بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل مهار بر جابه‌جایی دیوار پایدارسازی شده با مهار مارپیچ

محمدعماد محمودی مهریزی*؛
دانشگاه خوارزمی، پردیس بین‌الملل، گروه مهندسی عمران،
یونس دقیق؛ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، گروه مهندسی عمران،
جواد نظری افشار؛ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرقدس، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۷/۰۸ پذیرش ۹۷/۱۰/۰۸

چکیده

مهارهای مارپیچ از روش‌های نوین در پایدارسازی دیواره‌ها و ساخت دیوارهای حایل هستند. در این پژوهش تأثیر شکل مهارهای مارپیچ بر جابه‌جایی دیواره پایدارسازی شده با این روش از نظر آزمایشگاهی بررسی شده است. بدین‌منظور از ٤ نوع مهار مارپیچ با قطر و تعداد صفحات مارپیچ متفاوت برای پایدارسازی دیواره استفاده شده است. برای بررسی میزان جابه‌جایی و تغییراتی که در مراحل مختلف خاک‌برداری در مدل‌سازی فیزیکی رخ می‌دهد از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) استفاده شده و عکس‌های گرفته شده از مراحل مختلف تجزیه و تحلیل و مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده می‌توان بیان کرد که در شیب پشت (back slope) ۲۰ درجه، میزان جابه‌جایی تاج دیواره با کاهش تعداد صفحه‌های مارپیچ و قطر آن‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه میزان جابه‌جایی مجاز دیواره تعیین کننده نوع مهار مارپیچ استفاده شده است. با توجه به این‌که در شیب پشت ۲۰ درجه مهار مارپیچ دارای ۳ مارپیچ کم‌ترین میزان جابه‌جایی را در تاج دیواره ایجاد می‌کند و جابه‌جایی رخ داده از دیوار پایدارسازی شده به‌روش میخ‌کوبی کم‌تر است، در زمان وجود سربار استفاده از روش مهار مارپیچ به‌جای میخ‌کوبی منطقی به‌نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: مهار مارپیچ، دیوار، جابه‌جایی افقی، سرعت‌سنجی تصویری ذرات، پایدارسازی.

*نویسنده مسئول me.mahmudi@gmail.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

مقدمه

افزایش ساخت و ساز در مناطق شهری که نتیجهٔ افزایش تراکم در عرصه‌های محدود و در نواحی پر تراکم است، ایجاد گودبرداری‌ها در مجاورت سازه‌های موجود و تأسیسات شهری را به‌همراه دارد. از جمله روش‌های پرکاربرد در پایدارسازی دیواره‌ها استفاده از میخ‌کوبی و دوخت به پشت است که به شکل گسترده در کشور ما اجرا می‌شوند. روش مهار مارپیچ باتوجه به ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله سرعت عملیات اجرا بالا و اقتصادی بودن یکی از روش‌هایی است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است و در مواردی جای‌گزین میخ‌کوبی و دوخت به پشت متداول شده است. کارهای انجام شده و در دسترس در حوزهٔ پایدارسازی دیواره‌ها با استفاده از مهارهای مارپیچ بسیار اندک هستند، ولی تعدادی از تحقیقات که مربوط به مقاومت بالاآمدگی و بیرون‌کشی مهارهای مارپیچ و پایدارسازی دیواره‌ها است در این بخش بیان شده‌اند. تمامی این کارها از تأثیر تعداد صفحات مارپیچ و شکل آن‌ها روی ظرفیت باربری مهارها سخن به میان آورده‌اند که نقش آن‌ها در آزمایش‌های بیان شده در ادامه بررسی شده است:

گالی[1] و همکاران در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ با استفاده از مهارهای تک و چند مارپیچ تأثیر شکل جزء مارپیچ، خواص ماسه و عمق نصب را بر مقدار گشتاور نصب مورد نیاز بررسی کردند. آن‌ها هم‌چنین به بررسی آزمایشگاهی توسعهٔ تنش در ماسه به‌علت نصب و بالاآمدگی مهارهای مارپیچ پرداختند [۱]، [۲]. کارهای انجام شده به‌وسیلهٔ گالی و همکاران از منابع اصلی در حوزهٔ شمع‌ها و مهارهای مارپیچ است. یکی از مواردی که این تیم تحقیقاتی روی آن تحقیق نکرده است بررسی اثر گروه مهار است. برای بررسی تعامل مهارهای چند مارپیچ جاسازی شده در خاک دانه‌ای به‌صورت گروهی تحقیق شاهین[2] و دمارس[3] بررسی شده است [۳]. کارهای انجام شده به‌وسیلهٔ میتال[4] و موخرجی[5] نیز در رابطه با بررسی‌های آزمایشگاهی روی رفتار گروهی از مهارهای تک، دو و سه مارپیچ تحت تأثیر بارهای

1. Ghaly
2. Shaheen
3. Demars
4. Mittal
5. Mukherjee

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

بالاآمدگی عمودی روی خاک ماسه‌ای است. مشاهده شده است که بار بیرون‌کشش به‌طور چشم‌گیری با عمق نصب مهار و تعداد مهارها و شکل آن‌ها تغییر می‌کند [٤]-[٦]. در رابطه با الگوی قرارگیری و تعداد مهارها با توجه به تعداد کم تحقیقات از این پژوهش‌ها و مباحث کلی مربوط به میخ‌کوبی و مهار استفاده شده است.

از مهم‌ترین کارهای انجام شده روی دیواره‌های پایدارسازی شده به‌وسیلهٔ مهارهای مارپیچ کار پرکو[1] و دیردوروف[2] و همکاران است. این دو تحقیق از عملیاتی و اجرایی بودن این اعضا در پایدارسازی دیواره‌ها سخن به‌میان آورده‌اند. پرکوخلاصه‌ای شامل تجزیهٔ مهندسی ظرفیت مهار مارپیچ و مثالی از طراحی دیوار حائل ارائه کرده و در مورد آثار زاویهٔ انحراف روی ظرفیت بیرون‌کشش، عملکرد مهار در ماسه‌ها، رفتارهای تنش- کرنش و تعیین ظرفیت بیرون‌کشی مهار بحث کرده است [۷]. دیردوروف و همکاران به تشریح نتایج آماده‌سازی دیوار خاکی میخ‌کوبی شده مارپیچ پرداخته‌اند. طراحی و توضیح دیوار خاکی میخ‌کوبی شده مارپیچ، به‌همراه نتایج اولیه و حاصل از بازخوانی اطلاعات ابزار دقیق، در این مقاله ارائه شده است [۸].

لوتنگر[3] رفتار مهارهای چند مارپیچ را در ماسه و با انجام یک سری از آزمایش‌های در مقیاس واقعی بالاآمدگی محوری روی مهارهای مارپیچ با میله مربعی بررسی قرار کرده است [۹]. از طرف دیگر تسوها[4] و همکاران به ارزیابی پیکربندی تیغه‌های مارپیچ (از جمله تعداد و قطر) و خصوصیات خاک در ظرفیت بالاآمدگی مهارهای چند مارپیچ پرداخته‌اند [۱۰]، [۱۱]. فیلهو[5] و همکاران با انجام آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیده‌اند که قطر بخش هادی، توزیع بار در امتداد مهار مارپیچ و تعداد مارپیچ‌ها بر ضریب گشتاور نصب (K_T) تأثیر می‌گذارند [۱۲]. در سال ۲۰۱۵، کلمنس[6] و لوتنگر به جمع‌بندی و بررسی کاربرد تکنولوژی اعضای مارپیچ پرداختند و نیازهای این تکنولوژی برای پیشرفت بیش‌تر را بیان کردند، طبق بررسی آن‌ها یکی از مواردی که نیاز به تحقیق بیشتر دارد بررسی تأثیر گروه مهار مارپیچ

1. Perko
2. Deardorff
3. Lutenegger
4. Tsuha
5. Filho
6. Clemence

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است [۱۳]. یکی از آخرین تحقیقات در حوزهٔ مهار مارپیچ مقالات تسوها و شیاهون[1] و همکاران بوده است که به بیان خلاصه‌ای از مهارهای مارپیچ با مرکزیت تأثیر نصب و آزمایش‌های مدل تحت گرانش و سابقه بررسی‌های سانتریفوژ روی مهارهای مارپیچ برای تعیین مسائل مربوط به مقیاس در مدل‌سازی مهارهای مارپیچ پرداختند [۱٤]، [۱۵].

