

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه قم

(طرح تحقیقات کاربردی)

گزارش طرح پژوهشی

با موضوع:

طراحی پایدارسازی گود بر اساس سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی

شهر قم

مجری پروژه

دکتر مهدی خداپرست

همکار پروژه

مهندس احسان قربانی

کارفرما: سازمان نظام مهندسی ساختمان استان قم

پاییز ۱۴۰۰

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴	فصل اول: مقدمه
۶	فصل دوم: حفاری عمیق و اثرات محیطی آن بر زمین و سازه‌های مجاور گود
۶	۱-۲- روش‌های گودبرداری در توده خاک و اثرات محیطی آن
۷	۲-۲- روش‌های برآورد توده خاک جابجا شده ناشی از گودبرداری
۱۳	۳-۲- ارتباط بین نشست زمین و خرابی به وجود آمده در سازه مجاور
۱۵	فصل سوم: پایش، روش‌های انجام و کاربردهای آن در عملیات گودبرداری
۱۵	۱-۳- مقدمه
۱۶	۲-۳- روش‌های انجام پایش
۱۶	۱-۲-۳- پایش چشمی
۱۷	۲-۲-۳- پایش با استفاده از ابزار دقیق
۱۹	۳-۲-۳- پایش به روش ژئودتیک
۲۰	۳-۳- کاربردهای پایش در عملیات گودبرداری
۲۱	۱-۳-۳- مطالعه موردی ۱
۲۱	۲-۳-۳- مطالعه موردی ۲
۲۲	۳-۳-۳- مطالعه موردی ۳
۲۳	۴-۳-۳- مطالعه موردی ۴
۲۳	۵-۳-۳- مطالعه موردی ۵
۲۵	فصل چهارم: استفاده از مطالعات عددی در عملیات گودبرداری و کاربردهای آن
۲۵	۱-۴- مقدمه
۲۶	۲-۴- مدل‌های رفتاری
۲۸	۳-۴- مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار
۲۸	۴-۴- کاربرد مدل‌های رفتاری مختلف در مدلسازی عددی
۳۲	فصل پنجم: طراحی سازه نگهبان بر اساس سطح عملکرد
۳۶	فصل ششم: شرایط ساختگاهی شهر قم
۳۶	۱-۶- زمین‌شناسی استان قم

۳۹	..... ۲-۶ مطالعات ساختگاهی شهر قم
۴۲	..... فصل هفتم: مدل‌سازی عددی
۴۲	..... ۱-۷- مقدمه
۴۳	..... ۲-۷- آنالیز حساسیت بر روی مدل عددی
۵۰	..... ۳-۷- کالیبراسیون مدل عددی
۵۲	..... فصل هشتم: طراحی پایدارسازی گودها بر اساس سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم
۵۲	..... ۱-۸- تاثیر پارامترهای سازه‌ای در ساختگاه‌های مورد مطالعه
۶۳	..... ۲-۸- طراحی گود بر اساس سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم
۷۶	..... فصل نهم: مثال موردی برای روش طراحی ارائه شده
۷۶	..... ۱-۹- خلاصه‌ای از روش سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم
۷۶	..... ۲-۹- مثال‌های موردی
۷۶	..... ۱-۲-۹- پروژه پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا اصلاح شده
۸۴	..... ۲-۲-۹- پروژه پایدارسازی شده با استفاده از سازه خرپایی
۸۸	..... مراجع

مقدمه

با توسعه ساخت و سازهای زیرزمینی و استفاده از فضای زیر سطح زمین، گودبرداری‌های عمیق در مناطق شهری و تأثیرات محیطی آنها در حال افزایش می‌باشد که به یکی از معضلات کلان‌شهرها تبدیل شده است. با انجام عملیات خاکبرداری تعادل اولیه خاک به هم خورده و از حالت سکون به حالت فعال در می‌آید و وضعیت تنشی آن دچار تغییراتی شده که منجر به تغییر شکل توده خاک می‌گردد. تغییر شکل خاک در اثر تغییر وضعیت تنش‌ها در توده خاک اطراف گود در قالب نشست زمین مجاور و تغییر شکل جانبی دیواره گود رخمون می‌کند. بنابراین یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های مهندسين در عملیات گودبرداری حفاظت از دیواره‌های گود به منظور به حداقل رساندن میزان تغییر شکل‌ها می‌باشد. بدین ترتیب به منظور کنترل تغییر شکل در توده خاک و تبعات به وجود آمده، با پیشروی عملیات خاکبرداری سازه‌های موقت و یا دائمی اجرا می‌شود که به آن سازه نگهبان می‌گویند.

معمولا طراحی سازه‌های نگهبان گودهای شهری در آیین‌نامه‌ها بر اساس نیرو بیان شده است اما روش‌های مبتنی بر نیرو اطلاعاتی را در زمینه تغییر مکان‌ها به طراح ارائه نخواهند داد. در دیواره گودهایی که بر اساس نیرو طراحی شده‌اند، با وجود کفایت در برابر تنش‌های به وجود آمده، ممکن است وقوع تغییر شکل‌های بزرگ برای برخی از همجواری‌های گود قابل قبول باشد ولی در برخی دیگر امکان دارد که حتی در برابر تغییر شکل‌های کوچک کاربری خود را از دست بدهند. بنابراین تحلیل‌هایی که تغییر شکل دیوار را در طراحی در نظر می‌گیرند، شاخص مفیدتری از عملکرد دیوار ارائه می‌دهند. به بیانی دیگر، پذیرش خسارت در سازه‌های مجاور گود بر اساس معیار جابجایی قابل تعریف است لذا تغییر مکان معیار مناسب‌تری برای تعریف شاخص خسارت و تحلیل خطر می‌باشد. اخیرا طراحی بر اساس سطح عملکرد در برخی آیین‌نامه‌های معتبر جهانی مانند آیین‌نامه طراحی سازه‌های بندری ژاپن و آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای برای سازه‌های بلند در ژاپن جایگزین روش‌های مبتنی بر تنش شده است، بدین ترتیب استفاده از این روش در طراحی پایدارسازی گود به کاربر اجازه می‌دهد تا با توجه به تغییر شکل مطلوب اقدام به طراحی عناصر پایدارکننده نماید.

این موضوع در گودبرداری فضاهای زیرزمینی در مجاورت بافت فرسوده و یا سازه‌های حساس، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به منظور تعریف شاخص خسارت و تحلیل خطر در مجاورت سازه‌های حساس، تغییر شکل به وجود آمده در توده خاک اطراف گود با بکارگیری ابزار پایش مناسب به صورت مستمر کنترل می‌شود. محدوده تغییر شکل به وجود آمده در مجاورت گود به جنس زمین، نوع سیستم مهاری، کیفیت اجرا، توالی ساخت و هندسه گود بستگی دارد. به این ترتیب می‌توان با در دست داشتن مقادیر تغییر شکل به وجود آمده در توده خاک اطراف گود و تخمین شست متناظر زمین مجاور گود، نسبت به انتخاب سختی مورد نیاز سیستم مهاری مبادرت

نمود. به عبارت دیگر، در طراحی سیستم مهاری گودهای شهری با برآورد تغییر شکل جانبی دیواره گود و ایجاد ارتباط بین مقادیر به دست آمده با نشست زمین مجاور گود، امکان طراحی سازه نگهبان بر اساس کنترل تغییر شکل زمین مجاور فراهم می‌شود. به منظور ارائه روش طراحی عملکردی، پس از کالیبره نمودن^۱ و تطبیق مدل عددی با پایش‌های میدانی و با انجام مطالعه پارامتری، تغییر شکل‌های ماکزیمم متناظر با شرایط ژئوتکنیکی و سختی سازه نگهدارنده گود به دست می‌آید که چهارچوبی را برای طراحی سازه نگهبان بر اساس سطح عملکرد، مبتنی بر کنترل تغییر شکل ایجاد می‌کند.

^۱ Calibrate

حفاری عمیق و اثرات محیطی آن بر زمین و سازه‌های مجاور گود

۲-۱- روش‌های گودبرداری در توده خاک و اثرات محیطی آن

همانطور که عنوان شد، تغییر شکل خاک در اثر تغییر وضعیت تنش‌ها در توده خاک اطراف گود ناشی از گودبرداری در قالب نشست زمین مجاور و تغییر شکل جانبی دیواره گود رخنمون می‌کند. بنابراین یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های مهندسی در عملیات گودبرداری تخمین میزان تغییر شکل توده خاک و حفاظت از دیواره‌های گود به منظور به حداقل رساندن میزان تغییر شکل‌ها می‌باشد. قبل از انجام گودبرداری فشار خاک در دو طرف یکسان است اما زمانی که خاکبرداری انجام شود، فشار از یک طرف برداشته شده و احتمال رانش افقی از یک سو شکل می‌گیرد. وقوع رانش به جنس زمین و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک محل بستگی دارد. با خارج شدن شرایط زمین از حالت سکون احتمال ایجاد گوه گسیختگی در زیر پی ساختمان‌های مجاور و یا دیواره گود ایجاد می‌شود. بنابراین با انجام پایدارسازی خاک اطراف گود باید تا جای ممکن از فعال شدن فرایند رانشی از ابتدای کار جلوگیری به عمل آید. یکی از مسائلی که در اجرای گودبرداری بسیار حائز اهمیت است، انتخاب روشی مناسب برای پایدارسازی گود می‌باشد که هم ایمنی پروژه را تضمین کرده و هم با توجه به ویژگی‌های پروژه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد و هزینه زیادی تحمیل نکند. با بررسی تعداد ۵۰ ساختمان در مجاورت گودهای عمیق تعداد ۴۵ عدد از آن‌ها دچار صدمات مختصر تا جدی شده بودند که نشان از تاثیرپذیری زیاد مجاورت گودبرداری‌های شهری از عملیات گودبرداری دارد [۱]. بدین ترتیب عملیات پایدارسازی در گودبرداری‌های شهری باید با در نظر گرفتن جمیع جهات با دقت مطلوبی صورت پذیرد.

از سویی دیگر، گاه مطالعات ناکافی پیش از حفاری فضاهای زیرزمینی با دست بالا گرفتن ضرایب ایمنی منجر به صرف هزینه‌های زیادی در پروژه‌های عمرانی می‌شود. در گودبرداری کم عمق در شرایط ژئوتکنیکی مطلوب، استفاده از روش‌های پایدارسازی خاص با صرف هزینه‌های گزاف نتیجه‌ای جز اتلاف منابع و سرمایه‌های ملی ندارد. به عبارتی دیگر، طراحی محافظه‌کارانه در پایدارسازی گود به منظور حفظ ایمنی بیشتر بدون توجه به مطالعات آزمایشگاهی و شرایط محیطی در برخی مراکز دولتی، منجر به غیر اقتصادی شدن طرح و اتلاف سرمایه‌های بومی در این گونه پروژه‌ها می‌شود. در چنین شرایطی ارائه یک روش طراحی بر اساس میزان تغییر شکل مجاز زمین با توجه به اهمیت ساختمان‌های مجاور و هم‌جواری‌های موجود در اطراف پروژه ضروری است تا علاوه بر حفظ ایمنی گود و سازه‌های مجاور، از هزینه‌های غیرضرور جلوگیری به عمل آید.

مکانیزم پایدارسازی حفاری‌های زیرزمینی به دو دسته کلی تقسیم می‌شود. دسته اول مربوط به روش‌هایی است که در آن‌ها از پارامترهای مقاومتی دیواره گود استفاده می‌شود و بخشی از توده خاک پشت دیواره گود که درون گوه گسیختگی قرار می‌گیرد به بخش پایداری که بیرون از گوه گسیختگی قرار گرفته متصل می‌شود. روش‌هایی که در این دسته قرار می‌گیرند موسوم به «روش‌های متکی به دیواره گود» هستند. روش میخکوبی و روش دوخت به پشت یا انکراژ از جمله روش‌های متکی به دیواره گود به حساب می‌آیند. دسته دوم مربوط به روش‌هایی است که در آن‌ها از پارامترهای مقاومتی کف استفاده می‌شود به این ترتیب که حرکت جانبی دیواره گود با استفاده از المان‌های فشاری به کف گود متکی شده و مهار می‌شود. روش‌هایی که در این دسته قرار می‌گیرند موسوم به «روش‌های متکی به کف» هستند. از جمله روش‌های متکی به کف در پایدارسازی گود می‌توان به روش خرپا و روش شمع و استرات یا مهار متقابل اشاره نمود. بعضاً در پایدارسازی گودهای عمیق از روش‌های متکی به کف و متکی به دیوار به صورت تلفیقی و توأماً استفاده می‌شود؛ به عنوان مثال گاه وجود تاسیسات زیرزمینی از قبیل لوله‌های آب و فاضلاب، کابل‌های برق و تلفن و قنات‌ها در اعماق سطحی اجازه استفاده از سیستم انکراژ را نمی‌دهد در این صورت به منظور جلوگیری از قطع تاسیسات زیرزمینی، آسیب به مجاورت و بروز حوادث در اعماق سطحی از سیستم مهار متقابل و در اعماق پایین‌تر از سیستم شمع و انکراژ استفاده می‌شود. قابلیت ایجاد تغییرات در طرح در حین پایدارسازی گود در هر زمان و در هر مرحله از انجام عملیات گودبرداری به منظور سبک‌سازی برای اقتصادی نمودن پروژه و یا مقاوم‌سازی برای ایمنی بیشتر یک ویژگی کاربردی است که در روش‌های متکی به کف برجسته‌تر است. به عنوان مثال در پایدارسازی گود به روش بالا به پایین برای پیمانکار امکان افزایش ایمنی با اضافه نمودن المان‌های مقاومتی بیشتر در هر مرحله از پایدارسازی، در هر قسمت از سیستم پایدارکننده و در هر عمقی از دیواره گود فراهم است اما در روش‌های متکی به دیواره چنین اقداماتی نیاز به ابزار و ماشین‌آلات سنگین و خاص دارد که با خطرات زیادی همراه است. با توجه به روش‌های متنوع و گسترده‌ای که در پایدارسازی گودهای عمیق وجود دارد، این مهندس طراح است که با توجه به بودجه، شرایط محیطی و ژئوتکنیکی طرح، عوارض و معارض، هم‌جواری‌های موجود و تغییر شکل مجاز زمین و سازه‌های مجاور تصمیم به بکارگیری یکی از انواع این روش‌ها می‌نماید. تنها مسأله‌ای که نباید از ذهن مهندسین و کارفرمایان پروژه‌هایی که درگیر گودبرداری‌های عمیق هستند مغفول بماند، این است که هیچگاه نباید مسائل فنی و ایمنی پروژه که با جان افراد مرتبط است قربانی انگیزه‌های مالی و مسائل اقتصادی شود. بنابراین اولویت اصلی در پروژه‌های گودبرداری که با خطرات جانی زیادی همراه است، ایمنی و سلامت پروژه می‌باشد.

۲-۲- روش‌های برآورد توده خاک جابجا شده ناشی از گودبرداری

دو روش متداول برای به دست آوردن مقدار نشست زمین مجاور گود ناشی از گودبرداری روش تجربی و مطالعه عددی است. در مدل‌های عددی مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته، با تخمین کرنش و تغییر مکان خاک پشت دیواره گود، مقدار فشار جانبی تعیین می‌شود. حتی ممکن است حالت فشار خاک در نقاط مختلف دیوار متفاوت باشد و این موضوع در مدل‌های عددی لحاظ می‌شود. بنابراین مقدار فشار جانبی در هر نقطه با توجه به مقدار تغییر مکان آن نقطه به دست می‌آید.

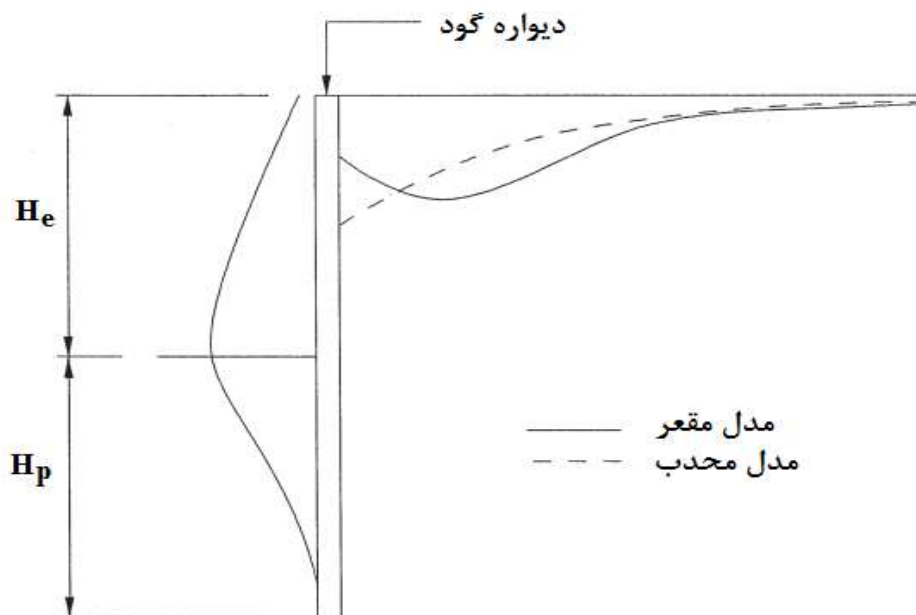
مطالعه عددی، روش بسیار مناسب و دقیقی در برآورد تغییر شکل دیواره گود می‌باشد اما در برآورد نشست زمین مجاور گود روش مناسبی نیست. یکی از دلایل آن این است که رفتار خاک در کرنش‌های خیلی کوچک، سختی زیادی دارد و با افزایش کرنش میزان سختی آن کاهش می‌یابد و بسیاری از مدل‌های رفتاری قادر به مدلسازی کرنش‌های کوچک در خاک نمی‌باشند [۲]. به همین منظور در بسیاری از مطالعات پیش از حفاری تغییر شکل دیواره گود با استفاده از مدل عددی تخمین زده می‌شود و نشست زمین مجاور گود

با استفاده از روابط تجربی که توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است، بدست می‌آید. محققین مختلف در سال‌های گذشته اقدام به تعیین تغییر شکل جانبی دیوار و همچنین ایجاد روابطی بین نشست زمین مجاور و تغییر شکل جانبی نموده‌اند. عوامل زیادی در جابجایی دیواره گود تاثیرگذار است، از جمله این عوامل می‌توان به شرایط خاک و سطح آب زیرزمینی، عمق گود و هندسه زمین حفاری شده، نوع سازه نگهدارنده و سختی سیستم مهارتی، روش اجرا، سربار و مدت اجرا اشاره کرد. در این قسمت حداکثر مقادیر جابجایی بر اساس نوع خاک مورد بحث قرار خواهد گرفت. باید توجه داشت که البته جابجایی‌ها ممکن است بر اثر عوامل مختلف نظیر کاهش سطح آب زیرزمینی یا نصب فونداسیون نیز در کف گود اتفاق بیفتد لیکن در مطالعات صورت گرفته توسط برخی محققین از آن‌ها در تعیین تغییر شکل جانبی دیوار ناشی از گودبرداری صرف نظر شده است [۳].

به این ترتیب روابط تجربی برای ایجاد ارتباط میان داده‌های به دست آمده از تغییر شکل جانبی دیوار و نشست زمین مجاور گود، ارائه شده است تا جایگزین مطالعه عددی برای به دست آوردن نشست زمین مجاور گود شود. در شکل ۱-۲، دو نوع عمده نشست خاک ناشی از گودبرداری نشان داده شده است:

الف- مدل محدب یا مثلثی شکل، که نشست ماکزیمم نزدیک دیوار اتفاق می‌افتد.

ب- مدل مقعر یا دوزنقه‌ای شکل، که نشست ماکزیمم در فاصله‌ای نسبت به دیوار رخ می‌دهد.

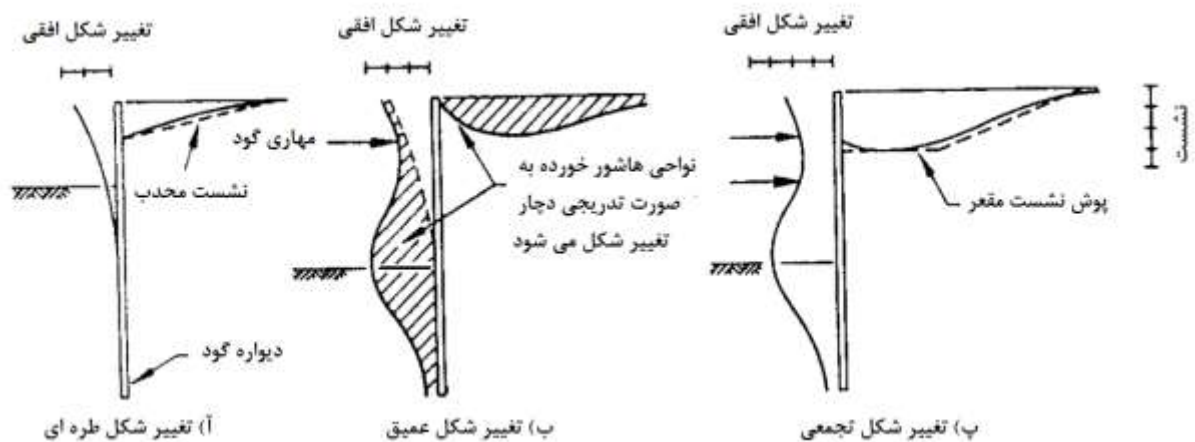


شکل ۱-۲. انواع نشست خاک مجاور گود [۴]

در روش‌های متفاوت گودبرداری، ناحیه تحت تاثیر تغییر نمی‌کند و فقط شکل نشست مجاور گود تفاوت خواهد کرد (محدب یا مقعر). چنانچه در اولین مرحله گودبرداری تغییر شکل بزرگی در دیوار اتفاق بیفتد و در مراحل بعد تغییر شکل دیوار نسبت به تغییر شکل اولیه کوچک باشد یا به عبارتی دیوار تغییر شکل طره‌ای داشته باشد، در این حالت معمولاً نشست زمین مجاور به صورت

محدب می‌باشد. بالعکس چنانچه تغییر شکل اولیه دیوار نسبت به مراحل بعدی در اعماق بیشتر، کوچک باشد یا مقداری از تغییر شکل اولیه دیوار در اثر نصب مهاریه‌های حفاری جبران شود، در این صورت تغییر شکل به وجود آمده در اعماق سطحی به اعماق پایین‌تر منتقل می‌شود، در این حالت معمولاً مدل مقعر اتفاق می‌افتد [۴].

در برخی موارد امکان دارد مهاریه‌های سطوح بالایی هنوز تحت کشش قرار نگرفته باشند، یا سختی سیستم مهاریه کافی نبوده و یا از سیستم مهاریه انعطاف‌پذیر استفاده شود. در این موارد زمین با تغییر شکل زیاد در مراحل اولیه گودبرداری همراه بوده و تغییر شکل طره‌ای اتفاق می‌افتد. مطابق با مطالعات کلاو و اورورک در سال ۱۹۹۰ نشست زمین مجاور گود در این حالت به صورت توزیع مثلثی می‌باشد (شکل ۲-۲ (أ)). با پیشروی گودبرداری به اعماق پایین‌تر، سطوح بالایی با نصب مهاریه‌ها سخت‌تر می‌شوند و جابجایی جانبی زمین را محدود می‌نمایند. در نتیجه مطابق شکل ۲-۲ (ب)، در صورت تداوم تغییر شکل، جابجایی ماکزیمم در عمق به سمت داخل گود اتفاق می‌افتد. در اثر برآیند تغییر شکل طره‌ای و تغییر شکل عمیق، جابجایی تجمعی در دیوار و زمین مطابق شکل ۲-۲ (پ) ایجاد می‌شود. چنانچه جابجایی عمیق، در تغییر شکل دیوار تاثیر بیشتری ایجاد نماید، در این صورت توزیع نشست زمین مجاور گود به صورت دوزنقه‌ای شکل و یا مقعر خواهد بود که این حالت در گودبرداری عمیق در خاک رسی نرم تا متوسط معمول می‌باشد. همچنین چنانچه تغییر شکل طره‌ای، تاثیر بیشتری در تغییر شکل دیوار ایجاد نماید، در این صورت توزیع نشست زمین مجاور گود به صورت مثلثی شکل یا محدب خواهد بود که این حالت در ماسه و خاک رسی سفت تا خیلی سخت معمول می‌باشد. نوع نشست زمین مجاور گود به سیستم مهاریه نیز وابسته است، به عنوان مثال با توجه به تغییر شکل زیاد خاک در سیستم مهاریه میخکوبی در مراحل اولیه، نشست زمین مجاور گود در این حالت معمولاً به صورت مثلثی شکل است [۳].



شکل ۲-۲. جابجایی‌های متداول دیواره گود [۳]

در مطالعه‌ای دیگر که توسط هسیه و او در سال ۱۹۹۷ انجام شد، پارامتر A_s مطابق با شکل ۲-۳ معرفی شد که از تفاضل مساحت جابجایی کلی دیوار (A_{tmax}) و مساحت تغییر شکل طره‌ای دیوار به دست می‌آید و مساحت تغییر شکل طره‌ای دیوار برابر با ماکزیمم

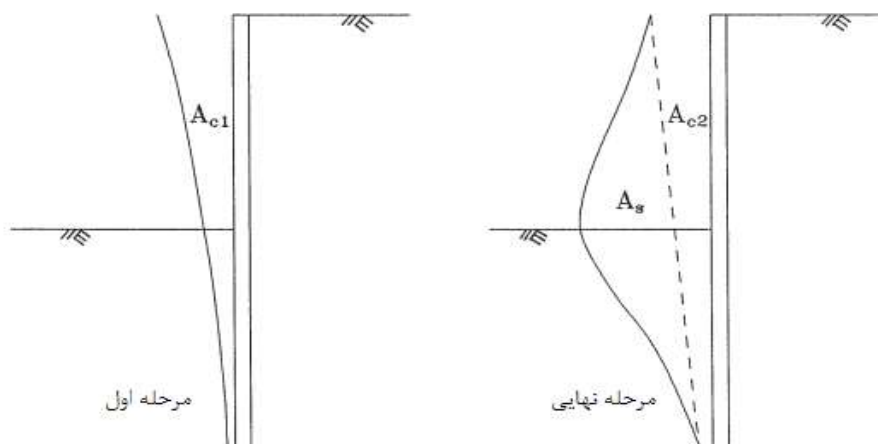
¹ Clough and O'Rourke (1990)

¹ Hsieh and Ou (1997)

مساحت جابجایی طره‌ای در پایان مرحله اول گودبرداری (A_{c1}) و جابجایی طره‌ای در مرحله نهایی گودبرداری (A_{c2}) می‌باشد. چنانچه $A_s \geq 1.6A_c$ ، نشست مقعر رخ می‌دهد و در غیر این صورت نشست به وجود آمده به صورت محدب خواهد بود [۵].

$$A_c = \text{Max}(A_{c1}, A_{c2}) \quad \text{رابطه ۱-۲}$$

$$A_s = A_{hmax} - A_c \quad \text{رابطه ۲-۲}$$



شکل ۲-۳. تعیین نشست زمین مجاور گود با توجه به مساحت تغییر شکل طره ای و کلی دیوار [۵]

ارتفاع متناظر با ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار ($H_{\delta hm}$)، با افزایش عمق گود افزایش می‌یابد. در مطالعات وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، داده‌های گزارش شده برای ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار بین دو محدوده $0.5H$ و $1/4H$ قرار می‌گیرد که H معرف ارتفاع گود می‌باشد [۶].

نشست زمین مجاور گود به جنس زمین هم بستگی دارد به این ترتیب که نشست مثلثی شکل یا محدب در ماسه و خاک رسی سفت تا خیلی سخت معمول می‌باشد و نشست ذوزنقه ای یا مقعر در خاک رسی نرم متداول است [۷]. در خاک رسی سفت و ماسه‌ای به علت پایداری ذاتی این نوع از خاک، سختی سیستم مهاری و فاصله مهاری‌ها کمترین تاثیر در وقوع ماکزیمم تغییر شکل‌های جانبی را دارد. بنابراین سختی خاک تاثیر بیشتری از سختی سیستم مهاری بر روی تغییر شکل زمین دارد. در رابطه با خاک رسی نرم و متوسط نشست ماکزیمم معمولاً در فاصله‌ای نسبت به دیوار اتفاق می‌افتد (حالت مقعر) [۷]. موقعیت ماکزیمم نشست زمین مجاور گود بستگی به موقعیت تمرکز تنش در خاک اطراف دیوار حائل دارد؛ بنابراین موقعیت ماکزیمم نشست در زمین مجاور گود نمی‌تواند تنها تابعی از عمق گودبرداری باشد [۸]. در عوض ناحیه تحت تاثیر گودبرداری در پشت دیواره گود که دچار نشست می‌شود، با افزایش عمق، افزایش می‌یابد. سازه‌ها و زیرساخت‌های عمومی در این ناحیه ممکن است آسیب ببینند. این ناحیه، ناحیه تحت تاثیر

¹ Wang et al. (2010)

ظاهری (AIR) می‌باشد و مطابق با رابطه ۲-۳ تعریف شده است. نشست زمین مجاور گود در خارج از محدوده AIR کوچک است و سازه‌ها تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند [۸].

$$AIR = (H_e + D) \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \leq (H_e + H_p) \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

در این رابطه H_e عمق نهایی گودبرداری، D عمق نفوذ دیوار در زیر بستر گود، φ زاویه اصطکاک داخلی خاک و H_p تراز مهاری است. چنانچه عمق نفوذ دیوار خیلی محافظه‌کارانه اتخاذ شود، استفاده از رابطه فوق منطقی نخواهد بود [۸].

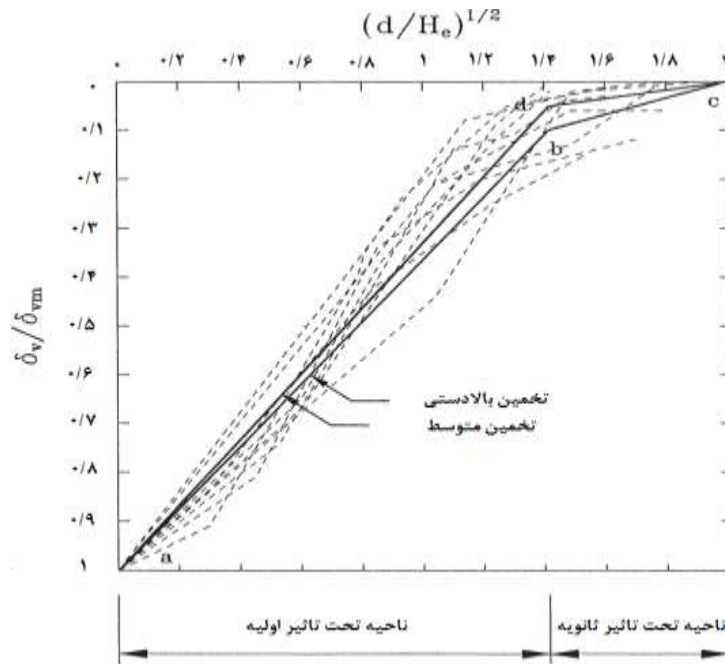
نسبت تغییر شکل (R) که بیانگر نسبت ماکزیمم نشست زمین به ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار می‌باشد در محدوده ۰/۵ تا ۱ قرار می‌گیرد و در خاک رسی سفت و ماسه متراکم این نسبت حدود ۰/۵ تا ۰/۷۵ است. در صورت به وجود آمدن جابجایی بزرگ در خاک ممکن است که ماکزیمم نشست زمین از ماکزیمم تغییر شکل به وجود آمده در دیوار بیشتر باشد. در واقع برای خاک رس خیلی نرم، ماکزیمم نشست ممکن است از ماکزیمم تغییر شکل جانبی بیشتر شود که دلیل آن می‌تواند وجود جریان پلاستیک پیرامون گودبرداری باشد [۴].

