

کاربرد نظریه خاک غیراشباع در بررسی پایداری خاکریزها

سید محمد منصورزاده، عضو هیأت علمی، پژوهشکده حمل و نقل، تهران، ایران
محمود وفائیان، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
مسعود میرمحمدصادقی، استادیار، مجتمع عالی آموزشی پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان، اصفهان، ایران
[E-mail:m_mansoorzadeh@yahoo.com](mailto:m_mansoorzadeh@yahoo.com)

چکیده

بدون تردید در بسیاری از طرحهای ژئوتکنیکی، با خاکریزهایی مواجه می‌شویم که با کوبیدن لایه‌های خاک احداث می‌شوند و همان طور که می‌دانیم شرایط احداث این خاکریزها در وضعیت غیراشباع است. بنابراین درک دقیق رفتار مکانیکی خاک در حین احداث و در دوران بهره‌برداری این خاکریزها مستلزم بهره‌گیری از قوانین مکانیک خاک غیراشباع است. این درحالی است که مکانیک خاک غیراشباع نسبت به مکانیک خاک کلاسیک با ناشناخته‌های بسیار فراوانی روبه روست و دلیل عمده آن، پیچیده بودن رفتار خاک در وضعیت غیراشباع است. این مقاله به بررسی تأثیر درجه اشباع خاک بر ضریب اطمینان پایداری خاکریز پرداخته و همزمان تأثیر برخی پارامترهای دیگر بر پایداری خاکریز غیراشباع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق جهت تحلیل محیط خاکی غیراشباع از نرم افزار اجزای محدود UDAM استفاده شده است. همچنین توسعه‌ای بر روی یک برنامه پایداری شیب، به روش بیشاپ اصلاح شده به نام CASSAP، داده شد که این برنامه جدید MCASSAP نامیده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک غیراشباع، خاکریز، مکش ماتریسی، درجه اشباع، فشار هوا و آب حفره‌ای

۱. مقدمه

آنها بسیار متغیر و تابع عوامل مختلفی، چون درصد اشباع، نفوذپذیری و زمان است. در این تحقیق روند تغییرات فشار هوا و آب حفره‌ای و تغییرات مکش ماتریسی در مقطع یک خاکریز مشخص فرضی در شرایط غیراشباع و در درصدهای اشباع مختلف، مورد بررسی قرار می‌گیرد و نشان داده می‌شود که تغییرات این پارامترها ممکن است در جهت افزایش ضریب اطمینان و یا بالعکس نقش داشته باشد.

۲. نظریه خاکهای غیراشباع و پایداری

خاکریزهای غیراشباع

بررسی وضعیت غیراشباع خاکها از حدود سالهای دهه ۱۹۶۰ آغاز شده و تاکنون تحقیقات متعددی به صورت آزمایشگاهی، محاسباتی و نظری در مورد آن انجام شده است. از نظر کاربردی

در بررسی پایداری خاکریزها در حوزه مهندسی ژئوتکنیک، آن طور که معمول است می‌توان پارامترهای مقاومتی هر نوع خاک را بر حسب درصد رطوبت و میزان کوبیدگی آن در آزمایشگاه تعیین و ضریب اطمینان پایداری را روی یک سطح لغزش آزمایشی در آن خاکریز محاسبه کرد. با وجود این توجه به این نکته حایز اهمیت است که شرایط احداث خاکریزها، شرایط خاصی است که وضعیت خاک نه در حالت اشباع و در نه حالت خشک باشد، بلکه واقعاً و عملاً در وضعیت شرایط غیراشباع قرار داشته باشد. از این جهت، در تحلیل پایداری این خاکریزها بر اساس تئوری خاک غیراشباع، مقادیر پارامترهای درگیر در محاسبات بعضاً به طور شدیدی متفاوت از این مقادیر در شرایط خاک اشباع و خشک است. از مهم‌ترین این عوامل در خاکهای غیراشباع نقش تغییرات فشار آب حفره‌ای و فشار هوای حفره‌ای از یک سو، و مقاومت حاصل از مکش ماتریسی از سوی دیگر است که مقادیر

دانشمندان پس از تحقیقات فراوان به این نتیجه رسیدند که هر ترکیب دوتایی از سه متغیر حالت تنش $(\sigma - u_a)$ ، $(\sigma - u_w)$ و $(u_a - u_w)$ را می‌توان برای این منظور استفاده کرد [۲]. در مطالعه حاضر از دو متغیر $(\sigma - u_a)$ و $(u_a - u_w)$ استفاده شده است که به ترتیب تنش نرمال خالص و مکش ماتریسی نامیده می‌شوند.

همچنین برای تعیین مقاومت برشی در یک بخش از خاک، رابطه ساده کولمب یعنی:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (3)$$

که برای خاک اشباع صادق است، به صورت روابط مفصل زیر در حوزه غیراشباع تعمیم داده می‌شود:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (5)$$

$$\tau_f = c' + [\sigma - u_a + \left(\frac{S_r - S_{ru}}{1 - S_{ru}}\right) (u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (6)$$

$$\tau_f = c_s + (\sigma - u_a) \tan \phi_s$$

رابطه (۴) توسط فردلند و همکاران (۱۹۷۸) [۳]، رابطه (۵) توسط وناپالی و همکاران (۱۹۹۶) [۴] و رابطه (۶) توسط گتمیری (۱۹۹۲) ارائه شده است [۵].

در این روابط S_r ، S_{ru} و ϕ^b به ترتیب درجه اشباع، درجه اشباع باقیمانده و زاویه معرف نرخ افزایش مقاومت برشی نسبت به مکش ماتریسی است و c_s و ϕ_s نیز از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$c_s = c' + m_2(u_a - u_w) \quad (7)$$

$$\phi_s = \phi_{ult} + (\phi_{in} - \phi_{ult}) \left[1 - \frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_{ult}} \right] \quad (8)$$

که در این روابط ϕ_{in} ، ϕ_{ult} و $(u_a - u_w)_{ult}$ و m_2 به ترتیب معرف زاویه اصطکاک داخلی اولیه خاک، زاویه اصطکاک نهایی، مکش ماتریسی نهایی و یک ضریب ثابت هستند.

