

تأثیر مدل رفتاری در تحلیل تغییرشکل دیواره در گودبرداری عمیق

جهانگیر خزائی* (استادیار)

عادل گزایی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)
دوری ۲-۳۳، شماره ۱/۲، ص. ۶۹-۷۶

گودبرداری عمیق در خاک‌های سست می‌تواند منجر به تغییرشکل بیش از حد زمین و در نتیجه، ایجاد خسارت به ساختمان‌های مجاور گود شود. انتخاب مدل رفتاری مناسب با نوع خاک در مسائل مربوط به گودبرداری، پارامتری بسیار مهم در ارزیابی تغییرشکل‌های به‌وجودآمده در دیواره و کف گود است. در پژوهش حاضر، مدل‌سازی گودبرداری در خاک‌های رسی نرم و سخت با استفاده از مدل‌های رفتاری خاک سخت‌شونده، خاک نرم‌شونده، و موهر-کولمب^۱ و همچنین گودبرداری مهارشده در خاک‌های ماسه‌یی سست و متراکم با استفاده از مدل‌های رفتاری خاک سخت‌شونده و موهر-کولمب با استفاده از نرم‌افزار المان محدودی PLAXIS انجام و نتایج حاصل مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، وابستگی قابل توجه تغییرشکل زمین و دیواره‌ی گود به مدل رفتاری انتخاب‌شده کاملاً مشهود است.

واژگان کلیدی: گودبرداری مهارشده، مدل رفتاری، تغییرشکل دیواره، تورم، نرم‌افزار PLAXIS.

۱. مقدمه

یکی از دغدغه‌های اصلی در احداث تأسیسات زیرزمینی در مناطق شهری، اثر تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری در ساختمان‌های مجاور است. طراحی گودبرداری باید علاوه بر جلوگیری از ایجاد تغییرشکل‌های بیش از اندازه‌ی زمین، از نظر اقتصادی نیز بهینه باشد. برای تحلیل و طراحی گودبرداری، معمولاً از روش‌های عددی استفاده می‌شود، که یکی از مناسب‌ترین آن‌ها، روش المان محدود (FEM)^۲ است، که در نرم‌افزار PLAXIS نیز استفاده می‌شود. اما فقط استفاده از روش عددی مناسب بدون در نظر گرفتن مدل رفتاری^۳ مناسب برای خاک نمی‌تواند دقت نتایج به‌دست آمده از تحلیل را تضمین کند، لذا با توجه به نوع خاک و نوع مسئله‌ی ژئوتکنیکی و هدفی که در طراحی وجود دارد، باید مدل رفتاری مناسب برای مسئله انتخاب شود، به گونه‌یی که مدل رفتاری انتخاب‌شده بیشترین سازگاری را با رفتار واقعی خاک داشته باشد. مثلاً در طراحی گود در خاک‌های رسی نرم، معمولاً بدون توجه به اثر کرنش‌های کوچک خاک، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده می‌شود، اما همان‌طور که در برخی پژوهش‌ها اشاره شده است،^۴ اثر این کرنش‌ها در مدل‌سازی گودبرداری بسیار مهم است و تغییرشکل‌های حاصل از مدل‌سازی گود با در نظر گرفتن پارامتر مذکور، تفاوت قابل ملاحظه‌یی با مدل رفتاری موهر-کولمب خواهد داشت.

همچنین با اشاره به اثر برخی مدل‌های رفتاری جدید در مسائل خاک‌برداری نشان داده شده است که انتخاب مدل رفتاری مناسب می‌تواند منجر به پیش‌بینی بهتر

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۴/۸/۲۳، پذیرش ۱۳۹۴/۹/۸.

j.khazaie@razi.ac.ir
adelgeraili@yahoo.com

تغییرشکل زمین در اثر گودبرداری شود.^{۵-۳} امروزه با توجه به پیشرفت‌های صورت‌گرفته در ساخت تجهیزات اندازه‌گیری می‌توان از تجهیزات مذکور برای اندازه‌گیری میزان تغییرشکل گود در محل استفاده کرد و بنابراین نتایج واقعی را نیز در محل گودبرداری به دست آورد.^{۶-۸} با انجام تحلیل‌های المان محدودی و مطالعات آزمایشگاهی در متروی بانکوک، تأثیر مدل‌های رفتاری مختلف در خاک رسی نرم بررسی شده و این نتیجه به‌دست آمده است^۹ که مدل‌های رفتاری خاک نرم‌شونده^۴ و خاک سخت‌شونده^۵ نسبت به سایر مدل‌های رفتاری نتایج بهتری در مورد تغییرشکل دیواره و کف گود ارائه می‌دهند و همچنین با مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو مدل مذکور و نتایج ثبت‌شده در محل نشان داده شده است که تطابق خوبی بین تغییرشکل‌های به‌دست‌آمده در دو حالت وجود دارد. همچنین با استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف به تحلیل عددی گودبرداری مهارشده به‌وسیله‌ی میخکوبی پرداخته شده و نتایج حاصل از مدل‌های رفتاری پیشرفته‌ی مذکور با نتایج حاصل از مدل رفتاری مرسوم موهر-کولمب مقایسه شده است.^{۱۰} نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش اخیر نشان داده است که در تحلیل گودبرداری در خاک‌های نرم و در مواردی که تغییرشکل جانبی دیواره‌ی گود، عاملی کنترل‌کننده برای سازه‌های مجاور باشد، استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته بسیار مطلوب‌تر از مدل‌های اولیه است و سختی خمشی میل مهارها، تأثیر زیادی در نحوه‌ی شکست پوشش داخلی دیواره‌ی گود دارد.

