

Numerical analysis of inclined struts and truss structure in excavation stabilization based on the damage potential index (DPI)

Seyed Shahab Emamzadeh^{1*}

1- Assistant Professor, Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this research, in different conditions, the behavior of the inclined Struts support system and truss guard structure has been investigated. For this purpose, the horizontal and vertical movements of the soil due to excavation and the level of damage of buildings adjacent to these systems are determined to maintain the excavation. Excavation has been studied at three depths of 4, 7 and 10 meters, which indicate shallow, medium and high depth excavation, respectively. Mohr-Columb's behavioral criterion was used for soil behavior. The excavation was modeled in stages with PLAXIS software. Comparing the outputs obtained from numerical modeling, it was concluded that the horizontal and vertical soil displacement in the inclined Struts models is more than the truss guard structure models. The reason is the lack of vertical member and lateral bracing system in the Inclined Struts, unlike the truss guard structure. The values of stress and abutment reactions in the Inclined Struts method were obtained more than the oblique member of the truss guard structure due to the presence of more indefinite degrees in the truss, which causes stress transfer from more paths and less abutment reactions. Finally, based on the damage potential index DPI, it was determined that between the two systems of Inclined Struts and truss guard structure to stabilize the excavation in the vicinity of the neighboring building in urban areas, the safety and strength of the truss guard structure and the use of truss is safer.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 February 2021

Revise Date: 15 June 2021

Accept Date: 03 August 2021

Keywords:

Excavation

Inclined Struts

Truss structure

Finite Element

PLAXIS

Damage Potential Index DPI

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.271828.2356>

*Corresponding author: Seyed Shahab Emamzadeh.

Email address: shemamzadeh@khu.ac.ir

تحلیل عددی سازه نگهبان تیرک مایل و سازه خرابایی در پایدارسازی گود برمبنای

شاخص پتانسیل خرابایی DPI

سید شهاب امامزاده^{*۱}

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش در شرایط مختلف، رفتار سیستم نگهدارنده تیرک مایل و سازه نگهبان خرابایی بررسی شده است. برای این منظور حرکات افقی و عمودی خاک در اثر گودبرداری و سطح خرابایی ساختمان‌های مجاور این سیستم‌ها برای نگهداری گود تعیین می‌شود. گودبرداری در سه عمق ۴، ۷ و ۱۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است که به ترتیب نشان‌دهنده گودهای کم عمق، با عمق متوسط و با عمق زیاد هستند. از معیار رفتاری مور کولمب برای رفتار خاک استفاده شد. گودبرداری بصورت مرحله‌ای با نرم‌افزار *PLAXIS* مدل‌سازی گردید. با مقایسه خروجی‌های بدست آمده از مدل‌سازی عددی اینگونه نتیجه گیری گردید که جابجایی افقی و قائم خاک، در مدل‌های تیرک مایل بیشتر از مدل‌های سازه نگهبان خرابایی است. دلیل آن عدم وجود عضو قائم و سیستم مهاربندی جانبی در تیرک مایل، برخلاف سازه نگهبان خرابایی است. مقادیر تنش و عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی در روش تیرک مایل، بیشتر از عضو مایل سازه نگهبان خرابایی بدست آمد که دلیل آن وجود درجات نامعینی بیشتر در خرابا است که باعث انتقال تنش از مسیرهای بیشتر و کمتر شدن مقدار عکس-العمل‌های تکیه‌گاهی می‌شود. در نهایت براساس روش شاخص پتانسیل خرابایی *DPI* مشخص گردید که از بین دو سیستم تیرک مایل و سازه نگهبان خرابایی برای پایدارسازی گودبرداری در مجاورت ساختمان همسایه در مناطق شهری، ایمنی و مقاومت سازه نگهبان خرابایی بیشتر و استفاده از خرابا مطمئن‌تر است.

کلمات کلیدی: گودبرداری، سازه‌های نگهبان خرابایی، پلکسیس، سیستم تیرک مایل گود، اجزای محدود، شاخص پتانسیل خرابایی *DPI*

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.271828.2356	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۳/۲۵	۱۳۹۹/۱۱/۱۶
10.22065/jsce.2021.271828.2356					
سیدشهاب امامزاده shemamzadeh@khu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

امروزه با افزایش و گسترش روزافزون احداث ساختمان‌های مرتفع و لزوم قرارگیری پارکینگ در طبقات پایین‌تر از سطح زمین، رعایت اصول و قوانین گودبرداری صحیح شهری در راستای کاهش خطرات و آسیب‌های مالی و جانی، ضروری و غیرقابل اغماض است. گودبرداری در زمره‌ی عملیات خاکی خطرناک قرار دارد. یکی از حساس‌ترین مسائل ژئوتکنیکی، گودبرداری در مجاورت ساختمان موجود است. براساس آمارهای موجود، خسارت زیادی تاکنون در اثر گودبرداری‌ها به ساختمان‌های همسایه در درجات مختلف وارد شده است. گودبرداری سبب برهم‌خوردن تعادل خاک و تغییر وضعیت تنش‌ها در خاک می‌شود. بنابراین انجام عملیات گودبرداری می‌تواند باعث برهم‌خوردن انسجام خاک و گسیختگی آن شده و یا موجب از بین رفتن تعادل و پایداری سازه‌ی مجاور گود گردد [۱]. در پروژه‌هایی که نیازمند گودبرداری هستند، ابتدا باید وضعیت پایداری شیب طبیعی موجود در محل کنترل شود و به تناسب آن نسبت به انتخاب سازه‌های نگهدارنده، اقدام نمود. سازه‌های نگهدارنده ممکن است موقت باشند مانند سیستم تیرک مایل و سیستم خرپایی و یا اینکه دائمی باشند مانند دیوارهای حائل دائمی زیرزمین ساختمان‌ها و نظایر آنها. همچنین ممکن است سازه‌های نگهدارنده موقت، پس از اتمام گودبرداری برچیده نشوند و به عنوان دیوارهای حائل دائمی عمل کنند و یا اینکه پس از اجرای سازه نگهدارنده موقت گودبرداری، اقدام به تکمیل یا تقویت آن‌ها نموده و سپس به عنوان دیوار حائل دائمی مورد استفاده قرار گیرند. مساله اصلی در انتخاب مناسب سازه نگهدارنده، کنترل تغییرشکل گود و سازه‌های اطراف آن است. توکلی و همکاران [۲] در تحقیقی تغییرشکل‌های محیط اطراف گودبرداری و میزان تأثیر این تغییرمکان‌ها بر روی سازه‌های اطراف را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. برای این منظور اثر سختی سازه‌های مجاور بر میزان جابجایی زمین ناشی از گودبرداری لحاظ شد. در این تحقیق از دو نرم افزار Etabs و Plaxis و از مدل رفتاری خاک سخت شونده برای مصالح زمین استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که سختی سازه مجاور گود تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی کنترل تغییر مکان زمین ناشی از گودبرداری دارد. یکی از سیستم‌های متداول و سنتی در ایران برای محافظت گود، سیستم تیرک مایل است که تحقیقات کمی روی آن انجام شده است. برای مثال، خاتمی [۳]، سیستم تیرک مایل را با مدل‌سازی دو بعدی مورد مطالعه قرار داد. وی در این تحقیق به چگونگی تأثیر پارامترهای مؤثر بر رفتار تیرک مایل پرداخت و به این نتیجه رسید که خاک‌هایی که چسبندگی آنها کمتر از 20 kN/m^2 است و همچنین در گودهای عمیق‌تر از ۱۲ متر استفاده از تیرک مایل باعث ریزش گود خواهد شد. فاخر [۴] درباره مکانیزم عملکرد تیرک مایل مطالعاتی انجام داد و ضمن تشریح عملکرد تیرک مایل توصیه‌های کاربردی راجع به نحوه اتصال تیرک مایل به کف گود و ساختمان همسایه ارائه داد. سبزی و فاخر [۵] در یک پروژه گودبرداری که با سیستم تیرک مایل محافظت می‌شد کرنش‌سنج‌هایی را در مجاورت ساختمان همسایه در شهر تهران نصب کرده و در مراحل مختلف گودبرداری تغییرشکل‌ها را اندازه‌گیری نمودند. همچنین به کمک ابزار الکترونیکی نصب شده در تیرک‌های مایل نیروی وارد شده به هر تیرک را اندازه‌گیری کردند. در این تحقیق میزان تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده خاک مجاور گود و میزان نیروی‌های وارد بر تیرک به نمایش درآمد.

با توجه به اینکه این سیستم‌های نگهدارنده بیشتر در ایران استفاده شده لذا تحقیقات خارجی کمی روی رفتار آنها وجود دارد و در داخل کشور نیز بیشتر تحقیقات تجربی و میدانی [۶] بوده و جای تحلیل‌های عددی برای این سیستم‌های متداول گودبرداری در کشور خالی است. البته تحقیقاتی داخلی و خارجی بسیاری در زمینه پایداری سازه‌های عمیق انجام شده است [۷] که قابل استفاده در گودهای کم عمق نیستند. مهمترین نقطه ضعف سیستم تیرک مایل و سیستم خرپایی، موضعی یا گسسته بودن اثر آنها است به‌طوری‌که مابین تیرک‌ها و یا خرپاها حفاظت مناسبی انجام نمی‌شود. با اینحال اقتصادی بودن این روش‌ها نسبت به پایداری‌های پیوسته مانند دیوارحایل یا سپر کوپی یکی از نقاط قوت آنها است [۸]. لذا با توجه به اهمیت حفظ گودبرداری در پروژه‌های ساختمانی و کاهش خسارات وارده در این تحقیق به تحلیل عددی این سیستم‌ها پرداخته می‌شود. در ابتدا روش پایداری سازی تیرک مایل و سازه خرپایی معرفی شده سپس تئوری‌های گسیختگی خاک ارائه خواهد شد و در آنها به مدل عددی سازه‌های نگهدارنده و صحت سنجی آنها پرداخته می‌شود.

