بررسی اثر نانو اکسید روی بر عریان شدگی رطوبتی مخلوط های آسفالتی حاوی خرده شیشه

داود ساعدی[1]، حمید شیرمحمدی[2]، اسفندیار مردانی[3]، غلامحسین حامدی[4]، یونس آذریون[5]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-راه و ترابری، دانشگاه ارومیه، st_d.saedi@urmia.ac.ir

2- استادیار گروه عمران-راه و ترابری، دانشگاه ارومیه، h.shirmohammadi@urmia.ac.ir

3- استادیار گروه عمران-راه و ترابری، دانشگاه ارومیه، e.mardani@urmia.ac.ir

4- استادیار گروه عمران-راه و ترابری، دانشگاه گیلان، hamedi@guilan.ac.ir

5- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-راه و ترابری، دانشگاه ارومیه، yones.azarion.99@gmail.com

چکیده

در این پژوهش برای بررسی پتانسیل عریان شدگی رطوبتی مخلوط های آسفالتی حاوی خرده شیشه، 12 ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی با استفاده از سه نوع سنگدانه شامل سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت که به ترتیب دارای خاصیت بازی، اسیدی و اسیدی بوده، قیر با درجه نفوذ 70-60، خرده شیشه ضایعاتی که جایگزین 10 درصد بخش ریزدانه سنگدانه ها شده و یک نوع افزودنی ضدعریان شدگی به نام نانو اکسید روی که در دو درصد وزن قیر برای اصلاح آن استفاده شده، تهیه شده است. برای ارزیابی عملکرد مخلوط ها، آزمایشات مکانیکی طرح اختلاط مارشال و کشش غیرمستقیم در شرایط خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، شایان ذکر است که به منظور بررسی دقیق تر اثر خرده شیشه و افزودنی ضد عریان شگی نانو اکسید روی یک، سه و پنج سیکل یخ-ذوب به نمونه های قرار گرفته تحت شرایط اشباع در آزمایش کشش غیرمستقیم اعمال شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایشات نشان دادند که استفاده از خرده شیشه در مخلوط های آسفالتی باعث افت مقاومت مخلوط ها در برابر رطوبت می شود. که استفاده از افزودنی ضدعریان شدگی نانو اکسید روی می تواند باعث بهبود چشمگیر مقاومت مخلوط های آسفالتی حاوی خرده شیشه در برابر آسیب های ناشی از رطوبت شود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالت شیشه ای، عریان شدگی، نانو اکسید روی، کشش غیرمستقیم، افزودنی ضدعریان شدگی

1. مقدمه

بسیاری از ادارات راه تلاش‌های گسترده ای را به منظور کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری روسازی انجام داده اند. یکی از خرابی هایی که باعث صرف هزینه های گزاف در روسازی های آسفالتی می‌شود، خرابی رطوبتی است [1]. خرابی رطوبتی را از دست دادن خصوصیات مکانیکی مواد در نتیجه وجود آب در مخلوط های آسفالتی تعریف می‌کنند. این نوع خرابی علاوه بر آنکه خود یک خرابی مهم به حساب می آید، می‌تواند سبب رخداد یا تشدید سایر خرابی ها مانند ترک‌خوردگی خستگی، شیارشدگی، جداشدن قیر از سنگدانه و چاله در روسازی های آسفالتی شود. شدت خرابی رطوبتی که عریان شدگی نیز نامیده می‌شود به فاکتورهای داخلی و خارجی ارتباط دارد. فاکتورهای داخلی به خصوصیات مواد مورد استفاده در مخلوط آسفالتی نظیر سنگدانه و قیر ارتباط دارند در حالیکه فاکتورهای خارجی شامل شرایط محیطی، روش های تولید و اجرا، طراحی روسازی و شدت ترافیک می باشد. اگر چه خرابی رطوبتی بیش از 70 سال است که مورد توجه محققین قرار گرفته است اما جنبه های بسیاری از این نوع خرابی هنوز ناشناخته باقیمانده است [2]. دو سئوال کلیدی در این رابطه وجود دارد: 1) روش هایی که می توان شدت خرابی رطوبتی را کاهش داد و 2) روش و شرایطی که می توان پتانسیل خرابی رطوبتی را به صورت دقیق پیش بینی کرد [3]. امروزه، نیاز به استفاده از مواد جدید در