در مطالعه‌ی حاضر با در نظر گرفتن خاک‌های ماسه‌یی و رسی با مشخصات مقاومتی متفاوت و با استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف، یک گود با هندسه‌ی

مدل‌های رفتاری مذکور باهم مقایسه شده‌اند. مشخصات خاک‌های استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، از نوشتارهای ارائه شده‌ی دیگر پژوهشگران،^[۱۰] اتخاذ شده است.

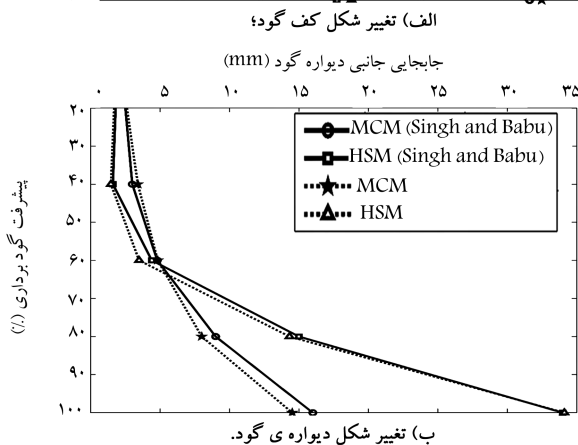
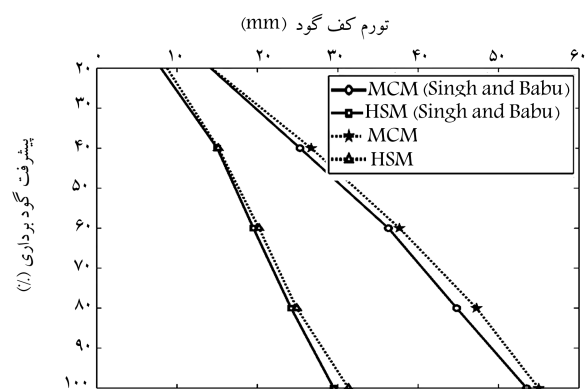
۱.۲. صحت‌سنجی نرم‌افزار PLAXIS

همان‌طور که بیان شده است، مدل‌سازی مسائل در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS انجام شده است، لذا در گام نخست باید محاسبات انجام و نتایج به دست آمده با نرم‌افزار مذکور صحت‌سنجی شوند. بدین منظور، مسئله‌ی در نظر گرفته شده در پژوهشی در سال ۲۰۱۰،^[۱۰] با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS مدل‌سازی شده است. این مسئله شامل گودبرداری به عمق و عرض ۱۰ متر در خاک فاقد چسبندگی است، که با توجه به تقارن هندسه و شرایط بارگذاری، نصف مسئله مدل‌سازی شده است. نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی در شکل ۲ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲، تغییرشکل‌های به دست آمده از مدل‌سازی برای کف و دیواره‌ی

جدول ۲. مشخصات المان‌های استفاده شده در مدل‌سازی.

آیتم	تعداد گره‌ی المان	تعداد گره‌ی انتگرال‌گیری	روش المان
خاک	۱۵	۱۲ نقطه‌یی	۱۶۴۹
پوشش بتنی	۵	۴ نقطه‌یی	۲۰
ژئوگرید	۵	۴ نقطه‌یی	۲۵۲
سطح مشترک	۵	۴ نقطه‌یی	۴۰



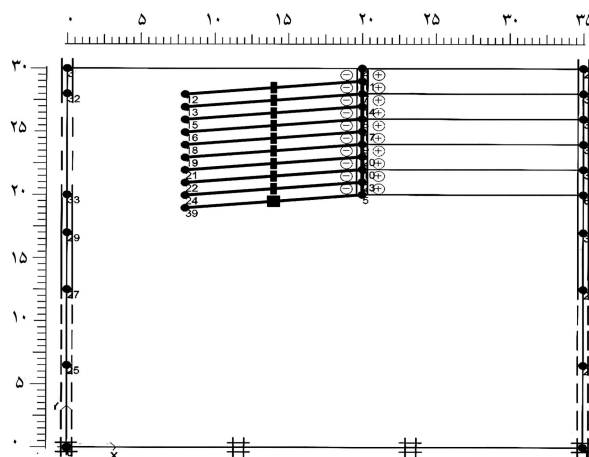
شکل ۲. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی PLAXIS و نتایج مرجع^[۱۰].

یکسان با روش عددی المان محدودی تحلیل و تغییرشکل‌های کف و جداره‌ی گود در حالات مختلف مقایسه شده‌اند، تا بدین طریق بتوان تحلیلی نسبتاً جامع با توجه به مدل‌های رفتاری مختلف و خاک‌های با ویژگی‌های متفاوت ارائه داد.

۲. معرفی مدل تحلیلی

مسئله‌ی در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، شامل گودبرداری به عمق ۱۰ متر و عرض ۳۰ متر در خاک‌های با مشخصات متفاوت است، که با روش میخکوبی مهار شده است. در شکل ۱، مشخصات اولیه‌ی مسئله شامل مشخصات هندسی و شرایط مرزی نشان داده شده است. شایان ذکر است که با توجه به تقارن شرایط هندسی، نصف مسئله مدل‌سازی شده است. در پژوهش حاضر، به جهت آنکه امکان مقایسه‌ی نتایج فراهم باشد، برای تمامی مدل‌ها از مشخصات هندسی و شرایط مرزی یکسان استفاده شده است.

