

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم (H-WMA) حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالتی (RAP)

امیر کاووسی^{۱*}، جمال رحیمی^۲

۱. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

kavussia@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۳/۱۸

چکیده

آسفالت نیمه گرم (Half-Warm Mix Asphalt) به دلیل شرایط تولید خاص، یکی از مخلوط‌های جایگزین آسفالت‌های مرسوم سرد، گرم و داغ است. آسفالت نیمه گرم (H-WMA) در محدوده دمایی ۶۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد تولید و متراکم می‌شود که نسبت به آسفالت داغ (HMA) دمای کمتری در مراحل تولید نیاز دارد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر درصدهای بالای تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) استفاده شده در آسفالت نیمه گرم روی ویژگی‌های وزنی-حجمی و مکانیکی این نوع از مخلوط‌ها است. در این راستا، نمونه‌های آسفالت نیمه گرم با درصدهای جایگزینی ۷۰ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت تهیه و با نمونه‌های شاهد ساخته شده به روش داغ (HMA) مقایسه شدند. درصد فیر بهینه برای تمامی مخلوط‌ها تعیین و سپس آزمایش‌های کشش غیرمستقیم (IDT)، خمش نیم دایره‌ای (SCB) انجام و حساسیت رطوبتی نمونه آسفالت‌های داغ (HMA) و نیمه گرم تعیین شدند. از آزمایش کشش غیرمستقیم روی نمونه‌ها نتایج قابل قبولی حاصل شد. به این صورت که با افزایش درصد جایگزینی RAP، مقاومت IDT نمونه‌ها افزایش نشان داد. نتیجه آن که با افزایش درصد تراشه، نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR) نمونه‌های آسفالت نیمه گرم بهبود یافت. نتایج بیشتر TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت در مقایسه با مخلوط‌های تهیه شده با مصالح خام نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط‌های حاوی تراشه در برابر رطوبت بود. اما نتایج آزمایش‌ها SCB که در دماهای میانی و پایین محیط انجام شدند، حاکی از آن بودند که استفاده از تراشه تا یک درصد محدود موجب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها می‌شود و افزایش بیشتر آن در مخلوط موجب شکنندگی شدن نمونه‌ها می‌شود، که این امر به معنی کاهش مقاومت مخلوط‌های حاوی تراشه زیاد در برابر گسترش ترک‌ها و بدتر شدن شرایط انتشار آن‌ها است. بررسی نتایج انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که مخلوط‌های حاوی درصد تراشه بیشتر، انرژی شکست کمتری دارند.

واژگان کلیدی: آسفالت نیمه گرم (H-WMA)، تراشه آسفالت بازیافتی (RAP)، فیر امولسیون، آزمایش کشش غیرمستقیم (IDT)، آزمایش

خمش نیم دایره‌ای (SCB)

۱- مقدمه

فناوری‌های دوست‌دار محیط‌زیست از جمله فناوری‌های مطلوب در جهت توسعه پایدار هستند. از جمله مزایای این گونه از فناوری‌ها، مصرف کمتر سوخت و انرژی، کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، مقرون به صرفه بودن و قابلیت بازیافت مجدد است که در امور راه و ترابری، توجه دست اندرکاران را در بخش‌های ساخت، نگهداری و بهسازی راه‌ها به خود جلب کرده‌اند [1]. کاهش دماهای تولید، پخش و تراکم آسفالت، منجر به کاهش خطرات آتش سوزی در کارخانه آسفالت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. فناوری تولید مخلوط آسفالت نیمه گرم (H-WMA) یک نمونه از فناوری‌های در حال رشد است که ویژگی‌های ذکر شده را دارد و می‌تواند به عنوان جایگزین مخلوط‌های آسفالتی داغ رایج مورد استفاده قرار گیرد. در حال حاضر از دو فناوری جدید آسفالت گرم (WMA) و آسفالت نیمه گرم (H-WMA) برای ساخت روسازی‌های انعطاف‌پذیر در دماهای کمتر از آسفالت‌های داغ متداول (HMA) استفاده می‌شود. محدوده دماهای اختلاط و تراکم آسفالت نیمه گرم ۱۳۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد است [2, 3].

از طرف دیگر می‌توان دوباره از تراشه آسفالت (RAP)، به دلیل دارا بودن مواد و مصالح ارزشمند همچون قیر و سنگدانه، در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد. این کار منجر به کاهش استفاده از مواد و مصالح جدید، از جمله قیر و مصالح سنگی خام می‌شود [4]. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر درصد‌های مختلف جایگزینی تراشه‌های آسفالتی (RAP) در مخلوط آسفالتی نیمه گرم (H-WMA)، نمونه‌های آسفالت حاوی درصد‌های مختلف، صفر، ۷۰ و ۱۰۰ درصد تراشه ساخته و با آزمایش‌های کشش غیر مستقیم و خمش نیم دایره‌ای مورد ارزیابی و مقایسه با مخلوط‌های آسفالت داغ (HMA) متداول قرار گرفتند.

۲- پیشینه تحقیق

با توجه به مطالعات انجام شده، استفاده از تراشه آسفالتی در مخلوط آسفالتی نیمه گرم، دارای مزیت‌های بیشتری در مقایسه

با مخلوط‌های آسفالتی مرسوم است که مهم‌ترین آنها مزیت‌های اقتصادی و زیست محیطی و نتایج قابل قبول آزمایش‌های مکانیکی است. بیشتر هزینه‌ها در مخلوط‌های آسفالت بازیافتی مربوط به هزینه‌های فرآوری تراشه‌ها، بکارگیری مواد جوانساز برای احیاء مخلوط‌ها و کنترل آلاینده‌های هوا هنگام تولید است. به طور کلی برآورد شده است که استفاده ۱۰۰٪ تراشه آسفالت، موجب کاهش هزینه تهیه مخلوط به میزان ۵۰ تا ۷۰٪ می‌شود [۴]. در تحقیقی در سال ۲۰۲۰ به این نتیجه رسیده شد که استفاده از مخلوط حاوی ۱۰۰٪ RAP همراه با پودر لاستیک و روغن سوخته، هزینه تهیه مواد و تولید آسفالت را به ترتیب تا ۷۴٪ و ۹۱٪ کاهش می‌دهد [5]. مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم مزیت‌های دیگری، از آن جمله مصرف انرژی کمتر (۳ تا ۴ کیلوگرم در تن) [4] در مقایسه با روش‌های بازیافت داغ درجا (HIR) و روش‌های تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) دارند [6]. همچنین باعث کاهش انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای در طول روند تولید می‌شوند. به گونه‌ای که برخی از پژوهشگران کاهش ۳۰٪ CO₂ و ۲۵٪ SO₂ را در مقایسه با مخلوط‌های آسفالت داغ گزارش داده‌اند [4, 7]. از دیگر مزایای مهم زیست محیطی آنها می‌توان به ضرورت کاهش محوطه‌های دفن زباله برای دفع روسازی‌های تخریب شده اشاره کرد. [8, 9] در تحقیقی دیگر مشخص شد که با بکارگیری مخلوط‌های حاوی ۷۰٪ و ۱۰۰٪ تراشه آسفالتی به ترتیب ۳۱٪ و ۳۶٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی شده است. به طریق مشابه، از نظر استفاده از منابع زیست محیطی، به طور میانگین ۳۱٪ و ۳۵٪ صرفه‌جویی گزارش شده است [10]. در مورد ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالتی، پژوهش‌های اخیر نشان داده است که کاهش دمای تولید (در محدوده دمایی مخلوط‌های آسفالت گرم و نیمه گرم در مقایسه با آسفالت‌های داغ) و استفاده از مقادیر زیاد تراشه، عملکرد مکانیکی مخلوط‌ها را چندان هم کاهش نداده است [11, 12]. با وجود این، برخی دیگر از محققان بر این عقیده‌اند که کاهش دماهای تولید و تراکم منجر به کاهش ویژگی‌های حجمی، تراکم ناکافی و حساسیت رطوبتی

