

## بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به

### عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوط‌های آسفالتی

سینا واحدی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسن طاهرخانی (مسئول مکاتبات)، دانشیار راه و ترابری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

**E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir**

ساسان وهابی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷

#### چکیده

هدف این مطالعه بررسی خصوصیات ماستیک و مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر های ضایعاتی کارخانه‌های تولید روی است. فیلرهای کیک لیچ و کیک کبالت در درصد‌های مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ با فیلر آهکی ترکیب شده و در ماستیک و مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. آزمایش‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ و انکمی بر روی ماستیک‌ها انجام شد. بر روی مخلوط‌های آسفالتی آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی و کانتابرو در حالت خشک و مرطوب انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در ماستیک‌های ساخته شده با افزایش مقادیر کیک کبالت و کیک لیچ به عنوان فیلر، نقطه نرمی برای هر دو فیلر افزایش و درجه نفوذ و کشش پذیری کاهش داشته است. نسبت مارشال با افزایش مقدار فیلرهای ضایعاتی بیشتر می‌شود و برای مخلوط‌های حاوی کیک لیچ نسبت مارشال بزرگتری به دست می‌آید. با افزودن هر دو نوع فیلر مقدار حساسیت رطوبتی افزایش پیدا کرد که این موضوع در مخلوط‌های آسفالتی حاوی کیک کبالت بیشتر نمایان می‌باشد. آزمایش کانتابرو نشان داد که با افزایش مقدار فیلرهای ضایعاتی مقاومت به شن زدگی افزایش می‌یابد و مخلوط‌های حاوی کیک کبالت مقاومت به شن زدگی کمتری دارند. تاثیر رطوبت به مقاومت به شن زدگی مشابه تاثیر آن به مقاومت کششی می‌باشد و برای مخلوط‌های حاوی کیک کبالت رطوبت اثر مخرب بیشتری دارد. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از فیلر ضایعاتی کیک لیچ تا ۷۵٪ بدون نگرانی در مورد آسیب رطوبتی قابل استفاده است. اما، در صورتی که از فیلر کیک کبالت استفاده شود باید موضوع حساسیت رطوبتی را مورد توجه قرار داد

واژه‌های کلیدی: فیلر ضایعاتی، ماستیک، مخلوط آسفالتی، آسیب رطوبتی، شن زدگی

## ۱. مقدمه

(2009, Moraes and Bahia 2015). مشخصاتی مثل

چگالی ذرات، فضای خالی ریگدن<sup>۳</sup>، آب دوستی، بافت سطحی، سطح مخصوص، ترکیبات شیمیایی و کانی شناسی، دانه بندی، دامنه خمیری، شکل ذرات و .... هر کدام به نوعی بر خواص مختلف ماستیک و مخلوط آسفالتی تاثیر گذار هستند. در حقیقت، بسیاری از مشخصات عملکردی مخلوطهای آسفالتی شامل حساسیت دمایی، مقاومت به تغییر شکل، مقاومت به ترک خوردگی، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی، مقاومت به پیرشدگی و... وابستگی زیادی به خصوصیات فیلر مورد استفاده دارد (Movilla-Quesada et al. 2015, Liao et al., 2012, Choudhary et al. 2020).

به طور سنتی از غبار ایجاد شده در فرآیند خریدار سنگ، سیمان و آهک هیدراته به عنوان فیلر در مخلوطهای آسفالتی استفاده می شود و این فیلر ها عملکرد رضایت بخشی نیز در مخلوطهای آسفالتی داشته اند (Lesueur et al., 2013; Kavussi and Bakhtiari, 2013). اما، مشکل استفاده از این فیلرها، که همراه با بهره برداری وسیع از معادن طبیعی هستند، کاهش این منابع و افزایش هزینه تولید آنها به دلیل افزایش فاصله حمل می باشد. مشکل دیگر مسائل زیست محیطی ایجاد شده توسط بهره برداری از معادن طبیعی است، مثل از بین بردن لایه های نگهدارنده آبهای زیرزمینی، پایین آوردن سطح آبهای زیر زمینی، از بین بردن پوشش گیاهی و تخریب اکوسیستم. به همین دلیل، خیلی از مناطق محدودیتهایی را در بهره برداری از معادن اعمال می کنند، که منجر به افزایش هزینه تولید آسفالت گردیده است. مشکلات زیست محیطی و افزایش هزینه مربوط به فیلرهای سنتی منجر به این شده است که محققین به استفاده از مواد جایگزین توجه نمایند. از جمله این مواد استفاده از ضایعات مختلف شهری و صنعتی و ساختمانی به عنوان فیلر در مخلوطهای آسفالتی می باشد. استفاده از ضایعات به عنوان فیلر علاوه بر کاهش هزینه تولید آسفالت باعث کاهش اثرات مخرب زیست محیطی مواد ضایعاتی می گردد. اما، استفاده از مواد جایگزین نیاز به بررسی

بتن آسفالتی گرم یکی از پر مصرف ترین مصالح در پروژه های روسازی در ایران و دنیاست و عملکرد آن تاثیر زیادی بر روی خرابی های روسازی آسفالتی دارد (Sun et al., 2020; Khavandi et al., 2019). بتن آسفالتی یک نوع ماده مرکب چند فازه می باشد که مخلوطی از مصالح سنگی با دانه بندی پیوسته، شامل مصالح درشت دانه، ریزدانه و فیلر، و قیر است که در ماهای معینی مخلوط و متراکم می گردد. این ماده مرکب مستعد بروز انواع خرابی ها شامل، شیارشدگی<sup>۱</sup>، ترک خوردگی، شن زدگی<sup>۲</sup> و آسیب رطوبتی است که پتانسیل رخداد این خرابی ها متاثر از کیفیت اجزای تشکیل دهنده آن، نسبت اختلاط و شرایط ساخت و اجرای آن می باشد. یکی از مهمترین اجزای تشکیل دهنده بتن آسفالتی فیلر می باشد که عموماً به ذراتی از مصالح سنگی که ریزتر از ۰,۰۷۵ میلی متر هستند اطلاق می گردد. وزن فیلر نسبت به وزن کل بتن آسفالتی معمولاً از ۲ تا ۱۰٪ می باشد، ولی ویژگی های آن تاثیر زیادی بر عملکرد مخلوط آسفالتی دارد. از سال ۱۹۱۴ که برای اولین بار تاثیر فیلر بر عملکرد بتن آسفالتی گزارش شده است (Tian et al., 2021)، تحقیقات زیادی انجام گرفته که در آنها تاثیر مشخصات فیلر بر عملکرد مخلوطهای آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته اند. در حال حاضر، عموم محققین باور دارند که ماستیک آسفالت که از ترکیب فیلر با قیر ایجاد می شود، نقش پیوند دهنده مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی را ایفا کرده، فضای خالی بین مصالح سنگی را پر کرده و بارها را انتقال می دهد (Wang et al., 2011; Chen et al., 2011). عملکرد سازه ای مخلوط آسفالتی به مقدار زیادی متاثر از ماستیک قیری است و در ماده مرکب مخلوط آسفالتی ضعیف ترین بخش آن ماستیک قیری است (Tan and Guo, 2014). ماستیک قیری نیز به مقدار زیادی متاثر از مشخصات قیر، نسبت مقدار فیلر به قیر (Ye et al. 2017, Ma et al. 2009) و مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژی فیلر می باشد (Wu et al. 2011, Ma et al.).

بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی

تولید این فلز مطالعات و تحقیقات عملی و علمی جدی صورت نگرفته است، این پسماندهای باقی مانده، موجب آلودگی بسیار زیاد محیط اطراف کارخانه‌ها و در نهایت باعث آسیب جدی به محیط زیست شده‌اند. همچنین تحقیقات و کارهای انجام شده بر روی این پسماندها بیشتر در محدوده‌ی آزمایشگاهی بوده و برای بازیافت و تولید صنعتی آن‌چنان مقرون به صرفه نمی‌باشند و روش‌هایی که در سایر نقاط جهان انجام می‌شوند شامل روش‌های رسوبی و یا استخراج حلالی هستند که گران قیمت بوده و موجب وابستگی صنعت به تکنولوژی آن‌ها می‌شود. استان زنجان یکی از مراکز اصلی تولید روی در کشور می‌باشد که ضایعات این تولیدات در زمینی به مساحت ۲۲ هکتار نزدیک به شهر زنجان دپو شده و مشکلات زیست محیطی فراوانی به همراه داشته‌اند. این پسماندها شامل کیک لیچ<sup>۴</sup>، کیک کبالت<sup>۵</sup>، کیک نیکل<sup>۶</sup> و همچنین دوده روی<sup>۷</sup> می‌باشند. مطالعات انجام گرفته در خصوص استفاده از ضایعات صنعت روی در تولید آسفالت بسیار محدود می‌باشد. اسلام و همکارانش از جاروسیت که یک ماده جامد ضایعاتی در صنعت روی می‌باشد در ماستیک و مخلوط آسفالتی استفاده کردند و آن را با خاکستر بادی و پودر سنگ مقایسه کردند و نشان دادند که از نظر مقاومت به آسیب رطوبتی، ترک خوردگی و شیارشدگی عملکرد بهتری از سایر فیلرها دارند (Islam et al., 2021). فخری و همکارانش نیز خصوصیات بتن آسفالتی گرم حاوی فیلر ساخته شده از سرباره روی را از نظر مقاومت در برابر آسیب رطوبتی، شیارشدگی و خودترمیمی<sup>۸</sup> بررسی نموده و دریافتند که فیلر ضایعاتی عملکرد بهتری از فیلر آهکی دارد (Fakhri et al., 2020). در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۲ توسط وهابی و همکارانش صورت گرفت نشان داده شد که استفاده از کیک نیکل به علت اثرات زیست محیطی مخرب، قابل استفاده در بتن آسفالتی نیست (Vahabi et al., 2022)، و فیلر دوده روی بهترین عملکرد در بتن آسفالتی را نتیجه داد. همچنین، آنها نشان دادند که فیلر کیک کبالت و کیک لیچ از نظر آسیب رطوبتی تامین کننده

دقیق آنها از نظر فنی و زیست محیطی دارد. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که استفاده از انواع مختلفی از مواد ضایعاتی به عنوان فیلر مورد تحقیق قرار گرفته است. استفاده از انواع خاکسترها مثل خاکستر پوسته برنج (Al-hdabi 2016, Mistry et al. 2018, Arabani et al. 2017)، خاکستر نیشکر (Zainudin et al. 2016)، خاکستر زباله‌های شهری (Woszuk et al. 2019)، خاکستر بادی ذغال سنگ (Faheem et al. 2017, Russo et al., 2021)، ضایعات صنایع شامل ضایعات سرامیک (Aburkaba and Munaindy 2010, Rochlany et al., 2021)، ضایعات صنعت سیمان (Ekblad et al. 2015, Bolden et al. 2013)، ضایعات صنایع آلومینیم (Choudhary et al. 2018, Zhang et al. 2018)، ضایعات صنعت فولاد (Munaindy and Aburkaba 2011, Munaindy et al. 2009)، ضایعات صنعت مس (Modarres and Alinia 2016, Bengar 2019, Nazer et al., 2016)، ضایعات صنایع کاغذ (Passandin et al. 2016)، ضایعات شیشه (Saltan et al. 2015, Androjjic and Dimter 2016)، ضایعات ساختمانی شامل بتن و آجر (Chen et al., 2011, Choudhary et al., 2021) از جمله موارد استفاده از ضایعات به عنوان فیلر در مخلوطهای آسفالتی می‌باشند. چودهاری و همکارانش مرور جامعی بر ادبیات فنی در خصوص استفاده از ضایعات به عنوان فیلر انجام داده‌اند (Choudhary et al., 2020).

