



ارزیابی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد تسلیح شده با الیاف پلی پروپیلن

محمد رضا صبوری^{*}، محمد صادقی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

کلمات کلیدی:

بازیافت سرد
الیاف
قبر امولسیون
پلی پروپیلن
سیمان

خلاصه: برخلاف مزایای قابل توجه بازیافت سرد روسازی‌های آسفالتی، به دلیل ضعف‌های عملکردی، استفاده از آن چندان متداول نیست. در این پژوهش، اثر الیاف پلی پروپیلن و همچنین اثر هم‌زمان الیاف پلی پروپیلن و سیمان در بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های بازیافتی سرد امولسیونی تحقیق شده است. بدین منظور، مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از الیاف پلی پروپیلن در دو طول و سه مقدار مختلف تسلیح شده و آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، شاخص تحمل ترک و خمش تیرچه‌ی نیم‌دایره‌ای برای یافتن طول و مقدار بهینه‌ی الیاف و نیز بررسی عملکرد مخلوط‌های الیافی انجام شد. همچنین اثر هم‌زمان الیاف (در درصد و طول بهینه) و سیمان بررسی شد. نتایج نشانگر آن است که اگرچه استفاده از الیاف پلی پروپیلن، مقاومت تر را در بدترین حالت تا ۵۴ درصد کاهش می‌دهد، در بهترین حالت مقاومت خشک را تا ۳۹ درصد افزایش می‌دهد. نتایج همچنین نشانگر امکان افزایش قابل ملاحظه‌ی شاخص‌های شکست در آزمایش‌های IDEAL-CT و SCB با استفاده از الیاف پلی پروپیلن است. مقادیر شاخص‌های تحمل ترک و شاخص انعطاف‌پذیری برای مخلوط‌های دارای الیاف به ترتیب ۳/۵ و ۲/۸ برابر بزرگ‌تر از مقادیر مخلوط کنترل پایه بود. همچنین مشاهده شد که استفاده از هم‌زمان الیاف و سیمان توانایی حفظ و ارتقای اثرات مثبت سیمان و جبران کاهش شاخص‌های شکست ناشی از افزودن سیمان را دارد و در عین حال حساسیت رطوبتی متاثر از الیاف را برطرف می‌کند. نتایج نشانگر این است که استفاده از هم‌زمان الیاف و سیمان می‌تواند به رویکردی اقتصادی جهت کاهش مقدار امولسیون بهینه و در عین حال ارتقای خصوصیات عملکردی مخلوط بازیافتی سرد منجر شود.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به نیاز انسان‌ها به جابه‌جایی، حمل‌ونقل جاده‌ای یک لازمه محسوب می‌شود. با توسعه‌ی صنایع مدرن، مصرف شدید منابع انرژی به خصوص نفت، منجر به بحران انرژی و مشکلات محیط‌زیستی می‌شود. به همین جهت یافتن تکنولوژی‌های مبتکرانه‌ی ساخت و استفاده از مصالح جایگزین برای حفظ و ایجاد یک سیستم روسازی کارآمد، ایمن و اقتصادی یکی از وظایف اصلی نهادهای دولتی، جوامع علمی و نیز مجریان امر است. بازیافت مصالح آسفالتی برای بهسازی، نوسازی و ترمیم روسازی‌ها بیش از ۷۰ سال است که مورد استفاده قرار می‌گیرد و قابلیت صرفه‌جویی در استفاده از مصالح و سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود عملکرد روسازی را داراست [۱]. بازیافت روسازی‌های آسفالتی به صورت کلی به دو روش داغ و سرد قابل انجام است. بازیافت سرد روسازی به سه روش:

(۱) بازیافت سرد درجا (CIR)^(۱)، (۲) بازیافت سرد کارخانه‌ای (CCPR)^(۲)، و (۳) بازیافت تمام عمق (FDR)^(۳) انجام می‌شود. تفاوت بازیافت سرد تمام عمق با بازیافت سرد درجا در این است که در بازیافت سرد تمام عمق علاوه بر لایه‌ی رویه آسفالتی، بخشی از اساس دانه‌ای نیز هم‌زمان بازیافت می‌شود. بازیافت سرد در مقایسه با بازیافت داغ به دلیل عدم نیاز به داغ کردن مصالح آسفالتی بازیافتی (RAP)^(۴)، صرفه‌جویی عمده‌ای در مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به آن فراهم می‌کند و مزایای محیط‌زیستی، اقتصادی و ایمنی قابل توجهی دارد [۵-۲]. با این وجود، استفاده از مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ (HMA)^(۵) با برخی ضعف‌های عملکردی همراه است. درصد هوای نسبی بالاتر، زمان

- 1 Cold In-Place Recycling
- 2 Cold Central Plant Recycling
- 3 Full Depth Reclamation
- 4 Reclaimed Asphalt Pavement
- 5 Hot Mix Asphalt

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sabouri@sharif.edu



دو دلیل عمده برای استفاده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی کاهش نه‌شینی قیر^۲ و بهبود عملکرد و خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. عملکرد مخلوط‌های تسلیح شده با الیاف شدیداً وابسته به نوع الیاف و همچنین مقدار، قطر، طول و بافت سطحی آن‌ها می‌باشد [۱۸]. اگر طول الیاف خیلی بلند باشد، مشکلات "توده شدن" الیاف ممکن است پیش آید که در آن الیاف به شکل یک توده جمع می‌شود و پراکندگی یکنواختی در قیر نخواهد داشت. از طرف دیگر، در صورتی که طول الیاف خیلی کوتاه باشد ممکن است اثر تسلیح نداشته و صرفاً نقش پرکننده‌ای^۳ گران قیمت را در مخلوط ایفا کند [۱۶]. استفاده از مقادیر زیاد الیاف می‌تواند باعث بروز مشکلات در تراکم مخلوط و در نتیجه افزایش درصد هوای مخلوط شود [۱۹]. طول الیاف نیز بر ویسکوزیته تاثیر می‌گذارد. افزایش ویسکوزیته برای الیاف کوتاه‌تر کمتر از الیاف بلندتر است، اما الیاف بلندتر ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در مورد اختلاط شود [۲۰]. جدول ۱ خلاصه‌ی نتایج برخی از پژوهش‌ها در استفاده از الیاف پلی پروپیلن در مخلوط‌های سرد و بازیافتی سرد را نشان می‌دهد. نتایج نشانگر آن است که استفاده از الیاف پلی پروپیلن در مخلوط‌های بازیافتی سرد با قیر امولسیون و کف‌قیر^۵ توانایی بهبود مقاومت و پایداری مخلوط در حالت خشک را دارد و تغییر محسوسی در مقاومت تر ایجاد نمی‌کند [۲۱-۲۳]. استفاده‌ی هم‌زمان از الیاف و سیمان در مخلوط‌های فاقد قیر امولسیون یا کف‌قیر نسبت به مخلوط‌های دارای سیمان به نتایج بهتری از نظر مدول برجهندگی منجر شده است [۲۴]. همچنین استفاده‌ی هم‌زمان از الیاف و سیمان در مخلوط‌های اصلاح شده با کف‌قیر نتایج بهتری نسبت به استفاده از سیمان رقم می‌زند [۱۱].

مخلوط‌های بازیافتی سرد در مقایسه با مخلوط‌های داغ همواره نامرغوب‌تر و ضعیف‌تر پنداشته شده و استفاده از آن‌ها با نگرانی و عدم قطعیت از منظر عملکرد میدانی مواجه بوده است. اگر بتوان ضعف‌های عملکردی این مخلوط‌ها را از میان برد یا کاهش داد، می‌توان اقبال بیشتری برای استفاده از فرایندی به صرفه، دوستدار محیط زیست و ایمن به وجود آورد. مطالعات پیشین در مورد بررسی اثر الیاف در مخلوط‌های سرد و بازیافتی سرد عمدتاً متوجه خصوصیات نظیر مقاومت، سختی و مقاومت در برابر شیار شدگی آن‌ها بوده و خصوصیات شکست این مخلوط‌ها کمتر بررسی شده است. استفاده‌ی هم‌زمان از سیمان و الیاف نیز به ندرت انجام گرفته و به نظر

عمل‌آوری به نسبت بالا، مقاومت اولیه‌ی کمتر و حساسیت رطوبتی بیشتر از مخلوط‌های HMA مهم‌ترین این موارد می‌باشند [۸-۶].

استفاده از افزودنی‌های شیمیایی نظیر سیمان برای بهبود عملکرد مخلوط‌های بازیافتی سرد بسیار متداول است. پژوهش‌های متعددی نشان می‌دهند که افزودنی‌های شیمیایی مقاومت اولیه و مقاومت در برابر رطوبت را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهد [۹-۱۲ و ۳]. افزودن سیمان برای کسب سریع‌تر مقاومت اولیه‌ی مخلوط‌های آسفالتی سرد یکی از راهکارهای متداول است؛ زیرا از یک سو شکست امولسیون را تسریع می‌کند، و از سوی دیگر پس از فرایند هیدراسیون به عنوان یک عامل اتصال ثانویه عمل می‌کند [۱۰]. استفاده از افزودنی‌های شیمیایی در عین حال تردی این مخلوط‌ها را نیز افزایش می‌دهد [۱۰] که خود می‌تواند خصوصیات شکست و عملکرد دراز مدت آن‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. عملکرد خستگی مخلوط‌های حاوی سیمان در سطوح ترافیک سنگین کاهش شدیدی نسبت به مخلوط‌های بدون سیمان نشان داده است [۱۳]. همچنین استفاده از سیمان میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد که این امر از فواید زیست‌محیطی بازیافت سرد می‌کاهد [۱۰]. استفاده از سیمان‌های زودگیر نیز در مخلوط‌های سرد بررسی شده است. محققین دریافته‌اند که با استفاده از این سیمان‌ها می‌توان مقاومت اولیه‌ی این مخلوط‌ها را به طرز چشمگیری افزایش داد [۱۴]. همچنین، سیمان‌های زودگیر مثل سیمان‌های دارای سولفوآلومینات کلسیم و آلومینات کلسیم می‌توانند در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، مقدار انتشار کربن را کاهش دهند [۱۴].