در سال ۱۹۹۷، هسیه و او رابطه‌ای بین نشست زمین مجاور گود و تغییر شکل جانبی دیوار بر اساس مطالعات پیشین ارائه نمودند. مطابق با روش ایشان، یک رابطه سه خطی بین نشست و فاصله از دیوار برای حالت محدب بر اساس ۱۰ مطالعه موردی به کار گرفته شد. خط ab به عنوان ناحیه اولیه تحت تاثیر قرار گرفته تا فاصله $2H_e$ که H_e معرف ارتفاع گود است، می‌باشد که با نشست مشاهده شده توسط کلاو و اورورک در سال ۱۹۹۰ مطابقت دارد. خط bc با یک شیب ملایم‌تر ترسیم شده است که به عنوان ناحیه ثانویه تحت تاثیر قرار می‌گیرد و تا فاصله $4H_e$ امتداد می‌یابد (شکل ۲-۴). روابط ۲-۴ و ۲-۵ و منحنی به دست آمده مطابق با شکل ۲-۴ نتایج مطالعه هسیه و او برای حالت محدب می‌باشد. در اینجا d فاصله افقی از لبه دیواره گود، δ_v نشست زمین در فواصل مختلف از لبه دیواره گود و δ_{vm} ماکزیمم نشست زمین مجاور گود می‌باشد.

$$\delta_v = \left(-0.636 \sqrt{\frac{d}{H_e}} + 1 \right) \delta_{vm} \quad \text{for } \frac{d}{H_e} \leq 2 \quad \text{رابطه ۲-۴}$$

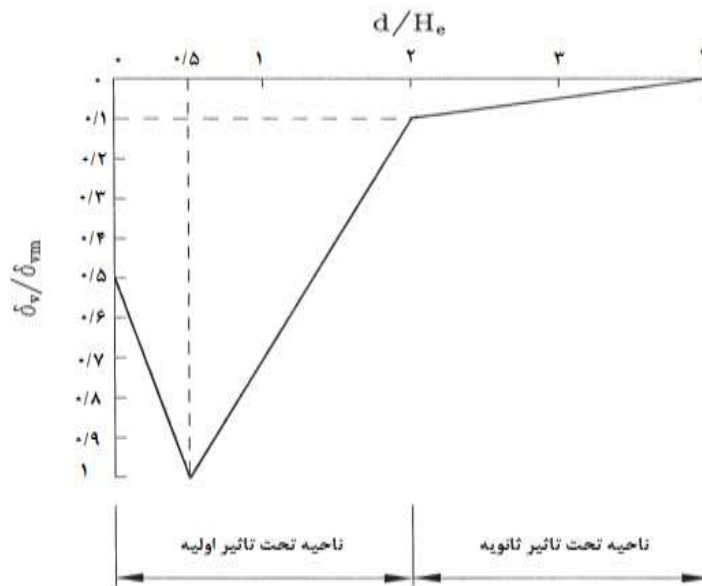
$$\delta_v = \left(-0.171 \sqrt{\frac{d}{H_e}} + 0.342 \right) \delta_{vm} \quad \text{for } 2 < \frac{d}{H_e} \leq 4 \quad \text{رابطه ۲-۵}$$

^۱ Apparent Influence Region



شکل ۲-۴. پروفیل نشست برای حالت محدب [۵]

برای حالت مقعر، ماکزیمم نشست زمین مجاور گود در فاصله نصف عمقی که بیشترین تغییر شکل جانبی رخ می‌دهد، اتفاق می‌افتد. بیشترین تغییر شکل جانبی در اکثر گودها در تاج گود اتفاق می‌افتد؛ بنابراین ماکزیمم نشست زمین مجاور گود در حالت مقعر در فاصله نصف عمق گودبرداری به وقوع می‌پیوندد ($H_e/2$). نشست زمین مجاور دیوار در حالت مقعر برای خاک رس نرم تا متوسط حدود $0.5\delta_{vm}$ تا $0.7\delta_{vm}$ می‌باشد که در این حالت مقدار $0.5\delta_{vm}$ برای آن در نظر گرفته شده است. مقدار نشست در فاصله $2H_e$ حدود $0.1\delta_{vm}$ و در $4H_e$ حدود صفر می‌باشد. شکل ۲-۵ پروفیل نشست برای حالت مقعر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵. پروفیل نشست برای حالت مقعر [۵]

بعدتر کونگ و همکاران^۱ با انجام مطالعات عددی سه مدل برای تخمین ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار، تعیین نسبت تغییر شکل و ماکزیمم نشست و تعیین پروفیل نشست زمین مجاور گود در خاک رسی نرم و متوسط ایجاد نمودند و روش تعریف شده را با تعدادی موارد مطالعاتی جدید اعتبارسنجی کردند. با تقسیم نمودار شکل ۲-۵ به سه ناحیه $0.5 \leq d/H_e \leq 2$ ، $2 \leq d/H_e \leq 4$ و $d/H_e \leq 0.5$ که d معرف فاصله از لبه دیواره گود و H_e عمق گود می‌باشد، مقدار نشست قائم مطابق روابط ۲-۶ تا ۲-۸ قابل برآورد است. همچنین پارامترهای δ_v و δ_{vm} در این شکل معرف به ترتیب مقدار نشست قائم در فواصل مختلف از لبه دیوار گود و ماکزیمم نشست زمین مجاور گود می‌باشد [۹].

$$\delta_v / \delta_{vm} = (1.6 \times d/H_e + 0.2) \quad \text{for } 0 \leq \frac{d}{H_e} \leq 0.5 \quad \text{رابطه ۲-۶}$$

$$\delta_v / \delta_{vm} = (-0.6 \times d/H_e + 1.3) \quad \text{for } 0.5 \leq \frac{d}{H_e} \leq 2 \quad \text{رابطه ۲-۷}$$

$$\delta_v / \delta_{vm} = (-0.05 \times d/H_e + 0.2) \quad \text{for } 2 \leq \frac{d}{H_e} \leq 4 \quad \text{رابطه ۲-۸}$$

۲-۳- ارتباط بین نشست زمین و خرابی به وجود آمده در سازه مجاور

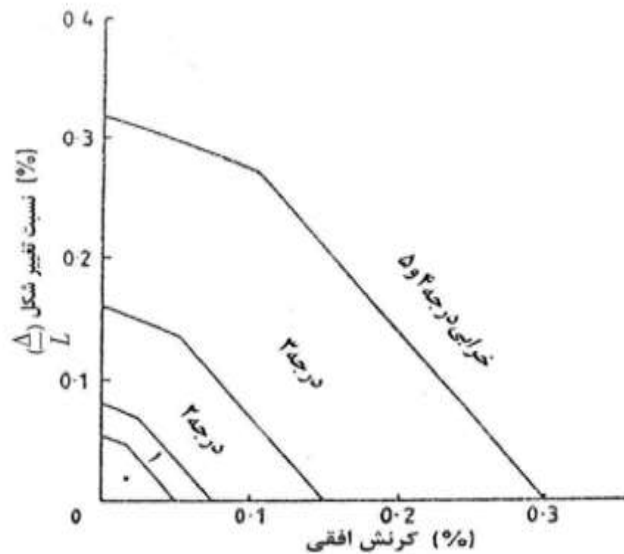
روش‌هایی توسط محققین مختلف برای ایجاد ارتباط بین نشست قائم زمین و خرابی‌های وارده شده به سازه‌های مجاور ارائه شده است. در اینجا به عنوان نمونه معیار برلند^۲ به صورت کاملاً مختصر به عنوان روشی برای تعیین میزان خرابی در سازه مجاور گود با توجه به نشست زمین تبیین می‌شود [۱۰]. متغیرهای مورد استفاده در این معیار نسبت تغییر شکل (Δ/L) و کرنش افقی (ϵ_h) می‌باشد. نسبت تغییر شکل در واقع حاصل تقسیم نشست قائم آن نقطه (Δ) به طول دهانه مورد بررسی (L) است. معمولاً حداکثر این مقدار در فاصله بین ستون مجاور گود و ستون ماقبل آن اتفاق می‌افتد. کرنش افقی به میانگین کرنش افقی بین دو نقطه در اثر حرکت افقی غیریکنواخت آن دو نقطه گفته می‌شود. برای مثال اگر دو ستون که به فاصله L در مجاورت هم هستند به اندازه h_1 و h_2 به طرف گود حرکت افقی داشته باشند، آنگاه داریم (رابطه ۲-۹):

$$\epsilon_h = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad \text{رابطه ۲-۹}$$

بر اساس دو پارامتر فوق مطابق با شکل ۲-۶ نمودارهایی ایجاد شده است که میزان خرابی را از قابل صرف‌نظر (درجه صفر) تا خیلی شدید (درجه ۴ و ۵) طبقه‌بندی می‌نماید.

^۱ Kung et al. (2007)

^۲ Burland (1997)



شکل ۲-۶. رابطه بین کرنش افقی و درجات آسیب [۱۰]

بر اساس تئوری برلند محقق دیگری به نام دی در سال ۱۹۹۸ سعی در تبیین حدود خرابی‌های فوق با استفاده از دو معیار نشست (Δ) و نسبت تغییر شکل (Δ/L) داشت که منجر به جدول ۲-۱ شد [۱۱]. همچنین محققان دیگری نیز روابطی را برای تبیین نشست مجاز معرفی کرده‌اند که در اینجا به آن‌ها پرداخته نمی‌شود [۱۲ و ۱۳].

جدول ۲-۱. ارزیابی آسیب‌ها در معیار برلند [۱۱]

Δ/L	Δ	عرض تقریبی ترک (میلی‌متر)	آسیب دیدگی
$< 1/300$	$< 3\text{cm}$	بین صفر تا ۱	قابل صرف نظر کردن
$1/1 - 300/240$	$3\text{cm} - 4\text{cm}$	کمتر از ۱	خیلی ناچیز
$1/1 - 240/175$	$4\text{cm} - 5\text{cm}$	کمتر از ۵	ناچیز
$1/1 - 175/120$	$5\text{cm} - 8\text{cm}$	بین ۵ تا ۱۵ با بیش از ۳ ترک	متوسط
$1/1 - 120/70$	$8\text{cm} - 13\text{cm}$	بین ۱۵ تا ۲۵ و وابسته به تعداد ترک‌ها	شدید
$> 1/70$	$> 13\text{cm}$	بیش از ۲۵ و وابسته به تعداد ترک‌ها	خیلی شدید

^۲ Day (1998)

پایش، روش‌های انجام و کاربردهای آن در عملیات گودبرداری

۳-۱- مقدمه

تجربیات تلخ سالیان اخیر در پروژه‌های ساختمانی، تلفات مالی و جانی در این حوزه و تبعات آن باعث شده است که دست اندرکاران پروژه‌های ساختمانی نسبت به ایمنی کارگاه نگاه جدی‌تری داشته باشند. در کنار رعایت موارد و نکات ایمنی در کارگاه که مسئولیت آن با کارشناس ایمنی کارگاه می‌باشد، نظارت و کنترل پاسخ اجزا ساختمان و مجاورین آن در حین و پس از عملیات ساخت اهمیت بسزایی دارد. به طور کلی هر گونه فعالیت صنعتی و یا غیر صنعتی که جان و یا مال افراد در آن‌ها دخیل باشد نیاز به نظارت و کنترل دارد. به این ترتیب کلیه فعالیت‌های ساختمانی که با جان و مال افراد در ارتباط است نیاز به کنترل و پایش دارد. به مجموعه فرآیندهایی شامل دیده‌بانی در یک بازه زمانی خاص، پیاده سازی مشاهدات، یافتن روندها و دنبال کردن آنها و جمع آوری اطلاعات مربوطه در راستای نظارت بر این فعالیت‌ها مانیتورینگ یا پایش گفته می‌شود. پایشگر کسی است که با توجه به اطلاعات به دست آمده از مشاهدات و دنبال کردن روندها به جمع آوری اطلاعات به منظور کنترل و تصمیم‌گیری پیرامون فعالیت مربوطه می‌پردازد.

با توجه مقدمه بیان شده، در این قسمت به ضرورت نظارت و پایش در عملیات گودبرداری پرداخته می‌شود. یکی از عمده موارد حادثه ساز در عملیات ساختمانی گودبرداری است. گودبرداری‌های غیراصولی به ویژه در بافت‌های فرسوده شهری، موارد زیادی از تخریب کامل یا جزئی ساختمان‌های مجاور را به دنبال داشته که علاوه بر خسارت مادی، گاهی با آسیب‌های جانی نیز همراه بوده است. پایشگر در پروژه‌های ساختمانی مهندس ناظر می‌باشد که با استفاده از ابزار اندازه‌گیری که در دست دارد بر روند کلی در فرآیند اجرا اشراف داشته و با نظارت به موقع و مقایسه نتایج با مقادیر پیش فرض از اشتباهات اجرایی جلوگیری کرده و در صورت لزوم، پاسخ عناصر سازه‌ای در حین و پس از اجرا را با ابزار مناسب پایش می‌نماید. به همین ترتیب در عملیات اجرای گود که اهمیت زیادی دارد، پایشگر یک فرد حرفه‌ای با صلاحیت ژئوتکنیک است که دارای مدرک مرتبط بوده و دوره‌های لازم را گذرانده باشد. همچنین او باید تخصص مورد نیاز را برای نظارت بر فرآیندهای اجرایی، انجام مشاهدات، یافتن روندها و دنبال کردن آن‌ها، تحلیل نتایج پایش، اندازه‌گیری دقت پارامترهای طراحی و مقایسه با نتایج پیش فرض و اجرای تمهیدات مورد نیاز در صورت انحراف روندهای پایش از الگوهای پیش‌بینی شده را داشته باشد و مانند یک خلبان که سکان دار هواپیماست، فرآیندهای اجرایی هنگام عملیات گودبرداری را رصد و کنترل نماید. به منظور جلوگیری از حوادث فاجعه بار در عملیات گودبرداری، باید مطالعات ژئوتکنیک لازم پیش از حفاری با دقت مناسبی انجام شود، تاسیسات زیرزمینی و استحکام ساختمان‌های مجاور در اطراف پروژه بررسی شده، عملیات

گودبرداری با بکارگیری ابزار پایش مناسب کنترل شود و ضمن استفاده از نیروهای مجرب، ساکنین ساختمان‌های مجاور از زمان گودبرداری مطلع شده و هشدارهای لازم به آن‌ها داده شود.

همانطور که پیش از این نیز عنوان شد در گودبرداری فضاهای زیرزمینی در مجاورت بافت فرسوده و یا سازه‌های حساس، کنترل تغییر شکل بسیار حائز اهمیت می‌باشد. محدوده این تغییر شکل به جنس زمین، نوع سیستم مهاری، کیفیت اجرا، توالی ساخت و هندسه گود بستگی دارد. پیش‌بینی روند تغییر شکل‌های زمین نیازمند ابزارگذاری و مطالعات میدانی با استفاده از ابزار پایش مناسب می‌باشد؛ در حقیقت اولین گام برای تحلیل تغییر شکل، مدلسازی عددی، کالیبراسیون آن، تعریف شاخص خسارت و تحلیل خطر، کنترل تغییر شکل به وجود آمده در توده خاک اطراف گود با بکارگیری ابزار پایش مناسب به صورت مستمر می‌باشد. استفاده از ابزار کاربردی مناسب نیازمند شناسایی محدودیت‌ها، ویژگی‌ها، معایب و مزایا برای هر یک از این ابزار می‌باشد. در تعیین ابزار پایش فاکتورهای زیادی از جمله روش پایدارسازی گود، شرایط هندسی، شرایط جوی، نوع مطالعات عددی، بودجه تعیین شده برای انجام مطالعات و سهولت استفاده از ابزار تاثیرگذار است. به منظور کنترل تغییر شکل‌ها ناشی از عملیات گودبرداری لازم است مهندس ژئوتکنیک با نگاهی فنی و ریزبینانه به پایش دقیق رفتار گود و سازه‌های مجاور آن بپردازد. پیش‌بینی یک تخمین منطقی و قابل قبول از شرایط میدانی توسط مدل‌های عددی مستلزم کالیبره نمودن نتایج مطالعات عددی با داده‌های به دست آمده از پایش‌های میدانی است؛ بنابراین انجام پایش‌های میدانی برای کالیبراسیون مدل عددی نیز امری ضروری به حساب می‌آید. به صورت خلاصه، به منظور کالیبره کردن مدلسازی عددی و صحت سنجی نتایج به دست آمده از آن، تغییر شکل‌های به وجود آمده ناشی از فعالیت‌های میدانی میبایست توسط پایشگر حرفه‌ای و با بکارگیری ابزار پایش مناسب پایش شود. تنها در این صورت است که با در دست داشتن مقادیر تغییر شکل به وجود آمده در توده خاک اطراف گود می‌توان با بهره‌گیری از مدلسازی عددی به طراحی گود بر اساس تغییر شکل مبادرت نمود.

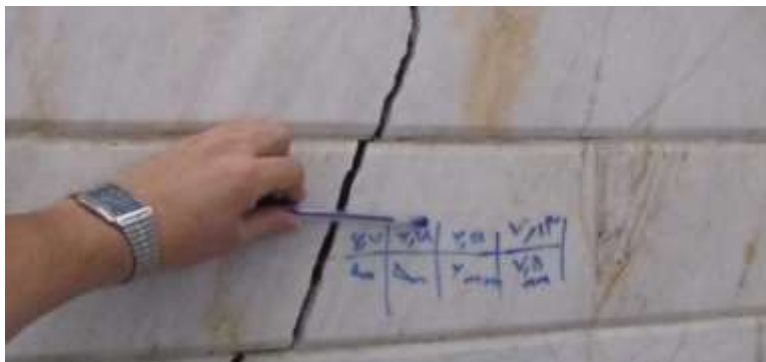
۳-۲- روش‌های انجام پایش

روش‌های انجام پایش را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: پایش چشمی، پایش با استفاده از ابزار دقیق و پایش به روش ژئودتیک^۱ که در ادامه بصورت جداگانه به هر یک پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱- پایش چشمی

بررسی دوره‌ای به منظور شناسایی هر گونه تغییر وضعیت در زمین اطراف و یا سازه‌های مجاور گود، جابجایی عناصر سازه‌ای گود، نشست در سطح زمین، بیرون زدگی منهول و یا مستحذات زیرزمینی و... را پایش چشمی می‌نامند. بدین ترتیب پایشگر به صورت دوره‌ای معابر اطراف گود، سازه‌های مجاور و مستحذات زیرزمینی را بازرسی نموده و هر گونه تغییرات را به منظور در نظر گرفتن تمهیدات لازم گزارش می‌نماید. بهتر است گزارشات پایشگر به صورت تصویری باشد و اندازه ترک‌های مشاهده شده با ذکر تاریخ در بازه‌های زمانی مختلف مقایسه شود. شکل ۳-۱ به پایش چشمی صورت گرفته در یک پروژه گودبرداری اشاره دارد؛ همانطور که مشاهده می‌شود، میزان طول ترک در تاریخ‌های متفاوت در طول پروژه بر روی دیوار ثبت شده است.

^۱ Geodetic



شکل ۳-۱. بررسی دوره‌ای ترک‌های ایجاد شده در سازه‌های مجاور گود به صورت چشمی

۳-۲-۲- پایش با استفاده از ابزار دقیق

در این روش تغییر شکل‌های ایجاد شده از جمله تغییر شکل‌های جانبی دیواره گود، نشست زمین مجاور گود، انحراف سازه‌های مجاور و ... با بهره‌گیری از ابزار دقیق‌های مختلف و با نصب تجهیزات در نقاط مناسب از سازه نگهبان، دیواره گود و سازه یا زمین مجاور در بازه‌های زمانی مشخص قرائت و پایش می‌شود.

انحراف‌سنج یکی از پرکاربردترین ابزار دقیق‌های مورد استفاده در عملیات گودبرداری است. چنانچه رفتار خاک در مدل عددی مدل شود، استفاده از داده‌های پایش بدست آمده از انحراف‌سنج می‌تواند مفیدترین ابزار باشد. داده‌های بدست آمده از این ابزار برای پایش نشست زمین و تغییر شکل دیواره گود ناشی از عملیات گودبرداری مناسب است. برای استفاده از انحراف‌سنج ابتدا محل نصب با دستگاه مناسب حفاری شده و کیسینگ گذاری می‌شود. سپس کاوشگر^۲ دستگاه انحراف‌سنج در بازه زمانی‌های مشخص از داخل کیسینگ در عمق حرکت می‌کند و میزان انحراف لوله‌های کیسینگ را قرائت می‌نماید. در شکل ۳-۲ نمونه‌ای از کاوشگر به همراه لوله‌های کیسینگ نمایش داده شده است.



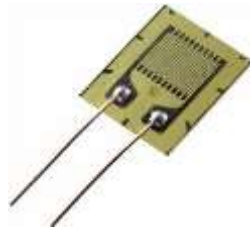
شکل ۳-۲. نمونه‌ای از کیسینگ و کاوشگر در دستگاه انحراف سنج

از دیگر ابزار پایش می‌توان به کرنش‌سنج‌ها اشاره کرد. کرنش‌سنج برای اندازه‌گیری کرنش سازه‌های نگهدارنده موقت به منظور پایش تغییر شکل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ابزار یک سنسور الکترونیکی است که برای اندازه‌گیری تنش و تغییرات نسبی طول یک

^۱ Inclinator

^۲ Prob

جسم به کار می‌رود. برای این منظور در هنگام نصب عناصر سازه‌ای، کرنش‌سنج بر روی عضو مورد نظر نصب شده و با اتصال سیم‌های خروجی کرنش‌سنج به دیتالاگر داده‌های مورد نیاز استخراج می‌شود. نمونه‌ای از کرنش‌سنج در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳. نمونه‌ای از کرنش‌سنج

زاویه سنج ابزاری برای اندازه‌گیری زاویه قرارگیری یک جسم نسبت به سطح افق است. این ابزار قابل نصب بر روی سازه‌های اطراف گود بوده و بدین ترتیب می‌تواند تغییر زاویه ایجاد شده را در سازه‌ها در اثر تغییر شکل توده خاک پایش نماید. این ابزار دارای خروجی عقربه‌ای^۱ و یا رقومی^۲ بوده و برای کنترل وضعیت، قابل اتصال به نمایشگر می‌باشد (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴. نمونه‌ای از یک زاویه سنج با خروجی دیجیتال

از دیگر ابزار پایش می‌توان به نیروسنج‌ها اشاره نمود. نمونه‌ای از نیروسنج در شکل ۳-۵ قابل مشاهده است. نیروسنج انواع مختلفی دارد و برای اندازه‌گیری نیرو یا تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد. کارایی آن به این ترتیب است که تغییرات نیرو را بر اساس تغییر ولتاژ حس کرده و ثبت می‌نماید. نیروسنج‌ها در صنایع مختلف کاربردهای زیادی دارند و در پایش تنش وارده شده به عناصر سازه‌ای گودها در عملیات گودبردای مورد استفاده مهندسين ژئوتکنیک قرار می‌گیرند. با نصب ابزار کرنش‌سنج بر روی نیروسنج امکان پایش کرنش ایجاد شده در کنار تنش به صورت همزمان ایجاد می‌شود.



شکل ۳-۵. نمونه‌ای از یک نیروسنج برای اندازه‌گیری فشار

1 Tiltmeter
2 Analog
3 Digital
1 Load Cell

۳-۲-۳- پایش به روش ژئودتیک

در این روش با استفاده از عملیات نقشه برداری به وسیله یک ابزار مهندسی خاص و با منشورهای برچسبی مخصوص، بعد از کالیبره نمودن دستگاه‌ها، نسبت به محاسبه جابجایی دیواره گود و سایر اجزاء رفتارسنجی و بررسی جابجایی یک سازه اقدام می‌شود. یک روش نوین برای پایش به روش ژئودتیک پیشرفته استفاده از اسکن لیزری سه بعدی برای ثبت دقیق و همراه با جزییات فعالیت‌های ساختمانی است. عکس‌های گرفته شده توسط این لیزر قابل استفاده در مدل‌های عددی به منظور ایجاد دقیق فضای حفاری شده برای انجام تحلیل عددی است. شکل ۳-۶ دستگاه اسکنر سه بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶. دستگاه اسکنر سه بعدی

دوربین توتال استیشن^۱ با استفاده از منشور چشمی ابزاری ساده و مناسب است که امکان پایش جابجایی را فراهم می‌نماید. سادگی و کم هزینه بودن این ابزار در کنار دقت قابل قبول در پروژه‌های مهندسی، خلا پایش‌های میدانی برای تمامی پروژه‌های مهندسی از جمله گودبرداری را از بین می‌برد و به کارفرمایان اجازه می‌دهد تا با انجام نظارت‌های مورد نیاز حین کار ریسک‌ها و خطرات پروژه را به حداقل برسانند. با استفاده از این ابزار می‌توان به عنوان مثال در یک پروژه گودبرداری نقاط ثابتی را به عنوان ایستگاه انتخاب نموده و پس از توجیه دوربین نسبت به برداشت نقاط مورد نظر درون گود اقدام نمود. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن تارگت‌هایی ثابت در مناطقی دورتر به عنوان نقاط مرجع که تحت تاثیر عملیات گودبرداری قرار نگیرد، نقاط مورد نظر درون گود را برداشت نموده و جابجایی نقاط مورد نظر را نسبت به نقاط مرجع که بدون جابجایی است کنترل نمود. روش دوم روش ساده‌تری می‌باشد و نیازی به توجیه دوربین ندارد ضمن اینکه در استفاده از دوربین توتال استیشن به منظور پایش جابجایی دیواره گود، جابجایی نسبی نقاط مرجع باید پیوسته صفر باشد، بنابراین از این موضوع می‌توان برای بررسی صحت و دقت اطلاعات بدست آمده استفاده نمود. در شکل ۳-۷ نمونه‌ای از منشور برچسبی نصب شده بر روی سازه نگهدارنده به منظور پایش تغییر شکل با دوربین توتال استیشن ملاحظه می‌شود.

^۱ Total Station

^۲ Target



شکل ۳-۷. نمونه‌ای از منشور برچسبی نصب شده بر روی سازه نگهبان به منظور پایش تغییر شکل با دوربین توتال استیشن

۳-۳- کاربردهای پایش در عملیات گودبرداری

پیش‌بینی روند تغییر شکل‌های زمین نیازمند مدلسازی عددی و کالیبراسیون آن با پایش‌های میدانی می‌باشد. از جمله کاربردهای پایش در عملیات گودبرداری، انجام گودبرداری به روش ساخت مشاهده‌ای، مدلسازی عددی و کالیبراسیون مدل، تعریف شاخص خسارت و تحلیل خطر و طراحی گودبرداری بر اساس سطح عملکرد سازه‌های مجاور گود می‌باشد.

روش ساخت مشاهده‌ای از دیرباز در کشورهای توسعه یافته در عملیات گودبرداری مورد توجه بوده است. در این روش مراحل ساخت در حین رفتارنگاری اصلاح می‌گردد و بهینه می‌شود. بنابراین فرضیات طراحی بهبود یافته می‌تواند برای پیش‌بینی دقیق رفتار گود و مراحل بعدی ساخت مورد استفاده قرار گیرد. در این شیوه در مرحله ۱ تغییر شکل زمین و سازه نگهبان در حین مراحل ساخت دائماً مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد و با مقادیر بحرانی و کنترلی متناظر مقایسه می‌شود. مقادیر بحرانی، مقادیری است که با عبور از آن‌ها سازه نگهبان و یا سازه‌های مجاور دچار گسیختگی می‌شود. مقادیر کنترلی، مقادیر بدست آمده در طرح اولیه می‌باشد که عبور از آن‌ها منجر به غیراقتصادی شدن پروژه می‌شود. در مرحله ۲، بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده و کنترل آن‌ها با مقادیر مرزی، فرضیات طراحی مورد بازبینی قرار می‌گیرد و با استفاده از داده‌های بدست آمده از پایش برای پیش‌بینی رفتار زمین آنالیز بازگشتی صورت می‌گیرد و مراحل بعدی ساخت بازطراحی می‌شود. در مرحله ۳ ضریب اطمینان گودبرداری بر اساس طرح جدید مجدداً مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، این روش با محافظه‌کارانه‌ترین مقادیر شروع می‌شود و با اصلاحات صورت گرفته به محتمل‌ترین مقادیر می‌رسد. در اجرای عملیات گودبرداری و پایدارسازی گود به روش ساخت مشاهده‌ای، مجری این قابلیت را دارد که در هر مرحله از گودبرداری با توجه به اطلاعات به دست آمده از مطالعات میدانی طرح اجرایی را بنا به صلاحدید به منظور افزایش ایمنی و یا اقتصادی نمودن پروژه با تغییراتی همراه نماید.

در طراحی گود بر اساس سطح عملکرد سازه‌های مجاور میبایست تغییر شکل مجاز زمین برآورد شود. تغییر شکل مجاز در گود به سختی سیستم مهارتی، جنس زمین و آسیب پذیری سازه‌های مجاور وابسته است. تعیین آسیب پذیری سازه‌های مجاور نیاز به نظر متخصصین و افراد خبره دارد که با توجه به ویژگی سازه‌های مجاور کارشناسی می‌شود. به این ترتیب برای رسیدن به چنین مهمی در گام اول اطلاعات دقیقی پیرامون تغییر شکل مجاز زمین نیاز است که لزوم انجام پایش‌های میدانی را نشان می‌دهد. به طراحی

گود بر اساس سطح عملکرد در فصل‌های بعدی بیشتر پرداخته خواهد شد لذا در ادامه به تعدادی مثال موردی که سایر کاربردهای پایش‌های میدانی را نشان می‌دهد اشاره می‌شود.

۳-۳-۱- مطالعه موردی ۱

گودبرداری به عمق ۱۳ متر در خاک رسی نرم تا متوسط در شیکاگو که با استفاده از دیوار شمعی سکانت به ضخامت ۹۰ سانتی‌متر به همراه یک ردیف مهار افقی و دو ردیف انکور^۱ مهار شده است توسط فینو و همکاران در سال ۲۰۰۲ مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. مشاهدات محلی شامل پایش جابجایی جانبی دیوار در ۵ نقطه، پایش نشست ساختمان مجاور در امتداد وجه خارجی دیوار، پایش نیروهای وارد بر سیستم مهاری و کنترل سطح خرابی در ساختمان مجاور انجام شد. عملیات اجرایی در این مطالعه شامل نصب دیوار، گودبرداری و پایدارسازی گود و تخریب تونل و نوسازی ایستگاه مترو در محدوده پروژه بود. در انتهای پایش، جابجایی جانبی ماکزیمم دیوار ۳۸ میلی‌متر بود که ۹ میلی‌متر آن هنگام نصب دیوار، ۱۶ میلی‌متر در حین گودبرداری و ۱۳ میلی‌متر دیگر در حین تخریب تونل و نوسازی ایستگاه مترو در اثر خزش خاک و کاهش سختی دیوار اتفاق افتاد. نشست اندازه‌گیری شده حدود ۴۰ میلی‌متر بود که ۱۰ میلی‌متر از آن در حین نصب دیوار، ۱۸ میلی‌متر در حین گودبرداری و نصب مهارها و ۱۲ میلی‌متر دیگر در حین تخریب تونل و بازسازی ایستگاه مترو در اثر خزش خاک و کاهش سختی دیوار به وقوع پیوست. مدلسازی عددی نشان داد، نتایج مشاهدات محلی و مقادیر محاسبه شده برای نشست در مجاورت گود تطابق خوبی با یکدیگر داشته و در نهایت این نتایج استفاده از ابزار زاویه سنج برای ارزیابی تغییر شکل سازه مجاور ناشی از گودبرداری در رس اشباع نرم را تایید می‌کند.

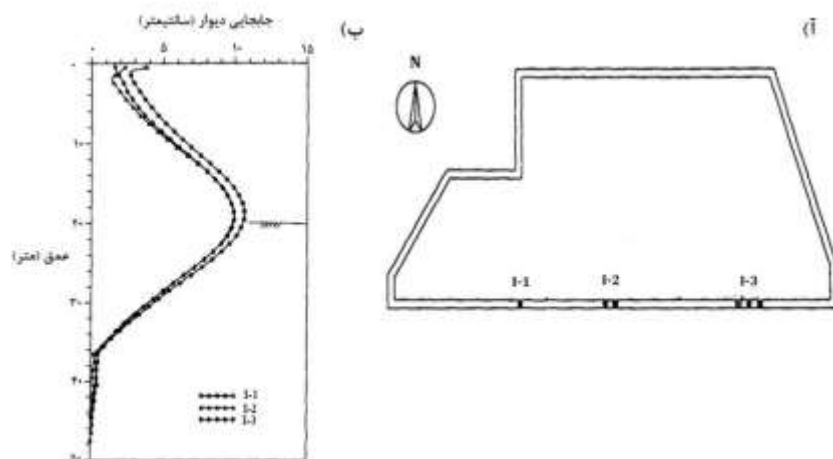
۳-۳-۲- مطالعه موردی ۲

گود مهار شده به روش ساخت از بالا به عمق ۱۹/۷ متر، توسط او و همکاران در سال ۱۹۹۸^۲ با انجام ابزارگذاری‌های وسیع و آزمایشهای صحرایی مختلف مورد پایش قرار گرفت [۱۵]. جابجایی افقی دیوار دیافراگمی در سه نقطه مختلف در امتداد یکی از دیواره‌های گود با حفر گمانه و کیسینگ گذاری و تعبیه زاویه سنج در فواصل زمانی مختلف رفتارنگاری شد. اطلاعات به دست آمده از زاویه‌سنج‌های به کارگرفته شده در بازه‌های زمانی مختلف با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه صورت گرفته بر روی سه زاویه‌سنج نشان داد که روند جابجایی‌ها در طول دیواره مشابه یکدیگر است (شکل ۳-۸). در نتیجه می‌توان چنین برداشت نمود که دیوار در این امتداد به صورت کرنش صفحه‌ای عمل می‌کند به این معنی که سختی المان دیوار در طول دیواره یکسان است و پدیده آرشینگ یا قوس زدگی اتفاق نمی‌افتد.

¹ Anchor

² Finno et al. (2002)

² Ou et al. (1998)



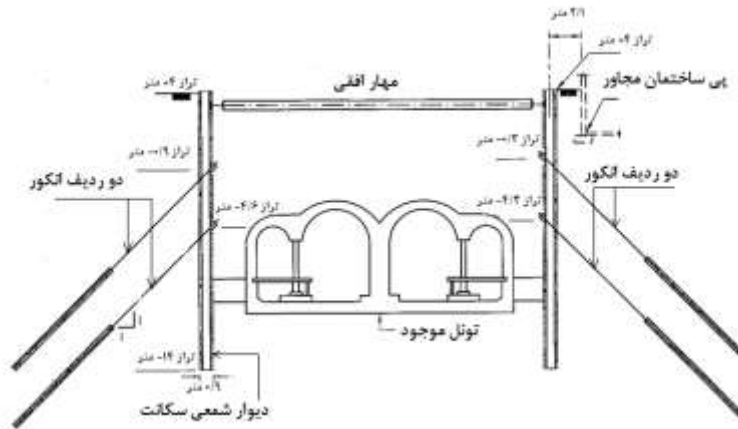
شکل ۳-۸. ا. موقعیت زاویه سنج‌های تعبیه شده در امتداد دیواره گود (ب) پروفیل تغییر شکل جانبی به دست آمده از سه زاویه سنج تعبیه شده در امتداد دیوار [۱۵]

۳-۳-۳- مطالعه موردی ۳

گودبرداری به عمق ۱۳ متر در شیکاگو در خاک رسی نرم تا متوسط که با استفاده از دیوار شمعی سکانت به ضخامت ۹۰ سانتی‌متر به همراه یک ردیف مهار افقی و دو ردیف انکور^۱ مهار شده است توسط فینو و کالولو در سال ۲۰۰۵ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳-۹) [۱۶]. در مطالعه ایشان، با انجام پایش‌های میدانی و تحلیل بازگشتی، شرایط مساله در دو جبهه مختلف از دیوار در فازهای مختلف مدلسازی شد. با پیشروی در عملیات گودبرداری و پایدارسازی گود، پارامترهای ژئوتکنیکی مدل شده با مقادیر واقعی به مرور کالیبره شده و در نتیجه مقادیر تغییر شکل پیش‌بینی شده توسط مدل با نتایج پایش همگرا تر شد. با وجود آنکه نتایج مطالعات عددی در هنگام استفاده از تخمین اولیه پارامترها، خیلی بزرگتر از مشاهدات میدانی صورت گرفته به دست آمد؛ اما هنگامی که پارامترهای مدل با مشاهدات مرحله اول بهینه شدند، مقادیر به دست آمده از مطالعات عددی تنها ۱۵٪ از مشاهدات میدانی بزرگتر بود. در واقع تحلیل بازگشتی اعمال شده در مرحله ۱، پارامترهای مدل را به نحوی کالیبره نمود که مدل به کار گرفته شده رفتار خاک را با دقت خوبی در حین ساخت قابل پیش‌بینی نمود. به عبارت دیگر همگرایی نسبتاً خوب نتایج در همان مرحله اول نشان داد که آنالیز بازگشتی انجام شده، پارامترهای مدل را به نحوی کالیبره کرده است که رفتار کلی خاک با دقت خوبی با استفاده از مطالعات عددی قابل برآورد شده است. نتایج آماری نشان داد که مقادیر بهینه سازی شده در مرحله اول بیش از ۹۹٪ در مقایسه با مقادیر اولیه پیش‌بینی شده، بهبود یافته و بعد از سه مرحله بهینه‌سازی نتایج مطالعات عددی دقیقاً با پایش‌های میدانی منطبق شد.

