

## ویژگی‌های ساختاری در مخلوط‌های آسفالت بازیافتی سرد (شناخت ریزساختار)

### مقاله علمی - پژوهشی

حسن زیاری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حسین توکلی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مهدی زال نژاد\*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.zalnezhad.313@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۲۳۶-۲۱۹

### چکیده

این مطالعه بررسی جامعی در خصوص ویژگی‌های ریزساختار مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی با تمرکز بر مزایای زیست‌محیطی آن و روش‌های مختلف جهت مطالعه ریزساختار از جمله میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری، پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه می‌کند. این تحقیق چهار ویژگی کلیدی ریزساختار شامل حفره‌های هوا و سنگ‌دانه‌های درشت، شاخص یکنواختی، تأثیر انواع مختلف افزودنی‌ها و فرایند افزایش مقاومت اولیه را بررسی می‌کند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که ریزساختار مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی می‌تواند تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل، مانند دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها و روش تراکم مورد استفاده قرار گیرد. بررسی‌ها نشان داد که تغییر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها از ریز به درشت، اندازه فضای خالی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، هر دو روش تراکم و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر اندازه و توزیع حفره‌های هوا تأثیر می‌گذارد. یکنواختی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی به تدریج با دانه‌بندی از ریز به درشت کاهش یافته و متراکم‌کننده ژیراتوری سوپریو از نظر یکنواختی بهترین روش در بین سه روش تراکم است. این مطالعه همچنین تأثیر انواع مختلف افزودنی‌ها را بر ریزساختار و عملکرد مخلوط بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه سیمان برای مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون ۱ تا ۲ درصد برای اطمینان از مقاومت در برابر ترک در دمای پایین پیشنهاد می‌شود. به‌طور کلی، این تحقیق حاکی از اهمیت در نظر گرفتن ریزساختار در طراحی و ارزیابی مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی است که می‌تواند به توسعه مخلوط‌های آسفالتی پایدار کمک کند.

واژه‌های کلیدی: آسفالت سرد، ریزساختار، آسفالت سرد بازیافتی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس

### ۱- مقدمه

برای دستیابی به هدف روسازی پایدار است. بدین منظور استفاده از روسازی آسفالت بازیافتی (RAP<sup>۱</sup>)، به ویژه برای بازسازی و بهسازی روسازی‌ها به یک روش استاندارد تبدیل شده است (Y. Li et al., 2019; Lin et al.; Ma, Polaczyk, et al., 2022; Taherkhani & Noorian, 2020). استفاده از روسازی آسفالت بازیافتی باعث کاهش استفاده از سنگ‌دانه‌های طبیعی، به ویژه شن و سنگ خرد شده و همچنین موجب کاهش

چالش‌های ناشی از فرسودگی روسازی آسفالتی اولیه و احساس نیاز به محدود کردن مصرف منابع طبیعی برای تولید روسازی باعث شده است، مطالعات اخیر به سمت ساخت پایدار روسازی‌های آسفالتی سوق داده شود (Li et al., 2013; Ma et al., 2021; Pantini, Borghi, & Rigamonti, 2018; Santos, Flintsch, & Ferreira, 2017). بازیافت مصالح راهسازی برای استفاده مجدد در روسازی جدید یک جزء مهم

هزینه های ساخت روسازی می شود (Farooq & Mir, 2017; Ma, Wang, et al., 2022). از آن جایی که فناوری آسفالت سرد بازیافتی مبتنی بر آسفالت سرد است، بنابراین دمای کمتری مورد نیاز است و باعث کاهش مصرف سوخت فسیلی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه ای می شود. همچنین آسفالت سرد بازیافتی از نوع درجا نیز مزایای زیست محیطی دیگری نیز مانند کاهش آلودگی صوتی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای بدلیل کاهش میزان حمل و نقل را به ارمان می آورد. همچنین استفاده از آسفالت سرد درجا به طور کلی موجب سهولت در عملیات اجرایی و افزایش ایمنی هنگام ساخت و ساز و حمل و نقل می شود (Jin et al., 2021; Lin et al., 2015; Liu et al., 2022; Ma et al., 2015; Pi, Li, et al., 2019; Xiao et al., 2018).

با وجود این مزایا، برای مخلوط آسفالت سرد بازیافتی محدودیت های برجسته ای همچون نیاز به یک دوره عمل آوری و پوشش لایه ها مطابق با شرایط محیط سایت، کنترل کیفیت دشوار روسازی باتوجه به عدم وجود هیچ روش طراحی استاندارد پذیرفته شده و استفاده از مخلوط های آسفالت سرد بازیافتی فقط در لایه پایین لایه های روسازی، وجود دارد. عامل اساسی بازدارنده تحقیقات در مورد طراحی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی و کاربردهای متعاقب آن فقدان یک استاندارد واحد است. به طور خلاصه، به دلیل پتانسیل قابل توجه مخلوط های آسفالت سرد بازیافتی برای پرداختن به الزامات حفاظت از محیط زیست و مزایای تجاری آن، نیاز آشکار به مطالعات بیشتر در مورد فناوری مخلوط آسفالت سرد بازیافتی وجود دارد (Buczyński, Šrámek, & Mazurek, 2023; Gu et al., 2019; Liu et al., 2022; Pi, Huang, et al., 2019).

یکی از روش های کاربردی به منظور مطالعات بیشتر در مورد مخلوط آسفالت سرد بازیافتی بررسی خصوصیات ریزساختار<sup>۲</sup> این مخلوط ها است. ریزساختار به آرایش ذرات تشکیل دهنده یک ماده در مقیاس میکروسکوپی اشاره دارد که شامل اندازه، شکل، جهت و توزیع این ذرات است. ریزساختار می تواند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی ها و رفتار مواد داشته باشد. ریزساختار یک ماده نقش مهمی در تعیین خواص ماکروسکوپی آن مانند استحکام، چقرمگی و شکل پذیری دارد (Meyers, Mishra, 2006 & Benson, 2006). نحوه چیدمان اتم ها، دانه ها و سایر ویژگی های ساختاری می تواند بر ویژگی های مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی مواد و همچنین واکنش آن به شرایط مختلف محیطی تأثیر بگذارد (Hull D., 2011). یکی از مهم ترین جنبه های ریزساختار، آرایش دانه ها در داخل یک ماده است. مرزهای دانه و رابط بین دانه های مجاور، می تواند به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی و الکتریکی مواد تأثیر بگذارد. اندازه و توزیع دانه ها در یک ماده نیز می تواند بر خواص آن تأثیر بگذارد (Lu, 2014).

## ۲- کاربرد ریزساختار در بررسی خصوصیات مواد

اصطلاح ریزساختار به معنای آن دسته از ویژگی های یک ماده است که با چشم قابل مشاهده نیست و می توان آن را با بررسی یک نمونه انتخاب شده با یک روش مناسب آشکار کرد. اطلاعات ریزساختاری شامل شناسایی فازهای موجود (کریستالی یا شیشه ای)، تعیین مورفولوژی آن ها (اندازه دانه یا ذرات و توزیع آن ها) و ترکیب شیمیایی این فازها است. (David Brandon, 2008). روش های مختلفی به منظور تجزیه و تحلیل ریزساختار مورد استفاده قرار می گیرند که در ادامه بررسی خواهند شد.

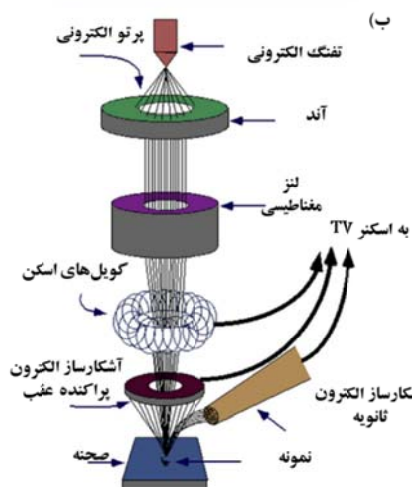
### ۲-۱- میکروسکوپ نوری<sup>۳</sup>

این روش یکی از رایج ترین روش های مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل ریزساختار است که شامل استفاده از نور مرئی برای مشاهده ریزساختار مواد است. مورفولوژی، اندازه و توزیع دانه ها و فازها در یک ماده را می توان از طریق میکروسکوپ نوری تعیین کرد (B.D. Cullity, 2014). میکروسکوپ نوری از نور مرئی و سامانه ای از عدسی ها برای بزرگ نمایی تصاویر نمونه های کوچک استفاده می کند (Di Gianfrancesco, 2017). در شکل ۱ نمونه ای از میکروسکوپ نوری و نحوه عملکرد آن به تصویر کشیده شده است. استفاده میکروسکوپ نوری به دلیل ارائه انبوهی از اطلاعات موجود در تصویر بزرگ نمایی شده، در دسترس بودن میکروسکوپ های باکیفیت بالا

بزرگ‌نمایی بالا تولید می‌کند (Joseph Goldstein, 2003). میکروسکوپ الکترونی روبشی، پرکاربردترین نوع میکروسکوپ الکترونی است (Leng, 2013). نمونه‌ها را می‌توان در خلأ زیاد، در خلأ کم و در حالت محیطی در شرایط مرطوب مشاهده کرد (Di Gianfrancesco, 2017). در شکل ۳ ابزار میکروسکوپ الکترونی روبشی و نحوه عملکرد آن به تصویر کشیده شده است.



