

# یک روش نوین برای محاسبه شعاع مؤثر چاه دارای شکاف اسیدی در مخازن گاز میعانی

حجت مهدی یار\*، عظیم سالاری، جعفر قاجار

بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

**چکیده:** شکاف اسیدی چاه یکی از روش‌های مؤثر جلوگیری یا کاهش تشکیل میعان‌های مخازن گاز میعانی کربناته است. بدین ترتیب که شکست موفق چاه، با کاهش مقاومت در برابر جریان سیال، امکان بالا نگه داشتن فشار ته چاه را فراهم می‌کند. یکی از مباحث مهم در این زمینه برآورد شعاع مؤثر چاه ترک‌دار می‌باشد. محاسبه این کمیت افزون بر امکان برآورد ضریب تولید چاه وسیله ای مفید برای تعریف چاه در مدل سازی مخزن می‌باشد. در این پژوهش رابطه‌های لازم برای برآورد شعاع مؤثر چاه دارای شکست اسیدی ارائه می‌شود. در این راستا نخست رابطه‌های مربوط به برآورد طول و عرض شکاف و همچنین ضریب هدایت آن معرفی و سپس تأثیر اینرسی بر کاهش هدایت مؤثر چاه بیان می‌شود. عملکرد شکاف در مخازن گاز میعانی می‌تواند بسیار متفاوت از آن در مخازن نفتی و یا گازی می‌باشد. دلیل این امر پیچیدگی جریان دو فازی گاز میعانی در ماتریکس و شکاف است. با این موردها، رابطه‌ای کلی برای برآورد شعاع مؤثر چاه ترک‌دار درون مخزن گاز میعانی ارائه می‌شود. در این رابطه افزون بر تأثیر تشکیل میعانات، تأثیر اینرسی و کاپلینگ بر تراوایی نسبی درون شکاف و ماتریکس بر شعاع مؤثر چاه لحاظ شده است.

**کلمات کلیدی:** شکاف اسیدی، شکاف هیدرولیکی، شعاع مؤثر چاه، عامل پوسته، مخازن گاز میعانی.

**KEYWORDS:** Acid fracture, Hydraulic fracture, Effective wellbore radius, Gas condensate reservoirs, Skin factor.

## مقدمه

افزون بر این، میعان‌ها به شکل مانعی، به‌ویژه در اطراف چاه، تراوایی نسبی گاز و در نتیجه سرعت تولید را کم می‌کنند. از این رو مطالعه و بررسی روش‌هایی برای جلوگیری از تشکیل میعان‌ها و یا بیرون راندن آنان از مخزن مورد توجه و مطالعه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از روش‌های جلوگیری یا کاهش تشکیل میعان‌های گازی شکست هیدرولیکی است. شکست هیدرولیکی چاه با کاهش مقاومت جریان سیال، امکان بالا نگه داشتن فشار ته چاهی را فراهم می‌کند. به این ترتیب که با کاهش مقاومت، اختلاف فشار کم‌تری برای تولید

در مخازن گاز میعانی تشکیل میعان‌های درون مخزن و اطراف چاه باعث کاهش ارزش فرآورده‌ها و همچنین کاهش سرعت تولید می‌شود. به این مفهوم که در نقطه‌هایی از مخزن که فشار سیال کم‌تر از فشار شبنم شود، در اثر پدیده میعان معکوس، میعاناتی درون مخزن تشکیل می‌شوند. این میعان‌ها به‌طور عمده از هیدروکربن‌های سنگین‌تر گاز شکل گرفته و به دلیل آن که در مقایسه با فاز گاز تحرک پذیری کم‌تری دارند عمده تولید نمی‌شوند. بنابراین به تدریج سیال درون مخزن، از مواد با ارزش، غنی‌تر ولی فرآورده‌ها به تدریج سبک‌تر و بی ارزش‌تر می‌شوند.

\* عهده‌دار مکاتب

+E-mail: mahdiyar@shirazu.ac.ir

**شعاع مؤثر چاه ترک‌دار**

شکاف هیدرولیکی در دو نوع عمده پروپانتی و اسیدی اجرا می‌شود. در هر دو نوع، نخست سیالی با فشاری بیش از فشار شکست سازند به آن تزریق می‌شود. برای باز ماندن شکست، پس از کاهش نیروی هیدرولیک سیال، دو روش عمده وجود دارد که عبارتند از تزریق پروپانت و یا تزریق اسید. پروپانت ذره‌های مستحکمی در اندازه ماسه بوده و شکافی که در آن پروپانت تزریق شده شکاف پروپانتی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در شکاف اسیدی، که تنها در مخازن کربناته قابل اجراست، پس از ایجاد شکاف هیدرولیکی هیدروکلریک اسید به درون شکاف تزریق می‌شود. واکنش اسید با سطح جانبی شکاف و حل شدن کربنات درون اسید باعث می‌شود که پس از پایان عملیات و به هم آمدن لایه‌های زمین، شکافی اسیدی باقی بماند.

شکل ۱ به صورت شمایی یک چاه ترک‌دار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود در یک شکاف ایده آل فرض می‌شود که شکاف دارای دو بال قرینه و با ضخامت ثابت است. عامل‌هایی که تولید چاه شکسته شده را کنترل می‌نمایند عبارتند از:

$$x_f: \text{طول هر بال شکاف (نیم طول شکاف)}$$

$$w_f: \text{ضخامت شکاف}$$

$$k_f: \text{تراوایی شکاف}$$

$$k: \text{تراوایی ماتریکس.}$$

تأثیر این چهار پارامتر بر عملکرد شکاف در تولید چاه را می‌توان توسط دو عدد بدون بعد خلاصه نمود [۱]. هدایت پذیری بدون بعد شکاف<sup>۲</sup> که با  $C_{FD}$  نشان داده می‌شود، عبارت است از نسبت هدایت درون شکاف به هدایت درون ماتریکس و به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$C_{FD} = \frac{k_f w_f}{k x_f} \quad (1)$$

عدد بدون بعد دوم عبارت است از نسبت نیم طول شکاف به نصف طول سطح تخلیه<sup>۳</sup>.

$$I_x = \frac{x_f}{x_e} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $I_x$  و  $x_e$  به ترتیب نسبت نفوذ شکاف و نصف طول سطح تخلیه (مربع شکل) می‌باشند.

