

## بررسی روند تغییر رطوبت و حجم خاک سیلتی غیراشباع در حین تحکیم

مهرداد مقدس<sup>۱\*</sup>، علی رئیس استبرق<sup>۲</sup>

دانشجوی دکتری، سازه های آبی گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۴/۲۷)

### چکیده

در این پژوهش تغییرات حجم و رطوبت یک خاک سیلتی غیراشباع تحت مکش های مختلف از طریق انجام آزمایش تحکیم در دستگاه سه محوری مخصوص خاک های غیراشباع، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها روی نمونه های خاک سیلتی تهیه شده از روش رسوب گذاری در یک دستگاه سه محوری اصلاح شده (دستگاه سه محوری با محفظه دوجداره) تحت پنج مکش مختلف در بازه ۰ تا ۳۰۰ کیلو پاسکال انجام شدند. برای ایجاد مکش مورد نظر در نمونه از روش انتقال محوری استفاده شد و بارگذاری نمونه تحت مکش ثابت از روش بارگذاری تدریجی صورت گرفت. نتایج نشان می دهد فشار پیش تحکیمی با افزایش مکش افزایش می یابد. علاوه بر آن با توجه به نتایج حاصله، ایجاد منحنی تسلیم (LC) در صفحه تنش- مکش امکان پذیر است. همچنین بررسی تغییرات شیب و عرض از مبدأ منحنی های تحکیم نشان دادند که تغییرات رطوبت و حجم نمونه خاک در خاک های غیراشباع تابع تغییرات مکش خاک می باشد.

**واژه های کلیدی:** تحکیم، خاک غیراشباع، رطوبت خاک، فشار پیش تحکیمی، مکش.

### مقدمه

خاک های غیراشباع از سه فاز جامد، مایع و هوا تشکیل شده اند. وجود فاز هوا موجب می گردد که خواص مکانیکی آن ها با خاک های اشباع که متشکل از دو فاز جامد و مایع می باشند یکسان نباشد. فاز هوا در خاک های غیراشباع موجب پیدایش مکش ماتریک در آن ها می گردد. مکش ماتریک با رابطه ۱ بیان می شود.

$$s = u_a - u_w \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه  $s$  مکش ماتریک و  $u_a, u_w$  به ترتیب فشار آب و فشار هوای بین ذرات جامد توده خاک می باشد. Bishop (1959) یک رابطه واحدی را برای بیان خواص این خاک ها ارائه نمود که در رابطه ۲ نشان داده شده است.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + x(u_a - u_w) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در رابطه فوق،  $\sigma, \sigma'$  به ترتیب تنش کل و تنش مؤثر وارد بر توده خاک غیراشباع و  $x$  پارامتری است که به درجه اشباع خاک بستگی دارد و مقدار آن برای خاک های اشباع یک و برای خاک های خشک صفر است.

لیکن تحقیقات بعدی به وسیله محققین دیگر (Jennings and Burland, 1962; Wheeler and Karube, 1995) داد

که فرمول ارائه شده به وسیله Bishop (1959) کافی نیست. لذا آن ها با توجه به تحقیقات انجام شده به این نتیجه رسیدند که بیان خواص مکانیکی این خاک ها به وسیله دو رابطه  $\sigma' = \sigma - u_a$  و  $s = u_a - u_w$  امکان پذیر است.

Alonso *et al* (1990) با توجه به نتایج آزمایش های انجام شده روی نمونه های مختلف خاک غیراشباع یک مدل الاستوپلاستیک در فضای  $q-p^s-s$  (تنش انحرافی- تنش خالص و مکش) برای بررسی خواص مکانیکی این خاک ها ارائه نمودند که  $q$  و  $p^s$  عبارتند از:

(رابطه ۳)

$$(q = \sigma_1 - \sigma_3), (p' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} - u_w), (s = u_a - u_w)$$

که در رابطه ۳،  $q$  و  $p'$  به ترتیب تنش انحرافی و میانگین تنش خالص می باشند همچنین  $\sigma_1, \sigma_3$  به ترتیب فشار همه جانبه محوری و جانبی می باشند. مدل ارائه شده در حالت دوبعدی وقتی تنش ها در حالت ایزوتروپیک هستند ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) به منحنی تبدیل می گردد که تحت عنوان منحنی تسلیم  $LC^1$  مشهور است.

به طور کلی مکش ماتریک ( $s$ ) یک نقش اساسی را در فهم رفتار خاک های غیراشباع دارد (Estabragh and Javadi, 2014).

$$\omega = N_w(s) - \lambda_w(s) \ln \frac{P'}{P_c} \quad (\text{رابطه ۵})$$

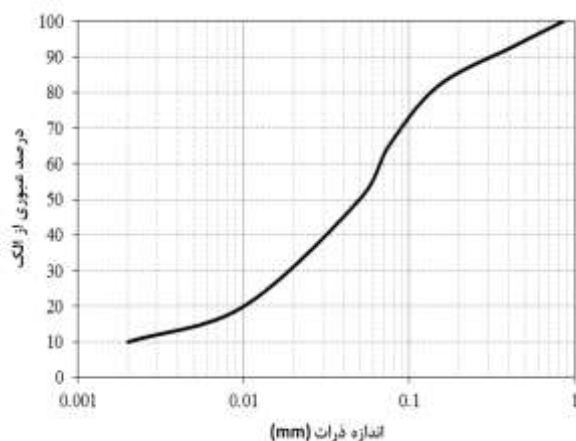
در رابطه فوق  $\omega$  درصد رطوبت خاک و  $N_w(s)$  و  $\lambda_w(s)$  به ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط تحکیم نرمال می-باشند.

در پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون بررسی‌ها روی نمونه-های تهیه‌شده با مکش اولیه نامعین صورت گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی چگونگی تغییرات میزان رطوبت و میزان حجم یک خاک غیراشباع از مرحله رساندن خاک اشباع به یک مکش مشخص و سپس اعمال فشار به آن در حین عمل تحکیم و بررسی خصوصیات تحکیم خاک سیلتی غیراشباع می‌باشد. این عمل با پنج مکش مختلف انجام گرفت، به طوری که آزمایش‌ها روی نمونه‌های تهیه‌شده از روش رسوب‌گذاری (در حالت تقریباً اشباع) تحت مکش‌های مختلف (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال) صورت پذیرفت و سپس نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### خاک مورد استفاده

برای انجام تحقیق از یک خاک سیلتی استفاده شد که منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۱) نشان داده شده است. این خاک شامل ۳۵ درصد ماسه، ۵۳ درصد سیلت و ۱۲ درصد رس بود که آزمایش‌های شناسایی فیزیکی بر روی آن مطابق استانداردهای ASTM D422، ASTM D4318، ASTM D854 و ASTM D698 انجام شدند و نتایج آن در جدول (۱) مشاهده می‌شوند. بر اساس سامانه طبقه‌بندی متحد، این خاک در گروه ML قرار می‌گیرد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده

تحکیم در خاک‌های غیراشباع نیز مانند خاک‌های اشباع با عمل بارگذاری امکان‌پذیر است به طوری که می‌توان گفت تحکیم در خاک‌های غیراشباع با اعمال بار در اثر خروج تدریجی آب و هوای بین ذرات صورت می‌گیرد و پس از آن بار وارد به ذرات جامد خاک منتقل می‌گردد (Fredlund and Rhardjo, 2012). مطالعه تحکیم پذیری خاک‌های غیراشباع در آزمایشگاه معمولاً تحت مکش ثابت انجام می‌شود به طوری که مکش را در طول بارگذاری ثابت نگه‌داشته و تحکیم نمونه به طور کامل انجام می‌شود.

حجم ویژه یک خاک  $(v = 1 + e)$  در حین بارگذاری در شرایط مکش ثابت تغییر می‌کند. محققین بسیاری از قبیل Alonso *et al.* (1990); Cui and Delage (1996); Estabragh *et al.* (2004); Thu *et al.* (2007); Estabragh and Javadi (2014a) به بررسی اثر فشار پیش تحکیمی خاک و شیب خط تحکیم نرمال در حین آزمایش تحکیم تحت مکش-های مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش مکش، تنش تسلیم یا فشار پیش تحکیمی افزایش و شیب منحنی تحکیم نرمال، کاهش می‌یابد. در مقابل برخی محققین مانند Zhang and Lytton (2009a,b) و Zhang *et al.* (2010) در تحقیقات خود به نتیجه عکس آن رسیدند. Estabragh and Javadi (2014b) به بررسی اثر فشار پیش تحکیمی و مکش بر خصوصیات تحکیمی یک خاک سیلتی غیراشباع پرداختند و اثر آن را بر شکل سطح روسکو و هورسلو در خاک‌های غیراشباع بررسی کردند و مرز حالت الاستیک و پلاستیک خاک را در سطح هورسلو به عنوان یک سطح مرزی برای نمونه‌های غیراشباع پیش تحکیم یافته و سطح روسکو به عنوان یک سطح مرزی برای نمونه‌های عادی تحکیم یافته در مکش‌های مختلف نشان دادند. Wheeler and Sivakumar (1995) نشان دادند که شیب خط تحکیم نرمال با افزایش مکش افزایش می‌یابد و رابطه (۴) را برای خط تحکیم نرمال ارائه نمودند.

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{P'}{P_c} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه فوق  $v$  حجم ویژه،  $P_c$  فشار مرجع،  $P'$  میانگین تنش خالص و  $N(s)$  و  $\lambda(s)$  به ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط تحکیم نرمال می‌باشند.

در این پژوهش علاوه بر بررسی تغییر حجم خاک سیلتی، به بررسی تغییرات رطوبت خاک نیز حین تحکیم پرداخته شده و مشابه رابطه (۴)، از رابطه (۵) به منظور بررسی تغییرات رطوبت خاک در حین تحکیم استفاده شده است.

به این ترتیب آب به تدریج از بالا و پایین نمونه خارج شده و نمونه خاک پس از رسوب گذاری، به حالت تقریباً اشباع و با تراکم مورد نظر تهیه می‌شد. سپس با استفاده از قالب تهیه نمونه (قالب مخصوص دستگاه سه محوری) به ابعاد نمونه مورد نظر با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر اقدام به اخذ نمونه از قالب اصلی گردید. با وزن کردن نمونه‌ها اطمینان حاصل می‌شد که وزن نمونه‌ها، شرایط تراکمی و شرایط رطوبتی آن‌ها یکسان است.

#### دستگاه مورد استفاده

در مطالعات آزمایشگاهی خاک‌های غیراشباع یکی از مهمترین مسائل محدودکننده، مسئله کنترل و ایجاد مکش در نمونه خاک است. در این پژوهش از روش انتقال محور به منظور ایجاد و کنترل مکش در نمونه خاک استفاده شده است به طوری که با اعمال فشار آب و هوا به طور جداگانه به نمونه خاک می‌توان به مکش مورد نظر نائل شد. محققین بسیاری از این روش برای ایجاد مکش دلخواه در نمونه خاک استفاده نموده‌اند (Fredlund and Murgernstern, 1977; Sharma, 1998; Sivakumar, 1993)

آزمایش‌ها در یک دستگاه سه محوری دوجداره مخصوص خاک‌های غیراشباع انجام شدند. این دستگاه مشابه دستگاه سلول دوجداره مورد استفاده توسط Wheeler and Sivakumar (1995) بوده و قابلیت اندازه‌گیری تغییر حجم نمونه را با استفاده از تغییر حجم آب سلول داخلی دارد. تصویر شماتیک دستگاه مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. دستگاه متشکل از یک سلول داخلی و یک سلول خارجی به شکل مجزا بوده که به منظور جلوگیری از انبساط در سلول داخلی فشار یکسانی به هر دو سلول وارد می‌شد. با اندازه‌گیری تغییر حجم آب ورودی به سلول داخلی و یا تغییر حجم خروجی از سلول داخلی، تغییر حجم نمونه اندازه‌گیری می‌شد. فشار آب منفذی ( $u_w$ ) از طریق سنگ متخلخل اشباع با عدد ورود هوای ۵ بار موجود در کف نمونه، به نمونه اعمال و اندازه‌گیری می‌شد و فشار هوای منفذی ( $u_a$ ) از بالای نمونه و از طریق یک سنگ متخلخل با نقطه ورود هوای کم به نمونه اعمال می‌شد تغییر حجم نمونه خاک نیز با اندازه‌گیری میزان تغییر حجم آب سلول داخلی توسط یک دستگاه تغییر حجم سنج اندازه‌گیری و ثبت می‌شد که با استفاده از داده‌های تغییر حجم نمونه محاسبه تغییرات نسبت تخلخل و حجم ویژه خاک امکان پذیر می‌شد. همچنین میزان آب ورودی به نمونه خاک و یا خروجی از نمونه خاک توسط یک دستگاه مجهز به حسگر اندازه‌گیری می‌شد که توسط آن تغییرات آب ورودی و خروجی به نمونه قابل اندازه-

