ارزيابي تغيير شكل دائم آسفالت متخلخل پليمري

ابراهیم حسامي[i]؛علي خدايي[ii]؛ فريدون مقدس‌نژاد[iii]

چكيده

پديده آب لغزي (Hydroplaning) در مناطقي با ميزان بارندگي زياد، باعث كاهش ايمني در راه‌ها گرديده است. ايجاد یک لايه آسفالت متخلخل با فضاي خالي بالاي حدود ۱۸ درصد، مي‌تواند آب را از روي راه دور و به صورت زه‌كش از جاده خارج نمايد، از طرفی وجود اين لايه مي‌تواند عامل كاهش آلودگي صدا گردد. پائين بودن استحكام، پايداري، خصوصيات مكانيكي و بالا بودن ميزان تغيير شكل دائمي، از محدوديت‌هاي استفاده از آسفالت متخلخل بشمار مي‌آيد .در اين پژوهش تأثير پليمرهاي APP , SBR بر روي تغيير شكل دائم آسفالت متخلخل مورد ارزيابي قرار مي‌گيرد.

گزينش بهترين دانه‌بندي براي ايجاد فضاي خالي بالاي ۱۸ درصد و طرح اختلاط آسفالت با استفاده از روش كانتابرو از كارهاي مهم اين پژوهش بود . نتايج آزمايش‌ها نشان دادند كه افزودن پليمر باعث افزايش وزن مخصوص، افزايش درصد فضاي خالي آسفالت و تقويت، استحكام و پايداري آسفالت متخلخل خواهد شد. در زمان آزمايش خزش آشكار گرديد كه آسفالت متخلخل با قير اصلاح شده پليمري، كمترين تغيير شكل اوليه و همچنين تغيير شكل دائم را نسبت به نمونه ساخته شده با قير خالص داشته است. افزودن پليمر باعث افزايش مقادير بازگشت ويسكوالاستيک، افزايش مدول سفتي در تمامي دماها و تنشهاي اعمالي و همچنين تغيير شكل خزشي كمتري در آسفالت متخلخل شده است.

كلمات كليدي

آسفالت متخلخل، تغيير شكل دائم، كانتابرو، خزش، ويسكوالاستيک، مدول سفتي

Permanent Deformation of Polymer Modified Porous Asphalt

E. Hesami, A. Khodaee, 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

---

[i] كارشناس‌ارشد مهندسی عمران – راه‌ترابري، دانشگاه صنعتي اميركبير، دانشكده‌ي مهندسي عمران و محيط‌زيست:
Email: EbrahimHesami@Gmail. com

[ii] . استاديار، دانشگاه صنعتي اميركبير، دانشكده‌ي مهندسی عمران و محيط‌زيست   *Email: Khodaii@aut.ac.ir*

[iii] . استاديار، دانشگاه صنعتي اميركبير، دانشكده‌ي مهندسی عمران و محيط‌زيست

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.

KEYWORDS

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

۱- مقدمه

در مناطق با ميزان بارندگي زياد ، وجود آب مي‌تواند بين چرخ وسائط نقليه و روسازي فاصله ايجاد نمايد (پديده آب لغزي) که اين امر بشدت ايمني در راه را کاهش مي‌دهد. ايجاد يک لايه آسفالت متخلخل با فضاي خالي بالاي حدود ۱۸ درصد، مي‌تواند اين مشکل را از بين ببرد. اين مقدار فضاي خالي باعث مي‌شود که مصالح سنگي درشت دانه به مقداري زياد در آن مصرف گردد.آسفالت متخلخل به علت وجود فضاي خالي زياد و کم بودن مصالح ريزدانه در مقايسه با بتن آسفالتي از مقاومت کمتري برخوردار است. اگرچه آسفالت متخلخل جهت ايجاد يک لايه سطحي و فقط براي زهکشي و کاهش صدا به کار برده مي‌شود ليکن بررسي افزايش مقاومت و کاهش تغيير شکلهاي دائم از اهداف اين پژوهش مي‌باشد.

فن‌آوري آسفالت متخلخل به اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوائل دهه ۱۹۶۰ ميلادي برمي‌گردد ولي استفاده وسيع آن از دهه ۱۹۸۰ آغاز شد . گرچه در سال‌هاي اوليه دو کشور بريتانيا و آمريکا از آسفالت متخلخل استفاده مي‌کردند ولي با گذشت سال‌هاي متمادي کشورهاي مختلف اروپايي نيز به طور گسترده‌اي از آن استفاده نمودند[۱].

درسال ۱۹۸۱ سه محقق اسپانيايي، در کنفرانس کن اعلام نمودند که آزمايش مارشال براي طرح اختلاط آسفالت متخلخل ناکافي است. آنها روش کانتابرو[۱] را ارائه دادند در اين روش علاوه بر انجام آزمايش‌هاي مارشال، نمونه‌هاي مارشال را درون درام دستگاه لوس‌آنجلس (بدون گلوله‌هاي فلزي) به تعداد ۳۰۰ دور با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقيقه در درجه حرارت‌هاي ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتي‌گراد قرار دادند، حداکثر افت وزني نمونه‌ها بايد ۳۰% در دماي ۱۸ درجه سانتيگراد و ۲۵% در دماي ۲۵ درجه سانتيگراد باشد.براي تعيين فرونشست چسبنده ، نمونه‌ها را در داخل يک سبد فلزي قرار داده و سپس سبد را در گرمخانه به مدت يک ساعت در دماي ۶۰ درجه سانتي‌گراد گذاشته تا درصد مقدار چسبنده جدا شده از مصالح سنگي محاسبه شود [۲].

