[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

ارزیابی عملکرد ژئومکانیکی کائولین متراکم شده با به‌کارگیری مدل رفتاری خاک‌های غیراشباع

علیرضا صادق آبادی[۱]، علی نورزاد[*۲]، امیرعلی زاد[۱]

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، گروه مهندسی عمران،

۲. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ مهندسی عمران، آب و محیط زیست

تاریخ: دریافت ۹۸/۱۲/۱٤ پذیرش ۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

از عمده‌ترین دلایل اهمیت شناخت دقیق رفتار کائولین‌های متراکم شده آن است که عمده لایه‌های رویی پهنه‌های زمین‌شناختی تشکیل‌دهندهٔ این نوع خاک به‌صورت غیراشباع در طبیعت یافت می‌شوند و با شناسایی این نوع خاک در یک منطقه می‌توان تمهیدات لازم را برای مقابله با خرابی‌های احتمالی اندیشید. در خاک‌های غیراشباع از دو متغیر حالت تنش (تنش میانگین و مکش ماتریسی) استفاده می‌شود و مدل‌های موجود مکانیک خاک، قابلیت شبیه‌سازی رفتار پیچیده خاک‌های غیراشباع در حالت‌های مختلف بارگذاری نیرویی و محیطی (یعنی تغییرات مکش) را دارند. ولی در مقایسه با واقعیت موجود رفتار خاک، این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار خاک‌های غیراشباع نیستند. در این پژوهش، سعی شده است با بررسی تفضیلی مدل رفتاری پایه بارسلونا به‌عنوان یک مدل ساختاری خاک غیراشباع، نقاط ضعف این نوع مدل شناسایی شده وبا انجام شبیه‌سازی کامپیوتری، فرمول‌بندی کامل مدل پایه خاک غیراشباع بارسلونا براساس مکانیک خاک حالت بحرانی و با استفاده از روش تفاضل محدود، پیاده‌سازی شوند و در ادامه رفتار این نوع خاک به‌صورت محیط متخلخل سه فازه شبیه‌سازی و با شرایط واقعی صحت‌سنجی شود. به‌منظور دست‌یابی به انطباق بهتر این مدل با واقعیت، تحلیل محاسباتی انجام شده است و با در نظر گرفتن نسبت بیش تحکیمی در معادلات تسلیم مدل پایه بارسلونا، مدل تکمیل شده پیشنهادی در یک پروژه

[*] نویسنده مسئول a_noorzad@sbu.ac.ir

عملی بهسازی با اختلاط عمیق خاک به‌منظور کنترل نشست به‌کار گرفته شده است. در این تحقیق مشاهده شد در کائولین‌های متراکم، مسیرهای تنش در مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل عددی انجام شده در این پژوهش هم‌خوانی خوبی با یک‌دیگر دارند، از این‌رو مدل پیشنهادی می‌توانند در پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار خاک‌های غیراشباع در مهندسی ژئوتکنیک و به ویژه خاکریزهای مهندسی به‌کار گرفته شود. هم‌چنین نتایج حاصل از استفاده از این مدل در کنترل نشست با بهسازی خاک به روش اختلاط عمیق نتایج دقیق‌تری در مقایسه با واقعیت نشان می‌دهد

واژه‌های کلیدی: کائولین متراکم، خاک‌های غیراشباع، مدل سازی عددی، نسبت پیش تحکیمی، مسیرهای تنش.

مقدمه

شناخت دقیق رفتار خاک نیمه‌اشباع از جمله مباحثی است که در چند سال اخیر به آن توجه شده است و تحقیقات متعددی در مورد آن ارائه شده است . به‌نظر می‌رسد یکی از دلایل اهمیت این موضوع آن است که در چند سال اخیر سازه‌های زیادی به‌دلیل فرو ریزش[1] خاک زیر آنها دچار آسیب و حتی خرابی کلی شده‌اند. این پدیده‌ای است که با افزایش درجهٔ اشباع (کاهش مکش ماتریسی) در خاک‌های فروریزشی غیراشباع[2] (به‌طور معمول) رخ می‌دهد و علت آن کاهش حجم ناگهانی خاک در اثر تخریب ساختار داخلی به‌دلیل اشباع شدن است. با شناسایی خاک غیراشباع در یک منطقه و بررسی رفتار آن تحت عواملی مانند رطوبت، فشار، دما و غیره می‌توان تمهیدات لازم را برای مقابله با خرابی‌های احتمالی اندیشید. در این تحقیق خاک پایه استفاده شده از نوع کائولین متراکم شده[3] ازگروه کانی‌های رسی است. کانی‌های این گروه عبارتند از کائولینیت[4]، دیکیت، ناکریت، هالوزیت، متاهالویزیت، که ترکیب شیمیایی تمامی آن‌ها یکسان است. تمامی کانی‌های گروه کائولینیت از نظر ساختاری شبیه یک‌دیگر هستند. ذرات کائولینیت معمولاً به شکل ورقه‌هایی با ساختار شش ضلعی هستند. کانی‌های تشکیل دهنده کائولین، کواتزر و کائولینیت به‌همراه مقدار کمی

1. Collapse1
2. Unsaturated soils
3. Compacted kaolin
4. Kaolinite

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

ایلیت است. پژوهش‌گران در این زمینه سعی داشتند با استفاده از مدل‌های رفتاری[1] مربوط به خاک‌های اشباع، مدل‌هایی برای خاک‌های غیراشباع ارائه کنند که به‌دلیل تفاوت‌های اساسی این دو نوع خاک، و پیچیدگی رفتاری که در محیط سه فازه خاک‌های غیراشباع وجود دارد، این تلاش‌ها با دشواری‌های مواجه شده است. از سوی دیگر وجود این مشکل در مواردی منجر به احداث سازه‌های خاکی با ضریب اطمینان پایین و یا غیراقتصادی می‌شد. امروزه با پیشرفت در کامپیوتر و اجرای مدل‌سازی‌های عددی و مطالعات آزمایشگاهی گسترده بر رفتار این نوع خاک‌ها، نتایج نشان داد که به‌جای عمل تنش مؤثر که در مکانیک خاک کلاسیک استفاده می‌شد، از دو متغیر حالت تنش (یعنی تنش میانگین و ماتریس مکش) در خاک‌های غیراشباع استفاده شود. این امر کمک می‌کند تا مدل‌های مکانیک خاک پیشرفته قابلیت شبیه‌سازی رفتار پیچیده خاک‌های غیراشباع در حالت‌های مختلف بارگذاری و تغییرات محیطی را داشته باشند.

مدل‌سازی رفتار خاک‌های غیراشباع موضوع اصلی بررسی‌های اخیر از جمله ویلر و همکاران ۲۰۰۳[2] [٤]، ژنگ و همکاران ۲۰۰٤[3] [٥]، نوت و لالویی ۲۰۰۸[4] [۸] و ژنگ و لایتون ۲۰۰۹[5] [٦]، [۷] بوده است. از طرفی به‌دلیل پیچیدگی‌های که پیاده سازی این مدل‌های رفتاری در برنامه‌های محاسباتی نرم‌افزارهای کامپیوتری دارد، کم‌تر به‌کاربردهای عملی آنها توجه شده است. یکی از مدل‌های رفتاری پایه برای بیان رفتار ژئومکانیکی و ارتجاعی-خمیری خاک‌های غیراشباع، مدل پایه بارسلونا است [۱]. این مدل به‌وسیلهٔ آلونسو و همکاران ۱۹۹۰[6] [۹] با توسعهٔ مدل کم کلی اصلاح شده، ایجاد شد که ابعاد مختلف خاک‌های غیراشباع شامل تاثیر رطوبت، کرنش‌های گسیختگی یا متورم شونده و رابطه تنش منبسط شونده و مکش را مطرح نمود. دراین مدل رفتاری، مدل حالت بحرانی کم کلی اصلاح شده[7] به‌گونه‌ای توسعه داده شده است که رفتار خاک‌های غیراشباع را در برگرفته و در حالت حدی مکش صفر ($s=0$) به مدل کم کلی اصلاح شده، تبدیل می‌شوند. در این پژوهش، روابط

1. Constitutive models
2. Wheeler et al. 2003
3. Zheng et al. 2004
4. Nuth & Lallui 2008
5. Zheng & Lighton 2009
6. Alonso et al. 1990
7. Modified Cam Clay

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

کامل مدل رفتاری خاک غیراشباع پایه بارسلونا[1] با توسعه کد FISH در نرم افزار $FLAC^{2D}$ شبیه‌سازی شده و علاوه بر آن توابعی برای تحلیل کرنش‌ها و تنش‌های خالص وابسته به مکش (به‌عنوان مثال تنش کل منهای فشار هوای محبوس $\sigma_t - \sigma_a$) در فضای سه فازه خاک غیراشباع تعریف شده است. برای شبیه‌سازی واکنش فشار مکش در کائولین متراکم به‌عنوان خاک پایه غیراشباع در این تحقیق، نتایج مدل سانتریفوژ ژنگ و همکاران ۲۰۱۳ [۱۳] از یک خاکریز مهندسی با تأکید بر ارزیابی نشست مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. با استفاده از پارامترهای کائولین متراکم شده و پیاده‌سازی آن با استفاده از FISH، در نرم‌افزار عددی، امکان انجام این مهم فراهم شده است. مسیرهای تنش حاصل از آزمایش‌های آلونسو و همکاران و نتایج حاصل از پیاده‌سازی پارامترهای خاک پایه و تحلیل آن در FLAC، در مورد مسیرهای تنش ارزیابی می‌شوند [۳]. نتایج حاصل در هر دو بخش کنترل نشست و مسیرهای تنش، تطابق خوبی را با واقعیت نشان داده است. این مسیرهای تنش ارتباط بین تغییرات تنش متوسط خالص با حجم مخصوص نسبی را ارائه می‌دهند که بررسی‌ها به تفکیک هر نمودار حاکی از عکس العمل مناسب به پارامترهای خاک غیراشباع اعمال شده در این تحقیق است. علاوه بر بررسی واکنش انتخاب مدل رفتاری پایه بارسلونا در خاکریزهای مهندسی، کاربرد ستون‌های اختلاط عمیق[2] به‌عنوان تسلیح و بهسازی خاک در محیط سه فازه خاک غیراشباع بررسی و با رگرسیون خطی[3] و روابط ریاضی در محاسبات عددی، اثر ضریب بیش تحکیمی[4] به‌منظور بهینه کردن کاربرد پیاده‌سازی[5] روابط اصلاح شده شده پیشنهادی در برنامه تفاضل محدود FISH، بررسی شده است. برای صحت‌سنجی مدل توسعه داده پیشنهادی، نشست یک پروژه واقعی شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار عددی با نتایج واقعی آن کنترل می‌شود.

