

حدود مجاز جابه‌جایی دیوار گودهای تسلیح شده به روش میخکوبی بر اساس سطوح خرابی سازه‌های مجاور گود

ابراهیم نعیمی فر^۱، شهاب الدین یثربی^{۲*}، علی فاخر^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تهران

yasrobis@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱/۳۰]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۶/۲۲]

چکیده - احتمال خرابی و آسیب به سازه‌های مجاور گودبرداری همواره به عنوان یک مسئله چالش برانگیز در طول پایدارسازی دیوار گودبرداری‌های عمیق با روش "میخکوبی" مطرح بوده است. منشأ این خرابی‌ها بیشتر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در دیوارهای گود با پیشرفت گودبرداری است. با این وجود تاکنون ارتباط منطقی بین میزان جابه‌جایی‌ها و میزان خرابی قابل انتظار در سازه‌های مجاور ارائه نشده است. در این پژوهش سعی شده است با تکیه بر ۱۰ مطالعه موردی و ۹۰ تحلیل عددی سه‌بعدی کالیبره شده و بهره‌گیری از آنالیزهای احتمالاتی، به ارائه حدود مجاز جابه‌جایی دیوار میخکوبی شده با توجه به احتمال آسیب به سازه‌های مصالح بنایی واقع در مجاورت گود پرداخته شود. نتایج این پژوهش ارائه دهنده سطوح خرابی سازه‌های مجاور گود تحت مقادیر مختلف جابه‌جایی است. سطوح خرابی پیشنهادی در این مقاله، نشان دهنده "میزان خرابی" محتمل در سازه‌های مجاور دیوارهای میخکوبی شده، با توجه به "فاصله سازه" از دیوار گود و بیشینه مقادیر "جابه‌جایی افقی" دیواره گود و با در نظر گرفتن آناز عمق گود و نوع خاک است.

واژگان کلیدی: گودبرداری، میخکوبی، حدود مجاز جابه‌جایی، سطوح خرابی.

۱- مقدمه

سمت داخل گود داشته و المان‌های فولادی با تحمل کشش، از جابه‌جایی دیواره گود به سمت داخل گود جلوگیری می‌کنند. از این‌رو المان‌ها با پیشرفت گودبرداری به صورت مقاوم عمل کرده و ناحیه‌ای از خاک پشت دیواره حالت محرک می‌یابد [۱ و ۳]. به عبارت دیگر در تکنیک میخکوبی، به منظور بسیج شدن نیروی کششی در المان‌های فولادی، جابه‌جایی دیوار گود اجتناب ناپذیر است. جابه‌جایی دیوار میخکوبی که به عنوان لازمه بسیج نیرو در

در سال‌های اخیر، میخکوبی^۱ به عنوان یک روش اقتصادی به منظور پایدارسازی دیوارهای گودبرداری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. شیوه اجرای این روش در مراجع و آیین‌نامه‌ها به تفصیل بیان شده است [۱ و ۲] و به طور خلاصه شامل تسلیح خاک با استفاده از المان‌های فولادی (میخ) در آرایش و طول مشخص است. در طول اجرای تکنیک میخکوبی و با پیشرفت گودبرداری، دیواره گود تمایل به جابه‌جایی به

جدول (۱) درجه‌بندی سطح خرابی براساس روش مشاهداتی [۱۵]

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

Table 1. Classification of building damage based on observational method [15]

بر اساس تقسیم‌بندی مشاهداتی ارائه شده در جدول (۱)، پژوهشگران مختلف سطوح خرابی سازه‌های مجاور گود را با توجه به پروفیل تغییر شکل دیوار گود و کرنش جانبی سازه [۴] و همچنین بر اساس اختلاف نشست ستون‌های سازه [۱۰] ارائه کرده‌اند. در سال‌های اخیر در یک پژوهش دقیق‌تر Boscardin و Cording [۸ و ۱۲] به ارائه سطوح خرابی بر اساس بازشدگی قاب (کرنش جانبی) و تغییر زاویه بین تیرها و ستون‌های قاب (اعوجاج زاویه‌ای) پرداختند. این سطوح که به وسیله داده‌های عددی و آزمایشگاهی کالیبره شده است [۱۷] در شکل (۱) ارائه شده است.

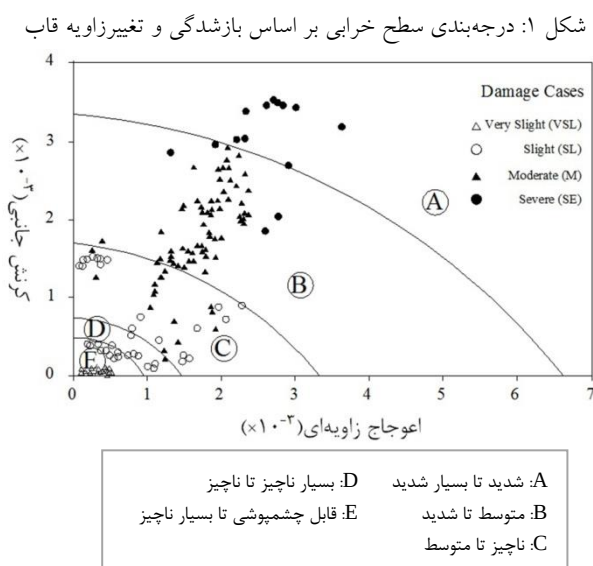


Fig. 1. Damage level based on lateral strain and angular distortion

مطابق شکل، میزان خرابی قابل انتظار در قاب سازه (نواحی A

میخ‌ها گفته شد، منتج به تغییر شکل‌های قائم (نشست) و تغییر شکل‌های افقی خاک مجاور گود می‌شود. این تغییر شکل‌ها موجب برخی آسیب‌ها به سازه‌ها و شریان‌های حیاطی مجاور محدوده گودبرداری می‌شود که منشا بسیاری از چالش‌ها در استفاده از روش میخکوبی در تثبیت دیوارهای گود در مناطق شهری است.

ارزیابی و تخمین اثر تغییر شکل‌های پیش‌گفته بر خرابی سازه‌های مجاور گود از موضوعات با اهمیت در طول گودبرداری بوده و پژوهشگران بسیاری به این موضوع پرداخته‌اند. در عمده مطالعات صورت گرفته، در تعریف میزان خرابی سازه در طول گودبرداری از مفهوم "سطوح خرابی" استفاده می‌شود. منظور از "سطوح خرابی"، حدود خرابی قابل انتظار در سازه در طول گودبرداری است و هر سطح خرابی تعریف کننده پیشینه خرابی قابل انتظار در سازه است.

به منظور تعیین سطوح خرابی سازه به واسطه گودبرداری، پارامترهایی با عنوان کلی "پارامترهای تغییر شکل" تعریف شده است [۴ و ۵]. این پارامترها معرف تغییر شکل افقی و دورانی قاب سازه بر اساس جابه‌جایی افقی و نشست محدوده اطراف گود است. سطوح خرابی سازه مجاور گود به واسطه جابه‌جایی‌های ناشی از گودبرداری با انجام آزمایش‌های تجربی مقیاس شده [۶ و ۷]، مشاهداتی میدانی و مطالعه‌ی موردی [۸-۱۰] و مطالعه‌های عددی [۱۱-۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مهمترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه تعیین سطوح خرابی براساس مطالعات Burland و همکارانش شکل گرفته است [۱۵]. در این مطالعات روشی مشاهداتی بر اساس عرض و فراوانی ترک‌های ایجاد شده در سازه، به منظور تعیین درجه خرابی سازه ارائه شده است. عمده نتایج این مطالعات در قالب جدول (۱) نشان داده شده است. مطابق جدول ملاحظه می‌شود که با توجه به ابعاد و توزیع ترک‌ها، میزان آسیب وارد شده به سازه به واسطه جابه‌جایی دیوار گود در ۵ سطح: بسیار ناچیز، ناچیز، مبه و وسیله‌ی، شدید و بسیار شدید^۲ تقسیم‌بندی شده است.

1. Deformation parameters

2. Very Slight, Slight, Moderate, Severe, Very Severe

بدون کارایی لازم بوده است. در آیین‌نامه‌های داخلی نیز (مبحث هفتم مقررات ملی) برای تمامی گودبرداری‌ها مقدار مجاز جابه‌جایی دیوار گود برابر ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که به نظر منطقی نیست.

