معرفی نرم‌افزار شبیه‌ساز تشکیل آسفالتین پارس

سیدعلی موسوی دهقانی*، محمود دین‌محمد[1]، عطیه‌سادات دیباجی[2]، سیدصالح هندی[3]، محمد امیری[4] ■ پژوهشگاه صنعت نفت

مقدمه

آسفالتین‌ها مولکول‌های هیدروکربنی سنگینی هستند که به‌طور طبیعی در سیال مخزن وجود دارند. از دید عملیاتی آسفالتین‌ها برش قطبی و غیرفرار نفت هستند که در نرمال آلکان‌ها مثل پنتان، هگزان و هپتان غیرقابل‌حل و در حلال‌های آروماتیکی مانند تولوئن و بنزن محلول هستند. عموماً با افزایش تعداد کربن نرمال آلکان رسوب‌دهنده، وزن مولکولی، قطبیت و آروماتیسیتی آسفالتین‌های رسوب‌کرده افزایش می‌یابد. مطالعات در مورد آسفالتین نشان می‌دهد که این رسوب از مولکول‌های بزرگِ شامل اتم‌های کربن که در داخلی‌ترین قسمت هسته قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. قسمت خارجی هسته شامل کربن، هیدروژن، گوگرد، اکسیژن و نیتروژن است؛ به‌طوری که آخرین ترکیبات ذکر شده (هترو اتم‌ها) از طریق جذب سطحی با سیستم ارتباط خواهند داشت و با افزایش تعداد هترو اتم‌ها و افزایش آروماتیسیته‌ی نفت، وزن مولکولی آسفالتین افزایش خواهد یافت. همچنین آسفالتین شامل فلزات گروه انتقالی مانند نیکل، وانادیم و مقدار جزیی آهن و مس است. بنابراین می‌توان گفت آسفالتین مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات آلی است که در آن هر نوع ترکیب، مشخصه‌ی مربوط به‌خود را دارد. وزن مولکولی آسفالتین‌ها بسیار زیاد و در محدوده‌ی ۷۰۰ تا ۲,۰۰۰,۰۰۰ است. واکنش شیمیایی، الکتریکی یا مکانیکی سبب عدم‌تثبیت ذرات، لخته‌شدن و رسوب آسفالتین می‌شود. دما، فشار، ترکیب شیمیایی نفت، تأثیر جریان الکتریکی در حفره‌ی چاه و همچنین آشفتگی بر رسوب آسفالتین مؤثر هستند [۱و۲].

آسفالتین‌ها ممکن است به‌دلیل عوامل مختلفی از جمله تغییرات دما، فشار، ترکیب درصد، PH، رژیم جریان، اثرات دیواره‌ی چاه، تأثیر جریان الکتریکی در حفره‌ی چاه، آشفتگی و... رسوب کنند. همچنین ممکن است طی کاهش فشار مخزن در حین تولید طبیعی نفت یا طی فرآیند تزریق گاز جهت افزایش ضریب برداشت مخزن یا افزودن رقیق‌کننده‌ها به نفت سنگین (جهت فرآورش)، آسفالتین تشکیل شود. ته‌نشینی آسفالتین ممکن است در تمامی نقاط سیستم تولیدی از جمله داخل مخزن، اطراف چاه، خطوط لوله‌ی انتقال، تأسیسات سطح‌الارضی و تجهیزات پالایشگاهی رخ دهد. رسوب این مواد سنگین سبب کاهش تولید و مشکلات دیگری نیز می‌شود. تشکیل رسوب آسفالتین سبب کاهش نفوذپذیری، آسیب سازند، مسدود شدن ستون چاه و تأسیسات سطح‌الارضی، افزایش گرانروی سیال مخزن، تشکیل امولسیون نفت در آب و در نهایت کاهش یا توقف تولید خواهد شد که این امر زیان‌های اقتصادی گسترده‌ای به‌همراه خواهد داشت.

با توجه به هزینه‌های فراوان تشکیل رسوب آسفالتین در ترکیبات نفتی (از مخزن تا تأسیسات فرآورش نفت) و نیز هزینه‌های فراوان مربوط به انجام آزمایش‌های دما و فشار زیاد جهت تعیین رفتار فازی آسفالتین،

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات(mousavisa@ripi.ir)

مجهز شـدن به ابـزاری برای پیش‌بینـی رفتار فـازی آسـفالتین در فرآیندهـای مختلف (از تولیـد نفـت در مخزن تـا تولید و فـرآورش نفـت در تأسیسـات و فرآیندهـای مختلـف پایین‌دسـت) امری ضـروری به‌نظر می‌رسـد. جهت پاسخ‌گویی به این سؤالات باید در کنار فعالیت‌های آزمایشگاهی، مدل‌هایی نظری نیز ارائه کرد تـا بتوان به کمک آنهـا رفتار فازی رسوب آسفالتین را با دقت قابل‌قبولی پیش‌بینی کرد. مدل‌های مذکور مدل‌های ترمودینامیکی یا استاتیکی رسـوب آسفالتین نامیده می‌شوند. در طول سـالیان اخیر مدل‌هـای مختلفی برای پیش‌بینی رفتار فازی آسفالتین‌ها پیشنهاد و ارائه شـده اسـت. مدل‌های ترمودینامیکی بر اساس طبیعت و ماهیت آسـفالتین و حلالیت آنها در نفت توسـعه یافته‌اند [۳و۴و۵و۶]. در این زمینه کارهای متنوع و متعددی انجام شـده است. با توجه به پیچیدگی ماهیت و نیز رفتار آسفالتین در ترکیبـات نفتی، تعداد بسـیار کمـی از این مدل‌هـا می‌توانند در شـرایط خـاص عملیاتی (مانند دما، فشـار یا تزریق) ایـن رفتار فازی را پیش‌بینی کنند.