1. Barcelona Basic Model
2. Deep soil mixing (DSM)
3. Linear regression
4. Over consolidation ratio
5. Implementation

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

روابط و توابع ریاضی مدل پایه بارسلونا

معادلات حاکم در مدل پایه بارسلونا با استفاده از روابط مدل کم کلی اصلاح شده به‌عنوان مدل الاستیک و در فضای سه‌بعدی تنش تعریف شده‌اند. در حالت تنش‌های هم‌سان، در مبحث رفتار خمیری خاک، تنش متوسط خالص و ماتریس مکش به‌صورت معادلات ۱ و۲ بیان می‌شوند:

$$\bar{p} = p - u_a \quad (۱)$$

$$s = u_a - u_w \quad (۲)$$

که در این روابط $\bar{p}$ تنش خالص متوسط کل، u_a فشار هوای محبوس و u_w، فشار آب منفذی است. در این مدل، رابطهٔ بین تغییرات الاستیک حجم مخصوص v، با تغییرات تنش متوسط خالص[1] و مکش[2] به‌صورت معادلهٔ (۳) تعریف می‌شود:

$$dv_e = -\kappa \frac{d\bar{p}}{\bar{p}} - \kappa_s \frac{ds}{s+P_{at}} \quad (۳)$$

در معادلهٔ (۳) κ و κ_s به‌ترتیب پارامتر سختی روی خط تورم، برای تغییرات مکش در محدودهٔ الاستیک و P_{at} فشار اتمسفر هستند [۱۸]. در این مدل چگونگی تغییرات حجم ویژه (v=1+e) خاک غیراشباع تحت تنش هم‌سانگرد و در یک مکش ثابت به‌صورت رابطهٔ (٤) پیشنهاد شده است:

$$v = N(s) - \lambda(s) ln \frac{p}{p^c} \quad (٤)$$

در این رابطه، p^c تنش مرجعی است که در آن v=$N(s)$ است چنان‌که از معادلهٔ (٤) مشخص است، یکی از فرضیات ساده کننده مدل استفاده از رابطهٔ خطی برای $ln\ (p)$ و v است که بیان‌گر این مطلب است که پدیده فروریزش با تر کردن خاک به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد. در این رابطهٔ $\lambda(s)$ بیان‌کنندهٔ سختی خاک استکه به‌میزان مکش بستگی دارد (شکل۱ الف). آلونسو و همکاران (۱۹۹۰) در این مدل پیشنهاد می‌کنند که $\lambda(s)$ با افزایش مکش به‌صورت یکنواخت کاهش یابد [۹]. رابطه پیشنهادی آنها به‌صورت معادلهٔ (۵) است:

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r\,] \quad (۵)$$

که در آن r ثابتی است که به‌سختی بیشینهٔ خاک مرتبط است و β پارامتر کنترل‌کنندهٔ نرخ تغییرات سختی با مکش است. در هنگام افزایش بار به‌صورت هم‌سان‌گرد در یک مکش ثابت (s) قبل

1. Net mean stress
2. Suction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

از رسیدن به یک تنش پیش تحکیمی (p_0) رفتار خاک الاستیک است، نقطه p_0 نشان‌دهندهٔ نقطه تسلیم خاک است. مقدار p_0 به میزان مکش خاک بستگی دارد با افزایش سطح مکش مقدار آن افزایش می‌یابد. این مقدار برای حالت اشباع (s=0) با p_0* نشان داده می‌شود. آلونسوو همکاران رابطهٔ (٦) را برای تغییرات تنش پیش تحکیمی p_0 با مکش و هم‌چنین تشریح پدید فروریزش در هنگام کاهش مکش در یک سطح تنش هم‌سان‌گرد ثابت ارائه کردند [۹]:

$$\frac{po}{p^c} = \left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\left(\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}\right)} \qquad (٦)$$

$\bar{p}_0(\mathrm{s})$ نقطهٔ تسلیم $\bar{p}$ در حالت تنش s و $\bar{p}_0(0)$ مقدار $\bar{p}_0(\mathrm{s})$ در نقطه مکش صفر یا همان اشباع است. این نقطه محل تقاطع منحنی تسلیم با محور $\bar{p}$ است که معرف اندازه فعلی منحنی تسلیم است. رابطهٔ (٦) که در فضای p-s یک منحنی تسلیم بنام بار–فروریزش[1] (LC) را نشان می‌دهد نقش اساسی در مدل پایه بارسلونا، ایفا می‌کند [۱۸]. این مدل در فضای p-s یک خط تسلیم مستقیم به‌نام افزایش مکش (SI) را علاوه بر منحنی تسلیم LC ارائه می‌دهد بدین‌ترتیب هنگامی که خاک به یک سطح مکش که قبلاً تحت آن قرار گرفته بود می‌رسد کرنش‌های برگشت ناپذیر در خاک ایجاد می‌شود منحنی‌های تسلیم SI , LC در فضای p-s محدوده‌ای را مشخص می‌کنند که در داخل این محدوده رفتار خاک الاستیک است. لازم به ذکر است منحنی تسلیم LC در صفحه s:p وقتی که $\bar{p}$ (0) = p^c، به‌صورت عمودی است و وقتی به‌صورت افزایشی است به حالت منحنی نزدیک می‌شود. فرض اصلی آلونسو و همکاران ۱۹۹۰ و جوسا[2] ۱۹۸۸[۱۱] در ارائه رابطهٔ (۷) تعیین شکل منحنی تسلیم LC از حالت تنش مرجع به تنش معادل مکش نهایی است:

$$N(s) = N(0) - \big(\lambda(0) - \lambda(s)\big)\ln p^c - \kappa_s \ln\left(\frac{s+P_{at}}{P_{at}}\right) \qquad (۷)$$

در این معادله $N(0)$ محل برخورد متناظر در مکش صفر و اشباع کامل است. تعداد ۷ ثابت خاک κ، κ_s، $\lambda(0)$ ، $N(0)$، r ، β و s برای بیان رفتار مدل تحت تنش‌های همسان[3] مورد نیاز است. سه ثابت دیگر خاک، مدل را برای حالت‌های تنش سه محوری کامل می‌کنند.

1. Loading collapse
2. Josa 1988
3. Isotropic stresses

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

ارزیابی و سنجش عمکرد مدل پایه بارسلونا در FLAC

در این بخش کد FISH روابط مدل پایه بارسلونا در نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC ارزیابی شده است. و هدف این است که دقت کد در مقایسه با داده‌های موجود در بیشینه موضوع بررسی شود. بدین‌منظور نتایج حاصل از نرم‌افزار با پژوهش‌های آلونسو و همکاران (۱۹۹۰) (خصوصاً در مباحث مربوط به مسیرهای تنش[1]) بررسی و مقایسه شده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل پایه بارسلونا ساخته شده، یک مدل واقعی خاکریز مهندسی که قبلاً به‌وسیلهٔ ژنگ و همکاران[2] (۲۰۱۳)[۱۳] ، تجزیه و تحلیل شده است، شبیه‌سازی شده و تحت اثر وزن و تغییرات ماتریس مکش، ارزیابی شده است.

پارامترهای استفاده شده در این مدل‌سازی عددی از پژوهش آلونسو (۱۹۹۰) استخراج شده که جمع‌بندی آنها در جدول ۱ نشان داده است [۱۲]. برای انجام این شبیه‌سازی، تک المانی که دارای شرایط تقارن‌محوری است در نظر گرفته شده است تا آزمایش‌های سه‌محوری روی خاک مورد نظر اعمال شود. به‌دلیل کفایت بیش‌تر، علاوه بر استفاده از تک المان از یک شبکه شامل چندین المان استفاده شده است. مزیت این شبکه‌بندی افزایش دقت و شبیه‌سازی بهتر تابع مکش و تغییرات آن در مدل است. در شرایط مرزی دو قسمت از آن ثابت در نظر گرفته شده و از دو جهت دیگر بارگذاری می‌شود که در واقع نشان‌دهندهٔ یک چهارم نمونه‌ای است که تحت آزمایش فشار سه‌محوری قرار داده شود.

جدول۱. پارامترهای خاک غیراشباع به‌کار رفته در مدل آلونسو۱۹۹۰ به‌عنوان خاک [۸]

	فشردگی تحت اعمال تغییرات تنش					فشردگی[3] تحت اعمال تغییرات مکش				پارامترهای مرجع برای تنش	
نوع خاک	λo	κ(κ)	β⁻¹ (MPa)	r	p^c MPa	λs	κs	G MPa	M	k	P_{p_o} MPa	S_o MPa
کائولین متراکم	۰/۱٤	۰/۰۰۸	۱٦/٤	۰/۲٦	۰/۰٤۳	۰/۰۵	۰/۰۱	۳/۳	۰/۸۲	۱/۲٤	۰/۰۵۵	۰/۰۳

1. Stress paths
2. Zheng et al. 2013
3 Compression

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

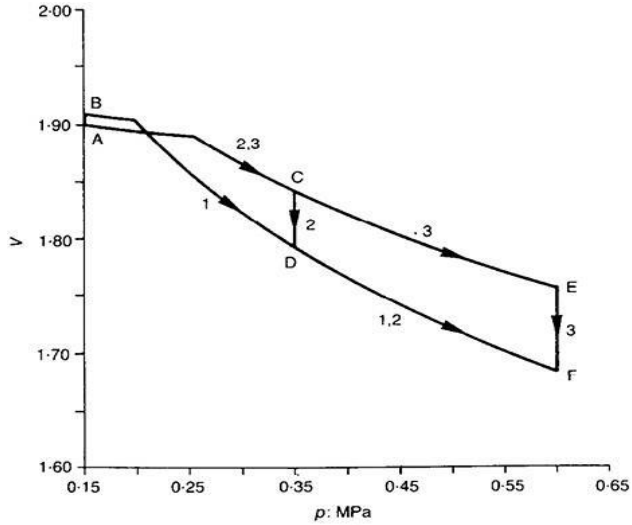
بررسی و صحت‌سنجی نمودارهای مسیر تنش

شکل ۱ مسیرهای تنش وابسته به تغییر شکل حجمی ناشی از روند ترشوندگی را نشان می‌دهد. سه مسیر تنش در این شکل به‌صورت ABDFH، ACEGH و ACEFH نشان داده شده‌اند، که شامل سه مسیر ترشوندگی AB، EF و GH هستند. تمام مسیرهای تنش از نقطه A با تنش متوسط خالص ۱۵۰ kPa و مقدار مکش اولیه ۲۰۰ kPa آغاز شده و در نقطه H با تنش متوسط خالص ٦۰۰ kPa، جایی برای مکش وجود نداشته و زمانی که مقدار نهایی آن به صفر رسیده است پایان می‌یابد. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود پروسه ترشوندگی در سه تنش متوسط میانگین ۱۵۰، ۳۰۰ و ٦۰۰ کیلوپاسکال که به نوعی فشارهای محصورکنندهٔ هستند اتفاق می‌افتد. این پروسه باعث می‌شود تا تغییرحجم ناشی از این پدیده (ترشوندگی) به‌وجود آید.