شعاع مؤثر چاه<sup>۴</sup> که کنترل کننده شاخص تولید چاه است، دارای رابطه ساده زیر با ضریب پوسته چاه می‌باشد.

$$r'_w = x_f e^{-S_f} \quad (3)$$

از چاه مورد نیاز بوده و می‌توان فشار ته چاه را بالاتر نگه داشت. روشن است که چنانچه فشار ته چاه از فشار شبنم بالاتر باقی بماند، میعان‌هایی تشکیل نمی‌شود.

شکاف هیدرولیکی به دو شکل شکاف پروپانتی و شکاف اسیدی اجرا می‌شود. شکاف اسیدی، تنها در مخازن کربناته قابل اجراست. در این عملیات، پس از آن‌که با تزریق سیالی، با فشاری بالاتر از فشار شکست سازند، شکست هیدرولیکی ایجاد شد هیدروکلریک اسید به درون شکاف تزریق می‌شود. اسید تزریقی با خوردگی سطوح جانبی شکاف، باعث می‌شود پس از عملیات و به هم آمدن لایه‌های زمین، شکاف به‌طور کامل بسته نشود.

محاسبه جریان چاه دارای شکاف یکی از مباحث مهم در مهندسی بهره برداری و همچنین شبیه سازی مخزن است. از این رو بسیاری از پژوهشگران مطالعه‌های گسترده‌ای در این زمینه انجام داده‌اند [۹-۱]. مهدی یار و همکاران [۲، ۱] رابطه‌هایی برای برآورد شعاع مؤثر چاه دارای شکاف پروپانتی در مخازن نفتی، گازی و گاز میعانی ارائه دادند. فرایند تزریق اسید در چاه به منظور افزایش تولید نیز مورد مطالعه گسترده قرار گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به مدل ارائه شده توسط معارف و همکاران اشاره نمود [۱۰].

سالاری [۴] نشان داد که می‌توان از رابطه‌های مهدی یار و همکاران [۲، ۱] برای برآورد شعاع مؤثر چاه دارای شکاف اسیدی در مخازن نفتی استفاده نمود. برای استفاده از این رابطه‌ها نیاز به داشتن اندازه‌های شکاف اسیدی است. مقدارهای این دو کمیت را می‌توان با استفاده از رابطه‌های مهدی یار و همکاران [۳] برآورد نمود.

ولی، تا آنجا که اطلاعات نویسندگان این مقاله نشان می‌دهد، تاکنون روابطی برای برآورد عملکرد چاه دارای شکاف اسیدی در مخازن گاز میعانی ارائه نشده است. در این نوع مخازن به دلیل پیچیدگی جریان، شعاع مؤثر چاه می‌تواند متفاوت از مقدار آن در مخازن نفت و گاز معمولی باشد. دلیل این امر افزون بر پیچیدگی‌های جریان دو فازی تأثیرهای دو گانه سرعت بر تراوایی نسبی در این سامانه‌های دارای کشش سطحی کم، می‌باشد [۲].

در این مطالعه رابطه‌های مورد نیاز برای برآورد شعاع مؤثر چاه دارای شکاف اسیدی در مخازن گازی و گاز میعانی توسعه و ارائه می‌شود. این معادله‌ها می‌توانند در برآورد شاخص تولید چاه دارای شکاف، مدل سازی چاه و همچنین برآوردهای اقتصادی عملیات شکست چاه دارای کاربرد گسترده‌ای باشند.

(۱) Propped fracture

(۳) Drainage area

(۲) Dimension- less fracture conductivity

(۴) Effective wellbore radius

$$\frac{x_f}{h} = \frac{\frac{q_{inj1} t}{h^2 w_f}}{\left(\frac{\rho_r(1-\phi)}{\beta\rho\omega}\right)^{1.0453} + \left(\frac{(1-f_a)\sqrt{\frac{k\phi\Delta p t}{2\mu}}}{w_f}\right)^{0.2567}} \quad (8)$$

در معادله بالا:

$q_{inj1}$ : شدت جریان تزریق اسید به یک بال شکاف،  $\Delta p$  اختلاف بین فشار اسید و فشار سیال درون ماتریکس،  $t$  مدت زمان تزریق اسید و  $f_a$  کسری از اسید هدررفت که با سنگ واکنش می‌دهد (به‌طور معمول ۰/۳ می‌باشد).

پارامتر مورد نیاز دیگر برای برآورد  $C_{FD}$  هدایت‌پذیری نهایی شکاف  $(k_f w_f)$  یعنی در انتهای عملیات و به هم آمدن شکاف می‌باشد. یکی از رابطه‌های معتبر در این زمینه رابطه ارایه شده توسط دنگ و همکاران [۵] است.

