



روشی کارا جهت محاسبه میزان گاز هدررفت از شبکه‌های شاخه‌ای با در نظر گرفتن افت‌های موضعی

مرتضی بهبهانی‌نژاد^{۱*}، عزیز عظیمی^۲، حجت سعیدیان^۳ و مازیار چنگیزیان^۴

^۱دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی شبکه‌های گازرسانی، دانشگاه شهید چمران، اهواز

^۲استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات حفاری، دانشگاه شهید چمران، اهواز

^۳کارشناس ارشد مکانیک، مرکز پژوهشی شبکه‌های گازرسانی، دانشگاه شهید چمران، اهواز

^۴استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی شبکه‌های گازرسانی، دانشگاه شهید چمران، اهواز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۹/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۳۰

چکیده

در این مقاله، جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا درون شبکه‌های گازرسانی به‌منظور محاسبه میزان گاز هدررفت، شبیه‌سازی شده است. تعیین دقیق دبی هدررفت درون این شبکه‌ها، نیازمند محاسبه افت‌های موضعی با توجه به اثرات تراکم‌پذیری است؛ لذا ابتدا تعریفی جدید مطابق با ماهیت جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا برای محاسبه افت‌های موضعی ارائه شده است؛ سپس حالت‌های مختلف جریان سه‌بعدی درون اتصالات T-شکل توسط نرم‌افزار فلوئنت، شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، رابطه‌ای برای محاسبه میزان افت فشار درون این‌گونه اتصالات به‌صورت تابعی از عدد ماخ ورودی به آن‌ها به‌دست‌آمده است. رابطه پیشنهادشده در مقایسه با روابط ارائه شده توسط سایر محققان، دارای فرمی به مراتب ساده‌تر بوده، با سهولت بسیار بیشتری نیز در تدوین نرم‌افزارهای تحلیل شبکه‌های گازرسانی قابل پیاده‌سازی است؛ در نهایت با استفاده از رابطه افت به‌دست آمده و توسط الگوریتمی جدید، میزان گاز هدررفت از شبکه شاخه‌ای نمونه محاسبه شده است. انطباق بسیار خوب نتایج به‌دست آمده از برنامه عددی و فلوئنت با یکدیگر، کارایی رابطه افت به‌دست آمده و صحت الگوریتم عددی به‌کار رفته را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: افت‌های موضعی؛ جریان‌های تراکم‌پذیر؛ شبیه‌سازی عددی؛ شبکه گازرسانی؛ گاز هدررفت.

An Efficient Approach to Calculate the Amount of Released Gas in Branched Networks Considering Minor Loss Effects

M. Behbahani-Nejad^{1*}, A. Azimi², H. Saidian³ and M. Changizian⁴

¹Associate Prof., Mech. Eng. Dept., Research Center of Natural Gas Networks, ShahidChamran Univ., Ahvaz, Iran.

²Assistant Prof., Mech. Eng. Dept., Drilling Research Center, ShahidChamran Univ., Ahvaz, Iran.

³Msc, Research Center of Natural Gas Networks, ShahidChamran Univ., Ahvaz, Iran.

⁴Assistant Prof., Mech. Eng. Dept., Research Center of Natural Gas Networks, ShahidChamran Univ., Ahvaz, Iran.

Abstract

In this paper, high velocity compressible flows in gas networks have been simulated in order to calculate the amount of released gas. The exact determination of the released gas in the networks needs to calculate the minor losses along with the existing compressibility effects. First, a new definition based on the physics of high velocity compressible flows has been proposed to calculate the minor losses. Then, different types of the three-dimensional flow through T-type junctions are simulated using Fluent Package. Based on the obtained results, an appropriate relation is proposed to calculate minor loss coefficients as function of junction inlet Mach number. The proposed relation has much simpler form than those proposed by the others and it can be more easily applied to develop the gas networks analysis softwares. Finally, the amount of released gas through a branched network is calculated using a new algorithm based on our proposed minor loss equation. The very good agreement between the numerical code and Fluent results shows the accuracy and efficiency of the proposed minor loss relation and applied numerical algorithm.

Keywords: Minor Losses; Compressible Flows; Numerical Simulation; Gas Network; Released Gas.

۱- مقدمه

همواره شبیه‌سازی شبکه‌های گازرسانی به دلیل اهمیت بالا و گستردگی بیش از حد آن، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. عمده شبیه‌سازی‌های انجام گرفته که در قالب نرم‌افزارهای کاربردی مورد استفاده کاربران هستند با فرض جریان پایا، تراکم ناپذیر و یک بعدی بنا شده‌اند. این فرضیات، در حالت عادی و برای کاربردهای متداول درون شبکه‌های گازرسانی منطقی است. در حالت‌هایی خاص از قبیل، رهاسازی گاز به اتمسفر (به منظور راه‌اندازی شبکه یا تخلیه شبکه) و یا شکستن خط لوله و مسائلی از این قبیل، با توجه به وجود اختلاف فشار بالا، سرعت در خط لوله به شدت افزایش می‌یابد. در این حالت فرض جریان تراکم‌ناپذیر، نتایج قابل قبولی ارائه نداده، انتظار می‌رود اثرات تراکم‌پذیری به‌صورت تابعی از عدد ماخ، جریان درون لوله خود را نمایان سازند. بدین منظور و برای شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا درون شبکه‌های گازرسانی، به داده‌های مطمئنی از افت‌های موضعی موجود در شبکه نیاز است، به‌گونه‌ای که اثرات تراکم‌پذیری جریان در آن‌ها دیده شده باشد. محاسبه این افت‌ها و لحاظ کردن آن‌ها در مدل‌های یک‌بعدی، کمک فراوانی به واقعی‌تر کردن فرآیند شبیه‌سازی می‌کند؛ لذا با توجه به اهمیت این‌گونه افت‌ها و تاثیر چشمگیر آن‌ها بر محاسبه میزان گازهای هدررفت، در این قسمت ابتدا به مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه محاسبه ضرایب افت فشار درون اتصالات متداول در شبکه‌های گازرسانی پرداخته، در ادامه فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی یک بعدی جریان‌های پایا و تراکم‌پذیر درون شبکه‌های گازرسانی بررسی شده است.