جدول ۱- خواص فیزیکی خاک مورد استفاده

|  |      |
|--|------|
| حد روانی (I <sub>p</sub> )               | ۳۴   |
| حد خمیری (I <sub>L</sub> )               | ۲۸   |
| شاخص خمیری (I <sub>p</sub> )             | ۶    |
| وزن مخصوص دانه‌های جامد (Gs)             | ۲/۶۵ |
| وزن واحد خشک بیشینه (kN/m <sup>3</sup> ) | ۱۷/۵ |
| رطوبت بهینه (I <sub>p</sub> )            | ۱۶   |
| دانسیته نسبی (I <sub>p</sub> )           | ۹۱   |

#### تهیه نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌ها از سه روش تهیه نمونه دست‌نخورده، تهیه نمونه به روش تراکم استاتیکی و تهیه نمونه به روش رسوب‌گذاری<sup>۲</sup> می‌توان استفاده نمود. به دلیل اینکه نمونه‌های مورد استفاده بایستی همگن و ساخت آن‌ها با شرایط یکسان تکرارپذیر باشد از روش اول نمی‌توان استفاده کرد. همچنین به دلیل اینکه در طبیعت و در شرایط واقعی نمونه خاک در اثر رسوب‌گذاری ایجاد می‌شود روش رسوب‌گذاری نسبت به روش تراکم استاتیکی به شرایط طبیعی نزدیک‌تر است. همچنین در روش تراکم استاتیکی وقتی که نمونه خاک به منظور ایجاد مکش مورد نظر در دستگاه قرار داده می‌شود اگر مکش مورد نظر کمتر از مکش اولیه نمونه باشد نمونه ریزش<sup>۳</sup> رخ می‌دهد که موجب سخت‌شدگی شده و در نتایج تأثیر می‌گذارد. لذا برای جلوگیری از این پدیده، از روش رسوب‌گذاری استفاده شد که توسط محققینی مانند Andersonland and Khattak, 1979; Marto, 1996; Estabragh et al, 2011 نیز استفاده شده است.

لذا در این پژوهش برای تهیه نمونه‌ها، از روش رسوب‌گذاری استفاده شد. بدین ترتیب که مقداری از خاک با رطوبت دو برابر حد روانی، مرطوب شده و پس از آن عمل اختلاط با همزن دستی به مدت حدود دو ساعت انجام شد و پس از حصول اطمینان از یکنواختی آن، مخلوط تهیه‌شده داخل یک قالب استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ریخته شد، در پایین نمونه و زیر مخلوط خاک و آب یک غشاء نیمه‌تراوا و سپس مقداری شن برای زهکشی آب قرار داده شد تا خروج آب از نمونه و زهکشی آن به سهولت انجام شود سپس نمونه خاک از بالا با یک غشاء نیمه‌تراوا محصور شده و با استفاده از دستگاه جک هیدرولیکی به مدت ۵ روز تحت سربار افزایشی تا میزان حداکثر ۱۱۰ کیلوپاسکال قرار داده شد.

2. Slurry Method  
3. Collapse

گیری بود.

#### روش نصب نمونه

پس از تهیه نمونه خاک، نمونه داخل غشاء مخصوص آزمایش سه محوری قرار داده شده و روی سنگ متخلخل با عدد ورود هوای بالا قرار داده می‌شود. لازم به ذکر است جهت اعمال بهتر فشار آب منفذی به نمونه با قرار دادن دو سیم فلزی کوچک در زیر نمونه خاک از تماس کامل نمونه خاک و سنگ متخلخل زیرین جلوگیری می‌شود. همچنین سنگ متخلخل بالای نمونه نیز با عدد ورود هوای کم به منظور اعمال فشار هوای منفذی به نمونه خاک، در بالای نمونه قرار داده شد سپس سلول‌های داخلی و خارجی مطابق شکل (۲) در اطراف نمونه قرار داده شده و پس از پر شدن از آب و هواگیری آن‌ها، اقدام به شروع آزمایش‌ها گردید.

