

Comparison of Nail Axial Force, Deformation and Failure Surfaces in Sand and Clay Soils with Considering Corner Effect

Jahangir Khazaei^{1*}, Ali Ghahramani²

1- Assistant Professor, Civil Eng department. Razi university, Kermanshah, Iran

2- MSc of Geotechnic, Civil Eng department. Razi university, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Investigation and evaluation of damages to surrounding structures and also estimation of rupture levels by considering the amount of deformations and the amount of adjacent gates are important issues in the nailing system in urban areas. In this research, we tried to evaluate the axial force of the nails and the deformation in concave and convex dams; in sandy and clay soils. In this regard, numerical modeling is carried out using the Abaqus CAE software in the soil environment and parametric studies are carried out for different corner angles in the excavation under the service load. The results of this study indicate the effect of concave cortical deterioration and the damaging effect of the convex corners, which is in contrast to the concave hedge, in gondolas with sandy soil as well as clayey soil. The maximum axial force of the nails in the clay soil is less than that of the sandy soil, which decreases with the approach to the hollow corner. For maximum seating and horizontal displacement of the Goodwall wall, there is also a turning point between the angular angles of 130 ° to 150 °, with a good turnaround. By comparing and analyzing land surface levels and rupture levels, we will find that the maximum level of earth's summation in sandy soils will be the highest level of rupture, and in clay soils, ground-level landings in the location of critical burst surface changes It is noteworthy.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 June 2019

Revise Date: 05 August 2019

Accept Date: 27 August 2019

Keywords:

*Corner effect;
Nail axial force;
Sand soil;
Clay soil;
Surface settlement;
Deformation of wall*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.191374.1889

*Corresponding author: Jahangir Khazaei

Email address: j.khazaie@razi.ac.ir

مقایسه نیروی محوری میخ، تغییر شکل و سطوح گسیختگی ناشی از گودبرداری در خاک های ماسه ای و رسی با در نظر گرفتن اثر گوشه

جهانگیر خزائی^{۱*}، علی قهرمانی^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

بررسی و ارزیابی خرابی های وارده به سازه های اطراف گود و همچنین تخمین سطوح گسیختگی از طریق محاسبه مقدار تغییر شکل ها و مقدار نشست های مجاور گود از مسائل مهم در سیستم میخ گذاری در نواحی شهری به شمار می رود. در این تحقیق سعی شده است نیروی محوری میخ ها و تغییر شکل در گودهای مقعر و محدب؛ در خاک های ماسه ای و رسی ارزیابی شود. در این راستا مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود *Abaqus CAE* در محیط خاک انجام شده و مطالعات پارامتریک برای زاویه های مختلف گوشه در گودبرداری تحت بار سرویس انجام می گیرد. نتایج این تحقیق، نشان گر تاثیر بازدارندگی گوشه های مقعر و تاثیر رو به تخریب گوشه های محدب که برعکس گود مقعر است در گودهایی با خاک ماسه ای و همچنین خاک رسی می باشد. ماکزیمم نیروی محوری میخ ها در خاک رسی کمتر از مقدار آن در خاک ماسه ای می باشد که با نزدیک شده به گوشه گود این مقدار کاهش می یابد. برای ماکزیمم نشست زمین و تغییر مکان افقی دیواره گود نیز تقریباً بین زوایای گوشه ۱۳۰ درجه تا ۱۵۰ درجه یک نقطه عطف وجود دارد که رفتار گود در آن کاملاً تغییر خواهد نمود. با مقایسه و تحلیل نشست های سطح زمین و سطوح گسیختگی متوجه خواهیم شد که در ماکزیمم نشست سطح زمین در خاک ماسه ای، ماکزیمم سطوح گسیختگی رخ خواهد داد و در خاک رسی، نشست های سطح زمین در محل سطوح گسیختگی بحرانی دارای تغییرات قابل توجه می باشد.

کلمات کلیدی: اثر گوشه، نیروی محوری میخ، خاک ماسه ای، خاک رسی، نشست سطح زمین، تغییر شکل دیواره

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2019.191374.1889					
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.191374.1889	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۶/۰۵	۱۳۹۸/۰۵/۱۴	۱۳۹۸/۰۴/۰۲
جهانگیر خزائی j.khazaie@razi.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

روش میخ‌گذاری یک روش ساده و اقتصادی برای پایداری شیب‌ها و دیوارها می‌باشد. روش‌های طراحی مختلفی از جمله روش معادلات حدی (LEM)، روش طراحی تنش کارهای مختلف، روش دیویس [۱]، روش ژرمن [۲ و ۳] و روش فرانسوی [۴] برای میخ‌گذاری خاک وجود دارد. اکثر روش‌های طراحی فعلی برای دیوارهای خاکی میخ‌گذاری شده بر اساس مفهوم روش تعادل حدی (LEM) است که از روش‌های تجزیه و تحلیل پایداری شیب‌های کلاسیک به دست می‌آید. این روش‌ها برای افزودن نیروهای مقاومتی اضافه شده توسط میخ‌ها اصلاح شده‌اند. بر اساس روش معادلات حدی، اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا یک سری از دستورالعمل‌های طراحی [۹-۵] منتشر کرده است که امروزه بسیاری از مهندسان برای میخ‌گذاری و مسلح سازی سازه‌های خاکی از آن استفاده می‌کنند. میخ‌گذاری یک روش مسلح سازی و تقویت زمین است که به طور گسترده‌ای برای حفظ دیوارهای حائل قائم یا نزدیک به قائم از آن استفاده می‌شود. کاربردهای معمول روش میخ‌گذاری خاک عبارت‌اند از: تثبیت دامنه‌های جاده و راه‌آهن، حفاری‌های زیرزمینی و نگهداری از پل‌های جانبی و دیوارهای جانبی جاده‌های متقابل برای مترو [۱۰، ۱۱]. یکی از نگرانی‌های اصلی مربوط به دیوار خاکی میخ‌گذاری شده، جابه‌جایی افقی دیواره گود می‌باشد که یک معیار قابل توجه برای پایداری گود محسوب می‌شود [۹].

در روش میخ‌گذاری، دیواره گود تمایل به جابه‌جایی افقی به سمت داخل گود را دارد و میخ‌ها با تحمل کشش از جابه‌جایی گود به سمت داخل جلوگیری می‌کنند. بدین ترتیب این اجزاء با گذشت روند گودبرداری به صورت مقاوم عمل می‌کنند و در ناحیه‌ای از خاک پشت دیوار حالت محرک شکل می‌گیرد [۱۲ و ۱۳]. در یکی از مطالعات انجام گرفته داده‌های مختلفی از نشست سطح زمین در اطراف دیواره گود پرداخته شده است که در این مطالعه محدوده تاثیر گود در خاک‌های رسی نرم تا فاصله ماکزیمم ۴ برابر عمق گود و در خاک‌های رسی متوسط تا سفت، تا فاصله ماکزیمم ۲ برابر عمق گود تخمین زده شده است، که بر اساس نتایج این تحقیق، در خاک‌های رسی سفت و خاک‌های ماسه‌ای، ماکزیمم تغییر شکل دیواره به ۰/۵ درصد عمق دیواره محدود گردیده است [۱۴].

برای تعیین سطوح خرابی سازه‌ها روابطی در برخی مقالات آورده شده است که وابستگی این خرابی‌ها را با سطوح گسیختگی گودبرداری و تغییر شکل‌های افقی و نشست‌های سطح زمین در اطراف گود نشان می‌دهد [۱۵ و ۱۶].

کلاف^۱ و اررک^۲ [۱۷] نیز نمودارهایی برای تخمین نشست سطح زمین به طور جداگانه برای ماسه‌ها، رس‌های نرم تا متوسط و رس‌های سخت ارائه کردند. اغلب داده‌های آنان حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده در آمریکا می‌باشد. کلاف و رورکه اعلام کردند که یک مجموعه نسبتاً خوب تعریف شده از داده‌های نشست ناشی از گودبرداری، وقتی که نشست‌ها به عنوان بخشی از نشست حداکثر در نظر گرفته شده‌اند، حاصل شد. آن‌ها یک پروفیل نشست بی بعد به عنوان مبنایی برای تخمین الگوهای جابجایی قائم در مجاورت گودبرداری‌ها ارائه کردند. پروفیل‌های مجزا برای خاک‌های ماسه‌ای، رس‌های سخت تا خیلی سخت و رس‌های نرم تا متوسط ارائه شد. با دانستن میزان نشست حداکثر، نمودارهای بی بعد می‌توان برای تخمین نشست‌های سطحی واقعی به کار برد. ناحیه‌ی تاثیر برای گودبرداری در رس‌های سخت تا خیلی سخت برابر با 3H و برای گودبرداری در خاک‌های ماسه‌ای و رس‌های نرم تا متوسط 2H می‌باشد.

او^۳ و همکاران [۱۸] یک تکنیک اجزا محدود سه‌بعدی غیر خطی برای تحلیل گودبرداری‌های عمیق پیشنهاد دادند. آن‌ها تاثیر وجود گوشه‌ها را بر روی رفتار تغییر شکل گودبرداری به وسیله‌ی تحلیل یک گودبرداری در لایه‌ی خاک رسی با سختی نرم تا متوسط را مطالعه کردند. تحلیل سه‌بعدی نشان داد که گوشه‌ها باعث محدود کردن تغییر شکل‌های دیوار گودبرداری می‌گردند. تاثیر بازدارندگی گوشه‌ها با فاصله گرفتن از گوشه‌ها کاهش می‌یابد. آن‌ها اعلام کردند که تراکم مش‌بندی درون ناحیه گودبرداری می‌تواند منجر به نتایج صحیح‌تری گردد و تراکم آن در ناحیه بیرون گودبرداری اهمیت کمتری بر نتایج تحلیل خواهد داشت.