¹ Anchor

² Finno and Calvello (2005)



شکل ۳-۹. مقطع شماتیک از گود پایدارسازی شده به همراه موقعیت تونل و ساختمان مجاور گود [۱۴]

۳-۳-۴- مطالعه موردی ۴

در مطالعه ایکوتا و همکاران در سال ۱۹۹۴ با انجام پایش‌های میدانی، امکان حذف مهارهای افقی اضافی در گودبرداری به روش ساخت از بالا با استفاده از آنالیز بازگشتی مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۷]. در این پروژه استفاده از مهارهای افقی اضافی بین طبقات هم هزینه بر و هم زمان بر بود و از طرفی در طراحی اولیه استفاده از مهارهای افقی اضافی در دو تراز ضروری تشخیص داده شده بود. با رفتارنگاری گود در مراحل اولیه ساخت، لزوم استفاده از این مهارها مورد بازبینی قرار گرفت. نتایج پایش نشان داد که با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده برای تغییر شکل و آنالیز بازگشتی و بازطراحی صورت گرفته، تنش ایجاد شده در میلگردهای مسلح ساز دیوار دیافراگمی در برابر بارهای موجود تا آخرین مرحله حفاری حتی بدون اولین و دومین مهار، از مقادیر مجاز آن تجاوز نمی‌کند. بنابراین بر اساس مشاهدات صورت گرفته استفاده از دو ردیف مهار افقی غیرضروری تشخیص داده شد و طراحی‌ها مورد بازبینی قرار گرفت که با صرفه جویی در زمان و هزینه همراه بود. نهایتاً گودبرداری عمیق به عمق $18/3$ متر تنها با استفاده از دال دو طبقه زیرزمینی و بدون استفاده از مهار افقی اضافی با ایمنی کامل انجام پذیرفت.

۳-۳-۵- مطالعه موردی ۵

در گود پایدارسازی به روش ساخت از بالا ناقص، عدم انتقال بارهای جانبی در دهانه $7/5$ متری به نقطه پایدار مقابل و تنها اتکا به ستون‌های میانی باعث تغییر شکل در توده خاک و ایجاد نقاط پلاستیک پشت دهانه $7/5$ متری گردید که وقوع تغییر شکل‌های اضافی بیش از حد انتظار را در این مقطع در پی داشت (شکل ۳-۱۰). در عین حال استفاده از روش ساخت مشاهده‌ای با استفاده از دوربین توتال استیشن در خلال عملیات گودبرداری در این پروژه و اصلاح مراحل ساخت با استفاده از رفتارنگاری باعث شد تا از وقوع حوادث فجیع‌تر جلوگیری به عمل آید؛ به این ترتیب که تحلیل به موقع داده‌های به دست آمده از نقاط درون گود، تخمین

³ Ikuta et al. (1994)

روند تغییر شکل‌ها در مراحل بعدی گودبرداری و در نتیجه تمهیدات به موقعی که توسط پیمانکار به کار بسته شد، منجر به ایجاد تغییر در مراحل اجرایی و مقاوم‌سازی وجه جنوبی گود گردید که تغییر شکل پیش‌رونده در این وجه را متوقف نمود [۱۸].



شکل ۳-۱۰. دهانه ۷/۵ متری در ضلع جنوبی گود پروژه میدان پلیس قم، پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا ناقص [۱۸]

استفاده از مطالعات عددی در عملیات گودبرداری و کاربردهای آن

۴-۱- مقدمه

تغییر شکل‌های کوتاه مدت دیواره گود که مربوط به مراحل ساخت می‌باشد، با مدلسازی عددی قابل تخمین است اما در عمل گاهی خطاهای زیادی در مدل‌های عددی وجود دارد. برخی از خطاها در تعیین متغیرهای ورودی مدل‌های عددی به وجود می‌آید و برخی مربوط به انتخاب روش حل می‌باشد. مدلسازی و بدست آوردن تغییر شکل جانبی با استفاده از مدل عددی مستلزم کالیبره نمودن و صحت‌سنجی نتایج مطالعات عددی با داده‌های پایش بدست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی است. صحت‌سنجی مدل عددی تنها با استفاده از مطالعات میدانی ممکن می‌باشد، بنابراین فعالیت‌های میدانی باید با انتخاب ابزار مناسب، ابزارگذاری و پایش شود و نتایج آن در مدلسازی عددی مورد استفاده قرار گیرد.

توجه به این نکته ضروری است که مدل‌های عددی همواره تخمینی از واقعیت را به دست می‌دهد و به طور حتم دارای خطاهای اجتناب‌ناپذیری است که برخی از آن‌ها نرم‌افزاری است و برخی دیگر ناشی از انتخاب نامناسب شرایط مدلسازی و نوع تحلیل عددی است. با توجه به پیشرفت‌های قابل توجهی که در علوم مرتبط با نرم‌افزارهای عددی به وجود آمده است، کمتر خطایی متوجه آن است. در ارتباط با شرایط مدلسازی و نوع تحلیل عددی، کاربر باید تسلط کاملی نسبت به روش تحلیل، شرایط مدل، نوع تحلیل دوبعدی و یا سه‌بعدی، مدل رفتاری حاکم بر مدل، پارامترهای مورد نیاز در مدل‌های رفتاری، مقدار ورودی برای پارامترها و قضاوت مهندسی صحیح بر روی نتایج محاسبات داشته باشد.

به منظور همگرا شدن داده‌های به دست آمده از پایش با نتایج مطالعات عددی، مدل‌های عددی با استفاده از روش سعی و خطا کالیبره می‌شوند. پیشرفت‌های اخیر در حس‌گرها و مطالعات عددی، زنجیره اندازه‌گیری و پیش‌بینی تغییر شکل بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده را کامل می‌کند. همانطور که عنوان شد، دقت مطالعات عددی صورت گرفته تا حدود زیادی به تجربه کاربر پیرامون مدلسازی عددی مسائل مختلف، درک مدل‌های رفتاری مختلف خاک و محدودیت‌های هر یک از آن‌ها، تعیین پارامترهای هر مدل و قضاوت مهندسی بر روی نتایج محاسبات بستگی دارد.

استفاده از تحلیل بازگشتی برای کاهش اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده یک روش برای کالیبره نمودن مدل ساخته شده به منظور پیش‌بینی رفتارهای بعدی با درجه اطمینان بالا در همان مراحل ابتدایی می‌باشد. میزان موفقیت این روش به مدلسازی

اجزا محدود، دقت پایش صورت گرفته و صحت تحلیل بازگشتی بسنگی دارد. فایده اساسی تحلیل بازگشتی این است که پارامترهای استفاده شده در مدل عددی منجر به مقادیری خواهد شد که بیشترین مطابقت را با اندازه‌گیری‌های محلی خواهند داشت.

شناسایی پارامترهای مهم برای انجام تحلیل بازگشتی کار دشواری است که نیاز به تحلیل حساسیت دارد. در تحلیل حساسیت با متغیر قرار دادن یک پارامتر و ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها، میزان حساسیت مدل عددی برای مسئله مورد نظر به متغیر برآورد شده و به این ترتیب اهمیت نسبی پارامترها تعیین می‌شود. تعداد و نوع پارامترهای ورودی در تحلیل حساسیت بستگی به مدل رفتاری مورد استفاده برای خاک، شرایط تنش، مشاهدات میدانی و نوع مطالعات عددی دارد.

در مدلسازی عملیات گودبرداری، علاوه بر مدلسازی منطقی مراحل ساخت، فاکتورهای مهم دیگری نظیر ابعاد مدل در نظر گرفته شده و تنش‌های اولیه موجود، در پاسخ‌های محاسبه شده تاثیرگذار است. در بیشتر اوقات اثر نصب دیوار در مدل عددی مورد چشم‌پوشی قرار می‌گیرد با این وجود، اطلاعات آماری فراوانی نشان‌دهنده افزایش جابجایی‌ها در اثر نصب دیوار است. تاثیر مربوط به نصب دیوار در مدلسازی دوبعدی به صورت صفحه‌ای به علت در نظر نگرفتن اثر آرشینگ^۱ در پنل‌ها کمتر رخنمون می‌کند [۱۹]. نکته دیگر که در مدلسازی عددی عملیات گودبرداری حائز اهمیت است، نحوه مدل کردن مهاری‌ها و المان‌های سازه‌ای گود می‌باشد. معمولاً المان‌های سازه‌ای نگهدارنده در مدلسازی اجزا محدود در مدل صفحه‌ای، با مدلسازی سختی نگهدارنده‌ها و معادل سازی آن با در نظر گرفتن فاصله آن‌ها انجام می‌گیرد.

۴-۲- مدل‌های رفتاری

در تحلیل هر سازه به منظور بررسی تنش‌ها و تغییر شکل‌ها، ابتدا بایستی نوع بارهای وارده و رفتار صحیح مصالح و عناصر تشکیل دهنده را در برابر آن بارها شناخت و سپس با انتخاب مدل رفتاری مناسب به تحلیل آن پرداخت. در خاک در ترازهای تنش کم، دانه‌ها همانند فنر عمل کرده و رفتاری مشابه با رفتار کشسانی از خود نشان می‌دهند اما با بالا رفتن تراز تنش، دانه‌ها روی یکدیگر شروع به لغزش نموده و آرایش آن‌ها به هم می‌خورد که منجر به تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر خواهد شد. در واقع رفتار واقعی خاک نه به صورت الاستیک خطی و نه الاستوپلاستیک ایده‌آل است بلکه رفتار آن ترکیبی است و در کرنش‌های کوچک رفتاری سخت دارد که با افزایش کرنش، سختی آن کاهش می‌یابد [۱۹].

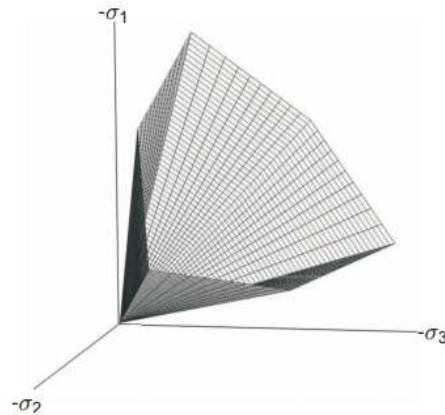
مدل‌های مختلفی برای تعیین سطح گسیختگی وجود دارند و پارامترهای موجود در مدل‌های رفتاری ویژگی‌های خاک را تبیین می‌کنند. مدل‌های رفتاری با توجه به توانایی مدل در پیش‌بینی روندها، نوع مصالح به کار گرفته شده در تحلیل، مدت زمان محاسبات، پارامترهای در دست برای ورود به نرم‌افزار و دقت نتایج حاصله انتخاب می‌شوند. تعیین وقوع پلاستیسیته در خاک در مدل‌های رفتاری با استفاده از تابع تسلیم به عنوان تابعی از تنش و کرنش تعریف می‌شود؛ در واقع معیار تسلیم مصالح در مدل‌های رفتاری با استفاده از تابع تسلیم معرفی می‌گردد. برای بررسی رفتار موادی با خاصیت سخت شوندگی نظیر خاک و بتن که مقاومت خود را از طریق اصطکاک بین ذرات به دست می‌آورند، معیار تسلیم موهر-کولومب^۲ و یا دراگر-پراگر^۳ مناسب می‌باشد [۲۰]. با رسیدن وضعیت تنش در خاک به معیار تسلیم، خاک گسیخته نشده، بلکه در این حالت تغییر شکل‌های خمیری یا پلاستیک آغاز می‌گردند.

^۱ Arching

^۲ Mohr-Coulomb

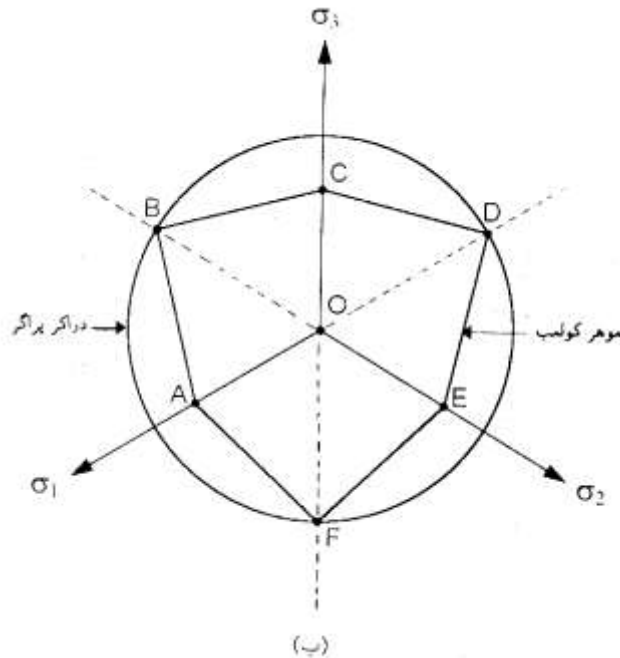
^۳Drucker Prager

در صورتیکه تغییر شکل‌های پلاستیک به وجود آمده در خاک ناشی از تنش‌های وارده به قطع تعدادی از پیوندها منجر شود، با باربرداری، جسم دیگر به حالت اولیه خود باز نمی‌گردد که به این حالت گسیختگی اطلاق می‌شود. شرایط تسلیم در مدل موهر-کولومب کامل از ۶ تابع تسلیم تشکیل شده است. چنانچه شرایط تسلیم برای همه توابع محقق گردد یک شش ضلعی فضای در فضای سه بعدی به وجود می‌آید که به کلاهک تسلیم موسوم است (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱. سطح تسلیم موهر-کولومب در فضای سه بعدی تنش‌های اصلی [۲۱]

در مدل دراگر-پراگر، شکل سطح تسلیم به صورت دایره کامل خواهد بود و بعد سوم تنش در سطح تسلیم تاثیری نخواهد داشت. در شکل ۴-۲، تابع تسلیم در مدل موهر-کولومب با مدل دراگر-پراگر مقایسه شده است. با کاهش بعد سوم تنش در مدل دراگر-پراگر، شکل سطح منحنی محاطی، سه گوش خواهد شد.



شکل ۴-۲. مقایسه تابع تسلیم در مدل موهر-کولومب و مدل دراگر-پراگر [۲۱]

۳-۴- مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار

روش‌های مختلفی برای حل مسائل مهندسی در نرم‌افزارهای عددی وجود دارد که در اینجا به شرحی مختصر از دو روش متداول آن اکتفا می‌شود: (۱) تحلیل مسائل ریاضی و مهندسی مبتنی بر روش المان محدود (۲) تحلیل مسائل ریاضی و مهندسی مبتنی بر روش تفاضل محدود. البته روش‌های عددی دیگری نیز وجود دارند که در اینجا به آن‌ها اشاره نشده است.

در روش المان محدود، محیط مساله به صورت پیوسته مدل می‌شود و به تعداد محدودی المان تقسیم می‌گردد که در نقاط گرهی به هم متصل هستند. در واقع در این روش حل، مسائل بزرگ به تعداد محدودی از بخش‌های کوچکتر و ساده‌تری تقسیم می‌شود که به هر کدام از آن‌ها یک المان می‌گویند. تنش، کرنش و تغییر شکل ایجاد شده در یک المان بر رفتار المان‌های مجاورش تاثیر دارد و به این ترتیب، معادلات تنش بین هر گره با ایجاد و متلاشی سازی ماتریس سختی در سراسر شبکه اجزا محدود تحلیل می‌شود. در روش تفاضل محدود نیز مانند روش المان محدود، زمین به صورت پیوسته و با تقسیم به تعدادی المان که در نقاط گرهی به هم متصل هستند، مدل می‌گردد؛ تفاوت این روش با روش المان محدود در این است که تنش‌های وارده بر هر گره در گام‌های زمانی به اندازه کافی کوچک به گره‌های مجاور منتقل می‌گردد و دیگر نیازی به شکل‌گیری هیچ ماتریسی نمی‌باشد. با این رویکرد روش تفاضل محدود برای محاسبات دینامیکی بسیار کارآمد بوده اما اگر این روش برای مسائل استاتیکی به کار رود ممکن است زمان محاسبات بیشتری نیاز باشد.

نوع تحلیل در نرم‌افزارهای عددی به صورت دو بعدی و یا سه بعدی بر اساس عوامل مختلف از جمله موضوع مساله و نوع فضای مورد نیاز برای مدلسازی تعیین می‌گردد. همانطور که عنوان شد در مدل‌های عددی، محیط پیوسته موجود در مساله با استفاده از مش‌بندی به تعداد محدودی از اجزای کوچک تقسیم می‌گردد. جزیهای ایجاد شده نه باید آنقدر بزرگ باشند که نتایج به دست آمده با دقت کمی همراه باشد و نه آنقدر ریز که زمان محاسبات طولانی گردد. توصیه می‌شود که در فواصل نزدیک به المان‌های حساس که توزیع تنش و تغییر شکل در اطراف آن‌ها در حل مساله اهمیت دارد، از المان‌های ریزتر و در فواصل دور از المان‌های درشت‌تر استفاده گردد. در روی اضلاع و یا داخل هر المان، نقاطی به عنوان گره انتخاب می‌شوند؛ تابع تغییر شکل، تغییر مکان هر نقطه از المان را به تغییر مکان گره‌ها ربط می‌دهد. هر چه تعداد گره‌ها بالاتر باشد، دقت جواب‌های به دست آمده و زمان تحلیل نیز بیشتر خواهد بود [۲۱].

مدل مصالح در نرم‌افزارهای عددی با مجموعه‌ای از روابط ریاضی که ارتباط بین تنش و کرنش را بیان می‌کند، تعریف می‌شود. در این روابط مقادیر بسیار کوچک از تنش موثر به مقادیر بسیار کوچک از کرنش ارتباط داده می‌شود. تمامی مدل‌های رفتاری موجود در نرم‌افزار بر اساس روابط بین تنش موثر- کرنش بیان شده‌اند.

۴-۴- کاربرد مدل‌های رفتاری مختلف در مدلسازی عددی

مدل‌های رفتاری مختلف دارای کاربردهای متفاوت هستند که وقتی می‌توان از آن‌ها بیشترین استفاده را کرد که در جای مناسب خود مورد استفاده قرار گیرند. معمولاً استفاده از مدل موهر- کولومب (MC) در نرم‌افزار در مسائل گودبرداری منجر به ایجاد بالازدگی غیرواقعی در کف گود می‌شود که دلیل آن عدم وجود پارامترهای سختی متفاوت برای بارگذاری و باربرداری است که در نتیجه با در نظر گرفتن مدول باربرداری برابر با مدول بارگذاری تغییر شکل‌هایی بیش از حد انتظار در کف گود ایجاد می‌نماید [۲۲]. با توجه به توضیحات، چنانچه بنا بر استفاده از مدول سختی ثابتی برای نشان دادن رفتار خاک باشد، می‌بایست از سختی وابسته به تراز تنش

استفاده کرد که در مدل‌های رفتاری پیشرفته میسر می‌باشد. از طرفی دیگر، در مدل‌های رفتاری پیشرفته زمان محاسبات با توجه به وجود پارامترهای سختی بیشتر، طولانی‌تر است.

در بسیاری از مسائل مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک، داده‌های خوبی از پارامترهای مقاومتی وجود دارد اما اطلاعات خیلی اندکی از پارامترهای سختی در دسترس است. در چنین شرایطی استفاده از مدل‌های پیچیده تنش- کرنش برای محاسبه مقادیر ژئوتکنیکی به هیچ وجه کارساز نیست و در عوض استفاده از مدل با سختی دوگانه توصیه می‌گردد [۲۲]. معروف‌ترین مدل‌ها با سختی دوگانه مدل کم کلی و مدل هایپروالاستیک می‌باشد که منجر به خلق مدل خاک سخت شونده می‌شود. با وجود اینکه از مدل خاک سخت شونده (HS) به عنوان یک مدل پیشرفته نام برده می‌شود اما این مدل رفتارهای نرم شونده‌گی خاک ناشی از تاثیرات اتساع را در نظر نمی‌گیرد و در اعمال بارگذاری سیکلیک و لرزه‌ای ناتوان است؛ همچنین این مدل افزایش سختی خاک در کرنش‌های کوچک را در نظر نمی‌گیرد. خاک در کرنش‌های خیلی کوچک، سختی زیادی دارد و با افزایش کرنش میزان سختی آن کاهش می‌یابد استفاده از مدل سخت‌شونده، کاهش زیاد سختی در برابر کرنش‌های کوچک را در نظر نمی‌گیرد و این در حالیست که پروفیل نشست در فواصل مختلف از دیوار تنها در صورتی به خوبی در مدلسازی عددی با مقادیر مشاهده شده تطبیق پیدا می‌کند که کرنش‌های غیرخطی کوچک خاک در مدل با دقت بالایی لحاظ شود [۲].

برای برطرف کردن مشکلات ذکر شده در مدل خاک سخت شونده، مدل خاک سخت شونده برای کرنش‌های کوچک (HS_{small}) ارائه شد که افزایش سختی خاک در کرنش‌های کوچک را در نظر می‌گیرد. این مدل در مقایسه با مدل رفتاری خاک سخت شونده جایگاهی قابل اعتمادتری ارائه می‌دهد. بنابراین این مدل رفتاری تاریخچه تنش خاک و مدول سختی وابسته به کرنش را شامل می‌شود و تا حدودی برای بارگذاری سیکلیک مناسب است. چنانچه از این مدل در مدلسازی دینامیکی استفاده شود، کم شدن مقاومت مصالح در اثر تنش‌های سیکلیک در نظر گرفته می‌شود. در مسائل گودبرداری، در صورت استفاده از مدل‌های رفتاری که دارای محدوده الاستیک خطی هستند (مانند مدل موهر- کولومب) کاهش سختی با کرنش‌های الاستیک در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین چنانچه مسیر تنش در محدوده الاستیک قرار گیرد ممکن است که سختی خاک پشت دیوار بیش از حد اندازه تخمین زده شده و در نتیجه کرنش‌های کوچکتری از واقعیت ایجاد گردد؛ در این صورت نشست زمین مجاور گود خیلی کمتر از مشاهدات میدانی تخمین زده می‌شود. در مدل خاک سخت شونده، سختی خاک هنگام بارگذاری- باربرداری به صورت الاستیک فرض شده است اما در واقعیت محدوده کرنش الاستیک برای مصالح خاکی بسیار کوچک است. مصالح خاکی در کرنش‌های کوچک سختی بالاتری از خود نشان می‌دهند که این مساله در مدل‌های رفتاری موهر- کولومب و خاک سخت شونده نادیده گرفته می‌شود [۲۲]. تفاوت مدل خاک سخت شونده استاندارد با مدل خاک سخت شونده برای کرنش‌های کوچک، در این است که مدل خاک سخت شونده استاندارد سختی خاک در کرنش‌های خیلی کوچک را در نظر نمی‌گیرد و در نتیجه تغییر شکل‌های نسبتاً محافظه کارانه تری را در مقایسه با مدل خاک سخت شونده با سختی در کرنش‌های کوچک ارائه می‌دهد. از سویی دیگر از محدودیت‌های این مدل می‌توان به عدم در نظر گرفتن نرم شونده‌گی تدریجی خاک در بارگذاری سیکلیک نام برد. بنابراین مدل HS_{small} برای مسائلی که نرم شونده‌گی در اثر بارگذاری سیکلیک نقشی اساسی ایفا می‌کند، مناسب نیست. بنابراین مسائل مرتبط با روانگرایی و کرنش حجمی تجمعی غیر قابل بازگشت در اثر بارگذاری سیکلیک در این مدل رفتاری کاربرد ندارد. زمان مدلسازی در این مدل رفتاری در قیاس با مدل خاک سخت شونده طولانی‌تر است.

جداول ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ که کاربرد مدل‌های رفتاری را به ترتیب برای انواع مصالح، در مسائل مختلف ژئوتکنیکی و تحت بارگذاری‌های متفاوت نشان می‌دهد، توسط نرم‌افزار پلکسیز به منظور راهنمایی کاربر در انتخاب مدل رفتاری مناسب ارائه شده است.

جدول ۴-۱. کاربرد مدل‌های رفتاری مختلف برای انواع مصالح در پلکسیز [۲۱]

مدل	بتن	سنگ	شن	ماسه	لای	رس پیش تحکیم یافته	رس عادی تحکیم یافته	آلی
الاستیک خطی	C	C	-	-	-	-	-	-
موهر- کولومب	A	B	C	C	C	C	C	C
خاک سخت شونده (HS)	-	-	B	B	B	B	B	-
HS _{Small}	-	-	A	A	A	A	B	-
خاک نرم خزشی	-	-	-	-	-	-	A	A
خاک نرم	-	-	-	-	-	-	A	A
کم کلی اصلاح شده	-	-	-	-	-	-	C	C

A: بهترین مدل رفتاری برای مدلسازی مصالح

B: مدل رفتاری منطقی و مناسبی برای مدلسازی مصالح

C: مدل رفتاری مناسب صرفاً برای ارزیابی اولیه

جدول ۴-۲. کاربرد مدل‌های رفتاری مختلف در مسائل ژئوتکنیکی در پلکسیز [۲۱]

مدل	فونداسیون	گودبرداری	تونل	خاکریز	شیروانی	سد	دریایی	سایر
الاستیک خطی	-	-	C	-	-	-	-	-
موهر- کولومب	C	C	C	C	C	C	C	C
خاک سخت شونده (HS)	B	B	B	B	B	B	B	B
HS _{Small}	A	A	A	A	A	A	A	A
خاک نرم خزشی	B	B	B	A	A	B	B	B
خاک نرم	B	B	B	A	A	B	B	B
کم کلی اصلاح شده	C	C	C	C	C	C	C	C

A: بهترین مدل رفتاری برای مدلسازی مصالح

B: مدل رفتاری منطقی و مناسبی برای مدلسازی مصالح

C: مدل رفتاری مناسب صرفاً برای ارزیابی اولیه

جدول ۴-۳. کاربرد مدل‌های رفتاری مختلف تحت بارگذاری‌های متفاوت در پلکسیز [۲۱]

مدل	تراکم اولیه	باربرداری- بارگذاری مجدد	برش ویا بارگذاری انحرافی	بارگذاری زهکشی نشده	بارگذاری سیکلیک	فشار به همراه برش	کشش به همراه برش
الاستیک خطی	C	C	-	-	-	-	-
موهر- کولومب	C	B	C	C	-	C	C
خاک سخت شونده (HS)	A	B	B	B	C	A	A
HS _{Small}	A	A	A	B	B	A	A
خاک نرم خزشی	A	B	B	B	C	A	B
خاک نرم	A	B	B	B	C	A	B
کم کلی اصلاح شده	C	C	C	C	C	C	C

A: بهترین مدل رفتاری برای مدلسازی مصالح

B: مدل رفتاری منطقی و مناسبی برای مدلسازی مصالح

C: مدل رفتاری مناسب صرفاً برای ارزیابی اولیه

طراحی سازه نگهبان بر اساس سطح عملکرد

معمولا طراحی دیوار حائل در آیین‌نامه‌ها بر اساس نیرو بیان شده است که برای طراحی در محدوده الاستیک^۱ مناسب است، اما پذیرش خسارت در سازه‌های مجاور گود بر اساس معیار جابجایی قابل تعریف است. روش‌های مبتنی بر نیرو اطلاعاتی را در زمینه تغییر مکان‌ها به طراح ارائه نخواهند داد. وقوع تغییر شکل‌های بزرگ برای برخی از دیوارها ممکن است قابل قبول باشد ولی برخی دیگر ممکن است حتی در برابر تغییر شکل‌های کوچک کاربری خود را از دست بدهند. بنابراین تحلیل‌هایی که تغییر شکل دیوار را در طراحی در نظر می‌گیرند، شاخص مفیدتری از عملکرد دیوار ارائه می‌دهند [۲۴]. اخیرا طراحی بر اساس سطح عملکرد^۲ در آیین‌نامه‌های معتبر جهانی مانند آیین‌نامه طراحی سازه‌های بندری ژاپن و آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای برای سازه‌های بلند در ژاپن جایگزین روش‌های مبتنی بر تنش شده است. بدین ترتیب استفاده از این روش در طراحی پایدارسازی گود به کاربر اجازه می‌دهد که با توجه به تغییر شکل مطلوب اقدام به طراحی عناصر پایدارکننده نماید. بنابراین میزان سختی سیستم بر اساس تغییر شکل مورد نظر قابل برآورد است. در طراحی سیستم مهاری گودهای شهری با به دست آوردن تغییر شکل جانبی از مدل عددی و ایجاد ارتباط بین مقادیر به دست آمده با نشست زمین مجاور گود، امکان طراحی سازه نگهبان بر اساس کنترل تغییر شکل زمین مجاور فراهم می‌شود. برای این منظور پس از کالیبره نمودن مدل عددی و با انجام مطالعه پارامتری، تغییر شکل‌های ماکزیمم متناظر با شرایط ژئوتکنیکی و سختی سازه نگهدارنده گود به دست می‌آید که بستر را برای طراحی سازه نگهبان بر اساس سطح عملکرد، مهیا می‌کند.

با توجه به هم‌جواری پروژه‌های گودبرداری شهری با سازه‌ها و تاسیسات شهری، گاه‌ها وقوع تغییر شکل‌های ناچیز هم منجر به ناکارآمدی سیستم مهاری خواهد شد. بنابراین طراحی گود تنها مبتنی بر نیرو و بدون توجه به تغییر مکان شاخص مناسبی برای پایدارسازی گود در محیط‌های شهری ارائه نمی‌دهد. تئوری طراحی بر اساس سطح عملکرد از سال ۱۹۹۰ و با مطالعه کلاو و اوروک مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۷]. این تئوری به مرور توسط محققین مختلف توسعه پیدا کرد [۴، ۸، ۲۵ و ۲۶]. در همین راستا و در سال ۲۰۱۰، برایسون و زاپاتا پارامتر جدیدی را موسوم به پارامتر سختی نسبی برای تعریف سختی سیستم مهاری ارائه نمودند که سختی و مقاومت خاک را نیز در تعیین سختی سیستم مهاری دخیل می‌نمود [۲۷]. پارامتر سختی نسبی که برای تعیین

^۱ Elastic

^۲ Performance Based Design

^۳ Bryson and Zapata

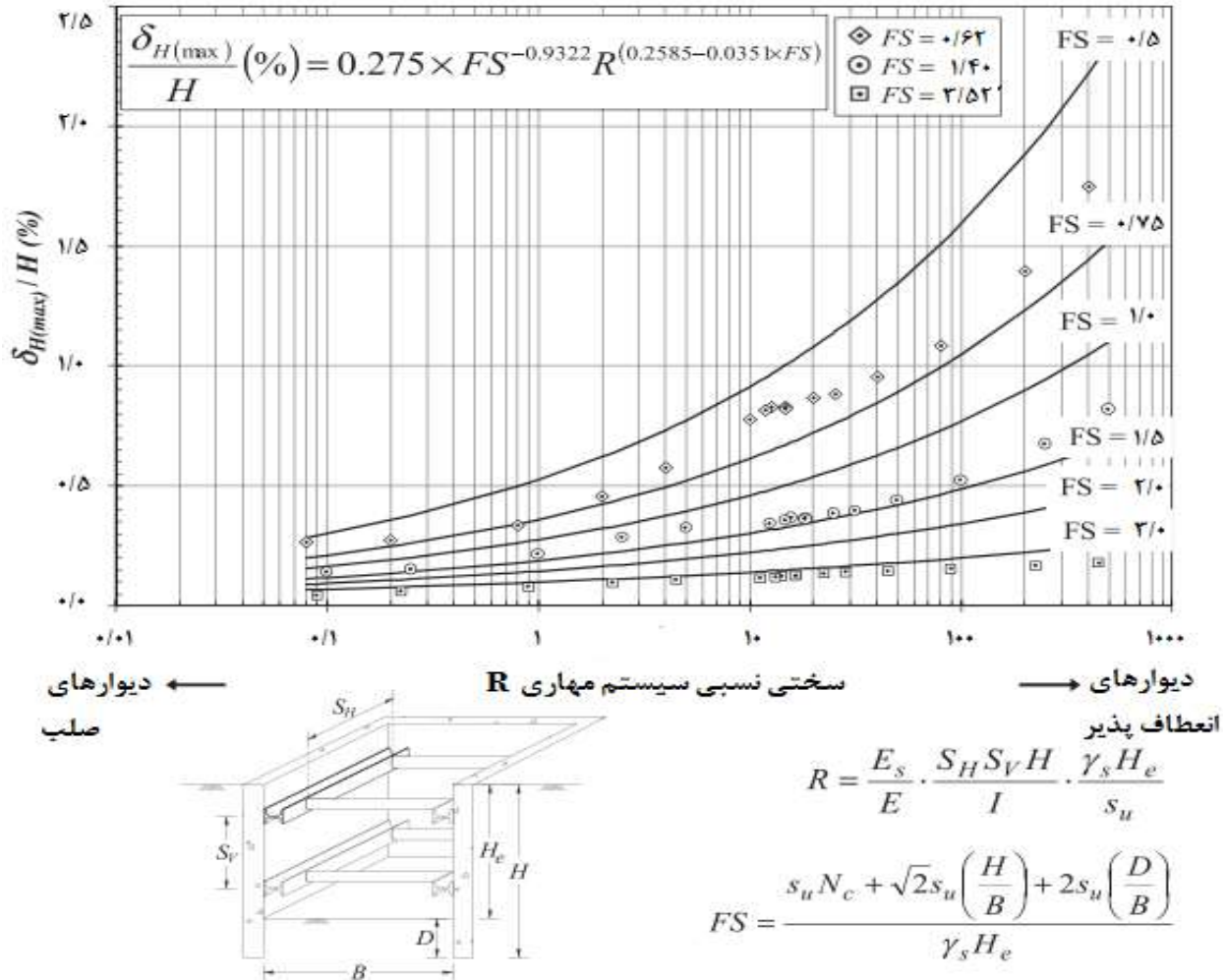
سختی نسبی سیستم مهاری در حفاری گود با استفاده از مطالعات عددی سه بعدی و مطالعات پارامتری شکل گرفت مطابق با رابطه ۵-۱ تعریف می‌شود:

$$R = \frac{E_s}{E} \cdot \frac{S_H S_V H}{I} \cdot \frac{\gamma_s H_e}{S_u} \quad \text{رابطه ۵-۱}$$

در این رابطه E_s مدول الاستیسته خاک، E مدول الاستیسته دیوار، S_H و S_V به ترتیب فاصله افقی و قائم مهاری‌ها، H ارتفاع دیوار، H_e ارتفاع گود، γ_s میانگین وزن مخصوص خاک و S_u مقاومت برشی زهکشی نشده خاک در کف گود است. مقادیر کوچک R نشان‌دهنده دیوارهای سخت مانند دیوارهای دیافراگمی است و مقادیر بزرگ آن بیانگر دیوارهای انعطاف پذیر مانند ورق‌های فولادی است. با بهره‌گیری از پارامترهای سختی نسبی سیستم مهاری و ضریب اطمینان در برابر بالآمدگی کف گود (این ضریب مختص خاک رسی است و بر اساس مقاومت برشی زهکشی نشده خاک تعریف می‌شود) ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیواره گود قابل برآورد است. گراف‌های شکل ۵-۱ ماکزیمم تغییر شکل جانبی ثبت شده در انتهای حفاری را در برابر سختی نسبی سیستم مهاری برای ضریب اطمینان در برابر بالا آمدگی در خاکهای رسی مختلف نشان می‌دهد. مطابق با گراف‌های ترسیم شده در این شکل هر چه ضریب اطمینان در برابر بالآمدگی کف گود و سختی سیستم مهاری کمتر باشد، تغییر شکل‌های بزرگتری برای دیواره گود قابل انتظار است. این گراف‌ها در قالب رابطه ۵-۲ تعریف می‌شوند.

$$\frac{\delta_{H(\max)}}{H} \% = 0.275 \times FS^{-0.9322} R^{(0.2585 - 0.0351 \times FS)} \quad \text{رابطه ۵-۲}$$

شکل ۵-۱ به طراح اجازه می‌دهد، ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار را با توجه به هندسه گود پیش‌بینی نماید. بعد از پیش‌بینی ماکزیمم تغییر شکل جانبی می‌توان از آن برای تخمین نشست زمین مجاور گود نیز استفاده نمود. از سویی دیگر، بیشترین مقدار تغییر شکل جانبی دیوار با توجه به سطح خرابی قابل قبول در سازه‌های مجاور و نشست مجاز زمین مجاور گود و با بهره‌گیری از رابطه بین ماکزیمم نشست زمین مجاور با ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیواره گود قابل برآورد است. با برآورد ماکزیمم تغییر شکل جانبی مجاز دیوار، این امکان برای طراح فراهم می‌شود که با مراجعه به شکل ۵-۱ سختی مورد نیاز سیستم مهاری را تعیین نماید. بنابراین امکان طراحی سیستم مهاری بر اساس تغییر شکل جانبی مجاز با استفاده از این گراف‌ها فراهم می‌شود. به این ترتیب هر چه ماکزیمم تغییر شکل جانبی مجاز دیواره برای یک گود کمتر باشد، سختی بیشتری برای سیستم مهاری مورد نیاز است.



