

اثر رسوب گذاری کلسیم کربنات توسط عامل باکتریایی بر پوشش قیری و عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی سرد

حامد عطاران دوم، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ابوالفضل محمدزاده مقدم (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محسن کرابی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سمانه عطاران دوم، دانش آموخته دوره دکتری، گرایش فیزیولوژی گیاهی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

Email: ab-moghadam@um.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۴

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۴

چکیده

راهکارهای نوین جهت بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی سرد و جلوگیری از خرابی‌های ناشی از نفوذ آب، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش از رسوب گذاری کلسیم کربنات بر روی سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی توسط عامل باکتریایی، با ایجاد سطحی از رسوب آهکی که ماده ای آب‌گریز است، برای بهبود پوشش قیری و همچنین بهبود حساسیت رطوبتی استفاده شد. برای این منظور ابتدا عمل آوری بیولوژیکی بر روی مصالح سنگی مانده بر روی الک ۵۰ به مدت ۳۱ روز قبل از ساخت مخلوط آسفالتی سرد انجام شد. برای مشخص شدن تشکیل رسوب کلسیم کربنات بر روی سطح مصالح سنگی دو آزمایش پراش اشعه ایکس و طیف سنج مادون قرمز فوریه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این دو آزمایش تشکیل رسوب کلسیم کربنات بر سطوح سنگدانه‌ها را نشان داد. پس از عمل آوری بیولوژیکی مصالح سنگی، دو نوع مخلوط آسفالتی سرد با سنگدانه معمولی و با سنگدانه عمل آوری شده تهیه شد. برای بررسی اثر بهبود رسوب گذاری باکتریایی بر پوشش قیری و عریان شدگی دو مخلوط، آزمایش آب جوشان انجام شد. سپس با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، ارزیابی کمی از وضعیت پوشش قیری در سطح مصالح سنگی صورت گرفت. در انتها نیز آزمایش اولتراسونیک بر روی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده به منظور بررسی سختی و مدول دینامیکی انجام شد. جهت ارزیابی اثر معنی دار عامل باکتریایی بر ویژگی‌های مذکور، آزمون t در سطح اطمینان ۹۵ درصد صورت گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط آسفالتی سرد با سنگدانه عمل آوری شده، پوشش قیری بهتر و عریان شدگی کمتر در برابر رطوبت داشته و مدول دینامیکی بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی سرد با سنگدانه معمولی دارد.

واژه های کلیدی: مخلوط آسفالتی سرد، کلسیم کربنات، باکتری، رسوب گذاری بیولوژیکی، عریان شدگی

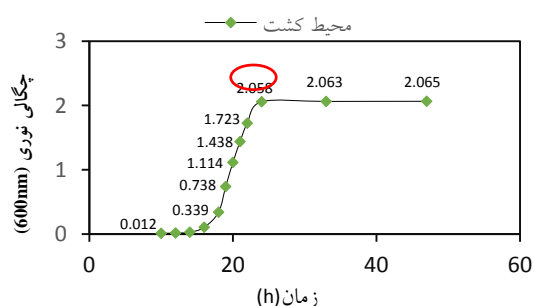
۱. مقدمه

[Moraes, Velasquez and Bahia, 2011. De, 2005]

اغلب، کاهش چسبندگی در مخلوط های آسفالتی توسط خرابی رطوبتی اتفاق می افتد [Horgnies et al. 2011]. هرچند چسبندگی قیر با سطح مصالح سنگی بدون حضور آب مورد نظر است. [Valdés, et al. 2014] از طرفی مصالح سنگی که بیش از ۹۰ درصد وزن مخلوط آسفالتی را شامل می شود، از عناصر مهم و اساسی در کیفیت ساختار مخلوط آسفالتی است بطوریکه خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مصالح سنگی به طور مستقیم در خواص مخلوط آسفالتی تاثیر دارد [Behbahani, Ayazi and Shojaei, 2015]. بنابراین ارائه روشی که به واسطه آن بتوان خواص مصالح سنگی و چسبندگی بین قیر و سنگدانه بهبود یابد، بسیار ارزشمند است. اخیرا رسوب بیولوژیکی کلسیم کربنات توسط عامل باکتریایی به عنوان یک روش دوست دار طبیعت برای بهبود دوام مصالح سنگی به دلیل خاصیت آب گریزی که بر سطح آن ها ایجاد می کند استفاده شده است. نتایج نشان داد که رسوب بیولوژیکی باعث پر شدن خلل و فرج سنگدانه ها شده، بافت سطح سنگدانه ها را یکنواخت تر می کند و جذب آب سنگدانه ها را کاهش می دهد [García-González et al. 2017. Wang et al. 2017]. در مطالعه دیگری از روش رسوب گذاری بیولوژیکی کلسیم کربنات بر روی سطوح بتنی به منظور افزایش چسبندگی بین سطح ملات بتنی با مواد ترمیمی استفاده شد. نتایج نشان داد که رسوب بیولوژیکی کلسیم کربنات مقاومت برشی بین دو سطح را افزایش می دهد [Snoeck et al. 2018]. پن و همکاران از روش رسوب گذاری بیولوژیکی برای بهبود اتصال بین قیر و سطح بتن باز یافتی استفاده کردند. نتایج نشان داد که چسبندگی بین قیر و سطح بتنی به صورت چشمگیری افزایش یافته است [Pan, Li, Hong et al. 2015]. در این روش رسوب کلسیم کربنات در سطح سلول باکتری با تجزیه اوره و طی یک سری واکنش های شیمیایی در شرایط محیط اتفاق می افتد [Wu, Johannesson and Geiker, 2012]. گروه باکتریایی باسیلوس از بیشترین

رطوبت، چرخه ذوب و یخبندان، ترافیک سنگین و ترکیب این موارد از علل اصلی تضعیف و تخریب روسازی راه ها است [Ferrotti, Pasquini and Canestrari, 2014]. در فعالیتهای تعمیر و نگهداری راه ها زمانی مرمت صورت می گیرد که بیشترین بهبود با کمترین هزینه را در برداشته باشد [Peshkin, Hoerner and Zimmerman, 2004] و خرابی هایی مثل چاله ها و گودی ها بایستی به محض تشکیل در کوتاه ترین زمان ممکن تعمیر شوند [Ferrotti, Pasquini and Canestrari, 2014]. آسفالت سرد یک مخلوط ویسکو-الاستو-پلاستیک^۱ است که می تواند برای روسازی در دمای محیط ساخته شود. مزیت های مخلوط آسفالتی سرد در مقایسه با دیگر مخلوط های آسفالتی، شامل: نسبت هزینه به اثربخشی کمتر [Gómez-Meijide, Pérez, Airey et al. 2015]، فواید محیط زیستی [Al-Busaltan et al. 2012. Gómez-Meijide and Pérez, 2014]، ذخیره انرژی به دلیل تولید در دمای محیط [Frazer, 2008]، سلامت و ایمنی است. اما این مخلوط ها عمر سرویس دهی کمتر، ویژگی های مکانیکی ضعیف تر و تخلخل بالاتری نسبت به مخلوط های آسفالتی گرم دارند [Needham, 1996. Read and Whiteoak, 2003. Oruc, Celik and Akpinar, 2007. Thanaya, Zoorob and Forth, 2009]. یکی از مشکلات عمده مخلوط های آسفالتی سرد حساسیت رطوبتی آن ها است که می تواند باعث از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سطح سنگدانه شود. کاهش مقاومت و ایجاد خرابی در مخلوط های آسفالتی به دو صورت رخ می دهد: ۱- کاهش پیوستگی^۲ و ۲- کاهش چسبندگی^۳. کاهش پیوستگی در اثر گسیختگی مولکول های قیر به وجود می آید اما کاهش چسبندگی در اثر از بین رفتن اتصال بین قیر و سطح سنگدانه اتفاق می افتد. چسبندگی به عنوان فرآیندی برای اتصال ذرات با سطوح غیر هم فاز یا تمایل مولکول های غیر مشابه برای پیوستن به یکدیگر تعریف می شود

