بررسی آزمایشگاهی استفاده از مخلوط ماسه-HDPE به عنوان بستر تقویت‌شده راه

معصومه خدابخشی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

مهیار عربانی*، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

Email: arabani@guilan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰ – پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

چکیده

امروزه، استفاده از ضایعات پلاستیکی در مهندسی راه و ژئوتکنیک، به‌ویژه در تثبیت بستر راه، مورد توجه محققان قرار گرفته است. این مطالعه، به بررسی تأثیر استفاده از پلی‌اتیلن ضایعاتی خردشده با دانسیته زیاد (HDPE) به منظور تقویت بستر ماسه‌ای راه پرداخته است. در این پژوهش، اثر افزودن HDPE به ماسه از طریق انجام آزمایش‌های تحکیم، پروکتور اصلاح‌شده (MSP)، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و برش مستقیم (DS) مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج این پژوهش، افزودن HDPE به ماسه، به‌دلیل وزن مخصوص کم HDPE، حداکثر وزن مخصوص خشک مخلوط را کاهش داده، اما تغییر قابل توجهی در میزان رطوبت بهینه ایجاد نمی‌کند. همچنین، نتایج نشان داد که افزودن HDPE به ماسه، مقاومت برشی مخلوط را به دلیل افزایش مقاومت اصطکاکی و افزایش قفل و بست بین ذرات بهبود بخشیده و سبب افزایش CBR مخلوط ماسه–HDPE تا ۴۸/۷ درصد می‌گردد. بنابراین، معلوم گردید که استفاده از مخلوط ماسه-HDPE برای تقویت بستر، به‌طور قابل توجهی خواص مقاومتی بستر ماسه‌ای را افزایش داده و در نتیجه منجر به کاهش هزینه‌های احداث راه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بستر راه‌ها، CBR، HDPE، مدیریت ضایعات، خواص ژئوتکنیک.

۱. مقدمه

یکی از مهمترین عوامل در طراحی روسازی‌ها، مقاومت خاک بستر می‌باشد (پاتل و همکاران، ۲۰۱۳). تقویت و تثبیت بستر راه سبب افزایش توان باربری خاک بستر شده و در نتیجه کاهش ضخامت روسازی را به دنبال خواهد داشت. ساخت یک بستر باکیفیت و مقاوم، در افزایش عمر مفید واقعی روسازی نیز تأثیرگذار است (شیفر و همکاران، ۲۰۰۸). رسوبات ماسه‌ای فراوان‌ترین رسوبات محیط‌های کویری و ساحلی هستند که در نقاط مختلف جهان پراکنده‌اند. این رسوبات از توان باربری نسبتاً خوبی برخوردار هستند و به دلیل ساختار آنها امکان تثبیت و تقویت آنها از طریق مخلوط کردن آنها با مواد افزودنی به‌سادگی امکان‌پذیر است. به همین خاطر، تحقیقات زیادی در زمینه تثبیت و تقویت خاک‌های ماسه‌ای با مواد مختلف، از جمله پلاستیک‌های ضایعاتی، توسط محققان انجام شده است. بخش مهمی از این تحقیقات، به کاربرد پلاستیک‌ها و مواد پلیمری ضایعاتی اختصاص دارد (چودری و همکاران، ۲۰۱۰).

طبق نظر اتحادیه تجاری صنعت پلاستیک[1] (SPI)، پلاستیک به هفت دسته تقسیم می‌شود: پلی‌اتیلن با دانسیته زیاد (HDPE)، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، پلی‌اتیلن با دانسیته کم (LDPE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی-وینیل کلراید (PVC)، پلی‌استایرن (PS) و سایر موارد. از میان دسته‌های اصلی مواد پلی‌اتیلنی، HDPE یکی از مهم‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در صنعت پلاستیک به‌شمار می‌رود. باید توجه داشت که استفاده از مواد ضایعاتی مانند HDPE که انباشت آنها برای محیط‌زیست خطرناک است و محیط را آلوده می‌کنند، رویکردی مورد توجه، اقتصادی، جدید و سازگار با محیط‌زیست است. در ادامه، تحقیقات اخیر انجام شده در رابطه با تقویت بستر با مواد ضایعاتی پلاستیکی مورد بررسی قرار می-گیرد.

شاه و مودها (۲۰۱۹) اثر زباله پلاستیکی (پت) در خاک ماسه‌ای سیلت‌دار مورد استفاده در بستر روسازی (به عنوان تسلیح‌کننده خاک) را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آنها نشان داد که استفاده از ضایعات پلاستیکی پت، به علت افزایش CBR ماسه، یک راه‌حل مقرون به-صرفه برای بهبود مقاومت بستر است.

ابوختالا و فال (۲۰۲۱) کاربرد پلاستیک‌های مختلف PP، PET، HDPE و LDPE را در خاک‌های ماسه لای-دار/رسی و خاک ماسه‌ای جهت کاربرد در بستر بررسی کردند. بر اساس منحنی‌های تراکم، به دلیل چگالی نسبی کمتر مواد پلاستیکی، حداکثر چگالی خشک خاک بستر با استفاده از ضایعات پلاستیکی کاهش یافت. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری و مدول برجهندگی بستر به شکل، نوع و درصد پلاستیک بستگی دارد و جایگزینی جزئی زباله پلاستیکی با خاک می‌تواند در بستر جاده مفید باشد.

کرمی و همکاران (۲۰۲۱) از ترکیب سیمان، پلیمرها، آنزیم‌ها و خاکستر بادی برای تثبیت خاک بستر استفاده کردند. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری خاک بستر با استفاده از مخلوطی از خاکستر بادی، سیمان و آنزیم‌ها بهبود می‌یابد و در نتیجه ضخامت لایه جاده را کاهش می‌دهد.

امحدی و اصف (۲۰۲۱) به بررسی آزمایشگاهی ماسه کویری اصلاح‌شده با سیمان و خاکستر بادی پرداختند. ماسه کویری در صورت بهبود با سیمان می‌تواند به عنوان یک مصالح ساختمانی قابل اعتماد برای برآوردن نیازهای مقاومتی استفاده شود و ضخامت روسازی راه و آسفالت را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

آمنا (۲۰۲۲) با هدف بهبود مقاومت خاک‌های انبساطی، به بررسی استفاده از نوارهای پلاستیکی ضایعاتی حاصل از بطری آب برای لایه بستر جاده‌ها پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از نوارهای زباله پلاستیکی به عنوان مصالح تقویت‌کننده بستر می‌تواند