در برخی از موارد، انواع مختلفی از الیاف برای بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی به آن‌ها افزوده می‌شوند. تحقیقات در زمینه‌ی استفاده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی به دهه ۱۹۵۰ میلادی باز می‌گردد [۱۵]. با استفاده از الیاف که مقاومت کششی به مراتب بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی دارند، شانس بیشتری برای ارتقای مقاومت کششی و پیوستگی این مخلوط‌ها وجود دارد [۱۵]. نقش اصلی الیاف افزایش مقاومت کششی و شکل‌پذیری مخلوط از طریق بهبود قفل و بست سنگدانه‌ها است که می‌تواند مقدار انرژی کرنشی قابل جذب طی فرایندهای خستگی و شکست را افزایش دهد [۱۶]. انتظار می‌رود که افزودن الیاف به مخلوط ظرفیت جذب انرژی و یا طاقت^۱ آن را افزایش داده و فرآیند گسترش ترک‌ها را به تعویق بیندازد [۱۷]. الیاف با تحمل تنش‌های کششی، به عنوان متوقف‌کننده‌ی ترک عمل کرده و می‌تواند مانع از گسترش ترک‌ها شود [۱۵].

- 2 Draindown
- 3 Balling
- 4 Filler
- 5 Foamed Asphalt

- 1 Toughness

جدول ۱. خلاصه‌ی نتایج استفاده از الیاف پلی پروپیلن در مخلوط‌های سرد و بازیافتی سرد

Table 1. Summary of researches on the use of Polypropylene fibers in cold and cold recycled asphalt mixtures

پژوهش	اصلاح کننده	طول الیاف (mm)	مقدار الیاف	نتایج
[۲۱]	امولسیون	۴۰، ۲۰، ۱۰	۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی مخلوط	- کاهش پایداری و مدول بر جهندگی - نتایج مشابه با مخلوط کنترل در کرنش دائمی در آزمایش سه محوری استاتیکی و دینامیکی
[۲۳]	کفگیر	نامشخص	۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۷۵ درصد وزنی RAP	- افزایش مدول دینامیک خشک و عدم تغییر مدول دینامیک تر - افزایش ITS ^۱ خشک و تر برای بیشتر مقادیر - حدود مشابه ITS ^۲ برای همه‌ی مخلوط‌ها - بهترین عملکرد برای الیاف در ۰/۱۵ درصد
[۲۲]	امولسیون	۱۰	۰/۱۵ درصد وزنی مخلوط	- افزایش پایداری، ITS و مقاومت در برابر شیار شدگی
[۲۴]	سیمان	نامشخص	۰/۱۵ درصد	- افزایش مدول بر جهندگی با افزودن سیمان و عملکرد بهتر همزمان سیمان و الیاف
[۱۱]	کفگیر و سیمان	۱۵ و ۲۰	۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۷۵ درصد	- افزایش سختی، مقاومت و مقاومت در برابر شیار شدگی - عملکرد بهتر استفاده‌ی همزمان از الیاف و سیمان

۲- مواد و روش‌ها

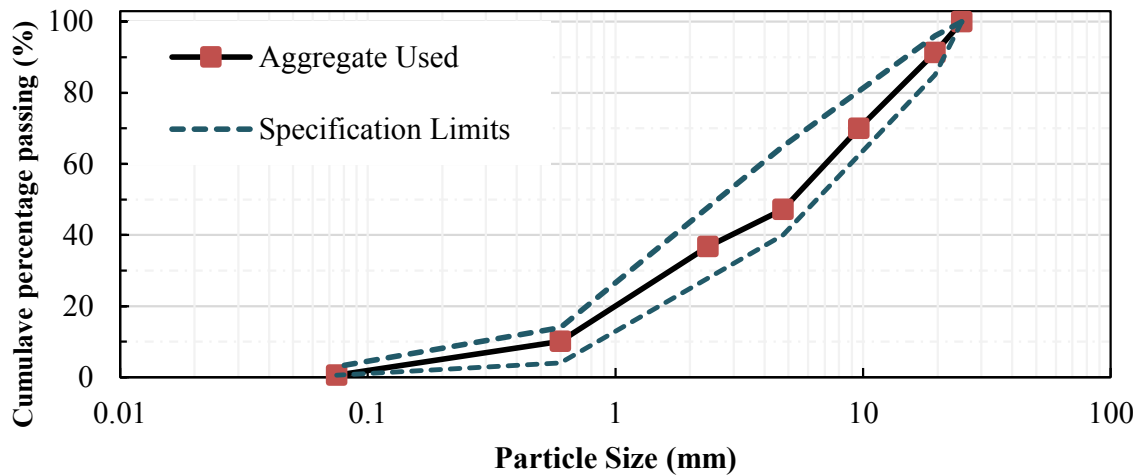
۲-۱- مواد و مصالح

مخلوط‌های بازیافتی در این پژوهش سرد از سنگدانه‌های RAP (بدون افزودن سنگدانه‌ی تازه) منطبق بر حدود دانه‌بندی استاندارد AASH-17-31-TO MP تشکیل شده است. شکل ۱ دانه‌بندی مصالح و حدود بالا و پایین استاندارد را مشخص می‌کند. ماده‌ی تثبیت کننده‌ی مخلوط، قیر امولسیون کاتیونی دیرشکن CSS-1h با مقدار قیر ۶۳ درصد از قیر پایه‌ی PG 64-22 است. سیمان مورد استفاده در این پژوهش تیپ ۳ می‌باشد. لاتکس استفاده شده در این پژوهش، از پایه‌ی SBR می‌باشد. در مخلوط‌های دارای سیمان، قیر امولسیون با افزودن ۴ درصد لاتکس و ۵/۰ درصد گوگرد در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و طی ۳۰ دقیقه اختلاط اصلاح شده است. خصوصیات الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در پژوهش حاضر منطبق با جدول ۲ می‌باشد.

۲-۲- تعریف نمونه‌های کنترل و نام‌گذاری نمونه‌ها

مخلوط‌های کنترل که برای مقایسه‌ی اثر الیاف در حالت‌های با یا بدون سیمان استفاده می‌شوند به شرح زیر تعریف و نام‌گذاری شدند:

می‌رسد که پیش‌تر مطالعه‌ای در مورد بررسی اثر همزمان سیمان و الیاف در مخلوط‌های بازیافتی سرد با قیر امولسیون انجام نشده است. اگرچه عملکرد خستگی و شکست مخلوط‌های سرد دارای سیمان مورد نگرانی است، چنین خصوصیتی به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است و ارائه‌ی راهکارهایی در جهت رفع تردی ناشی از سیمان کمتر مورد توجه بوده است. طبیعتاً رویکردی که با ارتقای همزمان خصوصیات مقاومت، حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر ترک در راستای کاهش مقدار امولسیون گام بردارد نیز دنبال نشده است. پژوهش حاضر علاوه بر ارزیابی خصوصیات مقاومت، مقاومت در برابر رطوبت و تحمل ترک در بازه‌ی وسیعی از مقادیر و طول‌های الیاف پلی پروپیلن و تحقیق طول بهینه‌ی الیاف، استفاده‌ی همزمان از سیمان و الیاف پلی پروپیلن را تحقیق می‌کند. بدین منظور مخلوط‌های بازیافتی سرد امولسیونی با استفاده از الیاف پلی پروپیلن در دو طول و سه مقدار مختلف تسلیح شده و طول و مقدار بهینه‌ی الیاف تحقیق می‌گردد. سپس خصوصیات شکست مخلوط بهینه مورد بررسی قرار گرفته و با مخلوط بدون الیاف مقایسه می‌شود. نهایتاً افزودن همزمان طول و مقدار بهینه‌ی الیاف پلی پروپیلن و ۲ درصد سیمان تحقیق شده و عملکرد مخلوط در آزمایش‌های مختلف بررسی می‌شود.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی استفاده شده جهت ساخت نمونه‌ها

Fig. 1. Gradation of RAP aggregate used in this study

۲-۳- آزمایش‌ها

فرایند اختلاط نمونه‌های بازیافتی سرد به ترتیب به صورت اختلاط خشک مصالح و الیاف به مدت ۳۰ ثانیه، افزودن آب و ادامه اختلاط به مدت ۶۰ ثانیه، افزودن امولسیون و اختلاط آن به مدت ۶۰ ثانیه‌ی دیگر انجام شد. در نمونه‌های حاوی سیمان، فرایند اختلاط همچنین شامل اضافه کردن سیمان و انجام اختلاط به مدت ۳۰ ثانیه به عنوان آخرین مرحله می‌شد. بررسی چند روش اختلاط نشان داد که انتخاب چنین فرایند اختلاطی، بهترین پراکندگی ظاهری الیاف را در مخلوط نتیجه می‌دهد. با توجه به اینکه روشی مدرن و کمی برای ارزیابی اختلاط الیاف در مخلوط آسفالتی در ادبیات فنی یافت نشد، مواردی مانند بازرسی چشمی نمونه‌ها حین ساخت برای رویت شکل‌گیری توده‌ی الیاف احتمالی، تغییرات غیرقابل انتظار در وزن مخصوص و درصد هوای نمونه‌ها در حضور الیاف به عنوان معیاری از عدم توزیع یکنواخت الیاف در این پژوهش به کار گرفته شد.

درصد بهینه‌ی امولسیون و آب مصرفی به ترتیب برابر با ۶ و ۳ درصد انتخاب شد. این درصدهای بهینه، در پژوهش دیگری با استفاده از مصالح و روش‌های ساخت و عمل‌آوری یکسان با پژوهش حاضر و با استفاده از روش طرح اختلاط پیشنهاد شده توسط موسسه‌ی بازیافت و احیای آسفالت

- مخلوط کنترل پایه: مخلوط دارای ۶ درصد امولسیون، ۳ درصد آب کلی و بدون افزودنی (6E)
- مخلوط کنترل سیمانی: مخلوط دارای ۴/۵ درصد امولسیون اصلاح شده با لاتکس، ۴ درصد آب کلی و ۲ درصد سیمان (4.5ME2C) برای نام‌گذاری نمونه‌های دارای الیاف از یک ترکیب دو قسمتی به شکل رابطه‌ی (۱) استفاده شد که در آن بخش‌ها با علامت «+» جدا می‌شوند. بخش اول نوع مخلوط کنترل و بخش دوم مقدار و طول الیاف افزوده شده به آن را بیان می‌کند.

$$X + \alpha PP\beta \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق:

X : به صورت یکی از دو صورت 6E یا 4.5ME2C نوشته شده که پیشتر توضیح داده شد.

α و β : به ترتیب درصد وزنی الیاف نسبت به RAP و طول این الیاف برحسب میلی‌متر را نشان می‌دهند.

PP : نشان دهنده الیاف پلی پروپیلن می‌باشد.