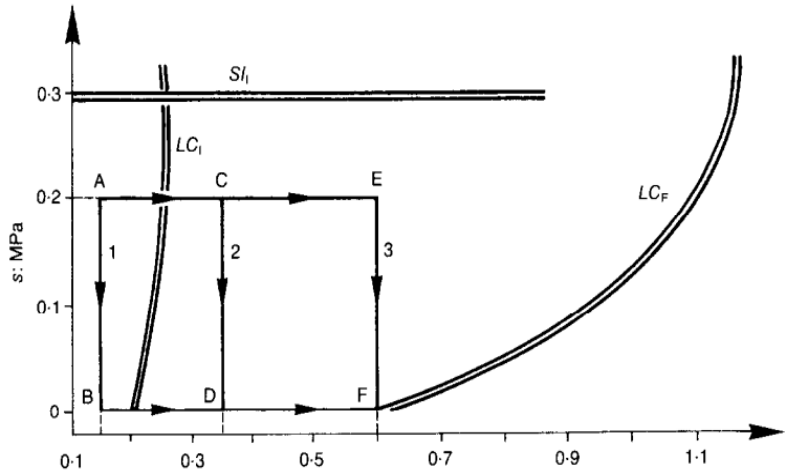
حالت دیگری در این مسیرهای تنش وجود دارد که با اضافه کردن کرنش‌های برشی به آنها، به‌وجود می‌آیند. علاوه بر آن سه مسیر AB، AC و AD با تنش میانگین ثابت ۰/۱۵ مگاپاسکال بررسی شده‌اند. نیروهای متناظر با این تنش‌های میانگین برای مسیر AB، kPa ۱۰۰، مسیر AC، ۲۰۰kPa و مسیر AD، ۳۰۰kPa است.

در شکل ۲ رفتار پیش‌بینی شده در مدل پایه بارسلونا که به‌وسیلهٔ آلونسو ۱۹۹۰ ارائه شده، نشان داده شده است. از طرفی در پژوهش آلونسو نمودارهای تحلیلی برای مسیر تنش به‌دست آمده‌اند که ناشی از عکس‌العمل مدل نسبت به کاهش ماتریس مکش(که همان فرآیند ترشوندگی است) در مقابل تنش متوسط خالص است. چنان‌که ملاحظه می‌شود مسیر ترشوندگی AB، در ناحیهٔ ارتجاعی اتفاق می‌افتد و باعث ایجاد تورم ادامه دار می‌شود. مسیر CD، زمانی که نمونه تحت فشار ایزوتروپیک قرار می‌گیرد اتفاق می‌افتد. در این مرحله تنش میانگین خالص به ۳۵۰ kPa رسیده که در نهایت تغییر حجم ناشی از آن باعث فروریختگی ناشی از ترشوندگی می‌شود. در مسیر EF، که ترشوندگی در فشار ایزوتروپیک ٦۰۰ kPa رخ می‌دهد به مانند مسیر AB، در محدوده ارتجاعی، تورمی به‌میزان ۰/۷۵ را تحمل می‌کند تا موجب فروریزش ناشی از پروسه ترشوندگی شود. در فرآیند ترشوندگی، فروریزش به محض شروع کاهش مکش اتفاق می‌افتد. مقدار اندک تغییرشکل ارتجاعی که به‌صورت تورم در مسیر CD، ایجاد می‌شود، کم‌تر از تغییر مکان منحنی تسلیم LC به نقطه نهایی آن است

(که در اثر این فشار ایزوتروپیک به‌وجود می‌آید). در انتها، در مسیر EF، و در فشار محصورکننده بیش‌تر، بیش‌ترین فروریزش اتفاق می‌افتد. هم‌چنین نمودارهای فشاری درخلال اینکه ترشوندگی کامل می‌شود، از یک مسیر واحد برای حالات اشباع تبعیت می‌کنند.



شکل۱. عکس العمل‌های مدل پایه بارسلونا در فرآیند ترشوندگی (مسیر تنش)- آلونسو ۱۹۹۰



شکل۲. عکس العمل‌های مدل پایه بارسلونا در فرآیند ترشوندگی (کاهش ماتریس مکش در مقابل افزایش تنش خالص متوسط)- آلونسو ۱۹۹۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

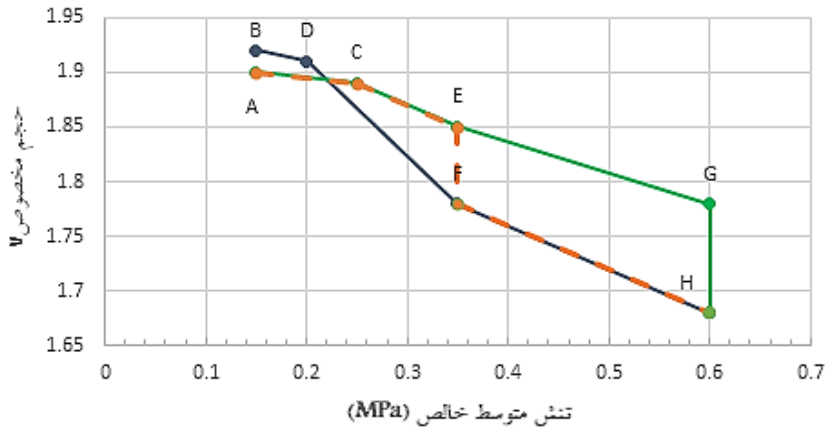
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

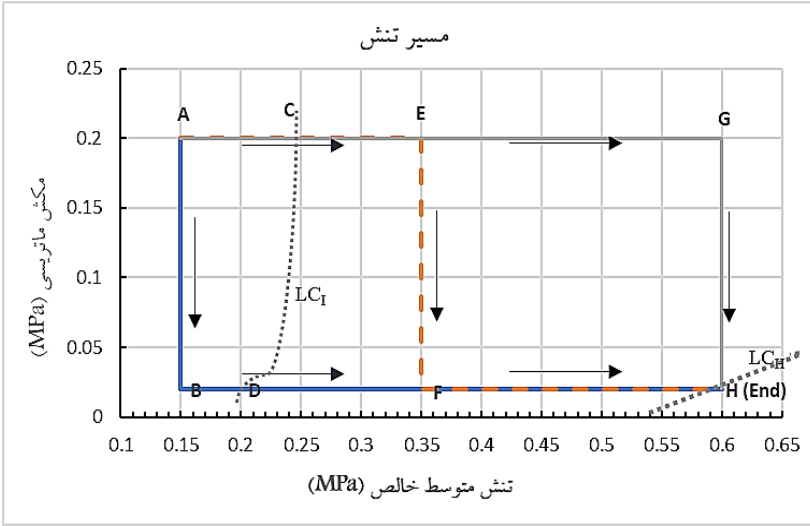
چنان‌که اشاره شد در تحقیقات مربوط حالت‌های اول و دوم آزمایش‌های آلونسو مسیر تنش در مقابل تغییرات مکش در پروسه ترشوندگی در قالب نمودارهای تحلیلی بررسی شده‌اند. مسیر تنش ABFH، در محدودهٔ ارتجاعی واقع شده و در مسیر AEFH نمونه تحت فشار محصور شده، تورم می‌یابد. در این مسیر، حجم مخصوص از مقدار تقریبی ۱/۸۲ به ۱/۷۶ کاهش می‌یابد و به‌طور مشابه نیز در مسیر AEGH، که در فشار محصور شده ۱۵۰kPa آغاز و در مقدار ۶۰۰kPa، پایان می‌یابد، حجم مخصوص از ۱/۷۹ به ۱/۷۳ کاهش می‌یابد. در ناحیهٔ ارتجاعی، نمونه خاک آزمایش شده، تحت اعمال تنش‌های کم‌تر، به مراتب مقدار کم‌تری تورم را تجربه می‌کند. به‌عبارت دیگر در صفحات تنشی بزرگ‌تر، فروریزش اتفاق می‌افتد.

در تمامی این مسیرها، منحنی تسلیم (LC) متاثر از حرکت از مکان اولیه خود، به نقطه نهایی است. در شکل‌های ۳ و ٤ به‌ترتیب مسیرهای تنش به‌صورت افزایش تنش متوسط با کاهش حجم مخصوص و تغییرات ماتریس مکش نشان داده شده‌اند. این روند در نتیجه حاصل از آزمایش سه‌محوری با ساز وکار کنترل مکش انجام می‌شود که شامل کنترل مثبت هوا و فشار آب در نمونه خاک مرجع است و اجازه کنترل ماتریس مکش در نمونه داده می‌شود. باید توجه داشت که رفتار خاک غیراشباع مقید به نیروی مکش (s) است. ماتریس مکش به‌صورت اختلاف بین فشار هوای حفره‌ای و فشار آب حفره‌ای تعریف می‌شود.



شکل ۳. مسیرهای تنش به‌صورت افزایش تنش متوسط با کاهش حجم مخصوص

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]



شکل ٤. مسیرهای تنش به‌صورت افزایش تنش متوسط با تغییرات مکش

در این حالت از یک نقطه با تنش متوسط کم و ماتریس مکش زیاد به نقطه‌ای در انتهای مسیر با تنش متوسط زیاد و ماتریس مکش کم می‌رسد. در این حالت نسبت تخلخل عدد ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو حجم اولیه نمونه ($V=e+1$) عدد ۱/۹ به‌دست می‌آید.

در مسیر AEF، که ابتدای مسیر تنش است با ثابت نگه داشتن ماتریس مکش در مقدار ۲۰۰kPa، تنش متوسط افزایش یافته تا از مقدار ۱۵۰kPa به ٦۰۰kPa برسد. در این مرحله با ثابت نگه داشتن تنش متوسط و کاهش مکش از ۲۰۰kPa به صفر، نمونه به حالت اشباع می‌رسد. به‌همین ترتیب در مسیر ABF، در ابتدا با ثابت نگه داشتن تنش متوسط در مقدار ۱۵۰kPa به مکش صفر که حالت اشباع را نشان می دهد رسیده و در همین حالت اشباع که در آن ماتریس مکش صفر است تنش متوسط خالص به مقدار ٦۰۰kPa می‌رسد. در مسیر ACDF، در ابتدا در حالت مکش ثابت ۲۰۰kPa، تنش متوسط از ۱۵۰kPa به ۳۵۰kPa رسانده می‌شود. بعد با ثابت نگه داشتن تنش متوسط در مقدار ۳۵۰kPa مقدار مکش به صفر رسیده تا خاک اشباع شود. در حالت اشباع مجددا تنش متوسط تا مقدار نهایی آن یعنی ٦۰۰kPa افزایش داده می‌شود.

