



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه صنایع رنگ

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir

نشریه علوم و فناوری رنگ / ۱ (۱۳۸۶)، ۱۸ - ۷



آمیخته‌های قیری مناسب جهت کاربردهای پوششی مختلف

وحید حدادی^۱، علی اکبر یوسفی^{۲*}، علی رضا معینی^۳، مسعود تقی گنجی^۴، مرتضی خسروی^۱

۱- گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲- گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران

۳- پژوهشگاه صنایع رنگ، تهران، ایران

۴- پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۳/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۵/۲۲ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۶/۸/۳۰

چکیده

قیر یک ماده پوششی بسیار مهم در پوشش‌های ضد خوردگی و ضد رطوبتی می‌باشد که کاربردهای گسترده و وسیعی دارد. این ترکیب بسته به نوع کاربرد باید دارای خواص شیمیایی و فیزیکی متفاوتی باشد. به این دلیل مطالعه ساختار داخلی و خواص فیزیکی-شیمیایی قیر از اهمیت بالایی برخوردار است. تغییر در خواص فیزیکی قیرها بیشتر از طریق هوادهی قیرهای نرم‌تر انجام می‌شود و مطالعات انجام گرفته نیز بر این اساس بوده است. در این مقاله سعی شد با اختلاط قیرهای دمیده ۱۱۰/۱۰، قیر ۸۵/۱۰۰ و برش نفتی (H.V.S. Heavy vacuum slops)، قیرهای مختلف بخصوص قیرهای ۶۰/۷۰، ۸۵/۲۵ و ۹۰/۱۵ تهیه گردد. مشاهده شد که رفتارهای نقطه نرمی نسبت به کاهش درصد آسفالتن‌ها در تمام مراحل اختلاط به صورت خطی است. در حالی که رفتار درجه نفوذ با کاهش درصد آسفالتن‌ها به صورت نمایی می‌باشد. دلایل این رفتارها بسته به نوع نیروهای برشی به کار برده شده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و با ارتباط دادن آنها به گرانیروی و نیروهای همجسبی بین آسفالتن‌ها توجیه شدند. در نهایت با بررسی خواص و نتایج اختلاط مواد فوق با یکدیگر فرمولاسیون‌هایی جهت رسیدن به قیرهای یاد شده به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: H.V.S.، قیر، نقطه نرمی، درجه نفوذ، گرانیروی، انرژی همجسبی.

Bituminous Blends for Different Coating Applications

V. Hadadi, A. A. Yousefi*, R. Moeini, M. T. Ganji and M. Khosravi

Abstract

Bitumen is a very important component of anti-corrosion coatings and water proofing membranes which has found many applications. Depending on the application, bitumens have different compositions and physico-chemical properties. Softer bitumen is usually air-blown to adjust the physical properties of the final bitumen. Here, preparation of 60/70, 85/25 and 90/15 bitumens was achieved via physical mixing of air-blown 110/10 bitumen with 85/100 penetration grade and heavy-vacuum slops (HVS) cut. The softening point of the resulting bitumen changes with the asphaltenes' content, whereas its penetration varies exponentially. This difference in behavior was attributed to the shear forces applied during the tests and was account for via the bitumen viscosity and cohesive energy acting between asphaltenes. Finally, some formulations for the target bitumens were reported via mixing of the above-mentioned raw-materials. *J. Color Sci. Tech.* 1(2007), 7-18. © Institute for Colorants, Paint and Coatings.

Keyword: H.V.S., bitumen, softening point, penetration grade, viscosity, cohesive energy.

۱- مقدمه

قیر ماده بسیار مهم است که در موارد بسیار زیادی به عنوان بایندر پوشش‌های مختلف به کار برده می‌شود. از میان این کاربردهای قیر می‌توان به روکش‌ها و پوشش‌های لوله‌های نفت و گاز، آسفالت به عنوان پوشش بسیار مهم جاده‌ها و خیابان‌ها، پوشش‌های عایق رطوبت و صدا در خودرو، پوشش‌های قطعات صنعتی و عایق‌های بام و بخش‌های مختلف ساختمان اشاره کرد. از آنجا که پوشش‌های پایه قیر در هنگام استفاده در معرض شرایط مختلف محیطی و تنش‌های مختلف مکانیکی قرار دارند مطالعه ساختار شیمیایی و فیزیکی قیر و خواص فیزیکی - مکانیکی آن بسیار اهمیت دارد.

در انواع کاربردهای قیر، عایق‌های رطوبتی از پوشش‌های ساختمانی بسیار مهم هستند که نقش اساسی در ماندگاری و حفظ انبیه ساختمانی دارند. این عایق‌ها معمولاً مخلوطی از چند نوع قیر و مواد افزودنی مختلف مانند فیلر (تالک،...)، مواد پلیمری، الیاف بافته و نفاخته پلیمری و معدنی ساخته می‌شوند. بخش قیر این عایق‌ها به دلیل آمیختن از قیرهای مختلف باید مورد مطالعه قرار گیرد [۱]. در جهان، قیرهای مختلف تحت عمل تقطیر از نفت خام تهیه می‌شوند. برای تولید قیرهایی با نقطه نرمی بالا و درجه نفوذ پایین از عمل هوادهای روان‌تر استفاده می‌شوند. اختلال کوچکی در میزان هوادهای می‌تواند خاصیت قیر را تا میزان زیادی تغییر دهد و هنوز کار منسجمی برای تهیه قیرهای متفاوت از طریق اختلاط انجام نشده است.

قیرهای نفتی از جمله فرآورده‌های نفتی می‌باشند که طی مراحل پالایش نفت خام در پالایشگاه‌ها، به طور مستقیم و یا تحت فرآیندهای تکمیلی نظیر هوادهای حاصل می‌شوند. در کشور ما عمدتاً قیرها در دو دسته تولید می‌شود [۲،۳].

دسته اول تحت عنوان "قیرهای نفوذی" می‌باشند که بر مبنای مشخصه درجه نفوذ دسته‌بندی و تولید می‌شوند و در بازار به قیر نرم معروفند که قیرهای ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰ از این دسته‌اند [۴].

دسته دوم تحت عنوان "قیرهای دمیده" می‌باشند که بر مبنای دو مشخصه نقطه نرمی و درجه نفوذ دسته‌بندی و تولید می‌شوند و در بازار به قیر سفت معروفند که قیرهای ۸۵/۲۵، ۹۰/۱۵ و ۱۱۰/۱۰ از این دسته‌اند [۵]. در بسیاری موارد صنایع مختلف بسته به نوع محصولات تولیدی خود نوع خاصی از قیر را مورد مصرف قرار می‌دهند. این در حالی است که تنوع قیرهای موجود، محدود بوده و یا به دلایل متعدد از جمله نقایص موجود هنگام تولید، ذخیره‌سازی و یا حمل و نقل قیر مشخصات اصلی خود را از دست داده و باید اصلاح گردد [۶].

بر اساس آزمون‌های مختلف، قیرها از نظر فیزیکی یک ماده همگن در مقیاس میکرو می‌باشند. با این حال این مواد از نظر شیمیایی یک مخلوط ناهمگن (heterogeneous) از ترکیبات شیمیایی مختلف می‌باشند. علی‌رغم این مسأله، همه قیرها دارای یک سری خصوصیات و خواص مشترک می‌باشند. ساختار عنصری قیرها که به روش تجزیه

شعله یا سایر روش‌ها به دست آمده حاکی از آن است که حدود ۹۰٪ قیر را اتم‌های کربن و هیدروژن تشکیل می‌دهند. همچنین اغلب قیرها دارای نیتروژن، گوگرد و اکسیژن به نسبت‌های مختلف، ولی کم می‌باشند. قیر، یا به بیان بهتر مواد قیری مخلوط بسیار متنوعی از طیف وسیعی از هیدروکربن‌ها می‌باشند که در انواع اشباع و غیراشباع، حلقوی و غیرحلقوی، قطبی و غیرقطبی، قرار می‌گیرند. ضمناً گروهی از این هیدروکربن‌ها علاوه بر کربن و هیدروژن دارای هترو اتم (N,S,O,...) در ساختار خود می‌باشند [۷].

