

بررسی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی

سجاد مسعودی*، کارشناس ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

سید مهدی ابطحی، دانشیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
احمد گلی، استادیار، دانشکده حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

Email: s.masoudi@cv.iut.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۵/۰۴ - پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۸

چکیده

با توجه به اصل توسعه‌ی پایدار و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از آلودگی هوا و همچنین گسترش روزافزون پروژه‌های عمرانی و محدود بودن معادن سنگی، کاهش دمای ساخت مخلوط‌های آسفالتی و استفاده از مصالح جانبی به عنوان جایگزین مصالح سنگی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این پژوهش، عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد مورد بررسی قرار گرفته است. از سنگدانه‌های آهکی و سرباره‌ی فولاد کوره‌ی قوس الکتریکی به عنوان مصالح مصرفی و همچنین از ساسویت به عنوان ماده‌ی افزودنی ساخت آسفالت گرم استفاده شده است. با استفاده از ۱/۵ درصد ساسویت نسبت به وزن قیر، دمای ساخت و تراکم مخلوط‌های آسفالتی 20°C کاهش یافته است. برای شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت نمونه‌های آسفالتی به ترتیب از استانداردهای AASHTO R35 و AASHTO R30 استفاده گردیده است. ساسویت با استفاده از همزن معمولی و همزن برش بالا با قیر مخلوط شده و تست‌های سنتی و شارپ انجام شده روی آن‌ها حاکی از عدم حساسیت ساسویت نسبت به شرایط اختلاط می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد نمونه‌های آسفالتی، از تست‌های مقاومت مارشال، مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیک استفاده شده است. در نهایت، رشد کمی نتایج هر کدام از نمونه‌ها نسبت به آسفالت داغ آهکی ارائه گردیده است. به طور کلی، استفاده از سرباره به عنوان جایگزین مصالح آهکی، حساسیت بیشتر مخلوط‌های آسفالتی نسبت به پیرشدگی را موجب شده است. همچنین، نمونه‌های آسفالتی داغ در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی گرم، نسبت به پیرشدگی از حساسیت بیشتری برخوردار می‌باشند. با توجه به این که مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی، نسبت به سایر مخلوط‌های آسفالتی، عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت بهتری از خود نشان داده‌اند، استفاده از آن‌ها توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت گرم، ساسویت، سرباره فولاد، پیرشدگی، عملکرد بلندمدت

۱. مقدمه

۱۰۰ درصد بخش درشت‌دانه با سرباره جایگزین شده، استفاده گردیده است. به منظور ارزیابی ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده، از تست‌های مقاومت مارشال، مدول برجهنگی، خزش دینامیک، خستگی کششی غیرمستقیم و مقاومت کششی غیرمستقیم استفاده شده است. نتایج حاصل بیانگر آن است که جایگزینی درشت‌دانه با سرباره فولاد تا ۷۵ درصد موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد.

احمدزاده و سنگز (۲۰۰۹) استفاده از سرباره‌های تولید شده در کشور ترکیه در ساخت مخلوط‌های آسفالتی داغ را بررسی نمودند. بدین سبب از چهار نوع مخلوط آسفالتی شامل ترکیبی از دو نوع قیر (AC-10 و AC-5) و دو نوع مصالح (در یک دسته، مصالح تماماً از جنس آهکی و در دسته دیگر ریزدانه آهکی و درشت‌دانه سرباره) استفاده شده است. نمونه‌های حاوی سرباره در مقایسه با نمونه‌های شاهد از مقاومت مارشال بیشتر، روانی کمتر و در نتیجه نسبت مارشال^۳ بیشتری برخوردار می‌باشند. نتیجه آزمایش کشش غیرمستقیم نیز نشان‌دهنده مقاومت چسبندگی بیشتر مخلوط‌های حاوی سرباره در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌باشد. بنابراین، می‌توان مقاومت بیشتر این نمونه‌ها در برابر اثرات مخرب آب را نتیجه گرفت. همچنین نتایج آزمایش‌های مدول سختی کششی غیرمستقیم و سختی خزشی، بیشتر بودن مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی و شیارشدگی نمونه‌های حاوی سرباره را مشخص نموده است.

پاستو و بالدو (۲۰۱۰) به تحلیل عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی پرداختند. جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی از سنگدانه‌های آهکی و سرباره و قیر اصلاح‌شده با افزودنی SBS در دو درصد مختلف استفاده شده است. در این تحقیق، ابتدا ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی و زیست‌شناسی سرباره

با توجه به بحث توسعه پایدار و نگرانی‌های زیست-محیطی ناشی از آلودگی هوا، کاهش روزافزون منابع سوخت‌های فسیلی و تمایل به مصرف انرژی کمتر، کاهش دمای ساخت مخلوط‌های آسفالتی امری ضروری محسوب می‌گردد. هدف اصلی فرایندهایی که در ساخت آسفالت گرم^۱ به کار گرفته می‌شود، کاهش دمای ساخت و حمل و همچنین کاهش دمای تراکم این مخلوط‌ها است. به گونه‌ای که عملکردی مشابه یا حتی بهتر از آسفالت‌های داغ^۲ داشته باشند. علیرغم وجود روش‌های مختلف جهت کاهش دمای ساخت آسفالت، فناوری‌های ساخت آسفالت گرم را می‌توان به سه دسته کلی افزودنی‌های آلی، افزودنی‌های شیمیایی و کف‌گیرها تقسیم نمود. هدف تمام این فرایندها بهبود کارایی مخلوط آسفالتی و نهایتاً کاهش دمای ساخت آن می‌باشد (روبیو و همکاران، ۲۰۱۲).

با توجه به گسترش روزافزون پروژه‌های عمرانی از یک سو و محدود بودن معادن سنگی از سوی دیگر، استفاده از مصالح جانبی به عنوان جایگزین مصالح سنگی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. سرباره فولاد، محصول جانبی فرایند تولید فولاد است که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد آن، از جمله وزن مخصوص زیاد، زاویه‌دار بودن، بافت سطحی سخت، مقاومت و دوام زیاد، قابلیت جایگزینی با سنگدانه‌های طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی را داراست (کاووسی و جلیلی قاضی‌زاده، ۲۰۱۴).

عاصی و همکاران (۲۰۰۷) جایگزینی بخش درشت‌دانه مصالح مورد استفاده جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی با سرباره‌ی فولاد را مورد بررسی قرار دادند. از این رو، علاوه بر نمونه‌های شاهد، از چهار گروه مخلوط دیگر که در آن‌ها ۲۵، ۵۰، ۷۵ و

1- Warm Mix Asphalt (WMA)

2- Hot Mix Asphalt (HMA)

3- Marshall Quotient

درشت‌دانه استفاده شده است موجب کاهش شیارشدگی و افزایش نسبت مارشال گردیده است.

کاووسی و جلیلی قاضی‌زاده (۲۰۱۴) عملکرد خستگی کوتاه‌مدت و بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده از سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی را به کمک آزمایش تیرخستگی چهارنقطه‌ای بررسی نمودند. نتایج آزمایش خستگی نشان دهنده‌ی آن است که به موجب چسبندگی سطحی بهتر سرباره و همچنین شکستگی بیشتر آن، افزایش درصد استفاده از سرباره موجب افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی پیر نشده می‌گردد. با این وجود، عملکرد خستگی بلندمدت نمونه‌ها تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. همچنین، در این تحقیق، پتانسیل تورم مصالح آهکی و سرباره با یکدیگر مقایسه شده است. نتیجه به دست آمده بیانگر افزایش حجم بیشتر نمونه شامل سرباره نسبت به نمونه آهکی می‌باشد.

با آنکه مطالعات و تحقیقات وسیعی در زمینه آسفالت گرم و همچنین استفاده از سرباره در اکثر نقاط دنیا صورت گرفته است، عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره فولادی از نقاط ابهام آن به شمار می‌آید که هدف این پژوهش بررسی آن می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲-۱. مصالح سنگی

جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش، از دو نوع سنگدانه‌ی آهکی و سرباره‌ای استفاده گردیده است. مصالح آهکی از معدنی واقع در کوهپایه (شرق اصفهان) و سرباره از کارخانه‌ی مجتمع فولاد مبارکه تهیه گردیده است. جهت تعیین ویژگی‌های این مصالح از تست‌های وزن مخصوص، درصد جذب آب و هم‌ارز ماسه استفاده و نتایج آن در جدول ۱ ارائه گردیده است.