در این مقاله با استناد به ۱۰ مطالعه موردی صورت گرفته در خاک تهران و ۹۰ مدل عددی سه‌بعدی کالیبره شده و بهره‌گیری از تحلیل‌های احتمالاتی، به ارائه "سطوح خرابی" سازه‌های مصالح بنایی مجاور گودهای تسلیح شده با "سیستم میخکوبی" بر اساس مقادیر "جابه‌جایی حداکثر" دیواره گود پرداخته می‌شود. در تعریف سطوح خرابی در این مقاله از متغیر DPI با تعریف ارائه شده در رابطه (۱)، مفاهیم ارائه شده در شکل‌های (۱) و (۲) و همچنین تقسیم‌بندی اشاره شده در جدول‌های (۱) و (۲) بهره گرفته می‌شود.

۲- مراحل انجام پژوهش

به منظور ارائه سطوح خرابی سازه‌های مجاور گود از مطالعات موردی و تحلیل‌های عددی به شرح زیر بهره گرفته شد:

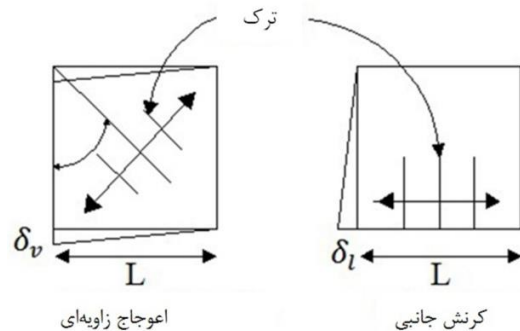
۱. مطالعات موردی: در ابتدای پژوهش اطلاعات مربوط به مطالعات ژئوتکنیک، طراحی سیستم تسلیح، نقشه‌های اجرایی و نتایج ایزاربندی از ۳۱ پروژه گودبرداری عمیق (۱۶۷-۳۱ متر) با بیش از ۱۴۰ سازه مسکونی (واقع در محدوده تأثیر ۳۱ پروژه) تهیه شد. در ادامه به واسطه برخی از خطاها در روش ایزاربندی در برخی از پروژه‌ها، مشکلات اجرایی ایجاد شده در طول گودبرداری، نتایج غیرمنطقی در جابه‌جایی با توجه به شرایط خاک پروژه، شیوه خاکبرداری غیر متعارف و همچنین شرایط خاص سازه‌های مجاور، بسیاری از داده‌های به دست آمده از موارد تحت مطالعه حذف شد و در انتها تنها ۶ پروژه گودبرداری و ۱۰ سازه در مجاورت پروژه‌ها به عنوان موارد دارای شرایط مناسب به منظور انجام مطالعات موردی انتخاب شد.

۲. مطالعات عددی: تحلیل‌های عددی در سه مرحله به شرح زیر صورت پذیرفت:

۱-۲. ساخت مدل عددی در حالت عدم حضور سازه: به منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای خاک بر مقادیر تغییر شکل دیواره گود و نواحی اطراف گود پس از اتمام گودبرداری، به مدل‌سازی عددی

تا E با توجه به کرنش جانبی و اعوجاج زاویه‌ای قاب، قابل ارزیابی است. توصیف پارامترهای تعریف کننده محورهای افقی و قائم در این شکل، در شکل (۲) ارائه شده است.

شکل ۲: معرفی پارامترهای شکل (۱) و رابطه (۱)



$$\beta = \delta_v / L$$

$$\varepsilon_1 = \delta_l / L$$

Fig. 2. Definition of parameters in Fig. 1 and Eq. 1

همان‌گونه که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، پارامترهای ارائه شده به شکل کلی در بردارنده مشخصات تغییر شکل سازه بوده و پروفیل تغییر شکل دیواره گود کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات بیشتر در این زمینه به وسیله‌ی Schuster و همکاران صورت گرفته است [۱۸-۲۰]. در این مطالعات سطوح خرابی با استفاده از تعریف شاخص پتانسیل خرابی (DPI) برای سازه مجاور گود مطابق جدول (۲) ارائه شده است. پارامتر DPI مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود.

(۱) $DPI = 20 \times 10^{-3} (\varepsilon_1 \cos^2 \theta_{max} + \beta \sin \theta_{max} \cos \theta_{max})$
در این رابطه، ε_1 ، β مطابق شکل (۲) تعریف شده است و پارامتر θ_{max} زاویه بین امتداد ترک‌ها و محور قائم است.

جدول (۲) درجه‌بندی سطح خرابی براساس DPI [۱۸-۲۰]

DPI	سطح خرابی	
0-15	ND-VSL	قابل چشم‌پوشی تا بسیار ناچیز
15-25	SL	ناچیز
25-35	SL-M	ناچیز تا متوسط
35-60	M	متوسط
60-85	SE	شدید
>85	VSE	بسیار شدید

Table 2. Damage level classification based on DPI

سطوح خرابی ارائه شده در منابع مختلف محدود بوده و در بسیاری از موارد به واسطه لزوم ایزاربندی سازه مجاور گود،

1. Damage Potential Index

متوقف بودن فرآیند گودبرداری در طول چند سال و یا سایر مشکلات اجرایی، قضاوت در مورد نتایج جابه‌جایی ارائه شده و تحلیل داده‌ها را با مشکل مواجه ساخته و از این رو داده‌های مربوطه از محدوده مطالعات موردی حذف شد.

در مرحله بعد، با حضور در محل پروژه‌های مورد مطالعه، ضمن بررسی بیشتر وضعیت گودبرداری، موقعیت هریک از ساختمان‌های مجاور گود ثبت شد و به ارزیابی وضعیت ساختمان‌ها از نظر سازه‌ای، تعداد طبقات، قدمت ساخت، ابعاد قاب‌ها و درجه خرابی قاب‌ها با توجه به روش مشاهداتی یاد شده در مقدمه، پرداخته شد. در این مرحله نیز به واسطه عدم امکان بازدید از برخی ساختمان‌ها، عدم هماهنگی منطقی بین درجه خرابی و نتایج مانیتورینگ، مشکلات خاص موجود در ساختمان، موقعیت خاص سازه نسبت به گود و ... برخی از داده‌ها از مطالعات موردی حذف شد.

با توجه به مطالب اشاره شده، پس از بررسی داده‌های اولیه (بیش از ۱۴۰ سازه)، ۱۰ مورد مطابق جدول (۴) به منظور انجام مطالعات موردی انتخاب شد.

جدول (۳) مشخصات گود و سازه در هریک از ۱۰ مورد تحت مطالعه

ردیف	نوع سازه	عمق گود	فاصله سازه از دیوار گود	طول دهانه	تعداد طبقه	نوع پی
۱	مصالح بنایی	۳۱	۱۳	۵-۶	۲	منفرد
۲	مصالح بنایی	۲۳/۵	۰	۵-۶	۱+۱	منفرد
۳	مصالح بنایی	۲۲	۶/۵	۴-۵	۳	منفرد
۴	مصالح بنایی	۲۲/۵	۱/۵	۵-۶	۲	منفرد
۵	مصالح بنایی	۲۶	۶	۵-۶	۲	منفرد
۶	مصالح بنایی	۲۶	۰	۵-۶	۲	منفرد
۷	مصالح بنایی	۳۱	۷	۴-۵	۲	منفرد
۸	مصالح بنایی	۲۸	۱/۵	۵-۶	۲	منفرد
۹	مصالح بنایی	۲۸	۰	۵-۶	۲	منفرد
۱۰	مصالح بنایی	۱۶/۷	۰	۴-۵	۳	منفرد

Table 3. Specifications of excavation and adjacent structure in this study

۴- تحلیل‌های عددی

مطالعات عددی در سه بخش صورت پذیرفت. در بخش اول به صورت خاص، با مدل‌سازی دیوار میخکوبی در شرایط عدم حضور سازه، به بررسی تاثیر پارامترهای خاک بر مود تغییرشکل دیوار پرداخته شد. منظور از مود تغییرشکل، شکل نهایی دیوار گود

دیوار گود (در حالت عدم حضور سازه در مجاورت گود) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.11-1 پرداخته شد.

۲-۲. ساخت مدل عددی (گود+سازه) از ۱۰ مطالعه موردی اشاره شده در بند ۱ و کالیبره کردن آن: در این مرحله با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.11-1 مدل عددی شامل دیواره گود و سازه مجاور آن از هریک از ۱۰ مورد تحت مطالعه (خروجی مرحله ۱) ایجاد و بر اساس داده‌های میدانی کالیبره شد.

۲-۳. ایده‌آل سازی ۱۰ مدل عددی اشاره شده در بند ۲-۲ و انجام مطالعات پارامتریک: در ادامه بمنظور مقایسه پذیرتر کردن نتایج، در هریک از ۱۰ مدل عددی کالیبره شده، همسان‌سازی و تغییراتی صورت پذیرفت از جمله: حذف آب زیرزمینی، مشابه‌سازی روش تسلیح دیوار گود، اصلاح عمق گود. پس از اصلاح و ایده‌آل سازی، به مطالعات پارامتریک پرداخته شد.

