

تأثیر شکستگی طبیعی بر فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی

محمود بهنیا^{1*}

1- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: فروردین 1394، پذیرش: تیر 1394)

چکیده

شکست هیدرولیکی یکی از روش‌های انگیزش مخازن هیدروکربوری است که با هدف افزایش برداشت از مخازن با نفوذپذیری کم، توسعه یافته است. به منظور طراحی ایمن و بهینه‌ی این فرآیند، ضروری است که پارامترهای مؤثر بر گسترش ترک هیدرولیکی قبل از اجرای آن بر سنگ مخزن مورد ارزیابی قرار گیرد. در مخازن شکسته شده و دارای ناپیوستگی‌های از پیش موجود، نحوه‌ی گسترش شکست هیدرولیکی به دلیل اندرکنش آن با شکستگی‌های طبیعی متفاوت است به گونه‌ای که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند فشار موردنیاز برای گسترش شکست هیدرولیکی را افزایش داده و بر جایگیری پروپانت و قدرت انتقال سیال در درون شکستگی تأثیر عمده‌ای داشته باشند. در همین راستا در این مطالعه یک برنامه‌ی عددی (2DFPM) با تلفیق روش المان مرزی (ناپیوستگی - جابجایی (DDM)) و روش تفاضل محدود (FDM) با هدف مدلسازی هندسه‌ی شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته شده توسعه‌ی داده شد و با استفاده از مدل KGD اعتبارسنجی گردید. در ادامه حالات مختلف برخورد شکست هیدرولیکی با ناپیوستگی مدلسازی شد و تأثیر ناپیوستگی‌های از پیش موجود بر تغییرات فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی و میزان بازشدگی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نحوه‌ی برخورد شکست هیدرولیکی به ناپیوستگی طبیعی و پارامترهای تزریق از عوامل عمده‌ی کنترل‌کننده‌ی گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته شده هستند.

کلمات کلیدی

شکستگی هیدرولیکی، شکستگی طبیعی، فشار سیال، روش ناپیوستگی-جابجایی، روش تفاضل محدود

1- مقدمه

در این مطالعه روش المان مرزی مرتبه‌ی بالا به همراه المان نوک ترک به‌منظور بررسی گسترش شکست هیدرولیکی در مجاورت شکستگی‌های طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است. در همین راستا یک برنامه‌ی عددی (2DFPM) از تلفیق روش ناپیوستگی-جابجایی و روش تفاضل محدود توسعه داده شده است. از روش تفاضل محدود به دلیل قابلیت بالایی که در حل معادلات وابسته به زمان دارد برای مدل‌سازی جریان سیال و برآورد توزیع واقعی فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی استفاده گردید.

با استفاده از برنامه‌ی عددی توسعه داده شده، تغییرات فشار سیال درون شکستگی در حالت‌های مختلف برخورد با ناپیوستگی مورد بررسی قرار گرفت و همچنین میزان بازشدگی شکست هیدرولیکی و توانایی آن برای انتقال سیال دیگر پارامتر مورد مطالعه بوده است.

لازم به ذکر است که کلیه‌ی مدل‌سازی‌ها در حالت دوبعدی، کرنش صفحه‌ای و با فرض الاستیسیته خطی صورت پذیرفته است. عدم نفوذ سیال به درون سنگ و همچنین وجود سیال نیوتنی تراکم ناپذیر از فرضیات موجود در مدل‌سازی‌ها بوده است. همچنین پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی به‌گونه‌ای انتخاب شده است که لغزش و یا بازشدگی در امتداد ناپیوستگی رخ ندهد.

2- روش ناپیوستگی-جابجایی مرتبه‌ی بالا

یک المان ناپیوستگی-جابجایی با طول $2a$ که در امتداد محور x قرار دارد در شکل 1(a) نشان داده شده و توزیع کلی آن $u(\varepsilon)$ مشخص شده است.

با در نظر گرفتن اجزاء u_x و u_y برای حالت کلی $u(\varepsilon)$ فرض ثابت بودن آن‌ها و همچنین برابری آن‌ها با مقادیر D_x و D_y در بازه $(-a, +a)$ که در شکل 1(b) نشان داده شده است، دو سطح المان ناپیوستگی - جابجایی می‌توانند در امتداد محور y به دو بخش مثبت $(y=0_+)$ و بخش منفی $(y=0_-)$ تقسیم شوند.

مقادیر ثابت تغییر شکل D_x و D_y به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} D_x &= u_x(x, 0_-) - u_x(x, 0_+), \\ D_y &= u_y(x, 0_-) - u_y(x, 0_+) \end{aligned} \quad (1)$$

قرارداد علامت مثبت D_x و D_y در شکل 1(b) نشان داده

شکست هیدرولیکی یکی از روش‌های تحریک مخزن است که برای افزایش بهره‌برداری نفت و گاز از مخازن با نفوذپذیری کم، مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. به دلیل وجود لایه‌بندی و ناپیوستگی‌ها در مخازن نفتی، گسترش شکست هیدرولیکی در چنین محیط‌هایی از نحوه‌ی قرار گرفتن نسبت به این عوارض ساختاری تأثیر می‌پذیرد. در این محیط‌ها به علت برخورد شکستگی با ناپیوستگی‌های از پیش موجود، پارامترهای طراحی نسبت به محیط‌های پیوسته دارای تفاوت‌هایی هستند. یکی از این پارامترها که ضروری است قبل از اجرای عملیات شکست هیدرولیکی مورد مطالعه قرار گیرد، میزان فشار شکست و تغییر فشار سیال درونی شکستگی هیدرولیکی بسته به شرایط ناپیوستگی‌های موجود در محیط است.

مدلسازی‌های عددی به‌منظور شناخت بهتر این پارامترها به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش المان مرزی در مدل‌سازی فرآیند شکست هیدرولیکی که یک مسئله‌ی مکانیک شکستی است و تنش در محدوده‌ی نوک آن به سرعت تغییر می‌کند، کارآمدتر است. از این رو، این روش قدرتمند عددی به‌طور گسترده در مکانیک شکست مورد استفاده قرار گرفته است [2-3]. لازم به ذکر است که در روش المان مرزی به دلیل کاهش یک بعد مسئله و عدم نیاز به المان‌بندی سطح -تنها با المان‌بندی مرزها و سطح ترک- میزان داده‌ها و زمان محاسبات نسبت به روش المان محدود به شدت کاهش می‌یابد. روش ناپیوستگی-جابجایی (DDM) که یک روش المان مرزی غیرمستقیم است به دلیل عدم نیاز به مش بندی مجدد در حین گسترش ترک، برای مدل‌سازی مسائل گسترش ترک بسیار مناسب است.