تعیین و پس از آماده نمودن طرح اختلاط، جهت تراکم نمونه‌ها از دستگاه ژیراتوری استفاده شده است. کلیه مخلوط‌های ساخته شده با سرباره نسبت به مخلوط‌های ساخته شده با مصالح طبیعی از خصوصیات مکانیکی بهتر و حساسیت رطوبتی کمتر و در نتیجه از دوام بالاتری برخوردار می‌باشند.

عربانی و آذرهوش (۲۰۱۲) امکان استفاده از بتن بازیافتی و سرباره به عنوان جایگزین سنگدانه‌های معدنی را بررسی نمودند. آن‌ها در شش نوع مخلوط آسفالتی از سرباره و بتن بازیافتی به عنوان ریزدانه و درشت‌دانه استفاده و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها را تعیین و با مخلوط‌های شاهد مقایسه نمودند. گرچه نتایج بیانگر آن است که بهترین مخلوط آسفالتی با استفاده از سرباره به عنوان درشت‌دانه و بتن بازیافتی به عنوان ریزدانه حاصل می‌گردد، با این وجود نمونه‌هایی که در آن‌ها تنها درشت‌دانه با سرباره جایگزین شده است، مقاومت مارشال و مدول برجهنگی بیشتر، تغییرشکل دائمی و روانی کمتر و همچنین عملکرد خستگی بهتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند که علت آن نیز زاویه‌دار بودن این مصالح و درگیری بهتر آن‌ها با یکدیگر می‌باشد.

عامری و همکاران (۲۰۱۳) امکان جایگزینی بخشی از مصالح آهکی با سرباره در مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم را بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بیانگر آن است که استفاده از سرباره در ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم موجب بهبود چسبندگی سطحی و همچنین بهبود مقاومت در برابر خرابی‌های ناشی از رطوبت و به‌طور کلی موجب افزایش دوام آن‌ها گردیده است. پیوستگی^۱ بیشتر در مخلوط آسفالتی گرم و قفل‌شدگی^۲ بهتر مصالح با یکدیگر در مخلوط‌هایی که در آن‌ها از سرباره به عنوان

1- Cohesive
2- Interlocking

جدول ۱. خصوصیات مصالح مورد استفاده

سرباره	مصالح آهکی			استاندارد	آزمایش
	درشت‌دانه	ریزدانه	فیلر		
۳/۴۴۶	۲/۶۵۲	۲/۶۳۴		ASTM C127 & C128	وزن مخصوص حجمی (g/cm ³)
۳/۴۶۳	۲/۶۶۴	۲/۶۵۷		ASTM C127 & C128	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (g/cm ³)
۳/۵۷۲	۲/۶۹۵	۲/۶۷۱		ASTM C127 & C128	وزن مخصوص ظاهری (g/cm ³)
			۲/۷۲۳	ASTM D854	وزن مخصوص فیلر (g/cm ³)
۱/۳	۰/۶	۰/۸		ASTM C127 & C128	جذب آب (%)
		۷۵		ASTM D2419	هم‌ارز ماسه

(توپکا) پیشنهاد گردیده، استفاده شده است. وزن مورد نیاز از سنگدانه‌های با اندازه‌های مختلف و درصد عبوری هر کدام از الک‌ها برای ساخت نمونه‌های مارشال در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۲-۲. دانه‌بندی

در این پژوهش، از دو نوع مصالح آهکی (L) و سرباره‌ای (S) استفاده گردیده است. جهت تهیه نمونه‌های آسفالتی از دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ آیین‌نامه راه‌های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) که برای لایه رویه

جدول ۲. مشخصات دانه‌بندی مورد استفاده در تهیه نمونه‌های آسفالتی

مصالح نوع S				مصالح نوع L			اندازه الک
درصد حجمی عبوری	درصد وزنی عبوری	وزن مانده بر الک (گرم)	نوع مصالح	درصد عبوری	وزن مانده بر الک (گرم)	نوع مصالح	
۱۰۰	۱۰۰	۰	—	۱۰۰	۰	—	۱۹ mm
۹۵	۹۴/۲۷	۷۷	سرباره	۹۵	۶۰	آهکی	۱۲/۵ mm
۵۹	۵۲/۷۶	۵۵۷	سرباره	۵۹	۴۳۲	آهکی	۴/۷۵ mm (#۴)
۴۳	۳۸/۴۶	۱۹۲	آهکی	۴۳	۱۹۲	آهکی	۲/۳۶ mm (#۸)
۱۳	۱۱/۶۳	۳۶۰	آهکی	۱۳	۳۶۰	آهکی	۰/۳ mm (#۵۰)
۶	۵/۳۷	۸۴	آهکی	۶	۸۴	آهکی	۰/۰۷۵ mm (#۲۰۰)
۰	۰	۷۲	آهکی	۰	۷۲	آهکی	فیلر

۳-۲-۳. ماده‌ی افزودنی

ساسوبیت، ماده افزودنی مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد که خصوصیات آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. خصوصیات ساسوییت مورد استفاده

نام ماده افزودنی	ساسوییت
اجزای سازنده	هیدروکربن آلیفاتیک
حالت فیزیکی	گرانول
رنگ	سفید
بو	بی بو
چگالی حجمی	۶۲۲-۵۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب
نقطه اشتعال	۲۹۰ °C
حلالیت در آب	غیرقابل حل
دژ مصرفی	۱/۵ درصد (نسبت به وزن قیر)

۲-۴. قیر

۴ آورده شده و جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم از همان قیر به انضمام ۱/۵ درصد ساسوییت استفاده گردیده است.

به منظور ساخت مخلوط‌های آسفالتی داغ از قیر ۲۲-۶۴ PG (با درجه نفوذ ۶۰/۷۰) تهیه شده از شرکت پالایش نفت جی واقع در اصفهان که مشخصات آن در جدول

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های سنتی قیر مورد استفاده

استاندارد	قیر ۶۰/۷۰	خصوصیات
ASTM D70	۱/۰۱۹	وزن مخصوص در دمای ۲۵ °C (g/cm ^۳)
ASTM D5	۶۴	درجه نفوذ در دمای ۲۵ °C (mm ۰/۱)
ASTM D36	۴۹/۷	نقطه نرمی (°C)
ASTM D113	>۱۰۰	انگمی در دمای ۲۵ °C (cm)
ASTM D92	۳۱۱	نقطه اشتعال (°C)
ASTM D2171	۱۸۴۰	ویسکوزیته دینامیک در دمای ۶۰ °C (P)
ASTM D2170	۳۴۲	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ °C (cSt)

۲-۵. شرایط اختلاط قیر و ساسوییت

ساسوییت به آن اضافه شده و مخلوط به مدت ۹۰ دقیقه توسط همزن برش بالا، با دور ۳۵۰۰ rpm ترکیب گردیده است. سپس، روی ترکیب به دست آمده از هر دو حالت، آزمایش‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ و آزمایش‌های درجه عملکردی صورت پذیرفته، که نتایج آن‌ها در جداول زیر آمده است. به منظور اختلاط قیر و ساسوییت و همچنین انجام آزمایش‌های سنتی و

ساسوییت با دو شرایط مختلف توسط همزن معمولی و همزن برش بالا با قیر مخلوط گردیده است. در حالت اول، ابتدا دمای قیر به ۱۴۰ °C رسانده شده و سپس ۱/۵ درصد وزنی قیر به آن ساسوییت افزوده گردیده و پس از آن به مدت ۱۰ دقیقه به کمک همزن معمولی با دور ۲۵۰ rpm، قیر و ساسوییت با هم مخلوط شده‌اند. در حالت دوم، پس از رسیدن دمای قیر به ۱۸۰ °C

عملکردی، از تجهیزات آزمایشگاه شرکت پالایش نفت جی استفاده شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش‌ها سنتی مخلوط قیر و ساسوبیت

مخلوط قیر و ساسوبیت حالت دوم	مخلوط قیر و ساسوبیت حالت اول	خصوصیات
۴۶/۷	۴۸/۵	درجه نفوذ در دمای ۲۵ °C (۰/۱ mm)
۶۴/۶	۶۲/۵	نقطه نرمی (°C)

