

# مدل سازی فرآیند فیلتراسیون گل حفاری در چاه با در نظر گرفتن تراکم پذیری کیک گل<sup>۱</sup> و مهاجرت ذرات ریز

محمد حسین غضنفری<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی شریففوشید فتوایی مقدم<sup>۲</sup>، ابوالقاسم امامزاده<sup>۳</sup>، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

دقت در توصیف و تفسیر فرآیند فیلتراسیون و در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر تغییر ضخامت کیک گل ایجاد شده، حجم فیلتره گلی که در سازند نفوذ می کند، پراکنندگی سیال و هجوم ذرات ریز سیال حفاری جهت ارائه یک استراتژی بهینه برای جلوگیری از آسیب سازند در حین عملیات حفاری بسیار حائز اهمیت است. هدف از انجام این تحقیق ارائه مدلی برای تفسیر فرآیند فیلتراسیون و پیش بینی عوامل مؤثر بر تغییر ضخامت کیک گل با زمان، حجم فیلتره گل وارد شده به سازند مخزنی و اطلاعات مربوط به نرخ نفوذ فیلتره گل در شرایط دینامیکی با در نظر گرفتن اثر تراکم پذیری کیک گل و مهاجرت ذرات می باشد. برای مدل سازی فرآیند فیلتراسیون ابتدا معادلات موازنه جرم مربوط به ذرات ریز و درشت بر اساس نظریه متوسط ضخامت کیک<sup>۲</sup> سیوان نوشته شده اند. بر اساس این معادلات و با در نظر گرفتن شرایط مرزی سازند، مدل ریاضی فیلتراسیون ارائه شده است. در ادامه کد مدل ریاضی ارائه شده در محیط نرم افزار Matlab نوشته شده است. خروجی این مدل به صورت نمودارهای تغییرات ضخامت کیک گل، تراوایی آن و حجم فیلتره ورودی به سازند بر حسب زمان ارائه شده اند. نتایج نشان داد که مهاجرت ذرات ریز به محیط فیلتر باعث افزایش شیب نمودار تغییرات ضخامت و هم چنین ضخامت نهایی کیک گل می شود. هم چنین مهاجرت ذرات ریز به درون محیط فیلتر اثر خود را به صورت افزایش میزان حجم فیلتره ورودی به سازند نشان می دهد. میزان تراوایی ناحیه فیلتر تأثیر زیادی بر میزان ضخامت کیک گل ایجاد شده دارد؛ بدین صورت که با افزایش تراوایی فیلتر شاهد تشکیل کیک گل ضخیم تری خواهیم بود.

واژگان کلیدی: فیلتراسیون، متوسط ضخامت کیک، معادلات موازنه جرم، مهاجرت ذرات، جریان غیر داری

## مقدمه

آنالیز مدل ها، تفسیر داده های آزمایشگاهی، بهینه سازی و شبیه سازی فرآیند فیلتراسیون همواره از موضوعات مورد علاقه صنعت نفت بوده است. در ابتدا این تلاش ها منجر به ایجاد یک سری روابط تجربی برای مدل سازی کیک گل شد. این روابط مانند آنچه توسط کلارک و بارت<sup>۳</sup> بیان شد [۱] اغلب اوقات برای فیلتراسیون های استاتیکی و دینامیک مورد استفاده قرار گرفتند. لیو و سیوان<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۶ مدل معادلات دیفرانسیل جزئی را برای فیلتر کیک گل تراکم ناپذیر، فیلتره و هجوم ذرات ریز داخل سنگ مخزن در شرایط دینامیک ارائه کردند [۲]. حل تعدادی از این مدل های معادلات دیفرانسیل جزئی نیازمند برنامه های عددی پیچیده، زمان بر و محاسبات فراوان بود. برای کاستن این پیچیدگی عبود و کوراپسیو غلو<sup>۵</sup> [۳]، عبود [۴] و سیوان [۵] فرمول های متوسط ضخامت کیک را جهت سادگی باز نویسی کردند که در نتیجه آن معادلات دیفرانسیل جزئی به معادلات دیفرانسیل معمولی که نیازمند انجام محاسبات بسیار کمتری بودند تبدیل شد.

## ۱- روش کار

برای مدل سازی فرآیند فیلتراسیون گل حفاری و تشکیل کیک گل در حالت دینامیک و زمانی که مته در حال چرخش است از آنجا که در این شرایط فیلتراسیون در حالت شعاعی و فشار ثابت اتفاق می افتد برای شبیه سازی

با ورود مته به سازند، به دلیل نبود مانع، هجوم وسیع و سریع گل رخ می دهد. ذرات جامد موجود در سیال اندازه های متفاوتی دارند. ذراتی که قطر آنها از اندازه متوسط حفره ها بزرگتر است نمی توانند وارد محیط متخلخل شده و روی سطح سازند رسوب می کنند. این ذرات لایه ای با تراوایی بسیار کم روی سطح سازند تشکیل داده و بدین ترتیب نفوذ فیلتره و ذرات همراه به درون سازند را به حداقل می رسانند. این لایه محافظت کننده کیک گل خارجی نامیده می شود. ذرات کوچک تر می توانند وارد منافذ محیط متخلخل شده و محل های گلوگاهی را مسدود نمایند. با مسدود شدن گلوگاه ها و پر شدن منافذ و حفرات با ذرات جامد، کیک گل درونی نیز شکل می گیرد.

