

بررسی آزمایشگاهی و عددی کارایی ریزشمع‌ها جهت تقویت خاکریزهای بلند راه‌آهن

مرتضی اسماعیلی* (دانشیار)

مرتضی قارونی نیک (استادیار)

فرید خیر (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، (پیاو ۱۳۹۳)
دوری ۲-۳۰، شماره ۱/۱، ص. ۷۲-۵۹

در این پروژه به منظور افزایش باربری استاتیکی و دینامیکی خاکریزهای بلند راه‌آهن، به بررسی چگونگی تقویت شیروانی‌های آن با استفاده از ریزشمع‌ها پرداخته شده است. بدین منظور در بخش اول با ساخت یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از خاکریز راه‌آهن متکی بر بستر ماسه‌یی با مقیاس ۱ به ۲۰ و در ادامه با انجام تعدادی آزمایش بارگذاری بر خاکریز تقویت شده با ریزشمع به بررسی کاربری این روش مقاوم‌سازی پرداخته شده است. سپس در حین انجام آزمایش‌های بارگذاری و با استفاده از ابزار دقیق، مقادیر نشست خاکریز و کرنش محوری ریزشمع اندازه‌گیری و در مرحله‌ی بعد مدلی عددی و سه بعدی طراحی و با استفاده از نتایج ابزاربندی آزمایشگاهی کالیبره شده است. در پایان، تحلیل حساسیت روی پارامترهای مختلف ریزشمع صورت گرفته و بهینه‌ترین چیدمان جهت تقویت خاکریزهای بلند راه‌آهن ارائه شده است.

واژگان کلیدی: خاکریزهای بلند راه‌آهن، ریزشمع، افزایش بار محوری، پایداری دینامیکی - استاتیکی، نشست سطحی خاکریز، کرنش محوری.

۱. مقدمه

یکی از مسائل بسیار حائز اهمیت در مدیریت تعمیر و نگهداری خطوط ریلی بالاستی، پایداری بستر و خاکریز راه‌آهن تحت تأثیر بارهای بهره‌برداری و محیطی است. این موضوع به ویژه در خاکریزهای بلند متکی بر بسترهای سست و با ظرفیت باربری ناچیز و همچنین مستعد نشست دارای اهمیت قابل ملاحظه‌یی است. از دیدگاه طراحی و همچنین تعمیر و نگهداری، اهمیت موضوع یادشده متوجه این موارد است:^[۱]

۱. خاکریزهای بلند راه‌آهن در محدوده‌ی بزرگ‌تر از ۵ متر به علت وزن قابل توجه خاکریز و در صورت عدم استفاده از مصالح مناسب در بدنه‌ی خاکریز، مستعد نشست‌های مختلف و به ویژه نشست خزشی هستند.
۲. خاکریزهای بلند به علت اینرسی بالا در شرایط زلزله، مستعد لغزش جانبی هستند.
۳. در شرایط افزایش بار محوری خطوط ریلی متکی بر سطح خاکریزهای بلند، امکان لغزش این خاکریزها وجود دارد.
۴. نشست خاکریزهای بلند متکی بر بسترهای سست، معمولاً موجب گسیختگی خاکریز و یا تغییر هندسه‌ی خط ریلی می‌شود.

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱۱/۱، اصلاحیه ۱۳۹۱/۴/۳۱، پذیرش ۱۳۹۱/۸/۱۶.

۵. از دیدگاه اصلاح مشخصات خاکریز و بستر در خطوط ریلی در حال بهره‌برداری، استفاده از روش‌های تثبیت خاکریز و بستر که موجب انسداد خط و قطع ترافیک نمی‌شوند، ارجحیت بیشتری دارند.^[۳-۱]

در میان روش‌های متنوع بهسازی خاک می‌توان تعدادی را به منظور پایداری بستر خطوط ریلی برشمرد که امکان اصلاح خط ریلی در حال بهره‌برداری را فراهم می‌آورند از آن جمله می‌توان به استفاده از ستون‌های سنگی در بسترهای رسی و سیلتی، روش اختلاط عمیق خاک، تزریق دوغاب با فشار بالا و همچنین استفاده از ریزشمع‌ها به صورت تکی و گروهی اشاره کرد. استفاده از این روش بهسازی در مطالعات و پروژه‌های راه و راه‌آهن به منظور پایداری بستر و خاکریز در برابر گسیختگی، همچنین کنترل نشست آنها تحت اثر بارهای بهره‌برداری و محیطی به کار گرفته شده است. برای نمونه می‌توان به مجموعه‌ی تحقیقات و مدل‌سازی‌های عددی صورت‌گرفته جهت تقویت خاکریز راه‌آهن گریس بای به وسیله‌ی ریزشمع‌های غیرمشبک با استفاده از نرم‌افزار Flac-۲D (۲۰۰۳)،^[۲] تعیین روش طراحی ریزشمع‌های مشبک جهت جلوگیری از لغزش شیروانی‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود (۱۹۸۹)،^[۵] بررسی سه بعدی رفتار لرزه‌یی ریزشمع‌های مورب به روش اجزاء محدود (۲۰۰۴)،^[۶] تحلیل دینامیکی فونداسیونی از ریزشمع در بستر و زیرسازی خاکریزها به روش اجزاء محدود (۲۰۰۹)،^[۷] شبیه‌سازی عددی جهت بررسی تأثیر وضعیت ابتدایی ماسه

۲. مشخصات مدل فیزیکی

۱.۲. مشخصات بستر و خاکریز

اتاقک بارگذاری دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران دارای ابعاد 2.5×2.5 با ارتفاع ۲ متر است. با توجه به انتخاب ماسه SP با دانه‌بندی متوسط به عنوان بستر و همچنین مشخصات مصالح SC به عنوان خاکریز، مجموعه از کنترل‌های عددی اولیه برای تعیین بیشینه ابعاد مناسب برای خاکریز صورت گرفته و در این راه معیار اصلی انتخاب ابعاد خاکریز، عدم تداخل سطح گسیختگی عمیق با دیواره‌های اتاقک قرار داده شد. با این بررسی نهایتاً مقیاس ساخت خاکریز برابر با ۱ به ۲۰ انتخاب شد. مشخصات مصالح بستر ماسه‌ای و خاکریز ماسه‌ای رس‌دار در جدول ۱ ارائه شده است. [۲۱-۲۳]

مطابق جدول ۱، مقادیر پارامترهای یادشده بر اساس آزمایش‌های مرتبط براساس آئین‌نامه‌ی ASTM استخراج شده است. این تذکر لازم است که برای اجرای بستر لایه لایه از ماسه مذکور با درصد رطوبت طبیعی ۷٪ و با عبور یک بار غلتک ۵۰ کیلوگرمی تراکم ۸۸٪ مطابق با آزمایش پراکتور اصلاح‌شده حاصل شده است. با توجه به عبور ۷ بار غلتک یادشده از روی مصالح خاکریز با درصد رطوبت بهینه ۱۱٪، تراکم پراکتور استاندارد برابر با ۹۲٪ حاصل شده است. اجرای لایه‌های بستر و خاکریز به‌طور متوالی با لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری صورت گرفته و در مجموع مطابق شکل ۱، بستر و خاکریز با هندسه‌ی موردنظر اجرا شده است. [۲۲-۲۴]

۲.۲. مشخصات ریزشمع‌ها

از دیدگاه آئین‌نامه‌ی طراحی خاکریز راه‌آهن مشتمل بر دو بخش است، که در بخش اول انتخاب مصالح مناسبی که بتواند الزامات تراکم، CBR و همچنین مدول کشسانی EV۲ را تأمین کند و در گام دوم با استفاده از این مصالح الزامات باربری و نشست نیز برآورده شود. در بخش دوم که عملاً منجر به تعیین هندسه‌ی خاکریز می‌شود، مسئله‌ی تأمین ظرفیت باربری از طریق کنترل پایداری شبروانی قابل ارزیابی خواهد

بر تست‌های المانی و اجرای ریزشمع با استفاده از نرم‌افزار Flac-۳D (۲۰۱۱)، [۸] بررسی ظرفیت باربری جانبی ریزشمع‌ها (۲۰۰۴)، [۹] چگونگی طراحی ریزشمع‌ها جهت پایداری سطح شیب‌دار با استفاده از نرم‌افزارهای تعادل حدی و اجزاء محدود (۲۰۱۰)، [۱۰] مطالعه‌ی رفتاری ریزشمع‌ها با استفاده از ابزاربندی آنها در هنگام انجام آزمایش‌های بارگذاری (۲۰۰۷)، [۱۱] طراحی ریزشمع جهت تقویت سد خاکی راک ران واقع در پسنیلوانیا (۲۰۰۴)، [۱۲] و در نهایت تحلیل کشسان خمیری سه‌بعدی رفتار لرزه‌ی ریزشمع‌های مورب و همچنین مطالعه‌ی تأثیر خمیری در برهم‌کنش لرزه‌ی خاک - ریزشمع (۲۰۱۱) [۱۳، ۱۴] اشاره کرد. به‌علاوه در مورد عملیات میدانی و کارگاهی می‌توان به پایداری سازی خاکریز شاهراه اصلی مندوسینو در کالیفرنیا با استفاده از ریزشمع‌های مشبک، [۱۵] مقاوم‌سازی خاکریز جاده‌ی میسوری توسط دیواره‌ی ریزشمع‌های منفرد، تقویت خاکریز جاده‌ی ایالتی ۴۰۲۳ واقع در پسنیلوانیا توسط ریزشمع‌های منفرد، [۱۵] مقاوم‌سازی سد خاکی راک ران واقع در پسنیلوانیا، [۱۶] مقاوم‌سازی خاکریز راه‌آهن گریمس بای در انتاریو کانادا با استفاده از ریزشمع‌های غیرمشبک، [۴] و طراحی و اجرای ریزشمع‌ها و میل‌های مهار دائم جهت تقویت سطح سست خاک [۱۶] اشاره کرد. در پایان نیز می‌توان به چند نمونه از پروژه‌های آزمایشگاهی از جمله بررسی رابطه‌ی بار-تغییرشکل در ریزشمع‌ها (۲۰۰۷)، [۱۷] بررسی تأثیر ریزشمع‌ها در کرنش برشی لرزه‌ی توده‌ی خاک تقویت‌شده (۲۰۰۴)، [۱۸] و بررسی تنش‌های پیوستگی نهایی در ریزشمع مشاهده‌شده در هنگام آزمایش‌های بارگذاری بر انواع رس و ماسه (۲۰۰۹) [۱۹] اشاره داشت. از طرف دیگر از بعد فنی و مهندسی به کاربرد ریزشمع‌ها در پایداری سازی بسترهای سست در دستورالعمل FHWA [۱] پرداخته شده است، به‌علاوه با نگاهی تخصصی به مقوله‌ی ژئوتکنیک خطوط ریلی، تثبیت خاکریزهای راه‌آهن توسط ریزشمع‌ها در استانداردهای UIC۷۱۹، UIC۷۲۲ [۲] نیز مورد توصیه قرار گرفته است.

از آنجا که مرور ادبیات فنی نشان‌دهنده‌ی آن است که در مقیاس آزمایشگاهی و عددی تحقیق جامعی بر روی رفتار ریزشمع‌های غیرمشبک (منفرد) مورد استفاده جهت پایداری سازی خاکریزهای بلند راه‌آهن با بسترهایی سست صورت نگرفته است؛ لذا، در این پژوهش با دو رویکرد آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار خاکریزهای مذکور متکی بر بستر ماسه‌ای پرداخته شده است.