سید کاظم رضوی^۴ و مسعود حاجی علیلوی بناب^۵ [۱۹] به بررسی عوامل موثر بر ضریب اطمینان (FOS) و محل سطوح گسیختگی بحرانی در حالت بهره‌برداری پرداختند. طبق نظر بعضی از محققان میخ در زاویه بین ۵ تا ۲۰ درجه نسبت به افق مقاومت برشی

۱. Clough GW

۲. O'Rourke TD

۳. OU C-Y

۴. Razavi SK

۵. Hajjalilue Bonab M

و خمشی آن برای پایداری اندک است، بنابراین پارامترهای اساسی برای کنترل طراحی، تغییر مکان و پایداری دیوار میخ گذاری شده به سطح تماس بین خاک و میخ بستگی دارد؛ به همین دلیل در این مطالعه میخ ها را به صورت کابل مدل سازی نمودند. یک نمونه طبق آیین نامه FHWA و با ضریب ایمنی ۱/۳۵ برای پایداری کلی آن طراحی شده است که ۵ مرحله حفاری دارد و هر فاز حفاری عمق ۲ متر دارد و در هر مرحله میخ گذاری دارد. تاثیر مدول الاستیسیته میخ ها برای بررسی این مورد سه حالت مختلف مدل سازی شده است که با کاهش مدول الاستیسیته، نشست های سطحی نزدیک دیوار افزایش می یابند. با کاهش مدول الاستیسیته، سختی خاک در نواحی نزدیک میخ ها کاهش یافته است و باعث شده به دو ناحیه تبدیل شود.

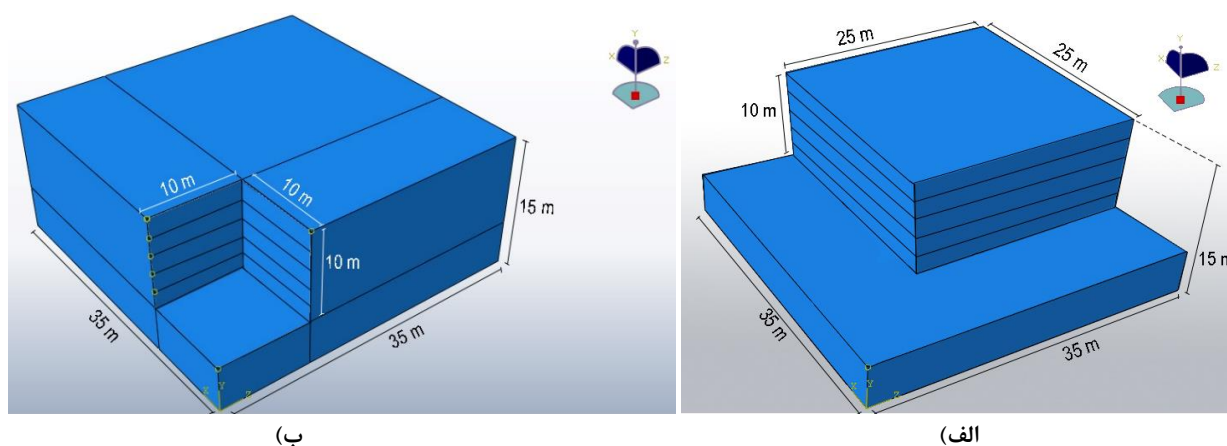
بررسی ها نشان می دهد که تاکنون تحقیقات مهمی در ارتباط با تاثیر زاویه گوشه گود بر ماکزیمم نشست سطح زمین و تغییر شکل دیواره گود و ماکزیمم نیروی محوری میخ ها انجام نشده و یا گزارش نگردیده است. در این تحقیق تاثیر زاویه گوشه گود بر روی ماکزیمم نشست سطح زمین و تغییر شکل دیواره گود و ماکزیمم نیروی محوری میخ ها تحت بارهای سرویس بررسی و مطالعه خواهد شد.

۲- مدل تحلیلی

مسئله بررسی شده در این پژوهش، گودبرداری مهار شده به روش میخ گذاری می باشد. به دلیل ماهیت مسأله در دست بررسی، نوع تحلیل ها، توقعات مورد نظر از مدل سازی عددی و امکانات نرم افزاری در دسترس، تحلیل های عددی انجام شده در این مطالعه، از نوع تحلیل سه بعدی و اجزاء محدود با نرم افزار Abaqus CAE می باشد. در ادامه هندسه مدل سازی، مدل رفتاری، مشخصات مصالح، شرایط مرزی و بارگذاری شرح داده شده است.

۲-۱- هندسه مدل

هندسه مدل تحلیلی شامل بلوکی از خاک به ابعاد ۳۵ متر در ۳۵ متر و با ارتفاع ۱۵ متر است که مطابق شکل ۱، برای حالت گوشه مقعر، یک گود به ابعاد ۱۰*۱۰*۱۰ متر مکعب در ۵ فاز حفاری شده است. برای حالت گوشه محدب نیز مثل حالت مقعر ولی دو مکعب مستطیل به ابعاد ۱۰*۱۰*۲۵ نیز گودبرداری می شود تا اثرات گوشه محدب آشکار شود. فرآیند انجام گودبرداری، به صورت حفاری مرحله ای است، به طوری که کل عمق گودبرداری که برابر با ۱۰ متر در ۵ مرحله ۲ متری حفاری می شود، قابل ذکر است که انتخاب فاز حفاری ۲ متری به منظور نزدیک شدن به شرایط این مطالعه به پژوهش مندرج در مرجع شماره [۱۹] (رضوی و همکاران) بوده که بتوان صحت سنجی و مدل سازی را با آن مقایسه نمود و از طرفی اگر فازها کمتر از ۲ متر اختیار شوند، تعداد فازهای محاسبات عددی، بیهوده زیاد می شود.



شکل ۱: مدل سه بعدی اجزاء محدود؛ الف) گود مقعر، ب) گود محدب.

۲-۳- مشخصات مصالح

مطابق جدول ۱ مشخصات مقاومتی خاک ماسه‌ای و رسی و در جدول ۲ مشخصات مصالح استفاده شده (میخ‌ها و بتن شاتکریت) دیواره گود مهار شده در این مطالعه آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مقاومتی خاک‌های مورد مطالعه [۱۹]

مشخصات خاک رسی	مشخصات خاک ماسه‌ای	
۴۲	۵	C: kpa, چسبندگی
۱۰	۴۰	ϕ_g : deg, زاویه اصطکاک
۲۰	۲۰	E: MPa, مدول یانگ
۰/۳	۰/۳	ν , ضریب پواسون
۲۰ و ۰	۲۰ و ۰	ψ , زاویه اتساع
۱۸	۱۸	وزن مخصوص, kN/m ³

جدول ۲: مشخصات کلی مصالح تسلیح دیواره‌ی گود [۱۹]

مشخصات میخ‌ها	E: GPa, مدول یانگ میخ‌ها	۲۰۰
	cg: kN/m, مقاومت چسبندگی بین خاک و میخ (برحسب واحد طول)	۱/۸۸۴
	ϕ_g : deg, زاویه اصطکاک بین خاک و میخ	۰
	kg: Mpa, سختی بین خاک-میخ (برحسب واحد طول)	۷۱/۴
	pg: m, محیط بین خاک و میخ	۰/۳۱۴
	A: m ² , مساحت سطح مقطع عرضی میخ	۰/۰۰۷۸۵
	Ft: MN, مقاومت تسلیم کششی میخ	۱۳۵
مشخصات مصالح شاتکریت	E: GPa, مدول یانگ	۲۰
	ν , ضریب پواسون	۰/۲
	f: mm, ضخامت شاتکریت	۱۰۰

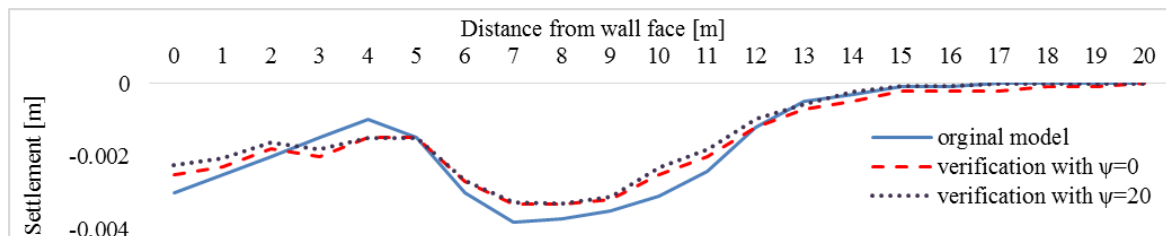
۲-۴- شرایط مرزی و بارگذاری مدل

با توجه به اینکه مدل هندسی به صورت سه‌بعدی تعریف می‌شود، مرزهای قائم طوری محدود شده اند که فقط امکان تغییر مکان در راستای قائم به صورت بدون اصطکاک مقدور است و انتقال افقی وجود ندارد اما کف مدل طوری محدود شده است که امکان انتقال در جهت افقی فقط امکان پذیر باشد. فرض بر این است که بار سرویس یک بار دائمی بر روی سطح اطراف گودبرداری شامل وزن خاک و ساختمان بتنی ۹ طبقه با وزن تقریبی هر طبقه ۱۵kpa که به صورت یکنواخت و برابر ۱۳۵kpa بر روی سطح زمین بالادست گودبرداری (بار وارده بلافاصله از لبه گود شروع شده است) وارد می‌شود. [۲۰].

