

# بررسی آنالیز چاه آزمایشی در مخازن شکافدار طبیعی

مهدی نجف پور - کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی مالک اشتر  
خدارحم شفیعی مطلق - کارشناسی ارشد زمین شناسی - عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد

[mnajafpur@yahoo.com](mailto:mnajafpur@yahoo.com)

## چکیده :

مخازن شکافدار طبیعی درصد بسیار مهمی از ذخایر هیدروکربنی را در جهان تشکیل می دهند. شبیه سازی مخزن یک روش بنیادی در توصیف این نوع از مخازن است. خواص شکاف اغلب در دسترس نمی باشد و منجر می شود تا توصیف سیستم شکاف با مشکل رو به رو شود. از سوی دیگر آنالیز چاه آزمایشی یکی از دانسته های خوب و یک روش توصیف مخزن است که به طور وسیعی بدین منظور استفاده می شود. آنالیز چاه آزمایشی در NFR دو پارامتر اساسی شامل نسبت (قابلیت) ذخیره و ضریب جریان بین تخلخلی را آماده می کند. نسبت ذخیره، مربوط به تخلخل شکاف است. ضریب جریان بین تخلخلی می تواند با فاکتور شکل ارتباط یابد که تابعی از فاصله شکاف است. همچنین آزمایشات فشار باید سه رژیم جریان که واکنش فشار در NFR را برای تعیین برآورد قابل اطمینان تخلخل و فاکتور شکل شکاف توصیف می کند را، ارائه کند.

واژه های کلیدی: مخازن شکافدار طبیعی، چاه آزمایشی، ذخایر هیدروکربنی

## ۱- مقدمه

مخازن شکافدار طبیعی مخازنی هستند که حاوی شکستگی های طبیعی می باشند و تاثیرات مثبت یا منفی بر روی جریان سیال می گذرانند. مخازن شکافدار طبیعی دارای دو نوع محیط متفاوت می باشند. یکی ماتریکس که ذخیره بالا و ظرفیت جریانی پایین می باشد و دیگری شکافها (شکستگیها) که مسیر جریانی بالایی را فراهم می کنند ولی دارای ذخیره پایینی هستند. بعضی از محققین مدل های متنوعی را جهت توصیف رفتارهای فشار درون مخازن شکافدار طبیعی ارائه داده اند، از جمله خصوصیتی که مورد توجه قرار داده اند میتوان : جریان از ماتریکس به شکافها، جهت یابی شکافها، توزیع قطعات شکسته از نظر اندازه بلوک شکستگی، را می توان نام برد. آزمایشات فشار ناپایدار در مخازن شکافدار طبیعی با مدل ارائه شده توسط Warren و Root [1] سازگاری قابل توجهی دارد. خصوصیات رفتاری واکنش فشار با دو پارامتر بدون بعد توصیف شده است: یکی نسبت ذخیره ( $\omega$ ) و دیگری ضریب جریان بین تخلخلی (بین ذره ای) ( $\lambda$ ) می باشد. مدل های شبیه سازی استاندارد برای مخازن شکافدار طبیعی، بر اساس همان اصول حاکم بر محیط متخلخل استوار است، که این مدل های شبیه سازی به صورت شبکه های گریدبندی شده ای تشکیل می شوند و برای نشان دادن ماتریکس و شکافها، هر کدام از یک گرید استفاده می شود و جریان سیال از ماتریکس به شکافها به صورت تابع انتقالی نشان داده می شود. در بعضی موارد خاص که ماتریکس توسط مدل قابل نمایش نمی باشد، شبکه تقریبی شکافهای گسسته ترجیح داده می شود. موفقیت یک مدل شبیه سازی استاندارد، در رعایت کردن ارائه رفتار مخزن، پیشگویی در عملکردهای آینده و دقت و صحت در توصیف مخزن است. در مخازن شکافدار طبیعی، توزیع و ارتباط درونی شکافها، بسیار مهم می باشد. اطلاعات فراوانی از منابع متنوعی برای فهم سیستمهای شکافها گردآوری شده است، ولی هنوز گواه مستندی برای استفاده پارامترهای بدست آمده از چاه آزمایی ( $\omega$  و  $\lambda$ ) در مخازن شکافدار طبیعی، به عنوان داده های ورودی مدل وجود ندارد.

تجزیه و تحلیل چاه آزمایی، ابزاری شناخته شده و کارآمد در مدیریت مخازن است. در کنار دیگر فعالیتهای کوتاه مدت مانند ارزیابی آسیب دیدگی، بهینه سازی چاه، نتایج چاه آزمایی، غالباً منطبق با دیگر اصول مدیریتی مخازن است. تاثیر نفوذ پذیری و میانگین فشار مخازن دو پارامتر اساسی هستند که با چاه آزمایی تخمین زده می شوند. میانگین فشار مخزن در مدل های شبیه سازی یکی از اطلاعات ورودی مدل محسوب می شود. چاه آزمایی همچنین بعنوان ابزاری جهت کالیبراسیون ساختمان مدل شبیه سازی با مقایسه کردن خروجی مدل و مقادیر واقعی مورد استفاده قرار می گیرد. در مخازن شکافدار طبیعی دو پارامتر ( $\omega$  و  $\lambda$ ) وجود دارد که به ترتیب نشانگر تخلخل شکافها و فاکتور شکل آنها (که به فضای شکافی نیز بیان می شود) می باشد. در مدل های شبیه

سازی به تخلخل دوگانه (دوتایی) بعنوان اطلاعات ورودی مدل مورد نیاز هستند. مخازن شکافدار طبیعی مقدار قابل توجهی از ذخایر هیدروکربنی سرتاسر جهان را در خود ذخیره کرده و یا تولید می کنند. یک روش اساسی جهت توصیف این نوع مخازن، شبیه سازی آن مخازن می باشد. در بعضی موارد که پیچیدگیهایی بر طبیعت این مخازن حاکم شود، مدل‌های با تخلخل دوگانه و ساده سازی کلاسیک قادر به نمایش NFR نمی باشند. به هر حال هنوز استفاده کردن از مدل DFN در مقیاس میدانی کاربردی نیست، ولی در آینده نزدیک مدل‌های با تخلخل دوگانه به طور گسترده ای قابل اجرا و ارائه می باشند .

