بررسی اثر پله دادن در پایدارسازی گود به روش میخ‌کوبی با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری مختلف

جهانگیر خزایی
استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
پست الکترونیک:
j.khazaie@razi.ac.ir

میرهادی میرنقی‌زاده*
دانشجوی دکتری خاک و پی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
پست الکترونیک:
mirnaghizadeh.mirhadi@stu.razi.ac.ir

پایدارسازی گود به روش میخ‌کوبی یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های گودبرداری در مناطق شهری است. در این روش، استفاده از یک تا دو پله، باعث کاهش تغییرشکل‌ها، افزایش ضریب اطمینان و عملکرد مناسب دیواره گود می‌گردد. در مطالعه حاضر، به بررسی اثر پله دادن در پایدارسازی گود به روش میخ‌کوبی با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری خاک موهرکولمب، HS و HSsmall با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پرداخته شده است. همچنین در این تحقیق، میزان تأثیر استفاده از روش ترکیب میخ‌کوبی با پلکانی در کاهش تغییرشکل‌ها و افزایش ضریب اطمینان، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که با استفاده از یک یا دو پله در دیوار میخ‌کوبی نسبت به دیوار قائم میخ‌کوبی شده با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری مختلف، تغییرشکل‌های حداکثر افقی و قائم و تغییرشکل‌های افقی لبه‌ی بالای گود، بشدت کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده شد که استفاده از یک یا دو پله در دیوار میخ‌کوبی شده صرف‌نظر از مدل رفتاری، باعث افزایش ضریب اطمینان به یک نسبت می‌شود.

واژگان کلیدی: گودبرداری، روش میخ‌کوبی پلکانی، موهرکولمب، HS، HSsmall.

۱- مقدمه

عملکرد دیوار میخ‌کوبی شده خاک، به‌میزان زیادی تحت تأثیر اندرکنش پیچیده دوطرفه بین اجزای اصلی شامل خاک، تقویت کننده (میخ) و سطح دیوار است. به‌علاوه، عوامل مختلف دیگر مانند توالی عملیات ساخت، روش نصب میخ، اتصال بین میخ و سطح گودبرداری و همچنین شیب میخ در رفتار دیوار میخ‌کوبی خاک، مؤثر می‌باشد. برای مطالعه اندرکنش پیچیده خاک- سازه و ارزیابی عملکرد دیوارهای میخ‌کوبی خاک، اغلب شبیه‌سازی عددی با استفاده از کد محاسباتی دقیق براساس تکنیک‌های عددی مانند روش المان محدود (اسمیت و سو[1] ۱۹۹۷، ژانگ[2] و همکاران ۱۹۹۹ و فن و لو[3] ۲۰۰۸) [۱- ۳]، روش المان گسسته (به‌عنوان مثال، کیم[4] و همکاران ۱۹۹۷) و روش تفاضل محدود (بابو[5] و همکاران ۲۰۰۲) [۴ و ۵] انجام شده است. دقت شبیه‌سازی عددی به‌طور قابل‌توجهی به مدل خاک استفاده شده (برینکرو[6] و همکاران ۲۰۰۶) [۶] و انتخاب پارامترهای مدل مربوطه مناسب (کالولو و فینو[7] ۲۰۰۴) [۷] بستگی دارد.

مدل موهر- کولمب[8]، اولین مدل خاک انتخاب شده در این پژوهش، بیشتر در شبیه‌سازی عددی در برنامه‌های

[1]- Smith and Su
[2]- Zhang
[3]- Fan and Luo
[4]- Kim
[5]- Babu
[6]- Brinkgreve
[7]- Calvello and Finno
[8]- Mohr-Coulomb model

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۰۳، بازنگری ۱۳۹۶/۰۲/۱۹، پذیرش ۱۳۹۶/۰۴/۱۲.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2017.554.1027

کاربردی میخ‌کوبی خاک استفاده شده است [۱- ۵]. از طرفی، معیار عملکرد دراکر- پراگر (ان‌جی و لی[9] ۲۰۰۲) [۸] و مدل خاک سخت شونده (لیو و خو[10] ۲۰۰۶) [۹] نیز برای شبیه‌سازی رفتار خاک در مدل‌سازی عددی دیوار میخ‌کوبی شده در خاک به‌کار برده شده است. همچنین، بنز[11] (۲۰۰۷) مدل توسعه یافته برای سختی در کرنش‌های کوچک خاک (HSsmall[12]) را در مدل‌سازی عددی استفاده نموده است [۱۰].