فلز روی جزء پرمصرف‌ترین فلزات غیر آهنی محسوب می‌شود. خواص فیزیکی، شیمیایی، آلیاژها و ترکیبات متنوع این فلز، آن را در دسته پرمصرف‌ترین فلزات قرار داده‌است، به طوری که بعد از فولاد، آلومینیوم و مس در رتبه چهارم تقاضا و مصرف قرار دارد. مهم‌ترین کاربرد فلز روی، در گالوانیزه کردن فولاد می‌باشد. از آنجایی که صنعت روی، یک صنعت جدید و نوپا در کشور می‌باشد و هنوز بر روی پسماندهای باقی مانده از فرآیند

مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق، از نوع آهک دولومیتی بوده و از شرکت نگین گستران راه زندیگان واقع در استان زنجان تهیه شده است. جدول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات فنی، چگالی‌ها و جذب آب مصالح سنگی را نشان می‌دهند. دانه‌بندی مورد استفاده برای مصالح سنگی مخلوط مطابق با دانه‌بندی شماره ۴ نشریه شماره ۲۳۴ با حداکثر اندازه مصالح ۱۹ میلی‌متر انتخاب گردیده است. در شکل ۱ دانه‌بندی مورد استفاده برای مخلوطها و دانه بندی محدوده مشخص شده توسط آیین‌نامه نشان داده شده‌اند.

قیر مصرفی در این تحقیق، قیر ۷۰-۶۰ درجه نفوذی تولید شرکت ایمن راه ایثار تبریز می‌باشد. مشخصات فنی قیر استفاده شده بر اساس نتایج اعلام شده آزمایشگاه شرکت ایمن راه ایثار تبریز مطابق جدول ۳ می‌باشد.

الزامات آیین‌نامه‌ای نیستند. در تحقیق وهابی و همکارانش هر کدام از فیلرها به تنهایی استفاده گردیدند. به منظور بهره‌گیری از ضایعات کارخانجات روی و کاهش اثرات زیست محیطی و اقتصادی‌تر کردن تولید آسفالت، این تحقیق با این هدف انجام شد که امکان جایگزینی بخشی از فیلر آهکی با فیلرهای ضایعاتی کیک کبالت و کیک لیچ بررسی شود. به همین منظور، در تحقیق حاضر قابلیت استفاده از این فیلرها در ترکیب با فیلر آهکی، با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ از فیلر آهکی با هر کدام از فیلرهای ضایعاتی و بررسی خصوصیات ماستیکها و بتن آسفالتی تولید شده با آنها، مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که از نظر زیست محیطی نیز این دو نوع فیلر قابل قبول می‌باشند (Vahabi et al., 2022).

## ۲. مواد و مصالح

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل مصالح سنگی آهکی، فیلرهای ضایعاتی از جنس کیک لیچ و کیک کبالت و فیلر آهکی به عنوان فیلر کنترل، و قیر خالص ۶۰/۷۰ است.

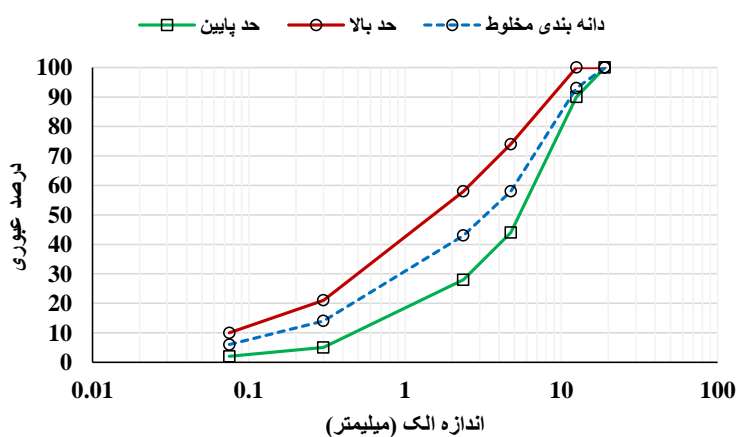
جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی بکر

نتایج آزمایش		روش آزمایش	درصد مجاز		مشخصه
ریزدانه	درشت دانه		ریزدانه	درشت دانه	
-	۲۴	AASHTO-T96	-	۲۵	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس انجلس
۷۸	-	AASHTO-T176	۵۰	-	ارزش ماسه‌ای
-	در یک جبهه ۱۰۰	ASTM -D5821	-	۹۵	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴
-	در دو جبهه ۹۸		-	۹۰	
-	۲۰	-	-	-	درصد سیلیس مصالح سنگی
-	۱۲	ASTM D4791	-	۱۵	درصد دانه های طویل و متورق
۳	-	AASHTO-M6	-	-	ضریب نرمی ماسه
۰,۷	۱,۳	AASHTO-T104	۱۲	۸	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
-	بیش از ۹۵ درصد	ASTM-D1664	-	-	درصد اندود به قیر مصالح سنگی

بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی

جدول ۲. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

جذب آب (%)	وزن مخصوص ( $gr/cm^3$ )		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۰٫۸	۲٫۶۵	۲٫۷۱	مصالح سنگی مانده روی الک ۸
۱٫۲	۲٫۶۵۲	۲٫۷۳	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰
-		۲٫۷۶	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲٫۶۵۹		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی ( $G_{sb}$ ( $gr/cm^3$ ))



شکل ۱. دانه بندی مخلوطها و محدوده دانه بندی مشخصات فنی

جدول ۳. مشخصات قیر تهیه شده از شرکت ایمن راه تبریز

مشخصه	روش آزمایش	نتیجه	حدود آیین نامه
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، برحسب ۰٫۱ میلی متر	ASTM-D5	۶۴	۶۰-۷۰
نقطه نرمی برحسب درجه سانتی گراد	ASTM- D36	۵۳	۴۹-۵۶
مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی گراد، برحسب سانتی گراد	ASTM- D113	۱۳۶	حداقل ۱۰۰
حلالیت در تری کلرواتیلن، برحسب درصد	ASTM-D2042	۹۹٫۷۵	حداقل ۹۹
نقطه اشتعال، برحسب درجه سانتی گراد	ASTM- D92	۳۰۰	حداقل ۲۳۲
لعاب نازک قیر (۱۶۳ درجه سانتی گراد در ۵ ساعت)	ASTM- D1754	۰٫۰۹	حداکثر ۰٫۸
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد ( $gr/cm^3$ )	ASTM- D70	۱٫۰۲	۱٫۰۱۴
نسبت درجه نفوذ بعد از تغییر جرم به درجه نفوذ اولیه		۷۰	حداکثر ۰٫۸
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد (بعد از تغییر جرم)	ASTM-D5		۴۵

نگین گستران راه زندیگان تهیه گردید و فیلرهای ضایعاتی استفاده شده از محل پسماند ضایعات شهرک صنعتی روی زنجان، تهیه شده‌اند. این پسماندها در فاصله ۳۰۰ متری شهرک روی زنجان به صورت روباز جمع‌آوری و انباشت می‌شوند

پسماندهای کارخانه‌های روی در ایران شامل کیک لیچ، کیک کبالت، کیک نیکل و همچنین دوده روی می‌باشند. کیک لیچ و کیک کبالت به‌عنوان فیلر در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فیلر آهکی مورد استفاده از کارخانه آسفالت شرکت

ذرات ریزتر، خشن تر و نامتقارن تر می باشند. نمونه فیلر کنترل نیز دارای ساختاری دانه‌ای و گرانوله می باشد. ذرات ریزتر در آن دارای اندازه‌هایی نزدیک به هم می باشند ولی در عین حال نامنظم در کنار هم قرار گرفته اند. جدول ۵ ترکیبات شیمیایی مختلف موجود در انواع فیلرها را نشان می دهد که بر اساس آزمایش پراش اشعه ایکس<sup>۱</sup> (XRD) به دست آمده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد، ترکیب غالب در فیلر آهکی CaO و در کیک لیچ و کبالت SO<sub>3</sub> می باشد. همچنین، مقدار اکسید سیلیس SiO<sub>2</sub> که موثر بر حساسیت رطوبتی است در فیلر آهکی کمتر از دو نوع فیلر ضایعاتی می باشد.



شکل ۲. موقعیت کلی شهرک صنعتی روی و محل انباشت پسماندهای صنعتی



شکل ۳. فیلرهای مورد مطالعه در این پژوهش

(شکل ۲). بخش زیادی از این پسماندها، در ابتدا به صورت خاک یا کلوخ به هم چسبیده می باشند و از آنجایی که رطوبت را به سرعت جذب می کنند و ذرات سریعاً به هم می چسبند، قبل از استفاده این پسماندها به عنوان فیلر، تمامی این خاکها به وسیله سنگ شکن فکی به مدت ۳۰ دقیقه خرد و در نهایت توسط آسیاب ساچمه‌ای به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۹۰ rpm خرد و به صورت پودر و در سایز مورد نیاز به دست آمدند. شکل ۳ فیلرهای آهکی، لیچ و کبالت را نشان می دهد. جدول ۴ نیز برخی از ویژگی‌های فیلرهای استفاده شده در این تحقیق را بر حسب نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می دهد (Taherkhani et al., 2020). در مطالعه قبلی که توسط طاهرخانی و همکاران صورت گرفت نشان داده شد که استفاده از کیک نیکل از نظر معیارهای زیست محیطی قابل قبول نبوده و همچنین، دوده روی نیز اثرات بهبود دهنده مطلوبی بر روی خصوصیات مخلوط آسفالتی دارد و به تنهایی معیارهای مربوط به آسیب رطوبتی را تامین نمی نماید (Taherkhani et al., 2020). اما، کیک لیچ و کیک کبالت اگر به تنهایی به عنوان فیلر استفاده گردند مقاومت در برابر آسیب رطوبتی تامین نمی شود. بنابراین در این تحقیق هدف این است که این دو نوع فیلر در ترکیب با فیلر آهکی مورد بررسی قرار گیرند.

