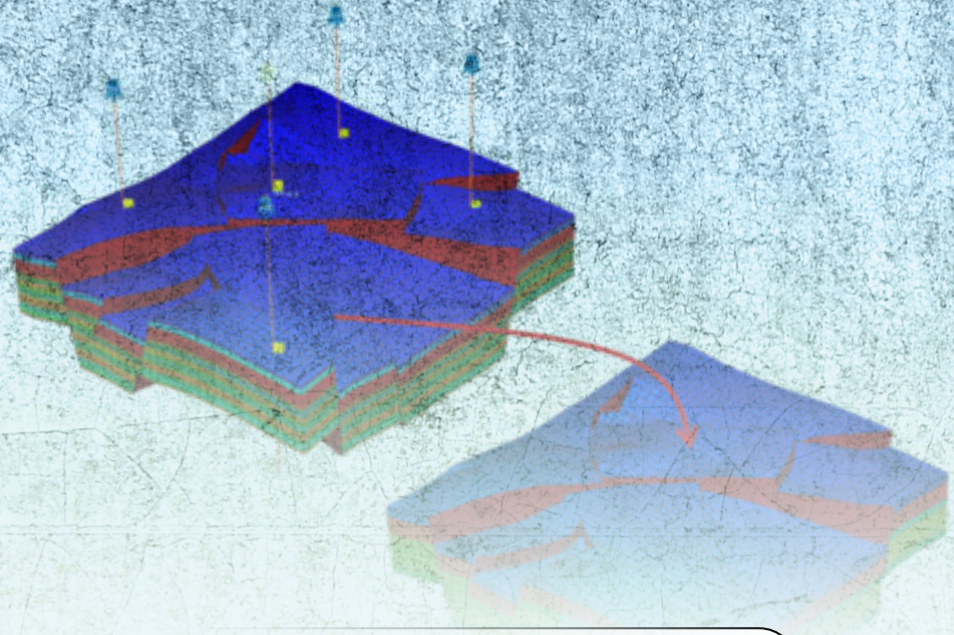


بررسی مکانیزم‌های تولید در مخازن شکافدار طبیعی

با نگاه ویژه به مخازن ایران

علی شاه محمد*

چکیده:

در حالت کلی مخازن به دو نوع قابل تقسیم‌بندی هستند: مخازن معمولی و مخازن شکافدار.
مهمترین وجه تمایز این دو نوع مخزن در مکانیزم تولید آنها می‌باشد، زیرا وجود شکاف‌ها در مخازن شکافدار طبیعی باعث ایجاد انواع گوناگونی از تولید در مقایسه با مخازن معمولی (بدون شکاف) می‌گردند. مکانیزم‌های تولید از مخازن معمولی به قرار زیرند:

۱- تولید از طریق تخلیهٔ طبیعی.
۲- تولید از طریق کلاهک گازی.
۳- تولید از طریق سفرهٔ آبی.
۴- تولید از طریق انبساط سنگ و سیال.

از سوی دیگر، مکانیزم‌های تولید از مخازن شکافدار طبیعی عبارتند از:

۱- تولید از طریق پدیدهٔ همرفت.
۲- تولید از طریق پدیدهٔ نفوذ.
۳- تولید از طریق گاز محلول.
۴- تولید از طریق ریزش ثقلی و جذب (آشام).
۵- تولید از طریق فرآیند بلوک به بلوک.
۶- تولید از طریق ریزش ثقلی غیرتعادلی گاز - نفت.

کلمات کلیدی:

مخزن شکافدار، پدیدهٔ همرفت، پدیدهٔ نفوذ.

مقدمه:

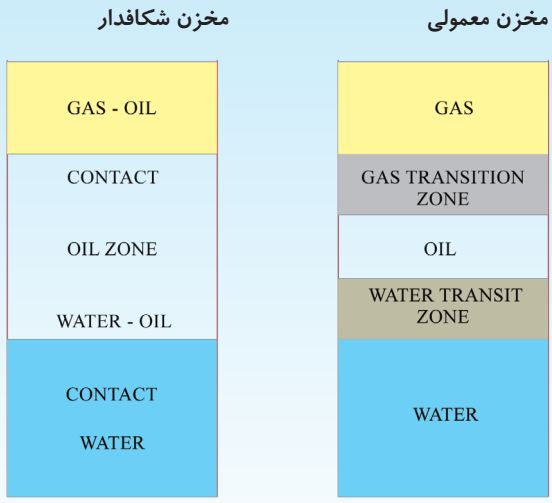
مهندسین مخازن اغلب در صدد هستند که رفتار آیندهٔ یک مخزن شکافدار را با استفاده از تاریخچه تولید آن مخزن و ارزیابی رفتار آیندهٔ آن از طریق روش‌ها و راهکارهای موجود برای مخازن معمولی، پیش‌بینی نمایند، اما متأسفانه در اکثر موارد رفتاری که از طریق محاسبات یک مخزن معمولی به دست آمده قابل انطباق بر رفتار گذشته یک مخزن شکافدار نمی‌باشد. در چنین مواردی دست یافتن به یک تاریخچهٔ صحیح از مخازن شکافدار، با استفاده از روش‌هایی از قبیل دستکاری اطلاعات اولیه تا ایجاد تغییراتی کاملاً غیرحقیقی در اطلاعات، قابل حصول می‌باشد. به عنوان مثال در یک حالت، انطباق تاریخچه ممکن است از طریق چند برابر نمودن غیرواقعی حجم نفت درجا حاصل گردد.

بنابراین باید اظهار داشت که عدم رسیدن به یک انطباق تاریخچهٔ کامل بین مدل و مخزن شکافدار، وقتی که از روش‌های بازسازی یک مخزن معمولی برای یک مخزن شکافدار استفاده می‌کنیم، نتیجهٔ مستقیم وجود مکانیزم‌های تولید ویژه در مخازن شکافدار می‌باشد که ناشی از تعاملات بین ماتریکس و شکاف می‌باشند.

در حالت کلی شبکه شکاف‌ها به چند ناحیه قابل تقسیم‌بندی است که هریک از آنها (شکاف‌ها) منحصراً تنها با یک فاز اشباع گردیده‌اند و این در حالی است که داخل هر ناحیه از بلوک‌های ماتریکس با یک، دو و یا هر سه فاز اشباع گردیده است. این نکته نیز قابل ذکر است که همواره داخل هر مخزن یک ناحیه‌بندی از سیالات قبل از شروع تولید از آن مخزن وجود دارد (در

* کارشناس ارشد مهندسی نفت،دانشگاه کالگری کانادا

شکل -۱: شمایی از سطوح تماس آب - نفت و گاز- نفت در یک مخزن معمولی و شکافدار



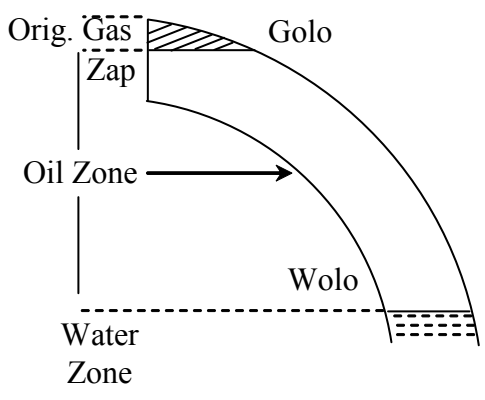
شرایط ایستا) ولی پس از شروع تولید از مخزن و در طی دورهٔ بهره‌برداری از آن، ناحیه‌بندی دیگری از سیالات در داخل مخزن ایجاد می‌شود (در شرایط پویا یا دینامیک). تعاملات میان شکاف و ماتریکس در یک بلوک به موقعیت نسبی آن بلوک در مخزن و سطوح تماس نسبی آب - نفت و گاز - نفت بستگی دارد.