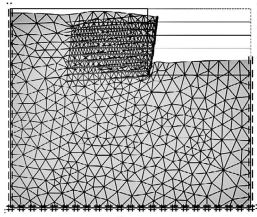
پس از مشخص کردن ویژگی‌های خاک مورد مطالعه، مدل‌سازی گودبرداری با توجه به مدل رفتاری مورد نظر انجام شده است. برای مدل‌سازی میخکوبی در نرم‌افزار PLAXIS از ۱۰ آیتم ژئوگرید^۶ به طول ۱۲ متر، فاصله‌ی عمودی و افقی ۱ متر و با سختی محوری $10^3 \times 229$ کیلو نیوتن بر متر در واحد عرض استفاده شده است. در جدول ۱، مشخصات رویه‌ی بتنی^۷ جداره‌ی داخلی دیواره‌ی گود ارائه شده است. جهت مش‌بندی محدوده‌ی خاکی از المان‌های ۱۵ گره‌یی استفاده شده است. در جدول ۲، مشخصات مش استفاده شده برای محدوده‌ی خاکی و عناصر سازه‌یی ارائه شده است. برای خاک رس در دو حالت نرم و سخت، مدل‌سازی با استفاده از سه مدل رفتاری موهر - کولمب (MCM)، خاک نرم‌شونده (SSM)، و خاک سخت‌شونده (HSM) انجام و نتایج به دست آمده باهم مقایسه شده‌اند. برای خاک ماسه‌یی نیز در دو حالت سست و متراکم، مدل‌سازی گودبرداری با استفاده از دو مدل رفتاری موهر - کولمب و خاک سخت‌شونده انجام و نهایتاً نتایج به دست آمده برای



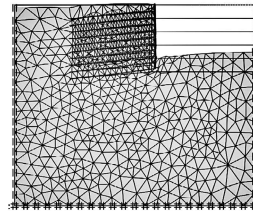
شکل ۱. مشخصات هندسی، بارگذاری، و شرایط مرزی مسئله.

جدول ۱. مشخصات پوشش بتنی جداره‌ی داخلی دیواره‌ی گود.

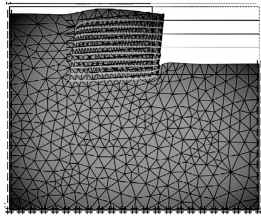
ν	w (KN/m/m)	EI (KN.m ² /m)	EA (KN/m)
۰/۱۵	۸/۲	1.23×10^5	1.4×10^7



جایجایی کل $222/57 \times 10^{-3} \text{ m}$
(بزرگنمایی ۱۰ برابر)
(ب) مدل سازی با مدل رفتاری خاک نرم شونده؛



جایجایی کل $295/41 \times 10^{-3} \text{ m}$
(بزرگنمایی ۱۰ برابر)
(الف) مدل سازی با مدل رفتاری موهر کلمب؛



جایجایی کل $385/24 \times 10^{-3} \text{ m}$
(بزرگنمایی ۵ برابر)
(ج) مدل سازی با مدل رفتاری خاک سخت شونده.

شکل ۳. مش تغییرشکل یافته‌ی ناشی از گودبرداری در خاک رس نرم.

گود در گام‌های مختلف خاک‌برداری تطابق خوبی با نتایج سینگ و بابو^[۱۰] دارد. بدیهی است که دقت نتایج به دست آمده از نرم افزار PLAXIS در مسئله‌ی فوق، صحت محاسبات آتی را اثبات خواهد کرد.

۲.۲. مدل سازی گود در خاک رسی نرم

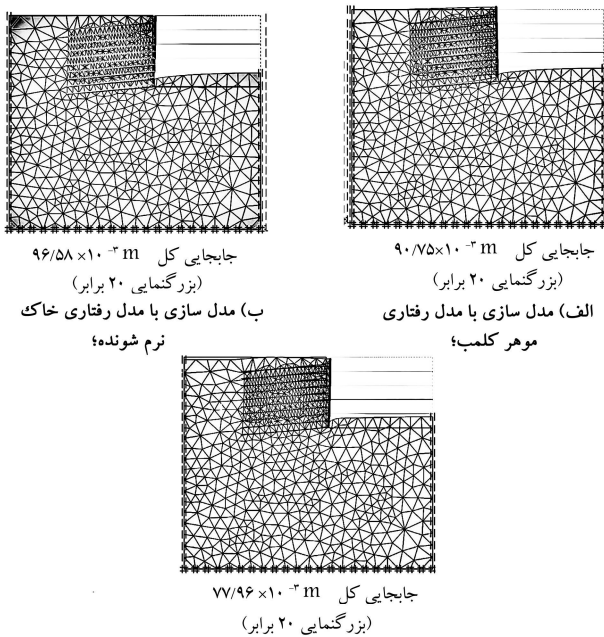
در جدول ۳، پارامترهای در نظر گرفته شده برای مدل‌های رفتاری مختلف جهت مدل‌سازی گودبرداری در خاک رسی نرم نشان داده شده است. با توجه به مش تغییرشکل یافته‌ی مسئله، که در شکل ۳ نشان داده شده است، با انتخاب مدل رفتاری موهر-کولمب، تغییرشکل‌های کمتری در سطح زمین رخ می‌دهد و در مناطق نزدیک به دیواره‌ی گود، اندکی تورم در سطح زمین مشاهده می‌شود.

در شکل ۴، تغییرشکل عمودی کف گود (تورم) و تغییرشکل جانبی دیواره‌ی گود با در نظر گرفتن سه مدل رفتاری مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ الف مشاهده می‌شود که مقدار تورم پیش‌بینی شده در کف گود با استفاده از مدل خاک سخت‌شونده بیشتر از دو مدل دیگر است، و مقدار تورم پیش‌بینی شده با استفاده از مدل خاک نرم‌شونده کمتر از سایر مدل‌ها بوده است.

با بررسی شکل ۴ ب مشاهده می‌شود که مقدار جابه‌جایی جانبی دیواره در مدل خاک سخت‌شونده، بیشترین مقدار و در مدل موهر-کولمب، کمترین مقدار را دارد. همچنین با توجه به شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که در مدل‌های خاک سخت‌شونده

جدول ۳. پارامترهای مدل‌های رفتاری انتخاب شده برای رس نرم.