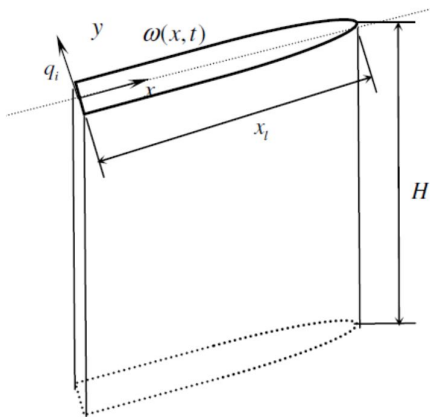
اخیراً روش ناپیوستگی-جابجایی با المان مرتبه‌ی بالا به همراه المان نوک ترک برای حل مسائل مربوط به گسترش ترک مورد استفاده قرار گرفته است [4-9]. در المان‌های مرتبه‌ی بالا با برهم‌گذاری نقاط مرکزی زیر المان‌ها (هر المان مرتبه‌ی بالا می‌تواند به دو، سه و یا چهار زیر المان تقسیم شود)، دقت محاسبات افزایش می‌یابد. همچنین مشکل یکتایی در نوک ترک نیز با استفاده از المان نوک ترک برطرف می‌شود.

شده است [10].

محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. با صرف نظر کردن از عبارت تراوش، معادله‌ی پیوستگی برای جریان سیال تراکم ناپذیر در درون شکستگی هیدرولیکی به صورت رابطه‌ی 2 بیان می‌شود:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق w میزان بازشدگی شکست هیدرولیکی و q دبی جریان سیال در یک مقطع از شکستگی است. جریان سیال می‌تواند بر اساس قانون پویسیلی بر حسب میزان بازشدگی و فشار سیال موجود در شکستگی بیان گردد [12].



شکل 2: هندسه‌ی شکست هیدرولیکی در حالت کرنش صفحه‌ای برای مدلسازی جریان سیال درون آن [13]

$$q = \frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial p_f}{\partial x} \quad (3)$$

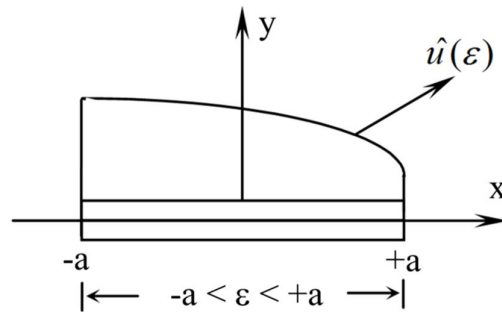
که در این رابطه P_f فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی و μ گرانروی سیال است. شرایط مرزی برای این مسئله برابر است با:

$$q(0, t) = q_i = \text{const} \quad (4)$$

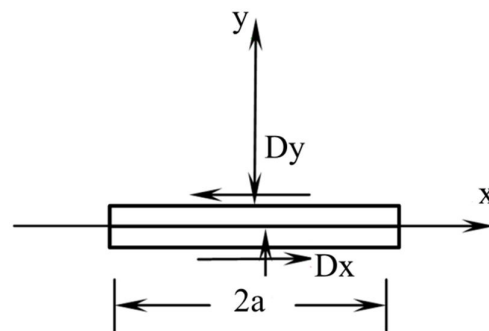
q_i نرخ تزریق سیال در درون گمانه ($x=0$) است. همچنین فرض می‌شود که فشار سیال بر روی نوک ترک برابر با صفر است و بنابراین به صورت رابطه‌ی 5 بیان می‌گردد.

$$p_f(x_l, t) - \sigma_n = 0 \quad (5)$$

در این رابطه σ_n تنش بر جای عمود بر سطح شکستگی هیدرولیکی است. با توجه به اینکه شکستگی هیدرولیکی



(a)



(b)

شکل 1: (a) المان ناپیوستگی - جابجایی به همراه توزیع $u(\epsilon)$ (b) المان ثابت در روش ناپیوستگی - جابجایی

فرمولاسیون مربوط به المان کوادراتیک و همچنین المان نوک ترک که به منظور افزایش دقت در برنامه‌ی عددی توسعه داده شده مورد استفاده قرار گرفته است در منبع شماره [11] ارائه شده است.

3- سیال نیوتنی درون شکستگی هیدرولیکی

به منظور برآورد توزیع واقعی فشار سیال بر روی مرز شکستگی هیدرولیکی، در این مطالعه جریان سیال درون شکستگی هیدرولیکی به عنوان یک سیال نیوتنی تراکم ناپذیر مدل شده است.

هندسه‌ی شکستگی هیدرولیکی، با فرض کرنش صفحه‌ای به گونه‌ای که ارتفاع شکستگی به مراتب از طول آن بیشتر است ($H \gg L$) در شکل 2 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این هندسه منطبق بر مدل KGD بوده که با شکستگی‌های واقعی ایجاد شده در دیواره‌ی چاه‌ها تطابق مناسبی داشته و به طور گسترده توسط

$$\begin{aligned} a_i &= (w_i^{m+1} + w_{i-1}^{m+1})^3 \\ b_i &= -(w_i^{m+1} + w_{i+1}^{m+1})^3 - (w_i^{m+1} + w_{i-1}^{m+1})^3 \\ c_i &= (w_i^{m+1} + w_{i+1}^{m+1})^3 \\ d_i &= \frac{w_i^{m+1} - w_i^m}{(\Delta t / 8\mu'(\Delta x)^2)} \end{aligned} \quad (12)$$

جایی که $\mu' = 12\mu$ است. همچنین ضرایب a، b و c برای گره اول و آخر به ترتیب برابرند با:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0, \quad b_1 = -(w_1^{m+1} + w_2^{m+1})^3, \\ c_1 &= (w_1^{m+1} + w_2^{m+1})^3, \\ d_1 &= \frac{w_1^{m+1} - w_1^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} q_1}{(\Delta t / 8\mu'(\Delta x)^2)} \end{aligned} \quad (13)$$

$$a_n = 0, \quad b_n = 1, \quad c_n = 0, \quad d_n = \sigma_{\infty, n} \quad (14)$$

4- فلوجارت‌ها و الگوریتم عددی

محاسبات در برنامه‌ی 2DFPM در شش مرحله انجام می‌شود. این مراحل عبارت‌اند از:

- تولید هندسه‌ی مرزها و پارامترهای مکانیکی محیط
 - تولید بردارهای نیرو ناشی از جریان سیال بر روی مرزها
 - محاسبه‌ی ضرایب تأثیر بر روی تمام المان‌ها و تشکیل دستگاه معادلات
 - حل دستگاه معادلات و تعیین مقادیر مجهول DD
 - حل معادلات جریان سیال و فرآیند تکرار فشار سیال- بازشدگی ترک
 - محاسبه‌ی تنش‌ها و کرنش‌ها بر روی نقاط درون محیط با استفاده از برهم‌نهی مقادیر DD
- جزئیات این مراحل به شرح زیر است:

مرحله‌ی اول: مرزهای مسئله که توسط قطعاتی مشخص شده است به تعداد المان‌های مشخص شده برای هر قطعه تقسیم و مشخصات المان‌ها و مختصات گره‌های آن‌ها استخراج می‌گردد. در ادامه‌ی این مرحله مشخصاتی همانند تنش‌های برجا و ضرایب الاستیسیته (مدول یانگ و نسبت پواسون) برای توده‌سنگ و هم‌چنین سختی نرمال و برشی، چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک و مقاومت کششی

