



تعیین ویژگی‌های فنی یکی از مخازن نفتی جنوب باختری ایران با استفاده از تحلیل نتایج چاه آزمایشی

سیاوش عاشوری، دانشگاه صنعت نفت اهواز

محمد زاید پور*، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

چکیده

چاه آزمایشی روشی مرسوم و کلیدی در صنایع نفت و گاز به شمار می‌آید. نتایج تحلیل داده‌های چاه آزمایشی برای اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری بسیار مهم است. تحلیل چاه آزمایشی یکی از مهمترین روش‌های موجود برای مهندسان مخزن جهت تعیین برخی از خصوصیات مخزن مانند تراوایی متوسط، محل مرزها و گسل است. داده‌های چاه آزمایشی اطلاعات بسیار ارزشمندی را برای تشخیص خصوصیات مخزن، پیش‌بینی عملکرد آن و تشخیص آسیب‌دیدگی سازند در نواحی اطراف چاه، در اختیار کارشناسان قرار می‌دهد که متعاقب تحلیل داده‌ها می‌توانند به ارائه راهکارهای سازنده پی‌برده و در نهایت، مدیریت تولید ونحوه برداشت از یک چاه یا مخزن هیدروکربوری را بهتر شناسایی کنند.

در این مقاله، پارامترهای مخزنی با استفاده از داده‌های چاه آزمایشی در یکی از مخازن نفتی جنوب باختری ایران بررسی و توسط نرم‌افزار PANSYSTEM مورد تحلیل قرار می‌گیرد. اساس تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار، بر اساس تطبیق نمودارهای الگو و استفاده از رگرسیون غیرخطی صورت می‌گیرد. براساس نتایج به دست آمده از آنالیز داده‌ها، مشخص گردید که مدل شعاعی همگن بر روی داده‌های چاه آزمایشی انطباق مناسبی نشان می‌دهد. همچنین، ریزشکاف‌های مشاهده شده در ساختار زمین‌شناسی منطقه، نقشی در تولید نداشته و برخلاف پیش‌بینی‌های اولیه‌ی مخزن، فاقد تخلخل دوگانه تشخیص داده شد.

واژگان کلیدی: آنالیز چاه آزمایشی، تراوایی، ضریب پوسته، نمودارهای الگوی مشتق فشاری، رگرسیون غیرخطی

واژگان کلیدی

مقدمه

نمایش گرافیکی جواب‌های تئوری معادلات جریان هستند، توسعه یافت. تعمیم یافتن این منحنی‌ها به‌طور مستقیم به دلیل پیشرفت علم رایانه است زیرا زمان انجام محاسبات این روش بسیار کم شده است. روش‌های جدید مبتنی بر منحنی‌های الگوی پارامتر مشتق فشار که در سال ۱۹۸۳ توسط بوردت ارائه گردید، چاه آزمایشی را به ابزاری صحیح و کارآمد برای شناخت و ویژگی‌های مخزن تبدیل کرد. استفاده از نمودارهای مشتق، ارائه گستره‌ی وسیعی از اثرات مرزها و تحلیل چاه‌های افقی و مخازن شکاف‌دار را به دنبال داشت. در واقع، کاربرد نمودارهای مادر (مشتق)، افق جدیدی را در چاه آزمایشی روشن و آن را به یکی از مهم‌ترین علوم مهندسی مخزن تبدیل کرد. با توجه به کارآمدی چاه آزمایشی در شناسایی دقیق مشخصه‌های فنی مخازن که نیاز اصلی در ساخت مدل درست از مخزن است، در حال حاضر این ابزار به‌طور گسترده‌ای در حوزه‌های نفت و گاز استفاده می‌شود و به یکی از اصلی‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در طول اکتشاف و توسعه میادین نفت و گاز تبدیل شده است. لذا در این پژوهش، چگونگی به دست آوردن مشخصه‌های فنی مخازن، از طریق آنالیز رایانه‌ای داده‌های چاه آزمایشی مورد بررسی قرار گرفته است.

در عملیات چاه آزمایشی، تجزیه و تحلیل رفتار مخزن و چاه بر اساس عکس‌العمل مخزن در برابر تغییرات تولید یا تزریق، طی زمان انجام عملیات است. این عکس‌العمل مخزن توسط مشخصه‌هایی نظیر تراوایی، ضریب پوسته، ظرفیت حفره چاه، مشخصات شکاف، نوع مرزهای مخزن و فاصله آن، ضریب تخلخل دوگانه^۱ و... کنترل می‌شود. از این‌رو، چاه آزمایشی یکی از مهم‌ترین ابزارهای مهندسان برای شناخت دقیق مخزن و ارائه مناسب‌ترین سناریوی تولید و رسیدن به حداکثر بهره‌دهی از مخزن محسوب می‌شود. برای تفسیر داده‌های چاه آزمایشی از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که در دو گروه اصلی روش‌های متعارف و روش‌های مبتنی بر تطبیق با دسته‌منحنی‌ها طبقه‌بندی می‌شود. هر یک از این دو گروه را می‌توان با توجه به نوع چاه و مخزن و شرایط مرزهای مخزن به کار گرفت. روش‌های متعارف بر اساس تشخیص دوره‌های مختلف جریان از روی نمودار لگاریتمی فشار بر حسب زمان پایه‌گذاری شده است.

در روش تطبیق با دسته‌منحنی‌های الگو که در سال ۱۹۷۰ توسط آگاروال و همکارانش^۲ ارائه شد، استفاده از منحنی‌های الگویی که

*نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات (m.zadparvar@hotmail.com)

۱- شرح مخزن و ساختار آن

مخزن مورد مطالعه در غرب ساحل رودخانه کارون واقع شده است. مخزن سطحی صاف در حدود ۳ تا ۵ متر بالای سطح دریا دارد و سازند تولیدی فعلی آن، فهلیان با طولی معادل ۲۴ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر، در عمق ۴۰۰ متری، با حرارت ۱۴۰ درجه سانتی گراد، حاوی سیال نفتی سبک با API ۳۸-۴۰ می باشد. در این مخزن تاکنون ۳۱ چاه حفاری شده که شامل ۲۴ حلقه تولیدی، ۴ حلقه تزریقی گاز، ۱ حلقه دفعی آب های زائد و ۲ حلقه چاه مسدود است.