FHWA[۲] روش طراحي را براي آسفالت متخلخل در سال ۱۹۷۴ توسعه داد و در سال ۱۹۹۰ آن را بازنگري نمود. تفاوت عمده آسفالت متخلخل استفاده شده در آمريکا با اروپا درصد فضاي خالي آنها مي‌باشد که در آمريکا حداکثر ۱۵% و در اروپا به حدود ۱۸% مي‌رسد [۳].

آسفالت متخلخل در ابتدا آمادگي خرابي زودرس داشت. در اوايل سال ۱۹۹۰ ، GDOT[۳] آسفالت متخلخل با دانه‌بندي ۱۲/۵mm را توسعه داد که اين مخلوط براساس استاندارد GDOT تا سال ۱۹۹۳ به طور وسيعي استفاده شد. از آن به بعد استفاده از قيرهاي اصلاح شده پليمري[۴] و الياف تثبيت کننده در آسفالت متخلخل توسط GDOT متداول گرديد و کاهش قابل توجه خرابي‌هاي زودرس و بهبود زه‌کشي در آن مشاهده شد [۴].

براي مطالعه راه‌هايي که محل رفت و آمد تحت بارهاي سنگين ترافيکي بوده و بمنظور ارزيابي تغيير شکل‌هاي به وجود آمده در آسفالت متخلخل از آزمايش خستگي نانت استفاده گرديد [۵]. در اين مطالعه از انواع نمونه‌ها با دانه‌بندي‌هاي مختلف و همچنين قيرهاي پليمري استفاده و خصوصيات مکانيکي آنان در آزمايش‌هايي از جمله آزمايش رد چرخ[۵] مورد ارزيابي قرار گرفت. نتايج نشان داد که آسفالت متخلخل ساخته شده با پليمر[۶] SBS بدون تغيير در ميزان تخلخل، عمق شيار کمتري در آزمايش رد چرخ از خود نشان داده است.

از آنجا که استفاده از اين آسفالت متداول نگرديده است لذا در اين پژوهش ابتدا ضمن مطالعه بر روي طرح اختلاط آسفالت متخلخل در ايران بهترين روش طرح اختلاط انتخاب گرديد و پس از تعيين قير بهينه براي نمونه‌هاي مختلف آزمايش خزش بر روي نمونه‌هاي منتخب انجام گرديد.

آسفالت يک ماده ويسکوالاستيک است و تغيير شکل در آن نه تنها به شدت بارگذاري بلکه به زمان بارگذاري و تأثير آن در تغيير شکل نيز بستگي دارد. از کاستيهای آسفالت متخلخل بعلت فضاي خالي قابل توجه بويژه در سرعتهاي کم، بالا بودن تغيير شکل در آن مي‌باشد. بنابراين آزمايش مناسبي که بتواند اين رفتار آسفالت متخلخل را مورد ارزيابي قرار دهد آزمايش خزش با بارگذاري استاتيکي مي‌باشد که در اين پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. Uzan(۱۹۹۶) مدلي ارائه نمود که در آن از روش تفکيک کرنشها براي محاسبه تغيير شکل استفاده نمود [۶]. در اين روش کرنش نهايي ايجاد شده در روسازي آسفالتي برابر مجموع کرنشهاي الاستيک، ويسکوالاستيک،

پلاستيک و ويسکوپلاستيک ايجاد شده در روسازي در اثر اعمال بار محاسبه شده است :

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

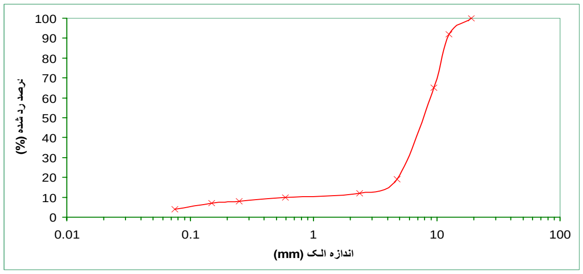
تغيير شکل دائم، يکي از عمده‌ترين خرابي‌هايي است که باعث از بين رفتن آسفالت متخلخل مي‌شود، در اين پژوهش با استفاده از آزمايش خزش خصوصيات و رفتار اين آسفالت مورد بررسي و ارزيابي قرار مي‌گيرد.

۲- مصالح سنگي

مصالح سنگي مورد استفاده، از نوع مصالح سنگي آهکي از معدن کوهي سنگ آهک شهر نکاء واقع در ۱۵ کيلومتري شرق ساري انتخاب گرديد و نمونه مصالح بعد از شکسته شدن و دانه‌بندي، تحت آزمايش‌هاي مختلف براساس روش AASHTO قرار گرفت. فيلر مورد استفاده، از نوع پودرسنگ آهکي انتخاب گرديد و آزمايش‌هاي لازم براساس روش‌هاي استاندارد AASHTO بر روي اين نوع فيلر انجام گرفت.

۲-۱- دانه‌بندي مصالح سنگي

اسکلت و استخوان‌بندي اصلي مخلوط‌هاي آسفالت متخلخل را مصالح سنگي درشت دانه بزرگتر از ۴/۷۵mm تشکيل مي‌دهد. ميزان سنگ‌دانه‌هاي درشت بکار رفته در اين مخلوط‌ها زياد است. انتخاب دانه‌بندي طرح بايستي براساس عملکرد وظيفه‌اي مورد انتظار از آسفالت متخلخل باشد. عملکرد وظيفه‌اي آسفالت متخلخل شامل بهبود ايمني، کاهش آلودگي صوتي و بالا بودن ظرفيت زه‌کشي است [۳]و[۵]. منحني دانه‌بندي مصالح سنگي براي ساخت نمونه‌هاي آسفالت متخلخل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): منحني دانه‌بندي مصالح سنگي در آسفالت متخلخل

۳- چسبنده مورد استفاده

از ۳ نوع چسبنده قيري استفاده شده است که قير خالص۶۰/۷۰ توليد پالايشگاه تهران به عنوان قير پايه مورد استفاده قرار گرفته است. براي اصلاح خصوصيات فني قير، با توجه به مطالعات انجام شده در مورد قيرهاي پلميري و استفاده از پليمرهاي داخل کشور [۷]، از دو نوع پليمر استايرين بوتادين‌رابر (SBR)[۷] و ضايعات پليمر پلي‌پروپيلين (APP)[۸] از توليدات پتروشيمي داخل کشور استفاده شده است.