در ابتدا بسته است بنابراین شرط اولیه آن برای بازشدگی برابر است با:

$$w(x, 0) = 0 \quad (6)$$

رابطه‌ی 2 با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی از زمان t_m تا t_{m+1} به صورت زیر گسسته می‌شود:

$$\frac{w_i^{m+1} - w_i^m}{\Delta t} = \frac{q_{i+1/2}^{m+1} - q_{i-1/2}^{m+1}}{\Delta x} \quad (7)$$

در اینجا رابطه $\Delta x = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$ و با فرض $\Delta t = t_{m+1} - t_m$

$$w_{i+1/2}^{m+1} = \frac{w_{i+1}^{m+1} + w_i^{m+1}}{2} \quad \text{و} \quad w_{i-1/2}^{m+1} = \frac{w_{i-1}^{m+1} + w_i^{m+1}}{2}$$

و بر اساس رابطه‌ی 3:

$$q_{i+1/2} = \frac{(w_{i+1}^{m+1} + w_i^{m+1})^3}{8 \times 12\mu} \frac{p_{i+1}^{m+1} - p_i^{m+1}}{\Delta x} \quad (8)$$

$$q_{i-1/2} = \frac{(w_i^{m+1} + w_{i-1}^{m+1})^3}{8 \times 12\mu} \frac{p_i^{m+1} - p_{i-1}^{m+1}}{\Delta x} \quad (9)$$

با جایگذاری روابط 8 و 9 در رابطه‌ی 7، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} w_i^{m+1} - w_i^m &= \frac{\Delta t}{8 \times 12\mu(\Delta x)^2} [(w_{i+1}^{m+1} + w_i^{m+1})^3 p \\ &- (w_{i+1}^{m+1} + w_i^{m+1})^3 p_i^{m+1} - (w_i^{m+1} + w_{i-1}^{m+1})^3 p_i^{m+1} \\ &+ (w_i^{m+1} + w_{i-1}^{m+1})^3 p_{i-1}^{m+1}] \end{aligned} \quad (10)$$

همچنین شرایط مرزی بیان شده در روابط 4 و 5 به صورت زیر گسسته می‌شوند:

$$\begin{aligned} q_{1/2}^m &= q_1 & i=1 \\ p_n^m &= \sigma_n & i=n \end{aligned}$$

و شرط مرزی برای بازشدگی می‌تواند به صورت $w_i^0 = w(x_i, 0) = 0$ بیان شود. ترکیب رابطه‌ی 10 با شرایط مرزی گسسته شده منجر به رابطه‌ی نهایی زیر می‌گردد:

$$a_i p_{i-1}^{m+1} + b_i p_i^{m+1} + c_i p_{i+1}^{m+1} = d_i \quad (11)$$

که در این رابطه برای مقادیر $i=2$ الی $n=1$.

اصل برهم‌نهی و مقادیر DD محاسبه شده بر روی مرزها امکان‌پذیر است. در این مرحله با تعریف یک شبکه از نقاط در درون یا بیرون محیط، ماتریس ضرایب تأثیر برای این نقاط محاسبه و سپس تنش‌ها و تغییرشکل‌های مربوطه برآورد می‌شوند.

5- الگوریتم عددی حل جریان سیال

مهم‌ترین چالش در مدل کردن جریان سیال نیوتنی، تعیین دو متغیر مجهول و وابسته به هم، یعنی میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی و فشار سیال درون آن است. میزان بازشدگی (که عکس‌العمل مکانیکی توده سنگ مخزن است)، بسته به میزان بار اعمال شده توسط سیال نیوتنی بر دیواره‌های شکستگی هیدرولیکی تغییر می‌کند. از طرفی میزان فشار سیال و تغییرات آن در طول شکستگی هیدرولیکی وابسته به میزان بازشدگی آن است. بنابراین ضروری است از یک فرآیند تکرارشونده برای محاسبه‌ی توزیع فشار سیال و میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی استفاده شود.

نحوه‌ی حل به‌گونه‌ای است که در هر گام زمانی، در ابتدا با استفاده از معادلات تحلیلی ارائه شده برای محاسبه‌ی توزیع فشار سیال در امتداد ترک، توزیع فشار ($(p_i^{(k)})(x_i, t_m)$) در امتداد شکستگی هیدرولیکی محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از DDM میزان بازشدگی ($(w_i^{(k)})(x_i, t_m)$) ناشی از این توزیع فشار محاسبه می‌گردد. سپس با معلوم بودن میزان بازشدگی و با استفاده از رابطه‌ی 11 توزیع فشار سیال ($(p_i^{(k+1/2)})(x_i, t_m)$) در امتداد شکستگی هیدرولیکی محاسبه می‌شود. مقادیر فشار محاسبه شده با مقادیر اولیه مقایسه و در صورتی که اختلاف آن‌ها از میزان تعیین شده بیشتر باشد، دوباره محاسبات توسط DDM برای یافتن میزان تغییرشکل‌ها ($(w_i^{(k+1)})(x_i, t_m)$) ادامه می‌یابد، که این تغییرشکل‌ها نیز برای یافتن توزیع فشار سیال ($(p_i^{(k+1)})(x_i, t_m)$) مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمانی که اختلاف فشارهای دو مرحله‌ی پیاپی به صفر نزدیک گردد یا از مقدار بسیار کوچکی کمتر شود، نتایج همگرا شده و محاسبات متوقف می‌شود. الگوریتم حل معادلات جریان سیال در شکل 3 نشان داده شده است.

برای ناپیوستگی‌ها تعریف و به المان مربوطه تخصیص داده می‌شود. همچنین شدت جریان و گرانشی سیال دو پارامتری هستند که برای بیان مشخصات سیال تعیین می‌شوند.

مرحله‌ی دوم: در این مرحله شرایط مرزی که شامل شرایط تنش و یا تغییر شکل و یا ترکیبی از هر دو است، بر روی گره‌های هر المان تعریف می‌شود. تنش‌های برجا نیز با توجه به وضعیت قرارگیری هر المان در فضا به دو مؤلفه‌ی موازی و عمود بر آن تقسیم و با تنش‌های اعمالی بر هر المان جمع می‌شوند.

لازم به ذکر است که تنش‌های اعمالی بر هر المان از حل معادلات جریان سیال در درون شکستگی هیدرولیکی برآورد می‌شوند. در نهایت بردار {B} که شرایط مرزی تنش یا تغییر شکل را برای تمامی گره‌ها دربر دارد ایجاد می‌شود. مرحله‌ی سوم: در این مرحله ماتریس ضرایب تأثیر بر اساس فرمول‌بندی ارائه شده برای هر المان (کوادراتیک یا نوک ترک) محاسبه و ماتریس ضرایب [C] برای تمامی گره‌های آن‌ها تولید می‌شود [11].

