



مقاله پژوهشی

## طراحی و بهینه‌سازی شکاف هیدرولیکی با ترکیب روش UFD و مدل دوبعدی KGD در یک مخزن فرضی

سعید جمشیدی<sup>۱\*</sup>؛ علی زلکی نژاد<sup>۲</sup>

۱. دانشیار؛ گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف  
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲  
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.289952.1140

### چکیده

ایجاد شکاف هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که امروزه برای افزایش تولید نفت به‌خصوص در میدان‌هایی با تراوایی پایین استفاده می‌شود. مدل‌های مختلف دوبعدی و سه‌بعدی برای طراحی شکاف هیدرولیکی وجود دارند که در این مقاله با ترکیب روش *Unified Fracture Design* و مدل دوبعدی طراحی، با حدس مقدار تراوایی شکاف در وزن پروپانتهای مختلف، پارامترهای مورد نیاز برای طراحی شکاف هیدرولیکی در آن وزن پروپانتهای به دست می‌آیند و سپس مقدار تراوایی شکاف با استفاده از نمودارهایی که غلظت پروپانت در شکاف و فشار بسته شدن شکاف و هدایت‌پذیری شکاف را به هم ربط می‌دهند، به‌روزرسانی می‌شود که این نمودارها برای پروپانتهای مختلف، متفاوت هستند که در این مقاله از نمودار مرتبط با پروپانت شن با سایز مش ۳۰/۵۰ استفاده شده است. پس از محاسبه تمامی پارامترهای مورد نیاز در وزن پروپانتهای مختلف، لازم است تا مناسب‌ترین وزن پروپانت انتخاب شود که از دو روش متفاوت می‌توان برای این کار استفاده کرد؛ در روش اول با توجه به مقادیر پارامترهایی مانند نرخ تزریق، اثر پوسته، فشار تزریق در سطح، بازدهی عملیات شکاف هیدرولیکی و سایر پارامترهای مورد نظر، وزن پروپانت مدنظر انتخاب می‌شود و در روش دیگر، وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق مدنظر به دست آورده می‌شود و طراحی شکاف هیدرولیکی بر اساس نرخ تزریق مدنظر انجام می‌شود. در انتها برای اطمینان از صحت نتایج به‌دست‌آمده توسط این روش، یک حساسیت‌سنجی نیز انجام شده است که معتبر بودن این روش را اثبات می‌کند.

### واژگان کلیدی

طراحی شکاف هیدرولیکی،  
مدل KGD،  
روش UFD،  
وزن پروپانت،  
شکاف هیدرولیکی

### ۱. پیش‌گفتار

تولید نفت و همچنین گاز در دنیا داشته است [۱] [۲]. افزایش ضریب بهره‌دهی از جمله مباحث مهم صنعت نفت و گاز است و مهندسان نفت همواره تلاش می‌کنند تا با استفاده از روش‌های گوناگون، میزان ضریب بازیافت و میزان نفت قابل استحصال را افزایش دهند، یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که بدین منظور به کار گرفته می‌شود، انجام عملیات شکاف هیدرولیکی می‌باشد. استفاده از شکاف هیدرولیکی برای تولید از مخازن نامتعارف<sup>۱</sup> به‌شدت کمک‌کننده می‌باشد که در چنین مخازنی، شکافی با طول زیاد و دهانه‌ی کوچک، مناسب می‌باشد [۳] [۴].

تولید نفت از مخازن به دلایل متعددی از جمله پایین بودن مقدار نفوذپذیری و رسوب آسفالتین و مشکلات دیگر، نمی‌تواند در حد مطلوب باشد، از این رو استفاده از روش‌هایی مانند شکاف هیدرولیکی می‌تواند تولید از چنین مخازنی را افزایش دهد. عملیات شکاف هیدرولیکی برای اولین بار در سال ۱۹۴۹ انجام شد و از زمان معرفی شکاف هیدرولیکی، تاکنون حدود ۲.۵ میلیون عملیات شکاف هیدرولیکی انجام شده است. عملیات شکاف هیدرولیکی در سال‌های اخیر، سهم به‌سزایی در افزایش

<sup>1</sup> Unconventional reservoirs

در دهه‌های اخیر طراحی‌های جدیدی با هدف افزایش تولید از هیدروکربن‌های گیر افتاده<sup>۲</sup> ارائه شده‌اند [۱۰] [۱۱] [۱۲]. طراحی بهینه شکاف هیدرولیکی با مدل‌های سه‌بعدی به دلیل حجم زیاد محاسبات و وقت‌گیر بودن مناسب نیست [۱۳] [۱۴] [۱۵]. بنابراین در سال‌های اخیر طراحی شکاف هیدرولیکی با ترکیب روش *UFD* و یکی از مدل‌های *PKN* یا *KGD* معرفی شد [۱۶].

## ۲. روش کار

در طراحی زیر، با فرض اینکه چاه به‌صورت عمودی تکمیل شده و مخزن نیز دارای ناحیه تخلیه مربعی<sup>۳</sup> است، عملیات طراحی انجام می‌شود. در کل، فرآیندی که برای طراحی شکاف در نظر گرفته شده است، این‌گونه است که پس از انجام محاسبات ژئومکانیکی، در وزن پروپانت‌های مختلف، تمام پارامترهای مورد نیاز برای طراحی شکاف هیدرولیکی محاسبه می‌شوند و سپس مناسب‌ترین مورد انتخاب خواهد شد. روابط پارامترهای مختلف مورد نیاز با جزییات کامل در ادامه مقاله آورده شده‌اند [۱۷]. در ابتدا با توجه به روابط ژئومکانیکی، مقادیر گرادیان حداقل تنش افقی<sup>۴</sup>، حداکثر تنش افقی<sup>۵</sup>، فشار مورد نیاز برای شکست سازند<sup>۶</sup> و فشار بسته شدن شکاف<sup>۷</sup> با استفاده از معادلات ۱ تا ۴ به دست آورده می‌شوند.

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} \times (\sigma_v - \alpha \times P_p) + \alpha \times P_p \quad (1)$$

که در رابطه ۱،  $v$  مقدار نسبت پواسون<sup>۸</sup>،  $\alpha$  مقدار ضریب پوروالستیک<sup>۹</sup> و  $P_p$  مقدار گرادیان فشار حفرات<sup>۱۰</sup> به واحد *psi/ft* است و  $\sigma_v$  گرادیان تنش عمودی<sup>۱۱</sup> برحسب *psi/ft* می‌باشد و  $\sigma_h$  گرادیان حداقل تنش افقی می‌باشد که مقدار آن برحسب *psi/ft* به دست می‌آید

در مخازن با تراوایی پایین، میزان بازدهی و تولید نفت بعد از انجام عملیات شکاف هیدرولیکی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۵].

در روش شکاف هیدرولیکی، پس از بررسی‌های مورد نیاز، لایه‌ای را برای انجام شکاف هیدرولیکی انتخاب می‌کنند و سیالی با گرانش کم و فشار بالا به‌صورت سیال پیش تزریق جهت ایجاد ترک و گسترش آن به داخل چاه پمپ می‌کنند، پس از تزریق این سیال، سیال اصلی که گرانش آن به مراتب از سیال پیش تزریق بیشتر است را به همراه مقدار زیادی پروپانت مخلوط می‌کنند و سپس مخلوط حاصل را با استفاده از پمپ‌هایی با فشار مناسب به داخل چاه تزریق می‌کنند تا شکاف‌ها و ترک‌هایی را در مخزن ایجاد کند که پس از ایجاد شکاف، پروپانت‌ها در شکاف‌ها باقی می‌مانند تا راه ارتباطی ایجادشده، مسدود نگردد [۲]. قرار گرفتن دقیق و درست پروپانت‌ها در شکاف، می‌تواند منجر به بسته شدن سریع شکاف و در نتیجه کاهش تولید شوند [۶] [۷] [۸].

