

چاه آزمایی مخازن گازی دو ناحیه‌ای دارای شکاف هیدرولیکی از طریق شبیه‌سازی بدون بعد عددی

محمد آزادی تبار، محمد محمدی و سعید جمشیدی*

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۱۲

چکیده

تولید نفت و گاز از مخازن هیدروکربوری همواره منجر به بروز مشکلاتی از قبیل آسیب‌سازند می‌شود. ایجاد شکاف هیدرولیکی به‌خصوص در مخازن غیرمتعارف گازی می‌تواند تا حدی این مشکل را برطرف نماید. لزوم استفاده از ویژگی‌های میدانی نیازمند این است که مخزن با تمامی ناهمگونی‌ها و لایه‌های متعدد آن شبیه‌سازی شود. در این مقاله، معادلات حاکم بر مخزن دو ناحیه‌ای با شکاف هیدرولیک در ناحیه اول، به‌صورت بدون بعد حل شده و نمودارهای الگو برای چاه‌آزمایی این مخازن بررسی شده است. این مخزن از دو ناحیه داخلی و خارجی تشکیل شده است. ناحیه داخلی شامل یک شکاف هیدرولیکی و یک چاه تولیدی است. با توجه به نامحدود بودن شکاف، تمام تولید از شکاف انجام می‌شود و سیال به‌محض ورود به فضای شکاف، تولید می‌شود. مرزهای خارجی مخزن بسته در نظر گرفته شده است. وجود شکاف هیدرولیکی در مخازن گازی کم‌تراوای دو ناحیه‌ای باعث می‌شود که منحنی مشتق شبه‌فشار و شبه‌فشار بدون بعد به پنج بخش متفاوت تقسیم شود. این پنج بخش به ترتیب عبارت‌اند از: اثر شکاف هیدرولیک، جریان شعاعی ناحیه داخلی، جریان گذرای بین ناحیه داخلی و خارجی، جریان شعاعی ناحیه خارجی و اثر مرزهای مخزن است.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی بدون بعد، چاه‌آزمایی، مخازن گازی غیرمتعارف، شکاف هیدرولیکی، مخزن دو

ناحیه‌ای

مقدمه

بهره‌بردار قرار گیرد، جلوگیری از بروز آسیب‌سازند و یا مواجهه با آن در صورت روبرو شدن با آن است. در صورتی که از بروز آسیب‌سازند پیشگیری نشود، به‌ناچار باید آن را برطرف کرد. برای این کار روش‌های متعددی وجود دارد. ایجاد شکاف هیدرولیکی، یکی از این روش‌هاست.

تولید نفت و گاز از مخازن منجر به بروز آسیب‌سازند می‌شود. این آسیب، تولید مخزن را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهد. به همین دلیل یکی از مهم‌ترین نکاتی که باید مورد توجه شرکت‌های

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
شناسه دیجیتال (DOI: 10.22078/pr.2017.2708.2247)

jamshidi.s@gmail.com

۱۱]. هاشمی و همکاران یک چاه افقی در مخزن گاز میعانی [۱۲]، یو لیو و همکاران یک چاه با شکاف محدود [۱۳]، کتی مکین یک چاه زمین‌گرمایی [۱۴]، یوژان وان و همکاران یک چاه با شکاف‌های پیچیده [۱۵] را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند که تنها نمونه‌ای از کاربردهای حل عددی برای شبیه‌سازی و چاه‌آزمایی است.

از کان [۶] از روش حل تحلیلی تابع منشأ^۱ برای مخازن نفتی ناهمگن استفاده کرد و توزیع فشار درون مخزن را برای شکل‌های مختلف چاه در مخزن به‌دست آورد. به‌این ترتیب، برای مخازنی با پیچیدگی‌هایی از قبیل اثر انبارگی چاه، آسیب‌سازند، دبی متغیر تولید و تولید از مخازن شکاف‌دار طبیعی آنالیز چاه‌آزمایی ارائه نمود. چو و شانک [۱۶] یک مدل ریاضی برای چاه عمودی شکاف‌دار با شکاف محدود و یا با دبی ثابت ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که این مدل ریاضی می‌تواند برای مخازن گاز میعانی استفاده شود. لوجان و همکاران [۱۷] مکانیسم تشکیل شکاف را با شبیه‌سازی هم‌زمان مخزن و ژئومکانیک، مدل‌سازی کردند. همچنین آن‌ها عملکرد چاه پس از ایجاد شکاف هیدرولیک را بررسی کردند.

دینگ و همکاران [۱۸] یک روش عددی به‌منظور بررسی عملکرد چاه‌های دارای شکاف هیدرولیک انجام داده‌اند. در این مطالعه اثرات گرید بر شبیه‌سازی و میزان تولید بررسی شده است. آن‌ها نشان دادند که در شبیه‌سازی عددی ممکن است جریان گذرا در زمان‌های ابتدایی مشاهده شود.

ژائو و همکاران [۷] حل تحلیلی با استفاده از تابع منشأ را به‌منظور آنالیز چاه‌آزمایی یک مخزن دو ناحیه‌ای که دارای یک شکاف نامحدود در ناحیه اول است، توسعه دادند.

با مقایسه بین چاه‌های دارای شکاف هیدرولیک در مخازن تک ناحیه و مخازن دوناچه‌ای، به این نتیجه

استفاده از این روش در مخازن گازی با نفوذپذیری پایین، می‌تواند راه‌گشا باشد [۱]. برای آشنایی با سازوکار اثرگذاری ایجاد شکاف هیدرولیکی نیاز است که از روابط و معادلات حاکم بر مخزن اطلاعات کافی داشت. در این صورت است که می‌توان برخی از خواص ایستا و جریانی مخزن از قبیل ضریب پوسته، نفوذپذیری و ... را به نحو مؤثری تعیین نمود [۲]. درک درست شرایط مخزن بخصوص در مخازن غیرمتعارف با تراوایی ناچیز بسیار حیاتی است. شرایط مرزی در مخازن گازی می‌تواند تأثیر بیشتری بر فرآیند تولید بگذارد. برای مثال حرکت آب از مرزهای مخزن به داخل آن و زیانه کشیدن آن از لابه‌لای گاز موجود در مخزن، تولید را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳].

روش‌های نوین چاه‌آزمایی و تفسیر آن‌ها به تطابق بین داده‌های واقعی و مدل شبیه‌سازی وابسته است. در بسیاری از مخازن به‌دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، داده‌های فشار گذرا امکان تطابق با مدل‌های تحلیلی ندارد [۴ و ۵]. لزوم استفاده از ویژگی‌های واقعی مخزن محققان را بر این واداشته است که تلاش کنند تا مخزن را با تمامی ناهمگونی‌ها و لایه‌های متعدد آن، مدل‌سازی نمایند [۶]. یکی از ساده‌ترین مدل‌ها، مدل دولایه‌ای (دوناچه‌ای) است که از دولایه داخلی و خارجی (در مختصات استوانه‌ای) تشکیل شده است. محققان روش‌های تحلیلی متعددی را برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی این مخازن مورد استفاده قرار داده‌اند [۷]. در روش‌های تحلیلی و حل آن‌ها، مشکلات و موانعی ممکن است به وجود آید. روش معمول برای گذر از این دشواری‌ها، فرض‌های ساده شونده هستند؛ اما بدیهی است که این فرض‌ها نتایج به‌دست‌آمده را با خطاهای بزرگی مواجه می‌سازد. برای این منظور شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش‌های متداول (روش اختلاف محدود، روش المان محدود و ...) مورد استفاده قرار گرفته است تا جواب‌ها به نحوی واقعی‌تر به نظر برسند [۸].