ساختمان سازند تولیدی، تاقدیسی متقارن با سن کرتاسه از جنس گچ و عمدتاً حاوی رگه های شیلی است که نظیر بیشتر سازندهای نفتی جنوب غرب ایران، دارای امتداد شمال غربی-جنوب شرقی می باشد و از سه لایه تشکیل شده که لایه های ۲ و ۳ آن تولیدی است. (شکل ۱-۱)

۱-۱- چگونگی به دست آوردن داده های لابر اتوری

تنها راه مستقیم دسترسی به مخزن، مغزه گیری است و با به کار بردن نمونه های مغزه امکان انجام برخی اندازه گیری های مستقیم از خواص مخزنی فراهم می شود. اما گرفتن مغزه از مخزن همواره با چالش های زیادی روبرو است زیرا به طور معمول، یک پلاگ، نمایانگر جزئی معادل ۱۰^{-۹} برابر حجم کل مخزن است. لذا، اطلاعاتی که از آنالیز لابر اتوری مغزه حاصل می شود، قسمت کوچکی از مخزن را پشتیبانی می کند. از سویی دیگر، تعداد روش های به کار گرفته شده جهت به دست آوردن داده های آزمایشگاهی، گسترده وسیعی از مطالعات مقایسه ای برونزدهای زمین شناسی تا پرتونگاری محوری روی پلاگ های مغزه در آزمایشگاه را شامل می شود که یکپارچه سازی این اطلاعات کار بسیار مشکلی است. در هر صورت، از این مخزن ۴ جعبه مغزه در اعماق ۴۲۳۳-۴۲۴۸ متری گرفته شده که از این تعداد، ۱۲ نمونه ای افقی، ۵ نمونه ای عمودی و ۲۴ بخش نازک ۳ برابری مطالعات پتروفیزیکی مهیا گردید. همچنین نگار گاما از روی نمونه ها تهیه شد.

جهت تشخیص اشباع سیالات از روش دین استارک^۴، تعیین فشار موینگی از روش تزریق حیوه و محاسبه فشار موینگی بین نفت و هوا از آزمایش سانتی فیوژ استفاده شد که نسبت به روش دیگر بسیار سریع تر بوده و نیز فشارهای مؤثر بالاتر در آن قابل دستیابی است. همچنین، جهت کاربرد داده ها در محاسبات مهندسی عمل بازگرداندن به شرایط مخزن از رابطه ۱- و نرمال سازی داده ها از رابطه ۲- استفاده شد:

$$P_{CR} = P_{CL} \frac{(\sigma \cos\theta)R}{(\sigma \cos\theta)L} \quad (1)$$

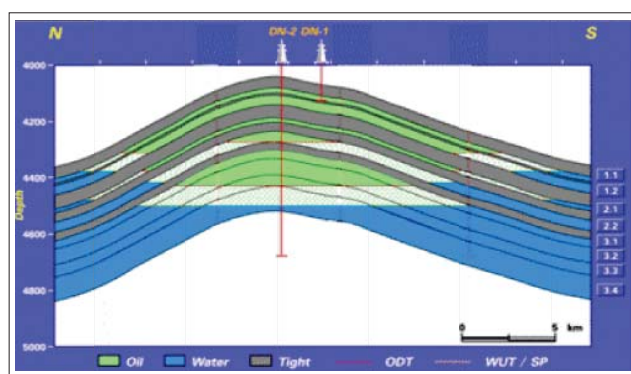
$$J_{(sw)} = 0.21645 \frac{P_c}{\partial \cos\theta} \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad (2)$$

باید توجه داشت که هدف تابع J یکسان کردن منحنی های فشار موینگی است و برای یک لیتولوژی مشخص کارایی دارد. پس از انجام مراحل فوق نیاز به میانگین گیری از داده هاست. جهت تشخیص ترشوندگی، بر روی چند نمونه، آزمایش صورت گرفت و در نهایت، جهت تشخیص نفوذ پذیری نسبی، نمونه ها با سیال آب و گاز سیلاب زنی شد که در نمونه های مختلف نتایج متفاوتی را نشان داد. برخی از منابع اطلاعاتی نیز حاصل از اندازه گیری های نمودار چاه با ابزار رزونانس مغناطیس هسته ای جمع آوری گردید.

۲-۱- نتایج حاصل از آنالیز هسته و چاه پیمایی در مخزن

بر اساس نتایج آزمایش ها مشخص گردید، بیشترین اشباع نفت مربوط به اعماق ۴۲۴۸-۴۲۴۷ متری و کمترین اشباع، مربوط به اعماق ۴۲۴۵-۴۲۴۴ متری است. همچنین، بررسی نمودار گاما نشان دهنده وجود لایه شیلی در اعماق ۴۲۴۸-۴۲۴۷ متری است. نتایج نشان داد که شاخص

پارامتر	فهلپان لایه اول	فهلپان لایه دوم	فهلپان لایه سوم
عمق (متر)	۴۲۵۳-۴۱۲۰	۴۳۵۶-۴۲۵۳	۴۵۸۵-۴۳۵۶
دمال (سانتی گراد)	۲۷۳/۲	۲۸۹/۴	۲۹۴/۳
فشار اولیه (استاتیک پام)	۹۲۶۰	۹۱۷۰	۹۱۸۱
فشار حباب (پام)	۴۹۰۸	۴۲۸۳	۴۸۴۳
تراکم پذیری سیال	۱۵/۵ e ^{-۶}	۱۲/۴ e ^{-۶}	۱۵ e ^{-۶}
ضریب حجمی نفت	۲/۳۶۵	۲/۲۵۴	۲/۳۵۶
	۲/۵۹۱	۲/۵۰۵	۲/۵۸۶
چگالی نفت	۰/۵۹۵	۰/۶۰۳	۰/۵۹۵
	۰/۵۴۴	۰/۵۴۲	۰/۵۴۴
ویسکوزیته (سانتی پوز)	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۲۸
	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۲۰
درجه API	۳۳/۴۸	۳۵/۴۴	۳۳/۷۱