۳- صحت سنجی

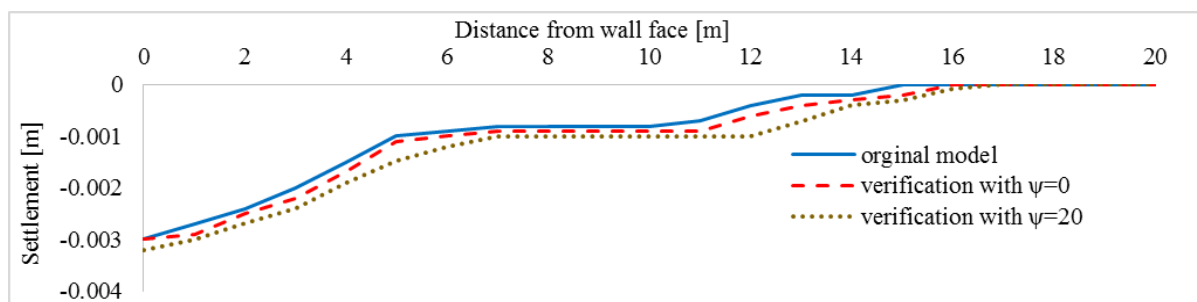
همان‌طور که بیان شده است، مدل‌سازی مسائل در مطالعه حاضر به استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Abaqus CAE انجام شده است، لذا در گام نخست باید روند تحلیل و نتایج حاصل صحت‌سنجی شوند. بدین منظور، مسئله‌ی در نظر گرفته شده در پژوهشی در سال ۲۰۱۷ [۱۹] که با استفاده از نرم افزار FLAC انجام شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مسئله شامل گودبرداری به شکل کرنش مسطح به عمق ۱۰ متر و عرض ۱/۵ متر است.

در صحت‌سنجی مدل از خاک با مشخصات مقاله مرجع [۱۹] استفاده شده است. لکن جهت کنترل دقیق‌تر موضوع از همان مشخصات خاک ولی با $(\psi=0-20)$ نیز بررسی‌ها انجام شد و نتایج مقایسه گردید، که تفاوت چندانی بین نتایج این دو نوع خاک وجود نداشت لذا برای مدل‌سازی از همان مشخصات مقاله مرجع استفاده گردید.



شکل ۳: مقایسه نشست سطح زمین در مدل صحت‌سنجی شده با مدل اصلی در خاک ماسه‌ای

در این حالت حداکثر اختلاف در فاصله $0.6H$ تا $0.9H$ رخ می‌دهد و این تفاوت به مقدار 0.5 میلی‌متر می‌رسد. این ناحیه، ناحیه‌ای است که نوک میخ‌ها در آن قرار دارند و حداکثر نشست سطحی نیز در آن ناحیه رخ می‌دهد. در ادامه طبق شکل ۴، مقایسه نشست‌های سطحی برای گودبرداری در خاک رسی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مقایسه نشست سطح زمین در مدل صحت‌سنجی شده با مدل اصلی در خاک رسی

در این حالت نیز اختلاف بدست آمده از مدل‌سازی در مراحل مختلف گودبرداری در خاک رسی حداقل می‌باشد. حداکثر اختلاف در مقایسه مدل صحت‌سنجی شده و مدل اصلی در این حالت‌ها به تقریباً 0.5 میلی‌متر می‌رسد، که تطابق خوبی با نتایج رضوی و همکاران [۱۹] دارد. بدیهی است که دقت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار Abaqus در مسئله‌ی فوق، صحت محاسبات آبی را اثبات خواهد کرد.

۴- مطالعات پارامتریک

عمده تمرکز این پژوهش بر تغییر شکل سه‌بعدی گود و نشان دادن اثر گوشه‌ی گود است به همین منظور بررسی ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها و ماکزیمم نشست سطح زمین و ماکزیمم تغییر شکل افقی دیواره گود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه برای بررسی اثر هندسه و گوشه گود، ۴ حالت مختلف برای شکل گوشه گود در نظر گرفته شده است؛ برای حالت گود مقعر از سه زاویه؛ 60° ، 90° و 120° و حالت گود محدب با زاویه 270° درجه. جزییات حالت‌های مطالعه شده در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

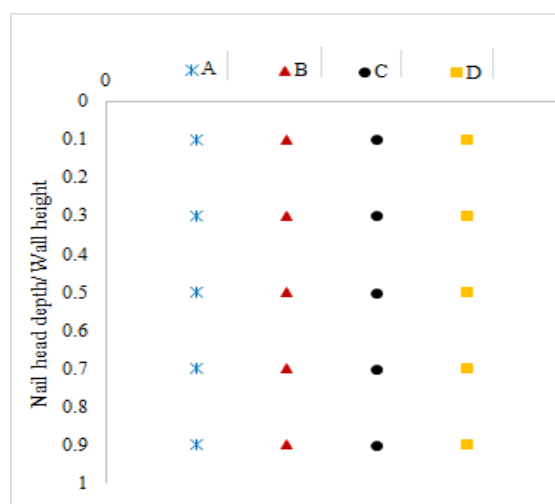
خاک مورد مطالعه	نوع حالت گوشه گود	زاویه گوشه گود ($^\circ$)	مدول الاستیسیته میخ‌ها (Gpa)	طول میخ‌ها (m)
ماسه و رس	مقعر	۶۰	۲۰۰	۷/۳
ماسه و رس	مقعر	۹۰	۲۰۰	۷/۳
ماسه و رس	مقعر	۱۲۰	۲۰۰	۷/۳
ماسه و رس	محدب	۲۷۰	۲۰۰	۷/۳

۵- تحلیل و تفسیر نتایج

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های متعدد سه‌بعدی اجزاء محدود صورت گرفته با هدف مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی گوشه و هندسه‌ی گود بر نیروی محوری میخ‌ها و ماکزیمم نشست سطح زمین و ماکزیمم تغییرشکل افقی دیواره گود بررسی می‌گردد.

۵-۱- ماکزیمم نیروی نرمال شده میخ‌ها

در این تحقیق ۵ مرحله برای حفر گودبرداری صورت گرفته‌است که عمق هرکدام از این مراحل ۲ متر می‌باشد و در هر مرحله برای گود مقعر از ۴ میخ و برای گود محدب از ۱۲ میخ (با توجه به ابعاد آن که برای مقایسه از همان ۴ میخ اول استفاده می‌گردد) به کار رفته‌است. در شکل ۵ می‌توان آرایش میخ‌ها را مشاهده نمود. برای نشان دادن از ۴ مقطع برای میخ‌ها استفاده شده‌است که مقطع A نزدیک‌ترین مقطع به گوشه گودبرداری (به فاصله ۲ متر) می‌باشد و به همین ترتیب مقاطع دیگر B، C و D با فاصله بیشتر (به ترتیب ۴ متر، ۶ متر و ۸ متر)، از گوشه گود قرار دارند.

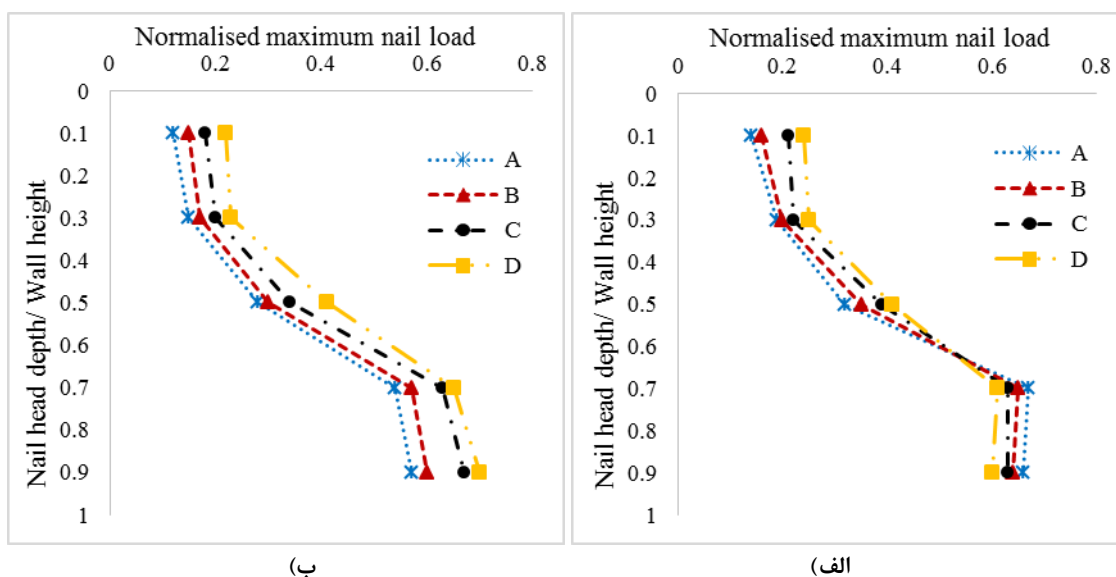


شکل ۵: آرایش میخ‌ها در ۴ ستون و ۵ ردیف با توجه به عمق گود

در شکل ۶ ماکزیمم نیروی کششی در میخ‌ها در خاک ماسه‌ای و خاک رسی برای گود ۶۰ درجه نشان داده شده‌است. محور افقی این نمودارها مقدار نرمال شده‌ی ماکزیمم نیروی موجود در هر ردیف میخ‌ها و محور قائم مقدار نرمال شده عمق (نسبت عمق قرارگیری میخ‌ها به ارتفاع گود) می‌باشد.

