

# ارزیابی تغییر شکل دائم آسفالت متخلخل پلیمری

ابراهیم حسامی<sup>۱</sup>؛ علی خدایی<sup>۲</sup>؛ فریدون مقدس‌نژاد<sup>۳</sup>

## چکیده

پدیده آب لغزی (Hydroplaning) در مناطقی با میزان بارندگی زیاد، باعث کاهش ایمنی در راه‌ها گردیده است. ایجاد یک لایه آسفالت متخلخل با فضای خالی بالای حدود ۱۸ درصد، می‌تواند آب را از روی راه دور و به صورت زهکش از جاده خارج نماید، از طرفی وجود این لایه می‌تواند عامل کاهش آلودگی صدا گردد. پائین بودن استحکام، پایداری، خصوصیات مکانیکی و بالا بودن میزان تغییر شکل دائمی، از محدودیت‌های استفاده از آسفالت متخلخل بشمار می‌آید. در این پژوهش تأثیر پلیمرهای SBR، APP بر روی تغییر شکل دائم آسفالت متخلخل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. گزینش بهترین دانه‌بندی برای ایجاد فضای خالی بالای ۱۸ درصد و طرح اختلاط آسفالت با استفاده از روش کانتابرو از کارهای مهم این پژوهش بود. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که افزودن پلیمر باعث افزایش وزن مخصوص، افزایش درصد فضای خالی آسفالت و تقویت، استحکام و پایداری آسفالت متخلخل خواهد شد. در زمان آزمایش خزش آشکار گردید که آسفالت متخلخل با قیر اصلاح شده پلیمری، کمترین تغییر شکل اولیه و همچنین تغییر شکل دائم را نسبت به نمونه ساخته شده با قیر خالص داشته است. افزودن پلیمر باعث افزایش مقادیر بازگشت ویسکوالاستیک، افزایش مدول سفتی در تمامی دماها و تنشهای اعمالی و همچنین تغییر شکل خزشی کمتری در آسفالت متخلخل شده است.

## کلمات کلیدی

آسفالت متخلخل، تغییر شکل دائم، کانتابرو، خزش، ویسکوالاستیک، مدول سفتی

## *Permanent Deformation of Polymer Modified Porous Asphalt*

E. Hesami, A. Khodaei, F. Moghadasnejad

### ABSTRACT

Hydroplaning phenomenon in rainy areas has caused the reduction of safety in the roads. Using a layer of porous asphalt with void about 18% can drain the water from the road and send it out, It also can decrease sound pollution. Low stability and durability and mechanical characteristics of this asphalt and high permanent deformation are limitations of porous asphalt. In these study effects of SBR and APP polymers on porous asphalt regarding permanent deformation was evaluated.

Choosing the best aggregate for creating void above 18% and mix design of asphalt through use of cantabero method were the important parts of the study. The results of experiments showed that adding polymer increases specific weight, improving percentage of the void in asphalt, and amplifying strength and stability of porous asphalt.

During the creep test, it was determined that porous polymer modified bituminous mixtures will have the least primary and permanent deformation than the specimens were made with pure bitumen. Adding polymer causes more amount of viscoelastic recovery, increase of stiffness modulus in all temperatures and all stresses and also decreases of creep deformation in porous asphalt.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران - راه‌ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست:

Email: EbrahimHesami@Gmail.com

<sup>ii</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست Email: Khodaii@aut.ac.ir

<sup>iii</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست

## KEYWORDS

Porous Asphalt, Permanent Deformation, Cantabero, Viscoelastic, Stiffness Modulus.

آسفالت متخلخل در ابتدا آمادگی خرابی زودرس داشت. در اوایل سال ۱۹۹۰، GDOT آسفالت متخلخل با دانه‌بندی ۱۲/۵mm را توسعه داد که این مخلوط براساس استاندارد GDOT تا سال ۱۹۹۳ به طور وسیعی استفاده شد. از آن به بعد استفاده از قیرهای اصلاح شده پلیمری<sup>۱</sup> و الیاف تثبیت کننده در آسفالت متخلخل توسط GDOT متداول گردید و کاهش قابل توجه خرابی‌های زودرس و بهبود زهکشی در آن مشاهده شد [۴].

برای مطالعه راه‌هایی که محل رفت و آمد تحت بارهای سنگین ترافیکی بوده و بمنظور ارزیابی تغییر شکل‌های به وجود آمده در آسفالت متخلخل از آزمایش خستگی نانت استفاده گردید [۵]. در این مطالعه از انواع نمونه‌ها با دانه‌بندی‌های مختلف و همچنین قیرهای پلیمری استفاده و خصوصیات مکانیکی آنان در آزمایش‌هایی از جمله آزمایش رد چرخ<sup>۲</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آسفالت متخلخل ساخته شده با پلیمر<sup>۱</sup> SBS بدون تغییر در میزان تخلخل، عمق شیار کمتری در آزمایش رد چرخ از خود نشان داده است.

از آنجا که استفاده از این آسفالت متداول نگردیده است لذا در این پژوهش ابتدا ضمن مطالعه بر روی طرح اختلاط آسفالت متخلخل در ایران بهترین روش طرح اختلاط انتخاب گردید و پس از تعیین قیر بهینه برای نمونه‌های مختلف آزمایش خزش بر روی نمونه‌های منتخب انجام گردید.