شکل ۴ مورفولوژی سطح فیلرهای این پژوهش را براساس نتایج میکروسکوپ الکترونی<sup>۹</sup> (SEM) در دو مقیاس ۵۰ و ۱۰ میکرومتر با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ برابر نمایش می دهد. براساس این تصاویر کیک لیچ ساختاری غیر خشن با دانه‌های نسبتاً بزرگ دارد. گوشه ذرات این فیلر حالتی گرد دارد و فضای خالی سطح ذرات آن قابل توجه می باشد. ساختار سطح کیک کبالت دارای

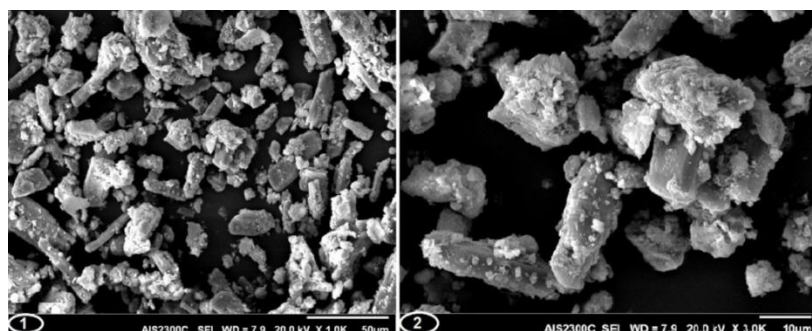
بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی

جدول ۴. مشخصات وزنی و حجمی فیلرهای مورد بررسی (Taherkhani et al., 2020)

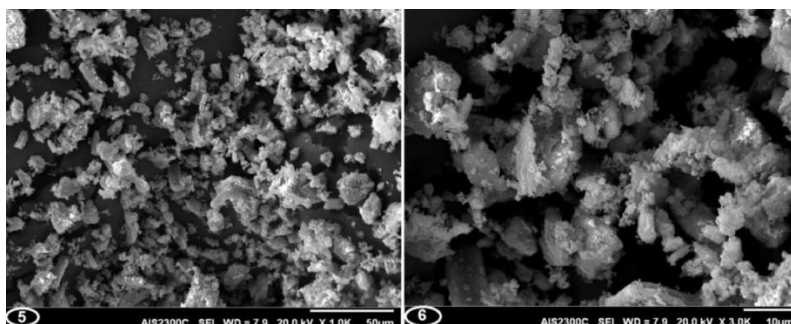
نوع فیلر	درصد رطوبت (%)	وزن مخصوص ذره (gr/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص حجمی (gr/cm <sup>3</sup> )	فضای خالی ریگدن (%)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)	PH محلول	مقدار متیلن آبی (mgr/gr)	حلالیت فیلر در آب	زاویه آب دوستی (°)
آهک	۰,۵۶	۲,۶۶	۱,۴۲	۳۶,۸۳	۲۲	۶,۶۱	۱,۲۵	۵,۲	۹۷,۵
لیچ	۱۲,۵۶	۲,۲۴	۱,۰۴	۵۲,۰۳	۲۳,۸۸	۶,۱۳	۴,۲۵	۲۷,۰۲	۷۱,۱
کبالت	۱۱,۱۸	۲,۲۴	۱,۰۹	۴۸,۸۴	۴۸,۸۳	۵,۳۱	۴	۲۷,۳	۷۵,۵

جدول ۵. نتایج آنالیز ترکیبات شیمیایی فیلرها بر اساس XRD

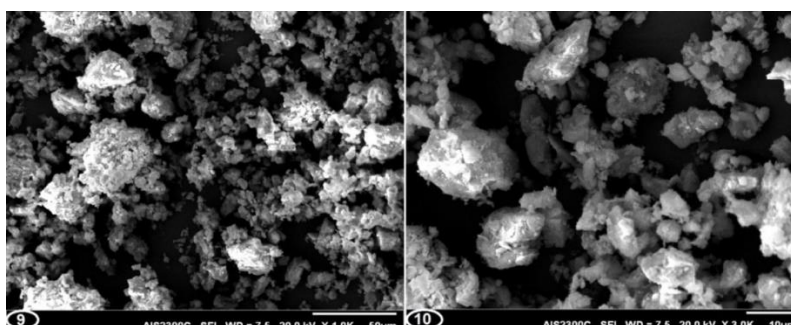
نوع ترکیب	فیلر آهکی	کیک لیچ	کیک کبالت
Na <sub>2</sub> O	۰,۰۹	۴,۱۲	۱۱,۴۳
MgO	۴,۱۰	۱,۱۱	۲,۲۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۳۸	۴,۵۵	۱,۶۲
SiO <sub>2</sub>	۱۶,۸۹	۱۷,۴۴	۰,۶۵
SO <sub>3</sub>	۶,۷۲	۲۴,۵۸	۲۸,۸۰
K <sub>2</sub> O	۰,۲۰	۰,۹۲	۰,۳۷
CaO	۵۴,۳۳	۱۵,۵۷	۸,۹۰
TiO <sub>2</sub>	۰,۰۷	۰,۲۶	۰,۰۲
ZnO	۰,۵۴	۲,۲۲	۱۶,۷۸



الف- تصویر الکترونی SEM فیلر کیک لیچ



ب- تصویر الکترونی SEM فیلر کبک کبالت



ج- تصویر الکترونی SEM فیلر آهکی

شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مربوط به فیلر کنترل

### ۳. برنامه آزمایش‌ها و ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش خصوصیات ماستیک‌ها و مخلوط‌های بتن آسفالتی ساخته شده با فیلرهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. ماستیک و مخلوط کنترل تماماً با فیلر آهکی ساخته شد و سپس هر کدام از فیلرها با درصدهای مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ جایگزین فیلر آهکی شدند. جدول ۶ ترکیبات مختلف و مقدار هر کدام از فیلرها را نشان می‌دهد. نام‌گذاری ترکیب‌های مختلف بر اساس نوع فیلر اضافه‌شده و درصدهای متفاوت ترکیب‌شده با فیلر آهکی انجام شد. در این نام‌گذاری حرف L برای فیلر کبک لیچ و حرف C برای فیلر کبک کبالت می‌باشد. مقدار وزنی فیلر به قیر در این تحقیق ۰,۶ در نظر گرفته شد. به‌طور دقیق‌تر می‌توان گفت در هر نمونه مخلوط ماستیک ۱۰۰ گرمی، مقدار ۳۷,۵ گرم فیلر و ۶۲,۵ گرم قیر ترکیب شدند. بر روی ماستیک‌های ساخته شده آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی و درجه انگمی انجام گرفت. مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده نیز تحت آزمایش مارشال، مقاومت کششی در حالت خشک و تر

مطابق استاندارد AASHTO T283، به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی، و آزمایش کانتابرو در حالت خشک و تر به منظور ارزیابی مقاومت در برابر شن زدگی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در این تحقیق مخلوط‌های مختلف با درصد قیر یکسان ساخته شده تا از اثر مقدار قیر در نتایج صرف نظر گردد. برای ساخت نمونه‌های ماستیک با فیلرهای موردنظر و با درصدهای مختلف تعیین‌شده، ابتدا به قیر در دمای  $160 \pm 5$  درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا به روانی مورد نظر برسد. سپس قیر روان شده در ۸ ظرف کوچک و به اندازه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های مربوط به ماستیک جدا شد. در حین اختلاط دمای قیر باید بالا و به صورت ثابت نگه داشته شود، که به این منظور از یک هیتر استفاده شد تا دمای قیر در حین اختلاط افت نکند. مقادیر فیلرهای مورد نیاز برای هر ترکیب مطابق جدول ۶ نیز به صورت تدریجی به قیر اضافه شد تا از یکنواختی ماستیک ایجاد شده و دقیق بودن مقادیر اضافه‌شده اطمینان حاصل شود. زمان اختلاط برای هر ترکیب ۱۵min و سرعت اختلاط نیز ۱۸۰۰rpm در نظر گرفته شد که بر اساس تحقیق قبلی انجام

بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی

در آب با دمای پایین سریعاً پایین آورده شد تا ترکیب قیر و فیلر سریعاً سفت شود.

گرفته می‌باشد (Taherkhani et al., 2020). بعد از انجام اختلاط، برای اطمینان از تنشین نشدن فیلرهای اضافه‌شده، دمای ماستیک‌های ساخته شده با قرار دادن ظروف حاوی این ترکیبات

جدول ۶. مشخصات ترکیبات مورد بررسی

نام ترکیب	مقدار فیلر آهکی	نوع و درصد فیلر ضایعاتی
کنترل	٪۱۰۰	
25%L	٪۷۵	٪۲۵ لیچ
50%L	٪۵۰	٪۵۰ لیچ
75%L	٪۲۵	٪۷۵ لیچ
100%L	٪۰	٪۱۰۰ لیچ
25%C	٪۷۵	٪۲۵ کبالت
50%C	٪۵۰	٪۵۰ کبالت
75%C	٪۲۵	٪۷۵ کبالت
100%C	٪۰	٪۱۰۰ کبالت

#### ۴-۲-۴ آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوطهای

##### آسفالتی

#### ۴-۲-۴-۱ آزمایش مارشال

آزمایش استقامت بر روی نمونه‌های بتن آسفالتی ساخته شده با فیلرها بر طبق استاندارد ASTM D1559 انجام شد و استقامت مارشال و روانی به دست آمد. با تقسیم استقامت مارشال به روانی نسبت مارشال برای مخلوطها به دست آمد. ضمناً، قبل از انجام آزمایش مارشال وزن مخصوص واقعی نمونه‌های متراکم و همین‌طور وزن مخصوص حداکثر نظری مخلوطها نیز برای محاسبه درصد فضای خالی مخلوطها تعیین گردید.

#### ۴-۲-۴-۲ آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

برای بررسی حساسیت رطوبتی فیلرهای جایگزین برای فیلر آهکی، آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (لاتمن اصلاح‌شده<sup>۱۲</sup>) بر اساس استاندارد (AASHTO-T283) استفاده شد. برای انجام این آزمایش نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت تقریبی  $68 \pm 1$  میلی‌متر ساخته شدند. نمونه‌های مخلوط آسفالتی با تنظیم تعداد ضربات چکش مارشال برای رسیدن به درصد فضای خالی  $7 \pm 1$  متراکم شدند. پس از

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد مخلوطهای آسفالتی ساخته‌شده حاوی فیلرهایی از جنس آهک، لیچ و کبالت در درصدهای مختلف، ۹ ترکیب مختلف با درصدهای متفاوت این فیلرها مطابق جدول ۶ در نظر گرفته شد. تمامی نمونه‌ها برای آزمایش مارشال و افت وزنی کانتابرو<sup>۱۱</sup> از روش مارشال، طبق استاندارد ASTM-D1559 با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۶۷ میلی‌متر با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه ساخته شدند، و برای نمونه‌های آزمایش مقاومت کششی تعداد ضربه‌ها طوری تنظیم گردید که فضای خالی مورد نیاز به دست آید. میزان قیر بهینه به روش مارشال ۴٫۸٪ تعیین گردید و برای همه مخلوطها همین درصد استفاده گردید.

#### ۴. آزمایش‌های انجام شده

#### ۴-۱-۱ آزمایش‌های انجام شده بر روی ماستیک‌ها

آزمایش‌های انجام شده بر روی ماستیکها شامل درجه نفوذ مطابق استاندارد ASTM D5، نقطه نرمی مطابق استاندارد ASTM D36 و آزمایش درجه انگمی مطابق استاندارد ASTM D113 می‌باشد.

که در آن  $ITS_w$  میانگین مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده و  $ITS_d$ : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک می‌باشند.