عدم وجود نواحی انتقالی در مخازن شکافدار بیانگر ویژگی‌های مخصوص این نوع از مخازن است. به بیان دیگر، سطوح تماس دو فاز در مخازن شکافدار، برخلاف مخازن معمولی که به صورت یک ناحیهٔ انتقالی گسترده می‌باشند، به صورت سطوح جداسازی مشخصی می‌باشند (شکل- ۱).

در یک مخزن شکافدار از آنجایی‌که حرکت و انتقال سیال در شبکهٔ شکاف‌ها به دلیل نفوذپذیری بسیار بالای شکاف‌ها به راحتی صورت می‌گیرد لذا سطوح تماس دو فاز در هر دو حالت ایستا و پویا کاملاً واضح و مشخص و به صورت افقی می‌باشند و هرگونه تغییری در سطوح به سرعت تعدیل می‌گردد. برخلاف این حالت در یک مخزن معمولی ناحیه تعادلی در هر دو حالت ایستا و پویا به صورت یک ناحیه گسترده وجود دارد.

تقسیم‌بندی مخزن شکافدار به نواحی گوناگون اساساً بستگی به میزان اشباع شبکهٔ شکاف‌ها دارد. **بنابراین اندازهٔ سه ناحیهٔ اصلی آب، نفت و گاز بستگی به محل سطوح تماس آب - نفت و گاز - نفت در شبکه شکاف‌ها دارد.**

شکل -۲: سطح مقطع عمودی در یک مخزن شکافدار و ناحیه‌بندی سیالات در حالت ایستا



همچنین در طول دورهٔ تولید از مخزن شکافدار، امکان توسعهٔ زیرناحیه‌ها (نواحی کوچکتر موجود در سه ناحیهٔ اصلی) به دلیل برقراری تعادل سیال داخل بلوک ماتریکس و نیز جابجایی سیال بین ماتریکس و شکاف وجود دارد. در واقع نحوهٔ توسعه و قرارگیری نواحی اصلی و زیرناحیه‌ها در طول دورهٔ تولید از مخزن شکافدار به دلیل تبادل پیاپی سیال بین ماتریکس و شکاف، جداشدگی سیال در شکاف‌ها، تغییرات ایجاد شده در فازها به دلیل آزاد شدن گاز، سیال تولید شده از مخزن و... مرتباً در حال تغییر می‌باشد.

ناحیه‌بندی مخزن در شرایط ایستا

یک مخزن شکافدار قبل از شروع به تولید (با توجه به توزیع اشباع سیال در شکاف‌ها) می‌تواند شامل نفت، آب و کلاهک گازی باشد (شکل- ۲).

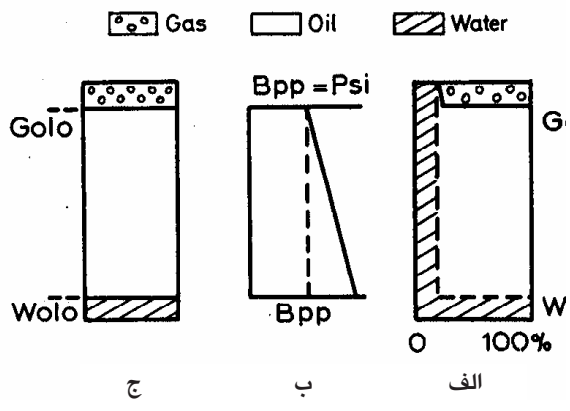
در همین راستا حدود (مرزهای) اولیه سیالات با نمادهای GOLO (original gas-oil level) و WOLO (original water-oil level) نشان داده می‌شوند.

هر دوی این مرزها نشان‌دهندهٔ تعادل ایستا (قبل از شروع تولید) بین هر سه فاز نفت، آب و گاز داخل شبکه شکاف‌ها و نیز بین شبکهٔ شکاف‌ها و نیز بلوک‌های ماتریکس می‌باشند. سطوح تماس دو فاز همانگونه که در شکل ۳-الف نشان داده شده همواره به صورت خطی افقی و کاملاً مشخص می‌باشند.

در بدو امر و قبل از شروع تولید توزیع فشار به صورت شماتیک در شکل ۳- ب نشان داده شده است به طوری که فشار نقطهٔ حباب Bpp در کل مخزن ثابت می‌باشد و با عمق تغییری نمی‌کند. در سطح تماس گاز- نفت (GOLO) فشار ایستای اولیه (Psi) برابر با فشار نقطهٔ حباب می‌باشد (Bpp=Psi). با افزایش عمق از سطح تماس گاز- نفت به سطح تماس آب- نفت، فشار مخزن با گرادیانی برابر با دانسیتهٔ نفت شروع به افزایش پیدا می‌کند (شکل ۳-ب)، لذا اختلاف فشار Psi-Bpp با افزایش عمق افزایش می‌یابد.

توزیع درجهٔ اشباع سیال درسیستم شکاف- ماتریکس به صورت شماتیک در شکل ۳- ج نشان داده شده است. درجهٔ اشباع نشان داده شده در این شکل، بیانگر اشباع کلی مخزن می‌باشد که از حفرات ماتریکس و شکاف حاصل گردیده است. بنابراین، آنچه ملاحظه می‌شود اشباع اولیه و ذاتی آب است که در ناحیهٔ نفتی و گازی نشان داده شده است.

شکل - ۳: شمایی از نواحی تحت شرایط ایستا: الف) توزیع نواحی ب) توزیع فشار ج) توزیع اشباع ماتریکس



نهایتاً اینکه قبل از شروع به تولید و در حالت ایستا ناحیه نفتی بین GOLO و WOLO قرار دارد. پایین‌تر از WOLO حفرات ماتریکس از آب اشباع گردیده‌اند در حالی که بین WOLO و GOLO بلوک‌های ماتریکس از نفت و آب همراه اشباع گردیده‌اند و شکاف‌ها تنها از نفت اشباع شده‌اند. بالاتر از GOLO شکاف‌ها به وسیلهٔ گاز اشباع گردیده‌اند و بلوک‌های ماتریکس نیز به وسیلهٔ گاز و آب همراه اشباع شده‌اند.

