



A Comparison of Two Unsaturated Soil Constitutive Models in Static Consolidation to Investigate Change of Saturation and Volume

Meysam Zarinfar

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran,
Email: zarinfar@basu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 31, 2021

Revised: March. 1, 2022

Accepted: Apr. 4, 2022

Published online: Nov. 22, 2022

Keywords:

Constitutive model,
Unsaturated soil,
Numerical simulation,
Plasticity

In this paper, the ability and performance of two unsaturated soil constitutive models are compared. One constitutive model is in the context of classical plasticity, and the other constitutive model is in the context of generalized plasticity. The selected models consider the effect of water retention curve on the unsaturated soil behavior. First, a program in FORTRAN language is written for each constitutive model. In the next step, the written program is validated with the experimental results. Finally, eight different suction-stress paths are modeled to identify the strengths and weaknesses of the constitutive models. The results showed that both models could simulate the loading at constant suction, increasing the yield stress and decreasing the soil deformation with an increase of suction. In drying–wetting cycles, the variation of the yield stress of the Sun et al., 2007 model is less consistent with experimental data than the variation of the yield stress of the EBSZ model, and Sun et al., 2007 Model cannot simulate some important properties of unsaturated soils. The EBSZ model cannot simulate a sudden volume reduction (failure) under decreasing suction in unsaturated soils. Using the EBSZ model in the deformation analysis of unsaturated soil may not be reliable.

Cite this article: Zarinfar, M. (2022). A Comparison of two unsaturated soil constitutive models in static consolidation to investigate change of saturation and volume, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (8), 1785-1812.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.336573.669170>



مقایسه دو مدل رفتاری خاک غیراشباع در تحکیم استاتیکی جهت بررسی تغییرات حجم و درجه اشباع

میشم زرین فر

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، ایمیل: zarinfar@basu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱/۱۵)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰	در این مقاله توانایی و عملکرد دو مدل رفتاری خاک غیراشباع مقایسه شده است. یک مدل رفتاری در چارچوب پلاستیسته کلاسیک و مدل رفتاری دیگر در چارچوب پلاستیسته تعمیم یافته قرار دارند. مدل‌های انتخاب شده تأثیر منحنی نگهداشت آب را بر رفتار خاک غیراشباع در نظر می‌گیرند. ابتدا برای هر مدل رفتاری برنامه‌ای در قالب زبان فرترن نوشته شد. در مرحله بعدی برنامه نوشته شده به وسیله داده‌های آزمایشگاهی صحت سنجی شد. در انتها، ۸ مسیر تنش - مکشی متفاوت مدل‌سازی شد تا نقاط ضعف و قوت مدل‌های رفتاری مشخص گردد. نتایج نشان داد که هر دو مدل توانایی مدل‌سازی بارگذاری در مکش ثابت، افزایش تنش تسلیم و کاهش تغییر شکل خاک با افزایش مکش را دارا هستند. در سیکل‌های خشک‌شدگی-ترشدگی، تغییرات تنش تسلیم در مدل Sun et al., 2007 نسبت به مدل EBSZ انطباق کمتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد و مدل Sun et al., 2007 توانایی مدل‌کردن بعضی ویژگی‌های مهم خاک غیراشباع را ندارد. مدل EBSZ نمی‌تواند کاهش حجم ناگهانی (گسیختگی) خاک غیراشباع را در زمان کاهش مکش شبیه‌سازی نماید. استفاده از مدل EBSZ در تحلیل‌های تغییر شکل خاک غیراشباع ممکن است در جهت اطمینان نباشد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۱۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۱	
واژه‌های کلیدی: مدل رفتاری، خاک غیراشباع، مدل‌سازی عددی، پلاستیسته.	

استناد: زرین فر، میثم. (۱۴۰۱). مقایسه دو مدل رفتاری خاک غیراشباع در تحکیم استاتیکی جهت بررسی تغییرات حجم و درجه اشباع. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*,

۵۳ (۸)، ۸۱۱۲-۱۷۸۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.336573.669170>

© نویسندگان.

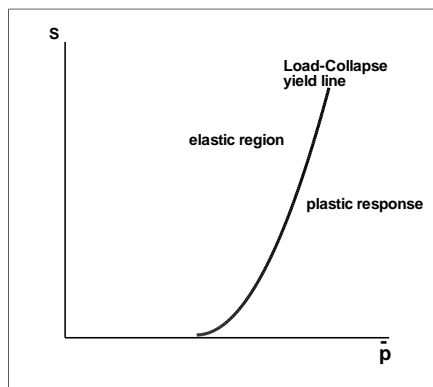
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

از آنجا که خاک در اغلب سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر سد، تونل، شیروانی‌ها و ... عمدتاً در فاز غیر اشباع قرار دارد و وضعیت اشباع و خشک دو حالت خاص از خاک‌های غیر اشباع هستند، مدل سازی رفتاری این گونه خاک مهم و حائز اهمیت است. پژوهش‌های انجام شده در خصوص مدل سازی رفتاری خاک‌های غیر اشباع در گذشته را می‌توان با مراجعه به مقالات مروری ارائه شده در این زمینه مطالعه نمود (Gens et al., 2006; Sheng et al., 2008; D'Onza et al., 2011; Sheng 2011; Ng et al., 2020).

یکی از اولین مدل‌های الاستوپلاستیکی که سعی داشت رفتار خاک غیر اشباع را فرمول بندی کند، از دو متغیر مستقل تنش $\sigma - u_a$ و $\sigma - u_w$ (Alonso et al., 1987, 1990) استفاده کرد. ایده این مدل بر پایه نتایج آزمایشگاهی گذشته که غالباً آزمایش ائودومتر بودند، شکل گرفت. آزمایش‌های دیگری توسط Delage et al., 1992; Sivakumar 1992; Zakaria 1994; Gehling et al., 1995; Alonso et al., 1995; Dineen 1997; Colmenares 2002 نیز ارائه شدند که به ارزیابی ایده‌های این مدل پرداختند. Alonso et al., 1990 فرمول بندی مدل خود را که به مدل بارسلونا مشهور شد، ارائه داد. این مدل تعمیم یافته کم کلی اصلاح شده^۱ (MCC) برای خاک‌های غیر اشباع است. مهم ترین ویژگی این مدل، استفاده از منحنی تسلیم در فضای مکش - فشار است (شکل ۱) که منحنی تسلیم بار-گسیختگی^۱ (LC) نامیده می‌شود. تسلیم شدن LC به دلیل افزایش فشار یا کاهش مکش رخ می‌دهد. در صورت تسلیم شدن منحنی LC و صرف نظر از مسیر تنش، کاهش حجم برگشت ناپذیر یا پلاستیک به وجود می‌آید. از دیگر ویژگی‌های این مدل می‌توان به سخت شوندهگی ایزوتروپ و جابه جایی LC در صورت به وجود آمدن تغییر شکل پلاستیک اشاره کرد.

مدل بارسلونا دو ویژگی مهم در رفتار خاک‌های غیر اشباع را توصیف می‌کند. اولاً کاهش حجم ناگهانی خاک غیر اشباع در صورت کاهش مکش و ثانیاً افزایش تنش تسلیم با افزایش مکش را مدل می‌نماید. مهم ترین ضعف این مدل فرض اشباع بودن خاک در صورت صفر بودن مکش است. آزمایش‌های انجام شده بروی نمونه‌های خاک غیر اشباع نشان داده است که حجم سیال درون حفره‌های دو نمونه خاک با مکش برابر، لزوماً یکسان نیست. به این پدیده که در نتیجه سیکل افزایش و کاهش مکش در نمونه به وجود می‌آید پسماند هیدرولیکی^۲ اطلاق می‌شود و ناشی از ویژگی نگهداشت آب در خاک است (Wheeler et al., 2003).



شکل ۱- منحنی تسلیم در صفحه مکش-فشار (Alonso et al., 1990)

D'Onza et al., 2011 مروری بر تحقیق مشترک انجام شده توسط هفت دانشگاه ارائه کرده‌اند و مدل‌های مختلف مکانیکی خاک و نگهداشت آب را در مدل سازی نتایج آزمایشگاهی محک زده‌اند. مدل‌های رفتاری بر اساس منحنی نگهداشت آب دسته بندی شدند. دسته اول، از منحنی ارائه شده در مقاله Van Genuchten 1980 و دسته دوم از منحنی ارائه شده در مقاله Brooks and Corey 1964 بهره گرفته‌اند. با توجه به این نکته که کرنش حجمی سبب جابه جایی منحنی هیسترسیس در امتداد محور مکش می‌شود ویژگی مکانیکی و هیدرولیکی خاک بر یکدیگر تأثیر گذارند و در مدل سازی می‌بایست اثر متقابل آن‌ها در نظر گرفته شود. روش دیگری که در پژوهش‌های پیشین جهت مدل سازی پیشنهاد شده است، استفاده از مکش به عنوان پارامتر سخت شوندهگی در مدل رفتاری است (Bolzon et al.,)

1 Modified Cam Clay

2. Load- Collapse

3. Hydraulic Hysteresis

(1996; Santagiuliana and Schrefler 2006)

در این مقاله مدل رفتاری خاک غیراشباع EBSZ که توسط Santagiuliana and Schrefler 2006 و مدل رفتاری که توسط Sun et al., 2007 ارائه شده است، مقایسه می‌شوند. علت انتخاب این دو مدل رفتاری آن است که علاوه بر این که هر دو مدل از منحنی نگهداشت آب استفاده می‌نمایند از تنش مؤثر و مکش جهت شبیه‌سازی بهره می‌گیرند. مدل رفتاری Sun et al., 2007 در چارچوب پلاستیسیته کلاسیک ارائه شده است. در این چارچوب رابطه سطح تسلیم و پتانسیل پلاستیک به صورت مشخص تعریف می‌شود. اما مدل رفتاری EBSZ در چارچوب پلاستیسیته تعمیم‌یافته ارائه شده است. در این چارچوب رابطه‌ای مشخص برای سطح تسلیم و پتانسیل پلاستیک ارائه نمی‌شود، اما بردارهای عمود بر این سطوح و سخت‌شوندگی به وسیله روابطی معین می‌شوند. همچنین به دلیل مشتق‌پذیر بودن فرمول‌بندی پلاستیسیته تعمیم‌یافته، انتقال از حالت الاستیک به حالت پلاستیک به صورت تدریجی به وجود می‌آید. درحالی‌که به دلیل ناپوستگی مشتق در شروع تسلیم مدل‌های الاستوپلاستیک، انتقال از حالت الاستیک به پلاستیک ناگهانی است. باتوجه‌به این که نتایج مدل‌هایی که از مفهوم نگهداشت آب در شبیه‌سازی استفاده نموده‌اند نسبت به مدل‌هایی که از مدل مکانیکی استفاده نموده‌اند، نزدیک‌تر به واقعیت بوده است (D'Onza et al., 2011)، در هر دو مدل از منحنی نگهداشت آب استفاده شده است. باتوجه‌به اهمیت مدل‌سازی خاک غیراشباع به‌ویژه در مسائل پایداری خاک، هدف در این مقاله مقایسه عملکرد دو مدل رفتاری و ارزیابی توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی مسیرهای متفاوت تنش-مکش است. از این‌رو، ابتدا مدل‌های رفتاری در فترن برنامه‌نویسی شدند. سپس نتایج به‌دست‌آمده از کد نوشته شده با نتایج مقالات صحت‌سنجی شد. در انتها مسیرهای تنش-مکش ارائه شده در مقالات Alonso et al., 1990 و Wheeler et al., 2003 با استفاده از دو مدل شبیه‌سازی شد و نقاط ضعف و قوت دو مدل با هم مقایسه گردید.

معادلات حاکم و گسسته‌سازی معادلات

در این بخش معادلات حاکم و گسسته‌سازی این معادلات برای خاک غیراشباع به‌اختصار توصیف می‌شود. اطلاعات بیشتر در این خصوص در کتاب Lewis and Schrefler 1998 ارائه شده است. معادلات ذیل جهت مدل‌سازی جریان آب‌وهوا درون محیط متخلخل تغییر شکل‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل معادله تعادل مومنتوم، معادله تعادل جرمی فاز سیال و معادله تعادل جرمی فاز گاز است. معادلات تعادل جرمی با صرف نظر کردن از تغییر فاز در نظر گرفته شده‌اند.

$$\mathbf{L}^T \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\left(\frac{\alpha - n}{K_s} S_w^2 + \frac{n S_w}{K_w} \right) \frac{\partial p^w}{\partial t} + \frac{\alpha - n}{K_s} S_w S_g \frac{\partial p^g}{\partial t} + \alpha S_w \mathbf{m}^T \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \dots \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\dots + \left[\frac{\alpha - n}{K_s} (p^w S_w - p^g S_g) + n \right] \frac{\partial S_w}{\partial t} + \nabla^T \left[\frac{\mathbf{k} \mathbf{k}^{nw}}{\mu^w} (-\nabla p^w + \rho^w \mathbf{g}) \right] = 0$$

$$\frac{\alpha - n}{K_s} S_w S_g \frac{\partial p^w}{\partial t} + \frac{\alpha - n}{K_s} S_g^2 \frac{\partial p^g}{\partial t} - \left[\frac{\alpha - n}{K_s} S_g (p^g - p^w) + n \right] \frac{\partial S_w}{\partial t} + \dots \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\dots + \alpha S_g \mathbf{m}^T \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{n S_g}{\rho^g} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p^g M_g}{\hat{\theta} R} \right) + \nabla^T \left[\frac{\mathbf{k} \mathbf{k}^{rg}}{\mu^g} (-\nabla p^g + \rho^g \mathbf{g}) \right] = 0$$

$$\rho = (1 - n) \rho^s + n S_w \rho^w + n S_g \rho^g \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\mathbf{m}^T = [1, 1, 0, 0]^T \quad (\text{رابطه ۶})$$

جهت حل معادلات حاکم از روابط ساختاری زیر استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تمرکز اصلی مقاله حاضر بروی رابطه تنش-

کرنش - مکش قرار گرفته است که در بخش ۳ و ۴ به تفصیل ارائه شده است.

$$d\sigma' = \mathbf{D}d\varepsilon + \mathbf{D}_s^{-1}ds \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$\sigma' = \sigma + \mathbf{m}^T \alpha (S_w p^w + S_g p^g) \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$S_w = S_w(S) \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$S = p^g - p^w \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

جهت گسسته‌سازی مکانی مجهولات مسائله شامل تغییر مکان، فشار آب و فشار گاز یا به عبارت دیگر تخمین مقدار مجهولات با

استفاده از مقادیر گرهی المان از روابط ذیل استفاده می‌شود.

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}_u \bar{\mathbf{u}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$p_w = N_p \bar{p}^w \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$p_g = N_p \bar{p}^g \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

از ضرب کردن توابع شکل در معادلات ۱، ۲ و ۳ و انتگرال‌گیری بروی دامنه مسئله معادلات گسسته شده زیر به دست می‌آیند.