#### ۴-۲-۳ آزمایش کانتابرو

جهت تعیین چسبندگی سنگ‌دانه‌ها به قیر و بررسی میزان پیوستگی مخلوط آسفالتی از آزمایش کانتابرو استفاده گردید. در گذشته بیشتر از این آزمایش برای ارزیابی آسفالت ساخته شده با دانه‌بندی گسسته و آسفالت متخلخل استفاده می‌شد اما در سال‌های اخیر استفاده از این آزمایش برای ارزیابی آسفالت با دانه‌بندی پیوسته نیز شایع شده است (Cox et al, 2017). در این تحقیق آزمایش کانتابرو برای نمونه‌های خشک طبق استاندارد NLT-352 (NLT, 1986) و برای نمونه‌های مرطوب طبق استاندارد NLT-362 (EC, 1992) انجام شد. شش نمونه از هر ترکیب با استفاده از ۷۵ ضربه چکش مارشال به طرفین نمونه تهیه گردید. سه نمونه تحت شرایط خشک به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سه نمونه دیگر تحت شرایط مرطوب به مدت ۲۴ ساعت درون آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت درون آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. نمونه‌ها در دستگاه لس‌آنجلس، بدون استفاده از گوی‌های فلزی قرار گرفته و بعد از ۱۰ دقیقه چرخش استوانه با سرعت ۳۰ دور در دقیقه نمونه‌ها بیرون آورده شده و وزن گردیدند (شکل ۵). درصد افت وزنی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۳ تعیین گردید.

$$CL = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (3)$$

که در آن CL درصد افت وزنی کانتابرو، A وزن اولیه نمونه و B وزن نهایی نمونه می‌باشد.

خارج کردن نمونه‌ها از قالب، به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند. نمونه‌ها به دو گروه خشک و تر تقسیم‌بندی شدند. گروه خشک قبل از انجام آزمایش، در کیسه پلاستیکی قرار داده شدند و به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. گروه دیگر نمونه‌ها عمل‌آوری شدند. ابتدا توسط دستگاه خلاء بین ۷۰ تا ۸۰ درصد اشباع شده، سپس در کیسه پلاستیکی محتوی  $10 \pm 5$  میلی‌لیتر آب قرار داده شدند و در فریزر در دمای  $18 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۱۶ ساعت نگهداری گردیدند. بعد از آن، نمونه‌ها در حمام مارشال ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شده و در مرحله آخر عمل‌آوری و قبل از آزمایش، نمونه‌ها در حمام آب  $25^\circ C$  به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند. نمونه‌های خشک و عمل‌آوری شده، تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. ارزیابی مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از جک مارشال، با سرعت بارگذاری  $50/8 \text{ mm/min}$  انجام گرفت، بعد از بارگذاری نمونه‌ها تا شکست با استفاده از معادله ۱ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها تعیین گردید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (1)$$

که در آن، ITS، مقاومت کششی غیرمستقیم (Kpa)، P: حداکثر بار اعمالی (N)، t: ارتفاع نمونه (mm) و D قطر نمونه (mm) می‌باشد. نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک (TSR) مطابق معادله ۲ محاسبه گردید.

$$TSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad (2)$$



شکل ۵. نمونه‌های پس از انجام آزمایش کانتابرو

مورد مطالعه در این تحقیق اگرچه کیک لیچ دارای فضای ریگدن بیشتری است اما درجه نفوذ آن بیشتر از کیک کبالت می‌باشد. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از مورفولوژی و سطح مخصوص فیلرها باشد. ذرات کیک کبالت دارای بافت زبرتری از فیلر کیک لیچ بوده و سطح مخصوص آن نیز بیشتر است که نشان دهنده ریزدانه تر بودن می‌باشد. افزایش زبری ذرات فیلر باعث جذب بیشتر قیر می‌شود که در نهایت سختی ماستیک را افزایش می‌دهد (Choudhary et al, 2020). ریزدانه تر بودن فیلر کبالت نیز اثر سخت کنندگی آن را افزایش می‌دهد. فیلر با سطح مخصوص بالاتر قیر بیشتری را جذب کرده و سختی را افزایش می‌دهد (Antunes et al. 2016, Clopotel and Bahia 2013, Taylor 2007). فیلر آهکی سطح ناهموارتری دارد اما به دلیل سطح مخصوص و فضای ریگدن کمتر اثر سخت کنندگی کمتری از فیلرهای ضایعاتی دارد.

شکل ۷ نتایج نقطه نرمی قیر خالص و ماستیکها را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، ماستیکها دارای نقطه نرمی بزرگتری از قیر خالص می‌باشند. همچنین، با افزایش درصد جایگزینی فیلرهای ضایعاتی نقطه نرمی افزایش می‌یابد. تحقیقات انجام گرفته توسط ویلیانوویچ بر روی ارتباط بین ساختار فیلر و سختی ماستیک نشان داد که رابطه ای بین نقطه نرمی ماستیک و فضای ریگدن، گردگوشگی ذرات فیلر و سطح مخصوص آنها وجود دارد. بنابراین، بیشتر بودن نقطه نرمی ماستیکهای حاوی فیلر ضایعاتی و افزایش آن با افزایش مقدار

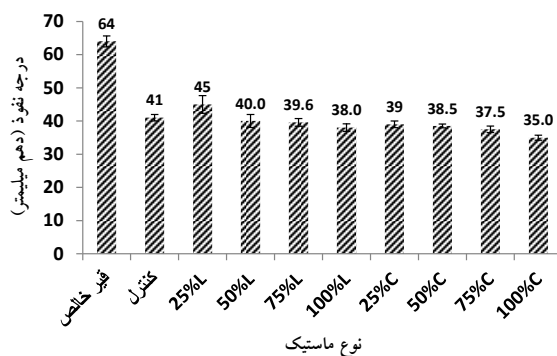
## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱ نتایج آزمایش بر روی ماستیکها

شکل ۶ نتایج آزمایش درجه نفوذ قیر خالص و ماستیکهای ساخته شده با فیلرها را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد همه ماستیکها دارای درجه نفوذ کمتری از قیر خالص هستند که به دلیل اثر سخت کنندگی فیلرها در ماستیک می‌باشد. افزایش درجه نفوذ به معنی افزایش سختی ماستیک در دمای معمولی می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که غیر از ماستیک حاوی ۲۵٪ فیلر کیک لیچ بقیه ماستیکها دارای درجه نفوذ کمتری از ماستیک کنترل ساخته شده با ۱۰۰٪ فیلر آهکی می‌باشند. ضمناً، با افزایش جایگزینی فیلرهای ضایعاتی درجه نفوذ کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش درجه نفوذ همچنین نشان دهنده این است که فیلر کیک کبالت اثر سخت کنندگی بیشتری از فیلر کیک لیچ دارد. اثر سخت کنندگی فیلرها به مورفولوژی، سطح مخصوص، منافذ ریگدن و سایر مشخصات فیزیکی آنها ارتباط می‌یابد. مقداری از قیر پس از پر کردن فضای ریگدن بصورت آزاد در مخلوط ماستیک پخش می‌شود که آن را قیر آزاد می‌نامند (Liao et al, 2012). این مقدار از قیر موجب نرمی ماستیک می‌شود، در واقع می‌توان گفت که اثر روغن کاری بر ماستیک داشته و روانی آن را افزایش می‌دهد (Sangiorgi et al, 2017). در نسبت فیلر به قیر برابر، هر چقدر فضای خالی ریگدن در فیلرها کمتر باشد، قیر آزاد بیشتر بوده و ماستیک نرمتر خواهد بود. در میان فیلرهای

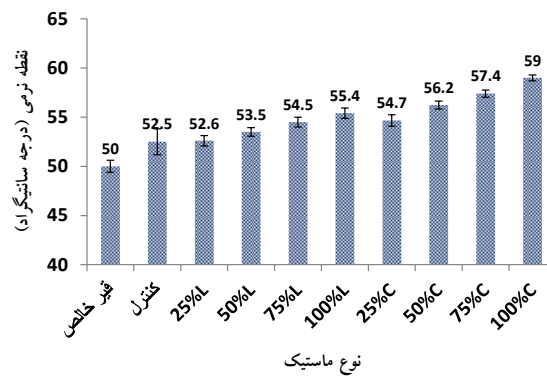
Ball برابر با ۲۰ درجه سانتیگراد تعریف می شود و در پرتغال این مقدار باید بین ۱۲ تا ۱۶ درجه سانتیگراد می باشد. درجه انگمی معمولاً برای بیان پیوستگی<sup>۱۳</sup> و چسبندگی<sup>۱۴</sup> قیر و ماستیک استفاده می شود (Periera et al., 2018). پیوستگی به صورت مقدار انرژی لازم برای ایجاد یک ترک در حجم ماده تعریف می شود، و به همراه چسبندگی قیر به سطح سنگدانه بیانگر مقاومت به ترک خوردگی مخلوط می باشد (Little et al., 2017). مطالعات انجام گرفته نشان دهنده این است که رابطه مستقیمی بین درجه انگمی قیر و عملکرد روسازی وجود دارد (Ruan et al., 2003). کندهال (Kandhal, 1977) نشان داد که در روسازی هایی که در ایالت پنسیلوانیای آمریکا ساخته شده اند، در میان قیرهایی که درجه نفوذ یکسانی داشته اند آسفالت های ساخته شده با قیرهایی با درجه انگمی بالاتر خرابی کمتری داشته اند. درجه انگمی میزان کشیدگی قیر یا ماستیک با سرعت استاندارد قبل از گسیختگی می باشد. شکل ۹ نتایج آزمایش درجه انگمی ماستیکها را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد درجه انگمی ماستیکها از قیر خالص کمتر بوده و افزودن فیلر باعث کاهش شکل پذیری قیر می گردد. همچنین ملاحظه می گردد که با افزایش مقدار فیلرهای ضایعاتی درجه انگمی بیشتر کاهش می یابد. ضمناً نتایج بیانگر این است که فیلر یک کبالت درجه انگمی کمتری از فیلر یک لیچ نتیجه می دهد. مشابه نتایج درجه نفوذ و نقطه نرمی تغییرات در درجه انگمی ماستیکها هم به بافت سطحی ذرات، فضای ریگدن، سطح مخصوص و سایر ویژگی های فیزیکی فیلرها ارتباط می یابد.

