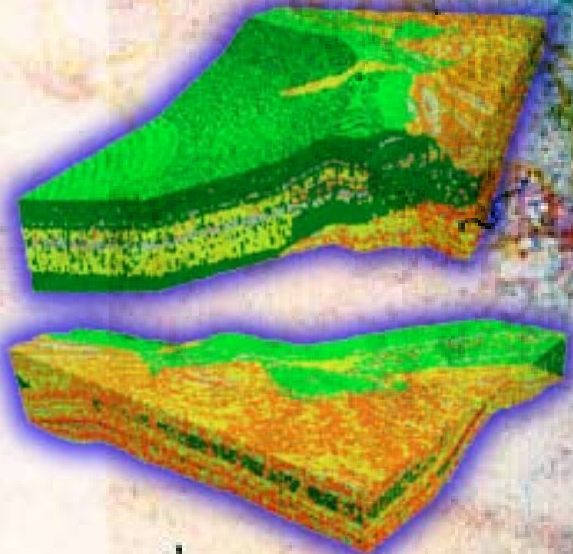


مبانی تئوری توسعه منحنی‌های کاهش تولید در تحلیل داده‌های میدانی یک چاه

◀ دکتر شهاب گرامی*



قسمت اول

چکیده

داده‌ها (Data) به خودی خود فاقد معنی بوده و زمانی ارزش می‌یابند که تجزیه و تحلیل آنها منجر به دستیابی به اطلاعات (Information) جدید گردد. منحنی‌های کاهش تولید (Decline curve) یکی از روش‌های پر استفاده در تحلیل داده‌های تولید جهت به دست آوردن اطلاعاتی نظیر ذخیره هیدروکربوری قابل بازیافت (Expected ultimate recovery) و یا درجا (In-place) و پیش‌بینی تولید آبی مخزن می‌باشند.

منحنی‌های کاهش تولید طیف وسیعی از مدل‌ها و روش‌های ارائه شده شامل: Arps, Fetkovich, Blasingame, Agarwal-Gardener و همچنین روش‌های جدید موازنه مواد جریانی و دینامیکی را در برمی‌گیرد. در این مقاله ضمن مرور مختصر روش‌های فوق، تئوری پایه در توسعه مدل‌های ریاضی مرتبط با روش‌های فوق که در برگیرنده تحلیل داده‌های تولید با شرایط متغیر عملیاتی در چاه می‌باشد، اشاره خواهد شد.

کلمات کلیدی:

تحلیل داده‌های تولید، منحنی‌های کاهش تولید، زمان موازنه مواد، مدل ریاضی.

مقدمه

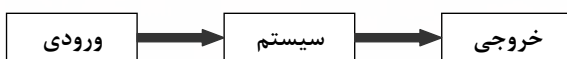
بهینه‌سازی توسعه میادین نفتی و گازی نیازمند مدیریت هوشمندانه مخزن و بهره‌برداری می‌باشد. در توسعه یک میدان از روش‌های متعددی نظیر هدایت آزمایش‌های قابلیت تولید و برنامه‌ریزی جهت آزمایش پایلوت می‌توان بهره برد. در این راستا مؤلفه‌های اصلی در توسعه یک میدان عبارتند از: (الف) تخمین «ذخیره هیدروکربوری درجا» و (ب) «بهره‌دهی چاه‌ها».

این دو مؤلفه، اطلاعاتی است که توسط روش‌های مناسب تجزیه و تحلیل داده‌های تولید قابل حصول می‌باشند. داده‌ها به خودی خود فاقد ارزش اطلاعاتی بوده و زمانی اهمیت می‌یابند که مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. به طور کلی دو روش «حل مستقیم» و «حل معکوس» در به دست آوردن اطلاعات از داده‌ها به کار برده می‌شوند.

