

بررسی و ارزیابی تأثیر افزودنی بنتونیت بر خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی گرم

علیرضا عاملی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
رضوان باباگلی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، تهران، ایران
محمد کاشانی نوین، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amelii@gmail.com

دریافت: 1395/09/09 - پذیرش: 1396/02/15

چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی و ارزیابی تأثیرات بنتونیت بر خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی گرم است. برنامه آزمایشگاهی این تحقیق شامل استفاده از پنج درصد افزودنی بنتونیت (10٪، 15٪، 20٪، 25٪ و 30٪ وزنی قیر) برای اصلاح قیر خالص بوده است. آزمایشهای مختلفی از جمله: مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خستگی انجام شده است. آزمایش خستگی براساس تست تیر خمشی چهار نقطه‌ای با سطح کرنش ثابت در سه سطح 600، 800 و 1000 میکرو کرنش با بارگذاری سینوسی انجام شد. عمر خستگی نمونه‌ها براساس کاهش پنجاه درصدی در مدول سختی اولیه ارزیابی شد. نتایج نشان داد، عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با بنتونیت بیشتر از مخلوطهای آسفالتی معمولی میباشد. همچنین، بنتونیت منجر به افزایش نسبی مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول سختی مخلوطهای آسفالتی گردید. سرانجام، براساس نتایج آزمایشگاهی و با استفاده از رگرسیون خطی لگاریتمی نتایج، مدلی جهت توصیف رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی شامل قیر اصلاح شده بنتونیتی با رویکرد پدیده شناختی تجربی پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: بنتونیت، عمر خستگی، آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای، کشش غیر مستقیم، انرژی شکست

1- مقدمه

چگونگی افزایش عمر آسفالت در اثر تکرار بارگذاری ترافیک انجام شده است [Xiao, Zhao, Amirkhanian, 2009; Daniel and Kim, 2001; Taherkhani and Ebrahimi moghadam, 2012]. امروزه مواد افزودنی مختلفی از جمله معدنی، آلی، طبیعی و صنعتی جهت افزایش عمر مخلوطهای آسفالتی از طریق پیشگیری یا ایجاد وقفه در ایجاد ترک در روسازیهای آسفالتی، کاهش تغییر شکل های دایمی، روزدگی قیر و همچنین کاهش سختی آسفالت بعلت پیرشدگی قیر، بدون تأثیر منفی بر پارامترهای عملکردی مختلف مخلوط آسفالتی استفاده می شود [Al-Hadidy and Yi-qiu, 2009; Ahmadinia, 2011]. با این حال، با در نظر گرفتن شرایط جغرافیایی یک منطقه و

ترک خستگی، یک ترک ناشی از بار است که در اثر تکرار بار ترافیکی ایجاد می‌شود. این نوع از ترک یکی از مهم‌ترین نوع خرابی در روسازیهای انعطاف‌پذیر می باشد. عمر خستگی مخلوط آسفالتی به طور مستقیم به بسیاری از خصوصیات مهندسی مخلوط آسفالتی بستگی دارد. ریز ساختار پیچیده مخلوط آسفالتی به دانه‌بندی مصالح سنگی، خصوصیات برهم کنشی قیر-مصالح سنگی، توزیع فضای خالی و ارتباط بین فضاهای خالی بستگی دارد. در نتیجه، خستگی مخلوطهای آسفالتی بسیار پیچیده و بعضی اوقات غیر قابل پیش‌بینی میباشد. [Xiao and Zhao and Amirkhanian, 2009; You and Buttlar, 2004; Wang, et.al, 2004]. مطالعات متعددی جهت درک چگونگی ایجاد ترک و

امکانات و شرایط مختلف موجود در یک کشور، انتخاب افزودنی مناسب از یک کشور به کشور دیگر متفاوت است.

2-پیشینه تحقیق

در مطالعات متعدد انجام شده، مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی [Ozen, 2011; Khodaii and Mehrara, 2009]، خستگی [Birliker, 2011] و حساسیت رطوبتی [Gorkem and Sengoz, 2009; Yilmaz and Kok, 2009] بعد از استفاده از قیر اصلاح شده پلیمری افزایش یافته است.

بسیاری از تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی نشان داده است که استفاده از مخلوطهای آسفالتی حاوی پودر لاستیک، در حالت کلی، سبب افزایش دوام و کاهش ترکهای انعکاسی، عمر خستگی، مقاومت لغزشی و مقاومت در برابر تغییر شکلهای دائمی روکشهای آسفالتی می شود [Rubber Manufacturers Association, 2006; Hicks, 1995]

در تحقیقی که توسط خدایی انجام شده است، تأثیر دو نوع نانورس نانوفیل و کلویسیت cloisite-15A را بر خصوصیات رئولوژیکی قیر بررسی نموده است. هنگامی که قیر با مقدار کمی از نانورس اصلاح شده، خواص فیزیکی آن درشرایطی که خاک رس در سطح بسیار ریزی پراکنده شده، به خوبی افزایش یافته است. نتایج نشان داده که اصلاح کردن قیر با نانورس باعث افزایش سختی و مقاومت پیرشدگی قیر شده است. اضافه کردن درصد کمی نانورس به قیر، منجر به بهبود خصوصیات رئولوژیکی، کاهش درجه نفوذ و شکل پذیری و افزایش نقطه نرمی و مقاومت پیرشدگی قیر شده است. همچنین نتایج آزمایش برش دینامیکی نشان داد، مدول کل برشی (G^*) با کاهش دما یا افزایش فرکانس افزایش یافته است. درحالیکه زاویه فاز (δ) با افزایش دما یا کاهش فرکانس افزایش می یابد.

[Jahromi and Khodaii, 2009]

قیل، تأثیر نانورس کلویسیت بر روی عملکرد مخلوطهای آسفالتی با انجام آزمایشهای مکانیکی مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج نشان داده است که نانورس سبب بهبود خصوصیات مخلوط از جمله مقاومت کششی غیر مستقیم، خزش و مقاومت خستگی شده است [Ghile, 2005].