از آن با نسبت وزن به حجم ۲۰ درصد محلول اوره فیلتر شده به محیط اضافه شد. سپس کشت خطی باکتری انجام شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و بعد از آن در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. در ادامه محیط کشت مایع مطابق روش فیشر متشکل از ۱۰ میلی لیتر محلول اوره ۲۰ درصد، ۱/۳ گرم نوترینت برات^۷ و ۹۰ میلی لیتر آب مقطر تشکیل شد [Stocks-Fischer, Galinat and Bang, 1999]. پس از آن باکتری از محیط جامد به محیط کشت مایع تلقیح شد. ارلن حاوی باکتری در شیکر-انکوباتور در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و چرخش ۱۲۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. یکی از روش‌های تشخیص رشد باکتری در زمان اندازه‌گیری کدورت مایع سوسپانسیون با اندازه‌گیری جذب با چگالی نوری^۸ (OD) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر است. بنابراین در این پژوهش رشد باکتری در مایع سوسپانسیون با اندازه‌گیری جذب با چگالی نوری در طول موج ۶۰۰ nm (OD₆₀₀) به مدت سه روز و هر دو ساعت توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. نتیجه این عمل، در شکل (۱) آورده شده است. این شکل، نمودار رشد باکتری باسیلوس پاستوری را نشان می‌دهد. پس از مشخص شدن نمودار رشد باکتری، به منظور عمل رسوبدهی بر روی سنگدانه محلول باکتری پس از ۲۴ ساعت (ابتدای فاز سکون) با OD = ۲ از شیکر خارج شد.



شکل ۱. نمودار رشد باکتری Sporosarcina pasteurii با

اندازه‌گیری چگالی نوری

۳-۳ دانه‌بندی، مواد و مصالح

در این پژوهش از مصالح سنگی رودخانه‌ای شکسته که از کارخانه آسفالت مجیدی مشهد تهیه شد، استفاده گردید. جتس

گونه‌های باکتریایی کلسیت ساز در نظر گرفته شده است [De Muynck, De Belie and Verstraete, 2010, Wong, 2015]. این گروه از باکتری‌ها به دلیل اینکه به وفور در طبیعت یافت می‌شوند، قابلیت این را دارند که مقدار قابل توجهی کلسیت را در مدت زمان کوتاهی تولید کنند که عمدتاً به شرایط محیطی بستگی دارد [Rivadeneira et al. 1994]. در این پژوهش نیز از باکتری باسیلوس پاستوری^۹ به مدت سه روز جهت ترسیب کلسیم کربنات بر روی سنگدانه‌های عبوری از الک ۵۰ استفاده شد و سپس سنگدانه‌ها به مدت ۲۸ روز به منظور تثبیت رسوب بر سطوح سنگدانه در دمای محیط نگهداری شد. سپس تشکیل رسوب کلسیم کربنات بر روی سطح مصالح سنگی با دو آزمایش پراش اشعه ایکس و طیف‌سنج مادون قرمز فوریه مورد بررسی قرار گرفت. بعد از آن مخلوط آسفالتی سرد با درصد رطوبت بهینه ۳ درصد و قیر باقیمانده بهینه ۵ درصد به صورت مخلوط متراکم نشده برای آزمایش آب جوشان تهیه شد و نتیجه حاصل با استفاده از پردازش تصویر با نرم افزار متلب^{۱۰} کمی سازی شد. پس از آن آزمایش اولتراسونیک برای بررسی ارزیابی سختی و مدول دینامیکی نمونه شاهد و نمونه عمل‌آوری شده با باکتری بررسی شد. در انتها آزمون t با استفاده از نرم افزار مینی‌تب^{۱۱} برای بررسی معناداری اثر باکتری بر ویژگی‌های مذکور در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۳ محیط کشت و پرورش باکتری

در پژوهش حاضر از باکتری Sporosarcina pasteurii PTCC 1645 (bacillus pasteurii) جهت فرایند رسوب‌گذاری بیولوژیکی بر روی سنگدانه استفاده شده است. باکتری از مرکز کلکسیون فارچها و باکتریهای صنعتی ایران تهیه گردید. طبق دستور العمل شرکت محیط جامد متشکل از ۲۸ g/L نوترینت آگار، ۱۰ mg/L منیزیم سولفات (MnSO₄×2H₂O) و آب مقطر در ارلن تهیه شد و در اتوکلاو در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۰ بار به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد و پس

انجام شد. طبق روش وانگ محلول حاوی باکتری همراه با محلول تغذیه اوره-کلسیم کلراید مطابق شکل (۲) هر هشت ساعت به مدت سه روز اسپری شد [Wang et al. 2017]. طبق نتیجه کاهانی و همکاران اثر رسوب باکتریایی در زمان ۲۸ روز در تثبیت خاک بیشترین مقاومت را داشته است و بعد از آن مقاومت فشاری تک محوره با شیب ملایمی ثابت می ماند [Kahani et al. 2012]. بنابراین در این تحقیق رسوب تشکیل شده به مدت ۲۸ روز پس از عمل آوری سه روزه روی سنگدانه برای تثبیت و ایجاد چسبندگی بر روی سنگدانه‌ها باقی ماند. شکل (۳) رسوب تشکیل شده بر روی مصالح سنگی را نشان می‌دهد.

مصالح آهکی و عمدتاً دولومیتی است. دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق جدول (۱) بر اساس دانه بندی پیوسته مخلوط آسفالتی نشریه ۲۳۴ انتخاب گردید. قیر مورد استفاده، قیر کاتیونی دیر شکن (CSS-1h) با قیر باقیمانده ۶۵ درصد، تهیه شده از شرکت توسعه ساختار محیط ایران است. جدول (۲) مشخصات فیزیکی قیر امولسیون را نشان می‌دهد.

۳-۴ عمل آوری رسوب زیستی بر روی سنگدانه‌ها

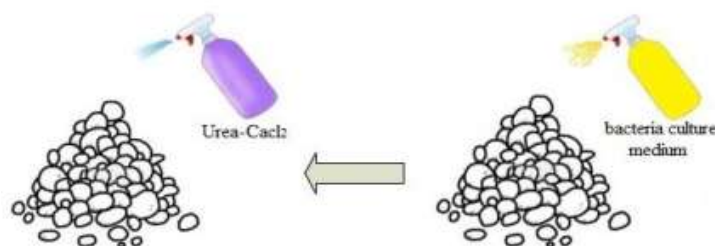
تا کنون روش‌های متنوعی برای عمل آوری باکتریایی بر روی سطح سنگدانه‌ها ارائه شده است [Pan et al. 2015, García-González et al. 2017., Wang et al. 2017]. مصالح سنگی عبوری از الک ۵۰ ریزدانه هستند و عملیات رسوب‌دهی باعث کلوخه‌شدن آن‌ها می‌شود، بنابراین در این پژوهش عمل آوری بر روی مصالح سنگی مانده روی الک ۵۰

جدول ۱. دانه‌بندی پیوسته مخلوط آسفالتی سرد

اندازه الک	درصد وزنی رده‌شده از هر الک
۱۲/۵ میلی‌متر	۱۰۰
۹/۵ میلی‌متر	۹۵
۴/۷۵ میلی‌متر	۷۵
۲/۳۶ میلی‌متر	۴۹/۵
۰/۳ میلی‌متر	۱۵
۰/۰۷۵ میلی‌متر	۶

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر امولسیونی CSS-1h

آزمایش	استاندارد	نتیجه
تست الک %	ASTM D6933	الک مش ۲۰
ویسکوزیته	ASTM D244	۲۲.۵۹
درصد قیر %	ASTM D6997	۶۴.۱
پایداری ۲۴ ساعت %	ASTM D6930	۰.۳