اتصالات T- شکل، یکی از اتصالات متداول و پرکاربرد درون شبکه‌های گازرسانی است که در زمینه شبیه‌سازی و محاسبه ضرایب افت آن‌ها تاکنون فعالیت‌های متنوعی صورت گرفته است.

آشفته آب درون اتصالات T- شکل را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرده، تفاوت میان نتایج عددی و آزمایشگاهی و همچنین تفاوت میان مدل‌های مختلف را مورد بحث قرار دادند [۲ و ۳]. اوکا^۳ و ایتو^۴، ضریب افت اتصالات T- شکل با گوشه‌های تیز و نسبت، مساحت‌های بزرگ را برای پنج زاویه مختلف انشعاب‌ها از ۴۵ درجه گرفته تا ۱۳۵ درجه بررسی کرده نتایج قابل ملاحظه‌ای برای تمامی ساختارهای جریان به‌دست آورده‌اند [۴]. کاستا^۵ و همکاران، به بررسی اثرات گوشه‌ها بر مشخصات جریان درون اتصالات T- شکل پرداخته‌اند. آن‌ها دریافتند که با گرد کردن گوشه‌ها بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بسته به نسبت دبی جرمی، افت انرژی مربوط به انشعابات کاهش می‌یابد [۵].

متأسفانه در تمامی حالت‌های ذکر شده تاکنون، ضرایب افت فشار محاسبه شده، مختص جریان‌های تراکم‌ناپذیر بوده است. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد، اطلاعات موجود پیرامون جریان‌های تراکم‌پذیر محدود بوده، مربوط به محدوده کوچک از اعداد ماخ هستند. در ادامه فعالیت‌های صورت گرفته برای محاسبه ضرایب افت فشار موضعی در جریان‌های تراکم‌پذیر بررسی می‌شود.

بنسون^۶ و وولات^۷، اولین داده‌های تجربی را برای سیال عامل هوا درون زانویی‌ها و اتصالات T- شکل ارائه کردند. آن‌ها به‌صورت تجربی و تئوری، به بررسی جریان‌های ناپایا درون این‌گونه اتصالات پرداختند [۶]؛ این در حالی است که ضریب افت ارائه شده، طبق تعاریف مرتبط با جریان‌های تراکم‌ناپذیر محاسبه شده است. موریمون^۸ و همکاران، اتصالات T- شکل تجاری با زبری‌های متفاوت و گوشه‌های گرد در محل اتصال را بررسی و با استفاده از روابط تراکم‌ناپذیر نتایج را ارائه کردند [۷]. ابوحیدر^۹ و دیکسون^{۱۰}، یک تست پر هزینه برای زوایا و نسبت سطوح متفاوت درون اتصالات T- شکل و Y- شکل انجام داده‌اند [۸]. تست‌های

داده‌های تجربی بسیاری پیرامون جریان‌های تراکم‌ناپذیر اتصالات وجود دارد که مطمئن‌ترین و کامل‌ترین آن‌ها توسط میلر^۱ ارائه شده است [۱]. سیرا-اسپینوسا^۲ و همکاران، جریان

²Sierra-Espinosa³Oka⁴Ito⁵Costa⁶Benson⁷Woollatt⁸Morimune⁹Abou-Haidar¹⁰Dixon¹Miller

برنامه‌های عددی اعمال شده، بدین صورت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی به واقعیت نزدیک‌تر شود.

تاکنون فعالیت‌های متنوعی در زمینه شبیه‌سازی عددی جریان‌های تراکم‌پذیر و پایای یک‌بعدی درون شبکه‌های گازرسانی صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه، پری‌توریوس^۲ و همکاران، جریان درون شبکه‌های گسترده گاز طبیعی را به‌صورت پایا، یک‌بعدی و هم‌دما شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مدل خود را برای جریان‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر ارائه کرده، نتایج به‌دست آمده را با نتایج سایر مراجع موجود مقایسه کردند [۱۱]. همچنین یوسف‌زاده، به‌صورت عددی جریان‌های تراکم‌پذیر و هم‌دما درون شبکه‌های گازرسانی را مورد بررسی قرار داد. وی روش‌های مختلف تحلیل شبکه را بررسی کرده، در نهایت از روش نیوتن-لوپ-نودبه‌همراه تئوری گراف استفاده کرد. از معادله ویموث، برای تحلیل جریان درون شبکه استفاده شده، نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های موجود در مراجع اعتبارسنجی شده است [۱۲]. البته لازم به ذکر است در تمامی این موارد که برای شرایط کارکرد متداول درون شبکه‌ها صادق هستند، سرعت گاز درون خطوط لوله پایین بوده، میزان افت فشار درون اتصالات و دیگر تجهیزات موجود در شبکه چندان چشم‌گیر نیست؛ لذا در بسیاری از نرم‌افزارها به‌دلیل ناچیز بودن این میزان افت فشار درون اتصالات، یا از اثرات آن در فرآیند تحلیل شبکه چشم‌پوشی کرده، یا از روابط جریان‌های تراکم‌ناپذیر برای نظر گرفتن این میزان افت فشار استفاده کرده‌اند. اما برای حالت‌هایی خاص از قبیل، رهاسازی گاز به اتمسفر (به منظور راه‌اندازی شبکه یا تخلیه شبکه) و یا شکستن خط لوله و مسائلی از این قبیل، با توجه به وجود اختلاف فشار بالا، سرعت در خط لوله به‌شدت افزایش می‌یابد. در این راستا و برای تحلیل این نوع مسایل، تاکنون فعالیت‌های اندکی صورت گرفته است.

