



## مدلسازی عددی رفتار خزشی گودبرداری‌های پایدارسازی شده با میل‌مه‌ار همراه با مطالعه موردی در تهران

هادی حسینی، علی فاخر\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

### کلمات کلیدی:

گودبرداری  
میل‌مه‌ار  
رفتار تابع زمان  
مدلسازی عددی  
خاک درشت دانه تهران

**خلاصه:** برخی از گودبرداری‌های ساختمانی لازم است تا برای مدت طولانی طراحی شوند یا گاهی به مدت طولانی رها می‌شوند. پایدارسازی اغلب این گودها با استفاده از میل‌مه‌ارها یا انکرها انجام می‌شود. مشاهدات و مطالعات میدانی این گودها نشان می‌دهد که در برخی موارد با گذشت زمان تغییر شکل دیوار گود افزایش و نیروی قفل‌شدگی میل‌مه‌ارها کاهش می‌یابد و خطراتی را به دنبال دارد. بنابراین شناخت رفتار طولانی مدت سیستم پایدارسازی به وسیله میل‌مه‌ار بسیار مهم است. هدف اصلی این پژوهش، مطالعه تغییرات بار میل‌مه‌ار در گودبرداری‌ها است. مدلسازی عددی رفتار طولانی مدت خاک‌ها پیچیدگی‌های زیادی دارد و ممکن است منطبق بر واقعیت نباشد. بنابراین در این پژوهش ابتدا داده‌هایی در خصوص رفتار طولانی مدت از یک مطالعه موردی در تهران جمع‌آوری شده و سپس با بهره‌گیری از مدلسازی عددی در نرم‌افزار تفاضل محدود به مطالعه رفتار سیستم میل‌مه‌ارها در طول زمان پرداخته شده است. همچنین با استفاده از روش تحلیل برگشتی، متغیرهای خزشی ورودی مدل رفتاری تابع زمان در مدل عددی تعیین و استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش و نتایج میدانی، رفتار تابع زمان مدل عددی انجام شده در نرم‌افزار مورد نظر را تایید می‌نماید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در یک میل‌مه‌ار نصب شده در اعماق میانی گود در یک سال پس از پیش‌تنیدگی، در حدود ۷ درصد کاهش بار رخ می‌دهد. همچنین در طول زمان خزشی، حداکثر تغییر شکل افقی دیوار گود ۱۳ درصد در طول یک سال افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

شامل سرمه‌ار<sup>۵</sup>، صفحه اتکا<sup>۶</sup> و شیپوری<sup>۷</sup> است که این اجزا قادرند نیروی پیش‌تنیدگی را از فولاد پیش‌تنیده (میلگرد یا استرنده<sup>۸</sup>) به زمین منتقل کنند. طول بدون پیوند بخشی از فولاد پیش‌تنیده است که آزادانه کشش الاستیک داشته و نیروی اعمالی به آن را منتقل می‌کند. طول پیوند با دوغاب در تماس است و قادر است بار کششی اعمال شده را به زمین منتقل کند. [۱]

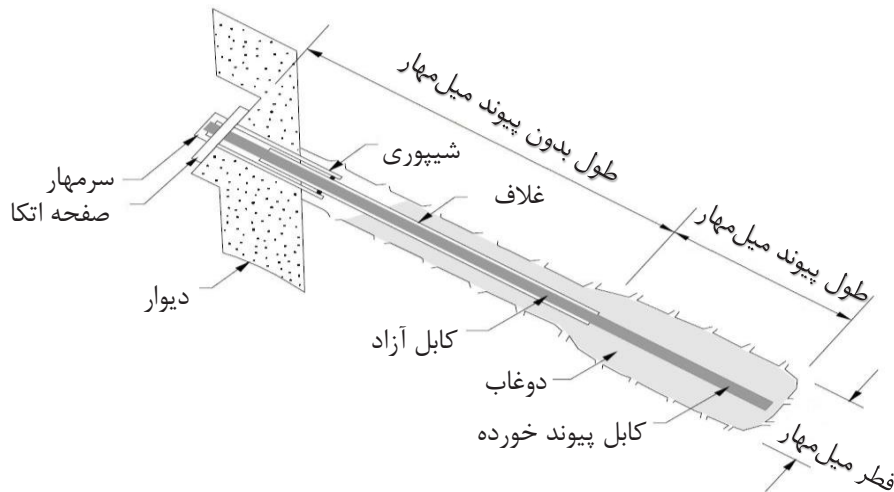
با توجه به این که خاک‌ها طبیعت دانه‌ای دارند، رفتار زمانی به خصوص خزش آنها مورد توجه متخصصان است. پدیده خزش عبارت است از افزایش تدریجی تغییر شکل یک ماده مانند بتن، خاک یا سنگ در طول زمان که تحت اثر بار ثابت قرار دارد. برای مشاهده کردن این پدیده به صورت تجربی می‌توان نمونه‌ای از خاک موردنظر را سریعاً تحت بار ثابت (درصدی از مقاومت نهایی نمونه) بارگذاری و تغییر شکل ایجاد شده در آن را در طول زمان اندازه‌گیری کرد که این آزمایش به آزمایش خزش معروف است.

گودبرداری به خصوص در اعماق زیاد یکی از پرمخاطره‌ترین فعالیت‌های عمرانی است. به منظور جلوگیری از ریزش گود و تبعات منفی احتمالی آن، از سازه‌ها و راه‌هایی تحت عنوان پایدارسازی برای مه‌ار گود استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها استفاده از میل‌مه‌ار<sup>۱</sup> یا انکر است. میل‌مه‌ار یک المان سازه‌ای نصب شده در خاک یا سنگ است که برای انتقال بار کششی اعمال شده، به زمین استفاده می‌شود. میل‌مه‌ارها در حفره‌هایی که با دوغاب پر می‌شوند، نصب می‌شوند. اجزای اصلی یک میل‌مه‌ار مطابق شکل ۱ عبارت است از مه‌ار<sup>۲</sup>، طول آزاد<sup>۳</sup> (بدون پیوند) و طول پیوند<sup>۴</sup>. بخش مه‌اری میل‌مه‌ار

- 1 Anchor
- 2 Anchorage
- 3 Unbond Length
- 4 Bond Length

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: afakher@ut.ac.ir





شکل ۱. اجزای تشکیل دهنده میل مهار [۱]

Fig. 1. Components of an anchor

تیمی از دانشگاه A&M تگزاس رفتار طولانی مدت دیواره میخ کوبی شده را در خاک ریزدانه با شاخص خمیری بالاتر از ۲۰ مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش با استفاده از تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی و مدلسازی عددی سه هدف (الف) کالیبراسیون مدل‌های رفتاری با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده از آزمایشگاه؛ (ب) شبیه سازی رفتار بلند مدت دیوار واقعی میخ کوبی شده و مقایسه مدل و نتایج پایش شده؛ و (ج) انجام تحلیل پارامتریک برای مطالعه تاثیر عوامل مختلف دنبال شد. [۴] مطالعات مونترو و همکاران در خاک رسی اسکاتلند [۵] و اعظمی در خاک رسی تهران [۶] به بررسی رفتار بلند مدت میل مهارها پرداختند. همچنین میرزایی به بررسی خزش در خاک رس جنوب تهران پرداخت. او با استفاده از انجام آزمایش‌های خزشی پارامترهای مدل رفتاری خزشی برگر را به دست آورد و در مدلسازی عددی استفاده کرد. [۷] در خاک مارن نیز مطالعاتی مانند پژوهش ماهوتی در سال ۱۳۹۶ در خاک تبریز انجام شده است که از آزمایش‌های مقیاس واقعی و مدلسازی عددی این آزمایش‌ها در نرم‌افزار FLAC 3D استفاده کرده است. [۸] بسیاری از مطالعات انجام شده در این خصوص با استفاده مدلسازی عددی به بررسی رفتار بلند مدت پرداختند. اغلب این مطالعات مانند مطالعه‌ای که آرایش در سال ۱۳۹۴ انجام داده است [۹] از نرم‌افزار FLAC و مدل رفتاری برگر استفاده کردند.

مطالعات اشاره شده در بالا دارای کمبودهای زیر هستند:

الف) مطالعات در خاک‌های مختلف به خصوص درشت دانه دارای

امروزه برخی از گودها به دلیل مشکلاتی از جمله مالی یا مدیریتی، در حین یا در پایان مراحل گودبرداری رها می‌شوند و به مرور تهدیدی جدی برای سلامتی و جان شهروندان و سازه‌های اطراف آن تبدیل می‌شوند. در گودهای پایدار شده با میل مهار در طول زمان به طور معمول بار میل مهار با گذشت زمان تغییر می‌کند که این تغییر بار امکان دارد باعث ایجاد تغییر مکان‌های جانبی قابل توجه در دیواره گود شود و موجب ریزش گود گردد. به همین دلیل مطالعه رفتار بلند مدت سیستم پایدارسازی میل مهار موضوع مهمی است.

مطالعات کمی در رابطه با رفتار طولانی مدت میل مهار انجام شده است که از روش‌های مختلفی همچون مدلسازی عددی، مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایش‌های مدل‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. از اولین مطالعاتی که در این زمینه انجام شد می‌توان به پژوهش لودویگ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۴ اشاره کرد که در طی آزمایش‌های بارگذاری مختلف، بارهای هر سیکل را برای مدت زمان مختلف ثابت نگه داشت و جابه‌جایی به وجود آمده را در طول زمان بررسی کرد. [۲] رضوانی و توتونچیان در سال ۲۰۲۱ با استفاده از داده‌های میدانی یک گود و تحلیل عددی، جابجایی دیوار ثبت شده توسط ابزار دقیق در حین و پس از ساخت و ساز برای مقایسه جابجایی واقعی دیوار گودبرداری و پیش‌بینی‌های تحلیل عددی را مطالعه کرد. [۳] اغلب مطالعات انجام شده تاکنون در خاک‌های ریزدانه انجام شده است.

1 Ludwig



شکل ۲. نمایی از گود بیمارستان آتیه غرب

Fig. 2. Excavation of Atiyeh Gharb Hospital

تفاضل محدود صریح<sup>۱</sup> دو بعدی برای انجام محاسبات مکانیک مهندسی است و دارای زبان برنامه‌نویسی داخلی FISH است که در تحقیق حاضر برای تسهیل برخی از محاسبات به کار رفت. این نرم‌افزار همچنین توانایی مدل‌سازی رفتار خزشی ویسکوالاستیک و همچنین ویسکوپلاستیک را دارد. در این تحقیق جهت راستی آزمایی بر اساس داده‌های میدانی از داده‌های پروژه بیمارستان آتیه غرب واقع در شهرک غرب شهر تهران استفاده شده است. عمق گود این پروژه حدود ۴۲ متر است و برای پایدارسازی آن از ترکیب شمع‌های بتنی، میل‌مه‌ار و میخ‌کوبی استفاده شده است. خاک محل پروژه درشت‌دانه دارای سیمان‌تاسیون و بر اساس نقشه پراکنندگی آبرفت‌های مختلف تهران از نوع آبرفتی نوع B است. [۱۰] نمایی از این گود در شکل ۲ نشان داده شده است.

