ماهنامه علمى پژوهشى



دانگاه ترمیت مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیهسازی غیرخطی ناپایداری انگشتی لزج حرارتی در محیط متخلخل ناهمسانگرد

صديقه درانى1، محمود نوروزى2*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
 * شاهرود، صندوق پستی shahroodut.ac.ir ،3619995161

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، ناپایداری انگشتی لزج حرارتی، در جابجایی مخلوط شدنی در یک محیط متخلخل با نفوذپذیری ناهمسانگرد مورد مطالعه قرار گرفته است. ویسکوزیته تابعی از دما و غلظت تعریف شده است. تأثیرات ناهمسانگردی تانسور نفوذپذیری و نیز تأثیر عدد لوئیس و ضریب تأخیر حرارتی که بهدلیل انتقال حرارت سیالات با محیط جامد بهوجود میآید مورد بررسی قرار گرفته است. رشد و شکلگیری این انگشتیها نقشی بسیار مهم در قرآیند جابجایی سیالات، به خصوص انتقال نفت از مخازن کشف شده دارد. این شبیهسازی غیرخطی، با استفاده از روش طیفی و تبدیلات هارتلی به بررسی ناپایداری انگشتی لزج حرارتی در یک محیط متخلخل با نفوذپذیری ناهمسانگرد پرداخته شده است. نتایج ارائه شده شامل کانتورهای غلظت و دما، منحنیهای مقادیر میانگین غلظت و دما، بازده جاروبی و طول اختلاط است. نتایج نشان میدهد با فازایش نفوذپذیری در جهت جریان به نفوذپذیری در جهت عمود بر جریان انگشتیها دیرتر به انتهای جبهه میرسند، ناپایداری کاهش بیدا میکند و جریان پایدارتری بهدست میآید. همچنین با افزایش عدد لوئیس جبهه حرارتی بدون انگشتی ظاهر میشود، بالا رفتن عدد لوئیس به پایداری جریان نیز کمک میکند. کاهش ضریب تأخیر حرارتی علاوه بر اینکه باعث عقبافتادگی جبهه حرارتی در پشت جبهه سیالاتی می گردد، باعث بایدارتر شدن جریان نیز می شود.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 27 آبان 1396 پذیرش: 88 بهمن 1396 ارائه در سایت: 20 اسفند 1396 <i>کلید واژگان:</i> انگشتی لزج حرارتی ضریب تأخیر حرارتی

Nonlinear simulation of thermo-viscous fingering instability in anisotropic

porous media

Sedighe Dorrani¹, Mahmood Norouzi²

Mechanical Engineering Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran * P.O.B. 3619995161, Shahrood, Iran, mnorouzi@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 18 November 2017 Accepted 28 January 2018 Available Online 21 February 2018

Keywords: Thermao-viscous fingering Nonlinear simulation Thermal lag coefficient

ABSTRACT

In this paper, thermal-viscous fingering instability of miscible flow displacements in anisotropic porous media is studied .for the first time An exponential dependence of viscosity on temperature and concentration is represented by two parameters β_T and β_C , respectively. The effect of anisotropic properties of permeability tensor, Lewis number and thermal lag coefficient are investigated. Creation and propagation of these fingers are playing an important role in displacement of fluids and especially on oil transformation from discovered oil reservoirs in enhanced oil recovery process. In nonlinear simulation, a spectral method based on the Hartley transforms are used to model the thermal-viscous fingering instability in anisotropic porous media. The results include concentration and temperature contours, sweep efficiency, and mixing length. The results indicated that by increasing the anisotropic permeability ratio, the fingers arrive later to the end of the front, instability decrease and more stable flow is obtained. Also, by increasing the Lewis number, thermal front stays behind the flow front and increasing the stability of the flow field.

ناپایداری زمانی اتفاق میافتد که سیالی با ویسکوزیته بیشتر توسط سیالی با ویسکوزیته کمتر جابهجا میشود که نتیجه آن ایجاد ساختاری شبیه به انگشت در سیال با ویسکوزیته کمتر است. یعنی مرز مشترک دو سیال بهعلت اختلاف ویسکوزیته ثابت نبوده و ساختاری انگشت مانند به خود می گیرد. ناپایداری انگشتی، از آنجا که دارای مصداقهای متعددی در صنایع است از دهه 50 میلادی بهعنوان یک موضوع اساسی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. مصداقهای متعدد این پدیده در مهندسی مخازن 1- مقدمه

بررسی جریان در محیط متخلخل از جمله مسائل مورد توجه در مکانیک سیالات محسوب می شود. مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است از آن جمله می توان به مطالعات صورت گرفته توسط زارع قادی و همکاران [1] و اژدری و همکاران [2] اشاره نمود. یکی از شناخته ترین ناپایداری های هیدرودینامیک در محیط متخلخل، ناپایداری انگشتی لزج^۱ است. این

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Dorrani, M. Norouzi, Nonlinear simulation of thermo-viscous fingering instability in anisotropic porous media, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 9/18, 2018 (m* UP Persian)

¹ Thermo viscous fingering instability

نفتی، هیدرولوژی آبهای زیرزمینی، چاههای ژئوترمال، احتراق، رسوبگیری الکتروشیمیایی، سیلابزنی امتزاجی به هنگام بازیافت نفت، منطقه گذرا بین آب شور و آب تازه در سفرههای آب زیرزمینی و غیره است. در بیشتر کاربردها، ناپایداری لزج پدیده نامطلوبی است زیرا باعث کاهش بازده فرایند جابهجایی میگردد. از جمله آنکه به طور قابل توجهی باعث کاهش بازیافت نفت می شود [4,3].

از مدلسازی اولیه توسط هیل [5] تا مطالعه شکری و همکاران [6] بررسی عوامل مختلف در این پدیده مدنظر بوده است. این پدیده شگفتانگیز توجه بسیاری از دانشمندان دیگر را نیز به خود جلب کرده است که میتوان به کارهای زیر اشاره نمود.