1. Source Function

ذکر این نکته ضروری است که شکاف تنها در بخشی از ناحیه داخلی قرار دارد و به ناحیه خارجی نمی‌رسد. با توجه به نامحدود بودن شکاف، تمام تولید از آن انجام می‌شود و سیال به محض ورود به این فضا، تولید می‌شود. مرزهای خارجی مخزن بسته در نظر گرفته شده است و تولید با دبی ثابت انجام می‌شود. همچنین سیال مخزن به صورت تک فاز (گاز) است. این نوع مدل در مخازن نامتعارف، مانند مخازن شیلی با تراوایی کم که در اثر حفاری پوسته در اطراف چاه ایجاد می‌شود، کاربرد دارد. به این صورت که در اثر حفاری و نفوذ گل به درون سازند یک ناحیه با تراوایی کم در اطراف چاه (ناحیه داخلی) نسبت به بخش‌های دورتر (ناحیه خارجی) ایجاد می‌شود. برای افزایش تراوایی این مخازن، ایجاد شکاف هیدرولیکی در ناحیه داخلی روشی مناسب برای افزایش تراوایی ناحیه آسیب‌دیده است. با توجه به اینکه روش حل به صورت بی‌بعد ارائه شده است، هر نسبتی بین ناحیه داخلی و ناحیه خارجی می‌تواند در نظر گرفته شود. با توجه به میزان نفوذ گل حفاری در لایه مخزن، طول ناحیه اول در شرایط میدانی تعیین می‌شود.

معادلات

معادله پیوستگی جرم حاکم بر یک المان در یک مخزن گازی به صورت زیر است

$$\rho q|_{r+dr} - \rho q|_r + \rho q|_{z+dz} - \rho q|_z = \frac{\partial(\rho V \phi)}{\partial t} - \rho B_g q_{sc} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (1)$$

که در این معادله ρ چگالی، q دبی، V حجم المان، B_g ضریب حجمی گاز، ϕ تخلخل، q_{sc} دبی تولید در شرایط استاندارد، r شعاع در سامانه شعاعی، r' شعاع در سامانه شعاعی درون شکاف، z ارتفاع درون شکاف و δ تابع دیراک است، حجم المان

$$V = 2\pi r dr dz \quad (2)$$

dr طول المان در راستای شعاعی و dz ارتفاع المان است. دبی در راستای محور شعاعی

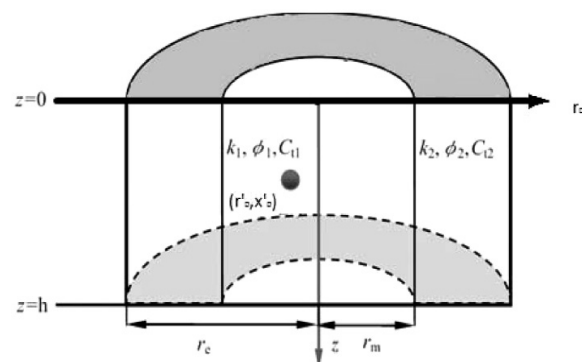
رسیدند که یک بخش گذرا به صورت پله‌ای بین ناحیه داخلی و خارجی وجود دارد. در تمامی مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های ذکر شده، به دلیل محدودیت حل تحلیلی، مطالعه و شبیه‌سازی مخزن دوناچه‌ای که هر دو ناحیه محدود باشند (دارای طول مشخص) و ناحیه اول دارای شکاف هیدرولیک باشد، انجام نشده است. نامحدود گرفتن ناحیه دوم موجب می‌شود دو بخش جریان شعاعی ناحیه خارجی و جریان شبه پایدار مرزی در آنالیز چاه‌آزمایی این نوع مخازن دیده نشود. وجود برخی ابهام‌ها در شرایط عملکرد مخازن کم‌تراوایی گازی دو ناحیه‌ای ما را بر آن داشته است که شبیه‌سازی عددی را برای این مخازن انجام داده و پارامترهای مؤثر بر جریان را در حین تولید مورد ارزیابی قرار دهیم.

روش کار

در این بخش سعی بر این است که روابط کلی حاکم بر مسئله و نحوه استفاده از آن‌ها توضیح داده شوند. ابتدا تعریف‌های مورد نظر برای تبدیل معادلات به حالت‌های بدون بعد در نظر گرفته می‌شوند. در بخش‌های بعدی نیز به ترتیب معادلات حاکم برای یک مخزن دارای دو ناحیه با مشخصات متفاوت به دست می‌آید.

مدل مخزن دو ناحیه‌ای دارای شکاف هیدرولیکی

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، این مخزن از دو ناحیه داخلی و خارجی تشکیل شده است. ناحیه داخلی شامل یک شکاف هیدرولیکی و یک چاه تولیدی است.



شکل ۱ شماتیک مخزن دو ناحیه‌ای شبیه‌سازی شده

معادله زیر به دست می‌آید:

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial(r \frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial r})}{\partial r} + k_z \frac{\partial(\frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial z})}{\partial z} = \frac{\partial(\frac{p}{z_g} \phi)}{\partial t} - \frac{p}{z_g} B_g q_{sc} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (13)$$

با استفاده از قاعده مشتق زنجیری در نهایت رابطه ۱۴ به دست می‌آید:

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial(r \frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial r})}{\partial r} + k_z \frac{\partial(\frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial z})}{\partial z} = \phi \frac{\partial(\frac{p}{z_g})}{\partial t} + \frac{p}{z_g} \frac{\partial \phi}{\partial p} * \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{p}{z_g} B_g q_{sc} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (14)$$

با استفاده از تعریف شبه‌فشار گاز خواهیم داشت:

$$\psi = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu z_g} dp \quad (15)$$

که ψ شبه‌فشار گاز است. با مشتق‌گیری از طرفین رابطه ۱۵ و بازنویسی آن به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{\mu z_g}{2p} \frac{\partial \psi}{\partial u} = \frac{\partial p}{\partial u} \quad (16)$$

ضریب تراکم‌پذیری هم‌دمای گاز و سازند به ترتیب، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$c_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{z_g} \left(\frac{\partial z_g}{\partial p} \right)_T \quad (17)$$

$$C_f = \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \quad (18)$$

مجدداً با کمک قاعده زنجیری،

$$\frac{\partial(\frac{p}{z_g})}{\partial t} = \frac{\partial(\frac{p}{z_g})}{\partial p} * \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p}{z_g} \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{z_g} \frac{\partial z_g}{\partial p} \right) = \frac{p}{z_g} c_g \frac{\partial p}{\partial t} \quad (19)$$

است. با جای‌گذاری روابط ۱۹ و ۱۸ در رابطه ۱۴

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \phi \frac{p}{z_g} c_g \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p}{z_g} c_f \phi * \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{p B_g q_{sc}}{2 z_g \pi r \partial z \partial r} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (20)$$

با توجه به اینکه

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial(r \frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial r})}{\partial r} + k_z \frac{\partial(\frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial z})}{\partial z} = \phi \frac{p}{z_g} c_t \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{p B_g q_{sc}}{2 \pi z_g r \partial z \partial r} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (21)$$

و با جای‌گذاری رابطه ۱۶ در ۲۱ رابطه ۲۲ به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$q_r = v_r * A_r \quad (3)$$

که v_r و A_r به ترتیب سرعت و سطح مقطع در راستای شعاعی است. دبی در راستای محور Z

$$q_z = v_z * A_z \quad (4)$$

که v_z و A_z به ترتیب سرعت و سطح مقطع در راستای محور Z است. سطح مقطع ناحیه در راستای شعاعی

$$A_r = 2 \pi r \partial z \quad (5)$$

و سطح مقطع در راستای محور Z

$$A_z = 2 \pi r \partial r \quad (6)$$

است. با جای‌گذاری روابط ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ در رابطه ۱ خواهیم داشت:

$$\frac{\rho r v|_{r+\partial r} - \rho r v|_r}{r \partial r} + \frac{\rho v|_{z+\partial z} - \rho v|_z}{\partial z} = \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} - \frac{\rho B_g q_{sc}}{2 \pi r \partial r \partial z} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (7)$$

