

تحلیل عملکرد دیواره‌ی میخ‌کوبی در تثبیت دیواره‌ی گودبرداری‌های عمیق براساس سطوح خرابی سازه‌های مجاور گود

ابراهیم نمیمی‌فر (دانشجوی دکتری)

شهاب‌الدین یثربی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

علی فاخر (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

علی اکبر گلشانی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۲/۴، ص. ۱۲۳-۱۳۶، (یادداشت شنی)

تخمین و ارزیابی آسیب‌های وارده به سازه‌های اطراف گود به‌واسطه‌ی جابجایی‌های زمین، از مسائل حائز اهمیت در ملاحظات مربوط به طراحی سیستم میخ‌کوبی در مناطق شهری است. این مسئله در صورت حضور سازه‌های با عمر زیاد و یا با درجه‌ی استحکام پایین در مجاورت گود اهمیت بیشتری دارد. به‌واسطه‌ی نبود داده‌های مستند و دقیق و همچنین تعدد متغیرهای تأثیرگذار در پاسخ سازه‌ها به جابجایی‌های ناشی از گودبرداری، در حال حاضر معیارهای تخمین درجه‌ی آسیب سازه‌های مجاور گود، بسیار معهود و در بسیاری از موارد به‌واسطه‌ی محدودیت‌های موجود کاربردی نیستند. در این پژوهش سعی شده است با تکیه بر ۱۰ مطالعه‌ی موردی و همچنین بهره‌گیری از آنالیزهای عددی و احتمالاتی، ضمن تحلیل عملکرد سیستم میخ‌کوبی در تثبیت دیواره‌ی گودبرداری‌های عمیق، به ارائه‌ی سطوح خرابی سازه‌های مجاور گود براساس تابع پتانسیل خرابی پرداخته شود. سطوح خرابی پیشنهادی در این نوشتار، نشانگر میزان خرابی محتمل در سازه‌های مصالح بنایی مجاور دیواره‌های میخ‌کوبی شده، با توجه به فاصله‌ی قاب سازه از بر گود و به‌ازاء بیشینه‌ی مقادیر تغییرشکل افقی دیواره‌ی گود است.

i.naeimifar@yahoo.com
shahab.yasrobi@gmail.com
afakher@ut.ac.ir
hgoleshani@hotmail.com

واژگان کلیدی: گودبرداری، میخ‌کوبی، عملکرد، سطوح خرابی.

۱. مقدمه

جابجایی دیواره‌ی میخ‌کوبی، که به‌عنوان لازمه‌ی بسیج نیرو در میخ‌ها ذکر شده است، منتج به تغییرشکل‌های قائم (نشست) و تغییرشکل‌های افقی خاک مجاور گود می‌شود. این تغییرشکل‌ها موجب برخی آسیب‌ها به سازه‌ها و شریان‌های حیاطی مجاور محدوده‌ی گودبرداری می‌شود، که منشأ بسیاری از چالش‌ها در استفاده از روش میخ‌کوبی در تثبیت دیواره‌های گود در مناطق شهری است.

به‌طورکلی علاوه بر روش میخ‌کوبی در عمده‌ی روش‌های تسلیح خاک، جابجایی دیواره‌ی گود اجتناب‌ناپذیر است. از این رو این موضوع مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و در این زمینه، مطالعات متعددی صورت پذیرفته است. در یکی از مطالعات انجام‌شده به ارائه‌ی داده‌های مختلف ثبت‌شده از نشست خاک در مجاور دیواره‌ی گود پرداخته شده است.^[۱] در مطالعه‌ی مذکور که بر روی گودهای مسلح‌شده با روش اجرای شمع متمرکز بوده است، محدوده‌ی تأثیر گود در خاک‌های رسی نرم تا فاصله‌ی بیشینه‌ی ۴ برابر عمق گود و در خاک‌های رسی متوسط تا سفت تا فاصله‌ی بیشینه‌ی ۲ برابر گود تخمین زده شده است. براساس سایر نتایج ارائه‌شده،

در سال‌های اخیر، میخ‌کوبی^۱ به‌عنوان یک روش اقتصادی به‌منظور تثبیت دیواره‌ی گودبرداری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. شیوه‌ی اجرای این روش در مراجع و آیین‌نامه‌ها به تفصیل بیان شده است.^[۱] و به‌طور خلاصه شامل تسلیح خاک با استفاده از المان‌های فولادی (میخ)^۲ در آرایش و طول مشخص است.

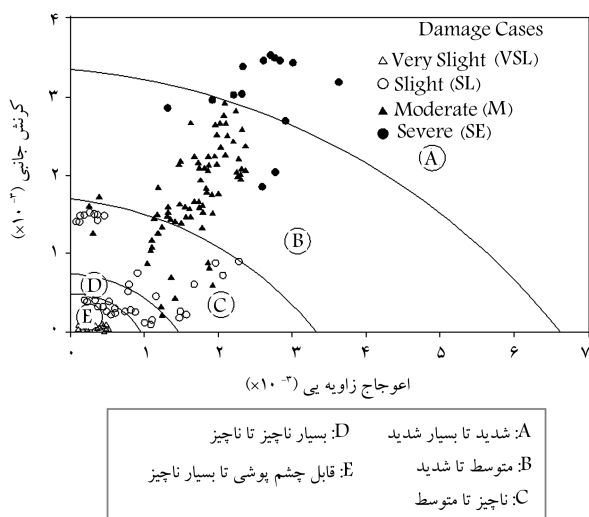
در طول اجرای روش میخ‌کوبی و با پیشرفت گودبرداری، دیواره‌ی گود تمایل به جابجایی به سمت داخل گود دارد و المان‌های فولادی با تحمل کشش، از جابجایی دیواره‌ی گود به سمت داخل گود جلوگیری می‌کنند. از این رو المان‌ها با پیشرفت گودبرداری به‌صورت مقاوم^۳ عمل می‌کنند و ناحیه‌ی بی‌از خاک پشت دیواره، حالت محرک^۴ می‌یابد.^[۱] به‌عبارت دیگر، در روش میخ‌کوبی، به‌منظور بسیج شدن نیروی کششی در المان‌های فولادی، جابجایی دیواره اجتناب‌ناپذیر است.

* نویسنده مسئول

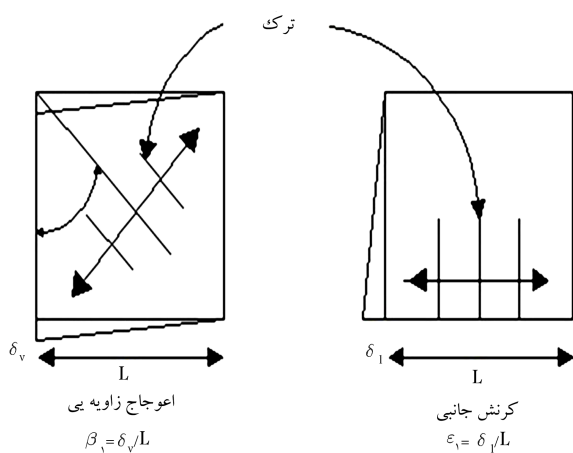
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۹/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۲/۱۷، پذیرش ۱۳۹۳/۲/۱۵.

از پارامترهای تغییرشکل هستند و توسط داده‌های عددی و آزمایشگاهی کالیبره شده‌اند،^[۲۴] در شکل ۱ مشاهده می‌شوند.

