

**معرفی - فرمولاسیون پیوسته، مروری بر مراحل اساسی استخراج معادلات جریان، مفاهیم اساسی**

فهم اساسی هر شاخه‌ای از علوم مهندسی وابستگی تام به شناخت و ملاحظه نقش آن رشته و میزان تعامل و ارتباط با سایر رشته‌های علوم و مهندسی دارد. اگر به هر دلیلی، قصد برقراری یک بیان علمی و عمیق و به عبارت مهندسی یک مدل تقریبی و نزدیک به واقعیت از یک یا چند پدیده فیزیکوشیمیایی داریم، باید مبادی تصورمان را روی حداقل چهار محور متمرکز کرده و تصمیم بگیریم:

(الف) نحوه نگرش به مساله (میکروسکوپی یا ماکروسکوپی)

(ب) اصول و قوانین موضوعه و مربوطه (قوانین عام و خاص)

(ج) نحوه بیان مدل ریاضی و کمی (مبتنی بر قوانین اولیه آماری یا تجربی)

(د) نوع فرمولاسیون (متوسط‌گیری یا توزیعی)

به طور معمول، معادلات جریان برای جریان سیال در محیط متخلخل بر اساس معادلات پایستگی جرم، اندازه حرکت، انرژی و معادلات ضروری برای سیالات و محیط متخلخل بدست می‌آیند. برای سادگی، معادله انرژی با فرض وجود شرایط همدمايي، نادیده گرفته می‌شود. اگرچه در شرایطی که دمای مخزن تغییر می‌کند، مانند تزریق آب سرد به داخل مخزن گرمتر، معادله انرژی مهم بوده و باید در نظر گرفته شود. در زیر، معادلات برای سیستم‌های خطی و یک بعدی در نظر گرفته شده‌اند اما به راحتی برای سیستم‌های دو و سه بعدی و مختصات دیگر قابل گسترش هستند.

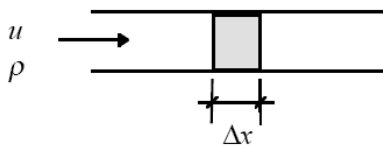
پایستگی جرم

محیط متخلخل یک بعدی زیر را در نظر بگیرید.



معادله پایستگی جرم در طول یک المان از ورقه که در آن سیالی با چگالی ρ و سرعت v در حال گذر است، به

صورت زیر نوشته می‌شود:



{نرخ تغییرات جرم درون المان} = {جرم خارج شده از المان در $x + dx$ } - {جرم وارد شده در به المان x }

$$\{u\rho A\}_x - \{u\rho A\}_{x+\Delta x} = \frac{\partial}{\partial t} \{\phi\Delta x A\rho\}$$



نکته: در برخی مراجع، وجود چاه/چشمه را به صورت مکان‌های تکنیکی و با استفاده از تابع دیراک وابسته در حالت پیوسته (PDE) نمایش می‌دهند. در حالت یک بعدی، چشمه یا چاه به صورت نقطه و در حالت دوبعدی و سه‌بعدی به صورت خط نمایش می‌دهند. در فرمولاسیون گسسته بلوک‌های دارای چشمه و چاه به صورت مقتضی عمل می‌شود.

با تقسیم بر Δx و گرفتن حد وقتی که $\Delta x \rightarrow 0$ معادله پایداری جرم یا معادله پیوستگی به دست می‌آید:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(u\rho A) = A \frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho)$$

به کلی بودن معادله دقت کنید، نه سطح مقطع A ، نه چگالی ρ ، و نه درجه تخلخل ϕ ، را از پراتر بیرون نیاورده‌ایم. بدیهی است برای انواع حالات (نظیر چگالی ثابت، تخلخلی متغیر و سطح مقطع متغیر) شکل کلی معادله را می‌توان ساده‌تر کرد. این سهولت و ساده‌شدن هم کاربرد تحلیلی دارد و هم کاربرد در حل عددی. برای سطح مقطع ثابت، معادله پیوستگی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(u\rho) = \frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho)$$

معادله مومنتوم

مساله فرمولاسیون حرکت سیال در محیط متخلخل با حرکت سیال در یک محیط پیوسته (غیر متخلخل) از همین جا، جدا می‌شود. آنها فقط در قانون عام بقای جرم (معادله پیوستگی) با هم مشترک هستند و در قوانین خاص با هم اختلاف جدی دارند. در حالت مکانیک سیالات محیط پیوسته، بعد از نوشتن معادله پیوستگی (قانون بقای جرم، قانون عام) معادله بقای مومنتوم (قانون عام) را همراه با قانون خاص گرانروی (مثل نیوتن) نوشته می‌شود تا تشکیل معادلات حاکم ناویه-استوک را بدهند. در طرف مقابل، مکانیک سیالات محیط متخلخل با نوشتن معادله داریسی که یک معادله نیمه تجربی (نیمه عام-نیمه خاص) است با یک کرشمه دو کار می‌کنند. با ترکیب معادلات پیوستگی و داریسی و همچنین سایر معادلات و قوانین خاص مقتضی (مثلاً در حالت چند فازی و یا چند جزئی از روابط اشباع‌شدگی فازها و تعادل ترمودینامیکی استفاده می‌شود) معادلات حاکم به دست آمده و آماده حل می‌شوند.

