

مدل سازی عددی پدیده شکست هیدرولیکی در محیط پروالاستیک با استفاده از المان چسبنده

مریم نصرتی^۱، علی اکبر گلشانی^{۲*}، امیدرضا بارانی^۳

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

*golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۳/۰۶]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۳/۱۱]

چکیده

از نقطه نظر مهندسی نفت و گاز در چاه‌هایی با نفوذپذیر کم یا چاه‌های آسیب دیده یکی از مهم‌ترین اهداف، افزایش بهره‌دهی است. روش‌های گوناگونی برای افزایش بازده چاه‌های نفت و گاز با نفوذپذیری پایین وجود دارد. از مهم‌ترین روش‌های افزایش بهره‌دهی می‌توان به پدیده شکست هیدرولیکی اشاره کرد. در این پژوهش مدل‌سازی دو بعدی شکاف هیدرولیکی با استفاده از روش اجزای محدود و المان‌های چسبنده و با نرم‌افزار آباکوس بررسی شده است. گسترش شکاف هیدرولیکی به صورت شبه استاتیکی و در محیط متخلخل و تراوا و با نرخ تزریق سیال ثابت فرض شده است. در این پژوهش اثر سیال به صورت مستقیم در شکاف هیدرولیکی وارد شده است که در نتیجه فشار سیال بدون هیچ گونه ساده‌سازی در طول شکاف اعمال می‌شود. همچنین تاثیر دو پارامتر نرخ تزریق سیال و مدول الاستیسیته محیط روی تنش موثر، فشار و بازشدگی در دهانه شکاف هیدرولیکی بررسی شده است. برای درستی آزمایشی، نتایج مدل‌سازی با روش تحلیلی KGD مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: شکست هیدرولیکی، اجزای محدود، مکانیک شکست، المان چسبنده.

۱- مقدمه

داخل مشبک‌ها^۳ یا نقاط ضعیف دیواره چاه، سیال اولیه چسبناک که پد^۴ نام دارد، پمپ می‌شود. وقتی که فشار به اندازه لازم رسید ترک از فاصله سوراخ شده آغاز می‌شود و در سنگ مخزن رشد می‌کند. در صورتی که پمپاژ بعد از ایجاد شکاف قطع شود به تدریج فشار داخل آن کاسته شده و به آرامی بسته

آنچه امروزه عملیات شکست هیدرولیکی^۱ نامیده می‌شود، برای اولین بار در سال ۱۹۳۰ توسط شرکت دو کمیکال^۲ در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفت [1]. در عمل روند ایجاد شکاف هیدرولیکی بدین صورت است که در ابتدا از

در دهانه ترک با گذشت زمان با روش تحلیلی KGD مقایسه شده است. تاثیر مقدار دبی های مختلف و مدول الاستیسیته های مختلف در فشار دهانه شکاف هیدرولیکی با افزایش زمان، تنش موثر و بازشدگی در طول شکاف هیدرولیکی بررسی شده است. در این پژوهش اثر سیال به صورت مستقیم در شکاف هیدرولیکی وارد شده است که در نتیجه فشار سیال بدون هیچگونه ساده سازی در طول شکاف اعمال می شود.

۲- تئوری

۲-۱- المان چسبنده

در دهه گذشته روش های عددی زیادی برای مدل سازی خرابی در مواد توسعه پیدا کرده است. روش المان محدود روش هایی برای پیش بینی رفتار خرابی در مواد ارائه داده است که یکی از این روش ها استفاده از قانون چسبنده در المان محدود برای مدل سازی شروع ترک و رشد آن است. شکل (۱) المان های ناحیه چسبنده را که بین المان های پیوسته قرار گرفته اند نشان می دهد [9].

شکل ۱. المان های ناحیه چسبنده بین المان های محیط [۹]

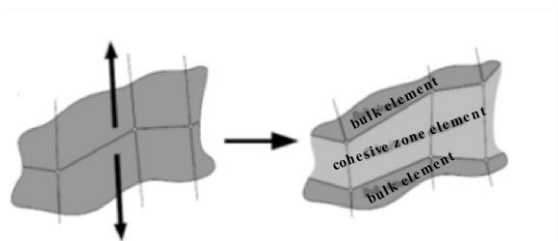


Fig. 1. Cohesive zone elements along bulk element boundaries

از مزایای المان های چسبنده این است که، به جای ناحیه نوک ترک الاستیک که در مکانیک شکست الاستیک خطی کلاسیک دارای تنش بی نهایت است، این المان از تکینگی^۸ در تنش نوک ترک اجتناب می کند.

۲-۲- قانون چسبندگی

قانون چسبندگی رابطه بین تانسور تنش، T ، و جابه جایی در سراسر سطوح چسبنده، δ ، را بیان می کند. تابع

می شود. بنابراین در مرحله بعد برای جلوگیری از بسته شدن شکاف های هیدرولیکی ایجاد شده، مخلوطی از سیال و ماسه های دانه بندی شده که در اصطلاح به آن پروپانت^۱ گفته می شود به داخل شکاف ها پمپ شده و در نهایت شکاف هایی با تراوی با ایجاد می شوند [2].

