

مقایسه عملکرد متغیرهای تنش در بیان مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع

علیرضا باقریه^{۱*}، علی فارسی جانی^۲، رضا فرپور^۳

- ۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر
- ۲- دانشجوی دکتری عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
- ۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

bagheri@malayeru.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۱/۲۸]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۴/۱۴]

چکیده- مقاومت برشی از جمله موارد مهم و اساسی برای تعیین رفتار مکانیکی خاک‌ها است. در مورد مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع، بین پژوهشگران اختلاف نظرهایی وجود دارد. در این میان دو روش برای تعیین مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع ارائه شده است. در یکی از روش‌ها مقاومت برشی خاک با استفاده دو متغیر مستقل تنش مانند تنش خالص و مکش توصیف می‌شود؛ در این روش پارامترهای مقاومتی در حالت‌های اشباع و غیر اشباع با یکدیگر متفاوت و مستقل از یکدیگر است؛ به عبارت دیگر به محض ایجاد مکش در خاک، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی اشباع اعتبار خود را از دست می‌دهند. متقابلاً در دیدگاه مبتنی بر تنش مؤثر، آثار تنش خالص و مکش در تنش مؤثر ادغام می‌شود و پارامترهای مقاومت برشی مستقل از مکش در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش با انجام آزمایش‌های برش مستقیم غیر اشباع و جمع‌آوری داده‌های پژوهشگران دیگر در این زمینه، مقایسه‌ای بین روش‌های تعیین مقاومت برشی خاک در حالت غیر اشباع انجام شده و مزایا و معایب آنها بررسی شده است. نتایج حاکی از مزیت‌های استفاده از تنش مؤثر در ساده‌سازی پیش‌بینی مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع است و در همین حالت همان پارامترهای مقاومت برشی اشباع برای حالت غیر اشباع نیز قابل تعمیم است.

واژگان کلیدی: مقاومت برشی، غیر اشباع، تنش مؤثر، تنش خالص، برش مستقیم.

۱- مقدمه

$$\tau_f = c + (\sigma - u_w) \tan(\phi) \quad (1)$$

که در آن C چسبندگی خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک است.

رفتار مکانیکی خاک که بیشتر وابسته به رفتار تغییر حجمی و مقاومت برشی است، با استفاده از متغیرهای حالت تنش بیان می‌شود. این متغیرها مستقل از ویژگی‌های خاک است و تعداد آنها به تعداد فازهای موجود در خاک بستگی دارد [2].

تنش مؤثر برای خاک‌های غیر اشباع در رابطه ۲ بیان شده است [3,4].

بررسی رفتار مکانیکی خاک‌ها در شرایط مختلف یکی از بحث‌های مهم در علم مکانیک خاک است. رفتار مکانیکی خاک‌ها به سه بخش رفتار هیدرولیکی، مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی در شرایط مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. بخش عمده پیش‌بینی طراحان از رفتار خاک در شرایط مختلف وابسته به علم و شناخت آنها نسبت به تغییر رفتار برشی خاک در شرایط مختلف است. مقاومت برشی خاک تعیین کننده رفتار برشی خاک در شرایط متفاوت است که با بهره‌گیری از اصل تنش مؤثر ترزاقی [1] در معیار گسیختگی موهر کولمب به

و c' نیز بیان کننده چسبندگی خاک در حالت اشباع است. در این روش پارامترهای مقاومتی در حالت اشباع و غیر اشباع مستقل و متفاوت از یکدیگر هستند. به عبارت دیگر در مکش‌های متفاوت، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نیز متفاوت است. شکل (۱) پوش گسیختگی موهركلمب را برای رابطه ۴ نشان می‌دهد.

شکل ۱- پوش گسیختگی برشی سه بعدی (فردلان و همکاران ۱۹۷۸)[7]

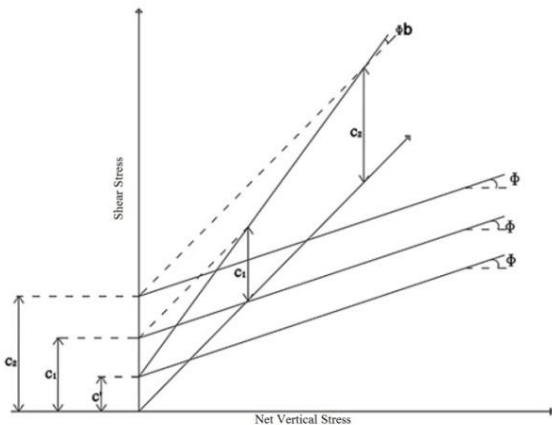


Fig. 1. Failure envelope in three dimensional stress space according to Fredlund et al. 1978[7]

می‌توان پوش گسیختگی موهركلمب خاک غیراشباع را در دستگاه مختصات دو بعدی تنش برشی در مقابل تنش قائم خالص مانند شکل (۲) نشان داد.

شکل ۲- تصویر پوش گسیختگی برشی در صفحه تنش برشی- تنش خالص (فردلان و همکاران ۱۹۷۸)[7]

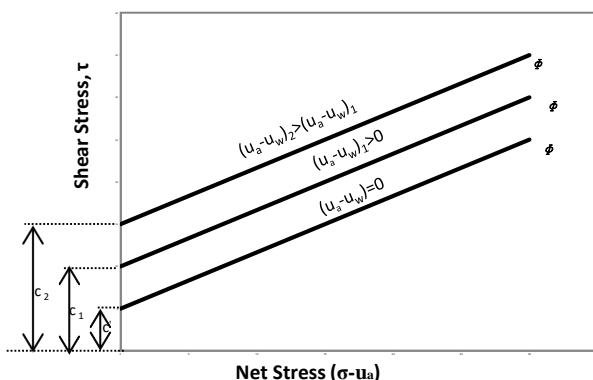


Fig. 2. Shear stress versus net stress according to Fredlund et al. 1978[7]

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در هر مکشی، مقدار متفاوتی برای چسبندگی خاک به دست می‌آید.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1-2)$$

یا

$$\sigma' = (\sigma_{\text{net}}) + \chi(s) \quad (2-2)$$

که در آن u_a فشار هوای منفذی، χ ضریب تنش مؤثر، s مکش خاک و σ_{net} تنش خالص است. روابط زیادی برای بیان ضریب تنش مؤثر به وسیله‌ی پژوهشگران ارائه شده است که یکی از موفق‌ترین این روابط، رابطه‌ای است که به وسیله‌ی خلیلی و خباز ارائه شده است [5].

$$\chi = \begin{cases} \left(\frac{u_a - u_w}{u_e} \right)^{-0.55} & (u_a - u_w) > u_e \\ 1 & (u_a - u_w) \leq u_e \end{cases} \quad (3)$$

که در آن u_e مکش ورود هوا، و متناظر با حالتی است که درجه اشباع خاک کمتر از ۱ می‌شود [6].

و نیز نسبت $\left(\frac{u_a - u_w}{u_e} \right)$ به عنوان نسبت مکش معرفی

شده است.

پیچیدگی رفتار خاک در حالت اشباع به علت عدم وجود حباب‌های هوا در فضای خالی بین ذرات، نسبت به خاک غیر اشباع کمتر است؛ این در حالی است که بیشتر خاک‌ها در شرایط محیطی به صورت غیر اشباع است. از این رو باید در روابط ارائه شده برای بیان رفتار مکانیکی خاک، تأثیر وجود هوای حفره‌ای نیز در نظر گرفته شود. برای بیان مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع دو روش متفاوت مطرح است؛ روش استفاده از متغیرهای مستقل و روش مبتنی بر تنش مؤثر.

فردلان و همکاران [7] با بهره‌گیری از متغیرهای مستقل تنش، رابطه زیر را برای بیان مقاومت برشی خاک‌ها در حالت غیر اشباع ارائه نمودند.

$$\begin{cases} \tau_f = c + (\sigma - u_a) \tan(\phi) \\ c = c' + (u_a - u_w) \tan(\phi^b) \end{cases} \quad (4)$$

که در آن c چسبندگی ظاهری خاک است که متناسب با مقدار مکش درون خاک، و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک است که متناظر با تنش خالص وارد شده بر خاک است. ϕ^b نشان دهنده زاویه اصطکاک داخلی خاک متناظر با مکش خاک $(u_a - u_w)$

باقریه و فارسی جانی [10] و جمع آوری اطلاعات آزمایشگاهی پژوهشگران دیگر در این زمینه، مقایسه‌ای بین این دو روش صورت گیرد و مزایا و معایب دو روش مورد بررسی قرار گرفته تا روش بهتر با ذکر امتیازات آن معین شود. با این روش گامی مهم برای آسانی محاسبه و پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در شرایط اشباع و غیر اشباع برداشته می شود.

