

تأثیر جنس سنگ‌های کربناته بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در سنگ‌های کربناته زون البرز مرکزی

عرفان صادقی*^۱، محمدرضا نیکودل^۲، ماشاله خامه چیان^۳، امیر کاووسی^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

چکیده

زون البرز مرکزی دربرگیرنده صنایع مختلف و جمعیت بالای متمرکز (حدود یک‌چهارم جمعیت کشور) می‌باشد که شناخت منابع موردنیاز جهت تامین منابع و ایجاد زیرساخت‌های لازم برای این جمعیت کثیر ضروری است. یکی از مصالح عمده در زون البرز مرکزی وجود گستره متنوعی از سنگ‌های کربناته (سازندهای الیکا، لار، دلیچای، تیزکوه، زیارت و کند) می‌باشد، از این رو شناخت ویژگی‌های این سنگ‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف مطالعه حاضر بررسی خصوصیات مهندسی شش سازند کربناته زون البرز مرکزی و رده‌بندی سنگ‌های کربناته بر مبنای جنس آن‌ها و بر اساس عملکرد آن‌ها در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. از این روی با نمونه‌گیری از این سازندها و انجام آزمایش‌های مختلف، سازندهای مورد مطالعه رده‌بندی شده و در ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. سازندهای انتخابی شامل الیکا، دلیچای، لار، تیزکوه، زیارت و کند می‌باشد. سنگ‌های کربناته مورد مطالعه بر اساس سنگ‌شناسی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی آن‌ها در آزمایش خستگی و ترک‌خوردگی رده‌بندی شدند. این رده‌بندی به ترتیب از بهترین عملکرد به سمت ضعیف‌ترین عملکرد شامل میکرایت (سازند الیکا)، بایوکلاست گریستون (سازند کند)، بایوکلاست پکستون (سازند دلیچای)، بایوکلاست پکستون (تیزکوه)، پکستون-وکستون (سازند زیارت) و دولومیت (سازند لار) می‌باشند. به طور کلی سنگ‌های آهکی عملکرد بهتری از سنگ دولومیتی دارد.

کلید واژه‌ها: زون البرز مرکزی، سنگ کربناته، خستگی، SCB، مخلوط آسفالتی.

۱. دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران Erfan.sadeghi@modares.ac.ir

۲. دانشیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. استاد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴. استاد راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

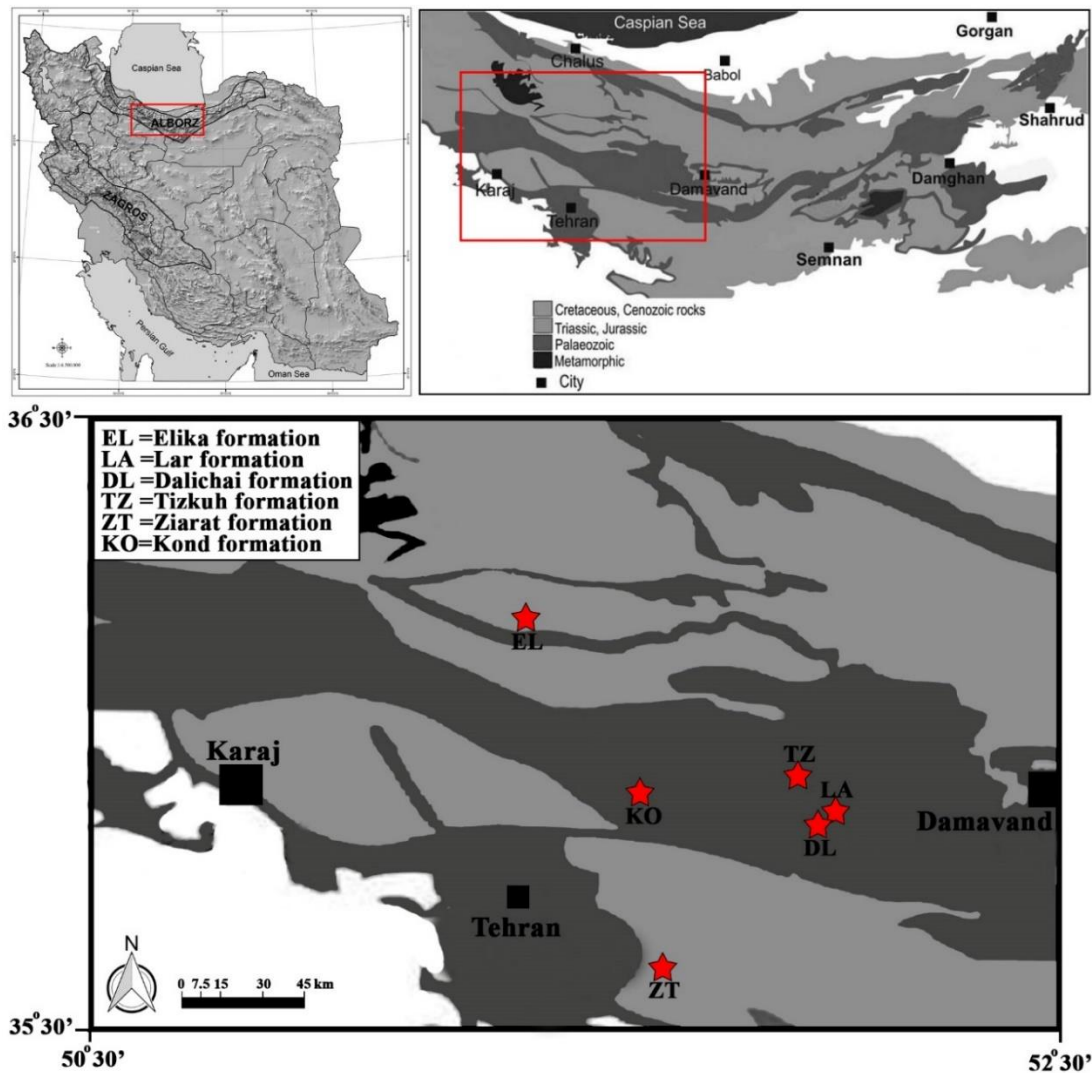
آسفالت گرم با دانه‌بندی پیوسته یکی از رایج‌ترین مصالح سازه‌ای جهت اجرای روسازی راه به سبب کیفیت بالا آن‌ها می‌باشد. این نوع آسفالت دارای یک ترکیب هتروژن از سنگدانه، فیلرها، قیر و حفرات هوا است. با توجه به اینکه سنگدانه‌ها بخش اعظم آن را تشکیل می‌دهند بررسی تاثیر خصوصیات سنگدانه‌ها بر روی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی امری ضروری در طراحی با کیفیت آن‌ها می‌باشد. یکی از مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی که در طراحی مخلوط‌های آسفالتی بایستی مدنظر قرار بگیرد، مقاومت این مصالح در برابر خستگی می‌باشد. خستگی پدیده‌ای است که روسازی آسفالت در معرض تنش‌های مکرر کمتر از مقاومت نهایی گسیختگی قرار می‌گیرد و در طی این فرایند خرابی‌ها در مصالح تجمع می‌یابد (Ghuzlan, 2001). تحت تاثیر بارهای مکرر و تنش‌های ایجاد شده که در سطح روسازی به صورت فشاری و در پایین‌ترین لایه آسفالتی به صورت کششی می‌باشد، اگر این تنش‌ها بیشتر از تنش‌های کششی مجاز آن لایه آسفالتی باشند، منجر به ایجاد ترک‌هایی به شکل طولی یا هگزاگونال و گسترش آن‌ها به لایه‌های بالایی می‌شوند. مکانیسم گسیختگی ناشی از خستگی دارای سه مرحله ایجاد ترک، گسترش ترک و نهایتاً گسیختگی می‌باشد. ترک‌خوردگی ناشی از خستگی به دلیل از بین رفتن چسبندگی بین سنگدانه و قیر، از بین رفتن پیوستگی مخلوط آسفالتی و یا ترکیبی از این دو عامل به وجود می‌آید (Tan and Guo, 2013, Taherkhani, 2016, Cong et al.,) همانند سنگ‌آهک در مخلوط آسفالتی نشان از کاهش پیوستگی قیر و ایجاد ریزترک می‌دهند و سنگدانه‌های اسیدی نشان از کاهش چسبندگی و جداشدن قیر از سطح سنگدانه و همچنین شن‌زدگی دارند (Birgisson et al., 2003). رایج‌ترین آزمایش برای تعیین خستگی مخلوط‌های آسفالتی آزمایش خمش نیم دایره‌ای می‌باشد. آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای، رایج‌ترین آزمایش تعیین میزان مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در