به طور معمول گسترش شکاف هیدرولیکی در چهارچوب مکانیک شکست الاستیک خطی^۲ بررسی می شود. در سال ۲۰۰۷ اداجی و دتورنی [3] یک راه حل عددی کرنش مسطح برای گسترش شکاف هیدرولیکی ارائه کردند. وندامه^۳ و همکاران [4] به بررسی اثر پروالاستیسیته در گسترش شکاف هیدرولیکی پرداختند. بون^۴ و همکاران [5] یک مدل سازی دو بعدی پروالاستیک برای گسترش شکاف هیدرولیکی ارائه دادند. آن ها مفهوم پروالاستیسیته را در مدل PKN وارد کردند و اظهار داشتند که تاثیر پروالاستیسیته می تواند سبب افزایش فشاری شود که در جهت بسته شدن شکاف عمل می کند. عقیقی [6] مدل سازی دو بعدی کاملاً جفت شده گسترش شکاف هیدرولیکی با استفاده از روش اجزای محدود انجام داد. او اظهار داشت که در محیط پروالاستیک فشار لازم برای گسترش شکاف هیدرولیکی بیشتر از مقدار مشابه در محیط الاستیک است. کریوگران^۵ [7] به مدل سازی رشد شکاف هیدرولیکی در قالب روش المان محدود چسبنده و با ضخامت صفر^۶ پرداختند. ژانگ^۷ و همکاران [8] یک مدل سازی سه بعدی غیر خطی در محیط چند لایه و با استفاده از المان محدود ارائه دادند.

در این پژوهش، مدل دوبعدی کرنش صفحه ای برای مدل سازی عملیات شکست هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی عملیات شکست هیدرولیکی از روش اجزای محدود با استفاده از المان های چسبنده و با معیار خرابی تنش - جدایش استفاده شده است. برای مدل سازی نرم افزار آباکوس استفاده شده است و تغییرات طول ترک، بازشدگی ترک و فشار

- 1 Proppant
- 2 Linear elastic fracture mechanics
- 3 Vandamme
- 4 Boone
- 5 Carrier and Granet
- 6 Zero thickness
- 7 Zhang

شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳. الگوی جریان سیال در المان چسبنده [10]

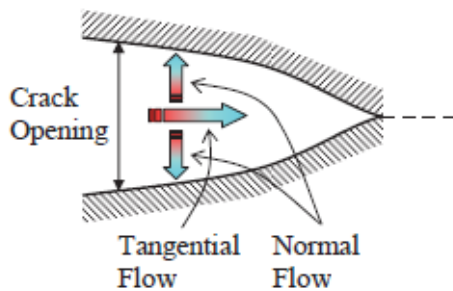


Fig. 3. Fluid flow pattern in cohesive Element

طبق قانون مکعبی مقدار شار سیال در جریان مماسی از رابطه (۴) بدست می آید که در آن گرادیان فشار سیال در طول ناحیه چسبنده، u_x سرعت جریان، w بازشدگی ترک و μ ویسکوزیته سیال است.

$$q = \int_{-w/2}^{w/2} u_x(z) dz = -\frac{w^3}{12\mu} \nabla p_f \quad (4)$$

سیال تراکم ناپذیر و نیوتنی فرض شده است و معادله پیوستگی قانون بقای جرم به صورت رابطه (۵) تعریف می شود:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot q + (q_t + q_b) = Q(t)\delta(x, y) \quad (5)$$

در این رابطه $Q(t)$ نرخ تزریق و $q_t(x, y, t)$ و $q_b(x, y, t)$ به ترتیب نرخ جریان عمودی در سطح بالا و پایین المان های چسبنده هستند که نشت سیال از طریق سطوح شکست به نزدیکی مصالح را منعکس می کند. برای شکستگی های نفوذپذیر جریان عمودی به صورت رابطه (۶) تعریف می شود:

$$\begin{cases} q_t = c_t (P_f - P_t) \\ q_b = c_b (P_f - P_b) \end{cases} \quad (6)$$

در این رابطه P_f به عنوان ترکشن روی سطوح باز شده شکست، P_t و P_b به ترتیب فشار آب حفره ای در نزدیکی مصالح پروالاستیک در بالا و پایین سطوح شکست و C_t و C_b مربوط به ضرایب نشت سیال است. با قرار دادن رابطه (۴) و (۶) در رابطه (۵)، رابطه (۷) به صورت زیر بیان می شود:

پتانسیل چسبنده، ϕ ، به صورت رابطه (۱) تعریف می شود [10].

$$T = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \quad (1)$$

قانون چسبندگی دو خطی یا مثلثی که در شکل (۲) مشاهده می شود در این پژوهش در نظر گرفته شده است. این قانون به طور گسترده ای برای شبیه سازی شکست یا فرآیند خستگی در مصالح شکننده استفاده می شود [11]. برای مود تغییر شکل عمودی، پارامترهای بحرانی مورد نیاز در قانون چسبنده دو خطی شامل انرژی شکست، G_c ، مقاومت چسبندگی، T_{max} ، سختی اولیه چسبندگی، K ، بازشدگی بحرانی در آسیب کامل، δ_c و بازشدگی بحرانی برای آغاز آسیب، δ_0 است. اما تنها سه مولفه از این پارامترها مستقل هستند و رابطه آن ها به صورت رابطه (۲) بیان می شود [10]:

$$G_c = \frac{1}{2} T_{max} \delta_c = \frac{1}{2\alpha} T_{max} \delta_0 = \frac{T_{max}^2}{2\alpha k} \quad (2)$$