ووجسیک^۳ و همکاران، جریان پایای گاز طبیعی را برای حالت‌هایی که خطوط لوله دچار آسیب‌دیدگی می‌شوند، بررسی کرده، از مدل‌های متداول آدیاباتیک و هم‌دما برای شبیه‌سازی گاز واقعی و ایده‌آل استفاده کردند [۱۳]. آن‌ها

مربوطه در محدوده وسیعی از اعداد ماخ تا رسیدن به حالت خفگی، صورت گرفته است. نتایج تنها برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر اعتبارسنجی شده، در حالی‌که عدد ماخ بزرگتر از مقدار ۰/۲ بوده، خطاهای چشمگیری مشاهده شده است. شاید بتوان ادعا کرد که اولین اقدامات اساسی جهت دستیابی به مدلی برای محاسبه ضرایب افت فشار جریان گاز درون اتصالات با احتساب اثرات تراکم‌پذیری، مربوط به گارسیا^۱ و همکاران است [۹]. ایشان مطالعه عددی و آزمایشگاهی روی جریان‌های تراکم‌پذیر درون اتصالات T-- شکل انجام دادند و ضریب افت فشار موضعی درون اتصالات را محاسبه کردند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی، نشان می‌دهد که استفاده از مدل توربولانسی SST k- ω به همراه حلگر ترکیبی و ضمنی، منجر به نتایج عددی مناسب می‌شود. همچنین ایشان دریافتند که ضریب افت محاسبه شده با استفاده از روابط موجود، حساسیت کمی به تغییرات عدد ماخ داشته، لازم است که تعریف ارائه شده برای این ضریب بهبود یابد. بدین منظور گارسیا و همکاران [۱۰]، رابطه جدیدی برای ضریب افت فشار درون اتصالات پیشنهاد دادند به‌گونه‌ای که توسط آن بتوان اثرات تراکم‌پذیری را تابعی از عدد ماخ توصیف کرد. شایان ذکر است که مدل پیشنهاد شده توسط گارسیا و همکاران [۱۰]، هیچ‌گونه مفهومی از افت فشار درون اتصال را مستقیماً در بر ندارد و فقط رابطه‌ای میان عدد ماخ قبل و بعد از اتصال برقرار می‌کند. از طرفی جهت محاسبه ضریب افت فشار، اتصال توسط این رابطه نیاز است، پارامترهای متعددی توسط روابط متعدد محاسبه شود که این امر، سهولت استفاده از این مدل را در شبیه‌سازی شبکه‌های گازرسانی خدشه‌دار می‌سازد. به‌همین دلیل ارائه روشی موثر و کارآمد جهت محاسبه افت فشار جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا درون اتصالات T- شکل، امری ضروری به‌نظر می‌رسد. به‌گونه‌ای که توسط آن بتوان با سهولت بیشتری نسبت به مدل‌های قبلی، ضرایب افت فشار موضعی را محاسبه کرد.

پس از ارائه مدل مورد نظر جهت محاسبه ضرایب افت فشار درون اتصالات، لازم است به نوعی این افت‌ها در

² Pretorius

³ Kostowski

¹ García

با یکدیگر، صحت شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته و کارایی رابطه افت به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

۲- افت‌های موضعی جریان‌های تراکم‌پذیر

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، افت‌های موضعی در جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا، از اهمیت فراوانی برخوردار بوده، تاثیر به‌سزایی در محاسبه میزان گازهای هدررفت دارند؛ لذا در این قسمت، به ارائه روشی موثر و کارآمد جهت محاسبه افت فشار ناشی از اتصالات موجود در شبکه‌های گازرسانی پرداخته می‌شود. یکی از اتصالات متداول و پرکاربرد درون شبکه‌های گازرسانی، اتصالات T- شکل هستند که در ادامه با توجه به تعریف جدید، ارائه و شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی صورت گرفته، رابطه‌ای برای محاسبه میزان افت فشار درون این‌گونه اتصالات، به‌صورت تابعی از عدد ماخ ورودی به آن‌ها به‌دست‌آمده است.

ضرایب افت فشار به کار رفته در فعالیت‌های پیشین، بیشتر مختص جریان‌های تراکم‌ناپذیر بوده، از محدود فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه جریان‌های تراکم‌پذیر درون اتصالات می‌توان به کار گارسیا اشاره کرد [۱۰]. وی برای محاسبه ضریب افت فشار اتصالات، تعریف جدیدی را ارائه کرد که مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\bar{K} = \frac{(1 + a M_3^{*2})^b - 1}{(1 + a M_i^{*2})^b} \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

$$a = (\gamma - 1)/2, \quad b = \gamma/(\gamma - 1)$$

که در آن γ همان نسبت گرماهای ویژه و M_1^* و M_3^* به‌ترتیب، عدد ماخ برون‌یابی شده در ورودی و خروجی اتصال است. برای محاسبه این خواص برون‌یابی شده و در نتیجه محاسبه ضریب افت مربوطه، می‌بایست از روابط متعدد ارائه شده در مرجع [۱۰] استفاده کرد که این امر، سهولت استفاده از این روابط را در تحلیل شبکه‌های گازرسانی دچار مشکل می‌سازد. از سوی دیگر، به اذعان پیشنهاددهندگان رابطه (۱)، ضریب مربوطه هیچ‌گونه مفهومی از افت فشار درون اتصال را مستقیماً در بر ندارد و فقط رابطه‌ای میان پارامترهای قبل و بعد از اتصال برقرار می‌کند.

لذا در این مقاله، تعریف جدیدی برای محاسبه ضریب افت فشار موضعی ارائه شده که ضمن سادگی و سهولت

همچنین مطالعه عددی مرتبط با شکستن خط لوله در خطوط فشار قوی و متوسط انجام دادند و اهمیت انتخاب مدل مناسب برای جریان (هم‌دما، آدیاباتیک، گاز ایده‌آل و واقعی) را بررسی کردند.

یوها^۱ و همکاران، مدل ریاضی از رهاسازی تصادفی گاز درون خطوط لوله برای جریان‌های پایای یک‌بعدی و آدیاباتیک ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل سوراخ، برای رهایش گاز از سوراخ‌های کوچک و مدل لوله، برای رهایش گاز از میان سوراخ‌های کامل (شکست خط لوله) مناسب است. همچنین در این پژوهش، مدلی جدید برای پیش‌بینی جریان رهاشده از یک سوراخ با شرایطی مابین دو حالت فوق ارائه شده است [۱۴].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی عددی جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا تاکنون، معطوف به یک خط لوله بوده، در زمینه شبیه‌سازی عددی این‌گونه جریان‌ها درون شبکه‌های گازرسانی، هیچ‌گونه فعالیتی صورت نگرفته است.