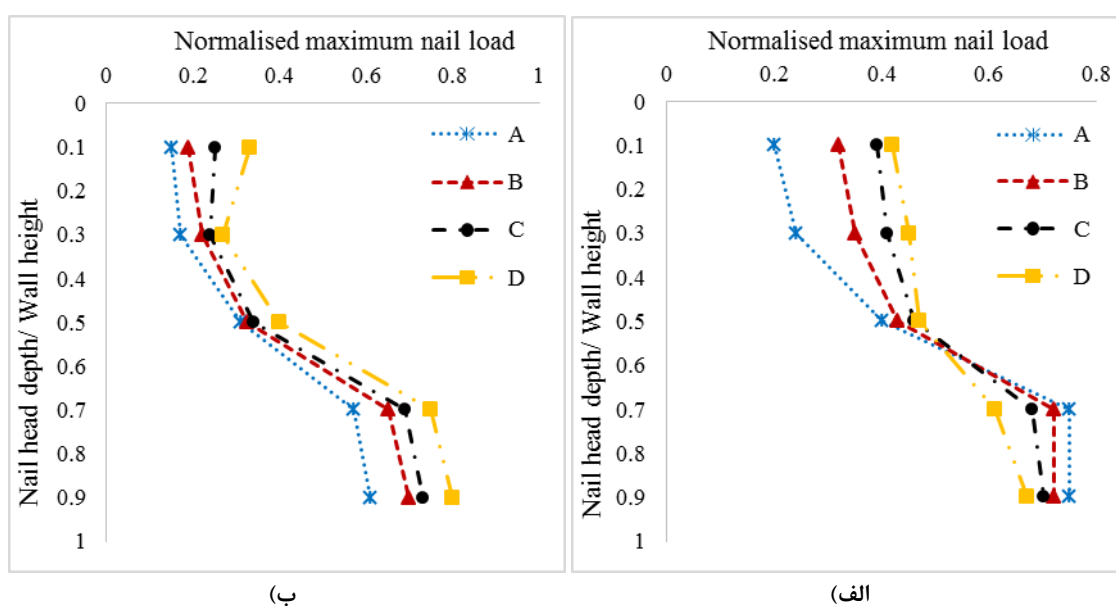
همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل ۶ الف، در خاک ماسه‌ای ماکزیمم نیروی میخ‌ها برای مقطع A که به گوشه گود نزدیک است کمتر از مقاطع دیگر است و به ترتیب هرچه از گوشه گود فاصله بیشتر می‌شود این مقدار بیشتر خواهد شد. این روند تا عمق حدود ۰/۶ برقرار می‌باشد که با افزایش بیشتر عمق این روند کاملاً برعکس شده و نیروی محوری برای میخ‌های نزدیک گوشه گود بیشتر از نیروی میخ‌های دورتر از گود خواهد شد.

در شکل ۶ ب، نیروی محوری در میخ‌ها در خاک رسی با افزایش عمق افزایش می‌یابد که هرچه از گوشه گود فاصله گرفته شود مقدار نیروی ماکزیمم محوری میخ‌ها نیز بیشتر شده و با افزایش عمق همین روند ادامه خواهد داشت.



شکل ۶: ماکزیمم نیروی کششی میخ‌ها برای گود با زاویه گوشه ۶۰ درجه؛ (الف) در خاک دانه‌ای، (ب) در خاک چسبنده

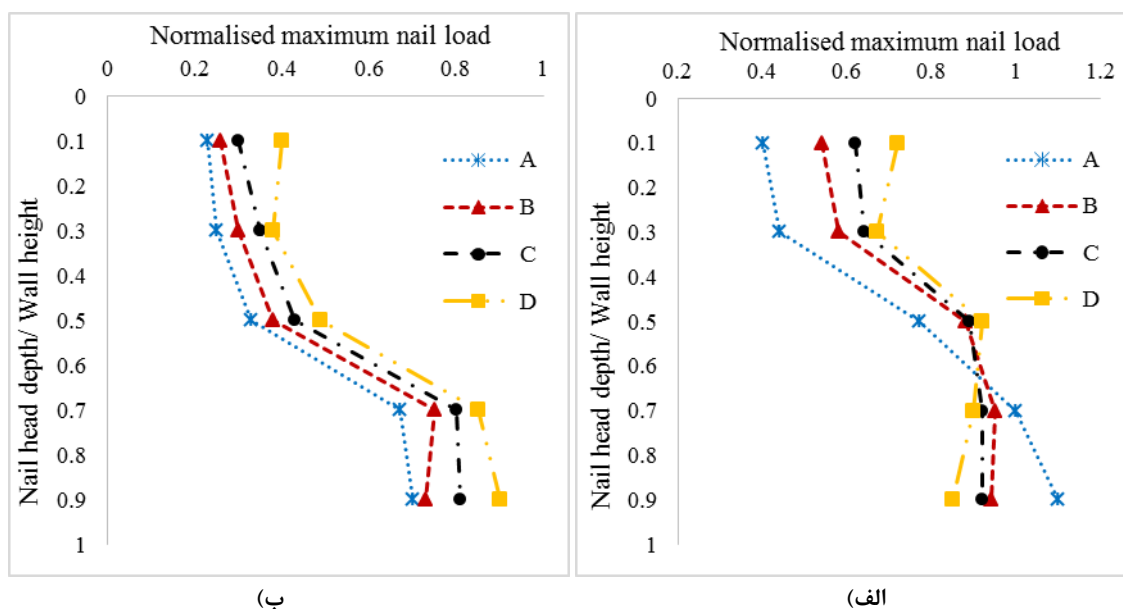
طبق شکل ۷، ماکزیمم نیروی نرمال شده برای گود ۹۰ درجه در خاک ماسه ای و رسی مشاهده می‌شود. با افزایش زاویه گوشه گود مقدار نیروی محوری در میخ‌ها مقداری افزایش داشته که خود نشان دهنده‌ی تاثیر بازدارندگی و کاهش زاویه گوشه گود برداری بر نیروی محوری میخ‌ها می‌باشد به طوری که هرچه زاویه گوشه گود کمتر باشد، این تاثیر بیشتر و چشم‌گیرتر خواهد بود. در این حالت نیز در خاک ماسه‌ای ماکزیمم نیروی میخ‌ها برای مقطع A که به گوشه گود نزدیک است کمتر از مقاطع دیگر است و به ترتیب هرچه از گوشه گود فاصله گرفته‌شود این مقدار بیشتر خواهد شد. این روند تا عمق بین حدود ۰/۶ و ۰/۷ برقرار می‌باشد که با افزایش بیشتر عمق این روند کاملاً برعکس شده و نیروی محوری برای میخ‌های نزدیک گوشه گود بیشتر از نیروی میخ‌های دورتر از گود خواهد شد. برای خاک رسی نیز هرچه به سمت گوشه گود نزدیک‌تر شده، مقدار ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها کاهش می‌یابد و میخ‌های پایینی نسبت به میخ‌های ردیف‌های بالاتر دارای نیروی محوری بیشتری خواهند بود.



شکل ۷: ماکزیمم نیروی کششی میخ‌ها برای گود با زاویه گوشه ۹۰ درجه؛ (الف) در خاک دانه‌ای، (ب) در خاک چسبنده