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \sigma' d\Omega - \mathbf{C}_{sw} \bar{p}^w - \mathbf{C}_{sg} \bar{p}^g = \mathbf{f}^u \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$\mathbf{C}_{sw}^T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{P}_{ww} \frac{\partial \bar{p}^w}{\partial t} + \mathbf{C}_{wg} \frac{\partial \bar{p}^g}{\partial t} + \mathbf{H}_{ww} \bar{p}^w = \mathbf{f}^w \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$\mathbf{C}_{sg}^T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{C}_{gw} \frac{\partial \bar{p}^w}{\partial t} + \mathbf{P}_{gg} \frac{\partial \bar{p}^g}{\partial t} + \mathbf{H}_{gg} \bar{p}^g = \mathbf{f}^g \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

در نگارش معادلات فوق از نمادهایی استفاده شده است که با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند.

$$\mathbf{C}_{sw} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T S_w \alpha \mathbf{m} \mathbf{N}_p d\Omega, \quad \mathbf{C}_{sg} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T S_g \alpha \mathbf{m} \mathbf{N}_p d\Omega \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^u}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N^u}{\partial y} \\ \frac{\partial N^u}{\partial y} & \frac{\partial N^u}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$\mathbf{f}^u = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u^T \left((n-1)\rho^s + nS_w \rho^w + nS_g \rho^g \right) \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma_u^q} \mathbf{N}_u^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$n \frac{\partial S_w}{\partial t} = n \frac{\partial S_w}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial t} = \mathbf{C}_s \frac{\partial S}{\partial t} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$\mathbf{P}_{ww} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \left(\frac{\alpha - n}{K_s} S_w \left(S_w - p^w \frac{C_s}{n} + p^g \frac{C_s}{n} \right) + \frac{nS_w}{K_w} - C_s \right) \mathbf{N}_p d\Omega \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$\mathbf{C}_{wg} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \left(\frac{\alpha - n}{K_s} S_w \left(S_g + p^w \frac{C_s}{n} - p^g \frac{C_s}{n} \right) + C_s \right) \mathbf{N}_p d\Omega \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

$$\mathbf{H}_{ww} = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{N}_p^T \frac{\mathbf{k} \mathbf{k}^{rw}}{\mu^w} \nabla \mathbf{N}_p d\Omega \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

$$\mathbf{C}_{gw} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \left(\frac{\alpha - n}{K_s} S_g \left(S_w + p^g \frac{C_s}{n} - p^w \frac{C_s}{n} \right) + C_s \right) \mathbf{N}_p d\Omega \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

$$\mathbf{P}_{gg} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \left(\frac{\alpha - n}{K_s} S_g \left(S_g - p^g \frac{C_s}{n} + p^w \frac{C_s}{n} \right) + \frac{nS_g}{\rho^g} \frac{M_g}{\hat{\theta} R} - C_s \right) \mathbf{N}_p d\Omega \quad (\text{رابطه ۲۵})$$

$$\mathbf{H}_{gg} = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{N}_p^T \frac{\mathbf{k}k^{rg}}{\mu^g} \nabla \mathbf{N}_p d\Omega \quad (\text{رابطه ۲۶})$$

$$\mathbf{f}^w = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{N}_p^T \frac{\mathbf{k}k^{rw}}{\mu^w} \rho^w \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma_w^q} \mathbf{N}_p^T \frac{q^w}{\rho^w} d\Gamma \quad (\text{رابطه ۲۷})$$

$$\mathbf{f}^g = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{N}_p^T \frac{\mathbf{k}k^{rg}}{\mu^g} \rho^g \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma_g^q} \mathbf{N}_p^T \frac{q^g}{\rho^g} d\Gamma \quad (\text{رابطه ۲۸})$$

برای تقریب پارامتر جابه‌جایی در زمان نیز می‌توان از روش نیومارک اصلاح شده مرتبه ۲ و برای پارامتر فشار آب فشار گاز از روش نیومارک اصلاح شده مرتبه ۱ استفاده نمود.

مدل رفتاری Sun et al., 2007

Sun et al., 2007 مدل رفتاری با استفاده از چارچوب مدل Sheng et al., 2004 برای خاک‌های غیراشباع ارائه نمود. در این مدل علاوه بر منحنی تسلیم معمول، از دو سطح تسلیم دیگر جهت محاسبه مکش و درجه اشباع به نام SI و SD استفاده شده است (شکل ۲).

$$f^{SI} \equiv S - S_I = 0 \quad (\text{رابطه ۲۹})$$

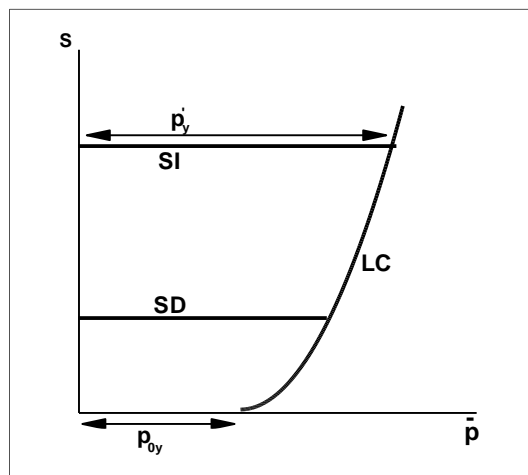
$$f^{SD} \equiv s_D - s = 0 \quad (\text{رابطه ۳۰})$$

آنان به صورت آزمایشگاهی تأثیر نسبت تخلخل را بر روی منحنی پسماند هیدرولیکی بررسی و رابطه بین نسبت تخلخل و درجه اشباع را به صورت زیر در نظر گرفتند (شکل ۲):

$$dS_r = -\lambda_{se} de - \kappa_s \frac{ds}{s} \quad (\text{رابطه ۳۱})$$

$$dS_r = -\lambda_{se} de - \lambda_{sr} \frac{ds}{s} \quad (\text{رابطه ۳۲})$$

اگر مکش در مسیر تنش از s_I بیشتر یا از s_D کمتر شود (شکل ۲)، نمو درجه اشباع از معادله (۳۲) و در غیر این صورت از معادله (۳۱) به دست می‌آید. پارامترهایی هستند که برای محاسبه نمو درجه اشباع استفاده می‌شوند و پارامتری است که تغییرات درجه اشباع را به تغییرات حجمی نمونه خاک وابسته می‌کند تا اثر رفتار مکانیکی خاک بر رفتار هیدرولیکی در نظر گرفته شود.



شکل ۲- توابع تسلیم در فضای مکش و تنش مؤثر (Sun et al., 2007)

تغییرات تنش مؤثر تسلیم (p'_y) در نتیجه تغییرات مکش با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (شکل ۲):

$$p'_y = p'_n \left(\frac{p_{0y}}{p'_n} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (\text{رابطه ۳۳})$$

$$p' = -\frac{tr \sigma'_{ij}}{3} \quad (\text{رابطه ۳۴})$$

$\lambda(s)$ را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\lambda(s) = \lambda(0) + \frac{\lambda_s s}{p_a + s} \quad (\text{رابطه ۳۵})$$

λ_s پارامتر خاک و s مکش خاک است و از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$s = (u_a - u_w) \quad (\text{رابطه ۳۶})$$

با مشتق گیری از معادله (۳۳) نسبت به p_{0y} و s ، نمو تنش تسلیم غیراشباع به صورت زیر به دست می آید:

$$dp'_y = \frac{\partial p'_y}{\partial p_{0y}} dp_{0y} + \frac{\partial p'_y}{\partial s} ds = \frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa} \left(\frac{p_{0y}}{p'_n} \right)^{\frac{\lambda(0) - \lambda(s)}{\lambda(s) - \kappa}} dp_{0y} + \frac{\lambda_s p'_y p_a (\lambda(0) - \kappa)}{(\lambda(s) - \kappa)^2 (p_a + s)^2} \ln \left(\frac{p'_n}{p_{0y}} \right) ds \quad (\text{رابطه ۳۷})$$

زمانی که تنش در نمونه به گونه ای باشد که درون منحنی تسلیم (منحنی LC) قرار گیرد کرنش حجمی الاستیک از رابطه زیر به دست می آید:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa dp'}{(1+e)p'} \quad (\text{رابطه ۳۸})$$

اگر تنش در نمونه به گونه ای باشد که روی منحنی LC قرار گیرد کرنش پلاستیک حجمی از رابطه زیر به دست می آید:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{(\lambda(0) - \kappa) dp_{0y}}{(1+e)p_{0y}} \quad (\text{رابطه ۳۹})$$

که در آن dp_{0y} را می توان از معادله (۳۷) محاسبه نمود.

$$dp_{0y} = \left(dp'_y - \frac{\partial p'_y}{\partial s} ds \right) \times \frac{\partial p_{0y}}{\partial p'_y} \quad (\text{رابطه ۴۰})$$

Sun et al., 2007 جهت مدل کردن رفتار برشی خاک، از مدل MCC و قانون جریان همراه استفاده نمودند ($f = g$). تابع تسلیم

این مدل در رابطه ۴۱ و محاسبه نمو کرنش پلاستیک از قانون جریان در رابطه ۴۳ ذکر شده است.

$$f = g = q^2 + M^2 p'(p' - p'_y) = 0 \quad (\text{رابطه ۴۱})$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} dev \sigma'_{ij} : dev \sigma'_{ij}} \quad (\text{رابطه ۴۲})$$

$$d\varepsilon^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \quad (\text{رابطه ۴۳})$$

با اعمال شرایط سازگاری ($df = 0$) می توان Λ را مطابق با رابطه ۴۴ محاسبه نمود.

$$\Lambda = \frac{M^2 (2p' - p_y) dp' + 2q dq - M^2 p' \frac{\partial p'_y}{\partial s} ds}{-M^2 p' \frac{\partial p'_y}{\partial p_{0y}} p_{0y} \frac{(1+e)}{(\lambda(0) - \kappa)} M^2 (2p' - p_y)} \quad (\text{رابطه ۴۴})$$

مدل رفتاری EBSZ

این مدل بر پایه مدل رفتاری پاستور برای خاک اشباع (Pastor et al., 1990) و مدل BSZ (Bolzon et al., 1996) که اصلاح مدل پاستور برای خاک غیراشباع است بنا نهاده شده است. در این مدل به منظور لحاظ نمودن اثر پسماند هیدرولیکی نمو کرنش پلاستیک ($d\varepsilon^p$) به دو بخش تقسیم شده است که یک بخش در نتیجه نمو تنش مؤثر ($d\sigma'$) و بخش دیگر در نتیجه نمو مکش (ds) به وجود می آید.

$$d\varepsilon^p = \frac{1}{H} n_g n^T d\sigma' + \frac{1}{H_b} n_g ds \quad (\text{رابطه ۴۵})$$

$$\sigma' = \sigma - (u_a - \chi s) I \quad (\text{رابطه ۴۶})$$

اولین جمله در رابطه (۴۵) منطبق بر مدل رفتاری پاستور است. جمله دوم کرنش پلاستیک به وجود آمده در نتیجه نمو مکش را

محاسبه می نماید. بردارهای n و n_g از روابط زیر محاسبه می شوند:



$$n = \frac{1}{\sqrt{1+d_f^2}} \{d_f; 1\}^T \quad d_f = (1+c)(M_f - \eta) \quad (\text{رابطه ۴۷})$$

$$n_g = \frac{1}{\sqrt{1+d_g^2}} \{d_g; 1\}^T \quad d_g = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = (1+c)(M_g - \eta) \quad (\text{رابطه ۴۸})$$

اگر از قانون جریان همراه در مدل سازی استفاده شود مقدار M_g و M_f باهم برابر خواهند بود. d_g و d_f پارامترهایی هستند که بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست می آید و از پارامترهای ثابت مدل رفتاری هستند. η برابر با نسبت تنش (q/p') و c با ترسیم منحنی تغییرات حجم در مقابل نسبت تنش محاسبه می شود. c پارامتری است که شکل سطح تسلیم را مشخص می کند و اگر برابر با ۱ باشد، سطح تسلیم سهموی است. اگر چه در این رویکرد سطوح تسلیم و پتانسیل صریحا تعریف نمی شوند اما می توان با انتگرال گیری از بردارهای عمود بر سطوح تسلیم و پتانسیل، رابطه ای برای این سطوح به دست آورد که در رابطه زیر، سطح تسلیم به دست آمده از انتگرال گیری رابطه ۴۷ نمایش داده شده است.

$$f \equiv q - M_f p' \left(1 + \frac{1}{c}\right) \left[1 - \left(\frac{p'}{p_f}\right)^c\right] \quad (\text{رابطه ۴۹})$$

با استفاده از رابطه (۴۵)، کرنش پلاستیک به دست می آید:

$$d\varepsilon^p = \left(\frac{n^T D^e d\varepsilon + \frac{H}{H_b} ds}{H + n^T D^e n_g} \right) n_g \quad (\text{رابطه ۵۰})$$

پارامترهای سخت شونده گی مدل نیز به صورت زیر تعریف شده اند:

$$H = H_0 P' H_w H_f (H_v + H_s) H_{dm} \quad (\text{رابطه ۵۱})$$

$$H_b = w H_0 p' H_f H_{dm} \quad (\text{رابطه ۵۲})$$

$$H_0 = \frac{1 + e_0}{\lambda(0) - k} \quad (\text{رابطه ۵۳})$$

$$H_w = 1 + as \quad , \quad a = \frac{\lambda(0) - \lambda(s)}{s(\lambda(s) - \kappa)} \quad (\text{رابطه ۵۴})$$

$$H_f = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_f}\right) \quad \eta_f = \left(1 + \frac{1}{c}\right) M_f \quad (\text{رابطه ۵۵})$$

$$H_v = \left(1 - \frac{\eta}{M_g}\right) \quad (\text{رابطه ۵۶})$$

$$H_s = \beta_0 \beta_1 \exp(-\beta_0 \xi) \quad (\text{رابطه ۵۷})$$

$$H_{dm} = \left(\frac{\zeta_{\max} J(s)}{\zeta}\right)^\gamma \quad J(s) = e^{[\alpha(1-s_w)]} \quad \zeta = p' \left[1 - \left(\frac{1}{1+c}\right) \frac{\eta}{M}\right]^{\frac{1}{c}} \quad (\text{رابطه ۵۸})$$

β_0 از ۱/۵ تا ۵ و معمولا برابر با ۴/۲ انتخاب می شود. β_1 از ۰/۱ تا ۰/۲ تغییر می کند و به طور معمول برابر با ۰/۲ انتخاب می شود. پارامتر γ به گونه ای انتخاب می شود که منحنی به دست آمده از مدل در اولین بارگذاری مجدد، منطبق بر نتایج آزمایشگاهی باشد. ζ بیان کننده تأثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار خاک است. پارامتر ζ حداکثر مقدار تنش نمونه خاک را در خود ذخیره می کند. این پارامتر علاوه بر تنش به درجه اشباع نیز وابسته است. جهت محاسبه تغییرات مکش و درجه اشباع می توان از روابط ۳۱ و ۳۲ استفاده نمود.

صحت سنجی کد المان محدود در حل معادلات حاکم

جهت به کارگیری معادلات حاکم در حل مسئله کاربردی، از آزمایش زهکشی ستون ماسه استفاده می شود (Huang and Zienkiewicz 1998). در آزمایش مزبور، زهکشی از ستون قائمی به ارتفاع ۱۰۰ و عرض ۱۰ سانتیمتر در شرایط کرنش مسطح انجام شد. شرایط مرزی مسئله در شکل (۳) نمایش داده شده است. شبکه المان محدود این ستون متشکل از ۱۰ المان چهارگوش چهار گرهی است. شرایط مرزی در پایین ستون برای فاز جامد در هر دو جهت افقی و قائم گیردارند و حرکت دیگر نقاط فاز جامد در راستای قائم آزاد

است و از حرکت آنها در راستای افق جلوگیری شده است. سطح آزاد آب در مرز پایینی قرار دارد به عبارت دیگر بروی این مرز خاک اشباع باقی می ماند.

خصوصیات مصالح در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱- پارامترهای مسئله زهکشی ستون ماسه

E	ν	ρ_s	ρ_w	k	n	K_w
۳ MPa	۰/۲۸۵۷	۲۶۶۸ Kg/m ^۳	۹۸۱ Kg/m ^۳	۰/۰۰۴۵ cm/s	۰/۲۹۷۵	۲,۱ GPa

در شکل (۴) منحنی های تغییرات درجه اشباع و نفوذپذیری در مقابل تغییرات مکش نشان داده شده است. نتایج تحلیل انجام شده برای نقاط ۳، ۱۳ و ۲۱ در قالب منحنی های تغییرات مکش و تغییر مکان قائم در شکل (۵) نشان داده شده است. با شروع جریان آب در نقاط بالایی ستون ماسه با کاهش درجه اشباع، مکش به وجود می آید. همانطور که مشاهده می شود تطابق مناسبی بین تحلیل انجام شده و نتایج Huang and Zienkiewicz 1998 برقرار است.