۲- بررسی آزمایش‌های باقریه و فارسی جانی

[10]

در این پژوهش نتایج یک برنامه آزمایشگاهی که به وسیله باقریه و فارسی جانی [10] منتشر شده است به اختصار ذکر می‌گردد. نتایج پژوهش بالا به کمک نتایج دیگری که از سایر مقالات استخراج شده است، در ارزیابی عملکرد متغیرهای تنش به کار رفته است.

شرح کامل آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده در حالت غیراشباع و روش تعیین منحنی مشخصه آب-خاک به تفصیل در پژوهش باقریه و فارسی جانی [10] بیان شده است و در اینجا به بیان نتایج حاصل از آن اکتفا شده است. شکل (۳) نشان دهنده منحنی مشخصه آب-خاک، و جدول (۱) مشخصات تنش برشی نمونه‌های خاک آزمایش شده را نشان می‌دهد.

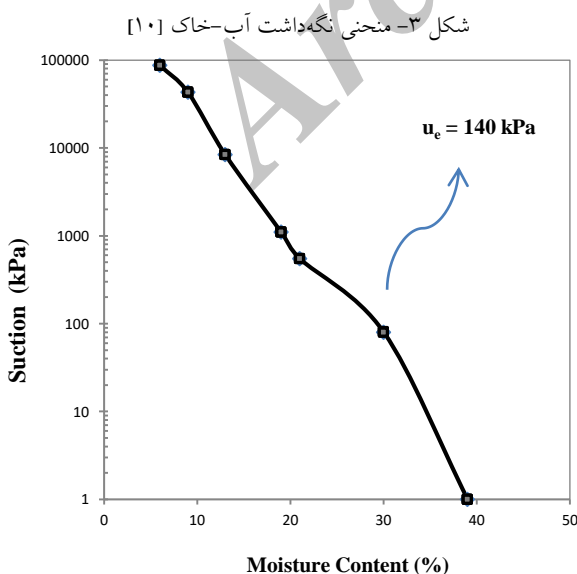


Fig. 3. Water retention curve [10]

روش دوم، مبتنی بر استفاده از اصل تنش مؤثر است و پس از زیر سوال بردن اعتبار اصل تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع به وسیله جینگز و بورلند [8] کمتر مورد توجه قرار گرفت. جینگز و بورلند [8] بیان داشتند که با افزایش میزان درجه اشباع خاک، مقدار مکش درون خاک کاهش می‌یابد، از اینرو تنش مؤثر کاهش یافته پس انتظار افزایش حجم نمونه‌های خاک غیراشباع می‌رود؛ درحالی‌که در خاک‌های فروریزی کاهش حجم رخ می‌دهد و به همین علت اعتبار اصل تنش مؤثر در خاک‌های غیر اشباع را زیر سوال بردند. اما پس از مقاله خلیلی و خباز [5] رویکرد مجددی به این روش بوجود آمد؛ خلیلی و همکاران [9] پدیده تغییر شکل فروریزی را یک تغییر شکل الاستوپلاستیک تعبیر کرده و تغییر شکل بوجود آمده در اثر اشباع شدن خاک‌های رمبنده را با مفهوم سخت شوندگی ناشی از مکش توجیه نمودند. در این روش پارامترهای مقاومتی خاک در حالت اشباع و غیر اشباع یکسان است و تغییرات مکش تأثیری بر میزان پارامترهای مقاومت برشی خاک ندارد. به عبارت دیگر، در صورتی که تخمین مناسبی از میزان تنش مؤثر در دست باشد، نیازی به اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی در شرایط غیراشباع وجود ندارد و پارامترهای حالت اشباع کماکان در این حالت نیز معتبر و قابل استفاده هستند.

با استفاده از اصل تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع، رابطه زیر برای بیان مقاومت برشی خاک‌ها در حالت غیراشباع ارائه شده است.

$$\tau_f = c + [(\sigma - u_a) + \chi s] \tan \phi'$$

یا

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi' \quad (5)$$

که در آن C چسبندگی خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک، و χ نشان دهنده ضریب تنش مؤثر S مکش خاک را بیان می‌کند.

همان‌گونه که توضیح داده شد، تفاوت‌های زیادی بین این دو روش ارائه شده، وجود دارد. در این پژوهش سعی بر این شده است که با بررسی آزمایش‌های برش مستقیم غیر اشباع

شکل ۵- پوش گسیختگی خاک مطالعه شده بر اساس متغیرهای مستقل تنش

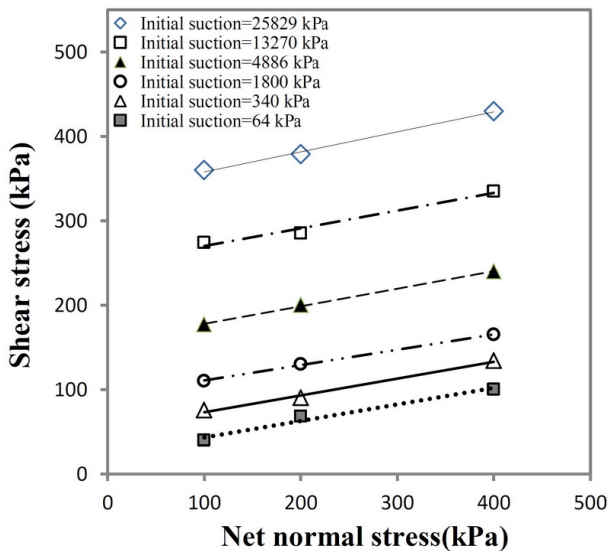


Fig. 5. Shear stress envelope of soil by using independent stress variables

از طرفی با توجه به تنش قائم خالص وارد شده بر نمونه‌های خاک و با در دست داشتن میزان مکش نمونه‌ها در هر آزمایش (از طریق منحنی مشخصه آب-خاک و میزان رطوبت آنها) و به کمک روابط ۲ و ۳ تنش قائم مؤثر برای هر نمونه مشخص شد.

در شکل (۴) مشاهده می‌شود که در مکش‌های متفاوت، خطوط پوش گسیختگی روی یک خط با ضریب همبستگی مناسب ($R^2=0.98$) قرار گرفته‌اند؛ به عبارت دیگر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در شرایط مختلف (اشباع و غیراشباع) یکسان است و تغییرات مکش درون خاک تأثیری بر پارامترهای مقاومت برشی خاک نداشته است و تغییرات تنش برشی خاک تنها به علت تغییرات تنش مؤثر قائم اعمالی روی نمونه‌های خاک رخ می‌دهد و این موضوع مؤید اعتبار اصل تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع است؛ به عبارت دیگر اگر تخمین مناسبی از میزان تنش مؤثر در مکش‌های مختلف در دست باشد، نیازی به اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی در شرایط غیراشباع وجود ندارد و پارامترهای حالت اشباع کماکان در این حالت نیز معتبر و قابل استفاده است.

در شکل (۵) مشاهده می‌شود که در هر مکش متفاوت، خط پوش گسیختگی خاک تغییر کرده است و فاصله تغییرات به حدی زیاد است که طراحان در شرایط مختلف (مکش‌های متفاوت) با مقادیر مختلفی از پارامترهای مقاومت برشی مواجه

جدول ۱- مقادیر تنش برشی در لحظه گسیختگی در نمونه‌های خاک تحت

Net Normal Stress (kPa)	Matric Suction (kPa)				
	25283	814	204	659	144
4	2	4	2	4	2
100	410	315	220	145	114
200	359	265	180	110	70
400	340	254	157	90	55.5

Table 1. Shear stresses at failure under different conditions of suction and normal stress

۱-۲- تحلیل نتایج آزمایش‌های باقریه و فارسی جانی [10]

بنابر اهداف پژوهش که به آن اشاره خواهد شد، با انجام آزمایش‌های تعیین مکش (تعیین منحنی مشخصه آب-خاک) از خاکی استفاده شد که مقدار مکش بافتی آن زیاد باشد. خاک انتخاب شده برای انجام آزمایش برش مستقیم، خاکی ریزدانه و دارای ذرات کوچکتر از الک شماره ۲۰۰ است.

تغییرات تنش برشی بیشینه به ازای تنش عمودی مؤثر و تنش عمودی خالص در شکل‌های (۴) و (۵) رسم شده است.

نمونه‌های خاک در دستگاه برش مستقیم تحت نیروی عمودی مختلف آزمایش شدند که حاصل تقسیم این نیروها بر مساحت نمونه‌ها (ابعاد قالب دستگاه برش مستقیم) نشان دهنده تنش قائم خالص وارد شده بر آنها بوده است.