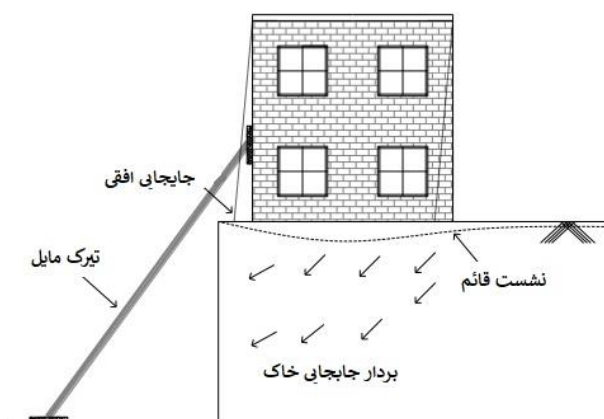
۲- معرفی روش تیرک مایل و سازه خرپایی

انتخاب روش مناسب برای پایدارسازی گودبرداری‌های شهری، به کلیه شرایط تأثیرگذار بستگی دارد و در شرایط مختلف، به صورت‌های گوناگون اتخاذ می‌شود. در انتخاب و طراحی سازه نگهبان، عوامل زیادی دخیل هستند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]:

- نوع خاک و مقاومت برشی آن
- عمق و دهانه گودبرداری
- پایداری کف گود و جوانب آن
- کوتاه یا بلندمدت بودن گودبرداری
- شرایط تکتونیک و زلزله‌خیزی منطقه
- وجود درزها، ترک‌ها و لنزهای موجود در خاک و سنگ
- ضرورت استفاده از سیستم مهاربندی، موقتی و یا دائمی، پذیرش مخاطره و میزان هزینه
- محدودیت‌های تغییرمکان قائم و جانبی سطح مجاور گود و اثر آن بر سازه‌های موجود اطراف گود
- سربار مجاور گود اعم از وزن ساختمان یا خاکریز کنار گود و یا وزن ناشی از توقف احتمالی ماشین‌آلات

۲-۱- روش تیرک مایل

این روش به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و درعین حال محبوب‌ترین روش‌های محافظت از گود در کشورمان شناخته شده و همچنان نیز با وجود ساختار بسیار ساده هواداران زیادی دارد. تیرک مایل در واقع عضوی است که به صورت مایل، پی ساختمان مجاور گود یا قسمت‌های میانی دیواره‌ی گود را به کف گود متصل می‌نماید. تیرک معمولاً از پروفیل‌های فولادی ساخته می‌شود ولی می‌تواند از جنس چوب نیز باشد. در شکل ۱ نمونه‌ای از پایدارسازی گود با استفاده از تیرک مایل نشان داده شده است.



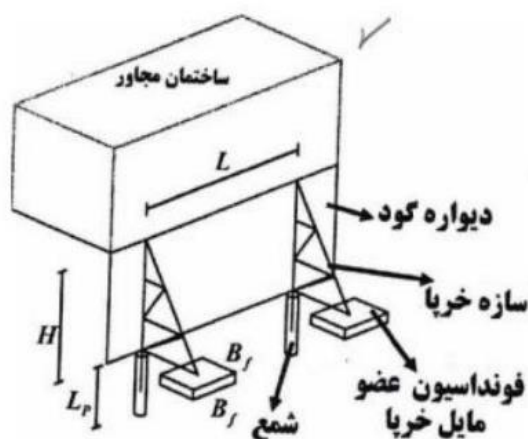
شکل ۱: استفاده از تیرک مایل برای محافظت از گود شهری [۹].

خرابی ساختمان‌های موجود در کنار گود در اثر دو عامل نشست ساختمان و حرکت افقی خاک کنار گود به وجود می‌آید که هر دو عامل نقش بسیار مهمی دارا هستند. مکانیزم عملکرد تیرک مایل به گونه‌ای است که در عین سادگی هر دو عامل مخرب فوق را کنترل می‌نماید. به این صورت که قسمتی از بار را از کف ساختمان مجاور به کف گود منتقل کرده و در نتیجه نشست ساختمان کنترل می‌شود. از طرفی دیگر، مایل بودن تیرک تا حدودی باعث جلوگیری از حرکت افقی ساختمان می‌گردد. بدیهی است که در این سیستم، کارایی عضو مایل در حالت فشاری بوده و در مقابل نیروهای کششی عملکرد مناسبی نخواهد داشت. مهم‌ترین موضوع در طراحی و ساخت تیرک مایل، نحوه‌ی اتصال آن به دیواره‌ی گود و مقید نمودن انتهای دیگر تیر در زمین کف گود است. متأسفانه در اغلب سیستم‌های تیرک مایل به کار

برده شده برای حفاظت از گود شهری، این موضوع نادیده گرفته شده است. در این تحقیق طبق مطالعات میدانی مشاهده شد که تیرک مایل در مواردی که ساختمان مجاور گود حداکثر دو طبقه باشد استفاده گسترده دارد. با اینحال جهت بررسی فتار کامل تیرک مایل وضعیت وجود ساختمان چهار طبقه نیز بررسی شده است. در تمامی نمونه‌های مورد تحقیق حاضر از تیر آهن INP8 به عنوان تیرک استفاده شده است که کوچکترین پروفیل مصرفی برای تیرک است.

۲-۲- روش سازه نگهبان خرابایی

این روش یکی از متداول‌ترین و مناسب‌ترین روش‌ها به منظور پایدارسازی گودبرداری‌ها در مناطق شهری محسوب می‌شود. دلیل این امر، ساده بودن اجرای آن و عدم وابستگی به ماشین‌آلات تخصصی در حین اجرا است. مراحل اجرای اصولی سازه نگهبان خرابایی بدین صورت است که ابتدا در محل قرارگیری عضو قائم خرابا در مجاورت گود چاهک‌هایی با عمقی برابر با مجموع عمق گود و طولی برای گیرداری عضو حفر می‌شود. سپس قفسه پیش‌ساخته آرماتورهای فولادی و عضو قائم را درون شمع فرستاده و اقدام به بتن‌ریزی شمع (قسمت انتهایی چاهک) می‌کنند. بعد از سخت شدن بتن شمع، می‌توان با یک شیب مطمئن خاکبرداری را شروع کرد و اعضای مایل را مرحله به مرحله از بالا به پایین اجرا نمود. شکل ۲ نمایی از سازه نگهبان خرابایی را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۲: نمایی از پایدارسازی گود با سازه نگهبان خرابایی [۳].

روش سازه نگهبان خرابایی دارای مزایای بسیار زیادی است و از نظر اجرا در شرایط مختلف قابلیت انعطاف زیادی دارد ولی در عین حال معایبی نیز دارد. از مهمترین مزایای این روش می‌توان به مناسب بودن این روش برای اغلب گودهای واقع در مناطق شهری، امکان استفاده مجدد از سازه (خرابا)، ساده بودن مراحل اجرا و عدم نیاز به ماشین‌آلات تخصصی اشاره کرد. از طرفی دیگر از معایب قابل توجه این روش نیز می‌توان گفت در مقایسه با روش‌های پیشرفته‌تر سرعت اجرای کمتری دارد. همچنین نیاز به خاکبرداری دستی در مراحل اولیه سرعت اجرا را کند می‌کند. از طرفی دیگر، جاگیر بودن خراباها مشکلاتی را در روند اجرای سازه اصلی بوجود می‌آورند. روش سازه نگهبان خرابایی در ایران به میزان بسیار گسترده‌ای به کار می‌رود و می‌توان گفت که پرکاربردترین سازه نگهبان گودها در ایران است. در این تحقیق برای پایدارسازی گودهایی به عمق ۴، ۷ و ۱۰ متر از سیستم خرابایی استفاده شده است. رفتار اعضای خرابایی بصورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته می‌شود تا در صورت افزایش بار ناشی از سربار اطراف گود وضعیت غیرارتجاعی و نهایتاً گسیختگی اعضا قابل بررسی باشد.

۲-۳- مراحل اجرای سازه نگهبان

محافظت از گود دارای چند مرحله است. ابتدا به دلیل رعایت ایمنی یک ترانشه با شیب پایدار در کنار ساختمان همسایه ایجاد می‌گردد. سپس به منظور کارگزاری تیرک مایل یا سیستم خرابایی فقط باریکه‌ای طبق شکل الف-۳ از خاک برداشته شده و بعد از

کارگذاری تیرک‌ها طبق شکل ب-۳ باقی گود طبق شکل ج-۳ مرحله به مرحله خاکبرداری می‌شود. بنابراین به منظور در نظر گرفتن بدترین حالت در مدلسازی‌ها، شالوده ساختمان مجاور گود درست در مجاورت دیواره گودبرداری در نظر گرفته می‌شود.



الف



ب



ج

شکل ۳: مراحل اجرایی گودبرداری و محافظت از آن به روش تیرک مایل و روش خرابایی

۳- تئوری های ساده گسیختگی خاک

مدل‌های رفتاری نشانگر مقاومت و سختی خاک بوده و بر مبنای نتایج آزمایشگاهی تعریف می‌شوند. مدل‌های ساده و کم پارامتر از پرفردارترین مدل‌ها در طراحان سازه‌های نگهدارنده هستند. دو مدل موهر-کولمب و مدل خاک سخت شونده GHS¹ از مدل‌های متداول به شمار می‌روند. مدل رفتاری موهر-کولمب در حالت حدی تنش با زاویه اصطکاک (ϕ) ، چسبندگی (c) توصیف می‌شود که پارامترهای مقاومتی خاک هستند. در این مدل رفتاری، مدول سختی خاک ثابت و مستقل از تنش بوده و رفتار سختی شونده خاک در نظر گرفته نمی‌شود. مدل خاک سخت شونده برخلاف مدل موهر-کولمب، وابستگی مدول سختی به تنش را نیز به حساب می‌آورد. این بدان معنی است که همه پارامترهای سختی (سختی سه محوری E_{50} ، سختی باربرداری سه محوری E_{ur} ، و سختی بارگذاری انودومتر E_{oed}) با افزایش فشار، افزایش می‌یابند. علاوه بر موارد ذکر شده، شرایط اولیه خاک مانند پیش تحکیمی در اکثر حالات مربوط به تغییر شکل خاک نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. طبق مدل خاک سخت شونده، خاک موجود در زیر کف گود دارای سختی کمتری در مقایسه با شرایط واقعی است. زیرا در مدل خاک سخت شونده، سختی خاک وابسته به تنش است. از طرفی گودبرداری باعث می‌شود تا تنش‌های سربار بر روی کف گود

¹Generalized Soil Hardening

آزاد گردند و در نتیجه خاک سختی بالایی از خود نشان ندهد. این در حالی است که در واقعیت به دلیل وجود تنش‌های پیش تحکیمی، خاک از سختی قابل توجهی برخوردار است و در اثر باربرداری به میزان چشمگیری کاهش پیدا نمی‌کند. بنابراین در مدل GHS این کا-ستی‌ها برطرف شده است. مدل GHS روابط جدیدی را برای تنش در مدل خاک سخت شونده با در نظر گرفتن تنش‌های پیش تحکیمی ارائه می‌دهد. این مدل امکان تغییر در تنظیمات مربوط به وابستگی تنش - کرنش را فراهم نموده است.