جدول ۲. خصوصیات الیاف پلی پروپیلن استفاده شده در این پژوهش، ارائه شده توسط تولید کننده

Table 2. Properties of Polypropylene fibers, provided by the manufacturer

۳۵۰-۴۰۰	مقاومت کششی (Mpa)	۰/۹۱	جرم مخصوص (gr/cm^3)
۳-۳/۵	مدول الاستیسیته (GPa)	۱۸ و ۱۲	طول (mm)
۲۰	ازدیاد طول (%)	۰/۰۳۵	ضخامت (mm)

جدول ۳. نتایج عملکردی مخلوط در مقادیر بهینه‌ی قیر امولسیون و آب (طرح اختلاط) [۲۵]

Table 3. Test results in optimum contents of emulsified asphalt and water (mix design) [25].

۳۵۰-۴۰۰	مقاومت کششی (Mpa)	۰/۹۱	جرم مخصوص (gr/cm^3)
۳-۳/۵	مدول الاستیسیته (GPa)	۱۸ و ۱۲	طول (mm)
۲۰	ازدیاد طول (%)	۰/۰۳۵	ضخامت (mm)

بررسی‌های اولیه در مورد پراکندگی الیاف در مخلوط انجام شد. مقادیر بیشتر از ۰/۳ درصد پراکندگی مناسبی در مخلوط نداشتند و با توجه به آن حداکثر مقدار برابر با ۰/۳ درصد انتخاب شد. برای ارزیابی حساسیت رطوبتی از نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (ITSR) استفاده شد که حاصل تقسیم مقاومت کششی در حالت تر به حالت خشک است.

مقادیر درصد هوای نمونه‌های مختلفی که در این پژوهش آزمایش شده‌اند پس از عمل‌آوری نمونه‌ها و پیش از انجام آزمایش IDT اندازه‌گیری شد. درصد هوای نمونه‌های کنترل پایه و کنترل سیمانی به ترتیب برابر با ۱۴ و ۱۳/۳ درصد بود. درصد هوای نمونه‌های دارای الیاف پلی پروپیلن بهینه بدون سیمان و دارای ۲ درصد سیمان نیز به ترتیب ۱۲/۶ و ۱۲/۹ درصد محاسبه گردید. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که، استفاده از الیاف و سیمان به صورت هم‌زمان و جداگانه، باعث کاهش درصد هوای مخلوط‌ها شده است.

آزمایش IDEAL-CT طبق استاندارد ASTM D8225-19

(ARRA) با ارزیابی نتایج عملکردی حاصل از آزمایش‌های IDT خشک و تر و شاخص ITSIR به دست آمده است [۲۵]. جدول ۳ نتایج آزمایش‌های مختلف در مقادیر بهینه‌ی قیر امولسیون و آب را در پژوهش مذکور نشان می‌دهد.

نمونه‌های کشش غیرمستقیم (IDT) با استفاده از دستگاه مارشال و با ۷۵ ضربه متراکم و ساخته شدند. نمونه‌ها پس از تراکم به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. نمونه‌های تر ۲۴ ساعت دیگر در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و سپس آزمایش شدند. نمونه‌های دارای الیاف پلی پروپیلن در دو طول ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر و سه مقدار ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی RAP ساخته و طبق استاندارد ASTM D6931 - 17 آزمایش شدند. مقادیر الیاف در پژوهش حاضر به صورت وزنی و نسبت به وزن RAP محاسبه و استفاده شد. تعداد ۲ تکرار نمونه‌ی IDT در هر حالت آزمایش شده و مقادیر میانگین ۲ تکرار گزارش شد. طول‌ها و مقادیر، با توجه به مرور ادبیات فنی، گزینه‌های طول موجود در بازار و نتایج

- 1 Asphalt Recycling and Reclaiming Association
- 2 Indirect Tensile Test

در رابطه‌ی (۳)، G_f انرژی شکست و مشابه تعریف قبلی برای آزمایش IDEAL-CT و $|m|$ قدر مطلق شیب در نقطه‌ی عطف منحنی نیرو-جابجایی پس از بار حداکثر است. جهت به دست آوردن نقطه‌ی عطف برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB نوشته و استفاده شد که طبق ضوابط استاندارد AASHTO TP 124-18 نقطه‌ی عطف مناسب را یافته و محاسبه‌ی سایر مقادیر مورد نیاز را انجام می‌دهد.

۲-۴- برنامه آزمایش و تعداد نمونه‌ها

شکل ۲ برنامه‌ی آزمایش‌های پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. در فاز اول، آزمایش‌های IDT خشک و تر به منظور بررسی اثر الیاف پلی پروپیلن و یافتن طول و مقدار بهینه‌ی آن‌ها استفاده می‌شوند. پس از تعیین طول و مقدار بهینه، آزمایش‌ها در فاز دوم برای بررسی اثر هم‌زمان الیاف و سیمان انجام می‌شود.

مجموع تعداد نمونه‌های آزمایش شده به همراه تکرار نمونه‌ها در هر آزمایش در جدول ۴ قابل مشاهده است.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج مخلوط‌های دارای الیاف

۳-۱-۱- نتایج IDT

شکل ۳ نتایج IDT خشک نمونه‌های دارای مقادیر و طول‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و مقایسه‌ی آن با مخلوط کنترل پایه را نشان می‌دهد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، مقاومت خشک نمونه‌های دارای الیاف در حالت کلی نسبت به نمونه‌ی کنترل پایه (که با خطچین نشان داده شده است) بیشتر بود. در مقادیر مختلف الیاف، طول کوچک‌تر الیاف (۱۲ میلی‌متر) عملکرد بهتری را نسبت به طول دیگر نشان داد. همچنین مشخص است که در محدوده‌ی مقادیر این آزمایش، ITS خشک با افزایش مقدار الیاف کاهش می‌یابد به نحوی که بیشترین مقاومت در کمترین مقدار و طول کوچک‌تر الیاف (۱/۱ درصد و ۱۲ میلی‌متر) به دست آمد. نمونه‌های دارای الیاف در تمامی حالت‌ها غیر از یک مورد مقادیر بهتری نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف نشان دادند که نشانگر امکان بهبود قابل توجه مقاومت خشک با استفاده از الیاف می‌باشد. در بهترین حالت، این افزایش برابر با ۳۹ درصد بود.

شکل ۴ و شکل ۵ نتایج ITS و ITSR نمونه‌های دارای مقادیر و طول‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و مقایسه‌ی آن با مخلوط کنترل پایه را نشان می‌دهند. مقادیر ITS و ITSR در تمامی حالت‌ها نسبت به

انجام شد. این آزمایش بر روی نمونه‌های IDT خشک انجام شد و میانگین نتایج ۲ تکرار گزارش شد. در این آزمایش مقدار شاخص تاب آوری ترک (CT_{Index}) از رابطه‌ی (۲) تعیین می‌شود و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، مقاومت در برابر ترک خوردگی بیشتر است.

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \quad (2)$$

CT_{Index} = شاخص تاب آوری ترک

t = ضخامت نمونه (mm)

l_{75} = تغییر شکل نمونه در نقطه‌ی متناظر با ۷۵ درصد نیروی حداکثر

(mm)

D = قطر نمونه (mm)

G_f = انرژی شکست ($Joules / m^2$)

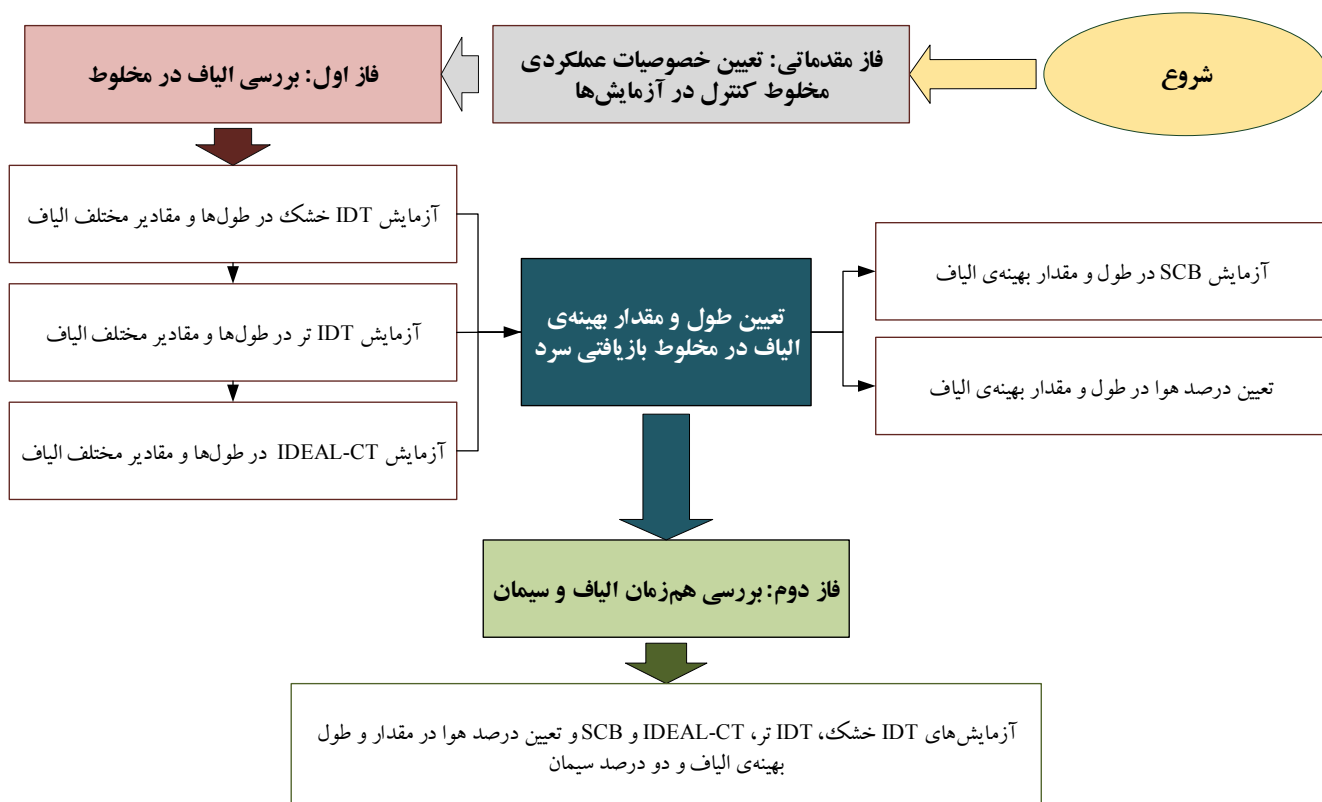
$|m_{75}|$ = شیب خط برازش شده به داده‌های نیرو-جابجایی در حد