ناحیه‌بندی مخزن در شرایط پویا

هنگامی که تولید از مخزن آغاز می‌گردد فشار ایستای اولیهٔ مخزن ($Psi=B_{pp}$) شروع به کاهش می‌کند. ($Ps>B_{pp}$) تخلیهٔ تدریجی لایهٔ نفتی و در نتیجه انبساط کلاهک گازی و سفرهٔ آبی باعث تغییر سطوح تماس GOLO و WOLO به نقاط جدید GOL و WOL می‌گردند (شکل ۴-الف).

الف- نواحی اصلی:

بر اثر تولید از مخزن شکافدار، نواحی اصلی زیر که در شکل (۴- الف) نشان داده شده‌اند پدید می‌آیند:

- ناحیهٔ اشباع با آب بین WOLO و WOL.
- ناحیهٔ اشباع با گاز بین GOLO و GOL.
- یک ناحیهٔ اشباع با نفت بین WOL و GOL.

علاوه بر اینها امکان مشخص کردن چند زیرناحیهٔ درون لایهٔ نفتی، که در نتیجهٔ کاهش فشار مخزن به وجود می‌آیند وجود دارد. همانطور که در شکل ۴- ب ملاحظه می‌شود، فشار مخزن به مقداری کمتر از فشار اولیه کاهش می‌یابد و در سطح تماس گاز – نفت فشار برابر با مقداری کمتر از فشار حباب می‌گردد ($Ps<Pbb$). در ناحیهٔ گازی فشار با افزایش عمق به صورت تابعی از دانسیتهٔ گاز افزایش می‌یابد در حالی که در ناحیهٔ نفتی فشار با عمق و به صورت تابعی از دانسیتهٔ نفت افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل پیداست در عمقی پایین‌تر از سطح GOL فشار مخزن با فشار اشباع برابر می‌گردد ($Ps=P_{bb}$). پایین‌تر از این نقطه $Ps > B_{pp}$ و با افزایش عمق فشار به صورت تابعی از دانسیتهٔ نفت تا سطح تماس آب – نفت افزایش می‌یابد. به همین ترتیب در اعماق پایین‌تر از WOL در ناحیهٔ آبی، فشار با عمق به صورت تابعی از دانسیتهٔ آب تغییر می‌کند (شکل ۳- ب).

ب- زیر ناحیه‌ها:

در نتیجهٔ تغییرات فشار با عمق، ناحیهٔ نفتی به دو زیرناحیهٔ دیگر قابل تقسیم می‌باشد:

- ناحیهٔ گاز زده که بین GOL و نقطه‌ای که $P_{ss}=B_{pp}$ برقرار می‌باشد قرار دارد (شکل-۴).
- ناحیهٔ تحت اشباع که بین WOL و نقطه‌ای که $P_{ss}=B_{pp}$ برقرار می‌باشد قرار دارد (شکل-۴).

جهت بررسی بیشتر دو زیرناحیهٔ یاد شده توجه به نکات زیر ضروری است:

- در ناحیهٔ گاز زده به دلیل اینکه فشار مخزن پایین‌تر از فشار حباب می‌باشد، حجمی از گاز از درون نفت خارج می‌گردد. به همین جهت در این مورد، مکانیزم رانش نفت تحت تأثیر گاز آزاد موجود در بلوک‌های ماتریکس و شبکهٔ شکاف‌های اشباع شده با نفت قرار می‌گیرد. در این حالت جابجایی سیال بین ماتریکس و شکاف‌ها دارای فرایند پیچیده‌ای می‌گردد که تحت تأثیر عواملی همچون جاذبه، فشارهای مویینه و به وجود آمدن پدیده‌هایی همچون همرفت، فوق اشباع و... قرار می‌گیرد.

پدیده‌هایی که در این حالت در یک مخزن شکافدار رخ می‌دهند، اساساً بسیار پیچیده‌تر از موقعی است که با یک مخزن معمولی که دارای مکانیزم تولید گاز محلول می‌باشد سرو کار داریم.

- در ناحیهٔ تحت اشباع، در نتیجهٔ بالا بودن فشار مخزن از فشار نقطهٔ حباب، تمامی سیستم ماتریکس – شکاف‌ها تنها با یک فاز قابل تحرک یعنی نفت، اشباع می‌باشد. جابجایی سیال بین ماتریکس و شکاف در اثر انبساط سیال، که آن نیز به دلیل تخلیهٔ طبیعی مخزن و تراکم‌پذیری سیستم متشکل از سنگ مخزن و سیال موجود در ماتریکس و شکاف‌ها می‌باشد، اتفاق می‌افتد.

ج- توزیع اشباع سیالات:

چهار ناحیهٔ موجود در یک مخزن شکافدار (ناحیهٔ گازی، ناحیهٔ گاز زده، ناحیه تحت اشباع و ناحیهٔ آبی) دارای اشباعی از سیالات به صورت زیر می‌باشند (شکل ۴-ج):

- در ناحیهٔ گازی میزان اشباع گاز تا مقداری برابر با $Sg=1-Swi-(Sor)g$ افزایش می‌یابد. مقدار اشباع نفت باقی‌مانده (Sor)g به عواملی همچون شرایط پیشروی جبههٔ گازی (شکل ۴-c) و ویژگی‌های خاص جبههٔ ریزشی بستگی دارد. حجم گاز موجود در ناحیهٔ گازی بستگی به حجم حفرات موجود در ماتریکس بین سطوح GOLO و GOL دارد.
- در ناحیهٔ گاز زدهٔ منطقهٔ نفتی، میزان اشباع گاز نشان‌دهندهٔ مقدار نفت خارج شده از ماتریکس در اثر کاهش فشار مخزن به زیر نقطه حباب می‌باشد. نفت باقی مانده در این منطقه به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقدار نفت باقی مانده موجود در ناحیه کلاهک گازی می‌باشد.
- در ناحیهٔ نفتی تحت اشباع، تنها دوفاز نفت و آب همزاد وجود دارد زیرا در این ناحیه هنوز گازی از نفت خارج نگردیده است.
- در ناحیهٔ آب زدهٔ اشباعی از آب (همزاد و نفوذ کرده) و اشباعی از نفت باقی مانده (S_{or}) وجود دارد که نتیجهٔ جذب آب موجود در شکاف‌های احاطه‌کنندهٔ بلوک‌های ماتریکس توسط ماتریکس از طریق پدیدهٔ جذب می‌باشد.

تئوری:

پدیدهٔ همرفت:

تاکنون کارهای تحقیقاتی و آزمایشگاهی فراوانی در دو دههٔ اخیر در زمینه درک بهتر از مکانیزم‌هایی که در بلوک‌های ماتریکس یک مخزن شکافدار رخ می‌دهند انجام شده است. با این وجود دربارهٔ رفتار شکاف‌ها از نقطه نظر انتقال جرم تحقیقات کمتری انجام گرفته است.

در رابطه با بحث همرفت فعالیت‌هایی توسط Peaceman (۱۹۷۶) و بدون ارائهٔ هیچگونه فرمول ریاضی انجام شده است که هنگام مطالعه مخازن شکافدار از نقطه نظر همرفت یا تأثیر دادن همرفت در مدل شبیه‌سازی کارایی دارد.