در شکل ۳ مقطع مورد نظر مدل‌سازی نشان داده شده است. در این شکل محل قرارگیری میخ‌کوبی‌ها و میل‌مه‌ارها، محل نصب دو نیروسنج بر میل‌مه‌ارها و شماره‌گذاری میل‌مه‌ارهای موجود در این مقطع نشان داده شده است. زاویه قرارگیری میخ‌کوبی‌ها و میل‌مه‌ارها نسبت به افق ۱۰ درجه است و تا زیر ساختمان همسایه ادامه دارند. تراز آب زیرزمینی قبل از گودبرداری در عمق ۱۸/۴ متری از سطح زمین قرار دارد. مشخصات میل‌مه‌ارها و میخ‌کوبی‌های تعبیه شده در گود مورد نظر به ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

1 Explicit Finite Difference

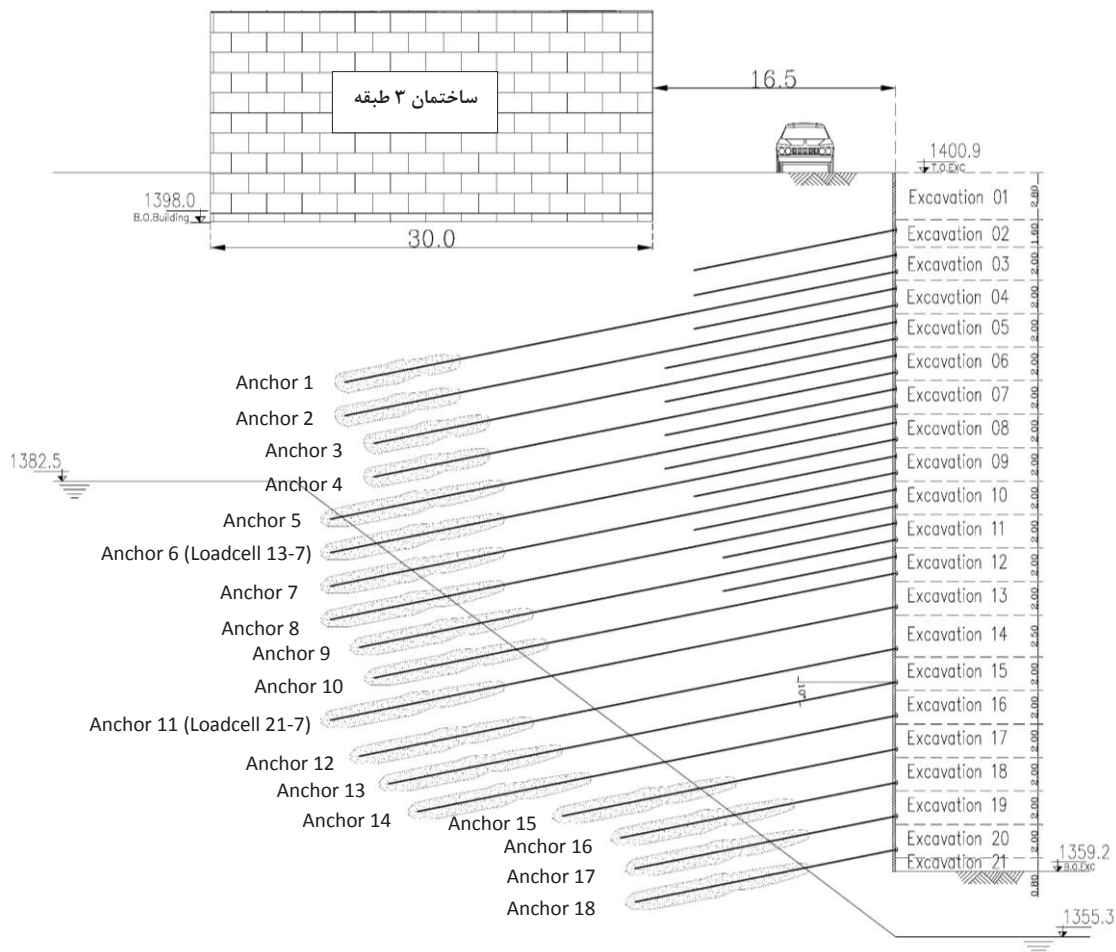
سیمانتاسیون وجود ندارد.

ب) پارامترهای خزشی خاک در تحقیقات قبلی از آزمایش‌های آزمایشگاهی به دست آمده است و راستی آزمایی بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی گودبرداری وجود ندارد.

در مقاله حاضر سعی می‌شود کمبودهای بالا برطرف گردد و به مطالعه رفتار طولانی مدت میل‌مه‌ارها در گودبرداری‌ها پرداخته شود. در این پژوهش با استفاده از داده‌های میدانی در خصوص رفتار طولانی مدت یک پروژه، مدل‌سازی عددی با تعریف مدل خزشی برگر انجام شده و رفتار طولانی مدت آن بررسی شده است. همچنین با استفاده از تحلیل برگشتی، متغیرهای خزشی ورودی مدل رفتاری تابع زمان برای خاک درشت‌دانه تهران پیش‌بینی و پیشنهاد شده است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی گودها در مراجع مختلف مورد بحث قرار گرفته است. در این تحقیق نیز از اصول متداول مدل‌سازی عددی استفاده شد. این مقاله فاقد نوآوری خاصی در روش مدل‌سازی عددی است و تنها نکته خاص در تحقیق حاضر شامل توجه به رفتار خزشی یا طولانی مدت خاک و میل‌مه‌ار است. بنابراین با توجه به ویژگی‌های مسئله مورد تحقیق تصمیم‌گیری شد که از یک نرم‌افزار تجاری استفاده شود که امکان وارد کردن رفتار طولانی مدت یا خزشی را داشته باشد. در این پژوهش مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D نسخه 8.1 انجام شده است. این نرم‌افزار یک برنامه رایانه‌ای



شکل ۳. تپ اول موقعیت میخ‌ها و میل‌مه‌ارها در مقطع مورد نظر

Fig. 3. The first type of the position of nails and anchors in the desired section

عمق گود و خاک زیر گود یک برابر عمق گود در نظر گرفته شده است. در تحلیل‌های مربوط به تغییر شکل، شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف می‌شود که در مرزهای جانبی از جابه‌جایی افقی و در مرز تحتانی از جابه‌جایی در هر دو جهت افقی و قائم (کاملاً صلب) جلوگیری شود. مدل ساخته شده در نرم‌افزار FLAC بر اساس ابعاد تعیین شده، در شکل ۴ نشان داده شده است. برای مش‌بندی مدل مطابق این شکل ابعاد المان‌ها در مش‌بندی محیط خاک در نواحی نزدیک به دیواره گود و محدوده المان‌های میخ و میل‌مه‌ار، کوچک و در حدود ۵۰ در ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای کاهش زمان تحلیل، ابعاد المان‌ها در فاصله دورتر از محدوده دیواره گود به تدریج به طوری که در دورترین فاصله، ابعاد مش برابر با ۲ در ۲ متر شود افزایش داده شد.

مراحل مدلسازی عددی به کار رفته در این پژوهش، در ادامه بیان می‌شود.

### ۲-۱- هندسه، شرایط مرزی و شبکه بندی مدل

اولین گام در مدلسازی انتخاب مناسب هندسه اولیه مدل مورد نظر است. در این پژوهش، ابعاد مدل بر اساس فرضیات پژوهش‌های دیگر [۱۱] و صحت‌سنجی‌هایی که بر روی این مدل انجام داده شد، انتخاب گردید. البته معیارهایی همچون زمان تحلیل و تاثیر ابعاد بر نتایج نیز در نظر گرفته شد. بعد مدل در پشت دیواره گود تا حدود ۳ برابر عمق گود در مدلسازی امتداد داده شده است. ابعاد دیگر مدل در سمت مقابل دیواره گود یک برابر

جدول ۱. مشخصات میل‌مه‌ارهای تعبیه شده در گود مورد مطالعه در مدل عددی

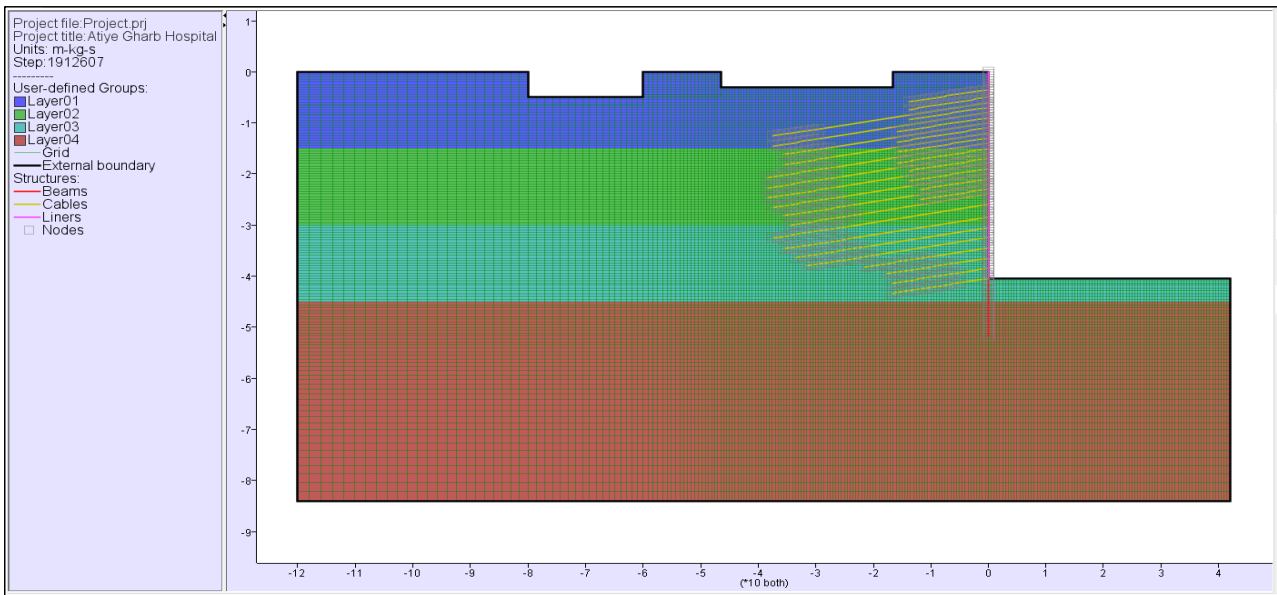
**Table 1. The specifications of the anchors in the studied excavation of numerical model**

Anchor No.	Depth (m)	Type	Total Length (m)	Total Length (m)
Anchor 1	5.9	5 Strands	38	8
Anchor 2	7.9	5 Strands	38	8
Anchor 3	9.9	5 Strands	36	8
Anchor 4	11.9	5 Strands	36	8
Anchor 5	13.9	6 Strands	39	12
Anchor 6	15.9	6 Strands	39	12
Anchor 7	17.9	6 Strands	39	12
Anchor 8	19.9	6 Strands	38	12
Anchor 9	21.9	6 Strands	36	12
Anchor 10	23.9	6 Strands	35	12
Anchor 11	25.9	6 Strands	38	12
Anchor 12	28.4	6 Strands	36	12
Anchor 13	30.4	6 Strands	34	12
Anchor 14	32.4	6 Strands	32	12
Anchor 15	34.4	6 Strands	22	12
Anchor 16	36.4	6 Strands	18	12
Anchor 17	38.4	6 Strands	17	12
Anchor 18	40.4	6 Strands	17	12

جدول ۲. مشخصات میخ کوبی‌های تعبیه شده در گود مورد مطالعه در مدل عددی

**Table 2. The specifications of the nails in the studied excavation of numerical model**

Nail No.	Depth (m)	Diameter (m)	Total Length (m)
Nail 1	3.4	28	14
Nail 2	4.9	28	14
Nail 3	6.9	28	14
Nail 4	8.9	28	16
Nail 5	10.9	28	16
Nail 6	12.9	40	16
Nail 7	14.9	40	16
Nail 8	16.9	40	14
Nail 9	18.9	40	14
Nail 10	20.9	40	12
Nail 11	22.9	40	12