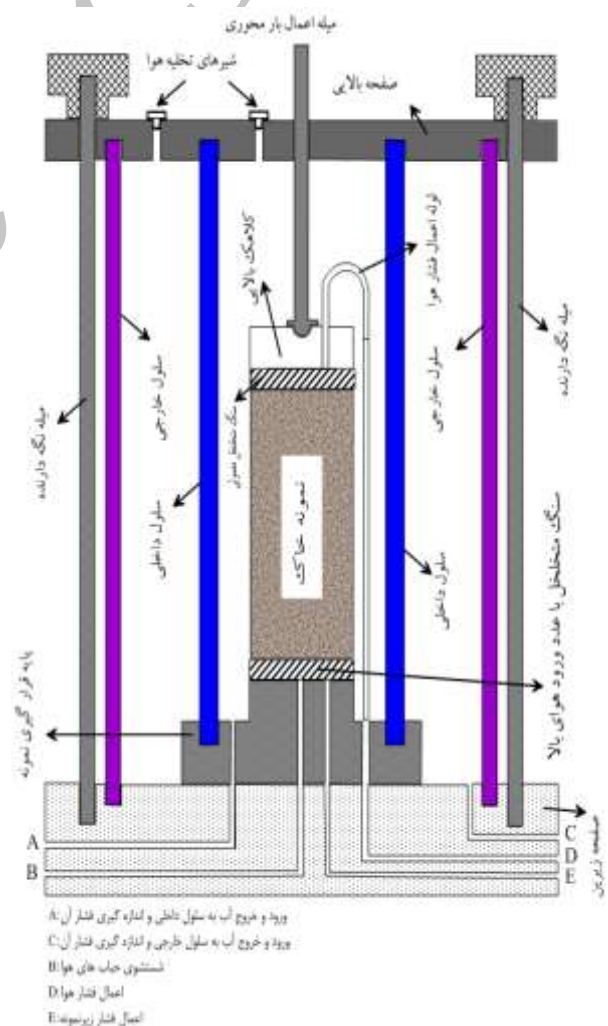
#### مراحل انجام آزمایش

مراحل انجام آزمایش شامل دو مرحله اصلی بوده که در مرحله اول نمونه خاک تهیه شده از حالت اشباع با مکش تقریباً صفر، به مکش موردنظر رسانده شده و در مرحله بعد پس از ثابت شدن مکش موردنظر، بارگذاری بر نمونه خاک انجام شده و مرحله تحکیم انجام شد نحوه انجام این مراحل به شرح زیر می‌باشد.

#### مرحله تعادل

هدف از این مرحله ایجاد مکش مورد نظر در نمونه خاک با اعمال فشار هوا و فشار آب از بالا و پایین نمونه خاک است، به طوری که پس از اعمال فشارهای هوا و آب به نمونه خاک، مکش خاک به طور تدریجی از مقدار اولیه پس از ساخت نمونه (تقریباً اشباع) به مکش موردنظر می‌رسد. نمونه تحت شرایط مذکور قرار داده شد که در طی آن آب به نمونه وارد و یا از آن خارج گردید. برای رسیدن به مکش موردنظر، فشار آب منفذی برابر با ۵۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شده و فشار هوا بر حسب میزان مکش انتخابی به نمونه اعمال می‌شد به گونه‌ای که اختلاف فشار هوا و فشار آب منفذی برابر با مکش انتخابی بود. لازم به ذکر است رساندن فشار هوا، فشار آب منفذی و فشار سلول‌های داخلی و خارجی به مقادیر اولیه به شکل تدریجی و در زمان حدود سه ساعت انجام می‌شد و در تمام این مدت فشار سلول داخلی و خارجی ۲۰ کیلوپاسکال بیشتر از فشار هوا اعمال می‌شد. زمانی که میزان آب ورودی به نمونه و یا خروجی از نمونه کمتر از  $0.1 \text{ cm}^3/\text{day}$  می‌شد تعادل نمونه ایجاد شده و از ایجاد مکش موردنظر در نمونه اطمینان حاصل می‌شد (Sivakumar, 1993; Zakaria, 1994; Sharma, 1998). در پژوهش حاضر این زمان حدود ۵ تا ۶ روز به طول انجامید. در طول این مدت میزان آب ورودی به نمونه و یا خروجی از نمونه

اعمال فشار به سلول داخلی و خارجی و همچنین فشار آب حفره‌ای ( $u_w$ ) به وسیله دستگاه‌های اعمال فشار صورت می‌پذیرد. دستگاه‌های مذکور به یک سری سرور موتور مجهز شده‌اند که می‌توان اعمال بار را به صورت تدریجی و با سرعت خاصی انجام داد. تغییرات فشار در طول مراحل اعمال تدریجی آن به صورت خودکار ثبت می‌گردد. تغییرات حجم آب ورودی و خروجی به سلول داخلی و به نمونه نیز به وسیله دستگاه‌های مربوطه به صورت خودکار ثبت می‌گردد. لازم به ذکر است قبل از انجام آزمایش‌های اصلی نیز اقدام به واسنجی<sup>۴</sup> قسمت‌های مختلف دستگاه سه محوری شامل واسنجی سلول (جذب آبی و جذب آب با زمان) و همچنین واسنجی دستگاه تغییر حجم تحت شرایط مختلف (اعمال فشارهای مختلف و دمای ثابت) گردید.



شکل ۲- تصویر شماتیک دستگاه سه محوری با سلول دوجداره مورد استفاده

مکش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال رطوبت نمونه کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده این است که آب از نمونه خارج می‌شود و موجب کاهش رطوبت اولیه نمونه می‌شود. به طوری که رطوبت اولیه نمونه از مقدار ۲۲/۸ درصد در پایان مرحله تعادل به ازای مکش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب به مقادیر ۱۳، ۱۲/۱، ۱۰ و ۷/۵ درصد رسیده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود افزایش مکش موجب خروج حجم آب بیشتری از نمونه می‌گردد. با تغییر رطوبت نمونه، حجم آن تغییر می‌کند که موجب تغییر در نسبت تخلخل می‌شود. در حالت رسیدن به مکش صفر (حالت اشباع)، با توجه به اینکه تغییر درصد رطوبت نمونه ناچیز است، میزان تغییرات نسبت تخلخل نیز در حالت اشباع تقریباً ناچیز بوده و نسبت تخلخل نمونه تقریباً ثابت مانده است (شکل ۳-ب). ولی در مکش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال با افزایش زمان، درصد رطوبت و نسبت تخلخل کاهش می‌یابد به طوری که نسبت تخلخل نمونه از میزان ۰/۶۲ در ابتدای مرحله تعادل به مقادیر ۰/۵۶۵، ۰/۵۵، ۰/۵۳ و ۰/۴۶۵ به ترتیب به ازای مکش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال در پایان مرحله تعادل رسیده‌اند. این مطلب نشان‌دهنده این است که شرایط اولیه نمونه نزدیک به حالت اشباع بوده است به طوری که نمونه، برای رسیدن به مکش صفر یا حالت اشباع با تغییر چندانی در رطوبت و نسبت تخلخل مواجه نشده است ولی در مکش‌های دیگر دچار کاهش رطوبت و نسبت تخلخل شده است همچنین با افزایش مکش، مقدار کاهش رطوبت بیشتر بوده و کاهش نسبت تخلخل نیز بیشتر است؛ که این نتایج با نتایج بسیاری از محققین از جمله Schnellmann et al. (2015) مطابقت دارد.

و نیز تغییرات حجم آب سلول داخلی که نشان‌دهنده تغییرات حجم نمونه می‌باشد به طور خودکار در فواصل زمانی مختلف ثبت گردید.