مهارهای مارپیچ نسبت به مهارهای دوغابی مزایای فراوانی دارند که تعدادی از آن‌ها عبارتند از [۷]، [۱٦]–[۱۹]: نصب سریع و آسان، عدم نیاز به حفاری، بدون نیاز به دوغاب و ایجاد نخاله، پس‌کشیدگی فوری پس از نصب بدون نیاز به گذشت زمان گیرش دوغاب، نصب در هر شرایط آب و هوایی، نصب در دامنهٔ گسترده‌ای از خاک‌ها، امکان نصب در زیرسطح آب زیرزمینی، حداقل دست‌خوردگی محیط، نصب در شرایط دسترسی دشوار و نیاز به تجهیزات متداول و نیروی انسانی کم‌تر. با توجه به مزایای بیان شده استفاده از مهارهای مارپیچ در پایدارسازی دیواره‌ها و شیب‌ها، ساخت دیوارهای حائل و غیره در حال گسترش بوده است و نیاز به انجام پژوهش‌های بیش‌تر در رابطه با این موضوع وجود دارد.

بیش‌تر کارهای انجام شده در رابطه با مهارهای مارپیچ مربوط به مهار تک بوده است. بسیاری از پارامترهای مؤثر در ظرفیت گروه مهار از جمله، تأثیر شکل مهار، الگوی قرارگیری، تعداد مهار و غیره مواردی هستند که تحقیقات کمی روی آن‌ها انجام شده است. یکی از این موارد بررسی تأثیر گروه مهار در پایدارسازی دیواره‌ها است که تحقیق کافی و جامعی در این خصوص انجام نشده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده به‌وسیلهٔ کلمنس و لوتنگر، آن‌ها نیز بیان کرده‌اند که بررسی تأثیر گروه مهار استفاده شده در پایدارسازی دیواره‌ها از مواردی است که سوالات فراوانی پیرامون آن وجود دارد [۱۳]. تمامی موارد بیان شده باعث شده است که برای اولین بار پژوهشی روی تأثیر پیکربندی تیغه‌های مارپیچ (از جمله تعداد و قطر) در گروه مهار مارپیچ استفاده شده در پایدارسازی دیوار برای بررسی رفتار این نوع دیواره انجام شود. در این تحقیق برای بالابردن دقت نتایج و تعیین گوه گسیختگی از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات استفاده شده است. در نهایت برای

1. Schiavon

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

شفاف‌تر شدن بحث مقایسه‌ای با روش میخ‌کوبی که روشی متداول در ایران است، انجام شده است.

مصالح، تجهیزات استفاده شده و شرح آزمایش

با توجه به این‌که روش پژوهش استفاده شده در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی است ابتدا لازم است در خصوص اصول مدل‌سازی فیزیکی توضیح مختصر و مفیدی ارائه شود. اگر مدل‌سازی فیزیکی در مقیاسی غیر از مقیاس واقعی انجام شود، سوالی اساسی در بارهٔ اعتبار نتایج حاصل از انجام آزمایش بر مدل‌های کوچک و تعمیم آن‌ها به مقیاس واقعی مطرح می‌شود. بنابراین توجه به قانون‌های مقیاسی مناسب و تحلیل ابعادی، برای کنترل آن‌ها ضروری است. مزایای استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی با مقیاس کوچک عبارتند از: کنترل کامل بر همهٔ جزئیات مدل، امکان انتخاب خاک آزمایش شده، امکان انتخاب شرایط مرزی و بارگذاری مدل‌ها و در نتیجه افزایش دقت در نحوهٔ اعمال بارگذاری، مقدار کم خاک مورد نیاز، امکان انجام آزمایش‌های زیاد و تکرار مشاهدات و بررسی تأثیر تغییر پارامترهای کلیدی و در نهایت هزینه بسیار کم‌تر نسبت به آزمایش‌ها با مقیاس واقعی [۲۰]. باتوجه به فرمول‌های ارائه شده در مراجع مختلف، ظرفیت باربری (Q_u) مهارهای مارپیچ با استفاده از فرمول ۱ به‌دست می‌آید [۷]، [۲۱]:

$$Q_u = \sum[A_h(cN_c + qN_q)] \qquad (۱)$$

که در آن، c چسبندگی خاک، $q = \gamma d$، d عمق صفحه مارپیچ، γ وزن مخصوص، A_h مساحت مارپیچ و N_c و N_q ضرایب ظرفیت باربری به‌ترتیب، برای چسبندگی و سربار بوده است که به‌وسیلهٔ محققان مختلفی از جمله میرهوف[1] بیان شده‌اند و در محاسبه ظرفیت باربری پی کاربرد دارند [۲۲]. در خاک‌های دانه‌ای به‌دلیل نبود چسبندگی معادلهٔ (۱) به صورت معادله ۲ خواهد شد:

$$Q_u = \sum[A_h(qN_q)] \qquad (۲)$$

با توجه به رابطهٔ (۲) و بررسی‌های انجام شده به‌وسیلهٔ اسپگنولی[2] و همکاران [۲۳] و مقدم [۲٤]، [۲۵]، مقیاس هندسی استفاده شده در مدل‌سازی آزمایشگاهی مقیاس ۱ به ۱۰

[1] Meyerhof
2. Spagnoli

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

است [۲۳]. نمونه‌ای از ضرایب مقیاس در مدل‌سازی فیزیکی به‌صورت جدول ۱ است و در واقع عدد مقیاس (λ) همان ۱۰ است.

جدول ۱. روابط شبیه‌سازی برای مدل‌سازی [۱٤]، [۲٦]

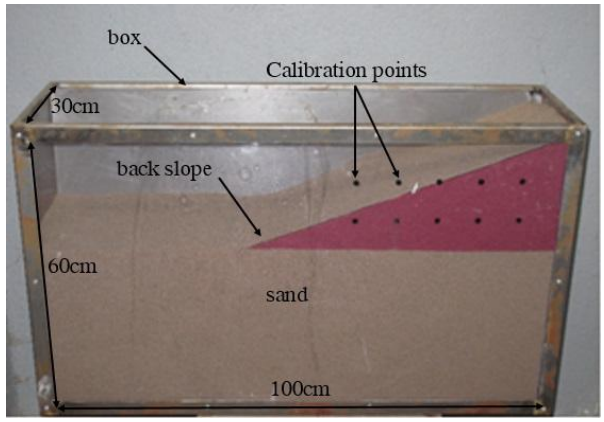
پارامتر	مقدار در مدل	مقدار در واقعیت
طول	$1/\lambda$	1
مساحت صفحه	$1/\lambda^2$	1
تنش و کرنش	1	1
سختی محوری	$1/\lambda^2$	1
سختی خمشی	$1/\lambda^4$	1

جعبهٔ آزمایش: جعبه آزمایش از ورق فلزی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر، طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ٦۰ سانتی‌متر ساخته شده است که در یک طرف آن طلقی به ضخامت ۲ سانتی‌متر وجود دارد. نکته‌ای که در انتخاب جعبه آزمایش حائز اهمیت است صلبیت آن است، بدین‌معنی که جعبه تحمل تنش‌های وارده از طرف خاک درون را داشته و تحت اثر آن تغییر شکل ندهد. این شرایط با استفاده از سخت کننده‌هایی در بدنهٔ جعبه تأمین گشته است. جعبه آزمایش دارای نقاط کالیبره است که برای تبدیل واحد پیکسل در عکس‌برداری به میلی‌متر و برطرف کردن تحدب چهارگوشه عکس استفاده شده است (شکل ۱).

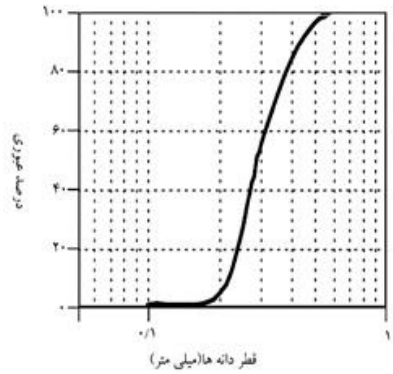
خاک آزمایش: خاک استفاده شده، ماسه خشک منطقه قم تپه صوفیان استان آذربایجان شرقی است که بر اساس طبقه‌بندی متحد، دانه‌بندی یکنواخت داشته و جزو ماسه بد دانه‌بندی (SP) قرار دارد. نمودار مربوط به منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۲ و مشخصات خاک آزمایش شده در جدول ۲ ارائه شده است.