مخازن زمین گرمایی که جایگاه آنها به عنوان یکی از منابع انرژی تثبیت شده است، مثال دیگری هستند که در آنها پدیده همرفت نقش مهمی را در چگونگی توزیع حرارتی ایفاء می‌کند. البته هنوز شناخت دقیقی از این نوع مخازن به ویژه از نقطه نظر همرفتی در دست نیست.

هدف این بخش دست یافتن به شناخت بیشتر از پدیدهٔ همرفت و تأثیر آن بر جریان سیال در شکاف‌ها در هنگام مطالعهٔ

رفتار بلوک‌های ماتریکس می‌باشد.

از دیـد تاریخـی، نخسـتین بـار «برنـارد» (۱۹۰۰) در یادداشـت‌های آزمایشگاهی خود، ضمن گرم کردن یک مایع، به پدیدهٔ همرفت حرارتی اشـاره کرده است. بعدها در سال ۱۹۱۶، Rayleigh از نقطـه نظـر ریاضی شـرایطی را کـه در آن چنین مکانیزمی وارد عمل می‌شود را بیان نمود.

در اینجا بیان خلاصـه‌ای از مکانیزم‌هایی که در یک مخزن شـکافدار رخ می‌دهند ضروری می‌باشـد. برای شـروع، در اکثر مخازن کاملا شـکافدار و نیمه شـکافدار، کـه دارای گاز محلول می‌باشند، خواص سـیال در کل ضخامت لایهٔ نفتی آنها یکسان می‌باشـد. این موضوع دلالت بر این امر دارد که به دلیل گرادیان دمایی، جریان همرفتی سـیال در شکاف‌ها و قبل از شروع تولید وجود دارد.

بـه محض آغـاز تولید از مخـزن و افت فشـار حاصـل از تولید، فرایندهای زیر در سیستم شکاف‌ها به وقوع می‌پیوندند:

۱- پایین رفتن سطح تماس گاز – نفت.

۲- نفت موجود در نزدیکی سطح تماس گاز – نفت شروع به آزاد نمودن گاز محلول خود می‌نماید و لذا سنگین‌تر می‌شود. این امر می‌تواند باعث تسریع فرایند همرفت در شکاف‌ها گردد.

۳- بسـته به نرخ افت فشار در مخزن و سرعت همرفت، گاز آزاد شده از نفت موجود در ماتریکس به داخل شکاف جریان می‌یابد (ناحیهٔ گاز زده).

۴- پس از خروج گاز از ماتریکس، جهت پر کردن فضای خالی ایجاد شده، نفت از شبکهٔ شکاف‌ها به درون ماتریکس جریان می‌یابد.

۵- در صورت تماس بلوک‌های ماتریکس با گاز یا آب موجود در شـکاف‌ها، در اثر پدیدهٔ ریزش ثقلی نفت از بلوک‌های ماتریکس به داخل شکاف‌ها جریان می‌یابد.

۶- به محض اینکه نفت سـنگین موجود در شـکاف‌ها (که دارای گاز محلول کمتری است) در مجاورت نفت موجود در ماتریکس قرار می‌گیرد (که دارای گاز محلول بیشـتری است)، گاز موجود در فاز گاز ماتریکـس به درون شـکاف‌ها نفوذ می‌نمایـد و نفت موجود در شکاف جایگزین آن می‌گردد.

۷- در ناحیـهٔ نفتی (ناحیهٔ زیر ناحیهٔ گاز زده) نفت به دلیل انبسـاط درجا، از درون ماتریکس به شـکاف جریان می‌یابد. البته بسته به مشـخصات PVT سیال ماتریکس، سرعت کاهش فشار و درجهٔ نفوذ، عکس این پدیده نیز ممکن است رخ دهد.

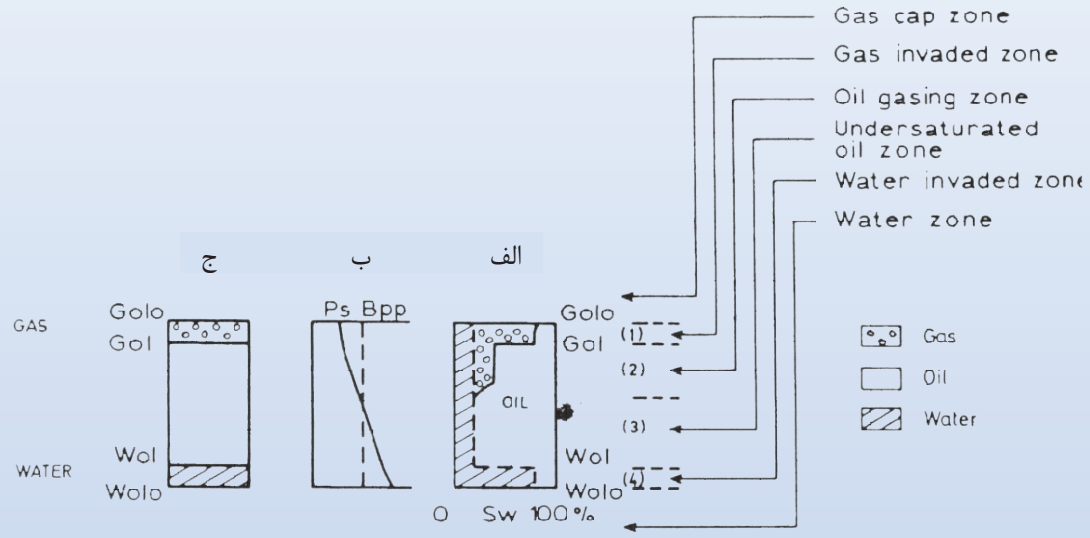
مطالعـه و تجزیه و تحلیل تاریخچهٔ تولید مخازن شـکافدار مهم ایران و عراق، مؤید این مطلب می‌باشد که با ادامهٔ افت فشار مخزن در اثر تولید، فشار نقطهٔ حباب نفت موجود در شکاف‌ها در ناحیه‌ای که مسـتقیماً زیر کلاهک گازی قرار دارد، مشابه همان افت فشار را در سطح تماس گاز - نفت نشان می‌دهد.

از سـوی دیگر ناحیه نفتـی که ارتباط آن با سـطح تماس گاز–نفت از طریق حلقهٔ گاز - نفت (که قبلاً بیان شـد) می‌باشـد، کاهش کمتری را در فشـار حباب نشـان می‌دهـد و در صورت فاصلـهٔ کافی با حلقهٔ گاز – نفت تقریباً هیچ نوع کاهشـی را در فشار حباب این ناحیه شاهد نخواهیم بود.