(الف)

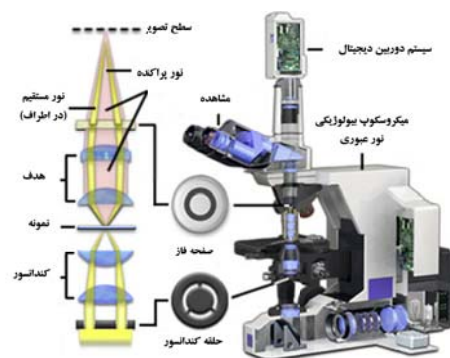


شکل ۳. الف) ابزار SEM، ب) شماتیک کارکرد دستگاه (Di Gianfrancesco, 2017)

## ۲-۴- میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۶</sup>

این روش مبتنی بر استفاده از پرتوی الکترون است که از طریق یک نمونه نازک عبور داده می‌شود (David B. Williams, 2009). میکروسکوپ‌های الکترونی تصاویری از ریزساختارهای مواد با بزرگ‌نمایی و وضوح بسیار بالاتر از میکروسکوپ‌های نوری تولید می‌کنند (Leng, 2013). میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری با میکروسکوپ‌های نوری معمولی تفاوت

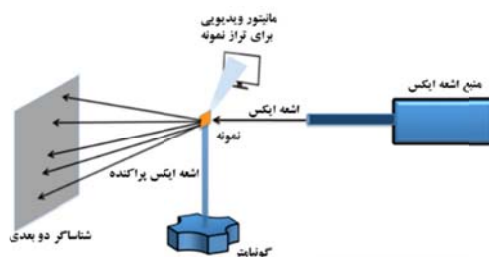
و همچنین روش‌های ارزان‌قیمت ثبت تصویر به یک ابزار مناسب برای تجزیه و تحلیل ریزساختار تبدیل شده است (David Brandon, 2008).



شکل ۱. میکروسکوپ نوری (Di Gianfrancesco, 2017)

## ۲-۲- پراش اشعه ایکس<sup>۴</sup>

پراش اشعه ایکس مبتنی بر هدایت پرتوهای ایکس به یک ماده و اندازه‌گیری الگوی پراش آن‌ها برای تعیین ساختار بلوری و جهت‌گیری ماده است. این روش می‌تواند اطلاعاتی در مورد اندازه، شکل و آرایش کریستال‌ها در یک ماده ارائه دهد (Leng, 2013; Taheri-Shakib & Al-Mayah, 2023). در شکل ۲ نحوه عملکرد این روش به تصویر کشیده شده است.

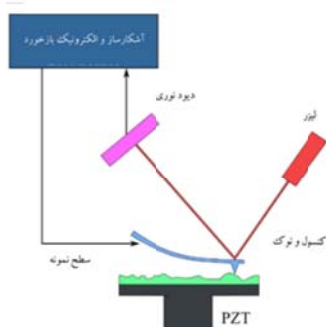


شکل ۲. بلورنگاری اشعه ایکس (Di Gianfrancesco, 2017)

## ۲-۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۵</sup>

این روش یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد برای توصیف ریزساختار است که مبتنی بر استفاده از یک پرتو الکترونی متمرکز برای اسکن سطح یک ماده است که تصاویری با وضوح و

### Atomic Force Microscope



شکل ۵. میکروسکوپ نیروی اتمی و شماتیک عملکرد آن (Mokobi, 2022)

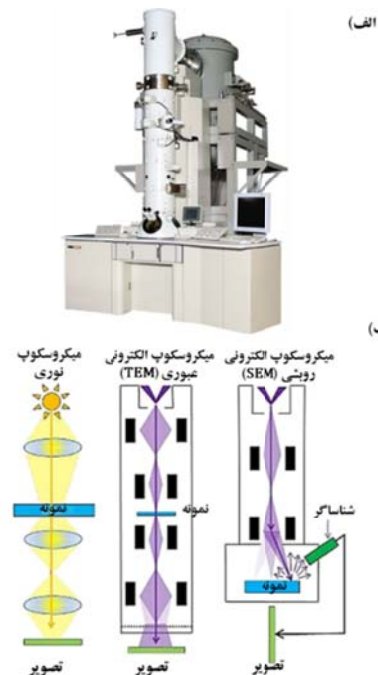
### ۳- خصوصیات ریزساختار مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی

در ادامه برخی از خصوصیات و کاربرد ریزساختار مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی بررسی خواهد شد.

#### ۳-۱- فضای خالی هوا

در یک مطالعه بیست و چهار جاده دارای آسفالت سرد بازیافتی در آیووا از طریق آزمایش‌های میدانی مورد بررسی قرار گرفتند. عملکرد بهتر در جاده‌هایی با حجم بیشتری از فضای خالی هوا مشاهده شد. باین حال، از نتایج تجربی دیگر، تأیید شد که مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی با حجم بیشتری از حفره‌های هوا حساس‌تر به آسیب رطوبت هستند. این دو نتیجه متناقض نشان می‌دهند که تنها تمرکز بر حجم فضای خالی کافی نیست. نمونه‌هایی با حجم کل فضای خالی یکسان ممکن است دارای توزیع فضای خالی متفاوت باشند و در نتیجه خواص متمایزی از خود نشان دهند؛ بنابراین، ویژگی‌های بیشتری مانند اندازه، تعداد،

دارند؛ زیرا از الکترون‌ها به جای فوتون‌ها برای تولید تصاویر استفاده می‌کنند (Di Gianfrancesco, 2017). در شکل ۴ تجهیزات میکروسکوپ الکترونی عبوری و مقایسه بین سه روش میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری آورده شده است.



شکل ۴. الف) تجهیزات میکروسکوپ الکترونی عبوری و ب) تفاوت بین میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی عبوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (Di Gianfrancesco, 2017)

#### ۲-۵- میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۷</sup>

میکروسکوپ نیروی اتمی یک روش شناسایی روبشی است که شامل اسکن نوک تیز بر روی سطح یک ماده و اندازه‌گیری نیروهای برهم‌کنش بین نوک و سطح ماده است. این روش می‌تواند اطلاعاتی در مورد توپوگرافی، زبری و خواص مکانیکی سطح ماده ارائه دهد (Bharat Bhushan (auth.), 2010). با استفاده از این روش، ساختار سطح با وضوح و دقت فوق‌العاده‌ای قابل مشاهده و اندازه‌گیری است (Peter Eaton, 2010). در شکل ۵ میکروسکوپ نیروی اتمی و شماتیک عملکرد آن آورده شده است.

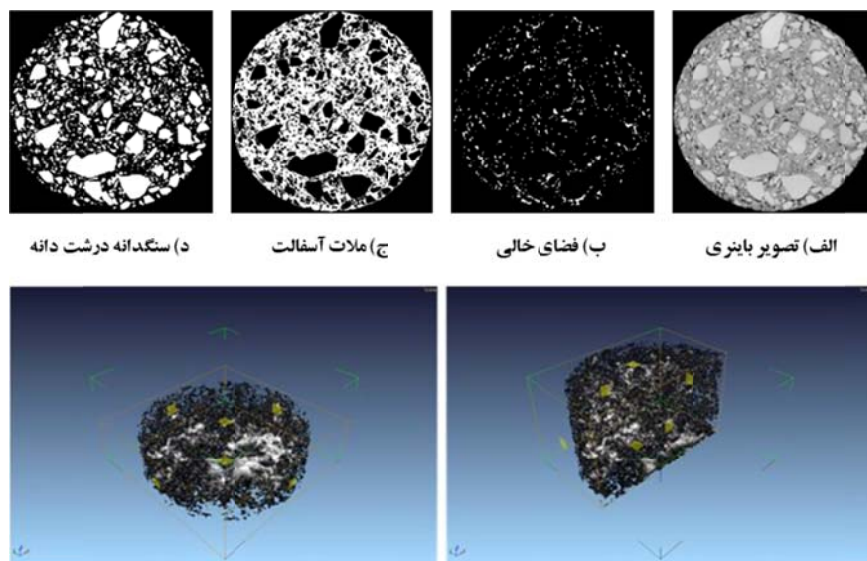
محاسبه شده در همه نمونه‌ها کوچک‌تر از نمونه‌های اندازه‌گیری شده است، اما انحرافات کوچک (حدود ۱ درصد) است. دلیل انحرافات احتمالاً به دلیل این است که برخی از حفره‌های هوا در مخلوط‌ها با آزمایش توموگرافی اشعه ایکس شناسایی نمی‌شوند. حجم ذرات سنگ‌دانه درشت نیز کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است و انحرافات کمتر از ۵ درصد است. دقت پردازش تصویر از نظر انحراف مقدار فضای خالی هوا و حجم سنگ‌دانه درشت قابل قبول است (Yu et al., 2018).

