ارزیابی تاثیر افزودنی ریزدانه‌های سرباره فولاد و سنگ کوهی به‌عنوان جایگزین فیلر در مخلوط آسفالتی متخلخل

امیر رضا حدادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
امیر ایزدی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل، ایران
حسن دیواندری*، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰٤/۰٦– پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵
صفحه ۱٤-۱

چکیده

از آنجایی که حفظ ایمنی و کیفیت راه از مهم‌ترین فاکتور ها در ساخت و طراحی روسازی جاده است، استفاده از آسفالت متخلخل به‌عنوان مدلی از روسازی هدایت کننده آب این امکان را می دهد تا در شرایط بارندگی، ایمنی جاده حفظ شود و خطرات ناشی از شرایط نامناسب جوی تا حدود زیادی کاهش یابد. با توجه به مدل ساخت روسازی آسفالت متخلخل، توجه به کیفیت و دوام آن از مسائل مهم در طراحی این نوع از مخلوط های آسفالتی است. کارشناسان و محققین، بکارگیری مصالح نوین و افزودنی‌ها را جهت بهبود علمکرد آسفالت متخلخل پیشنهاد نموده اند. یکی از این مصالح که در ساخت آسفالت‌های گرم متداول مورد توجه قرار گرفته است، ضایعاتی به نام سرباره فولاد بوده که نتیجه مثبت آن در عملکرد مخلوط آسفالت گرم مشخص شده است. در این تحقیق جهت بررسی دقیق‌تر، استفاده از ریزدانه‌های سرباره به عنوان فیلر در آسفالت متخلخل با ریزدانه‌های سنگ کوهی مقایسه شده است. نتایج حاصل از انجام آزمایشات عملکردی نظیر کانتابرو و حساسیات رطوبتی (لاتمن) مشخص نمود که بکارگیری سرباره فولاد بعنوان فیلر نه‌تنها بهبودی در عملکرد مخلوط آسفالت متخلخل را به‌همراه نداشته است بلکه کاهش خواص عملکردی را نیز منتج شده است. همچنین در این پژوهش ضمن بررسی دلایل نتایج کسب شده پیشنهادهایی جهت بهبود عملکرد آسفالت متخلخل سرباره ای ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت متخلخل، حساسیت رطوبتی، سرباره فولاد، فیلر، کانتابرو

۱- مقدمه

امروزه مبحث ایمنی در تردد یکی از اصول اولیه مهندسی راه، ترافیک و برنامه ریزی حمل ونقل است. برمبنای گزارش سازمان بهداشت جهانی(WHO)[1] هر ساله بیش از ۱/۱۷ میلیون نفر در سوانح جاده‌ای در جهان، جان خود را از دست می‌دهند که از این آمار ۷۰ درصد آن مربوط به کشورهای در حال توسعه است و بیش از ۱۰ میلیون نفر معلول و زخمی میشوند(Sodagari and Hassani and Moafi, 2005). پیش بینی می‌شود که در ۱۰ سال آتی در کشورهای در حال توسعه در اثر حوادث مختلف حمل و نقلی، ٦ میلیون نفر جان خود را از دست داده و ٦۰ میلیون نفر زخمی خواهندشد، مگر این که اقدامات مناسبی جهت جلوگیری از این حوادث صورت گیرد (Health Organization, 2015 Word). از آنجای که روسازی متخلخل یکی از روش‌های ارتقاء ایمنی سطح راه در مناطق بارشی می‌باشد، از این‌رو توجه به کیفیت آن به جهت بالا رفتن دوام و ماندگاری مورد توجه قرار گرفته است(Perez-Jimenez and Gordillo, 1990). جهت بهبود کیفیت روسازی از

نظر اصطکاکی و افزایش مقاومت در برابر سایر خرابی‌ها، مواد و مصالح مختلفی در آزمایشگاه ارزیابی می‌شوند. سرباره‌های آهن و فولاد از جمله مصالحی هستند که از آن‌ها در ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم[۲] استفاده شده است. سرباره‌های آهن و فولاد از تفاله‌های کارخانه‌های ذوب آهن بدست می‌آیند و در حجم‌های وسیع قابل دسترسی هستند. تنها مشکل استفاده از این مواد، محدود بودن منابع تولید آن است. معمولاً محدوده استفاده از این سرباره‌ها تا شعاع صد کیلومتری از منبع تولید آن است(Wu and Xue and Yongchun, 2015). تحقیقات متعددی در خصوص تأثیر سنگدانه‌های سرباره بر خصوصیات مکانیکی مخلوط های آسفالتی انجام شده است. اکثر این تحقیقات نقش مثبت سرباره را در افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار[۳]، عریان شدگی و لغزندگی تایید نمود(Solomon, 1991). برهمین اساس در این پژوهش با انجام آزمایش‌های کاربردی مربوط به مخلوط آسفالت متخلخل[۴] تلاش شده تاثیر استفاده از ریزدانه‌های سرباره فولادی بعنوان فیلر در مخلوط آسفالت متخلخل، ارزیابی گردد.