## ۲- مخازن شکافدار طبیعی

در دو دهه گذشته مخازن شکافدار طبیعی به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته اند. در ابتدا این مخازن بعنوان مخازن ماتریکس کلاسیک طبقه بندی میشدند، ولی در طول مراحل پیشرفت بعدی دوباره بعنوان مخازن طبیعی طبقه بندی شدند. تعیین سیستم شکافی یک مخزن در طی زمان کوتاه از لحاظ اقتصادی برای مدیریت مخزن مقرون به صرفه نمی باشد. شکافها (شکستگیها) با اصطلاحات گوناگون بر اساس اهداف خاص شناسایی و تعریف می شوند. از نظر نلسون [2] شکافها، سطوح گسسته طبیعی قابل رویت سنگ می باشند که در طی دگرذیسی یا دیاژنز فیزیکی بوجود آمده اند. شکافها همچنین می توانند بر اثر تخریب مواد کم دوام در برابر جریان آب تشکیل شوند. خصوصیات شکافها به نوع فرایند تولیدی (ژنز) آنها نیز وابسته است. شکافها می توانند تاثیرات مثبت یا منفی بر جریان سیال داشته باشند. مخازن شکافدار طبیعی مخازنی هستند که شکستگیها می توانند هر گونه تاثیری بر عملکرد مخزن داشته باشند. نلسون [2] بر اهمیت جمع آوری اطلاعات شناسایی مخازن قبل از توسعه آنها تاکید فراوان دارد.

## ۳- خصوصیات شکافها

عرض شکافها و فاصله بین آنها دو عامل اصلی تعیین کننده تخلخل و نفوذپذیری آنهاست. عرض شکاف (e) در واقع فاصله بین دو سطح موازی است که شکاف را تشکیل می دهند و فاصله شکاف (D) میانگین فاصله بین شکستگی های منظم می باشد. مطابق نظر نلسون [2] چهار تا از مناسبترین خصوصیات مخازن شکافدار، جهت تصمیم گیری درباره مسائل و توسعه آنها عبارتند از:

☑ تخلخل شکافها

☑ نفوذ پذیری شکافها

☑ اشباع سیال درون شکافها

#### ۴- تخلخل شکافها

تخلخل شکافها در واقع نسبت فضای خالی بین شکستگیها به کل فضای خالی موجود در سیستم میباشد. تخلخل شکافها با استفاده از فرمول زیر تخمین زده می شود :

$$\phi_f = \left[ \frac{e}{D + e} \right] \times 100 \quad (1)$$

بنا براین میتوان بیان کرد که تخلخل شکاف، نسبی است. تخلخل می تواند در بعضی از موقعیتهای مخازن به صد در صد هم برسد. اما این مقدار برای تمام مخازن عموماً کمتر از ۱٪ است. مطابق نظر [2] Nelson تخلخل شکاف همیشه کمتر از ۲٪ است و در بیشتر مخازن کمتر از ۱٪ می باشد و عموماً این مقدار از ۵٪ هم کمتر می شود. استثناً در شکافهای حفره دار تخلخل دارای تنوع بسیار بالایی است و میتواند از صفر تا مقدار بالایی تغییر کند. اهمیت تخلخل شکافها در عملکرد مخزن بستگی به نوع شکستگی مخزن دارد. اگر سیستم شکستگی طبیعی، تخلخل و نفوذپذیری مخزن را موجب شود، تخلخل شکاف یک پارامتر اساسی برای تعیین توسعه مخزن می باشد. همانطور که سهم تخلخل ماتریکس در کل سیستم افزایش می یابد به همان نسبت تخلخل شکاف کاهش می یابد. تخمین تخلخل شکاف در مخازنی که تخلخل ماتریکس چندین برابر تخلخل شکاف باشد، کار مشکلی نیست. تخلخل شکافها یکی از خصوصیات شکستگیهاست که تعیین آن مشکل می باشد.

منابع عمومی تخمین تخلخل شکاف به شرح ذیل می باشند:

- آنالیز مغره
- رابطه بین تخلخل و نفوذ پذیری
- برداشتهای میدانی و نتایج آزمایشگاهی
- چاه نگاری
- چاه آزمایی

## ۵- نفوذپذیری شکافها

نفوذپذیری در واقع تعیین کننده توانایی یک محیط در عبور دادن مایعات یا سیالات از خود می باشد. وجود شکافهای باز، ظرفیت جریانی مخازن را بشدت بالا میبرد. بنابر این نفوذپذیری شکافها مهمترین عامل تعیین کننده کیفیت و بازده تولیدی مخزن می باشد. معادله دارسی که در مدل جریان سیال در محیط متخلخل صدق میکند، در مدل جریان درون شکافها و شکستگیها غیر قابل استفاده است. بنابر این تئوری سطوح موازی به مدل جریان سیال در شکافها توسعه داده شد. مدل سطوح موازی بر اساس فاصله و پهنای شکافها ارائه شده است. [2] Nelson با استناد به نظر Parsons (1966) مدلی برای شکافها و جریان سیال در ماتریکس ارائه داد و معادله ای برای بدست آوردن نفوذپذیری شکستگی بدست آورد:

$$k_f = \left[ \frac{e^2}{12} \times \frac{\rho g}{\mu} \right] \quad (2)$$

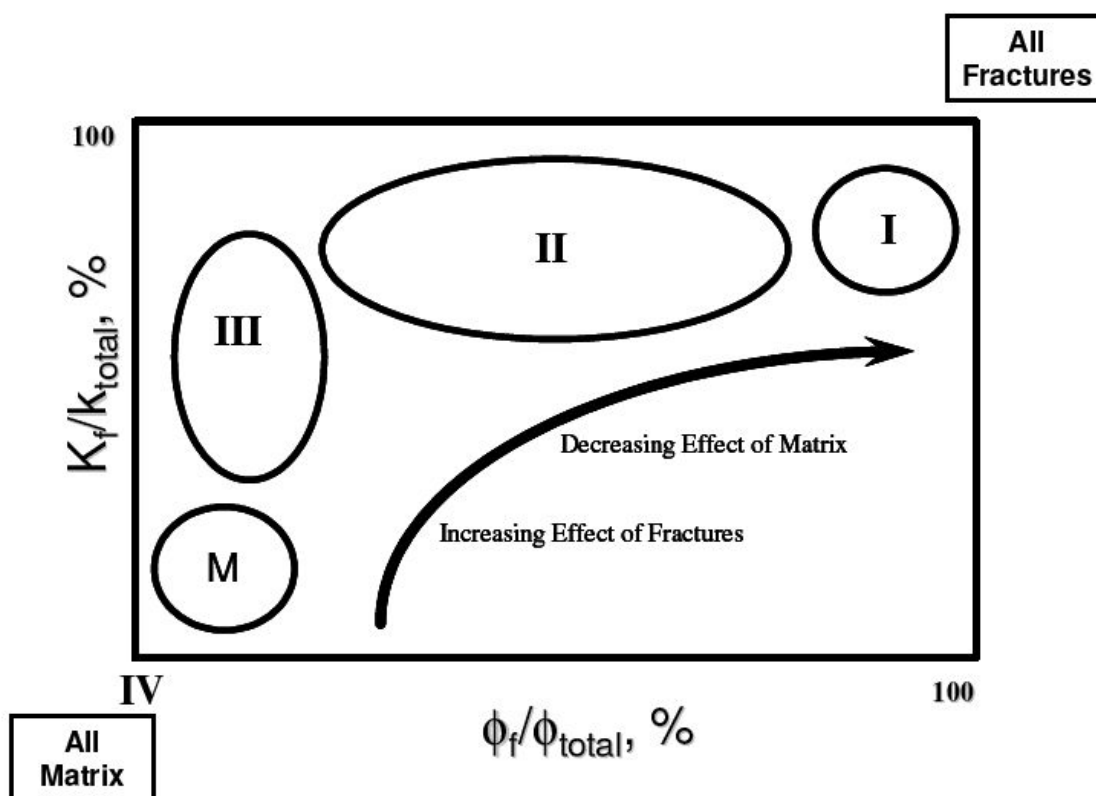
این معادله جریان خطی بین دو سطح هموار ثابت و موازی و شکافهای همگن با توجه به جهت، پهنای و فضا در نظر گرفته می شود. رابطه پارسون در عین سادگی قابلیت کاربرد برای جریان سیال در مخازن شکافدار را دارد. شکافها همیشه موجب بهبود جریان مایع در مخازن نمی شوند. در بعضی از موارد شکافهای پر شده یا نیمه پر شده بعنوان یک عامل مسدود کننده جریان عمل می کنند. تاثیر شکاف بر نفوذپذیری به چندین عامل مانند مورفولوژی، جهت آن و غیره بستگی دارد. تعیین پهنای و نفوذپذیری شکافها با استفاده از اطلاعات مغزه در آزمایشگاه دشوار می باشد. آنالیز چاه آزمایشی رایج ترین روش برای تعیین نفوذپذیری می باشد.

## ۶- طبقه بندی مخازن شکافدار

نلسون [2] بر اساس کار هوبرت و ویلز (۱۹۵۵) مخازن شکافدار را به صورت زیر طبقه بندی کرد:

- نوع اول: مخازنی که در آنها شکافها عامل اصلی تخلخل و نفوذپذیری هستند.
- نوع دوم: مخازنی که در آنها شکافها عامل اصلی نفوذپذیری می باشند.
- نوع سوم: مخازنی که در آنها شکافها عامل کمکی نفوذپذیری می باشند.
- نوع چهارم: مخازنی که در آنها شکافها باعث تخلخل و نفوذپذیری نمی شوند بلکه باعث ایجاد نامتجانسی در مخزن و مانعی برای جریان می شوند.

همانطوریکه در شکل (۱) نشان داده می شود، شکافها در مخازن نوع اول از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشند و در نوع دوم و بعد آن از اهمیت کمتری برخوردار می باشند، به همین نسبت اهمیت تخلخل و نفوذ پذیری با نوع مخازن تغییر می کنند.



شکل (۱): طرح شماتیک درصد تخلخل و نفوذپذیری شکاف در چهار نوع مخزن شکافدار [2]

جدول (۱) ویژگی ها، مشکلات بالقوه و چند مثال از مخازن شکافدار نوع اول و دوم و سوم را نشان می دهد.