شکل ۵-۱. نمودار تغییر شکل جانبی بر اساس سختی نسبی سیستم مهاری و ضریب اطمینان در برابر بالآمدگی کف گود [۲۸]

گاه‌ها افزایش سختی سیستم مهاری به نقطه‌ای می‌رسد که دیگر افزایش در پارامترهای سختی سیستم چندان موثر نخواهد بود؛ در چنین حالتی چنانچه مقادیر جابجایی از حد مجاز فراتر رود، ناگزیر باید عمق گودبرداری محدود شود. بر اساس مطالب ارائه شده، مراحل طراحی پایدارسازی گود بر اساس سطح عملکرد به شرح زیر است:

- ۱) تعیین نوع شرایط ساختمانی
- ۲) تعیین سطح خرابی قابل قبول برای سازه‌های مجاور گود و نشست مجاز زمین مجاور با انجام قضاوت مهندسی
- ۳) محاسبه ماکزیمم مقدار قابل قبول برای تغییر شکل جانبی دیوار با استفاده از روابط تجربی
- ۴) برآورد سختی مورد نیاز سیستم مهاری با توجه به نوع ساختگاه، ماکزیمم مقدار قابل قبول برای تغییر شکل جانبی و عمق گود مورد نظر
- ۵) تخمین پارامترهای سازه‌ای به نحوی که سختی مورد نیاز سیستم مهاری به دست آمده از مرحله قبل ارضا شود
- ۶) کنترل پارامترهای سازه‌ای بر اساس روابط تعادل حدی و اطمینان از کفایت عناصر سازه‌ای در برابر شکست سازه‌ای

لازم به یادآوری است که نشست مجاز برای زمین مجاور گود با علم به کاربری و نوع سازه مجاور توسط کارشناسان تعیین می‌گردد. سپس بر اساس ماکزیمم تغییر شکل مجاز برای دیواره گود و با توجه به شرایط ساختمانی، سختی مورد نیاز برای سیستم مهاریه گود تعیین می‌شود. همچنین از سوی دیگر در این روش طراح می‌تواند بر اساس سیستم مهاریه موجود، ماکزیمم تغییر شکل جانبی گود و در نتیجه ماکزیمم نشست زمین مجاور گود را پیش‌بینی نماید. روش طراحی ارائه شده برای طراحی سیستم مهاریه جانبی در محیط شهری مناسب است؛ چرا که شرایط محدود کننده در این طراحی بر اساس ماکزیمم نشست مجاز زمین مجاور گود تنظیم شده است.

با توجه به مطالب ارائه شده و اهمیت طراحی بر اساس سطح عملکرد لازم است این روش، با انجام مطالعات دقیق در شرایط ژئوتکنیکی هر منطقه، بومی سازی شود. بر این اساس تلاش شده است که روابط مربوط به نحوه طراحی پایدارسازی گودها بر اساس سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم با چنین رویکردی بومی سازی شود که در ادامه به آن پرداخته شده است. لازم به ذکر است که این روش، با شناسایی و در دست داشتن شرایط ژئوتکنیکی مناطق مختلف قابل تعمیم به سایر شهرهایی که ایمنی سازه‌های مجاور گود در آن‌ها اهمیت دارد، می‌باشد. حصول چنین مهمی نیازمند ایجاد کارگروه‌های تخصصی در شهرهای مختلف و تخصیص بودجه برای به ثمر نشستن روش طراحی گود بر اساس سطح عملکرد در این شهرها است.

شرایط ساختگاهی شهر قم

۱-۶- زمین شناسی استان قم

استان قم با وسعت ۱۱۲۳۸ کیلومتر مربع در کریدور مرکزی ایران و در ۱۲۵ کیلومتری جنوب تهران بین مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی نسبت به نصف النهار گرینویچ^۱ و ۳۴ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا واقع شده است که این مقدار ۷٪ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود. رشته کوه‌های جنوب باختری و بلندی‌های جنوب خاوری در ناحیه قم توسط دشتی گسترده که مسیر رودخانه‌های قمرود و قره‌چای است، از هم جدا می‌شوند. استان قم از طرف شمال به استان تهران، از شرق به استان سمنان، از جنوب به استان اصفهان و از طرف جنوب غربی تا شمال غربی به استان مرکزی محدود می‌باشد. ارتفاع مرکز شهرستان از سطح دریا ۹۲۸ متر و ارتفاع بلندترین نقطه استان، در مناطق کوهستانی، ۳۳۳۰ متر ارتفاع و پست‌ترین نقطه آن در حاشیه دریاچه نمک قم حدود ۷۰۰ متر است. موقعیت استان قم بر روی نقشه جغرافیا ایران در شکل ۱-۶ نمایش داده شده است [۲۹].

از آنجاییکه استان قم نزدیک به منطقه بیابانی مرکز ایران است، آب و هوای آن در طبقه بندی اقلیمی کشور در زمره آب و هوای نیمه بیابانی (جز اقلیم کویری و خشک) محسوب می‌شود. قم جز استان‌های با خطر زیاد در زمینه زلزله محسوب می‌شود و پیشینه لرزه خیزی در محدوده استان قم بیانگر فعالیت بالای گسل‌های آن می‌باشد. عمده گسل‌ها در استان قم از نوع معکوس و لغزنده است که در شرایط فعال هستند. گسل‌های مهم استان قم، گسل‌های خضر، قیزقلعه و گسل‌های فرعی می‌باشند [۲۹].

^۱ Greenwich, London, UK



شکل ۶-۱. موقعیت جغرافیا استان قم بر روی نقشه ایران

از منظر زمین‌شناسی، استان قم بخشی از قلمروی ساختاری ایران مرکزی است که مورفولوژی^۱ حاکم بر آن شامل مجموعه‌ای از رشته کوه‌ها و دشت‌های نیمه موازی با روند شمال باختری- جنوب خاوری است. قدیمی‌ترین سنگ‌های استان قم متعلق به اوایل دوران سوم است. زمین‌های استان قم به دو دوره ترشیاری^۲ و کواترنری^۳ تعلق دارند. زمین‌های مربوط به کواترنری به صورت‌های مخروط افکنه، پادگانه آبرفتی و پهنه‌های نسبتاً هموار بوده و از رسوبات با دانه‌بندی‌های مختلف تشکیل شده‌اند. مخروط افکنه‌ها و دشت‌ها اغلب محل تمرکز اکثر روستاها و شهرهای استان می‌باشد. زمین‌های ترشیاری نیز به صورت مناطق ناهموار و کوهستانی در نقاط مختلف استان به ویژه در جنوب غرب آن گسترده شده است [۲۹].

ناهمواری‌های استان قم شامل نواحی کوهستانی، نواحی کوهپایه‌ای و دشتهاست. بیشتر مساحت استان قم را دشت‌ها تشکیل می‌دهند؛ مانند دشت‌های قم، جعفرآباد، خلجستان، کهک، فنات، قمرد، سلفچگان و مسیله. دشت قم که محل استقرار شهر قم است، از قطب‌های مهم صنعتی و کشاورزی استان محسوب می‌شود. جنس خاک در این نواحی از رسوبات آبرفتی ریزدانه و عمدتاً گچ، آهک و نمک است. وجود تشکیلات گچی و نمکی باعث شور شدن آب‌های ناحیه شده است به طوری‌که هر چه از نواحی کوهستان

^۱ Morphology

^۲ Tertiary

^۳ Quaternary

جنوب و غرب به طرف دریاچه نمک و دشت مسیله حرکت کنیم، از کیفیت آب و خاک کاسته می‌شود. نواحی کوهستانی با ارتفاع بالاتر از ۱۵۰۰ متر از سطح دریا در بخش جنوب، جنوب غربی و غرب استان قرار دارند. در جنوب استان، ارتفاعات اردهال قرار دارد که بلندترین کوه استان در این ناحیه واقع است و در غرب، ارتفاعات تفرش واقع شده است. نواحی کوهپایه‌ای نیز بیشتر در پای ارتفاعات اردهال و تفرش قرار دارند و از رسوبات ریز و درشت و به شکل مخروط افکنه‌های بزرگ و کوچک ساخته شده‌اند [۲۹].

استان قم در زون ایران مرکزی که در آن سنگ‌های رسوبی، مارنی، آهکی و برونزد وجود دارد، قرار گرفته است که به آن سازند قم اطلاق می‌شود که نام آن از شهر قم واقع در ایران مرکزی گرفته شده است. سازند قم به مجموع رسوبات دریایی حوضه قم گفته می‌شود که همان رسوبات کم عمق آهک و مارن به حساب می‌آید و به صورت قابل ملاحظه‌ای از سازند قرمز تحتانی و فوقانی متمایز است. سازند قم را می‌توان به صورت تناوبی از مارن و آهک به همراه درون لایه‌های مارن ژیبس‌دار و ژیبس در نظر گرفت که با توجه به نمونه‌های سنگی از مناطق خورآباد، درچاه، کمرکوه، دوبردار و نرداکی در زمان الیگوسن^۴ میانی و پسین تا میوسن^۵ پیشین، با پیشروی دریا به سمت شمال غرب و به صورت غیر همزمان تشکیل شده است. در این سازند مارن‌هایی به رنگ قرمز، سبز، سبز مایل به کرم، با دانه‌هایی به ابعاد سیلت تا ماسه و رگه‌هایی از گچ و نمک دیده می‌شود و در ادامه دارای تناوبی از شیل‌های سیلتی قرمز و سبز رنگ، مارن‌های ژیبس‌دار، ماسه سنگ‌های قرمز ژیبس‌دار به همراه حفرات پر شده از کلسیت و کلریت و مواد آذر آواری می‌باشد. حرکت تکتونیکی^۱ آذر این سازند، باعث نامتعادل شدن حوضچه‌های رسوبی دریایی و ایجاد میان‌لایه‌های کولابی^۲ شده است. در میوسن پیشین سنگ آتشفشانی بازیک^۳ دیده می‌شود. ضخامت و درصد آهک و مارن متغیر می‌باشد و در نیمه جنوبی، دارای بیشترین گسترش است [۲۹].

در بخش‌های مرکزی شهر قم در سطح زمین، کفه‌های رسی و سیلتی گسترده‌ای به رنگ کرم مایل به سفید مشاهده می‌شود. در بخش جنوب شرقی شهر قم شامل شهرک زین‌الدین و ایثار، مارن قرمز، شیل، ماسه سنگ گچ‌دار قرمز تیره و سنگ گچ دیده می‌شود. لایه‌های ضخیم از مارن و کنگلومرا در نیمه شمالی شهر و در زیر کفه رسی مشاهده می‌گردد. در جنوب شهر قم و در حاشیه شهرک پردیسان، ساختار کنگلومرا با قطعاتی از آهک و مارن دیده می‌شود. در بخش‌های جنوبی، در منطقه سالاریه و صفاشهر مارن‌های سبز خاکستری با میان لایه‌هایی از آهک رسی و به طور محلی گچ وجود دارد. در حاشیه رودخانه قمرود نیز عمدتاً رسوبات و تهنشست‌های رودخانه‌ای عهد حاضر مشاهده می‌گردد که بر روی کفه‌های رسی ایجاد شده‌اند. مارن‌های سبز رنگ با عدسی‌هایی از گچ در مناطق کوه خضر، شاه جمال و کوه سفید همراه با میان لایه‌هایی از سنگ آهک رسی نازک تا متوسط پدید آمده است [۲۹] و [۳۰]. در شمال باختر و در مسیر جاده جعفریه، رسوبات به صورت ذرات به ابعاد سیلت و رس تا قلوه‌هایی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر، دیده می‌شود. دانه‌های درشت، گردگوشه و دارای جنسی متنوع از سنگ‌های رسوبی تا سنگ‌های آذرین و دگرگونی می‌باشند. با پیشروی از شمال باختر به سمت مرکز شهر و جمکران، رسوبات درشت به مرور کم می‌شود و مصالح ریزدانه غالب می‌گردد؛ در محدوده جمکران جنس رسوبات غالباً سیلت و رس می‌باشد. با توجه به شیب طبیعی زمین به سمت جنوب خاور دشت قم استدلال می‌شود که در واقع سیلاب‌های رودخانه قم به سمت جنوب خاور تا فواصل دور از رودخانه ادامه یافته‌اند و سبب رسوب گذاری ضخیم

^۴ Oligocene

^۵ Miocene

^۱ Tectonic

^۲ Lagoon

^۳ Basic

رس در نواحی جنوب خاوری شده‌اند [۳۱]. به طور کلی جهت جریان آب‌های زیرزمینی از شمال غرب به سمت جنوب شرق می‌باشد و سطح آب زیرزمینی در شهر به طور متوسط حدود ۳۰ تا ۴۰ متر از سطح زمین می‌باشد [۳۲].

۶-۲- مطالعات ساختگاهی شهر قم

بر اساس مطالعات ژئوتکنیک و زمین‌شناختی خط A مسیر تونل مترو قم که در آن ۸۲۵ متر حفاری ماشینی، ۲۹۷ آزمایش نفوذ استاندارد، ۹ آزمایش دان هول، ۶۹ آزمایش پرسیمتری، ۱۹ آزمایش بارگذاری صفحه، ۸ آزمایش برش برجا^۵ و ۲۹ آزمایش نفوذپذیری لفران^۶ انجام شده است، لایه‌های گوناگون منطقه مورد مطالعه به چهار واحد خاکی تفکیک شده‌اند. در این واحدها به ترتیب واحد خاک QC-1 متشکل از شن ماسه‌دار و یا ماسه شن‌دار با درصد ریزدانه ۵ تا ۲۰ درصد، واحد خاکی QC-2 متشکل از ماسه لای و رس دار به همراه شن با درصد ریزدانه ۳۵ تا ۶۰ درصد، واحد خاکی Qf-1 متشکل از لای رس‌دار با مقدار اندکی ماسه با درصد ریزدانه بیش از ۶۰ درصد و اندیس خمیری کمتر از ۷ و واحد خاکی Qf-2 متشکل از رس لای‌دار با مقدار اندکی ماسه با درصد ریزدانه بیش از ۶۰ درصد و اندیس خمیری بیش از ۷ می‌باشد [۳۲]. از سویی دیگر، مطالعات جامعی بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی شهر قم در قالب یک طرح پژوهشی توسط خدایپرست، ۱۳۹۳ صورت پذیرفت که در آن نقشه پهنه بندی شهر برای پارامترهای نوع زمین، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، ظرفیت باربری مجاز پی مربعی، ظرفیت باربری مجاز پی نواری، ظرفیت باربری مجاز پی شبکه‌ای، ظرفیت باربری مجاز پی گسترده و ضریب عکس العمل بستر تهیه شده است [۳۳]. در این تحقیق با توجه به طرح پژوهشی ارائه شده برای شهر قم و مطالعات ژئوتکنیک خط A مسیر تونل مترو قم ساختگاه شهر قم به پنج تیپ تقسیم شده است که مطابق با جدول ۶-۱ می‌باشد.

واحدهای خاکی تفکیک شده نمود خوبی از شرایط ساختگاهی در محدوده شهر قم ارائه می‌کند. در این خصوص رسوبات ریزدانه QC-2 و Qf-3 بیش‌ترین گسترش و واحد QC-1 کمترین گسترش را دارد. محدوده جمکران تا حوالی میدان ولیعصر از واحدهای ریزدانه QC-1، Qf-2، Qf-3 و Qf-1 تشکیل شده است. از حوالی میدان ولیعصر تا میدان پلیس، علاوه بر دو واحد خاکی مذکور، واحد درشت دانه QC-1 نیز وجود دارد. از محدوده میدان پلیس شرایط ساختگاهی به تدریج وارد واحد QC-2 می‌شود و این شرایط ساختگاهی تا عماریاسر و چهل اختران ادامه دارد. محدوده رودخانه قمرود تنها بخشی است که تماماً از واحد QC-1 تشکیل شده است. از این محدوده تا حوالی زیرگذر راه‌آهن به تدریج از مقدار رسوبات درشت دانه کاسته شده و واحد ریزدانه QC-2 و Qf-3 غالب می‌گردد. در امتداد این مسیر و در حوالی میدان معصومیه و کشاورز شرایط ساختگاهی وارد واحد QC-2 خواهد شد؛ بعد از آن تا قلعه کامکار یک لنز درشت دانه QC-1 در اعماق نزدیک به زمین غالب می‌گردد.

^۴ Standard Penetration Test (SPT)

^۵ Down-Hole Test

^۶ Pressuremeter Test

^۷ Plate-Load Test

^۸ Direct Shear Test

^۹ Lofran Permeability Test

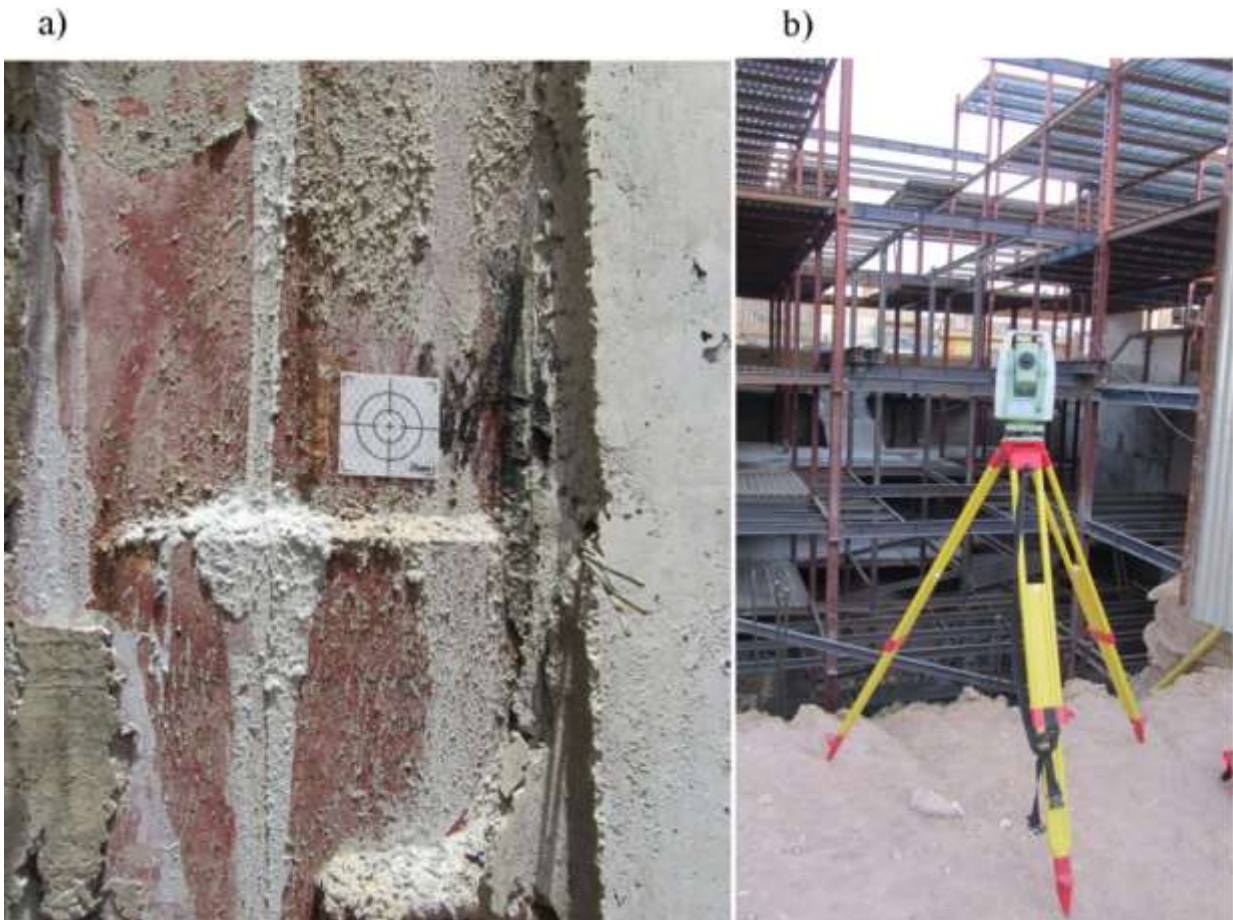
برای تعیین صحت و درستی مقادیر ارائه شده برای این پنج واحد خاکی، دو گود عمیق در محدوده میدان پلیس و عمارياسر مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب که شناسایی واحدهای خاکی برای دو گود مورد نظر به صورت آزمایشگاهی تحقیق و سپس با انجام مدلسازی عددی و انطباق تغییر شکل‌های به دست آمده از پایش‌های میدانی با مدل عددی این مقادیر کالیبره شد [۳۱]. در این گودها شناسایی خاک محل با انجام مطالعات صحرایی و آزمایشهای آزمایشگاهی انجام شده است. در گودهای مورد اشاره، تغییر شکل دیواره گود در حین انجام عملیات گودبرداری و نصب سیستم مهاری با بکارگیری دوربین توتال استیشن و با استفاده از منشور برجسیبی تعبیه شده بر روی نقاطی که تغییر شکل آنها حائز اهمیت است، پایش شد. نمونه‌ای از منشورهای برجسیبی که بر روی یکی از ستون‌های سازه نگهبان گود تعبیه شده به همراه دوربین توتال استیشن که بر روی ایستگاه مستقر شده است، در شکل ۶-۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۶-۱. پارامترهای ژئوتکنیکی برای پنج تیپ ساختگاه [۳۳]

مشخصات خاک		Qc-1	Qc-2	Qf-1	Qf-2	Qf-3
چسبندگی (kg/cm ²)	c'	۰	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
زاویه اصطکاک (degree)	φ'	۳۷	۳۴	۳۰	۲۶	۲۱
مدول الاستیک (kg/cm ²)	بارگذاری	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰
	باربرداری	۱۰۵۰	۹۰۰	۷۵۰	۶۰۰	۴۵۰
وزن مخصوص خشک (g/cm ³)		۱/۸	۱/۷	۱/۶۵	۱/۶	۱/۶
وزن مخصوص کل (g/cm ³)		۲	۱/۹۵	۱/۹	۱/۹	۱/۹

بدین ترتیب و با توجه به مقادیر به دست آمده از پایش‌های میدانی، امکان انجام مدلسازی عددی و تطبیق تغییر شکل افقی گود در مقاطع مختلف با خروجی‌های به دست آمده از نرم‌افزار فراهم می‌شود و از آن می‌توان برای کالیبره نمودن پارامترهای ژئوتکنیکی و شرایط ساختگاهی در محدوده این گودها استفاده نمود. در مدل عددی تخمین اولیه تغییرمکان‌ها در هر مرحله از خاکبرداری با استفاده از مشخصات خاک، عمق گودبرداری، مشخصات سیستم مهاری و شرایط محیطی محاسبه می‌گردد؛ در واقع با تخصیص ابعاد و جنس المان‌های مختلف در سیستم مهاری، سختی سیستم به دست می‌آید و با توجه به آن میزان تغییر شکل ناشی از فشار فعال توده خاک بر سیستم در اثر خاکبرداری برآورد می‌شود.

با توجه به کالیبراسیون صورت گرفته بر روی گود پروژه میدان پلیس، پارامترهای ژئوتکنیکی موجود در حدود همان مقادیر ارائه شده در جدول ۶-۱ به دست آمد که صحت و درستی این موضوع با انجام مطالعات مشابه بر روی پروژه عمارياسر، تایید شد. مدلسازی فوق در پیش‌بینی ماکزیمم مقدار تغییر شکل در انتها برای هر دو پروژه سودمند واقع شد.



شکل ۶-۲. ابزار پایش (a) منشور برجسی نصب شده بر روی یکی از ستون‌های پروژه (b) دوربین توتال استیشن مستقر بر روی ایستگاه [۳۱]

مدلسازی عددی

۷-۱- مقدمه

جهت تعیین تغییر شکل ماکزیمم گود در برابر سختی سیستم مهاری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی مختلف استفاده از نرم‌افزار عددی در دستور کار قرار گرفت. همان طور که پیش از این گفته شد، انتخاب مدل رفتاری مناسب در مطالعات عددی بسیار مهم می‌باشد. استفاده از مدل‌هایی که رفتارهای خاک و روابط غیر خطی تنش- کرنش پیش از گسیختگی را بهتر پیش بینی می‌کنند، دید واقعی تری از جابجایی‌های زمین ارائه می‌دهد. مدل‌هایی که دارای یک سطح تسلیم می‌باشند مانند مدل موهر- کولومب برای تخمین اولیه رفتار خاک مناسب می‌باشند. مدل‌هایی که دارای دو سطح تسلیم می‌باشند، الگوهای جابجایی واقعی تری ارائه می‌دهند؛ خصوصاً در مسائل باربرداری نظیر گودبرداری؛ از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل خاک سخت شونده اشاره نمود. ایده اصلی در این مدل از رابطه هیپربولیک بین کرنش محوری و تنش انحرافی در بارگذاری سه محوری نشأت می‌گیرد. از جمله تفاوت‌های مدل خاک سخت شونده نسبت به مدل موهر- کولومب، می‌توان به وجود دو نوع سخت شوندگی برشی و فشاری، عدم ثابت بودن سطح تسلیم مدل و تغییر آن با افزایش کرنش‌های پلاستیک و سختی وابسته به تراز تنش اشاره کرد. همچنین مدل‌هایی که دارای چندین سطح تسلیم می‌باشند قابلیت مدلسازی رفتارهای پیچیده تری از خاک نظیر نرم شوندگی، سختی خاک در کرنش‌های کوچک و ناهمگنی را دارند اما این مدل‌ها معمولاً نیازمند تعداد زیادی از پارامترهای ورودی هستند؛ مانند مدل HS_{Small}.

در اینجا به منظور ایجاد ارتباط بین تغییر شکل ماکزیمم گود و سختی سیستم مهاری در ساختگاه‌هایی مشابه با ساختگاه مورد مطالعه، با توجه به محدود بودن پارامترهای آزمایشگاهی، مدل رفتاری HS در نرم‌افزار پلکسیز^۱ مورد استفاده قرار گرفته است. همان طور که عنوان شد، کلاهدک تسلیم فشاری در این مدل محدوده کرنش پلاستیک حجمی و سطح تسلیم برشی محدوده کرنش برشی را تعیین می‌کند و گسیختگی در این مدل با معیار گسیختگی موهر- کولومب تعریف می‌شود. از خصوصیات این مدل کاهش سختی در برابر بار انحرافی و ایجاد کرنش‌های پلاستیک برگشت ناپذیر است.

جهت پیش‌بینی مقادیر تغییر شکل دیواره گود میبایست پیش از هر چیز مدل عددی را با نتایج به دست آمده از پایش‌های میدانی کالیبره نمود. با توجه به پارامترهای در دست از شرایط ژئوتکنیکی موجود در پروژه میدان پلیس، از آنجاییکه مدل خاک سخت

¹ PLAXIS

شونده (HS) در مدلسازی عددی مدنظر است برای انجام کالیبراسیون مدل و شناخت تاثیر پارامترهای مدل HS لازم است آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای این مدل صورت گیرد. در آنالیز حساسیت پارامترهای اصلی مدل HS، شامل مدول سختی سکانت، مدول اوندومتريک، مدول بارگذاري- باربرداري، پارامتر تواني، چسبندگي خاک و زاويه اصطکاک خاک به عنوان متغير در نظر گرفته شدند. جهت درک بهتر تاثیر پارامترها، مدل عددی با تنها یک نوع خاک تعريف شد.

در گود مورد اشاره، تغيير شکل ديواره گود در حين انجام عمليات گودبرداري و نصب سيستم مهاري با بکارگيري دوربين توتال استیشن و با استفاده از منشور برچسبي تعبیه شده بر روی نقاطی که تغيير شکل آنها حائز اهمیت است، پایش شد. در کنترل تغيير شکل با استفاده از این ابزار، اطلاعات بدست آمده از دوربين در حين گودبرداري و پایدارسازی گود با انجام کدنویسی های ساده ای در نرم افزار اکسل مورد تحليل قرار می گیرد و پروفیل تغيير شکل مقاطع مورد پایش، بدست می آید [۱۸].

در مدل عددی تخمین اولیه تغییرمکان ها در هر مرحله از خاکبرداری با استفاده از مشخصات خاک، عمق گودبرداری، مشخصات سيستم مهاري و شرایط محیطی محاسبه می گردد؛ در واقع با تخصیص ابعاد و جنس المان های مختلف در سيستم مهاري، سختی سيستم به دست می آید و با توجه به آن میزان تغيير شکل ناشی از فشار فعال توده خاک بر سيستم در اثر خاکبرداری برآورد می شود.

برای اطمینان از صحت فرضیات طراحی نظیر چسبندگی، زاویه اصطکاک، وزن مخصوص و مدول الاستیسیته خاک، نتایج پایش در هر مرحله از خاکبرداری با نتایج خروجی نرم افزار مقایسه می گردد. در صورت همخوانی نتایج پایش گود و محاسبات نرم افزاری، می توان اطمینان حاصل نمود که کالیبراسیون مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی با دقت مناسبی انجام شده است [۳۱]. به این ترتیب با ادامه روند پایدارسازی در مدل عددی، چنانچه روند تغيير شکل در بخشی از گود سیر صعودی داشته باشد و یا تغيير شکل ها به حدی ناچیز باشد که اصلاح طرح به اقتصادی شدن پروژه کمک نماید، تمهیدات لازم با انجام آنالیز بازگشتی و بازطراحی طرح، قابل اعمال است. در صورتی که در مراحل بعدی خاکبرداری مشخص گردد که نتایج پایش گود از نتیجه تغییرمکان های نرم افزار بیشتر است، نیاز به اصلاح طرح و تقویت سيستم پایدارکننده وجود دارد.

۷-۲- آنالیز حساسیت بر روی مدل عددی

در پروژه میدان پلیس، بلندترین دهانه سازه که در وسط دیواره گود در ضلع جنوبی واقع است، منشورگذاري، پایش و مدل شد. عملیات پایش در این دهانه ۷/۵ متری با استفاده از ۷ منشور برچسبی در ترازهای ۱+، ۴- و ۷/۵- انجام پذیرفت. بر اساس عملیات پایش صورت گرفته، مقدار متوسط تغيير شکل در این دهانه در سه تراز فوق با توجه به روند زمانی اجرای عملیات، در شکل ۷-۱ مشاهده می شود.