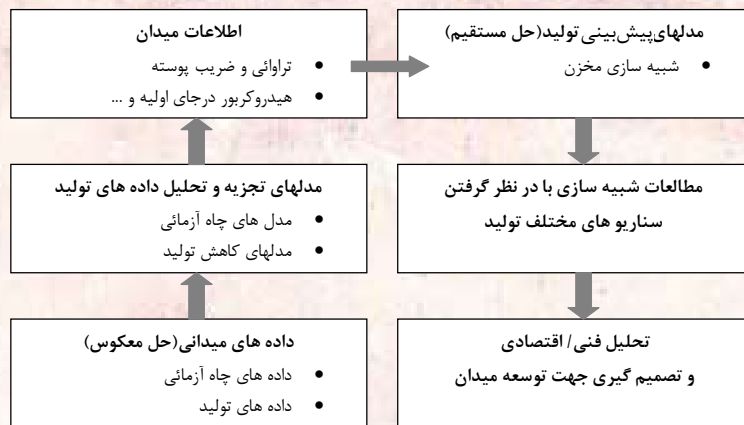
همان‌گونه که در شکل ۱- نشان داده شده است، در روش «حل مستقیم»، سیستم به عنوان یک پیش‌فرض معلوم بوده و پاسخ سیستم نسبت به یک مجموعه ورودی تعیین می‌گردد.

به عنوان مثال پیش‌بینی عملکرد مخزن و انجام مطالعه حساسیت‌سنجی از جمله مثال‌های کاربردی «حل مستقیم» در مهندسی مخزن می‌باشد. از طرف دیگر در روش «حل معکوس»، ورودی به سیستم و خروجی از سیستم معلوم بوده ولی مشخصات سیستم نامعلوم می‌باشد. لذا در حل معکوس تلاش می‌گردد تا از تحلیل داده‌های ورودی و خروجی، مشخصات سیستم شناسایی شود. یک مثال مشخص از کاربرد «حل معکوس» در مهندسی بهره‌برداری، تجزیه و تحلیل داده‌های چاه‌آزمایی با استفاده از روش‌های ترسیمی است. در چاه‌آزمایی، مخزن نماینده سیستم بوده و دبی جریان و فشار جریانی به ترتیب، ورودی و خروجی سیستم را تشکیل می‌دهند. با تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی، می‌توان ویژگی‌های مخزن نظیر تراوانی (Permeability) و ضریب پوسته (Skin) چاه تولیدی را تعیین نمود.

شکل-۱: تجزیه و تحلیل داده‌ها از طریق روش‌های حل مستقیم و معکوس.



شکل-۲: اهمیت تجزیه و تحلیل داده‌ها در توسعه میادین هیدروکربوری.



همانگونه که در شکل-۲ نشان داده شده است، تصمیم‌گیری فنی/اقتصادی جهت توسعه میادین نفت و گاز نیازمند پیش‌بینی تولید با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف می‌باشد. معمولاً پیش‌بینی تولید با استفاده از مدل‌های ریاضی که فرایندهای مهم فیزیکی مخزن در آن لحاظ شده باشد صورت می‌پذیرد. اطلاعات موجود مخزن مانند تخلخل، تراوانی، ضریب پوسته چاه‌ها، هندسه مخزن و... در قالب اطلاعات ورودی سیستم وارد مدل ریاضی شده و از روش «حل مستقیم» پیش‌بینی صورت می‌پذیرد. بدیهی است که خطای این پیش‌بینی با ورود اطلاعات واقعی مخزن کاهش خواهد یافت.

یکی از روش‌های به دست آوردن اطلاعات واقعی مخزن، تجزیه و تحلیل داده‌های تولید از چاه‌های یک مخزن می‌باشد. به صورت ویژه، روش‌های چاه‌آزمایی در یک فرایند حل معکوس تراوانی و ضریب پوسته چاه را محاسبه نموده و روش‌های مبتنی بر منحنی‌های کاهش تولید و موازنه مواد دینامیکی منجر به تعیین مقدار هیدروکربور اولیه می‌گردد. به طور کلی دو نوع داده شامل:

داده‌های کوتاه‌مدت (Short-term data) به دست آمده در رژیم جریان گذار (Transient) و داده‌های طولانی‌مدت میدانی (long-term data) در برآوردهای مهندسی مخزن در نظر گرفته می‌شوند.

