



## تأثیر نوع تکیه‌گاه بار-جابجایی آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای بر پارامترهای مختلف مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی

علی میرهاشمی<sup>۱</sup>، سعید صبحی<sup>۲\*</sup>، پویان ایبار<sup>۱</sup>، افشار یوسفی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸

### کلمات کلیدی:

آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای  
تکیه‌گاه بار-جابجایی  
مکانیک شکست  
مخلوط آسفالتی  
ضریب تغییرات

**خلاصه:** امروزه آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای به عنوان یک روش مرسوم در بررسی رفتار شکست مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش مطابق آیین‌نامه‌ها دارای شرایط خاص آزمایشگاهی از جمله ابعاد هندسی نمونه، دمای آزمایش و نرخ بارگذاری مشخصی می‌باشند که در آزمایشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی با ایجاد شرایط یکسان رعایت می‌شوند. ولی در کنار فراهم‌سازی شرایط یکسان آزمایش، شکل و نوع تکیه‌گاه‌ها مورد استفاده در آزمایش کمتر توجه قرار گرفته و دارای نوع و شکل یکپارچه‌ای نمی‌باشند که ممکن است این امر موجب تفاوت در نتایج آزمایشگاهی گردد. لذا در این پژوهش تأثیر ۵ نوع تکیه‌گاه مختلف بر روی پارامترهای مهم مکانیک شکست مخلوط آسفالتی با در نظر گرفتن ضریب تغییرات مورد بررسی قرار گرفت. نرخ بارگذاری مورد استفاده برابر ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و نمونه‌های آسفالتی ساخته شده تحت بارگذاری استاتیکی یکنواخت مود I خالص قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد انتخاب نوع تکیه‌گاه تأثیر مستقیمی بر روی پارامترهای مکانیک شکست دارد و انتخاب تکیه‌گاه اشتباه ممکن است خطای قابل توجهی وارد نتایج آزمایش کند و همچنین وجود اصطکاک در بین نمونه و تکیه‌گاه موجب پراکندگی بیشتر نتایج آزمایشگاهی شده و میزان تکرارپذیری نتایج را کاهش دهد. بدین منظور پیشنهاد می‌شود تکیه‌گاه‌های صلب که آزادی حرکت ندارند و دارای اصطکاک زیادی با نمونه هستند، در حد امکان مورد استفاده قرار نگیرند. در این تحقیق مطابق نتایج با در نظر گرفتن شرایط آزمایشگاهی خاص (هندسی نمونه، دمای آزمایشگاهی و نرخ بارگذاری مشخص) تکیه‌گاه شماره ۱ به عنوان مناسب‌ترین تکیه‌گاه با تکرارپذیری بالای نتایج انتخاب شد.

### ۱- مقدمه

مکانیک شکست به عنوان یکی از شاخه‌های علم مکانیک مصالح همواره در بررسی نحوه ترک خوردگی و شکست مصالح به خصوص روسازی آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترک خوردگی روسازی در مناطق سردسیر و مناطق پر ترافیک، یکی از شایع‌ترین خرابی‌ها در این مناطق بوده و یک حقیقت انکارناپذیر می‌باشد که نیازمند مطالعه و بررسی بیشتر در مورد نحوه ایجاد این نوع خرابی از طریق شناخت مکانیزم رشد ترک و شکست روسازی است. امروزه به علت اهمیت موضوع خرابی ترک خوردگی، کاربرد مکانیک شکست در مخلوط‌های آسفالتی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است و در این راستا جهت ارزیابی ترک خوردگی از انواع آزمایش‌های مکانیکی مانند آزمایش تیر خمشی مطابق دستورالعمل AASHTO T321، آزمایش

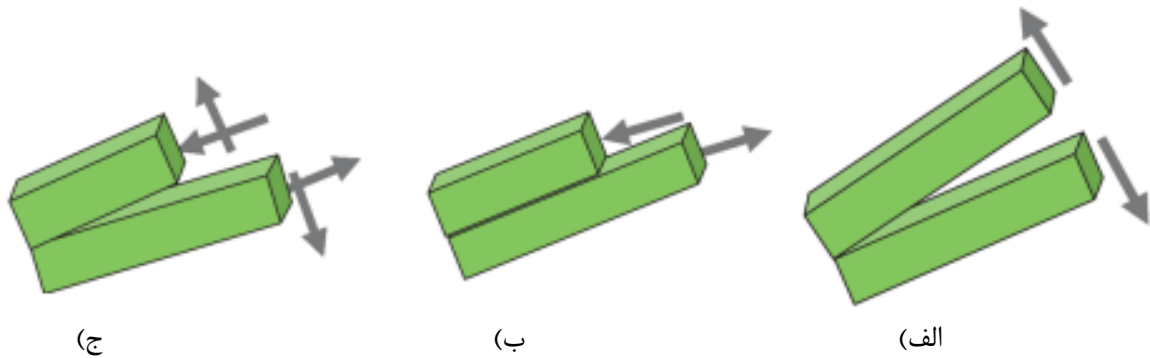
کشش غیرمستقیم<sup>۱</sup> مطابق دستورالعمل AASHTO T322 و آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای<sup>۲</sup> طبق دستورالعمل AASHTO TP105 استفاده می‌شود که در این میان آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای با توجه به خصوصیات از قبیل سهولت، تکرارپذیری و حساسیت به پارامترهای مخلوط آسفالتی بیشتر مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۴]. قاعده کلی آزمایش SCB گسترش ترک در یک نمونه نیمه دایره‌ای شکل با استفاده از میانگین تنش‌های کششی ایجاد شده در طی حالت خمشی سه نقطه‌ای است [۵]. در این آزمایش یک بار استاتیکی با تغییر مکان ثابت به وسط نمونه وارد شده و توسط تکیه‌گاه‌های دو طرف تحمل می‌شود. در این حالت شکست در مخلوط آسفالتی در حالت کلی به سه صورت، شکست در حالت بازشدگی، شکست در حالت برشی و همچنین شکست مخلوط آسفالتی در ترکیب دو حالت برش-بازشدگی ممکن است رخ بدهد و توسط آزمایش SCB می‌تواند

1 Indirect Tensile Test (IDT)  
2 Semi-circular Bend (SCB)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saeid.sobhi@stu.nit.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. حالت‌های مختلف شکست مخلوط آسفالتی: الف) حالت بازشدگی، ب) حالت برشی، ج) ترکیب حالت برش - بازشدگی [۶]

Fig. 1. Different fracture modes of asphalt mixture: A) Opening mode, B) Shearing mode, C) Mixed mode of shear-opening

[۱۲] در سال ۲۰۰۹ در تحقیقی تأثیر پارامترهای مختلف نوع قیر، نوع سنگدانه، نرخ بارگذاری و طول ترک را بر روی انرژی شکست و حداکثر نیروی شکست<sup>۵</sup> در سه دمای پایین مورد بررسی قرار داد. نتایج حاکی از آن بود که نرخ بارگذاری و طول ترک تأثیر بسزایی بر روی انرژی شکست داشته ولی روند مشخصی در بین طول ترک و نرخ بارگذاری با حداکثر نیروی شکست وجود ندارد. در مطالعه دیگری تأثیر پارامترهای مختلف ضخامت نمونه، طول ترک در نمونه، نرخ بارگذاری و دمای آزمایش بر روی مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به ضریب تغییرات داده‌های پارامترهای مورد بررسی، محدوده قابل قبول هر یک از پارامترها پیشنهاد داده شد [۱۳]. سلیمانیان و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۹ با بررسی تأثیر دما و نرخ بارگذاری بر پارامترهای مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی، نظیر مقدار نیرو و انرژی لازم برای شکست و نشانه سفتی نمونه‌های مخلوط آسفالتی، دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و نرخ بارگذاری ۵ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه را مناسب‌ترین ترکیب برای ارزیابی خستگی مخلوط‌های آسفالتی ناحیه شمالی آمریکا پیشنهاد دادند. یوسفی و همکاران [۱۵] نیز در سال ۲۰۱۹ با تمرکز بر نرخ بارگذاری آزمایش SCB تأثیر انواع نرخ بارگذاری بر روی پارامترهای مختلف مکانیک شکست را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق ۶ نوع نرخ بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفت و طبق ضریب تغییرات آزمایش نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه به عنوان نرخ بارگذاری مناسب انتخاب شد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش نرخ بارگذاری همواره مقدار حداکثر بار انرژی شکست و حداکثر انرژی شکست برای گسیختگی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد ولی دو شاخص انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک خوردگی با

ارزیابی شود (شکل ۱) [۶]. در این تحقیق شکست حالت بازشدگی که ناشی از تغییراتی دمایی (تحت اثر کشش) می‌باشد مورد مطالعه قرار گرفته است. با تحلیل داده‌های به دست آمده از آزمایش SCB پارامترهای مختلف مکانیک شکست از جمله انرژی شکست<sup>۱</sup>، چقرمگی شکست<sup>۲</sup>، شاخص انعطاف‌پذیری<sup>۳</sup> و شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی<sup>۴</sup> قابل بررسی می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر فاصله تکیه‌گاه‌ها از وسط بار و زاویه ترک خوردگی (مودهای مختلف بارگذاری) خواص مکانیک شکست مخلوط آسفالتی از طریق این آزمایش می‌تواند مورد بررسی قرار بگیرد [۷]. در آزمایش SCB به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی‌های حرارتی در دماهای پایین از پارامترهای انرژی شکست و چقرمگی شکست استفاده می‌شود [۸ و ۹] و همچنین امروزه جهت ارزیابی خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط در کنار استفاده از انرژی شکست، دو پارامتر جدید شاخص انعطاف‌پذیری و شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰، ۱۱ و ۱۲].