۴- سطوح خرابی ساختمان‌های مجاور گود

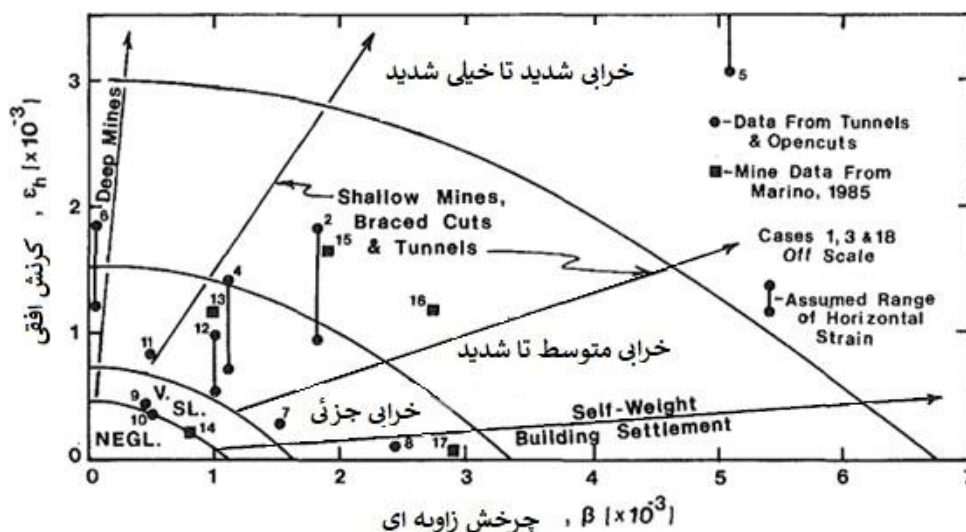
منظور از سطوح خرابی حدود خرابی قابل انتظار در سازه مجاور گود در طول گودبرداری است. هر سطح خرابی بیان کننده بیشینه خرابی قابل انتظار در سازه است. از اولین تحقیقات در این زمینه می‌توان به مطالعه اسکمپتون و مک‌دونالد اشاره کرد [۶]. آن‌ها حدود مجاز تغییر شکل یک قاب به دهانه L را وابسته به چرخش زاویه‌ای ناشی از نشست دانستند و نسبت (L/300) را به عنوان مقدار مجاز معرفی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که چرخش سازه در این نسبت باعث به وجود آمدن ترک‌های قابل مشاهده می‌شود. اما یک سال بعد پولشین و توکار [۱۰] به این نتیجه رسیدند که هم طول قاب L و هم ارتفاع قاب H هر دو تأمان باید در مقدار مجاز چرخش به حساب بیایند تا بتوان سطوح خرابی مختلف را تخمین زد و با توجه به آن شش سطح خرابی را برای سازه‌های دچار نشست تعریف کردند. تا این سال، به کرنش افقی در تعیین حدود مجاز تغییر شکل توجه نشده بود. بولند و همکاران [۱۱] با توجه به فراوانی ترک‌ها، عرض دهانه و امکان تعمیر، سطوح آسیب را طبق جدول ۱ معرفی کردند. این روش مورد اقبال بسیاری از پژوهشگران واقع شده است و در تحقیقات زیادی به عنوان معیار خرابی استفاده می‌شود. با توجه به توصیف خرابی‌ها در هر سطح بر طبق این روش سازه‌های نگهبان باید طوری طراحی شوند که میزان خرابی از سطح یک بیشتر نشود. دودینگ و مک‌کنا [۱۲] طی تحقیقاتی نتیجه گرفت که علاوه بر عوامل فوق، عرض ترک تابعی از شرایط محیطی مانند دما و رطوبت نیز هست.

جدول ۱: میزان سطوح خرابی سازه مجاور گود براساس تحقیق بولند و همکاران [۱۱]

عرض تقریبی ترک (mm)	توصیف خرابی‌های نمونه	آسیب دیدگی
کمتر از ۰/۱	ترک‌های مویی به عرض کمتر از ۰/۱ میلی‌متر قابل صرف‌نظر کردن هستند	قابل اغماض
کمتر از ۱	ترک‌های ریز که به آسانی می‌توان هنگام نقاشی ساختمان مخفی کرد. احتمالاً شکستگی‌های ناچیز جدا از هم در ساختمان یا ترک‌های قابل مشاهده از نزدیک در نمای آجری	خیلی ناچیز
کمتر از ۵	ترک‌هایی که به آسانی پر می‌شوند. و احتمالاً نیاز به نقاشی مجدد هست. چند شکستگی جزئی در داخل ساختمان دیده می‌شود. ترک‌ها از بیرون قابل رویت هستند. حتی در برخی نواحی ممکن است لازم باشد ترک‌ها با سیمان پر شوند. (برای اطمینان از عایق‌کاری در برابر عوامل جوی) در و پنجره کمی چفت می‌شوند.	ناچیز
۵ تا ۱۵ یا تعداد بالای ۳	ترک‌هایی که می‌توان توسط بنا با آنها را با بتونه پر کرد. ترک‌هایی که دوباره ایجاد می‌شوند. می‌توان به وسیله یک جدار مناسب پوشاند. پر کردن ترک‌های آجرکاری خارجی و یا احتمالاً ترمیم آجرکاری لازم است. در و پنجره‌ها چفت می‌شوند. لوله‌های تاسیسات ممکن است بشکنند. غالباً در برابر عوامل جوی دچار آسیب می‌شود.	متوسط
۱۵ تا ۲۵ بسته به تعداد ترک	تعمیراتی که شامل تخریب و دوباره‌سازی بخش‌هایی از دیوارها، به ویژه بالای در و پنجره هستند. در و پنجره تاب برمی‌دارد و کف دارای شیب قابل توجهی می‌شود. دیوار بطور چشمگیری انحراف یافته و دچار تحذب می‌شود. از باربری تیرها کاسته می‌گردد. لوله‌های تاسیسات از هم گسیخته می‌گردند.	شدید
بزرگ‌تر از ۲۵	نیاز به تعمیرات اساسی شامل بازسازی جزئی و یا کامل حس می‌شود. تیرها باربرری خود را از دست می‌دهد. دیوارها به طرز بدی انحراف می‌یابند و باید آنها را تخریب کرد. پنجره‌ها تاب برداشته و می‌شکنند. خطر ناپایداری.	بسیار شدید

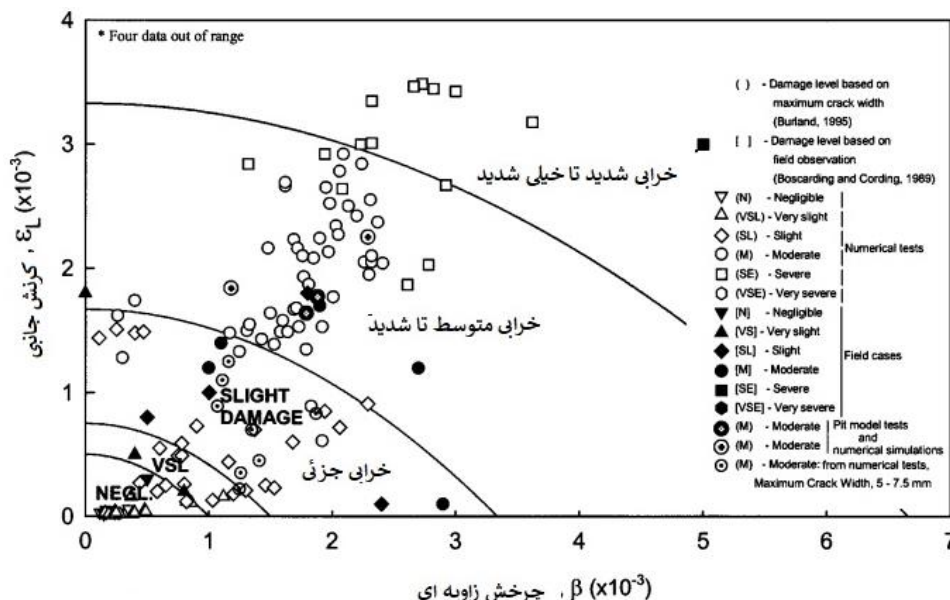
برای اولین بار، بوساکاردین و کوردینگ [۱۰] طی تحقیقاتی نشان دادند که بروز خرابی در ساختمان‌های مجاور گود حاصل اندرکنش همزمان تغییر شکل افقی و قائم است. آن‌ها پس از بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی تیرهای عمیق، متوجه شدند که در تیرهایی

که تحت کرنش افقی و انحراف زاویه‌ای به طور همزمان قرار گیرند، میزان خرابی ایجاد شده بحرانی تر خواهد بود. بنابراین، با ارائه نموداری (شکل ۴) روشی جدید برای تعیین درجه خرابی پیشنهاد دادند. سپس با استفاده از داده‌های تجربی روش ارائه شده را صحت‌سنجی نمودند.



شکل ۴: نمودار پیشنهادی بوساکاردین و کوردینگ برای تعیین میزان خرابی ساختمان مجاور گود (۱۹۸۹) [۱۰]

بون [۱۴] جدول دیگری پیشنهاد داد که در آن عوامل دیگری نظیر ابعاد ساختمان، مقاومت کششی و مقاومت برشی ساختمان و میزان لغزش بین زمین و فونداسیون در نظر گرفته شده بود. این روش با فرض کرنش یکسان میان خاک و ساختمان معرفی شد. سان و کوردینگ در تحقیق دیگری [۱۵] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سعی در بهبود روش پیشنهادی داشتند. آنها با شبیه‌سازی ساختمانی در مجاور گود در مقیاس آزمایشگاهی، انحراف زاویه‌ای و کرنش طولی را به تدریج در مدل‌های آزمایشگاهی افزایش می‌داند تا دچار ترک-خوردگی شوند. آنها نتایج این آزمایش‌ها را به صورت نموداری درآورده و به منظور اعتبارسنجی آن نتایج ۱۸ مورد گزارش میدانی و ۱۲۲ مدل‌سازی عددی را با نمودار مقایسه کردند. به این ترتیب توانستند نمودار ارائه شده در شکل ۴ را بهبود بخشند (شکل ۵).