فرآيند اختلاط و تهيه قيرهاي پليمري از کارهاي مهم انجام شده بود. سه پارامتر دما، زمان و ميزان و چگونگي اختلاط و نوع پليمرهاي مصرفي از شاخص‌هاي مهم در تهيه قيرهاي اصلاح شده مي‌باشد. سپس از سه نوع چسبنده قير خالص ۶۰/۷۰، چسبنده قيري با ۸ درصد APP و چسبنده قيري با ۹ درصد SBR استفاده گرديد. آزمايش‌هاي لازم به طور مشترک بر روي هر ۳ نوع چسبنده انجام و نتايج آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱)- نتايج آزمايش‌هاي انجام شده بر روي چسبنده‌ها

نام آزمايش	واحد	نتيجه آزمايش		
		۶۰/۷۰	**SBR**	**APP**
درجه نفوذ در ۲۵ $^{\circ}C$	۰/۱mm	۶۴	۴۷	۴۶
نقطه نرمي	$^{\circ}C$	۵۱	۶۳	۶۲
خاصيت انگلمي در ۲۵ $^{\circ}C$	cm	۱۰۰$^{+}$	۱۰۰$^{+}$	۱۰۰$^{+}$
درجه اشتعال	$^{\circ}C$	۳۲۵	۳۲۲	۳۰۵
چگالي	—	۱/۰۱۵	۱/۰۱	۱/۰۰۹
نشانه نفوذ (PI)	—	-۰/۳۵	۱/۴۵	۱/۲۱

۴- فرايند طرح اختلاط

براي طرح اختلاط از روش کانتابرو استفاده شده است. نمونه‌ها در درصدهاي مختلف قير و با سه نوع چسبنده و با حداکثر تراکم ۵۰ ضربه چکش مارشال مورد آزمايش‌هاي مختلف در اين روش قرار گرفت. معيارهاي مورد بررسي براي تعيين قير بهينه در آسفالت متخلخل عبارتند از [۸]:

- حداقل درصد فضاي خالي مخلوط ۱۸ درصد
- حداقل استقامت مارشال ۴۵۰kgf
- حداکثر افت وزني در اثر آزمايش کانتابرو ۲۵ درصد و در دماي ۲۵ $^{\circ}C$
- حداکثر فرو نشست چسبنده ۳۰ درصد

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

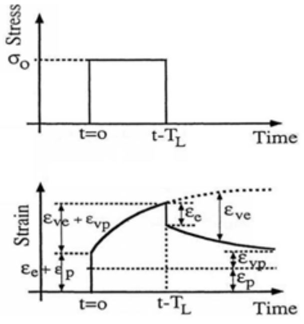
جدول (۲): مشخصات انواع مخلوط‌هاي آسفالت متخلخل در درصد چسبنده بهینه

نوع مخلوط	درصد چسبنده بهینه	G_{mb}	G_{mm}	V_A	V_{MA}	V_{FA}	مارشال **kgf**	رواني **۰/۲۵mm**	افت وزني كانتابرو (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 پلیمري (PAC) APP	۵	۱/۹۶۳	۲/۴۴۵	۱۹/۷۱	۲۶/۵۸	۲۵/۸۵	۵۲۰	۱۳/۵۲	۸/۶	۰/۲۶۹
چسبنده پلیمري (SAC) SBR	۵	۱/۹۷۹	۲/۴۳۸	۱۸/۸۳	۲۵/۹۸	۲۷/۱۴	۵۲۷	۱۴/۰۴	۹	۰/۲۷۵

۵- آزمایش خزش[۹]

آزمایش خزش، براي تعیین رفتار رئولوژي در مخلوط‌هاي آسفالتي مورد استفاده قرار مي‌گیرد. در این آزمایش رفتار آسفالت تحت بارگذاري استاتیکي و در مقابل زمان، مشخص مي‌گردد. به طور کلي مي‌توان تغییر شکل‌ها را در آسفالت به چهار مرحله مطابق با شکل ۲ تقسیم کرد که عبارتند از:

۱- الاستیک $\left(\varepsilon_e\right)$
۲- ویسکوالاستیک $\left(\varepsilon_{ve}\right)$
۳- ویسکوپلاستیک $\left(\varepsilon_{vp}\right)$
۴- پلاستیک $\left(\varepsilon_p\right)$



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

آزمایش خزش بر روي نمونه‌هاي مخلوط آسفالت متخلخل با سه نوع چسبنده یاد شده، انجام گردید. این آزمایش با اعمال تنش ثابت Kg/cm^2 ۱/۱۶ و Kg/cm^2 ۲/۲۳ بر روي نمونه‌ها در درجه حرارت‌هاي $^{\circ}C$ ۴۰ و $^{\circ}C$ ۶۰ انجام شد. نمونه‌ها قبل از بارگذاري به مدت ۱ ساعت در حمام آب $^{\circ}C$ ۴۰ و $^{\circ}C$ ۶۰ قرار گرفته و سپس تنش مورد نظر بر نمونه‌ها اعمال شد.