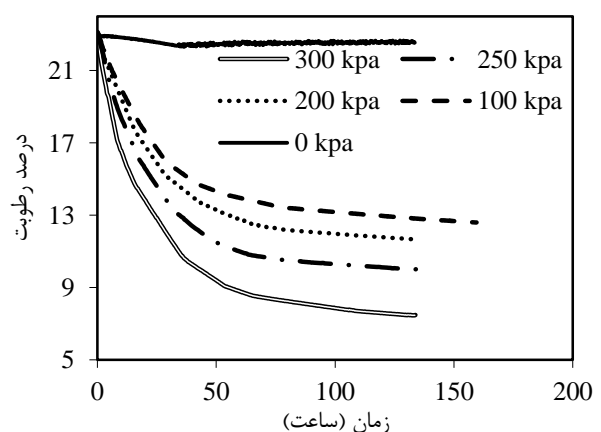
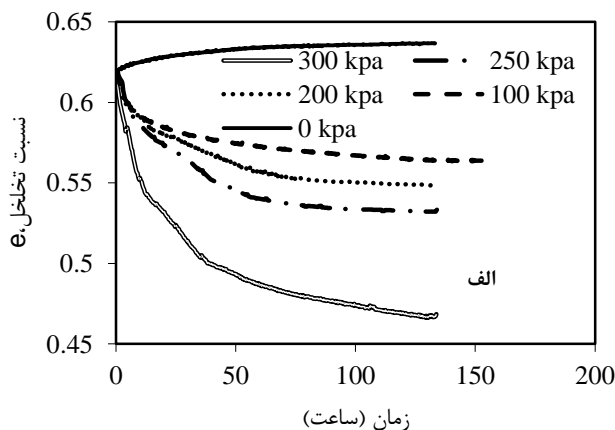
### مرحله تحکیم

پس از انجام مرحله تعادل (ایجاد مکش موردنظر) در نمونه، مرحله تحکیم با اعمال بار صورت پذیرفت. در این مرحله مکش ایجادشده در نمونه ثابت نگه‌داشته شد به عبارتی مقادیر اولیه  $u_a$  و  $u_w$  حفظ گردید. اعمال بار بر نمونه به صورت تدریجی از طریق افزایش فشار سلول داخلی و خارجی با نرخ افزایش ۴ کیلوپاسکال در هر ساعت صورت گرفت. محققینی مانند Vassallo et al. (2007) نیز از همین نرخ افزایشی استفاده کردند. عمل بارگذاری تا رسیدن به فشار خالص حدود ۵۵۰ کیلوپاسکال برای هر نمونه با مکش موردنظر انجام شد. در طول مرحله تحکیم تغییرات فشار اعمال‌شده به نمونه، تغییرات حجم آب ورودی به نمونه و یا حجم آب خروجی از نمونه و نیز تغییر حجم سلول داخلی در فواصل زمانی مختلف ثبت گردید.

### نتایج و بحث

#### الف- مرحله تعادل

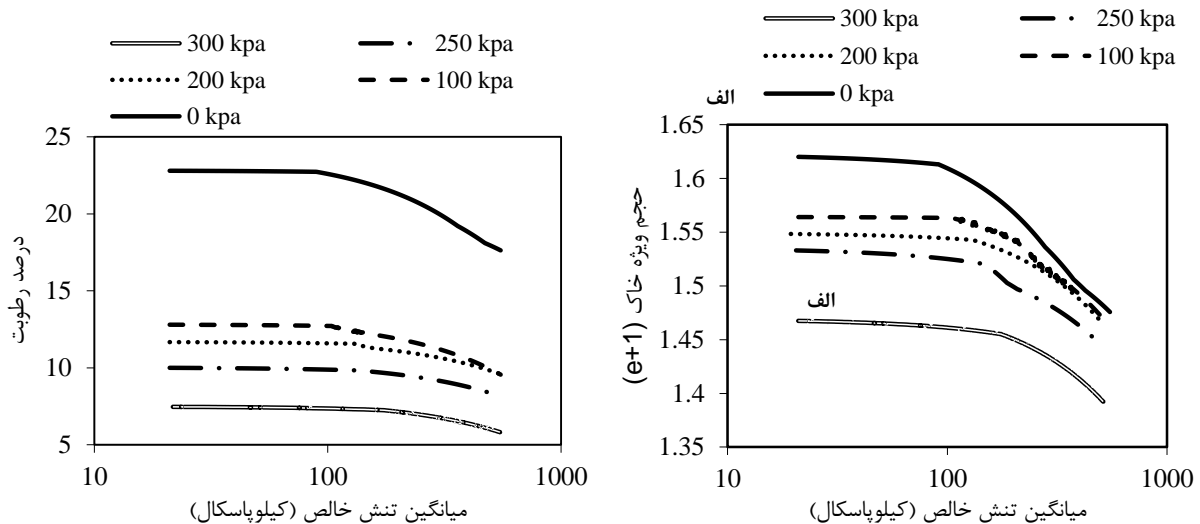
در مرحله تعادل، مکش اعمال‌شده به نمونه موجب تغییر رطوبت و نسبت تخلخل اولیه نمونه می‌شود. شکل (۳ الف و ب) تغییرات رطوبت و نسبت تخلخل را برای رسیدن نمونه به حالت تعادل، به ازای پنج مکش صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود در حالت رسیدن نمونه به حالت اشباع (مکش صفر)، آب میزان رطوبت نمونه تقریباً ثابت مانده است ولی برای



شکل ۳- تغییرات الف- درصد رطوبت خاک ب- نسبت تخلخل خاک در حین رسیدن به تعادل (برای چهار مکش)

شکل (۴-ب) تغییرات رطوبت خاک را در حین تحکیم، به ازای مکش‌های مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌گردد، افزایش بار وارد بر نمونه، موجب کاهش حجم ویژه می‌گردد تا اینکه نمونه به نقطه تسلیم (فشار پیش تحکیمی) می‌رسد و پس از آن تحکیم نرمال (عادی) در نمونه صورت می‌پذیرد.