صحت سنجی مدل Sun et al., 2007

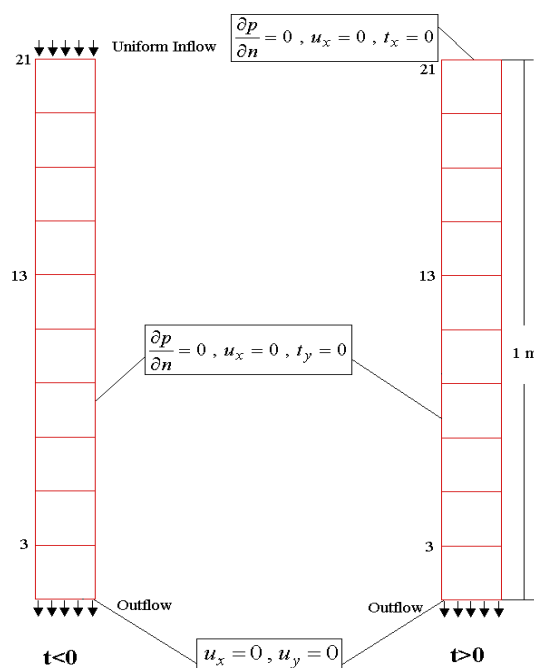
در این بخش آزمایش های مدل سازی شده در مقاله Sun et al., 2007 جهت صحت سنجی کد نوشته شده ارائه می گردد. در مدل سازی این بخش از پارامترهای جدول ۲ استفاده می شود:

جدول ۲- پارامترهای مدل رفتاری Sun et al., 2007

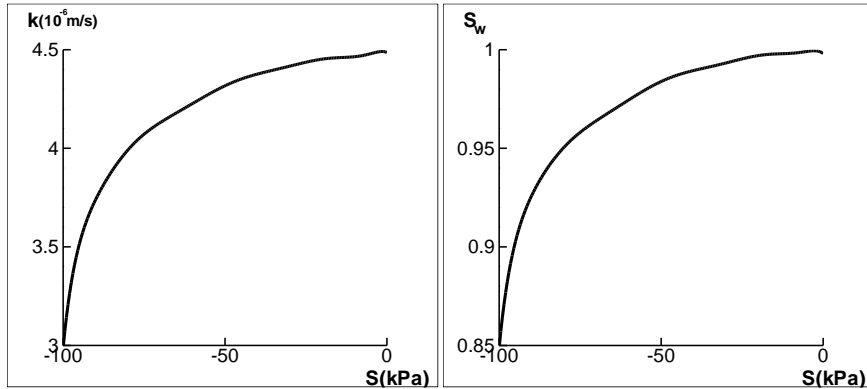
$\lambda(0)$	κ	λ_s	λ_{se}	κ_s	λ_{sr}	P_{0y}	P'_n	M	e_0
۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۰۱	۰/۱۳	۱۵ kPa	۲ MPa	۱/۱	۱/۳۸

شبکه المان محدود مورد استفاده و شرایط مرزی آن در شکل (۶) نشان داده شده است. تحلیل انجام شده مطابق با شرایط آزمایش سه محوری غیر اشباع در شرایط تقارن مرکزی و در حالت بارگذاری استاتیکی انجام شده است.

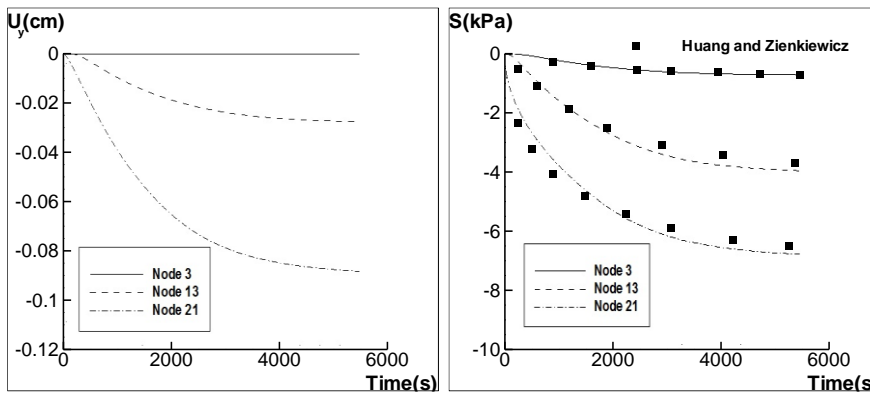
محل اولیه سطوح تسلیم مکش $S_D = 140 kPa$ و $S_I = 250 kPa$ در نظر گرفته شده است.



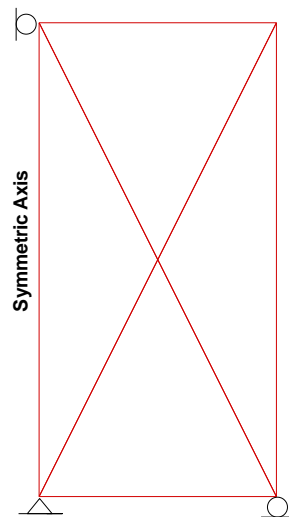
شکل ۳- شرایط مرزی زهکشی ستون ماسه ای



شکل ۴- تغییرات درجه اشباع و نفوذپذیری با تغییرات مکش

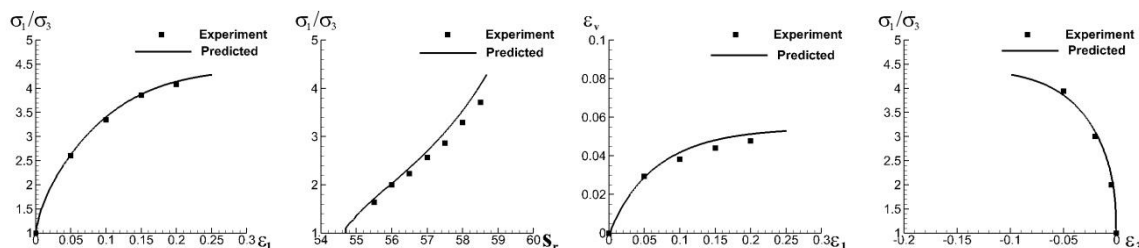


شکل ۵- تغییرات مکش و تغییر مکان قائم در نقاط مشخص شده

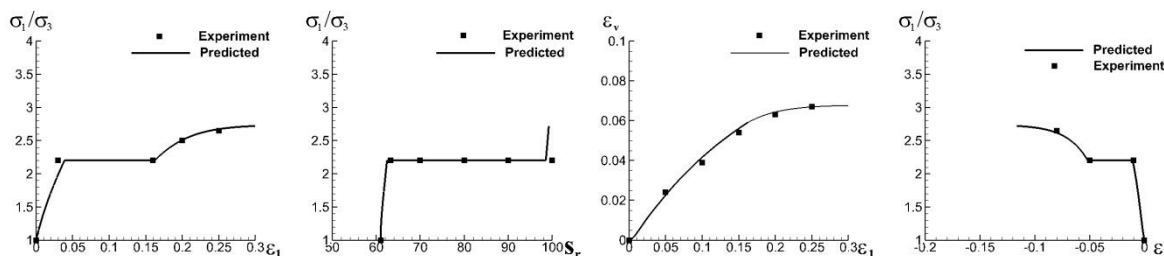


شکل ۶- شبکه المان محدود آزمایش سه محوری

شکل‌های ۷ و ۸ مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی را نمایش می‌دهند. در شکل ۷، آزمایش سه محوری مدل‌سازی شده در تنش ثابت ۱۹۶ کیلوپاسکال و مکش ۱۴۷ کیلو پاسکال نمایش داده شده است. شکل ۸ آزمایشی مشابه با شکل ۷ را نمایش می‌دهد با این تفاوت که در نسبت تنش حدود ۲،۲، مکش از ۱۴۷ به صفر کاهش داده می‌شود. همان گونه که ملاحظه می‌شود تطابق مناسبی بین نتایج کد نوشته شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.



شکل ۷- مدل سازی آزمایش سه محوری خاک رس (در مکش ۱۴۷ kPa و تنش ۱۹۶ kPa)



شکل ۸- مدل سازی آزمایش سه محوری خاک رس (در مکش ۱۴۷ kPa و تنش ۱۹۶ kPa و سپس کاهش مکش تا ۰)

صحت سنجی مدل EBSZ

در مقاله Santagiuliana et al., 2006 آزمایشی ارائه شده است تا توانایی مدل را در پیش بینی رفتار خاک در سیکل کاهش-افزایش مکش ارزیابی نماید. ابتدا مکش از ۲۰۰ kPa به ۲۰ kPa کاهش می یابد (مسیر AB) و سپس افزایش داده می شود تا به ۲۰۰ kPa برسد. این سیکل در تنش $\bar{p} = 10$ kPa انجام می شود. پارامترهای مورد نیاز و مقادیر اولیه مدل سازی در جداول ۲ و ۳ نمایش داده شده اند. باتوجه به این که مقدار $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ نقشی مشابه با LC در مدل Sun et al., 2007 دارد، در شکل ۹ مقادیر متناظر با $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ با عبارت LC نمایش داده شده اند. در مسیر AB حجم به صورت الاستیک افزایش می یابد اما تغییرات درجه اشباع به صورت الاستوپلاستیک تغییر می کند. تغییرات درجه اشباع موجب کاهش مقدار $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ می شود و نمونه در مسیر افزایش مکش در تنش کمتری به تسلیم می رسد. به همین دلیل در مسیر افزایش مکش BCD، تغییرات حجم پلاستیک در نمونه به وجود می آید اما تغییرات درجه اشباع به صورت الاستیک تغییر می کند. (شکل ۹). این رفتار به وسیله مدل هایی نظیر Alonso et al., 1990 قابل مدل کردن نیست.

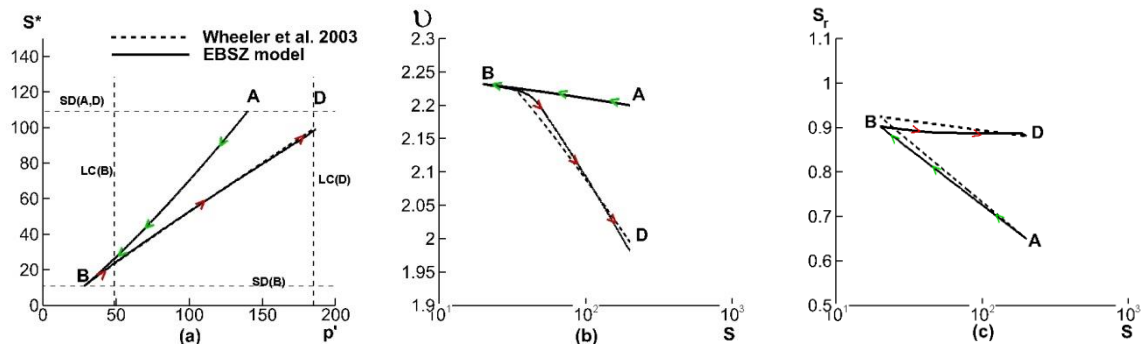
جدول ۳- پارامترهای مدل رفتاری EBSZ

$\lambda(0)$	κ	α	w	γ	a	β_0	β_1	κ_s	λ_{Sr}	c	M_f	M_g	η_f
۰/۱۵	۰/۰۲	۸	۱۰	۱۰	-۰/۰۰۳	۴/۲	۰/۲	۰/۰۲	۰/۱۲	۱	۱	۱	۱/۵

جدول ۴- مقادیر اولیه مدل رفتاری EBSZ

p_{max}	$\bar{p} = p - u_a$	s	S_r	v	S_D	S_I
۲۰ kPa	۱۰ kPa	۲۰۰ kPa	۰/۶۵	۲/۲	۲۰۰ kPa	۲۰۰۰ kPa

در شکل ۹ نتایج به دست آمده از برنامه تهیه شده نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود مدل سازی صورت گرفته با نتایج ارائه شده توسط Wheeler et al., 2003 مطابقت دارد.



شکل ۹- مدل سازی سیکل کاهش - افزایش مکش در تنش خالص متوسط ثابت (a) مسیر تنش (b) حجم مخصوص (c) درجه اشباع

ارزیابی مدل های رفتاری

در این بخش به ارزیابی مدل های رفتاری پرداخت می شود. این ارزیابی به وسیله آزمایش هایی که Alonso و Wheeler et al., 2003 و et al., 1990 در مقاله خود ارائه داده اند، انجام می شود. هدف در این بخش مشخص نمودن نقاط ضعف و قوت و مقایسه عملکرد دو مدل رفتاری در مسیرهای متفاوت تنشی - مکشی است. پارامترهای مورد استفاده در مدل Sun et al., 2007 در جدول (۵) و پارامترهای مورد استفاده در مدل EBSZ در جدول (۶) ارائه شده اند.

جدول ۵- پارامترهای مدل Sun et al., 2007

$\lambda(0)$	κ	λ_s	λ_{se}	κ_s	λ_{Sr}	p_{0y}	p'_n	M	e_0
۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۲۵۵	۰/۶۱	۰/۰۲	۰/۱۲	۱۰ kPa	۲ MPa	۱	۱/۲

جدول ۶- پارامترهای مورد استفاده در مدل EBSZ

$\lambda(0)$	κ	α	w	γ	a	β_0	β_1	λ_{se}	κ_s	λ_{Sr}	c	M_f	M_g	η_f	e_0
۰/۱۵	۰/۰۲	۸	۱۰	۱۰	-۰/۰۰۳	۴/۲	۰/۲	۰/۶۱	۰/۰۲	۰/۱۲	۱	۱	۱	۱/۵	۱/۲

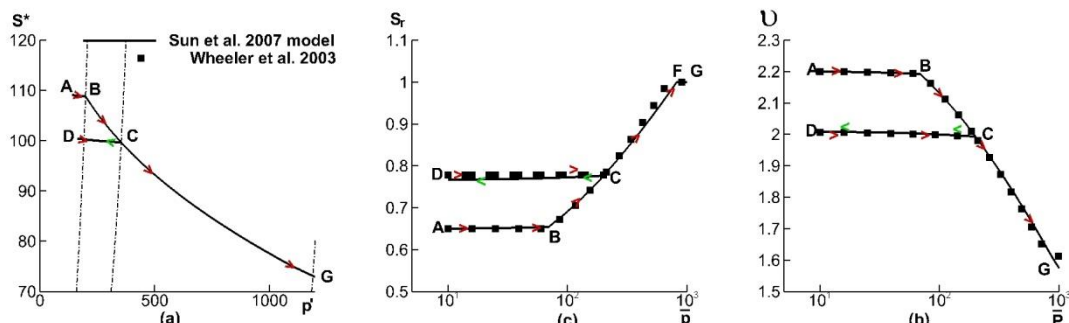
اعمال تنش همه جانبه در مکش ثابت:

اولین مدل سازی در مکش ثابت ۲۰۰ kPa انجام می شود. \bar{p} (تنش همه جانبه) از ۱۰ kPa تا ۱۰۰۰ kPa تغییر می کند. در ۲۰۰ kPa $\bar{p} =$ باربرداری انجام می شود. شکل (۱۰) شبیه سازی آزمایش را به وسیله مدل رفتاری Sun et al., 2007 و شکل (۱۱) شبیه سازی را به وسیله مدل رفتاری EBSZ نمایش می دهند. در شکل (۱۰-a) و (۱۱-a) مسیر تنش در صفحه (s^*, p') نمایش داده شده است. پارامتری است که از ضرب مکش در پوکی به دست می آید و به آن مکش اصلاح شده اطلاق می شود. در تمام مسیر آزمایش، مکش ثابت است در نتیجه سطوح SI و SD به تسلیم نمی رسند. پس از شروع بارگذاری در نقطه B، نمونه به تسلیم می رسد. در این نقطه نرخ تغییرات کرنش حجمی و به تبع آن نرخ تغییر درجه اشباع افزایش می یابد (شکل (۱۰-c) و (۱۱-c)). مسیر باربرداری CD در ناحیه الاستیک قرار دارد و بعد از شروع بارگذاری نمونه در نقطه C که روی LC است به تسلیم می رسد. پس از شروع بارگذاری مجدد، نمونه در نقطه C به تسلیم می رسد. درجه اشباع پیوسته افزایش می یابد تا در نقطه F نمونه به اشباع کامل می رسد. در مدل EBSZ p_{max} برابر با ۱۲ کیلو پاسکال انتخاب شد تا در درجه اشباع اولیه نمونه مقدار $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ برابر با p_0 در مدل Sun et al., 2007 شود. در این مدل رفتاری جهت در نظر گرفتن تاریخچه بارگذاری، از پارامتر H_{dm} استفاده می شود. H_{dm} در حالت بارگذاری ایزوتروپ برابر با رابطه زیر است:

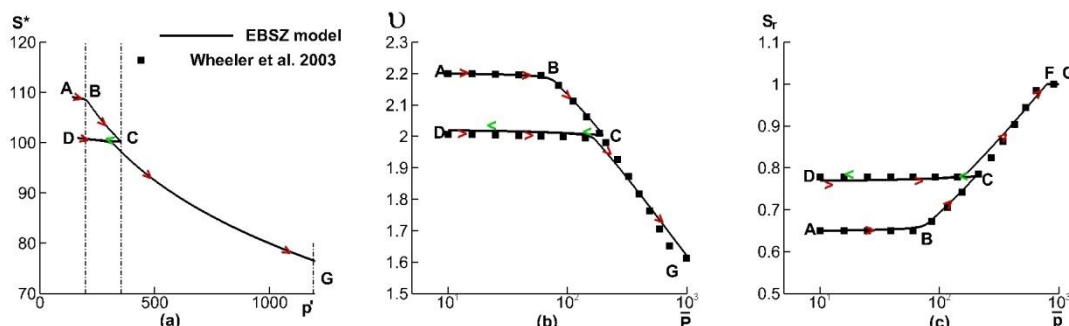
$$H_{dm} = \frac{p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}}{p'} \quad (\text{رابطه ۵۹})$$

رابطه فوق ساده شده رابطه ۳۰ در حالت $q=0$ است. مقدار زیاد H_{dm} نشان دهنده آن است که وضعیت فعلی تنش از حداکثر تنش تجربه شده خاک فاصله دارد. هر چه H_{dm} بزرگتر باشد مقدار تغییر شکل پیش بینی شده توسط مدل کمتر است. در شکل (۱۱-a) مسیر تنش در فضای $p' : s^*$ به همراه چگونگی تغییرات $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ در حین بارگذاری ترسیم شده است. از آنجاکه مقدار این پارامتر به درجه

اشباع وابسته است با کاهش درجه اشباع مقدار $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ که معادل با تنش تسلیم است، افزایش می‌یابد. چنان که از شکل های (۱۰) و (۱۱) مشهود است هر دو مدل در شبیه‌سازی بارگذاری همه‌جانبه در مکش ثابت عملکردی مشابه و مناسبی دارند. تفاوت این دو مدل در کاهش مقدار تنش تسلیم در مسیر بارگذاری مجدد DC در مدل EBSZ است که در مدل Sun et al., 2007 دیده نمی‌شود. به دلیل رابطه بین تنش تسلیم در مدل EBSZ و درجه اشباع، مقدار تنش تسلیم در امتداد مسیر باربرداری CD کاهش یافته و نمونه در تنش کمتری به تسلیم می‌رسد. این ویژگی مدل EBSZ تطابق بیشتری با واقعیت دارد.



