

مدل سازی و بررسی تشکیل کیک خارجی در دیواره های چاه های تزریق آب در مخازن نفت

عطیه عدلی*⁺، فریرز رشیدی

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

روح الله فرج زاده

هلند، دلفت، دانشگاه صنعتی دلفت

چکیده: تزریق دوباره آب تولیدی از مخازن نسبت به بقیه روش های دفع آب تولیدی مطلوب تر است. این روش هم از دیدگاه محیط زیستی و هم اقتصادی بهتر از سایر روش هاست و همچنین یکی از روش های حفظ فشار مخازن است. وجود ذره های کلونیدی در آب تولیدی باعث کاهش نفوذپذیری مخزن می شود که به طور معمول تخریب سازند را در پی دارد. فرایند تخریب سازند با صاف کردن با جریان موازی سطح سیال (Cross flow filtration) مشابه است. در این پژوهش، به مدل سازی تشکیل کیک خارجی در فرایند صاف کردن با جریان موازی سطح در چاه نفت برای شرایط پایدار پرداخته می شود و پروفایل های ضخامت کیک، سرعت نفوذ، سرعت سیال در چاه و فشار در چاه نسبت به ارتفاع چاه به دست آمده و در نهایت هم آنالیز حساسیت ضخامت کیک به پارامترهای متفاوت مدل انجام می شود. مزیت این مدل نسبت به مدل های قبلی این است که پیروی مکانی کمیت های ذکر شده در نظر گرفته می شود برخلاف مدل های قبل که پروفایل های کمیت های مذکور را تنها تابع زمان در نظر می گرفتند.

واژه های کلیدی: کیک خارجی، آب تولیدی، محیط متخلخل، صاف کردن.

KEY WORDS: External cake, Produced water, Porous media, Filtration.

مقدمه

ویژگی های سیال تولیدی و میزان ناخالصی بسیار بالا، این جریان یکی از بزرگ ترین جریان های اتلافی در صنعت نفت است که ورود آن به محیط زیست به وسیله قانون ها محدود می شود. همچنین هزینه های خالص سازی این آب بسیار بالاست و بهترین روش این است که آب تولیدی به نوعی دفع شود. یکی از روش های دفع آب تولیدی تزریق دوباره به مخازن است که افزون بر این که

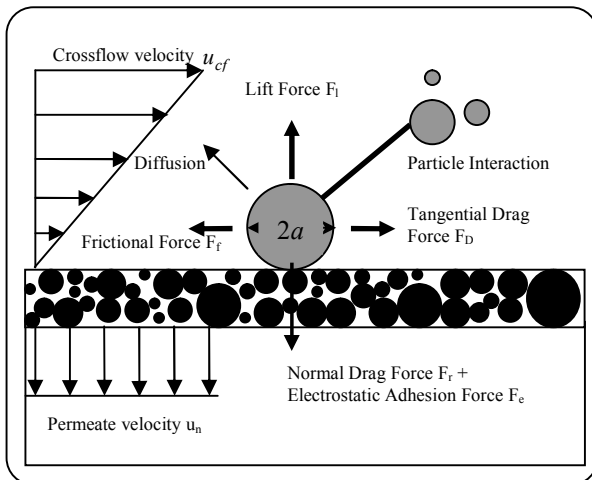
مخازن نفت یک لایه آب طبیعی دارند، همچنین برای دستیابی به ماکسیمم تولید نفت مقداری آب اضافی نیز به مخازن تزریق می شود بنابراین، مایعی که از مخازن تولید می شود نفت به همراه آب است. به طور متوسط در بیشتر مناطق جهان ۷۵ درصد از کل حجم سیال تولیدی مخزن را آب تشکیل می دهد که این درصد در برخی مناطق به حدود ۹۸ درصد نیز می رسد [۱]. با توجه به

*E-mail: atieh.adli@gmail.com

*عده دار مکاتبات

جدول ۱- شرایط مورد استفاده در مدل‌سازی [۸].

۱۰ μm	نفوذپذیری کیک (k_c)
۱٫۵ D	نفوذپذیری محیط متخلخل (k)
۱۰ cm	ضخامت محیط متخلخل (l)
۵ bar	فشار در انتهای کانال (P_{BP})
۰٫۴	تخلخل کیک (ϕ_c)
$8,32 \text{ E}-3$	گاما ($\gamma=f/w$)
۱ m	طول کانال (L)
۵٫۶ mm	شعاع کانال (R)
$2,78 \text{ E}-6 \text{ m}^3/\text{sec}$	دبی تزریق (Q_0)



شکل ۱- نیروهای وارد بر ذره در سطح کیک [۹].

همه ذره‌های هماتیت دارای شعاع ثابت $2 \mu\text{m}$ هستند شرایط دیگر در جدول ۱ آمده است.

مرحله ۲

در این مرحله ابتدا باید نیروهای وارد بر یک ذره در سطح کیک خارجی شناسایی و آنالیز میزان بزرگی آنها با توجه به شرایط مواد معلق صورت بگیرد.