یاد شده، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای به علت سادگی ساخت نمونه و سهولت انجام آزمایش، یکی از آزمایش‌های رایج در ارزیابی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی است [20 تا 22]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در خصوص رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی با توجه به شرایط بارگذاری و دمایی انجام شده است. برای نمونه، در یک تحقیق، ۱۳ رفتار شکست مخلوط آسفالتی داغ با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت [23]. مطابق نتایج این پژوهشگران، به این نتیجه رسیدند که چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی داغ تا حد قابل توجهی وابسته به دما است. به طوریکه با کاهش دما، میزان استحکام شکست تا حد مشخصی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. پژوهشگران دیگری مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را بر اساس نتایج آزمایش SCB مورد مطالعه قرار داده و از خروجی‌های آزمایش خستگی SCB به منظور بررسی ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌ها استفاده کردند [24]. در تحقیق آنان، نتایج تأثیر نرخ بارگذاری و دما بر مقاومت آسفالت نشان داده شد. همچنین چگونگی ارتباط میان نرخ بارگذاری و مقاومت مخلوط‌ها تشریح شد. با افزایش نرخ بارگذاری، مقاومت ابتدا به سرعت افزایش یافته و سپس از نرخ افزایش آن کاسته می‌شود [24]. پژوهشگران دیگری عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالتی مخلوط شده با یک نوع افزودنی شیمیایی را با استفاده از آزمایش SCB و محاسبه [انتگرال آنها در دماهای میانی مورد ارزیابی قرار دادند. مطابق نتایج این پژوهشگران، افزایش درصد تراشه آسفالتی باعث سخت شدن بیش از حد مخلوط آسفالتی و کاهش مقاومت شکست آن‌ها می‌شود. نتیجه دیگر آن‌ها آن بود که با اضافه کردن افزودنی شیمیایی، سختی مخلوط کاهش می‌یابد اما تأثیر منفی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها ندارد [25].

۳- مصالح و آزمایش‌ها

نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیمه گرم بدون/دارای RAP، پس از ساخت و عمل‌آوری، به منظور بررسی ویژگی‌های مکانیکی آنها، تحت آزمایش‌های کشش غیر مستقیم و تعیین حساسیت

مخلوط‌های بازیابی شده می‌شود [13, 14]. برخی دیگر از پژوهشگران نیز اعتقاد دارند که با توجه به اینکه سنگدانه‌های تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) توسط یک لایه نازک قیر پیر شده، پوشانده شده‌اند، انتظار نمی‌رود که حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها از مخلوط‌های آسفالت داغ (HMA) بیشتر باشد [4, 15]. پژوهشگران دیگری نتیجه گرفته‌اند که مخلوط‌های حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالت که در دماهای محیط تولید شده‌اند، ظرفیت تحمل بار و مقاومت در برابر شیارشدگی کمتری را در مقایسه با آسفالت‌های داغ از خود نشان داده‌اند. احتمالاً این امر به دلیل پایین بودن دماهای اختلاط و تراکم می‌باشد [16]. در پژوهش‌های دیگری نشان داده شده است که استفاده مجدد از تراشه آسفالت بازیافتی در مقیاس زیاد و یا حتی تا ۱۰۰٪ تراشه، به دلیل سخت شدن قیر و اکسیداسیونی که در طول عمر خدمت‌دهی روسازی تجربه کرده است، باعث سخت‌تر و شکننده‌تر شدن مخلوط آسفالت بازیافتی می‌شود. ضمن آن که با افزایش درصد تراشه آسفالت، تنش کششی غیر مستقیم (ITS) نیز افزایش داشته است. [5, 17, 18]

در تحقیق دیگری، با استفاده از ۱۰۰٪ RAP و بررسی ویژگی‌های مکانیکی آسفالت نیمه‌گرم، این نتیجه حاصل شد که عمر خستگی مخلوط کاهش می‌یابد. با اینکه سختی بیشتر مخلوط دلیل این رفتار است، اما همین سختی منجر به عملکرد خوب مخلوط در برابر تغییر شکل‌های دائمی در هر شرایط آب و هوایی شده است [19].

ترک‌خوردگی خستگی، یکی از خرابی‌های مهم در روسازی‌های آسفالتی است که به دلیل تکرار بارگذاری ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه در زیر لایه آسفالتی ایجاد شده و با گذر زمان به سطح روسازی گسترش می‌یابد. این ترک‌ها با ایجاد راهی برای نفوذ رطوبت به داخل روسازی، به‌طور قابل توجهی دوام و مقاومت روسازی آسفالتی را کاهش داده و باعث ایجاد خرابی‌های دیگر در روسازی می‌شوند [13]. برای ارزیابی سازوکار رشد ترک و شکست مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش‌های مختلفی، مانند آزمایش کشش غیرمستقیم، آزمایش تیر خمشی، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای و آزمایش کشش دیسکی متراکم (DCP) استفاده می‌شود. از میان آزمایش‌های

رطوبتی و همچنین آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB) قرار گرفتند. در این تحقیق تأثیر درصد‌های مختلف جایگزینی RAP به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های وزنی-حجمی و ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا نمونه‌ها در دو حالت تر و خشک برای تعیین شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) و مقاومت کشش غیر مستقیم (IDT) ساخته و تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۱-۳- مواد و مصالح

برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم از یک نوع مصالح سنگی دارای مقادیر زیاد سنگدانه‌های سیلیسی استفاده شد تا

حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها بیشتر مورد ارزیابی (تحت تأثیر افزودن تراشه های آسفالتی) قرار گیرند. دانه‌بندی مورد استفاده، دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور بود. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. دو نوع قیر در این پژوهش استفاده شد. ۱- قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ برای ساخت مخلوط های HMA و ۲- قیر امولسیون کاتیونی (CSS-1) برای ساخت مخلوط‌های H-WMA که مشخصات آنها به ترتیب در جداول (۲ و ۳) آورده شده است. مشخصات تراشه آسفالت بازیافتی مورد تحقیق در جدول (۴) آورده شده است. قیر تراشه بعد از اکسترکشن ۳،۵٪ بدست آمد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده

Aggregate Size	Test	Standard Method	Result
Coarse Aggregate	Specific Gravity (g/cm^3)	ASTM D127	2.51
	Fractured Particles (%)	ASTM-D5821	93
	Los Angeles Abrasion Value (%)	ASTM C535	14
Fine Aggregate	Specific Gravity (g/cm^3)	ASTM D128	2.67
	Fractured Particles (%)	ASTM C1252	52
	Sand Equivalent (%)	ASTM D2419	67

Table 1. Physical properties of the aggregates used

جدول ۲. مشخصات قیر ۶۰/۷۰ مورد استفاده

Test	Standard Method	Result
Penetration (0.1 mm)	ASTM D5	65
Softening Point ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D36	53
Specific Gravity (g/cm^3)	ASTM D70	1.02
Ductility (cm)	ASTM D113	164
Flash Point ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D92	316

Table 2. Properties of the 60/70 asphalt binder

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیون مورد استفاده (قیر ۱-CSS)

Test	Standard Method	Result
Sybolt-Furol Viscosity at 25°C , s	ASTM D88	32
Retained on Sieve	ASTM D6933	0.005
Particle Charge	ASTM D7402	Cationic
Storage Stability	ASTM D6930	0.6

