

عبور ذره از یک محیط متخلخل

پژوهش‌نفت

سال هفدهم
شماره ۲-۵۶
صفحه ۴۷-۴۰، ۱۳۸۶روح‌اله فرج‌زاده، قربانعلی صبحی*، وحید ژاله کریمی و ایوب صادق‌آزاد
پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز مطالعات اکتشاف و تولید
sobhiga@ripi.ir

نفت و هیدرولوژی، مسأله‌ای بسیار مهم می‌باشد؛ مانند مسدود شدن چاه‌های آب که همواره اتفاق می‌افتد و باعث به وجود آمدن مشکلات عدیده در زمینه آبرسانی و آبیاری می‌شود. در مهندسی نفت نیز رسوب ذرات موجود در گل‌های حفاری و یا سیال تزریقی به چاه، موجب بسته شدن مجراهای عبوری سیال به چاه شده و تولید چاه را کاهش می‌دهند. به همین دلیل وجود مدل‌هایی که بتواند مقدار و شدت تخریب را با توجه به خواص سوسپانسیون و محیط متخلخل پیش‌بینی کند بسیار ضروری است. بر این اساس پژوهش‌های متعددی بر روی مکانیسم‌های رسوب ذرات در محیط متخلخل انجام گرفته است. با وجود این به دلیل پیچیدگی موضوع، این مسأله به طور کامل آشکار نشده است. ظاهراً زمانی که ذرات ریز سوسپانسیون توسط سیال در مجاورت دانه سنگ‌ها قرار می‌گیرد دو حالت پیش می‌آید [۱]: یا ذره به دانه سنگ یا ذرات رسوب یافته قبلی چسبیده و به اصطلاح رسوب می‌کند و یا توسط سیال از مکان‌های رسوب دور شده و به مسیر خود ادامه می‌دهد. رسوب ذرات در داخل محیط متخلخل، باعث تغییر خواص سیال و محیط متخلخل می‌شود. مثلاً با افزایش حجم ذرات رسوبی در داخل سوراخ‌های محیط متخلخل، تخلخل مؤثر در کل سیستم، هر چند بسیار جزئی، کاهش پیدا می‌کند.

چکیده

در ازدیاد برداشت از مخازن به‌وسیله افزایش فشار، با رعایت قوانین زیست محیطی گاهی اوقات آب تولید شده از مخزن دوباره به مخزن بازگردانده می‌شود. وجود ذرات جامد و همچنین قطرات ریز نفت موجود در آب تزریقی، سبب کاهش شدید ضریب نفوذ پذیری مخزن و در نتیجه کاهش تولید می‌شود. در این تحقیق عبور سیالات حاوی ذرات جامد (سوسپانسیون‌ها) در محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته و همچنین مکانیسم‌های رسوب ذرات با توجه به سرعت سیال و اندازه ذرات توضیح داده شده است. در ادامه، مهم‌ترین مدل ریاضی مورد استفاده در نرم‌افزارهای مختلف معرفی و تأثیر پارامترهای مختلف در شدت و اندازه تخریب سازند بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، سوسپانسیون، ذرات جامد، تخریب سازند

مقدمه

حرکت سیال حاوی ذرات جامد از داخل یک محیط متخلخل، تقریباً در بیشتر رشته‌های مهندسی به خصوص

تعاریف

محیط متخلخل

محیط متخلخل (سنگ، خاک، بسترهای کاتالیستی و ...) شبکه تخلخل‌هایی است که برخی از آنها به هم متصل بوده و باعث عبور جریان سیال می‌شوند. شبکه تخلخل‌های متصل به هم گاهی اوقات تخلخل مؤثر نیز نامیده می‌شود [۱].

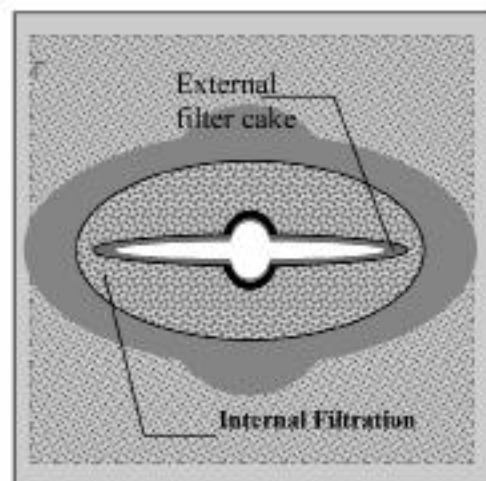
سوسپانسیون

سیال حاوی ذره در این مقاله سوسپانسیون نامیده می‌شود، زیرا ذره در سیال معلق بوده و در صورت سکون پس از گذشت مدت زمان مشخصی ته نشین خواهد شد.