آسفالت یک ماده ویسکوالاستیک است و تغییر شکل در آن نه تنها به شدت بارگذاری بلکه به زمان بارگذاری و تأثیر آن در تغییر شکل نیز بستگی دارد. از کاستیهای آسفالت متخلخل بعلت فضای خالی قابل توجه بویژه در سرعت‌های کم، بالا بودن تغییر شکل در آن می‌باشد. بنابراین آزمایش مناسبی که بتواند این رفتار آسفالت متخلخل را مورد ارزیابی قرار دهد آزمایش خزش با بارگذاری استاتیکی می‌باشد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. Uzan (۱۹۹۶) مدلی ارائه نمود که در آن از روش تفکیک کرنشها برای محاسبه تغییر شکل استفاده نمود [۶]. در این روش کرنش نهایی ایجاد شده در روسازی آسفالتی برابر مجموع کرنشهای الاستیک، ویسکوالاستیک، پلاستیک و ویسکوپلاستیک ایجاد شده در روسازی در اثر اعمال بار محاسبه شده است:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp}$$

تغییر شکل دائم، یکی از عمده‌ترین خرابی‌هایی است که

## ۱- مقدمه

در مناطق با میزان بارندگی زیاد، وجود آب می‌تواند بین چرخ و سائط نقلیه و روسازی فاصله ایجاد نماید (پدیده آب لغزی) که این امر بشدت ایمنی در راه را کاهش می‌دهد. ایجاد یک لایه آسفالت متخلخل با فضای خالی بالای حدود ۱۸ درصد، می‌تواند این مشکل را از بین ببرد. این مقدار فضای خالی باعث می‌شود که مصالح سنگی درشت دانه به مقداری زیاد در آن مصرف گردد. آسفالت متخلخل به علت وجود فضای خالی زیاد و کم بودن مصالح ریزدانه در مقایسه با بتن آسفالتی از مقاومت کمتری برخوردار است. اگرچه آسفالت متخلخل جهت ایجاد یک لایه سطحی و فقط برای زهکشی و کاهش صدا به کار برده می‌شود لیکن بررسی افزایش مقاومت و کاهش تغییر شکلهای دائم از اهداف این پژوهش می‌باشد.

فن‌آوری آسفالت متخلخل به اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوائل دهه ۱۹۶۰ میلادی برمی‌گردد ولی استفاده وسیع آن از دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. گرچه در سال‌های اولیه دو کشور بریتانیا و آمریکا از آسفالت متخلخل استفاده می‌کردند ولی با گذشت سال‌های متمادی کشورهای مختلف اروپایی نیز به طور گسترده‌ای از آن استفاده نمودند [۱].

در سال ۱۹۸۱ سه محقق اسپانیایی، در کنفرانس کن اعلام نمودند که آزمایش مارشال برای طرح اختلاط آسفالت متخلخل ناکافی است. آنها روش کانتابرو<sup>۱</sup> را ارائه دادند در این روش علاوه بر انجام آزمایش‌های مارشال، نمونه‌های مارشال را درون درام دستگاه لوس‌آنجلس (بدون گلوله‌های فلزی) به تعداد ۳۰۰ دور با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه در درجه حرارت‌های ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار دادند، حداکثر افت وزنی نمونه‌ها باید ۳۰٪ در دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد و ۲۵٪ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد. برای تعیین فرونشست چسبنده، نمونه‌ها را در داخل یک سبد فلزی قرار داده و سپس سبد را در گرمخانه به مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته تا درصد مقدار چسبنده جدا شده از مصالح سنگی محاسبه شود [۲].

FHWA<sup>۲</sup> روش طراحی را برای آسفالت متخلخل در سال ۱۹۷۴ توسعه داد و در سال ۱۹۹۰ آن را بازنگری نمود. تفاوت عمده آسفالت متخلخل استفاده شده در آمریکا با اروپا درصد فضای خالی آنها می‌باشد که در آمریکا حداکثر ۱۵٪ و در اروپا به حدود ۱۸٪ می‌رسد [۳].

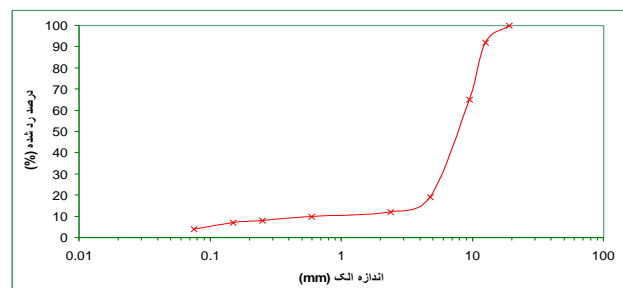
باعث از بین رفتن آسفالت متخلخل می‌شود، در این پژوهش با استفاده از آزمایش خزش خصوصیات و رفتار این آسفالت مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده، از نوع مصالح سنگی آهکی از معدن کوهی سنگ آهک شهر نكاء واقع در ۱۵ کیلومتری شرق ساری انتخاب گردید و نمونه مصالح بعد از شکسته شدن و دانه‌بندی، تحت آزمایش‌های مختلف براساس روش AASHTO قرار گرفت. فیلر مورد استفاده، از نوع پودرسنگ آهکی انتخاب گردید و آزمایش‌های لازم براساس روش‌های استاندارد AASHTO بر روی این نوع فیلر انجام گرفت.

### ۲-۱- دانه‌بندی مصالح سنگی

اسکلت و استخوان‌بندی اصلی مخلوط‌های آسفالت متخلخل را مصالح سنگی درشت دانه بزرگتر از ۴/۷۵mm تشکیل می‌دهد. میزان سنگ‌دانه‌های درشت بکار رفته در این مخلوط‌ها زیاد است. انتخاب دانه‌بندی طرح بایستی براساس عملکرد وظیفه‌ای مورد انتظار از آسفالت متخلخل باشد. عملکرد وظیفه‌ای آسفالت متخلخل شامل بهبود ایمنی، کاهش آلودگی صوتی و بالا بودن ظرفیت زهکشی است [۳] و [۵]. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی برای ساخت نمونه‌های آسفالت متخلخل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی در آسفالت متخلخل

### ۳- چسبنده مورد استفاده

از ۳ نوع چسبنده قیری استفاده شده است که قیر خالص ۶۰/۷۰ تولید پالایشگاه تهران به عنوان قیر پایه مورد استفاده قرار گرفته است. برای اصلاح خصوصیات فنی قیر، با توجه به مطالعات انجام شده در مورد قیرهای پلیمری و استفاده از پلیمرهای داخل کشور [۷]، از دو نوع پلیمر استایرین بوتادین رابر (SBR)<sup>۷</sup> و ضایعات پلیمر پلی‌پروپیلین (APP)<sup>۸</sup> از تولیدات پتروشیمی داخل کشور استفاده شده است.