جدول ۶. نتایج آزمایش DSR قیر و ساسوبیت

$G^* \times \sin(\delta)$	$G^*/\sin(\delta)$	δ (°)	G^* (kPa)	دما (°C)	
-	۱/۰۵	۸۶/۴	۱/۰۵	۶۴	Original
-	۰/۴۷۰	۸۷/۷	۰/۴۷۰	۷۰	
-	۳/۷۸	۸۱/۹	۳/۷۵	۶۴	RTFO
-	۱/۶۲	۸۴/۴	۱/۶۲	۷۰	
۴۷۵۰	-	۴۰/۲	۷۳۶۰	۱۹	PAV
۶۹۳۰	-	۳۸/۴	۱۱۲۰۰	۱۶	
-	۱/۶۹	۸۳/۳	۱/۶۷	۶۴	Original
-	۰/۸۴۳	۸۴/۷	۰/۸۳۹	۷۰	
-	۲/۹۸	۸۲/۴	۲/۹۵	۶۴	RTFO
-	۱/۳۳	۸۴/۶	۱/۳۳	۷۰	
۴۱۲۰	-	۳۹/۷	۶۴۵۰	۱۹	PAV
۵۷۴۰	-	۳۷/۲	۹۵۰۰	۱۶	
-	۱/۷۰	۸۲/۹	۱/۶۱	۶۴	Original
-	۰/۷۹۳	۸۴/۴	۰/۷۸۹	۷۰	
-	۲/۹۴	۸۲/۳	۲/۹۱	۶۴	RTFO
-	۱/۳۰	۸۴/۳	۱/۲۹	۷۰	
۴۰۵۰	-	۳۹/۲	۶۴۱۰	۱۹	PAV
۵۷۳۰	-	۳۶/۸	۹۵۶۰	۱۶	

جدول ۷. نتایج آزمایش BBR قیر و ساسوبیت

-۱۸°C	-۱۲ °C	-۶ °C		
-	۰/۳۰۲۸	۰/۳۳۴۲	m value	قیر پایه
-	۱۲۵/۹۰	۵۲/۶۶	stiffness	
۰/۲۶۱۹	۰/۳۱۰۲	-	m value	مخلوط قیر و ساسوبیت
۱۸۶/۶۴	۱۰۸/۵۲	-	stiffness	حالت اول
۰/۲۵۴۰	۰/۳۰۹۵	-	m value	مخلوط قیر و ساسوبیت
۱۷۸/۵۳	۱۰۹/۴۱	-	stiffness	حالت دوم

۲-۶. تعیین درصد قیر بهینه

به منظور تعیین درصد قیر بهینه سنگدانه‌های کاملاً آهکی (L) و سنگدانه‌های مخلوط سرباره و آهکی (S) مطابق استاندارد ASTM D1559 از آزمایش‌های وزن مخصوص، مقاومت مارشال، روانی، درصد فضای خالی (V_a)، درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و درصد فضای خالی پرشده با قیر (VFA) استفاده شده و نتایج آن در جدول ۸ ارائه گردیده است. در نهایت، درصد قیر بهینه مصالح نوع L و S به ترتیب ۴/۷۵ و ۵/۲ درصد به دست آمده است.

با توجه به این که نتایج ارائه شده حاکی از اختلاف بسیار ناچیز مخلوط‌های به دست آمده از ترکیب با همزن معمولی و همزن برش بالا می‌باشد، بنابراین نحوه‌ی اختلاط قیر و ساسوبیت، بر عملکرد مخلوط قیری تأثیرگذار نمی‌باشد. لذا برای ساخت تمام مخلوط‌های آسفالتی گرم، از قیر ترکیب شده با ساسوبیت توسط همزن معمولی و با شرایط ذکر شده استفاده گردیده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که استفاده از ساسوبیت، پیرشدگی مخلوط قیری را کاهش داده و موجب بهبود عملکرد آن در دماهای کم می‌گردد.

جدول ۸. نتایج آزمایش مارشال

درصد قیر بهینه	VFA (%)	VMA (%)	روانی (mm)	استقامت مارشال (KN)	وزن مخصوص (gr/cm^3)	فضای خالی (%)	نوع مصالح
۴/۷۵	۷۳	۱۴/۹	۳/۳	۱۴/۵۸	۲/۳۷۶	۴	L
۵/۲	۷۴	۱۵/۲	۳/۵	۱۵/۵۱	۲/۶۳۶	۴	S

۲-۷. آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی

انواع نمونه‌های آسفالتی و دمای ساخت و تراکم آن‌ها در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹. دمای ساخت و تراکم نمونه‌های آسفالتی

دمای تراکم (°C)	دمای ساخت (°C)	علامت اختصاری	نمونه
۱۳۵	۱۵۵	HL	آسفالت داغ با مصالح آهکی
۱۳۵	۱۵۵	HS	آسفالت داغ با مصالح آهکی و سرباره
۱۱۵	۱۳۵	WL	آسفالت گرم با مصالح آهکی
۱۱۵	۱۳۵	WS	آسفالت گرم با مصالح آهکی و سرباره

نمونه‌ها از گرمخانه خارج شده‌اند. در واقع در این پژوهش بر نیمی از نمونه‌ها صرفاً پیرشدگی کوتاه‌مدت و بر نیمی دیگر از نمونه‌ها پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت، پیرشدگی بلندمدت نیز اعمال گردیده است.

۳. آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده روی مخلوط‌های آسفالتی در جدول ۱۰ آورده شده‌اند. تمامی آزمایش‌های ذکر شده روی سه نمونه‌ی آسفالتی انجام شده و میانگین نتایج آن‌ها ارائه گردیده است.

کلید نمونه‌ها، به منظور اعمال پیرشدگی کوتاه‌مدت مطابق استاندارد AASHTO R35 پس از انجام عمل اختلاط، طوری که ارتفاعی بین ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر داشته باشند در ظرفی ریخته شده و به مدت ۲ ساعت در گرمخانه با دمای تراکم قرار گرفته‌اند (بونوکویست، ۲۰۱۱). برای اعمال شرایط پیرشدگی بلندمدت نیز نیمی از نمونه‌ها (که قبلاً پیرشدگی کوتاه‌مدت بر آن‌ها اعمال گردیده بود) انتخاب شده و مطابق استاندارد AASHTO R30 به مدت ۱۲۰ ساعت در گرمخانه با دمای ۸۵ °C قرار گرفته‌اند. پس از این مدت، گرمخانه خاموش شده و درب آن باز گردیده و پس از گذشت ۲۴ ساعت

جدول ۱۰. مشخصات آزمایش‌های انجام شده روی مخلوط‌های آسفالتی

توضیحات	دمای انجام آزمایش (°C)	استاندارد	آزمایش
-	۲۵	ASTM D1559	وزن مخصوص
نسبت استقامت مارشال به روانی، نسبت مارشال نامیده می‌شود.	۲۵	ASTM D1559	استقامت مارشال، روانی و نسبت مارشال
بارگذاری به‌صورت نیمه سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه	۴۰	ASTM D4123-82	مدول برجهنگی
نرخ تغییر شکل برابر ۵۱ mm/min	۲۵	AASHTO T283-03	مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS)
نسبت ITS نمونه‌های اشباع به ITS نمونه‌های غیر اشباع	۲۵	AASHTO T283-03	حساسیت رطوبتی (نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم)
نسبت مدول برجهنگی نمونه‌های اشباع به مدول برجهنگی نمونه‌های غیر اشباع	۴۰	-	حساسیت رطوبتی (نسبت مدول برجهنگی) ^۲
تنش اعمالی ۶۰۰ KPa، زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه	۵۰	US.NCHRP 9-19	خزش دینامیک

¹ - Tensile Strength Ratio (TSR)

² - Resilient Modulus Ratio (RMR)

۳-۱. تست مارشال

استقامت آسفالت عبارت است از بیشینه مقدار بار، برحسب کیلوگرم، که نمونه آسفالت مورد آزمایش می‌تواند بدون ایجاد شکست، تحمل نماید. نمونه‌ها پس از انجام آزمایش وزن مخصوص در حمام آب گرم مجهز به ترموستات با دمای °C ۶۰ قرار می‌گیرند. این دما در واقع بیشینه دمایی است که آسفالت در تابستان با آن مواجه می‌شود. مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در حمام آب باید بین ۳۰ تا ۴۰ دقیقه باشد که در این پژوهش به منظور یکسان‌سازی، کلیه‌ی نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام قرار داده شده‌اند. پس از این زمان، نمونه‌ها از آب خارج شده و در حالت عمود بر جهت کوبش در زیر فک دستگاه قرار می‌گیرند.

۳-۲. مدول برجهنگی

جهت انجام آزمایش مدول برجهنگی، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای انجام آزمایش (°C ۴۰) قرار گرفتند. سپس، با اعمال بار به صورت نیمه سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت، مدول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی بر اساس رابطه‌ی (۱) تعیین شده است:

$$MR = \frac{P(v+0.27)}{t\Delta H} \quad (1)$$

که MR مدول برجهنگی (MPa)، P ماکزیمم نیروی دینامیک (N)، t ضخامت نمونه (mm)، ΔH تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر (mm) و v ضریب پواسون (که ۰/۳۵ در نظر گرفته شده) است.