در دهه های اخیر، بتونیت و بتونیت اصلاح شده آلی به عنوان مسلح کننده در مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته اند. در مطالعات گذشته، تعداد وسیعی از آزمایشات بر

روی قیر انجام شده و تغییرات نقطه نرمی، ویسکوزیته و شکل پذیری به صورت تابعی از درصد رس و نوع رس گزارش شده است. نتایج آزمایش رثومتر تیرچه خمشی برای نمونه های پیرشده تحت آزمایش RTFO و PAV نشان داده است که اصلاح قیر با بتونیت و بتونیت آلی اصلاح شده، سبب بهبود خصوصیات دمای پایین قیر و بهبود قابل توجه در مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط آسفالتی می گردد [Zare Shahabadi et.al, 2010]

یکی از ساده ترین مدل های خستگی، عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی بر اساس سطح کرنش ثابت و سطح تنش ثابت را پیش بینی می نماید. معادله های 1 و 2 به ترتیب ساده ترین مدل های خستگی برای سطح کرنش ثابت و سطح تنش ثابت را نشان می دهند. این نوع از مدل خستگی تأثیرات دما، مدول و فرکانس بارگذاری را بر روی مخلوط آسفالتی گرم در نظر نمی گیرد. رابطه بین عمر خستگی و سطح تنش-کرنش در پروژه SHRP برای بازه هایی از تنش و کرنش، به طور مداوم مورد تأیید واقع شده است [Adhikari, Shen and You, 2009; Khavandi and Ameri, 2013]

$$N_f = a \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^b \quad (1)$$

$$N_f = a \left(\frac{1}{\sigma} \right)^b \quad (2)$$

که،

ϵ = کرنش کششی در انتهای نمونه، (in./in.)

σ = تنش کششی اعمالی (psi) و

a, b = ضرایب تعیین شده تجربی

علاوه بر مدل های ساده 1 و 2، مدل های خستگی دیگری از جمله انستیتو آسفالت و مدل شل نیز وجود دارند که توسط آژانس های مختلف استفاده می شوند یا بر پایه ملاحظات مختلف می باشند.

مهم ترین نقش این مدلها ایجاد یک رابطه بین خصوصیات مخلوط آسفالتی، پاسخ روسازی و تکرار بار تا رسیدن به شکست می باشد. پارامترهای این مدلها اساساً بر پایه توالی بار پیوسته و ضرایب توسط رگرسیون تجربی داده ها تعیین می شوند. معادلات 3 و 4 به ترتیب، مدل انیستیتو آسفالت و شل را نشان می دهند.

$$N_f = 0.0796(\epsilon_t)^{-3.291} (E_t)^{-0.854} \quad (3)$$

$$N_f = 0.0685(\varepsilon_t)^{-5.671} (E_1)^{-2.363} \quad (4)$$

که E_1 مدول سختی اولیه مخلوط آسفالتی (psi)

مونیسیت و همکاران، مدلی جهت پیش بینی عمر خستگی معرفی نمودند که در آن از مدول سختی اولیه و کرنش کششی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. معادله 5 مدل پیش بینی عمر خستگی ارائه شده توسط مونیسیت را نشان می‌دهد. [Santiago, et.al, 2007; Ziari and Shadman, 2013] و [Monismith, Epps and Finn, 1985]

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad (5)$$

که، k_1, k_2, k_3 = ضرایب تعیین شده تجربی E = مدول اولیه مخلوط آسفالتی (psi)

در این تحقیق، از افزودنی بتونیت جهت اصلاح قیر استفاده شده است. بتونیت نوعی سنگ رسوبی با نسبت زیاد ماده معدنی خاک رس و ساختار لایه لایه 2:1 و با غلظت زیاد یونهای سدیم می‌باشد. [Santiago et al, 2007]. در واقع، بتونیت نوعی خاک رس با مقدار مونتوریلونیت زیاد در ساختار خود می‌باشد. [Utracki, 2004]

ایران در نقطه‌ای از جهان واقع است که منابع متعددی از بتونیت موجود می‌باشد. با در نظر گرفتن قیمت کم بتونیت در مقابل دیگر افزودنی‌های موجود و منابع متعدد بتونیت در ایران، ارزیابی قیر اصلاح شده با بتونیت از دلایل اصلی این تحقیق می‌باشد.

3-اهداف تحقیق

هدف از این تحقیق، مطالعه خصوصیات و رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با قیر اصلاح شده بتونیتی از

طریق آزمایش‌های مختلف می‌باشد. آزمایشات مختلفی برای ارزیابی خصوصیات مهندسی مخلوط آسفالتی از جمله: مدول برجهنگی، مقاومت کششی غیر مستقیم و عمر خستگی با استفاده از آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای انجام شده است. سرانجام، براساس نتایج آزمایشگاهی و با استفاده از رگرسیون خطی لگاریتمی نتایج، مدلی جهت توصیف رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی شامل قیر اصلاح شده بتونیتی با رویکرد پدیده شناختی تجربی پیشنهاد گردیده است.

4-روش تحقیق

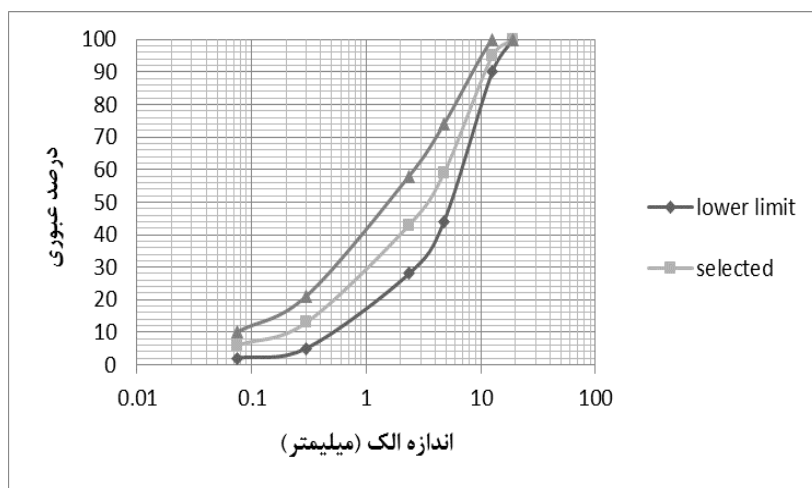
روش انجام تحقیق شامل انتخاب مصالح، ساخت نمونه‌های قیر با درصد‌های مختلف افزودنی، ساخت نمونه‌های آسفالت با درصد‌های مختلف افزودنی و در نهایت انجام آزمایش‌های مدول برجهنگی، کشش غیرمستقیم و خستگی بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی می‌باشد.

4-1- مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش از سنگ شکسته کوهی معدن اسب چران رودهن با دانه‌بندی شماره 4 آیین‌نامه روسازی آسفالتی و همچنین 5 درصد فیلر پودرسنگ استفاده شده است. دانه‌بندی مورد استفاده در شکل 1 نشان داده شده است. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول 1 آمده است. قیر بکارگرفته شده در این پژوهش از نوع قیرخالص 60/70 بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده است و مشخصات فیزیکی آن در جدول 2 آمده است.

