

ارزیابی تاثیر ویژگی های زمین شناسی سنگ های کربناته کوهی بر حساسیت رطوبتی مخلوط

آسفالت داغ

لیلا رضائی^۱، غلامرضا شعاعی^{۲*}، احمد منصوریان^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۹

چکیده

سنگدانه ها اسکلت ساختمانی مخلوط آسفالت را تشکیل می دهند و ویژگی های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی سنگ نقش مهمی در عملکرد آسفالت خواهد داشت. با شناسایی ویژگی های زمین شناسی سنگدانه ها می توان اطلاعات مفیدی از نحوه رفتار آسفالت در زمان بهره برداری به دست آورد. در این پژوهش با در نظر گرفتن ۱۳ معدن کوهی کربناته با سازندهای زمین شناسی متنوع واقع در استان های اردبیل، اصفهان، تهران، زنجان، سمنان، قم و همدان؛ ویژگی های زمین شناسی سنگ های هر معدن از جمله نوع بافت، نوع کانی ها و عناصر تشکیل دهنده آن مورد شناسایی قرار گرفت و تاثیر ویژگی های زمین شناسی تعیین شده روی نتایج حاصل از آزمایش های نمونه های آسفالتی از جمله آب جوشان، کشش غیرمستقیم، نسبت استحکام مارشال آسفالت و همچنین میزان جذب قیر توسط سنگدانه ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتیجه بررسی ها نشان می دهد که نوع بافت میکروسکوپی سنگ های کربناته در کاهش و یا افزایش جذب قیر موثر است و همچنین وجود کانی های تبخیری حتی به میزان کم سبب افزایش حساسیت رطوبتی آسفالت می شود.

کلید واژه ها: سنگدانه های کربناته، زمین شناسی، مخلوط آسفالت داغ، حساسیت رطوبتی.

۱. دانشجویان دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران shoaei@modares.ac.ir

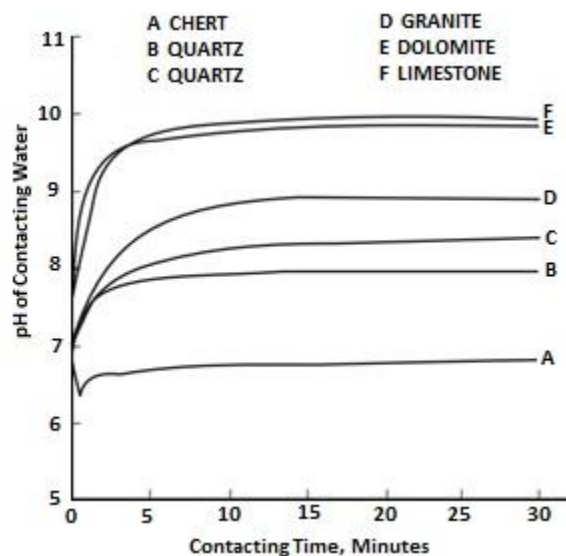
۳. عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

یکی از مهمترین عوامل رخداد بسیاری از خرابی‌های روسازی آسفالتی از جمله عریان‌شدگی، شن‌زدگی، خستگی و تغییر شکل دائمی حساسیت رطوبتی است، کیم و همکاران (Kim et al., 2008). حساسیت رطوبتی با مکانیسم‌های مختلف سبب کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌شود، لیتل و جونز (Little and Jones, 2003). در حساسیت‌های رطوبتی روسازی‌های آسفالتی تعامل بین سنگدانه و قیر پدیده‌ای است که از شیمی سطح، اجزای تشکیل دهنده، ساختار مولکولی، ترکیب شیمیایی، تعامل فیزیکی و مکانیکی و تبادل و تعامل گرمایی سنگدانه و قیر تاثیر می‌پذیرد، رودریگز-آلوزا (Rodriguez-Alloza et al., 2015). کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها عامل تعیین کننده انرژی سطحی و فرایندهای شیمیایی موثر در جذب و

چسبندگی قیر است که از جمله خواص آبدوست و آبگریز بودن و تغییرات PH محیط که در پدیده عریان‌شدگی موثر است را کنترل می‌کند، ایری و همکاران، چنگ و همکاران، کانیت پونگ و باهیا، یون و تارر (Airey et al., 2007,)، Cheng et al., 2003, Kanitpong and Bahia, 2008, Yoon and Tarrer, 1989). نمودار شکل ۱ تاثیر نوع سنگدانه در میزان PH محیط در تماس با آب را نشان می‌دهد، هاوسون (Howson et al., 2011). جدول ۱ تاثیر نوع کانی‌های سنگ با عریان‌شدگی آسفالت را نشان می‌دهد، باگمپاده و همکاران (Bagampadde et al., 2004).



شکل ۱. تاثیر نوع سنگدانه در میزان PH محیط در تماس با آب، هاوسون و همکاران (Howson et al, 2011)

اصلی سنگ (رسوبی، دگرگونی و آذرین)، انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و یا سنگدانه‌های انتخاب شده از یک گروه اصلی از تنوع و فراوانی چندانی برخوردار نیستند،

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد، در روش پژوهش‌ها به منظور بررسی تاثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی در عملکرد مخلوط آسفالتی، سنگدانه‌ها از هر سه یا دو گروه

کربناته) با فراوانی ۱۳ معدن متفاوت از همان گروه، ویژگی‌های ذاتی یکسان و همچنین تنوع در ویژگی‌های یک گروه سنگ به منظور کاربرد در مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

ابوقدیس و الشویلی، آناستازیو و همکاران و لبیب و همکاران (Abo-Qudais and Al-Shweily, 2007,) (مکارچیان و Anastasio et al., 2017, Labib et al., 2007 کریمی، ۱۳۹۴). به همین دلیل در پژوهش حاضر سعی شده است با انتخاب یک گروه اصلی سنگ (سنگ‌های رسوبی

جدول ۱. تاثیر نوع کانی بر عریان شدگی مخلوط، باگمپاده و همکاران (Bagampadde et al, 2004)

Category	Mineral Type	Rock	Comment
Silica	Quartz - SiO ₄	Granite	Poor adherends as water attaches due to H-bonding.
		Rhyolite Sandstone Quartzite	
Ferromagnesian	Olivine - (MgFe) ₂ SiO ₄ Augite - (Ca,Mg,Fe)(Si,Al) ₂ O ₆ Hornblende - (Ca,Na) ₂₋₃ (Mg,Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Al) ₅ (Al,Si) ₈ -O ₂₂ (OH) ₂ Biotite - K(Mg,Fe ²⁺) ₃ (Al,Fe ³⁺)- Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Gabbro Diabase Andesite Basalt Diorite Mica	Olivine and augite form insoluble Mg and Ca salts while biotite gives soluble K salts. Hornblende is intermediary in character.
		Limestone	Calcite – CaCO ₃ Dolomite – CaMg(CO ₃) ₂
Feldspar	Albite - NaAlSi ₃ O ₈ Orthoclase - KAlSi ₃ O ₈ Anorthite - CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Rhyolite Granite Quartzite Gneiss Sandstone Diabase Gabbro	Some strip due to Na and K soluble salt formation. Anorthite forms insoluble Ca salts that are resistant to stripping.
Clays	Illite Kaolinite Montmorillonite	Dust Baghouse fines	Fine coating (<4μ) and readily take up water. Form stable bonds lime.

در خصوص هر یک از آن‌ها اطلاعات لازم ارائه می‌شود.

۱-۱-۲. سنگدانه

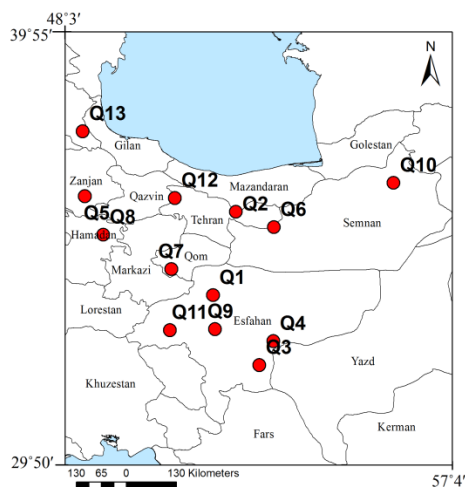
با توجه به اینکه بیشتر معادن کوهی سنگدانه مورد استفاده آسفالت در کشور از نوع سنگ‌های کربناته است

۲. مصالح و آزمایش‌ها

۱-۲. مصالح

مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالتی این پژوهش را سنگدانه و قیر تشکیل می‌دهد، که در ادامه

(مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۰) ۲ موقعیت مکانی معادن مورد مطالعه نشان داده شده است. سنگدانه‌های انتخاب شده در این پژوهش از معادن کوهی کربناته واقع در استان‌های اردبیل، اصفهان، تهران، زنجان، سمنان، قم و همدان انتخاب شده است. در شکل



شکل ۲. موقعیت مکانی معادن سنگدانه مورد مطالعه

۲-۱-۲. قیر

تشکیل دهنده و میزان کانی کربناته موجود در سنگ است و بخش دوم ارزیابی مخلوط‌های آسفالت داغ ساخته شده از سنگدانه‌های هر یک از معادن شامل: جذب قیر مصالح و آزمایش‌های حساسیت رطوبتی است. شکل ۳ فرآیند کلی ارزیابی آزمایشگاهی پژوهش حاضر نشان داده شده است.