۳-۳. مقاومت کششی غیرمستقیم

با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم و طی مراحل زیر مقاومت کششی نمونه‌ها محاسبه گردیده است.

- قرار دادن نمونه‌ها در دمای °C ۲۵ به مدت ۲۴ ساعت
- قرار دادن نمونه در بین فک‌های دستگاه

- اعمال بارگذاری با سرعت ۲ اینچ (۵/۱ سانتی‌متر) در دقیقه تا شکست نمونه در امتداد قائم و ثبت تغییرات جابه‌جایی قائم در برابر نیرو

- استفاده از رابطه‌ی (۲) جهت محاسبه تنش کششی افقی در مرکز نمونه:

$$ITS = \frac{2P}{\pi t d} \quad (2)$$

که ITS تنش کششی (N/mm^2)، P بار اعمال شده (N)، t ضخامت (ارتفاع) نمونه (mm) و d قطر نمونه (mm) است.

۳-۴. حساسیت رطوبتی

حساسیت رطوبتی معیاری جهت تعیین مقاومت آسفالت در برابر رطوبت می‌باشد. با وجود آنکه استاندارد AASHTO T283-03 به منظور مقایسه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از نسبت مقاومت کششی استفاده می‌نماید، در این پژوهش، علاوه بر آن، از نسبت مدول برجهنگی نیز استفاده شده است. برای هر کدام از انواع مخلوط‌های آسفالتی ۶ نمونه تهیه شده است که ۳ تا از آن‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای °C ۶۰ و پس از آن به مدت یک ساعت در محفظه آب با دمای °C ۲۵ قرار گرفته‌اند. سه نمونه‌ی دیگر تنها به مدت ۲۰ دقیقه در حمام آب با دمای °C ۲۵ قرار گرفته‌اند. نمونه‌های دسته اول تحت عنوان نمونه‌های اشباع و نمونه‌های دسته دوم تحت عنوان نمونه‌های غیراشباع نامیده می‌شوند. پس از آن، روی هر ۶ نمونه تست مدول برجهنگی در دمای °C ۴۰ و همچنین تست مقاومت کششی غیرمستقیم در دمای °C ۲۵ انجام پذیرفته است. بنابراین، حساسیت رطوبتی نمونه‌ها توسط نسبت مقاومت کششی و نسبت مدول برجهنگی به ترتیب به کمک روابط (۳) و (۴) تعیین گردیده‌اند:

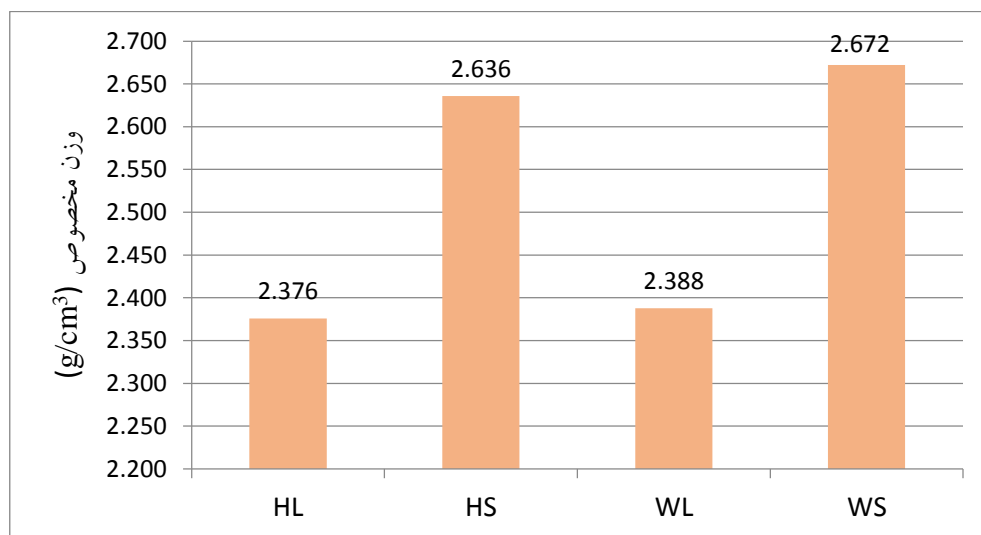
$$TSR = \frac{ITS_c}{ITS_{uc}} \quad (3)$$

تحت تنش محوری مشخص قرار گرفته و تا تعداد سیکل مشخصی که توسط اپراتور تعیین می‌شود، بارگذاری ادامه می‌یابد. از طرفی، به وسیله دو کرنش-سنج LVDT²، کرنش تجمعی نمونه در هر سیکل اندازه‌گیری و نموداری که محور افقی آن، تعداد سیکل بارگذاری و محور قائم آن کرنش تجمعی است، توسط کامپیوتر متصل به دستگاه رسم می‌گردد.

۴. بررسی و تحلیل نتایج

۴-۱. وزن مخصوص

وزن مخصوص‌های به دست آمده برای هر کدام از نمونه‌ها در شکل ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱. وزن مخصوص

که TSR نسبت مقاومت کششی، ITS_c میانگین مقاومت کششی نمونه‌های اشباع و ITS_{uc} میانگین مقاومت کششی نمونه‌های غیراشباع است.

$$RMR = \frac{MR_c}{MR_{uc}} \quad (4)$$

که RMR نسبت مدول برجهندگی، MR_c میانگین مدول برجهندگی نمونه‌های اشباع و MR_{uc} میانگین مدول برجهندگی نمونه‌های غیراشباع است.

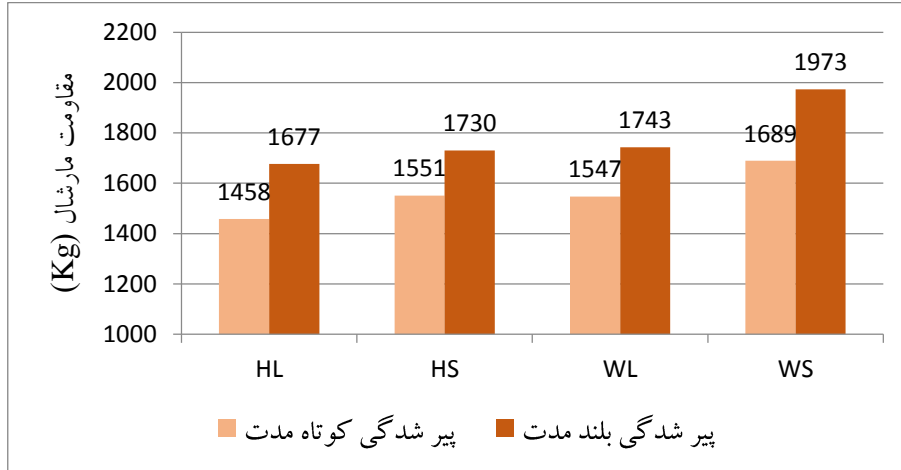
۳-۵. خزش دینامیک

آزمایش خزش دینامیک به این صورت انجام می‌پذیرد که نمونه آسفالتی به وسیله صفحه زیرین دستگاه UTM و یک دیسک فلزی که روی نمونه قرار داده می‌شود، کلاهک‌گذاری^۱ می‌گردد. سپس توسط باری دینامیک،

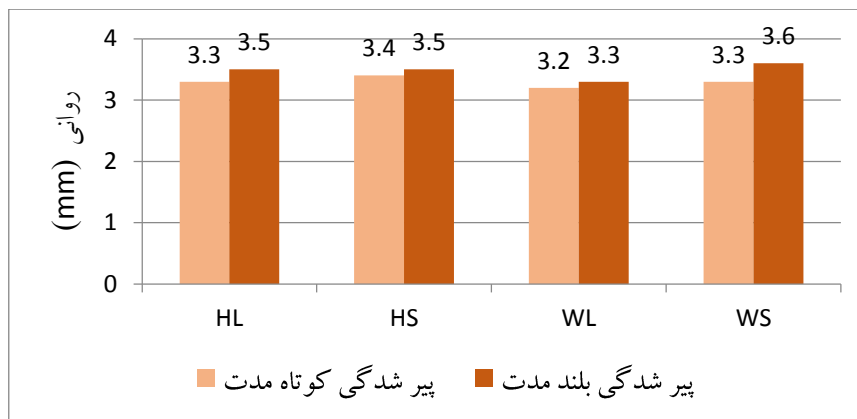
۴-۲. استقامت مارشال، روانی و نسبت مارشال

در نتیجه‌ی انجام آزمایش مارشال، استقامت مارشال و روانی تعیین گردیده است که به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده‌اند.