شکل ۲. شیوه عمل آوری سنگدانه



ب- مصالح سنگی بعد از عمل آوری



شکل ۳. الف- مصالح سنگی قبل از عمل آوری

[Labbi, Bodiang and Ledion, 1984, Bottcher and Gehlken, 1997, Carbó et al. 1997, Reig, Adelantado and Moreno, 2002]. حدود ۹۵ درصد کاربرد دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز کیفی است که بر اساس محل بیشینه صورت می‌گیرد. طیف مادون قرمز در ناحیه عدد موج 400 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} اسکن شد. آزمایش پراش اشعه ایکس نیز برای تشخیص رسوب تشکیل شده بر سطوح مصالح سنگی، قبل و بعد از عمل آوری انجام شد. در این آزمایش هرچه قلّه پراش نرم‌تر باشد ساختار ماده بی‌شکل‌تر و هرچه قلّه پراش تیزتر باشد ساختار ماده کریستالی‌تر و مقاوم‌تر است. همچنین هرچه مقدار یک فاز کریستالی بیشتر باشد قلّه بزرگتری بوجود می‌آید [Yang and Yue, 2000]. این آزمایش توسط دستگاه Explorer GNR X-ray Diffractometer با تشعشع شناسگر دکتریس^{۱۱} (نوار سریع) $\text{Cu-K}\alpha$ در 40 kV و 30 mA انجام شد. اسکن در بازه‌های زمانی ثابت صورت گرفت. بازه زمانی و طول گام به ترتیب 1s و 0.1° بودند. گام اسکن برای زاویه پراکندگی (2 θ) بین 20° تا 80° تنظیم شد.

۳-۵ آزمایش XRD^9 و FT-IR^{10}

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای دو آزمایش XRD (پراش اشعه ایکس) و FT-IR (طیف‌سنجی مادون قرمز) تعدادی از مصالح سنگی درشت دانه انتخاب شد. با استفاده از سمباده، یک لایه از سطح سنگدانه‌ها جدا شد و سپس روی همان مصالح عمل آوری بیولوژیکی انجام شد. بعد از عمل آوری سنگدانه‌ها با باکتری، سطح سنگدانه‌ها با آب مقطر شسته شد تا مواد اضافی از سطح سنگدانه زدوده شود و مصالح در آن قرار داده شد تا خشک شود سپس سطح نازکی از سطح سنگدانه‌ها مجدداً با سمباده برداشته شد و دو پودر بدست آمده که از سطوح مصالح سنگی قبل و بعد از عمل آوری برای آزمایشات مذکور آماده گردید. آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز برای تشخیص تغییرات شیمیایی بر روی سطح مصالح سنگی، قبل و بعد از عمل آوری انجام شد. این آزمایش بر اساس جذب و شدت عبور تابش مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی صورت می‌گیرد. آزمایش طیف سنج فوریه ابزار مفید در شناسایی ترکیبات معدنی و گروه‌های عاملی آن‌ها است [Labbe, Bediang]

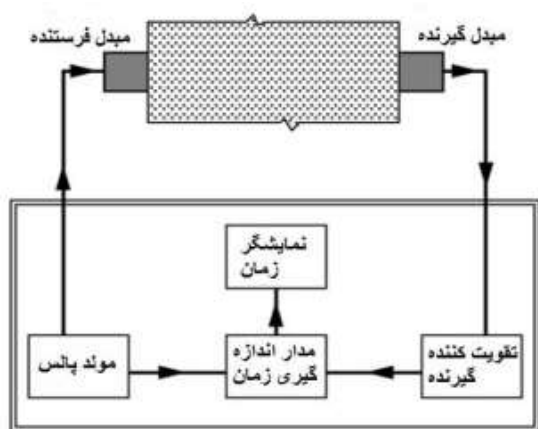
$$CR = \frac{Coating_{AfterBoiling}}{Coating_{BeforeBoiling}} \times 100\%$$

۷-۳ آزمایش سرعت موج اولتراسونیک^{۱۵} (UPV)

دستگاه اولتراسونیک انرژی صوتی با فرکانس بالا تولید می‌کند که از آن می‌توان برای تعیین مشخصات عملکردی مختلف استفاده کرد. این آزمایش برای بررسی یکنواختی و کیفیت نمونه که نشان دهنده حضور حفرات و ترک‌ها است و برای ارزیابی اثر عوامل مختلف بر ترمیم ترک‌ها در بتن استفاده می‌شود. سازگاری این روش بر مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی و آزمایش شده است و نتایج آن قابل قبول است [Ramanathan, Stallings and Newsome, 1991, Tigdemir, Kalyoncuoglu and Kalyoncuoglu, 2004]. از این آزمایش می‌توان مدول دینامیکی و سختی نمونه را تخمین زد. در این تحقیق از دستگاه اولتراسونیک که شامل تولید کننده موج، یک جفت مبدل (فرستنده و گیرنده)، تقویت کننده، مدار اندازه گیری زمان، نمایشگر زمان و کابل‌ها است برای بررسی مدول دینامیکی نمونه های آسفالتی با سنگدانه ساده (CMA) و سنگدانه عمل آوری شده با باکتری (B-CMA)، استفاده شد. ابتدا زمان به وسیله میله فلزی مخصوص بر روی $26 \mu s$ کالیبره شد، سپس مطابق شکل (۴) با اتصال مبدل‌ها به سطوح نمونه در دو طرف، زمان انتقال موج اندازه‌گیری شد. دقت آزمایش به نحوه اتصال مبدل‌ها و فاصله مرکز به مرکز فرستنده و گیرنده بستگی دارد. به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری از مقداری گریس بر فصل مشترک مبدل و نمونه استفاده شد. اتصال و فشار مبدل‌ها بر سطوح نمونه باید به مقدار کافی باشد تا زمان انتقال موج به مقدار ثابتی برسد. کمیت اندازه‌گیری در این آزمایش زمان انتقال موج است که بر اساس آن مطابق معادله (۲) سرعت موج در فرکانس 54 kHz اندازه‌گیری می‌شود. V سرعت موج بر حسب m/s ، L طول نمونه بر حسب m و T زمان انتقال موج بر حسب ثانیه است. با داشتن سرعت موج طبق معادله (۳) مدول دینامیکی نمونه بر حسب پاسکال (MPa) محاسبه

۶-۳ آزمایش آب‌جوشان اصلاح‌شده با پردازش تصویر

آزمایش آب جوشان یک آزمایش کیفی بر روی مخلوط آسفالتی متراکم نشده است که نشانگر دوام و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی است [Ling, Hanz and Bahia, 2016]. دو کیلوگرم آسفالت سرد متراکم نشده مطابق طرح اختلاط تهیه شد. پس از گذشت ۷ روز از تهیه دو مخلوط آسفالتی سرد متراکم نشده CMA^{12} و $B-CMA^{13}$ پوشش قیری نمونه‌ها قبل از آزمایش آب جوشان بر اساس توصیه نشریه MS-19 انستیتو آسفالت بررسی گردید [Manual, 1992]. آزمایش آب جوشان بر اساس استاندارد ASTM D3625 و پوشش قیری بر روی مخلوط آسفالتی سرد، قبل و بعد از آزمایش آب جوشان بررسی شد [Ling et al. 2013, Ling, Hanz and Bahia, 2016]. به منظور بررسی کمی پوشش قیری به جای بررسی چشمی، با استفاده از پردازش تصویر، مقدار پوشش قیری بر روی مخلوط‌ها بدست آمد. حدود ۵۰۰ گرم از مخلوط آسفالتی متراکم نشده مطابق استاندارد داخل بشر شیشه‌ای ریخته شد و حدود $2/5$ سانتی‌متر آب بالای آن قرار داده شد و به مدت ۱۵ دقیقه جوشانده شد. سپس قیر بوجود آمده بر روی سطح آب به منظور جلوگیری از چسبندگی دوباره بر روی سطح سنگدانه‌ها از سطح آب استخراج گردید و مخلوط‌ها بر روی پارچه سفید و تمیز پخش شد و به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار گرفت تا آب مخلوط خشک شود. سپس از مصالح عکس برداری صورت گرفت و مطابق پژوهش چنگ لینگ و همکاران [Ling, Hanz and Bahia, 2016] با استفاده از نرم افزار متلب، عکس‌ها به صورت باینری (سیاه و سفید) تغییر یافت و پردازش تصویر انجام گردید. سپس تعداد پیکسل‌های سفید و سیاه اندازه‌گیری شد. پیکسل‌های سیاه نشانگر پوشش قیری و پیکسل‌های سفید نشانگر عریان‌شدگی مصالح هستند. ضریب پوشش قیری^{۱۴} (CR) مطابق معادله (۱) به عنوان یک شاخص برای بررسی مقدار عریان‌شدگی پس از آزمایش آب جوشان بررسی گردید.