شکل ۴- پوش گسیختگی خاک مطالعه شده بر اساس نظریه تنش مؤثر

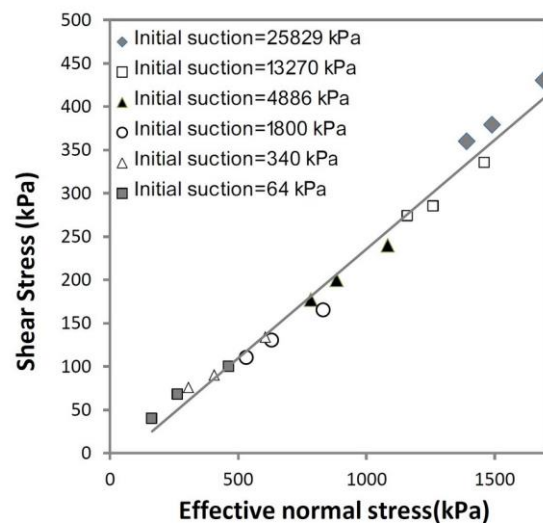


Fig. 4. Shear stress envelope according to effective stress concept at different suctions

پیش‌بینی مقاومت برشی خاکهای غیر اشباع شود. پارامترهای ϕ^b و ϕ تعیین شد و مقادیر آنها در جدول (۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برخلاف آنچه که در مدل گفته شده فرض شده است، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی خاک ϕ در مکش‌های متفاوت عددی ثابت نیست. همچنین در این جدول ملاحظه می‌شود که پارامتر ϕ^b همان‌گونه که در توضیح شکل (۶) گفته شد، در مکش‌های مختلف ثابت نیست. این نتیجه نشان دهنده ضعف مدل فردلاند و همکاران [7] در بیان مقاومت برشی خاک در عین پیچیدگی و تعداد پارامترهای بیشتر آن است.

شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده چسبندگی ظاهری در برابر مکش

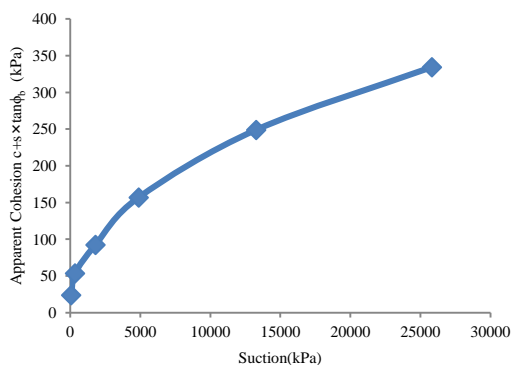


Fig. 6. The measured apparent cohesion vs. suction

جدول ۲- مقادیر پارامترهای خاک آزمایش شده در مکش‌های مختلف بر

اساس مدل فردلاند و همکاران (۱۹۷۸) [7]

Suction(kPa)	ϕ (degree)	ϕ^b (degree)
25829	13.3	0.393
13270	11.9	0.63
4886	11.8	1.2
1800	10.3	1.5
340	11.2	6.1
64	11	6.1

Table 2. Shear strength parameters at different suctions according to Fredlund et al. (1978) approach [7]

در تعیین تنش مؤثر خاک غیر اشباع، ضریب تنش مؤثر نقش تعیین کننده‌ای دارد که بر اساس پژوهش انجام شده به وسیله خلیلی و خباز [4] طبق رابطه ۳ قابل تخمین است. در این پژوهش به بررسی درستی این رابطه نیز پرداخته شده است. برای نیل به این هدف، ابتدا ضرایب تنش مؤثر (χ) حاصل از آزمایش‌ها با مشخص بودن تنش‌های قائم اعمالی بر نمونه‌ها،

هستند که اندازه این تغییرات بسیار بزرگ است. این تغییرات باعث پیچیدگی رفتار خاک شده و آگاهی پژوهشگران و طراحان را از رفتار خاک در شرایط مختلف پیچیده‌تر می‌کند؛ از این رو که در این روش با هر تغییری در مقدار مکش خاک، مقدار چسبندگی آن نیز تغییر می‌کند که این مقدار مجهول است. و برای تعیین آن در هر مکش متفاوت باید آزمایش‌های زیادی انجام شود که زمان و هزینه بیشتری می‌خواهد.

همان‌گونه که در قسمت ۲-۱ بیان شد، سعی بر این بوده است تا نمونه خاک مطالعه شده دارای مقادیر مکشی بالایی باشد تا نتیجه مطلوبی که در شکل (۴ و ۵) ارائه شده است، به دست آید و نشان داده شود که تغییرات چسبندگی خاک در روش متغیرهای مستقل فردلاند و همکارانش [7] هنگامی که بازه تغییرات مکش زیاد است، تا چه اندازه متغیر و متفاوت است. درحالی که این تغییرات مکش، تأثیری بر پارامترهای خاک در روش مبتنی بر تنش مؤثر پیشنهاد شده به وسیله خلیلی و خباز [4] نداشته است و با توجه به این روش می‌توان به سهولت پارامترهای مقاومت برشی خاک را در حالت اشباع با کمترین هزینه و سریع‌ترین زمان به دست آورد و در تمامی حالات مختلف مکشی به آنها رجوع کرد.

در این مرحله برای بررسی بیشتر مدل ارائه شده به وسیله فردلاند و همکاران [7] با ترسیم مقاومت‌های برشی حاصل از آزمایش‌ها در برابر مکش‌های متفاوت و با توجه به رابطه ۴، مقادیر ϕ و ϕ^b تعیین شد تا با بررسی پارامترهای حاصل از مدل فردلاند و همکاران [7] درباره دقت آن بحث شود.

شکل (۶) نشان دهنده مقادیر چسبندگی ظاهری در برابر مکش‌های مختلف است؛ همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شیب این خط با افزایش مکش به تدریج کاهش می‌یابد و آهنگ تغییرات خطی نیست در حالیکه رابطه پیشنهادی فردلاند و همکاران تغییرات خطی را بر اساس رابطه ۴ پیشنهاد می‌کنند. نتایج شکل (۶) بیانگر عدم اعتبار این نظر است و نشان می‌دهد مقدار ϕ^b ثابت نیست و نمی‌توان آنرا یک پارامتر ثابت در خاک در نظر گرفت. خطای ثابت در نظر گرفتن این پارامتر به ویژه در دامنه‌های بزرگ مکش می‌تواند موجب خطاهای زیادی در

شکل ۸- منحنی نگه‌داشت آب-خاک (داده‌های اشنلمن و همکاران [11])

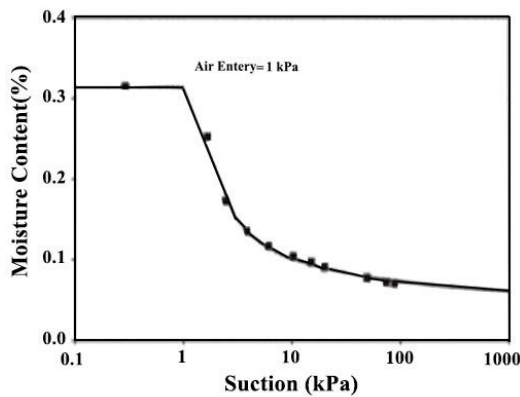


Fig. 8. Water retention curve (data from Schnellmann et. al, 2013 [11])

جدول ۳- مقادیر تنش برشی بیشینه (داده‌های اشنلمن و همکاران [11])

Net Normal Stress (kPa)	Suction (kPa)				
	15	45	95	195	445
0	3	9	12	23	31
50	36	44	48	56	64
230	161	168	-	188	192
320	218	231	239	241	246

Table 3. Shear stresses at failure for different suction values (data from Schnellmann et. al, 2013 [11])

شکل ۹- پوش گسیختگی بر اساس نظریه متغیرهای مستقل تنش (داده‌های اشنلمن و همکاران [11])

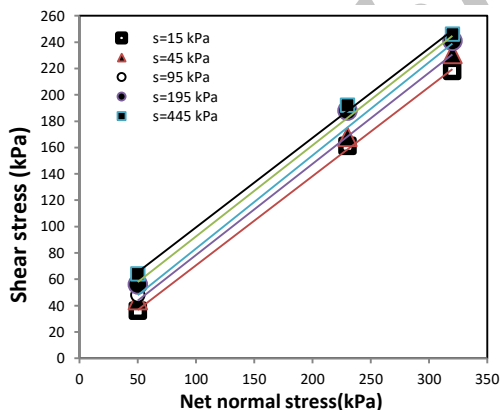


Fig. 9. Shear strength envelope according to independent stress variables approach (data from Schnellmann et. al, 2013 [11])

با توجه به جدول (۳)، پوش گسیختگی برای خاک مورد نظر بر اساس نظریه متغیرهای مستقل تنش فردلاند و همکاران [7] در شکل (۹) ارائه شده است. با توجه به جدول (۳) و شکل (۸) مقادیر تنش مؤثر قائم برای نمونه خاک با استفاده از روابط ۲ و ۳ به دست آمد. پوش گسیختگی بر اساس فرضیه تئوری تنش مؤثر در شکل (۱۰) ارائه شده است.

