

شبیه‌سازی عددی جریان تراکم‌پذیر گذرا درون خطوط لوله طویل انتقال گاز طبیعی با استفاده از یک الگوریتم موازی مناسب

مهرنوش تارمیغ، مرتضی بهبهانی‌نژاد، عزیز عظیمی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ خرداد ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۹ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۳ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۹ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

خط لوله گاز
جریان گذرا
پردازش موازی
کتابخانه MPI

چکیده: یکی از مسائل مطرح و مورد توجه در صنعت گازرسانی، تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله انتقال می‌باشد. با وجود مطالعات صورت گرفته، هنوز دقت و زمان محاسبات به‌عنوان دو چالش مهم در این زمینه مطرح هستند. در این مقاله، طراحی یک الگوریتم موازی جهت شبیه‌سازی عددی جریان هم‌دما و غیرهم‌دما گاز مطرح شده‌است. تحلیل عددی جریان با استفاده از روش اختلاف محدود ضمنی تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ صورت پذیرفته‌است. موازی‌سازی مسئله نیز به‌روش انتقال پیام با کتابخانه MPI انجام شده‌است. به‌منظور نشان دادن قابلیت‌های برنامه کامپیوتری توسعه داده‌شده، دو مسئله شامل جریان درون دو خط لوله با شرایط متفاوت تحلیل و صحت‌سنجی شده‌است. در انتها، پس از صحت‌سنجی نتایج، معیارهای عملکرد روش پیشنهادی مثل زمان محاسبات، کاهش زمان به دست آمده و میزان افزایش سرعت از نتایج شبیه‌سازی استخراج شده‌اند. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از پردازش موازی می‌توان تا حد زیادی زمان محاسبات جریان درون خطوط لوله انتقال گاز طویل را کاهش داد. علاوه بر این، با به کارگیری این روش در شبکه‌های محاسباتی ریز نسبت به شبکه‌های درشت، کارایی الگوریتم موازی افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

گاز طبیعی یکی از منابع مهم انرژی است که استفاده از آن به‌سرعت در حال گسترش است. یکی از ملزومات توسعه صنعت گاز، انتقال آن می‌باشد. انتقال گاز طبیعی از طریق خط لوله همچنان به‌عنوان مهم‌ترین شیوه انتقال گاز محسوب می‌شود.

در خط لوله، دو نوع جریان پایا و گذرا را می‌توان در نظر گرفت [۱]. معادلات حاکم بر جریان گذرای گاز طبیعی، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی می‌باشند که ماهیت هذلولوی دارند. این معادلات بایستی به‌صورت عددی حل شوند تا بتوان رفتار دینامیکی جریان درون خطوط لوله را پیش‌بینی کرد. از طرفی دیگر، لوله‌های انتقال گاز طبیعی غالباً دارای طول زیادی هستند و برای حل عددی جریان درون این لوله‌ها می‌بایست از تعداد زیادی گره محاسباتی استفاده نمود. به‌خصوص هنگامی که مدت زمان شبیه‌سازی جریان طولانی باشد، پیش‌بینی رفتار گذرای جریان بسیار زمان‌بر و پرهزینه خواهد شد. در نتیجه، عمده‌ترین مشکل در شبیه‌سازی این جریان‌ها، زمان رسیدن به جواب می‌باشد. با به کارگیری پردازش موازی به همراه بهبود الگوریتم حل مسئله، می‌توان با استفاده از تکنولوژی و ابزار موجود، مسائل را با دقت مطلوبی حل نمود و فرآیند حل را نیز با سرعت بالاتر و صرف هزینه کمتر به انجام رساند. به‌منظور موازی‌سازی مسئله در سیستم‌های حافظه توزیع‌شده، لازم است مسئله با روش معینی میان

پردازنده‌ها تقسیم شود و نحوه ارتباط بین پردازنده‌ها مشخص شود. بدین منظور ارائه یک راهکار مناسب که دربرگیرنده هر دو کار فوق باشد، بهره‌گیری مؤثری از این سیستم‌ها را نتیجه می‌دهد. تقسیم‌بندی مسئله باید به‌گونه‌ای باشد که نسبت عملیات سری به موازی کاهش یابد و حداقل ارتباط بین پردازنده‌ها موردنیاز باشد. سپس، نحوه ارتباط صحیح بین پردازنده‌ها برای ارسال و دریافت اطلاعات مشخص می‌شود. پیاده‌سازی صحیح پردازش موازی، موجب کاهش زمان کل محاسبات و حافظه موردنیاز می‌گردد.

در سال ۱۹۴۳ اولین راه‌حل برای تحلیل جریان گاز در خط لوله افقی توسط لیبیل^۱ ارائه شد [۲]. او نتیجه گرفت که برای لوله‌های کوتاه، فرض جریان بی‌دررو نسبت به فرض جریان دما ثابت منطقی‌تر است. استونر^۲ [۳] معادلات جبری غیرخطی مربوط به خطوط انتقال در حالت پایا شامل خط لوله، کمپرسور، شیر کنترلی و میادین ذخیره را با استفاده از روش نیوتن-رافسون حل نمود. دونان^۳ و همکاران [۴] با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک^۴ خطوط لوله را شبیه‌سازی نمودند. این نرم‌افزار در زمینه شبیه‌سازی خطوط لوله بسیار محدود است. در سال ۲۰۰۰ آسیاداکس و چاکزیکوفسکی^۵ [۵] در مقاله‌ای به بیان تفاوت‌های میان نتایج حاصل از تحلیل گذرای جریان

- 1 Lapple
- 2 Stoner
- 3 Donan
- 4 Simulink
- 5 Osiadacz and Chaczikowsky

نتیجه می‌دهد. این رویکرد به نحوی است که می‌توان موازی‌سازی را بر روی بخش قابل توجهی از الگوریتم حل اعمال نمود. تقسیم دامنه استفاده‌شده، موجب افزایش محل‌گرایی^{۱۰} پردازشگرها شده‌است که این موضوع، میزان تبادل اطلاعات میان پردازشگرها را کاهش داده‌است. همچنین با استفاده از روش پیشنهادی، قابلیت توسعه^{۱۱} و ارتقای برنامه کامپیوتری، که یکی از پارامترهای مهم در نرم‌افزارهای موازی می‌باشد، بیش‌تر شده‌است.

در مقاله حاضر، طراحی الگوریتمی موازی برای شبیه‌سازی جریان گذرا درون خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ارائه شده‌است. در ادامه، ابتدا معادلات حاکم بر جریان‌های هم‌دما و غیرهم‌دما و روش عددی به کار رفته جهت حل آن‌ها معرفی خواهند شد. موازی‌سازی مسئله به روش انتقال پیام با کتابخانه MPI^{۱۲} انجام شده‌است. در انتها، مسائلی جهت صحت‌سنجی نتایج و بررسی راندمان برنامه کامپیوتری تدوین شده، اجرا شده‌اند. در اجرای موازی، زمان محاسبات، کاهش زمان به دست آمده، میزان افزایش سرعت و رابطه راندمان با تعداد پردازشگرهای فعال به دست آمده‌اند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده دقت و توانایی بالای روش به کار رفته می‌باشند.

۲- روابط و معادلات

معادلات حاکم بر جریان و روش حل عددی بکار رفته در ادامه بیان شده‌اند.

۲-۱- معادلات حاکم بر خطوط لوله انتقال گاز

مدل‌سازی حالت گذرای جریان گاز در خط لوله بر اساس معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و یک معادله حالت مناسب انجام می‌شود. از نقطه‌نظر ریاضی، این معادلات تشکیل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی را می‌دهند. مشکل بودن حل این معادلات باعث شده‌است که با در نظر گرفتن برخی فرضیات صحیح، معادلات را ساده‌تر کنند. مدل‌های ساده‌شده با صرف‌نظر از برخی جملات مدل اصلی به دست می‌آیند. در مدل مورد استفاده، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- خط لوله افقی است.
 - جریان یک‌بعدی در نظر گرفته شده‌است.
 - متغیرهای جریان را می‌توان به‌طور مناسب با مقدار متوسط آن‌ها روی هر سطح مقطع بیان کرد.
- معادلات حاکم بر رفتار غیردائم جریان برای یک لوله افقی به‌صورت دسته معادلات زیر تعریف می‌شوند [۱۱]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E(Q)}{\partial x} - H(Q) = 0 \quad (1)$$

متغیرهای موجود در رابطه (۱)، ماتریس‌هایی به فرم معادله (۲) هستند.

- 10 Locality
- 11 Modularity
- 12 Message Passing Interface

گاز در خطوط لوله، با در نظر گرفتن دو فرض ساده‌کننده جریان دماثابت و جریان بی‌دررو، پرداختند. تائو و تی^۱ [۶] با مقایسه خطوط انتقال گاز با مدارهای الکتریکی و معادل‌سازی پارامترهای سیالاتی و الکتریکی، رفتار خط لوله در حالت گذرا را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۰۸ عباسپور و چاپمن^۲ [۷] با استفاده از روش تفاضل محدود غیرصریح به حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که اثرات رفتار گاز در حالت غیرهم‌دما به‌شدت در دقت محاسبات جریان، به‌خصوص جریان گذرای سریع، مؤثر است. نوربهشت و قاسمی‌نژاد [۸] در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۳ جریان گذرا در خطوط انتقال گاز طبیعی را شبیه‌سازی کردند. برای مدل‌سازی از معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادله گاز ایده‌آل، با در نظر گرفتن اثرات اغتشاش در یک شبکه استوانه‌ای دوبعدی، استفاده شد. این معادلات به روش حجم محدود^۳ گسسته شدند.