شکل ۵: نمودار پیشنهادی اصلاح شده سان و کوردینگ برای تعیین میزان خرابی ساختمان مجاور گود

این تحقیقات اعتبار بیشتری به روش ارائه شده کوردینگ بخشید و باعث شده تا امروز هم در بسیاری از تحقیقات برای تخمین سطح خرابی از این شیوه استفاده شود. همانطور که ذکر شد و در شکل نیز مشخص است، این روش علاوه بر مشاهدات میدانی، با مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات عددی نیز اعتبارسنجی شده است. سون و کوردینگ [۱۶] در طی تحقیقی بر روی تأثیر سختی برشی و سختی خمشی ساختمان بر میزان واژگونی سازه نشان دادند که مقدار سختی برشی تأثیرگذارتر از سختی خمشی ساختمان است. آن‌ها در این پژوهش، روابطی به منظور تعیین میزان کرنش‌های قطری ساختمان که متناظر با اندازه واژگونی سازه است ارائه دادند. این روابط براساس خصوصیات هندسی، سختی خمشی و سختی برشی ساختمان تشکیل شده‌اند و با توجه به درصد بازشوها قابل تغییر هستند. جوآنگ و شوستر [۱۷] با استفاده از مدل‌سازی عددی موفق به ارائه روابط تحلیلی شدند که می‌تواند میزان احتمالی وقوع خرابی در ساختمان مجاور گود را مشخص نماید. در این روش میزان خرابی ساختمان با استفاده از شاخص پتانسیل خرابی^۲ DPI تعیین می‌شود. این شاخص به وسیله روابط ۱ تا ۳ تعیین شده و مقیاس آن با توجه به جدول ۲ از صفر (میزان خرابی قابل چشم‌پوشی) تا بیش از ۸۵ برای خاک‌های موجود در ناحیه مقعر و بیش از ۸۰ برای خاک‌های موجود در ناحیه محدب اطرف گود (میزان خرابی بسیار شدید) است. روابط ۱ تا ۳ بر مبنای ϵ_1 کرنش طولی، ϵ_p کرنش اصلی و (β) چرخش زاویه‌ای است.

$$DPI = \epsilon_p / \left(\frac{1}{200} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\epsilon_p = \epsilon_1 \times \cos^2 \theta_{max} + \beta \times \cos \theta_{max} \sin \theta_{max} \quad (2)$$

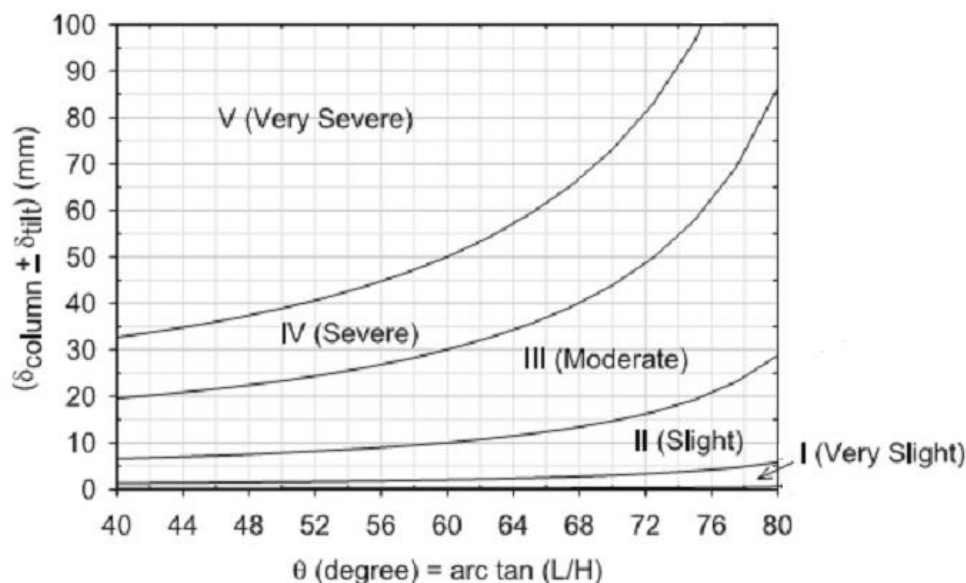
$$\theta_{max} = 0.5 \times \tan^{-1} \theta_{max} \quad (3)$$

جدول ۲: تخمین میزان خرابی ساختمان مجاور گود براساس تحقیق کونگ و شوستر (۲۰۱۶) [۱۴]

تخمین درجه خرابی	DPI در ناحیه مقعر	DPI در ناحیه محدب
قابل چشم پوشی	۱۵-۰	۱۰-۰
ناچیز	۲۵-۱۵	۲۰-۱۰
ناچیز تا متوسط	۳۵-۲۵	۳۰-۲۰
متوسط	۶۰-۳۵	۵۰-۳۰
شدید	۸۵-۶۰	۸۰-۵۰
بسیار شدید	>۸۵	>۸۰

در جدیدترین تحقیق به منظور تعیین میزان خرابی ساختمان مجاور گود، هالیم [۱۸] نمودار ساده‌ای جهت تعیین میزان خسارت پیشنهاد داده است. این مطالعه با بررسی و اندازه‌گیری‌های موردی در سنگاپور انجام و صحت‌سنجی شده است. این نمودار در شکل ۶ قابل مشاهده است. در این نمودار محور افقی نمایانگر ابعاد قاب ساختمان و محور عمودی مجموع اختلاف تراز میان دو ستونی از قاب است که در اثر نشست و کج شدگی ایجاد می‌گردد.

² Damage Potential Index



شکل ۶: ارزیابی میزان خرابی ساختمان مجاور گود [۱۵]

در این تحقیق اثر کرنش افقی در تعیین میزان خرابی در نظر گرفته نشده است. این در حالی است که در تحقیقات قبلی اهمیت این کرنش در تخمین سطح خرابی ساختمان مجاور گود مشخص شده است. در حقیقت نتایج این تحقیق با استفاده از روابط هندسی بین کرنش‌های قاب و عرض ترک و تلفیق آن با نتایج تحقیق بورلند [۱۱] به دست آمده است و صرفاً در حالتی که قاب دچار نشست ناهمگون شود ولی کرنش افقی در آن پدید نیاید، قابل استفاده خواهد بود.

۵- روش ارزیابی گود و سازه نگهدار

در حال حاضر آیین‌نامه ویژه‌ای در سطح داخلی و یا بین‌المللی به منظور ارزیابی و بررسی گودهای محافظت شده با استفاده از سیستم خرابی یا تیرک مایل وجود ندارد. به همین دلیل برای ارزیابی گود از روش جوانگ و شوستر [۱۷] استفاده می‌گردد. در این روش گودها با استفاده از شاخص بی‌بعدی به شاخص پتانسیل خرابی DPI^۳ مورد بررسی واقع می‌شوند. به این صورت که با در نظر گرفتن دو نقطه در زیر شالوده ساختمان کنار گود و استخراج مختصات و جابجایی‌های افقی و قائم آن‌ها می‌توان کرنش طولی ε و چرخش زاویه‌ای β را با توجه به روابط زیر به دست آورد.

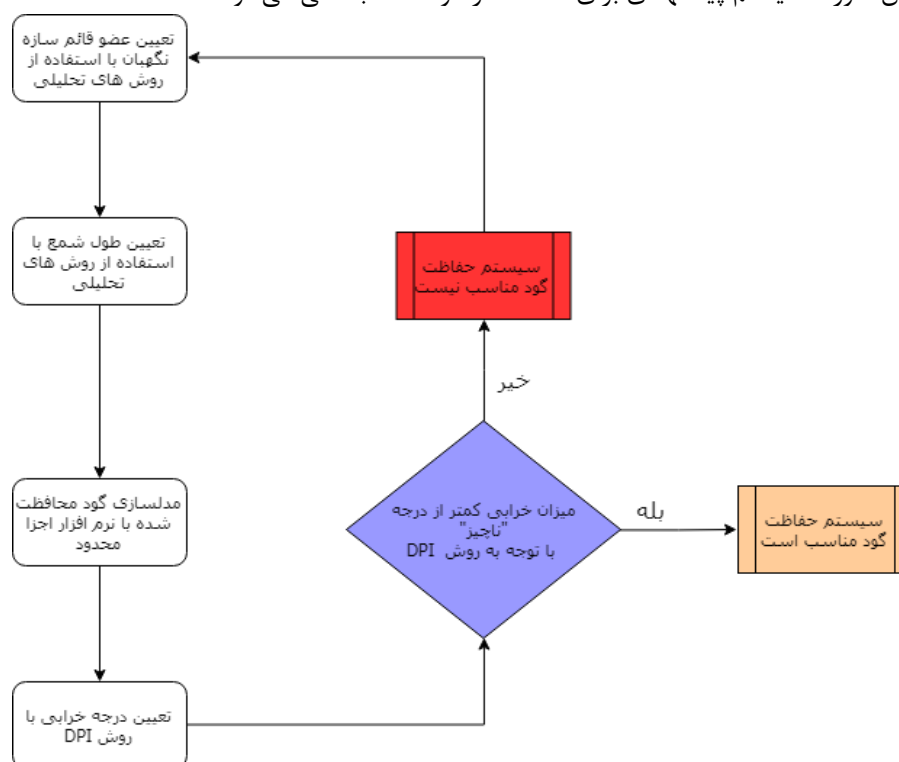
$$\varepsilon = \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{x_1 - x_2} \quad (۴)$$

$$\beta = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{x_1 - x_2} \quad (۵)$$

در این روابط x_1 و x_2 مختصات طولی نقاط زیر شالوده و Δx_1 و Δx_2 جابجایی‌های مربوط به آن‌ها در جهت طولی و Δy_1 و Δy_2 جابجایی‌های عرضی می‌باشند. پس از محاسبه جابجایی‌هایی طولی و عرضی، ε و β تعیین می‌شوند و با استفاده از آن‌ها درجه خرابی DPI به دست می‌آید. در نهایت با بررسی درجه خرابی به دست آمده می‌توان پتانسیل خرابی گود را ارزیابی نمود. برای این منظور کاربرگی در نرم‌افزار EXCEL طراحی شد و مقادیر مربوط به ε ، β و DPI با استفاده از مختصات نقاط زیر شالوده ساختمان مجاور گود و همچنین تغییرشکل‌های مربوط به آن‌ها محاسبه گردید. در نهایت اگر درجه خرابی محاسبه شده در ناحیه قابل اغماض قرار گیرد، می‌توان نتیجه