$$k_f w_f = C'_1 \exp(-C'_2 \sigma_c) \quad (9)$$

$$C'_1 = 4.48 \times 10^9 [0.1756 \operatorname{erf}(0.8\sigma_D)]^3 w_{fa}^{2.49} \left[ 1 + \left( 1.82 \operatorname{erf}\left(3.25(\lambda_{D,x} - 0.12)\right) - 1.31 \operatorname{erf}\left(6.71(\lambda_{D,z} - 0.03)\right) \right) \sqrt{\exp(\sigma_D) - 1} \right] \times [0.22(\lambda_{D,x}\sigma_D)^{2.8} + 0.01((1 - \lambda_{D,z})\sigma_D)^{0.4}]^{0.52} \quad (10)$$

$$C'_2 = [14.9 - 3.78 \ln(\sigma_D) - 6.81 \ln(E)] \times 10^{-4} \quad (11)$$

همان‌گونه که دیده می‌شود، برای استفاده از معادله‌های بالا افزودن بر ویژگی‌های فیزیکی سنگ احتیاج به داشتن مقدار  $w_{fa}$  می‌باشد.  $w_{fa}$  عبارت است از عرض شکاف در پایان تزریق اسید (پیش از کاهش فشار هیدرولیکی اسید و به هم آمدن لایه‌های زمین). مهیدی یار و همکاران [۳] رابطه زیر را برای محاسبه این کمیت ارایه داده‌اند.

$$w_{FD} = \frac{C_0 N_1^{C_1} N_2^{C_2} N_3^{C_3} N_4^{C_4}}{1 + N_5^{C_5}} \quad (12)$$

عدهای بدون بعد این معادله به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$N_1 = \frac{\sqrt[3]{q_{inj1} t}}{h} \quad (13)$$

$$N_2 = \frac{kt}{h} \quad (14)$$

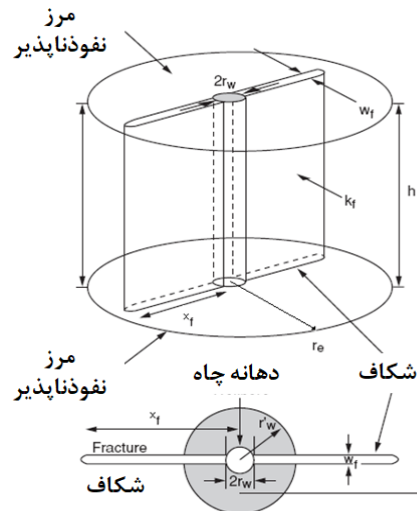
$$N_3 = \frac{1}{(1-\phi)} \quad (15)$$

$$N_4 = \omega \quad (16)$$

$$N_5 = \frac{\mu h^2}{\Delta p t k} \quad (17)$$

$$w_{FD} = \frac{w_{fa}}{h} \quad (18)$$

ثابت‌های  $C_0$  تا  $C_5$  برای سنگ‌های دولومیت و آهکی، در جدول ۱ ردیف شده‌اند.



شکل ۱- نمایش شمایی یک چاه با شکاف هیدرولیکی درون یک سازند استوانه‌ای

در مخازن تک فاز و در غیاب تأثیر نیروی اینرسی (جریان دارسی)، مهیدی یار و همکاران [۱] روابط زیر را برای برآورد شعاع مؤثر چاه دارای شکاف پروپانتی، معرفی نمودند.

$$r'_w = \frac{x_f}{2 \times \delta + \frac{\pi}{C_{FD}}} \quad (4)$$

ثابت  $\delta$  برای دو حالت پایا و شبه پایا، به ترتیب، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\delta = \ln\left(e - \frac{0.17}{r_{eD} - 0.87}\right) \quad (5)$$

$$\delta = \ln\left(e + \frac{0.64}{(r_{eD} - 0.746)^{1.283}}\right) \quad (6)$$

در این معادله‌ها  $r_{eD}$  شعاع خارجی بدون بعد است که با نسبت نفوذ شکاف رابطه وارون دارد.

$$r_{eD} = \frac{r_e}{x_f} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{I_x} \quad (7)$$

در موردهایی که  $I_x \leq 0.2$  می‌باشد معادله‌های (۵) و (۶) یکسان شده و عملکرد شکاف برای دو حالت پایا و شبه پایا یکسان است. ولی برای شکاف‌های طولانی ( $I_x > 0.2$ ) نتیجه‌های دو معادله یادشده متفاوت می‌شود. سالاری [۴] نشان داد که معادله (۴) برای محاسبه شعاع مؤثر چاه‌های دارای شکاف اسیدی نیز قابل استفاده است. به این منظور لازم است که  $C_{FD}$  براساس هدایت‌پذیری  $(k_f w_f)$  و نیم طول شکاف اسیدی ( $x_f$ ) محاسبه شود. برای محاسبه نیم طول شکاف اسیدی مهیدی یار و همکاران معادله زیر را ارایه دادند [۳]:

جدول ۱- ثابت‌های معادله عرض شکاف در پایان تزریق اسید ( $w_{fa}$ ).

| Rock type  | $C_0$   | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$  |
|--|---------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Dolomite<br>$\beta=1/27$<br>$\rho_r=2840 \text{ kg/m}^3$   | ۰/۹۴۳۵۷ | ۰/۰۴  | ۰/۹۷۴ | ۱/۰   | ۱/۱۰۱ | ۰/۰۰۷۵ |
| Limestone<br>$\beta=1/372$<br>$\rho_r=2710 \text{ kg/m}^3$ | ۱/۰۶۳۶۵ | ۰/۰۴  | ۰/۹۷۴ | ۱/۰   | ۱/۱۰۱ | ۰/۰۰۷۵ |

## تأثیر اینرسی

به دلیل مقدار چشمگیر سرعت سیال درون شکاف، به‌طور معمول تأثیر نیروی اینرسی بر عملکرد شکاف قابل چشم‌پوشی نبوده و در واقعیت نیروی اینرسی باعث کاهش هدایت‌پذیری مؤثر شکاف می‌شود. مهدی یار و همکاران [۲] رابطه‌های گوناگونی را که برای برآورد هدایت مؤثر شکاف ارائه شده بود مورد واکاوی قرار دادند. نتیجه‌های به‌دست‌آمده نشان داد که رابطه زیر که توسط گوپی و همکاران [۶] ارائه شده دارای دقت خوبی است.