فیلتراسیون

زمانی که سیال حاوی ذرات جامد از یک محیط متخلخل عبور می‌کند، فاز مایع و فاز جامد آن از هم جدا می‌شوند. این دقیقاً همان چیزی است که در فرایند فیلتراسیون اتفاق می‌افتد. به همین دلیل فرایند انتقال سیال حاوی ذرات جامد از یک محیط متخلخل نیز فیلتراسیون نامیده می‌شود [۲].

فاز مایع و جامد به دو طریق از هم جدا می‌شوند: تجمع ذرات در جلوی یک سطح خارجی یا رسوب ذرات در داخل منافذ محیط متخلخل (شکل ۱). در حالت اول، تجمع ذرات، تشکیل یک لایه کیک با ضریب نفوذپذیری بسیار پایین را می‌دهند. این لایه کیک، مانع ورود ذرات به داخل محیط متخلخل و نیز خروج سیال از داخل محیط متخلخل



شکل ۱- تجمع ذرات در اطراف یک چاه آب

می‌شود. در حالت دوم ذره با سیال به داخل محیط متخلخل نفوذ کرده و در منافذ^۲ و گلوگاه‌های^۳ آن رسوب می‌کند. رسوب ذرات باعث محدود شدن مجراهای نفوذی سیال شده و ضریب نفوذپذیری را کاهش می‌دهد [۳]. لذا کاهش در ضریب نفوذپذیری سازند (تشکیلات)، تخریب سازند^۴ تلقی می‌شود.

مکان‌های رسوب^۵

هر یک از دانه‌های سنگ محیط متخلخل^۶ می‌توانند تعدادی ذره را دور خود جمع کنند. به همین دلیل دانه‌های سنگ گاهی اوقات جمع‌کننده^۷ هم نامیده می‌شوند. مکان‌هایی که یک ذره هنگام عبور از یک محیط متخلخل می‌تواند در آنجا رسوب کند، مکان‌های رسوب نامیده شده‌اند [۳].

سطوح خارجی^۸: ذره بر روی سطح محیط متخلخل گیر کرده و بر روی آن رسوب می‌کند. در این حالت یک لایه کیک بر روی سطح خارجی محیط متخلخل تشکیل می‌شود [۴] (شکل ۲ حالت a).

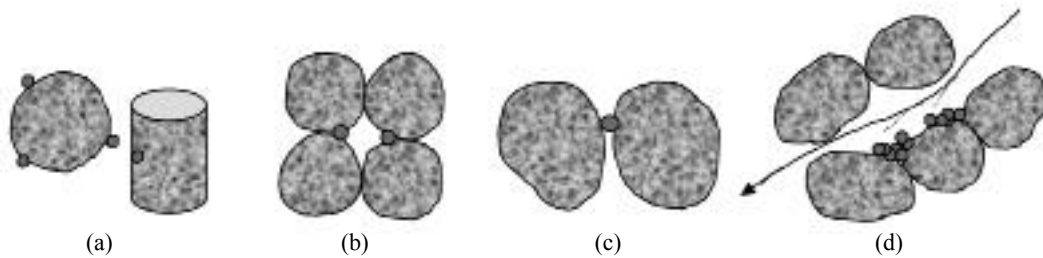
گوشه‌ها و شکاف‌های بین دانه سنگ‌ها^۹: ذره بین گوشه‌های محدب گیر افتاده و همان جا می‌ماند. (شکل ۲، حالت b). **مکان‌های تنگ^{۱۰}:** زمانی که اندازه ذره از فاصله بین دو دانه سنگ و یا گلوگاه بزرگتر است، ذره در گلوگاه گیر کرده و باعث بسته شدن آن می‌شود (شکل ۲، حالت c).

مکان‌های گود مانند^{۱۱}: ذره در طول مسیر حرکت سیال، مکان‌های حفره مانند امنی پیدا کرده و همان جا رسوب می‌کند. این مکان‌های امن، حفره و یا گودهایی هستند که توسط چند دانه سنگ به وجود آمده‌اند. در این مکان‌ها ذره از مسیر سیال دور افتاده و همان جا می‌ماند (شکل ۲، حالت d).