نتیجه این‌که خاک تنها کاهش مکش ماتریسی را تجربه می‌کند. یعنی در تنش متوسط ثابتی نمونه را به مکش صفر رسانده و اشباع می‌شود. چنان‌که در شکل ٤ مشخص شده

است، در این حالت از هر مسیری حرکت شود، تغییری در حجم مخصوص نهایی حاصل نمی‌شود. این مسئله بیان‌گر آن است که در حالت کاهش ماتریس مکش، تغییر حجم نمونه مستقل از مسیر تنش است. براساس نتایج به‌دست آمده از تحقیقات و مشاهدات آزمایشگاهی گنس (۱۹۸۸) و آلونسو (۱۹۹۰) [۸]، نشان داده شده که با حرکت از نقطه A به نقطه B، و تنش متوسط پایین، اگر نمونه اشباع شده، در آن افزایش حجم مشاهده می‌شود. در حقیقت از یک نقطه با تنش متوسط با مقدار کم و مکش بالا در نهایت به تنش متوسط زیاد و ماتریس مکش پایین می‌رسد.

برای مسیر ACEF، با تنش متوسط ۱۵۰kPa و فشار مکش ۲۰۰kPa شروع شده و سپس نمونه در تنش متوسط ثابت، با کاهش ماتریس مکش روبرو شده تا در نهایت به نقطه s=۰ و اشباع برسد. در همین حالت اشباع، مقدار تنش متوسط افزایش یافته تا به ۶۰۰kPa که انتهای مسیر است برسد. در مسیر تنش ACDF، نیز بمانند حالت قبل، فرآیند کاهش مکش در دو مرحله صورت می‌گیرد. در یک مرحله با ثابت نگه داشتن تنش میانگین متوسط در عدد ۱۵۰kPa، ماتریس مکش کاهش یافته به‌طوری‌که مقدار آن از۲۰۰ kPa به ۱۰۰kPa می‌رسد. در انتها نیز با کاهش مکش تا صفر، نمونه کاملاً اشباع می‌شود. در این میان مقدار تنش متوسط تا عدد نهایی آن یعنی ۶۰۰kPa افزایش پیدا کرده است. در مقابل و در مسیر ABDF، پس از گذر از نقطه شروع مسیر، در حالی که ماتریس مکش ثابت است، تنش میانگین تا مقدار نهایی آن یعنی ۶۰۰kPa افزایش یافته و بعد از آن با کاهش ماتریس مکش تا مقدار صفر، نمونه خاک اشباع می‌شود.

تفاوت این قسمت با قبل این است که در قسمتی از مسیرهای تنش، ماتریس مکش در دو مرحله کاهش می‌یابد. و چون به مانند قبل، خاک فقط کاهش ماتریس مکش را تجربه می‌کند در عمل، نتایج تقریباً شبیه به هم هستند. در این حالت با کاهش ماتریس مکش، تغییر حجم نمونه، مستقل از مسیر نشان می‌دهد دلیل این امر آن است که از هر مسیری حرکت شود، حجم مخصوص نسبی نهایی تغییر پیدا نمی‌کند.

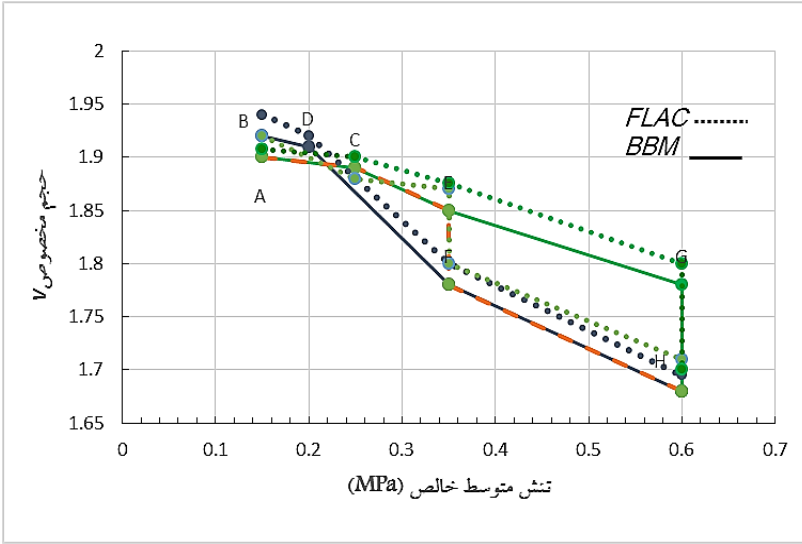
در مسیرهای AC و AE موردی که در قبل در خصوص افزایش حجم نمونه به آن پرداخته شد در نتایج حاصل از این قسمت نیز به‌وضوح در شکل ٤ قابل مشاهده است. این بدان معنا است در صورتی که در تنش‌های متوسط خالص با مقادیر کم‌تر، مکش به مرور و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

تا حذف کامل کاهش داده تا خاک کاملاً اشباع شود، با افزایش حجم نسبی نمونه مواجه می‌شود. از مقایسه نتایج حاصل از برنامه نویسی در FLAC FISH با نتایج تحلیلی حاصل از پژوهش‌های آلونسو، این نتیجه حاصل می‌شود که شبیه‌سازی کامپیوتری انجام شده براساس فلوچارت تنظیمی، در عین حال که همه وقایع رخ داده برای نمونه را در طول مسیر تنش مدل کرده، بین مقادیر حاصل از آن نیز با نتایج حاصل از پژوهش‌های آلونسو وهمکاران در سال (۱۹۹۰) اختلاف ناچیزی وجود دارد که صحت عملکرد برنامه را نشان می‌دهد (شکل ۵).

با بررسی مسیرهای مختلف تنش، مشاهده می‌شود که نقطه شروع و نقطه نهایی یکسان است. این قضیه کمک چشم‌گیری به تفسیر نتایج با تکیه بر این موضوع که تغییرشکل‌های حاصل شده به مسیرهای تنش وابسته هستند، می‌کند.



شکل ۵. مقایسهٔ نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل پایه بارسلونا درFLAC و نتایج پژوهش‌های آلونسو(۱۹۹۰).

چنان‌که پیش‌تر اشاره شد سه مسیر تنش BDFH، ACEGH و ACEFH شامل سه مسیر ترشوندگی AB ، EF و GH هستند. برای کنترل مضاعف فرآیند صحت‌سنجی نتایج حاصل از برنامه‌نویسی صورت گرفته مطابق الگوریتم و روابط ریاضی به‌دست آمده در این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

تحقیق، به‌تفکیک با نتایج حاصل ازآزمایش‌های آلونسو مقایسه می‌شوند که مبین تطابق مناسب این نتایج با یک‌دیگرند (شکل٦).

ارزیابی مدل خاک غیراشباع با شبیه‌سازی رفتاری یک خاکریز واقعی

به‌منظور ارزیابی مدل شبیه‌سازی کامپیوتری شده در محیط تفاضل محدود FLAC، و بعد از این‌که کارایی مدل پایه بارسلونا در این کار عددی صحت‌سنجی شد، برای ارزیابی همه جانبه، رفتار یک خاکریز مهندسی در ابعاد واقعی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای خاک مرجع که در شبیه‌سازی کامپیوتری برنامه به‌کارگرفته شده‌اند و در این ارزیابی به‌منظور صحت‌سنجی استفاده شده‌اند، از تحقیقات آلونسو (۱۹۹۰) استخراج شده‌اند.

مقادیر این پارامترها که صرفاً مربوط به خاک‌های غیراشباع هستند در جدول ۲ آمده‌اند.

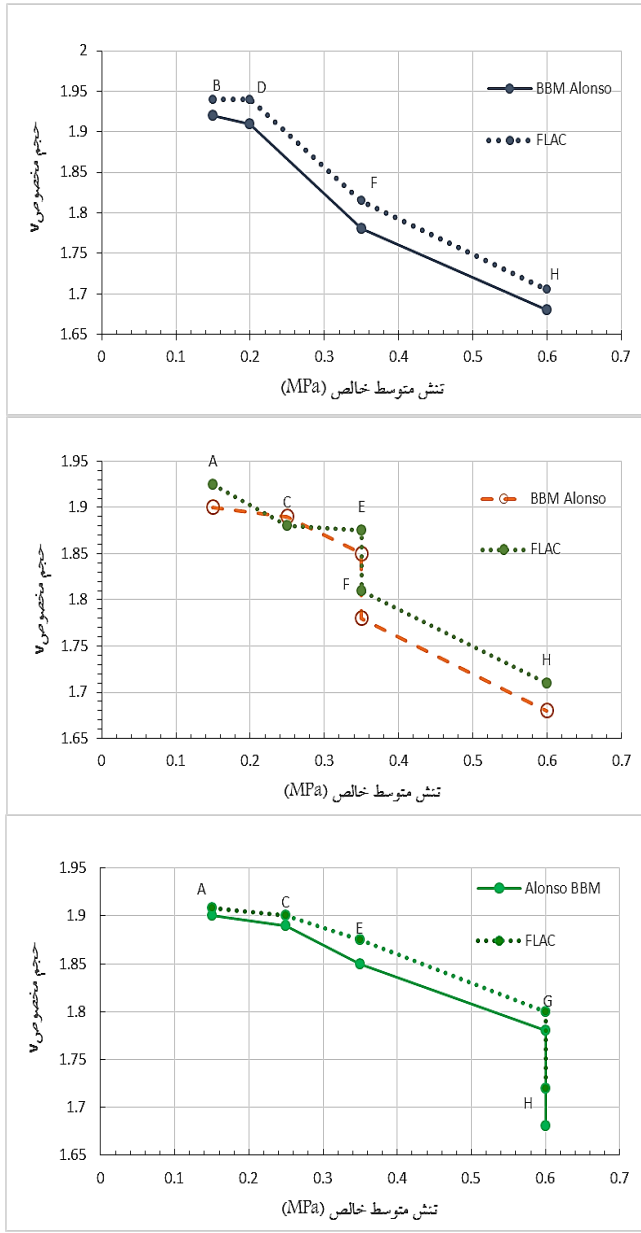
جدول ۲. پارامترهای استفاده شده درخاک غیراشباع برای شبیه سازی عددی خاکریز مهندسی ژنگ ۲۰۱۳ [۱۳]

	فشردگی تحت اعمال تغییرات تنش					فشردگی تحت اعمال تغییرات مکش					پارامترهای مرجع برای تنش	
نوع خاک	λo	κ(κ)	β (MPa)⁻¹	r	p^c MPa	λs	κs	G MPa	M	k	p_{po} MPa	S_o MPa
کائولین متراکم	۰/۱٤	۰/۰۰۸	۱٦/٤	۰/۲٦	۰/۰٤۳	۰/۰٥	۰/۰۱	۳/۳	۰/۸۲	۱/۲٤	۰/۰٥٥	۰/۰۳
رس کائولینیت	۰/۰٦٦	۰/۰۰۷۷	۲۰	۰/۲٥	۰/۰۱۲	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۷	۱/۲	۰/۸	۰/۰۲۰	۰/۳

مسیرهای تنش مورد بحث به‌منظور تعیین پارامترهای مدل پایه بارسلونا و از آزمایش‌ها انجام شده روی نمونه‌های خاک‌های غیراشباع در تحقیقات آلونسو و گنس [۹]، [۱۰] به‌دست آمده است. در این مقطع، نمونه لای متراکم که از آزمایش‌های آلونسو و همکاران (۱۹۹۰) [۸] و جوسا[1] (۲۰۰٦) [۱۱] به‌دست آمده، برای تعیین پارامترهای خاک آلونسو استفاده شده است. ساختار این خاک متشکل از کائولین با ترکیبی از ایلیت است. این مدل خاکریز چنان‌که اشاره شد در طی فرآیند متداول ساخت خاکریزها که با پدیده ترشوندگی همراه است، شبیه‌سازی شده است.