¹ Excel

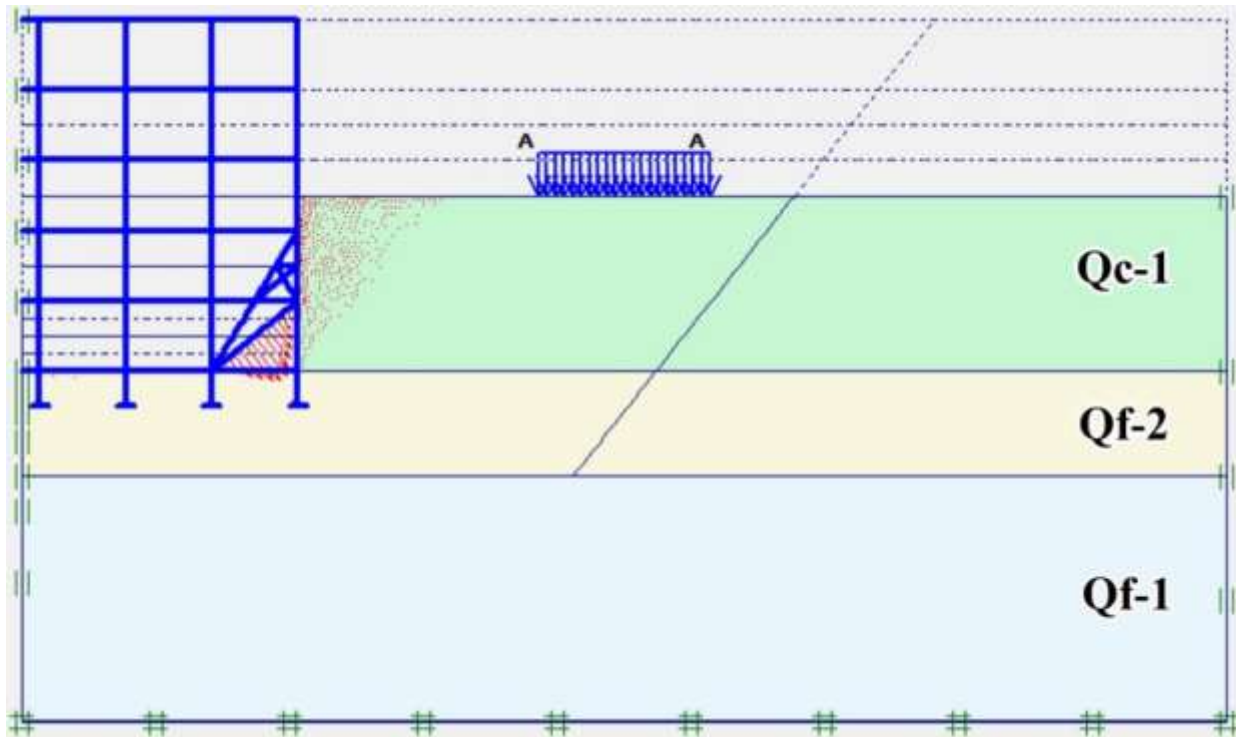


شکل ۷-۱. میزان متوسط تغییر شکل دیواره ضلع جنوبی گود در سه تراز +۱، -۴ و -۷/۵ متر نسبت به تراز خیابان در طول مدت گودبرداری و پایدارسازی گود پروژه میدان پلیس [۱۸]

همانطور که عنوان شد، در مدل‌سازی عددی برای کالیبره نمودن پارامترهای مقاومتی خاک از نرم‌افزار المان محدود پلکسیز دو بعدی استفاده شد و با توجه به محدود بودن پارامترهای آزمایشگاهی مدل رفتاری خاک سخت‌شونده (HS) برای مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. توالی و روند پایدارسازی در مدل‌سازی عددی شامل نکاتی می‌باشد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. در گود اجرا شده به روش ساخت از بالا اصلاح شده، مسیر عبور و مرور ماشین‌های حفاری با پیش‌بینی مراحل بعدی اجرایی و با دقت زیادی تعیین شد؛ بعضاً ستون‌هایی به منظور دسترسی به فضای آزاد بیشتر در آغاز عملیات اجرایی احداث نشد و جانمایی آن‌ها به گام‌های بعدی موکول گشت؛ گام‌های حفاری به عمق‌های حدود ۲ تا ۳ متری به صورت یک دهانه در میان اجرا شد؛ در ترازهایی از حفاری بنا به شرایط به وجود آمده، تعدادی از سقف‌های سازه برای ایجاد صلبیت بیشتر در حین پایدارسازی اجرا گشت و یا از اعضای مورب و مهارهای اضافه استفاده شد که این مهارها بعد از تکمیل مراحل ساخت برچیده شدند. موارد عنوان شده، در مدل‌سازی عددی مطابق با روند اجرایی، اعمال شد [۳۱].

پایش‌های میدانی و مدل‌سازی عددی بر روی دهانه ۷/۵ متری در ضلع جنوبی گود به عنوان بلندترین دهانه موجود متمرکز شد. در مطالعات عددی، با بهره‌برداری از تقارن‌های موجود در مساله تنها نیمی از گود در شرایط کرنش صفحه‌ای به صورت دوبعدی مدل شد. همچنین محدوده تاثیر گود در مدل‌های اجزا محدود بیش از محدوده متاثر از گودبرداری تعریف شده توسط هسیه و او در سال ۱۹۹۷ تعیین گردید [۵]. در مدل‌سازی عددی با بهره‌گیری از تقارن‌های موجود در مساله تنها نیمی از گود در شرایط کرنش صفحه‌ای به صورت دوبعدی مدل شد. شرایط مرزی در دو طرف مدل از جابجایی در جهت افقی و در کف مدل از جابجایی در هر دو جهت ممانعت می‌کند. امکان تغییر شکل در بالای مدل در هر دو جهت وجود دارد. به منظور ساده‌سازی، آرایش پیچیده مهارها در مدل عددی به صورت منظم و با فواصل یکسان، به سختی معادل تبدیل شد و همچنین ساده‌سازی‌هایی در شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه تبیین گردید. مش‌بندی در مناطقی که تغییر شکل آن‌ها حائز اهمیت بیش‌تری است ریزتر اعمال گردید و مراحل حفاری و مهارگذاری در قسمت محاسبات تعریف شد. مطابق با تیپ بندی ارائه شده، شرایط ساختگاهی شهر قم، شامل پنج تیپ خاک می‌باشد که بر اساس مطالعات صحرایی انجام شده در محدوده پروژه، سه نوع QC-1، Qf-1 و Qf-2 مشاهده می‌شود. هندسه مدل شده در دهانه

۷/۵ متری از ضلع جنوبی پروژه میدان پلیس، مطابق با شکل ۷-۲ می‌باشد. همچنین مراحل محاسباتی در مدل عددی مطابق با جدول ۷-۱ در ۲۵ فاز محاسباتی مشاهده می‌شود [۳۱].



شکل ۷-۲. هندسه مدل‌سازی شده برای دهانه ۷/۵ متری در ضلع جنوبی گود میدان پلیس [۳۱]

جدول ۷-۱. مراحل محاسباتی در مدل عددی برای دهانه ۷/۵ متری در ضلع جنوبی گود میدان پلیس [۳۱]

مرحله اول	فاز ۱ تا ۴	اعمال بار، نصب ستون‌های سازه به همراه شمع کیسونی، اتصال قاب‌های سازه در تراز +۱۰ متر
مرحله دوم	فاز ۵	صفر کردن تغییر شکل‌ها در مدل عددی و حفاری خاک تا تراز -۲ متر
مرحله سوم	فاز ۶	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز -۴ متر، نصب دیوار حائل پیرامونی تا تراز -۲ متر
مرحله چهارم	فاز ۷	نصب قاب‌های سه دهانه انتهایی در تراز +۶ متر
مرحله پنجم	فاز ۸ و ۹	حفاری سه دهانه ابتدایی تا عمق -۶ متر و دهانه چهارم تا عمق -۴ متر
مرحله ششم	فاز ۱۰	نصب دیوار حائل تا تراز -۷ متر
مرحله هفتم	فاز ۱۱ و ۱۲	حفاری دهانه انتهایی تا عمق -۶ متر، نصب قاب‌ها برای دو دهانه انتهایی در تراز +۲ متر
مرحله هشتم	فاز ۱۳	حفاری تا تراز -۷ متر تا جلو یال خرابی بزرگ
مرحله نهم	فاز ۱۴	نصب قاب‌ها برای دو دهانه انتهایی در ترازهای -۲ و -۶ متر
مرحله دهم	فاز ۱۵	حفاری سه دهانه ابتدایی تا عمق -۸ متر، نصب دیوار حائل تا تراز -۱۰ متر
مرحله یازدهم	فاز ۱۶ و ۱۷	حفاری دو دهانه ابتدایی تا عمق -۱۰ متر و دهانه انتهایی تا جلو یال خرابی کوچک تا تراز -۸ متر
مرحله دوازدهم	فاز ۱۸	نصب یال خرابی کوچک
مرحله سیزدهم	فاز ۱۹ و ۲۰	حفاری خاک جلو یال خرابی کوچک تا عمق -۱۰ متر
مرحله چهاردهم	فاز ۲۱ و ۲۲	حفاری خاک پشت یال خرابی کوچک تا عمق -۱۰ متر
مرحله پانزدهم	فاز ۲۳	ریختن فونداسیون دو دهانه انتهایی
مرحله شانزدهم	فاز ۲۴	تکمیل اسکلت سازه و مقاوم سازی دیواره گود
مرحله هفدهم	فاز ۲۵	آنالیز پایداری

در آنالیز حساسیت صورت گرفته برای مدل عددی، فواصل افقی و قائم مهاریها، سختی مهاریها و هندسه گود، پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. بنابراین آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی شامل مدول الاستیسته سکانت در تنش ۵۰٪، زاویه اصطکاک، چسبندگی، پارامتر توانی و تراز کف مدل انجام شد؛ سایر پارامترها بر اساس مقادیر پیش فرض در نرم افزار پلکسیز برای مدل خاک سخت شونده در نظر گرفته شد. همچنین سختی کاهش یافته خاک اطراف ستون‌ها ناشی از دست خوردگی خاک هنگام جایگذاری ستون به صورت یک ضریب کاهش در سختی ستون اعمال شد که جز متغیرهای آنالیز حساسیت در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی عددی، با در نظر گرفتن دیوار مسلح شده بتنی به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر با میلگرد ۱۰ به فواصل ۱۵ سانتی‌متر برای دیواره گود، مقدار ممان اینرسی دیوار $0.0036 \text{ (m}^4\text{/m)}$ می‌باشد. سختی خمشی دیواره گود ۲۵ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه برای فاصله افقی و قائم مهاریهای افقی نگهدارنده دیواره به ترتیب ۵ و ۴ متر می‌باشد. با فرض پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا اصلاح شده، فاصله درون صفحه‌های قاب‌ها و یا به عبارتی فاصله ستون‌های پیرامونی از اولین ردیف از ستون‌های مرکزی ۵ متر در نظر گرفته شده است. عرض گود ۳۲ متر می‌باشد. طول شمع زیر ستون و عمق گود به ترتیب ۲ و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. در رابطه با فاصله افقی مهاریها لازم به توضیح است که، المان‌های مهاریهی در مدل‌سازی اجزا محدود در مدل صفحه‌ای، با مدل‌سازی سختی نگهدارنده‌ها و معادل سازی آن با در نظر گرفتن فاصله آن‌ها انجام می‌گیرد که در اینجا برای المان‌های مهاریهی IPE360 با فواصل افقی ۵ متر در نظر گرفته شده است. با کاهش یا افزایش فاصله افقی و نوع پروفیل سختی معادل المان مهاریهی تغییر می‌کند. در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار پلکسیز همه المان‌های سازه‌ای از قبیل تیر و ستون‌ها، شمع زیر ستون، فونداسیون سازه و سایر المان‌های مهاریهی با المان صفحه^۱ تعریف می‌شود و به این ترتیب سختی خمشی، ممان اینرسی و سطح مقطع المان تخصیص داده می‌شود (شکل ۷-۳). همچنین شرایط ساختگاهی با استفاده از المان کلاستر^۲ در این نرم‌افزار با تخصیص پارامترهای سختی خاک، چسبندگی، زاویه اصطکاک، وزن مخصوص خاک، ضریب پواسون و پارامتر توانی تعریف می‌شود (شکل ۷-۴).

Material set		Properties	
Identification:	C1	EA :	1.953E+05 kN/m
Material type:	Elastic	EI :	847.500 kNm ² /m
Comments		d :	0.228 m
		w :	0.102 kN/m/m
		v :	0.200
		M _p :	1.000E+15 kNm/m
		N _p :	1.000E+15 kN/m
		Rayleigh α :	0.000
		Rayleigh β :	0.000

شکل ۷-۳. تخصیص سختی خمشی، ممان اینرسی و سطح مقطع المان‌های سازه‌ای در نرم‌افزار پلکسیز

¹ Plate

² Cluster

General	Parameters	Interfaces
Stiffness		
E_{50}^{ref} :	3.500E+04	kN/m ²
E_{oed}^{ref} :	3.500E+04	kN/m ²
E_{ur}^{ref} :	1.050E+05	kN/m ²
power (m) :	0.500	
Strength		
c_{ref} :	1.000E-03	kN/m ²
ϕ (phi) :	37.000	°
ψ (psi) :	7.000	°
Alternatives		
<input type="checkbox"/> Use alternatives		
C_c :	0.0099	
C_s :	0.0024	
e_{init} :	0.5000	
Advanced...		

SoilTest
Next
OK
Cancel

شکل ۷-۴. تخصیص پارامترهای خاک در نرم‌افزار پلکسیز

برای سهولت در تحلیل نتایج و با توجه به متغیر قرار گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی، شرایط ساختمانی در آنالیز حساسیت شامل دو نوع خاک Qc-1 و Qf-1 در نظر گرفته شد؛ به این ترتیب که ساختگاه Qc-1 شرایط پروژه تا بستر گود و ساختگاه Qf-1 شرایط پروژه از بستر گود تا کف مدل را توصیف می‌کند. در این مطالعه آنالیز حساسیت با پردازش ۷۳ مدل عددی صورت گرفت؛ حساسیت مدل نسبت به هر یک از پارامترهای ژئوتکنیکی در ۴۰ مدل ابتدایی مورد بررسی قرار گرفت و سپس سعی بر ایجاد رابطه‌ای برای تخمین تغییر شکل با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت با استفاده از ۳۳ مورد مطالعاتی فرضی دیگر شد. مطالعات عددی صورت گرفته مطابق با جدول ۷-۲ نمایش داده شده است. مطابق با این جدول $E1$ ، $\phi1$ ، $c1$ ، $m1$ و $R1$ به ترتیب مدول سختی سکانت، زاویه اصطکاک، چسبندگی، پارامتر توانی و ضریب کاهش سختی خاک اطراف ستون ناشی از دست خوردگی در لایه اول و $E2$ ، $\phi2$ ، $c2$ و $m2$ به ترتیب مدول سختی سکانت، زاویه اصطکاک، چسبندگی و پارامتر توانی در لایه دوم می‌باشد؛ T ضخامت لایه دوم می‌باشد که از بستر گود تا کف مدل امتداد می‌یابد. لازم به ذکر است مطالعات پیشین مقدار پارامتر توانی m را برای ساختگاه‌هایی مشابه با ساختگاه Qc-1 و Qc-2 بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ پیشنهاد می‌کند [۳۴، ۳۵، ۳۶]. همچنین در این جدول δ_{h-max} ، FS و به ترتیب تغییر شکل افقی ماکزیمم دیوار، تراز متناظر با تغییر شکل ماکزیمم و ضریب ایمنی به دست آمده از نرم‌افزار پلکسیز است. عمق گود در تمامی مدل‌های فرضی برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شد.

جدول ۷-۲. مدل‌های عددی پردازش شده در آنالیز حساسیت [۳۱]

	E1 Kg/cm ²	φ1 deg.	c1 kN/m ²	M1 [-]	R1 [-]	E2 Kg/cm ²	φ2 deg.	c2 kN/m ²	m2 [-]	T m	δ _{h-max} mm	h-max m	FS [-]
۱	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۶/۵	+۲/۵	۱۱/۵
۲	۱۵۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۸/۵	+۲/۵	۱۲/۹۶
۳	۲۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۸/۱	+۲/۵	۱۲/۸۶
۴	۲۵۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۷/۶	+۲/۵	۱۲/۹۲
۵	۳۵۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۵/۵	+۲/۵	۱۰/۶۵
۶	۳۰۰	۳۶	۰/۲۵	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۲۹/۹	+۲/۵	۱۲/۹
۷	۳۰۰	۳۶	۰/۵	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۲۴/۶	+۲/۵	۱۲/۹
۸	۳۰۰	۳۶	۰/۷۵	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۲۴	+۲/۵	۱۳/۱
۹	۳۰۰	۳۶	۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۲۰/۸	+۲/۵	۱۱/۷۳
۱۰	۳۰۰	۳۶	۱/۵	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۱۵/۴	+۲/۵	۱۱/۳
۱۱	۳۰۰	۳۶	۲/۵	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۱۶	+۲/۵	۱۳/۶
۱۲	۳۰۰	۳۶	۵	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۱۶/۶	+۳	۱۳/۷
۱۳	۳۰۰	۲۷	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۵۶/۶	+۲/۵	۱۱/۱۷
۱۴	۳۰۰	۳۰	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۵۰/۴	+۲/۵	۱۱/۳
۱۵	۳۰۰	۳۳	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۴۴/۲	+۲/۵	۱۲/۲۷
۱۶	۳۰۰	۳۹	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۲/۲	+۲/۵	۱۱/۷۴
۱۷	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۱۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۵۴/۶	+۲/۵	۱۳/۸۵
۱۸	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۱۵۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۴۲/۶	+۲	۱۱/۸
۱۹	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۵۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۱/۹	+۲/۵	۱۱/۲
۲۰	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۲/۵	۱	۲۰	۷۹/۸	+۲/۵	۷/۹
۲۱	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۵	۱	۲۰	۶۲/۴	+۲/۵	۹/۷
۲۲	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۵	۱	۲۰	۲۸/۶	+۲/۵	۱۳/۸۶
۲۳	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۲۰	۱	۲۰	۲۶	+۲/۵	۱۳/۲۷
۲۴	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۴	۱۰	۱	۲۰	۳۵/۷	+۲/۵	۱۲/۱
۲۵	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۳۰	۱۰	۱	۲۰	۳۷/۴	+۲/۵	۱۳/۴
۲۶	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۳۳	۱۰	۱	۲۰	۳۶/۴	+۲/۵	۱۳/۶
۲۷	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۳۶	۱۰	۱	۲۰	۳۸	+۲/۵	۱۲/۷
۲۸	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۶	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۶	+۲/۵	۱۲
۲۹	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۷	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۴۳	+۲/۵	۱۱/۹۵
۳۰	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	-۰/۹	۲۰	۳۳/۶	+۲/۵	۱۲/۷۳
۳۱	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	-۰/۸	۲۰	۳۰/۵	+۲/۵	۱۲/۲۵
۳۲	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	-۰/۹	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۷/۵	+۲/۵	۱۲/۲۶
۳۳	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	-۰/۸	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۸/۷	+۲/۵	۱۲/۴۸
۳۴	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	-۰/۷	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۴۱/۳	+۲/۵	۱۰/۹۵
۳۵	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	-۰/۶	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۴۴	+۲/۵	۱۰/۵
۳۶	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۵	۳۵/۲	+۲/۵	۱۱/۹۹
۳۷	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۲۲	۳۷/۸	+۲/۵	۱۴/۲
۳۸	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۱۸	۳۷/۸	+۲/۵	۱۱/۹۹
۳۹	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۱۵	۳۶/۶	+۲/۵	۱۱/۲۱
۴۰	۳۰۰	۳۶	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۷	۱۰	۱	۱۰	۳۵/۷	+۲/۵	۱۲/۵۵
۴۱	۲۵۰	۳۰	۰/۰/۱	۰/۵	۱	۱۵۰	۲۴	۱۰	۱	۲۰	۵۸/۵	+۲/۵	۱۱/۹۷

	E1 Kg/cm ²	$\varphi 1$ deg.	c1 kN/m ²	M1 [-]	R1 [-]	E2 Kg/cm ²	$\varphi 2$ deg.	c2 kN/m ²	m2 [-]	T m	δ_{h-max} mm	h-max m	FS [-]
۴۲	۳۵۰	۳۳	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۵۰	۳۰	۱۰	۱	۲۰	۳۶/۷	+۲	۱۱/۹۱
۴۳	۲۷۰	۳۳	۰/۰۱	۰/۵	۱	۱۷۰	۲۵	۱۰	۱	۲۰	۴۴/۹	+۲/۵	۱۱/۵۸
۴۴	۳۴۰	۳۸	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۴۰	۳۲	۱۰	۱	۲۰	۲۹/۸	+۲/۵	۱۲/۷۸
۴۵	۲۵۰	۳۳	۰/۰۱	۰/۵	۱	۱۵۰	۲۵	۱۰	۱	۲۰	۵۲/۲	+۲/۵	۱۱/۷۷
۴۶	۲۸۰	۳۵	۰/۰۱	۰/۵	۱	۱۸۰	۲۶	۱۰	۱	۲۰	۳۹/۸	+۲/۵	۱۲/۳۲
۴۷	۳۷۰	۳۸	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۲۰	۲۹	۱۰	۱	۲۰	۳۱/۹	+۲/۵	۱۲/۳
۴۸	۴۰۰	۴۰	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۵۰	۲۵	۱۰	۱	۲۰	۲۵/۶	+۲/۵	۱۱/۲۴
۴۹	۳۳۰	۳۷	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۳۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۳۱/۴	+۲/۵	۱۱/۵۶
۵۰	۴۵۰	۴۰	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۸۰	۲۴	۱۰	۱	۲۰	۲۶/۲	+۲/۵	۱۱/۱۳
۵۱	۳۰۰	۳۱	۰/۰۱	۰/۵	۰/۸	۱۹۰	۲۸	۱۰	۱	۲۰	۵۱/۳	+۲/۵	۱۰/۷
۵۲	۲۹۰	۳۲	۰/۰۱	۰/۵	۰/۹	۱۶۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۵۲/۵	+۲/۵	۱۰/۸۱
۵۳	۳۱۰	۳۲	۰/۰۱	۰/۵	۰/۹	۱۸۰	۲۸	۱۰	۱	۲۰	۴۷/۹	+۲/۵	۱۱/۸۶
۵۴	۳۲۰	۳۴	۰/۰۱	۰/۵	۰/۸	۲۱۰	۲۸	۱۰	۱	۲۰	۴۲/۳	+۲/۵	۱۱/۲۷
۵۵	۳۴۰	۳۵	۰/۰۱	۰/۵	۰/۹	۲۰۰	۲۹	۱۰	۱	۲۰	۴۰/۱	+۲/۵	۱۱/۹۶
۵۶	۳۶۰	۳۸	۰/۰۱	۰/۵	۰/۸	۲۴۰	۳۰	۱۰	۱	۲۰	۳۲/۴	+۲/۵	۱۱/۲
۵۷	۳۳۰	۳۶	۰/۰۱	۰/۵	۰/۷	۱۹۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۴۱/۸	+۲/۵	۱۰/۷۶
۵۸	۳۴۰	۳۷	۰/۰۱	۰/۵	۰/۶	۲۱۰	۲۸	۱۰	۱	۲۰	۴۳/۳	+۲/۵	۱۱/۳۱
۵۹	۲۹۰	۳۲	۰/۰۱	۰/۵	۰/۷	۱۲۰	۲۵	۱۰	۱	۲۰	۶۵/۳	+۲/۵	۱۱/۱۵
۶۰	۲۹۰	۳۲	۰/۰۱	۰/۵	۰/۶	۱۲۰	۲۵	۱۰	۱	۲۰	۶۹/۶	+۲/۵	۱۰/۸۹
۶۱	۳۱۰	۳۳	۰/۰۱	۰/۵	۰/۶	۱۹۰	۲۶	۱۰	۱	۲۰	۵۲/۷	+۲/۵	۱۰/۱۳
۶۲	۳۰۰	۲۸	۰/۰۱	۰/۵	۰/۷	۲۱۰	۲۷	۱۰	۱	۲۰	۶۱/۲	+۲/۵	۱۰/۲۳
۶۳	۲۹۰	۳۵	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۱۰	۲۷	۸	۱	۲۰	۴۷/۳	+۲/۵	۱۰/۸۹
۶۴	۳۴۰	۳۷	۰/۰۱	۰/۵	۰/۷۵	۲۴۰	۲۹	۱۰	۱	۲۰	۳۶	+۲/۵	۱۰/۳۴
۶۵	۳۱۰	۳۵	۰/۰۱	۰/۵	۰/۷۵	۱۹۰	۲۵	۱۰	۱	۲۰	۴۳/۳	+۲/۵	۱۰/۷
۶۶	۳۰۰	۳۲	۰/۰۱	۰/۵	۰/۸	۲۸۰	۳۰	۱۰	۱	۲۰	۴۰/۷	+۲	۱۱/۵۱
۶۷	۲۵۰	۳۰	۰/۰۱	۰/۵	۱	۲۸۰	۳۲	۱۰	۱	۲۰	۴۱/۵	+۲	۱۱/۴۱
۶۸	۳۱۰	۳۵	۰/۶	۰/۵	۱	۲۲۰	۲۶	۱۰	۱	۲۰	۲۴/۱	+۲/۵	۱۴/۱۵
۶۹	۳۲۰	۳۳	۲	۰/۵	۱	۱۸۰	۲۵	۱۰	۱	۲۰	۱۸/۲	+۳	۱۶/۶۳
۷۰	۳۴۰	۳۲	۵	۰/۵	۱	۲۰۰	۲۸	۱۰	۱	۲۰	۱۶	+۳	۱۲/۸۱
۷۱	۳۰۰	۳۳	۰/۰۱	۰/۵	۱	۱۹۰	۲۶	۵	۱	۲۰	۶۹/۷	+۲/۵	۸/۴۷
۷۲	۲۹۰	۳۵	۰/۸	۰/۵	۱	۲۱۰	۲۸	۱۰	۱	۲۰	۲۲/۵	+۳	۱۱/۵۳
۷۳	۳۲۵	۳۴	۴	۰/۵	۱	۱۹۰	۲۸	۱۰	۱	۲۰	۱۵/۹	+۳	۱۳/۵۸

روند ماکزیمم تغییر شکل افقی ایجاد شده در دیوار نسبت به تغییر در هر یک از پارامترهای ژئوتکنیکی با پردازش مدل‌های عددی فوق به دست می‌آید. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات پارامتری، پارامترهایی که از الگوی منطقی‌ای پیروی نمی‌کردند، کنار گذاشته شدند. بنابراین از بین پارامترهای فوق، m و T که در ازای تغییرات خیلی کوچک در آن‌ها نتایج متفاوتی به دست می‌آید کنار گذاشته شدند و سایر پارامترها مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر این اساس مطابق با جدول ۷-۳ حساسیت مدل به پارامترهای ژئوتکنیکی مورد بحث، بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها مرتب شد. مطابق با این جدول، پارامتر $\varphi 1$ با اهمیت نسبی ۴۲٪، مهم‌ترین پارامتر در مدل عددی ایجاد شده است و پارامتر $\varphi 2$ با اهمیت نسبی ۲٪ کم‌تاثیرترین پارامتر تشخیص داده شد. مطابق با این جدول، پارامترها به ترتیب اهمیت نسبی آن‌ها عبارتند از $\varphi 1$ ، $c2$ ، $E2$ ، R ، $c1$ ، $E1$ و $\varphi 2$.

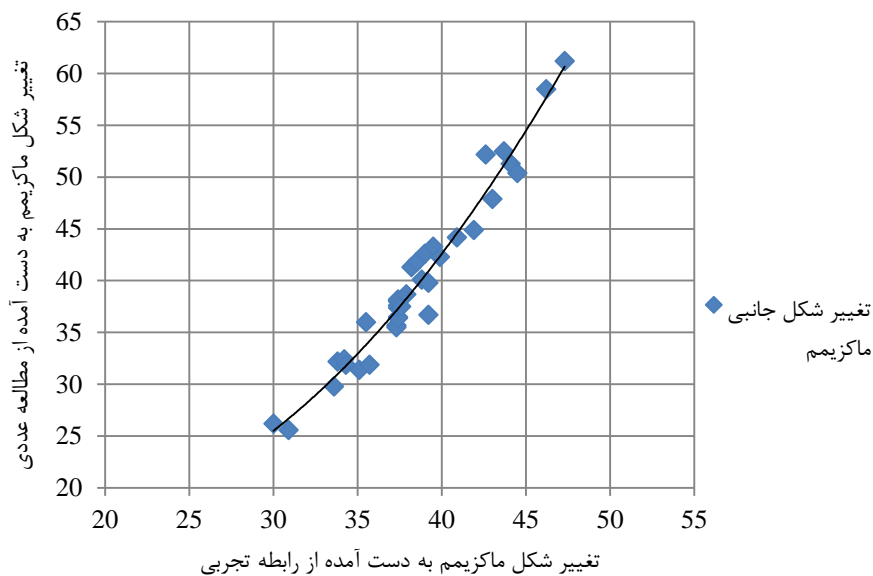
جدول ۳-۷. اهمیت نسبی پارامترها بر اساس نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت [۳۱]

ردیف	پارامتر	اهمیت نسبی
۱	φ_1	۴۲٪
۲	c2	۱۷٪
۳	E2	۱۶٪
۴	R	۱۰٪
۵	c1	۸٪
۶	E1	۲٪
۷	φ_2	۲٪

۳-۷- کالیبراسیون مدل عددی

بعد از انجام آنالیز حساسیت، مدل فرضی دیگر به منظور ایجاد رابطه‌ای برای تخمین تغییر شکل بر اساس پارامترهای ورودی پردازش شد. بر اساس مدل‌های فرضی پردازش شده، پارامترهایی که با نتایج کلی همگرایی نداشتند کنار گذاشته شدند؛ نهایتاً با کنار گذاشتن پارامترهای c1 و c2 و با توجه به نتایج مدل‌های فرضی و مدل‌های پردازش شده در آنالیز حساسیت برای پارامترهای E1، E2، φ_1 ، φ_2 و R مطابق با گراف شکل ۵-۷ رابطه‌ای به منظور تخمین تغییر شکل بر اساس مقادیر ورودی برای این پارامترها و با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها به دست آمد (رابطه ۱-۷). بنابراین با توجه به رابطه ۱-۷ می‌توان با متغیر قرار دادن پارامترهای E1، E2، φ_1 ، φ_2 و R، تغییر شکل ماکزیمم جانبی دیوار را با دقت خوبی و بدون نیاز به پردازش مدل عددی تخمین زد. این رابطه در تطبیق مدل عددی با پایش‌های میدانی و کالیبره کردن مدل نقش موثری ایفا نمود [۳۱].

$$\delta_{h-max} = 0.155E_1 + 42.67\varphi_1 + 6.689E_2 + 0.13\varphi_2 + 2.68R - 89.4 \quad (\text{رابطه ۱-۷})$$



شکل ۵-۷. تخمین تغییر شکل بر اساس مدل‌های فرضی پردازش شده بر اساس پارامترهای ورودی [۳۱ و ۳۷]

با بهره‌گیری از شکل ۷-۵ و رابطه ۷-۱ که از آنالیز حساسیت به دست آمد و بعد از چندین سعی و خطا در پردازش مدل، مدل عددی بر اساس نتایج به دست آمده از پایش‌های میدانی تا یکصد و پنجمین روز از عملیات گودبرداری و پایدارسازی گود و با رسیدن تراز گود به عمق ۶- متر، کالیبره شد. به این ترتیب امکان پیشبینی تغییر شکل تا پایان عملیات گودبرداری با بهره‌گیری از مدل عددی پردازش شده فراهم می‌شود.

مدل کالیبره شده در نرم افزار دو بعدی پلکسیز با بکارگیری مدل رفتاری خاک سخت شونده امکان انجام مطالعات عددی با متغیر قرار دادن پارامترهای سازه‌ای در پنج تیپ ساختگاه موجود را فراهم می‌نماید. بنابراین می‌توان با متغیر قرار دادن پارامترهای سازه‌ای در هر یک از شرایط ساختگاهی، تاثیر پارامترهای سازه‌ای را در میزان تغییر شکل دیواره گود در شرایط ساختگاهی مختلف برآورد نمود و چهارچوبی برای طراحی گود بر اساس سطح عملکرد با توجه به میزان سختی سیستم مهاري ایجاد کرد.

طراحی پایدارسازی گودها بر اساس سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم

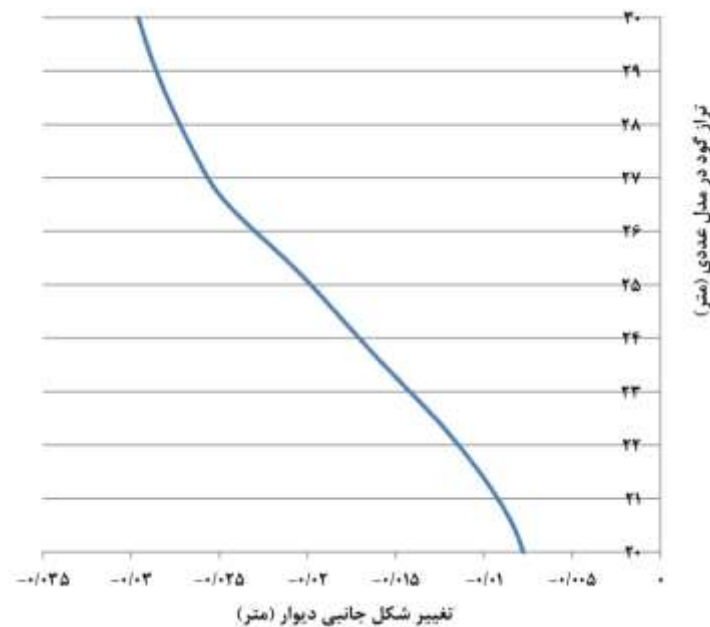
۸-۱- تاثیر پارامترهای سازه‌ای در ساختگاه‌های مورد مطالعه

به منظور ارائه طراحی عملکردی، ویژگی‌های سازه‌ای در پنج شرایط ساختگاهی ذکر شده در جدول ۶-۱، به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شوند. متغیرهای سازه‌ای در نظر گرفته شده عبارتند از ممان اینرسی واحد طول دیواره گود (I)، سختی خمشی دیواره گود (E)، فاصله افقی مهاریه‌ها (S_H)، فاصله قائم مهاریه‌ها (S_V)، فاصله درون صفحه‌ای قاب‌ها (با فرض اینکه روش پایدارسازی ساخت از بالا اصلاح شده باشد) (S_P)، عرض گود (w)، طول شمع زیر ستون (T) و عمق گود (H). در مدلسازی عددی، با در نظر گرفتن دیوار مسلح شده بتنی به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر با میلگرد ۱۰ به فواصل ۱۵ سانتیمتر برای دیواره گود، مقدار اولیه ممان اینرسی دیوار (m^4/m) ۰/۰۰۳۶ می‌باشد. سختی خمشی دیواره گود ۲۵ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه برای فاصله افقی و قائم مهاریه‌های افقی نگهدارنده دیواره به ترتیب ۵ و ۴ متر می‌باشد. با فرض پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا اصلاح شده، فاصله درون صفحه‌ای قاب‌ها و یا به عبارتی فاصله ستون‌های پیرامونی از اولین ردیف از ستون‌های مرکزی ۵ متر در نظر گرفته شده است. عرض اولیه گود ۳۲ متر می‌باشد. طول شمع زیر ستون و عمق گود به ترتیب ۲ و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، با متغیر قرار دادن پارامترهای سازه‌ای مطابق با جدول ۸-۱، چهارچوبی برای روش طراحی عملکردی ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که جهت مطالعه تاثیر ممان اینرسی دیوار بر روی تغییر شکل افقی دیواره گود، ضخامت دیوار (B) به صورت متغیر قرار گرفته است. در رابطه با فاصله افقی مهاریه‌ها لازم به توضیح است که، المان‌های مهاریه در مدلسازی اجزا محدود در مدل صفحه‌ای، با مدلسازی سختی نگهدارنده‌ها و معادل سازی آن با در نظر گرفتن فاصله آن‌ها انجام می‌گیرد که در اینجا برای المان‌های مهاریه، IPE360 با فواصل افقی ۵ متر در نظر گرفته شده است. با کاهش یا افزایش فاصله افقی و نوع پروفیل سختی معادل المان مهاریه تغییر می‌کند. نهایتاً روابط به دست آمده برای تغییر شکل دیواره گود در برابر متغیر قرار گرفتن پارامترهای سازه‌ای در مدل‌های عددی در دو گود به عمق‌های ۶ و ۱۸ متر صحت سنجی شده است.