مدل خاک سخت‌شونده	رس نرم	مدل خاک نرم‌شونده	رس نرم	مدل موهر-کولمب	رس نرم
شرایط زهکشی شده		شرایط زهکشی شده		شرایط زهکشی شده	
$\gamma_{Unsat} \text{ (KN/m}^3\text{)}$	۱۶٫۵	$\gamma_{Unsat} \text{ (KN/m}^3\text{)}$	۱۶٫۵	$\gamma_{Unsat} \text{ (KN/m}^3\text{)}$	۱۶٫۵
e_{init}	۰٫۵	e_{init}	۰٫۵	e_{init}	۰٫۵
e_{min}	۰	c_k	۱۰٫۱۵	c_k	۱۰٫۱۵
e_{max}	۹۹۹	λ^*	۰٫۱۱	$E_{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۸۰۰۰
c_k	۱۰٫۱۵	K^*	۰٫۲۳	ν	۰٫۳۳
$E_{\Delta}^{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۱۵۰۰	$C \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۱	$G_{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۳۰۰۷
$E_{oed}^{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۱۶۷۲	$\varphi \text{ (}^\circ\text{)}$	۲۷	$E_{oed} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۱۱۸۵۳
m	۱	$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	۰	$C_{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۱
$C_{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۱	ν_{ur}	۰٫۱۵	$\varphi \text{ (}^\circ\text{)}$	۲۷
$\varphi \text{ (}^\circ\text{)}$	۲۷	K_o^{nc}	۰٫۵۵	$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	۰
$\psi \text{ (}^\circ\text{)}$	۰	R_{inter}	۱	$E_{inc} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۰
$E_{ur}^{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۸۰۰۰			$y_{ref} \text{ (m)}$	۰
$\nu_{ur}^{(nu)}$	۰٫۲			$C_{increment} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۰
$P^{ref} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۱۰۰			$T_{str} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۰
$C_{increment} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۰			R_{inter}	۱
$y_{ref} \text{ (m)}$	۰				
R_f	۰٫۹				
$T_{str} \text{ (KN/m}^2\text{)}$	۰				
R_{inter}	۱				
$\delta_{inter} \text{ (m)}$	۰				

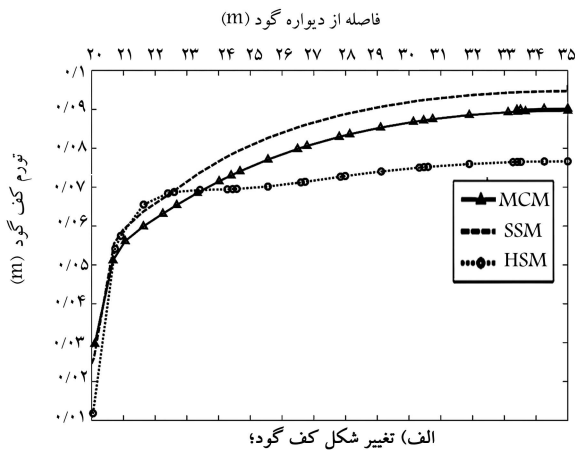


جایجایی کل $96/58 \times 10^{-3} \text{ m}$ (بزرگنمایی ۲۰ برابر)
 (ب) مدل سازی با مدل رفتاری خاک نرم شونده؛

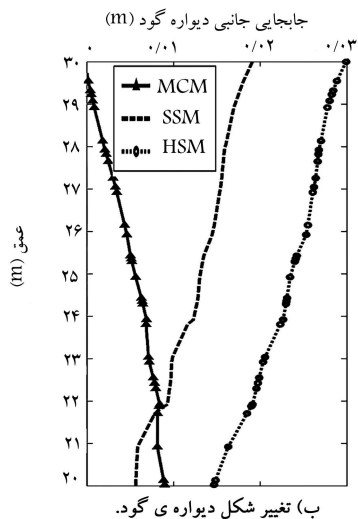
جایجایی کل $90/75 \times 10^{-3} \text{ m}$ (بزرگنمایی ۲۰ برابر)
 (الف) مدل سازی با مدل رفتاری موهر کولمب؛

جایجایی کل $77/96 \times 10^{-3} \text{ m}$ (بزرگنمایی ۲۰ برابر)
 (ج) مدل سازی با مدل رفتاری خاک سخت شونده.

شکل ۵. منحنی تغییر شکل یافته‌ی ناشی از گودبرداری در خاک رس سخت.

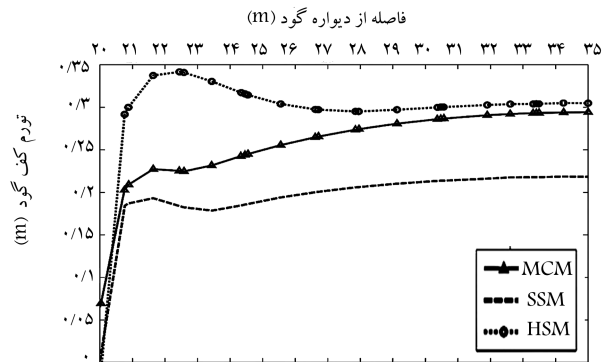


الف) تغییر شکل کف گود؛

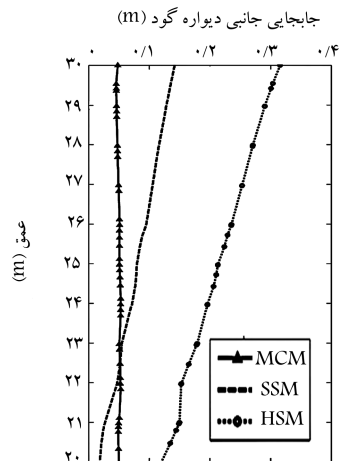


ب) تغییر شکل دیواره ی گود.

شکل ۶. مقایسه‌ی تغییر شکل ناشی از گودبرداری در خاک رس سخت با استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف.