شکل ۱ | ساختمان تاقدیسی و لایه های تشکیل دهنده سازند فهلیان



داشت در صورتی که اطلاعات فشار با کیفیت بالا در دسترس باشد، تکنیک‌های تفسیر امروزی این اجازه را می‌دهد که مهندسان مخزن ناهمگنی‌های بزرگ مقیاس^۸ مخزنی را شناسایی کرده و در نهایت، به مدل دقیق‌تری از مخزن دست یابند. بر این اساس، مهندسان مخازن، آزمایش‌هایی شامل آزمایش متعارف (افت فشار- ساخت

ترشوندگی اموت_ هاروی^۵ نمونه‌ها بین ۰/۳۲۶- و ۰/۱۹۴- است و لذا می‌توان اظهار داشت که نمونه‌ها دارای ترشوندگی میانه (خشی) است که با بیشتر سنگ مخازن کربناته ایران، همگونی ترشوندگی دارد. براساس بررسی‌ها، بیشترین مقدار آب غیرقابل استحصال مربوط به عمق ۴۲۴۴/۸۹ متری و کمترین مقدار، در عمق ۴۲۴۷/۸۳ تا مقدار ۵/۴۹ درصد می‌باشد. بیشترین میزان توزیع اندازه‌ی فضاها ی خالی نمونه‌ها در حدود ۰/۱ میکرون محاسبه گردید. همچنین، بدون در نظر گرفتن تخلخل و نفوذپذیری، میزان اشباع نفت غیرقابل استحصال به وسیله ساترفیوژ برای تمام نمونه‌ها ۲۵ درصد به دست آمد. بررسی‌های معمول شامل تخلخل، نفوذپذیری و نفوذپذیری کلینکلبرگ^۹ بر روی نمونه‌ها تحت ۴ فشار همه‌جانبه انجام شد. تخلخل در محدوده ۲۳-۹ درصد، تراوایی مطلق در بازه ۴/۳۳ تا ۹۱/۱۷ میلی‌داری و شاخص تراوایی کلینکلبرگ در گستره ۳/۱۵ تا ۸۵/۱ میلی‌داری گزارش گردید.

۱-۳- نتایج آنالیز سیال مخزن

نمونه‌های مورد مطالعه برای بررسی خواص سیال مخزن از سه حلقه چاه (شامل چاه-۵ برای لایه اول و دوم، چاه-۴ برای لایه دوم و سوم و چاه-۶ برای لایه سوم) به صورت تک‌فازی ته‌چاهی برداشت و جهت مطالعات آزمایشگاهی به‌طور مستقیم از شرایط مخزن به شرایط استاندارد تغییر فشار و دما داده شد.^۷ همچنین، به‌منظور تعیین نقطه حباب فشار نمونه‌های مورد مطالعه در دمای ثابت مخزن، از فشاری بالاتر از فشار اولیه مخزن در چندین مرحله کاهش داده شد و حجم سیال در هر یک از مراحل اندازه‌گیری گردید که نتایج در جدول-۱ گزارش شده است.

۲- چاه‌آزمایی و اهداف آن

چاه‌ها جهت تشخیص سیالات تولیدی، تخریب چاه و تعیین برخی پارامترهای اولیه مخزنی چون فشار و تراوایی و نیز تشخیص مرزهای مخزن مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر ورود ابزارهای اندازه‌گیری با دقت بالا به‌همراه وجود نرم‌افزارهای تطابقی بر اساس نوع منحنی، سبب شده که چاه‌آزمایی ابزاری قدرتمند در ارزیابی، توصیف و مدیریت مخزن باشد. تحول ابزارهای اندازه‌گیری فشار، مهم‌ترین عامل در این خصوص است. آزمایش‌های خاص نظیر آزمایش فشار پالس و با فاصله که بر بازشناسی اختلال‌های کوچک تکیه دارند، در حال حاضر، تکنیک‌های مناسب در اغلب میدان‌ها به‌شمار می‌رود. همچنین، نصب ابزارهای اندازه‌گیر درون‌چاهی، ترسیم از پروفایل فشار مخزن را حین بهره‌برداری ارائه می‌دهد که می‌تواند جهت بهبود شناخت مخزن بسیار سودمند باشد. باید توجه