1 Josa 2006

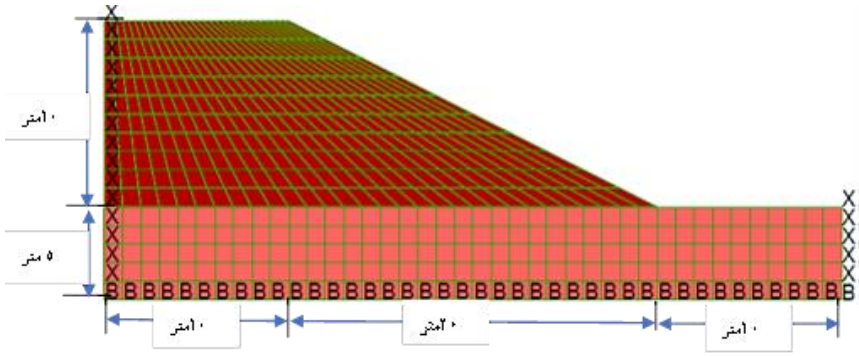
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]



شکل ٦. مقایسهٔ نتایج مدل پایه بارسلونا در FLAC (تحقیق حاضر) و نتایج پژوهش‌های آلونسو(۱۹۹۰)- برای مسیر تنش

شکل ۷، هندسه مدل که در محیط FLAC با ساختار شبکه‌بندی تفاضل محدود و با تراکم واحد (۱×۱) به‌منظور شروع مدل‌سازی و تحلیل عددی ایجاد شده است، را نشان می‌دهد.

مدل موهرکلمب برای شبیه‌سازی فونداسیون خاکریز به‌کار رفته و به‌صورت اشباع فرض شده است. ارتفاع خاکریز ۱۰متر است و شیب آن ۱ به ۲ (1v: 2h) است. خاک فونداسیون مشابه خاک موجود در خاکریز در نظر گرفته شده و ضخامت آن ۵ متر و کاملاً اشباع است. به‌منظور سهولت انجام محاسبات و شبیه‌سازی مدل در محیط تفاضل محدود، می‌توان به‌دلیل وجود تقارن، تنها نیمی از خاکریز در نظر گرفته شده است. خط تقارن در سمت چپ مدل قرار دارد. طول خاکریز در قسمت پایین ۳۰ متر و در قسمت بالایی ۱۰متر است.



شکل ۷.هندسه مدل و شبکه بندی تفاضل محدود مدل خاکریز

در شبکه‌بندی تفاضل محدود شکل ۷ با تراکم۱×۱، مرزبندی تفاضل محدود در مدل خاکریز و فونداسیون به‌گونه‌ای انجام شده که مرزهای جانبی در تنها در جهت y توانایی جابه‌جایی داشته و مرز پایین که در محل فصل مشترک خاک و فونداسیون است در هر دو جهت x و y کاملاً ثابت شده و توانایی جا به‌جایی ندارند.

با اعمال روابط مربوط به معادلات خاک‌های غیراشباع در برنامه تفاضل محدود، حساسیت مرزها به‌دلیل کفایت انجام محاسبات عددی ارزیابی می‌شوند. این شرایط مرزی برای شبیه‌سازی دقیق‌تر مدل واقعی به‌کار گرفته شده در تحقیقات ژنگ[1] و همکاران ۲۰۱۳ [۱۳]، در محیط برنامه تفاضل محدود، تعیین شده‌اند.

1. Zheng

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

رفتار این مدل ساخته شده با خاک غیراشباع با استفاده از روابط مدل پایه بارسلونا شبیه‌سازی شده است. مکش ماتریسی اولیه در این مدل kPa ۱۰۰ است. در اولین مرحله تحلیل، المان‌های تشکیل‌دهندهٔ فنداسیون، در اثر تنش‌های ناشی از وزن به تعادل می‌رسد. به‌دلیل انطباق شرایط ساخت با واقعیت، مدل‌سازی در ۱۰ مرحله انجام شده و در هر مرحله تنش‌های ناشی از وزن مدل به آن اضافه شده تا تغییرشکل‌های ناشی از آن محاسبه شود. در مرحله بعد با توجه به پیش‌بینی محاسبه تغییرات مکش در هر المان شبکه‌ای، تغییرشکل‌های ناشی از ترشوندگی[1] خاک، با کاهش ماتریس مکش از مقدار اولیه آن تا صفر محاسبه می‌شوند. نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی کامپیوتری که در فرمولاسیون آلونسو پیش‌بینی نشده و به‌نوعی دقت محاسبات را افزایش می‌دهد در نظر گرفتن تغییرات مکش در المان‌های خاک غیراشباع است. به‌منظور جلوگیری از پیچیدگی‌ها و حذف نامنظمی‌های بیش از حد در توزیع تنش در مرحله کاهش نیروی مکش در المان‌های خاک، تغییرات ماتریس مکش حذف شده و ثابت در نظر گرفته می‌شوند. با این کار خطاهای احتمالی زیادی که در المان‌ها به‌وجود می‌آید تا حد زیادی کاهش یافته و دقت مدل‌سازی بیش‌تر می‌شود.

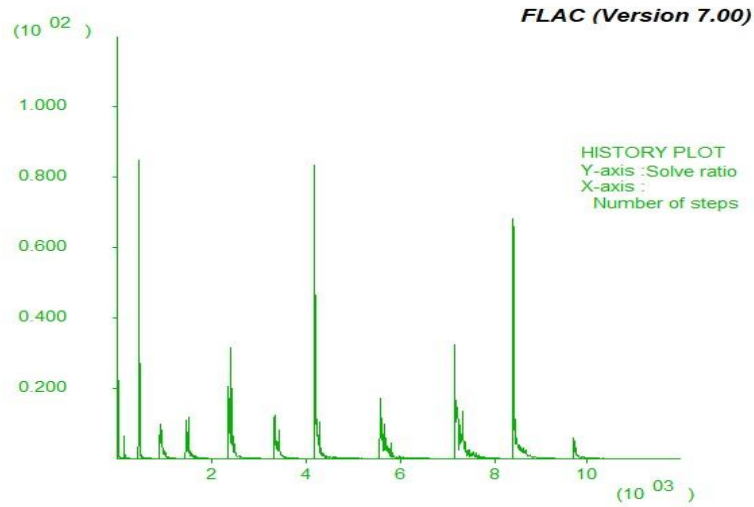
به‌منظور کنترل عملکرد جابه‌جایی خاکریز که یکی از فاکتورهای مهم محسوب می‌شود، توزیع بردارهای جابه‌جایی در این تحقیق بررسی می‌شوند [۱۵]. نحوهٔ توزیع این بردارها باید به‌گونه‌ای باشند که عملکرد کل مدل را در حالات مختلف ارزیابی کند. در محیط برنامه تفاضل محدود برای اطمینان از عملکرد برنامه ساخته شده باید تنش‌های اولیه در هر المان و به‌ترتیب در کل المان‌های تشکیل‌دهندهٔ محاسبه تا پس از چندگام انجام حلقه محاسبات به تعادل رسیده و نسبت تنش‌ها به‌سمت صفر میل کنند. تعداد گام‌های این محاسبات به‌طور معمول $۱۰^{۵}$ است که در صورت نرسیدن به تعادل باید اصلاحات در کدهای نوشته شده انجام شود. در پژوهش حاضر چنان‌که در شکل ۸ مشخص است محاسبات حتی بعد این‌که تغییرات مکش (Δs) در نظر گرفته می‌شود، مدل به تعادل می‌رسد. و بعد از $۱۰^{۳}$گام به تعادل می‌رسد، که با توجه به حجم محاسبات، مطلوب و قابل قبول است.

در شکل ۹، توزیع نشست به‌صورت بردارهای جابه‌جایی در این تحقیق روی مدل واقعی و مدل‌سازی انجام شده با کدهای مدل پایه بارسلونا نشان داده شده‌اند. در تحقیق حاضر

1. Wetting induced

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

تغییر شکل‌های کلی در جهت محور y، به‌ترتیب برای حالات تحت اثر وزن خاکریز، بعد از اتمام ساخت به‌صورت غیراشباع و حالت با اشباع تدریجی، ۲۰۸ میلی‌متر و ۳٤۲ میلی‌متر است که تقریباً با اختلاف کم‌تر از ۵ درصد، همان اعدادی هستند که در تحقیقات قبلی (ژنگ و همکاران ۲۰۱۳ [۱۳]) به‌دست آمده بود.به‌منظور ارزیابی بهتر عملکرد برنامه‌سازی روابط مدل خاک غیراشباع نشست‌ها و تغییرشکل‌های جانبی، خاکریز در شرایط"سه فازه اشباع" بررسی شده است [۱۵]، [۲۱].



