۱۵- مدل‌سازی حوضه‌های رسوبی و سیستم‌های نفتی

به دلیل پیچیده بودن سیستم‌های طبیعی، فهم و درک کامل آن‌ها بسیار مشکل می‌باشد. مدل‌سازی، کوششی برای ساده نمودن این پیچیدگی‌ها است. مدل‌سازی حوضه واژه‌ای است که برای توصیف مدل‌سازی فرآیندهایی چون تولید، خروج، مهاجرت، به تله افتادن و محافظت هیدروکربن به کار می‌رود. این تعریف هر دو قسمت مدل‌سازی حوضه رسوبی و مدل‌سازی سیستم نفتی (petroleum system) را در بر می‌گیرد. مدل‌سازی سیستم نفتی تلاشی برای ساختن تاریخچه زایش و انباشت اقتصادی هیدروکربن در یک سیستم خاص است. مدل‌سازی حوضه اغلب به طور هم‌زمان چندین سیستم نفتی را در بر می‌گیرد. در طراحی چنین مدل‌هایی لازم است دقت کافی مبذول شود تا دقت مدل بالا باشد. مدل‌های سیستم نفتی ابزارهای مفیدی برای توصیف رفتار سیستم‌های هیدروکربنی هستند. انجام تحلیل‌های حساسیت سنجی برای کاربرد مناسب همه مدل‌ها در اکتشاف، ضروری است.

مدل‌سازی حوضه رسوبی برای ساختن تاریخچه رسوبگذاری یک توالی از واحدهای سنگی و پیش‌بینی رفتار و خصوصیات آن‌ها انجام می‌شود. مدل‌سازی می‌تواند به‌صورت رو به جلو یا معکوس باشد. در مدل‌سازی رو به جلو (forward modeling) با مفروضاتی که امیدواریم فرآیندهای اصلی عمل کننده در سیستم باشند، شروع می‌کنیم. به عنوان مثال این مفروضات می‌توانند عمق آب، جهت و دامنه موج، شیب ساحل، سرعت رسوبگذاری و... باشند. سپس اجازه می‌دهیم تا مدل برای مدت محدودی کار کند و آنگاه تغییرات به وجود آمده در سیستم ملاحظه می‌شود. در مدل‌سازی معکوس (reverse modeling)، وضعیت فعلی یک سیستم در نظر گرفته می‌شود و تلاش می‌شود تا وضعیت ابتدایی و فرآیندهای مؤثری که وضعیت فعلی را به وجود آورده‌اند به دست آید. اکثر مدل‌های حوضه رو به جلو هستند.

از مهمترین اهداف مدل‌سازی حوضه، توصیف چگونگی تدفین سنگ منشأ، تولید و خروج هیدروکربن در این سنگ‌ها، مهاجرت، به تله افتادن و حفظ هیدروکربن‌ها است. معمولاً تعریف مدل‌سازی حوضه آن‌طور که اکنون استفاده شد با مفهوم یک حوضه رسوبی بیشتر تطابق دارد تا با تعریف یک سیستم نفتی. مدل‌سازی یک حوضه منفرد اغلب چندین سیستم نفتی را در بر می‌گیرد، بدون اینکه آن‌ها را از هم جدا کند.

جمع‌آوری داده‌ها، اولین قدم در مدل‌سازی حوضه است. داده‌ها می‌توانند از اطلاعات زمین‌شناسی ناحیه، از چاه‌ها، از نمودارها و از اطلاعات لرزه‌ای بدست آیند. تلفیق تمامی این داده‌ها منجر به توصیف تاریخچهٔ حوضه خواهد شود.