^۳ Damage Potential Index (DPI)

گرفت که سیستم ارائه شده برای محافظت از گود دارای میزان مناسبی از ایمنی است. در غیر این صورت اگر درجه خرابی بالاتری حاصل شد، نشان دهنده این است که سیستم پیشنهادی برای گود مجاز نخواهد بود. براساس نتایج به دست آمده سیستم پایدارسازی که دارای درجه خرابی DPI قابل اغماض باشد، برای گود مناسب تشخیص داده خواهد شد. در ادامه تحقیق حاضر، به عنوان نمونه‌های موردی، نتایج مربوط به محافظت از گودهایی به عمق چهار، هفت و ده متر آورده شده است. به این صورت که نتایج هر دسته در جدولی ارائه شده و در ستون آخر جدول سیستم سازه‌ای مناسب برای محافظت از گود که دارای درجه خرابی در ناحیه قابل اغماض است بیان می‌گردد. انتخاب اولیه سیستم سازه‌ای خرابایی مناسب گود با استفاده از روش‌های تحلیلی (اشرفی، ۱۳۹۵) و پس از آن در صورت مناسب نبودن سیستم به وسیله سعی و خطا صورت گرفته است. در گودهای متداول شهری اگر فرض شود که به هر تیرک به طور متوسط یک تن نیرو وارد گردد می‌توان با در نظر گرفتن تنش مجاز ۳۶۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع برای فولاد st37 از تیر آهن IPE80 استفاده نمود. شکل ۷ چگونگی ارزیابی گود و نحوه محاسبه جزییات سیستم سازه نگهبان در این تحقیق را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. اگر میزان درجه خرابی «ناچیز» حاصل شد در آن صورت سیستم پیشنهادی برای حفاظت از گود مناسب تلقی می‌شود.



شکل ۷: چگونگی ارزیابی گود و نحوه محاسبه جزییات سیستم سازه نگهبان در تحقیق حاضر

۶- مدل عددی

در این تحقیق برای ارزیابی گود و سازه نگهبان از نرم‌افزار المان محدود دوبعدی Plaxis-2D ویرایش ۸,۲ استفاده شده است که مدل رفتاری مختلفی برای حل مسائل مکانیک خاک دارد و قادر است دامنه وسیعی از رفتار خاک‌ها را مدل نماید. این نرم‌افزار برای مدل کردن میدان تنش و جابجایی دوبعدی خاک با هندسه ساده کاربرد فراوانی دارد. معادله‌های حاکم در این نرم‌افزار معادله‌های تعادل خاک است. این نرم‌افزار برای تحلیل دوبعدی از روش اجزای محدود روی یک میدان شبکه‌بندی شده استفاده می‌کند. جهت اطمینان از عملکرد برنامه نتایج این نرم‌افزار با مدل میدانی سبزی و فاخر [۵] بررسی شد که طبق جزییات بخش بعدی نتایج قابل قبولی بدست آمد.

۱-۴- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

صحت‌سنجی مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق به دو قسمت تقسیم می‌شود. در مرحله اول استقلال پاسخ مدل‌ها از اندازه مش‌بندی با استفاده از آنالیز حساسیت انجام گرفته است. برای این منظور اندازه مش‌بندی از بسیار درشت تا بسیار ریز تغییر داده می‌شود و در هر مرحله حداکثر تغییر شکل افقی دیواره گود از نرم‌افزار استخراج می‌گردد. هرگاه ابعاد مش‌بندی به اندازه‌ای رسید که درصد تفاوت تغییر شکل نسبت به سایز مش‌بندی مرحله قبلی کمتر از پنج درصد باشد، می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد انتخابی مقادیر مناسبی است. از این رو با توجه به جدول ۳، حداکثر اختلاف پاسخ‌ها وقتی که اندازه مش‌بندی ریز است با مرحله قبلی (اندازه مش‌بندی متوسط) کمتر از پنج درصد است. لذا اندازه مش‌بندی در کلیه مدل‌ها ریز در نظر گرفته می‌شود. برای دستیابی به دقت بیشتر ابعاد مش در ناحیه نزدیک به دیواره گود ریزتر انتخاب می‌گردد.

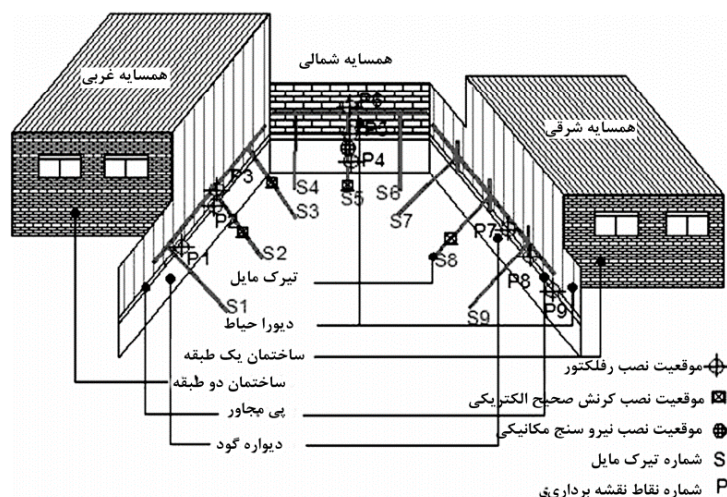
جدول ۳- بررسی استقلال پاسخ‌های نرم‌افزار اجزای محدود از مش‌بندی

درصد اختلاف پاسخ‌ها	حداکثر تغییر شکل افقی (mm)	اندازه مش‌بندی
-	۲,۵۴	بسیار درشت
۱۷٪	۳,۳۳	درشت
۱۰٪	۳,۸۷	متوسط
۴٪	۴,۱۹	ریز
۳٪	۴,۳۲	بسیار ریز

در بخش دوم اعتبارسنجی هدف آن است که از صحت مقادیر به دست آمده از خروجی‌های نرم‌افزار اطمینان حاصل شود. خطاهای بسیاری در خروجی ممکن است به دلایل مختلف از جمله ورودی‌های نادرست یا عدم استفاده از روش مدل‌سازی مناسب رخ دهد. برای این منظور با مدل‌سازی مطالعه تجربی سبزی و فاخر در سال ۱۳۹۵ بر روی یک گودبرداری در شهر تهران و مقایسه نتایج اخذ شده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار مانند تغییر شکل دیواره گود با مقادیر به دست آمده در مطالعه اخیر می‌توان اطمینان حاصل نمود که مدل عددی ایجاد شده دارای نتایج قابل اتکایی است. در شکل ۸ گود مورد مطالعه در تحقیق سبزی و فاخر مدل‌سازی شده است.



شکل ۸- گودبرداری مورد بررسی در مطالعه سبزی و فاخر، ۱۳۹۵ [۵]



شکل ۹- طرح کلی از گود ابرابندی شده و نقاط شماره گذاری شده [۵]

شرایط ژئوتکنیکی مدل با توجه به مقادیر موجود در منطقه به نرم افزار معرفی شده است. این مقادیر در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۴- شرایط ژئوتکنیکی منطقه در مدلسازی سبزی و فاخر، ۱۳۹۵

ضریب پوآسون ν	مدول الاستیسیته E (MPa)	عرض گود (m)	عمق گود (m)	زاویه اصطکاک داخلی ϕ	مقاومت چسبندگی C (KPa)
۰/۳۵	۷۰	۱۴	۳/۵	۳۴	۱۵

در این مدل گودبرداری در دو مرحله صورت می‌گیرد. ابتدا مرحله اول خاکبرداری قسمت میانی گود با رعایت فاصله دو متر از دیواره گود (ساختمان‌های همسایه) انجام می‌شود. پس از خاکبرداری قسمت میانی، امکان نصب تیرک‌ها فراهم می‌شود. پس از کارگذاری تیرک‌های مایل حفاری ادامه می‌یابد تا کل گود خاکبرداری شود. با توجه به اینکه ساختمان‌های همسایه یک و دو طبقه هستند، بار معادل آن‌ها به صورت گستره و به ترتیب برابر 7 KN/m^2 و 14 KN/m^2 در نظر گرفته می‌شود.

در جدول ۵ مقادیر به دست آمده از مدلسازی عددی گود با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده آن‌ها در محل که با استفاده از ابزار دقیق نقشه‌برداری حاصل شده مقایسه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود مقادیر تغییرشکل‌های افقی برداشت شده با مقادیر عددی محاسبه شده توسط نرم‌افزار نزدیکی مناسبی را نشان می‌دهند. در واقع درصد اختلاف این دو مقدار با یکدیگر کمتر از پنج درصد است که نشان دهنده دقت مدلسازی در محاسبه تغییرشکل افقی است.

جدول ۵- مقایسه تغییر شکل های اندازه گیری شده در مطالعه سبزی و فاخر (۱۳۹۵) با مقادیر عددی مدلسازی شده در تحقیق حاضر

موقعیت	میزان تغییر مکان		درصد تطابق
	تغییر شکل افقی واقعی (mm)	تغییر شکل افقی مدل عددی (mm)	
زیر ساختمان یک طبقه در محل تکیه گاه تیرک مایل	۲	۲/۱۱	۵٪
زیر ساختمان دو طبقه در محل تکیه گاه تیرک مایل	۳	۳/۱۳	۴٪
موقعیت	میزان تغییر مکان		درصد تطابق
	نشست کف گود واقعی (mm)	نشست محاسبه شده با نرم-افزار (mm)	
زیر ساختمان یک طبقه در محل تکیه گاه تیرک مایل	۲	۲/۱۸	۹٪

در محاسبه مقادیر نشست ملاحظه می گردد که هر چند مقادیر عددی همچنان دارای دقت مناسبی در مقایسه با مقادیر واقعی هستند ولی این میزان نسبت به تغییر شکل های افقی از دقت کمتری برخوردار است. اختلاف میزان نشست محاسبه شده با مقادیر واقعی را می توان ناشی از نوع مدل خاک مورد استفاده در مطالعه عددی دانست؛ زیرا همانگونه که می دانیم مدول الاستیسته در سطوح تنش مختلف متفاوت است؛ به این صورت که مدول الاستیسته در باربرداری حدود پنج برابر مقدار آن در بارگذاری است. استفاده از مدل خاک موهر-کلمب که مدول الاستیسته باربرداری را اعمال نمی کند سبب می گردد تا مقادیر حرکت رو به بالای خاک کف گود به صورت محافظه کارانه بیشتر از مقادیر واقعی نشان می دهد. هر چند میزان اختلاف هنوز هم کمتر از ۱۰ درصد است که نشان دهنده مناسب بودن نتایج عددی است.