شکل ۱۰- مدل‌سازی بارگذاری همه‌جانبه در مکش ثابت به‌وسیله مدل Sun et al., 2007 (a) فضای مکش اصلاح شده - تنش مؤثر همه‌جانبه (b) فضای حجم مخصوص - تنش همه‌جانبه (c) فضای درجه اشباع - تنش همه‌جانبه



شکل ۱۱- مدل‌سازی بارگذاری همه‌جانبه در مکش ثابت به‌وسیله مدل EBSZ (a) فضای مکش اصلاح شده - تنش مؤثر همه‌جانبه (b) فضای حجم مخصوص - تنش همه‌جانبه (c) فضای درجه اشباع - تنش همه‌جانبه

مدل‌سازی انبساط و گسیختگی ناگهانی در پروسه کاهش مکش:

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) رفتار خاک را تحت کاهش مکش از ۲۰۰kPa به ۱۰kPa نشان می‌دهند. این آزمایش در دو تنش همه‌جانبه متفاوت شکل‌های (۱۲) و (۱۳) در مسیر AC و $\bar{p} = 50kPa$ در مسیر DEFG انجام می‌شود. در شکل (۱۲-a) مسیر تنش در صفحه $p' : s^*$ و چگونگی تغییرات سطوح تسلیم LC و SD نمایش داده شده است. با کاهش مکش اولاً مقدار نیروی وارد بر نمونه کاهش می‌یابد ثانیاً طبق رابطه (۹) تنش تسلیم کاهش می‌یابد. در نتیجه این امکان وجود دارد که با کاهش مکش، نمونه به تسلیم برسد. در مسیر AC و در هر دو مدل، باربرداری الاستیک به وجود می‌آید که با کاهش تنش مؤثر، حجم افزایش می‌یابد (شکل (۱۲-b) و (۱۳-b)). همانطور که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمایش داده شده است، منحنی تسلیم LC با مسیر تنش AC متقاطع نیست. از ابتدای مسیر منحنی SD به تسلیم می‌رسد و افزایش درجه اشباع به‌صورت الاستوپلاستیک رخ می‌دهد. مسیر DG در تنش همه‌جانبه بیشتری انجام می‌شود. به همین دلیل در مدل Sun et al., 2007 و در حین اعمال کاهش مکش، مسیر تنش منحنی LC را در نقطه E قطع می‌کند و مدل کرنش گسیختگی را مدل می‌کند (شکل (۱۲-a)). به وجود آمدن کرنش پلاستیک انقباضی یا کاهش حجم ناگهانی در نمونه خاک، نرخ تغییرات درجه اشباع را افزایش می‌دهد که بیان‌کننده تأثیر متقابل عملکرد هیدرولیکی و مکانیکی خاک غیراشباع است (۸-c). مدل رفتاری Sun et al., 2007 توانایی مدل‌سازی گسیختگی ناگهانی در مسیر کاهش مکش را داراست.

در شکل (۱۳) شبیه‌سازی این آزمایش به‌وسیله مدل EBSZ نشان داده شده است. در شکل (۱۳-a) مسیر تنش در فضای $p' : s^*$ و تغییرات منحنی SD و $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ در حین بارگذاری ترسیم شده است. در مسیر AC و DG، مدل افزایش حجم الاستیک و افزایش درجه اشباع پلاستیک (به دلیل تسلیم شدن SD) را پیش‌بینی می‌کند. کرنش پلاستیک در مسیر کاهش مکش طبق رابطه ۴۵، از رابطه

زیر به دست می‌آید.

$$d\varepsilon_v^p = \frac{1}{H_b} n_g ds \quad (\text{رابطه ۶۰})$$

حذف ترم $n_g n^T d\sigma' / H$ از معادله (۲۲)، به علت کاهش تنش مؤثر است که متناظر با حالت باربرداری فرض می‌شود. در تئوری پلاستیسیته تعمیم‌یافته اگر n بردار واحد عمود بر سطح تسلیم در نظر گرفته شود، تعاریف بارگذاری و باربرداری به صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$n^T \cdot d\sigma'^e > 0 \quad \text{loading} \quad (\text{رابطه ۶۱})$$

$$n^T \cdot d\sigma'^e < 0 \quad \text{unloading} \quad (\text{رابطه ۶۲})$$

$$n^T \cdot d\sigma'^e = 0 \quad \text{neutral loading} \quad (\text{رابطه ۶۳})$$

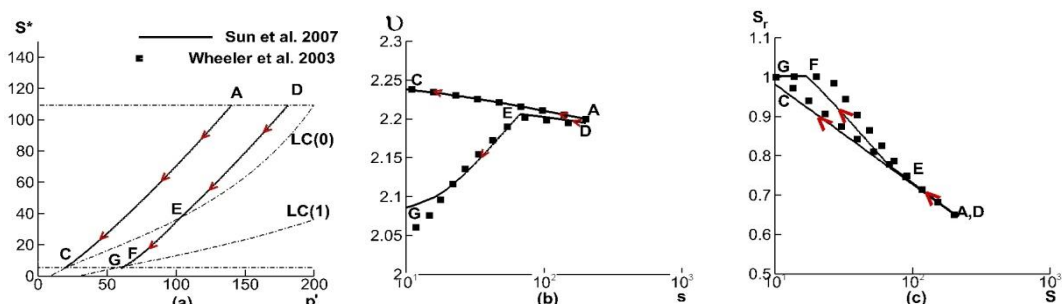
که در آن:

$$d\sigma'^e = D^e \cdot d\varepsilon \quad (\text{رابطه ۶۴})$$

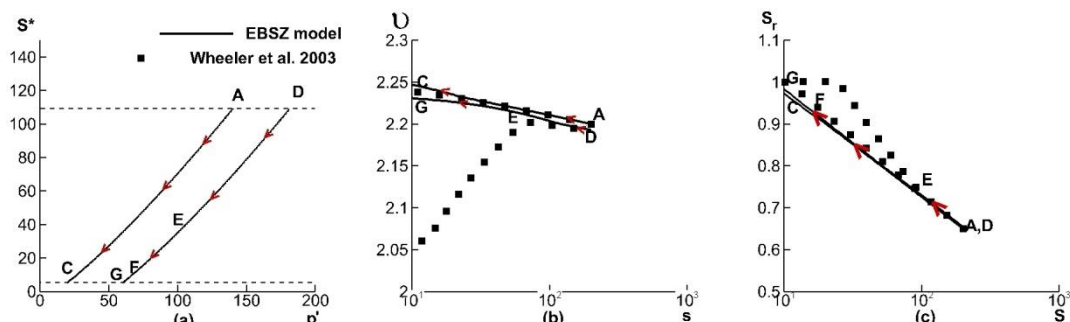
در این رابطه D^e ماتریس رفتاری الاستیک است و به مدول الاستیک و ضریب پواسون وابسته است. با توجه به کاهش تنش مؤثر به دلیل افزایش درجه اشباع، حالت باربرداری در مدل پیش‌بینی می‌شود. از آنجاکه مقدار H_b و n_g در بارگذاری همه‌جانبه مثبت است، پس نمو کرنش پلاستیک هم علامت با نمو مکش است. در نتیجه با کاهش مکش، نمو کرنش پلاستیک منفی خواهد بود. مطابق با قرارداد معمول مکانیک خاک که اگر فشار و کاهش حجم در خاک به وجود آید مثبت در نظر گرفته می‌شود، نمو کرنش منفی به معنی افزایش حجم در خاک است. در نتیجه این مدل توانایی شبیه‌سازی کاهش حجم ناگهانی خاک را در مسیر کاهش مکش ندارد و همواره افزایش حجم را به دلیل کاهش تنش مؤثر پیش‌بینی می‌نماید.

مدل‌سازی سیکل کاهش-افزایش مکش

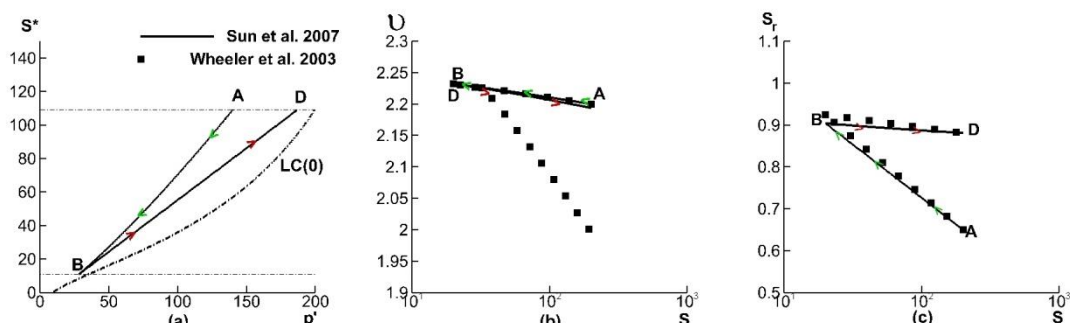
در این آزمایش ابتدا مکش از $100kPa$ به $20kPa$ کاهش می‌یابد و سپس مکش افزایش می‌یابد تا به $200kPa$ برسد. در تمام طول آزمایش تنش همه‌جانبه ثابت و برابر با $\bar{p} = 10kPa$ است. شکل (۹) برای مدل EBSZ و شکل (۱۴) برای مدل Sun et al., 2007 اعمال سیکل کاهش-افزایش مکش را نشان می‌دهند. برای مدل Sun et al., 2007، مسیر کاهش مکش AB و افزایش مکش BD به طور کامل درون ناحیه الاستیک یا منحنی LC قرار دارند. در نتیجه با کاهش تنش مؤثر، حجم افزایش و با افزایش تنش مؤثر، حجم کاهش می‌یابد (۱۰-b). از ابتدای مسیر کاهش مکش منحنی SD به تسلیم می‌رسد و افزایش درجه اشباع به صورت الاستوپلاستیک رخ می‌دهد. اما در مسیر افزایش مکش منحنی SI به تسلیم نمی‌رسد و تغییرات درجه اشباع نیز الاستیک است (۱۰-c). می‌بایست به این نکته اشاره نمود که در حالت کلی این مدل توانایی شبیه‌سازی کاهش حجم بوجودآمده در افزایش مکش را داراست. اگر تنش نقطه A بیش از $10kPa$ بود (به عنوان مثال $50kPa$) در مسیر افزایش مکش منحنی LC به تسلیم می‌رسید و مدل کاهش حجم را پیش‌بینی می‌نمود. هدف از ارائه چنین آزمایشی آن است که این مدل در چنین مسیرهای تنشی، به دلیل شکل خاص منحنی تسلیم LC و عدم وابستگی حرکت آن به منحنی‌های SD و SI انعطاف‌پذیری کمتری دارد. با استفاده از مدل رفتاری EBSZ که در بخش صحت‌سنجی این مدل (بخش ۵) ارائه شد، می‌توان این آزمایش را بخوبی مدل‌سازی کرد. زیرا پارامتر $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ که به تغییرات درجه اشباع وابسته است به مدل قابلیت شبیه‌سازی این رفتار خاک غیراشباع را می‌دهد.



شکل ۱۲- مدل‌سازی کاهش مکش در تنش همه‌جانبه ثابت به وسیله مدل Sun et al., 2007 (a) فضای مکش اصلاح شده-تنش مؤثر همه‌جانبه (b) فضای حجم مخصوص-تنش همه‌جانبه (c) فضای درجه اشباع-تنش همه‌جانبه



شکل ۱۳- مدل سازی کاهش مکش در تنش همه جانبه ثابت به وسیله مدل EBSZ (a) فضای مکش اصلاح شده - تنش مؤثر همه جانبه (b) فضای حجم مخصوص - تنش همه جانبه (c) فضای درجه اشباع - تنش همه جانبه



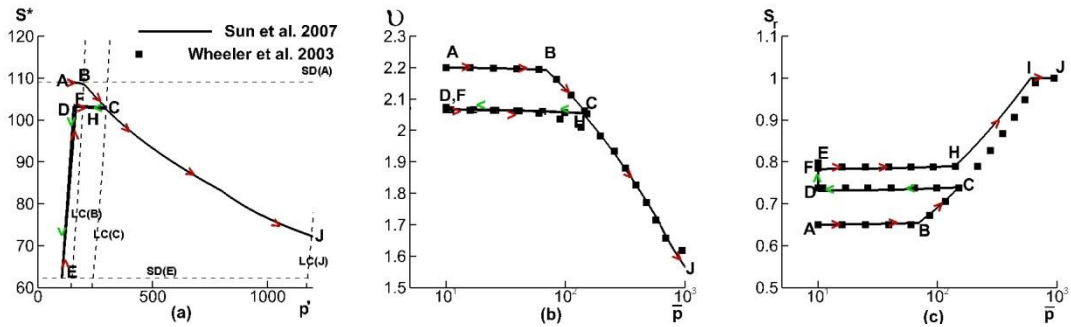
شکل ۱۴- مدل سازی سیکل کاهش - افزایش مکش در تنش همه جانبه ثابت به وسیله مدل Sun et al., 2007 (a) فضای مکش اصلاح شده - تنش مؤثر همه جانبه (b) فضای حجم مخصوص - تنش همه جانبه (c) فضای درجه اشباع - تنش همه جانبه

ترکیب سیکل باربرداری و بارگذاری تنشی-مکشی

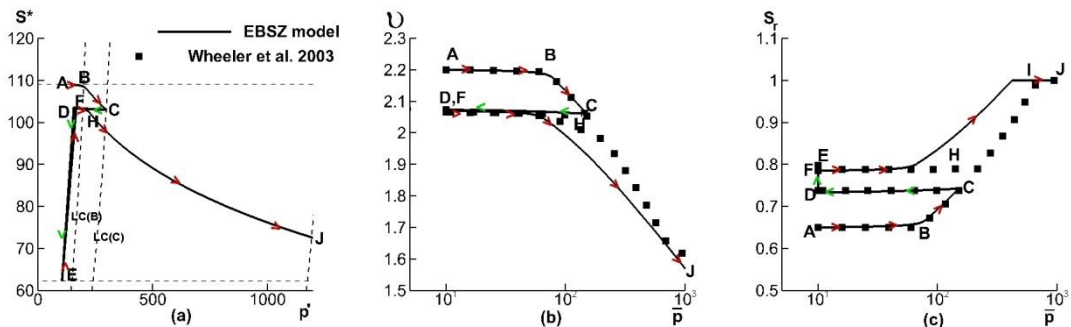
در این آزمایش، ابتدا سیکل باربرداری - بارگذاری (ABCD) در مکش ثابت ۲۰۰ kPa انجام می شود. سپس \bar{p} از ۱۰ kPa به مقدار kPa ۱۵۰ افزایش یافته و در ادامه به ۱۰ kPa کاهش داده می شود. بعد از این مرحله، سیکل کاهش - افزایش مکش (DEF) انجام می شود. این سیکل در $\bar{p} = 10$ kPa و با کاهش مکش از ۲۰۰ kPa به ۱۲۰ kPa و بازگشت دوباره مکش به ۲۰۰ kPa انجام می شود. سپس با ثابت نگه داشتن مکش، \bar{p} از ۱۰ kPa به ۱۰۰۰ kPa افزایش می یابد (مسیر FGHIJ).

