

# پیش‌بینی مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع در حالت کرنش صفحه‌یی با استفاده از روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی

محسن اژداری (استادیار)

بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان

محمد نهنگی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

لیلا صادقی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

با توجه به هزینه‌ی زیاد و زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌های برش مستقیم یا سه‌محوری روی خاک‌های غیراشباع، معمولاً پارامترهای مقاومت برشی لازم در کاربردهای عملی، با استفاده از روابط تجربی موجود پیش‌بینی می‌شوند. اما تحقیقات جدید حاکی از آن است که هیچ‌یک از روش‌های تجربی ارائه شده در ادبیات مکانیک خاک‌های غیراشباع توانایی پیش‌بینی مقاومت برشی همه‌ی انواع خاک‌ها را ندارند. در این نوشتار، با استفاده از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم موجود در ادبیات مکانیک خاک‌های غیراشباع و نیز به منظور پیش‌بینی پارامتر مقاومت برشی این‌گونه خاک‌ها یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی تربیت می‌شود. این شبکه‌ی عصبی دارای شش نرون ورودی است که چهار نرون آن شامل پارامترهای منحنی مشخصه‌ی آب-خاک است که با استفاده از رابطه‌ی بروکز و کوری<sup>[۱]</sup> به دست می‌آید. پارامترهای دیگر ورودی به شبکه، مقادیر مکش و فشار قائم خالص اعمالی به نمونه را شامل می‌شوند. به منظور اعتبارسنجی شبکه عصبی مصنوعی تربیت شده، پارامتر تنش مؤثر برای خاک‌هایی که شبکه در طی آموزش با آنها رویه‌رو نشده بود، با استفاده از این شبکه محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده با مقادیر آزمایشگاهی به خوبی هم‌خوانی دارند.

واژگان کلیدی: خاک‌های غیراشباع، آزمایش برش مستقیم، شبکه‌ی عصبی مصنوعی.

ajdari@shirazu.ac.ir  
mnaahangi@gmail.com  
leila.sadeghil@gmail.com

## ۱. مقدمه

غیراشباع چنین نوشته می‌شود:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

که در آن  $\sigma$  تنش کل،  $u_a$  فشار هوا،  $u_w$  فشار آب منفذی، و  $\chi$  پارامتر تنش مؤثر خاک و وابسته به خواص خاک و درجه‌ی اشباع آن است. پارامتر تنش مؤثر برای خاک کاملاً خشک برابر صفر و برای خاک کاملاً اشباع برابر ۱ است. پیش از این مطالعاتی برای استفاده از شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی پارامتر تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع صورت گرفته است،<sup>[۲]</sup> اما در این پژوهش‌ها تأثیر روش ساخت نمونه و میزان تنش خالص اعمالی بر  $\chi$  لحاظ نشده است.

در این نوشتار، با هدف پیش‌بینی پارامتر «تنش مؤثر» و با استفاده از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم موجود در ادبیات مکانیک خاک‌های غیراشباع، یک شبکه‌ی عصبی تربیت شده است و طی آن ماتریس‌های وزن و توابع انتقال مورد استفاده مطرح شده است. همچنین با استفاده از شبکه‌ی تربیت شده، دامنه‌ی پارامتر

مدل‌های رفتاری در مکانیک خاک غالباً براساس چارچوب حالت بحرانی پی‌ریزی می‌شوند. «حالت بحرانی» منحنی واحدی است که تمام مسیرهای تنش به آن ختم می‌شود و بنابراین، در مدل‌سازی رفتار مکانیکی خاک اهمیت به‌سزایی دارد. صحت هر مدل رفتاری در مکانیک خاک، به میزان درستی تخمین آن مدل از حالت بحرانی وابسته است. با فرض معیار تسلیم موهر-کولمب، منحنی خطی حالت بحرانی چنین نوشته می‌شود:

$$\tau = \sigma'_n \tan \phi' + c' \quad (1)$$

که در آن  $\tau$  مقاومت برشی خاک در صفحه‌ی گسیختگی،  $\sigma'_n$  تنش مؤثر قائم و  $c'$  و  $\phi'$  پارامترهای مقاومت برشی خاک هستند. پس از موفقیت اصل تنش مؤثر در مدل‌سازی رفتار خاک‌های اشباع، محققین بر آن شدند که این اصل را برای خاک‌های غیراشباع تعمیم دهند. رابطه‌ی تنش مؤثر پیشنهادی<sup>[۱]</sup> برای خاک‌های تاربخ: دریافت ۱۳۸۷/۸/۵، اصلاحیه ۱۳۸۷/۱۱/۷، پذیرش ۱۳۸۸/۱۰/۱۴.

$\theta_r$  نیز محتوای رطوبت حجمی پسماند،  $\theta_s$  محتوای رطوبت حجمی اشباع خاک، و  $\kappa$  پارامتر خاک است و از برازش داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. با این فرض که معادله منحنی مشخصه آب-خاک مطابق رابطه ۵ نوشته شود: [۱۴]

$$\bar{\theta} = e^{-[(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b] f} \quad (5)$$

رابطه ۳ را برای مقاومت برشی خاک غیراشباع می‌توان چنین نوشت:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + \left[ \frac{(u_a - u_w)_b}{u_a - u_w} \right] f' \times (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (6)$$

که در آن  $(u_a - u_w)_b$  مکش واسط بین حالت اشباع و غیراشباع خاک، و  $f'$  از برازش داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. آزمایشات برش مستقیم در سال ۱۹۹۶ نشان داد که تأثیر مکش بر مقاومت برشی خاک‌های ریزدانه بسیار بیشتر از خاک‌های درشت‌دانه است. [۱۵] همچنین اعمال مکش بر خاک باعث افزایش اتساع آن در حین برش (سخت‌گردانی مکشی) می‌شود.