با توجه به مرور فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا، مشخص گردید تاکنون روشی جامع جهت محاسبه افت‌های موضعی موجود در شبکه‌های گازرسانی ارائه نشده است؛ لذا در این مقاله، به‌منظور محاسبه افت‌های موضعی ناشی از اتصالات، ابتدا تعریفی جدید برای محاسبه این افت‌ها، تابع اثرات تراکم‌پذیری ارائه شده است؛ سپس با توجه به شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی صورت گرفته برای حالت‌های مختلف جریان درون اتصالات T- شکل و استخراج نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها، رابطه‌ای برای محاسبه میزان افت فشار درون این‌گونه اتصالات به‌صورت تابعی از عدد ماخ ورودی به آن‌ها به‌دست‌آمده است. پس از آن با استفاده از رابطه افت به‌دست آمده و در نظر گرفتن فرضیاتی از قبیل، جریان پایا، آدیاباتیک، غیرلزج و یک‌بعدی (فرضیات جریان فانو)، یک برنامه عددی برای تحلیل جریان گاز درون شبکه‌های شاخه‌ای نوشته شده است. در انتها، به‌منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی حاضر، نتایج به‌دست آمده از برنامه عددی، با نتایج فلونتت مقایسه شده است. انطباق بسیار خوب نتایج

^۱ Yuhua

قبلی [۹]، از مدل توربولانسی دو معادله‌ای $\omega - \kappa$ SST به همراه اثرات تراکم‌پذیری استفاده شده است. این مدل به‌طور همزمان از توانایی مدل $\omega - \kappa$ برای احتساب نواحی رینولدز پایین و مدل $\epsilon - \kappa$ برای احتساب نواحی رینولدز بالا بهره می‌گیرد. همچنین از دیگر ویژگی‌های این مدل می‌توان به کارایی آن در به حساب آوردن اثرات انتقال تنش‌های برشی غالب جریان اشاره کرد. این خصوصیات، سبب شده‌است که مدل $\omega - \kappa$ SST برای محدوده وسیعی از جریان‌ها نسبت به مدل $\omega - \kappa$ بسیار دقیق‌تر باشد [۱۵].

در مسئله حاضر برای بررسی پارامترهای موثر بر ضریب افت فشار، پس از مطالعه فعالیت‌های پیشین مشخص گردید در جریان‌های تراکم‌ناپذیر این ضریب، تنها تابع نسبت دبی جرمی بین انشعابات است [۱۱]. در صورتی که برای جریان‌های تراکم‌پذیر چنین نیست و ضریب افت فشار برای این جریان‌ها، مستقل از نسبت دبی جرمی بین انشعابات و تنها تابع عدد ماخ ورودی به اتصال است [۱۰]؛ بنابراین جهت یافتن رابطه‌ای برای محاسبه ضریب افت موضعی اتصال، شبیه‌سازی‌های عددی جریان برای اعداد ماخ مختلف و نسبت دبی جرمی ثابت ($\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} = 0.5$) صورت گرفته است.

با توجه به این نکته که بخش عظیمی از شبکه‌های توزیع گازرسانی در مقیاس ۲ اینچ (۵/۰۸ سانتیمتر) بوده، لذا مدل‌سازی‌های صورت گرفته برای انشعابات ۲ اینچ در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر، نسبت طول به قطری حدود ۶۰ برای هر انشعاب در نظر گرفته شده است. علت این امر، فاصله گرفتن از محل اتصال و اطمینان یافتن از صحت شرایط مرزی فشار ثابت در ورودی و خروجی انشعابات است که نتایج کار حاضر و مراجع موجود [۱۰]، صحت این فرض را نشان می‌دهد.

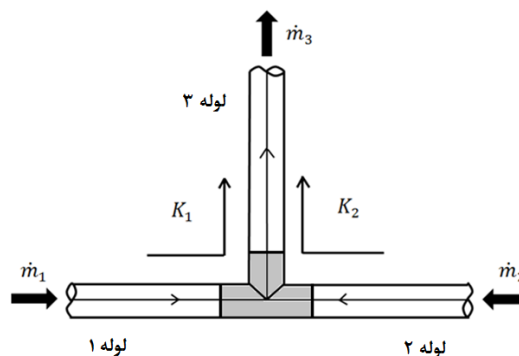
همچنین با توجه به این نکته که هدف از کار حاضر شبیه‌سازی حالت‌هایی از قبیل، رهاسازی گاز به اتمسفر (به منظور راه‌اندازی شبکه یا تخلیه شبکه) و یا شکستن خط لوله و مسائلی از این قبیل است، لذا فشار خروجی شبکه برابر با فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، جهت یافتن رابطه‌ای مناسب برای محاسبه افت‌های موضعی تابعی از عدد ماخ ورودی به اتصال، می‌بایست شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، محدوده وسیعی از اعداد ماخ در محل اتصال را پوشش دهد؛ لذا با توجه به مشخصات هندسی و فشار

استفاده در تحلیل شبکه‌های گازرسانی، به‌صورت مستقیم معیاری از میزان افت فشار درون اتصال را در بر خواهد داشت. ضریب افت ارائه شده (K_i)، به‌صورت نسبت فشار کل بعد از اتصال (P_{03}) به فشار کل قبل از اتصال (P_{01}) تعریف شده، مطابق با رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$K_i = \frac{P_{03}}{P_{0i}} \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

نظر به اینکه ضریب افت فشار موضعی با توجه به نوع اتصال و جهت جریان درون شاخه‌ها متفاوت است، در این مقاله به عنوان نمونه، تغییرات این ضریب درون اتصال T-شکلی مطابق با شکل ۱ مورد توجه قرار گرفته است.

برای این منظور، لوله‌هایی به طول ۶۰ برابر قطر به اتصال مربوطه وصل و شبیه‌سازی عددی برای شرایط مختلف جریان گاز درون آن صورت گرفته است. سپس با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های فوق، مقادیر فشار کل در ورود و خروج از اتصال استخراج شده، در نهایت با استفاده از تعریف پیشنهادشده مطابق با رابطه (۲)، مقدار ضریب افت فشار موضعی برای جریان‌های تراکم‌پذیر مربوطه به‌صورت تابعی از عدد ماخ ورودی به اتصال به‌دست آمده است.



شکل ۱- اتصال T-شکل مورد نظر

۱-۲- شبیه‌سازی عددی جریان درون اتصالات

در این مقاله، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی صورت گرفته با فرض جریان پایا، لزج، تراکم‌پذیر و آدیاباتیک انجام شده است. همچنین برای مدل کردن تنش‌های رینولدز و و ضرایب پخش آشفته می‌توان از مدل‌های توربولانسی مختلفی استفاده کرد که در کار حاضر با توجه به نتایج پژوهش‌های

همچنین با توجه به هندسه مسئله و برخورداری از شرایط مرزی متقارن، می‌توان از شرط تقارن در نرم‌افزار گمبیت استفاده کرده، بدین صورت حجم محاسباتی را تا یک چهارم کاهش داد.