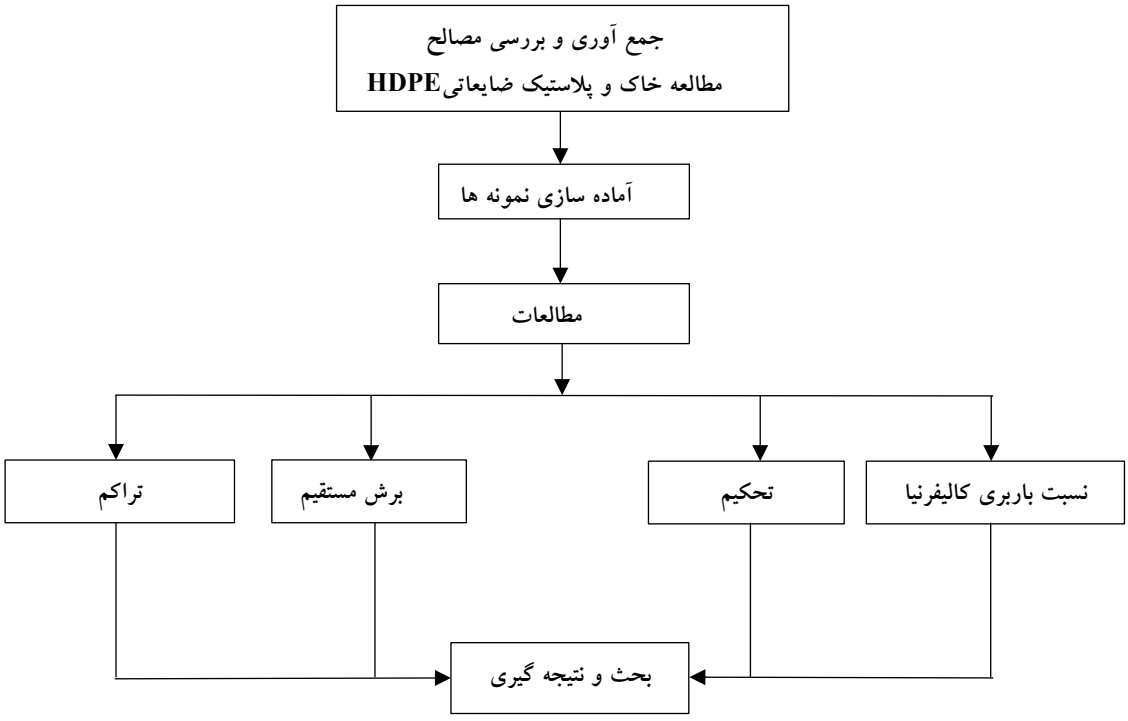
[1]- The Plastic Industry Trade Association

علاوه بر بهبود خصوصیات خاک، به کاهش آلودگی زیست‌محیطی کمک کند.

اگرچه مطالعات متعددی در رابطه با استفاده از مواد پلاستیکی مختلف برای تقویت و بهسازی بستر راه انجام شده است ولی تا کنون هیچگونه مطالعه‌ای روی تأثیر استفاده از ذرات خردشده HDPE به‌عنوان یک ماده ضایعاتی فراوان در طبیعت بر بهبود خواص خاک‌های ماسه‌ای موجود در بستر راه انجام نشده است. در این پژوهش، با استفاده از آزمایش‌های مختلف، تأثیر افزودن ضایعات پلاستیکی (ذرات خردشده HDPE) در بهبود خواص ژئوتکنیک مخلوط ماسه–HDPE به‌منظور کاربرد آن در تثبیت بستر راه‌ها بررسی شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر HDPE بر پارامترهای مقاومتی، از جمله حداکثر وزن مخصوص خشک، زاویه اصطکاک داخلی و به‌ویژه افزایش CBR بستر ماسه‌ای راه‌ها است که منجر به کاهش ضخامت روسازی و به تبع آن کاهش هزینه احداث راه می‌گردد.

۲. کارهای آزمایشگاهی

شکل ۱، روند کارهای مختلف انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بخش عمده‌ای از فعالیت‌های انجام شده در این پژوهش مربوط به مطالعات آزمایشگاهی می‌باشد. در این پژوهش، بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های تراکم ، برش مستقیم، تحکیم و CBR روی آنها انجام گردیده است. کلیه آزمایش‌ها با سه بار تکرار انجام شدند.



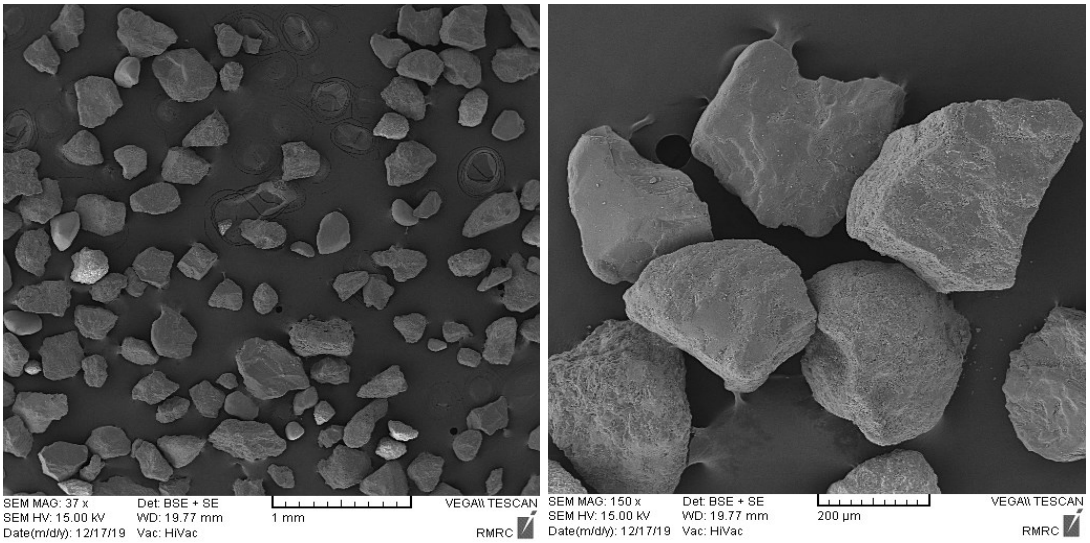
شکل ۱. مراحل کارهای انجام شده در این پژوهش

۲-۱. مصالح

۲-۱-۱. ماسه

مصالح مورد بررسی در این پژوهش، خاک ماسه بندر انزلی، یکی از شهرهای ساحلی استان گیلان، است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی خاک متحد، این ماسه به عنوان ماسه با دانه‌بندی بد (SP) طبقه‌بندی می‌شود. توزیع اندازه ذرات در جدول ۱ و خصوصیات فیزیکی خاک مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۲، تصویری را که از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ماسه بندر انزلی به دست آمده نشان می‌دهد.