عزایز و سنیق [7]، تحلیل پایداری را با استفاده از تقریب شبه خطی برای سیال باریک شونده مورد مطالعه قرار دادند و شرایط بحرانی آن را معرفی نمودند. میشرا و همکاران [8] برای اولین بار با در نظر گرفتن مقدار منفی برای نسبت تحرک^۱ به بررسی رفتار انگشتی در این حالت پرداختند. اوندانو و همکاران [9] با استفاده با در نظر گرفتن گرانش، جریانی از نفت که توسط سیال نیوتنی، غیرنیوتنی باریک شونده و ویسکوالاستیک جابهجا میشد را مورد بررسی قرار دادند. نوروزی و شوقی [11,10] اثر ناهمسانگردی محیط بر ناپایداری انگشتی لزج در محیط ناهمسانگرد را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آنها نشان داده شد هم در جریان نیوتنی و هم در جابه جایی سیال نیوتنی توسط سیال غیرنیوتنی با افزایش نفوذپذیری در جهت جریان به جهت عمود بر آن جریان پایدارتر خواهد شد. بلوتسر کاسکایا و كانيخو [12] به شبيهسازى سهبعدى ناپايدارى انگشتى لزج بهوسيله روش حجم محدود پرداختهاند. شوقی و نوروزی [13] ناپایداری انگشتی را در یک محیط ناهمگن مورد بررسی قرار دادند. کیهانی و همکاران [14] جابهجایی سيال نيوتني توسط سيال ويسكوالاستيک كريمينال⊣ريكسن-فيلبي را موردا شبیه سازی قرار دادهاند. شکری و همکاران [15] ناپایداری انگشتی سیال ويسكوالاستيك اولدرويد-بي را شبيهسازي نمودند.

در مطالعاتی که تاکنون اشاره شد دو سیال شرکت کننده در فرایند جابهجایی، همدما در نظر گرفته شده است. بنابراین ویسکوزیته جریان تنها تابع غلظت میباشد. هنگامی که سیالات درگیر در یک فرایند جابهجایی همدما نباشند، اختلاف دمای بین سیالات باعث تغییر ویسکوزیته آنها میشود. درنتیجه ویسکوزیته علاوه بر غلظت تابع دما نیز میباشد و ناپایداری انگشتی ایجاد شده بهعنوان ناپایداری انگشتی لزج حرارتی شناخته میشود و از آنجا که نرخ نفوذ جرم و حرارت متفاوت است دو جبهه وجود خواهد داشت: جبهه غلظت و جبهه حرارت. از آنجایی که تبادل حرارت بین محیط جامد و سیال اتفاق میافتد در نتیجه جبهه حرارت آهستهتر از جبهه غلظت حرکت مینماید و غالباً در پشت جبهه غلظت و با تاخیر گسترش مییابد.

ناپایداری انگشتی حرارتی لزج توجه محققین را در فرایندهایی نظیر سیلابزنی آب داغ^۲ و سیلابزنی بخار^۳ به خود جلب نموده است. حجم مطالعات در این زمینه نسبت به حالت همدما بسیار اندک است. اولین بررسیها در این زمینه توسط کانگ و همکاران [16] صورت گرفته است. آنها جابجایی نفتهای سنگین طبیعی و مصنوعی را تحت شرایط مختلف توسط بخارآب بررسی نمودند. سلول هل شاو⁴ استفاده شده برای جابجایی بخار آب از شیشههای پیرکس ساخته شده بود. آنها نتایج را برای دو حالت

جابجایی در سلول هل شاو افقی و جابجایی در یک سطح مقطع عمودی ارائه نمودند. همچنین در این مطالعه گزارش شده است که بهدلیل تلفات حرارتی و در تماس بودن با نفت سرد اولیه، بخار بهسرعت متراکم می شود. صغیر و همکاران [17] به بررسی ناپایداری انگشتی در حالتی که سیالات بهکار رفته با یکدیگر اختلاف دما داشتند پرداختند. آنها از گلیسرین و آب در این آزمایش استفاده نمودند و مشاهده شد زمانی که آب داغ به سیستم تزریق می شود فاصله نوک تا پایه انگشتی ها کمتر از حالتی است که آب سرد به سیستم تزریق می شود. در این حالت نیروی شناوری از پیشرفت سریع انگشتیها جلوگیری مینماید. هولوای و برایان [18] به بررسی انگشتیها زمانی که گلیسرین داغ یک گلیسرین سرد با ویسکوزیته بیشتر را جابهجا مینماید پرداختهاند. هندسه موردنظر آنها یک سلول هل شاو شعاعی بود. آنها نتایج عددی و آزمایشگاهی را با یکدیگر مقایسه نمودند. در هیچکدام از مطالعات اشاره شده تاکنون به بررسی ساختار و مکانیزم انگشتیها در هر دو جبهه دما و غلظت پرداخته نشده است. نخستین مطالعه در این زمینه توسط پریتچارد و همکاران [19] انجام شد. در این مطالعه یک تحلیل پایداری خطی⁶ در سلول هل شاو شعاعی ارائه شد و به کمک آن به بررسی ناپایداری انگشتی لزج برای یک سیستم با دو جبهه پرداختند. نتایج آنها نشان میدهد که هریک از دو جبهه چگونه در جهت پایداری و یا ناپایداری جریان عمل مىنمايند.

اسلام و عزایز [20] به تجزیه و تحلیل پایداری خطی برای ناپایداری انگشتی لزج حرارتی در یک سلول هل شاو مستقیم الخط پرداختند. آنها همچنین این مسئله را مورد شبیه سازی غیر خطی قرار دادند [21]. نتایج آنها تایید کننده ی نتایج حاصل از پایداری خطی است. آنها گزارش نمودند که با انتقال حرارت بین سیال و محیط جامد بین جبهه حرارتی و جبهه جرمی تأخیر میافتد و جبهه حرارتی پشت جبهه جرمی قرار می گیرد. همچنین نتایج را برای عدد لوئیسهای 1 و 100 موردبررسی قرار داده و مشاهده نمودند که در مقادیر بزرگ از عدد لوئیس حوزه دما با یک موج ضعیف منتشر می شود. سجادی و عزایز [22] ناپایداری لزج حرارتی را در یک محیط ناهمگن موردمطالعه قرار داده و گزارش نمودند که ناهمگنی محیط به ناپایداری جریان کمک می کند.

