

# بررسی عملکرد تیرک مایل با استفاده از ابزاربندی گود در مجاور ساختمان همسایه

زهرا سبزی<sup>۱</sup>، علی فاخر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری خاک و پی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

afakher@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۳

**چکیده-** حوادث بسیار زیادی ناشی از گودبرداری غیراصولی در مناطق شهری اتفاق می‌افتد. یکی از روش‌های متداول گودبرداری در ایران، استفاده از تیرک مایل برای حفاظت از ساختمان مجاور گود است. در این مقاله با ابزاربندی گود محافظت شده‌ای با تیرک مایل، راجع به عملکرد تیرک‌ها شناخت خوبی به دست آمد. همچنین به منظور تصدیق نتایج رفتارنگاری گود، مدلسازی عددی دو بعدی انجام شد. نتایج به دست آمده از مکانیزم عملکرد تیرک مایل شناخت مؤثری ارائه می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری‌ها و همچنین تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد بخشی از بار ساختمان همسایه از طریق تیرک مایل، به کف گود منتقل و مقدار نشست قائم زیر پی کم شده و تیرک مایل به دلیل ایجاد قید جانبی موجب کاهش تغییر مکان‌های افقی گود و دیوار ساختمان همسایه می‌شود. همچنین در این مقاله اثر پارامترهای مهم در عملکرد تیرک‌های مایل بررسی شده است. در نهایت می‌توان گفت این مقاله با معرفی یک مجموعه ابزاربندی و ابزار جدید ساخته شده در این تحقیق، می‌تواند در گسترش ابزار مورد استفاده در رفتارسنجی گودبرداری‌ها، نقش مؤثری ایفا کند.

**واژگان کلیدی:** گودبرداری، تیرک مایل، ساختمان مجاور، اندازه‌گیری میدانی.

## ۱- مقدمه

مناطق شهری، گودبرداری در کنار ساختمان‌ها افزایش چشمگیری داشته است. با انجام گودبرداری به دلیل تغییرات وسیع توزیع تنش، تغییر شکل‌هایی در توده خاک و ساختمان‌های مجاور گود اتفاق می‌افتد. در گودبرداری‌های شهری، کنترل تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک و سازه‌های مجاور، به دلیل احتمال بروز آسیب در ساختمان‌ها همواره موضوع مهمی است. از طرفی طراحی بهینه و ایمن سازه‌ی نگهدارنده، مستلزم شناخت عملکرد و

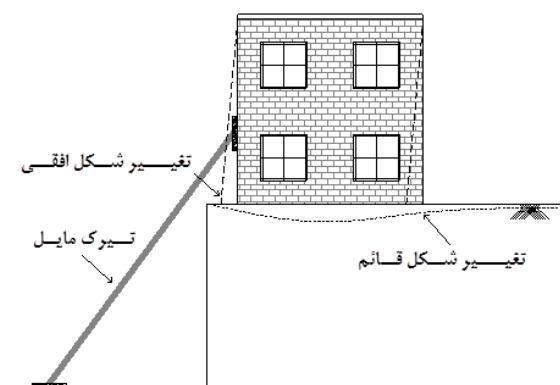
طراحی‌های ژئوتکنیکی همواره بر اساس فرضیات زیادی انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های میدانی با ابزاربندی محل، امکاناتی را در اختیار قرار می‌دهد که با وجود محدودیت‌های ناشی از تغییرات ذاتی خاک و ناشناخته بودن رفتار آن، بتوان طراحی ایمن و کارآمدی داشت. در نتیجه ابزاربندی در مطالعات حرفه‌ای و تحقیقات ژئوتکنیکی نقش مهمی دارد. با گسترش ساخت و ساز در

گودبرداری موجب تغییر شکل بیش تر از مقدار مجاز در ساختمان همسایه شود، موجب صدمه به آن می گردد. دیدگاه ساده‌ی کنترل تغییر شکل ساختمان، که فقط بر اساس کنترل نشست قائم قرار دارد، برای مطالعه مکانیزم عملکرد تیرک‌های مایل در گودبرداری‌ها نیست. ساختمانی که در مجاورت گود قرار دارد، علاوه بر تغییر مکان قائم، دچار تغییر مکان افقی نیز می شود. این تغییر مکان افقی به خصوص در حالت غیریکنواخت، به تنهایی برای صدمه زدن به ساختمان کافی است. بنابراین کنترل تغییر شکل با کنترل نشست قائم و تغییر مکان افقی ساختمان ضروری است [۱]. بر اساس مطالعات بوسکاردین و کوردینگ و برلند آسیب‌های ایجاد شده در ساختمان مجاور گود، تابعی از کرنش‌های افقی ایجاد شده و نشست ساختمان بوده و محدود کردن کرنش افقی نیز برای کاهش آسیب به ساختمان مؤثر است. شکل ۲ نشانگر نمودارهای ارائه شده به وسیله بوسکاردین و کوردینگ و برلند است. در مطالعات انجام شده درجه‌ی آسیب وارد بر ساختمان‌ها از «قابل صرف نظر» تا «خیلی شدید» تقسیم شده است [۵]، [۶].

در خصوص مکانیزم عملکرد تیرک‌های مایل متداول در ایران، تاکنون مطالعات و اندازه‌گیری میدانی صورت نگرفته است. با رفتارنگاری در گودبرداری، می‌توان تأثیر آن‌را روی سازه‌های مجاور بررسی کرد و نسبت به ایمن بودن آن‌ها و نیز دیواره‌ی گود و همچنین در خصوص مکانیزم عملکرد تیرک‌ها اظهار نظر نمود. مطالعات حاضر به عنوان بخشی از تحقیقات گسترده در خصوص گودبرداری با تیرک مایل به تجربیات اندازه‌گیری میدانی و جزئیات آن می‌پردازد. با توجه به این‌که نحوه‌ی اتصال تیرک مایل به فونداسیون ساختمان‌های مجاور از یک سو و به فونداسیون خود تیرک از سوی دیگر در عملکرد و بارگیری تیرک‌ها تأثیر زیادی دارد و این اتصال‌ها در اجرا

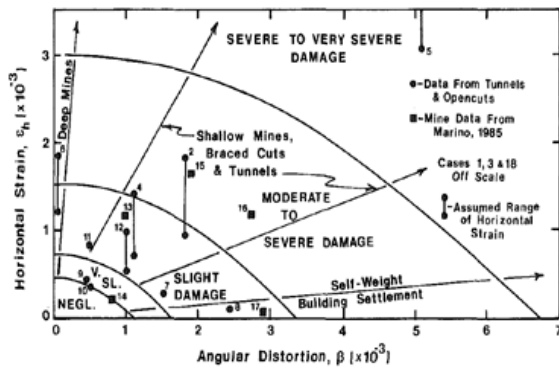
نیروهای وارد بر آن می‌باشد. یکی از روش‌های سنتی حفاظت از گود در ایران، استفاده از تیرک مایل است [۱]. شکل (۱) نشانگر طرح شماتیکی از این روش است. از آنجا که این روش در کارهای عملی به کار می‌رود، شناخت آن و تعیین معایب و مزایا و همچنین محدودیت‌ها و محدوده‌ی مناسب کاربرد آن ضروری است. مطالعات عددی و نظری زیادی در این خصوص صورت گرفته و شناخت اولیه مکانیزم عمل تیرک‌های مایل و نیز نیروهای وارد بر آن مبتنی بر مطالعات عددی است [۲]، [۳]، [۴]. بر اساس تحقیقات عددی انجام شده مکانیزم عملکرد تیرک مایل در گودبرداری‌های سنتی مجاور ساختمان همسایه به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

الف- بخشی از بار ستون یا دیوار کناری ساختمان همسایه از طریق تیرک مایل به کف گود منتقل و بار کم‌تری به خاک زیر پی وارد می‌شود، بنابراین مقدار نشست قائم زیر پی، کاهش می‌یابد. ب- تیرک مایل به دلیل ایجاد قید جانبی موجب کاهش تغییر مکان‌های افقی گود و ساختمان همسایه می‌شود. همانطور که در ادامه تشریح می‌شود، کاهش تغییر مکان افقی در عملکرد تأثیر مهمی دارد.