در برخی مواقع، تحقیقات پیچیده ژئوتکنیک نیاز به انتخاب سنجیده‌تر و دقیق‌تری از پارامترهای مدل دارند. براین‌اساس، استفاده از مدل‌های پیشرفته خاک، پاسخی واقعی‌تر از ساختارهای شبیه‌سازی شده ارائه می‌دهند؛ اما از طرفی دیگر، ممکن است زمان و ظرفیت ماشین محاسباتی بیشتری مورد نیاز باشد. در مطالعه حاضر، مدل‌های پیشرفته خاک یعنی مدل خاک سخت شونده (HS[13])، مدل سخت شونده در کرنش‌های کوچک و مدل موهر- کولمب که بیشتر مورد توجه محققین جهت ارزیابی‌های مدل‌سازی عددی دیوار میخ‌کوبی در خاک می‌باشند؛ استفاده شده است [۱۱]. روش دیوار میخ‌کوبی قائم توسط پژوهشگران متعددی مطالعه شده است که از جمله این تحقیقات می‌توان به مراجع [۱۱- ۱۵] اشاره کرد؛ اما تأثیر ترکیب میخ‌کوبی در خاک با روش پلکانی در تغییرشکل‌ها و پایداری گود بررسی نشده است. بنابراین، هدف و نوآوری این مطالعه، بررسی میزان کمّی تأثیر ترکیب روش پلکانی با میخ‌کوبی در تغییرشکل‌ها و پایداری می‌باشد.

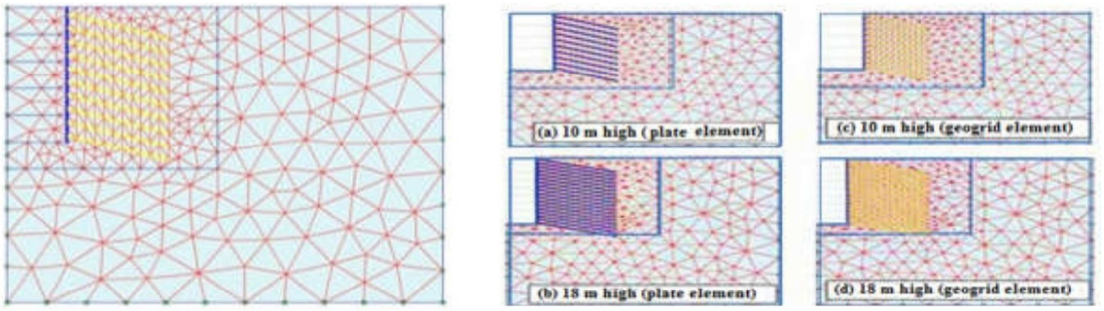
۲- مدل‌سازی عددی

در تحلیل عددی برای هر مسأله ژئوتکنیکی، مراحل مشخصی وجود دارد که رعایت آنها در تحلیل ضروری است. این مراحل در تمامی نرم‌افزارهایی که با روش‌های عددی در حل مسائل ژئوتکنیکی به‌کار گرفته می‌شوند، از جمله نرم‌افزار پلکسیس[14]، دارای اصول مشابهی می‌باشند که عبارتند از: تعریف هندسه مسأله، اعمال شرایط مرزی، مش‌بندی و حل مسأله [۱۶]. در مطالعه حاضر، کلیه‌ی مدل‌سازی‌ها با نرم‌افزار المان محدود پلکسیس دوبعدی انجام شده است.