و سپس با ساده‌سازی و حذف‌گیری از طرفین معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} - \frac{\rho B_g q_{sc}}{2 \pi r \partial z \partial r} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (8)$$

طبق معادله دارسی برای سرعت گاز در راستای شعاعی و عمودی روابط ۹ و ۱۰ برقرار خواهد بود:

$$v_r = \frac{k_r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (9)$$

$$v_z = \frac{k_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (10)$$

که k_r و k_z به ترتیب تراوایی در راستای شعاعی و عمودی و μ ویسکوزیته سیال است. بر طبق معادله حالت چگالی گاز از معادله زیر محاسبه شود:

$$\rho_g = \frac{M}{RT} \frac{p}{z_g} \quad (11)$$

که M وزن مولکولی گاز، R ثابت جهانی گاز و z_g ضریب انحراف گاز است. با جای‌گذاری روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ در رابطه ۸ رابطه زیر حاصل می‌شود

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial(r \frac{M}{RT} \frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial r})}{\partial r} + k_z \frac{\partial(\frac{M}{RT} \frac{p}{z_g \mu} \frac{\partial p}{\partial z})}{\partial z} = \frac{\partial(\frac{M}{RT} \frac{p}{z_g} \phi)}{\partial t} - \frac{M}{RT} \frac{p}{z_g} B_g q_{sc} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (12)$$

با ساده‌سازی رابطه ۱۲ و خارج کردن ثابت‌ها،

$$t_D = \frac{k_f t}{\phi_1 \mu_1 c_{r,1} L_{re}^2} \quad (31)$$

C_{ti1} تراکم‌پذیری کل ناحیه داخلی مخزن در شرایط اولیه $t=0$ (atm⁻¹)، زمان تولید (s)، μ گرانیوی گاز در دما و فشار کنونی (cp) و

$$M_{12} = \frac{k_{r1} k_{z2}}{k_{r2} k_{z1}} \quad (32)$$

$$z_D = \frac{z}{L_{re}} \sqrt{\frac{3k_{r1}^2 k_{z1}}{k_{z1}}} \quad (33)$$

$$W_{12} = \frac{\phi_2 c_{g2}}{\phi_1 c_{g1}} \quad (34)$$

با استفاده از روابط ۳۵ و ۳۶ روابط به‌صورت کامل بدون بعد می‌شوند:

$$\psi_D = \frac{T_{sc}}{P_{sc} T} \frac{\pi k h}{q_{sc}} \Delta \psi \quad (35)$$

$$\bar{q} = \frac{q_{sc}}{2x_f h_f} = \frac{q_{sc}}{2\pi r_D \Delta Z_D} \quad (36)$$

q_{sc} دبی تولید در شرایط استاندارد (cm³/s)، با جای‌گذاری روابط ۳۵ و ۳۶ در ۲۵ و ۲۶، معادلات مشتق جزئی بی‌بعد جریان گاز برای ناحیه داخلی و خارجی به‌دست می‌آید:

$$\left(r_D \frac{\partial(\Delta\psi_{1D})}{\partial r_D} \right) + \frac{\partial^2(\Delta\psi_{1D})}{\partial Z_D^2} = \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \frac{\partial(\Delta\psi_{1D})}{\partial t_D} - \frac{h}{r_D \Delta r_D \Delta Z_D} \delta(r_D - r'_D) \delta(Z_D - Z'_D) \quad (37)$$

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial(\Delta\psi_{2D})}{\partial r_D} \right) + \frac{k_{r1} k_{z2}}{k_{r2} k_{z1}} \frac{\partial^2(\Delta\psi_{2D})}{\partial Z_D^2} = \eta_{rD} \frac{\partial(\Delta\psi_{2D})}{\partial t_D} \quad (38)$$

گسسته‌سازی معادلات

شرایط اولیه

در ابتدا، فشار در سرتاسر سیستم یکسان است $(\Delta\psi_D(t=0, r_D, h_D) = 0)$.

قالب برنامه‌نویسی معادلات

با گسسته‌سازی روابط ۳۷ و ۳۸ به روش اختلاف محدود [۲۲-۱۹] و با توجه به اینکه شکاف به‌صورت کامل نفوذ کرده است (معادلات در جهت z نیاز به گسسته‌سازی ندارند)، سیستم به‌صورت یک‌بعدی ساده می‌شود:

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \phi c_{t\mu} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{2pB_g q_{sc}}{2\pi z_r \partial z \partial r} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (22)$$

و

$$\Delta \psi(P) = \psi(P_i) - \psi(P) \quad (23)$$

جای‌گذاری اختلاف شبه فشار در رابطه ۲۲

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 \Delta \psi}{\partial z^2} = \phi c_{t\mu} \frac{\partial \Delta \psi}{\partial t} - \frac{pB_g q_{sc}}{\pi z_r \partial z \partial r} * \delta(r-r') \delta(z-z') \quad (24)$$

این معادله، معادله کلی حاکم بر مخزن است، در صورتی که ناحیه‌ای از مخزن دارای شکاف نباشد، ترم دارای تابع دیراک قابل حذف است. با استفاده از رابطه ۲۴ معادلات حاکم برای مدل دوناحیه‌ای تعریف‌شده به‌صورت زیر می‌تواند به‌دست آید. رابطه ۲۵ برای ناحیه داخلی که شکاف هیدرولیک در آن قرار دارد و رابطه ۲۶ برای ناحیه خارجی است.

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial(\Delta\psi_1)}{\partial r_D} \right) + \frac{\partial^2(\Delta\psi_1)}{\partial Z_D^2} = \frac{\partial(\Delta\psi_1)}{\partial t_D} - \frac{2P_{sc} T \bar{q}}{T_{sc} k_{r1}} \delta(r_D - r'_D) \delta(Z_D - Z'_D) \quad (25)$$

k_1 نفوذپذیری مؤثر نواحی داخلی، k_{r1} ، k_{r2} نفوذپذیری شعاعی نواحی داخلی و خارجی (D)، k_z نفوذپذیری در جهت z (D) و شعاع بی‌بعد

$$r_D = \frac{r}{L_{re}} \quad (27)$$

طول مرجع در سامانه (cm)

$$L_{re} = x_f \quad (28)$$

x_f نصف طول شکاف و η_{rD} نسبت هدایت‌پذیری ناحیه داخلی به خارجی (D/(cp.atm⁻¹))

$$\eta_{rD} = \frac{k_{r1} \phi_2 c_{g2}}{k_{r2} \phi_1 c_{g1}} = \frac{M_{12}}{W_{12}} \quad (29)$$

ϕ_1 تخلخل ناحیه داخلی برای مخزن دوناحیه‌ای گازی و ϕ_2 تخلخل ناحیه خارجی برای مخزن دوناحیه‌ای گازی، C_{gi1} تراکم‌پذیری گاز ناحیه داخلی مخزن در شرایط اولیه (atm⁻¹)، C_{gi2} تراکم‌پذیری گاز ناحیه خارجی مخزن در شرایط اولیه (atm⁻¹) و

$$r_{mD} = \frac{r_m}{L_{re}} \quad (30)$$

r_m شعاع ناحیه داخلی (cm) و در معادله بعدی زمان بی‌بعد است

محاسبه پارامتر cte:

ابتدا طبق رابطه دارسی

$$q_{sc} = \frac{kA}{\mu B_g} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (42)$$