معادله پایداری مومنتوم برای هر سیستم از معادلات ناویر-استوکس استخراج می‌شود. اما این معادلات برای جریان‌های با سرعت کم در درون محیط متخلخل توسط معادله نیمه تجربی داریسی بیان می‌شوند. این معادله برای سیستم یک بعدی و جریان افقی به صورت زیر است:

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

برای جریان‌ها با سرعت بالاتر، از معادله فروشه‌ایم می‌توان استفاده کرد:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = u \frac{\mu}{k} + \beta u^n$$



مقدار n توسط موسکات برابر ۲ پیشنهاد شده است. هم چنین معادله برینکمن که در هر دو محیط متخلخل و غیر متخلخل استفاده می‌شود:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = u \frac{\mu}{k} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

معادله برینکمن در محیط متخلخل به معادله دارسی، با حذف جمله آخر، و برای جریان‌های کانالی به معادله استوکس با حذف ترم دارسی، تبدیل می‌شود.

معادله ضروری برای محیط متخلخل

برای در نظر گرفتن وابستگی تخلخل به فشار، از تعریف تراکم‌پذیری سنگ استفاده می‌شود:

$$c_r = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial P} \right)_T$$

شکل مهندسی (عملی و تجربی) این معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$\% c_{rock} \triangleq \frac{\Delta \phi / \phi}{\Delta P} * 100$$

صورت کسر عملاً میزان تغییر نسبی تخلخلی را نسبت به فشار بیان می‌کند و به بیان دقیق‌تر:

$$\% c_{rock} \triangleq \frac{(\phi_2 - \phi_1) / \phi}{P_2 - P_1} * 100$$

بطوریکه ϕ_1 و ϕ_2 درجه تخلخل در فشارهای P_1 و P_2 (به ترتیب) می‌باشند. برای بیان ریاضی از معادله بالا حد گرفته و با استفاده از تعریف مشتق، ضریب تراکم‌پذیری سنگ را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$c_r = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial P} \right)_T$$

با ثابت گرفتن دما عبارت فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{dP}{d\phi} = \frac{1}{\phi c_r}$$

به طور معمول، فرض می‌شود حجم توده دارای مقداری ثابتی است (V_b). یا به طور مشابه تراکم‌پذیری حجم توده صفر باشد.

معادله ضروری برای سیال

با به یاد آوردن تعریف تراکم‌پذیری سیال، که برای هر ماده‌ای در دمای ثابت کاربرد دارد، داریم:

$$c_f = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

معادله مشابه، معادله حالت گاز است که برای گاز ایده‌آل به صورت $PV = nRT$ و برای گاز حقیقی به صورت

$$PV = ZnRT$$

چگالی گاز به صورت زیر بیان می‌شود:



$$\rho_g = \rho_{gS} \frac{P Z_S}{Z P_S}$$

که در آن S نشان دهنده سطح یا حالت استاندارد است. برای اهداف شبیه سازی مخازن، عموماً توصیف سیال نفت با ترکیب نامعلوم (Black oil) یا توصیف سیال ترکیبی (Compositional) استفاده می شود. در ابتدا به مدل Black oil پرداخته و مدل ترکیبی را در آینده بررسی خواهیم کرد.

در یک مدل استاندارد Black oil، ضریب حجمی سازنده، B ، برای هر سیال، نسبت گاز به نفت برای گاز حل شده در نفت R_{so} ، گرانی و چگالی در نظر گرفته می شود. در یک مدل اصلاح شده، ممکن است مقادیر نفت پراکنده در گاز، r_s ، و گاز حل شده در آب، R_{sw} ، نیز در نظر گرفته شود.