در مسیر بارگذاری ABC که در مکش ثابت انجام می شود نمونه تسلیم می شود و تغییر حجم پلاستیک در نمونه به وجود می آید (شکل (۱۵) و (۱۶)). با به تسلیم رسیدن LC نرخ تغییرات درجه اشباع افزایش می یابد (شکل (۱۵) و (۱۶)). در مسیر باربرداری افزایش حجم به صورت الاستیک و کاهش درجه اشباع به وسیله مدل پیش بینی می شود. در سیکل کاهش - افزایش مکش، نرخ تغییرات درجه اشباع افزایش می یابد. این امر بدان دلیل است که در مسیر کاهش مکش SD تسلیم می شود و درجه اشباع برگشتناپذیر یا پلاستیک در خاک به وجود می آید در حالی که در افزایش مکش SI تسلیم نمی شود.

در سیکل کاهش - افزایش مکش، منحنی LC به تسلیم نمی رسد و تغییرات حجمی الاستیک است (شکل (۱۵) و (۱۶)). در زمان باربرداری و سیکل مکشی منحنی LC ثابت است. در بارگذاری مجدد نمونه در نقطه C به تسلیم می رسد و روی منحنی بارگذاری قبلی قرار می گیرد. مدل رفتاری Sun et al., 2007 قابلیت مدل سازی کاهش تنش تسلیم را بعد از سیکل کاهش - افزایش مکش ندارد. در نتیجه در بارگذاری مجدد، نمونه در نقطه C به تسلیم می رسد (شکل (۱۵) و (۱۶)). در صورتی که نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند که تنش تسلیم نمونه های غیر اشباع بنتونیت - کائولن بعد از سیکل کاهش - افزایش مکش کاهش می یابد (Wheeler et al., 2003).



شکل ۱۵- مدل سازی بارگذاری در مکش ثابت بعد از اعمال سیکل مکشی به وسیله مدل Sun et al., 2007 (a) فضای مکش اصلاح شده - تنش مؤثر همه جانبه (b) فضای حجم مخصوص - تنش همه جانبه (c) فضای درجه اشباع - تنش همه جانبه

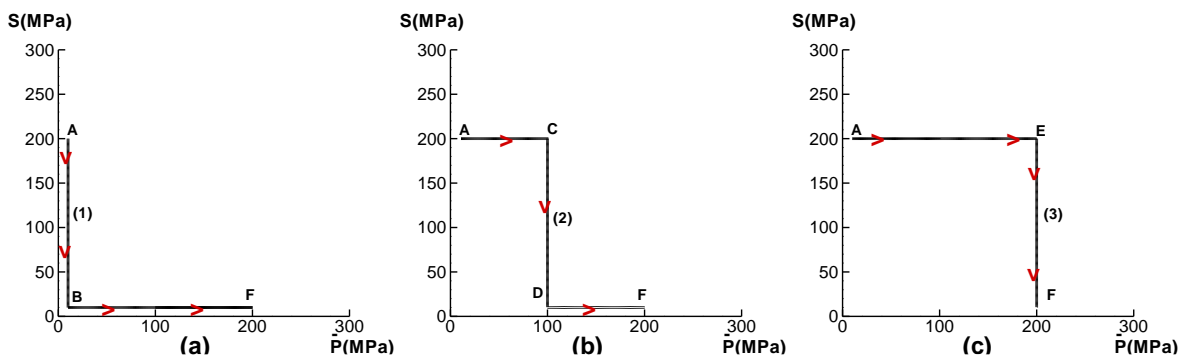


شکل ۱۶- مدل سازی بارگذاری در مکش ثابت بعد از اعمال سیکل مکشی به وسیله مدل EBSZ (a) فضای مکش اصلاح شده - تنش مؤثر همه جانبه (b) فضای حجم مخصوص - تنش همه جانبه (c) فضای درجه اشباع - تنش همه جانبه

در شکل (۱۶) شبیه سازی این آزمایش توسط مدل EBSZ نشان داده شده است. در شکل (۱۶-ا) مسیر تنش در فضای $p' : s^*$ به همراه چگونگی تغییرات منحنی SD و $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ در حین بارگذاری ترسیم شده است. در مسیر بارگذاری ABC میزان تنش از $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ بیشتر می شود و موجب افزایش این پارامتر و افزایش نرخ تغییرات کرنش حجمی (شکل (۱۵-ج)) و نرخ تغییر درجه اشباع می شود (شکل (۱۵-د)). در سیکل مکشی به دلیل تسلیم شدن منحنی SD افزایش پلاستیک در درجه اشباع به وجود می آید و موجب می شود $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ از مقدار پیشین خود که در بارگذاری (مسیر ABC) تجربه کرده است کمتر شود. در بارگذاری مجدد مقدار تنش سریعتر به $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ می رسد و در تنش کمتری نسبت به حداکثر تنش تجربه شده خاک، نرخ تغییر شکل افزایش می یابد (شکل (۱۵-ب)). در نتیجه این مدل توانایی مدل سازی رفتاری نمونه های کائولن - بنتونیت را داراست.

بررسی تغییرات حجمی و درجه اشباع در مسیر کاهش مکش - افزایش تنش مختلف

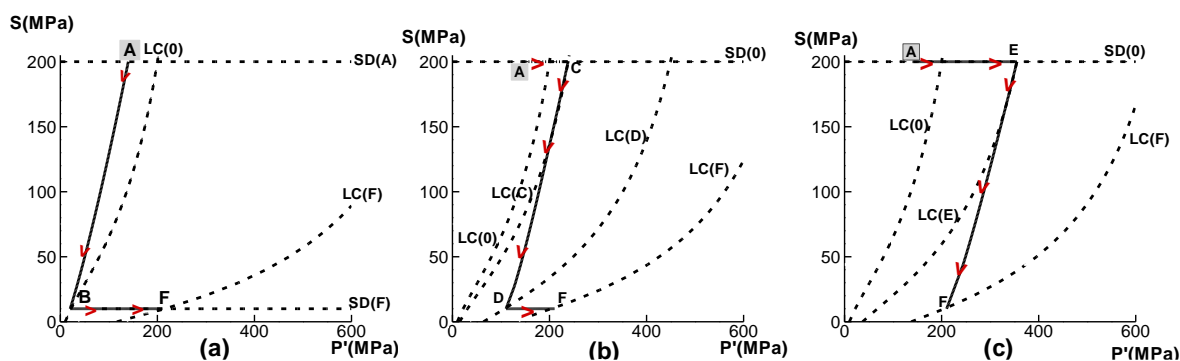
مسیر تنش مدل سازی شده در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. سه مسیر کاهش مکش AB، CD و EF در سه تنش $\bar{p} = 100kPa$ ، $\bar{p} = 100kPa$ ، $\bar{p} = 200kPa$ به نمونه اعمال می شود به گونه ای که نقاط ابتدا و انتهای هر سه مسیر بروی هم قرار گیرند.



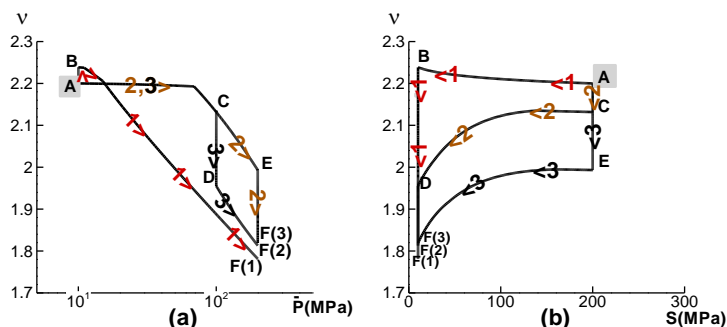
شکل ۱۷- مسیر تنش در صفحه $s : \bar{p}$

در شکل ۱۸ مسیر تنش در فضای $s : p'$ و برای مدل Sun et al., 2007 رسم شده است. مسیر AB کاملاً درون ناحیه الاستیک و منحنی LC قرار دارد. در این مسیر به دلیل تسلیم شدن منحنی SD درجه اشباع پلاستیک در نمونه به وجود می‌آید. در مسیر بارگذاری LC ، BF به تسلیم می‌رسد و همزمان با افزایش تنش مؤثر، کرنش پلاستیک و کاهش حجم در نمونه به وجود می‌آید تا نمونه به $F(1)$ می‌رسد (شکل (a-۱۸)). به دلیل ثابت بودن مکش منحنی SD در مسیر BF به تسلیم نمی‌رسد ولی به دلیل ایجاد تغییر شکل پلاستیک پس از تسلیم شدن LC ، نرخ تغییر درجه اشباع افزایش می‌یابد (شکل (a-۲۰)).

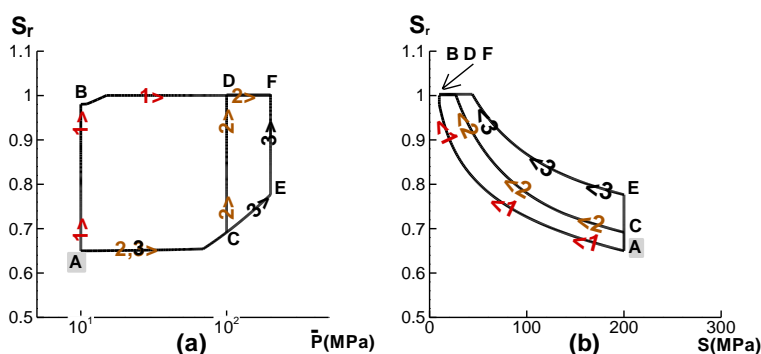
در مسیر بارگذاری از A تا C ، LC به تسلیم می‌رسد و تغییر شکل پلاستیک در نمونه به وجود می‌آید و منحنی تسلیم به $LC(C)$ جابه‌جا می‌شود (شکل (b-۱۸)). ایجاد تغییر شکل پلاستیک منجر به افزایش نرخ تغییرات درجه اشباع می‌شود (شکل (a-۲۰)). در مسیر کاهش مکش از C تا D هر دو منحنی LC و SD به تسلیم می‌رسند. علی‌رغم کاهش تنش مؤثر به دلیل تسلیم شدن LC کاهش حجم ناگهانی در نمونه به وجود می‌آید (شکل (b-۱۹)). با رسیدن به اشباع کامل SD در محل نقطه D ثابت باقی می‌ماند، اما LC همچنان حرکت می‌کند. به عبارت دیگر با کاهش تنش مؤثر مدل کاهش حجم را در حالت اشباع پیش‌بینی می‌کند. با بارگذاری از D تا F تسلیم شدن LC ادامه دارد و کاهش حجم پلاستیک را به وجود می‌آورد. تغییر شکل نهایی نمونه با $F(2)$ در شکل نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- مسیر تنش در صفحه $s^* : p'$ (مدل Sun et al., 2007)



شکل ۱۹- تغییرات حجم مخصوص در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)



شکل ۲۰- تغییرات درجه اشباع در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)

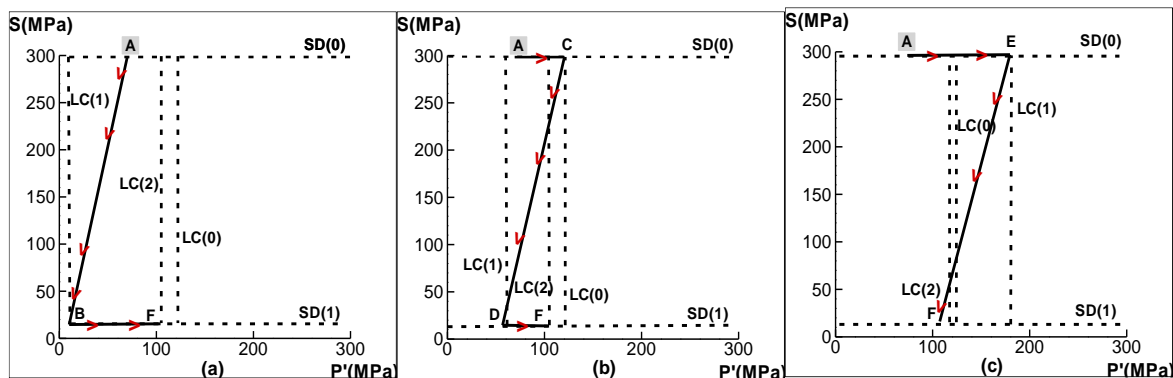
در شکل (۱۸-۱) و در مسیر بارگذاری AE تغییرات درجه اشباع الاستیک است. در مسیر کاهش مکش از E تا F هر دو منحنی SD و LC به تسلیم می‌رسند. تغییرات درجه اشباع و کرنش حجمی الاستوپلاستیک است. پس از رسیدن به حالت اشباع نیز مدل کاهش حجم را به دلیل تسلیم شدن LC پیش‌بینی می‌کند. در نهایت نمونه به نقطه F(3) می‌رسد.

در شکل ۲۱ مسیر تنش برای مدل EBSZ ترسیم شده است. این مدل نیز دارای دو سطح SD و SI است که برای مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی استفاده می‌شود. در شکل (۲۲-۱) و در مسیر کاهش مکش از A تا B به دلیل کاهش مقدار تنش مؤثر افزایش حجم رخ می‌دهد (کل (۲۲)). با افزایش درجه اشباع مقدار $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ کاهش می‌یابد. تغییرات درجه اشباع به دلیل تسلیم شدن SD الاستوپلاستیک است. در مسیر بارگذاری BF نیز به دلیل افزایش $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ تغییر شکل‌های بزرگ محاسبه می‌شود. تغییر شکل نهایی نمونه با F(1) نشان داده شده است (شکل (۲۲-۱)).

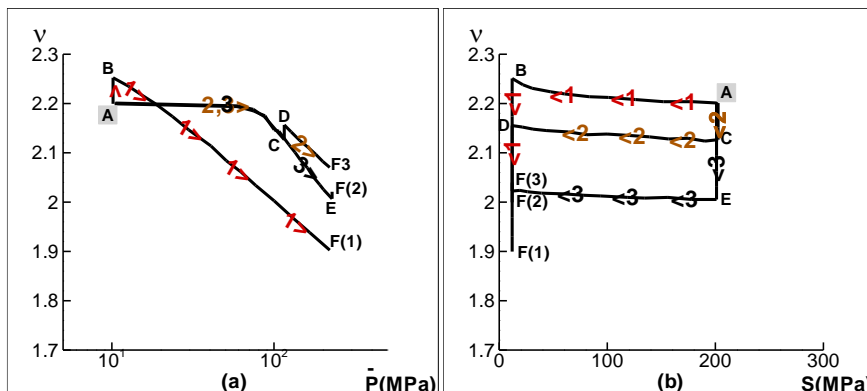
در مسیر بارگذاری AC مقدار تنش کمتر از $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ است و تغییر شکل‌های محاسبه شده کوچک و الاستیک است. با نزدیک شدن به مقدار تنش به $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ نرخ تغییر کرنش حجمی افزایش می‌یابد (شکل (۲۲-۱)). در مسیر کاهش مکش نیز با کاهش تنش مؤثر، حجم افزایش می‌یابد.

در مسیر بارگذاری AE تغییر شکل اولیه کوچک است و با نزدیک شدن تنش به محل $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ تغییر شکل افزایش می‌یابد. به دلیل ثابت ماندن مکش تغییرات درجه اشباع الاستیک است (شکل (۲۳-۱)). در مسیر کاهش مکش نیز مدل افزایش حجم را پیش‌بینی می‌کند. در انتهای مسیر تنش نمونه به F(3) می‌رسد (شکل (۲۲-۱)).