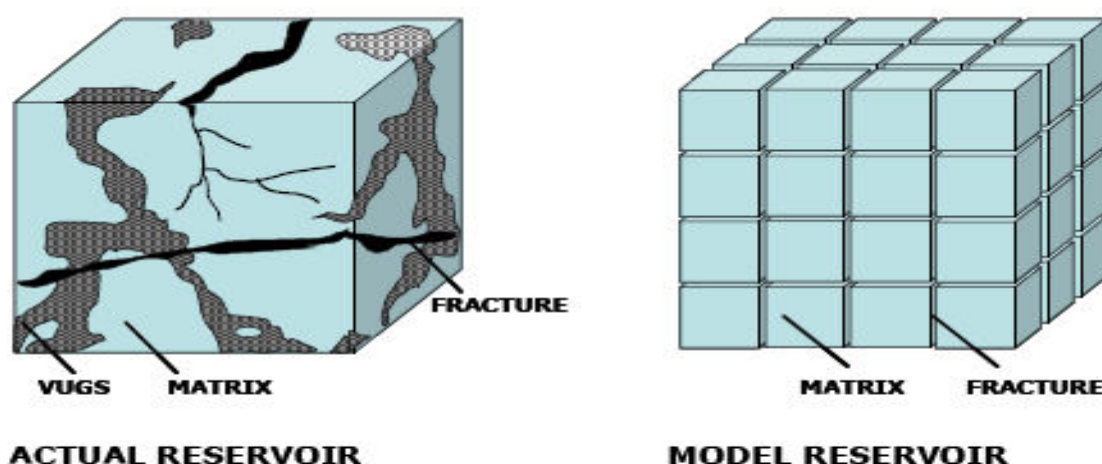
جدول (۱): مشخصات و مثالهایی از مخازن نوع اول تا سوم.

Reservoir Type	Characteristics	Problems	Field Examples
Type 1	<p>Large drainage areas per well</p> <p>Few wells needed for development</p> <p>Good reservoir quality-well information correlation</p> <p>Easy good well location identification</p> <p>High initial potential</p>	<p>Rapid decline rates</p> <p>Possible early water encroachment</p> <p>Size/shape drainage area difficult to determine</p> <p>Reserves estimation complex</p> <p>Additional wells accelerate but not add reserves</p>	<p>Amal, Libia</p> <p>Ellenburger, Texas</p> <p>Edison, California</p> <p>Wolf Springs, Montana</p> <p>Big Sandy, Kentucky</p>
Type 2	<p>Can develop low permeability rocks</p> <p>Well rates higher than anticipated</p> <p>Hydrocarbon charge often facilitated by fractures</p>	<p>Poor matrix recovery (poor fracture-matrix communication)</p> <p>Poor performance on secondary recovery</p> <p>Possible early water encroachment</p> <p>Recovery factor variable and difficult to determine</p> <p>Fracture closure may occur in overpressured reservoir</p>	<p>Agha Jari, Iran</p> <p>Hart Kel, Iran</p> <p>Rangely, Colorado</p> <p>Spraberry, Texas</p> <p>La Paz/Mara, Venezuela</p>
Type 3	<p>Reserves dominated by matrix properties</p> <p>Reserve distribution fairly homogeneous</p> <p>High sustained well rates</p> <p>Great reservoir continuity</p>	<p>Highly anisotropic permeability</p> <p>Unusual response in secondary recovery</p> <p>Drainage areas often highly elliptical</p> <p>Interconnected reservoirs</p> <p>Poor log/core analysis correlation</p> <p>Poor well test performance</p>	<p>Kirkuk, Iraq</p> <p>Gachsaran, Iran</p> <p>Hassi Mesaoud, Algeria</p> <p>Dukhan, Qatar</p> <p>Cottonwood Creek, Wyoming</p> <p>Lacq, France</p>

## ۷- آنالیز چاه آزمایشی در مخازن شکافدار طبیعی

یکی از اولین مستندات نزدیک به مدل NFR به وسیله پولارد [3] (۱۹۵۳)، ارائه شده بود که در واقع روشی برای انتخاب میزان تحریک اسیدی (اسید کاری) میسر می ساخت. بعد ها pirson [4] روش پولار را گسترش داد و حجم تخلخل ماتریکس را محاسبه کرد. علیرغم مفید بودن روش پولار در کاربرد میدانی، بعضی از محققین [1,6] عدم صحت آن را ابراز می دارند.

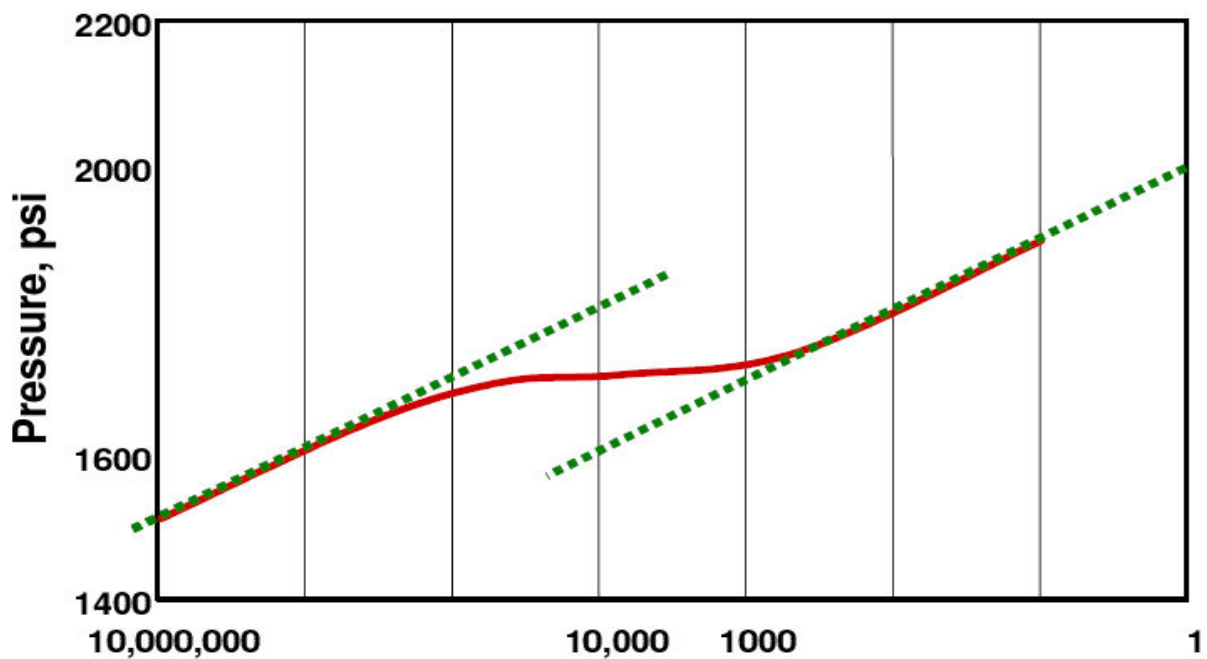
Warren & Root [1] مدلی ایده‌آل جهت مطالعه جریان سیال در مخازن غیر همگن توسعه دادند که در شکل (۲) نشان داده شده است. این مدل از بلوکهای مکعبی تشکیل شده است که مکعبها نشان دهنده ماتریکس و فواصل بین آنها نشانگر شکستگیهای موجود در ماتریکس می باشد. همگن بودن، متجانس بودن تخلخل دوگانه محیط، پراکندگی یکنواخت اندازه بلوک، جریان سیال از ماتریکس به شکاف و از شکاف به چاه، از فرضیات اساسی مدل هستند. جریان سیال از ماتریکس به شکافها حالت شبه پایدار (پایدار کاذب) است.