الف) تغییر شکل کف گود؛



ب) تغییر شکل دیواره ی گود.

شکل ۴. مقایسه‌ی تغییر شکل ناشی از گودبرداری در خاک رس نرم با استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف.

و خاک نرم شونده، تغییر شکل قسمت فوقانی دیواره بیشتر از قسمت تحتانی است؛ ولی در مدل موهر - کولمب، تغییر شکل قسمت فوقانی و تحتانی دیواره تقریباً یکسان است.

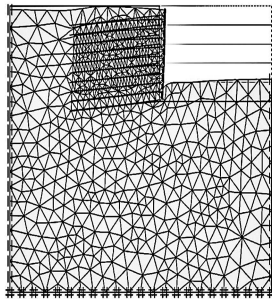
۳.۲. مدل سازی گود در خاک رسی سخت

در جدول ۴، پارامترهای مربوط به مدل‌های رفتاری مختلف جهت مدل سازی گودبرداری در خاک رسی سخت نشان داده شده است. منحنی تغییر شکل یافته‌ی مسئله، پس از مدل سازی و تحلیل در نرم افزار PLAXIS برای هر سه مدل رفتاری در نظر گرفته شده در شکل ۵ نشان داده شده است، که باز هم می‌توان مشاهده کرد که در مدل موهر - کولمب، تغییر شکل سطح زمین در مناطق نزدیک دیواره‌ی گود به صورت تورمی است. البته با مقایسه‌ی مقدار تورم در این حالت با خاک رسی نرم می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تورم پیش‌بینی شده سطح زمین در مدل موهر - کولمب با افزایش پارامترهای مقاومتی خاک رس افزایش می‌یابد.

نتایج تغییر شکل کف و دیواره‌ی گود با توجه به سه مدل رفتاری مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ الف مشاهده می‌شود که مقدار تورم کف گود در فواصل نزدیک به دیواره، بیشترین مقدار را در مدل خاک سخت شونده و کمترین مقدار را در مدل موهر - کولمب دارد، اما با افزایش فاصله از دیواره‌ی گود همانند خاک رس نرم، در اینجا نیز مشاهده می‌شود که در مدل خاک سخت شونده میزان

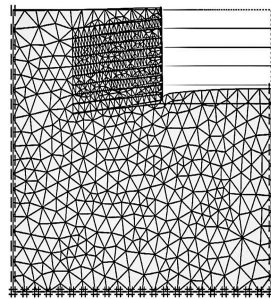
جدول ۴. پارامترهای مدل‌های رفتاری انتخاب شده برای رس سخت.

مدل خاک سخت‌شونده	رس سخت	مدل خاک نرم‌شونده	رس سخت	مدل موهر - کلمب	رس سخت
شرایط زهکشی شده		شرایط زهکشی شده		شرایط زهکشی شده	
γ_{Unsat} (KN/m ^۳)	۱۸	γ_{Unsat} (KN/m ^۳)	۱۸	γ_{Unsat} (KN/m ^۳)	۱۸
e_{init}	۰٫۵	e_{init}	۰٫۵	e_{init}	۰٫۵
e_{min}	۰	c_k	۱۰٫۱۵	c_k	۱۰٫۱۵
e_{max}	۹۹۹	λ^*	۰٫۰۳۸	E_{ref} (KN/m ^۲)	۴۵۰۰۰
c_k	۱۰٫۱۵	K^*	۰٫۰۰۹	ν	۰٫۳
$E_{\delta_0}^{ref}$ (KN/m ^۲)	۹۵۰۰	C (KN/m ^۲)	۱۱٫۵	G_{ref} (KN/m ^۲)	۱۷۳۰۷
E_{oed}^{ref} (KN/m ^۲)	۱۲۰۰۰	φ (°)	۲۸	E_{oed} (KN/m ^۲)	۶۰۵۷۶
m	۱	ψ (°)	۰	C_{ref} (KN/m ^۲)	۰٫۳
C_{ref} (KN/m ^۲)	۱۱٫۵	ν_{ur}	۰٫۲	φ (°)	۴۱
φ (°)	۲۸	$K_{\delta_0}^{nc}$	۰٫۵۳	ψ (°)	۱۴
ψ (°)	۰	R_{inter}	۱	E_{inc} (KN/m ^۲)	۰
E_{ur}^{ref} (KN/m ^۲)	۳۰۰۰۰			y_{ref} (m)	۰
$\nu_{ur}^{(nu)}$	۰٫۲			$C_{increment}$ (KN/m ^۲)	۰
P^{ref} (KN/m ^۲)	۱۰۰			T_{str} (KN/m ^۲)	۰
$C_{increment}$ (KN/m ^۲)	۰			R_{inter}	۱
y_{ref} (m)	۰				
R_f	۰٫۹				
T_{str} (KN/m ^۲)	۰				
R_{inter}	۱				
δ_{inter} (m)	۰				



جایجایی کل ۴۶/۵۱×۱۰^{-۳} m (بزرگنمایی ۵۰ برابر)

ب) مدل سازی با مدل رفتاری خاک سخت‌شونده.



جایجایی کل ۸۰/۸۶×۱۰^{-۳} m (بزرگنمایی ۲۰ برابر)

الف) مدل سازی با مدل رفتاری موهر کلمب؛

شکل ۷. مش تغییرشکل یافته‌ی ناشی از گودبرداری در خاک ماسه‌یی سست.

داده شده است. مش تغییرشکل یافته برای خاک مذکور، برای هر دو مدل رفتاری در شکل ۷ نشان داده شده است، که در آن، اندکی تورم در سطح زمین در نقاط نزدیک دیواره‌ی گود در مدل موهر - کولمب قابل رؤیت است. بنابراین می‌توان گفت که مدل موهر - کولمب برای هر دو خاک چسبنده و غیرچسبنده، تغییرشکل سطح زمین را در نقاط نزدیک به دیواره‌ی گود به شکل تورمی پیش‌بینی می‌کند.