داده‌های کوتاه‌مدت معمولاً در نتیجه چاه‌آزمایی بر روی یک یا چند چاه تولیدی به دست آمده و از کیفیت مطلوبی برخوردار می‌باشند (چون در چاه‌آزمایی شرایط عملیاتی تحت کنترل می‌باشد). از طرف دیگر، داده‌های طولانی‌مدت میدانی، پس از تخلیه قابل توجه مخزن قابل دسترس بوده و از کیفیت نامطلوبی برخوردار می‌باشند. دلیل عدم کیفیت داده‌های طولانی‌مدت به متأثر بودن دبی و فشار جریانی چاه از شرایط پایین‌دست میدان باز می‌گردد که طی یک دوره طولانی، خارج از کنترل می‌باشد.

به عنوان مثال کاهش و افزایش مصرف گاز در پایین‌دست میدان گازی، نوسانات تولید از چاه را به همراه خواهد داشت. تفسیر داده‌های میدانی نیازمند استفاده از مدل‌هایی است که تا حد امکان به شرایط واقعی فرایند تولید نزدیک باشد.

در این راستا، اولین مرحله به دست آوردن مدل‌های تحلیلی یا عددی مناسبی است که فرایندهای مهم تولید از مخزن را در نظر گیرد. در مرحله بعد این مدل‌ها که عمدتاً در قالب معادلات دیفرانسیل ارائه می‌شوند تحت شرایط اولیه (Initial condition) و شرایط مرزی (Boundary conditions) موجود در سیستم حل شده و سپس نتایج حاصله به صورت منحنی‌های مدل

همانگونه که در شکل-۳ نشان داده شده است، در اثر تولید از چاه یک اغتشاش فشاری از دهانه چاه آغاز شده و به سمت مرزهای مخزن ادامه می‌یابد. سرعت حرکت این اغتشاش وابسته به ویژگی‌های مخزن و سیال درون آن بوده که توسط ضریب نفوذ هیدرولیکی، $k/\phi \mu c_v$ ، تخمین زده می‌شود. تا زمانی که هیچکدام از مرزهای مخزن اغتشاش، فشار ایجاد شده را حس ننموده‌اند به رژیم جریان، «حالت گذار» اطلاق می‌گردد. طی رژیم جریان گذار که در ابتدای تولید از چاه وجود دارد، فشار مخزن در فواصل دور از چاه تولیدی در حد فشار اولیه ثابت باقی خواهد ماند.

۲-۱- رژیم جریان گذار (Transient)

به طور کلی دو رژیم جریان فیزیکی شامل رژیم جریان گذار (Transient) و رژیم جریان مرزی متأثر از مرز (Boundary dominated) در تعیین شرایط مرزی معادلات حاکم بر جریان سیال درون مخزن در نظر گرفته می‌شوند. به طور خاص برای یک چاه تولیدی در مرکز یک مخزن استوانه‌ای، رژیم جریان گذار و جریان متأثر از مرز به ترتیب متناظر با شرایط عملکرد نامحدود (Infinite acting) و عملکرد محدود (Finite acting) مخزن می‌باشند. در این بخش این دو رژیم جریان توصیف می‌گردد.

به طور کلی دو رژیم جریان فیزیکی شامل رژیم جریان گذار (Transient) و رژیم جریان مرزی متأثر از مرز (Boundary dominated) در تعیین شرایط مرزی معادلات حاکم بر جریان سیال درون مخزن در نظر گرفته می‌شوند. به طور خاص برای یک چاه تولیدی در مرکز یک مخزن استوانه‌ای، رژیم جریان گذار و جریان متأثر از مرز به ترتیب متناظر با شرایط عملکرد نامحدود (Infinite acting) و عملکرد محدود (Finite acting) مخزن می‌باشند. در این بخش این دو رژیم جریان توصیف می‌گردد.

به طور کلی دو رژیم جریان فیزیکی شامل رژیم جریان گذار (Transient) و رژیم جریان مرزی متأثر از مرز (Boundary dominated) در تعیین شرایط مرزی معادلات حاکم بر جریان سیال درون مخزن در نظر گرفته می‌شوند. به طور خاص برای یک چاه تولیدی در مرکز یک مخزن استوانه‌ای، رژیم جریان گذار و جریان متأثر از مرز به ترتیب متناظر با شرایط عملکرد نامحدود (Infinite acting) و عملکرد محدود (Finite acting) مخزن می‌باشند. در این بخش این دو رژیم جریان توصیف می‌گردد.