در این پژوهش به منظور انتخاب نوع قیر در ساخت نمونه‌های آسفالتی از سامانه طبقه‌بندی قیر بر اساس عملکرد (PG) (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۸) استفاده شد. با توجه به اینکه قیر غالب مورد استفاده در محدوده معادن سنگدانه‌ها، قیر PG 64-22 است، در ساخت نمونه‌های آسفالت از قیر PG 64-22 استفاده شد.

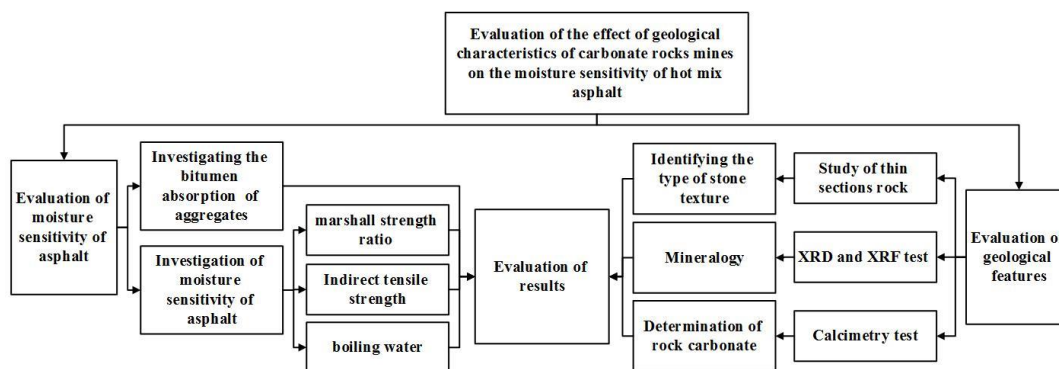
۲-۲-۱. آزمایش‌های مربوط به ویژگی‌های زمین‌شناسی

مصالح سنگی

برای شناسایی ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگدانه‌ها، شناسایی بافت سنگ، تعیین نوع کانی‌های سنگ و میزان درصد کانی‌های کربناته در نظر گرفته شد.

۲-۲. آزمایش‌ها

ارزیابی و آزمایش‌ها در این پژوهش به دو بخش کلی تقسیم می‌شود؛ بخش اول بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ‌ها، شامل: شناسایی بافت سنگ، تعیین نوع کانی‌های



شکل ۳. روندنمای روش انجام کار در این پژوهش

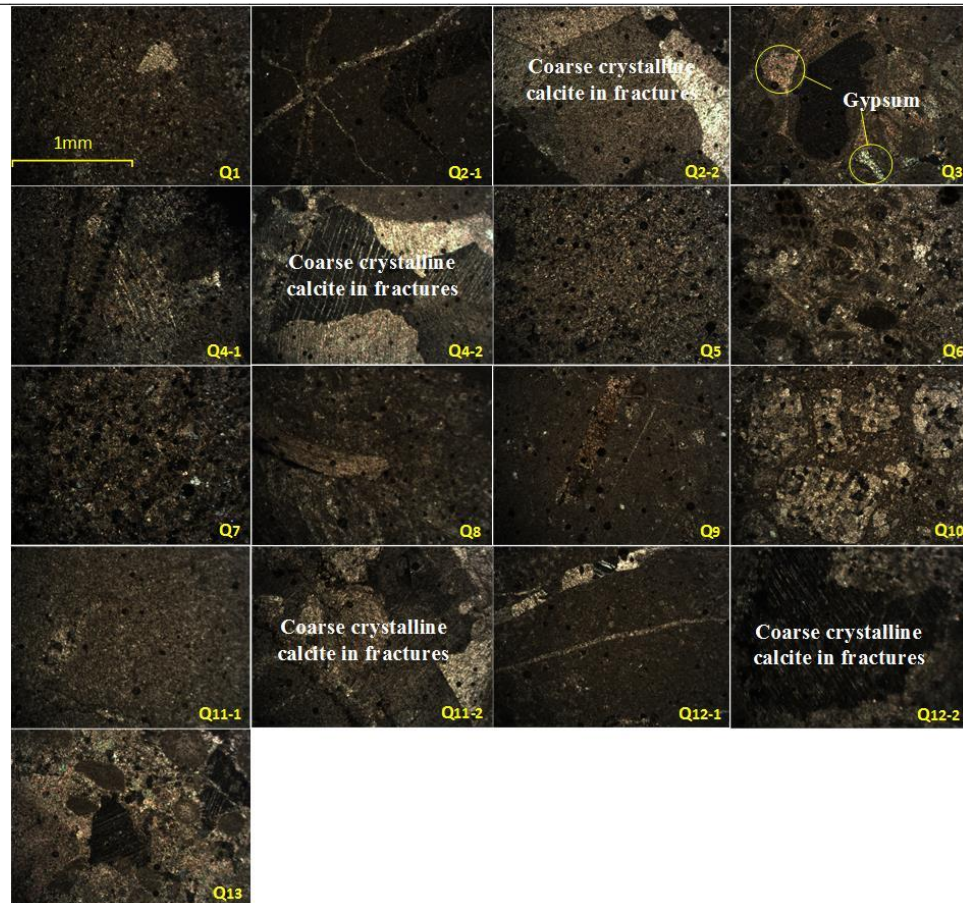
بلورهای درشت کلسیت پر شده است، Q₃: پکستون، Q₄: مادستون دارای شکستگی هایی که با سیمان درشت بلور کلسیت پر شده است، Q₅: مادستون تجدید تبلور یافته، Q₆: پکستون، Q₇: پکستون، Q₈: وکستون، Q₉: مادستون، Q₁₀: وکستون دولومیتی شده، Q₁₁: مادستون حاوی شکستگی-هایی که با سیمان درشت بلور کلسیت پر شده است، Q₁₂: وکستون دارای شکستگی های پر شده با سیمان درشت بلور کلسیت و Q₁₃: پکستون. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ در شکل ۴ نشان داده شده است.

الف. نوع بافت سنگ

برای بررسی نوع بافت سنگ، مقاطع نازک سنگ تهیه شد و مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفت. با توجه به اینکه سنگ های مورد مطالعه از نوع رسوبی کربناته است، برای نام گذاری بافت سنگ، از طبقه بندی دانهام برای بافت سنگ های کربناته استفاده شد. در جدول ۲ طبقه بندی دانهام برای سنگ های کربناته نشان داده شده است. نام بافت سنگ های مورد مطالعه عبارت است از: Q₁: مادستون دارای قطعات کرانوئید، Q₂: وکستون دارای شکستگی هایی که با

جدول ۲. طبقه بندی بافت سنگ های کربناته، دانهام (Dunham, 1962)

Depositional texture recognizable					
Original components not bound together during deposition				Original components were bound together	Depositional texture not recognizable
Contains mud (clay and fine silt-sized carbonate)		Grain supported	Lacks mud and is grain supported		
Mud supported	More than 10% grains			Less than 10% grains	
Mudstone	Wackstone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Crystalline



شکل ۴. بافت سنگ‌های مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس طبقه‌بندی دانه‌ها برای سنگ‌های کربناته؛ Q₁: بافت مادستون دارای قطعات کراتوئید، Q₂₋₁: وکستون دارای شکستگی‌هایی که با بلورهای درشت بلور کلسیت پر شده است (Q₂₋₂)، Q₃: اوئید پکستون، Q₄₋₁: مادستون دارای شکستگی‌هایی که با سیمان درشت بلور کلسیت پر شده است (Q₄₋₂)، Q₅: مادستون تجدید تبلور یافته، Q₆: پکستون، Q₇: پکستون، Q₈: وکستون، Q₉: مادستون، Q₁₀: وکستون دولومیتی شده، Q₁₁₋₁: مادستون حاوی شکستگی‌هایی که با سیمان درشت بلور کلسیت پر شده است (Q₁₁₋₂)، Q₁₂₋₁: وکستون دارای شکستگی‌های پر شده با سیمان درشت بلور کلسیت (Q₁₂₋₂) و Q₁₃: پکستون.