در شکل ۸، تورم کف و تغییرشکل جانبی دیواره‌ی گود با توجه به دو مدل رفتاری موهر - کولمب و خاک سخت‌شونده نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸الف و مقایسه‌ی نتایج مشاهده می‌شود که مقدار تورم پیش‌بینی شده در کف گود با استفاده از مدل موهر - کولمب بیشتر از مدل خاک سخت‌شونده است. با بررسی شکل ۸ب

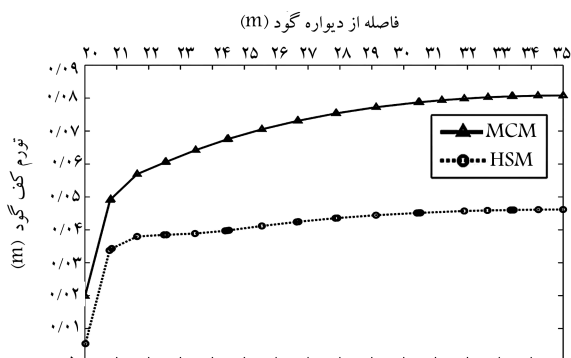
تورم خاک روندی تقریباً ثابت دارد، اما در دو حالت دیگر این روند به صورت افزایشی است. بنابراین مشاهده می‌شود که در فواصل دور از دیواره‌ی گود، تورم حاصل از مدل خاک نرم‌شونده بیشتر از دو مدل دیگر است و مدل خاک سخت‌شونده، کمترین مقادیر تورم کف گود را در این نقاط پیش‌بینی می‌کند. با دقت در شکل‌های ۴الف و ۶الف می‌توان مشاهده کرد که در هر سه مدل رفتاری در نقاط نزدیک به دیواره‌ی گود تورم کف گود، یک نقطه‌ی بیشینه دارند (در مدل خاک سخت‌شونده این نقطه واضح‌تر است)، که با افزایش سختی خاک رس از مقدار بیشینه‌ی مذکور کاسته شده است و رفتاری یکنواخت‌تر مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ب مشاهده می‌شود، در خاک رس سخت نیز همانند خاک رس نرم، مقدار جابه‌جایی جانبی دیواره در مدل رفتاری خاک سخت‌شونده بیشترین مقدار و در مدل رفتاری موهر - کولمب کمترین مقدار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور باز هم همانند آنچه در خاک رس نرم مشاهده می‌شود، در مدل‌های خاک سخت‌شونده و خاک نرم‌شونده، تغییرشکل قسمت فوقانی دیواره‌ی گود بیشتر از قسمت تحتانی آن بوده و در واقع تغییرشکل دیواره‌ی گود به صورت طریبی و در حال دورشدن از خاک پشت دیواره است، اما مدل موهر - کولمب، رفتاری کاملاً متفاوت از دو مدل دیگر دارد. در مدل مذکور تغییرشکل قسمت فوقانی دیواره کمتر از قسمت تحتانی آن است و مشاهده می‌شود که دیواره‌ی گود در قسمت فوقانی به سمت خاک پشت دیواره حرکت کرده است.

۴.۲. مدل سازی گود در خاک ماسه‌یی سست

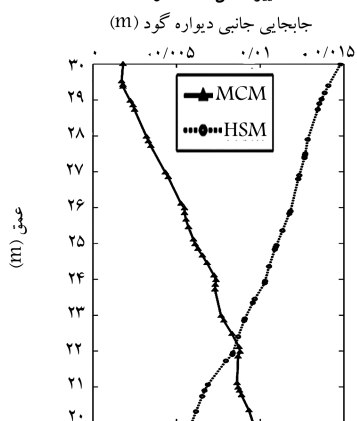
در جدول ۵، پارامترهای در نظر گرفته شده برای دو مدل رفتاری موهر - کولمب و خاک سخت‌شونده جهت مدل سازی گودبرداری در خاک ماسه‌یی سست نشان

جدول ۵. پارامترهای مدل‌های رفتاری انتخاب شده برای ماسه‌ی سست.

مدل خاک سخت شونده	ماسه‌ی سست	مدل موه‌ر - کولمب	ماسه‌ی سست
شرایط زهکشی شده		شرایط زهکشی شده	
γ_{Unsat} (KN/m ^۳)	۱۷	γ_{Unsat} (KN/m ^۳)	۱۷
e_{init}	۰٫۵	e_{init}	۰٫۵
e_{min}	۰	c_k	۱۰٫۱۵
e_{max}	۹۹۹	E_{ref} (KN/m ^۲)	۳۰۰۰۰
c_k	۱۰٫۱۵	ν	۰٫۳۳
$E_{\delta_c}^{ref}$ (KN/m ^۲)	۲۰۰۰۰	G_{ref} (KN/m ^۲)	۱۱۲۷۸
$E_{\delta_e}^{ref}$ (KN/m ^۲)	۱۶۰۰۰	E_{oed} (KN/m ^۲)	۴۴۴۴۹
m	۰٫۶۵	C_{ref} (KN/m ^۲)	۰٫۳
C_{ref} (KN/m ^۲)	۰٫۳	φ (°)	۳۴
φ (°)	۳۴	ψ (°)	۰
ψ (°)	۰	E_{inc} (KN/m ^۲)	۰
E_{ur}^{ref} (KN/m ^۲)	۶۰۰۰۰	y_{ref} (m)	۰
$\nu_{ur}^{(nu)}$	۰٫۲	$C_{increment}$ (KN/m ^۲)	۰
P^{ref} (KN/m ^۲)	۱۰۰	T_{str} (KN/m ^۲)	۰
$C_{increment}$ (KN/m ^۲)	۰	R_{inter}	۱
y_{ref} (m)	۰		
R_f	۰٫۹		
T_{str} (KN/m ^۲)	۰		
R_{inter}	۱		
δ_{inter} (m)	۰		



الف) تغییر شکل کف گود؛



ب) تغییر شکل دیواره‌ی گود.

