

تحلیل عددی اثر ترک خوردگی بسترهای ماسه‌ای در مسیرهای با بارگذاری سبک و روستایی محدوده‌ی محور یزد-بافق

مقاله علمی - پژوهشی

زهره غفوری فرد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
سارا سرفراز، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
محمد مهدی خبیری*، دانشیار، بخش ژئوتکنیک و راه، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

صفحه ۲۶-۱۱

چکیده

امروزه یکی از برنامه‌های مهم مدیریت راه در سراسر جهان توسعه راه‌های دسترسی است؛ چراکه راه‌های دسترسی روستایی برقرارکننده ارتباطات اجتماعی و جمعیتی بین روستاها و شهرها و عامل مهم در گسترش تجارت و بازرگانی است. از آنجایی که بخشی وسیعی از سطح کشور را ماسه‌ها پوشانده است؛ اکثر راه‌های دسترسی بر روی خاک بستر ماسه‌ای اجرا می‌شوند و یکی از مهم‌ترین مشکل‌های راه‌های دسترسی ایجادشده بر روی بستر ماسه‌ای، ترک‌های موضعی است. از این رو این پژوهش به منظور تحلیل عددی اثر ترک خوردگی بسترهای ماسه‌ای در مسیرهای با بارگذاری سبک و روستایی در محدوده‌ی محور یزد-بافق انجام شده است. در این پژوهش نمونه‌های از خاک ماسه‌ای محدوده محور یزد-بافق برداشت شد و تعدادی از نمونه‌ها نیز تثبیت شد. سپس مشخصات نمونه‌های خاک تثبیت شده و تثبیت نشده در نرم‌افزار پلکسیس وارد و در دو حالت ترک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد در اثر بارگذاری بر روی راهی با خاک بستر ماسه‌ای دارای ترک، روستایی دچار نشست زیادی (بیش از حد مجاز) می‌شود اما تثبیت خاک بستر ماسه به صورت چشمگیری باعث کاهش نشست می‌شود؛ به طوری که در ترکی با عرض ۲ و عمق ۱۰ میلی‌متر (عمق و عرض ثابت) میزان نشست بعد از تثبیت ۵۹ درصد نسبت به قبل از تثبیت کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که محل‌هایی از جاده‌های کم ترافیک که دارای ترک‌های عمیق‌تر هستند بایست در مقایسه با مناطق دارای ترک‌هایی با عمق کم ولی بازشدگی بیشتر، با اولویت بالاتری مرمت و بهسازی شوند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل عددی، ترک خوردگی، خاک بستر ماسه‌ای، مسیرهای روستایی، مسیرهای با بارگذاری سبک

۱- مقدمه

راه‌های برون شهری بر اساس نوع عملکرد به سه گروه، راه‌های شریانی، اصلی و فرعی تقسیم بندی می‌شوند که هر یک از این گروه‌ها مجدداً با توجه به اینکه چه مناطقی را به هم متصل می‌کنند به چند دسته تقسیم می‌شوند (جدول ۱). در این بین نقش راه‌های فرعی درجه سه، برقراری ارتباط

مناطق روستایی کوچک با یکدیگر، بازمی‌نای مجاور و راه‌ها با درجه بالاتر است (نشریه ۱۳۹۱، ۴۱۵). امروزه اهمیت راه‌های دسترسی و کم ترافیک و گسترش استفاده از آن‌ها در توسعه جوامع روستایی و کم جمعیت بر کسی پوشیده نیست (آقاجانی و چشمالوس، ۱۴۰۰، ارشدنژاد، ۱۳۹۸، کلاتی مقدم

(و همکاران ۱۳۹۸). به طوری که توسعه راه‌های روستایی همواره یکی از برنامه‌های مهم مدیریت راه در سراسر جهان است (Mustafa et al., 2021)، چراکه راه‌های دسترسی روستایی علاوه بر برقراری ارتباطات اجتماعی و جمعیتی بین روستاها و شهرها عامل مهم در ارتباط روستاها با بازار محصولات کشاورزی، خدماتی، صنایع دستی و گسترش تجارت و بازرگانی است (Asher & Novosad, 2020)؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۲؛ کامبوزیا و همکاران، ۱۴۰۰). در هر پروژه عمرانی از جمله راه‌سازی، خاک یکی از مهم‌ترین مصالحی است که استفاده می‌شود. به طور کلی کیفیت خاک بستر، میزان تحمل باربری، حساسیت و آسیب‌پذیری آن در برابر عوامل جوی، در انتخاب لایه‌های روسازی نقش تعیین‌کننده دارد (Andavan & Kumar, 2020) از طرفی نیاز روزافزون جوامع به شبکه‌های مختلف حمل‌ونقل و همچنین توسعه راه‌های دسترسی موجب گردیده است تا شاهد توسعه قابل توجه راه‌ها و شبکه‌های حمل‌ونقلی در مناطق مختلفی از جمله مناطق بیابانی باشیم که دارای خاک ماسه‌ای‌اند و برای راه‌سازی مناسب‌اند. Mahima

(Mishra et al., 2021; Sini, 2021) و محمد مهدی خبیری و همکاران، ۱۳۹۹). کشور ایران نیز از این مورد مستثنا نیست زیرا که این کشور در منطقه‌ای گرم و خشک قرار گرفته و بخشی وسیعی از سطح کشور را ماسه‌ها پوشانده است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸) به طوری که حدود ۸۰ میلیون هکتار از مساحت کشور را مناطق کویری و تپه‌های ماسه‌ای می‌پوشاند؛ این اراضی بیشتر در استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان، یزد، مرکزی و سمنان قرار دارد که راه‌های دسترسی بر روی آن‌ها ساخته می‌شوند (باطنی، ۱۳۹۶). از جمله مشکلات این نوع بسترها می‌توان به عدم چسبندگی داخلی و گسیختگی زود هنگام آن‌ها در مقابل نیروهای برشی و همچنین یکنواختی دانه‌بندی که باعث می‌شود در اثر اعمال بار، هرچند اندک و حتی جریان باد تغییر شکل‌هایی زیاد و فروریزش و حرکت آن‌ها رخ دهد و در نتیجه تکیه‌گاه سازه‌ها از بین رفته و در نهایت باعث خرابی سازه می‌شود، اشاره کرد (حیدری فیروز آبادی و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول ۱. طبقه‌بندی عملکردی راه‌ها

طبقه	نام	عملکرد
شریانی	آزادراه	جزئی از شبکه راه‌های ملی-دهلیز سفرهای داخلی و عبوری از کشور-برقرارکننده ارتباط بین مراکز استان‌ها و یا شهرهای بزرگ داخل کشور
	بزرگراه	
اصلی	درجه یک	جزئی از شبکه راه‌های ملی-دهلیز سفرهای داخلی و عبوری از کشور- برقرارکننده ارتباط بین مراکز استان‌ها و یا مراکز استان‌ها با شهرهای بزرگ داخل کشور استان
	درجه دو	برقرارکننده ارتباط بین شهرهای داخل استان-جزئی از شبکه راه‌های استانی و بین شهری-دهلیز سفرهای مهم داخلی استانی
فرعی	درجه یک	تأمین‌کننده دسترسی به شبکه راه استانی- برقرارکننده ارتباط بین مولدهای ترافیکی مهم در یک استان مانند پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، مراکز و شهرک‌های صنعتی، مراکز کشاورزی و مراکز آموزشی به شهرها- برقرارکننده ارتباط بین یک بخش یا دهستان یا چندین روستا به راه با طبقه‌بندی بالاتر یا به شهر- جمع‌کننده ترافیک راه طبقه‌بندی پایین‌های و انتقال به راه طبقه‌بندی بندی بالاتر
	درجه دو	برقرارکننده ارتباط بین روستاها با یکدیگر-برقرارکننده ارتباط بین روستاها با راه‌های با طبقه بالاتر- برقرارکننده ارتباط بین مولدهای ترافیکی محلی کوچک مانند مراکز صنعتی، مراکز تفریحی برون‌شهری در حاشیه شهرهای کوچک، پارک‌های جنگلی
	درجه سه	برقرارکننده ارتباط بین روستاهای کوچک با یکدیگر یا با راه‌های با بندی بالاتر طبقه-تأمین دسترسی به زمین‌های مجاور شبکه راه‌های با درجه بالاتر- فراهم کردن ارتباط بین ناطق روستایی با زمین‌های مجاور