شکل ۴. روش انجام آزمایش اولتراسونیک برای بدست آوردن زمان موج عبوری از مخلوط آسفالتی سرد

۳-۸ مشخصات فیزیکی مخلوط ها

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی سرد بر اساس نشریه MS-19 انستیتو آسفالت انجام شد. پس از انجام آزمایشات پایداری و روانی و رسم نمودارهای مربوط به طرح اختلاط درصد آب بهینه ۳ درصد و قیر باقیمانده بهینه ۵ درصد برای تهیه مخلوط آسفالتی سرد استفاده گردید. جهت بررسی اثر باکتری بر پارامترهای فیزیکی مخلوط آسفالتی ابتدا وزن مخصوص بیشینه متراکم نشده دو مخلوط اندازه گیری شد. پس از اینکه مخلوط های آسفالتی توسط دستگاه ژیراتوری مطابق طرح اختلاط با سرعت ۳۰ دور در دقیقه تهیه شد وزن خشک مخلوط ها (W_a) و وزن مخصوص توده ای (G_{mb}) دو مخلوط اندازه گیری شد. شکل (۵) تغییرات مشخصات فیزیکی دو مخلوط CMA و B-CMA را نسبت به یکدیگر نشان می دهد. بر اساس شکل (۵-الف) وزن مخلوط B-CMA به مقدار ۷/۰۶ گرم نسبت به وزن مخلوط CMA بیشتر شده است که علت آن را می توان تشکیل رسوب کلسیم کربنات بر سطح مصالح سنگی دانست. مطابق شکل (۵-ب) وزن مخصوص بیشینه متراکم نشده (G_{mm}) مخلوط B-CMA به مقدار ۰/۵۴ درصد و مطابق شکل (۵-ج) وزن مخصوص توده ای نیز به مقدار ۱/۰۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. علت این امر را می توان افزایش وزن سنگدانه ها دانست که با

می گردد. وزن مخصوص نمونه آسفالتی (ρ) بر حسب kg/m^3 است. ضریب پواسن دینامیکی (μ) مخلوط آسفالتی سرد ۰/۳۵ فرض شد.

$$V = L / T \quad \text{معادله ۲}$$

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \text{معادله ۳}$$

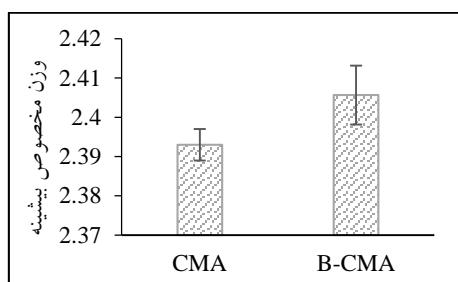
۲ نتایج و بحث

۳-۱ تغییرات وزن مصالح سنگی

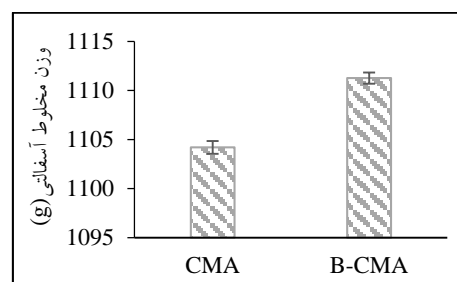
مصالح سنگی عمل آوری شده مانده روی الک ۵۰ با آب شستشو داده شد تا باقیمانده ذرات غیر چسبنده از سطح آن ها زدوده شود سپس در آن و دمای ۷۵ درجه قرار داده شد تا زمانی که وزن نمونه ثابت گردید. پس از آن مصالح سنگی خشک شده توزین شد. طبقه بندی ارائه شده از جدول ۹-۱ آیین نامه روسازی آسفالت های ایران (نشریه ۲۳۴)، مقدار وزن مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۵۰ برابر با ۹۱۸/۷۵ گرم است که بعد از عمل آوری بر روی سه نمونه مصالح سنگی تغییرات وزن مطابق جدول (۳) آورده شده است که می توان به صورت میانگین مقدار رسوب ایجاد شده در مخلوط مصالح سنگی را حدود ۷/۶۵ گرم دانست. افزایش وزن در نمونه ها می تواند به دلیل ایجاد رسوب کلسیم کربنات در مصالح سنگی و تخمینی برای رسوب کلسیم کربنات ایجاد شده در سطح آن ها باشد [García-González et al. 2017, Wang et al. 2017]. هرچه زبری سطوح سنگدانه بیشتر باشد میزان رسوب تشکیل شده بر روی سطح مصالح سنگی به دلیل جلوگیری از سرخوردن بیشتر می شود. البته غلظت یون کلسیم نیز بر مقدار رسوب تشکیل شده تاثیر دارد که در این پژوهش نزدیک به غلظت بهینه اوره و کلسیم بر طبق تحقیقات پیشین استفاده شده است [Chunxiang et al. 2009, Okwadha and Li, 2016]. [2010, Otlewska and Gutarowska, 2016]

جدول ۳. تغییرات وزن مصالح سنگی بعد از عمل آوری بیولوژیکی

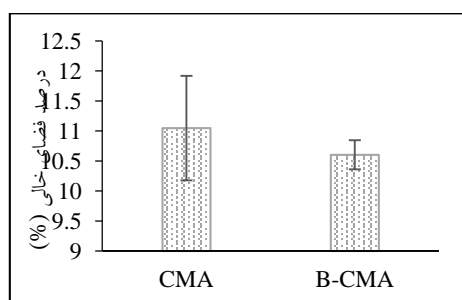
نمونه	وزن مصالح سنگی قبل از عمل آوری (gr)	وزن مصالح سنگی بعد از عمل آوری (gr)	وزن رسوب تشکیل شده (gr)
۱	۹۱۸/۷۵	۹۲۶/۷	۷/۹۵
۲	۹۱۸/۷۵	۹۲۵/۷	۶/۹۵
۳	۹۱۸/۷۵	۹۲۶/۸	۸/۰۵



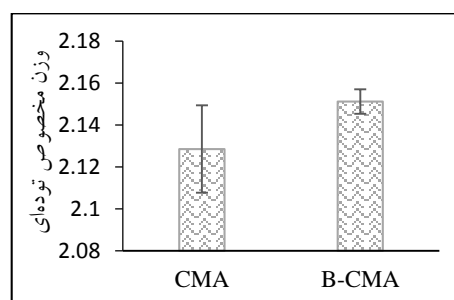
ب



الف



د



ج

شکل ۵. مقایسه مشخصات فیزیکی مخلوط های آسفالتی CMA و B-CMA. الف) وزن مخلوط های آسفالتی. ب) وزن مخصوص

بیشینه متراکم نشده. ج) وزن مخصوص توده‌ای. د) درصد فضای خالی مخلوط

۳-۹ آزمایش FT-IR

طیف سنگی FT-IR به خوبی برای شناسایی کلسیم کربنات استفاده شده است و محققان از این روش برای مقایسه قبل و بعد از تشکیل رسوب کلسیم کربنات ناشی از عامل باکتریایی بر روی مصالح سنگی استفاده کرده‌اند. در شکل (۶) طیف FT-IR مربوط به سطح سنگدانه قبل و بعد از عمل آوری مشخص شده است. طیف‌های با اعداد موج حدود 712 cm^{-1} ، 875 cm^{-1} و 1432 cm^{-1} متعلق به کلسیم کربنات است. از مقایسه طیف

وزن مخصوص مخلوط رابطه مستقیم دارند. بر اساس شکل (۵-د) درصد فضای خالی نمونه (P_a) مخلوط B-CMA به مقدار ۰/۴۴ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است که تغییر محسوسی در درصد فضای خالی نمونه B-CMA ایجاد نشده است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترسیب بیولوژیکی بر روی مصالح سنگی تاثیری بر درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی سرد ندارد.