نیروهای وارد بر ذره در این شرایط عبارت‌اند از:

- ۱- نیروی دراگ (نرمال و مماس) ۲- بالا برنده ۳- بویانسی
- ۴- نفوذ ۵- بین ذره ای (الکتروستاتیک و وان در والس)
- ۶- اصطکاک که در شکل ۱ نشان داده شده اند.

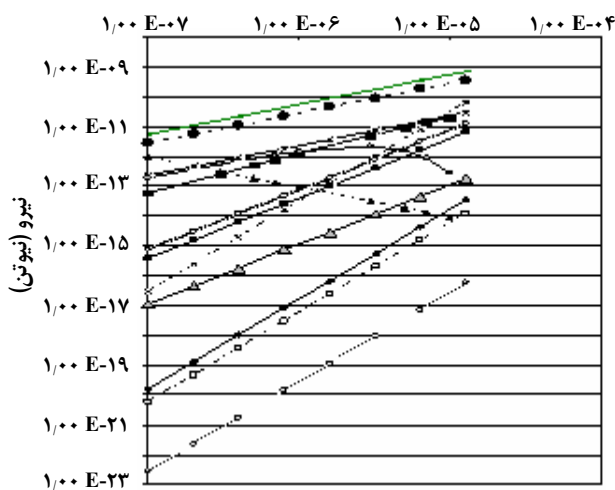
مشکلی از نظر قانون‌های محیط زیستی ندارد چون به افزایش فشار مخزن کمک می‌کند فواید اقتصادی را نیز به همراه دارد. اما مانند هر روش دیگری این روش نیز مشکلاتی دارد، به علت وجود ذره‌های جامد و قطره‌های نفت در آب تولیدی تزریق آن به سازندهای زیرزمینی باعث تخریب سازند می‌شود که این تخریب به دو صورت تشکیل رسوب داخل محیط متخلخل و همچنین روی محیط متخلخل اتفاق می‌افتد. در استفاده از گل حفاری نیز چنین مشکلی وجود دارد. رسوب ذره‌ها نشان دهنده‌ی این است که هنگام عبور آب تولیدی از سازند فاز مایع و جامد آن از هم جدا می‌شوند و این همان اتفاقی است که در فرایند صاف کردن رخ می‌دهد حرکت آب در چاه هم موازی سطح محیط متخلخل است، پس می‌توان این فرایند را به نوعی صاف کردن با جریان موازی سطح دانست.

تاکنون روی پدیده تشکیل رسوب روی محیط متخلخل یا همان کیک خارجی در مهندسی شیمی و مهندسی نفت بررسی‌های زیادی انجام شده که از آن جمله می‌توان به مراجع [۵-۲] در زمینه مهندسی نفت و مراجع [۶ و ۷] در زمینه سیستم‌های کلوئیدی و غشاه‌ها اشاره کرد. در زمینه مدل‌سازی تشکیل کیک خارجی کارهای قبلی بر این اساس بوده است که به علت کوچکی صافی‌ها از پیروی مکانی ضخامت کیک تشکیل شده صرف‌نظر شده و تنها پیروی زمانی مدنظر قرار گرفته است. اما به دلیل این که در مورد این فرایند صافی دیواره چاه است که طول بسیار بزرگی دارد از پیروی مکانی نمی‌توان صرف‌نظر کرد همچنین بیشتر مدل‌ها تاکنون نیروهای موثر در رسوب یا عدم رسوب ذره را نیروهای بالابرنده و نفوذ در نظر گرفته‌اند، حال آن که در سال ۲۰۰۴ میلادی فرج زاده [۸] نشان داد که در این فرایند نیروهای موثر دراگ و اصطکاک هستند. در مرجع [۸] مدل‌سازی تشکیل کیک خارجی برای یک شکاف در چاه در شرایط پایدار صورت گرفته است. در این مقاله هم مدل‌سازی تشکیل کیک خارجی در چاه برای شرایط پایدار صورت می‌گیرد.

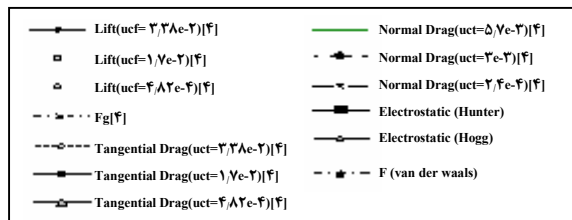
مدل‌سازی تشکیل کیک خارجی در شرایط پایدار