جدول (۲): مشخصات انواع مخلوط‌های آسفالت متخلخل در درصد چسبنده بهینه

فرآیند اختلاط و تهیه قیرهای پلیمری از کارهای مهم انجام شده بود. سه پارامتر دما، زمان و میزان و چگونگی اختلاط و نوع پلیمرهای مصرفی از شاخص‌های مهم در تهیه قیرهای اصلاح شده می‌باشد. سپس از سه نوع چسبنده قیر خالص ۶۰/۷۰، چسبنده قیری با ۸ درصد APP و چسبنده قیری با ۹ درصد SBR استفاده گردید. آزمایش‌های لازم به طور مشترک بر روی هر ۳ نوع چسبنده انجام و نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱)- نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی چسبنده‌ها

نتیجه آزمایش			واحد	نام آزمایش
APP	SBR	۶۰/۷۰		
۴۶	۴۷	۶۴	۰/۱mm	درجه نفوذ در $25^{\circ}C$
۶۲	۶۳	۵۱	$^{\circ}C$	نقطه نرمی
۱۰۰+	۱۰۰+	۱۰۰+	cm	خاصیت انگلی در $25^{\circ}C$
۳۰۵	۳۲۲	۳۲۵	$^{\circ}C$	درجه اشتعال
۱/۰۰۹	۱/۰۱	۱/۰۱۵	—	چگالی
۱/۲۱	۱/۴۵	-۰/۳۵	—	نشانه نفوذ (PI)

### ۴- فرایند طرح اختلاط

برای طرح اختلاط از روش کانتابرو استفاده شده است. نمونه‌ها در درصدهای مختلف قیر و با سه نوع چسبنده و با حداکثر تراکم ۵۰ ضربه چکش مارشال مورد آزمایش‌های مختلف در این روش قرار گرفت. معیارهای مورد بررسی برای تعیین قیر بهینه در آسفالت متخلخل عبارتند از [۸]:

- حداقل درصد فضای خالی مخلوط ۱۸ درصد
- حداقل استقامت مارشال ۴۵۰ kgf
- حداکثر افت وزنی در اثر آزمایش کانتابرو ۲۵ درصد و

در دمای  $25^{\circ}C$

- حداکثر فرو نشست چسبنده ۳۰ درصد

پس از انجام مراحل طرح اختلاط، مشخصات هر کدام از انواع مخلوط‌ها در درصد چسبنده بهینه مربوط به هر کدام در جدول ۲ آورده شده است.

نوع مخلوط	درصد چسبنده بهینه	$G_{mb}$	$G_{mm}$	$V_A$	$V_{MA}$	$V_{FA}$	مارشال kgf	روانی $\cdot/25mm$	افت وزنی کانتابرو (درصد)	افت قیر در اثر فرو نشست (درصد)
قیر خالص (AC)	۴/۵	۲/۰۲۴	۲/۴۷۰	۱۸/۰۶	۲۳/۹۰	۲۴/۴۴	۴۷۴	۱۴/۶	۱۹/۴	۰/۲۹۶
چسبنده پلیمری (PAC) APP	۵	۱/۹۶۳	۲/۴۴۵	۱۹/۷۱	۲۶/۵۸	۲۵/۸۵	۵۲۰	۱۳/۵۲	۸/۶	۰/۲۶۹
چسبنده پلیمری (SAC) SBR	۵	۱/۹۷۹	۲/۴۳۸	۱۸/۸۳	۲۵/۹۸	۲۷/۱۴	۵۲۷	۱۴/۰۴	۹	۰/۲۷۵

نمایشگر دیجیتالی مربوطه قرائت گردید. قرائت‌ها بلافاصله بعد از بارگذاری و در دقیقه اول در ثانیه‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و پس از آن در دقیقه‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ انجام شد. در نهایت قرائت‌ها در دقیقه‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ پس از بارگذاری انجام شد. بعد از بارگذاری به مدت ۱ ساعت و برای بوجود آمدن خزش در نمونه، عمل باربرداری صورت گرفت تا شرایط برای حالت ترمیم خزش فراهم شود. کلیه قرائت‌ها در مرحله بار برداری در فواصل زمانی مشابه با حالت بارگذاری نتایج آزمایش خزش و ترمیم خزش انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف آسفالت متخلخل در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات موجود در جدول‌های یاد شده، نمودارهای مربوطه در شکل‌های ۳ الی ۶ آورده شده است.

#### ۶- تحلیل نتایج آزمایش خزش و ترمیم خزش

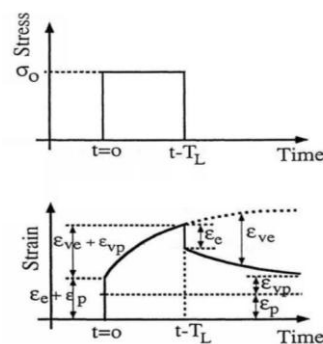
جداول و شکل‌ها مشخص می‌نمایند که در تمامی نمونه‌ها بعد از اعمال تنش‌های منتخب، مقداری تغییر شکل آنی در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. این تغییر بیشتر ناشی از تغییر شکل تراکمی نمونه می‌باشد. هر چقدر فضای خالی در نمونه‌ها بیشتر باشد این تغییر شکل بیشتر خواهد شد. از طرفی این تغییر شکل به طور مستقیم با ویسکوزیته مخلوط و همچنین مدول سفتی مخلوط در ارتباط است در دماهای پائین اختلاف قابل ملاحظه‌ای در تغییر کل آنی ایجاد شده دیده نمی‌شود اما در درجه حرارت‌های بالاتر، کارایی مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر SBR، APP بهتر مشخص می‌شود و تغییر شکل آنی کمتری از خود نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌های ۳-۶ مشاهده می‌شود هر چه بر میزان تنش و دما افزوده شود تغییرات تغییر شکل، بیشتر خود را نشان می‌دهد.