کنترل‌کننده‌های دینامیکی و تولیدات یک حوضه رسوبی در حال تکامل، که زمینه تشکیل و تولید هیدروکربن را دارد عبارتند از:

- سرعت فرونشست، بالاآمدگی و تغییر شکل حوضهٔ پرشده
- جغرافیای دیرینه، عمق سنجی دیرینه و آب و هوای دیرینه
- شرایط رسوبگذاری و تولید (نظیر سرعت رسوبگذاری، محیط‌ها، رخساره‌ها، تجمع مواد آلی)
- هیدرودینامیک (توزیع فشار سیال و الگوهای آن)
- خصوصیات سنگ، نظیر تخلخل، تراوایی، دانسیته و رسانایی حرارتی
- خصوصیات سیال، مثل ترکیب، دانسیته و گرانروی
- عبور گرما (انتقال و جابجایی)
- تبدیل مواد آلی (زایش هیدروکربن)
- توزیع دوباره سیالات، مخصوصاً مهاجرت اولیه و ثانویه نفت و گاز
- تشکیل نفتگیر

برای مطالعات حوضه به طور کلی چهار نوع مدل مورد بحث قرار گرفته است:

۱- مدل‌های پرشدگی حوضه (basin fill models)

۲ - مدل‌های تغییرشکل تکتونیکی (tectonic deformation models)

۳ - مدل‌های جریان سیالات زیرزمینی (groundwater fluid flow models)

۴ - مدل‌های تاریخچهٔ گرمایی حوضه (basin thermal history models)

در مدل‌های پرشدگی حوضه، پارامترهای اصلی که مورد تأکید است عبارتند از رسوبگذاری و خصوصیات چینه‌شناسی. مدل‌سازی رو به جلو می‌تواند شمار زیادی از مدل‌های احتمالی چگونگی پرشدگی رسوبات یک حوضه را به وجود آورد و لذا قدرت پیشگویی وضعیت یک حوضه را مهیا سازد. مدل‌های تغییرشکل تکتونیکی، چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی را در مقیاس حوضه شبیه‌سازی می‌کند. چنین کاری در یک پیش‌مدل با پارامترهای اختصاصی که از مقاطع عرضی ساختمانی امروزی به دست می‌آید، عملی است. مدل‌های جریان سیالات زیرزمینی، معمولاً بخاطر چگونگی حرکت آب در محیط‌های متخلخل زیرسطحی، برای اهداف هیدروژئولوژی و هیدرودینامیک به کار می‌رود. مدل‌های تاریخچهٔ گرمایی یک حوضه، مدل‌هایی هستند که زمان زایش هیدروکربن، مهاجرت و تجمع آن بازسازی می‌کند.

۱۵-۱ اهداف و محدودیت‌های مدل‌سازی

در یک مدل‌سازی مناسب موارد زیر باید مشخص شود:

- نوع و میزان هیدروکربن تولید شده در هر مرحله زمانی
- مقدار هیدروکربن خارج شده از هر بلوک سنگی در هر مرحله زمانی
- میزان نسبت‌های فاز گاز و نفت در سیالات هیدروکربنی خارج شده
- تراوایی کل (هم به موازات لایه بندی و هم عمود بر آن) برای هر بلوک از سنگ به عنوان تابعی از زمان
- جهت و نرخ حرکت هر فاز سیال هیدروکربنی در تراوایی قابل دسترس

برای رسیدن به این اهداف باید قادر باشیم بزرگی نیروهای رانشی مختلف را به عنوان تابعی از زمان در هر بلوک مشخص کنیم. تراوایی مطلق ماتریکس و منحنی‌های تراوایی نسبی برای سه فاز سیال (نفت، گاز و آب) در هر نوع سنگ و میزان تراوایی شکستگی برای این سنگ‌ها به اضافه همه اطلاعات لازم برای انجام مدل‌سازی پختگی، نیز لازم است. در واقع بیشتر اطلاعات لازم برای انجام چنین محاسباتی در دسترس نیستند. معادلات لازم معمولاً به خوبی شناخته شده‌اند، اما اغلب توانایی آن‌ها برای توصیف سیستم‌های زمین‌شناسی نامعین است. داده‌های ورودی لازم، اغلب در دسترس نیستند و یا به خاطر هتروژن بودن وضعیت زمین‌شناسی کم اعتبار هستند.