۲-پیشینه تحقیق

۲-۱-تثبیت خاک بستر ماسه‌ای

می‌کنند اما بهسازی زیستی یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک است که خیلی از مشکلات مذکور را ندارد. این روش بر پایه تولید میکروبی رسوب کربنات کلسیم استوار است و نقش باکتری در این روش ترشح آنزیم اوره آز و تسریع هیدرولیز اوره است. با افزودن یون کلسیم به یون کربنات تولیدشده در فرآیند هیدرولیز اوره، رسوب کربنات کلسیم تشکیل می‌شود که باعث قابلیت سیمانی شدن و تثبیت ماسه سست می‌شود (کریمیان و همکاران، ۱۳۹۷). در تحقیقی دیگر گوواتامانا و همکاران تثبیت خاک ماسه با روش رسوب کلسیتی ناشی از میکروپ (MICP) یکی از محبوب‌ترین تکنیک‌های تثبیت بیوتکنولوژیکی خاک معرفی می‌کنند زیرا که این روش علاوه بر اینکه منجر به بهبود قابل توجهی خواص ژئوتکنیکی خاک می‌شود؛ روشی اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست است (Gowthaman et al., 2019). علاوه بر این وانگ و همکاران بیان اینکه روش‌های بهسازی بیولوژیکی خاک به دلیل سازگاری با محیط‌زیست و هزینه کم اخیراً به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ به بررسی هم‌زمان اثر رسوب کربنات ناشی از میکروبی (MICP) و موارد پلیمری بر روی خاک ماسه پرداختند که نتایج گویای بهبود خواص و عملکرد خاک ماسه در اثر تثبیت با این دو ماده است (Wang et al., 2018). علاوه بر این خوشدل سنگده، نگهدار و قویدل پژوهشی در خصوص بررسی عملکرد تثبیت بیولوژیکی خاک به کمک نانو سیلیس انجام دادند. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که پارامترهای مقاومت برشی و میزان چسبندگی توسط تأثیر توأمان باکتری و نانو سیلیس به‌صورت چشمگیری بهبود یافت همچنین زاویه اصطکاک خاک حدود ۱۲٪ افزایش یافت (خوشدل سنگده و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر این طی چند سال اخیر، مسائل زیست محیطی و اقتصادی سبب توجه به استفاده از مواد زائد و ضایعاتی صنایع جهت اصلاح و بهبود خصوصیات خاک شده است (هوشیار و رستمی، ۱۳۹۷) که تحقیقات متعددی

همان‌طور که اشاره شد خاک‌های ماسه‌ای از مهم‌ترین خاک‌های محیط‌های کویری هستند که در نقاط مختلف جهان پراکنده‌اند (حسنیو همکاران، ۱۳۸۳) اما خاک‌های ماسه‌ای به دلیل مشخصات و مقاومت پایین برای عملیات راه‌سازی نامرغوب محسوب می‌شوند (Majumder & Bhattacharyya, 2021) خبیری و همکاران، (۱۳۹۹). از آنجاکه جایگزینی خاک ماسه با خاک‌های مرغوب برای بستر روسازی بسیار پرهزینه است؛ بهبود خصوصیات مکانیکی خاک به‌خصوص پارامترهای مقاومتی خاک‌های ریزدانه، همواره مورد توجه مهندسان عمران بوده است. در همین راستا دانشمندان از دیرباز با افزودن مواد مختلف به خاک، سعی در تسلیح و تثبیت خاک، به‌منظور بهبود خصوصیات مکانیکی خاک داشتند (خالقیان و صبا، ۱۳۹۸) امروزه روش‌های تثبیت خاک یکی از مهم‌ترین زمینه‌های علم مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شوند که در مهندسی راه‌سازی پرکاربرد است (Kalkan, 2020)؛ سبجانی آبی بیگلو و حمیدی، (۱۳۹۸). امروزه تثبیت خاک‌ها به طرق گوناگون نظیر روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی امکان‌پذیر است (Afrin, 2017) ذوالفقاری فر و سوزنی، (۱۳۹۵). روش تثبیت با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، وسعت منطقه مورد نظر جهت بهسازی، دسترسی محل به مصالح، تجهیزات و نیروهای متخصص، فاکتورهای زیست محیطی، تجارب مهندسان، مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می‌شوند (عاطفی فرد و همکاران، ۱۳۹۵)؛ اما امروزه با توجه به مشکلات محیط زیستی، مهندسان سعی در به‌کارگیری روش‌های تثبیتی که آسیب کمتری به محیط‌زیست می‌زنند، دارند (Behnood, 2018; Hoang et al., 2019) که تحقیقات متعددی در این خصوص صورت گرفته است به‌عنوان مثال بر اساس پژوهش کریمیان، حسنلوراد و کریمی، اکثر روش‌های بهسازی خاک پرهزینه، زمان‌بر، از لحاظ اجرایی سخت و از لحاظ محیط زیستی نیز خسارات زیادی به طبیعت وارد

درصد و کاهش شاخص خمیری بین ۲۵ تا ۴۰ درصد می‌شود، همچنین رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها بین ۳۰ تا ۸۵ درصد و عدد CBR ماکزیمم تا ۱۲ برابر افزایش پیدا می‌کند (سرفراز و همکارا، ۱۴۰۰). در پژوهش دیگری بخشی، آبتی و گنجی دوست بابیان اینکه استفاده از روش‌های نوین تثبیت خاک به دلیل کاهش اثرات سو بر محیط‌زیست، جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی است؛ به بررسی تثبیت خاک با استفاده از نانو پلیمر پلی‌لاتیس پرداختند که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد تثبیت خاک با استفاده از نانو پلیمر پلی‌لاتیس قشر یکنواخت به هم چسبیده‌ای را به وجود می‌آورد که باعث بهبود خواص خاک ماسه می‌شود و اثرات تخریبی کمتری بر روی محیط‌زیست دارد (بخشی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر باغبان شوکت‌آباد، توفیق و توفیق اثر ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی تفتان و نانو مواد که شامل نانو سیلیس و نانو رس است، بر تثبیت خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار دادند و برای ارزیابی تأثیر این مواد بر نمونه‌های خاک ماسه، آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی و نانو مواد، جایگزین مناسبی برای مواد سیمانی در تثبیت خاک هستند، به طوری که افزودن پوزولان و نانو مواد به خاک باعث افزایش مقاومت و بهبود رفتار مکانیکی خاک می‌شود (باغبان شوکت‌آباد و همکاران، ۱۳۹۹). از این رو با توجه به مطالب ارائه شده تثبیت خاک‌های ماسه در راه‌سازی بسیار حائز اهمیت است که به روش‌های گوناگونی نیز قابل انجام است و امروزه با رشد علم و فناوری تنوع این روش‌ها نیز افزایش می‌یابد.