مهارهای آزمایش: مهارهای مارپیچ شامل یک میله، با حداقل یک صفحه مارپیچ وصل شده به میله است. ابعاد معمولی میله مهار در محدوده ٤ تا ۹ سانتی‌متر قطر یا عرض است. ضخامت معمول مارپیچ‌ها در محدوده ۱ تا ۲ سانتی‌متر است، در حالی که قطر معمول صفحه بین ۱۵–۳٦ سانتی‌متر است. صفحات مارپیچ معمولاً به فاصلهٔ سه قطر مارپیچ در طول میله بارگذاری (معروف به میله پیش‌رو) از یک‌دیگر فاصله دارند. بخش‌های پیش‌رو می‌توانند دارای طول‌های مختلفی باشند اما به‌طور معمول در محدودهٔ ۰/۲۵ تا ۳ متر هستند. به‌دلیل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]



شکل ۱. جعبهٔ نمونه به‌همراه نقاط کالیبره



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک

جدول ۲. مشخصات خاک آزمایش شده

مشخصه	مقدار
حداکثر وزن مخصوص خشک خاک، $\gamma_{d\,max}(\frac{KN}{m^3})$	۱۶/۷۶
حداقل وزن مخصوص خشک خاک، $\gamma_{d\,min}(\frac{KN}{m^3})$	۱۴/۲۰
حجم توده ویژه، **Gs**	۲/۶۳
زاویه اصطکاک داخلی، **φ**	۲۸
قطر بزرگ‌ترین دانه عبوری از الکی که ۱۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند، D_{10} **(mm)**	۰/۲۲
قطر بزرگ‌ترین دانه عبوری از الکی که ۳۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند، D_{30} **(mm)**	۰/۲۴
قطر بزرگ‌ترین دانه عبوری از الکی که ۶۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند، D_{60} **(mm)**	۰/۳۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

فاصله‌گذاری مورد نیاز سه قطر مارپیچ، بیش‌ترین تعداد مارپیچ که به‌طور معمول به یک بخش پیشرو متصل می‌شوند ۳ مارپیچ است. اگر طراحی مهار مستلزم بیش از سه مارپیچ باشد، تا زمانی که الزامات برآورده شوند بخش‌های پیش‌رو می‌توانند به یک‌دیگر متصل شوند. مقاطع گسترش، قطعهٔ میله فولادی استفاده شده برای افزایش طول کل مهار مارپیچ هستند. طول معمول مقاطع گسترش از ۰/۹ تا ۳ متر متغیر است. این مقاطع با استفاده از انتهای هم‌پوشانی و پین فولادی به یک‌دیگر متصل می‌شوند [۲۱]، [۲۷]. برای مدل‌سازی مهارهار مارپیچ از میله‌های فلزی دارای مارپیچ استفاده شده است که قسمت انتهایی این میله‌ها رزوه شده تا بسته شدن مهره در انتهای آن امکان‌پذیر باشد (شکل ۳). با توجه به محدوده اعداد بیان شده و مقیاس ۱ به ۱۰، طول مارپیچ، قطر میله، قطر مارپیچ‌ها و فاصله مارپیچ‌ها مشخص شده‌اند (جدول ۳).



شکل ۳. چهار نوع مهار مارپیچ استفاده شده در آزمایش

جدول ۳. مشخصات مهارهای آزمایش شده

نوع	طول (mm)	قطر میله (mm)	ضخامت صفحه (mm)	قطر صفحه مارپیچ (mm)	فاصله گام (mm)	تعداد مارپیچ	فاصله مارپیچ‌ها (mm)	زاویه قرار مهار (درجه)
۱	۳۷۵	٤	۱	۳۰	٤	۱	–	۱۵
۲	۳۷۵	٤	۱	۳۰-۲۵	٤	۲	۹۰	۱۵
۳	۳۷۵	٤	۱	۳۰	٤	۲	۹۰	۱۵
٤	۳۷۵	٤	۱	۳۰	٤	۳	۹۰	۱۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

پوشش دیوار (facing) و چیدمان مهارها:

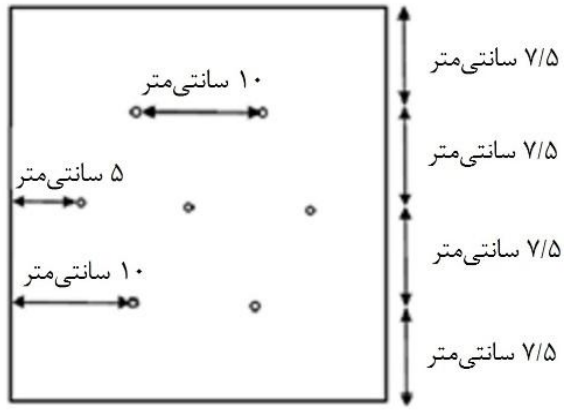
با توجه به ضریب مقیاس معین شده، تمامی طول‌های موجود در آزمایش‌ها بر عدد ۱۰ تقسیم شده‌اند. به این ترتیب، برای دیواری به طول و ارتفاع ۳ متر، ابعاد دیواره به ۳۰ سانتی‌متر تقلیل یافته است. بر طبق بررسی‌های انجام شده، رویهٔ به‌کار رفته در آزمایشگاه که معادل رویه‌ای بتنی با ضخامت رایج ۳۰ سانتی‌متر در شرایط واقعی است، از جنس آلومینیوم با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر انتخاب و ساخته شده است [۲۰]، [۲۸]. به‌منظور نزدیک بودن رفتار مدل به رفتار واقعی سیستم در قسمتی از پوشش که با خاک در تماس است یک لایه نازک خاک ماسه به‌صورت یکنواخت با چسب چسبانده شده است. برای جلوگیری از ورود ماسه بین پوشش و طلق از دو قطعه چسب نواری شفاف که روبه‌روی هم چسبانده می‌شوند بهره گرفته شده است.

به‌طور معمول در اکثر پروژه‌های ساخت و پایدارسازی دیوارها، فواصل افقی و عمودی مسلح کننده‌ها دارای حداقل و حداکثر اندازه ۱ الی ٦ متر از یک‌دیگر هستند. این مقدار برای دیوارهای میخ‌کوبی متداول $S_v \times S_h \leq 4$ است [۲۹]، [۳۰]. از طرف دیگر با بررسی ادبیات تحقیق مشخص شده است که برای بررسی اثر متقابل گروه مهارهای مارپیچ محدوده 1D تا 6D برای فاصله مهارها محدوده‌ای مناسب است [٤]–[٦]، [۳۱]–[۳٦]. در نتیجه فاصلهٔ افقی تقریبا 3D که مقداری تقریباً مشترک در همه تحقیقات بوده استفاده شده است. فواصل افقی و عمودی برابر ۱۰۰ و ۷۵ سانتی‌متر برای مهار انتخاب شد و با ضرب این مقدار در ضریب کاهنده مقیاس ۱/۱۰، مقادیر۱۰ و ۷٫۵ سانتی‌متر برای فواصل مرکز تا مرکز مسلح کننده‌ها در دیواره به‌دست آمد. نحوه قرارگیری مهارها بر روی صفحه آلومینیومی در شکل ٤ نشان داده شده است.

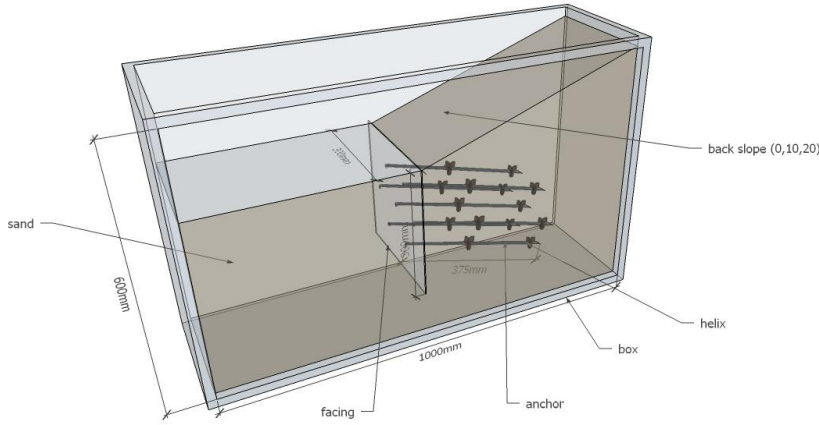
اتصال مهار به پوشش دیوار: در قسمت پوشش دیوار، مارپیچ‌ها با استفاده از صفحه باربر فولادی و مهره بر پوشش محکم می‌شوند (شکل ۵). عملکرد اصلی این المان‌ها ایجاد عکس‌العمل برای هر مارپیچ جهت انتقال نیروی کششی و هم‌چنین ایجاد پایداری محلی خاک نزدیک سطح دیوار است. در ساخت این مدل از واشرهای دایره‌ای شکل به‌عنوان صفحه باربر و از مهره جهت نصب مارپیچ‌ها استفاده شده است. این مهره‌ها در هنگام

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

قرارگیری مارپیچ‌ها و تنظیم زاویه آن‌ها درون خاک در قست انتهایی آن‌ها بسته شده‌اند.