در سال ۱۹۹۷، با فرض تساوی پارامترهای تنش مؤثر و درجه اشباع خاک، نسبت به تخمین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع اقدام شد. [۱۶] اگرچه محققین نتایج این مطالعات خود را رضایت‌بخش اعلام کردند، مطالعات بعدی نشان داد که پارامتر تنش مؤثر شدیداً وابسته به خواص خاک است. [۱۷] از دیگر روابط تجربی ارائه شده برای مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع، [۱۸] می‌توان به رابطه ۷ اشاره کرد:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + \Theta^\kappa (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (7)$$

که در آن  $\Theta = \frac{\theta}{\theta_s}$ ، محتوای رطوبت حجمی نسبی، و  $\kappa$  پارامتر خاک است که از برازش داده‌ها به دست می‌آید. در سال ۲۰۰۶، بررسی آزمایش‌های مقاومت برشی موجود در ادبیات مکانیک خاک‌های غیراشباع به طرح رابطه تجربی ۸ برای  $\kappa$  منجر شد: [۱۹]

$$\kappa = -0.016 I_p^T + 0.0975 I_p + 1 \quad (8)$$

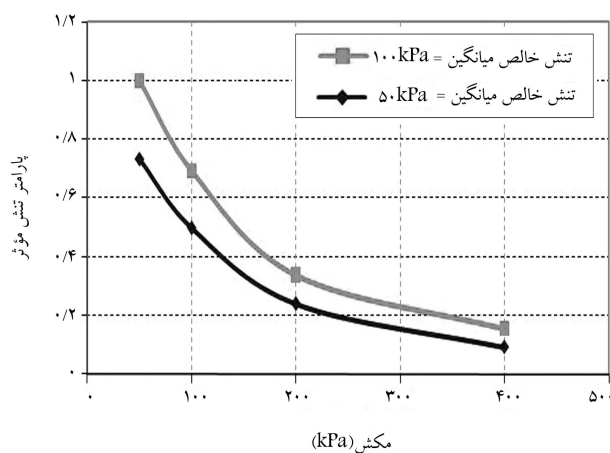
که در آن  $I_p$  دامنه‌ی خمیری خاک مورد نظر است.

در سال ۱۹۹۸، پس از بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت برشی روی نوع خاک مختلف، نشان داده شد که منحنی تغییرات پارامتر تنش مؤثر، با نسبت مکش به مکش ورود هوا برای خاک‌های مختلف منحنی ثابتی است که در فضای نیمه‌لگاریتمی به صورت یک خط مستقیم قابل ارائه است. [۲۰] بر این اساس رابطه تجربی ۹ برای پارامتر تنش مؤثر ارائه شد:

$$\chi = \left[ \frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_b} \right]^\gamma \quad (9)$$

که در آن  $\gamma$  پارامتر خاک و بین ۰٫۴ تا ۰٫۶۵- است. این محققین بهترین برازش را با مقدار ۰٫۵۵- برای  $\gamma$  به دست آوردند. در سال ۲۰۰۴ نیز رابطه‌ی مشابهی با استفاده از هندسه‌ی فراکتالی، برای  $\chi$  به دست آمد. [۲۰] بعد فراکتالی مورد نیاز برای استفاده از این رابطه را می‌توان از منحنی مشخصه آب-خاک تخمین زد.

بررسی داده‌های مقاومت برشی برای خاک‌های مختلف نشان داد که خط معیار تسلیم در حالت‌های اشباع و غیراشباع، و در فضای تنش مؤثر منحصر به فرد است. [۱۷] در این مطالعات محققین موفق شدند تغییر حجم خاک‌های غیراشباع را با استفاده از رابطه تجربی ۹ نیز به خوبی پیش‌بینی کنند.



شکل ۱. تأثیر حالت تنش بر مقدار تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع. [۸۷]

تنش مؤثر برای خاک ریزدانه‌ی شیراز محاسبه شد. نرون‌های ورودی به شبکه شامل پارامترهای منحنی مشخصه آب-خاک و مکش می‌شوند. در ادامه‌ی مطلب اشاره خواهیم کرد که نتایج آزمایشات نشان‌گر ایجاد تغییرات قابل توجه در شکل منحنی مشخصه آب-خاک، بر اثر اعمال تنش‌های جدید است. [۲۵] همچنین بررسی آزمایشات برشی انجام شده بر روی خاک‌های غیراشباع [۸۷] تأثیر قابل توجه تنش بر مقدار  $\chi$  را به خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱). لذا مقدار تنش خالص اعمالی به نمونه نیز به عنوان پارامتر مستقل ورودی به شبکه‌ی عصبی پذیرفته شد.

## ۲. مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مقاومت

### برشی خاک‌های غیراشباع

در اولین تلاش‌ها برای بررسی تجربی و نظری مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع، [۲۱] ضمن انجام آزمایش‌های سه‌محوری روی چهار نمونه خاک غیراشباع در مکش‌های مختلف، نشان داده شد که تغییرات پارامتر تنش مؤثر همراه با مکش شدیداً به ساختار خاک وابسته است. [۲۰] اما مقدار تقریبی  $S_r$  برای پارامتر تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع پذیرفته شد. در ادامه‌ی این مطالعات، در سال ۱۹۶۷ نیز براساس مطالعات آزمایشگاهی و نظری نشان داده شد که ممکن است مقادیر پارامتر تنش مؤثر ( $\chi$ ) در درجات اشباع بالا از ۱ هم بزرگ‌تر شود. [۱۱]

در سال ۱۹۸۹، با انجام آزمایش برش مستقیم بر روی دو نوع خاک رسی و یک نوع ماسه‌ی رس‌دار نشان داده شد که اولاً «مکش» سبب افزایش مقادیر مقاومت برشی به صورت غیرخطی می‌شود، و ثانیاً وقتی که خاک به حالت خشک نزدیک می‌شود افزایش مکش تغییر چندانی در مقاومت برشی ایجاد نمی‌کند. [۱۲] از سوی دیگر، محققین براساس فرض دو متغیر حالت مستقل برای خاک غیراشباع، و با استفاده از پارامترهای منحنی مشخصه آب-خاک رابطه‌ی مقاومت برشی خاک غیراشباع را ارائه کردند: [۱۳]

$$\tau = c' + (\sigma_n - \sigma_u) \tan \phi' + (u_a - u_w) [\bar{\theta} (u_a - u_w)]^\kappa \tan \phi' \quad (3)$$

که در آن  $\bar{\theta}$  محتوای رطوبت حجمی خاک است و چنین تعریف می‌شود:

$$\bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

در حین ترشدن و در مکش ثابت از چسبندگی ظاهری در زمان خشک شدن کم تر است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در سال ۲۰۰۶، چنین نتیجه می‌گیریم که طی آزمایش‌های CD و CW پارامترهای مقاومت‌های برشی مؤثر خاک مقادیری برابر دارند، اگرچه مقدار چسبندگی ظاهری خاک متفاوت است. [۲۸] همچنین، نتایج حاصل از دیگر آزمایشات در سال ۲۰۰۶ حاکی از آن است که تأثیر مکش در اتساع خاک در حین برش، مخصوصاً در مکش‌های زیاد، بیشتر از تأثیر مکش در افزایش مقاومت برشی خاک است. [۲۹]