براساس بررسیهای انجام شده تاکنون مطالعهای در زمینه انپایداری انگشتی لزج حرارتی در محیط ناهمسانگرد صورت نگرفته است. با توجه به نقش گسترده ناهمسانگردی بر روی ناپایداری انگشتی، بررسی تاثیر آن روی ناپایداری انگشتی حرارتی با دو جبهه غلظت و دما میتواند موضوعی کاربردی باشد. محیطهای طبیعی و صنعتی به ندرت همسانگرد میباشند. ازطرفی سیال بهطور طبیعی تمایل به پیشروی در مسیرهایی با نفوذپذیری بالاتر خواهد داشت. بررسی نقش ناهمسانگردی تانسور نفوذپذیری محیطهای متخلخل در فرایندهایی نظیر کروماتوگرافی، فیلتراسیون و ازدیاد برداشت نفت کاربردی است. بهعنوان نمونه شناسایی دقیق تر مناطق مورد مطالعه بهتر و باصرفهتر در جهت ازدیاد بیشتر از مخازن نفت داشته باشند.

در این مطالعه برای نخستین بار به بررسی نقش ناهمسانگردی نفوذپذیری بر رشد و گسترش ناپایداری انگشتی لزج حرارتی در محیط متخلخل پرداخته شده است. برای این منظور از روش طیفی و تبدیلات هارتلی جهت شبیهسازی عددی استفاده شده است. همچنین مطالعه حاضر براساس جابهجاییهای مخلوط شدنی که در آن ناپایداری براساس اختلاف ویسکوزیته

¹ Mobility ratio

² Hot water flooding ³ Steam flooding

⁴ Hele-shaw cell

⁵ Linear stability analysis

و اختلاف دما به وجود می آیند انجام گرفته است. شایان ذکر است که در جریانهای مخلوطشدنی برخلاف جریانهای مخلوطنشدنی، سطح مشترک کاملاً مشخصی بین دو سیال وجود ندارد. در این جا با ارائه کانتورهای غلظت و دما، منحنیهای مقادیر میانگین غلظت و دما و همچنین بازده جاروبی و طول اختلاط، اثر ناهمسانگردی محیط متخلخل و ضریب تاخیر حرارتی بر ناپایداری انگشتی لزج حرارتی مطالعه شده است.

2- محيط متخلخل ناهمسانگرد

برای بررسی جریان سیال در محیط متخلخل از معادله دارسی استفاده می شود که برای محیط متخلخلی بانفوذپذیری ناهمسانگرد رابطه بین گرادیان فشار و سرعت را به صورت معادله (1) بیان می کند:

$$\begin{cases} q_x \\ q_y \end{cases} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{cases}$$
(1)

در این رابطه k_{ij} اجزاء تانسور نفوذپذیری pدبی، μ ویسکوزیته سیال و p فشار استاتیک است. با توجه به قانون تقابل، تانسور نفوذپذیری متقارن بوده و رابطهی (2) در آن برقرار است $K_{ii} = K_{ii}$ (2)

در مسائلی از قبیل انتقال حرارت هدایتی، نفوذپذیری و پراکندگی مغناطیسی و مدولهای مکانیکی که به بررسی ناهمسانگردی در یک پدیده می پردازند، از دو دستگاه مختصات اصلی¹ و فرعی^۲ استفاده میکنند. در مطالعه حاضر به بررسی رفتار ناهمسانگرد نفوذپذیری بر ناپایداری انگشتی لزج حرارتی پرداخته شده است. جهتهای سیستم مختصات اصلی، جهتهایی هستند که در آنها مقادیر نفوذپذیری با استفاده از روشهای آزمایشگاهی به دست میآیند. بنابراین ترمهای غیرقطری این خواص در سیستم مختصاتی اصلی صفر است. قانون دارسی در این سیستم مختصاتی اصلی به صورت معادله (3) بیان می شود:

$$\begin{cases} q_x \\ q_y \end{cases}_{\text{on}} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \overline{K}_{11} & 0 \\ 0 & \overline{K}_{22} \end{bmatrix}_{\text{on}} \begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ 2 \end{cases}$$
(3)

3- معادلات حاكم

یک جابهجایی مخلوط شدنی غیر هم دما را در یک محیط متخلخل همگن در نظر بگیرید در این جریان سیالی با خواص $_{2}, \mu_{2}, T_{2}\rho$ توسط سیال دیگری با خواص $_{1}, \mu_{1}, T_{1}\rho$ توسط سیال دیگری با خواص $_{1}, \mu_{1}, T_{1}\rho$ است جابهجا می شود. برای این جریان معادلات به شکل معادلات (7-4) ارائه می شوند:

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{4}$$

$$7P = -\frac{\mu}{\nu}u\tag{5}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{\phi} (V \cdot \nabla)C = D_C \nabla^2 C \tag{6}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\pi}{\Phi} (V \cdot \nabla) T = D_T \nabla^2 T \tag{7}$$

که معادله (4) معادله پیوستگی، معادله (5) معادله دارسی که برای جریان در محیط متخلخل به کار می رود و رابطه بین سرعت و گرادیان فشار را نشان می دهد. معادله (6) معادله کانوکشن- دیفیوژن برای غلظت و معادله (7) معادله انرژی است. در معادلات فوق، u سرعت دارسی، D_T پراکندگی جرمی، D_c پراکندگی حرارتی، Φ تخلخل محیط و K تانسور نفوذپذیری

است. در معادله (7) پارامتر λ که نشاندهنده سرعت جبهه گرمایی به سرعت جبهه جرمی است، ضریب تأخیر حرارتی^۳ نامیده میشود و به شکل معادله (8) تعریف میشود.

$$\lambda = \frac{\Phi \rho_f C_{P_f}}{\Phi \rho_f C_{P_f} + (1 - \Phi) \rho_s C_{P_s}}$$
(8)

همان طور که گفته شد به دلیل اتلاف حرارتی به محیط، جبهه گرمایی پشت جبهه جرمی قرار می گیرد و از این رو $1 \ge \lambda$ است. در معادله (8) پشت جبهه جرمی قرار می گیرد و از این رو $1 \ge \lambda$ است. در معادله (8) ج C_{P_f} ، ρ_f ، ρ_f به ترتیب نشان دهنده چگالی و ظرفیت گرمایی سیال و چگالی و ظرفیت گرمایی قالب جامد هستند. در جابجایی های مخلوط شدنی غیر هم دما، ویسکوزیته تابعی از غلظت و دما است و به صورت معادله (9) بیان می شود

$$\mu(C \cdot \theta) = \exp(\beta_{\rm C}(1-C) + \beta_{\rm T}(1-\theta)) \tag{9}$$

که به $\mu_{1}(\mu_{2}/\mu_{1}) + \mu_{2}$ کفته میشود، $\mu_{1}(\mu_{2}/\mu_{1}) + \mu_{2}(\mu_{2}/\mu_{1})$ و به ترتیب ویسکوزیته سیال جابجا شونده و جابجا کننده هستند و به $\mu_{T_{1}} = \mu_{T_{2}} + \mu_{T_{1}}$ نسبت تحرک حرارتی گفته میشود. $\mu_{T_{2}}(\mu_{T_{1}})$ ویسکوزیته یک فاز از سیال در دو دمای متفاوت هستند.