برای طراحی صحیح این عملیات نیاز به اطلاعاتی مانند مقادیر تنش‌های میدان، فشارهای مخزن و خصوصیات مکانیکی مخزن می‌باشد و همچنین انتخاب سیال و پروپانت مناسب نیز، دو عامل مهم دیگر در یک طراحی مناسب هستند [۱]. برای طراحی شکاف هیدرولیکی، مدل‌های مختلف دو بعدی و سه بعدی وجود دارد که برخی از این مدل‌های دو بعدی، مدل *PKN* (*Perkins-Kern-Nordgren*)، مدل *KGD* و مدل شعاعی (*Khristianovich-Geertsma De klerk*) و مدل شعاعی هستند که در مدل‌های *PKN* و *KGD*، ارتفاع شکستگی را ثابت در نظر می‌گیرند ولی در مدل شعاعی، طول و ارتفاع را یکسان در نظر می‌گیرند. هرچه نسبت طول شکستگی به ارتفاع شکستگی بیشتر شود، مدل *PKN* بیشتر به مدل‌های سه بعدی نزدیک می‌شود و هرچه این نسبت کمتر شود، مدل *KGD* به مدل سه بعدی نزدیک می‌شود و برای طراحی شکاف مناسب‌تر خواهد بود [۱] [۹].

<sup>2</sup> Trapped hydrocarbons

<sup>3</sup> Square drainage area

<sup>4</sup> minimum horizontal stress

<sup>5</sup> maximum horizontal stress

<sup>6</sup> pressure required for fracturing

<sup>7</sup> closure pressure

<sup>8</sup> Poisson ratio

<sup>9</sup> poro-elastic coefficient

<sup>10</sup> pore pressure

<sup>11</sup> Vertical stress

$$\sigma_H = \sigma_h \times H + \sigma_{tect} \quad (2)$$

$$V_f = \left( \frac{h \times M_p}{h_f} \right) / (\rho_p \times (1 - \phi_p)) \quad (5)$$

که در فرمول ۵،  $h$  میزان ضخامت لایه به  $h_f$  ارتفاع شکاف  $ft$ ،  $M_p$  میزان جرم پروپانت به  $lb$  و  $\rho_p$  مقدار چگالی پروپانت به  $lb/ft^3$  و  $\phi_p$  مقدار تخلخل پروپانت به صورت کسر می باشد و مقدار  $V_f$  به صورت  $ft^3$  به دست می آید. بعد از محاسبه مقدار حجم شکاف، می توان با فرمول ۶، مقدار عدد پروپانت<sup>۱۴</sup> را به دست آورد.

$$N_p = \frac{(2 \times k_f \times V_f)}{(k \times V_r)} \quad (6)$$

که در فرمول ۶،  $k_f$  تراوایی شکاف به  $md$ ،  $k$  تراوایی مخزن به  $md$ ،  $V_f$  حجم شکاف به  $ft^3$  و  $V_r$  نیز حجم مخزن به  $ft^3$  می باشد. بعد از محاسبه مقدار  $N_p$  بسته به اینکه مقدار آن کمتر از ۰/۱ باشد یا بیشتر از ۱۰ باشد یا بین ۰/۱ و ۱۰ باشد، می توان مقدار بی بعد بهینه هدایت پذیری شکاف ( $C_{fD opt}$ ) و حداکثر ضریب بهره دهی بدون بعد<sup>۱۵</sup> را با فرمول های ۷ و ۸ به دست آورد.

$$\begin{aligned} C_{fD opt} &= 1.6 \text{ for } N_p < 0.1 \\ C_{fD opt} &= 1.6 + \exp [(-0.588 + 1.48 \ln N_p) / (1 + 0.142 \ln N_p)] \text{ for } 0.1 < N_p < 10 \\ C_{fD opt} &= N_p \text{ for } N_p > 0.1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} J_{D max pss} &= 1 / [0.99 - 0.5 \ln N_p] \text{ for } N_p \leq 0.1 \\ J_{D max pss} &= 6 / \pi - \exp \left\{ \frac{[0.423 - 0.311 N_p - 0.089 (N_p)^2]}{[1 + 0.66 N_p + 0.015 (N_p)^2]} \right\} \\ J_{D max pss} &= 6 / \pi \text{ for } N_p \geq 100 \end{aligned} \quad (8)$$

$$X_{f opt} = \left( \frac{k_f \times V_f}{(2 \times C_{fD opt} \times k \times h)} \right)^{0.5} \quad (9)$$

$$W_{opt} = \left( \frac{C_{fD opt} \times k \times V_f}{(2 \times k_f \times h)} \right)^{0.5} \quad (10)$$

که در فرمول ۲،  $H$  میزان عمق سازند بر حسب  $ft$  و  $\sigma_{tect}$  میزان تنش تکتونیک<sup>۱۲</sup> بر حسب  $psi$  می باشد و مقدار  $\sigma_H$  که حداکثر تنش افقی است، بر حسب  $psi$  به دست می آید.

$$P_{cl} = \sigma_h \times H \quad (3)$$

در فرمول ۳ نیز مقدار فشار بسته شدن شکاف بر حسب  $psi$  به دست می آید.

$$P_{bd} = 3 \times H \times \sigma_h - \sigma_H + T - P_p \times H \quad (4)$$

در فرمول ۴،  $T$  مقدار مقاومت کششی<sup>۱۳</sup> در واحد  $psi$  و  $P_{bd}$  مقدار فشار مورد نیاز برای شکست در واحد  $psi$  است. با حدس مقدار تراوایی شکاف در وزن پروپانت مدنظر، پارامترهای مورد نیاز برای طراحی شکاف هیدرولیکی با فرمول های زیر محاسبه می شوند و در انتها مقدار تراوایی شکاف با نمودارهایی که تراوایی شکاف و فشار بسته شدن شکاف و غلظت پروپانت در شکاف را به هم ربط می دهند، به روزرسانی می شود تا مقدار تراوایی شکاف به مقدار واقعی نزدیک تر شود و همین فرآیند برای وزن پروپانت های مختلف انجام می شود.

با استفاده از مقادیر  $N_p$  و در پی آن  $C_{fD opt}$ ، می توان مقادیر بهینه طول شکاف و عرض شکاف را با فرمول های ۹ و ۱۰ محاسبه کرد.

<sup>12</sup> Tectonic stress

<sup>13</sup> tensile strength

<sup>14</sup> proppant number

<sup>15</sup> maximum dimensionless pseudosteady state productivity index

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (14)$$

که در فرمول ۱۴،  $\nu$  مقدار نسبت پواسون و  $E$  مدول یانگ<sup>۱۶</sup> می‌باشند و واحد  $G$  و  $E$  یکسان است.

از آنجا که تمایل بر این است که عرض شکاف برابر با عرض بهینه شود، می‌توان با برابر قرار دادن دو فرمول ۱۳ و ۱۰، میزان نرخ تزریق را به دست آورد.

مقداری از حجم تزریق هدر می‌رود و مقداری صرف به وجود آمدن شکاف می‌شود، پس:

$$V_{inj} = V_f + V_{leak\ off} \quad (15)$$

که مقدار  $V_f$  از رابطه ۱۶ به دست می‌آید.

$$V_f = 2 \times h_f \times x_f \times w \quad (16)$$

و مقدار  $V_{leak\ off}$  از رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

$$V_{leak\ off} = 2 \times K_l \times C_l \times (2 \times h_f \times x_f) \times \left(\frac{h}{h_f}\right) \times \sqrt{t_i} \quad (17)$$

و مقدار کل حجم تزریق هم برابر با نرخ تزریق ضربدر مدت زمان تزریق می‌باشد. پس:

$$q \times t_i = 2 \times h_f \times x_f \times w + 2 \times K_l \times C_l \times (2 \times h_f \times x_f) \times \left(\frac{h}{h_f}\right) \times \sqrt{t_i} \quad (18)$$

که در فرمول ۱۸ مقادیر طول و عرض و ارتفاع شکاف برحسب  $ft$ ؛ نرخ تزریق برحسب  $ft^3/min$  و زمان تزریق برحسب  $min$ ، و  $C_l$  ضریب هدر رفت برحسب فوت بر جذر دقیقه و  $K_l$ ، عامل توزیع زمان باز شدن<sup>۱۸</sup>، بی‌بعد، می‌باشند.