عدد ضریب ایمنی می‌تواند اطمینان خاطر قابل‌توجهی برای مهندسان در کارهای اجرایی ایجاد کند. در اینجا از برنامه اجزای محدود غیرخطی پلکسیس برای محاسبه ضریب ایمنی و تغییرشکل‌ها استفاده شد. این برنامه، قابلیت‌های چشمگیری دارد؛ به‌طوری‌که می‌تواند رفتار اندرکنش بین خاک- مسلح کننده را وارد محاسبات خود کرده و همچنین قادر است ضریب ایمنی را ارائه کند تا بتوان مدل‌های مختلف را از نظر پایداری با یکدیگر مقایسه کرد [۱۷].

برای تعیین صحت انجام محاسبات، یک مدل (ارتفاع گود ۱۰ متر و میخ‌ها از المان ژئوگریدی) از مدل بابو و سینگ[15] انتخاب و مدل‌سازی شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. پارامترهای به‌کار رفته در مدل‌سازی عددی نیز در جدول ۱ ارائه شده است [۱۴]. سپس نتایج برنامه با مدل اصلی مقایسه شد. در این بررسی، خروجی‌های برنامه همخوانی قابل قبولی با نتایج به‌دست آمده حاصل از مدل اصلی داشتند که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان از خروجی‌های برنامه به‌عنوان اعداد معتبری استفاده کرد. در این مطالعه، یک گود با ارتفاع ثابت ۱۰ متر با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پلکسیس مدل‌سازی شده است.

[9]- Ng and Lee
[10]- Liew and Khoo
[11]- Benz
[12]- Hardening Soil Small Strain model
[13]- Hardening Soil model
[14]- Plaxis Software
[15]- Babu and Singh



(الف) (ب)

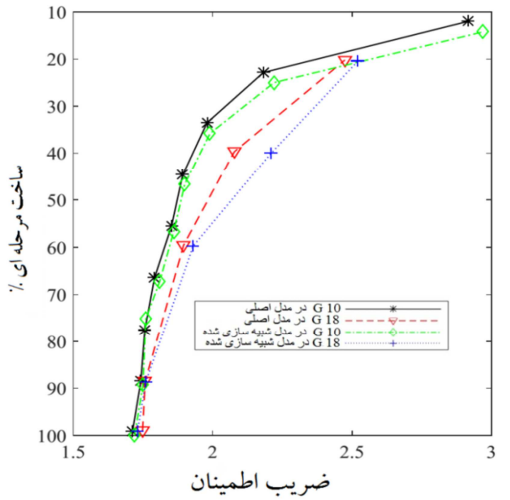
شکل ۱- (الف) مدل عددی انجام شده در مرجع [۱۴] و (ب) نتیجه صحت‌سنجی مدل(C).

جدول ۱- پارامترهای به‌کار رفته در مدل‌سازی عددی مرجع [۱۴].