مکانیسم‌های رسوب یا فیلتراسیون^{۱۲}

برای آنکه ذره رسوب کند، باید در یکی از مکان‌های رسوب، بین ذره و دانه سنگ برخوردی صورت پذیرد.

- | | |
|---------------------|---------------------------|
| 1. Filtration | 7. Collector |
| 2. Pores | 8. Surface Sites |
| 3. Throats | 9. Crevice Sites |
| 4. Formation Damage | 10. Constriction Sites |
| 5. Retention Sites | 11. Cavern Sites |
| 6. Grains | 12. Filtration Mechanisms |



شکل ۲- مکان‌های مختلف رسوب: (a) سطوح خارجی (b) گوشه‌ها و شکاف‌های بین دانه سنگ‌ها (c) مکان‌های تنگ (d) مکان‌های گود مانند

رسوب یا گیرافتادگی بر اثر نیروی اینرسی^۴: زمانی که سرعت سیال زیاد و یا دانسیته ذره از دانسیته دانه سنگ بیشتر است نیروهای اینرسی ذره را از مسیر خود منحرف کرده و احتمال برخورد ذره با دانه سنگ افزایش می‌یابد. این مکانیسم زمانی مؤثر است که اینرسی سیال حاوی ذره، بیشتر از نیروی هیدرودینامیکی باشد. به همین دلیل مکانیسم گیرافتادگی بر اثر نیروی اینرسی بیشتر در فیلتراسیون هوا^۵ مطرح است تا فیلتراسیون آب^۶.

احتمال برخورد ذره با دانه سنگ بر اثر این مکانیسم (η_{im}) با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{im} = \frac{(\rho_p - \rho_f) d_p^2 v_p}{18 \mu d_m} \quad (3)$$

و ρ_f و ρ_p به ترتیب دانسیته‌های ذره و سیال، v_p سرعت ذره و μ ویسکوزیته سیال است.

ته‌نشینی بر اثر نیروی جاذبه^۷: زمانی که دانسیته سیال با دانسیته ذره متفاوت است، سرعت ذره با سرعت سیال متفاوت بوده و ذره از مسیر جریان منحرف و در اثر نیروی جاذبه^۸ ذره با دانه سنگ برخورد خواهد کرد.

احتمال برخورد ذره با دانه سنگ بر اثر نیروی جاذبه (η_s) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_s = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{18 \mu U} \quad (4)$$

و ρ_f و ρ_p به ترتیب دانسیته‌های ذره و سیال، d_p قطر ذره، U سرعت سیال، μ ویسکوزیته سیال و g شتاب جاذبه می‌باشند. در بیشتر مقالات، دو مکانیسم ته‌نشینی و گیرافتادگی بر اثر نیروی اینرسی یکی در نظر گرفته می‌شوند.

امکان برخورد بین ذره و دانه سنگ به سرعت سیال حاوی ذره، سرعت خود ذره، اندازه ذره، اندازه دانه سنگ، غلظت ذره جامد در سیال و همچنین ویسکوزیته و دانسیته سیال و دانسیته ذره بستگی دارد. بزرگی و تعدد این عوامل باعث چسبیدن و در برخی موارد جدا شدن ذره از دانه سنگ می‌شود. یک ذره بر اثر مکانیسم‌های مختلفی رسوب می‌کند که عبارتند از:

برخورد مستقیم^۱: زمانی که دانسیته ذره با دانسیته سیال برابر است، خط سیر^۲ ذره با خط سیر سیال یکسان خواهد بود. در این حالت زمانی که فاصله خط سیر با سطح دانه سنگ کمتر از $d_p/2$ (نصف قطر ذره) باشد، ذره با دانه سنگ برخورد می‌کند [۵].

حرکت سیال از منافذ محیط متخلخل، بالاخره ذرات دانه سنگ را در مجاورت همدیگر قرار خواهد داد چرا که اندازه ذره محدود می‌باشد.