نیز در این زمینه صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهش افراکوتی و همکارانش اشاره کرد. آن‌ها با تأکید بر آلودگی محیطی حاصل مواد زائد صنعتی از جمله ضایعات زغال‌سنگ و در دسترس بودن آن به بررسی اثر ضایعات زغال‌سنگ بر بهبود خواص ماسه پرداختند که نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر بهبود خصوصیات مکانیکی ماسه تثبیت‌شده با ضایعات زغال‌سنگ و اقتصادی بودن این روش است (Afrakoti et al., 2020). در پژوهشی دیگر رهگذر، صابریان و لی، تثبیت خاک با خاکستر پوسته برنج (RHA) را به عنوان از سازگارترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌های تثبیت خاک معرفی می‌کنند. بر اساس این پژوهش خاکستر پوسته برنج بر بهبود خواص خاک ماسه اثربخشی قابل توجهی دارد؛ ضمن اینکه این روش دارای مزایای دیگری از جمله هزینه کم و دوستدار محیط‌زیست است (Rahgozar et al., 2018). همچنین در سال ۲۰۱۹ جانعلی‌زاده چوبیستی، عموزاده کوش و سلیمانی کوتنایی پژوهشی تحت عنوان بررسی خواص مکانیکی خاک تثبیت‌شده با نانو کربنات کلسیم و تقویت‌شده با الیاف ضایعات فرش انجام دادند که نتایج نشان دهند اثر مثبت این دو ماده در بهبود خواص ژئوتکنیکی و استحکام خاک است (Choobbasti et al., 2019). علاوه بر این روش‌ها امروزه با پیشرفت چشمگیر فناوری نانو و نانو مواد استفاده از این نوع مواد در تثبیت خاک گسترش یافته است (انتظارالمهدی و پژوهان، ۱۳۹۵). سرفراز، خبیری و مهرنهاد در پژوهشی در سال ۱۴۰۰ به بررسی تأثیر نانو سلولز در اصلاح مشخصات خاک بستر ماسه‌ای پرداختند که نتایج بیانگر این است که افزودن نانو سلولز سبب کاهش حد روانی و خمیری به ترتیب بین ۲۱ تا ۲۷ درصد و ۶۰ تا ۶۵

۲-۲-مدل‌سازی خاک بستر روسازی

پژوهشی تحت عنوان بهبود زیرسازی روسازی با افزودن سیمان و خاکستر بادی به شن و ماسه طبیعی بیابان بیان می‌دارد که ویژگی‌های خاک بستر برای طراحی روسازی‌ها خصوصاً ارزیابی‌هایی اقتصادی یک جاده بسیار مهم است.

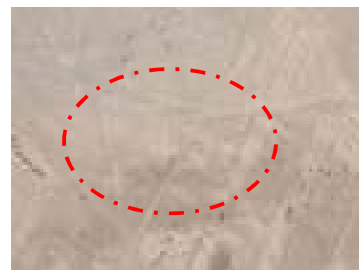
یکی از مهم‌ترین مشکل‌ها راه‌های دسترسی ایجادشده بر روی بستر ماسه‌ای، ترک‌های موضعی است که به عنوان بسترهای ماسه‌ای ترک‌خورده مطرح می‌شود (Anggraini, 2015). (Wu & Wu, 2020). احمدی و عساف در

موجود به صورت کاملاً قایم اعمال گردید ضریب اصطکاک تأثیر چندانی بر تنش‌های ایجاد شده در خاک بستر نداشت از این رو جهت کاهش میزان تنش‌ها و کرنش‌ها می‌توان مدول الاستیسیته خاک بستر را افزایش داد (حیدری فیروزآبادی و خبیری، ۱۳۹۶). علاوه بر این خبیری و بلوچ سیرگانی در پژوهشی با تأکید بر اینکه در مواقع بحران، جاده‌ها وظیفه تأمین ضروریات زندگی مناطق درگیر را دارند، وجود خاک‌های سست و نرم به دلیل عدم مقاومت کافی در برابر بارگذاری‌های سنگین به عنوان یکی از مسائل ویژه و دارای مخاطره بالا در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌آیند؛ پژوهشی را باهدف مدل‌سازی تحلیلی وضعیت تنش و کرنش فشاری بحران روی خاک بستر تثبیت شده انجام دادند که نتایج مدل‌سازی مشتمل بر عکس‌العمل بستر راه در سطح فوقانی نسبت به بار وارده چرخ زوج به صورت کرنش فشاری است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد بهترین حالت برای بهبود مقاومت و کاهش واکنش‌های بحران روسازی افزایش مواد تثبیت‌کننده به خاک به دست می‌آید (خبیری و بلوچ سیرگانی، ۱۳۹۷). همچنین نظامی، خرقانی و مهران نیا در پژوهشی برای بررسی خاک دانه‌ای به سازی شده به روش بیولوژیکی در بستر راه از روش مدل‌سازی عددی استفاده کردند. آن‌ها به کمک نرم‌افزار آباکوس، ۱۱ بستر یک‌راه بهسازی شده‌ی ماسه به روش بیولوژیکی، مدل‌سازی کردند. در این مدل‌سازی لایه‌ی خاک موردنظر در حالت الاستو پلاستیک مدل‌سازی شد و مقادیر نشست با استفاده از مدل الاستوپلاستیک در ضخامت‌های مختلف خاک بستر محاسبه شد. نتایج به دست آمده نشان از تأثیر قابل توجه به سازی خاک به روش بیولوژیکی در کاهش تغییر شکل پلاستیک خاک و مطلوب بودن مدل‌سازی عددی جهت بررسی خصوصیات خاک بستر دارد (نظامی و همکاران، ۱۳۹۶). احمد و همکاران نیز بایبان اینکه رفتار تورم و انقباض خاک بستر تأثیر قابل توجهی بر عملکرد روسازی دارد به مدل‌سازی عددی رطوبت خاک بستر به کمک روش المان محدود و نرم‌افزار PLAXFlow پرداخت. در این پژوهش نتایج مدل‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی مستقیم مقایسه شد و اعتبار پارامترهای برآورد شده تأیید شد، زیرا نتایج مدل‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی مستقیم مطابقت داشت (Ahmed et al., 2018).

خاک ماسه‌ای موجود در بیابان‌ها، کیفیت بسیار پایین برای ساخت روسازی دارند و منجر به مشکلات مهمی مانند ایجاد ترک‌ها، شیارها و شکست می‌شود (Amhadi & Assaf, 2021). همچنین آصف زاده، هاشمیان و بیات در پژوهشی در سال ۲۰۱۷ با تأکید بر اینکه عملکرد سازه‌های روسازی به شدت به عملکرد لایه خاک بستر بستگی دارد بیان می‌دارد ایجاد تغییر شکل دائمی در خاک بستر تحت بارهای ترافیکی می‌تواند باعث مشکلات روسازی شود لذا ارزیابی رفتار تغییر شکل دائمی و ترک خاک بستر ماسه‌ای در نسبت‌های تنش و سطوح تنش مختلف ضروری است (Asefzadeh et al., 2017). از این رو مدل‌سازی خاک بستر ماسه‌ای و تثبیت آن بسیار حائز اهمیت است. در خصوص مدل‌سازی خاک بستر مطالعات متعددی انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعه پاتل و پاتل در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد. آن‌ها در پژوهشی بایبان اینکه خاک بستر یک جزء ضروری برای طراحی روسازی انعطاف‌پذیر و صلب است؛ با به‌کارگیری تحلیل رگرسیون متغیر چندگانه، مدل‌هایی را برای پیش‌بینی نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، ضریب واکنش زیرسطحی (K-Value)، مقاومت فشاری نامحدود، نفوذ مخروط دینامیکی (DCP) از حداکثر چگالی خشک (MDD) و بهینه و همچنین نمودارهایی برای استخراج داده‌های نشست به صورت سریع و ساده ارائه می‌دهد (Patel & others, 2013). همچنین در تحقیقی که توسط فیروزآبادی و خبیری تحت عنوان مطالعه اثر تغییر مشخصات تراکم خاک بستر و اصطکاک بین لایه‌ای بر عکس‌العمل روسازی به روش عددی انجام شد، قابلیت بارگذاری، حداکثر و حداقل تنش‌ها و کرنش‌های خاک بستر یک روسازی انعطاف‌پذیر با استفاده از روش میکرو سازه‌ای و المان محدود و به صورت عددی باهدف بررسی مشخصات خاک بستر از جمله مدول الاستیسیته، میزان نشست و کرنش‌ها و ضریب اصطکاک بین لایه‌ای و رابطه آن‌ها با بارهای مختلف بررسی شد. آن‌ها در این راستا یک خاک بستر با تراکم‌های مختلف کم، متوسط و زیاد در نظر گرفتند که برای هر یک از حالات سه مقدار اصطکاک بین لایه‌ای تعریف کردند و پس از مدل‌سازی بدنه راه، سطح روسازی تحت نشست‌های مختلف قرار دادند. نتایج این پژوهش بیانگر این بودند که با افزایش بارگذاری به طور پیوسته تنش‌ها افزایش یافتند و همچنین هنگامی که بار