در نمودارهای ۳-۶ مشخص شده که افزودن پلیمر به قیر و استفاده از آن در آسفالت متخلخل، رفتار این نوع آسفالت را در مقابل تنش و حرارت بالاتر اصلاح می‌کند.

#### ۵- آزمایش خزش<sup>۹</sup>

آزمایش خزش، برای تعیین رفتار رئولوژی در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش رفتار آسفالت تحت بارگذاری استاتیکی و در مقابل زمان، مشخص می‌گردد. به طور کلی می‌توان تغییر شکل‌ها را در آسفالت به چهار مرحله مطابق با شکل ۲ تقسیم کرد که عبارتند از:

- ۱- الاستیک ( $\epsilon_e$ )
- ۲- ویسکوالاستیک ( $\epsilon_{ve}$ )
- ۳- ویسکوپلاستیک ( $\epsilon_{vp}$ )
- ۴- پلاستیک ( $\epsilon_p$ )



شکل (۲)- انواع کرنش ایجاد شده در آسفالت در زمان بارگذاری و بار برداری [۶]

آزمایش خزش بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالت متخلخل با سه نوع چسبنده یاد شده، انجام گردید. این آزمایش با اعمال تنش ثابت  $1/16 \text{ Kg/cm}^2$  و  $2/23 \text{ Kg/cm}^2$  بر روی نمونه‌ها در درجه حرارت‌های  $40^\circ \text{C}$  و  $60^\circ \text{C}$  انجام شد. نمونه‌ها قبل از بارگذاری به مدت ۱ ساعت در حمام آب  $40^\circ \text{C}$  و  $60^\circ \text{C}$  قرار گرفته و سپس تنش مورد نظر بر نمونه‌ها اعمال شد. در تمام مدت بارگذاری و باربرداری دمای نمونه با کنترل اتوماتیک دمای آب درون دستگاه توسط ترموستات کنترل می‌شد. تنش‌های منتخب در دماهای مورد نظر به مدت ۱ ساعت بر روی نمونه‌ها اعمال شد. تغییر شکل‌های به وجود آمده بر روی نمونه توسط یک LVDT اندازه‌گیری و نتایج از روی

جدول (۳): نتایج بدست آمده از آزمایش خزش و ترمیم خزش تحت تنش  $1/16 \text{ Kg/cm}^2$

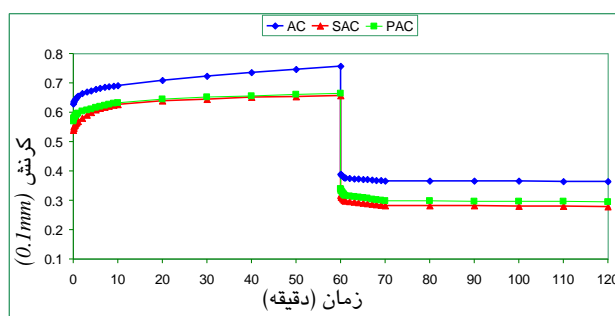
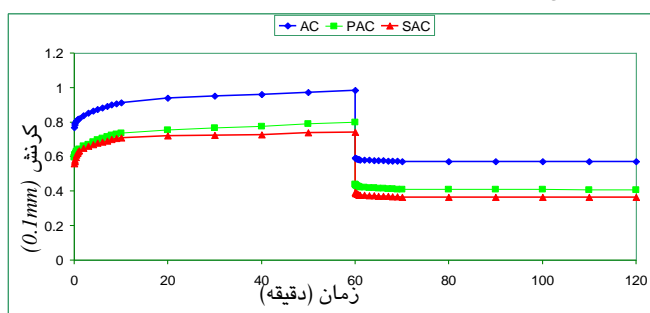
نوع مخلوط	کرش آبی در $t = 0$ ( $0/1\text{mm}$ )	حداکثر کرش در پایان مدت بارگذاری ( $0/1\text{mm}$ )	کرش الاستیک بازگشته		مقدار کرش ویسکوالاستیک بازگشته ( $0/1\text{mm}$ )	کرش نمایی (برگشت ناپذیر) ( $0/1\text{mm}$ )	بازگشت ویسکوالاستیک VER (%)
			%	( $0/1\text{mm}$ )			
درجه حرارت = $40^\circ\text{C}$							
AC	0/628	0/758	0/369	48/7	0/025	0/364	51/98
PAC	0/570	0/665	0/325	49/6	0/046	0/294	55/79
SAC	0/540	0/658	0/341	51/8	0/028	0/279	57/60
درجه حرارت = $60^\circ\text{C}$							
AC	0/770	0/984	0/392	39/8	0/021	0/571	41/97
PAC	0/596	0/798	0/359	45/0	0/022	0/407	49/00
SAC	0/561	0/743	0/352	47/4	0/027	0/364	51/01

جدول (۴): نتایج بدست آمده از آزمایش خزش و ترمیم خزش تحت تنش  $2/23 \text{ Kg/cm}^2$

نوع مخلوط	کرش آبی در $t = 0$ ( $0/1\text{mm}$ )	حداکثر کرش در پایان مدت بارگذاری ( $0/1\text{mm}$ )	کرش الاستیک بازگشته		مقدار کرش ویسکوالاستیک بازگشته ( $0/1\text{mm}$ )	کرش نمایی (برگشت ناپذیر) ( $0/1\text{mm}$ )	بازگشت ویسکوالاستیک VER (%)
			%	( $0/1\text{mm}$ )			
درجه حرارت = $40^\circ\text{C}$							
AC	0/848	1/094	0/518	47/3	0/023	0/553	49/45
PAC	0/741	0/848	0/434	51/2	0/042	0/372	56/13
SAC	0/704	0/820	0/449	54/1	0/040	0/341	58/91
درجه حرارت = $60^\circ\text{C}$							
AC	0/967	1/230	0/449	36/5	0/022	0/759	38/29
PAC	0/741	0/872	0/408	46/8	0/028	0/436	50/00
SAC	0/722	0/858	0/418	48/7	0/019	0/431	51/11