برابر ترک‌خوردگی می‌باشد که دلیل این موضوع سادگی آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش و قابلیت تکرارپذیری نتایج آن می‌باشد (Zhang et al. 2018, Fan et al. 2018, Saadeh and Eljairi, 2018, Xiaoge et al. 2018, Ferjani et al. 2019, Sadeghi et al. 2022). این آزمایش برای اولین بار توسط چانگ و کوروپو (Chong and Kuruppu, 1984) برای تعیین سختی شکست نمونه‌های سنگ پیشنهاد گردید. در ادامه محققین بسیاری بر روی جنبه‌های از آزمایش همچون ارزیابی نتایج در دماهای مختلف، در سرعت‌های مختلف بارگذاری، نوع قیر، جنس و اندازه سنگدانه‌ها، فضای خالی، تاثیر این پارامترها روی تغییرات مقدار فاکتور شدت تنش و نهایتاً مدل‌سازی این نتایج پرداختند (Arabani and Ferdowsi, 2007, Biligiri et al. 2012, Elseifi et al. 2012, Behbahani et al. 2013, Wang et al. 2013, Mohammad aliha et al. 2014, Pirmohammad and Ayatollahi, 2015). هدف از انجام این مطالعه ارزیابی تاثیر نوع و جنس مصالح کربناته بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی و بررسی میزان ترک خوردگی آن‌ها می‌باشد. در این مطالعه علاوه بر انجام آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای و محاسبه میزان شاخص انعطاف پذیری نمونه‌ها، از نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی مقطع میکروسکوپی تهیه شده و به صورت ریز مقیاس نیز تاثیر جنس و خصوصیات مصالح مورد ارزیابی واقع شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. خصوصیات مصالح مورد استفاده

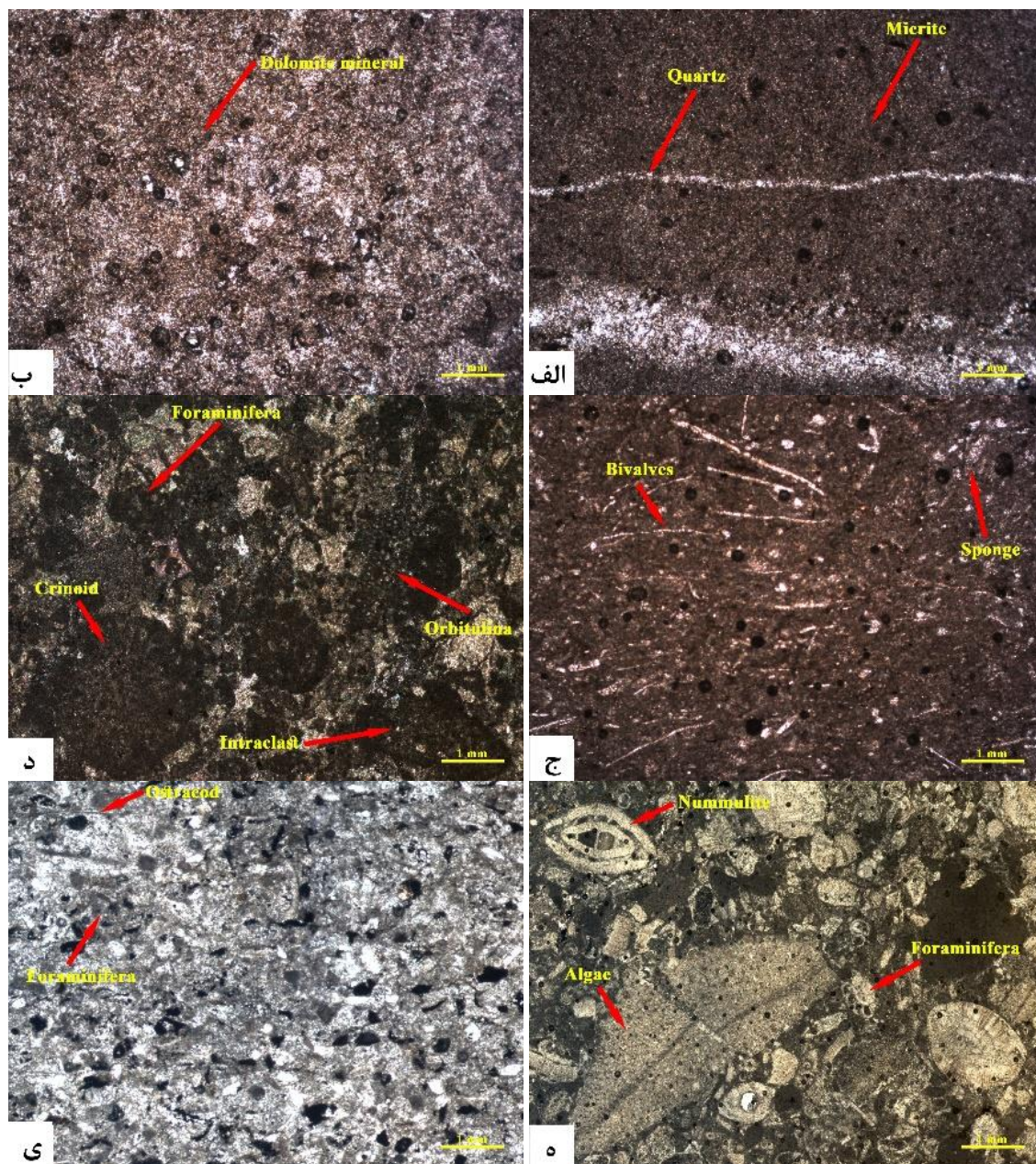
در این مطالعه تعداد ۶ سازند کربناته از زون البرز مرکزی به منظور ارزیابی تاثیر جنس سنگ بر پارامتر خستگی مخلوط‌های آسفالتی انتخاب و نمونه برداری شده است. توزیع مکانی این مصالح بر اساس مقطع تیپ سازند زمین شناسی در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ مشخصات جغرافیایی مقطع تیپ (محل نمونه‌برداری) و نتایج مطالعه مقاطع میکروسکوپی از قبیل جنس نمونه‌ها آورده شده است. تصاویر مقاطع میکروسکوپی مصالح مورد مطالعه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۱. موقعیت مطالعه و برداشت نمونه از سازندهای کربناته زون البرز مرکزی

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد مطالعه زون البرز مرکزی

Formation Name	Lithology	Components	Coordinate
		Skeletal, Non-skeletal	
Elika	Limestone (Mudstone)	Micrite, Quartz	N 36°09'13" E 51°24'26"
Lar	Dolostone	Dolomite mineral	N 35°48'47" E 52°01'55"
Dalichai	Limestone (Bioclast packstone)	Pelagic bivalves and sponge needles	N 35°48'43" E 52°01'49"
Tizkuh	Limestone (Bioclast packstone)	Crinoids, intraclasts, foraminifera, Orbitulina fossils	N 35°52'21" E 52°00'39"
Ziarat	Packstone-Wackestone	Nummulite, Algae fragments	N 35°34'59" E 51°41'34"
Kond	Limestone (Bioclastic Grainstone)	Foraminifera, bivalvia, Ostracod	N 35°52'47" E 51°39'04"



شکل ۲. تصاویر مقاطع میکروسکوپی مصالح کربناته مورد مطالعه، الف) الیکا، ب) لار، ج) دلیچای، د) تیزکوه، ه) زیارت، ی) کند