دانستن اینکه آسفالتین در چه شرایطی و چه مقدار رسـوب می‌کند می‌تواند کمک مؤثری جهت پیشگیری از ضرر و زیان اقتصادی باشد. از ایـن‌رو با توجه به امکان تشـکیل رسـوب آسفالتین در نقاط مختلف فرآیند تولید و تزریق و متغیرهـای متنوع مؤثر در ایجـاد این پدیده، نیاز به‌توسعه‌ی نرم‌افزاری بومی و مستقل جهت پیش‌بینی، کنترل و مدیریت رسوبات آسفالتینی و نیـز پیش‌بینی و تعیین اثـر متغیرهای مختلف بر رسـوب آسـفالتین به‌منظور تولید صیانتی و افزایش ضریب برداشت از مخازن بیش از پیش احساس می‌شد. در راسـتای نیل به این هدف، تحلیل، طراحی و پیاده‌سـازی نرم‌افزار شبیه‌ساز تشکیل آسفالتین پارس[۵] انجام شد.

۱- نرم‌افزار شبیه‌ساز تشکیل آسفالتین پارس

با توجـه به نیـاز بخش بالادسـتی صنعت نفت به داشـتن نرم‌افـزاری مناسـب و بومی جهـت پیش‌بینی رفتـار فازی آسـفالتین و بنا به‌درخواست شـرکت مهندسی و توسعه نفت (متن)، تولید و توسـعه‌ی شبیه‌سـاز تشـکیل آسـفالتین پارس در گروه توسـعه‌ی نرم‌افزار پارس (از زیرمجموعه‌هـای پردیس پژوهش و توسعه‌ی صنایع بالادستی پژوهشگاه صنعت نفت) از سال ۱۳۹۱ آغاز شد و در اسفند ۱۳۹۲ نسخه‌ی نخست این نرم‌افزار ارائه گردید.

از مهم‌ترین مـوارد کاربرد ایـن نرم‌افزار می‌تـوان بـه پیش‌بینـی، کنتـرل و مدیریت رسوبات آسفالتینی و نیز پیش‌بینی و تعیین اثر متغیرهای مختلف بر این رسـوب اشاره کرد. این نرم‌افزار جهت اسـتفاده در شـرکت ملی نفت و شـرکت‌های تابعه و سـرمایه‌گذار در زمینه‌ی نفت جهت بررسـی و فهم بهتر رفتار فازی آسـفالتین و تأثیر این ترکیبات بر تولید، انتقال، ذخیره و پالایش خواهد بود.

این شبیه‌سـاز از جمله معدود نرم‌افزارهای موجود جهت پیش‌بینی رفتار فازی آسـفالتین اسـت که به‌صورت مسـتقل و تقریبـاً جامع تشـکیل آسـفالتین در فرآیندهـای مختلف را شبیه‌سـازی می‌کنـد. تئوری‌های اسـتفاده شـده در این نرم‌افزار برای شبیه‌سـازی رفتار آسـفالتین شـامل تئوری محلول‌های پلیمری است که نسـبت به سـایر تئوری‌ها مثل مدل جـام، بـه ماهیـت و واقعیـت آسـفالتین در سیسـتم‌های نفتـی نزدیک‌تـر می‌باشـد. دو مدل مورد اسـتفاده در این نسـخه از نرم‌افزار عبارتند از مدل محلول پلیمری اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینـز[۶] و مدل محلول پلیمری میلر-اصلاح‌شـده‌ی فلوری-هاگینـز[۷]. جزئیـات مربوط به هـر دو مدل در منابـع [۳و۴و۵و۶] ذکر شده است.

متغیرهای قابل‌تنظیم مدل آسـفالتین شامل چگالی (یا وزن مولکولی) آسفالتین، حلالیت آسـفالتین، ضریـب برهم کنش آسـفالتین و نفت و نیز عدد کئوردیناسیون آسفالتین (فقط در مدل میلر) اسـت. با توجه به اینکه معمولاً در کنـار داده‌هـای مربوط به میزان تشـکیل آسـفالتین، داده‌های مربوط به وزن مولکولی و/یا چگالی آسـفالتین نیز در دسـترس است در این نسـخه کاربر با داشـتن هریک از این دو داده می‌توانـد دیگـری را برازش کرده و به‌دسـت آورد. در صورتی‌که هـر دوی این داده‌ها موجـود بوده و نیازی بـه برازش آنها نباشـد کاربـر می‌تواند یکی را بـرای برازش انتخاب کـرده و در قسـمت مربوطه با تنظیم حد بالا و پایین و مقدار اولیه یکسان، آن داده را نیز بدون تغییر در مدل‌سازی وارد کند.

متغیرهـای مدل‌های مورد اسـتفاده در این نرم‌افـزار با داده‌هـای آزمایشـگاهی مربوط بـه آسـفالتین و نیـز داده‌های آزمایشـگاهی مربـوط به میزان تشـکیل آسـفالتین (در این نسـخه داده‌های آزمایشـگاهی میزان تشکیل آسـفالتین در فرآینـد تخلیه طبیعـی) برازش می‌شـوند. پس از تنظیم متغیرهای مدل مورد اسـتفاده در نرم‌افـزار با اسـتفاده از داده‌های آزمایشگاهی، نرم‌افزار قادر به پیش‌بینی میزان تشکیل آسـفالتین در شرایط تولید طبیعی، در مسیر تولید، در فرآیندهای تزریق (تزریق گاز یـا حلال) و نیـز اختلاط نفت‌هـا در دماهای مختلف خواهد بود.