Tests on residue after distillation

Residue by Distillation %	ASTM D6997	60
Oil from Distillation %	ASTM D6997	4
Penetration, 0.1 mm @25°C	ASTM D5	109
Ductility, Cm, @25°C	ASTM D113	>100
Solubility in TCE wt.%	ASTM D2042	99.89

Table 3. Properties of the CSS-1 bitumen emulsion

جدول ۴. مشخصات قیر تراشه آسفالتی بعد از استخراج از مخلوط

Test	Standard Method	Result
Penetration (0.1 mm)	ASTM D5	14.3
Softening Point (C°)	ASTM D36	71.8
Total Binder Content of the RAP Material (%)	ASTM D2172	5.3
Binder Content of Fine RAP Material (%)	ASTM D2172	6.25
Binder Content of Coarse RAP Material (%)	ASTM D2172	2.6

Table 4. Properties of the asphalt binder of the RAP after extractionBC_{total}: درصد قیر بهینه (نهایی) مخلوط

OEC: درصد بهینه قیر امولسیون

BE: درصد قیر امولسیون (۶۰٪)

CRB: درصد قیر موجود در RAP درشت دانه (۶،۲٪)

FRB: درصد قیر موجود در RAP ریز دانه (۶،۲۵٪)

جدول ۵. درصد قیر بهینه مخلوط آسفالت نیمه گرم

Sample	Optimum Emulsion Content	Optimum Binder Content
HWMA-R0	10.5%	6.3%
HWMA-R70	5%	5.8%
HWMA-R100	2.5%	5.6%

Table 5. Optimum binder content of H-WMA mix

جدول ۶. اختصارات نامگذاری نمونه‌های آسفالتی

Sample	Description
HMA	Control Hot Mix Asphalt
HWMA-R0	Control Half-Warm Mix Asphalt With 0% RAP
HWMA-R70	Half-Warm Mix Asphalt With 70% RAP
HWMA-R100	Half-Warm Mix Asphalt With 100% RAP

Table 6. Nomination and abbreviations of samples**۳-۳-۳- آزمایش کشش غیرمستقیم (IDT)**

آزمایش کشش غیرمستقیم، تنش‌های کششی و فشاری را به طور هم‌زمان در نمونه ایجاد می‌کند که شبیه‌سازی زیادی به

۳-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالت نیمه‌گرم و آسفالت داغ بر اساس روش مارشال با اعمال ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه‌ها انجام شد. دماهای اختلاط و تراکم مخلوط، از نمودار کندروانی-درجه حرارت برای قیر ۶۰/۷۰، بر اساس محدوده مناسب کندروانی در شرایط اختلاط (۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی استوکس) و شرایط تراکم (۲۵۰ الی ۳۰۰ سانتی استوکس) به ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. بر اساس نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مقاومتی مخلوط در مقادیر مختلف قیر، مقدار بهینه قیر برابر با ۵،۸٪ بدست آمد. طرح اختلاط مخلوط‌های H-WMA نیز براساس روش مارشال و با اعمال ۷۵ ضربه تراکم در هر طرف نمونه‌ها انجام شد. مقادیر درصد قیر امولسیون بهینه و درصد قیر نهایی مخلوط‌ها در جدول (۵) آورده شده است. به منظور ایجاد سهولت در گزارش نمونه‌ها، آنها با اختصارات و نامگذاری آورده شده‌اند (جدول ۶). لازم به ذکر است که برای تولید مخلوط‌های بازیافتی، ۴۰٪ از RAP ریزدانه و ۶۰٪ از RAP درشت‌دانه مورد استفاده قرار گرفتند. درصد قیر نهایی به طور مثال برای مخلوط حاوی ۷۰ درصد RAP از رابطه (۱) زیر محاسبه شد.

$$BC_{total} = OEC \times BE + 70\%(60\% \times CRB + 40\% \times FRB) \quad (1)$$

در این رابطه:

مخلوط حساسیت رطوبتی کمتری دارد. طبق آیین‌نامه‌ها این نسبت نباید کمتر از ۸۰ درصد باشد.

$$TSR = \frac{TSR_{wet}}{TSR_{dry}} \quad (۳)$$

در این رابطه:

TSR: نسبت مقاومت کششی

TSR_{wet} : میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها در شرایط مرطوب

بر حسب کیلوپاسکال

TSR_{dry} : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های شاهد بر حسب

کیلوپاسکال

۳-۵- آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB) در دماهای

میانی

ترک‌خوردگی ناشی از خستگی روسازی، از رایج‌ترین انواع خرابی روسازی‌ها است که معمولاً در دماهای میانی محیط حادث می‌شود. در این پژوهش آزمایش SCB مطابق با استاندارد ASTM D8044 برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک خوردگی انجام شد. برای این منظور نمونه‌های نیم‌دایره‌ای با قطر ۱۵۰ و ضخامت ۵۷ میلی‌متر و سه طول شکاف ۲۵، ۳۲ و ۳۸ میلی‌متر ساخته شدند. سپس به طور یکنواخت با سرعت اعمال بار ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایش نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی بحرانی (J_c) هماهنگی خوبی با مقاومت گسترش ترک‌خوردگی‌ها در مخلوط مورد آزمایش دارد. پس به جای تحلیل متداول نیرو و تغییر شکل در لحظه شکست، از این پارامتر استفاده شد. در انتها نیز مطابق استاندارد ASTM D8044-16، مقدار انتگرال J بر اساس فرمول (۴) زیر برای سه تکرار محاسبه و پس از میانگین‌گیری تعیین شد.

$$J_c = -\left(\frac{1}{b}\right) \frac{dU}{da} \quad (۴)$$

در این رابطه:

J_c : نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی بحرانی بر حسب کیلو ژول

بر متر مربع

b: ضخامت نمونه بر حسب متر

dU/da : تغییر انرژی کرنشی با طول شکاف بر حسب کیلو

ژول بر متر

بارگذاری روسازی در حین عبور کامیون‌ها دارد. در این تحقیق مقاومت IDT نمونه‌ها مطابق استاندارد AASHTO T322 تعیین شد. این آزمایش بر اساس اعمال بار یکنواخت در جهت قطر نمونه با سرعت ۵۰/۸ میلی‌متر در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا زمان شکست انجام شد. نمونه‌ها دارای قطر ۱۰۱/۶ و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر بودند. مقاومت IDT به صورت بیشترین بار قابل تحمل توسط نمونه تعریف می‌شود و نشان دهنده مقاومت مخلوط در برابر ترک‌خوردگی است. سه تکرار برای هر نمونه انجام شد. بعد از بدست آوردن مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها، مقاومت کششی غیر مستقیم (IDT) از رابطه (۲) زیر تعیین شد.

$$IDT = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (۲)$$

در این رابطه:

IDT: مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال

P: حداکثر بار وارد شده بر حسب نیوتن

t: ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر

D: قطر نمونه بر حسب میلی‌متر

۳-۴- حساسیت رطوبتی (TSR)

یکی از مهمترین ویژگی‌های روسازی‌های آسفالتی دوام آنها در برابر رطوبت است. بنابراین حساسیت رطوبتی یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی آنها می‌باشد. TSR پارامتری است که از آزمایش IDT تعیین شده و مقاومت مخلوط را در برابر عریان‌شدگی ارزیابی می‌کند. در این پژوهش حساسیت رطوبتی نمونه‌ها با انجام آزمایش IDT مطابق استاندارد AASHTO T283 تعیین شد. برای انجام این آزمایش باید دقت شود که درصد فضای خالی نمونه‌ها در تمامی آنها تقریباً برابر و بین ۶ تا ۸ درصد باشد. در ادامه، نمونه‌ها به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول نمونه‌های شاهد که در حالت خشک آزمایش شدند و گروه دوم نمونه‌هایی که پس از اشباع در آب و در شرایط مرطوب آزمایش شدند. پس از تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در حالت‌های اشباع و خشک، بر اساس رابطه (۳)، از تقسیم مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت اشباع به حالت خشک، نسبت TSR بدست آمد. هر چه این نسبت بر حسب درصد به ۱۰۰ نزدیکتر باشد مناسبتر است و