ضریب حجمی سازند و نسبت گاز محلول به نفت به صورت زیر تعریف می شوند:

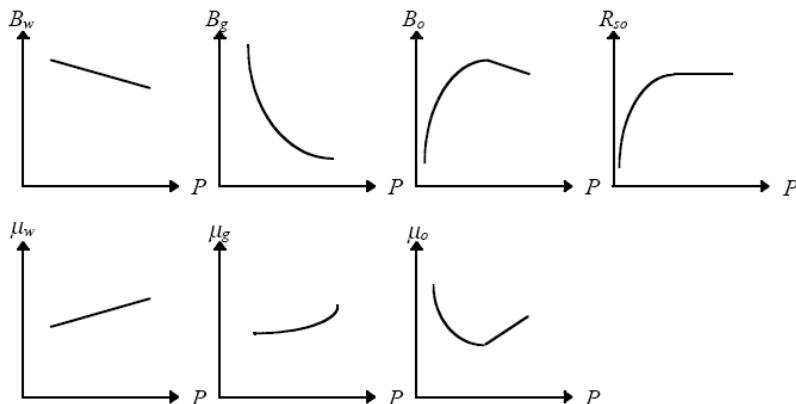
$$B = \frac{\text{volume at reservoir condition}}{\text{volume at standard condition}}$$

$$R_{so} = \frac{\text{volume of gas evolved from oil at standard condition}}{\text{volume of oil at standard condition}}$$

چگالی نفت در شرایط مخزن با این پارامترها، و چگالی گاز و نفت، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho_o = \frac{\rho_{oS} + \rho_{gS} R_{so}}{B_o}$$

نمودار صوری وابستگی به فشار برای پارامترهای سیال Black Oil به صورت زیر می باشد:





اگر سیال مایع باشد، بسته به اینکه شبه‌سازی مورد نظر، شبه‌سازی نفت خام است یا شبه‌سازی ترکیبی، استفاده از C_f شکل‌های دیگری می‌پذیرد، به طور مثال اگر در حالت شبه‌سازی نفت خام باشیم، C_f را به B یا ضریب حجمی مربوط می‌کنیم و اگر شبه‌سازی ترکیبی (چند جزئی، چند فازی) باشد، از معادله حالت یا مدل چگالی مایعات استفاده می‌کنیم. اگر سیال گاز باشد، C_f را بر حسب معادله حالت که چگالی را می‌دهد می‌نویسیم و اگر گاز به صورت محلول در نفت (شبه‌سازی نفت خام یا شبه‌سازی ترکیبی دو جزئی) مدنظر باشد از همان B ولی اصلاح شده (با استفاده از نسبت گاز محلول به نفت R_{so}) استفاده می‌کنیم.

معادله جریان

برای سیستم جریان یک فازی، افقی، یک بعدی و فرض برقراری معادله دارسی و ثابت بودن سطح مقطع عرضی، معادله جریان به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu B} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right)$$

شرایط مرزی

همانطور که قبلاً توضیح داده شده است، اساساً دو نوع BC's وجود دارد: شرایط فشار (شرایط دیریکله) و شرایط دبی (شرایط نیومن). رایج‌ترین شرایط مرزی در مخازن با فرض وجود چاه/چشمه در زیر بیان خواهند شد.

شرایط دیریکله

وقتی شرایط فشار معین شده‌اند، مقادیر فشار در دو طرف سیستم مشخص می‌شوند. برای سیستم خطی فرض شده فوق، دو شرط مرزی فشار در دو طرف به صورت زیر داریم:

$$P(x=0, t > 0) = P_L \quad , \quad P(x=L, t > 0) = P_R$$

برای جریان مخزن، شرط فشار به عنوان فشار ته چاه تولید/ تزریق، در نقطه‌ای از مخزن معین می‌شود. اگرچه در یک بررسی دقیق‌تر، این شرط مرزی نیست اما این شرط مانند شرط مرزی فشار بررسی می‌شود.

شرط نیومن

متناوباً، ممکن است دبی جریان در دو طرف انتهایی سیستم مشخص شده باشد. با استفاده از معادله دارسی در انتهای سیستم ساده فوق، شرایط به صورت زیر در می‌آیند:

$$Q_L = -\frac{kA}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=0}$$

$$Q_R = -\frac{kA}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=L}$$



برای جریان مخزن، شرط دبی ممکن است به عنوان دبی تزریق یا تولید چاه در نقطه‌ای از مخزن یا دبی صفر (no-flow) در مرزهای نفوذ ناپذیر، یا گسل، معین شود یا، بین لایه‌های بدون ارتباط.

شرط اولیه: به عنوان یک مثال، ممکن است برای سیستم ساده فوق، فشار اولیه ثابت مشخص شود:

$$P(x, t = 0) = P_0$$

ممکن است شرط اولیه تابعی از مکان باشد. برای سیستم‌های غیر افقی، فشار هیدرواستاتیکی بر اساس یک سطح مبنا و چگالی سیال محاسبه می‌شود:

$$P(z, t = 0) = P_{ref} + (z - z_{ref}) \rho g$$

جریان‌های چند فازی:

معادله پیوستگی برای هر فاز از جریان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(u_l \rho_l) = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_l S_l) \quad l = o, w, g$$

که معادله دارسی مرتبط با هر فاز به صورت زیر است:

$$u_l = -\frac{k k_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial P_l}{\partial x} \quad l = o, w, g$$