طبق تحقیق شیفر و همکاران (۲۰۰۸) و ارائه راهنمای طراحی برای بهبود کیفیت بستر و زیراساس جاده‌ها، ماسه SP جزو خاک‌های مناسب جهت استفاده در بستر می‌باشد و از آنجایی که محدوده زاویه اصطکاک داخلی و محدوده وزن خشک ویژه ماسه بندرانزلی در محدوده ماسه رایج (احمدی و همکاران، ۲۰۱۵) قرار دارد، نتایج حاصله را می‌توان به سایر انواع ماسه‌های SP تعمیم داد.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ماسه انزلی مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱. توزیع دانه‌بندی ماسه

جرم رد شده از الک (٪)	نام الک/اندازه چشمه (میلی‌متر)
۹۹/۹۸	شماره ٤ (٤/۷۵ mm)
۹۹/۷٦	شماره ۸ (۲/۳٦ mm)
۹۹/۷۰	شماره ١٦ (۱/۱۸ mm)
۹۹/۵۰	شماره ۳۰ (۰/۵۹۵ mm)
۹٤/٦٤	شماره ۵۰ (۰/۳ mm)
٦/۷٦	شماره ۱۰۰ (۰/۱۵ mm)
۰	شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ mm)
۰	Pan

جدول ۲. پارامترهای شاخص ماسه انزلی

پارامتر	شاخص
اسم خاک در طبقه‌بندی متحد	ماسه بددانه‌بندی شده (SP)
D_{50} (میلی‌متر)	۰/۲۱
D_{max} (میلی‌متر)	۱/۱۸
ضریب انحنای خاک	۲/٤
ضریب خمیدگی خاک	۱/۲
حداکثروزن مخصوص خشک خاک	١٦/۲

حداقل وزن مخصوص خشک خاک	۱۵
حداکثر تخلخل	۰/۷۳
حداقل تخلخل	۰/٦۰۵
چگالی خاک	۲/٦۵

۲-۱-۲. مواد پلاستیکی

در این تحقیق، زباله پلاستیکی HDPE خردشده، به عنوان مواد تقویت‌کننده ماسه استفاده شد. تراشه‌های HDPE به صورت خردشده از یک کارخانه بازیافت خریداری شدند. پس از شستشو و خشک شدن، HDPE توسط دستگاه برش در کارخانه به قطعات کوچک خرد شد. خواص HDPE مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ آورده شده است. همچنین، جدول ٤، توزیع اندازه ذرات HDPE را نشان می‌دهد.

جدول ۳. خصوصیات HDPE استفاده شده در پژوهش

خصوصیات	مقادیر
کومونومر	بوتن-۱، هگزان-۱، اکتن-۱
کومونومر شکسته	کمتر از ۱۰٪ وزن
چگالی (g/cm^3)	۰/۹٤۲-۰/۹۳۲
شاخص جریان مذاب (۱۹۰/۵)	min ۱۰ g/۳ -۰/۳
دمای ذوب	۱۳۰ ^oC
کریستالیتی	۵۵-۵۰ درصد
تعداد جرم مولکولی متوسط	۵۰۰۰۰-۱۵۰۰۰
پراکندگی وزن مولکولی	٤-۱۵
گرمای ذوب مربوط به J/g ۲۹۳ برای HDPE کریستالی است	

جدول ٤. توزیع دانه‌بندی HDPE

جرم رد شده از الک (٪)	نام الک/اندازه چشمه (میلی‌متر)
۱۰۰	(٤/۷۵ mm) شماره ٤
۹۹/۹۹	(۲/۳٦ mm) شماره ۸
٤۲/۱۸	(۱/۱۸ mm) شماره ۱٦
۱۱/٦۷	(۰/۵۹۵ mm) شماره ۳۰
۲/۰۷۳	(۰/۳ mm) شماره ۵۰
۰/۳۱٦	(۰/۱۵ mm) شماره ۱۰۰
۰	(۰/۰۷۵ mm) شماره ۲۰۰
۰	Pan

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

چهار نسبت جرم خشک HDPE خردشده (۲، ٤، ٦ و ٨ درصد) انتخاب شده و با ماسه مخلوط و با بیلچه هم زده شد تا یکنواختی کامل حاصل شود. برای جلوگیری از جداشدگی ذرات، ۵٪ رطوبت به مخلوط‌ها اضافه شد تا بین ماسه و تراشه‌های HDPE چسبندگی ایجاد شود. ژو و همکاران (۲۰۰۸) آزمایش‌های برش مستقیم را روی مخلوط‌های ماسه و دانه‌های EPS در شرایط خشک و مرطوب انجام دادند. آنها گزارش دادند که این مقدار آب مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها تأثیر ناچیزی بر مقاومت مخلوط دارد. برای مقایسه بهتر نتایج، آزمایش‌ها روی نمونه‌های خاک بدون HDPE نیز انجام شد.

۲-۳. آزمایش‌های آزمایشگاهی

به‌طور کلی، هدف این مطالعه، بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن HDPE به ماسه در بستر راه‌ها بوده است. برای دستیابی به بستر با کیفیت خوب، درک مناسب از خصوصیات مهندسی خاک بستر مانند حداکثر وزن مخصوص خشک، CBR و پارامترهای مقاومت برشی ضروری است. به همین خاطر، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومتی روی خاک ماسه‌ای تقویت‌شده و تقویت نشده انجام گردید.

۲-۳-۱. آزمایش پروکتور اصلاح‌شده (MSP)

آزمایش‌های پروکتور اصلاح‌شده طبق استاندارد ASTM D698 (۲۰۲۱) برای محاسبه حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) و درصد رطوبت بهینه (OMC) انجام شد. آزمایش‌های تراکم در درصدهای مختلف HDPE و درصد رطوبت برای به دست آوردن روابط بین وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت خاک انجام گردیدند.

۲-۳-۲. آزمایش برش مستقیم (DST)

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D3080 (۲۰۲۰) در جعبه برش در شرایط وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه با نرخ کرنش کنترل شده یک میلی‌متر در دقیقه انجام شد. آزمایش برش مستقیم روی مخلوط ماسه–HDPE برای ارزیابی تأثیر HDPE بر بهبود مقاومت برشی ماسه انجام گردید. آزمایش‌ها در سه تنش نرمال (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال) انجام شدند. با دقت کافی، مخلوطی همگن و یکنواخت تهیه گردید. تمام نمونه‌ها در دو چگالی نسبی (D_r) ٤۰ و ۷۰ درصد متراکم شدند و متعاقباً در تنش‌های نرمال انتخابی مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳-۳. آزمایش تحکیم یک‌بعدی

آزمایش تحکیم برای محاسبه رفتار پارامترهای تراکم-پذیری تحت تنش نرمال اعمال شده، انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های تراکم‌پذیری، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی مطابق با استاندارد ASTM D2435 (۲۰۲۰) انجام شد. برای بررسی تأثیر HDPE بر رفتار تحکیم مخلوط، آزمایش روی درصدهای مختلف HDPE انجام شد. پس از اختلاط HDPE با ماسه و رساندن تراکم مخلوط تا تراکم نسبی معین (٤۰ و ۷۰ درصد)، بار اعمال شد. این فرآیند برای سه تنش نرمال (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال) تکرار شد. در پایان اعمال افزایش تنش، نسبت فضای خالی بر اساس روش ارتفاع خاک جامد محاسبه گردید.