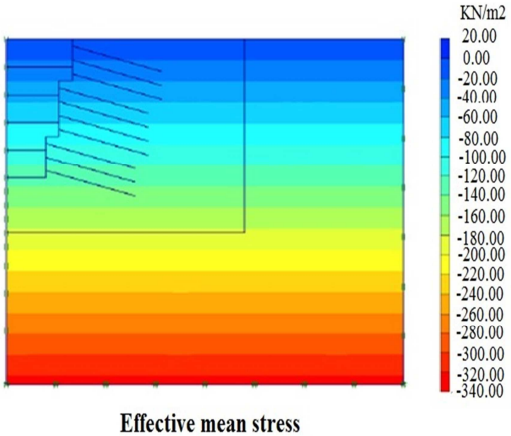
پارامتر	مقدار
مدل شبیه‌سازی شده	کرنش صفحه‌ای
مشخصات درجای خاک و رخپوش شاتکریتی و میخ	
مدل خاک	موهرکولمب
ضریب چسبندگی c (کیلوپاسکال)	۴
ضریب اصطکاک φ (درجه)	۳۱/۵
وزن مخصوص γ (کیلونیوتن/مترمکعب)	۱۷
مدول الاستیسیته خاک E_s (مگاپاسکال)	۲۰
ضریب پواسون خاک ν	۰/۳
مدل مصالح	الاستیک
مقاومت تسلیم تقویتی f_y (مگاپاسکال)	۴۱۵
مدول الاستیسیته تقویتی E_n (گیگاپاسکال)	۲۰۰
مدول الاستیسیته گروت E_g (بتن)	۲۲
قطر تقویتی d (میلیمتر)	۲۰
قطر سوراخ حفاری D_{DH} (میلیمتر)	۱۰۰
طول میخ L (متر)	۷
زاویه شیب میخ t (درجه)	۱۵
فواصل Sv*Sh (متر)	۱*۱
ضخامت رخپوش شاتکریتی (میلیمتر)	۲۰

۳- بحث و بررسی نتایج

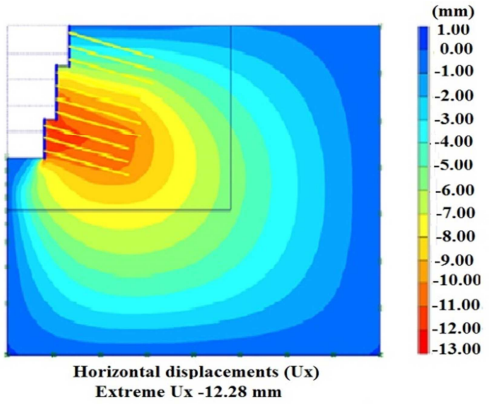
در شکل ۳، بررسی اثر پله دادن در پایدارسازی گود به روش میخ‌کوبی و ارزیابی تنش مؤثر اولیه با در نظر گرفتن دو پله در دیوار میخ‌کوبی شده در خاک نشان داده شده است. همچنین تصویر شماتیک تغییرشکل‌های افقی دیوار میخ‌کوبی شده در خاک در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۲- مقایسه نتایج مرجع [۱۴] با مدل شبیه‌سازی شده.



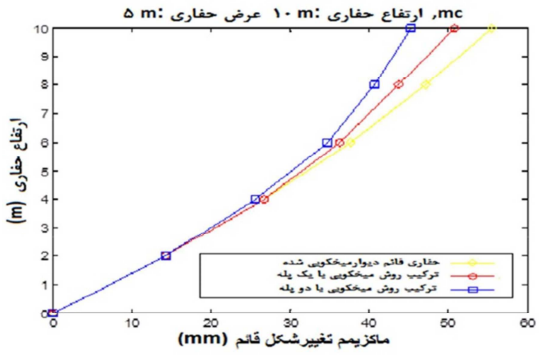
شکل ۳- تنش مؤثر اولیه با در نظر گرفتن دو پله در دیوار میخ‌کوبی شده در خاک.



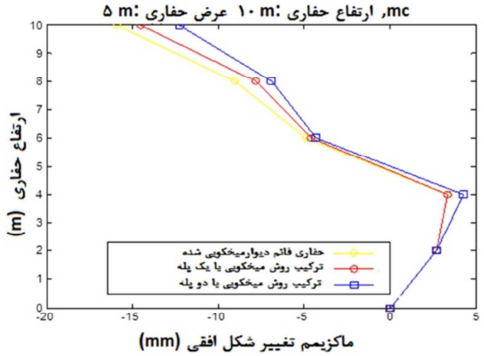
شکل ۴- شکل شماتیک تغییرشکل‌های افقی دیوار با در نظر گرفتن دو پله در دیوار میخکوبی شده در خاک.