تمامی مقادیر بالا به جز  $K_l$  و  $t_i$  مشخص هستند و از آنجا که مقدار  $K_l$  بین ۱.۳۳ و ۱.۵۷ می‌باشد، می‌توان با استفاده از روش حدس و خطا، مقادیر دقیق  $K_l$  و  $t_i$  را به دست آورد. مقدار  $K_l$  از رابطه ۱۹ به دست می‌آید.

$$K_l = 0.5 \left( \left( \frac{8}{3} \right) \times \eta + \pi(1 - \eta) \right) \quad (19)$$

حال با توجه به مقدار  $C_{fD\ opt}$  می‌توان میزان اثر پوسته را محاسبه کرد که از فرمول‌های شعاعی برای محاسبه اثر پوسته استفاده شده است.

چنانچه  $C_{fD\ opt}$  بیشتر از ۵۰ باشد، مقدار  $S_f$  از رابطه ۱۰ به دست می‌آید.

$$S_f = 0.7 - \ln\left(\frac{x_f}{r_w}\right) \quad (11)$$

چنانچه  $C_{fD\ opt}$  کمتر از ۵۰ باشد، مقدار  $S_f$  از رابطه ۱۲ به دست می‌آید.

$$S_f = 1.52 + 2.31 \log(r_w) - 1.545 \log\left(\frac{k_f \times w}{k}\right) - 0.765 \log(x_f) \quad (12)$$

که در فرمول‌های ۱۱ و ۱۲، مقادیر خواسته شده برحسب  $ft$  جاگذاری می‌شوند.

مقدار اثر پوسته نمی‌تواند از لحاظ قدر مطلق، بیشتر از مقدار  $\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)$  باشد و از طرفی مقدار آن هم باید به اندازه‌ای معقول، کوچک باشد تا عملیات شکاف هیدرولیکی ثمربخش باشد و باعث افزایش تولید شود.

مقدار بهینه عرض شکاف با فرمول بالا به دست می‌آید، از طرفی میزان عرض شکاف طبق مدل  $KGD$  به صورت زیر می‌باشد.

$$w = 0.29 \times 0.79 \times \left( \frac{q \times \mu_{fluid} \times (1 - \nu) \times x_f^2}{G \times h_f} \right)^{0.25} \quad (13)$$

در فرمول ۱۳، نرخ تزریق برحسب  $bpm$  است،  $\mu$  ویسکوزیته سیال شکاف هیدرولیکی برحسب  $cp$ ،  $\nu$  مقدار نسبت پواسون و  $x_f$  مقدار طول شکاف برحسب  $ft$ ، مقدار ارتفاع شکاف برحسب  $ft$ ، مقدار مدول برشی<sup>۱۶</sup> برحسب  $psi$ ، و  $w$  مقدار عرض شکاف برحسب  $inch$  می‌باشد.

به جای فرمول ۱۳ می‌توان از فرمول دهانه شکاف مدل  $PKN$  که به صورت

$$w = \frac{\pi}{4} \times 0.75 \times 0.3 \times \left( \frac{q \times \mu_{fluid} \times (1 - \nu) \times x_f}{G} \right)^{0.25}$$

است نیز استفاده کرد. برای محاسبه مدول برشی می‌توان از فرمول ۱۴ استفاده کرد.

<sup>16</sup> shear modulus of elasticity

<sup>17</sup> young modulus of elasticity

<sup>18</sup> opening time distribution factor

که برای محاسبه رینولدز، نرخ تزریق باید برحسب  $bpd$ ، چگالی سیال برحسب  $lb/ft^3$ ، قطر داخلی لوله برحسب  $inch$  و ویسکوزیته سیال برحسب  $cp$  باشد. پس از محاسبه ضریب اصطکاک، از رابطه ۲۶، می توان مقدار  $\Delta P_f$  در نرخ های تزریق بالا را محاسبه کرد.

$$\Delta P_f = \frac{2 \times f_f \times \rho_{frac fluid} \times u^2 \times H}{g_c \times D \times 144} \quad (26)$$

در رابطه ۲۶ مقدار چگالی سیال شکاف باید برحسب  $lb/ft^3$ ، سرعت تزریق  $(u = \frac{q}{A})$  برحسب  $ft/s$  و قطر لوله و عمق سازند برحسب  $ft$  هستند و مقدار  $\Delta P_f$  برحسب  $psi$  به دست می آید. به مرحله تزریق سیال بدون پروپانت که مسئولیت ایجاد شکستگی اولیه و بازشدگی اولیه را دارد، مرحله پد<sup>۲۰</sup> می گویند که در این مرحله بخشی از طول و عرض شکستگی نهایی در عملیات ایجاد می شود [۱]. رابطه ای میان حجم کل سیال تزریقی و حجم سیال در مرحله پد وجود دارد که به شکل زیر است.

$$V_{pad} = V_{inj} \times \left( \frac{1 - \eta}{1 + \eta} \right) \quad (27)$$

زمان مورد نیاز در مرحله پد نیز از رابطه ی زیر به دست می آید. غلظت پروپانت در شکاف از رابطه ی ۲۹ به دست می آید.

$$t_{pad} = \frac{V_{pad}}{q} \quad (28)$$

کدام در شرایط متفاوت، نیاز به انجام آزمایش های مربوطه می باشد. برای به دست آوردن نمودارهای هدایت پذیری شکاف در مقابل فشار بسته شدن شکاف لازم است برای هر نوع پروپانت در سایزهای مختلف، آزمایشی انجام شود که این آزمایش ها معمولاً در دمایی حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه فارنهایت انجام می شوند و در حدود ۵۰ ساعت فشار اعمال می شود. در این آزمایش ها به طور معمول، میزان غلظت پروپانت در شکاف را،  $2 lb/ft^2$  در نظر می گیرند ولی می توان در هر آزمایش، این میزان غلظت را تغییر داد تا نمودار برای غلظت های مختلف به دست بیاید [۱۸]

که  $\eta$  همان بازده شکاف هست که از رابطه ۲۰ به دست می آید.

$$\eta = \frac{V_f}{V_{inj}} \quad (20)$$

که در فرمول ۲۰، هر دو مقدار  $V_f$  و  $V_{inj}$  باید برحسب یک واحد باشند، مثلاً هر دو  $ft^3$  باشند. برای محاسبه فشار تزریق در سطح<sup>۱۹</sup> از رابطه ۲۱ استفاده می شود.

$$P_i = P_{bd} - \Delta P_h + \Delta P_f \quad (21)$$

که مقدار  $\Delta P_h$  از رابطه ۲۲ به دست می آید.

$$\Delta P_h = \rho_{frac fluid} \times G_w \times H \quad (22)$$

که در رابطه ۲۲،  $G_w$  میزان گرادیان فشار آب برحسب  $psi/ft$  است و  $\rho_{frac fluid}$  چگالی مخصوص سیال مورد استفاده برای شکاف است و  $H$  عمق سازند برحسب  $ft$  است و  $\Delta P_h$  برحسب  $psi$  به دست می آید.