فاصل جابجایی ۸۵ تا ۶۵ درصد نیروی حداکثر

آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB^۱) در مخلوط دارای طول و مقدار بهینه‌ی الیاف و نیز مخلوط‌های بدون الیاف در حالت‌های دارای سیمان و فاقد سیمان انجام شد تا اثر الیاف بر عملکرد شکست مخلوط تحقیق و با حالت‌های فاقد الیاف مقایسه شود. برای ساخت نمونه‌های SCB، مخلوط‌های آسفالتی پس از اختلاط در دستگاه متراکم کننده‌ی گردشی (SGC^۲) با ۳۰ گردش متراکم شد. نمونه‌های نیم‌دایره‌ای طبق استاندارد AASHTO TP 124-18 در ضخامت ۵۰ میلی‌متر و طول شیار ۱۵ میلی‌متر برش داده شده و آزمایش شدند. تعداد ۸ نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای در هر حالت آزمایش شده و مقادیر میانگین آن‌ها گزارش شد. در این آزمایش مقادیر شاخص انعطاف‌پذیری (FI^۴) و انرژی شکست محاسبه گردید. طبق رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود:

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad (3)$$

- 1 Cracking Tolerance Index
- 2 Semi-Circular Bend
- 3 Superpave Gyrotory Compactor
- 4 Flexibility Index



شکل ۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

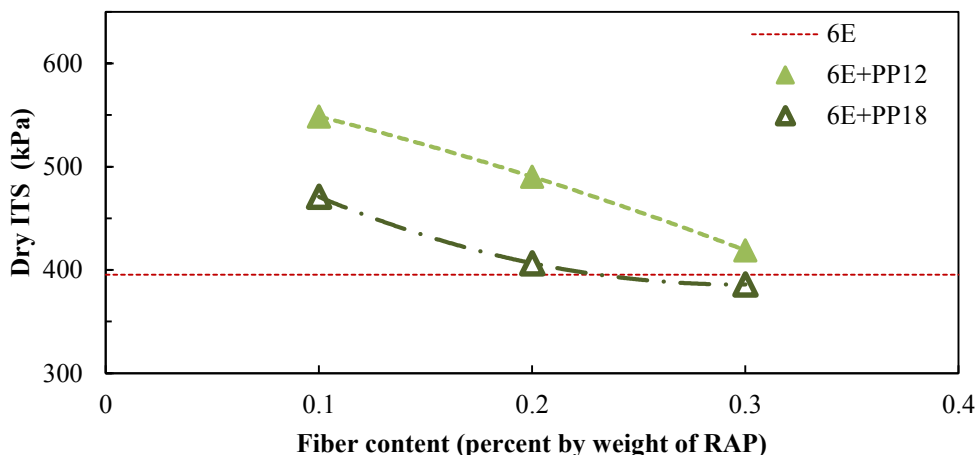
Fig. 2. Test plan

جدول ۴. مجموع تعداد نمونه‌ها در هر آزمایش

Table 4. Total number of samples in each test

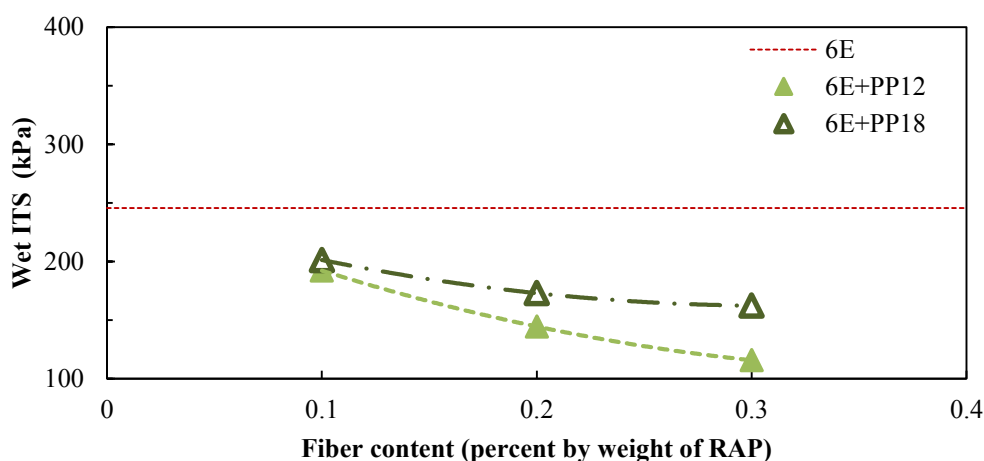
تعداد کل نمونه‌ها	تعداد تکرار	آزمایش
۱۶	۲	Dry IDT
۱۶	۲	Wet IDT
۱۶*	۲	IDEAL-CT
۲۴	۸	SCB

* شاخص‌های IDEAL-CT در حین آزمایش IDT خشک محاسبه شده و نمونه‌های مجزا برای آن ساخته نشده است.



شکل ۳. نتایج IDT خشک نمونه‌های دارای مقادیر و طول‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط کنترل پایه

Fig. 3. Dry IDT results for different contents and lengths of Polypropylene fibers compared to control mixture



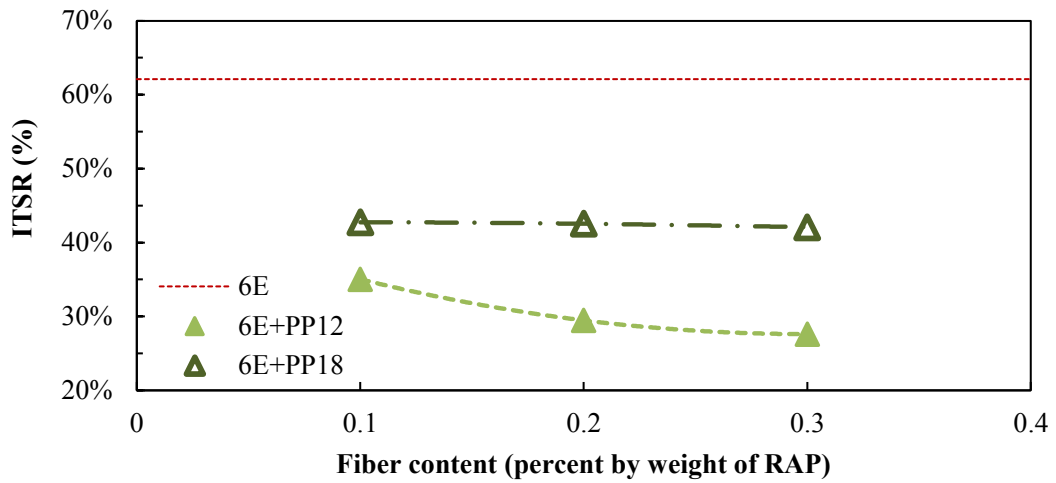
شکل ۴. نتایج IDT تر نمونه‌های دارای مقادیر و طول‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط کنترل پایه

Fig. 4. Wet IDT results for different contents and lengths of Polypropylene fibers compared to control mixture

۳-۱-۲- نتایج IDEAL-CT

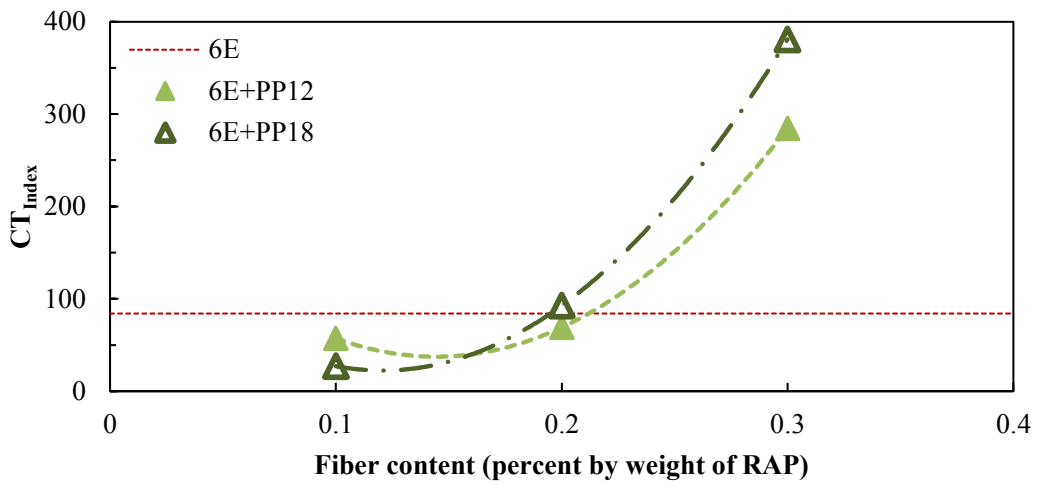
شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب مقادیر CT_{Index} و انرژی شکست را برای نمونه‌های دارای طول‌ها و مقادیر مختلف الیاف و همچنین مخلوط کنترل پایه نشان می‌دهند. در حالت کلی، هر دو شاخص با افزایش مقدار الیاف افزایش یافتند و بهترین نتایج هر دو شاخص در مقدار ۰/۳ درصد به دست

نمونه‌ی بدون الیاف پایین‌تر بودند. این مورد می‌تواند به دلیل آبدوستی الیاف باشد که حساسیت رطوبتی مخلوط را تشدید می‌کند. این کاهش در بدترین حالت تا ۵۴ درصد بود. همچنین از این حیث، مخلوط‌های دارای طول بیشتر الیاف عملکرد بهتری را نسبت به طول کمتر نشان دادند و در مقادیر کمتر الیاف نسبت به مقادیر بیشتر، وضعیت کمی بهتر بود.