وضعیت فـوق در تاریخچهٔ میادین کرکوک و گچسـاران به راحتی قابل تشـخیص است. در این میادین کلاهک گازی اولیه در یک سـمت سـاختاری که طول آن ۹۶ کیلومتر اسـت قرار گرفته اسـت. معهذا با رشد کردن کلاهک گازی، به همان نسبت حجم بیشـتری از مخزن تحت تأثیـر فرآیند بالا قرار می‌گیرد. این مشـاهدات به همراه تحلیل رفتـار مخزن منجر به پی بردن به اهمیت فرآیند همرفت در شـکاف‌ها طی مطالعات مهندسـی مخزن می‌گردند. این فرایند باید به صورت دقیق برای کل مخزن به حساب آید و از به کاربردن مقادیر کلی برای این فرایند پرهیز شود تا بتوان از برون‌یابی مدل حاصل از دخالت دادن دقیق این فرایند و تاریخچهٔ تولید مخزن، آیندهٔ تولید را پیش‌بینی کرد.

علاوه بر اینها، در صورتی که نرخ افت فشار زیاد باشد و یا در داخل شکاف‌ها پدیدهٔ همرفت به وقوع نپیوندد، اشباع گاز آزادی که در داخل ماتریکس شکل می‌گیرد از مقدار اشباع بحرانی آن فراتر رفته و منجر به جابجا کردن نفت داخل شکاف‌ها می‌گردد. بنابراین انتقال جرم بین ماتریکس و شکاف به سادگی به صورت جریانـی از گاز آزاد از ماتریکـس به شـکاف و جریانی از نفت از شکاف به ماتریکس تعریف می‌گردد. نتیجهٔ نهایی این فرایند این خواهد بود که در اندک زمانی ناحیهٔ گاز زده کل سـتون نفت را در برمی‌گیرد.

شکل -۴: شمایی از نواحی تحت شرایط پویا: الف) توزیع نواحی از طریق تماس سیالات در شکاف‌ها ب) فشار بر حسب عمق در مخزن و رابطه Ps با Bpp ج) توزیع اشباع در ماتریکس



برعکس، هنگامی که یک مخزن شکافدار با یک دبی قابل قبول ولی اندک تولید می‌نماید، منجر به تولید یک ناحیهٔ گاز زده کوچک می‌شود که اندازهٔ آن بستگی به طول کوچکترین بعد بلوک‌های ماتریکسی دارد که در تماس با شکاف هستند. یک ناحیهٔ گاز زده کوتاه به وسیلهٔ عمل نمودن یک مکانیزم قوی همرفتی در داخل شکاف‌ها توضیح داده می‌شود، که در نتیجه منجر به نفوذ گاز از میان مایع بین ماتریکس و شکاف می‌گردد.

فرایند همرفت سیال در یک ستون استوانه‌ای در حضور و بدون حضور محیط متخلخل و در شرایطی که نسبت بین کوتاه‌ترین وجه ظرف به وجه دیگر برابر ۱/۱۰ باشد چه از نظر تئوری و چه آزمایشگاهی بررسی گردیده است. با رسیدن این نسبت به ۱/۵ حداقل نیروی لازم جهت شروع نمودن فرایند همرفت به طور مشخصی افزایش می‌یابد.

اصلی‌ترین نیروی حاکم بر فرایند همرفت در مخازن نفتی وجود گرادیان چگالی معکوس است که خود ناشی از گرادیان دمای سازند می‌باشد. از آنجایی که ضخامت شکاف در مقایسه با دیگر ابعاد آن بسیار کم می‌باشد و گرادیان دانسیتهٔ معکوس به واسطهٔ گرادیان زمین گرمایی می‌باشد، امکان وجود پدیدهٔ همرفت در یک شکاف تقریباً صفر می‌باشد. این در حالی است که تجربه نشان می‌دهد که جریان همرفت مشخصی در مخازن کاملاً شکافدار تا نیمه شکافدار وجود دارد. خواص بسیار یکنواخت سیال در کل طول ستون ۶۰۰۰ فوتی نفت در چندین مخزن شکافدار ایرانی و عراقی اثباتی است بر وجود جریان‌های همرفت در این مخازن.

یکی از این مخازن در بخش بالایی خود (سنگ آهک) و شکافدار بوده و به احتمال زیاد در اعماق پایین‌تر شکاف نخورده است (ماسه سنگ) و خواص PVT بسیار یکنواختی در ناحیه بالایی نشان می‌دهد در حالیکه در اعماق پایین‌تر فشار نقطهٔ حباب با عمق به سرعت کاهش می‌یابد.

توسعهٔ مباحث تئوری پدیدهٔ همرفت موضوع بسیار مورد علاقه و جذابی است. در این مباحث اغلب چندین احتمال وجود دارد که تنها نتایج آزمایشگاهی می‌توانند به یافتن مورد صحیح کمک نمایند. در غیر این صورت نتایج گمراه‌کننده‌ای حاصل خواهد گشت. یک مثال خوب در توضیح عبارت بالا وجود فرایند همرفت در شکاف‌های نازک می‌باشد که تئوری فعلی قادر به پیش‌بینی دقیق آن نمی‌باشد.

Peaceman به بیان مدلی می‌پردازد که در آن جریان لغزشی در طول دو دیوارهٔ شکاف وجود دارد که در تئوری او اثبات نمی‌شود. او تنها شرایط مرزی بین دو سلولی را که دربرگیرندهٔ شکاف هستند را در نظر می‌گیرد، در حالی‌که شرایط مرزی مربوط به عرض سلول‌ها از قبیل سطح تماس بین سلول‌ها و دیواره‌ها که اهمیت کمتری دارند در نظر گرفته نمی‌شوند.

این تئوری به همراه مجموعهٔ آزمایشاتی که توسط IFP انجام پذیرفت منتهی به انتخاب گزینهٔ مناسب می‌گردند. به علاوه کارهای تئوری و آزمایشگاهی تیلور (۱۹۵۴) نیز بررسی گردیدند.

آزمایشات انجام گرفته توسط IFP منجر به کشف مفهوم جدیدی از یک روش برداشت ثانویه در مخازنی گردید که دارای نفوذ پذیری نسبتاً زیاد تا زیاد، فشار بالا، اشباع بالای نفت و گاز محلول کم موجود در نفت می‌باشند. این نوع مخازن که معمولاً نفت دوست بوده و حاوی نفت با گرانروی بالا می‌باشند دارای بازدهی چندانی با استفاده از روش تزریق آب نمی‌باشند. بنابراین هنگامی که آنها در طول فرایند نفوذ – همرفت از گاز اشباع می‌شوند مقادیر بیشتری از نفت قابل برداشت می‌باشد. اثبات این فرایند توسط IFP به ثبت رسیده است.