ساختار مخلوط های آسفالتی برای کاهش خرابی رطوبتی به دلیل گسترش شبکه روسازی، افزایش شدت ترافیک، وجود کامیون های سنگین و در برخی نقاط شرایط محیطی خشن‌تر بیشتر احساس می شود [4-7]. از طرفی دیگر، رشد و توسعه سریع صنعت و اقتصاد، باعث افزایش میزان مصرف و به تبع آن تولید مقدار زیادی مواد ضایعاتی شده است. مقدار وسیعی از ضایعات مانند شیشه، فلز، بتن، چوب، سرباره کوره ها، پلاستیک، تایر ضایعاتی که در زباله دان های سراسر دنیا جمع آوری می شوند باعث مشکلات زیادی شده که هم از حیث مالی و هم از حیث زیست محیطی هزینه های زیادی برای دولت ها و شرکت های خصوصی به همراه داشته اند. در ارتباط با مشکل رشد این مواد یک نگرانی این است که با هماهنگی و ارتباط بین همه اجزایی که درگیر آن هستند بتوان یک روش مناسب برای حل آن یافت. یک راه حل برای مشکل مواد ضایعاتی این است که این مواد بازیافت شوند و در سایر قسمت ها مورد استفاده قرار گیرند [8, 9]. استفاده از مواد ضایعاتی در ساخت راه ها علاوه بر آن که باعث کاهش مقدار مواد ضایعاتی و حذف فضای مورد نیاز برای دفع این مصالح می شود و از لحاظ محیط زیستی نیز منافعی ایجاد می شود بلکه باعث می شود که لزوم استفاده از منابع طبیعی جدید نیز کم شود و همچنین استفاده از این مواد می تواند استفاده از معادن جدید را نیز کاهش دهد [10]. شیشه به عنوان یکی از مهمترین مواد ضایعاتی تولید شده در سراسر جهان به شمار می رود. که از زمان پیدایش آن، با گسترش استفاده مواجه شده به نحوی که با گذشت زمان میزان استفاده از شیشه و به تبع آن تولید زباله های شیشه به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به عنوان نمونه می توان به تولید قابل ملاحظه 17 میلیون تنی شیشه در اروپا اشاره کرد [11]. شیشه دارای محاسن زیادی می باشد که از مهمترین آن ها می توان گفت شیشه خرد شده به راحتی قابل دسترس بوده و از لحاظ محیط زیستی نیز تمیز است. همچنین، شیشه نسبتا ارزان قیمت بوده و برخی از خصوصیات مهندسی آن حتی از سنگدانه های طبیعی نیز بهتر است [12]. زباله شیشه خرد شده یک ماده غیرمعدنی و غیرفلزی می باشد که قابل تجزیه و سوزاندن نیست و استفاده دوباره آن نیز با سختی هایی همراه است. در پروژه های تحقیقاتی و اجرایی، شیشه خرد شده در ساخت راه ها به عنوان جایگزین بخشی از قسمت درشت دانه و ریزدانه سنگدانه مورد استفاده قرار گرفته است. بسیاری از کشورها استفاده از شیشه را در قسمتی از آیین نامه های فنی راهسازی خود گنجانده اند که استفاده هر چه بیشتر این ماده را تشویق می‌کنند. در صورتی که شیشه خرد شده در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد به آن مخلوط آسفالتی، مخلوط آسفالتی شیشه ای می‌گویند [13]. در طی سالیان اخیر با توجه به مزایایی که استفاده از شیشه خرد شده از لحاظ اقتصادی و محیط زیستی به همراه داشته است، استفاده از این ماده رو به گسترش می باشد که لزوم بررسی خصوصیات مهندسی شیشه خرد شده و مخلوط آسفالتی شیشه‌ای را بیشتر می کند [13].

2. مطالعات پیشین

جهت ارزیابی عملکرد و حساسیت های رطوبتی مخلوط های آسفالت شیشه ای مطالعات متعددی صورت گرفته است. در تحقیقی به ارزیابی تاثیر خرده شیشه بر بهبود خصوصیات دینامیکی مخلوط آسفالتی پرداخته شد. به همین منظور از قیر با درجه نفوذ 70-60، خرده شیشه تهیه شده از کارخانجات صنعتی و افزودنی ضدعریان شدگی آهک هیدراته استفاده شد. برای این ارزیابی از سیستم آزمایش آسفالت ناتینگهام برای تعیین مدول سختی نمونه ها به وسیله کشش غیرمستقیم بهره برده شد. نتایج نشان دادند که استفاده از خرده شیشه و آهک هیدراته باعث افزایش در مدول سختی مخلوط های ساخته شده می شود. علاوه بر این مقدار 15 درصد شیشه به عنوان مقدار بهینه شناسایی شد و استفاده از آهک هیدراته باعث بهبود چسبندگی در مخلوط آسفالت شیشه ای می شود [14]. در تحقیقی دیگر استفاده از الیاف شیشه ای در مخلوط آسفالت سنگدانه ای باعث افزایش مقاومت خستگی این نوع مخلوط ها شد. در این مطالعه مشخص شد که استفاده از الیاف شیشه ای به اندازه 0.1، 0.2 و 0.3 درصد می تواند عمر خستگی این نمونه های شیشه

ای را به ترتیب به اندازه 28.2، 37.2 و 44.4 درصد نسبت به نمونه های کنترل افزایش دهد [15]. در مطالعه ای به ارزیابی حساسیت رطوبتی و تخریب مخلوط آسفالت شیشه ای تحت سیکل های یخ-ذوب پرداخته شد. به همین منظور خرده شیشه جایگزین 20 درصد سنگدانه شد و از آهک هیدراته در 2 درصد وزن سنگدانه به عنوان افزودنی ضدعریان شدگی جهت بهبود مقاومت مخلوط آسفالت شیشه ای در برابر خرابی های رطوبت استفاده شد. همچنین، دو نوع نمونه (یکی برای مخلوط آسفالت شیشه ای و دیگری برای مخلوط کنترل) برای انجام آزمایشات تهیه شد. برای این ارزیابی از روش مبتنی بر اندازه گیری مدول مرکب استفاده شد که بر روی هر کدام از نمونه ها چهار آزمایش(در شرایط خشک، پس از 14 روز در حمام آب گرم، پس از سه سیکل یخ-ذوب، پس از 10 سیکل یخ-ذوب) انجام گرفت. به علاوه، از مدل ریاضی برای شبیه سازی رفتار مواد استفاده شد. نتایج نشان دادند که تکرار سیکل های یخ-ذوب در مخلوط آسفالت شیشه ای سبب آسیب بیشتری نسبت به مخلوط های کنترل می شود. با این وجود هر دو مخلوط تحت 10 دوره سیکل یخ-ذوب آسیب دیدند [16]. در مطالعه دیگری به بررسی اثر مواد ضایعاتی به عنوان فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی گرم پرداخته شد. در این بررسی مخلوط آسفالتی ساخته شده شامل پودر زباله شیشه، پودر زباله آجر، پوسته خاکستر برنج و پودر سنگ (مخلوط کنترل) بود و درصد قیر بهینه برای هر مخلوط به صورت مجزا تعیین شد. برای این ارزیابی از آزمایشات مارشال، مدول سختی کشش غیرمستقیم و خستگی کشش غیرمستقیم استفاده شد. نتایج حاصله نشان دادند که ترکیبات حاوی پودر زباله شیشه و پودر زباله آجر عمر خستگی و عملکرد بهتری را نسبت به مخلوط های دیگر دارند [17].