۲- پیشینه تحقیق

بررسی تحقیقات محققین پیشین نشان داد که استفاده از آسفالت متخلخل یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش آلودگی صوتی و افزایش ایمنی در رانندگی می‌باشد. در کشور سوئیس نیز به منظور کاهش صدا و افزایش ایمنی ترافیک از آسفالت متخلخل استفاده شده است (Isenring and Kofter, 1990). بر اساس بررسی کارشناسان کشور فرانسه، استفاده از آسفالت متخلخل در راه‌های این کشور منجر به کاهش میزان تصادفات در شرایط خیس بودن جاده‌ها شده است(Bonnot, 1997). عملکرد آسفالت متخلخل در اتریش نیز رضایت بخش بوده است. اما حساسیت به شن‌زدگی سطح آسفالت در این کشور موجب شده تا مسئولین به استفاده از آسفالت معمولی روی آورند (Litzka, 2000). با وجود مزایایی که برای آسفالت متخلخل برشمرده شد، نیاز به مصالح با مقاومت بالا در مقابل سایش و شکستگی، لزوم استفاده از مواد قیری اصلاح شده، نیاز به یک لایه آب‌بندی شده در زیر لایه آسفالت متخلخل و لزوم نگهداری بیشتر آن، معمولاً منجر به افزایش هزینه این نوع آسفالت نسبت به آسفالت متداول می‌شود (Mansouriyan et al, 2016). با توجه به برخی ضعف‌ها در آسفالت متخلخل محققین استفاده از مصالح با کیفیت بهتر را جهت افزایش عملکرد و دوام مخلوط آسفالت متخلخل پیشنهاد نمودند(Fakhri et al, 2017). استفاده از سرباره کوره بلند در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند بافت درشتی را محیا نموده و مقاومت لغزندگی مخلوط آسفالتی را افزایش دهد(Esmaeili and Marandi and Safapour, 2005).در تحقیق دیگری که توسط پاستو و همکاران انجام شد، ضمن بررسی مدول سختی و مقاومت خستگی در آزمایش کششی غیر مستقیم، استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی به عنوان راهکاری مناسب به منظور افزایش توان باربری مخلوط‌های آسفالتی معرفی شده است (Pasetto and Baldo, 2011). اولین کاربرد عملی استفاده از سرباره فولادبرای ساخت آسفالت، در کانادا و در بزرگراه اونتاریا بود. ولی بروز مشکلات عملکردی موجب شد که وزارت حمل و نقل کانادا استفاده از سرباره فولاد در آسفالت را در سال ۱۹۹۱ کنار بگذارد(Solomon, 1993). بررسی تاثیر استفاده از سرباره فولاد در مخلوط‌های متخلخل نیز نشان داده است که مخلوط‌های حاوی مصالح سرباره‌ای قابلیت بیشتری در جذب سر و صدای تولید شده در اثر تماس لاستیک و سطح روسازی دارند(Shen and Wu and Du, 2009). استفاده از هر دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه سرباره فولاد به عنوان سنگدانه در مخلوط آسفالتی امکان پذیر نیست. چرا که منجر به افزایش فضای خالی در مخلوط می‌شود(Ahmedzade and Sengoz, 2008). استفاده از فیلر در آسفالت سبب ازدیاد قدرت باربری، کاهش تغییر شکل نسبی، افزایش مقاومت در برابر ضربه، افزایش مقاومت برشی و فشاری، افزایش کندروانی قیر و کاهش شکنندگی آن می‌شود (Zarei and Malaki and Elyasi, 2015). تحقیقات بسیاری در مخلوط‌های آسفالتی برای جایگزین کردن فیلرهای معدنی سنتی (پودرسنگ) با مصالح دیگر برای ایجاد علمکرد بهتر و ساختار روسازی انعطاف‌پذیر و اقتصادی‌تر انجام شد. لذا با توجه به آنکه ریزدانه‌های سرباره بعنوان فیلر در مخلوط آسفالت متخلخل تاکنون مورد ارزیابی عملکردی قرار نگرفته است در این پژوهش با استفاده از آزمایش های مختلف مقاومت کششی، مقاومت در برابر اضمحلال مخلوط و مقاومت دربرابر رطوبت مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۳- بیان مسئله

استفاده از سرباره فولاد جهت بهبود پارامترهای عملکردی آسفالت سابقه زیادی دارد و تقریباً در تمام پژوهش‌های انجام شده نتایج مثبتی از این امر گرفته شده‌است. اما کمتر به بررسی

ریزدانه‌های سرباره پرداخته‌انـد. از آنجـایی کـه فیلـر و خاصـیت شیمیایی و فیزیکی آن بر خصوصیات مخلوط آسفالت تاثیر گـذار است به همین منظور اثر ریزدانه‌های سـرباره فـولاد[۵] در مخلـوط آسفالت متخلخل مورد بررسی قرار گرفته‌است.

٤- فرضیات پژوهش

با توجه به آنکه بررسی تاثیر نوع فیلر در این تحقیق مورد نظـر است، جنس مصالح سنگی ثابت و از نوع سرباره انتخاب شـده و تنها جنس فیلر تغییر می‌کند. همچنین جنس و میزان قیر نیز ثابت می‌باشد. در طول مدت ساخت و آزمایش نمونه‌ها، دمـای محـیط ثابت است که در نهایت تمامی نمونه‌ها در شرایط یکسان سـاخته و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

٥- هدف پژوهش

هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی عملکرد فیلر از جنس سرباره فولاد در مخلوط آسفالت متخلخل است. با این هدف کـه مشخص گردد که آیا فیلر از جـنس سـرباره مـی‌توانـد عملکـرد مخلوط آسفالتی متخلخل را همانند سنگدانه‌هـای سـرباره بهبـود بخشد یا خیر؟ برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌های مختلفـی مانند کانتابرو[۶] و حساسیت رطوبتی (آزمایش لاتمن اصلاح شده)[۷] بعنوان آزمایش‌های کاربردی انجام شد تا در نهایت ضمن تحلیـل و بررسی نتایج مشخص گردد که آیا می‌توان بـا ایـن ترکیـب بـه مخلوطی با داوم بیشتر و عملکردی بهتر دست یافت یا خیر.

٦- روش تحقیق

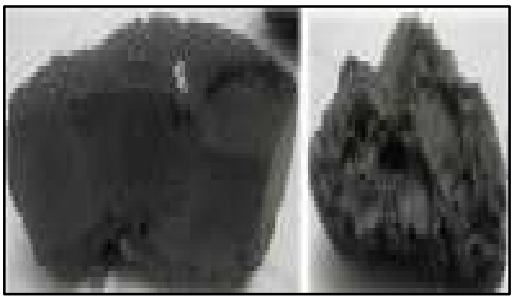
در این پژوهش پس از تهیه مصالح سنگی، سرباره فولادی و قیر مناسب تحقیق، نمونه‌ها در دو ترکیب متفاوت از نظر جنس فیلـر ساخته شدند. یکی از ترکیب‌ها، از فیلر کـاملاً سـرباره‌ای سـاخته شد و جنس فیلر مخلـوط دیگـر از پـودر سـنگ کـوهی بـود. در نهایت نمونه‌ها تحت آزمایش‌های کانتابرو و لاتمن قرار گرفت و نتایج بررسی و تحلیل گردید.

۷- معرفی مصالح

در این بخش توضیحاتی در خصوص سرباره، مصالح سنگی و قیر مورد استفاده و خواص هر یک از آنها ارائه می‌گردد.

۷-۱- سرباره

سرباره فولاد طبق تعریف ASTM، محصولی غیر فلزی است که از کوره‌های تولید فولاد به روش قوس الکتریکی بدست می‌آید. کاربرد سرباره در مخلوط آسفالتی می‌تواند از دپوی بی‌رویه آن در محل‌های تولید فولاد جلوگیری نماید و باعث کاهش آلودگی محیط زیست شود. در شکل (۱) دو نمونه از سرباره‌های مختلف از لحاظ شکل ظاهری نمایش داده شده‌است.