مرحله ۱

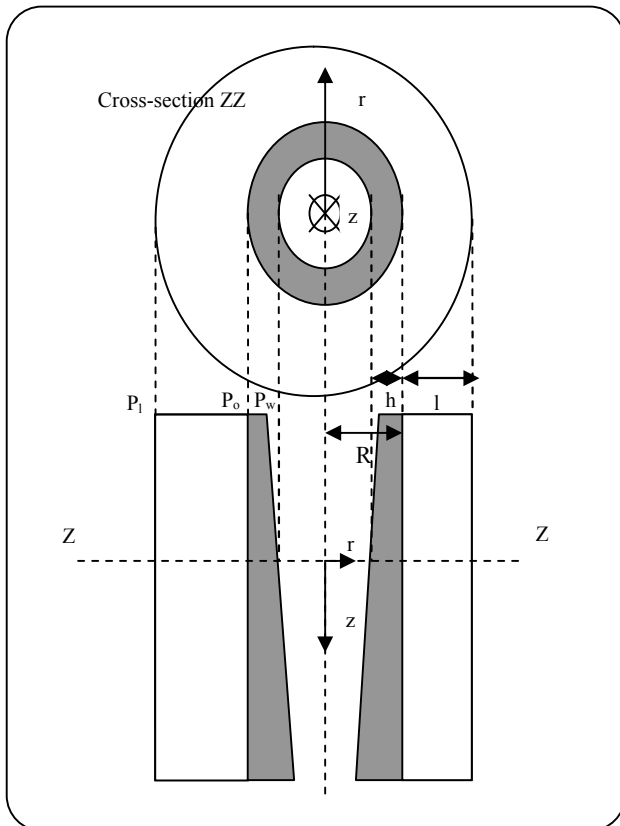
نخستین مرحله معرفی شرایطی است که مدل‌سازی برای آن صورت می‌گیرد. شرایط مدل‌سازی این مقاله مطابق با شرایط مرجع [۸] است که سیال تزریقی در آن مواد معلق از ذره‌های هماتیت در آب با غلظت 40 mg/lit است. فرض این است که



شکل ۲- نتیجه‌های آنالیز نیروها [۱۰].



شکل ۳- تشکیل کیک خارجی در دیواره چاه.



شکل ۳- تشکیل کیک خارجی در دیواره چاه.

آنالیز میزان بزرگی نیروها برای سیال مورد نظر در مراجع [۹] و [۱۰] انجام شده و نتیجه این آنالیز در شکل ۲ آورده شده است. در این آنالیز میزان بزرگی نیروهای بالابرنده و دراگ مماسی برای سه مقدار سرعت سیال در چاه و نیز میزان بزرگی نیروی دراگ نرمال برای سه مقدار سرعت نفوذ تعیین شده است، همچنین بزرگی نیروی الکتروستاتیک طبق دو رابطه Hogg و Hunter مشخص شده و نیروهای وان دروالس و وزن هم تعیین مقدار شده‌اند. این آنالیز برای یک رنج مشخصی از قطر ذره‌ها صورت گرفته که برای قطر ذره‌ها مورد نظر این مقاله نیروهای دراگ، اصطکاک و الکتروستاتیک نیروهای موثر هستند.

مرحله ۳

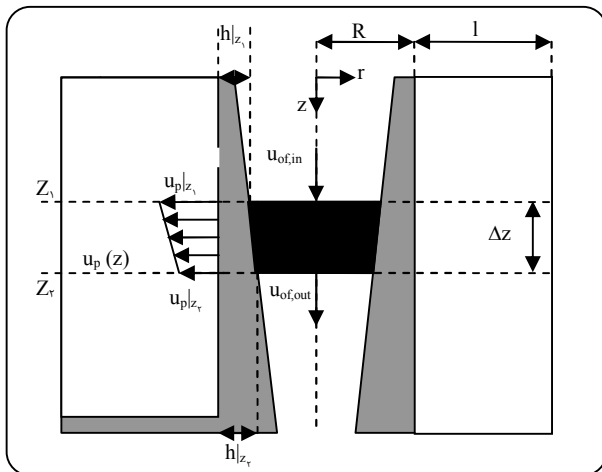
نحوه تشکیل کیک خارجی در شکل ۳ نشان داده شده است که در آن ارتفاع کیک، h ارتفاع کیک، u_p سرعت نفوذ و u_{cf} سرعت سیال در چاه است. فرضیات ساده کننده عبارت‌اند از:

- ۱- نیروهای بالابرنده، بویانسی، نفوذ و وان دروالس قابل چشم پوشی است.
- ۲- با وجود اهمیت نیروی الکتروستاتیک به این دلیل که ورود آن به مدل‌سازی باعث به وجود آمدن پیچیدگی‌های زیاد می‌شود از آن صرف نظر می‌کنیم.
- ۳- تغییرهای سرعت در جهت r قابل چشم پوشی است.
- ۴- نیروی برشی تنها در جهت z است.
- ۵- پروفایل سرعت در همه جهتها به طور کامل توسعه یافته است.
- ۶- تخلخل کیک ثابت است.
- ۷- نفوذپذیری کیک و محیط متخلخل ثابت هستند.
- ۸- سیال تزریقی یک سیال نیوتنی است.
- ۹- دما را ثابت فرض می‌کنیم تا بتوان چگالی سیال را ثابت در نظر گرفت.

مرحله ۴

موازنه نیرو: فرمول‌بندی نیروهای موثر در این شرایط در مرجع [۱۰] انجام شده است که با توجه به آن، نیروهای دراگ نرمال و دراگ مماسی به صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$F_d = w\pi a^2 \frac{\mu u_{cf}}{R-h} \quad (1)$$



شکل ۴-المان در نظر گرفته شده برای مدل سازی.