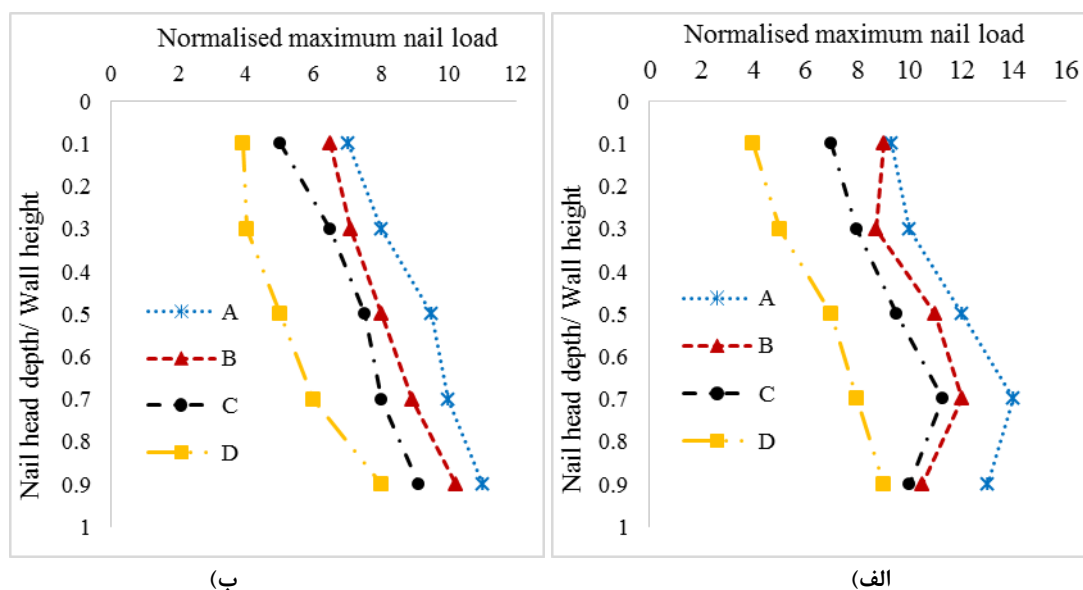
در شکل ۸ مقدار ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها در گود ۱۲۰ درجه برای خاک ماسه‌ای و رسی نشان داده شده است. برای هر دو خاک مقدار نیروی محوری میخ‌ها نسبت به نیروی محوری میخ در گود با زاویه گوشه کمتر، به مراتب بیشتر می باشد. مطابق شکل ۸ الف، در خاک ماسه‌ای نیروی محوری در میخ‌های بالایی برای مقاطعی که به گوشه گود نزدیک تر است، کمتر می باشد و این روند تا حدود ۰/۶ تا ۰/۷ عمق ادامه دارد اما از آن ناحیه به بعد این روند عکس شده و نیروی میخ‌های پایین تر، بیشتر خواهد شد. این مقادیر برای نیروی محوری میخ‌ها در ردیف‌های پایینی بیشتر از از نیروی محوری میخ‌های ردیف بالاتر است. این نتایج تاثیر وجود گوشه گود بر برداری بر نیروی محوری میخ‌ها را نشان می دهد که باعث کمتر شدن نیروی محوری میخ‌ها می شود، اما هرچه زاویه گوشه گود برداری کمتر باشد تاثیر کاهش نیروی محوری میخ‌ها به مراتب بیشتر خواهد شد.

در شکل ۸ ب، مقدار ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها در گود ۱۲۰ درجه در خاک رسی را نشان می دهد. در مقایسه با گود با زاویه گوشه کمتر، مقدار نیروی محوری ماکزیمم میخ‌ها بیشتر می باشد و نشان دهنده این است که هرچه زاویه گوشه گود بیشتر شود، تاثیر بازدارندگی گوشه گود بر روی ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها کاهش می یابد. در این حالت نیز نیروی محوری میخ‌های ردیف پایین تر، بیشتر از نیروی محوری میخ‌های ردیف بالاتر می باشد و به این ترتیب که با فاصله گرفتن از گوشه گود، نیروی محوری ماکزیمم میخ‌ها بیشتر خواهد شد.



شکل ۸: ماکزیمم نیروی کششی میخ‌ها برای گود با زاویه گوشه ۱۲۰ درجه؛ الف) در خاک دانه‌ای، ب) در خاک چسبنده

طبق شکل ۹، ماکزیمم نیروی کششی میخ‌ها برای گود با زاویه گوشه ۲۷۰ درجه (گود با گوشه محدب) برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی نشان داده شده است. در شکل ۹ الف، گود برداری در خاک ماسه را نشان می دهد که روند ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها همانند موارد مشابه در گود مقعر نمی باشد، در گود مقعر در ارتفاع حدود ۰/۶ تا ۰/۷ یک نقطه عطف در نمودارهای مربوط به نیروی محوری میخ‌ها مشاهده می شد که در ردیف‌های پایینی این مقدار نیرو در میخ‌های نزدیک به گوشه گود بیشتر می شد اما در گود محدب چنین اتفاقی نخواهد افتاد. در شکل ۹ ب، گود برداری در خاک رسی را نشان می دهد که همانند شکل ۹ الف، نیروی محوری میخ‌ها در ردیف‌های پایینی بیشتر از نیروی محوری میخ‌های ردیف‌های بالاتر می باشد. در تمامی موارد مقایسه ماکزیمم نیروی محوری در خاک ماسه‌ای و رسی؛ این مقدار ماکزیمم نیرو در میخ‌های جایگذاری شده در خاک ماسه‌ای بیشتر از میخ‌های جایگذاری شده در خاک رسی می باشد.

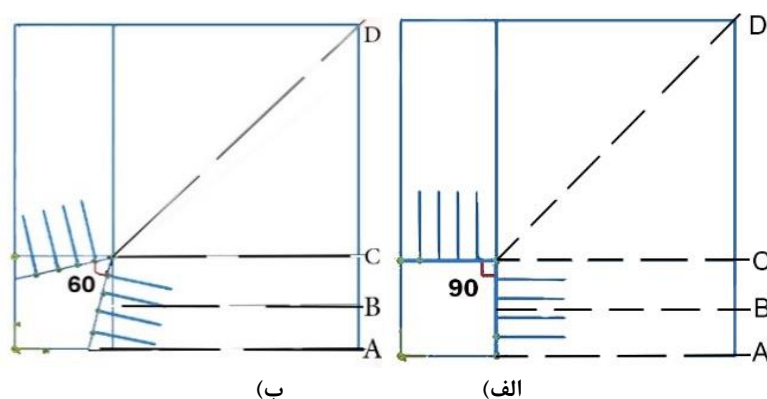


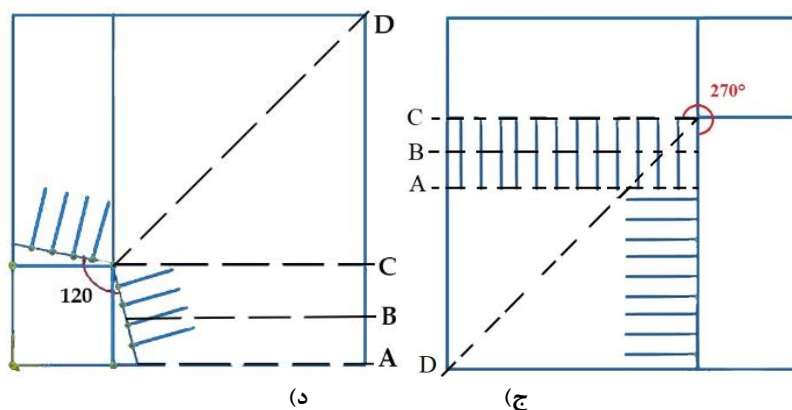
شکل ۹: ماکزیمم نیروی کششی میخ‌ها برای گود با زاویه گوشه ۲۷۰ درجه: (الف) در خاک دانه‌ای، (ب) در خاک چسبنده

۵-۲- اثر زاویه گوشه گود (کنج) بر ماکزیمم نشست سطح زمین

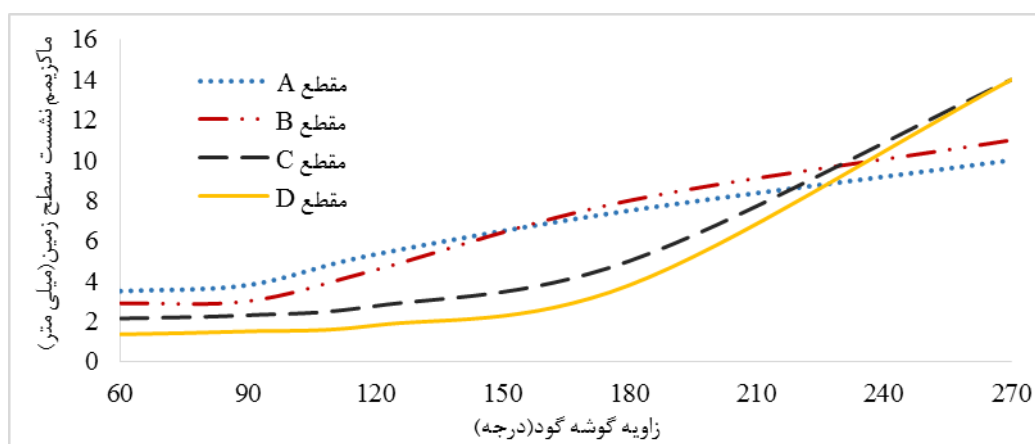
در شکل ۱۰ پلان چهار حالت مختلف مدل‌سازی گود و مقاطع مختلفی بر روی آن جهت نمایش نشست سطح زمین نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید طبق شکل ۱۱، ماکزیمم نشست سطح زمین در خاک ماسه‌ای برای زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه تقریباً مشابه هم می‌باشد؛ با عبور از زاویه ۹۰ ماکزیمم نشست سطح زمین افزایش پیدا کرده و تا زاویه تقریباً ۱۵۰ درجه این روند افزایشی ادامه دارد که هرچه به گوشه گود نزدیک‌تر شده، ماکزیمم نشست سطح زمین کاهش می‌یابد. برای زوایای بعد از ۱۵۰ درجه یک نقطه عطف در نمودار مشاهده می‌گردد که رفتار گوشه گود برداری کاملاً عوض شده و از حالت گود مقعر با اثرات بازدارندگی در نشست به یک گود محدب با اثرات تمایل به تخریب گود تبدیل می‌شود.