در آزمایش SCB پارامترهای مختلف ابعاد هندسی نمونه، اندازه طول ترک، فاصله تکیه‌گاه‌ها، نرخ بارگذاری و دمای انجام آزمایش تأثیر بسزایی در نتایج آزمایش دارد و به این علت جهت یکسان‌سازی شرایط آزمایش استانداردهای مختلفی در مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌ها تدوین شده است و همچنین همواره طی چندین سال گذشته تأثیر هر یک از این پارامترها بر روی خواص شکست مخلوط آسفالتی بررسی شده است. لی و ماراستینو

- 1 Fracture Energy (FE)
- 2 Fracture toughness (Kf)
- 3 Flexibility Index (FI)
- 4 Cracking Resistance Index (CRI)

5 Critical Load (Pcr)

تکیه‌گاه‌های مورد استفاده در مؤسسات و آزمایشگاه‌ها یکسان نبوده و در نتیجه ممکن است نتایج متفاوتی را نشان دهند. بنابراین در این تحقیق با تمرکز بر روی تأثیر نوع تکیه‌گاه در پارامترهای به دست آمده از مکانیک شکست اهداف زیر دنبال می‌شود:

- 1) بررسی تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی تکرارپذیری نتایج آزمایش SCB با در نظر گرفتن ضریب تغییرات و پراکندگی داده‌های پارامترهای مورد بررسی
- 2) ارزیابی تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی پارامترهای مکانیک شکست در دمای متوسط و تعیین تکیه‌گاه مناسب با کمترین ضریب تغییرات و پراکندگی داده‌ها

## ۲- مصالح

### ۲-۱- مصالح سنگی و قیر مصرفی

در این پژوهش از مصالح سنگی رودخانه‌ای با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده شده که خصوصیات سنگدانه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. دانه‌بندی مصالح سنگی نیز با توجه به استاندارد و محدودیت‌های طرح اختلاط حجمی روسازی ممتاز در شکل ۲ نشان داده شده است. قیر مصرفی مورد استفاده نیز قیر خالص با درجه‌ی نفوذ ۶۰/۷۰ (با درجه عملکردی ۲۲-۶۴ PG) بوده که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده و خصوصیات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

### ۳- ساخت نمونه‌های آسفالتی و خمش نیم‌دایره‌ای

در این پژوهش برای تهیه نمونه‌های آسفالتی از روش طرح اختلاط روسازی ممتاز با سطح ۱ و با در نظر گرفتن ترافیک بیش از ۱۰ میلیون و کمتر از ۳۰ میلیون (سطح ۵ از سطوح ترافیک) و حداکثر دمای ۳۹-۴۱ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. قبل از ساخت نمونه‌های آسفالتی مصالح سنگی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد و قیر به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد در اوون قرار داده شدند. به منظور تراکم نمونه‌های ساخته شده از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری به جای روش تراکم مارشال با وارد کردن هم‌زمان یک نیروی استاتیکی و نیروهای برشی ناشی از دوران قالب حول راستایی قائم، عمل ورز دادن و تراکم مخلوط آسفالتی استفاده شده است که در شکل ۳ تصویر آن به نمایش گذاشته است. طبق جدول ۳ مقدار دوران طرح (N<sub>d</sub>) بر اساس سطح ترافیک و حداکثر دمای هفت روز در محل اجرای پروژه روسازی برابر ۱۲۱ انتخاب شده است.

افزایش نرخ بارگذاری روال مشخصی ندارند. بهرامی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۹ تأثیر اهمیت نوع تکیه‌گاه بر روی چقرمگی شکست سنگ را از طریق آزمایش SCB بررسی نمودند و نتایج نشان داد علی‌رغم استفاده رایج محققان از دو تکیه‌گاه ثابت و تکیه‌گاه آزاد نیمه متحرک، بین تکیه‌گاه ثابت و تکیه‌گاه آزاد نیمه متحرک درون سطح نیم‌دایره‌ای و همچنین سطح تماس نمونه با تکیه‌گاه، اصطکاک وجود داشته و باعث وارد شدن خطای زیادی در نتایج آزمایش می‌شود. در تحقیق دیگری صدیقی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۰ با استفاده از تحلیل آماری تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی چقرمگی شکست را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آزمایش همانند نتایج صدیقی بوده و نشان دهنده رابطه خوب بین نتایج آزمایش و نتایج پیش بینی شده حاصل از تحلیل المان محدود نمونه‌ها بود.

مرور پژوهش‌های قبلی محققان نشان می‌دهد در آزمایش SCB تکیه‌گاه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پارامتر انرژی شکست مورد استفاده قرار گرفته که به طور عمده در سه نوع اصلی طبقه‌بندی می‌شوند و عبارت اند از، تکیه‌گاه ثابت [۲۱-۱۸] تکیه‌گاه غلتکی در سطح انحنا دار دارای فنر و بدون فنر [۲۵-۲۲] و همچنین تکیه‌گاه غلتکی آزاد [۲۸-۲۶] تکیه‌گاه ثابت کاملاً غیرقابل حرکت بوده و به پایه ثابت متصل است. در تکیه‌گاه غلتکی دو غلتک درون سطح انحنا دار (نیم‌دایره) قرار گرفته و می‌تواند در محل خود به طور جزئی بچرخد ولی تکیه‌گاه غلتکی آزاد دارای دو غلتک است که بر روی سطح صاف قرار گرفته و به راحتی بر روی سطح در زیر نمونه می‌چرخد. با توجه به استفاده طیف مختلفی از انواع تکیه‌گاه در مطالعات قبلی متأسفانه تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی شکست مخلوط آسفالتی به طور گسترده بررسی نشده، بنابراین لازم است تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی داده‌ها و همچنین تکرارپذیری نتایج آزمایش مورد بررسی قرار بگیرد که در تحقیق پیشرو با در نظر گرفتن مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایش تأثیر ۵ نوع از تکیه‌گاه‌ها بر روی پارامترهای مختلف مکانیک شکست (حداکثر بار، حداکثر انرژی، شاخص انعطاف‌پذیری و شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی) در دمای متوسط بر اساس ضریب تغییرات و پراکندگی داده‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

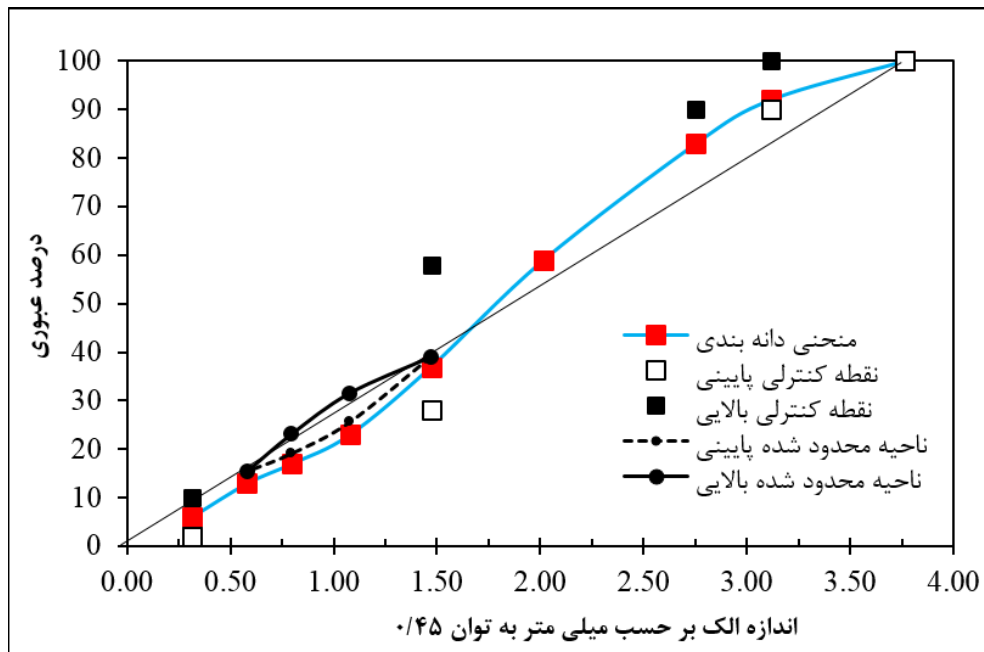
### ۱-۱- اهداف پژوهش

آزمایش SCB به علت سادگی، انجام سریع آزمایش و نزدیک بودن به شرایط میدانی به طور گسترده توسط مؤسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌ها به عنوان ابزاری جهت کنترل کیفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود شرایط آزمایشگاهی یکسان آزمایش اعم از نرخ بارگذاری و دمای آزمایش،

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها

Table 1. Physical properties of aggregates

مصالح	نوع آزمایش	روش استاندارد	حدود مجاز	نتیجه آزمایش
مصالح سنگی	سایش لس آنجلس (درصد)	ASTM C535	حداکثر ۳۰	۱۴
	درصد شکستگی در یک وجه	ASTM D5821	حداقل ۹۵	۹۷
	درصد شکستگی در دو وجه	ASTM D5821	حداقل ۹۰	۹۳
	وزن مخصوص درشت دانه ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	ASTM D127	-	۲/۵۱
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۶/۲
مصالح سنگی ریز دانه	ذرات سوزنی و پولکی شکل (درصد)	AASHTO T4791	حداکثر ۱۰	۰/۴
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۱
	وزن مخصوص ریزدانه ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	ASTM D128	-	۲/۶۷
	درصد شکستگی مصالح ریز دانه (درصد)	ASTM C1252	حداقل ۴۵	۵۲
	ارزش ماسه‌ای (درصد)	ASTM D2419	حداقل ۴۵	۶۷



شکل ۲. منحنی دانه بندی سنگدانه مخلوط آسفالتی [۲۶-۲۸]

Fig. 2. Aggregate gradation curve of asphalt mixture

جدول ۲. مشخصات قیر ۶۰/۷۰

Table 2. The properties of 60/70 bitumen

نوع آزمایش	روش استاندارد	حدود مجاز	نتیجه آزمایش
درجه نفوذ (0.1mm)	ASTM D5	۷۰-۶۰	۶۲
نقطه نرمی (°C)	ASTM D36	۵۶-۴۹	۴۸/۵
شکل پذیری (cm)	ASTM D113	حداقل ۱۰۰	۱۳۰
درجه اشتعال (°C)	ASTM D92	حداقل ۲۳۲	۲۹۰
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM D70	-	۱/۰۱۸

جدول ۳. راهنمای انتخاب تعداد دوران (Nd) برحسب دما و ترافیک

Table 3. Guide for selecting the number of gyration (Nd) in terms of temperature and traffic