با این مقدمه آشکار است که هرگونه تلاشی برای تجزیه مولکولی قیرها بی‌حاصل خواهد بود و نیز به همین دلیل است که اطلاعات مندرج در منابع و استانداردهای قیر، جملگی به روش‌های تفکیک به وسیله حلال‌های آلی و کروماتوگرافی برای جداسازی گروه‌هایی از اجزا با خواص مشابه، تأکید دارند. از سلسله‌مراحلی که در تفکیک اجزای قیرها کاربرد فراوان داشته و امروزه نیز مورد پذیرش و تأیید اغلب متخصصین می‌باشد عبارتند از تقسیم قیر به اجزاء نسبتاً مشخص به نام آسفالتن‌ها Asphaltenes و مالتن‌ها Maltenes و همچنین تقسیم مالتن‌ها به اجزاء ابهام‌آمیز به نام رزین‌ها Resins و روغن‌ها Oils [۸]. در شکل‌های ۱ و ۲ ساختار مالتن‌ها و آسفالتن‌ها نشان داده شده است.

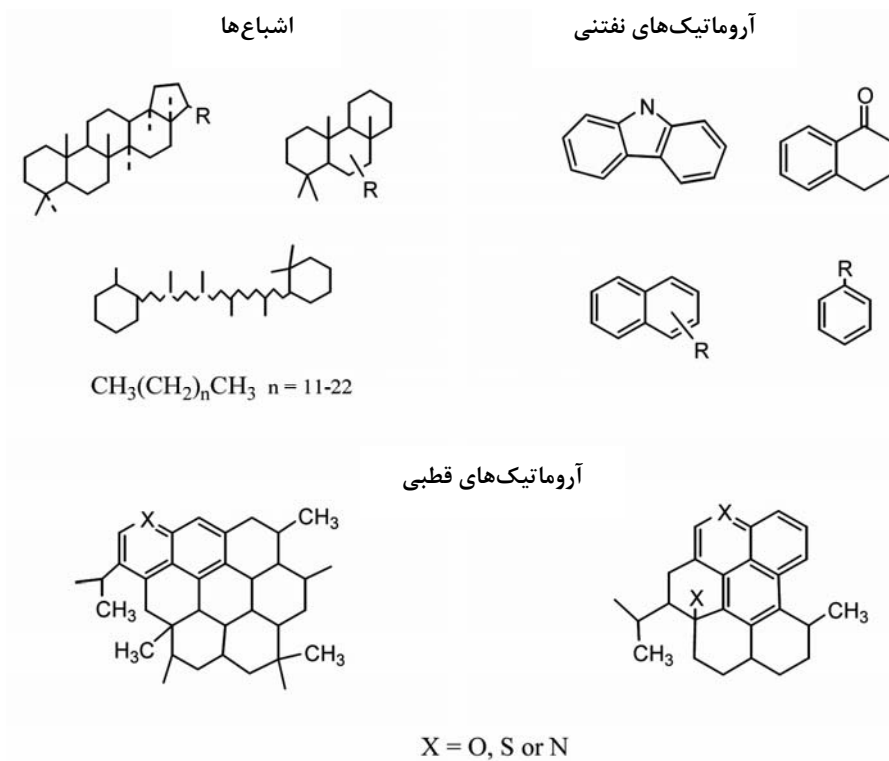
روش معتبر ASTM (یا روش Corbett) برای تفکیک قیر به چهار برش نیز بر پایه تقسیم‌بندی فوق استوار می‌باشد. در این روش ابتدا قیر را با یک حلال پارافینی خالص (نظیر نرمال هپتان) مجاور می‌نمایند، لذا آسفالتن ته‌نشین شده و پس از صاف و خشک کردن، پودری با رنگ قهوه‌ای تیره تا سیاه به دست می‌آید که در بنزن، تتراکلرید کربن و دی‌سولفید کربن محلول است اما در هیدروکربن‌های پارافینی خالص نامحلول است. آسفالتن‌ها از درجه آروماتیسیته بالایی برخوردار بوده و دارای گروه‌های حلقوی متراکم و در هم رفته هستند [۴].

در هنگام تولید قیر در پالایشگاه به دلیل پیچیدگی ساختار شیمیایی آن تنها از طریق آزمون‌های فیزیکی شناخته شده مشهوری مانند درجه نفوذ و نقطه نرمی کیفیت آن را کنترل می‌کنند. در عین حال جهت تولید و تنظیم خواص قیر از برش‌های مختلف موجود در پالایشگاه مانند فورفورال اکسترکت و PDA-Tar جهت رسیدن به خواص فیزیکی مورد نظر استفاده می‌کنند.

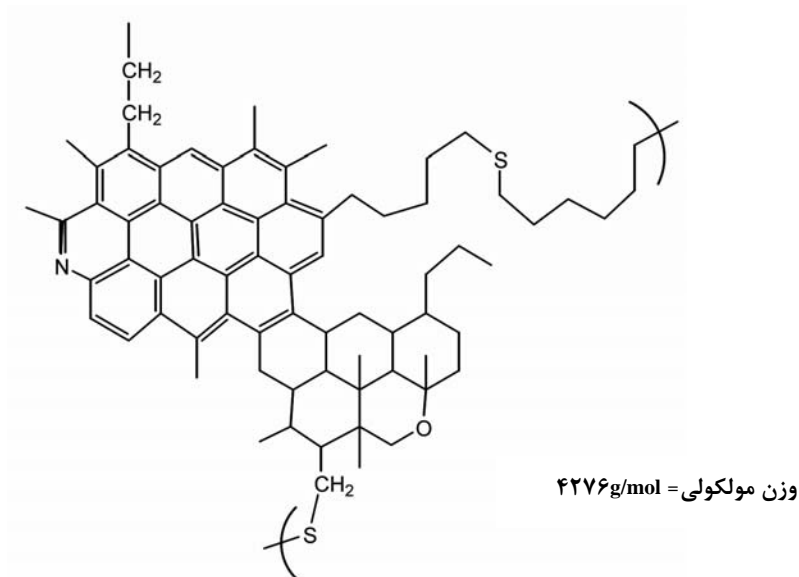
البته در مورد قیرهایی که از نفت‌های غیر سنگین مانند نفت حوزه آسماری که در عمده پالایشگاه‌های ایران استفاده می‌شود فرآیند هوادهای قیر جهت کاهش نسبت H/C اجتناب‌ناپذیر است ولی کافی نیست و قیر باید حتماً با برش‌های دیگر نفتی جهت رسیدن به خواص استاندارد مورد نظر مخلوط شود [۹]. در عین حال، هیچ قیر مناسبی جهت تولید مستقیم عایق رطوبتی در پالایشگاه‌های کشور تولید نمی‌شود. در صنعت عایق رطوبتی معمولاً قیرهای نفتی دمیده و

بالا در حضور مواد با گرانی کم می‌باشد. این کاهش گرانی در مورد مواد پلیمری معمولی کاملاً شناخته شده است ولی در مورد مواد قیر که اوزان مولکولی بالایی دارند تاکنون مطالعه نشده است [۳].