جدول 1. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

| استانداردآزمایش | | حدود مجازطبق نشریه 234 | | نتایج آزمایش | شرح |
|-----------------|--------|------------------------|------|-----------------|---|
| ASTM | AASHTO | رویه | آستر | | |
| - | T96 | 30 | 40 | 22/3 | حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد) |
| - | - | 25 | 30 | 9 | حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد) |
| D5821 | - | 90 | 80 | 94 | حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره 4 |
| - | T85 | 2/5 | 2/5 | 2/2 | حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه) |
| - | T84 | 2/5 | 2/8 | 2/4 | حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه) |



شکل 1. دانه بندی مصالح سنگی

جدول 2. مشخصات فیزیکی قیر

| نوع آزمایش | استاندارد | نتیجه آزمایش |
|---------------------------|------------|--------------------------|
| نقطه نرمی | ASTM D36 | 47 درجه سانتیگراد |
| درجه نفوذ در دمای 25 درجه | ASTM D 5 | 67 دسی میلیمتر |
| درجه اشتعال | ASTM D96 | 304 درجه سانتیگراد |
| شکل پذیری در دمای 25 | ASTM D 113 | بیش از 100 سانتیمتر |
| چگالی | ASTM D 70 | 1,045 gr/cm ³ |
| افت حرارتی | ASTM D 6 | 0/05 درصد |
| قابلیت حل | ASTM D 4 | 99/5 درصد |

4-2- افزودنی

افزودنی به کار رفته

بتونیت سدیم دار¹ می باشد که مشخصات فیزیکی و هندسی آن در جداول 3 و 4 آمده است. 5 درصد از افزودنی بتونیت بنام های 10٪، 15٪، 20٪، 25٪ و 30٪ نسبت به وزن قیر استفاده شده است. قیر اصلاح شده با مخلوط کن با برش بالا مخلوط

گردیده است. ابتدا قیر خالص به مدت نیم ساعت در دمای 140 درجه سانتیگراد گرم گردیده و سپس بتونیت به آن اضافه شده و به مدت 15 دقیقه در دمای 140 درجه سانتیگراد با سرعت 4000 دور در دقیقه مخلوط شده اند. در شکل 2 دانه بندی بتونیت مورد استفاده آورده شده است [Zare -Shahabadi, Shokuhfar and Ebrahimi Nejad, 2010]

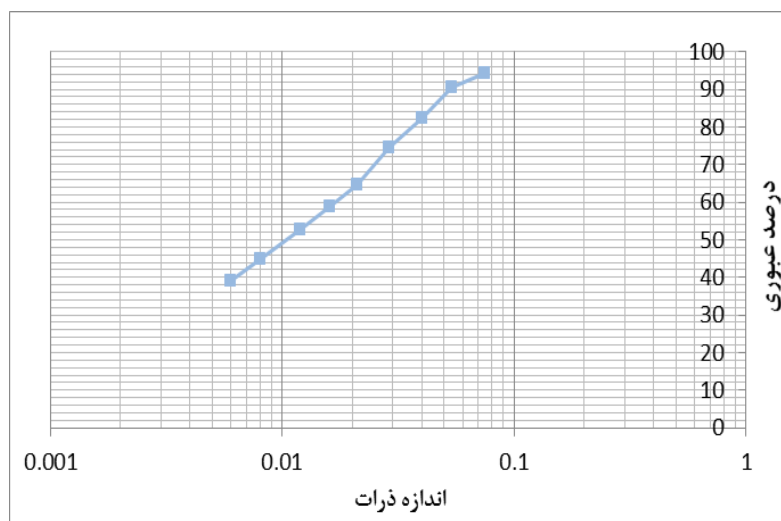
جدول 3. مشخصات فیزیکی و هندسی بتونیت

| نوع آزمایش | استاندارد | مقادیر اندازه گیری شده |
|-------------|------------|------------------------|
| وزن مخصوص | ASTM C168 | 2/5 gr/cm ³ |
| درصد رطوبت | ASTM D2216 | 6-10 % |
| وزن مولکولی | ** | 100/1 gr |
| نقطه جوش | ** | - |
| نقطه ذوب | ** | 1430 درجه سانتیگراد |
| نوع کریستال | ** | کریستالی لایه لایه |
| رنگ | ** | جامد کرم |
| جذب آب | ** | 600 % |

** بر اساس اطلاعات شرکت درین کاشان

جدول 4. خصوصیات شیمیایی بتونیت

| اجزاء تشکیل دهنده | بتونیت |
|-------------------|--------|
| SiO_2 | 70/06 |
| Al_2O_3 | 14/22 |
| Fe_2O_3 | 3/04 |
| Na_2O | 2/17 |
| K_2O | 0/39 |
| MgO | 2/4 |
| CaO | 1/68 |
| LoI | 5/32 |



شکل 2. دانه‌بندی بتونیت

4-3- روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

پایداری³ و روانی⁴ (نشریه 234) بر روی آنها انجام پذیرفت و نتایج با نمونه‌های شاهد مقایسه شده است [Ziari et al, 2012]. زمانی که افزودنی‌های مذکور به قیر اضافه می‌شود، خصوصیات قیر از جمله درجه نفوذ، درجه نرمی و شکل پذیری تغییر می‌کند و این خصوصیات اثر مستقیمی بر خواص مخلوطهای آسفالتی دارد. برای ارزیابی تاثیر افزودنی‌ها بر خواص مخلوطهای آسفالتی گرم، مدول برجهنگی، کشش غیر مستقیم و خستگی بر روی انواع مخلوطهای ساخته شده انجام شده است.

برای تراکم نمونه‌های تیر خستگی در این تحقیق از دستگاه ساخته شده در مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده گردیده است. این دستگاه بر اساس استاندارد تراکم مالشی خطی دپارتمان کلورادو ساخته

در این پژوهش برای تهیه درصد قیر بهینه ابتدا 18 نمونه مخلوط آسفالتی با درصدهای 4/، 5/، 5/5، 6/، 6/5 و 6/ با قیر بدون افزودنی ساخته شده است و پس از انجام آزمایشهای مارشال، درصد قیر بهینه مشخص گردیده است. برای تهیه نمونه‌های حاوی افزودنی، ابتدا مصالح سنگی تا دمای 170 درجه سانتیگراد گرم و قیرهای با درصدهای مختلف بتونیت شامل 10، 15، 20، 25 و 30 درصد تا دمای 140 درجه سانتیگراد گرم شده اند و به ازای هر درصد 3 نمونه تهیه شده است. سپس مخلوط حاصل تحت روش تراکم مارشال با ضربه متراکم گردیده است. سپس نمونه‌ها به مدت 2 ساعت،

در دمای آزمایشگاه قرارداد شده تا سرد شوند. پس از سرد شدن نمونه‌ها از قالب خارج شده و آزمایش‌های چگالی²،

شده است.