ترافیک هم‌ارز طرح (۱۰ <sup>۶</sup> )	حداکثر دمای هوا در مدت ۷ روز (°C)											
	<۳۹			۴۱-۳۹			۴۲-۴۱			۴۴-۴۳		
	Ni	Nd	Nm	Ni	Nd	Nm	Ni	Nd	Nm	Ni	Nd	Nm
<۰/۳	۷	۶۸	۱۰۴	۷	۷۴	۱۱۴	۷	۷۸	۱۲۱	۷	۸۲	۱۲۷
<۱	۷	۷۶	۱۱۷	۷	۸۳	۱۲۹	۷	۸۸	۱۳۸	۸	۹۳	۱۴۶
<۳	۷	۸۶	۱۳۴	۸	۹۵	۱۵۰	۸	۱۰۰	۱۵۸	۸	۱۰۵	۱۶۷
<۱۰	۸	۹۶	۱۵۲	۸	۱۰۶	۱۶۹	۸	۱۱۳	۱۸۱	۹	۱۱۹	۱۹۲
<۳۰	۸	۱۰۹	۱۷۴	۹	۱۲۱	۱۹۵	۹	۱۲۸	۲۰۸	۹	۱۳۵	۲۲۰
<۱۰۰	۹	۱۲۶	۲۰۴	۹	۱۳۹	۲۲۸	۹	۱۴۶	۲۴۰	۱۰	۱۵۳	۲۵۳
>۱۰۰	۹	۱۴۳	۲۳۳	۱۰	۱۵۸	۲۶۲	۱۰	۱۶۵	۲۷۵	۱۰	۱۷۲	۲۸۸

پارامترهای حجمی برای مخلوط آسفالتی شاهد آورده شده است. جهت ساخت نمونه‌های نیم‌دایره‌ای، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای (به ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر) ساخته شده را مطابق شکل ۴ به نمونه‌های دیسکی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر برش داده و هر نمونه دیسکی به دو قسمت نیم‌دایره نصف می‌شوند. قبل از برش نمونه‌ها با توجه به ارتفاع زیاد نمونه و احتمال تراکم نقطه‌ای متفاوت نمونه‌های برش خورده، ابتدا و انتهای نمونه استوانه‌ای را به اندازه ۲۵ میلی‌متر برش داده و مابقی نمونه استوانه‌ای را به سه قسمت با ضخامت ۳۰ میلی‌متر تقسیم می‌شوند.

بر اساس آیین‌نامه روسازی ممتاز (AASHTO M323)، جهت تعیین میزان قیر بهینه برای هر یک از مخلوط آسفالتی مورد نظر، درصد قیر استفاده شده در مخلوط آسفالتی که در آن درصد فضای خالی مخلوط در تعداد دوران طرح مخلوط (که در این تحقیق، تعداد دوران برابر ۱۲۱ در نظر گرفته شده است) برابر ۴ درصد بوده و شرایط لازم طبق آیین‌نامه روسازی ممتاز برای مقدار درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA) و نسبت گرد و خاک را داشته باشد، به عنوان درصد بهینه قیر مخلوط آسفالتی تعریف شده است. در جدول ۴ نتایج



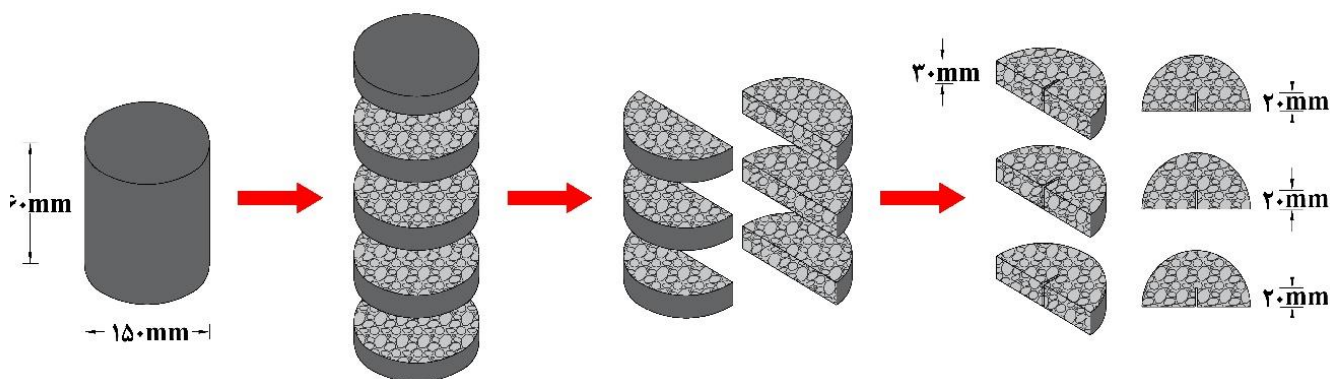
شکل ۳. دستگاه متراکم کننده ژیراتوری

Fig. 3. Gyratory compactor machine

جدول ۴. پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی

Table 4. Volumetric parameters of asphalt mixtures

ترافیک هم‌ارز طرح (۱۰ <sup>۶</sup> )	حداکثر دمای هوا در مدت ۷ روز (°C)											
	<۳۹			۴۱-۳۹			۴۲-۴۱			۴۴-۴۳		
	N <sub>i</sub>	N <sub>d</sub>	N <sub>m</sub>	N <sub>i</sub>	N <sub>d</sub>	N <sub>m</sub>	N <sub>i</sub>	N <sub>d</sub>	N <sub>m</sub>	N <sub>i</sub>	N <sub>d</sub>	N <sub>m</sub>
<۰/۳	۷	۶۸	۱۰۴	۷	۷۴	۱۱۴	۷	۷۸	۱۲۱	۷	۸۲	۱۲۷
<۱	۷	۷۶	۱۱۷	۷	۸۳	۱۲۹	۷	۸۸	۱۳۸	۸	۹۳	۱۴۶
<۳	۷	۸۶	۱۳۴	۸	۹۵	۱۵۰	۸	۱۰۰	۱۵۸	۸	۱۰۵	۱۶۷
<۱۰	۸	۹۶	۱۵۲	۸	۱۰۶	۱۶۹	۸	۱۱۳	۱۸۱	۹	۱۱۹	۱۹۲
<۳۰	۸	۱۰۹	۱۷۴	۹	۱۲۱	۱۹۵	۹	۱۲۸	۲۰۸	۹	۱۳۵	۲۲۰
<۱۰	۹	۱۲۶	۲۰۴	۹	۱۳۹	۲۲۸	۹	۱۴۶	۲۴۰	۱۰	۱۵۳	۲۵۳
>۱۰۰	۹	۱۴۳	۲۳۳	۱۰	۱۵۸	۲۶۲	۱۰	۱۶۵	۲۷۵	۱۰	۱۷۲	۲۸۸



شکل ۴. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های SCB

Fig. 4. Steps of preparing SCB specimens

می‌باشد که در این پژوهش طبق شکل ۵ بر اساس شکل هندسی، میزان نوع آزادی حرکت و فنر غلتک متصل به تکیه‌گاه به ۵ نوع مختلف به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- 1) تکیه‌گاه نوع اول از دو غلتک استوانه‌ای شکل بر روی سطح صاف تشکیل شده است که می‌تواند آزادانه بر روی سطح بچرخد (شماره ۱).
- 2) تکیه‌گاه نوع دوم به شکل ثابت ساخته شده و دارای حرکت جانبی نبوده و سطوح آن به صورت انحنا می‌باشد (شماره ۲).
- 3) تکیه‌گاه نوع سوم مطابق شکل ۵ از دو غلتک استوانه‌ای در داخل سطح انحنا دار (نیم‌دایره‌ای) تشکیل شده که دارای حرکت جانبی افقی محدوده شده می‌باشد (شماره ۳).
- 4) تکیه‌گاه نوع چهارم همانند نوع سوم بوده با این تفاوت که غلتک‌های استوانه‌ای توسط فنری با سختی مشخص به سطح انحنا دار متصل شده و حرکت جانبی آن را نسبت به تکیه‌گاه نوع سوم بیشتر محدودتر کرده است (شماره ۴).
- 5) تکیه‌گاه نوع پنجم مشابه تکیه‌گاه نوع دوم بوده با این تفاوت که از دو غلتک استوانه‌ای تشکیل شده که به سطح صاف متصل شده و دارای حرکت جانبی نمی‌باشد (شماره ۵).

#### ۴-۲- پارامترهای مکانیک شکست مورد بررسی

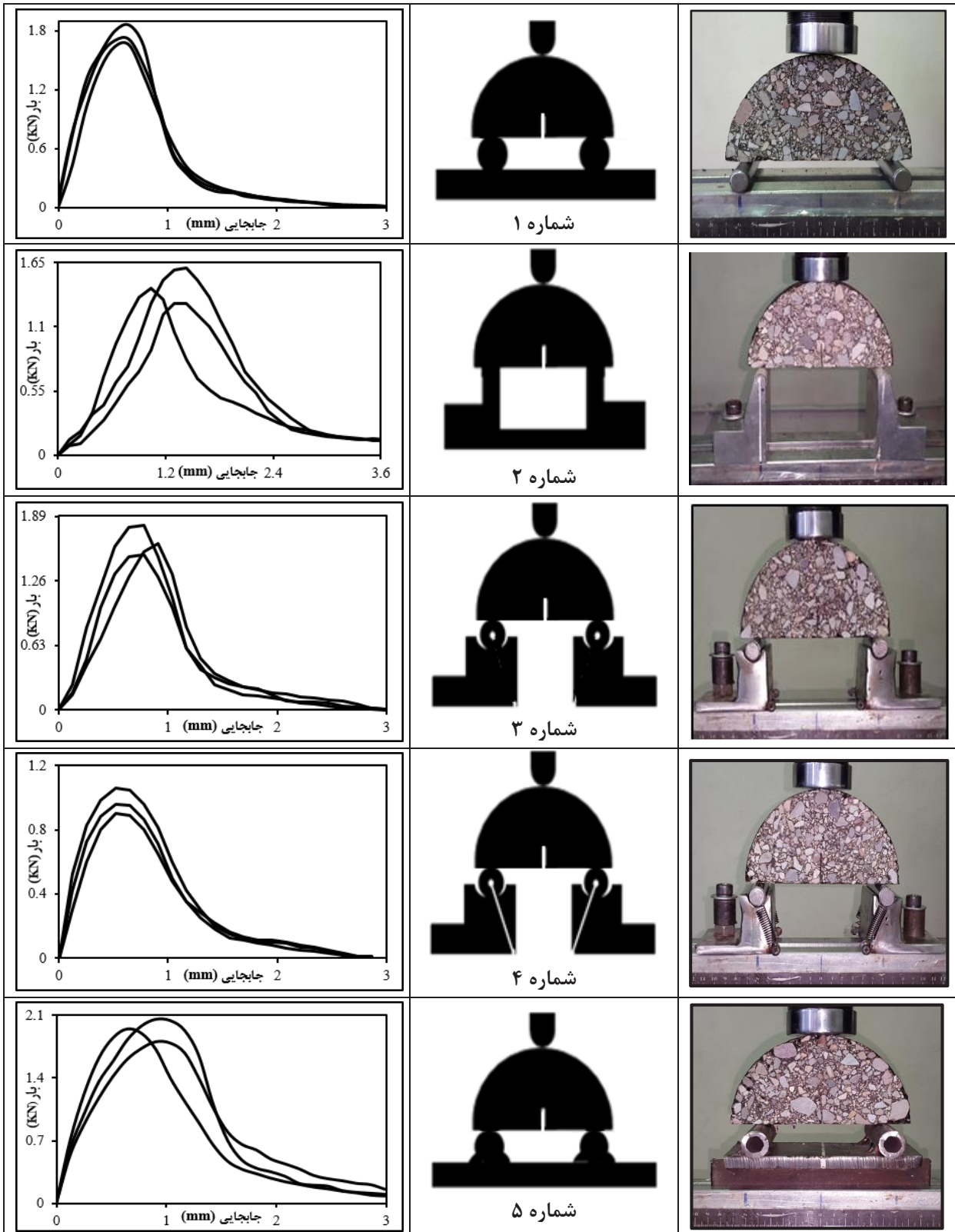
با تحلیل نمودار بار-جابجایی نمونه بارگذاری شده مطابق شکل ۷ مقادیر پارامترهای مکانیک شکست مورد مطالعه به شرح زیر تعیین می‌شوند:

#### ۴- برنامه آزمایشگاهی شرایط تکیه‌گاه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش تأثیر پنج نوع تکیه‌گاه مختلف و متداول آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (بر اساس پیشینه مطالعات آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای) بر روی پارامترهای مکانیک شکست با در نظر گرفتن ضریب تغییرات مورد بررسی قرار گرفت. مطابق مطالعات قبلی یوسفی و همکاران مناسب‌ترین نرخ جهت بارگذاری استاتیکی یکنواخت مود I خالص دمای متوسط برابر ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد [۱۵] و برای پایین آوردن خطای داده‌های به دست آمده و بررسی تکرارپذیری داده‌ها، برای هر نوع تکیه‌گاه سه نمونه SCB و در مجموع ۱۵ نمونه آزمایشگاهی SCB (نوع مخلوط آسفالتی یکسان برای ۵ نوع تکیه‌گاه \* ۳ بار تکرار آزمایش) تهیه گردید که در شکل ۵ نحوه قرارگیری نمونه‌ها بر روی تکیه‌گاه‌های مختلف دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتن نشان داده شده است. طبق چارت آزمایشگاهی شکل ۶ در هر نوع تکیه‌گاه مورد استفاده در این پژوهش پارامترهای مختلف به دست آمده از تحلیل مکانیک شکست نمونه‌ها، شامل حداکثر نیروی لازم جهت شکست، مقدار انرژی لازم جهت شکست، نشانه انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی و نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفته شد.

#### ۴-۱- شرایط تکیه‌گاه‌های مورد مطالعه

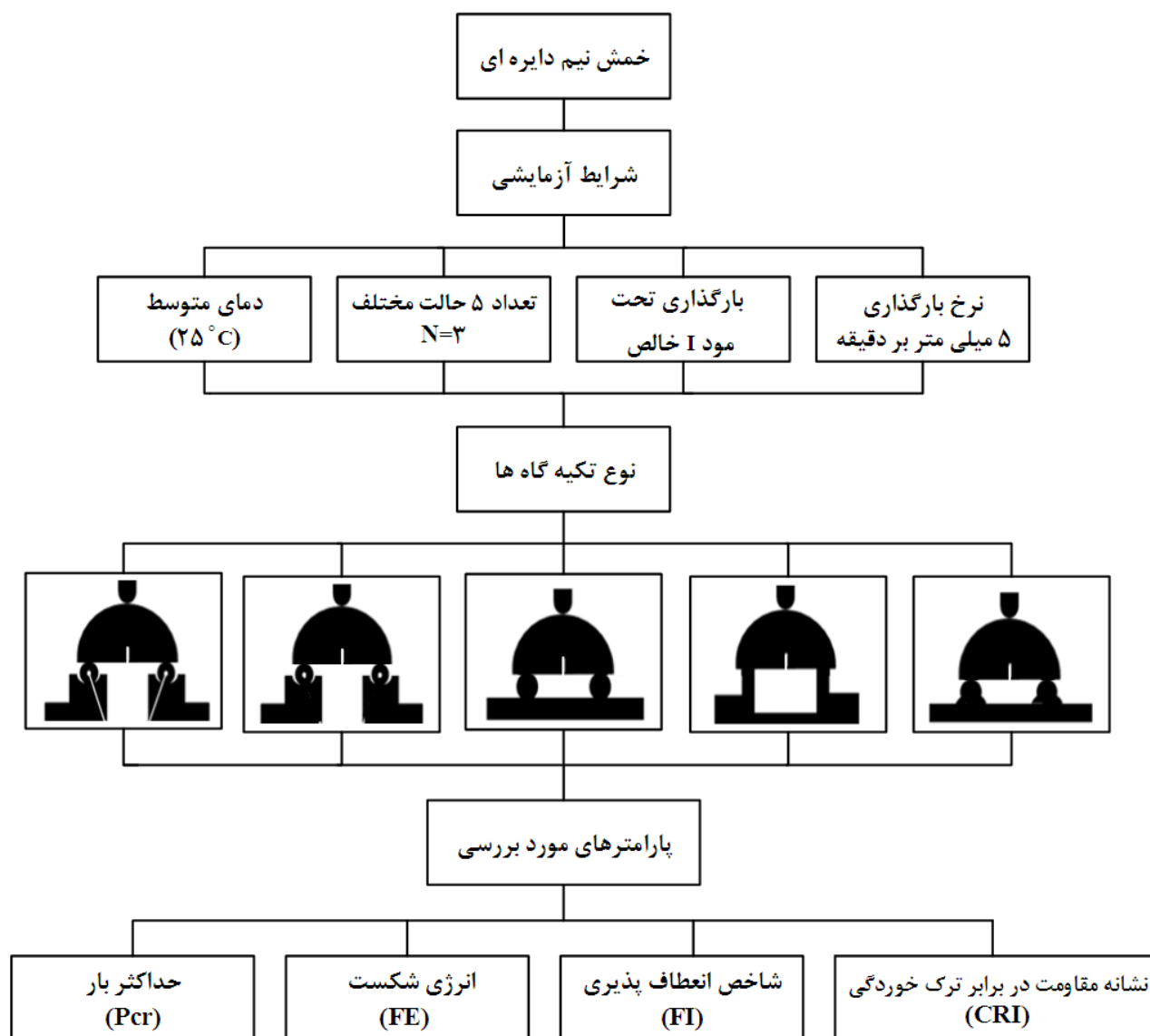
تکیه‌گاه‌های مورد استفاده طبق دستورالعمل‌ها و مؤسسات دانشگاهی مختلف، بر اساس درجه آزادی تکیه‌گاه دارای سه دسته عمده دارای حرکت غلتشی جانبی آزاد، بدون حرکت جانبی و دارای حرکت چرخشی مختصر



شکل ۵. انواع تکیه‌گاه مورد مطالعه و منحنی بار-جابجایی

Fig. 5. Types of supports studied and load-displacement curve





شکل ۶. چارت آزمایشگاهی

Fig. 6. Laboratory chart

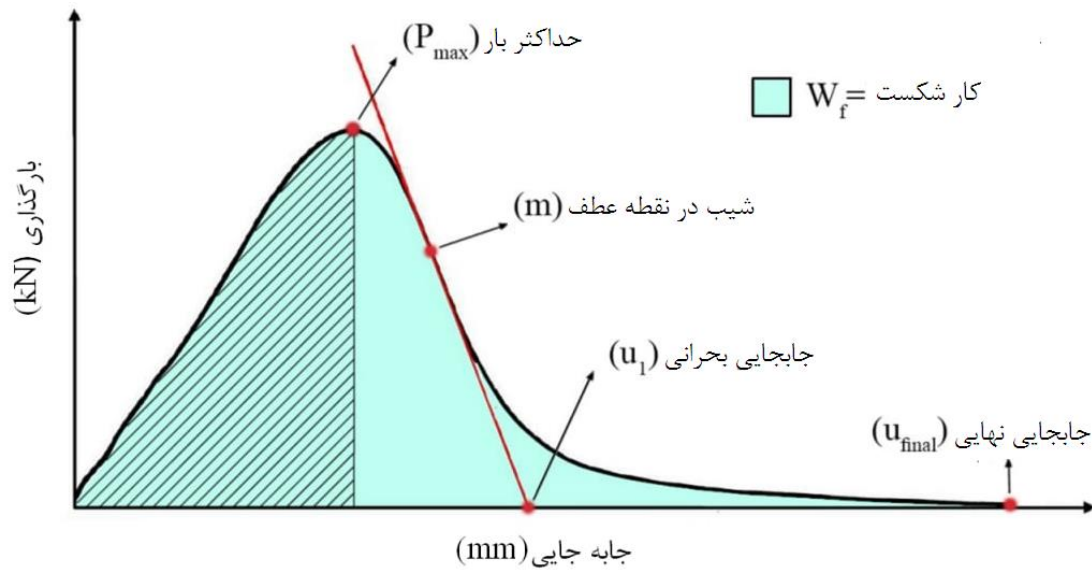
### بار بحرانی

نمونه‌های مخلوط آسفالتی به عنوان مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی تعریف می‌شود. این شاخص نشان دهنده ظرفیت کلی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شکست می‌باشد [۳۰ و ۲۹]. و مطابق رابطه (۱) از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی (ناحیه رنگ شده زیر شکل ۷) به سطح مقطع ترک خورده به دست می‌آید.

بار بحرانی در واقع حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه‌های مخلوط آسفالتی قبل از ترک خوردگی است که با رسیدن بار به این مقدار نمونه شروع به ترک از محل برش می‌گردد که در شکل ۷ مشخص شده است.

### انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها

در آزمایش SCB مقدار انرژی لازم برای ترک خوردگی (شکست)



شکل ۷. نتیجه حاصل از منحنی بار-جابجایی آزمایش SCB

Fig. 7. The result of the load-displacement curve of the SCB test

که در این رابطه  $G_f$  برابر مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوطهای آسفالتی بر حسب ژول بر متر مربع،  $|m|$  برابر شیب در نقطه عطف قسمت دوم منحنی نیرو-جابجایی (مطابق شکل ۷) بر حسب کیلو نیوتن بر میلی‌متر و  $A$  ضریب تبدیل واحد و ضریب مقیاس‌گذاری تعریف شده است و در این مطالعه برابر  $0/01$  می‌باشد.

### نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی

نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی در واقع شکل توسعه پیدا کرده شاخص FI می‌باشد که به منظور ارزیابی مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای متوسط استفاده می‌شود [۳۲] که در این رابطه به جای شیب در نقطه عطف مقدار  $P_{max}$  جایگذاری شده و طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$CRI = \frac{G_f}{P_{max}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $G_f$  برابر مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوطهای آسفالتی بر حسب ژول بر مترمربع و  $P_{max}$  حداکثر نیروی وارده بر نمونه بر حسب کیلو نیوتن است.

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

که در این رابطه  $G_f$  مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط آسفالتی بر حسب ژول بر متر مربع و  $W_f$  مقدار کار لازم برای شکست مخلوط آسفالتی بر حسب ژول و  $A$  سطح مقطع ترک خورده بر حسب متر مربع نمونه آسفالتی است.

### نشانه انعطاف‌پذیری

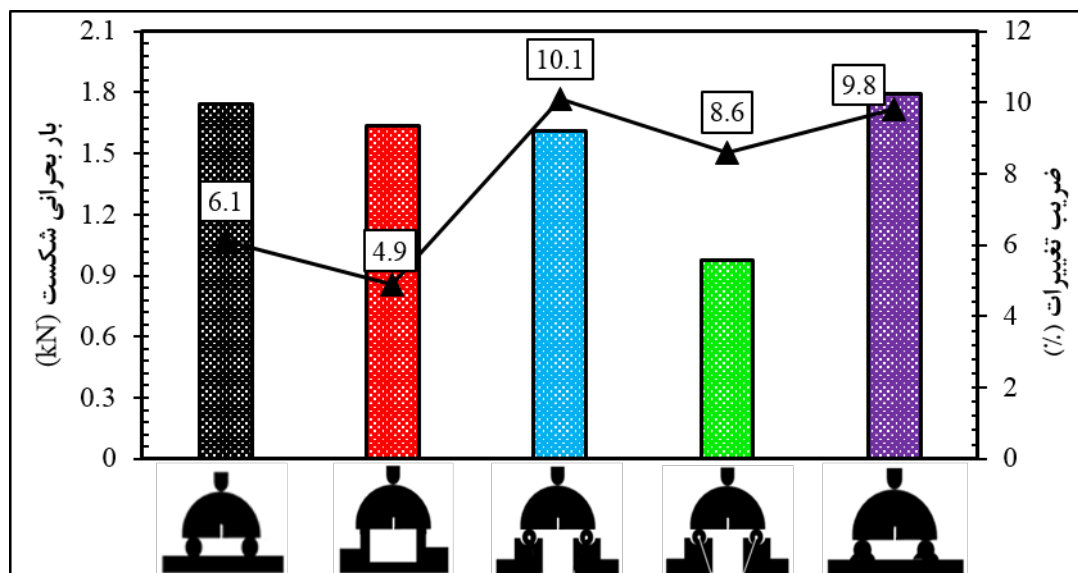
القادی و همکاران طی مطالعات خود نشان دادند که انرژی لازم برای شکست نمونه در دمای متوسط به تنهایی شاخص مناسبی برای تعیین مقاومت ترک خوردگی نمی‌باشد بنابراین شاخص کمکی با عنوان نشانه انعطاف‌پذیری تعریف کرده که به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱] و از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$FI = A * \frac{G_f}{|m|} \quad (2)$$

جدول ۵. مقادیر بار بحرانی به دست آمده در تکیه‌گاه‌های مختلف بارگذاری

Table 5. The critical load values obtained at different loading supports

تکیه‌گاه بار - جابجایی	تکیه‌گاه شماره ۱	تکیه‌گاه شماره ۲	تکیه‌گاه شماره ۳	تکیه‌گاه شماره ۴	تکیه‌گاه شماره ۵
۱	۱/۶۶	۱/۶	۱/۵۱	۰/۹۶	۱/۶
۲	۱/۷۱	۱/۵۸	۱/۸	۱/۰۷	۱/۸۲
۳	۱/۸۶	۱/۷۳	۱/۵۲	۰/۹	۱/۹۵
میانگین	۱/۷۴	۱/۶۴	۱/۶۱	۰/۹۷	۱/۷۹
انحراف معیار	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۱۷
ضریب تغییرات	۶/۰۹	۴/۸۷	۱۰/۱۲	۸/۶۱	۹/۷۶



شکل ۸. تأثیر تکیه‌گاه‌های مختلف بار - جابجایی بر میزان حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۵ °C

Fig. 8. Effect of different load-displacement supports on the maximum load required to fracture asphalt mixtures at 25 °C

شده و موجب شده که نمونه در این تکیه‌گاه نسبت به تکیه‌گاه شماره ۳ قبل از شکست حداکثر نیرو کمتری را تحمل کند، اگر چه در تکیه‌گاه شماره ۲ و ۵ به خاطر صلب بودن (ثابت بودن تکیه‌گاه) نمونه آسفالتی بیشترین بار را قبل از شکستن تجربه می‌کند. میزان پراکندگی داده‌های حداکثر نیروی لازم برای شکست بین ۴/۹ الی ۱۰/۱ می‌باشد به طوری که ضریب تغییرات در تکیه‌گاه شماره ۲ کمترین مقدار را دارد و بیشترین ضریب تغییرات مربوط به تکیه‌گاه شماره ۳ است.

### ۵- نتایج و بحث

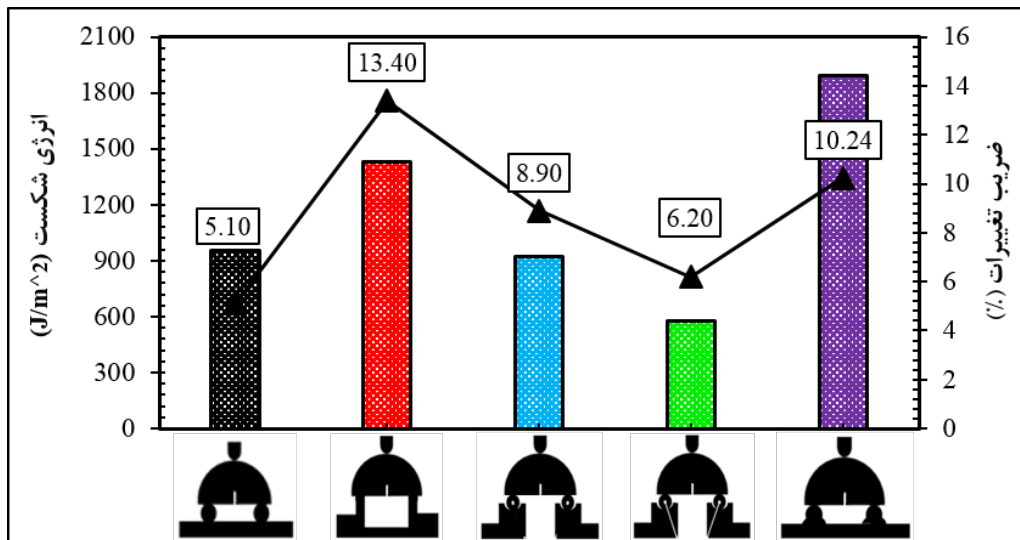
۵-۱- تأثیر نوع تکیه‌گاه‌های مختلف نیرو-جابجایی بر حداکثر نیروی لازم برای شکستگی مخلوط‌های آسفالتی

مقدار حداکثر نیروی شکست مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۸ و جدول ۵ نمایش آورده شده است. مطابق شکل مقدار نیروی حداکثر در تمامی تکیه‌گاه‌ها به جز تکیه‌گاه شماره ۴ مقداری تقریباً برابر دارند. تفاوت عمده‌ای بین تکیه‌گاه شماره ۳ و ۴ دیده می‌شود که گمان می‌رود وجود فنر در تکیه‌گاه شماره ۴ باعث چرخش کمتر غلتک (اصطکاک بیشتر) در بین نمونه و تکیه‌گاه

جدول ۶. مقادیر انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی در تکیه‌گاه‌های مختلف بارگذاری

Table 6. The energy required values to fracture asphalt mixtures at different loading supports

تکیه‌گاه بار - جابجایی	تکیه‌گاه شماره ۱	تکیه‌گاه شماره ۲	تکیه‌گاه شماره ۳	تکیه‌گاه شماره ۴	تکیه‌گاه شماره ۵
۱	۹۰۶/۳۹	۱۶۵۲/۷۸	۹۶۲/۷۲	۵۴۴/۳۳	۱۸۶۵/۴۶
۲	۹۵۳/۳۴	۱۳۲۴/۰۸	۹۷۴/۳۹	۶۱۶/۳۱	۱۶۲۵/۴۸
۳	۱۰۰۴/۰۳	۱۳۱۵/۲۷	۸۲۶/۸۷	۵۸۰	۱۹۹۴/۳۱
میانگین	۹۵۴/۵۵	۱۴۳۰/۷۱	۹۲۱/۳۲	۵۸۰/۲۱	۱۸۲۸/۴۲
انحراف معیار	۴۵/۸۸	۱۹۲/۳۷	۸۲/۰۱	۳۵/۹۹	۱۸۷/۱۸۵
ضریب تغییرات	۵/۱۲	۱۳/۴۴	۸/۹	۶/۲۰	۱۰/۲۴



شکل ۹. تأثیر تکیه‌گاه‌های مختلف بار-جابجایی بر میزان انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

Fig. 9. Effect of different load-displacement supports on energy required to fracture asphalt mixtures at 25 °C