پایین منجر به بهبود مقاومت مخلوط در برابر ایجاد و گسترش ترک می‌شود. سه تکرار برای هر نمونه انجام گرفت. برای تعیین مقدار قیر بهینه مخلوط، از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های آسفالتی داغ و نمونه‌های نیمه‌گرم، مخلوط‌ها به ترتیب تا دمای ۱۷۰-۱۶۰ (به مدت ۲۴ ساعت) و ۱۱۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (به مدت ۶ ساعت) گرم شدند. قیر خالص مخلوط HMA تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و قیر امولسیون مخلوط H-WMA تا دمای ۸۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. تراشه آسفالت‌های بازیافتی نیز تا دمای ۱۰۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. سپس در مخلوط HMA، سنگ‌دانه‌ها و قیر خالص مورد نظر تا ایجاد یک مخلوط همگن با یکدیگر مخلوط شدند. نمونه‌های مارشال مطابق با استاندارد مخلوط آسفالتی متراکم ساخته و توسط چکش مارشال با اعمال ۷۵ ضربه به طرفین نمونه‌ها در قالب ۴ اینچی متراکم شدند. برای مخلوط H-WMA از قالب‌های معمولی استفاده شد که ابتدا تا حدود ۸۵ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. سپس مصالح سنگی و قیر امولسیونی با هم مخلوط شدند تا جایی که سطح سنگدانه‌ها کاملاً با قیر امولسیونی پوشش شدند. پس از آن تراشه آسفالت بازیافتی گرم شده به آنها اضافه و بار دیگر در دمای ۹۵-۸۵ درجه سانتی‌گراد مخلوط شدند. نهایتاً مخلوط‌های بدست آمده در دمای ۸۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد متراکم شدند. سپس به منظور عمل‌آوری (حصول اطمینان از دفع و تبخیر آب موجود در قیر امولسیون) نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در داخل گرمخانه قرار داده شدند. نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای (SCB) مطابق استاندارد BS EN 12697-32 ساخته شدند. در این روش از یک دستگاه پیکور و یک متراکم‌کننده فلزی برای متراکم کردن نمونه‌ها تا حصول ارتفاع مورد نظر استفاده شد. پس از تراکم، نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده بریده شدند و ترک مورد نظر در آنها ایجاد گردید. شکل (۱) مراحل ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

۴- نتایج و بحث

از نتایج آزمایشات انجام شده روی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی در تحقیق موارد زیر قابل بحث است.

از شیب نمودار انرژی کرنشی (U) مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر شکل تا زمان شکست در برابر طول شکاف محاسبه می‌شود. J_e تفاوت انرژی پتانسیل بین نمونه‌های بارگذاری شده با طول شکاف‌های مختلف است. این پارامتر، انرژی ذخیره شده در نمونه برای توسعه ترک را نشان می‌دهد. با افزایش J_e مقاومت در برابر گسترش ترک بهبود می‌یابد سه تکرار برای هر نمونه انجام گرفت.

۳-۶- آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB) در دماهای پایین

ترک‌خوردگی‌های حرارتی روسازی‌های آسفالتی در دماهای پایین، در اثر انقباض روسازی حادث می‌شوند. آزمایش SCB در دماهای پایین هماهنگی خوبی با مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر آثار منفی ناشی از دمای پایین دارد. در این پژوهش این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO TP105 انجام شد. بدین منظور نمونه‌های نیم‌دایره‌ای دارای قطر ۱۵۰، ضخامت ۲۵ و طول شکاف ۱۵ میلی‌متر ساخته شدند. سپس به مدت دو ساعت در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس از آن به صورت یکنواخت با سرعت ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد تا حصول شکست بارگذاری شدند. انرژی شکست نمونه‌ها مطابق فرمول (۵) زیر محاسبه شد:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (5)$$

در این رابطه:

G_f : انرژی شکست بر حسب ژول بر متر مربع

W_f : کار شکست بر حسب ژول (مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر شکل)

A_{lig} : مساحت ترک بر حسب متر مربع (مطابق فرمول (۶) زیر محاسبه شد.

$$A_{lig} = (r - a)t \quad (6)$$

در این رابطه:

a : طول شکاف بر حسب متر

t : شعاع نمونه بر حسب متر

t : ضخامت نمونه بر حسب متر است.

انرژی شکست نشانگر مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک سطح واحد از ترک است. افزایش انرژی شکست در دماهای

۴-۱-۱- قیر بهینه

یافت. درصد قیر نهایی مخلوط‌ها نیز با افزایش درصد تراشه، با اختلاف اندکی کاهش نشان داد. دلیل این امر می‌تواند پوشش سنگدانه‌های بازیافتی توسط قیر سخت شده باشد.

میزان تراشه و سختی آن تاثیر زیادی روی ویژگیهای وزنی-حجمی مخلوط و در نتیجه روی قیر بهینه آن دارد. تاثیر قیر مخلوط‌های HMA و درصد قیر امولسیون‌ی مخلوط‌های H-WMA روی پارامترهای، استقامت مارشال، روانی، نسبت مارشال و وزن مخصوص آسفالت در ادامه مورد تشریح قرار گرفته است.

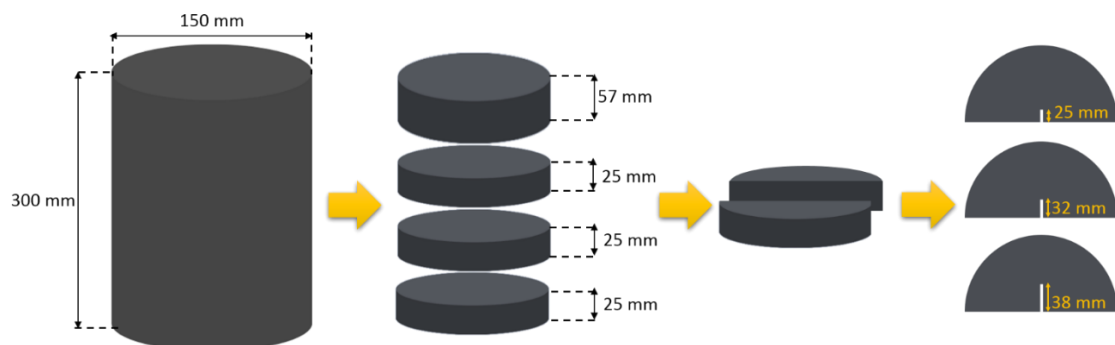
۴-۱-۲- استقامت مارشال

استقامت مارشال، رابطه مستقیمی با سختی مخلوط‌ها دارد. به این صورت که هر چقدر مخلوط سخت‌تر باشد، استقامت مارشال آن نیز بالاتر است. برای نمونه، مطابق با شکل (۳)، مخلوط H-WMA-R100 با توجه به دارا بودن مقدار زیاد تراشه آسفالتی، قیر سخت شده و پیر شده بیشتری دارد و در نتیجه در مقایسه با سایر مخلوط‌ها دارای استقامت مارشال بیشتری است. هر چقدر درصد تراشه بیشتر باشد، استقامت مارشال نیز افزایش می‌یابد.