توصیف پارامترهای تعریف‌کننده‌ی محورهای افقی و قائم در شکل ۱، در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، پارامترهای ارائه شده به‌طور کلی در بردارنده‌ی مشخصات تغییرشکل سازه هستند و پروفیل تغییرشکل دیواره‌ی گود کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش‌های دیگری نیز مطالعات بیشتری در این زمینه صورت گرفته است،^[۲۵-۲۷] که در آن‌ها سطوح خرابی با استفاده از



شکل ۱. درجه‌بندی سطوح خرابی براساس بازشدگی و تغییر زاویه‌ی قاب.



شکل ۲. معرفی پارامترهای شکل ۱ و رابطه‌ی ۱.

جدول ۱. درجه‌بندی سطح خرابی براساس روش مشاهداتی.^[۲۴]

عرض تخمینی ترک	توضیحات در رابطه با نوع خرابی*	سطح خرابی
کمتر از ۱mm	ترک‌های ریز که به سادگی قابل ترمیم باشد.	بسیار ناچیز (VSL)
کمتر از ۵mm	ترک‌هایی که به راحتی قابل مشاهده بوده و نیاز به زیرسازی چندانی ندارند.	ناچیز (SL)
بین ۵ mm تا ۱۵ mm یا تعداد ترک بیش از ۳	ترک‌هایی که نیاز به شکافتن و زیرسازی مجدد جهت ترمیم دارند.	متوسط (M)
بین ۱۵ mm تا ۲۵ mm تابع تعداد ترک‌ها	ترک‌هایی که عمدتاً با تغییر شیب کف، تغییرشکل قاب‌های در و پنجره همراه است.	شدید (SE)
بیش از ۲۵ mm تابع تعداد ترک‌ها	ترک‌هایی که نیازمند بازسازی کلی و عمدتاً سازه‌ی داشته باشند.	بسیار شدید (VSE)

* توضیحات کامل در رابطه با سطح توصیفی خرابی در مرجع ۲۲ ارائه شده است.

در خاک‌های رسی سفت و خاک‌های ماسه‌یی، بیشینه‌ی تغییرشکل افقی دیواره به ۰٫۵٪ ارتفاع محدود شده است.

پیش‌بینی شکل پروفیل نشست در طول گودبرداری و همچنین مقادیر و حالت تغییرشکل دیواره‌ی گود از دیگر موارد مورد مطالعه توسط پژوهشگران مختلف بوده است.^[۴-۷] در مطالعات مذکور که بیشتر ماهیت تجربی داشته‌اند، پروفیل تغییرشکل و نشست خاک برای چند روش مختلف: دوخت به پشت، اجرای شمع و اجرای بادبند (دستک) مورد مطالعه قرار گرفته است.

استفاده از روش‌های عددی و المان محدود به منظور ارزیابی پروفیل تغییرشکل محدوده‌ی اطراف گود توسط برخی از پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است.^[۸-۱۰] در عمده‌ی مطالعات ذکر شده، به ارزیابی شکل پروفیل نشست پرداخته شده است. اثر سختی دیواره‌ی گود در پروفیل نشست و پروفیل تغییرشکل افقی دیواره، مقادیر نیروهای ایجاد شده در سیستم تسلیح از دیگر موارد مورد بررسی در مطالعات مذکور بوده است. همان‌طور که اشاره شده است، تغییرشکل‌های دیواره و جابجایی‌های زمین ناشی از گودبرداری در صورت حضور سازه در مجاورت گود، اهمیت دو چندان می‌یابد. ارزیابی و تخمین اثر تغییرشکل‌های پیش‌گفته در خرابی سازه‌های مجاور گود از موضوعات با اهمیت است، که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار قرار گرفته است. در تعریف میزان خرابی سازه از مفهوم «سطوح خرابی» استفاده می‌شود. منظور از «سطوح خرابی»، حدود خرابی قابل انتظار در سازه است و هر سطح خرابی تعریف‌کننده‌ی بیشینه‌ی خرابی قابل انتظار در سازه است.

به منظور تعیین سطوح خرابی سازه به واسطه‌ی گودبرداری، پارامترهایی با عنوان کلی «پارامترهای تغییرشکل»^۵ تعریف شده است.^[۱۱،۱۲] این پارامترها معرف تغییرشکل افقی و دورانی قاب سازه براساس جابجایی افقی و نشست محدوده‌ی اطراف گود هستند. سطوح خرابی سازه‌ی مجاور گود به واسطه‌ی جابجایی‌های ناشی از گودبرداری با انجام آزمایش‌های تجربی مقیاس شده،^[۱۳،۱۴] مشاهدات میدانی و مطالعات موردی،^[۱۵-۱۷] و همچنین مطالعات عددی،^[۱۸-۲۱] مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه تعیین سطوح خرابی در سال ۱۹۷۷ انجام شده است،^[۲۲] که در آن یک روش مشاهداتی براساس عرض و فراوانی ترک‌های ایجاد شده در سازه، به منظور تعیین درجه‌ی خرابی سازه ارائه شده است. عمده‌ی نتایج مطالعات مذکور در جدول ۱ ارائه شده است، که مطابق آن ملاحظه می‌شود که با توجه به ابعاد و توزیع ترک‌ها، میزان آسیب وارده به سازه در ۵ سطح: بسیار ناچیز، ناچیز، متوسط، شدید و بسیار شدید،^۶ تقسیم‌بندی شده است. براساس تقسیم‌بندی مشاهداتی ارائه شده در جدول ۱، پژوهشگران مختلف سطوح خرابی سازه‌های مجاور گود را با توجه به پروفیل تغییرشکل کف گود و گرنش جانبی سازه،^[۲۳،۲۴] و همچنین براساس اختلاف نشست ستون‌های سازه،^[۲۷] ارائه کرده‌اند. در پژوهش‌های دیگری نیز به ارائه‌ی سطوح خرابی براساس بازشدگی قاب و تغییر زاویه‌ی آن پرداخته شده است.^[۱۵،۱۹] سطوح مذکور که بر مبنای مشخصات دقیق‌تری

DPI	سطح خرابی
۰-۱۵	ND-VSL قابل چشم‌پوشی تا بسیار ناچیز
۱۵-۲۵	SL ناچیز
۲۵-۳۵	SL-M ناچیز تا متوسط
۳۵-۶۰	M متوسط
۶۰-۸۵	SE شدید
> ۸۵	VSE بسیار شدید

تعریف شاخص پتانسیل خرابی (DPI)^۲ برای سازه‌ی مجاور گود مطابق جدول ۲ ارائه شده است. پارامتر DPI مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$DPI = 20 \times 10^3 (\varepsilon_1 \cos^2 \theta_{max} + \beta \sin \theta_{max} \cos \theta_{max}) \quad (1)$$

که در آن، θ_{max} و β ، ε_1 مطابق شکل ۲ تعریف شده است.

سطوح خرابی ارائه شده در منابع مختلف محدود بوده و در بسیاری از موارد، به واسطه‌ی لزوم ابرار بندی سازه‌ی مجاور گود، کارایی لازم را نداشته‌اند. از طرف دیگر در تعریف سطوح خرابی موجود، تفاوتی بین سیستم‌های مهار در نظر گرفته نشده است و داده‌های به کاررفته در تعریف سطوح خرابی شامل گودهای مهار شده با روش‌های مختلف بوده است.

در این نوشتار با استناد به ۱۰ مطالعه‌ی موردی صورت گرفته در خاک تهران و همچنین بهره‌گیری از تحلیل‌های عددی به ارائه‌ی سطوح خرابی سازه‌های مصالح بنایی مجاور گودهای تسلیح شده با سیستم میخ‌کوبی پرداخته شده است. در تعریف سطوح خرابی از متغیر DPI با مفهوم پیش‌گفته استفاده شده است.