مطابق تئوری اشتاین^۳، با فرض توزیع یکنواخت و سهمی برای سرعت سیال، احتمال برخورد مستقیم ذره با دانه سنگ، متناسب با مجذور نسبت شعاع ذره به دانه سنگ می‌باشد و احتمال آن را از فرمول زیر می‌توان محاسبه کرد [۵]:

$$\eta_I = \frac{3}{2} A_s \frac{d_p^2}{d_g^2} \quad (1)$$

در این عبارت η_I احتمال برخورد ذره با سنگ به دلیل برخورد مستقیم، d_p قطر ذره و d_g قطر دانه سنگ و A_s پارامتری است که تابع تخلخل محیط متخلخل بوده و با فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$A_s = \frac{2(1-\gamma^5)}{2-3\gamma+3\gamma^5-2\gamma^6} \quad (2)$$

$$\gamma = (1-\phi')^{\frac{1}{3}}$$

در این رابطه ϕ' تخلخل مؤثر می‌باشد.

- | | |
|------------------------|---------------------|
| 1. Direct Interceptive | 5. Air Filtration |
| 2. Stream Line | 6. Water Filtration |
| 3. Stein | 7. Sedimentation |
| 4. Inertial Impaction | 8. Gravity Force |

و باعث بسته شدن گلوگاه می‌شود. به این حالت پل زدن می‌گویند (شکل ۳، حالت‌های B و C). پدیده‌های گیر کردن و پل زدن، فرایندهایی کاملاً فیزیکی بوده و با هندسه ذره و محیط متخلخل مرتبط می‌باشند [۵].

نیروهای سطح: نیروی جاذبه و اندروالسی و نیروی دافعه دو لایه^۶ نیز در رسوب ذرات نقش اساسی دارند. زمانی که یک ذره باردار به یک دانه سنگ باردار نزدیک می‌شود، برآیند دو نیروی واندروالسی و دو لایه‌ای مشخص می‌کند که ذره به دانه سنگ خواهد چسبید یا نه. احتمال برخورد ذره به دانه سنگ بر اثر نیروهای سطح (η_E) با رابطه پیشنهادی راجاگوپالان محاسبه می‌شود [۶]:

$$\eta_E = A_s \left(\frac{4A}{9\pi\mu} \right)^{1/8} \left(\frac{d_p^{13/8}}{(\phi v_p)^{1/8} d_g^{15/8}} \right) \quad (6)$$

که در این عبارت ϕ تخلخل و A ثابت هاماکر^۷ و برابر J^{-20} می‌باشد.

بنابراین احتمال کل برخورد ذره بر اثر مکانیسم‌های فوق از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\eta = \eta_D + \eta_I + \eta_{im} + \eta_S + \eta_E \quad (7)$$

متناسب با اندازه و شکل ذره، یکی از مکانیسم‌های فوق در رسوب آن نقش اساسی خواهد داشت. به عنوان مثال

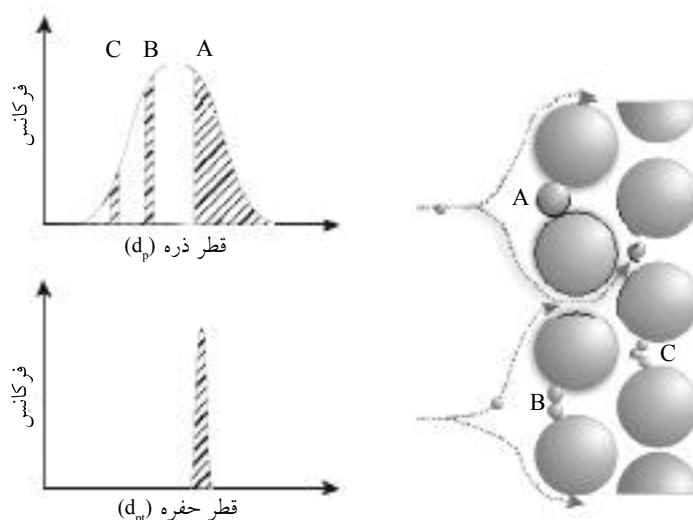
در برخی از این مقالات v_p را سرعت ته‌نشینی ذره^۱ می‌نامند [۶].