دال توسط این دستگاه در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است. در این تحقیق، برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تحت کرنش ثابت انجام شده است. تمامی نمونه‌ها با 4 درصد فضای خالی در درصد قیر بهینه ساخته شده است. برای جلوگیری از ایجاد درصد فضای زیاد در سطح نمونه، 10 میلیمتر از تمامی وجوه نمونه بریده شده است. سپس نمونه‌ها برای رسیدن به ابعاد مورد نیاز برای آزمایش خستگی با استفاده از برش آب خنک مطابق ابعاد استاندارد AASHTO-T321 (50×63.5×380 میلیمتر) برش داده می‌شوند.

[Colorado Department of Transportation, 2009].

برای ساخت هر دال از 9 عدد مصالح سنگی 1200 گرمی مورد نیاز برای ساخت نمونه مارشال، استفاده شده است. ابتدا هر کدام از این نمونه‌های 1200 گرمی با مقدار قیر بهینه و برای نمونه‌های آسفالت گرم با مقدار مشخص افزودنی به همراه قیر مخلوط گردیده‌اند. قالب تراکم نیز به همراه مخلوط در این دما داخل اون گرم شده است. سپس مخلوط به داخل قالب ریخته و تراکم بر روی نمونه‌ها با دستگاه مورد نظر انجام گرفته است. متوسط زمان تراکم برای نمونه‌ها حدود 15 دقیقه می‌باشد. بعد از مدت زمان برای خنک شدن نمونه‌ها، نمونه‌ها از داخل قالب‌ها جدا گردیده‌اند. نمایی از نحوه ساخت و تراکم



شکل 3. نمایی از نحوه ساخت و تراکم دال



شکل 4. نمایی از نحوه برش دال

5- روش کار آزمایش

1-5 آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، همانطور که در

شکل 5 مشاهده می‌شود، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین

نمونه (mm^3) ، δ تغییر شکل می باشد.

5-2- مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط های سخت تر در دماهای پایین تر بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می باشند. برای تعیین مدول برجهندگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شده است. ابتدا نمونه ها به مدت 24 ساعت در محفظه دستگاه در دمای $25^{\circ}C$ قرار داده شده اند. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار $0/1$ ثانیه، زمان استراحت $0/9$ ثانیه و ضریب پواسون $0/35$ فرض گردیده است. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، 3 نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه 5 پالس تکرار شده است و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شده است. مدول برجهندگی براساس معادله زیر محاسبه می گردد:

$$M_r = \frac{p(\rho + 0.2734)}{\delta t} \quad (8)$$

M_r = مدول برجهندگی (مگا پاسکال)

P = بار تکراری (نیوتن)

V = نسبت پواسن

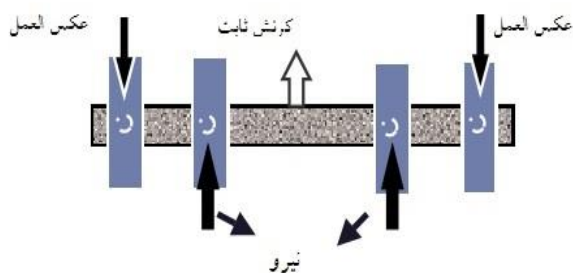
t = ضخامت نمونه (میلی متر)

H = تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی متر)

V = تغییر شکل قائم برگشت پذیر (میلی متر)

5-3- آزمایش تیر خمشی چهار نقطه ای خستگی

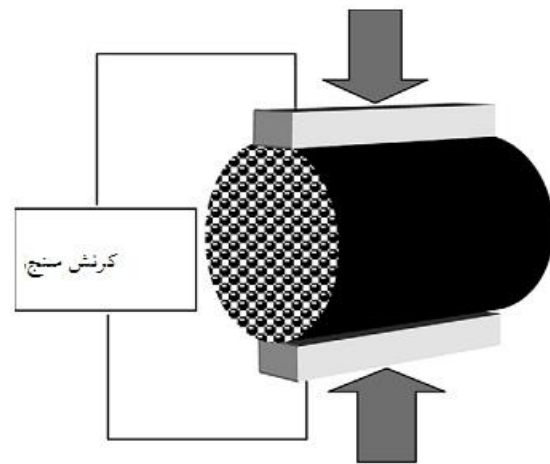
مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه ای براساس آیین نامه AASHTO T321-07 ارزیابی شده است. هدف از این آزمایش تعیین عمر خستگی تیرها در سطوح کرنش مختلف می باشد. تنظیمات و طرح آزمایش تیر خمشی چهار نقطه ای در شکل 6 نشان داده شده است.



مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی و پیش بینی ظهور ترک ها در مخلوط آسفالتی استفاده می شود. همچنین می توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیر مستقیم بر اساس آیین نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت $50/8$ میلیمتر بر دقیقه و دمای 20 درجه سانتیگراد انجام شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها با استفاده از معادله زیر تعیین شده است:

$$ITS = (2P_{max}) / (\pi D t) \quad (6)$$

که ITS: مقاومت کششی نمونه ها بر حسب Kpa ، P_{max} بار اعمالی در زمان شکست بر حسب kN ، D قطر نمونه ها بر حسب میلیمتر، t ارتفاع نمونه ها بر اساس میلیمتر می باشد.



شکل 5. شکل شماتیک دستگاه کشش غیر مستقیم

[Xiaoming, et.al, 2008]

انرژی شکست و مقاومت کششی به عنوان دو پارامتر به طور همزمان برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط های آسفالتی مورد استفاده قرار می گیرد [Khodary Moalla Hamed, 2010]. [2010 انرژی شکست به عنوان کار انجام شده جهت ایجاد یک ترک که برابر است با سطح زیر منحنی بار-تغییر شکل شکست نمونه تعریف می گردد. برای محاسبه چگالی انرژی شکست از آزمایش کشش غیر مستقیم، انرژی شکست بر حجم مخلوط تقسیم می گردد. چگالی انرژی شکست براساس معادله زیر محاسبه می گردد [Roque et.al, 2002]:

$$FE = \frac{\int_0^{\delta_{max}} P(\delta) d\delta}{V} \quad (7)$$

که FE چگالی انرژی شکست (MPa)، P بار، (N)، V حجم

خود برسد، ادامه می‌یابد. بعد از آزمایش عمر خستگی تیرها، عمر خستگی مخلوط با معادله زیر محاسبه گردیده است: [Arabani and Mirabdolazimi, 2011]

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (12)$$

که N_f تعداد سیکل بارگذاری تا خستگی، ε دامنه کرنش مورد استفاده در آزمایش خستگی، a و b ضرایب ثابت می‌باشند.