در این رابطه α به صورت رابطه (۳) تعریف می شود:

$$\alpha = \frac{\delta_0}{\delta_c} \quad (3)$$

شکل ۲. نمودار کشش-جدایش دو خطی یا مثلثی [12]

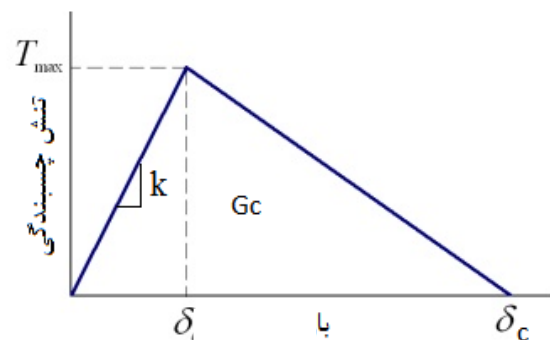


Fig. 2. Bi-linear cohesive element traction-separation law

سطح زیر نمودار بیانگر انرژی شکست یا نرخ رهاسازی انرژی ماکزیمم است که با G_c نشان داده می شود [12].

۲-۳- جریان سیال در ناحیه چسبنده

جریان سیال در فضای خالی بین سطوح منسجم در

مصالح در نظر گرفته شده مطابق جدول (۱) است. طول ناحیه چسبنده که شکاف هیدرولیکی در این محیط می تواند گسترش پیدا کند برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. سیال ایجاد کننده شکاف هیدرولیکی، نیوتنی و تراکم ناپذیر فرض شده که با یک نرخ ثابت و با مقدار $0/0001 \text{ m}^2/\text{s}$ در محیط پروالاستیک تزریق شده است. دو نوع المان برای مش بندی محیط در نظر گرفته شده است. المانی که برای محیط سنگی در نظر گرفته ایم المان های دوبعدی پیوسته چهار گرهی کرنش صفحه ای فشار منغذی است (CPE4RP) و المان دیگری که برای ناحیه چسبنده در نظر گرفته ایم المان چسبنده شش گرهی است و دارای سه درجه آزادی در جهت x و y و فشار آب حفره ای است که قابلیت تزریق سیال در این المان وجود دارد (COH2D4P). شکل المان ها و مش بندی محیط در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴. هندسه، شرایط مرزی، مش بندی و المان های استفاده شده در مسئله

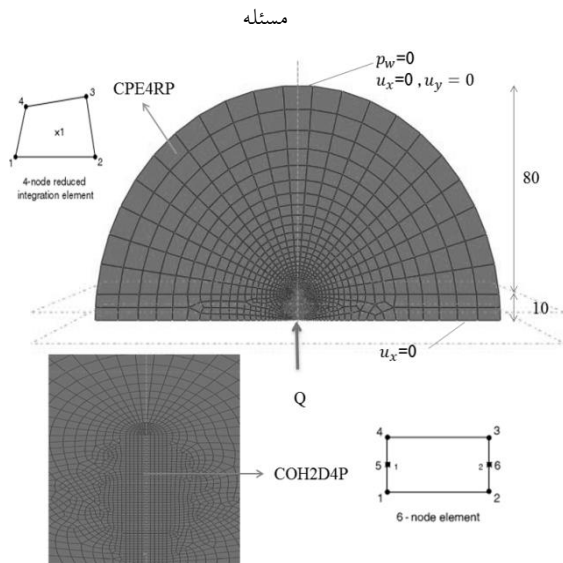


Fig. 4. Geometry, boundary conditions and finite element mesh of the problem

سایز مش ها به اندازه کافی ریز است تا توزیع کشش و فشار سیال به درستی نشان داده شود و مدل ساخته شده مستقل از مش بندی باشد و همگرایی راه حل را تضمین کند در حالی که مش بندی در نواحی دورتر به منظور کم کردن تعداد کلی المان ها می تواند درشت تر باشد. گام های زمانی به اندازه

$$\frac{\partial w}{\partial t} + c_t (p_f + p_t) + c_b (p_f - p_b) = \quad (7)$$

$$\frac{1}{12 \mu} \nabla \cdot (w^3 \nabla p_f) + Q(t) \delta(x, y)$$

فشار سیال که شکست هیدرولیکی را باز می کند با تنش هایی که در سراسر ناحیه چسبنده وارد می شود و با تنش های کششی ناحیه چسبنده به تعادل می رسد [10].

۳- معیارهای رشد و گسترش شکاف هیدرولیکی

معیار در نظر گرفته شده در این پژوهش معیار تنش اسمی مرتبه دوم است. این معیار به صورت رابطه (۸) نشان داده می شود. t_n مولفه عمودی و t_s و t_t دو مولفه برشی صفحه ای که احتمال ترک خوردگی در آن وجود دارد است. t_n^0 ، t_s^0 و t_t^0 بیشترین مقادیر تنش اسمی مجاز ماده را نشان می دهند. نماد $\langle \rangle$ به پراتز ماکالای معروف است. هنگامی که آرگومان این تابع منفی شود، مقدار تابع برابر صفر می شود و برای مقادیر مثبت آرگومان، تابع برابر با مقدار آرگومانش می شود.