در ابتدا مطالعاتی مقدماتی به منظور تعیین موقعیت قرارگیری ریزشمع‌ها نسبت به شبروانی خاکریز صورت پذیرفت که بر مبنای آن قرارگیری ریزشمع در پای خاکریز مناسب‌ترین حالت است. سپس در بخش آزمایشگاهی با استفاده از تجهیزات اتاقک بارگذاری دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران، بستر و خاکریز راه‌آهن با مقیاس ۱ به ۲۰ شبیه‌سازی و تحت تأثیر بارگذاری استاتیکی قرار گرفته است. در ادامه، با اجرای دو چیدمان پیشنهادی برای ریزشمع‌ها در پای خاکریز بارگسیختگی اندازه‌گیری شده است؛ و با توجه به ابزاربندی سطح خاکریز و همچنین ریزشمع‌ها، امکان اندازه‌گیری نشست سطحی بستر به‌علاوه کرنش محوری در ریزشمع‌ها فراهم آمده است. و نیز با ساخت مدل عددی سه‌بعدی مبتنی بر روش اجزاء محدود برای دو چیدمان پیشنهادی ریزشمع‌ها و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی مدل‌های عددی مذکور کالیبره شده‌اند، قابل توجه است که به‌طور کلی جهت کالیبراسیون مدل‌سازی عددی سه آزمایش فیزیکی در محیط آزمایشگاه، یکی بر خاکریز غیرمشبک و دو عدد دیگر بر خاکریزهای تقویت‌شده با ریزشمع، تعریف شده است. در بخش انتهایی نوشتار نیز با انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای هندسی ریزشمع اعم از قطر، طول، تعداد و فاصله، بهینه‌ترین وضعیت چیدمان جهت رسیدن به ضرایب اطمینان پایداری شبروانی تعیین شده است. [۲۰، ۲۱]



الف) نمایش چگونگی متراکم‌سازی بستر ماسه‌ای؛

ب) مراحل اجرای خاکریز در لایه‌های ۱۰ سانتی متری؛

ج) خاکریز تکمیل شده برای آزمایش بارگذاری شماره ۲.

شکل ۱. مراحل ساخت نمونه آزمایشگاهی بستر و خاکریز جهت انجام آزمایشات بارگذاری.

جدول ۱. مشخصات مصالح بستر ماسه‌یی و خاکریز ماسه‌یی رس‌دار. [۲۳ و ۲۴]

شماره‌ی آزمایش مربوط در استاندارد ASTM					
D ۱۵۵۶ - ۰۷	D ۰۶۹۸ - ۰۷ E ۰۱	D ۴۳۹۴ - ۰۸	D ۳۰۸۰ - ۰۴	D ۳۰۸۰ - ۰۴	
پارامتر مورد بررسی					
موقعیت توده‌ی خاک	زاویه‌ی اصطکاک	چسبندگی	مدول	وزن مخصوص	وزن مخصوص
	زهکشی شده	زهکشی شده	کشسانی	اشباع	غیراشباع
	$\phi' (^{\circ})$	(KN/m ²)	(KN/m ²)	(KN/m ³)	(KN/m ³)
خاک بستر (ماسه)	۲۸	۱	۱۷۰۱۰	۱۸	۱۵/۶
خاک خاکریز	۳۲	۲۵	۴۹۸۹۱	۲۰	۱۷/۶

جدول ۲. مشخصات فنی ریزشمع‌ها. [۲۵]

مشخصات فنی						
شماره‌ی چیدمان	جنس غلاف	مقاومت فشاری دوغاب	فشار تزریق	نسبت آب به سیمان	مدول کشسانی دوغاب	مدول کشسانی فولاد به‌کار
	ریزشمع	سیمان (MPa)	دوغاب (بار)	دوغاب سیمان	سیمان (MPa)	رفته در مفتول تسلیح (MPa)
یک و دو (آزمایش‌های دو و سه)	لاستیک نرم و شفاف	۳۴/۵	۲-۱/۵	۰/۵	۳۱۰۰۰	۱۵۰۲۵۰

جدول ۳. مشخصات هندسی ریزشمع‌ها در دو چیدمان پیشنهادی به منظور اجرای آزمایش‌های بارگذاری شماره‌ی دو و سه. [۱]

مشخصات هندسی						
شماره‌ی چیدمان	زاویه‌ی نسبت به‌امتداد قائم ($^{\circ}$)	تعداد در کل	تعداد در مقطع	فاصله‌ی مرکز به مرکز ریزشمع‌ها در طول خاکریز (cm)	قطر مفتول تسلیح (mm)	قطر ریز شمع با مدنظر قرارداد ناحیه‌ی نفوذ دوغاب (cm)
یک (آزمایش شماره‌ی دو)	۴۵	۲۴	۲	۲۰	۳/۷	۲/۵
دو (آزمایش شماره‌ی سه)	۴۵-۰	۳۲	۴	۳۳/۳۳	۳/۷	۲/۵

از آزمایش کششی فولاد بر مفتول تسلیح (ASTM E^{۸۸}M) و آزمایش فشاری تک‌محوری بر نمونه‌ی مکعبی به ابعاد ۵×۵×۵ cm^۳ از دوغاب سیمان (ASTM C^{۱۰۹}M) پارامترهای مربوط مطابق با جدول ۲ به‌دست آمد. [۲۵] پس از تعیین پارامترهای مذکور مشخصات هندسی ریزشمع‌ها مطابق با شرایط واقعی انتخاب شد (جدول ۳)، به‌علاوه قطر ریزشمع و مفتول تسلیح آن به ترتیب برابر با ۳۰ و ۳۲ میلی‌متر در مقیاس واقعی معادل با ۱۵ و ۳/۷ میلی‌متر در مقیاس آزمایشگاهی انتخاب شد (جهت معادل‌سازی آرماتور تسلیح به مفتول تسلیح اختلاف مدول کشسانی آنها نیز مد نظر قرار گرفت). [۳-۱]

شکل ۲، مدل ریزشمع اجراشده در آزمایشگاه و شکل ۳ چیدمان کلی شماره‌ی یک و دو را برای ریزشمع‌ها در محیط آزمایشگاه نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که به منظور انجام عملیات تزریق از دوغاب سیمان پرتلند تیپ دو با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و فشار تزریق ۱/۵ تا ۲ بار استفاده شده است. برای اجرای دقیق ریزشمع، ابتدا محل ریزشمع حفاری و سپس غلاف لاستیکی مشبک درون

بود که با کنترل این پارامتر شیب‌های کناری خاکریز مشخص خواهد شد. با توجه به آنکه به‌طور معمول شیب خاکریز ۱ به ۱/۵ انتخاب می‌شود، در این بخش هدف آن است که کنترل شود که آیا ضرایب اطمینان پایداری شیروانی تأمین خواهد شد یا خیر. مطابق با توصیه‌ی آئین‌نامه‌ی UIC۷۱۹ ضرایب اطمینان پایداری شیروانی متناظر با حالات مختلفی اعم از اعمال وزن خاکریز (شرایط ساخت)، اعمال سربار زنده ناشی از عبور وسیله‌ی نقلیه‌ی ریلی (شرایط بهره‌برداری) و همچنین شرایط اعمال زلزله بر وزن خاکریز را به ترتیب ۱/۵، ۱/۳ و ۱/۱ تعیین کرده است. از آنجا که در این تحقیق بارگذاری زنده با بارگذاری ناشی از جک با ظرفیت ۳۰ تن و به‌صورت استاتیکی اعمال می‌شود، لذا هدف آن خواهد بود که بارگسیختگی خاکریز تقویت‌نشده (خاکریز معمولی بدون مسلح‌کننده) با شرایط اعمال دو چیدمان پیشنهادی ریز شمع جهت پایداری‌سازی خاکریز مقایسه شود.

ابتدا نیاز به تعیین مشخصات فنی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی ریزشمع جهت انتخاب مشخصات هندسی مطابق با شرایط واقعی است، بدین منظور با استفاده



الف) سوراخ‌های غلاف؛ ب) کوبش غلاف؛ ج) پمپ تزریق؛

د) نصب کرنش سنج بر مفتول تسلیح؛ ه) لحظه‌ی تزریق دوغاب؛

واریز شمع‌های اجرا شده و سیم‌های خروجی کرنش سنج‌ها قبل از اجرای تیر سر شمع.

شکل ۴. نمایش اجرای ریزشمع‌ها.

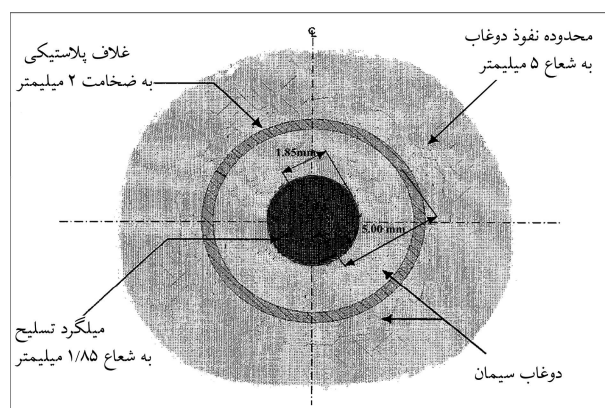


الف) رگه‌های تزریق دوغاب
مکانیکی خاک؛

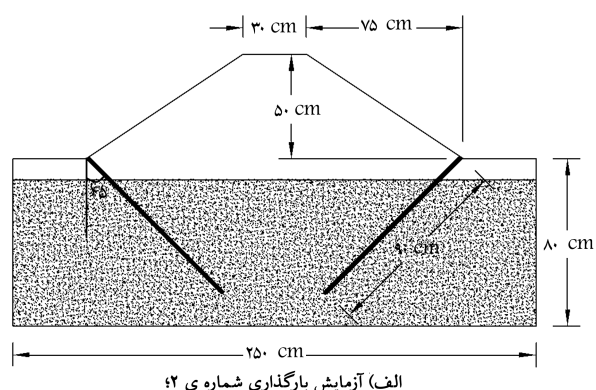


ب) نمایش شعاع نفوذ دوغاب به خاک اطراف.

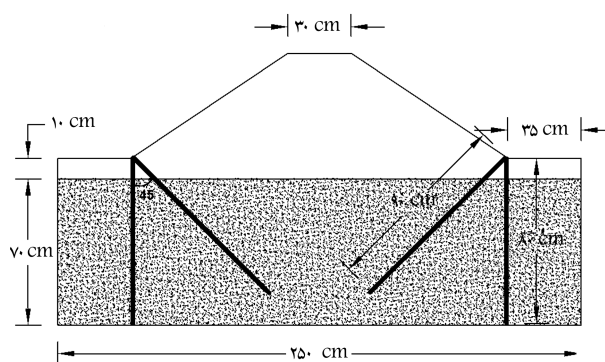
شکل ۵. نمایش چگونگی عملیات تزریق ریزشمع و تاثیر آن بر خاک اطراف.



شکل ۲. نمایش مقطع ریزشمع اجرا شده در محیط آزمایشگاه. [۱]



الف) آزمایش بارگذاری شماره ۲؛



ب) آزمایش بارگذاری شماره ۳.

شکل ۳. چیدمان ریزشمع‌ها.