در زمینه پردازش موازی نیز تحقیقاتی صورت گرفته است که شمار آن‌ها در سال‌های اخیر روبه‌رشد بوده است. در سال ۱۹۹۸ لپر^۴ [۹] با استفاده از مدل برنامه‌نویسی SPMD^۵، یک شبیه‌سازی سه‌بعدی برای جریان آشفته فعال در بویلرهای کمکی^۶ انجام داد. او توانست معیار تسریع ۱۲ را با استفاده از ۲۴ پردازنده نتیجه بگیرد. همچنین با اعمال موازنه بار^۷ توانست تسریع را به حدود ۱۵ برساند. گوروبتس^۸ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان آشفته با الگوریتم موازی برای معماری‌های محاسباتی مختلف را ارائه کردند. همچنین آن‌ها به معرفی سری جدیدی از شبیه‌سازی‌های مستقیم عددی برای جریان آشفته و تراکم‌ناپذیر همراه با انتقال حرارت و قابل‌اجرا با الگوریتم در نظر گرفته‌شده پرداختند.

با توجه به تحقیقات پیشین، یکی از نوآوری‌های کار حاضر، استفاده از پردازش موازی در تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی و نشان دادن تأثیر مطلوب آن بر کاهش زمان محاسبات و افزایش کارایی است. علاوه‌بر این، از روش تقسیم دامنه هندسی^۹ جهت تقسیم‌بندی مسئله استفاده شده‌است که این دامنه، طول خط لوله می‌باشد. به بیان دیگر، طراحی یک الگوریتم کارا با انتقال داده کم، افزایش سرعت خوب و دقت مناسب، که قابلیت تحلیل جریان گاز درون یک خط لوله طویل را با سرعت بالا دارا باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. ایده به‌کار رفته، تقسیم خط لوله به چند بخش و بررسی هر بخش به‌طور مستقل، از طریق روابطی جهت تحلیل جریان در نقاط انفعال در طول لوله است. تلفیق و به کارگیری صحیح این روش‌ها، روشی مطلوب و کاربردی جهت شبیه‌سازی جریان درون خطوط طویل انتقال گاز را

- 1 Tao and Ti
- 2 Abbaspour and Chapman
- 3 Finite Volume Method
- 4 Lepper
- 5 Single Program Multiple Data
- 6 Utility Boilers
- 7 Load Balance
- 8 Gorobets
- 9 Geometric Domain Decomposition

روش تفاضلات محدود^۲ یکی از روش‌های مناسب برای این منظور است. در تحقیق حاضر، به منظور حل معادلات حاکم از روش ضمنی تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ^۳ استفاده شده است. این روش، محدوده پایداری وسیعی دارد. از این رو می‌توان با حفظ دقت، گام‌های زمانی و مکانی حل مسئله را به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفت. در این روش، مشتق زمانی با استفاده از تفاضل پسرو حول گام زمانی $j+1$ بسط داده می‌شود. به دلیل حضور عبارات غیرخطی، معادلات تفاضل محدود به دست آمده حول گام زمانی j با استفاده از بسط تیلور خطی‌سازی می‌شوند. پس از این مرحله، با استفاده از قاعده مشتق زنجیره‌ای، شکل خاصی از معادله تفاضل محدود حاکم به نام فرمول بندی دلتا^۴ بدست می‌آید. با تشکیل ماتریس‌های ژاکوبین شار و تجزیه آن‌ها به وسیله مشخصه‌های مثبت و منفی و اعمال شکل‌های پسرو و پیشروی مشتقات مکانی، نوعی روش پادبادسو^۵ بدست می‌آید. با استفاده از این روش، مشتق زمانی در رابطه (۱) با تفاضل محدود مرتبه اول تقریب زده می‌شود و رابطه (۸) حاصل می‌شود.

$$\frac{Q^{j+1} - Q^j}{\Delta t} + \frac{\partial E^{j+1}}{\partial x} - H^{j+1} = 0 \quad (۸)$$

تغییر خواص جریان در هر گام زمانی بصورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$\Delta Q = Q^{j+1} - Q^j \quad (۹)$$

روند حل مسئله، مرحله به مرحله بر معادلات اعمال شده است و در نهایت، فرم اختلاف محدود معادلات حاکم به صورت زیر به دست آمده است [۱۳]:

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} A_{i-1}^+\right) \Delta Q_{i-1} \\ & + \left[I + \frac{\Delta t}{\Delta x} (A_i^+ - A_i^-) - \Delta t B_i \right] \Delta Q_i \\ & + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} A_{i+1}^-\right) \Delta Q_{i+1} \\ & = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (E_i^+ - E_{i-1}^+ + E_{i+1}^- - E_i^-) + \Delta t H_i \end{aligned} \quad (۱۰)$$

بالانویس j برای راحتی کار در برخی معادلات حذف شده است. در این رابطه، $I = (\partial E / \partial Q)$ و $B = (\partial H / \partial Q)$ به جمله‌های $A = (\partial E / \partial Q)$ و $B = (\partial H / \partial Q)$ ماتریس‌های ژاکوبین شار گفته می‌شود. با توجه به خاصیت همگنی معادلات اولر، ماتریس ژاکوبین A و بردار شار E را می‌توان به زیربردارهایی تجزیه کرد که هر زیربردار متناظر با مقدار ویژه مثبت و یا منفی ماتریس ژاکوبین شار باشد. در رابطه (۱۰)، A^+ و A^- ماتریس‌های ژاکوبین شار تجزیه شده و

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e_0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (p + e_0)u \end{bmatrix}, \quad (۲)$$

$$H(Q) = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho G \\ -\rho(q + uG) \end{bmatrix}$$

در روابط بالا، ρ جرم مخصوص، u متوسط سرعت جریان در هر مقطع عمود بر محور لوله، p فشار و e_0 انرژی کل بر واحد حجم است که طبق رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$e_0 = p / (Z(\gamma - 1)) + \rho u^2 / 2 \quad (۳)$$

معادله چهارم موردنیاز برای حل جریان گاز، معادله حالت یا قانون گازها است.

$$p = \rho ZRT \quad (۴)$$

اگر جریان دما ثابت فرض شود، معادله انرژی حذف خواهد شد [۱۲]. در این راستا، رابطه (۵) نشان‌دهنده معادله حالت یا قانون گازها برای جریان هم‌دما می‌باشد.

$$p = \rho c^2 \quad (۵)$$

در رابطه فوق، c سرعت صوت دما ثابت است و از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$c = (ZRT)^{\frac{1}{2}} \quad (۶)$$

در جریان غیرهم‌دما نیز سرعت محلی صوت برابر با $c = (Z\gamma p / \rho)^{1/2}$ می‌باشد. جمله ناهمگن در رابطه (۱) شامل عبارات زیر است:

$$G = f \frac{u^2}{2Di} \frac{u}{|u|}, \quad q = \frac{\dot{Q}}{\rho A_r dx} \quad (۷)$$

در این معادلات، Z ضریب تراکم‌پذیری سیال، Di قطر لوله، f ضریب اصطکاک، γ نسبت گرماهای ویژه، T دمای سیال، R ثابت گاز، A_r سطح مقطع لوله و \dot{Q} نرخ انتقال حرارت می‌باشد. همچنین، ضریب اصطکاک با استفاده از نمودار مودی^۱ یا روابط ارائه شده توسط چن و هالند، کلبروک-وایت و دیگر معادلات موجود قابل محاسبه است.

۲-۲- حل عددی معادلات

پس از ارائه مدل ریاضی، گام مهم بعدی پیدا کردن روش حل عددی مناسب برای آن است. انتخاب یک طرح عددی مناسب جهت گسسته‌سازی معادلات حاکم، موجب افزایش دقت محاسبات و کاهش زمان حل می‌گردد.

1 Moody Diagram

- 2 Finite Difference Method
- 3 Steger-Warming
- 4 Delta Formulation
- 5 Upwind

به دست می‌آیند [۱۴]. روابط (۱۷) و (۱۸) برای مشخصه‌های پیشرو معتبر هستند.

$$\frac{-u+c}{c^2} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{A_r} \frac{dW}{dt} + \frac{vf}{2A_r^2 Di} W |W| = 0 \quad (17)$$

$$\frac{dx}{dt} = u + c \quad (18)$$

معادلات (۲۱) و (۲۲) نیز برای مشخصه‌های پسرو بکار می‌روند.

$$\frac{-u-c}{c^2} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{A_r} \frac{dW}{dt} + \frac{vf}{2A_r^2 Di} W |W| = 0 \quad (19)$$

$$\frac{dx}{dt} = u - c \quad (20)$$

با صرف نظر از سرعت سیال در برابر سرعت صوت، می‌توان منحنی‌های مشخصه را خط مستقیم فرض کرد. با استفاده از این فرض، نقطه انفصال در طول لوله را می‌توان مطابق شکل ۱ در نظر گرفت. فرم گسسته شده معادلات قبل به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{1}{c} \frac{p_{i,j} - p_{i-1,j-1}}{\Delta t} + \frac{1}{A_r} \frac{W_{i,j} - W_{i-1,j-1}}{\Delta t} + \frac{f}{2A_r^2 Di} V_{i-1,j-1} W_{i-1,j-1} |W_{i-1,j-1}| = 0 \quad (21)$$

$$\frac{-1}{c} \frac{p_{i,j} - p_{i+1,j-1}}{\Delta t} + \frac{1}{A_r} \frac{W_{i,j} - W_{i+1,j-1}}{\Delta t} + \frac{f}{2A_r^2 Di} V_{i+1,j-1} W_{i+1,j-1} |W_{i+1,j-1}| = 0 \quad (22)$$

با توجه به شکل ۱، به دلیل این که دو لوله از تقسیم یک خط لوله ایجاد شده‌اند، قطر و در نتیجه سطح مقطع آن‌ها یکسان است. برای حل جریان، مشخصه پیشرو بر روی خط لوله ورودی و مشخصه پسرو بر روی خط لوله خروجی اعمال می‌شود. اگر از افت فشار در محل اتصال دو لوله صرف نظر شود، می‌توان آن را یک منطقه هم‌فشار در نظر گرفت. با استفاده از معادلات (۲۱) و (۲۲) در محل اتصال و سپس جایگذاری آن‌ها در قانون بقای جرم، رابطه (۲۳) برای محاسبه فشار در این نقطه حاصل می‌شود.