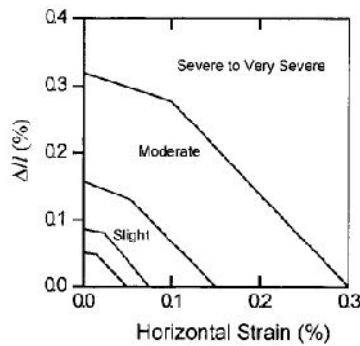


شکل (۱) طرح شماتیکی از روش گودبرداری با تیرک مایل

یکی از اهداف مقاله‌ی حاضر، بررسی مکانیزم‌های (الف) و (ب) مندرج در بالا با اندازه‌گیری‌های میدانی است. اگر



(الف)



(ب)

شکل (۲) معیار آسیب ساختمان ارائه شده به وسیله (الف) بوسکار دین و کوردینگ [۵]، (ب) برلند [۶]

جدول (۱) خصوصیات ژئوتکنیکی پروژه

ضریب فنریت خاک Ks (kg/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص γ	زاویه اصطکاک خاک φ	چسبندگی خاک C (kPa)	مدول الاستیسیته E (kg/cm <sup>2</sup> )
1.2	1900	35	0.0	700

تیرک‌های مورد استفاده دارای مقطع فولادی قوطی و به ابعاد ۱۴ × ۱۴ سانتی‌متر و با ضخامت ۵ میلی‌متر است.

### ۳- انتخاب و نصب ابزار

سیستم کامل رفتارسنجی در گودبرداری با استفاده از تیرک مایل، شامل ابزار ثبت تغییرشکل‌های ایجاد شده در دیواره‌ی گود، زمین‌های مجاور گود و تغییرشکل‌های ایجاد شده در ساختمان‌های مجاور گود است. همچنین سیستم

غالباً نامناسب بوده و با شفته یا گچ صورت می‌گیرد، نتایج حاصل از مطالعات فقط شامل شرایطی است که پی صحیحی برای تیرک، اجرا شده و اتصال آن با ساختمان مجاور به صورت صحیح و بر اساس توصیه‌های ارائه شده [۱] باشد.

دو هدف اصلی در مقاله‌ی حاضر پی گرفته می‌شود: ۱- مجموعه‌ای از ابزار برای گودبرداری سنتی در مجاور ساختمان همسایه ارائه گردد. ۲- مکانیزم‌های نظری (الف) و (ب) که برای گودبرداری سنتی با توجه به مطالعات عددی در گذشته به دست آمده‌اند، در اندازه‌گیری محلی تأیید شود.

### ۲- مشخصات پروژه

در این تحقیق گودی که با تیرک مایل محافظت شده، انتخاب شده است و با ابزاربندی آن سعی شده تا شناخت بهتری در رابطه با این روش حفاظت گود، به دست آید. شکل ۳ نشانگر تصویر کلی از گود مورد نظر است. مساحت گود مورد نظر ۲۱ × ۱۴ مترمربع و عمق آن ۳/۵ متر زیر تراز پی ابنیه‌ی مجاور می‌باشد. در ضلع شرقی گود که ۲۱ متر طول دارد، ساختمان مسکونی یک طبقه دارای اسکلت دیوار باربر با کلاف بتنی و در ضلع شمالی گود با ۱۴ متر طول، دیوار آجری به ارتفاع ۳ متر و ضخامت ۳۵ سانتی‌متر و در ضلع غربی یک ساختمان مسکونی دو طبقه دارای اسکلت بتنی قرار داشت. تعداد تیرک‌ها در هر وجه در شکل ۵ مشخص است و فاصله تیرک‌ها به طور متوسط ۳/۵ می‌باشد. خاک محل پروژه اغلب ماسه‌ای و در بعضی موارد با سنگدانه‌های درشت‌تر تا قطر حداکثر ۵۰ میلی‌متر با تراکم بالاست. خصوصیات ژئوتکنیکی پروژه مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است. سیستم سازه‌ی نگهبان گود فقط تیرک‌های مایل متصل به دیوار ساختمان‌های مجاور است.

نظر نصب می‌شوند، شامل میلگرد فولادی ۴۰ سانتی‌متری کاشته شده در داخل استوانه‌ای بتنی به قطر ۵۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر در نقطه‌ی ثابت و با فاصله از محل گودبرداری است. دقت حاصله در استفاده از این روش، با توجه به دقت ابزار مورد استفاده و نیروی انسانی، می‌تواند از ۱۰ mm تا ۰/۱ mm باشد [۷]. دقت دوربین نقشه‌برداری برابر ۱ mm بوده که به دلیل برداشت مختصاتی از سه بنج مارک، این دقت سه برابر می‌شود. روش مورد استفاده برای پایش تغییرشکل‌های ایجاد شده در اثر گودبرداری در این تحقیق، استفاده از روش برداشت مختصات هندسی نقاط با استفاده از دوربین توتال استیشن لیزری پنتاکس<sup>۲</sup> است. این نوع از دوربین‌ها که در واقع نوعی تئودولیت<sup>۳</sup> الکتریکی همراه یک فاصله سنج الکتریکی می‌باشند، قابلیت ارائه‌ی مختصات هر نقطه‌ی نامشخص را همراه فاصله و زاویه آن نسبت به نقطه‌ی مبنا (بنج مارک) دارا است. در این دوربین‌ها که اندازه‌گیری با استفاده از روابط مثلثاتی<sup>۴</sup> و مثلث‌بندی<sup>۵</sup> انجام می‌شود، خطاهای حاصل از اندازه‌گیری و مثلث‌بندی دستی که در استفاده از دوربین تئودولیت وجود دارد، به طور کامل حذف می‌شود. برای اندازه‌گیری با دوربین‌های توتال، در نقاط مورد نظر رفلکتور نصب و تغییرشکل‌ها در سه جهت ثبت می‌شوند [۸]. رفلکتورهای نصب شده، برچسب‌های ۵×۵ سانتی‌متر مربعی بوده و روی سطح صاف، با دقت زیاد و رو به سمت بنج مارک نصب می‌شوند. شکل ۴ نشانگر نمونه‌ای از نقاط مورد نظر است. ثبت تغییرشکل‌ها با دوربین به روش مختصاتی صورت می‌گیرد. برای تأمین دقت مورد نیاز از سه عدد بنج مارک ثابت به صورت مثلثی استفاده می‌شود که هر بار دوربین در بنج مارک اول سانتراژ و به سمت بنج مارک دوم قراولروی

ابزاربندی باید دربرگیرنده‌ی تغییرات نیروهای ایجاد شده در تیرک مایل باشد. در گود موردنظر نیز سعی شده است ابزار به نحوی انتخاب شوند که پاسخگویی سؤالات موردنظر درباره‌ی نحوه‌ی عملکرد تیرک‌ها باشند و بتوان با آن‌ها متغیرهای لازم را در مراحل گودبرداری ثبت نمود. روش‌های مورد استفاده برای ثبت داده‌های مورد نظر شامل دو بخش اندازه‌گیری تغییر شکل‌های دیواره‌ی گود و اندازه‌گیری نیروهای ایجاد شده در تیرک‌های مایل است. جدول ۲ بیانگر مراحل گودبرداری و نصب تیرک‌ها طی روزهای گودبرداری است.



شکل (۳) تصویر کلی از گود مورد مطالعه و تیرک‌های مایل

### ۳-۱- اندازه‌گیری تغییر شکل

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها در پروژه‌های ژئوتکنیکی وجود دارد. از این میان می‌توان به انحراف سنج‌ها و اکستنسومترها اشاره کرد. یکی از روش‌های متداول و با قدمت زیاد در اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها، روش نقشه‌برداری است که تاکنون در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی استفاده شده و نتایج قابل اعتمادی ارائه کرده است. در این روش می‌توان تغییرشکل زمین، دیواره و هر نقطه در دسترسی را به‌دست آورد. اندازه‌گیری‌ها از نقطه‌ی مبنا انجام می‌شود. نقاط مبنا و یا بنج مارک‌ها<sup>۱</sup> که روی نقطه‌ی ثابتی در اطراف محل مورد

2- Pentax

3- Theodolite

4- Trigonometry

5- Triangulation

1- Bench mark

منظور بررسی عملکرد تیرک‌های مایل در گود، تیرک‌ها، ابزاربندی و نیروی وارد بر آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. دو گروه ابزار برای اندازه‌گیری نیروی تیرک‌ها وجود دارد: سلول‌های بار و کرنش‌سنج‌ها. سلول‌های بار و یا همان نیروسنج‌ها به ابزاری گفته می‌شود که در مسیر انتقال نیرو قرار می‌گیرد و به صورت مکانیکی و یا الکترونیکی نیروی وارد شده را به دست می‌دهند.