آن قرار داده می‌شود، در گام بعد عملیات تزریق صورت می‌گیرد و سریعاً مفتول تسلیح درون ریزشمع جاگذاری می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵). در عین حال برای عملکرد یکپارچه‌ی ریزشمع‌ها تیر سرشمع با ابعاد 7×10 سانتی‌متر اجرا شده است. [۲۵، ۱]

۳.۲. تجهیزات ابزاربندی و بارگذاری مدل فیزیکی

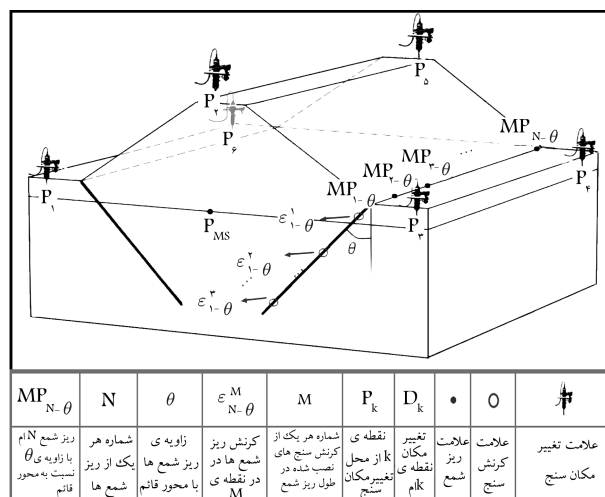
با توجه به این مسئله که در طول انجام آزمایش‌های بارگذاری موردنظر، نیاز به ابزاربندی مدل جهت کنترل میزان نشست خاکریز و سطح بستر همچنین تغییرشکل محوری ریزشمع‌ها خواهد بود، لذا لازم است نقاط کلیدی سطح خاکریز و همچنین ریزشمع ابزاربندی شوند. نتایج این پایش مدل فیزیکی در بخش‌های

جدول ۴. وضعیت ابزاربندی در هر یک از آزمایش‌های فیزیکی یک، دو و سه.

شماره‌ی	تعداد ردیف	نام ریزشمع‌هایی که در	شماره‌ی هریک از کرنش‌سنج‌های نصب‌شده در	نام نقاطی که تغییر
آزمایش	ریزشمع در یک	هر ردیف بر آنها	طول ریزشمع [فاصله‌ی کرنش‌سنج	مکان‌سنج بر آنها
فیزیکی	سمت خاکریز	کرنش‌سنج نصب شده است	مربوط تا ابتدای ریزشمع] (cm)	نصب شده است
۱	-	-	-	P۱ تا P۶
۲	۱	MP۱-۴۵, MP۶-۴۵, MP۱۲-۴۵	۱ [۳۰], ۲ [۵۰] و ۳ [۸۰]	P۱ تا P۶
۳	۲	MP۱-۰, MP۵-۰, MP۸-۰	۱ [۳۰], ۲ [۵۰] و ۳ [۸۰]	P۱ تا P۶
		MP۱-۴۵, MP۵-۴۵, MP۸-۴۵	۱ [۲۰], ۲ [۴۵] و ۳ [۷۰]	



شکل ۷. مدل فیزیکی اجراشده برای آزمایش شماره‌ی سه به‌صورت ابزاربندی‌شده، قبل از شروع بارگذاری استاتیکی.



شکل ۶. تصویری از چگونگی ابزاربندی مدل‌های فیزیکی.

۳. نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری بر مدل‌های فیزیکی

پس از اتمام ساخت مدل‌های فیزیکی و نصب ابزار موردنظر که جزئیات آنها در بخش ۲ نشان داده شد، روند بارگذاری با جک ۳۰ تنی با گام بارگذاری ۲۵۰ کیلوگرم آغاز شد و این رویه تا افت ناگهانی گنج کنترل فشار متصل به سیستم هیدرولیک جک ادامه داده شد. در عین حال روند تغییر شکل خاکریز تا مشاهده‌ی آثار سطح لغزش از یک سو و از سوی دیگر روند ایجاد کرنش در مفتول تسلیح ریزشمع‌ها نیز مورد پایش قرار گرفت.

۱.۳. نمایش چگونگی گسیختگی خاکریز به‌صورت تصویری

شکل‌های ۸ تا ۱۰ شرایط گسیختگی هر سه مدل، چگونگی نشست، سطح گسیختگی خاکریز و همچنین بلندشدگی بستر واقع در طرفین خاکریز و در مجموع شرایط کلی مدل‌ها در حین و پس از اتمام آزمایش را نشان می‌دهد. مقادیر بار گسیختگی، بلندشدگی طرفین خاکریزها و همچنین نشست تاج خاکریز برای مدل‌های موردنظر در جدول‌های بخش‌های بعدی خلاصه شده است.

۲.۳. مقادیر بار گسیختگی مدل‌های فیزیکی

در حین عملیات بارگذاری مقدار تغییر شکل تاج خاکریز توسط درجه‌بندی صورت‌گرفته بر پلکسی‌گلاس به ازای ۱ تن افزایش بار در گنج آنالوگ نصب‌شده بر پمپ هیدرولیک جک بارگذاری قرائت و نمودار بار- تغییر شکل تاج خاکریز ترسیم شد (شکل ۱۱). همچنین مقادیر بار وارده در آستانه‌ی گسیختگی خاکریزها در جدول ۵ درج شده است.

آنی به منظور کالیبراسیون مدل عددی سه بعدی خاکریز مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

بر این اساس و مطابق با پیش‌بینی اولیه، مقادیر تغییر شکل‌ها و کرنش‌های مدل آزمایشگاهی مبتنی بر روابط تحلیلی به ترتیب دو تغییر شکل سنج CDP۱۰۰، CDP۵۰ برای تعیین نشست تاج خاکریز در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به این نکته که کرنش‌سنج‌ها بر مفتول تسلیح ریزشمع نصب می‌شوند، از کرنش‌سنجی مخصوص FLA-۶-۱۱ با ابعاد ۲×۵/۵ cm استفاده شده است. این تذکر لازم است که تمامی ابزار یادشده توسط شرکت ژاپنی Tokyo Sokki kenkyujo تولید می‌شوند (مدل دیتالاگ و نرم‌افزار وابسته به آن به ترتیب TMR۲۱۲ و TMR۲۲۰ است). [۲۶]

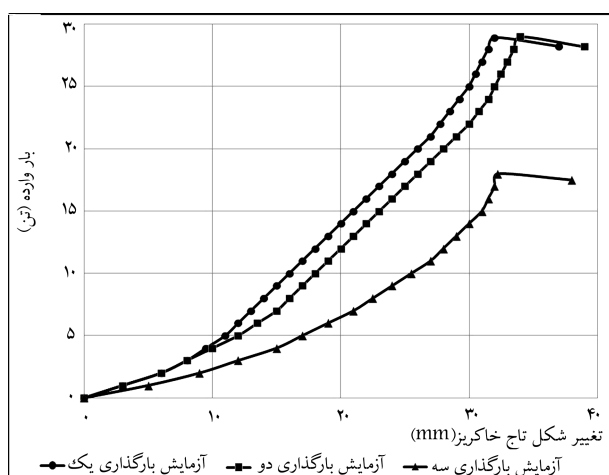
در شکل ۶، موقعیت ابزار دقیق مورد استفاده برای مدل‌های فیزیکی اجراشده در آزمایش‌های بارگذاری یک، دو، و سه نمایش داده شده است، با توجه به شکل ۶، وضعیت ابزاربندی در هریک از آزمایش‌های یک، دو، و سه مطابق با جدول ۴ است.

جهت اعمال بار بر مدل فیزیکی از یک جک بارگذاری ۳۰ تن متشکل از شلنگ هیدرولیک، پمپ هیدرولیک، سیلندر پیستون و گنج آنالوگ استفاده شده است، همچنین با توجه به تمرکز بار حاصل از جک به منظور توزیع مناسب بار بر سطح خاکریز، انتهای پیستون بر یک پروفیل فولادی IPE۲۰ که بال تحتانی آن با ورق‌ی به ابعاد ۲۴۰×۳۰ cm نیز تقویت شده استفاده شده است. شکل ۷، برای نمونه مدل اجراشده برای آزمایش شماره‌ی سه را در حالت ابزاربندی‌شده و آماده‌ی بارگذاری نشان می‌دهد. [۲۰]



- (الف) نمایش مقطع خاکریز قبل از شروع آزمایش؛
 (ب) نمایش نشست کاسه پی لایه های بستر و خاکریز بعلاوه ی تورم شیروانی های آن از هر دو سمت؛
 (ج) نمایش تورم و قاج خوردگی شیروانی خاکریز در سمت راست (در هر دو سمت مشاهده شده است)؛
 (د) ترک خوردگی و آسیب وارده به تیر سر شمع به دلیل فشار ناشی از بارگذاری توسط شیروانی خاکریز.

شکل ۱۰. مراحل انجام آزمایش بارگذاری شماره ۳ بر خاکریز تقویت شده با چیدمان ریزش‌شماره ۲



شکل ۱۱. نمودار بار وارده - تغییرشکل در تاج خاکریز.

جدول ۵. میزان باربری خاکریز در لحظه ی گسیختگی.

شماره ی آزمایش			
۳	۲	۱	
۴۰۱/۳۹	۴۰۲/۷۷	۲۵۴/۱۶	مقدار بار گسیختگی
(۲۸/۹ تن)	(۲۹ تن)	(۱۸/۳ تن)	(KN/m²)

جدول ۶. تغییرشکل نقاط مختلف از خاکریز و بستر در لحظه ی گسیختگی (برای مشاهده ی موقعیت نقاط ابزاربندی شده به شکل ۶ مراجعه شود).

نقطه ی مورد نظر (mm)							شماره ی آزمایش
DMS	D۶	D۵	D۴	D۳	D۲	D۱	
۱۸/۵	-۸/۷۵	۳۲	-۱۵	-۱۵	۳۲/۷۵	-۱۰	۱
۲۲	-۲	-۳۳/۷۵	-۱/۵	-۱/۵	۳۴	-۲	۲
۱۷/۵	-۱/۷۵	۳۲/۵	-۱	-۱	۳۲	-۱/۵	۳



- (الف) نمایش خاکریز ساخته شده قبل از انجام عملیات تکمیلی و نصب تغییر مکان سنج ها؛
 (ب) مشاهده ی ترک ایجاد شده در شیروانی سمت راست خاکریز در هنگام اعمال بار ۱۲ تن (دقیقه ی ششم از بارگذاری)؛



- (ج) تصویری از ترک حاصل از گسیختگی ایجاد شده در سمت راست خاکریز؛
 (د) نمایش گسیختگی سمت راست خاکریز و ترک های حاصل از آن.

شکل ۸. مراحل انجام آزمایش بارگذاری شماره ۱ بر خاکریز تقویت نشده



- (الف) نمایش مقطع خاکریز قبل از شروع آزمایش؛
 (ب) مشاهده ی تورم در شیروانی خاکریز در حین افزایش بار (وجود ریز شمع مانعی جهت رانش شیروانی خاکریز می باشد)؛



- (ج) نمایش نشست کاسه پی لایه های بستر و خاکریز بعلاوه ی تورم شیروانی های آن از هر دو سمت (همانطور که مشهود است وجود ریزش مانع از حرکت لایه های بستر به کناره ها و لغزش شیروانی خاکریز شده است و تنها نشست در میانه ی بستر قابل قبول است)؛
 (د) نمایش تورم و قاج خوردگی شیروانی خاکریز در سمت راست (در هر دو سمت مشاهده شده است).