۲-۲. سنگدانه

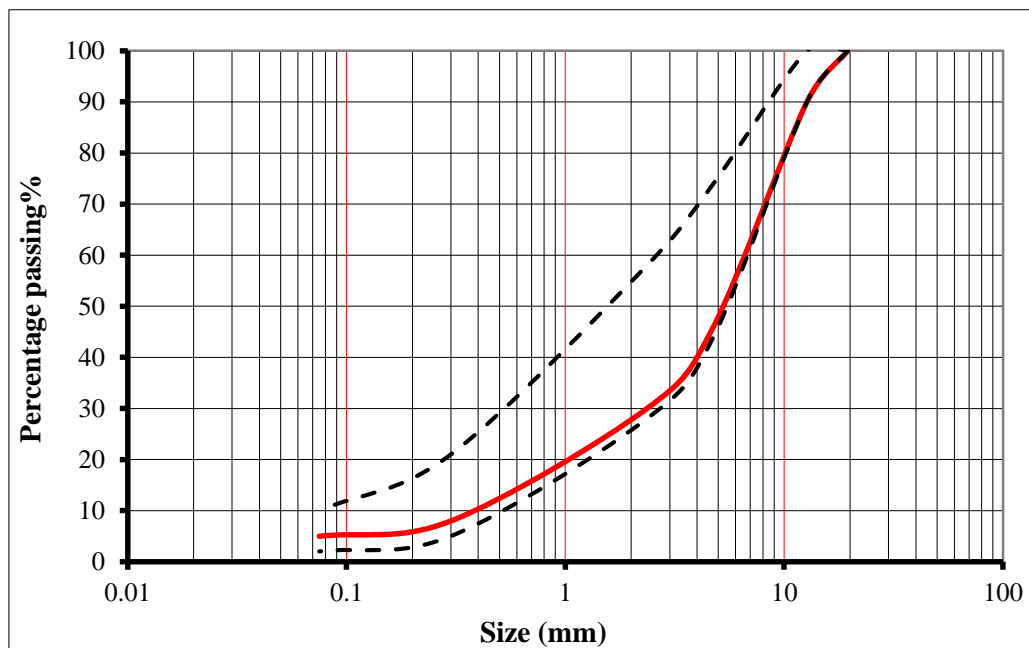
همانگونه که در بخش قبلی اشاره شده تعداد شش سنگدانه متفاوت از جنس کربناته متعلق به زون البرز مرکزی جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. این سازندها عبارت‌اند از الیکا، دلیچای، لار، تیزکوه، زیارت و کند می‌باشد که به ترتیب جنس آن‌ها شامل میکرایت، بایوکلاست پکستون، دولومیت، بایوکلاست

پکستون، پکستون-وکستون و بایوکلاست گرینستون (سنگ آهک توفی) می‌باشد. متغیر اصلی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی جنس سنگدانه است و سایر متغیرها همچون دانه‌بندی، نوع قیر و غیره ثابت نگه‌داشته شده است. به منظور تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی از دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ (لایه‌های آستر و رویه روسازی) نشریه شماره ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور استفاده شده است. حداکثر

اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۱۹ میلیمتر بوده و شامل ۵۴ درصد سنگدانه درشت، ۴۱ درصد سنگدانه ریز و ۶ درصد فیلر می‌باشد. حدود دانه‌بندی شماره ۴ مخلوط آسفالتی پیوسته در جدول ۲ و دانه‌بندی منتخب در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. حدود دانه‌بندی شماره ۴ و دانه‌بندی انتخابی

Sieve size (mm)	% Passing	% Retained	Coarse - Fine	size
19	100	0	54 %	Coarse
12.5	90	10		
9	90	0		
4.75	46	44		
2.36	30	16	41 %	Fine
1.18	30	0		
0.5	30	0		
0.3	8	22		
0.15	8	0		Filler
0.075	5	3		
Filler (Pan)	0	5	5 %	



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی منتخب در محدوده نشریه ۲۳۴

داده شده است. بر اساس آزمایش مارشال درصد قیر بهینه برای سازندهای الیکا، لار، دلچای، تیزکوه، زیارت و لار به ترتیب ۵/۸۲، ۵/۸۲، ۵/۸۶، ۵/۴۵، ۶/۰۳ و ۶/۰۸ درصد می‌باشد.

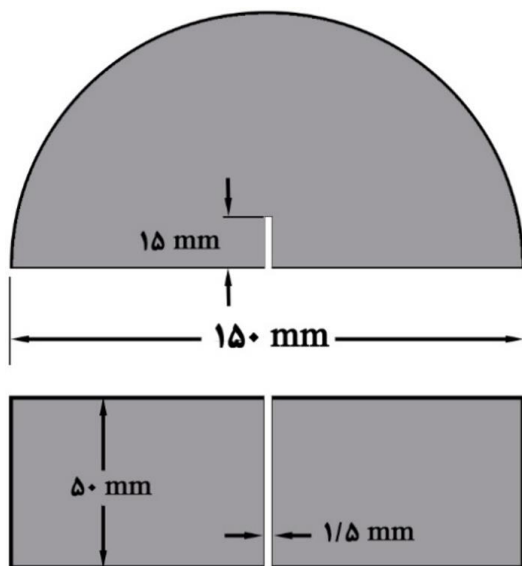
۳-۲. مشخصات قیر

انتخاب نوع قیر در فرایند روسازی به عواملی همچون شرایط جوی، نوع و شدت ترافیک، جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی، نوع روسازی و نحوه اجرا بستگی دارد. قیر مورد استفاده در این تحقیق از پالایشگاه شرکت نفت پاسارگاد و از نوع ۷۰-۶۰ می‌باشد. در جدول ۳ مشخصات قیر مورد استفاده نشان

جدول ۳. مشخصات قیر مورد استفاده

Property (unit)	Standard	Analysis (value)	Specification	
			Min.	Max.
Density at 15 °C (kg/m ³)	ASTM D70	1.018	-	-
Penetration at 25 °C (100 g, 5 s) (dmm)	ASTM D5	60	60	70
Flash point (COC) (°C)	ASTM D92	250	232	-
Softening point (°C)	ASTM D36	52	49	56
Ductility at 25 °C (5 cm/min) (cm)	ASTM D113	100	100	-
Solubility in trichloroethylene (%)	ASTM D2042	99.6	99.5	-
Absolute viscosity at 60 °C (Pa-s)	ASTM D2171	336	-	-
RTFO mass loss (%)	ASTM D1754	-0.03	-	0.8

استوانه‌ای به قطر ۱۵۲/۴ میلی‌متر (۶ اینچ) شد. در ادامه به منظور تهیه نمونه‌های آزمایش SCB، نمونه‌های دیسکی به ضخامت ۵۰ میلی‌متر با استفاده از یک اره مخصوص سنگ‌بری به دو نیم استوانه مساوی برش داده شد. سپس بر روی نمونه‌های نیم دایره‌ای با استفاده از تیغه نازک، شیاری به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و طول ۱۵ میلی‌متر به صورت قائم در وسط نمونه ایجاد گردید (شکل ۴).

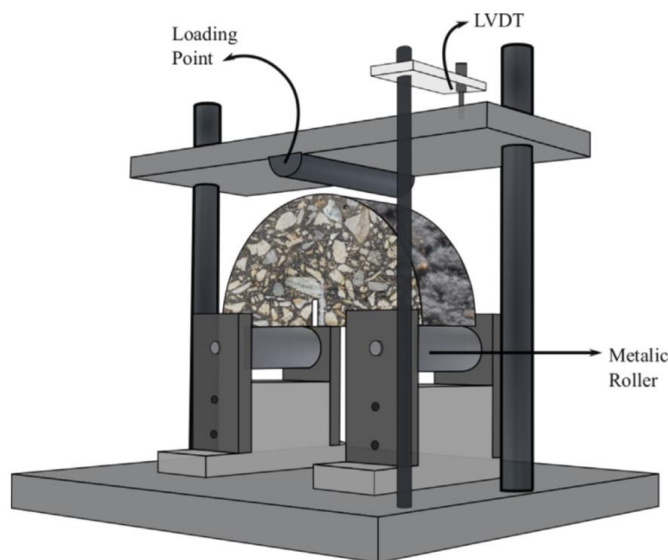


شکل ۴. هندسه نمونه‌های آزمایش خمش نیم‌دایره و نحوه قرارگیری نمونه زیر دستگاه

دانشگاه تربیت مدرس مستقر می‌باشد. آزمایش‌های خستگی در این پژوهش در دمای میانه (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام گردیده و نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه بوده است.