3. مصالح مصرفی

در این پژوهش از سه نوع سنگدانه پایه شامل سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت که معدن استخراج آنها به ترتیب معدن روستای خرم آباد واقع در بخش سلفچگان استان قم، معدن روستای صفرآباد در مجاورت سایت هسته ای فردو و معدن جمال آباد واقع در شهرستان پاکدشت استان تهران می باشد، استفاده شده است. دلیل اصلی استفاده از این نوع سنگدانه ها، درجه آبدوستی متفاوت آنها (به ترتیب بازی، اسیدی و اسیدی) بوده است تا بتوان تاثیر نوع سنگدانه هایی با کانی های مختلف و با حساسیت های مختلف در برابر خرابی رطوبتی را مورد ارزیابی قرار داد. دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش، دانه بندی شماره 3 نشریه 234 بوده است. که اندازه حداکثر و اسمی سنگدانه های این دانه بندی به ترتیب برابر 25 و 19 میلی متر هستند. خصوصیات فیزیکی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش در جدول 1 ارائه شده است. همچنین، قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش دارای درجه نفوذ 70-60 می باشد که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده است. خصوصیات قیر مورد استفاده در جدول 2 ارائه شده است. به علاوه، برای بهبود مقاومت مخلوط ها از افزودنی نانو اکسید روی استفاده شده که خصوصیات این نوع نانو ماده در جدول 3 آمده است. خرده شیشه هاي مورد استفاده در این پژوهش از شیشه های ضایعاتی کارگاه شیشه بری تهیه شده است که حداکثر اندازه ذرات شیشه 4/75 میلیمتر می باشد. همچنین، در این پژوهش شیشه خرد شده جایگزین قسمت ریزدانه سنگدانه ها شده است. زیرا طبق مطالعات پیشین افزودن شیشه خرد شده در ابعاد درشت دانه باعث کاهش ضریب اصطکاک، خراش و پاره شدن لاستیک ها و مشکلات دیگر می شود [20-18]. با توجه به مطالعات پیشین، در این پژوهش تصمیم گرفته شد تا شیشه خرد شده جایگزین 10 درصد از قسمت ریزدانه سنگدانه های پایه شود.

جدول 1: خصوصیات فیزیکی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش

آزمایش	استاندارد	سنگ آهک	گرانیت	کوارتزیت	حدود آیین‌نامه
وزن ویژه (درشت دانه)					
حجمی	ASTM C127	2/59	2/61	2/48	-
موثر		2/60	2/63	2/49	-
ظاهری		2/62	2/65	2/52	-
وزن ویژه (ریزدانه)					
حجمی	ASTM C128	2/57	2/60	2/46	-
موثر		2/58	2/62	2/48	-
ظاهری		2/61	2/65	2/49	-
وزن ویژه (فیلر)	ASTM D854	2/56	2/55	2/44	-
حداکثر سایش لس‌آنجلس	ASTM C131	27	19	26	حداکثر30
حداکثر جذب آب	ASTM C127	0/8	1/2	1/7	2/8
ذرات سوزنی و پولکی	ASTM D4791	3	9	6	حداکثر 15
درصد شکستگی	ASTM D5821	89	91	86	براساس ترافیک
دوام در برابر سولفات سدیم	ASTM C88	2	4	7	حداکثر 8

جدول 2: خصوصیات قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی	چگالی در 25 ºc	درجه نفوذ	نقطه نرمی ºc	شکل پذیری cm	درجه اشتعال ºc	افت وزنی %	درجه خلوص %
استاندارد	ASTM D70-76	ASTM D5-73	ASTM D36-76	ASTM D113-79	ASTM D92-78	ASTM D1754-78	ASTM D2042-76
مقدار مجاز	-	60-70	49-56	حداقل 100	حداقل 232	-	-
60-70	1/02	66	51	105	262	0/75	99/5

جدول 3: خصوصیات فیزیکی نانو اکسید روی مورد استفاده در این پژوهش

خواص	نانو اکسید روی
ساختار	کریستالی روزنه روی
شکل ذرات	مکعبی
جرم مخصوص (gr/cm^3)	5/5-5/6
شاخص انکساری	2
مساحت سطح ویژه (m^2/gr)	40±5
میانگین اندازه ذرات (nm)	20≈
جرم مخصوص حجمی(gr/m^3)	0/28-0/48
درجه اسیدیته	8/5-9/5
درصد آب	≤0/7

4. آزمایش ها

1.4 آزمایش طرح اختلاط مارشال بر اساس استاندارد AASHTO T245

در این پژوهش از طرح اختلاط به روش مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه استفاده شده است [21].