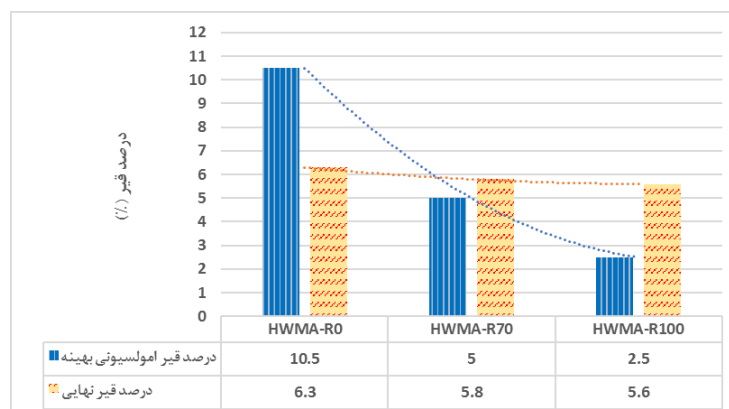
۴-۱-۱- تاثیر درصد تراشه

به منظور جبران مقدار قیر لازم مخلوط‌های H-WMA، از قیر امولسیون‌ی کاتیونی (CSS-1) استفاده شد. در مخلوط HWMA-R0 از آنجا که تراشه آسفالتی استفاده نشده بود، این مقدار از سایر درصد‌های قیر امولسیون‌ی مخلوط‌های دیگر بیشتر بود (شکل ۲). با افزایش مقدار تراشه، این درصد کاهش

شکل ۱. مراحل ساخت نمونه‌های SCB

**Fig. 1.** Preparation processes of the SCB samples

شکل ۲. مقایسه افزایش درصد RAP با درصد قیر امولسیون‌ی بهینه و درصد قیر نهایی

**Fig. 2.** Results of total binder content of mixes containing different amounts of RAP

MQ = نسبت مارشال (kN/mm)

Marshall Stability = استقامت مارشال (kN)

Marshall Flow = روانی مارشال (mm)

این مقدار نشانگر سختی مخلوط و انعطاف‌پذیری آن، و معرف مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل است. مقدار بیشتر این پارامتر، بیانگر آن است که مخلوط دارای استقامت مارشال بیشتر، ضمن کمترین مقاومت برای انعطاف‌پذیری است. به عبارتی نشانگر مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی است [26]. با توجه به نتایج قبلی مندرج در شکل‌های (۳ و ۴) می‌توان به این نتیجه دست یافت که هر چقدر درصد تراشه آسفالتی بیشتر باشد، استقامت مارشال افزایش و روانی آن نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه برای نمونه H-WMA-R100، دارای بیشترین استقامت مارشال و کمترین روانی می‌باشد. این بهترین حالت ممکن برای بیشترین نسبت مارشال است که در شکل (۵) می‌توان نتایج را به طور کامل مشاهده کرد.

شکل ۵. نسبت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه

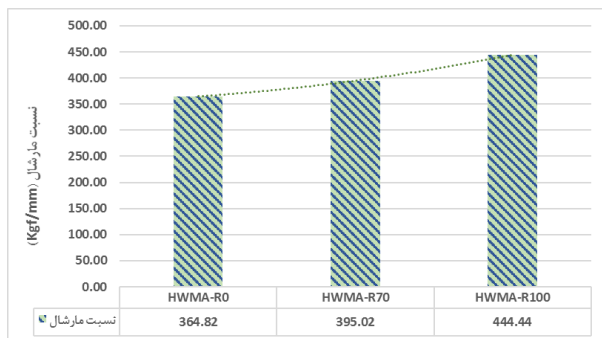


Fig. 5. Marshall Quotient of mixes at different amounts of RAP

۲-۷- نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم (IDT)

شکل (۶) مقادیر تنش کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی مختلف را در دو حالت تر و خشک نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد RAP، مقدار IDT برای دو حالت تر و خشک افزایش داشته است. بیشترین مقدار این افزایش مربوط به مخلوط HWMA-R100 است که در آن از ۱۰۰٪ تراشه استفاده شده است. نتایج به این شکل بود که مقدار IDT خشک نمونه HWMA-R100 نسبت به نمونه HWMA-R70، ۹٪ و نسبت به نمونه HWMA-R0، ۲۳٪ بیشتر بود. دلیل این رفتار نمونه‌ها را می‌توان به قیر سفت

شکل ۳. روند افزایش استقامت مارشال بر حسب افزایش درصد تراشه

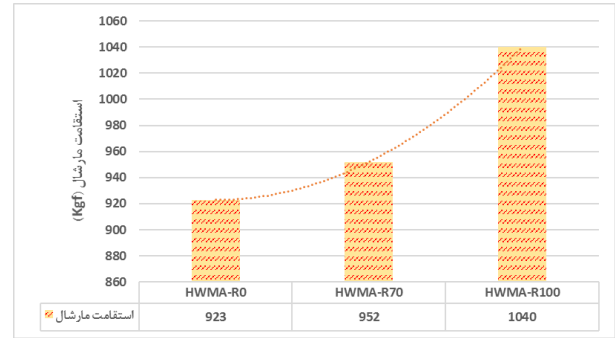


Fig. 3. Results of Marshall Stability test versus percentages of RAP

۳-۱-۴- روانی مارشال

روانی مارشال یک مخلوط آسفالتی نشان دهنده میزان انعطاف‌پذیری آن مخلوط است. همان‌گونه که در شکل (۳) نیز مشخص است، روانی با افزایش درصد تراشه آسفالتی بازافتی کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار مخلوط‌ها را می‌توان به ساختار و شبکه سخت و پیر شده قیر موجود در تراشه نسبت داد. هرچه مخلوط سخت‌تر باشد، میزان روانی آن نیز کمتر می‌شود. این مقدار با اندازه‌گیری جابه‌جایی فک دستگاه به صورت شکل (۴) گزارش شد. در این شکل روند کاهش روانی با افزایش درصد تراشه آسفالتی مشاهده می‌شود.

شکل ۴. روند تغییرات روانی مارشال با افزایش درصد تراشه آسفالت

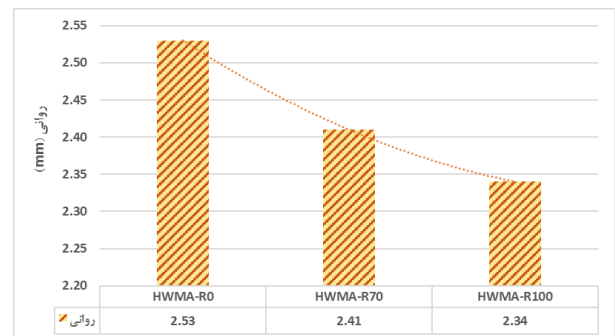


Fig. 4. Marshall Flow testing results versus different amounts of RAP

۴-۱-۴- نسبت مارشال

نسبت مارشال (Marshall Quotient) مطابق رابطه (۲) زیر، از تقسیم استقامت مارشال هر نمونه بر روانی آن بدست می‌آید.

$$\text{رابطه (۲)} \quad MQ = \frac{\text{Marshall Stability}}{\text{Marshall Flow}}$$

در این رابطه:

به طور کلی بیشتر بودن مقدار TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP نسبت به مخلوط شاهد نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط‌های حاوی RAP است. این امر می‌تواند به دلیل پوشش کامل سطح سنگدانه‌ها توسط قیر پیر شده باشد که نیروی چسبندگی زیادی بین قیر و مصالح سنگی ایجاد کرده و موجب عدم نفوذ رطوبت به مصالح سنگی می‌شود. بیشتر پژوهشگران نیز مقاومت بیشتر مخلوط‌های حاوی RAP را در برابر حساسیت رطوبتی نسبت به مخلوط‌های دارای مصالح معدنی (بدون RAP) را تأیید کرده‌اند. این در حالی است که تعدادی از پژوهشگران نتیجه عکس گرفته‌اند. بنابراین در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهایی مانند درصد استفاده از RAP، دماهای اختلاط و تراکم و نوع سنگ دانه مورد استفاده از جمله پارامترهایی هستند که در مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی ساخته شده با RAP تأثیر زیادی داشته و موجب عملکرد متفاوت RAP در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی H-WMA می‌شوند.