بنابراین می توان نتیجه گرفت خروجی های عددی نرم افزار دارای دقت مناسبی در حد نیاز این تحقیق هستند. البته مسائلی مانند یکنواخت نبودن خصوصیات خاک در عمق، دو بعدی بودن مدل و دقیق نبودن پارامترهای اندازه گیری شده در محل نیز می تواند منجر به حصول اختلاف بین نتایج شود. در مجموع مرور نتایج مؤید قابل اعتماد بودن نوع مدلسازی استفاده شده در این تحقیق است.

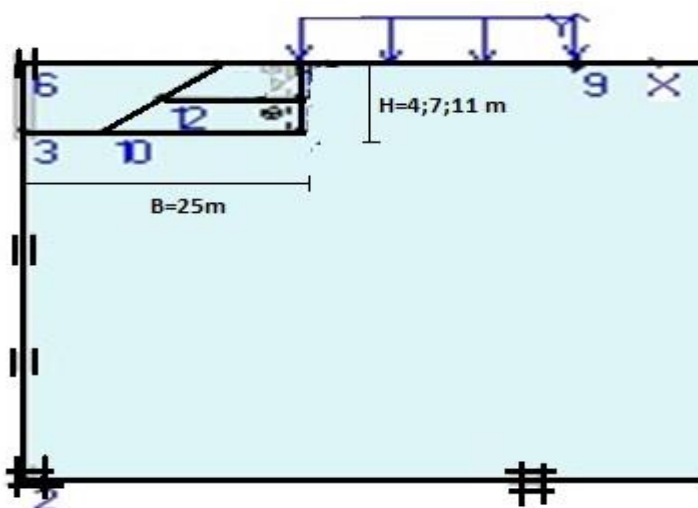
۲-۴- مقایسه عددی گود حفاظت شده با تیرک و خرپا

برای مقایسه عملکرد تیرک مایل با سازه نگهبان خرپایی، گودهایی در سه عمق ۴، ۷ و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. محیط خاک مجاور گود با ابعاد ۲۵×۵۵ متر مدل سازی شد. با توجه به مرحله ای بودن اجرای سیستم خرپایی و سیستم تیرک مایل، تمام گام های خاک برداری، حفاری و قرار دادن سازه نگهبان با توجه به ترتیب مرحله اجرایی آنها مدل شده است. در تمامی مدل ها سرپار ناشی از ساختمان های مجاور گود در نظر گرفته شد.

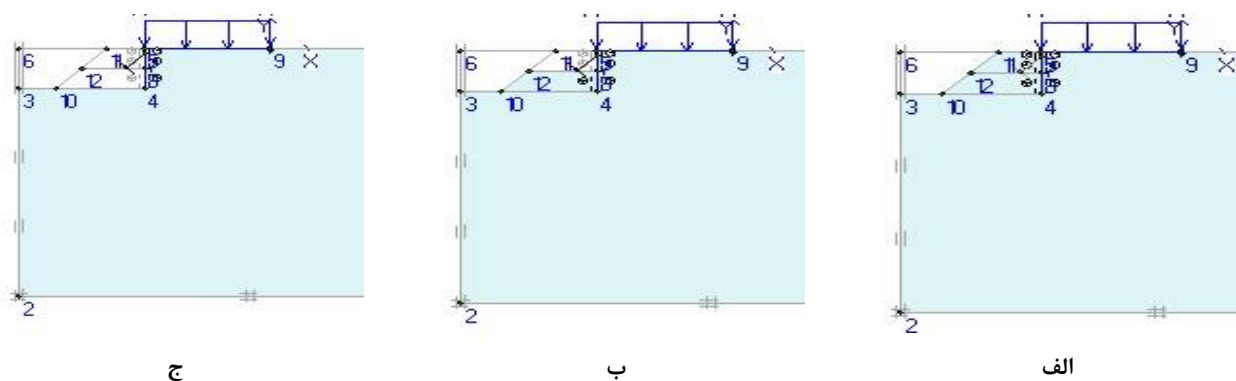
به منظور ارائه جداول طراحی اولیه، بیست و چهار وضعیت ژئوتکنیکی شامل دو مقدار برای مقاومت چسبندگی خاک (زیاد و متوسط)، دو مقدار برای میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک (زیاد و متوسط) و دو مقدار برای میزان سرپار مجاور در سه عمق مختلف

گودبرداری در نظر گرفته شده است. در انتخاب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سعی شده است تا با توجه به منابع موجود (داس براجا، ۲۰۲۱) [۱] مقادیری انتخاب شود که طیف وسیعی از شرایط ژئوتکنیکی را در برگیرد. در رابطه با میزان سربار مجاور گود نیز دو مقدار برای ساختمان‌های تا دو طبقه و تا چهار طبقه در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه سربار ناشی از ساختمان مجاور گود، باید بار زنده و مرده ساختمان محاسبه شود. با توجه به میحث ششم مقررات ملی ساختمان وزن هر متر مربع ساختمان متداول شهری به طور تقریبی ۷۰۰ کیلوگرم شامل ۵۰۰ کیلوگرم بار مرده و ۲۰۰ کیلوگرم بار زنده است. با فرض اینکه عرض متوسط ساختمان‌های مسکونی شهری برابر ۱۰ متر باشد، سربار معادل وزن ساختمان مجاور گود را می‌توان به صورت یک بار گسترده به طول ۱۰ متر و به مقدار ۷۰۰ کیلوگرم بر مترطول به ازای هر طبقه در نظر گرفت. لذا در این تحقیق برای ساختمان دو طبقه ۱۴ کیلونیوتن بر مترطول و برای ساختمان چهار طبقه ۲۸ کیلونیوتن بر مترطول سربار در مجاورت گود در نظر گرفته شده است. فاصله تیرک‌ها و خراباها از یکدیگر نیز ۳ متر در نظر گرفته شده است. تیرک مایل بصورت المان محدودی از نوع تیر و با شرط مرزی یک انتهای گیردار و شمع مایل^۴ و با رفتار الاستیک مدل شده است. در شکل ۸ مدل خاک قبل از گودبرداری ۴ متری را نشان داده شده است. در این مدل با تعریف خطوطی مراحل برداشت خاک و اجرای سازه نگهبان پیش‌بینی شده است.

شکل الف-۹ خاکبرداری و ایجاد سپر خاکی شیبدار با زاویه ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. در شکل ب-۹ اولین مرحله خاکبرداری انجام شده و همزمان تیرک مایل نصب می‌گردد. شکل ج-۹ آخرین مرحله گودبرداری و اتصال تیرک مایل به کف گود را نشان می‌دهد.



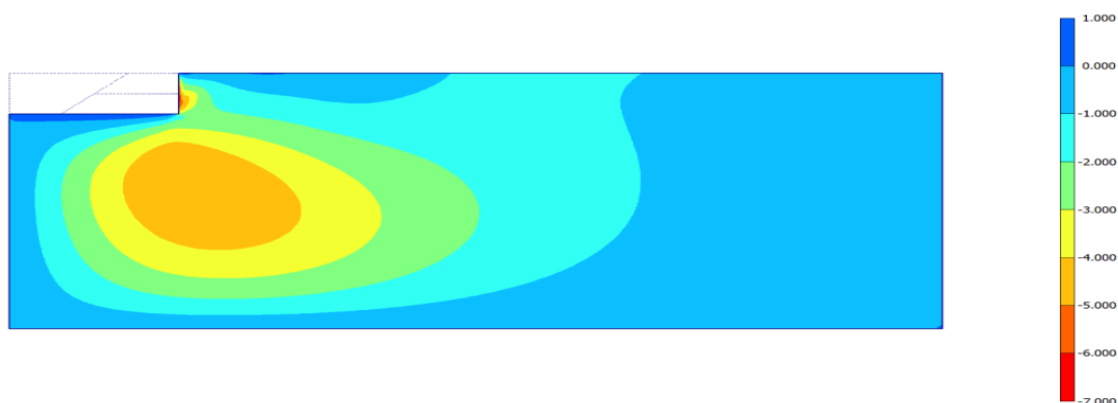
شکل ۸: هندسه مدل قبل از خاکبرداری



شکل ۹: مراحل گودبرداری و اجرای سازه نگهبان

⁴ Fixed-end anchor

نتایج تحلیل عددی در گودبرداری معمولاً عبارت است از میدان تنش و جابجایی که به روش اجزای محدود بدست می‌آید. طبق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ جابجایی افقی حداکثر در عمق میانی گود صورت می‌پذیرد. این موضوع نشان دهنده این است که تیرک مایل توانایی خوبی در مهار قسمت‌های بالایی گود دارد و در صورت رخداد خرابی در گود، این اتفاق احتمالاً از قسمت‌های میانی گود شروع می‌شود. بنابراین کنترل تغییر مکان‌های جانبی در میانه گود از اهمیت به سزایی در گودهای محافظت شده با تیرک مایل برخوردار است. بیشترین مقدار تغییر شکل قائم در کف گود صورت می‌پذیرد؛ این در حالی است که تیرک مایل نشست قائم خاک را در ناحیه زیر شالوده ساختمان مجاور گود کنترل نموده است.



شکل ۱۰: کانتور جابجایی افقی گود چهار متری محافظت شده با تیرک مایل (mm)



شکل ۱۱: کانتور جابجایی قائم گود چهار متری محافظت شده با تیرک مایل (mm)

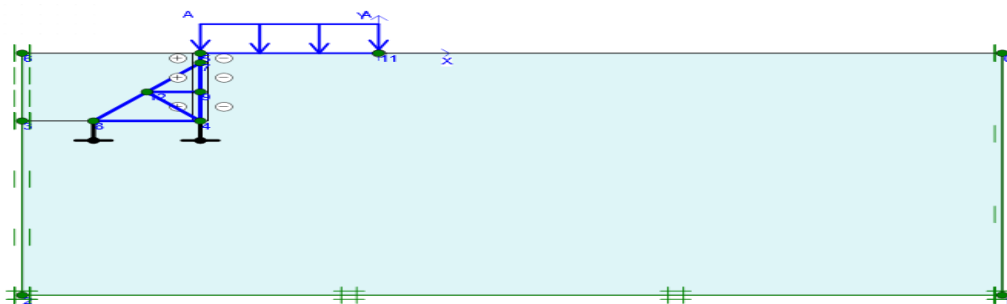
کرنش طولی و چرخش زاویه‌ای طبق روابط ۴ و ۵ و از کانتورهایی مشابه شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بدست می‌آیند. که حداکثر آنها در جدول ۳ ارائه شده است. سپس از روابط ۱ الی ۳ شاخص پتانسیل خرابی DPI محاسبه می‌گردد.