پژوهش به منظور بررسی تحلیل عددی اثر وجود ترک در بستریهای ماسه‌ای در مسیرهای با ترافیک کم به صورت مطالعه موردی در ابتدای محور یزد-بافق انجام شده است. ابتدای محور یزد-بافق در منطقه دشت یزد - بافق قرار دارد که این منطقه در جنوب شرق فلات مرکزی ایران و در منطقه‌ی کاملاً بیابانی واقع است و با ماسه‌های روان سطحی پوشیده است که از لحاظ ابعاد ۳۳۰ هکتار این منطقه را پوشش می‌دهد و مسیرهای دسترسی و مسیرهایی با ترافیک سبک با رویه‌های آسفالتی کم ضخامت یا شنی متعددی در آن مشاهده می‌شود. شکل ۱ موقعیت قرارگیری منطقه مورد مطالعه، نمونه از خاک مورد مطالعه و لایه‌های خاک در محل ترک را نمایش می‌دهد.

در پژوهشی دیگر پنگ و همکاران یک مدل تحلیلی برای تعیین کمیت اثر رطوبت و تنش بر مدول ارتجاعی خاک بستر یک روسازی انعطاف‌پذیر به کمک نرم‌افزار متلب و آباکوس ارائه کرد سپس یک مدل برای توصیف رطوبت غیرخطی و تنش خاک بستر برنامه‌ریزی شد. شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش نشان داد که توزیع رطوبت بستر به طور قابل توجهی بر توزیع مدول ارتجاعی بستر و پاسخ بحرانی سازه‌های روسازی تأثیر می‌گذارد. (Peng et al., 2020). همان‌طور که اشاره شد مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی خاک بستر و بررسی خصوصیات آن به این روش انجام شده است اما تاکنون پژوهشی در خصوص مدل‌سازی عددی اثر وجود ترک در بستریهای ماسه‌ای در مسیرهای دسترسی و راه‌های کم ترافیک انجام نشده است. از این رو این



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱. الف) موقعیت قرارگیری منطقه مورد مطالعه، (ب) نمونه خاک ماسه برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

(ج) لایه‌های خاک در محل گسیختگی

۳- روش تحقیق

۳-۱- برداشت میدانی

مشخصات نمونه‌های اولیه خاک و خاک تثبیت شده در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است.

در این پژوهش ابتدا نمونه‌هایی از خاک ماسه از منطقه دشت یزد-بافق برداشت شد و سپس تثبیت شد که

جدول ۲. مشخصات خاک ماسه برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

۱۰۸۶	رطوبت طبیعی
۴۱،۳	حد روانی
۲۵،۳	حد خمیری
۲۰،۷۳	چسبندگی C (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)
۲۷،۵	زاویه اصطکاک ϕ (درجه)

جدول ۳. مشخصات خاک ماسه برداشت شده تثبیت شده از منطقه مورد مطالعه

۴,۶	چسبندگی C (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)
۳۶,۵	زاویه اصطکاک ϕ (درجه)
۱۵۸,۲	مقاومت تک محوری (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)
۷۹,۱	مدول الاستیسیته ($E_{50} \text{ kg/cm}^2$)

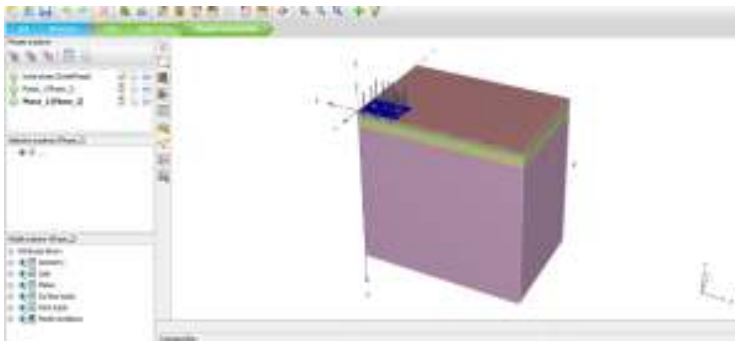
۲-۳-۲- مدل سازی

۱-۲-۳-۱- مدل سازی هندسی

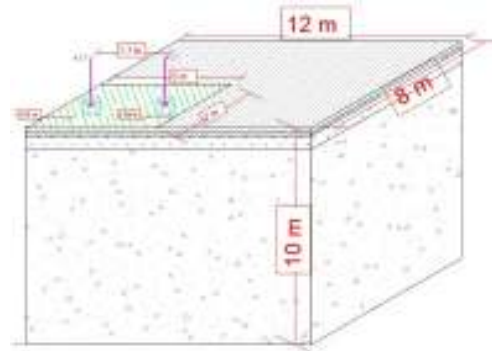
بار چرخ کامیون استاندارد به صورت دو بار نقطه‌ای به فاصله ۰/۶۵ متر از لبه سواره‌رو بر روی آن قرار گرفت، فاصله بین بارها ۱/۷ متر (فاصله چرخ‌های در کامیون استاندارد) در نظر گرفته شد. برای بارهای ثقلی نیز از بار ژئواستاتیک استفاده گردید که به تمام المان‌ها اعمال می‌شود. در نهایت در تب استیج استراکچر دو فاز طراحی شد. که فاز اول نشست‌های ناشی ژئواستاتیک و در فاز دوم نشست‌های ناشی ژئواستاتیک و بار چرخ کامیون لحاظ گردید. بدین ترتیب اختلاف نتایج بین فاز ۱ و ۲ نشست ناشی از بار چرخ خواهد بود. شکل ۳-الف ابعاد هندسی مدل و شکل ۳-ب نمونه مدل سازی شده در نرم افزار را نشان می‌دهد.

مدل سازی به صورت سه بعدی در محیط پلکسیس انجام و تحلیل گردید؛ این نرم افزار برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های گرایش خاک (مهندسی ژئوتکنیک) کاربرد دارد که بر اساس روش المان محدود طراحی شده است (Brinkgreve et al., 2016). دستیابی به پاسخ منطقی در نرم افزار المان محدود باید حداقل با در نظر گرفتن ابعاد مرزی مدل باشد. ابعاد کل روسازی مورد مطالعه ۸ متر عرض و ۱۲ متر طول در نظر گرفته شد (۸ متر عرض مسیر کم ترافیک)؛ که برای خلاصه سازی مدل، از ابعاد یک چهارم آن یعنی ۲ متر عرض و ۳ متر طول استفاده شد. این سطح به عنوان یک پلیت در مدل نرم افزاری در نظر گرفته شد که

(ب)



(الف)



شکل ۳. (الف) ابعاد اجزای مختلف مدل شده در نرم افزار، (ب) شکل هندسی مدل در نرم افزار پلکسیس

۲-۲-۳- خصوصیات مصالح

زیراساس بود که همگی بر روی خاک بستر ماسه‌ای قرار دارند. در این مدل سازی، دو ترک یکی در طول راه و دیگری در عرض راه ایجاد گردید و ترک در عرض راه که میزان

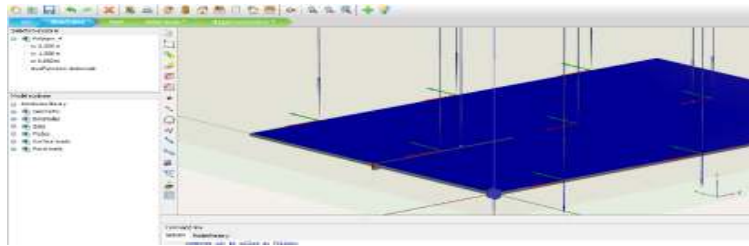
بعد از ترسیم هندسه مدل در نرم افزار خصوصیات هریک از لایه‌ها، برای نرم افزار تعریف و سپس به هندسه شکل تخصیص داده شد. لایه‌های روسازی شامل رویه، اساس و

تعریف می‌شود. پارامترهای چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) معرف معیار گسیختگی هستند. در مدل رفتاری موهر - کلمب زاویه اتساع (ψ) نشانگر قانون جریان است که توصیه شده است مقدار آن را $\phi - 30^\circ$ در نظر گرفته شود.