رفتاری وابسته به زمان دارد فعال تر می شود. بنابراین تغییر

شکل های



شکل (۳): نتایج آزمایش خزش در دمای  $40^\circ\text{C}$  و تنش  $1/16 \text{ Kg/cm}^2$

شکل (۴): نتایج آزمایش خزش در دمای  $60^\circ\text{C}$  و تنش  $2/23 \text{ Kg/cm}^2$

ویسکوالاستیک بیشتری در نمونه های آسفالت متخلخل ایجاد می شود. این مورد باعث افزایش حداکثر تغییر شکل نمونه در پایان مدت زمان بارگذاری می شود. بعد از ایجاد تغییر شکل های تراکمی در نمونه که معمولاً در دقیقه های اول (حدود

با توجه به شکل های ۳ الی ۶ مشاهده می شود که در درجه حرارت های پائین تر عمده تغییر شکل های نمونه آسفالت متخلخل تحت تنش در لحظات اولیه بارگذاری ایجاد می شود و هر چقدر بر میزان درجه حرارت و شدت بارگذاری افزوده شود روند افزایش تغییر شکل در نمونه های آسفالت متخلخل بیشتر می شود، زیرا در این حالت بخش ویسکوز آسفالت که

- بلافاصله پس از باربرداری یک بازگشت آبی در نمونه به وجود می‌آید به همین جهت به آن بازگشت الاستیک گفته می‌شود، چون متشکل از زمان است و بلافاصله پس از باربرداری ایجاد می‌شود.

- با بررسی جداول می‌توان مشاهده نمود که به ازای یک تنش ثابت هر چقدر درجه حرارت بیشتر شود مقدار درصد بازگشت الاستیک کمتر می‌شود. چون با افزایش دما قسمت ویسکوز آسفالت متخلخل تقویت می‌شود و پیرو آن خصوصیات الاستیک مخلوط آسفالت متخلخل تضعیف می‌شود.

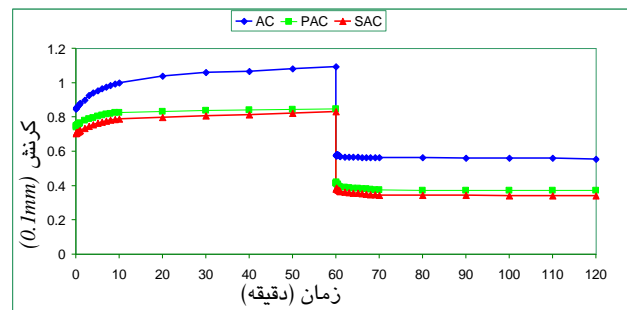
- پس از بار برداری و ایجاد بازگشت الاستیک تا پایان مدت بار برداری، تغییر شکل‌های ویسکوالاستیک ایجاد شده، در نمونه‌های آسفالت متخلخل بازگشت می‌کنند ولی تغییر شکل‌های ویسکوپلاستیک به صورت تغییر شکل‌های دائمی در نمونه باقی می‌ماند.

#### ۷- تأثیر پلیمر بر تغییرات تنش - کرنش

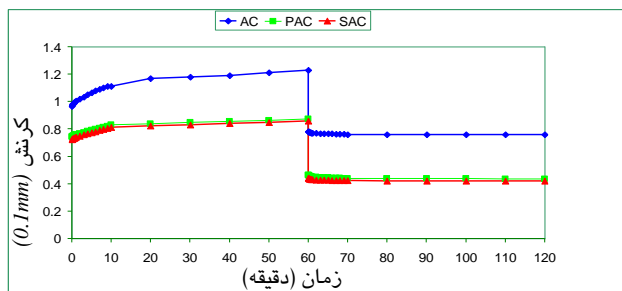
با مشاهده جداول ۴ و ۳ مشاهده می‌گردد که در یک دمای ثابت هر اندازه شدت بارگذاری افزایش یابد مقدار درصد بازگشت الاستیک نمونه‌های پلیمری افزایش می‌یابد. البته باید به این نکته نیز توجه کرد که در دماهای بالا، هرچقدر شدت بارگذاری بیشتر باشد کرنش ویسکوپلاستیک بیشتری در نمونه رخ می‌دهد.

با استفاده از نتایج آزمایش خزش منحنی تغییرات تنش - کرنش در دو درجه حرارت و در پایان مدت بارگذاری در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مخلوط آسفالت متخلخل اصلاح شده پلیمری کرنش کمتری نسبت به مخلوط با قیر خالص داشته و با افزایش دما، دامنه تغییرات نمونه مخلوط با قیر خالص نسبت به نمونه‌های پلیمری افزایش می‌یابد. این افزایش در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و تنش  $2/23 \text{ Kg/cm}^2$  قابل توجه می‌باشد. این مطلب همچنین با مشاهده شکل ۸ به خوبی دریافت می‌گردد. همچنین مشخص است که هر چه دما بیشتر می‌شود شیب منحنی تنش - کرنش بیشتر خواهد شد یعنی تغییر شکل‌های دائمی بیشتری در نمونه‌های آسفالت متخلخل ایجاد می‌شود.

۲۰ دقیقه) بارگذاری انجام می‌شود آهنگ تغییر شکل تراکمی کند شده و احتمال بوجود آمدن تغییر شکل‌های برشی در قالب جابجایی سنگدانه‌ها در نمونه آسفالت متخلخل ایجاد می‌شود. هر چقدر شدت عوامل تشدیدکننده این پدیده از جمله درجه حرارت و شدت بارگذاری بیشتر باشد، تغییر شکل‌های بیشتری در نمونه‌های آسفالت متخلخل ایجاد می‌شود.