1-Capping
2- Linear Variable Differential Transducers

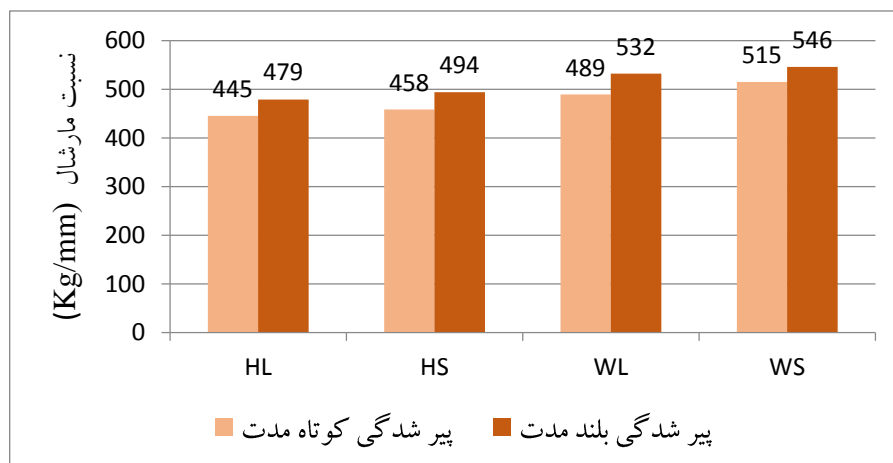


شکل ۲. استقامت مارشال



شکل ۳. روانی

پس از تعیین مقاومت مارشال و روانی برای هر کدام از حالت‌ها، از تقسیم استقامت مارشال به روانی، نسبت مارشال تعیین گردیده و نمودار آن در ذیل ارائه شده است.

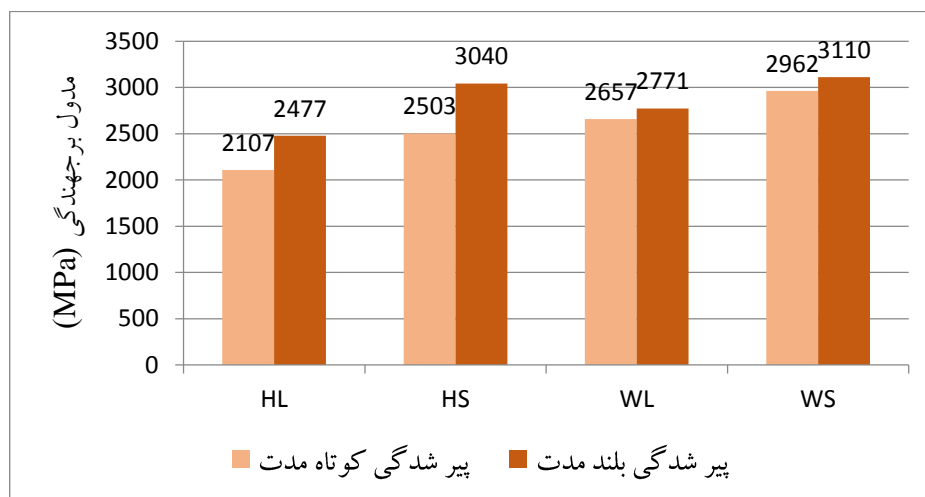


شکل ۴. نسبت مارشال

و مقاومت مارشال بالاتر این نمونه‌ها را رقم خواهد زد. همه‌ی نمونه‌ها پس از اعمال شرایط پیرشدگی بلندمدت مقاومت مارشال و سختی بیشتری کسب نموده‌اند. پیرشدگی موجب تبخیر مواد فرار و روغنی قیر شده و در نتیجه سختی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داده و همین سختی بیشتر، مقاومت مارشال نمونه‌ها را بهبود بخشیده است.

۳-۴. مدول بر جهندگی

نتایج مدول بر جهندگی در دمای 40°C در نمودار ۵ ارائه گردیده است.



شکل ۵. مدول بر جهندگی در دمای 40°C

عوامل تأثیرگذار بر مدول بر جهندگی است. احتمالاً چسبندگی بین قیر و سرباره بیشتر می‌باشد. لذا مدول بر جهندگی آسفالت ساخته شده از آن نیز بیشتر از آسفالت‌های آهکی است.

قیر به‌عنوان چسباننده سنگدانه‌ها نقش مهمی در سختی و قدرت باربری آسفالت ایفا می‌کند. افزودن ساسوبیت به قیر، عملکردی دوگانه و کاملاً متفاوت به آن می‌بخشد. در دمایی بیشتر از دمای ذوب ساسوبیت

استفاده از سرباره و ساسوبیت موجب افزایش مقاومت و نسبت مارشال نمونه‌ها شده است. سرباره‌ها از خواص مکانیکی بالاتری برخوردار می‌باشند و همچنین بافت تیز گوشه و سطح مضرس آن‌ها موجب قفل‌شدگی بهتر سنگدانه‌ها در یکدیگر می‌گردد. در ضمن، درصد قیر بهینه بیشتر مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره احتمالاً موجب بهبود پوشش قیری درشت‌دانه‌ها شده و اتصال بین آن‌ها را بهبود می‌بخشد که همه‌ی این موارد مقاومت و سختی بیشتر نمونه‌ها را در پی خواهد داشت. تراکم‌پذیری بهتر مخلوط‌های آسفالتی حاوی ساسوبیت و ساختار مشبکی که در اثر استفاده از این افزودنی در قیر پدید می‌آید سختی بیشتر

سرباره نسبت به مصالح آهکی دارای وجه‌های شکستگی بیشتر و شکل ظاهری گوشه‌دارتری است که منجر به درگیری بهتر آن‌ها با یکدیگر گشته و در نتیجه انسجام بیشتر آسفالت‌های حاوی سرباره را رقم خواهد زد. همچنین، مقاومت مکانیکی بیشتر این نوع مصالح نسبت به سنگدانه‌های آهکی، سختی و ظرفیت باربری آسفالت ساخته شده از سرباره را افزایش می‌دهد. چسبندگی سطحی بین قیر و سنگدانه نیز یکی دیگر از

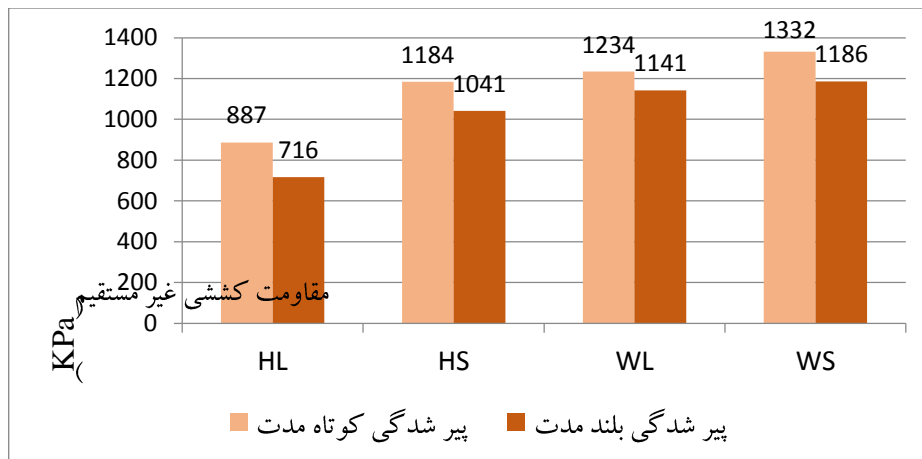
آسفالتین و به طور کلی‌تر، اجزای قطبی در قیر و همچنین افزایش کربونیل موجب سخت‌تر شدن قیر و در نتیجه مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. در واقع، پیرشدگی موجب افزایش خواص الاستیک قیر می‌گردد. بنا بر علل ذکر شده، پیرشدگی مدول برجهندگی بیشتر آسفالت را در پی خواهد داشت.