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 \quad (8)$$

برای رشد شکاف هیدرولیکی، اگر نرخ رهاسازی انرژی بزرگتر از انرژی شکست، G_c ، شود ترک شروع به رشد خواهد کرد. در این پژوهش از معیار BK یا بنزگاق-کنان استفاده می شود. این معیار با رابطه (۹) بیان می شود:

$$G_c = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta \quad (9)$$

برای این معیار G_{IC} ، G_{IIC} و G_{IIC} به ترتیب کار انجام شده به وسیله تنش های نرمال و برشی اولیه و ثانویه و η پارامتر ماده است [13].

۴- مدل اجزای محدود

برای مدل سازی گسترش شکاف هیدرولیکی مشخصات

$$CMP = 1.135 \left(\frac{G^3 Q \mu}{(1-\nu)^3 L^2} \right)^{1/4} \quad (12)$$

در این روابط L ، طول ترک، $CMOD$ بازشدگی دهانه ترک، Q نرخ تزریق بر واحد ارتفاع شکست هیدرولیکی، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، ν ضریب پواسون، G مدول برشی، t زمان، CMP فشار دهانه سیال و S تنش برجای عمود بر مسیر گسترش ترک است [14]. فشار در این روش فشار خالص است، بنابراین برای مقایسه بهتر تنش برجا صفر در نظر گرفته شده است. با این حال مدل ارائه شده توانایی تحمل تنش‌های برجای ناهمسان را دارد.

شکل ۵. مقایسه طول شکاف هیدرولیکی در مدل KGD و مدل‌سازی

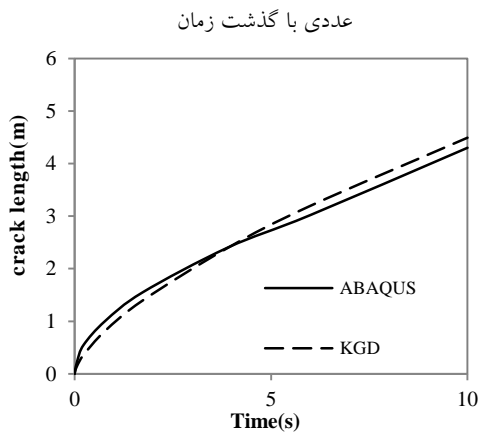


Fig. 5. Comparison of the numerical and analytical results (KGD) for a hydraulically driven fracture at the crack length

شکل ۶. مقایسه بازشدگی دهانه شکاف هیدرولیکی در مدل KGD و

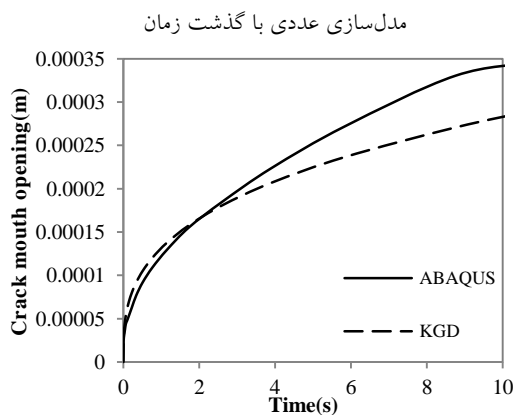


Fig. 6. Comparison of the numerical and KGD for a hydraulically driven fracture at the crack mouth opening

کافی کوچک و برابر با ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح برای مدل‌سازی شکاف هیدرولیکی

Young's modulus	$E=1.596 \times 10^7 \text{KPa}$
Poisson's ratio	$\nu=0.2$
Initial porosity	$n=0.19$
Solid phase density	$\rho_s=2000 \text{Kg/m}^3$
Water density	$\rho_w=1000 \text{Kg/m}^3$
Bulk modulus of solid phase	$K_s=3.6 \times 10^7 \text{KPa}$
Bulk modulus of water	$K_w=3 \times 10^6 \text{KPa}$
Intrinsic permeability	$K=2 \times 10^{-14} \text{m}^2$
Dynamic viscosity of water	$\mu_w=10^{-6} \text{KPa}$
Atmospheric pressure	$P_{\text{atm}}=0 \text{KPa}$

Table 1. Material properties for modelling hydraulic fracture

همچنین در این مدل فشار آب حفره‌ای اولیه برابر با فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. پارامترهای المان چسبنده $\sigma_c=0.45 \text{MPa}$ و $G_c=143 \text{N/m}$ هستند. σ_c مقاومت چسبندگی و G_c انرژی شکست المان چسبنده است. به دلیل تقارن، رشد شکاف هیدرولیکی تحت مود I یا مود بازشدگی است.

۴-۱- درستی آزمایشی نتایج مدل‌سازی

در شرایط محدود کننده که نشست سیال وجود ندارد و محیط نفوذناپذیر فرض می‌شود و با فرض‌های ساده‌سازی که سیال شکست تراکم‌ناپذیر است راه حل عددی مسئله با روش تحلیلی کرنش صفحه‌ای KGD مقایسه می‌شود. در این روش تحلیلی فرض بر آن است که محیط نفوذناپذیر ($K=6 \times 10^{-15} \text{m}^2$) و سیال شکست تراکم‌ناپذیر باشد. روش KGD با روابط (۱۰، ۱۱ و ۱۲) بیان می‌شود.

$$L = 0.68 \left(\frac{GQ^3}{\mu(1-\nu)} \right)^{1/6} t^{2/3} \quad (10)$$

$$CMOD = 1.87 \left(\frac{\mu(1-\nu)Q^3}{G} \right)^{1/6} t^{1/3} \quad (11)$$

[16]، خوئی و ساریس^۲ [17] وجود دارد که روش های تحلیلی در عملیات شکست هیدرولیکی معمولاً فشار تزریق را کمتر در نظر می گیرند. به این دلیل که نشت سیال باعث افزایش فشار آب حفره ای در محیط متخلخل و بنابراین سخت تر شدن محیط اطراف و در نتیجه ایجاد تنش های فشاری اضافی می شود.