۲ | نرخ تولید و تغییرات دبی و فشار در چاه‌های مورد آزمایش

دبی (Stb/Day)	فشار (Psia)	زمان (hr)	# چاه	دبی (Stb/Day)	فشار (Psia)	زمان (hr)	# چاه
۰	۸۵۸۵	۰	W18-L3	۰	۸۶۲۹	۰	W13-L3
۲۲۳۱	۸۲۴۵	۸	W18-L3	۲۲۳۱	۸۳۱۹	۸/۱	W13-L3
۴۵۳۲	۸۰۹۵	۱۶	W18-L3	۴۵۳۲	۸۱۷۸	۱۶/۲	W13-L3
۶۴۸۲	۷۷۵۸	۳۳/۹۹۷۱۱	W18-L3	۶۴۸۲	۸۰۰۰	۲۴/۱۹۱۴۶	W13-L3
۰	۸۵۹۶	۴۸	W18-L3	۰	۸۶۲۴	۴۸/۲	W13-L3
۰	۸۶۲۷	۰	W26-L2	۰	۸۵۶۶	۰	W09-L2
۲۷۳۸	۶۹۰۸	۱۱/۹	W26-L2	۲۷۳۸	۸۲۵۳	۸/۳	W09-L2
۳۳۵۸	۶۶۰۷/۸۹۹۹	۲۳/۹	W26-L2	۳۳۵۸	۸۱۱۴/۵	۱۶/۳	W09-L2
۴۵۸۱	۵۹۷۲	۳۵/۹۹۹۹۵	W26-L2	۴۵۸۱	۷۹۳۵	۲۴/۳۱۸۵	W09-L2
۰	۸۶۴۶	۷۱/۷	W26-L2	۰	۸۵۷۰	۴۷/۸	W09-L2
۰	۸۶۵۶	۰	W17-L3	۰	۸۴۹۷	۰	W31-L3
۲۸۴۰	۸۳۱۰	۸/۲	W17-L3	۲۸۴۰	۶۳۲۲/۲۹۹۸	۱۲	W31-L3
۳۹۶۱	۸۱۵۶	۱۶/۱	W17-L3	۳۹۶۱	۵۷۱۱	۲۴	W31-L3
۵۳۵۲	۷۹۶۱/۷۹۹۸	۲۴/۱۹۲۹۳	W17-L3	۵۳۵۲	۴۹۶۵/۷۰۰۲	۳۶۰۰۶۲	W31-L3
۰	۸۶۷۶/۲۱۱۹	۴۷/۰۸۱۹۳	W17-L3	۰	۸۵۱۰	۷۲	W31-L3
۰	۸۵۳۰	۰	W27-L3	۰	۸۵۹۰	۰	W07-L3
۲۲۶۴	۶۹۶۳/۷۹۹۸	۲۰	W27-L3	۲۲۶۴	۸۲۴۵	۸	W07-L3
۳۸۲۹	۵۸۷۴/۶۰۰۱	۴۲	W27-L3	۳۸۲۹	۸۰۹۶	۹.۱۵	W07-L3
۵۲۴۷	۵۰۷۴/۷۹۹۸	۵۴	W27-L3	۵۲۴۷	۷۹۰۰	۲۴/۰۱۵۸۳	W07-L3
۰	۸۵۲۳/۰۹۹۶	۱۰.۸	W27-L3	۰	۸۵۹۰	۴۸	W07-L3
۰	۹۱۱۳	۰/۰۰۱۱۶	W25-L1	۰	۸۵۹۰	۰	W25-L1
۳۶۰	۵۲۵۸	۱۱/۸۶۷۸۵	W25-L1	۳۶۰	۸۵۹۰	۰	W25-L1
۰	۹۱۲۷	۲۳/۷۸۳۴	W25-L1	۰	۸۵۹۰	۰	W25-L1

شده جهت به دست آوردن شناخت بهتر ژئومتری داخلی مخزن استفاده می شود. لذا، نتایج این نوع چاه آزمایی در تعیین تعداد و موقعیت چاه های تولیدی و تزریقی کاربرد دارد. در آزمایش چندچاهی، سرعت جریان در یک چاه تولیدی و میزان فشار در یک چاه دورتر (چاه مشاهده ای) اندازه گیری می شود. هدف از این کار، بازیابی ارتباط هیدرولیکی بین چاه ها و درک چگونگی پیوستگی مخزن است. لذا، این آزمایش، پیش از اجرای پروژه های بازیابی ثانویه انجام می شود. این نوع چاه آزمایی ابزاری مؤثر در شناخت کلی شکل مخزن است.

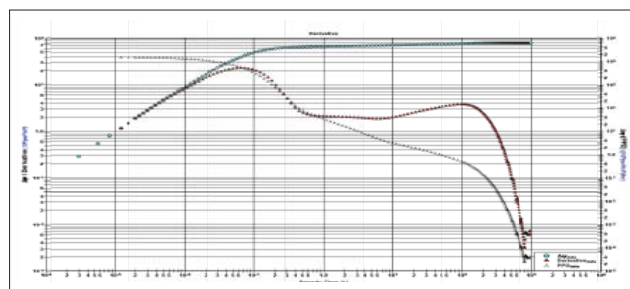
۲-۱ تشریح عملیات چاه آزمایی و گردآوری داده ها

در مخزن هدف، عملیات چاه آزمایی متعارف به صورت سه دوره ی کاهش فشار و سپس یک دوره ی ساخت فشار از سوی مهندسان طراحی و در ۱۰ حلقه چاه به اجرا گذاشته شد. طی سه دوره ی آزمایش افت فشار، دبی ها به صورت پلکانی افزایش داده شد و سپس، بارساندن دبی به صفر و بستن چاه ها، یک دوره آزمایش ساخت فشار به اجرا در آمد. نرخ تولید و مدت زمان آن در جدول ۲ آمده است.

ابزار ثبت داده ها از نوع درون چاهی مبدل کریستال مرتعش (WCQR) با حس گر کریستال کوارتز است که در دو حالت اوسیلاتور و جبران پویا، عملکرد اندازه گیری فوق العاده ای دارد. این نوع ابزار با طول ترکیبی ۱۸۱ سانتی متر و قطر ۳۱ میلی متر قادر است در فشار ۱۶۰۰۰ پام و در حرارت ۳۵۰ درجه فارنهایت به خوبی عمل ثبت ۱۰۰۰۰۰ داده را با دقت فشاری و دمایی ۰/۱ پام و ۰/۹ درجه فارنهایت، با

فشار)، چاه آزمایی مدت دار^۱ و آزمایش های چندچاهی (بین چاهی و پالس) را طراحی می کنند. در واقع در آزمایش های متعارف، بررسی تغییرات در نسبت سطح تولید از یک چاه و انطباق این تغییرات با فشار ته چاه مورد نظر است. این آشفتگی های فشار به درون سازند گسترش یافته و با اشکال مختلف وابسته به عوارض مخزنی قابل شناسایی است. بدین ترتیب، با استفاده از تفسیر داده های حاصل از این نوع آزمایش که شامل دوره هایی از دبی ها می گردد، ویژگی های مهم مخزنی نظیر تراوایی، آسیب و نوع مرزهای مخزنی معین می شود.

