ارزیابی ظرفیت بیرون کشیدگی مهارهای صفحه ای مکانیکی بازشو همراه با تزریق دوغاب در خاک ماسه ای

مهدی صدیقی مقدم [۱]، امیر علی زاد*[۱]، مریم یزدی[۱]، امین توحیدی[۲]

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: امیرعلی زاد، A.zad@iauctb.ac.ir

چکیده

مهارهای مکانیکی صفحه‌ای بازشو به‌طور گسترده برای تحمل بارهای کششی سازه‌های سبک و متوسط به کار می‌روند؛ با این حال، در صورت مواجهه با لایه‌های سست یا عدم بازشدگی کامل صفحات، دستیابی به ظرفیت طراحی با چالش مواجه می‌شود. در این پژوهش، برای نخستین‌بار رفتار باربری سامانه مهار مکانیکی بازشونده تلفیق‌شده با تزریق دوغاب سیمانی به عنوان یک راهکار بهسازی درجا در خاک ماسه‌ای فیروزکوه با تراکم‌های نسبی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ به صورت آزمایشگاهی در مقیاس واقعی (۱:۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. متغیرهای آزمون شامل فشار تزریق ۵ تا ۷ bar، حجم تزریق ۲ تا ۶ لیتر و تراز تزریق ۱۵، ۳۰، ۴۵ . ۶۰ سانتی متر (بالاتر از صفحات) بودند .نتایج حاصل از آزمون‌ها در مقایسه با مدل مبنا (مهار مکانیکی بدون تزریق با ظرفیت بیرون‌کشی ۱۹۸ تا ۳۰۹ کیلوگرم) نشان داد که اعمال تزریق در تمامی حالت‌ها موجب ارتقای ظرفیت باربری بین ۱۱٫۲٪ تا ۵۰٫۰٪ نسبت به حالت مبنا می‌گردد .بیشترین رشد ظرفیت باربری معادل ۵۰٫۰٪ (افزایش بار بیرون‌کشی از ۳۰۲ به ۴۵۳ کیلوگرم نسبت به مهار مبنا) در خاک متراکم (Dr=70%)، تحت فشار بهینه ۷barو در تراز تزریق ۴۵cm به ثبت رسید. در مقابل، کمترین بهبود ۱۰٫۵٪ تا (در تراز تزریق ۱۵cmبه دلیل تداخل گوه گسیختگی مهار با حباب دوغاب رخ داد. همچنین در تراز ۶۰cm برای تراکم‌های ۳۰٪ و ۵۰٪، نشت سطحی مانع از تشکیل حباب باربر گردید. نتایج نشان می‌دهد که تشکیل حباب دوغاب با حجم بهینه ۴L همانند یک «صفحه مهاری دوم مجازی» عمل میکند.

کلمات کلیدی

مهار صفحه ای مکانیکی، ظرفیت بیرون کشیدگی، تزریق دوغاب، خاک ماسه ای فیروزکوه.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

مهارها یکی از مهم‌ترین اجزای نگهدارنده در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی به شمار می‌روند و به‌طور گسترده در پایدارسازی شیروانی‌ها، دیواره‌های گود، سازه‌های نگهبان، تونل‌ها و فونداسیون‌ها مورد استفاده قرار می گیرند. عملکرد مناسب این اجزا نقش تعیین کننده‌ای در تأمین ایمنی، کنترل تغییر شکل ها و افزایش پایداری سازه‌های خاکی دارد. در میان انواع مختلف مهارها، مهارهای مکانیکی به دلیل سهولت نصب، سرعت اجرا، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و قابلیت استفاده در شرایط متنوع زمین، همواره مورد توجه پژوهشگران و مجریان پروژه‌ها بوده‌اند [۱].

با وجود مزایای متعدد، عملکرد مهارهای مکانیکی به‌شدت به نحوه استقرار و بازشدگی مناسب اجزای بیرون‌کششی آن‌ها وابسته است. در شرایط اجرایی واقعی، عواملی نظیر ناهمگنی محیط، محدودیت‌های نصب، وجود لایه‌های مقاوم یا سنگی، و باز نشدن کامل صفحات مهار می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت باربری و افت عملکرد سامانه شود. این مسئله به‌ویژه در شرایطی که دستیابی به ظرفیت طراحی ضروری است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و لزوم ارائه راهکارهای تقویتی و اصلاحی را آشکار می‌سازد.

در سال‌های اخیر، توسعه نسل جدیدی از مهارهای مکانیکی با عنوان مهار صفحه ای مکانیکی بازشو (EMPAS[1]) زمینه تازه‌ای برای ارتقای عملکرد این سامانه‌ها فراهم کرده است [۲]. با این حال، همچنان این پرسش مطرح است که در صورت عدم دستیابی مهار به ظرفیت مطلوب پس از نصب، چه راهکاری می‌تواند به‌صورت مؤثر، اجرایی و اقتصادی ظرفیت باربری آن را افزایش دهد. در این راستا، تزریق دوغاب سیمان به‌عنوان یکی از روش‌های متداول بهسازی و تقویت در مهندسی ژئوتکنیک، می‌تواند با بهبود اندرکنش بین مهار و محیط اطراف، افزایش مقاومت موضعی و تقویت ناحیه درگیر، عملکرد بیرون‌کششی مهار را بهبود بخشد.

با وجود کاربرد گسترده تزریق در بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی، بررسی اثر آن بر عملکرد مهارهای مکانیکی پس از باز شدن صفحات بیرون‌کششی، به‌ویژه در مهارهای نسل جدید، همچنان نیازمند مطالعه دقیق آزمایشگاهی است. شناخت میزان تأثیر تزریق، نحوه تغییر ظرفیت باربری و ارزیابی نقش پارامترهای مؤثر، می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی و اجرای این نوع مهارها نقش مهمی ایفا کند.

تزریق دوغاب در مهار های مکانیکی میتواند راهکار مناسبی برای افزایش ظرفیت باربری مهار های مکانیکی باشد. در پژوهش‌های پیشین، استفاده از تزریق همزمان دوغاب در حین نصب مهارهای پیچشی[2] نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۳و۴]. نتایج مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تزریق دوغاب موجب تشکیل ناحیه‌ای از خاک-سیمان در اطراف عضو پیچشی شده و بهبود قابل توجهی در عملکرد محوری آن ایجاد می‌کند.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر تزریق دوغاب سیمان بر ظرفیت باربری مهارهای مکانیکی EMPAS است. برای دستیابی به این هدف، مجموعه‌ای از آزمایش‌های اولیه و بیرون‌کششی در شرایط مختلف انجام شده و اثر برخی پارامترهای مؤثر بر رفتار مهار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق می‌تواند در ارائه راهکاری عملی برای افزایش ظرفیت باربری مهارهای مکانیکی و بهبود عملکرد آن‌ها در شرایط اجرایی واقعی مؤثر باشد.

۲- تاریخچه مهار های صفحه ای مکانیکی بازشو

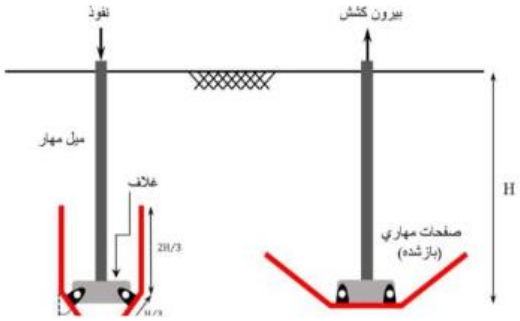
مهار صفحه ای مکانیکی بازشو اولین بار در سال ۲۰۲۱ معرفی شد[۲]. مطالعات انجام شده در زمینه مهار های مکانیکی و به ویژه مهار های صفحه ای باز شونده نشان می دهد که ظرفیت بیرون کششی این سامانه ها ت

ابعی از هندسه صفحات، نحوه بازشدن آن‌ها، ویژگی های محیط اطراف و شرایط بارگذاری است [۲و۵–۹]. در پژوهش های پیشین، سازوکار اندرکنش صفحات با توده خاک، نحوه تشکیل گوه گسیختگی و اثر اندرکنش مهار و خاک به‌عنوان عوامل اصلی کنترل

[1] Expandable Mechanical Plate Anchor System
[2] Helical

ACCEPTED MANUSCRIPT

کننده ظرفیت باربری معرفی شده‌اند [۲و۵و۸]. همچنین نتایج برخی مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی نشان داده است که رفتار مهار های صفحه ای در خاک های دانه ای به طور قابل توجهی تحت تأثیر نحوه استقرار صفحات و شرایط تراکم محیط قرار دارد [۶و۷و۹].