هدف از انجام این تحقیق ارائه مدلی برای تفسیر فرآیند فیلتراسیون و پیش بینی عوامل مؤثر بر تغییر ضخامت کیک گل با زمان، میزان صافاب گل وارد شده به سازند مخزنی و اطلاعات مربوط به نرخ نفوذ فیلتره گل در شرایط دینامیکی با در نظر گرفتن اثر تراکم پذیری کیک گل و مهاجرت ذرات است. با توجه به اینکه اغلب مدل های ارائه شده پیشین جهت توصیف فرآیند فیلتراسیون به بررسی این پدیده در شرایط استاتیکی می پردازند و جریان خطی در نظر گرفته می شود و به این دلیل که در حالت واقعی فیلتراسیون در شرایط دینامیک و حالت جریان شعاعی رخ می دهد این مدل ها تطابق چندانی با شرایط واقعی عملیات حفاری ندارند و پاسخ های حاصل چندان قابل اعتماد نیست.

\* نویسنده عهده دار مکاتبات (farshidghanavati@gmail.com)

## ۲-۱- معادلات موازنه جرم

- با توجه به معادلات موازنه حجمی بر اساس متوسط ضخامت کیک مدل‌های فیلتراسیون برای موارد ۱ تا ۴ به صورت زیر نوشته می‌شود:
- کلیه ذرات فیلتر کیک (بزرگ و کوچک)
  - ذرات ریز فیلتر کیک
  - سیال حامل سوسپانسیون ذرات ریز عبوری از داخل فیلتر کیک
  - ذرات ریز حمل شده به وسیله سوسپانسیون ذرات ریز عبوری از داخل فیلتر کیک

## ۲-۲- فرم‌های متوسط ضخامت کیک برای معادلات موازنه جرم

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_s \bar{\rho}_p] = 2r_c R_{ps}^\sigma + (r_w^2 - r_c^2) \bar{R}_{p2s} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_c \bar{\rho}_{p2s}] = 2r_c R_{p2s}^\sigma + (r_w^2 - r_c^2) \bar{R}_{p2s} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_1 \bar{\rho}_1] + (\epsilon_1 \rho_1)_{slurry} \frac{dr_c^2}{dt} = 2r_c (\rho_1 u_1)_{slurry} - 2r_w (\rho_1 u_1)_{filter} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_1 \bar{\rho}_{p21}] + (c_{p21} \epsilon_1)_{slurry} = 2r_c (c_{p21} u_1)_{slurry} - 2r_w (c_{p21} u_1)_{filter} - 2r_c R_{p2s}^\sigma - (r_w^2 - r_c^2) \bar{R}_{p2s} \quad (4)$$

برای اغلب کاربردهای عملی فرض اینکه ذرات و سیال حامل تراکم‌ناپذیرند قابل قبول است.

## ۲-۳- نرخ حجمی بقای ذرات درشت و ریز

نرخ حجمی بقای ذرات درشت و ریز به ترتیب به وسیله روابط زیر ارائه می‌شود:

$$N_{is}^\sigma = R_{is}^\sigma / \rho_p \quad (5)$$

$$N_{p2s} = R_{p2s} / \rho_p \quad (6)$$

## ۲-۴- معادلات موازنه حجمی

جاگذاری معادلات ۵ و ۶ در معادلات ۱-۴ به ترتیب معادلات موازنه حجمی زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_s^-] = 2r_c N_{ps}^\sigma + (r_w^2 - r_c^2) \bar{N}_{p2s} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_{p2s}^-] = 2r_c N_{ps2}^\sigma + (r_w^2 - r_c^2) \bar{N}_{p2s} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_1^-] + (\epsilon_1)_{slurry} \frac{dr_c^2}{dt} = 2r_c (u_1)_{slurry} - 2r_w (u_1)_{filter} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_1^-] + (\epsilon_1)_{slurry} \frac{dr_c^2}{dt} = 2r_c (u_1)_{slurry} - 2r_w (u_1)_{filter} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} [(r_w^2 - r_c^2) \bar{\epsilon}_{p21}^-] + (\epsilon_{p21})_{slurry} \frac{dr_c^2}{dt} = 2r_c (u_{p21})_{slurry} - 2r_w (u_{p21})_{filter} - 2r_c N_{p2s}^\sigma - (r_w^2 - r_c^2) \bar{N}_{p2s} \quad (10)$$