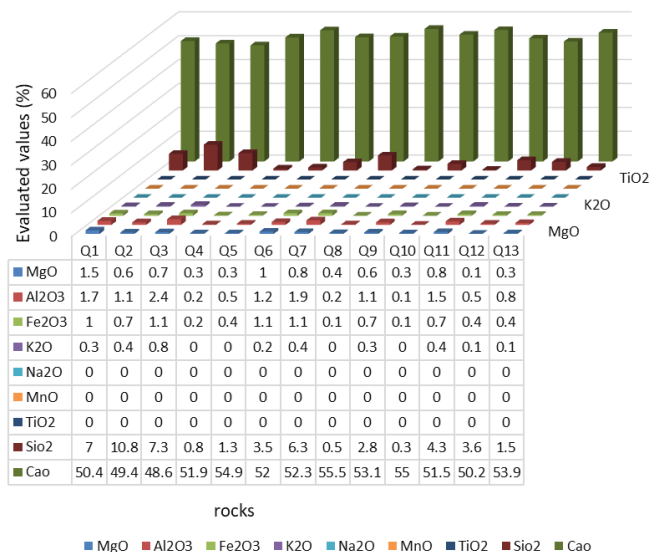
ب. شناسایی نوع کانی‌ها و عناصر تشکیل دهنده سنگ

صورت قرص‌های پرس شده آماده می‌شوند)، تغییرات انجام شده به عنوان نتیجه آزمایش XRF ثبت می‌شود. تصاویری از آماده‌سازی نمونه‌های مصالح سنگی برای انجام آزمایش XRF در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج آنالیز XRF برای نمونه سنگ‌های ۱۳ معدن کوهی مورد بررسی در شکل ۶ نمایش داده شده‌است.

آنالیز XRF مصالح سنگی، روشی برای تشخیص و اندازه‌گیری میزان تمرکز عناصر موجود در نمونه‌ها از فلوئور تا اورانیم از ۱ ppm تا ۱۰۰٪ است، ویلیامز (Williams, 1987). نتیجه آنالیز برای عناصر اصلی به صورت اکسید و بر حسب درصد و برای عناصر فرعی به صورت عنصری و بر حسب ppm گزارش می‌شود. در این روش در فرایند خاصی با تابش اشعه X به نمونه‌های پودر شده (که به



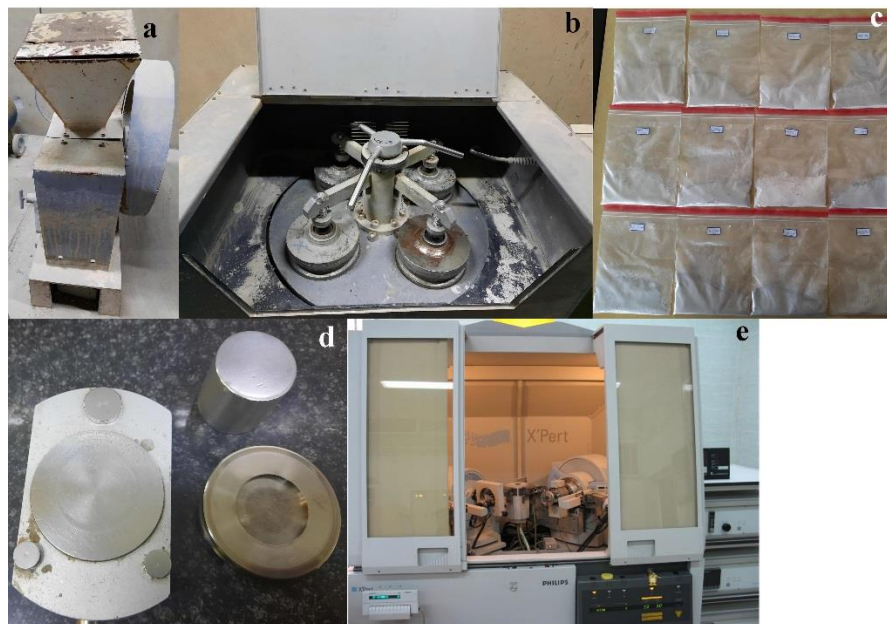
شکل ۵. تصاویر آماده سازی نمونه برای آزمایش XRF، تصاویر؛ (a) خرد کردن سنگ، (b) پودر کردن سنگ، (c) پودر سنگ، (d و e) مخلوط کردن پودر سنگ با چسب مخصوص، (f) پودر مورد استفاده در ته نمونه های قرص شکل، (g) پرس کردن پودر سنگ و تبدیل آن به نمونه های قرص شکل، (h) نمونه های قرص شکل، (i) قرار دادن نمونه های قرص شکل در دستگاه



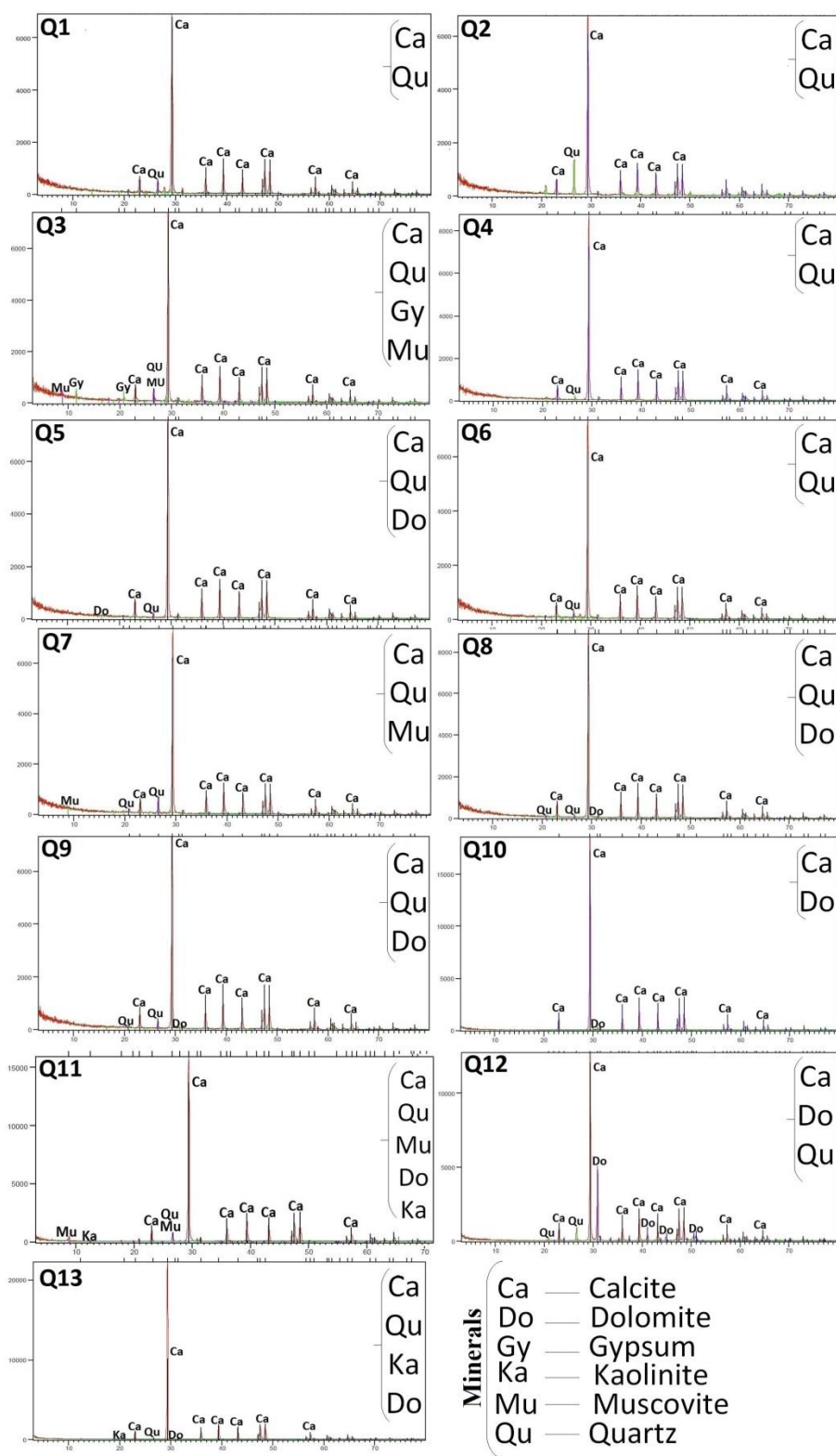
شکل ۶. نتایج آزمایش XRF روی سنگ معادن مورد مطالعه

X به نمونه‌های پودر شده اشکال گوناگون بلورین فازها تعیین می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش XRD سنگ‌ها در شکل ۸ نمایش داده شده است.