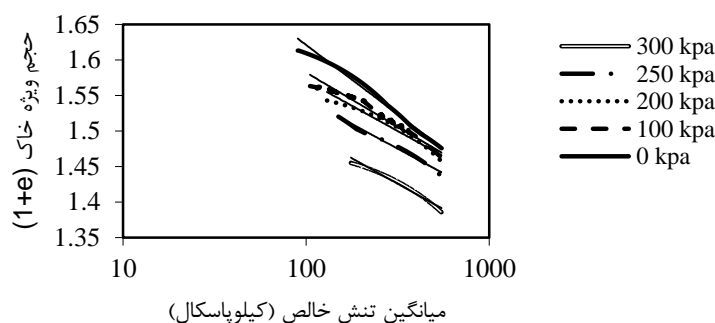
همان‌طور که بیان شد پس از مرحله تعادل سازی، عمل تحکیم با روش بارگذاری تدریجی روی نمونه با مکش ثابت صورت پذیرفت. نتایج تحکیم برای مکش‌های مختلف (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال) در شکل (۴) مشاهده می‌شود. شکل (۴-الف) تغییرات  $V$  یا حجم ویژه نمونه خاک و  $p'$  و  $(1+e)$  میانگین تنش خالص  $(p' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} - u_w)$



شکل ۴- تغییرات الف- حجم ویژه خاک ب- رطوبت خاک در حین تحکیم (برای پنج مکش)

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در یک مکش ثابت، با افزایش میانگین تنش وارد بر خاک، درصد رطوبت خاک کاهش می‌یابد و پس از رسیدن نمونه به فشار پیش تحکیمی با یک شیب نسبتاً مشخص این کاهش ادامه می‌یابد که این شیب در مکش‌های مختلف یکسان نبوده و در ب به بررسی تغییرات این شیب در مکش‌های مختلف پرداخته شده است. شکل (۵) منحنی‌های تحکیم نرمال را برای مکش‌های مختلف نشان می‌دهد. با ترسیم خطوط تحکیم عادی پس از فشار پیش تحکیمی و برازش خطوط بر روی آن‌ها (شکل ۵) اقدام به استخراج شیب‌های منحنی تحکیم  $(\lambda(s))$  و عرض از مبدأ آن‌ها  $(N(s))$  شد. (مطابق رابطه ۴).

همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود، در یک مکش معین، با افزایش میانگین تنش خالص حجم ویژه خاک کاهش می‌یابد و پس از رسیدن به نقطه تسلیم (فشار پیش تحکیمی)، با یک شیب مشخص حجم ویژه خاک کاهش می‌یابد که این نتایج با یافته‌های Alonso et. al (1990); Cui and Estabragh and Javadi (2008); Delage (1996) مطابقت دارد. پس از رسیدن به نقطه تسلیم، شیب منحنی‌های تحکیم نرمال در مکش‌های مختلف یکسان نبوده و در ادامه به مقایسه این شیب‌ها در مکش‌های مختلف پرداخته شده است. در شکل (۴-ب) تغییرات درصد رطوبت خاک با افزایش میانگین تنش خالص وارد بر نمونه خاک نشان داده شده است.



شکل ۵- خطوط تحکیم عادی به ازای مکش‌های مختلف

خاک وجود دارد که در این منحنی دو نقطه مشخص از مکش تحت عنوان عدد ورود هوا<sup>۵</sup> و مکش پسماند<sup>۶</sup> وجود دارد. در حالت پسماند تغییرات  $\lambda(s)$  تقریباً ثابت می‌گردد که با تحقیقات Vanapali et al, 1999 و Thu et al. 2007 مطابقت دارد.

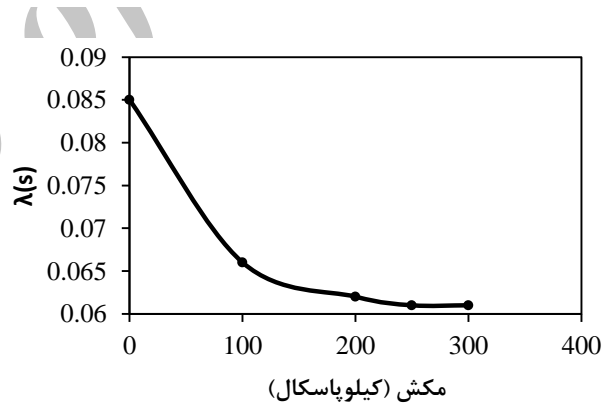
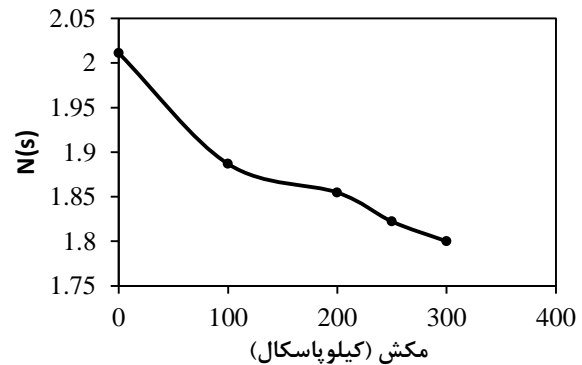
در شکل (۴-ب) تغییرات درصد رطوبت خاک با افزایش میانگین تنش خالص وارد بر خاک نشان داده شد، مشابه مرحله تحکیم، با ترسیم خطوط تحکیم عادی بعد از فشار پیش تسلیمی، می‌توان اقدام به ارزیابی شیب و عرض از مبدأ این خطوط مطابق رابطه ۵ نمود (شکل ۷).

پس از ترسیم خطوط تحکیم نرمال (در صفحه درصد رطوبت، میانگین تنش خالص) اقدام به استخراج شیب و عرض از مبدأ خطوط تحکیم نرمال به ازای مکش‌های مختلف گردید که تغییرات آن در شکل‌های (۸ الف و ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش مکش خاک، شیب و عرض از مبدأ خط تحکیم نرمال کاهش می‌یابد شیب آن با افزایش مکش کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر شیب و عرض از مبدأ خطوط تحکیم نرمال در خاک‌های غیراشباع تابعی از مکش خاک بوده و با خشک‌تر شدن خاک، تحکیم پذیری خاک کمتر می‌شود.