در زمینه جریان سیال در محیط‌های خاکی غیراشباع نیز تحقیقات متعددی صورت پذیرفته است. عموماً برای خاک غیراشباع، دو نوع نفوذپذیری، نفوذپذیری نسبت به آب حفره‌ای و نفوذپذیری نسبت به هوای حفره‌ای تعریف می‌شود. این ضرایب، اعداد ثابت نبوده و تابع عواملی مانند درصد رطوبت، مکش ماتریسی و ...

نیز این تئوریا و نتایج آزمایش‌های مربوط به آنها در شرایط خاص پروژه‌های اجرایی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌هایی از این تحقیقات را می‌توان در کتاب مکانیک خاکهای غیراشباع [۱] و مقالات متعددی که در این زمینه ارائه شده‌اند، مشاهده کرد.

اساساً رفتار مکانیکی خاک، توسط عبارات حالت تنش در آن خاک قابل توصیف است و حالت تنش نیز شامل ترکیبات معینی از متغیرها، موسوم به متغیرهای حالت تنش است. این متغیرها مستقل از خواص فیزیکی خاک بوده و تعداد آنها عمدتاً وابسته به تعداد فازهای تشکیل دهنده خاک است. به‌عنوان مثال تنش مؤثر ترزاقی، یک متغیر حالت تنش جهت توصیف رفتار مکانیکی خاکهای اشباع است [۱].

ارائه یک رابطه تنش مؤثر برای خاکهای غیراشباع به‌عنوان بسط رابطه تنش مؤثر خاکهای اشباع، از سالها قبل مدنظر پژوهشگران بوده و در این راستا بسیاری از آنها سعی داشتند که یک متغیر حالت تنش یکتا و یا به‌عبارتی دیگر همان معادله تنش مؤثر ترزاقی را با ایجاد تغییراتی در آن، برای خاکهای غیراشباع نیز بکار برند. از جمله می‌توان به روابط زیر اشاره کرد [۱].

$$\sigma' = \sigma - \beta' u_w \quad (1)$$

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

رابطه (۱) توسط کرانی و همکاران (۱۹۵۸) و رابطه (۲) توسط بیشاپ (۱۹۵۹) پیشنهاد شد. در این روابط σ ، σ' ، u_w و u_a به ترتیب تنش کل، تنش مؤثر، فشار آب حفره‌ای و فشار هوای حفره‌ای هستند و β' نیز یک ضریب موسوم به فاکتور نگهداری و χ پارامتری وابسته به درجه اشباع خاک و عددی بین ۰ و ۱ است [۱].

البته ناگفته نماند که برخی دیگر از پژوهشگران با انجام تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه، بی‌اعتباری این گونه روابط را نشان دادند و نتیجه این که نمی‌توان از یک رابطه تنش مؤثر یکتا استفاده کرد و در همین راستا پژوهشگران بحث جایگزینی متغیرهای حالت تنش را به جای تنش مؤثر مطرح کردند و نظریه استفاده از سطوح حالت (به طور مثال سطح حالت نشانه خلأ و سطح حالت درجه اشباع) را برای بررسی رفتار مکانیکی خاکهای غیراشباع پیشنهاد دادند.

برای توصیف رفتار مکانیکی خاک غیراشباع با توجه به تعداد فازهای تشکیل دهنده آن، حداقل دو متغیر حالت تنش لازم است.

(۱۹۹۳) اصلاح شده است. نرم افزار مذکور یک برنامه نسبتاً مفصل برای تحلیل دو بعدی محیط‌های خاکی است و مدل‌های مختلفی از جمله مدل غیراشباع را در بر می‌گیرد. لازم به ذکر است که تغییر مکان‌ها در سیستم به حد کافی کوچک فرض شده‌اند اما رفتار مصالح غیرخطی پیش‌بینی شده است. المان‌های مورد استفاده در این برنامه جهت تهیه مدل، از نوع ایزوپارامتریک چهارگره‌ای هستند و برنامه پس از انجام آنالیز در مراحل مختلف، مقادیر تنش مؤثر و فشار آب و فشار هوای حفره‌ای را در وسط المان‌ها و تغییر مکان‌های افقی و قائم را در رئوس المان‌ها ارائه می‌کند. توسط میر محمد صادقی (دانشگاه تهران)، توسعه‌ای روی این برنامه با فرض تغییر شکل‌های بزرگ انجام شده است. کارایی این برنامه در بررسی رفتار خاک‌های غیراشباع در پروژه‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج کاربرد آن در مقالات متعددی به چاپ رسیده است. نمونه‌هایی از کاربرد این برنامه را می‌توان در مقالات ارائه شده توسط گتمیری و دولژ (۱۹۹۵)، لیجیل و همکاران (۱۹۹۵) و گتمیری و همکاران (۱۹۹۵) [۱۱] مطالعه کرد.

۴. تحقیق حاضر و نتایج آن

الف) استفاده از نرم افزار UDAM در تعیین مکش ماتریسی، فشار هوا و فشار آب حفره‌ای و...

هدف از مطالعه حاضر، به طور خلاصه، بررسی پایداری یک شیب خاکی معین غیراشباع بر اساس روش‌های معمولی فرض سطح لغزش آزمایشی و ارزیابی اثر پارامترهای مؤثر بر نتیجه این محاسبات است. مدل استفاده شده در این مطالعه مطابق شکل ۱ متشکل از ۱۰۰ جزء و ۱۲۱ گره در شبکه‌ای مرکب از اجزاء ۴ گرهی است. گره‌های مقید در جهت X ، گره‌های تحتانی و گره‌های مقید در جهت X ، مجموعه گره‌های تحتانی و گره‌های روی محور تقارن هستند. زهکشی هوا و آب حفره‌ای از گره‌های واقع بر دامنه خاکریز و یا گره‌های تحتانی انجام می‌شود. مدل مذکور با استفاده از برنامه UDAM مورد تحلیل قرار گرفته و پارامترهای مورد نیاز به دست می‌آید. مشخصات سطوح حالت مصالح تشکیل دهنده این خاکریز، در جدول ۱ ارائه شده است [۱۲]. در شکل ۲ سطوح حالت مذکور برای خاک مورد نظر ترسیم شده‌اند. برای محاسبه نفوذپذیری از روابط (۹) و (۱۰) استفاده می‌شود و مشخصات مربوط به نفوذپذیری و مکش مصالح در جدول ۲ ارائه شده‌است.