انرژی تلف شده در هر سیکل بارگذاری و انرژی تلف شده تجمعی به ترتیب با استفاده از معادله های (13) و (14) محاسبه می‌شوند:

$$D = \pi \sigma \varepsilon \sin(360f \varphi) \quad (13)$$

که D انرژی تلف شده (J/m^3)، f فرکانس بارگذاری (هرتز)، φ تأخیر زمانی (ثانیه) می‌باشد.

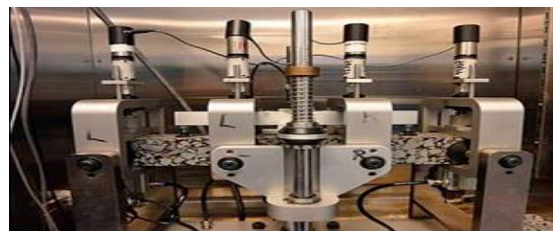
$$W = \sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad (14)$$

که W انرژی شکست تجمعی (J/m^3)، D_i انرژی شکست سیکل i ام.

6- نتیجه گیری

6-1- آزمایش مدول برجهندگی

شکل 7 تغییرات مدول برجهندگی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با درصدهای مختلف بنتونیت (10٪، 15٪، 20٪، 25٪ و 30٪ وزنی قیر) را نشان می‌دهد. مدول برجهندگی در دماهای پایین تا حدودی مرتبط با ترکهای حرارتی می‌باشد. مخلوطهای سخت‌تر در دماهای پایین‌تر بیشتر مستعد ایجاد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. [Ziari et.al, 2013]. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌های دارای افزودنی در قیاس با نمونه بدون افزودنی، مدول برجهندگی بیشتری دارند، که این امر به دلیل افزایش سفتی قیر و در نتیجه



شکل 6. تنظیمات و طرح آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای

آزمایش خستگی می‌تواند هم در شرایط تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شود. در حالت تنش ثابت، شکست نمونه بلافاصله بعد از شروع ترک تعریف می‌شود. در حالت کرنش ثابت، شکست نمونه زمانی که مدول سختی آن به نصف مدول اولیه آن می‌رسد، تعریف می‌گردد. این معیار بر اساس آیین نامه [AASHTO, AASHTO-T321 استفاده شده است. 2004].

تمامی نمونه‌ها در سطح کرنش ثابت 600، 800 و 1000 میکرو استرین با بارگذاری سینوسی مورد آزمایش قرار گرفته اند. آزمایش در دمای ثابت 20 درجه سانتیگراد انجام شده است. نمونه‌ها به مدت 2 ساعت قبل از آزمایش در دمای 20 درجه سانتیگراد قرار گرفته اند تا به دمای مذکور برسند. فرکانس بارگذاری 10 هرتز می‌باشد. [AASHTO, 2004]. مدول سختی براساس نیرو و جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بعد از 50 سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شده است [Quantao Liu et al, 2012], [Moddares and Hamedi, 2013]

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (9)$$

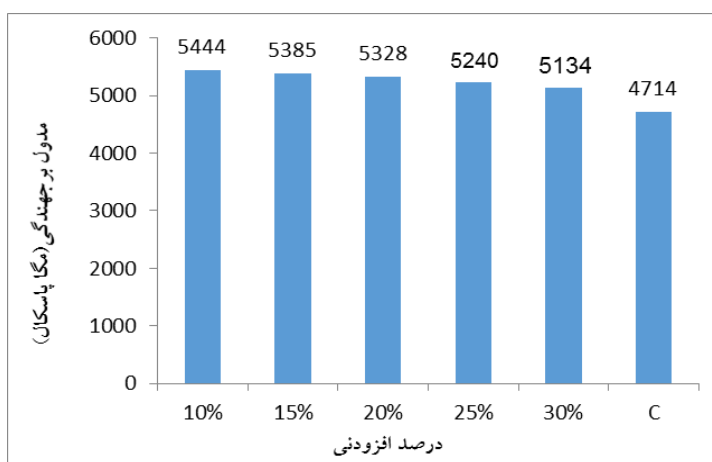
$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (10)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (11)$$

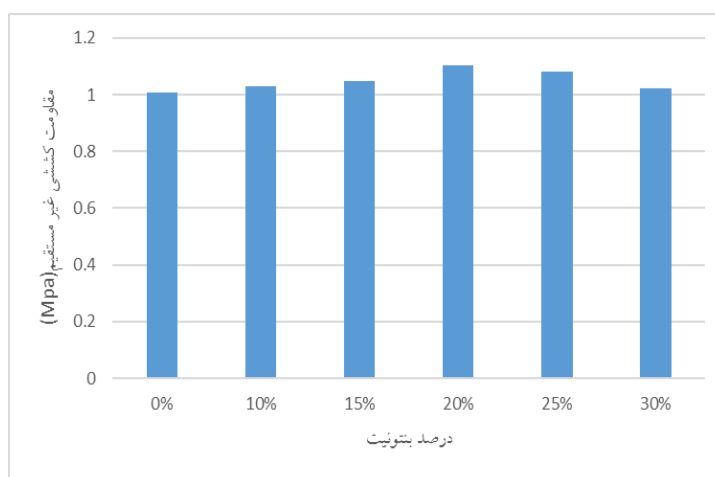
که ε حداکثر کرنش اعمال شده بر تیر، δ تغییر شکل ماکزیمم در وسط تیر (میلیمتر)، G_0 طول خارجی گیج (355/5 میلیمتر)، G_1 طول داخلی گیج (118/5 میلیمتر)، σ حداکثر تنش کششی (کیلوپاسکال)، P حداکثر نیرو (کیلو نیوتن)، B میانگین عرض تیر (میلیمتر)، S مدول سختی تیر (مگاپاسکال).