۲. روش انجام پژوهش

به منظور ارائه‌ی سطوح خرابی سازه‌ی مجاور گود از مطالعات موردی و تحلیل‌های عددی استفاده شده است. بدین منظور در ابتدا، مدل عددی از دیواره‌ی میخ‌کوبی و سازه‌ی مجاور آن ایجاد و به بررسی مفهوم خرابی و چگونگی توزیع آن در قاب‌ها و طبقات یک سازه‌ی ۲ طبقه پرداخته شده است. پس از این مرحله، به منظور ارائه‌ی سطوح خرابی سازه‌ی مجاور گود، این مراحل صورت پذیرفته است:

۱. **مطالعات موردی:** در طول ۲ سال، ۴ پروژه‌ی گودبرداری عمیق در فازهای انجام مطالعات ژئوتکنیک، طراحی سیستم تسلیح، نظارت بر اجرا، ابرار بندی و پایش ترک خوردگی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مطالعات به عنوان بخشی از مطالعات موردی لحاظ شده است. به منظور افزایش دامنه‌ی داده‌ها در مطالعات موردی، اطلاعات مربوط به مشخصات خاک، نقشه‌های اجرایی، نتایج ابرار بندی از ۲۷ پروژه‌ی گودبرداری عمیق دیگر (در محدوده عمق ۱۶/۷ الی ۳۱ متر) از شرکت‌های طراح و مجری دریافت شده است.

۲. **فیلتر کردن نتایج مانیوتورینگ:** داده‌های مربوط به ۱۴ پروژه‌ی گودبرداری از داده‌های جمع‌آوری شده در مرحله‌ی قبل به واسطه‌ی عدم دقت در روش نقشه برداری به کار گرفته شده، برخورد با مشکلات اجرایی در طول گودبرداری، نتایج غیرمنطقی در جابجایی با توجه به شرایط خاک پروژه، شیوه‌ی اجرا نامناسب از محدوده داده‌های مورد مطالعه حذف شده است.

۳. **کنترل سازه‌های مجاور گود:** در این مرحله با حضور در محدوده‌ی هر یک از ۱۷ پروژه‌ی گودبرداری (کسر ۱۴ پروژه‌ی حذف شده از ۳۱ پروژه‌ی تحت

مطالعه)، به بررسی شرایط پروژه، ارزیابی نوع سازه‌ی مجاور گود، فاصله‌ی سازه از بر گود، تعداد طبقات سازه و ارزیابی درجه‌ی خرابی قاب‌های سازه براساس روش مشاهداتی پرداخته شد.

۴. **فیلتر کردن داده‌ها:** پس از حضور در محل پروژه، موقعیت هر یک از سازه‌های مجاور گود ثبت شده است. ارتباط خرابی هر یک از سازه‌های ثبت شده و جابجایی دیواره‌ی گود در قالب یک مطالعه‌ی موردی تحت بررسی قرار گرفت. در این مرحله نیز با توجه به عدم تطابق منطقی بین درجه‌ی خرابی و نتایج مانیوتورینگ، مشکلات خاص موجود در سازه و... اقدام به فیلتر کردن و حذف تعدادی از داده‌ها شد. در انتهای این مرحله، فقط ۱۰ مورد سازه با مصالح بنایی و با قدمت بیشتر از ۲۰ سال به عنوان موارد مناسب به منظور ادامه‌ی مطالعات موردی انتخاب شده است. این تذکر لازم است که داده‌های خام اولیه برای ۳۱ پروژه‌ی گودبرداری، بیش از ۱۴۰ سازه‌ی مسکونی در مجاورت گود بوده است، که براساس فیلترینگ‌های صورت گرفته، ۱۰ سازه برای ادامه‌ی مطالعات موردی انتخاب شده است.

۵. **ایجاد مدل عددی و کالیبره کردن آن:** در این مرحله با استفاده از نرم‌افزار Plaxis، مدل عددی شامل دیواره‌ی گود و سازه‌ی مجاور آن از هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه (خروجی مرحله‌ی قبل) ایجاد و براساس نتایج میدانی کالیبره شده است.

۶. **اصلاح موارد تحت مطالعه با استفاده از مدل‌های عددی کالیبره شده:** در ادامه، هر یک از ۱۰ مدل عددی کالیبره شده، به منظور افزایش امکان مقایسه با اعمال تغییراتی از جمله: حذف آب، یکسان‌سازی روش تسلیح دیواره‌ی گود، اصلاح عمق گود، افزایش تعداد قاب‌های سازه، اصلاح و ایده‌آل شده است. این تذکر لازم است که سختی قاب‌ها و دیوارها، نوع پی، خاک محدوده‌ی گودبرداری، ضرایب فشار خاک بر دیواره، سطوح تماس، مشخصات فنی سیستم تسلیح، بارگذاری، اندازه‌ی مدل، ابعاد مش بندی، نوع المان‌ها، شرایط مرزی، درجات آزادی از جمله مواردی است که در طول اصلاح و ایده‌آل‌سازی تغییر نکرده و در حالت کالیبره شده باقی مانده است.

۷. **ارائه‌ی سطوح خرابی:** با توجه به نتایج خرابی ارزیابی شده از مدل‌های عددی ایده‌آل‌سازی شده در مرحله‌ی قبل، در این مرحله مقدار DPI هر قاب مجاور گود و میزان جابجایی دیواره‌ی گود برداشت و با توجه به مجموع نتایج به دست آمده، سطوح خرابی برای سازه‌های مجاور گود ارائه شده است.

۳. ارزیابی پتانسیل خرابی در سازه‌ی مجاور دیوار

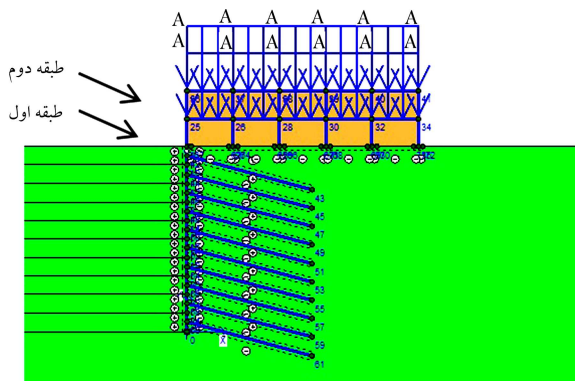
میخ‌کوبی

در این نوشتار پیش از ارائه‌ی سطوح خرابی، ابتدا با استفاده از مدل‌سازی عددی، پتانسیل خرابی در قاب‌های مجاور دیواره‌ی میخ‌کوبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از این بخش، آشنایی بیشتر با مفهوم خرابی و همچنین چگونگی توزیع خرابی در قاب‌ها و طبقات یک سازه در مجاورت دیواره‌ی گود است.