اگرچه، معادله پیوستگی برای فاز گاز با توجه به گاز محلول و گاز آزاد باید اصلاح شود. حالی که در معادله نفت، فقط نفت باقیمانده مایع در سطح باید لحاظ گردد:

$$\rho_o = \frac{\rho_{os} + \rho_g R_{so}}{B_o} = \rho_{oL} + \rho_{oG}$$

که نشان دهنده بخشی از نفت مایع باقیمانده در سطح (در تانک ذخیره) و ρ_{oG} ، بخش گازی در سطح است. بنابراین معادله نفت و گاز به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(u_{oL} \rho_o) = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_{oL} S_o)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g + \rho_{oG} u_o) = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_g S_g + \phi \rho_{oG} S_o)$$

شکل نهایی معادلات فوق بعد از جاگذاری معادله دارسی و پارامترهای سیال Black Oil و در نظر گرفتن جمله دبی جریان چاه به صورت زیر تبدیل می‌شود:



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kk_{ro}}{\mu_o B_o} \frac{\partial P_o}{\partial x} \right) - q'_o = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kk_{rg}}{\mu_g B_g} \frac{\partial P_g}{\partial x} + R_{so} \frac{kk_{ro}}{\mu_o B_o} \frac{\partial P_o}{\partial x} \right) - q'_g - R_{so} q'_o = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_g}{B_g} + R_{so} \frac{\phi S_o}{B_o} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kk_{rw}}{\mu_w B_w} \frac{\partial P_o}{\partial x} \right) - q'_w = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right)$$

که

$$P_{cow} = P_o - P_w$$

$$P_{cog} = P_g - P_o$$

$$\sum_{l=o,w,g} S_l = 1$$

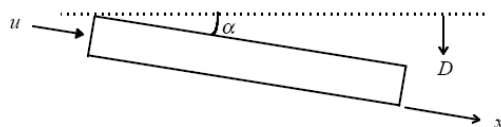
معادله نفت می‌تواند با در نظر گرفتن نفت پراکنده در گاز اصلاح شود. به طور مشابه معادله آب با در نظر گرفتن گاز

محلول در آب.

دستگاه معادلات PDE شامل شش مجهول (سه تا فشار فاز و سه تا درجه اشباع‌شدگی فاز) می‌باشد، در نتیجه نیاز به سه معادله دیگر علاوه بر سه معادله PDE داریم. معمولاً از سه معادله باقیمانده دوتایش مربوط به فشار موئینگی و دیگری مربوط به موازنه کلی جرم فاز می‌باشد. اگر قطر متوسط حفرات خیلی کوچک نباشد، می‌توان فشارهای موئینگی را صفر فرض کرد و عملاً فشارهای هر فاز را در هر نقطه مکانی و زمانی، مساوی هم در نظر گرفت. به هر حال در حالت کلی با یک دستگاه PDAE، یعنی (Partial Differential Algebraic Equations) رو به رو هستیم. اگر از بسته‌های نرم افزاری تجاری (مثل Diff Pack یا PDE Toolbox در محیط Matlab) بخواهیم استفاده کنیم، آنها فقط PDE حل می‌کنند نه PDAE، لذا باید به نحوی معادلات جبری را حذف کنیم. این کار را یا در حالت اصلی (original) یعنی در حالت پیوسته انجام می‌دهند یا در حالت گسسته. از اینرو انواع و اقسام فرمولاسیون مکانیک سیالات در محیط متخلخل از همین جا بروز پیدا می‌کند. مضافاً اینکه واژگان و اصطلاحات جدیدی هم خلق می‌شوند، مانند تقریب جبری مشتقات پاره‌ای دارای جمله غیرخطی، IMPES، متغیرهای اولیه، ثانویه، درجه آزادی برای حل، فرم ضعیف،

جریان غیر افقی

برای جریان شیب‌دار یک بعدی



معادله دارسی اصلاح می‌شود:

$$u = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g \frac{\partial D}{\partial x} \right)$$



و در شکل زاویه شیب α و گرادیان هیدرواستاتیکی:

$$u = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \gamma \sin(\alpha) \right)$$

که $\gamma = \rho g$ گرادیان هیدرواستاتیکی سیال است.