تغییرشکل قائم حداکثر در گود با دیوار قائم و استفاده از پله در همه حالات در کف گود و به‌صورت تورم (رو به بالا) اتفاق می‌افتد. تغییرشکل‌های ماکزیمم دیوار میخ‌کوبی و تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود میخ‌کوبی شده با مدل خاک موهرکولمب به‌ترتیب در اشکال ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

در عمل، استفاده از یک تا دو پله در عملیات گودبرداری با توجه به محدودیت‌های موجود مخصوصا در محدوده‌های شهری بسیار متداول می‌باشد. همانطور که از اشکال ۵ و ۶ مشاهده می‌شود استفاده از یک پله با در نظر گرفتن مدل خاک موهرکولمب باعث کاهش تغییرشکل حداکثر افقی و قائم دیواره گود میخ‌کوبی شده به‌ترتیب تا حدود ۱۳٪ و ۷٪ و باعث کاهش تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود تا حدود ۷۵٪ می‌شود.

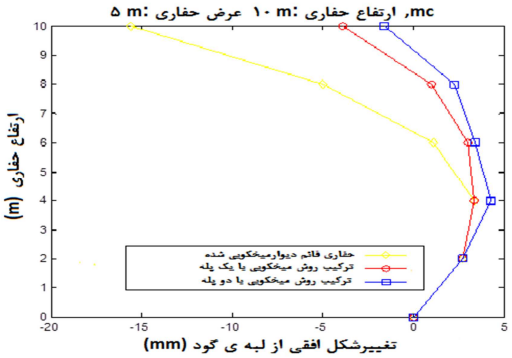


(ب)



(الف)

شکل ۵- تغییرشکل‌های حداکثر دیوار میخ‌کوبی شده با مدل خاک موهرکولمب. (الف) افقی و (ب) قائم.

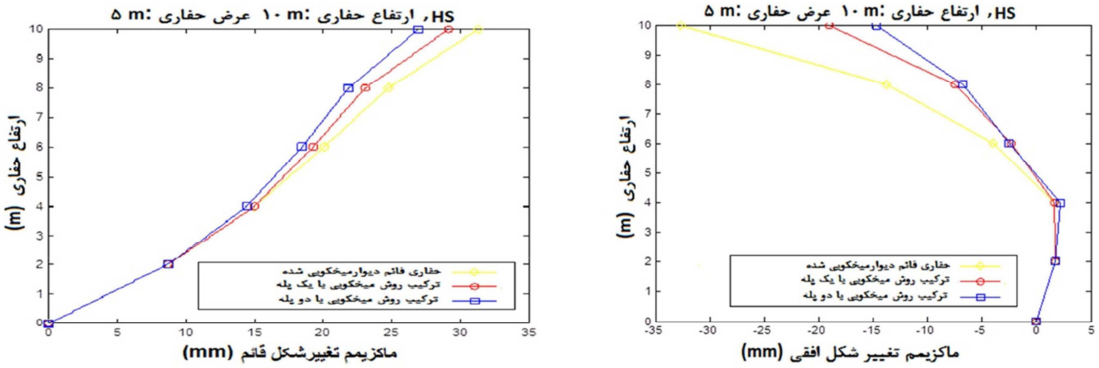


شکل ۶- تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود میخ‌کوبی شده با مدل خاک موهرکولمب.

این در حالی است که استفاده از دو پله با در نظر گرفتن مدل خاک موهرکولمب باعث کاهش تغییرشکل ماکزیمم افقی و قائم دیواره گود میخ‌کوبی شده به‌ترتیب تا حدود ۲۰٪ و ۱۶٪ و باعث کاهش تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود تا حدود ۸۸٪ می‌شود.