نفوذی به همراه پلیمرهای بازیافتی با یکدیگر مخلوط شده و در حضور پودر تالک و منسوجات بافته و نفاخته یک لایه عایق رطوبتی حاصل می‌شود. آنچه عملاً اتفاق می‌افتد کاهش گرانی مواد دارای گرانی



شکل ۱: انواع ساختارهای مالتن‌ها [۸].



شکل ۲: یکی از ساختارهای فرضی آسفالتن‌ها [۸].

دستگاه نفوذسنج استفاده شد [۱۰،۱۱].

مواد

در این کار تحقیقاتی از مواد فهرست شده در جدول ۱ به عنوان مواد اولیه مورد اختلاط استفاده شد.

روش‌های کار

مطابق مراحل ذکر شده در بخش‌های زیر عملیات اختلاط در ۵ حالت و با درصدهای مختلف از مواد اولیه فوق انجام شد، و برای هر یک از حالت‌های آزمایش، ۵ نمونه تهیه گردید. اختلاط با استفاده از مخلوط‌کن آزمایشگاهی مطابق شکل ۳ در شرایط دمای 170°C و زمان اختلاط ۳۰ دقیقه انجام گرفت و نمونه‌های حاصله مطابق روش‌های ذکر شده مطابق استانداردهای مربوطه مورد آزمایش قرار گرفته و مشخصه‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ آنها تعیین گردید که نتایج مربوطه در جدول‌ها ۲ تا ۷ درجه می‌باشد [۱۲].

در این مقاله اثر اختلاط برش‌های نفتی با قیرهای مختلف روی خواص مخلوط حاصله گزارش و مطالعه خواهد شد. هدف از این مطالعه دستیابی به قیرهای پایه مورد نیاز و یا اصلاح مشخصات قیر، منحنی اختلاط قیرهای مورد استفاده در عایق‌های رطوبتی می‌باشد و در این راستا از روش اختلاط و به کارگیری برش H.V.S بهره‌گیری شده است. در نهایت فرمول‌هایی پیشنهاد خواهد شد که در تولید عایق‌های رطوبتی استفاده خواهد شد.

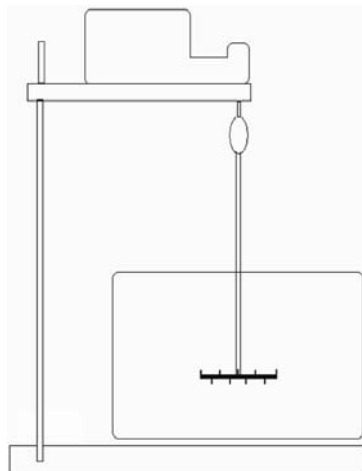
همچنین اثر برهمکنش‌های بین اجزاء مخلوط شده با یکدیگر و چگونگی کاهش گرانیوی قیرهای دارای گرانیوی بالا در حضور مواد قیری و نفتی دیگر مطالعه و بررسی خواهد شد.

۲- بخش تجربی

جهت تعیین مشخصات قیر از دو مشخصه اساسی قیرها یعنی نقطه نرمی و درجه نفوذ بهره‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری نقطه نرمی از روش آزمایش استاندارد ASTM-D36 به روش حلقه و گلوله و برای اندازه‌گیری درجه نفوذ از روش آزمایش استاندارد ASTM-D5 و

جدول ۱: مشخصات مواد اولیه مورد اختلاط.

آزمون	نمونه	برش H.V.S	قیر ۱۱۰/۱۰	قیر ۸۵/۱۰۰
	نقطه نرمی	--	۱۱۰	۴۵
	درجه نفوذ در 25°C (۰/۱mm)	--	۷	۹۳
	کشش‌پذیری در 25°C (cm)	--	۰/۵	+۱۰۰
	نقطه اشتعال ($^{\circ}\text{C}$)	۲۴۸	۳۳۹	۳۲۷
	حلالیت درتری کلرواتیلن (درصد وزنی)	--	۹۹/۹۱	۹۹/۹۹
	گرانیوی کینماتیک	۱۹	--	--



شکل ۳: نمای ساده مخلوط‌کن آزمایشگاهی و نوع همزن آن.

۳- نتایج و بحث

اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با روغن H.V.S

در این مرحله درصدهای مختلف از برش H.V.S و قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با هم مخلوط گردیده و نتیجه آزمایش نفوذ و آزمایش نقطه نرمی در جدول ۲ گزارش و منحنی تغییرات آن در شکل ۴ رسم شده است. معادلات خطوط و R^2 برای هریک از مشخصه‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ در جدول ۳ آورده شده است.

اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰

در این مرحله درصدهای مختلف از قیر ۸۵/۱۰۰ و قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با هم مخلوط گردیده و نتیجه آزمایش نفوذ و آزمایش نقطه نرمی در

جدول ۴ گزارش و منحنی تغییرات آن در شکل ۵ رسم شده است. معادلات خطوط و R^2 برای هریک از مشخصه‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ در جدول ۳ آورده شده است.

اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۵٪ روغن H.V.S

در این مرحله درصدهای مختلف از قیر ۸۵/۱۰۰، قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ همراه با ۵٪ برش H.V.S با هم مخلوط گردیده و نتیجه آزمایش نفوذ و آزمایش نقطه نرمی در جدول ۵ گزارش و منحنی تغییرات آن در شکل ۶ رسم گردیده است. معادلات خطوط و R^2 برای هر یک از مشخصه‌های نقطه نرمی (S.P) و درجه نفوذ در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲: نتایج اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با روغن H.V.S

درجه نفوذ (°/1 mm)	نقطه نرمی (°C)	H.V.S (%)	قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ (%)
۹/۵	۱۰۴	۱۰	۹۰
۱۷/۵	۹۷	۲۰	۸۰
۳۲/۵	۸۳	۳۰	۷۰
۵۸/۲	۶۸	۴۰	۶۰
۱۵۰	۴۹,۵	۵۰	۵۰

جدول ۳: اطلاعات آماری معادلات برازش شده در داده‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ.

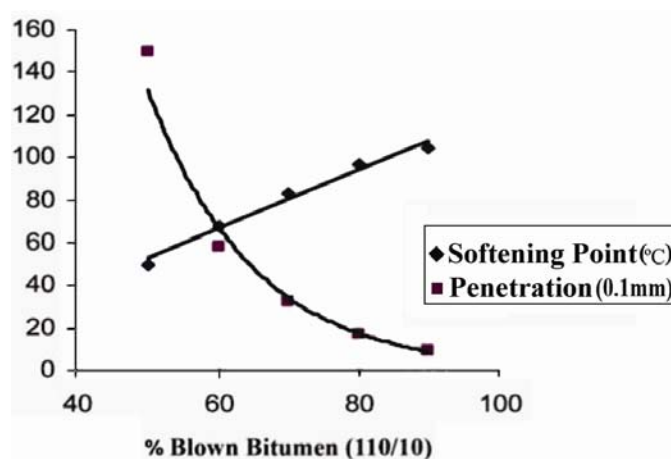
آمیخته قیری	نوع داده‌ها	معادله برازش شده	نوع تغییرات	R^2
۱۱۰/۱۰+HVS	نقطه نرمی	$y = 138x - 16/3$	خطی	۰/۹۷۷۷
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰	درجه نفوذ	$y = 3782/4e^{-6/72.4x}$	نمایی	۰/۹۹۰۳
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۵٪HVS	نقطه نرمی	$y = 61/211x + 50/751$	خطی	۰/۹۹۵۲
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۱۰٪HVS	درجه نفوذ	$y = 53/833e^{-2/2816x}$	نمایی	۰/۹۷۸۷
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۱۵٪HVS	نقطه نرمی	$y = 78/857x + 35/352$	خطی	۰/۹۷۹۲
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۱۰٪HVS	درجه نفوذ	$y = 75/654e^{-2/1885x}$	نمایی	۰/۹۴۴۷
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۱۰٪HVS	نقطه نرمی	$y = 87x + 24/2$	خطی	۰/۹۹۱۷
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۱۰٪HVS	درجه نفوذ	$y = -46/5x + 52/35$	خطی	۰/۹۷۹۳
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۱۵٪HVS	نقطه نرمی	$y = 92/62x + 14/499$	خطی	۰/۹۸۶۸
۱۱۰/۱۰+۸۵/۱۰۰+۱۵٪HVS	درجه نفوذ	$y = 57/16x + 64/185$	خطی	۰/۹۶۱۵

جدول ۴: اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰.