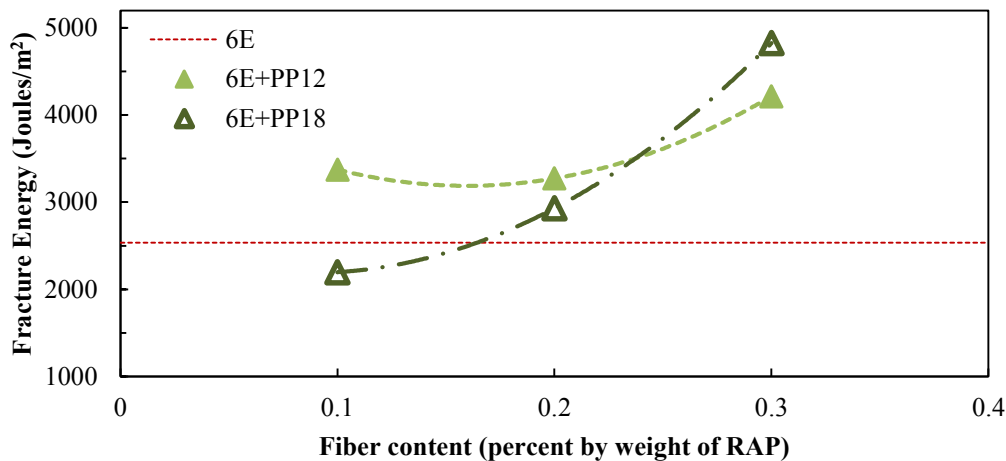
شکل ۵. مقادیر ITSR نمونه‌های دارای مقادیر و طول‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط کنترل پایه

Fig. 5. ITSR results for different contents and lengths of Polypropylene fibers compared to control mixture



شکل ۶. نتایج CT_{Index} نمونه‌های دارای مقادیر و طول‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط کنترل پایه

Fig. 6. CT_{Index} results for different contents and lengths of Polypropylene fibers compared to control mixture



شکل ۷. نتایج انرژی شکست نمونه‌های دارای مقادیر و طول‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط کنترل پایه

Fig. 7. Fracture energy results for different contents and lengths of Polypropylene fibers compared to control mixture

الیاف تاثیر خاصی بر مقدار نیروی حداکثر نداشته و در عوض مقدار حداکثر جابه‌جایی نمونه در نقطه‌ی شکست (کشیدگی افقی منحنی) را افزایش داده است، که به معنی ظرفیت جذب انرژی و خصوصیات شکست بهتر می‌باشد. همچنین در مقایسه‌ی دو طول می‌توان دریافت که بهترین نتیجه‌ی مقاومتی برای کمترین مقدار استفاده از الیاف ۱۲ میلی‌متری به دست آمده و بهترین خصوصیات شکست در بیشترین مقدار استفاده‌ی الیاف ۱۸ میلی‌متری حاصل شده است. این موارد پیشتر در نتایج آزمایش‌های IDEAL-CT و IDT نیز مشاهده شده بود.

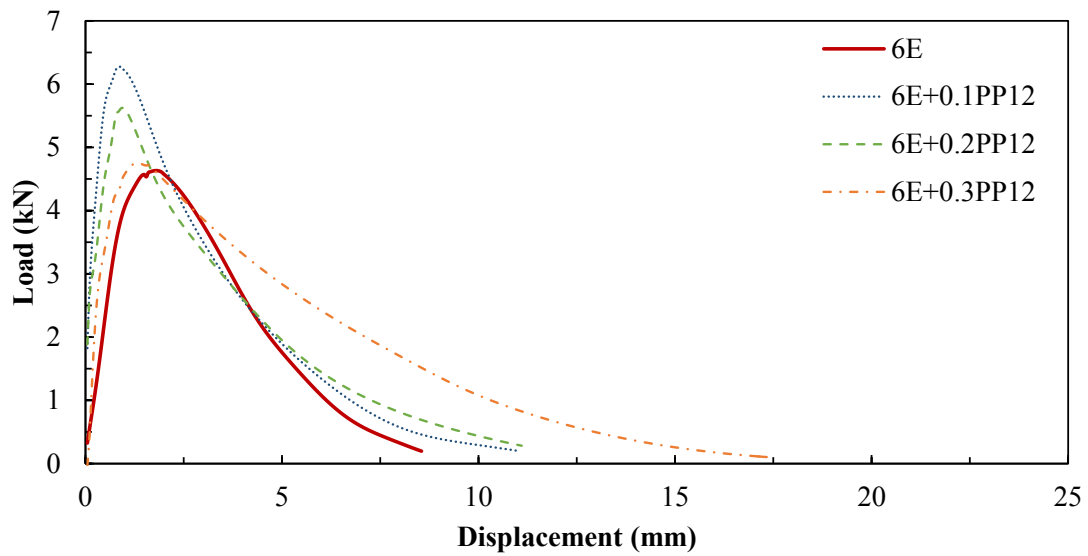
۳-۲- تعیین طول و مقدار بهینه‌ی الیاف

نتایجی که در قسمت قبل بررسی شد نشانگر آن است که حصول بهترین خصوصیات مقاومتی و خصوصیات شکست از طریق تسلیح به وسیله‌ی الیاف به طور هم‌زمان امکان‌پذیر نیست. از نقطه نظر مقاومت، نمونه‌های دارای طول و مقدار کمتر الیاف پلی پروپیلن عملکرد بهتری دارند؛ در حالی که از حیث خصوصیات شکست عکس این حالت صادق است. با توجه به این مسئله، اگر هدف از تسلیح بهبود مقاومت مخلوط باشد، طول ۱۲ میلی‌متر و مقدار ۰/۱ درصد، حالت بهینه بوده و اگر هدف اصلی دستیابی به خصوصیات شکست بهتر باشد، طول ۱۸ میلی‌متر و مقدار ۰/۳ درصد، پیشنهاد می‌شود. استاندارد AASHTO MP 31-17 حداقل مقدار ITS خشک را

آمد. در مقدار ۰/۱ درصد، طول ۱۲ میلی‌متر، عملکرد بهتری نسبت به طول ۱۸ میلی‌متر نشان داد. در مقدار ۰/۲ درصد، نتایج دو طول مشابه بود. در استفاده‌ی ۰/۳ درصدی از الیاف، نتایج شاخص‌های آزمایش IDEAL-CT نسبت به مقادیر دیگر الیاف و همچنین مخلوط کنترل پایه افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان داد. در مقایسه‌ی دو طول، استفاده از طول ۱۸ میلی‌متر الیاف به عملکرد بهتری منتج شد. بهترین نتایج کلی از منظر CT_{Index} و انرژی شکست نیز برای طول ۱۸ میلی‌متر الیاف و مقدار ۰/۳ درصد استفاده از الیاف حاصل شد. در این حالت، مقادیر CT_{Index} و انرژی شکست در آزمایش IDEAL-CT نسبت به حالت کنترل پایه به ترتیب ۳۵۳ درصد و ۹۰ درصد افزایش یافتند.

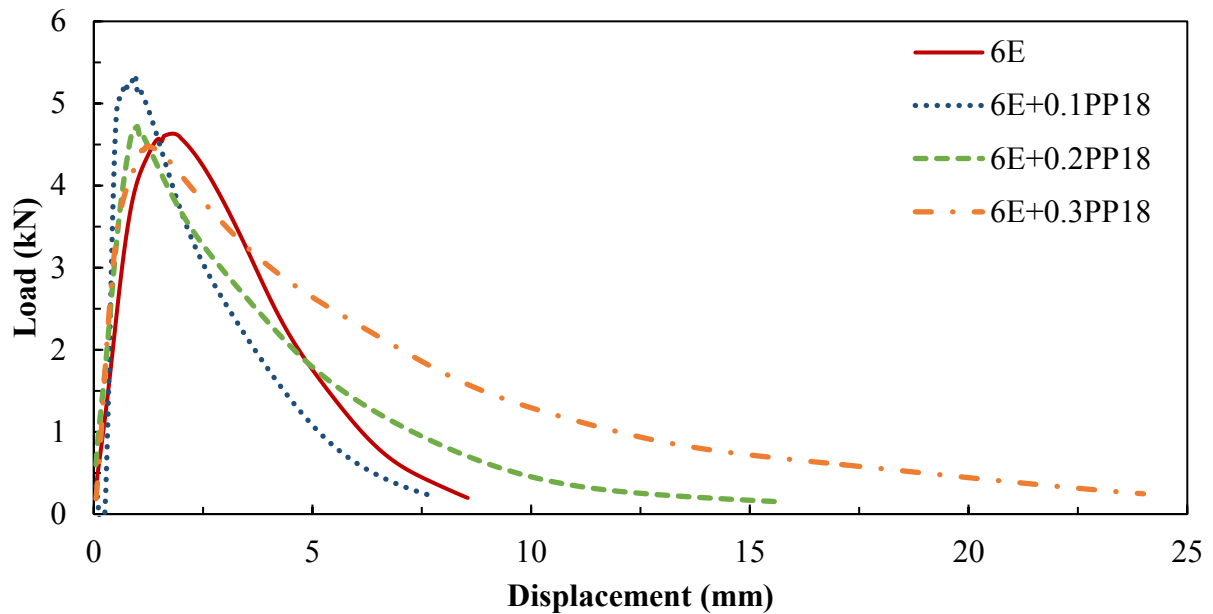
۳-۱-۳- بررسی نمودارهای نیرو-جابه‌جایی

شکل ۸ و شکل ۹ نمودارهای نیرو-جابه‌جایی مربوط به مقادیر مختلف استفاده از الیاف ۱۲ و ۱۸ میلی‌متری را نشان داده و با مخلوط کنترل پایه مقایسه می‌کند. در این شکل‌ها هر کدام از منحنی‌ها، میانگین مقادیر نیرو-جابه‌جایی دو تکرار نمونه در هر حالت را نشان می‌دهد. از شکل ۸ و شکل ۹ می‌توان دریافت که استفاده از ۰/۱ درصد الیاف مقدار نیروی حداکثر در آزمایش را نسبت به مخلوط کنترل پایه افزایش داده که به معنی بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه می‌باشد. در مقابل، افزودن ۰/۳ درصد



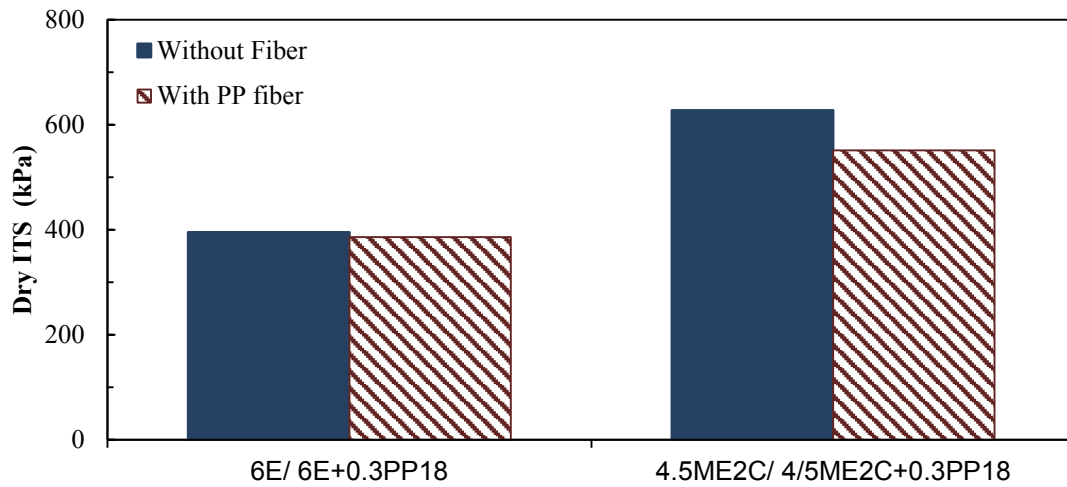
شکل ۸. نمودار نیرو-جابجایی مخلوط‌های دارای الیاف پلی پروپیلن ۱۲ میلی متری و مقادیر مختلف