..

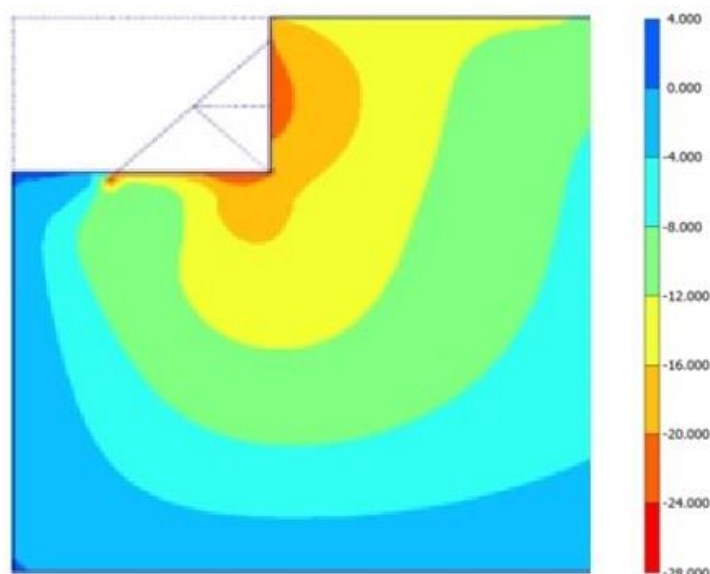
جدول ۳: رفتار گود با عمق چهار متر و سیستم حفاظت مناسب آن

سیستم حفاظت از گود		نوع سازه	DPI	چرخش زاویه‌ای $\times 10^{-4}$	کرنش طولی $\times 10^{-4}$	زاویه اصطکاک داخلی	مقاومت چسبندگی (kN/m ²)	ساختمان مجاور گود (طبقه)
خرپا/تیرک	عمق شمع (m)							
۱/۳	۸۱PE	تیرک	۱۵/۷۸	۵/۷۰	۶/۸۶	۲۰	۱۰	۲
۱	۸۱PE	تیرک	۱۵/۸۹	۵/۶۷	۶/۹۳	۳۰	۱۰	۲
۱	۸۱PE	تیرک	۱۷/۸۹	۶/۵۴	۷/۷	۲۰	۲۰	۲
۰/۶	۸۱PE	تیرک	۱۷/۸۸	۶/۵۳	۷/۷۵	۳۰	۲۰	۲
۱/۳	۸۱PE	خرپا	۸/۳۲	۵/۸۹	۱/۳۸	۲۰	۱۰	۴
۱	۸۱PE	خرپا	۸/۵۶	۶/۲۳	۱/۵۴	۳۰	۱۰	۴
۱	۸۱PE	تیرک	۱۷/۴۴	۱۳/۳۳	۹/۲۳	۲۰	۲۰	۴
۰/۶	۸۱PE	تیرک	۱۹/۶۲	۶/۷۰	۹/۲۲	۳۰	۲۰	۴

در جدول ۳، در ستون دوم و سوم پارامترهای خاک و در ستون چهارم و پنجم به ترتیب کرنش طولی و چرخش زاویه‌ای و ستون ششم مربوط به ارزیابی گود با استفاده از DPI است. در نهایت در ستون آخر با توجه به ارزیابی صورت گرفته جزئیات سیستم مناسب محافظت کننده گود ارائه شده است. در صورتی که سیستم از نوع تیرک مایل باشد، طول تیرک و در صورتی که از نوع سازه نگهدارنده خرپایی باشد، ابعاد آن و در صورتی که از نوع سیستم سازه نگهدارنده خرپایی باشد، ابعاد عضو قائم در جدول قرار گرفته است. طبق نتایج جدول ۳ برای سرباره چهار طبقه، شاخص DPI در سیستم خرپایی نهایتاً به ۸/۵۶ می‌رسد در حالیکه در سیستم تیرک مایل این شاخص به ۱۹/۶۲ خواهد رسید که حساس بودن این شاخص به سیستم پایدارسازی را نشان می‌دهد. از طرفی در هر دو سیستم تیرک و خرپا با دو برابر شدن تعداد طبقات یا سرباره تغییر محسوسی در شاخص DPI ایجاد نمی‌شود. بنابراین می‌توان گفت هنگامی که ساختمان مجاور گود برابر چهار طبقه در نظر گرفته می‌شود، به دلیل سنگینی ساختمان تیرک مایل قادر به محافظت از دیواره گود نبوده و مجبور به استفاده از سیستم سازه نگهدارنده خرپایی خواهیم بود. تغییر شکل‌های افقی و عمودی گودهای هفت متری مدل شده به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به نمایش در آورده شده است.



شکل ۱۲: گود هفت متری محافظت شده با سازه خرپایی

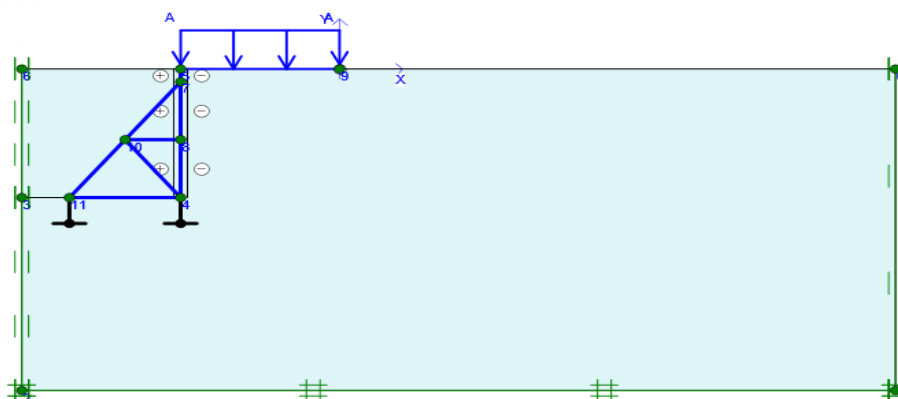


شکل ۱۳: تغییر شکل افقی در گود چهار متری محافظت شده با سازه خرپایی (mm)

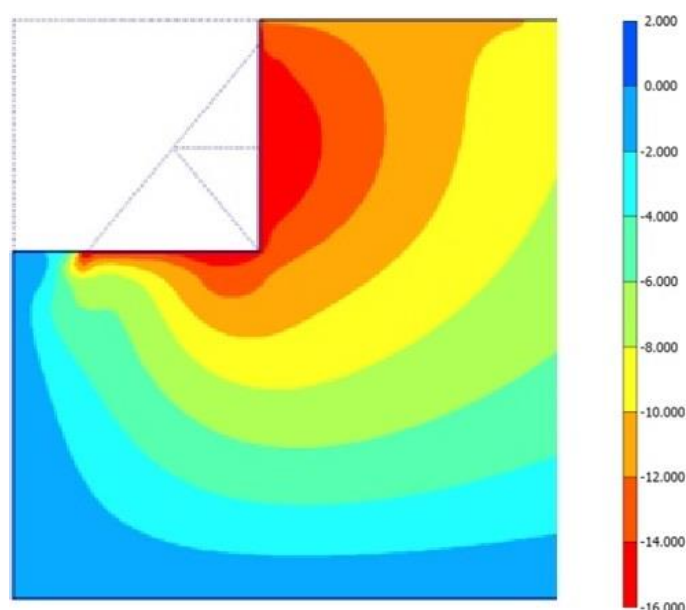
با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به دلیل وجود شمع در زیر پایه‌های سازه نگهبان خرپایی، میزان تغییر شکل‌های افقی به مقدار چشمگیری در کف گود کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که المان قائم سازه خرپایی سبب توزیع نسبتاً یکنواخت تغییر شکل‌های افقی در زیر شالوده ساختمان مجاور شده است. لذا انتخاب مناسب و دقیق المان قائم در نگهداری گود امری بسیار مهم تلقی می‌شود. با توجه به نتایج جدول ۴ در صورت وجود سختی مناسب، سازه نگهبان می‌تواند به نحو مناسب از حرکت ساختمان مجاور گود جلوگیری نماید و همچنین اتصال مناسبی با کف گود و دیوار گود داشته باشد.

جدول ۴: رفتار گود با عمق هفت متری و سیستم حفاظت مناسب آن

سیستم حفاظت از گود		DPI	چرخش زاویه‌ای $\times 10^{-4}$	کرنش طولی $\times 10^{-4}$	زاویه اصطکاک داخلی	مقاومت چسبندگی (KN/m ²)	ساختمان مجاور گود (طبقه)
شمع (m)	عضو قائم (IPE)						
۲/۵	IPE۱۰	۹/۱۹	۸/۲۴	۰/۹۰	۲۰	۱۰	۲
۱/۵	IPE۱۲	۸/۲۴	۶/۵۳	۱/۵۳	۳۰	۱۰	۲
۱/۵	IPE۱۴	۱۸/۴۰	۵/۴۴	۲/۷۲	۲۰	۲۰	۲
۱/۱	IPE۸	۸/۴۸	۷/۵۲	۰/۹۱	۳۰	۲۰	۲
۲/۵	IPE۱۶	۷/۵۹	۶/۰۷	۱/۳۶	۲۰	۱۰	۴
۱/۵	IPE۱۲	۸/۲۴	۶/۵۳	۱/۵۳	۳۰	۱۰	۴
۱/۵	IPE۱۴	۸/۵۴	۷/۷۱	۰/۷۹	۲۰	۲۰	۴
۱/۱	IPE۱۰	۸/۴۸	۷/۵۲	۰/۹۱	۳۰	۲۰	۴