E^- و E^+ بردارهای شار تجزیه شده هستند. این ماتریس‌ها برای هریک از جریان‌های هم‌دما و غیرهم‌دما با استفاده از نرم افزار میپل^۱ بدست آمده‌اند. با استفاده از رابطه (۱۰) برای هر کدام از نقاط شبکه و اعمال شرایط مرزی، یک دستگاه سه قطری بلوکی حاصل می‌شود. با حل این دستگاه برای هر گام زمانی، متغیرهای جریان در آن گام محاسبه می‌شوند. شرایط مرزی مورد نیاز برای حل معادلات، در حالت غیرهم‌دما شش شرط مرزی و در حالت هم‌دما چهار شرط مرزی هستند که باتوجه به مقادیر مشخصه در مرزها، بایستی نیمی از این شرایط به صورت شرط مرزی تحلیلی بر روی مرزها معلوم باشند و بقیه از درون میدان جریان محاسباتی تعیین شوند.

با تقسیم خط لوله به چند بخش، نیاز به تعیین اطلاعات جریان در محل اتصال لوله‌ها می‌باشد. برای محاسبه فشار در محل اتصال دو لوله، جریان دما ثابت در نظر گرفته می‌شود. روابط (۱۳) و (۱۴) بیانگر دو معادله بقای جرم و مومنتوم هستند.

$$\frac{\partial v}{\partial t} - v^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{v} \right) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{u}{v} \right) = - \frac{\partial}{\partial x} \left(p + \frac{u^2}{v} \right) - \frac{fu |u|}{2v Di} \quad (12)$$

حجم مخصوص در حالت کلی برای مایعات و گازها به فشار و دما بستگی دارد. با در نظر گرفتن دمای ثابت، حجم مخصوص فقط به فشار وابسته است.

$$v = v(p) \quad (13)$$

فشار در طول لوله تغییر می‌کند و مقدار آن در هر نقطه با زمان متغیر است. این وضعیت با رابطه (۱۶) توصیف می‌شود.

$$p = p(x, t) \quad (14)$$

با محاسبه مشتقات جزئی حجم مخصوص و اعمال معادله حالت گاز کامل بر معادلات (۱۱) و (۱۲)، روابط (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{c^2}{A_r} \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{1}{A_r} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \frac{W^2}{A_r^2} \right) + 2v \frac{W}{A_r^2} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{vf}{2A_r^2 Di} W |W| = 0 \quad (16)$$

در این روابط، W دبی جرمی جریان و v حجم مخصوص گاز است. با ترکیب دو معادله (۱۵) و (۱۶)، معادلاتی برای مشخصه‌های چپ و راست

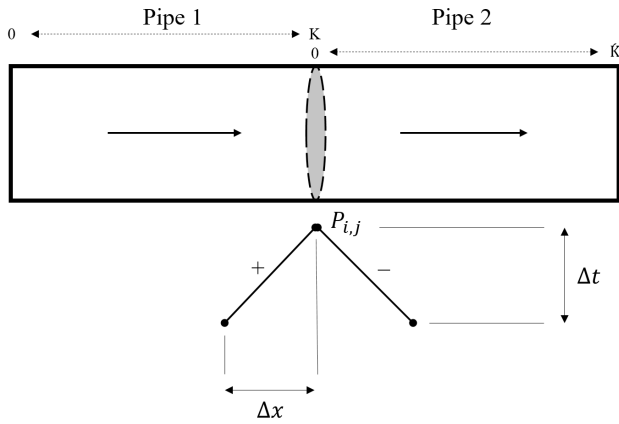


Fig. 1. Modeling the flow at the junction of the pipeline using characteristics lines.

شکل ۱: مدل سازی جریان در نقطه انفعال خط لوله با استفاده از خطوط مشخصه

هر الگوریتم پردازش موازی باید به نحوی مسئله را در بین واحدهای محاسباتی موجود تقسیم نماید. بطور کلی، دو دسته بندی عمومی، (۱) تقسیم دامنه و (۲) تقسیم عملیات، برای این کار وجود دارد [۱۵]. از نظر قابلیت موازی سازی کارها، روش های حل عددی معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی در گروهی با ویژگی های زیر قرار دارند:

۱. وجود وابستگی شدید میان کارها
۲. عدم امکان خوشه بندی کارها در گروه های با وابستگی کم
۳. نیاز به انتقال داده زیاد

به همین دلیل این نوع گروه، مشکل ترین مسائل برای موازی سازی را دارا می باشد. در مسئله مورد نظر که به این گروه تعلق دارد، به دلیل اینکه باید محاسبات معینی روی حجم داده زیادی انجام شود و همچنین حداقل نیاز به اطلاعات دیگر پردازنده ها وجود داشته باشد، روش تقسیم دامنه برای تقسیم مسئله مناسب است. معادلات حاکم بر هر زیردامنه، همان دسته معادلات رابطه (۱) هستند. با تقسیم دامنه مسئله، دامنه حل این معادله برای پردازشگرهای مختلف فرق می کند، در صورتی که روش حل برای آن ها یکسان می باشد و با استفاده از معادله (۱۰) صورت می گیرد.

در این پژوهش، دامنه اصلی حل مسئله که طول خط لوله می باشد، به زیربخش هایی تقسیم می شود که توسط پردازشگرهای مختلف به صورت جداگانه حل می شوند. این موضوع در شکل ۲ نشان داده شده است. این بخش ها، با استفاده از روابط (۲۳) و (۲۵) مجزا و مستقل می شوند. این روابط شرایط مرزی مورد نیاز برای حل هر زیردامنه، به جز در مرزهای ورودی و خروجی خط لوله را فراهم می سازند.

با استفاده از این تقسیم دامنه، هر پردازنده تنها به اطلاعات نزدیک به مرز پردازنده های دیگر احتیاج دارد. در زیردامنه های میانی، اطلاعات ۲ گره میان پردازشگرها مبادله می شود، ولی در زیردامنه های ابتدایی و انتهایی، که شامل مرزهای ورودی و خروجی خط لوله می شوند، تبادل داده فقط برای یک گره انجام می شود (شکل ۳).

$$p_{JUNC,j} = \left(\frac{c}{2A_r} \right) \times (R_{in} - R_{out}),$$

$$R_{in} = W_{K-1,j-1}^{in} + \frac{A_r}{c} p_{K-1,j-1}^{in} - A_r \Delta t$$

$$\times \left[\frac{f^{in}}{2(A_r)^2 Di} v_{K-1,j-1}^{in} W_{K-1,j-1}^{in} \left| W_{K-1,j-1}^{in} \right| \right], \quad (23)$$

$$R_{out} = W_{1,j-1}^{out} - \frac{A_r}{c} p_{1,j-1}^{out} - A_r \Delta t$$

$$\times \left[\frac{f^{out}}{2(A_r)^2 Di} v_{1,j-1}^{out} W_{1,j-1}^{out} \left| W_{1,j-1}^{out} \right| \right]$$

در جریان غیرهم دم به محاسبه دما در محل اتصال دو لوله نیاز است. این موضوع در شرایط غیرهم دم مطرح می شود، زیرا در حالت هم دم، دمای عملکرد در طول شبیه سازی ثابت باقی می ماند. با فرض جریان پایا، بدون نیروهای جسمی و صرف نظر از اثرات لزجت، معادله انرژی برای اتصال دو لوله به صورت زیر برقرار است:

$$h_0 = Const. \quad (24)$$

از آن جا که سرعت سیال در خطوط انتقال گاز کم است، اگر از تغییرات سرعت در نقطه اتصال و گره مجاور آن صرف نظر شود، می توان به رابطه (۲۵) رسید.

$$T_{JUNC,j} = T_{K-1,j-1}^{in} \quad (25)$$

با تعیین فشار و دما از روابط (۲۳) و (۲۵)، چگالی گاز از معادله حالت به دست خواهد آمد. دبی های ورودی به اتصال و خروجی از آن نیز از برقراری قانون بقای جرم تعیین خواهند شد.

۳- پردازش موازی

نیازهای محاسباتی بشر در دو زمینه علمی و تجاری به سرعت رو به رشد است. حل مسائل حجیم در کامپیوترهایی که فقط یک پردازشگر دارند، به دو دلیل غیرممکن است: الف) فضای حافظه ای که به یک پردازشگر اختصاص داده می شود، محدود است، ب) زمان محاسباتی که برای حل مسائل مورد نیاز است، کاربردی نیستند. یکی از راه های کاهش زمان محاسبات، تقسیم مسئله به قسمت های جداگانه ای است که به طور همزمان حل شوند. پردازش مسائلی که قابلیت تفکیک به اجزا را دارند، پردازش موازی نامیده می شود. پردازش موازی با افزایش تعداد پردازشگرها و یک سیستم ارتباطی مؤثر بین آن ها، راه حل بسیار موثری برای حل این مشکل ارائه می کند.

از قوی ترین و پرکاربردترین استانداردهای مورداستفاده در برنامه نویسی موازی، استاندارد MPI است. در پژوهش حاضر نیز از واسط انتقال پیام MPI استفاده شده است. اعمال MPI در سیستم های حافظه توزیع شده، نیاز به برنامه نویسی خاصی و تغییرات گسترده در برنامه سری دارد.

متغیرهای جریان از جمله فشار، دما، سرعت و چگالی، (۹) تبادل اطلاعات روی مرزها میان پردازشگرها، (۱۰) بررسی شرط پایان شبیه‌سازی و رفتن به گام زمانی بعد.