### ۳. منحنی مشخصه‌ی آب-خاک (SWCC)

رابطه‌ی درصد رطوبت خاک و مکش موجود در آن را با عنوان «منحنی مشخصه‌ی خاک» می‌شناسیم. اگرچه برخی از محققین معتقدند با توجه به وابستگی این منحنی به حالت تنش و مسیر بارگذاری نمی‌توان آن را مشخصه‌ی خاک دانست، از آنجا که در این نوشتار اثر حالت تنش به صورت مستقل در نظر گرفته می‌شود و آزمایش‌های برش مستقیم تنها دارای یک مسیر تنش هستند، عنوان مشخصه‌ی آب-خاک در ادامه‌ی این مقاله هم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پیش از این روابط مختلفی برای برازش داده‌های آزمایشگاهی و به دست آوردن پارامترهای منحنی مشخصه‌ی آب-خاک پیشنهاد شده است. در این نوشتار از رابطه‌ی بروکز و کوری [۱] استفاده می‌شود که مزیت آن بر دیگر روابط موجود، کم‌تر بودن تعداد پارامترها و معنادار بودن آنها است. این رابطه چنین نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{u_a - u_w}{u_a - u_w} \right)^\lambda & \text{for } (u_a - u_w) \geq (u_a - u_w)_b \\ \theta = \theta_s & \text{for } (u_a - u_w) \leq (u_a - u_w)_b \end{cases} \quad (12)$$

که در آن  $\theta_r$  محتوای حجمی رطوبت پسماند خاک،  $\theta_s$  محتوای حجمی رطوبت خاک در حالت اشباع و  $\lambda$  پارامتر برازش است و نماینده‌ی شیب منحنی در فضای نیمه‌لگاریتمی است. عبارت  $(u_a - u_w)_b$  نشان‌گر مکش ورود هوا به هنگام خشک شدن خاک، و مکش خروج هوا در چرخه‌ی ترساز می‌نمونه است.

### ۴. شبکه‌ی عصبی

شبکه‌ی عصبی مصنوعی، ساختاری متشکل از تعدادی واحد پردازش‌گر ساده با نام نرون است. [۳۰] هرکدام از این نرون‌ها با پردازش سیگنال‌های ورودی به شبکه، نتایج را از طریق اتصالات به نرون‌های لایه‌ی بعدی منتقل می‌کنند. وظیفه‌ی اتصالات سیگنال‌های ورودی به هر اتصال، بعد از اختصاص وزن به هرکدام به نرون بعد منتقل می‌شوند. در شبکه‌های پرسپترون چندلایه (MLP)، نرون‌ها در چند لایه سازمان‌دهی می‌شوند: لایه‌ی ورودی، لایه‌ی یا لایه‌های پنهان (میانی) و لایه‌ی خروجی. هر نرون به تمام نرون‌های لایه‌ی بعدی متصل است، ولی هیچ اتصالی بین نرون‌های یک لایه وجود ندارد. همچنین، هر نرون یک تابع انتقال (یا تابع فعال‌سازی) دارد که معمولاً از نوع سیگموئید است.

منظور از تربیت شبکه پیدا کردن وزن هر اتصال و نوع تابع انتقال هر لایه است، به‌گونه‌ی که خطای شبکه در پیش‌بینی هدف مورد نظر کمینه شود. به این منظور، قانون یادگیری<sup>۲</sup> مناسب و حضور مجموعه داده‌های واقعی کافی برای یادگیری و بررسی

در سال ۱۹۹۸، ضمن انجام آزمایش‌های سه محوری CD و CW روی خاک‌های کشاورزی نشان داده شد که مقاومت برشی این خاک‌ها تحت تنش‌های همه‌جانبه‌ی کوچک، بسیار کم‌تر از مقداری است که خط حالت بحرانی نشان می‌دهد. [۲۱] همچنین، امکان نمایش حالت بحرانی در فضای تنش خالص برای آزمایش‌های CW به صورت خطوط ثابت رد شد.

آزمایشات انجام‌شده در سال ۱۹۹۹ نشان‌گر تأثیر قابل ملاحظه‌ی تنش خالص همه‌جانبه بر مکش ورود هوا بود. [۲۲] براساس این مشاهدات، محققین یک رابطه‌ی سه بعدی دوقسمتی را برای مقاومت برشی خاک‌های تحت تنش ارائه کردند که قسمت اول آن تا مکش ورود هوا - خاک ادامه می‌یابد و قسمت دوم آن غیرمستوی است و تابع مکش ورود هوا و سه پارامتر دیگر از خواص خاک است که از برازش داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند.

پس از آن محققین نشان دادند که شیب خطوط حالت بحرانی در فضای تنش خالص - حجم مخصوص با افزایش مکش زیاد می‌شود. [۲۳] همچنین این آزمایشات نشان داد که مدل‌های بارسلونایی توانایی پیش‌بینی رفتار خاک‌های متراکم ماسه‌یی را در حین برش ندارند.

در سال ۲۰۰۲، پس از انجام آزمایشات برشی روی خاک آماسی، رابطه‌ی تجربی هذلولی<sup>۱۰</sup> برای مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع ارائه شد. [۲۴]

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \frac{a(u_a - u_s)}{1 + \frac{1-a}{p_{at}}(u_a - u_s)} \quad (10)$$

که در آن فشار جو و  $a$  پارامتر خاک است و از برازش داده‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. این رابطه با روابط مقاومت برشی قبلی و معیار تسلیم موهر-کلمب تطابق ندارد، اما با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده تطابق خوبی نشان داد.