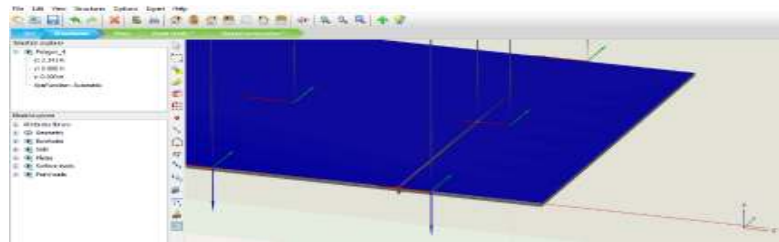
۳-۲-۳- بارگذاری

در این پژوهش دو نوع بار بر روی مدل اعمال شد که شامل بار چرخ کامیون که به صورت استاتیکی بر سطح رویه اعمال شد (بار استاندارد تحت عنوان دو بار نقطه‌ای به فاصله ۰/۶۵ از لبه راه مدل‌سازی شد (Abdellatif, 2013) و نیروهای ثقلی که به صورت ژئواستاتیکی به تمام المان‌های مدل اعمال می‌شد. سپس در مرحله بعدی مدل مش بندی برای تمامی مدل‌ها انجام شد (شکل ۵).

نشست بیشتری داشت به عنوان ترک بحرانی انتخاب و از آن پس تمامی تحلیل‌ها بر روی ترک بحرانی انجام شد. در شکل ۴ هر دو نمونه ترک عرضی و طولی نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی ترک‌های سطحی موجود نیز ترک‌های مثلثی شکل با عرض و عمق مختلف در جهت طولی مسیر به وجود آمد که برای تشکیل المان داخل ترک از مدول الاستیسیته نزدیک به صفر استفاده شد. در مدل‌سازی این پژوهش از مدل رفتاری موهر کلمب در تعریف مصالح استفاده شد. لازم به ذکر است که رفتار کلیه مصالح به جز پلیت ایجاد شده در ماسه طبق مدل رفتاری موهر-کلمب مدل‌سازی گشت. رفتار پلیت ایجاد شده در مدل‌سازی به صورت الاستیک در نظر گرفته شد. مدل رفتاری موهر کلمب مدلی است الاستوپلاستیک که رفتار غیرخطی مصالح را هم در تحلیل‌ها در نظر می‌گیرد. در این مدل رفتاری تنش - کرنش ناحیه خطی مصالح توسط دو پارامتر مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسن (U) و بر اساس قانون هوک

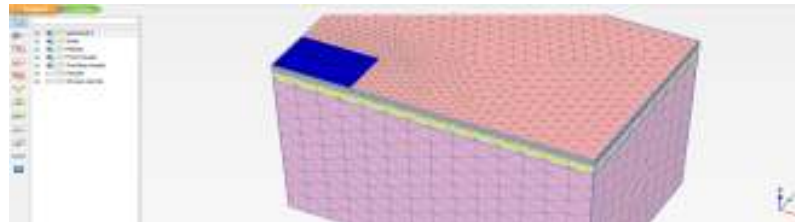


(الف)



(ب)

شکل ۴. (الف) ترک ایجاد شده در عرض راه، (ب) ترک ایجاد شده در طول راه



شکل ۵. مش بندی مدل در نرم افزار

مقدار تغییر شکل سطحی را ۰/۰۰۶۵ میلی متر نشان می‌داد که با کمک مدل‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار این تحقیق عدد ۰/۰۰۶۲ میلی متر را نشان داد که اختلاف ۴/۱۶ درصدی و کوچک‌تر بودن خطای محاسباتی کمتر از ۵ درصد، عملکرد صحیح نرم‌افزار مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

۴- نتایج تحقیق

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش به کمک نرم‌افزار پلکسیس، تحلیل عددی اثر ترک خوردگی بسترهای ماسه‌ای در مسیرهای با بارگذاری سبک و روستایی محدوددهی محور یزد-بافق مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۴ و شکل ۶ و ۷ نتایج حاصل از نرم‌افزار ارایه شده است.

۳-۲-۴- حالت‌های مختلف ترک‌های مدل شده

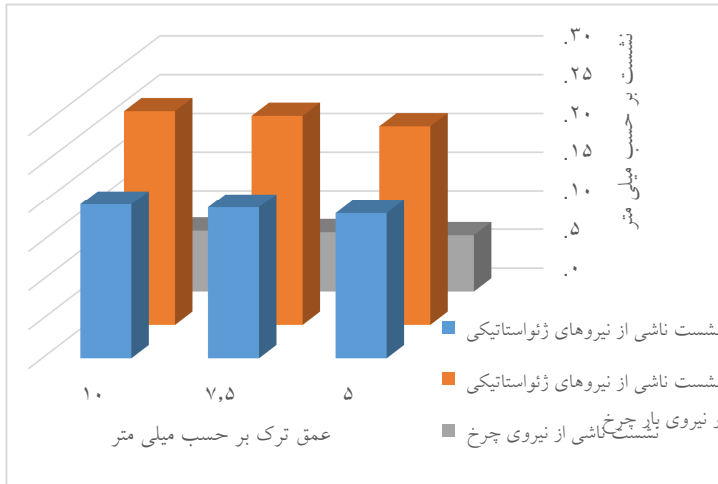
به منظور بررسی عملکرد خاک بستر ماسه‌ای، مدل‌سازی در حالات مختلف انجام شد که شامل موارد زیر است:
الف) عرض ترک ثابت (۲ سانتی‌متر)، عمق ترک متغیر ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر
ب) عمق ترک ثابت (۷/۵ سانتی‌متر)، عرض ترک متغیر ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتی‌متر دلیل انتخاب عرض و طول‌های انتخاب شده به دلیل مشاهدات میدانی بود که در چندین نقطه‌ی مختلف در کناره مسیر مشاهده گردید.

۳-۲-۵- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی کارکردی نرم‌افزار مورد استفاده از نتایج پژوهش رحمان و همکاران استفاده شد (Rahman et al., 2019) در مدل‌سازی انجام شده توسط این محقق نیز رفتار الاستیک بررسی شد که فرضیات و نتایج تحقیق نامبرده