در تمام مدت بارگذاري و باربرداري دماي نمونه با کنترل اتوماتیک دماي آب درون دستگاه توسط ترموستات کنترل مي‌شد. تنش‌هاي منتخب در دماهاي مورد نظر به مدت ۱ساعت بر روي نمونه‌ها اعمال شد. تغییر شکل‌هاي به وجود آمده بر روي نمونه توسط یک LVDT اندازه‌گیري و نتایج از روي نمایشگر دیجیتالي مربوطه قرائت گردید. قرائت‌ها بلافاصله بعد از بارگذاري و در دقیقه اول در ثانیه‌هاي 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 بارگذاري انجام شد. بعد از بارگذاري به مدت ۱ ساعت و براي بوجود آمدن خزش در نمونه، عمل باربرداري صورت گرفت تا شرایط براي حالت ترمیم خزش فراهم شود. کلیه قرائت‌ها در مرحله بار برداري در فواصل زماني مشابه با حالت بارگذاري نتایج آزمایش خزش و ترمیم خزش انجام شده بر روي نمونه‌هاي مختلف آسفالت متخلخل در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات موجود در جدول‌هاي یاد شده، نمودارهاي مربوطه در شکل‌هاي ۳ الي ۶ آورده شده است.

۶- تحلیل نتایج آزمایش خزش و ترمیم خزش

جداول و شکل‌ها مشخص مي‌نمایند که در تمامي نمونه‌ها بعد از اعمال تنش‌هاي منتخب، مقداري تغییر شکل آني در نمونه‌ها ایجاد مي‌شود. این تغییر بیشتر ناشي از تغییر شکل تراکمي نمونه مي‌باشد. هر چقدر فضاي خالي در نمونه‌ها بیشتر باشد این تغییر شکل بیشتر خواهد شد. از طرفي این تغییر شکل به طور مستقیم با ویسکوزیته مخلوط و همچنین مدول سفتي مخلوط در ارتباط است در دماهاي پائین اختلاف قابل ملاحظه‌اي در تغییر کل آني ایجاد شده دیده نمي‌شود اما در درجه حرارت‌هاي بالاتر، کارآیي مخلوط‌هاي اصلاح شده با پلیمر SBR , APP بهتر مشخص مي‌شود و تغییر شکل آني کمتري از خود نشان مي‌دهد. همانگونه که در شکل‌هاي ۶-۳ مشاهده مي‌شود هر چه بر میزان تنش و دما افزوده شود تغییرات تغییر شکل، بیشتر خود را نشان مي‌دهد.

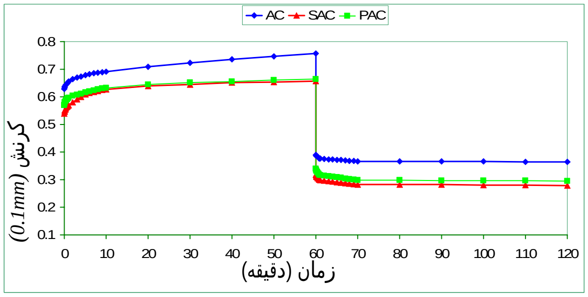
در نمودارهاي ۶-۳ مشخص شده که افزودن پلیمر به قیر و استفاده ازآن در آسفالت متخلخل، رفتار این نوع آسفالت را در مقابل تنش و حرارت بالاتر اصلاح مي‌کند.

جدول (۳): نتايج بدست آمده از آزمايش خزش و ترميم خزش تحت تنش ۱/۱۶ Kg/cm^2

نوع مخلوط	کرنش آني در (۰/۱mm) t = ۰	حداکثر کرنش در پايان مدت بارگذاري (۰/۱mm)	کرنش الاستيك بازگشته (۰/۱mm)	کرنش الاستيك بازگشته %	مقدار کرنش ويسکوالاستيك بازگشته (۰/۱mm)	کرنش نمايي (برگشت‌ناپذير) (۰/۱mm)	بازگشت ويسکوالاستيک VER (%)
درجه حرارت= C ° ۴۰							
AC	۰/۶۲۸	۰/۷۵۸	۰/۳۶۹	۴۸/۷	۰/۰۲۵	۰/۳۶۴	۵۱/۹۸
PAC	۰/۵۷۰	۰/۶۶۵	۰/۳۲۵	۴۹/۶	۰/۰۴۶	۰/۲۹۴	۵۵/۷۹
SAC	۰/۵۴۰	۰/۶۵۸	۰/۳۴۱	۵۱/۸	۰/۰۳۸	۰/۲۷۹	۵۷/۶۰
درجه حرارت= C° ۶۰							
AC	۰/۷۷۰	۰/۹۸۴	۰/۳۹۲	۳۹/۸	۰/۰۲۱	۰/۵۷۱	۴۱/۹۷
PAC	۰/۵۹۶	۰/۷۹۸	۰/۳۵۹	۴۵/۰	۰/۰۳۲	۰/۴۰۷	۴۹/۰۰
SAC	۰/۵۶۱	۰/۷۴۳	۰/۳۵۲	۴۷/۴	۰/۰۲۷	۰/۳۶۴	۵۱/۰۱

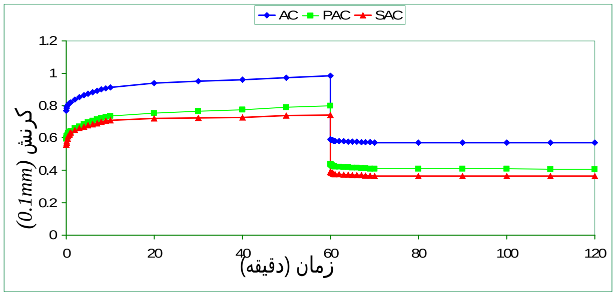
جدول (۴): نتايج بدست آمده از آزمايش خزش و ترميم خزش تحت تنش ۲/۲۳ Kg/cm^2