آزمایش خستگی تا زمانی که مدول سختی به نصف مقدار اولیه

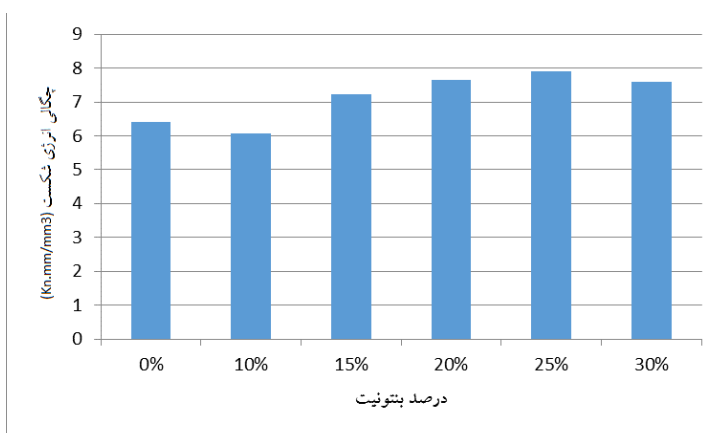
سختی آسفالت در حضور افزودنی ها می باشد.



شکل 7. نمودار مدول برجهنگی نمونه های حاوی افزودنی و خالص



شکل 8. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم



شکل 9. چگالی انرژی شکست نمونه ها

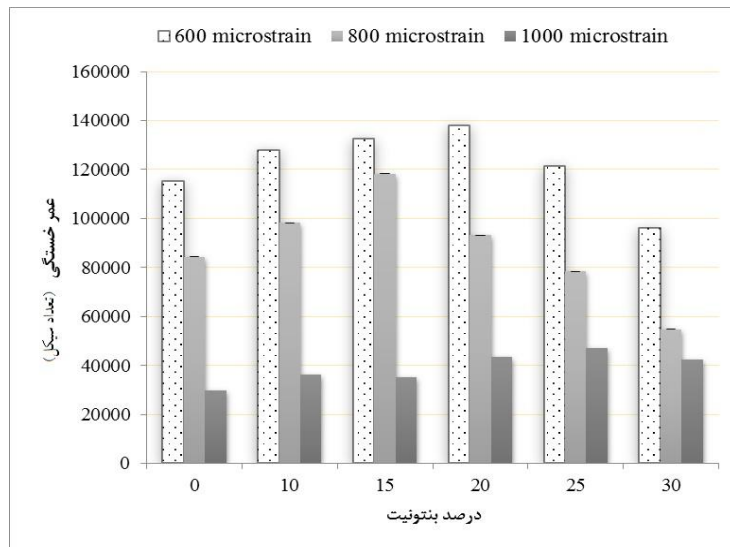
6-2- مقاومت کششی غیرمستقیم

میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خالص و حاوی افزودنی در شکل 8 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر حاصل از میانگین سه نمونه می‌باشد. با توجه به شکل‌های 8 و 9، اضافه نمودن بتونیت سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم و چگالی انرژی شکست مخلوط‌ها می‌گردد. از آنجایی که انرژی شکست، مجموع انرژی الاستیک و انرژی کرنشی خزشی تلف شده می‌باشد، اضافه نمودن بتونیت به مقدار مشخص (20٪) منجر به افزایش انرژی الاستیک و انرژی کرنشی خزشی تلف شده می‌گردد. در حالیکه اصلاح نمودن قیر با بیش از 20٪ بتونیت منجر به کاهش سهم انرژی الاستیک شده است و افزایش قابل توجهی در انرژی تلف‌شده کل مخلوط ندارد. همچنین، اصلاح قیر با مقادیر بیشتر (30٪) منجر به کاهش چگالی انرژی شکست مخلوط می‌گردد.

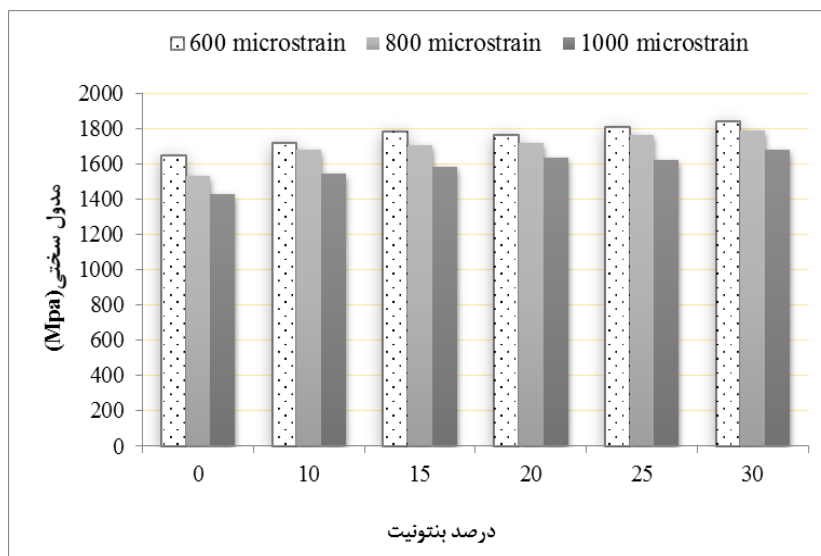
از طرفی، با افزودن بتونیت تا مقدار 20٪ وزنی قیر، بتونیت سبب افزایش مقدار سختی قیر شده (Ziari, 2012) و در نتیجه مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش می‌یابد. در درصد‌های بیشتر از 20٪، بتونیت سبب افزایش ویسکوزیته قیر شده و پوشش قیر بر سنگدانه‌ها سخت‌تر می‌گردد و در نتیجه مقاومت کششی غیرمستقیم کاهش می‌یابد.

6-3- تحلیل عمر خستگی

ترک خستگی که با بارگذاری ترافیکی در ارتباط می‌باشد، به عنوان یکی از مهم‌ترین نوع خرابی در روسازی‌ها است و به بسیاری از خصوصیات مخلوط آسفالتی گرم مرتبط می‌باشد. شکل 10 نشان می‌دهد که مخلوط‌های حاوی افزودنی بتونیت دارای عمر خستگی بیشتری می‌باشند. همان‌طور که در شکل 10 مشخص است، مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده حاوی قیر اصلاح شده با 10٪، 15٪، 20٪ و 25٪ بتونیت در سطح کرنش 600 میکرواسترین، دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی گرم شاهد می‌باشند. اما اضافه نمودن 30٪ بتونیت سبب کاهش عمر خستگی می‌گردد. در مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح شده با بیش از 25٪ بتونیت، پیوستگی قیر به سنگدانه‌ها کاهش پیدا می‌کند. در حالیکه در مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح شده با 10٪، 15٪، 20٪ و 25٪ بتونیت، بتونیت تأثیر منفی بر روی چسبندگی قیر به مصالح سنگی ندارد. [Ziari et.al, 2012]. با توجه به نمودار، مشاهده می‌گردد در سطح کرنش 800 میکرو استرین عمر خستگی به ازای 15٪ افزودنی به مقدار بیشینه خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. ولی در سطح کرنش 1000 میکرو استرین عمر خستگی با افزودن بتونیت روند مشخصی ندارد و مقدار بیشینه به ازای 25٪ افزودنی می‌باشد. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی قیر اصلاح شده بتونیتی دارای مدول سختی بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی قیر اصلاح نشده می‌باشند.