۴-۴. مقاومت کششی غیرمستقیم

نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم در نمودار ۶ ارائه گردیده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مقاومت کششی نمونه‌هایی که در ساخت آن‌ها از سرباره استفاده شده است بیشتر از نمونه‌هایی می‌باشد که تماماً از سنگدانه‌های آهکی ساخته شده‌اند. همچنین، از مقایسه نتایج مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم می‌توان دریافت که آسفالت‌های گرم ساخته شده به کمک ساسوبیت نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ مقاومت کششی بیشتری دارند. علت این امر را می‌توان چسبندگی بهتر سرباره نسبت به مصالح آهکی، سطح بیشتر درگیری قیر و سرباره به علت تخلخل بیشتر مصالح سرباره‌ای و همچنین چسبندگی و پیوستگی بهتر قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت نسبت به قیر پایه دانست.

(حدوداً 100°C) این ماده منجر به کاهش ویسکوزیته قیر شده، در حالی که در دماهای متوسط و کم، ویسکوزیته قیر را افزایش می‌دهد. ویسکوزیته بیشتر قیر حاوی ساسوبیت باعث ممانعت از جابه‌جایی مولکول‌ها در قیر اصلاح شده می‌گردد. در نتیجه، همین امر را می‌توان علت اصلی سخت‌تر شدن قیر اصلاح شده با ساسوبیت نسبت به قیر پایه دانست. از طرف دیگر، ساسوبیت موجب تسهیل تراکم‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. لذا، با توجه به انرژی تراکم یکسان جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی داغ و گرم، مخلوط‌های گرم حاوی ساسوبیت بهتر متراکم شده و از درصد فضای خالی کمتری برخوردار می‌باشند و بنابراین سختی بیشتر و در نتیجه مدول برجهندگی بالاتری دارند.

پیرشدگی نیز بر سختی و مدول بر جهندگی آسفالت تأثیرگذار است. پیرشدگی موجب تغییر در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیک قیر می‌گردد. اکسیداسیون که علت اصلی پیرشدگی بلندمدت می‌باشد باعث تغییر در توازن آسفالتن، رزین و آروماتیک‌ها در قیر پیر شده می‌گردد. بررسی گروه‌های بنیادی قیر نیز نشان دهنده آن است که اکسیداسیون منجر به تولید دو محصول اصلی کربونیل (C=O) و سولفوکسید (S=O) می‌گردد. افزایش



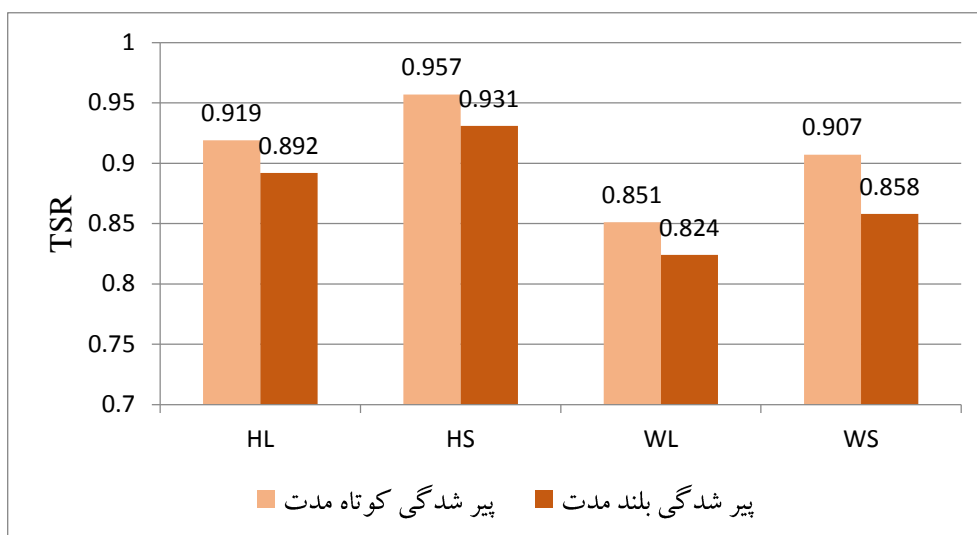
شکل ۶. مقاومت کششی غیرمستقیم در دمای 25°C

کششی پس از اعمال پیرشدگی بلندمدت محسوب گردد.

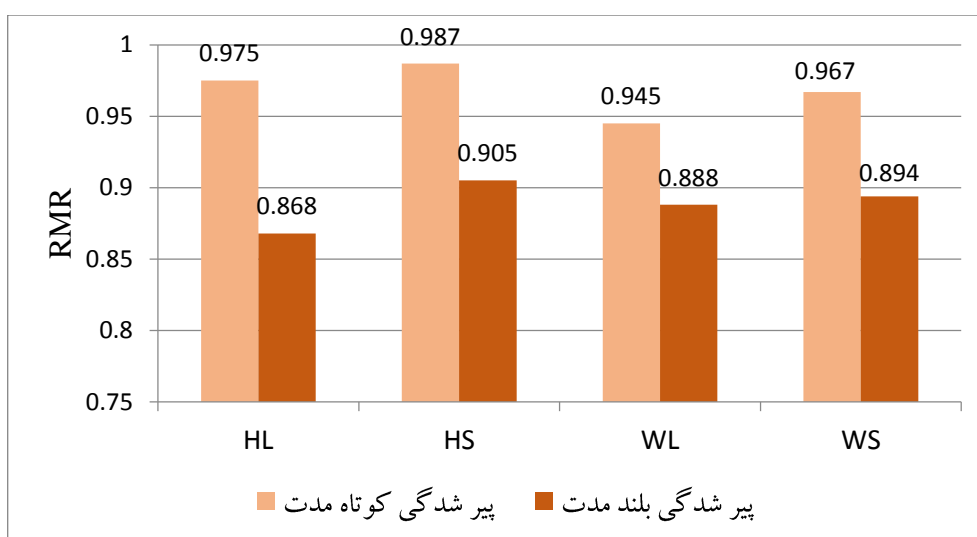
۴-۵. حساسیت رطوبتی

نتایج تست‌های حساسیت رطوبتی (RMR و TSR) برای نمونه‌های با پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه گردیده است.

اعمال پیرشدگی بلندمدت روی نمونه‌های آسفالتی داغ و گرم موجب کاهش مقاومت کششی آن‌ها شده است. گرچه پیرشدگی بلندمدت، افزایش سختی مخلوط‌های آسفالتی را در پی خواهد داشت، ولی احتمالاً منجر به کاهش چسبندگی بین سنگدانه‌ها و قیر می‌گردد. همین امر می‌تواند دلیل اصلی کاهش مقاومت



شکل ۷. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) در دمای ۲۵ °C



شکل ۸. نسبت مدول بر جهندگی (RMR) در دمای ۴۰ °C

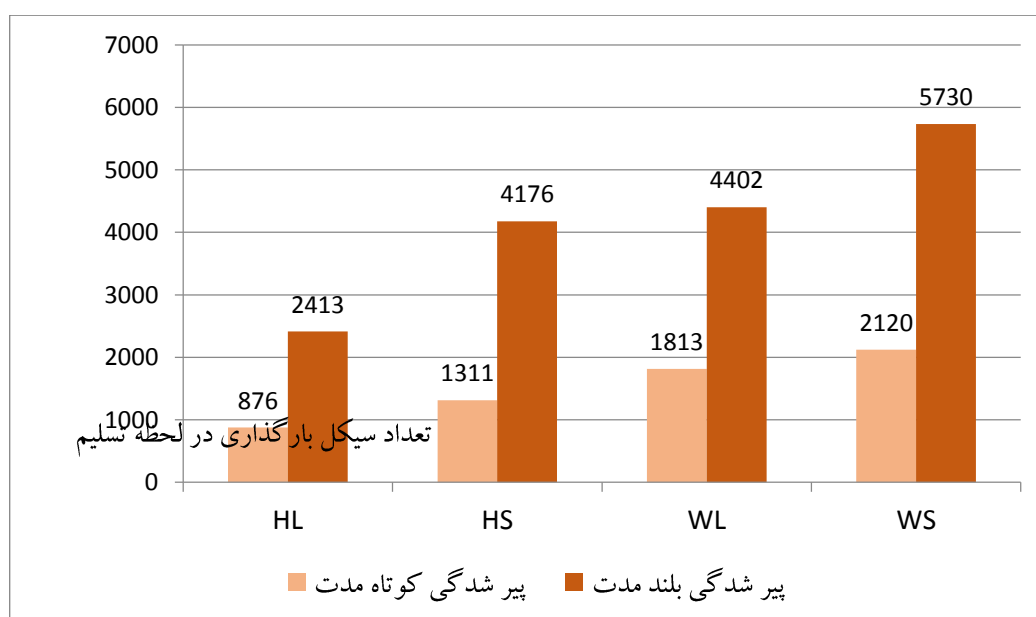
احتمال آن می‌رود که با وجود خشک بودن سطح سنگدانه‌ها، رطوبت اندکی در آن‌ها باقی بماند. رطوبت باقی‌مانده به صورت یک خطر بالقوه، عملکرد آسفالت را تهدید می‌نماید که بسته به میزان رطوبت می‌تواند تأثیرات متفاوتی داشته باشد. رطوبت باقی‌مانده در سنگدانه‌ها و همچنین قرارگیری نمونه‌های آسفالتی به مدت طولانی در معرض رطوبت، آن‌هم در دمای زیاد، خرابی نمونه‌های آسفالتی را از درون و بیرون موجب می‌گردد. با مشاهده‌ی شکل‌های فوق می‌توان دریافت که اعمال پیرشدگی بلندمدت نیز، به سبب کاهش چسبندگی قیر و سنگدانه، موجب حساسیت رطوبتی بیشتر در کلیه مخلوط‌های آسفالتی شده است.