۱-۱- مدل‌هـای مـورد اسـتفاده در نرم‌افزار PAPSim

داشـتن دانـش و اطلاعـات کافـی برای مشخصه‌سـازی و همچنیـن خـواص ترمودینامیکی، فیزیکی و شـیمیایی آسفالتین به‌عنوان یـک جزء موجود در ترکیبات نفتی، از نیازهـای اولیه و اساسـی جهـت پیش‌بینی رفتار فـازی آسـفالتین‌ها در ترکیبـات نفتی است. پس از کسب این قبیل اطلاعات، رفتار این جزء باید دست‌کم به‌طور کیفی و مطابق با مشاهدات آزمایشگاهی مدل‌سازی شود. بعد از آن، باید تئوری کار بر اساس اصول صحیح ترمودینامیکـی و همچنیـن فرضیات منطقی، توسـعه داده شـده و متغیرهای مدل بر اساس

داده‌های آزمایشگاهی تنظیم گردند.

پس از تهیه‌ی مدل انعطاف‌پذیر برای پیش‌بینی رفتار فازی-ترمودینامیکی پدیده‌ی تشکیل، رشد و رسوب آسفالتین در ترکیبات نفتی در شرایط واقعی مخزن، اثر عوامل محیطی و عملیاتی مانند فشار، دما و تزریق گاز پیش‌بینی می‌شود.

با این مقدمه می‌توان گفت مدل‌هایی که برای بیان و پیش‌بینی رفتار استفاده می‌شوند باید تا حد ممکن خصوصیات زیر را داشته باشند:

- این مدل‌ها شامل طیف وسیعی از نفت‌ها و سیستم‌های مختلف نیستند اما باید برای سیستم‌های نفتی مشابه پاسخ‌گو باشند.
- این مدل‌ها با داشتن فرضیات و تئوری‌های منطقی و بدون خروج از اصول ترمودینامیکی، باید بیشتر جنبه کاربردی داشته باشند. به‌عبارتی آوردن تئوری‌ها و اصول مختلف به‌صورت جزیی در این مدل‌ها، بیشتر باعث پیچیدگی کار می‌شود. این در حالی است که ورود این تئوری‌ها به‌صورت جزیی شاید تأثیر چندانی در بهبود نتایج حاصله نسبت به مدل‌های ساده‌تر کاربردیِ مبتنی بر تئوری‌ها و فرضیات صحیح و منطقی نداشته باشند.

در نگاه نخست این مدل‌ها باید دست‌کم به‌طور کیفی پاسخ‌گوی تأثیر متغیرهای مختلف مثل دما، فشار و ترکیب درصد سیال بر پدیده‌های مختلف تشکیل، رشد و رسوب آسفالتین باشند.

مدل‌های مورد استفاده در این نرم‌افزار مدل معادلات حالت مکعب برای رفتار فازی سیال نفت و گاز و مدل محلول‌های پلیمری اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز و مدل میلر-اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز برای بیان رفتار فازی آسفالتین هستند. در اینجا توضیح مختصری در خصوص مدل دوم یعنی مدل میلر-اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز ارائه خواهد شد.

مدل میلر-اصلاح‌شده‌ی فلوری توسط میرزایی و همکاران [۴] و موسوی و همکاران [۵و۶] توسعه داده شد. اساس این مدل، تئوری محلول‌های پلیمری (مدل حلالیت) است؛ با این تفاوت که دو اصلاحیه در جملات آن انجام شده است. این اصلاحیه‌ها در تئوری فلوری-هاگینز (به‌عنوان اساس محاسبات در مدل حلالیت) انجام شده است. اصلاحیه‌ی نخست روی جمله‌ی مربوط به باقیمانده که جمله‌ی تغییرات آنتالپی را در بر دارد انجام شده و اصلاحیه‌ی دوم روی جمله‌ی ترکیبی که شامل جمله‌ی تغییرات آنتروپی می‌شود [۷و۸] انجام پذیرفته است. در ادامه مختصری در مورد مدل‌های مورد استفاده برای بیان رفتار فازی آسفالتین در این نرم‌افزار ارائه شده است:

در تئوری اولیه‌ی فلوری-هاگینز انرژی آزاد گیبس مولی جزیی یا پتانسیل شیمیایی برای جزء-۱ از رابطه‌ی-۱ محاسبه می‌شود:

$$\Delta\overline{G}_1 = \Delta\mu_1 = \Delta\overline{H}_1 - T\Delta\overline{S}_1 \qquad (۱)$$

در این رابطه، $\Delta\overline{H}_1$ آنتالپی مولی جزیی جزء-۱ و $\Delta\overline{S}_1$، آنتروپی مولی جزیی جزء-۱ است که در تئوری یادشده این دو عبارت با روابط-۲و۳ مشخص می‌شوند:

$$\Delta\overline{H}_1 = \nu_1(\phi_2)^2(\delta_1-\delta_2)^2 \qquad (۲)$$

$$\Delta\overline{S}_1 = -R\left[\ln\phi_1 + (1-\frac{\nu_1}{\nu_2})\phi_2\right] \qquad (۳)$$

در این روابط φ_i کسر حجمی، ν_i حجم مولی و δ_i متغیر حلالیت جزء i است.

عبارت باقیمانده در مدل فلوری-هاگینز با تعریف متغیر متقابل دو جزیی بین حلال و حل‌شونده (l_{12}) توسط فانک و پراسنیتز تصحیح شد [۷]. با وارد کردن این متغیر در عبارت آنتالپی، رابطه‌ی-۴ به‌دست می‌آید:

$$\Delta\overline{H}_1 = \nu_1(\phi_2)^2\left[(\delta_1-\delta_2)^2 + 2l_{12}\delta_1\delta_2\right] \qquad (۴)$$

با به‌کارگیری اصلاحیه‌ی بالا، کسر مولی جزء آسفالتین در فاز مایع (φ_a^L) در مخلوطی از آسفالتین و نفت از رابطه‌ی-۵ تعیین می‌شود:

$$\phi_a^L = \exp\left[-1+\frac{\nu_a}{\nu_L}-\frac{\nu_a}{RT}\left[(\delta_a-\delta_L)^2+2l_{aL}\delta_a\delta_L\right]\right] \qquad (۵)$$

در این رابطه l_{aL} متغیر متقابل دو جزیی بین آسفالتین و نفت است. رابطه‌ی-۵ اصلاح‌شده‌ی رابطه‌ی-۴ است و به تئوری تصحیح شده‌ی فلوری-هاگینز (MFH) معروف است.