فرآیند فیلتراسیون گل حفاری در چاه، فرض شده که حفاری از یک عمق مشخص (حدود ۱۰۰ متری) با نرخ نفوذ ثابت آغاز گردد. عمق حفاری چاه ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. البته هر ناحیه دیگری از چاه نیز می‌توانست مورد بررسی قرار گیرد و از این جهت محدودیت خاصی وجود ندارد. از آنجا که در حین حفاری ممکن است عملیات به علت بروز مشکلاتی متوقف شود برای این مواقع نیز شرایط متفاوت فشاری در محاسبات مربوط به مدل گنجانده شده است. این شرایط به گونه‌ای است که در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری از نقطه شروع حفاری، هر کدام از حفاری‌ها به مدت یک ساعت متوقف می‌شوند. در حین پایین رفتن رشته حفاری، به علت افزایش عمق شاهد تغییراتی در فشار اعمالی توسط گل حفاری خواهیم بود. این فشار ترکیبی از فشار ستون گل حفاری و فشار پمپ گل است؛ اگرچه مقادیر تلف شده در اثر نیروهای اصطکاکی را (که در اینجا مقداری ثابت برای آن در نظر گرفته شده) باید از این مقدار کاست. هنگام توقف حفاری فشار اعمال شده تنها فشار ستون سیال حفاری خواهد بود. محدوده مورد نظر در چاه به المان‌های ۱۰ سانتی متری تقسیم شده که در این حالت فیلتراسیون در فشار ثابت اتفاق می‌افتد. روش کار نیز بدین ترتیب است که فشار اعمالی روی هر المان با استفاده از رابطه ۳۰- (که در ادامه به آن اشاره خواهد شد) قابل محاسبه است. نقطه وسط هر المان به عنوان نقطه مرجع جهت محاسبه فشار انتخاب شده است. مقادیر کمیت‌های مدل از داده‌های مشخص شده نیز در جدول ۱- ارائه شده‌اند. این مقادیر ترکیبی از داده‌های به کار رفته توسط کراپسیو غلو-عبود [۳]، تین [۶] و سیوان است. معادلات مدل با استفاده از روش عددی رانگ-کوتا-فلبرگ در محیط نرم‌افزار Matlab حل می‌شوند. در این حالت خروجی مدل در قالب نمودارهای ضخامت کیک گل، تغییرات تراوایی گل و حجم فیلتره ورودی به سازند نسبت به زمان خواهد بود. به علت تفاوت شرایط فشاری اعمالی هر المان نمودارهای خروجی مدل برای هر کدام متفاوت خواهد بود. به دلیل اینکه نخستین المان مدت زمان بیشتری با گل حفاری در تماس بوده نمودارهای خروجی مدل برای این المان حاوی اطلاعات کامل تری از فرآیند فیلتراسیون خواهد بود. در ادامه اثر سه عامل هجوم ذرات ریز، جزء حجمی سیال حامل در دوغاب و تراوایی سازند روی نمودارهای خروجی مدل بررسی شده و حساسیت مدل نسبت به این عوامل سنجیده می‌شود. نکته قابل ذکر این تحقیق آنست که جهت رعایت شرایط واقعی حاکم بر عملیات فیلتراسیون گل حفاری و با توجه به اینکه عبور جریان صافاب از محیط متخلخل کیک و سازند از قانون دارسی پیروی نمی‌کند، به جای قانون دارسی از قانون فورشهیمر استفاده شده است.

## ۲-۵- مدل سازی ریاضی

در این قسمت روابط و معادلات موازنه جرم برای ذرات رسوب کننده روی دیواره چاه برای شرایط فیلتراسیون شعاعی در حالتی که کیک گل تراکم‌پذیر فرض شده ارائه می‌گردد:

جریان سوسپانسیون ذرات و فیلتر کیک جامد به ترتیب با زیر نویس های  $f$  و  $S$  نشان داده شده‌اند. فاز حامل (مایع) و ذرات به ترتیب با  $I$  و  $p$  نمایش داده می‌شوند. ذرات [بزرگ + کوچک] به صورت  $p$  نمایش داده می‌شوند و ذرات بزرگ و کوچک نیز به ترتیب به صورت  $p_1$  و  $p_2$  مشخص می‌شوند.



## ۵-۲- قانون فورشهیمر برای جریان شعاعی [۷]

$$N_{ps}^{\sigma} = k_d^{\sigma} \left[ \frac{u_i \epsilon_{pl}}{1 - \epsilon_{pl}} \right]_{slurry} - k_{e2}^{\sigma} (1 - \bar{\phi}_c) (\tau_s - \tau_{cr}) U(\tau_s - \tau_{cr}) \quad (21)$$

$$-\frac{ap}{ar} = \frac{\mu}{k} u + \rho \beta u^2 \quad (11)$$

$$N_{p2s}^{\sigma} = k_{d2}^{\sigma} \left[ \frac{u_i \epsilon_{p2l}}{1 - \epsilon_{p2l}} \right]_{slurry} - k_{e2}^{\sigma} (\epsilon_{p2s}) c (\tau_s - \tau_{cr2}) U(\tau_s - \tau_{cr2}) \quad (22)$$

$$-\frac{ap}{ar} = \frac{\mu}{2\pi kh} \left( \frac{q}{r} \right) + \frac{\rho \beta}{(2\pi h)^2} \left( \frac{q}{r} \right)^2 \quad (12)$$

$$\bar{N}_{p2s} = \bar{k}_d \bar{\epsilon}_{p2l} - \bar{k}_e \bar{\epsilon}_{p2s} \quad (23)$$

اختلاف فشار روی فیلتر کیک و محیط متخلخل می تواند با انتگرال گیری از معادله ۱۲ به ترتیب به صورت های زیر بیان شود [۸]:

$$\tau_s \text{ با استفاده از معادله رویینوویچ-مونی به صورت زیر تخمین زده می شود:} \quad (24) \quad p_c - p_w = \frac{\mu \bar{q}_c}{2\pi h k_c} \ln \left( \frac{r_w}{r_c} \right) + \frac{\rho \bar{\beta}_c \bar{q}_c^2}{(2\pi h)^2} \left( \frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_w} \right)$$

$$\text{به طوری که } n' \text{ و } k' \text{ شاخص های استحکام و جریان هستند و } v \text{ سرعت} \quad (13)$$

$$\text{مماسی دوغاب روی سطح فیلتر کیک است.} \quad (14) \quad p_w - p_e = \frac{\mu \bar{q}_e}{2\pi h k_e} \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) + \frac{\rho \bar{\beta}_e \bar{q}_e^2}{(2\pi h)^2} \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right)$$

راویو و همکارانش [۱۱] پیشنهاد کردند که تنش برشی میانگین به صورت تجربی محاسبه شود. به همین جهت از تابع پله ای [u] استفاده می کنیم. وقتی  $\tau_{cr} > \tau_s$ ، این تابع برابر صفر و زمانی که  $\tau_{cr} \leq \tau_s$ ، تابع مساوی یک خواهد بود.