شکل ۸ نمودار نسبت تنش‌های اولیه در المان‌های مدل به تعداد گام‌های محاسبات

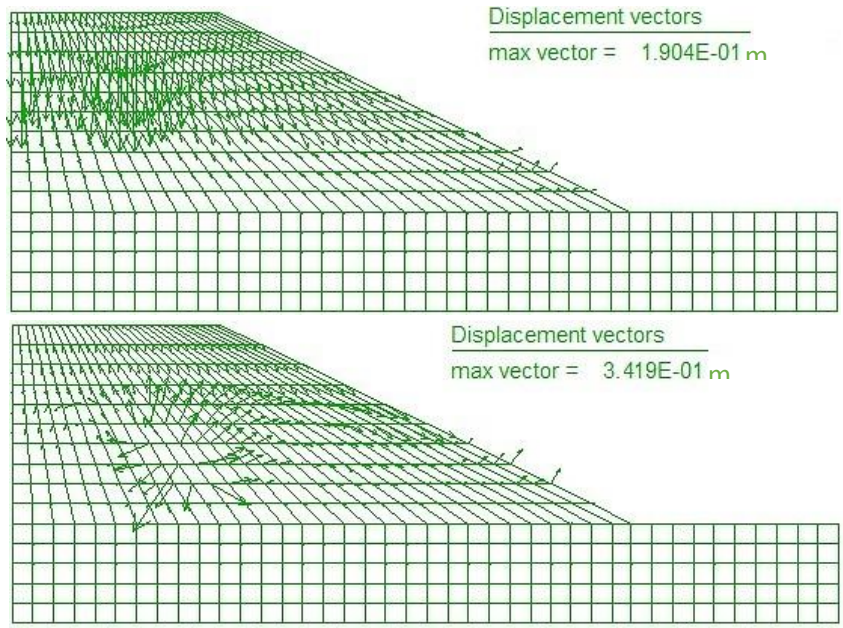
نمودارهای مقایسه‌ای نشست‌های سطح خاکریز در مقاطع مختلف آن، در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. چنان‌که از نمودار این شکل مشخص است، در کار تجربی ژنگ و همکاران (۲۰۱۳) [۱۳]، نشست رویه مدل، نزدیک به ٦۰ میلی‌متر و در این پژوهش۵۳ میلی‌متر به‌دست آمده است. بعد از اشباع کامل، این تغییر شکل‌های قائم بیش از سه برابر مقادیر قبلی برای نشست است به‌طوری‌که برای مدل تجربی به۲۵۰ میلی‌متر و برای مدل عددی این تحقیق به ۲۳۹ میلی‌متر رسیده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

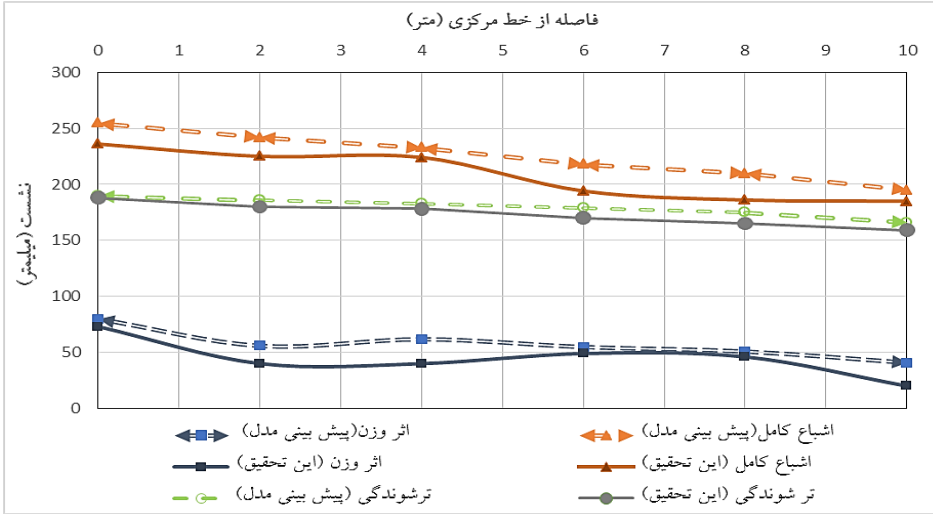
این در حالی است که مقدار نشست در هنگام پدیده ترشوندگی نزدیک به ۱۹۰ میلی متر می‌رسد. به‌همین ترتیب در شکل ۱۱، نشست در محل خط تقارن[1] و در ترازهای مختلف خاکریز در سه حالت، تحت وزن خاکریز، اشباع کامل و پدیده ترشوندگی نشان داده شده‌اند [۱۳]. در هر دو قسمت تحلیل عددی به‌روش تفاضل محدود و کار تجربی ژنگ. حداکثر نشست تحت اثر وزن خود و در حالت خشک، در نقطه میانی ارتفاعی خاکریز رخ می‌دهد دلیل آن هم ساخت مرحله به مرحله[2] خاکریز است و تغییرمکان تجمعی در هر مرحله ساخت و در ارتفاع مورد نظر گزارش شده است. نتایج حاصل شده در هر دو تحقیق، انطباق خوبی داشته که نشان از نزدیکی نتایج حاصل از برنامه‌نویسی در محیط تفاضل محدود[3] و کار تجربی قبلی دارد.



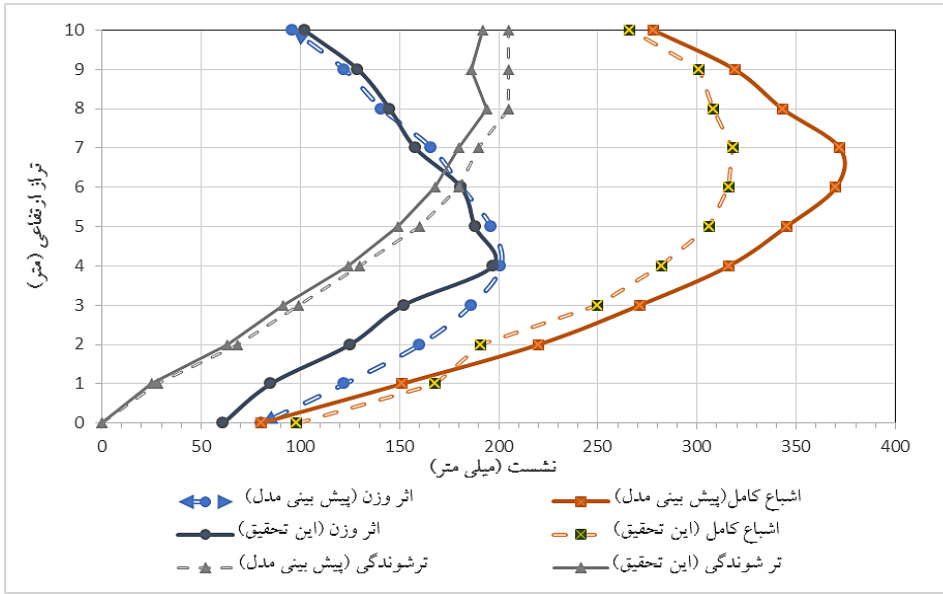
شکل ۹. بردارهای جابه‌جایی در محیط تفاضل محدود (در تحقیق حاضر):
الف) بعد از اتمام مراحل ساخت خاکریز ب) بعد از فرآیند ترشدگی و اشباع کامل

1. Centre line
2. Incrementally construction
3. Finite difference medium

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]



شکل ۱۰. نمودارهای مقایسه‌ای نشست‌های سطح خاکریز در فواصل مختلف از مرکز، در این پژوهش و تجربیات قبلی



شکل ۱۱. نمودارهای مقایسه‌ای نشست‌های سطح خاکریز در فواصل مختلف از مرکز، پژوهش حاضر و تحقیقات قبلی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

ارزیابی فشار ناشی از مکش و نسبت بیش تحکیمی در خاکریزهای غیراشباع

مطابق آن‌چه بدان اشاره شد، تحقیقات انجام شده قبلی به مانند آلونسو و همکاران ۱۹۸۸ و ۱۹۹۰ و گنس و همکاران ۲۰۰۶ [۹]، به‌منظور دست‌یابی به مدلی کاربردی برای خاک‌های غیراشباع، مدل کم کلی اصلاح شده را توسعه دادند تا بدین‌وسیله رفتار پیچیده تنش-کرنش و تورم خاک‌های غیراشباع را نشان دهند.

از زمان شروع این تحقیقات، خیلی از پژوهش‌گران روی رفتار مکانیکی خاک‌های غیراشباع و تعداد زیادی از این مدل‌های رفتاری برای پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش نمونه‌های عادی یا کمی بیش تحکیم یافته خاک‌های غیراشباع بررسی‌هایی انجام داده‌اند [۱۸]، [۱۹]. با این حال، تأثیر نسبت بیش تحکیمی روی تغییرشکل‌ها و در مسیر ترشوندگی خاک‌های غیراشباع بسیار دست کم گرفته شده‌اند [۲٤]. شیب منحنی فشردگی وقتی که مکش افزایش می‌یابد، کاهش پیدا می‌کند اما شیب منحنی باربرداری[1] تغییر نمی‌کند [۱۵].

با فرض اینکه مقادیر کرنش حجمی پلاستیک در نقاط A و C برابر باشند، تابع تسلیم بارگذاری- فروریزش (LC) چنان‌که در بخش اول مقاله توضیح داده شد، می‌توان با اعمال ضریب α به‌عنوان نسبت بیش تحکیمی به‌صورت معادلهٔ (۸) بیان کرد:

$$\frac{p_0}{p^c} = \alpha \left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\left(\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}\right)} \qquad (۸)$$

از این‌رو منظور کردن ضریب بیش تحکیمی[2] (OCR) در خاکریزهای مهندسی می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای قابل توجه در بررسی نشست آنها مطرح شود. با اعمال ضریب بیش تحکیمی در طرف دوم رابطهٔ (۸) و انجام برنامه‌نویسی مجدد در محیط تفاضل محدود FLAC، وضعیت تغییرشکل‌های قائم (نشست) در خاکریز مهندسی، بررسی می‌شود.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ شامل نمودارهایی مقایسه‌ای از تحقیقات ژنگ (۲۰۱۳) [۱۳] و پژوهش حاضر برای ارزیابی و بررسی اثرات مکش در کنترل نشست خاکریز است. ماتریس مکش عموماً با نزدیک شدن به سطح آب که در این‌جا روی پی قرار دارد، کاهش می‌یابد. فشارهای مکش اولیه ۱۰۰ و ۲۰۰kPa است. شکل ۱۲، نشست سطح خاکریز را در مقاطع

1. Inclined unloading Curves
2. Over-consolidation ratio

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

مختلف در فشار مکش ۱۰۰kPa نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقادیر زیاد نشست برای کائولین متراکم در حالاتی که ترشدگی بیش‌تری با بارهای محیطی وجود دارد، اتفاق می‌افتد.

نتایج حاصل از پیاده‌سازی روابط پایه بارسلونا در FLAC با و بدون در نظرگرفتن نسبت بیش تحکیمی و مقایسه با پیش‌بینی مدل در پژوهش‌های قبلی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

در هر دو کار تجربی قبلی و تحقیق فعلی، خاکریزهای با مکش اولیه کم‌تر باعث ایجاد نشست‌های بیش‌تری می‌شوند. برای مکش ۲۰۰kPa، نشست سطحی بعد از اشباع کامل، ۸۰ میلی‌متر بیش‌تر از حالت مشابه در مکش ۱۰۰kPa است. با منظور کردن نسبت بیش تحکیمی این اختلاف به ٦۰ میلی‌متر می‌رسد که نتیجه آن مقادیر کم‌تر نشست در این حالت است.