برای اصلاح جمله‌ی ترکیبی در رابطه‌ی-۱، رابطه‌ی آنتروپی ارائه شده توسط میلر [۷]، به‌جای رابطه‌ی-۲ استفاده شد [۴و۵و۶] و معادله‌ی-۶ حاصل گردید:

$$\Delta\overline{S}_1 = -R\left[\ln\phi_1 - \frac{z}{2}\ln\left[1-\frac{2}{z}(1-\frac{\nu_1}{\nu_2})\phi_2\right]\right] \qquad (۶)$$

متغیر بسیار مهمی که در این رابطه ظاهر شده عدد کئوردینانسیون^ (z) است. این عدد نشان‌دهنده‌ی تعداد مولکول‌هایی است که یک مولکول مرکزی را احاطه کرده‌اند.

جهت به‌دست آوردن یک رابطه جدید برای کسر مولی آسفالتین در فاز مایع (φ_a^L) با استفاده از اصلاحیه‌ی جمله‌ی آنتالپی و آنتروپی، معادلات-۴و۶ را در رابطه‌ی انرژی گیبس (معادله‌ی-۱) قرار می‌دهیم. با جاگذاری رابطه‌های ذکر شده و بازنویسی این رابطه برای آسفالتین (جزء-۱ را آسفالتین (a) و جزء-۲ را فاز نفت (L) فرض می‌کنیم) در سیستمی متشکل از آسفالتین، رابطه‌ی-۷ برای کسر حجمی آسفالتین محلول در نفت با استفاده از مدل MMFH به‌دست خواهد آمد:

$$\phi_a^L = \exp\left[\frac{z}{2}\ln\left[1-\frac{2}{z}(1-\frac{\nu_a}{\nu_L})\right] - \frac{\nu_a}{RT}\left[(\delta_a-\delta_L)^2+2l_{aL}\delta_a\delta_L\right]\right] \qquad (۷)$$

این رابطه معادله‌ی اصلی مدل MMFH است. در رابطه‌ی ۷- متغیر حلالیت آسفالتین (δ_a)، حجم مولی آسفالتین (v_a)، ضریب برهم‌کنش نفت و آسفالتین (l_{aL}) و نیز عدد کئوردیناسیون (z) متغیرهای اصلی قابل‌تنظیم مدل هستند.

۱-۲- ساختار کلی نرم‌افزار

ساختار کلی نرم‌افزار شامل چهار بخش اصلیِ پایگاه داده، رابط کاربر گرافیکی، ریاضی و بخش فنی است. جزئیات بیشتر در مورد این بخش‌ها در ادامه آورده شده است.

۱-۲-۱- بخش رابط کاربر گرافیکی

شامل ورود و نمایش اطلاعات، شبیه‌سازی فرآیندها، انجام برازش مدل‌ها، نمایش خروجی‌ها و نیز رابط کاربر گرافیکی است که کار تحلیل، طراحی، پیاده‌سازی و آزمایش آنها به‌طور کامل در این نسخه انجام شده است.

۱-۲-۲- بخش اصلی ریاضی

در این نسخه از نرم‌افزار شامل توابع کتابخانه‌ای برای انجام محاسبات ریاضی، بهینه‌ساز جهت انجام رگرسیون غیرخطی برای بخش سیالات و معادلات حالت و نیز رگرسیون غیرخطی برای برازش مدل‌های تشکیل آسفالتین است. تحلیل، طراحی، پیاده‌سازی و آزمایش این بخش نیز به‌طور کامل در این نسخه انجام شده است.

۱-۲-۳- بخش فنی

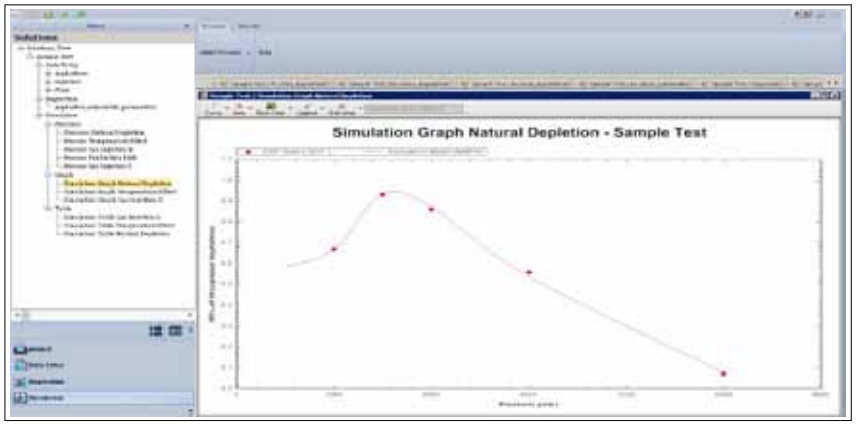
شامل کلیه‌ی محاسبات فنی و ترمودینامیکی برای انجام تعادلات فازی سیالات مخزن و سیالات تزریقی، محاسبات مربوط به مدل‌های ترمودینامیکی تشکیل آسفالتین شامل مدل اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز و مدل میلر-اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز و نیز محاسبات مربوط به فرآیندهای برازش مدل‌ها (سیال و آسفالتین) است که تحلیل، طراحی، پیاده‌سازی و آزمایش این بخش نیز به‌طور کامل در این نسخه انجام شده است. در ادامه ماژول‌های اصلی نرم‌افزار با جزئیات بیشتری شرح داده خواهد شد.

