlund; Delwyn; G; and Morgenstern; Norbert R; "Stress State Variables for Unsaturated Soils"; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; 103, ASCE 12919 (1977).
- [5]. Geiser; F; Laloui; L; and Vulliet; L; "Modelling the Behaviour of Unsaturated Silt"; *Balkema*, 2000.
- [6]. Sun; De'an; Sheng; Daichao; and Sloan; Scott W; "Elastoplastic Modelling of Hydraulic and Stress-Strain Behaviour of Unsaturated Soils"; *Mechanics of Materials*; 39.3, (2007), 212-21.
- [7]. Maleki; Mohammad; and Bayat; Meysam; "Experimental Evaluation of Mechanical Behavior of Unsaturated Silty Sand under Constant Water Content Condition"; *Engineering Geology*; 14, (2012), 45-56.
- [8]. Maleki; Mohammad; Bayat; Maysam; and Shahi Karjani; Majid; "Evaluation of unsaturated soil behavior based on consolidated-drained and constant water content tests results."; *9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan, Iran, (2012).

# Validation of the effective stress relations in the laboratory stress paths for unsaturated soils regarding the critical state of Soil Mechanics

Mohammad Maleki<sup>1</sup>, Elham Jadidi<sup>2</sup>

1- Associate Prof. of Geotechnical Engineering., Faculty of Eng., Bu-Ali sina University

2- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Eng., Bu-Ali sina University

maleki@basu.ac.ir

## Abstract:

An unsaturated soil is not a special type of soil, rather a state of the soil. All soils can be partially saturated with water. The unsaturated soils are often encountered in civil engineering practice, such as compaction works in construction of roads, dams and other types of embankment. Performing a design process in geotechnical engineering, regardless of the unsaturated soil condition, is simple but can make the increase in costs associated with construction. Moreover, the retaining structures designed with the assumption of completely dry soil condition, particularly for granular soils, may encounter a reduction in factor of safety upon wetting after end of construction. Also several researchers investigate the variation of the shear strength of unsaturated soils with matrix suction which is defined as the difference between pore air pressure and pore water pressure. Stress-strain relation is more complex in case of the unsaturated soil. This is also influenced by many factors including externally applied stresses, soil type, structure, density, and suction. Therefore, constitutive models for soils should ideally represent the soil behavior over entire ranges of possible pore pressure and stress values. In the literature, there are different approaches differing upon the choice of the set of suitable variables describing the material behavior. This choice is a key point in unsaturated soils modeling. Possible pairs of suitable stress variables for use in unsaturated soil mechanics presented by Fredlund and Morgenstern (1977) with Three combinations Consist of  $(\sigma - U_a)$  and  $(U_a - U_w)$ ,  $(\sigma - U_w)$  and  $(U_a - U_w)$ ,  $(\sigma - U_w)$  and  $(\sigma - U_a)$ . The stress-state variables employed in early models are the net stress and the suction. It is the simplest and most practical choice in terms of stress path representation, but, it poses difficulties when trying to incorporate hydraulic hysteresis effects. This combination could fail to provide a straightforward transition between saturated and unsaturated states, i.e. for a null suction. On the other hand, Terzaghi's effective stress cannot be exactly recovered. These stress variables are also difficult to implement in existing finite element codes for saturated soils because most relations for saturated soil are described in term of effective stress. The effective stress principle is probably the single most fundamental contribution in the field of soil mechanics. On the other hand, it is true to say that the principle of effective stress lies at the foundation of most modern soil mechanics theory and practice. Therefore, selection of appropriate stress variables for unsaturated soils has often been an intensively debated issue, often in connection with the possibility of defining an effective stress measure. So far, many efforts have been made for development of effective stress of unsaturated soils in the literature. This paper presents a comparison between the values of effective stress parameter in unsaturated granular soils obtained from relations proposed by Schrefler, Aitchison, Kohgo, Khalili-Khabbaz and Dangla-Coussy, regarding the critical state concept. The principle is to compare experimental data obtained of both consolidated drained and constant water content tests in conventional stress-strain coordinates, stress variables being usually net stress and suction, into new effective stress coordinates. The critical state lines (CSL) at different suction values tend to converge remarkably towards a unique saturated line in the deviatoric stress versus mean effective stress coordinates. Therefore since critical state lines is presented independent of suction, comparison of soil properties in many cases becomes easier. The comparison results show that effective stress values determined from the relation proposed by Khalili-Khabbaz gives good agreement with the values from the both type test results.

**Keywords:** Effective stress, unsaturated soil, critical state line, validation, independent stress variables