با اندکی جابجایی و تغییرات رابطه ۴۳ به دست می‌آید:

$$\frac{2P}{\mu Z} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{2P}{\mu Z} \frac{q_{sc} \mu B_g}{kA} \quad (43)$$

با استفاده از شبه فشار در رابطه ۴۴ و ضرب دو

طرف در یک مقدار ثابت

$$\frac{T_{sc}}{P_{sc} T} \frac{\pi k_1 h}{q_{sc}} * \frac{\partial(\Delta \psi)}{\partial r} = \frac{2P}{\mu Z} \frac{q_{sc} \mu B_g}{kA} \frac{T_{sc}}{P_{sc} T} \frac{\pi k_1 h}{q_{sc}} \quad (44)$$

به دست می‌آید که می‌توان آن را طبق رابطه

به صورت بدون بعد تبدیل کرد.

$$\frac{\partial(\Delta \psi_D)}{\partial r_D} = \frac{L_{re}}{r_w} = \frac{1}{r_{wD}} \quad (45)$$

نتایج و بحث

شکل ۲ منحنی‌های الگو شبه‌فشار بی‌بعد و مشتق آن برحسب زمان بی‌بعد برای شکاف هیدرولیک عمودی در یک چاه گازی دوناحیه‌ای را نشان می‌دهد. شبه فشار بی‌بعد از حل روابط ۳۷ و ۳۸ به صورت هم‌زمان به روش اختلاف محدود و با شرایط مرزی و اولیه مناسب به دست آمده است. بدین منظور، برنامه‌نویسی معادلات در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. مشتق شبه فشار بی‌بعد به صورت عددی و پس‌رو گرفته شده است. متغیر (m_D) شبه فشار بی‌بعد و مشتق آن (d_{mD}) است. این نمودار دارای روندهای متعددی است که به بخش‌های زیر تقسیم می‌شود.

- بخش اول: تشکیل جریان خطی با شیب ۰/۵ در هر دو منحنی شبه‌فشار و مشتق شبه فشار روی محورهای لگاریتمی دیده می‌شود. به علت اینکه هدایت شکاف بی‌نهایت دیده شده است و هیچ افت فشاری در طول شکاف مشاهده نمی‌شود [۲].
- بخش دوم: جریان شعاعی در ناحیه اول که مشخصه آن یک خط افقی در منحنی مشتق است [۳، ۱۲] و [۱۳]. مقدار این خط افقی برابر ۰/۵ است [۲۳].

$$2 * \left(\frac{r_{D,i+1/2} \Delta \psi^{t+dt}_{D,i+1,j} - \Delta \psi^{t+dt}_{D,i,j}}{r_{D,i,j} \Delta r_{D,i,j} (\Delta r_{D,i,j} + \Delta r_{D,i+1,j})} - \frac{r_{D,i-1/2} \Delta \psi^{t+dt}_{D,i,j} - \Delta \psi^{t+dt}_{D,i-1,j}}{r_{D,i,j} \Delta r_{D,i,j} (\Delta r_{D,i,j} + \Delta r_{D,i-1,j})} - CF \frac{\Delta \psi_{D,i,j}^{t+dt}}{\Delta t_D} \right) = -CF \frac{\Delta \psi_{D,i,j}^t}{\Delta t_D} - \frac{1}{r_D \Delta r_{D,i,j}} * \frac{\Delta r_{D,i,j}}{x_{FD}} * \delta(r_{D,i,j} - r'_{D,i,j}) \quad (39)$$

در معادله بالا به دلیل اینکه کل دبی تولیدی از شکاف مقدار ثابتی است، مقدار تولید از یک المان از شکاف به نسبت کل طول شکاف تقسیم می‌شود تا کسری از دبی که از هر المان تولید می‌شود، محاسبه گردد. معادله کلی به صورت:

$$a_{i+1} \Delta \psi^{t+dt}_{D,i+1} + b_{i-1} \Delta \psi^{t+dt}_{D,i-1} + e_i \Delta \psi^{t+dt}_{D,i} = f_i \quad (40)$$

نوشته می‌شود که در آن ضرایب دستگاه معادله به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$a_{i+1} = x_p \frac{r_{D,i+1/2}}{r_{D,i}} \frac{2}{\Delta r_{D,i,j} (\Delta r_{D,i} + \Delta r_{D,i+1})}$$

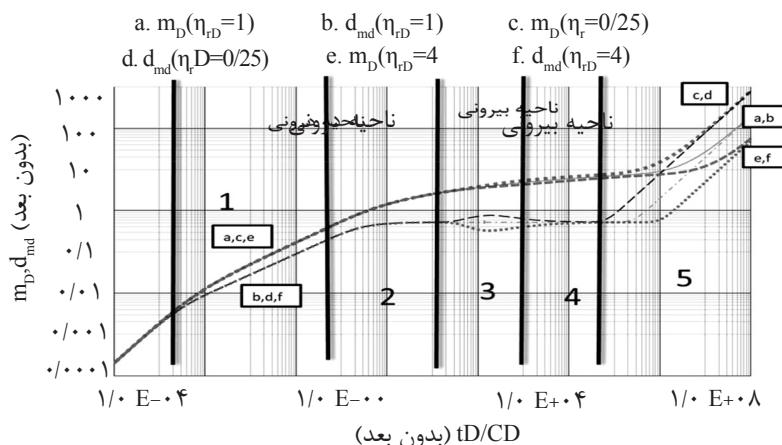
$$b_{i-1} = x_m \frac{r_{D,i-1/2}}{r_{D,i}} \frac{2}{\Delta r_{D,i} (\Delta r_{D,i} + \Delta r_{D,i-1})}$$

$$e_i = -(a_{i+1} + (1-well) * b_{i-1} + \frac{CF(2)}{\Delta t_D})$$

$$f_i = -CF \frac{\Delta \psi'_{1D,i}}{\Delta t_D} - x_c \frac{1}{r_{D,i} x_{FD}} - n_w * \frac{r_{D,i}^{cte}}{r_{D,i} * \Delta r_{D,i}}$$

و CF ، n_w ، x_p و x_m وابسته به شرایط مرزی و حضور در ناحیه داخلی و خارجی است. برای ناحیه خارجی $CF = \eta_{rD}$ (۴۱)

است. این در حالی است که برای ناحیه داخلی ضریب بالا برابر یک است. اگر $i=1$ ، x_m برابر صفر می‌شوند و در غیر این صورت برابر یک هستند. اگر $i=N_x$ باشد، آنگاه x_p برابر صفر است و در غیر این صورت برابر یک خواهد بود. هنگامی که بلوک‌ها درون شکاف هستند، $x_c=1$ و در غیر این صورت برابر صفر است. اگر از چاه تولید صورت گیرد، آنگاه برای $i=1$ و $well=1$ و در سایر بلوک‌ها برابر صفر است. اگر تولید فقط از شکاف باشد، $well$ همواره برابر صفر خواهد بود.