پدیدهٔ نفوذ:

معمولاً در مطالعات مربوط به جریان غیرامتزاجی گاز و نفت در یک محیط متخلخل، فرایند نفوذ در نظر گرفته نمی‌شود. این بدان دلیل است که در یک سیستم بزرگ مانند یک مخزن، فرایند نفوذ غیرتعادلی گاز یا گاز محلول در نفت که حاوی حجم متفاوتی از گاز محلول می‌باشد بسیار طولانی و زمان‌بر است. بنابراین می‌توان مشاهده کرد که تغییرات ترکیب سیال اغلب بسیار بیشتر از حالتی است که بر اثر پدیدهٔ نفوذ در طول یک دورهٔ مشخص از زمان به وقوع می‌پیوندد. از سوی دیگر، در مخازن نیمه شکافدار تا کاملاً شکافدار که نفت درون شکاف‌های عمودی بر اثر گرادیان دمایی دچار همرفت می‌گردد، فرایند نفوذ نقش مهمی را بازی می‌کند. در اثر این فرایند با کاهش فشار مخزن، حجم زیادی از گاز از بلوک ماتریکس و از درون منطقهٔ نفتی به سمت کلاهک گازی جابجا می‌شود. به عکس، با افزایش فشار مخزن این فرایند باعث خروج گاز از کلاهک گازی و انتقال آن به بلوک‌های ماتریکس می‌گردد.

در مورد اول، فشار نقطهٔ حباب نفتی که در بلوک‌های منطقهٔ نفتی قرار دارد بر اثر کاهش فشار مخزن افت می‌یابد. این فرایند **«رکود نقطهٔ حباب»** (Bubble point pressure depression) نام دارد. این در حالی است که **در مورد دوم** فشار نقطهٔ حباب نفتی که در بلوک‌های ماتریکس منطقهٔ نفتی قرار دارد با افزایش فشار مخزن افزایش می‌یابد که این پدیده **«افزایش فشار نقطهٔ حباب»** (Bubble point pressure elevation) نام دارد.

به عنوان مثال، هردوی این پدیده‌ها در میدان هفتکل ایران در طول بازه‌های زمانی گوناگون روی می‌دهد. کاهش میزان GOR این میدان طی سال‌های ۱۹۲۸ تا ۱۹۵۱ هم‌گام با کاهش فشار مخزن و افزایش GOR تولیدی طی دورهٔ عدم تولید از میدان (۱۹۵۴-۱۹۵۱) هنگامی که فشار مخزن ۷۹ پام افزایش یافت، نشانه‌هایی از وجود دو فرایند بالا هستند.

ذکر این نکته جالب است که تغییرات GOR از مقادیر نزولی تا مقادیر صعودی کاملاً هم راستا با تغییرات فشار مخزن می‌باشد. پس از آن هنگامی که در انتهای سال ۱۹۵۴ فشار مخزن دوباره رو به کاهش گذاشت، مقدار GOR برای حدود دو سال ثابت ماند و سپس شروع به افت نمود. علت آن چنین است که در طول دورهٔ عدم تولید از میدان که باعث افزایش فشار به مقدار ۷۹ پام شد، سطح GOC نیز به اندازهٔ ۱۲۰ فوت بالا آمد. این دو عمل که به صورت هم‌زمان به وقوع پیوستند باعث تبدیل ناحیهٔ گاز زده کوچک موجود در مخزن به ناحیهٔ نفتی، در اثر حل شدن گاز آزاد موجود در این ناحیه درون نفت، گردیدند. این امر باعث می‌شود که بلوک‌های موجود در این ناحیه (۱۲۰ فوت) دارای مقدار Rs (گاز محلول در نفت) اندکی بیشتر از نفتی که در GOC و بالاتر از آن قرار دارد باشد. بنابراین همانطور که مجدداً فشار مخزن و GOC به موازات هم کاهش می‌یابند، ترکیب نفت موجود در GOC مشابه نفت موجود در بلوک‌ها می‌باشد و مدت زمان ۲ تا ۳ سال به منظور بازیابی مجدد GOR محلول به روند سابق، کافی نمی‌باشد.

الگویی مشابه این، از اوایل سال ۱۹۷۶ هنگامی که فشار مخزن به وسیلهٔ تزریق گاز رو به افزایش گذاشت تکرار شد، در حالیکه ارتفاع ستون نفت حدود ۱۳۰ فوت بود. قابل ذکر است

که کاهش GOR در طی طول دورهٔ تخلیه طبیعی در تمامی مخازن شکافدار ایران دیده شده است.

اگرچه این رفتار اساساً به دلیل همرفت حرارتی در سیستم شکاف‌ها می‌باشد، اما بر این موضوع که نفت حاوی Rs پایین (نفت دارای Rs در شرایط GOC) در تمامی ناحیهٔ نفتی شکافدار وجود دارد صحه می‌گذارد. بنابراین بلوک‌ها به وسیلهٔ نفتی احاطه شده‌اند که دارای مقادیر گاز محلول کمتری نسبت به نفت درون خود بلوک‌ها می‌باشد. این موضوع مهم‌ترین دلیل وقوع پدیدهٔ نفوذ بین شکاف‌ها و بلوک‌های ماتریکس می‌باشد.

هنگامی که در یک مخزن شکافدار پدیدهٔ نفوذ به وقوع می‌پیوندد، با کاهش فشار مخزن، حجم زیادی از گاز موجود در ستون نفتی به کلاهک گازی منتقل می‌گردد و بالعکس. این امر باعث کاهش فشار حباب اولیهٔ نفت موجود در بلوک‌های ماتریکس و کوچک‌تر شدن ناحیهٔ گاز زده در مخزن می‌گردد. تغییرات یاد شده در فشار نقطهٔ حباب و ضخامت ناحیهٔ گاز زده در شکل - ۵ نشان داده شده‌اند. بنابراین برای در دست داشتن یک تحلیل مناسب از یک مخزن، مخصوصاً بر حسب بازدهی جابجایی گاز و نفت، موقعیت چنین حجم گازی تأثیر مهمی در نتایج تحلیل (راندمان جابجایی‌ها) خواهد داشت.

قابل ذکر است که نیروی اصلی همرفتی که منجر به چرخش نفت، درون ریزشکاف‌ها می‌گردد، گرادیان دمایی موجود در مخزن است. مخزنی با ضخامت سازندی برابر با ۵۰۰ فوت و گرادیان دمایی ۱/۵ درجهٔ فارنهایت در ۱۰۰ فوت دارای نیروی همرفتی نسبی برابر با : ۵ × ۱/۵ × β می‌باشد که β ثابت انبساط حرارتی است.

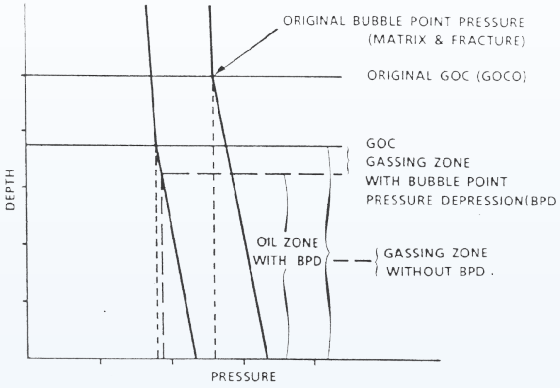
در مقایسه با نیروی ذکر شده بالا، اضافه افزایش دانسیته در GOC که بر اثر کاهش فشار مخزن پدید آمده و آزاد شدن گاز از داخل محلول، دارای مقدار کمی می‌باشد. در غیاب همرفت حرارتی، افزایش دانسیتهٔ موجود در GOC به مرور بیشتر شده و نهایتاً منجر به تأمین حداقل عدد Rayleigh می‌گردد و این در صورتی است که شکاف‌ها همچنان با نفت مایع یکنواختی اشباع باشند.