(چگالی ها و نرخ های آبی جریان سوسپانسیون های ذرات ریز عبوری از داخل ماتریس کیک و سازند یکسان فرض شده است. از این رو با جمع، باز آرای و حل معادلات ۱۳ و ۱۴ برای جریان دارسی خواهیم داشت:

## ۷-۲- رابطه تراوایی

با در نظر گرفتن رسوب ذرات ریز و متراکم شدن کیک می توان تراوایی "متوسط ضخامت کیک" را با استفاده از معادله تین و همکارانش [۶] تخمین زد:

$$\frac{\bar{k}_c}{k_c} = (1 + \alpha_1 \bar{\epsilon}_{p2s}^2)^{-1} \left( 1 + \frac{\bar{p}_s}{p_a} \right)^{-\beta} \quad (25) \quad \bar{q}_c = \bar{q}_r \cong q_c = \frac{u_c}{2\pi r_c h} = \frac{(u_q)_{slurry}}{2\pi r_c h [1 - (\epsilon_{pl})_{slurry}]} = \frac{-\tilde{\beta} + \sqrt{\tilde{\beta}^2 - 4\tilde{\alpha}\tilde{\gamma}}}{2\tilde{\alpha}} \quad (16)$$

و برای جریان غیر دارسی داریم:

$$\tilde{\alpha} = \frac{\rho}{(2\pi h)^2} = \left[ \tilde{\beta}_c \left( \frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_w} \right) + \beta \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) \right] \quad (17)$$

$$\tilde{\beta} = \frac{\mu}{2\pi h} = \left[ \frac{1}{k_c} \ln \left( \frac{r_w}{r_c} \right) + \frac{1}{k_e} \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) \right] \quad (18)$$

$$\tilde{\gamma} = -(p_c - p_e) \quad (19)$$

## ۸-۲- فشار سیال و تخلخل متوسط ضخامت کیک

فشار متوسط سیال در فیلتر کیک برای فیلتراسیون در جریان شعاعی می تواند مشابه با دیک [۱۲] بیان شود:

$$\bar{p} = \int_{r_c}^{r_w} p \bar{\phi} r dr / \int_{r_c}^{r_w} \bar{\phi} r dr \quad (26) \quad \bar{p} = p_c - p \quad (29)$$

$$\bar{\phi} = \int_{r_c}^{r_w} \bar{\phi} r dr / \int_{r_c}^{r_w} r dr \quad (27)$$

$$\bar{p}\bar{\phi} = \int_{r_c}^{r_w} p \bar{\phi} r dr / \int_{r_c}^{r_w} r dr \quad (28)$$

مشابه کرامپ و تایلر [۱۳] نیروی کششی متوسط ضخامت کیک ایجاد شده توسط جریان سوسپانسیون ذرات ریز از داخل فیلتر کیک، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\bar{p}_s = p_c - p \quad (29)$$

که در آن  $p_c$  فشار دوغاب اعمالی روی سطح فیلتر کیک در حال رشد و  $\bar{p}$  فشار ضخامت متوسط جریان سوسپانسیون ذرات ریز داخل کیک است. فشار اعمالی بر هر المان کیک از طرف سیال حفاری از رابطه ۳۰-۳۰ حاصل می شود:

$$p = \rho gh + (\text{pump pressure}) - (\text{friction pressre}) \quad (30)$$

$\beta$  توسط رابطه ارائه شده توسط لیو و همکارانش [۲] به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\beta = 2.92 \times 10^4 \tau / (\phi k) \quad (20)$$

## ۶-۲- نرخ های رسوب ذرات

برای فیلتراسیون دینامیک شامل عبور جریان، نرخ حجمی همه ذرات رسوبی (بزرگ و کوچک) در واحد سطح کیک که در تماس با دوغاب است به وسیله اختلاف بین نرخ های رسوب و فرسایش به صورت زیر بیان می شود [۹ و ۱۰]:

برای رسوب همه ذرات (بزرگ و کوچک) و ذرات ریز دوغاب روی سطح در حال رشد کیک و ابقای ذرات ریز جریان سوسپانسیون در داخل ماتریس کیک به ترتیب خواهیم داشت:

### ۳- نحوه انجام آزمایش‌ها/مدل سازی‌ها

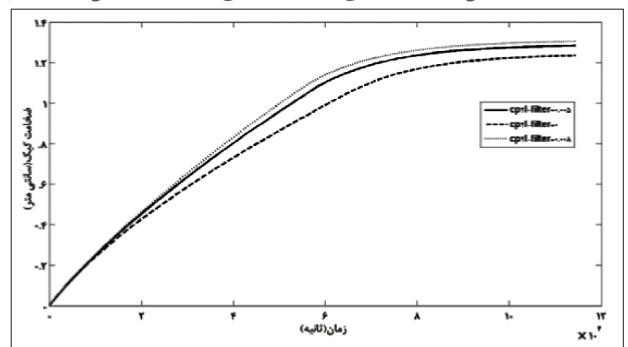
همان گونه که در قسمت روش کار بیان شد ابتدا معادلات موازنه جرم برای ذرات تشکیل دهنده گل حفاری نوشته می‌شود. برای حل این معادلات که در قالب معادلات ۱- تا ۱۰ بیان شده‌اند و محاسبه مقادیر عوامل مؤثر بر تغییر ضخامت کیک و حجم صافاب ورودی به سازند، از روش عددی رانگ- کوتا- فلبرگ استفاده می‌شود. برای محاسبه میزان تغییرات تراوایی کیک گل نیز از رابطه ۲۵ استفاده شده است. با کدنویسی این روابط در نرم افزار Matlab و حل عددی آنها توسط این نرم افزار، نتایج خروجی به صورت نمودارهای تغییرات ضخامت کیک، حجم صافاب ورودی به سازند و تغییرات تراوایی کیک بر حسب زمان به دست می‌آید. قابل ذکر است برای بررسی اثر هر یک از عوامل روی هر نمودار خروجی نرم افزار، سه مقدار متفاوت از عوامل مورد نظر انتخاب شده و سایر عوامل ثابت فرض شده‌اند. مقادیر مورد استفاده برای عوامل مدل نیز از اطلاعات حاصل از آزمایش‌های انجام شده توسط سیوان و تین انتخاب شده‌اند.

### ۴- ارائه نتایج و بحث

با افزایش هجوم ذرات ریز به درون سازند به این علت که این ذرات از محیط متخلخل کیک عبور کرده و به جای رسوب در آنجا وارد سازند می‌شوند، تراوایی کیک گل که به میزان زیادی تحت تأثیر رسوب این ذرات قرار دارد به میزان کمتری کاهش می‌یابد. از این رو با حفظ تراوایی کیک گل این محیط متخلخل هم چنان توانایی خود را در عبور جریان فیلتره گل حفظ می‌کند و فرآیند رسوب ذرات بزرگ تر روی سطح کیک که در تماس با دوغاب است و قادر به عبور از منافذ ریز نیست ادامه پیدا کرده و شاهد به وجود آمدن کیک ضخیم تری روی دیواره چاه خواهیم بود.

اثر این پدیده روی حجم فیلتره‌ای که وارد سازند می‌شود به گونه‌ای است که با افزایش ذرات ورودی به سازند شاهد ورود حجم بیشتری از فیلتره گل نیز به سازند خواهیم بود. علت این امر را می‌توان با مشاهده شکل ۷- دریافت. این نمودار نیز اثر هجوم ذرات ریز به درون سازند را به صورت کاهش کمتر تراوایی کیک گل در حین فرآیند فیلتراسیون نشان می‌دهد. طبیعی است که با افزایش توانایی عبوردهی جریان توسط کیک فیلتره بیشتری وارد سازند خواهد شد.

دیگر عامل مورد بررسی جزء حجمی، سیال حامل در دوغاب



شکل ۷ | اثر عامل  $C_{p21}$  بر نمودار تغییرات ضخامت کیک گل

است. افزایش این عامل به معنی وجود ذرات معلق کمتری در دوغاب و در نتیجه رقیق بودن دوغاب گل است. با کاهش ذرات ریز موجود در سوسپانسیون گل حفاری و افزایش جزء حجمی سیال حامل طبق شکل ۵- تراوایی کیک تشکیل شده تغییر کرده و به میزان کمتری کاهش می‌یابد. به همین دلیل همان گونه که در شکل ۸- نیز قابل تشخیص است می‌توان پیش بینی کرد که میزان حجم فیلتره ورودی به سازند نیز در اثر نبود مانعی مؤثر در برابر جریان فیلتره افزایش خواهد یافت. به همین دلایل فرآیند فیلتراسیون برای مدت زمان بیشتری ادامه یافته و ذرات بزرگ تر موجود در سوسپانسیون گل حفاری که تشکیل دهنده اسکلت کیک هستند روی سطح آن رسوب کرده و کیک ضخیم تری ایجاد می‌کنند. شکل ۲- نیز صحت این مطلب را تایید می‌کند.

تراوایی سازند نیز از جمله عوامل مؤثر بر فرآیند فیلتراسیون است. تراوایی زیاد سازند به معنی توانایی سازند در عبور جریان بیشتر از محیط متخلخل سازند است. از این جهت با افزایش این توانایی فرآیند فیلتراسیون با شدت بیشتری انجام شده و این امر بیان کننده ورود حجم بیشتری از فیلتره گل به درون سازند است. همان گونه که در شکل ۶- دیده می‌شود. افزایش تراوایی سازند باعث کاهش جزئی تراوایی کیک گل می‌گردد. علت این امر می‌تواند رسوب بیشتر ذرات ریز در فضای متخلخل کیک در اثر شدت یافتن فرآیند فیلتراسیون و عبور جریان سوسپانسیون ذرات ریز از این محیط باشد. این اتفاق می‌تواند تا حدودی از شدت فیلتراسیون بکاهد و شاهد تغییرات زیادی در حجم فیلتره ورودی نباشیم. اما هر دوی این عوامل نمی‌توانند مانع از افزایش جزئی در ضخامت کیک ایجاد شده گردند.