فیلرهای ضایعاتی می تواند به دلیل بیشتر بودن سطح مخصوص و فضای خالی ریگدن فیلرهای ضایعاتی نسبت به فیلر آهکی باشد. نتایج همچنین بیانگر این است که ماستیکهای حاوی فیلر یک کبالت دارای نقطه نرمی بالاتری از یک لیچ می باشد که به دلیل بافت زبرتر ذرات و همچنین بالاتر بودن سطح مخصوص فیلر کبالت می باشد. بیشتر بودن نقطه نرمی نشان دهنده حساسیت کمتر به دمای ماستیک می باشد. با کاهش حساسیت دمایی مقاومت ماستیک به تغییر شکل در دماهای بالا و ترک خوردگی در دمای پایین افزایش می یابد (Wu et al., 2011).  $\Delta Ring \& Ball$  به صورت اختلاف نقطه نرمی قیر خالص و ماستیک قیری می باشد و به عنوان شاخصی برای افزایش ویسکوزیته قیر در اثر افزودن فیلر به آن در نسبت وزنی فیلر به قیر ۰,۶، تعریف می شود. مقدار  $\Delta Ring \& Ball$  برای ماستیکهای مختلف در شکل ۸ نشان داده شده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد بیشترین  $\Delta Ring \& Ball$  مربوط به ماستیک ساخته شده با ۱۰۰٪ فیلر یک کبالت می باشد. همچنین فیلرهای ضایعاتی  $\Delta Ring \& Ball$  بیشتری از فیلر آهکی داشته و ماستیکهای حاوی فیلر کبالت  $\Delta Ring \& Ball$  بیشتری از ماستیکهای ساخته شده با فیلر یک لیچ هستند. به جای تعریف نسبت فیلر به قیر که در خیلی از مشخصات فنی رایج است، برخی از کشورها برای تضمین عملکرد بهینه مخلوط آسفالتی محدودیتهای برای  $\Delta Ring \& Ball$  الزام می نمایند. مثلاً، در آلمان مشخصات فنی الزام می کنند که  $\Delta Ring \& Ball$  ۸ تا ۲۵ درجه سانتیگراد باشد. یا مثلاً در لهستان حداکثر مقدار برای  $\Delta Ring \& Ball$

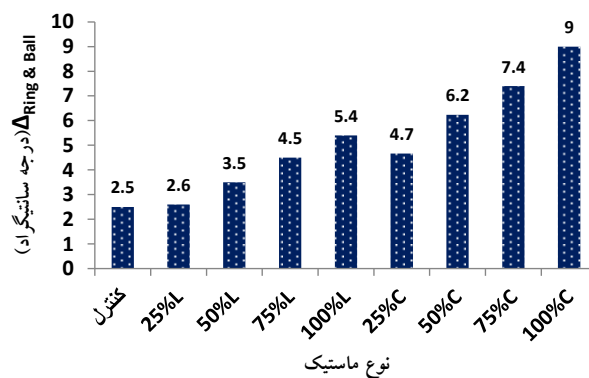


شکل ۶. میزان درجه نفوذ انواع ماستیک

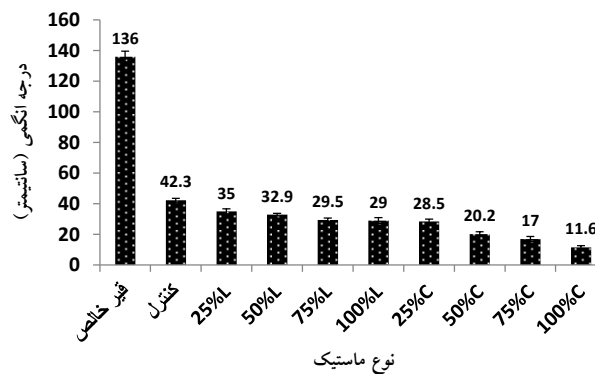
بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی



شکل ۷. میزان نقطه نرمی انواع ماستیک



شکل ۸.  $\Delta$  Ring & Ball ماستیکها



شکل ۹. میزان کشش پذیری ماستیک

## ۲-۵ نتایج آزمایش مارشال

شکل ۱۰ نتایج استقامت مارشال مخلوطهای ساخته شده با درصدهای مختلف از انواع فیلرها را نشان می‌دهد. این نتایج از آزمایش بر روی سه نمونه برای هر ترکیب و میانگین‌گیری از آنها به دست آمده است. با توجه به نتایج حاصل شده، تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق الزامات آیین نامه

AASHTO که حداقل مقدار استقامت مارشال (۸۰۰ کیلوگرم)

برای مخلوطهای آسفالتی طراحی شده تحت ترافیک سنگین را تعیین کرده است، برآورده می‌کند. استقامت مارشال نیرویی است که نمونه آسفالتی تا لحظه شکست در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد تحمل می‌نماید. استقامت مارشال متاثر از عوامل مختلفی از جمله مشخصات ماستیک قیری بین سنگدانه‌ها، مشخصات سنگدانه‌ها، مقدار قیر و فضای خالی مخلوط در حالت متراکم می‌باشد. در

هر چقدر نرمی بتن آسفالتی بیشتر باشد نشان دهنده شکل پذیری بیشتر آن می‌باشد و بیشتر مستعد تغییر شکل پلاستیک است. ضمناً نرمی کمتر نیز نشان دهنده شکنندگی بیشتر مخلوط می‌باشد. از همین رو، مشخصات فنی مقدار حداقل و حداکثر معینی از نرمی را برای بتن آسفالتی الزام می‌نمایند تا تضمین کننده مقاومت به شیار شدگی و ترک خوردگی باشد. در نشریه ۲۳۴ مقدار حداقل و حداکثر مورد نیاز برای نرمی بتن آسفالتی گرم به ترتیب، ۲ و ۳٫۵ میلی‌متر می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد همه مخلوطها مشخصات فنی را ارضاء می‌نمایند. نتایج نرمی در این تحقیق نیز وابسته به خصوصیات فیلرها هستند زیرا سایر مشخصات مخلوطها یکسان می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مقدار نرمی مخلوط ساخته شده با فیلر آهکی از فیلرهای ضایعاتی بیشتر می‌باشد. همچنین با افزایش جایگزینی فیلرهای ضایعاتی مقدار نرمی کاهش می‌یابد. همانگونه که قبلاً توضیح داده شد، مخلوط ساخته شده با فیلر کیک لیچ دارای شکل پذیری بیشتری بوده و به همین دلیل مقدار نرمی بیشتری از مخلوطهای ساخته شده با کیک کبالت دارد. بیشتر بودن نرمی مخلوط ساخته شده با فیلر آهکی نیز می‌تواند به دلیل سطح مخصوص و فضای ریگدن کمتر آن باشد که منجر به افزایش قیر موثر در مخلوط شده و آن را شکل پذیرتر می‌نماید.

نسبت مارشال<sup>۱۵</sup> به طور معمول برای ارزیابی مقاومت به تغییر شکل مخلوطهای آسفالتی استفاده می‌شود (Ameri and Behnood, 2013, Zoorob & Suparma 2000). برخی از موسسات حداقل و حداکثر نسبت مارشالی را، به ترتیب، برای تضمین مقاومت در برابر تغییر شکل و ترک خوردگی الزام می‌نمایند. مثلاً در انگلستان حداقل نسبت مارشال ۲۰۰ کیلوگرم بر میلی‌متر و حداکثر ۵۰۰ کیلوگرم بر میلی‌متر را الزام می‌کنند. شکل ۱۳ نتایج نسبت مارشال را نشان می‌دهد که از تقسیم میانگین استقامت مارشال به میانگین نرمی برای هر مخلوط تعیین گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، میزان نسبت مارشال مخلوطهای حاوی فیلر ضایعاتی از مخلوط کنترل بیشتر است.

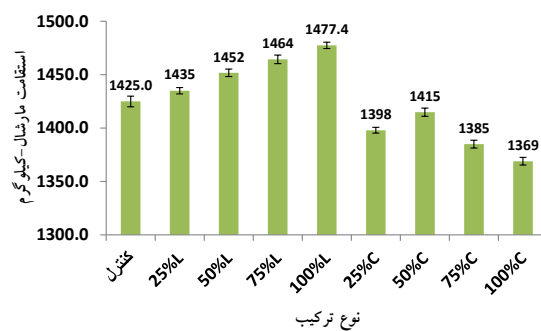
این تحقیق، همه مخلوطها دارای نوع و مقدار قیر و سنگدانه‌های یکسانی بوده و فضای خالی آنها نیز در محدوده مجاز ۳ تا ۵٪ می‌باشد. شکل ۱۱ مقدار فضای خالی مخلوطها را نشان می‌دهد که با تعیین وزن مخصوص واقعی و حداکثر نظری آنها محاسبه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش میزان فیلرهای ضایعاتی مقدار فضای خالی مخلوط افزایش می‌یابد که به دلیل فضای ریگدن بالا و سطح مخصوص بیشتر فیلرهای ضایعاتی است. با افزایش سطح مخصوص و فضای خالی ریگدن مقدار قیر موثر کاهش یافته و درصد فضای خالی افزایش می‌یابد. فیلر کبالت به دلیل ریزدانه تر بودن فضای خالی بیشتری را نتیجه داده است. بنابراین، تفاوت در مقادیر استقامت مارشال به نوع فیلرها ارتباط می‌یابد که آن هم به خصوصیات مورفولوژی، سطح مخصوص، فضای ریگدن و سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها مرتبط می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد، استقامت مارشال با افزایش میزان جایگزینی فیلر کیک لیچ افزایش می‌یابد. اما در فیلر کیک کبالت بعد از افزایش تا ۲۵٪ جایگزینی مقدار آن کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان دهنده این است که استقامت مارشال مخلوطهای ساخته شده با کیک لیچ بیشتر از آن برای مخلوطهای ساخته شده با کیک کبالت است. اگرچه، قبلاً در نتایج ماستیکها دیده شد که سختی ماستیک ساخته شده با کیک کبالت بیشتر از کیک لیچ است، اما استقامت کمتری نتیجه داده است. این تفاوت می‌تواند به خاطر شکل پذیری کمتری باشد که در ماستیک ساخته شده با کیک کبالت به دست می‌آید. در آزمایش مارشال هر چقدر ماستیک شکل پذیری بیشتری داشته باشد تا زمان گسیختگی نیروی بیشتری را تحمل می‌نماید. ماستیک ساخته شده با فیلر کیک لیچ به دلیل سطح مخصوص کمتر و صاف تر بودن ذرات آن دارای شکل پذیری بیشتری است، که در نتایج انگمی نیز دیده شد که شکل پذیری بیشتری دارند.

شکل ۱۲ نتایج نرمی مارشال را نشان می‌دهد که عبارت است از تغییر شکل قطری نمونه ها در لحظه شکست در آزمایش مارشال.

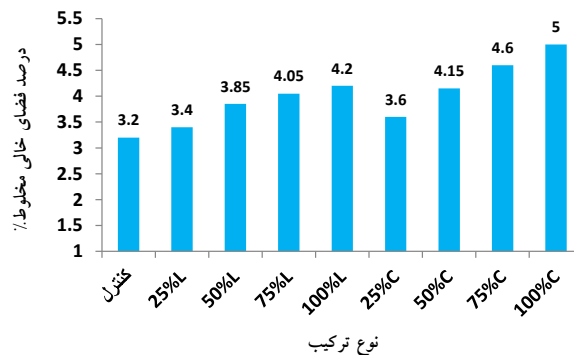
بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی

قابل ارتباط است. مقدار کمتر نسبت مارشال برای مخلوط ساخته شده با فیلر آهکی به دلیل سختی کمتر ماستیک ساخته شده با آن است که در قسمتهای قبل توضیح داده شد. افزایش مقدار نسبت مارشال با افزایش مقدار فیلرهای ضایعاتی را می توان مرتبط با افزایش میزان سخت شدگی ماستیک دانست، که البته شکل پذیری نیز کاهش می یابد. ضمناً بیشتر بودن نسبت مارشال در مخلوطهای حاوی فیلر کیک لیچ به شکل پذیری بیشتر آن قابل ارتباط است.