۴-۶. خزش دینامیک

از نتایج تست خزش دینامیک که در شکل ۹ ارائه گردیده است می‌توان جهت بررسی مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها استفاده نمود.

همان‌طور که انتظار می‌رود، نوع سنگدانه نقش مهمی در حساسیت رطوبتی آسفالت ایفا می‌کند. مخلوط‌های آسفالتی که بخش درشت‌دانه آن‌ها با سرباره جایگزین شده است به علت چسبندگی بهتر این نوع مصالح به قیر، نسبت به رطوبت، حساسیت کمتری دارند. همچنین، میزان قیر بیشتر مورد استفاده در آسفالت‌های حاوی سرباره، موجب سطح درگیری بیشتر و ضخامت بیشتر پوشش سنگدانه‌ها توسط قیر شده و همین امر خرابی آن‌ها در برابر رطوبت را کاهش می‌دهد.

نتایج حاکی از حساسیت رطوبتی بیشتر مخلوط‌های آسفالتی گرم نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ می‌باشد. بسیاری از محققین بر این عقیده‌اند که دمای کمتر در ساخت آسفالت (مخصوصاً هنگامی که دمای ساخت بین ۱۴۰-۱۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد) امکان خشک شدن کامل سنگدانه‌ها را فراهم نمی‌آورد. از آنجایی که در ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم، هدف، کاهش دمای ساخت و تراکم می‌باشد، لذا



شکل ۹. خزش دینامیک

می‌تواند افزایش خاصیت الاستیک آسفالت در اثر پیرشدگی باشد.

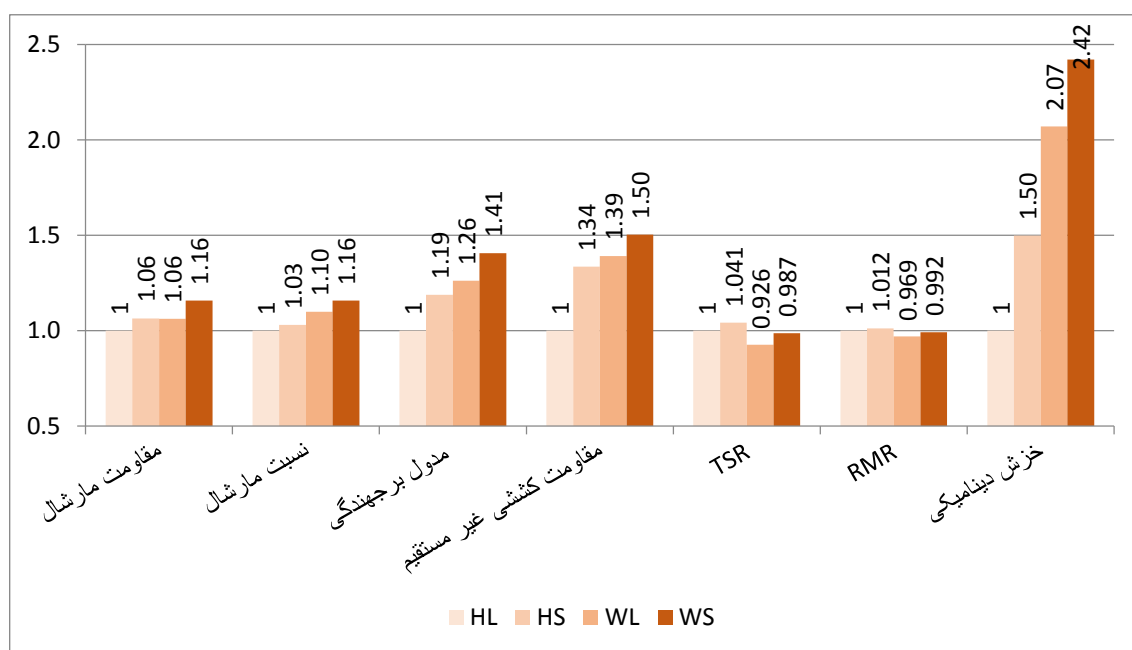
۴-۷. رشد کمی نتایج نسبت به آسفالت داغ

آهکی

جهت مقایسه مخلوط‌های آسفالتی مختلف با آسفالت داغ آهکی (به‌عنوان نمونه‌های کنترل) رشد کمی مقادیر هر آزمایش برای آسفالت داغ سرباره‌ای، آسفالت گرم آهکی و آسفالت گرم سرباره‌ای نسبت به نمونه‌های کنترل برای حالت پیرشدگی کوتاه‌مدت در شکل ۱۰ و برای حالت پیرشدگی بلندمدت در شکل ۱۱ ارائه گردیده است. با توجه به اعداد ارائه شده در نمودارها برای آسفالت داغ سرباره‌ای (بیانگر تأثیر سرباره) و آسفالت گرم آهکی (بیانگر تأثیر ساسوبیت) می‌توان تأثیرگذاری سرباره و ساسوبیت بر هر کدام از پارامترها را با یکدیگر مقایسه نمود.

قفل‌شدگی بهتر سرباره‌ها در یکدیگر که به علت شکل ظاهری تیز گوشه و بافت زبر آن‌ها می‌باشد و همچنین چسبندگی بهتر آن‌ها به قیر، موجب مقاومت بیشتر آسفالت سرباره‌ای در برابر شیارشدگی نسبت به آسفالت آهکی گشته است. با توجه به کاهش زاویه فازی در صورت استفاده از ساسوبیت (چنانچه در نتایج تست رئومتر برش دینامیک نیز مشخص گردید)، این افزودنی خاصیت الاستیک قیر و طبیعتاً آسفالت را بهبود می‌بخشد. الاستیک‌تر شدن آسفالت موجب می‌گردد که تغییرشکل‌های ماندگار، یا به عبارتی کرنش‌های تجمعی، در آن کاهش یابد. به همین دلیل نیز در صورت استفاده از ساسوبیت، تعداد سیکل‌های بارگذاری در لحظه‌ی تسلیم افزایش می‌یابد.

آزمایش خزش دینامیک، کاملاً به پیرشدگی آسفالت حساس بوده و اعمال پیرشدگی بلندمدت موجب افزایش چشمگیر نتایج آن گردیده است. علت افزایش عدد روانی بعد از اعمال پیرشدگی بلندمدت،