$$C_{fd-eff} = C_{fd} \times \frac{1}{1+0.62 \times Re_w} \quad (19)$$

در این‌جا  $C_{fd-eff}$  ضریب هدایت مؤثر شکاف و  $Re_w$  عدد رینولدز محاسبه شده در شرایط دهانه چاه می‌باشد. که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Re_w = \frac{\rho_w v_w k_f \beta_f}{\mu_w} \quad (20)$$

در معادله (۲۰)،  $\beta_f$  ضریب اینرسی درون شکاف و  $\rho_w$  و  $\mu_w$  به ترتیب دانسیته و گرانیوی سیال در فشار ته چاهی می‌باشند. همچنین، سرعت در ورودی شکاف به دهانه چاه است و دارای رابطه زیر با  $q_w$ ، شدت جریان در شرایط ته چاهی، می‌باشد.

$$v_w = \frac{q_w}{2hw_f} \quad (21)$$

در معادله بالا  $w_f$  عرض نهایی شکاف، پس از به‌هم آمدن لایه‌های زمین، می‌باشد. مقدار این کمیت را می‌توان با داشتن  $k_f w_f$ ، برآورد شده از معادله (۹)، به‌دست آورد. می‌دانیم که از برابر قرار دادن معادله جریان آرام مابین دو صفحه موازی با معادله داری تراوایی معادل یک شکاف به ضخامت  $w_f$  به شکل زیر به‌دست می‌آید.

$$k_f = \frac{w_f^2}{12} \quad (22)$$

بنابراین می‌توان گفت:

$$w_f = (12k_f w_f)^{1/3} \quad (23)$$

برای برآورد هدایت‌پذیری مؤثر شکاف ضریب اینرسی شکاف ( $\beta_f$ ) نیز مورد نیاز است. این پارامتر را می‌توان با استفاده از مقدار به‌دست آمده برای تراوایی شکاف (معادله (۲۲)) و به کمک رابطه‌های تجربی ارائه شده برای ضریب اینرسی، مانند رابطه جونز [۱۱] و یا گریتسما [۱۲] برآورد کرد. پس از محاسبه ضریب هدایت مؤثر، شعاع مؤثر چاه از معادله زیر قابل محاسبه است.

$$r'_w = \frac{x_f}{2 \times \delta + \frac{\pi}{C_{fd-eff}}} \quad (24)$$

## شکاف اسیدی در مخازن گاز میعانی

رابطه‌هایی که تا کنون معرفی شد امکان محاسبه شعاع مؤثر چاه دارای شکاف اسیدی در سامانه تک فاز (نفث و یا گاز) را فراهم می‌نماید. ولی چطور می‌توان از این رابطه‌ها برای برآورد شعاع مؤثر چاه در مخازن گاز میعانی استفاده نمود؟ روشن است که در این نوع مخازن، به‌دلیل تشکیل میعان‌ها در درون و اطراف شکاف و همچنین تأثیر پیچیده سرعت بر تراوایی نسبی، محاسبه‌های شعاع مؤثر چاه پیچیده‌تر می‌باشد.

شکل ۲ توزیع  $GTR^1$ ، نسبت دبی گاز به مجموع شدت جریان گاز و مایع، را در اطراف یک چاه ترکدار نشان می‌دهد که توسط شبیه ساز خانگی مدل شده است. اطلاعات به‌کارگرفته شده در این شبیه سازی در جدول‌های ۲ و ۳ آمده و توضیحات مربوط به شبیه ساز خانگی در مرجع [۲] بیان شده است.

همان  $k_i$  که از شکل ۲ دیده می‌شود ناحیه دو فازي بیش‌تر در اطراف شکاف شکل می‌گیرد. در صورت ثابت ماندن فشار ته چاهی، با افزایش ضریب هدایت مؤثر شکاف ناحیه دو فازي به سمت محور

(۱) Gas Total Ratio

جدول ۲- اطلاعات به کار گرفته شده در شبیه سازی شکاف؛ شکل ۲

| C <sub>FD-eff</sub> | C <sub>FD</sub> | فشار ته چاه | P <sub>c</sub> | β <sub>f</sub>                         | k <sub>f</sub> | w <sub>f</sub> | x <sub>f</sub> | فشار شبنم   | دما   | سیال   |
|---------------------|-----------------|-------------|----------------|--|----------------|----------------|----------------|-------------|-------|--|
| ۱/۰۵                | ۲/۴۲۸           | ۳۵۲۱/۵ psia | ۳۵۷۱/۵ psia    | ۳/۵۱۱×۱۰ <sup>-۵</sup> m <sup>-۱</sup> | ۱۴۶ D          | ۱۶ mm          | ۱۰۵/۷ m        | ۳۵۴۱/۵ psia | ۵۰۰ K | C <sub>1</sub> -C <sub>10</sub> (Z <sub>C1</sub> =٪۸۰) |

جدول ۳- مقادیرهای تراوایی نسبی پایه سنگ ماتریس استفاده شده در این مطالعه

| GTR                                   | ۰ | ۰/۷۱   | ۰/۹۱   | ۰/۹۷   | ۰/۹۹   | ۰/۹۹۵  | ۱/۰ |
|---------------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| k <sub>rgb</sub> (Matrix, k=۱۰/۷۳ mD) | ۰ | ۰/۰۷۴۴ | ۰/۱۹۲۷ | ۰/۳۳۰۹ | ۰/۵۹۴۵ | ۰/۷۳۷۹ | ۱/۰ |

$$MR_w = \frac{M_{rbflw}}{M_{rmlw}} = \frac{\left(\frac{\rho_g}{\mu_g} k_{rgb-f} + \frac{\rho_c}{\mu_c} k_{rcb-f}\right)_{well-bore}}{\left(\frac{\rho_g}{\mu_g} k_{rg-m} + \frac{\rho_c}{\mu_c} k_{rc-m}\right)_{well-bore}} \quad (26)$$