مقدار انرژی شکست نمونه‌ها به ترتیب در تکیه‌های شماره ۵ و ۴ رخ می‌دهد. تکیه‌گاه‌های شماره ۲ و ۵ دارای تکیه ثابت بوده و بیشترین مقدار انرژی در این دو تکیه‌گاه ثبت شده که با توجه به نمودار به نظر می‌رسد ثابت بودن تکیه‌گاه‌ها به دلیل وجود حداکثری نیروی اصطکاک بین نمونه و تکیه‌گاه موجب مقدار جابجایی بیشتر برای شکست مخلوط آسفالتی و تشکیل سطح زیر نمودار بزرگ‌تر می‌شود (مطابق نمودار بار-جابجایی شکل ۷). در واقع ثابت شدن تکیه‌گاه (تکیه‌گاه‌های شماره ۲ و ۵) نسبت به تکیه‌گاه غلتکی

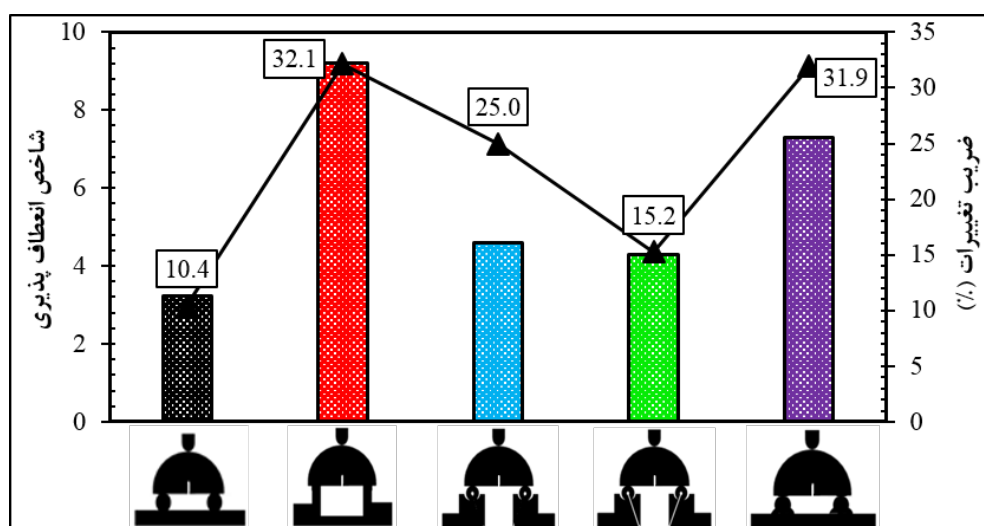
۲-۵ تأثیر تکیه‌گاه‌های مختلف نیرو-جابجایی بر انرژی لازم برای شکستگی مخلوط‌های آسفالتی

نتایج تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی انرژی لازم برای شکستگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط در شکل ۹ و جدول ۶ آورده شده است. مطابق نمودار ۹ مشاهده می‌شود که به جز تکیه‌گاه شماره ۱ تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی انرژی لازم برای شکست مخلوط آسفالتی در دمای متوسط روند مشابهی با نتایج حداکثر نیروی لازم برای شکست دارد به طوری که بیشترین و کمترین

جدول ۷. مقادیر شاخص انعطاف پذیری مخلوط‌های آسفالتی در تکیه‌گاه‌های مختلف بارگذاری

Table 7. The flexibility index values of asphalt mixtures at different loading supports

تکیه‌گاه بار - جابجایی	تکیه‌گاه شماره ۱	تکیه‌گاه شماره ۲	تکیه‌گاه شماره ۳	تکیه‌گاه شماره ۴	تکیه‌گاه شماره ۵
۱	۳/۵۴	۱۰/۸	۵/۷	۳/۷	۸/۵۶
۲	۲/۸۷	۱۱/۰۳	۴/۷۳	۴/۱۹	۴/۶
۳	۳/۲۴	۵/۷۹	۳/۴	۵	۸/۷
میانگین	۳/۲۲	۹/۲۱	۴/۶۱	۴/۳	۷/۲۹
انحراف معیار	۰/۳۳	۲/۹۶	۱/۱۵	۰/۶۵	۲/۳۲
ضریب تغییرات	۱۰/۴۱	۳۲/۱۴	۲۴/۹۸	۱۵/۲۳	۳۱/۹۲



شکل ۱۰. تأثیر تکیه‌گاه‌های مختلف بار-جابجایی بر شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۵ °C

Fig. 10. Effect of different load-displacement supports on flexibility index of asphalt mixtures at 25 °C

۵-۳- تأثیر تکیه‌گاه‌های مختلف نیرو-جابجایی بر شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی

شاخص انعطاف‌پذیری پارامتر مهمی در تحلیل رفتار ترک خوردگی نمونه‌های ترد در دمای متوسط است که مقادیر این شاخص در شکل ۱۰ و جدول ۷ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که همانند نتایج حداکثر انرژی شکست، دو تکیه‌گاه ثابت شماره ۲ و ۵ دارای بیشترین شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی می‌باشند که ممکن است این امر ارتباط مستقیمی با بالا بودن سطح انرژی شکست مخلوط آسفالتی در دو تکیه‌گاه داشته باشد. البته با توجه به اینکه شاخص انعطاف‌پذیری متأثر از

آزاد (شماره ۱) بر روی سطح مسطح، مقدار انرژی شکست را به ترتیب به اندازه ۵۰ و ۹۲ درصد افزایش می‌دهد که این امر حاکی از مؤثر بودن نوع تکیه‌گاه در پارامتر مهم انرژی شکست مخلوط آسفالتی می‌باشد. البته مقدار آزادی غلتک تکیه‌گاه در سطوح صاف و انحنادار نیز تأثیری جزئی در پارامتر انرژی شکست دارد طوری که این پارامتر در سطح انحنادار (تکیه‌گاه شماره ۳) نسبت به سطح صاف (تکیه‌گاه شماره ۱) مقدار کمتری دارد (مقدار ۳/۶ درصد). با توجه به نمودار ۹ مشاهده می‌شود که ضریب تغییرات نتایج تمامی تکیه‌گاه‌ها در محدوده قابل قبول بوده و بیشترین و کمترین پراکندگی نتایج به ترتیب مربوط به تکیه‌گاه شماره ۲ و ۱ است.

جدول ۸. مقادیر شیب در نقطه عطف منحنی مخلوط‌های آسفالتی در تکیه‌گاه‌های مختلف بارگذاری

Table 8. The values of slope at the curve inflection point of asphalt mixtures at different loading supports

تکیه‌گاه - جابجایی	تکیه‌گاه شماره ۱	تکیه‌گاه شماره ۲	تکیه‌گاه شماره ۳	تکیه‌گاه شماره ۴	تکیه‌گاه شماره ۵
۱	۲/۵۶	۱/۵۳	۱/۶۹	۱/۴۷	۲/۱۸
۲	۳/۳۲	۱/۲	۲/۰۶	۱/۴۷	۳/۵۳
۳	۳/۱	۲/۲۷	۲/۴۳	۱/۱۶	۲/۲۹
میانگین	۲/۹۹	۱/۶۷	۲/۰۶	۱/۳۷	۲/۶۷
انحراف معیار	۰/۳۹	۰/۵۴	۰/۳۷	۰/۱۸	۰/۷۵
ضریب تغییرات	۱۳/۰۶	۳۲/۸۸	۱۷/۹۶	۱۳/۰۹	۲۸/۱۱

ترک خوردگی تمامی تکیه‌گاه‌ها تقریباً برابر می‌باشند. طبق نمودار با افزایش محدودیت آزادی تکیه‌گاه (ثابت کردن غلتک استوانه‌ای در تکیه‌گاه و اضافه کردن فنر به غلتک تکیه‌گاه) مقدار شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال تکیه‌گاه شماره ۲ و ۵ که در میان بقیه تکیه‌گاه‌ها بیشترین مقدار شاخص مقاومت را دارا می‌باشند، نسبت به تکیه‌گاه شماره ۱ که از دو غلتک آزاد بر روی سطح صاف تشکیل شده به ترتیب به اندازه ۶۰ و ۸۷ درصد افزایش شاخص مقاومت را به همراه دارند. با مقایسه شاخص مقاومت و شاخص انعطاف‌پذیری می‌توان مشاهده کرد که مقادیر ضریب تغییرات شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی دارای مقادیر کمتری از شاخص انعطاف‌پذیری می‌باشند که دلیل آن کمتر بودن ضریب پراکندگی حداکثر انرژی و حداکثر نیروی شکست نسبت به شیب نقطه عطف نمودار می‌باشد.

۵-۵- ضریب تغییرات مربوط به کلیه پارامترهای مکانیک شکست

به منظور بررسی مقدار پراکندگی و تکرارپذیری نتایج مختلف تکیه‌گاه‌ها، ضریب تغییرات مربوط به تمامی پارامترهای مکانیک شکست مورد بررسی در این تحقیق به طور خلاصه در جدول ۱۰ آورده شده است. مطابق جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که ضریب تغییرات پارامترهای  $P_{cr}$ ،  $FE$ ،  $FI$  و  $CRI$  به ترتیب در محدوده‌های ۱۰/۱۲-۶/۰۹ درصد، ۱۳/۴۵-۵/۱۲ درصد، ۱۰/۴۱-۳۲/۱۵ درصد و ۱۵/۹۵-۱/۶۱ درصد است. با مقایسه ضرایب تغییرات تمامی پارامترهای تکیه‌گاه‌ها دیده می‌شود که پارامتر  $P_{cr}$  کمترین

پارامتر دیگر شیب نقطه عطف منحنی (m) می‌باشد بنابراین این پارامتر نیز تأثیر بسزایی در مقدار شاخص انعطاف‌پذیری دارد که به طور خلاصه مقادیر این پارامتر در تکیه‌گاه‌های مختلف به کار گرفته شده در تحقیق در جدول ۸ آورده شده است. مطابق جدول ۸ با محدودیت آزادی تکیه‌گاه، مقدار شیب نقطه عطف منحنی کاهش پیدا می‌کند و همچنین استفاده از فنر تکیه‌گاه تأثیر آن را تشدید می‌کند به طوری که کمترین مقدار شیب نقطه عطف در تکیه‌گاه شماره ۴ به دست می‌آید. همچنین مطابق نتایج بیشترین ضرایب تغییرات مقدار شیب در دو تکیه‌گاه شماره ۲ و ۵ و کمترین در تکیه‌گاه شماره ۱ حاصل می‌شود. طبق نتایج شکل ۱۰ با محدودیت آزادی تکیه‌گاه مقدار شاخص انعطاف‌پذیری افزایش پیدا می‌کند به طوری که مطابق مطلب بیان شده بیشترین مقادیر شاخص (۹/۲۱ و ۷/۲۹) در دو تکیه‌گاه ثابت حاصل می‌شود. در این ارزیابی دو تکیه‌گاه شماره ۲ و ۱ نیز دارای بیشترین و کمترین ضریب تغییرات و پراکندگی شاخص انعطاف‌پذیری نمونه‌ها می‌باشند و مقادیر سایر تکیه‌گاه‌ها نیز در محدوده نسبتاً قابل قبولی قرار دارند.

