



شبیه‌سازی جریان همرفت در یک میکرومدل شکافدار برای مخازن نفتی ترک‌دار

مهین شفیعی^۱، دانشیار دانشگاه بخش مهندسی شیمی شهید باهنر کرمان
سیهر اسلانی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد مخازن هیدرو کربوری دانشگاه شهید باهنر کرمان

رحیم حسینی زاده^۳، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهید باهنر کرمان
امیرضیائی^۴، استادیار بخش مهندسی شیمی دانشگاه شهید باهنر کرمان
علی مخی^۵، دانشیار بخش مهندسی شیمی دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

عمده مخازن نفتی ایران را مخازن شکافدار تشکیل می‌دهند. همرفت به دلیل تأثیر گذاری بر شبیه‌سازی خطوط جریانی و نیز خواص سیال ستون نفتی یکی از پدیده‌های مهم در مخازن شکافدار، چه قبل و چه بعد از تولید است. همرفت، دو فاکتور مهم در مخزن دارد:

- ۱- اختلاف چگالی لازم برای شروع همرفت که در قالب عدد ریلی بحرانی بیان می‌شود؛
- ۲- سرعت همرفت که سرعت همرفت، دما، شکل و عرض سلول‌ها تابع یکدیگرند.

در این تحقیق معادلات حاکم بر همرفت در یک میکرومدل مستطیل شکل آزمایشگاهی، با روش تفاضل محدود در توزیع دماهای مختلف، حل و نتایج بدست آمده برای عرض سلول‌ها و سرعت آنها با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه و روند تغییرات عرض و سرعت سلول‌ها بررسی شده‌اند.

معادله توزیع دمایی از دو قسمت یکی ترم‌های مربوط به همرفت و دیگری ترم‌های مربوط به رسانایی تشکیل شده است. اهمیت بیشتر هر یک از این دو قسمت در مقایسه با دیگری سبب رخ دادن توزیع دماهای متفاوتی می‌شود. در سرعت‌های کمتر همرفت، انتقال گرمای بیشتری بر اثر رسانایی صورت می‌گیرد و سلول‌های همرفتی عرض کمتری دارند؛ برعکس وقتی سرعت همرفت بیشتر باشد ترم‌های همرفتی، اهمیت بیشتر و سلول‌های همرفتی شکل توسعه یافته تری می‌یابند.

عرض سلول‌های همرفتی در حالت توسعه یافته برای جریان گرانیو تابعی از خواص سنگ و سیال است؛ درحالی که عرض سلول‌ها در حالتی که ترم‌های رسانایی، ترم عمده در معادله توزیع دمایی باشند فقط تابعی از خواص شکاف است. البته در شرایط واقعی مخزن با تغییر الگوی جریان به جریان داری، متغیرهای مؤثر بر عرض سلول‌ها تغییر می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: مخازن شکافدار، جریان همرفت، سلول‌های همرفتی^۶، توزیع دمایی

مقدمه

وجود دو محیط جداگانه در مخازن نفتی شکافدار، شامل شبکه شکاف‌ها و ماتریکس‌ها، سبب پدید آمدن پدیده‌های متفاوتی در مخازن شکافدار در مقایسه با مخازن ماسه‌سنگی می‌شود. این ساختار ناهمگون مخازن شکافدار، مکانیزم‌های تولید پیچیده را شامل همرفت، دیفیوژن، ریزش ثقلی، آشام و آزاد شدن گاز فعال می‌کند. استفاده از شبیه‌سازی‌های مخازن، بدون در نظر داشتن و اعمال شبکه شکاف‌ها به مدل استاتیک و فقط اکتفا به تغییر خصوصیات فیزیکی سنگ مخزن، مانند افزایش تخلخل و تراوایی برای تطبیق با تاریخچه عملکرد مخزن، می‌تواند به نتایج گمراه کننده‌ای از شبیه‌سازی با خطای بیش از ۵۰ درصد برسد [۱].

قبل از شروع تولید از مخزن، بر اثر وجود گرادیان دمایی و پس از شروع تولید از مخزن بر اثر تغییر گاز محلول در نفت، یک گرادیان چگالی در مخزن ایجاد می‌شود. این گرادیان چگالی، سبب ناپایداری و همرفت در مخزن است. هر چه تولید از مخزن در دبی پایین تری باشد، همرفت اثر بیشتری بر مخزن خواهد گذاشت و سبب

کاهش ناحیه گاززده و ضریب بازیافت بهتر خواهد شد.