تنش‌های برشی مقاوم به دست آمده از آزمایش‌ها و همچنین مشخص بودن زاویه اصطکاک داخلی اشباع و چسبندگی مؤثر خاک و با توجه به رابطه ۵، به دست آمدند و با مقادیر ضرایب تنش مؤثری که از رابطه خلیلی و خباز [5] به دست آمده بود؛ در دستگاه مختصات نیمه لگاریتمی (ضریب تنش مؤثر بر حسب نسبت مکش) ترسیم و مقایسه شدند؛ این داده‌ها در شکل (۷) ارائه شده است. لازم به توضیح است که نسبت مکش همان نسبت حاصل از تقسیم مکش خاک بر مکش ورودی هوا است که در رابطه ۳ ارائه شده است.

شکل ۷- مقادیر ضریب تنش مؤثر اندازه‌گیری شده در برابر نسبت مکش برای نمونه‌های خاک آزمایش شده

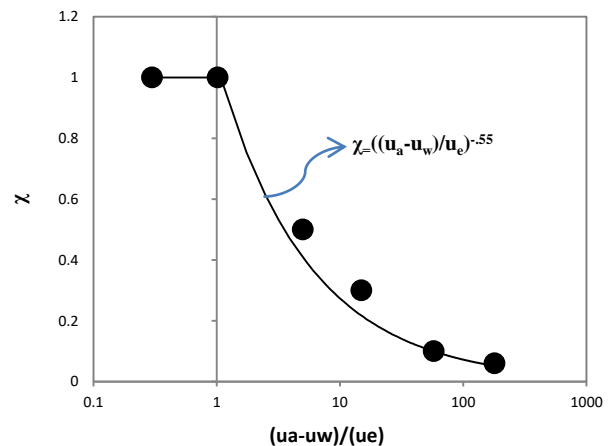


Fig. 7. The measured effective stress parameter versus normalized suction

همان‌گونه که در (شکل ۷) مشاهده می‌شود، مقدار ضرایب تنش مؤثری که از رابطه خلیلی و خباز [5] به دست آمده است، به مقدار ضرایب تنش مؤثر بدست آمده از آزمایش‌های انجام گرفته، بسیار نزدیک است؛ از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که رابطه خلیلی و خباز [5] با دقت بالایی قادر به تخمین ضریب تنش مؤثر است.

۳- نتایج آزمایش‌های سایر پژوهشگران

۳-۱- نتایج آزمایش‌های اشنلمن و همکاران

اشنلمن و همکاران روی خاکی از جنس شن و ماسه سیلتی آزمایش‌هایی برای تعیین مقاومت برشی خاک انجام دادند که منحنی نگه‌داشت آب آن در شکل (۸) نشان داده شده و داده‌های مقاومت برشی آن در جدول (۳) خلاصه شده است.

اعتبار این نظر است و نشان می‌دهد مقدار ϕ^b ثابت نیست و نمی‌توان آنرا یک پارامتر ثابت در خاک در نظر گرفت.

شکل ۱۱- مقادیر اندازه‌گیری شده چسبندگی ظاهری در برابر مکش (داده‌های اشنلنم و همکاران [11])

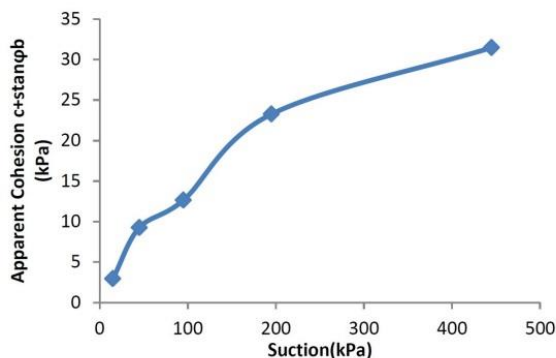


Fig. 11. The measured apparent cohesion vs. suction (data from Schnellmann et. al, 2013 [11])

شکل ۱۲- رابطه بین ضریب تنش مؤثر و نسبت مکش برای نمونه‌های خاک آزمایش شده به وسیله اشنلنم و همکاران [11]

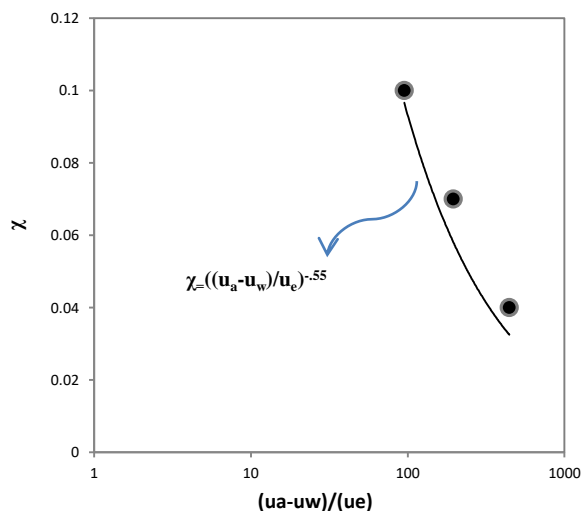


Fig. 12. Effective stress parameter χ (data from Schnellmann et. al, 2013 [11])

در شکل (۱۲) به بررسی درستی رابطه خلیلی و خباز [۵] در تعیین ضریب تنش مؤثر خاک غیراشباع بر اساس نتایج اشنلنم و همکاران [11] پرداخته شده است؛ از ایترو ضرایب تنش مؤثر خاک که از نتایج آزمایش‌ها و به کمک رابطه ۵ به دست آمده‌اند با ضرایب تنش مؤثر به دست آمده از رابطه ۳، در دستگاه مختصات ضریب تنش مؤثر برحسب نسبت مکش مقایسه شده‌اند.

شکل ۱۰- پوش گسیختگی بر اساس نظریه تنش مؤثر

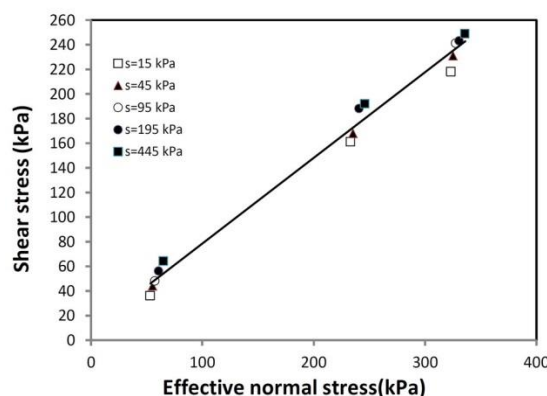


Fig. 10. Shear strength envelope according to effective stress approach (data from Schnellmann et. al, 2013 [11])

با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که خطوط پوش گسیختگی در مکش‌های مختلف، متفاوت از هم است. البته همان‌گونه که مشاهده می‌شود، علت نزدیک بودن این داده‌ها به یکدیگر این است که دامنه مکش‌های اعمال شده بزرگ نبوده است؛ از اینرو پوش گسیختگی در مکش‌های متفاوت به یکدیگر نزدیک شده‌اند. در مقابل، با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که همان داده‌ها بر اساس تنش مؤثر، با دقت بالایی ($R^2=0.99$) به وسیله خط واحدی برازش شده‌اند. پس می‌توان نتیجه گرفت که در مکش‌های پایین نیز روش مبتنی بر تنش مؤثر با دقت مطلوبی کارایی دارد. اما باید توجه داشت که در نتایج آزمایش‌های اشنلنم و همکاران [12] با وجود نزدیک بودن خطوط پوش گسیختگی در روش مبتنی بر متغیرهای مستقل تنش، در این روش همچنان به ازای مکش‌های متفاوت، چسبندگی خاک متفاوت است ولی در روش مبتنی بر تنش مؤثر، در هر شرایطی (مکش‌های متفاوت)، مقدار چسبندگی خاک یکسان بوده و می‌توان رفتار برشی خاک را با زحمت کمتری به وسیله یک پوش گسیختگی واحد بیان نمود.

در شکل (۱۱) مقادیر چسبندگی ظاهری به ازاء مکش‌های مختلف ترسیم شده است؛ همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شیب این خط در مکش‌های کوچک بیشترین مقدار را دارد، با افزایش مکش به تدریج شیب منحنی که معرف $\tan\phi^b$ است، کاهش می‌یابد و آهنگ تغییرات چسبندگی ظاهری خطی نیست در حالیکه رابطه پیشنهادی فردلانند و همکاران تغییرات خطی را بر اساس رابطه ۴ پیشنهاد می‌کنند. نتایج شکل (۱۱) بیانگر عدم

استفاده از روابط ۲ و ۳ به دست آمد. شکل (۱۳) نشان دهنده پوش گسیختگی فردلانند و همکاران [7] (بر مبنای متغیرهای مستقل) و شکل (۱۴) نشان دهنده پوش گسیختگی موهرکلمب بر مبنای تئوری تنش مؤثر، برای داده‌های آزمایشگاهی واناپالی و همکاران [12] است.