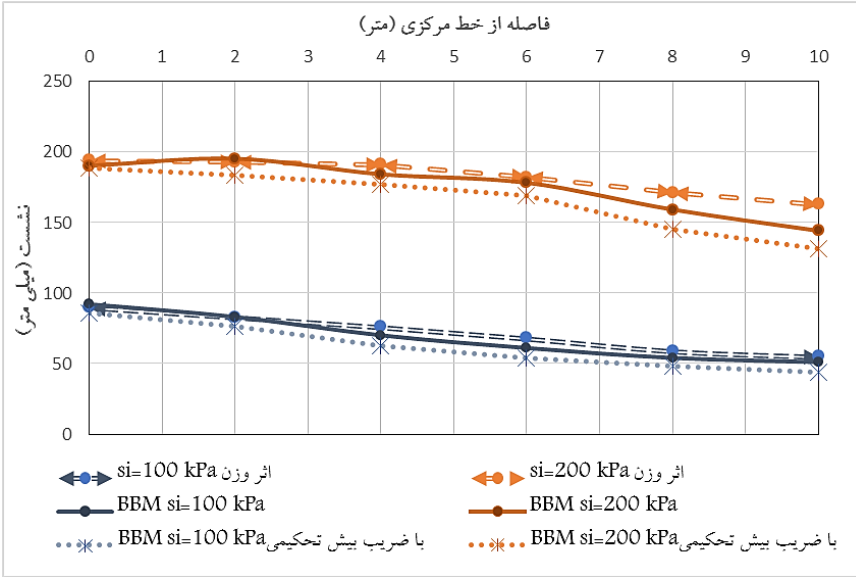
نمودار شکل ۱۳، نشان می دهد نشست ناشی از ترشوندگی به‌طور نسبی با افزایش مکش اولیه، افزایش یافته و با در نظر گرفتن ضریب بیش تحکیمی این مقدار نشست تا حدودی کاهش می‌یابد.

نتایج در این نمودار نشان می‌دهد که در این تحقیق و برای فشار مکش ۱۰۰ kPa، بیش‌ترین میزان ترشوندگی، بیش‌ترین میزان نشست را باعث می‌شود در حالی که با در نظر گرفتن نسبت بیش تحکیمی (OCR) این مقدار نشست کاهش می‌یابد که نشان از تأثیر این ضریب در کنترل نشست در مسیر ترشوندگی دارد.

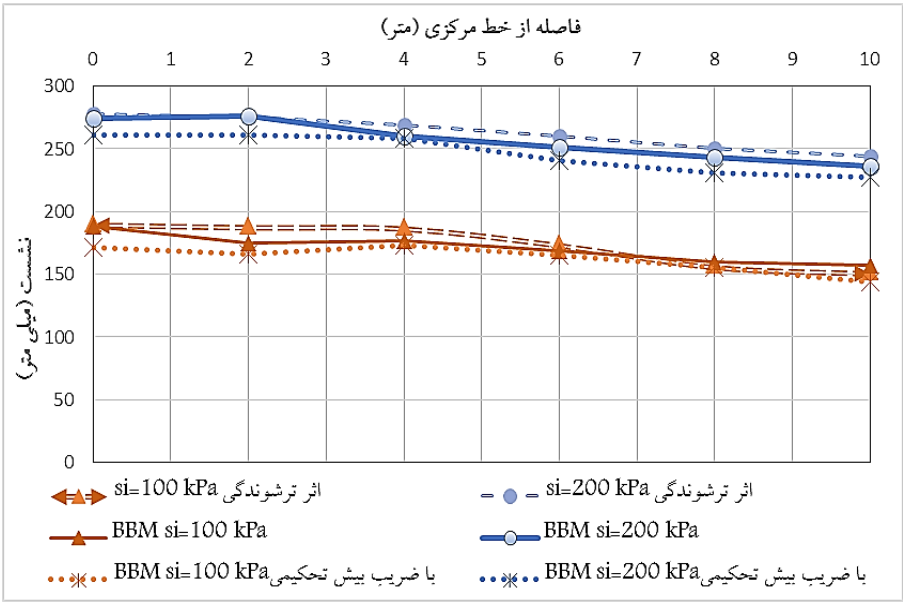
مدل سازی خاک بهسازی شده با ستون‌های اختلاط عمیق در محیط غیراشباع

در این بخش با شبیه سازی عددی، یک مدل واقعی در محیط سه فازه غیراشباع که با روش اختلاط عمیق، بهسازی شده است بررسی می‌شود. مدل با ستون‌های خاکی برای بهسازی و بدون این ستون‌ها به‌عنوان بدترین حالت برای طراحی فونداسیون خاکی ارزیابی می‌شود. طراحی پی به دو مورد مهم برای بررسی و صحت‌سنجی نیاز دارد، یکی بررسی کفایت ظرفیت باربری و دیگری کنترل نشست مجاز است [۲]، [۲۳].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]



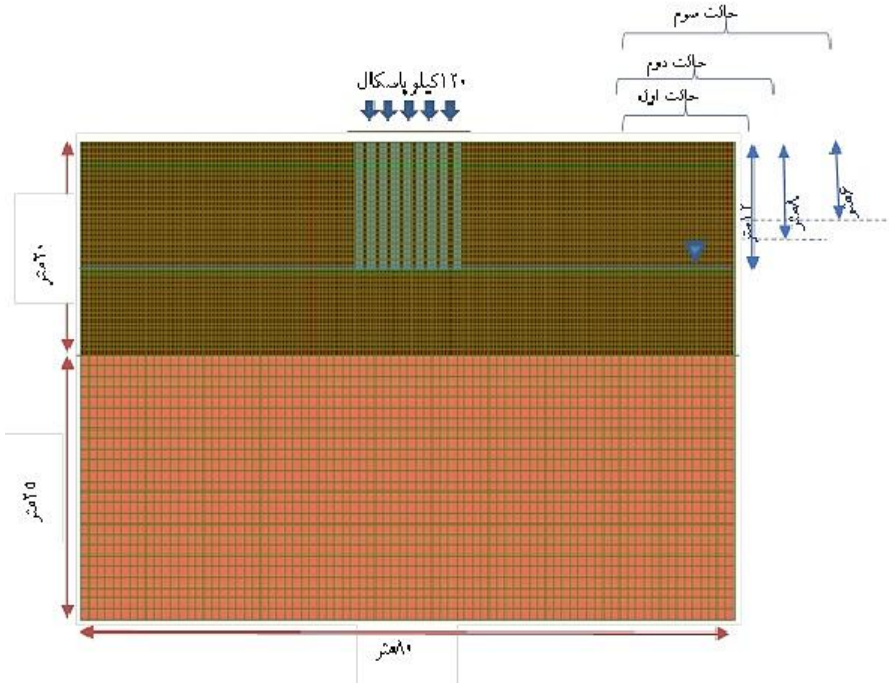
شکل ۱۲. نمودارهای مقایسه‌ای تأثیر مکش بر نشست‌های سطح خاکریز در فواصل مختلف از مرکز در سه حالت مختلف (اثر وزن سازه خاکی)



شکل ۱۳. نمودارهای مقایسه‌ای تأثیر مکش بر نشست‌های سطح خاکریز در فواصل مختلف از مرکز در سه حالت مختلف (اثر ترشوندگی)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

اغلب طرح‌هایی که مستلزم تسلیح پی با انواع المان‌های شمعی بمانند ستون‌های اختلاط عمیق هستند اساساً با بخشی از حجم خاک مبنا کنترل می‌شود. مدل بررسی شده از سازه‌ای به ابعاد ۴۵×۸۰ مترمربع شامل دو لایه خاک از یک تحقیقات محلی برداشت شده است. پی این سازه خاکی کاملاً اشباع فرض شده و با معیار تسلیم موهر کلمب مدل شده است. باری به اندازهٔ kPa ۱۲۰بر پی بتنی به مقطع ۱/۵×۰/۷۵ مترمربع واقع بر این سازه خاکی اعمال شده است. پارامترهای مدل پایه بارسلونا از کائولین متراکم شده مطابق جدول۲ برای مدل سازی استفاده شده است. این رس متراکم به‌صورت خمیری و در رده ML از طبقه‌بندی متحد خاک، قرار می‌گیرد. این ستون‌ها به‌وسیلهٔ یک لایه۲۰متری غیراشباع که روی یک بستر سنگی به ضخامت ۲۵متر قرار گرفته‌اند، احاطه شده‌اند. برای مدل‌سازی سه گزینه کرنش صفحه‌ای در مدل تفاضل محدود شبیه‌سازی شده‌اند. تراز آب زیرزمینی۱۲متر پائین‌تر از سطح قرار دارد که مدل را به دو بخش کاملاً اشباع و نیمه اشباع تقسیم کرده است [۱۴]، (شکل۱۴).

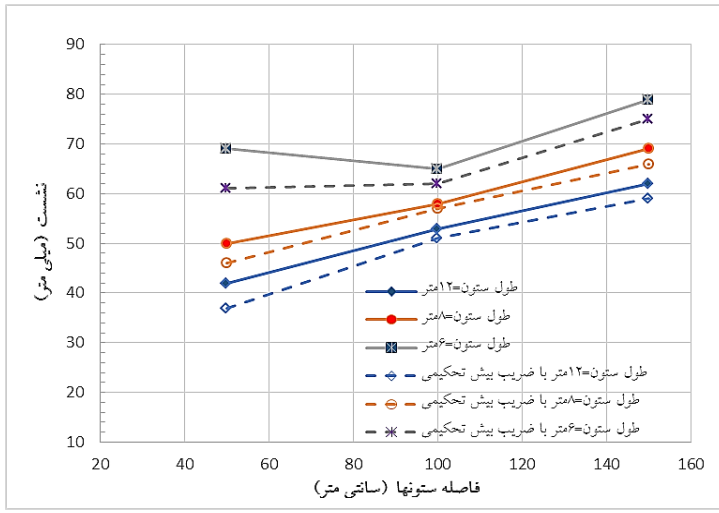


شکل ۱۴. مدل سازه خاکی با المان‌های تسلیح در سه حالت به‌طول‌های ۶، ۸ و ۱۲ متر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

به‌منظور بررسی دقیق‌تر و همهٔ جانبه کاربرد ستون‌های اختلاط عمیق در خاک غیراشباع، هر حالت به سه مدل با فواصل ۰/۵، ۱و ۱/۵ متری المان‌های تسلیح تقسیم شده است [۱۷]. بنابراین، ستون‌های اختلاط عمیق خاک که با مدل پایه بارسلونا شبیه‌سازی شده، در محیط برنامه‌نویسی تفاضل محدود در طول‌های و فواصل مختلف المان تسلیح برای ارزیابی کنترل نشست پیاده‌سازی شده است. چنان‌که اشاره شد با توسعهٔ مدل رفتاری کشسان کم کلی با صرف نظر از دما و منظور کردن فشار مکش در خاک به پیچیدگی مدل اضافه شده به‌طوری که به ۹ پارامتر جدید علاوه بر پارامترهای مدل کشسان، برای مدل‌سازی محیط سه فازه غیراشباع مورد نیاز است. بدین‌منظور، در محیط FLAC FISH برنامه‌ای برای محاسبه کرنش ناشی از مکش و در نتیجه یک تابع برای محاسبه تغییرات مکش در هر المان مدل که توانایی شبیه‌سازی قابلیت توابع تسلیم در محیط غیراشباع را دارد، تعریف شده است.