فشار پیش تحکیمی (نقطه تسلیم) برای مکش‌های مختلف از روش امتداد دادن دو قسمت ابتدا و انتهای منحنی تحکیم که به وسیله محققینی مانند Estabragh and Javadi (1996); Cui and Delage (1996); Sharma (1998) به کار رفته استخراج شدند که مقادیر آن برای مکش‌های صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر با ۹۰، ۱۰۵، ۱۳۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

شکل (۹) منحنی تسلیم LC را در صفحه  $p^s$ -s نشان می‌دهد. منحنی تسلیم LC از تعیین فشار پیش تحکیمی برای هر مکش تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر منحنی تسلیم LC مکان هندسی نقاط تسلیم (پیش تحکیم) برای هر مکش می‌باشد. منحنی تسلیم حاصله (شکل ۹) با نتایج سایر محققین از جمله Alonso et. al (1990); Wheeler and Sivakumar (1995); Cui and Delage (1996); Estabragh and Javadi (2008) همخوانی دارد. در داخل این منحنی تغییر شکل‌هایی ممکن است بر اثر تغییر مکش تحت بار ثابت ( $P^s$ ) و یا تحت مکش ثابت با تغییر بار ( $P^s$ ) صورت پذیرد که این تغییرات در داخل منحنی (سمت چپ منحنی) الاستیک و در خارج از آن (سمت

منحنی تغییرات  $\lambda(s)$  با مکش در شکل (۶-الف) آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد با افزایش مکش، مقدار  $\lambda(s)$  کاهش می‌یابد که با نتایج محققین قبلی از جمله Thu et al (2007) و Vanapali et al (1999) مطابقت دارد. شکل (۶-ب) تغییرات  $N(s)$  را با مکش نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مکش، مقدار  $N(s)$  کاهش می‌یابد که این موضوع با نتایج Thu et al. (2007) و Vanapali et al (1999) مطابقت دارد.



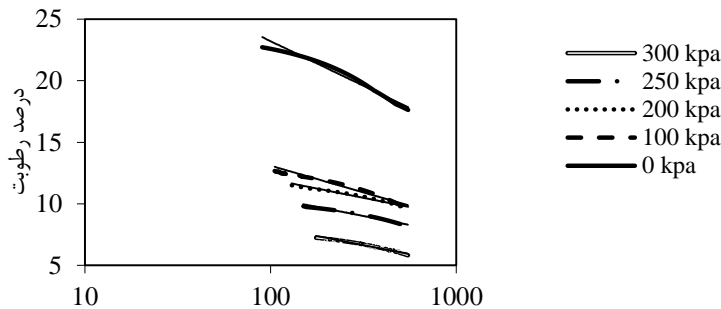
شکل ۶-الف- تغییرات شیب و ب- تغییرات عرض از مبدأ خط تحکیم با مکش

از شکل‌های (۵ و ۶) نتیجه گرفته می‌شود که در خاک‌های غیراشباع منحنی تحکیم نرمال به شکل یک خط و دارای یک شیب و عرض از مبدأ می‌باشد که این شیب و عرض از مبدأ تابع میزان مکش موجود در خاک بوده و با افزایش مکش کاهش می‌یابند. کاهش مقادیر شیب و مقادیر  $N(s)$  نشان‌دهنده آن است که تحکیم پذیری خاک غیراشباع نسبت به اشباع به علت مکش موجود کمتر است. به عبارت دیگر کاهش  $\lambda(s)$  و  $N(s)$  با افزایش مکش همراه است که مؤید این است که افزایش مکش میزان تحکیم پذیری خاک را کاهش می‌دهد.

معمولاً برای خاک‌های غیراشباع منحنی مشخصه آب و

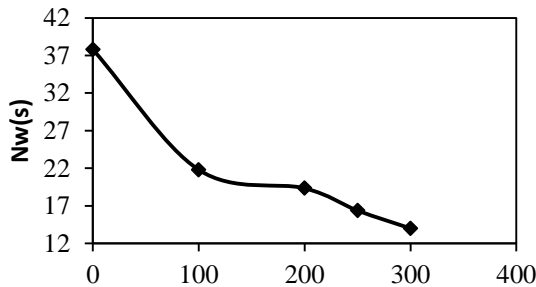
نقطه تسلیم افزایش می‌یابد که دلیل آن کاهش نسبت تخلخل با افزایش مکش خاک و در نتیجه افزایش تراکم خاک می‌باشد.

راست منحنی) غیر الاستیک است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مکش خاک، میانگین تنش خالص خاک در

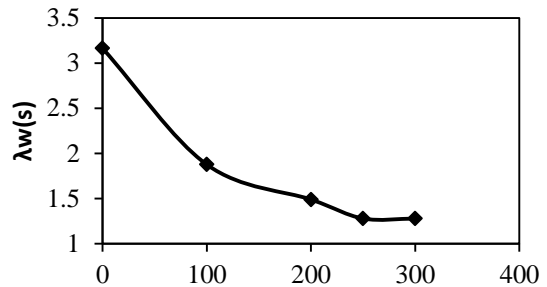


میانگین تنش خالص (کیلوپاسکال)

شکل ۷- منحنی تحکیم عادی برای تغییرات درصد رطوبت با میانگین تنش خالص

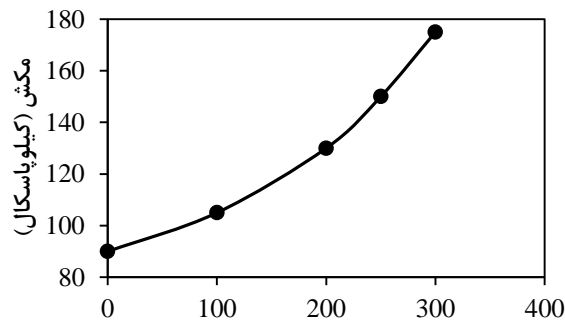


مکش (کیلوپاسکال)



مکش (کیلوپاسکال)

شکل ۸- الف- تغییرات شیب و ب- تغییرات عرض از مبدأ خط تحکیم با مکش



فشار پیش تحکیمی (کیلوپاسکال)

شکل ۹- منحنی پوش تسلیم

تابعی از مکش می‌باشند که مقادیر آن‌ها با افزایش مکش کاهش یافته و تحکیم پذیری کمتر خاک در مکش‌های بالاتر را نشان می‌دهد.