برای محاسبه ی  $\Delta P_f$  چنانچه نرخ تزریق کمتر از  $9 bpm$  باشد، از رابطه ی ۲۳ باید استفاده شود.

$$\Delta P_f = \left( \frac{518 \times \rho_{frac fluid}^{0.79} \times q^{1.79} \times \mu_{frac fluid}^{0.207}}{1000 \times D^{4.79}} \right) \times H \quad (23)$$

که در رابطه ۲۳ عمق سازند برحسب  $ft$  می باشد، نرخ تزریق برحسب  $bpm$  است،  $D$  قطر لوله برحسب  $inch$   $\mu_{frac fluid}$  ویسکوزیته سیال شکاف برحسب  $cp$  و  $\rho_{frac fluid}$  چگالی مخصوص سیال شکاف می باشد و  $\Delta P_f$  برحسب  $psi$  به دست می آید. چنانچه نرخ تزریق بیشتر از  $9 bpm$  باشد، ابتدا از فرمول ۲۴ ضریب اصطکاک به دست آورده می شود.

$$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -4 \log \left( \frac{\epsilon}{3.7065} - \frac{5.0452}{N_{re}} \log \left( \frac{\epsilon^{1.1098}}{2.8257} + \left( \frac{7.149}{N_{re}} \right)^{0.8981} \right) \right) \quad (24)$$

که در رابطه ۲۴،  $\epsilon$  میزان سختی لوله است و  $N_{re}$  نیز رینولدز است که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید.

$$N_{re} = \frac{1.48 \times \rho_{frac fluid} \times q}{D \times \mu_{frac fluid}} \quad (25)$$

<sup>19</sup> surface injection pressure

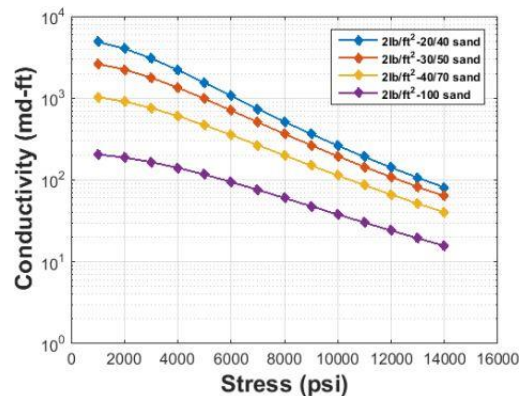
<sup>20</sup> pad

شکاف ثابت می‌باشند که داده‌های هر خط با نرم‌افزار *Graph Digitizer* استخراج شده‌اند و سپس معادلات مربوط به هر خط، با استفاده از نرم‌افزار *Table Curve* به دست آمده‌اند. در معادلات ۳۲ تا ۳۵، مقدار فشار بسته شدن شکاف برحسب *psi* و مقدار هدایت‌پذیری شکاف برحسب  $md \times ft$  می‌باشند.

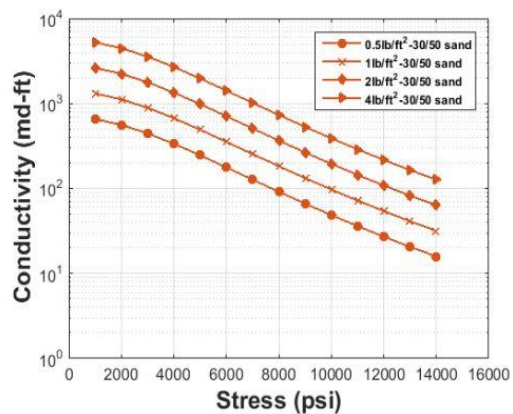
بعد از انجام محاسبات پارامترهای مختلف برای طراحی شکاف هیدرولیکی، با توجه مقدار غلظت پروپانت در شکاف و میزان فشار بسته شدن شکاف می‌توان مقدار جدید تراوایی شکاف را به دست آورد. به این صورت که ابتدا باید مشاهده شود که مقدار غلظت پروپانت در شکاف با توجه به رابطه‌ی ۲۹ چقدر شده است، مثلاً چنانچه غلظت برابر با  $1/5 lb/ft^2$  شده باشد، به‌وسیله‌ی مقدار فشار بسته شدن شکاف می‌توان مقدار هدایت‌پذیری شکاف در غلظت‌های  $1 lb/ft^2$  و  $2 lb/ft^2$  به دست آورد، سپس با استفاده از میان‌یابی، مقدار هدایت‌پذیری شکاف در غلظت  $1/5 lb/ft^2$  را به دست آورد و سپس از آنجاکه مقدار هدایت‌پذیری شکاف برابر با حاصل‌ضرب دهانه‌ی شکاف در تراوایی شکاف است، می‌توان مقدار تراوایی شکاف را به دست آورد. حال با مقدار جدید تراوایی شکاف، دوباره باید محاسبات انجام شوند و این روش حدس و خطا آن قدر ادامه پیدا کند تا به تراوایی شکاف مطلوب رسیده شود. همین کار باید برای چند وزن پروپانت مختلف انجام شود.

حال که در وزن پروپانت‌های مختلف، پارامترهای مختلف به دست آورده شده‌اند، نیاز است که بهترین مورد برای انجام شکاف هیدرولیکی انتخاب شود که در این مقاله، از دو روش برای این کار استفاده شده است. روش اول این است که یک محدوده برای برخی از پارامترها مشخص شود (مثلاً بازدهی بالاتر از ۶۰ درصد و نرخ تزریق بین  $4 bpm$  تا  $12 bpm$  و ...) و بر اساس این محدودیت‌ها، بهترین مورد انتخاب شود. روش دیگر بدین گونه است که با توجه به رابطه‌ی ۳۶ که یک رابطه تجربی میان نرخ تزریق و وزن پروپانت می‌باشد، وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق مدنظر محاسبه شود و در آن وزن پروپانت، محاسبات انجام شوند.

در شکل‌های ۱ و ۲، دو نمونه از این نمودارها رو مشاهده می‌کنید که در این مقاله از شکل ۲ که مرتبط به پروپانت شن با سایز مش  $30/50$  است، استفاده شده است که در غلظت‌های مختلف، رابطه‌ی بین فشار بسته شدن شکاف و هدایت‌پذیری شکاف به دست آورده شده است (روابط ۳۲ تا ۳۵)؛ که در نمودارهای زیر، میزان *FC* مقدار هدایت‌پذیری برحسب  $md \times ft$  و مقدار فشار بسته شدن شکاف برحسب *psi* باشد [۱۹] [۲۰].



شکل ۱. رابطه بین هدایت‌پذیری شکاف و فشار بسته شدن شکاف برای پروپانت‌های مختلف در غلظت ثابت [۱۹]



شکل ۲. رابطه بین هدایت‌پذیری شکاف و فشار بسته شدن شکاف و غلظت پروپانت در شکاف برای پروپانت شن با سایز مش  $30/50$  [۱۹]

هر کدام از خطوط موجود در شکل ۲، رابطه‌ی بین فشار بسته شدن شکاف و هدایت‌پذیری شکاف در یک غلظت پروپانت در

<sup>21</sup> mesh size

برای غلظت  $lb/ft^3$  ۰/۵:

$$\ln(FC) = 6.6049755 - 8.8146568 \times 10^{-5} \times P_{cl} - 3.3694367 \times 10^{-8} \times P_{cl}^2 + 1.4771053 \times 10^{-12} \times P_{cl}^3 \quad (32)$$

برای غلظت  $lb/ft^3$  ۱:

$$\ln(FC) = 7.2310561 - 3.1435 \times 10^{-5} \times P_{cl} - 4.525805 \times 10^{-8} \times P_{cl}^2 + 2.0932909 \times 10^{-12} \times P_{cl}^3 \quad (33)$$

برای غلظت برای غلظت  $lb/ft^3$  ۲:

$$\ln(FC) = 8.0189236 - 0.00010466936 \times P_{cl} - 3.2703634 \times 10^{-8} \times P_{cl}^2 + 1.5022131 \times 10^{-12} \times P_{cl}^3 \quad (34)$$

برای غلظت برای غلظت  $lb/ft^3$  ۴:

$$\ln(FC) = 8.6628426 - 9.6586152 \times 10^{-5} \times P_{cl} - 3.0068349 \times 10^{-8} \times P_{cl}^2 + 1.23622 \times 10^{-12} \times P_{cl}^3 \quad (35)$$