شایان ذکر است که علی‌رغم استفاده از شرط تقارن، شبیه‌سازی هر کدام از میدان‌های جریان با استفاده از سیستمی با ۸ هسته ۳/۰۶ GHz و حافظه ۲۴ گیگابایتی، حدود یک هفته به طول انجامیده است.

با توجه به این نکته که برای حل جریان آشفتخته درون اتصالات T-شکل از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST استفاده شده است، باید از دستورالعمل‌های این مدل آشفتگی برای تولید شبکه در نزدیکی دیواره استفاده کرد. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، این مدل آشفتگی می‌تواند هم جریان‌های با رینولدز پایین و هم جریان‌های با رینولدز بالا را تحلیل کند. در صورتی که در پنجره تنظیمات مدل آشفتگی گزینه جریان‌های انتقالی فعال باشد، مدل به‌صورت رینولدز پایین عمل می‌کند و باید از راهنمایی‌های توابع دیوار پیشرفته استفاده کرد، ولی اگر این گزینه غیر فعال باشد، باید از راهنمایی‌های موجود برای توابع دیوار بهره جست [۱۵].

به‌همین دلیل در کار حاضر با توجه به غیرفعال بودن این گزینه، شبکه نزدیک دیواره مطابق با رفتار توابع دیوار تولید شده و y^+ اولین سلول نزدیک دیواره باید در محدوده قانون لگاریتمی ($300 < y^+ < 30$) قرار گیرد.

یکی از پارامترهای مهم دیگر در تولید شبکه، ضریب رشد شبکه در نزدیکی دیواره است. به‌علت تغییرات شدید سرعت در نزدیک دیواره و تغییرات کم آن در مرکز لوله برای جریان‌های آشفتخته، باید شبکه‌ای مناسب جهت نمایش چنین تغییرات شدیدی ایجاد کرد. در این راستا، ناحیه محاسباتی به دو بخش نزدیک دیواره و مرکز لوله تقسیم شده، مطالعه شبکه برای چهار شبکه با مقادیر متفاوت y^+ اولین سلول نزدیک دیواره انجام شده است. فشار کل در ورودی اتصال مربوطه برابر، ۱ Psi و فشار استاتیک خروجی برابر، فشار اتمسفر و دمای سکون ۲۹۶ کلوین در نظر گرفته شده است. مقادیر کل سلول‌ها، ارتفاع اولین سلول‌های نزدیک دیواره، y^+ اولین سلول‌ها و میزان دبی حجمی محاسبه شده برای هر چهار شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

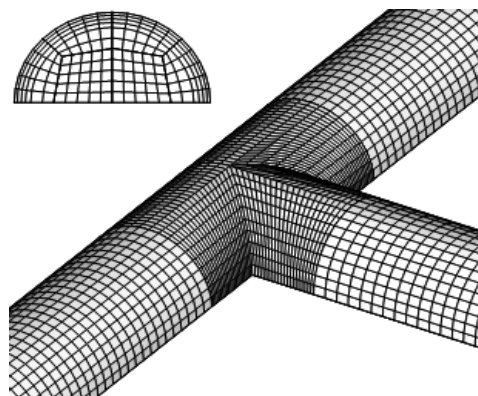
خروجی مسئله حاضر، فشارهای ورودی ۱، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ Psi به‌گونه‌ای انتخاب شده که محدوده وسیعی از اعداد ماخ در محل اتصال را پوشش دهد.

دیواره‌ها عایق و بدون لغزش در نظر گرفته شده است. فرض عایق بودن دیواره‌ها نیز به دلیل سرعت بالای گاز درون شبکه‌های گازرسانی در حالت تخلیه به اتمسفر است؛ زیرا که در این حالت به دلیل اختلاف فشار بالا، سرعت درون شبکه بسیار زیاد بوده، فرصت انتقال حرارت از سیال درون لوله گرفته می‌شود؛ لذا فرض عایق بودن دیواره‌ها، فرضی منطقی و قابل قبول است.

همچنین با توجه به این نکته که درصد بالایی از گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد؛ لذا در این مقاله، سیال عامل متان فرض شده، از قانون گاز ایده‌آل برای محاسبه چگالی استفاده شده است. برای بررسی صحت این فرض، می‌توان از ضریب تراکم‌پذیری گازها (Z) استفاده کرد که معیاری از میزان انحراف گازهای واقعی از گاز ایده‌آل است. از آنجا که فشار و دمای بحرانی برای گاز متان به ترتیب، ۴۵/۶ atm و ۱۹۰/۲ K است؛ لذا می‌توان دریافت که برای محدوده دمایی و فشاری کار حاضر و محدوده‌های وسیع‌تر، این ضریب تقریباً برابر ۱ بوده و لذا فرض گاز ایده‌آل با تقریب بسیار خوبی، نتایج گاز واقعی را ارائه می‌دهد.

۲-۲- شبکه محاسباتی

جهت شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی درون اتصال مورد نظر، ابتدا هندسه مربوطه در نرم‌افزار گمبیت به‌صورت سازمان شبکه‌بندی شده که نمایی از آن در شکل ۲ نشان داده شده است؛



شکل ۲- نمایی از شبکه با سازمان اتصال مورد نظر و

نمای برش خورده از سطح مقطع آن

می‌توان شبکه شماره (۳) را به‌عنوان شبکه مناسب برای شبیه‌سازی اتصالات T-شکل در نظر گرفت؛ زیرا در این شبکه علاوه بر همگرایی دبی حجمی و ضریب اصطکاک به یک مقدار ثابت، مقدار y^+ اولین سلول نزدیک دیواره نیز در محدوده مجاز مدل مورد استفاده قرار دارد.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در شبکه تولید شده، بررسی کیفیت شبکه مذکور بر حسب برابر بودن اضلاع سلول یا Q_{ESS} است. با توجه به تعریف، Q_{ESS} عددی بین صفر و یک است که هرچه میزان این عدد به صفر نزدیک باشد، بیانگر کیفیت بهتر شبکه و یکسانی اضلاع است؛ در صورتی که این عدد به یک متمایل شود، شبکه تولید شده دارای کیفیت مطلوبی نیست. مقدار این پارامتر در جدول ۲ برای اتصال T-شکل مربوطه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش از ۹۵ درصد سلول‌های شبکه دارای Q_{ESS} کمتر از ۰/۲ هستند و سلول‌های دارای کیفیت نامطلوب دیده نمی‌شود که در آن‌ها Q_{ESS} بزرگتر از ۰/۶ باشد. این مطلب، بیانگر وضعیت مطلوب شبکه تولید شده است.