مروری بر تحقیقات گذشته

بررسی چگالی و تغییرات پایداری و ناپایداری و بررسی تولید سلول‌های همرفت آزاد به سال ۱۹۰۰-۱۹۰۱ می‌رسد؛ لایه گرم شده که از زیر با توده گرمایی احاطه شده، جریان همرفت آزاد را سبب می‌شود. بنارد [۲] اولین کسی بود که پدیده ناپایداری و اختلاف چگالی بر اثر تغییرات گرمایی را تجزیه و تحلیل کرد. در ادامه، ریلی [۳] در ۱۹۱۶ معادله‌ای را بیان کرد که پایه اصلی ایجاد ناپایداری‌ها در چگالی مایعات بر آن نهاده شد.

کارهای تئوری و آزمایشگاهی زیادی نیز در دو دهه گذشته در زمینه فهم مکانیزم همرفت در مخازن شکافدار شده است، از جمله پارسون^۴ (۱۹۴۴)، دومور^۵ (۱۹۷۰)، ابگرال^۱ (۱۹۷۳) و سعیدی (۱۹۷۹)؛ البته در این میان، کارهایی که در سیستم‌های شکافدار درباره وجود یا عدم وجود انتقال جرم باشد کمتر دیده می‌شود؛ کارهایی در این

اندازه گیری و اندازه و سرعت سلول ها یا همان زمان رسیدن سلول ها به بالای مدل اندازه گیری می شود. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در جدول ۱ نمایش داده شده اند.

۲- فرضیات شبیه سازی

با فرض ثابت بودن دما در پایین و بالای مدل، در معادلات از فرضیه تقریب بوسینسک، استفاده و از تأثیر تغییرات چگالی بر خصوصیات سیال صرف نظر می شود. با توجه به ضخامت کم شکاف از گرادیان دمایی در ضخامت شکاف، صرف نظر و مدل، دوبعدی فرض می شود.

۳- معادلات جریان همرفت در شکاف

در یک مدل دوبعدی در دستگاه کارترین جهت عمودی Z و جهت افقی Y در نظر گرفته شود؛ معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

معادلات جریان

$$\frac{-\mu}{K} V_z = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \cos \alpha \quad (3)$$

$$\frac{-\mu}{K} V_y = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (4)$$

معادلات دما

$$\nabla^T T - j \left(V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

معادله فشار

$$\nabla^T P - j \left(V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

معادله حالت

$$\rho = \rho (1 - \beta(T - T_0) + c(P - P_0) + \dots) \quad (7)$$

که در آن K نفوذپذیری و برای شکاف $K = w^2/12$ است.

برای شبیه سازی هم می توان معادلات پیوستگی و دارسی (ساده شده معادله ناویه استوک) را جداگانه گسسته سازی و این دو معادله را ترکیب و به همراه معادلات دما و فشار حل کرد. برای ترکیب معادلات با مشتق گیری ضربدری معادله جریان نسبت به Z و Y و بکار گیری تقریب بوسینسک و معادله حالت به معادله زیر می رسم:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{K \rho g}{\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\beta(T - T_0) - c(p - p_0)) \cos \alpha \quad (8)$$

با تعریف متغیرهای وابسته و مستقل زیر:

$$Z = z/b, Y = y/b, \theta = (T - T_0)/(T_L - T_0), \theta = (P - P_0)/(P_L - P_0), \partial \psi / \partial Z = -L v_z / k,$$

$$\partial \psi / \partial Y = -L v_y / k, R_p = L p g K_c \Delta P \cos \alpha / \mu k, R_T = L p g K \beta \Delta T \cos \alpha / \mu k,$$

$$\sigma = L/b$$

k دیفیوزیویته دمایی است.

زمینه با پیسمن^[۱] (۱۹۷۶) بدون ارائه یک فرمول عملی برای شبیه سازی در مخازن شکافدار شده است [۴].

اما ریلی^[۲] (۱۹۱۶) درحقیقت یکی از مشهورترین فرمول ها را در رابطه با ناپایداری گرمایی برای آغاز پدیده همرفت بر پایه یک درجه شیب گرمایی خطی در یک لایه سیال بنا کرد [۳]. در یک محیط باز، بدون در نظر داشتن شرایط تخلخل و شکاف، تئوری همرفت بیان می دارد که این پدیده تابع پارامتری بدون بعد به نام عدد ریلی است. عدد ریلی، درحقیقت نسبت دو نیروی شناوری و تغییرات خطوط حرکتی یک توده است. عدد ریلی، یک مقدار بدون بعد دارد که اگر کمتر از این مقدار باشد، همرفت اتفاق نمی افتد. در بالاتر از مقدار بحرانی این عدد، نیروی شناوری بر نیروی ویسکوزیتی غلبه می کند و موجب تشکیل سلول های همرفتی می شود.

$$Ra = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T C_p}{\mu k} = \frac{L^3 \rho g \beta \Delta T}{\mu \alpha} \quad (1)$$