2.4 آزمایش کشش غیرمستقیم براساس استاندارد AASHTO T283

برای بررسی حساسیت رطوبتی در این پژوهش از آزمایش لاتمن اصلاح شده استفاده شده است. که برای هر ترکیب سه نمونه برای شرایط خشک و سه نمونه برای شرایط مرطوب هم برای مخلوط های کنترل و هم برای مخلوط های حاوی خرده شیشه ساخته شده است. به منظور بررسی دقیق تر اثر افزودنی نانو اکسید روی و خرده شیشه یک، سه و پنج سیکل یخ-ذوب به نمونه ها اعمال شده است. با استفاده از رابطه‌ی زیر، مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم برای نمونه های هر ترکیب مخلوط آسفالتی به دست می‌آید.

$$ITS = 2000F/t\pi d \quad (1)$$

که در این رابطه؛ ITS مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم بر حسب (kPa)؛ F مقدار نیروی لحظه گسیختگی بر حسب (N)؛ t ضخامت نمونه آسفالتی بر حسب (mm) و d قطر نمونه آسفالتی بر حسب (mm) می باشد.

حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان شدگی نمونه های مخلوط آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه های مرطوب به خشک(برحسب درصد) طبق رابطه زیر تعیین می شود.

$$TSR = \left(ITS_{wet} / ITS_{dry} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن؛ TSR نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم (بر حسب درصد)؛ ITS_{wet} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه های مرطوب (kPa) و ITS_{dry} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه های خشک (kPa) است.

5. نتایج و بحث

1.5 آزمایش طرح اختلاط مارشال

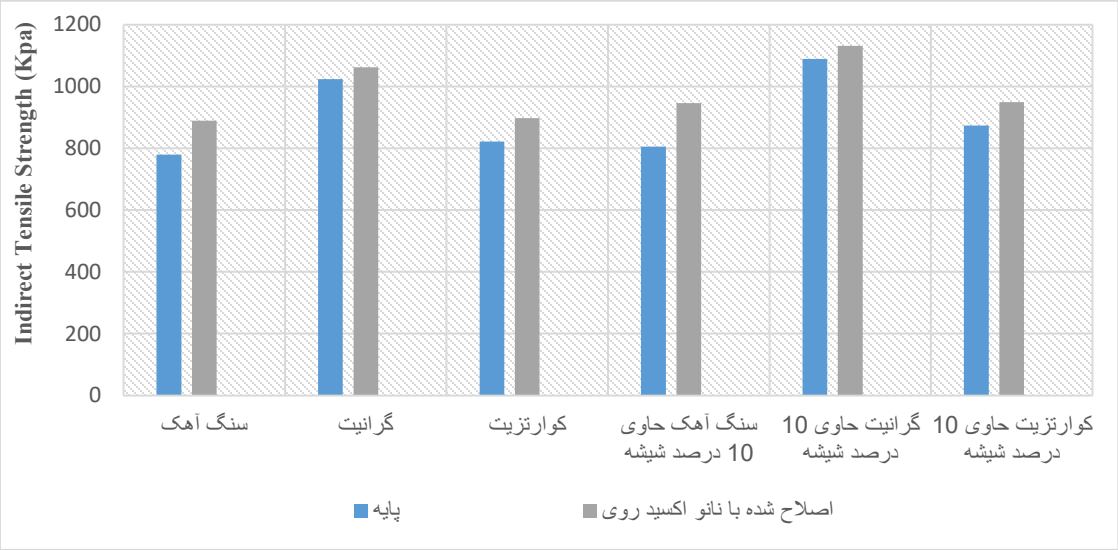
در این آزمایش، درصد قیر بهینه برای سه سنگدانه پایه سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت به ترتیب 5/75، 5/62 و 5/56 بدست آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده همانطور که مشاهده می شود میزان درصد قیر بهینه برای سنگدانه آهکی بیشتر از سنگدانه های گرانیتی و کوارتزیتی است. که این امر به دلیل خلل و فرج بیشتر سطوح سنگدانه سنگ آهک و جذب بیشتر این نوع سنگدانه نسبت به سنگدانه های گرانیتی و کوارتزیتی است.