در سال ۲۰۰۵ محققین با انجام آزمایشاتی، تغییرات منحنی مشخصه‌ی آب-خاک را با فشار همه‌جانبه بررسی، و معادله‌ی دوقسمتی ۱۱ را برای مقاومت برشی خاک غیراشباع ارائه کردند: [۲۵]

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (11 \text{ الف})$$

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + AEV] \tan \phi' + [(u_a - u_w) - AEV] \Theta^k [1 + (\sigma_n - \sigma_u) \lambda] \tan \phi' \quad (11 \text{ ب})$$

که در آن  $k$  و  $\lambda$  پارامترهای خاک هستند. این آزمایشات حاکی از آن است که هرچه تنش همه‌جانبه بیشتر شود مقدار مکش ورود هوا ( $AEV$ ) افزایش می‌یابد، و در مکش ثابت و تنش‌های بیشتر درجه‌ی اشباع بیشتر است. نتایج حاصل از این آزمایشات همچنین تأثیر تنش‌های اولیه را بر منحنی مشخصه‌ی آب-خاک و چرخه‌ی تر و خشک شدن خاک به خوبی نشان داد.

آزمایشات مقاومت برشی صورت‌گرفته در سال ۲۰۰۴ اثر سخت‌گردانی مکش را به خوبی به نمایش گذاشت [۲۶] و نشان داد که در مکش‌های زیاد رفتار خاک مشابه خاک‌های بسیار بیش‌تحکیم‌یافته است و اتساع و نرم‌شوندگی کرنشی کاملاً قابل تشخیص است. همچنین مقاومت برشی CW خاک وقتی که مکش از  $AEV$  بیشتر است و در شرایط کاملاً مشابه، همواره کم‌تر از مقاومت برشی CD است.

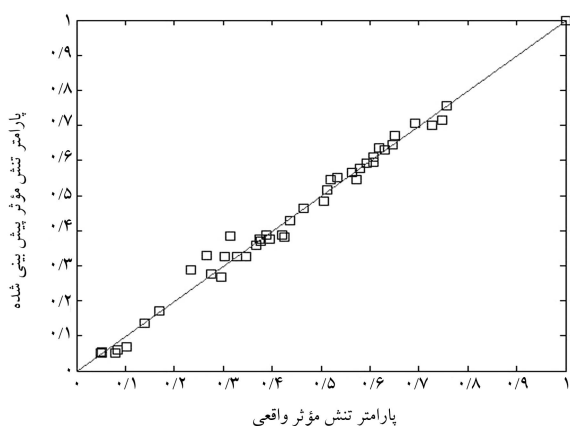
در سال ۲۰۰۶، محققین با انجام آزمایشات مقاومت برشی در هر دو چرخه‌ی تر و خشک شدن خاک نشان دادند که مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک به درجه‌ی اشباع و هیستریزس تر و خشک شدن بستگی ندارد. [۲۷] همچنین با توجه به نتایج این آزمایشات چسبندگی ظاهری خاک‌های غیراشباع به طور قابل ملاحظه‌ی متأثر از چرخه‌ی تر و خشک شدن خاک است، به‌گونه‌ی که چسبندگی ظاهری خاک

## ۶. نتایج

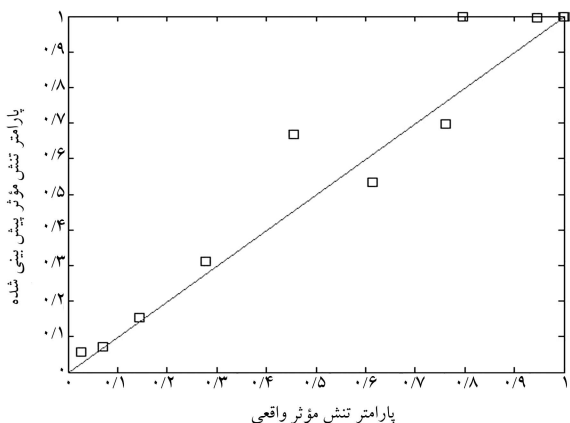
چنان‌که پیش‌تر نیز اشاره شد، از نتایج حاصل از ۵۸ آزمایش برش مستقیم تحکیم‌یافته و زه‌کشی‌شده که روی شش نوع خاک مختلف و در مکش‌های متفاوت انجام شده برای تربیت شبکه‌ی عصبی استفاده شد. توانایی شبکه‌ی مذکور با استفاده از نتایج ۱۲ آزمایش برش مستقیم دیگر که بر روی دو نوع خاک متفاوت از خاک‌های مرحله‌ی قبل انجام شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱).

در شکل‌های ۳ و ۴ مقادیر واقعی و محاسبه‌شده‌ی پارامتر تنش مؤثر برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی شبکه با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جذر مجموع مربعات خطا (RMSE) برای آموزش و تربیت شبکه به ترتیب برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۹ است و عملکرد شبکه قابل قبول است.

به‌منظور بررسی اهمیت نرون‌های ورودی به شبکه، هرکدام از نرون‌ها به صورت جداگانه حذف و ۵ شبکه‌ی جدید با استفاده از ۵ نرون ورودی تربیت شد. نتایج این تحلیل حساسیت در جدول ۳ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، پارامتر تنش مؤثر به تمام پارامترهای منحنی مشخصه‌ی آب-خاک به علاوه‌ی مقدار تنش خالص اعمالی کاملاً وابسته است و حذف هرکدام از آنها باعث کاهش کیفیت عملکرد شبکه می‌شود. مقادیر وزن‌های اتصالات شبکه‌ی مدل ۱ در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای داده‌های آموزش (RMSE = ۰/۰۲).

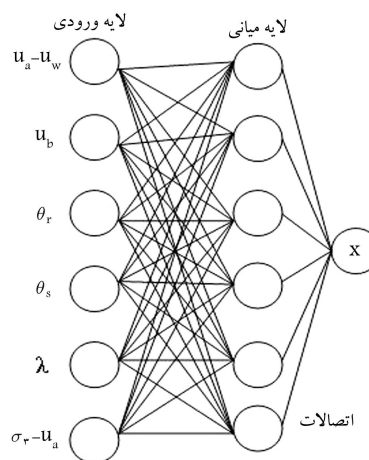


شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای داده‌های اعتبارسنجی (RMSE = ۰/۰۹).

عملکرد شبکه ضروری است.<sup>[۳۱]</sup> در این نوشتار یک شبکه‌ی پیش‌خور با الگوریتم پس‌انتشار خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به محدود بودن تعداد آزمایش‌های برش مستقیم انجام‌شده روی خاک‌های غیراشباعی که منحنی مشخصه‌ی آب-خاک آنها نیز در دسترس است، و نیز به‌منظور تسریع در تربیت شبکه، انتخاب اولیه‌ی وزن اتصالات با استفاده از روش گون-ویدرا<sup>[۳۲]</sup> انجام می‌شود. همچنین، با هدف تضمین پیدا کردن کمیته‌ی قوی تابع تغییرات خطا و پرهیز از گرفتار شدن در کمیته‌های محلی، از نرخ یادگیری متغیر با زمان موجود در روش یادگیری لوبنرگ<sup>[۳۳]</sup> و مارکوارت<sup>[۳۴]</sup> استفاده خواهد شد.