که در آن $\alpha = k / \rho C_p$ دیفیوزیویته دمایی است.

a: نفوذ گرمایی

β: ضریب انبساطی

C_p: ضریب گرمایی

ΔT: تفاوت گرمایی

g: شتاب ثقلی

K: هدایت گرمایی

L: طول

μ: گرانیوی

۱- توصیف مدل آزمایشگاهی

داده های آزمایشگاهی از کار اسلامی [۵] گرفته شده و مدل آزمایشگاهی از یک شکاف با دیواره های عمودی شیشه ای تشکیل شده است؛ دو شیشه به ابعاد ۴۸ در ۱۰۰ سانتی متر که با سیمی مسی به قطر ۱ میلی متر از هم فاصله دارند و دما با چهار ترموکوپل در بالا و پایین مدل اندازه گیری می شود. سیال آزمایش شده در چهار مرحله از آزمایش، آب و در چهار مرحله از آزمایش، نفت سفید است. ارتفاع سیال شکاف که نمایانگر ارتفاع شکاف است، در مراحل مختلف آزمایش تغییر می کند. در آزمایش هایی که از آب، به منزله سیال استفاده شده، ماده پرمنگنات، ماده رنگی آزمایش است و در آزمایش های مربوط به نفت از رنگ روغنی، به منزله بودر رنگی استفاده می شود. از یک حمام آب، برای گرم کردن پایین سیال، ایجاد گرادیان دمایی و در نتیجه همرفت استفاده می شود. ابتدا دمای پایین مدل از لوله مسی و آبی که از حمام آب می آید، شروع به بالا رفتن می کند تا به نقطه ای برسد که عدد ریلی از عدد ریلی بحرانی بیشتر و همرفت شروع شود [۵].

در این نقطه، دمای حمام آب ثابت است. سپس دماها،



$$T = T - BW \cos \frac{n\pi(x+\frac{W}{2})}{W} + Cz \quad (11)$$

ابتدا با داشتن پهنای سلول، مقدار n و سپس توزیع سرعت و شکل پروفایل جریانی محاسبه می‌شوند. معادله ۹ به شکل کلی زیر است:

$$\nabla^2 u(x,y) = g(x,y)u(x,y) = \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial y^2} + g(x,y)u(x,y) = f(x,y) \quad (12)$$

این معادله در صورت صفر بودن تابع g ، معادله پویزون و در صورت صفر بودن هر دو تابع f و g ، معادله لاپلاس نامیده می‌شود. برای بکارگیری روش تفاضل محدود، طول محور x ها دامنه را به M_x قسمت، هر یک با طول $\Delta x = (x_f - x_0)/M_x$ و طول محور y ها دامنه را به M_y قسمت، هر یک با طول $\Delta y = (y_f - y_0)/M_y$ تقسیم می‌کنیم؛ با جایگزینی مشتقات دوم با تقریب تفاضل مرکزی سه نقطه‌ای، برای هر گره داخلی (x_j, y_i) که در آن $1 \leq i \leq M_y - 1$ و $1 \leq j \leq M_x - 1$ خواهیم داشت:

$$\frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\Delta y^2} + g_{i,j}u_{i,j} = f_{i,j} \quad (13)$$

که در آن $f_{i,j} = f(x_j, y_i)$ و $u_{i,j} = u(x_j, y_i)$ معادلات بالا را برای M_x گره در جهت x و M_y گره در جهت y ، می‌توان به شکل یک دسته معادلات با $(M_x - 1)(M_y - 1)$ متغیر حل کرد، اما این روش با بزرگ تر شدن M_x و M_y مشکل ساز می‌شود. برای ساده تر شدن حل معادلات از روش تکرار استفاده می‌کنیم و معادله را به شکل زیر می‌نویسیم؛ پس برای هر گره داخلی داریم:

$$u_{i,j} = r_y(u_{i,j+1} + u_{i,j-1}) + r_x(u_{i+1,j} + u_{i-1,j}) + r_{xy}(g_{i,j}u_{i,j} - f_{i,j}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = R_r \frac{\partial e}{\partial Y} - R_p \frac{\partial P}{\partial Y} \quad (9)$$

شرایط مرزی در مختصات کارتزین به این شکل است:

$$\Psi = 0 \text{ at } Z=0 \text{ and } Z=\sigma \text{ for } 0 < Y < 1$$

$$\Psi = 0 \text{ at } Y=0 \text{ and } Y=1 \text{ for } 0 < Z < \sigma$$

طرف دوم معادله بر حسب نوع توزیع دما و شرایط مرزی که تعریف می‌شود، متفاوت خواهد بود.