2.5 آزمایش کشش غیرمستقیم

1.2.5 مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط خشک

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش لاتمن اصلاح شده برای نمونه های دست نخورده که در شکل 1 ارائه شده است می توان گفت که استفاده از خرده شیشه در مخلوط های آسفالتی ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه سنگ آهک، گرانیت و

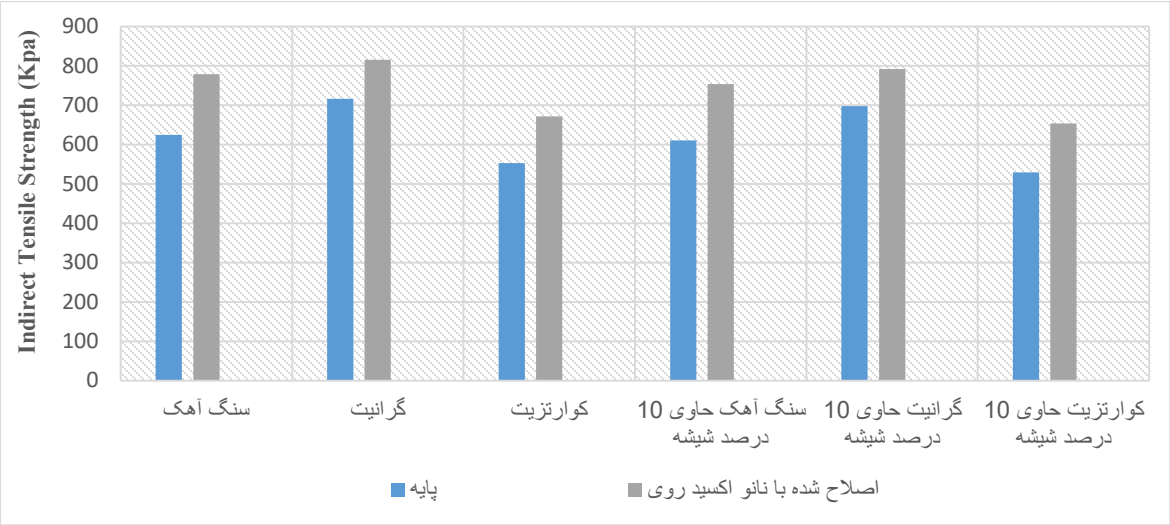
کوارتزیت باعث افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه های کنترل در شرایط خشک می شود. علاوه بر این، استفاده از نانو اکسید روی باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت نمونه های کنترل و شیشه ای در شراط خشک شده است. همچنین، همان طور که مشخص است مقاومت کششی مخلوط های کنترل و شیشه ای ساخته شده با سنگدانه گرانیتی نسبت به دو سنگدانه دیگر در شرایط خشک عملکرد بهتری را داشته است.



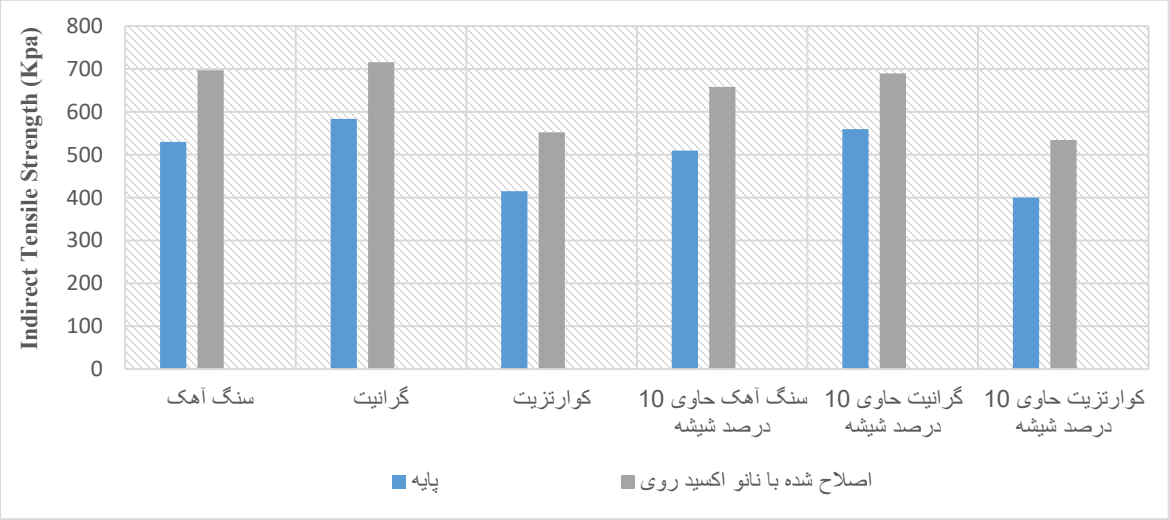
شکل 1: مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های آسفالتی در شرایط خشک