شکل ۱۴- پوش گسیختگی بر اساس نظریه تنش مؤثر (داده‌های واناپالی و همکاران [12])

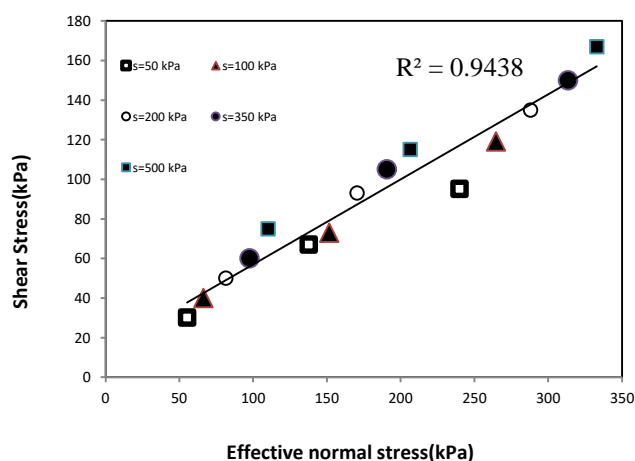


Fig. 14. Shear strength envelope according to effective stress approach (data from Vanapalli et al., 1996 [12])

همان‌گونه که در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌شود، بازه تغییرات چسبندگی خاک در روش متغیرهای مستقل بزرگ است و در مکش‌های متفاوت با توجه به خطوط پوش گسیختگی متفاوت، پارامترهای مقاومت برشی متفاوتی نیز ارائه شده است؛ در حالی که روش مبتنی بر تنش مؤثر با دقت مطلوب و زحمت کمتری به کمک خط پوش گسیختگی واحد، رفتار برشی و پارامترهای مقاومت برشی خاک را بیان نموده است. علاوه بر این در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که شیب خطوط در مکش‌های مختلف متفاوت است بنابراین نمی‌توان زاویه ϕ را در مکش‌های مختلف ثابت در نظر گرفت.

در شکل (۱۵) تغییرات چسبندگی ظاهری بر اساس مدل فردلانند و همکاران [8] ترسیم شده است. در محدوده مکش‌های اعمال شده، تغییرات خطی است. شاید اگر در دامنه بزرگتری مکش تغییر می‌کرد شکستگی و تغییر شیب این منحنی مانند مجموعه آزمایش‌های قبلی قابل مشاهده بود.

همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود ضرایب به دست آمده از رابطه ۳ با ضرایب به دست آمده از آزمایش‌های سه محوری خاک غیراشباع به هم نزدیک بوده که درستی رابطه ارائه شده به وسیله‌ی خلیلی و خباز [5] را نشان می‌دهد.

۲-۳- نتایج آزمایش‌های واناپالی و همکاران

داده‌های آزمایشگاهی واناپالی و همکاران [12] در جدول (۴) ارائه شده است. مقدار مکش متناظر با ورود هوا به ازای تنش‌های متفاوت، در این جدول ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر تنش برشی حداکثر داده‌های واناپالی و همکاران [12]

Net normal Stress (kPa)	Air entry Suction (kPa)	Matric Suction (kPa)				
		50	100	200	350	500
25	20	30	40	50	60	75
100	30	67	73	93	105	115
200	45	95	119	135	150	167

Table 4. Shear stresses at failure for different suction values (data from Vanapalli et. al, 1996 [12])

شکل ۱۳- پوش گسیختگی بر اساس نظریه متغیرهای مستقل تنش (داده‌های واناپالی و همکاران [12])

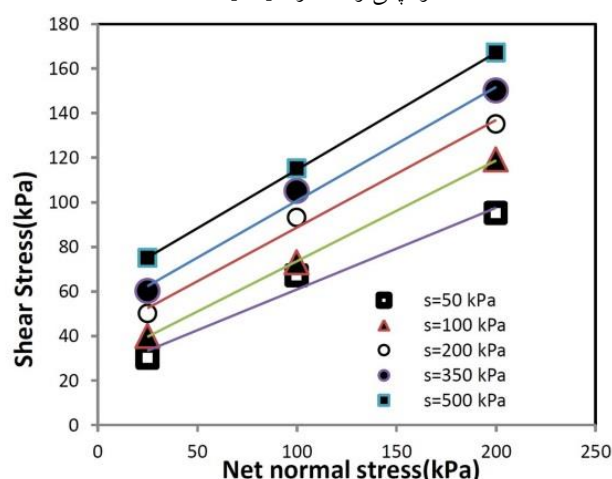


Fig. 13. Shear strength envelope according to independent stress variables approach (data from Vanapalli et. al, 1996 [12])

با توجه به اعداد (جدول ۴) مقادیر تنش برشی مؤثر با

(۱۹) نشان دهنده پوش گسیختگی بر مبنای تنش مؤثر است.

جدول ۵- مقادیر تنش برشی بیشینه داده‌های بو عزا و همکاران [13]

Net normal (kPa) stress	Air entry suction (kPa)	Matric Suction (kPa)			
		0	25	50	100
30	10	27	-	-	-
50	10	-	55	67	72
70	10	50	-	-	-
100	10	75	90	102	112
150	10	-	130	135	165

Table 5. Shear stresses at failure for different suction values (data from Bouazza et. al, 2013 [13])

شکل ۱۷- منحنی مشخصه آب-خاک بو عزا و همکاران [13]

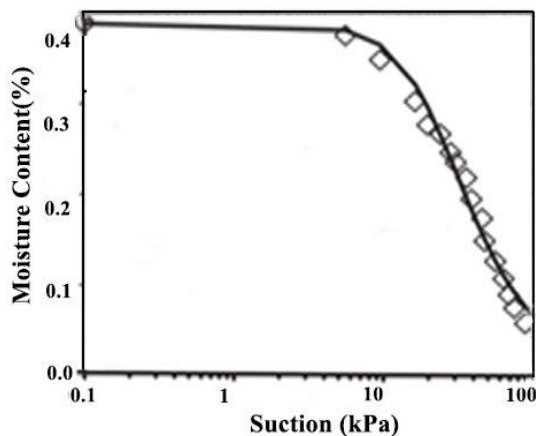


Fig. 17. Water retention curve (data from Bouazza et. al, 2013 [13])

شکل ۱۸- پوش گسیختگی بر اساس نظریه متغیرهای مستقل تنش (داده‌های بو عزا و همکاران [13])

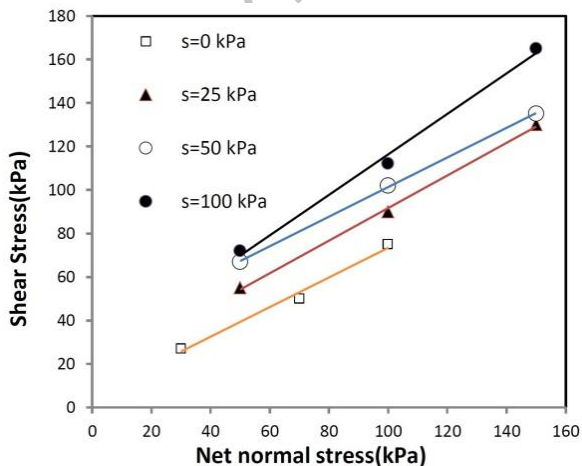


Fig. 18. Shear strength envelope according to independent stress variables approach (data from Bouazza et. al, 2013 [13])

شکل ۱۵- مقادیر اندازه‌گیری شده چسبندگی ظاهری در برابر مکش (داده‌های واناپالی و همکاران (۱۹۹۶) [12])

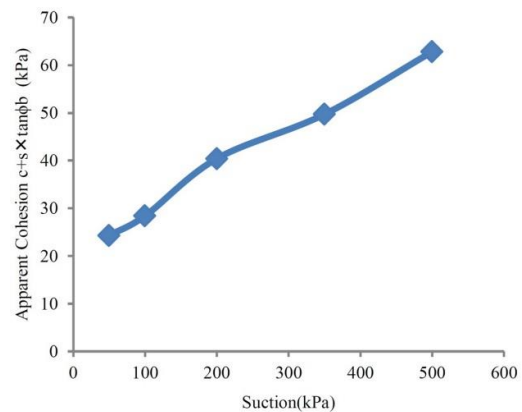


Fig. 15. The measured apparent cohesion vs. suction (data from Vanapalli et al., 1996 [12])

در شکل (۱۶) نیز به بررسی تغییرات ضرایب تنش مؤثر حاصل از آزمایش‌ها با ضرایب به دست آمده از رابطه ۳ پرداخته شده است. این شکل نیز نمایانگر دقت بالای رابطه ۳ در بیان ضریب تنش مؤثر خاک است.