Fig. 8. Load-displacement curves for mixtures with 12 mm Polypropylene fibers in different contents



شکل ۹. نمودار نیرو-جابجایی مخلوط‌های دارای الیاف پلی پروپیلن ۱۸ میلی متری در مقادیر مختلف

Fig. 9. Load-displacement curves for mixtures with 18 mm Polypropylene fibers in different contents



شکل ۱۰. نتایج ITS خشک نمونه‌های دارای طول و مقدار بهینه‌ی الیاف پلی پروپیلن و مقایسه با حالت‌های فاقد الیاف

Fig. 10. Dry ITS results of samples with optimum Polypropylene fibers compared to samples without fibers

می‌دهند. همانطور که اشاره شد، مخلوط‌های دارای سیمان نسبت به حالت فاقد سیمان با ۱/۵ درصد امولسیون کمتر ساخته شدند. مقایسه‌ی حالت‌های دارای سیمان و فاقد سیمان نشانگر افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت خشک مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از سیمان در حالت‌های بدون الیاف و همچنین دارای الیاف است. مقایسه‌ی حالت‌های دارای الیاف با مخلوط‌های کنترل پایه و کنترل سیمانی در شکل ۱۰ نشانگر آن است که الیاف بهینه‌ی پلی پروپیلن اثر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت خشک مخلوط بازیافتی سرد ندارد. با بررسی شکل ۱۱ و شکل ۱۲ می‌توان دریافت که اگر چه استفاده از الیاف در حالت بدون سیمان مقاومت تر مخلوط را کاهش می‌دهد و حساسیت رطوبتی را تشدید می‌کند، استفاده‌ی هم‌زمان از الیاف و سیمان توانایی جبران کاهش حساسیت رطوبتی را داراست. بیشترین مقدار ITSR برای حالت استفاده‌ی هم‌زمان از الیاف و سیمان به دست آمده است.

۳-۳-۲ نتایج IDEAL-CT

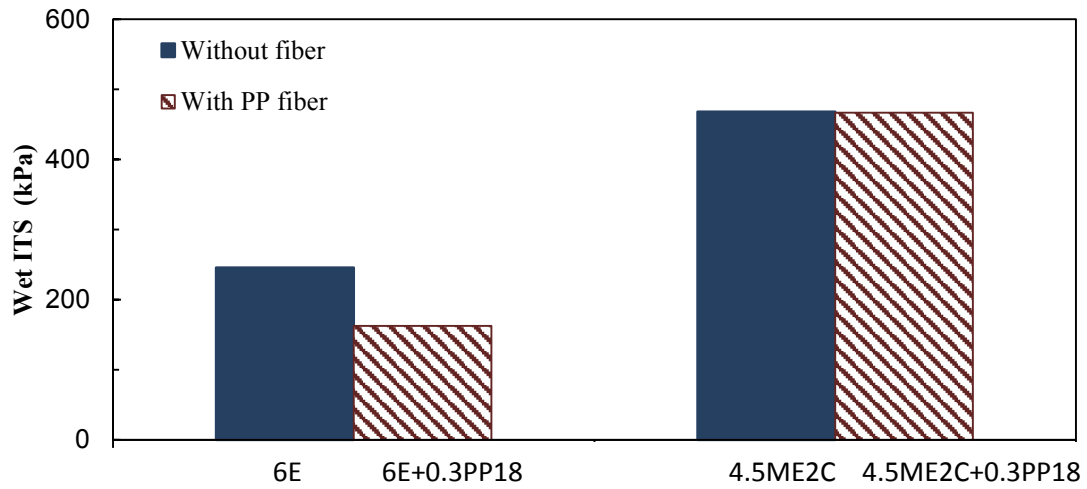
شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نتایج CT_{Index} و انرژی شکست در آزمایش IDEAL-CT را برای مخلوط‌های دارای الیاف بهینه‌ی پلی پروپیلن و همچنین حالت‌های کنترل نشان می‌دهند. مشاهده شد که استفاده از سیمان در حالت‌های دارای الیاف بهینه و نیز بدون الیاف مقدار CT_{Index} را کاهش

برابر با ۳۱۰ کیلوپاسکال تعیین کرده است. با توجه به نتایج بخش‌های پیشین، تمامی مخلوط‌های آزمایش شده در این پژوهش (شامل مخلوط کنترل پایه و همچنین مخلوط‌های حاوی الیاف) حداقل مقدار IDT خشک را تامین می‌کنند. لذا مخلوط‌های بازیافتی آزمایش شده در پژوهش حاضر در هر صورت کفایت لازم برای تامین حداقل مقدار IDT را دارا می‌باشند. از طرف دیگر استفاده از افزودنی‌های شیمیایی مانند سیمان، مقاومت مخلوط را تا حد زیادی ارتقا می‌دهد و نگرانی‌ها در مورد ضعف مقاومتی آن را مرتفع می‌کند. در چنین شرایطی بیشتر اثرات منفی سیمان بر روی رفتار شکست مخلوط سرد محل نگرانی و نیازمند اصلاح و ارتقا می‌باشد، نه خصوصیات مقاومتی آن. با توجه به این موارد، به نظر می‌رسد که ارتقای خصوصیات شکست هدف ارجح‌تری برای تعیین مقدار و طول بهینه الیاف باشد. بدین ترتیب، در این پژوهش طول ۱۸ میلی‌متر و مقدار ۰/۳ درصد وزنی RAP به عنوان مقادیر بهینه الیاف پلی پروپیلن اختیار شد.

۳-۳-۳ مخلوط‌های بازیافتی سرد دارای الیاف بهینه (با و بدون سیمان)

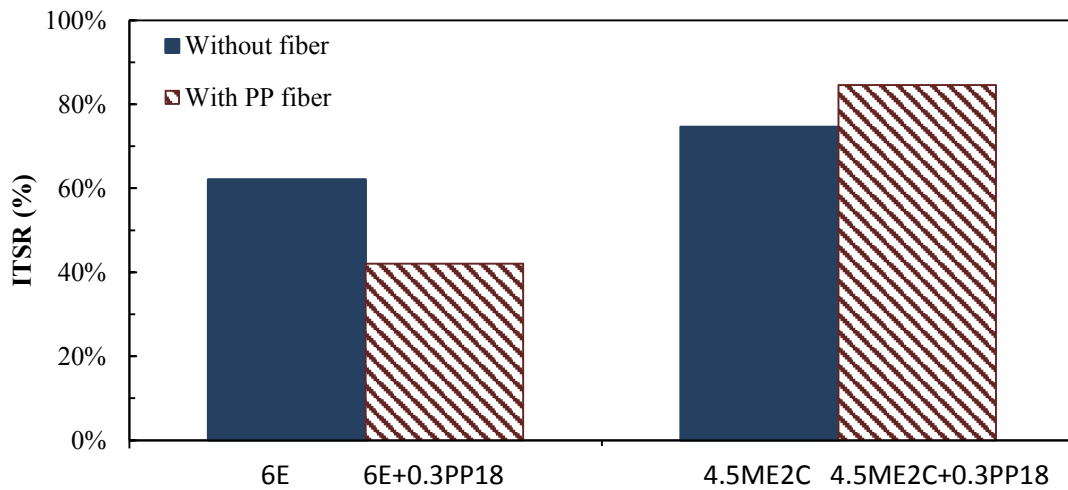
۳-۳-۱ نتایج IDT

شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نتایج ITS خشک، ITS تر و ITSR مخلوط‌های دارای طول و مقدار بهینه‌ی الیاف پلی پروپیلن و مخلوط‌های کنترل را نشان



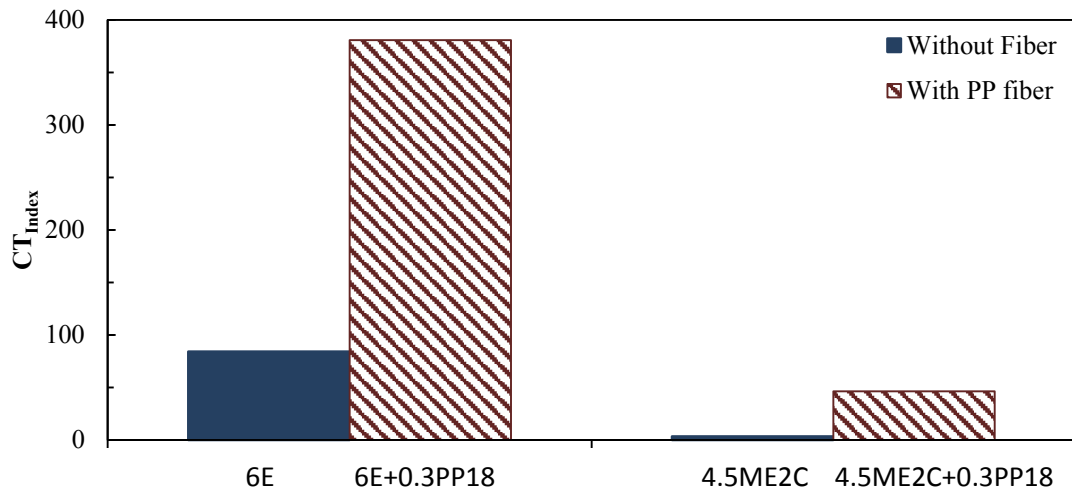
شکل ۱۱. نتایج ITS تر نمونه‌های دارای طول و مقدار بهینه‌ی پلی پروپیلن و مقایسه با حالت‌های فاقد الیاف

Fig. 11. Wet ITS results of samples with optimum Polypropylene fibers compared to samples without fibers