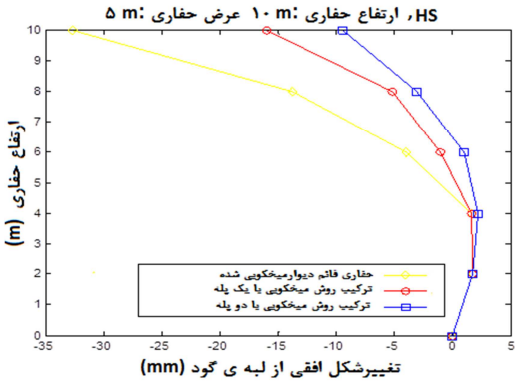
تغییرشکل‌های حداکثر دیوار میخ‌کوبی و تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود میخ‌کوبی شده با مدل خاک HS به‌ترتیب در اشکال ۷ و ۸ به تصویر کشیده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در صورت استفاده از یک پله با در نظر گرفتن مدل خاک HS تغییرشکل ماکزیمم افقی و قائم دیواره گود میخ‌کوبی شده به‌ترتیب تا حدود ۴۱ و ۸ درصد و تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود تا حدود ۵۱٪ کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن مدل خاک HS و استفاده از دو پله نیز باعث کاهش تغییرشکل حداکثر افقی و قائم دیواره گود میخ‌کوبی شده به‌ترتیب تا حدود ۵۴٪ و ۱۴٪ و

کاهش تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود تا حدود ۷۰٪ می‌شود.



(الف) (ب)

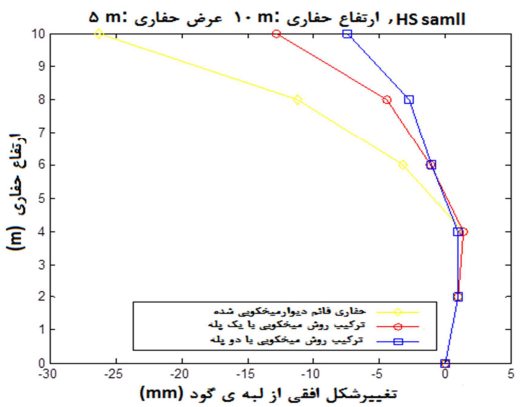
شکل ۷- تغییرشکل‌های حداکثر دیوار میخ‌کوبی شده با مدل خاک HS. (الف) افقی و (ب) قائم.



شکل ۸- تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود میخ‌کوبی شده با مدل خاک HS.

تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود میخ‌کوبی شده با مدل خاک و تغییرشکل‌های ماکزیمم دیوار میخ‌کوبی HSsmall به‌ترتیب در اشکال ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود استفاده از یک پله با در نظر گرفتن مدل خاک HSsmall باعث کاهش تغییرشکل ماکزیمم افقی و قائم دیواره گود میخ‌کوبی شده به‌ترتیب تا حدود ۴۸ و ۱۰ درصد و کاهش حدود ۵۳ درصدی تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود می‌شود. همچنین استفاده از دو پله با در نظر گرفتن مدل خاک HSsmall تغییرشکل ماکزیمم افقی و قائم دیواره گود میخ‌کوبی شده به‌ترتیب تا حدود ۵۷٪ و ۱۶٪ و نیز تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود تا حدود ۷۴٪ کاهش پیدا می‌کند.

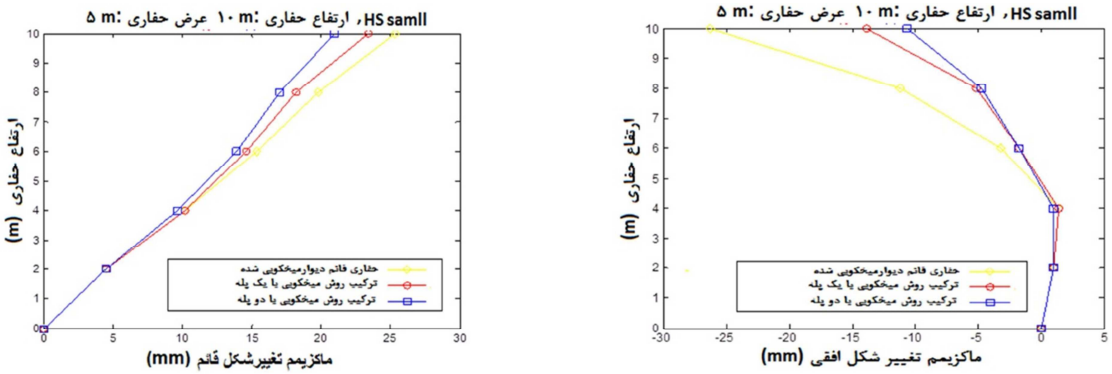
در جدول ۲ ضرایب اطمینان محاسبه شده در حالات مختلف ارائه شده است. با توجه به جدول، ملاحظه می‌شود با استفاده از یک و دو پله در دیوار میخ‌کوبی شده ضریب اطمینان نیز با تمام مدل‌های رفتاری در نظر گرفته شده به یک نسبت افزایش می‌یابد.