نوع مخلوط	کرنش آني در t = ۰ (۰/۱mm)	حداکثر کرنش در پايان مدت بارگذاري (۰/۱mm)	کرنش الاستيك بازگشته (۰/۱mm)	کرنش الاستيك بازگشته %	مقدار کرنش ويسکوالاستيك بازگشته (۰/۱mm)	کرنش نمايي (برگشت‌ناپذير) (۰/۱mm)	بازگشت ويسکوالاستيک VER (%)
درجه حرارت= C ° ۴۰							
AC	۰/۸۴۸	۱/۰۹۴	۰/۵۱۸	۴۷/۳	۰/۰۲۳	۰/۵۵۳	۴۹/۴۵
PAC	۰/۷۴۱	۰/۸۴۸	۰/۴۳۴	۵۱/۲	۰/۰۴۲	۰/۳۷۲	۵۶/۱۳
SAC	۰/۷۰۴	۰/۸۳۰	۰/۴۴۹	۵۴/۱	۰/۰۴۰	۰/۳۴۱	۵۸/۹۱
درجه حرارت= C° ۶۰							
AC	۰/۹۶۷	۱/۲۳۰	۰/۴۴۹	۳۶/۵	۰/۰۲۲	۰/۷۵۹	۳۸/۲۹
PAC	۰/۷۴۱	۰/۸۷۲	۰/۴۰۸	۴۶/۸	۰/۰۲۸	۰/۴۳۶	۵۰/۰۰
SAC	۰/۷۲۲	۰/۸۵۸	۰/۴۱۸	۴۸/۷	۰/۰۱۹	۰/۴۳۱	۵۱/۱۱



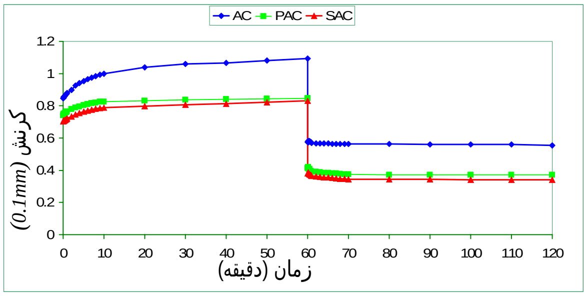
شکل (۳): نتايج آزمايش خزش در دماي C ° ۴۰ و تنش ۱/۱۶ Kg/cm^2

با توجه به شکل‌هاي ۳ الي ۶ مشاهده مي‌شود که در درجه حرارت‌هاي پائين‌تر عمده تغيير شکل‌هاي نمونه آسفالت متخلخل تحت تنش در لحظات اوليه بارگذاري ايجاد مي‌شود و هر چقدر بر ميزان درجه حرارت و شدت بارگذاري افزوده شود روند افزايش تغيير شکل در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل بيشتر مي‌شود، زيرا در اين حالت بخش ويسكوز آسفالت که رفتاري وابسته به زمان دارد فعال‌تر مي‌شود. بنابراين تغيير شكل‌هاي ويسكوالاستيک بيشتري در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل ايجاد مي‌شود. اين مورد باعث افزايش حداکثر تغيير شكل نمونه در پايان مدت زمان بارگذاري مي‌شود. بعد از ايجاد تغيير شكل‌هاي تراكمي در نمونه که معمولاً در دقيقه های اول (حدود

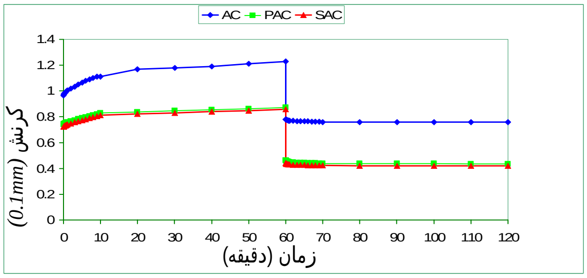


شكل (۴): نتايج آزمايش خزش در دماي C ° ۶۰ و تنش ۱/۱۶ Kg/cm^2

۲۰ دقيقه) بارگذاري انجام مي‌شود آهنگ تغيير شکل تراکمي کند شده و احتمال بوجود آمدن تغيير شکل‌هاي برشي در قالب جابجايي سنگ‌دانه‌ها در نمونه آسفالت متخلخل ايجاد مي‌شود. هر چقدر شدت عوامل تشديدکننده اين پديده از جمله درجه حرارت و شدت بارگذاري بيشتر باشد، تغيير شکل‌هاي بيشتري در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل ايجاد مي‌شود.



شکل (۵): نتايج آزمايش خزش در دماي ۴۰ $^{\circ}C$ و تنش ۲/۲۳ $Kg/cm^{۲}$



شکل (۶): نتايج آزمايش خزش در دماي ۶۰ $^{\circ}C$ و تنش ۲/۲۳ $Kg/cm^{۲}$

افزايش تغيير شکل در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل بيشتر مي‌شود، زيرا در اين حالت بخش ويسکوز آسفالت که رفتاري وابسته به زمان دارد فعال‌تر مي‌شود. بنابراين تغيير شکل‌هاي ويسکوالاستيک بيشتري در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل ايجاد مي‌شود. اين مورد باعث افزايش حداکثر تغيير شکل نمونه در پايان مدت زمان بارگذاري مي‌شود.

بعد از ايجاد تغيير شکل‌هاي تراکمي در نمونه که معمولاً در دقيقه های اول (حدود ۲۰ دقيقه) بارگذاري انجام مي‌شود آهنگ تغيير شکل تراکمي کند شده و احتمال بوجود آمدن تغيير شکل‌هاي برشي در قالب جابجايي سنگ‌دانه‌ها در نمونه آسفالت متخلخل ايجاد مي‌شود. هر چقدر شدت عوامل تشديدکننده اين پديده از جمله درجه حرارت و شدت بارگذاري بيشتر باشد، تغيير شکل‌هاي بيشتري در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل ايجاد مي‌شود.