چاه آزمایی مدت دار اغلب با هدف مشخصی از شناخت پیوستگی مخزن صورت می گیرد. این آزمایش دارای محدوده ای از زمان از چند روز تا چندین ماه بوده و اهداف معمولی نظیر اندازه گیری عوامل مؤثر در مخزن و ارزیابی کیفی نفت درجا در ارتباط با چاه مورد سنجش قرار می گیرد. از این آزمایش در میادین تازه کشف



شکل ۲ | کاربرد نمودار PPD جهت تشخیص داده های واقعی مخزنی از داده های متاثر از دهانه چاه

جدول ۳ | پارامترهای ورودی به نرم افزار جهت آنالیز داده های چاه آزمایی

شماره چاه	ضخامت سازند (Ft)	تخلخل سازند	تراکم پذیری سازند (Psi ⁻¹)	شعاع چاه (Ft)	ضریب انبساط چاه (bbl/Psi)	گرانروی (cp)	ضریب حجمی سازند (bbl/Stb)	تراکم پذیری نفت (Psi ⁻¹)
W12	۱۳۸/۵	۰/۱۵۹	۱/۵۸۰ e ^{-۵}	۰/۲۵۰	۰/۰۰۶۱۰۴	۰/۳۲۰	۱/۸۳۰	.
W18	۴۱۰	۰/۱۵۳	۱/۷۸۰ e ^{-۵}	۰/۲۱۰	۰/۰۰۹۰۰۰	۰/۳۰۰	۱/۶۹۰	.
W13	۳۸۸	۰/۰۹۹	۱/۶۲۰ e ^{-۵}	۰/۲۵۰	۰/۰۰۹۰۰۰	۰/۳۲۰	۱/۶۹۰	.
W26	۱۳۷	۰/۱۶۳	۱/۵۶۷ e ^{-۵}	۰/۱۷۸	۰/۰۰۹۵۰۰	۰/۳۲۰	۱/۸۲۲	۱/۳۴ e ^{-۵}
W۰۹	۴۰۰/۳	۰/۱۰۷۳	۱/۶۲۰ e ^{-۵}	۰/۲۵۰	۰/۰۰۷۸۰۰	۰/۳۱۲	۱/۶۹۰	.
W17	۳۴۸	۰/۱۳۸	۱/۶۲۶ e ^{-۵}	۰/۲۵۰	۰/۰۰۷۱۰۰	۰/۳۱۲	۱/۶۹۰	۱/۳۶۲ e ^{-۵}
W31	۱۲۸	۰/۱۲۰	۱/۶۸۰ e ^{-۵}	۰/۲۵۰	۰/۰۰۳۰۸۰	۰/۳۱۲	۱/۶۹۰	.
W27	۳۱۶/۶	۰/۱۰۷	۲/۱۵۷ e ^{-۵}	۰/۳۰۰	۰/۰۰۱۴۲۰	۰/۳۱۲	۱/۶۹۰	.
W25	۵۴۱۰	۰/۱۰۰	۱/۶۰۰ e ^{-۵}	۰/۲۵	۰/۰۰۰۴	۰/۳۲	۱/۶۹۰	.
W۰۷	۴۱۱	۰/۱۳۲	۱/۶۲۰ e ^{-۵}	۰/۲۵	۰/۰۰۰۴	۰/۳۲	۱/۶۹۰	.



پارامترهای مخزنی قابل محاسبه است. این روش در حقیقت ترکیبی از تمام تحلیل‌های موجود بر روی یک نمودار است. باید توجه داشت که تعریف مشتق‌گیری به صورت شیب نمودار نیمه‌لگاریتمی فشار بر اساس زمان $(\frac{dP}{dt})$ است. هنگامی که مشتق داده‌های چاه آزمایی بر روی مقیاس لگاریتمی رسم می‌شود، به وضوح می‌توان مشخصات شیب‌های مربوط به رژیم‌های مختلف جریانی را مشاهده کرد. بر این اساس، ذخیره حجمی دهانه چاه به صورت نقاطی با شیب یک، روی نمودار مشتقی نمود می‌یابد. اگر این خط با شیب یک به سمت راست جابجا شود، نشان‌دهنده ذخیره حجمی بزرگتری در دهانه چاه است و از مختصات $(\Delta t, Der)$ مربوط به هر نقطه دلخواه واقع بر خط راست، محاسبه می‌شود.

$$C = qB \left(\frac{\Delta t}{Der} \right) / 24 \quad (4)$$

جریان شعاعی در این تحلیل شامل مجموعه نقاطی می‌شود که بر روی خطی راست با شیب صفر قرار گیرند. موقعیت عمومی این نقاط نشان‌دهنده تراوایی مخزن است و هر قدر این موقعیت بزرگتر باشد، تراوایی کمتر خواهد بود. میزان این تراوایی از رابطه زیر معین می‌گردد:

$$k = 70.6 \frac{q\mu B}{h(Der)} \quad (5)$$

در این روش، مقدار ضریب پوسته تنها از مشتق به دست نمی‌آید. اما از جدایی عمودی مابین نقاط رسم شده و مشتق گرفته شده، میزان آن معین می‌گردد. در حقیقت، ترسیم داده‌ها به تنهایی کافی نیست و مشتق‌گیری لازم است. در چنین موردی، ضریب پوسته از تراوایی و همچنین با اطلاع از مقدار فشار اولیه محاسبه می‌شود.