جدول ۲- کیفیت سلول‌های شبکه از دیدگاه انحراف از اندازه یکسان

ردیف	کیفیت شبکه	درصد سلول‌ها	جمع درصد
۱	۰/۱-۰	۶۱/۶۶	۶۱/۶۶
۲	۰/۲-۰/۱	۳۴/۱۹	۹۵/۸۵
۳	۰/۳-۰/۲	۲/۱۷	۹۸/۰۲
۴	۰/۴-۰/۳	۱/۵۹	۹۹/۶۱
۵	۰/۵-۰/۴	۰/۳۷	۹۹/۹۸
۶	۰/۶-۰/۵	۰/۰۲	۱۰۰/۰۰
۷	بزرگتر از ۰/۶	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی عددی اتصال T-شکل

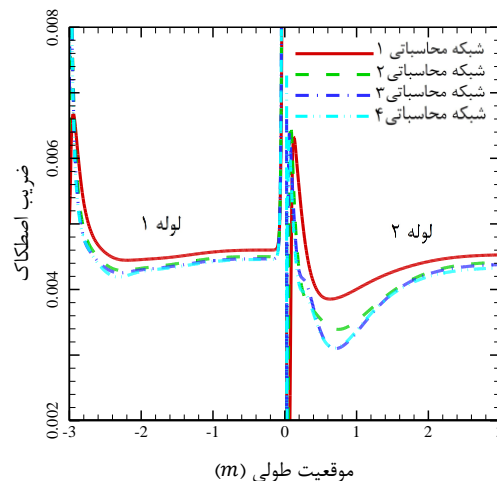
به‌منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی حاضر، هندسه‌ای مشابه با مسئله گارسیا (اتصال T-شکل ترکیب‌شونده) مدل‌سازی شده و برای حالت‌های مختلف جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته و استفاده از تعریف پیشنهادی گارسیا که در رابطه (۱) نشان داده شده است، ضریب افت فشار برای اتصال مورد نظر محاسبه شده است. در شکل ۴، ضرایب به‌دست آمده با نتایج گارسیا و همکاران مقایسه شده است.

با توجه به نتایج عددی به‌دست آمده برای دبی حجمی، مشاهده می‌شود مقدار این پارامتر برای هر چهار شبکه محاسباتی تقریباً ثابت بوده، نیازی به کوچکتر کردن ارتفاع اولین سلول نزدیک دیواره نبوده، می‌توان استنباط کرد شبکه شماره (۱)، شبکه مناسبی برای شروع فرآیند شبیه‌سازی است.

جدول ۱- تعداد سلول‌ها، ارتفاع اولین سلول، y^+ اولین سلول و دبی حجمی برای شبکه‌های مختلف

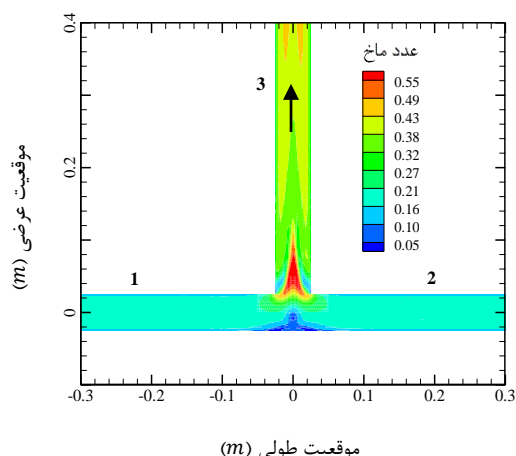
ردیف	تعداد کل سلول‌ها	ارتفاع اولین سلول (mm)	دبی حجمی (Nm^3/hr)	متوسط y^+
۱	۹۷۵۳۶	۲/۰	۱۳۷/۲۳	۱۶۰/۳۹
۲	۲۳۹۵۲۰	۱/۰	۱۳۶/۸۰	۸۰/۱۴
۳	۳۰۵۲۸۰	۰/۸	۱۳۷/۷۸	۶۴/۳۷
۴	۳۴۸۹۶۰	۰/۷	۱۳۸/۰۷	۵۶/۲۵

همچنین به‌منظور اطمینان یافتن از مناسب بودن شبکه انتخاب شده، تغییرات ضریب اصطکاک نیز در راستای خطوط ۱ و ۳ اتصال مربوطه، به‌عنوان معیاری برای مطالعه شبکه مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۳، تغییرات این ضریب بر حسب طول خطوط را برای هر چهار شبکه محاسباتی نشان می‌دهد.



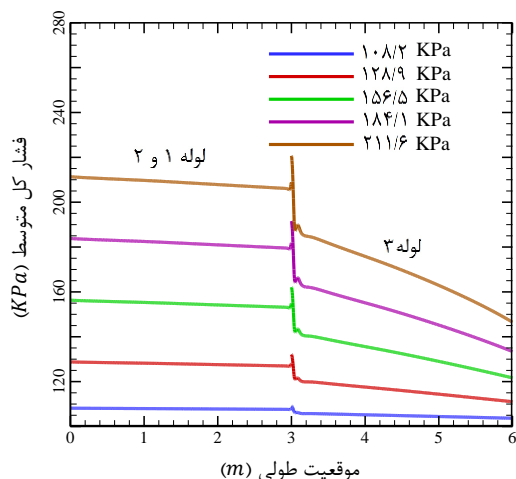
شکل ۳- تغییرات ضریب اصطکاک در راستای خطوط ۱ و ۳ اتصال T-شکل

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب اصطکاک برای شبکه شماره (۳) و (۴) تقریباً بر هم منطبق بوده،