جدول ۱. داده‌های ورودی برای انجام عملیات شکاف هیدرولیکی در

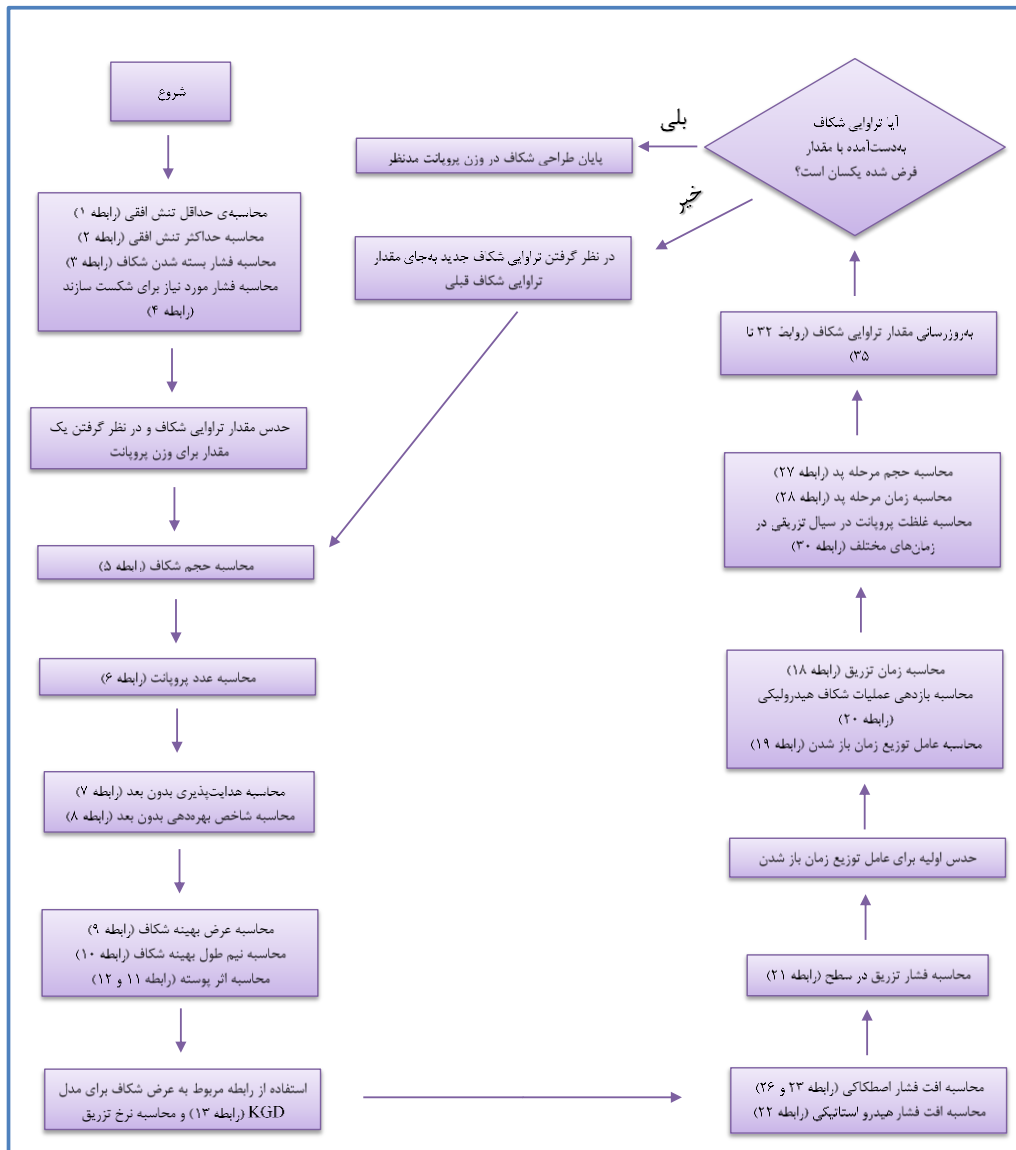
پارامتر	واحد	مقدار
$H$	ft	8000
$h$	ft	100
$k$	mD	0.01
$h_f$	ft	100
$C_l$	$ft^3 \llbracket \min \rrbracket ^{0.5}$	0.0001
$D$	inch	3
$roughness(e)$	dimensionless	0.0001
$\mu_{(frac fluid)}$	cp	10
$\rho_{(frac fluid)}$	lb/ft <sup>3</sup>	74.88
$G_w$	psi/ft	0.43
$v$	dimensionless	0.25
$E$	psi	107
$V_r$	ft <sup>3</sup>	1.39*108
$\rho_p$	lb/ft <sup>3</sup>	165.36
$\phi_p$	Dimensionless	0.38
$r_w$	ft	0.328
$\alpha$	Dimensionless	0.72
$\sigma_v$	psi/ft	1.15
$T$	psi	1000
$\sigma_{tect}$	psi	2000
$v$	Dimensionless	0.25
$c_f$	lb/gal	14

$$M_p = a + b \ln q + c(\ln q)^2 + d(\ln q)^3 + e(\ln q)^4 \quad (36)$$

که در رابطه بالا مقدار نرخ تزریق در واحد  $bpm$  و وزن پروپانت در واحد  $lb$  است و ضرایب معادله بالا، با استفاده از داده‌هایی که در وزن پروپانت‌های مختلف به دست آورده شده‌اند، به دست می‌آیند. در مثال ارائه‌شده در بخش نتیجه و بحث، بیشتر به نحوه استفاده از دو روش بالا پرداخته شده است. در شکل ۳، فرایند طراحی شکاف هیدرولیک به‌طور خلاصه ارائه شده است [۱۷]؛ که البته باید توجه داشته باشید که فرایند زیر برای محاسبه‌ی پارامترهای طراحی شکاف هیدرولیکی در یک وزن پروپانت مشخص می‌باشد و باید همین فرایند برای چندین وزن پروپانت مختلف انجام شود و سپس از میان آن‌ها، مناسب‌ترین گزینه انتخاب شود.

### ۳. نتایج و بحث

برای داده‌های زیر در جدول ۱ که متعلق به یک مخزن و یک چاه فرضی هستند، یک شکاف هیدرولیکی به‌صورت آنچه تاکنون بیان شده است، طراحی شده است. ابتدا به محاسبه داده‌های ژئومکانیک پرداخته شده است و با استفاده از فرمول‌های ۱ تا ۴ مقادیر گرادیان حداقل تنش افقی، حداکثر تنش افقی، فشار مورد نیاز برای شکست سازند و فشار بسته شدن شکاف محاسبه شده‌اند. نتایج این محاسبات در جدول ۲ آورده شده‌اند.



شکل ۳. فرایند طراحی شکاف هیدرولیکی

حال برای سایر محاسبات، نیاز به حس تراوایی شکاف می‌باشد. فرض بر این است که مقدار  $K_f = 100000 \text{ mD}$  و مقدار وزن پروپانتی که در آن محاسبات می‌خواهد انجام شود، برابر با  $M_p = 100000 \text{ lb}$  می‌باشند. حال که مقادیر  $K_f$  و  $M_p$  به دست آورده شده‌اند، می‌توان با فرمول‌های ۵ و ۶، به ترتیب حجم شکاف و عدد پروپانت را به دست آورد. در جدول ۳ مقادیر محاسبه‌شده برای حجم شکاف

جدول ۲. نتایج حاصل از محاسبات ژئومکانیکی

مقدار	واحد	پارامتر
0.59	psi/ft	$\sigma_h$
6717.9	psi	$\sigma_H$
4995.7	psi	$P_{bd}$
4717.9	psi	$P_{cl}$



و عدد پروپانت آورده شده‌اند.

جدول ۶. مقادیر نرخ تزریق و مدول برشی

مقدار	واحد	پارامتر
$Q$	$bpm$	5.41
$G$	$psi$	4000000
$S_f$	$Dimensionless$	-6.79

جدول ۳. مقادیر عدد پروپانت و حجم شکاف

مقدار	واحد	پارامتر
975.39	$V_f$	$ft^3$
140.34	$N_p$	$dimensionless$

حال با استفاده از حدس اولیه  $K_l = 1.5$  و با استفاده از روش حدس و خطا بین فرمول‌های ۱۸ و ۱۹، می‌توان نرخ تزریق و مقدار  $K_l$  را به دست آورد که در جدول ۷ این دو مقدار قابل مشاهده هستند. با توجه به اینکه، طول و عرض و ارتفاع شکاف مشخص هستند، پس حجم شکاف را با استفاده از فرمول ۲۰ می‌توان محاسبه کرد و از طرفی، حاصل ضرب نرخ تزریق در زمان تزریق نیز برابر با تمام حجم تزریق می‌باشد. پس از طریق فرمول ۲۰ می‌توان بازده عملیات را به دست آورد. مقدار بازدهی عملیات را در جدول ۷ می‌توان مشاهده کرد.