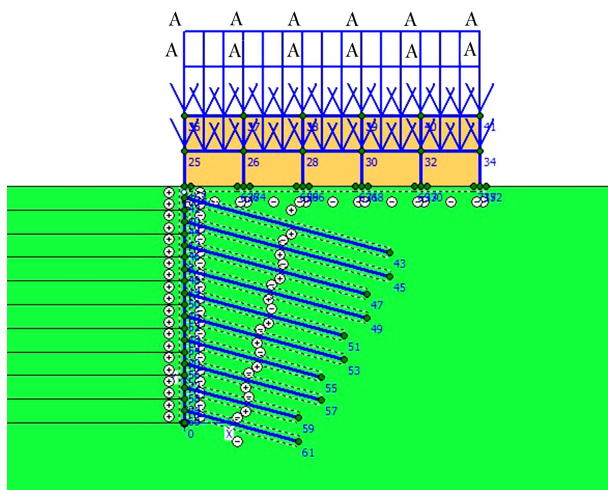
بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار Plaxis به مدل‌سازی دیواره‌ی میخ‌کوبی و سازه‌ی مجاور آن پرداخته شده است. در این مدل، خاک به صورت یک لایه و با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ و سازه‌ی مجاور دیواره‌ی میخ‌کوبی در ۲ طبقه و ۵ قاب (هر یک به عرض ۵ متر) در نظر گرفته شده است. آرایش میخ‌کوبی و

جدول ۳. پارامترهای خاک به‌کار گرفته‌شده در مدل عددی. [۲۸]

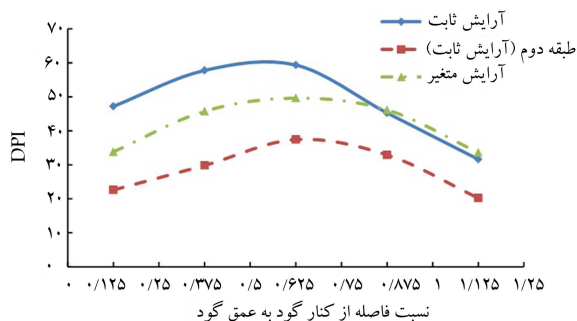
پارامتر	E_{ur}^{ref} (KN/m ²)	E_{oed}^{ref} (KN/m ²)	$E_{\delta_0}^{ref}$ (KN/m ²)	γ_{sat} (KN/m ³)	γ_{unsat} (KN/m ³)
مقدار	$1.9E^5$	$6.2E^4$	$6.4E^4$	۲۱	۲۰
پارامتر	v_{ur}	Φ	ϕ	C_{ref}	m
مقدار	۰.۲	۸	۳۸	۲۵	۰.۱
پارامتر	R_f	Y_{ref}	C_{inc}	K_0^{nc}	P_{ref} (KN/m ²)
مقدار	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۳۸	۱۰۰



شکل ۴. مدل عددی ایجادشده از سیستم میخ‌کوبی با طول ثابت.



شکل ۵. مدل عددی ایجادشده از سیستم میخ‌کوبی با طول متغیر.

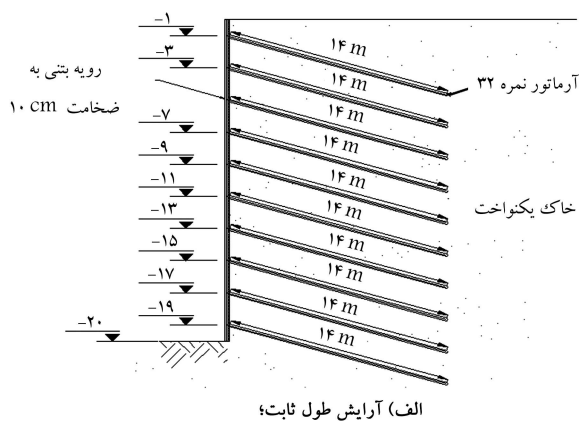


شکل ۶. مقادیر درجه‌ی خرابی در ۲ طبقه‌ی سازه و در ۲ آرایش میخ‌کوبی با طول ثابت و طول متغیر.

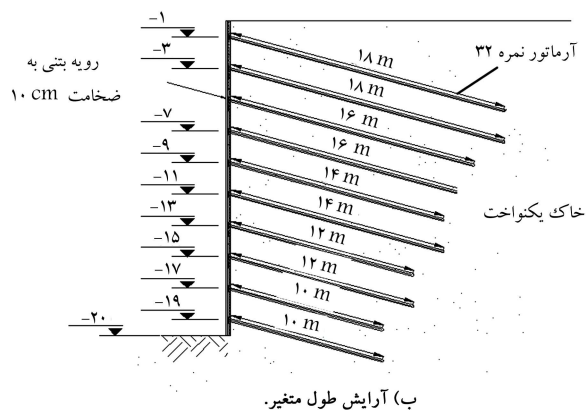
سایر مشخصات مدل مطابق شکل ۳ انتخاب شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ مدل عددی ایجادشده نشان داده شده است.

در هر یک از دو حالت فوق، مقادیر پتانسیل خرابی (DPI) در هر قاب سازه محاسبه شده است. به‌منظور محاسبه‌ی DPI، مقادیر جابجایی در ۴ گوشه‌ی هر قاب از مدل قرائت شده و در ادامه، مقادیر ϵ_1 و β مطابق با روابط ارائه‌شده در شکل ۲ محاسبه شده است. پس از ارزیابی مقدار دو پارامتر فوق از رابطه‌ی ۱، مقدار DPI محاسبه شده است.

در شکل ۶، مقدار این پارامتر در قاب‌های مختلف سازه نشان داده شده است. در شکل مذکور، محور قائم بیانگر مقدار DPI و محور افقی بیانگر نسبت فاصله‌ی مرکز هر قاب به عمق گود است. منحنی با خط‌ممتد در این شکل بیانگر درجه‌ی خرابی در هر قاب از طبقه‌ی اول و با آرایش میخ با طول ثابت، منحنی به‌صورت خط - نقطه بیانگر درجه‌ی خرابی در هر قاب از طبقه‌ی اول و با آرایش میخ با طول



الف) آرایش طول ثابت



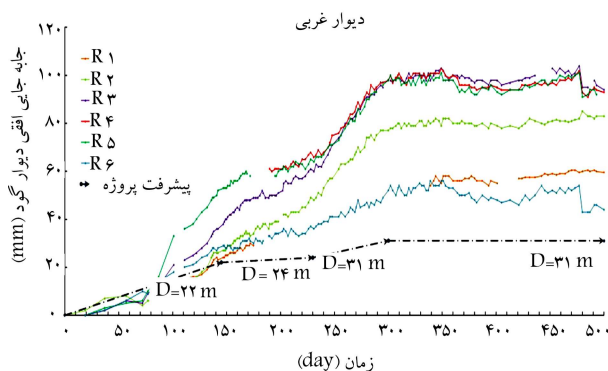
ب) آرایش طول متغیر

شکل ۳. سیستم میخ‌کوبی.

جدول ۴. اطلاعات موارد بررسی شده در مطالعه‌ی موردی.

شماره‌ی ردیف	نوع سازه	عمق گود	فاصله	دهانه	طبقات
۱	مصالح بنایی	۳۱	۱۳	۵-۶	۲
۲	مصالح بنایی	۲۳٫۵	۰	۵-۶	۱+۱*
۳	مصالح بنایی	۲۲	۶٫۵	۴-۵	۳
۴	مصالح بنایی	۲۲٫۵	۱٫۵	۵-۶	۲
۵	مصالح بنایی	۲۶	۰	۵-۶	۲
۶	مصالح بنایی	۲۶	۰	۵-۶	۲
۷	مصالح بنایی	۳۱	۷	۴-۵	۲
۸	مصالح بنایی	۲۸	۱٫۵	۵-۶	۲
۹	مصالح بنایی	۲۸	۰	۵-۶	۲
۱۰	مصالح بنایی	۱۶٫۷	۰	۴-۵	۳

* یک طبقه‌ی زیرزمین.



شکل ۷. نمونه‌ی نتایج مانتیورینگ دیواره‌ی میخ‌کوبی شده.