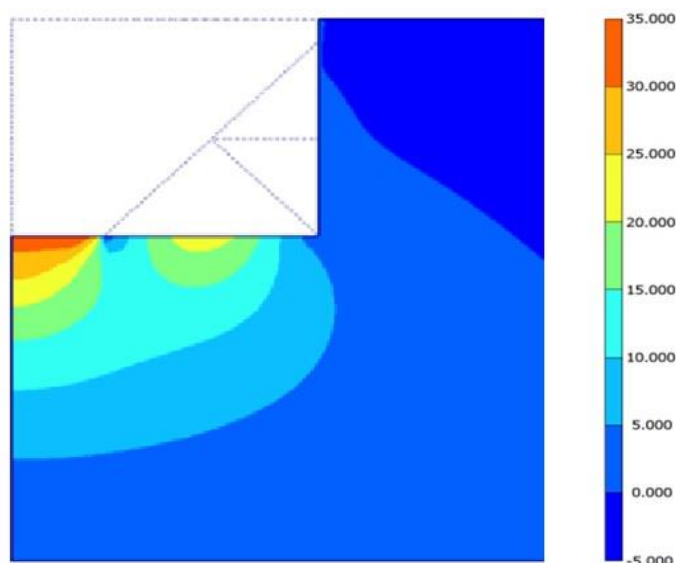


شکل ۱۴: گود ده متری محافظت شده با سازه نگهبان خرابایی



شکل ۱۵: تغییر شکل افقی در گود ده متری محافظت شده با سازه نگهبان خرابایی (mm)

موضوعی مهمی که باید به آن توجه نمود، میزان تغییر مکان افقی در کف گود است؛ در حالی که در گودهای کم ارتفاع (چهار متر) تقریباً می توان از این تغییر مکان چشم پوشی کرد، در گود ده متری طبق شکل ۱۶ این میزان افزایش چشم گیری داشته است. در واقع با افزایش ارتفاع گود به منظور حفظ مقاومت و تعادل سیستم نگهبان، ناچار به افزایش فاصله بین عضو مورب با دیواره گود هستیم. این موضوع سبب می شود تا تغییر مکان افقی در این فاصله افزایش یابد که نیازمند توجه ویژه در پروژه های گودبرداری عمیق است.



شکل ۱۶: تغییر شکل عمودی در گود ده متری محافظت شده با سازه نگهدارنده خرابی (mm)

با وجود افزایش چشمگیر تغییر مکان افقی با عمیق تر شدن گودبرداری، میزان تغییر مکان قائم تفاوت چندانی نمی‌کند. با این حال باید به فاصله عضو مورب با دیواره گود دقت ویژه‌ای نمود. زیرا در صورت مناسب نبود فاصله آن، احتمال بالازدگی کف گود می‌رود. همچنین می‌توان گفت فاصله عضو مورب تا دیواره گود برابر با دو سوم عمق گود مناسب به نظر می‌رسد. بطوری که با افزایش عمق گود، باید اثر تغییر مکان افقی کف گود در حد فاصل المان مورب تا دیواره گود به نحو مناسب مهار شود. جدول ۵ رفتار گود ده متری را نشان می‌دهد.

جدول ۵: رفتار گود با عمق ده متر و سیستم حفاظت مناسب آن

سیستم حفاظت از گود	شمع	عضو قائم (IPE)	DPI	چرخش زاویه‌ای $\times 10^{-4}$	کرنش طولی $\times 10^{-4}$	زاویه اصطکاک داخلی	مقاومت چسبندگی (KN/m ²)	ساختمان مجاور گود (طبقه)
۳/۱	IPE۲۴	۱۷/۱۰	۲/۴۵	۱۲/۴۳	۲۰	۱۰	۲	
۲/۵	IPE۱۸	۱۱/۲۴	۱/۱۰	۷/۱۰	۳۰	۱۰	۲	
۲/۷	IPE۲۲	۱۲/۱۱	۱/۳۵	۷/۸۹	۲۰	۲۰	۲	
۲/۱	IPE۱۶	۱۹/۰۶	۳/۱۴	۱۴/۳۶	۳۰	۲۰	۲	
۳/۱	IPE۲۴	۱۷/۱۰	۲/۴۵	۱۲/۴۳	۲۰	۱۰	۴	
۲/۵	IPE۲۰	۱۱/۱۰	۱/۰۸	۷/۰۱	۳۰	۱۰	۴	
۲/۷	IPE۲۲	۱۲/۵۸	۱/۴۲	۷/۷۸	۲۰	۲۰	۴	
۲/۱	IPE۲۴	۱۵/۷۰	۵/۶۳	۱۰/۶۵	۳۰	۲۰	۴	

۷- نتیجه گیری

با توجه به اینکه در آیین‌نامه‌های ملی و بین‌المللی فعلی، روشی برای تعیین حدود مجاز تغییر مکان دیواره گود برای سیستم تیرک مایل و سازه نگهدارنده خرابی ارائه نشده است، در این تحقیق برای دستیابی به این مهم از شاخص DPI شوستر و جوآنگ استفاده شده است. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود، اقدام به تهیه جداول طراحی سازه نگهدارنده گردید. به این صورت است که ابتدا نوع خاک تعیین می‌شود. سپس با یافتن عمق گود مورد نظر و تعداد طبقات ساختمان مجاور گود می‌توان تیپ سازه نگهدارنده

مناسب برای گود را با دقت تعیین نمود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نوع خاک و مقاومت آن عامل مؤثری در تعیین میزان تغییر شکل‌های دیواره گود است. البته خصوصیات خاک اعم از مدول الاستیسیته، وزن مخصوص و مقاومت چسبندگی خاک در عمق زمین دچار تغییر شده و مقدار ثابتی ندارد. لذا به منظور تدقیق پاسخ‌های دیواره گود می‌توان تغییرات مشخصات خاک در عمق را نیز در ادامه این تحقیق مورد بررسی قرار داد. بررسی گودهایی که در مجاورت ساختمان‌های بلند و یا بسیار حساس قرار دارند در چارچوب مطالعاتی این تحقیق قرار نگرفته است. از این رو می‌توان در راستای این مطالعه، به بررسی محافظت از گود در مجاورت این گونه سازه‌ها پرداخت. بنابراین با توجه به مطالعات صورت گرفته پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی سختی ساختمان مجاور گود در میزان جابجایی دیواره گود و در نتیجه تعیین درجه خرابی ساختمان مورد مطالعه قرار گیرد. نتایج بدست آمده در زیر خلاصه می‌گردد:

- (۱) با مقایسه سیستم تیرک مایل و سیستم خربایی در گودهای کم عمق تا ۴ متر مشخص شد که DPI تیرک مایل بسیار بالاتر از سیستم خربایی است و تا دو برابر هم می‌رسد. لذا استفاده از سیستم تیرک مایل در مجاورت سربار زیاد پیشنهاد نمی‌گردد.
- (۲) با مقایسه سیستم تیرک و خرپا برای گود ۴ متری مشخص شد که شاخص DPI تیرک بالای ۱۰ و در خرپا پایین‌تر از ۱۰ است.
- (۳) وجود تیرک مایل برای خاک‌ها با چسبندگی بالا و عمق کم می‌تواند جایگزین سیستم خربایی گردد.
- (۵) تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بیشتر از مقاومت چسبندگی خاک در شاخص DPI تاثیر دارد.
- (۶) نتایج نشان می‌دهد که در گود ۴ متری، تغییرات DPI نسبت به سربار حساسیت ناچیزی دارد و با دوبرابر شدن سربار نیز این شاخص تغییر زیادی ندارد.

مراجع

- [1] Das, B.M., Sivakugan, N. (2021). Principles of Foundation Engineering. 9th Edition. Cengage Learning Publisher.
- [2] Tavakoli, S., Aminfar, M.H., Edalati, M. (2017). Investigation the Effects of Soil Excavation on Earth Moving in Urban Areas (Case Study: Ilam City), *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol 47, Issue 2, 21-27. (In Persian).
- [3] Khatami, S.R. (2007). *Modeling of the method of diagonal beams in excavation with two-dimensional plaxis software*, Ms.C Thesis, 2008. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- [4] Fakher, A., (2005). The Mechanism of Inclined Struts in Conventional Excavation Adjacent to Existing Buildings, Report of Road, Housing & Urban Development Research Centre. (In Persian).
- [5] Sabzi Z, Fakher A., (2013). A Field Investigation in to the Performance of Inclined Struts connected to Adjacent Buildings During Excavation. *Modares Civil Engineering journal*. 2013; 13 (4) :27-43. (In Persian).
- [6] Skempton A.W. and MacDonald D.H. (1956). The allowable settlement of building. *Structural and building division meeting*, 727-768.
- [7] Maleki, Mahdi & Nabizadeh, Ali. (2021). Seismic performance of deep excavation restrained by guardian truss structures system using quasi-static approach. *SN Applied Sciences*. 3. 10.1007/s42452-021-04415-9
- [8] Ashraf H. (2019) Principles of excavation and Guard Structures, 2nd Ed, Iran, no avar.
- [9] Sabzi z, Fakher A. (2015) The performance of buildings adjacent to excavation supported by inclined struts. *International Journal of Civil Engineering*, 13: 1-15 URL: <http://ijce.iust.ac.ir/article1-935-en.htm>
- [10] Polshin D.E. and Tookar R.A. (1957) Maximum allowable non-uniform settlement of structure. *4th int. conf. soil Mech. Found. Eng*, Vol.1, 402.
- [11] Burland, J.B., Broms, B.B. and De Mello, V.F.B. (1977) Behaviour of foundations and structures. *9th int. conf. soil Mech. Found. Eng* Vol.2, 495-546
- [12] Dowding, C, H. & McKenna L.M. (2009) Crack response to long term environmental and blast vibration effects. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* Vol.131 pp 1151-116.
- [13] Boscardin M.D. & Cording E.J. (1989). Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol.115 No 1.
- [14] Boone S.J. (1996). Ground movement related building damage. *Journal of Geotechnical Engineering* Vol.122 No 11.
- [15] Son M. and Cording E.J. (2010) Estimation of building damage due to excavation-induced ground movement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol.131 No 2.
- [16] Son, M. and Cording, E.J. (2012) Evaluating of building stiffness for building response analyses to excavation-induced ground movement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol.133, No 8.
- [17] Juang, C.H., Shuster, M. and Ou C.Y. (2016) Fully probabilistic framework for evaluating excavation-induced damage potential of adjacent building. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol.137, No2.

- [18] Halim D. & Wong K. S. (2017) Prediction of frame structure damage resulting from deep excavation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Vol.138 No12
- [19] Manual PLAXIS, Finite element code for soil and rock plasticity, Delft University of Technology, Netherlands.