۴-۲- اثر نرخ تزریق سیال بر شکاف هیدرولیکی

در ادامه تاثیر بعضی از پارامترهای اصلی و تاثیرگذار در فشار دهانه شکاف به عنوان تابعی از زمان و توزیع تنش نرمال موثر و بازشدگی در طول مسیر شکاف هیدرولیکی بررسی می شود. پارامترهای در نظر گرفته شده نرخ تزریق سیال و مدول الاستیسیته محیط است.

فشار در دهانه ترک با گذشت زمان و برای دبی های مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. در نمونه های با دبی بالاتر فشار لازم برای رشد شکاف هیدرولیکی کمتر است. همچنین مشاهده می شود که تغییرات دبی تاثیر چندانی در فشار تزریق سیال نمی گذارد.

شکل ۸. تاثیر مقادیر مختلف نرخ تزریق سیال بر روی فشار دهانه

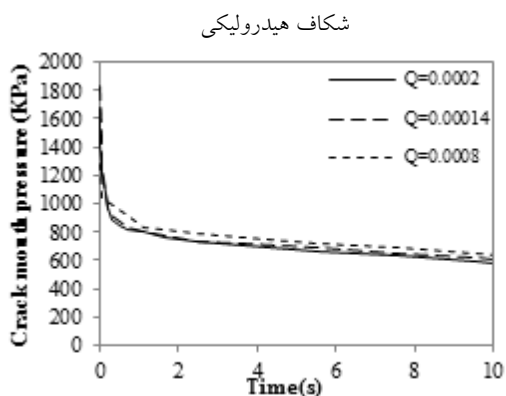


Fig. 8. Comparison of results for a hydraulically driven fracture with different injection rates at the crack mouth pressure

شکل (۹) توزیع تنش نرمال موثر در مسیر رشد شکاف هیدرولیکی و در محیط متخلخل و با دبی های متفاوت در زمان $t=10s$ را نشان می دهد. نتایج بیانگر این است که بیشترین مقدار تنش موثر که در محل نوک شکستگی است و بازشدگی

شکل ۷. مقایسه فشار دهانه شکاف هیدرولیکی در مدل KGD و

مدل سازی عددی با گذشت زمان

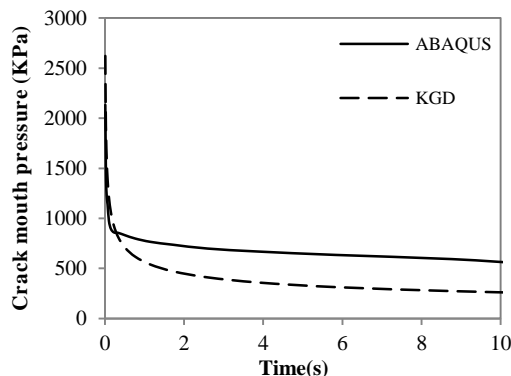


Fig. 7. Comparison of the numerical and analytical results (KGD) for a hydraulically driven fracture at the crack length

شکل های (۵، ۶ و ۷) راه حل عددی را با روش تحلیلی برای نمونه ای که شکست هیدرولیکی در محیط متخلخل نفوذ ناپذیر رشد می کند مقایسه می کنند. همان گونه که در شکل ها مشاهده می شود با افزایش زمان طول ترک افزایش می یابد و همچنین هماهنگی خوبی برای طول ترک بین روش KGD و مدل سازی عددی وجود دارد. بازشدگی در دهانه ترک نیز با افزایش زمان افزایش یافته اما بازشدگی در مدل KGD در روش تحلیلی فرض شده است، به این دلیل که در روش تحلیلی فرض شده است، نرخ جریان سیال در هر قسمت از شکاف برابر با نرخ تزریق باشد درحالی که در مدل سازی عددی بازشدگی بر نرخ جریان در داخل شکاف هیدرولیکی تاثیر می گذارد که این بازشدگی با مفهوم تاثیر انبارش^۱ بیان می شود. به بیان دیگر در زمان های اولیه نمودار KGD و مدل سازی عددی بر یکدیگر هماهنگ می شوند اما با گذشت زمان به دلیل تاثیر انبارش در دهانه ترک بازشدگی نسبت به روش KGD بیشتر و اختلاف بین بازشدگی ترک و نوک ترک افزایش می یابد. این اختلاف در کار داهی [15] نیز مشاهده شده است. در شکل (۷) فشار در دهانه ترک دارای مقدار زیادی است که این مقدار با گذشت زمان به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و سپس روند تقریباً یکنواختی را طی می کند. ظاهراً یک اختلاف فشار بین نمودارهای فشار دهانه ترک وجود دارد. شواهدی بر مبنای مقالات کریر و گرانت

۳-۴- اثر مدول الاستیسیته بر شکاف هیدرولیکی

تأثیر مدول الاستیسیته محیط در ویژگی‌های کلی شکاف هیدرولیکی نشان داده شده است. شکل (۱۱) نمودار فشار در دهانه ترک را با گذشت زمان و برای مدول الاستیسیته مختلف نشان می‌دهد. شکل نمودارها بیانگر این است که در مدول الاستیسیته بیشتر فشار لازم برای رشد شکاف هیدرولیکی بیشتر است.