در معادله حاضر،  $k_{rgb-f}$  و  $k_{rcb-f}$  تراوایی نسبی پایه فاز گاز و میعانات در شکاف می باشد. منظور از تراوایی نسبی پایه، تراوایی نسبی در شرایط آزمایشگاه (سرعت کم و کشش سطحی به نسبت بالا) می باشد. همچنین در این معادله  $k_{rg-m}$  و  $k_{rc-m}$ ، به ترتیب، تراوایی نسبی پایه گاز و میعانات در ماتریکس است. این مقادیر را می توان با داشتن مقادیرهای آزمایشگاهی تراوایی پایه و استفاده از رابطه های ارایه شده توسط غلامپور و مهدی یار [۱۳] محاسبه کرد. در رابطه (۲۵)،  $Re_w$ ، عدد رینولدز سامانه دو فازی در شرایط چاه بوده و به صورت زیر به دست می آید [۲]:

$$Re_w = \frac{\bar{\rho}_w v_w k_f \beta_f (k_{rgb-f} + k_{rcb-f})}{\mu_w} \quad (27)$$

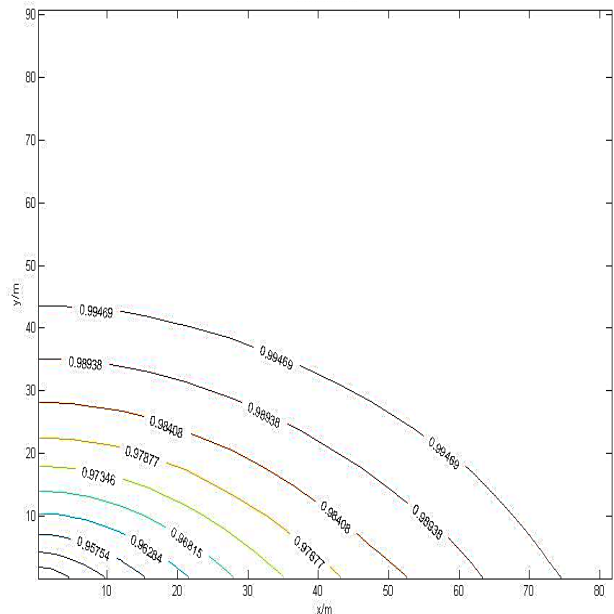
در اینجا  $\bar{\rho}_w$  و  $\mu_w$ ، دانسیته و گرانیوی میانگین بوده و در شرایط چاه اندازه گیری می شوند.

$$\bar{\rho}_w = GTR_w \times \rho_{gw} + (1 - GTR_w) \rho_{cw} \quad (28)$$

$$\mu_w = GTR_w \times \mu_{gw} + (1 - GTR_w) \mu_{cw} \quad (29)$$

در معادله ۲۷،  $\beta_f$ ، فاکتور اینرسی شکاف در حالت تک فازی است. با جمع بندی مطالب بیان شده در این قسمت می توان مراحل محاسبه شعاع مؤثر چاه تر کردار اسیدی در یک مخزن گاز میعانی را به شرح زیر خلاصه نمود:

- ۱- محاسبه عرض شکاف در پایان تزریق اسید و پیش از کاهش فشار هیدرولیکی ( $w_{fa}$ ) بوسیله معادله (۱۲).
- ۲- برآورد نیم طول شکاف ( $x_f$ ) با استفاده از معادله ۸.
- ۳- تعیین ضریب هدایت درون شکاف در پایان عملیات ( $k_f w_f$ ) با بهره گیری از معادله (۹).
- ۴- محاسبه ضریب هدایت بدون بعد ( $C_{FD}$ ) بوسیله معادله (۱).
- ۵- برآورد ضخامت نهایی شکاف ( $w_f$ ) با استفاده از معادله (۲۳).



شکل ۲- توزیع GTR در یک چهارم ناحیه تخلیه اطراف چاه تر کردار. سایر اطلاعات در جدول شماره ۲ آمده است.

افقی متمایل تر می شود. دلیل این امر کاهش افت فشار داخل شکاف با افزایش ضریب هدایت شکاف است. ولی در شدت جریان ثابت با افزایش راندمان شکاف، فشار ته چاهی بیش تر و در نتیجه ناحیه دو فازی کوچک تر می شود.

مهدی یار و همکاران [۲] تأثیر سرعت بر تراوایی نسبی درون شکاف و ماتریکس را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفتند که درون شکاف پدیده کاپلینگ قابل چشم پوشی باشد ولی در ماتریکس این گونه نبوده و بایستی تراوایی نسبی متأثر از سرعت را وارد محاسبه ها نمود. بر این مبنا ضریب هدایت پذیری متأثر از پدیده های سرعت و تشکیل میعان ها را می توان از رابطه زیر به دست آورد [۲].

$$C_{FD-eff} = C_{FD} \times MR_w \times \frac{1}{1 + 0.62 \times Re_w} \quad (25)$$

در این رابطه  $MR_w$  نسبت تحرک پذیری نسبی شکاف به ماتریکس بوده و رابطه آن به صورت زیر است:

جدول ۴- مقدارهای پارامترهای شکاف استفاده شده در اعتبارسنجی، شکل ۳.