یکی از معیارها برای اندازه‌گیری کارایی الگوریتم موازی، پارامتر تسریع^۱ است که به صورت نسبت زمان اجرای برنامه روی یک پردازنده به زمان اجرا توسط چند پردازنده تعریف می‌شود (رابطه (۲۶)). این نسبت نشان می‌دهد که با استفاده از چند پردازنده، الگوریتم تا چه حد سریع‌تر اجرا خواهد شد.

$$Speedup = \frac{T_{serial}}{T_{parallel}} \quad (26)$$

در حالت ایده‌آل، اگر از n پردازنده برای حل مسئله استفاده شود، زمان حل $1/n$ می‌شود. در نتیجه، در این حالت افزایش سرعت برابر n خواهد بود. از تقسیم تسریع بر تعداد پردازشگرها نیز راندمان محاسبه می‌شود. از قوانین مطرح در پردازش موازی می‌توان به قانون امدال^۲ اشاره نمود. این قانون بیان می‌کند که تسریع یک الگوریتم موازی در عمل به وسیله نسبت عملیات سری موجود در آن محدود می‌شود. برای مشاهده این موضوع، فرض می‌شود الگوریتم موردنظر برای یک پردازنده شامل SE عمل سری و PA عمل قابل موازی‌سازی است. با استفاده از یک پردازنده $T_1 = SE + PA$ و با استفاده از N پردازنده $T_N = SE + PA/N$ می‌شود. به دست آوردن نسبت این دو مقدار، رابطه زیر را نتیجه خواهد داد:

$$S_N = \frac{T_1}{T_N} = \frac{SE + PA}{SE + \frac{PA}{N}} \quad (27)$$

برای نشان دادن میزان نسبت عملیات سری به عملیات موازی، فاکتور F به صورت $F = SE/T_1$ تعریف می‌شود. با جایگذاری این مقدار در رابطه قبل، معادله (۲۸) نتیجه می‌شود.

$$S_N = \frac{SE + PA}{SE + \frac{PA}{N}} = \frac{N}{(N-1)F + 1} \quad (28)$$

این قانون نشان می‌دهد زیاد کردن پردازنده‌ها در بسیاری از موارد اقدام به صرفه‌ای نیست، بلکه باید سعی شود تا الگوریتم طوری طراحی شود که نسبت عملیات سری آن کم‌تر شود.

۴- نتایج

نتایج تحلیل جریان هم‌دما و غیرهم‌دما، گذرای گاز طبیعی درون خط لوله به دو صورت سری و موازی در این قسمت ارائه می‌شوند. کامپیوتر موازی مورد استفاده دارای حافظه ۱۶ گیگابایت و پردازنده‌ای با ۸ هسته واقعی و سرعت ۳ گیگاهرتز می‌باشد.

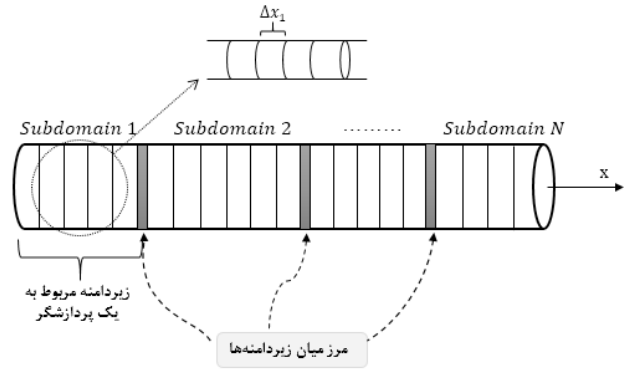


Fig. 2. Division of the geometric domain of the pipeline.

شکل ۲: تقسیم دامنه هندسی خط لوله

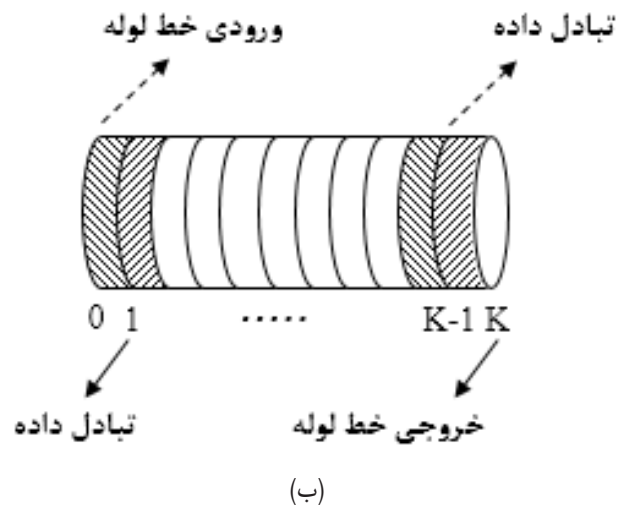
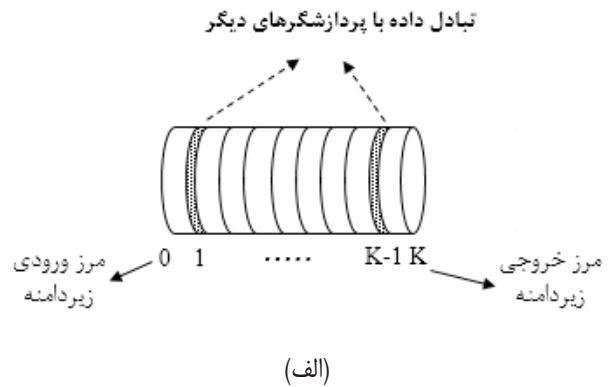


Fig. 3. Required data exchange, a) Middle subdomain, b) Boundary subdomain.

شکل ۳: تبادل داده مورد نیاز، (الف) زیردامنه میانی، (ب) زیردامنه مرزی

گام‌های اصلی در الگوریتم استفاده‌شده بدین شرح هستند: (۱) خواندن اطلاعات ورودی و تعیین شرایط اولیه، (۲) مشخص نمودن حوزه مربوط به هر پردازشگر، (۳) تعیین مقادیر ویژه و گام زمانی توسط هر پردازنده در بخش مربوط به خود و انتخاب کوچک‌ترین گام زمانی، (۴) محاسبه متغیرهای جریان در نقاط انفصال با تقسیم آن‌ها میان پردازشگرها، (۵) تعیین شرایط مرزی، (۶) تشکیل ماتریس‌های ژاکوبین و بردارهای شار توسط هر پردازنده، (۷) تشکیل ماتریس سه‌قطری بلوکی و حل آن توسط هر پردازنده، (۸) محاسبه تمامی

1 Speedup
2 Amdahl

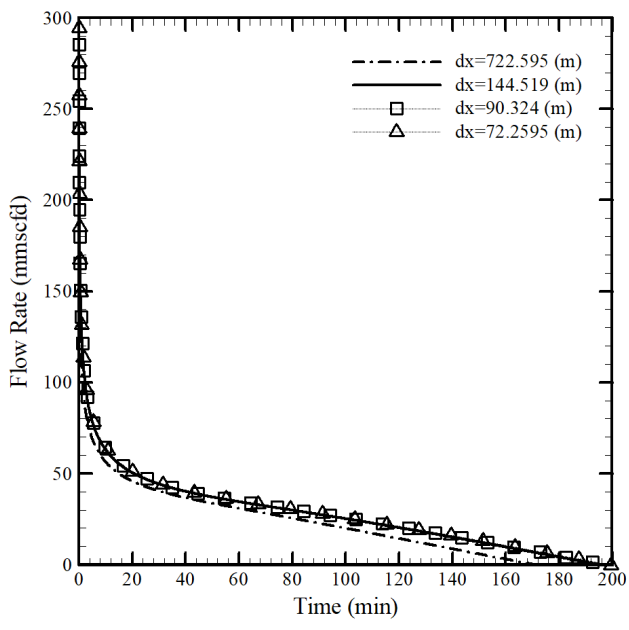


Fig. 5. Mass flow rate changes versus time at the pipe inlet for the different numbers of nodes

شکل ۵: تغییرات نرخ جریان در ورودی لوله با گذشت زمان برای تعداد گره‌های مختلف

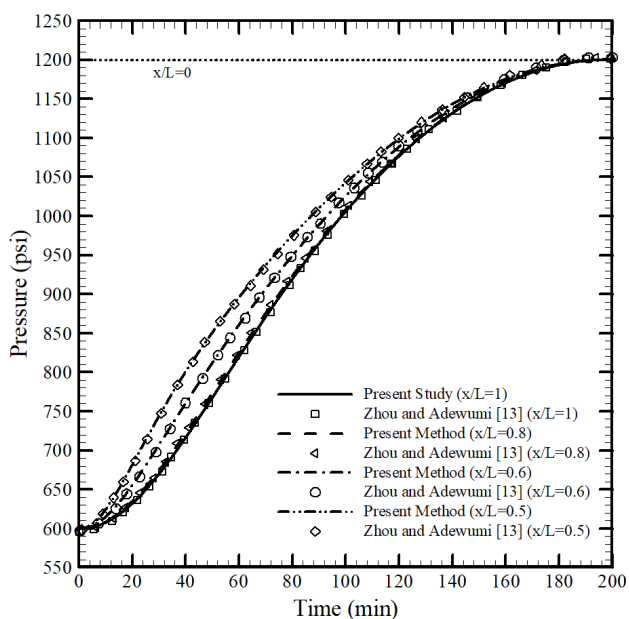


Fig. 6. Gas pressure changes versus time at the different pipe sections

شکل ۶: تغییرات فشار گاز در مقاطع مختلف لوله با گذشت زمان

برای اطمینان از عملکرد صحیح رابطه به دست آمده در نقاط انفصال، این خط لوله به چند بخش مجزا تقسیم و نتایج مساله با جواب‌های یک لوله ساده مقایسه شده‌اند. شکل ۸ تغییرات فشار در طول لوله اولیه در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل پیداست، فشار تغییرات همواری دارد و هیچ ناپیوستگی در محل اتصالات دیده نمی‌شود. تغییرات نرخ جریان گاز در طول

۴-۱- جریان هم‌دما در خط لوله گاز با خروجی صفر

نمونه جریانی که در این قسمت بررسی می‌شود، جریان هم‌دما در لوله‌ای به طول ۷۲۲۵۹/۵ متر و قطر ۰/۲۰۷ متر است. زبری لوله ۰/۶۱۷ میلی‌متر، لزجت گاز $1.1 \times 10^{-6} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ و سرعت صوت ۳۳۶/۱ متر بر ثانیه می‌باشد. ابتدا هیچ جریانی درون لوله برقرار نیست و فشار ثابت ۶۰۰ psi به گاز درون لوله اعمال شده‌است. مقطع انتهایی لوله کاملاً مسدود است. در لحظه $t > 0$ فشار در ورودی لوله به صورت آنی به مقدار ۱۲۰۰ psi می‌رسد و در این مقدار، ثابت نگه‌داشته می‌شود. این مسئله توسط ژو و آدومی [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج به دست آمده با نتایج ژو و آدومی مقایسه شده‌اند.