با توجه به اینکه نرخ تزریق کمتر از  $9 bpm$  است، می‌توان از فرمول ۲۳، مقدار افت فشار اصطکاکی را به دست آورد و از طرفی با فرمول ۲۲ می‌توان، افت فشار هیدرو استاتیک را به دست آورد و با داشتن این مقدار، می‌توان فشار تزریق در سطح را محاسبه کرد که هم مقادیر افت فشار و هم مقدار فشار تزریق در سطح را می‌توان در جدول ۹ مشاهده کرد.

جدول ۷. مقادیر زمان تزریق و عامل توزیع زمان باز شدن و بازدهی عملیات شکاف هیدرولیکی

مقدار	واحد	پارامتر
$t_i$	$min$	38.73
$K_l$	$dimensionless$	1.37
$H$	$dimensionless$	0.83

جدول ۸. مقادیر مربوط به افت فشار و فشار مورد نیاز برای تزریق

مقدار	واحد	پارامتر
$\Delta P_f$	$psi$	820.84
$\Delta P_h$	$psi$	4128
$P_i$	$psi$	1688.6

چنانچه نرخ تزریق بالاتر از  $9 bpm$  باشد، باید از رابطه ۲۶، مقدار

حال که مقدار عدد پروپانت به دست آمده است، می‌توان مقدار بی‌بعد بهینه هدایت‌پذیری شکاف ( $C_{fd opt}$ ) و شاخص بهره‌دهی بدون بعد را به دست آورد و از آنجایی که مقدار عدد پروپانت بزرگ‌تر از ۱۰ می‌باشد، مقدار آن با مقدار بی‌بعد بهینه هدایت‌پذیری شکاف برابر است. مقادیر محاسبه شده برای هدایت‌پذیری بدون بعد و شاخص بهره‌دهی بدون بعد در جدول ۴ آورده شده‌اند.

جدول ۴. مقادیر هدایت‌پذیری و شاخص بهره‌دهی بدون بعد

مقدار	واحد	پارامتر
$C_{(fd opt)}$	$Dimensionless$	140.34
$J_{(Dmax pss)}$	$Dimensionless$	1.91

اکنون با استفاده از مقدار  $C_{fd opt}$  می‌توان مقادیر بهینه‌ی طول و عرض شکاف را با فرمول‌های ۹ و ۱۰ به دست آورد که در جدول ۵ این مقادیر نشان داده شده‌اند.

جدول ۵. مقادیر طول و عرض شکاف در حالت بهینه

مقدار	واحد	پارامتر
$X_{(f opt)}$	$ft$	589.49
$W_{opt}$	$ft$	0.0083

حال که مقدار بهینه عرض شکاف به دست آورده شده‌اند، این مقدار را می‌توان برابر با مقدار عرض شکاف در فرمول  $KGD$  قرار داد (فرمول ۱۳) تا مقدار نرخ تزریق به دست بیاید. البته قبل از آن باید مقدار مدول برشی را با استفاده از رابطه ۱۴ به دست آورده شود. در جدول ۶ این دو مقدار نشان داده شده‌اند. از آنجاکه مقدار بی‌بعد بهینه هدایت‌پذیری شکاف بیشتر از ۵۰ است، برای محاسبه اثر پوسته، باید از رابطه ۱۱ استفاده کرد که این مقدار به دست آمده را می‌توان در جدول ۶ مشاهده کرد.

شود. در روش اول یک سری محدودیت‌ها به‌طور دلخواه برای بعضی پارامترها قرار داده شده‌اند و بر اساس آن‌ها، موارد مطلوب به دست آورده شده‌اند که این محدودیت‌ها در جدول ۱۱ نشان داده شده‌اند. با توجه به محدودیت‌های فوق، از بین موارد موجود، تنها سه مورد، شرایط بالا را دارند که به‌صورت زیر هستند و در جدول ۱۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۲. حدس‌های انتخابی بر اساس محدودیت‌های در نظر گرفته شده

پارامتر	حدس اول	حدس دوم	حدس سوم
(lb)M_p	100000	110000	120000
(lb/ft <sup>2</sup> )C_p	0.85	0.93	1.02
(mD)K_f	55486.75	55533.08	55500.15
(psi)P_cl	4717.9	4717.9	4717.9
(ft)X_f	589.49	589.49	589.49
(ft)W_f	0.0082731	0.0091005	0.0099278
(bpm)q	5.41	7.92	11.22
S_f	-6.79	-6.79	-6.79
(min)t_i	38.73	27.94	20.90
$\eta$ (fraction)	0.83	0.86	0.89
(psi)P_i	1688.6	2491.9	3296.6
(ft <sup>3</sup> )V_pad	110.27	91.38	77.61
(min)t_pad	3.63	2.06	1.23

حال از میان سه حدس بالا، با توجه به مباحث اقتصادی و سایر جنبه‌ها، یک مورد انتخاب می‌شود. در اینجا فرض بر این است که اولین حدس انتخاب شده است. برای رسم نمودار غلظت پروپانت برحسب زمان، نیاز هست که با استفاده از معادله ۳۰، رابطه‌ای میان زمان و غلظت پروپانت به دست آورده شود و باید توجه داشت که از آنجایی که در مرحله پد، پروپانت تزریق نمی‌شود، پس میزان غلظت پروپانت تا انتهای آن مرحله، صفر هست. برای به دست آوردن رابطه‌ی زمان و غلظت پروپانت، باید مقدار  $\epsilon$  را از رابطه ۳۱ به دست آورد که مقدار آن برابر با ۰/۰۹۳۷ می‌باشد. پس با استفاده از رابطه ۳۰ داریم:

افت فشار اصطکاکی را به دست آورد. حال که بازده عملیات و حجم سیال تزریقی و نرخ تزریق به دست آمدند، می‌توان مقدار حجم سیال در مرحله پد و مدت‌زمان این مرحله را با روابط ۲۷ و ۲۸ به دست آورد که در جدول ۱۰ این مقادیر آورده شده‌اند.

جدول ۹. مقادیر حجم و زمان مرحله‌ی پد

مقدار	واحد	پارامتر
V_pad	ft <sup>3</sup>	110.27
t_pad	min	3.63

حال باید میزان تراوایی شکاف تصحیح شود. با توجه به معادله ۲۹، میزان غلظت پروپانت در شکاف برابر با  $0.8482 \text{ lb/ft}^2$  می‌شود که با استفاده از میان‌بایی بین غلظت‌های  $0.5 \text{ lb/ft}^2$  و ۱، میزان هدایت‌پذیری و در نتیجه تراوایی شکاف به دست می‌آید که مقدار آن برابر با  $55487 \text{ mD}$  می‌باشد. حال که میزان تراوایی شکاف جدید به دست آمده و با حدس اولیه، متفاوت است، باید با تراوایی جدید به دست آمده، دوباره تمام پارامترهای مدنظر را محاسبه کرد و همین روش حدس و خطا را به پیش برد تا به مقدار تراوایی شکاف دقیق رسیده شود.

جدول ۱۰. مقادیر حجم و زمان مرحله‌ی پد

مقدار مطلوب	پارامتر
$-8.5 < S_f < -4.5$	S_f
$J_{(Dmax pss)} > 1.6$	J_(Dmax pss)
$\eta(fraction) > 0.6$	$\eta$
$4 < q(bpm) < 12$	q
$P_i(psi) < 4000$	P_i

این کار باید برای وزن پروپانت‌های مختلف انجام شود. حال باید از بین موارد موجود یک مورد به‌عنوان مورد مطلوب انتخاب

زیر می‌شود که در جدول ۱۳ آورده شده‌اند. پس از بین حدس‌های موجود، توانسته شد، با دو روش مختلف، حدس مناسب و مطلوب را انتخاب کرد. می‌توان انتظار داشت که طراحی صورت گرفته بسیار مطلوب باشد زیرا در مقادیر معقول نرخ تزریق و فشار تزریق در سطح، طول و عرض شکاف هیدرولیکی در حالت بهینه به دست آمده‌اند و همچنین بازده عملیات بسیار بالاست و اثر پوسته هم مقداری مناسب است و خبر از بهبود یافتن میزان تولید می‌دهد.