شکل ۱۶- رابطه بین ضریب تنش مؤثر و نسبت مکش برای نمونه‌های خاک آزمایش شده به وسیله واناپالی و همکاران [12]

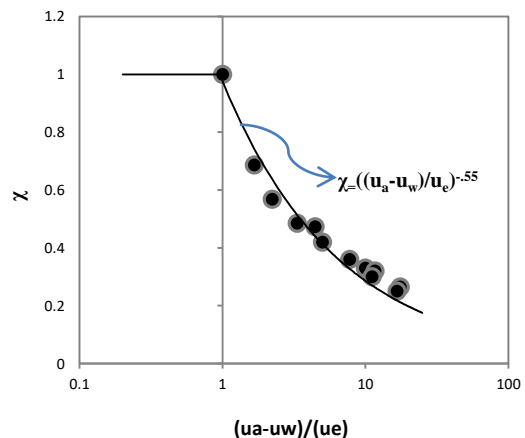


Fig. 16. Effective stress parameter χ (data from Vanapalli et al, 1996 [12])

۳-۳- نتایج آزمایش‌های بو عزا و همکاران

نتایج آزمایشگاهی بو عزا و همکاران [13] در جدول (۵) خلاصه شده است. با توجه به شکل (۱۷) و جدول (۵) تنش مؤثر خاک در مکش‌های متفاوت به دست آمد و پوش گسیختگی برای هر دو روش ترسیم شد. شکل (۱۸) نشان دهنده پوش گسیختگی بر مبنای متغیرهای مستقل تنش و شکل

شکل ۱۹- پوش گسیختگی بر اساس نظریه تنش مؤثر (داده‌های بوذا و همکاران [13])

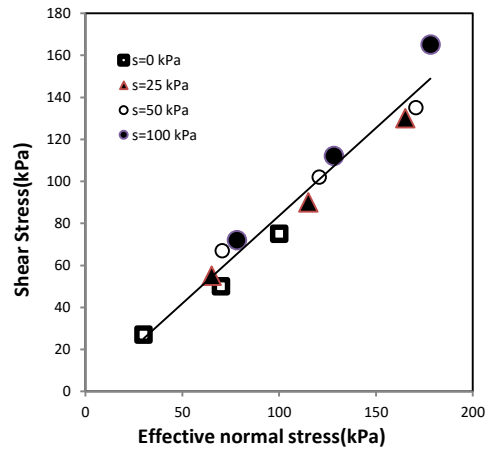


Fig. 19. Shear strength envelope according to effective stress approach (data from Bouazza et. al, 2013 [13])

همان‌گونه که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، آزمایش‌های انجام شده به وسیله بوذا و همکاران [13] روی خاکی انجام گرفته است که پتانسیل مکشی آن کم بوده است. با توجه به شکل (۱۸) مشاهده می‌شود، حتی هنگامی که تغییرات مکش خاک کم است، همچنان در روش متغیرهای مستقل تنش، پوش گسیختگی به ازای مکش‌های مختلف متفاوت است و خطی واحد در بین داده‌های آزمایشگاهی قابل ترسیم نیست. شیب خطوط نیز بایکدیگر مساوی نیست این امر ایجاب می‌کند که در صورت استفاده از تئوری متغیرهای مستقل تنش، برای هر مکش نیاز به تعیین پوش گسیختگی خاص آن مکش باشد که نشان دهنده وقت گیر بودن این روش نسبت به روش مبتنی بر تنش مؤثر است؛ در مقابل در روش مبتنی بر تنش مؤثر شکل (۱۹)، رفتار برشی خاک تنها با یک خط پوش گسیختگی واحد و دقیق، بیان می‌شود.

برای بررسی چسبندگی ظاهری در مدل فردلاند و همکاران [7] شکل (۲۰) برای استخراج پارامترهای معادله ۴ برای آزمایش‌های بوذا و همکاران [13] ترسیم شده است.

همان‌گونه که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود، چسبندگی ظاهری تا مقدار مکش ۵۰ kPa روند افزایشی و سپس کاهش یافته است. شیب خطوط که بیان‌گر تانژانت پارامتر ϕ^b است، برخلاف فرضیه‌های فردلاند و همکارانش [7] دارای مقدار ثابتی نیست.

شکل ۲۰- مقادیر اندازه‌گیری شده چسبندگی ظاهری در برابر مکش (داده‌های بوذا و همکاران)

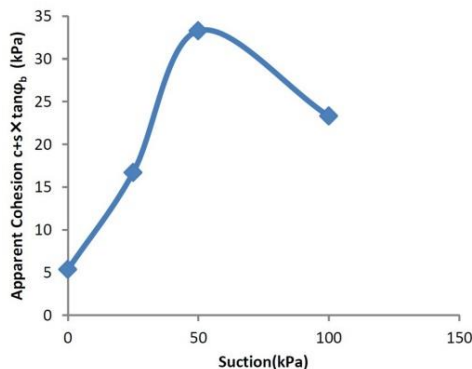


Fig. 20. The measured apparent cohesion vs. suction (data from Bouazza et. al, 2013 [13])

۳-۴- نتایج آزمایش‌های حمید و میلر [14]

تمامی داده‌های مربوط به آزمایش‌های برش مستقیم حاصل از پژوهش‌های حمید و میلر [14] در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- مقادیر تنش برشی حداکثر داده‌های حمید و میلر (۲۰۱۳) [14]

Net Normal Stress (kPa)	Air entry suction (kPa)	Matric Suction (kPa)		
		20	50	100
105	60	90	108	125
155	60	132	147	170
210	60	165	190	205

Table 6. Shear stresses at failure for different suction values (data from Hamid & Miller, 2009 [14])

با توجه به داده‌های (جدول ۶) پوش گسیختگی برای هر دو روش ترسیم شد. در شکل (۲۱) پوش گسیختگی بر اساس روش متغیرهای مستقل تنش و در شکل (۲۲) پوش گسیختگی طبق روش تنش مؤثر نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۲۲) مشاهده می‌شود که روش تنش مؤثر با دقت مطلوبی و پیچیدگی کمتری پارامترهای مقاومت برشی خاک را تعیین نموده است و از آنجایی که در این روش با مقادیر ثابتی برای پارامترهای مقاومت برشی خاک در هر حالتی (مکش‌های متفاوت) وجود دارد، آسانی این روش در کنار دقت بالای آن قابل درک است.

در شکل (۲۳) برای تعیین پارامتر ϕ^b در مدل فردلانند و همکاران [7] چسبندگی ظاهری در برابر مکش در نمونه‌های آزمایش شده به وسیله طاروق و همکاران [14] ترسیم شده است. می‌بینیم که روند تغییرات چسبندگی ظاهری حدوداً خطی است که با توجه به کوچک بودن دامنه مکش‌های اعمالی خطی بودن روند تغییرات، چندان دور از انتظار نیست.

در شکل (۲۴) به مقایسه ضرایب تنش مؤثر به دست آمده از رابطه خلیلی و خباز [5] در مقابل ضرایب به دست آمده از آزمایش‌های حمید و میلر [14] پرداخته شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که رابطه ارائه شده به وسیله خلیلی و خباز [5] با دقت بالایی، ضرایب تنش مؤثر را تخمین زده است.

شکل ۲۴- رابطه بین ضریب تنش مؤثر و نسبت مکش برای نمونه‌های خاک آزمایش شده به وسیله حمید و میلر [14]

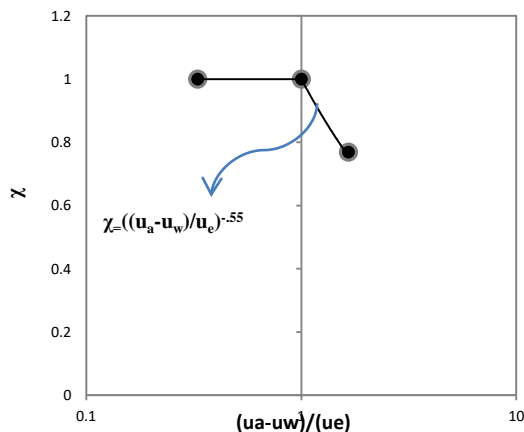


Fig. 24. Effective stress parameter χ (data from Hamid & Miller, 2009 [14])

شکل ۲۵- منحنی نگه‌داشت آب-خاک راهاردجو و همکاران (۲۰۰۴) [15]

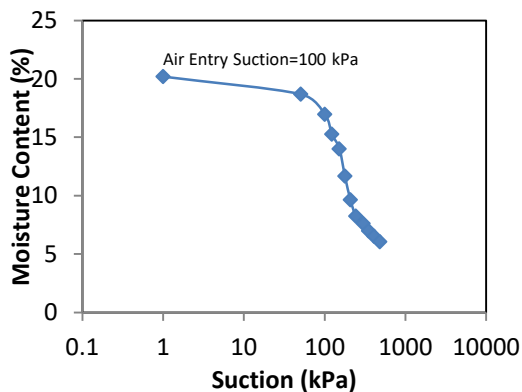


Fig. 25. Water retention curve (data from Rahardjo et. al, 2004 [15])

شکل ۲۱- پوش گسیختگی بر اساس نظریه متغیرهای مستقل تنش داده‌های حمید و میلر (۲۰۱۳) [14]