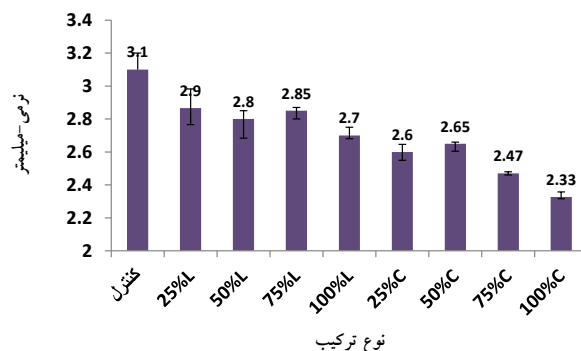
همچنین نتایج بیانگر این است که با افزایش میزان جایگزینی فیلر آهکی با فیلر ضایعاتی میزان نسبت مارشال افزایش می یابد. با توجه به این که اختلاف نرمی مخلوطها که در شکل ۱۲ نیز نشان داده شد زیاد نیست تغییر نسبت مارشال مخلوطها بیشتر متأثر از استقامت مارشال می باشد که قبلاً دلیل تغییرات آن توضیح داده شد. در شکل ۱۳ ملاحظه می گردد که با استفاده از فیلر کیک لیچ میزان نسبت مارشال بیشتری از فیلر کیک کبالت به دست می آید. نتایج نسبت مارشال به میزان سختی ماستیک و شکل پذیری آن



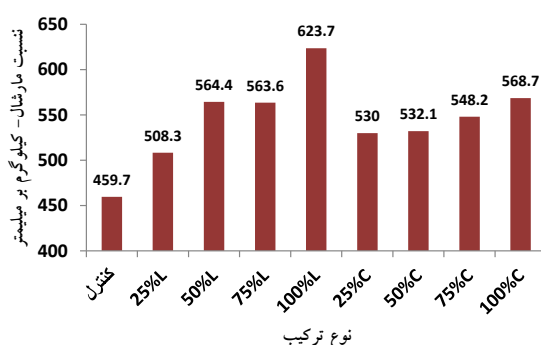
شکل ۱۰. نتایج استقامت مارشال مخلوطها



شکل ۱۱. درصد فضای خالی مخلوطهای متراکم



شکل ۱۲. نتایج نرمی مخلوطها



شکل ۱۳. نتایج نسبت مارشال مخلوطها

در تحقیق قبلی نشان داد که فیلر کبک لیچ دارای CaO بیشتری از کبک کبالت است (Taherkhani et al., 2020). همچنین، در شکل ۱۴ ملاحظه می‌گردد که مقاومت کششی مخلوطها در شرایط مرطوب کمتر از آن در شرایط خشک است که به دلیل آسیب رطوبتی می‌باشد. اما، میزان کاهش مقاومت کششی در شرایط مرطوب برای ترکیبات مختلف متفاوت است. با افزایش میزان جایگزینی فیلرهای ضایعاتی کاهش بیشتری در مقاومت کششی مرطوب ملاحظه می‌گردد که نشان دهنده آسیب‌پذیری بیشتر آنها در برابر رطوبت است. همچنین، میزان کاهش مقاومت در مخلوطهای حاوی کبک کبالت بیشتر از آن در مخلوطهای حاوی کبک لیچ است، و کمترین کاهش مقاومت را مخلوط حاوی فیلر آهکی دارد. کاهش مقاومت کششی در نمونه‌های مرطوب به اندرکنش بین ذرات فیلر و قیر مرتبط می‌شود که خود متاثر از پدیده فیزیکی-شیمیایی است که در مرز قیر و فاز فیلر در هنگام تماس آنها رخ می‌دهد. این پدیده وابسته به ویژگی‌هایی مثل بافت سطحی فیلر، ترکیبات شیمیایی ذرات، کانی شناسی، سطح مخصوص می‌باشد. بنابراین نتایج گرفته شده را باید مرتبط با این ویژگی‌ها از فیلرها دانست. خواننده برای توضیحات بیشتر در این خصوص می‌تواند به مقاله قبلی مولفین مراجعه نماید و برای جلوگیری از طولانی شدن مقاله در اینجا ذکر نمی‌گردد (Vahabi et al., 2022).

شکل ۱۵ نسبت مقاومت کششی مرطوب به خشک مخلوطهای مختلف را نشان می‌دهد که به عنوان معیاری برای ارزیابی مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی و حساسیت

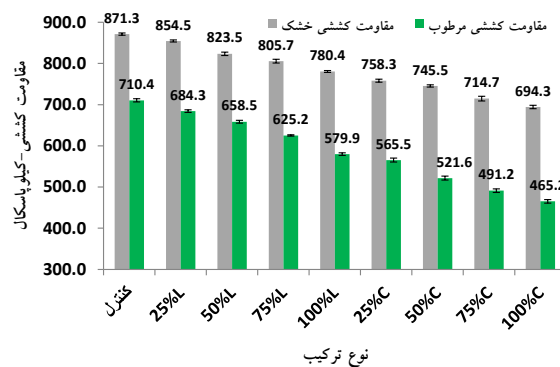
#### رطوبتی

مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی به مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی و حرارتی ارتباط می‌یابد (Huang et al., 2004). مخلوطهای آسفالتی با مقاومت کششی بالاتر در برابر ترک خوردگی مقاومت بالاتری دارند. در شکل ۱۴ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های خشک و عمل آمده نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد بیشترین مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب مربوط به مخلوط ساخته شده با فیلر آهکی است و با افزایش میزان جایگزینی فیلر آهکی با فیلرهای ضایعاتی مقدار مقاومت کششی کاهش می‌یابد. دلیل بیشتر بودن مقاومت کششی مخلوط حاوی فیلر آهکی را می‌توان به وجود ترکیب CaO بیشتر در آن ارتباط داد. تحقیقات قبلی اذعان می‌دارند که وجود CaO بیشتر در فیلر منجر به بیشتر شدن مقاومت کششی می‌شود (Niciri et al. 2018). همچنین، درصد فضای خالی کمتر و بافت زبر فیلر آهکی نیز در افزایش مقاومت کششی آن موثر است. ضمناً، مشاهده می‌گردد که مقدار مقاومت کششی مخلوطهای حاوی فیلر کبک کبالت از فیلر کبک لیچ کمتر است. دلیل بیشتر بودن مقاومت کششی مخلوطهای حاوی کبک لیچ را مشابه نتایج استقامت مارشال می‌توان به شکل‌پذیری بیشتر آن به دلیل سطح مخصوص کمتر و بافت هموارتر دانه‌های آن دانست، که باعث می‌شود بار بیشتری را تا قبل از شکست تحمل نماید. بررسی ترکیبات شیمیایی این فیلرها

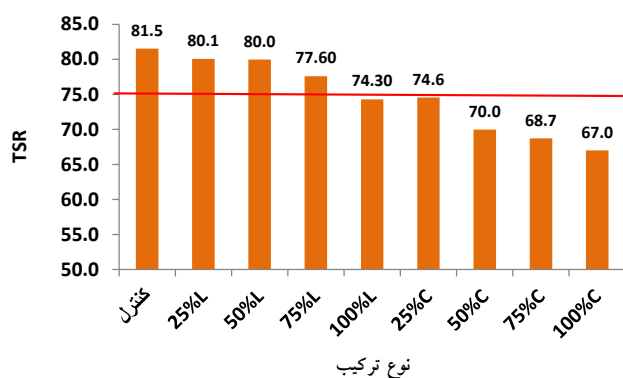
بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی

کمتری در برابر آسیب رطوبتی دارند. فیلر کیک کبالت در هیچ درصد جایگزینی تامین کننده الزام مشخصات فنی نیست، ولی فیلر کیک لیچ را تا ۷۵٪ می توان استفاده نمود. البته در صورت استفاده از فیلر کیک کبالت نیاز به استفاده از مواد ضد عریان شدگی برای تامین الزامات مشخصات فنی می باشد. از نظر نوع فیلر، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی به ترکیبات شیمیایی فیلر، بافت سطحی و خصوصیات فیزیکی آنها ارتباط می یابد. خواننده برای توضیح کامل این ارتباط می تواند به مقاله وهابی و همکاران (Vahabi et al., 2022) مراجعه نماید.

مخلوطهای با TSR بیشتر مقاومت بالاتری در برابر آسیب رطوبتی از خود نشان می دهند. مطابق آیین نامه روسازی های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) حداقل TSR مورد نیاز برای بتن آسفالتی گرم ۷۵٪ می باشد. همانگونه که در شکل ۱۵ ملاحظه می گردد، فیلر آهکی دارای بالاترین مقاومت در برابر آسیب رطوبتی می باشد که به دلیل خاصیت آبگریزی<sup>۱۶</sup> بودن این نوع فیلر می باشد. همچنین، با افزایش مقدار جایگزینی فیلر ضایعاتی مقاومت به آسیب رطوبتی کاهش می یابد که به دلیل خاصیت آب دوستی<sup>۱۷</sup> بیشتر این فیلرها می باشد. علاوه بر این، ملاحظه می گردد که مخلوطهای ساخته شده با فیلر کیک کبالت مقاومت



شکل ۱۴. نتایج مقاومت کشتی خشک و مرطوب مخلوطها



شکل ۱۵. نسبت مقاومت کشتی مخلوطها

متخلخل را اندازه گیری می کنند (Pérez-Jiménez and Calzada-Pérez, 1990). با این حال، در سالهای اخیر استفاده از این آزمایش برای ارزیابی دوام مخلوطهای آسفالتی توپر<sup>۱۹</sup> مثل بتن آسفالتی رواج یافته است. دوپل و هاوارد دوام مخلوطهای آسفالتی توپر حاوی تراشه های آسفالتی را با استفاده

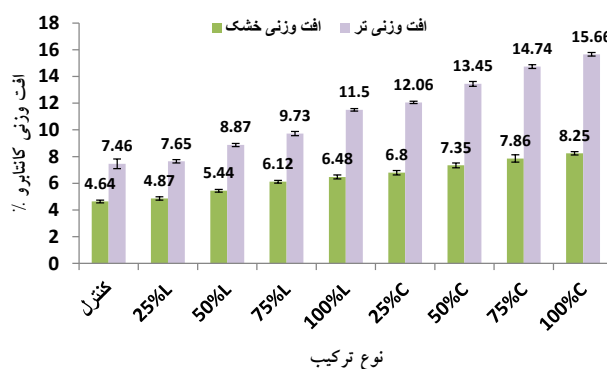
#### ۵-۴ نتایج آزمایش کانتابرو

آزمایش افت سایشی کانتابرو معمولاً برای ارزیابی دوام مخلوطهای آسفالتی متخلخل<sup>۱۸</sup> در مرحله طرح اختلاط آنها، بر اساس استاندارد AASHTO TP-108 انجام می شود. نتایج این آزمایش به طور غیر مستقیم پتانسیل شن زدگی مخلوطهای

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره چهارم (۶۱) / تابستان ۱۴۰۳