شکل ٤. چیدمان مهارها



شکل ۵. قرارگیری مهارها

فراهم کردن شرایط مرزی: برای از بین بردن اصطکاک بین خاک و طلق و تأمین شرایط کرنش مسطح از اسپری روغن شفاف و کریستالی سیلیکون و سلفون استفاده شده است. روغن سیلیکون روغنی بسیار لغزنده است که در عین حال رنگ زردی نداشته و استفاده از آن در انجام مدل‌سازی فیزیکی متداول است [۳۷].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

نحوه آماده‌سازی مدل: عامل مهمی که می‌تواند تأثیر چشم‌گیری روی نتایج آزمایش‌های داشته باشد تراکم ماسه استفاده شده است. بدین ترتیب ماسه استفاده شده از ارتفاع مشخصی (۵۰ سانتی‌متر) و به‌طور یکنواخت با استفاده از ظروف پلاستیکی ریزش ماسه دارای سوراخ در کف، درون جعبه آزمایش ریخته شده است. ظرف پلاستیکی ریزش ماسه مخزنی استوانه‌ای شکل با دهانه دایروی و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و حجم ٦ لیتر است که با استفاده از آن خاک مورد نظر از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سطح مدل حرکت داده شده است (الک مخصوص بارش ماسه) و به‌تدریج الک ریزش ماسه بالاتر برده می‌شود تا ارتفاع ریزش ماسه هم‌چنان ثابت بماند. نهایتاً دانسیته نسبی خاک بعد از اتمام آزمایش با احتساب وزن خاک و دانستن حجم آن محاسبه شده است. برای آغاز آزمایش جعبه خالی با استفاده از مواد شوینده کاملاً تمیز شده تا هیچ‌گونه آلودگی یا خاک روی وجه طلق و فلز چسبیده نباشد. سپس با استفاده از اسپری روغن سیلیکون، لایه‌ای از روغن بر وجه طلق و فلز اعمال شده است. در این مرحله ورقه‌ای از سلفون روی آن‌ها کشیده و کاملا به حالت صاف و یک‌نواخت درآمده تا جمع‌شدگی آن باعث جلوگیری از دید مدل و ایجاد نتایج اشتباه (wild rector) نگردد. در مرحلهٔ بعدی، خاک ماسه‌ای با استفاده از روش ذکر شده تا ارتفاع کف دیواره ریخته شده و پوشش داخلی جعبه قرار گرفته است و با استفاده از تراز و گونیا در حالت قائم تنظیم شده است. با از سرگیری ریزش خاک ماسه‌ای در دو طرف پوشش، ارتفاع خاک تا محل قرارگیری مارپیچ‌ها افزایش داده شده است. در این مدل‌سازی فرض بر آن است که مارپیچ‌ها از قبل در خاک قرار داشته‌اند. علت این فرض آن است که قرار دادن مارپیچ‌ها در حین ساخت مستلزم به هم خوردن مدل است و تکرارپذیری آزمایش را بسیار مشکل یا ناممکن می‌سازد. به همین دلیل مارپیچ‌ها در حین آماده‌سازی مدل درون خاک ماسه‌ای قرار گرفته‌اند. مارپیچ‌ها با زاویه ۱۵ درجه در محل سوراخ‌ها قرار گرفته و زاویه آن‌ها با استفاده از شابلون‌های ساخته شده تنظیم شده است. سپس ارتفاع خاک تا محل ردیف بعدی مارپیچ‌ها افزایش یافته و این مراحل تکرار شده تا دیوار کامل شود. برای ایجاد شیب پشت ۲۰ درجه از ورق شفاف رنگی بهره گرفته شده است. بدین ترتیب که زاویه مورد نظر روی ورق رسم شده و سپس با چسباندن این ورق روی طلق شیب مورد نظر با زاویه رسم شده ایجاد شده و سطح آن با استفاده از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

کاردک و خط کش صاف شده است (شکل ۱). پس از آماده شدن شیب، ورق از روی طلق جدا شده تا مانع از دید نمونه نشود.

نحوهٔ مدل‌سازی ساخت دیواره مهار مارپیچ: پس از آماده‌سازی مدل باید رفتار دیوار در طی ساخت آن مدل شود. بدیهی است که بهترین روش برای این کار همان ساخت دیوار به روشی است که در عمل انجام می‌پذیرد، بدین‌ترتیب که ابتدا خاک‌برداری انجام گرفته و سپس با قرار دادن مارپیچ‌ها، ساخت پوشش انجام می‌پذیرد. با این حال این روش فوق‌العاده پیچیده و وقت‌گیر است. از طرف دیگر به‌علت گام صفحه مارپیچ، این اجزا نخاله‌ای تولید نمی‌کنند و حداقل اختلال و دست خوردگی ایجاد می‌شود. در بسیاری از تحقیقات مشخص شده است که دست‌خوردگی ایجاد شده تأثیر ناچیزی بر ظرفیت باربری مهار مارپیچ دارد [۱۳]. بدین سبب برای تسهیل روند آزمایش‌ها و جلوگیری از ایجاد عاملی در تغییر نتایج از یک روش میانه برای مدل کردن این رفتار بهره گرفته شده است. بدین‌صورت که در هنگام ساخت مدل هر دو طرف پوشش خاک‌ریزی شده و سپس با خاک‌برداری طرف مقابل پوشش، این رفتار مدل شده است. در نتیجه در هر مرحله خاکبرداری در قسمت مقابل پوشش به منزله ساخت آن قسمت از دیوار مهار مارپیچ شده از بالا به پایین است و با انجام ۸ مرحله خاک‌برداری اجرای دیوار کامل گردیده است.

اغلب تعداد چشم‌گیری از نتایج آزمون‌های تکراری موجود نیست و تعیین انحراف معیار یا ضریب تغییرات برای تعیین تکرارپذیری بی معنا است. ساده‌ترین کار برای بررسی تکرارپذیری در این حالت، تکرار حداقل ۳ یا ٤ بار از یک آزمایش و در شرایط یک‌سان است. سپس با قرار دادن نتایج در کنار هم در خصوص تکرارپذیری آزمایش می‌توان صحبت کرد. برای این منظور آزمایش روی مهار نوع ۱ و نوع ٤ هر کدام ۳ مرتبه تکرار شده‌اند و نتایج آن‌ها مقایسه شده است. چیزی در حدود ۳ الی ۱۰ درصد اختلاف بین میزان جابه‌جایی تاج دیواره در یک آزمایش با شرایط یک‌سان دیده شده است. گذشت زمان از شروع آزمایش‌ها و مسلط شدن بر روند انجام آزمایش باعث کاهش اختلاف نتایج شده است.

عکس‌برداری: در این آزمایش از روش PIV برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی‌ها و نوع تغییر شکل خاک استفاده شده است. PIV در واقع روند اندازه‌گیری سرعت بوده است که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

به‌وسیلهٔ آدریان[1] در علوم مربوط به مکانیک سیالات و هیدرولیک بررسی شده و توسعه قرار گرفته است. برخلاف سیال که برای پردازش تصویر نیازمند تزریق ذرات (توپ‌های پلی استیرن یا پودر رنگی)، برای فراهم کردن بافت قابل تشخیص و مشخصه‌های تصویر است، ماسه طبیعی دارای بافت ذاتی ذرات با رنگ‌های مختلف است [۳۸]. با استفاده از دوربین دیجیتال، تصاویر متوالی از صفحه خاک در طول تغییر شکل گرفته شده و سپس تغییر شکل خاک با استفاده از تحلیل سرعت‌سنجی تصویری ذرات، مابین هر جفت تصویر متوالی تعیین می‌شود. برای به‌دست آوردن اطلاعات قابل فهم و مفید، بعد از انجام اندازه‌گیری در فضای تصویر، بردارهای جابه‌جایی حاصل، با استفاده از تبدیل فتوگرامتریک، از فضای تصویر به فضای جسم منتقل می‌شوند. پارامترهای انتقال بر اساس مشخصات فنی دوربین، شرایط تصویربرداری و مشخصات پنجره مشاهده و با روش کانون‌یابی تعیین شده‌اند. تصاویر با استفاده از دوربین عکاسی cannon powershot G10 دارای حس‌گر CCD، ۱٤/۷ مگاپیکسل، گرفته شده‌اند و برای جلوگیری از جابه‌جایی دوربین طی آزمایش، تمامی عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار remote capture و pc تهیه شده است. هم‌چنین دوربین روی سه پایه قرار داده شده و نسبت به سطح افق تراز بوده است. با انجام خاک‌برداری در ۸ مرحله، عکس‌برداری نیز در هر مرحله انجام گرفته که با احتساب حالت اولیه، ۹ عکس در هر آزمایش از قسمت مقابل مدل تهیه خواهد شد.