شکل ۹- تغییرشکل افقی لبه‌ی بالای گود میخ‌کوبی شده با مدل خاک HSsmall.

۴- نتیجه‌گیری

در عمل استفاده از یک تا دو پله در عملیات گودبرداری با توجه به محدودیت‌های موجود مخصوصا در محدوده‌های شهری بسیار متداول می‌باشد. این در حالی است که مطالعات زیادی بر روی ترکیب این روش با میخ‌کوبی در مقدار کمّی تأثیر آن در ضریب اطمینان و تغییرشکل‌ها انجام نگرفته است.



شکل ۱۰- تغییرشکل‌های ماکزیمم دیوار میخ‌کوبی شده با مدل خاک HSsmall. (الف) افقی و (ب) قائم.

جدول ۲- ضرایب اطمینان محاسبه شده در حالات مختلف.

	استفاده از مدل موهرکولمب	استفاده از مدل HS	استفاده از مدل HSsmall
	ضریب اطمینان		
دیوار قائم میخ‌کوبی شده	۱/۴۷	۱/۴۷	۱/۴۷
استفاده از یک پله در دیواره گود میخ‌کوبی شده	۱/۵۷	۱/۵۷	۱/۵۷
استفاده از دو پله در دیواره گود میخ‌کوبی شده	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۶

استفاده از یک تا دو پله ضمن آنکه در محدوده شهری علیرغم محدودیت‌های فضا امکان‌پذیر است و باعث کاهش قابل‌توجهی (بیش از ۴۸٪) در تغییرشکل‌ها و افزایش ضریب اطمینان گود به روش میخ‌کوبی می‌شود که استفاده از این تکنیک نسبتا جدید را توجیه می‌کند. بیشترین کاهش تغییرشکل ماکزیمم افقی و قائم دیواره گود میخ‌کوبی شده با در نظر گرفتن مدل رفتاری خاک HSsmall نسبت به دو مدل دیگر مورد بررسی، اتفاق افتاده که با استفاده از یک پله به ترتیب تا حدود ۴۸٪ و ۱۰٪ و با استفاده از دو پله شده به ترتیب تا حدود ۵۷٪ و ۱۶٪ می‌باشد. از طرفی براساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین کاهش تغییرشکل ماکزیمم افقی لبه‌ی بالای گود با در نظر گرفتن مدل رفتاری خاک موهرکولمب نسبت به دو مدل دیگر مورد بررسی، رخ داده که با استفاده از یک پله ۵۳٪ و با استفاده از دو پله حدود ۷۴٪ می‌باشد. همچنین مشاهده شد که با استفاده از یک و دو پله در دیوار میخ‌کوبی شده، ضریب اطمینان نیز با تمام مدل‌های رفتاری در نظر گرفته شده به یک نسبت افزایش پیدا می‌کند.

مراجع

[1] Smith, I. M., & Su, N. (1997). “Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, *21*(9), 583-597.
[2] Zhang, M., Song, E., & Chen, Z. (1999). “Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)”, *Computers and Geotechnics*, *25*(4), 191-204.