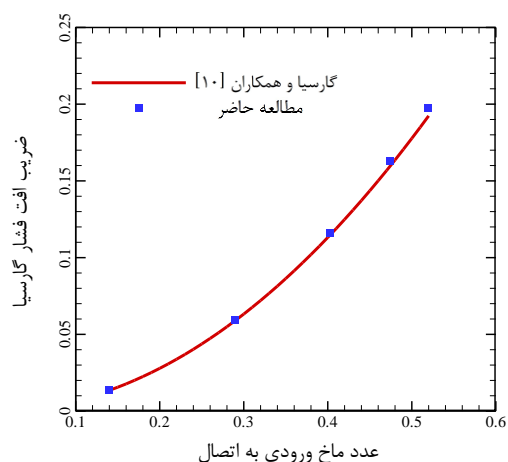


شکل ۶- تغییرات عدد ماخ در صفحه تقارن اتصال مربوطه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار کل در محل اتصال به دلیل افت موضعی، دچار کاهش ناگهانی و عدد ماخ به دلیل ترکیب شدن جریان‌ها با یکدیگر، دچار پرش ناگهانی می‌شود. در ادامه، به منظور آگاهی یافتن از نحوه تغییرات ضریب افت فشار به‌ازای حالت‌های مختلف جریان، تغییرات فشار کل و عدد ماخ متوسط در راستای طول انشعاب‌ها به‌ازای فشارهای مختلف ورودی در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.



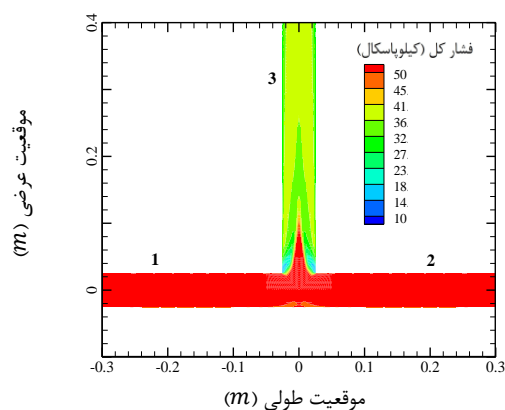
شکل ۷- تغییرات فشار کل متوسط در راستای طول انشعاب‌ها به‌ازای فشارهای مختلف ورودی



شکل ۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج گارسیا و همکاران برای اتصال T- شکل ترکیب‌شونده [۱۰]

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم خطای نسبی میان نتایج، ۲/۸ درصد بوده که این امر، صحت مدل‌سازی‌های صورت گرفته را نشان می‌دهد.

پس از اطمینان یافتن از صحت مدل‌سازی، می‌توان ضرایب افت فشار اتصال بررسی شده در کار حاضر را مطابق با تعریف جدید ارائه شده در رابطه (۲) محاسبه کرد. با توجه به وابستگی این ضریب به فشار کل و عدد ماخ در محل اتصال، لازم است از نحوه تغییرات این پارامترها در محل اتصال اطلاعات کافی در دسترس باشد. بدین منظور شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب، نحوه تغییرات این پارامترها در صفحه تقارن اتصال مربوطه را برای فشار ورودی ۱۵۶/۵ KPa (Psig) ۸ نشان می‌دهد.



شکل ۵- تغییرات فشار کل در صفحه تقارن اتصال مربوطه

M_1 ، همان عدد ماخ در ورودی اتصال و به فاصله ۱ قطر از محل اتصال است.

$$K_i = -4.466 M_i^3 - 1.757 M_i^2 \quad (3)$$

$$-0.016 M_i + 1.0 \quad i = 1, 2$$

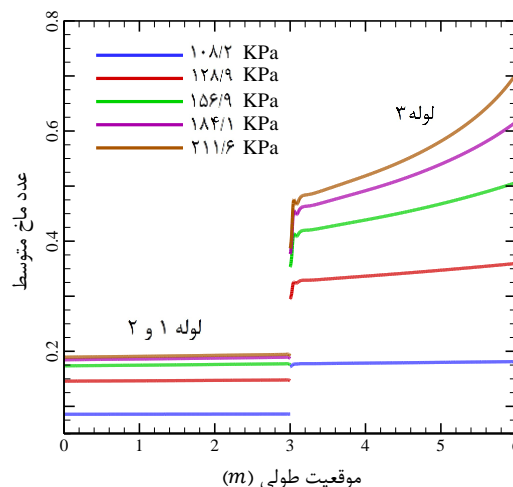
از مزایای این رابطه، می‌توان به سادگی و سهولت استفاده از آن در شبیه‌سازی شبکه‌های گازرسانی با سرعت‌های بالا اشاره کرد؛ بدین ترتیب که با داشتن عدد ماخ و فشار کل در ورودی به اتصال بلافاصله فشار کل خروجی از اتصال تعیین می‌شود.

۳- اعمال افت‌های موضعی در برنامه عددی

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، تعیین افت‌های موضعی موجود در شبکه برای جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا از اهمیت فراوانی برخوردار بوده تاثیر به‌سزایی در محاسبه میزان گازهای هدررفت دارند؛ لذا برای واقعی‌تر کردن نتایج عددی به‌دست آمده، می‌بایست به‌گونه‌ای اثرات افت‌های موضعی را در برنامه‌های عددی لحاظ کرد. در ادامه به‌منظور شبیه‌سازی عددی جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا درون یک شبکه شاخه‌ای نمونه، پس از بیان فرضیات و معادلات حاکم به بیان الگوریتم عددی به‌کاررفته و نحوه اعمال افت‌های موضعی در برنامه‌های عددی پرداخته شده است. در انتها نیز، نتایج به‌دست آمده از حل عددی با نتایج فلوننت مقایسه شده است.

۳-۱- فرضیات صورت‌گرفته و معادلات حاکم بر جریان

در این مقاله، به‌منظور شبیه‌سازی شبکه‌های گازرسانی در سرعت‌های بالا و محاسبه میزان گاز هدررفت، فرضیات ساده‌شونده‌ای صورت گرفته که طبق آن‌ها جریان پایا، غیر لزج، تراکم‌پذیر، آدیباتیک و یک‌بعدی در نظر گرفته شده است. سیال، عامل متان فرض شده و از قانون گاز ایده‌آل برای محاسبه چگالی استفاده شده است؛ لذا در این نوع جریان با توجه به فرضیات صورت گرفته (فرضیات جریان فانو)، چهار مجهول وجود دارد که برای حل آن‌ها به چهار معادله نیاز است. معادله‌های بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و حالت از آن دسته معادلات هستند که در روابط (۴) تا (۷) به‌ترتیب ارائه شده است [۱۶].