تحلیل PIV: پس از تهیه عکس‌ها مرحله بعد تحلیل آن‌ها با استفاده از مدول GeoPIV است. GeoPIV مدولی از نرم‌افزار MatLab است که با عمل عکس‌برداری سریع از اجزای خاک، می‌تواند تطابق خوبی با آزمایش‌های ژئوتکنیکی داشته باشد. خروجی این مدول به‌صورت ماتریس دو بعدی u و v است که اولی نشان‌دهندهٔ مؤلفهٔ افقی و دومی نشان‌دهندهٔ مؤلفهٔ عمودی بردار جابه‌جایی هر مش است. مدول موجود دارای دقت تقریبی یک پانزدهم پیکسل برای بافت ماسه است. جهت پردازش تصویر با استفاده از روش PIV عکس‌ها به مش‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند و هر مش دارای بافت تصویر مجزایی است و این امر اجازه می‌دهد تا محل مش مورد نظر در عکس‌های بعدی مشخص شود و جابه‌جایی‌های هر مش در عکس دوم نسبت به عکس اول به‌دست آیند.

1. Adrian

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

مش‌های انتخاب شده دارای اندازه ٦٤ پیکسل هستند و شعاع جستجوی لازم برای هم‌بستگی بین هر مش در زمان مقایسه ۳۲ پیکسل است. نتیجه تغییر مکان مش‌ها در عکس‌های مختلف در واحد پیکسل است و برای تبدیل از واحد پیکسل به میلی‌متر نیاز به نقاط کالیبراسیون است. این نقاط با استفاده از رنگ سیاه در فواصل مکانی معین (بر حسب میلی‌متر) روی پنجره مشاهده جای‌گذاری شده‌اند (شکل ۱). محل هر کدام از نقاط کالیبراسیون با استفاده از فتوگرامتری نزدیک برد تعیین شده و با توجه به مشخص بودن فاصله آن‌ها از هم و با توجه به این که محل نقاط کالیبراسیون در طول آزمایش تغییر نمی‌کند می‌توان با استفاده از فاکتور کالیبراسیون به‌دست آمده مختصات مش‌ها را به فضای واقعی منتقل کرد. بردارهای جابه‌جایی حاصل با استفاده از فتوگرامتری نزدیک برد از فضای تصویر به فضای واقعی منتقل می‌شوند و میدان جابه‌جایی صفحه خاک تحت مشاهده به دست می‌آید. یکی از پیشنهادهای داده شده، شبکه‌بندی عکس‌های گرفته شده با شبکه‌های ٦٤×٦٤ پیکسل است که بافت تصویر مناسبی برای تحلیل ایجاد می‌کند و جابه‌جایی شبکه‌ها در توده خاک در حال تغییر شکل را به‌دست می‌آورد.

پس از مش‌بندی و به‌دلیل وجود خطاهای ناشی از شرایط آزمایشگاهی، دقت دوربین، سرعت اعمال نیرو و... ، ممکن است تعداد بسیار محدودی از بردارهای جابه‌جایی حاصل از تحلیل نامعقول یا اشتباه باشند. بدین منظور لازم است تا این بردارهای خطا حذف شوند. بعد از حذف بردارهای خطا، میتوان بردارهای جابه‌جائی نهایی اصلاح شده را تعیین کرد. در آخر می‌توان کرنش‌های برشی حداکثر ایجاد شده در خاک را به‌دست آورد.

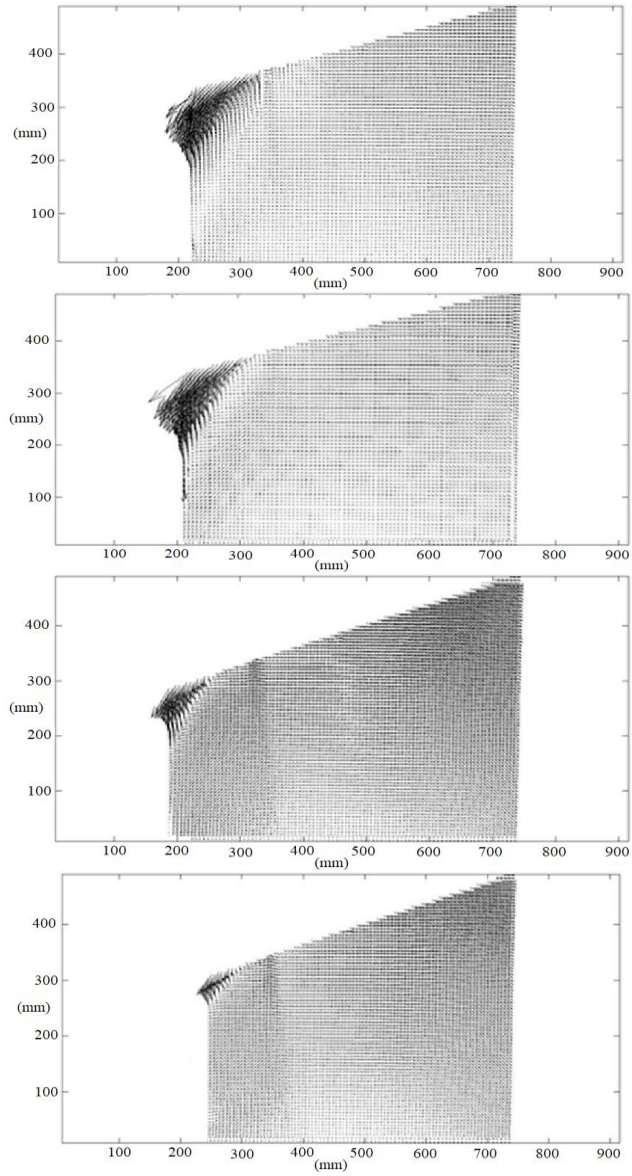
مقایسهٔ تغییر شکل خاک پشت دیوار در ٤ نوع مختلف مهار مارپیچ و شیب پشت ۲۰ درجه

مقایسه بردارها و میزان جابه‌جایی

به‌منظور مقایسه تغییر شکل خاک پشت دیوار بردارهای جابه‌جایی کل استفاده شده است. در شکل‌های ٦ الف، ب، ج و د بردارهای جابه‌جایی برای ٤ نوع مهار در زاویهٔ پشت ۲۰ درجه ارائه شده است. در شکل‌های ٦ ج و د شکل جابه‌جایی‌ها نزدیک به هم است و بیشینهٔ جابه‌جایی مربوط به مدل ۱ و شکل ٦ الف است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]



الف) مهار تک مارپیچ

ب) مهار دو مارپیچ

ج) مهار دو مارپیچ

د) مهار سه مارپیچ

شکل ٦. بردارهای جابه‌جایی دیوار پایدارسازی شده در حالت شیب پشت ۲۰ درجه

در شکل ۷ جابه‌جایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت ۲۰ درجه ارائه شده است. کاهش میزان جابه‌جایی برای تغییر مهار از نوع ۱ به ۲، ۱۸٪ بوده که دلیل کم بودن آن

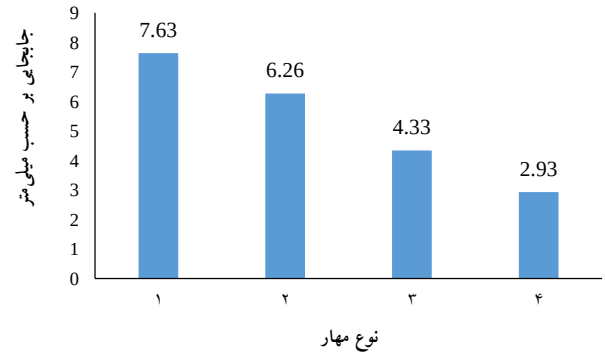
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