1-3- بىبعدسازى

جهت بیبعدسازی معادلات از روابط (10-15) استفاده میشود.

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{\frac{D_C \Phi}{u}} & (10) \\ t^* &= \frac{t}{\frac{D_C \Phi^2}{u^2}} & (11) \\ k^* &= \frac{K}{\overline{K}_{22}} & (12) \\ \theta^* &= \frac{T - T_2}{T_1 - T_2} & (13) \\ \mu^* &= \frac{\mu}{\mu_1} & (14) \\ C^* &= \frac{C}{C_1} & (15) \\ (20 - 16) &= x + 2 - x + 1 \\ c_1(x) = x + 1 \\$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \tag{16}$$

$$\nabla P^* = -K^{-1} \mu^* u^*$$
(17)
$$\frac{K}{K} = \begin{bmatrix} \alpha_K & 0 \end{bmatrix}$$
(18)

$$\frac{\bar{K}_{22}}{\partial c^*} = \frac{1}{2} \left[0 - 1 \right]$$

$$\frac{\partial c^*}{\partial c^*} + u^* \frac{\partial c^*}{\partial c^*} + v^* \frac{\partial c^*}{\partial c^*} = \left(\frac{\partial^2 c^*}{\partial c^*} + \frac{\partial^2 c^*}{\partial c^*} \right)$$
(19)

$$\frac{\partial t^*}{\partial t^*} - \frac{\partial x^*}{\partial x^*} - \frac{\partial y^*}{\partial y^*} = \log \left(\frac{\partial y^{*+2}}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial y^{*2}} \right)$$
(20)

و $\alpha_{\rm K} = \overline{K}_{11}/\overline{K}_{22}$ نسبت ناهمسانگردی طولی به عرضی تانسور نفوذپذیری است.

2-3- تبديل معادلات به صورت تابع جريان – ورتيسيتي

با بررسی مطالعات و تحقیقاتی که به حل جریان در پدیدههای مختلف روی

³ Thermal-lag coefficient

داده در مکانیک سیالات میپردازند، متوجه می شوید که فقط بخش کوچکی از این مطالعات، معادلات حاکم بر جریان را به صورت مستقیم مورد بحث و بررسی قرار داده اند. در واقع بخش قابل توجهی از آن ها با تبدیل معادلات به فرم تابع جریان – ورتیسیتی و حذف محاسبات مربوط به فشار در معادلات حاکم، با روشی بسیار کوتاه تر و آسان تر به بررسی و تحلیل مسأله می پردازند. به همین دلیل در مطالعه ی حاضر نیز ابتدا معادلات را به فرم تابع جریان – ورتیسیتی تبدیل می شوند و سپس با استفاده از همین معادلات به شبیه سازی ناپایداری انگشتی پرداخته می شود. روابط اولیه بین این تبدیلات به صورت روابط (21-23) است.

$$\iota = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad ; \quad v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \tag{21}$$

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \tag{22}$$

$$\nabla^2 \Psi = -\omega \tag{23}$$

با استفاده از این روابط به تبدیل معادلات حاکم پرداخته می شود. معادلهی پیوستگی به صورت معادله (24) همیشه برقرار و از فهرست معادلات حاکم خارج می شود.

$$\nabla \cdot u = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} = 0$$
(24)

با کرل گرفتن از معادلهی مومنتوم یعنی معادله (5) جمله فشار نیز از معادلات حذف می شود و منجر به رابطه بین گرادیان غلظت و دما و ورتیسیتی به صورت معادله (25) می شود

$$\omega = \frac{1}{\alpha_{\rm K}} \left(-\alpha_{\rm K} \left(\beta_{\rm C} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial x} + \beta_{\rm T} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \left(\beta_{\rm C} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial c}{\partial y} + \beta_{\rm T} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$$
(25)

معادله کانوکشن- دیفیوژن و معادله انرژی نیز بهصورت روابط (27,26) نوشته می شوند.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial y}\frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x}\frac{\partial c}{\partial y} = \nabla^2 c$$
(26)

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + \lambda \left(\frac{\partial\Psi}{\partial y}\frac{\partial\theta}{\partial x} - \frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial\theta}{\partial y}\right) = Le\nabla^2\theta \tag{27}$$

4- روش حل عددی

تبدیلات فوریه یکی از پرکاردبرترین ابزارهای ریاضی در علوم مهندسی میباشند که بهطور گسترده در حل معادلات مشتق جزئی مورد استفاده قرار میگیرند. تا قبل از سال 1991 تمام مطالعاتی که با استفاده از روش طیفی به بررسی ناپایداری انگشتی میپرداختند، از تبدیلات فوریه در حل معادلات مشتق جزیی استفاده میکردند. در این سال زیمرمن و هومسی [23] با معرفی تبدیلات هارتلی به بررسی ناپایداری انگشتی در محیط متخلخلی با پراکندگی ناهمسانگرد پرداختند. این تبدیل اگرچه شباهتهای بسیاری با تبدیل فوریه دارد ولی تفاوتهایی نیز با آن دارد که آن را به مراتب سریعتر از تبدیل فوریه میکند.