روش استفاده از مشتق فشار سبب گردید که انطباق، بهتر و تشخیص رژیم‌های جریانی سریع‌تر گردد و در نتیجه، تفسیر با کیفیت بالاتر انجام شد. بعدها به پیشنهاد زائورال و متلار^{۱۲} مشتق‌گیری اولیه فشار^{۱۳} به این روش افزوده شد تا راهی برای تشخیص تأثیرات دهانه چاه باشد. بر این اساس، بازرسی نمودارهای مشتق‌گیری اولیه فشار سبب می‌شود که داده‌های مربوط به تأثیرات دهانه چاه از داده‌های واقعی مخزن اشتباه گرفته نشود و تحلیل به صورت صحیح انجام پذیرد.

در حال حاضر، این رویکرد در همه نرم‌افزارهای رایانه‌ای تفسیر نتایج چاه آزمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نرم‌افزار PanSystem یکی از آن‌هاست در واقع، این نرم‌افزارها ابزارهایی با انعطاف لازم هستند که باعث می‌شوند کاربر، کنترل زیادی بر روی تعدادی از پارامترهای تعیین‌کننده داشته باشد و به این ترتیب، سبب کاهش ریسک در راستای همسان کردن مناسب با یک مدل مخزنی می‌شود.

نرخ پویش ۰/۱ ثانیه تا ۲۰ دقیقه انجام دهد. علت انتخاب این نوع حس‌گر، پایداری بالای آن در شرایط سخت با غلظت‌های بالای هیدروژن سولفید و دی‌اکسید کربن و محیط‌های اسیدی است. در کلیه چاه‌های مورد آزمایش، با راندن ابزار به درون چاه از سطح تا عمق لایه تولیدی، عملیات ثبت داده‌های فشاری با نرخ پویش ۵ ثانیه‌ای صورت گرفت. به همین دلیل، تعداد زیادی داده فشاری و دمایی توسط حس‌گر در سراسر عمق چاه تولید و گزارش گردید که تعداد زیادی از این داده‌ها به دلیل قرار گرفتن ابزار در عمقی غیر از عمق لایه تولیدی، قابل استفاده نبوده و نیاز شد در مراحل کار با نرم‌افزار تفسیر چاه آزمایی، عمل پایش داده‌ها صورت گیرد.

۳- تحلیل داده‌های چاه آزمایی

۳-۱- روش‌های تحلیل داده‌های چاه آزمایی

طی سالیان گذشته، آنالیز داده‌های چاه آزمایی به روش‌های مختلفی صورت می‌گرفت. لیکن، استفاده از این روش‌ها همواره محدودیت‌ها و معایبی را در پی داشته است. اما از سال ۱۹۷۰، روش نمودارهای الگو^{۱۰} در صنعت نفت معرفی شد؛ این روش، تطبیق داده‌های واقعی مخزن بر روی نمودارهای نمونه‌ی بدون بُعد و سپس، محاسبه تراوایی، ضریب پوسته، ثابت ذخیره حجمی دهانه چاه و اندازه مخزن با استفاده از نقطه‌ی انطباق انتخاب شده را شامل می‌گردد. مختصات این نقطه به صورت دلخواه از روی تطبیق نمودارهای الگو بر روی داده‌های واقعی مخزن خوانده می‌شود. با استفاده از این مختصات، مشخصات دهانه چاه و مخزن محاسبه می‌گردد. برای مثال، جهت به دست آوردن تراوایی، مقادیر ΔP و ΔPD از محل تطبیق نمودار الگو و داده‌های مخزنی معین می‌گردد و با استفاده از تعریف فشار بدون بُعد، میزان تراوایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k = 141.2 \frac{q\mu B}{h} \frac{\Delta PD}{\Delta P} \Big|_{match} \quad (3)$$

در بسیاری از مدل‌های مخزنی، نمونه‌های الگو مشابهند و مقادیر مختلفی با انتخاب نمودارهای نمونه مختلف به دست می‌آید. همچنین، این نمودارها قابل استفاده برای آزمایش افت فشار می‌باشد و برای آزمایش‌های ساخت فشار نیاز به تغییرات و محدودیت‌هایی دارد. این دو عامل از بزرگترین معایب کاربرد نمودارهای الگو جهت آنالیز داده‌های چاه آزمایی است.

در دهه ۱۹۸۰، بوردت^{۱۱} با اضافه کردن نمودارهای مشتقی فشار، گام نوینی را در جهت از بین بردن معایب پیشین برداشت. این روش تحلیل پیشرفته، به کمک نمودارهای نمونه شامل تطابق فشاری و مشتق نیمه‌لگاریتمی آن‌ها انجام می‌گیرد. در واقع، با برآزش یک خط راست بر روی داده‌های مشتق فشاری در مقیاس نیمه‌لگاریتمی، تمام

که با واقعیت مخزن همسان نیست.

۳-۲- تحلیل داده‌ها با رویکرد رایانه‌ای

برای تفسیر داده‌های چاه آزمایشی با استفاده از نرم‌افزارهایی نظیر PanSystem، علاوه بر داده‌های چاه آزمایشی، نیاز به ورود پارامترهایی مانند خصوصیات پتروفیزیکی سنگ مخزن (h, C_p, \emptyset)، خصوصیات سیال مخزن (μ_o, C_o, B_o)، شعاع دهانه چاه (r_w)، زمان تولید و دبی تولیدی (Q_o, t_p) است. این مقادیر برای مخزن مورد مطالعه در جدول ۳-۳ آمده است.