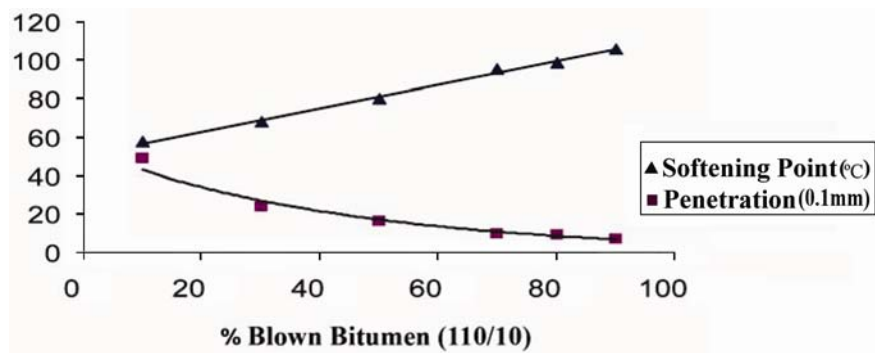
درجه نفوذ (۰/۱ mm)	نقطه نرمی (°C)	قیر ۸۵/۱۰۰ (%)	قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ (%)
۷/۳	۱۰۶	۱۰	۹۰
۹/۴	۹۹	۲۰	۸۰
۱۰	۹۵/۵	۳۰	۷۰
۱۶/۲	۸۰	۵۰	۵۰
۲۴	۶۸	۷۰	۳۰
۴۹	۵۸	۹۰	۱۰

جدول ۵: نتایج اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۵٪ روغن H.V.S.

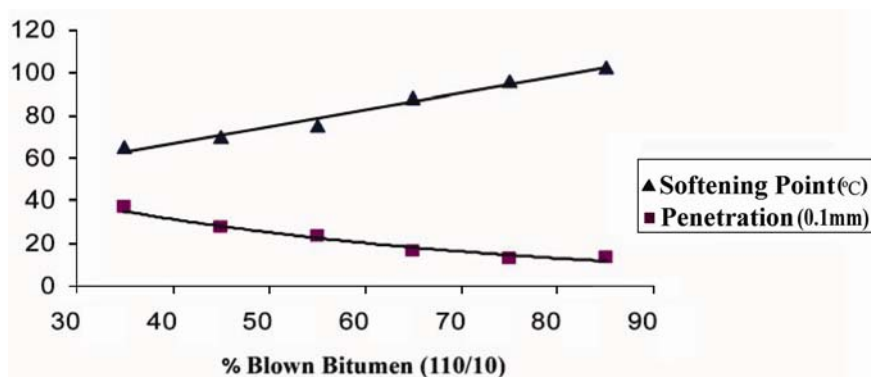
درجه نفوذ (۰/۱ mm)	نقطه نرمی (°C)	قیر ۸۵/۱۰۰ (%)	قیر دمیده ۱۰/۱۱۰ (%)
۱۳/۶	۱۰۲	۱۰	۸۵
۱۳	۹۶	۲۰	۷۵
۱۶/۵	۸۸	۳۰	۶۵
۲۳/۵	۷۵	۴۰	۵۵
۲۸	۷۰	۵۰	۴۵
۳۷	۶۵	۶۰	۳۵



شکل ۴: تغییرات نقطه نرمی و درجه نفوذ آمیخته‌های قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با روغن H.V.S.



شکل ۵: تغییرات نقطه نرمی و درجه نفوذ آمیخته‌های قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰.



شکل ۶: تغییرات نقطه نرمی و درجه نفوذ آمیخته‌های قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۵٪ روغن H.V.S.

شکل ۸ رسم شده است. معادلات خطوط و R^2 برای هر یک از مشخصه‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که در نمودارهای نقطه نرمی و درجه نفوذ دیده می‌شود نقطه نرمی در تمام حالت‌های مورد آزمایش (با افزایش H.V.S) به صورت خطی کاهش می‌یابد. این در حالی است که در همین محدوده درجه نفوذ از حالت نمودار نمایی به خطی تبدیل می‌شود. دلیل این امر را شاید بتوان با بررسی چگونگی توزیع ترکیبات آسفالتن‌ها در قیر بررسی کرد. همانطور که بیان شد در این تحقیق از قیر دمیده که بیشتر بستر این نوع قیرها را گروه‌های آسفالتنی تشکیل می‌دهند و بین آنها پیوندهای بین مولکولی ایجاد گردیده و نمای کلی آنها به صورت گلوله‌های پراکنده در بستر رزینی قیر می‌باشد به همراه H.V.S و قیر ۸۵/۱۰۰ که دارای ذرات آسفالتنی بسیار کمتری حتی از قیر ۶۰/۷۰ می‌باشد استفاده شده است [۱۳].

اختلاف قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۱۰٪ روغن H.V.S

در این مرحله درصدهای مختلف از قیر ۸۵/۱۰۰، قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ همراه با ۱۰٪ برش H.V.S با هم مخلوط گردیده و نتیجه آزمایش نفوذ و آزمایش نقطه نرمی در جدول ۶ گزارش و منحنی تغییرات آن در شکل ۷ رسم گردیده است. معادلات خطوط و R^2 برای هر یک از مشخصه‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ در جدول ۳ آورده شده است.

اختلاف قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۱۵٪ روغن H.V.S

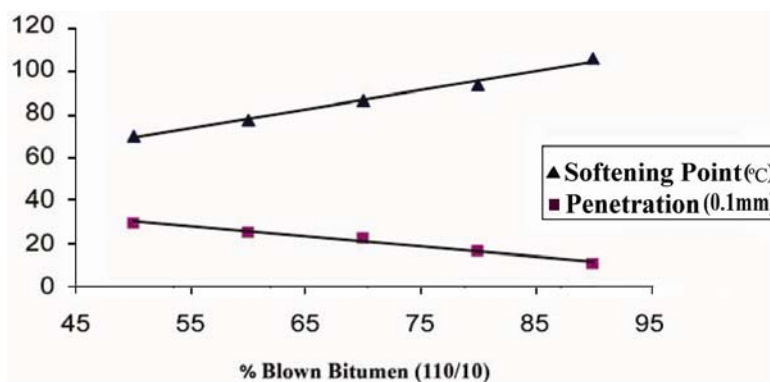
در این مرحله درصدهای مختلف از قیر ۸۵/۱۰۰، قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ همراه با ۱۵٪ برش H.V.S با هم مخلوط گردیده و نتیجه آزمایش نفوذ و آزمایش نقطه نرمی در جدول ۷ گزارش و منحنی تغییرات آن در

جدول ۶: نتایج اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۱۰٪ روغن H.V.S.