۳. ارائه سطوح خرابی: با توجه به نتایج تحلیل‌های عددی در مرحله قبل، در این مرحله، میزان جابه‌جایی حداکثر در دیوار گود و مقدار DPI هر قاب از سازه مجاور گود از مدل عددی استخراج و محاسبه شد و با توجه به مجموع نتایج بدست آمده و بهره‌گیری از تحلیل‌های احتمالاتی، سطوح خرابی پیشنهادی بر مبنای جابه‌جایی دیوار گود ارائه شد.

۳- مطالعات موردی

به منظور ارائه سطوح خرابی، در مرحله اول، در طول ۲ سال، ۴ پروژه گودبرداری در شهر تهران مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعه صورت گرفته شامل طراحی دیوارهای گود به روش میخکوبی، رفتارنگاری دیوارهای گود و پایش ترک‌خوردگی در سازه‌های اطراف گود با پیشرفت گودبرداری بوده است. در مرحله بعد به منظور افزایش موارد تحت مطالعه، داده‌های مربوط به نقشه‌های اجرایی، مشخصات ژئوتکنیک محدوده گودبرداری، مانیتورینگ گود و ... از ۲۷ پروژه گودبرداری عمیق در محدوده عمق ۱۶/۷ متر تا ۳۱ متر در شهر تهران جمع‌آوری شد.

با وجود جمع‌آوری داده‌ها از گودهای بزرگ و حساس و تحت نظارت گروه‌های فنی متخصص، داده‌های جمع‌آوری شده از ۱۴ پروژه دارای دقت کافی نبوده و یا جبهه‌های کاری در پروژه به واسطه برخورد با چاه، گالری‌های موجود در مجاورت گود،

نسبت به ارزیابی نشست می‌باشد. زیرا نشست در زیر سازه موجود ایجاد می‌شود، ولی شکم‌دادگی در سطح دیواره گود رخ می‌دهد که با استفاده از مشاهدات نقشه‌برداری و انحراف‌سنج‌ها به سادگی قابل ارزیابی است. تاثیر جابه‌جایی تاج و شکم‌دادگی دیوار گود بر نوع خرابی قاب در شکل (۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تغییر شکل نهایی دیوار گود عموماً ترکیبی از دو مود پیش گفته است.

شکل ۳: تاثیر جابه‌جایی تاج و شکم‌دادگی دیوار بر نوع خرابی سازه

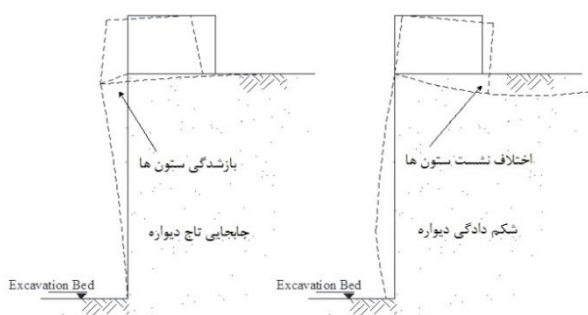


Fig. 3. Effect of wall deformation on damage type of adjacent structure

به منظور بررسی اثر پارامترهای خاک بر مود تغییر شکل دیواره، مدل عددی از دیوار میخکوبی شده به وسیله نرم‌افزار ABAQUS 6.11-1 در شرایط عدم حضور سازه بسط داده شد. مشخصات سیستم تسلیح و عمق گود در مدل عددی در این مرحله مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شد. در مدل ایجاد شده، طول میخ‌ها در عمق گود ثابت و برابر ۰/۷ ارتفاع دیواره گود در نظر گرفته شد. لازم به گفتن است که به واسطه تعدد پارامترهای تاثیرگذار در تدوین حدود مجاز جابه‌جایی دیوار گود، در این مقاله کلیه نتایج ارائه شده با فرض آرایش میخکوبی یکنواخت در عمق گودبرداری است.

شکل ۴: مشخصات سیستم تسلیح در مدل عددی

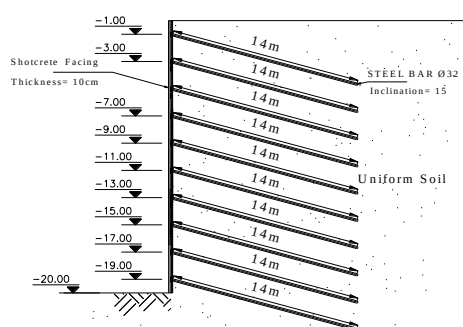


Fig. 4. Given dimensions of reinforcement system in FE model

(به صورت شکم‌دادگی یا جابه‌جایی تاج) پس از اتمام عملیات گودبرداری است. در بخش دوم مدل عددی از دیوار گود به همراه سازه مجاور آن ایجاد شد و کالبره شد. در بخش سوم مدل‌های عددی کالبره شده تا اندازه‌ای ایده‌آل‌سازی شده و مطالعات پارامتریک صورت پذیرفت.

۴-۱- تاثیر پارامترهای خاک بر درجه خرابی سازه

پیش از استفاده از داده‌های استخراج شده از بخش ۳ (مطالعات موردی) به منظور انجام تحلیل‌های عددی، ابتدا به بررسی اثر پارامترهای خاک بر درجه خرابی سازه مجاور گود پرداخته می‌شود. به شکل کلی، پارامترهای خاک در دو حالت می‌تواند بر سطح خرابی سازه مجاور دیوار گود تاثیرگذار باشد:

۱. پارامترهای خاک بر بیشینه مقدار جابه‌جایی دیوار گود تاثیرگذار است. به عبارت دیگر تحت شرایط مشابه از نظر مشخصات فیزیکی دیوار گود و مشخصات تسلیح دیواره، پارامترهای مقاومتی و عملکردی (مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک و مدول الاستیسیته) ضعیف‌تر خاک سبب جابه‌جایی بیشتر دیواره و به صورت متناظر خرابی بیشتر سازه مجاور گود می‌شود و پارامترهای قوی‌تر خاک سبب کاهش جابه‌جایی دیوار گود و به صورت متناظر خرابی کمتر سازه مجاور گود می‌شود.

۲. مود تغییر شکل دیواره بر نوع و سطح خرابی سازه مجاور گود تاثیرگذار است. جابه‌جایی افقی تاج دیواره گود و شکم‌دادگی دیواره گود، دو مود تغییر شکل شناخته شده برای سیستم میخکوبی است [۱]. منظور از جابه‌جایی افقی تاج دیواره گود، جابه‌جایی در بالاترین تراز دیواره گود و منظور از شکم‌دادگی دیواره گود، جابه‌جایی افقی دیواره گود در محدوده تراز یک چهارم تا یک سوم عمق گود نسبت به کف گود است. مود تغییر شکل به صورت جابه‌جایی تاج سبب فاصله گرفتن ستون‌های سازه مجاور گود (۱ در شکل ۲) می‌شود. شکم‌دادگی دیواره گود متناظر با نشست خاک پشت دیواره گود است، و سبب ایجاد دوران در قاب سازه مجاور گود (۲ در شکل ۲) می‌شود. از این‌رو ارزیابی این دو مود به شناخت بیشتر رفتار سازه مجاور گود کمک می‌نماید. علت انتخاب شاخص شکم‌دادگی گود به جای نشست، امکان ارزیابی راحت‌تر شکم‌دادگی در پروژه‌های گودبرداری

بیشتر از شکم‌دادگی است. بر اساس نتایج، مقادیر جابه‌جایی مطلق دیواره به ازای پارامترهای خاک مورد مطالعه تفاوت محسوس داشته است، با این وجود مطابق شکل، مقادیر نسبت جابه‌جایی در محدوده خاک‌های مورد مطالعه از مقدار $1/0.5$ تا $1/6.5$ تغییر کرده است. به منظور استفاده از نتایج این بخش در مطالعات صورت گرفته در بخش آتی، با توجه به روند تغییرات مشاهداتی شده، مشخصات ژئوتکنیکی خاک مطابق شکل ۶ به سه ناحیه A، B و C که به ترتیب متناظر با خاک‌های اصطکاکی، خاک‌های چسبنده-اصطکاکی و خاک‌های چسبنده می‌باشد تفکیک شد. سایر نواحی (غیر هاشور)، بواسطه عدم حضور داده، در تقسیم‌بندی لحاظ نشد.