شکل ۷. مقادیر TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف

تراشه

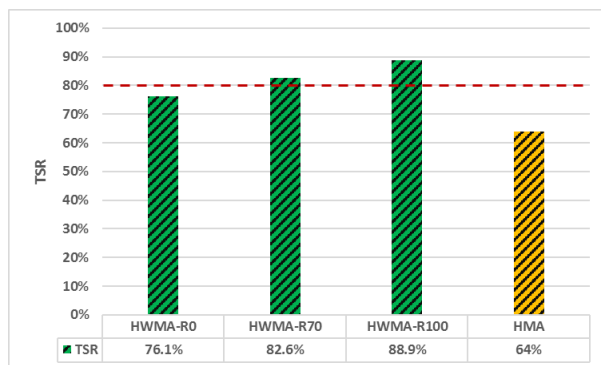


Fig. 7. TSR values of mixes containing different amounts of RAP

همواره بسیاری از پژوهشگران مقدار حداقل ۸۰ درصد را به عنوان TSR قابل قبول برای مقاومت مخلوط در برابر حساسیت رطوبتی معرفی کرده‌اند. جالب است که برای مخلوط HMA مقدار TSR کمتر از ۸۰ درصد است که نشان دهنده کافی نبودن مقاومت مخلوط آسفالتی شاهد در برابر رطوبت است. با مقایسه TSR دو مخلوط HWMA-R0 و HMA، در شکل (۶) ملاحظه می‌شود که این دو مخلوط حداقل مقاومت لازم آیین نامه را برآورده نکرده‌اند. در نتیجه مقاومت کافی در برابر رطوبت را ندارند. این امر ممکن است

شده موجود در RAP و به دنبال آن سخت بودن RAP نسبت داد. در نتیجه، وجود RAP باعث افزایش سختی مخلوط مورد نظر شده است. با وجود این شرایط تمرکز تنش و کرنش نیز تا حد زیادی کاهش یافته است. بنابراین مقدار مقاومت نمونه در برابر بار وارد شده نیز بیشتر شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از این آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از درصد‌های بالای RAP در مخلوط‌های H-WMA، تأثیر مثبتی بر عملکرد کششی غیر مستقیم این مخلوط‌ها دارد.

شکل ۶. نتایج تنش کششی غیرمستقیم (IDT) نمونه‌های آسفالتی مختلف

در شرایط تر و خشک

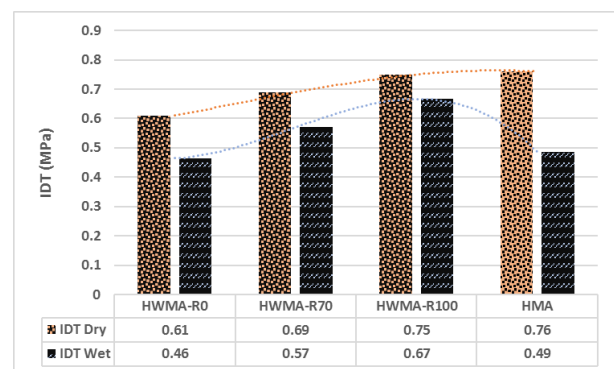


Fig. 6. IDT testing results of samples at dry and wet conditions

از طرفی با مقایسه نتایج IDT خشک نمونه‌های H-WMA با HMA می‌توان به این نتیجه رسید که این مقدار برای مخلوط‌های HMA از مخلوط‌های H-WMA بیشتر بوده است. دلیل این افزایش را می‌توان بالا بودن دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های HMA در مقایسه با مخلوط‌های H-WMA دانست. همچنین با در نظر گرفتن مقادیر بدست آمده از IDT نمونه‌های HMA تر، می‌توان به این نتیجه رسید که کاتیونی بودن قیر امولسیون استفاده شده در مخلوط HWMA-R0 موجب پوشش مناسب سنگدانه‌های سیلیسی شده است که در حالت مخلوط‌های HMA حاوی سنگدانه‌های سیلیسی مقبول حاصل نمی‌شود.

۴-۲- نتایج نسبت مقاومت کششی (TSR)

شکل (۷) نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مخلوط HWMA-R100 نسبت به HWMA-R70، ۷٪ و نسبت به نمونه HWMA-R0، ۱۷٪ عملکرد بهتر داشته است.

سختتر و شکننده‌تر می‌شود. از طرف دیگر پارامتر J_c نیز که معرف مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شروع و گسترش ترک خوردگی می‌باشد، کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت در برابر گسترش ترک مخلوط‌های H-WMA با افزایش مصالح RAP به دلیل کاهش پارامتر J_c ، کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۸. مقادیر انرژی کرنشی (U) مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه

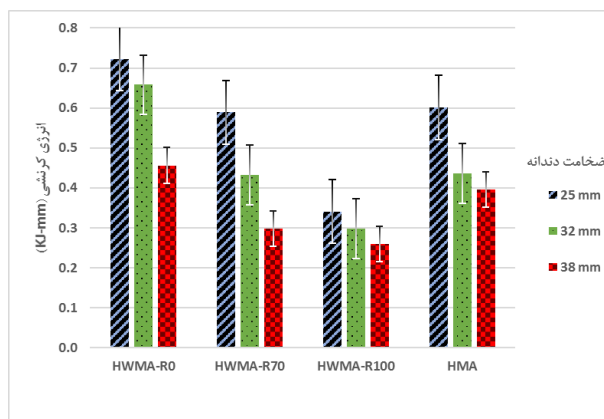


Fig. 8. Strength Energy (U) of mixes containing different amounts of RAP

شکل ۹. مقادیر J_c مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه

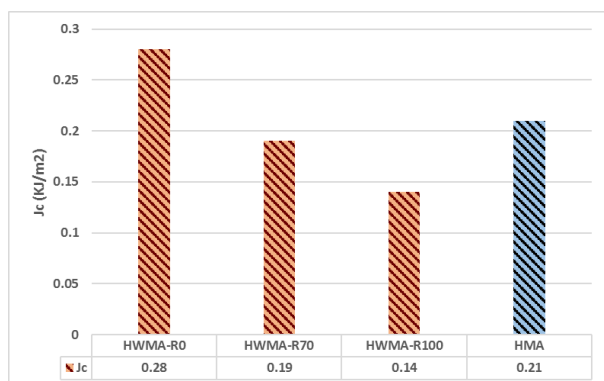


Fig. 9. J_c values of mixes containing different amounts of RAP

با مقایسه نتایج آزمایش دو نمونه آسفالتی HMA و HWMA می‌توان به این نتیجه رسید که قیر موجود در مخلوط HMA، به دلیل تجربه کردن دمای بالا در هنگام اختلاط، نسبت به قیر استفاده شده در مخلوط HWMA-R0 که دمای کمتری را در حین عملیات ساخت تجربه کرده است، سختتر است. همین دلیل منجر به درک این موضوع می‌شود که مخلوط HMA دارای J_c کمتری نسبت به J_c مخلوط

به علت استفاده از مصالح با درصد بالای سیلیس یا پایین بودن دماهای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی (به دلیل نیمه گرم بودن مخلوط‌های آسفالتی) باشد.