۲-۳-٤. آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا

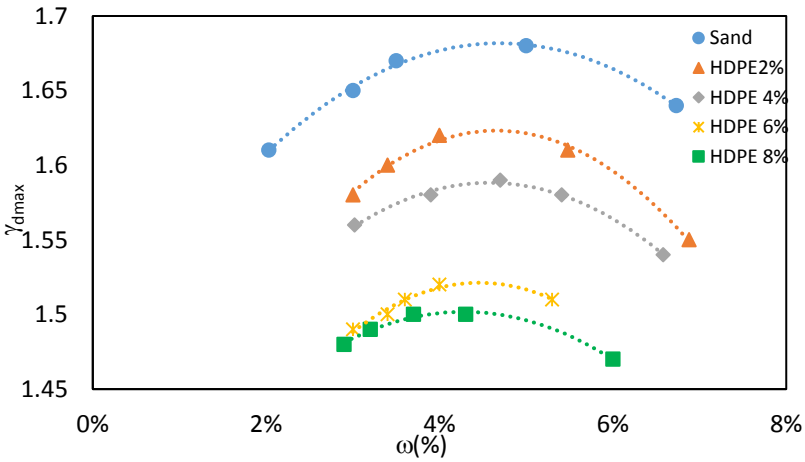
آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا، مقاومت باربری خاک بستر و لایه‌های شنی راه را برای طراحی روسازی ارزیابی می‌کند. در این پژوهش، از آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا برای ارزیابی اثربخشی ضایعات پلاستیکی بر مقاومت مخلوط ماسه-HDPE استفاده گردید. برای این

منظور، نمونه‌های استوانه‌ای در درصد رطوبت بهینه متراکم گردیدند. برای بارگذاری، از یک ماشین مکانیکی مجهز به یک پایه متحرک که با سرعت یکنواخت ۱٫۲۷ میلی‌متر در دقیقه حرکت می‌کند، استفاده شد. آزمایش‌های ظرفیت باربری کالیفرنیا در درصدهای مختلف HDPE و بر اساس استاندارد ASTM D1883-21 (۲۰۲۱) انجام شد.

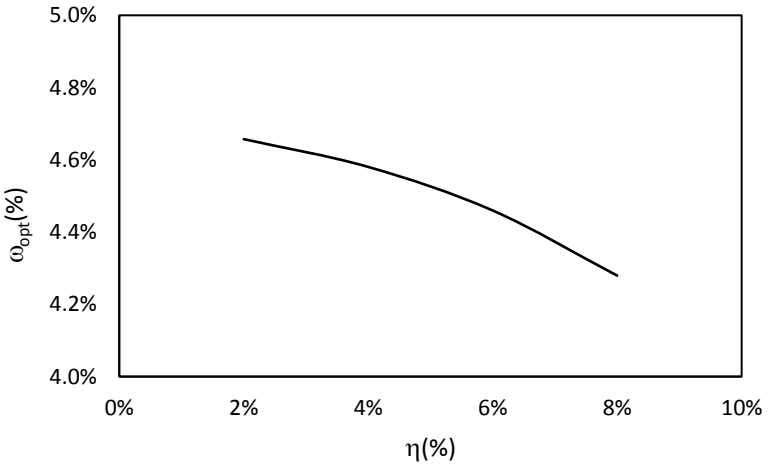
۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش پروکتور اصلاح‌شده

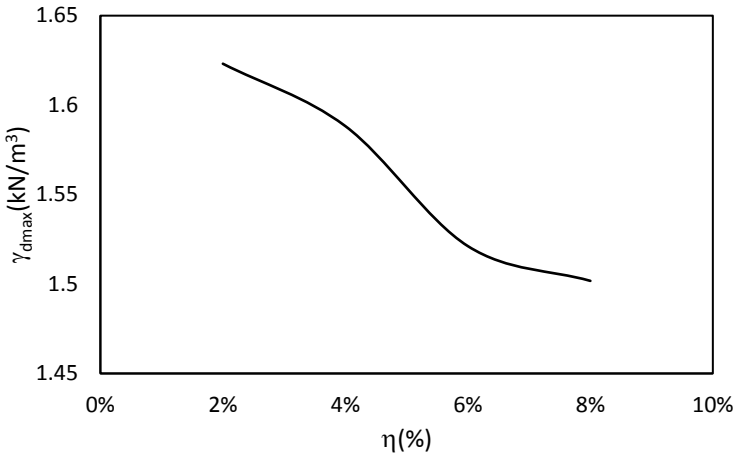
ارتباط بین وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه از آزمایش‌های تراکم برای خاک مخلوط شده با درصدهای مختلف HDPE در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روند تغییرات منحنی‌های تراکم خاک‌های ماسه‌ای حاوی HDPE مشابه خاک ماسه خالص است. بر اساس شکل ۳، افزایش درصد HDPE در مخلوط ماسه-HDPE، وزن مخصوص خشک را به دلیل وزن مخصوص کم HDPE کاهش داده، اما تغییر زیادی در درصد رطوبت بهینه ایجاد نکرده است. تغییرات وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه برای مخلوط در درصدهای مختلف HDPE در شکل‌های ٤ و ٥ نشان داده شده است.



شکل ۳. رابطه درصد رطوبت- وزن واحد خشک در ماسه با مقادیر مختلف HDPE



شکل ٤. اثر درصدهای مختلف HDPE بر درصد رطوبت بهینه مخلوط

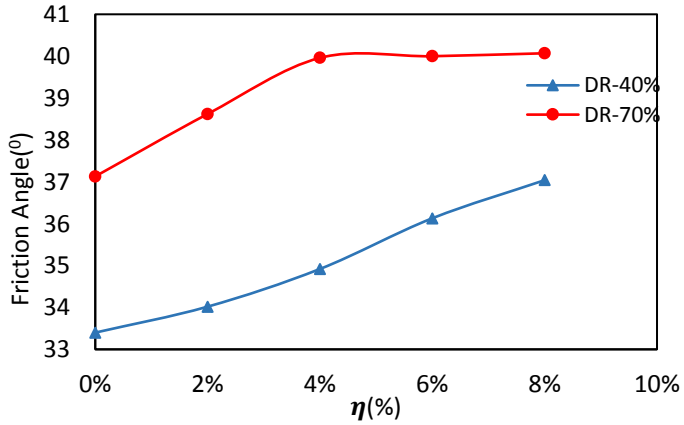


شکل ۵. **اثر درصدهای مختلف HDPE بر** وزن مخصوص خشک **مخلوط**

نتایج تحقیق کومار و همکاران (۲۰۱۸) در رابطه با اثر افزودن پلی‌اتیلن با دانسیته کم (HDPE) به خاک لای با حد روانی کم (ML) و نتایج تحقیق اسود حسن و همکاران (۲۰۲۱) در مورد افزودن PET و PP به خاک‌های لای و رس و همچنین تحقیق ابوختالا و فال (۲۰۲۱) نشان دادند که افزودن الیاف پلاستیکی منجر به کاهش حداکثر چگالی خشک مخلوط می‌گردد که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت دارد.

۳-۲. آزمایش برش مستقیم (DST)

شکل ٦، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی را با درصدهای مختلف HDPE در تراکم نسبی٤٠، برابر ۷۰٪ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ٦، زاویه اصطکاک داخلی مخلوط، با افزایش درصد HDPE، به دلیل ظرفیت درهم قفل‌شدن بین خاک و ذرات HDPE به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای تراکم نسبی بیشتر و با افزایش بیشتر از ٤ درصد HDPE، افزایش زاویه اصطکاک تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در حالی که در تراکم نسبی ٤٠٪، روند افزایشی پارامترهای برشی با افزایش HDPE همچنان ادامه می‌یابد. در واقع، در مخلوط ماسه سست، حفره‌های ایجاد شده توسط ذرات HDPE توسط دانه‌های ماسه اشغال می‌شود، به طوری که زاویه اصطکاک این مخلوط بیشتر از مخلوط متراکم افزایش می‌یابد.