شکل ۵: نسبت تغییر شکل بازای مقادیر مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک

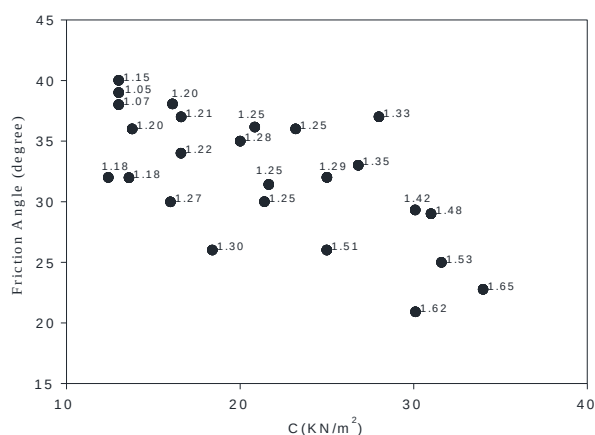


Fig. 5. Variation of displacement ratio for different values of soil cohesion and friction angle

شکل ۶: تقسیم‌بندی پارامترهای خاک به منظور ادامه پژوهش

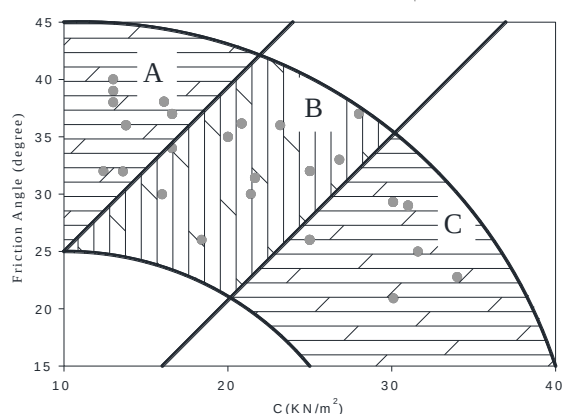


Fig. 6. Soil parameters discretization to follow the research

۴-۲- بسط مدل عددی دیوار گود به همراه سازه مجاور

همان‌گونه که در بخش مطالعات موردی اشاره شد، از میان بیش از

بررسی اثر پارامترهای خاک بر مود تغییر شکل در قالب یک مطالعه پارامتریک صورت پذیرفت. به عبارت دیگر پارامترهای خاک در مدل عددی تغییر یافته و در هر حالت مود تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفت. به منظور انجام مطالعه پارامتریک دو راهکار پیشنهاد شد.

۱. انتخاب پارامترها از یک نمونه خاک و تغییر یک پارامتر خاک با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و ارزیابی مود تغییر شکل در مدل عددی. در این حالت که در انجام پژوهش‌های مشابه، بسیار متعارف است، کل پارامترهای خاک (مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، تراکم و ...) ثابت در نظر گرفته می‌شود و تنها پارامتر چسبندگی یا زاویه اصطکاک (که معرف چسبندگی یا دانه‌ای بودن خاک می‌باشد) تغییر می‌کند.

۲. انتخاب نمونه‌های مختلف خاک بر اساس نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیک انجام شده در سطح تهران و کالیبره کردن مدل رفتاری خاک، برای هر نمونه (بر اساس نتایج آزمایش‌های سه‌محوری) و تعیین مود تغییر شکل در مدل عددی.

به منظور افزایش دقت مطالعات صورت گرفته و تطابق منطقی با شرایط خاک، روش دوم انتخاب شد. در این روش با دسترسی به بیش از ۳۵ مورد گزارش آزمایش‌ها مطالعات ژئوتکنیک در سطح تهران، نتایج آزمایش‌ها روی ۲۵ نمونه خاک مناسب، برای این پژوهش به کار گرفته شد. لازم به گفتن است که در مدل‌های عددی ایجاد شده، خاک به صورت همگن و در یک لایه مورد مطالعه قرار گرفته است.

به منظور مطالعه مود تغییر شکل، نسبت جابه‌جایی تاج به جابه‌جایی شکم گود مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۵) مقدار این نسبت به ازای مقادیر مختلف پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک به صورت برجسته نقاط ارائه شده است.

مطابق نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی در این بخش، ملاحظه می‌شود که در محدوده پارامترهای مقاومتی و تراکمی خاک‌های مورد مطالعه، مود تغییر شکل دیوار گود، با افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک خاک از حالت شکم‌دادگی دیواره به حالت جابه‌جایی تاج دیواره میل می‌کند. به عبارت دیگر، در محدوده پارامترهای مقاومتی مورد مطالعه، در خاک‌های چسبنده نسبت به خاک‌های دانه‌ای، تمایل دیواره به جابه‌جایی تاج

نمودارهای ارائه شده به وسیله Padde و همکاران [۲۱]، با در نظر گرفتن ضخامت ملات برابر ۱۵ میلی‌متر و نسبت مدول الاستیسیته آجر به ملات برابر ۴/۴، نسبت مدول الاستیسیته دیوار در جهت قائم به مدول الاستیسیته آجر برابر ۰/۶۷ و این نسبت در جهت افق برابر ۰/۶۲ است.

در پژوهش حاضر به منظور تخمین پارامترهای مقاومتی واحد بنایی سه سطح کیفیت خوب^۱، کیفیت متوسط وسیله^۲ و کیفیت بد^۳ مورد استفاده قرار گرفت [۲۲]. مطابق با سطوح کیفیت پیش-گفته که بر اساس مشاهداتی عینی و قضاوت مهندسی تعیین می‌شود سطح کیفیت خوب متناظر با مقاومت برابر 60 Kg/cm^2 و سطوح کیفیت متوسط وسیله و ضعیف به ترتیب متناظر با مقاومت برابر 40 Kg/cm^2 و 20 Kg/cm^2 است. مقدار مدول الاستیسیته ۵۵۰ برابر مقاومت فشاری واحد بنایی در نظر گرفته شد [۲۲]. مراحل مدلسازی در جدول (۴) ارائه شده است. نمونه‌ای از مدل ساخته شده در این بخش و نمونه‌ای از خروجی مدل در قالب شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

جدول (۴) مراحل ساخت مدل در تحلیل عددی

شماره مرحله	توضیحات
۱	ساخت هندسه مدل
۲	اعمال تنش‌های اولیه و بارگذاری سازه مجاور گود
۳	صفر کردن جابه‌جایی‌ها در محدوده گودبرداری
۴	خاکبرداری لایه اول (۲ متر) در محدوده گودبرداری
۵	فعال‌سازی المان میخ و شاتکریت در ردیف اول میخکوبی
۶	فعال‌سازی سطوح تماس
۷	تکرار مراحل ۴ تا ۶ تا رسیدن به تراز کف گود

Table 4. Staged construction used to develop model

شکل ۷: شمای کلی از مدل عددی، خروجی INP Code

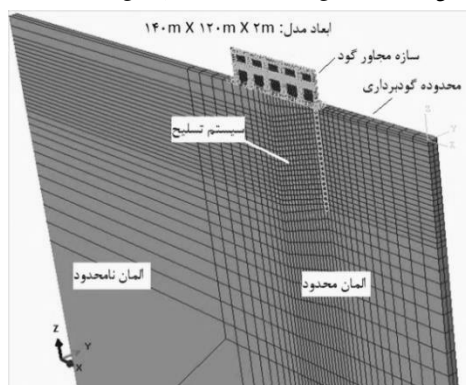


Fig. 7. Typical view of FE model

۱۴۰ سازه در مجاورت ۳۱ پروژه گودبرداری، تنها ۱۰ سازه در مجاورت ۶ پروژه گودبرداری، به منظور ادامه پژوهش دارای دقت لازم و شرایط مناسب تشخیص داده شد.

در مطالعات موردی، دستیابی به رابطه‌ای منطقی بین میزان جابه‌جایی دیوار گود و خرابی سازه‌ی مجاور آن مورد بررسی قرار گرفت و هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه به دقت تحلیل شد. با این وجود به واسطه تنوع در آرایش میخکوبی در طرح تسلیح دیوار گود در هر یک از موارد تحت مطالعه، شرایط ژئوتکنیکی متفاوت و برخی از تفاوت‌های دیگر، اکتفا به نتایج مطالعات موردی به تنهایی نتوانست خروجی مناسب به منظور تحلیل‌های بیشتر ارائه دهد. از این رو از تحلیل‌های عددی بهره گرفته شد. در این راستا، ابتدا مدل عددی شامل دیوار گود به همراه سازه مجاور آن از هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه ایجاد شد و بر اساس داده‌های ابزارسنجی در هر پروژه، صحت‌سنجی شد. در ادامه به منظور افزایش امکان مقایسه نتایج، برخی از اصلاحات روی هر یک از ۱۰ مدل عددی انجام شد و مطالعات پارامتریک صورت پذیرفت.