۲-۴ آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB)

آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای یک آزمایش مکانیکی آزمایشگاهی است که از نمونه‌های با هندسه نیم دایره‌ای جهت ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل ترک‌خوردگی طراحی شده است. این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO TP124 و در دماهای مختلفی جهت شبیه سازی شرایط مختلف انجام می‌گردد. پس از تعیین طرح اختلاط مخلوط آسفالتی و درصد قیر بهینه، اقدام به آماده‌سازی نمونه‌های



دستگاه سرو-کنترل مورد استفاده جهت انجام آزمایش ساخت شرکت SANTAM با ظرفیت ۱۰ تن بوده که قابلیت ترسیم منحنی بار-جابجایی و اندازه‌گیری بار بحرانی شکست مخلوط‌های آسفالتی را دارد (شکل ۵). این دستگاه در

شاخص انعطاف‌پذیری (FI) به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در دمای متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص بر اساس رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$FI = \frac{G_f}{abs(m)} \times A \quad (2)$$

در این رابطه G_f برابر مقدار کل انرژی مخلوط آسفالتی (J/m^2)، m برابر شیب در نقطه عطف قسمت دوم منحنی نیرو-جابجایی (kN/mm) و A ضریب مقیاس و تبدیل واحد بوده و مقدار آن برابر 0.01 است (شکل ۶).

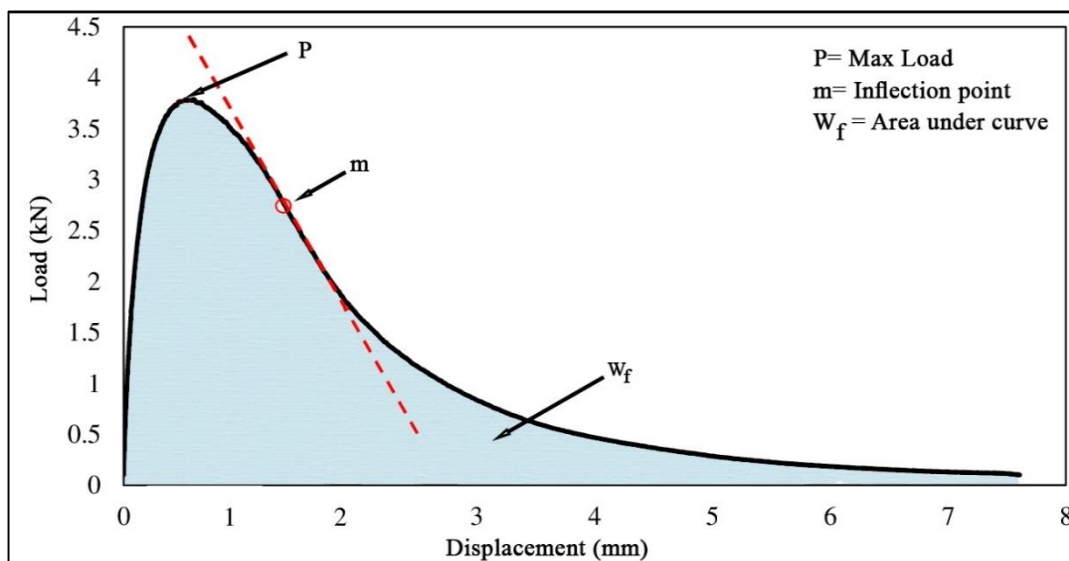
پس از انجام آزمایش SCB، از نتایج آن می‌توان پارامترهای همچون انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها (G_f) و شاخص انعطاف‌پذیری (FI) را جهت ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی محاسبه نمود. پارامتر انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها (G_f)، که نشان‌دهنده ظرفیت کلی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شکست است از رابطه (۱) به دست می‌آید. این شاخص از تقسیم مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی (شکل ۶) به سطح مقطع شکست به دست می‌آید.

$$G_f = \frac{W_f}{A} = \int \frac{(P)du}{A} \quad (1)$$

در این رابطه G_f برابر مقدار کل انرژی مخلوط آسفالتی (J/m^2)، W_f مقدار کار لازم برای شکست مخلوط آسفالتی (J) و A سطح مقطع شکست (m^2).



شکل ۵. دستگاه آزمایش خمش نیم‌دایره و نحوه قرارگیری نمونه زیر دستگاه



شکل ۶. نمودار شماتیک بار-جابجایی آزمایش SCB

۵-۲ مقاطع میکروسکوپی مخلوط های آسفالتی

برای تهیه مقاطع میکروسکوپی مخلوط های آسفالتی، نمونه های مکعب مستطیلی به ارتفاع ۵۰ میلی متر، عرض ۲۵ میلی متر و ضخامت ۲۰ میلی متر از نمونه های متراکم برش داده شد. سپس به منظور حفظ ساختار نمونه ها در مراحل برش و ساب، از رزین اپوکسی جهت غوطه ور ساختن نمونه ها استفاده شد. در نهایت مقاطع میکروسکوپی با ضخامت ۳۵ میکرون از نمونه ها تهیه گردید.

۳- نتایج و بحث

جدول ۴. نتایج آزمایش های پراش پرتو ایکس

Formation Name	XRD	XRF								
		CaO	Co	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO
Elika	Ca, Dl, Qz	41.59	41.80	6.58	4.75	1.47	2.97	0.30	-	0.26
Lar	Dl, Ca, Qz	37.94	46.35	11.89	1.46	0.52	1.50	-	0.13	0.12
Dalichai	Ca, Qz	35.08	27.02	1.03	29.02	4.17	1.41	0.91	0.25	0.10
Tizkuh	Cal	55.52	43.14	0.31	0.47	0.22	0.10	-	-	0.08
Ziarat	Ca, Qz	53.35	41.30	0.35	4.08	0.26	0.18	0.05	0.10	0.18
Kond	Ca, Qz	48.81	36.16	0.52	10.26	1.87	1.26	0.08	0.46	0.22

Qz = Quartz; Dl=Dolomite; Ca = Calcite

باشند به جز سازند لار که کانی دولومیت ساختار اصلی سنگ را تشکیل داده و در رده بندی سنگ ها کربناته، دولومیت

بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۴، همه سازندهای دارای ترکیبات کربناته بوده و عمدتاً متشکل از کلسیت می-

انجام گردید. برای تعیین وزن مخصوص سنگدانه درشت از استاندارد ASTM C127، وزن مخصوص سنگدانه ریز از استاندارد ASTM C128 و برای تعیین وزن مخصوص فیلر از استاندارد ASTM C188 استفاده شده است. همچنین ضرایب تطویل و تورق بر اساس استاندارد ASTM D4791 مشخص گردید. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

(دولوستون) نام‌گذاری می‌شوند. بیشترین مقادیر CaCO_3 نیز به ترتیب متعلق به سازند تیزکوه (% ۹۸/۶۶) بوده و کمترین آن متعلق به سازند دلیچای (% ۶۴/۰۱) می‌باشد. بیشترین مقادیر سیلیس نیز در ترکیب کانی‌شناسی سازندهای دلیچای (% ۲۹/۰۲) و کند (% ۱۰/۲۶) شناسایی شده است.

۲-۳ مشخصات سنگدانه‌ها

به منظور تکمیل اطلاعات لازم بر روی سنگدانه‌ها، آزمایش‌های وزن مخصوص سنگدانه، جذب آب، تطویل و تورق

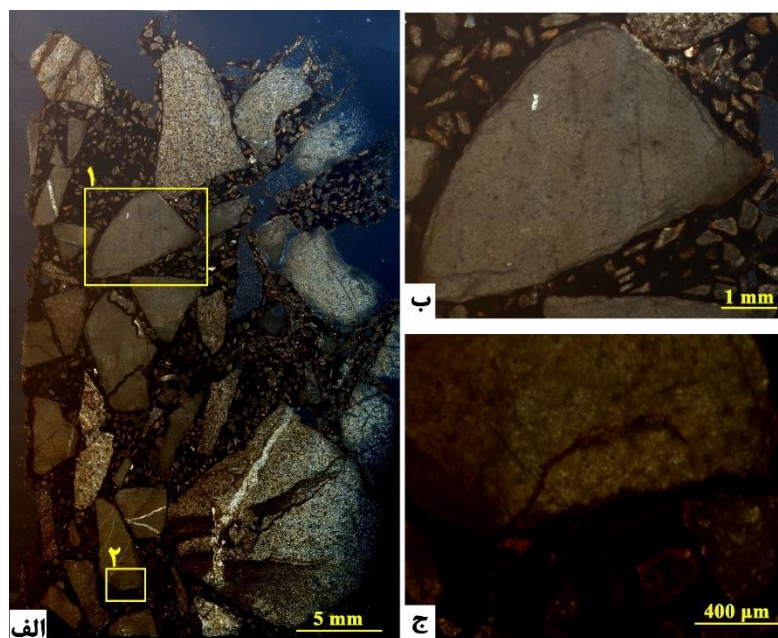
جدول ۵. مشخصات مصالح سنگدانه‌ای مورد مطالعه

Formation Name	Specific Gravity		Water absorption		Elongation %	Flakiness %
	Coarse	Fine	Coarse	Fine		
Elika	2.67	2.69	0.32	0.28	9.72	20.08
Lar	2.63	2.64	1.28	1.27	16.93	12.16
Dalichai	2.64	2.65	0.46	0.44	7.38	25.99
Tizkuh	2.68	2.70	0.52	0.51	11.91	15.71
Ziarat	2.49	2.51	1.50	1.46	23.77	12.09
Kond	2.61	2.62	0.36	0.33	26.57	24.75

(شکل ۷ الف). همچنین ایجاد شکستگی در اثر انجام آزمایش (شکل ۷ ب) و وجود تعداد محدودی ترک از قبل موجود یا ایجاد شده در اثر تراکم مخلوط آسفالتی و پرشدن آنها توسط قیر (شکل ۷ ج) از دیگر پدیده‌های موجود در مقیاس میکروسکوپی است.