شکل ۲ اثر تغییر نسبت هدایت پذیری، سایر پارامترها ثابت هستند ($x_{rD} = 10, r_{mD} = 100, r_{eD} = 10000, N_x = 1200$)

آن برسد، بعد از آن افت فشار مخزن وارد مرحله‌ای می‌شود که به آن شبه پایدار می‌گویند. در این حالت، فشار مخزن در تمام نقاط با یک سرعت ثابت کاهش می‌یابد. این دوره جریان بر اساس عکس‌العمل فشار مانند یک تانک بسته است که سیال به تدریج از آن تخلیه می‌شود [۲۶]. با افزایش مقدار نسبت هدایت‌پذیری ناحیه داخلی به خارجی، یا تراوایی ناحیه داخلی بیشتر از ناحیه خارجی است یا اینکه تراکم‌پذیری ناحیه خارجی از داخلی بیشتر است ($\eta_{rD} = \frac{k_{r1}\phi_{g2}}{k_{r2}\phi_{g1}}$). با افزایش نسبت هدایت‌پذیری، به دلیل کاهش تراوایی ناحیه خارجی یا افزایش تراکم‌پذیری این ناحیه، موج افت فشار دیرتر به مرز می‌رسد در نتیجه جریان شعاعی ناحیه خارجی برای مدت‌زمان طولانی‌تری ادامه می‌یابد. این بخش، مشابه بخش قبلی، تنها زمانی قابل مشاهده است که مخزن (ناحیه دوم) دارای مرز مشخصی باشد. شکل ۲ اثر تغییر نسبت هدایت‌پذیری ناحیه داخلی به خارجی (η_{rD}) را در محورهای لگاریتمی برحسب شبه‌فشار بی‌بعد و مشتق شبه‌فشار بی‌بعد نسبت به زمان بی‌بعد در شکاف با نفوذ کامل نشان می‌دهد. مشخص است که با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها و تغییر نسبت هدایت‌پذیری، جریان شعاعی ناحیه دوم تحت تأثیر قرار می‌گیرد، دلیل اصلی آن نیز بی‌بعدسازی همه پارامترها بر اساس خواص ناحیه اول است. هنگامی که $\eta_{rD} = 1$ باشد، مدل یک مخزن تک‌ناحیه‌ای دارای چاه با شکاف هیدرولیک

این جریان تنها زمانی مشاهده می‌شود که شعاع ناحیه داخلی بسیار بیشتر از طول شکاف باشد. در غیر این صورت، این ناحیه توسط جریان گذرا پوشانده خواهد شد [۲۴].

- بخش سوم: جریان گذرا بین ناحیه داخلی و خارجی که مشخصه آن، جریان شبیه یک پله است. اگر نسبت هدایت‌پذیری ناحیه داخلی به خارجی (η_{rD}) برابر یک نباشد، یک برآمدگی یا فرورفتگی در در منحنی مشتق مشاهده خواهد شد [۱۶، ۲۵]. در این دوره جریانی، به دلیل تغییر خواص سنگ و سیال، نمودار شبه فشار بی‌بعد و مشتق آن، تغییر می‌کند. دلیل اصلی این تغییرات، بی‌بعدسازی پارامترها نسبت به خواص سنگ و سیال ناحیه اول است.

- بخش چهارم: دوره جریان شعاعی ناحیه خارجی توسط یک خط افقی با مقدار ۰/۵ مشخص می‌شود. وقتی که موج افت فشار به ناحیه دوم می‌رسد، پاسخ فشاری توسط خواص ناحیه دوم کنترل می‌شود و مقدار مشتق منحنی شبه فشار در این دوره جریانی برابر ۰/۵ است. این بخش تنها زمانی قابل مشاهده است که ناحیه دوم محدود در نظر گرفته شود و دارای مرز مشخصی باشد.

- بخش پنجم: دوره جریانی شبه پایدار ناشی از مرزهای بسته که در منحنی مشتق با شیب ۱ و در منحنی فشار با شیب ۱ قابل مشاهده است. وقتی یک مخزن از همه جهات بسته باشد، فشار گذرا به اطراف مخزن حرکت می‌کند تا زمانی که به مرز

را نشان می‌دهد. هنگام استفاده از ۱۰۰ بلوک در تمام طول مخزن ($x_{fd} = 1, r_{ed} = 100, r_{md} = 10$)، تمامی شکاف، ناحیه داخلی و ناحیه خارجی به‌ترتیب توسط ۱، ۹ و ۹۰ بلوک نمایش داده می‌شود. در نمودار مشتق شبه فشار بی‌بعد با تعداد بلوک ۱۰۰، اثر شکاف (خط با شیب ۰/۵) قابل مشاهده نیست. با افزایش تعداد بلوک (۱۰۰۰-۲۰۰۰) اثر شکاف در نمودار شبه مشتق فشار بی‌بعد دیده می‌شود. با افزایش تعداد بلوک، شیب خط ۰/۵ در نمودار مشتق شبه فشار بی‌بعد، زودتر قابل دیده می‌شود. افزایش تعداد بلوک‌ها در زمان‌های انتهایی، تأثیر زیادی بر حل ندارد؛ اما اثر آن در زمان‌های ابتدایی (شبه‌سازی شکاف) قابل توجه است.

برای افزایش دقت شبه‌سازی (بدون افزایش تعداد مجهولات)، از بلوک‌های با ابعاد مختلف استفاده می‌شود. اطراف شکاف را با مش ریز و بخش‌های دورتر از شکاف را با مش درشت مش‌بندی شده است. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان پی برد که استفاده از مش ریز در نواحی دارای تغییرات (جریان سیال از شکاف به ناحیه داخلی) به‌جای افزایش تعداد مش مورد استفاده در کل مخزن، از دقت کافی برای شبه‌سازی شکاف و مشاهده مشتق شبه فشار بی‌بعد با شیب ۰/۵ برخوردار است. به‌عنوان مثال، هنگام استفاده از ۱۰۰ بلوک، ۱۰ بلوک برای شکاف، ۳۰ بلوک برای ناحیه داخلی و ۶۰ بلوک برای ناحیه خارجی استفاده شده است.

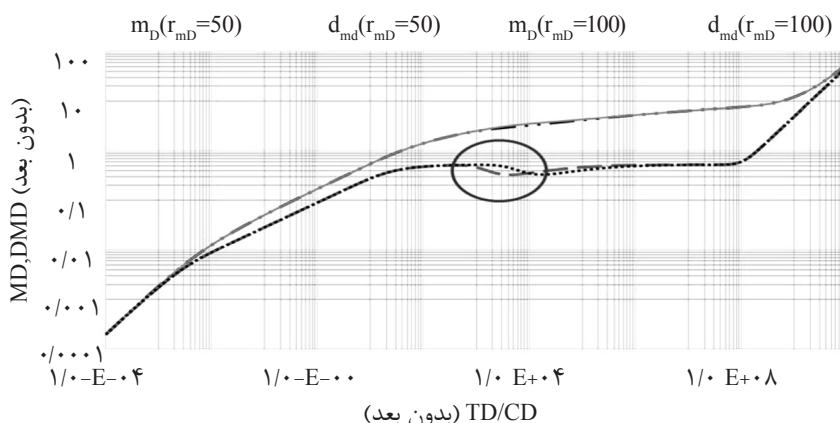
است. در واقع این منحنی به‌عنوان مدل پایه یک مخزن تک‌ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

اثر تغییر شعاع ناحیه داخلی بی‌بعد (r_{md})