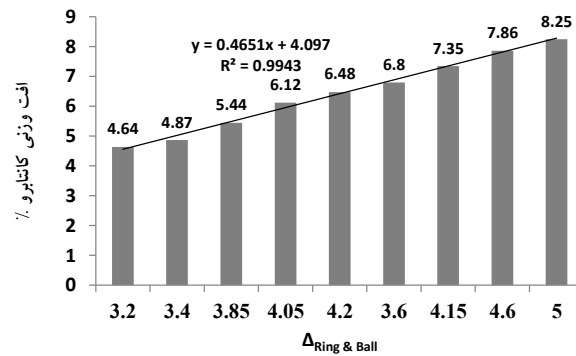
دهندگی سخت‌کنندگی فیلر می‌باشد، میزان افت وزنی کانتابرو نیز افزایش یافته است. همچنین، در این شکل ملاحظه می‌گردد که رابطه خطی مناسبی بین  $\Delta$ Ring & Ball و افت وزنی کانتابرو وجود دارد. به منظور تعیین اثر نوع فیلر بر روی افت وزنی در حالت مرطوب که بیانگر آسیب‌پذیری مخلوط در برابر رطوبت است، نسبت افت وزنی در حالت تر به حالت خشک در شکل ۱۸ ترسیم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوطهای حاوی فیلر کبالت آسیب بیشتری از رطوبت از نظر شن‌زدگی می‌بینند و با افزایش فیلر کبالت این آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. برای فیلر کیک لیچ روند ثابتی وجود ندارد و برای مخلوطی که کاملاً با این نوع فیلر ساخته شده است افت وزنی کانتابروی ناشی از رطوبت بیشتر از فیلر آهکی است، اما، در مقادیر کمتر کیک لیچ این نسبت با مقدار فیلر کنترل قابل مقایسه است. به منظور ایجاد ارتباط بین حساسیت رطوبتی با آزمایش مقاومت کششی و آزمایش کانتابرو، در شکل ۱۹ تغییرات نسبت مقاومت کششی TSR با نسبت افت وزنی در حالت تر به خشک در آزمایش کانتابرو ترسیم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد همبستگی خوبی بین این دو وجود دارد و با افزایش نسبت افت وزنی کانتابرو مقدار TSR نیز کاهش می‌یابد.

از آزمایش کانتابرو ارزیابی نمودند و نشان دادند که برای مخلوطهای آسفاتی توپر نیز مناسب می‌باشند (Doyle and Howard, 2016). نتایج این آزمایش نشان دهنده میزان مقاومت پیوند بین قیر و مصالح سنگی در برابر بارهای ترافیکی است. مخلوطهای آسفالتی با افت وزنی بالا بیشتر مستعد شن‌زدگی و متلاشی شدن در حین بهره‌برداری هستند. این آزمایش در حالت خشک و تر انجام می‌شود و اختلاف افت وزنی بین حالت خشک و تر بیانگر میزان تاثیر رطوبت بر شن‌زدگی مخلوط می‌باشد. شکل ۱۶ نتایج آزمایش کانتابرو در حالت خشک و تر را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، کمترین افت وزنی و مقاومت در برابر شن‌زدگی مربوط به فیلر آهکی است و با افزایش فیلرهای ضایعاتی افت وزنی در دو حالت مرطوب و خشک افزایش می‌یابد. این موضوع به مشخصات فیلرها قابل ارتباط است و اندرکنش ذرات فیلر با قیر که متاثر از خصوصیات شیمیایی و فیزیکی و مورفولوژی آنها می‌باشد و قبلاً در مورد فیلرهای مورد استفاده در آنها توضیح داده شد. با افزایش اثر سخت‌کنندگی فیلرها میزان شن‌زدگی آن بیشتر شده است. به همین منظور، نمودار تغییرات افت وزنی کانتابرو در حالت خشک با  $\Delta$ Ring & Ball در شکل ۱۷ ترسیم گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش  $\Delta$ Ring & Ball که نشان

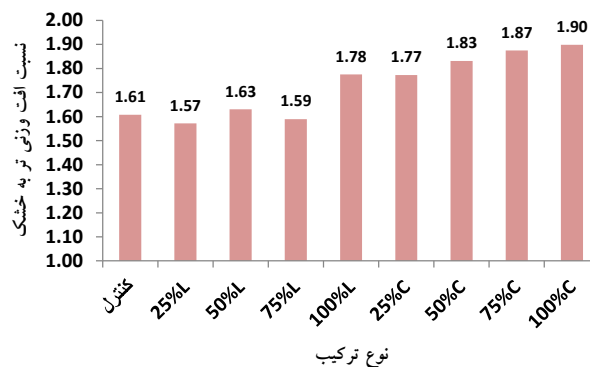


شکل ۱۶. افت وزنی کانتابرو در حالت خشک و تر

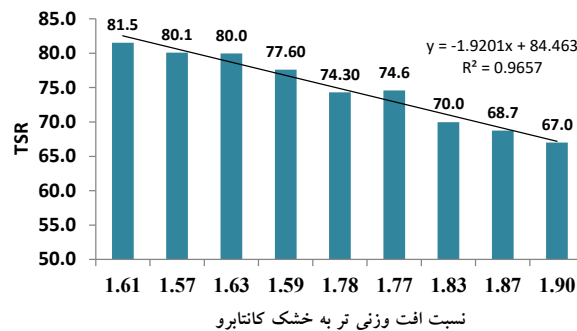
بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیج تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی



شکل ۱۷. تغییرات افت وزنی کانتابرو با  $\Delta_{\text{Ring \& Ball}}$



شکل ۱۸. نسبت افت وزنی کانتابرو در حالت تر به حالت خشک



شکل ۱۹. تغییرات TSR با نسبت افت وزنی کانتابرو در حالت تر به خشک

## ۶. نتیجه گیری

- شکل پذیری ماستیکهای ساخته شده با فیلرهای ضایعاتی از فیلر آهکی کمتر است و با افزایش میزان جایگزینی فیلرهای ضایعاتی شکل پذیری کاهش می یابد.
- استقامت مارشال مخلوطهای ساخته شده با کیک لیج از مخلوط کنترل بیشتر است و با افزایش میزان جایگزینی این فیلر استقامت افزایش می یابد. میزان روانی مخلوطهای ساخته

خلاصه نتایج این تحقیق به شرح زیر ارائه می گردد.

- فیلرهای ضایعاتی اثر سخت کنندگی بیشتری بر روی ماستیک نسبت به فیلر آهکی دارند و با افزایش مقدار جایگزینی این فیلرها اثر سخت کنندگی بیشتر می شود.

4. Leach cake
5. Cobalt cake
6. Nickel cake
7. Zinc ash
8. Self healing
9. Scanning electron microscopy
10. X-ray diffraction
11. Cantabro loss test
12. Modified Lutman test
13. Cohision
14. Adhision
15. Marshall quotient
16. Hydrophobic
17. Hydrophilic
18. Porous asphalt
19. Dense-graded asphalt

## ۸. مراجع

-خاوندی، ع.، حیدری، م.، دهقان، ا. (۱۳۹۸) "بررسی اثر افزودنیهای ضد عریان شدگی و نوع مصالح سنگدانه ای بر مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر آسبهای رطوبتی (مطالعه موردی: استان اردبیل)" مجله مهندسی حمل و نقل، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۸، ص ۸۶۶-۸۵۱.

-کاوسی، ا.، بختیاری، ج (۱۳۹۲) "بررسی تاثیرات دما و فیلر آهک هیدراته بر مقاومت شیار شدگی مخلوطهای آسفالتی" مجله مهندسی حمل و نقل، شماره اول، پاییز ۱۳۹۲، ص ص. ۷۱-۸۴.

-Aburkaba, E. E., Munaindy, R. (2010) "The use of industrial and by-product wastes as replacement of mineral fillers in stone mastic asphalt mixes" Proceedings of World Road Congress- Conference on Building and Infrastructure Technology, 2010.

-Al-Hdabi, A., (2016) "Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler" Construction and Building Materials, Vol. 126, pp. 544-551.

شده با فیلرهای ضایعاتی کمتر از مخلوط کنترل می‌باشد و نیز با افزایش مقدار کیک لیچ و کیک کبالت روانی کاهش می‌یابد.

- میزان مقاومت کششی در حالت خشک و عمل آمده با افزایش مقدار جایگزینی فیلرهای ضایعاتی کاهش می‌یابد.

مقدار مقاومت کششی مخلوط در حالت خشک و مرطوب با فیلر کیک لیچ بیشتر از فیلر کیک کبالت به دست می‌آید.

- حساسیت رطوبتی مخلوطها با افزایش میزان جایگزینی فیلر کیک کبالت و کیک لیچ افزایش می‌یابد و میزان حساسیت رطوبتی مخلوطهای ساخته شده با کیک کبالت کمتر از مخلوطهای ساخته شده با کیک لیچ است.

- مخلوطهای حاوی فیلرهای ضایعاتی مقاومت در برابر شن زدگی کمتری از مخلوط کنترل می‌باشند و با افزایش میزان این فیلرها مقاومت به شن زدگی کاهش می‌یابد.

- همبستگی خوبی بین اثر سخت کنندگی فیلر در ماستیک و میزان مقاومت به شن زدگی یافت شد. با افزایش میزان سخت کنندگی فیلر مقاومت به شن زدگی کاهش می‌یابد.

- تاثیر مخرب رطوبت بر شن زدگی با افزایش فیلر کیک کبالت افزایش می‌یابد و این اثر برای مخلوطهای حاوی کیک کبالت بیشتر از مخلوطهای حاوی کیک لیچ است.

- همبستگی خوبی بین آسیب پذیری مقاومت به شن زدگی در برابر رطوبت و نسبت مقاومت کششی TSR وجود دارد. با افزایش میزان TSR رطوبت اثر کمتری بر روی شن زدگی مخلوط دارد.

- با توجه به نتایج تحقیق می‌توان از کیک لیچ تا ۷۵٪ از وزن فیلر استفاده نمود و برای بالاتر از آن باید مقاومت به آسیب رطوبتی را مورد توجه قرار داد. اما، کیک کبالت در هر درصد جایگزینی بیشتر از ۲۵٪ نیاز به مواد ضد عریان شدگی در مخلوط دارد.