در حالی که کرنش‌سنج به ابزاری اطلاق می‌شود که روی سطح چسبانده می‌شود و با نیروی وارد بر جسم تغییر شکل می‌دهد و اساساً به دو نوع الکتریکی و تار مرتعش وجود دارد [۷]. در این تحقیق که ثبت نیروهای ایجاد شده در تیرک‌ها در مراحل گودبرداری در نظر بوده است، از کرنش‌سنج‌های الکتریکی استفاده شد. کرنش‌سنج‌ها به دلیل سهولت استفاده، صرفه‌ی اقتصادی نسبت به نیروسنج‌ها و نیز صحت نتایج حاصله در بسیاری از تحقیقات استفاده شده‌اند [۹]، [۱۰].

### ۳-۲-۱- استفاده از کرنش‌سنج الکتریکی

گیج‌های کرنش‌سنج الکتریکی کاربرد گسترده‌ای در اندازه‌گیری نیروها دارند. اساس کار کرنش‌سنج‌های الکتریکی تغییر طول برابر با تغییر طول جسمی است که روی آن چسبانده می‌شوند و با تغییر طول مقاومت الکتریکی آن‌ها تغییر می‌کند. گیج کرنش‌سنج مقاومت الکتریکی، هادی الکتریکی است که مقاومت آن تابعی از تغییر طول می‌باشد. کرنش‌سنج الکتریکی از سیم نازکی که به ورق پلاستیکی نازک متصل شده، تشکیل شده است که خود این صفحه به روی سازه متصل می‌شود و با تغییر طول سازه، طول آن تغییر و مقاومت الکتریکی آن نیز تغییر می‌کند. با داشتن مدول الاستیک سازه مورد نظر می‌توان به نیروی ایجاد شده در عضو سازه‌ای پی برد.

شده و به وسیله‌ی مختصات بنج مارک سوم کنترل سانتراژ می‌شود و خطاهای احتمالی سرشکن می‌شوند. شکل ۵ نشانگر تصویر ابزاربندی شده‌ی گود و نقاط مشخص شده با شماره‌ی آن‌ها برای ثبت داده‌هاست. قرائت تغییر شکل‌ها با دوربین به صورت روزانه انجام گرفت.

جدول (۲) مراحل گودبرداری در پروژه‌ی مورد مطالعه

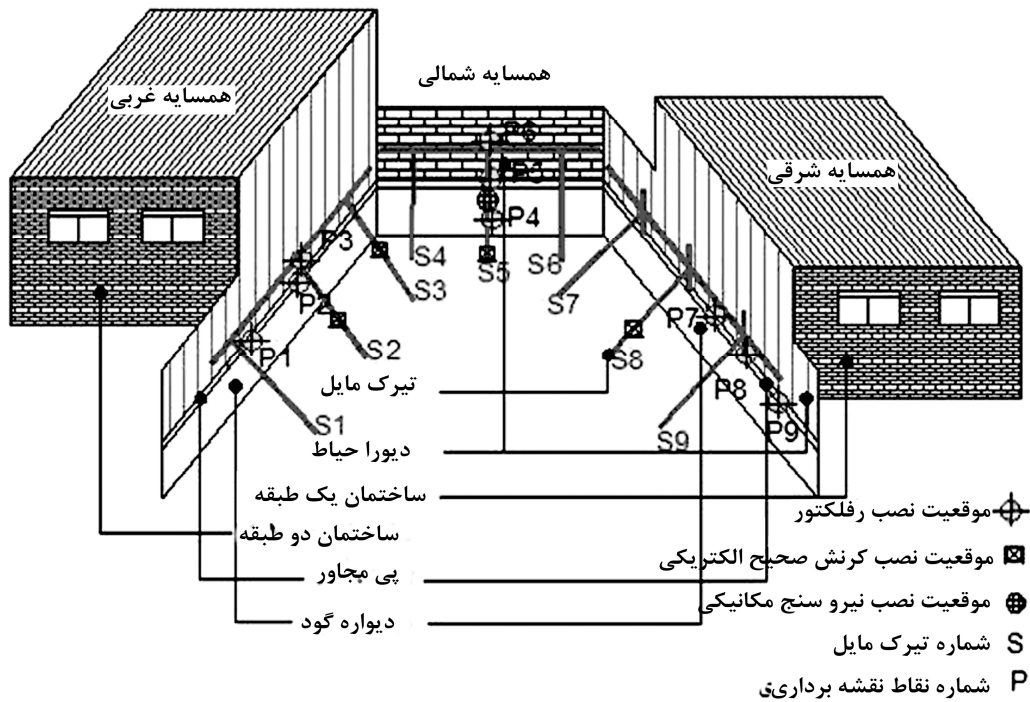
روز	مرحله گودبرداری
۱	گودبرداری وسط گود به فاصله‌ی ۲ متر از دیوارها با بیل مکانیکی
۲	اجرای پی بتنی برای تیرک‌های مایل در نقاط تعیین شده
۳	نصب تیرک‌های مایل در ۳ جهت
۴	گودبرداری دستی در ضلع شمالی و غربی
۵	اجرای دیوارهای آجری با آجر ماسه آهکی به عمق متوسط ۱۵ سانتی‌متر و عرض ۱ متر و به ارتفاع برابر با ارتفاع گود به فاصله ۱ متر از هم در محل زیر پی دیوار و ساختمان‌های مجاور
۶	ادامه‌ی عملیات گودبرداری دستی و اجرای دیوار آجری در ضلع شمالی و غربی
۷	گودبرداری دستی در ضلع شرقی
۸	اجرای دیوار آجری در ضلع شرقی و تکمیل عملیات خاک‌برداری و تسطیح بستر گود و برداشتن تیرک‌ها



شکل (۴) نمونه‌ای از رفلکتور نصب شده روی جدار گود

### ۳-۲- اندازه‌گیری نیرو

ابزار مختلفی برای حصول داده در پروژه‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. ابزار مورد استفاده اغلب به دو بخش سیستم مکانیکی و سیستم الکترونیکی تقسیم می‌شوند. به



شکل (۵) طرح کلی از گود ابزاربندی شده و نقاط شماره گذاری شده

رابطه‌ی ۲ نشانگر  $\epsilon_0$  و  $\epsilon_1$  کرنش در دو زمان اولیه و ثانویه است و در رابطه‌ی ۳،  $E$  مدول الاستیسیته تیرک،  $A$  سطح مقطع تیرک و  $F$  نیروی ایجاد شده در تیرک را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات دما در زمان اندازه‌گیری در هر پروژه و تغییر طول وابسته به تغییر دما، به منظور تصحیح اثر حرارت، کرنش‌سنجی با نیروی وارده صفر به صورت عمود بر کرنش‌سنج مورد نظر نصب می‌شود و می‌تواند با استفاده از ایجاد ساختار پل وتستون اثر تغییر طول ناشی از تغییر دما را حذف کند [۷]. شکل ۶ نشانگر طرح شماتیک این مکانیزم است. کرنش‌سنج‌ها اغلب با استفاده از چسب سنگ روی عضو چسبانده و سپس با چسب و یا نوارهایی در محل تثبیت و از آسیب دیدگی محافظت می‌شوند. شکل ۷ روش نصب و تیرک‌های مورد نظر را نشان می‌دهد. شکل ۵ نشانگر موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها در گود است. تغییرات مقاومت الکتریکی کرنش‌سنج با دستگاه ویژه‌ای به

رابطه‌ی ۱ تغییرات مقاومت الکتریکی کرنش‌سنج را نسبت به تغییرات طول ارائه می‌کند.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \times GF \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق،  $R$  مقاومت کرنش‌سنج،  $\Delta R$  تغییر مقاومت،  $L$  طول کرنش‌سنج و  $\Delta L$  تغییر طول و  $GF$  ضریب تناسب مربوط به هر گیج است که در کرنش‌سنج‌های مورد استفاده در این تحقیق مقاومت برابر ۳۵۰ اهم و ضریب تناسب برابر ۲/۱۴ است. دقت کرنش‌سنج برابر ۰/۱ ohm می‌باشد. این مشخصات را کارخانه‌ی سازنده ارائه می‌کند. رابطه‌ی ۲ و ۳ روش به‌دست آوردن نیروی عضو را با استفاده از کرنش‌سنج نشان می‌دهد.

$$\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_0, \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

$$F_{stn} = -EA \times (\Delta \epsilon) \quad (3)$$



شکل (۸) دیتالاگر طراحی و ساخته شده در این تحقیق

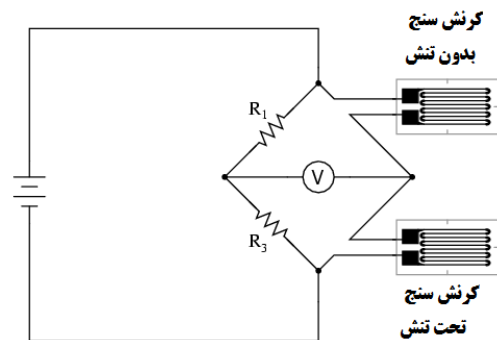
### ۳-۲-۲- ساخت و به کارگیری نیروسنج مکانیکی

شرایط اجرایی بسیاری از کارگاه‌های ساختمانی کوچک، چنان است که استفاده از ابزار مکانیکی ساده‌تر می‌باشد. از طرفی ابزار الکترونیکی حساسیت زیادی دارند و به سادگی از حالت کالیبره خارج می‌شوند. همچنین برای کار با ابزار الکترونیکی به افراد با تخصص بیش‌تر نیاز دارد. بنابراین در این تحقیق افزون بر ابزار الکترونیکی تشریح شده در بخش قبل، ابزار مکانیکی جدیدی طراحی و به کار گرفته شد.