جریان چند بعدی

معادله پیوستگی برای جریان چند بعدی و تک فازی در مختصات کارتزین به صورت زیر است:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho)$$

معادلات داری متناظر به قرار زیراند:

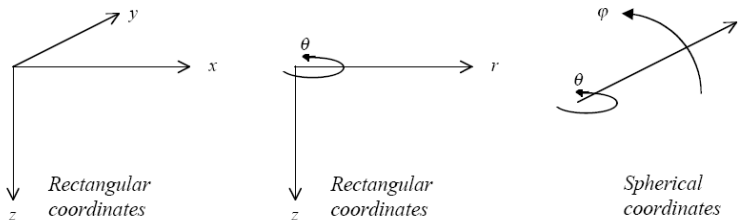
$$u_x = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \gamma \frac{\partial D}{\partial x} \right)$$

$$u_y = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y} - \gamma \frac{\partial D}{\partial y} \right)$$

$$u_z = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \gamma \frac{\partial D}{\partial z} \right)$$

سیستم‌های مختصات

به طور معمول، یکی از سیستم‌های مختصات مستطیلی یا استوانه‌ای در شبیه‌سازی مخزن استفاده می‌شود:



معادلات داری و پیوستگی برای جریان تک فازی در شکل اپراتوری به صورت زیراند:

$$-\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho)$$

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \gamma \nabla D)$$

که عملگرها برای مختصات مستطیلی (x, y, z) به صورت زیر تعریف می‌شوند:



$$\nabla \cdot () = \frac{\partial}{\partial x} () + \frac{\partial}{\partial y} () + \frac{\partial}{\partial z} () \quad (\text{divergence})$$

$$\nabla () = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} () + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} () + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} () \quad (\text{gradient})$$

و برای مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) :

$$\nabla \cdot () = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r ()) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} () + \frac{\partial}{\partial z} ()$$

$$\nabla () = \vec{i} \frac{\partial}{\partial r} () + \vec{j} \frac{\partial}{\partial \theta} () + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} ()$$

و برای مختصات کروی (r, θ, z) :

$$\nabla \cdot () = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 ()) + \frac{1}{r \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} () + \frac{\partial}{r \sin(\theta) \partial \varphi} ()$$

$$\nabla () = \vec{i} \frac{\partial}{\partial r} () + \vec{j} \frac{\partial}{\partial \theta} () + \vec{k} \frac{\partial}{\partial \varphi} ()$$

شرایط مرزی برای سیستم‌های چند فازی

شرایط مرزی فشار و دبی توضیح داده شده در بالا می‌توانند در سیستم‌های چند فازی مورد استفاده قرار بگیرند. اگرچه برای چاه تولید، دبی تولید نفت یا دبی تولید کل در سطح باید معین شود. بنابراین دبی‌های مشخص نشده باید با استفاده از معادله داری حساب شوند.

همچنین تولید، با مقدار حداکثر مجاز GOR یا WC نیز درگیر است. این شرایط در آینده بحث خواهند شد.

شرایط اولیه برای سیستم‌های چندفازی

علاوه بر فشارهای اولیه، اشباع‌شدگی‌های اولیه فازها، هم باید در سیستم چندفازی معین باشد. اینها نیازمند دانستن سطح تماس آب - نفت (WOC) و گاز - نفت (GOC) در مخزن است. با فرض حالت تعادلی سیستم، فشار اولیه فازها براساس سطح تماس و چگالی محاسبه می‌شوند.

سپس اشباع‌شدگی‌های فازی نیز بر اساس منحنی‌های فشار موئینگی حساب می‌شوند. روش دیگر استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی برای محاسبه اشباع‌شدگی‌های فازها است.

مروری بر خواص سنگ و سیال مخازن نفتی

نفوذپذیری، تخلخل، اشباع‌شدگی و تراکم‌پذیری:

یک خاصیت اساسی و مهم اجسام متخلخل، میزان هدایت یا عبور دبی سیالات است. این خاصیت موسوم به نفوذپذیری (Permeability) بوده و آن را با k نمایش می‌دهند و در زمره پارامترهای تجربی می‌باشد.



تخلخل (Porosity) که با ϕ نمایش می‌دهند، نسبت فضای خالی به کل حجم موجود می‌باشد. آنرا از نظر عددی به صورت کسر (کوچکتر از یک) یا درصد بیان می‌کنند. میزان اشباع‌شدگی (Saturation) یک فاز که با S_p نشان داده می‌شود، معادل است با آن کسر حجمی از کل فضای خالی (قابل پر شدن) که فاز p اشغال کرده است، لذا برای یک مخزن نفتی که عمدتاً شامل سه فاز گاز (g)، آب (w)، نفت (o) می‌باشد، رابطه زیر برقرار است:

$$S_o + S_g + S_w = 1$$

تراکم‌پذیری یک سنگ را می‌توان بر حسب حجم توده آن بیان کرد ولی در شبیه‌سازهای مخزن، متداول این است که بر حسب درجه تخلخل ϕ بیان شود:

$$c_r = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial P} \right)_T$$

اگر c_{rock} ثابت باشد و ϕ نیز فقط تابعی از فشار مخزن باشد، می‌توان از رابطه بالا انتگرال گرفت:

$$\phi = \phi_0 e^{c_r(P-P_0)}$$

اگر تابعیت بالا را بسط تیلور دهیم و دو جمله اول را در نظر بگیریم، می‌توان رابطه خطی زیر را انتظار داشت:

$$\phi \cong \phi_0 (1 + c_r (P - P_0))$$

بطوریکه ϕ_0 و P_0 ، تخلخل و فشار در شرایط استاندارد یا مبنا می‌باشند. در شرایط مخزن معمولاً P خیلی بزرگتر از P_0 می‌باشد، لذا از P_0 می‌توان صرف نظر کرد. همچنین، فشار P توسط فشار فازهای سیال مخزن بیان می‌شود.