| $C_{FD-eff}$<br>(range) | $P_e/psia$ | $GTR_w$<br>(range) | $P_{wf}/psia$<br>(range) | $I_x=X_f/X_e$<br>(range) | $\beta_f/m^{-1}$       | $k_f/D$ | $k_{fwf}/mD-m$              | $x_f/m$           | ضخامت<br>سازند | تعداد<br>داده | سیال  | سنگ ماتریس   |
|-------------------------|------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|---------|-----------------------------|-------------------|----------------|---------------|---|--|
| ۰/۱-۲۹                  | ۱۸۵۵       | ۰/۶۲-۰/۸۴          | ۱۳۵۰-۱۸۵۰                | ۰/۰۴-۰/۷                 | $۳/۵۱۱ \times ۱۰^{-۵}$ | ۱۴۶     | ۰/۸۷۶، ۰/۲۹۲<br>۲۰۴۴ و ۱۴۶۰ | ۰/۴۲، ۰/۱۷<br>۱۰۶ | ۳۰             | ۱۹۸           | $C_1-C_4$<br>( $Z_{C1} = ۷۳/۶$ )<br>$T=۳۱۱K$<br>$P_D= ۱۸۶۵ psi$ | Texas Cream<br>$k=۹/۱mD$<br>$\beta=۳/۹۲۷ \times ۱۰^{-۹}m^{-1}$ |

۶- محاسبه عدد رینولدز به کمک معادله (۲۷).

۷- برآورد ضریب هدایت بدون بعد مؤثر ( $C_{FD-eff}$ ) با استفاده از معادله (۲۵).

۸- محاسبه شعاع مؤثر چاه ( $r'_w$ ) به کمک معادله (۲۴).

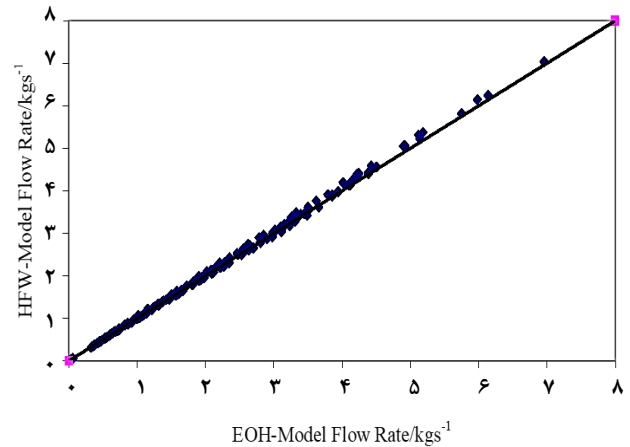
### اعتبارسنجی رابطه‌های ارایه شده

برای اعتبارسنجی روش ارایه شده در محاسبه شعاع مؤثر چاه شکاف‌دار میزان جریان ۱۹۸ چاه شکاف دار، با مشخصات نشان داده شده در جدول‌های ۳ و ۴، با دو روش عددی برآورد و نتیجه‌های مقایسه شده است. در روش اول شکاف و ناحیه اطراف چاه با استفاده از گریدبندی ریز مدل شده و جریان ورودی از شکاف به چاه محاسبه می‌شود ولی در روش دوم به‌جای استفاده از گریدبندی ریز، چاه شکاف‌دار به صورت یک چاه حفره باز و دارای شعاعی برابر با شعاع معادل چاه شکاف‌دار مدل و شدت جریان سیال ورودی به آن محاسبه می‌شود. مقایسه نتیجه‌های این دو روش در شکل ۳ آمده است. در اینجا متوسط درصد اختلاف نتیجه‌های دو روش بسیار پایین و برابر با ۷/۸ درصد می‌باشد که تأییدکننده دقت بالای روش ارایه شده در محاسبه شعاع مؤثر چاه شکاف‌دار اسیدی در مخازن گاز می‌باشد.

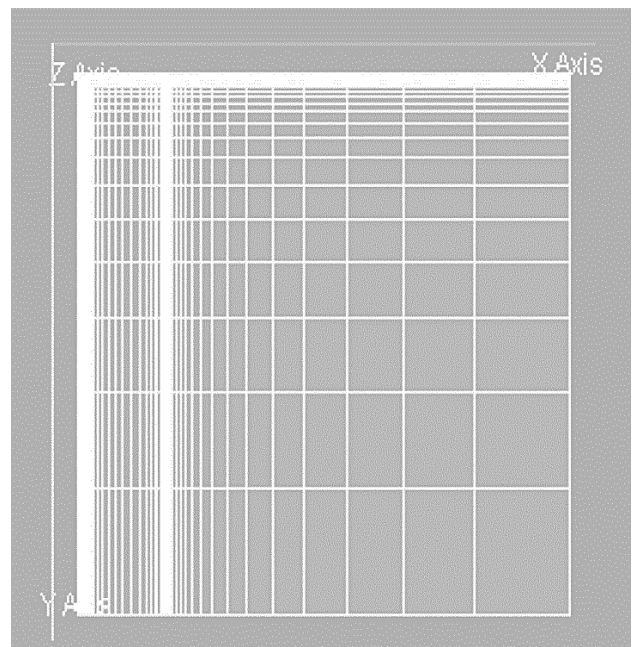
شکل ۴ نمونه‌ای از گریدبندی ریز مورد استفاده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود به دلیل تقارن در ناحیه تخلیه، تنها یک چهارم ماتریس و شکاف مدل می‌شود. در این گریدبندی ناحیه تخلیه به ۱۰۰۰ بلوک، ۴۰ بلوک (ستون) در راستای x و ۲۵ بلوک (ردیف) در راستای y تقسیم می‌شود. شکاف به ۲۵ بلوک نخستین ردیف اول تقسیم شده است. بنابراین عرض بلوک‌های این ردیف برابر با یک دوم عرض شکاف اصلی است. سایر توضیحات مربوط به شبیه‌سازهای عددی که در این قسمت مورد استفاده قرار گرفته اند در مرجع [۱۵] آمده است.