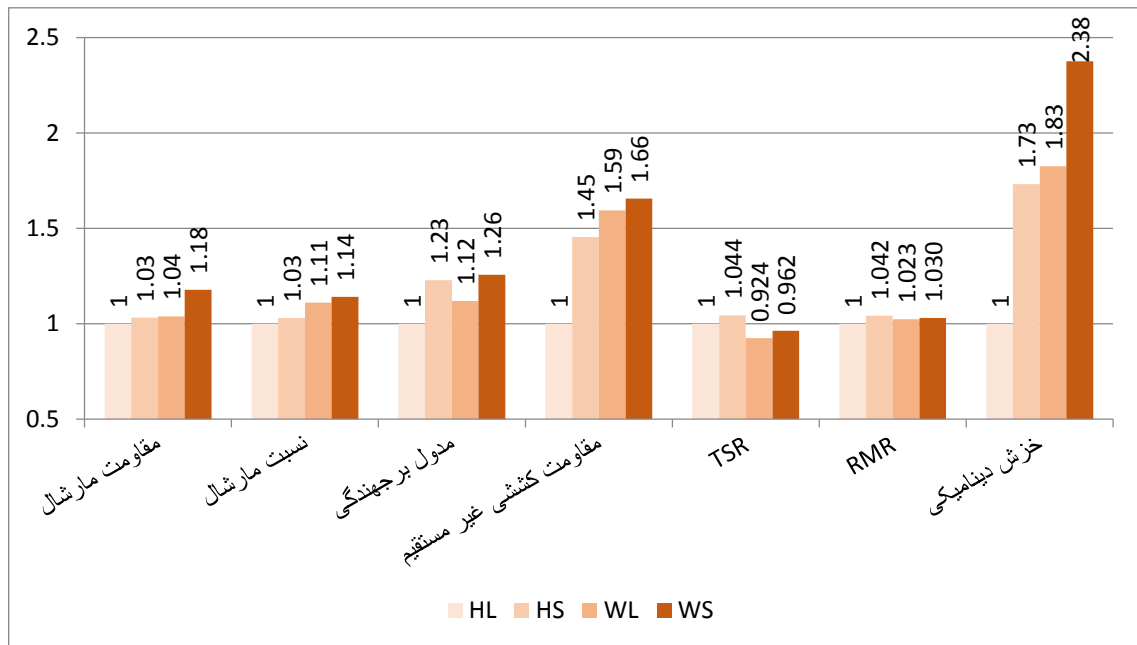


شکل ۱۰. نتایج کمی آزمایش‌ها برای مخلوط‌های با پیرشدگی کوتاه‌مدت

تأثیرگذارتر بوده و نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بهتر مخلوط آسفالتی گرم آهکی نسبت به آسفالت داغ سرباره‌ای می‌باشد.

در تست‌های حساسیت رطوبتی، استفاده از سرباره موجب افزایش مقاومت آسفالت در برابر رطوبت گردیده است. در حالی که استفاده از ساسوبیت و در نتیجه کاهش دمای ساخت آسفالت، موجب افزایش حساسیت آن نسبت به رطوبت می‌گردد. با توجه به نتیجه‌ی به دست آمده برای نمونه‌های گرم سرباره‌ای می‌توان دریافت که در صورت استفاده‌ی همزمان از ساسوبیت و سرباره، تأثیر ساسوبیت غالب بوده و حساسیت رطوبتی به میزان ناچیزی نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ آهکی افت می‌نماید.

چنانچه در شکل ۱۰ مشخص است، برای تمام آزمایش‌های انجام شده، به غیر از حساسیت رطوبتی (RMR, TSR) نتایج به دست آمده از روند خاصی پیروی می‌کنند. در تست‌های مارشال، مدول بر جهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و خزش دینامیک، آسفالت‌های گرم حاوی سرباره، مخلوط‌های آسفالتی گرم آهکی و آسفالت‌های داغ سرباره‌ای به ترتیب بیشترین رشد نتایج نسبت به نمونه‌های کنترل را داشته‌اند. از مقایسه آسفالت‌های آهکی که در ساخت آن‌ها از ساسوبیت استفاده شده است نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ سرباره‌ای می‌توان دریافت که گرچه نتایج به یکدیگر نزدیک است، با این وجود، استفاده از ساسوبیت نسبت به استفاده از سرباره



شکل ۱۱. نتایج کمی آزمایش‌ها برای مخلوط‌های با پیرشدگی بلندمدت

دینامیک گردیده‌اند. البته با توجه به آنکه نرخ پیرشدگی آسفالت‌های حاوی سرباره بیشتر از آسفالت‌های ساخته شده با مصالح آهکی است و از طرف دیگر همین پارامتر برای آسفالت‌های گرم حاوی ساسوبیت کمتر از

با توجه به شکل ۱۱، بعد از پیرشدگی بلندمدت نیز همانند نتایج به دست آمده برای پیرشدگی کوتاه‌مدت، ساسوبیت و سرباره موجب بهبود مقاومت مارشال، مدول بر جهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و خزش

- نوع سنگدانه و دمای ساخت آسفالت نقش مهمی در حساسیت رطوبتی آن ایفا می‌کنند. آسفالت‌هایی که در ساخت آن‌ها از مصالح آهکی استفاده شده است نسبت به آسفالت‌های سرباره‌ای و همچنین آسفالت‌های گرم نسبت به آسفالت‌های داغ، نسبت به رطوبت حساسیت بیشتری دارند. در ضمن، از آنجایی که پیرشدگی موجب کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌گردد، این پارامتر حساسیت بیشتر مخلوط‌های آسفالتی نسبت به رطوبت را سبب می‌شود.

- جنس مصالح مورد استفاده، بر پیرشدگی آسفالت تأثیرگذار می‌باشد. سرباره نسبت به مصالح آهکی از درصد جذب قیر بیشتر و ظرفیت گرمایی بالاتری برخوردار است که همین علل می‌تواند منجر به پیرشدگی بیشتر مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره‌ی فولاد گردد. مخلوط‌های آسفالتی گرم نسبت به آسفالت‌های داغ، پیرشدگی کمتری دارند. درصد فضای خالی کمتر منجر به ارتباط کمتر قیر و هوای آزاد شده، اکسیداسیون و نهایتاً پیرشدگی کمتر مخلوط‌های آسفالتی گرم را سبب می‌شود.

- به طور کلی استفاده از سرباره موجب بهبود کلیه خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی گردیده است. ساسوبیت نیز به غیر از آنکه مقاومت در برابر رطوبت را تضعیف نموده است، سایر پارامترهای مورد بررسی را بهبود بخشیده است. تلفیق سرباره و ساسوبیت و در نتیجه، ساخت آسفالت گرم سرباره‌ای علاوه بر آنکه مقاومت مارشال، مدول برجهنگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و خزش دینامیک را به طور قابل توجهی افزایش داده است، نسبت به آسفالت داغ آهکی تقریباً از حساسیت رطوبتی یکسانی برخوردار می‌باشد.

آسفالت‌های داغ می‌باشد، لذا در برخی از تست‌ها، مثلاً برای مدول برجهنگی، نتایج مربوط به آسفالت داغ سرباره‌ای نسبت به آسفالت گرم آهکی پیشی گرفته است. نتایج به دست آمده برای حساسیت رطوبتی نمونه‌ها نیز شباهت زیادی به نتایج حاصل بعد از پیرشدگی کوتاه‌مدت دارد.

۵. نتیجه‌گیری

- ترکیب قیر و ساسوبیت نسبت به شرایط اختلاط از جمله نوع همزن، دمای اختلاط و مدت زمان اختلاط حساسیت نداشته و از ساده‌ترین شرایط نیز می‌توان جهت ترکیب آن‌ها استفاده نمود.

- سرباره به سبب تخلخل و جذب قیر بیشتر، هنگام جایگزینی با بخش درشت‌دانه منجر به افزایش درصد قیر بهینه از $4/75$ درصد برای آسفالت آهکی به $5/2$ درصد گشته است.

- وزن مخصوص بیشتر آسفالت‌های گرم نسبت به آسفالت‌های داغ نشان می‌دهد که استفاده از $1/5$ درصد ساسوبیت علاوه بر کاهش دمای ساخت آسفالت به میزان 20°C منجر به بهبود تراکم‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی نیز گشته است.

- با توجه به نتایج به دست آمده برای عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت، آسفالت گرم سرباره‌ای بهترین عملکرد و آسفالت داغ آهکی ضعیف‌ترین عملکرد را دارند. نکته‌ی قابل توجه، نتایج تقریباً یکسان آسفالت‌های داغ سرباره‌ای و مخلوط‌های آسفالتی گرم آهکی، مخصوصاً برای نمونه‌های با پیرشدگی کوتاه‌مدت می‌باشد.

۶. مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۱. "آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران". نشریه ۲۳۴، تجدید نظر اول.
- AASHTO T283. 1989. "Standard method of test for resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage". 19th Edn., American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Ahmedzade, P. and Sengoz, B. 2009. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete". *J. Hazard. Mater.*, 165(1): 300-305.
- Ameri, M., Hesami, S. and Goli, H. 2013. "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag". *Constr. Build. Mater.*, 49: 611-617.
- Arabani, M. and Azarhoosh, A. R. 2012. "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 35: 1-7.
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y. and Shalabi, F. I. 2007. "Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes". *Can. J. Civil Eng.*, 34(8): 902-911.
- Bonaquist, R. F. 2011. "Mix design practices for warm mix asphalt". *Transport. Res. Board*, Vol. 691.
- Kavussi, A. and Qazizadeh, M. J. 2014. "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging". *Constr. Build. Mater.*, 72: 158-166.
- Pasetto, M. and Baldo, N. 2010. "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags". *J. Hazard. Mater.*, 181(1): 938-948.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. 2012. "Warm mix asphalt: An overview". *J. Cleaner Prod.*, 24: 76-84.