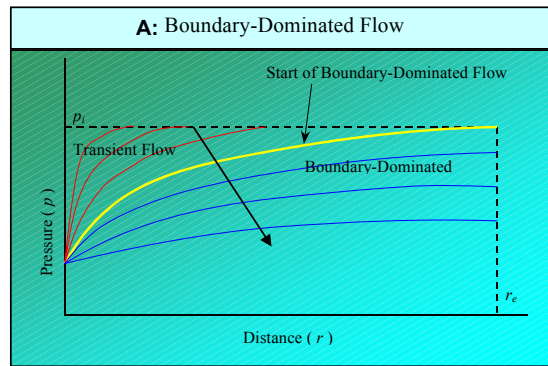
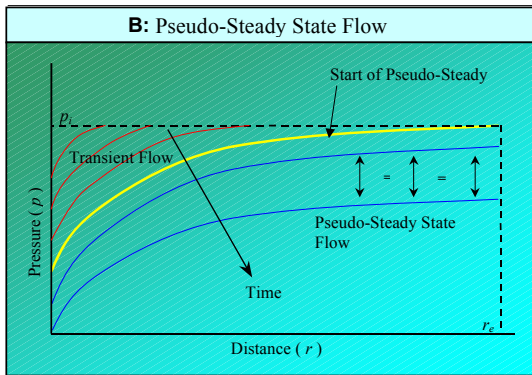
به طور کلی دو رژیم جریان فیزیکی شامل رژیم جریان گذار (Transient) و رژیم جریان مرزی متأثر از مرز (Boundary dominated) در تعیین شرایط مرزی معادلات حاکم بر جریان سیال درون مخزن در نظر گرفته می‌شوند. به طور خاص برای یک چاه تولیدی در مرکز یک مخزن استوانه‌ای، رژیم جریان گذار و جریان متأثر از مرز به ترتیب متناظر با شرایط عملکرد نامحدود (Infinite acting) و عملکرد محدود (Finite acting) مخزن می‌باشند. در این بخش این دو رژیم جریان توصیف می‌گردد.

به طور کلی دو رژیم جریان فیزیکی شامل رژیم جریان گذار (Transient) و رژیم جریان مرزی متأثر از مرز (Boundary dominated) در تعیین شرایط مرزی معادلات حاکم بر جریان سیال درون مخزن در نظر گرفته می‌شوند. به طور خاص برای یک چاه تولیدی در مرکز یک مخزن استوانه‌ای، رژیم جریان گذار و جریان متأثر از مرز به ترتیب متناظر با شرایط عملکرد نامحدود (Infinite acting) و عملکرد محدود (Finite acting) مخزن می‌باشند. در این بخش این دو رژیم جریان توصیف می‌گردد.

به طور کلی دو رژیم جریان فیزیکی شامل رژیم جریان گذار (Transient) و رژیم جریان مرزی متأثر از مرز (Boundary dominated) در تعیین شرایط مرزی معادلات حاکم بر جریان سیال درون مخزن در نظر گرفته می‌شوند. به طور خاص برای یک چاه تولیدی در مرکز یک مخزن استوانه‌ای، رژیم جریان گذار و جریان متأثر از مرز به ترتیب متناظر با شرایط عملکرد نامحدود (Infinite acting) و عملکرد محدود (Finite acting) مخزن می‌باشند. در این بخش این دو رژیم جریان توصیف می‌گردد.

به طور کلی دو رژیم جریان فیزیکی شامل رژیم جریان گذار (Transient) و رژیم جریان مرزی متأثر از مرز (Boundary dominated) در تعیین شرایط مرزی معادلات حاکم بر جریان سیال درون مخزن در نظر گرفته می‌شوند. به طور خاص برای یک چاه تولیدی در مرکز یک مخزن استوانه‌ای، رژیم جریان گذار و جریان متأثر از مرز به ترتیب متناظر با شرایط عملکرد نامحدود (Infinite acting) و عملکرد محدود (Finite acting) مخزن می‌باشند. در این بخش این دو رژیم جریان توصیف می‌گردد.