ترشوندگی (Wettability)

وقتی دو سیال امتزاج‌ناپذیر (Immiscible) در تماس با یک سطح جامد قرار بگیرند، یکی از آن دو از نظر سطح تماس، بیشتر از دیگری به جامد می‌چسبد و به عبارتی آنرا بیشتر تر می‌کند. از نظر پدیدارشناسی، این اختلاف ناشی از رقابت و انرژیهای مابین سطحی است. یک میزان و معیار برای این پدیده (ترکندگی)، زاویه تماس (Contact angle) است که با θ_c نمایش داده می‌شود. این زاویه تابع انرژی سطح تماس بین دو فاز جامد و سیال می‌باشد. بطور مثال برای سیستم آب - نفت - جامد داریم:

$$\sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos(\theta_c)$$

بطوریکه

$$\sigma_{os} = \text{انرژی بین سطح نفت و جامد}$$

$$\sigma_{ws} = \text{انرژی بین سطح آب و جامد}$$

$$\sigma_{ow} = \text{انرژی بین سطح آب و نفت}$$

$$\theta_c = \text{زاویه تماس بر حسب درجه}$$



می‌باشد. اگر θ_c کوچکتر از 90° درجه باشد، می‌گوییم سیستم آب-دوست است، یعنی آب بیشتر از نفت، سطح جامد را تر می‌کند ولی اگر θ_c بزرگتر از 90° درجه باشد، سیستم نفت-دوست می‌باشد و در صورتیکه $\theta_c = 90^\circ$ سیستم خنثی است.

فشار موئینگی (Capillary)

فشار موئینگی، اختلاف فشار حاضر بین دو فاز امتراج‌ناپذیر در یک سیستم موئینه (متخلخل) می‌باشد. اگر آنرا مثبت فرض کنیم، اختلاف فشار فاز غیر ترکننده و فاز ترکننده می‌باشد، یعنی

$$P_{capillary} = P_{non-wetting} - P_{wetting}$$

بطور مثال برای سیستم نفت - آب، اگر آب، فاز ترکننده باشد، آنگاه:

$$P_{cow} = P_o - P_w$$

و برای سیستم گاز - نفت:

$$P_{cog} = P_g - P_o$$

نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که فشار موئینگی را می‌توان بر حسب تابعی از درجه اشباع‌شدگی یکی از فازها بیان کرد، یعنی $P_{cow} = P_{cow}(S_w)$ و یا $P_{cog} = P_{cog}(S_g)$.

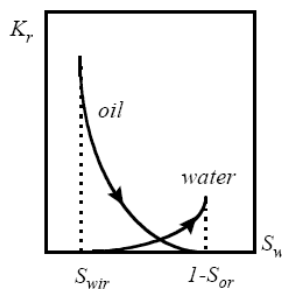
نفوذ پذیری نسبی (Relative Permeability)

وقتی بیش از یک سیال در محیط تخلخل حرکت کنند، با پدیده نفوذپذیری نسبی مواجه خواهیم شد. نفوذپذیری نسبی، به صورت نفوذپذیری موثر یک سیال در یک درجه‌ای از اشباع به نفوذپذیری سیال در اشباع صددرصد تعریف می‌شود:

$$k_{rl} = \frac{k_l}{k}$$

بطوریکه k_{rl} ، نفوذپذیری نسبی فاز l ، و k_l نفوذپذیری مطلق می‌باشد. باید توجه داشت که محدوده تغییرات حداکثر یک و حداقل صفر می‌باشد.

معمولاً برای نفوذپذیری نسبی، مشابه فشار موئینگی، نتایج آزمایشگاهی بر حسب درجه اشباع فاز ارائه می‌شود، به طور مثال برای سیستم آب-نفت، مقادیر نفوذپذیری نسبی نفت k_{ro} و نفوذپذیری نسبی آب k_{rw} ، بصورت تابعی از درجه اشباع آب S_w بیان می‌شود (شکل پائین).