شکل ۴. شبکه‌بندی خاک مدل شده در نرم‌افزار FLAC 2D

Fig. 4. Modeled soil grid in FLAC 2D software

کالیبراسیون این مدل با استفاده از آزمایش‌های داخل آزمایشگاهی معمولی یا آزمایش‌های درجا، ساده است. بنا به پیشنهاد راهنمای موجود در نرم‌افزار FLAC این مدل رفتاری برای پروژه‌های دارای اندرکنش سازه-خاک، حفاری‌ها، تونل زنی و آنالیز نشست استفاده می‌شود. [۱۳] در این مدل رفتاری مدول یانگ یک پارامتر وابسته به تنش است و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cot \phi - \sigma_3}{c \cdot \cot \phi + P_{ref}} \right)^m \quad (1)$$

همچنین از یک پارامتر سختی دیگر یعنی  $E_{50}$  در مدل رفتاری استفاده می‌شود که به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cot \phi - \sigma_3}{c \cdot \cot \phi + P_{ref}} \right)^m \quad (2)$$

بر اساس مطالعات ژئوتکنیک انجام گرفته برای پروژه، خاک محل از چهار لایه تشکیل شده است و مقادیر پارامترهای لایه‌های مختلف خاک

## ۲-۲- مدلسازی رفتار مستقل از زمان

برای مدلسازی خاک در نرم‌افزار در حالت مستقل از زمان از مدل رفتاری سخت شونده پلاستیک ( $PH^1$ ) استفاده می‌شود. مدل رفتاری سخت شونده پلاستیک که در نسخه‌های اخیر نرم‌افزار FLAC 2D به آن اضافه شده است، یک مدل ترکیبی سخت شونده برشی و حجمی است. این مدل رفتاری توسط سانچز<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۹ فرمول‌بندی شده است [۱۲] و این ویژگی را دارد که اشکالات اصلی فرمول‌بندی مدل الاستیک غیرخطی مانند شناسایی الگوی بارگذاری/ باربرداری و مدول حجمی را حذف کند. [۱۳] ویژگی‌های اصلی مدل سخت شونده پلاستیک عبارت است از:

۱ - رابطه هذلولوی تنش- کرنش در طول فشرده سازی زهکشی شده محوری؛

۲ - کرنش پلاستیک در هنگام بسیج اصطکاک (سخت شدگی برشی)؛

۳ - کرنش پلاستیک در فشرده سازی اولیه (سخت شدگی حجمی)؛

۴ - سختی الاستیک وابسته به تنش طبق قانون نیرو؛

۵ - باربرداری و بارگذاری مجدد الاستیک در مقایسه با بارگذاری خالص؛

۶ - حافظه تنش قبل از تحکیم؛ و

۷ - معیار گسیختگی موهر کولمب.

- 1 Plastic Hardening
- 2 Sanchez

جدول ۳. پارامترهای مدل رفتاری PH مورد استفاده در مدلسازی عددی

Table 3. Parameters of PH model used in numerical modeling

Soil layer	1	2	3	4
Depth(m)	$0 < H < 15$	$15 < H < 30$	$30 < H < 45$	$45 < H$
Mass-Density ( kg / m <sup>3</sup> )	2000	2000	2000	2000
Friction angle (Degrees)	36	33	34	34
Dilation angle (Degrees)	6	3	4	4
Cohesion (kPa)	30	35	40	45
$E_{50}^{ref}$ (MPa)	100	150	170	200
$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	100	150	170	200
$E_{ur}^{ref}$ (MPa)	300	450	510	600
Power (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3	0.3
Tension Limit (kPa)	41	54	59	67
$P_{ref}$ (kPa)	100	100	100	100
$Knc$	0.41	0.45	0.44	0.44

مدلسازی فازهای بعدی یعنی خاکبرداری و جاگذاری میخ کوبی و میل‌مه‌ار بر اساس توصیه پژوهش‌های گذشته [۱۴] هر لایه خاکبرداری در هر مرحله به دو زیرلایه تقسیم شده است. در فاز اول خاکبرداری و نصب شاتکریت زیرلایه اول انجام شده و در فاز بعدی خاکبرداری و نصب شاتکریت زیر لایه دوم، جاگذاری میخ کوبی یا میل‌مه‌ار موجود در آن مرحله و پیش تنیدگی همان میل‌مه‌ار به صورت همزمان انجام شده است. عمق هر لایه خاکبرداری در این مدل بین ۱/۵ تا ۲/۵ متر است. در هر فاز خاکبرداری، اگر سطح آب زیرزمینی در این ناحیه خاکبرداری وجود داشته باشد قبل از خاکبرداری سطح آب در محدوده گودبرداری ۰/۵ متر پایین تر از سطح ناحیه خاکبرداری در نظر گرفته شده و در نواحی اطراف گودبرداری با شیب ۱ به ۱/۵ به سطح آب قبل از گودبرداری وصل شده است. البته در آخرین فاز خاکبرداری سطح آب زیرزمینی بر اساس نقشه‌های اجرایی در محدوده گودبرداری در عمق ۴۵/۶ متر تعریف شده است.

پارامترهای استفاده شده در مدل برای سازه‌های شاتکریت، شمع نگهبان، میخ و میل‌مه‌ار در نرم‌افزار به صورت جداگانه در ادامه بیان می‌شود. در مدل

در مدل PH به صورت جدول ۳ است. پارامترهای چگالی، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی و مدول الاستیک از طریق آزمایش‌های مختلفی مانند آزمایش برجا که در مطالعات ژئوتکنیک انجام شده به دست آمده است. متغیرهای  $E_{50}^{ref}$ ،  $E_{oed}^{ref}$  و  $E_{ur}^{ref}$  به ترتیب سختی سکانتی در ۵۰ درصد تنش انحرافی نهایی در آزمایش سه محوری، سختی مماسی در آزمایش تحکیم و سختی باربرداری-بارگذاری مجدد در آزمایش سه محوری هنگامی که تنش همه جانبه برابر فشار مرجع  $P_{ref}$  باشد، است. بر اساس توصیه مراجع مختلف [۱۳] فشار مرجع برابر با فشار اتمسفر استاندارد (۱۰۰ کیلو پاسکال) در نظر گرفته شد. متغیر  $m$  توان مدول الاستیک در مدل رفتاری PH است و برای خاک درشت دانه موجود در پروژه برابر ۰/۵ تخمین زده شده است. مقدار حد کشش و ضریب عادی تحکیم یافته ( $Knc$ ) به ترتیب از روابط  $\sigma_{lim}^t = c / \tan \phi$  و  $K_{nc} = 1 - \sin \phi$  به دست می‌آید.

در نرم‌افزار گودبرداری و پایدارسازی به صورت مرحله به مرحله مدلسازی و تحلیل شده است. برای نصب سیستم شمع و میخ کوبی و میل‌مه‌ار، ابتدا شمع نگهبان مطابق نقشه‌های اجرایی در نرم‌افزار تعریف شده است. برای

جدول ۴. پارامترهای مورد استفاده برای رویه شاتکریت

Table 4. Parameters used for shotcrete

Area (cm <sup>2</sup> )	Mom. Inertia (cm <sup>4</sup> )	Thickness (cm)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
1500	28125	15	20	0.15

ترتیب با استفاده از روابط  $(2/3) \times c$  و  $\tan^{-1}((2/3) \times \tan \phi)$  محاسبه شده است. به دلیل اینکه زاویه اصطکاک داخلی کمتر از مقدار ۳۰ درجه است زاویه اتساع برابر با صفر در نظر گرفته شده است. پارامترهای استفاده شده برای مدلسازی شمع‌های نگهبان و سطح مشترک بین شمع و خاک به ترتیب به صورت جدول ۵ و جدول ۶ است.

از المان سازه‌ای کابل<sup>۲</sup> در نرم‌افزار جهت مدلسازی المان میخ کوبی و میل‌مه‌ار استفاده می‌شود. المان کابل تنها قادر به انتقال نیروی محوری است. مدلسازی عددی انجام شده در این پژوهش بر مبنای کرنش مسطح است و المان‌های میخ کوبی و میل‌مه‌ار به صورت فاصله‌دار مدلسازی شده است. بدین منظور از متغیر spacing در نرم‌افزار استفاده شده است. در نرم‌افزار از این متغیر برای مقیاس گذاری خودکار خواص و متغیرهای دیگر المان استفاده می‌شود تا تاثیر توزیع کابل‌ها را روی یک الگوی منظم با فاصله حساب کند. [۱۳]

در نرم پارامترهای مورد نیاز برای تعریف المان کابل در نرم‌افزار FLAC 2D به دو دسته کلی پارامترهای عنصر مسلح‌کننده و پارامترهای طول‌گیرداری تقسیم بندی می‌شوند. در مدلسازی المان کابل در نرم‌افزار FLAC پارامترهای سطح مقطع، ضریب ارتجاعی و مقاومت جاری‌شدگی کششی و فشاری تنها مختص به عنصر مسلح‌کننده (فولادی) است و خصوصیات دوغاب را در محاسبه آنها اعمال نشده است. [۱۵] تعیین پارامترهای مربوط به طول‌گیرداری میل‌مه‌ار اهمیت زیادی در خصوص رفتار طولانی مدت دارد به همین دلیل در این تحقیق مورد توجه جدی قرار گرفت. در بخش بعدی مقاله حاضر روش پیشنهادی برای تعیین متغیرهای مربوط به طول‌گیرداری میل‌مه‌ار ارائه می‌شود.

در این مدل طبق نقشه‌های اجرایی پروژه، از چهار ردیف میخ کوبی

از شاتکریت با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است که با هر مرحله خاکبرداری به صورت المان تیر<sup>۱</sup> اجرا شده است. پارامترهای مورد استفاده برای مدلسازی سازه شاتکریت در جدول ۴ قابل مشاهده است. متغیرهای مساحت و ممان اینرسی شاتکریت برای طول یک متر از آن محاسبه شده و مدول یانگ بتن نیز برای آن در نظر گرفته شده است.

در این مقطع از شمع‌های بتنی با قطر یک متر و فاصله چهار متر از یکدیگر استفاده شده و فضای بین آنها شاتکریت قرار داده شده است. محاسبه پارامترهای سطح مشترک بر اساس روابط ارائه شده در راهنمای نرم‌افزار FLAC انجام شده است. برای شبیه سازی سطح مشترک شمع و خاک المان سطح مشترک غیرمتصل<sup>۲</sup> استفاده شده است. بر اساس روابط ارائه شده در راهنمای نرم‌افزار FLAC 2D، مقادیر سختی قائم  $k_n$  و برشی  $k_s$  از رابطه (۳) محاسبه شده است. همچنین مقدار سختی قائم نصف مقدار سختی برشی در نظر گرفته شده است. [۱۳]

$$k_n \approx 10 \cdot \max\left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}}\right] \quad (3)$$

که در آن  $K$  و  $G$  به ترتیب مدول حجمی و مدول برشی محیط اطراف سطح مشترک و  $\Delta z_{\min}$  کوچکترین بعد مش در جهت قائم در همسایگی سطح مورد بررسی (۵۰ سانتی‌متر) است. به دلیل اینکه در رابطه (۱) مقدار حداکثر داخل پراتنز لازم است قرار داده شود مشخصات لایه سوم برای مدول حجمی و برشی در نظر گرفته شده است. مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی سطح مشترک بر اساس زاویه اصطکاک و چسبندگی میانگین لایه‌ها به

- 1 Beam
- 2 Interface Unglued

3 Cable



جدول ۵. پارامترهای مورد استفاده برای شمع نگهبان

Table 5. Parameters used for soldier pile

Radius (m)	Spacing (m)	Young's Modulus (GPa)
1.0	4.0	200

جدول ۶. پارامترهای مورد استفاده برای سطح مشترک شمع و خاک

Table 6. Parameters used for interface between pile and soil

Normal stiffness $k_n$ (MPa/m)	Shear stiffness $k_s$ (MPa/m)	Cohesion (kPa)	Friction Angle (degrees)	Dilation Angle (degrees)
17.5	35	23.3	24.4	0.0