ظرفیت باربری مهار نوع ۲ بوده است و نسبت به مهار ۱ تغییر چندانی نداشته است. افزایش تعداد صفحه مهار از تک مارپیچ به دو مارپیچ (تغییر نوع مهار از ۱ به ۳) اثر مناسبی بر میزان جابه‌جایی دیواره داشته و ٤۳٪ کاهش داده است. تغییر تعداد صفحه مارپیچ از یک مارپیچ به سه مارپیچ (تغییر نوع مهار از ۱ به ۳) باعث کاهش ٦۲٪ میزان جابه‌جایی تاج دیواره شده است و پیش‌بینی می‌شود نرخ کاهش جابه‌جایی با افزایش تعداد صفحه‌ها به همین شکل کاهش یابد. علت کاهش جابه‌جایی‌ها در ٤ نوع مهار مارپیچ افزایش ظرفیت باربری مهارها است که از نوع ۱ به ٤ رخ می‌دهد. به‌عبارت دیگر نقش مهارها در کمک به پایدارسازی شیروانی‌ها با افزایش تعداد صفحات و یا قطر آن‌ها افزایش می‌یابد ولی نکته‌ای که در این‌جا وجود دارد تأثیر این صفحات است به این شکل که تغییر میزان جابه‌جایی از مهار مدل ۱ به مهار مدل ۲ با تغییرات ایجاد شده از مهار مدل ۳ به ٤ یکی نیست. این موضوع به حداقل جابه‌جایی لازم برای فعال شدن مهارها اشاره دارد و این مطلب که شاید تغییر در شکل مهارها از یک جایی به بعد اقتصادی نباشد و نیاز به تغییر الگوی قرارگیری مهارها در درون خاک و یا تغییر روش پایدارسازی باشد.

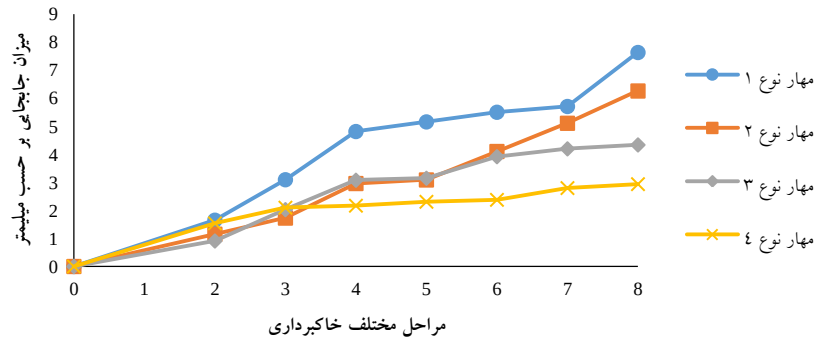
در شکل ۸ جابه‌جایی در مراحل مختلف خاک‌برداری برای ٤ نوع مهار استفاده شده در حالت شیب پشت ۲۰ درجه، ارائه گردیده است. چنان‌که در شکل ۸ قابل مشاهده است جابه‌جایی دیواره با افزایش ظرفیت باربری مهار کاهش یافته است. روند ابتدایی جابه‌جایی برای هر ٤ مهار در دو مرحلهٔ اول خاک‌برداری تقریباً یک‌سان است. دلیل این موضوع نیاز به جابه‌جایی برای فعال شدن مهارها است. برای برطرف کردن این مشکل در پروژه‌های حساس و کنترل جابه‌جایی، می‌توان از پس‌کشیدگی مهارهای مارپیچ استفاده کرد. پس از آن در مراحل ٤ تا ٦ تقریباً جابه‌جایی‌ها ثابت بوده است. این موضوع به سه دلیل بوده است: ۱. گیرداری دیواره ۲. وجود مسلح کننده‌ها و ایجاد نیروی کششی ناشی از جابه‌جایی مراحل قبل ۳. ظرفیت کافی مهارها برای مقابله با جابه‌جایی بیش‌تر. از مرحلهٔ ٦ تا ۸ به‌دلیل کاهش و اتمام گیرداری دیوار و ظرفیت باربری کم‌تر مهارهای نوع ۱ و ۲ در این دو حالت جابه‌جایی‌ها روندی رو به رشد داشته است. در مهارهای نوع ۳ و ٤ بیش‌ترین میزان جابه‌جایی مربوط به ٤ مرحله ابتدایی است. مهار نوع ۲ و ۳ که هر دو دارای دو صفحه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

مارپیچ هستند تا مرحلهٔ ٦ خاک‌برداری تقریباً دارای یک رفتار بوده‌اند ولی در انتها مهار نوع ۳ به‌دلیل ظرفیت باربری بیش‌تر نسبت به جابه‌جایی‌های کلی بهتر عمل کرده است.



شکل ۷. میزان جابه‌جایی‌ها در تاج دیوار برای ٤ نوع مهار مارپیچ در حالت شیب پشت ۲۰ درجه



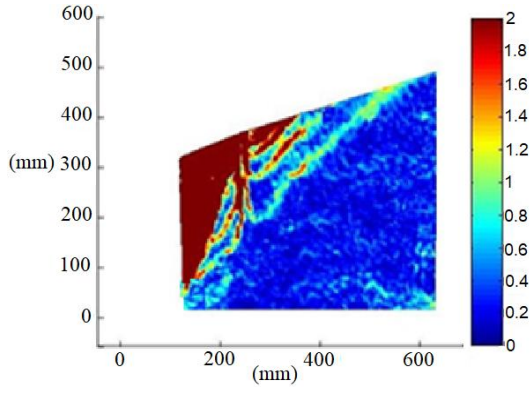
شکل ۸ میزان جابه‌جایی در تاج دیوار برای ٤ نوع مهار مارپیچ برای مراحل مختلف خاکبرداری در حالت شیب پشت ۲۰ درجه

مقایسه نمودارهای کرنش برشی

در شکل‌های ۹ نمودارهای کرنش برشی ایجاد شده در خاک پشت دیوار ارائه شده است. در شکل‌های ۹ الف و ب کرنش‌ها نزدیک به هم بوده است و یک گوه گسیختگی تشکیل شده است. در شکل ۹ الف بیش‌ترین کرنش برشی دیده می‌شود که مهار ظرفیت برابری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

کافی در شرایط وجود سربار را نداشته است. با تغییر نوع مهار و افزایش تعداد صفحات مارپیچ مقدار کرنش‌های برشی و نیز گستردگی آن‌ها در پشت دیواره کاهش یافته است. در شکل ۹ ج و د به‌دلیل ظرفیت باربری کافی مهار جابه‌جایی‌های نزدیک به‌هم دیده می‌شود و کرنش‌های برشی به شکل خطی در محدوده اولین صفحه مهار تشکیل شده است. با ایجاد این جابه‌جایی مهار تحت کشش قرار گرفته است و از تشکیل گوه گسیختگی جلوگیری کرده است. برای جلوگیری از چنین جابه‌جایی‌هایی از پس‌کشیدگی مهار و یا روش میخ مارپیچ خاک استفاده می‌شود. در روش میخ مارپیچ خاک تمام طول میله دارای صفحه‌های مارپیچ بوده و کل توده خاک مسلح می‌شود. این موضوع باعث جلوگیری از جابه‌جایی موضعی خاک می‌شود. لازم به بیان این مطلب است که در تمامی نمودارهای ارائه شده بازه کرنش بین ۰ و ۲ در نظر گرفته شده است و برای ایجاد امکان مقایسه بین نمودارهای مختلف این بازه در تمامی نمودارها یک‌سان فرض شده است.