شکل ۹. مراحل انجام آزمایش بارگذاری شماره ۲ بر خاکریز تقویت شده با چیدمان ریزش‌شماره ۱

۳.۳. تغییرشکل نقاط مختلف خاکریز

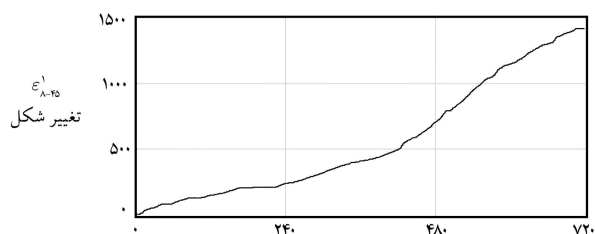
بلندشدگی طرفین بستر خاکریزها و همچنین نشست تاج خاکریز برای هر سه مدل در جدول ۶ خلاصه شده است. همچنین نمونه یی از خروجی های تغییرمکان سنج CDP ثبت شده با نرم افزار ۷۲۰۰-TMR در شکل ۱۲ آمده است.^[۲۶] با توجه به نمودار تغییرشکل- زمان در شکل ۱۲ می توان رفتار کلی مدل فیزیکی

دلیل وجود ریزشمع‌ها، انتقال نیرو و حرکت لایه‌های خاک به کناره‌های بستر بسیار ناچیز است و از لغزش شیروانی ممانعت به عمل می‌آورد و فقط نشست کاسه‌یی در لایه‌های میانی خاکریز و بستر مشاهده می‌شود (شکل‌های ۹ و ۱۰ ب).

۴.۳. مقادیر کرنش اندازه‌گیری شده در ریزشمع‌ها حاصل از بارگذاری مدل‌های فیزیکی

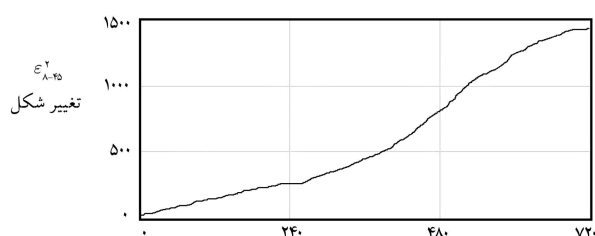
مقادیر کرنش ریزشمع‌ها توسط کرنش‌سنج‌های FLA-۶-۱۱ اندازه‌گیری و در جدول ۷ درج شده است، همچنین شکل ۱۳، نمونه‌ی خروجی‌های این کرنش‌سنج ثبت شده با نرم‌افزار TMR-۷۲۰۰ را برای ریزشمع شماره‌ی MP۸-۴۵ در سمت راست خاکریز آزمایش شماره‌ی سه نمایش می‌دهد. [۲۶]

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشهود است، تا دقیقه‌ی پنجم از بارگذاری خاکریز افزایش کرنش در ریزشمع‌ها شدت کمتری دارد و علت این امر ایجاد تراکم در لایه‌های خاکریز و میانه‌ی بستر است؛ اما پس از ایجاد تراکم مناسب در نقاط مذکور، لایه‌های بستر تمایل به حرکت به کناره‌ها را دارند و با ممانعت گروه ریزشمع‌ها مواجه می‌شوند و در نتیجه کرنش ریزشمع با شدت بیشتری افزایش می‌یابد؛ در نهایت نیز هنگام گسیختگی خاکریز، بار وارده از لایه‌های خاک به ریزشمع‌ها قطع می‌شود و مقدار کرنش ثابت می‌ماند.



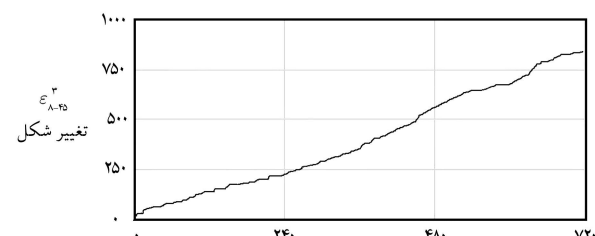
زمان اندازه‌گیری (S)

الف) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۱ از طول ریز شمع؛



زمان اندازه‌گیری (S)

ب) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۲ از طول ریز شمع؛



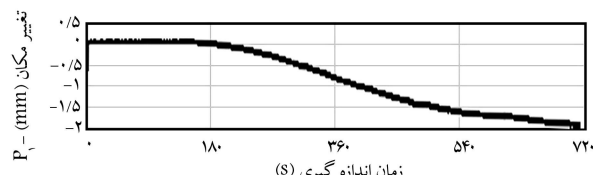
زمان اندازه‌گیری (S)

ج) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۳ از طول ریز شمع .

(برای مشاهده‌ی موقعیت کرنش‌سنج‌ها به شکل ۶ مراجعه شود)

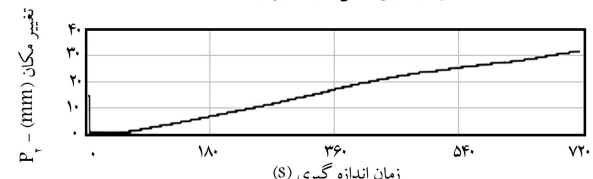
شکل ۱۳. نمایش مقادیر کرنش برای ریزشمع مایل هشتم در آزمایش بارگذاری شماره‌ی سه در سمت راست خاکریز.

شماره‌ی دو را در حین عملیات بارگذاری بررسی کرد، بدین منظور فقط کافی است شیب خطوط تغییرشکل را در بازه‌های زمانی مختلف مورد ارزیابی قرار داد. همان‌طور که مشهود است، در ۵ دقیقه‌ی ابتدایی شدت نشست در نقاط ۲ و ۵ در تاج خاکریز بیشتر بوده و این امر به علت ایجاد تراکم در لایه‌های خاکریز و میانه‌ی بستر است، در نتیجه انتقال نیرو و تبعاً تورم در نقاط ۱، ۳، ۴ و ۶ واقع در کناره‌های بستر شدت کمتری دارند، اما پس از دقیقه‌ی پنجم به علت ایجاد تراکم مناسب در لایه‌های خاکریز و میانه‌ی بستر شدت نشست در تاج خاکریز کاهش و با انتقال نیرو به کناره‌های بستر مقدار تورم در این نقاط افزایش می‌یابد. البته در مجموع به



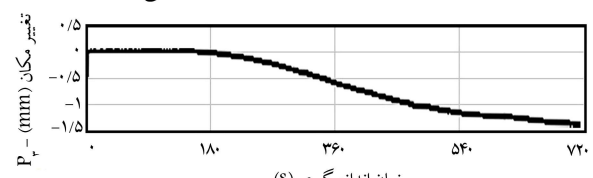
زمان اندازه‌گیری (S)

الف) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۱؛



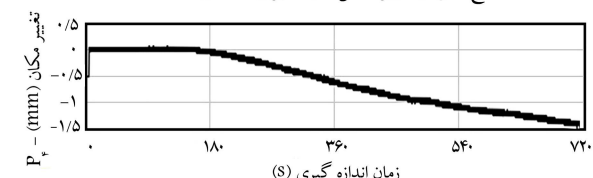
زمان اندازه‌گیری (S)

ب) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۲ از طول ریز شمع؛



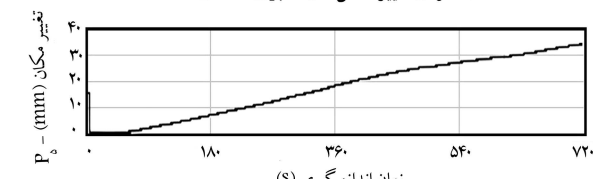
زمان اندازه‌گیری (S)

ج) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۳؛



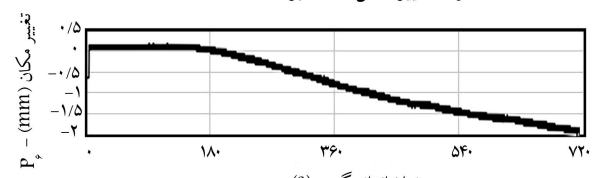
زمان اندازه‌گیری (S)

د) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۴؛



زمان اندازه‌گیری (S)

ه) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۵؛



زمان اندازه‌گیری (S)

و) نمودار تغییر شکل - زمان برای نقطه‌ی ۶.

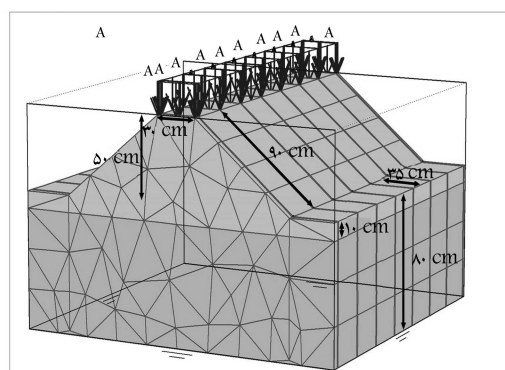
(برای مشاهده‌ی موقعیت نقاط به شکل ۶ مراجعه شود)

شکل ۱۲. نمایش خروجی نرم‌افزار TMR۷۲۰۰ و چگونگی تغییرشکل نقاط مختلف خاکریز در حین انجام آزمایش بارگذاری شماره‌ی دو.

جدول ۷. مقادیر کرنش محوری ریزش‌های ثبت شده با کرنش سنج‌های ۱۱-۶-FLA در طول آزمایش (برای بررسی شماره‌ی ریزش‌ها و موقعیت نقاط کرنش سنجی شده به شکل ۶ مراجعه شود).

کرنش ریزش‌ها در سمت چپ مقطع خاکریز (میکرواسترین)			کرنش ریزش‌ها در سمت راست مقطع خاکریز (میکرواسترین)			آزمایش دو
۵۱-۲۵	۴۵-۴۵	۴۵-۴۵	۵۱-۲۵	۴۵-۴۵	۴۵-۴۵	
۱۴۰۱	۱۴۱۱	۱۱۶۸	۱۴۰۵	۱۳۲۷	۱۱۲۰	M= ۱
۱۷۳۲	۱۷۸۱	۱۴۲۵	۱۷۸۰	۱۶۹۲	۱۳۲۷	M= ۲
۹۶۲	۱۰۳۳	۸۶۲	۹۷۸	۱۰۲۱	۸۱۱	M= ۳

آزمایش سه						آزمایش سه
۴۵-۴۵	۴۵-۴۵	۴۵-۴۵	۴۵-۴۵	۴۵-۴۵	۴۵-۴۵	
۱۲۷۹	۱۱۰۱	۱۶۵۸	۱۸۷۰	۱۳۱۱	۱۳۵۰	M= ۱
-۶۴۲	۱۶۹۳	-۷۲۹	۲۵۴۰	۸۰۹	۱۹۶۰	M= ۲
-۴۱۹	۸۹۵	-۴۸۹	۱۳۲۰	-۴۶۰	۱۱۸۰	M= ۳



شکل ۱۴. نمایش هندسه‌ی مدل، چگونگی المان‌بندی و شرایط مرزی در نرم‌افزار Plaxis ۳D مطابق با هر سه مدل فیزیکی.