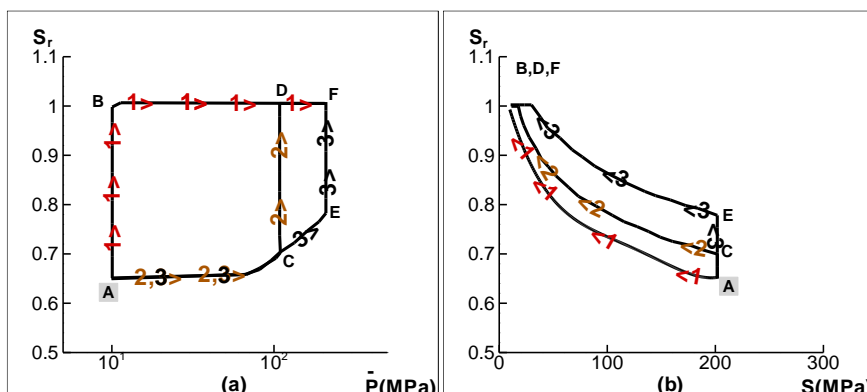
بررسی تغییرات حجمی و درجه اشباع در مسیر افزایش تنش - کاهش مکش مختلف
مسیر تنشی - مکشی این آزمایش در شکل (۲۴) نمایش داده شده است.



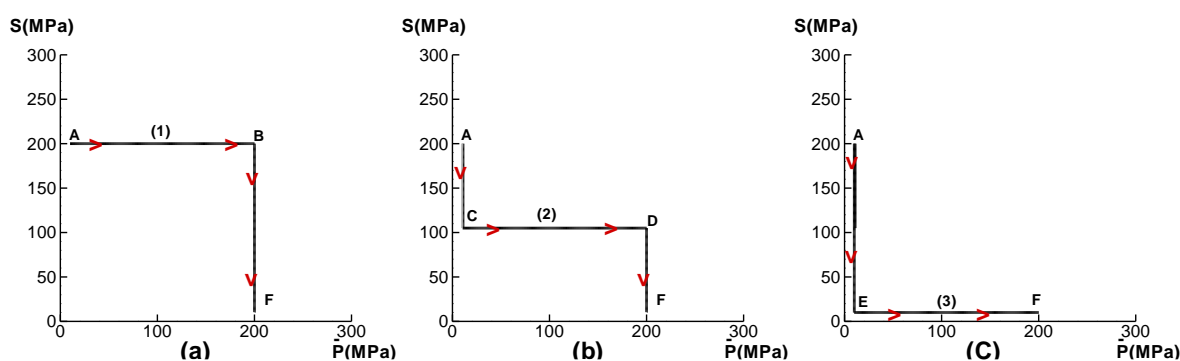
شکل ۲۱- مسیر تنش در صفحه p' : s^* (مدل EBSZ)



شکل ۲۲- تغییرات حجم مخصوص در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل EBSZ)

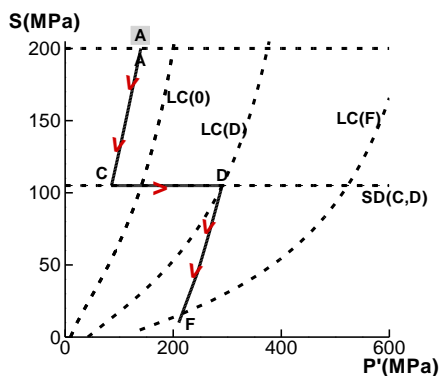


شکل ۲۳- تغییرات درجه اشباع در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش و برای (مدل EBSZ)

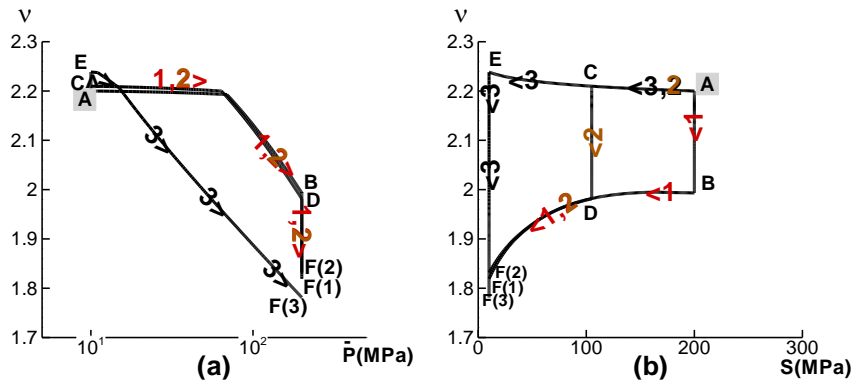


شکل ۲۴- مسیر تنش-مکش در صفحه $s : \bar{p}$

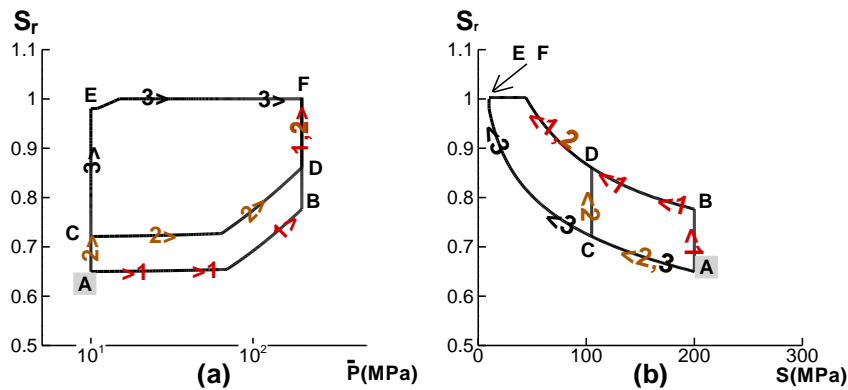
در شکل ۲۵ مسیر تنش در فضای $s : p'$ و برای مدل Sun et al., 2007 رسم شده است. باتوجه به انطباق دو مسیر تنش دیگر با بخش ۵، تنها مسیر ACDF در این شکل ترسیم شده است. در مسیر کاهش مکش AC، SD تسلیم می شود اما LC به تسلیم نمی رسد. پس تغییر شکل الاستیک است و افزایش حجم نمونه با کاهش تنش مؤثر رخ می دهد. در مسیر بارگذاری CD، LC نیز تسلیم می شود و تغییرات کرنش حجمی به صورت الاستوپلاستیک محاسبه می شود (شکل ۲۶-a). با به تسلیم رسیدن LC نرخ تغییر درجه اشباع نیز افزایش می یابد (شکل ۲۷-a). در مسیر کاهش مکش DF، SD و LC تسلیم می شوند. پس از اشباع شدن نمونه نیز به دلیل تسلیم شدن LC، مدل کاهش حجم را در نمونه پیش بینی می کند.



شکل ۲۵- مسیر تنش در صفحه $s^* : p'$ (مدل Sun et al., 2007)

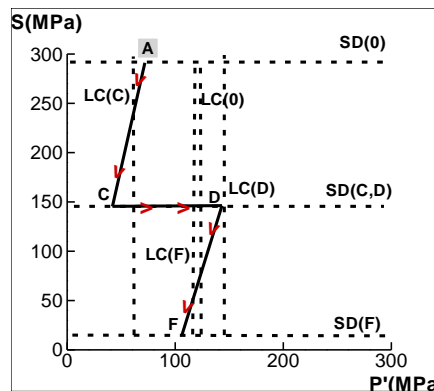


شکل ۲۶- تغییرات حجم مخصوص در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)

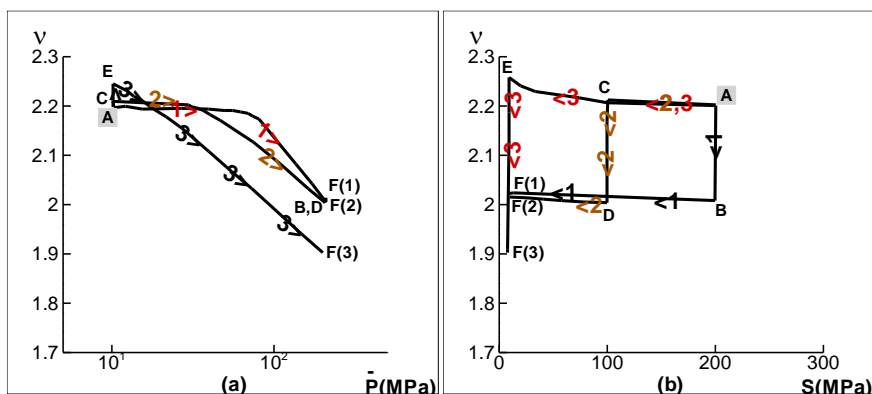


شکل ۲۷- تغییرات درجه اشباع در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)

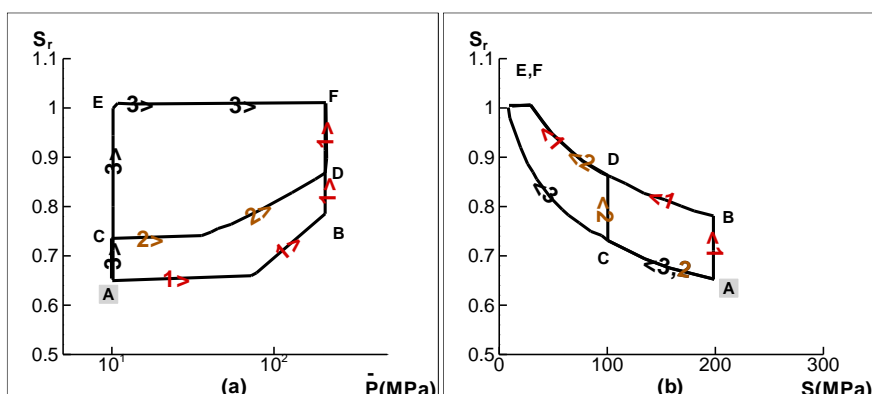
در شکل ۲۸ مسیر تنش برای مدل EBSZ ترسیم شده است. در مسیر AC منحنی SD تسلیم می‌شود و به محل SD(C) جابه‌جا می‌شود. به دلیل کمتر بودن مقدار تنش از میزان $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ تغییرات حجمی کوچک و الاستیک است. با افزایش درجه اشباع مقدار $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ کاهش می‌یابد. همانطور که پیش از این نیز ذکر شد این مدل همواره در مسیر کاهش مکش افزایش حجم را پیش‌بینی می‌کند (شکل ۲۹). در مسیر بارگذاری CD با بیشتر شدن مقدار تنش در نمونه، نرخ تغییر کرنش حجمی افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش کرنش حجمی، نرخ تغییر درجه اشباع نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳۰). با کاهش مکش، SD تسلیم می‌شود و تغییرات درجه اشباع نیز به صورت الاستوپلاستیک محاسبه می‌گردد. درجه اشباع افزایش می‌یابد تا نمونه به اشباع کامل برسد. تغییر شکل نهایی نمونه با F(2) نمایش داده شده است (شکل ۲۹-ب).



شکل ۲۸- مسیر تنش در صفحه $s^* : p'$ (مدل EBSZ)



شکل ۲۹- تغییرات حجم مخصوص در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل EBSZ)



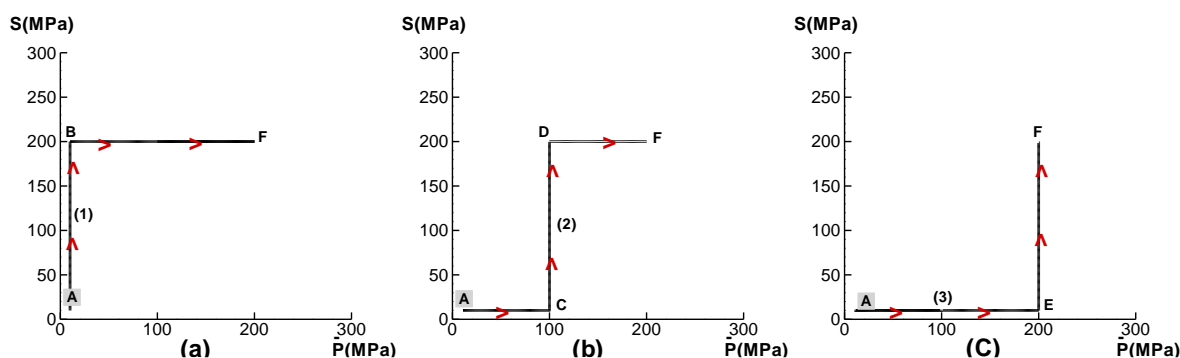
شکل ۳۰- تغییرات درجه اشباع در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل EBSZ)

Alonso et al., 1990 دو ویژگی مهم خاک غیر اشباع را در توصیف دو آزمایش اشاره شده در بخش ۶-۵ و ۶-۶ ارائه نموده است:

(۱) با افزایش مکش تنش تسلیم در خاک غیر اشباع افزایش می یابد و (۲) وقتی نمونه های خاک به اشباع می رسند، صرف نظر از مسیر تنش پیموده شده تغییر شکل های خاک غیر اشباع نزدیک به هم هستند. با مراجعه به شکل های ۱۸ الی ۳۰ هر دو مدل قادر به شبیه سازی افزایش تنش تسلیم با افزایش مکش هستند. تغییر شکل پیش بینی شده توسط مدل Sun et al., 2007 حداکثر با هم ۴ درصد اختلاف دارد که این مقدار برای مدل EBSZ به ۵ درصد می رسد.

بررسی تغییرات حجمی و درجه اشباع در مسیرهای افزایش تنش - افزایش مکش مختلف

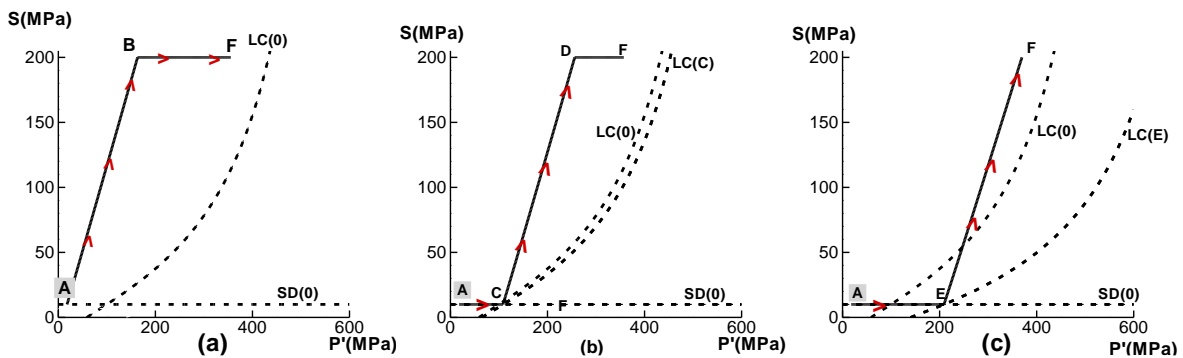
مسیر تنشی-مکشی این آزمایش در شکل ۳۱ نمایش داده شده است. سه مسیر افزایش مکش (AB و CD و EF) در سه تنش $\bar{p} = 10kPa$ و $\bar{p} = 100kPa$ و $\bar{p} = 200kPa$ به نمونه اعمال می شود.