## ۷. پی‌نوشت‌ها

1. Rutting
2. Ravelling
3. Rigden voids

- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2021). "Evaluation of engineering, economic and environmental suitability of waste filler incorporated asphalt mixes and pavements" *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 22, No. 1, pp. 624-S640.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.070>
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020) "Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review" *Construction and Building Materials*, Vol. 234, 117271.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>
- Choudhary, J., Kumar, B., Gupta, A. (2018) "Application of waste materials as fillers in bituminous mixes" *Waste Management* Vol. 78, pp. 417-425.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.009>
- Clopotel, C., Bahia, H. (2013) "The effect of bitumen polar groups adsorption on mastics properties at low temperatures" *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, No.1, pp. 38-51.  
<https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774745>
- Cox, B. C., Smith, B. T., Howard, I. L., & James, R. S. (2017). State of knowledge for Cantabro testing of dense graded asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29, No. 10, 04017174.
- Doyle, J. D., Howard, I. L. (2016) "Characterization of Dense-Graded Asphalt with the Cantabro Test" *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 44, No. 1, 2016, pp. 77-88.
- EC. Normas NLT. I, Ensayos de carreteras: NLT 362/92, (1992), "efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste" Madrid: Centro de Estudios de
- Ameri, M., Behnood, A. (2013) "Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates" *Construction and Building Materials*, Vol. 26, pp. 475-480.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.047>
- Androjić, I., Dimter, S. (2016) "Properties of hot mix asphalt with substituted waste glass" *Materials and Structures*, Vol. 49, pp. 249-259.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0492-3>
- Antunes, V., Freire, A. C., Quaresma, L., Micaelo, R. (2016) "Effect of the chemical composition of fillers in the filler-bitumen interaction" *Construction and Building Materials*, Vol. 104, pp. 85-91.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.042>
- Arabani, M., Tahami, S. A., Taghipoor, M., (2017) "Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials" *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 18, No.3, pp. 713-729.  
<https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1189349>
- Bolden, J., Abu-Lebdeh, T., Fini, E. (2013). "Utilization of recycled and waste materials in various construction applications" *American Journal of Environmental Science*, Vol. 9, No. 1, pp. 14-24.  
DOI:[10.3844/ajessp.2013.14.24](https://doi.org/10.3844/ajessp.2013.14.24)
- Chen, M. Z., Lin, J. T., Wu, S. P., Liu, C. H. (2011) "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture, *Construction and Building Materials*" Vol. 25, No. 4, pp. 1532-1536.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005>

<https://doi.org/10.1080/14680629.2012.743669>

-Liao, M., Chen, J. Tsou, K. (2012) "Fatigue characteristics of bitumen-filler mastics and asphalt mixtures" *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No.7, pp. 916-923.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000450)

- Little, D.N., Bhasin, A. and Lytton, R. (2017) "Micromechanics modeling of performance of asphalt concrete based on surface energy" *Modelling asphalt concrete*. McGraw-Hill Professional.

<https://accessengineeringlibrary.com/browse/modeling-of-asphalt-concrete/p20017c1a9970355001>. Accessed, 14

-Ma, T., Zhong, Y., Tang, T., Huang, X. (2009) "Design and evaluation of heat-resistant asphalt mixture for permafrost regions" *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 339-346.

<https://doi.org/10.1007/s40999-016-0039-9>

-Ma, T., Wang, H., Zhao, Y., Huang, X., Wang, S. (2017) "Laboratory investigation of crumb rubber modified asphalt binder and mixtures with warm-mix additives", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 185-194.

<https://doi.org/10.1007/s40999-016-0040-3>

-Mistry, R., Karmakar, S., Kumar Roy, T., (2018) "Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt" *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 20, No. 4, pp. 979-990.

<https://doi.org/10.1080/14680629.2017.142279>

1

-Modarres, A., Alinia Bengar, P. (2019) "Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder" *International*

*Carreteras, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*; 1992.

-Ekblad, J., Lundstrom, R., Simonsen, E. (2015) "Water susceptibility of asphalt mixtures as influenced by hydraulically active fillers", *Materials and Structures*, Vol. 48, No.3, pp. 1135-1147.

<https://doi.org/10.1617/s11527-013-0220-4>

-Faheem, A., Cloutier, C., Bautista, E. G., Sobolev, K., (2017) "Impact of Coal Combustion Product Incorporation in Asphalt Mixture Performance" 97th Annual Meeting of Transportation Research Board, (No. 17-05853).

-Fakhri, M., Javadi, S., Sassani, A., & Torabi-Dizaji, M. (2022). Zinc Slag as a Partial or Total Replacement for Mineral Filler in Warm Mix Asphalt and Its Effects on Self-Healing Capacity and Performance Characteristics. *Materials*, Vol. 15, No. 3, 736-743.

-Huang, B., Zhang, Z., Kingery, W., Zuo, G. (2004) "Fatigue crack characteristics of HMA mixtures containing RAP" in: *Proceeding 5th International Conference on Cracking in Pavements*, RILEM, pp. 631-638.

-Islam, S. S., Ransinchung RN, G. D., & Choudhary, J. (2021) "Sustainable Utilization of Waste Jarosite As Alternative Filler in Asphalt Mixes" *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 33, No. 11, 04021314.

-Kandhal, P. S. (1977). "Low-temperature ductility in relation to pavement performance" West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

-Lesueur, D., Petit, J., Ritter, H., (2013) "The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review" *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-16.

- NLT-352/86, (1986) "Caracterización de mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste", Normas NLT I.- Ensayos de carreteras, CEDEX.
- Pasandín, A.R., Perez, I., Ramirez, A., Cano, M.M. (2016) "Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler" *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, No. 1, pp. 853–862.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.016>
- Pereira, L., Freire, A. C., da Costa, M. S., Antunes, V., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2018). "Experimental study of the effect of filler on the ductility of filler-bitumen mastics" *Construction and Building Materials*, Vol. 189, pp. 1045-1053.
- Pérez-Jiménez, F. E., and Calzada-Pérez, M. A. (1990) "Analysis and Evaluation of the Performance of Porous Asphalt: The Spanish Experience" *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, 1990.  
<http://dx.doi.org/10.1520/STP23386S>
- Rochlani, M., Canon Falla, G., Wellner, F., Wang, D., Fan, Z., & Leischner, S. (2021). "Feasibility study of waste ceramic powder as a filler alternative for asphalt mastics using the DSR" *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 22, No. 11, pp. 2591-2603.
- Ruan, Y., Davison, R. R., & Glover, C. J. (2003). "An investigation of asphalt durability: Relationships between ductility and rheological properties for unmodified asphalts" *Petroleum Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 231-254.
- Russo, F., Veropalumbo, R., Oretto, C., Biancardo, S. A., Abbondati, F., & Viscione, N. (2021). "Verifying the Mechanical Performance of Cold and Hot Asphalt Mastics Containing Jet Journal of Pavement Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 977-985.  
<https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1373390>
- Moraes, R., Bahia, H. (2015) "Effect of mineral fillers on oxidative aging of asphalt binders: laboratory study using mastics" *Transportation Research Record*, Vol. 2506, No. 1, pp. 19-31.  
<https://doi.org/10.3141/2506-03>
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Castro-Fresno, D. Peo-Mansilla, D. (2015) "Experimental study on stiffness development of asphalt mixture containing cement and Ca (OH)<sub>2</sub> as contribution Filler" *Materials and Design*, Vol. 74, pp. 157–163.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.02.026>
- Muniandy, R., Aburkaba, E. E., Hamid, H. B., Yunus, R. B. T. (2009) "An initial investigation of the use of local industrial wastes and by-products as mineral fillers in stone mastic asphalt pavements" *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 3, pp. 54–63.
- Muniandy, R., Aburkaba, E. (2011) "The effect of type and particle size of industrial wastes filler on Indirect Tensile Stiffness and Fatigue performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures" *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, Vol. 5, No. 11, pp. 297–308.
- Nazer, A., Paya, J., Victoria, M. B., Monzo, J. (2016) "Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices" *Journal of Environmental Management*, Vol. 167, No. 1, pp. 115–123.  
DOI:[10.1016/j.jenvman.2015.11.024](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.024)
- Nciri, N., Shin, T., Lee, H., Cho, N. (2018) "Potential of Waste Oyster Shells as a Novel Bio-filler for Hot-Mix Asphalt" *Applied Science*, Vol. 8, No. 3, pp. 415-424.  
<https://doi.org/10.3390/app8030415>

investigation on effects of solid waste filler on mechanical properties of porous asphalt mixture" *Construction and building materials*, Vol. 279, 122436.

-Wang, H., Al-Qadi, I.L., Faheem, A. F., Bahia, H.U., Yang, S.U., Reinke, G.H. (2011) "Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential" *Transportation Research Records*, pp. 33–39, <https://doi.org/10.3141/2208-05>

-Wozzuk, A., Bandura, L., Franus, W. (2019) "Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt" *Journal of Cleaner Production*, Vol. 235, pp. 493-502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.353>

-Wu, S., Zhu, J. Zhong, J., Wang, D. (2011) "Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder" *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 6, pp. 2883-2887. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.040>

-Vahabi Komsari, S., Taherkhani, H., & Pakpour, M. (2022) "Investigating the use of zinc production wastes as filler in asphalt mixtures" *Road Materials and Pavement Design*, pp. 1-20.

-Zainudin, M.Z.M., Khairuddin, F. H., Ng, C. P., Osmi, C., Khadijah, S., Misnon, N., Murniati, S., (2016) "Effect of sugarcane bagasse ash as filler in hot mix asphalt" *Materials and Science Forum*, Vol. 846, pp. 683–689. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.846.683>

-Zhang, H., Li, H., Zhang, Y., Wang, D., Harvey, J., Wang, H. (2018) "Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler", *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 707–713.

*Grouting Waste as a Filler" Coatings*, Vol. 11, No. 7, pp. 751-759.

-Saltan, M., Öksüz, B., Uz, V.E. (2015) "Use of glass waste as mineral filler in hot mix asphalt" *Science, Engineering and Composite Materials*, Vol. 22, No. 3, pp. 271-277. DOI 10.1515/secm-2013-013

-Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., Dondi, G. (2016) "Assessment of waste bleaching clay as alternative filler for the production of porous asphalts" *Construction and Building Materials*, Vol. 109, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.052>

-Sun, G.; Zhang, J., Tan, X., Guo, D., Y. Zhou, Y., Guan, Y. (2020) "Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks", *Construction and Building Materials*, Vol. 254, 119299.

-Taherkhani, H., Vahabi Kamsari, S.; Pakpour, M. (2020) "Evaluating the properties of zinc production wastes as filler and their effects on asphalt mastic" *Construction and Building Materials*, Vol. 265, 120748.

-Tan, Y., Guo, M., (2014) "Micro-and nano-characterisation of interaction between asphalt and filler, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 42, No. 3, pp. 451-468. <https://doi.org/10.1520/JTE20130253>

-Taylor, R. (2007) "Surface interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics" Ph.D Thesis. Nottingham School of Civil Engineering. UK.

-Tian, Y., Sun, L., Li, H., Zhang, H., Harvey, J., Yang, B., ... & Fu, K. (2021). "Laboratory

بررسی استفاده از کیک کبالت و کیک لیچ تهیه شده از ضایعات صنعت روی به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوطهای آسفالتی

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.105>

-Zoorob, S.E., & Suparma, L.B., (2000)  
"Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)" Cement and Concrete Composites, Vol. 22, No. 4, pp. 233–242.

[Doi:10.1016/S0958-9465\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00026-3)

## سینا واحدی، حسن طاهرخانی، ساسان وهابی کُمساری

سینا واحدی درجه کارشناسی مهندسی عمران را در دانشگاه زنجان در سال ۱۳۹۸ اخذ نموده و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری از دانشگاه زنجان در سال ۱۴۰۱ اخذ نموده است. در حال حاضر مشغول فعالیت در بخش خصوصی در زمینه مهندسی عمران می باشند.

حسن طاهرخانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری در سال ۱۳۷۵ را از دانشگاه تربیت مدرس تهران. اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه ناینگهام انگلستان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان .مضاح و مواد روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه زنجان است.



ساسان وهابی کُمساری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه محقق اردبیلی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۷ را از دانشگاه زنجان اخذ نموده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مصالح روسازی و مخلوط های آسفالتی می باشد.