مدل عددی در این بخش با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.11-1 ایجاد شد. در این مدل به منظور در نظر گرفتن آثار سه‌بعدی توزیع تنش در اطراف میخ‌ها، باریکه‌ای به عرض ۲ متر از محدوده گود به همراه قاب سازه مجاور گود مدل‌سازی شد. به منظور افزایش دقت در فرآیند مدل‌سازی، از تکنیک حل ضمنی، المان‌های نامحدود در مرزهای مدل، ساخت مرحله‌ای و روش کاهش سختی بهره گرفته شد و اندرکنش در تمامی سطوح تماس لحاظ شد. به منظور در نظر گرفتن اتصال میخ به خاک از شرایط embedded region در نرم‌افزار استفاده شد و به منظور افزایش دقت مدل‌سازی، مش‌بندی کاملاً منطبق بر راستای میخ‌ها انجام شد و المان میخ کاملاً هماهنگ بر مرز المان‌های خاک قرار داده شد. در این مدل‌سازی، پارامترهای مدل موهرکلمب (بعنوان یک مدل الاستوپلاستیک) برای شبیه‌سازی دیواره آجری در نظر گرفته شد. به منظور تخمین پارامترهای دیوار آجری، عموماً از تعریف "واحد بنایی" استفاده می‌شود. مشخصات واحد بنایی در منابع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه بر اساس

1. Good
2. Fair
3. Poor

نظر گرفته شده است. محور قائم مقادیر قطعی به دست آمده برای DPI از نرم‌افزار می‌باشد. قرارگیری مقادیر مشاهداتی و محاسبه شده بر روی خط قطری نمودار بیانگر نزدیکی نتایج محاسباتی به نتایج مشاهداتی است.

شکل ۹: مقایسه مقادیر جابه‌جایی دیوار گود در مدل عددی و ابزارگذاری

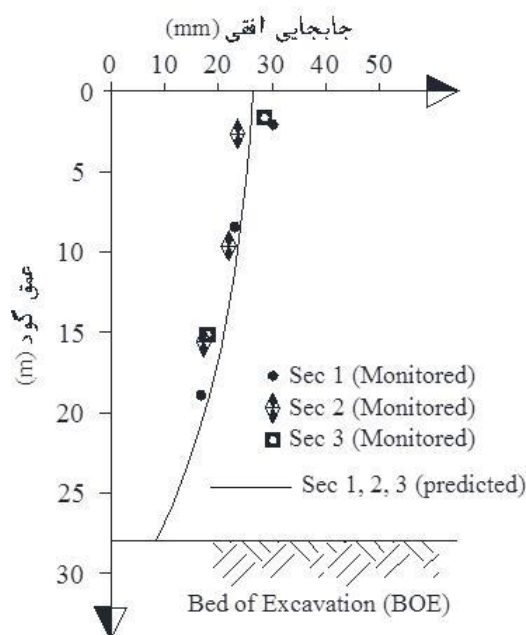


Fig. 9. Comparison between excavation wall deformation in FE model and field results

شکل ۱۰: مقایسه سطح خرابی در مدل عددی و روش مشاهداتی

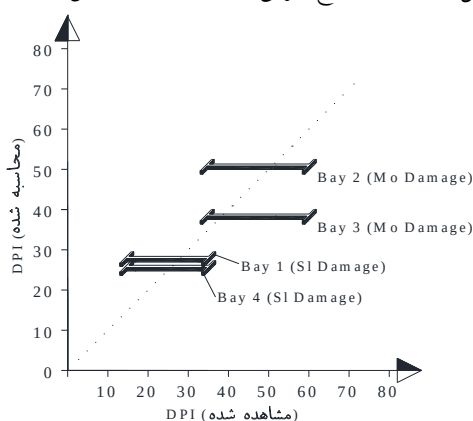


Fig. 10. Comparison between damage level based on observational and computational method

۳-۴- ایده‌آل سازی مدل عددی و انجام مطالعات پارامتریک

همان‌گونه که اشاره شد، هر یک از ۱۰ مورد تحت مطالعه دارای آرایش خاص میخکوبی، تراز آب متفاوت و ... بوده است. از این رو به منظور امکان مقایسه و استنتاج بهتر از موارد تحت مطالعه، به اصلاح و ایده‌آل سازی مدل صحت‌سنجی شده از هر یک از ۱۰

شکل ۸: نمونه‌ای از خروجی مدل عددی (جابه‌جایی دیوار گود بر حسب متر)

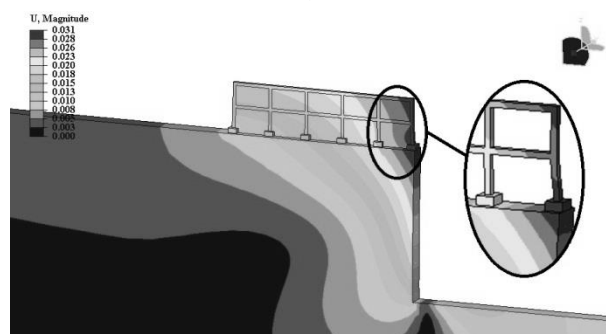


Fig. 8. Typical view of FE results

مدل عددی متناظر با هریک از ۱۰ مورد تحت مطالعه ایجاد شد و بر اساس نتایج ابزارگذاری کالیبره شد. صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل‌های عددی در دو حالت انجام پذیرفت.

۱. میزان جابه‌جایی دیواره گود بر اساس نتایج تحلیل عددی با نتایج حاصل از مانیتورینگ دیواره گود در شرایط واقعی مورد مقایسه و هم‌سنجی قرار گرفت. نمونه‌ای از نتایج مانیتورینگ دیوار گود در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل نقاط بیانگر نتایج ابزارگذاری و خط توپر نشان‌دهنده خروجی نرم‌افزار است.

۲. درجه خرابی سازه بر اساس نتایج تحلیل عددی با نتایج حاصل از روش مشاهداتی مورد مقایسه و هم‌سنجی قرار گرفت. لازم به گفتن است که به منظور تعیین درجه خرابی بر اساس نتایج تحلیل عددی، مقادیر جابه‌جایی در چهار گوشه هر قاب از مدل دریافت شد و در ادامه مقادیر ϵ_1 و β مطابق با روابط ارائه شده در شکل (۲) محاسبه شد. پس از ارزیابی مقدار دو پارامتر فوق، از رابطه (۱) و جدول (۲)، سطح خرابی در هر قاب از سازه در مدل عددی تعیین شد. بر اساس روش مشاهداتی نیز، ارزیابی درجه خرابی بر اساس موارد مندرج در جدول (۱) صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که معیار تحلیلی ارائه شده در جدول (۲) و رابطه (۱) بر اساس معیار مشاهداتی جدول (۱) بوده است و هم‌بستگی بین معیار تحلیلی و مشاهداتی وجود دارد [۱۸-۲۰]. نمونه‌ای از نتایج صحت‌سنجی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

در شکل (۱۰) محور افقی بیانگر مقدار DPI از روش مشاهداتی است. در روش مشاهداتی با توجه به سطح خرابی، دامنه‌ای از مقادیر DPI به دست می‌آید. با توجه به دامنه مقادیر DPI در روش مشاهداتی، ملاحظه می‌شود که برای هر دهانه، یک خط افقی در

محور افقی و پارامتر ۳ (سطح خرابی هر قاب) به صورت برچسب روی هر نقطه از نمودار به کار گرفته شد. پارامتر فاصله (محور قائم) به دو صورت مطلق و ضریبی از عمق ارائه شده است. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب مربوط به نتایج تحلیل‌های پارامتریک در سه عمق گودبرداری ۲۰، ۱۵ و ۱۰ متر و برای پارامترهای خاک محدوده A است. جزئیات نتایج مربوط به تحلیل‌های پارامتریک در محدوده B و C در این مقاله ارائه نشده است و تنها به نتایج نهایی در رابطه با دو محدوده پیش گفته اکتفا شده است.

لازم به گفتن است که در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب ۴ و ۳ قاب در محدوده تاثیر گود قرار داشته است. خط‌چین ترسیم شده در فاصله ۰/۷H بیانگر موقعیت تقریبی انتهای میخ‌ها در سیستم میخکوبی است.