هستند. فرمولهای متعددی برای برآورد ضریب نفوذپذیری آب و هوا ارائه شده‌اند [۱]. در تحقیق حاضر برای محاسبه این ضرایب، از روابط (۹) و (۱۰) استفاده شده است.

$$k_w = a 10^{e\alpha} \left(\frac{S_r - S_{ru}}{1 - S_{ru}} \right)^3 \quad (9)$$

$$k_a = b \frac{\gamma_a}{\mu_a} [e(1 - S_r)]^\beta \quad (10)$$

که در آن a, α, β و b ضرایب ثابت و e نشانه خلا و μ_a نیز لزجت هواست. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد دو رابطه فوق می‌توان به مرجع [۶] مراجعه کرد.

با توجه به مطالب فوق پیچیدگی تحلیل و ارزیابی پایداری شیب‌های خاکی غیراشباع، به خوبی قابل استنباط است، زیرا دانستن مفاهیم جدید مثل پارامترهای مذکور و روش‌های اندازه‌گیری آنها و دقت‌های لازم در آنها بحث‌های جدیدی را نسبت به مکانیک خاک کلاسیک مطرح می‌سازد و به همین علت معمولاً در طراحی‌ها و کارهای معمولی اجرایی، علاقه وافری به ورود به این مبحث دیده نمی‌شود و غالباً به این پیشگزاره و پیش قضاوت رضایت داده می‌شود که اگر در خاک‌های غیراشباع، تحلیل بر اساس خاک اشباع صورت گیرد نتایج در سمت اطمینان است. در مورد بررسی پایداری شیب‌های خاکی غیراشباع تحقیقات متعددی انجام شده است، از جمله می‌توان به مراجع [۷] و [۸] و [۹] اشاره کرد.

از سوی دیگر بحث بررسی پایداری خاکریزهای غیر اشباع و تحلیل رفتار آنها معمولاً در یکی از دو زمینه زیر صورت می‌گیرد: الف: تحلیل پایداری شیب‌های خاکی طبیعی که در حالت غیراشباع قرار دارند.

ب: توده‌های خاکی شیبدار که به وسیله کوبیدن لایه‌های خاک به منظور احداث یک سازه خاکی مشخص با ابعاد و شیب معلوم انباشته می‌شوند.

در مقاله حاضر وضعیت پایداری و عوامل مؤثر بر آن در خاکریزهایی که ساخته می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. نرم افزار UDAM

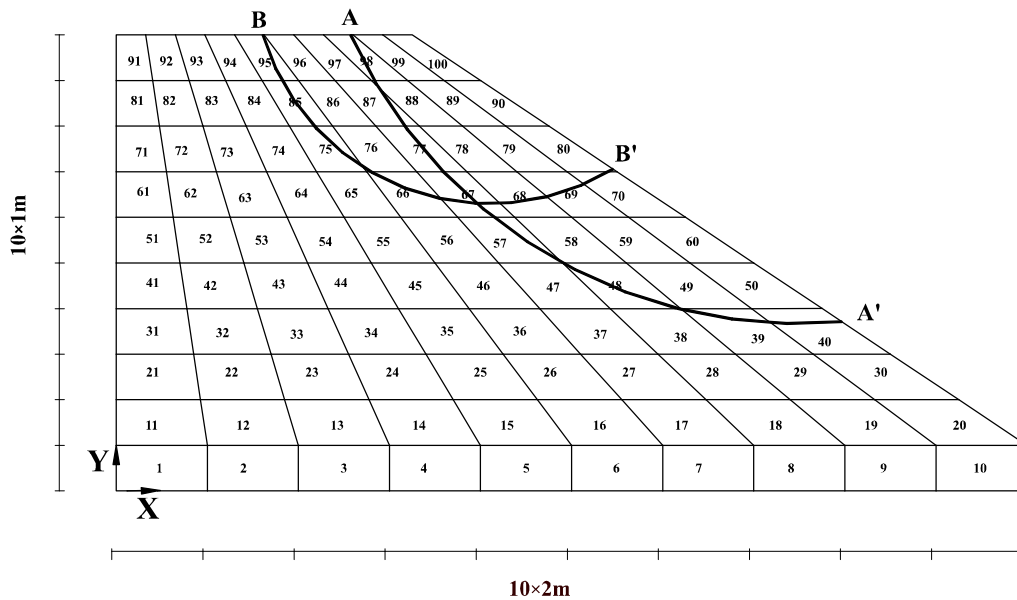
در این تحقیق برای تحلیل مدل‌های خاکی غیراشباع از نرم افزار اجزای محدود UDAM استفاده شده است. این نرم افزار توسط گتمیری و ناندا (۱۹۸۹) [۱۰] تدوین شده و سپس توسط گتمیری

جدول ۱. مشخصات سطوح حالت مصالح تشکیل دهنده خاکریز مورد مطالعه

پارامترها		معادله سطح حالت	سطوح حالت
۱/۳	a	$e = \frac{1 + e_0}{\exp \left\{ \frac{\left[a \frac{(\sigma - u_a)}{P_{atm}} + b \left(1 - \frac{(\sigma - u_a)}{\sigma_e} \right) \frac{(u_a - u_w)}{P_{atm}} \right]^{1-m}}{k_b (1-m)} \right\}} - 1$	نشانه خلا
۰/۲	b		
۰/۶	m		
$۲/۵ * ۱۰^{-۶}$	k_b		
۸۰	$\sigma_e (kPa)$		
۱/۰	a_s	$S_r = 1 - [a_s + b_s (\sigma - u_a)] \{1 - \exp[-c_s (u_a - u_w)]\}$	درجه اشباع
$-۰/۲۰۹ * ۱۰^{-۷}$	b_s		
$۰/۲۰۹ * ۱۰^{-۵}$	c_s		