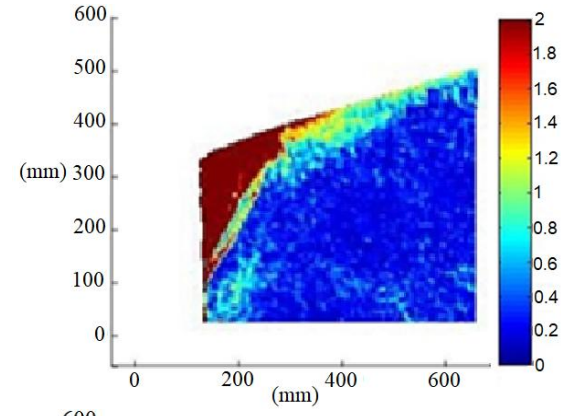


الف) مهار تک مارپیچ

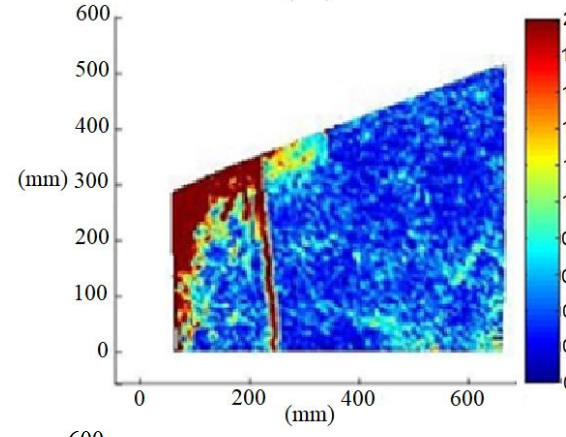
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

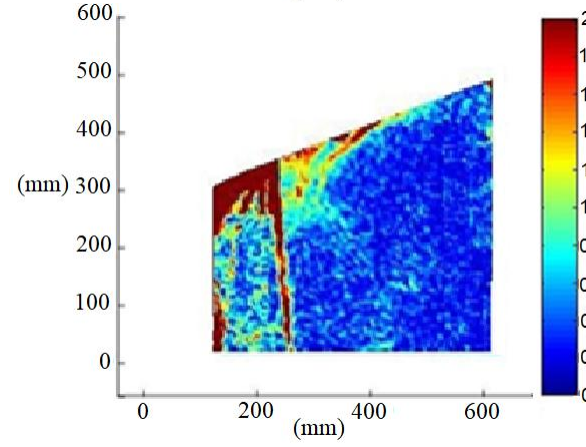
ب) مهار دو مارپیچ



ج) مهار دو مارپیچ



د) مهار سه مارپیچ



شکل ۹. کرنش برشی ایجاد شده در دیوار پایدارسازی شده با شیب پشت ۲۰ درجه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

مقایسهٔ جابه‌جایی تاج دیواره در حالت پایدارسازی به‌روش مهارمارپیچ و میخ‌کوبی

در تحقیقات انجام شده روی دیوار پایدارسازی شده به‌روش مهارهای مارپیچ به‌وسیلهٔ دیردورف و همکاران مشخص شده است که محدودهٔ نتایج جابه‌جایی دیوار، در محدوده مقادیر ارائه شده به‌وسیلهٔ دستورالعمل طراحی اداره بزرگراه فدرال (FHWA) برای دیوار میخ‌کوبی بوده است [۸]. تحقیق انجام شده به‌وسیلهٔ دیردورف و همکاران تنها موردی است که به مقایسهٔ مهار مارپیچ و میخکوبی پرداخته است. با توجه به مزایای فراوان روش مهار مارپیچ نسبت به میخ‌کوبی، نتایج به‌دست آمده با مقادیر به‌دست آمده از پایان‌نامهٔ "روش میخکوبی خاک با استفاده از مدلسازی فیزیکی به‌روش "PIV که در زیر آمده است مقایسه شده است [۳۷]. هدف از این مقایسه رسیدن به این نتیجه است که کدام روش و با چه تراکمی به پایدارسازی بهتر دیوار کمک می‌کند.

در هر دو تحقیق مهارها و میخ‌ها تحت زاویه ۱۵ درجه نصب شده‌اند. تعداد میخ‌کوبی‌های استفاده شده ۱۳ عدد ولی طول آن‌ها نسبت به مهارهای مارپیچ کوتاه‌تر و برابر با ۳۰ سانتی‌متر بوده است. قطر میخ‌های استفاده شده نیز ۳ میلی‌متر بوده است که بعد از چسباندن ماسه به آن به ٤ میلی‌متر افزایش یافته است. انتخاب طول بیش‌تر در مهار نسبت به میخ‌کوبی امری طبیعی است زیرا در روش مهار نیاز است تا قسمت باربر از گوه گسیختگی فاصله داشته باشد ولی روش میخ‌کوبی به تسلیح و پایدارسازی توده خاک کمک می‌کند. تعداد مهارهای مارپیچ استفاده شده ۷ عدد و طول آن‌ها ۳۷,۵ سانتی‌متر بوده است. از این‌رو تراکم استفاده شده در آزمایش‌های دیوار میخکوبی ۰/٤۳ بوده است در حالی که تراکم استفاده شده برای دیوار مهار مارپیچ ۰/۲۹ است (تراکم بیان شده سانتی‌متر اجرای مهار به سانتی‌متر مربع سطح پوشش است).

چنان‌که از مقایسهٔ نتایج جدول ٤ قابل مشاهده است در شیب پشت ۲۰ درجه تفاوت میان جابه‌جایی تاج دیواره با استفاده از سیستم میخ‌کوبی و مهار مارپیچ بسیار است از این رو برای کنترل جابه‌جایی‌ها می‌توان از روش مهار مارپیچ برای پایدارسازی دیواره‌های دارای سربار و یا شیب‌های زیاد استفاده کرد. استفاده از مهار نوع ۱ به‌جای روش میخ‌کوبی باعث

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

کاهش میزان جابه‌جایی تاج دیوار به اندازهٔ ٦١ درصد خواهد شد. بهترین جای‌گزین روش میخ‌کوبی نیز مهار نوع ٤ و یا مهار سه مارپیچ است که باعث کاهش جابه‌جایی تاج دیوار به اندازه ۸۵ درصد می‌شود. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد سرعت اجرای بالای مهارهای مارپیچ است. عدم نیاز به حفاری و تزریق باعث افزایش سرعت اجرای این روش نسبت به روش میخکوبی است. تراکم استفاده شده در روش مهار مارپیچ ۰/۲۹ بوده است که کم‌تر بودن از روش میخ‌کوبی (۰/٤۳) باعث افزایش سرعت اجرا و کاهش هزینه‌ها خواهد شد.

جدول ٤. مقایسه نتایج روش میخکوبی خاک و مهار مارپیچ با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی به روش PIV

جابه‌جایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت ۲۰ درجه برای میخکوبی	۲۰ میلیمتر
جابه‌جایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت ۲۰ درجه برای مهار نوع ۱	۷/٦۳ میلیمتر
جابه‌جایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت ۲۰ درجه برای مهار نوع ۲	٦/۲٦ میلیمتر
جابه‌جایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت ۲۰ درجه برای مهار نوع ۳	٤/۳۳ میلیمتر
جابه‌جایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت ۲۰ درجه برای مهار نوع ٤	۲/۹۳ میلیمتر

نتیجه‌گیری

آزمایش‌های صورت گرفته جهت بدست آوردن تأثیر شکل مهارهای مارپیچ بر میزان جابه‌جایی خاک پشت دیوار پایدارسازی شده به‌وسیلهٔ مهارهای مارپیچ، نحوه تغییر شکل در خاک پشت دیواره مهار مارپیچ و مقایسه این روش با روش میخ‌کوبی بوده است. برای رسیدن به این هدف از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات استفاده شده است. در آزمایش‌های انجام شده تمامی متغیرها به جز تعداد صفحات مارپیچ و قطر صفحات مارپیچ ثابت در نظر گرفته شده‌اند. به‌صورت خلاصه نتایج حاصل از ٤ آزمایش انجام یافته و مقایسهٔ آن با سیستم میخ‌کوبی را می‌توان بدین‌صورت بیان کرد:

۱. در شیب پشت ۲۰ درجه، میزان جابه‌جایی تاج دیواره با کاهش تعداد صفحه‌های مارپیچ و قطر آن‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه میزان جابه‌جایی مجاز دیواره تعیین کننده نوع مهار مارپیچ استفاده شده برای پایدارسازی دیوار است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

۲. کاهش میزان جابه‌جایی تاج دیواره از مهار نوع ۱ به مهار نوع ۲، ۱۸ درصد، مهار نوع ۱ به مهار نوع ۳، ٤۳ درصد و مهار نوع ۱ به مهار نوع ٤، ٦۲ درصد بوده است. این تغییر میزان جابه‌جایی نشان‌دهندهٔ این مطلب است که افزایش تعداد صفحه از افزایش قطر صفحه کارایی بیش‌تری دارد. با این حال افزایش صفحه از دو به سه کارایی کم‌تری نسبت به تغییر حالت از یک به دو داشته است. از این رو پیش‌بینی می‌شود که افزایش صفحه از سه به چهار تغییر چندانی در کاهش میزان جابه‌جایی دیواره ندارد و افزایش تعداد مهارها کاربردی‌تر است.