شکل ۱- مهار مکانیکی صفحه ای بازشو با انحنای رو به پایین [۲]

Figure 1: Downward-curved opening mechanical plate anchor

در سال های اخیر، توجه ویژه‌ای به مهار های چند صفحه‌ای و مهارهای بازشونده معطوف شده است، زیرا این سامانه ها به دلیل سهولت نصب، سرعت اجرا و امکان توسعه ظرفیت باربری، کاربردهای گسترده‌ای در پروژه‌های ژئوتکنیکی پیدا کرده‌اند [۷و۱۰–۱۲]. بخشی از پژوهش‌ها بر ارزیابی آزمایشگاهی رفتار این مهارها در خاک‌های دانه‌ای متمرکز بوده و بخشی دیگر، با استفاده از روش‌های عددی، به شبیه‌سازی ظرفیت بیرون‌کششی و بررسی سازوکار شکست پرداخته‌اند [۱و۹–۱۲]. نتایج این مطالعات بیانگر آن است که تغییر در هندسه مهار، تعداد صفحات، زاویه صفحات و شرایط بارگذاری می‌تواند پاسخ مکانیکی سامانه را به‌طور محسوسی تغییر دهد [۱و۱۰–۱۲].



شکل ۲- مهار های دو صفحه ای بازشو [۵]

Figure 2: Two-plate opening anchors

همچنین مطالعات متعددی در زمینه سازوکار گسیختگی و تعیین ظرفیت باربری مهارهای صفحه‌ای در خاک‌های ماسه‌ای انجام گرفته است [۱۷و۱۹]. ژوانگ و همکاران [۱۸]نشان دادند که زاویه صفحات مهار و تداخل حوزه‌های تنش بر ظرفیت نهایی بیرون‌کشیدگی در ماسه تأثیر مستقیم دارد.

در کنار این موارد، برخی پژوهش‌ها به بررسی اثر پارامترهای اجرایی مانند سرعت بارگذاری، نحوه بازشدن صفحات و شکل ناحیه گسیختگی پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که این عوامل می‌توانند بر میزان ظرفیت نهایی و نوع شکست اثرگذار باشند [۲و۱۱و۱۳]. با این حال، در شرایط واقعی اجرا همواره این احتمال وجود دارد که صفحات مهار به طور کامل باز نشوند یا به دلیل برخورد با لایه های

ACCEPTED MANUSCRIPT

مقاوم، ظرفیت مورد انتظار حاصل نشود. در چنین شرایطی، ارائه یک راهکار تقویتی برای افزایش ظرفیت باربری از اهمیت زیادی برخوردار است.

اگرچه استفاده از تزریق دوغاب سیمان به عنوان یک روش بهسازی در مهارهای مرسوم سابقه دارد [۳]، بررسی تلفیق تزریق تحت فشار با عملکرد مکانیکی صفحات بازشو در نسل جدید مهارهای مکانیکی تاکنون در ادبیات فنی مسکوت مانده است. در مطالعات پیشین [۱و ۱۲-۱۴]، عملکرد این مهارها صرفاً متکی بر مقاومت اتکایی مکانیکی صفحات فولادی بوده و در صورت برخورد با لایه‌های ضعیف، دستیابی به ظرفیت طراحی با افت شدید مواجه می‌شد. همچنین، بررسی اثرات پس‌تزریق بر مهارها در خاک‌های دانه‌ای متراکم حاکی از بهبود چشمگیر ظرفیت بیرون‌کشی در نتیجه قفل‌وبست ذرات و افزایش تنش‌های محصورکننده است [۱۶]. علاوه بر این، در زمینه مدلسازی اندرکنش مهار بازشو با محیط بهسازی‌شده، محمدخانی‌فرد و زاد [۱۵] با استفاده از روش ترکیبی CFD-DEM نشان دادند که شکل‌گیری محیط سخت‌شده ناشی از دوغاب سیمان، الگوی گسیختگی مهار را بازتوزیع کرده و مقاومت بیرون‌کشش را ارتقا می‌دهد.

نوآوری اصلی پژوهش حاضر، معرفی و ارزیابی یک سامانه هیبریدی (ترکیب مقاومت مکانیکی مهار با توده دوغاب سخت‌شده) به عنوان یک راهکار بهسازی درجا است که بدون نیاز به حفاری مجدد یا تغییر ابعاد مهار، کسری ظرفیت باربری را جبران می‌نماید.

وجه تمایز و برتری این پژوهش نسبت به کارهای گذشته عبارت است از:

۱) ارزیابی پارامتریک و هم‌زمان اثر فشار تزریق، حجم تزریق، و ارتفاع بهینه سوراخ‌های تزریق نسبت به صفحات مهار

۲) تبیین سازوکار اندرکنش سه‌گانه خاک-مهار-دوغاب و شبیه‌سازی عملکرد یک «صفحه مهاری دوم مجازی» ناشی از حباب دوغاب؛

۳) تعیین مرز بهینه تزریق به تفکیک تراکم‌های مختلف خاک ماسه‌ای (سست، متوسط و متراکم) جهت دستیابی به حداکثر راندمان باربری با حداقل صرف انرژی و مصالح.

نتایج این پژوهش دیدگاهی کاربردی جهت طراحی بهینه و افزایش اطمینان‌پذیری این مهارها در پروژه‌های ژئوتکنیکی و نیروگاه‌های خورشیدی فراهم می‌آورد

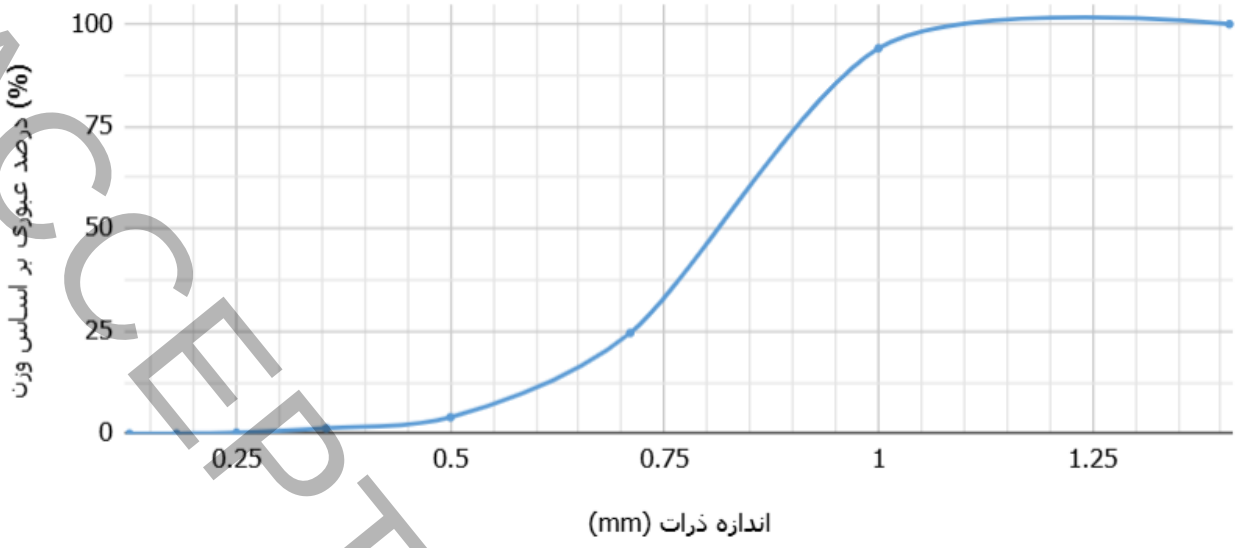
شایان ذکر است که مهار مکانیکی مورد مطالعه در این پژوهش با ابعاد واقعی متناسب با کاربردهای هدف (نظیر فونداسیون‌های مهارشده پنل‌های خورشیدی، تورهای آبزی‌پروری و سازه‌های سبک سطحی و دریایی) ساخته و آزمایش شده است.