شکل-۳: شماتیک جریان‌های گذار و متأثر از مرز. [۱]



عدم نیاز به شناخت مؤلفه‌های چاه و مخزن در تحلیل داده‌های تولید است. به طور خلاصه کاربرد روش Arps نیازمند تطبیق داده‌های تولید با یک منحنی تجربی و در نهایت پیش‌بینی تولید آتی چاه می‌باشد. لذا در این روش، داده‌های تولید بدون نیاز به آگاهی از مکانیسم رانشی مخزن تجزیه و تحلیل می‌گردند. در عمل به واسطه کاربرد فراوان روش Arps و تجارب به دست آمده، یک دستورالعمل راهبردی به منظور تجزیه و تحلیل دقیق‌تر داده‌های تولید ارائه گردیده است [۱].

در دهه ۱۹۶۰ میلادی [۳] Fetkovich منحنی مدل (Type Curve) را جهت تجزیه و تحلیل داده‌های طولانی‌مدت تولید توسعه داد. پیش از این، منحنی‌های مدل فقط جهت تعیین رژیم جریان و تجزیه و تحلیل داده‌های کوتاه‌مدت چاه آزمائی به کار می‌رفت. برخلاف روش Arps که توسط آن فقط داده‌های تولید در رژیم جریان متأثر از مرز تحلیل می‌گردد، روش Fetkovich [۳] قابلیت تجزیه و تحلیل هر دو نوع داده‌های رژیم جریانی چاه (جریان گذار و جریان متأثر مرز) را دارد.

در روش Fetkovich [۳] با ترکیب منحنی‌های تجربی Arps (جهت تحلیل جریان متأثر از مرز) و منحنی‌های مدل حاصل از حل معادله انتشار در شرایط تولید با فشار ثابت از چاه (جهت تحلیل جریان گذار)، یک روش جدید جهت تحلیل داده‌های تولید ارائه گردید.

روش Fetkovich [۳] همانند روش Arps [۲] فقط مقدار بازیافت نهایی را پیش‌بینی می‌نماید. برخلاف هیدروکربور درجا (In-place) که توسط طبیعت تعیین شده و مقدار آن ثابت می‌باشد، مقدار هیدروکربور قابل بازیافت وابسته به شرایط عملیاتی نظیر فشار پایین دست مخزن است. تعیین گاز یا نفت درجا توسط این دو روش امکان‌پذیر نمی‌باشد. افزون بر این کاربرد هر دو روش Arps [۲] و Fetkovich [۳] محدود به ثابت ماندن شرایط مخزن و شرایط عملیاتی (فشار تفکیک‌گر سرچاهی، تنظیمات چوک سرچاهی، اندازه لوله مغزی) می‌باشد. چنانچه شرایط فوق تغییر نماید (به عنوان مثال انجام مشبک‌کاری روی لایه‌های جدید یا کاهش فشار سرچاه گازی با نصب کمپرسور) نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، پیش از انجام تغییرات قابل تعمیم به زمان‌های پس از تغییرات اعمال شده بر چاه نخواهد بود.

در دهه ۱۹۸۰ میلادی با ارائه روش‌های پیشرفته نظیر روش‌های Blasingame [۴] و Agarwal-Gardner [۵] یک جهش قابل توجه در تجزیه و تحلیل داده‌های تولید ایجاد گردید.

از نظر کاربردی، با تجزیه و تحلیل رژیم جریان گذار می‌توان ویژگی‌هایی نظیر تراوایی و ضریب پوسته چاه تولیدی را در محدوده شعاع تخلیه چاه به دست آورد، لیکن هیچگونه اطلاعاتی در رابطه با ذخیره مخزن از تحلیل داده‌های این نوع رژیم جریان قابل حصول نیست.

۲-۲- جریان متأثر از مرز چاه (Boundary dominated)