2000]. بنابراین شدت قلّه پراش کلسیت در سطح سنگدانه‌ها بعد از عمل آوری بیشتر از سطح سنگدانه‌ها قبل از عمل آوری هستند و دولومیت و سیلیکون دی‌اکسید در نمونه بعد از عمل آوری به مقدار کمتری مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان برای سنگدانه‌های بعد از عمل آوری بیولوژیکی، به ایجاد کریستال کلسیت در سطح سنگدانه‌ها پی برد. از نتایج شکل (۶) در آزمایش FT-IR با شکل (۷) در آزمایش XRD می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش FT-IR ارتباط و هم‌پوشانی مناسبی با نتایج آزمایش XRD دارد و نتایج آزمایش FT-IR می‌تواند تاییدی بر نتایج آزمایش XRD باشد.

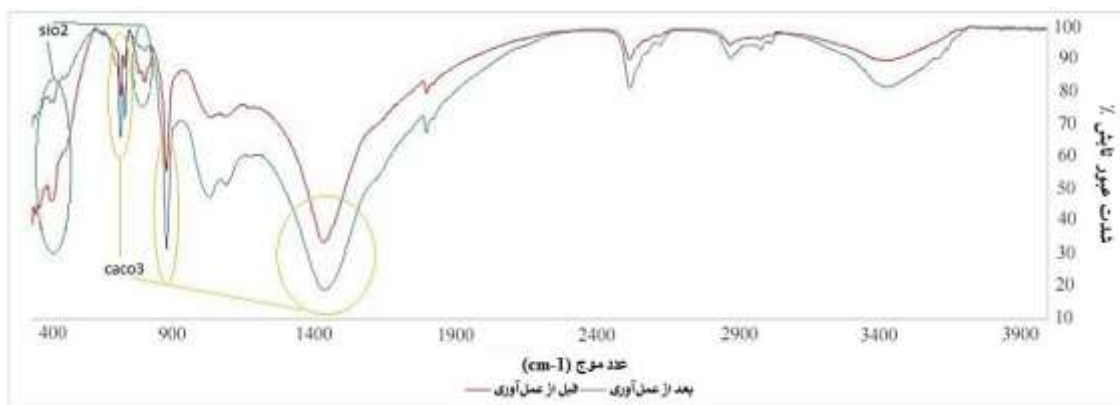
۳-۱۱ آزمایش آب جوشان اصلاح شده

شکل (۸) و (۹) پوشش قیری مصالح را با استفاده از پردازش تصویر قبل و بعد از آزمایش آب جوشان نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۰) پوشش قیری بر روی آسفالت متراکم نشده با مصالح سنگی ساده و عمل آوری شده قبل از آزمایش آب جوشان به ترتیب برابر با ۶۸ و ۸۲ درصد و بعد از آزمایش برابر با ۴۴ و ۶۲ درصد است. هم چنین ضریب پوشش قیری برای مصالح سنگی معمولی و مصالح سنگی عمل آوری شده به ترتیب برابر با ۶۵ درصد و ۷۶ درصد است. بنابراین ضریب پوشش قیری برای مخلوط حاوی مصالح سنگی عمل آوری شده با باکتری به مقدار ۱۱ درصد نسبت به مخلوط حاوی مصالح سنگی معمولی بیشتر شده است. این تغییر را می‌توان به دلیل ایجاد یک پوشش سطحی از رسوب کلسیم کربنات که یک ماده آب‌گریز است بر روی مصالح سنگی دانست که نتیجتاً باعث بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌گردد.

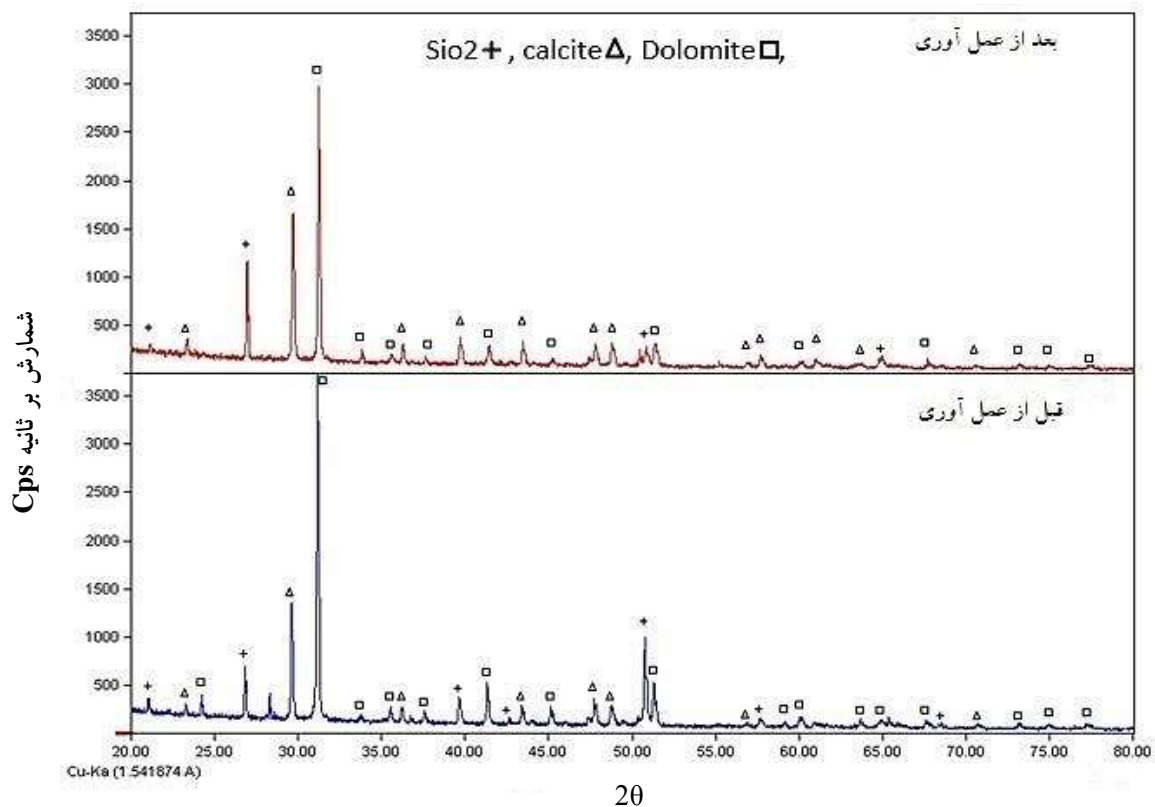
FT-IR سنگدانه قبل و بعد از عمل آوری در شکل (۶) مشخص می‌شود که شدت عبور تابش مربوط به CaCO_3 در سنگدانه عمل آوری شده بیشتر از سنگدانه معمولی است. طیف مربوط به SiO_2 شامل طیف‌های با اعداد موج 473 cm^{-1} و 468 cm^{-1} مربوط به اتصالات Si-O خارج از تغییر شکل ص.ای و اعداد موج 1082 cm^{-1} و 1094 cm^{-1} مربوط به اتصالات Si-O-Si است. طیف‌های مربوط به SiO_2 در سنگدانه بعد از عمل آوری، شدت عبور تابش کمتری دارد که علت آن ایجاد لایه سطحی کلسیم کربنات است که منجر به کاهش فاز سیلیسی در این لایه می‌شود.