مخزنی با مشخصات سیال $d\rho/dp = ۷ \times ۱۰^{-۳}$ gr/cc/bar و افت فشاری معادل ۵×۱۰^{-۳} bar/day و با داشتن نفوذپذیری بالای شکاف‌ها و داشتن ارتفاع کافی، جهت تأمین حداقل مقدار عدد Rayleigh به چند سال زمان نیاز دارد. به هرحال تحت شرایط قابل قبول بالا سیال نیم‌دور چرخیده و سپس متوقف می‌گردد. بنابراین، سیال موجود در شکاف‌ها هر چند سال به اندازهٔ نیم‌دور درون شکاف گردش می‌نماید. گرادیان فشار جانبی، که توسط تولید نفت از ریزشکاف‌ها به سمت چاه‌های تولیدی به وجود می‌آید، باعث حرکت سلول‌های دارای همرفت به سمت چاه تولیدی می‌گردد. در این بین سلول‌های جدیدی که دارای حداقل سرعت جانبی می‌باشند در محدودهٔ تولیدی چاه شکل می‌گیرند. انتقال سیال از ماتریکس به شکاف و بر عکس، در ناحیهٔ نفتی، تأثیر اندکی بر شکل، سرعت و پایداری سلول‌های همرفتی دارد؛ مگر آنکه حجم انتقال سیال مقداری در اندازهٔ حجم سلول‌های همرفتی در هر دوره زمانی باشد.

رانش گاز محلول:

مکانیزم رانش گازی نقش مهمی را در بازیافت نفت و تاریخچهٔ تولید گذشته و آیندهٔ اکثر مخازن بازی می‌کند. این امر مخصوصاً در مورد مخازن شکافدار صادق می‌باشد. دلیل این امر نیز آن است که نرخ افت فشار در اکثر مخازن شکافدار تنها در

شکل -۵ : تأثیر کاهش فشار نقطهٔ حباب بر توزیع سیالات در مخزن



حد چند بار در سال می‌باشد؛ چون در مخازن شکافدار به دلیل کوچک بودن بلوک‌های ماتریکس در مقایسه با ضخامت ستون نفتی، گاز جدا شده تنها پس از طی مسافتی کوتاه به سیستم شکاف‌ها می‌رسد. گازی که به این صورت از بلوک‌های ماتریکس خارج شده است می‌تواند به راحتی از طریق سیستم شکاف‌های موجود خود را به کلاهک گازی برساند. علاوه بر این تغییرات فشار بین دهانهٔ چاه و شعاع تخلیه آن معمولاً کم بوده و محدود به فواصل کوتاه می‌باشد در حالیکه در مخازن ماسه سنگی این مقدار می‌تواند بسیار بزرگ باشد.

ریزش ثقلی و آشام (جذب):

در مخازن تولیدکنندهٔ نفت، ریزش (Drainage) یکی دیگر از مکانیزم‌های مهم تولید می‌باشد. این مکانیزم در مخازن شکافدار نقش مهمی را در بازیابی هیدروکربن از بلوک‌های ماتریکس با نفوذپذیری پایین که دارای ارتفاع مناسبی هستند بازی می‌کند. در فرایند ریزش ثقلی اجباری، نرخ تزریق سیال جابجاکننده پیشاپیش تعیین شده و به عواملی همچون اختلاف دانسیتهٔ دو سیال، نفوذپذیری سنگ و اختلاف بین سطوح تماس سیال در ماتریکس و شکاف بستگی دارد. در این مورد نرخ جابجایی سیال بستگی به اختلاف فشار حاکم بر هر سیال در بلوک ماتریکس دارد. اختلاف فشار بر اثر اختلاف دانسیتهٔ موجود بین سیال ماتریکس و شکاف به وجود می‌آید. این در حالی است که در ریزش ثقلی آزاد، جابجایی بستگی به وزن سیال جابجاشونده دارد که به طور طبیعی به سمت پایین حرکت می‌کند. از تعریف سادهٔ بالا چنین استنباط می‌گردد که برای داشتن تولید از مخزنی با نفوذپذیری یک میلی دارسی و تحت ریزش آزاد، به زمانی معادل ۱۰۰۰ برابر بیشتر از حالتی که می‌خواهیم از همان مخزن ولی با نفوذپذیری یک دارسی تولید کنیم، نیاز خواهیم داشت (در صورت برابر بودن نفوذپذیری‌های نسبی آن دو مخزن). این امر به وضوح نقش شکاف‌ها را در مخازن شکافدار با نفوذپذیری پایین نشان می‌دهد که باعث ایجاد اختلاف فشار و تسریع در فرایند ریزش می‌گردند. نتیجتاً در ریزش ثقلی آزاد، اختلاف دانسیتهٔ سیالات دلیل جابجایی نفت می‌باشد (به‌جز در نواحی که گاز نسبتاً غیر متحرک می‌باشد)، در حالی که در یک مخزن دارای نفوذپذیری دوگانه، اختلاف دانسیتهٔ بین دو فاز و ارتفاع بلوک‌ها دلیل اصلی جابجایی می‌باشند.

در اینجا ذکر چند نکتهٔ فنی که در اثر سال‌ها کار و تحقیق حاصل شده‌اند ضروری به نظر می‌رسد. این نکات به قرار زیرند:

۱- ممکن است چنین تصور شود که با تولید سریعتر از یک مخزن شکافدار و نتیجتاً کاهش GOC و یا افزایش WOC با سرعت بیشتر، تعداد بلوک‌های ماتریکس بیشتری تحت فرآیند ریزش ثقلی واقع می‌گردند. بنابراین می‌توان حجم قابل برداشت بیشتری از نفت را در زمان کوتاه‌تری تولید نمود.

مفهوم بالا تقریباً در تمامی مقالات منتشر شده و مطالعات صورت گرفته پیش از اواسط دههٔ ۷۰ میلادی قابل مشاهده است. به هرحال اکنون مشخص شده است که با کاهش GOC و یا افزایش WOC (در سنگ‌های نفت دوست)، نفت تولید شده از بلوک‌های بالایی به وسیلهٔ بلوک‌های در حال تولید پایینی مکیده می‌شود (در مورد آب بلوک‌های بالایی می‌کند). این فرایند **«اثر بلوک به بلوک»** نام دارد.