## ۵. آموزش شبکه

یک شبکه‌ی پیش‌خور با الگوریتم پس‌انتشار خطا و با هدف پیش‌بینی مقدار پارامتر تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع تربیت شد. این شبکه دارای شش نرون ورودی است که به ترتیب شامل پارامترهای منحنی مشخصه‌ی آب-خاک، تنش قائم خالص اعمالی به نمونه، و مقدار مکش موجود در خاک هستند. پارامترهای منحنی مشخصه‌ی آب-خاک (SWCC) با استفاده از رابطه‌ی بروکز و کوری به دست می‌آیند و عبارت‌اند از: محتوای حجمی آب پس‌ماند نمونه‌ی خاک ( $\theta_r$ )، محتوای حجمی آب نمونه‌ی خاک در حالت اشباع ( $\theta_s$ )، مکش ورود هوا برای نمونه‌ی خاک در حین خشک کردن یا مکش خروج هوا برای نمونه‌ی خاک در حین ترساز ( $h_b$ )، و شیب منحنی SWCC در فضای نیمه‌لگاریتمی ( $\lambda$ ). مقادیر  $\theta_s$  و  $h_b$  مستقیماً از منحنی<sup>[۳۵]</sup> SWC و پارامترهای  $\theta_r$  و  $\lambda$  از برازش داده‌های آزمایشگاهی بر رابطه‌ی بروکز و کوری به دست می‌آیند. در شکل ۲ معماری شبکه‌ی مورد استفاده نشان داده شده است. از نتیجه‌ی ۵۸ آزمایش برش مستقیم انجام‌شده روی شش نوع خاک مختلف موجود در ادبیات مکانیک خاک‌های غیراشباع، به‌منظور تربیت شبکه‌ی عصبی مذکور استفاده شد. پارامترهای مربوط به این خاک‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. از نتایج ۱۲ آزمایش برش مستقیم دیگر که روی دو خاک دیگر انجام شده، به‌منظور اعتبارسنجی عملکرد شبکه استفاده شد. مشخصات این دو خاک در جدول ۲ قابل ملاحظه است. تعداد لایه‌ها و نرون‌های لایه‌های میانی، به‌گونه‌ی انتخاب شدند که عملکرد شبکه به بهترین نحو ممکن ارتقاء یابد. با وجود آن که روند کاهش خطای طی اعتبارسنجی عملکرد شبکه، چنان بود که نیازی به توقف زودهنگام تربیت شبکه احساس نشد، تعداد اپوک‌های مورد استفاده به ۸۰ محدود شد.



شکل ۲. معماری شبکه‌ی عصبی مصنوعی مورد استفاده.

جدول ۱. نتایج آزمایشات استفاده شده در اعتبارسنجی شبکه.

مرجع	تنش خالص قائم (kPa)	مکش (kPa)	$\chi$	$h_b$	$\theta_r$	$\theta_s$	$\lambda$
ESCARIO & JUCA, ۱۹۸۹	۱۲۰	۰	۱	۳۰	۰	۲۳٫۸	۰٫۱۹
ESCARIO & JUCA, ۱۹۸۹	۱۲۰	۸۰	۰٫۷۶۰۹	۳۰	۰	۲۳٫۸	۰٫۱۹
ESCARIO & JUCA, ۱۹۸۹	۱۲۰	۱۶۰	۰٫۴۵۴۹	۳۰	۰	۲۳٫۸	۰٫۱۹
ESCARIO & JUCA, ۱۹۸۹	۱۲۰	۵۰۰	۰٫۲۷۶۷	۳۰	۰	۲۳٫۸	۰٫۱۹
ESCARIO & JUCA, ۱۹۸۹	۱۲۰	۱۰۰۰	۰٫۱۴۴۳	۳۰	۰	۲۳٫۸	۰٫۱۹
ESCARIO & JUCA, ۱۹۸۹	۱۲۰	۲۰۰۰	۰٫۰۶۹۲	۳۰	۰	۲۳٫۸	۰٫۱۹
ESCARIO & JUCA, ۱۹۸۹	۱۲۰	۴۰۰۰	۰٫۰۲۷۱	۳۰	۰	۲۳٫۸	۰٫۱۹
Miller & Hamid, ۲۰۰۶	۱۰۵	۵۰	۰٫۹۴۴۹	۶	۰	۲۳٫۷	۰
Miller & Hamid, ۲۰۰۶	۱۴۵	۵۰	۰٫۹۹۸۶	۶	۰	۲۳٫۷	۰
Miller & Hamid, ۲۰۰۶	۲۱۲	۵۰	۰٫۷۹۶۹	۶	۰	۲۳٫۷	۰
Miller & Hamid, ۲۰۰۶	۱۰۵	۲۰	۱	۶	۰	۲۳٫۷	۰
Miller & Hamid, ۲۰۰۶	۱۰۵	۱۰۰	۰٫۶۱۴۷	۶	۰	۲۳٫۷	۰

جدول ۲. مشخصات خاک‌های مورد استفاده.

مرجع	خاک	$W_{opt}$	$\gamma_d \max$ (gr/cm <sup>3</sup> )	Gs	طبقه بندی متحده	LL	PI
Vanapalli, et al. (۱۹۹۶)	Glacial till	۱۶٫۳	۱٫۸	-	CL	۳۵٫۵	۱۸٫۷
Escario and Juca (۱۹۸۹)	Madrid Gray Clay	-	-	۲٫۶۴	MH	۷۱	۳۵
Escario and Juca (۱۹۸۹)	Red Silty Clay	-	-	۲٫۶۶	CL	۳۳	۱۳٫۶
Escario and Juca (۱۹۸۹)	Madrid Clay Sand	-	-	۲٫۷۱	SC	۲۸	۸
Zhan and Ng (۲۰۰۶)	Brown Yellow Clay	۲۰٫۵	۱٫۶۵	۲٫۶۷	CH	۵۰٫۵	۳۱
Miller and Hamid (۲۰۰۶)	Minko Silt	۱۲٫۸	۱٫۷۷	۲٫۶۸	CL	۲۸	۸

جدول ۳. مقایسه‌ی عملکرد شبکه‌های عصبی مختلف تربیت شده.