شکل ۱. دو نمونه از سرباره‌های فولادی از لحاظ بافت سطحی

شکل ۲. دانه‌بندی مختلف سرباره

منابع تولید سرباره در ایران، کارخانه‌های ذوب آهن اصفهان، اهواز، بندرعباس و اسفراین و ... است که سالیانه در حدود هشت‌صد هزار تن سرباره تولید می‌کنند و به راحتی می‌توان از آن‌ها در ساخت راه‌ها و بزرگراه‌های پر ترافیک اطراف منبع تولید آن، استفاده کرد.

سرباره‌ها با توجه به نحوه عمل‌آوری، انواع مختلفی دارند. سرباره کلوخه‌ای کوره بلند از سرد شدن سریع سرباره مذاب کوره بلند در هوا بدست می‌آیند که از نظر ظاهری شباهت زیادی به سنگ‌های آذرین دارند. در شکل (۲) دانه‌بندی مختلف مخلوط سرباره‌ای نشان داده شده است.

۷-۱-۱- ویژگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره

❖ سنگدانه‌های سرباره کلوخه ای کوره بلند، خاصیت بازی (PH=9) دارند. مطابق مفهوم واکنش شیمیایی فاز اسیدی قیر و فاز بازی سنگدانه در واکنش شیمیایی با یکدیگر شرکت کرده و ترکیب نفوذ ناپذیری در برابر رطوبت به وجود می‌آورند، بنابراین، سنگدانه‌هایی که خاصیت بازی دارند، درمقابل پدیده عریان شدگی[۸] مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند (Lee, 1974).

❖ بخاطر تیز گوشگی، زاویه‌دار بودن و زبر بودن بافت سطحی سنگدانه‌های سرباره کلوخه‌ای کوره بلند، مخلوط‌های آسفالتی بعد از خنک شدن قفل و بست مناسبی دارند. این مطلب باعث بالا رفتن مقاومت در برابر شیارشدگی[۹] می‌گردد (Lee, 1974).

❖ مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کلوخه‌ای کوره بلند به خاطر داشتن سطحی ناهموار، تیزگوشگی، تخلخل و سختی بالا، مقاومت اصطکاکی بالایی دارند. سنگدانه‌های حاصل از سرباره کلوخه‌های کوره بلند، مقدار صیقلی شدگی[۱۰] زیادی دارند. مقدار بالای PSV سنگدانه‌ها، باعث بالا رفتن مقاومت اصطکاکی مخلوط آسفالتی و روکش‌های سطحی ساخته شده از این مصالح می‌گردد(Lee, 1974).

۷-۱-۲- خواص فیزیکی، شیمیایی و آزمایشگاهی سرباره‌ها

سرباره فولاد مصرفی در این پژوهش، ترکیبی غیر فلزی است که دارای سیلکات‌های کلسیم، فریت‌های کلسیم، اکسید آهن، آلمینیوم، منگنز، کلسیم و منیزیوم است که ریز دانه‌های آن پس از فرآیند بازیافت به رنگ خاکستری تیره و دارای بافتی همگن و بسیار متراکم است و درشت دانه‌های آن تقریباً هم رنگ با مصالح کوهی و معمولی می‌باشند.

سرباره فولاد مورد نیاز از شرکت فولاد مبارکه سپاهان اصفهان تهیه شده‌است (ریوا تحقیق). در جداول (۱، ۲ و ۳) اطلاعات سرباره ارائه شده است.

۷-۲ سنگ کوهی

مصالح سنگی آسفالت متخلخل، مخلوطی از سنگدانه‌های درشت، سنگدانه‌های ریز و فیلر است که دارای دانه‌بندی باز[۱۱] یا میان‌تهی بوده و مصالح سنگی درشت‌دانه (روی الک ٤#) درصد زیادی از ترکیب مصالح سنگی را تشکیل داده است و عامل اصلی مقاومت در برابر شیارافتادگی و باربری زیاد این مخلوط‌ها می‌باشد(Mallick et al, 2009).

مصالح سنگی که در این تحقیق استفاده گردیده از معدن چالدران در جاده هراز آمل تهیه شده است. مصالح سنگی مورد استفاده باید از سختی و دوام کافی برخوردار باشد تا در حالت تماس سنگدانه با سنگدانه در مقابل بارهای ناشی از آمدوشد مقاومت نماید. به طور کلی مصالح خصوصیات کیفی یکنواختی داشته، عاری از هرگونه ذرات رس و لای، شیست و پوشش خاکی باشد. در جدول شماره ٤، محدوده استاندارد مشخصات مصالح سنگی مطابق استاندارد، همچنین مشخصات مصالح مصرفی در این پژوهش ارائه شده است.

۷-۳- قیر

ویسکوزیته قیر گرم شده باید به اندازه‌ای باشد تا در حین اختلاط اجازه پوشش کامل مصالح سنگی و جذب را پیدا کند. پس از پوشش دادن سنگدانه‌ها توسط قیر، سفتی قیر می‌تواند بر حساسیت رطوبتی تاثیر بگذارد. قیرهای سفت‌تر عموماً در برابر جدا شدن از سطح سنگدانه‌ها، مقاومت بیشتری از خود نشان میدهند. بنابراین طبیعی است که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از آنها، مقاومت بیشتری در برابر خرابی رطوبتی داشته باشند. (Cooley, Brown and Watson, 2013)

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سرباره‌های فولاد مبارکه سپاهان

ماده	نماد	میزان ٪
اکسیدآهن	FeO	۱۲–۱۳
اکسید آهن	Fe_2O_3	۱۱/۵–۱۵/۵
اکسید کلسیم	CaO	۲۷/٦–۵۲/٦
سیلیسیوم	SiO_2	۹,٤–۱۹,۹
اکسید منیزیم	MgO	۱/٤۷–۱/۸
اکسید آلمینیوم	Al_2O_3	۰/۹–۳
اکسید سدیم	V_2O_5	۲/۱۷–۲/۵۰
اکسید منگنز	MnO	٤/٤–۵/۰

جدول ۲. خواص فیزیکی سرباره فولاد مبارکه سپاهان اصفهان

ویژگی	واحد	مقدار
چگالی ظاهری ذرات	t/m^3	۳/۵۸
چگالی خشک ذرات	t/m^3	۳/٤۵
چگالی **SSD** ذرات	t/m^3	۳/٤۹
جذب آب	%	۰/۵۰
تطویل و تورق	%	۱۲ – ۷
درصد رطوبت	%	۵/۰–۷/۵
شاخص خمیری **(PI)**	-	صفر
ارزش ماسه ای	%	٦۰–۷۵