برای شناسایی کانی‌های تشکیل دهنده سنگ از آزمایش XRD استفاده شد. تصاویر آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش XRD در شکل ۷ نشان داده شده است. در این روش بر حسب اندازه‌گیری طول موج بازتابیده شده اشعه



شکل ۷. تصاویر آماده‌سازی نمونه برای آزمایش XRD، تصاویر؛ (a) خرد کردن سنگ‌ها، (b) پودر کردن سنگ، (c) پودر سنگ، (d) ریختن پودر سنگ در قالب‌های مخصوص، (e) قرار دادن قالب‌های حاوی پودر سنگ در دستگاه



شکل ۸. نمودارهای نتایج حاصل از آزمایش XRD برای ۱۳ سنگ معدن مورد بررسی در این پژوهش

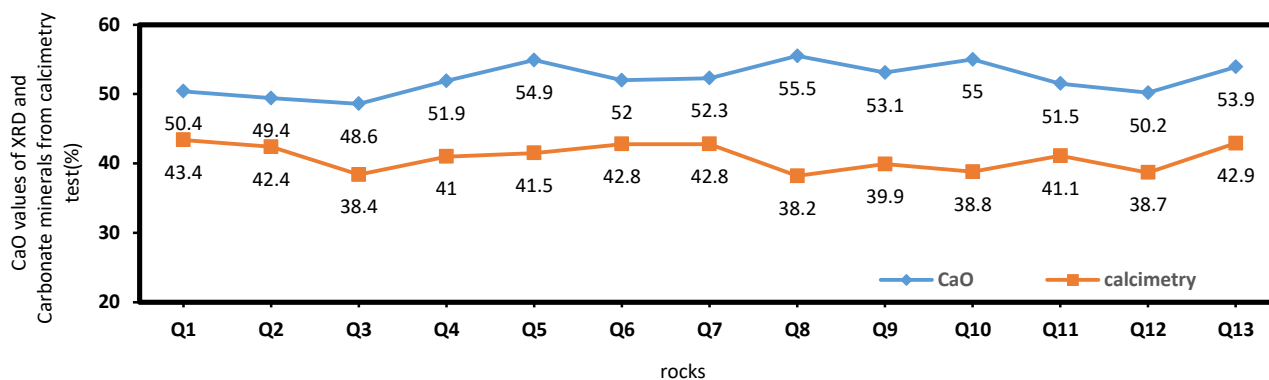
پ. تعیین میزان کانی‌های کربناته در سنگ‌ها

به منظور تعیین درصد کانی‌های کربناته سنگ معادن از آزمایش کلسیمتری استفاده شد. آزمایش کلسیمتری به روش برنارد و بر اساس استاندارد ASTM C25 انجام شد. در

شکل ۹ دستگاه آزمایش کلسیمتری نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۰ نتایج حاصل از آزمایش کلسیمتری را نشان می‌دهد.



شکل ۹. دستگاه آزمایش کلسیمتری



شکل ۱۰. نتایج حاصل از آزمایش کلسیمتری ۱۳ سنگ معدن مورد بررسی در این پژوهش

به منظور ساخت نمونه‌های آسفالت برای آزمایش‌های مربوط به حساسیت رطوبتی نیاز به طرح اختلاط مخلوط آسفالتی است. طرح اختلاط مخلوط آسفالت داغ در سه

۲-۲-۲. آسفالت

الف. ساخت نمونه‌های آسفالت

برای استفاده در مخلوط آسفالت داغ در جدول ۳ نشان داده شده است. دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش بر اساس دانه‌بندی شماره ۴ جدول ۹-۱ در نشریه شماره ۲۳۴، آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۰)، انجام شده است که اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۱۹ میلی‌متر است.

مرحله خلاصه می‌شود: (۱) انتخاب نوع مصالح سنگی و دانه‌بندی آن‌ها؛ (۲) انتخاب نوع قیر؛ (۳) تعیین مقدار قیر مورد نیاز برای برآورده کردن الزامات خاص یک پروژه. نوع سنگدانه و قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالت در بخش‌های (۱-۲) و (۲-۱) این مقاله توضیح داده شده است. نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی معادن مورد بررسی

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های سنگ ۱۳ معدن مورد بررسی در این پژوهش

Tests	Standards	Mines												
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
Sand-equivalent %	AASHTO T 176	55	75	55	82	82	67	81	66	50	71	61	74	51
Los Angeles abrasion %	AASHTO T 96	25	24	25	25	25	23	19	23	25	22	27	22	18
Elongation %	BS-812	22	14	10	18	18	21	15	13	10	5	10	20	12
Flakiness %	BS-812	29	15	7	17	17	10	17	14	15	11	17	14	16
Soundness of coarse aggregate by use of sodium sulfate %	AASHTO-T104	0	0.5	0.3	0.9	0.9	0.7	0.3	0.4	0.9	0.6	0.3	0.8	1
Fractured particles %	ASTM-D5821	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Uncompacted Void Content of Fine Aggregate %	ASTM-C1252	44	45	44	44	43	54	41	43	45	45	45	44	45

ویژگی‌های مخلوط آسفالتی تهیه شده از سنگ معادن مورد مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است.

بر اساس روش استاندارد ASTM D6926، محدوده دمایی اختلاط و تراکم آسفالت با توجه به کندروانی قیر به ترتیب ۱۵۰-۱۵۵ و ۱۳۶-۱۴۲ درجه سلسیوس تعیین شد.

برای تعدیل تاثیر سایر پارامترها در عملکرد مخلوط آسفالتی از یک نوع قیر و یک نوع دانه‌بندی به منظور ساخت نمونه‌های آسفالت داغ هر ۱۳ معدن استفاده شد.

ساخت نمونه‌های آسفالت بر اساس استاندارد D6926 ASTM و طرح مخلوط آسفالت به روش مارشال بر اساس مندرجات نشریه MS-2 موسسه آسفالت آمریکا انجام شد (Asphalt Institute, 2014).

جدول ۴. ویژگی‌های مخلوط آسفالتی تهیه شده از مصالح سنگی معادن مورد مطالعه

Optimal bitumen(%)	Bitumen absorption (%)	WFA ^{2*} (%)	WMA ^{1*} (%)	Air void*	Flow* (mm)	Stability* (Kgf)	Unite weight	Mines
4.7	0.27	73	14.3	4	3	1380	2.37	Q ₁
4.8	0.3	72	14.5	4	2.7	1040	2.37	Q ₂
4.7	0.24	73	14.2	4	3.3	1150	2.34	Q ₃
4.6	0.24	68	14	4	2.65	1400	2.25	Q ₄
4.8	0.46	75	14.5	4	3.2	1600	2.34	Q ₅
4.9	0.37	70	14.3	4	3.2	1350	2.34	Q ₆
4.9	0.55	72	14.25	4	3.2	1630	2.38	Q ₇
4.8	0.44	71.9	14.1	4	2.8	1212	2.36	Q ₈
4.6	0.28	71	14.1	4	2.7	1120	2.36	Q ₉
4.7	0.42	70	14.5	4	3.2	1280	2.37	Q ₁₀
4.6	0.26	72	14	4	2.6	1200	2.38	Q ₁₁
4.5	0.26	72	14.1	4	2.5	1185	2.44	Q ₁₂
4.3	0.23	75	14	4	2.8	1185	2.43	Q ₁₃

*corresponding to the optimal bitumen

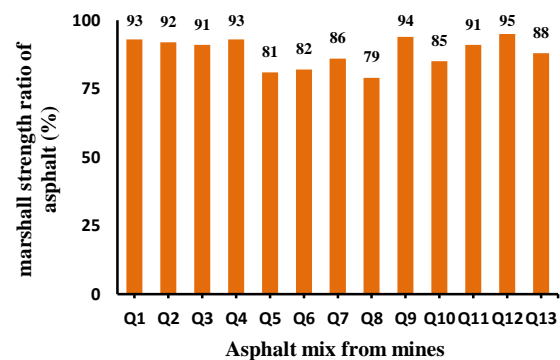
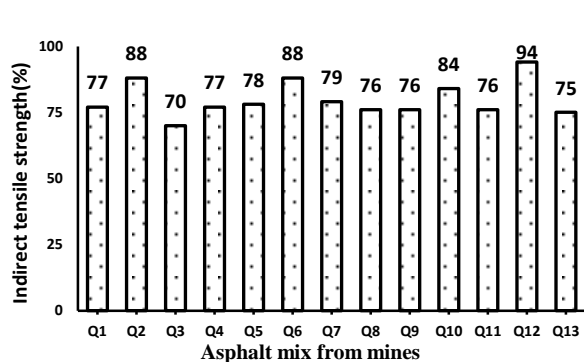
1 Void in Mineral Aggregates

2 Void Filled with Asphalt

که نتایج آن در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است (نمونه‌های آسفالت در این آزمایش دارای ۷ درصد فضای خالی هستند). آزمایش آب جوشان بر اساس استاندارد ASTM D3625 انجام شد. تصاویر مخلوط آسفالت معادن مورد مطالعه پس از انجام آزمایش آب جوشان در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش در نمودار شکل ۱۴ نشان داده شده است.