معادله ۲۷ در توزیع دمایی پیشنهادی سعیدی [۴] گسسته سازی و حل شده است:

الف- وقتی گرادیان تغییرات دمایی ثابت است؛ این حالت هنگامی اتفاق می‌افتد که مثلاً مؤلفه‌های سرعت، بزرگ و ترم رسانایی قابل چشم‌پوشی باشد. در این حالت معمولاً می‌توان توزیع دمایی ثابتی در نظر گرفت [۴].

ب- وقتی گرادیان تغییر دمایی برابر $1 - y/\sigma$ باشد $\sigma = L/b$ نسبت ابعاد^۳ است؛ L ارتفاع شکاف و b عرض سلول هاست.

ج- وقتی که از ترم‌های همرفت می‌توان صرف نظر کرد. در این حالت، توزیع دمایی به شکل زیر خواهد بود [۲]:

$$\theta = \frac{16a}{\pi^2} \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \sum_{m \text{ odd}}^{\infty} \frac{\sin m\pi y + \sin n\pi z/\sigma}{nm(m^2\pi^2 + \frac{n^2\pi^2}{\sigma^2})} \quad (10)$$

طرف دوم معادله در توزیع دمایی پیشنهاد شده فیروزآبادی [۶] نیز حل شده و فرق عمده این توزیع دمایی با سایر توزیع دمایی‌ها، در این است که همیشه تعداد سلول‌ها یک عدد صحیح فرد است.

فیروزآبادی برای اینکه فشاری در همرفت شرکت ندارد، یک توزیع دمایی به شکل زیر برای شکاف پیشنهاد کرد:

۱ | نتایج آزمایشگاهی بدست آمده [۵]

| شماره آزمایش | سیال مورد استفاده | ارتفاع شکاف (سانتی‌متر) | ضخامت شکاف (سانتی‌متر) | اختلاف دمای بالا و پایین مدل (سانتی‌گراد) | پهنای سلول‌ها (سانتی‌متر) | | عدد ریلی بحرانی | سرعت (سانتی‌متر بر ثانیه) |
|--------------|-------------------|-------------------------|------------------------|---|---------------------------|--------|-----------------|---------------------------|
| | | | | | اولیه | ثانویه | | |
| ۱ | آب | ۲۸ | ۱/۲ | ۵ | ۲/۳ | ۱۰/۵ | ۸۷۸/۸ | ۰/۰۴۶۶ |
| ۲ | نفت | ۲۲/۵ | ۱/۲ | ۵/۵ | ۱/۹ | ۱۴/۳ | ۷۲۹۳ | ۰/۰۶۸۱ |
| ۳ | نفت | ۲۵ | ۱/۳ | ۵ | ۳/۴ | ۱۵/۵ | ۸۴۵۱ | ۰/۰۶۴۱ |
| ۴ | آب | ۲۸ | ۱/۲ | ۵/۵ | ۲/۲ | ۱۰ | ۹۶۶/۷ | ۰/۰۵۱۸ |
| ۵ | آب | ۳۲ | ۱/۳ | ۵ | ۲/۳ | ۱۲ | ۱۱۷۸/۷ | ۰/۰۵۹۳ |
| ۶ | آب | ۳۶ | ۱/۴ | ۴/۵ | ۲/۵ | ۱۴ | ۱۳۸۴ | ۰/۰۶۰۰ |
| ۷ | نفت | ۲۱ | ۱/۲ | ۴ | ۲ | ۱۱ | ۴۷۰۹/۷ | ۰/۰۵۳۸ |
| ۸ | نفت | ۲۶ | ۱/۳ | ۶ | ۱/۹ | ۱۶/۵ | ۱۰۰۷۰ | ۰/۰۵۷۷ |

که در آن

$$\gamma_x = \frac{\Delta x^2}{2(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \text{ and } \gamma_y = \frac{\Delta y^2}{2(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \text{ and } \gamma_{xy} = \frac{\Delta x^2 \Delta y^2}{2(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \quad (15)$$

افقی در نظر گرفته می‌شوند و معادلات جداسازی شده برای هر گره در محیط Matlab کدنویسی می‌شوند؛ ابتدا همه گره‌ها برابر میانگین گره‌های مرزی قرار می‌گیرند. سپس با روش تکرار، از معادله ۱۴ برای کسب مقادیر گره‌ها اقدام می‌شود.