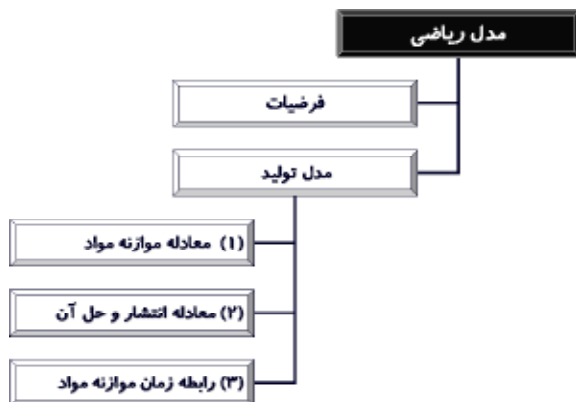
پس از حس شدن اغتشاش فشار ناشی از تولید توسط تمام مرزهای چاه تولیدی، رژیم جریان از حالت گذار به حالت متأثر از مرز تغییر می‌یابد. رژیم جریان متأثر از مرز به هر دو شرایط تولید با فشار ثابت (Constant pressure) و تولید با دبی ثابت (Constant rate) اطلاق می‌گردد (شکل ۳-الف و ب). لیکن تحت تولید با دبی ثابت چنانچه فشار در مرز مخزن ثابت بماند به آن رژیم جریان پایدار و در صورتیکه جریانی از مرز مخزن عبور نکند به آن رژیم جریان شبه پایدار (Pseudo-steady state) اطلاق می‌گردد.

رفتار مخزن در رژیم جریان شبه پایدار رفتار موسوم به Tank-type می‌باشد، به این معنی که نرخ کاهش فشار (dp/dt) در سرتاسر مخزن یکسان خواهد بود (شکل ۳-ب). تحت چنین شرایطی (تولید ثابت از چاه و رژیم جریان متأثر از مرز) چنانچه فشار چاه ۱ psi کاهش یابد فشار در هر شعاعی از مخزن و در نتیجه فشار متوسط مخزن نیز ۱ psi کاهش خواهد یافت.

۳- مروری بر منحنی‌های کاهش تولید

منحنی‌های کاهش تولید یک روش جهت تجزیه و تحلیل دبی کاهشی چاه و پیش‌بینی تولید آتی از چاه‌های نفت و گاز می‌باشند. تاریخچه منحنی‌های تولید به دهه ۱۹۲۰ میلادی باز می‌گردد، زمانی که پیش‌بینی تولید صرفاً بر اساس تجارب به دست آمده از عملکرد میادین مشابه و احتمالاً مجاور با مخزن در دست مطالعه بود. در دهه ۱۹۴۰ میلادی روش‌های جدیدی به منظور تحلیل داده‌های تولید ارائه گردید که معروف‌ترین آنها منحنی‌های کاهش تولید Arps [۲] است. اگر چه منحنی کاهش تولید Arps یک روش تجربی محسوب می‌شود، اما روابط تجربی ارائه شده از فیزیک حاکم بر تولید از یک مخزن بی‌بهره نیست. در دهه ۱۹۵۰ میلادی اولین روش نظام‌مند تحلیل داده‌های تولید با استفاده از روش Arps ارائه شد. یکی از شواهد موفقیت روش Arps، تداوم استفاده از آن تا به امروز است. یکی از ویژگی‌های جذاب روش Arps، سادگی آن به دلیل

شکل ۵- مدل ریاضی تولید از مخزن



این ساده‌سازی با هدف فاصله گرفتن از عملکرد غیرخطی سیستم و تا حد امکان خطی‌سازی (Linearization) سیستم صورت می‌پذیرد تا به واسطه آن بتوان ضمن توسعه مدل ریاضی، رفتار مدل فیزیکی را توصیف نمود. مدل‌های ریاضی ضمن توصیف یک سیستم با زبان ریاضی، به ارائه کاربردهای یک مدل می‌پردازند. در این بخش از مقاله ضمن ارائه یک مدل فیزیکی تولید، مدل‌سازی ریاضی فرآیند تولید نفت در شرایط متغیر تولید از این مدل پایه ارائه می‌شود.

۴-۱- مدل فیزیکی

همانگونه که در شکل ۴- نشان داده شده است، یک مخزن استوانه‌ای با ضخامت «h» و شعاع « r_e » حاوی نفت فوق اشباع به عنوان مدل فیزیکی در نظر گرفته می‌شود. یک حلقه چاه در مرکز این استوانه حفر شده و به طور کامل در طول ضخامت «h» تولیدی تکمیل شده است. با تولید از چاه، جریان نفت از طرف شعاع مخزن (r_e) به سمت شعاع چاه (r_w) آغاز شده که ضمن تخلیه مخزن سبب کاهش فشار مخزن نیز می‌گردد.