توزیع فضای خالی همه مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی با پردازش تصاویر CT در MATLAB برای شناسایی تعداد و اندازه فضاهای خالی هوا مشخص شد. برای همه نمونه‌ها، همانطور که در شکل ۷ آورده شده است، علی‌رغم دانه‌بندی مختلف سنگ‌دانه‌ها، روند مشابهی وجود دارد که حفره‌های هوای بیشتری در قسمت‌های بالا و پایین نمونه در مقایسه با قسمت میانی وجود دارد. اما برای روش‌های مختلف تراکم، توزیع نسبت فضای خالی هوا متفاوت است. برای نمونه‌های سوپرپیو ژیراتوری کامپکتور، حفره‌های هوا از عمق ۱۰ میلی‌متر تا ۵۵ میلی‌متر (ارتفاع ۴۵ میلی‌متر) وجود دارند. برای نمونه‌های مارشال و بار استاتیکی، عمق پایدار به ترتیب از ۱۵ میلی‌متر تا ۴۵ میلی‌متر و از ۱۵ میلی‌متر تا ۵۰ میلی‌متر است (Yu et al., 2018).

ساختار و توزیع حفره‌های هوا در مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی باید مورد مطالعه قرار گیرد (Gao et al., 2015).

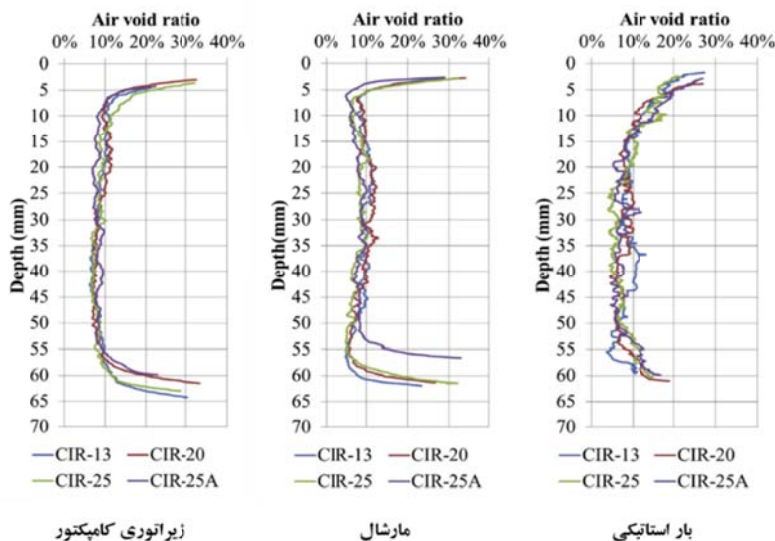
در یک مطالعه ساختار داخلی مخلوط آسفالت از طریق فناوری توموگرافی اشعه ایکس بررسی شد و اثرات چرخه تراکم، روش تراکم و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها نشان داد که فضای خالی نمونه‌های ساخته شده توسط سوپرپیو ژیراتوری کامپکتور<sup>۹</sup>، در انتهای بالایی و پایینی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از ناحیه میانی است. در این مطالعه، پارامترهای ریزساختار مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی با استفاده از روش‌های توموگرافی اشعه ایکس و پردازش تصویر دیجیتال از نظر سه جزء شامل فضای خالی، ملات آسفالت و سنگ‌دانه‌های درشت به‌طور کامل بررسی شد. این تحقیق توزیع فضای خالی چهار نوع مخلوط آسفالت سرد بازیافتی را بررسی کرد. یکنواختی آن‌ها تحت روش‌های مختلف تراکم و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها نیز با تجزیه و تحلیل توزیع ذرات درشت‌دانه اندازه‌گیری شد (Yu et al., 2018). نتیجه پردازش تصویر به‌دست آمده از توموگرافی اشعه ایکس در شکل ۶ نشان داده شده است که نشان‌دهنده فضای خالی هوا، ملات آسفالت و سنگ‌دانه درشت هستند. سپس تصاویر پردازش شده برای بازسازی سه‌بعدی به VGStudio MAX 2 وارد شدند و تصویر سه‌بعدی به دست آمد (Yu et al., 2018).

در این مطالعه، فضای خالی هوا و حجم سنگ‌دانه درشت بررسی شد، همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است. فضای خالی



۵) بازسازی تصویر سه بعدی

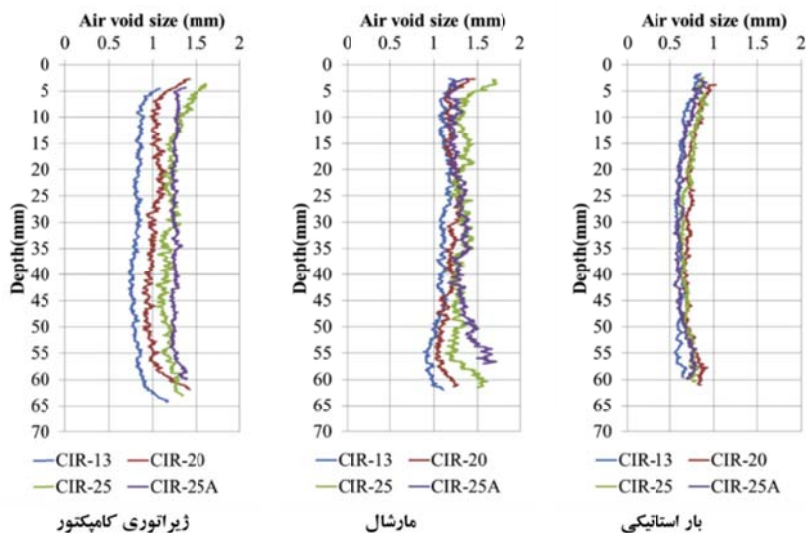
شکل ۶. نتیجه پردازش تصویر به‌دست آمده از CT اسکن و سه‌بعدی سازی از طریق تصاویر پردازش شده (Yu et al., 2018)



شکل ۷. توزیع درصد هوا در ارتفاع نمونه‌ها (Yu et al., 2018)

می‌ماند. از نظر روش‌های تراکم، روش تراکم مارشال دارای بیشترین اندازه فضای خالی هوا است و پس‌از آن روش تراکم سوپریو ژیراتوری کامپکتور و بار استاتیکی قرار دارد (Yu et al., 2018). بنابراین، با تغییر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها از ریز به درشت، اندازه فضای خالی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی بزرگ می‌شود. همچنین هر دو روش تراکم و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر اندازه و توزیع فضای خالی هوا تأثیر می‌گذارند (Yu et al., 2018).

دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها تأثیرات متفاوتی بر توزیع اندازه فضای خالی هوا با توجه به روش‌های تراکم دارد. همانطور که در شکل ۸ آورده شده است، برای نمونه‌های سوپریو ژیراتوری کامپکتور، اندازه فضای خالی هوا از ۰/۷ میلی‌متر به ۱/۲ میلی‌متر افزایش می‌یابد که دانه‌بندی کل از ریز به درشت افزایش می‌یابد. وضعیت نمونه‌های مارشال شبیه نمونه‌های سوپریو ژیراتوری کامپکتور است و اندازه فضای خالی هوا از ۱/۰ تا ۱/۵ میلی‌متر متغیر است. توزیع اندازه فضای خالی هوا در نمونه بار استاتیک اساساً باهم همپوشانی دارد و در محدوده ۰/۵ میلی‌متر تا ۱/۰ میلی‌متر باقی



شکل ۸. توزیع اندازه فضای خالی هوا (Yu et al., 2018)

جدول ۱. مقادیر فضای خالی و سنگدانه درشت در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی (Yu et al., 2018)

مخلوط	روش تراکم	مقدار فضای خالی هوا (%)			حجم سنگدانه درشت دانه (mm <sup>3</sup> )		
		اندازه گیری شده	محاسبه شده	اختلاف	اندازه گیری شده	محاسبه شده	اختلاف (%)
CIR-13	ژیراتوری کامپکتور	۱۱/۵	۱۰/۲	-۱/۳	۲۰۵۰۰۰	۱۹۶۱۲۰	-۴/۳
CIR-20		۱۱/۵	۱۰/۵	-۱/۰	۲۱۶۰۰۰	۲۰۷۳۰۷	-۴/۰
CIR-25		۱۱/۴	۱۰/۳	-۱/۱	۲۴۰۰۰۰	۲۳۰۹۸۷	-۳/۸
CIR-25A		۱۱/۴	۱۰/۲	-۱/۲	۲۳۲۰۰۰	۲۲۴۲۹۱	-۳/۳
CIR-13	مارشال	۱۱/۳	۱۰/۱	-۱/۲	۲۰۹۰۰۰	۱۹۹۴۷۶	-۴/۶
CIR-20		۱۱/۱	۱۰/۰	-۱/۱	۲۱۵۰۰۰	۲۰۶۵۴۳	-۳/۹
CIR-25		۱۰/۹	۹/۵	-۱/۴	۲۴۶۰۰۰	۲۳۵۵۸۰	-۴/۲
CIR-25A		۱۱/۸	۱۰/۶	-۱/۲	۲۳۲۰۰۰	۲۲۱۴۴۵	-۴/۵
CIR-13	بار استاتیک	۱۰/۷	۹/۹	-۰/۸	۱۴۲۰۰۰	۱۳۷۳۵۹	-۳/۳
CIR-20		۱۰/۵	۹/۵	-۱/۰	۱۵۷۰۰۰	۱۵۱۷۶۱	-۳/۳
CIR-25		۱۰/۶	۹/۵	-۱/۱	۱۹۱۰۰۰	۱۸۲۷۹۸	-۴/۳
CIR-25A		۱۱/۰	۱۰/۰	-۱/۰	۱۸۰۰۰۰	۱۷۲۵۶۳	-۴/۱

بر اساس این فرضیه، نسبت انحراف موقعیت یک سنگدانه درشت بر روی مقطعی از نمونه مخلوط آسفالتی به صورت رابطه های ذکر شده در ادامه محاسبه می شود ( Yu et al., 2018).