ابتدا استقلال از شبکه با در نظر گرفتن تعداد گره‌های مختلف بررسی شده‌است و نتایج در شکل‌های ۴ و ۵ ترسیم شده‌اند. مشاهده می‌شود که با ریزتر کردن شبکه، دقت جواب‌ها به مقدار مطلوبی رسیده‌است و در نهایت، مقدار $dx=72.2595$ برای حل مسئله در نظر گرفته شده‌است.

در شکل ۶ تغییرات فشار گاز با زمان در مقاطع مختلف لوله نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود در مقطع ورودی لوله ($x/L=0$) فشار برابر ۱۲۰۰ psi است و در تمام طول شبیه‌سازی ثابت باقی می‌ماند، اما فشار بقیه نقاط در طول لوله بطور یکنواخت از مقدار ۶۰۰ psi به ۱۲۰۰ psi افزایش می‌یابد. شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات نرخ جریان گاز با زمان در مقاطع مختلف لوله است. ابتدا در مقطع ورودی لوله، نرخ جریان یک پرش آنی دارد که دلیل آن، افزایش ناگهانی فشار در ورودی از مقدار ۶۰۰ psi به ۱۲۰۰ psi است. سپس به طور یکنواخت کاهش می‌یابد و در زمان انتهایی به صفر می‌رسد.

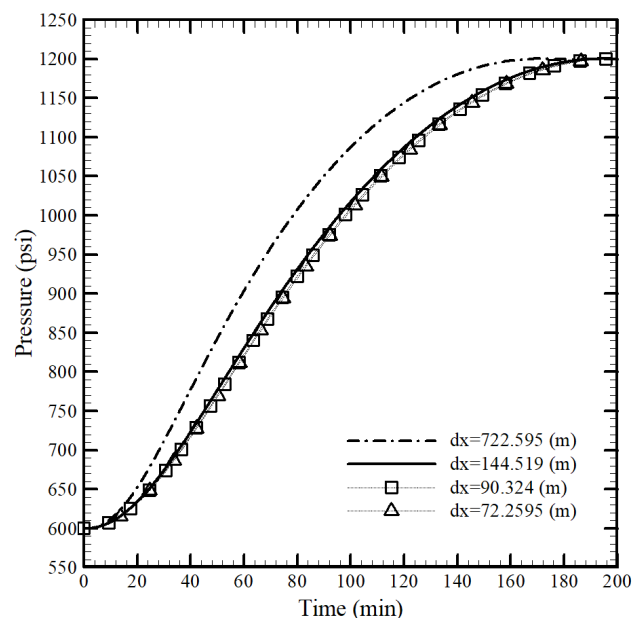


Fig. 4. Pressure changes versus time at the pipe outlet for the different numbers of nodes

شکل ۴: تغییرات فشار در خروجی لوله با گذشت زمان برای تعداد گره‌های مختلف

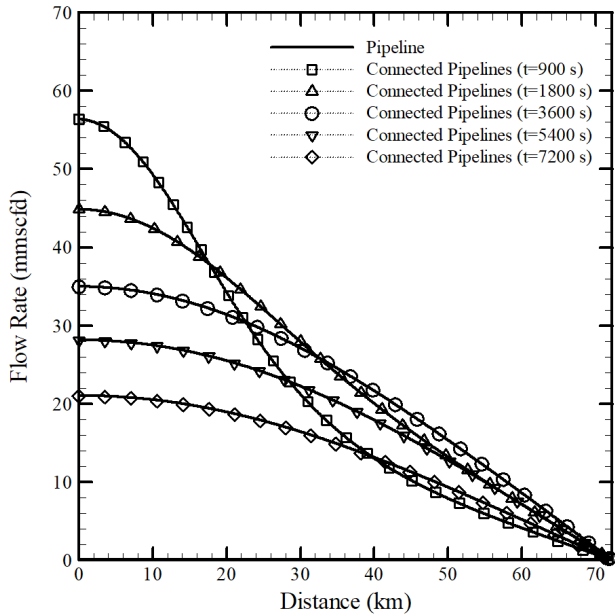


Fig. 9. Comparison of the pipeline solution by dividing it into several smaller sections to determine mass flow rate within the initial pipeline geometry at different times

شکل ۹: مقایسه حل خط لوله با تقسیم آن به چند بخش کوچک تر در تعیین نرخ جریان در طول لوله اولیه در زمان های مختلف

پردازشگرهای مختلف اجرا شده است و زمان حل مسئله برای هر حالت به دست آمده است. جدول ۱ مقایسه زمان حل مسئله با تغییر تعداد هسته های محاسباتی را نشان می دهد. مشاهده می شود که با توجه به اندازه شبکه، افزایش تعداد هسته ها از مقداری مشخص، تأثیری بر کاهش زمان ندارد و به دلیل افزایش ارتباطات، بازده الگوریتم کاهش می یابد. حال با ریزتر کردن شبکه، جریان درون لوله حل شده است و نتایج در جدول ۲ نوشته شده اند. مقادیر به دست آمده بیانگر کاهش زمان بیش تر حل مسئله نسبت به حالت قبل و کاهش قابل ملاحظه زمان اجرای برنامه هستند. نمودار افزایش سرعت برای چند حالت مختلف شبکه در شکل ۱۰ ترسیم شده است. افزایش شماره شبکه در شکل، بیانگر افزایش تعداد گره است.

همان گونه که از شکل ۱۰ مشخص است، با ریزتر کردن و افزایش

جدول ۱: زمان حل مسئله با تعداد هسته های محاسباتی مختلف

Table 1. The time of the problem solution with the number of different computing cores

روشن حل	تعداد هسته های محاسباتی	زمان اجرا (ثانیه)	درصد کاهش زمان
حل سریال		۹۵۵/۲۸	۰/۰
حل موازی	۲ هسته	۷۴۶/۰۳	۲۱/۹
	۳ هسته	۶۵۶/۲۷	۳۱/۳
	۴ هسته	۶۰۹/۱۲	۳۶/۲
	۵ هسته	۵۸۵/۵۵	۳۸/۷
	۶ هسته	۵۸۹/۳۹	۳۸/۳

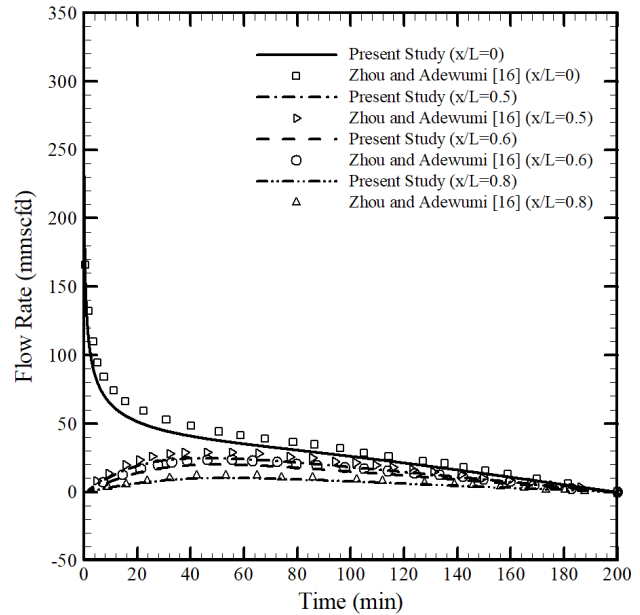


Fig. 7. Mass flow rate changes versus time at the different pipe sections

شکل ۷: تغییرات نرخ جریان در مقاطع مختلف لوله با گذشت زمان

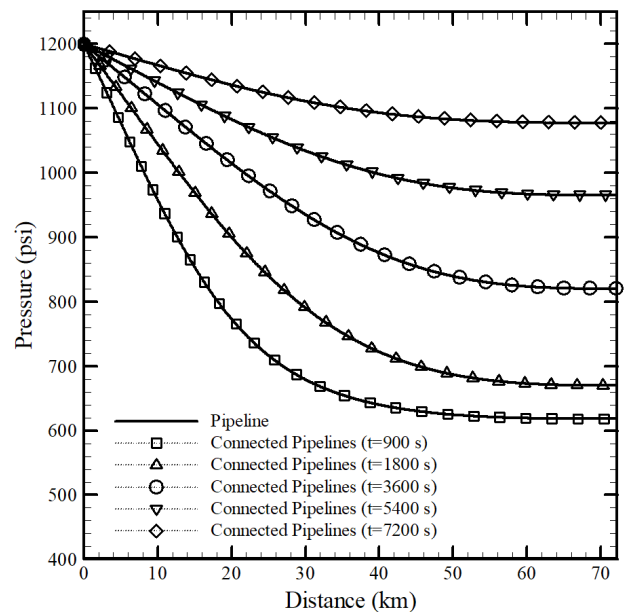


Fig. 8. Comparison of the pipeline solution by dividing it into several smaller sections to determine pressure within the initial pipeline geometry at different times

شکل ۸: مقایسه حل خط لوله با تقسیم آن به چند بخش کوچک تر در تعیین فشار در طول لوله اولیه در زمان های مختلف

لوله اولیه در زمان های مختلف نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. تطابق بسیار خوب مقادیر بدست آمده برای فشار و نرخ جریان نشان می دهد که روش بکار رفته می تواند جریان گذرا درون خط لوله اولیه را به خوبی پیش بینی نماید.