این رو سعی شده است با بهره‌گیری از تحلیل‌های عددی و با استفاده از نرم‌افزار Plaxis موارد تحت مطالعه در قالب مطالعات موردی، اصلاح و ایده‌آل‌سازی شود تا قابلیت استنتاج بیشتری یابد و مقایسه‌پذیرتر شود. بدین منظور در مرحله‌ی اول، مدل عددی از هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه ایجاد و هم‌سنجی شده است. هم‌سنجی مدل‌های عددی در ۲ حالت انجام شده است:

۱. میزان جابجایی دیواره‌ی گود براساس نتایج تحلیل عددی با نتایج حاصل از مانتیورینگ دیواره‌ی گود در شرایط واقعی مورد مقایسه و هم‌سنجی قرار گرفته است. نمونه‌ی نتایج مانتیورینگ دیواره‌ی گود در شکل ۷ نشان داده شده است (مربوط به مورد ۱ در جدول ۴).

۲. درجه‌ی خرابی سازه براساس نتایج تحلیل عددی با نتایج حاصل از روش مشاهداتی مورد مقایسه و هم‌سنجی قرار گرفته است. این تذکر لازم است که به‌منظور تعیین درجه‌ی خرابی براساس نتایج تحلیل عددی، مقادیر جابجایی در گوشه‌ی هر قاب از مدل دریافت شده و در ادامه، مقادیر ϵ_1 و β مطابق با روابط ارائه‌شده در شکل ۲ محاسبه شده است. پس از ارزیابی مقدار دو پارامتر ذکرشده، از رابطه‌ی ۱ و جدول ۲، سطح خرابی در هر قاب از سازه در مدل عددی تعیین شده است. براساس روش مشاهداتی نیز ارزیابی درجه‌ی خرابی براساس موارد مندرج در جدول ۱ صورت پذیرفته است. این تذکر لازم است که معیار تحلیلی ارائه‌شده در جدول ۲ و رابطه‌ی ۱ براساس معیار مشاهداتی جدول ۱ بوده است و همبستگی بین معیار تحلیلی و مشاهداتی وجود دارد. [۲۷-۲۵]

متغیر و منحنی به‌صورت خط‌چین بیانگر درجه‌ی خرابی در هر قاب از طبقه‌ی دوم و با آرایش میخ با طول ثابت است.

مطابق شکل ۶ ملاحظه می‌شود که میزان خرابی قاب‌ها با فاصله‌گرفتن از بر گود تا اندازه‌ی افزایش و سپس کاهش یافته است. از طرف دیگر، مطابق نتایج به‌دست‌آمده ملاحظه می‌شود که مقادیر درجه‌ی خرابی در قاب‌های طبقه‌ی اول در حالت آرایش با طول میخ متغیر کمتر از درجه‌ی خرابی در حالت میخ‌کوبی با آرایش میخ ثابت است. این اختلاف با افزایش فاصله‌ی قاب سازه از بر گود کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی مقادیر پتانسیل خرابی در قاب‌های طبقه‌ی اول و دوم سازه مشاهده می‌شود که میزان شاخص خرابی در طبقه‌ی دوم سازه‌ی مجاور گود در حدود ۵۰٪ طبقه‌ی اول آن است.

۴. سطوح خرابی پیشنهادی

۴.۱. مطالعات موردی

به‌منظور ارائه‌ی سطوح خرابی در مرحله‌ی اول، ابتدا ۴ پروژه‌ی گودبرداری در شهر تهران مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه صورت‌گرفته شامل: طراحی دیواره‌های گود به روش میخ‌کوبی، رفتارنگاری دیواره‌های گود و پایش ترک‌خوردگی در سازه‌های اطراف گود با پیشرفت گودبرداری بوده است. در مرحله‌ی بعد به‌منظور افزایش موارد مورد مطالعه، داده‌های مربوط به نقشه‌های اجرایی، مشخصات ژئوتکنیک محدوده‌ی گودبرداری، مانتیورینگ گود و... از ۲۷ پروژه‌ی گودبرداری عمیق در محدوده‌ی عمق ۱۶٫۷ متر تا ۳۱ متر در شهر تهران جمع‌آوری شده است.

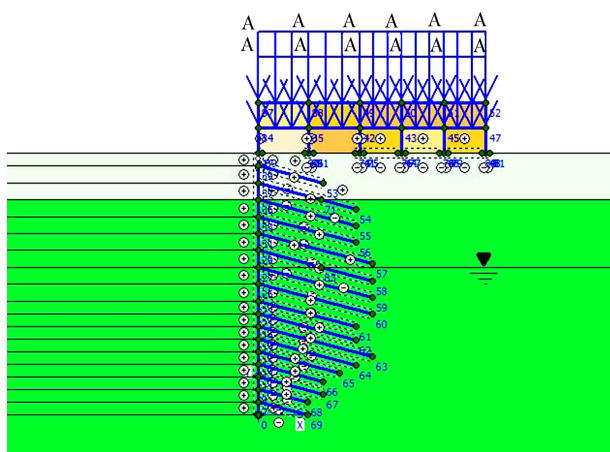
با وجود جمع‌آوری داده‌ها از گودهای بزرگ و حساس و تحت نظارت گروه‌های فنی متخصص، داده‌های جمع‌آوری‌شده از ۱۴ پروژه، دقت کافی نداشته و یا جبهه‌های کاری در پروژه به‌واسطه‌ی برخورد با چاه، گالری‌های موجود در مجاورت گود، متوقف‌بودن فرایند گودبرداری در طول چند سال و یا سایر مشکلات اجرایی، قضاوت در مورد نتایج جابجایی ارائه شده و تحلیل داده‌ها را با مشکل مواجه ساخته و از این رو داده‌های مربوطه از محدوده‌ی مطالعات موردی حذف شده‌اند.

در مرحله‌ی دوم، با حضور در محل پروژه‌های مورد مطالعه، ضمن بررسی بیشتر وضعیت گودبرداری، به ارزیابی وضعیت سازه‌های مجاور گود از نظر سازه‌ی، تعداد طبقات، قدمت ساخت، ابعاد قاب‌ها و درجه‌ی خرابی قاب‌ها با توجه به روش مشاهداتی ذکرشده در مقدمه پرداخته شده است. در این مرحله نیز به‌واسطه‌ی عدم امکان بازدید از برخی سازه‌ها، شرایط خاص سازه، موقعیت سازه نسبت به گود و... برخی از داده‌ها از مطالعات موردی حذف شده‌اند.

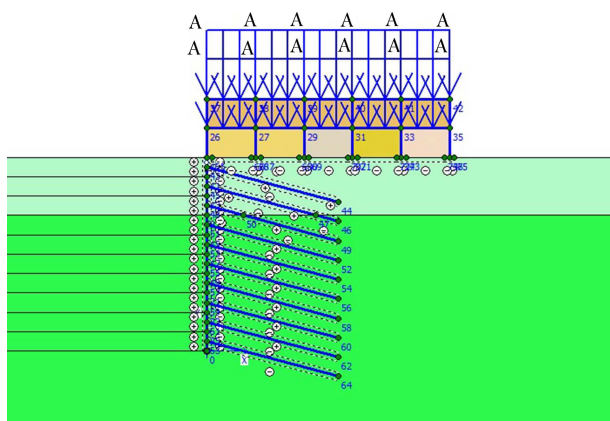
با توجه به مطالب اشاره‌شده، پس از بررسی داده‌های اولیه، ۱۰ مورد مطابق جدول ۴ به‌منظور انجام مطالعات موردی انتخاب و در هر مورد فقط یک قاب به‌منظور تحلیل عددی استفاده شد.