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{n=1}^{N_j} x_{nj}, \quad \bar{y}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{n=1}^{N_j} y_{nj}$$

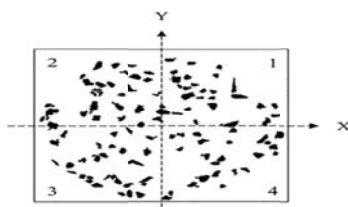
$$RPD_j = \frac{1}{R} \sqrt{\bar{x}_j^2 + \bar{y}_j^2}$$

### ۳-۲- شاخص یکنواختی<sup>۱۰</sup>

همگن بودن مخلوط آسفالت تضمینی مهم برای عملکرد طولانی مدت روسازی آسفالتی است. در این مطالعه، یک شاخص یکنواختی برای توصیف جامع مکان و توزیع کمی ذرات دانه های درشت روی سطح مقطع نمونه توسعه داده شد ( Yu et al., 2018).

### ۳-۲-۱- محاسبه شاخص یکنواختی

در شکل ۹، اگر توزیع سنگدانه های درشت یکنواخت باشد، مرکز همه دانه های درشت نسبت به مبدأ مختصات متقارن است.



شکل ۹. سیستم مختصات تصویر سنگدانه های درشت (Yu et al., 2018)

است. ضریب تغییرات کمیت سنگدانه‌های درشت بر روی یک بخش معین از نمونه مخلوط آسفالتی با استفاده از روابط آورده شده در ادامه محاسبه می‌شود (Yu et al., 2018).

$$N_j = \frac{N_{1j} + N_{2j} + N_{3j} + N_{4j}}{4}$$

$$CVQ_j = \frac{1}{\bar{N}_j} \sqrt{\frac{(N_{1j} - \bar{N}_j)^2 + (N_{2j} - \bar{N}_j)^2 + (N_{3j} - \bar{N}_j)^2 + (N_{4j} - \bar{N}_j)^2}{4}}$$

که در آن  $N_{1j}, N_{2j}, N_{3j}, N_{4j}$  تعداد سنگدانه‌های درشت در چهار ناحیه در بخش  $j$  هستند.  $N_{ij}$  میانگین تعداد سنگدانه‌های درشت در بخش  $j$  است. اندازه سنگدانه درشت درجات مختلفی از تأثیرگذاری بر یکنواختی دارد. سنگدانه درشت با مساحت بزرگ‌تر تأثیر بیشتری بر یکنواختی دارد؛ بنابراین، یک ضریب وزنی معرفی می‌شود (Yu et al., 2018).

$$w_{nj} = \frac{Area_{nj}}{Wholearea_j}$$

که در آن  $w_{nj}$  ضریب وزنی  $n$  امین دانه درشت در بخش  $j$  است. مساحت  $n$  ام دانه درشت است.  $Wholearea_j$  مجموع مساحت تمام سنگدانه‌های درشت در مقطع  $j$  است. در نهایت،  $UI$  به صورت زیر محاسبه می‌شود (Yu et al., 2018).

$$UI = \sum_{j=1}^J w_{nj} (RPD + CVQ_j) / J$$

که در آن  $J$  تعداد کل بخش‌ها است.

### ۳-۲-۲- تجزیه و تحلیل نتیجه محاسبه شاخص یکنواختی

مختلف تراکم نشان می‌دهد که به جز نمونه CIR-20، شاخص یکنواختی نمونه‌های سوپریو ژیراتوری کامپکتور حداقل و شاخص یکنواختی نمونه‌های بار استاتیک حداکثر هستند؛ بنابراین برای مخلوط آسفالت سرد بازیافتی، تراکم سوپریو ژیراتوری کامپکتور می‌تواند باعث توزیع یکنواخت مخلوط شود. روش تراکم بر همگنی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی تأثیر اندکی دارد ولی دانه‌بندی بسیار تأثیرگذارتر است (Yu et al., 2018).

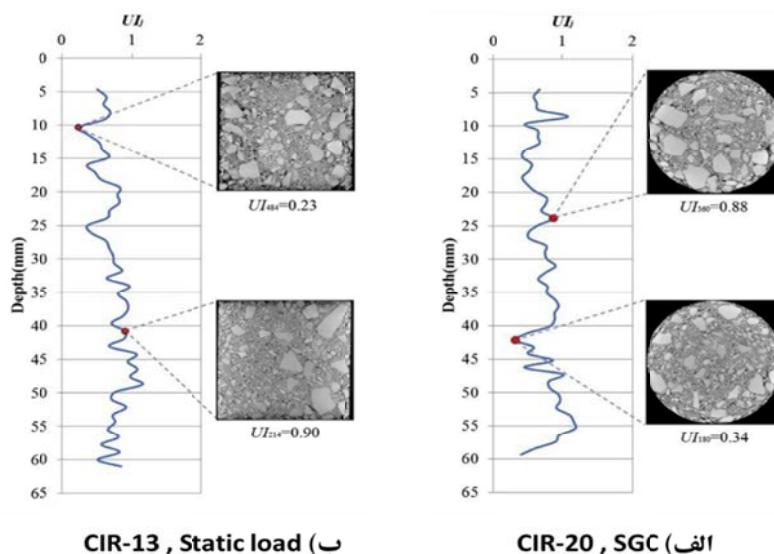
مشخصه یکنواختی تمام مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی با نتایج ارائه شده در جدول ۲ محاسبه شد. با درشت‌تر شدن دانه‌بندی کل، شاخص یکنواختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد، به این معنی که هر چه دانه‌بندی درشت‌تر باشد، یکنواختی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی بدتر می‌شود. واریانس شاخص یکنواختی با خود شاخص یکنواختی همبستگی خوبی دارد. هر چه واریانس بیشتر باشد، شاخص یکنواختی بیشتر است. مقایسه روش‌های

جدول ۲. نتایج محاسبه شاخص یکنواختی برای مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی در محل (Yu et al., 2018)

مخلوط	روش تراکم	نتایج محاسبات			
		RPD	CVQ	UI	Std
CIR-13	سوپرپیو ژیراتوری	۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۱۲
	کامپکتور				
	مارشال	۰/۱۶	۰/۳۵	۰/۵۱	۰/۱۵
CIR-20	سوپرپیو ژیراتوری	۰/۱۷	۰/۳۶	۰/۵۳	۰/۱۸
	کامپکتور				
	مارشال	۰/۲۳	۰/۴۱	۰/۶۴	۰/۱۵
CIR-25	سوپرپیو ژیراتوری	۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۵۵	۰/۲۰
	کامپکتور				
	مارشال	۰/۲۲	۰/۳۹	۰/۶۱	۰/۱۶
CIR-25A	سوپرپیو ژیراتوری	۰/۱۹	۰/۴۰	۰/۵۹	۰/۲۰
	کامپکتور				
	مارشال	۰/۲۰	۰/۴۴	۰/۶۴	۰/۲۱
CIR-25A	سوپرپیو ژیراتوری	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۶۹	۰/۲۰
	کامپکتور				
	مارشال	۰/۲۱	۰/۴۹	۰/۷۰	۰/۲۱
CIR-25A	سوپرپیو ژیراتوری	۰/۲۷	۰/۵۷	۰/۸۴	۰/۲۷
	کامپکتور				
	مارشال	۰/۳۲	۰/۶۷	۰/۹۹	۰/۳۱

بنابراین شاخص یکنواختی مقطع بزرگ است،  $UI_{360} = 0.88$ . سنگ‌دانه‌های درشت در ۱۸۰ امین تصویر از تصاویر اسکن شده، در کل مقطع پخش شده‌اند و توزیع یکنواخت است؛ بنابراین، شاخص یکنواختی این بخش کوچک است،  $UI_{180} = 0.34$ . شرایط یکنواختی مشابه را می‌توان از شکل ۱۰-ب، مشاهده کرد که نشان می‌دهد شاخص یکنواختی توسعه‌یافته در این مطالعه می‌تواند به‌طور مؤثری یکنواختی مخلوط‌های سرد بازیافتی درجا را نشان دهد (Yu et al., 2018).