۳-۱۰ آزمایش XRD

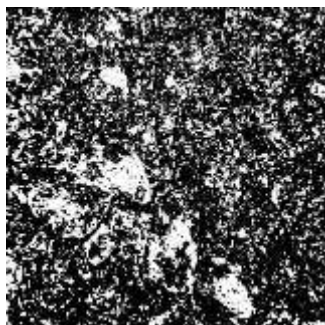
ترکیبات تشکیل دهنده سطوح مصالح سنگی نقش مهمی را در چسبندگی بین قیر و سنگدانه ایفا می‌کنند. بنابراین برای درک بهتر اثر رسوب زیستی ایجاد شده بر سطح مصالح سنگی عمل آوری شده، ترکیبات معدنی سطوح مصالح سنگی قبل و بعد از عمل آوری بیولوژیکی توسط آزمایش XRD بررسی شد. رسوب کلسیم کربنات دارای چند شکل متفاوت است: کلسیت که فاز اصلی کلسیم کربنات را تشکیل می‌دهد، و تریت^{۱۶} و آراگونیت^{۱۷}. از نظر ظاهری کلسیت سطح مقطع مثلثی شکل و دارای بیشترین مقاومت، و تریت به صورت شش ضلعی و آراگونیت مکعبی شکل است [McGill, 2005]. در شکل (۷) ترکیبات مختلفی مانند کلسیت، دولومیت و سیلیکون دی‌اکسید قبل و بعد از عمل آوری بیولوژیکی بر سطوح سنگدانه مشخص شده است. شدت قلّه پراش در آزمایش XRD مربوط به یک فاز رابطه مستقیمی با مقدار آن فاز دارد [Yang and Yue,



شکل ۶. مقایسه طیف FT-IR بر سطح سنگدانه‌ها قبل و بعد از عمل آوری



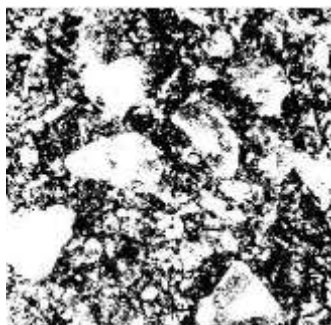
شکل ۷. نتیجه آزمایش XRD برای اثر تشکیل رسوب کلسیت بر سطح سنگدانه‌های عمل آوری شده



(ب) عکس باینری قبل از جوشاندن بر روی سنگدانه معمولی



(الف) عکس اصلی قبل از جوشاندن بر روی سنگدانه معمولی

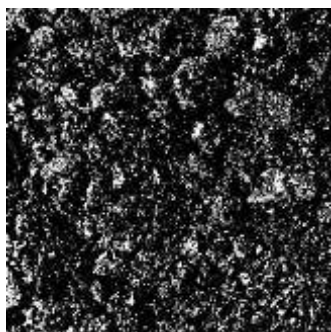


(د) عکس باینری بعد از جوشاندن بر روی سنگدانه معمولی



(ج) عکس اصلی بعد از جوشاندن بر روی سنگدانه معمولی

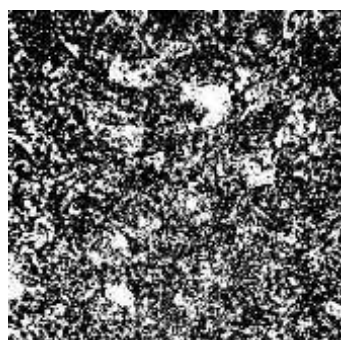
شکل ۸. استفاده از پردازش تصویر در ارزیابی عریان شدگی قبل و بعد از آزمایش آب جوشان بر روی مصالح سنگی معمولی



(ب) عکس باینری قبل از جوشاندن بر روی سنگدانه عمل آوری شده



(الف) عکس اصلی قبل از جوشاندن بر روی سنگدانه عمل آوری شده

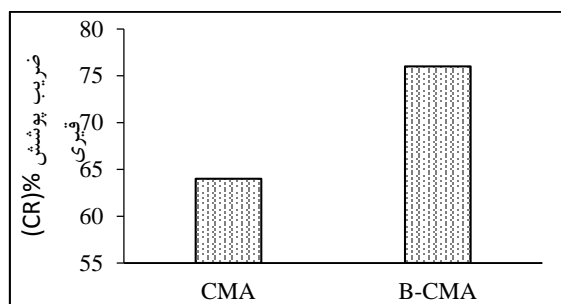


(د) عکس باینری بعد از جوشاندن بر روی سنگدانه عمل آوری شده

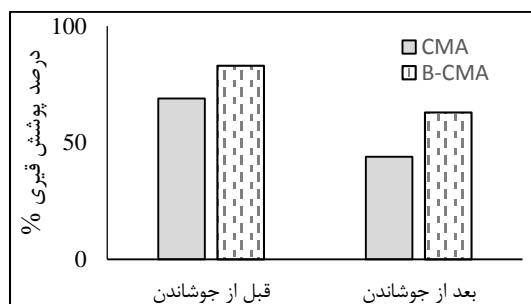


(ج) عکس اصلی بعد از جوشاندن بر روی سنگدانه عمل آوری شده

شکل ۹. استفاده از پردازش تصویر در ارزیابی عریان شدگی قبل و بعد از آزمایش آب جوشان بر روی مصالح سنگی عمل آوری شده



ب



الف

شکل ۱۰. نتایج آزمایش آب جوشان اصلاح شده بر روی مخلوط های آسفالتی CMA و B-CMA :

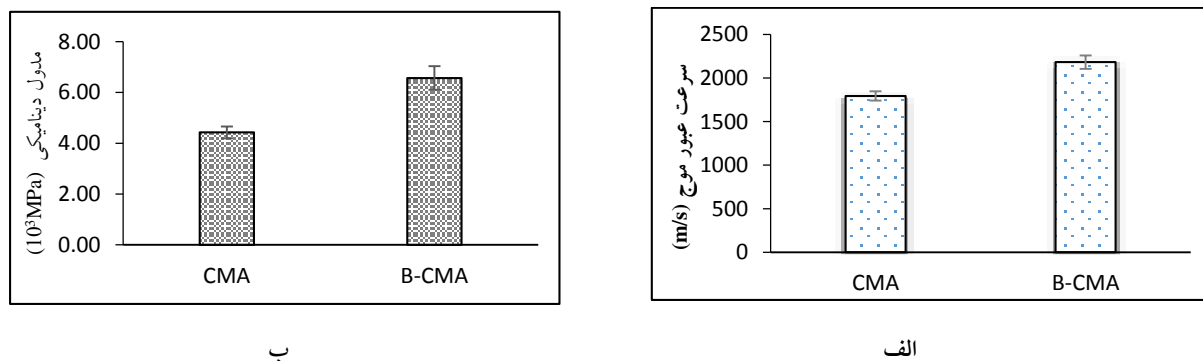
الف- درصد پوشش قیری قبل و بعد از آزمایش آب جوشان . ب- ضریب پوشش قیری بعد از آزمایش آب جوشان.

۳-۷ آنالیز واریانس (t-test)

به منظور بررسی معنادار تغییرات پارامترهای فیزیکی و نتایج تست اولتراسونیک مخلوط آسفالتی B-CMA نسبت به مخلوط آسفالتی CMA آزمون t توسط نرم افزار آماری مینی تب با سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد و نتایج آن در جدول (۴) ارائه گردید. مطابق جدول مقدار P برای تغییرات وزن خشک کمتر از ۰/۰۵ است که نشانه تفاوت معنی دار این دو نوع مخلوط است. این مقدار برای تغییرات وزن مخصوص بیشینه متراکم نشده، وزن مخصوص توده ای و درصد فضای خالی بیشتر از ۰/۰۵ بوده که نشان می دهد تغییرات این سه مشخصه معنادار نیست. هم چنین مقدار P برای تغییرات نتایج حاصل از آزمایش اولتراسونیک کمتر از ۰/۰۵ است و در نتیجه تغییرات سرعت موج عبوری و مدول دینامیکی برای مخلوط آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد B-CMA نسبت به مخلوط آسفالتی CMA معنادار است.