در شکل ۱۲، ماکزیمم نشست سطح زمین در خاک رسی نیز برای زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه تقریباً مشابه هم می‌باشد و با افزایش بیشتر زاویه گوشه گود، ماکزیمم نشست سطح زمین افزایش می‌یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت که زاویه ۹۰ درجه گوشه عملکرد بهتری را نسبت به زوایای دیگر گوشه گود دارد. در این حالت در زوایای گوشه بین ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه تغییر در رفتار گود مشاهده می‌گردد که رفتار بازدارندگی گوشه گود بر روی نشست سطح زمین به سمت افزایش در مقدار نشست‌ها میل خواهد کرد.

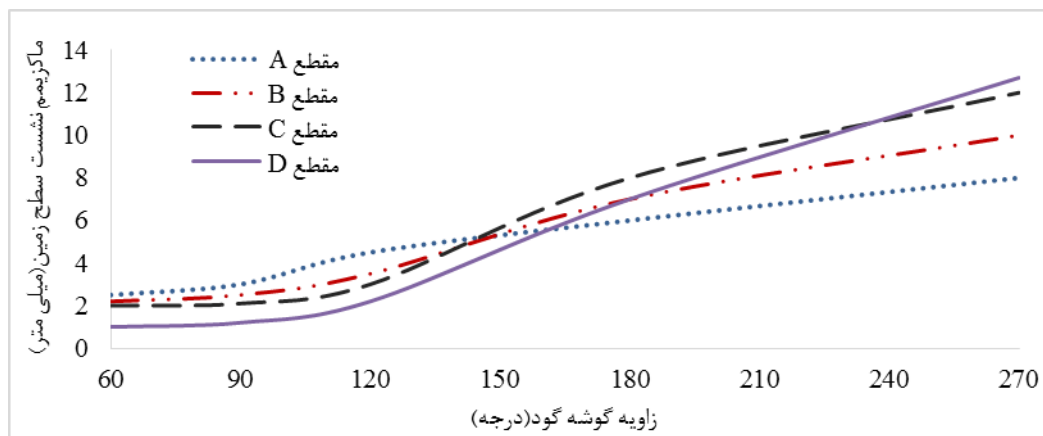




شکل ۱۰: پلان چهار حالت مختلف برای گودبرداری؛ الف) گود مقعر با زاویه ۶۰ درجه، ب) گود مقعر با زاویه ۹۰ درجه، ج) گود مقعر با زاویه ۱۲۰ درجه، د) گود محدب با زاویه ۲۷۰ درجه.



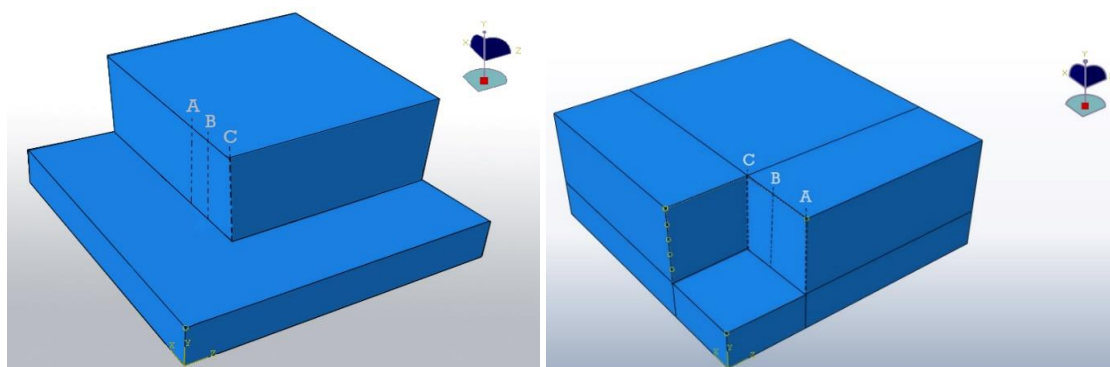
شکل ۱۱: نمودار ماکزیمم نشست سطح زمین-زاویه گوشه برای خاک ماسه‌ای



شکل ۱۲: نمودار ماکزیمم نشست سطح زمین-زاویه گوشه برای خاک رسی

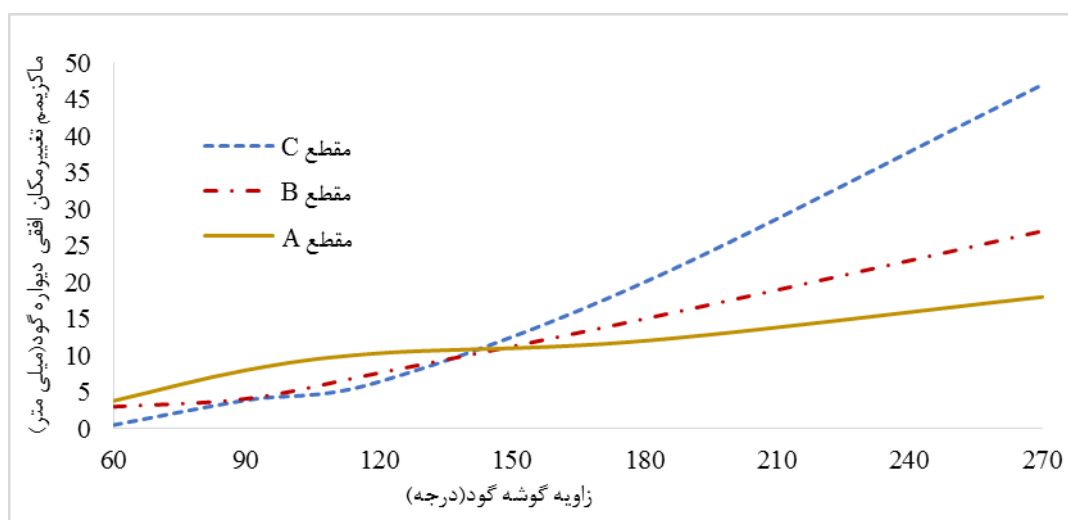
۵-۳- اثر زاویه گوشه گود (کنج) بر ماکزیمم تغییر مکان افقی دیواره‌ی گود

در این‌جا پس از مدل‌سازی و تحلیل، نتایج تغییر مکان افقی دیواره‌ی گودبرداری در سه راستای A، B و C همان‌طور که در شکل ۱۳ به ترتیب برای گود مقعر و گود محدب نشان داده شده‌است، برای تمامی زوایای گوشه گود بررسی شده و با هم مقایسه شده‌است. راستای C در گوشه گود، راستای B در فاصله $0.5H$ (ارتفاع گود می‌باشد) از گوشه گود و راستای A به فاصله H از گوشه گود قرار دارد.

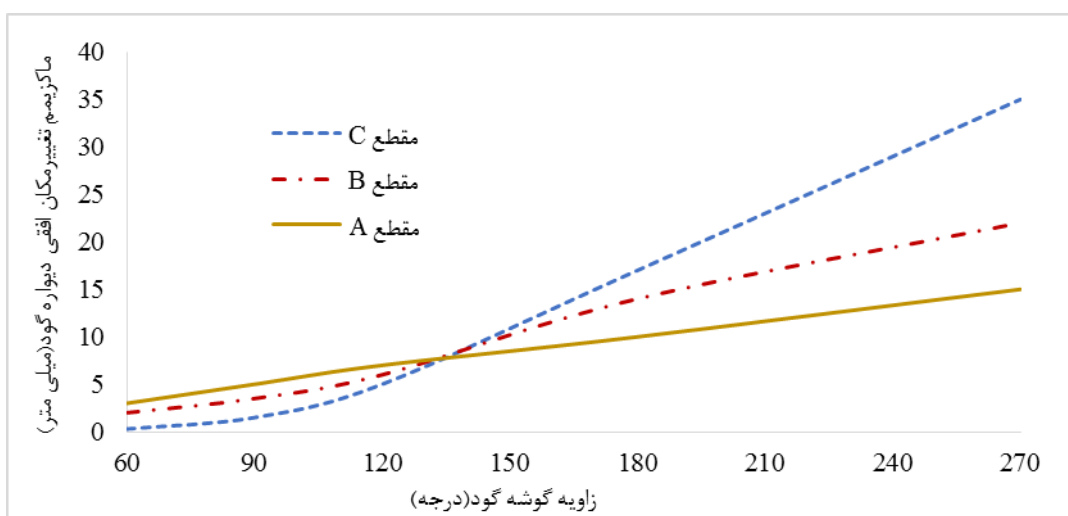


شکل ۱۳: مقاطع مختلف برای بررسی ماکزیمم تغییرمکان افقی دیواره‌ی گودبرداری؛ الف) گود مقعر، ب) گود محدب

در شکل ۱۴ تغییرمکان افقی دیواره گود در خاک ماسه‌ای را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که برای زوایای مقعر با نزدیک شدن به سمت گوشه گود اثر بازدارندگی در برابر تغییرمکان‌ها مشهود خواهد شد. در گود محدب تاثیر گوشه گود کاملا برعکس تاثیر گوشه مقعر گود می‌باشد که با نزدیک شدن به زوایای بین ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه گوشه گود مشاهده می‌گردد که رفتار گود کاملا عوض شده و گوشه گود به سمت ناپایداری میل خواهد کرد و رفتار گود مانند رفتار گود با گوشه محدب خواهد شد.