جدول ۴. نتایج نرم‌افزار

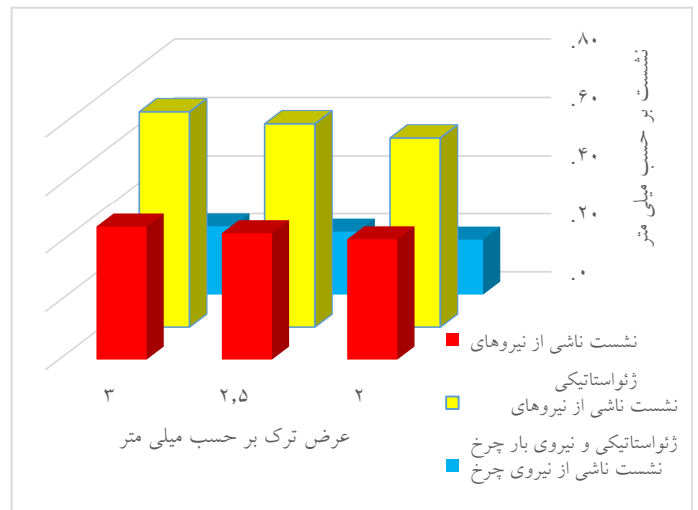
حالت	نوع خاک	نشست ناشی از نیروهای ژئواستاتیکی (میلی‌متر)			نشست ناشی از نیروهای ژئواستاتیکی و نیروی بار چرخ (میلی‌متر)			نشست ناشی از نیروی چرخ (میلی‌متر)		
الف	تثبیت نشده	عمق ترک								
		۵	۷/۵	۱۰	۵	۷/۵	۱۰	۵	۷/۵	۱۰
		۳۵/۶	۳۷/۴۵	۳۹/۴	۶۰/۷	۶۴/۸۵	۶۶/۷۵	۱۸/۰۵	۲۰/۵	۲۱/۰۵
		عرض ترک								
		۱/۵	۲	۲/۵	۱/۵	۲	۲/۵	۱/۵	۲	۲/۵
		۴۱/۲۵	۴۳/۳۵	۴۵/۶۵	۶۵/۱	۶۹/۹۵	۷۴/۰۵	۱۸/۸۵	۲۱/۶	۲۳/۴
ب	تثبیت شده	عمق ترک								
		۵	۷/۵	۱۰	۵	۷/۵	۱۰	۵	۷/۵	۱۰
		۱۸/۴	۱۹/۳۵	۱۹/۷۵	۲۵/۶	۲۶/۹۵	۲۷/۵۵	۷/۲	۷/۶	۷/۸
		عرض ترک								
		۱/۵	۲	۲/۵	۱/۵	۲	۲/۵	۱/۵	۲	۲/۵
		۱۹/۵۵	۲۰/۲۵	۲۱/۲۵	۲۷/۰۵	۲۸/۳۵	۲۹/۵۵	۷/۵	۸/۱	۸/۳



(ب)

(الف)

شکل ۶. میزان نشست محاسبه شده توسط نرم افزار در حالت الف: (الف) ماسه تثبیت نشده، (ب) ماسه تثبیت شده

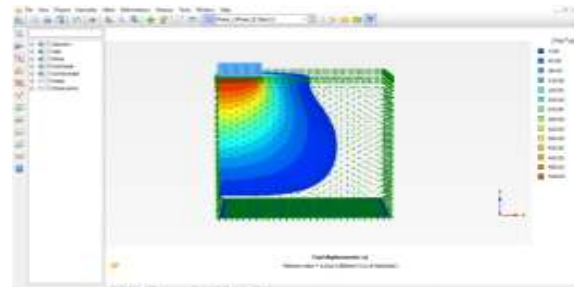
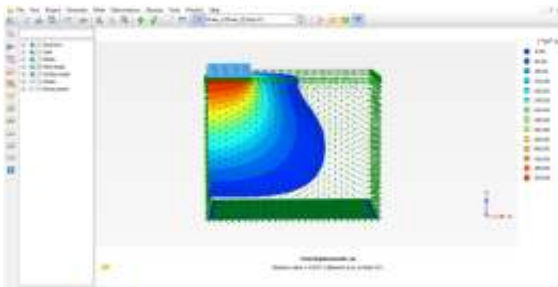


(ب)

(الف)

شکل ۷. میزان نشست محاسبه شده توسط نرم افزار در حالت ب: (الف) ماسه تثبیت نشده، (ب) ماسه تثبیت شده

در ادامه برخی از نتایج نرم افزاری به عنوان نمونه در شکل ۸ آمده است.



(ب)

(الف)

شکل ۸. (الف) نشست ژئواستاتیکی (الف) خاک تثبیت نشده، (ب) خاک تثبیت شده

از ۱/۵ به ۲/۵ میلی‌متر (در یک عمق ثابت ترک) میزان نشست ناشی از نیروهای ژئواستاتیکی و نیروی بار چرخ حدود ۱۲٪ افزایش می‌یابد؛ اما به‌طور مشخص می‌توان دریافت که در زمانی که عمق به‌عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته می‌شود با اضافه شدن عمق ناپیوستگی نشست‌های کلی خاک بستر به‌مراتب بیشتر اتفاق می‌افتد. در بررسی آماری نتایج میزان تأثیر متغیرهای عمق و بازشدگی ترک را به ازای مدل‌های مختلف بارگذاری و تثبیت با روش آنالیز یک‌طرفه توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد که نتایج جدول ۵ خلاصه این آزمون آماری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نتایج آزمون آماری مشاهده می‌شود توجه به محل‌هایی از جاده‌های کم ترافیک که دارای ترک‌های عمیق‌تر هستند بایست در مقایسه با مناطق دارای ترک‌های با عمق کم ولی بازشدگی بیشتر، با اولویت بالاتری مرمت و بهسازی شوند. لازم به ذکر است که ابعاد ترک‌ها با بررسی و تحقیق حضوری در موقعیت مورد مطالعه انتخاب گردید و با تقریب خوبی با واقعیت انطباق دارد.

همان‌طور که از نتایج پیداست در اثر بارگذاری بر روی راهی با خاک بستر ماسه‌ای (مطابق ماسه مورد مطالعه از محدوده محور یزد-بافق) دارای ترک، روسازی دچار نشست زیادی می‌شود و این در حالی است که نشست مجاز ۱۰ الی ۱۳ میلی‌متر است. همچنین نتایج گویای آن است که با تثبیت خاک بستر ماسه‌ای میزان نشست به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد به‌عنوان مثال در ترکی با عرض ۲ و عمق ۱۰ میلی‌متر (عمق و عرض ثابت) میزان نشست بعد از تثبیت ۵۹ درصد نسبت به قبل از تثبیت کاهش یافته است که نشان دهند اثر مثبت تثبیت در بهبود عملکرد خاک بستر ماسه‌ای و کاهش نشست آن است. در واقع تثبیت خاک بستر ماسه‌ای باعث افزایش مقاومت و بهبود خواص ژئوتکنیکی و در نتیجه کاهش نشست می‌شود (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر این با توجه به نتایج واضح است که عمق و عرض ترک دو پارامتر تأثیرگذار در میزان نشست هستند به‌طوری‌که با افزایش عمق ترک از ۵ به ۱۰ میلی‌متر (در یک عرض ثابت ترک) میزان نشست ناشی از نیروهای ژئواستاتیکی و نیروی بار چرخ حدود ۱۰٪ افزایش می‌یابد و با افزایش عرض ترک

جدول ۵. نتایج آزمون آماری وابستگی مقدار نشست و متغیر عمق و عرض بازشدگی بر میزان تغییر

متغیر	R ²	Sig	\bar{M}
عمق ناپیوستگی	۰/۷۵۹	۰,۰۰۰	۱۸/۴۱۲
عرض ناپیوستگی	۰/۶۹۳	۰/۰۰۱	۷/۲۱۶

۵- نتیجه‌گیری

(۲ سانتی‌متر)، عمق ترک متغیر ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر و عمق ترک ثابت (۷/۵ سانتی‌متر)، عرض ترک متغیر ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:
- در اثر بارگذاری بر روی راهی با خاک بستر ماسه‌ای (مطابق ماسه مورد مطالعه از محدوده محور یزد-بافق) دارای ترک، بستر ماسه‌ای دچار نشست زیادی (بیش‌ازحد مجاز) می‌شود.
- مطالعات این پژوهش نشان می‌دهد که تثبیت خاک بستر ماسه‌ای باعث افزایش مقاومت خاک بستر شده تقویت آن و

از آنجایی‌که امروزه راه‌های دسترسی و کم ترافیک و گسترش استفاده از آن‌ها به علت توسعه جوامع روستایی و کم جمعیت اهمیت پیدا کرده است و اکثر این راه‌ها در کشور ایران در بیابان‌ها بر روی خاک بستر ماسه‌ای اجرا می‌شوند؛ این پژوهش باهدف تحلیل عددی اثر ترک‌خوردگی بسترهای ماسه‌ای در مسیرهای روستایی و مسیرهایی با ترافیک کم در محور دشت یزد - بافق انجام شد. در این پژوهش نمونه‌هایی از خاک محور دشت یزد- بافق برداشت شد و تعدادی از آن‌ها تثبیت شد. سپس مشخصات آن‌ها در نرم‌افزار پلکسیس وارد و در دو حالت عرض ترک ثابت

با توجه به نتایج بررسی آماری انجام شده به طور مشخص می توان دریافت که در زمانی که عمق به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته می شود با اضافه شدن عمق ناپیوستگی نشست های کلی خاک بستر به مراتب بیشتر اتفاق می افتد -محل هایی از جاده های کم ترافیک که دارای ترک های عمیق تر هستند بایست در مقایسه با مناطق دارای ترک های با عمق کم ولی بازشدگی بیشتر، با اولویت بالاتری مرمت و بهسازی شوند.