شکل ۱۱: درجات خرابی سازه مجاور گود بازی مقادیر مختلف جابه‌جایی تاج عمق گود: ۲۰ متر، نوع خاک: A

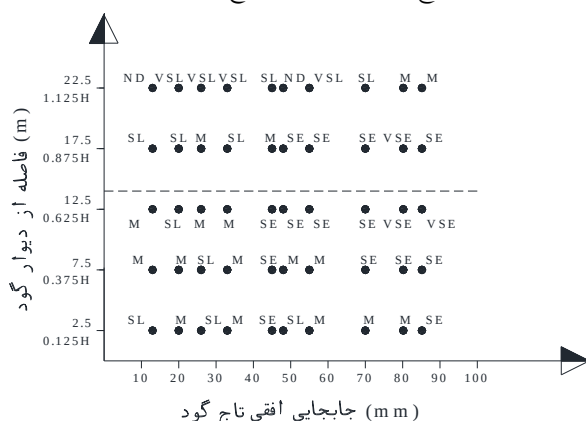


Fig. 11. Damage level based on horizontal displacement of excavation wall Excavation depth: 20m, Soil type: A

شکل ۱۲: درجات خرابی سازه مجاور گود بازی مقادیر مختلف جابه‌جایی تاج عمق گود: ۱۵ متر، نوع خاک: A

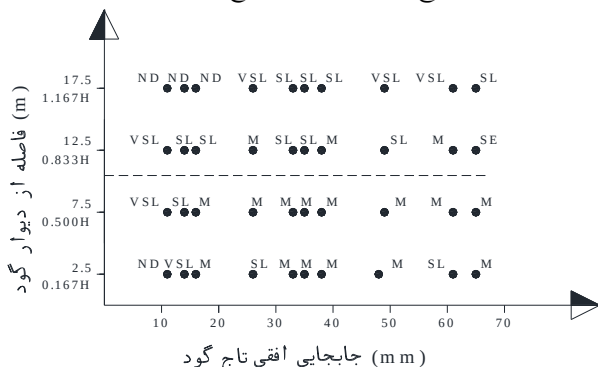


Fig. 12. Damage level based on horizontal displacement of excavation wall Excavation depth: 15m, Soil type: A

مورد تحت مطالعه (خروجی بخش ۴-۲) پرداخته شد. اصلاح و ایده‌آل سازی مدل‌ها در قالب موارد زیر صورت پذیرفت:

۱. آب زیرزمینی حذف شد.
 ۲. طول میخ‌ها برابر ۰/۷ ارتفاع دیواره گود لحاظ شد.
 ۳. عرض قاب‌ها در محدوده ۴ تا ۶ متر قرار داشت که در حالت ایده‌آل شده، عرض کلیه قاب‌ها برابر ۵ متر در نظر گرفته شد.
- لازم به ذکر است که سختی قاب‌ها و دیوارها، فرآیند باربرداری از کف گود، نوع پی، خاک محدوده گودبرداری، ضرایب فشار خاک بر دیواره، سطوح تماس، مشخصات فنی سیستم تسلیج، بارگذاری، اندازه مدل، ابعاد مش‌بندی، نوع المان‌ها، شرایط مرزی، درجات آزادی از جمله مواردی است، که در طول اصلاح و ایده‌آل سازی، تغییر نکرده و در حالت کالیبره شده باقی ماند.

۵- ارائه سطوح خرابی

پس از ساخت ۱۰ مدل عددی کالیبره شده در بخش ۴-۲ مطابق با شرایط ۱۰ مورد تجربی تحت مطالعه در بخش ۳ و ایده‌آل سازی هریک از مدل‌ها (بخش ۴-۳)، در این مرحله سعی می‌شود با استفاده از خروجی مدل‌های عددی و همچنین انجام مطالعات پارامتریک به استخراج رابطه‌ای بین میزان جابه‌جایی دیوار گود و خرابی سازه اطراف پرداخته شود. مطالعات پارامتریک بر روی هریک از ۱۰ مدل کالیبره شده، در ۳ عمق گودبرداری برابر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر و در سه موقعیت ژئوتکنیکی A، B و C (شکل ۶) انجام شد. به عبارت دیگر هر مدل کالیبره شده تحت سه عمق و سه خاک مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع در این مرحله ۹۰ مدل عددی مورد ارزیابی قرار گرفت.

پس از تحلیل مدل‌های عددی، مقادیر سه پارامتر از هر مدل استخراج شد: ۱. "فاصله مرکز هر قاب" از دیوار گود، ۲. مقدار "جابه‌جایی تاج" دیوار گود، ۳. "سطح خرابی هر قاب". به منظور تعیین سطح خرابی هر قاب، ابتدا مقدار DPI در هر قاب سازه مجاور دیوار گود (مطابق روند عنوان شده در بخش ۴-۲) محاسبه شد و سپس سطح خرابی از جدول ۲ استخراج شد.

نتایج تحلیل‌ها در نمودارهای شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. در این نمودارها، پارامتر ۱ (فاصله مرکز هر قاب از دیوار گود) در محور قائم، پارامتر ۲ (جابه‌جایی بیشینه تاج دیوار)

مجاور گود در هر یک از محدوده‌های I، II، III و IV در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵) احتمال خرابی در محدوده‌های شکل (۱۴)

سطح خرابی	محدوده I	محدوده II	محدوده III	محدوده IV
ND	٪۱۷	٪۳	۰	۰
VSL	٪۲۵	٪۶	۰	۰
SL	٪۳۷	٪۳۲	٪۵	۰
M	٪۲۱	٪۵۰	٪۶۰	٪۱۱
SE	۰	٪۹	٪۳۵	٪۵۶
VSE	۰	۰	۰	٪۳۳

Table 5. Damage probability in Fig. 14

احتمال اشاره شده در جدول، طبق تعریف برابر نسبت داده‌های هدف به تعداد داده‌های جامعه آماری است. به عنوان نمونه، داده‌های محدوده I برابر ۵۷ مورد است و تعداد قاب‌های با سطح آسیب M در این محدوده برابر ۱۲ داده است. از این‌رو احتمال آسیب در حد M به سازه‌های مجاور دیوار گود در محدوده I برابر ۲۱٪ محاسبه شد.

مطابق جدول ملاحظه می‌شود که چنانچه با توجه به مقادیر جابه‌جایی دیواره گود و فاصله سازه مجاور آن از دیوار گود، شرایط قاب سازه، در محدوده I در شکل (۱۴) قرار گیرد، احتمال آسیب به قاب سازه در حد ND برابر ۱۷ درصد، در حد VSL برابر ۲۵ درصد و احتمال آسیب به قاب سازه در حد SL و VSL به ترتیب برابر ۳۷ و ۲۱ درصد است. لازم به ذکر است که توصیف سطح خرابی اشاره شده در جدول (۵)، در جدول (۱) ارائه شده است.

با در نظر گرفتن حد SL به عنوان حد ترک‌های غیرسازه‌ای و قابل تحمل برای سازه [۱۷] و یا به عبارت دیگر حد سرویس سازه، می‌توان شکل (۱۵) را به منظور بررسی بیشتر احتمال خرابی سازه‌های مجاور گود ارائه نمود. در این شکل احتمال خرابی تا حد SL در هریک از محدوده‌های I تا IV بر اساس جدول (۵) محاسبه

شکل ۱۳: درجات خرابی سازه مجاور گود بازای مقادیر مختلف جابه‌جایی

تاج عمق گود: ۱۰ متر، نوع خاک: A

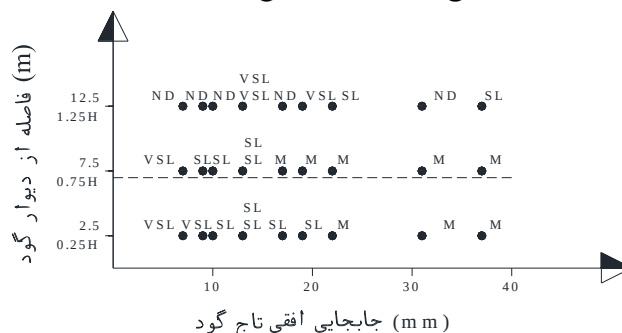


Fig. 13. Damage level based on horizontal displacement of excavation wall Excavation depth: 10m, Soil type: A

مطابق شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ ملاحظه می‌شود که سطح خرابی قاب‌ها با افزایش جابه‌جایی دیوار گود به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. با دقت بیشتر در نتایج، مشاهداتی می‌شود که با افزایش فاصله قاب از دیوار گود (افزایش در مقادیر محور قائم نمودارها) تا فاصله‌ای تقریباً برابر ۰/۷ ارتفاع دیوار گود (موقعیت تقریبی انتهای میخ‌ها در سیستم میخکوبی)، سطح خرابی قاب‌ها افزایش یافته و با بیشتر شدن فاصله، سطح خرابی تاندازه‌ای کاهش می‌یابد.