شیب و عرض از مبدأ منحنی‌های تحکیم یافته نرمال (در فضای درصد رطوبت، میانگین تنش خالص) تابعی از مکش خاک بوده و با افزایش مکش خاک کاهش می‌یابد.

فشارهای پیش تحکیم حاصله برای هر مکش، منحنی تسلیم LC را در صفحه  $p'$  و  $s$  به وجود می‌آورند.

## نتیجه‌گیری

طی یک برنامه تحقیقاتی یک سری آزمایش‌های تحکیم روی نمونه‌های یک خاک سیلتی تحت مکش‌های مختلف (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوپاسکال) صورت پذیرفت که نتایج زیر حاصل شد:

فشار پیش تحکیمی در خاک‌های غیراشباع، با افزایش مکش افزایش می‌یابد.

شیب و عرض از مبدأ منحنی‌های تحکیم یافته نرمال،



$N_w(s)$ : عرض از مبدأ منحنی تحکیم در حالت تغییرات درصد رطوبت  
 $\lambda(s)$ : شیب منحنی تحکیم  
 $\lambda_w(s)$ : شیب منحنی تحکیم در حالت تغییرات درصد رطوبت  
 $P_c$ : فشار مرجع  
 $p'$ : تنش مؤثر در خاک  
 $u_a$ : فشار هوای حفره‌ای  
 $u_w$ : فشار آب حفره‌ای

**فهرست علائم**  
 $G_s$ : وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک  
 $e$ : نسبت تخلخل خاک  
 $\sigma_1$ : تنش اصلی خاک  
 $\sigma_3$ : تنش شعاعی خاک  
 $s$ : مکش خاک  
 $w$ : درصد رطوبت خاک  
 $V$ : حجم ویژه خاک  
 $N(s)$ : عرض از مبدأ منحنی تحکیم

## REFERENCES

- Alonso, E. E., Gens, A., and Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, 40(3), 405-430.
- Andersonland, O. B., and Khattak, A. S. (1979). Shear strength of kaolinite/ fiber soil mixtures, in proceedings of *international conference on soil reinforcement*. Vol 1. Paris, France, pp 11-16.
- Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Tecknisk Ukeblad*, 106 (39), 859-863.
- Cui, Y. J. & Delage, P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), 291-311.
- Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., and Javadi, A. A. (2011). Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. *Geotechnical and geological eng. J.* 29, 899-908.
- Estabragh, A. R., Javadi, A. A., and Boot, J. C. (2004). Effect of compaction pressure on consolidation behavior of unsaturated silty soil. *Can Geotech. J.*, 41(3), 748-763.
- Estabragh, A. R., Javadi, A. A. (2008). Critical state for over consolidated unsaturated silty soil. *Can Geotech. J.*, 45, 408-420.
- Estabragh, A. R., and Javadi, A. A. (2014a). Roscoe and Horslev surfaces for unsaturated silty soil. *International Journal of Geomechanics, ASCE.*, 14(2), 230-238.
- Estabragh, A. R., and Javadi, A. A. (2014b). Effect of soil density and suction on the elastic and plastic parameters of unsaturated silty soil. *International Journal of Geomechanics, ASCE.*, in press.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (2012). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: Wiley Inter Science.
- Fredlund, D. G. and Morgenstern, N.R.. (1977). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: Wiley Inter Science.
- Jennings, J.E., and Burland, J.E. (1962). Limitation to the use of effective stress in partially saturated soils. *Geotechnique*, 12(2), 125-144.
- Marto, A. (1996). Volumetric compression of a silt under periodic loading. Ph.D. thesis, university of Bradford, Bradford, UK.
- Schnellmann, R., Rahardjo, H. and Schneider, H. R. (2015). Controlling parameter for unsaturated soil property functions: validated on the unsaturated shear strength. *Can. Geotech. J.* 52, 374-381.
- Sharma, R.S. (1998). Mechanical behavior of unsaturated highly expansive clays. D.Phil. thesis, university of Oxford, Oxford. UK.
- Sivakumar, V. (1993). A critical state framework for unsaturated soil. Ph.D thesis, university of Sheffield, Sheffield, UK.
- Thu, T. M., Rahardjo, H., and Leong, E. C. (2007). Soil water characteristic curve and consolidation behavior for a compacted silt. *Can Geotech. J.*, 44(3), 266-275.
- Vanapali, S. K., Fredlund, D. G., and Pufahl, D. E. (1999). The influence of soil structure and stress history on the soil water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, 49(2), 143-159.
- Vassallo, P., Mancuso, C., and Vinale, F. (2007). Effect of net stress and suction history on the small strain stiffness of a compacted clayey silt. *Can. Geotech. J.*, 44(4), 447-462.
- Wheeler, S.J., and Karube, D. (1995). State of the art report: constitutive modeling. In unsaturated soils: proceedings of the 1<sup>st</sup> international conference on unsaturated soils, paris, 6-8 sept. Vol . 3. Edited by E.E. Alonso and P. Delage. A.A Balkema, Rotterdam, the Netherlands. pp. 1323-1356.
- Wheeler, S.J., and Sivakumar, V. (1995). An elasto plastic critical state framework for unsaturated soil. *Geotechnique*, 45 (1), 35-53.
- Zakaria, I. (1994). Yielding of unsaturated soil. Ph.D. thesis, university of Sheffield, Sheffield, UK.
- Zhang, X., and Lytton, R. L. (2009a). Modified state-surface approach to the study of unsaturated soil behavior. Part 1: Basic concept. *Can Geotech. J.*, 46(5), 536-552.
- Zhang, X., and Lytton, R. L. (2009b). Modified state-surface approach to the study of unsaturated soil behavior. Part 2: General fomulation. *Can Geotech. J.*, 46(5), 553-570.
- Zhang, X., Liu, J., and Li, P. (2010). Determining the shapes of yield curves for unsaturated soils by modified state surface approach. *Journal of Geotechnics and Geoenviron. Eng, ASCE*, 10, 239-247.