نفوذ مولکولی: زمانی که اندازه ذرات پراکنده در سیال بسیار کوچک است ($dp < 1 \mu m$), ذرات تحت تأثیر نیروهای براونی، حرکات اتفاقی خواهند داشت. حرکات اتفاقی احتمال برخورد ذرات با دانه سنگ‌ها را بالا می‌برند. احتمال برخورد ذره و دانه سنگ بر اثر نفوذ (η_D), با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$\eta_D = 0.9 \left(\frac{kT}{\mu d_p d_g U} \right)^{2/3} \quad (5)$$

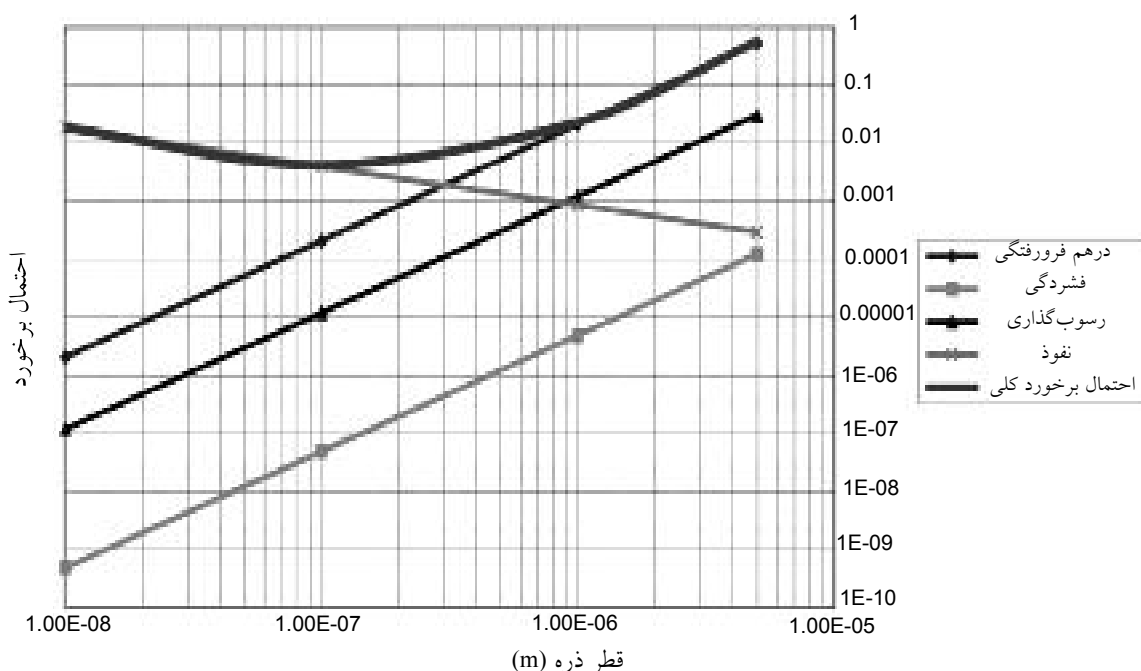
در این عبارت k ثابت بولتزمن و T دمای مطلق است. **گیر افتادن و پل زدن:** زمانی که ذره از گلوگاهی که اندازه آن کوچکتر از اندازه ذره است عبور می‌کند، در آن جا گیر کرده و سبب بسته شدن آن منفذ می‌شود. بنابراین مهمترین پارامتری که مؤثر بودن این مکانیسم فیزیکی را مشخص می‌کند، نسبت شعاع ذره به شعاع گلوگاه^۴ می‌باشد. کوچک بودن این نسبت به معنای گیر افتادن ذره می‌باشد (شکل ۳، حالت A).

در حالت دیگر، یک ذره به ذره یا ذرات دیگری که قبلاً توسط مکانیسم‌های دیگری رسوب کرده‌اند، می‌چسبند



شکل ۳- رابطه بین پل زدن و توزیع اندازه ذرات [۳]

1. Stokes Settling Velocity
2. Molecular Diffusion
3. Straining and Bridging
4. Throat
5. Surface Force
6. Double Layer
7. Hamaker



شکل ۴- تأثیر اندازه ذرات بر روی احتمال کل برخورد

فیزیکی و نیروهای سطح را در نظر نگرفته است. بنابراین شکل ۴ وابسته به مدلی است که برای محاسبه احتمالات برخورد ذره با دانه سنگ استفاده می‌شود.

مدل ریاضی مساله

فرایند بسته شدن مجراهای عبور سیال، پدیده‌ای است که به هنگام عبور سیال حاوی ذرات جامد از محیط متخلخل، بسیار اتفاق می‌افتد. برای درک بیشتر و بهتر مسأله و پیش‌بینی مقدار تخریب سازند، لازم است که مسأله به صورت یک مدل ریاضی تهیه شود. بسیاری از مدل‌های موجود از یک مدل اولیه و کلاسیک که توسط ایواساکی در سال ۱۹۳۷ پیشنهاد شد، ایده گرفته‌اند [۹]. این مدل کلاسیک که به نام تئوری فیلتراسیون خوانده می‌شود اگر چه با وجود فرضیات ساده کننده بسیار، نمی‌تواند مدل کاملی باشد ولی همچنان در نرم‌افزارهایی که برای تخریب سازند نوشته می‌شوند، کاربرد فراوان دارد.