شکل (۲): مدل ایده‌آل مخزن شکافدار واقعی ارائه شده توسط Warren&Root [1]

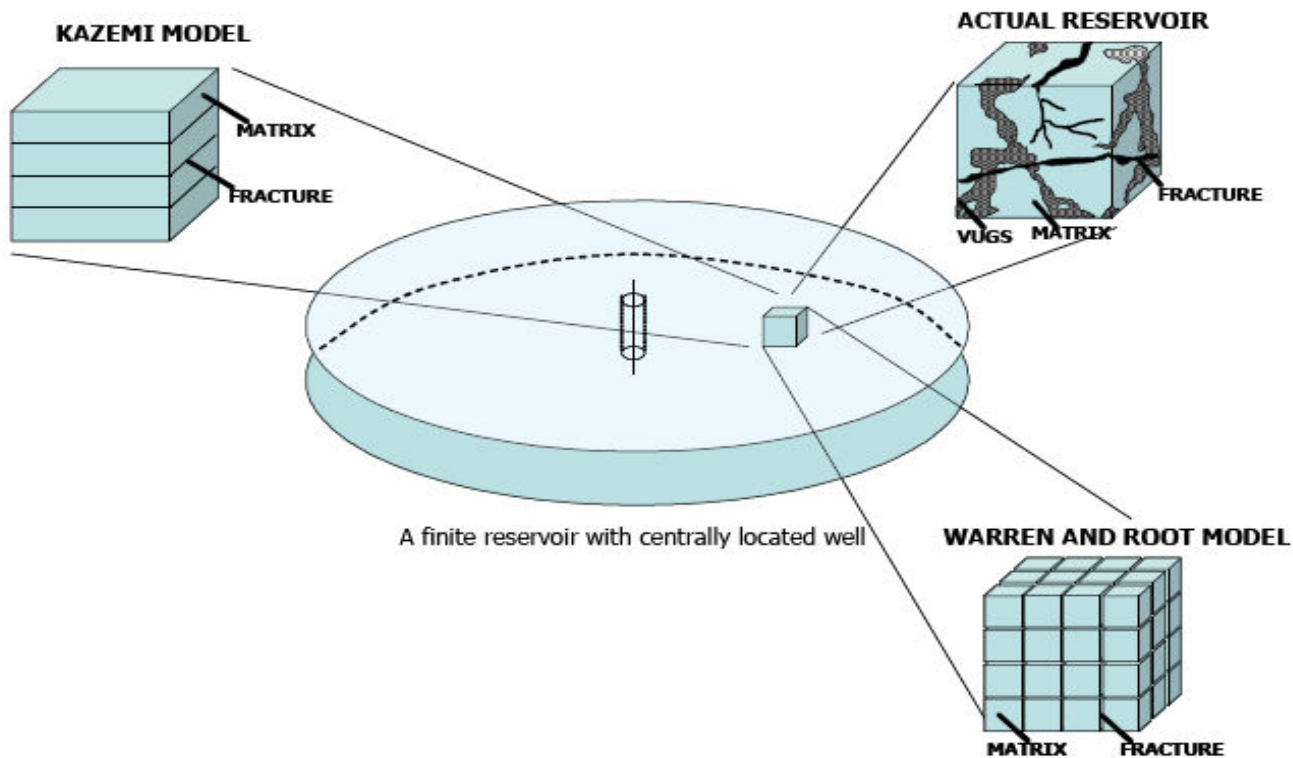
Warren & Root [1] واکنش فشار را بوسیله دو تا خط نیمه مستقیم مطابق شکل (۳) نشان دادند، که اولین خط مستقیم برای جریان گذرا در محیط شکاف می باشد. دومین خط کل جریان گذرا را در کل سیستم نشان می دهد. شیب خطوط در واقع نشان دهنده ظرفیت جریانی سازند است. فاصله عمودی خطوط نشانگر ظرفیت ذخیره سازند است. همچنین آنها دو پارامتر توصیف کننده رفتار فشار در سیستم شکسته شده را تعیین می کنند. اولین پارامتر نسبت ذخیره ( $\omega$ ) است، که نسبت میزان ذخیره شکافها به میزان ذخیره کل سیستم است. دومین پارامتر ضریب جریان بین تخلخلی ( $\lambda$ ) است که جریان حاکم از ماتریکس به شکاف است و نشانگر ناهمگنی سیستم است. Mavor & cinco [5] مدل Warren and root [1] را برای محاسبه ذخیره حفره های درون چاه و پوسته به کار بردند.