مهم‌ترین ماژول‌های مورد استفاده در این بخش شامل ماژول معادلات حالت، محاسبات تعادلات فازی خواص ترمودینامیکی فازها و توزیع اجزا در فازها و ماژول مدل‌های ترمودینامیکی آسفالتین شامل مدل اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز و مدل میلر-اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز است. در بخش معادلات حالت این نرم‌افزار از معادلات Peng-Robinson و SRK استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این نسخه از نرم‌افزار، داده‌ها و اطلاعات سیال از خروجی نرم‌افزارهای دیگر مثل PVTi گرفته می‌شود و در این خروجی‌ها هم معادله‌ی حالت مشخص شده و خواص اجزاء برای آن معادله‌ی حالت خاص است، این نرم‌افزار نیازی به تنظیم معادله‌ی حالت ندارد و این کار به‌طور خودکار انجام می‌شود. نرم‌افزار این توانایی را دارد که در صورت استفاده از این دو معادله‌ی حالت، محاسبات تشکیل آسفالتین را با توجه به معادلات حالت استفاده شده در بخش مدل سیال بدون مشکل انجام دهد.

ماژول بعدی که از اجزای اصلی و مهم است ماژول محاسبات تعادلات فازی ترکیبی بر اساس معادلات حالت می‌باشد. در این ماژول از ترکیب جاگذاری متوالی و روش نیوتون-رافسون استفاده شده است. نتایج این ماژول با نرم‌افزار PVTi (با ورودی‌های یکسان) مقایسه شده و در تمام موارد و نواحی دیاگرام فازی جواب تقریباً یکسانی به‌دست آمده است.

محاسبات مربوط به رفتار فازی آسفالتین در ماژول تشکیل آسفالتین برای هر دو مدل پلیمری شامل مدل اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز و نیز مدل میلر-اصلاح‌شده‌ی فلوری-هاگینز ارائه شده است. در ابتدا برای تنظیم متغیرهای مدل، از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به آسفالتین و نیز داده‌های آزمایشگاهی میزان تشکیل آسفالتین در آزمایش تخلیه در دمای مخزن استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در حال حاضر داده‌های آزمایشگاهیِ میزان تشکیل برای تنظیم مدل، تنها شامل داده‌های آزمایشگاهی میزان تشکیل در دمای ثابت و فشارهای متغیر است در نسخه‌ی حاضر، طراحی این بخش بر همین اساس انجام گرفته است. چنان‌چه داده‌های آزمایشگاهیِ میزان تشکیل از نوع دیگری نیز در دسترس باشد (به‌عنوان مثال میزان تشکیل در فرآیند تزریق) فرآیند مدنظر قابل‌طراحی و پیاده‌سازی در نرم‌افزار خواهد بود.

متغیرهای قابل‌تنظیم مدل آسفالتین شامل چگالی (یا وزن مولکولی) آسفالتین، حلالیت آسفالتین، ضریب برهم کنش آسفالتین و نفت و عدد کئوردیناسیون آسفالتین (فقط در مدل میلر) است. با توجه به اینکه معمولاً در کنار داده‌های مربوط به میزان تشکیل آسفالتین،



شکل ۱ | نمودار تغییر میزان تشکیل آسفالتین بر حسب فشار در فرآیند تخلیه‌ی طبیعی

داده‌هـای مربوط به وزن مولکولی و/یا چگالی آسـفالتین نیز در دسترس اسـت در این نسخه کاربر با داشـتن هریک از این دو داده می‌تواند دیگـری را برازش کرده و به‌دسـت آورد. در صورتی کـه هر دوی آنها را داشـته و نیازی به برازش آنها نباشـد کاربر می‌تواند یکی را برای بـرازش انتخاب کرده و در قسـمت مربوطه با تنظیم حد بالا و پایین و مقدار اولیه‌ی یکسان آن داده را نیز بدون تغییر در مدل‌سازی وارد کند.

موتور رگرسـیون غیرخطی و تنظیم متغیرها در این بخش، از روش تبرید شبیه‌سازی‌شـده[9] اسـتفاده می‌کند. این روش یکی از روش‌های پایـدار و قدرتمند جهت بهینه‌سـازی و تنظیم متغیرهای مدل است.

بعد از ورود داده‌های آزمایشگاهی آسفالتین بـا اسـتفاده از بهینه‌سـاز موجـود در نرم‌افزار متغیرهـای مدل تنظیم می‌شـوند. ایـن مدل از لحاظ ریاضی (بدون درنظر گرفتن محدوده‌های واقعـی متغیرها) توانایی تطبیق زیادی دارد ولی به‌هرحال کاربر باید شناخت و تجربه‌ی مناسبی جهت انتخاب محدوده‌های متغیرها یا حتی نوع متغیرهای قابل‌تنظیم نیز داشته باشد.

متغیرهـای تنظیم‌شـده در تمامـی مراحـل شبیه‌سـازی فرآیندها بدون تغییر مورد استفاده قـرار می‌گیرنـد. بایـد توجه داشـت که مدل ترمودینامیکی سـیال مخزن که از نرم‌افزارهای تجـاری مثل PVTi حاصل شـده بـدون هیچ تغییـری در متغیرهـا یـا خواص اجـزای آن، در مـدل آسـفالتین وارد شـده و در فرآینـد تنظیم مدل آسـفالتین نیز تغییـری در آن ایجاد نمی‌شود. به‌عبارتی مدل سیال مخزن همان مدل تنظیم‌شده‌ی قبلی خواهد بود؛ چراکه متغیرهای مدل آسفالتین مستقل از آن تنظیم می‌شوند.