لازم به ذکر است در هر گره چهار مجهول وجود دارد که شامل دو جزء تغییر شکل u_s و u_n و دو جزء نیروی σ_s و σ_n هستند. از طرفی شرایط سازگاری برای هر گره، چهار رابطه ارائه می‌کند و بنابراین مسئله قابل حل است. معادلات نهایی مسئله را ماتریس ضرایب تأثیر (C) به همراه معلومات (b) و مجهولات (D) شکل می‌دهند.

$$\left\{ \begin{aligned} b_s^i &= \sum_{j=1}^N C_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}^{ij} D_n^j \\ b_n^i &= \sum_{j=1}^N C_{ms}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N C_{mn}^{ij} D_n^j \end{aligned} \right\} \quad i=1 \text{ to } N \quad (15)$$

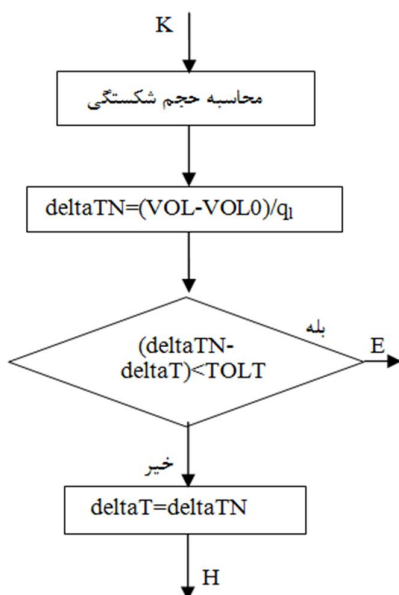
مرحله‌ی چهارم: حل دستگاه معادلات جبری $\{A\}\{X\}$ = {B} و تعیین مقادیر مجهول DD در این مرحله انجام می‌شود. حل این ماتریس در نرم‌افزار متلب و با استفاده از روش فاکتورگیری LU انجام می‌شود.

مرحله‌ی پنجم: برای محاسبه‌ی میزان فشار ناشی از جریان سیال درون شکستگی هیدرولیکی، معادلات جریان سیال به روش تفاضل محدود ضمنی حل و توزیع فشار سیال بر روی المان‌ها استخراج می‌شود.

مرحله‌ی ششم: محاسبه‌ی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها بر روی نقاط بیرون یا درون محیط مدل شده با استفاده از

$$\int_{-a}^a w(x,t) = Q_0 t \quad (17)$$

مقدار زمان جدید محاسبه شده، جایگزین مقدار قبلی می‌شود و محاسبات با استفاده از مقدار جدید تکرار می‌شود. این فرآیند تا زمانی که اختلاف دو مقدار قبلی و جدید به صفر نزدیک شود ادامه خواهد یافت. بعد از همگرا شدن منحنی‌های توزیع فشار سیال و همچنین زمان تزریق، بر اساس میزان بازشدگی‌های محاسبه شده، میزان تنش و کرنش در نقاط بیرونی ترک هیدرولیکی محاسبه می‌شود.



شکل 4: فلوجارت حل معادلات جریان سیال در برنامه‌ی عددی

6- اعتبار سنجی برنامه‌ی عددی توسعه داده شده

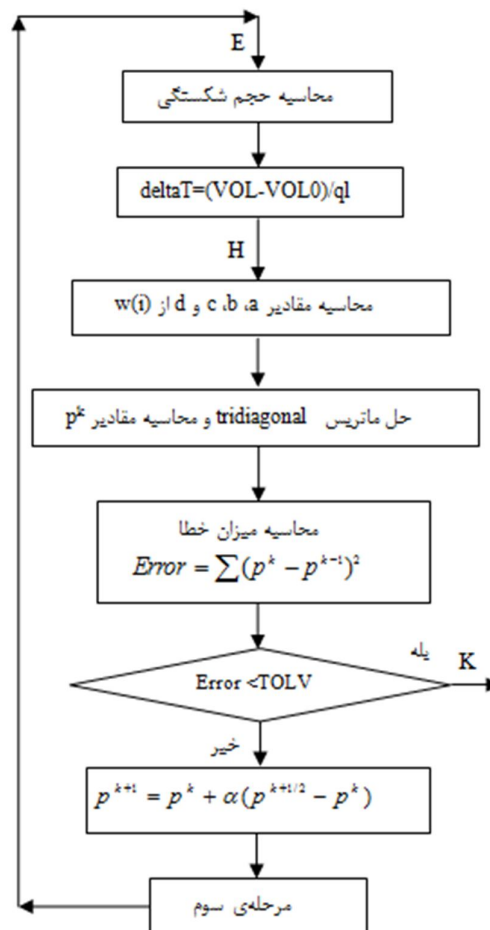
به منظور برآورد میزان دقت برنامه‌ی عددی توسعه داده شده در مدل‌سازی جریان سیال، تغییرات فشار خالص و میزان بازشدگی شکست هیدرولیکی در نقطه‌ی تزریق در دیواره چاه محاسبه و با مقادیر حاصل از مدل KGD مقایسه شد.

گیرتسما و دی کلرک [14] یک حل تقریبی برای حالت دوبعدی شکستگی هیدرولیکی و با فرض جریان سیال درون آن پیشنهاد داده‌اند و روابطی برای محاسبه‌ی طول شکستگی هیدرولیکی، بازشدگی آن و میزان فشار در درون چاه تزریق ارائه کرده‌اند:

برای کاهش تعداد فرآیندهای تکرار و همگرایی سریع‌تر نتایج، از یک فاکتور کاهنده (α) برای محاسبه‌ی میزان فشار سیال اعمالی در مرحله‌ی بعد استفاده می‌شود [13].

$$p_i^{(k+1)}(x_i, t_m) = p_i^{(k)}(x_i, t_m) + \alpha (p_i^{(k+1/2)}(x_i, t_m) - p_i^{(k)}(x_i, t_m)) \quad (16)$$

لازم به ذکر است که مدت زمان تزریق سیال نیز در هر گام زمانی اصلاح می‌شود. پس از همگرا شدن منحنی‌های توزیع فشار سیال و بازشدگی، حجم شکستگی هیدرولیکی به وسیله‌ی انتگرال‌گیری عددی و با استفاده از مقادیر بازشدگی و طول شکستگی محاسبه می‌شود (شکل 4) و سپس با استفاده از معادله موازنه جرم، زمان تزریق محاسبه می‌شود.



شکل 3: فلوجارت حل معادلات جریان سیال در برنامه‌ی عددی

از روش KGD بیشتر است. این اختلاف که به‌وسیله‌ی یوو [15] و داهی [16] نیز گزارش شده است به دلیل ساده-سازی صورت گرفته در مدل KGD است که در آن نرخ تزریق در تمام طول شکستگی یکسان فرض شده است.

مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که برنامه‌ی توسعه داده شده دارای دقت مناسبی در مدلسازی این‌گونه مسائل است و می‌تواند برای حل مسائل مربوط به گسترش شکست هیدرولیکی در مجاورت ناپیوستگی مورد استفاده قرار گیرد.

در ادامه نحوه‌ی توزیع فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی و همچنین تغییر این فشار متناسب با افزایش گرانیوی سیال و نرخ تزریق مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 7 منحنی تغییر غیرخطی فشار در امتداد شکستگی هیدرولیکی با طول 6 متر نشان داده شده است. در این مدلسازی نرخ تزریق به درون شکستگی از 10 بشکه در دقیقه به 70 بشکه در دقیقه افزایش داده شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ تزریق موجب افزایش فشار سیال درون شکستگی از 5/8 مگاپاسکال به بیش از 8/2 مگاپاسکال می‌شود. همچنین مدلسازی عددی نشان می‌دهد که افزایش گرانیوی سیال نیز موجب افزایش فشار درون شکستگی می‌گردد (شکل 8).