شکل (۵): نتایج آزمایش خزش در دمای  $40^\circ \text{C}$  و تنش  $2/23 \text{ Kg/cm}^2$



شکل (۶): نتایج آزمایش خزش در دمای  $60^\circ \text{C}$  و تنش  $2/23 \text{ Kg/cm}^2$

افزایش تغییر شکل در نمونه‌های آسفالت متخلخل بیشتر می‌شود، زیرا در این حالت بخش ویسکوز آسفالت که رفتاری وابسته به زمان دارد فعال‌تر می‌شود. بنابراین تغییر شکل‌های ویسکوالاستیک بیشتری در نمونه‌های آسفالت متخلخل ایجاد می‌شود. این مورد باعث افزایش حداکثر تغییر شکل نمونه در پایان مدت زمان بارگذاری می‌شود.

بعد از ایجاد تغییر شکل‌های تراکمی در نمونه که معمولاً در دقیقه‌های اول (حدود ۲۰ دقیقه) بارگذاری انجام می‌شود آهنگ تغییر شکل تراکمی کند شده و احتمال بوجود آمدن تغییر شکل‌های برشی در قالب جابجایی سنگدانه‌ها در نمونه آسفالت متخلخل ایجاد می‌شود. هر چقدر شدت عوامل تشدیدکننده این پدیده از جمله درجه حرارت و شدت بارگذاری بیشتر باشد، تغییر شکل‌های بیشتری در نمونه‌های آسفالت متخلخل ایجاد می‌شود.

از بررسی مرحله Recovery از نمودارها نکاتی مشخص می‌گردد که عبارتند از:

شده با پلیمر می‌باشد. بهبود رفتار آسفالت متخلخل ساخته شده با پلیمر در بازگشت ویسکوالاستیک ناشی از الاستیک بودن آسفالت به دلیل اصلاح آن با پلیمر می‌باشد.

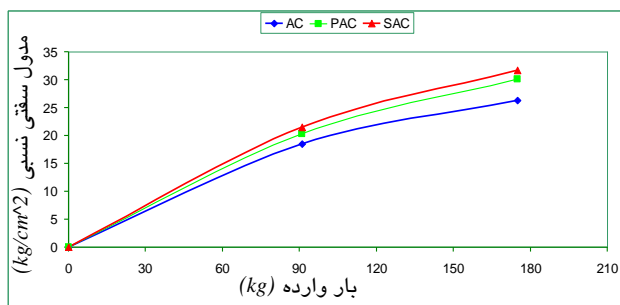
## ۸- ارزیابی تأثیر افزودنی پلیمر بر مدول سفتی

مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی یکی از مهمترین پارامترهای بیان کننده خصوصیات مکانیکی آسفالت است. همچنین برای طراحی لایه‌های روسازی مدول سفتی یکی از پارامترهای اصلی محسوب می‌شود. مدول سفتی آسفالت متخلخل را می‌توان براساس رابطه ۲ تعریف نمود:

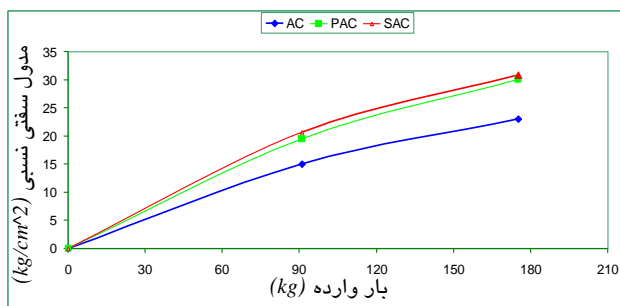
$$S(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} \quad (2)$$

$S(t)$ : مدول سفتی آسفالت متخلخل در لحظه  $t$ ، وابسته به زمان، برحسب  $Kg/cm^2$   
 $\sigma$ : تنش اعمال شده بر نمونه برحسب  $Kg/cm^2$   
 $\varepsilon(t)$ : کرنش نمونه آسفالت متخلخل در لحظه  $t$ ، متغییر با زمان

مدول سفتی تمام نمونه‌های آسفالت متخلخل محاسبه شده و نتایج به صورت نمودار در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه گردیده است.

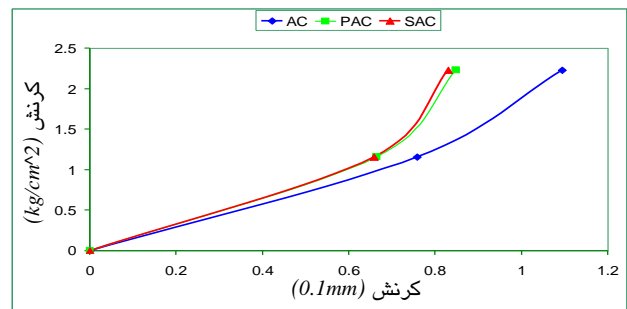


شکل (۹): تغییرات مدول سفتی نسبت به بارگذاری در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

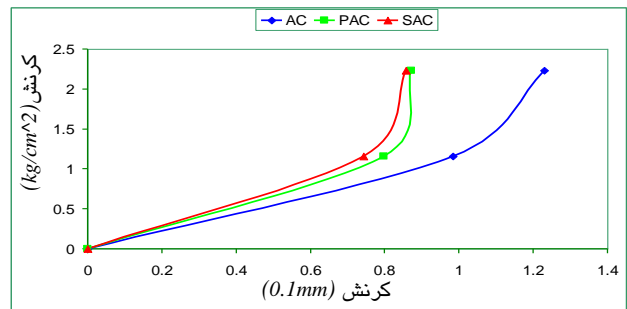


شکل (۱۰): تغییرات مدول سفتی نسبت به بارگذاری در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد

از روی نمودارها مشاهده می‌شود که هر چه دما و تنش بیشتر شود تفاوت مدول سفتی مخلوط با قیر خالص و



شکل (۷): منحنی تنش - کرنش در پایان مدت بارگذاری و دمای ۴۰ درجه سانتیگراد



شکل (۸): منحنی تنش - کرنش در پایان مدت بارگذاری و دمای ۶۰ درجه سانتیگراد

مطلب حائز اهمیت این است که نمونه‌های آسفالت متخلخل اصلاح شده پلیمری با APP و SBR در هر دو درجه حرارت مورد آزمایش، کرنش‌های کمتری نسبت به نمونه ساخته شده با قیر خالص داشته که در این بین نمونه ساخته شده با پلیمر SBR رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد. همچنین نمونه‌های پلیمری تغییر شکل دائمی کمتری از خود بروز داده و توانسته است ویسکوزیته مخلوط آسفالت متخلخل را در دماهای بالا تقریباً ثابت نگه دارد و پیرو آن مقاومت بیشتری را برای نمونه‌های آسفالت متخلخل در برابر ایجاد تغییر شکل تحت بارگذاری فراهم کند.