دراگ نرمال :

$$F_R = \epsilon \pi \mu a u_p \quad (2)$$

در این معادله ها a شعاع ذره ها، μ ناروانی سیال و w ضریب تناسب هستند. نیروی اصطکاک هم با استفاده از قانون کلمب به صورت زیر ارایه می شود:

$$F_f = f \cdot F_N \quad (3)$$

در صاف کردن با جریان موازی سطح سیال برای یک ذره که رسوب می کند برابری نیروی دراک مماسی و اصطکاک را داریم:

$$F_d = f \cdot F_f \quad (4)$$

$$w \pi a^2 \mu \frac{\bar{u}_{cf}}{R-h} = f (\epsilon \pi \mu a u_p) \quad \frac{f}{w} = \gamma$$

$$\frac{\bar{u}_{cf}}{u_p} = \frac{\epsilon \gamma}{a} (R-h)$$

که در معادله ی بالا پارامتر گاما به صورت $\gamma = \frac{f}{w}$ تعریف شده است.

مرحله ۵

موازنه جرمی در شرایط پایدار: برای نوشتن موازنه جرمی المانی به ارتفاع Δz به صورت شکل ۴ انتخاب می شود که در آن سیال از المان است. شرایط پایدار یعنی کیک به ضخامت تعادلی رسیده است و رسوب ذره ها متوقف شده است بنابراین تنها تابعیت مکانی داریم.

موازنه جرمی سیال:

$$(u_{cf} \pi (R-h)^2 \rho)_{in} = (u_{cf} \pi (R-h)^2 \rho)_{out} + \quad (5)$$

$$\frac{u_{p,1} + u_{p,2}}{2} \rho \times 2 \pi (R-h) \Delta z$$

در این معادله ρ چگالی سیال است.

$$-\frac{\partial (u_{cf} (R-h)^2)}{\partial z} = 2 u_p (R-h) \quad (6)$$

$$u_p = -\frac{1}{2(R-h)} \frac{\partial (u_{cf} (R-h)^2)}{\partial z} \quad (7)$$

مرحله ۶

به دست آوردن معادله ای برای ضخامت کیک: معادله ی دبی

سیال در کانال به صورت زیر است :

$$Q = u_{cf} \pi (R-h)^2 \quad (8)$$

با جاگذاری معادله ی (۸) در معادله ی (۷) داریم :

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = -2 \pi (R-h) u_p \quad (9)$$

دبی نفوذی هم با استفاده از قانون دارسی به صورت زیر ارایه می شود :

$$q = -2 \pi r L \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (10)$$

در این فرمول k نفوذپذیری محیطی است که سیال از آن عبور می کند μ هم ناروانی سیال است. اگر معادله ی (۱۰) را برای کیک تشکیل شده بنویسیم خواهیم داشت:

$$\int_{p_w}^{p_0} dp = -\frac{q \mu}{2 \pi k_c L} \int_{R-h}^R \frac{dr}{r} \quad (11)$$

$$p_w - p_0 = \frac{q \mu}{2 \pi k_c L} \ln \frac{R}{R-h} \quad (12)$$

همچنین چنانچه معادله را برای محیط متخلخل بنویسیم داریم:

$$\int_{p_0}^{p_1} dp = -\frac{q \mu}{2 \pi k L} \int_R^{R+1} \frac{dr}{r} \quad (13)$$

$$p_0 - p_1 = \frac{q \mu}{2 \pi k L} \ln \frac{R+1}{R} \quad (14)$$

معادله‌ی (۲۳) را با معادله‌ی (۹) برابر قرار می‌دهیم پس از ساده‌سازی داریم:

$$-2 \times \psi = \frac{6\gamma}{a} (R-h) \times \quad (24)$$

$$\left[(R-h) \frac{d\psi}{dz} - \psi \left(2 + \frac{1}{(\Theta - \ln(R-h))} \right) \frac{dh}{dz} \right] \quad \text{و یا:}$$

$$1 + \frac{3\gamma}{a} (R-h) \times \quad (25)$$

$$\left[\frac{(R-h)}{\psi} \frac{d\psi}{dz} - \left(2 + \frac{1}{(\Theta - \ln(R-h))} \right) \frac{dh}{dz} \right] = 0$$

از طرفی داریم (مرجع [۱۰]):

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{A \bar{u}_{cf} \mu}{(R-h)^2} + \rho g \quad (26)$$

معادله‌های (۴) و (۲۱) را در معادله‌ی (۲۶) جاگذاری می‌کنیم:

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{4\lambda\gamma\psi\mu}{a(R-h)^2(\Theta - \ln(R-h))} + \rho g \quad (27)$$

با استفاده از معادله‌ی (۱۹) و (۲۷) معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\psi}{dz} = - \frac{4\lambda k_c \gamma \psi}{a(R-h)^2(\Theta - \ln(R-h))} + \frac{\rho g k_c}{\mu} \quad (28)$$