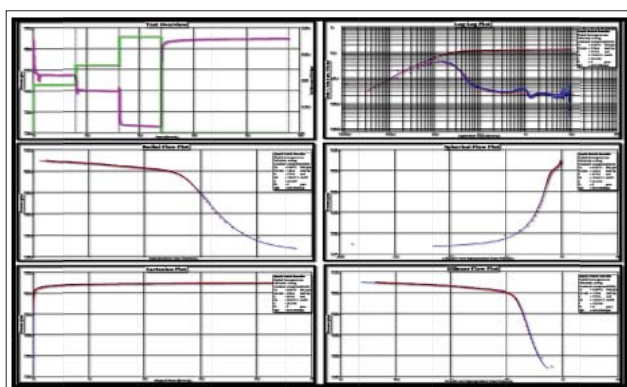
در مورد این مطالعه، سیال چاه‌ها نفت به صورت تک‌فازی و جهت چاه، عمودی در نظر گرفته شده است. با وارد کردن این اطلاعات به صورت جداگانه برای هر چاه، مرحله پیش پردازش داده‌ها صورت می‌گیرد. در این مرحله، با توجه به اینکه تعداد رکوردهای ثبت فشار بسیار زیاد است و قسمتی از آن‌ها مربوط به تأثیرات فشاری مخزن نیست، باید داده‌های اینچنینی را شناسایی و در صورت امکان آن‌ها را حذف کرد. از آنجایی که داده‌ها در یک فضای زمانی یکنواخت اندازه‌گیری شده است، روش مناسب برای کاهش تعداد داده‌ها، نمونه‌گیری لگاریتمی است.

بر این اساس، داده‌های بیشتری در زمان‌های اولیه و داده‌های کمتری در زمان‌های دورتر حفظ می‌شود. دلیل این انتخاب آن است که تغییرات سریع در زمان‌های اولیه اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب، وزن صحیح و مناسبی برای رفتار جریان نامتناهی که دارای حالت لگاریتمی است، اعمال می‌شود. لذا، جهت پیش پردازش داده‌ها در هر سیکل، تعداد ۳۰۰ داده حفظ شده و سایر داده‌ها حذف می‌گردد. بعد از پیش پردازش، مرحله بازشناسی مدل، حساس‌ترین مرحله‌ی تفسیر است؛ در این مرحله، پارامترهای داخلی، متناسب با مدل مخزنی، انتخاب می‌شوند. سپس، به صورت انفعالی و با تکنیک‌های رگرسیون، همسانی بهتر اطلاعات اندازه‌گیری شده، انجام می‌شود. در تطبیق مدل در نرم‌افزار، برای بسیاری از مخازن مختلف و الگوهای چاه‌ی متفاوت، مشخصات قابل تشخیصی وجود دارد که به آسانی بر روی نمودار مشتق فشاری قابل تشخیص است. این رویکرد که بیشتر، به تطبیق خودکار نمودار الگو^{۱۴} مشهور است، ابزار تحلیلی قدرتمندی است که با تطبیق داده‌های مشاهده‌ای با مدل مخزنی مورد نظر متفاوت است. در واقع، با استفاده از رگرسیون غیرخطی^{۱۵}، مقدار مشخصه‌های نامعلوم مخزن نظیر تراوایی، ضریب پوسته، فاصله تا مرز و ... تا جایی که مدل و داده‌ها (از حیث حداقل مربعات) با کمینه کردن جمع مربعات تفاوت فشارهای اندازه‌گیری شده و فشارهای مدل به هم نزدیک شوند؛ تغییر می‌کند:

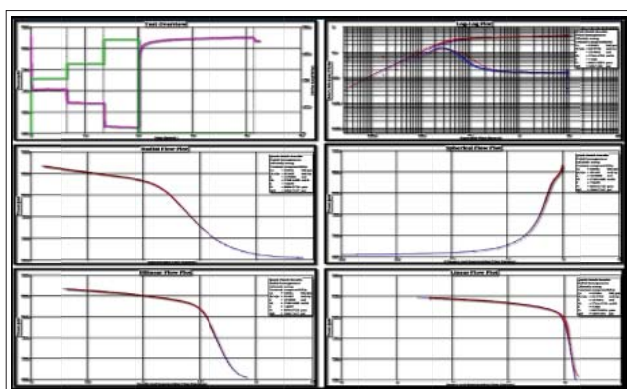
$$\sum_{i=1}^n [P_{\text{measured}}(t_i) - P_{\text{model}}(t_i, k, S, C, \dots)]^2 \quad (6)$$

شکل ۴ | نتایج مقدار مشخصه‌های فنی مخزن با استفاده از آنالیز داده‌های چاه آزمایشی

مشخصه شماره چاه	K	KH	S	Cs	Pi	Rinv
W07	۲۸/۲۱	۱۱۵۹۴/۳۱	۱۳/۹۷۳۱	-/۰.۰۷۸	۸۶۶۱/۳۳۵۹	۱۲۵۹/۷۳۶۸
W18	۳۷/۹۲	۱۵۵۵۷/۲	۲۰/۲۰۶	-/۰.۰۷۲	۸۵۷۶/۲۰	۹۵۳/۲۹۱۵۵
W17	۳۴/۳۱	۱۱۹۴۱/۳۷۶۴	۱۳/۲۱۸۷	-/۰.۰۷۲	۸۶۵۵/۹۹۶۸	۹۶۶/۲۱۴۲
W09	۴۴/۷۵	۱۷۹۲۳/۴۷	۱۸/۴۱۷۳	-/۰.۰۷۸	۸۵۷۶/۶۶۶	۱۲۶۶/۶۴۱۲
w26	۳۲/۶۳	۳۱۰۰/۷۸۹۵	۱۳/۹۷۳۳	-/۰.۰۹	۸۶۷۵/۸۲۶۶	۸۹۷/۳۰۹۱
W31	۴۱/۰۸	۵۲۵۸/۴۹۶	۳۹/۳۲۰۹	-/۰.۰۳۶	۸۵۳۴/۲۹۳	۱۳۷۸/۷۷۵۴
W27	۱۹/۹۷	۶۳۳۲/۵۶۵۳	۴۷/۸۹۸۷	-/۰.۱۴۲	۲۹۵۵/۴۹۴	۱۱۱۰/۷۹۳۳
W13	۷۱/۱۳	۲۷۵۹۷/۵۴۷۶	۲۸/۱۰۱	-/۰.۰۹	۸۶۳۴/۰۰۶۵	۱۶۶۵/۹۱۹۵
W12	۱۹/۹۶	۲۷۶۴/۴۷۳۳	۷/۳۵۶	-/۰.۰۶۱	۸۶۹۷/۰۲۵۴	۷۱۸/۱۶۲۸
W25	۱/۱۹	۶۴/۴۹۶۹	۳/۶۶۴۶	۴/۱۹۴ e ^{-۴}	۹۱۶۵	۱۴۹۱/۴۶۳۳