شکل ۸. مقایسه‌ی تغییر شکل ناشی از گودبرداری در خاک ماسه‌ی سست با استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف.

مشاهده می‌شود که دیواره‌ی گود در دو مدل خاک سخت‌شونده و موه‌ر - کولمب روند جابه‌جایی کاملاً متفاوتی دارد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، جابه‌جایی جانبی دیواره‌ی گود در مدل خاک سخت‌شونده همانند آنچه در خاک‌های رسی مشاهده شده است، در حال دورشدن از خاک پشت دیواره است، که میزان دورشدن در قسمت‌های فوقانی بیشتر از قسمت‌های تحتانی دیواره است. اما در مدل موه‌ر - کولمب دورشدن دیواره از خاک پشت به صورتی است که تغییر شکل قسمت فوقانی دیواره کمتر از قسمت تحتانی آن است.

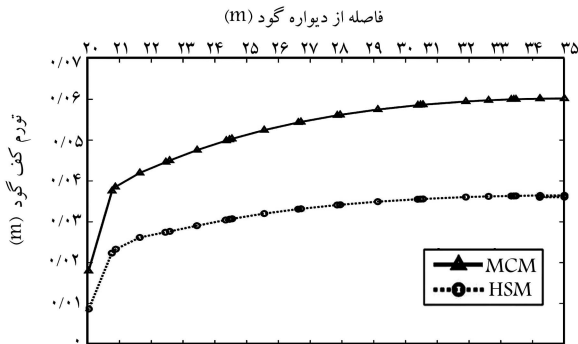
۵.۲. مدل‌سازی گود در خاک ماسه‌ی متراکم

پارامترهای در نظر گرفته شده برای دو مدل رفتاری موه‌ر - کولمب و خاک سخت‌شونده جهت مدل‌سازی گودبرداری در خاک ماسه‌ی متراکم در جدول ۶ نشان داده شده است. برای این نوع خاک نیز مش تغییر شکل یافته‌ی مسئله برای هر دو مدل رفتاری در نظر گرفته شده در شکل ۹ نشان داده شده است، که با توجه به شکل مذکور، بازم توهم سطح زمین در نقاط نزدیک دیواره‌ی گود در مدل موه‌ر - کولمب قابل رؤیت است، که مقدار آن بیشتر از توهم مشاهده شده در خاک ماسه‌ی سست است.

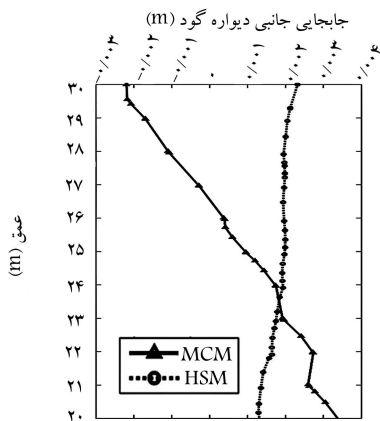
میزان توهم کف گود و جابه‌جایی افقی دیواره‌ی گود مدل‌سازی شده در خاک ماسه‌ی متراکم، برای مدل‌های رفتاری موه‌ر - کولمب و خاک سخت‌شونده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ الف و مقایسه‌ی نتایج مشاهده می‌شود که مقدار توهم پیش‌بینی شده در کف گود با استفاده از مدل موه‌ر - کولمب بیشتر از مدل خاک سخت‌شونده است. با بررسی شکل ۱۰ ب مشاهده می‌شود که در این نوع خاک هم رفتار دیواره‌ی گود در دو مدل خاک سخت‌شونده و موه‌ر - کولمب

جدول ۶. پارامترهای مدل‌های رفتاری انتخاب شده برای ماسه‌ی متراکم.

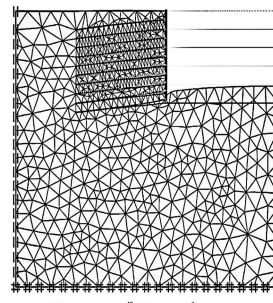
مدل خاک سخت شونده	ماسه‌ی سست	مدل موهر - کلمب	ماسه‌ی سست
شرایط زهکشی شده		شرایط زهکشی شده	
γ_{Unsat} (KN/m ^۳)	۱۸	γ_{Unsat} (KN/m ^۳)	۱۸
e_{init}	۰٫۵	e_{init}	۰٫۵
e_{min}	۰	c_k	۱۰٫۱۵
e_{max}	۹۹۹	E_{ref} (KN/m ^۲)	۴۵۰۰۰
c_k	۱۰٫۱۵	ν	۰٫۳
$E_{\delta_0}^{ref}$ (KN/m ^۲)	۳۷۰۰۰	G_{ref} (KN/m ^۲)	۱۷۳۰۷
E_{oed}^{ref} (KN/m ^۲)	۲۹۶۰۰	E_{oed} (KN/m ^۲)	۶۰۵۷۶
m	۰٫۵	C_{ref} (KN/m ^۲)	۰٫۳
C_{ref} (KN/m ^۲)	۰٫۳	φ (°)	۴۱
φ (°)	۴۱	ψ (°)	۱۴
ψ (°)	۱۴	E_{inc} (KN/m ^۲)	۰
E_{ur}^{ref} (KN/m ^۲)	۹۰۰۰۰	y_{ref} (m)	۰
$\nu_{ur}^{(nu)}$	۰٫۲	$C_{increment}$ (KN/m ^۲)	۰
P^{ref} (KN/m ^۲)	۱۰۰	T_{str} (KN/m ^۲)	۰
$C_{increment}$ (KN/m ^۲)	۰	R_{inter}	۱
y_{ref} (m)	۰		
R_f	۰٫۹		
T_{str} (KN/m ^۲)	۰		
R_{inter}	۱		
δ_{inter} (m)	۰		



الف) تغییر شکل کف گود؛

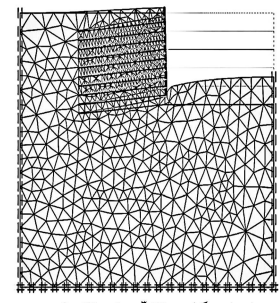


ب) تغییر شکل دیواره ی گود.