از آنجا که در عرض خطوط جریان هیچ جریان دیگری نیست، تابع جریان را می‌توان در گره‌های مرزی برابر صفر قرار داد [۶].
توابع f و g بر حسب شرایط مرزی فرض شده برای دما، متغیر خواهند بود. تابع g همیشه در اینجا صفر و تابع f در حالت اول که توزیع دمایی ثابت دارد، برابر یک ثابت است. در حالت دوم، برابر 1-y/σ و در حالت سوم، برابر معادله ضرب RT در مشتق معادله ۱۰، نسبت X خواهد بود.
در توزیع دمایی فیروزآبادی، معادله توزیع دمایی به صورت معادله ۱۱ است.
برای حل معادلات، ۲۱ گره در جهت عمودی و ۲۱ گره در جهت

۴- اعتبارسنجی نتایج برای عرض و سرعت سلول‌ها

نتایج شبیه‌سازی در توزیع دمایی‌های مختلف در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲ سرعت سلول‌ها در حالات مختلف شبیه‌سازی، سرعت سلول‌های آزمایشگاهی و نیز سرعت سلول‌های بدست آمده با حل تحلیلی سعیدی [۴] را نشان می‌دهد؛ همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در حالت ۱ با توجه به بالاتر بودن ترم‌های همرفتی، سرعت و عرض سلول‌ها بیشتر است و سلول‌ها شکل توسعه یافته تری دارند. حالت ۲ نیز تقریباً شبیه حالت ۱ و گرادینان دمایی میانگین فقط در یک

جدول ۲ | سرعت محاسبه شده سلول در مدل‌های مختلف (سرعت بر حسب cm/s است)

| شماره آزمایش | عدد ریلی آزمایش | سرعت محاسبه شده بامدل فیروزآبادی | سرعت محاسبه شده در حالت ۱ | سرعت محاسبه شده در حالت ۲ | سرعت محاسبه شده در حالت ۳ | سرعت آزمایشگاهی [۵] | سرعت محاسبه شده توسط حل تحلیلی [۴] |
|--------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------------------|
| ۱ | ۲۹۵۶ | ۰/۰۴۶۶ | ۰/۰۵۲ | ۰/۰۵۲ | ۰/۰۴۸ | ۰/۰۴۶۶ | ۰/۰۴۳۹ |
| ۲ | ۷۵۳۵ | ۰/۰۶۸۱ | ۰/۰۷۲ | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۷ | ۰/۰۶۸۱ | ۰/۰۷۵۶ |
| ۳ | ۸۹۵۰ | ۰/۰۶۴۱ | ۰/۰۷۸ | ۰/۰۸۱۵ | ۰/۰۷۴ | ۰/۰۶۴۱ | ۰/۰۷۸۸ |
| ۴ | ۳۴۷۹ | ۰/۰۵۱۸ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۵۱۲ | ۰/۰۵۱۸ | ۰/۰۴۸۳ |
| ۵ | ۴۲۷۶ | ۰/۰۵۹۳ | ۰/۰۵۸ | ۰/۰۵۶۲ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۵۹۳ | ۰/۰۵۱۵ |
| ۶ | ۵۰۷۴ | ۰/۰۶۰۰ | ۰/۰۶۴ | ۰/۰۶۱۷ | ۰/۰۶ | ۰/۰۶۰۰ | ۰/۰۵۳۸ |
| ۷ | ۴۹۶۰ | ۰/۰۵۳۸ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۵۹۸ | ۰/۰۵۸ | ۰/۰۵۳۸ | ۰/۰۵۲۳ |
| ۸ | ۱۰۷۴۰ | ۰/۰۵۷۷ | ۰/۰۸۵ | ۰/۰۸۱۹ | ۰/۰۷۸ | ۰/۰۵۷۷ | ۰/۰۹۰۳ |

جدول ۳ | عرض سلول‌ها (بر حسب سانتی‌متر) در مدل‌های مختلف عرض سلول‌های اندازه گرفته شده در آزمایشگاه (سانتی متر) [۵]