جدول۳. خواص مقاومتی سرباره فولاد مبارکه سپاهان اصفهان

ویژگی	واحد	مقدار
مقاومت در برابر سلفات سدیم	%	۰/۱۹
سایش لوس آنجلس	%	۱۵–۲۲
مقاومت فشاری اشباع در آب	$\frac{kg}{Cm^2}$	۱۰۱٤
مقاومت در برابر ضربه	%	۱٦/۵۰
سایش میکرودوال	%	۸
تحمل باربری **CBR**	%	۲۰۰–۳۳۰
مقاومت فشاری خشک	$\frac{kg}{Cm^2}$	۲۰٦۱
درصد افت وزنی مصالح درشت دانه در سلفات منیزیم	%	۱/۸–۲/۲

جدول٤. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در پژوهش

	مشخصه	مشخصات	مصالح مصرفی	روش آزمایش
الف) مصالح سنگی درشت‌دانه	آزمایش سایش لوس‌آنجلس	حداکثر ۲۰ درصد	۱۷ درصد	ASTM C131-89
	درصد افت وزنی با سولفات سدیم در ۵ سیکل	حداکثر ۱۵ درصد	۱۲ درصد	ASTM C88
	حداکثر تطویل (نسبت ۵:۱)	حداکثر ۵ درصد	۳ درصد	BS 812-105.1
	درصد جذب آب	حداکثر ۲ درصد	۰/۰۵ درصد	ASTM C127
	درصد شکستگی در یک جبهه	۱۰۰ درصد	۱۰۰ درصد	ASTM D5821
ب) مصالح سنگی ریزدانه	درصد شکستگی	۱۰۰ درصد	۱۰۰ درصد	ASTM C88
	ارزش ماسه‌ای	حداقل ۵۰ درصد	٦۳ درصد	AASHTO T176

به علت بافت باز آسفالت متخلخل، لایه نازک قیر سریع‌تر دچار هوازدگی شده و در نتیجهٔ اکسیداسیون سریعتر قیر، پتانسیل خستگی آسفالت افزایش میابد. به همین دلیل استفاده از قیرهای با ویسکوزیته زیاد ارجحیت نخواهد داشت. زیرا قیر سخت‌تر، سریعتر به نقطه بحرانی سختی می‌رسد. در انتخاب نوع قیر، عوامل دیگری نظیر آب‌وهوا و حجم ترافیک نیز باید منظور گردد. قیرهای نرم در آب‌وهوای گرم تمایل به روانی دارند و این پدیده منشاء ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک است (Issue 1 - 384).

قیر استفاده شده در این تحقیق، قیر با درجه نفوذ[12] ۷۰-٦۰ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد تهران می‌باشد. کاربرد قیر نفوذی عمدتاً در راهسازی است. برای مناطق با آب و هوای گرم تر، از قیر سفت‌تر (درجه نفوذ کمتر) و برای مناطق با آب و هوای سردتر، از قیرهای شل‌تر (درجه نفوذ بیشتر) استفاده می‌شود. در جدول شماره ۵ مشخصات قیر استفاده شده در این پژوهش آورده شده است.

۷-۳-۱- انتخاب درصد بهینه قیر

مطابق توصیه نشریه ۳۸٤ (دستورالعمل طرح، اجرا و نظارت آسفالت متخلخل)، تعیین درصد قیر بهینه با انجام آزمایشات تعیین درصد فضای خالی AASHTO T275، فرونشست قیر[13] (ASTM D6390)، آزمایش کانتابرو و آزمایش اصلاح شده لاتمن مطابق استاندارد (AASHTO T283) اقدام شده است.

آزمایش تعیین درصد فضای خالی برای تعیین حد بالای درصد قیر در مخلوط آسفالت متخلخل استفاده می‌شود که در این تحقیق مقدار این پارامتر ۲۰ درصد درنظر گرفته شد.

آزمایش کانتابرو به منظور سنجش میزان اضمحلال نمونه آسفالت متخلخل و همچنین بررسی چسبندگی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. با انجام این آزمایش حد پایین درصد قیر مورد استفاده مشخص می‌شود. نتایج این آزمایش نشان داد که با افزایش درصد وزنی قیر، میزان افت وزنی نمونه‌ها در آزمایش کانتابرو کاهش یافته و درصد افت وزنی در تمام نمونه‌ها در محدوده مناسب و کمتر از ۲۵ درصد می‌باشد.

به منظور سنجش میزان جداشدگی مصالح، آزمایش ریزش قیر نمونه‌های مخلوط آسفالتی متخلخل، انجام شد. نتایج این آزمایش نشان داد که با افزایش میزان قیر به حدود ۵ درصد، هیچگونه جاری شدن قیر اتفاق نمی‌افتد و با افزایش درصد قیر به بیش از ۵ درصد، میزان جاری شدن قیر بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که میزان افت وزنی مجاز در این آزمایش، حداکثر برابر ۰/۳ درصد است.

آزمایش اصلاح شده لاتمن به منظور ارزیابی مقاومت در مقابل رطوبت مخلوط‌های متراکم شده آسفالتی در شرایط اشباع و با سیکل‌های ذوب و یخ آب، انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش، هرسری از نمونه‌ها به دو گروه تقسیم بندی شدند. سپس مقاومت کششی غیر مستقیم[14] گروه اول در شرایط خشک و مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های گروه دوم پس از قرار گرفتن در شرایط اشباع و پس از طی شدن سیکل یخ‌زدگی و ذوب‌شدگی (با غوطه‌وری در آب گرم) بدست آمد. نتایج آزمایش‌های لاتمن انجام شده روی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش میزان قیر تا حدود ٦ درصد، نسبت مقاومت کششی افزایش یافته و بعد از آن با افزایش میزان قیر، کاهش در نسبت مقاومت کششی اتفاق می‌افتد.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مذکور درصد قیر برابر ٦ درصد، درنظر گرفته شد.