جدول ۲. اطلاعات مربوط به نفوذپذیری و مکش مصالح

اطلاعات مربوط به مکش		مشخصات نفوذپذیری مصالح	
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$۰/۷۰ * ۱۰^{-۱}$	m_2	$۰/۶۳۱ * ۱۰^{-۹}$	a
۳۲	$\phi_{ult} (^\circ)$	$۰/۶ * ۱۰^۱$	α
$۰/۱۵ * ۱۰^۴$	$(u_a - u_w)_{ult} (kPa)$	۰/۴	S_{rv}
۱۰	k_x / k_z	$۰/۱ * ۱۰^{-۴}$	b
-	-	$۰/۲۶ * ۱۰^۱$	β



شکل ۱. شبکه بندی مقطع خاکریز مورد مطالعه و سطوح لغزش آزمایشی

مکش ماتریسی و فشار آب حفره‌ای (منفی یا مثبت) قابل محاسبه است. بنابراین چنان که سطح لغزش آزمایشی معینی در مقطع خاکریز در نظر گرفته شود، بخش‌های مختلف آن سطح ممکن است در منطقه‌هایی قرار گیرد که بعضاً تحت تأثیر مکش دارای مقاومت بیشتر و یا تحت تأثیر فشار هوا متناظر با کاهش مقاومت است. بنابراین اگر مقادیر معین و واقعی این کمیت‌ها در محاسبه مشخص نباشد، تقریب نتیجه محاسبات معلوم نیست.

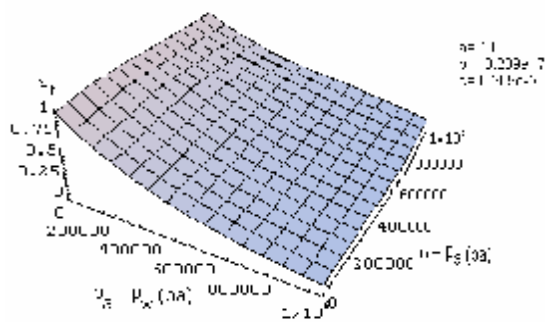
ب) توسعه انجام شده بر روی یک برنامه محاسباتی پایداری شیب‌ها (CASSAP)

برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری روی یک سطح لغزش فرضی، نیاز به یک روش محاسباتی و برنامه استفاده از آن روش است. در تحقیق حاضر، از برنامه محاسباتی مبتنی بر روش بیشاپ اصلاح شده بنام CASSAP (برنامه آنالیز پایداری شیب توسط سیروس آریانی) استفاده شد که برای شرایط خشک یا اشباع تدوین شده است. به منظور استفاده از این برنامه برای شرایط غیراشباع، توسعه‌ای روی این برنامه داده شد تا این برنامه بتواند پارامترهای مورد نیاز را از برنامه UDAM گرفته و براساس فرمولهای شماره (۶)، (۷) و (۸) در برنامه محاسباتی مبتنی بر روش بیشاپ اصلاح شده دخالت داده و ضریب اطمینان را بر اساس این شرایط ارائه کند. برنامه اصلاح شده در این مطالعه به نام MCASSAP نامیده می‌شود.

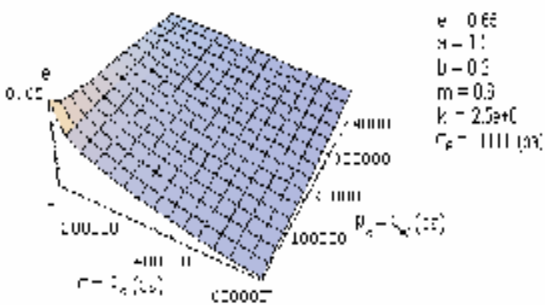
ج) تحلیلها و محاسبات انجام شده

مدل خاکریز مورد نظر در شرایط مختلفی تحلیل شد که نتایج در قالب چند مثال ارائه می‌گردد و در ادامه نتایج مربوط به بررسی ناحیه گسیختگی بحرانی براساس مفهوم نسبت تنش بیان خواهد شد:

مثال ۱: مقطع خاکریز شکل ۱ با در نظر گرفتن یک مرز زهکشی، مطابق شکل ۳-الف)، مدل‌سازی و توسط برنامه تحلیل شد. مطابق شکل برای به دست آوردن ضریب اطمینان روی یک سطح لغزش دایره‌ای معین $A-A'$ و در زمان بلافاصله پس از ساخت، لازم است که مقادیر فشار هوای حفره‌ای، مکش ماتریسی و... در المان‌هایی که سطح لغزش مذکور از داخل آنها عبور کرده، در دسترس باشند. این مقادیر از خروجی UDAM استخراج و به برنامه MCASSAP داده شد و ضرایب اطمینان برای درصدهای اشباع مختلف از جمله ۹۷٪، ۹۰٪، ۸۰٪ و ۷۰٪ به دست آمد.



(الف)



(ب)

شکل ۲. سطوح حالت متناظر با خاک مورد نظر؛ (الف) سطح حالت درجه اشباع، (ب) سطح حالت نشانه خلا

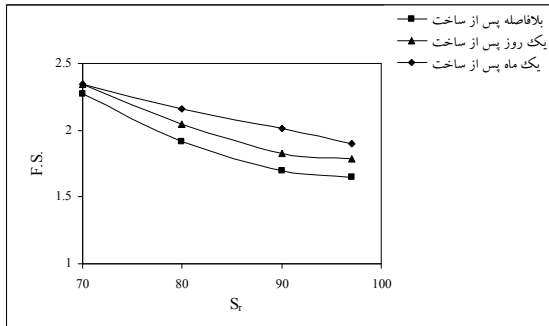
مشخصات هندسی و فیزیکی مقطع خاکریز شکل ۱ عبارت است از:

ارتفاع m ۱۰، شیب $(۱/۵)$ ، $\gamma = ۱۹/۲ \text{ kN/m}^3$ ، $c = ۹/۵۸ \text{ kPa}$ و $\phi = ۳۵/۲$ (چسبندگی در حالت اشباع)