| شماره آزمایش | عرض سلول‌های اندازه گرفته شده در آزمایشگاه (سانتی متر) [۵] | | عرض سلول‌های محاسبه شده توسط حل تحلیلی [۴] | | عرض سلول‌ها در حالت ۱ | | عرض سلول‌ها در حالت ۲ | | عرض سلول‌ها در حالت ۳ | |
|--------------|--|-------|--|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | ثانویه | اولیه | ثانویه | اولیه | ثانویه | اولیه | ثانویه | اولیه | ثانویه | اولیه |
| ۱ | ۱۰/۵ | ۲/۳ | ۲/۱۸ | ۱۰/۵ | ۶/۸۵ | ۴/۷ | ۲/۳ | ۱۰/۸۹ | ۱ | ۱۰/۸۹ |
| ۲ | ۱۴/۳ | ۱/۹ | ۲/۰۳ | ۱۴/۳ | ۵/۶ | ۲/۷۵ | ۱/۷۷ | ۱۴ | ۲ | ۱۴ |
| ۳ | ۱۵/۵ | ۳/۴ | ۳/۸۶ | ۱۵/۵ | ۵/۸۱ | ۳/۶۵ | ۲/۱ | ۱۴ | ۳ | ۱۴ |
| ۴ | ۱۰ | ۲/۲ | ۲/۱۸ | ۱۰ | ۶/۶۵ | ۴/۴ | ۲/۳ | ۱۰/۸۹ | ۴ | ۱۰/۸۹ |
| ۵ | ۱۲ | ۲/۳ | ۲/۴۳ | ۱۲ | ۷/۱ | ۴/۷ | ۲/۶ | ۱۰/۸۹ | ۵ | ۱۰/۸۹ |
| ۶ | ۱۴ | ۲/۵ | ۲/۶۷ | ۱۴ | ۷/۷ | ۸ | ۳/۲ | ۱۰/۸۹ | ۶ | ۱۰/۸۹ |
| ۷ | ۱۱ | ۲ | ۱/۸۹ | ۱۱ | ۵/۷ | ۳/۷ | ۱/۷۶ | ۱۰/۸۹ | ۷ | ۱۰/۸۹ |
| ۸ | ۱۶/۵ | ۱/۹ | ۲/۱۹ | ۱۶/۵ | ۵/۸ | ۴/۱ | ۲/۳۵ | ۱۰/۸۹ | ۸ | ۱۰/۸۹ |



هم جریان مانند حالت قبل خواهند بود. شکل ۴ خطوط هم جریان را در یک سلول برای حالتی که بتوان از ترم‌های همرفتی صرف نظر کرد نشان می‌دهد. در این حالت خطوط هم جریان از شکل مستطیلی، خارج و شکل مدوری می‌یابند و عرض کمتری دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سرعت، شکل و پهنای سلول‌های همرفتی در یک مدل دوبعدی برای مخازن نفتی ترکدار شبیه‌سازی شد. ابتدا یک شبکه گره 21×21 در طول و عرض نمونه در نظر گرفته شد و سپس با معادلات مربوطه، جداسازی و با نرم‌افزار Matlab حل شدند.

نتایج بدست آمده در شرایط متفاوت و وقتی هر یک از ترم‌های همرفت یا رسانایی غالب باشند، با هم مقایسه شده‌اند. این نتایج همچنین با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با میکرومدل مقایسه شده‌اند.

۱- ترم‌های همرفتی غالب، چون پراکندگی گرمایی کمتری با دیواره‌ها صورت می‌گیرد، برای رسیدن به تعادل گرمایی سیال باید مسافت بیشتری را طی کند. پس سرعت و عرض سلول‌ها بیشتر، شکل سلول‌ها توسعه یافته‌تر و شکل سلول‌های همرفتی مستطیلی است.

۲- با اهمیت یافتن ترم‌های رسانایی، شکل سلول‌ها از مستطیلی خارج می‌شود و به شکل بیضوی میل می‌کند. با کاهش یافتن مؤلفه‌های سرعت، عرض سلول‌ها نیز کاهش خواهد یافت و رسانایی، پراکندگی گرمایی بیشتری از دیواره‌ها خواهند داشت و برای پراکندگی گرمای اضافی با همرفت، به سرعت و عرض سلول‌های کمتری نیاز است.

۳- با افزایش عدد ریلی، تأثیر این عدد بر عرض‌ها بیشتر می‌شود. به‌طور کلی عرض سلول‌ها تابعی از مسافت مورد نیاز درست است که سیال باید طی کند تا در آن پراکندگی گرمایی صورت بگیرد و سیال به تعادل گرمایی برسد. هر عاملی که کم شدن تبادل گرمایی را در پی داشته باشد، سبب می‌شود سلول‌ها برای رسیدن به تعادل گرمایی مسافت بیشتری را طی کنند و عرض سلول‌ها بیشتر شود.

پیشنهادها

همرفت از موضوعاتی است که در مقایسه با بقیه مکانیزم‌های مخازن شکافدار درباره آن مطالعه کمتری شده و تحقیقات قبلی تناقض‌های زیادی با هم دارند. با توجه به اینکه کارهای تئوری همرفت، معمولاً با شرایط واقعی مخزن تفاوت فاحشی دارند، بنابراین آزمایش‌هایی که هم ضخامتی نزدیک تری به ضخامت مخزن داشته باشند و هم بررسی تأثیر شیب شکاف و ارتباط شکاف‌ها بر همرفت برای ادامه این کار پیشنهاد می‌شود. بررسی پارامترهای مؤثر بر عرض سلول‌ها که در شرایط گوناگون رابطه‌های متفاوتی دارد، نیز جای کار زیادی دارد.