۳-۶ آزمایش اولتراسونیک

شکل (۱۱) سرعت موج عبوری از مخلوط آسفالتی را در نمونه CMA و B-CMA نشان می دهد. از آن جایی که این آزمایش بیانگر سختی نمونه های آسفالتی است، بنابراین هرچه چسبندگی قیر و مصالح سنگی بیشتر باشد سختی آن در حالتی که بین سنگدانه و قیر چسبندگی ضعیف باشد بیشتر است. در نتیجه برای سنگدانه های عمل آوری شده با باکتری که باعث ایجاد رسوب کلسیم کربنات بر سطوح سنگدانه می شوند و باعث بهبود پوشش قیری و هم چنین چسبندگی بین قیر و سنگدانه می شوند زمان عبور موج کمتر از سنگدانه معمولی است. بنابراین مطابق معادله (۲) سرعت موج بیشتر خواهد بود و طبق معادله (۳) مدول دینامیکی نمونه یا عبارتی سختی نمونه بیشتر است. با توجه به شکل (۱۱) سرعت موج و مدول دینامیکی در نمونه B-CMA به ترتیب به اندازه ۲۱/۱۴ و ۴۸/۳۷ درصد از نمونه CMA بیشتر شده است.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج آزمایش اولتراسونیک در مخلوط های آسفالتی CMA و B-CMA: الف) سرعت موج عبوری. ب) مدول دینامیکی

جدول ۴. تحلیل نتایج و بررسی معنادار تغییرات آزمایش ها با روش آزمون t با سطح اطمینان ۹۵ درصد

منبع تحلیل	نوع مشخصه	نمونه	میانگین	خطای استاندارد	انحراف معیار	مقدار t	مقدار p
	وزن خشک (g)	CMA	۱۱۰۴/۲	۰/۳۸	۰/۶۵۶	-۱/۱۴	۰/۰۰۱*
		B-CMA	۱۱۱۱/۲۷	۰/۳۳	۰/۵۶۹		
مشخصات فیزیکی	وزن مخصوص بیشینه متراکم نشده	CMA	۲/۳۹۳۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۴۰	-۲/۵۸	۰/۰۸۲
		B-CMA	۲/۴۰۵۶۷	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۷۵		
	وزن مخصوص توده ای	CMA	۲/۱۲۸۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲۰۸	-۱/۸۱	۰/۲۱۲
		B-CMA	۲/۱۵۱۱۳	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۵۸۴		
	درصد فضای خالی (%)	CMA	۱۱/۰۴۸	۰/۵	۰/۸۷۱	۰/۸۵	۰/۴۸۴
		B-CMA	۱۰/۶۰۳	۰/۱۴	۰/۲۴۳		
اولتراسونیک	سرعت موج عبوری (m/s)	CMA	۱۸۲۶/۵	۲۶	۴۵	-۷/۳۱	۰/۰۰۵*
		B-CMA	۲۲۱۲/۷	۴۶	۷۹/۷		
	مدول دینامیک (MPa)	CMA	۴/۴۳×۱۰ ^۳	۰/۱۴	۲/۳۴	-۷/۱	۰/۰۱۹*
		B-CMA	۶/۵۷×۱۰ ^۳	۰/۲۷	۴/۶۷		

* مقدار p > ۰/۰۵

۴. نتیجه گیری

با توجه به آزمایشات انجام شده در این پژوهش و رسوب گذاری بیولوژیکی توسط باکتری‌های کلسیت ساز بر روی سطوح سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی سرد، می‌توان نتیجه گرفت:

۱- پس از عمل‌آوری بر روی مصالح سنگی، وزن آن‌ها به طور میانگین ۷/۶۵ گرم افزایش یافته است و این افزایش وزن ناشی از ترسیب کلسیم کربنات بر سطوح مصالح سنگی است.

۲- وزن مخلوط آسفالتی B-CMA به طور میانگین ۷/۰۶ گرم افزایش داشته است و همان‌طور که گفته شد علت آن تشکیل رسوب کلسیم کربنات بر سطح مصالح سنگی است. با انجام تحلیل واریانس با روش آزمون t این افزایش وزن، معنادار تشخیص داده شد. وزن مخصوص بیشینه مترکم نشده نیز به مقدار ۰/۵۴ درصد و هم‌چنین وزن مخصوص توده‌ای مخلوط آسفالتی به مقدار ۱/۰۵ درصد افزایش یافت که این افزایش معنادار نبود. درصد فضای خالی نمونه B-CMA به اندازه ۰/۴۴ درصد کاهش یافت که این تغییر معنادار نبود. بنابراین در این پژوهش می‌توان گفت عمل‌آوری بیولوژیکی بر روی مصالح سنگی تأثیری در فضای خالی مخلوط آسفالتی سرد نخواهد داشت.

۳- نتایج آزمایش FT-IR نشانگر افزایش شدت عبور تابش مربوط به طیف کلسیم کربنات و کاهش شدت عبور تابش مربوط به سیلیس دی‌اکسید است. علت این تغییر، تشکیل رسوب کلسیم کربنات در سطح مصالح سنگی و کاهش ترکیبات سیلیسی در این لایه است. نتایج آزمایش XRD بر سطح مصالح سنگی نشانگر افزایش قله پراش مربوط به کلسیت در سطح مصالح سنگی بعد از عمل‌آوری است. بنابراین نتایج این دو آزمایش هم‌پوشانی مناسبی برای اثبات ترسیب کلسیم کربنات بر سطح مصالح سنگی دارند.

۴- پوشش قیری قبل و بعد از انجام آزمایش آب جوشان اصلاح شده بر مخلوط آسفالتی مترکم نشده B-CMA نسبت به مخلوط آسفالتی CMA به ترتیب به مقدار ۱۴ و ۱۸ درصد افزایش داشته است. هم‌چنین ضریب پوشش قیری به مقدار ۱۱ درصد افزایش داشته است. بنابراین عریان‌شدگی مصالح به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است.

۵- با انجام آزمایش اولتراسونیک، مشخص شد که سرعت موج عبوری و مدول دینامیکی در نمونه B-CMA به ترتیب به اندازه ۲۱/۱۴ و ۴۸/۳۷ درصد از نمونه CMA بیشتر شده است و این تغییر با تحلیل آزمون t معنادار شناخته شد. بنابراین سختی نمونه B-CMA برای عبور موج اولتراسونیک به مقدار قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Visco-elasto-plastic
2. Cohesive
3. Adhesive
4. Bacillus pasteurii
5. Matlab
6. Minitab
7. Nutrient broth
8. Optical density
9. X-ray diffraction
10. Fourier-transform infrared spectroscopy
11. Dectris
12. Cold Mix Asphalt
13. Bacterial Cold Mix Asphalt
14. Coating ratio
15. Ultrasonic pulse velocity
16. Vaterite
17. Aragonite

۶. مراجع

- بهبهانی، حمید، ایازی، محمدجواد و شجاعی، محمد حسین (۱۳۹۴) "ارزیابی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی و پتانسیل