بعـد از تنظیـم متغیرهـای مربوط بـه مدل آسـفالتین، با شبیه‌سـازی فرآیندهای مختلف عملیاتـی، این نرم‌افزار قادر بـه پیش‌بینی رفتار فازی آسـفالتین در آن شرایط عملیاتی خواهد بود. مهم‌ترین فرآیندهای قابل‌شبیه‌سازی در این نسخه‌ی نرم‌افزار عبارتند از:

- شبیه‌سـازی تخلیه‌ی طبیعی سیال مخزن در دمای مخزن: این فرآیند میزان تشکیل آسفالتین با کاهش فشـار در دمای مخزن را شبیه‌سـازی می‌کند.
- شبیه‌سازی میزان تشکیل آسفالتین در مسیر تولید: این فرآیند اثر هم‌زمان کاهش فشار و دما در مسـیر تولید (مثلاً چاه یا خط لوله) بر میزان تشکیل آسفالتین را شبیه‌سازی می‌کند.
- شبیه‌سازی اثر دما بر میزان تشکیل آسفالتین: این فرآیند اثر فشـار در دماهـای مختلف را بر میزان تشکیل آسفالتین شبیه‌سازی می‌کند.
- شبیه‌سازی اثر تزریق سیال بر میزان تشکیل آسـفالتین (۱): این فرآیند اثر تزریق سیال (گاز طبیعـی، گازهـای غیرهیدروکربنـی خالـص و سـیالات مختلف دیگـر) بر میزان تشـکیل آسـفالتین را شبیه‌سازی می‌کند. این فرآیند در یک دما و فشـار انجام شـده و تنها متغیر میزان تزریق سیال (به‌صورت مول تزریق به مول سیال اصلی) است.
- شبیه‌سازی اثر تزریق سیال بر میزان تشکیل آسـفالتین (۲): این فرآیند اثر تزریق سیال (گاز طبیعـی، گازهـای غیرهیدروکربنـی خالـص و سـیالات مختلف دیگـر) بر میزان تشـکیل آسـفالتین را شبیه‌سازی می‌کند. این فرآیند در یـک دمای مشـخص انجام شـده و متغیرهای قابل‌بررسـی میزان تزریق سیال (به‌صورت مول تزریق) و فشار است.

۱-۳- ویژگی‌های نرم‌افزار PAPSim

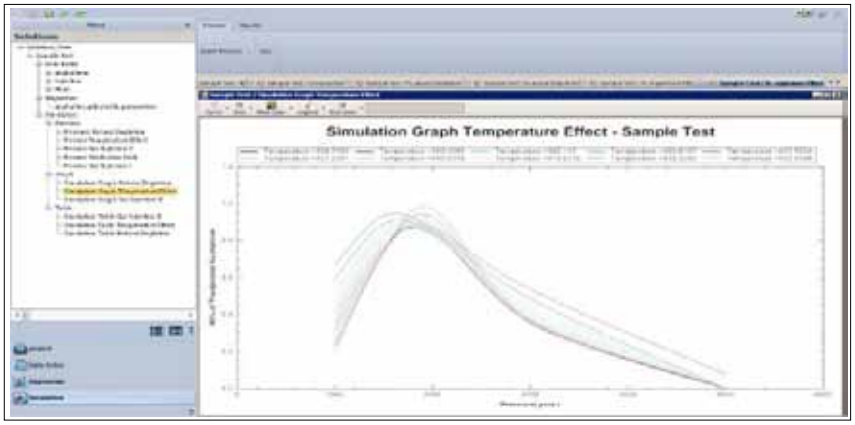
ویژگی‌های ذکرشده مربوط به نسخه‌ی فعلی است و در نسـخه‌های بعدی سعی بر تکمیل و بهبود این ویژگی‌ها خواهد بود.

۱-۳-۱- فنی

از مهم‌ترین ویژگی‌های این نسخه‌ی نرم‌افزار در بخش فنی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱-۳-۱-۱- مدل ترمودینامیکی آسفالتین

همان‌طـور کـه در گزارش‌هـای قبلـی نیـز عنوان شـد در ایـن نرم‌افـزار از دو مدل محلول‌های پلیمری یعنی مدل اصلاح‌شـده‌ی فلوری-هاگینـز و مدل میلر- اصلاح‌شـده‌ی فلوری-هاگینـز جهت پیش‌بینـی رفتار فازی آسـفالتین در شرایط مختلف عملیاتی تولید و تزریق اسـتفاده شده اسـت. مهم‌ترین ویژگی این مدل نسـبت بـه مدل‌های دیگـر از جمله مدل جامد، تئوری مناسـب و اصولی آن است که بـا ماهیت آسـفالتین و رفتار شـبه‌پلیمری آن نسـبت به مدل جامد، نزدیکی بیشـتری به واقعیت دارد. متغیرهای اصلی این مدل شـامل وزن مولکولی (چگالی)، حلالیت آسـفالتین، ضریـب برهم‌کنش آسـفالتین و نفت و عدد کئوردیناسـیون آسـفالتین (نمـادی از تعداد مولکول‌های آسـفالتین که در کنـار هم قرار می‌گیرند) اسـت. تمامی این متغیرها در مدل و در مورد جزء یا اجزای آسفالتینی قابل‌تنظیم است. ویژگی دیگر این مدل‌ها پایداری نسبی آنها در بخش شبیه‌سازی اثر متغیرهای مختلف