۳- تجهیزات آزمایش

۳-۱- خاک

در این پژوهش از ماسه فیروزکوه ۱۳۱ به‌عنوان محیط آزمایشگاهی استفاده شده است. این ماسه از لحاظ طبقه بندی متحد (Unified) در دسته ماسه بد دانه بندی شده (SP) قرار گرفته و به دلیل دانه‌بندی یکنواخت، شکل نسبتاً گرد و بدون ریزدانه، شرایطی مناسبی برای تحلیل رفتار مهارهای مکانیکی همراه با تزریق دوغاب را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، ویژگی‌های فیزیکی این ماسه باعث می‌شود اثر متغیرهای مورد بررسی (نظیر زاویه صفحه و فشار تزریق) به‌وضوح قابل تحلیل باشد. منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده در شکل شماره ۳ نمایش داده شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳- نمودار دانه بندی ماسه ۱۳۱ فیروزکوه

Figure 3: Sieve Analysis of Firouzkuh 131 sand

جدول ۱- مشخصات فیزیکی ماسه ۱۳۱ فیروزکوه

Table 1: Physical properties of Firouzkuh 131 sand

پارامتر	واحد	مقدار
φ	°	۳۴
$\gamma_{d\ min}$	g/cm^3	۱/۴۲
$\gamma_{d\ max}$	g/cm^3	۱/۶۰
e_{min}	-	۰/۶۰
e_{max}	-	۰/۷۹
C_c[1]	-	۰/۱۱
C_u[2]	-	۱/۵۴
Gs[3]	-	۲/۵۶

[1] Coefficient of Curvature
[2] Uniformity Coefficient
[3] Specific Gravity

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲-۳- تجهیزات آزمایش و مشخصات مهار

در این پژوهش، به منظور انجام آزمایش ها از یک محفظه آزمایشگاهی آزمایشگاهی با ابعاد ۱m×۱m×۱m استفاده شد. این محفظه از ورق فولادی با ضخامت ۳mm ساخته و به وسیله پروفیل های فولادی تقویت شده است تا از تغییر شکل جداره ها در هنگام بارگذاری و باربرداری جلوگیری شود.

مشابه مهار معرفی شده در پژوهش پیشین [۷]، مهار مورد استفاده در این تحقیق از دو بخش اصلی شامل شفت و صفحه تشکیل شده است. شفت مهار از یک میله فولادی به قطر ۳/۸۱cm (۱٫۵in) و طول ۱۶۰cm ساخته شد. صفحات مهار نیز دارای ابعاد cm ۳۰cm×۳۰ بوده و از ورق فولادی با ضخامت ۲mm ساخته شدند که در انتهای شفت نصب می‌شوند. این صفحات در یک سوم انتهایی خود، معادل ۵cm از هر طرف، خم شده‌اند و در این تحقیق اثر زاویه خم صفحات در سه مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت.

به‌منظور تزریق متقارن دوغاب در خاک و ارزیابی رفتار سیستم بر مبنای نسبت‌های فاصله‌گذاری نسبی نسبت به عرض صفحه بازشو، چهار سوراخ شعاعی با زاویه ۹۰ درجه و به قطر ۴ میلی‌متر در بدنه چهار شفت مجزا در فواصل ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متری بالاتر از صفحات بازشو تعبیه شد. قطر ۴ میلی‌متری سوراخ‌ها به نحوی تعیین گردید که علاوه بر پیشگیری از انسداد مجرا حین جریان دوغاب و افت فشار ناخواسته، کمترین افت در مقطع باربر شفت فولادی ایجاد گردد. همچنین در فاصله‌ای کمتر از ۵ میلی‌متر پایین‌تر از محل تزریق، شفت برش داده شد و یک کورکننده در آن قرار گرفت تا از عبور دوغاب به بخش پایین‌تر جلوگیری شده و تزریق کامل دوغاب در توده خاک اطراف تضمین شود. بخش فوقانی شفت نیز رزوه‌دار طراحی شد تا از طریق یک شیر مکانیکی به سیستم تزریق متصل شود. علاوه بر این، یک دستک فولادی افقی در بالای شفت تعبیه شد تا امکان اعمال نیروی بیرون‌کششی توسط جک ۵ton فراهم شود.

سیستم تزریق دوغاب شامل یک مخزن مخروطی شکل با ظرفیت ۳۵L بود که به وسیله یک شیر مکانیکی روی شفت نصب می‌شد. در قسمت فوقانی این مخزن، دو رابط برای نصب گیج فشار و ورودی هوای فشرده در نظر گرفته شد. پیش از نصب این تجهیزات، دوغاب از طریق همین رابط‌ها وارد مخزن می‌شد. برای تأمین فشار لازم تزریق، از یک کمپرسور هوا با فشار ۱۰bar و ظرفیت L50 استفاده شد که توانایی ایجاد فشار مناسب برای تزریق حجم محدودی از دوغاب را دارا بود.

سیستم اندازه گیری شامل یک نیروسنج خمشی با ظرفیت ۲ تن، نمایشگر وزن مجهز به قابلیت ثبت داده و انتقال اطلاعات به رایانه، یک خط کش مدرج متصل به بدنه شفت، یک تراز لیزری خطی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و یک جک ۵ton با دامنه بازشدگی ۲۰cm برای اعمال نیروی کششی به شفت بود. شکل شماره ۴ تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۴- تجهیزات آزمایش

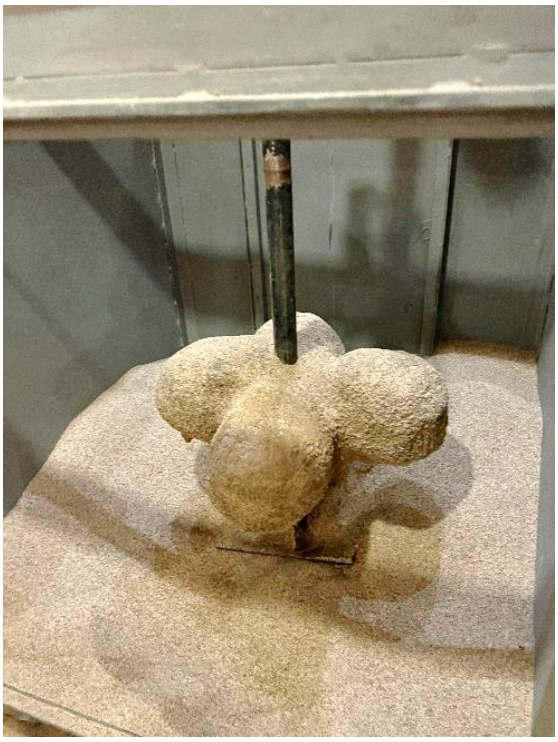
Figure 4: Test equipment

۴- روش انجام آزمایش

۴-۱- حجم دوغاب

به منظور بررسی نحوه گسترش دوغاب در توده خاک و تعیین حجم مناسب تزریق، در مرحله نخست چند آزمایش مقدماتی در تراکم نسبی ۵۰٪ و فشار تزریق ۶bar انجام شد. این آزمایش ها با هدف شناخت الگوی پخش دوغاب در مرکز محفظه آزمایشگاهی و برآورد حجم بهینه مورد نیاز صورت گرفت. در این مرحله، دوغاب در حجم های مختلف از ۲L تا ۶L (با نسبت آب به سیمان برابر و ۱ ٪ وزنی سیمان مکمل روان کننده دوغاب) به داخل خاک تزریق شد. نتایج نشان داد که با افزایش حجم تزریق تا ۴L، ابعاد حباب‌های تشکیل شده ناشی از تزریق افزایش می یابد. با این حال، تزریق مقادیر بیش از ۴L تأثیر محسوسی بر گسترش ناحیه دوغاب در عرض صفحات نداشت و در عوض موجب نشت و شره کردن دوغاب از بخش زیرین حباب های تشکیل شده شد. این پدیده با برهم زدن شرایط مرزی آزمایش، می‌توانست بر صحت نتایج اثرگذار باشد. از این رو، حجم ۴L به عنوان حجم ثابت و بهینه دوغاب برای تزریق در آزمایش های اصلی انتخاب شد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۵- تزریق دوغاب در حجم ۴L