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر پلیمرها بر میزان بازگشت ویسکوالاستیک نمونه‌های آسفالت متخلخل در طول مدت زمان باربرداری پارامتر VER به صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد [۹].

$$VER = \frac{\varepsilon_{rev}}{\varepsilon_{tot}} \times 100 \quad (1)$$

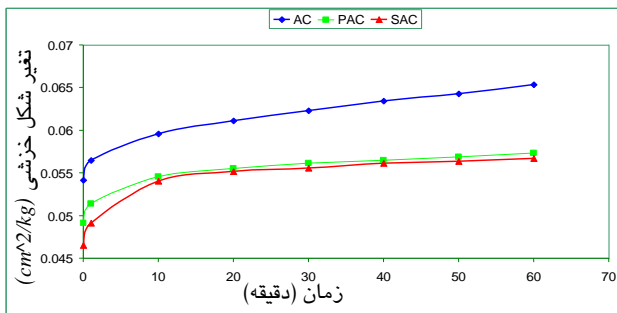
$\varepsilon_{rev}$ : مقدار کرنش برگشته در مدت زمان باربرداری

$\varepsilon_{tot}$ : مقدار کرنش ایجاد شده در مدت زمان بارگذاری

مقادیر VER محاسبه و در جداول ۳ و ۴ آورده شده است.

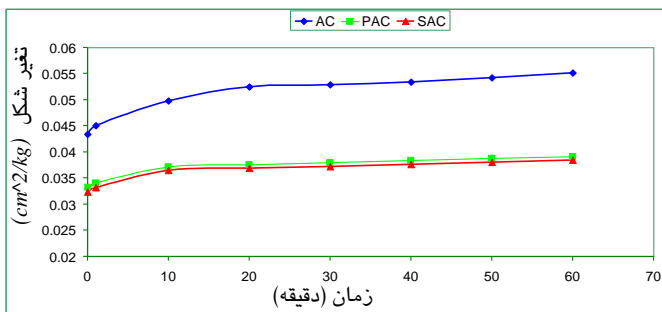
این مقادیر نشان می‌دهد که در تمامی دماها و تنش‌های اعمالی، نمونه آسفالت متخلخل ساخته شده با قیر خالص دارای بازگشت ویسکوالاستیک کمتری نسبت به نمونه‌های ساخته

مطلب با توجه به افزایش مدول سفتی در چنین حالتی قابل توجه است. چون تغییر شکل خزشی رابطه عکس با مدول سفتی مخلوط آسفالتی دارد.



شکل (۱۱): تغییرات تغییر شکل خزشی نسبت به زمان در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و تنش  $1/16 \text{ Kg/cm}^2$

نکته مهم در همه نمودارها این است که در تمامی موارد نمونه‌های آسفالت متخلخل اصلاح شده با پلیمر SBR, APP تغییر شکل خزشی کمتری نسبت به نمونه آسفالت متخلخل با قیر خالص از خود نشان دادند یعنی نمونه‌های اصلاح شده پلیمری مقاومت بیشتری در مقابل ایجاد تغییر شکل‌های دائمی از خود نشان می‌دهد و در نهایت تغییر شکل دائمی کمتری در آنها به وجود می‌آید.



شکل (۱۲): تغییرات تغییر شکل خزشی نسبت به زمان در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و تنش  $2/23 \text{ Kg/cm}^2$

نکته مهم در همه نمودارها این است که در تمامی موارد نمونه‌های آسفالت متخلخل اصلاح شده با پلیمر SBR, APP تغییر شکل خزشی کمتری نسبت به نمونه آسفالت متخلخل با قیر خالص از خود نشان دادند یعنی نمونه‌های اصلاح شده پلیمری مقاومت بیشتری در مقابل ایجاد تغییر شکل‌های دائمی از خود نشان می‌دهد و در نهایت تغییر شکل دائمی کمتری در آنها به وجود می‌آید.

## ۱۰ - نتیجه‌گیری

- تغییر شکل‌های آنی ایجاد شده در نمونه‌های آسفالت متخلخل در اثر اعمال بار و به علت افزایش پلیمر SBR, APP در مخلوط کاهش یافته است، در این میان، نمونه ساخته شده با

چسبنده‌های پلیمری افزایش پیدا می‌کند. آهنگ افزایش (شیب منحنی) در مورد نمونه‌های پلیمری بیشتر می‌باشد و این مطلب بدین معنی است که افزودن پلیمر SBR, APP به مخلوط باعث افزایش مدول سفتی مخلوط شده است.

با افزایش درجه حرارت قسمت ویسکوز مربوط به آسفالت متخلخل فعال‌تر می‌شود و پیرو آن، قسمت الاستیک تضعیف و میزان مدول سفتی کاسته می‌شود ولی این تغییرات در نمونه‌های آسفالت متخلخل پلیمری بسیار ناچیز می‌باشد. در نمودارها مشاهده می‌گردد در درجه حرارت‌های بالا در صورت افزایش شدت بارگذاری آسفالت متخلخل با قیر خالص مقاومت چندانی در مقابل تنش‌های اضافی از خود نشان نمی‌دهند، بنابراین این افزایش بارگذاری سبب افزایش تغییر شکل‌های ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک نمونه‌های آسفالت متخلخل (نمونه AC) می‌شود که در نهایت سبب ایجاد تغییر شکل‌های دائمی بیشتر در نمونه می‌شود.

همانگونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود مدول سفتی آسفالت متخلخل اصلاح شده با پلیمر تفاوت قابل ملاحظه‌ای با آسفالت متخلخل اصلاح نشده دارد این امر سبب می‌شود که در اثر اعمال تنش بر روی این نمونه‌ها کرنش کمتری نسبت به نمونه آسفالت متخلخل با قیر خالص در آن ایجاد شود که این عامل در نهایت سبب ایجاد تغییر شکل‌های دائمی کمتری در آن خواهد شد.

## ۹ - ارزیابی تأثیر پلیمر بر خزش آسفالت متخلخل

یکی از بهترین روش‌های ارزیابی خصوصیات مکانیکی، بررسی رفتار وابسته به زمان مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش خزش و ترمیم خزش می‌باشد. به طور کلی می‌توان خزش را طبق رابطه ۳ تعریف نمود [۱۰].

$$J(t) = \frac{\mathcal{E}(t)}{\sigma} \quad (3)$$

$J(t)$ : تغییر شکل خزش در لحظه  $t$  ( $\text{Kg/cm}^2$ )  
 $\sigma$ : تنش اعمال شده بر نمونه ( $\text{Kg/cm}^2$ )  
 $\mathcal{E}(t)$ : کرنش ایجاد شده در نمونه در اثر اعمال تنش (mm/mm)

با استفاده از نتایج آزمایش و رابطه تغییر شکل خزشی مربوط به تمامی نمونه‌ها محاسبه و برای مثال در مورد آن شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

همانگونه که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود در دمای ثابت با افزایش تنش، میزان تغییر شکل خزشی کاهش پیدا می‌کند این



Mallick, R.B.; kandhal, P.S.; watson, D.E.; "Open graded asphalt friction course - State of the practice", NCAT Report, NO.2000-1, 2004.

حسامی، سعید؛ ارزیابی خصوصیات مکانیکی آسفالت‌های نفوذناپذیر (ماستیکی) با قیرهای اصلاح شده پلیمری، پایان‌نامه دکتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۹.

Mallick, R.B.; kandhal, P.S.; Cooley, L.A.; Watson, D.E.; "Design, construction and performance of new-generation open-graded friction course", NCAT Report, NO. 2000-01, 2004.

Yang, H.; Pavement analysis and design, Prentice - hall, Inc, 1993.

Tawadzki, J.; "Adaptation of a creep test for evaluation of the permanent deformation of bituminous mixes", Mechanical test for bituminous materials, RILEM, ISB9054108762, 1997.

[۶] پلیمر SBR رفتار بهتری را از خود نشان داده است.

- میزان کرنش نهایی ایجاد شده در پایان مدت زمان بارگذاری در مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر کمتر از سایر نمونه‌ها است.

- در تمامی دماها و تنش‌های اعمالی، نمونه‌های آسفالت متخلخل پلیمری دارای بازگشت ویسکوالاستیک بیشتری نسبت به نمونه ساخته شده با قیر خالص بوده است.

- در دمای ثابت با افزایش شدت بارگذاری مدول سفتی نمونه ساخته شده با پلیمر SBR, APP افزایش بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد و در این میان نمونه ساخته شده با پلیمر SBR رفتار بهتری را از خود نشان داده است.

- پژوهش حاضر نشان داد که چقدر میزان تغییر شکل خزشی بیشتری در نمونه‌ها به وجود آید به همان نسبت تغییر شکل‌های دائمی بیشتری در آن نمونه‌ها به وجود می‌آید. چسبندگی پلیمری تغییر شکل خزشی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها به وجود می‌آورد.

- به طور کلی می‌توان گفت نمونه آسفالت متخلخل ساخته شده با چسبندگی پلیمری بیشترین مقاومت و بهترین عملکرد را در آزمایش خزش در قیاس با آسفالت متخلخل ساخته شده با قیر خالص دارا بودند و تغییر شکل‌های دائمی کمتری از خود نشان دادند. مقایسه دو پلیمر APP و SBR در آزمایش‌ها نشان داد که نمونه ساخته شده با پلیمر SBR خصوصیات بهتری به آسفالت متخلخل داده است.

## ۱۲- زیر نویس ها

- ۱ Cantabero
- ۲ Federal highway administration
- ۳ Georgia Department of Transportation
- ۴ Polymer Modified Bitumen
- ۵ Wheel Track Test
- ۶ Styrene Butadiene Styren
- ۷ Styrene Butadiene Rubber
- ۸ Atactic Poly Propylene
- ۹ Creep Test

## ۱۱- مراجع:

- [۱] Colwill, D.M.; G.J Bowskill; J.C. Nichols; M.E. Daines; "Porous asphalt Trials in United Kingdom", Transportation Research Record, 1427, National research Council, Washington, D.C., pp. 13 -21,1999.
- [۲] Isenring, T.; Harald, k.; Scazziga, I.; "Experience with Porous Asphalt in Switzerland", Transportation Research Record 1265, P.P. 41 - 53, 2000.
- [۳] Smith, R.W.; Rice, J.M.; Spelman, S.R.; "Design of Open-Graded Asphalt Friction Courses", Report FHWA-RD-74-2, Federal Highway Administration, 2001.
- [۴] Watson, D.; A. Johnson; D. Jared; "Georgia Department of Transportation's Progress in Open Graded Friction Course Development", Transportation Research Record, 1616, National research Council, Washington, D.C., pp. 30-33, 2003.
- [۵] Huet, M.; A., Boissoudy; J., Gramsammer; A., Bauduin; J., Samanos; "Experiments with Porous Asphalt on the Nantes Fatigue Test track", In Transportation Research Record 1265, National Research Council, Washington, D.C., pp. 54-58,1990.