لازم به ذکر است نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی که نشان می‌دهد افزایش نرخ تزریق و گرانیوی سیال موجب افزایش فشار سیال می‌گردد همخوانی دارد.

$$L(t) = 0.539 \left[\frac{E' q_0^3}{\mu} \right]^{1/6} t^{2/3}$$

$$w_{well}(t) = 2.36 \left[\frac{\mu q_0^3}{E'} \right]^{1/6} t^{1/3} \quad (18)$$

$$p_{n,well} = 1.09 \left[\mu E'^2 \right]^{1/3} t^{-1/3}$$

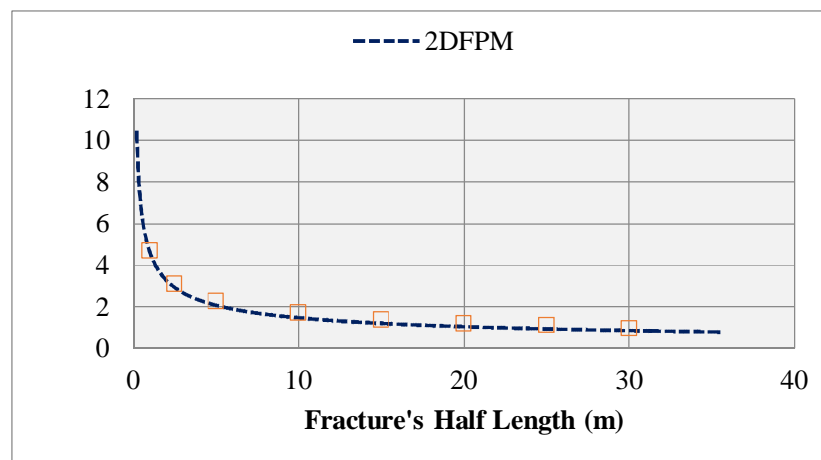
در این روابط E' مدول الاستیسیته کرنش صفحه‌ای ($E' = \frac{2G}{1-\nu}$) و q_0 نرخ تزریق سیال برای یک واحد ارتفاعی شکستگی هیدرولیکی $q_0 = Q_0 / h_f$ است. پارامترهای لحاظ شده برای محیط و سیال درون شکستگی در جدول 1 ارائه گردیده است.

جدول 1: پارامترهای ورودی در مدلسازی جریان سیال

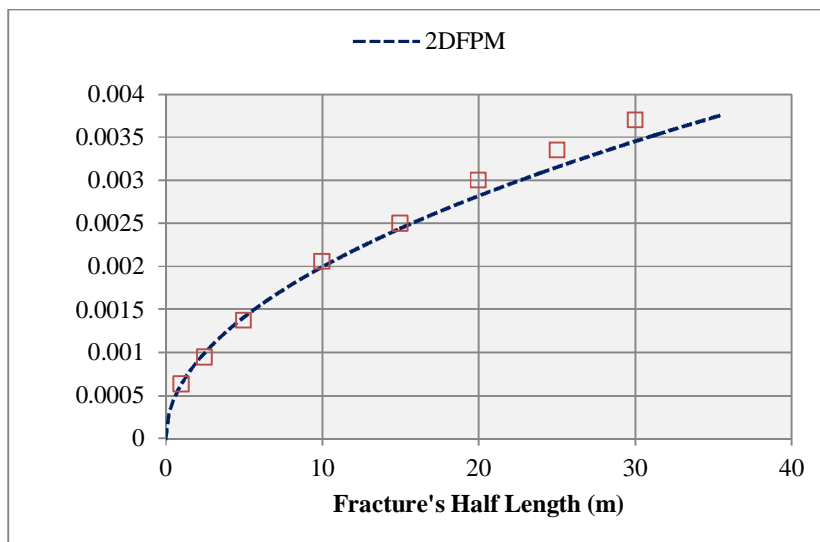
H (ft)	μ (cp)	Q_0 (bbl/min)	ν	E (psi)
100	100	5	0/25	4×10^6

در شکل 5 تغییرات فشار در نقطه تزریق با افزایش طول شکستگی هیدرولیکی برای این مطالعه و مدل KGD نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است نتایج حاصل از برنامه‌ی عددی توسعه داده شده دارای تطابق بسیار مناسبی با نتایج تحلیلی ارائه شده برای مدل KGD است.

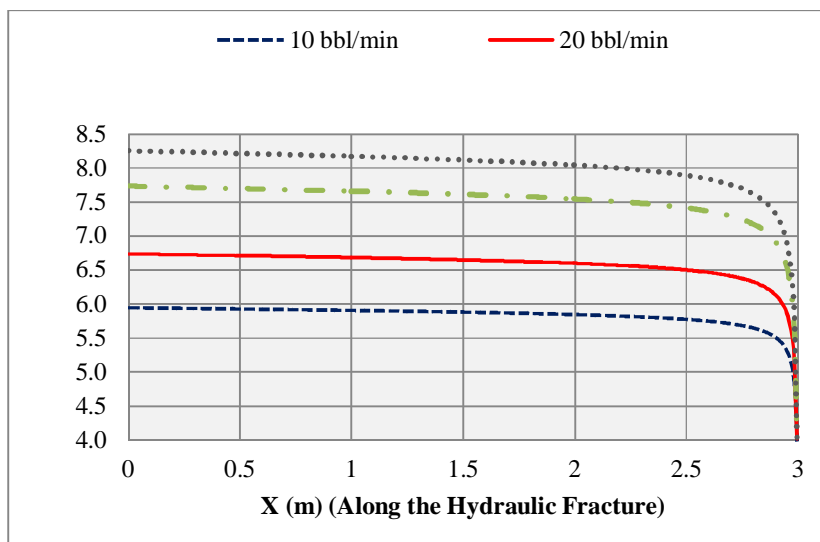
در شکل 6 میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی در دیواره چاه با مقادیر حاصل از مدل KGD مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای شکستگی هیدرولیکی با طول‌های بزرگ‌تر، میزان بازشدگی اندکی از مقادیر حاصل



شکل 5: تغییرات فشار سیال در دیواره چاه با افزایش طول شکستگی هیدرولیکی برای این مطالعه و مدل تحلیلی KGD



شکل 6: تغییرات بازشدگی شکستگی هیدرولیکی در دیواره چاه با افزایش طول آن برای این مطالعه و مدل تحلیلی KGD