شکل ۱۱. تأثیر مقادیر مختلف مدول الاستیسیته بر روی فشار دهانه شکاف

هیدرولیکی

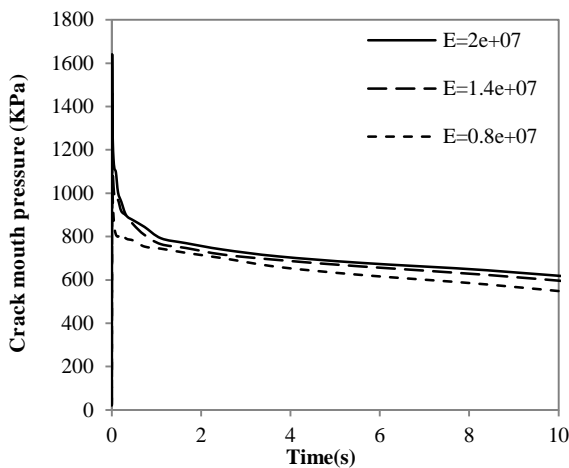


Fig. 11. Comparison of results for a hydraulically driven fracture with different Young's modulus at the crack mouth pressure

شکل ۱۲. تأثیر مقادیر مختلف مدول الاستیسیته بر روی تنش موثر

در طول شکاف هیدرولیکی

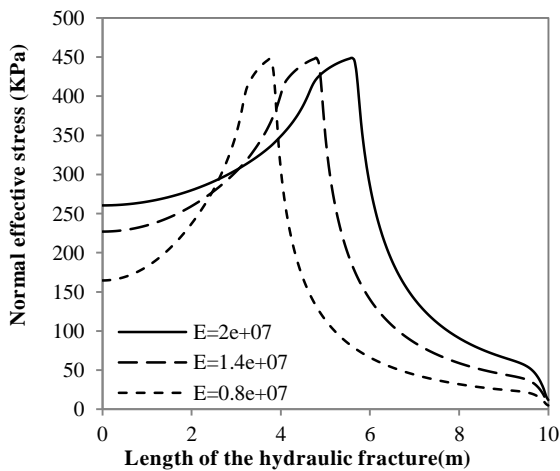


Fig. 12. Comparison of results for a hydraulically driven fracture with different Young's modulus at the Normal effective stress

در آنجا صفر است برابر با مقاومت محیط چسبنده است و همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش فاصله از نوک شکست تنش به سرعت کاهش می‌یابد و به مقدار اولیه تنش نزدیک می‌شود. شکل (۱۰) نشان می‌دهد زمانی که دبی افزایش می‌یابد به طور همزمان طول و بازشدگی شکاف هیدرولیکی افزایش یافته و در نتیجه بازده تولید افزایش پیدا می‌کند. این بدان معنی است که بازشدگی شکاف هیدرولیکی به طور مستقیم به دبی وابسته است.

شکل ۹. تأثیر مقادیر مختلف نرخ تزریق سیال بر روی تنش موثر

در طول شکاف هیدرولیکی

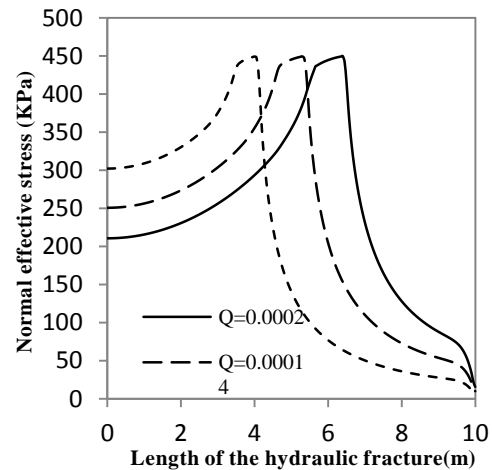


Fig. 9. Comparison of results for a hydraulically driven fracture with different injection rates at the numerical effective stress

شکل ۱۰. تأثیر مقادیر مختلف نرخ تزریق سیال بر روی بازشدگی

در طول شکاف هیدرولیکی

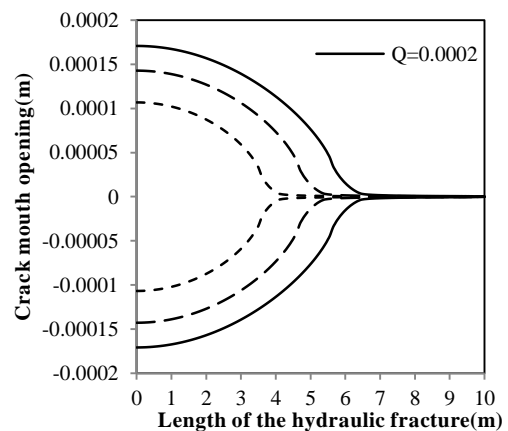


Fig.10. Comparison of results for a hydraulically driven fracture with different injection rates at the crack mouth opening