در حالت دیگر با همان داده‌های جدول ۱ و صرفاً با افزایش حجم مخزن به  $2 \times 10^8 \text{ ft}^3$  به طراحی مناسبی که در جدول ۱۴ آورده شده است، دست پیدا شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش حجم مخزن، هندسه شکاف بزرگ‌تر، وزن پروپانت مورد استفاده بیشتر و زمان تزریق نیز بیشتر شده است.

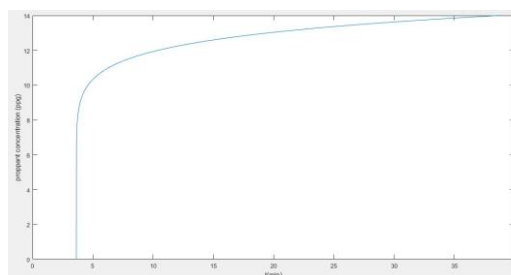
در حالت دیگر با همان داده‌های جدول ۱ و صرفاً با افزایش ضریب هدر رفت به  $0.5 \text{ ft}/\text{min}$  به طراحی مناسبی که در جدول ۱۵ آورده شده است، دست پیدا شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین تأثیر ضریب هدر رفت بر روی مقدار بازده و کاهش آن بوده است زیرا حجم هدر رفت بیشتر شده است و از طرفی زمان تزریق هم برای جبران این زمان هدر رفت بیشتر شده است.

در حالت دیگر با همان داده‌های جدول ۱ و صرفاً با افزایش عمق سازند به  $9000 \text{ ft}$  به طراحی مناسبی که در جدول ۱۶ آورده شده است، دست پیدا شده است.

$$c_p = 14 * \left( \frac{t - 3.6288}{38.734 - 3.6288} \right)^{0.0937}$$

که مقدار  $t$  بین  $3.63$  و  $38.73$  می‌باشد. نمودار غلظت پروپانت در سیال تزریقی در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴. غلظت پروپانت در سیال تزریقی در زمان‌های مختلف

روش دیگر که برای انتخاب حدس مطلوب می‌توان استفاده کرد، استفاده از رابطه‌ی ۳۶ و یافتن وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق مدنظرمان که برای مثال بالا، رابطه‌ی ۳۶ به صورت زیر می‌باشد.

$$65463.038 + 16283.926 \ln q + 2099.8628(\ln q)^2 + 185.82907(\ln q)^3 + 8.4434304(\ln q)^4 = M_p$$

که در دبی  $10 \text{ bpm}$ ، وزن پروپانت متناظر برابر با  $116597 \text{ lb}$  می‌شود که محاسبات در این وزن پروپانت در نهایت به صورت

جدول ۱۳. استفاده از وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق  $10 \text{ bpm}$  برای انجام محاسبات

پارامتر	(ft) W <sub>f</sub>	(min)t <sub>pad</sub>	(ft <sup>3</sup> )V <sub>pad</sub>	(psi)P <sub>i</sub>	H	(min)t <sub>i</sub>	S <sub>f</sub>	(bpm)q	(ft)X <sub>f</sub>	(psi)P <sub>cl</sub>	(mD)K <sub>f</sub>	(lb/ft <sup>2</sup> )C <sub>p</sub>	(lb)M <sub>p</sub>
مقدار	964 6	1.46	81.86	2843. 51	0.8 8	22.9	6.7 9	10	589. 49	4717. 9	55559	0.99	11659 7

جدول ۱۴. استفاده از وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق  $10 \text{ bpm}$  برای انجام محاسبات در حالت افزایش حجم مخزن

پارامتر	(ft) W <sub>f</sub>	(min)t <sub>pad</sub>	(ft <sup>3</sup> )V <sub>pad</sub>	(psi)P <sub>i</sub>	H	(min)t <sub>i</sub>	S <sub>f</sub>	(bpm)q	(ft)X <sub>f</sub>	(psi)P <sub>cl</sub>	(mD)K <sub>f</sub>	(lb/ft <sup>2</sup> )C <sub>p</sub>	(lb)M <sub>p</sub>
مقدار	057 3	2	113.1	2854. 4	0.8 8	30.3	6.9 8	10	707. 11	4717. 9	55281	1.08	15329 7

جدول ۱۵. استفاده از وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق ۱۰ bpm برای انجام محاسبات در حالت افزایش ضریب هد رفت

پارامتر	(ft)W <sub>f</sub>	(min)t <sub>pad</sub>	(ft3)V <sub>pad</sub>	(psi)P <sub>i</sub>	η	(min)t <sub>i</sub>	S <sub>f</sub>	(bpm)q	(ft)X <sub>f</sub>	(psi)P <sub>cl</sub>	(mD)K <sub>f</sub>	(lb/ft2)C <sub>p</sub>	(lb)M <sub>p</sub>
مقدار	0.00 964	3.36	189	2843. 5	0.7 7	26.2	- 6.7 8	10	589. 49	4717. 9	55559	0.99	11659 7

جدول ۱۶. استفاده از وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق ۱۰ bpm برای انجام محاسبات در حالت افزایش عمق سازنده

پارامتر	(ft)W <sub>f</sub>	(min)t <sub>pad</sub>	(ft3)V <sub>pad</sub>	(psi)P <sub>i</sub>	η	(min)t <sub>i</sub>	S <sub>f</sub>	(bpm)q	(ft)X <sub>f</sub>	(psi)P <sub>cl</sub>	(mD)K <sub>f</sub>	(lb/ft2)C <sub>p</sub>	(lb)M <sub>p</sub>
مقدار	0.00 964 6	1.46	81.86	3323. 83	0.8 8	23	- 6.7 9	10	589. 49	4717. 9	45813	0.99	11659 6

استفاده از چند پارامتر از جمله نرخ تزریق، اثر پوسته، بازدهی عملیات شکاف هیدرولیکی و سایر پارامترهای مدنظر برای انتخاب مناسب‌ترین وزن پروپانت می‌توان استفاده کرد. برای اطمینان از صحت نتایج این طراحی، در حالات گوناگون، پارامترهای مختلف تغییر داده شد و نتایج حاصله، مطابق با پارامتر تغییر یافته، بودند که به‌نوعی نشان از کیفیت و دقت بالای روش استفاده‌شده برای طراحی بهینه عملیات شکاف هیدرولیکی، می‌دهد.

در این مطالعه با استفاده از ترکیب روش *UFD* و مدل دوبعدی *KGD*، نحوه طراحی بهینه شکاف هیدرولیکی معرفی و در یک مخزن فرضی از این طراحی استفاده شد. علاوه بر ترکیب روش *UFD* با مدل دوبعدی *KGD*، می‌توان روش *UFD* را با مدل دوبعدی *PKN* نیز ترکیب و از آن استفاده کرد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت بیشترین تأثیر افزایش عمق سازنده بر روی فشار تزریق بوده است که منجر به افزایش آن شده است و از طرفی با افزایش عمق، میزان فشردگی پروپانت‌ها هم بیشتر می‌شود، پس تراوایی شکاف کاهش می‌یابد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از ترکیب روش *UFD* و مدل *KGD*، به طراحی شکاف هیدرولیکی بر اساس وزن پروپانت پرداخته‌شده است. در این طراحی با استفاده از حدس مقدار تراوایی شکاف در وزن پروپانت‌های مختلف، پارامترهای مورد نیاز برای طراحی شکاف هیدرولیکی در آن وزن پروپانت‌ها به دست آورده شده‌اند و سپس برای تصحیح میزان تراوایی شکاف، از نمودارهای مرتبط به پروپانت‌شن با سایز مش ۳۰/۵۰ استفاده‌شده است و چنانچه طراحی شکاف هیدرولیکی با یک نوع پروپانت دیگر مدنظر باشد، می‌توان از نمودارهای آن نوع پروپانت به‌جای نمودارهای پروپانت‌شن با سایز مش ۳۰/۵۰ استفاده کرد.