جایجایی کل ۳۶/۶۹ × ۱۰^{-۲} m (بزرگنمایی ۵۰ برابر)

ب) مدل سازی با مدل رفتاری خاک سخت شونده.



جایجایی کل ۶۰/۳۸ × ۱۰^{-۲} m (بزرگنمایی ۵۰ برابر)

الف) مدل سازی با مدل رفتاری موهر کلمب؛

شکل ۹. مش تغییرشکل یافته‌ی ناشی از گودبرداری در خاک ماسه‌ی متراکم.

متفاوت است. مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که جابه‌جایی جانبی دیواره‌ی گود در مدل خاک سخت‌شونده همانند آنچه در خاک‌های قبلی مشاهده شده است، در حال دورشدن از خاک پشت دیواره بوده و میزان دورشدن در قسمت‌های فوقانی بیشتر از قسمت‌های تحتانی دیواره است. اما در مدل موهر-کولمب، قسمت فوقانی دیواره کاملاً به سمت خاک پشت حرکت کرده و قسمت تحتانی دیواره از خاک پشت دور شده است.

۳. نتیجه‌گیری

شکل ۱۰. مقایسه‌ی تغییرشکل ناشی از گودبرداری در خاک رس ماسه‌ی متراکم با استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف.

در پژوهش حاضر، گودبرداری در دو نوع خاک رس نرم و سخت با استفاده از

فوقانی دیوار نشان می‌دهند و روند تغییرشکل دیوار با در نظر گرفتن دو مدل مذکور کاملاً متفاوت است. با مشاهده نتایج مدل‌سازی در خاک‌های ماسه‌یی سست و متراکم مشاهده می‌شود که میزان تورم کف گود در مدل موه‌ر- کولمب بیشتر از مدل خاک سخت‌شونده است. در خاک رس نرم، بیشترین میزان تورم کف گود در مدل خاک سخت‌شونده و کمترین میزان تورم در مدل خاک نرم‌شونده مشاهده می‌شود؛ اما در خاک رس سخت و در فواصل نزدیک به دیواره‌ی گود، بیشترین و کمترین تورم به ترتیب در مدل‌های خاک سخت‌شونده و موه‌ر- کولمب مشاهده می‌شود و با فاصله‌گرفتن از دیواره، مدل‌های خاک نرم‌شونده و خاک سخت‌شونده به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تورم کف گود را نشان می‌دهند.

سه مدل رفتاری موه‌ر- کولمب، خاک سخت‌شونده، و خاک نرم‌شونده و در دو نوع خاک ماسه‌یی سست و متراکم با استفاده از دو مدل رفتاری موه‌ر- کولمب و خاک سخت‌شونده با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS مدل‌سازی شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه‌ی حاضر می‌توان گفت مدل موه‌ر- کولمب، تغییرشکل سطح زمین در انواع مختلف خاک‌ها را در نقاط نزدیک دیواره‌ی گود به‌صورت تورمی پیش‌بینی می‌کند، که با افزایش پارامترهای مقاومتی خاک میزان تورم در این نقاط افزایش می‌یابد. در مورد تغییرشکل جانبی دیواره‌ی گود مشاهده شده است که در هر چهار نوع خاک در نظر گرفته‌شده، مدل خاک سخت‌شونده بیشترین میزان تغییرشکل جانبی و مدل موه‌ر- کولمب، کمترین میزان تغییرشکل جانبی را در قسمت

پانویس‌ها

1. Mohr-Coulomb
2. finite element method (FEM)
3. constitutive model
4. softening soil
5. hardening soil
6. Geogrid
7. facing

منابع (References)

1. Burland, J.B. "Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains", *Canadian Geotechnical Journal*, **26**(4), pp. 499-516 (1989).
2. Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B. and Burland, J.B. "Studies of the influence of nonlinear stress-strain characteristics in soil-structure interaction", *Géotechnique*, **36**(3), pp. 377-396 (1986).
3. Benz, T. "Small-strain stiffness of soil and its numerical consequences," PhD Thesis, University of Stuttgart (2007).
4. Osman, A.S. and Bolton, M.D. "Ground movement predictions for braced excavations in undrained clay", *Jour-*

- nal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(4), pp. 465-477 (2006).
5. Kung, G.T.-C., Ou, C.-Y. and Juang C.H. "Modeling small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavations", *Computer and Geotechnic*, **36**(1-2), pp. 304-419 (2009).
6. Mana, A.I. and Clough, G.W. "Prediction of movement for braced cuts in clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **107**(GT6), pp. 759-770 (1981).
7. Wong, K.S. and Broms, B.B. "Lateral wall deflections of braced excavation in clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, **115**(6), pp. 853-870 (2008).
8. Clough, G.W. and Rourke, T.D. "Construction induced movements of in situ walls", Part of Design and Performance of Earth Retaining Structures, *ASCE Special Conference*, Ithaca, New York, pp. 439-470 (1990).
9. Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E. and Balasubramaniam, A. "Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT", *Soils and Foundations*, **53**(5), pp. 756-773 (2013).
10. Singh, V.P. and Babu, G.L.S. "2D numerical simulations of soil nail walls", *Geotechnical Geological Engineering*, **28**(4), pp. 299-309 (2010).