همچنین شرایط مرزی با توجه به صلب بودن دیواره‌های اتاقک بارگذاری به صورت ثابت فرض شده است. برای مشاهده‌ی هندسه‌ی مدل، چگونگی المان‌بندی و شرایط مرزی به شکل ۱۴ مراجعه شود: [۲۷]

۲.۴. مشخصات مصالح

مشخصات مصالح مورد استفاده برای شبیه‌سازی خاکریزهای مربوطه مطابق با پارامترهای جداول ۱ و ۲ در نرم‌افزار Plaxis ۳D تعریف شده است. همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز اشاره شد، پارامترهای مربوط به خاک برای حالت زهکشی‌شده‌ی مصالح و با استفاده از آزمایش‌های درج شده در استاندارد $\phi = 40^\circ$ ASTM Volume D از جمله: برش مستقیم، تراکم پراکتور، تعیین چگالی نسبی در محل و بارگذاری صفحه به دست آمده‌اند. همچنین جهت تعیین مشخصات فنی ریزش‌ها نیز از آزمایش کششی فولاد، آزمایش فشاری دوغاب و آزمایش تزریق در ظرف مخصوص استفاده شده است.

۳.۴. روش بارگذاری و تحلیل

با توجه به نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های فیزیکی، مقدار تقریبی بارگسیختگی خاکریز در مدل‌های عددی نیز قابل پیش‌بینی است؛ براین اساس طریقه‌ی بارگذاری افزایش یافته در نرم‌افزار Plaxis ۳D به گونه‌ی تعریف شده است که این بار تا رسیدن به حد گسیختگی خاکریز افزایش یابد و سپس ثابت بماند. طبق این روش، مقادیر بار

در بخش بعد با عنایت به مقادیر به دست آمده برای نشست و کرنش‌ها از آزمایش‌های بارگذاری، مدل عددی سه بعدی به روش اجزاء محدود توسعه داده شده است و براساس نتایج مدل آزمایشگاهی کالیبره می‌شود، در عین حال میزان کارایی چیدمان‌های پیشنهادی برای ریزش‌ها در مقایسه با مدل فیزیکی بدون مصالح‌کننده مورد ارزیابی قرار داده خواهد شد.

۴. مدل‌سازی سه بعدی خاکریز به روش اجزاء محدود

در این بخش از تحقیق با توجه به نتایج حاصل از سه آزمایش بارگذاری بر مدل‌های فیزیکی، سه مدل عددی مبتنی بر روش اجزاء محدود توسعه داده شده است. هدف از این مدل‌سازی عددی نیل به این اهداف است:

۱. مقایسه و کالیبراسیون مدل‌های عددی براساس اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده از نتایج آزمایش‌های بارگذاری (مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی در آستانه‌ی گسیختگی خاکریز با خروجی‌های ثبت شده در لحظه‌ی گسیختگی مدل فیزیکی).
 ۲. بررسی کارایی چیدمان‌های پیشنهادی با توجه به: الف) مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی مدل‌های فیزیکی دو و سه، ب) تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکریز در مدل کالیبره‌شده‌ی عددی برای دو آزمایش فیزیکی دو و سه و مقایسه‌ی آن با ضریب اطمینان آیین‌نامه‌ی، که با استفاده از بررسی‌های انجام شده، دیدی کلی در رابطه با ضریب اهمیت پارامترهای هندسی مختلف ریزش به دست می‌آید (تا از این طریق عملیات تحلیل حساسیت در مرحله‌ی بعد با گام‌های کمتری از آزمون و خطا صورت پذیرد).
 ۳. تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ریزش، تعیین ضریب اهمیت پارامترها و تأثیر آنها در تأمین ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکریز.
- در این پژوهش تمامی شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار Plaxis ۳D انجام می‌شود و در ادامه، مراحل مدل‌سازی عددی سه بعدی با نرم‌افزار مربوطه به تفصیل شرح داده شده است.

۱.۴. هندسه‌ی مدل، المان‌بندی، و شرایط مرزی

مدل اشاره شده به صورت سه بعدی^۱ و با استفاده از المان‌های منشوری ۱۵ گرهه‌ی سه‌گوش^۲ در نرم‌افزار Plaxis ۳D تعریف شده است، مشخصات مش‌بندی آن عبارتند از: تعداد المان‌ها: ۲۴۲۵، تعداد گره‌ها: ۷۴۲۴ و تعداد نقاط تنش: ۱۴۵۵،

گسیختگی برای مدل‌های عددی یک، دو، و سه به ترتیب برابر با $۴۰۴/۱۷$ ، $۲۵۸/۳$ و $۴۰۴/۱۷$ کیلو نیوتن بر متر مربع به دست آمد. قابل توجه است که مدل‌های مربوط مبتنی بر روش اجزاء محدود رفتار می‌کنند، همچنین در روند تحلیل عددی رفتار مصالح خاکریز و بسترکشیان خمیری با معیار خمیری موهر-کولمب و سایر اجزای سازه‌بی خط ریلی و ریزشمع‌ها به صورت کشسان خطی در نظر گرفته شده‌اند. [۲۷]

۴.۴. مقایسه‌ی نتایج تحلیل مدل‌های عددی و آزمایشگاهی

پس از تحلیل مدل‌های عددی جهت کالیبراسیون آنها، خروجی‌های به دست آمده با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند، بدین منظور ابتدا میزان باربری خاکریز، سپس تغییرشکل‌های نقاط مختلف خاکریز و بستر و در نهایت کرنش محوری ریزشمع‌ها کنترل شد.

۱.۴.۴. مقایسه‌ی نتایج بارگسیختگی خاکریز

مقادیر بارگسیختگی خاکریزها حاصل از مطالعات عددی و فیزیکی در جدول ۸ درج شده است، اختلاف ناچیز بین مقادیر مذکور اثباتی بر صحت مدل‌سازی عددی و در نتیجه کالیبراسیون آن است.

۲.۴.۴. کنترل تغییرشکل نقاط مختلف خاکریز و بستر حاصل از تحلیل عددی

همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز گفته شد، در طول مدت انجام آزمایش‌های بارگذاری، مقادیر تغییرشکل نقاط مختلف بستر و خاکریز با استفاده از تغییرمکان‌سنج مربوطه اندازه‌گیری شد، در این بخش خروجی‌های حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در نقاط مذکور با یکدیگر مقایسه و تطبیق نتایج بررسی می‌شود. همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، مطابقت نسبی نتایج در نقاط مربوطه دلیلی دیگر بر صحت مدل‌سازی عددی است. این تذکر لازم است که پس از اتمام تحلیل عددی با نرم‌افزار جدول‌های تغییرشکل، تمامی نقاط و گرہ‌ها استخراج و بر مبنای مختصات نقاط موردنظر مقادیر تغییرشکل‌ها ثبت شده است.

جدول ۸. کنترل میزان باربری خاکریز در لحظه‌ی گسیختگی.

نوع مدل	شماره‌ی مدل		
	میزان باربری مدل یک (KN/m^2)	میزان باربری مدل دو (KN/m^2)	میزان باربری مدل سه (KN/m^2)
عددی	۲۵۸/۳	۴۰۴/۱۷	۴۰۴/۱۷
فیزیکی	۲۵۴/۱۶	۴۰۲/۷۷	۴۰۱/۳۹

جدول ۹. کنترل تغییرشکل نقاط مختلف از خاکریز و بستر در لحظه‌ی گسیختگی (برای مشاهده‌ی موقعیت نقاط ابزاربندی شده به شکل ۶ مراجعه شود).

شماره‌ی آزمایش و نوع مدل	تغییر مکان نقاط مختلف (mm)						
	DMS	D۶	D۵	D۴	D۳	D۲	D۱
۱ عددی	-۱۱/۵	۲۸/۵	-۱۸	-۱۷/۵	۲۹	-۱۲	۲۰
۱ فیزیکی	-۱۰	۳۲/۷۵	-۱۵	-۱۵	۳۲	-۸/۷۵	۱۸/۵
۲ عددی	-۳	۳۸	-۳/۵	-۳/۳	۳۸	-۲/۸	۲۲/۵
۲ فیزیکی	-۲	۳۴	-۱/۵	-۱/۵	۳۳/۷۵	-۲	۲۲
۳ عددی	-۲/۷	۳۵/۷۵	-۲/۵	-۲/۵	۳۶	-۲/۸	۲۰
۳ فیزیکی	-۱/۵	۳۲	-۱	-۱	۳۲/۵	-۱/۷۵	۱۷/۵

۳.۴.۴. کنترل کرنش محوری در ریزشمع‌ها حاصل از تحلیل عددی

با توجه به شکل ۶ و جدول ۴، موقعیت نقاطی از هر ریزشمع که کرنش‌سنج بر آنها نصب شده مشخص است، به گونه‌ی که در آزمایش شماره‌ی دو، ۶ ریزشمع و در آزمایش شماره‌ی سه، ۱۲ ریزشمع هر کدام در سه نقطه کرنش‌سنجی شده‌اند، از طرف دیگر مقادیر کرنش با استفاده از روابط مقاومت مصالح و خروجی‌های نرم‌افزار Plaxis ۳D از جمله لنگر، برش و نیروی محوری ریزشمع‌های مذکور در نقاط مربوطه محاسبه شده است و به منظور کالیبراسیون مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مذکور مقایسه شد (جدول ۱۰).

چنان‌که در جدول ۱۰ آمده است، مقادیر کرنش در نقاط مورد بررسی اختلافات ناچیزی دارند و این امر اثباتی بر مدل‌سازی عددی و تحلیل صورت‌گرفته بر آن است. از نکات قابل توجه دیگر که بیانگر دقت کلیه‌ی عملیات آزمایشگاهی و عددی است، اختلاف ناچیز مقادیر کرنش ریزشمع‌ها در سمت چپ و راست خاکریز است (تقارن در انتخاب ریزشمع‌ها در هر دو آزمایش دو و سه رعایت شده است)؛ همچنین لازم به ذکر است که بزرگی مقادیر کرنش‌ها با توجه به مقیاس مدل و بار وارده، مورد انتظار است.

۴.۴.۴. تعیین مقادیر ضریب اطمینان پایداری شیروانی با توجه به

چیدمان‌های پیشنهادی ریزشمع

در این بخش به منظور تعیین معیاری مناسب جهت عملیات تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی ریزشمع‌ها، نیاز به تعیین مقدار ضریب اطمینان پایداری شیروانی برای چیدمان‌های پیشنهادی یک و دو است، تا بر مبنای مقدار ضریب اطمینان حاصل و کنترل آن با ضریب اطمینان مجاز آیین‌نامه‌ی لزوم تقویت یا تقلیل پارامترهای هندسی به منظور افزایش یا کاهش ضریب اطمینان به منظور رسیدن به چیدمان بهینه (ضریب اطمینانی برابر با مقدار مجاز یعنی $۱/۳$) به دست آید. بدین منظور ابتدا لازم به تشریح چگونگی محاسبه‌ی ضریب اطمینان با نرم‌افزار Plaxis ۳D است. همان‌طور که می‌دانید ضریب اطمینان در این مبحث از مکانیک خاک بیانگر نسبت بین مقاومت برشی واقعی به کمینه‌ی مقاومت برشی محاسبه‌شده برای برقراری تعادل در خاکریز است، بر این اساس با توجه به شرایط استاندارد کولمب می‌توان گفت:

$$\text{Safty Factor} = (c - \sigma_n \cdot \tan \varphi) / (c_r - \sigma_n \cdot \tan \varphi_r) \quad (۱)$$

که در آن، φ و c پارامترهای مقاومت برشی ورودی، σ_n مؤلفه‌ی تنش حقیقی نرمال، φ_r و c_r پارامترهای کمینه‌ی مقاومت برشی لازم برای برقراری تعادل هستند.