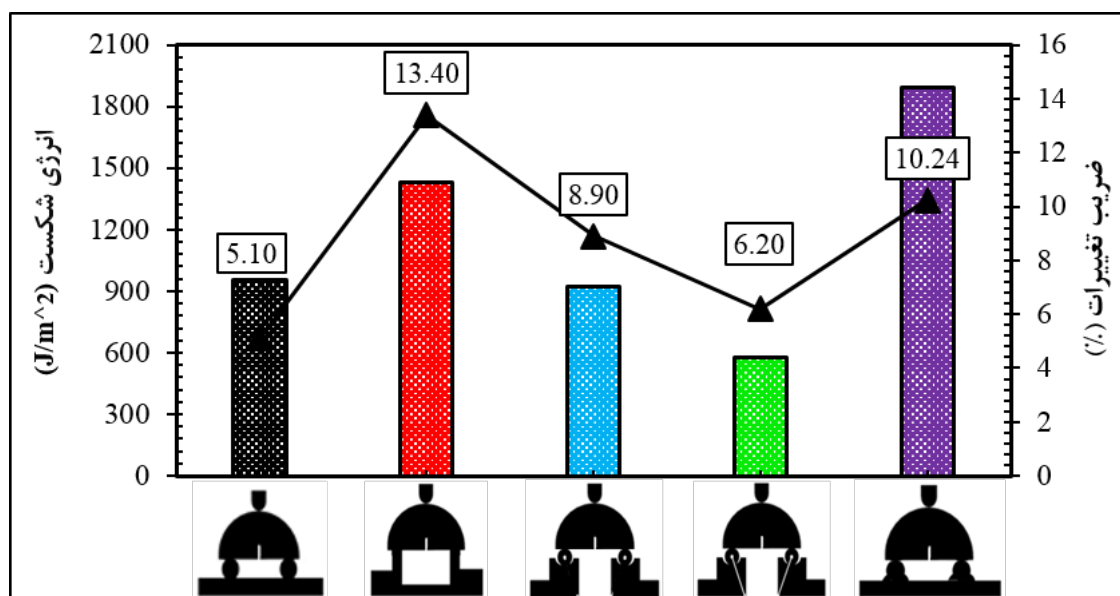
۵-۴- تأثیر تکیه‌گاه‌های مختلف نیرو-جابجایی بر نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی

مقادیر نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط در شکل ۱۱ و جدول ۹ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان دید روند شاخص مقاومت تقریباً همانند شاخص انعطاف‌پذیری می‌باشد و به جز دو تکیه‌گاه شماره ۲ و ۵ مقادیر نشانه مقاومت در برابر

جدول ۹. مقادیر شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوطهای آسفالتی در تکیه‌گاه‌های مختلف بارگذاری

Table 9. The cracking resistance index values of asphalt mixtures at different loading supports

تکیه‌گاه بار - جابجایی	تکیه‌گاه شماره ۱	تکیه‌گاه شماره ۲	تکیه‌گاه شماره ۳	تکیه‌گاه شماره ۴	تکیه‌گاه شماره ۵
۱	۵۴۷/۶	۱۰۳۲/۹۹	۶۳۵/۴۵	۵۶۹/۳۸	۱۱۶۳/۰۸
۲	۵۵۷/۵	۸۳۸	۵۴۱/۳۲	۵۷۸/۶۹	۸۹۳/۱۲
۳	۵۳۹/۸	۷۶۱/۶	۵۴۳/۹۹	۶۴۴/۴۴	۱۰۲۲/۷۲
میانگین	۵۴۸/۳	۸۷۷/۵	۵۷۳/۵۹	۵۹۷/۵۱	۱۰۲۶/۳۱
انحراف معیار	۸/۸۷	۱۳۹/۹	۵۳/۵۹	۴۰/۹۱	۱۳۵/۰۱
ضریب تغییرات	۱/۶۱	۱۵/۹۵	۹/۳۴	۶/۸۴	۱۳/۱۵



شکل ۱۱. تأثیر تکیه‌گاه‌های مختلف بار - جابجایی بر شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوطهای آسفالتی در دمای ۲۵ °C






Fig. 11. Effect of different load-displacement supports on cracking resistance index of asphalt mixtures at 25 °C

بوده و کمترین ضریب تغییرات را دارد و همچنین تکیه‌گاه شماره ۵ دارای بیشترین پراکندگی داده‌ها می‌باشد. بنابراین لازم به ذکر است در صورت شرایط یکسان بارگذاری و هندسی نمونه‌ها (نرخ بارگذاری آزمایش، ضخامت طول نمونه و اندازه ترک نمونه) همانند این پژوهش، توصیه می‌شود که از تکیه‌گاه شماره ۱ استفاده شود.

تأثیرپذیری از نوع تکیه‌گاه را داشته و دارای تکرارپذیری مناسبی نسبت به سایر پارامترها می‌باشد ولی از طرفی پارامتر FI متأثر از نوع تکیه‌گاه بوده و بیشترین پراکندگی داده‌ها را دارا می‌باشد. به منظور نتیجه‌گیری کلی در مورد نحوه عملکرد تأثیر نوع تکیه‌گاه با در نظر گرفتن میانگین ضریب تغییرات تمامی پارامترهای مورد بحث، مشاهده می‌شود که تکرارپذیری نتایج کلیه پارامترهای مورد بحث در تکیه‌گاه شماره ۱ مناسب‌تر از بقیه تکیه‌گاه‌ها

جدول ۱۰. مقدار ضریب تغییرات مربوط به پارامترهای مکانیک شکست

Table 10. The value of coefficient of variation related to the fracture mechanics parameters

پارامترها	ضریب تغییرات				
					
Pcr	۶/۰۹	۴/۸۷	۱۰/۱۲	۸/۶۲	۹/۷۶
FE	۵/۱۲	۱۳/۴۵	۸/۹	۶/۲	۱۰/۲۴
FI	۱۰/۴۱	۳۲/۱۵	۲۴/۹۸	۱۵/۲۴	۳۱/۹۲
CRI	۱/۶۱	۱۵/۹۵	۹/۳۴	۶/۸۵	۱۳/۱۶
میانگین	۵/۸۱	۱۶/۶	۱۳/۳۴	۹/۲۲	۱۶/۲۷

#### ۶- تحلیل آماری آنووا<sup>۱</sup>

مکانیک شکست در دمای متوسط و میزان تکرارپذیری نتایج آن‌ها با در نظر گرفتن مشخصات هندسی نمونه‌ها و نرخ بارگذاری مشخص مورد بررسی قرار گرفت که نتایج عمده به دست آمده شامل موارد زیر می‌باشد:

- شکل هندسی سطح تماس بین نمونه و تکیه‌گاه تأثیر جزئی بر روی پارامترهای مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی دارد، به عنوان مثال تکیه‌گاه شماره ۲ بر خلاف سایر تکیه‌گاه‌ها از جمله تکیه‌گاه شماره ۵ دارای سطح تماس انحنادار می‌باشد.
- انتخاب نوع تکیه‌گاه تأثیر مستقیم و مؤثری بر روی پارامترهای مکانیک شکست دارد و انتخاب تکیه‌گاه اشتباه ممکن است خطای قابل توجهی وارد نتایج آزمایش کند.
- استفاده از فنر با سختی مشخص در تکیه‌گاه غلتکی تأثیر بسزایی بر روی پارامترهای Pcr و FE دارد.

وجود اصطکاک در تکیه‌گاه‌ها تأثیر چشم‌گیری در نتایج پارامتر مکانیک شکست دارد و موجب وارد شدن خطا و پراکندگی نتایج می‌شود، به طوری که با افزایش محدودیت آزادی غلتش غلتک تکیه‌گاه‌ها مقدار پارامترها به اندازه قابل توجهی تغییر پیدا می‌کنند، به عنوان مثال تکیه‌گاه شماره ۲ و ۵ که دارای حالت صلب و ثابتی هستند نسبت به تکیه‌گاه شماره ۱ دارای بیشترین مقدار تمامی پارامترهای مکانیک شکست می‌باشند.

در تکیه‌گاه‌های صلب (تکیه‌گاه‌های ثابت ۲ و ۵) به دلیل وجود نیروی اصطکاک حداکثری بین نمونه و تکیه‌گاه، با اعمال بار، نمونه‌های

در این تحقیق در جهت بررسی تکرارپذیری آزمایش‌های انجام گرفته و بررسی تأثیرپذیری پارامترهای شکست از نوع تکیه‌گاه‌های مورد استفاده، از تحلیل آماری آنووا یک طرفه استفاده شده است که در جدول ۱۱ نتایج تحلیل آماری بر روی داده‌های آزمایش شکست و پارامترهای مورد بررسی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در همه پارامترهای بررسی شده مقدار فاکتور F از مقدار بحرانی بیشتر بوده و از طرفی مقدار P-value از مقدار ۰/۰۵ درصد کمتر بوده است. بنابراین می‌توان گفت که نوع تکیه‌گاه تأثیر زیادی بر پارامترهای مورد بررسی داشته و از لحاظ آماری و تکرارپذیری قابل توجه می‌باشد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

امروزه از آزمایش SCB به علت سادگی و انجام سریع آزمایش به عنوان ابزاری جهت کنترل کیفیت، بررسی رشد و گسترش ترک در مخلوط‌های آسفالتی در مؤسسات تحقیقاتی و دانشگاهی استفاده می‌شود. با وجود شرایط آزمایشگاهی یکسان آزمایش اعم از نرخ بارگذاری و دمای آزمایش، تکیه‌گاه‌های مورد استفاده در مؤسسات و آزمایشگاه‌ها متفاوت بوده و ممکن است تأثیر مستقیم بر روی نتایج آزمایش داشته باشد بنابراین این تحقیق با هدف بررسی تأثیر نوع تکیه‌گاه در پارامترهای به دست آمده از