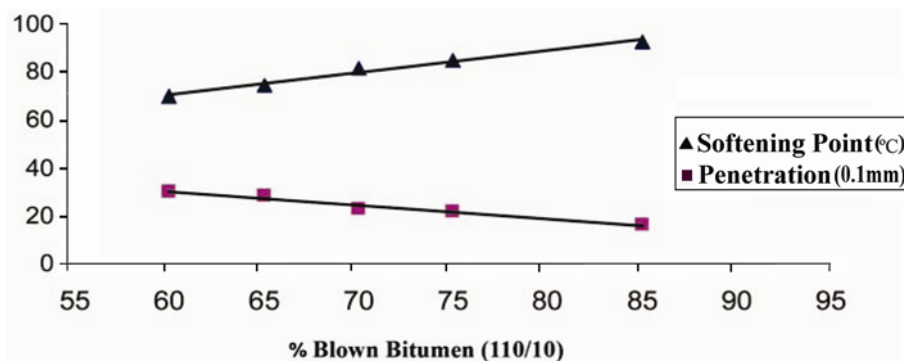
درجه نفوذ (۰/۱ mm)	نقطه نرمی (°C)	قیر ۸۵/۱۰۰ (%)	قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ (%)
۹/۵	۱۰۴	۰	۹۰
۱۵/۵	۹۲	۱۰	۸۰
۲۱/۵	۸۵	۲۰	۷۰
۲۴	۷۶	۳۰	۶۰
۲۸/۵	۶۸/۵	۴۰	۵۰

جدول ۷: نتایج اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۱۵٪ روغن H.V.S.

درجه نفوذ (۰/۱ mm)	نقطه نرمی (°C)	قیر ۸۵/۱۰۰ (%)	قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ (%)
۱۶	۹۲/۵	۰	۸۵
۲۱/۳	۸۴/۳	۱۰	۷۵
۲۲/۵	۸۱	۱۵	۷۰
۲۸/۴	۷۴	۲۰	۶۵
۲۹/۸	۶۹/۵	۲۵	۶۰



شکل ۷: تغییرات نقطه نرمی و درجه نفوذ آمیخته‌های قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۱۰٪ روغن H.V.S.



شکل ۸: تغییرات نقطه نرمی و درجه نفوذ آمیخته‌های قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۱۵٪ روغن H.V.S.

مشاهده کرد. در حالی که در شکل ۵ کاهش آسفالتن‌ها با افزایش قیر ۸۵/۱۰۰ که خود شامل مقداری آسفالتن بوده و توانایی کمتری برای انحلال قیر ۱۱۰/۱۰ را دارد همراه می‌باشد. در نتیجه کاهش در انرژی همچسبی بین آسفالتن‌ها و گرانروی با سرعت کمتری انجام می‌گیرد و به پیروی از آن تبدیل ساختار ژل به ساختار سل نیز با شدت کمتری صورت می‌پذیرد.

این مورد را می‌توان با توجه به نظریه امولسیون‌ها نیز بررسی کرد زیرا اگر H.V.S و قیر ۸۵/۱۰۰ را مانند امولسیفایر آسفالتن‌ها در نظر بگیریم (همانند بررسی رفتار امولسیون‌ها)، با اندازه‌گیری نیروهای بین ذرات امولسیون می‌توان به انرژی زیاد بین آنها پی برد. این انرژی توسط یک امولسیفایر کاهش یافته و هر چه غلظت امولسیفایر بیشتر باشد قطر ذرات امولسیونی کمتر شده و با قرار گرفتن در بین ذرات روغن یا قیر موجب ایجاد انرژی‌های دافعه‌ای از نوع الکتریکی می‌نمایند [۱۸]. در شکل‌های ۶ تا ۸ نیز با افزایش H.V.S به ترتیب سرعت انتقال ژل به سل و کاهش گرانروی در اثر کاهش انرژی همچسبی بین آسفالتن‌ها بیشتر می‌شود. همانطور که از شیب تغییرات نقطه نرمی آنها دیده می‌شود از ۶۱ در شکل ۶ به ۹۲ در شکل ۸ تغییر کرده است.

اما در مورد آزمون‌های درجه نفوذ شرایط کمی متفاوت است و در نگاه اول شاید کمی غیر منطقی به نظر آید. زیرا با توجه به درجه نفوذ در آزمایش‌های انجام شده به وضوح تبدیل تغییرات از حالت نمایی به حالت خطی در ناحیه‌ای که آزمایش‌ها انجام شده است را می‌توان مشاهده کرد. توجیه رفتارهای متفاوت درجه نفوذ در قبال تغییر غلظت آسفالتن‌ها می‌تواند به شرح زیر باشد.

با توجه به شکل ۴ (جایی که فقط قیر دمیده با H.V.S مخلوط می‌شود) متوجه تغییرات شدید نمایی درجه نفوذ می‌شویم. همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود در درصد‌های بالای قیر دمیده غلظت ترکیبات آسفالتنی بسیار بالا بوده، در نتیجه انرژی همچسبی بین آنها به سوزن اجازه نفوذ به داخل قیر را نمی‌دهد. این امر با وجود افزایش تا ۲۰٪ از H.V.S ادامه داشته و با توجه به مطالب فوق [۱۵، ۱۹] در این فاصله H.V.S به فضای بین آسفالتن‌ها نفوذ می‌کند و با کاهش انرژی همچسبی مقاومت آسفالتن‌ها را نسبت به نفوذ سوزن کاهش داده و موجب افزایش درجه نفوذ می‌شود. ولی هنوز گروه‌های آسفالتنی انرژی همچسبی بین خود را در بستر رزینی تا حد زیادی از دست نداده‌اند و همچنان ساختار ژلی خود را حفظ می‌کنند. این امر موجب تغییر درجه نفوذ به شکل خطی می‌شود. ولی با نزدیک شدن این حالت به حالت بحرانی و سپس حالت رقیق شده و با کاهش درصد آسفالتن‌ها علاوه بر اینکه میزان آسفالتن‌ها کمتر شده است، بر میزان ترکیبات مالتنی قیر (آروماتیک‌های نفتنی و آروماتیک‌های قطبی) نیز افزوده می‌شود که نتیجه آن افزایش فاصله آسفالتن‌ها از هم و کاهش زیاد انرژی همچسبی آنها است. ترکیبات آسفالتنی با کاهش غلظت

در هنگام اندازه‌گیری نقطه نرمی سطوح بیشتری نسبت به درجه نفوذ (در واقع یک سطح ۰/۵ سانتیمتری) تحت نیروی برشی قرار می‌گیرد در حالی که در اندازه‌گیری درجه نفوذ فقط یک سطح کمتر از یک میلیمتری تحت نیروی برشی قرار می‌گیرد و در این حالت انرژی‌های همچسبی (cohesive energy) بین ترکیبات آسفالتنی در سطوح بسیار کوچک‌تری تحت نیروی برشی قرار می‌گیرد که با مراجعه به مرجع [۱۴] می‌توان اطلاعات کافی در مورد انواع نیروهای برشی به دست آورد.