۳-۳ مطالعات میکروسکوپی

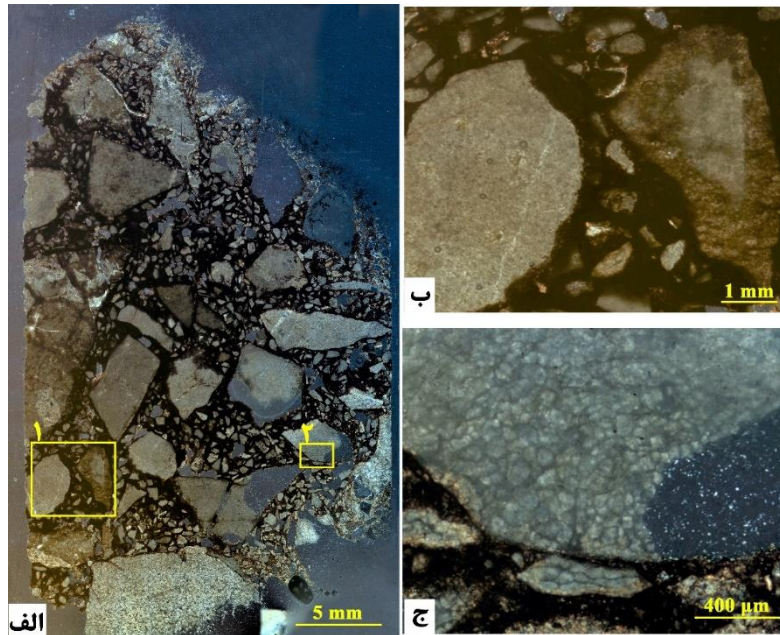
مطالعات میکروسکوپی در نمونه‌های سازند الیکا نشان‌دهنده زاویه داری سنگدانه‌ها و زبر بودن و ناصافی سطح سنگدانه، ترکیب یکنواخت ریزدانه و درشت‌دانه و ارتباط آن‌ها با هم، وجود نوار مناسب قیر در اطراف سنگدانه و ساییده شدن سنگدانه و به جا ماندن نوار قیر در زمان تهیه مقطع می‌باشد.



شکل ۷. الف) تصویر مقطع میکروسکوپی سازند الیکا، ب) تصویر کادر شماره ۱، ج) تصویر کادر شماره ۲

همچنین نفوذ قیر به متن سنگدانه توسط فرایند جذب انتخابی (شکل ۸ ب) و وجود تعداد زیادی میکرو ترک از قبل موجود (شکل ۸ ج) از دیگر موارد قابل مشاهده در نمونه‌های سازند لار است.

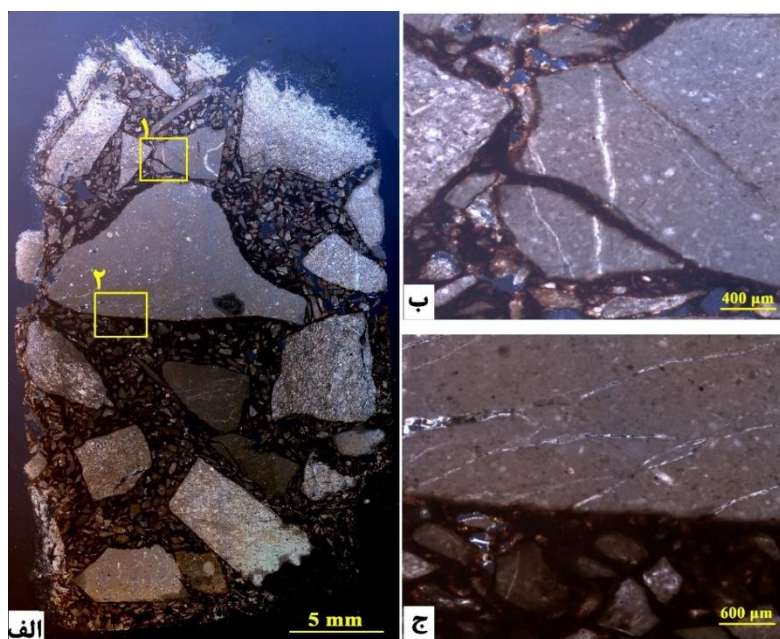
مقاطع میکروسکوپی سازند لار نشان‌دهنده تطویل و تورق پایین، زاویه داری سنگدانه، زبری مناسب سطوح سنگدانه، ترکیب یکنواخت ریزدانه و درشت‌دانه و ارتباط آن‌ها با هم و وجود نوار مناسب قیر اطراف سنگدانه است (شکل ۸ الف).



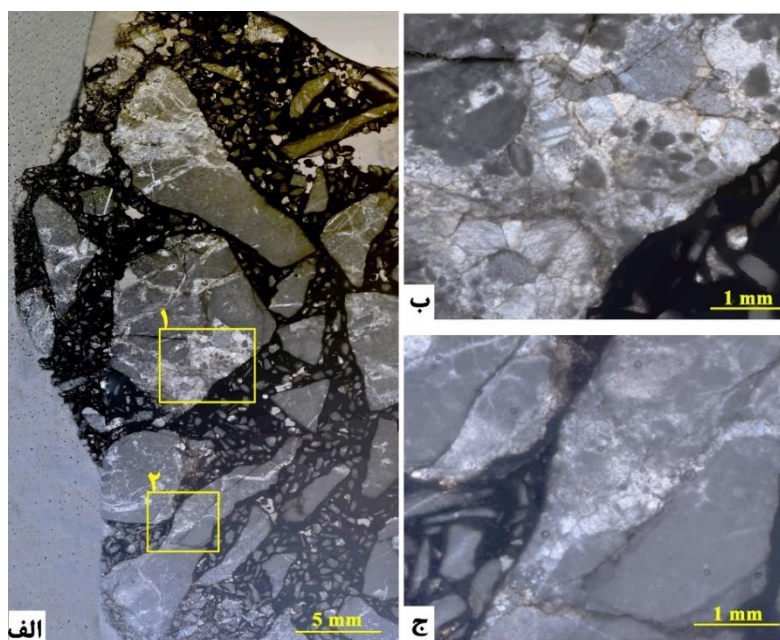
شکل ۸ الف) تصویر مقطع میکروسکوپی سازند لار، ب) تصویر کادر شماره ۱، ج) تصویر کادر شماره ۲

(شکل ۹ ج) از دیگر موارد قابل مشاهده است. نمونه‌های میکروسکوپی سازند تیزکوه نیز نشان‌دهنده تطویل و تورق پایین، زاویه داری و سطوح زبر سنگدانه، ترکیب یکنواخت ریزدانه و درشت‌دانه و ارتباط آن‌ها با هم و وجود نوار مناسب قیر اطراف سنگدانه می‌باشند (شکل ۱۰ الف). همچنین وجود میکروترک‌های بین بلورهای بزرگ کلسیت این سازند (شکل ۱۰ ب) و میکروترک‌های از قبل موجود در متن سنگدانه (شکل ۱۰ ج) از دیگر موارد قابل مشاهده است.