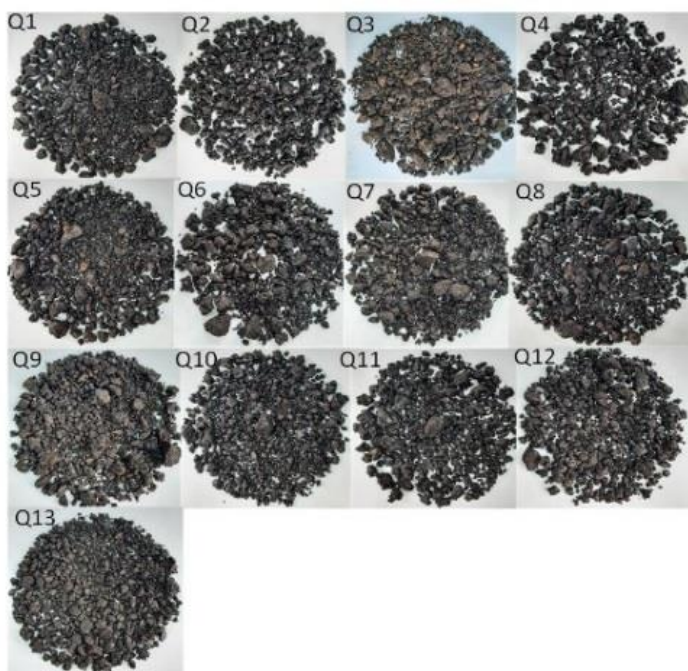
ب. بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش، از سه آزمایش؛ نسبت کشش غیرمستقیم (ITS)، نسبت متوسط استحکام مارشال (MSR) و آب جوشان استفاده شد. نسبت متوسط استحکام مارشال، نسبت متوسط استحکام سه نمونه آزمایشگاهی مارشال آسفالت است که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب با دمای 60 ± 1 درجه سانتیگراد قرار گرفته است به متوسط استحکام سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ۴۰ دقیقه (در این پژوهش ۳۵ دقیقه در نظر گرفته شده است) در داخل آب با همان دما قرار گرفته است، نتایج این آزمایش در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. آزمایش کشش غیرمستقیم، نسبت متوسط مقاومت کششی غیرمستقیم سه نمونه آزمایشگاهی اشباع به متوسط سه نمونه خشک به روش استاندارد AASHTO-T283 است

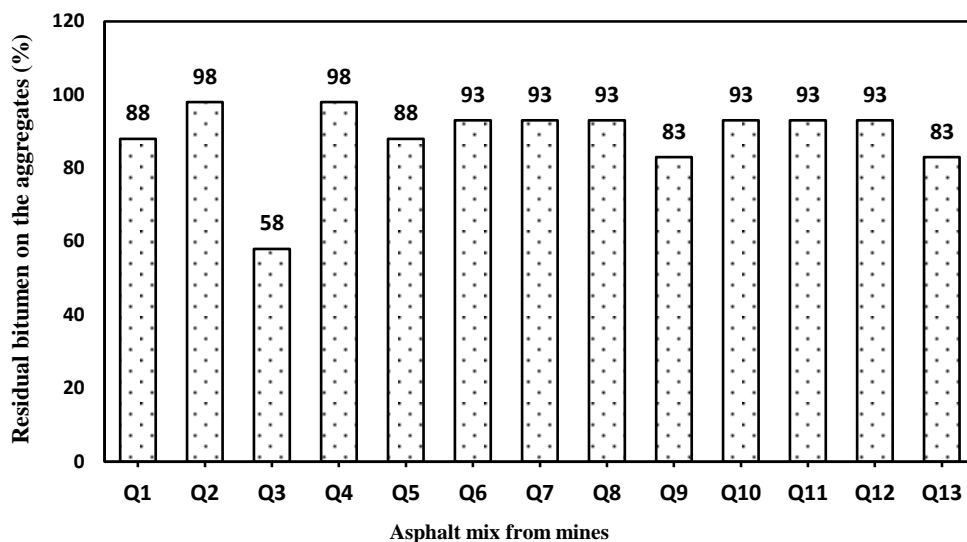


شکل ۱۲. مقادیر نسبت کشش غیر مستقیم نمونه های آسفالتی

شکل ۱۱. مقادیر نسبت استحکام مارشال نمونه های آسفالتی



شکل ۱۳. پوشش قیر باقیمانده مخلوط آسفالت معادن مورد مطالعه پس از انجام آزمایش آب جوشان



شکل ۱۴. نتایج آزمایش آب جوشان

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش XRF

نتایج XRF (شکل ۶) نشان می‌دهد مقادیر CaO به نسبت سایر اکسیدها قابل ملاحظه است و مقادیر SiO₂ حداکثر به میزان ده درصد در سنگ معادن مورد مطالعه شناسایی شده است. تحقیقات نشان می‌دهد، میزان انرژی سطحی سنگدانه‌ها عمدتاً متأثر از وجود اکسیدهای SiO₂ و CaO است. به طوری که مقدار انرژی سطحی با مقدار SiO₂ رابطه عکس و با مقدار CaO رابطه مستقیم دارد، هو و همکاران (Hou et al., 2020). همچنین بخش‌هایی روی سطح سنگدانه که تمایل بیشتری به برقراری پیوند با قیر دارند دربردارنده عناصری چون آلومینیوم، آهن، منیزیم و کلسیم است و بخش‌هایی روی سطح سنگدانه‌ها که تمایل کمتری به برقراری پیوند با قیر دارند حاوی عناصری چون سدیم و پتاسیم است، جیمیسون و همکاران (Jamieson et al., 1995). همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، میزان اکسیدهای سدیم و پتاسیم که از عوامل منفی در انرژی سطحی برای جذب قیر محسوب می‌شوند در سنگ معادن

مورد مطالعه بسیار ناچیز شناسایی شده است. اکسید سدیم حداکثر به میزان ۰/۲ درصد و اکسید پتاسیم حداکثر به میزان ۰/۷ درصد در سنگ‌های مورد مطالعه شناسایی شده است؛ در حالیکه عوامل مثبت در سطح انرژی سنگدانه‌ها در جذب قیر از جمله وجود اکسیدهای آلومینیم حداکثر ۲ درصد، آهن حداکثر ۱ درصد، منیزیم حداکثر ۳ درصد، کلسیم حداکثر ۵۵ درصد شناسایی شده است که نشان می‌دهد از نظر شیمیایی و سطوح انرژی جذب قیر، هر ۱۳ سنگ معدن مورد مطالعه شرایط مطلوبی دارند.

۳-۲. آزمایش XRD

نتایج XRD (شکل ۸) نشان می‌دهد که کانی اصلی سنگ در هر ۱۳ معدن کوهی مورد مطالعه کانی‌های کربناته است. کانی تبخیری ژپس در معدن Q₃، کانی دگرگونی مسکویت به میزان کمی در سنگ‌های سه معدن Q₃، Q₇ و Q₁₁ و کانی رسی کائولینیت در سنگ معادن Q₁₁ و Q₁₃ مشاهده می‌شود که هر سه نوع کانی‌های تبخیری، رسی و دگرگونی به علت مقاومت و سختی پایین این نوع کانی‌ها، اثر منفی در حساسیت رطوبتی آسفالت دارد.