۴.۲. ایده‌آل‌سازی مطالعات موردی با استفاده از تحلیل‌های عددی

موارد تحت مطالعه در قالب مطالعات موردی، از پروژه‌های مختلف حاصل شده و با توجه به مشخصات خاص هر پروژه، طراحی سیستم تسلیخ متفاوت بوده است. از طرف دیگر، سطح آب، عمق گودبرداری در پروژه، و مشخصات اجرایی سازه‌های مجاور گود در هر پروژه متفاوت است. این موارد سبب شده است که با وجود حذف و فیلترکردن بسیاری از داده‌ها، مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات موردی و نتیجه‌گیری از داده‌ها به‌واسطه‌ی تفاوت‌های ذکرشده تا اندازه‌ی غیرممکن شود. از



شکل ۸. مدل عددی ساخته شده از یکی از موارد تحت مطالعه.



شکل ۹. مدل عددی ایده‌آل‌سازی شده.

۳.۴. ارائه‌ی سطوح خرابی

براساس خروجی مدل عددی، به ارزیابی درجه‌ی خرابی در قاب‌های مجاور گود پرداخته شده است. برای این منظور از مفهوم DPI بهره گرفته شده است. بر این اساس، با تعیین مقادیر جابجایی قاب‌ها و استفاده از رابطه‌ی ۱، مقدار DPI برای هر قاب محاسبه شده است.

مقدار جابجایی تاج در هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه و فاصله‌ی مرکز هر قاب از لبه‌ی گود به همراه درجه‌ی خرابی قاب‌های مجاور گود (در طبقه‌ی اول)، به‌عنوان داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی (منتج شده از مطالعات موردی) در قالب شکل ۱۰ ارائه شده است، که در آن: محور افقی، جابجایی بیشینه‌ی گود، محور قائم، نسبت فاصله‌ی مرکز هر قاب از لبه‌ی گود به عمق گود؛ و اعداد مجاور هر نقطه، مقدار DPI مرتبط با قاب مورد مطالعه بوده است.

مطابق شکل مذکور ملاحظه می‌شود که هیچ روند منطقی‌یی در داده‌های تحت مطالعه قابل مشاهده نیست. از این رو سعی شده است محدوده‌ی تغییرات اعداد مورد مطالعه (DPI) تا اندازه‌ی کاهش یابد. بدین منظور از درجه‌بندی مطابق جدول ۲ در مقدمه استفاده شده است. با این تقسیم‌بندی، اعداد ارائه‌شده در شکل ۱۱ به ۶ درجه مطابق شکل ۱۲ تقسیم شده است.

مطابق شکل، باز هم استحصال یک روند منطقی از تغییر درجه‌ی خرابی براساس تغییرات جابجایی بیشینه و فاصله‌ی مرکز قاب از بر گود تا اندازه‌ی دشوار است. از این رو، دسته‌بندی داده‌ها مطابق شکل ۱۲ انجام شد. مطابق این شکل، صفحه به

مدل عددی ساخته شده از یکی از موارد تحت مطالعه (مورد ۱ در جدول ۴) در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مدل‌سازی از المان‌های beam به‌منظور شبیه‌سازی المان‌های قاب سازه با مصالح بنایی استفاده شده است. این المان به‌واسطه‌ی در نظر گرفتن مقاومت خمشی و برشی، برای شبیه‌سازی میخ‌ها و شاتکریت نیز به‌کار گرفته شده است.

در این مدل‌سازی، پارامترهای مدل H-S به‌منظور شبیه‌سازی خاک و پارامترهای مدل موهر - کلمب (به‌عنوان یک مدل کشسان‌خمری) برای شبیه‌سازی دیواره‌ی آجری در نظر گرفته شده است. به‌منظور تخمین پارامترهای دیوار آجری، عموماً از تعریف «واحد بنایی» استفاده شده است. مشخصات واحد بنایی در منابع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال براساس نمودارهای ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۱۹۸۳^[۲۹]، با در نظر گرفتن ضخامت ملات برابر ۱۵ میلی‌متر و نسبت مدول کشسانی آجر به ملات برابر ۴/۴، نسبت مدول کشسانی دیوار در جهت قائم به مدول کشسانی آجر برابر ۰/۶۷ و این نسبت در جهت افق برابر ۰/۶۲ است.

در این پژوهش به‌منظور تخمین پارامترهای مقاومتی، واحد بنایی ۳ سطح کیفیت خوب^۸، کیفیت متوسط^۹ و کیفیت بد^{۱۰} مورد استفاده قرار گرفته است.^[۳۰] مطابق با سطوح کیفیت پیش‌گفته که براساس مشاهدات عینی و قضاوت مهندسی تعیین می‌شود، سطح کیفیت خوب متناظر با مقاومت برابر ۶۰ Kg/cm^۲ و سطوح کیفیت متوسط و ضعیف به ترتیب متناظر با مقاومت برابر ۴۰ Kg/cm^۲ و ۲۰ Kg/cm^۲ است. مقدار مدول کشسانی ۵۵۰ برابر مقاومت فشاری واحد بنایی در نظر گرفته شده است.^[۳۰] در مدل‌سازی صورت‌گرفته، با توجه به فواصل دیوار باربر و ضخامت دیواره، پارامترهای مدول کشسانی و مقاومت فشاری برای واحد بنایی مطابق روابط ۲ و ۳ اصلاح شده است:

$$\nabla_{eq} = \frac{\nabla_b \times b}{L} \quad (2)$$

$$E_{eq} = \frac{E_b \times b}{L} \quad (3)$$

که در آن‌ها، پارامتر b معرف عرض دیوار باربر و پارامتر L معرف طول دهانه‌ی دیوار باربر است.

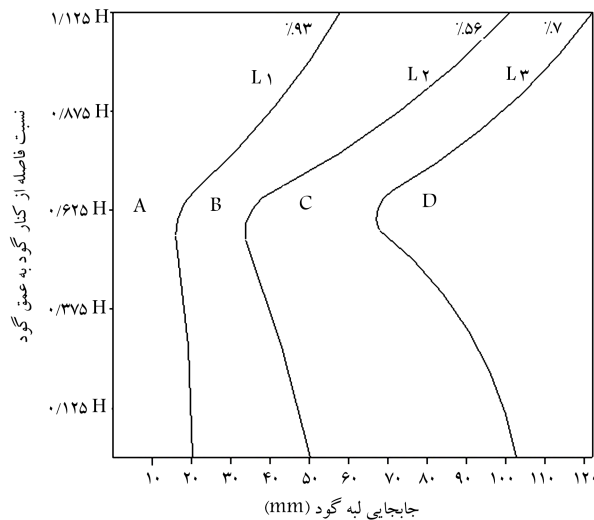
همان‌طور که اشاره شده است، هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه دارای شرایط خاص طراحی، عمق متفاوت، تراز آب متفاوت و... بوده است. از این رو به‌منظور امکان مقایسه و استنتاج بهتر از موارد تحت مطالعه، به اصلاح و ایده‌آل‌سازی مدل هم‌سنجی‌شده از هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه پرداخته شده است. اصلاح و ایده‌آل‌سازی مدل‌ها در قالب این موارد صورت پذیرفته است:

۱. آب زیرزمینی حذف شده است.
 ۲. عمق دیواره‌های گود برابر ۲۰ متر در نظر گرفته شده است.
 ۳. طول میخ‌ها برابر ۰/۷ ارتفاع دیواره‌ی گود لحاظ شده است.
 ۴. اصلاح ابعاد قاب‌ها، عرض قاب‌ها در محدوده‌ی ۴ تا ۶ متر قرار داشته است، که در حالت ایده‌آل‌شده، عرض کلیه‌ی قاب‌ها برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است.
- این تذکر لازم است که سختی قاب‌ها و دیوارها، نوع پی، خاک محدوده‌ی گودبرداری، ضرایب فشار خاک بر دیواره، سطوح تماس، مشخصات فنی سیستم تسلیح، بارگذاری، اندازه‌ی مدل، ابعاد مش‌بندی، نوع المان‌ها، شرایط مرزی، و درجات آزادی از جمله مواردی است که در طول اصلاح و ایده‌آل‌سازی، تغییر نکرده و در حالت کالیبره‌شده باقی مانده است.