Figure 5: Grout injection at a volume of 4 L



شکل ۶- تزریق دوغاب در حجم ۶L

Figure 6: Grout injection at a volume of 6 L

۲-۴- فشار تزریق

به منظور تعیین فشار مناسب تزریق، آزمایش‌ها در محدوده فشار ۴bar تا ۸bar انجام شد. شکل شماره ۷ و ۸ الگوی گسترش دوغاب در خاک با تراکم نسبی ۵۰٪ را نشان می‌دهند. نتایج نشان داد که در فشارهای کمتر از ۵ بار، سوراخ‌های تعبیه‌شده در مهار دچار گرفتگی شده و پس از تخلیه بخشی از دوغاب سیمان، بخش باقی‌مانده در داخل شفت و مخزن باقی می‌ماند و به‌طور کامل تزریق نمی‌شد. در مقابل، اعمال فشار ۸bar موجب گسیختگی کامل و ناگهانی حباب دوغاب در داخل خاک شد که این امر می‌توانست شرایط تزریق و پاسخ آزمایش را به‌طور نامطلوب تحت تأثیر قرار دهد. بر این اساس، با توجه به نتایج حاصل، فشارهای ۵bar، ۶bar و ۷bar به‌عنوان محدوده مناسب برای انجام آزمایش‌های این مرحله انتخاب شدند.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۷- گسیختگی حباب تزریق دوغاب در فشار ۸bar

Figure 7: Failure of the grout injection bulb at a pressure of 8 bar



شکل ۸- عدم تزریق پذیری دوغاب با فشار ۴ بار

Figure 8: Failure to achieve groutability at 4-bar injection pressure

۳-۴- زمانبندی تزریق

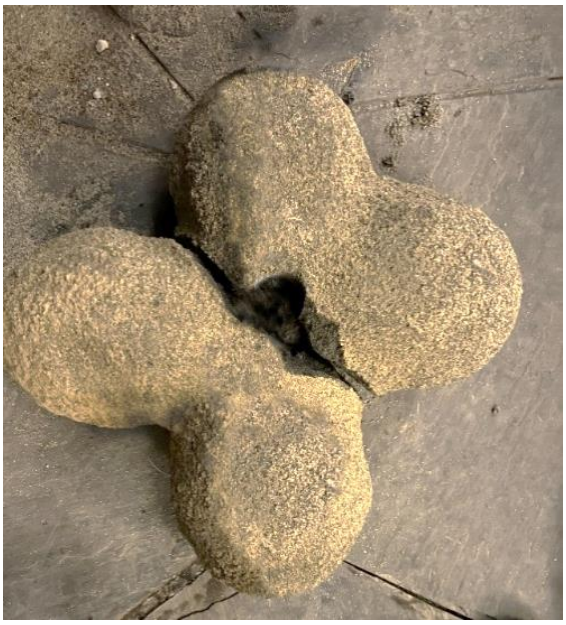
به منظور بررسی اثر صفحات شکل‌گرفته از دوغاب بر افزایش ظرفیت باربری مهار، آزمون‌های اولیه بیرون‌کشی مهار پس از گذشت ۱۰ روز از زمان گیرش دوغاب انجام شد. نتایج بررسی‌های اولیه نشان داد که توده دوغاب سخت‌شده در بالای صفحات فلزی، رفتاری مشابه چتر از خود نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که مانع انتقال مؤثر وزن خاک به صفحات فلزی شده و از بازشدگی به‌موقع آن‌ها جلوگیری می‌کند.

بر این اساس، تصمیم گرفته شد که در مرحله نخست، صفحات فلزی از طریق اعمال نیروی بیرون‌کشی اولیه باز شوند و پس از بازشدگی کامل صفحات و رسیدن آن‌ها به محدوده نزدیک به حداکثر ظرفیت کششی، در مرحله بعد دوغاب به داخل خاک تزریق شود. در جریان آزمون‌های اولیه مشاهده شد که برخی نمونه‌ها دارای ضعف در اتصال بین توده دوغاب سخت‌شده و میله مهار بوده‌اند، یا این‌که حباب تزریق‌شده دچار ترک‌های عمیق شده است. در نتیجه، هنگام اعمال نیروی بیرون‌کشی، میله مهار از توده تزریق جدا شده یا حباب دوغاب دچار شکست می‌شد. شکل شماره ۹ و ۱۰ این پدیده را نشان می‌دهد. به‌منظور رفع این مشکل، پس از بیرون‌کشی اولیه و حصول اطمینان از بازشدگی کامل صفحات و دستیابی مهار به حداکثر ظرفیت باربری، مهار از حالت تحت کشش خارج شد و سپس عملیات تزریق دوغاب انجام گرفت. این اقدام موجب کاهش تنش‌ها و جابه‌جایی ناخواسته ذرات خاک شده و در نهایت، کیفیت اتصال دوغاب به بدنه مهار را بهبود بخشید.

به منظور مقایسه نتایج و تعیین میزان افزایش ظرفیت باربری ناشی از تشکیل حباب دوغاب نسبت به حالت بدون تزریق، لازم است عملیات تزریق صرفاً پس از بازشدگی کامل صفحات انجام پذیرد. ازاین‌رو، برای ایجاد مبنای مقایسه، در هر یک از سه سطح تراکم نسبی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ و نیز برای هر یک از سه زاویه صفحات فلزی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، سه آزمون در شرایط بدون تزریق دوغاب اجرا شد که در مجموع شامل ۲۷ آزمایش است. هدف از اجرای این مجموعه آزمایش‌ها، تعیین دامنه عمق بازشدگی صفحات و

ACCEPTED MANUSCRIPT

همچنین برآورد حدود ظرفیت باربری کششی حداکثر مهار در حالت بدون تزریق بود. نتایج آزمایش‌ها در قالب نمونه نمودار در شکل شماره ۱۱ ارائه شده و خلاصه نتایج در جدول ۲ درج شده است.



شکل ۹- بروز ترک و شکستگی حباب تزریق

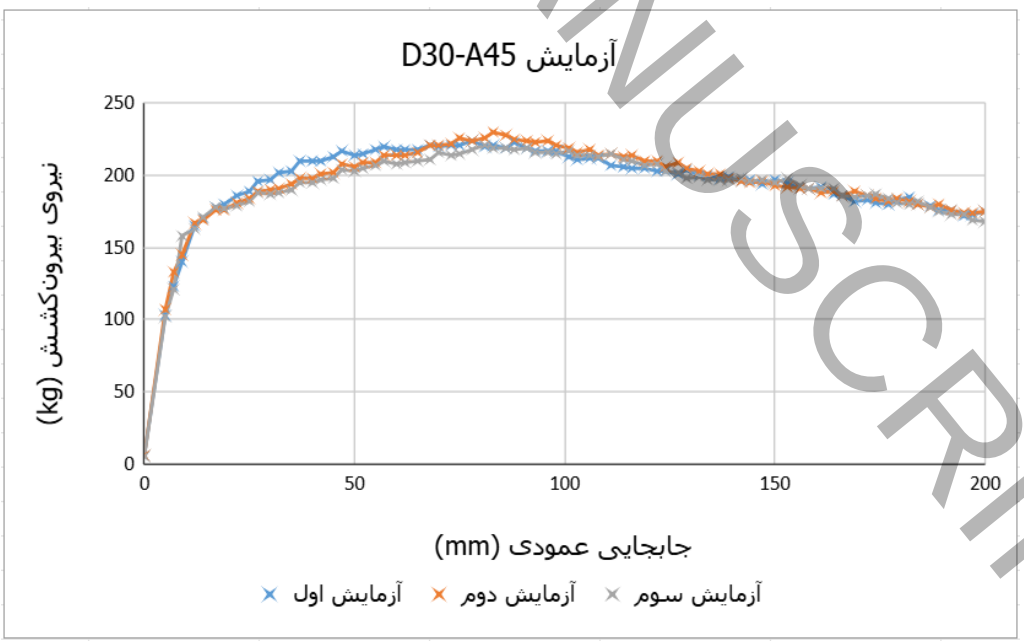
Figure 9: Development of cracks and fracturing of the grout bulb



شکل ۱۰- عدم اتصال مناسب حباب تزریق و مهار

Figure 10: Inadequate bonding between the grout bulb and the anchor

در این بخش از پژوهش، کدگذاری آزمایش‌ها به‌منظور سهولت ارائه نتایج در نمودارها و جداول به‌صورت Dxx-Ayy تعریف شد. در این کد، مقدار xx تراکم نسبی خاک (٪) و مقدار yy زاویه خم صفحه مهار (درجه) را نشان می‌دهد. بنابراین کد D30-A45 به آزمایشی اشاره دارد که در آن تراکم نسبی خاک ۳۰٪ و زاویه خم صفحه مهار ۴۵ درجه بوده است.