2.2.5 مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط مرطوب

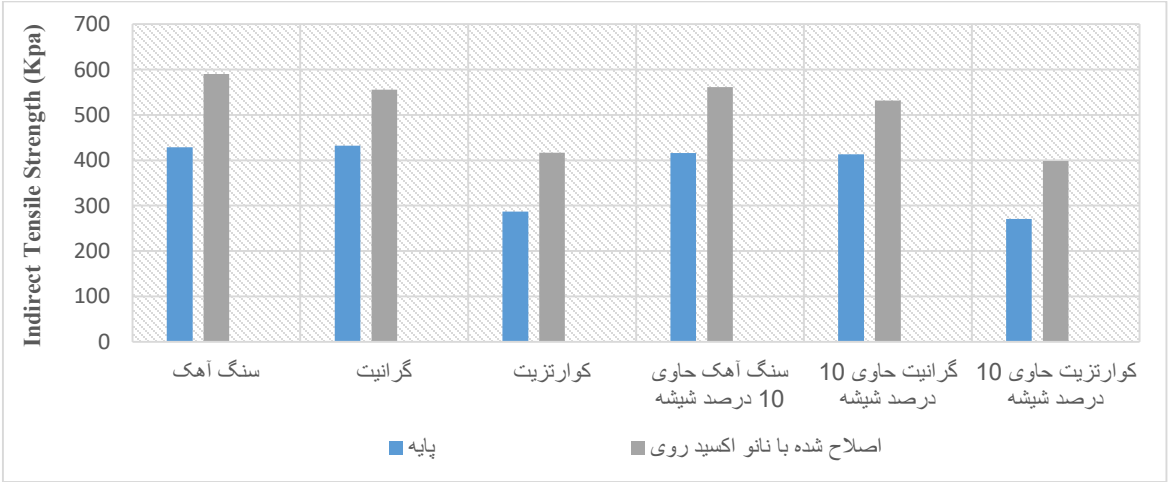
بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش لاتمن اصلاح شده برای نمونه های تحت شرایط اشباع که در شکل های 2 تا 4 ارائه شده است می توان گفت که استفاده از خرده شیشه در مخلوط های آسفالتی باعث کاهش مقاومت کششی نسبت به مخلوط های کنترل در شرایط مرطوب می شود. همچنین، مقاومت هر دو مخلوط پایه و شیشه ای ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت در شرایط مرطوب نسبت به شرایط خشک اقت محسوسی پیدا کرده است. که با افزایش تعداد سیکل های یخ-ذوب نرخ کاهش مقاومت در تمام نمونه های پایه و شیشه ای با شدت بیشتری اقت پیدا می کند. همان طور که از نتایج حاصل شده مشخص است استفاده از نانو اکسید روی باعث بهبود چشمگیر مقاومت هم در مخلوط های آسفالت شیشه ای و هم در مخلوط های آسفالت گرم در شرایط مرطوب شده است. به علاوه، بهبود مقاومت با استفاده از این نوع نانو ماده در این شرایط قابل ملاحظه تر از شرایط خشک بوده است. از طرفی دیگر، مقاومت مخلوط های پایه و شیشه ای ساخته شده با سنگدانه گرانیتی با افزایش تعداد سیکل های یخ-ذوب افت بیشتری می کند. که این به معنی پایداری ضعیف این نوع سنگدانه در برابر حساسیت های رطوبتی می باشد. در مقابل نمونه های شیشه ای و کنترل ساخته شده با سنگدانه آهکی دوام و پایداری بهتری را در برابر رطوبت داشته اند. همچنین، قابل ذکر است که مخلوط های ساخته شده با سنگدانه کوارتزیت ضعیف ترین مقاومت در برابر رطوبت را به خود اختصاص داده اند. که در هر سه نوع سنگدانه، استفاده از نانو اکسید روی مقاومت را به طور قابل ملاحظه ای بهبود بخشید.



شکل 2: مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های آسفالتی در شرایط مرطوب تحت یک دوره سیکل یخ – ذوب



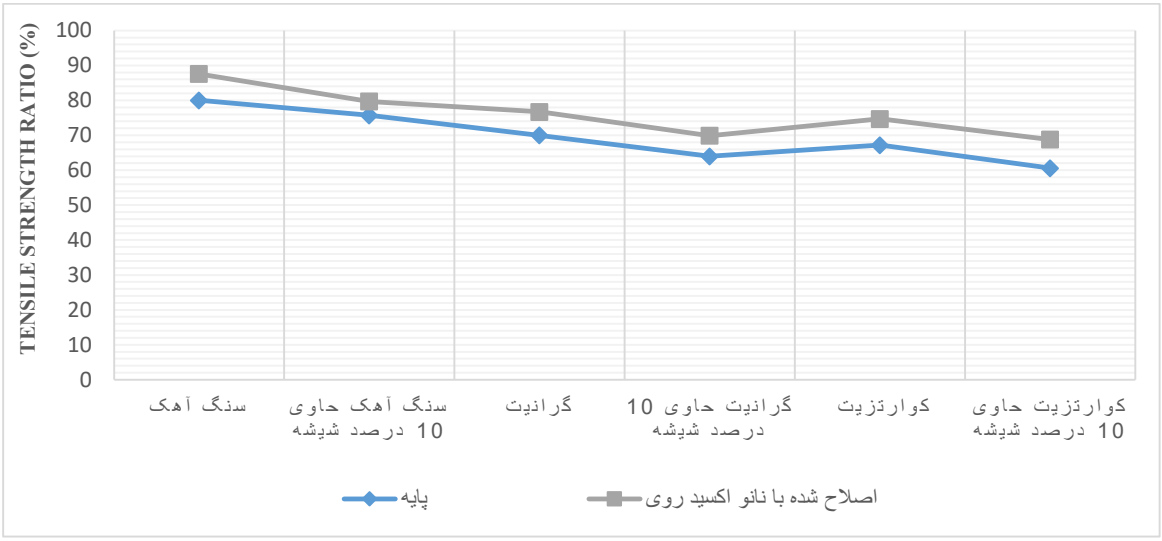
شکل 3: مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های آسفالتی در شرایط مرطوب تحت سه دوره سیکل یخ – ذوب