روش طیفی بهطور گستردهای در پدیدههای مورد بررسی در مکانیک سیالات و سایر علوم بهکار گرفته میشود. با استفاده از تبدیلات هارتلی، معادلات مشتق جزئی به معادلات دیفرانسیلی تبدیل میشوند. با بهکارگیری تبدیلات هارتلی حجم محاسباتی مسئله کاهش مییابد. تبدیل گسستهساز دوبعدی هارتلی بهصورت رابطه (28) بیان میشود. $G(k_x \cdot k_y) =$

$$f(k_{\chi} \cdot k_{y}) = \frac{1}{\sqrt{N_{\chi}N_{y}}} \sum_{x} \sum_{y} g(x \cdot y) cas\left(\frac{2\pi x k_{\chi}}{N_{\chi}} + \frac{2\pi x k_{y}}{N_{y}}\right)$$
(28)

در این رابطه N_x و N_y تعداد گرههای به کار رفته در مشربندی محیط محاسباتی و k_x و k_y به ترتیب عدد موجهای در جهت x و y می، اشد. cas نیز به صورت مجموع کسینوس و سینوس تعریف می شود. مثلا برای شناسه xبه صورت معادله (29) تعریف می شود.

cas(x) = sin(x) + cos(x)(29) cos(x) = cos(x) + cos(

$$c(x \cdot y \cdot t) = \overline{c}(x \cdot t) + c'(x \cdot y \cdot t)$$
(30)

$$\theta(x \cdot y \cdot t) = \overline{\theta}(x \cdot t) + \theta'(x \cdot y \cdot t)$$
(31)

در این معادلات $\left[\left(1 - \operatorname{erf}(x/\sqrt{4\,t})\right] = \frac{1}{2}\right] = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}(x/\sqrt{4\,t})\right]$ و 'c (x · t) $= \frac{1}{2}\left[1 - \operatorname{erf}(x/\sqrt{4\,Le\,t})\right]$ دما هستند. بنابراین در روند شبیه سازی به جای استفاده از غلظت و دمای کل، فقط جمله اغتشاشی را محاسبه کرده و برای به دست آوردن غلظت و دمای دمای اصلی در مسأله از معادلات (31,30) استفاده می شود. این جملات اغتشاشی در دو مرز موجود در جهت جریان صفر بوده، بنابراین شرط مرزی متناوب برای این جهت بدون تحمیل محاسبات اضافی فراهم می شود. شرط اوری می اولیه غلظت و دما به صورت معادلات (33,32) بیان می شوند.

$$c(x \cdot y \cdot t = t_{o}) = \overline{c}(x \cdot t_{o}) + \delta \cdot rand(y)$$

$$(32)$$

 $\theta(\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{t}_{0}) = \bar{\theta}(\mathbf{x} \cdot \mathbf{t}_{0}) + \delta \cdot \operatorname{rand}(\mathbf{y})$ (33) $\mathbf{t}_{0} = \mathbf{t}_{0} \cdot \mathbf{t}_{0}$ $\mathbf{t}_{0} = \mathbf{t}_{0} \cdot \mathbf{t}_{0}$

میکند و معمولا از مرتبه ^{2–}10 انتخاب میشود. rand مجموعهای از اعداد تصادفی است که بین 1 و 1- انتخاب میشوند و *σ* پارامتری است که شدت نفوذ پراکندگیها را از مرز جلویی نشان میدهد.

5- نتایج شبیهسازی

در تمام شبیه سازی های غیرخطی انجام گرفته برای ناپایداری انگشتی، با اعمال اغتشاشاتی کوچک، که به صورت تصادفی انتخاب می شوند، تحریک اولیه یلازم برای شروع ناپایداری را ایجاد می کنند. همان طور که در قسمت های پیشین نیز ذکر شد، شدت این اغتشاش توسط δ اعمال می گردد که در شبیه سازی انجام شده در این مطالعه مقدار آن برابر 0.01 در نظر گرفته شده است. این اغتشاشات به سرعت با گذشت زمان رشد کرده و کل دامنه محیط متخلخل را در بر می گیرند.

در این بخش نتایج بهدستآمده از شبیه سازی غیرخطی بررسی تأثیر ناهمسانگردی تانسور نفوذپذیری روی ناپایداری انگشتی لزج حرارتی مورد بررسی قرار می گیرد. موارد موردمطالعه شامل کانتورهای غلظت، منحنی میانگین غلظت عرضی، طول اختلاط، بازده جاروبی، بررسی تأثیرات عدد لوئیس و ضریب تأخیر حرارتی روی این ناپایداری خواهد بود. در تمام شبیه سازی ها Par = 2، $\beta_c = 3$ ، Pec = 2600 مد مگر خلاف آن ذکر شود.

1-5- اعتبار سنجى

در این قسمت مقایسه نتایج بهدست آمده از تحلیل پایداری خطی معادلات حاکم بر مسأله در محیط متخلخلی با خواص همسانگرد با نتایج تحلیل خطی اسلام عزایز [15] پرداخته شده است.

در "شكل 1" نرخ اغتشاشات برحسب عدد موج رسم شده است.تمام

 $\beta c=1, Le=1, \lambda=1, t0=10$



Fig. 1 Comparison of the Results of Islam and Azaiez and present study شكل 1 مقايسه نتايج اسلام و عزايز و مطالعه حاضر

 $\alpha_{\rm K}$ =1.8

نتایج بهدست آمده در این دو نمودار همخوانی بسیار خوبی با مطالعات انجام شده توسط اسلام و عزایز [19] دارند. منحنیها نتایج بهدست آمده از مطالعه حاضر و دایرهها و مربعها نتایج بهدست آمده توسط این دو محقق را به ترتیب برای $\beta_T = 2$ و $\beta_T = 1$ نشان میدهد همان طور که مشاهده می کنید نتایج تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند.