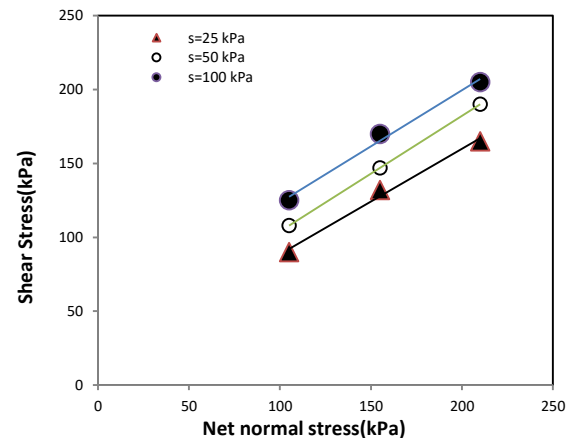


Fig. 21. Shear strength envelope according to independent stress variables approach (data from Hamid & Miller, 2009 [14])

شکل ۲۲- پوش گسیختگی بر اساس نظریه تنش مؤثر داده‌های حمید و میلر (۲۰۰۹) [14]

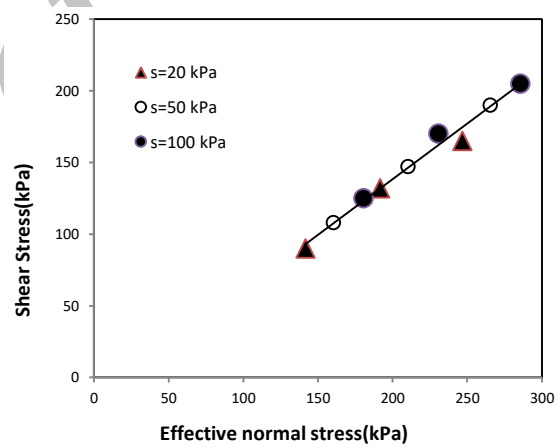


Fig. 22. Shear strength envelope according to effective stress approach (data from Hamid & Miller, 2009 [14])

شکل ۲۳- مقادیر اندازه‌گیری شده چسبندگی ظاهری در برابر مکش داده‌های حمید و میلر (۲۰۰۹) [14]

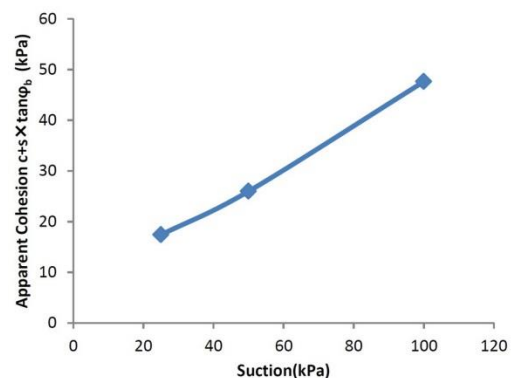
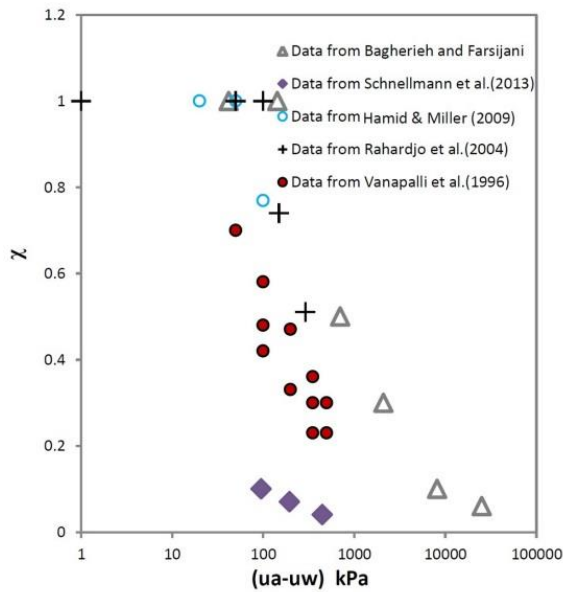
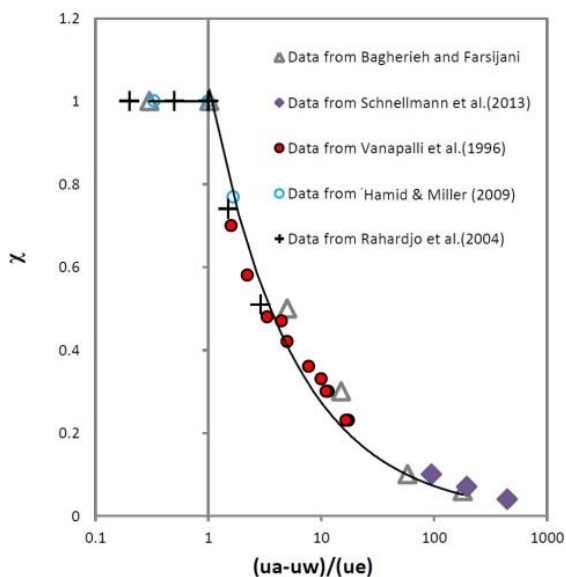


Fig. 23. The measured apparent cohesion vs. suction (data from Hamid & Miller, 2009 [14])

شکل ۲۷- تغییرات χ در برابر مکشFig. 27. Effective stress parameter χ versus suctionشکل ۲۸- منحنی χ در برابر نسبت مکشFig. 28. Effective stress parameter χ versus suction ratio

۴- تغییرات χ در برابر نسبت مکش در خاک‌های مختلف

در شکل‌های (۲۷ و ۲۸) به ترتیب χ در برابر مکش خاک و χ در برابر نسبت مکش ترسیم شده است. با توجه به شکل‌های گفته شده مشاهده می‌شود که در صورتی که χ در برابر مکش خاک رسم شود، رابطه مشخصی برای بیان χ با استفاده از مکش خاک قابل ارائه نیست، در حالی که در دستگاه مختصات χ -نسبت مکش، رابطه معناداری بین نسبت مکش و

۳-۵- نتایج آزمایش‌های راه‌اردجو و همکاران (۲۰۰۴)

راه‌اردجو و همکارانش در پژوهشی به بررسی نمونه‌های خاک غیراشباع در آزمایش‌های سه محوری با شرایط تحکیم یافته زهکشی شده (CD) و تحکیم یافته با کنترل فشار آب حفره‌ای (CW) پرداخته‌اند. که در اینجا نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته زهکشی شده ارائه و بررسی شده است. شکل (۲۵) منحنی نگه‌داشت آب-خاک نمونه‌ها و جدول (۷) نتایج آزمایش‌های برش مستقیم تحکیم یافته زهکشی شده راه‌اردجو و همکاران [15] را نشان می‌دهد.

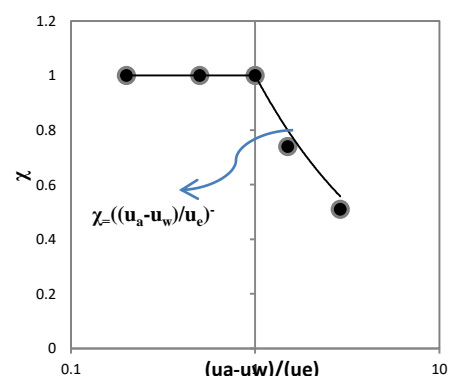
جدول ۷- مقادیر تنش برشی بیشینه راه‌اردجو و همکاران (۲۰۰۴) [15]

Net Normal Stress (kPa)	Air entry suction (kPa)	Suction (kPa)			
		50	100	150	290
72	100	75	-	-	-
194	100	150	-	-	-
75	100	-	108	-	-
150	100	-	55	-	-
100	100	-	-	130	-
350	100	-	-	283	-
170	100	-	-	-	195

Table 7. Shear stresses at failure for different suction values (data from Rahardjo et. al, 2004 [15])

بر اساس نتایج گفته شده در جدول (۷) ضرایب تنش مؤثر خاک به دست آمد و با ضرایب به دست آمده از رابطه خلیلی و خباز [5] در دستگاه مختصات لگاریتمی (ضریب تنش مؤثر برحسب نسبت مکش) ترسیم شد. نتایج در شکل (۲۶) ارائه شده است. این شکل نشان دهنده دقت مناسب رابطه ارائه شده به وسیله خلیلی و خباز است.

شکل ۲۶- رابطه بین پارامتر تنش مؤثر و نسبت مکش برای نمونه‌های خاک آزمایش شده به وسیله راه‌اردجو و همکاران (۲۰۰۴) [15]

Fig. 26. Effective stress parameter χ (data from Rahardjo et. al, 2004 [15])

می‌توان چنین بیان کرد که روش خلیلی و خباز [4] نسبت به روش فردلانند و همکاران [7] با وجود پیچیدگی کمتر، دارای دقت عمل بیشتری است و استفاده از این روش باعث صرفه جویی در وقت و هزینه می‌شود. به عبارت دیگر اگر تخمین مناسبی از میزان تنش مؤثر در دست باشد، نیازی به اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی در شرایط غیراشباع وجود ندارد و پارامترهای حالت اشباع کماکان در این حالت نیز معتبر و قابل استفاده است.