شکل ۲ | نتیجه‌ی شبیه‌سازی اثر دما بر میزان تشکیل آسفالتین

با استفاده از متغیرهای تنظیم‌شده‌ی قبلی است که این مورد یکی از نقاط ضعف مدل جامد می‌باشد. این موضوع در بخش شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف تشکیل آسفالتین در نرم‌افزار آورده شده است. یکی دیگر از مهم‌ترین تفاوت‌های مدل‌های پلیمری نسبت به مدل‌های جامد، اندازه‌ی ذرات است. در مدل‌های جامد، از معادلات حالت برای بیان رفتار فازی آسفالتین استفاده می‌شود؛ در حالی که به‌کارگیری این معادلات برای ذراتی مثل آسفالتین به‌عنوان ماکرومولکول درست نیست. علاوه بر این، در مدل‌های جامد از خواصی مثل دما و فشار بحرانی آسفالتین استفاده می‌شود که این خواص برای جزیی مثل آسفالتین تابه‌حال اندازه‌گیری نشده است. خواص مذکور در مدل‌های پلیمری اصلاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

۱-۳-۱-۲- مدل ترمودینامیکی سیال

جهت انجام محاسبات تعادلات فازی و محاسبه‌ی خواص فازها و نیز توزیع اجزا در فازها بر اساس مدل ترکیبی تعادلات فازی (جاگذاری متوالی و روش‌های نیوتنی)، موتور محاسباتی مناسبی طراحی و پیاده‌سازی شده که به‌راحتی قابل‌مقایسه با نرم‌افزارهای تجاری رایج است. این موتور محاسباتی در حقیقت بخش اصلی محاسبات (محاسبات تعادلات فازی) را انجام می‌دهد.

۱-۳-۲- کاربری

نسخه‌ی موجود نرم‌افزار از خروجی نرم‌افزارهای PVT به‌عنوان ورودی سیال استفاده می‌کند. به‌عبارتی پس از مدل‌سازی سیال در نرم‌افزار PVTi و برازش آن با داده‌های آزمایشگاهی PVT، خروجی سیال ترکیبی به‌عنوان سیال ورودی در نرم‌افزار وارد می‌شود. متغیرهای مدل آسفالتین بدون تغییر متغیرهای تنظیم‌شده در مدل سیال، با داده‌های آزمایشگاهی تشکیل آسفالتین تنظیم می‌گردد که این امر هیچ تغییری در مدل سیال به‌وجود نخواهد آورد. از دیگر ویژگی‌های این نرم‌افزار، یکی لحاظ کردن فرآیندهای مختلفی است که در آنها مسئله‌ی تشکیل آسفالتین محتمل خواهد بود و دیگری قابلیت تطابق خودکار مدل با داده‌های آزمایشگاهی است. برای این امر کاربر داده‌های آزمایشگاهی تشکیل آسفالتین را مستقیماً وارد نرم‌افزار کرده و از آنها جهت تنظیم متغیرها استفاده می‌کند (این کار در نرم‌افزارهای دیگر به‌راحتی انجام نمی‌شود).

۱-۳-۳- رابط کاربر گرافیکی

رابط کاربر گرافیکی این نرم‌افزار بر اساس زبان برنامه نویسی VB از بسته‌ی نرم‌افزاری Visual Studio. Net نوشته شده است. در این نرم‌افزار هدف بر مبنای طراحی ساده و کارآمد است. همچنین سعی شده دسترسی کاربر به منوهای مورد نیاز بسیار راحت باشد و کاربر تا حد امکان و بر مبنای پروژه‌های ایجادشده بتواند دستورات مجزا صادر کرده و نتایج را به‌صورت مجزا مشاهده نماید. در این قسمت می‌توان به ویژگی‌های زیر به‌عنوان موارد مهم اشاره کرد:

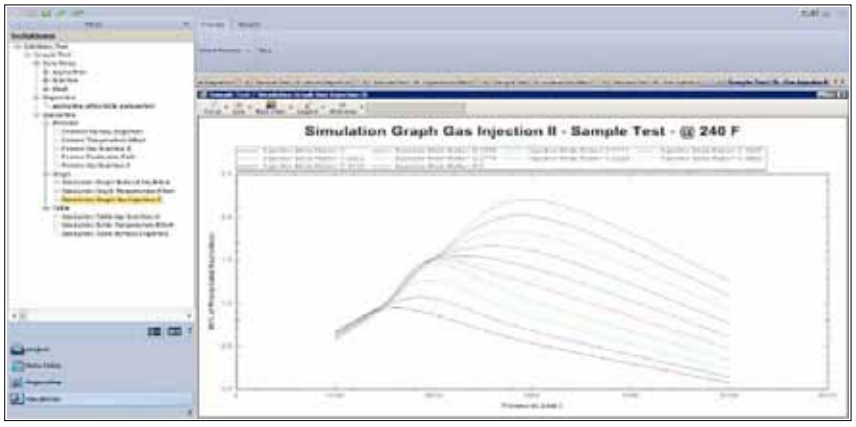
- طراحی نرم‌افزار جهت اجرای گام‌به‌گام توسط کاربر
- امکان ایجاد پروژه‌های متعدد تحت یک راه‌حل
- بارگذاری اطلاعات از طریق فایل یا به‌صورت دستی
- نمایش درختی پروژه‌های ایجادشده
- فرآیندهای طراحی‌شده
- قابلیت گزارش‌گیری به‌صورت نمودار یا جدول

۲- کاربرد نرم‌افزار PAPSim در مخازن هیدروکربنی ایران

نرم‌افزار PAPSim درحال حاضر در ابتدای راه ورود به صنعت نفت ایران است. بدون تردید این نرم‌افزار نیز مانند سایر نرم‌افزارها جهت صنعتی و تجاری‌شدن یا به‌عبارتی برای توسعه و بهبود خود نیازمند به‌کارگیری و استفاده توسط کاربران حرفه‌ای صنعت نفت می‌باشد. با آزمایش‌های انجام شده تا کنون (که یک نمونه‌ی آن در این مقاله آورده شده)، به‌نظر می‌رسد این نرم‌افزار در شرایط فعلی و توسعه‌یافته‌ی آن بتواند در آینده بخشی از نیازهای صنعت نفت در این زمینه را برآورده سازد. مقایسه‌ی نتایج این نرم‌افزار با داده‌های آزمایشگاهی و همچنین روند تشکیل آسفالتین در فرآیندهای مختلف نشان‌دهنده‌ی دقت و صحت نتایج و همچنین پایداری نرم‌افزار در مقایسه با مدل جامد است [۱۰و۱۱].