۳-۴- نتایج آزمایش SCB در دمای میانی

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که در نمونه‌های HWMA-R100 و HWMA-R70 مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی نمونه HWMA-R0، ۳۰ و ۳۸ درصد کاهش یافته است. البته ذکر این نکته هم بسیار مهم است که بسیاری از مطالعات اشاره کرده‌اند که با وجود قیر پیر شده در RAP، مقدار انرژی لازم برای شکست کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که در این پژوهش از مصالح RAP در مخلوط H-WMA استفاده شده است و انرژی لازم برای شکست، پارامتری وابسته به مقدار نیرو-جاب‌جایی است، مقدار انرژی لازم برای شکست بنا به این دلایل ۱- مقدار نیروی لازم بیشتر برای شکست به دلیل وجود RAP و ۲- مقدار انعطاف پذیری و جابه‌جایی کمتر مخلوط به دلیل سخت بودن مخلوط، کاهش یافته است.

مقایسه مقادیر انرژی کرنشی مخلوط‌های HMA و HWMA-R0، نشان می‌دهد که این مقدار برای مخلوط HMA کمتر از مخلوط HWMA-R0 است. همچنین دماهای اختلاط و تراکم بالاتر HMA باعث پیرشدگی قیر در مقایسه با مخلوط HWMA-R0 می‌شود که این خود منجر به افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط شده است. در نمونه‌های HWMA-R70 و HWMA-R100 نیز، مطابق با بحث قبلی، میزان سختی مخلوط با افزایش درصد RAP، زیادتر می‌شود. در نتیجه با افزایش میزان RAP پارامتر انرژی کرنشی با کاهش مواجه شده است.

همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، در مخلوط‌های H-WMA با افزایش درصد جایگزین RAP، مقدار پارامتر J_c کاهش پیدا کرده است. به طوری که این پارامتر با جایگزین کردن ۷۰ و ۱۰۰٪ RAP، به ترتیب ۳۲ و ۵۰٪ کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان به وجود RAP در ساختار مخلوط مرتبط دانست. مصالح RAP به دلیل قیر پیر شده و در نتیجه سفت شده، ساختار و شبکه‌ای سفت و سخت در مخلوط به وجود می‌آورند. به همین دلیل، مخلوط حاوی مصالح RAP،

بودن ذرات بار سطحی سنگدانه‌ها (منفی) با بار قیر امولسیون کاتیونی (مثبت) مربوط دانست.

(۲) مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) در حالت‌های تر و خشک با افزایش درصد جایگزینی تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار نمونه‌ها را می‌توان به قیر سفت شده موجود در تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) و به دنبال آن سخت بودن تراشه نسبت داد.

(۳) مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) خشک نمونه‌های آسفالت داغ (HMA) از سایر نمونه‌های H-WMA بیشتر بود. دلیل این افزایش را می‌توان به بالا بودن دماهای اختلاط و تراکم مخلوط‌های HMA نسبت به مخلوط‌های H-WMA نسبت داد.

(۴) حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها (TSR) با افزایش درصد جایگزینی تراشه آسفالتی کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل پوشش کامل سطح سنگدانه‌ها با قیر پیر شده و ایجاد نیروی چسبندگی زیاد بین قیر پیر شده و مصالح سنگی و عدم نفوذ رطوبت به سطح سنگدانه‌ها باشد.

(۵) مقایسه TSR دو مخلوط H-WMA-R0 و HMA، نشان می‌دهد که این دو مخلوط حداقل شرایط لازم آیین‌نامه را برآورده نکرده‌اند، که می‌تواند ناشی از ساخت مخلوط‌های آسفالتی با مصالح حاوی درصد بالای سیلیس یا پایین بودن دماهای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی H-WMA باشد.

(۶) در تمامی نمونه‌ها با افزایش عمق ترک میزان انرژی کرنشی کاهش می‌یابد. در نتیجه هر چه قدر میزان عمق ترک بیشتر باشد نیروی کمتری برای رشد ترک خوردگی مورد نیاز است.

(۷) انرژی کرنشی (U) در مخلوط‌های HMA کمتر از مخلوط‌های H-WMA-R0 است. دمای اختلاط و تراکم بالاتر HMA باعث پیرشدگی قیر در مقایسه با مخلوط H-WMA-R0 می‌شود که این خود منجر به افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط شده است.

(۸) مخلوط HMA دارای J_C کمتری نسبت به مخلوط H-WMA-R0 است. با توجه به کمتر بودن مقدار J_C مخلوط آسفالتی نیمه گرم با درصد‌های جایگزینی ۷۰ و ۱۰۰٪ تراشه در مقایسه با مخلوط HMA می‌توان نتیجه گرفت که این مخلوط‌ها مقاومت خوبی در برابر گسترش ترک ندارند.

HWMA-R0 باشد. در نتیجه، مقاومت مخلوط HMA به نسبت مخلوط HWMA-R0، در برابر شروع و گسترش ترک خوردگی، کاهش بیشتری پیدا می‌کند.

۴-۴- نتایج آزمایش SCB در دمای پایین

طبق استاندارد AASHTO TP 105-13، انرژی شکست (G_f) به عنوان انرژی مورد نیاز برای گسترش ترک خوردگی در دمای پایین، معیار اصلی مقایسه عملکرد دمای پایین مخلوط‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود.

بر اساس شکل (۱۰)، هر چه قدر درصد RAP در مخلوط کمتر باشد، انرژی شکست بیشتر می‌شود. برای نمونه انرژی شکست مخلوط HWMA-R0 از انرژی شکست مخلوط HWMA-R70، ۳۰٪ و از مخلوط HWMA-R100، ۳۸٪ بیشتر شده است. دلیل این رفتار نمونه‌ها را می‌توان به پیر شدگی و سخت بودن قیر موجود در مصالح RAP نسبت داد، با توجه به این فرض که مصالح RAP شکننده هستند، کاهش مقدار انرژی شکست نیز می‌تواند به همین موضوع مربوط باشد.

شکل ۱۰. مقادیر G_f مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه

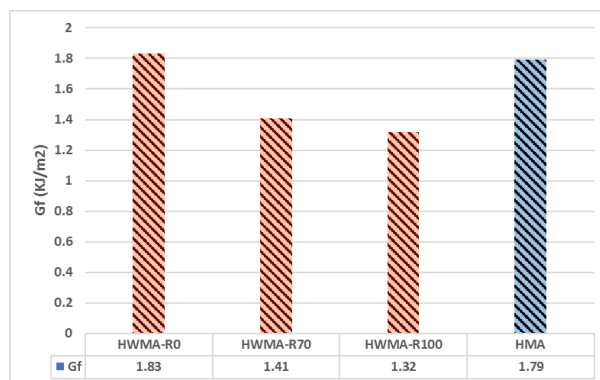


Fig. 10. G_f values of mixes containing different amounts of RAP

۵- نتیجه‌گیری

از بکارگیری درصد‌های مختلف تراشه در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم و آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، نتیجه‌گیری‌های زیر حاصل شد:

(۱) با توجه به سیلسی بودن مصالح مورد آزمایش و کاتیونی بودن قیر امولسیون مورد استفاده، چسبندگی مناسبی بین قیر و مصالح سنگی ایجاد شد. این امر را می‌توان به دلیل مخالف

Cycle Assessment 2020 (LCA 2020, Sacramento, CA, 3-6 June 2020); 2020: CRC Press.

[11] Swaroopa S, Sravani A, Jain P. Comparison of mechanistic characteristics of cold, mild warm and half warm mixes for bituminous road construction. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2015;22:85-92.

[12] Zhao S, Huang B, Shu X, Woods M. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2013;44:92-100.

[13] Ma T, Zhang D, Zhang Y, Zhao Y, Huang X. Effect of air voids on the high-temperature creep behavior of asphalt mixture based on three-dimensional discrete element modeling. *Materials & Design*. 2016;89:304-13.

[14] Rodríguez-Alloza A, Gallego J. Volumetric characteristics and compactability of asphalt rubber mixtures with organic warm mix asphalt additives. *Materiales de Construcción*. 2017;67(327):123.