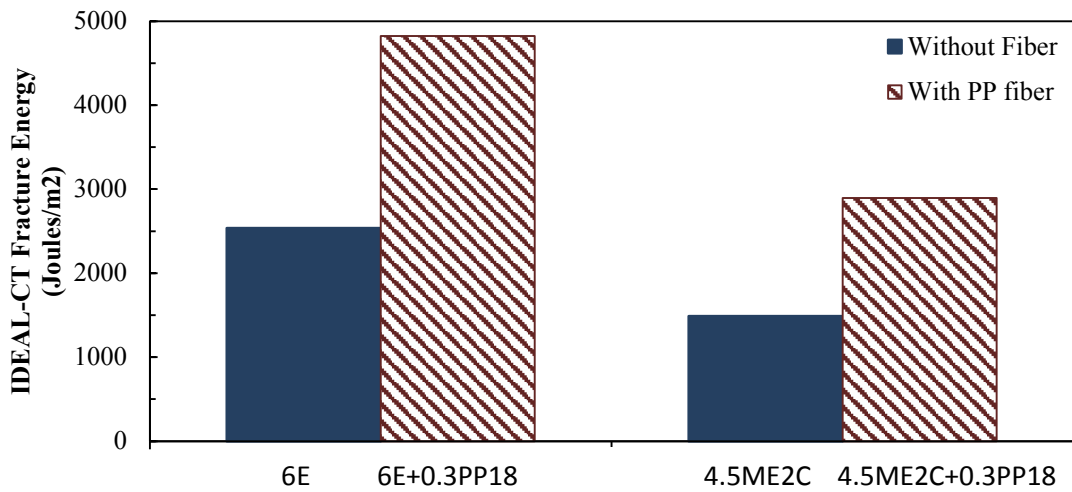
شکل ۱۲. نتایج ITSR نمونه‌های دارای طول و مقدار بهینه‌ی پلی پروپیلن و مقایسه با حالت‌های فاقد الیاف

Fig. 12. ITSR results of samples with optimum Polypropylene fibers compared to samples without fibers



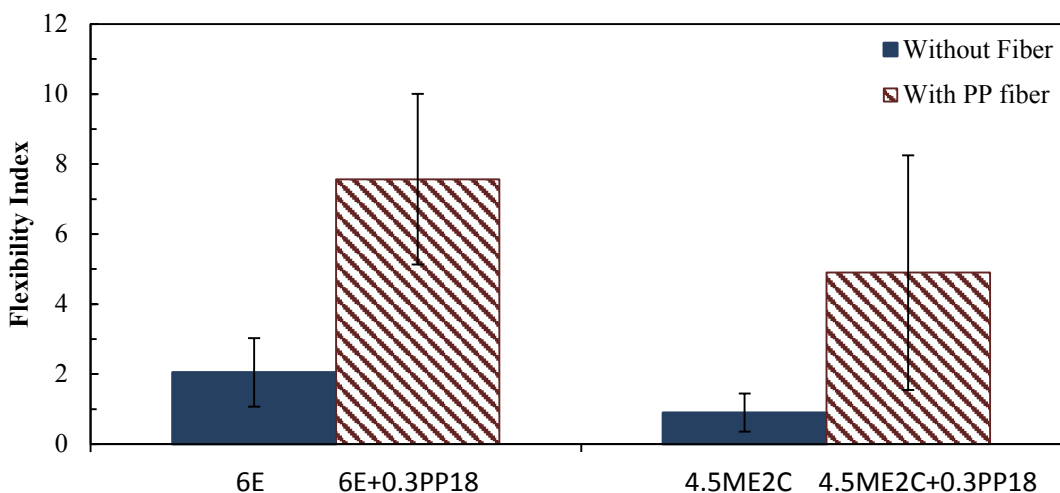
شکل ۱۳. نتایج CT_{Index} نمونه‌های دارای طول و مقدار بهینه‌ی پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط‌های کنترل

Fig. 13. CT_{Index} of samples with optimum Polypropylene compared to control mixtures



شکل ۱۴. نتایج انرژی شکست آزمایش IDEAL-CT نمونه‌های دارای طول و مقدار بهینه‌ی پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط‌های کنترل

Fig. 14. IDEAL-CT fracture energy of samples with optimum Polypropylene compared to control mixtures



شکل ۱۵. نتایج FI نمونه‌های دارای الیاف طول و مقدار بهینه‌ی پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط‌های کنترل

Fig. 15. FI of samples with optimum Polypropylene compared to control mixture

در مقایسه‌ی حالت‌های بدون سیمان مشهود است که اگرچه مقدار انرژی شکست برای حالت دارای الیاف تنها مقدار کمی نسبت به مخلوط بدون الیاف بیشتر است، تفاوت مقدار FI بسیار قابل توجه است. این مورد نشان می‌دهد که با افزودن الیاف پلی پروپیلن خصوصیات شکست و جذب انرژی مخلوط بهبود پیدا می‌کند. در حالت‌های دارای سیمان تفاوت معنادارتری میان نمونه‌های دارای الیاف پلی پروپیلن و بدون الیاف مشهود است. نتایج نشانگر آن است که در مقایسه‌ی مخلوط‌های دارای الیاف پلی پروپیلن و سیمان و مخلوط کنترل پایه با وجود کاهش ۱/۵ درصدی قیر امولسیون، مقدار FI بیشتری حاصل شده است. این مورد می‌تواند به رویکردی جهت کاهش مقدار امولسیون با استفاده همزمان از الیاف و سیمان منجر شده و بر مزایای اقتصادی بازیافت سرد بی‌افزاید.

۳-۳-۱- مقایسه‌ی آماری نتایج SCB

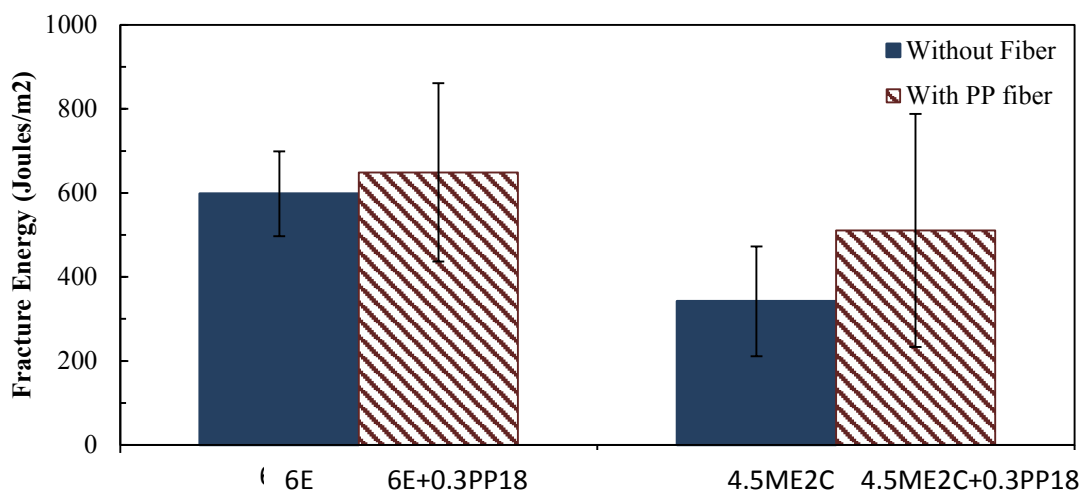
در این بخش برای ارزیابی اثر الیاف پلی پروپیلن روی نتایج SCB و تعیین مجموعه‌هایی که از نظر آماری دارای میانگین متفاوت از یکدیگر هستند، از تحلیل واریانس یک طرفه^۱ در نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. این آزمون آماری با فرض توزیع نرمال داده‌ها و یکنواختی پراکندگی‌ها

می‌دهد. با این حال مخلوط‌های دارای الیاف بهینه‌ی پلی پروپیلن هم در حالت بدون سیمان و هم حالت حاوی سیمان عملکرد به مراتب بهتری از منظر شاخص‌های CT_{Index} و انرژی شکست در آزمایش IDEAL-CT نشان دادند. افزایش قابل ملاحظه‌ی این شاخص‌ها نشانگر اثرات مثبت استفاده‌ی همزمان از الیاف و سیمان در مقایسه با حالتی است که فقط از سیمان استفاده می‌شود. همچنین مخلوط‌های دارای الیاف پلی پروپیلن و سیمان با وجود کاهش ۱/۵ درصدی قیر امولسیون، عملکرد قابل مقایسه‌ای نسبت به مخلوط کنترل پایه نشان دادند. در این حالت با وجود کاهش مقدار CT_{Index} ، مقدار انرژی شکست بیشتر بود. با توجه به کمتر بودن امولسیون در مخلوط‌های حاوی سیمان، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده‌ی همزمان از الیاف پلی پروپیلن و سیمان، امکان کاهش مقدار امولسیون مخلوط بازیافتی سرد و در عین حال حفظ خصوصیات شکست مشابه با مخلوط کنترل را امکان‌پذیر می‌کند.

۳-۳-۳- نتایج SCB

شکل ۱۵ و شکل ۱۶ مقادیر شاخص‌های FI و انرژی شکست (میانگین ۵ تا ۸ تکرار نمونه در هر حالت) در آزمایش SCB را برای مخلوط‌های دارای الیاف بهینه‌ی پلی پروپیلن و همچنین مخلوط‌های کنترل نشان می‌دهند.

1 One-way ANOVA



شکل ۱۶. نتایج انرژی شکست نمونه‌های دارای الیاف طول و مقدار بهینه‌ی پلی پروپیلن و مقایسه با مخلوط‌های کنترل

Fig. 16. SCB fracture energy of samples with optimum Polypropylene compared to control mixtures

جدول ۵. نتایج آزمون آماری ANOVA در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha=0.05$)

Table 5. ANOVA results at 95% confidence level ($\alpha=0.05$)

شاخص انعطاف پذیری (FI)	انرژی شکست	پارامتر
۰/۰۰۰	۰/۰۱۸	p-value

نتایج و تعیین گروه‌های دارای تفاوت عمده استفاده شد. در این روش مقایسه‌ی میانگین‌ها، حروف مشخصی برای هر حالت تخصیص داده می‌شود و حالت‌هایی که هیچ حرف مشترکی ندارند دارای تفاوت آماری شناخته می‌شوند. جدول ۶ نتایج این آزمون را بر اساس مقادیر FI نشان می‌دهد. نتایج نشانگر آن است که در هر دو حالت دارای سیمان و فاقد سیمان، مقادیر FI برای نمونه‌های دارای الیاف بهینه‌ی پلی پروپیلن به نحو قابل ملاحظه‌ای بهتر از نمونه‌های فاقد الیاف است؛ بنابراین از نظر آماری، اثر الیاف پلی پروپیلن در بهبود شاخص FI قابل ملاحظه است.