مدل	ورودی	معماری	تابع محرک	RMSE (آموزش)	RMSE (اعتبارسنجی)
۱	$\sigma_r, net, suction, h_b, \theta_r, \theta_s, \lambda$	۱ - ۶ - ۶	logsig-logsig	۰٫۰۲	۰٫۰۹۳
۲	$\sigma_r, net, suction, \theta_r, \theta_s, \lambda$	۱ - ۵ - ۵	logsig-logsig	۰٫۰۷	۰٫۱۴
۳	$\sigma_r, net, suction, h_b, \theta_s, \lambda$	۱ - ۵ - ۵	logsig-logsig	۰٫۰۴۵	۰٫۱۶
۴	$\sigma_r, net, suction, h_b, \theta_r, \lambda$	۱ - ۵ - ۵	logsig-logsig	۰٫۰۶	۰٫۲۳
۵	$\sigma_r, net, suction, h_b, \theta_r, \theta_s$	۱ - ۵ - ۵	logsig-logsig	۰٫۱	۰٫۱۳
۶	$suction, h_b, \theta_r, \theta_s, \lambda$	۱ - ۵ - ۵	logsig-logsig	۰٫۰۷	۰٫۳۳

جدول ۴. مقادیر وزن‌های اتصالات شبکه‌ی مدل ۱.

لایه‌ی میانی	تنش خالص قائم (kPa)	مکش (kPa)	$h_b$	$\theta_r$	$\theta_s$	$\lambda$	بایس ورودی	نرون خروجی
۱	-۰٫۰۲۳۶	۰٫۰۴۱۳	-۰٫۲۷۱۸	-۰٫۵۶۳	۰٫۵۳۸۳	۰٫۰۵۵۷	۵٫۴۶۴۶	۴٫۴۰۷۹
۲	۰٫۲۱۱۴	-۰٫۰۰۴۱	۰٫۳۸۱۲	۰٫۲۸۹۳	-۱٫۰۴۶۳	۰٫۰۰۰۶	-۱٫۴۲۲	۱٫۸۰۵
۳	۰٫۰۹۳۷	۰٫۰۵۳۳	-۰٫۰۴۲۱	۰٫۳۵۷۲	۰٫۸۰۹۵	-۰٫۰۵۸۵	۶٫۱۹۱۸	۶٫۰۲۰۱
۴	۰٫۵۰۸۲	-۲٫۲۳۷۷	-۰٫۹۹۵۲	-۲٫۲۶۳	-۰٫۳۳۵۹	-۰٫۰۸۳۷	-۱٫۱۰۵	-۱٫۱۷۶۱
۵	-۰٫۳۶۸۳	-۰٫۰۷۷۷	۰٫۰۴۳۴	-۰٫۸۵۴۷	-۰٫۳۲۶۹	۰٫۱۰۱۵	-۷٫۶۵۲	۵٫۳۳۰۴
۶	۵٫۶۰۶۳	۱٫۶۵۲۶	۱٫۹۸۷۳	۵٫۴۵۹۵	-۰٫۷۱۴۳	۰٫۰۷۰۷۹	۶٫۸۵۷۵	-۲٫۱۷۱۴
بایس خروجی	-	-	-	-	-	-	-	۲٫۰۶۳

ریزدانه‌ی شیراز، وقتی که تنش خالص اعمالی به نمونه برابر ۲۰۰ کیلوپاسکال است، مطابق شکل ۷ قابل تخمین است. چنان که مشاهده می‌شود، اعمال تنش باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی مکش ورود هوا می‌شود. مقدار  $\chi$  پس از عبور از  $h_b$  به تدریج کاهش می‌یابد و مقدار حد پایین آن ظاهراً مربوط به قسمت پایینی منحنی SWC و پس از عبور از مکش پسماند<sup>۳</sup> است.

با توجه به جدول ۳ ملاحظه می‌شود که پارامتر  $\theta_s$  تأثیر به‌سزایی در نتایج شبکه دارد. از یک سو با بررسی SWCC خاک‌های مختلف مشاهده شد که عملاً ممکن است  $\theta_s$  دو نوع خاک متفاوت باشند و بقیه‌ی پارامترهای آن‌ها کم و بیش برابر باشند. بنابراین تحلیل حساسیت مشابه پارامتر  $h_b$  امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، عمده‌ترین تأثیر اعمال تنش بر خاک کاهش تداخل است. بنابراین، تغییرات تداخل با  $\chi$  دقیقاً عکس تغییرات تنش با  $\chi$  است.

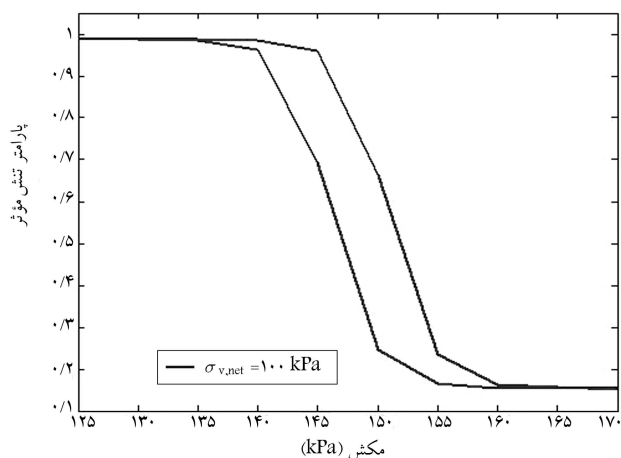
و بالاخره آخرین نکته‌ی قابل ذکر این است که، اگرچه روابط نظری ارائه‌شده برای پارامتر تنش مؤثر در مقاومت برشی و تغییر حجم خاک با هم متفاوت‌اند، در تنش‌های مهندسی معمولی این اختلاف بسیار ناچیز و قابل اغماض است. بنابراین لازم است بین صحت اصل تنش مؤثر در مهندسی و مقادیر جبری ارائه‌شده برای پارامتر تنش مؤثر تفاوت قائل شویم.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی خاک‌های دشت شیراز.