1 ANOVA



جدول ۱۱. نتایج تحلیل آماری بر روی داده‌های آزمایش شکست و پارامترهای مورد بررسی

Table 11. The results of statistical analysis on the fracture test data and the studied parameters

پارامترها		مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	فاکتور F	P-value	فاکتور F بحرانی
P max	Between Groups	۱/۳۰۴۳۷۳	۴	۰/۳۲۶۰۹۳	۱۹/۵۷۳۴۳	۰/۰۰۰۱۰۱	۳/۴۷۸۰۵
	Within Groups	۰/۱۶۶۶	۱۰	۰/۱۶۶۶			
	Total	۱/۴۷۰۹۷۳	۱۴				
FE	Between Groups	۱/۳۰۴۳۷۳	۴	۰/۳۲۶۰۹۳	۱۹/۵۷۳۴۳	۰/۰۰۰۱۰۱	۳/۴۷۸۰۵
	Within Groups	۰/۱۶۶۶	۱۰	۰/۱۶۶۶			
	Total	۱/۴۷۰۹۷۳	۱۴				
FI	Between Groups	۱/۳۰۴۳۷۳	۴	۰/۳۲۶۰۹۳	۱۹/۵۷۳۴۳	۰/۰۰۰۱۰۱	۳/۴۷۸۰۵
	Within Groups	۰/۱۶۶۶	۱۰	۰/۱۶۶۶			
	Total	۱/۴۷۰۹۷۳	۱۴				
M	Between Groups	۱/۳۰۴۳۷۳	۴	۰/۳۲۶۰۹۳	۱۹/۵۷۳۴۳	۰/۰۰۰۱۰۱	۳/۴۷۸۰۵
	Within Groups	۰/۱۶۶۶	۱۰	۰/۱۶۶۶			
	Total	۱/۴۷۰۹۷۳	۱۴				
CRI	Between Groups	۱/۳۰۴۳۷۳	۴	۰/۳۲۶۰۹۳	۱۹/۵۷۳۴۳	۰/۰۰۰۱۰۱	۳/۴۷۸۰۵
	Within Groups	۰/۱۶۶۶	۱۰	۰/۱۶۶۶			
	Total	۱/۴۷۰۹۷۳	۱۴				

7) با در نظر گرفتن میانگین ضریب تغییرات تمامی پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، تکیه‌گاه غلتکی آزاد (شماره ۱) کمترین پراکندگی نتایج را داشته و نتایج نسبتاً دقیق‌تری را ارائه می‌دهد.

### منابع

- [1] A. Molenaar, A. Scarpas, X. Liu, S. Erkens, Semi-circular bending test; simple but useful?, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 71 (2002).
- [2] Z. Wu, L.N. Mohammad, L. Wang, M.A. Mull, Fracture resistance characterization of superpave mixtures using the semi-circular bending test, Journal of ASTM International, 2(3) (2005) 1-15.

آسفالتی قبل از شکست مقدار جابجایی بیشتری را تجربه کرده و سطح زیر نمودار بزرگ‌تری تشکیل می‌شود (مقدار انرژی لازم جهت شکست افزایش می‌یابد).

6) مقدار سختی ثابت فنر در یک تکیه‌گاه غلتکی (تکیه‌گاه شماره ۴) عامل تعیین کننده‌ای در بروز نوع عکس العمل تکیه‌گاه و است به طوری که با افزایش سختی فنر اصطکاک بین نمونه تکیه‌گاه افزایش یافته و رفتار تکیه‌گاه به سمت تکیه‌گاه ثابت خواهد بود و مانند تکیه‌گاه صلب عمل می‌کند (تکیه‌گاه ۴ به تکیه‌گاه ۵ تبدیل می‌شود) و با کاهش سختی فنر مقدار اصطکاک بین تکیه‌گاه و نمونه کاهش یافته و رفتار تکیه‌گاه به سمت تکیه‌گاه آزاد غلتکی با سطح انحنادار خواهد بود (تکیه‌گاه شماره ۴ به تکیه‌گاه شماره ۳ تبدیل می‌شود).

- Illinois Center for Transportation/Illinois Department of Transportation, 2015.
- [12] X.-J. Li, M. Marasteanu, Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete, *Experimental mechanics*, 50(7) (2010) 867-876.
- [13] G. Nsengiyumva, Development of semi-circular bending (SCB) fracture test for bituminous mixtures, (2015).
- [14] X. Chen, M. Solaimanian, Effect of Test Temperature and Displacement Rate on Semicircular Bend Test, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7) (2019) 04019104.
- [15] A. Yousefi, a. Nowruzi, Y. Yousefi, S. Sobhi, Evaluation of the effect of loading rate of Semicircular Bending test on different fracture mechanical parameters of asphalt mixtures at intermediate temperature (in Persian), *Journal of Transportation Research*, (2020) -.
- [16] B. Bahrami, M. Ayatollahi, A. Mirzaei, M.Y. Yahya, Support type influence on rock fracture toughness measurement using semi-circular bending specimen, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (2019) 1-9.
- [17] I. Sedighi, M.R. Ayatollahi, B. Bahrami, A statistical approach on the support type effect on mode I fracture toughness determined using semi-circular bend (SCB) specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 226 (2020) 106891.
- [18] S. Pirmohammad, M. Ayatollahi, Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions, *Construction and Building Materials*, 53 (2014) 235-242.
- [19] M. Aliha, H. Fazaeli, S. Aghajani, F.M. Nejad, Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 95 (2015) 545-555.
- [20] M. Mirsayar, A. Razmi, F. Berto, Tangential strain-based criteria for mixed-mode I/II fracture toughness of cement concrete, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(1) (2018) 129-137.
- [21] A. Yousefi, S. Pirmohammad, S. Sobhi, Fracture [3] M. Aliha, A. Bahmani, S. Akhondi, A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix asphalt composites—Experimental and theoretical study, *International Journal of Solids and Structures*, 90 (2016) 167-177.
- [4] S. Pirmohammad, S. Sobhi, a. yusefi, Study on the effect of reclaimed asphalt pavement and rejuvenator on fracture behavior of WMA (in Persian), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(10) (2021) 18-18.
- [5] M. Kuruppu, Y. Obara, M. Ayatollahi, K. Chong, T. Funatsu, ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1) (2014) 267-274.
- [6] M. Aliha, A. Bahmani, S. Akhondi, Mixed mode fracture toughness testing of PMMA with different three-point bend type specimens, *European Journal of Mechanics-A/ Solids*, 58 (2016) 148-162.
- [7] G. Nsengiyumva, T. You, Y.-R. Kim, Experimental-statistical investigation of testing variables of a semicircular bending (SCB) fracture test repeatability for bituminous mixtures, *Journal of Testing and Evaluation*, 45(5) (2017) 1691-1701.
- [8] S. Pirmohammad, Y. Majd-Shokorlou, B. Amani, Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and carbon nanotubes, *Road Materials and Pavement Design*, (2019) 1-23.
- [9] A. Zofka, A. Braham, Comparison of low-temperature field performance and laboratory testing of 10 test sections in the Midwestern United States, *Transportation research record*, 2127(1) (2009) 107-114.
- [10] S. Im, H. Ban, Y.-R. Kim, Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry, *Construction and Building Materials*, 52 (2014) 413-421.
- [11] I.L. Al-Qadi, H. Ozer, J. Lambros, A. El Khatib, P. Singhvi, T. Khan, J. Rivera-Perez, B. Doll, Testing protocols to ensure performance of high asphalt binder replacement mixes using RAP and RAS, 0197-9191,

- dissipation evolution process and characteristics of marble in three tension-type failure tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(11) (2018) 3613-3624.
- [28] D.X. Lu, N.H. Nguyen, M. Saleh, H.H. Bui, Experimental and numerical investigations of non-standardised semi-circular bending test for asphalt concrete mixtures, *International Journal of Pavement Engineering*, (2019) 1-13.
- [29] M.A. Elseifi, L.N. Mohammad, H. Ying, S. Cooper III, 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) (2012) 124-139.
- [30] F.T.S. Aragão, D.A. Hartmann, Y.-R. Kim, L.M.G. Da Motta, M. Haft-Javaherian, Numerical-experimental approach to characterize fracture properties of asphalt mixtures at low temperatures, *Transportation Research Record*, 2447(1) (2014) 42-50.
- [31] H. Ozer, I.L. Al-Qadi, P. Singhvi, T. Khan, J. Rivera-Perez, A. El-Khatib, Fracture characterization of asphalt mixtures with high recycled content using Illinois semicircular bending test method and flexibility index, *Transportation Research Record*, 2575(1) (2016) 130-137.
- [32] F. Kaseer, F. Yin, E. Arámbula-Mercado, A.E. Martin, J.S. Daniel, S. Salari, Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 286-298.
- Toughness of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement, *Journal of Stress Analysis*, 5(1) (2020) 85-98.
- [22] X. Li, X. Zheng, W. Yuan, X. Cui, Y. Xie, Y. Wang, Instability of cracks initiation from a mixed-mode crack tip with iso-stress intensity factors KI and KII, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 96 (2018) 262-271.
- [23] H. Ozer, I.L. Al-Qadi, J. Lambros, A. El-Khatib, P. Singhvi, B. Doll, Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters, *Construction and Building Materials*, 115 (2016) 390-401.
- [24] W. Song, B. Huang, X. Shu, Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement, *Journal of Cleaner Production*, 192 (2018) 191-198.
- [25] J. Yang, H. Lian, W. Liang, V.P. Nguyen, Y. Chen, Experimental investigation of the effects of supercritical carbon dioxide on fracture toughness of bituminous coals, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 107 (2018) 233-242.
- [26] M.-D. Wei, F. Dai, N.-W. Xu, J.-F. Liu, Y. Xu, Experimental and numerical study on the cracked chevron notched semi-circular bend method for characterizing the mode I fracture toughness of rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5) (2016) 1595-1609.
- [27] F.-q. Gong, S. Luo, J.-y. Yan, Energy storage and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Mirhashemi, S. Sobhi, P. Ayar, A. A. Yousefi, *The Effects of SCB test support configurations on different fracture mechanic parameters in asphalt mixtures*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 2441-2460.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19356.7146