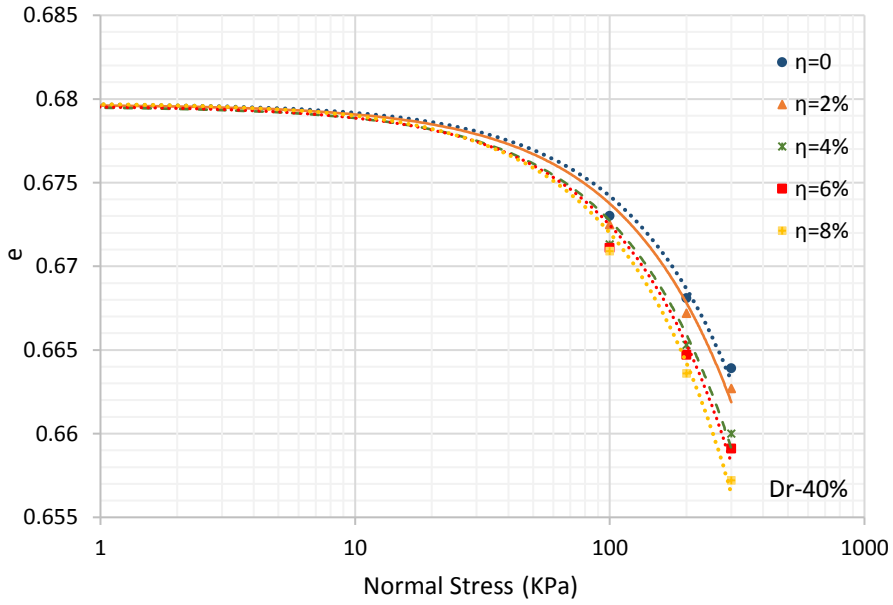


شکل ٦. اثر درصد HDPE بر زاویه اصطکاک

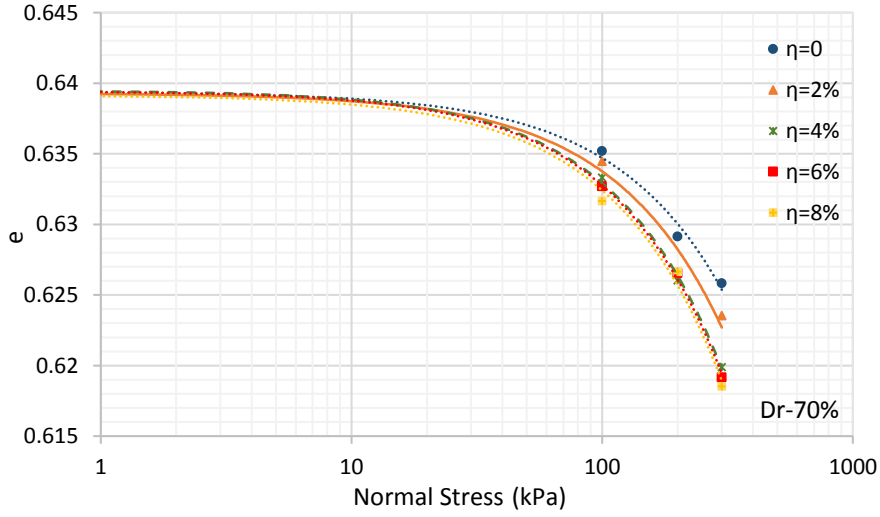
یافته‌های این مطالعه، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی ابوختالا و فال (۲۰۲۱) دارد. آنها به این نتیجه رسیدند که افزودن زباله پلاستیکی به خاک‌های ماسه‌ای می‌تواند ظرفیت باربری و مدول برجهندگی ماسه را افزایش داده و سبب افزایش مقاومت آن جهت استفاده در بستر راه گردد.

۳-۳. آزمایش تحکیم یک‌بعدی

نتایج آزمایش تحکیم یک‌بعدی در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است. در این شکل‌ها، رابطه بین نسبت تحلخل و تنش اعمال شده در ٤٠٪ و ۷۰٪ = D_r برای خاک مخلوط با درصدهای مختلف HDPE ارائه شده است.