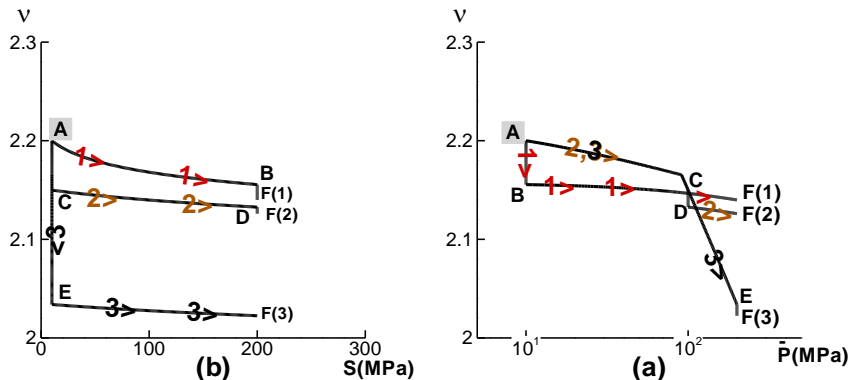
شکل ۳۱- مسیر تنش در صفحه $s : \bar{p}$

در شکل ۳۲ مسیر تنش در فضای $s : p'$ و برای مدل Sun et al., 2007 رسم شده است. در شکل (۳۲- a) و در تمام مسیر هیچیک

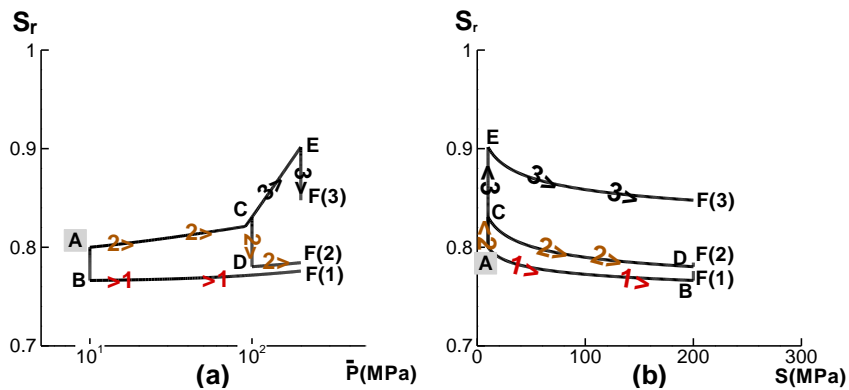
از سطوح به تسلیم نمی‌رسند. در نتیجه تغییر شکل و درجه اشباع به صورت الاستیک تغییر می‌کنند. تنش تسلیم در مدل Sun et al., 2007 با افزایش مکش افزایش می‌یابد، بدون آن که به مسیر تنش پیموده شده بستگی داشته باشد. در شکل (b-۳۲) نمونه ابتدا تحت بارگذاری قرار می‌گیرد که منجر به تسلیم شدن منحنی LC می‌شود. در مسیر افزایش مکش (CD) یا بارگذاری (DF) نیز هیچیک از سطوح به تسلیم نمی‌رسند. در شکل (c-۳۲) نمونه ابتدا تحت بارگذاری قرار می‌گیرد و منحنی LC تسلیم می‌شود. LC به LC(E) جابه‌جا می‌شود و تغییر شکل پلاستیک در نمونه به وجود می‌آورد (شکل (a-۳۳)). تغییرات درجه اشباع الاستیک است اما نرخ تغییر درجه اشباع با به تسلیم رسیدن LC افزایش می‌یابد (شکل (a-۳۴)). در مسیر افزایش مکش EF نیز هیچیک از سطوح به تسلیم نمی‌رسند و تغییرات کرنش حجمی و درجه اشباع الاستیک است.



شکل ۳۲- مسیر تنش در صفحه $s^* : p'$ (مدل Sun et al., 2007)



شکل ۳۳- تغییرات حجم مخصوص در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)

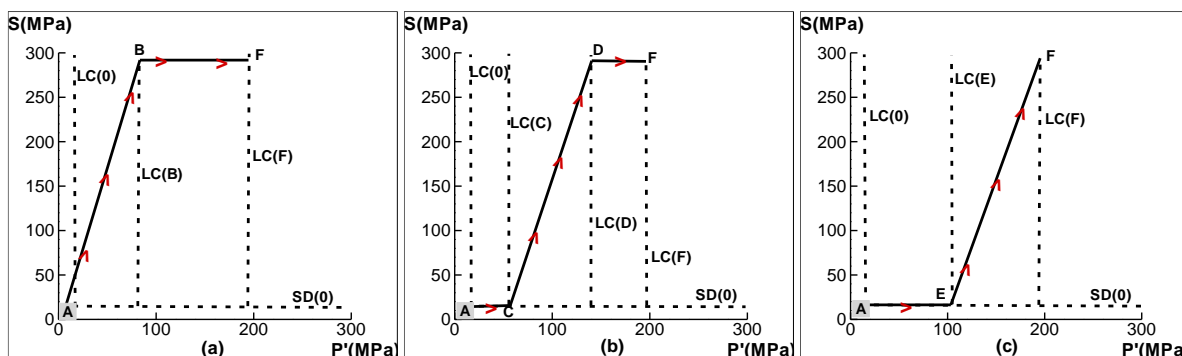


شکل ۳۴- تغییرات درجه اشباع در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)

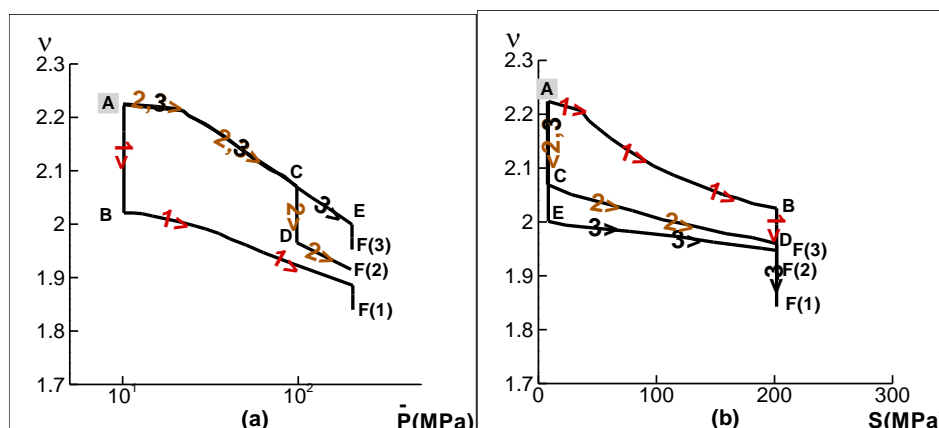
در شکل ۳۵ مسیر تنش برای مدل EBSZ ترسیم شده است. در مسیر A تا B درجه اشباع به صورت الاستیک تغییر می‌کند (شکل (b-۳۷)). بعد از شروع بارگذاری مقدار تنش به پارامتر $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ میل می‌کند. زمانی که مقدار تنش برابر با $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ شود، نرخ

تغییر حجم افزایش می‌یابد. تغییر شکل نهایی نمونه با $F(1)$ نشان داده شده است (شکل ۳۶-ا). هدف این آزمایش نشان دادن کاهش تغییر حجم در نتیجه افزایش مکش است. هر دو مدل این ویژگی خاک یعنی سخت شدن نمونه خاک غیر اشباع با افزایش مکش را به خوبی مدل می‌کنند.

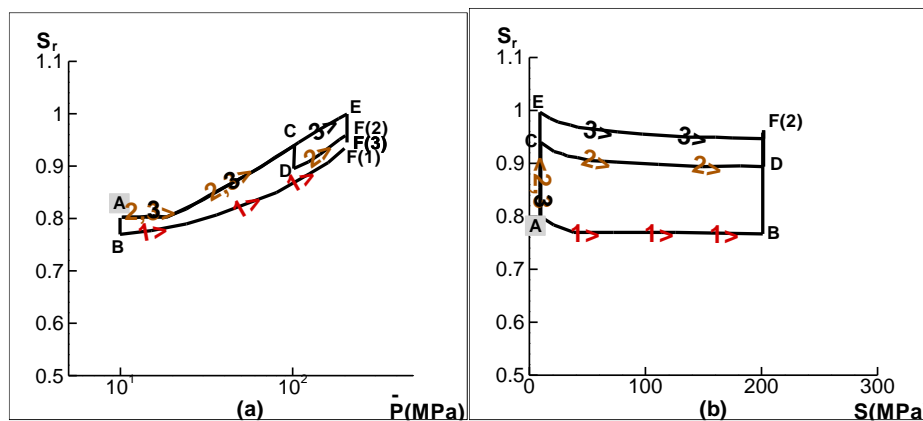
تنش تسلیم در مدل Sun et al., 2007 به مکش و تنش تسلیم در مدل EBSZ به درجه اشباع وابسته هستند. از آنجاکه تغییرات درجه اشباع بیش از مکش به مسیر تنشی - مکشی بستگی دارد (تغییرات درجه اشباع به صورت الاستوپلاستیک مدل می‌شود) و از آنجاکه میزان تنش تسلیم خاک غیر اشباع به تعداد لزه‌های هلالی آب در حفرات وابسته است (Wheeler et al., 2003)، در نتیجه فرض مدل EBSZ قوی‌تر از مدل Sun et al., 2007 است و تطابق بیشتری با واقعیت دارد.



شکل ۳۵- مسیر تنش در صفحه $s^* : p'$ (مدل EBSZ)



شکل ۳۶- تغییرات حجم مخصوص در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل EBSZ)

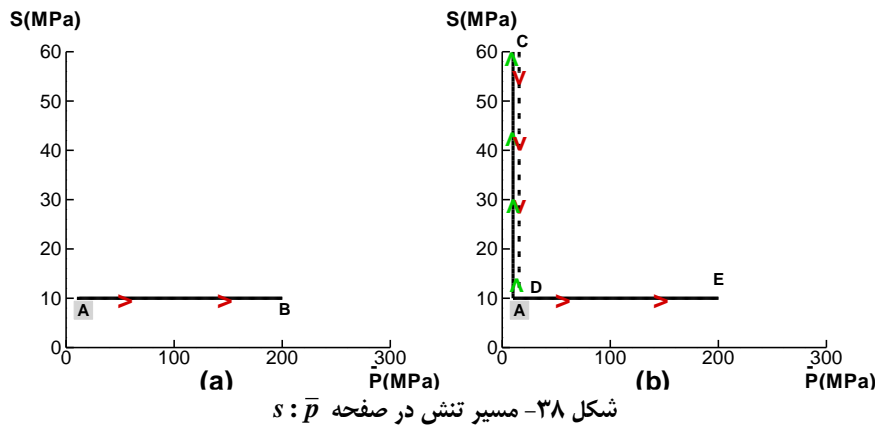


شکل ۳۷- تغییرات درجه اشباع در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل EBSZ)

اعمال بار به نمونه خاک غیر اشباع پس از سیکل افزایش - کاهش مکش

مسیر تنش در شکل ۳۸ نمایش داده شده است. در مسیر AB در مکش ثابت $s = 10kPa$ ، بارگذاری انجام می‌شود. در آزمایش

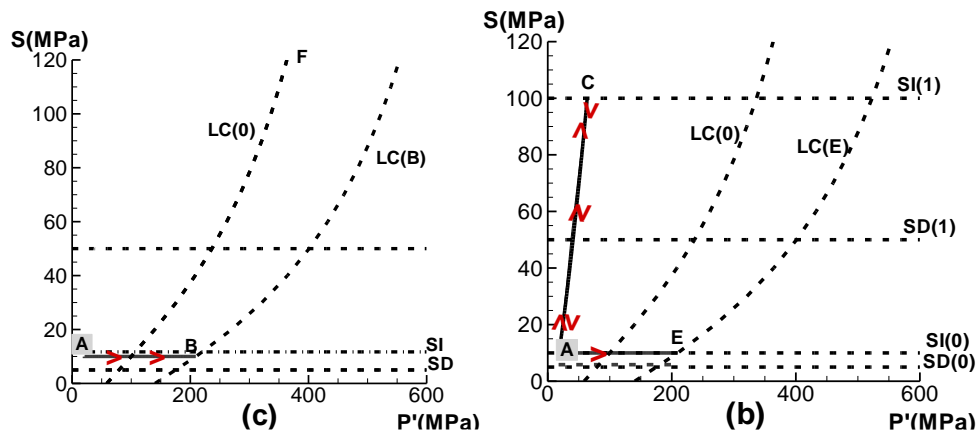
بعدی، ابتدا نمونه تحت افزایش مکش تا $100kPa$ قرار می‌گیرد (مسیر AC). سپس مکش کاهش می‌یابد تا به مقدار مکش اولیه برسد (مسیر CD). بعد از طی این سیکل کاهش-افزایش مکش، نمونه مجدداً بارگذاری می‌شود (مسیر DE).



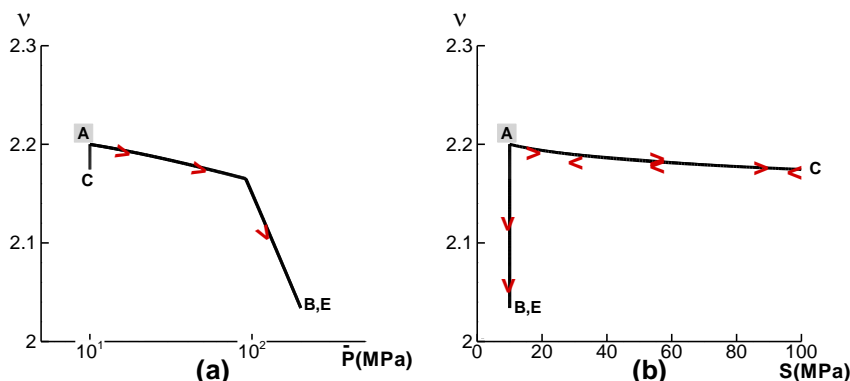
در شکل ۳۹ مسیر تنش به همراه منحنی‌های تسلیم در فضای $s : p'$ و برای مدل سان و همکاران رسم شده است. در مسیر تنش اول نمونه بارگذاری می‌شود تا به نقطه B برسد. در حین بارگذاری منحنی LC تسلیم می‌شود و تغییر شکل پلاستیک در نمونه ایجاد می‌گردد (شکل (a-۳۹)). به دلیل ثابت ماندن مکش منحنی‌های SD و SI تسلیم نمی‌شوند. با تسلیم شدن منحنی LC نرخ تغییرات درجه اشباع به دلیل تأثیر متقابل رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک افزایش می‌یابد (شکل (a-۴۱)).

در مسیر دوم، افزایش مکش تا نقطه C موجب تسلیم شدن منحنی SI می‌شود (شکل (b-۳۹)). تسلیم شدن SI موجب حرکت SD به $SD(1)$ می‌شود اما تغییری در محل منحنی LC ایجاد نمی‌شود و تغییر شکل در این مسیر الاستیک است (شکل (b-۴۰)). درجه اشباع بعد از به تسلیم رسیدن SI به صورت الاستوپلاستیک کاهش می‌یابد (شکل (b-۴۱)). در مسیر کاهش مکش منحنی SD به تسلیم می‌رسد. پس از تسلیم شدن SD نرخ افزایش درجه اشباع بیشتر می‌شود. تغییر شکل به وجود آمده در این مسیر نیز به صورت الاستیک است و با کاهش تنش مؤثر افزایش حجم در نمونه به وجود می‌آید و حجم مخصوص در نقطه D برابر با حجم مخصوص نقطه A است (شکل (b-۴۰)). به دلیل عدم وابستگی حرکتی LC به SI و SD سیکل افزایش - کاهش مکش موجب تغییر مکان LC نمی‌شود. پس در مسیر بارگذاری مجدد منحنی تغییر شکل ACDE کاملاً روی منحنی AB قرار می‌گیرد (شکل (a-۴۰)). باید به این نکته توجه نمود که به دلیل سیکل خشک‌شدگی و ترشدگی مقادیر درجه اشباع پیش‌بینی شده در این مدل روی هم قرار نمی‌گیرند (شکل (a-۴۱)).

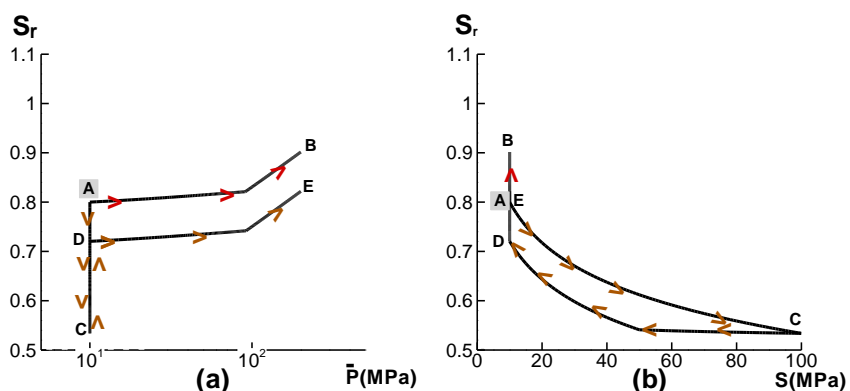
حال به بررسی این آزمایش با مدل EBSZ پرداخته می‌شود. در حین بارگذاری تا نقطه B، فاصله بین مقدار تنش و $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. در نتیجه نرخ تغییر کرنش حجمی در نمونه افزایش می‌یابد (شکل (a-۴۳)) و محل $LC(B)$ به جابه‌جا می‌شود. به دلیل ثابت ماندن مکش، منحنی‌های SD و SI تسلیم نمی‌شوند اما با افزایش نرخ تغییر شکل، نرخ تغییرات درجه اشباع نیز افزایش می‌یابد (شکل (a-۴۴)).