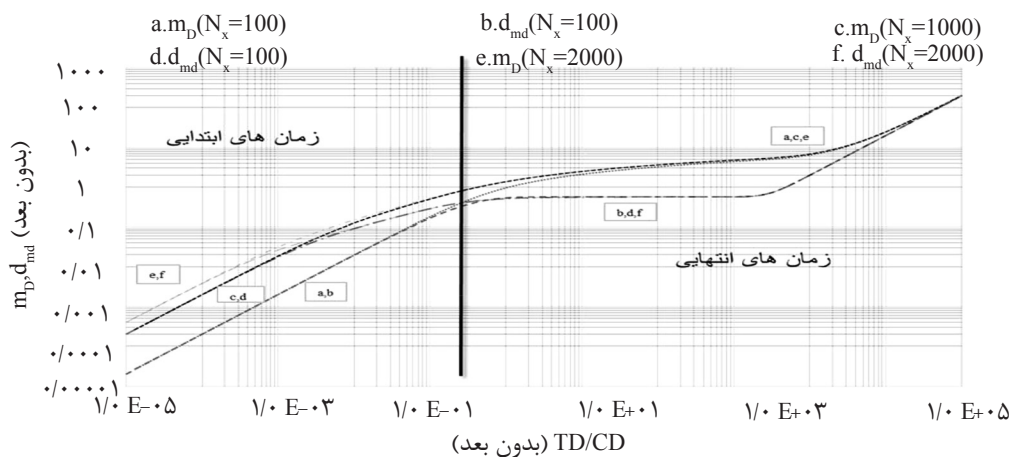
در شکل ۳ اثر تغییر شعاع ناحیه داخلی بی‌بعد r_{md} را بر روی نمودارهای به‌دست‌آمده مشاهده می‌کنید. هر چه این شعاع افزایش یابد، جریان شعاعی ناحیه اول برای مدت‌زمان طولانی‌تری ادامه خواهد داشت. در واقع به‌دلیل اینکه سایر پارامترها ثابت هستند، موج فشاری به‌دلیل افزایش طول ناحیه داخلی، دیرتر به ناحیه خارجی می‌رسد؛ اما به‌دلیل ثابت بودن سایر پارامترها تنها زمان مشاهده ناحیه گذرا، جریان شبیه پله در نمودار مشتق شبه‌فشار بی‌بعد بر حسب زمان بی‌بعد، متفاوت است. این بخش در شکل ۳ مشخص شده است.

اثر اندازه بلوک بر شبه‌سازی شکاف

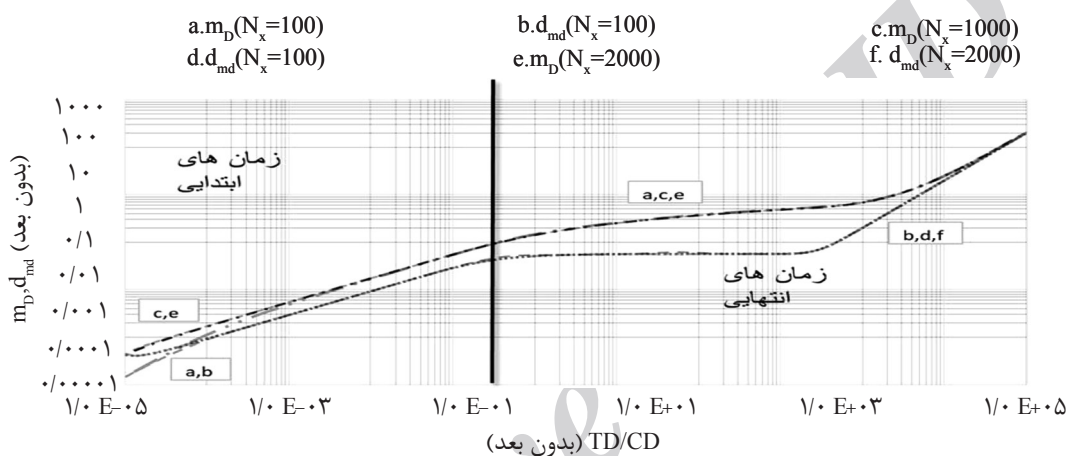
در این بخش انتخاب ابعاد و تقسیم‌بندی بلوک‌ها (مش) برای افزایش دقت، ضمن کنترل زمان شبه‌سازی بررسی شده است. با افزایش تعداد بلوک‌ها، دقت شبه‌سازی به‌دلیل خطای عددی کمتر، افزایش می‌یابد. زمان شبه‌سازی با توجه به افزایش مجهولات دستگاه معادلات، بیشتر می‌شود. حافظه موردنیاز، زمان محاسباتی و هزینه اجرای شبه‌سازی کامپیوتری توسط تعداد مش‌ها کنترل می‌شود. این سه پارامتر به‌صورت مستقیم، حداقل با توان یک به تعداد مش تغییر می‌کنند [۲۷ و ۲۸]. شکل ۴ اثر تعداد بلوک‌ها بر شبه‌سازی شکاف



شکل ۳ اثر افزایش شعاع ناحیه داخلی بی‌بعد (r_{md})، سایر پارامترها ثابت هستند ($x_{fd} = 10, \eta_o = 4, r_{ed} = 10000, N_x = 1200$)



شکل ۴ اثر افزایش تعداد بلوک بر شبیه‌سازی شکاف، ($x_{JD}=1, \eta_D=1, r_{eD}=100, r_{mD}=10$)



شکل ۵ بررسی اثر افزایش بلوک بر مش با ابعاد متغیر در شبیه‌سازی شکاف، ($x_{JD}=1, \eta_D=1, r_{eD}=100, r_{mD}=10$)

مثلی، ۳۷۸ المان گوشه‌ای و ۳۰ المان قله‌ای^۲ به‌کاربرده شده است.

جدول ۱ اثر افزایش بلوک بر زمان شبیه‌سازی

تعداد بلوک	زمان (s)
۱۰۰	۰/۸۸
۱۰۰۰	۳۰/۸۹
۲۰۰۰	۱۰۰/۲۵

جدول ۲ اثر افزایش تعداد بلوک بر زمان شبیه‌سازی با ابعاد متغیر بلوک

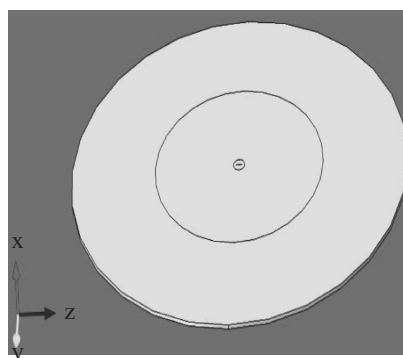
تعداد بلوک	زمان (s)
۱۰۰	۰/۸۶
۱۰۰۰	۲۸/۹۳
۲۰۰۰	۱۰۲/۴۱

با مقایسه جدول ۱، جدول ۲، شکل ۴ و شکل ۵ می‌توان پی برد که در زمان محاسبه تقریباً یکسان و با انتخاب مش با ابعاد متغیر، به‌جای افزایش تعداد مش که منجر به افزایش زمان شبیه‌سازی می‌شود، اثر شکاف بر منحنی‌های مشتق شبه‌فشار بی‌بعد قابل مشاهده است.

اعتبارسنجی

در این بخش به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک مخزن گازی دوناچی‌ای با چاه دارای شکاف هیدرولیک، نرم‌افزار کامسول به‌کاربرده شده است. مدل استاتیک ساخته‌شده در شکل ۶ قابل مشاهده است. اطلاعات مربوط به شرایط تولید و ابعاد مسئله در جدول ۳ آورده شده است. برای مش‌بندی این مخزن، ۲۷۱۲۲ المان چهار وجهی^۱، ۶۶۰۵ المان