۱۵-۲ برنامه‌ریزی

در نظر بگیرید که یک مدل‌سازی دو بعدی در یک منطقه با اطلاعات چند چاه و چند خط لرزه‌ای می‌خواهد صورت بگیرد. در ابتدا اطلاعات موجود بر روی یک نقشه آورده شده و جهت‌های مدل‌سازی، انتخاب می‌شوند. این جهات، باید همه چاه‌ها را شامل شود تا داده‌های چاه جهت بهینه‌سازی داده‌های ورودی مدل، در دسترس باشد. به طور کلی خط‌های در جهت شیب از خط‌های در جهت امتداد معتبرترند، چرا که مهاجرت هیدروکربن بیشتر در جهت فراشیب است. به هر حال در هنگام انتخاب جهات باید زمین‌شناسی محلی و میزان در دسترس بودن داده‌ها را در نظر داشت. تعداد مقاطع انتخاب شده به تراکم داده‌ها، پیچیدگی زمین شناسی، زمان و هزینه در دسترس و اهداف مطالعه بستگی دارد. منطقه مورد مطالعه، شبکه‌بندی و به بلوک‌هایی تقسیم می‌شود. نقاط کنترل که اطلاعات آن‌ها را داریم (مثل چاه‌ها) در مرکز بلوک‌ها قرار می‌گیرند تا یک میانگین از هر خصوصیت برای هر بلوک محاسبه شود.

۱۵-۳ زایش نفت از سنگ منشأ

زایش و تجمع هیدروکربن در حوضه‌های رسوبی مدیون واکنش‌های شیمیایی مواد آلی نهشته شده در سنگ منشأ و سپس مهاجرت آن‌ها به سنگ‌های مخزن است. در این فرایند، حوضهٔ رسوبی یک عامل واکنش‌دهنده (reactor) و مواد آلی، منشأ تأمین ذخیره می‌باشند. در اینجا واکنش شیمیایی به وسیله دما و فشار که مرتباً در طول تکامل حوضه رسوبی تغییر می‌کنند، کنترل می‌شوند.

در خروج هیدروکربن از سنگ منشأ، نیروی اختلاف پتانسیل هیدرولیکی، نیروی شناوری حاصل از اختلاف چگالی بین آب و نفت و نیروی موئینگی در مرز سنگ مؤثر هستند. پتانسیل هیدرولیکی بر روی همه سیالات به طور یکسان عمل می‌کند، در حالی که دو نیروی دیگر هیدروکربن را بیشتر از آب تحرک می‌بخشند. اهمیت نسبی این نیروها به ضخامت سنگ منشأ، اختلاف اندازه خلل و فرج در سنگ منشأ و لایه معبر (carrier bed)، چگالی (ترکیب) هیدروکربن، نرخ رسوبگذاری و تراوایی سنگ منشأ بستگی دارد. احتمالاً فشار شناوری در سنگ منشأ در اکثر موارد کمترین اهمیت را دارد. نیروی موئینگی نقش مهمی در خروج هیدروکربن ایفا می‌کند، به ویژه وقتی تولید در سنگی با تخلخل نسبتاً بالا رخ دهد. با همه این‌ها، از آنجا که فشار مویینگی، به لیتولوژی سنگ اطراف سنگ منشأ بستگی دارد، به خاطر اینکه اطلاعات مربوط به سطح بین لایه حمل کننده و سنگ منشأ کم است و به دلیل اینکه اطلاعات ما از پتانسیل هیدرولیکی در سنگ‌های متراکم کافی نیست توانایی ما برای پیش بینی بزرگی نیروهای عامل در خروج نفت محدود است.

۱۵-۴ مسیر مهاجرت

در مهاجرت ثانویه، نیروی شناوری سبب می‌شود که نفت در یک سازند همگن، تمایل به حرکت در جهت بیشترین شیب را داشته باشد. چنین مسیری عمود بر کانتورهای ساختمانی یعنی در جهت شیب واقعی است. خطوط عمود بر کانتورهای ساختمانی در افق بالایی سازند تراوا (یا قاعده پوش‌سنگ) را قاطع‌کانتور (ortho-contour) می‌نامند. نقشه قاطع‌کانتورها راهنمای خوبی برای یافتن مسیر مهاجرت است. باید توجه داشت که چنین نقشه‌هایی باید برای زمان واقعی مهاجرت ثانویه تهیه شوند. در مورد مسیر مهاجرت باید عواملی چون گسل‌های مسدود کننده و تراوا و تغییرات رخساره‌ای سازند تراوا در نظر گرفته شوند تا تصحیحات لازم در مورد مسیر واقعی مهاجرت اعمال شود.