همچنین از زحمات آقای دکتر مهنهاد و همکاری آقای مهندس علی پور که در تحلیل نرم افزار پلکسیس کمک های شایانی نمودند، تشکر می شود.

-باغبان شوکت آباد، ر.، توفیق، و. و توفیق، م.، (۱۳۹۹)، "تثبیت خاک ماسه ای با ژئوپلیمر بر پایه نانو مواد و پوزولان تفتان"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۹، ص. ۲۳۷۸-۲۳۵۷.

-فیروزآبادی، ح. ح.، خبیری، م.م.، و برخوردار، ک.، (۱۳۹۹)، "بررسی امکان سنجی تثبیت خاک بستر راه مناطق کویری با پساب صنایع سرامیک"، یازدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران.

-بخشی، م.م.، آیتی، ب.، و گنجی دوست، ح.، (۱۳۹۹)، "بررسی تثبیت خاک با استفاده از نانو پلیمر پلی لاتیس (مطالعه موردی: منطقه حسین آباد میش مست استان قم)، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۲، ص. ۱۸.

-حسینی، ا.، یربلی، س.ا.، و صالحی، م.، (۱۳۸۳)، "ساخت راه در بستر ماسه ای روان با استفاده از پوزولان و آهک"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱، شماره ۱.

-حیدری فیروزآبادی، ح. ح.، و خبیری، م.م.، (۱۳۹۶)، "مطالعه اثر تغییر مشخصات تراکم خاک بستر و اصطکاک بین لایه های

در نتیجه باعث کاهش نشست کل لایه روسازی کم ترافیک می شود.

-عمق و عرض ترک دو پارامتر تأثیرگذار در میزان نشست هستند به طوری که با افزایش عمق ترک از ۵ به ۱۰ میلی متر (در یک عرض ثابت ترک) میزان نشست ناشی از نیروهای ژئواستاتیکی و نیروی بار چرخ حدود ۱۰ درصد افزایش می یابد و با افزایش عرض ترک از ۱/۵ به ۲/۵ میلی متر (در یک عمق ثابت ترک) میزان نشست ناشی از نیروهای ژئواستاتیکی و نیروی بار چرخ حدود ۱۲ درصد افزایش می یابد.

۶- سپاسگزاری

بخش هایی از تحلیل های ارائه شده در این پژوهش توسط نویسنده دوم برای تحقیقات پایان نامه انجام شد که در مراحل بعدی از آن حذف شده و توسط نویسنده اول باراهنمایی نویسنده سوم تکمیل و به صورت این نوشتار ارائه گردید.

۷- مراجع

-آقاجانی، ح. و چشمالوس، س.، (۱۴۰۰)، "بررسی تاثیر گسترش راه های روستایی بر شاخص فقر روستایی در استان های ایران"، فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی، دوره ۲۵، شماره ۷۵، ص. ۳۳-۱۷.

-آیین نامه طرح هندسی راه های ایران (نشریه ۴۱۵) (۱۳۹۱)، "سازمان مدیریت و برنامه ریزی".

-ارشدنژاد، ش.، (۲۰۱۹)، "الگوریتم سلسله مراتبی SBMR برای انتخاب بهترین راه دسترسی به معادن"، فصلنامه جاده، دوره ۲۷، شماره ۹۸، ص. ۱۶۶-۱۵۷.

-انتظارالمهدی، م. م. و پژوهان، م.، (۱۳۹۵)، "تثبیت خاک با فناوری نانو"، کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی.

-باطنی، ع.، جلالیان، ا.، پدیدار، م.، و معصومی، ا.، (۱۳۹۶)، "بررسی اثر الیاف پلی پروپیلن و رزین پلی وینیل استات در تثبیت خاک شرق اصفهان"، دومین همایش بین المللی افق های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی و مدیریت فرهنگی شهرها.

- زیست.
- کامبوزیا، ن.، عامری، م. و حسینیان، س. م.، (۱۴۰۰)، "بررسی عوامل موثر در شدت تصادفات راه‌های روستایی گیلان جهت تعیین موثرترین عوامل و ارائه راهکارهای ایمنی، فصلنامه جاده"، دوره ۲۹، شماره ۱۰۶، ص. ۱۲۸-۱۱۵.
- کریمی، ا. ا. رحیمی حسن آباد، ا.، فتاحیان، س.، و صبوری، ر.، (۱۳۹۸)، "تثبیت خاک‌های ماسه‌ای مسئله دار با استفاده از مسلح کننده‌ها. ششمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری و پنجمین نمایشگاه تخصصی انبوه سازان مسکن و ساختمان استان تهران.
- کریمیان، ا.، حسنلو، م.، و کریمی، غ.، (۱۳۹۷)، "تثبیت زیستی ماسه به روش تزریق سطحی"، مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)، دوره ۵۰، شماره ۴، ص. ۷۴۶-۷۳۵.
- کلاتی مقدم، ف.، محتشمی، ت. و بذرافشان مقدم، ب.، (۱۳۹۸)، "الگوی بهینه حمل و نقل صیفی‌جات در شبکه راه‌های روستایی استان خراسان رضوی، فصلنامه راهبردهای توسعه روستایی.
- هوشیار، ا. و رستمی، و.، (۱۳۹۷)، "استفاده از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در بهبود ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای"، مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰ شماره ۴، ص. ۷۶۴-۷۵۵.
- نظامی، و. خرقانی، س. و مهران نیا، ن.، (۱۳۹۶)، "مدل‌سازی عددی خاک دانه‌ای به سازی شده به روش بیولوژیکی در بستر راه"، دوره ۳۰، شماره ۲، ص. ۱۱۸-۱۰۹.
- یوسفی، س. ش.، طبرسا، ع. و باقری، ی.، (۱۳۹۹)، "تاثیر دما بر رفتار نشست پذیری خاک ریزدانه تثبیت شده با سیمان"، تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، دوره ۵۱، شماره ۱۲، ص. ۳۲۲۱-۳۲۳۵.
- Abdellatif, S. E., (2013), "Three-dimensional finite element analysis of treated sediment base cracked flexible pavement", International Conference on Civil, Transport and Environment Engineering, Penang (Malaysia).
- Afrakoti, M. T. P., Choobasti, A. J., Ghadakpour, M., & Kutanaei, S. S., (2020), Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil. Construction and Building Materials, 239, 117848.
- Afrin, H. (2017), "A review on different types soil stabilization techniques", International Journal of Transportation Engineering and Technology, 3(2), pp.19-24.
- Ahmed, A., Hossain, M. S., Bin Alam, M. J., & Khan, M. S., (2018), "Moisture and Matric
- برعکس العمل روسازی به روش عددی، نهمین همایش قیر و آسفالت ایران.
- خالقیان، م.، و صبا، ح. ر.، (۱۳۹۸)، "بررسی پارامترهای خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار تثبیت شده با آهک و نانو پلیمر پلی وینیل استات"، دومین کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام.
- خبیری، م. م. و مجیدی شاد، م. م.، (۱۳۹۸)، "ارزیابی خصوصیات عملکردی روسازی آسفالتی بر روی بسترهای ماسه‌ای با اختلاط الیاف طبیعی و امولسیون پلی‌اورتان".
- خبیری، م. م. و بلوچ سیرگانی، پ.، (۱۳۹۷)، "طراحی روسازی قابل اطمینان در مواقع بحرانی با مقاوم سازی خاک بستر با کاربرد ژئوپلیمر و بررسی به روش مدلسازی عددی"، اولین کنفرانس ملی نقش مهندسی عمران در کاهش مخاطرات.
- خبیری، م. م.، مجیدی شاد، م. و غفوری فرد، ز.، (۱۳۹۹)، "بررسی عملکرد خاک بستر ماسه‌ای بهسازی شده با رزین اپوکسی در کنترل خرابی شیارشدگی روسازی آسفالتی"، دوازدهمین همایش قیر و آسفالت ایران.
- خوشدل سنگده، م. نگهدار، ع. و قویدل، ا.، (۱۴۰۰)، "بررسی عملکرد تثبیت بیولوژیکی خاک به کمک نانوسیلیس"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز.
- ذوالفقاری فرس. و سوزنی، م.، (۱۳۹۵)، "بررسی روش‌های مختلف تثبیت خاک در روسازی راه"، سومین کنگره علمی پژوهشی افق‌های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران.
- سبحانی آبی بیگلو، م. و حمیدی، ا.، (۱۳۹۸)، "بررسی کارایی ماسه مسلح با ترکیب سیمان و ضایعات ظروف یکبارمصرف در بستر راه‌ها"، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران.
- سرفراز، س.، خبیری، م. و مهرنهاد، ح.، (۱۴۰۰)، "بررسی تاثیر نانوسلولز در اصلاح مشخصات مکانیکی و تغییر حجم خاک بستر ماسه‌ای لای‌دار در کنترل گسیختگی موضعی آن، مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۱.
- عاطفی فرد، م. خیری، م.، داوودی، س.، آزاد فلاح، ع.، و بهنیا، س.، (۱۳۹۵)، "مروری اجمالی بر مهمترین روش‌های بهسازی و تثبیت خاک‌های مختلف"، دومین کنفرانس بین‌المللی تحقیقات در عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار.
- عباسی، م.، عظیمی، ن.، و جلیلونند، م. (۱۳۹۲)، "واکاوی آثار اقتصادی اجتماعی راه‌های روستایی بر توسعه پایدار، مطالعه موردی استان کرمانشاه، کنفرانس علوم کشاورزی و محیط