شکل ۷. نسبت فضای خالی در برابر فشار اعمال شده در D_r=٤٠٪

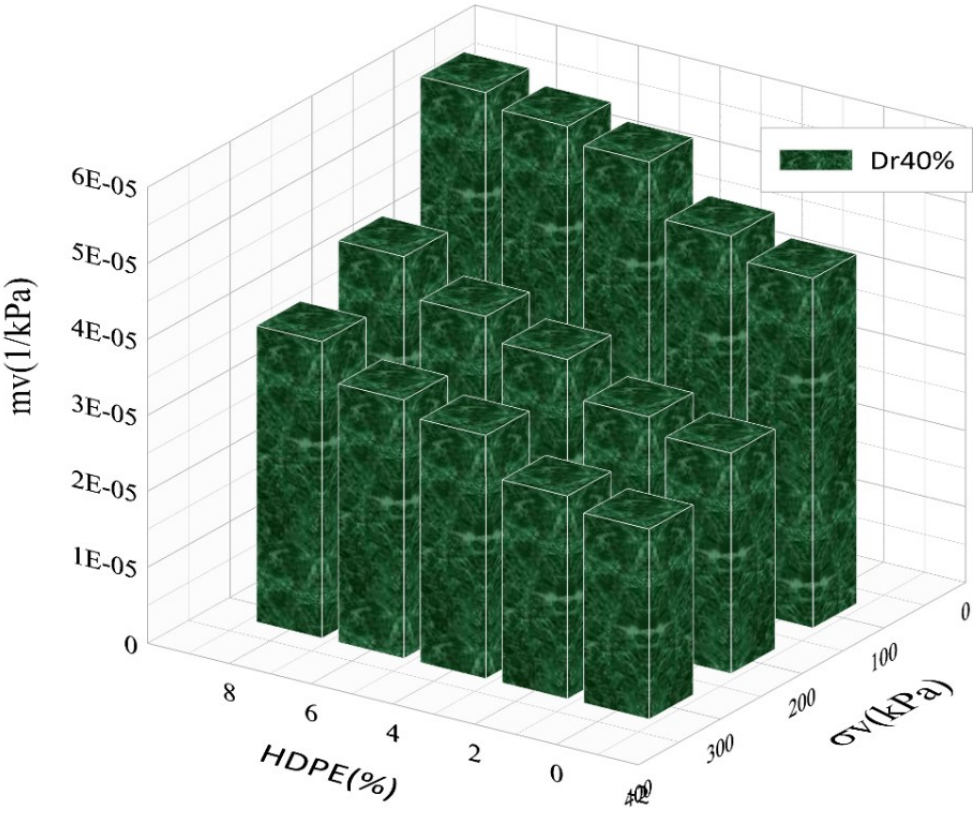


شکل ۸. نسبت فضای خالی در برابر فشار اعمال شده در D_r=۷۰٪

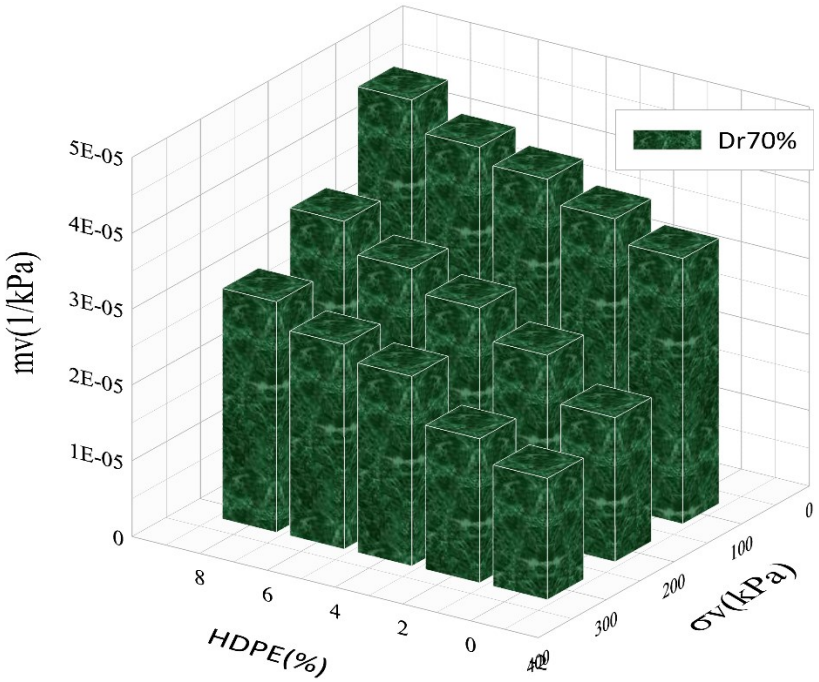
همانطور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، تخلخل خاک با افزایش درصد HDPE کاهش می‌یابد. از آنجایی که چگالی HDPE کم است، می‌تواند فضاهای خالی بیشتری را پر کند و در نتیجه نسبت فضای خالی بیشتر کاهش می‌یابد. شیب منحنی e- log P نشان می‌دهد که فشردگی مخلوط با افزایش درصد HDPE افزایش می‌یابد.

رابطه بین درصد ذرات HDPE (η) و ضریب فشردگی حجمی مخلوط (m_v) برای مخلوط ماسه - HDPE در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. وقتی همه متغیرها ثابت نگه داشته شدند، ضریب فشردگی حجمی مخلوط با افزایش درصد HDPE افزایش یافت.

ضریب فشردگی حجمی مخلوط‌های ماسه-HDPE تابعی از درصد HDPE، فشار وارده و تراکم نسبی مخلوط‌ها است. با توجه به کاهش تخلخل با افزایش درصد HDPE، تغییرات تخلخل خاک نسبت به تخلخل اولیه افزایش می‌یابد. در نتیجه، ضریب فشردگی حجمی مخلوط افزایش یافته و ضریب فشردگی حجمی مخلوط ماسه-HDPE با افزایش تراکم نسبی و فشار وارده کاهش می‌یابد. نتایج بررسی بابو و چوکسی (۲۰۱۱) روی ماسه و خاک قرمز حاوی پت نیز مؤید این مطلب است. در پژوهش این محققان، پارامترهای فشردگی، به‌دلیل وجود زباله‌های پلاستیکی در ماسه و خاک، کاهش یافت.



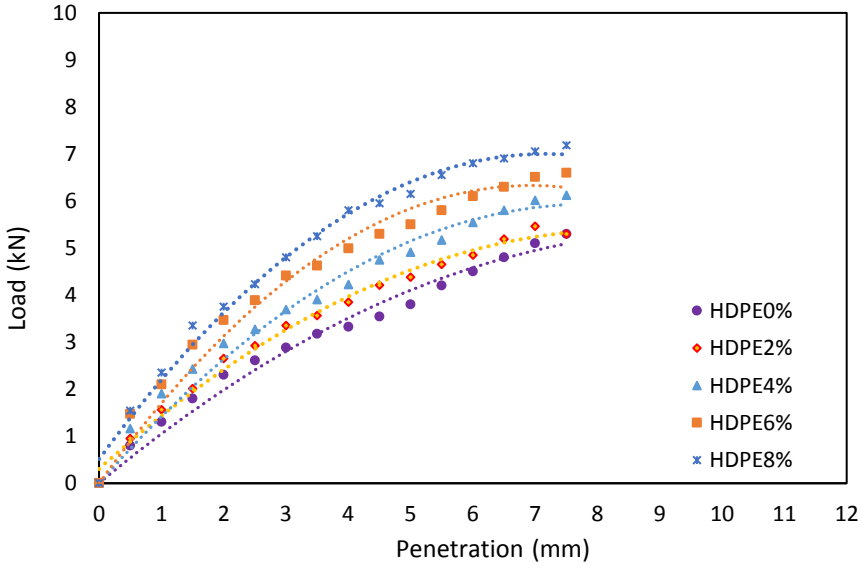
شکل ۹. اثر درصد HDPE بر ضریب فشردگی حجمی مخلوط در D_r=٪۴۰



شکل ۱۰. اثر درصد HDPE بر ضریب فشردگی حجمی مخلوط در D_r=٪۷۰

۳-٤. آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا

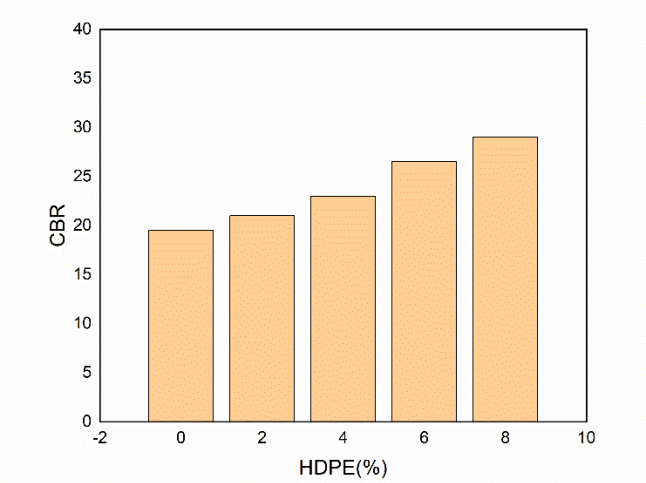
منحنی‌های نفوذ بار حاصل از آزمایش‌های ظرفیت باربری کالیفرنیا برای ماسه خالص و مخلوط ماسه-HDPEبا مقادیر مختلف پلاستیک ضایعاتی (۲، ٤، ٦ و ۸ درصد) در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. منحنی نفوذ بار برای درصدهای مختلف HDPE

به طور کلی، با استفاده از HDPE خردشده در خاک، به طور قابل توجهی بار وارده از طرف پیستون برای یک تغییرشکل معین، در مقایسه با ماسه خالص، افزایش یافت. افزایش مقدار CBR را می‌توان به پیوند بهتر بین

تراشه‌های HDPE و ذرات ماسه در مقایسه با ماسه خالص نسبت داد. شکل ۱۲، تغییر مقدار CBR با درصدهای مختلف HDPE خردشده را برای مخلوط‌های ماسه- HDPE ارائه می‌دهد.