جدول ۷. پارامترهای مورد استفاده برای میخ کوبی‌ها

Table 7. Parameters used for nails

Nail Type	Radius (mm)	Spacing (m)	Young's Modulus (GPa)	Compressive Yield Strength (KN)	Tensile Yield Strength (KN)	Perimeter (mm)
Φ28	28	2.0	200	2.6	258.6	345
Φ40	40	1.0, 2.0	200	5.3	527.8	345

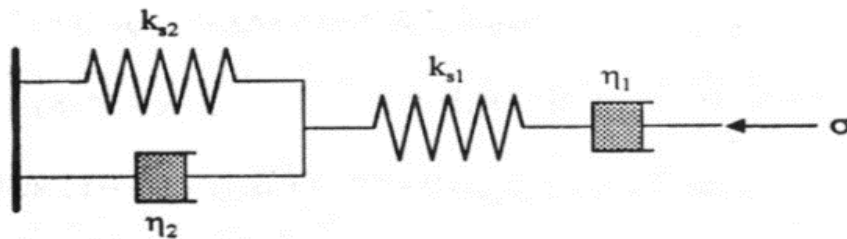
در مدل مورد بررسی از چهار ردیف میل‌مهار استرنده پنج رشته‌ای با فاصله دو متر و چهارده ردیف میل‌مهار استرنده شش رشته‌ای با فاصله دو متر استفاده شده است. بر اساس مشخصات سازنده آن و کنترل با آزمایش‌های مناسب، تنش تسلیم استرنده برابر با ۱۸۶۰ مگاپاسکال و مساحت هر رشته آن برابر با ۱۴۳ میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. برای محاسبه نیروی تسلیم کششی، تنش تسلیم در مساحت هر رشته و تعداد رشته ضرب شده است. برای مدلسازی بخش آزاد مهاری میل‌مهار پنج رشته‌ای و شش رشته‌ای پارامترهای جدول ۸ که مربوط به خود استرنده است اعمال شده است. استرندهای پنج رشته‌ای ۷۵۰ کیلونیوتن و استرندهای شش رشته‌ای ۹۰۰ کیلونیوتن پیش‌تنیده شده است.

قطر Φ28 با فاصله دو متر، چهار ردیف میخ کوبی قطر Φ40 با فاصله دو متر و دو ردیف میخ کوبی قطر Φ40 با فاصله یک متر در جهت عمود بر صفحه تحلیل استفاده شده است. قطر نهایی در میخ‌ها که شامل ناحیه دوغاب و ناحیه مخلوط دوغاب و خاک است، برابر با ۱۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و پارامتر محیط تعریف شده در نرم‌افزار بر اساس این قطر محاسبه شده است. برای محاسبه نیروی تسلیم کششی، تنش تسلیم آرماتور برابر با ۴۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. برای محاسبه نیروی تسلیم کششی المان مسلح‌کننده، تنش تسلیم مسلح‌کننده در مساحت این میخ کوبی ضرب شده و مقدار نیروی تسلیم فشاری یک صدم این نیروی تسلیم کششی در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای اختصاص یافته در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۸. پارامترهای مورد استفاده برای میل مهارها

Table 8. Parameters used for anchors

Anchor Type	Area (mm <sup>2</sup> )	Spacing (m)	Young's Modulus (GPa)	Compressive Yield Strength (kN)	Tensile Yield Strength (kN)
5 Strands	715	2.0	200	13.3	1329.9
6 Strands	858	2.0	200	15.9	1595.9



شکل ۵. الگوی رفتاری مدل برگر [۱۶]

Fig. 5. Burger model pattern [16]

فرض بر این است که اجزای ویسکوالاستیک و نرخ کرنش پلاستیکی به صورت سری عمل می‌کنند. قانون رفتاری قسمت ویسکوالاستیک این مدل بر اساس مدل برگر و قانون رفتاری قسمت پلاستیکی بر اساس مدل موهرکولمب رفتار می‌کند. الگوی برگر از ترکیب الگوهای ماکسول و کلوین مطابق شکل ۵ به صورت سری تشکیل می‌شود. نمودار تغییرات کرنش بر حسب زمان در الگوی برگر مطابق شکل ۶ رسم می‌شود و این نمودار برای نشان دادن رفتار واقعی ماده در خزش کشسان مناسب می‌باشد. [۱۶]

کرنش محوری در طول زمان  $\varepsilon(t)$  که تحت تنش محوری ثابت  $\sigma_1$  قرار دارد در بدنه برگر از رابطه زیر به دست می‌آید. [۱۷]

$$\varepsilon(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G^M} + \frac{\sigma_1}{3G^K} - \frac{\sigma_1}{3G^K} e^{-\frac{G^K t}{\eta^K}} + \frac{\sigma_1}{3\eta^M} t \quad (4)$$

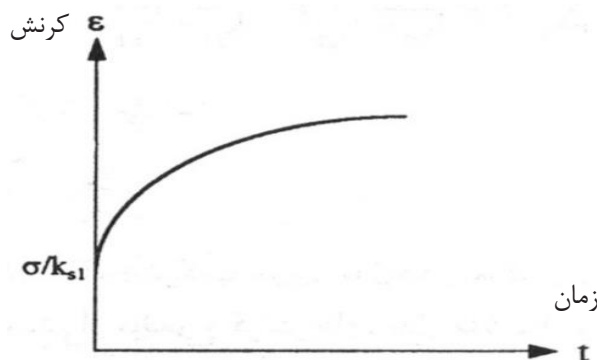
در این رابطه  $K$  مدول حجمی است. متغیرهای چهارگانه خزشی مدل برگر شامل متغیرهای  $G^M$  و  $G^K$  به ترتیب مدول برشی ماکسول و کلوین و متغیرهای  $\eta^K$  و  $\eta^M$  به ترتیب ویسکوزیته ماکسول و کلوین

### ۲-۳- انتخاب مدل رفتاری خزش

پس از اتمام مدلسازی رفتار مستقل از زمان گود مطابق مراحل بیان شده در بخش گذشته بایستی در فاز جدیدی رفتار خزشی مدلسازی شود. در نرم‌افزار FLAC 2D برای مدلسازی رفتار خزشی مدل‌های رفتاری مختلفی وجود دارد که در این پژوهش بر اساس مرور پژوهش‌های گذشته از مدل رفتاری برگر استفاده شده است. مدل رفتاری ویسکوپلاستیک برگر در تحقیق حاضر به دلایل زیر انتخاب شده است:

- این مدل رفتاری ترکیبی از مدل وابسته به زمان برگر و مدل موهرکولمب است و ورودی‌های بخش مدل موهرکولمب به راحتی در هر پروژه‌ای قابل دسترس است.
- تعداد پارامترهای ورودی آن در بخش مدل برگر نسبت به سایر مدل‌های رفتاری خزشی موجود در نرم‌افزار کمتر است.
- در مدلسازی رفتار وابسته به زمان اغلب پروژه‌ها از این مدل رفتاری استفاده شده است.

مدل خزشی ویسکوپلاستیک برگر با یک رفتار انحرافی ویسکوالاستوپلاستیک و رفتار حجمی الاستوپلاستیک توصیف می‌شود.



شکل ۶. نمودار تغییرات کرنش بر حسب زمان در الگوی برگر [۱۶]

Fig. 6. Diagram of strain changes over time in Burger model [16]

با توجه به محدودیت‌های اشاره شده، گام زمانی یک روز برای این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت و برای بررسی نتایج مختلف مدت زمان‌های مختلفی برای تحلیل خزشی در نرم‌افزار در نظر گرفته شد.

### ۳- نکات ویژه در مدلسازی عددی ارائه شده در این تحقیق

مراحل کلاسیک مدلسازی عددی در بخش قبلی مقاله ارائه شد. در اینجا برخی نکات خاص برای مدلسازی عددی موضوع مورد تحقیق ارائه می‌شود. روش شناسی این نکات برای اولین بار در این تحقیق جمع بندی شده و در مقاله حاضر ارائه می‌گردد.

#### ۳-۱- روش پیشنهادی برای تعیین متغیرهای میخ کوبی و میل‌مه‌ار

راهنمای نرم‌افزار FLAC، نحوه تعیین پارامترها را بر اساس محیط سنگی ارائه کرده است و متاسفانه در آن اشاره‌ای به چگونگی تعیین و محاسبه پارامترهای المان کابل در محیط خاکی نشده است. با توجه به این کمبود در راهنمای نرم‌افزار، پژوهش‌هایی توسط دیگران برای ارائه روشی کاربردی برای مدلسازی مهاری در محیط خاکی در نرم‌افزار FLAC انجام شد. برای تعیین متغیر سختی برشی ( $K_{bond}$ ) اگرچه بهترین روش برداشت مستقیم از نتایج آزمون کشش است، اما برای محاسبه این پارامتر از رابطه (۶) استفاده شده است. [۱۳]

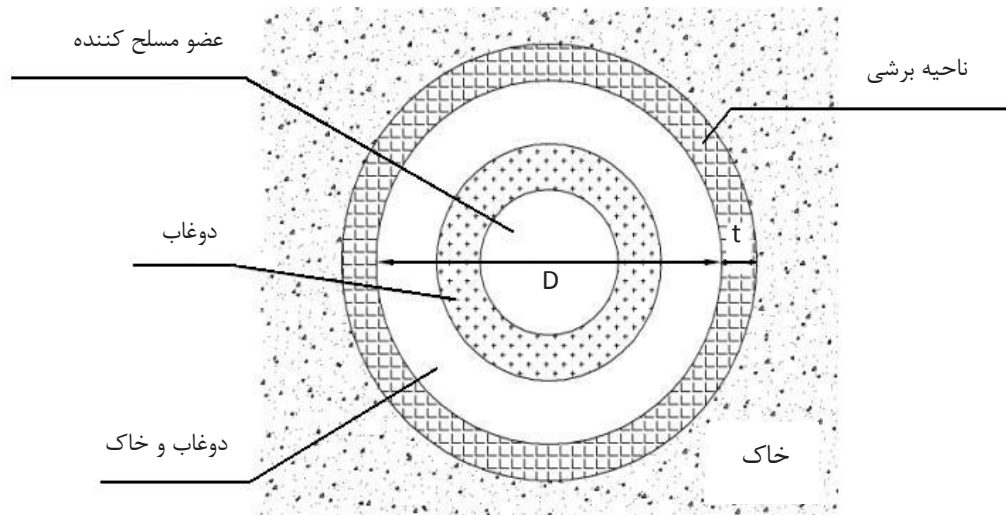
$$K_{bond} \approx \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (6)$$

است. تعیین پارامترهای مدل رفتاری برگر اهمیت زیادی دارد لیکن روش ساده‌ای برای این کار در مراجع فنی ملاحظه نشده است. بنابراین در این تحقیق تلاش شد که روش کاربردی مناسبی برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری برگر در پروژه‌های گودبرداری پایدارسازی شده با میل‌مه‌ار پیشنهاد گردد. این روش در بخش بعدی مقاله حاضر ارائه می‌شود. پس از تعریف مدل رفتاری برگر و اختصاص پارامترهای آن که در بخش بعدی درباره آن توضیح داده می‌شود لازم است گام زمانی و مدت زمان تحلیل خزشی تعیین شود.