جدول ۵. مشخصات قیر مصرفی در انجام پژوهش

آزمایش	روش آزمایش	اندازه	قیر مصرفی
دانسیته (گرم بر سانتیمتر مکعب)	ASTM D7	۱/۰۱–۱/۰۶	۱/۰٤
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد (دهم میلیمتر)	ASTM D5	٦۰–۷۰	٦٦
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	٤۹–٥٦	٥۳
کشش پذیری در ۲۵ درجه سانتیگراد (سانتیمتر)	ASTM D113	حداقل ۱۰۰	۱۰٦

۸- ساخت نمونه‌ها

۸-۱- انتخاب مصالح سنگی

مصالح سنگی درشت و ریز مصرفی در آسفالت متخلخل باید سخت، محکم، با دوام، تمیز و مکعبی شکل و صددرصد شکسته و با خصوصیات کیفی یکنواخت بوده و عاری از هرگونه ذرات رس، لای و پوشش خاکی باشد. مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق از جنس سرباره فولاد مبارکه اصفهان است. جهت مقایسه، در ساخت نمونه‌های شاهد، از فیلر حاصل از مصالح سنگ کوهی تهیه شده از معدن چالدران شهرستان آمل استفاده شده است. این مصالح مطابق جدول (٦) دانه‌بندی شده‌اند (Issue 1- 384) و در شکل (۳)، دانه بندی‌های مختلف مصالح مصرفی در پژوهش، نشان داده شده است.

جدول ٦. میزان مصالح توزیع شده بر اساس دانه‌بندی ارائه شده در نشریه ۳۸٤

اندازه الک (میلیمتر)	میزان در نمونه ۱۱۰۰ گرمی	اندازه الک (میلیمتر)	میزان در نمونه ۱۱۰۰ گرمی
مانده ۱/۲ اینچ	۹۰ گرم	**مانده ۸#**	۱۰۰ گرم
مانده ۳/۸ اینچ	۳۰۰ گرم	**مانده ۲۰۰#**	٥٥ گرم
مانده ٤#	٥۳۰ گرم	**عبوری از الک ۲۰۰#**	۳٥ گرم

شکل ۳. دانه‌بندی‌های مختلف مصالح سنگی استفاده شده

۸-۲- انتخاب دانه‌بندی برای ساخت آسفالت متخلخل

آسفالت متخلخل مخلوطی با دانه‌بندی باز و یا گسسته است که شامل مقدار زیادی از مصالح سنگی شکسته تک‌سایز و درصد فضای خالی زیاد (معمولاً بیش از۲۰٪) می‌باشد. که در این تحقیق از دانه بندی مصالح باز استفاده شده است (Issue1 - 384). با توجه به اینکه میزان کل مصالح سنگی برای ساخت آسفالت متخلخل ۱۱۰۰ گرم می‌باشد. در جدول شماره ٦، میزان مصالح مصرفی این پژوهش در سایزهای مختلف نشان داده شده است.

۸-۳- ساخت نمونه های آسفالتی متخلخل

نمونه‌های آسفالت متخلخل برای انجام آزمایشات، تحت شرایط کاملاً کنترل شده نزدیک به شرایط کارگاهی، ساخته شده است. ساخت نمونه‌های آسفالتی متخلخل شامل سه مرحله حرارت دادن مصالح و قیر، اختلاط سنگ دانه و قیر و

سپس تراکم می‌باشد. به‌دلیل ساختار اسکلتی و غالب بودن قسمت درشت‌دانه نمونه‌های متخلخل، جهت کنترل ارتفاع نمونه در حد متعارف از نمونه های ۱۱۰۰ گرمی (مطابق نشریه ۳۸٤) استفاده شده است. پس از توزین و دانه‌بندی، سنگدانه‌ها به مدت ۲٤ ساعت داخل اون در دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد قرار گرفته و دمای قیر جهت آماده سازی برای اختلاط، ۱۳۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد. همچنین جهت تراکم، از روش کوبشی توسط چکش مارشال استفاده گردید. مطابق نشریه ۳۸٤، تعداد ضربه مجاز در دو سمت نمونه، ۵۰ ضربه است. در شکل شماره ٤ مراحل مختلف اختلاط، کوبش و ساخت نمونه متخلخل نشان داده شده است.

شکل ٤. مراحل ساخت و اختلاط مخلوط آسفالت متخلخل با مواد بازیافتی

۹- آزمایش‌های انجام شده

۹-۱- آزمایش کانتابرو

یکی از مشکلات آسفالت متخلخل جدا شدگی سریع ذرات تشکیل‌دهنده آن می‌باشد، برای سنجش میزان اضمحلال نمونه آسفالتی متخلخل از آزمایش کانتابرو، مطابق با استاندارد ASTM C131 استفاده شده است. همچنین نتیجه حاصل از انجام این آزمایش می‌تواند جهت بررسی چسبندگی دانه‌های سنگی مخلوط مورد استفاده قرار گیرد.

در این آزمایش نمونه‌های مارشال را در درون درام دستگاه آزمایش لس‌آنجلس (بدون گوی فلزی) قرار داده و درصد وزن مضمحل شده (جدا شده) از نمونه اولیه را پس از ۳۰۰ بار چرخش درام دستگاه با سرعت ۳۰ دور در دقیقه بدست می‌آورند. در شکل شماره ۵، عملکرد آزمایش کانتابرو نشان داده شده است. این آزمایش طبق استانداردهای کشور اسپانیا انجام شده و جزییات انجام آزمایش به‌این صورت است که ابتدا نمونه‌های مارشال با دقت ۰/۱ گرم وزن شده (P_1) و سپس در دستگاه لوس‌آنجلس بدون گوی قرار داده می‌شود. دستگاه بر روی ۳۰۰ دور و با سرعت ۳۰-۳۳ دور در هر دقیقه تنظیم و پس از انجام آزمایش، نمونه مجدداً با دقت ۰/۱ گرم وزن می‌گردد (P_2). در نهایت درصد وزنی (P) از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید.

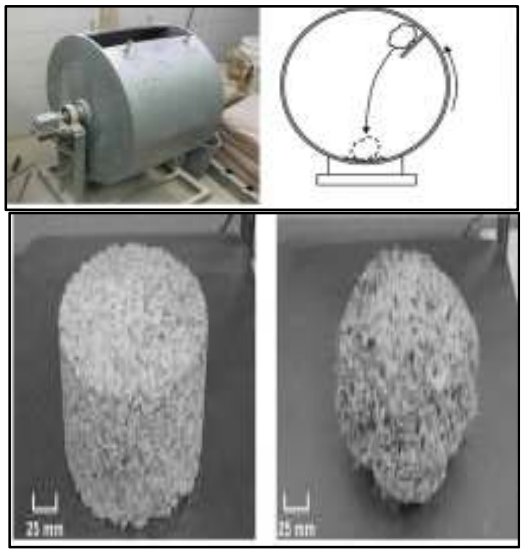
$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \qquad (۱)$$

که در این رابطه:

P: مقدار جداشدگی کانتابرو،

P_1: وزن اولیه نمونه برحسب گرم،

P_2: وزن نمونه پس از انجام آزمایش کانتابرو برحسب گرم می‌باشد.