در بسیاری از مدل‌ها، از قانون دارسی برای محاسبه نرخ جریان و حجم سیال جاری در لایه تراوا استفاده می‌شود. یکی از ضعف‌های این محاسبات این است که تراوایی واحدهای سنگی اغلب در دسترس نیست. مدل‌های سیستمی که دو فاز هیدروکربن و آب را مد نظر دارند در توصیف مهاجرت هیدروکربن هم نیروی شناوری و هم نیروی مویینگی را در نظر می‌گیرند و بنابراین اجازه حرکت هیدروکربن به‌صورت مجزا از آب را می‌دهند. در چنین مدل‌هایی گاز و نفت با یکدیگر حرکت می‌کنند و خواص این فاز مختلط، می‌تواند میانگین خواص نفت و گاز باشد. البته این خواص با گذشت زمان و همچنین در مکان‌های مختلف در اثر شکسته شدن مولکول‌های بزرگ و یا تغییرات فاز تغییر می‌کند. در نتیجه درک بهتر تعادل فازی به تعیین هر چه بهتر این خواص می‌انجامد. استفاده از مدل‌های حرکتی دو فازی (آب + هیدروکربن) نیازمند دانستن حجم هیدروکربن در هر نقطه از سیستم است. بنابراین باید حجم هیدروکربن خارج شده از سنگ منشأ مشخص شود و همین‌طور تراوایی نسبی مسیرهای مهاجرت برای فازهای ذکر شده تعیین گردد.

در حین مهاجرت ثانویه مقداری از نفت به هدر می‌رود. این هدرروی را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد: قسمتی که در تله‌های ریز به دام می‌افتد و قسمتی که در منافذ لایه حمل کننده، عمدتاً به خاطر نیروی موئینگی گیر می‌افتد و یا جذب سنگ می‌شود. قسمت دوم را اشباع‌شدگی نفت باقیمانده می‌نامند و تا حدود ۳۰ درصد حجم فضاهای خالی که نفت از بین آن‌ها عبور کرده می‌رسد. وقتی مهاجرت از طریق حجم کوچکی از سنگ حمل کننده رخ دهد، اتلاف کمتری خواهیم داشت. اگر چه از روی منحنی‌های تراوایی نسبی می‌توان اشباع‌شدگی نفت باقیمانده (نفت اشباع‌شدگی کاهش نیافتنی) را در یک مسیر حساب کرد اما محاسبه حجم فضاهای خالی یک لایه حمل کننده که نفت از آن‌ها عبور کرده، به هیچ وجه دقیق نیست.

همه مدل‌های تجمع - مهاجرت یک مشکل عمده دارند و آن این است که برای خواصی که حرکت سیال را کنترل می‌کنند (نظیر تراوایی نسبی و مطلق) یک میانگین برای هر بلوک به کار می‌برند و فرض می‌کنند که این بلوک همگن است، در حالی که سنگ‌ها به هتروژن بودن معروفند و حرکت سیال توسط زون‌هایی (اغلب کوچک) کنترل می‌شود که به طور نابهنجار تراوایی بالا یا پایین دارند. همچنین معمولاً مدل‌سازی‌ها دو بعدی انجام می‌شوند، در حالی که فرآیند حرکت سیال سه بعدی است. تغییرات ساختاری و لیتولوژیکی در بعد سوم می‌تواند مسیر مهاجرت را عوض کند. بنابراین هر جا با مدل‌سازی دو بعدی تجمعی از هیدروکربن پیش بینی می‌شود باید در جهت عمود بر آن نیز مدلی تهیه شود.