۳-۳. آزمایش کلسیمتری

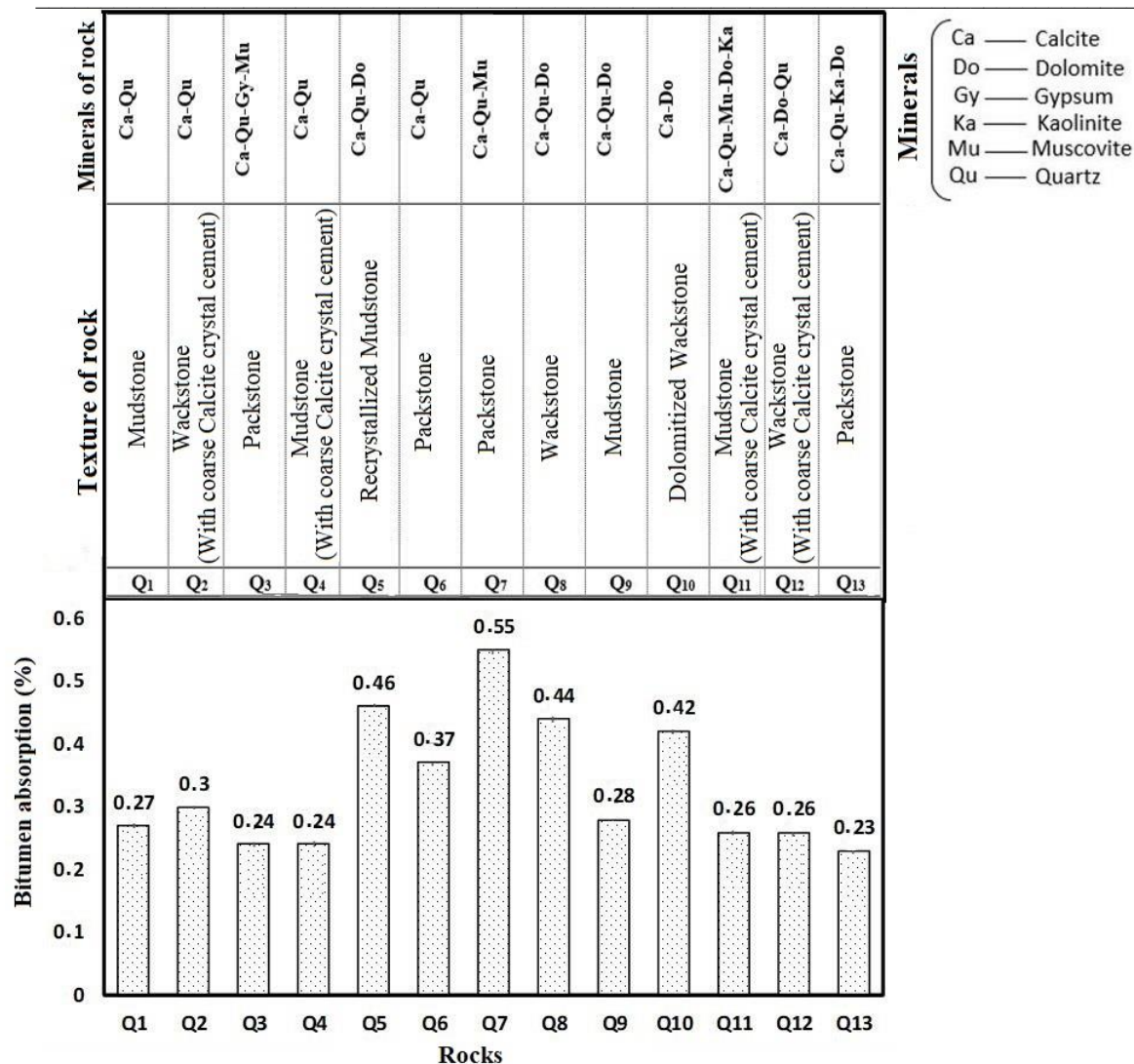
میزان بالای کانی‌های کربناته در سنگ علاوه بر ایجاد مقاومت بالا در سنگ، تورم‌پذیری سنگ را کاهش خواهد داد (صادقی، ۱۴۰۰). نتایج نشان می‌دهد، سنگ معادن مورد مطالعه کانی کربناته بالایی دارند. مقایسه نتایج آزمایش کلسیمتری و میزان CaO موجود در سنگ (به جز سنگ معادن Q₅، Q₈ و Q₁₀)، بیان‌کننده رابطه مستقیم مقدار CaO در سنگ و مقدار حاصل از آزمایش کلسیمتری است بطوری که میزان CaO بالا در سنگ منجر به مقدار کلسیمتری بالا می‌شود. با بررسی کانی‌های موجود در سه معدن Q₅، Q₈ و Q₁₀ که ناقض رابطه مستقیم نتایج آزمایش کلسیمتری و میزان CaO در این پژوهش است، مشاهده می‌شود که در هر سه نوع سنگ معادن Q₅، Q₈ و Q₁₀، کانی دولومیت بخشی از کانی‌های کربناته سنگ را تشکیل می‌دهد.

۳-۴. نتایج حاصل از بررسی تاثیر نوع بافت و کانی‌شناسی سنگ در نتایج حاصل از جذب قیر سنگدانه‌ها

همانطور که در نمودار شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. سنگ‌هایی که جذب قیر پایینی را نشان می‌دهند (کمتر از ۰/۳ درصد) عبارتند از: سنگ معادن Q₁₃ با جذب قیر ۰/۲۳ و Q₃ با جذب قیر ۰/۲۴ درصد؛ دارای بافت پکستون هستند، در بافت پکستون دانه‌های فراوان کربناته وجود دارد که فضای بین دانه‌ها از گل کربناته (ذرات کوچکتر از ۲۰ میکرون) پر می‌شود. همچنین سنگ معادن Q₄ با جذب قیر ۰/۲۴ درصد، Q₁₁ با جذب قیر ۰/۲۶ درصد و Q₁ با جذب قیر ۰/۲۷ درصد؛ دارای بافت مادستون هستند. بافت مادستون دارای درصد کمی دانه‌های کربناته (کمتر از ۱۰ درصد) است که در متنی از گل کربناته قرار گرفته‌اند. سنگ معدن Q₁₂ با

جذب قیر ۰/۲۶ درصد دارای بافت وکستون است این بافت از بیش از ۱۰ درصد از دانه‌های کربناته که در متنی از گل کربناته قرار گرفته است، تشکیل شده است و سنگ معادنی که داری جذب به نسبت بالاتری هستند (جذب بیش از ۰/۳ درصد) عبارتند از: سنگ معادن Q₇ با جذب قیر ۰/۵۵ درصد، Q₆ با جذب قیر ۰/۳۷ درصد دارای بافت پکستون، سنگ معادن Q₈ با میزان جذب قیر ۰/۴۴ درصد و Q₁₀ با میزان جذب قیر ۰/۴۲ درصد دارای بافت وکستون و سنگ معدن Q₅ با میزان جذب قیر ۰/۴۶ درصد دارای بافت مادستون است.

همانطور که انتظار می‌رود بافت‌هایی از سنگ که بیشتر از گل کربناته تشکیل شده است به علت نفوذ ناپذیری (ناچیز بودن فضای بین ذرات)، جذب قیر پایینی دارند مانند بافت مادستون در سنگ معادن Q₄، Q₁₁ و Q₁؛ ولی اگر این بافت به صورت ناقض تجدید تبلور پیدا کند و گل کربناته به صورت بخشی جای خود را به بلورهای کانی کربناته دهد به علت عدم یکنواختی بافت (وجود بلورها در زمینه گل) فضای خالی بین ذرات افزایش می‌یابد که در نتیجه جذب قیر سنگ افزایش پیدا می‌کند، مانند سنگ معدن Q₅. سنگ معادنی که از دانه‌های کربناته بیشتری برخوردارند جذب قیر بالاتری را نشان می‌دهد مانند سنگ معادن Q₇ و Q₆ با بافت پکستون و سنگ معادن Q₈ و Q₁₀ با بافت وکستون است. نتایج حاصل از آزمایش XRD دو سنگ معدن Q₃ و Q₁₃ با بافت پکستون وجود کانی‌های رسی و تبخیری را در سنگ نشان می‌دهد. در حالی که در سنگ معادن با بافت پکستون و وکستونی که دارای جذب قیر بالاتری هستند هیچ یک از کانی‌های رسی و تبخیری وجود ندارند.



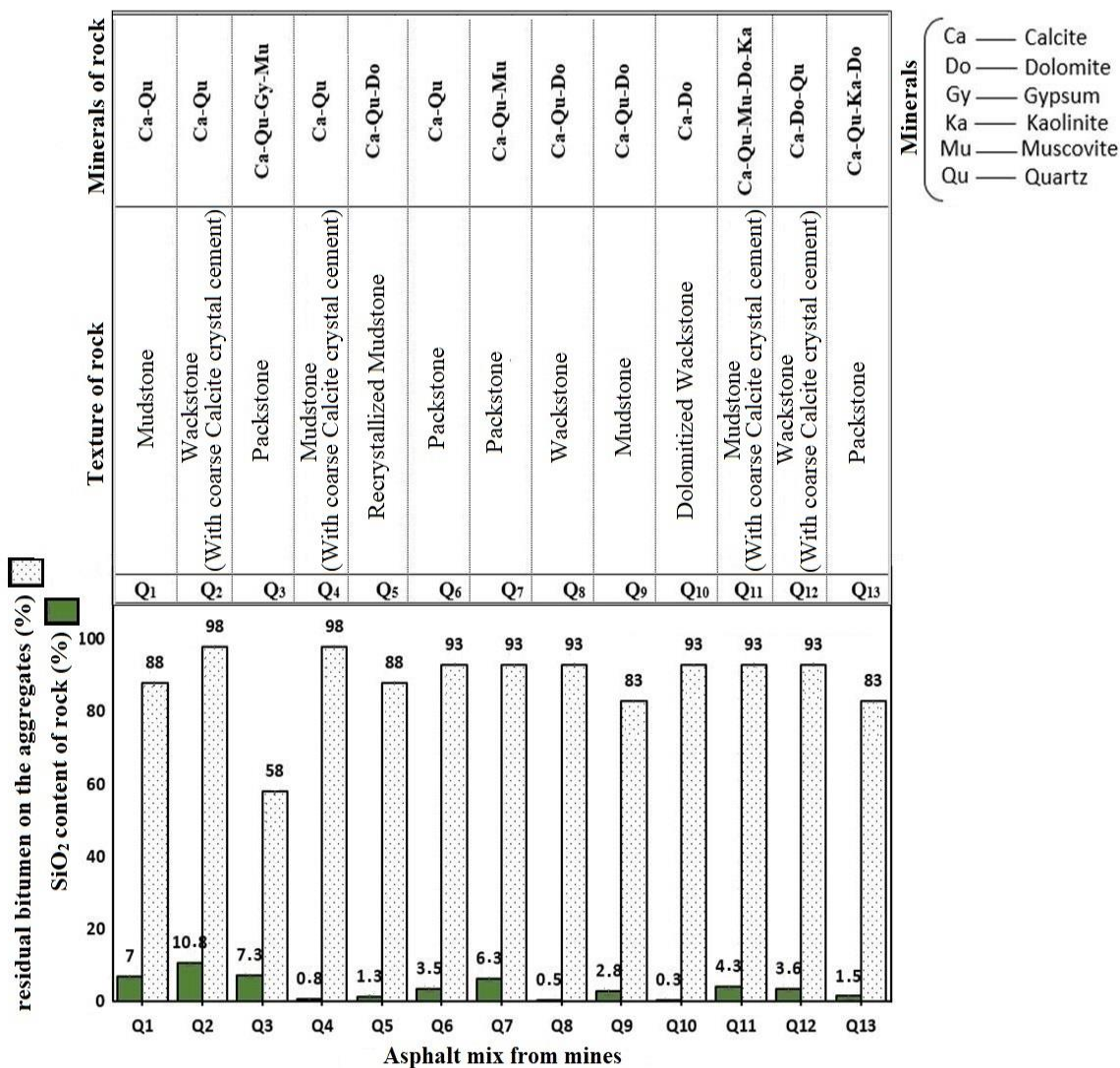
شکل ۱۵. بررسی تاثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی بر جذب قیر مصالح سنگی