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش H.V.S یک کاهش خطی در نقطه نرمی دیده می‌شود. این مطلب را می‌توان با تعمیم به یافته‌های Sanier توجیه کرد که در مورد کاهش گرانروی نفت خام با افزودن روان کننده‌ها تحقیق کرده است. Sanier علت کاهش گرانروی را انتقال حالت ژل به حالت سل و کاهش انرژی همچسبی بین آنها می‌داند [۱۵]. با تعمیم توجیه فوق به کاهش نقطه نرمی و افزایش درجه نفوذ دیده می‌شود که در درصد‌های بالای قیر دمیده درصد‌های آسفالتن‌ها بیشتر بوده و انرژی همچسبی زیاد بین آنها باعث افزایش گرانروی و بوجود آمدن ساختمان ژل (شکل ۹ سمت چپ) در ترکیب مورد نظر می‌شود. با افزایش H.V.S مولکول‌های آن در فواصل بین ذرات آسفالتن نفوذ کرده و با ایجاد فاصله در بین آنها نیروی همچسبی آسفالتن‌ها را کاهش می‌دهد که این امر با کاهش گرانروی و مقاومت در مقابل نیروی برشی حاصل از گلوله در آزمون نقطه نرمی همراه است. این روند تا آنجا ادامه دارد که ساختار ژل آسفالتن‌ها جای خود را به ساختار سل (شکل ۹ سمت راست) که دارای گرانروی و انرژی همچسبی به مراتب کمتر از ساختار ژل است می‌دهد. در این حالت بستر غالب مخلوط را رزین‌های مالتن قیر و H.V.S فرا گرفته است و ذرات آسفالتنی با کاهش شدید انرژی همچسبی مواجه شده و به صورت پراکنده در این بستر قرار می‌گیرند. در شکل ۵ نیز مانند شکل ۴ تغییرات نقطه نرمی با کاهش آسفالتن‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد که در اینجا نیز جایگزینی قیر ۸۵/۱۰۰ به جای آسفالتن‌ها موجب کاهش انرژی همچسبی و کاهش گرانروی می‌شود. با این تفاوت که شیب تغییرات نقطه نرمی در شکل ۴ معادل ۱۳۸ و در شکل ۵ برابر ۶۱ می‌باشد. دلیل این امر نیز با توجه به بررسی‌های Friedrich که تأثیر نفوذ حلال‌های مختلف با جرم مولکولی متفاوت را در قیر و نفت خام بررسی کرده است و نشان داده است که افزایش در توان انحلال حلال موجب تغییرات شدیدتری در کاهش گرانروی می‌شود قابل توجیه است [۱۶]. در این قسمت نیز این کاهش شیب تغییرات بدین دلیل است که در شکل ۴ کاهش آسفالتن‌ها با افزایش رزین‌ها و روان کننده‌ها همراه است و از طرفی قدرت حلالیت قیر بیشتری نسبت به قیر ۸۵/۱۰۰ دارد. در نتیجه آن کاهش ناگهانی در انرژی همچسبی آسفالتن‌ها و گرانروی پدید می‌آید که سیر تبدیل شدن ساختار ژل به ساختار سل در این مورد با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد [۱۷]. این ساختار را می‌توان در شکل ۱۰

آسفالتن‌ها در بستر رزینی قیر انرژی همچسبی بین خود را از دست داده و پس از عبور از ساختار ژل وارد یک ساختار گذار (transition) و بحرانی می‌شود که این مسأله موجب جهش ناگهانی در درجه نفوذ و رفتار نمایی تا قبل از رسیدن به ساختار سل می‌شود (شکل‌های ۹ و ۱۱).

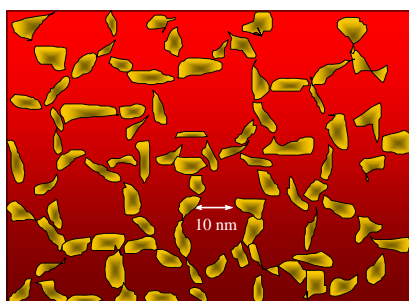
در شکل ۱۲ سه حالت ژل، بحرانی و سل در کنار هم مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در حالت سل (قسمت بالای شکل) ذرات آسفالتنی به طور کامل از هم فاصله داشته و نیروهای جاذبه بین آنها از بین رفته است در حالی که در حالت بحرانی (قسمت میانی شکل) حالت‌گذاری بین ژل و سل دیده می‌شود که با کوچک‌ترین تنش تغییرات زیادی در نیروهای بین آسفالتن‌ها به وجود می‌آید. در حالی که در حالت ژل آسفالتن‌ها آنقدر به یکدیگر نزدیک شده‌اند که حتی با یکدیگر همپوشانی دارند و این مسأله موجب افزایش نیروهای بین ذرات آسفالتن‌ها می‌شود [۱۵].

با توجه به شکل ۵ (جایی که فقط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر

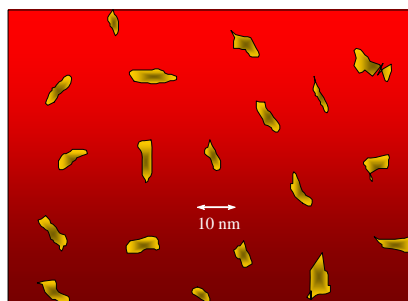
آسفالتن‌ها در بستر رزینی قیر انرژی همچسبی بین خود را از دست داده و پس از عبور از ساختار ژل وارد یک ساختار گذار (transition) و بحرانی می‌شود که این مسأله موجب جهش ناگهانی در درجه نفوذ و رفتار نمایی تا قبل از رسیدن به ساختار سل می‌شود (شکل‌های ۹ و ۱۱).

در شکل ۱۲ سه حالت ژل، بحرانی و سل در کنار هم مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در حالت سل (قسمت بالای شکل) ذرات آسفالتنی به طور کامل از هم فاصله داشته و نیروهای جاذبه بین آنها از بین رفته است در حالی که در حالت بحرانی (قسمت میانی شکل) حالت‌گذاری بین ژل و سل دیده می‌شود که با کوچک‌ترین تنش تغییرات زیادی در نیروهای بین آسفالتن‌ها به وجود می‌آید. در حالی که در حالت ژل آسفالتن‌ها آنقدر به یکدیگر نزدیک شده‌اند که حتی با یکدیگر همپوشانی دارند و این مسأله موجب افزایش نیروهای بین ذرات آسفالتن‌ها می‌شود [۱۵].

با توجه به شکل ۵ (جایی که فقط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ با قیر