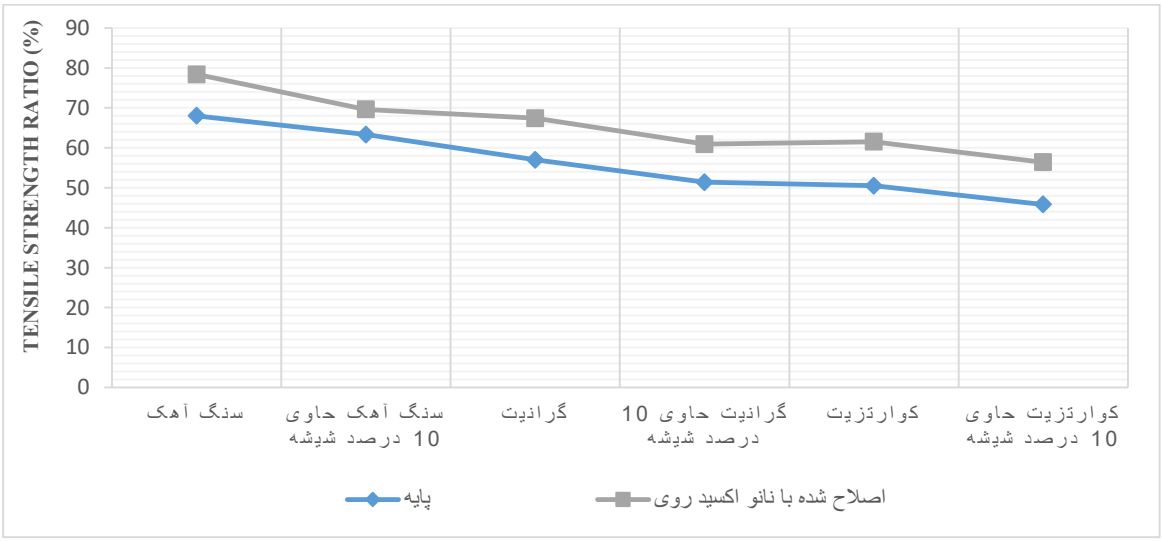
شکل 4: مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های آسفالتی درشرایط مرطوب تحت پنج دوره سیکل یخ – ذوب

3.2.5 نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

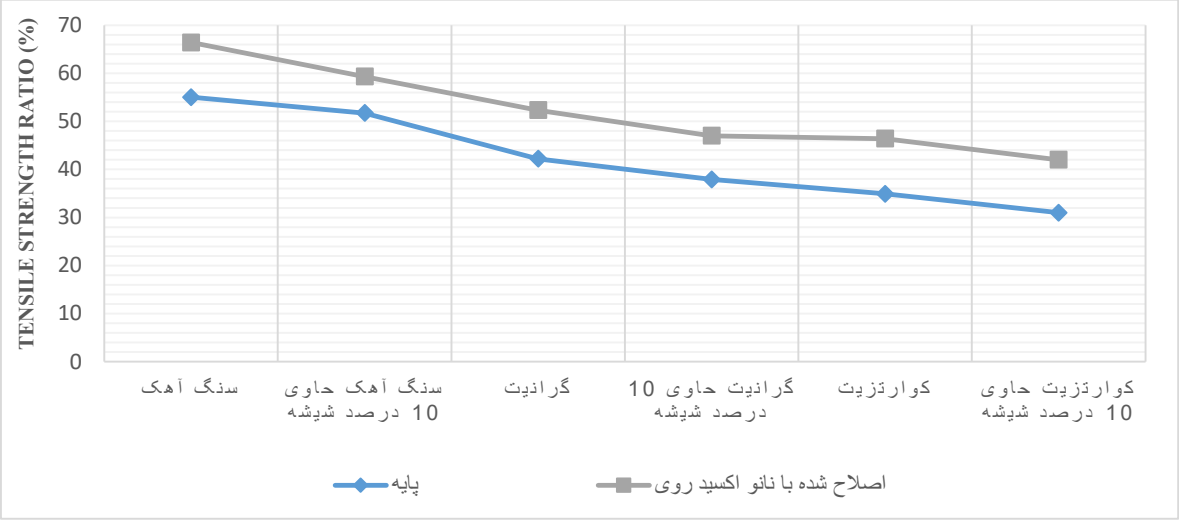
شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) به صورت نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های تحت شرایط مرطوب به خشک می باشد. که نتایج آن برای مخلوط های آسفالت شیشه ای و پایه در شکل های 5 تا 7 ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده همان طور که مشخص است استفاده از خرده شیشه در مخلوط های آسفالتی باعث افزایش حساسیت های رطوبتی می شود. همچنین، با افزایش تعداد سیکل های یخ-ذوب نسبت مقاومت کششی (TSR) در مخلوط های شیشه ای و گرم ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه افت بیشتری پیدا می کند. که استفاده از افزودنی ضدعریان شدگی نانو اکسید روی باعث افزایش قابل ملاحظه این شاخص در مخلوط های ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه هم در مخلوط های شیشه ای و هم کنترل شده است. لازم به ذکر است که سنگدانه آهکی نسبت به دو سنگدانه دیگر در برابر حساسیت های رطوبتی مقاوم تر بوده و عملکرد بهتری را داشته است. در مقابل سنگدانه کوارتزیتی کمترین مقاومت را در برابر رطوبت به خود اختصاص داده است.