شکل ۱۱- ظرفیت باربری بیرون کشش مهار با زاویه صفحه ۴۵ درجه در خاکی با تراکم ۳۰٪

Figure 11: Pullout capacity of the anchor with a plate angle of 45° in 30% relative density soil

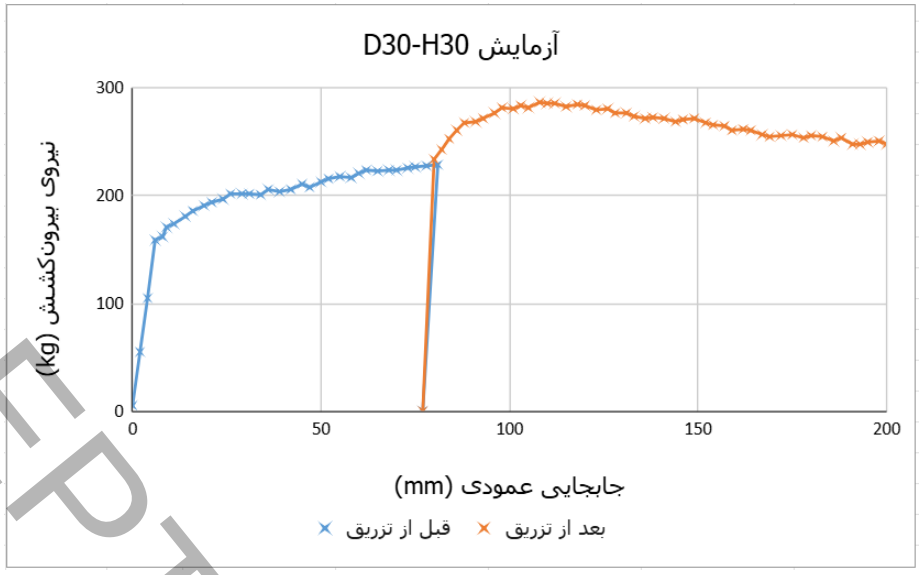
ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول 2- خلاصه آزمایش های بیرون کشش بدون تزریق Table 2: Summary of pullout tests without grout injection		
نام آزمایش	میانگین محل نقطه بیشینه (mm)	میانگین نیروی بیشینه (kg)
D30-A45	۸۰	۲۲۵
D30-A30	۱۰۰	۲۱۴
D30-A15	۱۰۹	۱۹۶
D50-A45	۵۱	۲۴۷
D50-A30	۶۴	۲۳۵
D50-A15	۷۰	۲۱۲
D70-A45	۴۶	۳۰۵
D70-A30	۵۰	۲۸۷
D70-A15	۵۶	۲۵۸

۴-۴- ارتفاع تزریق

به منظور تعیین ارتفاع بهینه تزریق، مجموعه‌ای شامل ۱۲ آزمایش با فشار تزریق 7bar و زاویه صفحه فلزی ۴۵ درجه، در خاک با تراکم‌های نسبی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ و در ارتفاع‌های 15cm، 30cm، 45cm و 60cm نسبت به صفحات مهار انجام شد. مراحل فرآیند انجام آزمایش به‌صورت مرحله‌ای شامل اعمال نیروی بیرون‌کششی اولیه تا رسیدن به حد نصاب بازشدگی کامل صفحات، سپس حذف بار کششی و رهاسازی مهار به‌منظور جلوگیری از ایجاد ترک در توده خاک بالای صفحات بازشده، و در ادامه انجام تزریق دوغاب بود. پس از تزریق، به دوغاب زمان عمل‌آوری اولیه داده شد تا گیرش اولیه انجام شده و مقاومت لازم برای تحمل بارگذاری مجدد فراهم گردد. در نهایت، بارگذاری کششی نهایی اعمال و حداکثر ظرفیت باربری بیرون‌کششی مهار در حالت تقویت‌شده با دوغاب اندازه‌گیری و ثبت شد. شکل ۱۲ نمونه ای از نمودار نیرو جابجایی این روند آزمایش را نمایش میدهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۲- ظرفیت بیرون کشش مهار در فاصله تزریق ۳۰cm در تراکم ۳۰٪ خاک به همراه تزریق دوغاب فشار ۷ بار

Figure 12: Pullout capacity of the anchor at an injection distance of 30 cm in 30% relative density soil with grout injection at 7-bar pressure

در تراکم‌های ۳۰٪ و ۵۰٪، در ارتفاع ۶۰cm از صفحات مهار، دوغاب از سطح خاک خارج شد؛ ازاین‌رو، انجام تزریق در این ارتفاع برای این دو تراکم امکان‌پذیر نبود. شکل ۱۳ این پدیده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- نشت دوغاب از سطح خاک در فاصله ۶۰cm در تراکم ۵۰٪ با فشار تزریق ۷ بار

Figure 13: Surface leakage of grout at 60 cm distance in 50% relative density under 7-bar injection pressure

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۳ نتایج ظرفیت برون کشش آزمایش‌های این بخش را نشان می‌دهند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین ظرفیت باربری در ارتفاع تزریق ۴۵cm نسبت به صفحه مهار حاصل شد؛ ازاین‌رو، این فاصله برای ادامه آزمایش‌ها به‌عنوان ارتفاع بهینه تزریق انتخاب گردید. با در نظر گرفتن عرض ۳۰cm صفحه مهار و تعریف آن با نماد H، این ارتفاع معادل H۱,۵است. تفسیر این نتیجه نشان می‌دهد که در فاصله‌های کمتر از H۱,۵، به دلیل نزدیکی محل تزریق به صفحه مهار، توده دوغاب به‌طور کامل و مستقل در خاک توسعه نمی‌یابد و در نتیجه اثر تقویتی آن محدود می‌شود. افزون بر این، همانطور که در شکل ۱۴ مشخص است، هندسه حباب دوغاب در این حالت فشرده‌تر بوده و شرایط مناسب برای بسیج حداکثری مقاومت خاک فراهم نمی‌شود. در مقابل، در فاصله H۱,۵، توده دوغاب ضمن تشکیل مناسب، از سربار کافی خاک بالاسری نیز برخوردار است و همین امر منجر به بیشینه‌شدن ظرفیت باربری می‌شود. در فاصله H۲نیز با وجود تشکیل مناسب توده دوغاب، کاهش سربار خاک بالای آن باعث افت جزئی ظرفیت باربری شده است.

در این بخش از پژوهش، کدگذاری آزمایش‌ها به‌منظور سهولت ارائه نتایج در نمودارها و جداول به‌صورت Dxx-Hyy تعریف شد. در این کد، مقدار xx تراکم نسبی خاک (%) و فاصله محل تزریق از صفحات مهار (cm) را نشان می‌دهد. بنابراین کد D30-H15 به آزمایشی اشاره دارد که در آن تراکم نسبی خاک ۳۰٪ و فاصله ۳۰cm محل تزریق از صفحات مهار را نشان میدهد.