2-5- كانتورهاى غلظت

در ابتدا به بررسی نقش ناهمسانگردی تانسور نفوذپذیری در رشد ناپایداریها پرداخته شده است. بدین منظور نتایج به دست آمده از شبیه سازی غیر خطی را برای دو مقدار از $_{\rm X}$ در "شکل 2" نشان داده شده است. می بینید که در حالتی که 1 = $_{\rm X}$ ، انگشتی ها سریعتر رشد می کنند و به انتهای جبهه می رسند. در صورتی که وقتی 1.8 = $_{\rm X}$ انگشتی ها با سرعت کمتری رشد می کنند. و دیرتر به انتهای جبهه می رسند. تأخیر ایجاد شده در رسیدن سیال جابجا کننده به انتهای مسیر منجر به ورود حجم بیشتر سیال به محیط



 $\alpha_{\rm K}$ =1

Fig. 2 Concentration iso-contours in time time for Le=1 and λ =1

 $\lambda=1$ و Le=1 و Le=1 و $\lambda=1$ و $\lambda=1$

و در نتیجه خروج بیشتر سیال جابجا شونده از محیط می شود. این فرایند به خوبی در نتایج به دست آمده قابل مشاهده است

همچنین اثر پوششی به خوبی در حالتی که $I = x_{\rm A}$ قابل مشاهده است در مکانیزم اثر پوششی نوک یک انگشتی درون انگشتی در حال رشد کناری نفوذ می کند. انگشتی پوشش داده شده رشد کرده و گرادیان غلظت بین انگشتی و سیال ویسکوز اطراف آن بیشتر میشود. در نتیجه این فرایند انگشتی بزرگتر و پهنتری بهدست میآید. "شکل 3" کانتورهای غلظت و دما را برای I=4 و I=4 نشان میدهد. وقتی I=4 هیچ انتقال حرارتی بین سیالات و محیط جامد وجود ندارد و برای I=4 هیچ انتقال حرارتی بین میالات و محیط جامد وجود ندارد و برای I=4 هیچ انتقال حرارتی بین مانند یکدیگر هستند. در تصاویر بهدست آمده از شبیه سازی غیرخطی در "شکل 3" مشاهده میشود که انگشتیها فرم افقی خود را از دست میدهند و پهنتر میشوند. این پهنشدگی به علت حرکتهای بسیار کوچک عمود بر جهت جریان ناشی میشود. این فرایند با نام فرایند انتشار در مطالعات مربوط

به ناپایداری انگشتی معرفی میشود.

"شکل 4" کانتورهای غلظت و دما را برای Le=1 و $\lambda=0.5$ نشان میدهد. در $1>\lambda$ به دلیل انتقال حرارت بین سیال و فاز جامد، سرعت جبهه حرارتی کاهش پیدا کرده و عقبتر از جبهه جرمی قرار می گیرد. همچنین با کاهش λ ناپایداری کاهش پیدا می کند. که با نتایج اسلام و عزایز [15] مطابقت دارد.

کانتورهای غلظت و دما برای Le=100 و ضریب تأخیر حرارتی 0.75 در "شکل 5" نشان داده شده است همانطور که مشاهده می کنید انگشتیها فقط در حوزه دما قابل مشاهده هستند و در جبهه حرارت هیچ انگشتی دیده نمی شود و حوزه دما تنها با یک موج ضعیف منتشر می شود. در کانتورهای غلظت "شکل 5" مکانیزمهای بهم پیوستگی و محو شدگی را مشاهده می کنید. این دو مکانیزم اولین بار توسط زیمرمن و هومسی [20] در شبیه سازی انجام گرفته شده در محیط متخلخل ناهمسانگرد معرفی شدند. این دو در شبیه سازیهای بعدی خود در شرایط همسانگرد نیز توانستند این



Fig. 3 (a) Concentration and (b) temperature iso-contours in time for Le=1 and λ =1

 $\lambda = 1$ و Le=1 و Le=1 و Le=1 و Le=1 و Le=1 و Le=1



Fig. 4 (a) Concentration and (b) temperature iso-contours in time for Le=1 and λ =0.5

 $\lambda=0.5$ و Le=1 و $\lambda=0.5$ و (b) دما برحسب زمان برای Le=1 و

مکانیزمها را مشاهده کنند. در مکانیزم بهم پیوستگی نوک یک انگشتی درون بدنه ی انگشتی همسایه ترکیب می شود. در نتیجه این ترکیب انگشتی بزرگتر و با ضخامت بیشتر به وجود می آید. همچنین با شکل گیری این مکانیزم جابجایی سیال ویسکوزتر توسط سیال دیگر با سرعت بیشتری انجام می گیرد. در مکانیزم محو شدگی یک انگشتی درون انگشتی کناری خود نفوذ کرده و با آن درون سیال ویسکوزتر نفوذ می کند.

3-5- مقادیر میانگین

یکی از متداول ترین مطالعات آزمایشگاهی و عددی در بررسی ناپایداری انگشتی بررسی منحنیهای بهدست آمده از مقادیر میانگین غلظت عرضی است. زیرمن و هومسی [20] در بررسی ناپایداری انگشتی در محیط متخلخلی که پراکندگی ناهمسانگرد داشت، منحنیهای میانگین عرضی و طولی غلظت را رسم کردند. در مطالعه حاضر منحنیهای میانگین غلظت و دما موردبررسی قرار گرفته است.

مقادیر میانگین غلظت و دما در "شکل 6" نشان داده شده است. از آن جا که 1=k این دو منحنی بر هم منطبق هستند که این نتیجه در کانتورهای غلظت هم نشان داده شد. "شکل 7" منحنیهای میانگین غلظت و دما را برای -5.6 نشان میدهد. همان طور که قبلاً که در کانتورهای غلظت و دما دیده شد برای 1>k به دلیل انتقال حرارت با محیط در جبهه حرارت تأخیر میافتد که این تأخیر در "شکل 7" قابل مشاهده است.

4-5- طول اختلاط

میزان پیشرفت سیال با ویسکوزیته کمتر درون سیال با ویسکوزیته بیشتر را طول اختلاط مینامند از این کمیت در ناپایداری انگشتی برای بیان به دست آوردن طول اختلاط^۱ یک ایده بسیار خوب به محققین برای پیدا کردن نقطه حملهی انگشتیها ارائه میدهد و در حقیقت بیشترین طول اختلاط بهدست آمده نشاندهنده بزرگترین طول انگشتی در ناحیه متخلخل موردنظر

¹ Mixing length



Fig. 5 (a) Concentration and (b) temperature iso-contours in time for Le=100 and λ =0.75

 λ =0.75 و Le=100 فشکل 5 کانتورهای (a) غلظت و (b) دما برحسب زمان برای Le=100 و

است. برای یک جابجایی پایدار این طول متناسب با $t^{1/2}$ میباشد. در جابجاییهای ناپایدار نیز در زمانهای اولیه شروع جریان که هنوز اغتششات کمتوان هستند، این طول متناسب با $t^{1/2}$ میباشد ولی با گذشت زمان و رشد انگشتیها، طول اختلاط تابعی پیچیده برحسب زمان میشود.