شکل ۱۲. تغییر CBR با درصد HDPE

بر اساس نتایج، اختلاط ماسه با زباله پلاستیکی خردشده HDPE، مقدار ظرفیت باربری کالیفرنیا را افزایش داد. نتایج افزایش CBR نشان داد که مخلوط ماسه–HDPE می‌تواند به عنوان یک لایه بستر نسبتاً قوی در ساخت روسازی استفاده شود. این یافته، با نتایج تحقیق شاه و مودها (۲۰۱۹) و ابوختالا و فال (۲۰۲۱) مبنی بر افزایش CBR خاک ماسه‌ای با افزایش پلاستیک مطابقت دارد. اگرچه در مطالعه آنها، برخلاف این پژوهش، از پلاستیک الیافی به جای پلاستیک خردشده استفاده شده، اما آنها رفتار مشابهی را در رابطه با روند تغییرات CBR مشاهده کردند. همچنین، طبق پژوهش اسود حسن و همکاران (۲۰۲۱)، تثبیت خاک با مواد شیمیایی با انتشار دی‌اکسید کربن همراه است و سبب آلودکی زیست‌محیطی می‌شود. در حالی که تثبیت بستر با پلاستیک چنین نیست. در واقع، طبق تحقیق این محققان، تثبیت بستر با پلاستیک علاوه بر افزایش CBR، دارای اثرات مخرب افزودنی‌های شیمیایی مختلف مورد استفاده برای تثبیت نمی‌باشد.

با توجه به راهنمای مرجع جنبه‌های ژئوتکنیک روسازی‌ها (کریستوفر و همکاران، ۲۰۰۶)، با افزایش مقاومت خاک، ضخامت مورد نیاز بستر کاهش می‌یابد و با بهینه‌سازی استفاده از مصالح مصرفی می‌توان هزینه‌های ساخت و ساز راه‌ها را به حداقل رساند. طبق نتایج این پژوهش، جایگزین کردن بخشی از مصالح طبیعی با مواد ضایعاتی، با توجه به افزایش مقاومت برشی و CBR، سبب صرفه‌جویی در استفاده از مصالح طبیعی، کاهش ضخامت بستر، کاهش هزینه‌ها و کمک به محیط‌زیست می‌شود. به طور کلی، هرچه مقدار CBR بیشتر باشد، هزینه‌های ساخت روسازی کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به افزایش ٤٨/٧ درصدی مقدار CBR با به‌کارگیری ٪۸ ذرات خردشده HDPE، انتظار می‌رود که ضخامت روسازی و در نتیجه هزینه‌های احداث راه به‌طور قابل توجهی تقلیل یابد.

٤. مقایسه نتایج آزمایشگاهی

در مقایسه با ماسه خالص، مخلوط ماسه و HDPE خردشده دارای وزن مخصوص کمتر بوده، ولی به علت

تیزگوشه بودن ذرات HDPE خردشده، قفل و بست بین دانه‌های ماسه و HDPE افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش مقاومت برشی مخلوط ماسه–HDPE می‌شود. به همین خاطر، افزایش CBR با افزایش درصد HDPE را می‌توان به افزایش مقاومت برشی مخلوط ماسه–HDPE نسبت داد. به عبارت دیگر، وجود ذرات پلاستیک خردشده در مخلوط، ضمن محدود کردن حرکت (کرنش جانبی) توده مخلوط در زیر فشار سنبه در آزمایش، سبب افزایش مقاومت مخلوط ماسه–HDPE در مقابل نفوذ سنبه دستگاه آزمایش CBR می‌شود.

با توجه به نتایج آزمایش تحکیم، افزایش HDPE به ماسه منجر به کاهش تخلخل مخلوط ماسه–HDPEمی‌شود و تغییرات تخلخل خاک نسبت به تخلخل اولیه افزایش می‌یابد. بنابراین، ضریب فشردگی حجمی مخلوط با افزایش HDPE افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به سبک‌تر شدن و کاهش وزن مخصوص مخلوط نسبت داد. بنابراین، به علت سبکی وزن و کاهش تخلخل مخلوط، قابلیت استفاده در کاربردهای دیگر، از جمله خاکریزهای راه و راه‌آهن را هم دارا خواهد بود.

۵. تجزیه و تحلیل حساسیت

بر اساس روش دامنه کسینوس (CAM)، تحلیل حساسیت برای ارزیابی اهمیت نسبی بین پارامترهای ورودی و مقادیر نتایج انجام شد. قدرت رابطه بین x_i و x_j با معادله (۱) به دست می‌آید:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{m} x_{ik} x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m} x_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^{m} x_{jk}^2}} \qquad (۱)$$

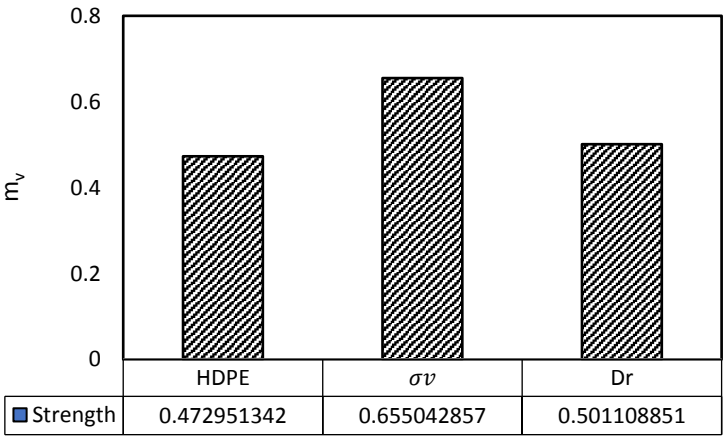
که در آن، هر یک از پارامترهای ورودی به عنوان یک آرایه داده X، که در معادله (۲) نشان داده شده است، تشکیل می‌شود (منجزی و همکاران، ۲۰۱۰):

$$X = \{x_1 . x_2 . x_3 ..... x_i .... x_n\} \qquad (۲)$$

و هر یک از عناصر آن یک بردار در فضای m بُعدی است که در معادله (۳) ارائه شده است (منجزی و همکاران، ۲۰۱۰):

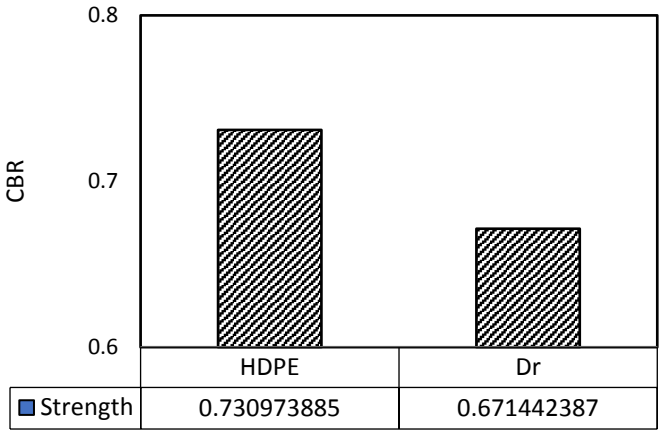
$$x_i = \{x_{i1} . x_{i2} . x_{i3} ..... x_{im}\} \qquad (۳)$$

رابطه بین ضریب فشردگی حجمی و پارامترهای ورودی در شکل ١٤ آورده شده است. بر اساس نتایج، σ_v مهمترین و تأثیرگذارترین عامل بر m_v می‌باشد.