و مدول الاستیسیته‌های مختلف در فشار دهانه شکاف هیدرولیکی با افزایش زمان، تنش موثر و بازشدگی در طول شکاف هیدرولیکی بررسی شده است. نتایج نمودارها نشان می‌دهد که دبی‌های بالاتر باعث رشد سریع‌تر شکاف هیدرولیکی می‌شود. این بدان معنی است که سرعت رشد شکست هیدرولیکی به طور مستقیم به دبی وابسته است. در نمونه‌های با دبی بالاتر فشار لازم برای رشد شکاف هیدرولیکی کمتر است. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات دبی تاثیر چندانی در فشار تزریق سیال نمی‌گذارد. به علاوه بیشترین مقدار تنش موثر که در محل نوک شکستگی است و بازشدگی در آنجا صفر است برابر با مقاومت محیط چسبنده است و همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش فاصله از نوک شکست تنش به سرعت کاهش پیدا می‌کند و به مقدار اولیه تنش نزدیک می‌شود. با افزایش دبی به طور همزمان طول و بازشدگی شکاف هیدرولیکی افزایش یافته و در نتیجه بازده تولید افزایش پیدا می‌کند.

تاثیر مدول الاستیسیته محیط در ویژگی‌های کلی شکاف هیدرولیکی بیانگر این است که مدول الاستیسیته بیشتر باعث رشد سریع‌تر شکاف هیدرولیکی می‌شود به طوری که در مدول الاستیسیته بالاتر طول شکاف هیدرولیکی بیشتر می‌باشد. علاوه بر این در نمونه‌های با مدول الاستیسیته بیشتر فشار لازم برای رشد شکاف هیدرولیکی بیشتر و بازشدگی در نقطه تزریق کمتر است. توزیع تنش نرمال موثر در مسیر رشد شکاف نشان داد که در این حالت نیز بیشترین مقدار تنش موثر که در محل نوک شکستگی است و بازشدگی در آنجا صفر است برابر با مقاومت محیط چسبنده است و همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش فاصله از نوک شکست تنش به سرعت کاهش پیدا می‌کند و به مقدار اولیه تنش نزدیک می‌شود.

References

- [1] Grebe; J.J; Stoesser; M; "Increasing crude production 20,000,000 bbl. from established fields"; World Petroleum Journal; vol. 6, no. 8, 1935, pp. 473-482.
- [2] Keshavarzi, R., Mohammadi, S. "A New Approach for Numerical Modeling of Hydraulic Fracture Propagation in Naturally Fractured Reservoirs".

۶- مراجع

شکل ۱۳. تاثیر مقادیر مختلف مدول الاستیسیته بر روی بازشدگی در طول شکاف هیدرولیکی

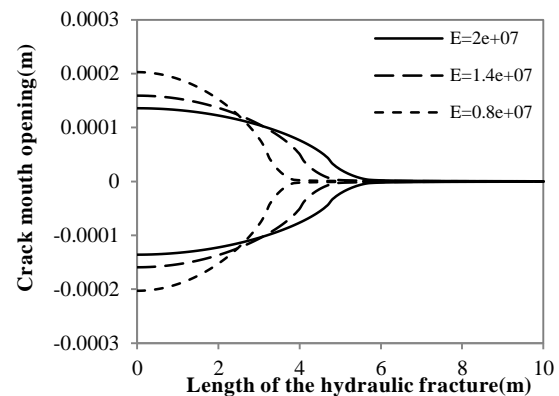


Fig. 13. Comparison of results for a hydraulically driven fracture with different Young's modulus at the Crack mouth opening

شکل (۱۲) توزیع تنش نرمال موثر در مسیر رشد شکاف هیدرولیکی و در محیط متخلخل و با مدول‌های متفاوت را در زمان $t=10s$ نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این است که مانند نمونه قبل بیشترین مقدار تنش موثر که در محل نوک شکستگی است و بازشدگی در آنجا صفر است برابر با مقاومت محیط چسبنده است و همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش فاصله از نوک شکست تنش به سرعت کاهش می‌یابد و به مقدار اولیه تنش نزدیک می‌شود. شکل (۱۳) نشان می‌دهد زمانی که مدول افزایش می‌یابد طول شکاف افزایش یافته اما عرض شکاف به دلیل سخت‌تر شدن محیط کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی دوبعدی شکاف هیدرولیکی با روش اجزای محدود و با استفاده از المان‌های چسبنده و با معیار خرابی تنش-جدایش انجام شده است.

نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که با گذشت زمان بازشدگی در دهانه شکاف هیدرولیکی و طول شکاف هیدرولیکی افزایش می‌یابد در حالی که فشار در دهانه شکاف هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش تحلیلی KGD هماهنگی دارد.