تغییرات طول اختلاط برحسب مقادیر مختلف α_K در "شکل 8" نشان داده شده است. همانگونه که در کانتورهای غلظت مشاهده شد ناهمسانگردی تانسور نفوذپذیری جریان را پایدارتر میکند. در نتیجه آن طول اختلاط



Fig. 6 Transversely averaged concentration and temperature profiles counturs for Le=1 and λ =1

 $\lambda = 1$ و Le=1 اسکل b منحنی میانگین غلظت عرضی و دما برای Le=1 و $\lambda = 1$

کوچکتری بهدست خواهد آمد این موضوع به روشنی در "شکل 8" قابل مشاهده است. میدانیم در محیطهای همسانگرد ناپایداری انگشتی سریعتر رشد کرده و با توجه به همین علت طول اختلاط نیز بیشتر خواهد بود.

"شکل 9" منحنیهای طول اختلاط را برای مقادیر مختلف ضریب تأخیر حرارتی نشان میدهد که همان طور که در کانتورها مشاهده شد با کاهش ضریب تاخیر حرارتی یعنی با افزایش انتقال حرارت سیالات با محیط جامد جریان پایدارتر میشود، بنابراین طول اختلاط نیز کاهش پیدا میکند.



Fig. 7 Transversely averaged concentration and temperature profiles counturs for Le=1 and λ =0.5

شکل 7 منحنی میانگین غلظت عرضی و دما برای Le=1 و λ =0.5 λ



Fig. 8 Mixing length porofiles for different values of α_K شکل 8 منحنیهای طول اختلاط در مقادیر مختلف α_K



, א אואוון length poromes for different values of λ شکل 9 منحنی های طول اختلاط در مقادیر مختلف λ

منحنیهای طول اختلاط برحسب تغییرت عدد Le در "شکل 10" نشان داده شده است. بالا رفتن عدد لوئیس به پایداری جریان کمک میکند در نتیجه باعث کاهش طول اختلاط میشود.

5-5- راندمان جاروبی

در یک محیط متخلخل حجم سیال جابجا شده به حجم کل موجود از آن سیال را بازده جاروبی^۱ می گویند این بازده بنا به کاربردهای مختلفی که دارد در چند نوع متفاوت تعریف می شود. در صنایع مربوط به نفت، بازده جاروبی به صورت نسبت حجم کل مواد هیدروکربنی موجود در مخزن به حجم جاروب شده از این مواد هیدروکربنی توسط سیال جابجا کننده، تعریف می شود و معمولاً از آن به عنوان پارامتری که میزان بهرهوری را تعیین می کند، استفاده



Fig. 10 Mixing length porofiles for different values of Lewis number شكل 10 منحنى هاى طول اختلاط در مقادير مختلف عدد لوئيس

¹ Sweap efficiency

می شود. این پارامتر در تحقیق حاضر نسبت حجم سیال جابه جا کننده به حجم سیال جابه جا شونده تعریف شده است. بیش ترین بازده جاروبی تا لحظه رسیدن انگشتی به خروجی، معیاری از بازده استخراج خواهد بود.

"شکل 11" راندمان جاروبی را در محیط متخلخلی با نفوذپذیری ناهمسانگرد نشان می دهد. از بخش کانتورهای غلظت و طول اختلاط مشاهده کردید که با افزایش α_K جریانی پایدارتر خواهد شد. به عبارت دیگر با افزایش این نسبت، انگشتیها با سرعت کندتری رشد کرده و آهستهتر از حالت همسانگرد درون سیال با ویسکوزیته بیشتر نفوذ می کنند. بنابراین باید برای مقادیر بزرگتر α_K راندمان جاروبی نیز افزایش می یابد.

"شکل 12" منحنیهای راندمان جاروبی را برای مقادیر مختلف ضریب تأخیر حرارتی نشان میدهد. که همان طور که در کانتورهای غلظت و منحنیهای طول اختلاط مشاهده شد با کاهش λ ناپایداری جریان کاهش مییابد. و انگشتیها دیرتر به انتهای جبهه میرسند بنابراین راندمان جاروبی نیز افزایش پیدا میکند.

منحنیهای راندمان جاروبی برحسب تغییرت عدد Le در "شکل 13" نشان داده شده است. بالا رفتن عدد لوئیس به پایداری جریان کمک میکند در نتیجه باعث افزایش راندمان جاروبی میشود.

6- نتیجه گیری

در این مطالعه، شبیهسازی غیرخطی ناپایداری انگشتی لزج حرارتی در جابجایی مخلوط شدنی و در یک محیط متخلخل ناهمسانگرد مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیهسازی از روش پر دقت طیفی و تبدیلات هارتلی استفاده شد. تأثیر ناهمسانگردی تانسور نفوذپذیری، عدد لوئیس و ضریب



Fig. 11 Sweap efficiency porofiles for different values of α_K شکل 11 منحنیهای راندمان جاروبی در مقادیر مختلف α_K



Fig. 12 Sweap efficiency porofiles for different values of λ شکل 12 منحنی_های راندمان جاروبی در مقادیر مختلف λ

M لزجت دینامیکی (kgm⁻¹s⁻¹)

ρ چگالی (kgm⁻³)