شکل 5: نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) مخلوط های آسفالتی تحت یک دوره سیکل یخ-ذوب



شکل 6: نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) مخلوط های آسفالتی تحت سه دوره سیکل یخ-ذوب



شکل 7: نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) مخلوط های آسفالتی تحت پنج دوره سیکل یخ-ذوب

6. نتیجه گیری

مهمترین نتایج بدست آمده از این پژوهش عبارتند از:

- نتایج بدست آمده از آزمایش حساسیت رطوبتی کشش غیرمستقیم نشان داد که استفاده از خرده شیشه در مخلوط های آسفالتی باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه های ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه آهک، گرانیت و کوارتزیت در شرایط خشک می شود. در مقابل استفاده از خرده شیشه باعث کاهش این مقاومت در نمونه های ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه در شرایط مرطوب شد. که با افزایش تعداد سیکل های یخ - ذوب این مقاومت افت قابل ملاحظه ای پیدا کرد.
- استفاده از افزودنی ضدعریان شدگی نانو اکسید روی هم در مخلوط های آسفالت شیشه ای و هم مخلوط های آسفالت گرم باعث بهبود چشمگیر مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) در شرایط خشک و مرطوب می شود.
- مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی در شرایط خشک بیشتر از دو سنگدانه آهکی و کوارتزیتی می باشد. در مقابل با تحت شرایط مرطوب قرار گرفتن نمونه ها، پایداری و عملکرد نمونه های ساخته شده با سنگدانه آهک در برابر حساسیت های رطوبتی بهتر از دو سنگدانه دیگر می باشد. همچنین، ضعیف ترین عملکرد در برابر رطوبت را سنگدانه کوارتزیتی به خود اختصاص داد.
- نسبت مقاومت کششی (TSR) برای نمونه های ساخته شده با سنگدانه آهکی بیشتر از سنگدانه های گرانیتی و کوارتزیتی می باشد. با افزایش تعداد سیکل های یخ-ذوب این شاخص افت بیشتری پیدا می کند. همچنین، استفاده از خرده شیشه در مخلوط ها باعث کاهش این شاخص در هر سه نوع سنگدانه می شود. که استفاده از نانو اکسید روی باعث بهبود این شاخص هم در مخلوط های حاوی شیشه و هم بدون شیشه می شود.

منابع

1. Apeagyei, A.K., J.R. Grenfell, and G.D. Airey, *Observation of reversible moisture damage in asphalt mixtures.* Construction and Building Materials, 2014. 60: p. 73-80.

2. Yusoff, N.I.M., et al., *The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures.* Construction and Building Materials, 2014. 72: p. 139-147.
3. Tarefder, R.A. and A.M. Zaman, *Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts.* Journal of Materials in Civil Engineering, 2009. 22(7): p. 714-725.
4. Arabani, M., H. Roshani, and G.H. Hamedi, *Estimating moisture sensitivity of warm mix asphalt modified with zycosoil as an antistrip agent using surface free energy method.* Journal of Materials in Civil Engineering, 2011. 2 :(7)4p. 889-897.
5. Hesami, S., et al., *Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt.* Construction and Building Materials, 2013. 47: p. 935-941.
6. Nejad, F.M., G.H. Hamedi, and A. Azarhoosh, *The Use of Surface Free Energy Method to Evaluate the Mechanism of the Effect of Hydrate Lime on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt.* Journal of Materials in Civil Engineering, 2012.
7. Arabani, M. and G.H. Hamedi, *Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt.* International Journal of Pavement Engineering, 2014. 15(1): p. 66-78.
8. Wu, S., W. Yang, and Y. Xu, *Preparation and properties of glass–asphalt concrete. Key Laboratory for silicate materials science and engineering of ministry of education.* Wuhan, People's Republic of China: Wuhan University of Technology, 2004.
9. Arnold, G., S. Werkmeister, and D. Alabaster, *The effect of adding recycled glass on the performance of basecourse aggregate*. 2008.
10. Wartman, J., D.G. Grubb, and A. Nasim, *Select engineering characteristics of crushed glass.* Journal of Materials in Civil Engineering, 2004. 16(6): p. 526-539.
11. Poulikakos, L., et al., *Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction.* Resources, Conservation and Recycling, 2017. 116: p. 32-44.
12. Kandhal, P.S., *Waste Materials in hot mix asphalt-An overview*. 1992, National Center for Asphalt Technology.
13. Kim, Y.R., *Modeling of asphalt concrete*. 2009, ASCE Press United State of America.
14. Arabani, M., *Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete.* Construction and Building Materials, 2011. 25(3): p. 1181-1185.
15. Moghaddam, T.B., M.R. Karim, and M. Abdelaziz, *A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes.* Scientific Research and Essays, 2011. 6(4): p. 670-682.
16. Lachance-Tremblay, É., et al., *Degradation of asphalt mixtures with glass aggregates subjected to freeze-thaw cycles* .Cold Regions Science and Technology, 2017. 141: p. 8-15.
17. Arabani, M., S.A. Tahami, and M. Taghipoor, *Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials.* Road Materials and Pavement Design, 2017. 18(3): p. 713-729.
18. Nash, P.T., et al., *Use of Glass Cullet in Roadway Construction. FHWA-TCEQ (0-1331).* 1995.
19. *The use of Crushed Glass as both an Aggregate Substitute in Road Base and in Asphalt in Australia,GHD Institue: Australia.* 2008.
20. Ahmed Abbas, J., *By Using Waste Glass as Secondary Aggregates in Asphalt Mixtures.* International Journal of Advanced Research, 2014. 2(1): p. 41-46.
21. Kandhal, P.S., *Large stone asphalt mixes: design and construction*. 1990, National Center for Asphalt Technology.