۴-۲- مدل‌سازی ریاضی

توسعه یک مدل ریاضی جهت تجزیه و تحلیل داده‌های تولید تحت شرایط متغیر در چاه نیازمند موارد فهرست شده زیر می‌باشد:

- ۱- معادله موازنه مواد جهت به دست آوردن فشار متوسط مخزن از داده‌های تولید (دبی زمان)؛
- ۲- برآورد زمان موازنه مواد (Material balance time; t_c) در فشار متوسط مخزن؛
- ۳- استفاده از روش‌های سنتی نظیر چاه‌آزمایی و تحلیل منحنی‌های مدل (علیرغم تغییرات شرایط تولید در چاه) با استفاده از تابع انتقال زمان واقعی (t) به زمان موازنه مواد (t_c).

در این بخش جزئیات مرتبط با توسعه یک مدل تولید تحت شرایط متغیر در چاه ارائه خواهد گردید. همانگونه که در شکل ۵- نشان داده شده است مدل ریاضی شامل مؤلفه‌های زیر می‌باشد:

الف) فرضیات ساده‌ساز؛
 ب) معادله موازنه مواد؛
 ج) معادله انتشار و حل آن تحت شرایط دبی ثابت و فشار ثابت در چاه و
 د) معادله زمان موازنه مواد.

ادامه دارد ...

در این روش‌ها همانند روش [۳] Fetkovich از منحنی‌های مدل، جهت تجزیه و تحلیل داده‌های تولید استفاده می‌شود، لیکن تفاوت اساسی روش‌های مدرن با روش [۳] Fetkovich در استفاده از داده‌های جریانی فشار و دبی چاه‌ها می‌باشد.

افزون بر این، روش‌های مدرن با استفاده از صورتی که حل تحلیلی هیچ کدام معادله حاکم بر جریان سیال در مخزن قادر به تعیین مقدار هیدروکربور در جای اولیه مخزن می‌باشند، در صورتیکه هیچ‌کدام از روش‌های Fetkovich [۳] و Arps [۲] قابلیت محاسبه هیدروکربور در جای اولیه مخزن را نداشتند.

دو ویژگی بارز روش‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل داده‌های تولید عبارتند از:

۱) نرمالایز نمودن دبی تولیدی (q) با استفاده از کاهش فشار جریانی (Δp) جهت اعمال تغییرات هم‌زمان فشار و دبی در تجزیه و تحلیل داده‌های مخزن.

۲) اعمال تغییرات تراکم‌پذیری گاز (در نتیجه کاهش فشار مخزن در محاسبات موازنه مواد با استفاده از مفهوم تابع شبه-زمان (Pseudo - time)).

از دیگر روش‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل داده‌های بهره‌برداری، روش‌های موازنه مواد جریانی (Flowing material balance) [۶] و موازنه مواد دینامیکی [۷] (Dynamic material balance) می‌باشند. در این روش‌ها به جای استفاده از منحنی‌های مدل در محاسبه مقدار هیدروکربور در چاه، از ترسیم فشار و دبی جریانی در برابر تولید انباشتی برای یک مخزن تحت تخلیه حجمی محاسبه می‌گردند.

همانند سایر روش‌های تحلیلی، روش‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل داده‌های تولید از فرضیاتی مناسب جهت ساده‌سازی مخزن و داده‌های تولید استفاده می‌نمایند. بیشتر روش‌ها بر پایه فرضیات تک‌فاز بودن و حجمی بودن عملکرد مخزن، توسعه داده شده است. اما بعضی از اثرات غیر حجمی نظیر اثر آبد و تداخل تولید چاه‌ها قابل اعمال در مدل‌های ریاضی به روش‌های فوق می‌باشد.

۴- مبانی تئوری توسعه مدل‌های تجزیه و تحلیل داده‌های تولید

از دیدگاه مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی مجموعه‌ای پیچیده از فرایندهای مختلف است که بسته به مقیاس (میکروسکوپی یا ماکروسکوپی) مسئله مورد مطالعه قرار می‌گیرند. معمولاً در مدل‌سازی تئوری یک فرایند فیزیکی، همواره سعی بر آن است تا فیزیک مسئله، به نحوی ساده شود تا خدشه‌ای به عملکرد نهایی سیستم وارد نشود.

شکل ۴- مدل فیزیکی مخزن