اگر معادله‌ی (۲۸) را در معادله‌ی (۲۵) جایگزین کنیم خواهیم داشت:

$$\frac{dh}{dz} = \left[\frac{\Theta - \ln(R-h)}{2\Theta - 2\ln(R-h) + 1} \right] \times \left[\frac{a}{3\gamma(R-h)} - \frac{4\lambda\gamma k_c}{a(R-h)(\Theta - \ln(R-h))} + \frac{\rho g k_c}{\mu\psi} (R-h) \right] \quad (29)$$

با استفاده از معادله‌های (۴) و (۲۱) معادله‌ی (۲۹) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{dh}{dz} = \left[\frac{\Theta - \ln(R-h)}{2\Theta - 2\ln(R-h) + 1} \right] \times \left[\frac{2u_p}{u_{cf}} - \frac{4\lambda u_p}{\psi} \frac{k_c \gamma}{a} + \frac{\rho g k_c}{\psi \mu} (R-h) \right] \quad (30)$$

مرحله ۷

در این قسمت برای به دست آوردن پروفایل‌های ضخامت کیک، سرعت نفوذ، سرعت سیال در چاه و فشار معادله‌های (۴)،

معادله‌ی (۱۲) را با معادله‌ی (۱۴) جمع می‌کنیم:

$$p_w - p_1 = \frac{q\mu}{2\pi L} \left(\frac{1}{k_c} \ln \frac{R}{R-h} + \frac{1}{k} \ln \frac{R+1}{R} \right) \quad (15)$$

از معادله‌ی (۱۵) می‌توان q یا دبی نفوذ را به دست آورد:

$$q = \frac{2\pi L(p_w - p_1)}{\mu \left(\frac{1}{k_c} \ln \frac{R}{R-h} + \frac{1}{k} \ln \frac{R+1}{R} \right)} \quad (16)$$

از طرف دیگر برای دبی نفوذ معادله‌ی زیر نیز برقرار است:

$$q = u_p 2\pi(R-h)L \quad (17)$$

از برابری معادله‌ی (۱۶) و (۱۷) معادله‌ی جدیدی برای سرعت نفوذ به دست می‌آوریم:

$$u_p = \frac{k_c(p_w - p_1)}{\mu(R-h) \left(\ln R + \frac{k_c}{k} \ln \frac{R+1}{R} - \ln(R-h) \right)} \quad (18)$$

پارامترهای ψ و Θ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\psi = \frac{k_c(p_w - p_1)}{\mu} \quad (19)$$

$$\Theta = \ln R + \frac{k_c}{k} \ln \frac{R+1}{R} \quad (20)$$

با جاگذاری معادله‌های (۱۹) و (۲۰) در معادله‌ی (۱۸) سرعت نفوذ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u_p = \frac{\psi}{(R-h)(\Theta - \ln(R-h))} \quad (21)$$

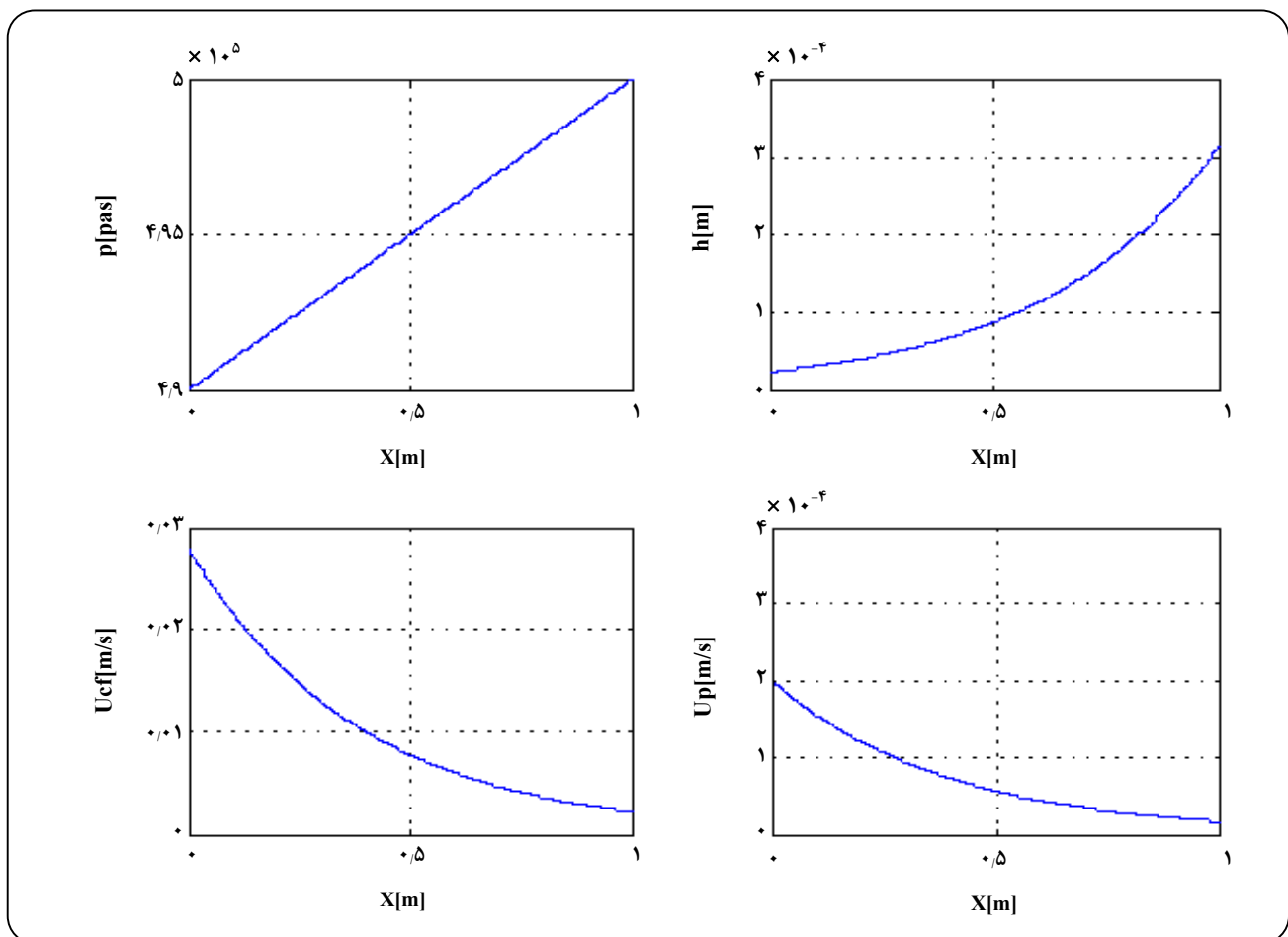
معادله‌های (۲۱) و (۸) را در معادله‌ی (۴) جایگزین می‌کنیم معادله‌ی دبی سیال به صورت زیر در می‌آید:

$$Q = \frac{6\gamma\psi\pi}{a} \frac{(R-h)^2}{(\Theta - \ln(R-h))} \quad (22)$$

اگر از (۲۲) معادله‌ی نسبت به z مشتق بگیریم:

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{6\gamma\pi}{a} \left[\frac{(R-h)^2 \frac{d\psi}{dz} - 2(R-h)\psi \frac{dh}{dz}}{(\Theta - \ln(R-h))^2} \right] \times \quad (23)$$

$$\left[\frac{(\Theta - \ln(R-h)) - \psi(R-h)^2 \frac{1}{(R-h)} \frac{dh}{dz}}{(\Theta - \ln(R-h))^2} \right]$$



شکل ۵- پروفایل های حاصل در شرایط پایدار.

افزایش ضخامت کیک در طول چاه باعث کاهش سرعت نفوذ می‌شود چون مقاومت در برابر نفوذ سیال به محیط متخلخل افزایش پیدا می‌کند.

سرعت سیال در چاه تحت تاثیر دو عامل است یکی کاهش دبی به دلیل نفوذ سیال به محیط متخلخل است که باعث کاهش سرعت در چاه می‌شود و دیگری کاهش سطح مقطع چاه به دلیل تشکیل کیک است که این باعث افزایش سرعت می‌شود، اما همانطور که از شکل مشخص است سرعت سیال در چاه کاهش پیدا کرده است و این نشان دهنده این است که تاثیر کاهش دبی نسبت به کاهش سطح مقطع در سرعت سیال بسیار بزرگتر است و کاهش دبی عامل غلبه کننده است. نمودار فشار هم نشان دهنده معادله‌ی صعودی و خطی فشار با طول چاه است که با توجه به معادله‌ی (۲۷) می‌توان دریافت که فشار تنها تابع ترم وزن سیال است و تشکیل رسوب تاثیری در تغییرهای فشار در چاه ندارد.

(۲۱)، (۲۷) و (۳۰) به وسیله‌ی یک برنامه در Matlab حل می‌شوند شرایط مرزی مورد استفاده برای حل معادله‌ها به صورت زیر است:

$$p(z=1) = 5 \text{ bar}$$

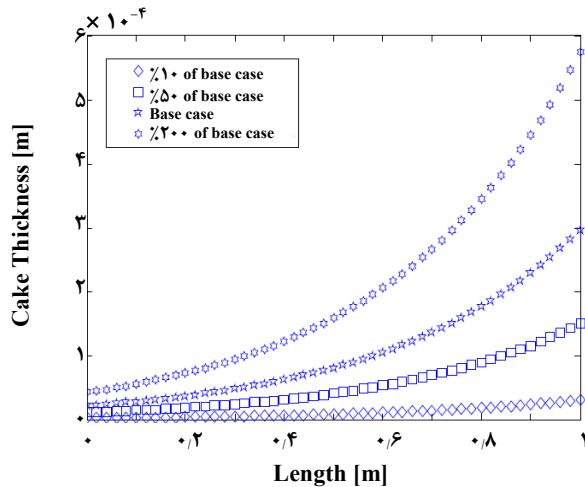
$$h \text{ (۲۲) و معادله‌ی } Q = 2,78E - 6 \text{ m}^3/\text{sec}$$

در $z=0$ بدست می‌آید:

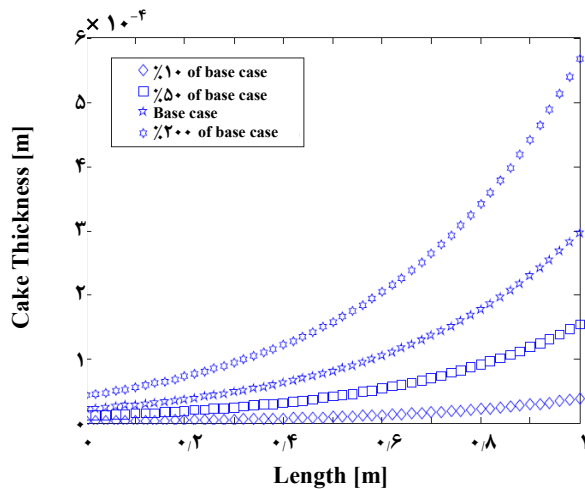
$$h = 2,45 E - 5 \text{ m}$$

نتیجه‌های مدل‌سازی

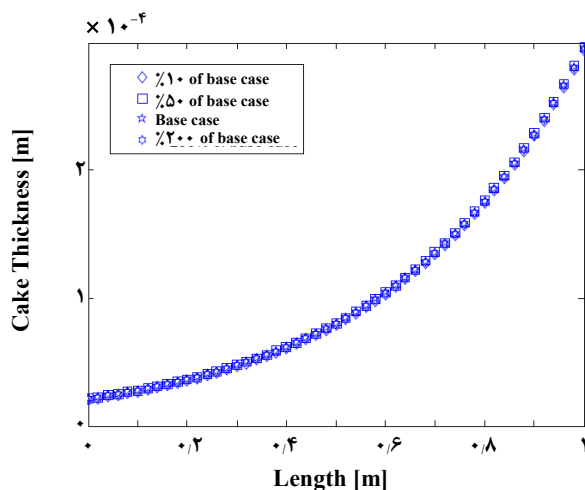
پروفایل‌های حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نتیجه‌ها بر می‌آید ضخامت کیک در طول چاه ثابت نیست که این نتیجه نیروهای برشی حاصل از سرعت سیال در چاه است. به تدریج که در طول چاه جلو می‌رویم این نیرو کاهش پیدا کرده در نتیجه ضخامت کیک در طول چاه افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۶- آنالیز حساسیت ضخامت کیک نسبت به نفوذ پذیری آن.



شکل ۷- آنالیز حساسیت ضخامت کیک نسبت به فشار در انتهای چاه.



شکل ۸- آنالیز حساسیت ضخامت کیک نسبت به نفوذ پذیری محیط متخلخل.

آنالیز حساسیت مدل

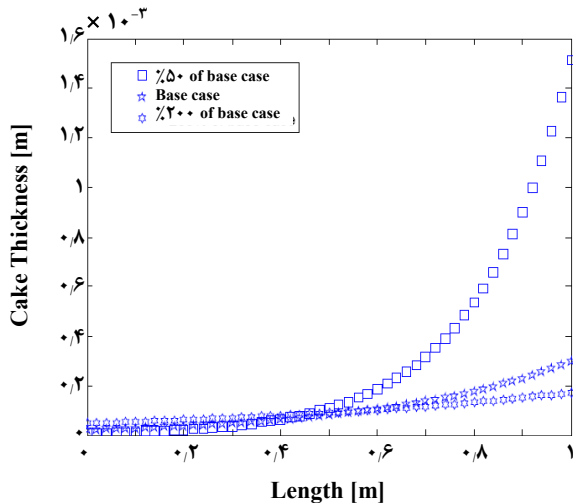
در این قسمت بررسی تغییرهای ضخامت کیک نسبت به تغییرهای پارامترهای نفوذپذیری کیک، نفوذپذیری محیط متخلخل فشار در انتهای چاه، شعاع ذره‌ها و ترم گاما انجام می‌شود. تغییرهای پارامترها به میزان ۱۰، ۵۰ و ۲۰۰ درصد مقدار اولیه است و در کل چاه این بررسی انجام می‌شود.

همان‌گونه که از شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است، معادله‌ی ضخامت کیک با دو پارامتر نفوذپذیری کیک و فشار انتهای چاه خطی و صعودی است که این به طور کامل منطقی است چون با افزایش نفوذپذیری کیک ضخامت آن نیز افزایش پیدا می‌کند همچنین با افزایش فشار طبق معادله‌ی داری سرعت نفوذ هم افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه ضخامت کیک افزایش می‌یابد.