مشابه شکل بالا برای سیستم‌های گاز-نفت نیز برقرار است. در هر دو حالت، پدیده هیستری (Hysteresis) برقرار است، یعنی بسته به اینکه آزمایش براساس پرشدن (Imbibition) است یا خالی شدن (Drainage)، مقادیر مربوطه فرق می‌کنند. نقاط حدی و انتهایی منحنی نفوذپذیری نسبی، معروف به مقادیر بازگشت‌ناپذیر یا تقلیل‌ناپذیر هستند، یعنی وقتی نفوذپذیری نسبی k_{ri} به سمت صفر میل می‌کند، مقادیر اشباع‌شدگی، مقادیر تقلیل‌ناپذیر هستند، برای شکل بالا، مقادیر تقلیل‌ناپذیر S_{wi} و S_{or} ، مربوط به فاز آب و نفت می‌باشند.

اگر در سیستم، سه فاز حضور داشته باشند، آنگاه نیاز به تعریف نفوذپذیری نسبی در حالت سه فازی داریم. تعیین تجربی (آزمایشگاهی) نفوذپذیری سه فازی سخت و مشکل می‌باشد (گرچه در حالت یکنواخت، این کار انجام شده است)، لذا در شبیه‌سازی مخازن، معمولاً نفوذپذیری را دو به دو در نظر می‌گیرند. روشهای مختلفی که سیستم سه فازی را بصورت دو فازی تقریب می‌زنند تا نفوذپذیری نسبی را تعیین کنند، عمدتاً شامل یک سری فرضیات و تقریب‌های مهندسی می‌باشد، بطور مثال:

- نفوذپذیری نسبی فاز آب، فقط تابع اشباع آن می‌باشد، علی‌رغم اینکه فاز گاز و نفت نیز حضور دارند.

- نفوذپذیری نسبی فاز گاز، فقط تابع درجه اشباع آن می‌باشد، علی‌رغم اینکه فاز آب و نفت نیز حضور دارند.

- نفوذپذیری نسبی فاز نفت، تابع درجه اشباع فاز آب و فاز گاز می‌باشد.

بدین ترتیب k_{rw} (نفوذپذیری نسبی آب) و k_{rg} (نفوذپذیری نسبی گاز) از اطلاعات نفوذپذیری نسبی دو فازی آب-

نفت و گاز-نفت به دست آمده و نفوذپذیری نسبی فاز نفت از یک رابطه تجربی صریح مثل رابطه Stone به دست می‌آید:

$$k_{ro} = k_{row}^* \left(\left(\frac{k_{rog}}{k_{row}} + k_{rw} \right) \left(\frac{k_{rog}}{k_{row}} + k_{rg} \right) - \left(k_{rw} + k_{rg} \right) \right)$$

بطوریکه k_{row} و k_{rog} مقادیر نفوذپذیری نسبی آب-نفت بوده و $k_{row}^* = k_{row} (S_w)$.

خواص سیال مخازن

مشخصه‌سازی سیال مخازن نفت سیاه

اگر سیال نفت حاضر در مخزن را به صورت یک سیستم دو جزئی در نظر بگیریم، مخزن مزبور را مخزن نفت سیاه (Black-oil reservoir) می‌نامند. دو جزء مورد نظر، یکی نفت سیاه مرده یا خام بوده و دیگری گاز حل شده در نفت (در فشار مخزن) می‌باشد. اگر R_s حجم گاز محلول در حجم واحد نفت در فشار مخزن باشد، آنگاه چگالی نفت طبق رابطه زیر داده می‌شود:

$$\rho_o = \frac{\rho_{oS} + \rho_{gS} R_{so}}{B_o}$$

بطوریکه ρ_{oS} و ρ_{gS} چگالی‌های مینا (یعنی اندازه‌گیری شده در شرایط سطح زمین یا استاندارد) گاز و نفت

می‌باشند. به طریق مشابه نیز می‌توان برای چگالی‌های آب و گاز نوشت:

$$\rho_w = \rho_{wS} / B_w$$

$$\rho_g = \rho_{gS} / B_g$$



مقادیر بدون بعد B_o ، B_w و B_g ، بیان‌کننده میزان حجم اولیه واحد حجم نفت، آب و گاز در شرایط مخزن اشغال است، به عبارتی یک واحد حجم مثلاً نفت در شرایط استاندارد، چقدر در فشار مخزن متراکم می‌شود (حجم آن با چه فاکتوری کوچک یا بزرگ می‌شود). این مقادیر موسوم به ضرایب حجمی سازند (Formation Volume Factor) می‌باشند. معمولاً B_o (فاکتور مربوط به نفت) و B_w (فاکتور مربوط به آب) بزرگتر از یک می‌باشند، چون با انحلال گاز در آنها، فاز مایع منبسط می‌شود، ولی B_g کوچکتر از یک می‌باشد، چون با افزایش فشار در مخزن، گازها حجم کمتری را اشغال می‌کنند. ضریب حجمی سازند را می‌توان توسط رابطه گازها (معادله حالت) رابطه‌مند نمود:

$$B_g = \frac{ZPT_s}{PT}$$

بطوریکه ایندکس S ، معرف شرایط استاندارد یا سطح (اندازه‌گیری روی سطح زمین) بوده و Z همان فاکتور انحراف از گاز کامل (Compressibility) می‌باشد.