دمای بدون بعد 🖯

زيرنويسها 1 سيال جابجا كننده

0n سيستم مختصات اصلي

- 8- مراجع
- A. Zare Ghadi, A. Haghighi Asl, M. S. Valipour, Numerical modelling of double-diffusive natural convection within an arc shaped enclosure filled with a porous medium, *Journal of Heat and Mass Transfer Research* (*JHMTR*), Vol. 1, No. 2, pp. 83-91, 2014.
- [2] A. Azhdari Heravi, F. Talebi, M. S. Valipour, Investigation of pore-scale random porous media using lattice boltzmann method, *Journal of Heat and Mass Transfer Research (JHMTR)*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-12, 2015.
- [3] D. Bensimon, L. P. Kadanoff, S. Liang, B. I. Shraiman, C. Tang, Viscous flows in two dimensions, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 58, No. 4, pp. 977, 1986.
- [4] K. V. McCloud, J. V. Maher, Experimental perturbations to Saffman-Taylor flow, *Physics Reports*, Vol. 260, No. 3, pp. 139-185, 1995.
- [5] S. Hill, Channeling in packed columns, *Chemical Engineering Science*, Vol. 1, No. 6, pp. 247-253, 1952.
- [6] H. Shokri, M. Kayhani, M. Norouzi, Saffman–Taylor instability of viscoelastic fluids in anisotropic porous media, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 135, No.17, pp. 1-13, 2018.
- [7] J. Azaiez, B. Singh, Stability of miscible displacements of shear thinning fluids in a Hele-Shaw cell, *Physics of Fluids*, Vol. 14, No. 5, pp. 1557-1571, 2002.
- [8] M. Mishra, M. Martin, A. De Wit, Influence of miscible viscous fingering with negative log-mobility ratio on spreading of adsorbed analytes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, No. 7, pp. 2392-2398, 2010.
- [9] J. Avendano, N. Pannacci, B. Herzhaft, P. Gateau, P. Coussot, Enhanced displacement of a liquid pushed by a viscoelastic fluid, *Journal of Colloid* and Interface Science, Vol. 410, pp. 172-180, 2013.
- [10] M. Nourozi, M. Shoghi, Nonlinear simulation of non-Newtonian viscous fingering instability in anisotropic porous media, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 415-425, 2015. (in Persian نفارسی)
- [11] M. Norouzi, M. Shoghi, A numerical study on miscible viscous fingering instability in anisotropic porous media, *Physics of Fluids*, Vol. 26, No. 8, pp. 084102, 2014.
- [12] M. Belotserkovskaya, A. Konyukhov, Numerical simulation of viscous fingering in porous media, *Physica Scripta*, Vol. 2010, No. T142, pp. 014056, 2010.
- [13] M. R. Shoghi, M. Norouzi, Linear stability analysis and nonlinear simulation of non-Newtonian viscous fingering instability in heterogeneous porous media, *Rheologica Acta*, Vol. 54, No. 11-12, pp. 973-991, 2015.
- [14] M. Kayhani, H. Shokri, M. Norouzi, Nonlinear simulation a of viscoelastic fingering instability, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 47-54, 2016. (in Persian فارسی)
- [15] H. Shokri, M. Kayhani, M. Norouzi, Nonlinear simulation and linear stability analysis of viscous fingering instability of viscoelastic liquids, *Physics of Fluids*, Vol. 29, No. 3, pp. 033101, 2017.
- [16] X. Kong, M. Haghighi, Y. Yortsos, Visualization of steam displacement of heavy oils in a Hele-Shaw cell, *Fuel*, Vol. 71, No. 12, pp. 1465-1471, 1992.
- [17] M. Saghir, O. Chaalal, M. Islam, Numerical and experimental modeling of viscous fingering during liquid–liquid miscible displacement, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 253-262, 200
- [18] K. E. Holloway, J. R. De Bruyn, Viscous fingering with a single fluid, *Canadian Journal of Physics*, Vol. 83, No. 5, pp. 551-564, 2005.
- [19] D. Pritchard, The instability of thermal and fluid fronts during radial injection in a porous medium, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 508, pp. 133-163, 2004.
- [20] M. Islam, J. Azaiez, Miscible thermo-viscous fingering instability in porous media, Part 1: Linear stability analysis, *Transport in Porous Media*, Vol. 84, No. 3, pp. 821-844, 2010.
- [21] M. Islam, J. Azaiez, Miscible thermo-viscous fingering instability in porous media. Part 2: Numerical simulations, *Transport in Porous Media*, Vol. 84, No. 3, pp. 845-861, 2010.
- [22] M. Sajjadi, J. Azaiez, Thermo-viscous fingering in heterogeneous media, Proceeding of Society of Petroleum Engineers, SPE Heavy Oil Conference Canada, 12-14 June, Calgary, Alberta, Canada, 2012.
- [23] W. Zimmerman, G. Homsy, Nonlinear viscous fingering in miscible displacement with anisotropic dispersion, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 3, No. 8, pp. 1859-1872, 1991.



Fig. 13 Sweap efficiency porofiles for different values of Lewis number

شکل 13 منحنیهای راندمان جاروبی در مقادیر مختلف عدد لوئیس

تأخیر حرارتی بر عوامل مشخص کننده ناپایداری مانند میانگین غلظت عرضی و دما، طول اختلاط، و بازده جاروبی موردبررسی قرار گرفتند. از نتایج بهدستآمده معلوم شد، با افزایش نفوذپذیری در جهت جریان به جهت عمود بر جریان، جریان پایدارتر شده، طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش پیدا می کند. با به اشتراک گذاشتن حرارت با محیط جبهه حرارت در پشت جبهه سیالاتی قرار می گیرد که این تأخیر حرارتی در کانتورهای دما و منحنیهای میانگین دما نمایش داده شد، همچنین کاهش ضریب تأخیر حرارتی به پایداری جریان کمک می کند. با افزایش عدد لوئیس گانتورهای دما بدون هیچ انگشتی ظاهر شدند و ناپایداری جریان کاهش یافت.

هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر ناهمسانگردی نفوذپذیری محیط متخلخل بر چگونگی رشد و پیشرفت ناپایداری انگشتی لزج حرارتی بوده است. مطالعات مشابهی در این زمینه در محیطهای متخلخل همسانگرد انجام شده است. ولی بررسی تأثیرات ناهمسانگردی محیط متخلخل بر ناپایداری انگشتی لزج حرارتی برای نخستین بار در این مطالعه صورت پذیرفته است. نتایج بهدستآمده از این تحقیق نشان میدهد ناهمسانگردی نفوذپذیری محیط متخلخل، انتقال حرارت با محیط متخلخل، و افزایش عدد لوئیس تأثیر زیادی در شکل گیری و پیشرفت ناپایداری انگشتی دارد.

7- فهر ست علائم

غاظت С پراکندگی ملکولی (m²s⁻¹) D_C $(m^2 s^{-1})$ پراکندگی حرارتی ($m^2 s^{-1}$ D_T نفوذیذیری (m²) К عدد لوئيس Le عدد یکلت جرمی Pec عدد پکلت حرارتی Pe_T دما (°_C) Т سرعت در جهت محور x (ms⁻¹) и سرعت در جهت محور y (ms⁻¹) y 12 علائم يوناني

م ير ع م تخلخل

لا ضريب تأخير حرارتي