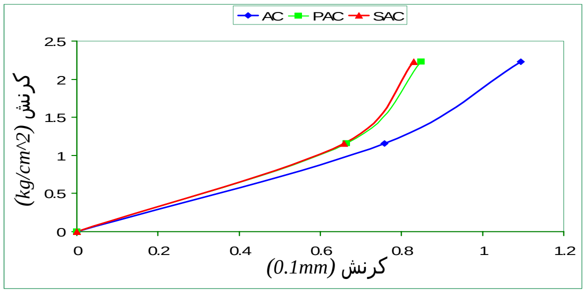
از بررسي مرحله Recovery از نمودارها نکاتي مشخص مي‌گردد که عبارتند از:

- بلافاصله پس از باربرداري يک بازگشت آني در نمونه به وجود مي‌آيد به همين جهت به آن بازگشت الاستيک گفته مي‌شود، چون متشکل از زمان است و بلافاصله پس از باربرداري ايجاد مي‌شود.
- با بررسي جداول مي‌توان مشاهده نمود که به ازاي يک تنش ثابت هر چقدر درجه حرارت بيشتر شود مقدار درصد بازگشت الاستيک کمتر مي‌شود. چون با افزايش دما قسمت ويسکوز آسفالت متخلخل تقويت مي‌شود و پيرو آن خصوصيات الاستيک مخلوط آسفالت متخلخل تضعيف مي‌شود.
- پس از بار برداري و ايجاد بازگشت الاستيک تا پايان مدت بار برداري، تغيير شکل‌هاي ويسکوالاستيک ايجاد شده، در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل بازگشت مي‌کنند ولي تغيير شکل‌هاي ويسکوپلاستيک به صورت تغيير شکل‌هاي دائمي در نمونه باقي مي‌ماند.

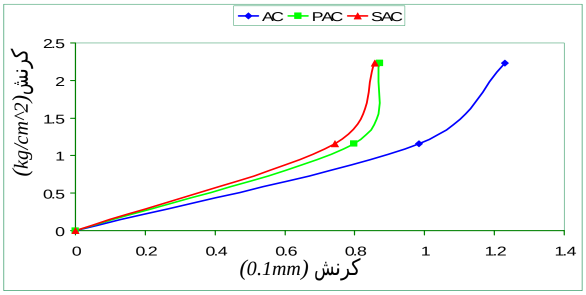
۷ - تأثير پليمر بر تغييرات تنش – کرنش

با مشاهده جداول ۳و۴ مشاهده مي‌گردد که در يک دماي ثابت هر اندازه شدت بارگذاري افزايش يابد مقدار درصد بازگشت الاستيک نمونه‌هاي پليمري افزايش مي‌يابد. البته بايد به اين نکته نيز توجه کرد که در دماهاي بالا، هرچقدرشدت بارگذاري بيشتر باشد کرنش ويسکوپلاستيک بيشتري در نمونه رخ مي‌دهد.

با استفاده از نتايج آزمايش خزش منحني تغييرات تنش – کرنش در دو درجه حرارت و در پايان مدت بارگذاري در شکل‌هاي ۷ و ۸ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده مي‌شود مخلوط آسفالت متخلخل اصلاح شده پلميري کرنش کمتري نسبت به مخلوط با قير خالص داشته و با افزايش دما، دامنه تغييرات نمونه مخلوط با قير خالص نسبت به نمونه‌هاي پليمري افزايش مي‌يابد. اين افزايش در دماي ۶۰ درجه سانتيگراد و تنش ۲/۲۳ $Kg/cm^{۲}$ قابل توجه مي‌باشد. اين مطلب همچنين با مشاهده شکل ۸ به خوبي دريافت مي‌گردد. همچنين مشخص است که هر چه دما بيشتر مي‌شود شيب منحني تنش – کرنش بيشتر خواهد شد يعني تغيير شکل‌هاي دائمي بيشتري در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل ايجاد مي‌شود.



شكل (۷): منحني تنش – كرنش در پايان مدت بارگذاري و دماي ۴۰ درجه سانتيگراد



شكل (۸): منحني تنش – كرنش در پايان مدت بارگذاري و دماي ۶۰ درجه سانتيگراد

مطلب حائز اهميت اين است كه نمونه‌هاي آسفالت متخلخل اصلاح شده پليمري با APP و SBR در هر دو درجه حرارت مورد آزمايش، كرنش‌هاي كمتري نسبت به نمونه ساخته شده با قير خالص داشته كه در اين بين نمونه ساخته شده با پليمر SBR رفتار بهتري از خود نشان مي‌دهد. همچنين نمونه‌هاي پليمري تغيير شكل دائمي كمتري از خود بروز داده و توانسته است ويسكوزيته مخلوط آسفالت متخلخل را در دماهاي بالا تقريباً ثابت نگه دارد و پيرو آن مقاومت بيشتري را براي نمونه‌هاي آسفالت متخلخل در برابر ايجاد تغيير شكل تحت بارگذاري فراهم كند.

براي بررسي دقيق‌تر تأثير پليمرها بر ميزان بازگشت ويسكوالاستيک نمونه‌هاي آسفالت متخلخل در طول مدت زمان باربرداري پارامتر VER به صورت رابطه ۱ تعريف مي‌گردد [۹].

$$VER = \frac{\varepsilon rev}{\varepsilon tot} \times 100 \qquad (۱)$$

εrev : مقدار كرنش برگشته در مدت زمان باربرداري

εtot : مقدار كرنش ايجاد شده در مدت زمان بارگذاري

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

اين مقادير نشان مي‌دهد كه در تمامي دماها و تنش‌هاي اعمالي، نمونه آسفالت متخلخل ساخته شده با قير خالص داراي بازگشت ويسكوالاستيک كمتري نسبت به نمونه‌هاي ساخته شده با پليمر مي‌باشد. بهبود رفتار آسفالت متخلخل ساخته شده با پليمر در بازگشت ويسكوالاستيک ناشي از الاستيک بودن آسفالت به دليل اصلاح آن با پليمر مي‌باشد.