شکل 10. عمر خستگی نمونه های آسفالتی



شکل 11. مدول سختی نمونه ها

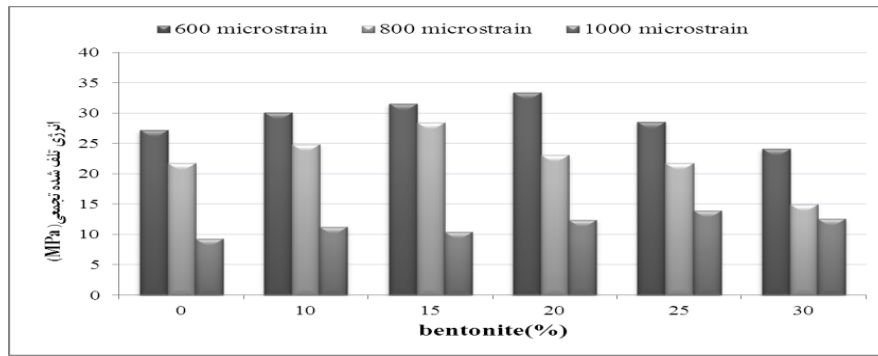
4-6 پیشنهاد مدل برای رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده بتونیتی

بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، یک تابع توانی همانطور که در معادله 15 نشان می‌دهد، برای مدل کردن و پیش بینی عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی گرم معمولی و مخلوطهای حاوی قیر اصلاح شده بتونیتی استفاده شده است. جدول 5، رابطه بین تعداد با اعمال شده جهت شکست نمونه بر اساس کرنش کششی اعمال شده را بر اساس تابع توانی زیر نشان می‌دهد.

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (15)$$

با توجه به شکل 12، انرژی تلف شده تجمعی مخلوطها نشان داده شده است. برای سطح کرنش 600 میکرواسترین، روند افزایشی انرژی تلف شده تجمعی تا 20٪ افزودنی بتونیت ادامه می‌یابد و به ازای مقادیر بیشتر افزودنی، روند کاهشی مشاهده می‌شود. در سطح کرنش 800 میکرواسترین، انرژی تلف شده تجمعی به ازای 15٪ افزودن بتونیت به مقدار ماکزیمم می‌رسد. در حالی که در سطح کرنش 1000 میکرواسترین روند مشخصی مشاهده نمی‌شود. هرچه انرژی تلف شده تجمعی بیشتر باشد، توانایی مصالح جهت جذب انرژی بیشتر می‌شود و بنابراین ترک خوردگی در آسفالت کاهش می‌یابد و عمر خستگی افزایش می‌یابد. [Van Dijk and Visser, 1977]

جدول 5 عمر خستگی نمونه های معمولی و نمونه های حاوی قیر اصلاح شده بتونیتی را نشان می دهد.



شکل 12. انرژی تلف شده تجمعی مخلوطها

جدول 5. عمر خستگی نمونه های معمولی و نمونه های حاوی قیر اصلاح شده بتونیتی

| مخلوط های آسفالتی | ضرایب مدل خستگی | | R ² |
|---------------------|-----------------|--------|----------------|
| | a | b | |
| نمونه شاهد | 1E+13 | 3/2337 | 0/8253 |
| مخلوط با 10٪ بتونیت | 7E+13 | 3/1051 | 0/8131 |
| مخلوط با 15٪ بتونیت | 1E+13 | 2/815 | 0/7415 |
| مخلوط با 20٪ بتونیت | 5E+12 | 2/7144 | 0/8968 |
| مخلوط با 25٪ بتونیت | 2E+12 | 2/5651 | 0/9279 |
| مخلوط با 30٪ بتونیت | 2E+11 | 2/2709 | 0/9901 |

روند افزایشی تا درصد بتونیت 20٪ ادامه دارد و به ازای نقادیر بیشتر آن مقاومت کششی کاهش می یابد.

3- مخلوطهای حاوی قیر اصلاح شده با 10٪ و 15٪

بتونیت دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به مخلوط های آسفالتی گرم معمولی به ترتیب در سطوح کرنش 800 و 600 میکرو استرین می باشند. اصلاح قیر خالص با مقادیر بیشتر بتونیت نه موجب افزایش و نه موجب بهبود عمر خستگی آسفالت می شود.

4- انرژی تلف شده مخلوطهای حاوی 10٪ و 15٪ بتونیت

از نمونه های شاهد بیشتر است. در حالی که روند افزایشی در درصدهای بالاتر بتونیت کاهش می یابد.

5- براساس نتایج، مدل ها برای پیش بینی عمر خستگی

نمونه های شاهد و اصلاح شده در سطوح کرنش مختلف به دست آمده است.

7- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر بتونیت به عنوان اصلاح کننده قیر بر مخلوط آسفالتی گرم می باشد. آزمایشهای متعددی جهت ارزیابی خصوصیات مخلوط آسفالتی گرم با درصدهای مختلف بتونیت در قیر انجام شده است. براساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، نتایج زیر حاصل شده است:

1- مدول برجهنگی مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح

شده بتونیتی بیشتر از مخلوطهای معمولی می باشد.

به طوریکه به ازای افزودن درصدهای بیشتر بتونیت روند کاهش خواهد داشت.

2- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های ساخته شده با قیر

اصلاح شده بتونیتی بالاتر از نمونه های شاهد می باشد.

8- پی نوشت ها

1. SodiumBentonite
2. Density
3. Stability

-Birlikler, RY (1998), "Additives can be added to bituminous mixtures and investigation of behavior of these mixtures and a prediction model for fatigue curve". Ph.D. Thesis. Istanbul: Istanbul Technical University; [Turkish].

-Colorado Department of Transportation (CDOT), (2009), "Standard Method of Test for Linear Kneading Compaction of Bituminous Mixture", Colorado Procedure Laboratory 5116.

-Daniel, JS., Kim RY (2001), "Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures". J Mater Civ Eng; 13:pp.434-40.