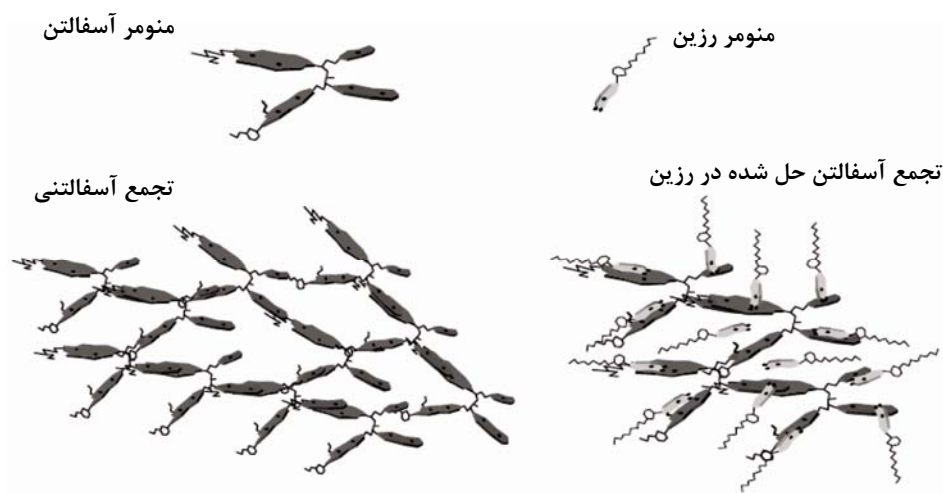


حالت ژل

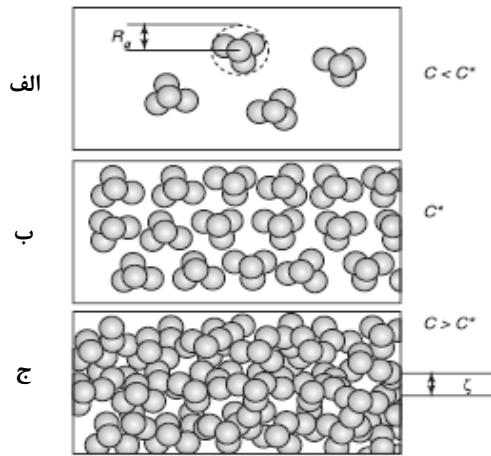


حالت سل

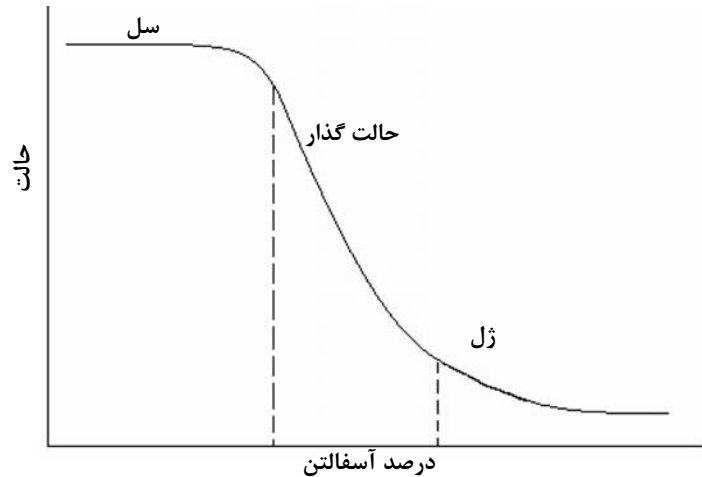
شکل ۹: طرح‌های ساده حالت‌های سل و ژل قیر [۳].



شکل ۱۰: ساختار آسفالتن‌ها در کنار رزین‌ها یا روغن‌ها [۱۸].



شکل ۱۲: ساختار سل (الف)، بحرانی (ب) و ژل (ج) [۱۵].



شکل ۱۱: تشریح حالت انتقال از حالت سل به حالت ژل.

به بعد در شکل ۵ تغییرات درجه نفوذ نمایی می‌شود و همانطور که بیان شد در این حالت مخلوط در ساختار گذار واقع شده که در حال سپری کردن این ساختار به ساختار سل می‌باشد و تأثیر آن در شکل ۶ نیز دیده می‌شود که مخلوط را با کمک ۵٪ روغن H.V.S مجبور به تغییر ناگهانی در انرژی همجسی می‌کند و یک تغییر نمایی ملایم در انتهای شکل ظاهر می‌شود.

دلیل خطی رفتار کردن در شکل‌های ۷ و ۸ را نیز می‌توان مانند بالا توجیه کرد زیرا هر دو نمودار در ناحیه‌ای از درصدهای قیر دمیده (درصد آسفالتن‌ها) نسبت به قیر ۸۵/۱۰۰ و قیر دمیده نسبت به H.V.S هستند که در هر دو حالت نمونه‌های مورد آزمایش، ساختار ژل دارند و هنوز وارد ساختار گذار نشده‌اند (در شکل ۴ و هم در شکل ۵ در آن نواحی درجه نفوذ به صورت خطی رفتار می‌نماید). افزایش این ترکیب‌ها در ناحیه مورد آزمایش علاوه بر اینکه به تنهایی موجب غیرخطی شدن درجه نفوذ نمی‌شوند بلکه ترکیب آنها در آن نواحی نیز موجب رفتار خطی مخلوط و باقی ماندن در ساختار ژل می‌شوند. پس می‌توان دلیل رفتار خطی در هر دو شکل ۷ و ۸ را رفتار خطی هر یک از اجزاء تشکیل دهنده مخلوط به تنهایی با قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ توجیه کرد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و بررسی رفتارها، نیروهای بین آسفالتن‌ها و ارتباط آنها با نقطه نرمی و درجه نفوذ می‌توان به این نکته اشاره نمود که در هنگام انجام آزمون‌های مختلف نقطه نرمی و درجه نفوذ نیروهای تقریباً مشابهی با مکانیسم‌های مختلف اعمال می‌گردند که نتایج متفاوتی را حاصل می‌نمایند در این مقاله همانطور که دیده شد نقطه نرمی در تمام مراحل اختلاط به صورت خطی عمل می‌نماید و کاملاً قابل پیش‌بینی هستند و می‌توان از طریق آنها به قیری با نقطه نرمی دلخواه دست یافت و این نتیجه به معنای پیروی درجه نفوذ به حالت خطی نیست با وجود اینکه در هر دو نوع نیروی برشی اعمال می‌شود اما سطوح اعمال

در توضیح مطالب فوق می‌توان همانطور که Friedrich تأثیر حلال‌های مختلف را در کاهش گرانشی بررسی کرده است [۱۶]، H.V.S و قیر ۸۵/۱۰۰ را مانند حلال‌هایی با قدرتهای مختلف برای قیر ۱۱۰/۱۰ در نظر گرفت که هر چه حلال قوی‌تر باشد تغییرات گرانشی و در نتیجه تغییرات انرژی همجسی، نسبت به کاهش درصد آسفالتن‌ها به صورت نمایی تغییر می‌کند. در این حالت نیز با مقایسه درجه نفوذ شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود که درجه نفوذ در مخلوط H.V.S با قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ به علت توانایی حلالیت بیشتر H.V.S با نمای بزرگ‌تری نسبت به شکل ۵ که قیر ۸۵/۱۰۰ با قیر ۱۱۰/۱۰ مخلوط شده است تغییر می‌کند.

در جای دیگر بررسی شکل ۶ (جایی که قیر دمیده و قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقدار ثابت ۵٪ روغن H.V.S با هم مخلوط می‌شوند) حکایت از آن دارد که درجه نفوذ با کاهش قیر دمیده تا ۶۵٪ به صورت خطی و پس از آن به صورت نمایی تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۶ در تمام آزمایش‌ها درصد قیر دمیده نسبت به H.V.S بین ۹۴ تا ۸۷٪ در حال تغییر است. با مقایسه این اعداد با شکل ۴ مشاهده می‌شود که تغییرات درجه نفوذ در ناحیه بین ۹۴ تا ۸۷٪ از قیر دمیده به صورت خطی تغییر می‌کند و در ناحیه خطی ساختار ژل سپری می‌شود و افزایش ۵٪ روغن H.V.S به قیر دمیده موجب تغییرات غیرخطی درجه نفوذ نمی‌شود. پس دلیل نمایی بودن شکل ۶ را می‌توان تأثیر قیر ۸۵/۱۰۰ با قیر ۱۱۰/۱۰ دانست که با بررسی شکل ۵ توجیه خواهد شد. با توجه به شکل ۵ درصد قیر دمیده نسبت به قیر ۸۵/۱۰۰ در ناحیه بین ۹۰ تا ۶۰٪ به صورت خطی عمل می‌کند و هنوز در ساختار ژل واقع شده است. در شکل ۶ نیز تا ۶۵٪ (۶۵٪) در شکل ۶ در واقع بین قیر دمیده، قیر ۸۵/۱۰۰ و H.V.S می‌باشد که درصد قیر دمیده نسبت به قیر ۸۵/۱۰۰ بدون در نظر گرفتن H.V.S معادل ۶۳٪ در شکل ۵ می‌باشد) درجه نفوذ به صورت خطی رفتار کرده است و نشان دهنده این است که تا این غلظت هم هنوز ساختار مخلوط، ساختار ژل می‌باشد. از ۶۰٪

تقدیر و تشکر

در انتها از شرکت عایق‌های رطوبتی ایران بخصوص سرکار خانم جلیلی و آقای روزبه محبی که امکانات لازم برای این تحقیق را فراهم کردند تشکر می‌شود.