#### ۲-۴- انتخاب گام زمانی تحلیل خزشی

برای تحلیل خزشی، زمان مسئله و گام زمانی در نرم‌افزار بیانگر زمان واقعی است. قوانین رفتاری در هر مدل رفتاری برای خزش باعث استفاده از گام زمانی در فرمول بندی خود می‌شود، بنابراین گام زمانی ممکن است بر پاسخ تاثیر بگذارد. مقدار گام زمانی در هر مدل رفتاری خزشی محدوده‌ای دارد. حداکثر گام زمانی خزش برای دقیق عمل کردن مدل عددی می‌تواند به عنوان نسبت ویسکوزیته ماده به مدول برشی آن بیان شود. برای مدل رفتاری ویسکوپلاستیک خزشی برگر، این رابطه به صورت رابطه (۵) در می‌آید. در این رابطه متغیرهای  $G^K$  و  $G^M$  به ترتیب مدول برشی ماکسول و کلونین و متغیرهای  $\eta^K$  و  $\eta^M$  به ترتیب ویسکوزیته ماکسول و کلونین در مدل برگر اشاره می‌کند. [۱۳]

$$\Delta t_{max}^{cr} = \min\left(\frac{\eta^K}{G^K}, \frac{\eta^M}{G^M}\right) \quad (5)$$



شکل ۷. قطر عضو مسلح کننده و ضخامت دوغاب یا ناحیه برشی در محیط خاکی [۱۵]

Fig. 7. Diameter of the reinforcing member and the thickness of the grout or shear zone in the soil environment [15]

یکسان است. در بخش پیوندی یا مهار شده میل‌مهار علاوه بر تخصیص پارامترهای موجود در جدول ۸ مشخصات دوغاب نیز تعریف شود. با توجه به اینکه قطر نهایی میل‌مهار با قطر نهایی میخ یکسان و برابر با ۱۱ سانتی‌متر فرض شده است، مقادیر پارامترهای دوغاب میل‌مهاری مشابه میخ کوبی‌ها محاسبه شده و برای مدل‌سازی میل‌مهاری از مقادیر به دست آمده برای میخ کوبی‌ها در جدول ۹ استفاده شده است.

### ۳-۲- روش پیشنهادی برای تعیین متغیرهای مدل رفتاری خزشی

در این پژوهش، به دلیل اینکه امکان انجام آزمایش‌های خزشی جهت به دست آوردن پارامترهای مدل خزشی برگر وجود نداشت و پروژه اتمام یافته بود برای به دست آوردن پارامترهای مدل رفتاری برگر از روش تحلیل برگشتی استفاده شده است. تحلیل برگشتی یک روش مناسب برای تعیین پارامترهای مدل با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای جمع‌آوری شده از آزمایش‌های داخل آزمایشگاهی [۲۰] یا تحقیقات برجها [۲۱] است. در این روش پارامترهای مدل را با استفاده از تعیین مقادیری که خروجی مدل و خروجی سیستم واقعی را برای ورودی مشابه تطابق بهینه قرار می‌دهد، تخمین می‌زنند. البته با توجه به امکانات نرم‌افزار FLAC و عدم اتصال آن با نرم‌افزارهایی همچون MATLAB برای کدنویسی و استفاده از خروجی‌ها، استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی برای یافتن سریعتر پارامترهای مدل بسیار سخت و پیچیده خواهد بود. به همین دلیل در این پژوهش روش آزمون و خطا اتخاذ

که در آن  $G$  مدول برشی هر لایه خاک،  $t$  ضخامت ناحیه برشی و  $D$  قطر نهایی ناحیه شامل عضو مسلح کننده، دوغاب و مخلوط خاک و دوغاب است. مطابق شکل ۷ در محیط خاکی یک ناحیه برشی در اطراف دوغاب ایجاد می‌شود که بر اساس پژوهش‌های گذشته [۱۸، ۱۹] ضخامت ناحیه برشی به عنوان یک لایه نازک در حدود ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

برای تعیین مقاومت چسبندگی ( $S_{bond}$ ) از رابطه (۷) استفاده شده است. [۱۳]

$$S_{bond} = \pi(D + 2t)c \quad (7)$$

که در آن علاوه بر پارامترهای تعریف شده در رابطه (۶)،  $c$  چسبندگی خاک محیطی است. پارامتر مقاومت اصطکاکی دوغاب (Sfriction) نیز برابر با زاویه اصطکاک لایه خاکی که مسلح کننده در آن قرار دارد، در نظر گرفته شده است. [۱۵]

با توجه به لایه بندی خاک و محل قرار گرفتن هر میخ کوبی یا میل‌مهار در هر کدام از لایه‌ها، مطابق روابط (۶) و (۷) مقادیر سختی برشی دوغاب ( $K_{bond}$ )، مقاومت چسبندگی ( $S_{bond}$ ) و زاویه اصطکاک (Sfriction) در جدول ۹ بیان شده است. این پارامترها برای هر دو میخ  $\Phi 28$  و  $\Phi 40$

جدول ۹. پارامترهای مورد استفاده برای میخ کوبی‌ها و میل‌مه‌ارها بر اساس موقعیت آنها در هر لایه

Table 9. Parameters used for nails and anchors based on their position in each layer

Soil Layer	1	2	3
$K_{bond}$ (kN/m <sup>2</sup> )	337570	506350	573860
$S_{bond}$ (kN/m)	10.9	12.7	14.5
$S_{friction}$ (degrees)	36	33	34

جدول ۱۰. مقادیر پارامترهای مدل خزشی ویسکوپلاستیک برگر

Table 10. Parameters used for the Burgers creep viscoplastic model

Depth(m)	$0 < H < 30$	$30 < H$
Maxwell shear modulus (MPa)	3700	5000
Maxwell viscosity (MPa.day)	200	700
Kelvin shear modulus (MPa)	1000	10000
Kelvin viscosity (MPa.day)	90	250

برگر وجود ندارد. همچنین ترکیبات مختلفی از مقادیر متغیرها به دست آمده است ولی مقادیر اشاره شده در جدول ۱۰ به دلیل معنادار بودن و همخوانی با مقادیر این متغیرها در منابع دیگر انتخاب شد.

#### ۴- راستی آزمایی مدل عددی در این تحقیق

مدلسازی عددی بدون صحت‌سنجی نمی‌تواند نشان‌دهنده شرایط واقعی یک مسئله باشد. معمولاً مقایسه با نتایج مدل‌های فیزیکی و عددی یا اندازه‌گیری‌های محلی در مسائل مرتبط با موضوع پژوهش روشی برای بررسی صحت اعتبار نتایج مدل‌های عددی تلقی می‌شود. در این تحقیق برای صحت‌سنجی مدلسازی عددی از داده‌های دو پروژه استفاده گردید:

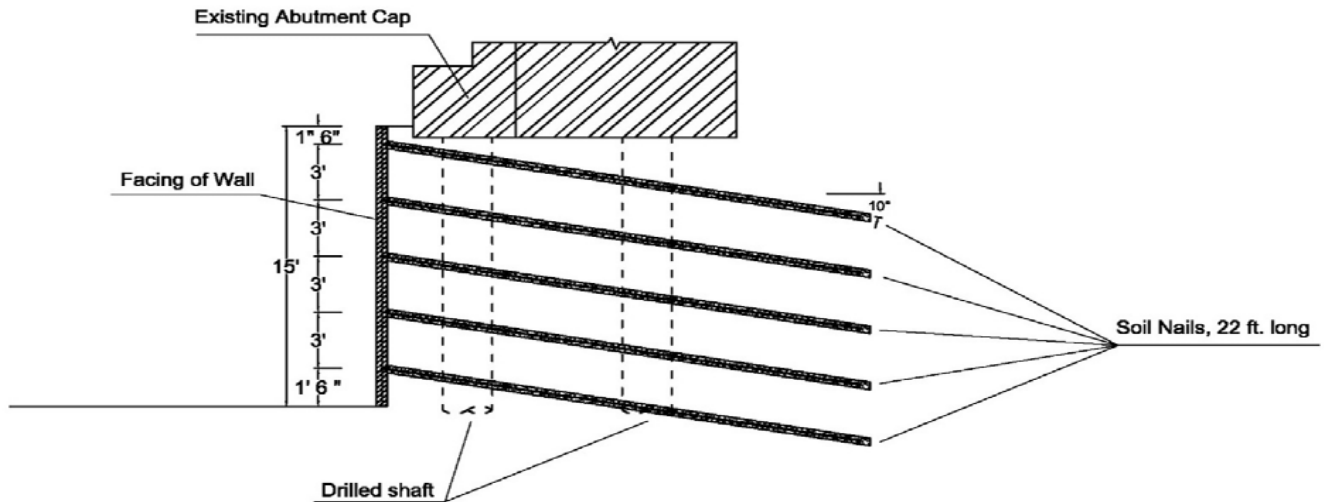
(الف) گودبرداری بیمارستان آتیه در تهران

(ب) دیوار میخکوبی شده در تگزاس

داده‌های نیروی میل‌مه‌ار حاصل از نیروسنج و جابه‌جایی‌های حاصل از نقشه برداری در پروژه (الف) با نتایج مدلسازی عددی مقایسه گردید. این مقایسه‌ها در بخش بعدی مقاله حاضر آمده است. در بخش حاضر راستی

شده است.

چهار پارامتر خزشی مدل رفتاری برگر با روش تحلیل برگشتی و با استفاده از مقادیر نیروی پیش‌تنیدگی موجود در میل‌مه‌ارها در طول زمان به عنوان خروجی سیستم تعیین شده است. در این روش بر اساس آزمون و خطا ابتدا با جایگذاری مقادیر استفاده شده در منابع دیگر و تغییر مقادیر آنها تعداد زیادی تحلیل برگشتی با مقادیر متفاوت پارامترهای برگر انجام شد تا مقادیر این پارامترها بهینه شوند. با توجه به اینکه یک یا دو توصیه در چند ادبیات فنی برای تعیین پارامترهای مدل پیشنهاد شده است ولی بر اساس این که این توصیه‌ها در همه ادبیات‌های فنی اشاره شده تعمیم نیافته است، نمی‌توان از این توصیه‌ها با اطمینان استفاده کرد. با توجه به اینکه در این مطالعه موردی یعنی پروژه بیمارستان آتیه غرب مدل دارای چهار لایه خاک است، هر دو لایه خاک یک لایه در نظر گرفته و یک مقدار پارامتر برای هر کدام به طور جداگانه تعریف شده است. بر این اساس، پارامترهای چهارگانه مدل خزشی برگر به صورت جدول ۱۰ به دست آمد. البته در این پروژه داده‌های کافی برای ارائه محدوده تقریبی برای هر یک از پارامترهای خزشی



شکل ۸. مقطع عرضی و جزئیات دیواره میخ‌کوبی شده [۴]

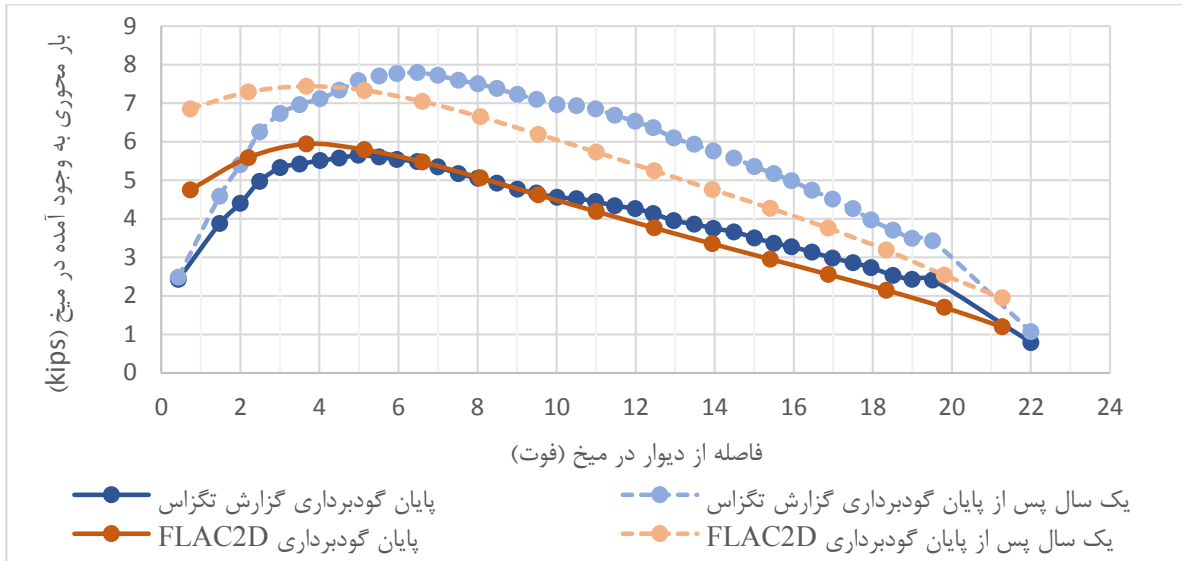
Fig. 8. Cross section and details of nailed wall [4]

با نتایج پژوهش گزارش تگزاس، در شکل ۱۰ با یکدیگر مقایسه شده است. این نتایج در دو زمان پایان گودبرداری و یک سال پس از پایان گودبرداری در نمودار ارائه شده است. در این نمودار از واحدهای استفاده شده در نمودار اصلی موجود در گزارش تگزاس استفاده شده و جابه‌جایی افقی دیوار بر حسب اینچ و عمق بر حسب فوت نشان داده شده است.