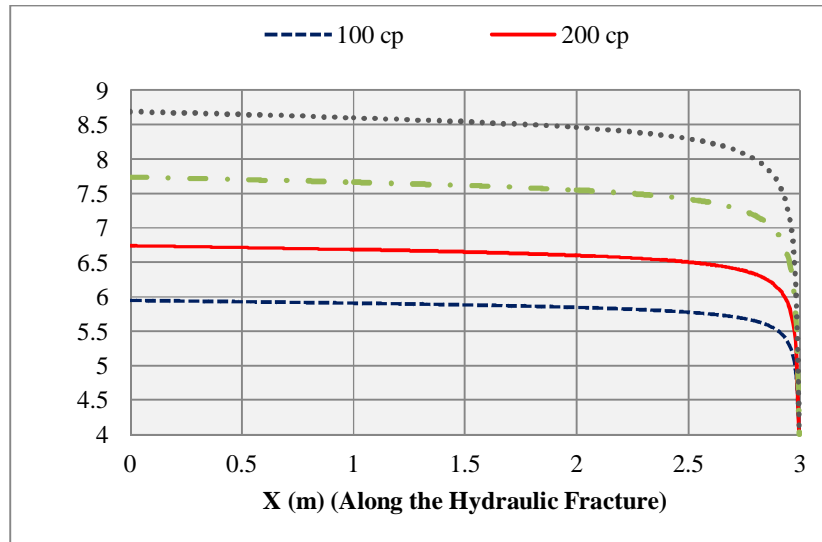
شکل 7: تغییرات فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی با افزایش نرخ تزریق سیال

7- تغییرات فشار سیال در حالت اندرکنش شکستگی هیدرولیکی و ناپیوستگی

به منظور بررسی تغییرات توزیع فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی متناسب با شرایط اندرکنش با ناپیوستگی، مدلسازی جریان در درون شکستگی هیدرولیکی در حالت اندرکنش و بدون آن انجام شد (شکل

(9).

پارامترهای استفاده شده برای محیط سنگی و جریان سیال نیز در جدول 2 ارائه شده است. تنش‌های افقی حداکثر و حداقل نیز به ترتیب 6 و 4 مگاپاسکال لحاظ شدند.



شکل 8: تغییرات فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی با افزایش گرانیوی سیال

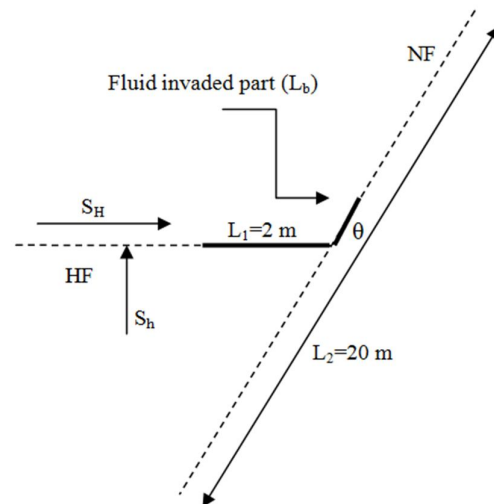
در حالی که یک ناپیوستگی با زاویه 40 درجه نسبت به افق و در فاصله 2 متری آن قرار دارد، حداکثر فشار در دهانه چاه تا مقدار 7 مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد که وجود ناپیوستگی در محیط باعث افزایش فشار سیال در درون شکستگی هیدرولیکی شده و فشار بیشتری برای توسعه آن در مجاورت ناپیوستگی‌های طبیعی نیاز است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که پس از برخورد شکستگی هیدرولیکی به ناپیوستگی موجود در محیط و نفوذ به درون آن، فشار سیال مجدداً افزایش می‌یابد. به‌منظور برآورد میزان تأثیر انحراف شکستگی هیدرولیکی به درون ناپیوستگی بر توزیع فشار سیال، این حالت نیز مدلسازی گردید. در این حالت شکستگی هیدرولیکی به اندازه یک متر در ناپیوستگی با طول 20 متر نفوذ می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که انحراف شکستگی هیدرولیکی به درون ناپیوستگی باعث افزایش فشار سیال می‌شود. این مسئله به دلیل افزایش تنش برجا بر روی نوک شکستگی هیدرولیکی بوده که موجب تغییر شرایط مرزی در نوک شکستگی می‌شود. از طرفی کاهش میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی در نقطه برخورد نیز موجب افزایش فشار سیال می‌شود (شکل 11).

تغییرات میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی برای دو حالت مورد مطالعه در شکل 12 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است میزان بازشدگی



شکل 9: هندسه‌ی اندرکنش شکستگی هیدرولیکی و ناپیوستگی در حالت نفوذ سیال به درون ناپیوستگی

جدول 2: پارامترهای ورودی در مدلسازی جریان سیال

H (ft)	μ (cp)	Q_0 (bbl/min)	ν	E (psi)
100	100	10	0/25	4×10^6

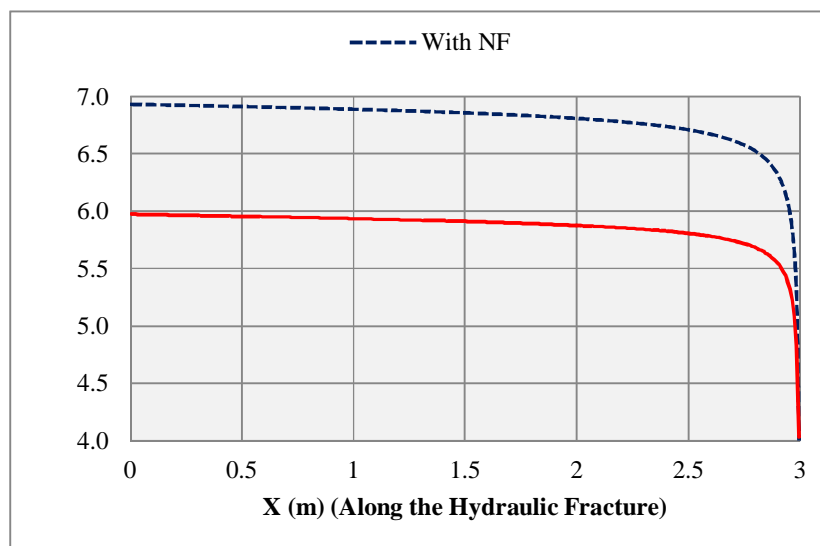
در شکل 10 توزیع فشار سیال در امتداد شکستگی هیدرولیکی برای حالت‌های وجود ناپیوستگی و عدم وجود آن نشان داده شده است. در حالت عدم وجود ناپیوستگی، حداکثر فشار در دهانه چاه برای یک شکستگی 6 متری به حدود 6 مگاپاسکال می‌رسد ولی برای این ترک هیدرولیکی

چاه، میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی برای مقادیر مختلف طول منحرف شده در امتداد ناپیوستگی محاسبه شد (شکل 13).