### نتیجه‌گیری

با افزایش هجوم ذرات ریز به درون سازند شاهد افزایش شیب نمودار تغییرات ضخامت و ایجاد کیک گل ضخیم تری روی دیواره چاه خواهیم بود. گفتنی است میزان این افزایش با توجه به چگالی و گرانیروی و فاز مایع سیال حفاری و هم چنین چگالی ذرات جامد موجود در گل متفاوت است. اثر این پدیده بر حجم فیلتره‌ای که وارد سازند می‌شود به گونه‌ای است که با افزایش ذرات ورودی به سازند شاهد ورود حجم بیشتری از فیلتره گل به سازند خواهیم بود.

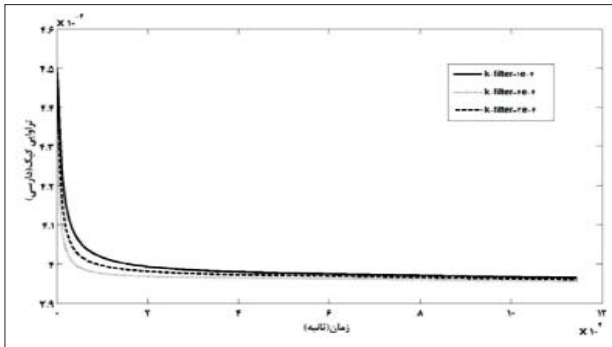
با کاهش جزء حجمی سیال حامل در دوغاب (نسبت حجم فاز مایع سیال حفاری به حجم کل سیال حفاری  $(Ei) slurry$ )، نمودار ضخامت کیک با شیب کمتری افزایش می‌یابد و در نهایت ضخامت کیک گل ایجاد شده کمتر خواهد بود. ضمن اینکه مقادیر تراوایی کیک گل به ویژه در زمان‌های ابتدایی فرآیند فیلتراسیون کاهش کمتری خواهد داشت.

اثر کاهش مقدار این عامل به گونه‌ای است که با کاهش مقدار آن مقدار فیلتره ورودی به محیط متخلخل نیز کاهش می‌یابد.

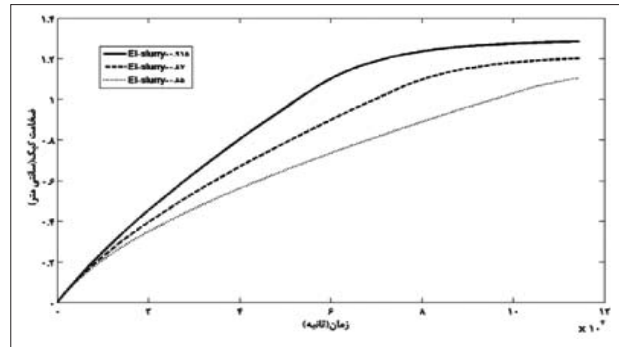
افزایش تراوایی سازند باعث کاهش جزئی تراوایی کیک و افزایش جزئی ضخامت کیک ایجاد شده می‌گردد.

البته در سازندها و مواد مختلف این میزان افزایش، متفاوت است. این عامل باعث می‌شود شاهد تغییرات زیادی در حجم فیلتره ورودی

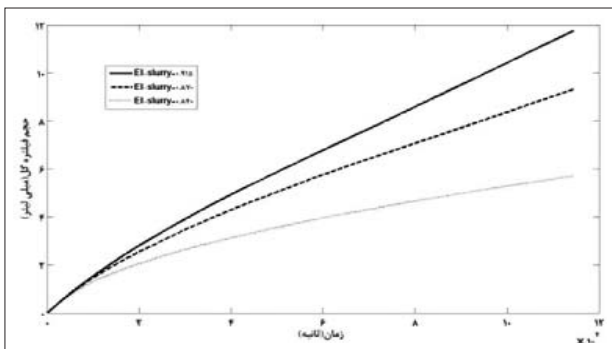
نباشیم. ■



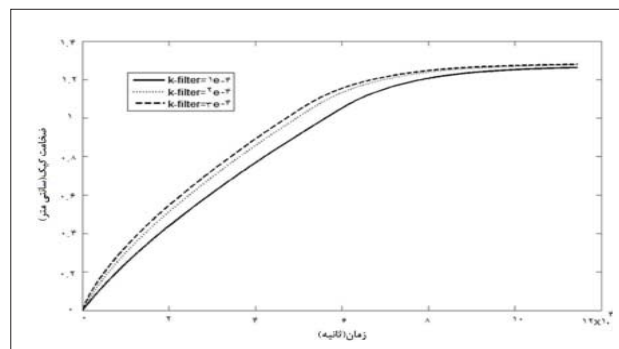
شکل ۶ | اثر عامل  $k_f$  روی بر تغییرات تراوایی کیک گل



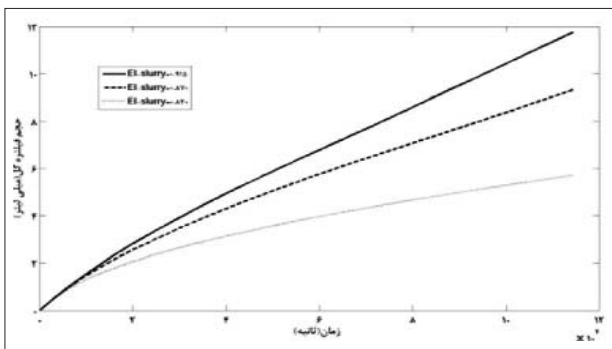
شکل ۷ | اثر عامل  $(\epsilon_s)_{slurry}$  بر نمودار تغییرات ضخامت کیک گل