شکل (۳): پلات نیمه لگاریتمی رفتار فشار در NFR

کاظمی [6] حالت مخصوصی از مدل Warren and Root [1] را بصورتی ارائه داد که در آن چاه در مرکز فرض می شد و شکافها به شکل افقی باشند. مدل کاظمی در شکل (۴) نشان داده شده است [6].



شکل (۴): مدل ایده ال مخازن شکافدار طبیعی، ارائه شده توسط کاظمی [6]

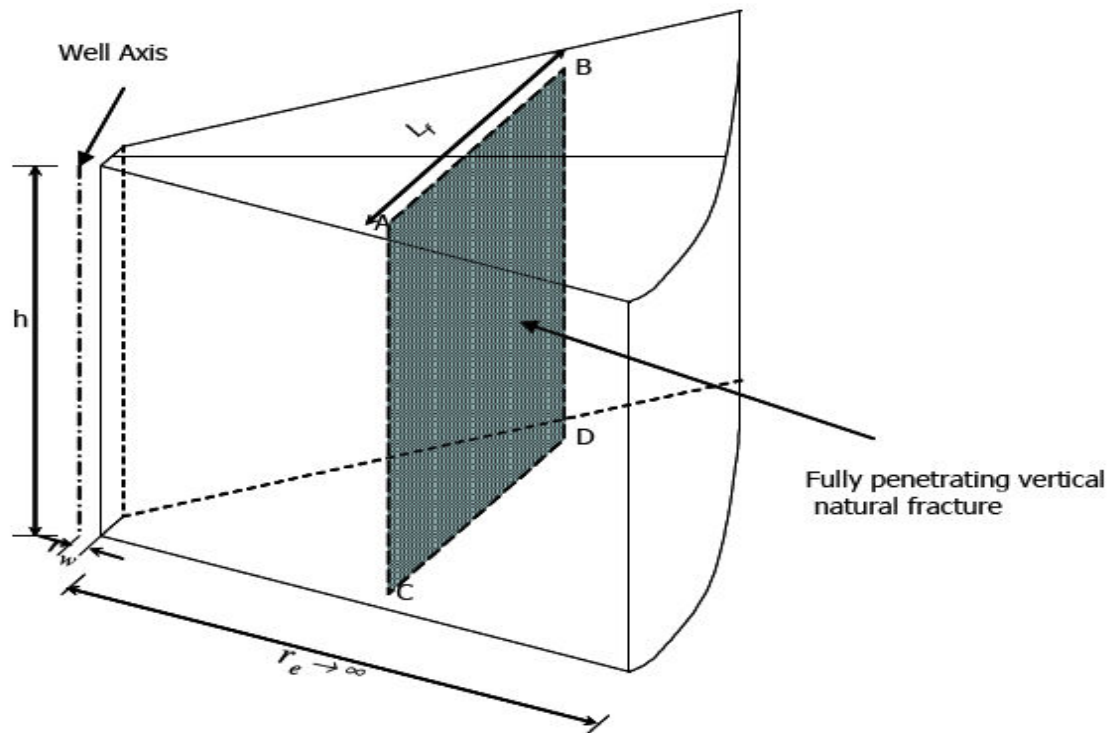
فرضیات کلی مدل کاظمی شامل: (۱) جریان تک فاز باشد. (۲) جریان در جهت عمودی و شعاعی ناپایدار است. (۳) سیال از ماتریکس (ذخیره بالا و ظرفیت جریانی فوق العاده پایین) به شکافها (ظرفیت جریانی بالا و ذخیره پایین) جریان یابد و از شکافها وارد چاه شود.

کاظمی [6] سه حالت فرضی فوق را شبیه سازی کرده است و واکنشهای ساختاری افت را تجزیه و تحلیل کرد. و سه تا خط نیمه لگاریتمی را بدست آورد. اولین و سومین خط در واقع معادلاتی هستند که در مدل Warren & Root [1] نشان داده شده اند. دومین خط مطابق با حالت گذرا از جریان حاکم بر شکاف به جریان حاکم بر کل سیستم است.

کاظمی [6] نتیجه گرفت که مدل Warren & Root [1] برای مخازن شکافدار در صورتی قابل قبول است که جریان ناپایدار باشد و ضریب جریان بین تخلخلی وابسته به طرز جریان از ماتریکس به شکاف است.

De Swaan [7] راه حلهای تحلیلی برای جریان ناپایدار بین تخلخلی در حالتی هندسی متفاوت ارائه داد که کاظمی [6] آنها را مورد استفاده قرار داده است. نتایج مشابه و بصورت خطوط مستقیم نیمه لگاریتمی بدست آمده است. بعدها، Najurieta [8] تئوری حالت گذرا را توسعه داد و

Moench [9] اثرات حالت شبه پایدار را در جریان بین ماتریکس و سیستم شکاف مورد بررسی قرار داد.