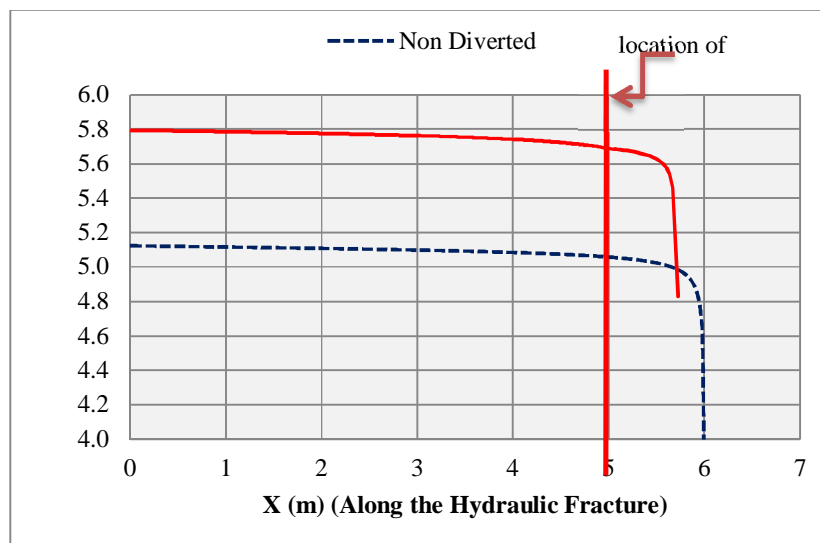
نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول نفوذ، طول کلی شکستگی هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد و بنابراین پروفیل فشار کاهش می‌یابد. میزان بازشدگی کلی با افزایش طول نفوذ بیشتر می‌گردد که البته اختلاف بین میزان بازشدگی در قسمت اصلی شکستگی هیدرولیکی و قسمت نفوذ کرده بیشتر هست.

شکستگی منحرف شده در نقطه برخورد، به‌طور مؤثری کاهش یافته که موجب افزایش فشار شده است. لازم به ذکر است حجم شکستگی هیدرولیکی به میزان اختلاف سطح زیر دو منحنی کاهش یافته و این امر توانایی آن در انتقال سیال را کاهش داده و موجب افزایش فشار سیال شده است.

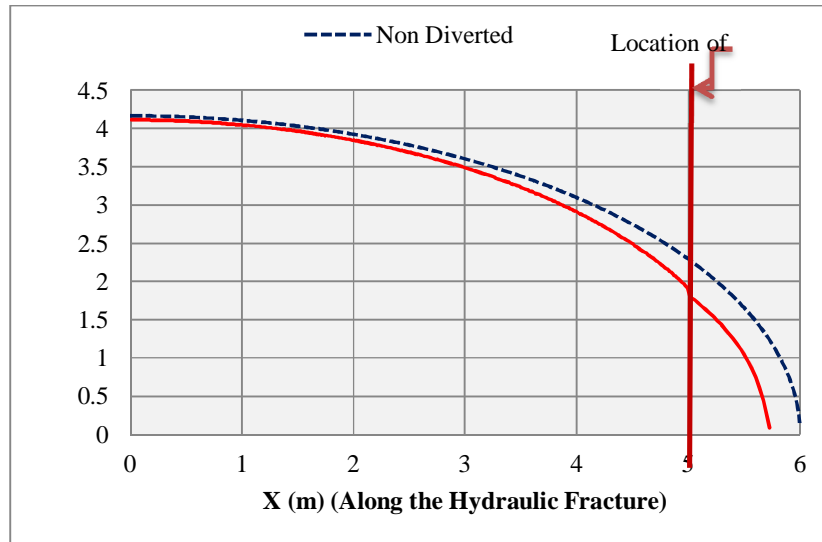
برای فهم بهتر تأثیر میزان انحراف به درون ناپیوستگی بر میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی و عبور پروپانت از آن و در نتیجه توانایی آن در انتقال نفت و گاز به درون



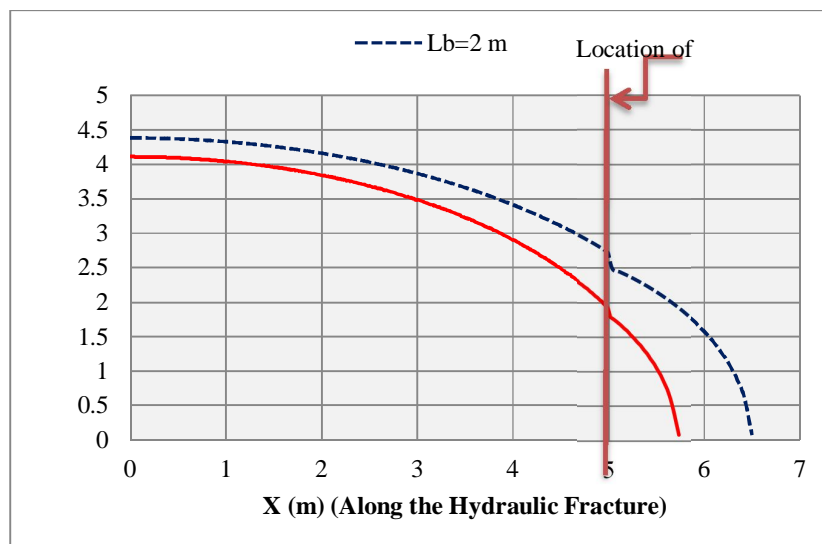
شکل 10: توزیع غیرخطی فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی برای دو حالت عدم وجود ناپیوستگی و وجود ناپیوستگی



شکل 11: توزیع غیرخطی فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی برای دو حالت انحراف به درون ناپیوستگی و بدون انحراف



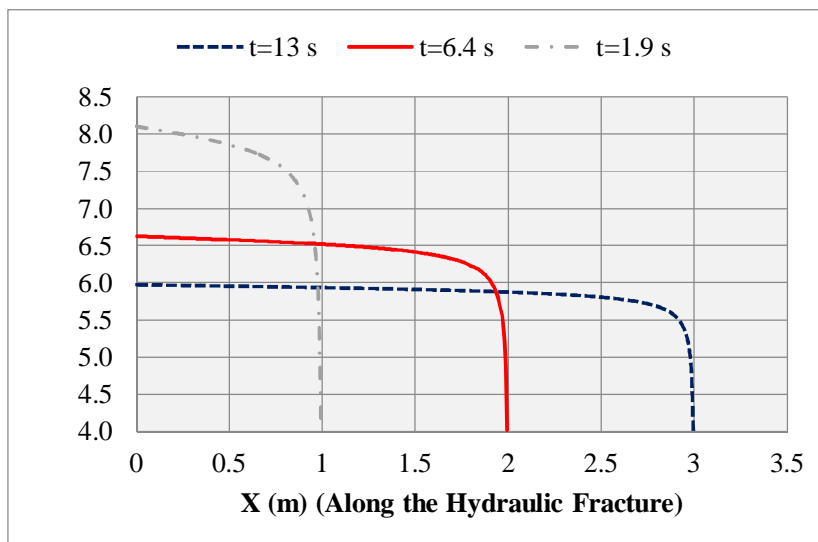
شکل 12: میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی برای حالت انحراف به درون ناپیوستگی و بدون انحراف



شکل 13: میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی برای طول‌های مختلف نفوذ به درون ناپیوستگی

یکی از عوامل تأثیرگذار بر موفقیت شکستگی هیدرولیکی در گذر از ناپیوستگی، فاصله میان چاه تزریق و ناپیوستگی موجود در محیط است. بنابراین در حالتی که فاصله ناپیوستگی تا چاه تزریق بیشتر باشد امکان عبور شکستگی از ناپیوستگی بدون تحریک ناپیوستگی افزایش می‌یابد. زیرا توانایی آن در باز کردن و یا ایجاد لغزش در امتداد ناپیوستگی کمتر می‌گردد.