شکل ۳۹- مسیر تنش در صفحه $s : p'$ (مدل Sun et al., 2007)

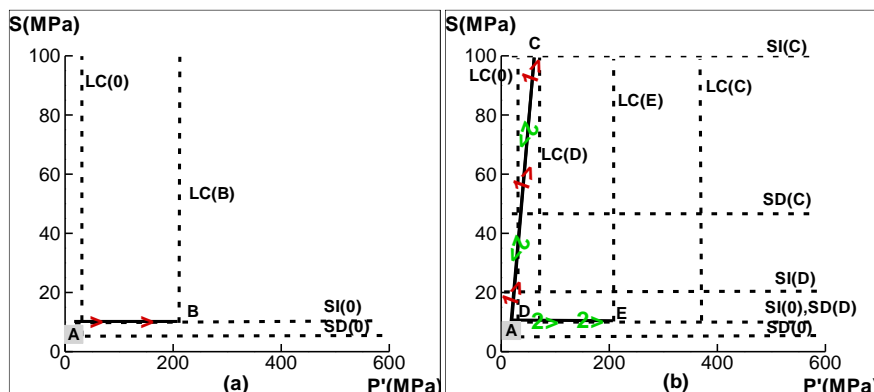


شکل ۴۰- تغییرات حجم مخصوص در مقابل تنش خالص متوسط (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)

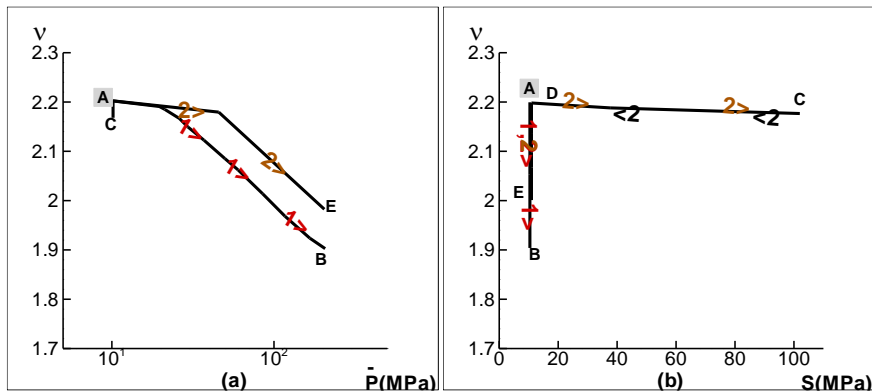


شکل ۴۱- تغییرات درجه اشباع در مقابل تنش خالص متوسط (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل Sun et al., 2007)

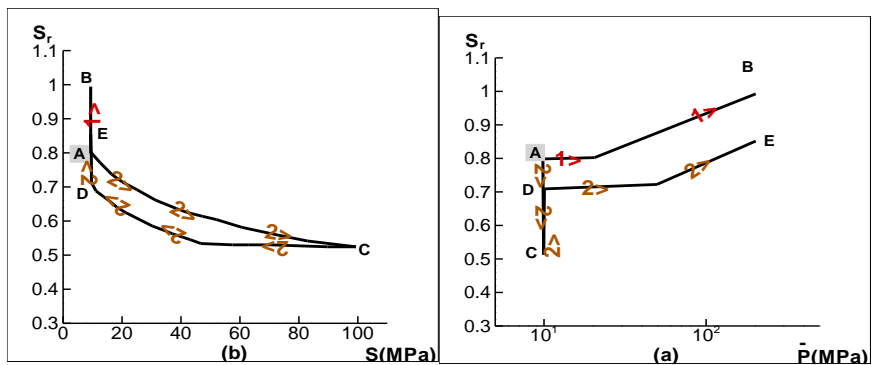
در مسیر دوم، با افزایش مکش تا نقطه C، منحنی SI به تسلیم می‌رسد. تسلیم شدن SI، موجب حرکت SD(C) به SD(C) می‌شود و مقدار پارامتر $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ با کاهش مقدار درجه اشباع افزایش می‌یابد. به دلیل تشابه عملکردی پارامتر $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ با منحنی LC در مدل Sun et al., 2007 و جهت خلاصه‌نویسی، مقدار این پارامتر روی شکل با LC نمایش داده شده است. در نتیجه افزایش مکش به محل LC(C) منتقل می‌شود و تغییر شکل در این مسیر الاستیک است (شکل (b-۴۳)). درجه اشباع پس از تسلیم شدن SI با نرخ بیشتری کاهش می‌یابد (شکل (b-۴۴)). در مسیر کاهش مکش، منحنی SD به تسلیم می‌رسد. پس از تسلیم شدن SD، نرخ تغییرات درجه اشباع افزایش می‌یابد. تسلیم شدن این منحنی موجب می‌شود که SI به SI(D) و LC به LC(D) تغییر مکان دهند (شکل (b-۴۲)). به دلیل کاهش مقدار درجه اشباع در این سیکل مقدار پارامتر $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ نسبت به مقدار اولیه خود افزایش می‌یابد. تغییر شکل این مسیر نیز به صورت الاستیک است و با کاهش تنش مؤثر افزایش حجم در نمونه به وجود می‌آید و حجم مخصوص در نقطه D برابر با حجم مخصوص نقطه A است (شکل (b-۴۳)). در مسیر بارگذاری مجدد به دلیل افزایش مقدار $p_{max} e^{\alpha(1-S_r)}$ ، نمونه در تنش بیشتری تسلیم می‌شود (شکل (b-۴۳)).



شکل ۴۲- مسیر تنش در صفحه $s^* : p'$ (مدل EBSZ)



شکل ۴۳- تغییرات حجم مخصوص در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش و (مدل EBSZ)



شکل ۴۴- تغییرات درجه انشباع در مقابل (a) تنش خالص متوسط (b) مکش (مدل EBSZ)

Alonso et al., 1990 نشان دادند که پس از یک سیکل افزایش-کاهش مکش، مقدار تنش تسلیم افزایش می‌یابد و افزایش نرخ کرنش در تنش بیشتری به وقوع می‌پیوندد. این ویژگی به‌وسیله مدل EBSZ شبیه‌سازی می‌شود در صورتی که مدل Sun et al., 2007 به دلیل عدم وابستگی حرکتی LC به منحنی‌های SI و SD قادر به مدل کردن آن نیست.

نتیجه‌گیری

در این مقاله دو مدل رفتاری Sun et al., 2007 و مدل EBSZ به‌وسیله مسیرهای تنش-مکشی متنوع خاک غیراشباع مقایسه شدند. از مقایسه عملکرد این دو مدل نتایج زیر حاصل شد:

- (۱) هر دو مدل در شبیه‌سازی بارگذاری ایزوتروپ در مکش ثابت عملکرد مناسبی دارند (بخش ۸-۱).
- (۲) مدل EBSZ توانایی مدل کردن کاهش حجم ناگهانی خاک غیراشباع یا خرابی را در مسیر کاهش مکش ندارد. زیرا کرنش پلاستیک حجمی در این مدل همواره هم علامت با نمو مکش است. در نتیجه در مسیر کاهش مکش، افزایش حجم به‌وسیله مدل پیش‌بینی می‌شود (بخش ۸-۲).
- (۳) اگرچه مدل Sun et al., 2007 توانایی مدل کردن کاهش حجم به وجود آمده در مسیر افزایش مکش در سیکل کاهش-افزایش مکش را داراست، اما به دلیل شکل خاص منحنی تسلیم LC، در چنین مسیرهایی انعطاف‌پذیری کمتری به نسبت مدل EBSZ دارد (بخش ۸-۳ و ۲).
- (۴) مدل Sun et al., 2007 توانایی مدل کردن رفتار نمونه‌های بنتونیت-کائولن را ندارد. در این نوع خاک غیراشباع، سیکل کاهش-افزایش مکش موجب می‌شود نقطه تسلیم نمونه کمتر از حداکثر تنش باشد که نمونه قبلاً آن را تجربه کرده است که در این مدل کاهش در تنش تسلیم به وجود نمی‌آید (بخش ۸-۴).
- (۵) هر دو مدل توانایی مدل سازی افزایش تنش تسلیم خاک غیراشباع با افزایش مکش را دارا هستند (بخش ۸-۵ و ۸-۶).
- (۶) هر دو مدل در زمان اشباع شدن نمونه خاک و صرف‌نظر از مسیر تنش پیموده‌شده، تغییر شکل‌هایی نزدیک به هم را محاسبه می‌نماید (بخش ۸-۵ و ۸-۶).
- (۷) به دلیل ضعف مدل EBSZ در مدل سازی کاهش حجم در مسیر کاهش مکش، و پیش‌بینی افزایشی حجم، تغییر شکل بیشتری

محاسبه می‌شود که در زمان استفاده از این مدل رفتاری در تحلیل‌ها می‌بایست مدنظر قرار گیرد (۸-۳).
 (۸) آزمایشات نشان داده‌اند که هر چه بارگذاری روی نمونه در مکش بالاتری انجام شود، مقدار تغییر شکل کمتری در نمونه به وجود می‌آید. هر دو مدل به‌خوبی سخت شدن نمونه خاک را با افزایش مکش مدل می‌نمایند (بخش ۸-۷).
 (۹) تنش تسلیم در مدل Sun et al., 2007 به مکش و تنش تسلیم در مدل EBSZ به درجه اشباع وابسته هستند. از آنجاکه تغییرات درجه اشباع بیش از مکش به مسیر تنشی - مکشی بستگی دارد (تغییرات درجه اشباع به‌صورت الاستوپلاستیک مدل می‌شود) و از آنجاکه میزان تنش تسلیم خاک غیراشباع به تعداد لنزهای هلالی آب در حفرات وابسته است (Wheeler et al., 2003)، در نتیجه فرض مدل EBSZ قوی‌تر از مدل Sun et al., 2007 است و تطابق بیشتری با واقعیت دارد (بخش ۸-۷).
 (۱۰) افزایش تنش تسلیم پس از اعمال سیکل کاهش-افزایش مکش به‌وسیله مدل EBSZ قابل شبیه‌سازی است در صورتی که مدل Sun et al., 2007 دارای چنین توانایی نمی‌باشد (بخش ۸-۸).
 نتایج نشان داد که اگرچه هر دو مدل در شبیه‌سازی مسیرهای تنشی معمول توانا هستند، اما ممکن است در مدل‌سازی مسیرهای تنشی پیچیده‌تر نقص‌هایی داشته باشند.

پارامترها

R ثابت جهانی گازها	a پارامتر مدل رفتاری EBSZ
S مکش	C_s رطوبت ویژه
S^w, S_r درجه اشباع آب	c شیب منحنی تغییرات حجم - نسبت تنش
S^g درجه اشباع گاز	D تانسور رفتاری الاستوپلاستیک
u تغییر مکان	D^e تانسور رفتاری حالت الاستیک
u_a فشار منفذی گاز	D_s ماتریس رابط بین مکش - کرنش
u_w فشار منفذی سیال	e تخلخل.
w پارامتر مدل رفتاری EBSZ	e_0 تخلخل اولیه
α ثابت بیوت	f سطح تسلیم
\mathcal{E} کرنش	g نیروی حجمی مربوط به اثرات گرانشی
\mathcal{E}^e کرنش الاستیک	H_b, H پارامتر سخت‌شوندگی
\mathcal{E}^p کرنش پلاستیک	M_g جرم مولی گاز
\mathcal{E}^c کرنش پلاستیک برشی	M_f, M شیب خط حالت بحرانی
η نسبت تنش	M_g شیب خط متناظر با افزایش حجم صفر
θ دمای مطلق	n پوکی
K شیب منحنی باربرداری تخلخل - تنش حجمی موثر اشباع	n_g بردار عمود بر سطح پتانسیل پلاستیک
K_s شیب منحنی باربرداری درجه اشباع - مکش	n بردار عمود بر سطح تسلیم
$\lambda(0)$ شیب منحنی بارگذاری تخلخل - تنش حجمی موثر اشباع	k تانسور نفوذپذیری
$\lambda(s)$ شیب منحنی بارگذاری تخلخل - تنش حجمی موثر غیراشباع	$k^{r\pi}$ پارامتر بی بعد نفوذپذیری نسبی
λ_{sr} شیب منحنی بارگذاری درجه اشباع - مکش	K_s مدول بالک دانه‌های خاک
λ_{se} شیب منحنی درجه اشباع - تخلخل	K_w مدول بالک آب
μ^w ویسکوزیته دینامیکی آب	P^w فشار آب
ρ^s چگالی فاز جامد	P^g فشار گاز
ρ چگالی متوسط محیط چند فازه	$p_{0,y}$ تنش مؤثر تسلیم خاک اشباع
σ تنش کل	p'_n تنش متناظر با گسیختگی در کاهش مکش
σ' تنش مؤثر	P_a فشار اتمسفر



REFERENCES

- Alonso, E. E. (1987). Special problem soils, General Report. In: Proceedings of 9th European Conference on SMFE, Dublin, Ireland. pp. 1087-1146.
- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- Alonso, E. E., Lloret, A., Gens, A., & Yang, D. Q. (1995). Experimental behaviour of highly expansive double-structure clay. In: Proceedings of The First International Conference on Unsaturated Soils, 6-8 Sep, Paris, France. pp. 11-16.
- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. *Transactions of the ASAE*, 7(1), 26-0028.
- Bolzon, G., Schrefler, B. A., & Zienkiewicz, O. C. (1996). Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Géotechnique*, 46(2), 279-289.
- Colmenares Montanez, J. E. (2002). *Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures*. Ph.D. dissertation, University of London, Imperial College.
- Delage, P., Vicol, T., & Suraj de Silva, G. P. R. (1992). Suction controlled testing of non-saturated soils with an osmotic consolidometer. In: Proceedings of International conference on expansive soils. Dallas, Texas. pp. 206-211.
- Dineen, K. (1997). *The influence of soil suction on compressibility and swelling*. Ph.D. dissertation, University of London, Imperial College.
- D'Onza, F., Gallipoli, D., Wheeler, S., Casini, F., Vaunat, J., Khalili, N., & Vassallo, R. (2011). Benchmark of constitutive models for unsaturated soils. *Géotechnique*, 61(4), 283-302.
- Gallipoli, D., Wheeler, S. J., & Karstunen, M. (2003). Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. *Géotechnique*, 53(1), 105-112.
- Gehling, W. Y. Y., Alonso, E. E., & Gens, A. (1995). Stress-path testing of expansive compacted soils. In: Proceedings of The First International Conference on Unsaturated Soils, 6-8 Sep, Paris, France. pp. 77-82.
- Gens, A., Sánchez, M., & Sheng, D. (2006). On constitutive modelling of unsaturated soils. *Acta Geotechnica*, 1(3), 137-147.
- Huang, M., & Zienkiewicz, O. C. (1998). New unconditionally stable staggered solution procedures for coupled soil-pore fluid dynamic problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 43(6), 1029-1052.
- Lewis, R.W., Schrefler, B.A., (1998) *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*, John Wiley & Sons, 2nd edition,
- Ng, C. W. W., Zhou, C., & Chiu, C. F. (2020). Constitutive modelling of state-dependent behaviour of unsaturated soils: an overview. *Acta Geotechnica*, 15(10), 2705-2725.
- Pastor, M., Zienkiewicz, O. C., & Chan, A. (1990). Generalized plasticity and the modelling of soil behaviour. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 14(3), 151-190.
- Sheng, D. (2011). Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour. *Computers and Geotechnics*, 38(6), 757-776.
- Sheng, D., Gens, A., Fredlund, D. G., & Sloan, S. W. (2008). Unsaturated soils: from constitutive modelling to numerical algorithms. *Computers and Geotechnics*, 35(6), 810-824.
- Sheng, D., Sloan, S. W., & Gens, A. (2004). A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects. *Computational Mechanics*, 33(6), 453-465.
- Santagiuliana, R., & Schrefler, B. A. (2006). Enhancing the Bolzon-Schrefler-Zienkiewicz constitutive model for partially saturated soil. *Transport in porous media*, 65(1), 1-30.
- Sun, D. A., Sheng, D., & Sloan, S. W. (2007). Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated soils. *Mechanics of Materials*, 39(3), 212-221.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Wheeler, S. J., Sharma, R. S., & Buisson, M. S. R. (2003). Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(1), 41-54.
- Sivakumar, V. (1993). *A critical state framework for unsaturated soil*. Ph.D. dissertation, University of Sheffield.
- Zakaria, I. (1994). *Yielding of unsaturated soil*. Ph.D. dissertation, University of Sheffield.