در راستای بررسی پایداری یک شیب خاکی، می‌توان نتایج زیر را از برنامه UDAM به دست آورد:

- ۱- میزان مکش ماتریسی و فشار هوای حفره‌ای در هر نقطه از خاکریز
- ۲- میزان فشار آب حفره‌ای (مثبت و یا منفی) در هر نقطه از خاکریز حاصل از وزن لایه‌های فوقانی
- ۳- میزان ضریب نفوذپذیری در برابر هوا و آب در هر نقطه از خاکریز
- ۴- تغییرات کمیت‌های ذکر شده به صورت تابعی از زمان
- ۵- تغییرات کمیت‌های ذکر شده در مقادیر مختلف درجه اشباع اولیه خاک
- ۶- تغییرات کمیت‌های ذکر شده در مقادیر مختلف درجه اشباع اولیه خاک

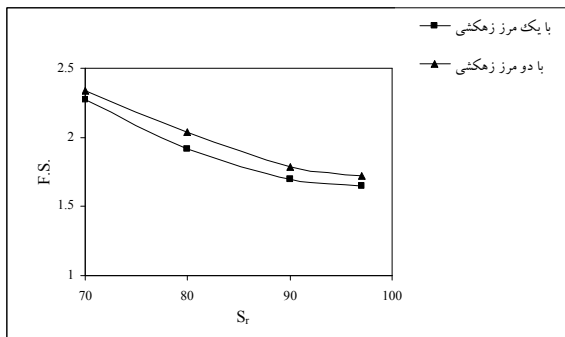
بنابراین در خاک‌های مختلف، با درصدهای اشباع مختلف و در نقاط مختلف یک خاکریز، مقادیر فشار هوای حفره‌ای،



شکل ۴. کردار ضریب اطمینان برحسب درجه اشباع، سطح لغزش $A-A'$ ، خاکریز با یک مرز زهکشی

مثال ۲: مقطع خاکریز مثال ۱ ولی این بار با در نظر گرفتن دو مرز زهکشی، مطابق مدل شکل ۳- (ب) در نظر گرفته شد. مدل مورد نظر توسط برنامه UDAM تحلیل شد و نتایج حاصل به برنامه MCASSAP داده شد و مقادیر ضریب اطمینان برای درصدهای اشباع ۹۷٪، ۹۰٪، ۸۰٪ و ۷۰٪ روی سطح لغزش $A-A'$ و در زمان بلافاصله پس از ساخت محاسبه شدند.

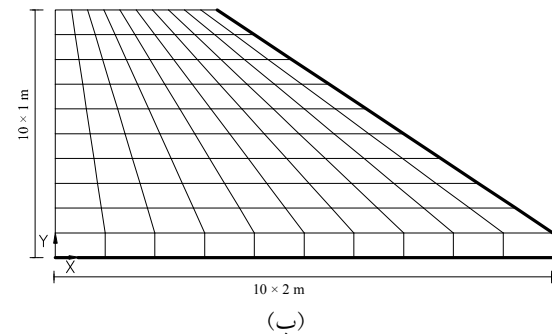
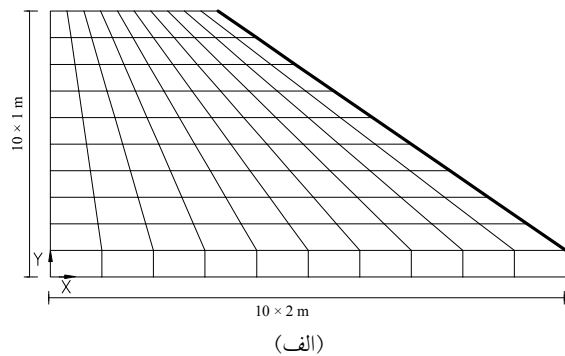
با مقایسه ضرایب اطمینان محاسبه شده در این مرحله (یعنی با دو مرز زهکشی) و مقادیر به دست آمده در مثال ۱، ملاحظه شد که مقادیر محاسبه شده در این مرحله، بزرگ ترند. علت این امر را می توان محو زود هنگام تر فشارهای حفره ای نسبت به وضعیت خاکریز با یک مرز زهکشی دانست. به بیانی دیگر با توجه به این که وجود فشار هوای حفره ای باعث کاهش متغیر حالت تنش $(\sigma - u_a)$ و در نتیجه کاهش ضریب اطمینان می شود، بنابراین با کمتر بودن فشار هوای حفره ای در وضعیت با دو مرز زهکشی، ضریب اطمینان بزرگ تری به دست می آید. کردار مقایسه ای مربوط به این دو دسته از ضرایب اطمینان برحسب درجه اشباع، در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. مقایسه ضرایب اطمینان روی سطح لغزش $A-A'$ در دو وضعیت مختلف زهکشی، بلافاصله پس از ساخت

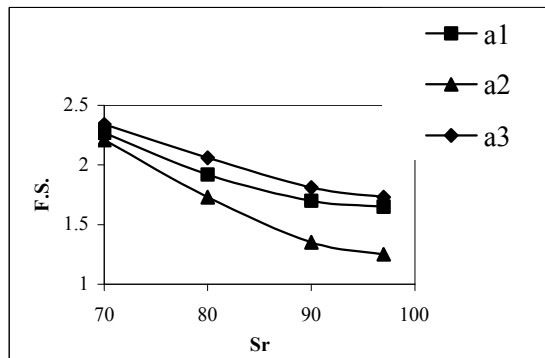
در کردار شکل ۴، تغییرات ضریب اطمینان ($F.S.$) برحسب درجه اشباع (S_r) ترسیم شده است. همان طور که دیده می شود با کاهش درجه اشباع از ۹۷٪ به سمت ۷۰٪، ضریب اطمینان محاسباتی افزایش می یابد. علت این امر را می توان ناشی از تأثیر مکش ماتریسی دانست زیرا وجود مکش در ساختار یک خاک، سبب افزایش استحکام و مقاومت برشی خاک می شود. بنابراین با کاهش درجه اشباع، مکش ماتریسی موجود در خاک افزایش یافته و این پدیده سبب بهبود مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش ضریب اطمینان پایداری خاکریز می شود.