### الف) طراحی و ساخت نیروسنج

یکی از اهداف تحقیق ارائه شده در این مقاله، ابداع روشی ساده برای اندازه‌گیری نیرو در تیرک‌های مایل، به منظور کنترل عملکرد تیرک‌های مایل در شرایط پروژه‌های ساختمانی ایران است. در همین راستا ایده‌های مختلفی مانند ۱- استفاده از فنر؛ ۲- رینگ‌های O شکل؛ ۳- دیسک‌های فتوالاستیک ارزیابی شدند. پس از بررسی شرایط اجرایی حاکم بر گودبرداری‌ها و نیز ابزارهای مورد مطالعه، ابزار خاصی طراحی و ساخته شد. این ابزار بر اساس قانون هوک [۱۱] طراحی و برای اندازه‌گیری نیروی ایجاد شده در تیرک، ساخته شده است. رابطه ۴ بیانگر قانون هوک است. این ابزار شامل فنر مرکزی می‌باشد که داخل دو عدد غلاف فولادی قرار گرفته است. برای تأمین

نام دیتالاگر اندازه‌گیری و با کالیبراسیون به نیرو تبدیل می‌شود. دیتالاگرها اغلب وسیله الکترونیکی می‌باشند که با اتصال به کامپیوتر می‌توانند در زمان‌های مشخصی تغییرات را ثبت کنند. ولی با توجه به شرایط گودهای محافظت شده با تیرک مایل، استفاده از دیتالاگرها در کارگاه مقدور نمی‌باشد. به همین دلیل نوع ساده‌ای از دیتالاگر قابل حمل که به سادگی در گود قابل استفاده بود، در این پروژه طراحی و ساخته شد. این دیتالاگر که با انرژی باتری کار می‌کند و دقت برابر با ۰/۰۰۰۰۱ ولت دارد، قابلیت اتصال به کرنش‌سنج را دارد و تغییرات ولتاژ را ثبت می‌کند. این تغییرات ولتاژ، که در واقع بر اساس قانون اهم تغییرات مقاومت را نشان می‌دهد، می‌تواند تغییرات نیرو را نیز نشان دهد. شکل ۸ نشانگر این دیتالاگر است. تغییرات نیرو به طور روزانه با دیتالاگر ثبت شد.

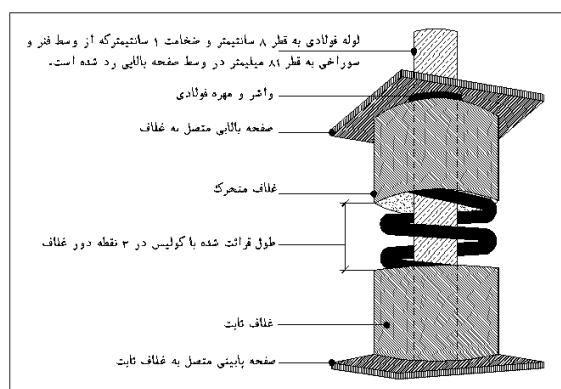


شکل (۶) پل وتستون ایجاد شده با استفاده از دو کرنش‌سنج

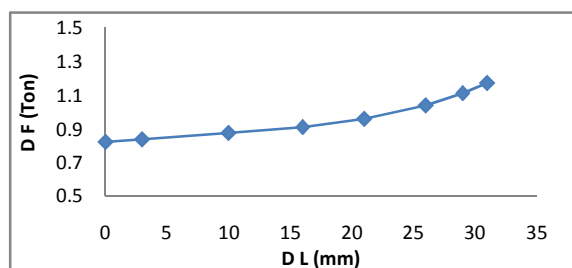


شکل (۷) نمونه کرنش‌سنج‌های نصب شده روی بدنه‌ی تیرک

تیرک مایل جوش شده است. شکل ۵ نشانگر موقعیت نصب نیروسنج در گود و تیرک مورد نظر است. شکل ۱۱ نیروسنج نصب شده را در محل نشان می‌دهد. برای ثبت تغییرات نیرو در تیرک، طول اولیه نیروسنج با کولیس شکل ۱۲ اندازه‌گیری شد. پس از آن با ثبت تغییرات طول نیروسنج و با استفاده از منحنی سختی سیستم در هر روز نیروی ایجاد شده در تیرک ثبت شد.



شکل (۹) طرح شماتیک نیروسنج مکانیکی



شکل (۱۰) منحنی سختی فنر (نیرو سنج مکانیکی)

#### ۴- اعتبارسنجی نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها

اعتبارسنجی نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها به وسیله‌ی دوربین نقشه‌برداری با استفاده از سه عدد بنج مارک که به صورت مثلثی در اطراف گود قرار داشتند، به روشی که پیش از این توضیح داده شد، انجام پذیرفت. به طوری که با قرائت هر نقطه با دوربین از هر بنج مارک در هر روز، تغییر مختصات ثابت بوده است. اعتبار نتایج

پایداری کل سیستم، دو غلاف با یک لوله‌ی فولادی یک سر رزوه که به غلاف اول جوش شده و از وسط فنر و غلاف دوم عبور کرده است، به هم متصل شده‌اند. لوله‌ی فولادی در پشت غلاف دوم با واشر و مهره مهار شده است. فنر انتخاب شده برای ساخت این وسیله از جنس فولاد سخت با قطر خارجی ۱۲ سانتی‌متر، ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر میله‌ی ۱۶ میلی‌متری است. طرح شماتیک این ابزار که می‌توان آن را نیروسنج مکانیکی قلمداد کرد، در شکل ۹ نشان داده می‌شود.

$$\Delta F = K \times \Delta L \quad (۴)$$

در رابطه‌ی فوق  $\Delta F$  تغییرات نیرو و  $\Delta L$  تغییر طول در راستای مورد نظر است. طبق قانون هوک نیروی وارد بر هر سیستم فنر گونه، متناسب با تغییر شکل ایجاد شده در آن است. ضریب این تناسب  $K$ ، سختی سیستم نام دارد. نیروسنج طراحی شده در این تحقیق نیز دارای سختی مشخصی است. برای کالیبره کردن دستگاه و به دست آوردن سختی سیستم، نیروسنج در آزمایشگاه تحت بارگذاری قرار گرفت و منحنی سختی سیستم تحت بارگذاری به دست آمد. منحنی سختی در شکل ۱۰ ارائه شده است. محدوده بارگذاری برای به دست آوردن سختی با توجه به نتایج تحلیل‌های عددی به دست آمده با این محقق [۳]، [۴] و نیز با توجه به تجربیات میدانی مشابه، به طوری انتخاب شد که حدود بارهای وارد بر تیرک را نیز شامل باشد.

#### ب) روش به کارگیری نیروسنج

به منظور اندازه‌گیری نیرو در تیرک‌ها، نیروسنج می‌بایست در مسیر انتقال نیرو در تیرک قرار گیرد. از این رو در گود مورد نظر یکی از تیرک‌ها (S5) انتخاب شده و در موقعیت نصب نیروسنج برش خورده و نیروسنج از هر دو طرف به



بخش شده و سپس بحث در مورد آن‌ها ارائه شده است.