1. Tetrahedral
2. Vertex



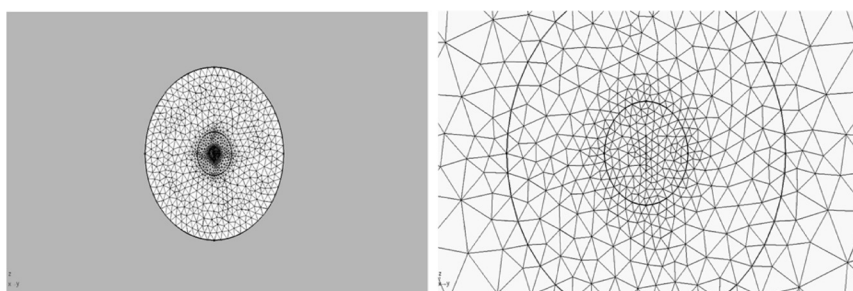
شکل ۶ هندسه مدل شبیه‌سازی شده در کامسول

جدول ۳ اطلاعات تولید مخزن گازی شبیه‌سازی شده در کامسول به منظور اعتبارسنجی مدل

توضیحات	واحد	عبارت	پارامترها
فشار اولیه مخزن	Pa	300e-5	P_0
بازشدگی شکاف	m	1e-6	D_{ff}
تراوایی ناحیه اول	m^2	1e-15	k_{mm}
تراوایی شکاف	m^2	۱۰۰	k_{ff}
سرعت خروج سیال از شکاف	m/s	1e-5	u_0
چگالی اولیه سیال مخزن	kg/m^3	۱	
ویسکوزیته اولیه سیال مخزن	Pa.s	1e-6	
تخلخل ناحیه داخلی	-	۰/۳	
تراکم‌پذیری سیال مخزن	Pa/1	1e-6	C_o
تراکم‌پذیری سنگ مخزن	Pa/1	1e-10	C_{rm}
تخلخل شکاف	-	۰/۳	
تراکم‌پذیری سیال درون شکاف	Pa/1	5e-7	C_{of}
طول شکاف هیدرولیک	m	۱۰	L_{re}
دمای شرایط استاندارد	K	۲۹۸	T_{sc}
دمای مخزن	K	۲۹۸	T
فشار شرایط استاندارد	Pa	1e+05	P_{sc}
تراوایی شکاف در ناحیه خارجی	m^2	4e-15	kmm^2
تخلخل ماتریس در ناحیه خارجی	-	۰/۳	
تراکم‌پذیری سنگ ماتریس ناحیه خارجی	Pa/1	1e-10	C_{rm2}
تراکم‌پذیری سیال در ناحیه خارجی	Pa/1	1e-7	CO_2

استفاده شده است. زمان شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار کامسول و اطلاعات سیستم رایانه‌ای در جدول ۴ آمده است. شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار کامسول برای مدل تعریف‌شده را نشان می‌دهد.

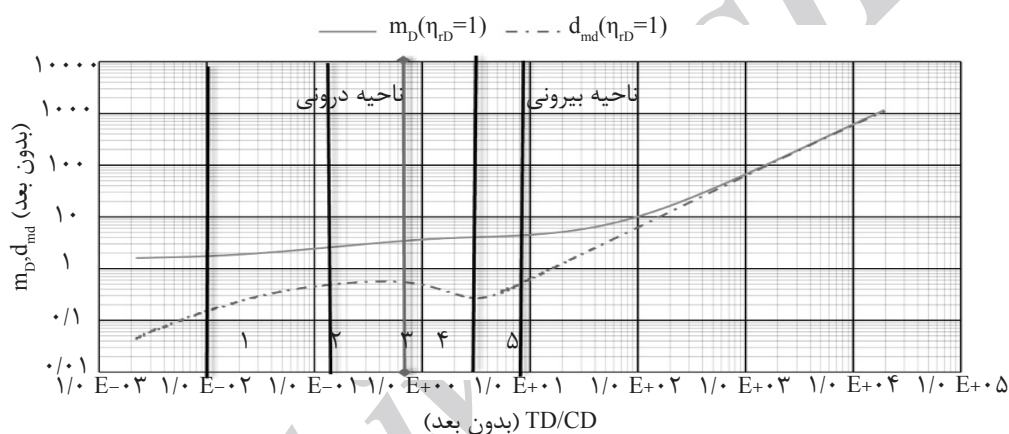
شکل ۷ مش‌بندی مورد استفاده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ابعاد شکاف نسبت به ابعاد مخزن بسیار کوچک (یک‌به‌بیست) است، در اطراف شکاف از مش‌های ریزتر به منظور دیده شدن اثر شکاف



شکل ۷ مش مورد استفاده به منظور شبیه‌سازی مدل

جدول ۴ اطلاعات محاسباتی و رایانه‌ای شبیه‌سازی کامسول

۲ hr, ۱۷ min, ۱۸ s	زمان شبیه‌سازی
Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @ 2.40GHz, 2 cores	واحد پردازشگر مرکزی ^۱
ویندوز ۸	سیستم عامل



شکل ۸ اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده توسط نرم افزار کامسول

برای منحنی شبه‌فشار و مشتق شبه‌فشار در بخش پنجم رخ می‌دهد [۲۶].

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی به کمک معادلات اشاره شده، مدل‌سازی مخزن در حالت واقعی را امکان‌پذیر ساخته است. از آنجاکه حل تحلیلی معادلات در بعضی مواقع بسیار دشوار است و در بعضی مواقع دیگر مستلزم فرضیات ساده‌شونده است، لذا برخی ابهامات آن را می‌توان از بین برد. در مخازن غیرمتعارف گازی که دارای شرایط به‌مراتب پیچیده‌تری نسبت به مخازن معمول است، این پیچیدگی‌ها دوچندان می‌شود.

همان‌گونه که از منحنی شبه‌فشار و مشتق آن مشخص است، پنج بخش مورد اشاره در سیستم سه‌بعدی نیز رخ می‌دهد. در بخش اول، خطی با شیب ۰/۵ در هر دو منحنی شبه‌فشار و مشتق شبه‌فشار به علت در نظر گرفتن شکاف بی‌نهایت دیده می‌شود و هیچ افت فشاری در طول شکاف مشاهده نمی‌شود [۲]. برای بخش دوم جریان شعاعی در ناحیه اول با یک خط افقی در منحنی مشتق مشاهده می‌گردد [۱۲ و ۱۳] و مقدار آن برابر با ۰/۵ است [۲۳]. جریان گذرای بین ناحیه داخلی و خارجی به صورت منحنی شبه‌پله در بخش سوم دیده می‌شود [۱۶ و ۲۵]. بخش چهارم نیز اختصاص به جریان شعاعی در ناحیه خارجی دارد. در نهایت جریان شبه‌پایدار به دلیل مرزهای بسته با شیب ۱

1. CPU

$k = \sqrt[3]{k_x k_y k_z}$ (D) K : نفوذپذیری معادل

k_x, k_y, k_z : نفوذپذیری در سه جهت x و y و z (D)

k_{r1}, k_{r2} : نفوذپذیری شعاعی نواحی داخلی و خارجی

(D)

k_{z1}, k_{z2} : نفوذپذیری عمودی نواحی داخلی و خارجی

(D)

k_i, k_j : نفوذپذیری مؤثر نواحی داخلی و خارجی

$k_i = \sqrt[3]{k_{r,i}^2 k_{z,i}}$, $i = 1, 2$

L_{re} : طول مرجع در سامانه (cm)

P_{sc} : فشار استاندارد مخزن (atm)

q_{sc} : دبی تولید در شرایط استاندارد (cm³/s)

r : شعاع در سامانه شعاعی (cm)

r_m : شعاع ناحیه داخلی (cm)

r_e : شعاع ناحیه خارجی (cm)

R : شعاع در محور کروی (cm)

t : زمان تولید (s)

T : دمای مخزن (K)

T_{sc} : دما در شرایط استاندارد (K)

N_x : تعداد بلوک در راستای محور (x)

W_{i2} : ضریب ذخیره‌پذیری $(\frac{\phi_1 C_{i1}}{\phi_2 C_{i2}})$

x, y, z : محورها

x_f : نصف طول شکاف

z_g : ضریب انحراف گاز

μ : گرانیوی گاز در دما و فشار کنونی (cp)

μ_{gi} : گرانیوی گاز در دما و فشار اولیه مخزن

ψ : شبه فشار

$\Delta\psi_1, \Delta\psi_2$: تفاوت شبه فشار در ناحیه داخلی و خارجی $(\Delta\psi_i = \psi_i(p_i) - \psi_i(p))$

λ_{Dd} : نسبت انتقال‌پذیری سیال ناحیه داخلی به خارجی

ϕ : تخلخل مخزن همگن

ϕ_1 : تخلخل ناحیه داخلی برای مخزن دو ناحیه‌ای گازی

ϕ_2 : تخلخل ناحیه خارجی برای مخزن دو ناحیه‌ای گازی

η_{r1}, η_{r2} : هدایت‌پذیری نواحی داخلی و خارجی

در شبیه‌سازی مخازن نامتعارف با استفاده از مش مناسب، می‌توان در زمان شبیه‌سازی یکسان، نتایج با دقت بالا به دست آورد. شبیه‌سازی مخزن گازی غیرمتعارف شکاف‌دار هیدرولیکی در این کار ما را به نتایج زیر رسانده است:

- وجود شکاف هیدرولیکی در مخازن گازی کم‌تراوای دو ناحیه‌ای باعث می‌شود که نمودار مشتق فشار و فشار بدون بعد به پنج بخش متفاوت تقسیم شود:

- در بخش اول جریانی خطی با شیب ۰/۵ در هر دو منحنی شبه‌فشار و مشتق شبه‌فشار روی محورهای لگاریتمی دیده می‌شود.