تحلیل و بررسی بیشتر بر روی نمودارهای فوق دشوار بوده و استحصال یک روند منطقی تا اندازه‌ای غیرممکن می‌باشد. از این‌رو تغییراتی در روش ارائه نتایج صورت پذیرفت: ۱. محور قائم هر نمودار نسبت به عمق گود نرمال‌سازی شد. ۲. کلیه داده‌ها روی یک نمودار نمایش داده شد. ۳. با توجه به توزیع داده‌ها، سطح نمودار به ۴ ناحیه تقسیم شد. شکل (۱۴) ارائه دهنده نتایج تحلیل‌ها با اعمال تغییرات ذکر شده است. مطابق شکل (۱۴)، صفحه به ۴ ناحیه I، II، III و IV تقسیم شد و فاصله تقریبی انتهای طول میخ‌ها از لبه گود به صورت خط‌چین نشان داده شد. انتخاب نواحی از معادله خاصی پیروی نکرده و تنها بر اساس توزیع داده‌ها و به منظور نتیجه‌گیری بهتر از داده‌ها ارائه شده است. با استناد به نتایج ملاحظه شد که در فاصله‌ای تقریباً برابر با طول میخ‌ها، میزان درجه خرابی حداکثر است این فاصله را می‌توان "فاصله بحرانی" نامید. از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که در محدوده بین دیوار گود تا فاصله بحرانی، میزان درجه خرابی بیش از محدوده فاصله بحرانی تا محدوده تاثیر گود است.

به منظور توصیف بیشتر شکل (۱۴)، احتمال آسیب به قاب‌های

شده است.

این شکل، محور افقی بیانگر بیشینه جابه‌جایی تاج گود پس از اتمام گودبرداری و محور قائم معرف نسبت "فاصله مرکز هریک از قاب‌های سازه از دیوار گود" به "عمق گود" می‌باشد. نمودار احتمال آسیب، برای خاک‌های نوع B و C با روند مشابه شد و به ترتیب در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.

شکل ۱۶: احتمال آسیب سازه‌ای به قاب‌های ساختمان مجاور گود در فواصل مختلف از دیوار گود و بازای مقادیر مختلف جابه‌جایی تاج گود، نوع خاک: B

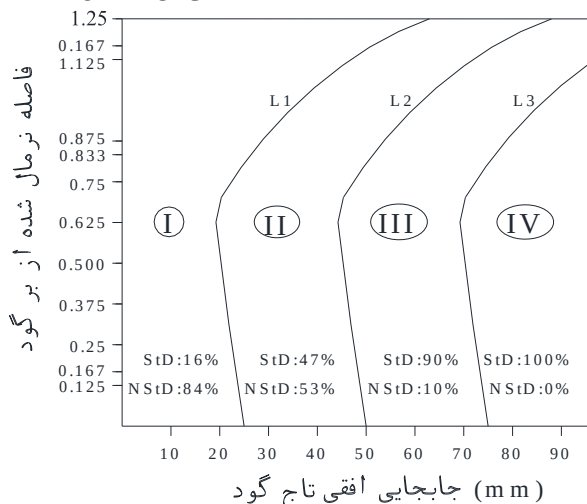


Fig. 16. Damage probability of adjacent structure based on normalized distance and displacement, Soil type: B

شکل ۱۷: احتمال آسیب سازه‌ای به قاب‌های ساختمان مجاور گود در فواصل مختلف از دیوار گود و بازای مقادیر مختلف جابه‌جایی تاج گود، نوع خاک: C

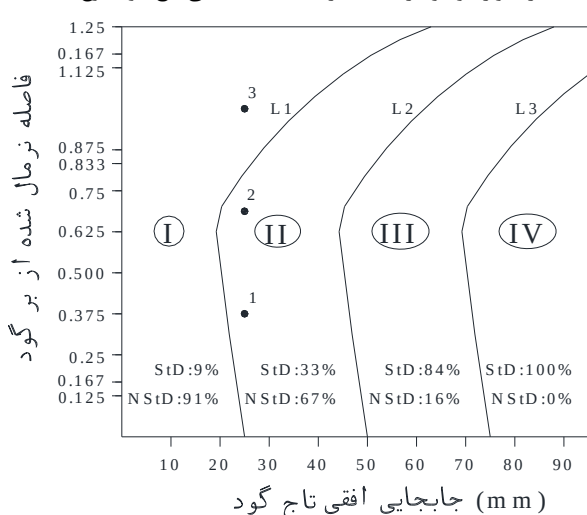


Fig. 17. Damage probability of adjacent structure based on normalized distance and displacement, Soil type: C

مرزهای L1، L2 و L3 را می‌توان حدود مجاز جابه‌جایی دیوار گود با توجه به احتمال خرابی مورد نظر در سازه مجاور گود دانست.

شکل ۱۴: سطوح خرابی سیستم میخکوبی، نوع خاک: A

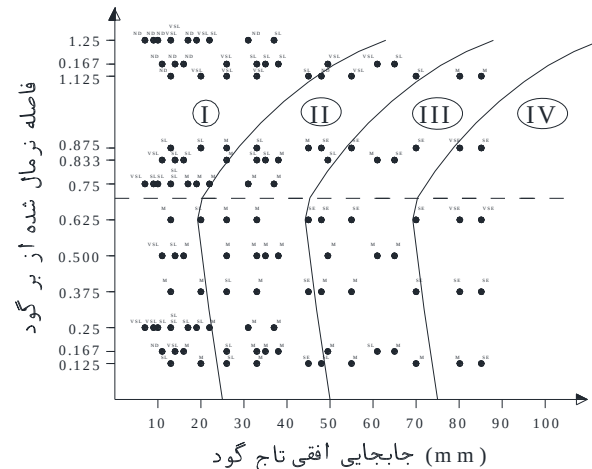


Fig. 14. Damage levels, Soil type: A

شکل ۱۵: احتمال آسیب سازه‌ای به قاب‌های ساختمان مجاور گود در فواصل مختلف از دیوار گود و بازای مقادیر مختلف جابه‌جایی تاج گود، نوع خاک: A

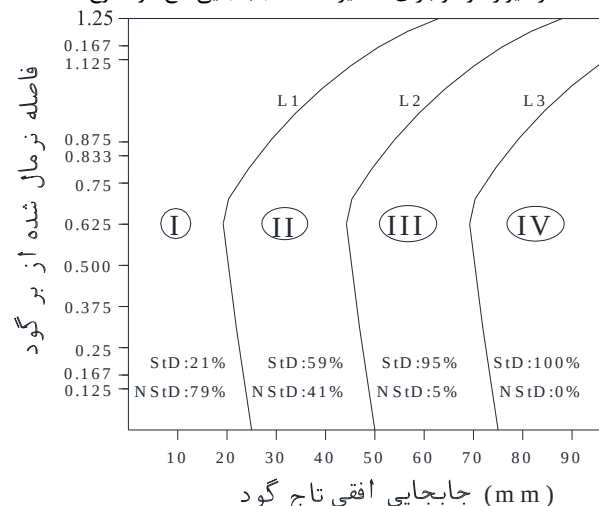


Fig. 15. Damage probability of adjacent structure based on normalized distance and displacement, Soil type: A

به عنوان نمونه احتمال خرابی تا حد SL (خرابی غیر سازه‌ای) در محدوده I، مطابق جدول برابر مجموع احتمال خرابی در محدوده-های ND و VSL و SL و برابر ۷۹ درصد (۱۷+۲۵+۳۷) است و احتمال خرابی فراتر از حد SL (خرابی سازه‌ای) برابر مجموع احتمال خرابی در محدوده M و SE و VSE برابر ۲۱ درصد (۲۱+۰+۰) است. در شکل (۱۵) احتمال آسیب سازه‌ای به قاب ساختمان مجاور دیوار گود و احتمال عدم آسیب سازه‌ای با روند مشابه در هر یک از محدوده‌های I تا IV محاسبه و به ترتیب با پارامترهای StD و NSD برای خاک نوع A معرفی شده است. در

همچنین ملاحظه شد که در محدوده بین دیوار گود تا فاصله بحرانی، میزان درجه خرابی بیش از محدوده فاصله بحرانی تا محدوده تاثیر گود است.