جدول 3- نتایج آزمایش های تزریق دوغاب با مهار صفحه ٤٥ درجه و فشار ۷bar در ارتفاع مختلف

Table 3: Test results of grout injection with a 45-degree plate anchor at 7-bar pressure and various injection elevations

نام آزمایش	میزان بیرون کشش قبل از تزریق(mm)	نیروی بیرون کشش قبل از تزریق(kg)	نقطه بیشینه بیرون کشش بعد از تزریق (mm)	نیروی بیشینه بیرون کشش بعد از تزریق (kg)	قطر متوسط حباب دوغاب
D30-H15	۸۰	۲۲۲	۱۱۷	۲۵۰	۳۵
D30-H30	۸۱	۲۲۹	۱۱۰	۲۸۶	۳۷
D30-H45	۷۹	۲۲۴	۱۰۱	۳۱۵	۴۵
D30-H60	۸۰	۲۲۸	-	-	-
D50-H15	۵۰	۲۵۰	۷۸	۲۷۸	۳۱
D50-H30	۵۱	۲۴۴	۷۳	۳۱۲	۳۳
D50-H45	۵۱	۲۴۸	۶۸	۳۶۵	۴۲
D50-H60	۵۲	۲۴۶	-	-	-
D70-H15	۴۶	۳۰۹	۶۹	۳۴۴	۳۰
D70-H30	۴۵	۳۰۷	۶۳	۴۰۱	۳۲
D70-H45	۴۵	۳۰۳	۵۹	۴۵۳	۳۹/۵
D70-H60	۴۶	۳۰۸	۵۹	۴۳۴	۴۰

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۴- مقطع دوغاب توپر کوچک شکل گرفته در فاصله تزریق ۱۵cm

Figure 14: Small solid grout cross-section formed at an injection distance of 15 cm

۴-۴- اثر توامان زاویه صفحه، فشار تزریق و تراکم خاک

پس از تعیین میزان بیرون‌کشیدگی اولیه و ارتفاع بهینه تزریق، به‌منظور ارزیابی اثر شرایط مختلف نصب بر عملکرد مهار مکانیکی بازشو، برنامه آزمایش‌ها بر پایه سه متغیر اصلی شامل تراکم نسبی خاک، فشار تزریق و زاویه صفحات مهار طراحی و طبقه‌بندی شد. جدول ۴ مجموعه آزمایش‌های نهایی را نشان می‌دهد که در قالب آن، در مجموع ۲۷ مدل آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴ قابل مشاهده میباشد. کدگذاری آزمایش‌ها به‌منظور سهولت ارائه نتایج در نمودارها و جداول به‌صورت Dxx-Ayy-Pz تعریف شد. در این کد، مقدار xx تراکم نسبی خاک (٪)، yy زاویه خم صفحات مهار (درجه) و z فشار تزریق (bar) را نمایش میدهد. بنابراین کد D30-A45-P5 به آزمایشی اشاره دارد که در آن تراکم نسبی خاک ۳۰٪ و زاویه خم صفحه ۴۵ درجه و فشار تزریق ۵bar می باشد.

جدول 4- نتایج آزمایش های اثر توامان فشار تزریق، تراکم نسیبی خاک و زاویه صفحه مهار

Table 4: Results of tests on the combined effects of injection pressure, soil relative density, and anchor plate angle

نام آزمایش	میزان بیرون کشش قبل از تزریق(mm)	نیروی بیرون کشش قبل از تزریق(kg)	میزان جابجایی معادل با نیروی بیشینه بیرون کشش بعد از تزریق(mm)	نیروی بیشینه بیرون کشش بعد از تزریق (kg)
D30-A45-P5	۸۰	۲۲۴	۱۲۱	۲۷۹
D30-A45-P6	۸۱	۲۲۸	۱۰۷	۲۹۷
D30-A45-P7	۹۰	۲۳۰	۱۰۴	۳۱۵
D30-A30-P5	۹۹	۲۱۳	۱۳۹	۲۶۲
D30-A30-P6	۱۰۱	۲۱۷	۱۲۶	۲۸۱
D30-A30-P7	۹۹	۲۱۵	۱۲۱	۳۰۰

ACCEPTED MANUSCRIPT

D30-A15-P5	۱۰۹	۱۹۵	۱۴۹	۲۳۶
D30-A15-P6	۱۱۰	۱۸۹	۱۳۶	۲۴۳
D30-A15-P7	۱۱۰	۱۹۸	۱۳۲	۲۵۹
D50-A45-P5	۵۰	۲۴۷	۸۲	۲۸۶
D50-A45-P6	۵۱	۲۵۱	۷۰	۳۵۴
D50-A45-P7	۵۰	۲۵۱	۶۶	۳۶۵
D50-A30-P5	۶۳	۲۳۷	۹۵	۲۸۱
D50-A30-P6	۶۵	۲۳۳	۸۶	۳۱۹
D50-A30-P7	۶۳	۲۴۰	۸۱	۳۳۹
D50-A15-P5	۷۰	۲۱۳	۱۰۱	۲۵۲
D50-A15-P6	۶۹	۲۱۰	۹۱	۲۹۷
D50-A15-P7	۶۹	۲۱۴	۸۵	۳۱۶
D70-A45-P5	۴۵	۳۰۶	۷۱	۳۳۸
D70-A30-P6	۴۷	۳۰۴	۶۴	۴۰۴
D70-A15-P7	۴۶	۳۰۲	۵۵	۴۵۳
D70-A45-P5	۵۰	۲۸۸	۷۶	۳۲۵
D70-A30-P6	۵۰	۲۸۵	۶۶	۳۸۴
D70-A15-P7	۴۹	۲۹۰	۶۲	۴۲۹
D70-A45-P5	۵۶	۲۵۵	۷۹	۲۹۱
D70-A30-P6	۵۶	۲۶۰	۷۲	۳۴۲
D70-A15-P7	۵۷	۲۵۶	۶۷	۳۸۸

نتایج نشان میدهد افزایش طول برون کشش اولیه به منظور باز شدن کامل صفحات ناشی از کاهش زاویه خم صفحات مهار که سبب نزدیک شدن محل تزریق به سطح خاک میشود به اندازه ای نبود که موجب نشت دوغاب به سطح خاک گردد. شکل شماره ۱۵ روند تغییرات درصد رشد ظرفیت باربری بیرون‌کششی مهارهای خاکی را پس از عملیات تزریق دوغاب سیمان تحت فشار نشان می‌دهد. طبق محاسبات انجام شده بر اساس رابطه شماره (۱) درصد رشد ظرفیت تحلیل نتایج به شرح زیر است:

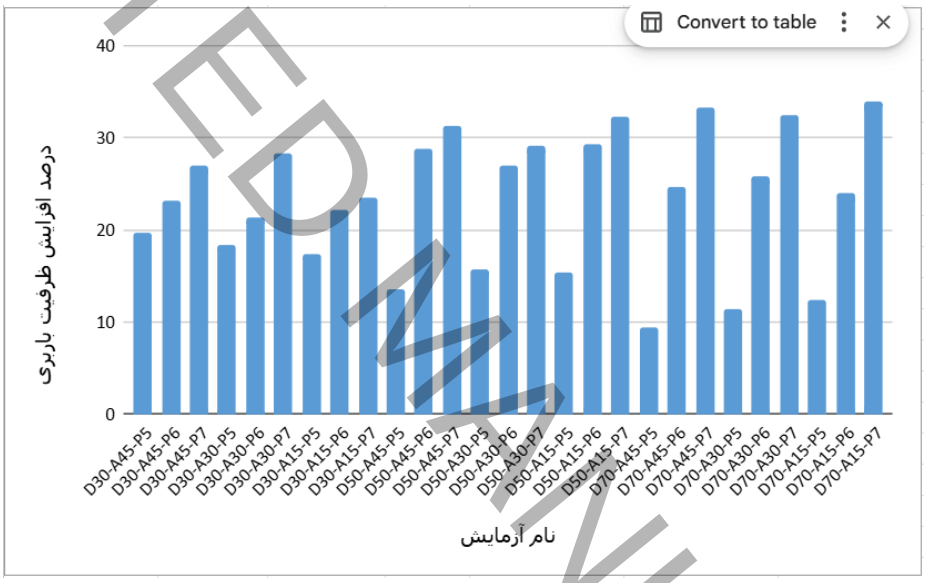
$$\frac{(Q_final - Q_initial)}{Q_initial} \times 100 \qquad (۱)$$

- ✓ تاثیر فشار تزریق: مشاهدات حاکی از آن است که فشار تزریق، تعیین‌کننده‌ترین فاکتور در بهبود عملکرد مهارهاست. در تمامی گروه‌های آزمایشی، با افزایش فشار تزریق از ۵bar به ۷bar بار، درصد افزایش ظرفیت باربری به‌طور پیوسته روند صعودی داشته است. این امر به دلیل ایجاد پیوند مکانیکی قوی‌تر بین دوغاب و دانه‌های خاک و همچنین گسترش شعاع نفوذ دوغاب در محیط اطراف مهار رخ می‌دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

- ✓ تاثیر تراکم نسبی خاک: در خاک‌های با تراکم نسبی پایین (۳۰٪) نفوذپذیری بالاتر خاک اجازه می‌دهد دوغاب به‌راحتی در فضای متخلخل حرکت کرده و حتی در فشارهای پایین نیز بهبود قابل توجهی (بیش از ۱۵٪) ایجاد کند. در خاک‌های با تراکم نسبی بالا (۷۰٪) اگرچه بیشترین مقدار مطلق افزایش ظرفیت در این خاک‌ها و در فشار Ybar ۷ مشاهده شده است (نزدیک به ۳۵٪ در مورد D70-A15-P7)، اما حساسیت این خاک‌ها به فشار تزریق بیشتر است. به‌طوری که در فشار پایین (۵ بار)، به دلیل مقاومت برشی بالای خاک و تخلخل کم، نفوذ دوغاب محدود شده و کمترین میزان بهبود ظرفیت (کمتر از ۱۰٪ در برخی موارد) ثبت شده است.