آسفالت این معدن به صورت قابل توجهی میزان پوشش قیر پایینی را نشان می‌دهد.

همانطور که در نمودار شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود، مقادیر سیلیس در سنگ‌های مورد مطالعه در این پژوهش مقادیر بالایی نیست بیشترین مقدار تنها در سه سنگ معدن Q₂ با ۱۰/۸ درصد، Q₃ با ۷/۳ درصد و Q₇ با ۶/۳ درصد است و سایر سنگ معادن مقادیر کمی سیلیس دارند. این میزان از مقادیر سیلیس تاثیر منفی در نتایج حاصل از آزمایش آب جوشان نشان نمی‌دهد.

۳-۵. نتایج حاصل از ارزیابی تاثیر نوع بافت و کانی‌شناسی سنگ در نتایج حاصل از آزمایش آب‌جوشان

نتایج حاصل از آزمایش آب‌جوشان با کانی‌های موجود در هر سنگ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد وجود کانی‌های تبخیری (مانند ژپس، انیدریت و ...) حتی به مقدار کم در سنگ به میزان قابل توجهی سبب کاهش پوشش قیر بر روی سنگدانه‌ها در آزمایش آب جوشان می‌شود، سنگ معدن Q₃ دارای کانی تبخیری ژپس است و نتیجه آزمایش آب‌جوشان مخلوط



شکل ۱۶. بررسی تاثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی بر نتایج آزمایش آب‌جوشان

(MSR) و نسبت کشش غیر مستقیم (ITS) در شکل ۱۷ نشان داده شده است؛ میزان بالای MSR (بیش از ۹۰ درصد) در سنگ معادن: Q₁ با MSR ۹۳ درصد، Q₄ با MSR ۹۳ درصد، Q₉ با MSR ۹۴ درصد، Q₁₁ با MSR ۹۱ درصد؛ دارای بافت مادستون، Q₂ با MSR ۹۲ درصد و Q₁₂

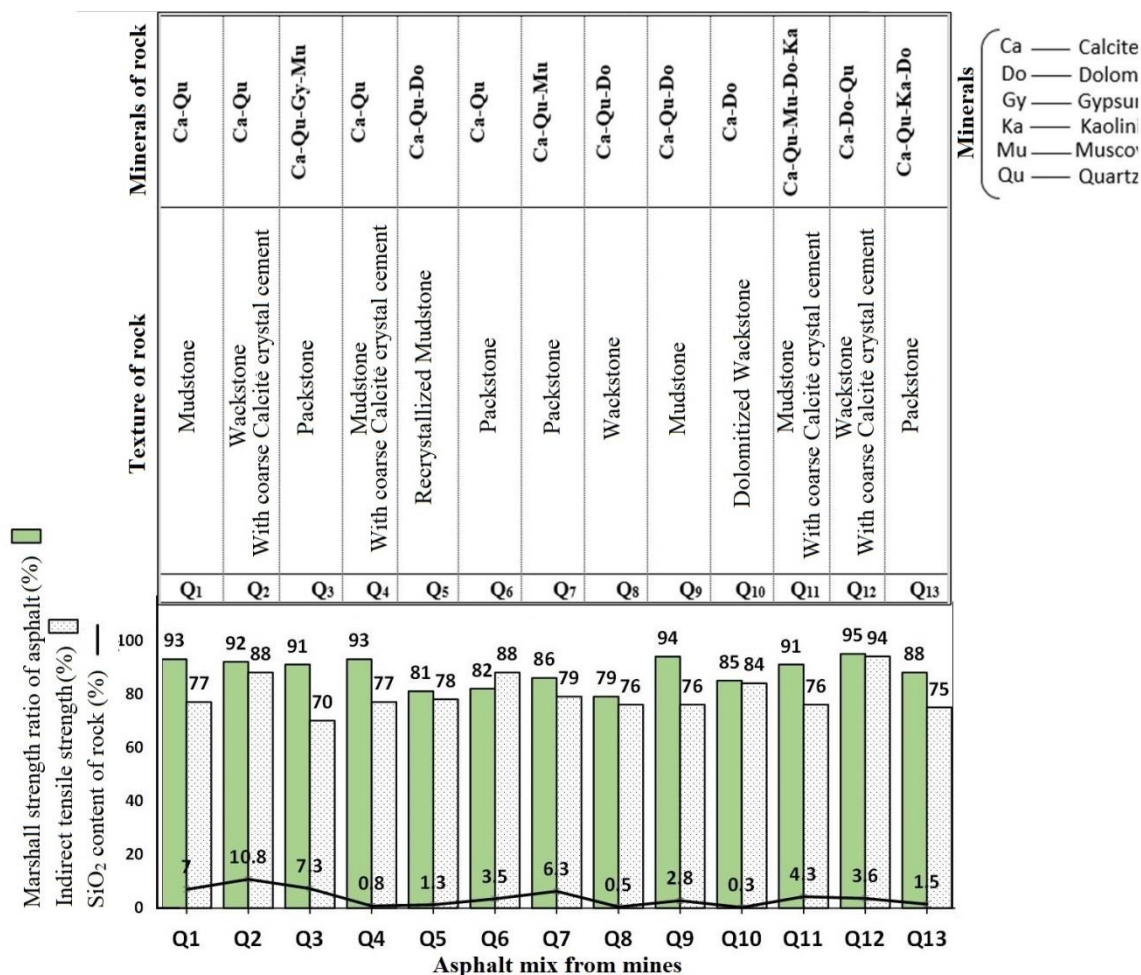
۳-۶. نتایج حاصل از ارزیابی تاثیر نوع بافت و کانی‌شناسی سنگ در نتایج حاصل از آزمایش‌های نسبت استحکام مارشال و نسبت کشش غیرمستقیم نتایج حاصل از ارزیابی تاثیر نوع بافت و کانی‌شناسی سنگ در نتایج حاصل از آزمایش‌های نسبت استحکام مارشال

پایین تری را به نسب سایر بافت‌ها طبقه‌بندی دانهام نشان می‌دهد؛ ولی سنگ معدن Q_3 با مقدار ITS برابر ۷۰ درصد؛ دارای بافت پکستون، کمترین مقدار ITS را نشان می‌دهد. سنگ معدن Q_3 دارای مقادیر بالایی کانی تبخیری ژئیس است که به شدت در مقاومت و استحکام سنگ تاثیرگذار بوده است. نتایج یاد شده نشان می‌دهد وجود کربنات متبلور (سیمان درشت بلور و بلورهای دولومیت) سبب افزایش مقادیر نسبت کشش غیر مستقیم و در نتیجه کاهش در حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود.