### ۵-۱- تغییر شکل‌های ثبت شده در دیواره قائم گود

شکل ۱۳ تغییر شکل‌های افقی ایجاد شده در مدت زمان گودبرداری را برای مجموعه نقاط مشخص شده در دیوار گود که مطابق روش نشان داده شده در شکل ۵ علامت‌گذاری شده‌اند، نشان می‌دهد. نقاط علامت‌گذاری شده برای ثبت تغییر شکل‌ها از P1 تا P9 شماره‌گذاری شده‌اند. همانطور که از نتایج بر می‌آید، روند تغییر شکل‌ها به طور کلی به صورت افزایشی بوده است. یعنی با پیشرفت عملیات گودبرداری تغییر شکل‌ها افزایش یافته‌اند. نقطه P3 در روز پنجم با کاهش تغییر شکل افقی مواجه شده است که به دلیل اجرای دیوار در زیر پی در طول دیواره‌ی غربی در این روز می‌باشد. بیش‌ترین تغییر شکل افقی در نقطه P6 و در دیوار شمالی و در روزهای پایان گودبرداری اتفاق افتاده که دلیل آن برداشتن حاشیه‌ی خاکی در زیر تیرک‌های مایل، همچنین نبود پی مناسب و نیز شناژهای نگه دارنده پی، بوده است. در روز ششم گودبرداری نشست در نقطه P7 کمی کاهش یافته که به دلیل اجرای دیوار در زیر پی و تزریق ملات ماسه و سیمان در زیر پی بوده که این عملیات کمی پی را به سمت بالا رانده است. تغییر شکل در دیواره‌ی شرقی کم‌ترین مقادیر را دارد که می‌تواند علاوه بر نقش تیرک‌های مایل به دلیل شرایط مساعد ساختمان و همچنین وجود پی نواری مناسب و شناژهای عمود بر پی باشد. شکل ۱۴ نشانگر تغییر شکل افقی دیوار شمالی گود را در مراحل مختلف گودبرداری است. این نتایج با ثبت تغییر شکل در نقاط P4، P5 و P6 برای یک مقطع از دیوار شمالی گود به دست آمده است. بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفته بر روی تغییر شکل دیوارهای نگهدارنده گود، دو نوع نمودار تغییر شکلی در ارتفاع

حاصل از کرنش سنج که با دیتالاگر ثبت شد، با استفاده از نوعی نیروسنج الکتریکی کالیبره شده موجود در بازار صورت پذیرفت. به طوری که با اعمال نیروی مشخص در شرایط آزمایشگاه به نیروسنج الکتریکی، تغییرات ولتاژ متناسب با نیرو در دیتالاگر ثبت شد و در نتیجه ضریب دیتالاگر به دست آمد. با استفاده از این ضریب تغییرات ولتاژ در دیتالاگر به تغییرات مقاومت در کرنش سنج‌ها مربوط شد. اعتبار نتایج حاصل از نیروسنج مکانیکی اندازه‌گیری با کرنش سنج‌های الکتریکی تأیید شد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۱) نیروسنج نصب شده در مسیر انتقال بار تیرک؛ الف- نمای دور، ب- نمای نزدیک

### ۵- روندهای مشاهده شده در اندازه‌گیری‌ها و بحث

در این بخش نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها در دو

### ۵-۲- نیروی ایجاد شده در تیرک‌ها

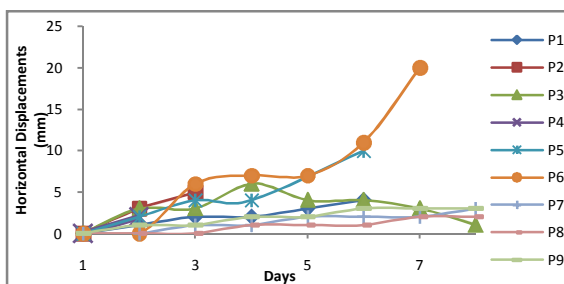
در شکل ۵ تیرک‌ها از S1 تا S5 شماره‌گذاری شده‌اند. تغییرات نیروی تیرک S5 در زمان گودبرداری که با نیروسنج مکانیکی اندازه‌گیری گردیده در شکل ۱۵ نشان داده شده است. روند کلی تغییرات نیرو در تیرک همزمان با پیشرفت گودبرداری، به صورت افزایشی بوده است. در روز پایانی نیروی وارد بر تیرک کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل اجرای دیوار در زیر پی دیوار شمالی باشد. همچنین در شکل ۱۵ نیروی به‌دست آمده از کرنش‌سنج در همان تیرک با نیروی ثبت شده به‌وسیله‌ی نیروسنج مکانیکی مقایسه شده است. همانطور که از نتایج اندازه‌گیری‌ها مشخص است، نیروسنج مکانیکی می‌تواند روند تغییرات نیرو را در تیرک‌ها به‌خوبی نشان دهد و همچنین از مقایسه نتایج کرنش‌سنج و نیروسنج بر می‌آید که نیروسنج مکانیکی می‌تواند مقدار نیروی ایجاد شده را نیز با دقت قابل قبولی ارائه نماید. مقدار نیروی تیرک در شروع گودبرداری با محاسبات انجام شده بر اساس منحنی سختی فنر به‌دست آمد که شامل تغییر طول فنر به دلیل وزن تیرک و درصد مختصری پیش‌تنیده کردن تیرک مایل می‌باشد.

شکل ۱۶ نیروهای ثبت شده در تیرک‌های S2، S3، S5 و S8 که با کرنش‌سنج الکتریکی اندازه‌گیری شده‌اند را نشان می‌دهد. اعداد ثبت شده در روزهای پایانی گودبرداری به صورت دقیق ثبت شده‌اند. اما به دلیل مشکلات ایجاد شده در دیتالاگر در روزهای نخستین گودبرداری قرائت دقیق صورت نگرفت. بیش‌ترین نیروی ایجاد شده در تیرک S5 بوده که حدود ۱۵٪ وزن دیوار آجری و کم‌ترین نیرو در تیرک S8 بوده است که تنها حدود ۱٪ وزن ساختمان مجاور را تحمل می‌کند. علی‌رغم این‌که تیرک S5 از دیوار شمالی محافظت می‌کند و بار ساختمان به آن وارد نمی‌شود، نیروی بیش‌تری را تحمل می‌کند که

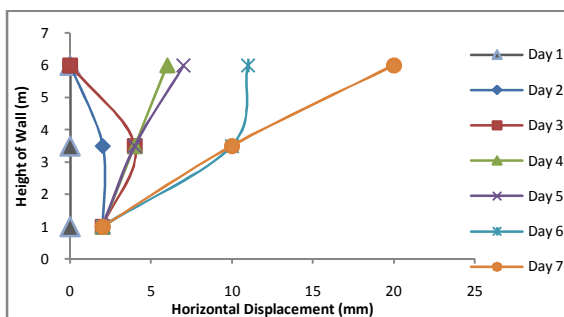
گود تعریف شده است: تغییرشکل طره‌ای<sup>۱</sup> و تغییرشکل شکمی<sup>۲</sup>. در تغییرشکل طره‌ای حداکثر تغییرشکل در بالای دیوار اتفاق می‌افتد. در حالی‌که در تغییرشکل شکمی حداکثر تغییرشکل در وسط ارتفاع دیوار اتفاق می‌افتد. در تغییرشکل‌های ثبت شده در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که تغییرشکل‌های افقی دیوار آجری شمالی گود در مراحل اولیه گودبرداری به شکل شکمی بوده و با پیشرفت عمق گودبرداری و برداشتن حاشیه خاکی از زیر تیرک‌های مایل، حالت تغییرشکل به سمت طره‌ای شدن پیش می‌رود.



شکل (۱۲) کولیس استفاده شده برای ثبت تغییر طول نیروسنج



شکل (۱۳) تغییر شکل‌های افقی ایجاد شده در مدت زمان گودبرداری در نقاط شماره‌گذاری شده (شکل ۳)



شکل (۱۴) تغییرات جابجایی دیوار آجری شمالی گود در مدت زمان گودبرداری

- 1- Overturning mode
- 2- Bulging mode

### ۵-۳- نکات مستقیم حاصل از اندازه‌گیری‌ها

از اندازه‌گیری‌های انجام شده، نکات ذیل به صورت مستقیم حاصل می‌شود:

(الف) اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ ارائه شده است. این اندازه‌گیری‌ها نشان داده‌اند که:

(الف)-۱- تغییرشکل‌ها در طول مدت گودبرداری روند افزایشی داشته است. (الف)-۲- نوع پی و شرایط ساختمان مجاور در مقدار تغییرشکل مؤثر است. (الف)-۳- تیرک مایل نشست و تغییرشکل افقی را کاهش می‌دهد.