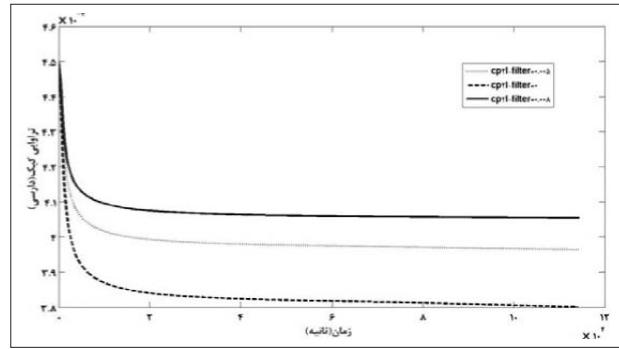
شکل ۸ | اثر عامل  $C_{p21}$  روی بر حجم فیلتر



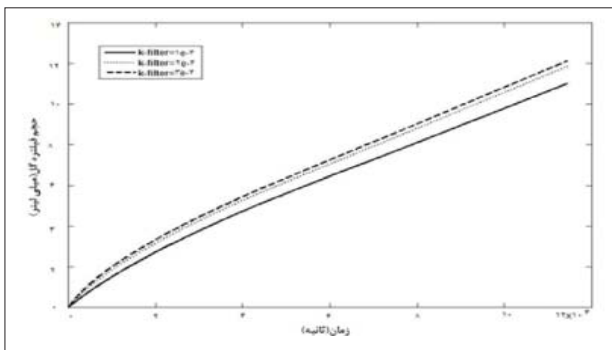
شکل ۹ | اثر عامل  $k_f$  بر نمودار تغییرات ضخامت کیک



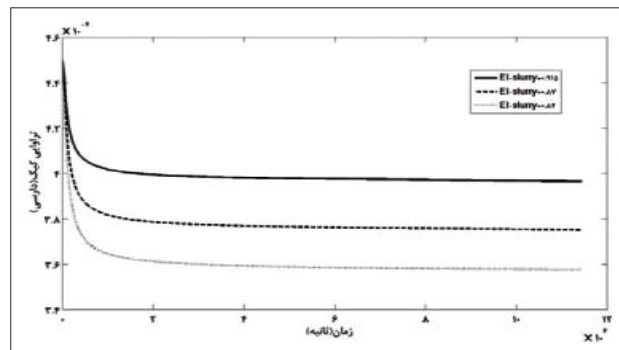
شکل ۱۰ | اثر عامل  $(\epsilon_s)_{slurry}$  بر نمودار حجم فیلتر



شکل ۱۱ | اثر عامل  $C_{p21}$  بر نمودار تغییرات تراوایی کیک گل



شکل ۱۲ | اثر عامل  $k_f$  روی نمودار حجم فیلتر



شکل ۱۳ | اثر عامل  $(\epsilon_s)_{slurry}$  بر نمودار تغییرات تراوایی کیک گل

مقدار	علامت	عامل
$\cdot / ۳۹ \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	$\phi = 1 - \epsilon_s^*$	تخلخل کیک بدون متراکم‌شدگی و رسوب ذرات ریز
$\cdot / ۶۱ \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	$\epsilon_s^* = 1 - \phi$	جزء حجمی ذرات کیک
$۱/۱۸ \text{ g/cm}^3$	$\rho_p$	چگالی ذرات
$۱/۲ \text{ g/cm}^3$	$\rho_f$	چگالی سیال حامل
$\cdot / ۱۰۹ \text{ fluid/g particle/cm}^3 \text{ carrier}$	$(C_p)_{\text{slurry}}$	جرم ذرات در واحد حجم سیال حامل
$\cdot / ۹۱۵ \text{ cm}^3 \text{ carrier fluid/cm}^3 \text{ slurry}$	$(\epsilon_s)_{\text{slurry}}$	جزء حجمی سیال حامل
$\cdot / ۰۰۰۲ \text{ cm}^3 \text{ carrier fluid/cm}^2 \text{ cake surface}$	$(\mu_f)_{\text{slurry}}$	شار حجمی سیال حامل دوغاب
$۱ \text{ atm}$	$P_c$	فشار ناحیه فیلتر
$\cdot / ۰۴۹ \text{ g small particle/cm}^3 \text{ carrier fluid}$	$(C_{p2})_{\text{slurry}} = (\rho_p \cdot \sigma_{p2})_{\text{slurry}}$	جرم ذرات ریز دوغاب در واحد حجم سیال حامل
$\cdot / ۴۱۵ \text{ cm}^3 \text{ small particle/cm}^3 \text{ carrier fluid}$	$(\sigma_{p2})_{\text{slurry}}$	حجم ذرات ریز دوغاب در واحد حجم سیال حامل
$\cdot / ۰۰۵ \text{ g small particle/cm}^3 \text{ carrier fluid}$	$(C_{p2})_{\text{filter}}$	جرم ذرات ریز فیلتره در واحد حجم سیال حامل
$۲۳ \text{ atm}$	$r_w$	شعاع فیلتر در معرض دوغاب
$۲۵ \text{ atm}$	$r_e$	شعاع فیلتر در معرض فیلتره
$۲۰$	$\tau_c$	تنش بحرانی ذرات
$۲۰$	$\tau_{c2}$	تنش بحرانی ذرات ریز
$\cdot / ۰۰۶۵ \text{ s}^{-1}$	$\bar{k}_d$	ثابت نرخ رسوب ذرات ریز در داخل کیک گل
$\cdot / ۰۰۰۰۴۳۵ \text{ s}^{-1}$	$\bar{k}_c$	ثابت نرخ جدایش ذرات ریز داخل کیک گل
$۱$	$k_d^\sigma$	ثابت نرخ رسوب ذرات کل روی سطح کیک گل
$\cdot / ۰۰۰۰۲ \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}$	$k_{c2}^\sigma$	ثابت نرخ فرسایش ذرات ریز از سطح کیک گل
$۳۰$	$\alpha_1$	عامل بدون بعد
$۱$	$\alpha_2$	عامل بدون بعد
$\cdot / ۰۹$	$\beta$	عامل بدون بعد
$\cdot / ۴۹$	$\delta$	عامل بدون بعد
$\cdot / ۰۰۰۴۵ \text{ darcy}$	$k_c^*$	تراوایی کیک بدون متراکم‌شدگی و رسوب ذرات
$\cdot / ۰۰۱ \text{ darcy}$	$k_f$	تراوایی فیلتر
$۱ \text{ cp}$	$\mu$	گرانروی سیال حامل
$۱$	$\alpha$	عامل بدون بعد
$۱$	$n$	عامل بدون بعد
$\text{atm } \infty$	$P_a$	ثابت تجربی
$۱ \text{ dyne/cm}^2/\text{sn}$	$k'$	عدد ثابت
$۱$	$n'$	عامل بدون بعد
$\cdot / ۰۲۵ \text{ cm/s}$	$D_r$	نرخ حفاری
$۱۰۰۰۰ \text{ cm}$	$h_R$	عمق مرجع
$۱۰۰ \text{ cm/s}$	$v$	سرعت مماسی دوغاب تزریقی
$\cdot / ۰۰۰۰۲ \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}$	$k_c^\sigma$	ثابت نرخ فرسایش ذرات کل از سطح کیک گل
$\cdot / ۱$	$k_{d2}^\sigma$	ثابت نرخ رسوب ذرات ریز روی سطح کیک گل
$۹/۸ \text{ m/s}^2$	$g$	شتاب گرانش زمین
$\cdot \text{ atm}$	$P_s$	فشار سطح زمین
$۶۸$	$P_p$	فشار پمپ گل