شکل ۱۰، شاخص یکنواختی دو مخلوط آسفالت سرد بازیافتی درجا را نشان می‌دهد. همگنی نمونه‌ها در عمق‌های مختلف نامنظم است و شاخص یکنواختی مقطع با عمق متفاوت است. در شکل ۱۰-الف، سنگ‌دانه‌های درشت در ۳۶۰ امین تصویر از تصاویر توموگرافی اشعه ایکس، عمدتاً در قسمت پایین سمت چپ مقطع متمرکز شده‌اند و سمت راست بالای پر از ملات آسفالت است. توزیع دانه‌درشت در کل مقطع یکنواخت نیست،



شکل ۱۰. شاخص یکنواختی مقاطع مختلف در عمق‌های متفاوت (Yu et al., 2018)

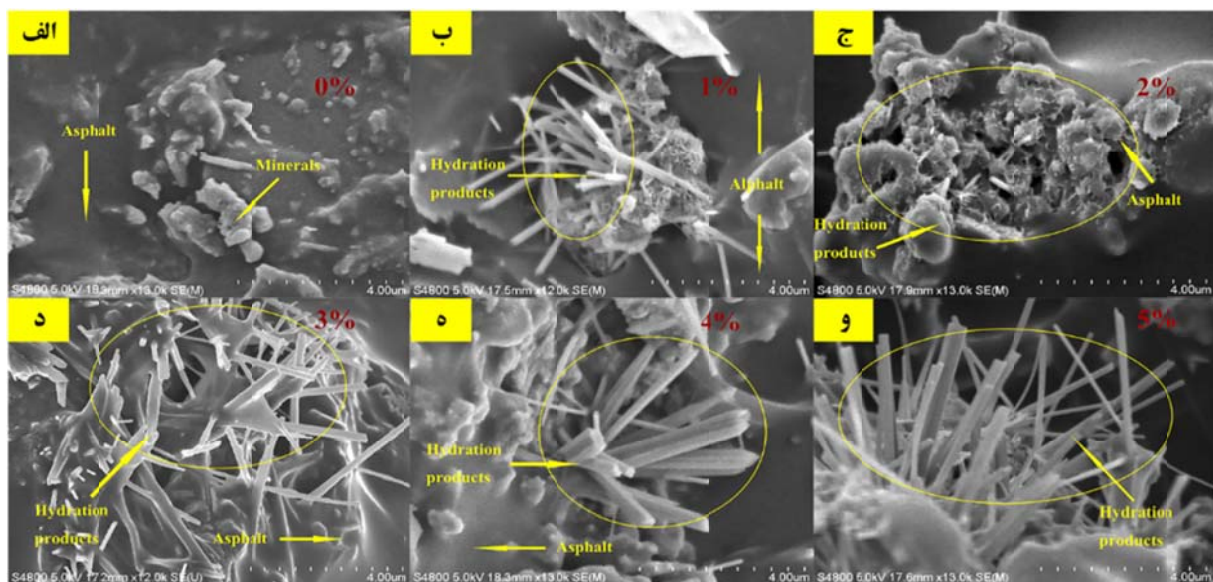
ریزساختار مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی که قادر است ریزساختار سطوح شکستگی را مشاهده کرده و ترکیب شیمیایی ملات را تجزیه و تحلیل کند، مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار ملات در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱-الف نشان داده شده است، سطح ملات صاف نیست اگرچه محصولات هیدراتاسیون نیز در سطح ملات مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین ملات از آسفالت و مواد معدنی تشکیل شده است. از شکل ۱۱-ب تا ۱۱-و، محصولات هیدراتاسیون در سطح ملات هنگامی که مقدار سیمان از ۱ درصد به ۵ درصد افزایش می‌یافت، مشاهده شد. با این وجود، همان‌طور که در شکل ۱۱-ب و ۱۱-ج، نشان داده شده است، نسبت محصولات هیدراتاسیون زمانی که مقدار سیمان ۱ درصد و ۲ درصد بود کمتر بود. از شکل ۱۱-د تا ۱۱-و، نسبت محصولات هیدراتاسیون با افزایش مقدار سیمان از ۳ تا ۵ درصد افزایش یافت. ترکیب ملات عمدتاً توسط محصولات هیدراتاسیون تشکیل شده بود. نسبت محصولات هیدراتاسیون زمانی که مقدار سیمان ۳ تا ۵ درصد بود غالب بود. در همین حال، شکل ۱۲ نشان می‌دهد که ارتباط بین غشای قیر و محصولات هیدراتاسیون پیوسته، صاف و بدون ترک بوده است. این نشان می‌دهد که چسبندگی خوبی بین غشای قیر و محصولات هیدراتاسیون وجود دارد (Yang, Yang, & Qian, 2019).

بنابراین، یکنواختی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی با دانه‌بندی از ریز به درشت به تدریج کاهش می‌یابد و در بین سه روش تراکم، سوپریو ژیراتوری کامپکتور از نظر یکنواختی بهترین است (Yu et al., 2018).

### ۳-۳- تشخیص حالت

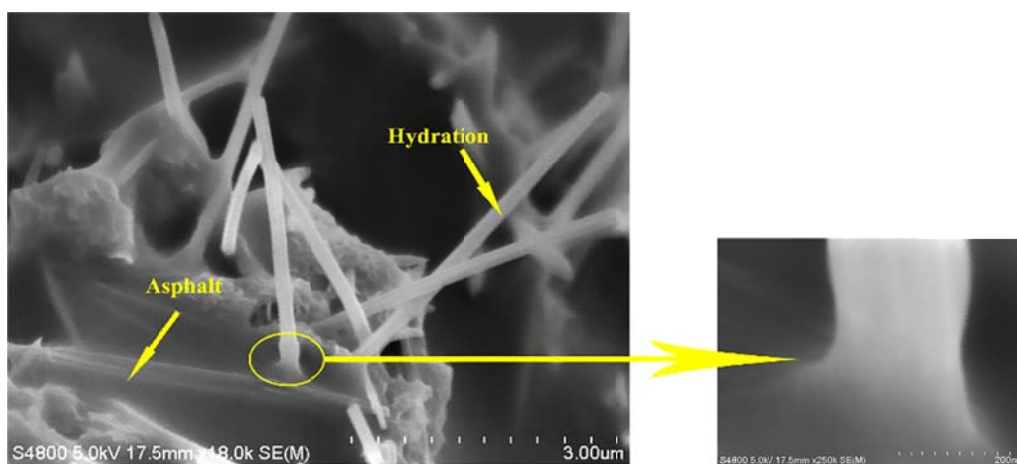
#### ۳-۳-۱- بررسی تأثیر انواع افزودنی‌ها

مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون<sup>۱۱</sup> یک فناوری اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای نگهداری و بازسازی روسازی آسفالت است. به منظور تعیین محدوده بهینه مقدار سیمان، برهم‌کنش پیچیده بین سیمان و قیر امولسیون و اثرات سیمان بر عملکرد مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون با مقادیر مختلف سیمان مورد بررسی قرار گرفت. سیمان نه تنها می‌تواند شکستن امولسیون را تسریع کند، بلکه می‌تواند سفتی مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون را نیز افزایش دهد. علاوه بر این، محصولات هیدراتاسیون می‌توانند چسبندگی بین ملات و سنگ‌دانه‌ها را با افزایش مقدار سیمان افزایش دهند (Yang, Yang, & Qian, 2019).



شکل ۱۱. ریزساختار ملات در مقادیر مختلف سیمان. الف) بدون سیمان ب) ۱ درصد سیمان ج) ۲ درصد سیمان د) ۳ درصد سیمان

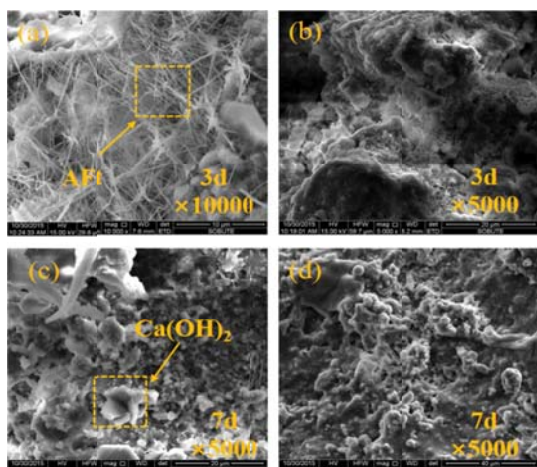
ه) ۴ درصد سیمان و) ۵ درصد سیمان (Yang, Yang, & Qian, 2019)



شکل ۱۲. حالت چسبندگی بین غشای قیر و محصولات هیدراتاسیون (Yang, Yang, & Qian, 2019)