برای مدل کردن مساله، با توجه به شکل ۵، قانون بقای جرم در یک بعد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(S + nC) + \frac{\partial(uC)}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0 \quad (8)$$

در این معادله U سرعت سوسپانسیون یا سیال حاوی ذرات جامد، C غلظت ذرات موجود در سوسپانسیون، S غلظت

برای ذرات بسیار کوچک، نفوذ مولکولی و نیروهای سطح، مکانیسم‌های اصلی رسوب خواهند بود درحالی‌که برای ذرات بزرگتر، این مکانیسم‌ها از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشند [۷]. شکل ۴ تأثیر اندازه ذرات و محیط بر روی احتمال کل برخورد را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن این شکل از اطلاعات موجود در جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱- اطلاعات استفاده شده در شکل ۴

۰/۲۳	پروسیته
۱۰۰	قطر دانه سنگ (μm)
۵۴۰۰	دانسیته ذره (kg/m^3)
۱۰۰۰	دانسیته سیال (kg/m^3)
۰/۰۰۱	ویسکوزیته سیال (Pa.s)
۰/۰۰۲	سرعت سیال (m/s)

مطابق این شکل برای ذرات با قطر بین ۱ و ۱۰ میکرون، برخورد مستقیم بین ذرات و دانه سنگ‌ها، مکانیسم اصلی رسوب ذرات است. همچنین از این شکل می‌توان دریافت که برای سرعت‌های کوچک، می‌توان از تأثیر نیروی اینرسی صرف نظر کرد. تأثیر نفوذ هم برای ذره و محیط مورد استفاده نیز بسیار کوچک می‌باشد. بایستی توجه کرد که مدل استفاده شده برای رسم شکل ۴، مکانیسم‌های

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \lambda |u| C \quad (13)$$

ضریب تناسب λ به نام «ضریب فیلتراسیون» و رابطه (۱۲) «معادله سینتیکی فیلتراسیون» نامیده می‌شوند. مطالعات بسیاری بر روی این معادله و همچنین ضریب فیلتراسیون صورت گرفته است. ضریب فیلتراسیون به عوامل متعددی از جمله سرعت سیال، اندازه ذره، محیط متخلخل، مقدار ذرات رسوب یافته و ... بستگی دارد.

$$\lambda = \lambda(\sigma, c, u, d_p, d_g, \dots) \quad (14)$$

در اکثر مقالات، ضریب فیلتراسیون تابعی از مقدار ذرات رسوب یافته قبلی در نظر گرفته شده و تأثیر پارامترهای دیگر نادیده انگاشته می‌شود. ولی بایستی توجه داشت که در سرعت‌های بالا، به خصوص اطراف چاه، سرعت عامل بسیار مهمی است و از تأثیرات آن نمی‌توان صرف نظر کرد [۸].

$$\lambda = \lambda_0 F(S) \quad (15)$$

برای حل معادلات از شرایط مرزی و اولیه زیر استفاده می‌شود:

در حالت خاص زمانی که λ ثابت است ($F(S)=1$)، جواب‌های زیر برای C و S به دست می‌آیند:

$$C = C_{in} e^{-\lambda x} \quad (16)$$

$$S = u \lambda C_{in} e^{-\lambda x} t \quad (17)$$

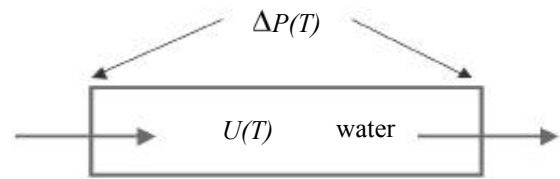
مدل‌های کاهش ضریب نفوذپذیری

رسوب ذرات در محیط متخلخل، باعث کاهش نفوذپذیری سیستم می‌شود. البته کاهش نفوذپذیری ممکن است دلایل دیگری هم داشته باشد ولی در تئوری فیلتراسیون فرض بر این است که دلیل این امر فقط و فقط پر شدن سوراخ‌ها و بسته شدن گلوگاه‌ها توسط ذرات می‌باشد. قانون داریسی رابطه بین سرعت سطحی و فشار را بیان می‌کند [۹]:

$$u = -\frac{k_0 k(S)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (18)$$

k_0 ضریب نفوذپذیری مطلق و $k(S)$ ضریب نفوذپذیری نسبی می‌باشد. زمانی که ضریب نفوذپذیری به عنوان تابعی از مقدار ذرات رسوب یافته بیان می‌شود به آن «ضریب یا عامل تخریب سازند» هم می‌گویند [۹].