## پانویس‌ها

- <sup>1</sup>. mud cake  
<sup>2</sup>. cake thickness averaging  
<sup>3</sup>. Clark & Barbat  
<sup>4</sup>. Liu X & Civan  
<sup>5</sup>. Corapcioglu & Abboud

## منابع

- [1] Clark, P. E., & Barbat, O., "The Analysis of Fluid-Loss Data," SPE 18971 paper, Proc., SPE Joint Rocky Mountain Regional/Low Permeability
- [2] Liu, X., & Civan, F., «Formation Damage and Filter Cake Buildup in Laboratory Core Tests: Modeling and Model-Assisted Analysis,» SPE Formation Evaluation J., Vol. 11, No. 1, pp. 26-30. March 1996.
- [3] Corapcioglu, M. Y., & Abboud, N. M., "Cake Filtration with Particle Penetration at the Cake Surface," SPE Reservoir Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 317-326, August 1990.
- [4] Abboud, N. M., "Formation of Filter Cakes with Particle Penetration at the Filter Septum," Panicle Science and Technology, Vol. 11, pp. 115-131, 1993.
- [5] Civan, F., «A Multi-Phase Mud Filtrate Invasion and Well Bore Filter Cake Formation Model,» SPE 28709 paper, Proceedings of the SPE International Petroleum Conference & Exhibition of Mexico, Veracruz, Mexico, pp. 399-412, October 10-13, 1994.
- [6] Tien, C., Bai, R., & Ramarao, B. V., «Analysis of Cake Growth in Cake Filtration: Effect of Fine Particle Retention,» AIChE J., Vol. 43, No. 1, pp. 33-44, January 1997
- [7] Forchheimer, P., "Wasserbewegung durch Boden," Zeitz. ver. Deutsch Ing. Vol. 45, pp. 1782-1788, 1901
- [8] Civan, F., "Predictive Model for Filter Cake Buildup and Filtrate Invasion with Non-Darcy Effects," SPE 52149 paper, Proceedings of the 1999 SPE Mid-Continent Operations Symposium held in Oklahoma City, Oklahoma, March 28-31, 1999a.
- [9] Civan, F., "A Multi-Purpose Formation Damage Model," SPE 31101 paper, Proceedings of the SPE Formation Damage Control Symposium held in Lafayette, Louisiana, pp. 311-326 February 14-15, 1996.
- [10] Civan, F., "Incompressible Cake Filtration: Mechanism, Parameters, and Modeling," AIChE J., Vol. 44, No. 11, pp. 2379-2387 November 1998a.
- [11] Ravi, K. M., Beirute, R. M., & Covington, R. L., "Erodability of Partially Dehydrated Gelled Drilling Fluid and Filter Cake," SPE 24571 paper, Proceedings of the 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Washington, DC, October 4-7, pp. 219-234, 1992.
- [12] Dake, L. P., Fundamentals of Reservoir Engineering, Elsevier Scientific Publishing Co., New York, 443 p, 1978
- [13] Tiller, F. M., & Crump, J. R., "Recent Advances in Compressible Cake Filtration Theory," in Mathematical Models and Design Methods in Solid-Liquid Separation, A. Rushton, ed., Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1985.
- [14] Civan, F., "Reservoir Formation Damage; Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation" Book, Chapter 12