بعد ازانجام تحلیل‌های محاسباتی در حالات مختلف المان تسلیح، نتایج در قالب شکل (۱۵) به‌صورت مقایسه‌ای نشست خاکریز در فواصل المان‌ها و فاصلهٔ آنها از یک‌دیگر را نشان می‌دهد. تحت بار ۱۲۰kPa، کل سازه مدل بسته به فاصلهٔ و طول ستون‌های اختلاط عمیق حداقل به اندازه‌های، ٤٢، ٥٠ و ٦٩ میلی‌متر نشست کرده‌اند و اختلاف نشست بین مقادیر حدکثر و حداقل هر حالت (طول) از ستون‌ها بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر بسته به فاصله مسلح کننده‌ها است.



شکل ۱۵. مدل سازه خاکی با المان‌های تسلیح در سه حالت به طول‌های ٦، ۸ و ۱۲ متر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

به‌عبارت دیگر، در مدل پایه پایه بارسلونا و بدون استفاده از المان‌های تسلیح، حداکثر مقدار نشست به ۱۲۰میلی‌متر می‌رسد. مقایسه نتایج در شکل ۱۵ نشان می دهد هر چه طول المان بیش‌تر باشد نشست کم‌تری به مجموعهٔ سازه خاکی تحمیل می‌شود، و با کم‌تر شدن فاصله بین ستون‌ها از ۱/۵ متر به ۰/۵ متر، روند تغییرمکان قائم قابل قبولی به‌دست می‌آید.

تغییر در روند منحنی نشست برای المان‌های با طول۶ متر، احتمالاً مربوط به کاهش اثر طول ستون، برای بهسازی خاک برای طول‌های کوتاه‌تر از این مقدار است. نتایج نشان می‌دهند که ادغام پارامترهای مدل پایه بارسلونا در ستون‌های بهسازی خاک، تأثیر قابل قبولی در کنترل نشست کل سازه می‌دهد. علاوه بر آن با اعمال اثر بیش تحکیمی در مدل تحت همان بار ۱۲۰kPa، کل سازه مدل بسته به فاصله و طول ستون‌های اختلاط عمیق حداقل به اندازه‌های، ۳۷، ٤٦ و ٦١ میلی‌متر نشست کرده‌اند که سازه بهسازی شده را باز هم در وضعیت بهتری قرار **می‌دهد.**

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روابط کامل مدل رفتاری کشسان–خمیری خاک غیراشباع پایه بارسلونا در نرم افزار $FLAC^{2D}$ نوشته شده و علاوه بر آن توابعی برای تحلیل محاسباتی کرنش‌ها و تنش‌های خالص وابسته به مکش، در فضای سه فازه کانی رسی از نوع کائولین متراکم غیراشباع تعریف شده‌اند. در این میان برای ارزیابی مدل، شبیه‌سازی‌های زیادی انجام گرفتند که در نتیجه آن، قابلیت خوب به‌کارگیری در مسائل عملی مهندسی، همانند پاسخ خاکریزهای در معرض فشار ماتریس مکش نشان داده شدند. نتایج، حاکی از تأثیر قابل توجه تأثیرات مکش در نشست سازه است. از این رو پتانسیل ماتریس مکش باید در فرآیند طراحی خاکریزهای ساخته شده از کانی‌های رسی غیراشباع، منظور شوند. از طرفی مدل‌سازی عددی و انجام تحلیل محاسباتی نشان داد که نسبت بیش تحکیمی نقش قابل توجهی در رفتار مکانیکی و هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع ایفا می‌کند. تحلیل‌های کنترل نشست در محیط برنامه‌سازی تفاضل محدود نشان از عملکرد بهتر در مواقع اعمال ضریب بیش- تحکیمی α در روابط تابع تسلیم مدل است. به‌عنوان مثال برای مکش ۲۰۰ kPa، نشست سطحی بعد از اشباع کامل، ۸۰ میلی‌متر بیش‌تر از حالت مشابه در مکش ۱۰۰ kPa

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

است. با منظور کردن نسبت بیش تحکیمی این اختلاف به ٦٠ میلی‌متر می‌رسد که نتیجه آن تعدیل تغییرمکان قائم سازه ۲۰درصد در این حالت است. علاوه بر آن، مدل‌سازی عددی پایه بارسلونا با برنامه $FLAC^{2D}$ ، برای ارزیابی یک مدل واقعی با اندرکنش مؤلفه‌های مختلفی مانند خاک متراکم، گروه ستون‌های اختلاط عمیق خاک و بستر سنگی به‌کار گرفته شدند. با شبیه‌سازی این سازه بهسازی شده در محیط سه فازه غیراشباع کائولین متراکم، نتایج خوبی در کنترل نشست در آرایش و طول‌های مختلف ستون‌ها، در مقایسه با محیط اشباع به‌دست آمده‌اند. به‌طوری‌که با به‌کارگیری مدل اصلاح شده و در فواصل مشخص ستون‌ها، برای طول‌های اختلاط ٦، ۱۲ و ۱۸ متر، به‌ترتیب ۱۲، ۸ و ۱۱/۵درصد عملکرد بهتر نسبت به مدل اولیه است. بنابراین می‌توان این مدل‌سازی را در طرح بهسازی خاک با ستون‌های اختلاط عمیق در محیط غیراشباع که بیش‌تر به واقعیت طبیعی آن نزدیک‌تر است به‌کار برد. تحقیقات آتی، می‌تواند توسعه به‌کار گیری مدل‌های عددی تفاضل محدود در مدل‌های با رویکرد غیراشباع باشد.

منابع

۱. یثربی س.، "مکانیک خاک‌های غیراشباع"، انتشارات سیمای دانش (۱۳۸٦).

۲. اصلانی م.، نظری افشار ج.، گنجیان ن.، "مطالعهٔ آزمایشگاهی مقاومت برشی معادل ماسه سست مسلح شده با ستون سنگی"، نشریهٔ زمین شناسی مهندسی، جلد سیزدهم، شماره ۳، پاییز (۱۳۹۸).

3. Jazebi M., Ahmadi M. M., "A Numerical Approach on Bearing Capacity of Drilled Shafts Embedded in Clay", J. Engineering Geology, Vol. 12 (2018).

4. Wheeler S. J., Sharma R. S., Buisson, M. S. R., "Coupling of hydraulic hysteresis and stress strain behavior in unsaturated soils", Géotechnique, Vol. 53, No. 1 (2003) 41-54 .

5. Sheng D., Sloan S. W., and Gens, A., "A constitutive model forunsaturated soils: Thermomechanical and computational aspects", Comput, Mech., Vol.33, No. 6 (2004) 453-465.

6. Zhang X., Lytton R. L., "A modified state surface approach on unsaturated soil behavior study. I: Basic concept", Can. Geotech. J., Vol. 46, No. 5 (2009a) 536-552.
7. Zhang X., Lytton R. L., "A modified state surface approach on unsaturated soil behavior study. II: General formulation", Can. Geotech. J., Vol. 46, No. 5 (2009b) 553-570.
8. Nuth M., Laloui L., "Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework", Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 32, No. 7 (2008) 771-801.
9. Alonso E. E., Gens A., Josa A., "A constitutive model for partially saturated soil", Geotechnique, Vol. 40, No. 3 (1990) 405-430.
10. Gens A., Sanchez M., Sheng D., "On constitutive modeling of unsaturated soils", Acta Geotech., Vol. 1, No. 3 (2006) 137-147.
11. Josa A., "Un modelo eslastoplastico para suelos no saturados", PhD. thesis, Univ. of Politencnica de Catalunya, Barcelona, Spain, (1988).
12. Gallipoli D., D'Onza F., Wheeler S. J., "A sequential method for selecting parameter values in the Barcelona basic model", Can. Geotech, J., Vol. 47, No.11 (2010) 1175-1186.
13. Zhang X., Xiao M., "Using modified state surface approach to select parameter values in the Barcelona basic model", Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech, Vol. 37, No. 12 (2013) 1847-1866.11.
14. Hatami K., Granados J. E., Esmaili D., Miller G. A., "Influence of gravimetric water content on geotextile reinforcement pullout resistance in MSE walls with marginal soils", Transp. Res. Rec., Vol. 13, No. 3836 (2013) 66-74.
15. Alipour R., Khazaei J., S. Pakbaz M., Ghalandarzadeh A., "Settlement control by deep and mass soil mixing in clayey soil", Int'l civil engineering Institution, Paper 160008, (2016).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]

16. Hatami K., Esmaeli D., Chan E. C., Miller G. A., "Laboratory performance of reduced-scale reinforced embankments at different moisture contents", Int'l Journal of Geotechnical Engineering., Vol. 8, No. 3 (2014).
17. Sexton B. G., McCabe B. A., "Modeling stone column installation in an elasto visco plastic soil", Int'l Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 9, No. 5 (2015).
18. Hatami A., Tourchi.S., "A thermomechanical constitutive model for unsaturated clays", Int'l Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 12, No. 2 (2018).
19. Fredlund D. G., Rahardjo H., Fredlund M. D., "Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice", JOHN WILEY & SONS INC., (2012).
20. Fredlund D. G., Rahardjo H.,"Soil mechanics for unsaturated soils", Wiley, New York, (1993).
21. Anand J., Puppala R. S., Soheil N., Deren Yuan., "Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes", FHWA/TX-08/0-5179-1, Federal Highway Administration, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, (2009) 76019-0308.
22. Sai Vanapalli & Won Oh., "A model for predicting the modulus of elasticity of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", Int'l Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 4, No. 4 (2014).
23. Mojezi M., Biglari M., Kazem M., Ashayeri J & I., "Determination of shear modulus and damping ratio of normally consolidated unsaturated kaolin", Int'l Journal of Geotechnical Engineering", (2018). http://doi.org/10.1080/19386362.2018.1425179.

24. Garcia L. M., "Influence of moisture content on pullout resistance of geotextiles in marginal quality soils", Master’s thesis, Univ. of Oklahoma, Norman, OK, (2010).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.2.2.9]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.307]