طبقه بندی	Gs	LL	PI	$\gamma_d \max$ (gr/cm <sup>۳</sup> )	$W_{opt}$
CL-ML	۲٫۷۷	۲۷	۷	۱٫۶۶	۲۱٫۵
CL-ML	۲٫۶۹	۲۰	۵	۱٫۹۱	۱۲٫۵

جدول ۶. مشخصات حد بالا و حد پایین منحنی‌های SWC خاک‌های دشت شیراز.

مراجع	$h_b$ (kPa)	$\theta_r$	$\theta_s$	$\lambda$
Johari, A. (۲۰۰۶): حد بالایی	۲۵	۱°	۴۴	۰٫۲۵
Johari, A. (۲۰۰۶): حد پایینی	۵۰	۶٫۹	۴۰	۰٫۲۳

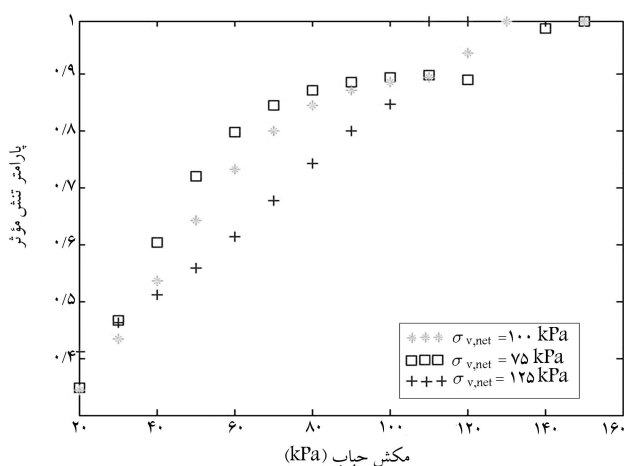


شکل ۷. دامنه‌ی تخمینی پارامتر تنش مؤثر خاک‌های ریزدانه دشت شیراز.

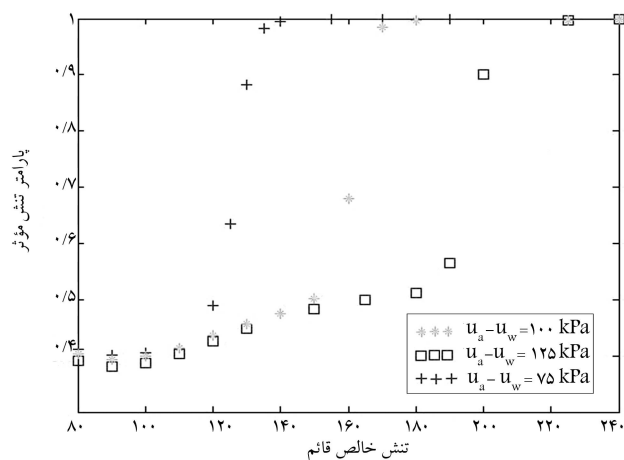
با هدف انجام تحلیل حساسیت شبکه نسبت به پارامترهای ورودی، منحنی‌های SWC خاک‌های مختلف موجود در ادبیات خاک‌های غیراشباع مورد بررسی قرار گرفت. در بین این منحنی‌ها می‌توان خاک‌هایی را یافت (مثلاً خاک سد هوم) که فقط یک پارامتر از منحنی SWC آنها با هم برابر است و بقیه‌ی پارامترها کاملاً متفاوت‌اند.<sup>[۱۷۹]</sup> بنابراین انجام چنین تحلیل‌هایی از نظر فیزیکی قابل قبول است.

شکل ۵ نتایج تحلیل حساسیت پارامتر تنش مؤثر را نسبت به مقدار مکش ورود هوا، در تنش‌های مختلف ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. نتایج مشابه این تحلیل را می‌توان در مورد تنش قائم اعمالی و در مکش‌های مختلف در شکل ۶ مشاهده کرد. تحلیل‌های دیگری که ممکن است شامل حرکت از حالت اشباع ( $\chi = 1$ ) به وضعیت غیراشباع ( $\chi < 1$ ) باشند، در حالتی که مقادیر مکش و مکش ورود هوا بدون تغییر می‌مانند، از نظر فیزیکی بی‌معنی هستند.

از شبکه‌ی تربیت‌شده در این مطالعه، برای تخمین بازه مقدار تنش مؤثر خاک‌های ریزدانه‌ی موجود در دشت شیراز استفاده شد (جدول ۵). در تحقیقات سال ۱۳۸۵، منحنی مشخصه‌ی ۱۴ نوع از این خاک‌ها با استفاده از آزمایش فشار صفحه به دست آمد.<sup>[۴۶]</sup> مشخصات حد بالا و حد پایین این منحنی‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. با بهره‌گیری از این پارامترها، دامنه‌ی مقدار پارامتر تنش مؤثر خاک‌های



شکل ۵. تغییرات مقدار پارامتر تنش مؤثر با مکش ورود هوا.



شکل ۶. تغییرات مقدار پارامتر تنش مؤثر با تنش قائم خالص.

## ۷. نتیجه‌گیری

امیدوارکننده اعلام شد. یادآور می‌شود که مکش ورود هوای خاک‌های مورد بررسی در این تحقیق بازه ۵ تا ۲۵۰ کیلوپاسکال را پوشش می‌دهند. صحت عملکرد شبکه برای خاک‌هایی که دارای مکش ورود هوای بیشتری هستند باید مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین، تمامی داده‌های مورد استفاده در طی آموزش و اعتبارسنجی از آزمایش‌های زهکشی شده برداشت شده‌اند و در این مرحله نمی‌توان با اطمینان درمورد عملکرد شبکه در پیش‌بینی نتایج آزمایش‌های CW سخن گفت.