همچنین در این پژوهش نشان داده شد، ضریب تنش مؤثر خاک که نقش اساسی در تعیین تنش مؤثر خاک غیر اشباع دارد؛ با دقت بسیار مطلوب از رابطه ارائه شده به وسیله خلیلی و خباز [5] قابل محاسبه است و منحنی χ در برابر نسبت مکش برای خاک‌های مختلف، منحصر به فرد است و تأثیر نوع خاک به وسیله مکش ورودی هوا در متغیر نسبت مکش دیده شده است و نسبت مکش به خوبی آثار جنس خاک را نرمالیزه می‌کند.

References

۶- مراجع

- [1] Terzaghi K. 1936 The shear resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. *Proceedings for the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Boston, **1**, 54-56.
- [2] Yasrobi S. S., Mirzaii A. 2011 Assessment of matric suction, saturation and relative density on shear strength and mechanical behavior of unsaturated clayey sands. *Sharif Journal of Civil Engineering*, **26**(2), 55-67. (In Persian)
- [3] Bishop A. W. 1959 The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad*, **106**(39), 859-863.
- [4] Khalili N. & Khabbaz M. H. 1996 *The effective stress concept in unsaturated soils*, Report No. R-360. Sydney, The University of New South Wales, Australia.
- [5] Khalili N., Khabbaz M. H. 1998 A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Geotechnique*, **48**(5), 681-687.
- [6] Bagherieh A. R., Khalili N., Habibagahi G. & Ghahremani A. 2009 Drying response and effective stress in a double porosity aggregated soil. *Engineering Geology*, **105**, 44-50.
- [7] Fredlund D.G. & Morgenstern N.R. & Widger A. 1978 Shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **15**, 313-321.
- [8] Jennings J.E.B. & Burland J.B. 1962 Limitations to

χ برای تمامی خاک‌ها وجود دارد. به عبارت دیگر منحنی χ نسبت مکش تابع جنس خاک نیست؛ از این رو نسبت مکش که برابر $\left(\frac{u_a - u_w}{u_e}\right)$ است، به خوبی می‌تواند آثار نوع خاک را نرمالیزه کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی متغیرهای تنش در بیان مقاومت برشی خاک غیراشباع پرداخته شد. مقایسه‌ای بین روش استفاده کننده از متغیرهای مستقل تنش و تنش مؤثر صورت گرفت. برای دستیابی به نتایج مطلوب، آزمایش‌های برش مستقیم روی خاک غیراشباع با پتانسیل مکشی بالا صورت گرفت. بر اساس نتایج آزمایش‌ها مشاهده شد که روش مبتنی بر تنش مؤثر با بهره‌گیری از رابطه ضریب تنش مؤثر خلیلی و خباز [5] در بازه بزرگ تغییرات مکش درون خاک، با دقت بالایی قادر به پیش بینی مقاومت برشی خاک و تعیین پارامترهای مقاومت برشی است. در مقابل، روش فردلانند و همکاران [7] که مبتنی بر پارامترهای مستقل تنش است؛ در مکش‌های متفاوت، پوش گسیختگی متفاوتی ارائه کرده است؛ به ویژه در بازه بزرگ تغییرات مکش، ملاحظه شد که نمی‌توان پارامترهای مقاومتی را ثابت در نظر گرفت و این موضوع استفاده از اینگونه مدل‌ها را با چالش جدی مواجه می‌کند.

آزمایش‌های باقریه و فارسی‌جانی [9] با نتایج آزمایشگاهی پژوهشگران دیگر مقایسه مشاهده شد که روش فردلانند و همکاران [7] (روش متغیرهای مستقل تنش) حتی در بازه کوچک تغییرات مکش از پیچیدگی بیشتری نسبت به روش مبتنی بر تنش مؤثر برخوردار است. این در حالی است که روش بیان شده به وسیله خلیلی و خباز [4] (مبتنی بر تنش مؤثر) با پیچیدگی کمتری رفتار برشی خاک را پیش‌بینی نموده و در تمام مقادیر مکش، مقدار ثابتی برای پارامترهای مقاومت برشی خاک ارائه می‌دهد.

روش خلیلی و خباز [4] بر پایه اصل تنش مؤثر استوار است. به عبارت دیگر می‌توان از پارامترهای مقاومت برشی خاک اشباع که به آسانی از آزمایش‌های مقاومتی در حالت اشباع به دست آمده، در هر مکشی استفاده نمود. در پایان

- [13] Bouazza A., Zornberg J., McCartney J.S. & Singh R.M. 2013 Unsaturated geotechnics applied to geoenvironmental engineering problems involving geosynthetics. *Engineering Geology*, **165**, 143-153.
- [14] Hamid T. B. & Miller G. A. 2009 Shear strength of unsaturated soil interfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, **46(5)**, 595-606.
- [15] Rahardjo H., Ong B.H. & Leong E.C. 2004 Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained constant water content triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **41**, 421-436.
- the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils. *Geotechnique*, **12(2)**, 125-144.
- [9] Khalili N., Geiser F. & Blight G.E. 2004 Effective stress in unsaturated soils, a review with new evidence. *International Journal of Geomechanics*, **4** (2), 115-126.
- [10] Bagherieh A. R. & Farsijani A. 2014 The effect of moisture content on the shear strength parameters of plastic fine soils. *Modares Journal of Civil Engineering*, **14(3)**, 31-41. (In Persian)
- [11] Schnellmann R., Rahardjo H. & Schneider H.R. 2013 Unsaturated shear strength of a silty sand. *Engineering Geology*, **162**, 88-96.
- [12] Vanapalli S.K., Fredlund D.G. & Pufahl D.E. 1996 The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till. *Geotechnical Testing Journal*, **19(3)**, 259-268.

Archive of SID

Performance of stress variables in predicting the shear strength of unsaturated soils

A.R. Bagherieh^{*1}, A. Farsijani³, R. Farpour²

1. Assist. Prof., Department of Civil Engineering, Malayer University.(Corresponding Author)

2. Ph.D. Student, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.

3. Graduate student, Islamic Azad University, Hamedan Branch.

bagheri@malayeru.ac.ir

Abstract:

Shear strength is one of the most important features in mechanical behavior of soils. The shear strength of unsaturated soils is still a controversial discussion among the researchers in this field. The methods of determining unsaturated shear strength are classified into two major categories. First, two independent stress variables known by matric suction and net stress are employed. Further, saturated and unsaturated strength parameters are considered to be independent. In other words, as soon as the pore water pressure becomes negative, the saturated effective friction angle and cohesion become invalid. This approach became significantly dominant since the validity of effective stress in unsaturated soils was questioned, as it was not clear how the collapse phenomenon can be described through effective stress concept. In the late 90s, some researchers referred back to effective stress concept and some ambiguity in explaining collapse was resolved. In this approach, effective stress is the main stress variable. Net stress and suction are combined into effective stress. The saturated and unsaturated shear strength parameters are assumed to be independent, and there is a smooth transition between saturated and unsaturated soil modeling. In this research these two approaches are compared by means of unsaturated direct shear experiments and some relevant experimental data from literature. The advantages and shortcomings of the mentioned methods are analyzed. In the direct shear experiments, a wide range of soil suction was applied to the samples. Therefore, it is possible to compare the effective stress and independent stress approaches in a wide range of suctions. The suctions of samples were measured by filter paper method. By plotting the failure envelopes in two approaches, the advantage of effective stress approach over the approach of independent stress variables is obvious. This advantage is especially drastic at higher suctions. The experimental data from literature similarly revealed this result. Thus, it can be stated that effective stress approach is simpler and less time consuming since the failure envelope is an identical unique line for all suctions and strength parameters of a soil at saturated and unsaturated states. Contrary to independent stress variable approach, it is not required to measure the strength parameters at various suctions. In other words, if the effective stress is properly estimated, the unsaturated shear strength can be predicted straightforwardly. Effective stress parameter is the key factor for appropriate evaluation of effective stress in unsaturated soils. One of the highly cited proposed equations for effective stress parameter is verified by experimental data. The values of predicted effective stress parameter and the values measured from experiment are plotted versus suction. There is a good agreement between the effective stress parameters calculated by the equation and those measured from experimental data. Therefore, it can be concluded that the empirical equation can accurately predict the effective stress parameter. It is worth mentioning that by normalizing the suction through dividing it into air entry suction, the effective stress parameter versus normalized suction becomes a unique line, regardless of soil type. Thus, the effect of soil type and its structure is normalized by means of using suction ratio.

Keywords: Shear Strength, Suction, Effective stress, Unsaturated soils.