عدد ثابت با حالت ۱ فرق دارد. سلول‌ها در حالت ۳ با اهمیت یافتن بیشتر ترم‌های رسانایی سرعت کمتری خواهند داشت. به نظر می‌آید، توزیع دمایی فیروزآبادی عرض و سرعت سلول‌ها را بیشتر از هر سه حالت بعدی پیش‌بینی می‌کند.

جدول ۳ عرض سلول‌ها در حالات مختلف شبیه‌سازی، عرض سلول‌های آزمایشگاهی و نیز عرض سلول‌های بدست آمده با حل تحلیلی سعیدی [۴] را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، عرض سلول‌ها در توزیع دمایی مطابق حالت اول، بیشتر عرض سلول‌ها در حالت توسعه یافته را نشان می‌دهد؛ درحالی که عرض سلول‌ها در حالت سوم بیشتر عرض اولیه سلول‌ها را نشان می‌دهد. این امر به دلیل آن است که در حالتی که رسانایی قوی‌ای در دیواره‌ها داریم، پراکندگی گرمایی بیشتری در دیواره‌ها صورت می‌گیرد، سیال برای رسیدن به تعادل گرمایی مسافت کمتری را باید طی کند و سلول‌ها عرض کمتری خواهند داشت.

در آزمایش، با توجه به پایین بودن سرعت سلول‌های همرفتی و اهمیت بیشتر ترم‌های رسانایی، سرعت‌های آزمایشگاهی بیشتر به سرعت در حالت ۳ نزدیکند. همچنین، حالت اول، بیشتر سرعت و عرض سلول‌ها را در حالت توسعه یافته و حالت سوم، بیشتر داده‌ها را در حالت شروع همرفت که شبیه حالت واقعی مخزن است، نشان می‌دهند.

۵- آنالیز حساسیت

۱-۱- تغییرات سرعت

همانطور که در جدول‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود، سرعت در هر سه مدل توزیع دمایی تقریباً به صورت خطی با عدد ریلی تغییر می‌کند.

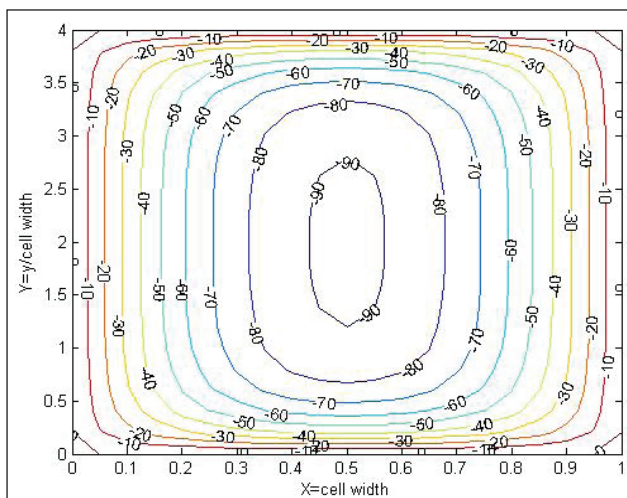
۲-۵- تغییرات عرض سلول‌ها

در مدل دمایی پیشنهادی فیروزآبادی، تعداد سلول‌ها همیشه یک عدد صحیح فرد است و عرض سلول‌ها برابر طول شکاف بر عرض سلول‌ها خواهد بود. در حالات اولیه همرفت، ضخامت سلول‌ها فقط تابع خصوصیات شکاف است؛ درحالی که در حالت توسعه یافته عدد ریلی نیز بر آن تأثیر دارد.

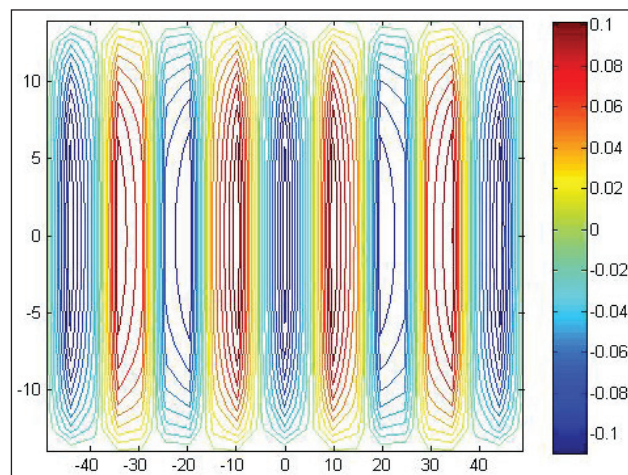
۶- توزیع دمایی‌های متفاوت و شکل خطوط جریان مرتبط با هر یک

شکل ۱ توزیع خطوط هم جریان، سرعت در طول کل سیستم و تعداد سلول‌ها را برای حالتی که توزیع دمایی مانند معادله ۱۱ است، نشان می‌دهد. شکل ۲ خطوط هم جریان را برای یک سلول، برای حالتی که بتوان توزیع دمایی را ثابت در نظر داشت، نشان می‌دهد؛ در این حالت خطوط هم جریان شکل مستطیلی دارند.