۲- در مخازن شکافدار نیمه‌آب دوست که فرایند آشام در تمام وجوه بلوک‌هایی که به شکاف‌ها راه دارند اتفاق می‌افتد، مدت زمان خیلی بیشتری طول می‌کشد تا فرایند ریزش ثقلی به شرایط نهایی خود برسد (برعکس حالتی که دیواره‌های بلوک‌ها به شکاف‌ها راه ندارند). این امر به خاطر این حقیقت اتفاق می‌افتد که جذب آب از طریق یکی از وجوه جانبی باعث ایجاد اشباع آب بیشتری در جلوی WOC در بلوک‌های ماتریکس می‌گردد. وجود این اشباع بیشتر نسبت به آب باعث ایجاد نفوذپذیری نسبی کمتری نسبت به نفت می‌گردد و نهایتاً جبهه نهایی آب–نفت با سرعت کمتری حرکت می‌کند.

۳- در تعداد زیادی از مخازن شکافدار سراسر جهان مشاهده می‌شود که آشام آب در هر دو نوع سنگ آب‌دوست یا نفت‌دوست، فرایند بسیار کندی می‌باشد. به عنوان مثال، یک مخزن کربناتهٔ آب‌دوست در فرانسه، تحت فرایند آشام با نفوذپذیری بسیار کم نسبت به آب می‌باشد. وجود این نفوذپذیری نسبی بسیار اندک که در آزمایشگاه‌ها به دست می‌آید، به وسیلهٔ نتایج ناموفق تزریق طولانی‌مدت آب در این مخازن، تأیید می‌گردد.

مثال دیگر در خاورمیانه مشاهده گردید و آن هنگامی بود که در یک مخزن شکافدار کربناته با نفوذ پذیری حدود ۱۰ میلی دارسی، تزریق آزمایشی آب پس از یک دورهٔ نسبتاً طولانی با شکست مواجه شد. نتایج مشابهی در یک میدان شکافدار در ناحیهٔ دریای شمال مشاهده شده است.

فرایند بلوک به بلوک:

به طور تئوری نشان داده شده است که کاهش اشباع فاز مایع جابجاشونده، طی فرایند ریزش، به صورت زیر رخ می‌دهد:

۱- جبههٔ گازی تا زمان رسیدن به عمق گیرکردگی (Hold up Depth) به سرعت به سمت پایین حرکت می‌نماید. بنابراین فاز جابجاشونده در قسمت‌های پایینی بلوک سریع‌تر به بخش‌های بالایی منحنی فشار مویینه می‌رسد، در حالیکه اشباع نفت در قسمت بالایی بلوک، پس از کاهش اشباع اولیه، به خاطر کاهش نفوذپذیری نسبی نفت به آهستگی شروع به تغییر می‌کند.

۲- بازدهی فرایند ریزش در اوایل تولید به وسیلهٔ شکل منحنی فشار مویینه کنترل می‌گردد، در حالیکه تولید طولانی مدت به وسیلهٔ منحنی نفوذپذیری نسبی کنترل می‌گردد.

۳- هنگامی که فشار مویینه در یک بلوک در حال تخلیه، به طور ناگهانی کاهش یابد، جبههٔ گازی به خاطر اشباع بالای نفت بین دو ناحیهٔ گیرکردگی به سرعت به پروفایل جدید اشباع نفت نزدیک می‌گردد. به هر جهت بخش عظیمی از نفت اضافی قابل بازیافت، که از قسمت بالایی بلوک می‌آید، به دلیل نفوذپذیری نسبی کمتر نسبت به وقتی که فشار مویینه کاهش نیافته بود، با دبی خیلی کمتری تولید می‌گردد.

در مورد خصوصیات سنگ ماتریکسی که به شدت دچار شکاف‌خوردگی شده است و دارای چندین مجموعه از شکاف‌های برش‌دار عمیق در جهات مختلف می‌باشد، می‌توان سنگ را به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های ماتریکس جدا از هم در نظر گرفت که به وسیلهٔ شکاف‌ها یا ریزشکافهای باریک اما نفوذپذیر احاطه شده است. از آنجایی‌که نفوذپذیری شبکهٔ شکاف‌ها یا ریزشکاف‌ها معمولاً حدود ۱۰۰۰ برابر ماتریکس می‌باشد، لذا فرض می‌شود نفتی که بلوک ماتریکس را در اثر پدیدهٔ «ریزش‌ثقلی» ترک می‌نماید ترجیحاً از طریق این شبکه به سوی سطح تماس گاز – نفت جریان می‌یابد تا اینکه از طریق بلوک‌های ماتریکس به سمت پایین حرکت نماید. در این صورت بلوک‌های ماتریکس موجود در کلاهک گازی، به طور کاملاً مستقل تخلیه می‌گردند و کل دبی نفت تولید شده در جریان ریزش، از مجموع دبی تولیدی توسط هر یک از بلوک‌های احاطه شده با گاز حاصل می‌گردد. این **«مفهوم تک‌بلوک»** به وسیله Saidi et al. (۱۹۷۵) در شبیه‌سازهای مخازن وارد گردیده است و به وسیلهٔ آن تعداد زیادی از مطالعات مهندسی مخازن صورت گرفته است. ویژگی منحصر به‌فرد این نوع از شبیه‌سازهای مخازن بازدهی ریزش تک بلوک در آنها می‌باشد. برای یک بلوک مشخص و با داشتن خواص سنگ و سیال موجود در آن، این بازدهی به راحتی قابل محاسبه است.

نتیجه‌گیری:

مکانیزم‌های گوناگون تولید که در مخازن شکافدار طبیعی وجود دارند باعث ایجاد انواع گوناگونی از تولید در این نوع از مخازن می‌گردند. تجربه‌های عملی نشان‌دهندهٔ این مطلب هستند که در بیش از ۹۰ درصد از چاه‌هایی که در یک مخزن شکافدار طبیعی حفر شده‌اند، میزان بازیافت نفت بسیار کمتر از چاه‌هایی است که در مخازن معمولی حفاری گردیده‌اند، زیرا شکاف‌ها باعث جریان یافتن گاز با سرعت بالاتری به سمت چاه شده و بنابراین با کاهش مقدار گاز قابل حرکت در مخزن جریان نفت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر وجود شکاف‌ها باعث جریان یافتن گاز به سمت بالا و تشکیل یک کلاهک گازی ثانویه می‌گردد (جداسازی ثقلی) و بنابراین بازیافت در مقایسه با مخازن معمولی افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت که مکانیزم‌های همرفت و نفوذ در تمام مخازن شکافدار طبیعی وجود دارند. همرفت به مانند یک همزن در مخزن شکافدار عمل می‌نماید و نفوذ باعث تولید همرفت می‌گردد.

مراجع:

1. Saidi , A. , 1987. Reservoir engineering of fractured reservoirs , Volume I.
2. Saidi , A. , 1987. Reservoir engineering of fractured reservoirs , Volume II.
3. Van golf racht , T.D. , 1982 ,Fundamentals of fractured reservoir engineering.
4. Dumore , J.M. , 1972 , Development of gas saturation during solution-gas drive in an oil layer below a gas cap. Soc. Of petroleum engineers journal, AIME ,Sept. .
5. Peaceman, D.W.1976.Convection in a fractured reservoir-the effect of matrix –fissure transfer on the instability of a density inversion in a vertical fissures, Soc. Of petroleum engineers journal, October, 269-279.