از طرفی با توجه به این که پس از پایان ساخت و با گذشت زمان، از فشارهای حفره ای کاسته می شود، بنابراین انتظار می رود که مقادیر ضریب اطمینان به دست آمده افزایش یابند. برای بررسی این موضوع، ضرایب اطمینان برای سطح لغزش $A-A'$ و در زمانهای آزمایشی یک روز و ۳۰ روز پس از پایان ساخت خاکریز محاسبه شدند. با مقایسه ضرایب اطمینان مربوط به این زمانها و مقادیر به دست آمده در مرحله بلافاصله پس از ساخت، ملاحظه می شود که این مقادیر بزرگ ترند کردار مقایسه ای در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳. شبکه بندی مقطع خاکریز با ارتفاع ۱۰ متر و ۱۰۰ المان؛ (الف) با یک مرز زهکشی، (ب) با دو مرز زهکشی

مثال ۱ (متناظر با a_1) در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می شود که مقادیر متناظر با a_2 کوچک تر از مقادیر مثال ۱ هستند. دلیل این امر آن است که با کاهش مقدار a در این حالت، در واقع نفوذپذیری خاک کاهش می یابد و در نتیجه فشارهای حفره ای نسبت به حالت واقعی دیرتر محو می شوند و حتی در برخی از المان ها فشار آب حفره ای مثبت ایجاد می شود. به تبع افزایش فشار آب حفره ای، فشارهای حفره ای نیز افزایش می یابد و همان طور که می دانیم فشار هوای حفره ای مستقیماً در روابط محاسبه ضریب اطمینان تأثیرگذار است و باعث کاهش ضریب اطمینان می شود از طرفی با توجه به شکل ۷ و مقایسه مقادیر ضریب اطمینان متناظر با a_3 و ضرایب اطمینان به دست آمده در مثال ۱ (متناظر با a_1) ملاحظه می شود که مقادیر اخیر، بزرگترند. دلیل این پدیده آن است که با افزایش مقدار a در واقع ضریب نفوذپذیری افزایش می یابد و بنابراین فشارهای حفره ای در حین ساخت زودتر محو می شوند. در نتیجه مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده در این حالت، بزرگتر از مقادیر ضریب اطمینان متناظر با a_2 و نیز a_1 هستند.



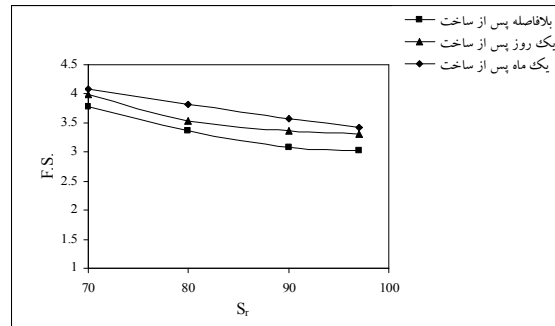
شکل ۷. مقایسه ضرایب اطمینان روی سطح لغزش $A-A'$ در سه حالت مختلف نفوذپذیری خاک، خاکریز مثال ۱

۵. نتایج مربوط به بررسی ناحیه گسیختگی

بحرانی براساس مفهوم نسبت تنش

همان طور که گفته شد تحلیل المان های غیراشباع در برنامه UDAM با استفاده از سطوح حالت و با بکارگیری مدل هیپربولیک صورت می پذیرد. این مدل با وارد کردن اثر مکش در رابطه تنش- تغییر شکل و برای حالت بارگذاری، به صورت زیر تصحیح شده است.

مثال ۳: مقطع خاکریز با شرایط کاملاً مشابه با خاکریز مثال ۱ در نظر گرفته شد، اما در این حالت، مقادیر ضریب اطمینان روی سطح لغزش $B-B'$ (با توجه شکل ۱) و در زمان بلافاصله پس از ساخت برای درصدهای اشباع ۹۷٪، ۹۰٪، ۸۰٪ و ۷۰٪ محاسبه شدند. تفاوت این سطح لغزش با سطح لغزش $A-A'$ در این است که قسمتی از مقطع بخش لغزش در این حالت، به صورت مقاوم عمل می کند. مجدداً روی این سطح لغزش نیز، مقادیر ضریب اطمینان در زمانهای آزمایشی یک روز و ۳۰ روز پس از پایان ساخت محاسبه شدند. کردار مقایسه ای بین این مقادیر و مقادیر ضریب اطمینان بلافاصله پس از ساخت روی سطح لغزش مذکور، در شکل ۶ ترسیم شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، در اینجا نیز مقادیر بلافاصله پس از ساخت، مقادیر کوچک تری هستند.



شکل ۶. کردار ضریب اطمینان برحسب درجه اشباع، سطح لغزش $B-B'$ ، خاکریز با یک مرز زهکشی

مثال ۴: مقطع خاکریز با ارتفاع ۱۰ متر و با یک مرز زهکشی (مانند مثال ۱) در نظر گرفته شد. هدف از این مثال، بررسی تأثیر تغییرات ضریب نفوذپذیری بر پایداری بدنه خاکی است. بنابراین در تابع نفوذپذیری آب یعنی رابطه (۹) پارامتر $a = a_1 = 0.631 \times 10^{-9}$ ، یک بار معادل ۰/۱ حالت اولیه، یعنی برابر با $a_2 = 0.631 \times 10^{-10}$ و بار دیگر معادل ۱۰ برابر حالت اولیه، یعنی $a_3 = 0.631 \times 10^{-8}$ در نظر گرفته شد. پس از تحلیل مدل مورد نظر توسط برنامه UDAM و با جایگذاری پارامترهای مورد نیاز از آن در برنامه MCASSAP مقادیر ضرایب اطمینان روی سطح لغزش $A-A'$ و در درجه های اشباع مختلف و در زمان بلافاصله پس از ساخت محاسبه شدند. کردار مقایسه ای برای مقایسه ضرایب اطمینان متناظر با دو مقدار اخیر a یعنی a_2 و a_3 و ضرایب اطمینان محاسبه شده در

به عبارت دیگر ضریب اطمینان موضعی در المان‌های با نسبت تنش بزرگ‌تر، مقدار کوچک‌تری است. بنابراین اگر خطوط تراز نسبت تنش در بدنه خاکریز ترسیم شوند، با توجه به آن می‌توان مناطق بحرانی گسیختگی را مشخص کرد و سطح لغزش بحرانی را به صورت یک بانده گسیختگی بحرانی به دست آورد. بنابراین اگر سطح لغزش معینی از نواحی را با نسبت تنش بزرگ‌تر عبور دهیم می‌توانیم آن را با تقریب خوبی به عنوان سطح گسیختگی بحرانی معرفی کنیم. برای به دست آوردن ضریب اطمینان کلی روی سطح مذکور می‌توان مانند قبل از برنامه MCASSAP استفاده کرد.