- بخش دوم جریان شعاعی در ناحیه داخلی است که مشخصه آن یک خط افقی در منحنی مشتق شبه‌فشار با مقدار ۰/۵ است.

- در بخش سوم جریان گذرا بین ناحیه داخلی و خارجی دیده می‌شود که مشخصه آن، جریان شبیه یک پله بر روی نمودار مشتق شبه‌فشار است.

- در بخش چهارم، دوره جریان شعاعی ناحیه خارجی توسط یک خط افقی با مقدار ۰/۵ مشخص می‌شود.

- بخش پنجم دوره جریانی شبه‌پایداری را نشان می‌دهد که ناشی از مرزهای بسته‌ای است که در منحنی مشتق و در منحنی شبه‌فشار با شیب ۱ قابل مشاهده است.

علائم و نشانه‌ها

B_g : ضریب حجمی گاز (sm³/sm³)

C : ضریب ذخیره چاه (cm³/atm)

C_D : ضریب ذخیره چاه بدون بعد

C_{ii} : تراکم‌پذیری کل مخزن در شرایط اولیه (atm⁻¹)

C_{i1} : تراکم‌پذیری کل ناحیه داخلی مخزن در شرایط اولیه (atm⁻¹)

C_{i2} : تراکم‌پذیری کل ناحیه خارجی مخزن در شرایط اولیه (atm⁻¹)

h : ضخامت سازند (cm)

h_r : ارتفاع شکاف (cm)

$(D)/(cp.atm^{-1})$

زیروندها

η_{rD} : نسبت هدایت‌پذیری ناحیه داخلی به خارجی

۱: ناحیه داخلی

$\delta(t)$: تابع دلتای دیراک

۲: ناحیه خارجی

wD : دهانه چاه بدون بعد

مراجع

- [1]. Rahmanian M. R., Solano N. and Aguilera R., "Storage and output flow from shale and tight gas reservoirs," in SPE Western Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [2]. Gringarten A. C., Ramey Jr H. J. and Raghavan R., "Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture," Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 14(04): pp. 347-360, 1974.
- [3]. Rahman M. M., Rahman M. and Rahman S., "An analytical model for production estimation from hydraulically fractured tight-gas reservoirs," in SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [4]. Boyun G., Westaway P. and Jacquemont J., "Field case studies of pressure transient data from complex reservoirs," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [5]. Corbett P. W., Geiger-Boschung S., Pinheiro Borges L., Garayev M., and Valdez C., "Limitations in numerical well test modelling of fractured carbonate rocks," in SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [6]. Ozkan E., "Performance of horizontal wells," Thesis/Dissertation, Tulsa Univ., OK (USA), 1988.
- [7]. Zhao Y. L., Zhang L. H., Liu Y. H., Hu Sh. Y. and Liu Q. G., "Transient pressure analysis of fractured well in bi-zonal gas reservoirs," Journal of Hydrology, Vol. 524: pp. 89-99, 2015.
- [8]. Al-Mohannadi N., Ozkan E. and Kazemi H., "Grid system requirements in numerical modeling of pressure-transient tests in horizontal wells," in SPE International Petroleum Conference in Mexico, Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [9]. Archer R. A. and Yildiz T. T., "Transient well index for numerical well test analysis," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [10]. Hegre T. "Hydraulically fractured horizontal well simulation. in European 3-D Reservoir Modelling Conference," Society of Petroleum Engineers, 1996.
- [11]. Zhao Y. L., Zhang L. H., Luo J. X. and Zhang B. N. "Performance of fractured horizontal well with stimulated reservoir volume in unconventional gas reservoir," Journal of Hydrology, Vol. 512, pp. 447-456, 2014.
- [12]. Hashemi A., Nicolas L. and Gringarten A. C., "Well test analysis of horizontal wells in gas-condensate reservoirs," SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 9(01), pp. 86-99, 2006.
- [13]. Liu Y. w., Ouyang W. P., Zhao P. H. and Fang H. J., "Numerical well test for well with finite conductivity vertical fracture in coalbed," Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 35: pp. 729-740. 2014.
- [14]. McLean K. and Zarrouk S. J., "Pressure transient analysis of geothermal wells: A framework for numerical

- modelling*," Renewable Energy, Vol. 101: pp. 737-746, 2017.
- [15]. Wan Y., Yuewu L., Wenchao L., Guofeng H. and Congcong N., "A numerical approach for pressure transient analysis of a vertical well with complex fractures," Acta Mechanica Sinica, Vol. 32(4): pp. 640-648, 2016.
- [16]. Chu W. C. and Shank G. D., "A new model for a fractured well in a radial, composite reservoir (includes associated papers 27919, 28665 and 29212)," SPE Formation Evaluation, Vol. 8(03): pp. 225-232, 1993.
- [17]. Ji L., Settari A. and Sullivan R. B., "A novel hydraulic fracturing model fully coupled with geomechanics and reservoir simulation," SPE Journal, Vol. 14, Issue 03, pp. 423-430, 2009.
- [18]. Ding D. Y., Wu Y. and Jeannin L., "Efficient simulation of hydraulic fractured wells in unconventional reservoirs," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 122, pp. 631-642, 2014.
- [19]. Aziz K. and Settari A., "Petroleum reservoir simulation," Chapman & Hall, 1979.
- [20]. Ertekin T., Abou-Kassen J. H. and King G. R., "Basic Applied Reservoir Simulations," Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [21]. Gerald C. F. and Wheatley P. O., "Applied numerical analysis," Vol. 70., Addison-Wesley Reading, MA, 1984.
- [22]. Rice R. G. and Do D. D., "Applied mathematics and modeling for chemical engineers," John Wiley & Sons, 2012.
- [23]. Wan Y., Yuewu L., Weiping O., Guofeng H. and Wenchao L., "Numerical investigation of dual-porosity model with transient transfer function based on discrete-fracture model," Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 37(5): pp. 611-626, 2016.
- [24]. Bourdet D., Ayoub J. and Pirard Y., "Use of pressure derivative in well test interpretation," SPE Formation Evaluation, Vol. 4(02): pp. 293-302, 1989.
- [25]. Chen C. C., "Modeling a fractured well in a composite reservoir," SPE Formation Evaluation, Vol. 10(04): pp. 241-246, 1995.
- [26]. Lee J., "Well testing," New York: Society of Petroleum Engineers, 1982.
- [27]. Audigane P. and Blunt M. J., "Dual mesh method for upscaling in waterflood simulation," Transport in Porous Media, Vol. 55(1): pp. 71-89, 2004.
- [28]. von Rosenberg D. U. "Local mesh refinement for finite difference methods," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1982.