شکل ۵. تصویر دستگاه و نمونه آزمایش کانتابرو

۹-۲- آزمایش کشش غیر مستقیم

این آزمایش جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی مارشال انجام می‌پذیرد. برای انجام آزمایش مذکور، مطابق استاندارد ASTM D6931، سه نمونه مارشال را در دمای معمولی آزمایشگاه (۲٤ درجه سانتیگراد) در مدت حدوداً ۲٤ ساعت قرار داده و بعد این سه نمونه را با استفاده از دستگاه مارشال اما با فک مخصوص مقاومت کششی غیر مستقیم، می‌شکنند (شکل شماره ٦). درنهایت میانگین سه آزمونه بعنوان مقاومت کششی غیر مستقیم (IDT) معرفی شده و از نتایج این آزمایش می‌توان در آزمایش لاتمن نیز کمک گرفت. مقاومت کششی غیرمستقیم با رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$ITS = \frac{2000p}{\pi tD} \qquad (۲)$$

که در این رابطه:

P: بیشینه بار بر حسب نیوتن،

T: میانگین ارتفاع نمونه برحسب میلی متر،

D: قطر نمونه بر حسب میلی متر می‌باشند.

شکل ٦. فک و دستگاه آزمایش مقاومت کششی خشک و نمونه تخریب شده در این آزمایش

۹-۳- آزمایش لاتمن اصلاح شده

آزمایش لاتمن یکی از متداول‌ترین آزمایش‌ها جهت تعیین حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی به شمار می‌آید. در حال حاضر این آزمایش به شکل گسترده مطابق استاندارد AASHTO T283 مورد استفاده قرار می‌گیرد. حداقل شش نمونه مشابه مخلوط آسفالتی گرم برای هر ترکیب، در دو گروه (خشک و مرطوب) سه تایی (به دلیل تقلیل تاثیر خطای آزمایشگاهی) ساخته می‌شوند. نمونه‌های اشباع شده به مدت ١٦ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد و در ادامه به مدت ۲٤ ساعت در دمای ٦۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و بقیه نمونه‌ها در شرایط خشک نگهداری میشوند. در ادامه همه نمونه‌ها به دمای یکسان آزمایشگاه (۲۵ درجه سانتی‌گراد) رسیده و آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌ها صورت می‌گیرد. در شکل شماره ۷، مراحل آزمایش لاتمن اصلاح شده نشان داده شده است.

شکل ۷. قرار گیری نمونه‌ها در حالت انجماد (دمای ۱۸- درجه سانتیگراد) و در آب گرم ٦۰ درجه سانتیگراد

مقدار TSR از روابط (۳) و (٤) تعیین می‌گردد:

$$TSR = 100\frac{S_{cond}}{S_{uncond}} \qquad (۳)$$

$$S = \frac{2000p}{\pi tD} \qquad (٤)$$

که در روابط فوق:

P: حداکثر مقدار بار عمودی وارده (kN)،

D: قطر نمونه (mm)،

t: ضخامت نمونه (mm)،

S_{cond}: میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته،

S_{uncond}: میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های خشک است.

۱۰- نتایج آزمایش‌های انجام شده

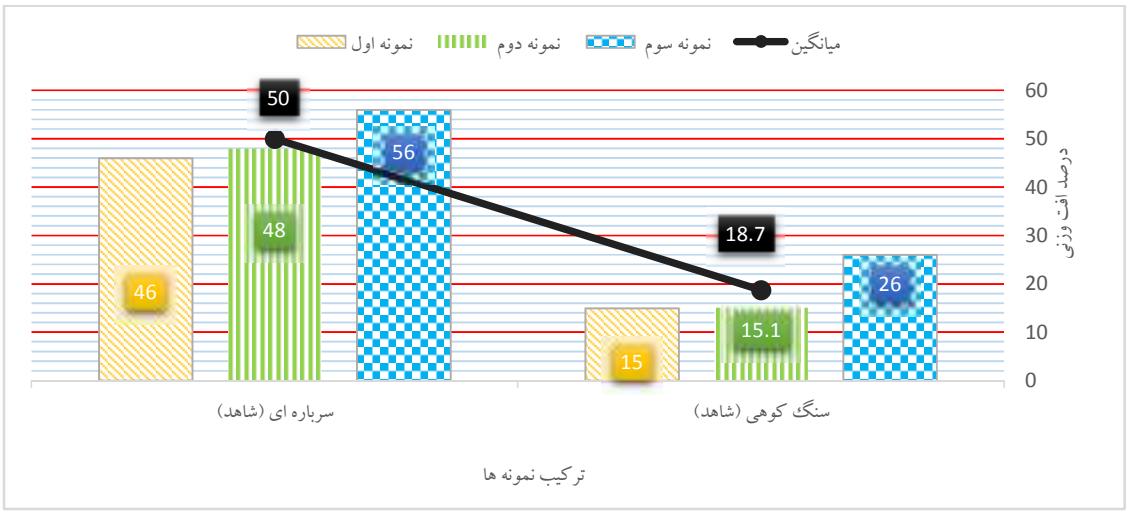
۱۰-۱- نتایج آزمایش مقاومت سایشی (کانتابرو)

برای انجام این آزمایش، علاوه بر نمونه‌های شاهد، سه عدد نمونه ساخته شده از سرباره فولادی در درام دستگاه کانتابرو قرار گرفت. در نهایت نتایج تغییر وزن‌ها بعنوان افت وزنی نمونه بیان شد که میزان آن با نمونه شاهد مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این آزمایش در قالب جدول شماره ۷ و نمودار شکل شماره ۸ در ادامه ارائه شده است.

نتایج انجام آزمایش کانتابرو در این پژوهش نشان داد که افت وزنی نمونه‌های سرباره‌ای بیشتر از نمونه شاهد بوده و این به آن معنا است که کیفیت فیلر سرباره فولادی به مراتب پایین‌تر از فیلر استفاده شده در نمونه شاهد می‌باشد. در نتیجه باعث کاهش مقاومت چسبندگی نمونه‌ها شده و اضمحلال نمونه‌های آسفالت متخلخل را به دنبال دارد.