حال که در وزن پروپانت‌های مختلف، پارامترهای مورد نیاز برای طراحی شکاف محاسبه‌شده‌اند، لازم است تا مناسب‌ترین وزن پروپانت انتخاب شود که این کار می‌تواند به دو روش انجام پذیرد؛ یک روش بر اساس نرخ تزریق است که با استفاده از رابطه‌ی تجربی میان وزن پروپانت و نرخ تزریق، وزن پروپانت متناظر با نرخ تزریق مدنظر به دست می‌آید و سپس در آن وزن پروپانت به‌دست‌آمده، طراحی شکاف انجام می‌شود و روش دیگر

## ۵. پیوست

علائم و نشانه‌های به‌کاررفته در مقاله به شرح زیر است.

عنوان	پارامتر	عنوان	پارامتر
فشار بسته شدن شکاف	$P_{cl}(psi)$	عمق سازند	$H(ft)$
فشار مورد نیاز برای شکست سازند	$P_{bd}(psi)$	ارتفاع سازند	$h(ft)$
حجم شکاف	$V_f(ft^3)$	تراوایی سازند	$k(mD)$
وزن پروپانت	$M_p(lb)$	ارتفاع شکاف	$h_f(ft)$
عدد پروپانت	$N_p$	ضریب هدر رفت	$C_1 (fv [min] ^{0.5})$
هدایت‌پذیری بدون بعد	$C_{(f Dopt)}$	قطر لوله	$D(inch)$
شاخص بهره‌دهی بدون بعد	$J_{(D max \frac{p_{ss}}{p_{ss}})}$	سختی لوله	$routhness(\epsilon)$
طول شکاف	$X_f(ft)$	ویسکوزیته سیال شکاف	$\mu_{(frac fluid)(cp)}$
عرض شکاف	$w(ft-inch)$	چگالی سیال شکاف	$\rho_{(frac fluid)(lb/ft^3)}$
اثر پوسته	$S_f$	گرادین فشار آب	$G_w(psi/ft)$
مدول برشی	$G(psi)$	نسبت پواسون	$\nu$
حجم هدر رفت	$V_{(leak off)(ft^3)}$	مدول یانگ	$E(psi)$
حجم تزریق	$V_{inj}(ft^3)$	حجم سازند	$V_r(ft^3)$
گرادین فشار حفرات	$P_p(psi/ft)$	چگالی پروپانت	$\rho_p(lb/ft^3)$
زمان تزریق	$t_i(min)$	تخلخل پروپانت	$\phi_p$
نرخ تزریق	$q(bpm)$	شعاع چاه	$r_w(ft)$
غلظت پروپانت در شکاف	$C_p(lb/ft^2)$	ضریب اصطکاک	$f_f$
بازده عملیات	$\eta$	ضریب پوروالاستیک	$\alpha$
عامل توزیع زمان باز شدن	$K_1$	گرادین تنش عمودی	$\sigma_v(psi/ft)$
افت فشار اصطکاکی	$\Delta P_f(psi)$	مقاومت کششی	$T(psi)$
افت فشار هیدرو استاتیکی	$\Delta P_H(psi)$	تنش تکتونیک	$\sigma_{tect}(psi)$
فشار تزریق در سطح	$P_i(psi)$	عدد رینولدز	$N_{re}$
حجم مرحله پد	$V_{pad}(ft^3)$	غلظت نهایی پروپانت در سیال تزریقی	$c_f(lb/gal)$
زمان مرحله پد	$t_{pad}(min)$	غلظت پروپانت در سیال تزریقی	$c_p(lb/gal)$
حداکثر تنش افقی	$\sigma_H(psi)$	تراوایی شکاف	$K_f(mD)$
		گرادین حد اقل تنش افقی	$\sigma_h(psi/ft)$

## ۶. مراجع

Al-Attar, Hazim H., and Farah A. Barkhad. "A Review OF UNCONVENTIONAL NATURAL GAS

- RESOURCES." *Journal of Nature Science and Sustainable Technology* ISSN 1933 (2018): 0324.
- Martin, T., & Economides, M. (2007). *Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production*. Virginia Gardens, FL: ET Publishing.
- Economides, M. J. (2013). *Petroleum production systems*. Pearson Education.
- Cipolla, C. L., Warpinski, N. R., Mayerhofer, M. J., Lolon, E., & Vincent, M. C. (2008, January). The relationship between fracture complexity, reservoir properties, and fracture treatment design. In *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Warpinski, N. R. (2009, January). Stress amplification and arch dimensions in proppant beds deposited by waterfracs. In *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Wang, W., Olson, J. E., Prodanović, M., & Schultz, R. A. (2018). Interaction between cemented natural fractures and hydraulic fractures assessed by experiments and numerical simulations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167, 506-516.
- Bunger, A. P., Zhang, X., & Jeffrey, R. G. (2012). Parameters affecting the interaction among closely spaced hydraulic fractures. *Spe Journal*, 17(01), 292-306.
- Lin, J., & Zhu, D. (2014). Modeling well performance for fractured horizontal gas wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 18, 180-193.
- Nolte, K. G., & Economides, M. J. (1991). Fracture design and validation with uncertainty and model limitations. *Journal of Petroleum Technology*, 43(09), 1-147.
- Song, B., Economides, M. J., & Ehlig-Economides, C. A. (2011, January). Design of multiple transverse fracture horizontal wells in shale gas reservoirs. In *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Liu, S., & Valkó, P. P. (2018). A rigorous hydraulic-fracture equilibrium-height model for multilayer formations. *SPE Production & Operations*, 33(02), 214-234.
- Rahim, Z., & Holditch, S. A. (1995). Using a three-dimensional concept in a two-dimensional model to predict accurate hydraulic fracture dimensions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 13(1), 15-27.
- Weng, X., Kresse, O., Cohen, C. E., Wu, R., & Gu, H. (2011, January). Modeling of hydraulic fracture network propagation in a naturally fractured formation. In *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Garavand, A., & Podgornov, V. M. (2018). Hydraulic fracture optimization by using a modified Pseudo-3D model in multi-layered reservoirs. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 3(4), 233-242.
- Al-Attar, H., Alshadafan, H., Al Kaabi, M., Al Hassani, A., & Al Mheiri, S. (2020). Integrated optimum design of hydraulic fracturing for tight hydrocarbon-bearing reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration*

and Production Technology, 10.(۸)

Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs. (2019). In Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs.

Huang, J., Perez, O., Huang, T., Safari, R., & Fragachan, F. E. (2018). Using engineered low viscosity fluid in hydraulic fracturing to enhance proppant placement. Society of Petroleum Engineers - SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition 2018, IHFT 2018.

Ai, K., Duan, L., Gao, H., & Jia, G. (2018). Hydraulic fracturing treatment optimization for low permeability reservoirs based on unified fracture design. Energies, 11.(۷)

عبدالهی پور، ابوالفضل، سلطانیان، حمید، فاتحیم رجبی، محمد و مرتضوی، سید علیرضا. طراحی میدانی عملیات شکست هیدرولیکی در سازند ماسه‌سنگی (مطالعه موردی: چاه قائم در میدان گازی هیوگوتون آمریکا). نشریه علمی پژوهشی ژئومکانیک نفت، ۱(۲)، ۲۱-۱.

احمدی، رضا و سمایی، آناهیتا، ۱۳۹۶، تعیین هندسه شکاف در عملیات شکاف هیدرولیکی با استفاده از مدل KGD، مطالعه موردی بر روی یک میدان نفتی در جنوب غرب ایران، چهارمین همایش بین‌المللی نفت، گاز و پتروشیمی، تهران