شکل ۳ | نمودارهای آنالیز داده‌های چاه آزمایشی چاه ۱۸



شکل ۴ | نمودارهای آنالیز داده‌های چاه آزمایشی چاه شماره ۱۲

**نتیجه گیری**

۱- مقایسه نفوذپذیری بین لایه‌های ۲ و ۳ بیانگر وضعیت مناسب میزان تراوایی لایه ۳ نسبت به لایه ۲ است. ضریب پوسته لایه‌های ۲ و ۳ این سازند، مثبت محاسبه و در محدوده ۶/۹۲ تا ۴۷/۸۹ تخمین زده شد. لیکن بر اساس نتایج، ضریب پوسته لایه ۳ نسبت به لایه ۲ بزرگ‌تر محاسبه شده است.

۲- فشار مخزن در لایه ۲ در محدوده ۸۶۹۸ تا ۸۵۷۷ پام و در لایه ۳ در محدوده ۸۶۵۶ تا ۸۵۱۴ پام محاسبه گردید. با توجه به بهتر بودن وضعیت فشار لایه ۲ نسبت به لایه ۳ می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل پتانسیل بهتر لایه ۳، همان‌طور که در تحلیل نفوذپذیری اشاره شد، تولید بیشتری از این لایه صورت می‌گیرد. لذا، فشار آن نسبت به لایه ۲ افت بیشتری کرده است.

۳- شعاع ریزش چاه‌ها در لایه ۲ در محدوده ۱۲۶۶ تا ۷۱۸ فوت و در لایه ۳ در محدوده ۱۶۶۵ تا ۹۵۳ فوت متغیر بوده است. شایان ذکر است این پارامتر همخوانی قابل قبولی با پارامترهای دبی تولیدی و تراوایی چاه‌ها داشته است.

۴- با توجه به منحنی‌های لگاریتمی - لگاریتمی مشتق فشار بر حسب زمان، داده‌های درون چاهی بیشتر با مدل جریان شعاعی همگن قابل انطباق بود. در تفسیر نمودارها کوتاه بودن زمان انجام آزمایش‌ها محرز گردید؛ به نحوی که در هیچ‌یک، اثرات و نوع مرزهای مخزن مشخص نیست. پیشنهاد می‌گردد در آزمایش‌های آتی، زمان بیشتری صرف شود تا بتوان به این هدف دست یافت.

باید توجه داشت که فرآیند رگراسیون غیرخطی نیازمند مشخص بودن مدل مخزنی است که قرار است تطبیق با آن انجام پذیرد. لذا، تحلیل رگراسیون غیرخطی باید همراه با یک روش تشخیص چشمی^{۱۶} به کار رود تا کاربر بتواند مدل مناسب را برای مخزن انتخاب کند.

در واقع، در همان زمانی که مدل مخزن انتخاب می‌شود، تحلیل گر با تخمین‌های مناسب برای مشخصه‌های مخزن، تحلیل رگراسیون غیرخطی را سرعت می‌بخشد. این، همان فرآیند کار با نرم‌افزارهای چاه‌آزمایی است.

یکی از نکات قابل توجه در تجزیه و تحلیل داده‌ها، وجود نوسانات زیاد در نمودار مشتق فشارناشی از مشتق‌گیری عددی در هر نقطه است که جهت رفع این مشکل در نرم‌افزار، از ابزار هموارسازی داده‌ها استفاده می‌شود.

۳-۳- تفسیر نمودارهای خروجی نرم‌افزار

نتایج آنالیز داده‌های چاه‌آزمایی مخزن مورد مطالعه شامل تعیین میزان هدایت‌پذیری، تراوایی، ضریب پوسته، ضریب ذخیره حفره دهانه چاه، فشار اولیه و شعاع ریزش در جدول ۴- نشان داده شده است. در تحلیل وضعیت نمودارهای چاه‌آزمایی، همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است، مخزن فاقد تخلخل دوگانه است. لیکن شکاف‌های ریزی در مخزن وجود دارد که در تولید نقش زیادی ندارد.

پانویس‌ها

1. Dual porosity
2. Agarwal et al
3. Thin Section
4. Dean Stark
5. Amott & Harvey
6. Klinkenberg Permeability

7. Zero Flash Process
8. Massive heterogeneous
9. Extended Welltest
10. Type Curve
11. Bourdet
12. Zaural & Matlar

13. Pressure premium derivative (PPD)
14. Automated Type Curve Matching
15. Nonlinear Regression
16. Visual Diagnosis

منابع

- [1] Roland N. Horne, Modern well test analysis a computer-aided approach: 4nd, Stanford University (1990).
- [2] Bourdet, D., Well Test Analysis: The use of advance interpretation models, ELSEVIER (2002).
- [3] Lee, John, Well Testing: Society of Petroleum Engineers of AIME, (1982).
- [4] قاسمی، صادق، بهار ۸۷، روش‌های تفسیر آزمایش‌های فشار در چاه‌های نفت و گاز، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
- [5] مک آلیس استوارت، ترجمه صادق کاظمی، ۱۳۹۰، عملیات تست چاه‌های نفت و گاز، مؤسسه فرهنگی هنری جهان کتاب
- [6] گرامی، شهاب، آذرماه ۸۷، مبانی تئوری توسعه منحنی‌های کاهش تولید در تحلیل داده‌های میدانی یک چاه، مجله اکتشاف و تولید ش ۵۲
- [7] Perrine, R.L.: "Analysis of pressure Build up Curves," Drill and Prod., API (1956), 482-509