مدل ساخته شده از مورد ۱ در جدول ۴، با اعمال اصلاحات ذکر شده در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۵. احتمال خرابی در محدوده‌های شکل ۱۵.

محدوده (%)				
D	C	B	A	
۰	۰	۰	۳۳	ND
۰	۰	۶	۳۳	VSL
۰	۷	۵۰	۲۷	SL
۰	۳۶	۳۸	۷	M
۲۰	۵۰	۶	۰	SE
۸۰	۷	۰	۰	VSE

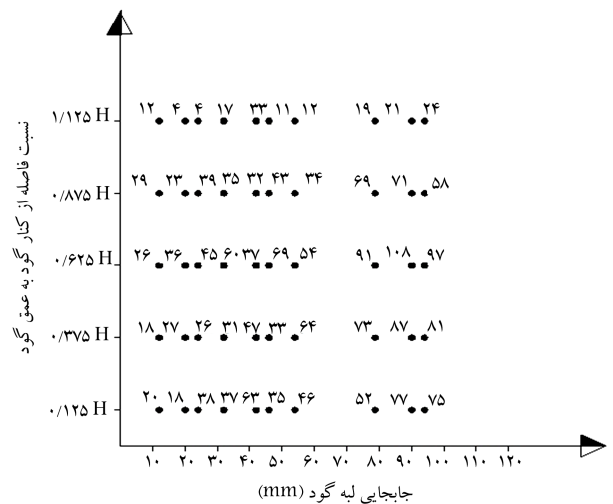


شکل ۱۳. تعریف حد سرویس سازه با توجه به میزان جابجایی بیشینه‌ی تاج دیواره‌ی گود و فاصله‌ی مرکز قاب سازه از بر گود.

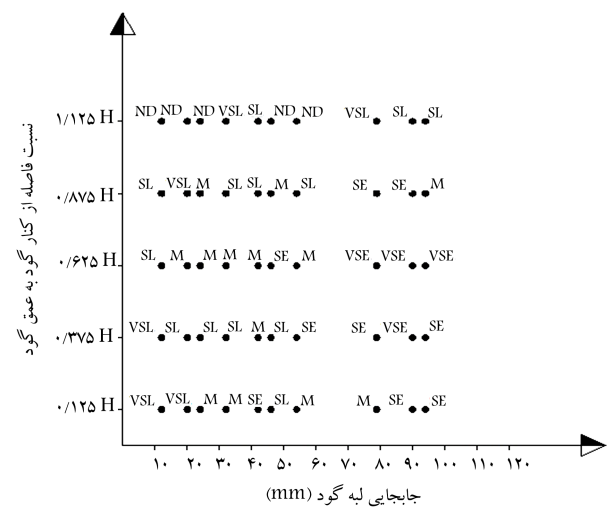
۴ ناحیه‌ی A, B, C و D تقسیم و فاصله‌ی تقریبی انتهای طول میخ‌ها از لبه‌ی گود به صورت خط چین نشان داده شده است. انتخاب نواحی از معادله‌ی خاصی پیروی نکرده و فقط براساس توزیع داده‌ها و به منظور نتیجه‌گیری بهتر از داده‌ها ارائه شده است. با استناد به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که در فاصله‌ی تقریباً برابر با طول میخ‌ها، میزان درجه‌ی خرابی به میزان بیشینه است، لذا این فاصله را می‌توان فاصله‌ی بحرانی نامید. با نزدیک شدن به لبه‌ی گود از فاصله‌ی بحرانی و یا با افزایش فاصله‌ی بیش از فاصله‌ی بحرانی، میزان خرابی ایجاد شده در سازه کمتر می‌شود. از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که در محدوده‌ی بین فاصله‌ی بحرانی تا لب گود، میزان درجه‌ی خرابی بیش از محدوده‌ی فاصله‌ی بحرانی تا محدوده‌ی تأثیر گود است. به منظور توصیف بیشتر شکل ۱۲، احتمال آسیب به قاب مجاور گود در هر یک از محدوده‌های A, B, C و D در جدول ۵ ارائه شده است. احتمال ارائه شده طبق تعریف برابر نسبت داده‌های هدف به تعداد داده‌های جامعه‌ی آماری است.

مطابق جدول ۵ ملاحظه می‌شود که چنانچه با توجه به مقادیر جابجایی دیواره‌ی گود و فاصله‌ی سازه‌ی مجاور آن از بر گود، شرایط قاب سازه در محدوده‌ی A در شکل ۱۳ قرار گیرد، احتمال آسیب به قاب سازه در حد ND برابر ۳۳٪، در حد VSL برابر ۳۳٪ و احتمال آسیب به قاب سازه در حد SL و SE به ترتیب برابر ۲۷ و ۷ درصد است. این تذکر لازم است که توصیف حالت خرابی ارائه شده در جدول ۵، در جدول ۱ ارائه شده است.

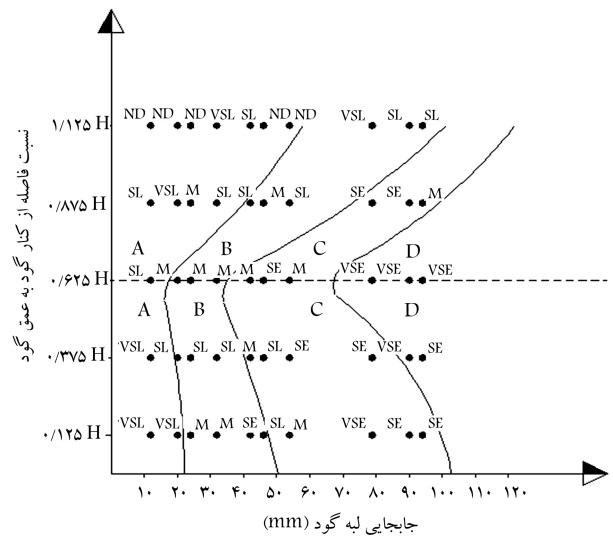
با در نظر گرفتن حد SL به عنوان حد ترک‌های غیرسازه‌ی و قابل تحمل برای



شکل ۱۰. مقادیر DPI به‌ازاء مقادیر مختلف جابجایی تاج و فاصله از بر گود.



شکل ۱۱. درجات خرابی سازه‌ی مجاور گود به‌ازاء مقادیر مختلف جابجایی تاج و فاصله از بر گود مطابق با تعریف جدول ۲.



شکل ۱۲. سطوح خرابی سیستم میخ‌کوبی.

سازه،^[۲۴] و با به‌عبارت دیگر، حد سرویس سازه، می‌توان شکل ۱۳ را به‌منظور بررسی بیشتر احتمال خرابی سازه‌های مجاور گود ارائه کرد، که در آن احتمال عدم آسیب سازه‌ی به قاب‌های مجاور گود مشاهده می‌شود.

مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که تا مرز L۱، احتمال عدم ایجاد ترک‌های سازه‌ی (خارج از حد سرویس) به قاب برابر ۹۳٪ و این احتمال تا مرزهای L۲ و L۳ به ترتیب برابر ۵۶٪ و ۷٪ است. همچنین ملاحظه می‌شود که به‌عنوان مثال چنانچه جابجایی تاج دیواره‌ی میخ‌کوبی شده براساس نتایج طراحی برابر ۳۰ میلی‌متر باشد، سازه‌های (با مصالح بتابی) موجود در محدوده‌ی دیواره‌ی گود تا فاصله‌ی برابر ۰٫۷ ارتفاع گود (از برگود) در ناحیه‌ی B قرار می‌گیرد و در فاصله‌ی بیش از آن در ناحیه‌ی A واقع می‌شود. به‌عبارت دقیق‌تر، قاب‌های در محدوده‌ی دیواره‌ی گود تا فاصله‌ی برابر ۰٫۷ ارتفاع گود با ایجاد ۳۰ میلی‌متر جابجایی، ۴۰٪ (کسر) از احتمال ۱۰۰٪ احتمال ترک‌خوردگی در حد سازه‌ی را دارد، که این احتمال برای سازه‌های دورتر از ۰٫۷ ارتفاع گود به ۷٪ (کسر ۹۳٪ از احتمال ۱۰۰٪) کاهش می‌یابد. با توجه به میزان خرابی قابل انتظار می‌توان طرح را اصلاح و یا برای بازسازی سازه‌ی مجاور دیواره‌ی گود هزینه‌ی در نظر گرفت.

۵. نتیجه‌گیری

مطابق با تحلیل‌های ارائه‌شده در این نوشتار، این نتایج قابل استنباط است:

۱. تعیین سطوح خرابی سازه‌های مجاور دیواره میخ‌کوبی شده براساس جابجایی افقی بیشینه‌ی دیواره‌ی گود و فاصله‌ی مرکز قاب سازه از برگود و همچنین معرفی حد سرویس در تعیین عملکرد دیواره‌ی میخ‌کوبی، مهم‌ترین دستاورد این نوشتار است.
۲. در فاصله‌ی تقریباً برابر با طول میخ‌ها از برگود در سطح زمین مجاور گود، میزان درجه‌ی خرابی به میزان بیشینه است. این فاصله، فاصله‌ی بحرانی نامیده شده است. با نزدیک شدن به لبه‌ی گود از فاصله‌ی بحرانی و یا با افزایش فاصله‌ی بیش از فاصله‌ی بحرانی، میزان خرابی ایجادشده در سازه کمتر می‌شود.
۳. درجه‌ی خرابی ایجادشده در قاب‌های طبقه‌ی دوم سازه در حدود ۵۰٪ درجه‌ی خرابی قاب‌های طبقه‌ی اول سازه است. این اثر به‌واسطه‌ی محصورشدگی و سختی بیشتر قاب‌های طبقه‌ی دوم است.

پانویس‌ها

1. nailing
2. nail
3. passive
4. active
5. deformation parameters
6. very slight, slight, moderate, severe, very severe
7. damage potential index
8. good
9. fair
10. poor

منابع (References)

1. 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).
2. Ghahreman, B. "Analysis of ground and building response around deep excavation in sand", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois (2004).
3. 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).
4. Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd Edition, John Wiley and Sons, New York, NY (1996).
5. Muller, C.G., Long, J.H., Weatherby, D.E., Cording, E.J., Powers III, W.F. and Briauund, J.L. "Summary report of research on permanent ground anchor walls", 3: Model-scale Wall Tests and Ground Anchor Tests (No. FHWA-RD-98-067) (1998).
6. Finno, R.J. and Roboski, J.F. "Three-dimensional response of a tied-back excavation through clay", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(3), pp. 273-282 (2005).
7. Kung, G.T.C., Juang, C.H., Hsiao, E.C.L. and Hashash, Y.M.A. "A simplified model for wall deflection and ground surface settlement caused by braced excavation in clays", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **133**(6), pp. 731-747 (2007).
8. Calvello, M. and Finno, R.J. "Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis", *Computers and Geotechnics*, **31**(5), pp. 411-425 (2004).
9. Finno, R.J. and Calvello, M. "Supported excavations: Observational method and inverse modeling", *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **131**(7), pp. 826-836 (2005).
10. Kung, G.T.C., Hsiao, E.C.L. and Juang, C.H. "Evaluation of a simplified mallstrain soil model for estimation of excavation-induced movements", *Canadian Geotechnical Journal*, **44**(6), pp. 726-736 (2007).
11. Boscardin, M.D. "Building response to excavation induced movements", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois (1980).
12. 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).
13. Laefer, D.F. "Prediction and assessment of ground movement and building damage induced by adjacent excava-

- tion", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois (2001).
14. Sawwaf, M.E. and Nazir, A.K. "The effect of deep excavation-induced lateral soil movements on the behavior of strip footing supported on reinforced sand", *J. Advanced Research*, **3**(4), pp. 337-344 (October 2012).
 15. Son, M. and Cording, E.J. "Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(2), pp. 162-177 (2005).
 16. Bryson, L.S. and Kotheimer, M.J. "Cracking in walls of a building adjacent to a deep excavation", *J. Performance of Construction Facilities*, **25**(6), pp. 491-503 (2011).
 17. Halim, D. and Wong, K.S. "Prediction of frame structure damage due to deep excavation", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**(12), pp. 1530-1536 (2012).
 18. Yoo, C. and Lee, D. "Deep excavation-induced ground surface movement characteristics – A numerical investigation", *J. Computers and Geotechnics*, **35**(2), pp. 231-252 (2007).
 19. Son, M. and Cording, E.J. "Evaluation of building stiffness for building response analysis to excavation-induced ground movements", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(8), pp. 995-1002 (2007).
 20. Son, M. and Cording, E.J. "Responses of buildings with different structural types to excavation-induced ground settlements", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(4), pp. 323-333 (2011).
 21. Bryson, L.S. and Zapata-Medina, D.J. "Method for estimating system stiffness for excavation support walls", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(9), pp. 1104-1115 (2012).
 22. Burland, J., Broms, B. and DeMello, V. "Behavior of foundations and structures: state-of-the-art report", *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Japanese Geotechnical Society, Tokyo, Japan, pp. 495-546 (1977).
 23. Boscardin, M. and Cording, E. "Building response to excavation induced settlement", *J. Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **115**(1), pp. 1-21 (1989).
 24. Son, M. "The response of buildings to excavation-induced ground movements", PhD thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill (2003).
 25. Hsiao, E., Schuster, M., Juang, C. and Kung, G., "Reliability analysis and updating of excavation-induced ground settlement for building serviceability assessment", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(10), pp. 1448-1458 (2008).
 26. Schuster, M., Kung, G., Juang, C. and Hashash, M. "Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(12), pp. 1823-1835 (2009).
 27. Juang, C., Schuster, M., Yu Ou, C. and Phoon, K. "Fully probabilistic framework for evaluating excavation-induced damage potential of adjacent buildings", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(2), pp. 130-139 (2011).
 28. Toe, P. and Wong, K. "Application of the hardening soil model in deep excavation analysis", *J. IES, Part A: Civil & Structural*, **5**(3), pp. 152-165 (2012).
 29. Padde, G.N., Linang, J.X. and Middleton, J. "Equivalent elastic moduli for brick masonry", *Journal of Computers and Geotechnics*, **8**(3), pp. 243-265 (1983).
 30. Management and Planning Organization Office of Deputy for Technical Affairs, *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Unreinforced Masonry Buildings*, No. 376 (2007) (in persian).