به منظور بررسی تغییرات پروفیل فشار سیال در امتداد شکستگی هیدرولیکی در طول زمان، تغییرات فشار سیال برای سه زمان $1/9$ ، $6/4$ و 13 ثانیه در شکل 14 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زمان تزریق و رشد شکستگی هیدرولیکی و در نتیجه افزایش طول آن، فشار موجود در امتداد شکستگی هیدرولیکی کاهش می‌یابد.



شکل 14: توزیع غیرخطی فشار سیال درون شکستگی هیدرولیکی در زمان‌های مختلف تزریق

نقطه تزریق از ناپیوستگی بستگی دارد.

در نهایت لازم به ذکر است که برنامه‌ی عددی توسعه داده شده می‌تواند تأثیر عوامل مختلف بر فرآیند گسترش شکستگی هیدرولیکی در مجاورت ناپیوستگی‌های موجود در محیط را به خوبی نشان دهد.

9- مراجع

- [1] Clark, J. B.; 1949; Hydraulic Process for Increasing the Productivity of Wells; Petroleum Trans. American Institute of Mining and Energy, v. 186, p. 1-8.
- [2] Aliabadi, M.H., Rooke, D.P.; 1991; Numerical Fracture Mechanics; Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
- [3] Aliabadi, M.H.; 1998; Fracture of Rocks; Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
- [4] Scavia, C.; 1995; A Method for the Study of Crack Propagation in Rock Structures; Géotechnique 45(3), 447-463.
- [5] Shou, K.J., Crouch, S.L.; 1995; A Higher order Displacement Discontinuity Method for Analysis of Crack Problems; Int. J. Rock Mech. Miner. Sci. Geomech. Abstr. 32, 49-55.
- [6] Tan, X.C., Kou, S.Q. Lindqvist, P.A.; 1996; Simulation of Rock Fragmentation by Indenters Using DDM and Fracture Mechanics; In: Aubertin, M., Hassani, F., Mitri, H. (Eds.), Rock Mechanics, Tools and Techniques. Balkema, Rotterdam.
- [7] Marji M. F., Hosseini Nasab, H. and Kohsary A. H.; 2006; On the Uses of Special Crack Tip Elements in Numerical Rock Fracture Mechanics; Int. J. Solids and Struct. 43, 1669- 1692.

8- نتیجه گیری

مدلسازی همزمان جریان سیال و تغییر شکل محیط، امکان بررسی گسترش شکستگی هیدرولیکی را نسبت به زمان و تحت تأثیر عواملی همچون گرانیروی سیال و نرخ تزریق فراهم می‌کند. هم‌چنین بررسی تغییرات فشار سیال در مراحل قبل و بعد از برخورد به ناپیوستگی و یا پس از انحراف به درون آن را میسر می‌کند.

در این راستا برنامه‌ی عددی (2DFPM) با تلفیق دو روش المان مرزی و تفاضل محدود توسعه داده شد و برای مدل کردن همزمان جریان سیال و تغییر شکل سیال در فرآیند شکستگی هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه اعتبار برنامه‌ی مذکور در مدل کردن شکستگی‌های صفحه‌ای با استفاده از مدل KGD سنجیده شد.

نتایج تحلیل‌های عددی نشان داد که فاصله نقطه تزریق از ناپیوستگی، گرانیروی سیال، نرخ تزریق و شرایط اندرکنش بر مقدار و چگونگی توزیع فشار در امتداد شکستگی هیدرولیکی تأثیرگذار است.

تغییر میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی در نقطه برخورد به ناپیوستگی و تأثیر آن بر میزان فشار سیال درون آن موجب می‌شود که فشار بیشتری برای گسترش شکستگی هیدرولیکی در مجاورت ناپیوستگی‌ها نیاز باشد. هم‌چنین موفق بودن عبور شکستگی هیدرولیکی از ناپیوستگی‌های موجود در محیط به محل حفر چاه و فاصله

- [8] Hossaini Nasab H., Marji M. F.; 2007; A Semi-Infinite Higher-Order Displacement Discontinuity Method and its Application to the Quasistatic Analysis of Radial Cracks Produced by Blasting; J. Mechanics of Materials and Structures, Vol. 2, No. 3.
- [9] Marji M. F., Dehghani I.; 2010; Kinked Crack Analysis by a Hybridized Boundary Element/Boundary Collocation Method; Int. J. of Solids and Structures
- [10] Crouch, S.L., Starfield, A.M.; 1990; Boundary Element Methods in Solid Mechanics; Allen and Unwin, London.
- [11] بهنیا، م، گشتاسبی، ک، فاتحی مرجی، م، گلشنی، الف، 1391، تأثیر شاخص‌های الاستیک لایه‌ها بر نحوه‌ی گسترش شکست هیدرولیکی با استفاده از روش ناپیوستگی-جابجایی، فصل‌نامه علمی-پژوهشی روش‌های عددی و تحلیلی در مهندسی معدن، شماره سوم، صفحه 1 الی 13
- [12] Batchelor, G.K. 1967. An Introduction to Fluid Dynamics. Original edition, Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- [13] Xue, W., 2010. Numerical Investigation of Interaction between Hydraulic Fractures and Natural Fractures, Master of Science Thesis, Texas A&M University, December 2010.
- [14] Greetesma, J., de Klerk, F., 1969. A Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulic Induced Fractures. Journal of petroleum technology, Vol. 21, 1571-81 [SPE 2458].
- [15] Yew, C.H., 1997. Mechanics of Hydraulic Fracturing. Houston, Texas: Gulf publishing company.
- [16] Dahi, A., 2009. Analysis of Hydraulic Fracture Propagation in Fractured Reservoirs, an Improved Model for the Interaction between Induced and Natural Fractures. PhD thesis, the University of Texas at Austin.

The Effect of Natural Fracture on Fluid Pressure Profile along the Hydraulic Fracture Length

M. Behnia^{1*}

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

* Corresponding Author: behnia@cc.iut.ac.ir
(Received: March 2015, Accepted: June 2015)

Abstract

Hydraulic Fracturing method was developed to increase the productivity of low permeability reservoirs. In this method, it is very important to predict the hydraulic fracturing geometry to ensure a safe and optimum design. Hydraulic fracture propagation is affected from natural discontinuities (fault, joint...) in fractured reservoirs. In this study, the interaction of hydraulic fracture with natural fractures and consequently the fracture propagation and variation of fluid pressure inside the hydraulic fracture is studied numerically. The numerical program (2DFPM) was developed based on combination of boundary element method (displacement discontinuity method (DDM)) and finite difference method (FDM). The validity of the numerical program was verified by KGD model. Different conditions of hydraulic and natural fracture interaction are modeled and the effect of natural fracture on distribution of fluid pressure profile along the hydraulic fracture length is studied. The results show that the interaction condition and injection parameters of fluid have more influence on the hydraulic fracturing method.

Keywords

Hydraulic Fracturing, Natural Fracture, Fluid Pressure Profile, Displacement Discontinuity Method, Finite Difference Method