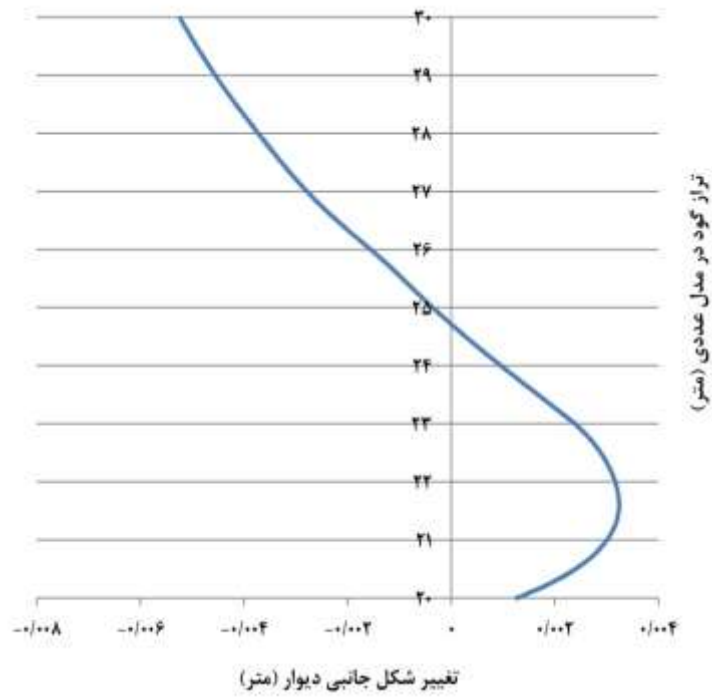
جدول ۸-۱. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای سازه‌ای در مدل‌های عددی به منظور ارائه روش طراحی عملکردی

متغیر	مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای سازه‌ای در مدل‌های عددی
B (m)	۰/۱۷۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۵، ۰/۷، ۱
E (GPa)	۶/۲۵، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰
S _H (m)	۲/۵، ۳/۷۵، ۵، ۷/۵، ۱۰
S _V (m)	۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵
S _P (m)	۳، ۴، ۵، ۶، ۷
T (m)	۱، ۲، ۳، ۴
w (m)	۲۲، ۳۲، ۴۲، ۵۲

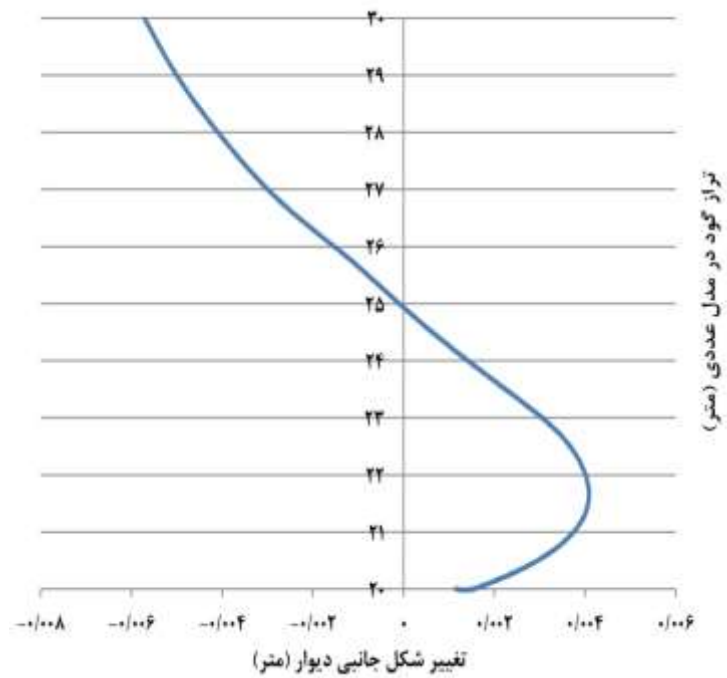
هر یک از مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای فوق در هر یک از پنج تیپ ساختگاه در قالب یک مدل عددی پردازش شده و نتایج به دست آمده برای ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیواره گود از آن استخراج شده است. با پردازش مدل‌های عددی، نسبت ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیوار به عمق گود به دست می‌آید. خروجی تغییر شکل جانبی دیواره گود در برابر عمق برای مدل‌های اولیه پردازش شده در ساختگاه‌های QC-1، QC-2، Qf-1، Qf-2، Qf-3 و در شکل‌های ۸-۱ تا ۸-۵ نشان داده شده است. در رابطه با این شکل لازم به توضیح است که در مدل‌سازی عددی عمق گود در تراز نسبی ۲۰ تا ۳۰ متر واقع شده است؛ به این معنا که تراز ۳۰ متر نشاندهنده سطح زمین و تراز ۲۰ متر نشاندهنده عمق ۱۰- متر است.



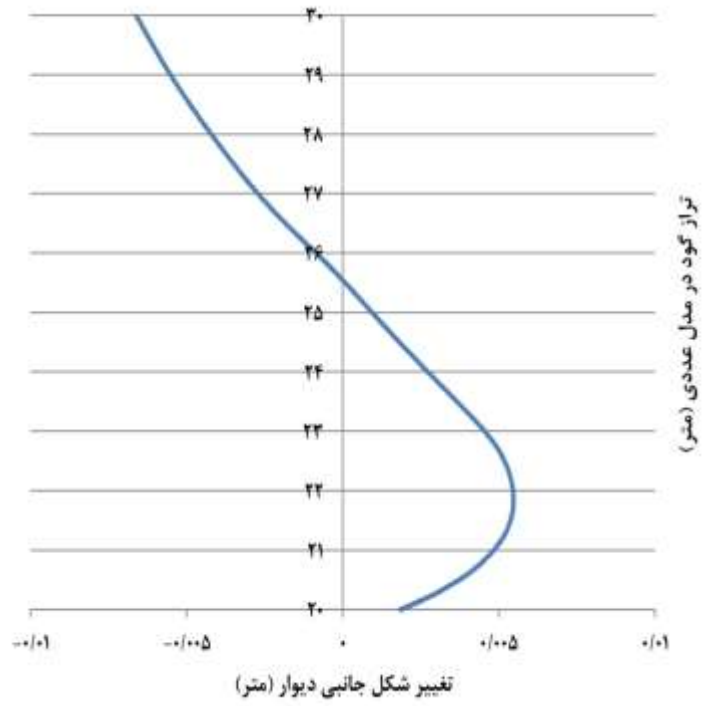
شکل ۸-۱. تغییر شکل جانبی دیواره گود در برابر عمق در مدل اولیه پردازش شده در ساختگاه QC-1



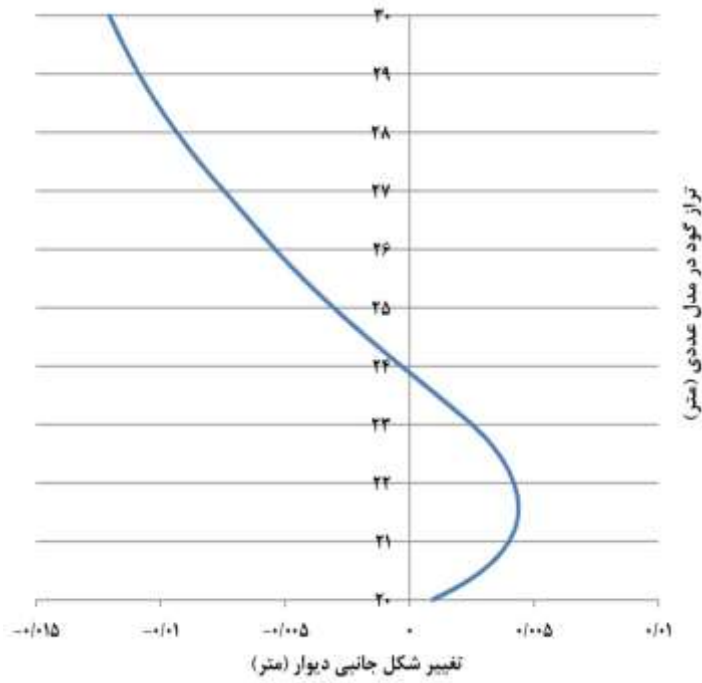
شکل ۸-۲. تغییر شکل جانبی دیواره گود در برابر عمق در مدل اولیه پردازش شده در ساختگاه QC-2



شکل ۸-۳. تغییر شکل جانبی دیواره گود در برابر عمق در مدل اولیه پردازش شده در ساختگاه Qf-1



شکل ۸-۴. تغییر شکل جانبی دیواره گود در برابر عمق در مدل اولیه پردازش شده در ساختگاه Qf-2



شکل ۸-۵. تغییر شکل جانبی دیواره گود در برابر عمق در مدل اولیه پردازش شده در ساختگاه Qf-3

همانطور که مشاهده می‌شود مطابق با شکل‌های ۱-۸ تا ۵-۸ ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود برای ساختگاه‌های QC-1, QC-2, Qf-1, Qf-2 و Qf-3 به ترتیب ۳۰، ۵، ۶، ۷ و ۱۲ میلی‌متر است. مقادیر نسبت ماکزیمم تغییر شکل جانبی به عمق گود برای پنج ساختگاه نشان می‌دهد که ساختگاه QC-2 با کم‌ترین میزان ماکزیمم تغییر شکل جانبی، از شرایط مناسب‌تری برای حفاری گودهای عمیق برخوردار است؛ بعد از آن ساختگاه‌های Qf-1, Qf-2 و بعد Qf-3 تغییر شکل کمتری ارائه می‌دهد. ساختگاه QC-1، به علت چسبندگی ناچیز، با بیشترین مقادیر تغییر شکل جانبی همراه است. به همین ترتیب با متغیر قرار دادن پارامترهای سازه‌ای مطابق با جدول ۱-۸ در ساختگاه‌های مورد بحث مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیواره در برابر عمق گود قابل حصول و مقایسه است.

با مقایسه نتایج به دست آمده از پارامترهای سازه‌ای موثر در میزان ماکزیمم تغییر شکل جانبی به عمق گود در شرایط ساختگاهی مختلف، نتیجه می‌شود که به جز عمق گود که تاثیر به سزایی در نسبت تغییر شکل جانبی ماکزیمم به عمق گود دارد، فاصله قائم مهاریها (S_v)، عرض دهانه‌ها (S_p)، طول شمع زیر ستون (T) و فاصله افقی مهاریها (S_H) به ترتیب بیشترین تاثیر و ممان اینرسی دیوار برای واحد طول (I) و سختی خمشی دیوار (E) کمترین تاثیر را در میزان نسبت تغییر شکل جانبی ماکزیمم به عمق گود دارند. همچنین عرض گود (w) در مدلسازی انجام شده برای این نوع از سیستم مهاریها بدون تاثیر تشخیص داده شد که از آن در طراحی عملکردی صرف نظر شده است. اهمیت نسبی پارامترهای فوق برای هر یک از شرایط ساختگاهی مطابق با جدول ۲-۸ نشان داده شده است.

جدول ۲-۸. اهمیت نسبی متغیرهای سازه‌ای در هر یک از شرایط ساختگاهی

نوع پارامتر سازه‌ای	درصد اهمیت نسبی پارامترهای سازه‌ای در شرایط ساختگاهی مختلف				
	Qc-1	Qc-2	Qf-1	Qf-2	Qf-3
I	۰/۶۳	۰/۰۷	۰/۶	۰/۹۷	۰/۶۳
E	۱/۳۹	۱/۲۸	۳/۴۳	۰/۸۳	۱/۲۳
S _H	۱۲/۵۶	۶/۶۱	۱۰/۸۳	۲۶/۰۳	۸/۱۶
T	۱۴/۲۴	۱۱/۵۱	۱۶/۵۳	۱۳/۲۴	۱۸/۵۵
S _p	۱۶/۴۳	۱۹/۱۸	۲۸/۹۳	۱۶/۵۵	۲۳/۱۹
S _v	۵۴/۷۶	۶۱/۳۶	۳۹/۶۷	۴۲/۳۸	۴۸/۲۴

جدول ۳-۸ تا ۸-۸ به صورت خلاصه مقادیر تغییر شکل ماکزیمم جانبی دیواره گود در ساختگاه QC-1 را در برابر مقادیر مختلف به ترتیب ممان اینرسی دیوار، سختی خمشی دیوار، فاصله افقی مهاریها، فاصله قائم مهاریها، طول شمع زیر ستون و عرض دهانه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۸-۳. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف ممان اینرسی دیوار در ساختگاه Qc-1

نسبت ممان اینرسی دیوار به ممان اینرسی اولیه (I_i/I_0)	0.128	0.369	1	2.939	8.042	23.369
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	36	31	30	28	27	27

جدول ۸-۴. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف سختی خمشی دیوار در ساختگاه Qc-1

نسبت سختی خمشی دیوار به سختی خمشی اولیه (E_i/E_0)	0.25	0.5	1	2	4	8
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	32	30	30	28	28	27

جدول ۸-۵. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله افقی مهارها در ساختگاه Qc-1

نسبت فاصله افقی مهارها به فاصله افقی اولیه (S_{Hi}/S_{H0})	0.5	0.75	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	26	28	30	32	33

جدول ۸-۶. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله قائم مهارها در ساختگاه Qc-1

نسبت فاصله قائم مهارها به فاصله قائم اولیه (S_{Vi}/S_{V0})	0.75	0.875	1	1.125	1.25
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	23	26	30	33	32

جدول ۸-۷. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف طول شمع زیر ستون در ساختگاه Qc-1

نسبت طول شمع زیر ستونها به طول شمع اولیه (T_i/T_0)	0.5	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	30	30	25	23

جدول ۸-۸. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف عرض دهانهها در ساختگاه Qc-1

نسبت عرض دهانهها به عرض دهانه اولیه (S_{pi}/S_{p0})	0.6	0.8	1	1.2	1.4
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	27	28	30	30	32

جدول ۸-۹ تا ۸-۱۴ به صورت خلاصه مقادیر تغییر شکل ماکزیمم جانبی دیواره گود در ساختگاه QC-2 را در برابر مقادیر مختلف به ترتیب ممان اینرسی دیوار، سختی خمشی دیوار، فاصله افقی مهارها، فاصله قائم مهارها، طول شمع زیر ستون و عرض دهانه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۸-۹. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف ممان اینرسی دیوار در ساختگاه QC-2

نسبت ممان اینرسی دیوار به ممان اینرسی اولیه (I_i/I_0)	0.128	0.369	1	2.939	8.042	23.369
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	6	5	5	4	5	5

جدول ۸-۱۰. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف سختی خمشی دیوار در ساختگاه QC-2

نسبت سختی خمشی دیوار به سختی خمشی اولیه (E_i/E_0)	0.25	0.5	1	2	4	8
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	6	6	5	5	4	5

جدول ۸-۱۱. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله افقی مهارها در ساختگاه QC-2

نسبت فاصله افقی مهارها به فاصله افقی اولیه (S_{Hi}/S_{H0})	0.5	0.75	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	4	5	5	6	5

جدول ۸-۱۲. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله قائم مهارها در ساختگاه QC-2

نسبت فاصله قائم مهارها به فاصله قائم اولیه (S_{Vi}/S_{V0})	0.75	0.875	1	1.125	1.25
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	4	5	5	7	7

جدول ۸-۱۳. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف طول شمع زیر ستون در ساختگاه QC-2

نسبت طول شمع زیر ستون‌ها به طول شمع اولیه (T_i/T_0)	0.5	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	6	5	5	4

جدول ۸-۱۴. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف عرض دهانه‌ها در ساختگاه Qc-2

نسبت عرض دهانه‌ها به عرض دهانه اولیه (S_{pi}/S_{p0})	0.6	0.8	1	1.2	1.4
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	4	5	5	5	6

جدول ۸-۱۵ تا ۸-۲۰ به صورت خلاصه مقادیر تغییر شکل ماکزیمم جانبی دیواره گود در ساختگاه Qf-1 را در برابر مقادیر مختلف به ترتیب ممان اینرسی دیواره، سختی خمشی دیوار، فاصله افقی مهارها، فاصله قائم مهارها، طول شمع زیر ستون و عرض دهانه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۸-۱۵. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف ممان اینرسی دیوار در ساختگاه Qf-1

نسبت ممان اینرسی دیوار به ممان اینرسی اولیه (I_i/I_0)	0.128	0.369	1	2.939	8.042	23.369
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	9	8	6	7	7	6

جدول ۸-۱۶. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف سختی خمشی دیوار در ساختگاه Qf-1

نسبت سختی خمشی دیوار به سختی خمشی اولیه (E_i/E_0)	0.25	0.5	1	2	4	8
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	8	6	6	6	4	4

جدول ۸-۱۷. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله افقی مهارها در ساختگاه Qf-1

نسبت فاصله افقی مهارها به فاصله افقی اولیه (S_{Hi}/S_{H0})	0.5	0.75	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	5	5	6	6	7

جدول ۸-۱۸. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله قائم مهارها در ساختگاه Qf-1

نسبت فاصله قائم مهارها به فاصله قائم اولیه (S_{vi}/S_{v0})	0.75	0.875	1	1.125	1.25
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	6	6	6	8	8

جدول ۸-۱۹. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف طول شمع زیر ستون در ساختگاه Qf-1

نسبت طول شمع زیر ستون‌ها به طول شمع اولیه (T_i/T_0)	0.5	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	8	6	5	5

جدول ۸-۲۰. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف عرض دهانه‌ها در ساختگاه Qf-1

نسبت عرض دهانه‌ها به عرض دهانه اولیه (S_{pi}/S_{p0})	0.6	0.8	1	1.2	1.4
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	5	6	6	7	8

جدول ۸-۲۱ تا ۸-۲۶ به صورت خلاصه مقادیر تغییر شکل ماکزیمم جانبی دیواره گود در ساختگاه Qf-2 را در برابر مقادیر مختلف به ترتیب ممان اینرسی دیوار، سختی خمشی دیوار، فاصله افقی مهارها، فاصله قائم مهارها، طول شمع زیر ستون و عرض دهانه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۸-۲۱. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف ممان اینرسی دیوار در ساختگاه Qf-2

نسبت ممان اینرسی دیوار به ممان اینرسی اولیه (I_i/I_0)	0.128	0.369	1	2.939	8.042	23.369
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	12	10	7	5	6	6

جدول ۸-۲۲. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف سختی خمشی دیوار در ساختگاه Qf-2

نسبت سختی خمشی دیوار به سختی خمشی اولیه (E_i/E_0)	0.25	0.5	1	2	4	8
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	7	7	7	5	6	6

جدول ۸-۲۳. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله افقی مهارها در ساختگاه Qf-2

نسبت فاصله افقی مهارها به فاصله افقی اولیه (S_{Hi}/S_{H0})	0.5	0.75	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	7	6	7	10	12

جدول ۸-۲۴. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله قائم مهاریها در ساختگاه Qf-2

نسبت فاصله قائم مهاریها به فاصله قائم اولیه (S_{vi}/S_{v0})	0.75	0.875	1	1.125	1.25
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	7	7	7	9	10

جدول ۸-۲۵. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف طول شمع زیر ستون در ساختگاه Qf-2

نسبت طول شمع زیر ستونها به طول شمع اولیه (T_i/T_0)	0.5	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	8	7	6	5

جدول ۸-۲۶. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف عرض دهانهها در ساختگاه Qf-2

نسبت عرض دهانهها به عرض دهانه اولیه (S_{pi}/S_{p0})	0.6	0.8	1	1.2	1.4
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	7	7	7	8	9

جدول ۸-۲۷ تا ۸-۳۲ به صورت خلاصه مقادیر تغییر شکل ماکزیمم جانبی دیواره گود در ساختگاه Qf-3 را در برابر مقادیر مختلف به ترتیب ممان اینرسی دیوار، سختی خمشی دیوار، فاصله افقی مهاریها، فاصله قائم مهاریها، طول شمع زیر ستون و عرض دهانهها نشان می دهد.

جدول ۸-۲۷. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف ممان اینرسی دیوار در ساختگاه Qf-3

نسبت ممان اینرسی دیوار به ممان اینرسی اولیه (I_i/I_0)	0.128	0.369	1	2.939	8.042	23.369
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	14	11	12	9	9	9

جدول ۸-۲۸. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف سختی خمشی دیوار در ساختگاه Qf-3

نسبت سختی خمشی دیوار به سختی خمشی اولیه (E_i/E_0)	0.25	0.5	1	2	4	8
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	14	13	12	11	12	11

جدول ۸-۲۹. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله افقی مهاری‌ها در ساختگاه Qf-3

نسبت فاصله افقی مهاری‌ها به فاصله افقی اولیه (S_{Hi}/S_{H0})	0.5	0.75	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	8	10	12	12	11

جدول ۸-۳۰. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف فاصله قائم مهاری‌ها در ساختگاه Qf-3

نسبت فاصله قائم مهاری‌ها به فاصله قائم اولیه (S_{vi}/S_{v0})	0.75	0.875	1	1.125	1.25
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	9	8	12	13	13

جدول ۸-۳۱. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف طول شمع زیر ستون در ساختگاه Qf-3

نسبت طول شمع زیر ستون‌ها به طول شمع اولیه ($Ti/T0$)	0.5	1	1.5	2
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	12	12	7	7

جدول ۸-۳۲. مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر مقادیر مختلف عرض دهانه‌ها در ساختگاه Qf-3

نسبت عرض دهانه‌ها به عرض دهانه اولیه (S_{pi}/S_{p0})	0.6	0.8	1	1.2	1.4
ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیواره گود ($\delta h \max$) (mm)	8	8	12	10	12

در بین پنج شرایط ساختگاهی مورد بحث، ساختگاه QC-2 کم‌ترین تاثیرپذیری را از پارامترهای سازه‌ای در بر می‌گیرد که دلیل آن می‌تواند پایداری ذاتی این نوع از ساختگاه باشد؛ بنابراین تفاوت چندانی در رفتار سیستم‌های مهاری مختلف در این ساختگاه وجود نخواهد داشت. گاه سختی در سیستم مهاری به نقطه‌ای می‌رسد که دیگر افزایش در پارامترهای سازه‌ای تاثیری در کاهش تغییر شکل جانبی ایفا نمی‌کند؛ در چنین شرایطی چنانچه مقادیر تغییر شکل جانبی فراتر از حد مجاز باشد، ناگزیر یا باید عمق گود کاهش یابد و یا شرایط ساختگاهی بهسازی گردد؛ به منظور بهسازی شرایط ساختگاهی می‌توان از المان‌های پیش‌تنیده مانند انکورها و یا استرات‌های پیش‌تنیده نیز استفاده نمود [۳۱].

۸-۲- طراحی گود بر اساس سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم

برای ایجاد ارتباط بین ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار و سختی سیستم مهاری با اعمال تغییراتی، پارامتر سختی نسبی (R) به دست آمده از مطالعات برایسون و زاپاتا در سال ۲۰۱۲ بومی سازی شد [۲۸، ۳۱ و ۳۸]. سختی سیستم مهاری تابع سختی دیوار، فاصله افقی و قائم مهاری‌ها، سختی مهاری‌ها، نوع اتصالات و طول شمع زیر ستون می‌باشد و ممکن است در سیستم‌های مهاری مختلف تعاریف متفاوتی داشته باشد و سختی خاک با مدول الاستیسته خاک به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی تعریف می‌شود. پارامتر سختی نسبی، یک پارامتر کیفی است که سختی خاک را به سختی سیستم مهاری مرتبط می‌سازد و شرایط مختلف ژئوتکنیکی و سازه‌ای را در مبانی محاسبات دخیل می‌نماید. این پارامتر به منظور مرتبط نمودن سختی خاک و سازه به عنوان یک متغیر در برابر تغییر شکل جانبی ماکزیمم تعریف شده است.

در این تحقیق با توجه به شرایط ساختگاهی شهر قم و عدم وجود پارامتر مقاومت برشی (چسبندگی) زهکشی نشده در خاکهای رسی و ماسه‌ای غیراشباع آن، جمله مربوطه از رابطه ۵-۱ حذف شد و در عوض با توجه به آنالیز حساسیت صورت گرفته، پارامترهای طول شمع زیر ستون (T) و عرض دهانه‌ها (S_p) در این رابطه دخیل گردید.

همچنین با توجه به اهمیت نسبی پارامترها در جدول ۸-۲، تاثیر پارامترهای سازه‌ای به صورت توانی و بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها در رابطه ۸-۱ اعمال می‌شود. به این ترتیب با توجه به درصد اهمیت نسبی پارامترهای سازه‌ای، دو رابطه ۸-۱ و ۸-۲ برای پنج تیپ ساختگاه شهر قم ارائه شده است که رابطه ۸-۱ مربوط به ساختگاه‌های Qc-1، Qc-2، Qf-1 و Qf-2 و رابطه ۸-۲ مربوط به ساختگاه‌های Qf-2 و Qf-3 است.

$$R = \frac{E_s}{\sqrt{E}} \times \frac{S_H S_V^2 H^3}{\sqrt{I}} \times \frac{S_p}{T} \quad \text{رابطه ۸-۱}$$

$$R = \frac{E_s}{\sqrt{E}} \times \frac{S_H S_V^2 H^2}{\sqrt{I}} \times \frac{S_p}{T} \quad \text{رابطه ۸-۲}$$

در روابط فوق پارامترهای E_s مدول سختی خاک، E سختی خمشی دیوار، S_H فاصله افقی مهاری‌ها، S_V فاصله قائم مهاری‌ها، H ارتفاع گود، I ممان اینرسی دیوار برای واحد طول، S_p عرض دهانه‌ها و T طول شمع زیر ستون می‌باشد.

نسبت ماکزیمم تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه‌های Qc-1، Qc-2، Qf-1، Qf-2 و Qf-3 به ترتیب در شکل‌های ۸-۶ تا ۸-۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های به دست آمده در گراف‌ها به خوبی رابطه بین ماکزیمم تغییر شکل جانبی در برابر سختی نسبی را در پنج تیپ ساختگاه موجود تبیین می‌نماید. روابط ۸-۳ تا ۸-۷ نسبت ماکزیمم تغییر شکل جانبی ایجاد شده به عمق گود را به ترتیب برای ساختگاه‌های Qc-1، Qc-2، Qf-1، Qf-2 و Qf-3 به سختی نسبی مرتبط می‌سازد.

$$\delta h/H * 10000 = 24.783e^{2E-07R} \quad \text{رابطه ۸-۳}$$

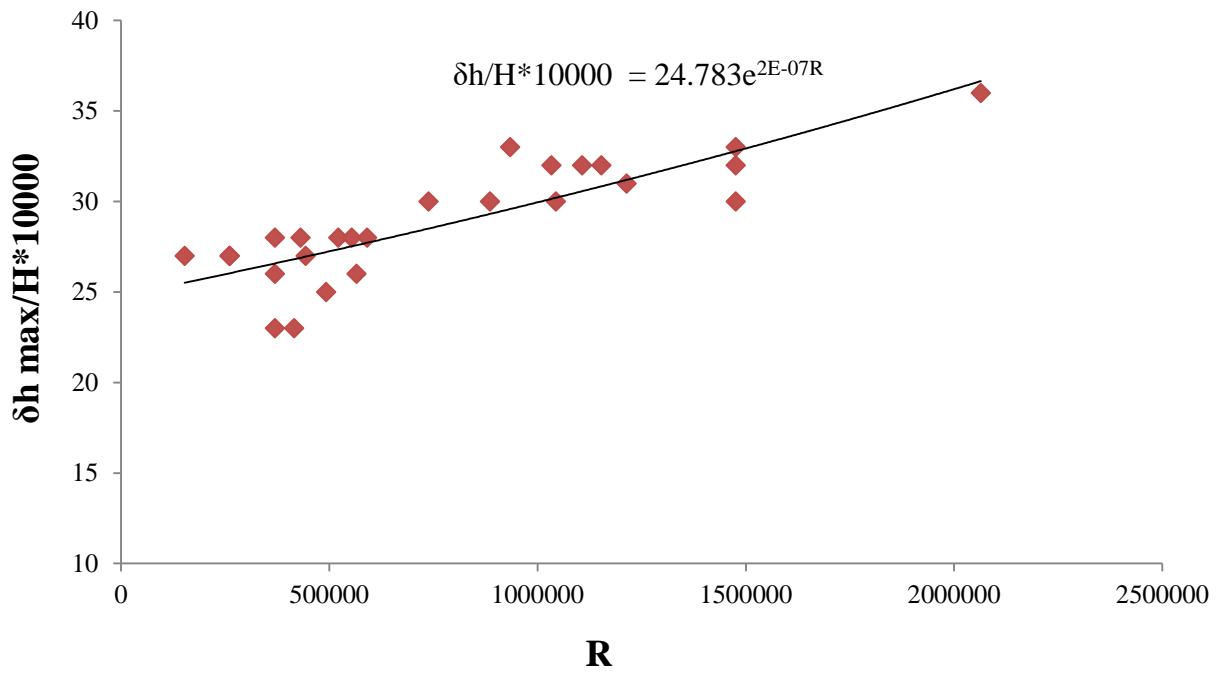
$$\delta h/H * 10000 = 4.2479e^{3E-07R} \quad \text{رابطه ۸-۴}$$

$$\delta h/H * 10000 = 5.0199e^{4E-07R} \quad \text{رابطه ۸-۵}$$

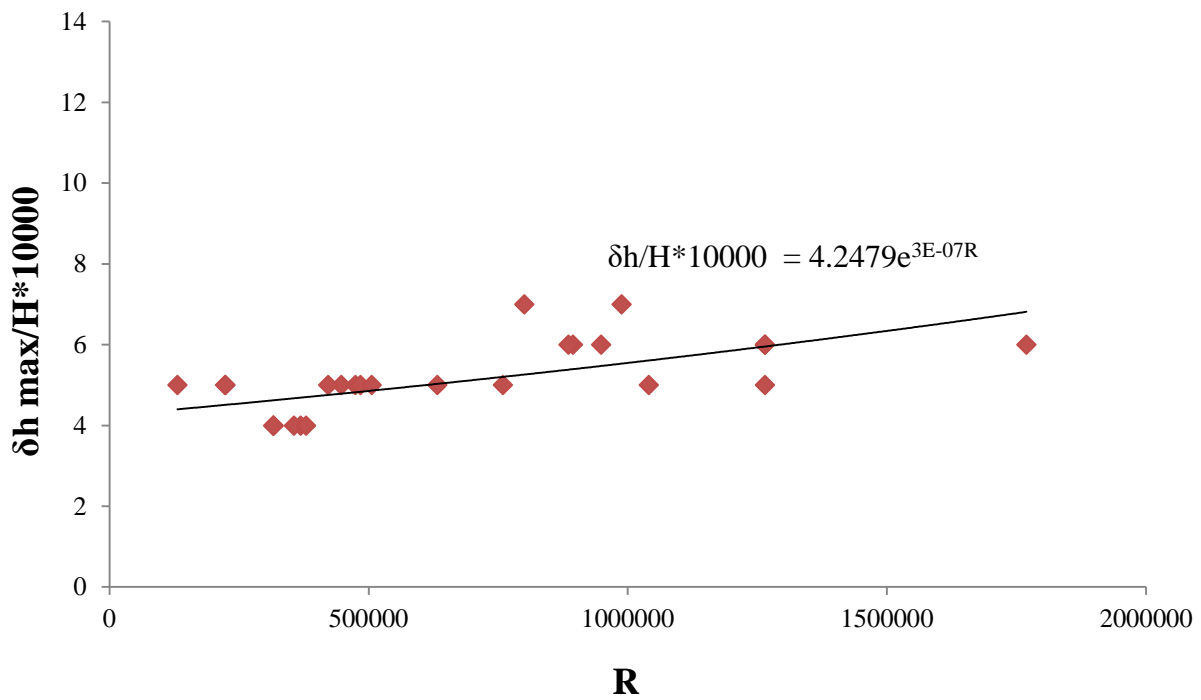
$$\delta h/H * 10000 = 5.2411e^{7E-06R} \quad \text{رابطه ۸-۶}$$

$$\delta h/H * 10000 = 8.108e^{7E-06R} \quad \text{رابطه ۸-۷}$$

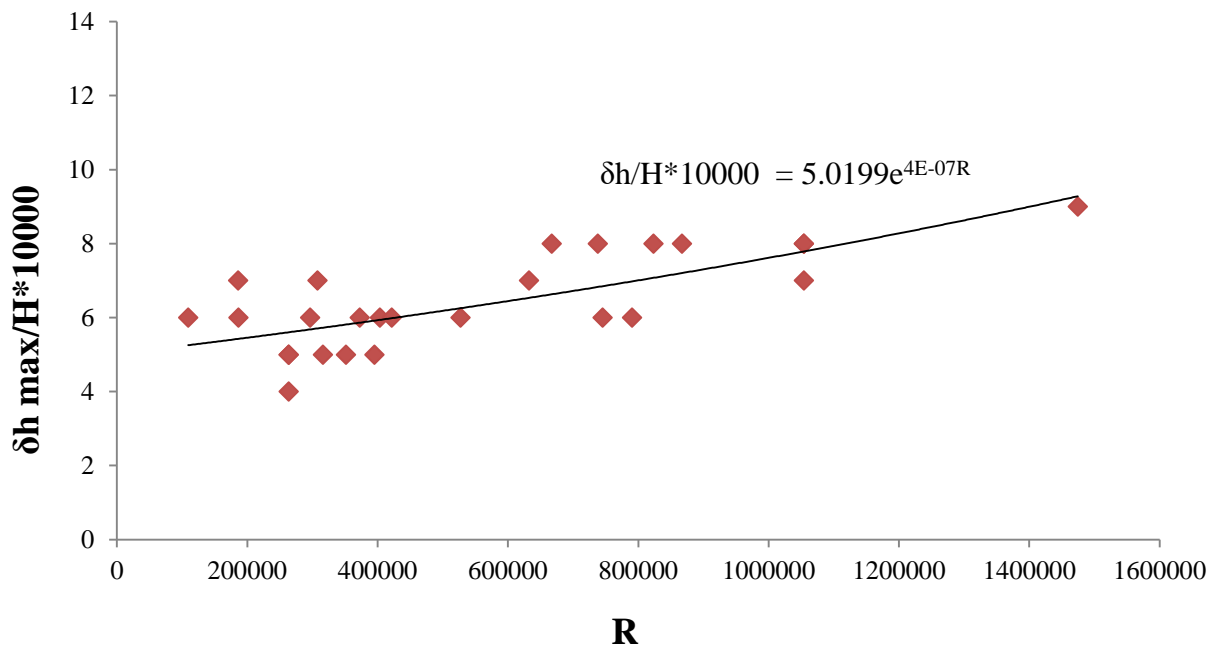
وجود موارد مطالعاتی واقعی در این ساختگاه‌ها و مقایسه با نتایج به دست آمده از مطالعات عددی، در توسعه این روابط بسیار راهگشا خواهد بود.