همانگونه که از شکل (۹ الف) قابل مشاهده است، نمونه‌های سازند دلیچای در زیر میکروسکوپ نشان‌دهنده تورق سنگدانه‌ها، زاویه داری سنگدانه‌ها، سطوح نسبتاً صاف سنگدانه، ترکیب یکنواخت ریزدانه و درشت‌دانه و ارتباط آن‌ها با هم و وجود نوار مناسب قیر در اطراف سنگدانه می‌باشند. همچنین وجود تعداد محدودی ترک از قبل موجود یا ایجاد شده در اثر تراکم مخلوط آسفالتی و پرشدن آنها توسط قیر (شکل ۹ ب) و ایجاد شکستگی زیاد در اثر انجام آزمایش



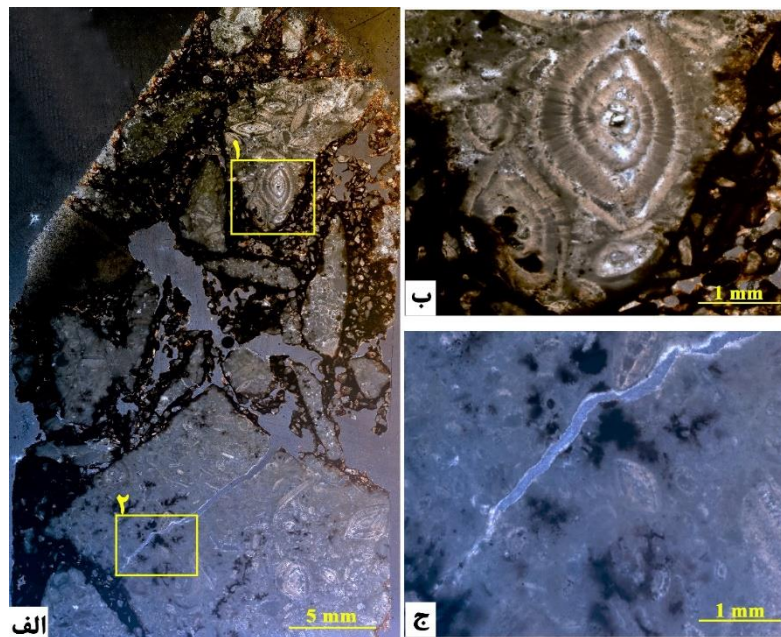
شکل ۹. الف) تصویر مقطع میکروسکوپی سازند دلیچای، ب) تصویر کادر شماره ۱، ج) تصویر کادر شماره ۲



شکل ۱۰. الف) تصویر مقطع میکروسکوپی سازند تیزکوه، ب) تصویر کادر شماره ۱، ج) تصویر کادر شماره ۲

درز و ترک در متن سنگدانه و نفوذ قیر به درون آنها و همچنین به درون منافذ فسیل‌ها در تعدادی از سنگدانه‌ها (شکل ۱۱ ب) و ایجاد درز و ترک در اثر انجام آزمایش (شکل ۱۱ ج) می‌باشد.

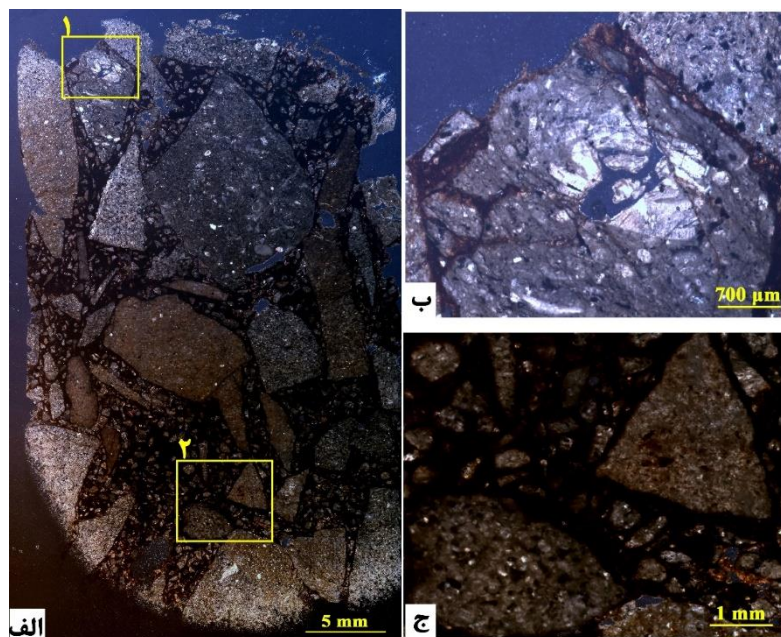
مقاطع میکروسکوپی سازند زیارت نشان‌دهنده تطویل و تورق پایین، زاویه داری و سطوح زبر سنگدانه، وجود نوار مناسب قیر اطراف سنگدانه، ترکیب یکنواخت ریزدانه و درشت‌دانه و ارتباط آن‌ها با هم (شکل ۱۱ الف)، وجود تعداد محدودی



شکل ۱۱. الف) تصویر مقطع میکروسکوپی سازند زیارت، ب) تصویر کادر شماره ۱، ج) تصویر کادر شماره ۲

۱۲ الف)، وجود تعداد محدودی میکروترک و پرشدن توسط قیر (شکل ۱۲ ب) و نفوذ محدود قیر به درون متن تعدادی از سنگدانه‌ها می‌باشد (شکل ۱۲ ج).

مطالعات میکروسکوپی سازند کند نیز نشان‌دهنده تطویل و تورق بالا، قفل و بست خوب سنگدانه، سطوح نسبتاً زیر سنگدانه، ترکیب یکنواخت ریزدانه و درشت‌دانه و ارتباط آن‌ها با هم، وجود نوار مناسب قیر اطراف سنگدانه‌ها (شکل

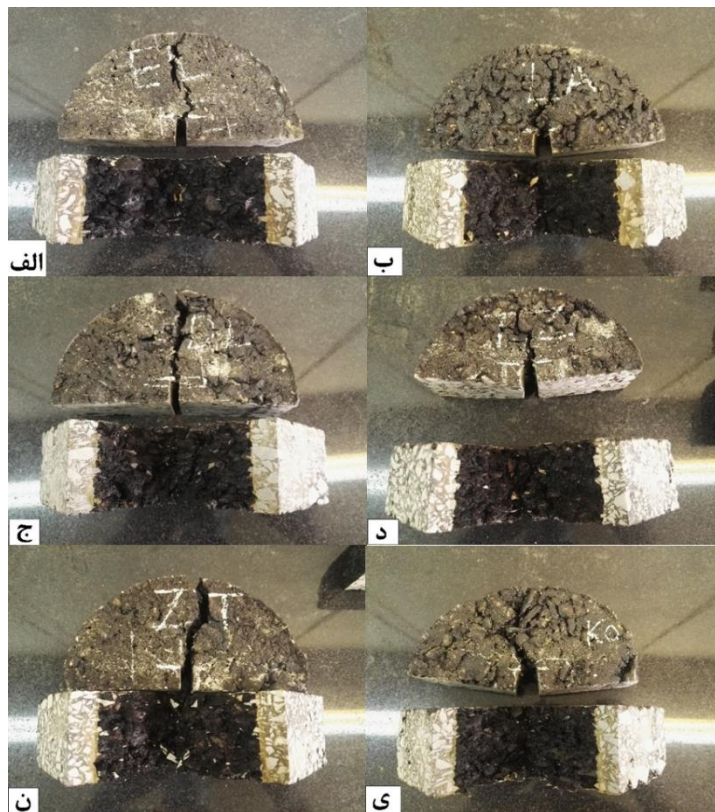


شکل ۱۲. الف) تصویر مقطع میکروسکوپی سازند کند، ب) تصویر کادر شماره ۱، ج) تصویر کادر شماره ۲