مطابق رابطه کارمن-کوزنی، ضریب نفوذپذیری، پارامتری وابسته به خصوصیات محیط است. با وجود این رسوب



شکل ۵- شماتیک یک بعدی ورود و خروج سیال حاوی ذره جامد از محیط متخلخل

حجمی ذرات رسوب یافته (حجم ذرات رسوب یافته به حجم واحد محیط)، n تخلخل محیط و D ضریب نفوذپذیری ذره می‌باشد. تئوری معروف فیلتراسیون با اعمال فرضیات ساده کننده زیر از رابطه (۸) مشتق می‌شود:

(۱) نفوذ ذرات قابل چشم پوشی است. ($D \approx 0$)

$$\frac{\partial}{\partial t}(S + nC) + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

(۲) حجم ذرات رسوب یافته به نسبت حجم خالی محیط بسیار کوچک می‌باشد. بنابراین تخلخل محیط ثابت می‌باشد.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

(۳) تعداد ذرات متحرک در مقایسه با ذرات ثابت (رسوب یافته) قابل صرف نظر کردن هستند. بنابراین تغییرات غلظت ذرات در سوسپانسیون در اثر رسوب قابل چشم پوشی می‌باشد (فرض اول هرتزیگ) [۷].

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

(۴) سرعت سیال ثابت می‌باشد.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

رابطه (۱۲)، شکل یک بعدی تئوری ساده فیلتراسیون می‌باشد.

محدودیت‌های تئوری فیلتراسیون

(۱) این تئوری فقط برای رسوبات کم و در نتیجه مراحل اولیه رسوب ذرات معتبر است.

(۲) تئوری فیلتراسیون رفتار دینامیکی محیط متخلخل (تغییرات تخلخل و سرعت و ...) را در نظر نمی‌گیرد.

معادله سینتیکی فیلتراسیون

سرعت رسوب ذرات در داخل محیط متخلخل با سرعت سیال در محیط متخلخل و غلظت ذره در سیال متناسب است:

نوشته می‌شود:

$$k_s = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{1 + \beta_1 S + \beta_2 S^2 + \dots} \quad (21)$$

با انجام آزمایش‌های مختلف و تطبیق آنها با مدل‌های توضیح داده شده، می‌توان برای هر نوع سنگ، ضریب فیلتراسیون خاص آن سنگ که با گذشت زمان تغییر پیدا می‌کند را استخراج کرد. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان پروفایل رسوب را برای زمان‌های مختلف به دست آورده و شدت تخریب سازند را پیش‌بینی کرد (شکل ۶). به طوری که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اکثر ذرات در نزدیکی چاه رسوب کرده و باعث قطع جریان سیال تولیدی به درون چاه می‌شوند، بنابراین لازم است که برای افزایش تولید این رسوب‌ها زدوده شوند [۱۰].

ذرات در داخل سوراخ‌های محیط متخلخل، نسبت سطح به حجم محیط را افزایش داده و باعث کاهش تخلخل محیط می‌شود [۱۰].

مدل‌های مختلفی برای کاهش نفوذپذیری پیشنهاد شده‌اند که اکثر آنها به فرم زیر هستند:

$$R_s = \frac{1}{(1 - a \cdot S)^n} \quad (19)$$

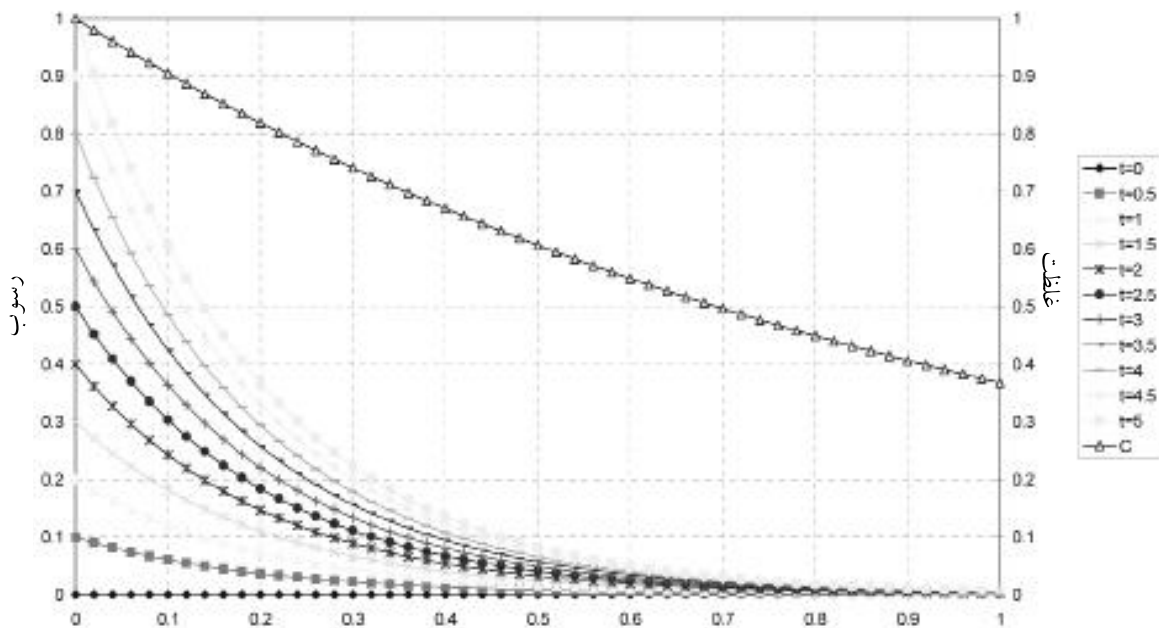
در این معادله R_s مقاومت محیط در برابر رسوب ذرات و n و a پارامترهای مثبت هستند.

با استفاده از سری‌های توانی، معادله (۱۹) را به صورت

زیر هم می‌توان نوشت:

$$R_s = \left(1 + naS + \frac{n(n+1)}{2} a^2 S^2 + \dots \right) \quad (20)$$

با معرفی β_n مدل کاهش ضریب نفوذپذیری به صورت زیر



میزان اندازه‌گیری شده

شکل ۶- پروفایل رسوب و غلظت در حالتی که ضریب فیلتراسیون ثابت است

منابع

- [1] Al-Abduwani F.A.H, de Zwart B., Farajzdeh R., van den Broek W.M.G.T & Currie P.K, "*Filtration of utilising static filtration experiments to test existing filtration theories for conformance*", 2nd Produced Water Workshop, Aberdeen, 2004.
- [2] Al-Abduwani F.A.H., R. Farajzadeh, P. Bedrikovetsky, W.M.G.T. van denBroek & P.K. Currie, "*Produced Water Re-Injection (PWRI): An experimental study of internal filtration and external filter cake build-up*", Poster in Gordon Research Conference, 10-16 July, Oxford, UK, 2004.
- [3] de Zwart A.H. & Schotting R.J., *Modelling of well clogging*, Delft university of technology, March 2004.
- [4] Eckstein E.C., Bailey P.G. & Shapiro A.H., "*Self-diffusion of particles in shear flow of a suspension*", J. Fluid Mech., Vol. 79, pp. 191-208, 1977.
- [5] Farajzadeh R., "*Produced Water Re-Injection (PWRI), An experimental investigation into internal filtration and external cake Build-up*", MS Thesis, Delft University of Technology, 2004.
- [6] Hamaker H.C. "*The London-van der waals attraction between spherical particles*", physica, Vol. 4, pp. 1058-1072, 1937.
- [7] Herzig J.P., Leclerc D.M. & Le Goff P. "*Flow of suspensions through application to deep filtration*", Industrial and engineering chemistry, Vol. 65 (5), pp. 8-35, 1970.
- [8] Ives K.J., "*Deep filters*", Filtr sep., pp. 125-135, March, April, 1967.
- [9] Iwasaki T., "*Some notes on sand filtration*", J. Am. Water Works Ass., Vol. 29, pp. 1591-1602, 1937.
- [10] Marchesin D., Hime G., Bedrikovetsky P., S.Souza A.L., Alvarez A. & Siqueira A.G., "*Analytical formulas in formation damage under linear and radial geometry, derivation and numerical evaluation*", ver 1.5.