- ✓ اثر متقابل پارامترها و تحلیل بهینه: تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که «فشار تزریق ۷ بار» به عنوان فشار بهینه عمل می‌کند؛ چرا که در این فشار، اثر محدودکننده تراکم بالای خاک خنثی شده و دوغاب با غلبه بر مقاومت جانبی، بیشترین نرخ بهبود را ایجاد کرده است. در مقابل، در فشارهای پایین نظیر ۵ بار، با افزایش تراکم خاک از ۳۰٪ به ۷۰٪، نرخ رشد ظرفیت باربری روند کاهشی نشان می‌دهد که نشان‌دهنده «کاهش تزریق‌پذیری» خاک در اثر کاهش تخلخل و افزایش تنش‌های همه جانبه است.



شکل ۱۵- نمودار میزان افزایش ظرفیت باربری کششی آزمایش ها

Figure 15: Chart of the percentage increase in the tensile load-bearing capacity of the tests

برای دستیابی به حداکثر راندمان در خاک‌های متراکم، استفاده از فشارهای بالاتر (نظیر ۷ بار) الزامی است، در حالی که در خاک‌های سست، تزریق حتی در فشارهای متوسط نیز منجر به بهبود عملکردی و راندمان فنی قابل‌توجهی (با کمترین صرف انرژی و مصرف دوغاب) در پایداری مهارها می‌گردد.

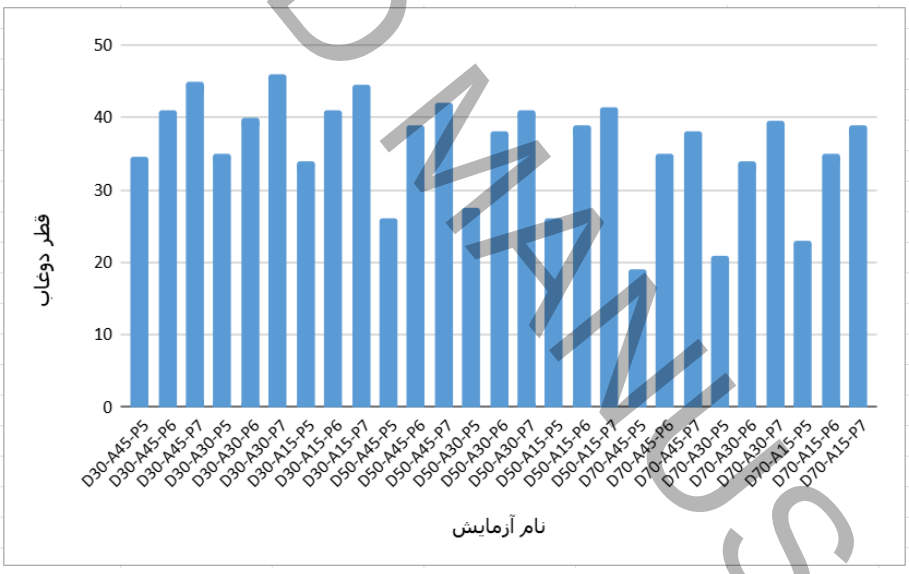
شکل شماره ۱۶ تغییرات قطر توده دوغاب تشکیل شده در آزمایش‌های مختلف را برحسب پارامترهای تراکم، فشار و زاویه نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات تجربی و نتایج به‌دست‌آمده، تحلیل فنی ابعاد و هندسه دوغاب به شرح زیر تبیین می‌گردد:

- ✓ تحلیل سازوکار تزریق در تراکم‌های بالا: در خاک‌های با تراکم نسبی بالا (۷۰٪) و تحت فشار تزریق پایین (۵ بار)، کمترین میزان قطر دوغاب ثبت شده است. این پدیده ناشی از کاهش شدید «تزریق‌پذیری» خاک به دلیل کاهش فضای متخلخل و افزایش تنش جانبی است. در این شرایط، مقاومت محیطی خاک بر فشار هیدرولیکی دوغاب غلبه کرده و منجر به توقف

ACCEPTED MANUSCRIPT

زودهنگام عملیات تزریق و باقی ماندن بخشی از دوغاب در شفت مهار شده است. این امر عملاً باعث عدم تشکیل کامل «حباب تزریق» و در نتیجه کاهش چشمگیر قطر مؤثر دوغاب می‌گردد.

- ✓ . هندسه توده دوغاب: تصاویر به‌دست‌آمده از حفاری مهارها (تصاویر شماره ۱۷ و ۱۸) نشان‌دهنده تغییر فرم هندسی دوغاب متناسب با تراکم خاک است. در تراکم‌های بالا توده دوغاب به صورت «کره‌ای شکل» و منسجم تشکیل می‌شود. به دلیل محدودیت فضا در خاک‌های متراکم، نفوذ شعاعی دوغاب محدود شده اما توده حاصل دارای چگالی و انسجام بالایی است. اما در تراکم‌های پایین به دلیل سهولت حرکتدوغاب در حفرات بزرگتر، شکل توده بیشتر به حالت «کشیده یا سوزنی» متمایل می‌شود که پتانسیل لغزش ذرات خاک بر روی سطح آن بیشتر است.
- ✓ اثر متقابل هندسه دوغاب و ظرفیت باربری: اگرچه با افزایش تراکم خاک، قطر ظاهری دوغاب کاهش می‌یابد، اما نتایج آزمایش‌های بیرون‌کششی نشان‌دهنده عملکرد بهتر مهارها در فشار ۷bar و تراکم‌های بالاست. این پارادوکس ظاهری (قطر کمتر اما ظرفیت بیشتر) را می‌توان از طریق «هندسه منسجم و کاسه‌ای» دوغاب در خاک‌های متراکم توجیه کرد، در تراکم‌های بالا، فاصله بین پره‌های نفوذ دوغاب به حداقل رسیده و یک توده یکپارچه ایجاد می‌شود. شکل منسجم و غیرکشیده دوغاب در تراکم‌های بالا، باعث ایجاد سطح اصطکاکی زبرتر و درگیری مکانیکی (Interlocking) قوی‌تر با ذرات خاک پیرامونی می‌گردد. این ساختار از لغزش ذرات بر روی سطح مهار جلوگیری کرده و ظرفیت بیرون‌کششی را به‌طور مؤثری افزایش می‌دهد.



شکل ۱۶- نمودار میزان فطر میانگین دوغاب شکل گرفته در هر آزمایش

Figure 16: Variation of the average diameter of the grout formed in each test

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۷- تزریق در تراکم ۳۰٪ و فشار ۷bar

Figure 17: Grout injection at 30% relative density and an injection pressure of 7 bar



شکل ۱۸- تزریق در تراکم ۷۰٪ و فشار ۷bar

Figure 18: Grout injection at 70% relative density and an injection pressure of 7 bar

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی، کارایی تزریق دوغاب سیمان به عنوان یک راهکار بهسازی درجا برای ارتقای ظرفیت بیرون‌کشیدگی مهار مکانیکی بازشونده در خاک ماسه‌ای فیروزکوه با تراکم‌های نسبی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ در مقیاس واقعی (۱:۱) مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین دستاوردهای کمّی و تحلیلی این مطالعه به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. ارتقای ظرفیت باربری نسبت به مدل مبنا: در تمامی سناریوهای تزریق موفق، ظرفیت کششی نهایی مهار بین ۱۱٫۲٪ تا ۵۰٫۰٪ نسبت به مهار مبنای بدون تزریق افزایش یافت. بیشترین افزایش باربری معادل ۵۰٫۰٪ (افزایش بار بیرون‌کشی از ۳۰۲ به ۴۵۳ کیلوگرم) در خاک متراکم (Dr=70%) با اعمال فشار تزریق ۷bar و در تراز ارتفاعی ۴۵cm به دست آمد.