پس از صحت سنجی الگوریتم به کار رفته، کد برنامه موازی برای تعداد

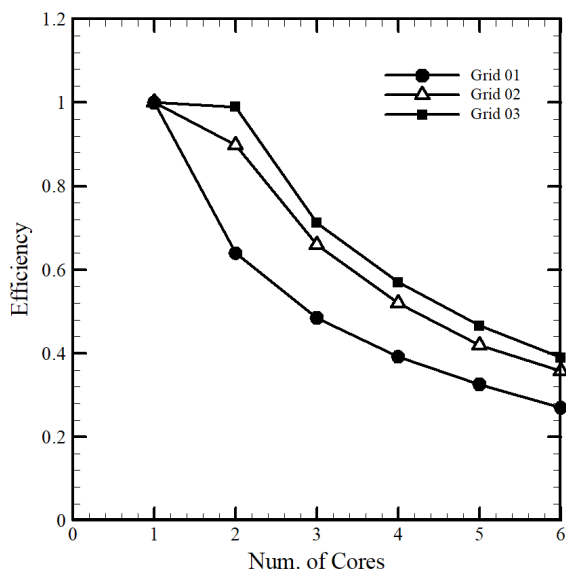


Fig. 11. Efficiency of the parallel algorithm for different grids
 شکل ۱۱: راندمان الگوریتم موازی برای شبکه‌های متفاوت

مؤثر است. با افزایش اندازه شبکه، حجم محاسبات در قسمت موازی برنامه بیش‌تر می‌شود و کاهش زمان نیز افزایش می‌یابد. برای هر حالت شبکه نیز، روند کاهشی راندمان با افزایش تعداد هسته‌ها به چشم می‌خورد. همان‌طور که توضیح داده شده، با افزایش تعداد هسته‌ها، به دلیل صرف زمانی برای ایجاد ارتباط میان هسته‌ها، راندمان کاهش می‌یابد.

۴-۲- جریان غیر هم‌دما در خط لوله گاز

جریان مورد بررسی در این بخش، جریان غیرهم‌دما و آدیاباتیک درون لوله‌ای به طول ۵۰ کیلومتر و قطر داخلی ۰/۵ متر می‌باشد. برای سیال مورد استفاده، وزن مولکولی ۱۸ و نسبت گرماهای ویژه ۱/۲۶ فرض شده‌است. به‌منظور تحلیل حالت گذرا، از شرایط جریان پایا به‌عنوان شرایط اولیه استفاده می‌شود. شرایط مرزی برای جریان پایا، فشار ورودی ۵ مگاپاسکال، فشار خروجی ۴ مگاپاسکال و دمای ورودی ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌اند. از زمان شروع شبیه‌سازی حالت گذرا، فشار ورودی مطابق شکل ۱۲ با زمان تغییر می‌کند، ولی فشار در خروجی لوله در مقدار ۴ مگاپاسکال ثابت باقی می‌ماند. هم‌چنین، دما در ورودی لوله ۶۰ درجه سانتی‌گراد است و در این مقدار ثابت باقی می‌ماند.

عباس‌پور [۱۷] این مسئله را تحلیل و بررسی کرده‌است. در این مسئله ضریب تراکم‌پذیری ثابت فرض می‌شود، در صورتی که عباس‌پور از ضریب تراکم‌پذیری متغیر استفاده کرده‌است. با توجه به نتایج مطالعه شبکه، گام مکانی $dx=200$ برای حل مسئله مناسب است.

شکل ۱۳ نشان‌دهنده تغییرات دبی جرمی با زمان در ورودی لوله است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، در لحظه $t > 0$ با ثابت ماندن فشار در ورودی و خروجی لوله، دبی جرمی در ورودی لوله با یک کاهش آنی مواجه می‌شود. دلیل آن افزایش ناگهانی دما در ورودی لوله است. در بقیه زمان‌ها

جدول ۲: زمان حل مسئله با تعداد هسته‌های محاسباتی مختلف برای شبکه ریز‌تر

Table 2. The time of the problem solution with the number of different computing cores for the fine grid

روش حل	تعداد هسته‌های محاسباتی	زمان اجرا (ثانیه)	درصد کاهش زمان
حل سریال		۵۶۴۲/۰۳	۰/۰
حل موازی	۲ هسته	۲۸۴۶/۹۲	۴۹/۵
	۳ هسته	۲۶۳۹/۹۳	۵۳/۲
	۴ هسته	۲۴۹۰/۲۶	۵۵/۹
	۵ هسته	۲۴۲۲/۰۴	۵۷/۱
	۶ هسته	۲۴۰۳/۱۵	۵۷/۴

نقاط شبکه، در تعداد هسته ثابت، افزایش سرعت به حالت ایده‌آل خطی نزدیک می‌شود که علت آن، افزایش بیشتر حجم محاسبات در مقایسه با ارتباط میان هسته‌ها است. در تعداد گره ثابت نیز با افزایش تعداد هسته‌ها، به دلیل افزایش حجم ارتباط بین هسته‌ها، بازده الگوریتم از حالت ایده‌آل دورتر می‌شود. منظور از حالت ایده‌آل، افزایش سرعت خطی است. با افزایش تعداد هسته‌ها، حجم محاسبات میان هسته‌های بیش‌تری تقسیم می‌شود و بار محاسباتی هر هسته کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر، ارتباط میان هسته‌ها نیز بیش‌تر می‌شود و مقداری از کاهش زمان به‌دست آمده، صرف برقراری ارتباط می‌شود. افزایش تعداد هسته‌ها و کوچک کردن مسئله تا زمانی که هماهنگی مناسبی میان این دو مقدار برقرار باشد، ادامه می‌یابد.

راندمان کد موازی برای اجراهای مختلف محاسبه و در شکل ۱۱ رسم شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، اندازه شبکه روی راندمان

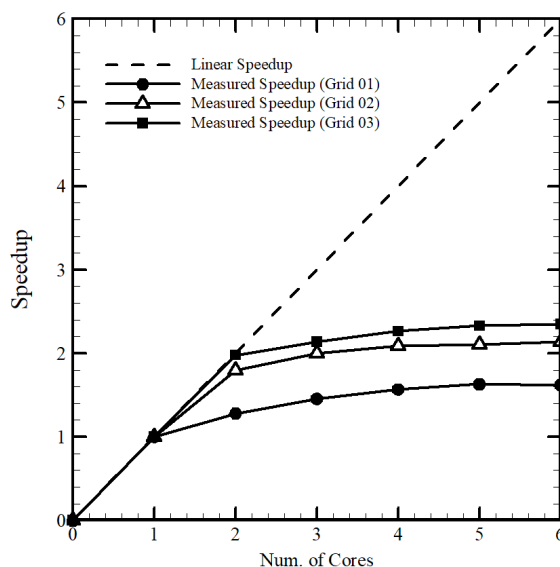


Fig. 10. Increasing the speed of the parallel algorithm for different grids
 شکل ۱۰: افزایش سرعت الگوریتم موازی برای شبکه‌های متفاوت

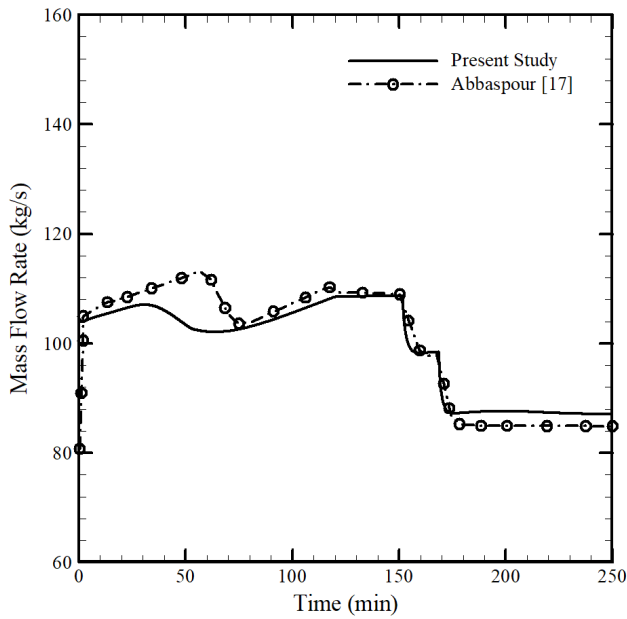


Fig. 14. Mass flow rate changes versus time at the pipe outlet
شکل ۱۴: تغییرات دبی جرمی با زمان در خروجی لوله

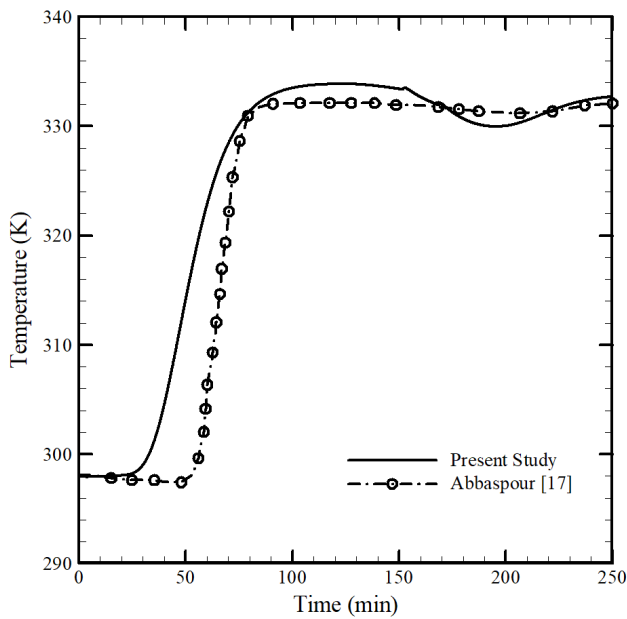


Fig. 15. Temperature changes versus time at the pipe outlet
شکل ۱۵: تغییرات دما با زمان در خروجی لوله

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، نتایج حالت موازی با حل سری هم‌خوانی کامل دارند و الگوریتم پیشنهادی، دقت جواب‌ها را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و روند حل را به‌درستی اجرا می‌کند.