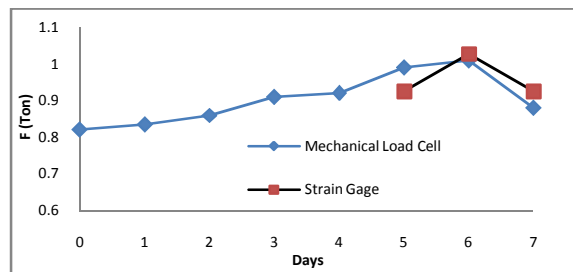
(ب) با اندازه‌گیری نیروی تیرک که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشانگر آن است، نتیجه‌گیری می‌شود که:

(ب)-۱- مشخص شد که قطعاً بخشی از نیروی ساختمان به تیرک‌های مایل وارد می‌شود. (ب)-۲- درصد نیروی وارد بر تیرک بین ۱٪ تا ۱۵٪ بار ساختمان مجاور مشاهده شد. به نظر می‌رسد این نیرو تابع اندرکنش خاک-سازه و پی است.

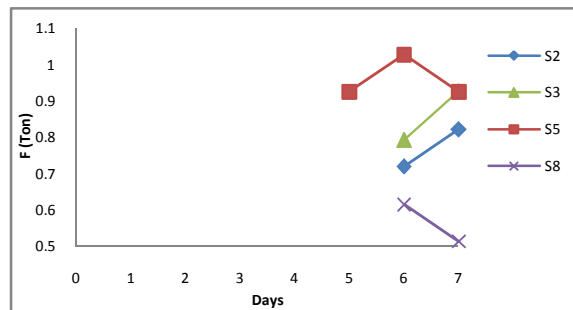
### ۶- تأیید تجربی مکانیزم عملکرد تیرک‌ها

شکل ۱۷ تغییرات نشست یک تراز مشخص در زیر پی را در بخشی از دیوار شرقی گود، در مراحل مختلف گودبرداری نشان می‌دهد. این نتایج با ثبت تغییرات در نقاط P7، P8 و P9 برای بخشی از دیوار شرقی در اطراف تیرک S9 به دست آمده است. در شکل ۵ موقعیت نقاط و همچنین موقعیت نصب تیرک S9 مشخص شده است. از نتایج ثبت شده مشخص است که با پیشرفت گودبرداری، نشست در دیوار گود افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که میزان نشست در نقطه P8 که منطبق بر محل نصب تیرک S9 است، کم‌تر از نقاط اطراف است. یعنی تیرک مایل توانسته است در محل اتصال، نشست دیوار گود را کاهش دهد. این موضوع موجب تأیید مکانیزم (الف) می‌شود که در

به دلیل شرایط نامساعد دیوار و نبود پی و شناژ بوده که باعث ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ‌تر و نیز اعمال نیروی بیش‌تر به تیرک شده است. تیرک S8 متصل به دیوار شرقی بوده و باید مقداری از بار ساختمان یک طبقه مجاور را تحمل کند؛ اما بار وارد بر آن کم‌تر از تیرک S5 (متصل به دیوار شمالی) می‌باشد. دلیل این موضوع شرایط ساختمان مجاور و پی نواری مناسب آن و وجود شناژهای عمود بر آن است. با توجه به مقادیر تغییرشکل‌های ایجاد شده در دیوار شرقی و شمالی، به نظر می‌رسد نیروی وارد شده بر تیرک، افزون بر تعداد طبقات ساختمان مجاور، بیش‌تر تابع شرایط ساختمان مجاور گود و همچنین مقدار تغییرشکل افقی ایجاد شده در ساختمان و دیواره گود است. در کل می‌توان گفت نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیرو در تیرک‌ها نشان می‌دهد که نیرو به تیرک انتقال می‌یابد و تیرک مایل می‌تواند بخشی از وزن ساختمان مجاور را تحمل کند. مقدار نیروی وارد شده به تیرک افزون بر وزن ساختمان مجاور، تابع شرایط سازه مجاور و پی آن است.



شکل (۱۵) تغییرات نیروی تیرک S5 در زمان گودبرداری



شکل (۱۶) تغییرات نیروی تیرک‌ها در زمان گودبرداری

گودبرداری، تغییرشکل افقی به سمت گود افزایش می‌یابد. با مقایسه‌ی مقادیر تغییرشکل در سه نقطه‌ی فوق، مشاهده می‌شود که به طور کلی در محل اتصال تیرک، مقدار تغییرشکل افقی رخ داده کم‌تر از نقاط اطراف است. یعنی تیرک مایل تا حدودی توانسته است تغییرشکل افقی را در دیوار مهار کند. این پدیده نیز تأییدی بر مکانیزم (الف) می‌باشد که در مقدمه‌ی مقاله‌ی حاضر اشاره شد.

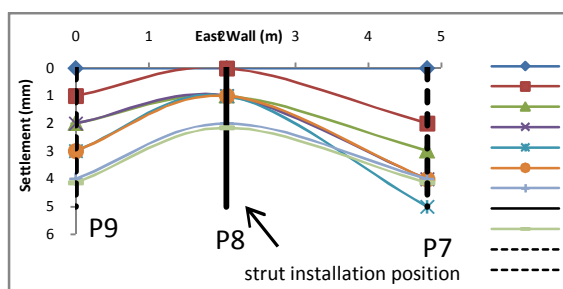
## ۷- تحلیل‌های عددی

اهداف مدلسازی عددی ارائه شده در این مقاله این است که (الف) مدل عددی صحت‌سنجی شده برای مطالعه‌ی تأثیر متغیرهای مختلف به کار رود. (ب) روندهای مشاهده شده در اندازه‌گیری‌های میدانی با روندها در مدلسازی عددی مقایسه شود.

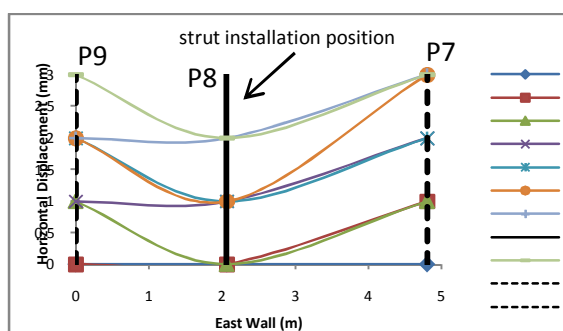
### ۷-۱- روش مدلسازی عددی

برای مطالعه‌ی دقیق رفتار گود، تیرک مایل و سازه‌های مجاور گود، مدلسازی عددی به صورت دو بعدی و با روش المان محدود انجام شد. مدل ایجاد شده با یک برنامه المان محدود Abaqus ویرایش 6.10 مدلسازی شده است [۱۲]. شکل ۱۹ نشانگر شبکه المان‌بندی شده، است. شرایط مرزی همانطور که در شکل نشان داده به نحوی است که در مرزهای قائم، از تغییر شکل‌های افقی و در مرز افقی کف مدل، از تغییر شکل افقی و قائم جلوگیری شده است. ابعاد به نحوی انتخاب شده‌اند که اثر مرزها در تحلیل به حداقل برسد. در مدلسازی خاک از المان‌های چهار گره‌ای با چهار نقطه‌ی انتگرال‌گیری در شرایط کرنش مسطح استفاده شده است. مش ایجاد شده برای خاک دارای ۸۶۱ گره و ۸۰۰ المان است. تحلیل‌ها به صورت الاستیک غیر خطی- پلاستیک

مقدمه این مقاله تشریح شد. به طور کلی نتایج حاصل از ثبت تغییرشکل‌ها در دیواره‌ی گود نشان می‌دهد تیرک مایل می‌تواند نقش مؤثری در کاهش نشست در پی ساختمان مجاور داشته و همچنین تا حدودی می‌تواند کاهش تغییر مکان افقی را در دیواره گود به همراه داشته باشد. مکانیزم (الف) با کم شدن نشست قائم بروز می‌کند. بنابراین انتقال بخشی از نیروی ستون کناری از طریق تیرک به کف گود ضروری است. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد که نیرو در تیرک به وجود می‌آید و با افزایش گودبرداری، زیاد می‌شود. بنابراین تیرک به کاهش نیروی وارد بر خاک زیر پی، کمک می‌کند.



شکل (۱۷) تغییرات نشست زیر پی در بخشی از دیواره‌ی شرقی گود منطبق بر نقاط P7، P8 و P9 در مدت زمان گودبرداری



شکل (۱۸) تغییرات جابجایی افقی پی در بخشی از دیواره‌ی شرقی گود منطبق بر نقاط P7، P8 و P9 در مدت زمان گودبرداری

شکل ۱۸ نشانگر تغییرشکل افقی نقاط P7، P8 و P9 از دیوار شرقی در مراحل مختلف گودبرداری است. در این نمودار به طور کلی مشاهده می‌شود که با پیشرفت مراحل

مبنا بوده و تحلیل‌های (۱-۱) و (۲-۱) تأثیر سختی خاک، (۱-۲) و (۲-۲) تأثیر چسبندگی خاک و تحلیل‌های (۱-۳) و (۲-۳) تأثیر سختی ساختمان مجاور را نشان می‌دهند. شکل ۲۰ تغییر شکل افقی دیوار گود را نشان می‌دهد.