بر اساس این صحت‌سنجی، مطابق شکل ۹ مشاهده شده است نتایج بار به وجود آمده در میخ‌کوبی ردیف سوم از نظر روند تغییر بار بین زمان پایان گودبرداری و یک سال پس از آن تطابق خوبی با نتایج گزارش تگزاس دارد. البته در مقایسه مقادیر نتایج، اختلاف وجود دارد که یکی از دلایل تفاوت نتایج استفاده از ورژن دو بعدی نرم‌افزار در مدلسازی عددی است که در گزارش از نسخه سه بعدی آن استفاده شده است. همچنین در گزارش تگزاس به فرضیات انجام گرفته در مدلسازی عددی اشاره نشده است تا بتوان از این فرضیات در مدلسازی عددی استفاده کرد. در نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰ مشاهده شده است که تطابق خوبی از نظر مقدار و روند در نتایج جابه‌جایی افقی دیوار میخ‌کوبی شده وجود دارد. در نتیجه می‌توان تفاوت نتایج در بخش نیروی به وجود آمده در میخ‌کوبی را نادیده گرفت و صحت فرضیات روش مدلسازی در نرم‌افزار را مورد تایید دانست.

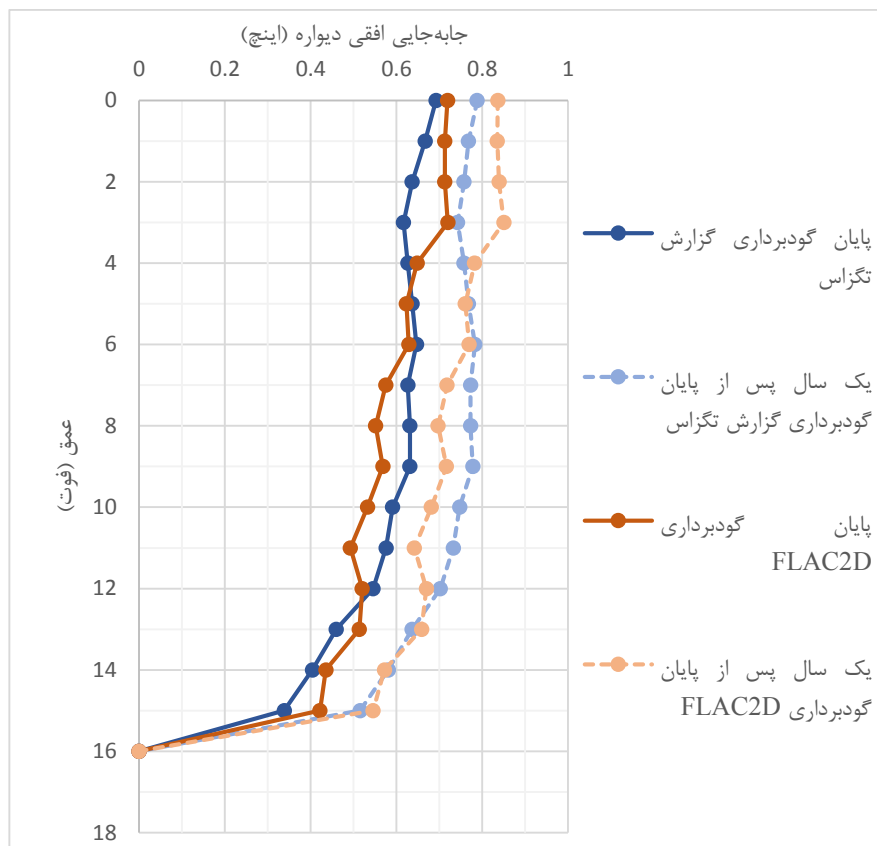
آزمایی بر اساس پروژه (ب) ارائه می‌گردد. این توضیح لازم است که پروژه (ب) به تنهایی در تحقیق حاضر مورد علاقه نبود ولی پروژه (الف) به دلیل گودبرداری با میل‌مه‌ار و خاک تهران مورد توجه بود. برای صحت‌سنجی مدلسازی عددی، در پروژه (ب) از یک پروژه دیوار میخ‌کوبی شده در جاده تگزاس که در پژوهشی توسط موسسه حمل و نقل تگزاس بررسی شده [۴]، استفاده شده است. شکل ۸ طرح دیوار میخ‌کوبی شده را نشان داده شده است که در آن از ۵ ردیف میخ‌کوبی به طول ۲۲ فوت (۶/۷ متر) استفاده شده است. خاک محل پروژه از نوع رس با شاخص خمیری بالاتر از ۲۰ است.

در پروژه تگزاس برای مدلسازی رفتار خاک از مدل رفتاری موهرکولمب و مدل رفتاری خزشی برگر استفاده شده است. پارامترهای اتخاذ شده برای مدلسازی در مرجع مربوطه ارائه شده است و بر اساس آن صحت‌سنجی انجام شده است. [۴] به منظور صحت‌سنجی این مسئله با نرم‌افزار FLAC2D مدلسازی شده است. برای مقایسه نتایج و اعتبارسنجی بار به وجود آمده در میخ‌ها، به نوان نمونه نتایج یک ردیف از میخ‌کوبی‌ها در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ بار محوری به وجود آمده در میخ‌کوبی ردیف سوم در زمان‌های پایان گودبرداری و یک سال پس از آن را نشان می‌دهد. نتایج جابه‌جایی افقی دیوار به دست آمده از نرم‌افزار به منظور مطابقت



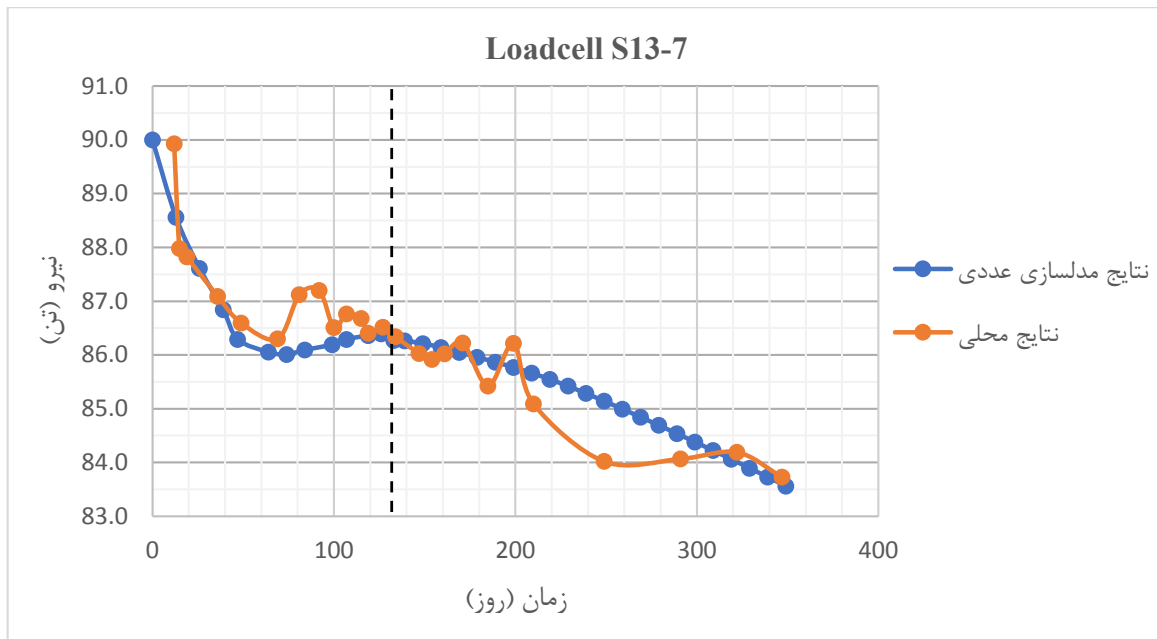
شکل ۹. بار محوری در میخ ردیف سوم در زمان پایان گودبرداری و یک سال پس از گودبرداری

Fig. 9. Axial load in the nail of the third row at the end of excavation and one year after excavation



شکل ۱۰. جابه‌جایی افقی دیوار میخ‌کوبی شده در زمان پایان گودبرداری و یک سال پس از گودبرداری

Fig. 10. Horizontal displacement of the nailed wall at the end of excavation and one year after excavation



شکل ۱۱. بار ثبت شده توسط نیروسنج S13-7 و پیش‌بینی شده توسط مدلسازی عددی در میل‌مه‌ار ششم

Fig. 11. Loads recorded by loadcell S13-7 and predicted by numerical modeling in 6th anchor

است. ۱۳۳ روز پس از نصب این نیروسنج (خط‌چین سیاه رنگ در شکل ۱۱) مراحل گودبرداری به اتمام رسیده و نتایج پس از این تاریخ مربوط به زمان خزشی است.

بر اساس قرائت‌های نیروسنج S13-7، میل‌مه‌ار ردیف ششم پس از نصب و پیش‌تنیدگی ۹۰ تنی، بار موجود در آن تا پایان مراحل ساخت و گودبرداری برابر با ۸۶/۳ تن و ۲۱۶ روز پس از آن برابر با ۸۳/۷ تن است. این بدین معنا است که در طول دوره ۳۴۷ روز پس از پیش‌تنیدگی، مقدار بار موجود در این میل‌مه‌ار ۰.۷٪ کاهش یافته است.

همچنین نیروسنج S21-7 بر روی میل‌مه‌ار تعبیه شده در عمق ۲۵/۹ متری نصب شده است و مطابق نمودار شکل ۱۲ نتایج آن به مدت ۲۸۳ روز در ۲۰ زمان مختلف (پس از پایان گودبرداری در ۱۲ زمان مختلف) ثبت شده است. ۶۹ روز پس از نصب نیروسنج (خط‌چین سیاه رنگ در شکل ۱۲) مراحل گودبرداری به اتمام رسیده و نتایج پس از این تاریخ مربوط به زمان خزشی است.