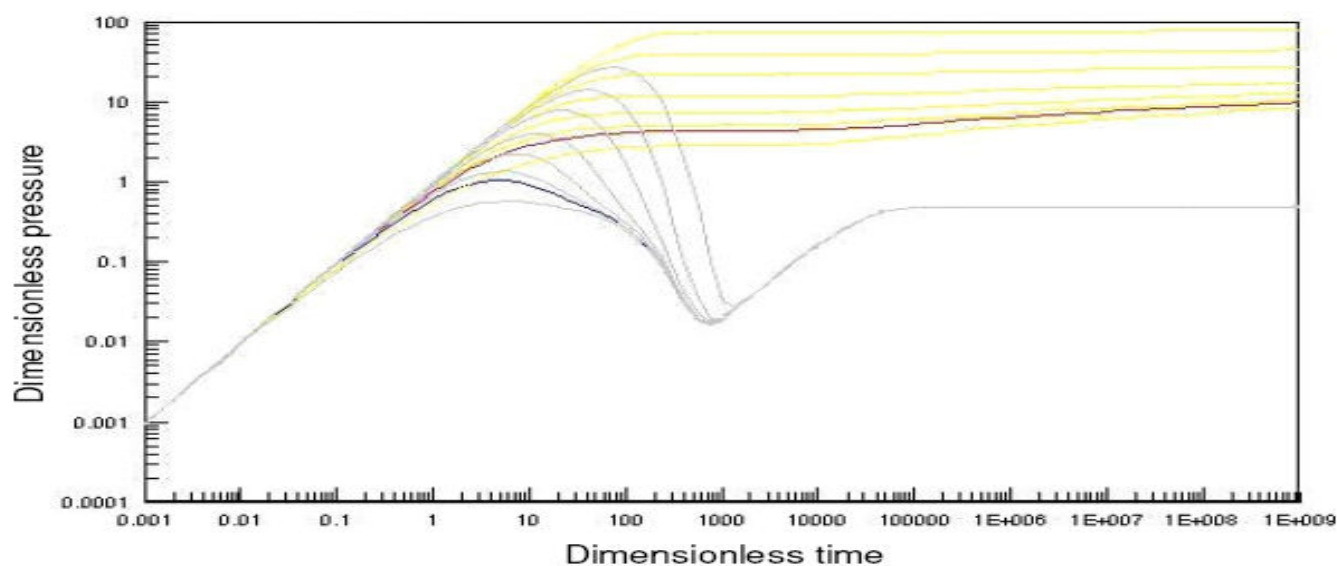


شکل (۵): مدل ایده ال برای نشان دادن یک شکستگی طبیعی (ارائه شده توسط Cinco و همکاران) [10]

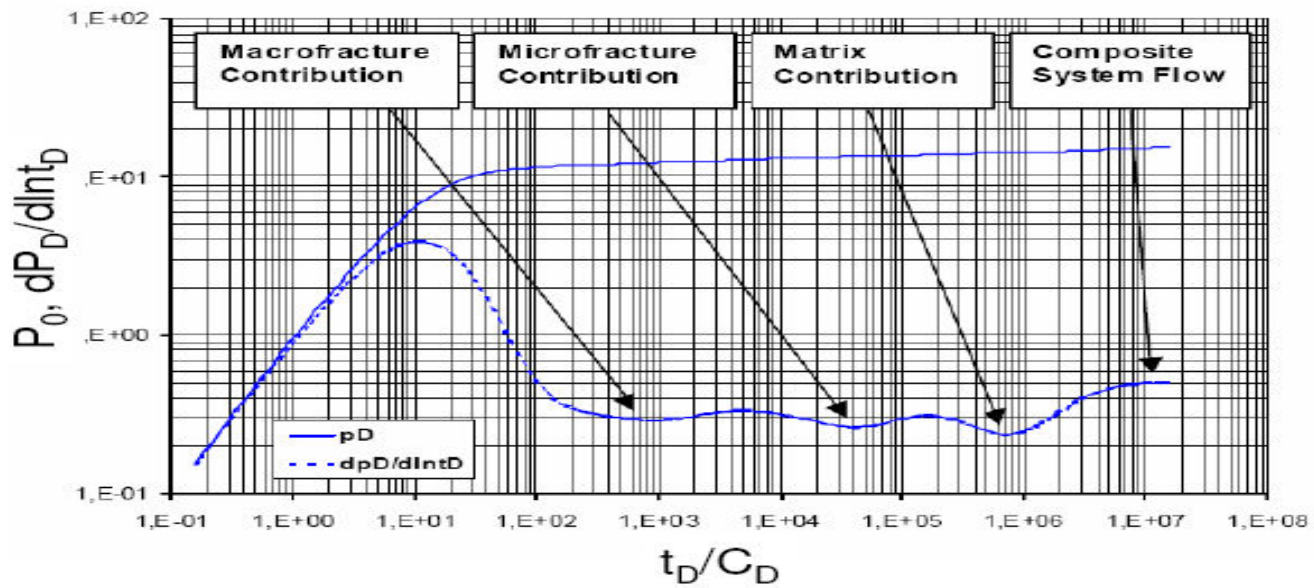
Cinco و همکارانش [10] مدل مدور فرضی را که چاه در مرکز آن قرار می گرفت و شکافها بصورت عمودی بودند، در نظر گرفتند این مدل در شکل (۵) نشان داده شده است و دارای فرضیات زیر است:

- (۱) متجانس بودن محیط متخلخل
  - (۲) سیال دارای قابلیت تراکم پایین و گرا نیروی ثابت باشد.
  - (۳) قابلیت تراکم سیستم ثابت باشد .
  - (۴) کل نفوذ به سمت چاه با نرخ ثابتی باشد.
- نتایج چنین فرضیاتی اگر چه برای یک شکاف می باشد، می دهد که رفتار فشار شبیه به مخزنی شکافهای یکسانی است که دارای سه خط مستقیم نیمه لگاریتمی شامل جریان در طی شکاف، حالت گذرا یا انتقالی و کل سیستم را نشان می دهد.