- Diaz, L. G. (2016) "Creep performance evaluation of Cold Mix Asphalt patching mixes", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol.9, No. 2, pp. 149-158.
- Ferrotti, G., Pasquini, E. and Canestrari, F. (2014) "Experimental characterization of high-performance fiber-reinforced cold mix asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol.57, pp. 117-125.
- Frazer, L. (2008) "Built environment: new default for asphalt?", *Environmental Health Perspectives*, Vol.116, No. 9, pp. A379.
- García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Wang, J., De Belie, N., Morán-del Pozo, J. M., Guerra-Romero, M. I. and Juan-Valdés, A. (2017) "Quality improvement of mixed and ceramic recycled aggregates by biodeposition of calcium carbonate", *Construction and Building Materials*, Vol.154, pp. 1015-1023.
- Gómez-Meijide, B. and Pérez, I. (2014) "A proposed methodology for the global study of the mechanical properties of cold asphalt mixtures", *Materials & Design*, Vol.57, pp. 520-527.
- Gómez-Meijide, B., Pérez, I., Airey, G. and Thom, N. (2015) "Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste", *Construction and Building Materials*, Vol.77, pp. 168-178.
- Horgnies, M., Darque-Ceretti, E., Fezai, H. and Felder, E. (2011) "Influence of the interfacial composition on the adhesion between aggregates and bitumen: Investigations by EDX, XPS and peel tests", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol.31, No. 4, pp. 238-247.
- Labbe, J., Bediang, B. and Ledion, J. (1984) . "Analyse qualitative et quantitative des mélanges solides calcite-aragonite par spectrophotométrie d'absorption infrarouge", *Analisis*, Vol.12, No. 10, pp. 514-522.
- شيارشدگی مخلوط های آسفالتی نیمه گرم"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۳، ص. ۴۰۵-۴۱۸.
- کاهانی، مصطفی. کلانتری، فرزین. بزاززاده، رویا و میرزایی، بهروز (۱۳۹۱)، "رسوب گذاری زیستی کلسیم کربنات در خاک های ماسه ای و تاثیر آن بر افزایش مقاومت خاک"، دوره ۰، شماره ۳، ص. ۱۱-۱۹.
- EAPA: European asphalt pavement association", (accessed 08. 11. 2016), from <http://www.eapa.org/promo.php>.
- Al-Busaltan, S., Al Nageim, H., Atherton, W. and Sharples, G. (2012) "Mechanical properties of an upgrading cold-mix asphalt using waste materials", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.24, No. 12, pp. 1484-1491.
- Bottcher, M. E. and Gehlken, P.-L. (1997) "FT-IR spectroscopic characterization of (Ca, Cd) CO₃ solid solutions: Compositional and carbon isotope effects", *Applied Spectroscopy*, Vol.51, No. 1, pp. 130-131.
- Carbó, M. D., Martínez, V. P., Adelantado, J. G., Reig, F. B. and Moreno, M. M. (1997) "Fourier transform infrared spectroscopy and the analytical study of sculptures and wall decoration", *Journal of Molecular Structure*, Vol.410, pp. 559-563.
- Chunxiang, Q., Jianyun, W., Ruixing, W. and Liang, C. (2009) "Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO₃ by *Bacillus pasteurii*", *Materials Science and Engineering: C*, Vol.29, No. 4, pp. 1273-1280.
- De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. (2010) "Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review", *Ecological Engineering*, Vol.36, No. 2, pp. 118-136.
- DE, P. (2005) "Handbook of adhesion", Longman Scientific & Technical.

experimental model conditions", Acta Biochimica Polonica, Vol.63, No. 2.

- Pan, Z.-Y., Li, G., Hong, C.-Y., Kuang, H.-L., Yu, Y., Feng, F.-X., Liu, D.-M. and Du, H. (2015) "Modified recycled concrete aggregates for asphalt mixture using microbial calcite precipitation", RSC Advances, Vol.5, No. 44, pp. 34854-34863.

- Peshkin, D. G., Hoerner, T. E. and Zimmerman, K. A. (2004). "Optimal timing of pavement preventive maintenance treatment applications". Transportation Research Board.

- Ramanathan, K., Stallings, R. and Newsome, J. (1991) "An ultrasonic technique for the measurement of adhesion of asphalt to aggregate", Journal of Adhesion Science and Technology, Vol.5, No. 3, pp. 181-190.

- Read, J. and Whiteoak, D. (2003). "The shell bitumen handbook". Thomas Telford.

- Reig, F. B., Adelantado, J. G. and Moreno, M. M. (2002) "FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and silica (quartz) mixtures using the constant ratio method. Application to geological samples", Talanta, Vol.58, No. 4, pp. 811-821.

- Rivadeneyra, M. A., Delgado, R., del Moral, A., Ferrer, M. R. and Ramos-Cormenzana, A. (1994) "Precipitation of calcium carbonate by *Vibrio* spp. from an inland saltern", FEMS Microbiology Ecology, Vol.13, No. 3, pp. 197-204.

- Snoeck, D., Wang, J., Bentz, D. P. and De Belie, N. (2018) "Applying a biodeposition layer to increase the bond of a repair mortar on a mortar substrate", Cement and Concrete Composites, Vol.86, pp. 30-39.

- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K. and Bang, S. S. (1999) "Microbiological precipitation of

- Ling, C., Hanz, A. and Bahia, H. (2016) "Measuring moisture susceptibility of Cold Mix Asphalt with a modified boiling test based on digital imaging", Construction and Building Materials, Vol.105, pp. 391-399.

- Ling, C., Moraes, R., Swiertz, D. and Bahia, H. (2013) "Measuring the influence of aggregate coating on the workability and moisture susceptibility of cold-mix asphalt", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2372, pp. 46-52.

- Manual, A. B. A. E. (1992) "Manual Series No. 19 (MS-19), the Asphalt Institute", Inc., Lexington, Kentucky.

- McGill, K. N. (2005). Calcium carbonate scaling of polymers in isothermal, stagnant water, University of Minnesota.

- Moraes, R., Velasquez, R. and Bahia, H. (2011) "Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2209, pp. 70-81.

- Needham, D. (1996). Developments in bitumen emulsion mixtures for roads, University of Nottingham.

- Okwadha, G. D. and Li, J. (2010) "Optimum conditions for microbial carbonate precipitation", Chemosphere, Vol.81, No. 9, pp. 1143-1148.

- Oruc, S., Celik, F. and Akpınar, M. V. (2007) "Effect of cement on emulsified asphalt mixtures", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.16, No. 5, pp. 578-583.

- Otlewska, A. and Gutarowska, B. (2016) "Environmental parameters conditioning microbially induced mineralization under the

"Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates", *Journal of Cleaner Production*, Vol.156, pp. 355-366.

- Wong, L. S. (2015) "Microbial cementation of ureolytic bacteria from the genus *Bacillus*: a review of the bacterial application on cement-based materials for cleaner production", *Journal of Cleaner Production*, Vol.93, pp. 5-17.

- Wu, M., Johannesson, B. and Geiker, M. (2012) "A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material", *Construction and Building Materials*, Vol.28, No. 1, pp. 571-583.

- Yang, N. and Yue, W. (2000) "Handbook of a collection of illustrative plates of inorganic nonmetal materials", Wuhan: Wuhan University of Technology Publishing Company.

CaCO₃", *Soil Biology and Biochemistry*, Vol.31, No. 11, pp. 1563-1571.

- Thanaya, I., Zoorob, S. and Forth, J. (2009) "A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport, Institution of Civil Engineers*:

- Tigdemir, M., Kalyoncuoglu, S. F. and Kalyoncuoglu, U. Y. (2004) "Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation", *NDT & E International*, Vol.37, No. 8, pp. 597-602.

- Valdés, G., Miró, R., Martínez, A. and Calabi, A. (2014) "Effect of the physical properties of aggregates on aggregate-asphalt bond measured using the UCL method", *Construction and Building Materials*, Vol.73, pp. 399-406.

- Wang, J., Vandevyvere, B., Vanhessche, S., Schoon, J., Boon, N. and De Belie, N. (2017)

حامد عطاران دوم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه آزاد اسلامی مشهد نمود و در حال حاضر دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش راه و ترابری در دانشگاه فردوسی مشهد است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهبود خواص روسازی آسفالتی و بتنی، خود ترمیمی بیولوژیکی در سازه ها و حمل و نقل هوشمند است.



ابوالفضل محمدزاده مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه آزاد اسلامی مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۸۷ را از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ایمنی ترافیک و طراحی آزمایش در تکنولوژی بتن و آسفالت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه فردوسی مشهد است.



محسن کرابی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه صنعت آب و برق و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-محیط زیست در سال ۱۳۷۸ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-محیط زیست از دانشگاه پلی تکنیک گرونویل (فرانسه) گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تصفیه آب و فاضلاب، بیوتکنولوژی و انتقال و انتشار آلاینده ها بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه فردوسی مشهد است.



سمانه عطاران دوم، درجه کارشناسی در رشته زیست شناسی را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه فردوسی مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیولوژی گیاهی در سال ۱۳۸۸ را از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در سال ۱۳۹۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته فیزیولوژی گیاهی از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان میکروبیولوژی، گیاهان دارویی بوده و در حال حاضر استاد حق التدریس موسسه آموزشی کاویان، همکار طرح جهاد دانشگاهی مشهد و عضو گروه متابولیت شرکت دانش بنیان زیست اقتصاد خیام است.