مقادیر موجود در جدول ۳ بیانگر کاهش زمان به دست آمده از حل مسئله برای دو حالت شبکه حل هستند. نمودار افزایش سرعت اجزای مختلف در شکل ۱۸ رسم شده‌است. در این مثال نیز مانند خط لوله بخش

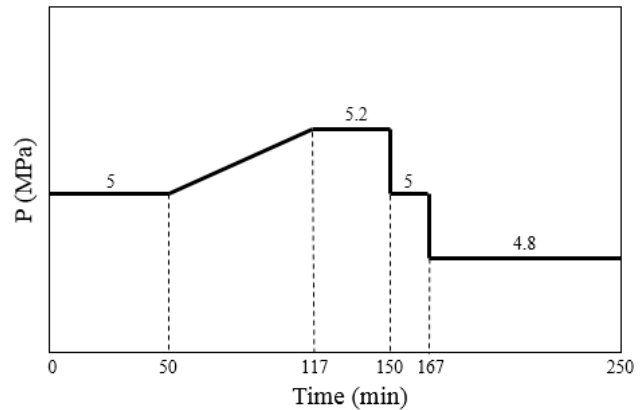


Fig. 12. Pressure changes versus time at the pipe inlet
شکل ۱۲: تغییرات فشار در ورودی با گذشت زمان

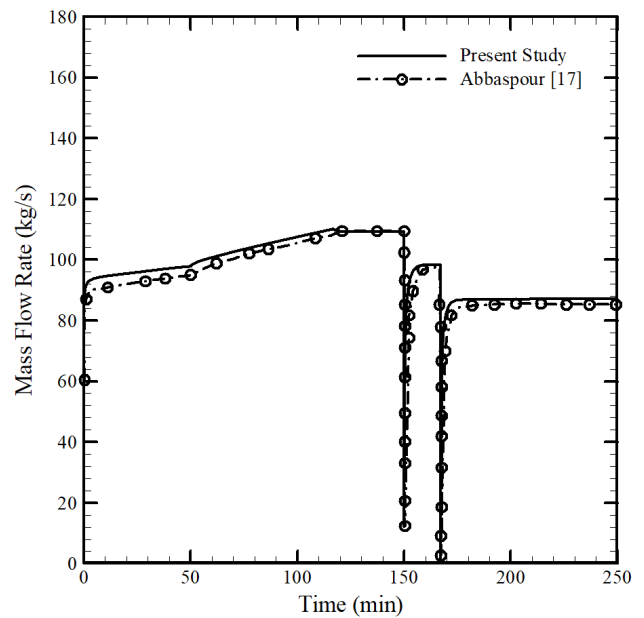


Fig. 13. Mass flow rate changes versus time at the pipe inlet
شکل ۱۳: تغییرات دبی جرمی با زمان در ورودی لوله

نیز تغییرات دبی با تغییرات فشار ورودی هم‌خوانی دارد. تغییرات دبی جرمی با زمان در خروجی لوله در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. نخست با ثابت ماندن فشار در ابتدا و انتهای لوله، افزایش دما در ورودی باعث تغییرات دبی می‌شود. با تغییرات ناگهانی فشار ورودی در زمان‌های ۱۵۰ و ۱۶۷ دقیقه، دبی در انتهای لوله نیز دچار تغییراتی خواهد شد.

نتایج تغییرات دما با زمان در خروجی لوله در شکل ۱۵ رسم شده‌است. روند تغییرات دما نیز با توضیحات گفته‌شده در شکل‌های قبل هم‌خوانی دارد. در ابتدا زمانی طول می‌کشد تا گره انتهایی، افزایش دمای ایجادشده در ورودی لوله را احساس کند. پس از آن، دما شروع به افزایش می‌کند. سپس، جریان در این خط لوله به‌صورت موازی حل شده‌است و نتایج در

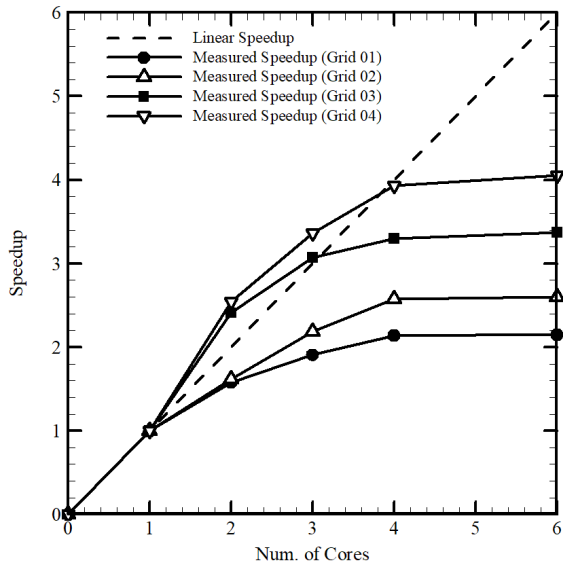


Fig. 18. Increasing the speed of the parallel algorithm for different grids

شکل ۱۸: افزایش سرعت الگوریتم موازی برای شبکه‌های متفاوت

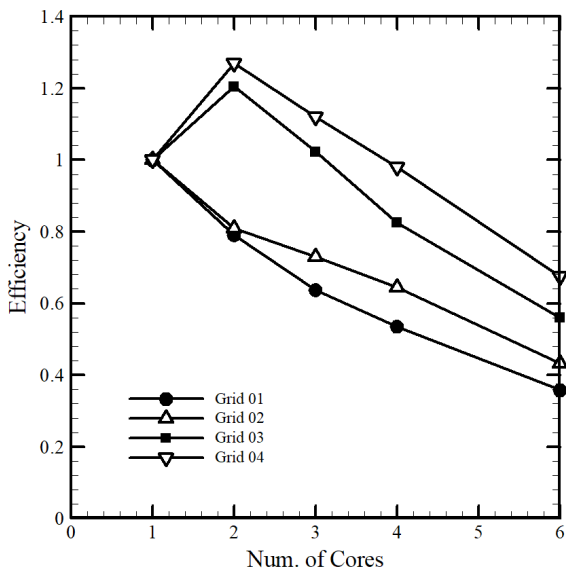


Fig. 19. Efficiency of the parallel algorithm for different grids

شکل ۱۹: راندمان الگوریتم موازی برای شبکه‌های متفاوت

۵- نتیجه‌گیری

روش تفاضل محدود، روشی بسیار پرکاربرد ولی با محاسبات قابل توجه است و استفاده از پردازش موازی می‌تواند تأثیر بسیاری در سرعت بخشیدن به پاسخ در این روش داشته‌باشد. هم‌چنین، کاهش زمان حاصل شده به کمک پردازش موازی، این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان مسائل پیچیده‌تری در خطوط انتقال گاز را با دقت بالاتری تحلیل کرد.

در تحقیق حاضر، تحلیل جریان گذرای هم‌دما و غیرهم‌دمای گاز طبیعی درون خطوط لوله به روش تفاضل محدود موازی صورت پذیرفته است. در این پژوهش، با موازی‌سازی گام‌های مختلف تحلیل مسئله، تأثیر مطلوب

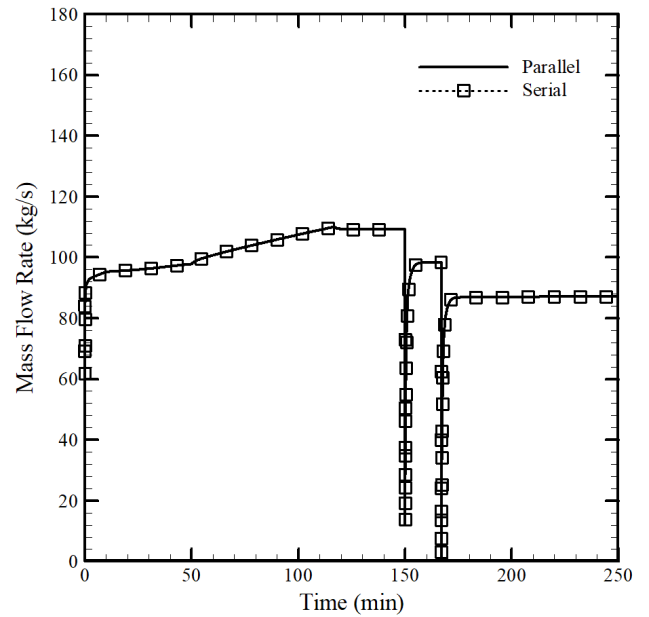


Fig. 16. Comparison of the parallel and serial solutions- Mass flow rate at the pipe inlet