مطالب اشاره‌شده پایه‌ی روش محاسبه‌ی ضریب اطمینان در نرم‌افزار ۳D Plaxis با عنوان Phi-c-Reduction است، بدین منظور چسبندگی و تانژانت زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در نسبت یکسان کاهش می‌یابند (رابطه‌ی ۲):

$$c/c_r = \tan \varphi / \tan \varphi_r = \Sigma M_{s.f} \quad (۲)$$

مقدار کاهش پارامترهای مقاومت برشی توسط ضریب افزایشدهنده‌ی $\Sigma M_{s.f}$ کنترل می‌شود، این پارامترها در یک روش گام به گام تا رسیدن به آستانه‌ی گسیختگی افزایش می‌یابند و در نتیجه، ضریب اطمینان به عنوان مقدار $\Sigma M_{s.f}$ در لحظه‌ی گسیختگی تعریف می‌شود، که بیانگر مقدار ثابتی در برگزیده‌ی تعداد گام‌های بارگذاری‌های متوالی کمتر یا بیشتر از این مقدار در آستانه‌ی گسیختگی است. [۲۸]

بر مبنای این تئوری در شکل ۱۵، نمودارهای مقادیر ضریب اطمینان گسیختگی شیروانی برای هر سه حالت از مدل‌سازی خاکریز نمایش داده شده است، همچنین با مقایسه‌ی دو چیدمان مربوط، دیدی کلی در رابطه با ضریب اهمیت هر یک از پارامترهای هندسی به منظور تحلیل حساسیت آنها با کمینه‌ی تعداد گام در روش

جدول ۱۰. کنترل مقادیر کرنش محوری ریزش‌ها حاصل از تحلیل عددی آزمون‌های دو و سه با نتایج آزمایشگاهی (برای بررسی شماره‌ی ریزش‌ها و موقعیت نقاط کرنش‌سنجی شده به شکل ۶ مراجعه شود).

کرنش ریزش‌ها در سمت راست مقطع خاکریز (میکرواسترین)						کرنش ریزش‌ها در سمت چپ مقطع خاکریز (میکرواسترین)					
آزمایش دو		E۱-۲۵		E۶-۲۵		E۱۲-۲۵		E۱-۲۵		E۶-۲۵	
عددی	M=۱	۱۱۵°	۱۴۲°	۱۴۲°	۱۱۰°	۱۳۵°	۱۴۰°	عددی	M=۲	۱۴۲°	۱۷۸°
		۱۱۲°	۱۳۲۷	۱۴۰۵	۱۱۶۸	۱۴۱۱	۱۴۰۱				
فیزیکی	M=۳	۸۵°	۱۰۵°	۹۵°	۸۵°	۱۰۴°	۱۰۰۰	عددی	M=۳	۸۱۱	۱۰۲۱
		۸۱۱	۱۰۲۱	۹۷۸	۸۶۲	۱۰۳۳	۹۶۲				
آزمایش سه											
		E۱-۲۵		E۵-۲۵		E۸-۲۵		E۵-۲۵		E۱-۲۵	
عددی	M=۱	۱۳۹۹	۷۱°	۱۸۲۱	۹۸°	۱۴۰۸	۷۱°	عددی	M=۲	۱۶۰۹	۲۸°
		۱۴۴۰	۸۴۲	۱۸۵۰	۹۴°	۱۳۰۰	۸۱°				
فیزیکی	M=۳	۹۱۷	۳۰۰°	۱۱۳۸	۲۴°	۸۵۱	۲۸°	عددی	M=۳	۹۰۰	۲۸°
		۹۰۰	۲۸°	۲۵۶	۸۱۵	۲۸۴	۱۱۸°				

مجموعه‌یی از عملیات تحلیل حساسیت بر مبنای آنها آغاز می‌شود؛ به علاوه مقایسه‌ی صورت‌گرفته بیانگر این امر است که با توجه به حجم کمتر مصالح مصرفی به صورت قابل ملاحظه در چیدمان شماره‌ی یک، این چیدمان به حالت بهینه نزدیک‌تر است.

۵. تحلیل حساسیت بر روی مشخصات هندسی ریزش‌ها جهت تعیین بهینه‌ترین چیدمان به منظور کسب ضریب اطمینان پایداری شیروانی

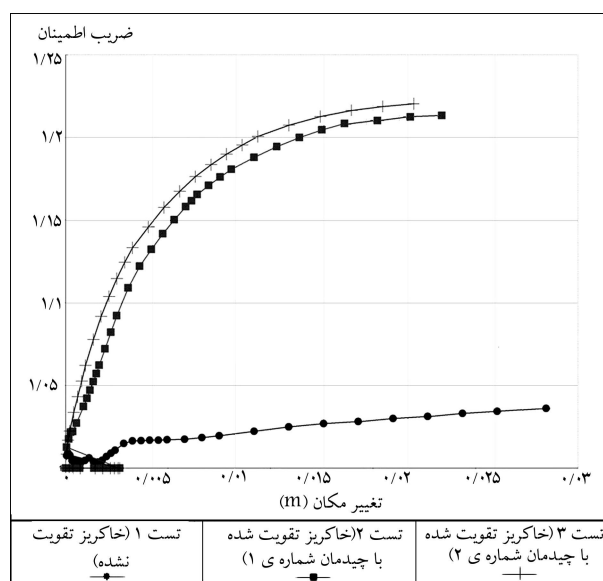
به طور خلاصه مشخصات هندسی ریزش‌ها را می‌توان در ۶ پارامتر تعریف کرد:

۱. فاصله‌ی ریزش‌ها تا پاشنه‌ی خاکریز (موقعیت قرارگیری آنها در شیروانی خاکریز)؛
۲. زاویه‌ی ریزش‌ها نسبت به محور قائم؛
۳. تعداد ریزش‌ها در مقطع خاکریز؛
۴. فاصله‌ی ریزش‌ها از یکدیگر در طول خاکریز؛
۵. قطر ریزش‌ها؛
۶. طول ریزش‌ها.

با توجه به مجموع مطالعات و مدل‌سازی‌های مقدماتی با استفاده از نرم‌افزار Slide و Plaxis، همچنین توصیه‌های آیین‌نامه‌ی UIC۷۱۹-R^[۲]، این نتایج حاصل شده است که بر مبنای آنها، مناسب‌ترین حالات برای پارامترهای هندسی ۱ و ۲ نیز مشخص می‌شود:

الف) علت اصلی گسیختگی شیروانی خاکریزهایی با بستر سست رانش و حرکت جانبی بستر است، در نتیجه مناسب‌ترین حالت برای پارامتر هندسی ۱ قرارگیری ریزش‌ها در پاشنه‌ی خاکریز خواهد بود تا بدین وسیله لایه‌های سست بستر به یکدیگر دوخته شود و همچنین مشخصات فنی و مکانیکی خاک بستر نیز به دلیل تزریق دوغاب بهبود یابد.

ب) چنان که گفته شد، رانش خاک بستر از میانه به کناره‌ی خاکریز دلیل اصلی بر لغزش شیروانی است؛ در نتیجه هرچه زاویه‌ی ریزش‌ها نسبت به محور قائم



شکل ۱۵. نمودار مقادیر ضریب اطمینان برای هر سه مدل عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار (خروجی نرم‌افزار Plaxis ۳D).

آزمون و خطا (روش به‌کاررفته جهت انجام تحلیل حساسیت) حاصل می‌شود. در جدول ۱۱ نیز مقدار ضریب اطمینان گسیختگی شیروانی، همچنین مقایسه‌ی دو چیدمان مربوطه حاصل از تحلیل عددی آنها درج شده است.

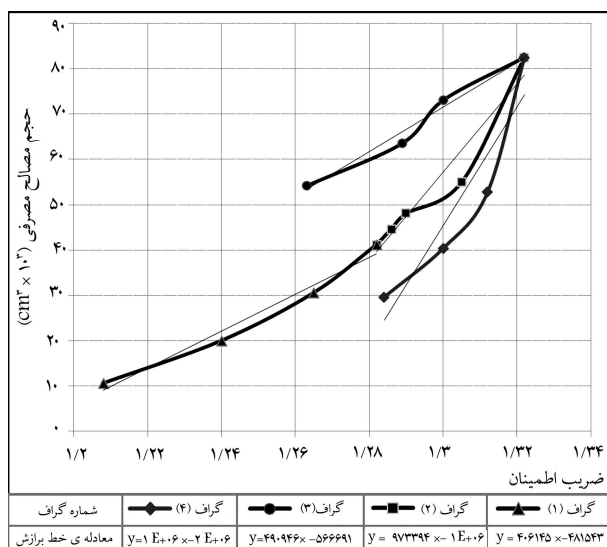
با توجه به نتایج مندرج در جدول ۱۱ می‌توان گفت که هر دو چیدمان پیشنهادی ضعیف‌تر از حالت بهینه است و به منظور انتخاب چیدمان بهینه (چیدمانی که مقدار ضریب اطمینان پایداری شیروانی در آن برابر با ۱/۳ باشد) در قسمت بعد،

جدول ۱۱. مقایسه‌ی دو چیدمان پیشنهادی با یکدیگر.

شماره‌ی چیدمان	تعداد ریزشمع به‌کار رفته	طول ریزشمع به‌کار رفته (cm)	مشخصات چیدمان			مقدار افزایش باربری (KN/m ²)	ضریب اطمینان پایداری شیروانی
			میزان کاهش تغییر شکل‌ها (mm)	تاج خاگریز	میان‌ه‌ی بستر گوشه‌ی بستر		
۱ (آزمایش دو)	۲۴	۹۰	۴٫۵	۶	۰٫۶۱	۱۴۵٫۸۷	۱٫۲۰۸
۲ (آزمایش سه)	۳۲	۸۵	۵٫۴۵	۸	۰٫۶۱۳	۱۴۵٫۸۷	۱٫۲۲۴

جدول ۱۲. نتایج تحلیل حساسیت بر پارامتر هندسی تعداد ریزشمع‌ها در مقطع خاگریز جهت تعیین چیدمان بهینه.

شماره‌ی چیدمان	زاویه‌ی نسبت به امتداد قائم (°)	تعداد در کل خاگریز	تعداد در مقطع خاگریز	فاصله‌ی مرکز به مرکز در طول خاگریز (cm)	قطر ریزشمع با مدنظر قراردادن ناحیه‌ی نفوذ دوغاب (cm)	طول ریزشمع (cm)	بار گسیختگی (KN/m ²)	حجم مصالح مصرفی (cm ³)	ضریب اطمینان
۱	۴۵	۲۴	۲	۲۰	۱۱٫۵	۹۰	۴۰۴٫۱۷	۱۰۶۰۵٫۶	۱٫۲۰۸
۳	۴۵٫۰	۴۸	۴	۲۰	۱۱٫۵	۹۰٫۸۰	۴۱۳٫۸۸	۲۰۰۳۲٫۸	۱٫۲۴
۴	۴۵٫۲۲/۵۰	۷۲	۶	۲۰	۱۱٫۵	۹۰٫۹۰٫۸۰	۴۲۲٫۲۲	۳۰۶۳۹٫۵۸	۱٫۲۶۵
۵	۴۵٫۳۰٫۱۵۰	۹۶	۸	۲۰	۱۱٫۵	۹۰٫۹۰٫۹۰٫۸۰	۴۲۷٫۷۷	۴۱۲۴۴	۱٫۲۸۲



شکل ۱۶. نمایش گراف‌های «حجم مصالح مصرفی - ضریب اطمینان» به‌زای تغییر اعمالی بر ۳ پارامتر مورد بررسی.