الف- با مقایسه‌ی نتایج تحلیل گودبرداری با تیرک مایل و بدون تیرک مایل مشاهده می‌شود که تیرک نقش مؤثری در کاهش تغییر شکل افقی داشته است. به طوری که در این حالت می‌توان گفت وجود تیرک مایل توانسته است تغییر شکل افقی دیوار را ۸۰٪ کاهش دهد. این موضوع ضمن این که در تأیید داده‌های مشاهده شده در اندازه‌گیری‌های میدانی و تحلیل‌های عددی محققان قبلی است، مکانیزم (ب) را بار دیگر تأیید می‌کند.

با مقایسه‌ی نتایج تحلیل (۱-۱) و (۲-۱) مشاهده می‌شود که در خاک با سختی کم‌تر تغییر شکل‌ها در هر دو حالت بزرگ‌تر شده و تیرک مایل حدود ۶۲٪ تغییر شکل افقی دیوار را کاهش داده است.

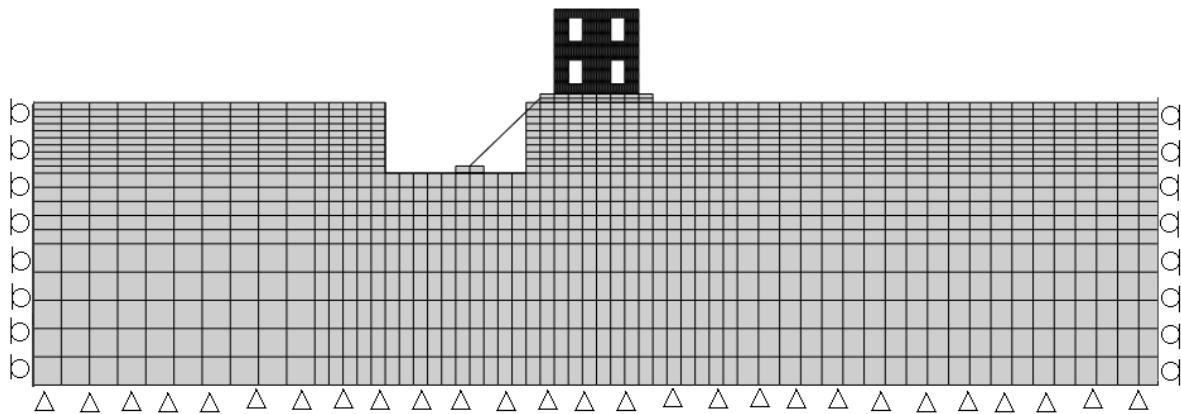
ب- در تحلیل‌های شماره (۱-۳) و (۲-۳) با افزایش ضریب چسبندگی خاک، تغییر شکل افقی دیواره کاهش چشمگیری داشته و خاک تا حدودی می‌تواند خود را ننگه داشته و تیرک مایل ۵۰٪ تغییر شکل افقی را کاهش داده است.

صورت گرفته است. مدل رفتاری موهر-کولمب برای المان‌های خاک انتخاب شده است. ساختمان مجاور به صورت یک دیوار باربر آجری با المان‌های چهار گره‌ای با شرایط تنش مسطح مدلسازی شد [۱۳]. مدل رفتاری حاکم بر آن الاستیک بدون معیار گسیختگی انتخاب شد. المان‌های فونداسیون المان‌های چهار گره‌ای با چهار نقطه انتگرال‌گیری و از جنس بتن می‌باشند. مدل رفتاری حاکم بر آن الاستیک بدون معیار گسیختگی انتخاب شد. اتصال بین المان‌های فونداسیون و خاک زیر آن به صورت اتصال گره به گره و به صورت مفصلی برقرار شده است و امکان جداشدگی بین آن‌ها وجود ندارد. تیرک مایل با المان تیر مدل شد و مدل رفتاری حاکم بر آن نیز الاستیک بدون معیار گسیختگی انتخاب شد.

## ۲-۷- مقایسه با نتایج تجربی و مطالعه پارامتریک

متغیرهای ورودی استفاده شده در مدلسازی در جدول ۳ نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر تیرک مایل در گودبرداری، تعداد زیادی تحلیل انجام گرفت.

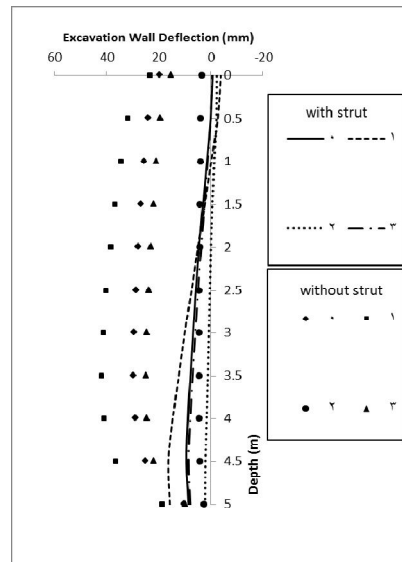
مشخصات تحلیل‌های انجام شده در جدول ۴ بیان شده است. نتایج تحلیل‌ها در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ نشان داده می‌شود. تحلیل‌های شماره (۱-۰) و (۲-۰) به عنوان تحلیل



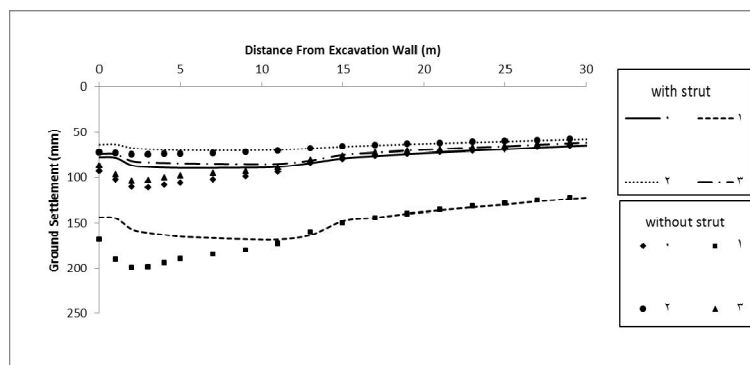
شکل (۱۹) مدل عددی ایجاد شده به همراه شرایط مرزی

جدول (۳) پارامترهای استفاده شده در مدلسازی

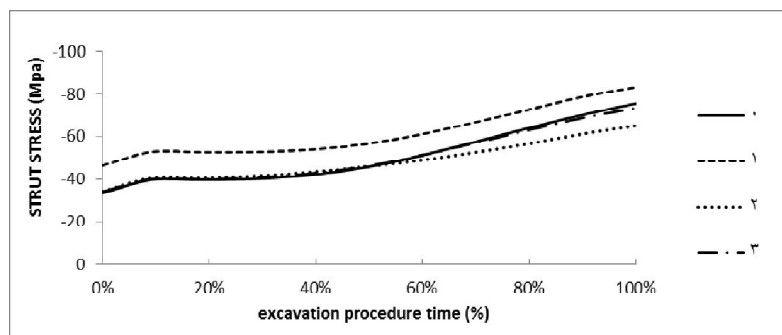
پارامتر	C (kN/m <sup>2</sup> )	Φ degree	ارتفاع گود (m)	عرض گود (m)	E خاک (MPa)	ν	چگای γ (kg/m <sup>3</sup> )	ساختمان مجاور E (kPa)	E بتن (MPa)	E فولاد (MPa)
مقدار	50	30	5	10	100	0.35	2000	3.4 × 10 <sup>5</sup>	2 × 10 <sup>4</sup>	2 × 10 <sup>5</sup>