همچنین بر اساس قرائت‌های نیروسنج S21-7، میل‌مه‌ار ردیف یازدهم پس از نصب و پیش‌تنیدگی ۹۰ تنی، بار موجود در آن تا پایان مراحل ساخت

## ۵- داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و مدلسازی عددی و تحلیل آنها

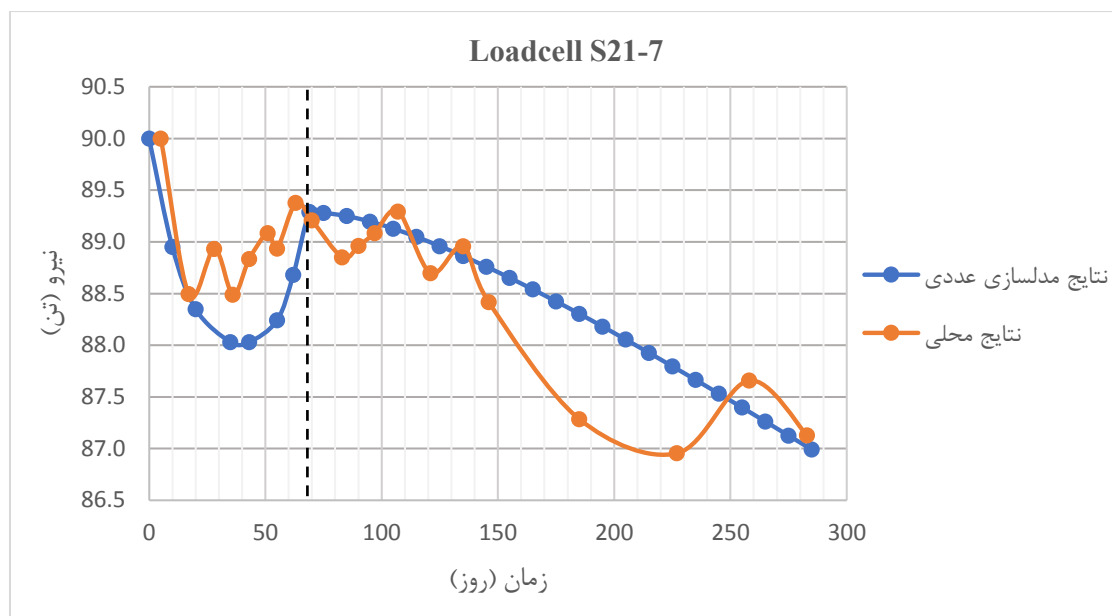
در این بخش داده‌های بدست آمده از تحلیل عددی در دو بخش شامل (الف) مقایسه تغییرات نیروی پیش‌تنیدگی میل‌مه‌ارها و (ب) جابه‌جایی افقی دیواره گود با گذشت زمان ارائه و مورد جمع‌بندی قرار گرفته شده است.

### ۵-۱- تغییرات نیروی پیش‌تنیدگی میل‌مه‌ارها با گذشت زمان

در گود بیمارستان آتیه غرب، بر روی دو میل‌مه‌ار نیروسنج نصب شده و بار موجود در این میل‌مه‌ارها مورد پایش قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها هم در زمان گودبرداری و هم پس از پایان گودبرداری (زمان خزشی) انجام گرفته و ثبت شده است. همانطور که گفته شد پارامترهای چهارگانه مدل خزشی برگر که بر اساس روش تحلیل برگشتی تعیین شده، از مقایسه و تطابق نتایج این دو نیروسنج و نتایج نرم‌افزار به دست آمده است.

نیروسنج S13-7 بر روی میل‌مه‌ار تعبیه شده در عمق ۱۵/۹ متر نصب شده است و مطابق نمودار شکل ۱۱ نتایج آن به مدت ۳۴۷ روز یعنی در ۲۵ زمان مختلف (پس از پایان گودبرداری در ۱۲ زمان مختلف) ثبت شده





شکل ۱۲. بار ثبت شده توسط نیروسنج S21-7 و پیش‌بینی شده توسط مدلسازی عددی در میل‌مه‌ار یازدهم

Fig. 12. Loads recorded by loadcell S21-7 and predicted by numerical modeling in 11th anchor

رفتار سایر میل‌مه‌ارها متفاوت باشد. در نتیجه این رفتار را می‌توان برای تمامی میل‌مه‌ارها با این مشخصات و تغییر شکل نسبت داد.

#### ۵-۲- جابه‌جایی افقی دیواره گود

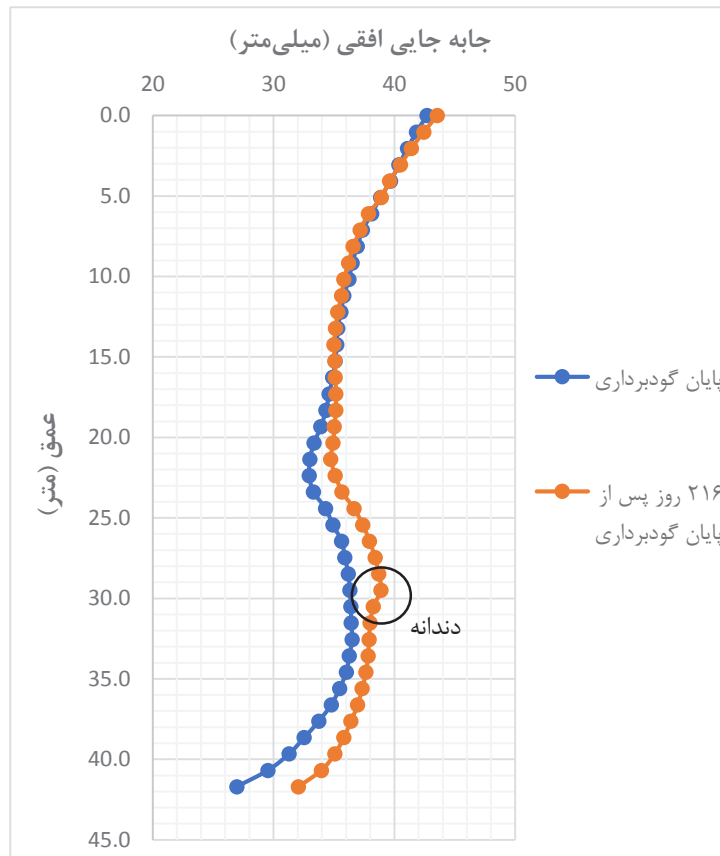
نیم‌رخ جابه‌جایی افقی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار در طول ارتفاع دیواره گود در دو حالت پایان گودبرداری و مدت زمان ۲۱۶ روز پس از پایان گودبرداری در شکل ۱۳ نشان داده و با یکدیگر مقایسه شده است.

در راس دیواره تا عمق حدوداً سه متری جابه‌جایی جانبی دیواره زیاد شده است که به دلیل نبود میخ کوبی و میل‌مه‌ار در این ارتفاع است. البته بر اساس طرح پایدارسازی ارائه شده توسط شرکت پیمانکار، این جابه‌جایی زیاد در عمل با اجرای دیواره حائل کاهش پیدا می‌کند و نباید مقدار جابه‌جایی افقی رخ داده در این ارتفاع را به عنوان جابه‌جایی افقی حداکثر در نظر گرفت. با در نظر گرفتن این مسئله، بر اساس شکل ۱۳ حداکثر جابه‌جایی افقی در پایان مراحل ساخت و گودبرداری برابر با ۳۶ میلی‌متر و ۲۱۶ روز بعد از آن در طول خزش برابر ۳۸ میلی‌متر است. بنابراین در طول خزش ۲۱۶ روز، جابه‌جایی حداکثر به مقدار ۵٪ افزایش پیدا کرده است. در مدت زمان یک سال خزش

و گودبرداری برابر با ۸۹/۲ تن و ۲۱۴ روز پس از آن برابر با ۸۷/۱ تن است. این بدین معنا است که در طول دوره ۲۸۳ روز پس از پیش‌تنیدگی، مقدار بار موجود در این میل‌مه‌ار ۳٪ کاهش یافته است.

مطابق نمودارهای بالا، نتایج ثبت شده توسط هر دو نیروسنج تطابق خوبی با نتایج پیش‌بینی شده توسط مدلسازی عددی دارند. البته باید اشاره کرد عوامل محیطی مانند دمای محیط در نیروی میل‌مه‌ارها تاثیرگذار است ولی اگر این داده‌ها در طولانی‌مدت بررسی شوند در هر دو نیروسنج کاهش بار مشاهده شده است.

البته این نتایج تنها برای دو میل‌مه‌ار از یک مقطع بررسی شده است و امکانات کافی نیست تا بتوان به تمام میل‌مه‌ارها نیروسنج نصب کرد. ولی به طور کلی چون میل‌مه‌ار از یک سمت در خاک وجود دارد و در بخش پیوند میل‌مه‌ار کشیده می‌شود و از سمت دیگر به سر میل‌مه‌ار و شمع بسته شده است، تغییر شکل در خاک و ناحیه پیوندی میل‌مه‌ار باعث می‌شود این بخش به سمت دیواره حرکت کند و مقدار کشش کم شود. بنابراین می‌توان گفت از آنجایی که میل‌مه‌ارهای دیگر از نظر مشخصات و روش اجرا مشابه دو میل‌مه‌ار مورد مطالعه هستند بنابراین دلیلی وجود ندارد که



شکل ۱۳. نیم‌رخ جابه‌جایی افقی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار در دو زمان پایان گودبرداری و ۲۱۶ روز پس از پایان گودبرداری

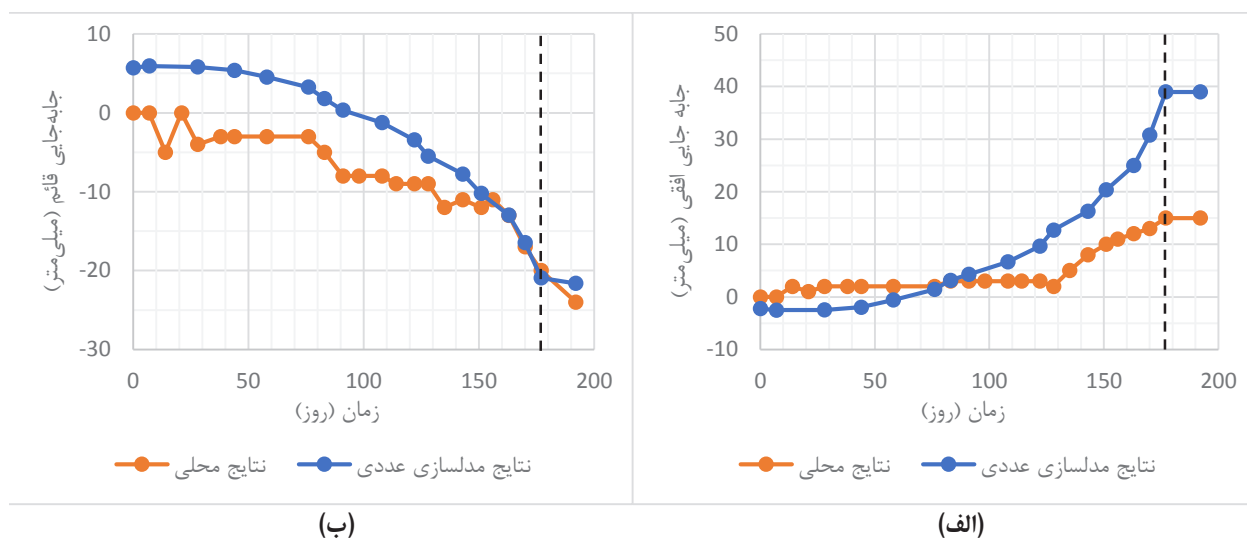
**Fig. 13. The profile of the horizontal displacement predicted by the software at the end of excavation and 216 days after the end of excavation.**

مربوط به حالت خزشی در نرم‌افزار است. البته بر اساس نتایج محلی موجود، نتایج برای حالت خزشی فقط برای ۱۵ روز موجود است و پس از آن نتایجی ثبت نشده است. در نمودار شکل ۱۴ زمان پایان مراحل ساخت و گودبرداری با خط‌چین رنگ سیاه مشخص شده است.