### تأثیر تشکیل میعانات و پدیده‌های سرعت بر عملکرد شکاف اسیدی در مخازن گاز میعانی

با استفاده از معادله‌های ارایه شده در این مقاله می‌توان تأثیرهای گوناگون سرعت و همچنین تشکیل ناحیه دو فازی را بر عملکرد



شکل ۳- شدت جریان چاه شکاف‌دار برآورده شده با استفاده از مدل گریدبندی ریز (HFW-Model) بر حسب مقدارهای برآورده شده با استفاده از مدل حفره باز (EOH-Model) که در آن شعاع چاه برابر با شعاع معادل در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- نمونه ای از مدل گریدبندی ریز که در آن یک چهارم ناحیه تخلیه مدل شده است. شکاف به بلوک‌های یکم تا بیست و پنجم ردیف اول تقسیم شده است.

جدول ۵- پارامترهای یک شکاف اسیدی

| $C_{fD-eff}$ | $C_{fD}$ | $P_e/psia$ | $GTR_w$ | $P_{wf}/psia$ | $I_x=X_f/X_e$ | $\beta_f/m^{-1}$       | $k_{fw}/mD-m$ | $x_f/m$ | ضخامت<br>سازند/ متر | سیال   | سنگ ماتریس   |
|--------------|----------|------------|---------|---------------|---------------|------------------------|---------------|---------|---------------------|--|--|
| ۰/۳۷         | ۱/۲۱     | ۳۵۷۱       | ۰/۹۴    | ۳۵۷۱          | ۰/۱۸          | $۳/۵۱۱ \times ۱۰^{-۵}$ | ۱۱۶۸          | ۱۰۵/۷   | ۳۰                  | $C_1-C_{10}$<br>( $Z_{C1} = ۰/۸۰$ )<br>$T=۵۰۰K$<br>$P_D=۳۵۴۱/۵psi$ | Texas Cream<br>$k=۹/۱mD$<br>$\beta=۳/۹۲۷ \times ۱۰^{-۹}$ |

### فهرست نمادها

|              |   |
|--------------|---|
| $C_{fD}$     | هدایت پذیری بدون بعد شکاف                     |
| $C_{fD-eff}$ | ضریب هدایت مؤثر شکاف                          |
| E            | مادول یانگ                                    |
| $f_a$        | کسری از اسید هدر رفت واکنش دهنده با سنگ واکنش |
| h            | ارتفاع شکاف                                   |
| $I_x$        | نسبت نفوذ شکاف                                |
| k            | تراوایی ماتریکس.                              |
| $k_f$        | تراوایی شکاف                                  |
| $k_{rgb-f}$  | تراوایی نسبی پایه فاز گاز در شکاف             |
| $k_{rcb-f}$  | تراوایی نسبی پایه فاز میعان ها در شکاف        |
| $k_{rg-m}$   | تراوایی نسبی فاز گاز در ماتریکس               |
| $k_{rc-m}$   | تراوایی نسبی فاز میعان ها در ماتریکس          |
| $MR_w$       | نسبت تحرک پذیری نسبی شکاف به ماتریکس          |
| $q_{inj1}$   | دبی تزریق اسید به یک بال شکاف.                |
| $q_w$        | دبی جریان در شرایط ته چاهی                    |
| $r_e$        | شعاع خارجی                                    |
| $r_{eD}$     | شعاع خارجی بی بعد                             |
| $Re_w$       | عدد رینولدز در شرایط دهانه چاه                |
| $r'_w$       | شعاع مؤثر چاه                                 |
| $W_f$        | ضخامت شکاف                                    |
| $S_f$        | ضخامت شکاف                                    |
| t            | مدت زمان تزریق اسید                           |
| $W_f$        | عرض نهایی شکاف                                |
| $\bar{W}_f$  | ضخامت متوسط شکاف (در انتهای تزریق اسید)       |
| $X_e$        | نصف طول سطح تخلیه                             |
| $Z_{C1}$     | درصد جرمی متان در مخلوط گاز و مایع            |
| $Z_{C4}$     | درصد جرمی بوتان در مخلوط گاز و مایع           |
| $\beta_f$    | ضریب اینرسی درون شکاف                         |
| $\Delta p$   | اختلاف بین فشار اسید و فشار سیال درون ماتریکس |

شکاف اسیدی مشخص و برآورد نمود. همان گونه که دیده شد نتیجه همه این موردها تغییر هدایت پذیری بدون بعد شکاف از  $C_{fD}$  به مقدار مؤثر آن ( $C_{fD-eff}$ ) می باشد. با توجه به شکل معادله (۴) می توان گفت که تأثیر پذیری شعاع مؤثر چاه از  $C_{fD-eff}$  نسبت عکس با بزرگی آن دارد. به عبارت دیگر چنانچه  $C_{fD-eff}$  خیلی بزرگتر از عدد  $\pi$  باشد تشکیل میعان ها و پدیده های نتیجه شده از سرعت سیال در شکاف و ماتریس باعث تغییر چشمگیری در شعاع مؤثر چاه نمی شود. ولی در صورتی که مقدار  $C_{fD-eff}$  با عدد  $\pi$  قابل مقایسه باشد کاهش  $C_{fD-eff}$  می تواند منجر به کاهش چشمگیر شعاع مؤثر چاه شود. به عنوان نمونه  $C_{fD}$  چاهی دارای شکاف اسیدی با مشخصه های قید شده در جدول ۵ برابر با ۱/۲۱ می باشد. شعاع مؤثر این چاه در یک مخزن نفتی برابر با ۳۳ متر است. ولی در یک مخزن گاز میعانی با مشخصه های جدول ۵ مقدار مؤثر هدایت پذیری شکاف برابر با ۰/۳۷ و در نتیجه شعاع مؤثر چاه برابر با ۱۰ متر خواهد بود.