جدول ۷. نتایج آزمایش کانتابرو نمونه‌های اصلی و نمونه‌های شاهد

نوع مخلوط	کد نمونه	وزن اولیه gr	وزن نهایی gr	سایش%	میانگین سایش%
کاملاً سرباره‌ای	Pc11121	۱۰۹۱	۵۸۵	٤٦	۵۰
	Pc11122	۱۱۷۱	٦۰٤	٤۸	
	Pc11140	۱۱٤۸	۵۰۰	۵٦	
سرباره‌ای با فیلر سنگ کوهی (نمونه‌های شاهد)	Pc11213	۱۱۷۹	۹۹۵	۱۵	۱۸/۷
	Pc11215	۱۱۷۰	۹۸٦	۱۵/۱	
	Pc11227	۱۱٤۱	۸٤۲	۲٦	



شکل ۸. نمودار تغییرات افت وزنی آزمایش کانتابرو در نمونه‌های اصلی و نمونه‌های شاهد

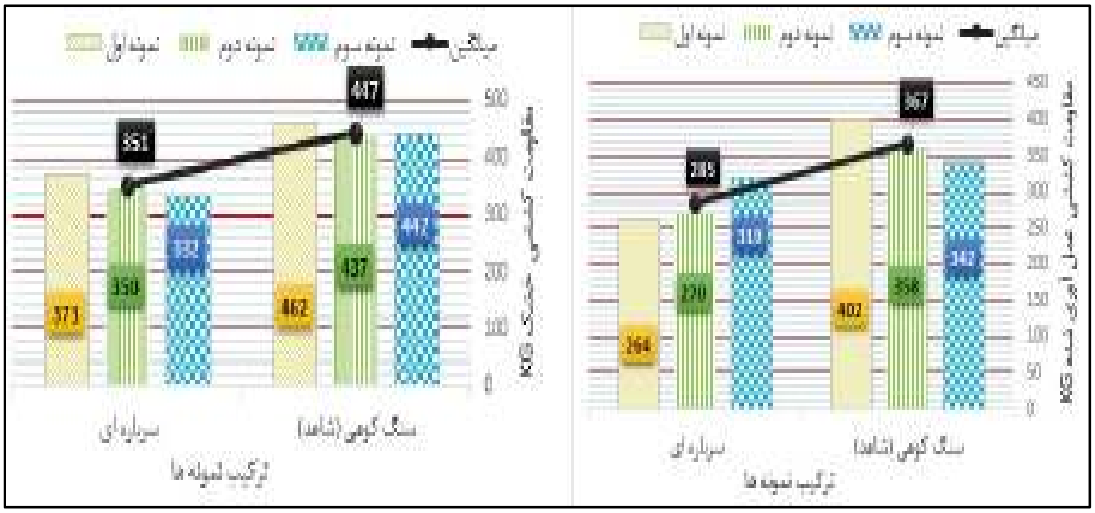
۱۰-۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی خشک و حساسیت رطوبتی TSR

برای انجام آزمایش علاوه بر نمونه های شاهد، شش نمونه از مصالح سنگی سرباره‌ای با استفاده از جک مخصوص بارگذاری مارشال به همراه فک مخصوص مقاومت کششی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در نهایت با نمونه شاهد مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن مطابق جدول شماره (۸) و نمودارهای شکل (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

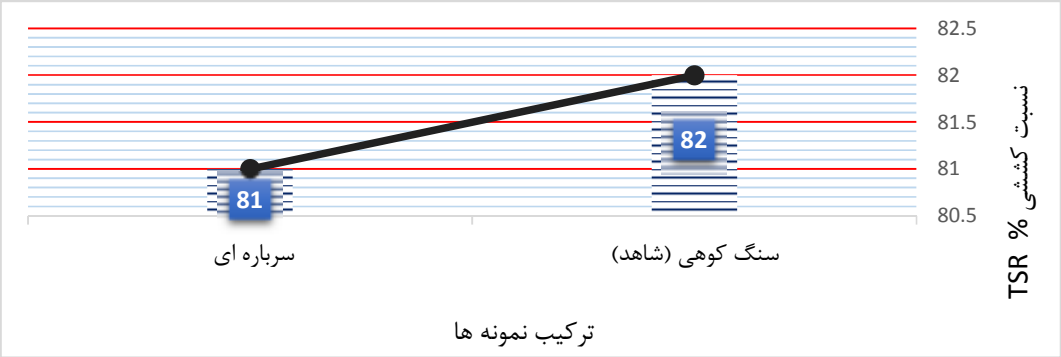
نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نشان داد که مخلوط‌های حاوی فیلر سرباره فولادی مقاومت کمتری نسبت به مخلوط شاهد (حاوی فیلر سنگ کوهی) دارد و در نتیجه نسبت مقاومت کششی نیز کاهش یافته است. هرچند استفاده از فیلر سرباره فولادی باعث کاهش مقاومت کششی مخلوط آسفالت متخلخل می‌شود اما نمودار نشان داده است نسبت مقاومت کششی تغییر چندانی ندارد. این به این معناست که مقاومت این نمونه‌ها در برابر رطوبت، تغییر زیادی نکرده است.

جدول ۸. نتایج آزمایش کششی غیر مستقیم خشک و تعیین نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها

نوع مخلوط	کد نمونه خشک	کششی خشکKg	متوسط مقاومت خشک	کد نمونه اشباع	کششی اشباع Kg	متوسط مقاومت اشباع	TSR%
کاملاً سرباره‌ای	Pc11110	۳۷۳	۳۵۱	Pc11124	۲٦٤	۲۸۵	٪۸۱
	Pc11113	۳۵۰		Pc11125	۲۷۰		
	Pc11126	۳۳۲		Pc11130	۳۱۹		
سرباره‌ای با فیلر سنگ کوهی (نمونه‌های شاهد)	Pc11212	٤٦۲	٤٤۷	Pc11235	٤۰۲	۳٦۷	٪۸۲
	Pc11222	٤۳۷		Pc11230	۳۵۸		
	Pc11232	٤٤۲		Pc11220	۳٤۲		