برای بررسی این موضوع، مدل خاکریز با ارتفاع ۱۰ متر و با یک مرز زهکشی به برنامه UDAM معرفی و تحلیل شد. خطوط تراز نسبت تنش برای چند حالت مختلف ترسیم شدند. در شکل ۸ برای درجه اشباع ۷۰٪ و ۹۰٪ و ۹۷٪ این خطوط تراز مذکور مشخص شده‌اند.

$$E = (E_i + E_s)(1 - R_f \cdot S_1)^2 \quad (11)$$

که در آن E_i و E_s به ترتیب مدول مماسی اولیه و ضریب مکش و R_f و S_1 نیز به ترتیب نسبت گسیختگی و نسبت تنش هستند که با روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$E_i = K \cdot P_{atm} \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_{atm}}\right)^n \quad (12)$$

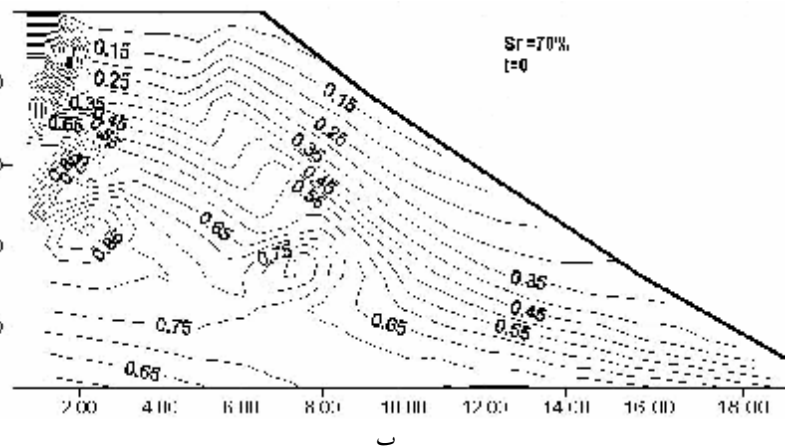
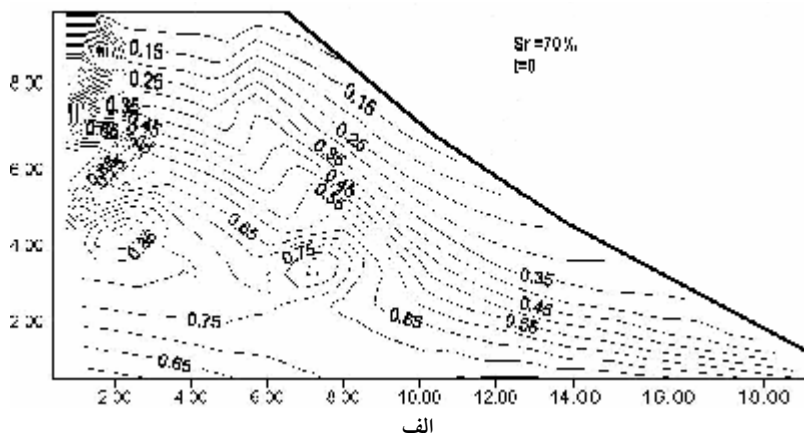
$$E_s = m_1 \cdot (u_a - u_w) \quad (13)$$

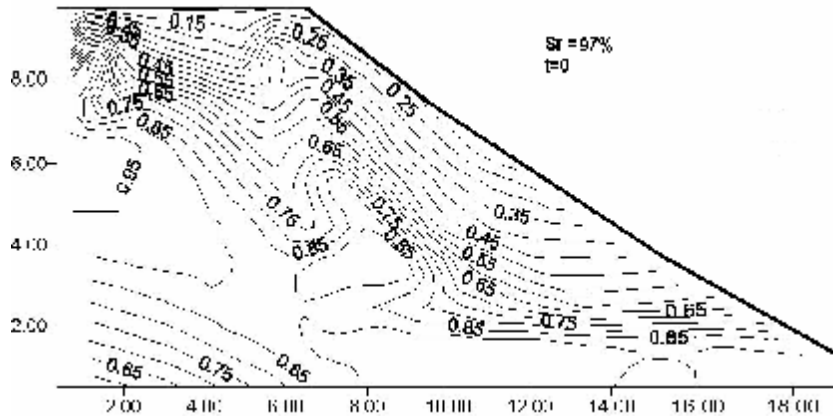
$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (14)$$

$$S_1 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (15)$$

f و ult معرف وضعیتهای گسیختگی و نهایی هستند.

با توجه به اینکه برنامه UDAM قادر به ارائه نسبت تنش در هر المان است، بنابراین براساس این مقادیر می‌توان وضعیت گسیختگی در هر المان را بررسی کرد، به طوری که اگر مقدار نسبت تنش برابر با واحد شود آنگاه المان به گسیختگی می‌رسد.