دانه‌های جدید و روسازی آسفالت احیاء شده را افزایش دهد. از این رو، پایداری در دمای بالا و حساسیت به رطوبت با مقدار سیمان از ۱ تا ۵ درصد افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، از شکل ۱۱-ب و ۱۱-ج، زمانی که ملات ترکیب حاوی ۱ تا ۲ درصد سیمان باشد، قیر غالب است و محصول هیدراتاسیون توسط قیر محاصره می‌شود. مخلوط‌های باز یافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون ساخته شده با ملات حاوی ۱ تا ۲ درصد سیمان، مواد تثبیت شده با قیر است و رفتار آن شبیه مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمای پایین است. با این حال، همان‌طور که در شکل ۱۱-د تا ۱۱-و نشان داده شده است، ملاتی توسط محصولات

اثر اصلی سیمان بر عملکرد مخلوط‌های باز یافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون توسط نسبت محصولات هیدراتاسیون و حالت گیر افتادن بین قیر و محصولات هیدراتاسیون کنترل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱-د، نشان داده شده است، با افزایش مقدار سیمان از ۱ تا ۵ درصد، محصولات فرایند هیدراتاسیون به تدریج افزایش می‌یابد. محصولات هیدراتاسیون مواد سفت و سختی هستند که می‌توانند سفتی و پایداری دمایی مخلوط‌های باز یافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون را بهبود بخشند. در همین حال، محصولات هیدراتاسیون توزیع شده در ملات آسفالت می‌تواند چسبندگی بین ملات و سنگ‌دانه‌ها



شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی مخلوط آسفالت سرد بازیافتی امولسیون در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (Lin et al., 2018)

آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی برای بررسی بیشتر فرایند تشکیل ریزساختار در مخلوط و یافتن عامل تأثیرگذار بر تشکیل ریزساختار انجام می‌شود. شکل ۱۴ تصاویر مشاهده مستمر ملات قیر امولسیون را با مصالح RAP نشان می‌دهد. فرآیند حذف امولسیون ذرات قیر امولسیون در همان موقعیت به مدت ۲۴ ساعت مشاهده می‌شود. از ساعت ۳ تا ساعت ۵، مشاهده می‌شود که ذرات قیر امولسیون شروع به همجوشی تدریجی می‌کنند. پس از ۸ ساعت مشاهده، فرایند ادغام ذرات امولسیون به‌وضوح نمایان می‌شود. پس از ۲۴ ساعت مشاهده، ذرات قیر امولسیون به تدریج قیر غشایی یکپارچه را تشکیل داده‌اند و مرزهای قیر امولسیون تشکیل شده بین ذرات ناپدید می‌شوند (Lin et al., 2018).

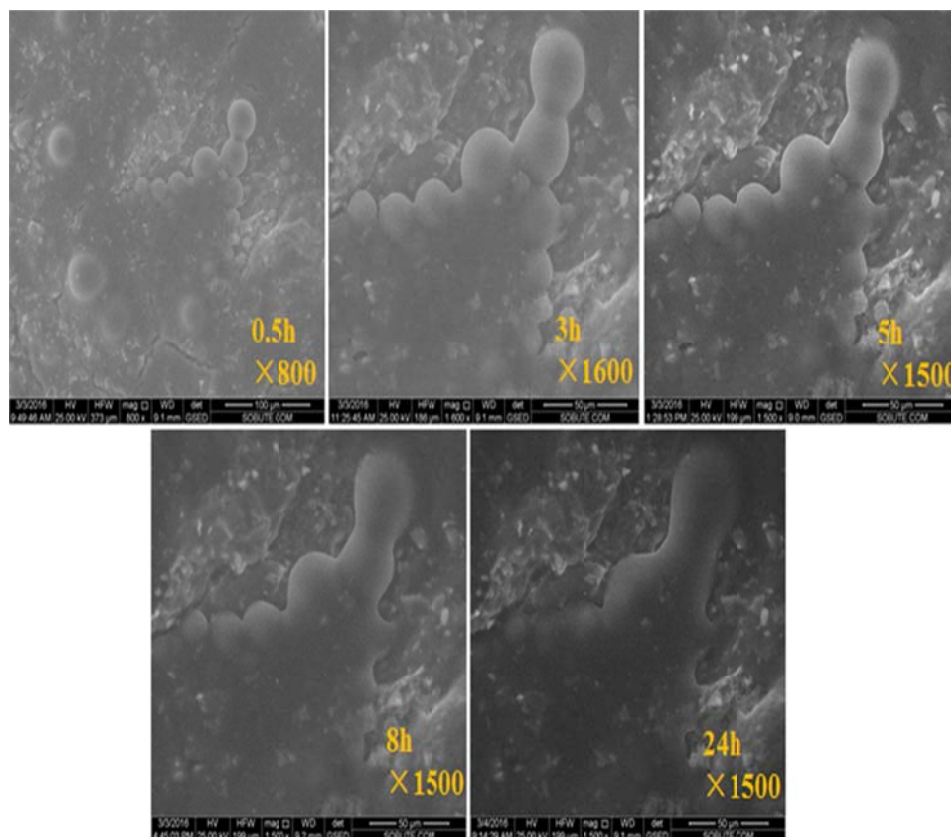
همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، فرایند تشکیل ریزساختار را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد. ابتدا ذرات قیر امولسیون با ذرات سیمان، پرکننده و همچنین سنگ‌دانه تماس پیدا می‌کنند. سپس فاصله بین ذرات قیر امولسیون و ذرات سیمان با تراکم به یکدیگر کمتر می‌شود. پس از تراکم، فرایند عمل‌آوری آغاز می‌شود و استحکام در مراحل اولیه ایجاد می‌شود. دمولسیفیکاسیون<sup>۱۳</sup> قیر امولسیون و هیدراته شدن سیمان منجر به تشکیل ریزساختار برای مخلوط بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون می‌شود (Lin et al., 2018).

هیدراتاسیون تشکیل‌شده است که مقدار سیمان مخلوط ۳ تا ۵ درصد می‌باشد. مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون ساخته‌شده با ملات حاوی ۳ تا ۵ درصد سیمان می‌تواند رفتار شکننده‌تری در شرایط دمایی پایین داشته باشد. به‌طورکلی، زمانی که مقدار سیمان ۱ تا ۲ درصد باشد، مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون دارای مقاومت ترک‌خوردگی در دمای پایین است؛ بنابراین با توجه به نتایج آزمایش‌های ریزساختار و عملکرد، مقدار بهینه سیمان ۱ تا ۲ درصد پیشنهاد می‌شود (Yang, Yang, & Qian, 2019).

### ۳-۲-۳- بررسی روند افزایش استحکام اولیه

در ادامه به بررسی ریزساختار و استحکام در مراحل اولیه (کمتر از ۱۴ روز) برای مخلوط آسفالت ۱۰۰٪ بازیافت شده سرد با قیر امولسیون و سیمان می‌پردازیم. تجربه عملی نشان داد که مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون مورد استفاده در زمستان یا مناطق سرد در چین ممکن است در مراحل اولیه (کمتر از ۱۴ روز) به دلیل استحکام پایین دچار زوال شوند. استحکام مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون در مراحل اولیه (کمتر از ۱۴ روز) برای صرفه‌جویی در زمان ساخت‌وساز و کاهش آسیب‌های اولیه جاده اهمیت زیادی دارد که به نگرانی حیاتی برای استفاده از این نوع مخلوط در مناطق سرد یا در فصل زمستان تبدیل می‌شود. استحکام اولیه مخلوط‌های بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون کمتر از مخلوط آسفالت داغ معمولی است (Lin et al., 2018).

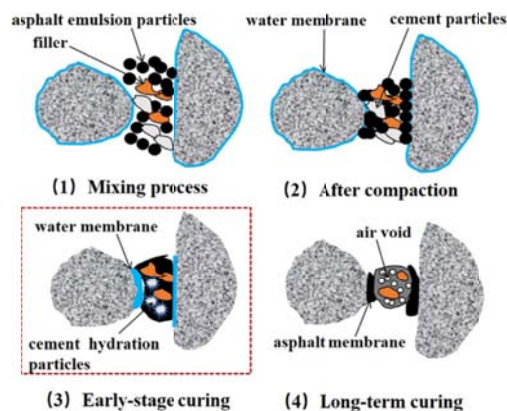
شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مخلوط بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون است که مورفولوژی داخلی آن را پس از عمل‌آوری ۳ و ۷ روزه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، محصولات هیدراتاسیون زیادی از جمله اترینگیت و هیدروکسید کلسیم در سطح مشترک بین سنگ‌دانه و ملات قیر امولسیون وجود دارد. محصولات هیدراتاسیون سوزنی<sup>۱۴</sup> سیمان، اصطکاک را در سطح مشترک مخلوط افزایش می‌دهد و در نتیجه استحکام آن در مراحل اولیه بهبود می‌یابد (Lin et al., 2018).



شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی از نمونه مخلوط بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون به مدت ۲۴ ساعت (Lin et al., 2018)

امولسیون اثرات کمتری دارند. فرآیند تشکیل ریزساختار توسط انتشار مولکولی بین ذرات قیر امولسیونی انجام می‌شود. همچنین، افزودن سورفکتانت و تسریع در دمولسیفیکاسیون قیر امولسیون، توانایی بهبود قابل توجهی در استحکام اولیه ۳ و ۷ روزه را داشته و این روش به عنوان یک پیشنهاد کاربردی مورد توصیه است (Lin et al., 2018).

در جدول ۳، برخی از تحقیقات انجام شده به وسیله بررسی ریزساختار به تفکیک روش بررسی، نوع مخلوط آسفالتی و ویژگی‌های مورد بررسی قرار گرفته در تحقیقات، به طور خلاصه آورده شده است.



شکل ۱۵. شماتیک تشکیل ریزساختار مخلوط بازیافتی سرد با استفاده از قیر امولسیون (Lin et al., 2018)

بر اساس این مطالعه، می‌توان به این نتیجه رسید که میزان رطوبت و رطوبت به‌طور قابل توجهی بر استحکام مراحل اولیه تأثیر می‌گذارند، در حالی که دمای عمل‌آوری و مقدار قیر

جدول ۳. روش‌های تحلیل ریزساختار و بررسی خواص در تحقیقات آسفالت

روش بررسی ریزساختار	نوع مخلوط آسفالتی	خصوصیات بررسی شده از طریق بررسی ریزساختار	مراجع
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی</li> <li>- میکروسکوپ نوری</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- مورفولوژی</li> <li>- بررسی رفتار شکسته شدن امولسیون</li> </ul>	(Wang et al., 2020)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ نوری</li> <li>- پراش اشعه ایکس</li> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی حل شدن ذرات خاکستر بادی</li> <li>- شکسته شدن امولسیون</li> </ul>	(Li et al., 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی اتصالات تشکیل شده</li> <li>- بررسی فرایند عمل آوری</li> </ul>	(Chen et al., 2020)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی ریزساختار اتصالات شکست</li> </ul>	(Lin, Hong, & Xiao, 2017)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی ریزساختار ملات سیمان</li> <li>- بررسی ریزساختار اتصالات شکست</li> </ul>	(Lin et al., 2020)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی رفتار ترک خستگی</li> </ul>	(Lyu et al., 2019)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی</li> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی تغییرات ریزساختار در مراحل اولیه</li> </ul>	(Lin et al., 2018)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- پراش اشعه ایکس</li> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی رفتار ترک خستگی</li> </ul>	(Lin et al., 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- پراش اشعه ایکس</li> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی با استفاده از کف قیر	<ul style="list-style-type: none"> <li>- توزیع فضای خالی</li> <li>- مورفولوژی</li> </ul>	(Z. Li et al., 2019)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- پراش اشعه ایکس</li> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت بازیافتی با استفاده از خاکستر بادی و ژئوپلیمر	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی توسعه ریزساختار</li> </ul>	(Hoy, Horpibulsuk, & Arulrajah, 2016)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ نیروی اتمی</li> <li>- پراش اشعه ایکس</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی فرایند تغییرات حالت و ریزساختار مخلوط</li> </ul>	(Yao, Xu, & Xu, 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی پراکنندگی افزودنی</li> </ul>	(Wang et al., 2023)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی ریزساختار افزودنی</li> <li>- مورفولوژی</li> </ul>	(Kong et al., 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- پراش اشعه ایکس</li> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی فرایند تغییرات حالت</li> </ul>	Abbasnejad & (Modarres, 2020)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- پراش اشعه ایکس</li> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی</li> </ul>	آسفالت امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی فرایند تغییرات حالت</li> </ul>	Yao, Tan, & Xu, (2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ نیروی اتمی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بررسی ریزساختار اتصالات</li> <li>- بررسی فرایند تغییرات حالت</li> </ul>	(Wang et al., 2022)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- میکروسکوپ الکترونی روبشی</li> </ul>	آسفالت سرد بازیافتی امولسیون	<ul style="list-style-type: none"> <li>- مورفولوژی</li> </ul>	(Wang et al., 2021)

#### ۴- نتیجه گیری

مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی در سال‌های اخیر به دلیل مزایای بی‌شمارشان، از جمله کاهش اثرات زیست محیطی و مقرون به صرفه بودن، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. ریزساختار این مخلوط‌ها نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی آن‌ها دارد که برای کاربرد موفقیت‌آمیز آن‌ها در ساخت روسازی مهم است. تجزیه و تحلیل ریزساختار، با استفاده از روش‌های مختلف مانند میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری، پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ نیروی اتمی، دید ارزشمندی را در مورد ویژگی‌های ریزساختاری مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی، از جمله بررسی فضای خالی هوا، شاخص یکنواختی، توزیع افزودنی و استحکام اولیه ارائه می‌دهند. بررسی ریزساختار این مخلوط‌ها و تأثیر مواد افزودنی بر خواص آن‌ها برای بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها و اطمینان از دوام طولانی‌مدت آن‌ها ضروری است؛ بنابراین، ادامه تحقیقات بر روی تحلیل ریزساختار و کاربرد آن در بررسی خواص مواد برای اجرای موفقیت‌آمیز مخلوط آسفالت سرد بازیافتی در ساخت روسازی ضروری است. پیشنهاد می‌شود که در مورد تحلیل ریزساختار مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی، تحقیقات بیشتری انجام شود و تأثیر افزودنی‌های مختلف بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی این مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، این ویژگی‌ها در طراحی و بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالت سرد بازیافتی برای کاربردهای خاص در نظر گرفته شود. به علاوه، می‌توان روش‌های جدید و نوآورانه‌ای را در تحلیل ریزساختار مواد توسعه داد تا نهایتاً یک روسازی پایدار و مناسب به دست آید.

#### ۵- پی‌نوشت‌ها

1. Reclaimed Asphalt Pavement
2. Microstructure
3. Optical Microscopy
4. X-Ray Diffraction (XRD)
5. Scanning Electron Microscopy (SEM)
6. Transmission Electron Microscopy (TEM)

7. Atomic Force Microscopy (AFM)
8. Superpave Gyrotory Compactor
9. Computed Tomography
10. Uniformity Index
11. Cold Recycled Mixes Using Asphalt Emulsion
12. Needle-Like Hydration Products (Aft)
13. Demulsification

#### ۶- مراجع

- Abbasnejad, S. Y., & Modarres, A., (2020). Effect of setting accelerator additive on short-and long-term properties of cold recycled mixture containing bitumen emulsion-cement composites. *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 1932-1954.
- B.D. Cullity, S. R. S. (2014). *Elements of X-Ray Diffraction* (Third ed.). Pearson Education Limited. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=a334b668e19ba9a86c96937522a7dabf>
- Bharat Bhushan (auth.), P. B. B. e., (2010). *Springer Handbook of Nanotechnology* (3 ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=d2a40c862f84d366ec521203953980a3>
- Buczyński, P., Šrámek, J., & Mazurek, G., (2023). The Influence of Recycled Materials on Cold Mix with Foamed Bitumen Properties. *Materials*, 16(3), 1208.
- Chen, T., Ma, T., Huang, X., Ma, S., Tang, F., & Wu, S., (2020). Microstructure of synthetic composite interfaces and verification of mixing order in cold-recycled asphalt emulsion mixture. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121467.
- David B. Williams, C. B. C., (2009). *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science* (2nd ed.). Springer. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=170796c59332fba41ce673cb97977e9b>
- David Brandon, W. D. K., (2008). *Microstructural Characterization of Materials*. Wiley.
- Di Gianfrancesco, A., (2017). 8 - Technologies for chemical analyses, microstructural and inspection investigations. In A. Di Gianfrancesco (Ed.), *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*. 197-245. Woodhead Publishing. [doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100552-1.00008-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100552-1.00008-7)
- Farooq, M. A., & Mir, M. S., (2017). Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in warm mix asphalt (WMA) pavements: a review. *Innovative*