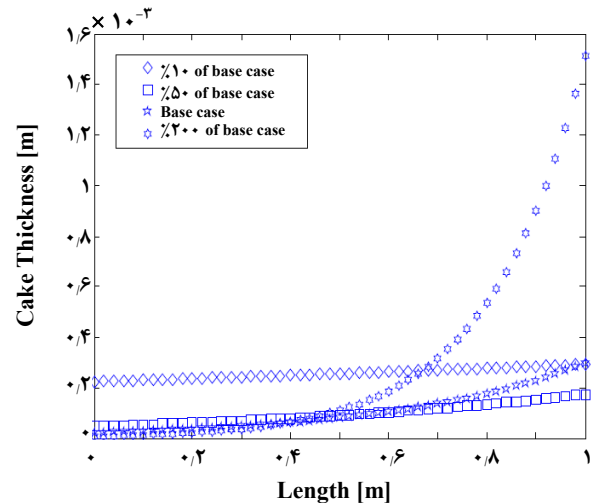
با توجه به شکل ۸ مشخص است که نفوذپذیری محیط متخلخل هیچ تاثیری بر ضخامت کیک ندارد که این می‌تواند به علت کوچک بودن نفوذپذیری کیک در مقابل نفوذپذیری محیط متخلخل باشد یا به این دلیل که مدل‌سازی تشکیل کیک خارجی بدون توجه به صافی کردن داخلی انجام شده است. اما همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود رابطه شعاع ذره‌ها و گاما با ضخامت کیک رابطه پیچیده‌ای است که می‌تواند به دلیل وجود این دو ترم در رابطه‌ی نیرو افزون بر رابطه ضخامت کیک باشد که باعث می‌شود نتوانیم رابطه مستقیمی بین این دو پارامتر و ضخامت کیک به دست آوریم. به هر صورت این پیچیدگی اهمیت بررسی بیشتر این دو پارامتر و همچنین لزوم انجام آزمایش‌های بیشتر برای به دست آوردن رابطه‌ی منطقی بین این دو پارامتر و ضخامت کیک را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری نهایی

۱- با مدل‌سازی تشکیل کیک خارجی روی دیواره چاه پروفایل کمیت‌هایی چون ضخامت کیک، سرعت نفوذ، سرعت سیال در چاه و فشار نسبت به طول چاه در شرایط پایدار مشخص شد (البته برای چاهی با شرایط آزمایشگاهی) که مشخص شد ضخامت کیک در طول چاه افزایش پیدا می‌کند که این به دلیل نیروهای برشی حاصل از سرعت سیال بود. افزایش ضخامت کیک منجر به کاهش سرعت نفوذ می‌شود. سرعت سیال هم در چاه به دلیل نشت سیال به محیط متخلخل کاهش پیدا می‌کند. فشار هم تنها تابع وزن سیال در چاه است و مستقل از عامل‌های دیگر می‌باشد.



شکل ۱۰- آنالیز حساسیت ضخامت کیک نسبت به پارامتر گاما.



شکل ۹- آنالیز حساسیت ضخامت کیک نسبت به شعاع ذره‌ها.

شعاع ذره‌ها و گاما تا اندازه ای پیچیده است و نیازمند آزمایش‌ها و بررسی‌های بیشتر است.

۲- با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده برای شرایط مدل‌سازی این پژوهش، ضخامت کیک با پارامترهای نفوذپذیری کیک و فشار انتهایی چاه رابطه خطی و مستقیم دارد اما نفوذپذیری محیط متخلخل هیچ تاثیری بر ضخامت کیک ندارد و تاثیر پارامترهای

تاریخ دریافت: ۱۵/۶/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۶/۱۲/۱۳

مراجع

- [1] Khatib, Z. and Verbeek, P., Water to Value-Produce Water Management for Sustainable Field Development of Mature and Green Fields, *Journal of Petroleum Technology*, **January**, p. 26 (2003).
- [2] Williams, M., Radial Filtration of Drilling Muds, *Trans. AIME*, **136**, p. 57 (1940).
- [3] Khatib, Z., "Prediction of Formation Damage Due to Suspended Solids: Modeling Approach of Filter Cake Buildup in Injectors", in SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, U.S.A., SPE 28488 (1994).
- [4] Civan, F., "Phenomenological Filtration Model for Highly Compressible Filter Cakes Involving Non-Darcy Flow" in 1999 SPE Mid-Continent Operations Symposium, Oklahoma City, U.S.A., SPE 52147 (1999).
- [5] Pang, S. and Sharma, M.M., "A Model for Predicting Injectivity Decline in Water Injection Wells" SPEFE, p. 194 (1997).
- [6] Jiao, D. and Sharma, M.M., "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions" *Journal of Colloid and Interface Science*, **162**, p. 454 (1994).
- [7] Altmann, J., Ripperger, S., Particle Deposition and Layer Formation at the Crossflow Microfiltration, *Journal of Membrane Science*, **124**, p. 119 (1997).
- [8] Farajzadeh, R., Produced Water Re-Injection (PWRI), An Experimental Investigation into Internal Filtration and External Cake Build-Up, Ms Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherland (2004).

- [9] IAbduwani, F.A.H., Bedrikovetsky, P., Farajzadeh, R., VandenBroek, W.M.G.T., Currie, P.K., "External Filter Cake Erosion: Mathematical Model and Experimental Study", SPE 94635 (2005).

[۱۰] عدلی، عطیه؛ فرج‌زاده، روح‌الله؛ رشیدی، فریبرز؛ آنالیز نیروهای وارد بر یک ذره به جهت مدل‌سازی تخریب

سازند در فرایند تزریق دوباره آب نمک تولیدی مخازن نفتی، اولین کنگره مهندسی نفت (۱۳۸۵).