شکل ۱۴: نمودار ماکزیمم تغییرمکان افقی دیواره گود-زاویه گوشه برای خاک ماسه‌ای



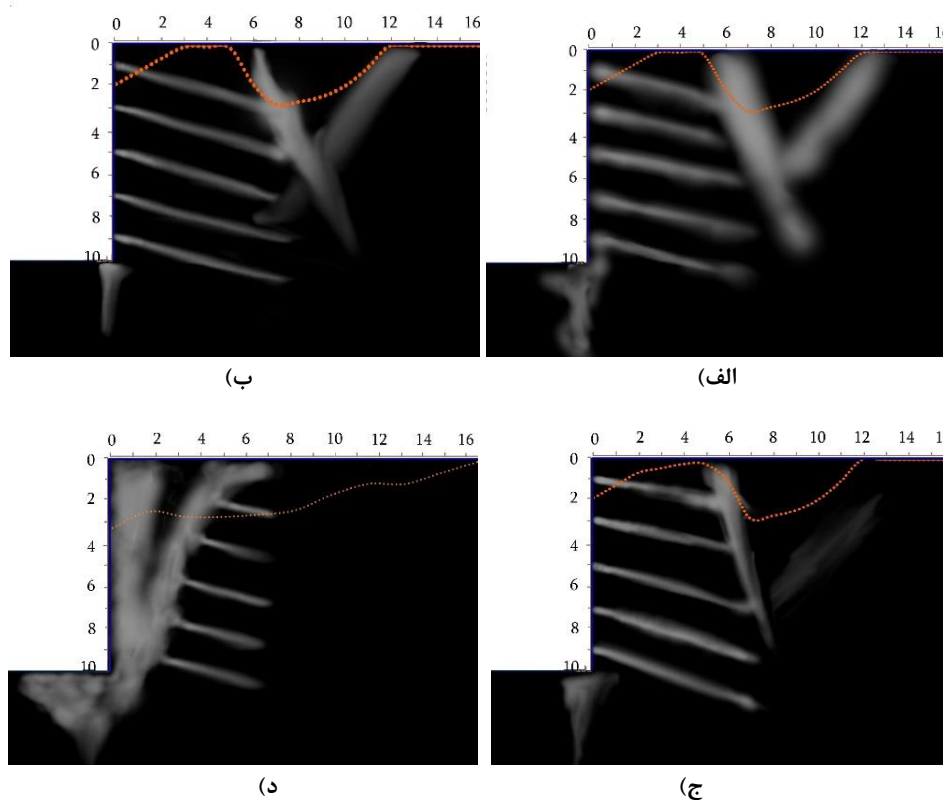
شکل ۱۵: نمودار ماکزیمم تغییرمکان افقی دیواره گود-زاویه گوشه برای خاک رسی

در ادامه طبق شکل ۱۵ تغییر مکان افقی دیواره گود در خاک رسی را نشان می‌دهد. در این حالت برای زوایای گوشه گود کمتر از مقادیر بین حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه، ماکزیمم تغییر مکان افقی دیواره گود در مقطع C که به گوشه گود نزدیک‌تر می‌باشد، کمتر از مقاطع دیگر است و به طور کلی در این حالت مقاطع دورتر از گوشه گود دارای تغییر مکان افقی بیشتر خواهد بود. بعد از گذر از این محدوده (زاویه بین ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه) این روند عکس شده و برای مقطع C که نزدیک به گوشه گود می‌باشد، ماکزیمم تغییر مکان افقی دیواره بیشتر از مقاطع دیگر که نسبت به گوشه دارای فاصله بیشتر هستند، می‌باشد.

۶- تاثیر زاویه گوشه گودبرداری (کنج) بر روی سطوح گسیختگی

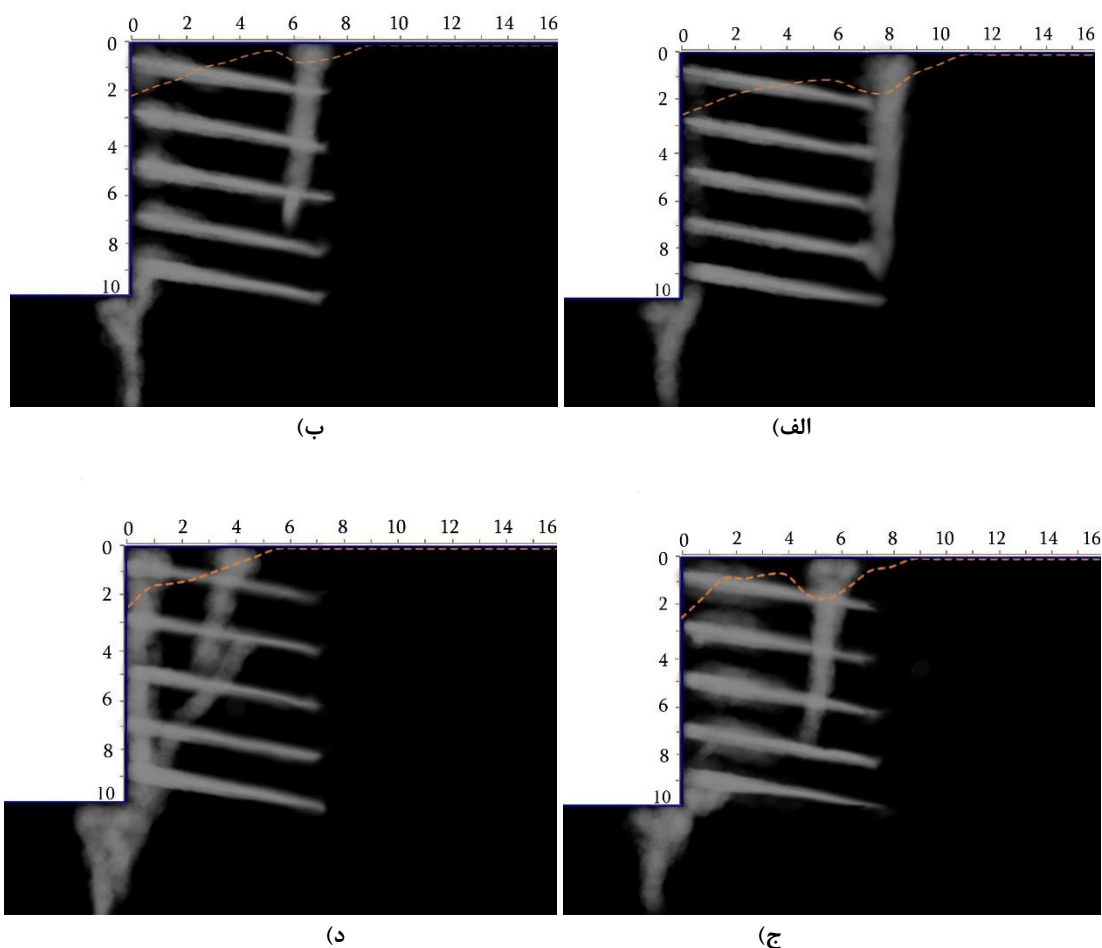
در این قسمت از تحقیق به مطالعه و بررسی محل سطوح گسیختگی بحرانی در حالت خاک ماسه ای و رسی در گوشه گود پرداخته شده است. همچنین نشست‌های سطح زمین به طور شماتیک بر روی سطوح گسیختگی قرار داده شده است تا رابطه‌ی میان نشست‌های سطح زمین و سطوح گسیختگی بررسی گردد. همان‌طور که در شکل‌های مربوط به گوه گسیختگی مشاهده می‌گردد، نرخ افزایش کرنش‌های برشی برای گودبرداری با زاویه گوشه‌های مقعر در خاک ماسه‌ای به ۲ ناحیه اصلی تقسیم می‌گردد. ناحیه ۱، ناحیه است که از لبه گود تا محل تقاطع باند گسیختگی اول و دوم ادامه دارد. ناحیه ۲، ناحیه‌ای است بین دو باند گسیختگی که تقریباً از انتهای میخ‌ها شروع شده و تا چند متر دورتر ادامه دارد و به شکل یک گوه گسیختگی رانشی مثلث شکل است که ناحیه ۱ را می‌راند. ناحیه ۱، ناحیه‌ای که میخ‌ها در آن قرار دارند (ناحیه مقاوم)، مانند ناحیه‌ی صلبی عمل می‌کند که جلوی رانش ناحیه ۲ را می‌گیرد اما ناحیه ۲ مانند ناحیه صلبی (ناحیه محرک) عمل می‌کند که به سمت جلو رانش می‌کند و تمایل به تخریب گودبرداری را دارد.

نرخ افزایش کرنش‌های برشی برای گودبرداری در خاک رسی تفاوت زیادی با حالت گودبرداری در خاک ماسه‌ای دارد و ناحیه گسیختگی یک ناحیه محرک می‌باشد که تقریباً از لبه گود شروع شده و تا انتهای میخ‌ها ادامه دارد. با افزایش زاویه گوشه گود این ناحیه به سمت لبه گود حرکت کرده و باعث ناپایداری گود خواهد شد.



شکل ۱۶: سطوح گسیختگی در گوشه گود برای خاک ماسه‌ای؛ الف) گود مقعر با زاویه 60° ، ب) گود مقعر با زاویه 90° ، ج) گود مقعر با زاویه 120° ، د) گود محدب با زاویه 127° .