شکل ۱۶: مقایسه حل موازی و سری - دبی جرمی در ورودی لوله

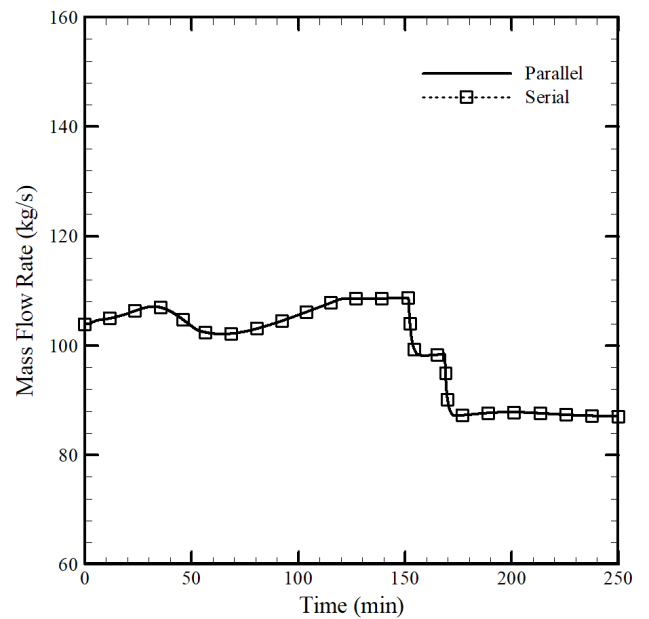


Fig. 17. Comparison of the parallel and serial solutions- Mass flow rate at the pipe outlet

شکل ۱۷: مقایسه حل موازی و سری - دبی جرمی در خروجی لوله

قبل، با افزایش تعداد نقاط شبکه، در تعداد هسته ثابت، تسریع افزایش می‌یابد. در تعداد

گره ثابت نیز، افزایش تعداد هسته‌ها، کاهش زمان بیشتری را نتیجه می‌دهد که شیب آن با پیشروی کاهش می‌یابد. در جریان غیرهم‌دما، به دلیل اضافه شدن معادله انرژی به دسته معادلات هر زیردامنه و افزایش محاسبات هر هسته نسبت به جریان هم‌دما، بازده افزایش می‌یابد. نمودار راندمان برنامه موازی برای شبکه‌های مختلف در شکل ۱۹ ترسیم شده‌است.

فهرست علائم

ماتریس ژاکوبین شار تجزیه شده متناظر با مقادیر ویژه مثبت	A^+
ماتریس ژاکوبین شار تجزیه شده متناظر با مقادیر ویژه منفی	A^-
سطح مقطع لوله، m^2	A_r
ماتریس ژاکوبین بردار H	B
سرعت محلی صوت، m/s	c
گرمای ویژه، $J/kg.K$	c_p
قطر لوله، m	Di
بردار شار تجزیه شده متناظر با مقادیر ویژه مثبت	E^+
بردار شار تجزیه شده متناظر با مقادیر ویژه منفی	E^-
انرژی کل بر واحد حجم، J/m^3	e_0
ضریب اصطکاک	f
بردار شامل ترم اصطکاک و انتقال حرارت	H
ماتریس واحد	I
فشار، Pa	p
ثابت گاز، $J/kg.K$	R
دما، K	T
زمان، s	t
سرعت محلی جریان در راستای محور لوله، m/s	u
حجم مخصوص، m^3/kg	v
دبی جرمی، kg/s	W
مکان، m	x
ضریب تراکم پذیری سیال	Z

علامت یونانی

نسبت گرماهای ویژه	γ
چگالی، kg/m^3	ρ

زیرنویس

شمارنده گام مکانی	i
شمارنده گام زمانی	j

منابع

- [1] S.P. Santos, Transient Analysis A Must in Gas Pipeline Design, 29th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), Arizona, (1997).
- [2] C.E. Lapple, Isothermal and Adiabatic Flow of Compressible Fluids, *Trans. Am. Inst. Eng.*, 39(1) (1943) 385-432.
- [3] M.A. Stoner, *Steady- State Analysis of Gas Production*

جدول ۳: مقایسه زمان حل مسئله با تعداد هسته های مختلف

Table 3. The time of the problem solution with the number of different computing cores

روش حل	تعداد هسته های محاسباتی	زمان اجرا (ثانیه)	درصد کاهش زمان	زمان اجرا (ثانیه)	درصد کاهش زمان
حل سریال		۱۳۹۲/۰۶	۰	۲۰۷۴/۹۷	۰
حل ۲ هسته	۲	۸۸۰/۹۷	۳۶/۷	۱۲۷۹/۲۹	۳۸/۳
حل ۳ هسته	۳	۷۲۶/۹۷	۴۷/۸	۹۴۷/۱۷	۵۴/۳
حل موازی ۴ هسته	۴	۶۴۹/۸۵	۵۳/۳	۸۰۵/۲۳	۶۱/۲
حل موازی ۶ هسته	۶	۶۴۵/۵۴	۵۳/۶	۷۹۶/۷۹	۶۱/۶

استفاده از روش پردازش موازی نشان داده شده است. تحلیل عددی مسئله با استفاده از روش تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ و مفهوم مشخصه ها، و موازی سازی مسئله به روش تقسیم دامنه هندسی انجام شده است. دو مسئله در شرایط هم دما و غیرهم دما با استفاده از مدل پیشنهادی به صورت سری و موازی حل شده اند.

نتایج به دست آمده، نشان دهنده دقت و توانایی بالای روش موازی در تحلیل جریان گاز است. الگوریتم انتخابی برای موازی سازی به گونه ای است که اعمال MPI بر روش حل مسئله را ساده تر کرده است و نیاز به تبادل اطلاعات میان واحدهای محاسباتی مختلف را کاهش داده است. همچنین این رویکرد، موجب کاهش نسبت عملیات سری به مقدار زیادی شده است. جواب های به دست آمده در حالت موازی و سری بر هم منطبق هستند که این موضوع روند درست الگوریتم موازی مورد استفاده را نشان می دهد. مقایسه زمان محاسباتی حل موازی با حل سری بیانگر آن است که روش موازی بر روی شبکه های ریزتر، کارایی بالاتری دارد. به طور کلی، کاهش زمان و میزان تسریع با افزایش تعداد پردازشگرها افزایش می یابند، ولی افزایش سرعت بدست آمده در مسئله غیرهم دما نسبت به جریان هم دما مطلوب تر است. در خط لوله غیرهم دما، با وارد شدن معادله انرژی در دستگاه معادلات و افزایش حجم محاسبات، نتیجه بهتری حاصل شده است.

خطوط لوله انتقال گاز، طول بسیار زیادی دارند و با توجه به دقت مورد نیاز، شبکه حل و حضور جملاتی مانند انتقال حرارت، زمان های شبیه سازی افزایش می یابند. بنابراین، انتظار می رود که در مسائل کاربردی، با بزرگ تر شدن هندسه و پیچیده تر شدن شرایط مرزی، تأثیر پردازش موازی افزایش یابد. همچنین، با توسعه مدل سازی عددی و ارتقای کد کامپیوتری حاضر، می توان جریان درون شبکه های گسترده گازرسانی را تحلیل نمود و کاهش زمان قابل ملاحظه ای بدست آورد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان از دفتر پژوهش گاز و دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می نمایند.

- on *Computational Mechanics (WCCM XI)*, (2014).
- [11] E. Tentis, D. Margaris, D. Papanikas, Transient Gas Flow Simulation Using an Adaptive Method of Lines, *C.R. Mecanique*, 331 (2003) 481–487.
- [12] J. Zhou, M.A. Adewumi, *Simulation of Transients in Natural Gas Pipelines*, Accepted by SPE Production & Facilities, (1995).
- [13] J.L. Steger, R.F. Warming, Flux Vector Splitting of the Inviscid Gasdynamic Equations with Application to Finite-Difference Methods, *Journal of Computational Physics*, 40 (1981) 263-293.
- [14] P.J. Thomas, *Simulation of Industrial Processes for Control Engineers*, Elsevier Sci. & Tech. Books, Duisburg, (1999).
- [15] J. Dongarra, *Sourcebook of Parallel Computing*, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, (2009).
- [16] J. Zhou, M.A. Adewumi, *Simulation of Transient Flow in Natural Gas Pipelines*, 27th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), Albuquerque, New Mexico, (1995).
- [17] M. Abbaspour, *Simulation and Optimization of Non-isothermal, One-Dimensional Single/Two Phase Flow in Natural Gas Pipeline*, PhD Thesis, Department of Mechanical and Nuclear Engineer, College of Engineering, Kansas State University, (2005).
- Transmission and Distribution Systems*, Meeting Society of Petroleum Engineers of AIME, Denever, Colorado, (1969).
- [4] A.F. Doonan, I. Fletcher, C.S. Cox, W.J.B. Arden, Evaluation of a Remote Boundary Pressure Control Strategy Using SIMULINKTM, *Proceeding from UKACC International Conference on Control*, 98 (1998) 129-134.
- [5] A.J. Osiadacz, M. Chaczikowsky, Comparison of Isothermal and Non-isothermal Pipeline Gas Flow Models, *J. Chemical Eng., Elsevier Sci.*, 81 (2000) 41-51.
- [6] W.Q. Tao, H.C. Ti, Transient Analysis of Gas Pipeline Network, *J. Chem. Eng.*, 69 (1998) 47–52.
- [7] M. Abbaspour, K.S. Chapman, Nonisothermal Transient Flow in Natural Gas Pipeline, *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 75(3) (2008) 10181–10188.
- [8] N. Noorbehesht, P. Ghaseminejad, Numerical Simulation of the Transient Flow in Natural Gas Transmission Lines Using a Computational Fluid Dynamic Method, *American Journal of Applied Sciences*, 10 (2013) 24-34.
- [9] J. Lepper, Parallelization of a Simulation Code for Reactive Flows on the Intel Paragon, *Computers Math. App.*, 35(7) (1998) 101-109.
- [10] A. Gorobets, F.X. Trias, R. Borrell, Direct Numerical Simulation of Turbulent Flows with Parallel Algorithms for Various Computing Architectures, 11th *World Congress*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Tarmigh, M. Behbahani-nejad, A. Azimi, Numerical Simulation of Transient Compressible Flow in Natural Gas long Transmission Pipelines Using a Suitable Parallel Algorithm, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 785-798.

DOI: 10.22060/mej.2017.11667.5152