در مرحله دوم از مدل‌سازی، تاثیر مقدار دبی‌های مختلف

- [10] Chen; Z; Finite element modelling of viscosity-dominated hydraulic fractures"; Journal of Petroleum Science and Engineering; vol. 88-89, 2012, pp. 136-144.
- [11] Mei;H;et,al; "Initiation and propagation of interfacial delamination in integrated thin-film structures"; 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Las Vegas, 2010.
- [12] Chen; D; El-Hacha; R;" Cohesive Fracture Study of a Bonded Coarse Silica Sand Aggregate Bond Interface Subjected to Mixed-Mode Bending Condition" Polymers; vol. 6, no.1, 2014, pp. 12-38.
- [13] ABAQUS, ABAQUS Documentation, Version 6.13-1, 2013.
- [14] Mohammadnejad; T; Khoei; A.R; "An extended finite element method for hydraulic fracture propagation deformable porous media with the cohesive crack model"; Finite Elements in Analysis and Design, vol.73, 2013,pp.77-95.
- [15] Dahi-Taleghani; A; "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; USA, 2009, 216 pp.
- [16] Carrier; B; Granet; S; " Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model"; Journal of Engineering Fracture Mechanics; vol. 79,2012, pp. 312-328.
- [17] Sarris; E; Papanastasiou ; P;" Numerical modeling of fluid-driven fractures in cohesive poroelastoplastic continuum"; International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics;vol. 37, no. 12, 2012, pp. 1822-1846.
- SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 20-22 March 2012
- [3] Adachi; J.I.; Detournay; E; "Plane strain propagation of a hydraulic fracture in a permeable rock"; Engineering Fracture Mechanics; vol. 75, no.16,2008, pp. 4666-4694.
- [4] Vandamme; L; Detournay; E; Roegiers; J.C; "Poroelasticity in Hydraulic Fracturing Simulators"; Journal of Petroleum Technology; vol.42,1987, pp.1199-1203.
- [5] Boone; T.J; Ingraffea; A.R; "A numerical Procedure for Simulation of Hydraulically Driven Fracture propagation in Poroelastic Media"; International Journal for Numerical Methods in geomechanics; 1990, vol.14, pp.27-47.
- [6] Aghighi; M.A; "Fully Coupled Fluid Flow and Geomechanics in the study of Hydraulic Fracturing and Post-fracture Production";PhD Thesis, The University of New South Wales,Sydney,2007.
- [7] Carrier; B; Granet; S; "Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model"; Journal of Engineering Fracture Mechanics; vol. 79, 2012, pp. 312-328.
- [8] Zhang; G.M; "Three-dimensional finite element simulation and parametric study for horizontal well hydraulic fracture"; Journal of Petroleum Science and Engineering; vol. 72, 2010, pp. 310-317.
- [9] Kregting; R; "Cohesive zone models towards a robust implementation of irreversible behavior"; Philips Applied Technologies,2005.

Numerical modeling of hydraulic fracturing in a poroelastic medium using cohesive elements

M. Nosrati, A. Golshani^{2*}, O.R. Barani³

1- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Assistant Prof., Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3- Assistant Prof., Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., K.N.Toosi University

*golshani@modares.ac.ir

Abstract:

From oil and gas engineering point of view, one of the challenges in low permeable or damaged wells is improving the productivity. There are different methods to increase the productivity of low permeable wells and one of the most efficient one is hydraulic fracturing. In this study, two-dimensional modeling of hydraulic fracturing using finite element method and cohesive element approach through traction-separation law has been performed. This approach avoids the singularity in the crack tip and the cohesive zone fits naturally into the conventional finite element method. Hydraulic fracture is assumed to propagate in a poroelastic and permeable medium with a constant injection rate and under quasi-static conditions and the criterion for fracture initiation is quadratic nominal stress criterion. Also as a propagation criterion, Benzeggagh Kenane (BK) approach has been considered. Two types of elements have been implemented in the model which are 4-node bilinear displacement and pore pressure reduced integration and 6-node displacement and pore pressure two-dimensional cohesive element. Cohesive elements have three degrees of freedom that two of them are in X and Y directions and one of them is pore pressure. Mesh size in the near fracture region is small enough to consider the stress and pressure distribution efficiently and avoid any problem in convergence. Meantime, to decrease the computation cost the mesh size gradually increases from fracture area to the boundaries. Also, to increase the accuracy of the model, the time steps for fracture propagation is 0.01 second. In addition, the effect of fracturing fluid has been directly included in the model which means that the fluid pressure would be applied along the fracture without any simplifying assumption. To validate the model, the results have been compared with KGD approach. The results indicate that in the initial steps the pressure at the wellbore wall is high which decreases with time significantly and eventually it gets a steady and uniform trend. In other words, in the initial steps, the fluid pressure should be high enough to overcome the hoop stress around the wellbore and after some injection periods, the fracturing fluid pressure would reach the breakdown pressure and the fracture starts to initiate and propagate. It is clearly observed that increasing the injection rate would lead to faster propagation of hydraulic fracture and in the models with higher injection rate the fracture tends to grow in the propagation direction. This indirectly means that increasing the injection rate would affect both opening and length of the hydraulic fracture which can result in increasing the productivity. The results reveal that the peak of the normal effective stress profiles corresponds to the fracture tip position, where the fracture opening is zero, and the peak value equals the cohesive strength of the material, as expected. Moreover, with increasing the distance from the fracture tip, the stress decreases rapidly and approaches the initial stress value. The way that Young's modulus affects the overall characteristics of hydraulic fracture implies that higher Young's modulus would lead to longer fractures. In other words, formations with higher Young's modulus can be fractured easily but the opening of the hydraulic fracture would reduce at the same time. This also indirectly means that Young's modulus would play an important role in the productivity.

Keywords: Hydraulic Fracturing, Finite Element, Fracture Mechanics, Cohesive Element.