برابر با ۱/۴ به‌دست آمده است. همچنین با توجه به مقادیر ضرایب اطمینان در جدول ۱۲ می‌توان گفت که هیچ‌یک از چیدمان‌های مفروض در حالت بهینه قرار ندارد و بدین منظور در مرحله‌ی بعد اقدام به کاهش فواصل ریزشمع‌ها تا رسیدن به چیدمان مورد نظر شده است.

۲.۵. بررسی تأثیر فاصله‌ی ریزشمع‌ها در طول خاگریز

در این مرحله از عملیات تحلیل حساسیت پارامتر هندسی، فاصله‌ی ریزشمع‌ها از یکدیگر متغیر فرض شده است؛ با توجه به نتیجه‌ی حاصل از مرحله‌ی قبل عملیات مربوط با چیدمان شماره‌ی پنج آغاز شده و میزان ضریب اطمینان با کاهش فواصل افزایش یافته است (جدول ۱۳).

در شکل ۱۶ گراف ۲، نمودار «حجم مصالح مصرفی - ضریب اطمینان» حاصل

افزایش یابد، مؤلفه‌ی افقی بار محوری آن افزایش می‌یابد و مقاومت در برابر نیرو و حرکت جانبی خاک بالا می‌رود، ولی با توجه به محدودیت‌های اجرایی توصیه می‌شود که زاویه‌ی مربوطه از ۴۵ درجه تجاوز نکند، بر این اساس پارامتر هندسی ۲ نیز از صفر تا ۴۵ درجه انتخاب می‌شود.

با توجه به مطالب ذکر شده، در این قسمت جهت تعیین ضریب اهمیت پارامترهای هندسی ۳ تا ۶ و در نهایت ارائه‌ی چیدمان بهینه، هریک از این پارامترهای هندسی در حین ثابت ماندن دیگر مشخصات هندسی تغییر داده می‌شوند و طبعاً هر پارامتر متغیری که ضریب اطمینان ۱/۳ را با مصالح مصرفی کمتر (صرفه‌ی اقتصادی بیشتر) حاصل کند، ضریب اهمیت بالاتری خواهد داشت؛ در نتیجه نمودار «حجم مصالح مصرفی - ضریب اطمینان» ترسیم و بر مبنای شیب خط برازش آن ضرایب اهمیت پارامترهای هندسی ۳ تا ۶ محاسبه می‌شود. به عبارتی دیگر، هر چقدر تغییرات پارامتری حجم مصالح مصرفی را به مقدار قابل ملاحظه تغییر دهد، در حالی که بر میزان ضریب اطمینان تأثیر چندانی نداشته باشد؛ دارای درجه‌ی اهمیت بالاتری به منظور تعیین چیدمان بهینه است. بدین منظور برای هریک از مشخصات هندسی ریزشمع‌ها چندین مقدار متفاوت تعریف می‌شود، سپس میزان ضریب اطمینان پایداری شیروانی و حجم مصالح مصرفی در هریک از این چیدمان‌ها به‌دست می‌آید.

۱.۵. بررسی تأثیر تعداد ریزشمع در مقطع خاگریز

در مرحله‌ی اول از عملیات تحلیل حساسیت پارامتر هندسی تعداد ریزشمع در مقطع خاگریز متغیر فرض می‌شود، با توجه به نتیجه‌ی حاصل از بخش قبل عملیات مربوط با چیدمان شماره‌ی یک آغاز و چگونگی صعود میزان ضریب اطمینان به دلیل افزایش تعداد ریزشمع‌ها در مقطع خاگریز بررسی می‌شود (جدول ۱۲).

در شکل ۱۶، گراف ۱، نمودار «حجم مصالح مصرفی - ضریب اطمینان» حاصل از تحلیل صورت‌گرفته در این قسمت نمایش داده شده است. با افزایش تعداد ریزشمع در مقطع خاگریز، حجم مصالح مصرفی به‌صورت قابل توجهی افزایش نیافته است و در نتیجه ضریب اهمیت این پارامتر مقدار قابل ملاحظه‌ی نخواهد بود، که بر مبنای محاسبات انجام شده برای گراف ۱ ضریب اهمیت پارامتر مربوط

جدول ۱۳. نتایج تحلیل حساسیت بر پارامتر هندسی فاصله‌ی ریزش‌ها از یکدیگر به منظور تعیین چیدمان بهینه.

شماره‌ی چیدمان	زاویه‌ی نسبت به امتداد قائم (°)	تعداد در کل خاگریز	تعداد در مقطع خاگریز	فاصله‌ی مرکز به مرکز در طول خاگریز (cm)	قطر ریزش‌ها با مدنظر قراردادن ناحیه‌ی نفوذ دوغاب (cm)	طول ریزش‌ها (cm)	بار گسیختگی (KN/m ²)	حجم مصالح مصرفی (cm ³)	ضریب اطمینان
۵	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۹۶	۸	۲۰	۱+۱،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۲۷،۷۷	۴۱۲۴۴	۱،۲۸۲
۶	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۰۴	۸	۱۹	۱+۱،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۲۹،۱۷	۴۴۶۸۱	۱،۲۸۶
۷	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۱۲	۸	۱۸	۱+۱،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۳۰،۵۵	۴۸۱۱۸	۱،۲۹
۸	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۲۸	۸	۱۵	۱+۱،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۳۶،۱۱	۵۴۹۹۲	۱،۳۵۰
۹	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۱،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۴۱،۶۷	۸۲۴۸۸	۱،۳۲۲

جدول ۱۴. نتایج تحلیل حساسیت بر پارامتر هندسی طول ریزش‌ها جهت تعیین چیدمان بهینه.

شماره‌ی چیدمان	زاویه‌ی نسبت به امتداد قائم (°)	تعداد در کل خاگریز	تعداد در مقطع خاگریز	فاصله‌ی مرکز به مرکز در طول خاگریز (cm)	قطر ریزش‌ها با مدنظر قراردادن ناحیه‌ی نفوذ دوغاب (cm)	طول ریزش‌ها (cm)	بار گسیختگی (KN/m ²)	حجم مصالح مصرفی (cm ³)	ضریب اطمینان
۹	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۱،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۴۱،۶۷	۸۲۴۸۸	۱،۳۲۲
۱۰	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۱،۵	۶۰،۶۰،۶۰،۵۰	۴۲۰،۸۳	۵۴۲۰۶،۴	۱،۲۶۳
۱۱	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۱،۵	۷۰،۷۰،۷۰،۶۰	۴۳۰،۵۶	۶۳۶۳۳،۶	۱،۲۸۹
۱۲	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۱،۵	۸۰،۸۰،۸۰،۷۰	۴۳۴،۷۲	۷۳۰۶۰،۸	۱،۳

در شکل ۱۶ گراف ۳، نمودار «حجم مصالح مصرفی - ضریب اطمینان» حاصل از تحلیل صورت‌گرفته در این قسمت نمایش داده شده است. با توجه به تغییر ناچیز در میزان ضرایب اطمینان و از طرفی تغییرات قابل ملاحظه در حجم مصالح مصرفی می‌توان گفت که پارامتر هندسی طول ریزش‌ها درجه اهمیت نسبتاً بالایی خواهد داشت و بر مبنای محاسبات مندرج در جدول ۱۶ برای گراف ۳، ضریب اهمیت پارامتر هندسی طول ریزش‌ها برابر با ۱/۷ است. همان‌طور که مشهود است، چیدمان شماره‌ی ۱۲ نیز در حالت بهینه قرار دارد، ولی با توجه به حجم مصالح مصرفی چیدمان بهینه‌ی شماره‌ی ۸ مناسب‌تر است.

۴.۵. بررسی تأثیر قطر ریزش‌ها

آخرین پارامتر مورد بررسی قطر ریزش‌ها است، در این مرحله به منظور رسیدن به حالت بهینه، قطر ریزش‌ها کاهش داده شده است. قابل توجه است که بر مبنای تعریف آیین‌نامه‌ی [۱] میزان قطر ریزش‌ها باید در مقیاس واقعی کوچک‌تر از ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شود که بر همین اساس قطرهای مورد بررسی ۲۰، ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر که به ترتیب در مقیاس آزمایشگاهی ۲، ۱/۷۵ و ۱/۵ سانتی‌متر هستند، انتخاب شده‌اند (جدول ۱۵).

در شکل ۱۶ گراف ۴، نمودار «حجم مصالح مصرفی - ضریب اطمینان» حاصل از تحلیل صورت‌گرفته در این قسمت نمایش داده شده است. بر مبنای تغییرات ضریب اطمینان و حجم مصالح مصرفی، قطر ریزش‌ها پارامتری با تأثیرگذاری بالاست و با توجه به محاسبات مندرج در جدول ۱۶ برای گراف ۴ مقدار ضریب اهمیت آن برابر با ۳/۵ به‌دست آمده است. به‌علاوه چیدمان شماره‌ی چهارده نیز در حالت بهینه قرار دارد و به دلیل کاهش قابل ملاحظه‌ی مصالح مصرفی نسبت به چیدمان‌های

از تحلیل صورت‌گرفته در این قسمت نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعمال تغییر در پارامتر فاصله‌ی ریزش‌ها از یکدیگر در هر دو مقدار ضریب اطمینان و حجم مصالح مصرفی تأثیر قابل توجهی دارد و بر مبنای محاسبات درج‌شده در جدول ۱۶ برای گراف ۲، ضریب اهمیت پارامتر مربوطه برابر با ۳/۴ به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که چیدمان شماره‌ی هشت در حالت بهینه قرار دارد، ولی با توجه به بیشینه‌بودن مقادیر طول و قطر بر مبنای ابعاد اتاقک بارگذاری و مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ی، در ادامه به منظور بررسی این پارامترها مقادیر آنها کاهش می‌یابند، بنابراین نیاز به تعریف چیدمانی قوی‌تر از حالت بهینه (چیدمان شماره‌ی نه) است، تا از این طریق این دو پارامتر نیز بررسی و بر مبنای صرفی اقتصادی (حجم مصالح مصرفی) بهینه‌ترین چیدمان برگزیده شود، بر این اساس در قسمت بعد با کاهش پارامتر طول ریزش‌ها، چگونگی کاهش حجم مصالح و ضریب اطمینان بررسی شده است.

۳.۵. بررسی تأثیر طول ریزش‌ها

با توجه به مطالب ذکرشده در بخش ۲.۵، چیدمان شماره‌ی نه با ضریب اطمینانی برابر با ۱/۳۲۲ تعریف شده است و در این مرحله به‌منزله‌ی معیار اولیه‌ی عملیات تحلیل حساسیت انتخاب می‌شود، تحلیل صورت‌گرفته در این مرحله مربوط به طول ریزش‌ها است، که بر مبنای عمق بستر مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار (که وابسته به ابعاد اتاقک بارگذاری در مدل‌های آزمایشگاهی است) بیشینه‌ی مقداری برابر با ۹۰ سانتی‌متر دارد. در این مرحله با کاهش طول ریزش‌ها، چگونگی کاهش ضریب اطمینان و مصالح مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱۴).

جدول ۱۵. نتایج تحلیل حساسیت بر پارامتر هندسی قطر ریزشمع‌ها جهت تعیین چیدمان بهینه.