همچنین از خانم الهام تقدیر که در تحریر و ویراستاری مقاله کمک کرده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

۵- مراجع

1. R. Scharff, Roofing Handbook. McGraw-Hill, New York, 1996.
2. A. A. Yousefi, S. M. Jalali, Conforming roofing membrane bitumen properties with ISIRI 3885 (A and S levels) using domestic polymers. Proceedings of the 1st National Conference on Polymer-Modified Bitumens and their Applications, Dec. 16-17(2002), 191-197.
3. A. A. Yousefi, Novel polymeric blends for bitumen modification. Proceedings of 1st State-Wide Roofing Conference, October (2001), 19-27.
4. A. J. Hoiberg, Bituminous materials. John Wiley Inc., New York 1979.
5. K. Beaton, The start of american oil refining. 29, (Mar.,1955), Business History Review. 28-53.
6. E. J. Barth, Asphalt science and technology. Janday Co., New York 1975.
7. A. R. Moeini, Introduction to bitumen and related tests. Research Institute of Petroleum Industry, 2005.
8. A. A. Yousefi, Preparation and rheological behavior of polymer-modified asphalts. Ph.D Dissertation, Dept. of Chem. Eng., Laval University, Quebec, Canada, 1999.
9. R. Thomas, Asphaltic road construction. by Hunter. R., Thomas Telford Ltd 2000.
10. British Standard BS 2000: Part 49-Penetration of bitumen and bituminous materials, this British Standard is identical to IP 49/86(89).
11. British Standard BS 2000: British Standard Methods of test for petroleum and its products. Part 58: Softening point of bitumen. This British Standard is identical to IP 58/86(89).
12. British Standard BS EN 12591:2000: Bitumen and bituminous binders-specification for paving grade bitumen.
13. The Shell Bitumen Handbook, Shell Oil Co., 1989.
14. J. F. Steffe, Rheological method in food process engineering. Michigan State University, 1996. (<http://www.egr.msu.edu/~steffe/freebook/STEFFE.pdf>).
15. A. Saniere, I. Henaut, J. F. Argillier, Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge. *Oil Gas Sci. Technol. IFP*, 59(2004), 455-466.
16. K. Friedrich, Effect of non-condensable on the vapex process. Ph.D Dissertation, University of Waterloo, Ontario, Canada 2005.
17. K. L. Gawryse, How asphaltene aggregate: role of chemistry and solvent. Ph.D Dissertation Dept. of Chem. Eng., North Carolina State University, 2005.
18. Bitumen emulsion technical bulletin. Akzo Nobel Asphalt Application-U.S.A, 2007.
19. E. De Angelis, C. M. Casciola, V. S. L'vov, A. Pomyalov, I. Procaccia, V. Tiberkevich, Drag reduction by a linear viscosity profile. *Phys. Rev. E*.70(2004), 055301-1-055301-4.

نیروی متفاوتی را دارا می‌باشد که رفتارهای متفاوتی را حاصل می‌نمایند و همانطور که در نتایج تغییر درجه نفوذ مشاهده می‌شود درجه نفوذ برخلاف انتظار رفتار خطی در تمام مراحل ندارد و فقط در ناحیه‌هایی از اختلاط، رفتار قابل پیش‌بینی دارند که اختلاط از آنها (H.V.S) و قیر ۸۵/۱۰۰ به تنهایی با قیر دمیده رفتار خطی داشته و به عبارت دیگر هر دو ماده افزودنی به قیر دمیده (H.V.S) و قیر ۸۵/۱۰۰ در هنگام اختلاط آنها به تنهایی به قیر ۱۱۰/۱۰ در ساختار ژل باقی مانده باشند و در این حالت، اختلاط هر دو ماده افزودنی به قیر دمیده به طور هم زمان در یک ناحیه همان رفتاری را خواهد داشت که هر یک از مواد افزودنی به تنهایی در این ناحیه رفتار خواهند کرد. پیرو مطالب فوق اگر در هنگام اختلاط H.V.S و قیر ۸۵/۱۰۰ با قیر دمیده ۱۱۰/۱۰، چند حالت قابل رخ دادن است:

- اختلاط در ناحیه‌ای واقع شده باشد که رفتار درجه نفوذ هر یک از اجزاء به تنهایی با قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ در آن ناحیه رفتار خطی از خود نشان می‌دهند (در هر دو حالت در ساختار ژل واقع شده باشند) که در این صورت محصول حاصل اختلاط نیز رفتار خطی از خود نشان می‌دهد.
- اختلاط در ناحیه‌ای واقع شده باشد که رفتار درجه نفوذ هر یک از اجزاء به تنهایی با قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ در آن ناحیه رفتاری باشد (در هر دو حالت در ساختار سل واقع شده باشند) که در این صورت رفتار درجه نفوذ مخلوط حالت نمایی دارد.
- اختلاط در ناحیه‌ای واقع شده باشد که فقط یکی از اجزاء در آن ناحیه به تنهایی با قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ رفتار نمایی داشته و دیگری دارای رفتار خطی باشد که در این صورت درجه نفوذ مخلوط به صورت نمایی با شیب کمتر از حالت نمایی آن جزیی که با قیر دمیده رفتار نمایی دارد تغییر می‌کند.
- با اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ و روغن H.V.S می‌توان قیرهای ۸۵/۲۵ و ۹۰/۱۵ تولید نمود.
- با اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ و قیر ۸۵/۱۰۰ با یا بدون حضور مقدار ۵٪ وزنی از H.V.S می‌توان قیر ۹۰/۱۵ تهیه نمود اما امکان تولید قیر ۸۵/۲۵ در این مورد وجود ندارد.
- با اختلاط قیر دمیده ۱۱۰/۱۰ و قیر ۸۵/۱۰۰ در حضور مقادیر ۱۰٪ و یا ۱۵٪ وزنی از H.V.S می‌توان هر دو قیر ۸۵/۲۵ و ۹۰/۱۵ را تولید نمود.
- با افزایش میزان برش H.V.S در نسبت‌های اختلاط می‌توان قیری با الاستیسیته بالاتر تولید کرد. به عبارت دیگر، با افزایش میزان H.V.S می‌توان در یک نقطه نرمی مشخص به درجه نفوذ بالاتری دست یافت. با توجه به موارد فوق مشخص می‌گردد که در صورت تهیه منحنی‌های اختلاط و به دست آوردن معادلات خطوط مربوطه، بررسی امکان دستیابی به قیری با مشخصات مطلوب با استفاده از مواد اولیه مورد نظر و تعیین نسبت اختلاط به سادگی میسر می‌باشد. از طرفی از آنجا که اختلاط، روشی بسیار ساده بوده، لذا کاربرد این فناوری در صنعت، کاملاً عملی است.