تابعیت حجم با دما و فشار، نزد گازها، معروف به معادله حالت می‌باشد، در حالیکه برای مایعات، این خاصیت ترموفیزیکی، معمولاً با دخالت دادن فاکتور تراکم‌پذیری، رابطه‌مند می‌شود لذا ضرایب حجمی سازند را می‌توان بر حسب

$$c_l \triangleq -\frac{1}{B_l} \frac{dB_l}{dP}$$

بطوریکه c_l ، تعریف ضریب تراکم‌پذیری فاز l می‌باشد. باید دقت نمود که برای فشارهای کوچکتر از فشار اشباع (اشباع انحلال گاز در مایع) در سیستم نفتی باید عبارت $(\rho_g B_g / \rho_o B_o)(dR_s/dP)$ را اضافه کرد. در فشارهای بالاتر (یعنی $P > P_b$) چون R_s ثابت است و با فشار تغییر نمی‌کند، به طور خودکار (چون مشتق می‌گیریم) صفر می‌شود $\{(dR_s/dP) = 0\}$.

دقت شود، وقتی $P < P_b$ باشد می‌گوئیم که نفت اشباع شده است. ولی وقتی $P \geq P_b$ باشد، S_g صفر می‌شود و نفت در حالت زیر اشباع (Under saturated) قرار دارد. برای حالت اشباع‌شدگی، اولین جمله تشکیل دهنده مقدار c_o (عبارت سمت راست رابطه بالا)، غالب است و در نتیجه c_o منفی می‌شود، این بدان معنی است که فاز نفت منبسط شده است تا زمانی که به فشار P_b برسیم. در بالاتر از فشار اشباع، c_o مثبت می‌شود و به منزله این است که با افزایش فشار، فاز مایع، فشرده‌تر و کم حجم‌تر می‌شود.

مشخصه‌سازی سیال ترکیبی (Compositional Fluid)

در بسیاری مواقع (مخازن)، فرض دو جزئی بودن سیال مخزن کافی نیست، بطور مثال، اگر فاز نفت دارای اجزای فرار باشد، آنگاه با کاهش فشار، با فاز بخار (فاز قابل میعان در مقابل فاز گاز که یک سیستم Supercritical است) مواجه می‌شویم و لازم است ترکیب درصد اجزای منتقل شده به فاز بخار را نیز در نظر بگیریم. این اجزای هیدروکربوری معمولاً شامل متان، اتان و پروپان می‌باشند و عبارتی برای مخازن میعانی (Condensate Reservoir)، فرض Black-oil صحیح نیست. هیدروکربورهایی که از فاز مایع به فاز بخار (و بالعکس) می‌روند، موسوم به سیالات ترکیبی (Compositional fluids) هستند. در عمل نیز همین طور است، حتی برای مخازن نفت سیاه، ولی برای مواجهه با مسائل آنها، نیازمند تحلیل یا تعریف یک سیستم چند جزئی هستیم که کار شبه‌سازی را بسیار سخت و مشکل می‌کنند.



به هر حال، فرض کنید، یک مول از سیال ترکیبی در شرایط مخزن، به V مول بخار و L مول مایع فلاش (Flash) می‌شود. بیلان جرم کلی منجر به رابطه $L+V=1$ شده و ترکیب درصد اجزاء (کسر مولی در مایع را با x_i و کسر ملی جزء i در بخار را با y_i نمایش می‌دهیم) توسط ثابت تعادل (Equilibrium K-Value) داده می‌شود:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i}$$

مقادیر K_i توسط نمودارهای تجربی سیستم‌های مختلف نفتی در فشارها و دماهای مختلف ارائه شده است، همچنین توسط معادلات حالت، می‌توان فوگاسیته بخار و مایع و به تبع آنها، مقادیر K_i را به دست آورد. معادلات بیلان جرم جزئی نیز می‌تواند در حل معادلات شبیه‌ساز کمک کند:

$$\sum x_i = \sum y_i$$
$$Lx_i + Vy_i = z_i$$

بطوریکه z_i ، کسر مولی جمعی جزء i می‌باشد.

از این معادلات می‌توان برای محاسبات جوش و شبنم نیز استفاده کرد، به طور مثال در دمای مشخص، وقتی (فشار جوش) $P = P_b$ باشد، آنگاه $L=1$ و $V=0$ است، لذا:

$$\sum z_i x_i = 1$$

منجر به محاسبات جوش و برای حالت $L=0$ و $V=1$ ، (فشار شبنم $P = P_d$)

$$\sum z_i / y_i = 1$$

منجر به محاسبات نقطه شبنم (Dew point) می‌شود.