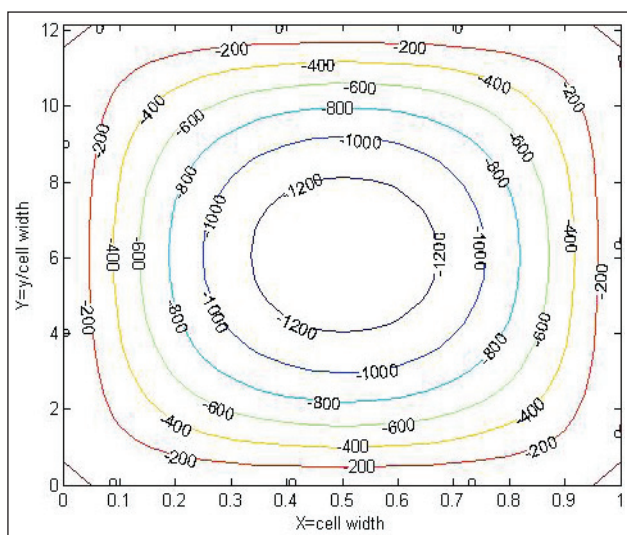
شکل ۳ خطوط هم جریان را در یک سلول برای وقتی که بتوان گرادینان دمایی به شکل $Y/\sigma - 1$ را در نظر داشت، نشان می‌دهد؛ در این حالت نیز چون متوسط تغییرات دمایی ثابت است، خطوط



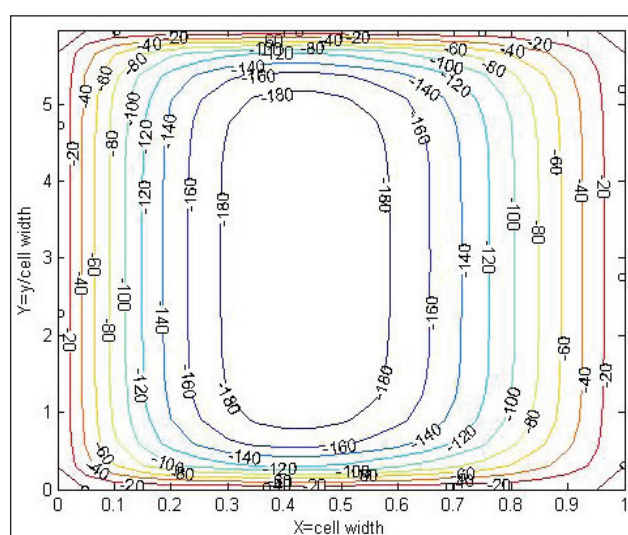
شکل ۲ | کاتوره‌های خطوط هم‌جریان برای یک سلول همرفتی در حالت اول



شکل ۱ | شماتیکی از خطوط جریانی و سلول‌های همرفتی تشکیل شده در توزیع دمای کسینوسی (آزمایش ۱)



شکل ۴ | خطوط هم‌جریان در حالت سوم (آزمایش ۱)



شکل ۳ | خطوط هم‌جریان برای یک سلول در حالت دوم (آزمایش ۱)

پانویس‌ها

- | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|
| 1. rahimhasanizadeh@gmail.com | 5. Sepehr_eslami2000@yahoo.com | 9. Dumore(1970) | 13. Aspect ratio |
| 2. sarrafiam@yahoo.com | 6. Convection cells | 10. Abgral(1973) | |
| 3. amohebbi2002@yahoo.com | 7. Benard(1900) | 11. Peaceman (1976) | |
| 4. m.schaffie@mail.uk.ac.ir | 8. Parson(1944) | 12. Rayleigh (1916) | |

منابع

- [۱] مکانیزم‌های تولید مخازن شکافدار، ولی احمد سجادیان، اولین کنگره ملی مخازن شکافدار، ۱۳۸۷
- [2] Benard, H.: "the vortex cellulars in a water liquid", review Gen. sci. pur. Appl. (1900) 11, P. 1261.
- [3] Rayleigh, Lord, "On Convection Currents in a Horizontal Layer of Fluid when the Higher Temperature is on the Underside", Phil. Mag. (1916), 32, P.529.
- [4] Reservoir Engineering of Fractured Reservoirs, ALI M. SAIDI, Total edition press, 1987
- [۵] سپهر اسلامی، «بررسی آزمایشگاهی جریان همرفت در یک میکرومدل شکافدار»، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۰
- [6] Thermodynamics of fractured reservoirs, A.Firoozabadi, McGraw-Hill, 1999