۸- ارزيابي تأثير افزودني پليمر بر مدول سفتي

مدول سفتي مخلوطهاي آسفالتي يكي از مهمترين پارامترهاي بيان كننده خصوصيات مكانيكي آسفالت است. همچنين براي طراحي لايه‌هاي روسازي مدول سفتي يكي از پارامترهاي اصلي محسوب مي‌شود. مدول سفتي آسفالت متخلخل را مي‌توان براساس رابطه ۲ تعريف نمود:

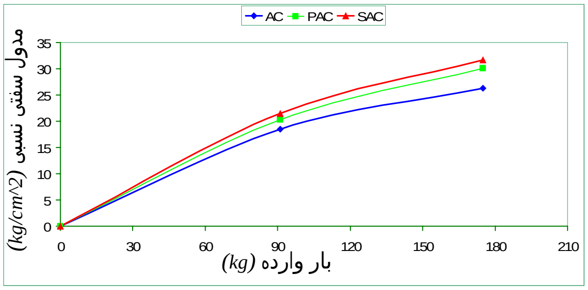
$$S(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} \qquad (۲)$$

S (t): مدول سفتي آسفالت متخلخل در لحظه t ،وابسته به زمان، برحسب Kg/cm^2

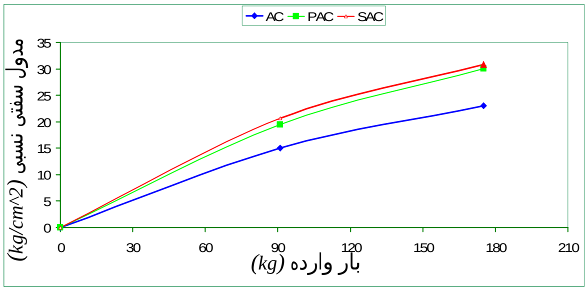
σ : تنش اعمال شده بر نمونه برحسب Kg/cm^2

ε (t): كرنش نمونه آسفالت متخلخل در لحظه t ، متغيير با زمان

مدول سفتي تمام نمونه‌هاي آسفالت متخلخل محاسبه شده و نتايج به صورت نمودار در شكل‌هاي ۹ و ۱۰ ارائه گرديده است.



شكل (۹): تغييرات مدول سفتي نسبت به بارگذاري در دماي ۴۰ درجه سانتيگراد



شكل (۱۰): تغييرات مدول سفتي نسبت به بارگذاري در دماي ۶۰ درجه سانتيگراد

از روي نمودارها مشاهده مي‌شود كه هر چه دما و تنش بيشتر شود تفاوت مدول سفتي مخلوط با قير خالص و چسبنده‌هاي پليمري افزايش پيدا مي‌كند. آهنگ افزايش (شيب

منحني) در مورد نمونه‌هاي پليمري بيشتر مي‌باشد و اين مطلب بدين‌معني است که افزودن پليمر SBR , APP به مخلوط باعث افزايش مدول سفتي مخلوط شده است.

با افزايش درجه حرارت قسمت ويسکوز مربوط به آسفالت متخلخل فعال‌تر مي‌شود و پيرو آن، قسمت الاستيک تضعيف و ميزان مدول سفتي کاسته مي‌شود ولي اين تغييرات در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل پليمري بسيار ناچيز مي‌باشد. در نمودارها مشاهده مي‌گردد در درجه حرارت‌هاي بالا در صورت افزايش شدت بارگذاري آسفالت متخلخل با قير خالص مقاومت چنداني در مقابل تنش‌هاي اضافي از خود نشان نمي‌دهند، بنابراين اين افزايش بارگذاري سبب افزايش تغيير شکل‌هاي ويسکوالاستيک و ويسکوپلاستيک نمونه‌هاي آسفالت متخلخل (نمونه AC) مي‌شود که در نهايت سبب ايجاد تغيير شکل‌هاي دائمي بيشتر در نمونه مي‌شود.

همانگونه که در شکل ۱۰ ملاحظه مي‌شود مدول سفتي آسفالت متخلخل اصلاح شده با پليمر تفاوت قابل ملاحظه‌اي با آسفالت متخلخل اصلاح نشده دارد اين امر سبب مي‌شود که در اثر اعمال تنش بر روي اين نمونه‌ها کرنش کمتري نسبت به نمونه آسفالت متخلخل با قير خالص در آن ايجاد شود که اين عامل در نهايت سبب ايجاد تغيير شکل‌هاي دائمي کمتري در آن خواهد شد.

۹- ارزيابي تأثير پليمر بر خزش آسفالت متخلخل

يکي از بهترين روش‌هاي ارزيابي خصوصيات مکانيکي، بررسي رفتار وابسته به زمان مخلوطهاي آسفالتي در آزمايش خزش و ترميم خزش مي‌باشد. به طور کلي مي‌توان خزش را طبق رابطه ۳ تعريف نمود [۱۰].

$$J(t)=\frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \qquad (۳)$$

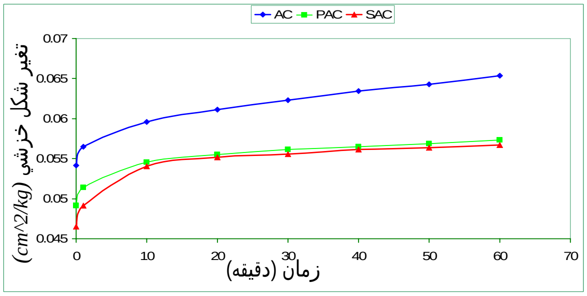
J (t): تغيير شکل خزش در لحظه t ($1/Kg/cm^2$)