References

۷- منابع

- [1] Lazarte, C. A., Victor Elias, P. E., Espinoza, R. D., Sabatini, P. J., "Soil Nail Walls" Report FHWA0-IF-03-017, Washington, D.C. 20590, (2003),
- [2] "Guide to soil nail design and construction", Civil engineering and development department, the government of the Hong Kong, Geo guide 7, March 2008.
- [3] Ghahreman, B., "Analysis of ground and building response around deep excavation in sand", Ph. D. Thesis, Department of civil eng., uni of Illinois, (2004).
- [4] Boscardin, M. D., "Building response to excavation induced movements", Ph. D. Thesis, Department of civil engineering, university of Illinois, (1980).
- [5] 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).
- [6] Laefer, D. F., "Prediction and assessment of ground movement and building damage induced by adjacent excavation, Ph. D. Thesis, Department of civil and environmental engineering, university of Illinois, (2001).
- [7] Sawwaf, M. E., 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, (2011).
- [8] Son, M., Cording, E. J., "Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements", J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 2, PP. 162-177, (2005).
- [9] Bryson, L. S., Kotheimer, M. J., "Cracking in Walls of a Building Adjacent to a Deep Excavation", J. performance of construction facilities, Vol. 25, No. 6, PP. 491-503, (2011).
- [10] Halim, D., Wong, K. S., "Prediction of Frame Structure Damage due to Deep Excavation", J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ARTICLE IN PRESS.
- [11] Yoo, C., Lee, D., "Deep excavation-induced ground surface movement characteristics - A numerical investigation" J. Computers and Geotechnics, 35, PP. 231-252, (2007).
- [12] Son, M., Cording, E. J., "Evaluation of Building Stiffness for Building Response Analysis to Excavation-Induced Ground Movements", J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 8, PP. 995-1002, (2007).
- [13] Son, M., Cording, E. J., "Responses of Buildings with Different Structural Types to Excavation-Induced Ground Settlements", J. Geotech. and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 4, PP. 323-333, (2011).
- [14] Bryson, L. S., Zapata-Medina, D. J., "Method for

به عنوان نمونه نمونه چنانچه پروژه گودبرداری به عمق ۱۶ متر در خاکی با پارامترهای ژئوتکنیکی C (شکل ۶) واقع گردد و جابه‌جایی تاج دیوار گود بر اساس نتایج طراحی، برابر ۲۵ میلیمتر (۱ اینچ) محاسبه شود و فاصله مرکز قاب‌های ساختمان مجاور گود از دیوار گود برابر ۶، ۱۱ و ۱۶ متر باشد. نقاط معرف قاب‌ها در موقعیت‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل ۱۷ واقع می‌شود و میزان خرابی سازه‌ای محتمل در قاب‌های به فواصل ۶ و ۱۱ متر برابر ۳۳ درصد و در قاب به فاصله ۱۶ متر برابر ۹ درصد است. با توجه به میزان خرابی قابل انتظار می‌توان طرح را اصلاح و یا هزینه بازسازی سازه مجاور دیوار گود (پیش از گودبرداری) در نظر گرفته شود. در یک تحلیل جامع‌تر می‌توان با تکیه بر آنالیز ریسک، ضریب اطمینان مناسب به منظور عدم آسیب به سازه مجاور دیوار گود را با استناد به احتمال خرابی حاصل شده، به طراحی اعمال نمود.

۶- نتیجه‌گیری

مطابق با تحلیل‌های ارائه شده، نتایج زیر قابل استنباط است:

۱. تعیین احتمال خرابی سازه‌های مجاور دیوار میخکوبی شده بر اساس جابه‌جایی افقی حداکثر دیوار گود و فاصله مرکز قاب سازه از دیوار گود (شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸) مهم‌ترین دستاورد این مقاله است. مرزهای ارائه شده در نمودارها (L1، L2 و L3) می‌تواند به عنوان حدود مجاز جابه‌جایی دیوار گود با توجه به احتمال خرابی قابل انتظار در پروژه و با توجه به اهمیت سازه مجاور گود به کار گرفته شود.
۲. مطابق نتایج، تحت مقادیر مختلف جابه‌جایی، میزان خرابی در خاک‌های محدوده C کمتر از نواحی A و B است. این موضوع را می‌توان به بیشتر بودن محدوده تاثیر جابه‌جایی دیوار گود در خاک‌های چسبنده نسبت داد. به عبارت دیگر در محدوده C، میزان جابه‌جایی تاج در سطح بیشتری از خاک پشت دیواره توزیع شده و از این‌رو تمرکز جابه‌جایی در زیر سازه و خرابی منتج از آن کمتر است.
۳. بر اساس نتایج، قاب‌های واقع در محدوده تقریبی انتهای میخ‌ها، خرابی بیشتری در طول گودبرداری تجربه می‌نمایند. از این‌رو فاصله‌ای برابر با طول میخ‌ها به عنوان فاصله بحرانی معرفی شد.

- Assessment", J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 10, PP. 1448-1458, (2008).
- [19] Schuster, M., Kung, G., Juang, C., "Simplified Model for Evaluating Damage Potential of Buildings Adjacent to a Braced Excavation", J. Geotech. and Geoen. Eng., Vol. 135, No. 12, PP. 1823-1835, (2009).
- [20] Juang, C., Schuster, M., Yu Ou, C., Phoon, K., "Fully Probabilistic Framework for Evaluating Excavation-Induced Damage Potential of Adjacent Buildings", J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 2, PP. 130-139, (2011).
- [21] Padde. G. N., Linang. J. X., Middleton. J., Equivalent elastic moduli for brick masonry, Journal of Computers and Geotechnics, vol. 8, pp243-265, (1983).
- [22] FEMA 356, Chapter 7, "Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings", (1998).
- Estimating System Stiffness for Excavation Support Walls", J. Geotech. and Geoen. Eng., ARTICLE IN PRESS.
- [15] Burland, J., Broms, B., 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, PP. 495-546, (1977).
- [16] Boscardin, M., Cording, E., "Building response to excavation induced settlement", J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 115, PP.1-21, (1989).
- [17] Son, M., "The response of buildings to excavation-induced ground movements", PhD thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill, (2003).
- [18] Hsiao, E., Schuster, M., Juang, C., Kung, G., "Reliability Analysis and Updating of Excavation-Induced Ground Settlement for Building Serviceability

Allowable limit of soil nail wall deflection based on damage level of adjacent structures

I. Naeimifar¹, S. S. Yasrobi^{2*}, A. Fakher³

1- PhD student of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., TarbiatModares University

2- AssociatedProf., Civil Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., TarbiatModares University

3- Associated Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., University of Tehran

yasrobis@modares.ac.ir

Abstract:

Damage probability of structures caused by excavation wall movement is an important design aspect of support system in urban areas. This will be more important, if the adjacent structure be old or have low strength parameters. Frame distortion and crack generation are signs of building damage to excavation-induced ground movements which is a challenge in projects involving deep excavations. These highlight the importance of evaluation of building response in excavation projects. The aim of estimation and evaluation of building response is to establish limiting criterion for excavation support system design to certify the structure safety against undesirable damage. Thus, limiting criterion prepares a framework to determine the damage level of building based on excavation induced ground movements. Mentioned limiting criterion also is named Damage criterion or Damage model. Damage models are too practical before design progress of nailing wall. Based on uncertainty in data from excavation project and variability of the many factors that contribute to the response of nearby structures, existing Damage models are rare and generally need special instrumentation of excavation wall and nearby structures, so they cannot prepare a simple framework to use in practical situation.

This paper describes a study of building response to excavation-related ground movements and provides procedure for damage assessment of building near excavation projects. This study uses field data based on 10 case studies and 90 calibrated 3D FEM models in addition to probabilistic analysis to establish new simple damage criterion for design consideration of excavation supported by soil nail wall technique. Presented Damage model simply relates the damage level of structure to maximum displacement of excavation wall. To create this paper following stages are used: 1. Case studies: 31 deep excavation (16.7-31 meters) from expert companies are studied in first stage. 2. First filtering of the collected data: part of collected data (14 projects of 27 projects) is eliminated from data base because of inaccuracy in the results of monitoring, unfavorable results in displacement caused by nearby galleries or underground facilities, inappropriate execution and etc. 3. Evaluation of the structures in the excavation-affected zone (EAZ). 4. Second filtering of database: part of first-filtered data is eliminated from data base because of non-deductible conditions of structure in EAZ, mismatch between damage level and results of monitoring and etc. At the end of this stage only ten masonry structures (TMS) were selected to continue case studies. 5. Creating and calibrating FE models: at this stage, FE models are included excavation wall and adjacent structure were extended for each of TMS and were calibrated based on field results. 6. Idealization of calibrated TMS's FE model (ICTM): each of calibrated TMS's FE models were modified and idealized by removing water table, modification of excavation condition, simplification of structure frames and etc. 7. Development of damage levels: in the last stage, DPI calculated from ICTM for each frame of structure and then compared with the value of excavation wall deflections. Finally, damage levels developed based on resulted database.

Key words: Excavation, Nailing, allowable limit of displacement, Damage level.