- characteristics of cold recycled mixtures using foamed asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 230, 956-965.
- Lin, J., Hong, J., & Xiao, Y., (2017). Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement. *Journal of Cleaner Production*, 156, 337-344.
- Lin, J., Huo, L., Xiao, Y., Xu, F., & Pan, P., (2020). Long-term performance characteristics and interface microstructure of field cold recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 259, 120406.
- Lin, J., Huo, L., Xu, F., Xiao, Y., & Hong, J., (2018). Development of microstructure and early-stage strength for 100% cold recycled asphalt mixture treated with emulsion and cement. *Construction and Building Materials*, 189, 924-933.
- Lin, J., Wei, T., Hong, J., Zhao, Y., & Liu, J., (2015). Research on development mechanism of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using emulsion asphalt. *Construction and Building Materials*, 99, 137-142.
- Lin, J., Xia, Y., Huo, L., Hong, J., Zhu, X., & Wu, S., (2022). Fatigue crack evolution and characteristic of cold recycled asphalt mixture in different dimensions. *Construction and Building Materials*, 325, 126818.
- Lin, J., Zhong, C., Hong, J., Zhu, X., & Xiao, Y., Investigation on Performance and Microscopic Mechanism of Cold Recycled Mixture with Geopolymer and Asphalt Emulsion. Available at SSRN 4549305.
- Liu, Z., Sun, L., Zhai, J., & Huang, W., (2022). A review of design methods for cold in-place recycling asphalt mixtures: Design processes, key parameters, and evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 133530.
- Lu, K., (2014). Nanomaterials. Making strong nanomaterials ductile with gradients. *Science*, 345(6203), 1455-1456.
- doi.org/10.1126/science.1255940**
- Lyu, Z., Shen, A., Qin, X., Yang, X., & Li, Y., (2019). Grey target optimization and the mechanism of cold recycled asphalt mixture with comprehensive performance. *Construction and Building Materials*, 198, 269-277.
- Ma, T., Wang, H., Zhao, Y., Huang, X., & Pi, Y., (2015). Strength mechanism and influence factors for cold recycled asphalt mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- Ma, Y., Polaczyk, P., Hu, W., Zhang, M., & Huang, B. (2021). Quantifying the effective mobilized RAP content during hot in-place recycling techniques. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127953. **doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127953**
- 53**
- Infrastructure Solutions*, 2(1), 10. **doi.org/10.1007/s41062-017-0058-7**
- Gao, L., Ni, F., Luo, H., & Charmot, S., (2015). Characterization of air voids in cold in-place recycling mixtures using X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 84, 429-436.
- Gu, F., Ma, W., West, R. C., Taylor, A. J., & Zhang, Y., (2019). Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1513-1523.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., & Arulrajah, A., (2016). Strength development of recycled asphalt pavement-fly ash geopolymer as a road construction material. *Construction and Building Materials*, 117, 209-219.
- Hull D., B. D. J., (2011). *Introduction to Dislocations* (5ed. ed.). <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=bf2580fa563989558cbeed97bb13bc5>
- Jin, D., Ge, D., Chen, S., Che, T., Liu, H., Malburg, L., & You, Z., (2021). Cold in-place recycling asphalt mixtures: Laboratory performance and preliminary ME design analysis. *Materials*, 14(8), 2036.
- Joseph Goldstein, D. E. N., David C. Joy, Charles E. Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer, J.R. Michael. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis* (3rd ed.). Springer. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=2b40548ad6465ef47b9d601aueb80900>
- Kong, L., Lu, Z., He, Z., Shen, Z., Xu, H., Yang, K., & Yu, L., (2022). Characterization of crack resistance mechanism of fiber modified emulsified asphalt cold recycling mixture based on acoustic emission parameters. *Construction and Building Materials*, 327, 126939.
- Leng, Y., (2013). *Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods* (2nd edition ed.). Wiley-VCH.
- Li, Q., Zhu, C., Zhang, H., & Zhang, S., (2022). Evaluation on long-term performance of emulsified asphalt cold recycled mixture incorporating fly ash by mechanistic and microscopic characterization. *Construction and Building Materials*, 319, 126120.
- Li, X., Wen, H., Edil, T. B., Sun, R., & VanReken, T. M., (2013). Cost, energy, and greenhouse gas analysis of fly ash stabilised cold in-place recycled asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 537-550. **doi.org/10.1080/14680629.2013.779302**
- Li, Y., Lyv, Y., Fan, L., & Zhang, Y., (2019). Effects of cement and emulsified asphalt on properties of mastics and 100% cold recycled asphalt mixtures. *Materials*, 12(5), 754.
- Li, Z., Hao, P., Liu, H., & Xu, J., (2019). Effect of cement on the strength and microcosmic

- Taherkhani, H., & Noorian, F. (2020). Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 21(5), 1238-1257. [doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220](https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220)
- Wang, D., Guo, T., Chang, H., Yao, X., Chen, Y., & Wang, T., (2021). Research on the performance of regenerant modified cold recycled mixture with asphalt emulsions. *Sustainability*, 13(13), 7284.
- Wang, J., Qin, Y., Xu, J., Chang, R., & Liu, L., (2022). Microscale Property Evaluation of the Interface between Cement Emulsified Asphalt and Aged Asphalt in Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 04022086.
- Wang, M., Huo, T., Xing, C., & Wang, Y., (2023). Influence of Fiber Mixing Process on the Cracking Resistance of Cold Recycled Asphalt Mixture. *Applied Sciences*, 13(2), 999.
- Wang, Z., Dai, N., Wang, X., Li, G., & Guo, H., (2020). Early-stage road property improvements of cold recycled asphalt emulsion mixture with microwave technology. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121451.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirhanian, S., (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579-604.
- Yang, Y., Yang, Y., & Qian, B., (2019). Performance and microstructure of cold recycled mixes using asphalt emulsion with different contents of cement. *Materials*, 12(16), 2548.
- Yao, X., Tan, L., & Xu, T., (2022). Preparation, properties and compound modification mechanism of waterborne epoxy resin/styrene butadiene rubber latex modified emulsified asphalt. *Construction and Building Materials*, 318, 126178.
- Yao, X., Xu, H., & Xu, T., (2022). Syncretization mechanism between emulsified asphalt and aged asphalt in cold recycled asphalt mixture using developed demulsification-dehydration method. *Construction and Building Materials*, 326, 126860.
- Yu, B., Gu, X., Ni, F., & Gao, L., (2018). Microstructure characterization of cold in-place recycled asphalt mixtures by X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 171, 969-976.
- Ma, Y., Polaczyk, P., Xiao, R., Jiang, X., Zhang, M., Liu, Y., & Huang, B. (2022). Influence of mobilized RAP content on the effective binder quality and performance of 100% hot in-place recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 342, 127941. [doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127941](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127941)
- Ma, Y., Wang, S., Zhou, H., Hu, W., Polaczyk, P., & Huang, B. (2022). Recycled polyethylene and crumb rubber composites modified asphalt with improved aging resistance and thermal stability. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130102. [doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130102](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130102)
- Meyers, M. A., Mishra, A., & Benson, D. J. (2006). Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in materials science*, 51(4), 427-556.
- Mokobi, F. (2022). *Atomic Force Microscope (AFM)- Definition, Principle, Parts, Uses*. <https://microbenotes.com/atomic-force-microscope-afm/>
- Pantini, S., Borghi, G., & Rigamonti, L., (2018). Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology. *Waste Management*, 80, 423-434. [doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.035](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.035)
- Peter Eaton, P. W., (2010). *Atomic Force Microscopy*. Oxford University Press, USA. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=22d557229da2b0792a000372220c2b7a>
- Pi, Y., Huang, Z., Pi, Y., Li, G., & Li, Y., (2019). Composition design and performance evaluation of emulsified asphalt cold recycled mixtures. *Materials*, 12(17), 2682.
- Pi, Y., Li, Y., Pi, Y., Huang, Z., & Li, Z., (2019). Strength and micro-mechanism analysis of cement-emulsified asphalt cold recycled mixture. *Materials*, 13(1), 128.
- Santos, J., Flintsch, G., & Ferreira, A., (2017). Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 15-31. [doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025)
- Taheri-Shakib, J., & Al-Mayah, A. (2023). A review of microstructure characterization of asphalt mixtures using computed tomography imaging: Prospects for properties and phase determination. *Construction and Building Materials*, 385, 131419.

# Structural Attributes in Cold Recycled Asphalt Mixes

## Microstructure Insights

*Hassan Ziari, Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Hossien Tavakoli, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mehdi Zalnezhad, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*E-mail: m.zalnezhad.313@gmail.com*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

### ABSTRACT

This study provides a comprehensive exploration of the microstructure characteristics of cold recycled asphalt mixes, with a primary focus on their environmental benefits. Utilizing a suite of analytical techniques including Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy, Transmission Electron Microscopy, X-ray diffraction, and Scanning Force Microscopy, the study delves into four pivotal microstructure facets: air voids and coarse aggregates, uniformity index, the impact of diverse additives, and the process of augmenting initial strength. The findings reveal that several factors, notably aggregate grading and compaction methodology, exert a notable influence on the microstructure of cold recycled mixes. Specifically, transitioning from fine to coarse grading amplifies void space within the cold asphalt mix. Moreover, both compaction methods and aggregate grading significantly alter the size and distribution of air voids. The study establishes that as grading shifts from fine to coarse, the uniformity of cold recycled asphalt mixes experiences a gradual decline. Additionally, the Superpave Gyratory compaction method emerges as the most effective among the three compaction methods considered. Furthermore, the investigation assesses the impact of diverse additives on microstructure and overall performance. Notably, optimal cement content for cold recycled asphalt, when using bitumen emulsion, is found to be in the range of 1-2%, ensuring resistance against cracking at low temperatures. In general, this research indicates the importance of considering the microstructure in the design and evaluation of cold recycled asphalt mixtures, which can help to develop sustainable asphalt mixtures.

**Keywords:** Cold Asphalt, Microstructure, Cold Recycled Asphalt, Scanning Electron Microscope, X-Ray Diffraction