[3] Fan, C. C., & Luo, J. H. (2008). “Numerical study on the optimum layout of soil–nailed slopes”, *Computers and Geotechnics*, *35*(4), 585-599.
[4] Kim, J. S., Kim, J. Y., & Lee, S. R. (1997). “Analysis of soil nailed earth slope by discrete element method”, *Computers and Geotechnics*, *20*(1), 1-14.
[5] Sivakumar Babu, G. L., Srinivasa Murthy, B. R., & Srinivas, A. (2002). “Analysis of construction factors influencing the behaviour of soil-nailed earth retaining walls”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, *6*(3), 137-143.
[6] Brinkgreve, R. B. J., Bakker, K. J., & Bonnier, P. G. (2006). “The relevance of small-strain soil stiffness in numerical simulation of excavation and tunneling projects”, In *Proceedings of 6th European Conference in Geotechnical Engineering, Graz, Austria*, 133-139.
[7] Calvello, M., & Finno, R. J. (2004). “Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis”, *Computers and Geotechnics*, *31*(5), 410-424.
[8] Ng, C. W. W., & Lee, G. T. K. (2002). “A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces”, *Computers and Geotechnics*, *29*(8), 673-697.
[9] Liew, S. S., & Khoo, C. M. (2006, May). “Design and construction of soil nail strengthening work over uncontrolled fill for a 14.5 m deep excavation”, In *10th International Conference on Piling and Deep Foundations*, *31*.
[10] Benz, T. (2007). Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik.
[11] Singh, V. P., & Babu, G. S. (2010). “2D numerical simulations of soil nail walls”, *Geotechnical and Geological Engineering*, *28*(4), 299-309.
[12] Ghareh, S. (2015). “Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils”, *Measurement*, *73*, 341-351.
[13] Menkiti, C. O., Long, M., Milligan, G. W. E., & Higgins, P. (2014). “Soil nailing in Dublin boulder clay”, *Geotechnical and Geological Engineering*, *32*(6), 1427-1438.
[14] Babu, G. S., & Singh, V. P. (2009). “Simulation of soil nail structures using PLAXIS 2D”, *Plaxis Bulletin Spring issue*, 16-21.
[15] Soil nail walls. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Bridge Technology, (2003).
[16] Sadeghi, J., & Shourmasti, H. H. (2015). “Tehran Subway Tunnel Settlement Analysis by Using Analytical, Experimental and Numerical Methods (Case Study: Station of Imam Ali University) ”, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, *4*(5), 325-328.
[17] Vermeer, P. A. (Ed.). (1998). Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses:[user's Guide]. AA Balkema.

The Effect on the Stabilization Excavation Stairs by Nailing with Regard to Various Behavioral Models

J. Khazaie

Assistant Professor, Geotechnical Engineering, Department of Engineering, Razi University.

e-mail: j.khazaie@razi.ac.ir

M. Mirnaghizadeh[*]

Ph.D Student, Geotechnical Engineering, Department of Engineering, Razi University.

e-mail: mirnaghizadeh.mirhadi@stu.razi.ac.ir

Excavation stabilization by soil nailing is one of the oldest and most common methods of excavation in urban areas that uses one to two steps causing reduces deformation, increases the safety factor and suitable performance of the excavation wall. The present study investigated The effect on the stairs excavation stabilization by nailing considering behavioral models Mohr-Coulomb soil and HS and HSsmal to finite element software is discussed. Among the effects that have been considered in this study the effect of the method of nailing combined with steps to reduce deformation and increase safety factory. Using one or two stairs in to the nailing vertical wall with regard to behavioral models Mohr Coulomb and HS and HSsmall soil maximum of horizontal and vertical deformations of the top edge of the excavation is severely reduced also it uses a two-stairs soil nailing safety factor in the wall, with all models of behavior is considered to increase the equality.

Keywords: Excavation, Stairs nailing method, MC, HS, HS small.

[*] Corresponding author