جدول ۷ نتایج آزمون ANOVA را بر اساس مقادیر انرژی شکست نشان می‌دهد که در هر دو حالت دارای سیمان و فاقد سیمان، مخلوط‌های دارای الیاف بهینه تفاوت عمده‌ای نسبت به مخلوط‌های بدون الیاف ایجاد

انجام شده است. در مرحله اول، صحت این دو فرض به ترتیب با استفاده از آزمون اندرسون-دارلینگ^۱ و آزمون لوین^۲ در سطح اطمینان ۹۵ درصد تایید شد. آزمون ANOVA با فرضیه‌ی صفر عدم وجود تفاوت قابل توجه بین میانگین‌ها انجام شد که نتایج آن در جدول ۵ قابل مشاهده است. با توجه به اینکه مقادیر p-value در هر دو شاخص بررسی شده از مقدار $=0.05$ کوچک‌تر هستند، فرضیه‌ی صفر رد می‌شود و بنابراین حداقل دو مجموعه دارای تفاوت آماری در مقایسه‌های انجام گرفته بر مبنای شاخص FI و انرژی شکست وجود دارد.

در ادامه از آزمون مقایسه‌های چندگانه‌ی تعقیبی توکی^۳ برای گروه‌بندی

- 1 Anderson-Darling
- 2 Levene's Test
- 3 Tukey's multiple comparison post hoc test

جدول ۶. نتایج آزمون آماری ANOVA برای مقایسه‌ی نتایج FI ($\alpha=0.05$)

Table 6. ANOVA results for comparison of FI results ($\alpha=0.05$)

گروه	میانگین	نمونه
A	۷/۶	6E+0.3PP18
AB	۴/۹	4.5ME2C+0.3PP18
BC	۲/۱	6E
C	۰/۹	4.5ME2C

جدول ۷. نتایج آزمون آماری ANOVA برای مقایسه‌ی نتایج انرژی شکست ($\alpha=0.05$)

Table 7. ANOVA results for comparison of fracture energy results ($\alpha=0.05$)

گروه	میانگین	نمونه
A	۶۴۸/۹	6E+0.3PP18
A	۵۹۸/۲	6E
AB	۵۱۱/۰	4.5ME2C+0.3PP18
B	۳۴۲/۰	4.5ME2C

و سیمان انجام شد. خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر است:

- طول و مقدار استفاده از الیاف پلی پروپیلن تاثیر مشخصی بر خصوصیات عملکردی مخلوط‌های بازبافتی سرد دارد.
- در محدوده‌ی طول‌ها و مقادیر این پژوهش، در کمترین طول و مقدار الیاف پلی پروپیلن، بهترین نتایج مقاومتی در آزمایش IDT خشک حاصل شد و در بیشترین طول و مقدار این الیاف، بهترین نتایج شکست در آزمایش IDEAL-CT به دست آمد.
- نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی پروپیلن در مخلوط‌های بازبافتی سرد بدون سیمان، حساسیت رطوبتی را تشدید می‌کند.
- تاثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن در بهبود عملکرد شکست مخلوط در حالتی که از سیمان استفاده نمی‌شود قابل توجه است. مخلوط دارای الیاف بهینه با اینکه افزایش قابل توجهی در انرژی شکست در آزمایش SCB نداشتند، شاخص انعطاف‌پذیری به شکل قابل توجه بهتری داشتند.

نکرده‌اند. با این حال، افزودن الیاف به مخلوط کنترل سیمانی توانسته کاهش عمده‌ی انرژی شکست این مخلوط در مقایسه با مخلوط کنترل پایه را جبران نموده و به مقادیر قابل مقایسه‌ای با آن منجر شود. با توجه به نتایج جدول ۶ و ۷، می‌توان گفت که افزودن الیاف در بهبود شاخص انعطاف‌پذیری نسبت به انرژی شکست موفق‌تر بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تسلیح مخلوط‌های بازبافتی سرد با الیاف پلی پروپیلن و همچنین استفاده‌ی هم‌زمان الیاف پلی پروپیلن و سیمان با هدف ارتقای عملکرد این مخلوط‌ها بررسی شد. بدین منظور آزمایش IDT در حالت خشک و تر و آزمایش IDEAL-CT برای تعیین طول و مقدار بهینه‌ی الیاف استفاده شدند و آزمایش SCB جهت مقایسه‌ی خصوصیات شکست در مخلوط‌های دارای الیاف بهینه و همچنین مخلوط‌های دارای الیاف بهینه

- [6] C. Ling, A. Hanz, H. Bahia, Evaluating moisture susceptibility of cold-mix asphalt, *Transportation Research Record*, 2446(1) (2014) 60-69.
- [7] A. Modarres, M. Rahimzadeh, M. Zarrabi, Field investigation of pavement rehabilitation utilizing cold in-place recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, 83 (2014) 112-120.
- [8] I. Thanaya, S. Zoorob, J. Forth, A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, Thomas Telford Ltd, 2009, pp. 47-55.
- [9] S.A. Cross, Evaluation of Cold In Place Recycled Mixtures on US-283 (1999).
- [10] X. Fang, A. Garcia-Hernandez, P. Lura, Overview on cold cement bitumen emulsion asphalt, *RILEM Technical Letters*, 1 (2016) 116-121.
- [11] E.A. Taziani, E. Toraldo, F. Giustozzi, M. Crispino, Investigation on the combined effect of fibers and cement on the mechanical performance of foamed bitumen mixtures containing 100% RAP, *Advances in Materials Science and Engineering* (2016)
- [12] J. Yan, Z. Leng, F. Li, H. Zhu, S. Bao, Early-age strength and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixes with various cement contents, *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 153-159.
- [13] A. Kavussi, A. Modarres, Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement, *Construction and Building Materials*, 24(10) (2010) 1920-1927.
- [14] E. Gartner, Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements, *Cement and Concrete research*, 34(9) (2004) 1489-1498.
- [15] H.K. Shanbara, F. Ruddock, W. Atherton, A laboratory study of high-performance cold mix asphalt mixtures reinforced with natural and synthetic fibres, *Construction and Building Materials*, 172 (2018) 166-175.
- [16] S.M. Abtahi, M. Sheikhzadeh, S.M. Hejazi, Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review, *Construction and Building Materials*, 24(6) (2010) 871-877.
- استفاده همزمان از الیاف بهینه‌ی پلی پروپیلن و سیمان حساسیت رطوبتی ناشی از الیاف را جبران کرده و ITSR بیشتری نسبت به مخلوط دارای سیمان حاصل کرد.
 - استفاده‌ی همزمان از الیاف بهینه‌ی پلی پروپیلن و سیمان با حفظ اثرات مثبت سیمان از منظر مقاومت و مقاومت در برابر رطوبت، خصوصیات شکست و جذب انرژی آن‌ها را به شکل قابل توجهی ارتقا داد.
 - تحلیل واریانس نشانگر آن است که استفاده از الیاف پلی پروپیلن در هر دو حالت سیمان و فاقد سیمان، به افزایش قابل ملاحظه‌ای در شاخص FI در آزمایش SCB انجامیده است.
- به نظر می‌رسد استفاده‌ی همزمان از الیاف پلی پروپیلن و سیمان می‌تواند به رویکردی کارآمد برای کاهش درصد امولسیون و حصول خصوصیات عملکردی مشابه با مخلوط کنترل منجر شود. در پژوهش حاضر، مخلوط‌های دارای الیاف پلی پروپیلن و ۲ درصد سیمان و ۱/۵ درصد امولسیون کمتر نسبت به مخلوط کنترل، تقریباً در تمامی شاخص‌های عملکردی نتایج بهتری نسبت به مخلوط فاقد افزودنی نشان دادند.

منابع

- [1] F. Xiao, S. Yao, J. Wang, X. Li, S. Amirkhani, A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 180 (2018) 579-604.
- [2] A.E. Alkins, B. Lane, T. Kazmierowski, Sustainable pavements: environmental, economic, and social benefits of in situ pavement recycling, *Transportation research record*, 2084(1) (2008) 100-103.
- [3] P. Ayar, Effects of additives on the mechanical performance in recycled mixtures with bitumen emulsion: an overview, *Construction and Building Materials*, 178 (2018) 551-561.
- [4] F. Gu, W. Ma, R.C. West, A.J. Taylor, Y. Zhang, Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: A case study, *Journal of cleaner production*, 208 (2019) 1513-1523.
- [5] G. Thenoux, A. Gonzalez, R. Dowling, Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile, *Resources, Conservation and Recycling*, 49(4) (2007) 325-339.

- asphalt using short polypropylene fibers, *Advances in Materials Science and Engineering* (2013)
- [23] G. Martinez-Arguelles, F. Giustozzi, M. Crispino, G.W. Flintsch, Laboratory investigation on mechanical performance of cold foamed bitumen mixes: bitumen source, foaming additive, fiber-reinforcement and cement effect, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 241-248.
- [24] A.J. Puppala, S. Saride, A. Potturi, L.R. Hoyos, Resilient Behavior of Cement-Fiber Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates, in: *Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support*, 2009, pp. 433-440.
- [25] H. Nikfarjam, "Performance Evaluation of Cold-Recycled Mixtures (In Farsi)," M.Sc. Thesis, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Iran, Sharif Digital Repository, 53093 (09), 2020. [Online]. Available: <http://repository.sharif.edu/resource/479269/>
- [17] L.R. Hoyos, A.J. Puppala, C.A. Ordonez, Characterization of cement-fiber-treated reclaimed asphalt pavement aggregates: preliminary investigation, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7) (2011) 977-989.
- [18] G. Ferrotti, E. Pasquini, F. Canestrari, Experimental characterization of high-performance fiber-reinforced cold mix asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 57 (2014) 117-125.
- [19] R.S. McDaniel, Fiber additives in asphalt mixtures, 2015.
- [20] C.J. Slebi-Acevedo, P. Lastra-González, P. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno, Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: a review, *Construction and Building Materials*, 200 (2019) 756-769.
- [21] B. de S. Bueno, W.R. Da Silva, D.C. de Lima, E. Minete, Engineering properties of fiber reinforced cold asphalt mixes, *Journal of Environmental Engineering*, 129(10) (2003) 952-955.
- [22] Y. Kim, T.-S. Park, Reinforcement of recycled foamed

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Sabouri, M. Sadeghi, *Investigation on properties of cold recycled asphalt mixtures reinforced with polypropylene fibers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(3) (2023) 583-602.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20436.7441