۳. باتوجه به این‌که در شیب پشت ۲۰ درجه مهار ۳ مارپیچ کم‌ترین میزان جابه‌جایی را در تاج دیواره ایجاد می‌کند و این جابه‌جایی نسبت به آزمایش انجام شده به‌وسیلهٔ میخ‌کوبی بسیار کم‌تر است، استفاده از روش مهار مارپیچ به‌جای میخ‌کوبی در زمان وجود سربار منطقی به‌نظر می‌رسد.

٤. تراکم دیواره پایدارسازی شده با استفاده از مهار مارپیچ نسبت به‌روش میخ‌کوبی کم‌تر بوده است از این رو اجرای آن نیاز به نیروی انسانی کم‌تری داشته، سرعت اجرای آن بیش‌تر است و از نظر اقتصادی مناسب‌تر است.

۵. همه مهارها برای فعال شدن نیاز به میزان کمی جابه‌جایی دارند و این مسئله با تغییر نوع مهار مارپیچ قابل برطرف کردن نیست. از این رو در صورتی که مقدار جابه‌جایی لازم برای فعال‌سازی مهارها بیش از مقدار مجاز جابه‌جایی تاج دیواره باشد، استفاده از مهار مارپیچ پس‌کشیده توصیه می‌شود.

٦. با مقایسهٔ روش مهار مارپیچ و میخ‌کوبی مشخص شده است که میزان جابه‌جایی تاج دیواره در روش مهار مارپیچ بسیار کم‌تر بوده است درنتیجه درصورتی که استفاده از این روش جنبه اقتصادی و فنی داشته باشد استفاده از آن کاملا توجیه‌پذیر خواهد بود.

۷. پیشنهاد می‌شود که سایز الگوهای قرارگیری مهار، اعمال سربار به‌وسیلهٔ پاشنه و مدل‌سازی عددی گروه مهار نیز بررسی و ارزیابی می‌شود

منابع

1. Ghaly A., Hanna A., Hanna M., "Installation torque of screw anchors in dry sand", Soils and Foundations, Vol. 31, (1991) 77-92.
2. Ghaly A., Hanna A., "Stresses and strains around helical screw anchors in sand", Soils and Foundations, Vol. 32, (1992) 27-42.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

3. Shaheen W. A., Demars K. R., "Interaction of multiple helical earth anchors embedded in granular soil", Marine georesources & geotechnology, Vol. 13, (1995) 357-374.
4. Mittal S., Mukherjee S., "Vertical uplift capacity of a group of helical screw anchors in sand", Indian Geotechnical Journal, Vol. 43, (2013) 238-250.
5. Mittal S., Mukherjee S., "Vertical Pullout Capacity of a Group of Helical Screw Anchors in Sand: An Empirical Approach", Indian Geotechnical Journal, Vol. 44, (2014) 480-488.
6. Mittal S., Mukherjee S., "Behaviour of group of helical screw anchors under compressive loads", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 33, (2015) 575-592.
7. Perko H. A., "Summary of earth retaining methods utilizing helical anchors." Magnum® Helix Foundation.™ Technical Reference Manual. March 4 (1999).
8. Deardorff D., Moeller M., Walt E., "Results of an instrumented helical soil nail wall", Earth Retention Conference 3, (2010) 262-269.
9. Lutenneger A., "Behavior of multi-helix screw anchors in sand", Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Toronto (2011).
10. Tsuha C. D. H. C., Aoki N., Rault G., Thorel L., Garnier J., "Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 49, (2012) 1102-1114.
11. Tsuha C. D. H. C., Santos T. D. C., Rault G., Thorel L., Garnier J., "Influence of multiple helix configuration on the uplift capacity of helical anchors", Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique, 18 (2013).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

12. Morais T. D. S.O., Tsuha C. D. H. C., "A New Experimental Procedure to Investigate the Torque Correlation Factor of Helical Anchors", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 19, (2014) 3851-3864.
13. Clemence S., Lutenegger A., "Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks", DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute, Vol. 9, (2015) 21-41.
14. Tsuha C. D. H. C., "Physical Modelling of the Behaviour of Helical Anchors", 3rd European Conf. on Physical Modelling in Geotechnics (EUROFUGE 2016), IFSTTAR Nantes Centre, France, 1st-3rd June, (2016).
15. Schiavon J. A., Tsuha C. D. H. C., Thorel L., "Scale effect in centrifuge tests of helical anchors in sand", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 16, (2016) 185-196.
16. Tokhi, H., Ren G., Li J., "Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand", Computers and Geotechnics, Vol. 78, (2016) 144-154.
17. Sharma M., Samanta M., Sarkar S., "Laboratory study on pullout capacity of helical soil nail in cohesionless soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 54, (2017) 1482-1495.
18. Tokhi H., Ren G., Li J., "Laboratory pullout resistance of a new screw soil nail in residual soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 55, (2017) 609-619.
19. Junaideen S. M., Tham L. G., Law K. T., Lee C. F., Yue Z. Q., "Laboratory study of soil nail interaction in loose, completely decomposed granite", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, (2004) 274-286.
20. Wood D. M., "Geotechnical modelling", CRC Press (2014).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

21. Stephenson R. W., "Design and Installation of Torque Anchors for Tiebacks and Foundations", Missouri University of Science and Technology, Rolla (2003).
22. Meyerhof G., "The ultimate bearing capacity of foudations", Geotechnique, Vol. 2 (1951) 301-332.
23. Spagnoli G., Gavin K., Brangan C., Bauer S., "In situ and laboratory tests in dense sand investigating the helix-to-shaft ratio of helical piles as a novel offshore foundation system", Frontiers in Offshore Geotechnics, vol. 3, (2015) 643-648.
24. Moghadam M. J., Zad A., Mehrannia N., Dastaran N., "Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 10 (2018) 947-957.
25. Moghadam M. J., Zad A., Mehrannia N., Dastaran N., "Experimental study of the influence of the shape and configuration of plate anchors on retaining walls", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics (2018) 1-49.
26. Tsuha C. H. C., Aoki N., Rault G., Thorel L., Garnier J., "Physical modelling of helical pile anchors", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 7 (2007) 01-12.
27. Young J. J. M., "Uplift capacity and displacement of helical anchors in cohesive soil", A Thesis Submitted to Oregon State University (2012).
28. Salgado R., Yoon S., Siddiki N. Z., "Construction of tire shreds test embankment" (2003).
29. Lazarte C. A., Robinson H., Gómez J. E., Baxter A., Cadden A., Berg R., "Soil Nail Walls Reference Manual", No. FHWA-NHI-14-007 , (2015).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]

30. Sabatini P., Pass D., Bachus R. C., "Ground anchors and anchored systems", United States, Federal Highway Administration, Office of Bridge Technology (1999).
31. Lanyi-Bennett S. A., Deng L., "Axial load testing of helical pile groups in a glaciolacustrine clay", Canadian Geotechnical Journal (2018).
32. Ghosh P., Samal S., "Interaction Effect of Group of Helical Anchors in Cohesive Soil Using Finite Element Analysis", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 35 (2017) 1475-1490.
33. Dong T. W., Zheng Y. R., "Limit analysis of vertical anti-pulling screw pile group under inclined loading on 3D elastic-plastic finite element strength reduction method", Journal of central south university, Vol. 21, (2014) 1165-1175.
34. Albusoda B. S., Abbase H. O., "Performance assessment of single and group of helical piles embedded in expansive soil", International Journal of Geo-Engineering, Vol. 8, (2017), 25.
35. Elsherbiny Z., El Naggar M., "The performance of helical pile groups under compressive loads: a numerical investigation", in Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2013).
36. Sakr M., Nazir A., Azzam W., Sallam A., "Uplift capacity of group screw piles with grouted shafts in sand", (2017).
۳۷. مهدوی ح.، کاتبی ه.، امین‌فر م.، "بررسی روش میخکوبی خاک با استفاده از مدلسازی فیزیکی به روش PIV" ، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز (۱۳۸۷).
38. White D., Take W., Bolton M., "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry", Geotechnique, Vol. 53 (2003) 619-631.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.5.3]