σ : تنش اعمال شده بر نمونه (Kg/cm^2)

$\varepsilon(t)$: کرنش ايجاد شده در نمونه در اثر اعمال تنش (mm/mm)

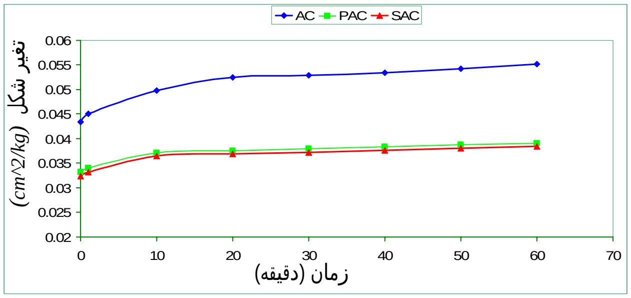
با استفاده از نتايج آزمايش و رابطه تغيير شکل خزشي مربوط به تمامي نمونه‌ها محاسبه و براي مثال در مورد آن شکل‌هاي ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

همانگونه که در شکل‌ها ملاحظه مي‌شود در دماي ثابت با افزايش تنش، ميزان تغيير شکل خزشي کاهش پيدا مي‌کند اين مطلب با توجه به افزايش مدول سفتي در چنين حالتي قابل توجيه است. چون تغيير شکل خزشي رابطه عکس با مدول سفتي مخلوط آسفالتي دارد.



شکل (۱۱): تغييرات تغيير شکل خزشي نسبت به زمان در دماي ۴۰ درجه سانتيگراد و تنش ۱/۱۶ Kg/cm^2

نکته مهم در همه نمودارها اين است که در تمامي موارد نمونه‌هاي آسفالت متخلخل اصلاح شده با پليمر SBR , APP تغيير شکل خزشي کمتري نسبت به نمونه آسفالت متخلخل با قير خالص از خود نشان دادند يعني نمونه‌هاي اصلاح شده پليمري مقاومت بيشتري در مقابل ايجاد تغيير شکل‌هاي دائمي از خود نشان مي‌دهد و در نهايت تغيير شکل دائمي کمتري در آنها به وجود مي‌آيد.



شکل (۱۲): تغييرات تغيير شکل خزشي نسبت به زمان در دماي ۶۰ درجه سانتيگراد و تنش ۲/۲۳ Kg/cm^2

نکته مهم در همه نمودارها اين است که در تمامي موارد نمونه‌هاي آسفالت متخلخل اصلاح شده با پليمر SBR , APP تغيير شکل خزشي کمتري نسبت به نمونه آسفالت متخلخل با قير خالص از خود نشان دادند يعني نمونه‌هاي اصلاح شده پليمري مقاومت بيشتري در مقابل ايجاد تغيير شکل‌هاي دائمي از خود نشان مي‌دهد و در نهايت تغيير شکل دائمي کمتري در آنها به وجود مي‌آيد.

۱۰- نتيجه‌گيري

- تغيير شکل‌هاي آني ايجاد شده در نمونه‌هاي آسفالت متخلخل در اثر اعمال بار و به علت افزايش پليمر SBR , APP در مخلوط کاهش يافته است، در اين ميان، نمونه ساخته شده با پليمر SBR رفتار بهتري را از خود نشان داده است.

- ميزان کرنش نهايي ايجاد شده در پايان‌مدت زمان بارگذاري در مخلوط‌هاي اصلاح شده با پليمر کمتر از ساير نمونه‌ها است.

- در تمامي دماها و تنش‌هاي اعمالي، نمونه‌هاي آسفالت متخلخل پليمري داراي بازگشت ويسکوالاستيک بيشتري نسبت به نمونه ساخته شده با قير خالص بوده است.

- در دماي ثابت با افزايش شدت بارگذاري مدول سفتي نمونه ساخته شده با پليمر SBR , APP افزايش بيشتري نسبت به ساير نمونه‌ها دارد و در اين ميان نمونه ساخته شده با پليمر SBR رفتار بهتري را از خود نشان داده است.

- پژوهش حاضر نشان داد که چقدر ميزان تغيير شکل خزشي بيشتري در نمونه‌ها به وجود آيد به همان نسبت تغيير شکل‌هاي دائمي بيشتري در آن نمونه‌ها به وجود مي‌آيد. چسبنده پليمري تغيير شکل خزشي کمتري نسبت به ساير نمونه‌ها به وجود مي‌آورد.

- به طور کلي مي‌توان گفت نمونه آسفالت متخلخل ساخته شده با چسبنده پليمري بيشترين مقاومت و بهترين عملکرد را در آزمايش خزش در قياس با آسفالت متخلخل ساخته شده با قير خالص دارا بودند و تغيير شکل‌هاي دائمي کمتري از خود نشان دادند. مقايسه دو پليمر APP و SBR در آزمايش‌ها نشان داد که نمونه ساخته شده با پليمر SBR خصوصيات بهتري به آسفالت متخلخل داده است.

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.

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

[۷] حسامي، سعيد؛ ارزيابي خصوصيات مکانيکي آسفالت‌هاي نفوذناپذير (ماستيکي) با قيرهاي اصلاح شده پليمري”، پايان‌نامه دکترا، دانشگاه علم و صنعت ايران، ۱۳۷۹.

[۸] 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.

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

[۱۰] Tawadzki, J.; “Adaptation of a creep test for evaluation of the permanent deformation of bituminous mixes”, Mechanical test for bituminous materials, RILEM, ISB9054108762, 1997.

۱۲- زيرنويس 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