۲-۱- نتایج شبیه‌سازی برای فرآیندهای مختلف تولید

در ادامه ضمن نمایش نحوه‌ی اجرای این نرم‌افزار و توضیح اغلب بخش‌های



شکل ۳ | نمودار شبیه‌سازی میزان تزریق سیال در دمای مشخص بر میزان تشکیل آسفالتین

آن، شبیه‌سازی تشکیل آسفالتین در یکی از نمونه‌های نفت زنده‌ی ایران ارائه می‌شود.

۲-۱-۱- تخلیه‌ی طبیعی

نتیجه‌ی شبیه‌سازی میزان تشکیل آسفالتین در فرآیند تخلیه طبیعی به‌صورت جدول و نمودار در شکل-۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۲- اثر دما

نتیجه‌ی اثر هم‌زمان دما و فشار بر میزان تشکیل آسفالتین در شکل-۲ نشان داده شده است.

۲-۱-۳- تزریق

نتایج اثر میزان تزریق سیال در دمای مشخص و فشارهای مختلف بر میزان تشکیل آسفالتین در شکل-۳ نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

نسخه‌ی اولیه شبیه‌ساز آسفالتین پارس بر اساس مدل MMFH توسط گروه توسعه‌ی نرم‌افزار پارس در پژوهشگاه صنعت نفت توسعه یافته و با موفقیت روی فرآیندهای مختلف تولید میادین داخلی آزمایش شده است. نتایج حاصل به‌شرح زیر است:

- این نرم‌افزار با دقتی مناسب، نتایج صحیحی که قابل‌مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی هستند ارائه می‌کند.
- این نرم‌افزار عملکرد مناسبی جهت شبیه‌سازی تشکیل آسفالتین در فرآیندهای مختلفی از جمله تخلیه‌ی طبیعی مخزن، تولید در ستون چاه، اثر تزریق سیال و تغییر دما و فشار داشته و این کار را با پایداری مناسبی انجام می‌دهد.
- با توجه به اینکه نسخه‌ی نخست نرم‌افزار مذکور به‌تازگی ارائه شده و در ابتدای راه توسعه و تجاری‌شدن است به‌نظر می‌رسد این نرم‌افزار در تعامل با کاربران حرفه‌ای بتواند مسیر رشد مناسبی را طی کرده و به‌صورت کاملاً تجاری و صنعتی در خدمت صنعت نفت کشور قرار گیرد.■

منابع

[1]. Mansoori, G.A.: ″Modeling of asphaltene and other heavy organic depositions,″ J. Pet. Sci. Eng. (1997) 17, 101111-.

[۲]. موسوی دهقانی سید علی، وفایی سفتی محسن، منصوری غلامعلی، "بررسی تجربی و مدل‌سازی میزان رسوب آسفالتین در مخازن نفتی در اثر تغییر فشار و تزریق گاز"، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳

[3]. Flory, P. J. Thermodynamics Of High Polymer Solutions. J. Chem. Phys. 1942, 10, 51.

[۴]. میرزایی بهروز، وفایی سفتی محسن، منصوری غلامعلی، موسوی دهقانی سید علی، "بررسی اثرات رسوب آسفالتین بر خواص سنگ مخزن در فرآیند تزریق گاز"، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۶

[5]. Mousavi-Dehghani S. A. ; Mirzayi B.; Mousavi S. M. H.; Fasih M. " An Applied And Efficient Model For Asphaltene Precipitation In Production And Miscible Gas Injection Processes", Petroleum Science And Technology, 28:113–124, 2010.

[6]. Mousavi-Dehghani S. A., Mirzayi B. And Vafaie-Sefti M., ″ Polymer Solution and Lattice Theory Applications for Modeling of Asphaltene Precipitation in Petroleum Mixtures″, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2008, Vol. 25, No. 03, pp. 523 – 534.

[7]. Funk E.W. and Prausnitz J. M., ″Thermodynamic Properties of Liquid Mixtures: Aromatic-Saturated Hydrocarbon Systems″. Industrial and Engineering Chemistry (1970), 62, 8.

[8]. Miller A. R., Proc. Cambridge Philos. Soc., (1943), 39, 54.

[۹]. موسوی دهقانی سید علی، "مقایسه عملکرد مدل MMFH و مدل جامد جهت پیش‌بینی اثر نوع و میزان تزریق گاز ترش بر رسوب آسفالتین در مخازن نفتی"، مجله‌ی پژوهش نفت، (دردست چاپ)

[۱۰]. موسوی دهقانی سید علی، " پیش‌بینی پروفایل حداکثر تشکیل آسفالتین در مسیر چاه با استفاده از مدل MMFH"، مجله‌ی پژوهش نفت، (دردست چاپ)

پانویس‌ها

[1] dinmohammadm@ripi.ir

[2] dibajias@ripi.ir

[3] hendiss@ripi.ir

[4] amirimo@ripi.ir

[5] Pars Asphaltene Precipitation Simulator (PAPSimTM)

[6] Modified Flory-Huggins (MFH)

[7] Miller Modified Flory-Huggins (MMFH)

[8] Coordination number

[9] Simulated Anealing (SA)