در خاک ماسه‌ای که هر عاملی باعث کوچک‌تر شدن ناحیه ۲ و بزرگ‌تر شدن ناحیه ۱ گردد، سبب می‌شود که گود پایدارتر بوده و گوه‌های گسیختگی وضعیت بهتری را داشته باشند. همچنین طبق شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد ماکزیمم نشست سطح زمین در ناحیه محرک ۲ اتفاق خواهد افتاد و در انتهای این ناحیه نشست سطح زمین تقریباً صفر خواهد شد. در شکل ۱۷ مشاهده می‌گردد که در خاک رسی فقط یک ناحیه گسیختگی وجود دارد و هرچه زاویه گود بزرگتر شود این ناحیه کوچک‌تر شده و به لبه گود نزدیک‌تر خواهد شد همچنین با مقایسه نشست‌های سطح زمین مشاهده می‌گردد که در محل سطح گسیختگی تغییر ناگهانی در مقدار نشست اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۱۷: سطوح گسیختگی در گوشه گود برای خاک رسی؛ الف) گود مقعر با زاویه 60° ، ب) گود مقعر با زاویه 90° ، ج) گود مقعر با زاویه 120° ، د) گود محدب با زاویه 270° .

۷- نتیجه‌گیری

عموماً در تحلیل و بررسی پایداری گودهای متداول از تاثیر گوشه گودبرداری صرف‌نظر می‌شود که با توجه به اهمیت مسأله گودبرداری مخصوصاً در نواحی شهری ناچاراً مجبور به حفر گودهایی با اشکال و هندسه و زوایای گوشه مختلف با توجه به ابعاد زمین در دسترس می‌باشیم. در این تحقیق سعی شده‌است تاثیر زاویه گوشه گودبرداری بر روی ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها، ماکزیمم نشست سطح زمین و ماکزیمم تغییرمکان افقی دیواره گود بررسی گردد که نتایج مشهود حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- در نظر گرفتن اثرات گوشه گودبرداری تاثیرات زیادی بر روی ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها هم در خاک ماسه‌ای و هم در خاک رسی دارد. تاثیر زاویه گوشه در خاک ماسه‌ای مشهودتر از اثرات آن در خاک رسی می‌باشد.
- ۲- در خاک ماسه‌ای، ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها در ردیف میخ‌های بالاتر برای مقاطع نزدیک به گوشه کمتر از میخ‌های دورتر از گوشه می‌باشد و در میخ‌های ردیف پایین تر برای میخ‌های نزدیک به گوشه بیشتر از میخ‌های نزدیک تر به گوشه گود می‌باشد. با افزایش زاویه گوشه گودبرداری ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها افزایش می‌یابد، پس با کاهش زاویه گوشه گود می‌توان نیروی محوری ایجاد شده در میخ را تا حدودی کاهش داد.
- ۳- در خاک رسی، نمودار نیروی محوری میخ‌ها تفاوت زیادی با خاک ماسه‌ای دارد؛ ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها در تمامی ردیف‌ها برای مقاطع نزدیک به گوشه کمتر از میخ‌های دورتر از گوشه می‌باشد. در این حالت نیز با افزایش زاویه گوشه گودبرداری ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها افزایش می‌یابد.
- ۴- نیروی ماکزیمم محوری میخ‌ها در هر دو گود حفر شده در خاک ماسه‌ای و رسی، در ردیف‌های بالاتر، حدود ۳۵٪ کمتر از نیروی محوری ردیف‌های پایین تر می‌باشد.
- ۵- ماکزیمم نشست سطح زمین در خاک ماسه‌ای برای زوایای گوشه ۶۰ و ۹۰ درجه تقریباً مشابه هم می‌باشد که با افزایش زاویه گوشه گود ماکزیمم نشست سطح زمین افزایش می‌یابد که با توجه به نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که تقریباً در زاویه گوشه ۱۵۰ درجه یک نقطه عطف وجود دارد که رفتار گود در آن کاملاً تغییر خواهد نمود و بعد از این محدوده تاثیر گوشه گودبرداری به سمت تخریب گود یعنی رفتاری مانند گوشه گود محدب از خود نشان خواهد داد.
- ۶- ماکزیمم نشست سطح زمین در خاک رسی نیز تا زاویه حدود ۹۰ درجه گوشه گود تغییر چندانی ندارد اما با افزایش زاویه گوشه گود در زاویه حدود بین ۱۴۰ و ۱۵۰ درجه رفتار بازدارندگی گوشه مقعر به رفتار تخریب کننده گود محدب نزدیک خواهد شد. ماکزیمم نشست سطح زمین در خاک رسی حدود ۱۷٪ کمتر از مقدار آن در خاک ماسه‌ای می‌باشد.
- ۷- در نمودارهای مربوط به ماکزیمم تغییر مکان افقی دیواره در خاک ماسه‌ای می‌توان مشاهده نمود که در زاویه حدود ۱۳۰ تا ۱۵۰ درجه گوشه، گود تغییر رفتار خواهد داد. این محدوده برای خاک رسی در حدود ۱۳۰ درجه می‌باشد. ماکزیمم تغییر مکان افقی دیواره در خاک رسی حدود ۱۵٪ کمتر از مقدار آن در خاک ماسه‌ای می‌باشد.
- ۸- با توجه به نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که تقریباً بین زوایای گوشه ۱۳۰ درجه تا ۱۵۰ درجه یک نقطه عطف وجود دارد که رفتار گود در آن کاملاً تغییر خواهد نمود و رفتار نیروی محوری میخ‌ها و نشست سطح زمین و تغییر مکان افقی دیواره گود را تحت تاثیر قرار خواهد داد.
- ۹- با توجه به نمودارهای نشست سطح زمین و محل ایجاد گوه‌های گسیختگی می‌توان نتیجه گرفت که در گودبرداری در خاک ماسه‌ای، محل رخداد ماکزیمم نشست سطح زمین در محدوده باند گوه‌های گسیختگی می‌باشد. و برای گودبرداری در خاک رسی، در لبه گود ماکزیمم نشست سطح زمین رخ خواهد داد و در محل گسیختگی در انتهای میخ‌ها یک تغییر در مقدار نشست‌ها اتفاق خواهد افتاد؛ بنابراین می‌توان محل گوه‌های گسیختگی را از روی نشست‌های سطح زمین پیش‌بینی نمود.

مراجع

- [1]. Shen C, Herrmann L, Romstad K, Bang S, Kim Y, Denatale J. (1981). An in situ Earth reinforcement lateral support system. NASA STI/Recon Technical Report N, 82.
- [2]. Stocker M, Korcher G, Gassler G, Gudehus G, editors. (1979). Soil nailing. International Conference on Soil Reinforcement.
- [3]. Stocker MF, Riedinger G, editors. (1990). The bearing behaviour of nailed retaining structures. Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE.

- [4]. Schlosser F, editor. (1982). Behaviour and design of soil nailing. International Symposium on Recent Development in Ground Improvement Techniques.
- [5]. Byrne R, Cotton D, Porterfield J, Wolschlag C, Ueblacker G. (1996). Manual for design and construction monitoring of soil nail walls.
- [6]. Byrne R, Cotton DP. J. Wolschlag, C. Ueblacker, G. (1998). Manual For Design And Construction Monitoring Of Soil Nail Wall. Report No. FHWA-SA-96-069R. Federal Highway Administration, US Department of Transport, Washington DC, USA.
- [7]. Byrne R, Cotton D, Porterfield J, Wolschlag C, Ueblacker G. (1998). Soil Manual for design and construction monitoring of soil nail wall. Manual of the Federal Highway Administration Division.
- [8]. Byrne R, Cotton D, Porterfield J, Wolschlag C, Ueblacker G. (1996). Manual for design and construction monitoring of soil nail walls.
- [9]. Walls SN, Lazarte CA. (2003). GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR NO. 7.
- [10]. Srinivasa Murthy B, Sivakumar Babu G, Srinivas A. (2002). Analysis of prototype soil-nailed retaining wall. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 6(3), 129-36.
- [11]. Yang Y. (2007). Remediating a soil-nailed excavation in Wuhan, China. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 160(4), 209-14.
- [12]. Lazarte, C.A., Victor Elias, P.E., Espinoza, R.D. and Sabatini, P.J., *Soil Nail Walls*, Report FHWA0-IF-03- 017, Washington D.C. 20590 (2003).
- [13]. Ghahreman, B.(2004). Analysis of ground and building response around deep excavation in sand, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois.
- [14]. Peck, R.B. \Deep excavation and tunneling in soft ground", *Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, State of the Art, pp. 225-290 (1969).
- [15]. Boscardin, M.D. (1980). Building response to excavation induced movements, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois (1980).
- [16]. Burland, J.B. \Assessment of risk of damage to building due to tunneling and excavation, *Proceeding of the 1th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, IS-Tokyo (1995).
- [17]. Clough GW, O'Rourke TD, editors. (1990). Construction induced movements of insitu walls. Design and performance of earth retaining structures, ASCE.
- [18]. Ou C-Y, Chiou D-C, Wu T-S. (1996). Three-dimensional finite element analysis of deep excavations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 337-45.
- [19]. Razavi SK, Hajjalilue Bonab M. (2017). Study of soil nailed wall under service loading condition. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 170(2), 161-74.
- [20]. C. A. Lazarte, H. Robinson, J. E. Gómez, A. Baxter, A. Cadden, and R. Berg. (2015). Geotechnical engineering circular No. 7 soil nail walls-reference manual. US Department of Transportation Publication No. FHWA-NHI-14-007, Federal Highway Administration, Washington DC, USA.