شایان ذکر است مقادیر سیلیس در سنگ‌های مورد مطالعه در این پژوهش مقادیر زیادی نیست بیشترین مقادیر تنها در سه سنگ معدن Q_2 با ۱۰/۸ درصد، Q_3 با ۷/۳ درصد و Q_7 با ۶/۳ درصد است و سایر سنگ معادن مقادیر کمی از سیلیس دارند. همانطور که نمودار شکل ۱۷ نشان می‌دهد این میزان از مقادیر سیلیس ارتباط و تاثیر قابل ملاحظه‌ای را در نتایج حاصل از نسبت کشش غیر مستقیم و نسبت استحکام مارشال نشان نمی‌دهد.

با MSR ۹۵ درصد؛ دارای بافت وکستون، Q_3 با MSR ۹۱ درصد؛ دارای بافت پکستون مشاهده می‌شود. ۴ سنگ معدن از ۷ مورد نامبرده شده (Q_1, Q_4, Q_9, Q_{11}) دارای بافت مادستون است و دو سنگ معدن (Q_2 و Q_{12}) دارای بافت وکستون هستند که در هر دو بافت وکستون، بخش زیادی از بافت سنگ را سیمان درشت بلور کلسیت تشکیل می‌دهد. بافت مادستون و بافت کربنات متبلور به نسبت سایر بافت‌های طبقه‌بندی دانهام برای سنگ‌های کربناته، از یکنواختی و یکپارچگی بیشتری برخوردار هستند. در نتیجه هر چه بافت سنگ از یکنواختی بیشتری برخوردار باشد سبب افزایش MSR خواهد شد.

میزان بالای نسبت کشش غیر مستقیم (ITS) (بیش از ۸۰ درصد) در سنگ معادن: Q_2 با مقدار ITS برابر ۸۸ درصد و Q_{12} با مقدار ITS برابر ۹۴ درصد؛ دارای بافت وکستون با سیمان درشت بلور کلسیتی و سنگ معدن Q_{10} با مقدار ITS برابر ۸۴ درصد؛ دارای بافت وکستون دولومیتی شده و سنگ معدن Q_6 با مقدار ITS برابر ۸۸ درصد؛ دارای بافت پکستون است. سنگ‌های دارای بافت مادستون مقادیر ITS



شکل ۱۷. نمودار ارزیابی تاثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ بر نتایج آزمایش‌های نسبت کشش غیرمستقیم و نسبت استحکام مارشال

۴. نتیجه‌گیری

معادن نامبرده) ساخته شد و آزمایش‌های مربوط به ارزیابی حساسیت رطوبتی روی نمونه‌های آسفالت ساخته شده انجام شد. سپس تاثیر ویژگی‌های تعیین شده توسط آزمایش‌ها و ارزیابی‌های تخصصی زمین‌شناسی سنگ معادن مورد مطالعه با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده (آزمایش آب جوشان، نسبت استحکام مارشال و نسبت کشش غیر مستقیم) روی نمونه آسفالت‌های هر یک از معادن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. از جمله نتایج

در این پژوهش ۱۳ معدن کوهی کربناته تامین کننده سنگدانه‌های تولید آسفالت در کشور انتخاب و مورد آزمایش و ارزیابی تخصصی زمین‌شناسی (آزمایش‌های XRD و XRF، آزمایش کلسیمتری و مطالعه مقاطع نازک سنگ) قرار گرفت. با استفاده از یک نوع قیر (PG 64-22) و یک نوع دانه‌بندی (دانه‌بندی شماره ۴ جدول ۹-۱ در نشریه شماره ۲۳۴، آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران)، ۱۳ نوع نمونه آسفالت آزمایشگاهی (استفاده از سنگدانه‌های ۱۳

- که از انجام این پژوهش حاصل شد عبارت است از:
- بافت‌هایی از سنگ که بیشتر از گِل کربناته تشکیل شده است به علت ناچیز بودن فضای بین ذرات در بافت سنگ، جذب قیر پایینی نشان می‌دهند مانند بافت مادستون؛
- وجود کانی تبخیری (در این پژوهش کانی ژپیس) در سنگ سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در پوشش قیر باقیمانده روی سنگدانه‌ها در آزمایش آب جوشان می‌شود؛
 - هر چه بافت سنگ از یکنواختی بیشتری برخوردار باشد سبب افزایش میزان نسبت استحکام مارشال و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی خواهد شد؛
 - وجود کانی تبخیری (در این پژوهش کانی ژپیس) در سنگ سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار نسبت کشش غیرمستقیم و در نتیجه افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود؛
- وجود کربنات متبلور (سیمان درشت بلور و بلورهای دولومیت) سبب افزایش مقادیر نسبت کشش غیرمستقیم و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود؛
 - سنگ‌های دارای بافت مادستون مقادیر پایین‌تری از نسبت کشش غیرمستقیم را به نسبت سایر بافت‌ها نشان می‌دهد؛ در نتیجه اگر سنگدانه‌ای که برای تهیه مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود دارای بافت غالب از نوع مادستون باشد، بروز خرابی رطوبتی در آن مخلوط آسفالتی محتمل خواهد بود؛
 - نتایج نشان می‌دهد مقادیر کم سیلیس (در این پژوهش کمتر از ۱۱ درصد) تاثیر منفی در نتایج حاصل از آزمایش آب جوشان، نسبت کشش غیر مستقیم و نسبت استحکام مارشال نشان نمی‌دهد.

منابع

- سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۰، آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴)، تجدید نظر اول. صادقی. ع.، ۱۴۰۰، ارزیابی دوام مصالح تولیدی از سنگ‌های کربناتی زون البرز مرکزی و کاربرد آن‌ها در مخلوط‌های آسفالتی، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۸، سامانه طبقه‌بندی قیر بر اساس عملکرد (PG)، [/https://pgi.bhrc.ac.ir](https://pgi.bhrc.ac.ir).
- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۰، وضعیت موجود تولید کنندگان قیر و آسفالت ایران، ۹۵ ص.
- مکارچیان. م.، کریمی. ا.، مقدس‌نژاد. ف.، ۱۳۹۴، بررسی تاثیر نوع الیاف و سنگدانه در مشخصات مکانیکی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) و مقایسه آن با بتن آسفالتی گرم (HMA).
- Abo-Qudais, S., Al-Shweily, H. (2007), Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior. *Construction and Building Materials*, 21(9), 1886–1898.
- Asphalt Institute (2014), MS-2, Asphalt Mix Design, 7th edition.
- Airey, G., Masad, E., Bhasin, A., Caro, S., and Little, D. N. (2007), Asphalt mixture moisture damage assessment combined with surface energy characterization. *Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials*, 1, 739–748.
- Anastasio, S., Perez Fortes, A. P., Hoff, I. (2017), Effect of aggregate petrology on the durability of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 146, 652–657.
- Bagampadde, U., Isacson, U., and Kiggundu, B., (2004), Classical and Contemporary Aspects of Stripping in Bituminous Mixes, *Road Materials and Pavement Design*, 5:1, 7-43
- Cheng, D., Little, D.N., Lytton, R.L., Holste, J.C., (2003), Moisture damage evaluation of asphalt mixtures by considering both moisture diffusion and repeated-load conditions. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1832 (1), 42e49.
- Dunham, R.J., (1962), Classification of carbonate rocks according to depositional texture, *Classification of Carbonate Rocks* (Ed. By W.E. Ham). Pp. 108-121. *Mcm. Am.Ass. Pctrol. Geol.* 1.
- Hou, Y., Ji, X., Zou, H., Chen, B., Jiang, Y. (2020), Study of surface microscopic properties of asphalt based on atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, 242, 118025.
- Howson, J., Masad, E., Bhasin, A., Little, D., Lytton, L. (2011), Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of changes in pH. *Construction and Building Materials* 25, 2554–2564
- Jamieson, I. L., Moulthrop, J. S., Jones, D. R. (1995), SHRP Results on Binder - Aggregate Adhesion and Resistance to Stripping. *Asphalt Yearbook*.
- Kanitpong, K., and Bahia, H.U., (2008), Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance, *International Journal of Pavement Engineering*, 9:1, 9-17
- Kim, Y. R., Lutfi, J. S., Bhasin, A., Little, D. N. (2008), Evaluation of Moisture Damage Mechanisms and Effects of Hydrated Lime in Asphalt Mixtures through Measurements of Mixture Component Properties and Performance Testing. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 20(10): 659–667
- Labib, M. E., Hefer, A. W., Little, D. N. (2007), Surface chemistry at the bitumen-aggregate interface. *Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials- Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*, 2(February), 1589–1599.
- Little, D.N., Jones, A.D.R., (2003), Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements. In: *Transportation Research Board National Seminar*, San Diego, CA, USA, pp. 37e70.
- Rodríguez-Alloza, A.M., Malik, A., Lenzen, M., Gallego, J., (2015), Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* 90, 171e182.
- Williams, K.L., (1987), *Introduction to X-Ray Spectrometry*, Allen and Unwin, London.
- Yoon HJ, Tarrer RR., (1989), Effect of aggregate properties on stripping. In: *Transportation research record* no. 1171, transportation research board., p. 37–43.