شکل ١٤. تحلیل حساسیت بین ضریب فشردگی حجم (m_v) و پارامترهای ورودی

شکل ۱۵، رابطه بین CBR و پارامترهای ورودی (D_r و درصد HDPE) را نشان می‌دهد. مقادیر CBR به عنوان شاخصی از ظرفیت باربری، مقاومت و استحکام خاک در طراحی و ساخت روسازی عمل می‌کند. بر اساس تحلیل حساسیت، از آنجایی که مخلوط HDPE در ماسه به طور قابل توجهی بر CBR تأثیر می‌گذارد، می‌توان از آن در طراحی روسازی و ساخت زیرسازی راه‌ها استفاده کرد.



شکل ۱۵. تحلیل حساسیت بین CBR و پارامترهای ورودی

٦. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خواص مخلوط ماسه–HDPE خردشده به منظور استفاده به عنوان مصالح بستر راه مورد بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- بر اساس نتایج آزمایش تراکم، افزودن HDPE خردشده به ماسه، وزن مخصوص خشک مخلوط را به دلیل وزن مخصوص کم آن کاهش می‌دهد. به‌دلیل کم و ناچیز بودن ویژگی جذب رطوبت HDPE، تفاوت قابل توجهی در درصد رطوبت بهینه ماسه تقویت‌شده با HDPE و ماسه خالص وجود ندارد.
- براساس نتایج آزمایش تحکیم، افزودن ذرات خردشده HDPE به ماسه سبب کاهش تخلخل مخلوط ماسه–HDPE می‌گردد و در نتیجه، ضریب فشردگی حجمی مخلوط ماسه–HDPE با اضافه کردن HDPE افزایش می‌یابد. این موضوع به علت سبک‌تر شدن و کاهش وزن مخصوص خشک مخلوط ماسه–HDPE است. بنابراین به دلیل سبکی وزن، مخلوط حاصل علاوه بر بستر تقویت‌شده راه، قابلیت استفاده در کاربردهای دیگر، از جمله خاکریزهای راه، را هم خواهد داشت.
- مخلوط ماسه و HDPE خردشده نسبت به ماسه خالص دارای وزن مخصوص کمتر بوده ولی به علت تیزگوشگی ذرات HDPE، قفل و بست بین ذرات ماسه و HDPE افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش مقاومت برشی مخلوط ماسه–HDPE می‌شود. به همین خاطر، افزایش مقدار CBR با افزایش مقدار درصد HDPE را می‌توان به افزایش مقاومت برشی مخلوط ماسه–HDPE نسبت داد.
- بر اساس نتایج آزمایش CBR، اختلاط ماسه با ذرات خردشده HDPE منجر به افزایش مقدار CBR می‌گردد. با افزودن ۸ درصد HDPE خردشده، مقدار CBR مخلوط تا ٤٨/٧ درصد افزایش می‌یابد. از این

رو، بهبود مقادیر CBR مخلوط ماسه–HDPE باعث می‌شود تا این مخلوط به عنوان یک لایه بستر تقویت‌شده نسبتاً قوی در احداث راه قابل استفاده باشد.

- طبق نتایج این پژوهش، جایگزینی بخشی از ماسه طبیعی بستر راه با ذرات خردشده HDPE، با توجه به افزایش مقاومت برشی و CBR، سبب صرفه‌جویی در استفاده از منابع طبیعی، افزایش مقاومت خاک بستر، کاهش هزینه احداث راه و کمک به محیط زیست می‌شود.

۷. مراجع

Abukhettala, M. and Fall, M. 2021. "Geotechnical characterization of plastic waste materials in pavement subgrade applications". Transport. Geotech., 27: 1-13.

Ahmadi, H., Eslami, A. and Arabani, M. 2015. "Characterization of sedimentary Anzali sand for static and seismic studies purposes". Int. J. Geog. Geol., 4(10): 155-169.

Amena, S. 2022. "Utilizing solid plastic wastes in subgrade pavement layers to reduce plastic environmental pollution". Clean. Eng. Technol. 7. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100438

Amhadi, T. S., Assaf, G. J. 2021. "Improvement of pavement subgrade by adding cement and fly ash to natural desert sand". Infrastruct., 6(11): 151. https://doi.org/10.3390/infrastructures6110151

ASTM D1883-21. 2021. "Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory- compacted soils". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D3080/D3080M-11. 2020. "Standard test methods for direct shear test of soils under consolidated drained conditions". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D2435-04/D2435M-11. 2020. "Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D698-12. 2021. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Aswad Hassan, H. J., Rasul, J. and Samin, M. 2021. "Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil". Transport. Infrastruct. Geotech., 8: 390-413.

Babu, G. L. S. and Chouksey, S. K. 2011. "Stress-strain response of plastic waste mixed soil". Waste Manag., 31(3): 481-488.

Choudhary, A. K., Jha, J. N. and Gill, K. S. 2010. "Utilization of plastic wastes for improving the sub-grades in flexible pavements". PP. 320-326. In: Paving Materials and Pavement Analysis.

Christopher, B. R., Charles Schwartz, P. E. and Boudreau, P. E. 2006. "Geotechnical aspects of pavements". U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWANHI-05-037.

Karami, H., Pooni, J., Robert, D., Costa, S., Li, J. and Setunge, S. 2021. "Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades". Transport. Geotech., 29: 100585.

Kumar, T., Panda, S., Hameed, S. and Maity, J. 2018. "Behaviour of soil by mixing of plastic strips". Int. Res. J. Eng. Technol. 5: 2578-2581.

Monjezi, M., Amini Khoshalan, H. and Yazdian Varjani, A. 2010. "Prediction of flyrock and backbreak in open pit blasting operation: A neurogenetic approach". Arab. J. Geosci. 5: 441-448. https://doi.org/10.1007/s12517-010-0185-3

Patel, M. A., Patel, H. S. and Dadhich, G. 2013. "Prediction of subgrade strength parameters from dynamic cone penetrometer index, modified liquid limit and moisture content". Proc. Soc. Behav. Sci., 104; 245-254. http://doi.org/ 10.1016/j.sbspro.2013.11.117.

Schaefer, V. R., White, D. J., Ceylan, H. and Stevens, L. J. 2008. "Design guide for improved quality of roadway subgrades and subbases". Statewide Urban Design and Specifications (SUDAS).

Shah, A. and Modha, H. 2019. "Improving the soil subgrade with plastic waste reinforcement- An experimental study". PP. 153-161. In: Shukla, S., Barai, S. and Mehta, A. (Eds.), Advances in Sustainable Construction

Materials and Geotechnical Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 35, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7480-7_13

SPI. 2014. "SPI resin identification code- Guide to correct use".

Zhu, W., Li, M., Zhang, C. and Zhao, G. 2008. "Density and strength properties of sand-expanded polystyrene beads mixture". GeoCongress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems, pp. 36-43.