۲. نقش تعیین‌کننده فشار تزریق و اندرکنش با تراکم: با افزایش فشار تزریق از ۵ به ۷ بار، ظرفیت باربری در تمامی تراکم‌ها روندی صعودی نشان داد. در خاک سست (Dr=30%) به دلیل نفوذپذیری بالاتر، حتی در فشار ۵ بار نیز بهبود ظرفیت قابل توجهی (معادل ۲۱٫۰٪ تا ۲۴٫۶٪) حاصل شد؛ اما در خاک متراکم (Dr=70%)، فشار ۵ بار نفوذ ناکافی داشته و کمترین رشد باربری (۱۰٫۵٪ تا ۱۴٫۱٪) را به همراه داشت، در حالی که افزایش فشار به ۷ بار با غلبه بر تنش‌های جانبی، منجر به جهش باربری تا مرز ۵۰٫۰٪ گردید. بنابراین، فشار ۷ بار به عنوان فشار بهینه تزریق تعیین می‌شود.

۳. ارتفاع بهینه تزریق و نسبت فاصله بحرانی: ارزیابی ترازهای مختلف سوراخ تزریق بر روی شفت نشان داد که تراز $45\ cm$ بالاتر از صفحات بهینه‌ترین موقعیت است و منجر به بیشترین رشد باربری (۴۰٫۶٪ تا ۴۹٫۵٪) در تمامی تراکم‌ها گردید. در مقابل:

- در تراز نزدیک (H=15)، به دلیل همپوشانی و تداخل مخروط گسیختگی صفحات مهار با حباب دوغاب، نرخ افزایش باربری به حداقل مقدار خود (۱۱٫۲٪ تا ۱۲٫۶٪) تنزل یافت.
- در تراز دور (H=60)، کاهش بار بالاسری منجر به فرار و نشت هیدرولیکی دوغاب به سطح زمین در تراکم‌های ۳۰٪ و ۵۰٪ شد و تزریق ناموفق گردید.

۴. بهینه‌سازی حجم دوغاب و هندسه حباب: تزریق حجم ۴ لیتر دوغاب سیمانی موجب تشکیل حباب دوغاب متقارن با قطر مؤثر بین ۳۰ تا ۴۵ سانتی‌متر شد که با رفتار به عنوان یک «صفحه مهاری دوم مجازی»، بیشترین باربری را بدون القای گسیختگی نامتقارن فراهم آورد.

۵. توالی اجرایی بحرانی: نتایج موید آن است که تزریق دوغاب حتماً باید پس از بازشدگی کامل صفحات مهار انجام گیرد. اجرای زودهنگام تزریق، سبب قفل‌شدگی صفحات در بالادست شده و از توسعه مخروط گسیختگی مهار جلوگیری می‌کند. همچنین اعمال پیش‌تنیدگی پیش از گیرش کامل دوغاب (۱۰ روز)، موجب ایجاد ریزترک در حباب و جداشدگی آن از شفت مهار تحت کشش نهایی می‌شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶- منابع و مراجع

1. Singh B, Mistry B. A study on load capacity of horizontal and inclined plate anchors in sandy soils. Vol. 3. 2011;3:6914–22.
2. Jalali Moghadam M, Dastaran N, Zad A. Introducing expandable mechanical plate anchors for onshore and offshore anchoring. Mar Georesources Geotechnol. 2022;40:329–48. doi:10.1080/1064119X.2021.1894274
3. Zhuang X, Zong Z, Huang Y, Wang P. Analysis of the Installation Effect on the Axial Performance of Pressure-Grouted Helical Piles in Clay by Small-Scale Model Tests. Buildings. 2022;12:992. doi:10.3390/buildings12070992
4. Mansour MA, El Naggar MH. Optimization of grouting method and axial performance of pressure-grouted helical piles. Can Geotech J. 2022;59:702–14. doi:10.1139/cgj-2021-0093
5. Abrifam S, Zad A, Yazdi M, Nazariafshar J. Experimental evaluation of the effect of pullout velocity on the behavior of multi-plate anchors. Mar Georesources Geotechnol. 2025;43:1478–94. doi:10.1080/1064119X.2024.2414385
6. Amjadi M, Mohammadkhanifard HR, Tohidi A, Zad A. Comparing pull-out capacity of expandable anchors using discrete/coupled Eulerian element methods versus finite element technique. Mar Georesources Geotechnol. 2024;42:840–55. doi:10.1080/1064119X.2023.2228308
7. Mohammadkhanifard HR, Jalali Moghadam M, Zad A, Ramesht MH. Evaluating the behavior of expandable multi-plate mechanical anchors in granular soils. Mar Georesources Geotechnol. 2022;40:1205–23. doi:10.1080/1064119X.2021.1980638
8. Mohammadkhanifard H, Zad AA. DEM modeling of dynamic anchors with particles of different shapes and sizes. Mar Georesources Geotechnol. 2025;43:1339–54. doi:10.1080/1064119X.2024.2405176
9. Mohammadkhanifard HR, Zad A. Effect of the failure wedge on the pullout capacity of anchors with self-compaction plates. Mar Georesources Geotechnol. 2026;44:501–15. doi:10.1080/1064119X.2025.2509108
10. Ng C, Wang Y, Zhang L, editors. Physical Modelling in Geotechnics: Proceedings of the Sixth International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, 6th ICPMG ’06, Hong Kong, 4 - 6 August 2006 [Internet]. Taylor & Francis; 2006 [cited 2026 Jun 5]. Available from: http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/NOE0415415866 doi:10.1201/NOE0415415866
11. Peccin Da Silva A, Diambra A, Karamitros D, Chow SH. A non-associative macroelement model for vertical plate anchors in clay. Can Geotech J. 2021;58:1703–15. doi:10.1139/cgj-2020-0314
12. Perko HA. Helical piles: a practical guide to design and installation. Hoboken, N.J: J. Wiley; 2009. 512 p.
13. Wang D, Hu Y, Randolph MF. Keying of Rectangular Plate Anchors in Normally Consolidated Clays. J Geotech Geoenvironmental Eng. 2011;137:1244–53. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000477
14. Yang M, Aubeny CP, Murff JD. Behavior of Suction Embedded Plate Anchors during Keying Process. J Geotech Geoenvironmental Eng. 2012;138:174–83. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000582

15. Mohammadkhanifard, H. R., and Zad, A., "Pull-Out Capacity of Multi-Plate Expandable Anchors in Grouted Media: A CFD-DEM Study", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 43, No. 10, pp. 1–20, 2025. https://doi.org/10.1007/s10706-024-02970-7

16. AlHonati, Q., and Szendefy, J., "Post-Grouting Behaviour of Ground Anchors in Dense Cohesionless Soils: Field Observations and Theoretical Insights", Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 69, No. 4, pp. 1383–1392, 2025. https://doi.org/10.3311/PPci.42573

17. Zhuang, P. Z., Yue, H. Y., Song, X. G., Sun, R. J., Wu, J. Q., and Guan, Y. H., "Ultimate Pullout Capacity of Single Vertical Plate Anchors in Sand", Marine Georesources & Geotechnology, Vol. 40, No. 8, pp. 1004–1022, 2022. https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1950247

18. Zhuang, P. Z., Yue, H. Y., Song, X. G., Yang, H., Zhang, H. B., and Yu, H. S., "Pullout Behaviour of Inclined Shallow Plate Anchors in Sand", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 59, No. 2, pp. 239–253, 2022. https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0495

ACCEPTED MANUSCRIPT

19. Choudhary, A. K., and Dash, S. K., "Load-Carrying Mechanism of Vertical Plate Anchors in Sand", International Journal of Geomechanics, Vol. 17, No. 5, p. 04016116, 2017. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000813

ACCEPTED MANUSCRIPT