به‌منظور استفاده از توانایی شبکه‌ی عصبی مصنوعی در پیش‌بینی پارامتر تنش مؤثر خاک‌های غیراشباع در حالت کرنش صفحه‌ی، یک شبکه‌ی پیش‌خور پس‌انتشار خطا آموزش داده شد. توانایی شبکه در پیش‌بینی نتایج آزمایش‌های برش مستقیمی که در طول آموزش تجربه نشده بود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این بررسی

## پانویس

1. suction hardening
2. learning rule
3. residual suction

## منابع

1. Brooks, R.H. and Corey A.T. "Hydraulic properties of porous medium", *Hydrology paper*, (3), Civ. Eng. Dep., Colorado State Univ., Fort Colins, Colo (1964).
2. Bishop, A.W. "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad*, **106** (39), pp. 859-863 (1959).
3. Lee, S.J.; Lee, S.R. and Kim, Y.S. "An approach to stimate unsaturated shear strength using artificial neural network and hyperbolic formulation", *Computer and Geotechnics*, **30**, pp. 489-503 (2003).
4. Kayadelen, C. "Estimation of effective stress parameter of unsaturated soils by using artificial neural network", *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. DOI*, **10**, 1002/nag (2007).
5. Lee, I.M.; Sung, S.G. and Cho, G.C. "Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite", *Can. Geotech. J.*, **42**, pp. 624-631 (2005).
6. Rassam, D.W. and Williams, D.J. "A relationship describing the shear strength of unsaturated soils", *Can. Geotech. J.*, **36**, pp. 363-368 (1999).
7. Russell, A.R. and Khalili, N. "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing", *Can. Geotech. J.*, **41**, pp. 1179-1192 (2004).
8. Russell, A.R. and Khalili, N. "A unified bounding surface plasticity for unsaturated soils", *Int. J. Numerical and Analytical Method in Geo mechanics*, **30**, pp. 181-212 (2006).
9. Bishop, A.W. and Donald, I.B. "The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus", *Proc. 5th Int. Con. Soil ech.*, **1**, pp. 13-21 (1961).
10. Bishop, A.W. and Blight, G.E. "Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated soils", *Geotechnique*, **13**, pp. 177-197 (1963).
11. Blight, E.G. "Effective stress evaluation for unsaturated soils", *ASCE, J. of Soil Mech. And Found. Div.*, **93**, SM2 (1967).
12. Adams, B.A. and Wulfsohn, D. "Critical state behavior of an agriculture soil", *J. Agric. Engng Res.*, **70**, pp. 345-354 (1998).
13. Escario, V. and Juca, J. "Strength and deformation of partly saturated soils", *Proc. of the 12th International Conf. on soil Mech. And Found. Eng., Rio de janiro*, **2**, pp. 43-46 (1989).
14. Fredlund, D.G.; Xing, A.; Fredlund, M.D. and Barbour, S.L. "The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil water characteristic curve", *Can. Geotech. J.*, **33**, pp. 440-448 (1996).
15. Gallage, C.P.K. and Uchimura, T. "Effect of wetting and drying on the unsaturated shear strength of a silty sand under low suction", *Proc. Unasaturated Soils 2006, ASCE, Sharma and Singhal*, pp. 1247-1258 (2006).
16. Gan, J.K.M. and Fredlund, D.G. "Shear strength characteristics of two saprolitic soils", *Can. Geotech. J.*, **33**, pp. 595-609 (1996).
17. Garven, E.N. and Vanapalli, S.K. "Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils", *Proc. Unasaturated Soils 2006, ASCE, Sharma and Singhal*, pp. 2570-2581 (2006).
18. Habibagahi, G. and Bamdad, A. "A neural network framework for mechanical behavior of unsaturated soils", *Can. Geotech. J.*, **40**, pp. 684-693 (2003).
19. Khalili, N. and Khabbaz, M.H. "A unique relationship for  $\chi$  for the determination of the shear strength of unsaturated soils", *Geotechnique*, **48**, pp. 1-7 (1998).
20. Xu, Y.F. "Fractal approach to unsaturated shear strength", *J. Geotech. Geoenv. Eng., ASCE*, **3**, pp. 264-273 (2004).
21. Khalili, N.; Geiser, F. and Blight, G.E. "Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidences", *Int. J. of Geomechanics*, **4**(2), pp. 115-126 (2004).
22. Levenberg, K. "A method for the solution of certain problems in least squares", *Quart. Appl. Math*, **2**, pp. 164-168 (1944).
23. Loret, B. and Khalili, N. "An effective stress elastoplastic model for unsaturated soils", *Mech. Mater.*, **44**, pp. 97-116 (2002).
24. McKee, C.R. and Bumb, A.C. "The importance of unsaturated flow in designing a monitoring system for a hazardous wastes and environmental emergencies", *Hazardous materials Control Research Institute national Conference, Houston, Tex.*, pp. 50-58 (March 1984).

25. Marquardt, D. "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters", *SIAM J. Appl. Math.*, **11**, pp. 431-441 (1963).
26. MATLAB, The MathWorks, Inc. Natick, Massachusetts (2004).
27. Miller, G.A. and Hamid, T.B. "Interface direct shear testing of unsaturated soil", *Geotechnical Testing Journal*, **30**(3), pp. 1-10 (2006).
28. Miao, L.; Liu, S. and Lai, Y. "Research of soil-water characteristics and shear strength of nanyang expansive soil", *Engineering Geology*, **65**, pp. 261-267 (2002).
29. Nguyen, D. and Widrow, B. "The truck backer-upper: An example of self learning in neural networks", International Conference on Neural Networks, Washington D.C., IEEE., **2**, pp. 363-375 (18-22 June 1989).
30. Oberg, A.L. and Salfors, G. "Determination of shear strength parameters of silts and sands based on the water retention curve", *Geot. Testing J. GTJODJ*, **20**(1), pp. 40-48 (1997).
31. Rahardjo, H.; Heng, O.B. and Choon, L.E. "Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests", *Can. Geotech. J.*, **41**, pp. 421-436 (2004).
32. Rampino, C.; Mancuso, C. and Vianale, F. "Experimental behavior and modeling of an unsaturated compacted soil", *Can. Geotech. J.*, **37**, pp. 748-763 (2000).
33. Thu, T.M.; Rahardjo, H. and Leong, E.C. "Effect of hysteresis on the shear strength envelopes from constant water content and consolidated drained triaxial tests", *Proc. Unsatrated Soils 2006, ASCE, Sharma and Singhal*, pp. 1212-1222 (2006).
34. Vanapalli, S.K.; Fredlund, D.G.; Pufahl, D.E. and Clifton, A.W. "Model for the prediction of shear strength with respect to matric suction", *Can. Geot. J.*, **33**, pp. 379-392 (1996).
35. Vanapalli, S.K.; Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E. "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic curve of a compacted till", *Geotechnique*, **49**, pp. 143-159 (1999).
36. Johari, A.; Habibagahi, G. and Ghahramani, A. "Prediction of soil-water characteristic curve using genetic programming", *ASCE; Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(5) (2006).