- Mahima, D., & Sini, T., (2021), "Performance evaluation of demolition waste infilled geocell-reinforced subgrade by flexural and rutting analysis", *Road Materials and Pavement Design*, pp.1–16.
- Majumder, M., & Bhattacharyya, S., (2021), "Mechanical Stabilization of Subgrade Using Sand Cement Mixture", In *Transportation, Water and Environmental Geotechnics* (pp. 171–175, Springer.
- Mishra, A. P., Sahoo, R. R., & Pradhan, P. K., (2021), "Improvement of Clayey Subgrade by Using Ferro-Sand", In *Recent Trends in Civil Engineering*, pp. 485–499, Springer.
- Mustafa, N. A., Munikanan, V., Zakaria, R., Aminudin, E., Langie, S., Yahya, M., Yusof, mohammed A., Adzar, J., Syafiq, M., Rashid, A., & others, (2021), "A review on rural roads in Malaysia: Green practice toward socio-economics", *International Journal of Modern Social Sciences*, 1(1), pp.12–16.
- Patel, H. S., & others, (2013), "Laboratory assessment to correlate strength parameter from physical properties of subgrade", *Procedia Engineering*, 51, pp.200–209.
- Peng, J., Zhang, J., Li, J., Yao, Y., & Zhang, A., (2020), "Modeling humidity and stress-dependent subgrade soils in flexible pavements", *Computers and Geotechnics*, 120, 103413.
- Rahgozar, M. A., Saberian, M., & Li, J. (2018), "Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study", *Transportation Geotechnics*, 14, pp.52–60.
- Rahman, M. S., Podolsky, J. H., & Scholz, T., (2019), "Preliminary local calibration of performance prediction models in AASHTOWare pavement ME design for flexible pavement rehabilitation in oregon", *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(2), 5019002.
- Wang, X., Tao, J., Bao, R., Tran, T., & Tucker-Kulesza, S., (2018), "Surficial soil stabilization against water-induced erosion using polymer-modified microbially induced carbonate precipitation", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 4018267.
- Wu, J. T., & Wu, Y. T., (2020), "Performance Evaluation of Asphalt Pavement with Semi-rigid Base and Fine-sand Subgrade by Indoor Large-Scale Accelerated Pavement Testing", In *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation*, Springer, pp. 80–89.
- Suction Behavior in Unsaturated Subgrade through Field Instrumentation and Numerical Modeling. In *PanAm Unsaturated Soils 2017*, pp. 226–235.
- Amhadi, T. S., & Assaf, G. J., (2021), "Improvement of Pavement Subgrade by Adding Cement and Fly Ash to Natural Desert Sand", *Infrastructures*, 6(11), pp.151.
- Andavan, S., & Kumar, B. M., (2020), "Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions-A review. *Materials Today: Proceedings*", 22, pp.1200–1202.
- Anggraini, V., (2015), "Reinforcement Effects of Nano-Modified Coir Fibres on Lime-Treated Marine Clay", Ph. D. Thesis, Universiti Putra Malaysia (UPM), Seri Kembangan, Selangor.
- Asefzadeh, A., Hashemian, L., & Bayat, A. (2017), "Characterization of permanent deformation behavior of silty sand subgrade soil under repeated load triaxial tests", *Transportation Research Record*, 2641(1), pp.103–110.
- Asher, S., & Novosad, P., (2020), "Rural roads and local economic development", *American Economic Review*, 110(3), pp.797–823.
- Behnood, A., (2018), "Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques", *Transportation Geotechnics*, 17, pp.14–32.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P. G., & others, (2016), *PLAXIS 2016*. PLAXIS Bv, the Netherlands.
- Choobbasti, A. J., Samakoosh, M. A., & Kutanaei, S. S., (2019), "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers", *Construction and Building Materials*, 211, pp.1094–1104.
- Gowthaman, S., Iki, T., Nakashima, K., Ebina, K., & Kawasaki, S., (2019), "Feasibility study for slope soil stabilization by microbial induced carbonate precipitation (MICP) using indigenous bacteria isolated from cold subarctic region", *SN Applied Sciences*, 1(11), pp.1–16.
- Hoang, T., Alleman, J., Cetin, B., Ikuma, K., & Choi, S. G., (2019), "Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzymeinduced calcite precipitation (BEICP)", *Canadian Geotechnical Journal*, 56(6), pp.808–822.
- Kalkan, E., (2020), "A Review on the Microbial Induced Carbonate Precipitation MICP for Soil Stabilization", *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 2(1), pp.38–47.

Numerical Analysis of the Effect of Cracking of Sand Beds on Light Loading and Rural Routes in the Yazd-Bafgh Line

Zohreh, Ghafori fard, M.Sc., Grad., Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Sara Sarfaraz, M.Sc., Grad., Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

One of the most important road management programs in the world today is access road development; because rural access roads establish social and demographic connections between villages and cities and are an important factor in the expansion of trade and commerce. Whereas a large part of the country is covered with sand; most access roads run on sandy soil and one of the most important problems of access roads created on the sand bed is local cracks. Therefore, this study was conducted to numerically analyze the effect of cracking of sand beds on light and rural loading routes in the Yazd-Bafgh line. In this study, samples were taken from the sandy soil of the Yazd-Bafgh line and a number of samples were stabilized. Then, the characteristics of stabilized and unsterilized soil samples were entered in Plaxis software and examined in two cases of cracking. The results show that due to loading on a road with cracked sand bed soil, the pavement suffers a lot of subsidence (excessive allowance) but stabilization of sand bed soil significantly reduces subsidence; Thus, in a crack with a width of 2 and a depth of 10 mm (constant depth and width), the amount of settling after stabilization has decreased by 59% compared to before stabilization. The results also show that areas of low-traffic roads that have deeper cracks should be repaired with higher priority compared to areas with shallow cracks but more openness.

Keywords: Numerical Analysis, Cracking, Sandy Bed Soil, Rural Routes, Light Loaded Routes