شکل (۲۰) تغییر شکل افقی دیوار گود



شکل (۲۱) نشست زمین مجاور گود



شکل (۲۲) تغییرات نیروی تیرک در مدت زمان گودبرداری

جدول (۴) مشخصات تحلیل‌های عددی انجام شده

شماره	تیرک مایل	خاک E (MPa)	c (kN/m <sup>2</sup> )	ساختمان مجاور E (kPa)
۱-۰	با تیرک	۱۰۰	۵۰	$3.4 \times 10^5$
۱-۱		۵۰	۵۰	$3.4 \times 10^5$
۱-۲		۱۰۰	۷۵	$3.4 \times 10^5$
۱-۳		۱۰۰	۵۰	$3.4 \times 10^6$
۲-۰	بدون تیرک	۱۰۰	۵۰	$3.4 \times 10^5$
۲-۱		۵۰	۵۰	$3.4 \times 10^5$
۲-۲		۱۰۰	۷۵	$3.4 \times 10^5$
۲-۳		۱۰۰	۵۰	$3.4 \times 10^6$

این تحلیل تیرک مایل توانسته است ۱۸٪ نشست را در مجاورت گود کاهش دهد. شکل ۲۲ نشانگر تغییرات نیروی تیرک است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش سختی خاک، نیروی وارد شده به تیرک افزایش زیادی داشته است. افزایش ضریب چسبندگی باعث کاهش نیروی وارد به تیرک شده و همچنین افزایش سختی ساختمان مجاور در کاهش نیروی وارد بر تیرک تأثیر ناچیزی داشته است. تحلیل‌های عددی انجام شده، نتایج و روند حاصل از مطالعات میدانی را به خوبی تأیید می‌کند. در کل نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که تیرک مایل، در کاهش تغییر شکل افقی دیوار گود نقش مؤثری دارد؛ همچنین با تحمل بخشی از بار ثقلی ساختمان مجاور باعث کم شدن نشست زمین مجاور گود می‌شود. میزان تأثیر تیرک مایل، به متغیرهای مختلفی از قبیل پارامترهای مقاومتی خاک، سختی ساختمان مجاور و ارتفاع گود بستگی دارد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد شرایط ساختمان مجاور روی تغییر شکل‌های ایجاد شده و نیروی وارد بر تیرک تأثیر می‌گذارد. مناسب‌تر بودن شرایط سازه مجاور باعث کاهش تغییر شکل‌ها و نیز نیروی وارد بر تیرک می‌شود.

## ۸- نتیجه‌گیری

نتایج ذیل از تحقیق حاضر که شامل اندازه‌گیری میدانی در یک پروژه و تحلیل‌های عددی است، به‌دست می‌آید:

۱- یک مجموعه کاربردی ابزاربندی گود در این تحقیق ارائه شد که شامل استفاده از روش نقشه‌برداری برای ثبت تغییر شکل‌ها و استفاده از نیروسنج مکانیکی برای ثبت نیروهای ایجاد شده و کرنش‌سنج به منظور اعتبارسنجی نتایج نیروسنج می‌باشد. این مجموعه ابزار به سادگی قابل دسترس بوده و می‌تواند تا حدود بسیار زیادی در کسب اطمینان از ایمنی گود و پیشگیری از حوادث و آسیب‌ها

(ج) بررسی اثر سختی ساختمان مجاور در تحلیل (۲-۳) نشان می‌دهد که با افزایش سختی ساختمان مجاور، تغییر شکل افقی دیوار بدون تیرک مایل، کم‌تر از تحلیل (۲-۰) بوده و با وجود تیرک مایل در تحلیل (۱-۳) تفاوت چندانی با تحلیل (۱-۰) ندارد و تیرک مایل توانسته است ۷۵٪ تغییر شکل افقی دیوار را کاهش دهد. شکل ۲۱ نشانگر نشست زمین مجاور گود است. بررسی نمودارهای نشست با مقایسه‌ی تحلیل‌های ۱-۰ و ۲-۰ نشانگر نقش مؤثر تیرک مایل در کاهش نشست در زمین مجاور گود است. به‌طوری‌که در مجاورت گود، کاهش نشست به‌دلیل وجود تیرک مایل حدود ۲۰٪ می‌باشد. با مقایسه‌ی نتایج تحلیل (۱-۱) و (۲-۱) مشاهده می‌شود که با کاهش سختی نشست زمین، افزایش چشمگیری در هر دو حالت گودبرداری با تیرک و بدون تیرک دارد و در این حالت تیرک مایل توانسته است حدود ۱۵٪ نشست را کاهش دهد. نتایج تحلیل (۱-۲) و (۲-۲) نشان می‌دهد که با افزایش چسبندگی خاک، نشست زمین مجاور گود کاهش یافته و تیرک مایل توانسته است ۷٪ نشست را در این حالت کاهش دهد. همچنین بررسی نتایج تحلیل‌های (۱-۳) و (۲-۳) نشان داده که افزایش سختی ساختمان مجاور در کاهش نشست زمین مجاور گود تأثیر ناچیزی داشته و در

مؤثر باشد.

## ۱۰- مراجع

[۱] فاخر، ع. «توصیه‌هایی برای بهبود گودبرداری‌های سنتی»، مجموعه مقالات دومین سمینار ساخت و ساز در پایتخت، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، (۱۳۸۵).

[2] Sadeghian S, Fakher A, "an investigation into a shoring method to support buildings adjacent to excavations", the 17th Southeast Asian geotechnical conference proceeding, 2010.

[3] Sabzi Z, Fakher A, "the effect of confining stress on the analysis of excavations adjacent to existing buildings", international conference on geotechnique, construction materials and environment, Kuala Lumpur, malaysia, Nov 14-16, pp162-166, 2012.

[۴] سبزی زهرا، فاخر علی، «ارائه‌ی حدود مناسب استفاده از تیرک مایل برای گودبرداری در مناطق شهری»، ششمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.

[5] Boscardin, M. D. and Cording, E. G. "building response to excavation-induced settlement", journal of geotechnical engineering, vol. 115, no.1 January, pp. 1-21, 1989.

[6] Burland, J. B., "assessment of risk of damage to building due to tunneling and excavation", earthquake geotechnical engineering, Ishihara edition, balkema, rotterdam, pp.1189-1201, 1997.

[7] Dunnicliff J, Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Wiley and Sons, A Wiley interscience publications, 1998.

[8] Kavanagh, B. F. and Glenn Bird, S. J. surveying principles and applications (4 ed.). Prentice Hall, 1996.

[9] Marie LaBaw S., "Earth pressure determination in trench rescue shoring systems", phd thesis, University of Maryland, 2009.

[10] Zaremba N.L. and Lehane B.M. "the performance of steel struts in a braced excavation in perth cbd", Australian geomechanics, 42(3), 2007.

۲- در این تحقیق نوعی نیروسنج مکانیکی ساده طراحی، ساخته، کالیبره و به طور موفقیت‌آمیز در گودبرداری استفاده شد. همچنین دیتالاگر قابل حمل که به‌سادگی در شرایط گودبرداری‌های ایران قابل استفاده باشد، طراحی و ساخته شد و به وسیله این ابزار داده‌هایی ثبت گردید.

۳- نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی، مؤکد مکانیزم عملکرد تیرک مایل که بر اساس مطالعات عددی انجام شده پیشین، پیشنهاد شده، می‌باشد. بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، تیرک مایل بخشی از بار وارد بر پی ساختمان و دیواره گود را تحمل کرده، نشست قائم را کاهش می‌دهد. همچنین تیرک می‌تواند در کاهش تغییر شکل‌های افقی و قائم و در نتیجه کاهش آسیب وارده بر سازه‌های مجاور، مؤثر باشد.

۴- نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی نشان داد شرایط ساختمان مجاور تا حدود زیادی بر عملکرد تیرک مایل تأثیر می‌گذارد.

۵- مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی شده در این تحقیق استفاده شد که نتایج مطالعات میدانی را تأیید می‌کند و همچنین اثر متغیرهای چسبندگی و سختی خاک و سختی ساختمان مجاور را روی عملکرد تیرک مایل نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد با شناخت عملکرد تیرک مایل و آموزش آن به جامعه حرفه‌ای می‌توان این روش را بهبود داد و همچنین از آن در محدوده‌ی مناسب کاربرد، استفاده نمود

## ۹- تشکر و قدردانی

این تحقیق با همکاری آقایان مهندس مصطفی ابرزاده در طراحی و ساخت دیتالاگر و مهندس اسماعیل آقازاده در طراحی و ساخت نیروسنج و نیز ثبت داده‌های مورد نیاز در گود، انجام شده است. در اینجا از زحمات ایشان سپاسگزاری می‌شود.



- [13] Ghahreman B., "Analysis of ground and building response around deep excavation in sand", PhD thesis, university of Illinois Urbana Champaign, 2004.
- [11] Ugural A.C., Fenster S.K., advanced strength and applied elasticity, 1995.
- [12] Dassault Systèmes Simulia Corp. Abaqus 6.10 user's manual, 2010.