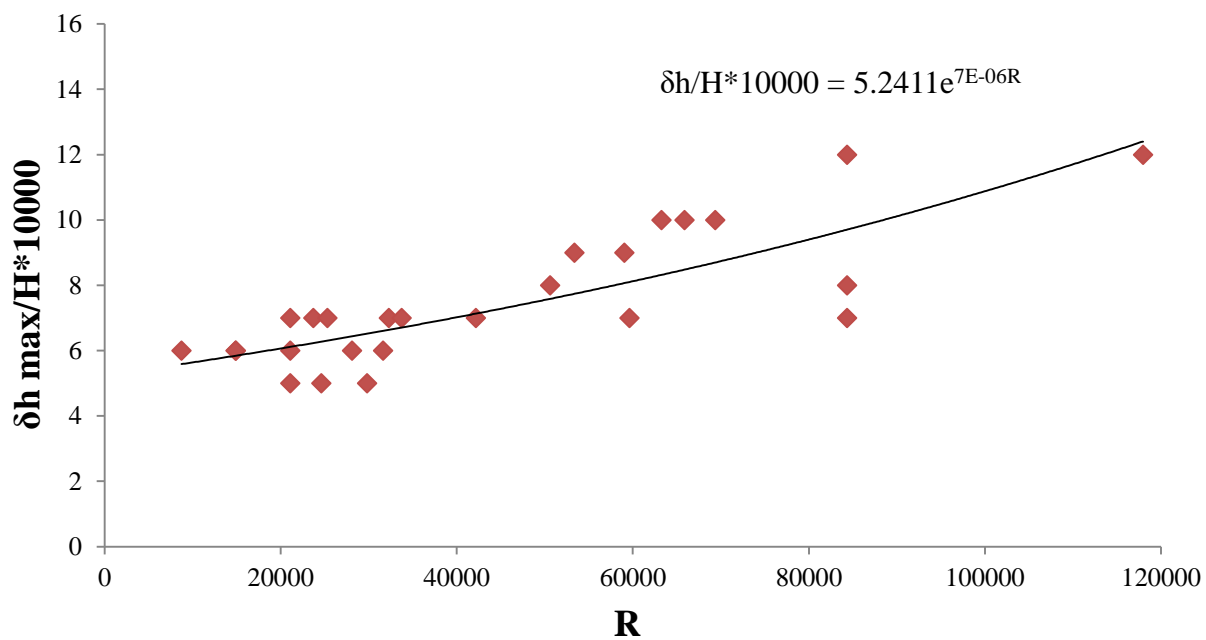
شکل ۸-۶. نسبت ماکزیمم تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه Qc-1



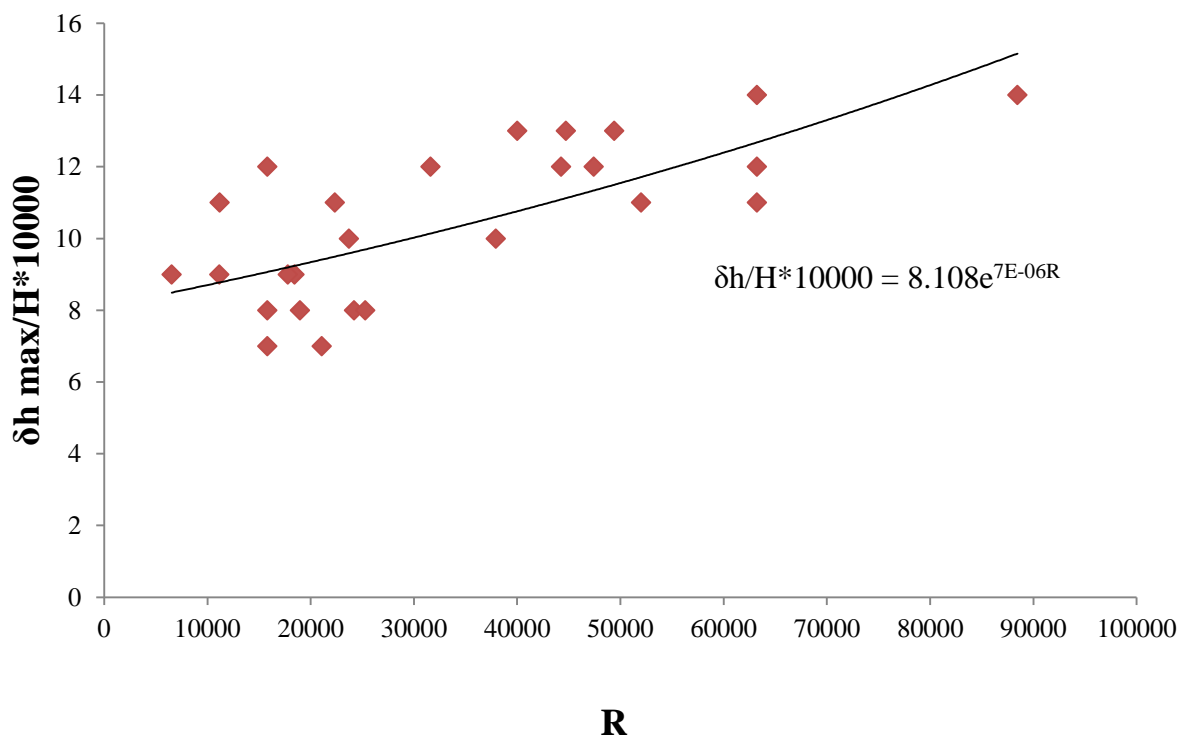
شکل ۸-۷. نسبت ماکزیمم تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه Qc-2



شکل ۸-۸. نسبت ماکزیمم تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه Qf-1



شکل ۸-۹. نسبت ماکزیمم تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه Qf-2



شکل ۸-۱۰. نسبت ماکزیمم تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه Qf-3

توسعه روابط به دست آمده نیازمند صحت‌سنجی نتایج با موارد مطالعاتی با کیفیتی است که داده‌های آن در دسترس بوده و پارامترهای ژئوتکنیکی آن در شرایط ساختگاهی اشاره شده قابل تعریف باشد. در خلا چنین داده‌هایی، به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده برای پنج نوع شرایط ساختگاهی، مدل‌های عددی فرضی در شرایط پروژه میدان پلیس پردازش شد و نتایج مدل‌های عددی با نتایج به دست آمده از روابط ۳-۸ تا ۷-۸ مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۸-۳۳ نتایج به دست آمده را برای مدل‌های عددی پردازش شده و مقادیر به دست آمده از روابط نشان می‌دهد.

جدول ۸-۳۳. مقایسه نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی و روابط به دست آمده در مدل‌های فرضی

شماره	شرایط ساختگاهی	پارامترهای سازه‌ای		ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی	ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی
				دیوار از مدلسازی عددی (میلیمتر)	دیوار از روابط به دست آمده (میلیمتر)
۱	Qc-1	H (m)	۶	۲۱	۱۶
		I (m ⁴ /m)	۰/۰۰۳۶		
		E (MPa)	۲۵۰۰۰		
		S _H (m)	۵		
		S _V (m)	۴		
		S _P (m)	۵		
		T (m)	۲		

۲	Qc-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۶ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۳	۲
۳	Qf-1	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۶ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۴	۳
۴	Qf-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۶ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۷	۴
۵	Qf-3	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۶ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۱۰	۵
۶	Qc-1	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۹۹	۱۰۶

۷	Qc-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۲۷	۲۳
۸	Qf-1	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۲۶	۳۱
۹	Qf-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۲۶	۲۵
۱۰	Qf-3	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۰۳۶ ۲۵۰۰۰ ۵ ۴ ۵ ۲	۲۷	۳۱
۱۱	Qf-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۰ ۰/۰۱۰۴۱۷ ۲۵۰۰۰ ۳,۷۵ ۴ ۵ ۲	۷	۶

۱۲	Qf-1	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۰ ۰/۰۰۱۳۰۲ ۲۵۰۰۰ ۷,۵ ۴ ۵ ۲	۷	۸
۱۳	Qc-1	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۰ ۰/۰۲۸۵۸۳ ۲۵۰۰۰ ۳/۷۵ ۳/۵ ۵ ۲	۲۵	۲۶
۱۴	Qc-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۶ ۰/۰۰۰۴۴۷ ۲۵۰۰۰ ۱۰ ۴ ۵ ۲	۵	۳
۱۵	Qf-1	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۲۸۵۸۳ ۲۵۰۰۰ ۲/۵ ۴ ۵ ۲	۵	۱۰
۱۶	Qc-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۲۸۵۸۳ ۲۵۰۰۰ ۲/۵ ۴ ۵ ۲	۴	۹

۱۷	Qc-1	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۲۸۵۸۳ ۲۵۰۰۰ ۲/۵ ۴ ۵ ۲	۴۲	۵۱
۱۸	Qf-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۲۸۵۸۳ ۲۵۰۰۰ ۲/۵ ۴ ۵ ۲	۷	۱۱
۱۹	Qf-3	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۰۱۳۰۲ ۲۵۰۰۰ ۷/۵ ۴ ۵ ۲	۱۷	۱۷
۲۰	Qf-2	H (m) I (m ⁴ /m) E (MPa) S _H (m) S _V (m) S _P (m) T (m)	۱۸ ۰/۰۰۱۳۰۲ ۲۵۰۰۰ ۴ ۴ ۵ ۲	۲۵	۳۲

نتایج صحت سنجی نشان می‌دهد که در شرایطی که سختی سیستم مهاری زیاد باشد، مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی ایجاد شده با استفاده از روابط اندکی کمتر از واقعیت تخمین زده می‌شود و در شرایطی که سختی سیستم مهاری کم باشد، مقادیر ماکزیمم تغییر شکل جانبی به صورت محافظه کارانه اندکی بیشتر از واقعیت تخمین زده می‌شود. در هر صورت بهره‌گیری از گراف‌های شکل‌های ۸-۶ تا ۸-۱۰، یک تخمین اولیه از مقدار ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار به دست می‌دهد که می‌توان از آن با احتیاط در کارهای مهندسی در شرایط ژئوتکنیکی مشابه استفاده نمود.

با توجه به روابط به دست آمده، امکان پیش‌بینی ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی در ساختگاه‌های مختلف بر اساس سختی سیستم مهاری فراهم می‌باشد. با پیش‌بینی ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی بر اساس نمودار شکل‌های ۸-۶ تا ۸-۱۰، نشست زمین مجاور گود با استفاده از روابط تجربی قابل تخمین است. مطابق با روابط تجربی به دست آمده از مطالعات پیشین، نشست زمین مجاور گود در خاک رسی سفت و یا ماسه‌ای، به صورت مثلثی شکل یا محدب می‌باشد [۴، ۷، ۸ و ۳۹]. نسبت ماکزیمم نشست زمین مجاور گود به تغییر شکل جانبی ماکزیمم دیوار بر اساس مطالعات کلاو و اوروک در سال ۱۹۹۰ برای ساختگاه رسی سفت و یا ماسه‌ای برابر با ۰/۷۵ و بر اساس مطالعات هسیه و او در سال ۱۹۹۷ برای ساختگاه‌های مختلف بین ۰/۵ تا ۱ گزارش شده است؛ در اینجا این نسبت برای شرایط ساختگاهی شهر قم برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته شد [۴، ۷ و ۳۱]. بر این اساس و با توجه به ساختگاه‌های موجود، پروفیل نشست به صورت محدب در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب نشست زمین برای فواصل $d/H_e \leq 2$ که d فاصله از دیواره گود و H_e عمق گود می‌باشد، طی رابطه ۸-۸ و برای فواصل $2 < d/H_e \leq 4$ طی رابطه ۸-۹ به دست می‌آید [۴].

$$\delta_v = \left(-0.636 \sqrt{\frac{d}{H_e}} + 1 \right) \delta_{vm} \quad \text{for } \frac{d}{H_e} \leq 2 \quad \text{رابطه ۸-۸}$$

$$\delta_v = \left(-0.171 \sqrt{\frac{d}{H_e}} + 0.342 \right) \delta_{vm} \quad \text{for } 2 < \frac{d}{H_e} \leq 4 \quad \text{رابطه ۸-۹}$$

پارامتر δ_{vm} در روابط بالا نشان‌دهنده ماکزیمم نشست زمین مجاور گود است که برابر با ۰/۷۵ ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب با توجه به فاصله استقرار ساختمان مجاور از لبه گود (d)، ماکزیمم نشست ساختمان مجاور گود تخمین زده می‌شود. ماکزیمم نشست مجاز سازه مجاور گود، به سطح خرابی قابل قبول در سازه مجاور گود بستگی دارد؛ سطح خرابی در سازه در اثر نشست زمین مجاور گود بر اساس روابط تجربی ارائه شده توسط محققین پیشین نظیر بسکاردین و کردینگ^۱، برلند^۲، دی^۳ و بون^۴ قابل برآورد است [۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳]. سطح خرابی قابل قبول برای هر سازه بر اساس هندسه، نوع سازه، کارایی و اهمیت آن توسط مهندسين مجرب و کارشناسان خبره تعیین می‌شود. به این ترتیب با توجه به ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار و به تبع آن نشست مجاز زمین مجاور گود و با در نظر گرفتن سطح خرابی قابل قبول در سازه‌های مجاور، می‌توان اقدام به طراحی سیستم مهاری مبتنی بر روابط حدی و با کنترل تغییر شکل بر اساس سطح عملکرد نمود.

به این ترتیب این روش با استفاده از پارامترهای خاک و سیستم مهاری، تغییر شکل نهایی جانبی و قائم را برآورد می‌نماید و به طراح اجازه می‌دهد که بر اساس ماکزیمم نشست مجاز، ابعاد المان‌های سیستم مهار جانبی را طراحی نماید. از آنجاییکه در این روش شرایط محدود کننده بر اساس ماکزیمم نشست مجاز زمین مجاور گود تعیین می‌شود، استفاده از آن در پروژه‌های شهری مناسب است. فلوچارت شکل ۸-۱۱، روش طراحی بر اساس سطح عملکرد مبتنی بر کنترل تغییر شکل را بر اساس نمودار شکل‌های ۸-۶ تا ۸-۱۰ که با انجام مطالعات عددی و میدانی به دست آمدند، تبیین می‌کند. باید توجه داشت که گراف‌های ارائه شده زمانی کاربرد خواهد

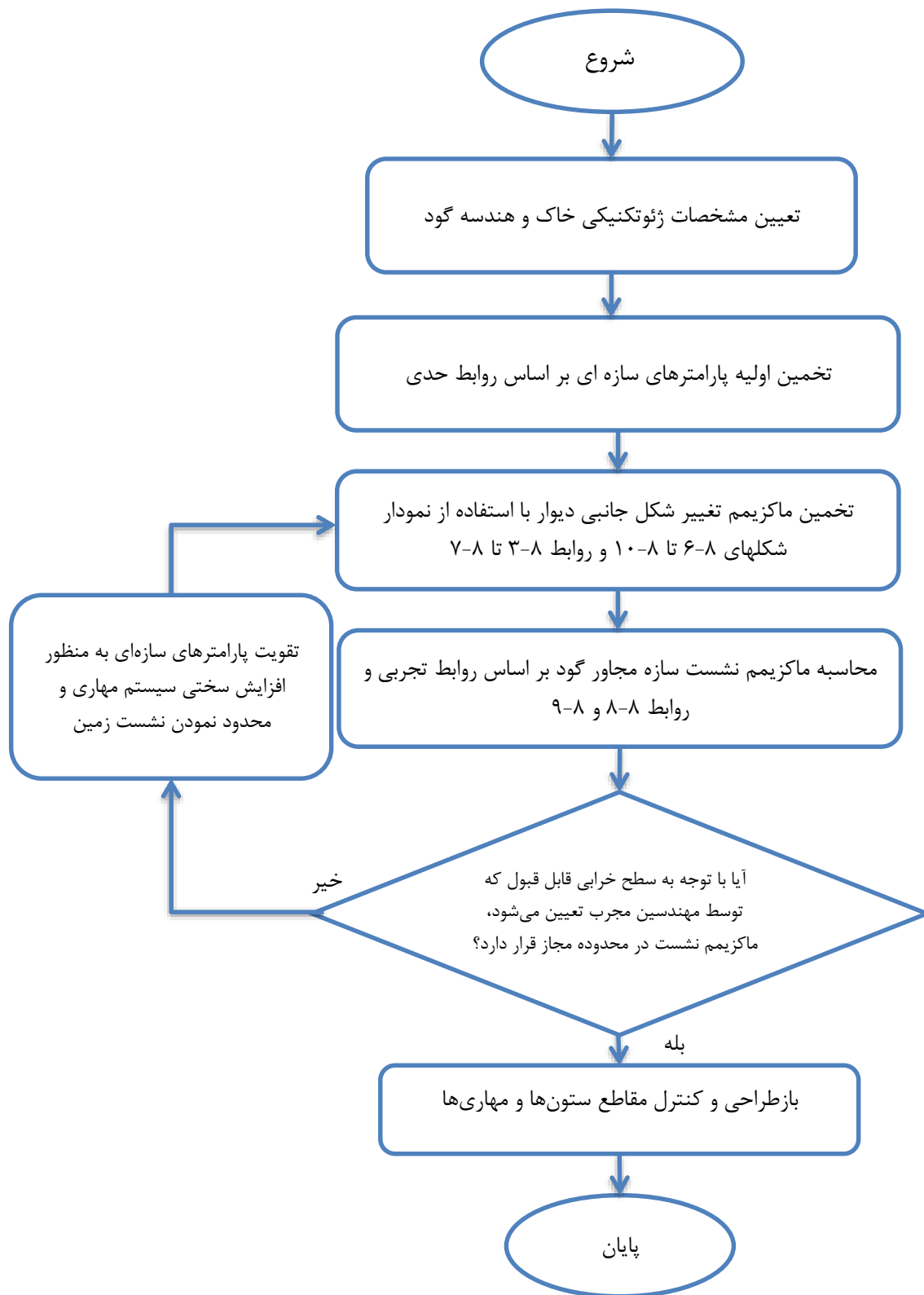
^۱ Boscardin and Cording (1989)

^۲ Burland (1997)

^۳ Day (1998)

^۴ Boone (2001)

داشت که مراحل اجرایی در عملیات پایدارسازی گود با کیفیت خوبی انجام شود؛ به عبارت دیگر آن دسته از تغییر شکل‌هایی که ناشی از نواقص و اشتباهات اجرایی باشد، در روش طراحی ارائه شده در نظر گرفته نشده است. همچنین توجه به این نکته ضروری است که فلوچارت ارائه شده تنها برای شرایط ساختگاهی که به آن‌ها اشاره شد، پیشنهاد شده است و صحت سنجی آن با داده‌های محلی ضروری است. لازم به یادآوری است که قضاوت مهندسی در رابطه با تشخیص تیپ زمین، تغییر شکل مجاز برای زمین و مسئولیت استفاده از گراف‌های ارائه شده به عهده طراح پایدارسازی گود است و مبانی ارائه شده به صورت خام نمی‌تواند مبنایی برای طراحی گود در کارهای مهندسی قرار گیرد. این روابط به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های مجاور گود در پایدارسازی طراحی شده توسط مهندسین طراح و به عنوان یک تخمین اولیه قابل کاربرد است و توسعه این روابط نیازمند مقایسه با پروژه‌های واقعی و اصلاح داده‌های موجود می‌باشد.



شکل ۸-۱۱. فلوچارت طراحی پایدارسازی گود بر اساس سطح عملکرد مبتنی بر کنترل تغییر شکل در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم

بر اساس مطالب ارائه شده، مراحل طراحی پایدارسازی گود بر اساس سطح عملکرد به شرح زیر است:

- ۱) تعیین نوع شرایط ساختمانی (برای استفاده از روابط پیشنهادی، شرایط ساختمانی حتما باید در چهارچوب شرایط ساختمانی اشاره شده در این گزارش باشد).
- ۲) تعیین سطح خرابی قابل قبول برای سازه‌های مجاور گود و نشست مجاز زمین مجاور
- ۳) محاسبه ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار با استفاده از روابط تجربی به دست آمده از مطالعات پیشین (همان‌طور که عنوان شد، ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیوار در شرایط ساختمانی قم غالباً $1/33$ برابر نشست مجاز زمین در لبه گود است).
- ۴) محاسبه سختی مورد نیاز سیستم مهاری با توجه به نوع ساختگاه و عمق گود مورد نظر با استفاده از روابط ۳-۸ تا ۷-۸ و شکل‌های ۶-۸ تا ۱۰-۸
- ۵) تخمین پارامترهای سازه‌ای به نحوی که سختی مورد نیاز سیستم مهاری به دست آمده از مرحله قبل با توجه به روابط ۱-۸ و ۲-۸ ارضا شود.
- ۶) کنترل پارامترهای سازه‌ای بر اساس روابط تعادل حدی و اطمینان از کفایت عناصر سازه‌ای در برابر شکست سازه‌ای

استفاده از روش ارائه شده برای طراحی بر اساس سطح عملکرد، طراح را از طراحی المان‌های پایدار کننده با استفاده از روش‌های مبتنی بر تنش بی‌نیاز نمی‌کند؛ بلکه استفاده از این روش به طراح کمک می‌کند که خدمت‌پذیری سازه‌های مجاور را در پایدارسازی گود بر اساس المان‌های طراحی شده کنترل نماید و در صورت لزوم این المان‌ها را تقویت کند. در انتها مجدداً تاکید می‌شود که روش ارائه شده برای سایر شهرها غیر از شهر قم، نیازمند بهینه‌سازی با داده‌های محلی و توسعه روابط با استفاده از اطلاعات به دست آمده از پروژه‌های واقعی است.

مثال موردی برای روش طراحی ارائه شده

۹-۱- خلاصه‌ای از روش سطح عملکرد در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم

همانطور که عنوان شد، ماکزیمم نشست زمین مجاور گود در شرایط ژئوتکنیکی شهر قم برابر با $0/75$ ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار در نظر گرفته می‌شود. با توجه به فاصله استقرار ساختمان مجاور از لبه گود (d)، ماکزیمم نشست ساختمان مجاور گود تخمین زده می‌شود. ماکزیمم نشست مجاز سازه مجاور گود، به سطح خرابی قابل قبول در سازه مجاور گود بستگی دارد. سطح خرابی در سازه در اثر نشست زمین مجاور گود بر اساس روابط تجربی ارائه شده توسط محققین پیشین قابل برآورد است؛ سطح خرابی قابل قبول برای هر سازه بر اساس هندسه، نوع سازه، کارایی و اهمیت آن توسط مهندسين مجرب و کارشناسان خبره تعیین می‌شود. به این ترتیب با توجه به ماکزیمم تغییر شکل جانبی دیوار و به تبع آن نشست مجاز زمین مجاور گود و با در نظر گرفتن سطح خرابی قابل قبول در سازه‌های مجاور، می‌توان اقدام به طراحی سیستم مهاری مبتنی بر روابط حدی و با کنترل تغییر شکل بر اساس سطح عملکرد نمود. لذا این روش با استفاده از پارامترهای خاک و سیستم مهاری، تغییر شکل نهایی جانبی و قائم را برآورد می‌نماید و به طراح اجازه می‌دهد که بر اساس ماکزیمم نشست مجاز، ابعاد المان‌های سیستم مهار جانبی را طراحی نماید.

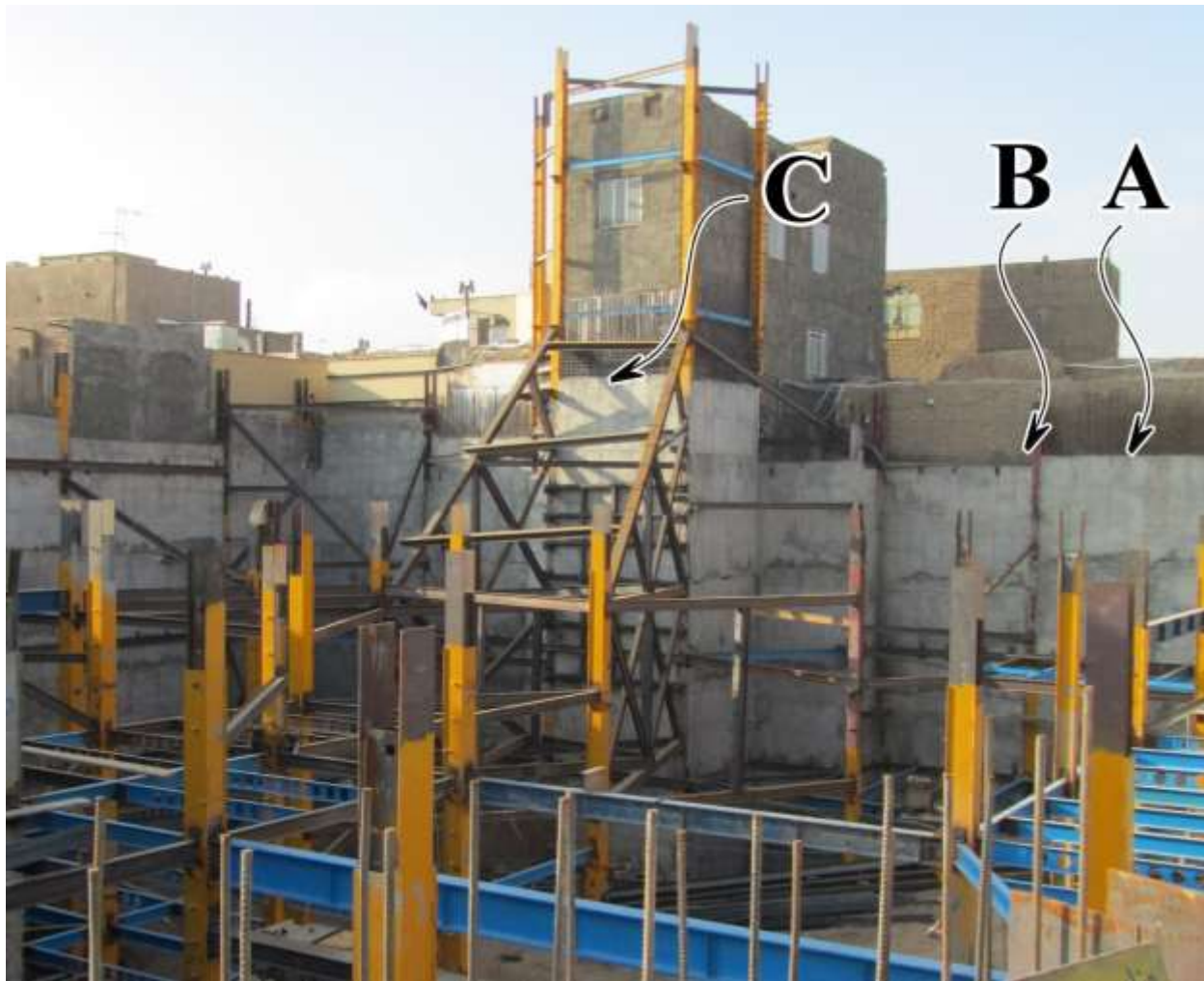
۹-۲- مثال‌های موردی

در ادامه دو مثال موردی از نحوه استفاده از روش ارائه شده تشریح می‌شود. در مثال اول به یک پروژه پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا ناقص در مرکز شهر قم پرداخته شده است و در مثال دوم پروژه پایدارسازی شده با سازه نگهبان خرابایی مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی مهم پروژه اول آن است که در آن پایش تغییر شکل دیواره گود و مدلسازی عددی نیز انجام شده است تا امکان کنترل و بررسی میزان دقت روش پیشنهادی در این تحقیق وجود داشته باشد.

۹-۲-۱- پروژه پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا اصلاح شده

قبل از توضیح نحوه طراحی پایدارسازی گود به روش سطح عملکرد، به ارائه توضیحاتی در خصوص پروژه پرداخته می‌شود. این پروژه در یکی از خیابان‌های پرتردد مرکزی شهر و در محدوده مسیر تونل مترو واقع شده است. بافت فرسوده، ساختمان‌های بنایی قدیمی و ساختمان بنایی ۳ طبقه که در پشت این گود قرار گرفته، از شرایط محیطی حاکم بر آن است. لازم به ذکر است که در طول مدت

زمان گودبرداری و نصب سیستم مهارتی، حفاری تونل مترو به محدوده این گود نرسیده است. موقعیت ساختمان بنایی سه طبقه در پشت گود به همراه المان‌های تقویتی در این مقطع که پس از وقوع تغییر شکل‌هایی بیش از حد انتظار اعمال شد در شکل ۹-۱ مشاهده می‌شود. روند تغییر شکل‌ها در ضلع جنوبی این گود در سه مقطع مورد پایش قرار گرفت که در شکل ۹-۱ قابل رویت است. ساختمان بنایی سه طبقه در پشت مقطع C واقع شده است. گمانه‌های حفاری شده در محدوده سایت پروژه دلالت بر وجود ساختگاه Qf-2 دارد. لوگ یکی از گمانه‌های حفاری شده در شکل ۹-۲ ملاحظه می‌شود.



شکل ۹-۱. موقعیت ساختمان سه طبقه در پشت گود به همراه المان‌های تقویتی پایدار کننده و مقاطع مورد پایش

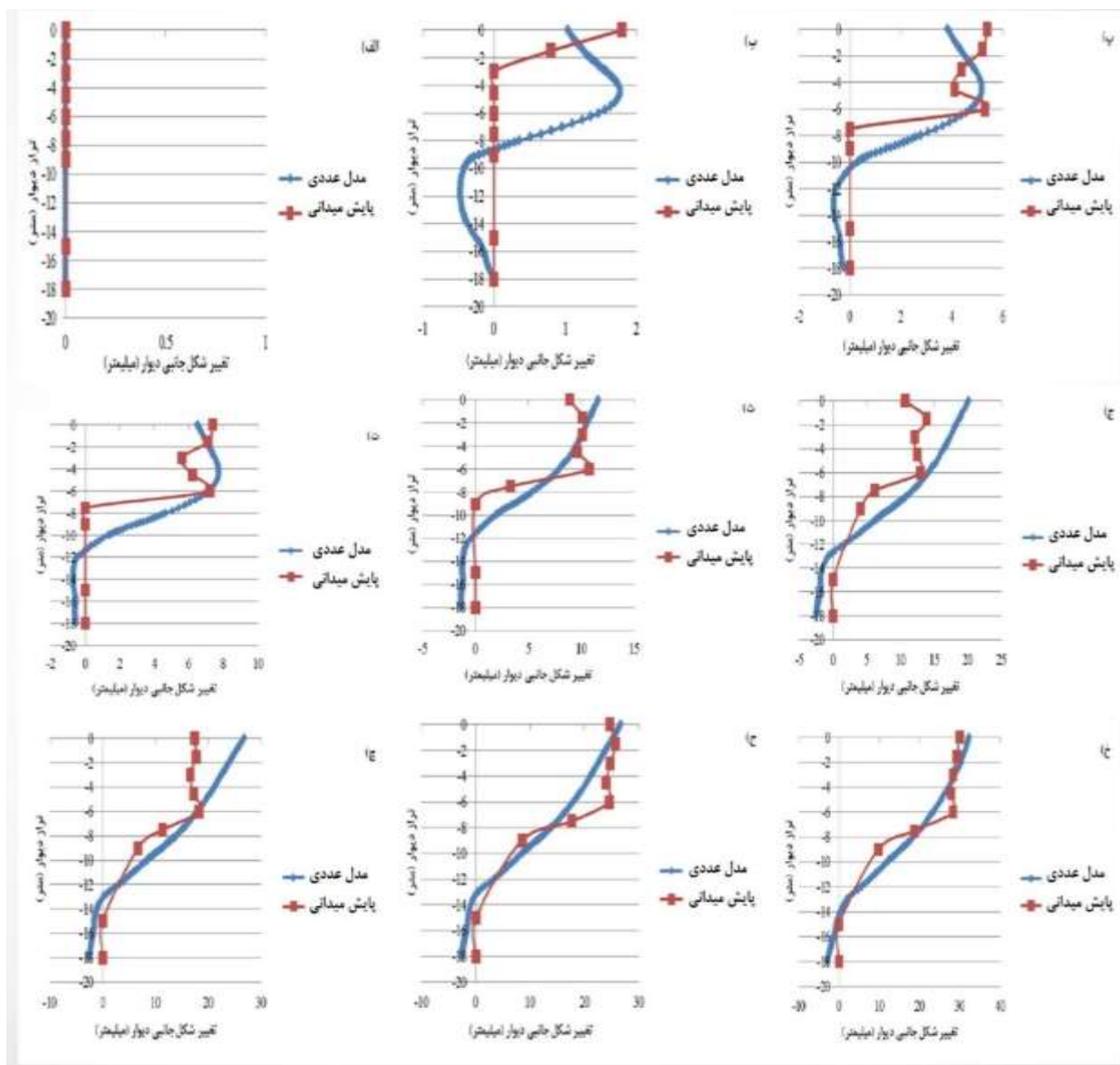
در این گود پایدارسازی به روش ساخت از بالای اصلاح شده انجام گرفته است؛ به این صورت که دال‌های سازه بعد از اجرای اسکلت، دیوار حائل و فونداسیون از پایین به بالا اجرا می‌شود. در این روش به منظور اینکه فضای کاری کمتری برای تکمیل اسکلت سازه در حین اجرای سقف‌ها اشغال گردد، دال‌های سازه با قالب بندی بدون جک و شمع و با استفاده از سقف‌های معلق ورق فولادی اجرا شده است.