Cinco و همکارانش [10] همچنین تاثیر جهت یابی شکاف (شکستگیها) را بر رفتار فشار مخزن، مورد توجه قرار داد. آنها نتیجه گرفتند که این خطوط نیمه لگاریتمی در تمام جاها و موقعیتهای با داشتن دوره گذرای متفاوت برای توابع جهت یابی شکاف موجود می باشد. Bourdet و همکارانش [11,12] استفاده کردن از انواع منحنی های به دست آمده از فشار در تفسیر چاه آزمایی را مطرح کرد. آنها در مخازن شکافدار طبیعی دو حالت جریان شبه پایدار و ناپایدار را مورد توجه قرار دادند. آنها همچنین تاثیرات ذخیره حفره های درون چاه و پوسته را نیز نتیجه گرفتند. واکنش های فشاری رفتارهای متفاوتی را نشان میدهد. برای جریان شبه پایدار، منحنی های به دست آمده به صورت V شکل می باشد. اگر جریان ناپایدار باشد، نتایج به دست آمده مقدار ثابت ۰/۲۵ را در طی حالت گذرا یا انتقالی نشان می دهد. شکل (۶) ارائه مثالی از انواع منحنی های Bourdet برای جریان شبه پایدار در مخازن شکافدار است. یکی از محققین عدم توانایی تخلخل دوگانه را در مخازن پیچیده مورد بررسی قرار داده است. Ershaghi & Abdassah [13] مدل تخلخل سه لایه ای را در سال ۱۹۸۶ ارائه دادند. به تازگی در سال ۲۰۰۴ Dreier و همکاران [14] مدل های تخلخل چهار لایه ای را ارائه دادند. شکل (۷) مثالی از مدل Dreier و همکارانش [14] را در ارائه واکنش فشار در سیستم تخلخل چهار لایه ای را نشان میدهد. با وجود اینکه اساس اغلب روشهای استفاده شده آنالیز چاه آزمایی، نظریه Warren & Root [1] می باشد، با بعضی تغییرات متنوع برای تشریح جریان از درون ماتریکس به شکاف، ضریب ذخیره حفره های درون چاه و پوسته مانند پارامترهای  $(\omega$  و  $\lambda$ ) معتبر است.



شکل (۶): انواع منحنی های به دست آمده برای مخازن با تخلخل دوگانه و جریان شبه پایدار [11]



شکل (۷): رفتار فشار در مخازن با تخلخل چهارگانه [14]

### نتیجه گیری :

- ۱- نسبت ذخیره ای که از آنالیز چاه آزمایشی به دست می آید، می تواند برآورد خوبی از مقدار تخلخل شکاف ها تهیه نماید.
- ۲- ضریب جریان بین تخلخلی که از آنالیز چاه آزمایشی به دست می آید، می تواند برای برآورد فاکتور شکل استفاده شود به شرطی که مقدار نفوذ پذیری ماتریکس معلوم باشد.

۳- واکنش فشار چاه آزمایشی، برای اینکه برآورد صحیح و مطمئنی از نسبت ذخیره و ضریب جریان بین تخلخلی به دست آید، می بایست رژیم جریان (جریان شعاعی شکاف، جریان گذرا، جریان شعاعی سیستم) را مشخص نماید.

۴- وجود نفوذ پذیری ناهمگن ماترکس منجر به عدم اطمینان در نتایج حاصل از آنالیز چاه آزمایشی می شود.

#### **NOMENCLATURE**

D = Fracture spacing, ft, m  
e = Fracture width, in, cm  
k = permeability, md  
L = Fracture spacing, ft  
 $r_w$  = wellbore radius, ft  
 $\phi$  = porosity  
 $\mu$  = viscosity, cp  
 $\rho$  = fluid density,  $lb_m/ft^3$   
w = Storativity ratio  
 $\lambda$  = Interporosity flow coefficient

#### **Subscripts**

e = effective  
f = fracture

#### **Abbreviations**

NFR = Naturally Fractured Reservoirs  
DFN = Discrete Fracture Network

## REFERENCES

1. **Warren J.E. and Root P.J.:** "The Behavior of NFR," SPEJ (September 1963) 245.
2. **Nelson, R.A.:** Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs, Gulf Professional Publishing, Woburn, MA, 2001.
3. **Pollard, P.:** "Evaluation of Acid Treatments from Pressure Buildup Analysis," *Trans. AIME* (1959) 216, 38.
4. **Pirson, R.S. and Pirson, S.J.:** "An Extension of the Pollard Analysis Method of Well Pressure Build-Up and Drawdown Tests," paper SPE 101 presented at the 1961 SPE Annual Fall Meeting, Dallas, Texas, 8-11 October.
5. **Mavor, M.J. and Cinco-Ley, H.:** "Transient Pressure Behavior of NFR," paper SPE 7977 presented at the 1979 SPE California Regional Meeting, Ventura, California, 18-20 April.
6. **Kazemi, H.:** "Pressure Transient Analysis of NFR with Uniform Fracture Distribution," *SPEJ* (December 1969) 451.
7. **De Swaan O. A.:** "Analytic Solutions for Determining NFR Properties by Well Testing," *SPEJ* (June 1976) 117.
8. **Najurieta, H.L.:** "A Theory for the Pressure Transient Analysis in NFR," paper SPE 6017 presented at the 1976 SPE Annual Technical Conference, New Orleans, 3-6 October.
9. **Moench, A.F.:** "Double-Porosity Models for a Fissured Groundwater Reservoir With Fracture Skin," *Water Resources Research* (July 1984) 831.

10. **Cinco-Ley, H., Samaniego V.F., and Dominguez, A.N.:** "Unsteady-State Flow Behavior for a Well Near a Natural Fracture," paper SPE 6019 presented at the 1976 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 3-6 October.
11. **Bourdet, D., Ayoub J., Whittle T., Pirard Y., and Kniazeff V.:**"Interpreting Well Tests in Fractured Reservoirs," World Oil (October 1983) 77.
12. **Bourdet D., Whittle T., Douglas A. and Pirard Y.:** "New Type Curves Aid Analysis of Fissured Zone Well Tests," World Oil (April 1984) 111.
13. **Abdassah, D. and Ershaghi, I.:** "Triple-porosity Systems for Representing Naturally Fractured Reservoirs," SPE Formation Evaluation (April 1986), 113.
14. **Dreier, J., Ozkan, E., and Kazemi, H.:** "New analytical pressure-transient models to detect and characterize reservoirs with multiple fracture systems," paper SPE 92039. . presented at the 2004 International Petroleum Conference, Puebla, Mexico, 8-9 November 2004.