- Feipeng Xiao, P.E Wenbin Zhao, Serji N. Amirkhanian (2009) "Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives". Construction and Building Materials 23; pp. 3144-3151.

-Ghaffarpour Jahromi, S., Khodaii, A. (2009), "Effects of Nano clay on rheological properties of bitumen binder". Construction and Building Materials 23; pp.2894-2904.

-Gorkem, C., Sengoz, B (2009), "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime". Constr Build Mater; 23:pp.2227-36.

-Hicks, R. G., Lundy, J. R., Leahy, R. B., Hanson, D., & Epps, J. (1995), "Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement": Summary of Practices in Arizona, California, and Florida. NASA, (19980011594).

-Khodary Moalla Hamed, F. (2010), "Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept (Doctoral dissertation, TU Darmstadt)".

-Khodaii, A., Mehrara, A. (2009), "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test". Constr Build Mater; 23:pp.2586-92.

-Monismith, C. L., Epps, J. A., & Finn, F. N. (1985), "IMPROVED ASPHALT MIX DESIGN (WITH DISCUSSION)". In Association of Asphalt Paving Technologists Proc (Vol. 54), pp. 347-406.

-Ozen, H. (2011), "Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples". Constr Build Mater; 25:pp.756-65.

-Perviz, A, tacettin G. (2007), "Influence of carbon black on the mechanical and electrical properties of asphalt mixtures". Indian journal of engineering and materials science, Vol.14, October, pp. 358-364.

-Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G., & van Montfort, J. (2012), Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. Construction and Building Materials, 29, pp. 403-409.

-Roberts F L. (1996), "Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction [M]. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association Education Foundation: pp.173-181.

-Roque, R., Birgisson, B., Zhang, Z., Sangpetngam, B., & Grant, T. (2002), Implementation of SHRP indirect

4. Flow

9-مراجع

-خاوندی، ع. و عامری، م. (1393)، "تعیین عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی در کرنش‌های کم با استفاده از آزمایش تیر خمشی با فرکانس بارگذاری 25 هرتز". مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره چهارم، تابستان 1393. ص. 484-494.

-زیاری، ح. و عامری، م. و دیواندری، ح. و باباگلی، ر. و کشاورزی، م. (1391)، "تأثیر افزودنی بتونیت بر خصوصیات قیر و پارامترهای مارشال"، مجله علمی-ترویجی جاده، پژوهشکده حمل و نقل، شماره 72. پاییز 1391، ص. 241-251.

-زیاری، ح. و شادمان بحارینه، م. (1392)، "ارایه مدل پیش‌بینی عمرخستگی آسفالت متخلخل پلیمری با رویکرد پدیده شناختی تجربی" مهندسی حمل و نقل، سال چهارم، شماره سوم، بهار 1392. ص. 221-231.

-طاهرخانی، ح. و ابراهیمی مقدم، الف. (1391)، "پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از شبکه‌های عصبی". مهندسی حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، پاییز 1391. ص. 45-58.

-مدرس، الف. و حامدی، ح. ر. (1393)، "خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطریهای پلاستیکی (PET)" مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره چهارم، تابستان 1393. ص. 533-546.

-معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (1390)، «آیین‌نامه روسازی راههای ایران (نشریه 234)»، تجدید نظر اول، تهران.

-AASHTO, (2006) "Standard Specification for Transportation Materials and Methods of sampling and Testing, American Association of State Highway and Transportation Officials".

-Adhikari, S., Shen, S., & You, Z. (2009). Evaluation of fatigue models of hot-mix asphalt through laboratory testing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2127(1), pp. 36-42.

-Ahmadinia E, Zargar M, Karim MR, Abdel aziz M, Shafigh P(2011), "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt". Mater Des; 32:PP.4844-9.

-Al-Hadidy, AI. Yi-qiu, T. (2009), "Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements". Mater Des; 30:pp.1133-40.

-Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M. (2011), "Experimental investigation of the fatigue behavior of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder. Materials Science and Engineering A528; pp.3866-3870.

based composites with graphite and mine powders". *Construction and Building Materials* 22; pp.121–12.

-You, A., Buttlar, WG. (2004), "Discrete element modeling to predict the modulus of asphalt concrete mixtures". *J Mater CivEng*; 16:pp.140–6.

-Yilmaz M, Kok BV. (2009) "Effects of ferrochromium slag with neat and polymer modified binders in hot bituminous mix". *Indian J Eng Mater S*; 16:pp.310–318.

-Zare Shahabadi, A., Shokuhfar, S., Ebrahimi Nejad. (2010), "Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles". *Construction and Building Materials*; 24:pp.1239-1244.

-Ziari, H., Behbahani, H., Izadi A., Nasr, D. (2013), "Investigating the Long Term Performance of Warm Mix Asphalt vs. Hot Mix Asphalt". *J. Cent. South Univ.* 20: pp. 256–266.

-Ziari, H., Divandari, H., Babagoli, R., & Akbari, A. (2012), "Influence of bentonite additive on bitumen and asphalt mixture properties". *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 68, pp. 1292-1297.

-Zoorob, SE., Suparna, LB. (2000), "Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)". *CemConcr Comp*; 22: pp.233–242.

tension tester to mitigate cracking in asphalt pavements and overlays (No. WPI 0510755, Final Report).

-Rubber Manufacturers Association (RMA) (2006), "US scrap tire markets 2006 edition. Rubber Manufactures Association", Washington (DC).

-Santiago, F., Mucientes, AE, Osorio, M., River, C. (2007), "Preparation of composites and Nano composites based on bentonite and poly (sodium acrylate). Effect of amount of bentonite on the swelling behavior". *EurPolym J*; 43: pp.1–9.

-Utracki LA (2004), "Clay-containing polymeric nanocomposites", vol. 1. *RapraTechnology*.

-Van Dijk, W., & Visser, W. (1977), "Energy Approach to Fatigue for Pavement Design. In Association of Asphalt Paving Technologists Proc (Vol. 46).

-Wang, LB., Wang, X., Mohammad, L., Wang, YP. (2004), "Application of mixture theory in the evaluation of mechanical properties of asphalt concrete". *J Mater CivEng*; 16:pp.167–74.

-Xiao F, Amirhanian SN, Juang HC (2009), "Prediction of fatigue life of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement using artificial neural networks" *J Mater CivEng*; 21(6):pp.253–61.

-Xiaoming, Liu., Shaopeng, Wu., Qunshan, Ye., Jian, Qiu., Bo, Li. (2008), "Properties evaluation of asphalt-