[15] Eltwati, A.; Putra Jaya, R.; Mohamed, A.; Jusli, E.; Al-Saffar, Z.; Hainin, M.R.; Enieb, M. Effect of Warm Mix Asphalt (WMA) Antistripping Agent on Performance of Waste Engine Oil-Rejuvenated Asphalt Binders and Mixtures. *Sustainability*, 15, 3807, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15043807>

[16] Mogawer WS, Austerman AJ, Kluttz R, Roussel M. High-performance thin-lift overlays with high reclaimed asphalt pavement content and warm-mix asphalt technology: Performance and workability characteristics. *Transportation research record*. 2012;2293(1):18-28.

[17] Behnood A. A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties. *Journal of Cleaner Production*. 2020;259:120817.

[18] Majidifard H, Tabatabaee N, Buttlar W. Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019;6(4):39. ۴۰۶-۶

[19] Pasandín AR, Pérez I, Gómez-Mejide B. Performance of High Rap Half-Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2020;12(24):10240.

[20] Nsengiyumva G, You T, Kim Y-R, Beran M. Investigation of testing variables of semicircular bending test for asphalt concrete mixtures: experimental-statistical approach. 2016.

[21] Chen L, Qian Z, Wang J. Multiscale numerical modeling of steel bridge deck pavements considering vehicle-pavement interaction. *International Journal of Geomechanics*. 2016;16(1):B4015002.

[22] Aliha M, Bahmani A, Akhondi S. A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix asphalt composites- Experimental and theoretical study. *International Journal of Solids and Structures*. 2016;90:167-77.

[23] Ayatollahi M-R, Pirmohammad S. Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes. *Structural engineering and mechanics: An international journal*. 2013;45(1):19-32.

Jiang J, Ni F, Dong Q, Wu F, Dai Y. Research on the fatigue equation of asphalt mixtures based on

(۹) هر چقدر درصد RAP در مخلوط کمتر باشد، انرژی شکست مخلوط (Gf) بیشتر است. در این تحقیق انرژی شکست (Gf) مخلوط HMA و مخلوط HWMA-R0 تقریباً برابرند. علت این امر را می‌توان به بالا بودن دماهای اختلاط و تراکم در مخلوط HMA و تا حدودی پیرشدگی قیر آن و شرایط دمایی پایین تولید مخلوط HWMA-R0 و چسبندگی مناسب بین سنگدانه های سیلیسی و قیر کاتیونی نسبت داد.

۶- مراجع

[1] Nations U. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Contract No.: A/RES/70/1.

[2] Anmar Dulaimi, Abdulmtalab Ali, Sajjala Sreedhar Reddy, Munder Bilema, and, Nur Izzi Md Yusoff, A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19(22), 14863, 2022; <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>

[3] Federico Autelitano, Erika Garilli and, Felice Giuliani, "Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on workability and mechanical performances, *Transportation Research Procedia*, Volume 55, 2021, pp 1081-1089, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.079>

[4] Zaumanis M, Mallick RB, Frank R. 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 2014;92:230-4. ۵

[5] Jahanbakhsh H, Karimi MM, Naseri H, Nejad FM. Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*. 2020;244:118837.

[6] Bardesi A, Soto JA. Low-temperature bitumen mixing: Cold, half warm and warm mixing. 2010;4:7-24.

[7] Marcobal J, Lizárraga J, Gallego J. Laboratory Compaction Study and Mechanical Performance Assessment of Half-Warm Mix Recycled Asphalt Mixtures Containing %۱۰۰ RAP. *Materials*. 2019;12(12):1992.

[8] Aurangzeb Q, Al-Qadi IL, Ozer H, Yang R. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, conservation and recycling*. 2014;83:77-86.

[9] Lee N, Chou C-P, Chen K-Y. Benefits in energy savings and CO2 reduction by using reclaimed asphalt pavement. 2012.

[10] Mattinzioli T, Moreno F, Rubio M, Martínez G, editors. LCA and cost comparative analysis of half-warm mix asphalts with varying degrees of RAP. Pavement, Roadway, and Bridge Life Cycle Assessment 2020: Proceedings of the International Symposium on Pavement Roadway, and Bridge Life

Singh D, Chitragar SF, Ashish PK. Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials. *Construction and Building* [26] Hınıslioğlu S, Ağar E. Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials letters*. 2004;58(3-4):267-71.

actual stress ratio using semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*. 2018;158:996-1002.

Laboratory Evaluation of Half-Warm Mix Asphalt (H-WMA) Containing High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Amir Kavussi^{*1}, Jamal Rahimi²

1. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*kavussia@modares.ac.ir

Abstract

Half warm mix asphalt (H-WMA) is one of the alternatives to conventional asphalt due to its special production conditions. Half warm mix asphalt (H-WMA) manufactured with high proportions of reclaimed asphalt pavement (RAP). Half warm mix asphalt (H-WMA) are produced and compacted at the temperature range of 60-100 ° C, which requires less temperature for production process of hot mix asphalt (HMA) for example cold mix asphalt (CMA) manufactured at a temperature lower than 60 ° C; (ii) half warm mix asphalt (H-WMA) manufactured at less than 100 ° C, normally at 60-100 ° C; (iii) warm mix asphalt (WMA) manufactured at temperatures of 100-140 ° C. The aim of this study is to investigate the effects of high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP) on the volumetric and mechanical properties of Half warm mix asphalt (H-WMA) mixtures. In this research, bitumen emulsion (CSS-1) and conventional bitumen 60/70 were used. The siliceous aggregates were obtained from a mine near Tehran and reclaimed asphalt pavement (RAP) were obtained from an asphalt plant and its granulation before and after extraction was done according to report number 234. Generally speaking, in H-WMA, aggregates are heated to temperatures of 100-110 ° C and then mixed with emulsion, which has previously been heated to 60-80 ° C and RAP are heated to 90-100 ° C. To determine the most suitable mixing time in the tests, the coating was visually analyzed after mixing times of 1 and 2 min and the mixing temperature was 95-85 ° C. Thus, a laboratory analysis was carried out in which the behavior of half warm mix asphalt (H-WMA) manufactured with 100%, 70% and 0% reclaimed asphalt pavement (RAP) was compared with that of a control mix, Hot mix asphalt (HMA). Optimum bitumen content for hot asphalt mixture (HMA) and optimum bitumen emulsion content for half warm mix asphalt (H-WMA) were calculated. Then indirect tensile tests (IDT) (at 25° C), moisture damage (TSR) and Semi-Circular Bending (SCB) Tests (at 25° C and -20° C) were performed on half warm mix asphalt (H-WMA) and hot mix asphalt (HWA). indirect tensile tests (IDT) yielded acceptable results, the IDT resistance increased with increasing the reclaimed asphalt pavement (RAP) content. Following this, the moisture damage (TSR) of half warm mix asphalt (H-WMA) improves by increasing the reclaimed asphalt pavement (RAP) content, which can be due to the complete covering of the surface of the aggregates with aged bitumen and the high adhesion force between the aged bitumen and the aggregates and the lack of moisture penetration into the aggregates. emulsified bitumen exhibited proper volumetric (e.g., air voids and density) and mechanical behavior in terms of moisture damage and IDT. On the other hand, the results of SCB tests at medium and low temperatures showed that by increasing the RAP content the samples become brittle, which means that resistance to crack propagation reduced, and it may be the reason for fracture energy reduction. These findings encourage greater confidence in promoting the use of these sustainable asphalt mixes for their use in road pavements or urban streets.

Keywords: Half-Warm Mix Asphalt (H-WMA), Recycled Asphalt Pavement (RAP), Bitumen Emulsion, Indirect Tensile Test (IDT), Moisture Damage, Semi Circular Bending (SCB) Tests