۱۵-۵ حفظ هیدروکربن

بایستی در نظر داشت که هر تجمع نفتی یا حفظ می‌شود و یا تخریب و تجزیه می‌گردد. تجزیه و تخریب هیدروکربن انباشته شده به چند صورت رخ می‌دهد:

- *شکسته شدن حرارتی*: پیش‌بینی شکسته شدن حرارتی با استفاده از مدل‌های کینتیک قابل انجام است.
- *اکسید شدن*: عمدتاً تبدیل سریع متان به دی اکسیدکربن در دماهای بالا (حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد) و در حضور سولفات است. از آنجا که اکثراً اکسید شدن متان در مخازن کربناتی و در دماهای بالا رخ می‌دهد با استفاده از معیارهای دما و لیتولوژی قابل پیش‌بینی است.
- *فرسایش تجمعات نفتی*: که با بازسازی تاریخچه دفن قابل پیش‌بینی است.
- *تجزیه زیستی و آبشویی*: آبشویی و تجزیه زیستی اغلب با هم رخ می‌دهند. مدل‌های فعلی نمی‌توانند این‌ها را پیش‌بینی کنند، اگر چه اصولاً باید قابل پیش‌بینی باشند.
- نشت از طریق پوش‌سنگ: اکثر مدل‌ها، شکستگی هیدرولیکی پوش‌سنگ در اثر نیروی شناوری را نشان می‌دهند، اما توانایی در نظر گرفتن شکستگی‌های تکتونیکی را ندارند.

۱۵-۶ آنالیزهای تاریخچه تدفین

آنالیزهای تاریخچه تدفین برای مدل‌سازی فرونشست، بالاآمدگی، پیش‌بینی پختگی و دیگر فاکتورها استفاده می‌شود. مطالعه تاریخچه تدفین به منظور پیش‌بینی زمان و عمقی است که در آن تولید هیدروکربن رخ داده است. پختگی سنگ منشأ از دو راه به دست می‌آید: اندازه‌گیری مستقیم از نمونه‌های به دست آمده از چاه‌ها و رخنمون‌ها و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل‌سازی. پختگی اندازه‌گیری شده از نمونه‌های دستی ارزش محدودی در اکتشاف دارند که بخشی از آن مربوط به در دسترس نبودن نمونه یا حفر نشدن چاه به تعداد مناسب است. داده‌های لازم برای این مدل‌سازی عمق سازندها، لیتولوژی سازندها، سن سرسازندها، عمق نهشته شدن سازندها، دمای ته چاه و مقادیر انعکاس ویترینایت بر اساس عمق و نوع کروژن است.

۱۵-۷ تحلیل‌های حساسیت‌سنجی

هر چه بیشتر از محدودیت دانش خود درباره معادلات و داده‌های ورودی لازم در مدل‌سازی حوضه و سیستم آگاه می‌شویم، بیشتر با مشکل تخمین مقدار و عدم قطعیت مدل‌ها مواجه

خواهیم شد. بنابراین انجام تحلیل‌های حساسیت سنجی در کاربرد مدل‌ها در اکتشاف، مهم است و یک کاربر باید بداند که عدم قطعیت موجود در داده‌های ورودی، چقدر بر تصمیم نهایی (که از روی اطلاعات خروجی اتخاذ می‌شود) اثر می‌گذارد. حداقل سه راه حل متفاوت برای تحلیل‌های حساسیت‌سنجی پیشنهاد شده است. یک پاسخ این است که با استفاده از حداکثر و حداقل پارامترهای مختلف ورودی، چندین شبیه‌سازی انجام شود. پاسخ صحیح بین بزرگ‌ترین و کوچکترین مقدار پارامترهای خروجی قرار دارد. چنین راه حلی خام است چرا که احتمال وقوع را نشان نمی‌دهد. پاسخ دوم که به طور روزافزونی مورد توجه مدل سازان قرار می‌گیرد استفاده از قوانین آماری برای نشان دادن احتمال وقوع جواب‌ها است. چنین مدل‌هایی چندین مقدار خروجی می‌دهند که احتمال وقوع آن‌ها نیز ذکر شده است. راه حل سوم این است که با داده‌های ورودی مشابه چندین شبیه‌سازی انجام شود. از آنجا که هر مدل به‌صورت جداگانه ساخته شده است، استفاده ار چندین مدل، تأثیر خود مدل بر روی اطلاعات خروجی را نشان می‌دهد.