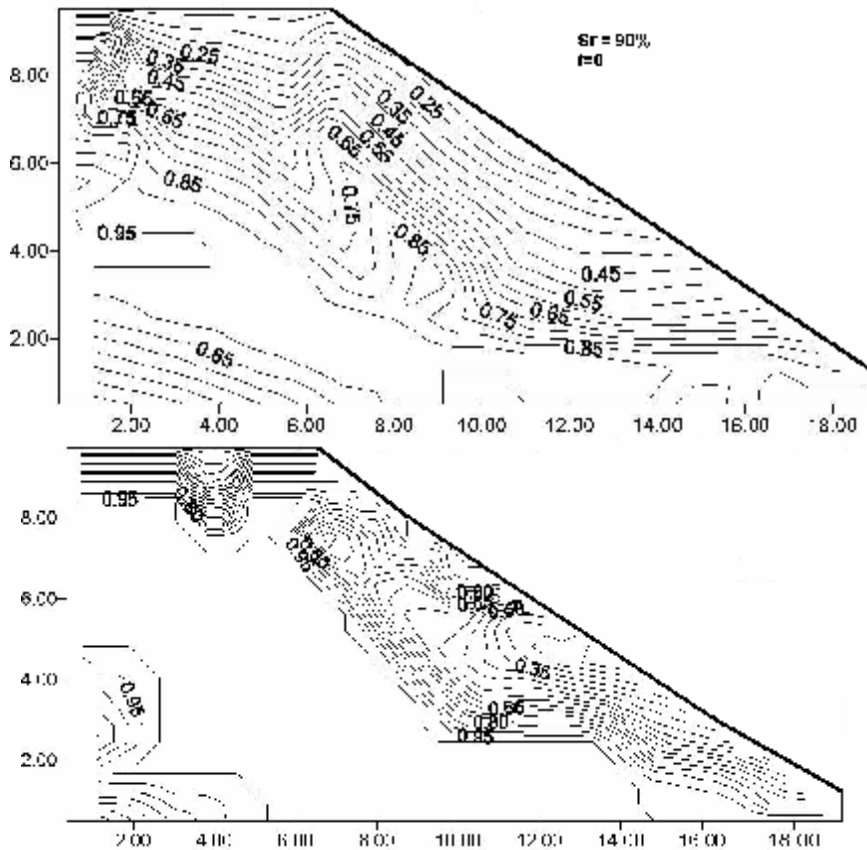
ج

شکل ۸. کردار توزیع نسبت تنش در خاکریز ۱۰ متری و با یک مرز زهکشی؛ (الف) $Sr=70\%$ ، (ب) $Sr=90\%$ ،

(ج) $Sr=97\%$

۹ خطوط تراز نسبت تنش و مربوط به درجه اشباع 90% در دو وضعیت مختلف نفوذپذیری مقایسه شده‌اند. همان طور که ملاحظه می‌شود با کاهش نفوذپذیری حالت بحرانی‌تری رخ می‌دهد.

همچنین مقدار ضریب نفوذپذیری ۱۰ برابر کوچک‌تر فرض شد و تحلیل‌های فوق مجدداً صورت پذیرفت و خطوط تراز نسبت تنش ترسیم و با حالت قبل مقایسه شدند. به عنوان مثال در شکل



شکل ۹. کردار توزیع نسبت تنش در خاکریز ۱۰ متری، با یک مرز زهکشی، درجه اشباع 90% و در دو وضعیت مختلف

نفوذپذیری؛ (الف) $K_w = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ، (ب) $K_w = 5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$

4. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996) "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction," *Can. Geo. J.*, Vol. 33, pp. 379-392.

5. Gatmiri, B. and Delage, P. (1995) "A new void ratio state surface formulation for the nonlinear elastic constitutive modeling of unsaturated soil – code U-Dam", *Unsaturated Soils. Proc. 1st. Int. Conf. on Unsaturated Soils (UNSAT 95)*, Paris, France, V. 2, pp. 1049-1056.

۶. طلایی، محمد هاشم (۱۳۷۵) " کاربرد مدل الاستوپلاستیک در تحلیل محیطهای خاک غیراشباع و استفاده در تحلیل سدهای حاکی در حین ساخت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

7. Gasmu, J. M., Rahardjo, H., Deutscher, M. S. and Leong, E. C. (2000) "Preliminary assessment of slope stability with respect to rainfall-induced slope failures", *The Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils (UNSAT-ASIA 2000)*, Singapore, pp. 783-788.

8. Kitamura, R., Sako, K. and Yamada, M. (2000) "A new slope stability analysis for Shirasu slopes in Japan," *The Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils (UNSAT-ASIA 2000)*, Singapore, pp. 795-800.

9. Cho, S. E. and Lee, S. R. (2001) "Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration", *Computers and Geotechnics*, Vol. 28, pp. 185-208.

10. Gatmiri, B. and Nanda, A. (1989) "Finite element analysis of unsaturated elasto-plastic soils" report of CERMES, ENPC.

11. Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils (1995), UNSAT-95, Paris, France.

12. Gatmiri, B., Delage, P. and Cerrolaza, M. (1998) "UDAM: A powerful finite element software for the analysis of unsaturated porous media," *Advances in Engineering Software*, Vol. 29, No. 1, pp. 29-43.

۶. نتیجه گیری

وجود مکش ماتریسی در ساختار خاک غیراشباع سبب استحکام بیشتر خاک و نیز افزایش مقاومت برشی خاک می شود.

همچنین با کاهش درجه اشباع خاک، مکش ماتریسی موجود در ساختار آن بیشتر می شود و بنابراین ضریب اطمینان پایداری نیز افزایش می یابد.

فشار هوای حفره ای سبب تغییر عبارت $(\sigma - u_a)$ می شود و در مطالعه حاضر به طور مستقیم در فرمول های محاسبه ضریب اطمینان وارد می شود. بنابراین در نظر گرفتن فشار هوا در محاسبات پایداری بر دقت تحلیل ها افزوده است.

پس از احداث خاکریز و با گذشت زمان های بیشتر، ضریب اطمینان پایداری افزایش می یابد. این پدیده می تواند به دلیل محو فشار هوا و فشار آب حفره ای در اثر گذشت زمان باشد. همچنین با کاهش نفوذپذیری خاک، ضریب اطمینان پایداری خاکریز (بخصوص در شرایط حین ساخت و بلافاصله پس از آن) نیز کاهش می یابد.

۷. مراجع

1. Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993) "Soil mechanics for unsaturated soils", London: John Wiley & Sons.

2. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978) "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321.

3. Ng, C.W.W. & Shi, Q., (1998) "A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage", *Computers and Geotechnics*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-28.