### نتیجه گیری

در این مطالعه برای اولین بار معادله های لازم برای برآورد شعاع مؤثر چاه دارای شکاف اسیدی در مخازن گازی و گاز میعانی ارائه و اعتبار سنجی شد. محاسبه شعاع مؤثر چاه امکان برآورد ضریب تولید چاه را فراهم می کند، که ابزاری مفید در محاسبه های مهندسی مخزن و مهندسی بهره برداری است. همچنین در مدل سازی مخزن تعریف چاه تر کدار با استفاده از شعاع مؤثر چاه یا عامل پوسته نیاز به استفاده از بلوک های بسیار ریز (برابر با عرض شکاف) را برطرف می نماید. میزان تأثیر تشکیل میعانات گازی و همچنین پدیده های مرتبط با سرعت سیال نسبت وارون با هدایت پذیری بدون بعد شکاف ( $C_{fD-eff}$ ) دارد. از این رو چنانچه  $C_{fD-eff}$  خیلی بزرگتر از عدد  $\pi$  باشد تشکیل میعانات و پدیده های نتیجه شده از سرعت سیال در شکاف و ماتریس باعث تغییر چشمگیری در شعاع مؤثر چاه نمی شود. ولی در موردهایی که مقدار  $C_{fD-eff}$  با عدد  $\pi$  قابل مقایسه باشد کاهش  $C_{fD-eff}$  می تواند منجر به کاهش چشمگیر شعاع مؤثر چاه شود.



|                                 |                   |                              |                   |
|---------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| طول عمودی رابطه                 | : $\lambda_{D,z}$ | دانسیته محلول اسید           | : $\rho$          |
| انحراف معیار تراوایی            | : $\sigma_D$      | دانسیته سنگ                  | : $\rho_r$        |
| تنش خاتمه                       | : $\sigma_c$      | چگالی سیال در فشار ته چاهی   | : $\rho_w$        |
| سرعت در ورودی شکاف به دهانه چاه | : $v_w$           | چگالی میانگین                | : $\bar{\rho}_w$  |
|                                 |                   | تخلخل ماتریکس                | : $\phi$          |
|                                 |                   | کسر جرمی اسید در محلول       | : $\omega$        |
|                                 |                   | گرانروی محلول اسید           | : $\mu$           |
|                                 |                   | گرانروی سیال در فشار ته چاهی | : $\mu_w$         |
|                                 |                   | گرانروی میانگین              | : $\bar{\mu}_w$   |
|                                 |                   | طول افقی رابطه               | : $\lambda_{D,x}$ |

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۷

## مراجع

- [1] Mahdiyar, H. Jamiolahmady, M. Sohrabi, M. Improved Darcy and non-Darcy Flow Formulations Around Hydraulically Fractured Wells, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **78**: 149-159 (2011) <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.05.013>.
- [2] Mahdiyar, H. Jamiolahmady, M. Sohrabi, M. Gas Condensate Flow Around Hydraulically Fractured Wells, *Transport in Porous Media* **89**: 505-532 (2011) 10.1007/s11242-011-9783-0.
- [3] Mahdiyar, H. Salari, A. Qajar, J. Kalantariasl, A. New Correlations for Etched Fracture Width and Half-Length of Acid-Fractured Wells, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **182**: 106286 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106286>.
- [4] Salari, A. "Investigation and Simulation of Acid Fracturing in Gas Condensate Carbonate Reservoirs", MSc Thesis, Shiraz University. (2018)
- [5] Deng, J. Mou, J. Hill, A.D. Zhu, D. A New Correlation of Acid-Fracture Conductivity Subject to Closure Stress, *SPE Production & Operations* **27**: 158-169 (2012) 10.2118/140402-PA.
- [6] Guppy, K.H. Cinco-Ley, H. Ramey, H.J. Jr., Samaniego-V, F. Non-Darcy Flow in Wells with Finite-Conductivity Vertical Fractures, *Society of Petroleum Engineers Journal* **22**: 681-698 (1982) 10.2118/8281-PA.
- [7] Mohan, J. Pope, G.A. Sharma, M.M. Effect of Non-Darcy Flow on Well Productivity of a Hydraulically Fractured Gas-Condensate Well, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **12**: 576-585 (2009) 10.2118/103025-PA.
- [8] Ravari, R.R. Wattenbarger, R.A. Rezaeidoust, A. Amani, M. "Analytical Evaluation of Gas Condensate Skin in Hydraulically Fractured Wells", *Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference.*, Society of Petroleum Engineers: Buenos Aires, Argentina. 12 (2007)
- [9] Wang, X. Indriati, S. Valko, P.P. Economides, M.J. "Production Impairment and Purpose-Built Design of Hydraulic Fractures in Gas-Condensate Reservoirs", *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China.*, Society of Petroleum Engineers: Beijing, China. 9 (2000)



- [10] معارف س.، مالمیر پ.، سلیمان زاده ا.، عرفانی ح.ر.، شهبازی خ.، بررسی اثر سرعت تزریق اسید بر عملکرد فرایند اسید زنی در یک مدل دو بعدی ناهمگن، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۳۷(۳): ۲۰۷ تا ۲۲۱ (۱۳۹۷).
- [11] Jones, S.C. "Using the Inertial Coefficient, B, To Characterize Heterogeneity in Reservoir Rock", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.*, Society of Petroleum Engineers: Dallas, Texas. 10. (1987)
- [12] Geertsma, J., Estimating the Coefficient of Inertial Resistance in Fluid Flow Through Porous Media, *Society of Petroleum Engineers Journal* **14**: 445-450 (1974) 10.2118/4706-PA.
- [13] Gholampour, F. Mahdiyar, H. A New Correlation for Relative Permeability in Gas-Condensate Reservoirs, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **172**: 831-838 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.077>.