همان گونه که از شکل ۱۴ نیز مشاهده می‌شود تطابق خوبی از لحاظ روند تغییر در طول زمان بین نتایج محلی و نتایج مدلسازی عددی وجود دارد. البته در عمق ۵ متری از مقطع، در زمان خزشی جابه‌جایی افقی پیش‌بینی شده توسط مدلسازی عددی بیشتر از مقدار جابه‌جایی ثبت شده در محل است. یکی از اختلافات موجود در نتایج به دلیل نداشتن اطلاعات کامل از اجرای مراحل گودبرداری و پایدارسازی در واقعیت و به تبع آن در نظر گیری فرضیات منطقی‌تر و ساده‌تر در مدلسازی عددی است. دلیل دیگر آن می‌تواند خطا در اندازه گیری میدانی دانست.

نیز مقدار جابه‌جایی حداکثر، ۱۳٪ یعنی ۵ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. همچنین دندان‌های که در نمودار نیم‌رخ جابه‌جایی افقی تنها در زمان خزشی در عمق ۳۰ متری (نشان داده شده در شکل ۱۳) رخ داده است به دلیل تفاوت فاصله عمودی دو میل‌مه‌ار قرار گرفته در این عمق (فاصله ۲/۵ متری) نسب به فاصله عمودی سایر میل‌مه‌ارها (۲ متری) است. این تفاوت فاصله میل‌مه‌ارها باعث شده است تا در جابه‌جایی‌های افقی دیوار گود رخ داده در زمان خزشی این دندان مشاهده شود.

همچنین در این مقطع نتایج تنها یک رفلکتور که در عمق ۵ متری سطح زمین جهت اندازه‌گیری و ثبت جابه‌جایی دیوار گود در محل نصب شده است در دسترس است. از آنجایی که نرم‌افزار تحلیل دو بعدی انجام می‌دهد، جابه‌جایی در این عمق در دو راستای افقی و قائم مطابق شکل ۱۴ با نتایج رفلکتور بررسی و مقایسه شده است. همچنین دقت شود که ۱۷۷ روز پس از نصب و قرائت رفلکتور، گودبرداری به اتمام رسیده است و مقادیر پس از آن



شکل ۱۴. مقایسه مقدار جابه‌جایی ثبت شده توسط رفلکتور و پیش بینی شده توسط مدل‌سازی عددی (الف) جابه‌جایی افقی؛ (ب) جابه‌جایی قائم

Fig. 14. Comparison of displacement value recorded by reflector and predicted by numerical modeling (a) horizontal displacement; (b) Vertical displacement

۶- نتیجه گیری

خزشی) میل‌مه‌ارهای به کار رفته در سیستم‌های پایدارسازی را به خوبی مدل کند.

۲- با توجه به این که تاکنون متغیرهای خزشی مدل رفتاری ویسکوپلاستیک برگر برای خاک درشت دانه تهران ارائه نشده بود، در این پژوهش این متغیرها از طریق تحلیل برگشتی رفتار طولانی مدت میل‌مه‌ار به دست آمد. این پارامترها شامل مدول برشی ماکسول، مدول برشی کلوین، ویسکوزیته ماکسول و ویسکوزیته کلوین می‌باشند. مقادیر پیشنهاد شده در این پژوهش را می‌توان برای خاک‌های مشابه خاک پروژه بیمارستان آتیه غرب استفاده کرد. خاک این پروژه از نوع درشت‌دانه دارای سیمان‌تاسیون است. البته با توجه به امکانات نرم‌افزار FLAC، استفاده از تکنیک‌های بهینه سازی برای یافتن سریعتر پارامترهای مدل بسیار سخت و پیچیده خواهد بود. به همین دلیل در این پژوهش روش آزمون و خطا در تحلیل برگشتی اتخاذ شده است.

۳- رفتار طولانی مدت گود پایدار شده نشان می‌دهد که در طول زمان در اثر خزش، تغییر شکل افقی دیواره گود در خاک درشت‌دانه دارای سیمان‌تاسیون تهران افزایش پیدا می‌کند و نیروی پیش تنیدگی موجود در میل‌مه‌ارها کاهش می‌یابد. این رفتار به دلیل تغییر شکل در خاک و ناحیه

همانطور که گفته شد، این پژوهش تنها برای دو میل‌مه‌ار از یک مقطع بررسی شده است و به دلیل محدودیت‌ها نمی‌توان به تمام میل‌مه‌ارها نیروسنج نصب کرد. ولی بر اساس رفتار میل‌مه‌ار در طول زمان، چون میل‌مه‌ار از یک سمت در خاک وجود دارد و از سمت دیگر به سر میل‌مه‌ار و شمع بسته شده است، تغییر شکل در خاک و ناحیه پیوندی میل‌مه‌ار باعث می‌شود این بخش به سمت دیواره حرکت کند و مقدار کشش کم شود. بنابراین می‌توان گفت از آنجایی که میل‌مه‌ارهای دیگر از نظر مشخصات و روش اجرا مشابه دو میل‌مه‌ار مورد مطالعه هستند بنابراین دلیلی وجود ندارد که رفتار سایر میل‌مه‌ارها متفاوت باشد. در نتیجه این رفتار را می‌توان برای تمامی میل‌مه‌ارها با این مشخصات و تغییر شکل نسبت داد. بنابراین بر اساس تحقیقات ارائه شده در این مقاله، نتایج زیر به دست آمد:

۱- در این مقاله روشی برای مدل‌سازی رفتار طولانی مدت گودبرداری‌های پایدارسازی شده با میل‌مه‌ار ارائه شد. با توجه به صحت‌سنجی انجام شده در این مقاله بر اساس داده‌های دیوار میخ کوبی شده تگزاس و همچنین مقایسه نتایج میدانی گودبرداری بیمارستان آتیه، نتیجه گیری گردید که روش مدل‌سازی عددی ارائه شده در این مقاله می‌تواند رفتار وابسته به زمان

- high plasticity index (PI) soils: technical report, Texas A&M Transportation Institute, 2017.
- [5] N.S. Montero-Cubillo, R.A. Galindo-Aires, A. Serrano-González, C. Olalla-Marañón, F.D. Simic-Sureda, Analytical model of an anchored wall in creep soils, *International Journal of Geomechanics*, 20(4) (2020) 04020027.
- [6] R. Azami, Experimental Study of Soil Creep in Excavation Anchors, Tarbiat Modares university, 2017, (in persian).
- [7] S. Mirzaee, Time effects in numerical analysis of excavation in urban areas, Bu-Ali Sina University, 2009, (in persian).
- [8] A. Mahouti, Pull-out Behavior of Grouted Anchors in Marl, University of Tabriz, 2017, (in persian).
- [9] T. Arayesh, Numerical Analysis of Viscoplastic Effect in Permanent Anchored Slope After along Time, Tarbiat Modares university, 2015, (in persian).
- [10] A. Cheshomi, S.R. Ramezannejad Elyerdi, A. Fakher, Development of Tehran alluvium classification based on geological characteristics and geotechnical parameters, *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 11(1) (2018) 65-79.
- [11] Y.-J. Lim, Three-dimensional nonlinear finite element analysis of tieback walls and of soil-nailed walls under piled bridge abutments, Texas A&M University, 1996.
- [12] T. Schanz, P. Vermeer, P.G. Bonnier, The hardening soil model: formulation and verification, in: *Beyond 2000 in computational geotechnics*, Routledge, 2019, pp. 281-296.
- [13] Fast Lagrangian Analysis of Continua, in, Itasca Consulting Group, Minneapolis, 2019.
- [14] S.M. Asadollahi, An Investigation Into The Stress Exerted To Facing Of Excavations Supported By Nailing And Anchorag, University of Tehran, 2017, (in persian).
- [15] N. Yeganeh, A. Akhtarpour, J. Bolouri Bazaz, Parameters Determination of Soil-Anchor Interaction for Numerical Modelling According to Field Data, *Modares Civil Engineering journal*, 15(4) (2015) 105-116, (in persian).
- [16] S.A. Sadrnejad, Soil plasticity and modeling, Khaje
- پیوندی میل‌مه‌ار است که باعث می‌شود این بخش به سمت دیواره حرکت کند و مقدار کشش کم شود.
- ۴- برای میل‌مه‌ارهای نصب شده در ترازهای فوقانی گود یعنی در اعماق بالایی و نزدیک به سطح زمین ارتفاع گود، کاهش بار بیشتری نسبت به سایر میل‌مه‌ارهای قرار در طول زمان خزش رخ می‌دهد. این موضوع به دلیل کاهش میزان نیروی سربار ناشی از وزن خاک در اعماق بالایی است. در ضمن مشخص شد که ترکیب میل‌مه‌ار و میخ کوبی موجب می‌شود که تغییر شکل خزشی ناچیز شود و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد، زیرا میخ کوبی باعث بهبود مشخصات مکانیکی خاک می‌شود.
- ۵- در مطالعه موردی ارائه شده در این مقاله، نیروی میل‌مه‌ار تعبیه شده در عمق ۱۵/۹ متری با گذشت ۳۴۷ روز ۰.۷٪ و نیروی میل‌مه‌ار تعبیه شده در عمق ۲۵/۹ متری با گذشت ۲۸۳ روز ۰.۳٪ کاهش یافت. همچنین بر اساس مطالعه مورد بررسی حداکثر تغییرشکل افقی دیوار در اثر خزش پس از یک سال پس از اتمام ساخت در حدود ۰.۱۳٪ نسبت به زمان اتمام ساخت افزایش می‌یابد.
- ۶- در طول زمان خزشی نیروی ایجاد شده در میخ کوبی مانند پروژه تگزاس (شکل ۹) افزایش می‌یابد ولی در میل‌مه‌ارها مانند گود بیمارستان آتیه غرب کاهش می‌یابد. زیرا مکانیزم عملکرد میخ کوبی و میل‌مه‌ار متفاوت است. بر خلاف میل‌مه‌ار در مورد میخ کوبی هیچ‌گونه نیروی پیش‌تیندگی در میخ ایجاد نمی‌شود و خاک باید تغییرشکل دهد تا نیرو در میخ ایجاد شود. با توجه به مکانیزم عملکرد میخ کوبی می‌توان گفت که هر چه خاک بیشتر تغییرشکل دهد نیروی بیشتری در آن به وجود می‌آید.

## منابع

- [1] P. Sabatini, D. Pass, R. Bachus, *Geotechnical engineering circular no. 4: Ground anchors and anchored systems*, 1999.
- [2] H. Ludwig, Short-term and long-term behavior of tiebacks anchored in clay, (1984).
- [3] R. Rezvani, M.A. Tutunchian, Horizontal displacement of urban deep excavated walls supported by multistrands anchors, steel piles, and in situ concrete piles: Case Study, *International Journal of Geomechanics*, 21(1) (2021) 05020008.
- [4] M. Sanchez, J.-L. Briaud, S. Hurlbaud, M.M. Kharanaghi, G. Bi, Creep behavior of soil nail walls in

- [20] L. Li, M. Gamache, M. Aubertin, Parameter determination for nonlinear stress criteria using a simple regression tool, Canadian geotechnical journal, 37(6) (2000) 1332-1347.
- [21] G. Gioda, L. Locatelli, Back analysis of the measurements performed during the excavation of a shallow tunnel in sand, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 23(13) (1999) 1407-1425.
- Nasir Toosi 2016 ,(in persian).
- [17] R.E. Goodman, Introduction to rock mechanics, Wiley New York, 1989.
- [18] L.-J. Su, J.-H. Yin, W.-H. Zhou, Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance, Computers and Geotechnics, 37(4) (2010) 555-564.
- [19] W.B. Wei, Y.M. Cheng, Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods, Computers and Geotechnics, 37(5) (2010) 602-618.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Hosseini, A. Fagher, Numerical Modelling of Creep Behavior of Excavations Stabilized with Anchors with a Case Study in Tehran, Amirkabir J. Civil Eng., 55(5) (2023) 1081-1102.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21896.7846