شماره چیدمان	زاویه‌ی نسبت به امتداد قائم (°)	تعداد در کل خاکریز	تعداد در مقطع خاکریز	فاصله‌ی مرکز به مرکز در طول خاکریز (cm)	قطر ریزشمع با مدنظر قرار دادن ناحیه‌ی نفوذ دوغاب (cm)	طول ریزشمع (cm)	بار گسیختگی (KN/m ²)	حجم مصالح مصرفی (cm ³)	ضریب اطمینان
۹	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۱،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۴۱،۶۷	۸۲۴۸۸	۱،۳۲۲
۱۳	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۱	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۳۷،۵	۵۲۷۹۲،۳۲	۱،۳۱۲
۱۴	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۰،۷۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۳۰،۵۶	۴۰۴۱۹،۱۲	۱،۳
۱۵	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۱۹۲	۸	۱۰	۱+۰،۵	۹۰،۹۰،۹۰،۸۰	۴۲۶،۳۹	۲۹۶۹۵،۶۸	۱،۲۸۴

جدول ۱۶. محاسبه‌ی ضریب اهمیت ۳ پارامتر مورد بررسی.

شماره‌ی گراف	پارامتر مورد بررسی	شیب خط برازش گراف	نسبت شیب گراف مربوط بر مجموع شیب‌ها	ضریب اهمیت هر پارامتر از ۱۰
۱	تعداد ریزشمع‌ها در مقطع خاکریز	۴۰۶۱۴۵	۰،۱۴۱۵	۱،۴
۲	فاصله‌ی طولی ریزشمع‌ها از یکدیگر	۹۷۳۳۹۴	۰،۳۳۹۱	۳،۴
۳	طول ریزشمع	۴۹۰۹۴۶	۰،۱۷۱	۱،۷
۴	قطر ریزشمع	۱۰۶	۰،۳۴۸۴	۳،۵

بهینه‌ی شماره‌ی هشت و دوازده از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است و همان‌طور که انتظار می‌رفت، تغییرات پارامتری با ضریب اهمیت بالاتر چیدمان بهینه‌تر را نیز حاصل می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری

- در این پروژه با دو رویکرد آزمایشگاهی و عددی به بررسی کاربری ریزشمع‌ها جهت تقویت خاکریزهای بلند راه‌آهن با بسترهای سست پرداخته شده است. ابتدا با ساخت یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از خاکریز راه‌آهن متکی بر بستر ماسه‌یی با مقیاس ۱ به ۲۰، بارگسیختگی خاکریز غیرمسلح تعیین و سپس با اجرای ریزشمع در پاشنه‌ی خاکریز با دو الگوی مختلف به ارزیابی بارگسیختگی نظیر این دو حالت پرداخته شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر رفتار بار-تغییرشکل، سطح خاکریز و بدنه‌ی ریزشمع‌ها ابزاربندی و به این ترتیب نشست سطحی و کرنش‌های محوری در ریزشمع‌ها در روند بارگذاری تا رسیدن به گسیختگی ثبت شده است. در ادامه، با توسعه‌ی یک مدل عددی سه بعدی مبتنی بر روش اجزاء محدود رفتار بار-تغییرشکل در دو حالت آزمایشگاهی مذکور با دو چیدمان مختلف از ریزشمع شبیه‌سازی و مدل عددی کالیبره شده است. در روند تحلیل عددی، رفتار مصالح خاکریز و بستر کشسان خمیری با معیار خمیری موهر-کولمب و سایر اجزای سازه‌یی خط ریلی و ریزشمع‌ها به صورت کشسان خطی در نظر گرفته شده‌اند. در پایان با روش آزمون و خطا تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مختلف ریزشمع با استفاده از مدل عددی کالیبره‌شده صورت گرفته و بهینه‌ترین چیدمان برای ریزشمع‌ها تعیین شده است، به علاوه اولویت‌بندی تمامی پارامترهای هندسی مربوط جهت تشخیص هر چه سریع‌تر چیدمان مذکور در دیگر پروژه‌ها ارائه شده است. بر این اساس پس از انجام سه آزمایش بارگذاری بر مدل فیزیکی و پانزده بار تحلیل نرم‌افزاری صورت‌گرفته
- با توجه به عملیات تحلیل حساسیت جهت تعیین چیدمان بهینه می‌توان گفت که درجه‌ی اهمیت پارامترهای هندسی ریزشمع‌ها به منظور تعیین بهینه‌ترین چیدمان با استفاده از روش آزمون و خطا عبارتند از: قطر ریزشمع با ضریب اهمیت ۳،۵، فاصله‌ی ریزشمع‌ها در طول خاکریز ۳،۴، طول ریزشمع با ضریب اهمیت ۱،۷ و تعداد ریزشمع‌ها در مقطع خاکریز با ضریب اهمیت ۱،۴.
- به منظور تقویت یک خاکریز با ریزشمع، قرارگیری گروه ریزشمع‌ها در پاشنه‌ی خاکریز، به تعداد هشت عدد در مقطع خاکریز و با زوایای ۰ تا ۴۵ درجه نسبت به محور قائم، در حالی که فقط پارامتر قطر ریزشمع، متغیر است (به دلیل ضریب اهمیت بزرگ‌تر)، مناسب‌ترین روش جهت تعیین چیدمان بهینه خواهد بود.
- با به‌کارگیری چیدمان بهینه، ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکریز بیش از ۳۰٪ افزایش می‌یابد.
- با استفاده از چیدمان بهینه، باربری استاتیکی خاکریز نزدیک به ۵۵٪ افزایش می‌یابد.
- تقویت خاکریز با استفاده از چیدمان بهینه، تغییرشکل نقاط مختلف آن را نزدیک به ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد.
- استفاده از نسبت آب به سیمان ۰،۴۵ تا ۰،۵ با فشار تزریق ۱،۵ تا ۲ بار، برای تزریق دوغاب در اجرای ریزشمع‌ها توصیه می‌شود.

پانوشتها

1. 3D parallel planes
2. quadratic 15-noded wedge

منابع (References)

1. Armour, T., Groneck, P., Keeley, J. and Sharma, S. "Micropile design and construction guidelines", FHWA-SA-97-070, USA: Department of Transportation, Federal Highway Administration, Priority Technologies Program, pp. 31-200 (June 2000).
2. All UIC Member, *Earthworks and Track-bed Layers for Railway Lines*, UIC719-R-Second Edition, USA: International Union of Railways, pp. 85-100 (January 1994).
3. Khayyer, F. "Improvement the railway embankments with micro-piles", M.S. thesis, School of Railway Engineering of Iran University of Science and Technology, Tehran, pp. 50-100 (2010).
4. Bruce, J., Ruel, M., Railroad, C.N., Ansari, N., Janes, M. and Isherwood, A. "Design and construction of a micropile wall to stabilize a railway embankment", *Geofoundations Ltd.*, pp. 1-11 (2003).
5. Cantoni, R.; Collatta, T.; Ghionna, V.N. and Moretti, P.C. "A design method for reticulated micropile structures in Sliding Slopes", *Ground Engineering*, **22**(4), pp. 41-47 (May 1989).
6. Marwan, S. and Shahrour, I. "Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(6), pp. 473-478 Elsevier Ltd. (2004).
7. Wang, Z., Mei, G., Cai, G. and Yu, X. "Dynamic finite element analysis of micropile foundation in subgrade", *ASCE Conf. Proc.*, Recent Advancement in Soil Behavior, in Situ Test Methods, Pile Foundations and Tunneling, pp. 139-144, doi:10.1061/41044(351)22 (2009).
8. Shu, S., Muhunthan, B. and Li, X.S. "Numerical simulation of the influence of initial state of sand on element tests and micropile performance", *Int. J. Geomech.*, **11**(5), pp. 370-380 (2011).
9. Richards, T.D. and Rothbauer, M.J. "Lateral loads on pin piles (micropiles)", *ASCE Conf. Proc.*, *GeoSupport*, **7**, pp. 158-174, doi:10.1061/40713 (2004).
10. Howe, W.K. "Micropiles for slope stabilization", *ASCE Conf. Proc.*, *GeoTrends*, pp. 78-90, doi:10.1061/41144(391)8 (2010).
11. Holman, T.P. and Barkauskas, B.D. "Mechanics of micropiles performance from instrumented load tests", *ASCE Conf. Proc.*, *7th FMGM*, pp. 1-14, doi:10.1061/40940(307)8 (2007).
12. Haider, T.F., Byle, M.J. and Horvath, R.E. "Dam stabilization with micro piles", *ASCE Conf. Proc.*, *Technological and Design Developments in Deep Foundations*, pp. 368-381, doi:10.1061/40511(288)26 (2004).
13. Shahrour, I., Alsaleh, H. and Souli, Mh. "3D elastoplastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles", *Computers and Geotechnics*, **39**, pp.1-7, Elsevier Ltd. (January 2012).
14. Alsaleh, H. and Shahrour, I. "Influence of plasticity on the seismic soil-micropiles-structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(3), pp. 574-578, Elsevier Ltd. (2009).
15. Bruse, D.A. and Geosystems, L.P. "History of micropiles in north america", ADSC, Micropile Construction and Design Seminar, Tuscani Sites and Casino, Las Vegas NV., pp. 1-10 (3-4 April 2008).
16. Schwarz, H., Dietz, K., Koster, H., Groâ, T. "Special use of micropiles and permanent anchors", *Proceedings of GeoSupport Conference, ASCE*, Orlando, Florida, 682-691 (2004).
17. Misra, A. and Chen, C.H. "Load displacement relationships for micropiles", *ASCE Conf. Proc.*, *Deep Foundations*, pp. 110-125, doi:10.1061/40601(256)9 (2002).
18. McManus, K.J., Charton, G. and Turner J.P. "Effect of micropiles on seismic shear strain", *ASCE Conf. Proc.*, *GeoSupport*, pp. 134-145, doi:10.1061/40713(2004)5 (2004).
19. Wolosick, J.R. "Ultimate micropile bond stresses observed during load testing in clays and sands", *ASCE Conf. Proc.*, *Contemporary Topics in Deep Foundations*, pp. 12-22, doi:10.1061/41021(335)2 (2009).
20. AISC, Inc. "Manual of steel construction, load and resistance factor design", Second Edition, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, Volume I: Structural Members Specifications & Codes, Volume II: Connections (2004).
21. Zakeri, J.A. and Shahrudi, M.M. "Investigating the effect of increasing axial load on the railway subgrade", M.S. thesis, School of Railway Engineering of Iran University of Science and Technology, Tehran, pp.151-153 (2006).
22. ASTM International, *ASTM Volume 04.08, Soil and Rock (I): D 420 - D 5876*, USA: American Society for Testing and Materials (March 2010).
23. ASTM D1195-D1195M-09, Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.03. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements (2011).
24. Das, B.M., *Principles of Geotechnical Engineering*, USA, The University of Texas at El Paso, pp. 50-150 (2005).
25. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318R-05*, USA, American Concrete Institute, Farmington Hills- MI. (2005).
26. Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd., Strain Gauge Type (TML Pam E-101S) and Civil Engineering Transducers (TML Pam E-720R) Manuals, pp.1-16 (2011).
27. Plaxis Designers and Committee, *Plaxis-3D Tunnel Version 1.2 and Plaxis-2D Version 8 Tutorial Manual*, pp. 7-11 (2002).
28. Ehteshami, M., Esmail Pour, E. and Esmaili, A.M. "Earth works for railway lines general technical specifications", Manual No.279, Management and Planning Organization Office of Deputy for Technical Affairs of Iran, Tehran, pp. 6-12 (2004).