عمق (متر)	نمونه	بروفاصل زمن شناسی	شناسایی نوع خاک	طبقه بندی		وزن مخصوص			پارامترهای مقاومتی							
				انمازه دانه ها			حدود آتبرگ		درصد رطوبت	خشک تر	SPT	روش مستقیم				
				۷۵ (%)	۴۲۵ (%)	۲۰۰ (%)	LL	PI	w%	γ_w (gr/cm ³)	γ_d (gr/cm ³)	N2+N3	ϕ Deg	c kg/cm ²	نوع آزمایش	
۳			SM, Silty sand	۰	۶۰	۲۰	—	NP	۳/۷۱٪	۱/۶۹	۱/۴۳	۲۲				
۴			SM, Silty sand	۰	۵۲	۲۶	—	NP	۴/۵۲٪	۱/۷۵	۱/۶۷	۲۵	۲۳	-۰.۶	سریع	
۵			ML, Silty silt	۰	۴۷	۵۳	—	NP	۱/۲۴٪	۱/۸۴	۱/۶۴	۲۵				
۶			SP-SM, Poorly graded sand with silt and gravel	۱۷	۶۹	۱۴	—	NP	۳/۵٪	۱/۸	۱/۷۲	۲۸				
۷			CL-ML, Silty clay	۰	۸	۹۲	۲۸٪	۷٪	۱/۲۶٪	۱/۷۶	۱/۵۶	۲۲	۲۱	-۰.۲	سریع	
۱۰			SM, Silty sand with gravel	۳۳	۵۲	۱۳	—	NP	۳/۲٪	۱/۶۹	۱/۶۴	۲۲				
۱۲			SM, Silty sand with gravel	۲۲	۷۰	۸	—	NP	۳/۷٪	۱/۷۵	۱/۶۹	۲۲	۲۷	-۰.۶	سریع	
۱۴			SM, Silty sand with gravel	۲۵	۶۹	۶	—	NP	۳/۱٪	۱/۷۶	۱/۷۱	۲۸				
۱۶			GP-GM, Poorly graded gravel with silt and sand	۷۱	۲۵	۴	—	NP	۳/۶٪	۲/۰.۵	۱/۹۸	>۵۰				
۱۸			GP-GM, Poorly graded gravel with silt and sand	۶۸	۲۲	۱۰	—	NP	۴/۷٪	۲/۱	۲/۰.۱	>۵۰	۳۸	-۰.۲	سریع	
۲۰			GW-GM, Well graded gravel with silt and sand	۴۹	۴۴	۷	—	NP	۴/۳٪	۲/۱.۵	۲/۰.۶	>۵۰				
۲۲			CL-ML, Silty clay with sand	۰	۲۰	۸۰	۲۹٪	۷٪	۱/۱۸٪	۱/۸۶	۱/۶۶	۲۴				
۲۴			CL-ML, Silty clay with sand	۰	۲۳	۷۷	۲۷٪	۷٪	۱/۳/۱٪	۱/۷۹	۱/۵۸	۲۵				
۲۶			ML, Silt	۰	۶	۹۲	—	NP	۱/۱۵٪	۱/۹۵	۱/۷۵	۲۵	۲۶	-۰.۱۳	سریع	
۲۸			CL-ML, Silty clay	۰	۱۲	۸۸	۲۳٪	۶٪	۱/۳/۳٪	۱/۸۵	۱/۶۵	۲۷				
۳۰			ML, Silty silt	۰	۴۸	۵۲	—	NP	۱/۲/۱٪	۱/۸	۱/۶۱	۲۵				
۳۲			SP-SM, Poorly graded sand with silt and gravel	۴۵	۴۹	۶	—	NP	۴/۳٪	۱/۸۴	۱/۷۶	>۵۰	۳۹	-۰.۱	سریع	
۳۴			GM, Silty gravel with sand	۴۲	۴۱	۱۶	—	NP	۵٪	۲/۰.۹	۱/۹۹	>۵۰				
۳۶			CL-ML, Silty clay	۰	۶	۹۲	۲۱٪	۶٪	۱/۳/۴٪	۱/۸۵	۱/۶۳	۲۸				
۳۸			CL-ML, Silty clay	۰	۸	۹۲	۲۰٪	۵٪	۱/۱۸٪	۱/۸۷	۱/۶۷	۲۷	۲۱	-۰.۲۲	سریع	

Note:
 ▲ disturbed: core barrel ● s.p.t. ■ undisturbed: core sample
 ○ undisturbed: Shelby □ disturbed sample ▼ water level

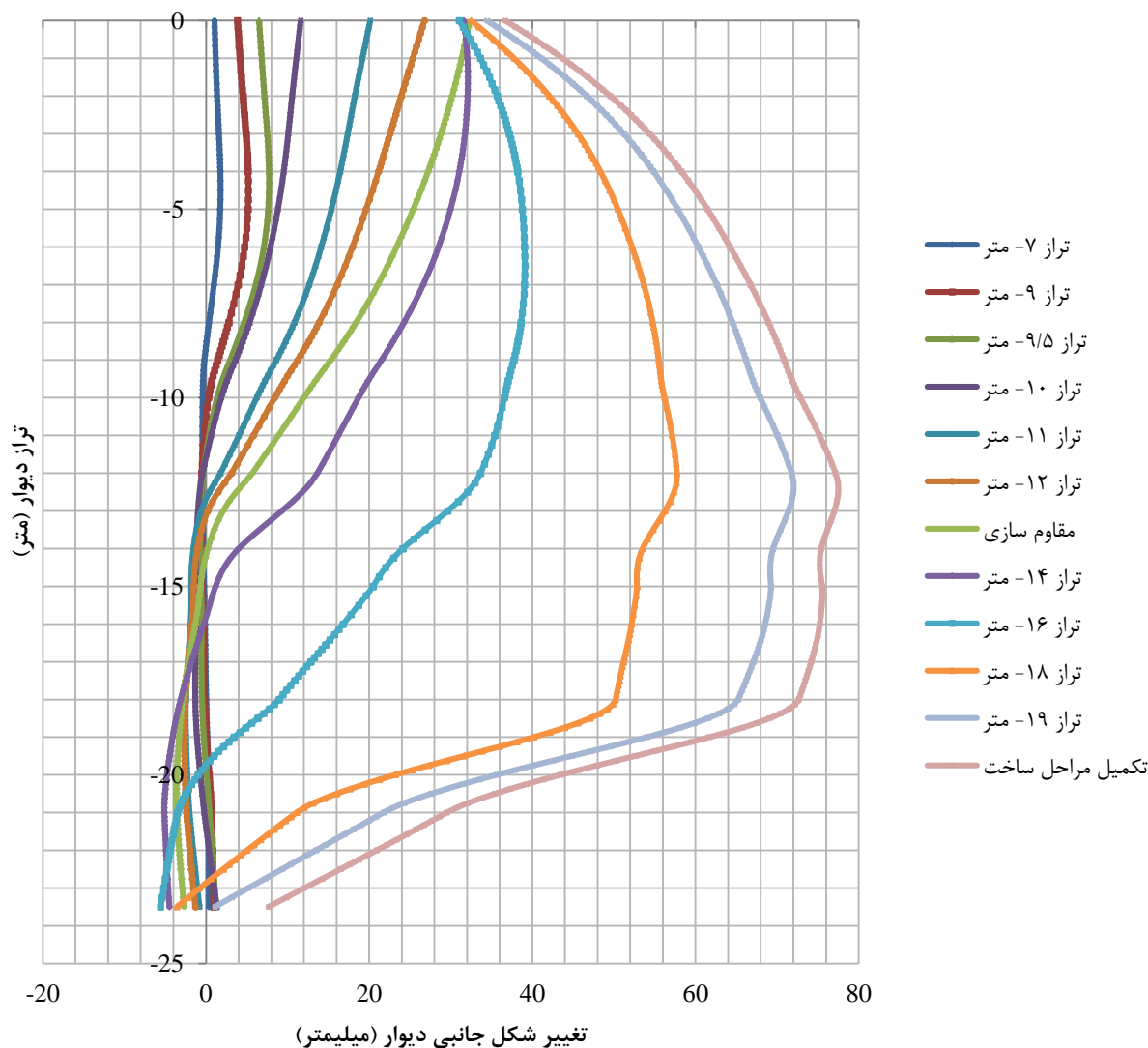
شکل ۹-۲. لوگ یکی از گمانه‌های حفاری شده در محدوده سایت پروژه

نتایج به دست آمده از مدل عددی برای مقطع C در مراحل مختلف پایدارسازی در شکل ۹-۳ مشاهده می‌شود. مطابق با این شکل و با توجه به پارامترهای ژئوتکنیکی ارائه شده در محدوده شهر قم، روند تغییر شکل در مدل عددی با پایش‌های میدانی به دست آمده با استفاده از دوربین توتال استیشن مقایسه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل عددی، ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیوار در این مقطع تا پایان شهریور ماه سال ۱۳۹۵، به ۳۲ میلیمتر رسیده است. این در شرایطی است که نتایج پایش‌های میدانی ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی دیوار را تا این زمان برای مقطع C، ۳۰ میلیمتر ثبت کرده است [۳۷].



شکل ۹-۳. مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعات عددی با قرائت‌های ثبت شده در پایش‌های میدانی در مقطع C در الف) ۹۵/۲/۲۸ ب) ۹۵/۳/۱۲ پ) ۹۵/۳/۲۶ ت) ۹۵/۴/۱۲ ث) ۹۵/۴/۲۷ ج) ۹۵/۵/۶ چ) ۹۵/۵/۳۰ ح) ۹۵/۶/۱۴ خ) ۹۵/۶/۳۱ [۳۷]

با توجه به کالیبره شدن مدل عددی با شرایط پروژه، ادامه مدلسازی گود نشان می‌داد که چنانچه مراحل ساخت در این مقطع به همین ترتیب دنبال می‌شد، در پایان عملیات پایدارسازی گود و با رسیدن عملیات حفاری به عمق ۲۱ متر ماکزیمم مقدار تغییر شکل جانبی در محدوده ۷۸ میلیمتر قابل انتظار بود. از طرفی وجود سازه بنایی سه طبقه در پشت مقطع C، روند ساخت را مخاطره آمیز می‌کرد. روند تغییر شکل‌ها در صورت تداوم مراحل ساخت طبق روند اولیه، مطابق با گراف‌های شکل ۹-۴ پیش‌بینی می‌شد.



شکل ۹-۴. پیش‌بینی روند تغییر شکل جانبی دیوار تا پایان عملیات حفاری و پایدارسازی گود در صورت حفظ روند اجرایی اولیه

در ادامه به بررسی مراحل پایدارسازی گود این پروژه بر اساس روش سطح عملکرد ارائه شده در فصل ۸ پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که ستون‌های سازه نگهدارنده گود دابل IPE240 و تیرهای اصلی IPE300 با میانگین فاصله ۵ متر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب مراحل طراحی پایدارسازی این گود بر اساس سطح عملکرد طی ۷ گام زیر انجام می‌شود.

گام اول:

نوع سازه نگهدارنده و سختی المان‌های مورد استفاده از آن توسط مهندس طراح، تعیین می‌شود. در اینجا گود به روش ساخت از بالا اصلاح شده با احداث دال‌های میانی بعد از انجام عملیات پایدارسازی مهار شده است و همانطور که عنوان شد برای المان‌های تیر و ستون به ترتیب IPE300 و دابل IPE240 استفاده شده است.

گام دوم:

با توجه به عمق گود، شرایط هندسی و شرایط ساختگاهی پارمترهای مورد نیاز برای برآورد سختی نسبی سیستم مهاري تعیین می‌شود. در این پروژه عمق گود (H) برابر با ۲۱ متر می‌باشد؛ شرایط ساختگاهی متناظر با ساختگاه Qf-2 بوده و مدول الاستیسیته خاک (E_s) ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد؛ سختی خمشی دیوار ۲۵۰۰۰ مگاپاسکال است؛ ممان اینرسی دیوار (I) با در نظر گرفتن دیوار بتنی مسلح با ضخامت ۳۵ سانتیمتر برابر با $0.0036 \text{ (m}^4/\text{m)}$ می‌باشد؛ فاصله افقی مهاري‌ها (S_H) ۵ متر است که با توجه به استفاده از IPE300 نیاز به تبدیل به سختی معادل است؛ فاصله قائم مهاري‌ها (S_V) ۴ متر است؛ عرض دهانه‌ها (S_P) در روش ساخت از بالا اصلاح شده ۵ متر می‌باشد و طول شمع زیر ستون (T) ۲ متر اجرا شده است.

فاصله معادل برای IPE300 به این ترتیب به دست می‌آید.

سطح مقطع IPE360 برابر با $72/7$ سانتیمتر مربع و سطح مقطع IPE300 برابر با $53/8$ سانتیمتر مربع است؛ به این ترتیب با نسبت تناسب به دست می‌آید که استفاده از IPE300 با فاصله ۵ متر معادل با استفاده از IPE360 با فاصله $6/75$ متر است. لذا مقدار S_H به $6/75$ متر معادل سازی می‌شود. به این ترتیب مشخصات پارمترهای سختی نسبی سیستم مهاري مطابق با جدول ۹-۱ تعیین می‌شود.

جدول ۹-۱. مشخصات پارمترهای سختی نسبی سیستم مهاري

H (m)	E_s (MPa)	E (MPa)	I (m^4/m)	S_H (m)	S_V (m)	S_P (m)	T (m)
۲۱	۲۰	۲۵۰۰۰	۰/۰۰۳۶	۶/۷۵	۴	۵	۲

گام سوم:

با توجه به مشخصات ارائه شده برای پارامتر سختی نسبی سیستم مهاري، این پارامتر مطابق با رابطه ۸-۲ که مختص شرایط ساختگاهی Qf-2 و Qf-3 است به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} R &= \frac{E_s}{\sqrt{E}} \times \frac{S_H S_V^2 H^2}{\sqrt{I}} \times \frac{S_P}{T} \\ &= \frac{20}{\sqrt{25000}} \times \frac{6.75 \times 4^2 \times 21^2}{\sqrt{0.0036}} \times \frac{5}{2} \\ &= 251022 \end{aligned}$$

گام چهارم:

با توجه به مقدار R به دست آمده از گام سوم مقدار تغییر شکل جانبی ماکزیمم دیواره گود طبق رابطه ۸-۶ که مختص ساختگاه Qf-2 است قابل برآورد است.

$$\delta h/H * 10000 = 5.2411e^{7E-06R} \rightarrow$$

$$\begin{aligned} \delta h &= \frac{5.2411e^{7E-06R} \times H}{10000} \\ &= \frac{30.38 \times 25000}{10000} \\ &= 76_{mm} \end{aligned}$$

گام پنجم:

پروفیل نشست زمین در شرایط ساختمانی قم به صورت محدب می‌باشد و نسبت ماکزیمم نشست زمین مجاور گود به تغییر شکل جانبی ماکزیمم دیوار برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس ماکزیمم نشست زمین در مجاورت گود برابر است با:

$$\begin{aligned} \delta v_{max} &= 0.75\delta h_{max} \\ &= 0.75 \times 76 \\ &= 57_{mm} \end{aligned}$$

گام ششم:

با توجه به فاصله سازه مجاور از لبه گود، نشست زیر سازه مجاور گود با استفاده از رابطه ۸-۸ محاسبه می‌شود. در این پروژه سازه مجاور در لبه گود واقع شده است لذا فاصله از لبه گود (d) برابر با صفر است.

$$\begin{aligned} \delta_v &= \left(-0.636 \sqrt{\frac{d}{H_e}} + 1 \right) \delta_{vm} \\ &= \delta_{vm} \\ &= 57_{mm} \end{aligned}$$

گام هفتم:

با توجه به فرسوده بودن سازه مجاور گود و سطح خرابی قابل قبول برای آن، نشست غیریکنواخت ۵۷ میلیمتری برای این سازه فراتر از محدوده مجاز است و منجر به گسیختگی و آوار شدن آن خواهد شد. لذا می‌بایست سختی سیستم مهاری با بکارگیری المان‌های اضافه تقویت شده و مجدد مراحل محاسباتی طی شود.

از طرف دیگر همانطور که ملاحظه شد مقدار تغییر شکل جانبی ماکزیمم دیواره گود با استفاده از مدلسازی عددی ۷۸ میلیمتر پیش‌بینی شد و روابط ارائه شده در این گزارش این مقدار را ۷۶ میلیمتر پیش‌بینی کرد. لذا بر اساس تخمین مقدار تغییر شکل جانبی و نشست زمین مجاور گود بر اساس طی کردن ۷ گام فوق، نیاز به تقویت المانهای سازه‌ای است.

توالی اجرا در این پروژه به منظور کنترل تغییر شکل توسط پیمانکار اصلاح گردید؛ به این ترتیب که از تراز ۱۴- متر به پایین، پیش از حفاری خاک با رسیدن به تراز تیرهای سازه، تیرهای اصلی و فرعی و بعضاً دیافراگم‌های سازه احداث گردید که طبق تصویر زیر انجام شده (شکل ۹-۵) و سپس اقدام به حفاری خاک شد.



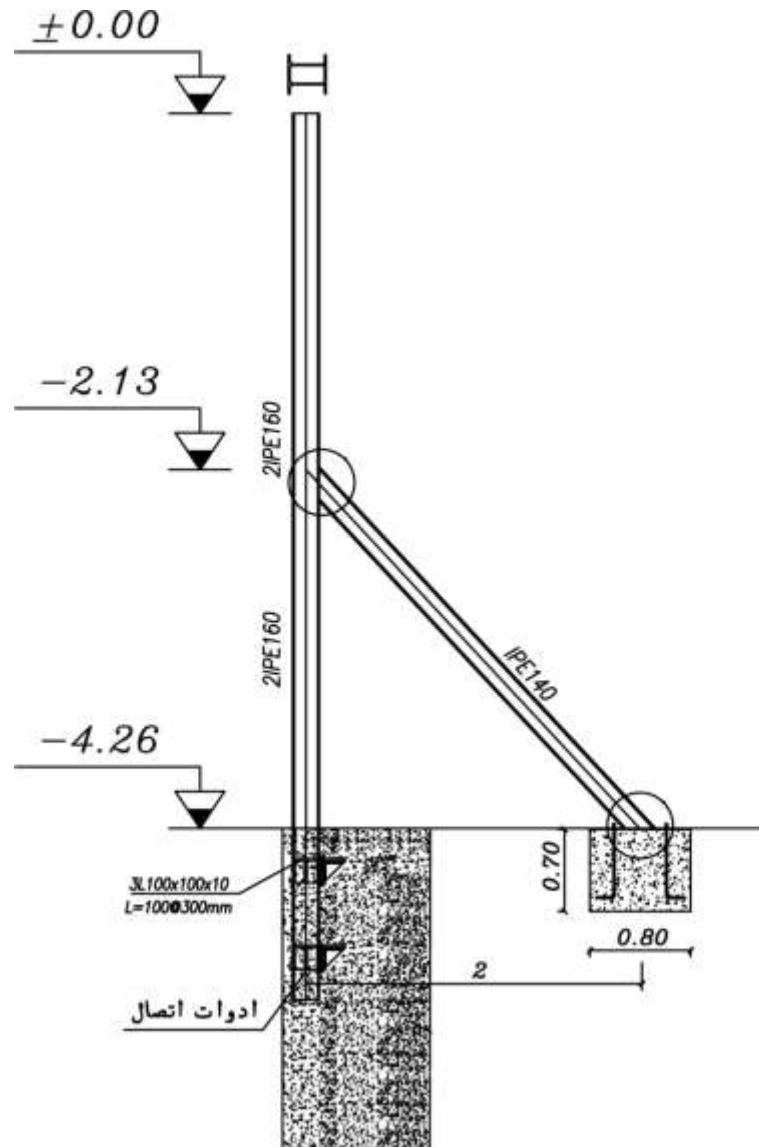
شکل ۹-۵. مقاوم سازی‌های انجام شده برای متوقف نمودن تغییر شکل پیش‌رونده

نهایتاً با انجام اصلاحات فوق و تغییرات صورت گرفته در روند مقدار ماکزیمم تغییر شکل جانبی در پایان مراحل ساخت به ۴۱ میلیمتر تقلیل یافت.

تاکید می‌گردد که استفاده از روش ارائه شده برای طراحی بر اساس سطح عملکرد، طراح را از طراحی المان‌های پایدار کننده بر اساس روش‌های مبتنی بر تنش بی‌نیاز نمی‌کند؛ بلکه استفاده از این روش به طراح کمک می‌کند که خدمت‌پذیری سازه‌های مجاور را در پایدارسازی گود بر اساس المان‌های طراحی شده کنترل نماید و در صورت لزوم این المان‌ها را تقویت کند.

۹-۲-۲- پروژه پایدارسازی شده با استفاده از سازه خرپایی

این پروژه در یکی از خیابان‌های پیرامونی شهر واقع شده است و وجود ساختمان‌های نسبتاً نوساز در اطراف از شرایط محیطی حاکم بر آن است. پایدارسازی گود به عمق ۵ متر در این پروژه با استفاده از سازه نگهدارنده خرپایی انجام شده است. فاصله خرابها در امتداد دیوار از یکدیگر ۳ متر است. شکل ۹-۷ هندسه خرپا طراحی شده و المان‌های به کار رفته در آن را برای این پروژه نشان می‌دهد.



شکل ۹-۷. هندسه خرپا طراحی شده و المان‌های به کار رفته در آن

شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه متناظر با ساختگاه Qf-1 می‌باشد. به این ترتیب که مدول الاستیسیته خاک ۲۵ مگاپاسکال، زاویه اصطکاک ۳۰ درجه، چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال و وزن مخصوص خاک ۱/۹ تن بر متر مکعب است.

روابط ارائه شده در این گزارش برای روش‌های پایدارسازی بالا به پایین اصلاح شده و شمع و استرات مناسب است. البته استفاده از این روابط برای پایدارسازی به روش سازه خریایی نیز با احتیاط بیشتر در کارهای مهندسی برای برآورد تغییر شکل‌های زمین پیش از شروع عملیات گودبرداری قابل استفاده است.

در روابط ارائه شده برای طراحی بر اساس سطح عملکرد به منظور استفاده برای سازه نگهبان خریایی، زاویه عضو مورب خرپا در سختی مهاریهای افقی (S_H) لحاظ می‌شود به این ترتیب که فاصله بین خرپاها با تقسیم بر سینوس زاویه عضو مورب معادل سازی می‌شود. به عنوان مثال در پروژه مورد بحث که فاصله خرپاها در امتداد دیوار از یکدیگر ۳ متر و زاویه عضو مورب ۴۵ درجه است، فاصله معادل سازی شده مهاریهای افقی در روابط ۳ تقسیم بر سینوس ۴۵ درجه که تقریباً معادل با ۴/۵ متر است در نظر گرفته می‌شود. طول شمع زیر ستون (T) برابر با طول شمع زیر المان قائم خرپا که در این مثال ۱/۵ متر است در نظر گرفته می‌شود. عمق گود (H) برابر با ۵ متر است. فاصله بین خرپاها با استفاده از چوب‌های چهار تراش به ضخامت ۱۰ سانتیمتر پوشش داده شده است. بنابراین ممان اینرسی دیواره گود قابل محاسبه است؛ همچنین سختی خمشی دیواره معادل با سختی خمشی چوب چهارتراش و در حدود ۱۲ گیگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود به این ترتیب و با توجه به اطلاعات موجود، مراحل پایدارسازی این گود بر اساس سطح عملکرد طی ۷ گام زیر برای این پروژه نیز قابل انجام است.

گام اول:

نوع سازه نگهبان و سختی المان‌های مورد استفاده از آن توسط مهندس طراح، طراحی می‌شود. که در اینجا گود به روش سازه نگهبان خریایی مهار شده و المان‌های خرپا مطابق با شکل ۹-۷ طراحی شده است.

گام دوم:

با توجه به عمق گود، شرایط هندسی و شرایط ساختگاهی پارامترهای مورد نیاز برای برآورد سختی نسبی سیستم مهاریه تعیین می‌شود. در این پروژه عمق گود (H) برابر با ۵ متر می‌باشد؛ شرایط ساختگاهی متناظر با ساختگاه $Qf-1$ بوده و مدول الاستیسیته خاک (E_s) ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد؛ سختی خمشی دیوار ۱۲۰۰۰ مگاپاسکال است؛ ممان اینرسی دیوار (I) با در نظر گرفتن چوب‌های چهارتراش با ضخامت ۱۰ سانتیمتر برابر با $۰/۰۰۰۰۸۳ \text{ (m}^4\text{/m)}$ می‌باشد؛ فاصله افقی خرپاها ۳ متر است که با توجه به مباحث عنوان شده در این مثال فاصله افقی مهاریهای (S_H) نیازمند تبدیل به فاصله معادل است؛ فاصله قائم مهاریهای (S_V) ۵ متر و عرض دهانه‌ها (S_P) ۱۵ متر بوده و طول شمع زیر المان قائم خرپا (T) ۱/۵ متر اجرا شده است.

برای تعیین فاصله معادل مهاریهای افقی به ترتیب زیر عمل شده است:

فاصله خرپاها در امتداد دیوار از یکدیگر ۳ متر و زاویه عضو مورب ۴۵ درجه است، فاصله معادل سازی شده مهاریهای افقی در روابط، ۳ تقسیم بر سینوس ۴۵ درجه که تقریباً معادل با ۴/۵ متر است در نظر گرفته می‌شود. لذا مقدار S_H به ۴/۵ متر معادل سازی می‌شود. به این ترتیب مشخصات پارامترهای سختی نسبی سیستم مهاریه مطابق با جدول ۹-۲ تعیین می‌شود.

جدول ۹-۲. مشخصات پارامترهای سختی نسبی سیستم مهاري

H (m)	E _s (MPa)	E (MPa)	I (m ⁴ /m)	S _H (m)	S _V (m)	S _P (m)	T (m)
۵	۲۵	۱۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۸۳	۴/۵	۵	۱۵	۱/۵

گام سوم:

با توجه به مشخصات ارائه شده برای پارامتر سختی نسبی سیستم مهاري، این پارامتر مطابق با رابطه ۸-۱ که مختص شرایط ساختگاهی QC-1، QC-2 و Qf-1 است به دست می‌آید.

لذا:

$$R = \frac{E_s}{\sqrt{E}} \times \frac{S_H S_V^2 H^3}{\sqrt{I}} \times \frac{S_P}{T}$$

$$= \frac{25}{\sqrt{12000}} \times \frac{4.5 \times 5^2 \times 5^3}{\sqrt{0.000083}} \times \frac{15}{1.5}$$

$$= 3522677$$

گام چهارم:

با توجه به مقدار R به دست آمده از گام سوم مقدار تغییر شکل جانبی ماکزیمم دیواره گود طبق رابطه ۸-۵ که مختص ساختگاه Qf-1 است قابل برآورد است.

$$\delta h/H * 10000 = 5.0199e^{4E-07R} \rightarrow$$

$$\delta h = \frac{5.0199e^{4E-07R} \times H}{10000}$$

$$= \frac{30.38 \times 5000}{10000}$$

$$= 21_{mm}$$

گام پنجم:

پروفیل نشست زمین در شرایط ساختگاهی قم به صورت محدب می‌باشد و نسبت ماکزیمم نشست زمین مجاور گود به تغییر شکل جانبی ماکزیمم دیوار برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس ماکزیمم نشست زمین در مجاورت گود برابر است با:

$$\delta v_{max} = 0.75 \delta h_{max}$$

$$= 0.75 \times 21$$

$$= 15_{mm}$$

گام ششم:

با توجه به فاصله سازه مجاور از لبه گود، نشست زیر سازه مجاور گود با استفاده از رابطه ۸-۸ محاسبه می‌شود. در این پروژه سازه مجاور در فاصله ۵ متری از لبه گود واقع شده است لذا فاصله از لبه گود (d) برابر با ۵ متر است.

$$\delta_v = \left(-0.636 \sqrt{\frac{d}{H_e}} + 1 \right) \delta_{vm}$$

$$= 0.364 \times \delta_{vm}$$

$$= 5_{mm}$$

گام هفتم:

با توجه به مقدار نشست غیر یکنواخت سازه مجاور گود که معادل با ۵ میلیمتر به دست آمد، سطح خرابی در محدوده سطح خرابی قابل قبول برای سازه مجاور گود تشخیص داده می‌شود. لذا طرح ارائه شده و المان‌های مورد استفاده در سازه نگهبان خرابایی اخلاقی در خدمت پذیری هم‌جواری‌ها ایجاد نمی‌نماید. به این ترتیب طرح گود بر اساس سطح عملکرد سازه مجاور گود قابل قبول می‌باشد.

- [1] Boone, S. J., Westland, J. and Nusink, R. (1999). Comparative evaluation of building responses to an adjacent braced excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 36, No. 2, pp. 210-223.
- [2] Finno, R. J. (2007). Use of monitoring data to update performance predictions of supported excavations. *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, pp. 1-30. DOI: 10.1061/40940(307)3.
- [3] Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990). Construction-induced movements of in situ walls. In *Proceeding, Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE Special Conference, Ithaca, New York, pp. 439-470.
- [4] Hsieh, P. G. and Ou, C. Y. (1997). Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 35, pp. 1004-1017.
- [5] Hsieh, P. G. and Ou, C. Y. (1997). Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 35, pp. 1004-1017.
- [6] Wang, J. H., Xu, Z. H. and Wang, W. D. (2010). Wall and ground movement due to deep excavations in Shanghai soft soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 136, No. 7, pp. 985-994.
- [7] Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990). Construction-induced movements of in situ walls. In *Proceeding, Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE Special Conference, Ithaca, New York, pp. 439-470.
- [8] Ou, C. Y., Hsieh, P. G. and Chiou, D. C. (1993). Characteristics of ground surface settlement during excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 30, No. 5, pp. 758-767.
- [9] Kung, G. T. C., Juang, C. H., Hsiao, E. C. L. and Hashash, Y. M. A. (2007). Simplified model for wall deflection and ground surface settlement caused by braced excavation in clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 133, No. 6, pp.731-747.
- [10] Burland, J. B. (1997). Assessment of risk of damage to building due to tunneling and excavation. *Earthquake Geotechnical Engineering*, Ishihara Edition, Balkema, Rotterdam, pp. 1189-1201.
- [11] Day, W. (1998). Discussion on "Ground movement-related building damage". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* May of 1998.
- [12] Boone, S. J. (2001). Ground movement-related building damage. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 122, No. 11, pp. 886-896.
- [13] Boscardin, M. D. and Cording, E. G. (1989). Building response to excavation induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 115, No. 1, pp. 1-21.
- [14] Finno, R. J., Bryson, S. and Calvello, M. (2002). Performance of a stiff support system in soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 128, No. 8, pp. 660-671.
- [15] Ou, C. Y., Liao, J. T. and Lin, H. D. (1998). Performance of diaphragm wall constructed using Top-Down method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 124, No. 9, pp. 798-808.
- [16] Finno, R. J. and Calvello, M. (2005). Supported excavation: Observational method and inverse modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 131, No. 7, pp. 826-836.

- [17] Ikuta, Y., Maruoka, M., Aoki, M. and Sato, E. (1994). Application of the observational method to a deep basement using the Top-Down method. *Geotechnique*, Volume 44, No. 4, pp. 655-664.
- [18] Ghorbani, E. and Khodaparast, M. (2019). Geodetic accuracy in observational construction of an excavation stabilized by Top-Down method – A case study. *Springer Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, v.37, no.6, pp. 4759-4775. DOI: 10.1007/s10706-019-00936-8
- [19] Finno, R. J. and Tu, X. (2006). Selected topics in numerical simulation of supported excavation. *International Conference of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*, Th. Triantafyllidis, ed., Bochum, Germany, Taylor & Francis, London, 3-20.
- [۲۰] صدر نژاد، ا. (۱۳۹۰). نظریه خمیری خاک و الگوسازی. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ دوم، تهران، ایران، ISBN: 978-964-8703-95-5
- [21] PLAXIS Manual. (2014). material models. PLAXIS publications, www.PLAXIS.nl
- [22] Obrzud, R. F. (2010). On the use of hardening soil small strain model in geotechnical practice. *Numerics in Geotechnics and Structures*, Elmepress International.
- [23] Finno, R. J. (2007). Use of monitoring data to update performance predictions of supported excavations. *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, pp. 1-30. DOI: 10.1061/40940(307)3.
- [۲۴] بازیار، م. ح. (۱۳۹۲). دینامیک خاک. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ دوم، تهران، ایران، ISBN:978-964-454-228-2
- [25] Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. *Journal of Japanese Geotechnical Society: Soils and Foundation*, Volume 44, No. 1, pp. 87-98.
- [26] Zapata, D. G. (2007). Semi-empirical method for designing excavation support systems based on deformation control. *University of Kentucky Master's Thesis*, Paper 468.
- [27] Bryson, L. S. and Zapata, D. G. (2010). Direct approach for designing an excavation support system to limit ground movement. *2010 Earth Retention Conference 3*, ASCE Library, Ondokuz Mayıs University, pp.154-161. DOI: 10.1061/41128(384)12.
- [28] Bryson, L. S. and Zapata, D. G. (2012). Method for estimating system stiffness for excavation support walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 138, No. 9, pp. 1104-1115.
- [۲۹] پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور (۱۳۹۲). ناحیه استان قم. www.ngdir.ir
- [۳۰] مهندسین مشاور پی بنیان ایستا (۱۳۹۳). گزارش مطالعات ژئوتکنیک پروژه مجتمع تجاری ساداتی، ۸۸۲۶ و ۸۸۲۷/۱.
- [۳۱] قربانی، احسان. (۱۳۹۵). طراحی پایدارسازی گود به روش Top-Down بر اساس سطح عملکرد مبتنی بر کنترل تغییر شکل با استفاده از مطالعات عددی و میدانی. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم.
- [۳۲] موسسه مهندسین مشاور ساحل (۱۳۹۰). خدمات مهندسی پروژه مترو قم – خط A، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل. SCE 2000 UNGR TUN EG RP-B0.
- [۳۳] خداپرست، مهدی. (۱۳۹۳). مطالعه و پهنه بندی ژئوتکنیکی (مکانیک خاک) برای ساختمان‌های مسکونی شهر قم. وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، دانشگاه قم، به درخواست سازمان نظام مهندسی استان قم.

- [34] Schanz, T. and Vermeer, P. A. (1998). On the stiffness of sands. *Geotechnique, Pre-failure Deformation Behaviour of Geomaterials*, Institution of Civil Engineers, Great Britain, pp. 383-387.
- [35] Von Soos, P. (1990). Properties of soil and rock. In *Grundbautaschenbuch part 4*. Ernst and Sohn, Berlin (In German).
- [36] Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Proceeding Europe Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, 19-25.
- [37] قربانی، احسان؛ خداپرست، مهدی؛ معزی، ابوالقاسم. (۱۳۹۷). رفتارنگاری گود پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا با استفاده از مطالعات عددی و میدانی (مطالعه موردی). نشریه پژوهش‌های عمران و محیط زیست، دانشگاه قم،
DOI: 10.22091/cer.2018.3258.1122
- [38] Ghorbani, E., Khodaparast, M. and Moezy, A. (2018). Designing an excavation on the basis of performance considering Top-Down method in the geotechnical conditions of Qom, Iran. *Numerical methods in Geotechnical Engineering IX, 9th NUMGE Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering in Porto, Portugal*, Taylor and Francis Group, 25 June 2018, pp. 1119-1127, ISBN 978-1-138-33203-4. 19
- [39] Long, M. (2001). Database for retaining wall and ground movements due to deep excavation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 127, pp. 203-224. 20