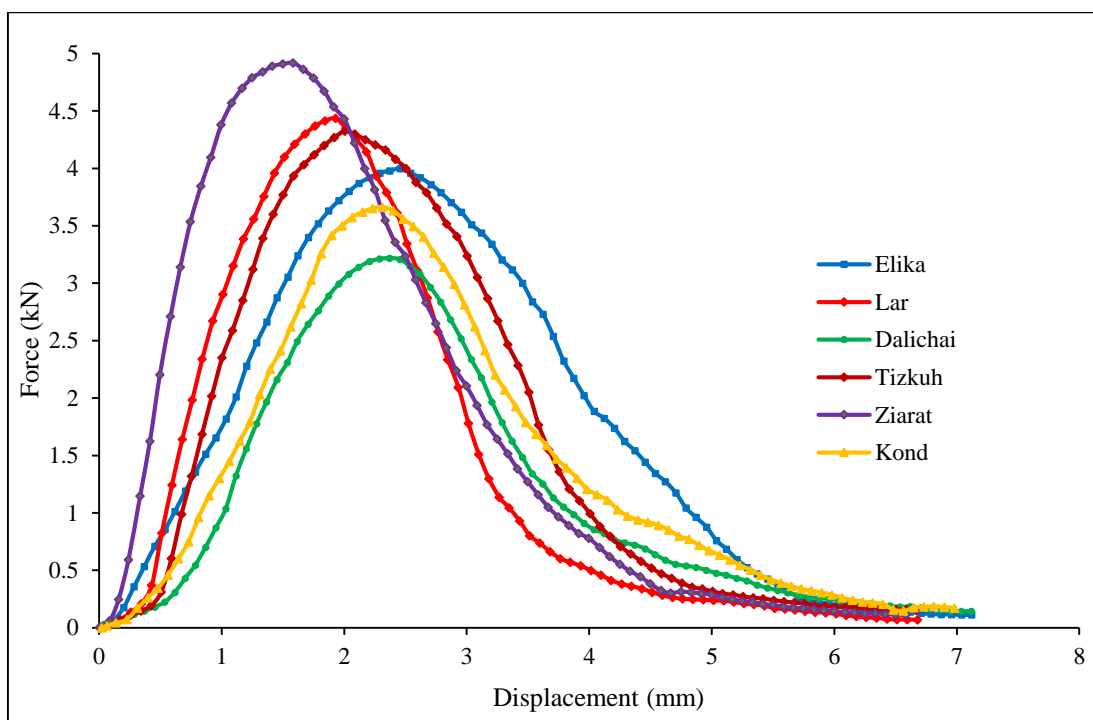
۳-۴ خستگی و ترک‌خوردگی

آزمایش خمش نیم دایره‌ای روشی قابل‌اعتماد برای ارزیابی خستگی و ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بوده و دارای مزایایی همچون آماده‌سازی نسبتاً آسان نمونه‌ها، آسان بودن انجام آزمایش و تحلیل نتایج و تکرارپذیری نتایج می‌باشد. آزمایش خمش نیم دایره‌ای بر روی نمونه‌های سازندهای مورد مطالعه انجام گردید (شکل ۱۳) و نمودارهای بار-جابجایی حاصل از آزمایش در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مقادیر جابجایی در نقطه شکست را می‌توان به منظور نشان‌دادن خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی قبل از گسیختگی به کار برد. بر اساس منحنی‌های شکل ۱۴ سازند زیارت دارای بالاترین مقدار بار حداکثر و کمترین مقدار تغییر شکل است که بیانگر رفتار شکننده است. از سوی دیگر سازند الیکا دارای بیشترین مقدار تغییر شکل بوده و بیشتر رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهد. منحنی‌های بار-جابجایی جهت محاسبه پارامترهای انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها، شیب در نقطه

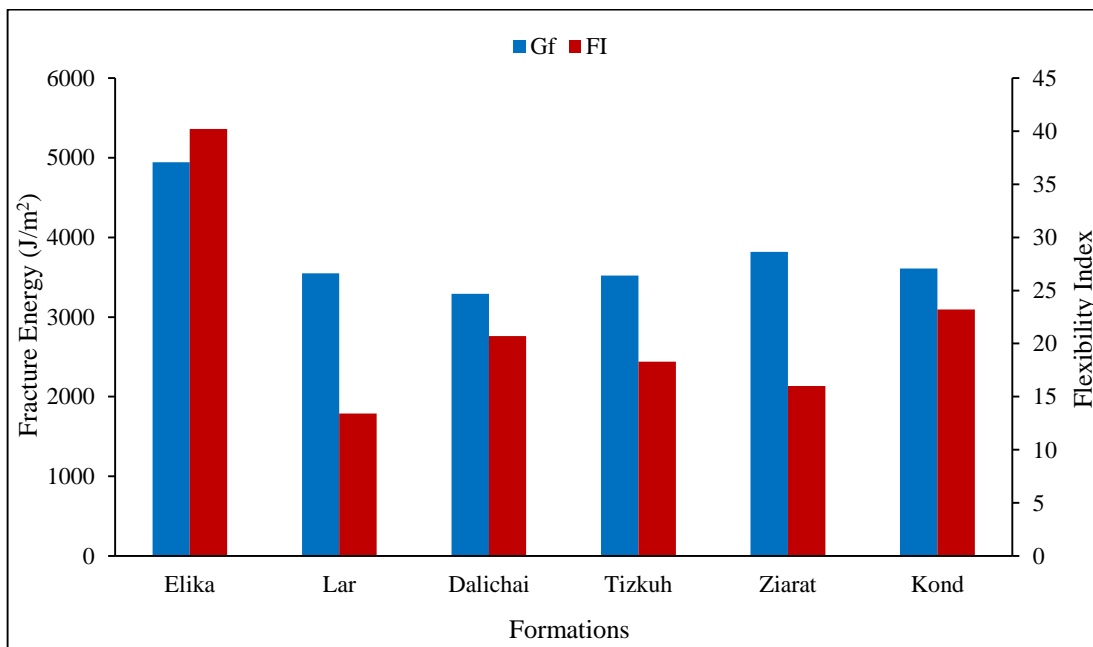
عطف قسمت دوم منحنی نیرو-جابجایی و شاخص انعطاف‌پذیری به کار می‌رود. نتایج پارامترهای انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها و شاخص انعطاف‌پذیری برای همه سازندهای کربناته در شکل ۱۵ نشان داده شده است. سازند الیکا دارای بیشترین مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها که می‌تواند در ارتباط با پیوند قوی بین سنگدانه‌های کربناته باشد. دیگر سازندهای کربناته علی‌رغم داشتن ترکیب متفاوت دارای مقادیر نسبتاً یکسانی از انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها می‌باشند. پارامتر شیب در نقطه عطف قسمت دوم منحنی نیرو-جابجایی که به عنوان یک پارامتر خوب دارای همبستگی قوی با انتشار ترک شناخته می‌شود همراه با پارامتر انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها به طور کامل بیان‌کننده پتانسیل نمونه به مقاومت در برابر ترک‌خوردگی نیستند. شاخص انعطاف‌پذیری به دلیل ترکیب کردن پارامترهای ذکر شده، نتایج قابل‌اعتمادتری را ارائه می‌دهد.



شکل ۱۳. تصویر تعدادی از نمونه‌های آزمایش SCB



شکل ۱۴. نمودارهای بار-جابجایی حاصل از آزمایش SCB



شکل ۱۵. نتایج پارامترهای انرژی لازم برای شکست نمونه ها و شاخص انعطاف پذیری سازندهای کربناته

دارند. سازند الیکا دارای کمترین مقدار جذب آب و تخلخل در ساختار خود می باشد، بنابراین به دلیل وجود فیلم قیر در اطراف سنگدانه ها دارای رفتار ویسکوالاستیک بهتری می باشد. مقدار شاخص انعطاف پذیری سازندهای کند و دلیچای حدودا

بر اساس شاخص انعطاف پذیری، بهترین عملکرد در میان مخلوطهای آسفالتی متعلق به سازند الیکا (۴۰/۲) می باشد که پس از آن سازندهای کند، دلیچای، تیزکوه، زیارت و لار به ترتیب بیشترین تا کمترین مقدار شاخص انعطاف پذیری را

(سازندهای دلیچای و تیزکوه) و پکستون-وکستون (سازند زیارت) تعیین گردید. بر اساس آزمایش XRF، بیشترین مقادیر CaCO_3 نیز به ترتیب متعلق به سازند تیزکوه (%/۹۸/۶۶) بوده و کمترین آن متعلق به سازند دلیچای (%/۶۴/۰۱) می‌باشد. بیشترین مقادیر سیلیس نیز در ترکیب کانی‌شناسی سازندهای دلیچای (%/۲۹/۰۲) و کند (%/۱۰/۲۶) شناسایی شده است.