شکل ۹. نمودار مقاومت کششی خشک و عمل آوری شده در شرایط ذوب و یخ



شکل ۱۰. نمودار نسبت مقاومت کششی TSR نمونه‌ها

۱۱- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش کانتابرو مشخص نمود که میزان افت وزنی مخلوط آسفالتی ساخته شده با سرباره بیش از نمونه شاهد است. این اختلاف نشان می‌دهد که فیلر سرباره‌ای نمی‌تواند تاثیر مثبتی بر عملکرد آسفالت متخلخل داشته باشد. می‌توان از این موضوع نتیجه گرفت که میزان چسبندگی به دلیل خاصیت شیمیایی و فیزیکی فیلر سرباره فولادی، نامناسب بوده و این ذرات بدلیل سیلیکاتی بودن خاصیت چسبندگی ضعیفی دارند. نتایج آزمایش کششی غیر مستقیم خشک مشخص نمود که نمونه حاوی فیلر سرباره فولادی، مقاومت کمتری نسبت به نمونه شاهد (ساخته شده با فیلر سنگ کوهی) دارد. دلیل آن هم کاهش میزان چسبندگی بین ذرات فیلر و سنگدانه‌های مخلوط ساخته شده از سرباره فولاد می-باشد. با وجود آنکه مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک حاوی فیلر سرباره به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد کمتر از نمونه‌های شاهد می‌باشند، اما در نسبت مقاومت کششی، اختلاف زیادی بین نمونه‌های حاوی سرباره و شاهد، مشاهده نمی‌گردد. این مطلب نشان می‌دهد که حساسیت رطوبتی در مخلوط سرباره فولادی فرق چندانی با مخلوط سنگ کوهی ندارد. با توجه به نتایج کسب شده از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش و همچنین مطالعات صورت گرفته محققین گذشته که نشان از اثر مثبت سنگدانه‌های سرباره فولادی بر آسفالت دارند، پیشنهاد می‌شود برای ساخت مخلوط‌های آسفالت متخلخل از مصالح سرباره فولادی استفاده گردد. اما جنس فیلر تغییر نماید. جنس فیلر می‌تواند از جنس سنگ کوهی باشد یا از مواد پزولانی که به مراتب کیفیت بهتری دارند، استفاده شود. این موضع علاوه بر افزایش دوام و بهبود عملکرد آسفالت متخلخل، باعث حفظ محیط زیست و کاهش استفاده از منابع طبیعی می‌گردد.

۱۲- سپاسگزاری

محققین این پژوهش از شرکت ریوا تحقیق اصفهان بدلیل در اختیار قرار دادن سرباره فولادی کارخانه فولاد مبارکه سپاهان و همچنین از آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه شمال جهت مساعدت در انجام آزمایشات صورت گرفته، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۱۳- پی‌نوشت‌ها

1- World Health Organization (WHO)
2- Hot Mix Asphalt (HMA)
3- Permanent Deformation
4- Porous Asphalt Mixture
5- Steel Slag
6- Cantabro Test
7- Modified Lottman Test
8- Stripping
9- Rutting
10- Polished Stone Value (PSV)
11- Open Gradation
12- Penetration Grade
13- Drain Down
14- Indirect Tensile Strength (IDT)

۱٤-مراجع

– پیروزبخت، ن.(۱۳۷٤)، "نگرشی بر وضعیت قراضه‌های آهنی و استاندارد آنها در ایران"، سمینار سالیانه جامعه ریخته گران ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ایران.

– زارعی، پ. ملکی، م. و الیاسی، م. (۱۳۹٤)، " بررسی خصوصیات آسفالت گرم در نوع فیلر استفاده شده"، اولین کنگره علمی پژوهشی افق‌های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران، ۹ تا ۱۰ مهر ۱۳۹٤، انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین.

– سوداگری، ج.، حسنی، الف. و معافی مدنی، ر. (۱۳۸٤)، "تعیین مقاومت لغزشی رویه‌های آسفالتی متخلخل، استخوان بندی سنگدانه‌ای و بتن آسفالتی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل ، دوره دوم، شماره٤.

– طباطبایی، ن. و اسماعیلی، الف. (۱۳۸۲)، "ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از سرباره کلوخه‌ای"، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

– فخری، م.، احمدی، الف.، علی نسب، ر. و کریمی گوغری، م. (۱۳۹٦)، "بررسی آزمایشگاهی رفتار فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با مصالح سنگی سرباره‌ای"، پژوهشنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۲، ص. ۲۲۷–۲۳۸.

– منصوریان، الف.، جایرونـد، ک. و فخری، م. (۱۳۹۵)، "بررسی عملکرد میدانی آسفالت متخلخل حاوی الیاف سلولزی و قیر پلیمری"، فصلنامه جاده، دوره ۲٤، شماره ۸٦ ص. ٦۹–۸۰.

– نشریه ۳۸٤-۱، (۱۳۹٤)، "دستورالعمل طرح، اجرا و نگهداری آسفالت متخلخل"، وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

- Ahmedzade, P. & Sengoz, B. (2008), "Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete", Journal of Hazardous Materials, No. 165, pp. 300–305.

- Bonnot, J. (1997), "French Experiences of Porous Asphalt", Proceedings of European conference on porous asphalt

- Blast Furnace Slag-User Guideline-Asphalt Concrete,www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/bfs2.htm.

- Cooley, L., Brown, E., & Watson, D. (2013), "Evaluation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Cellulose Fibers", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1723, pp.19-25.

- Esmaeili Kalalagh, A., Marandi, S.M. & Safapour, P. (2005), "Technical Effects of Air Cooled Blast Furnace Slag on Asphalt Mixtures", Transportation Research Journal, No. 2, pp. 199–206.

- Hassan, H.F., & Al-Jabri, K. (2010), "Laboratory Evaluation of Hot-Mix Asphalt Concrete Containing Copper Slag Aggregate", Journal of materials in civil engineering, 23(6), pp.879-885.

- Isenring, T. & Kofter, H. (1990), "Experience with Porous Asphalt in Switzerland", TRR, No. 1265, pp. 41-53.

- Lee, A.R. (1974), "Blast Furnace and Steel Slag", Production properties and uses, Edward Arnold Ltd, London.

- Litzka, J. (2002), "Austrian Experiences with Winter Maintenance on Porous Asphalt", Proceedings of the 9th international conference on asphalt pavements, Copenhagen, Denmark.

- Mallick, R., Kandhal, P., Cooley, L.A., & Watson, D. (2001), "Design Construction and Performance of New-Generation Open-Graded Friction Courses", Asphalt Paving Technology, 69, pp.391-423.

- Pasetto, M. & Baldo, N. (2011), "Mix Design and Performance Analysis of Asphalt Concretes with Electric Arc Furnace Slag", Construction and Building Materials No. 25, pp. 3458–3468.

- Perez-Jimenez, F.E., & Gordillo, J. (1990), “Optimization of Porous Mixes Through the Use of Special Binders", Transportation Research Record 1265, TRB, National Research Council, Washington D. C.

- Shen, D.H, Wu, C.M. & Du, J.C. (2009), “Laboratory Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag for Substitution of Aggregate in Porous Asphalt Mixture”, Construction and Building Materials, 23(1), pp.453–461.

- Solomon, C. (1991), “Slag-Iron and Steel”, Bu Mines Mineral Yearbook, 1.

- Word Health Organization, "Road Safety Note Accident", A Brochure For World Health Day, 7 April.

- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. & Chen, Y. (2015), “Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures”, Building and Environment, Vol. 42, Issue 7, pp.2580-25