مقاطع میکروسکوپی مخلوط‌های آسفالتی ابزاری بسیار مفید در بررسی مشخصات سنگدانه و قیر در مقیاس بسیار ریز است. مهم‌ترین شواهد قابل‌مشاهده در سازندهای مورد مطالعه شامل تطویل و تورق، زاویه داری سنگدانه، زبری سطوح سنگدانه، یکنواختی ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه و ارتباط آن‌ها با هم، بررسی وجود نوار قیر اطراف سنگدانه، نفوذ قیر به متن سنگدانه (فرایند جذب انتخابی) و بررسی میکروترک از قبل موجود یا ایجاد شده در اثر آزمایش است. در تعیین مقدار شاخص انعطاف‌پذیری، پارامتر جذب آب و درصد SiO_2 در ترکیب کانی‌شناسی اهمیت بسیاری دارند زیرا تعیین کننده رفتار الاستیک و ویسکوالاستیک اجزا مخلوط آسفالتی می‌شوند. فرایند جذب انتخابی سنگدانه‌ها اهمیت زیادی در رفتار قیر به دلیل تاثیر گذاری در فرایند انتشار انتخابی مولکول‌های قیر دارند. بیشترین مقدار شاخص انعطاف‌پذیری متعلق به سازند الیکا و کمترین مقدار آن متعلق به سازند لار است.

طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته مورد مطالعه بر اساس سنگ-شناسی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی به ترتیب از بهترین عملکرد به سمت ضعیف‌ترین عملکرد شامل میکرایت (سازند الیکا)، بایوکلاست گرینستون (سازند کند)، بایوکلاست پکستون (سازند دلیچای)، بیوکلاست پکستون (تیزکوه)، پکستون-وکستون (سازند زیارت) و دولومیت (سازند لار) می‌باشند.

نصف مقدار شاخص انعطاف‌پذیری سازند الیکا است که دلیل این امر وجود درصد بالاتر پارامتر جذب آب و درصد SiO_2 در ترکیب کانی‌شناسی می‌باشد. درصد بالای SiO_2 سبب افزایش مقاومت سنگدانه می‌شود که به تبع آن این مصالح رفتار الاستیک از خود نشان داده و مقدار رفتار ویسکوالاستیک قالب اغماض می‌باشد. در سازند تیزکوه به دلیل نفوذ مقداری از قیر به درون ریزترک‌های بین دانه‌ای، ضخامت فیلم قیر اطراف سنگدانه و رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد. همانگونه که قبلاً اشاره شد سازندهای زیارت و لار دارای بیشترین مقدار جذب آب نسبت به سایر سازندها بوده که این عامل سبب جذب بیشتر قیر به درون حفرات توسط فرایند جذب انتخابی می‌شود. در این فرایند مولکول‌های قیر در درون ساختار سنگدانه پراکنده شده که سبب تغییر مصالح از حالت هموزن به هتروژن و تغییر خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌های کربناته از مصالح الاستیک به مصالح ویسکوالاستیک می‌شود (Lue and Lytton, 2013). به‌رحال می‌توان نتیجه گرفت که مولکول‌های با اندازه کوچک‌تر از فاز حلال آسفالت همچون مالتن‌ها ترجیحاً به درون حفرات سنگدانه توسط فرایند انتشار انتخابی جذب شده و مولکول‌های بزرگ‌تر همانند آسفالتین‌ها درون قیر باقی می‌مانند (Lee et al. 1990, Curtis et al. 1993). نتیجه این فرایند با تغییرات در ساختار و خصوصیات فیلم قیر سبب شکننده شدن قیر و تسریع در ایجاد ترک‌خوردگی، پیرشدگی و تخریب رطوبتی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، هر شش سازند مورد مطالعه در گروه سنگ‌های کربناته و نام آن‌ها بر اساس رده‌بندی سنگ‌های کربناته (فولک و دانهام) شامل دولومیت (سازند لار)، بایوکلاست گرینستون (سازند کند)، میکرایت/مادستون (سازند الیکا)، بایوکلاست پکستون

- آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، ۱۳۹۰، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، تجدید نظر اول.
- AASHTO TP 124-20 (2020) Provisional Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bend Geometry (SCB) at Intermediate Temperature, American Association of State and Highway Transportation Officials .
- Arabani, M., Ferdowsi, B. 2009. Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures. *International Journal of Engineering*, 22(1): 47-58.
- ASTM C127-15 (2015) Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA .
- ASTM C128-15 (2015) Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM(American society for testing and materials), 2017. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, C188-17.
- ASTM(American society for testing and materials), 2019. Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, D4791-19.
- Behbahani, H., MohammadAliha, M.R., Fazaeli, H., Rezaifar, M.H. 2013. Effect of characteristic specifications on fracture toughness of asphalt concrete materials. In: *Proceedings of the 13th International Conference on fracture*, China, Beijing, 16-21.
- Biligiri, K. P., Said, S., Hakim, H. 2012. Asphalt mixtures' crack propagation assessment using semi-circular bending tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(4), 209-217.
- Birgisson, B., Roque, R., Page, G.C. 2003. Evaluation of Water Damage Using Hot Mix Asphalt Fracture Mechanics. *Proc. AAPT*
- Chong, K.P., Kuruppu, M.D. 1984. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. *International Journal of Fracture*, 26, 59-62.
- Cong, L., Peng, J., Guo, Z., Wang, Q. 2017. "Evaluation of fatigue cracking in asphalt mixtures based on surface energy", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3), D4015003.
- Curtis, C.W., Ensley, K., Epps, J. 1993. Fundamental properties of asphalt aggregate interactions including adhesion and absorption. National Research Council. Strategic Highway Research Program.
- Elseifi, M.A., Mohammad, L.N., Ying, H., Cooper III, S. 2012. Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 13:sup1, 124-139.
- Fan, S., Wang, H., Zhu, H., Sun, W. 2018. Evaluation of Self-Healing Performance of Asphalt Concrete for Low-Temperature Fracture Using Semicircular Bending Test, *J. Mater. Civ. Eng.* 30.(۹)
- Ferjani, A., Carter, A., Vaillancourt, M., Dardeau, A., Gandi, A. 2019. Effect of cement content on cracking resistance of full-depth reclamation materials using the semicircular bending test, *Adv. Civ. Eng. Mater.* 8 (1), 411-422.
- Ghuzlan, K.A. 2001. Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts. Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana- Champaign .
- Kavussi, A., Naderi, B. 2020. Application of SCB Test and Surface Free Energy Method in Evaluating Crack Resistance of SBS Modified Asphalt Mixes, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 53(1), 103 – 114 .
- Lee, D.Y., Guinn, J.A., Khandhal, P.S., Dunning, R.L. 1990. Absorption of asphalt into porous aggregates. Strategic Highway Research Program (SHRP) Rep. No. SHRP-A/UIR-90-009, National Research Council, Washington, DC.

-
- Lue, R., Lytton, R.L., 2013. Selective Absorption of Asphalt Binder by Limestone Aggregates in Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (2), 219-226.
- Mohammad Aliha, M.R., Behbahani, H., Fazaeli, H., Rezaifar, M.H. 2014. Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 54:623-635.
- Pirmohammad, S., Ayatollahi, M. R. 2015. Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading. *Cold Regions Science and Technology*, 110, 149-159.
- Saadeh, S., Eljairi, O. 2018. Comparison of Fracture Properties of Asphalt Concrete in Semicircular Bend Test Using Noncontact Camera and Crosshead Movement, *J. Mater. Civ. Eng.* 30.(۶)
- Sadeghi, E., Nikudel, M.R., Khamehchiyan, M., Kavussi, A. 2022. Evaluation of different types of carbonate aggregate performance in asphalt mixtures. *Bull Eng Geol Environ* 81, 329. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02815-8>
- Taherkhani, H. 2016. Investigation of asphalt concrete containing glass fibers and nanoclay, *Journal of Civil Engineering Infrastructures*, 49(1), 45-58.
- Tan, Y. Guo, M. 2013. Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic, *Construction and Building Materials*, 47, 254-260.
- Wang, H., Zhang, C., Yang, L., and You, Z. 2013. Study on the rubber-modified asphalt mixtures' cracking propagation using the extended finite element method. *Construction and Building Materials*, 47, 223-230.
- Xiaoge, T., Zhang, R., Yang, Z., Chu, Y., Zhen, S., Xv, Y. 2018. Simulation of Bending Fracture Process of Asphalt Mixture Semicircular Specimen with Extended Finite Element Method, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 1–8.
- Zhang, J., Sakhaeifar, M., Little, D.N., Bhasin, A., Kim, Y.-R. 2018. Characterization of Crack Growth Rate of Sulfur-Extended Asphalt Mixtures Using Cyclic Semicircular Bending Test, *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (12).