شکل ۸- تغییرات عدد ماخ متوسط در راستای طول

انشعاب‌ها به ازای فشارهای مختلف ورودی

شایان ذکر است که در تمامی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، باقیمانده‌ها به مقادیر کمتر از 0.000001 کاهش یافته، در طول تکرار ثابت شده‌اند، همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، زمان محاسباتی برای هرکدام از این شبیه‌سازی‌ها به‌طور متوسط نزدیک به یک هفته به طول انجامیده است. علی‌رغم طولانی بودن زمان محاسبات، در این مقاله سعی بر این بوده است که بتوان با انجام شبیه‌سازی‌های متفاوت، تمامی شرایط جریان را بررسی کرده، محدوده وسیعی از تغییرات عدد ماخ و فشار کل را برای اتصال مربوطه پوشش داد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان افت فشار کل درون اتصال، تابعی از عدد ماخ است. بدین صورت که با افزایش عدد ماخ ورودی به اتصال، فشار کل به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد و از یک عدد ماخ بحرانی به بعد، این نسبت افت فشار تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود، نوسانات عدد ماخ و فشار کل متوسط در محل اتصال، حدوداً تا فاصله ۱ قطر قبل از اتصال و ۴ قطر بعد از اتصال ادامه می‌یابد؛ لذا فواصل مذکور به‌عنوان نقاط بحرانی قبل و بعد از اتصال انتخاب شده، نتایج شبیه‌سازی عددی برای این فواصل استخراج و ضرایب افت فشار موضعی طبق رابطه (۲) محاسبه شده است. پس از محاسبه ضرایب افت فشار و با توجه به روش حداقل مربعات، تابعی برای ضریب افت فشار برحسب عدد ماخ ورودی به اتصال به‌دست آمده که در رابطه (۳) نشان داده شده است.

می‌شود. لازم به ذکر است که فواصل ۱ قطر و ۴ قطر قبل و بعد از اتصال، فواصلی هستند که تحت تاثیر اثرات ناشی از اتصال هستند و ارتباط میان پارامترهای جریان در این فواصل، توسط رابطه افت مربوطه در برنامه‌های عددی اعمال می‌شود. پس از آن طی یک فرآیند تکرار، میزان دبی هدررفت و سایر پارامترهای جریان محاسبه می‌شوند که در ادامه الگوریتم به‌کار رفته ارائه شده است.

۱- ابتدا سرعت در ورودی انشعاب شماره ۱ (شکل ۱) حدس زده می‌شود. در این حالت، با معلوم بودن دما و فشار کل در ورودی، بقیه پارامترهای جریان در ورودی به‌دست می‌آیند.

۲- با حل همزمان معادلات (۴) تا (۷) به‌صورت هم‌زمان و با استفاده از روش رانگ‌کوئی مرتبه چهار، مقادیر مجهولات در طول لوله شماره ۱ تعیین می‌شوند. با مشخص شدن فشار کل و عدد ماخ در خروجی لوله شماره ۱ و به فاصله ۱ قطری از محل اتصال، با استفاده از رابطه افت فشار برای اتصال و مسیر مربوطه، پارامتر فشار کل در انشعاب شماره ۳ و به فاصله ۴ قطری از محل اتصال مشخص می‌شود.

۳- متناسب با سرعت ورودی حدس زده شده در لوله شماره ۱ طی یک فرآیند تکرار، سرعت در ورودی لوله شماره ۲ به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که فشار کل به‌دست‌آمده در انشعاب شماره ۳ و به فاصله ۴ قطری از محل اتصال، توسط هر دو مسیر (مسیر لوله شماره ۱ به ۳ و مسیر لوله شماره ۲ به ۳)، با یکدیگر برابر شود.

۴- با استفاده از قانون گره، می‌توان دبی لوله شماره ۳ را با معلوم بودن دبی در لوله‌های شماره ۱ و ۲ محاسبه کرد.

۵- با مشخص شدن دبی و فشار کل در لوله شماره ۳ و به فاصله ۴ قطری از محل اتصال و استفاده از فرض جریان آدیاباتیک در محل اتصال، تمامی پارامترها در فاصله مذکور از لوله شماره ۳ به‌دست می‌آید.

۶- با مشخص شدن پارامترهای جریان در ورودی لوله شماره ۳ و استفاده از رابطه (۱۳)، می‌توان طولی از لوله محاسبه کرد که به ازای آن جریان درون لوله، صوتی می‌شود (L^*).

$$L^* = \frac{D}{f} \left(\frac{1 - M^2}{\gamma M^2} \right) + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln [(\gamma + 1)M^2 / (2 + (\gamma - 1)M^2)] \quad (13)$$

در صورتی که طول لوله شماره ۳ از این طول (L^*) بزرگتر باشد، جریان صوتی بوده، می‌توان با استفاده از روابط (۹) تا

$$\frac{d\rho}{dx} = -\frac{\rho}{u} \frac{du}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dx} + \rho u \frac{du}{dx} = -\frac{1}{2} \rho u^2 \frac{f}{D} \quad (5)$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dx} + \rho u \frac{du}{dx} = 0 \quad (6)$$

$$\rho R \frac{dT}{dx} = \frac{dP}{dx} - RT \frac{d\rho}{dx} \quad (7)$$

با حل همزمان معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و حالت، می‌توان مجهولات مسئله مشتمل بر توزیع فشار، سرعت، دما و چگالی را در راستای طول لوله مشخص کرد. پارامتر f در معادلات، بیانگر ضریب اصطکاک لوله بوده که در این مقاله برای محاسبه آن از رابطه هالند نشان داده شده در رابطه (۸) استفاده شده است.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{e/D}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (8)$$

همچنین در حالتی که جریان گاز درون لوله صوتی باشد، می‌توان از روابط (۹) تا (۱۲) که از همان معادلات جریان فانو به‌دست آمده‌اند، برای محاسبه پارامترهای جریان استفاده کرد.

$$\frac{fL}{D} = \frac{1 - M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln [(\gamma + 1)M^2 / (2 + (\gamma + 1)M^2)] \quad (9)$$

$$\frac{P}{P_{exit(M=1)}} = \frac{1}{M} \left[\frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

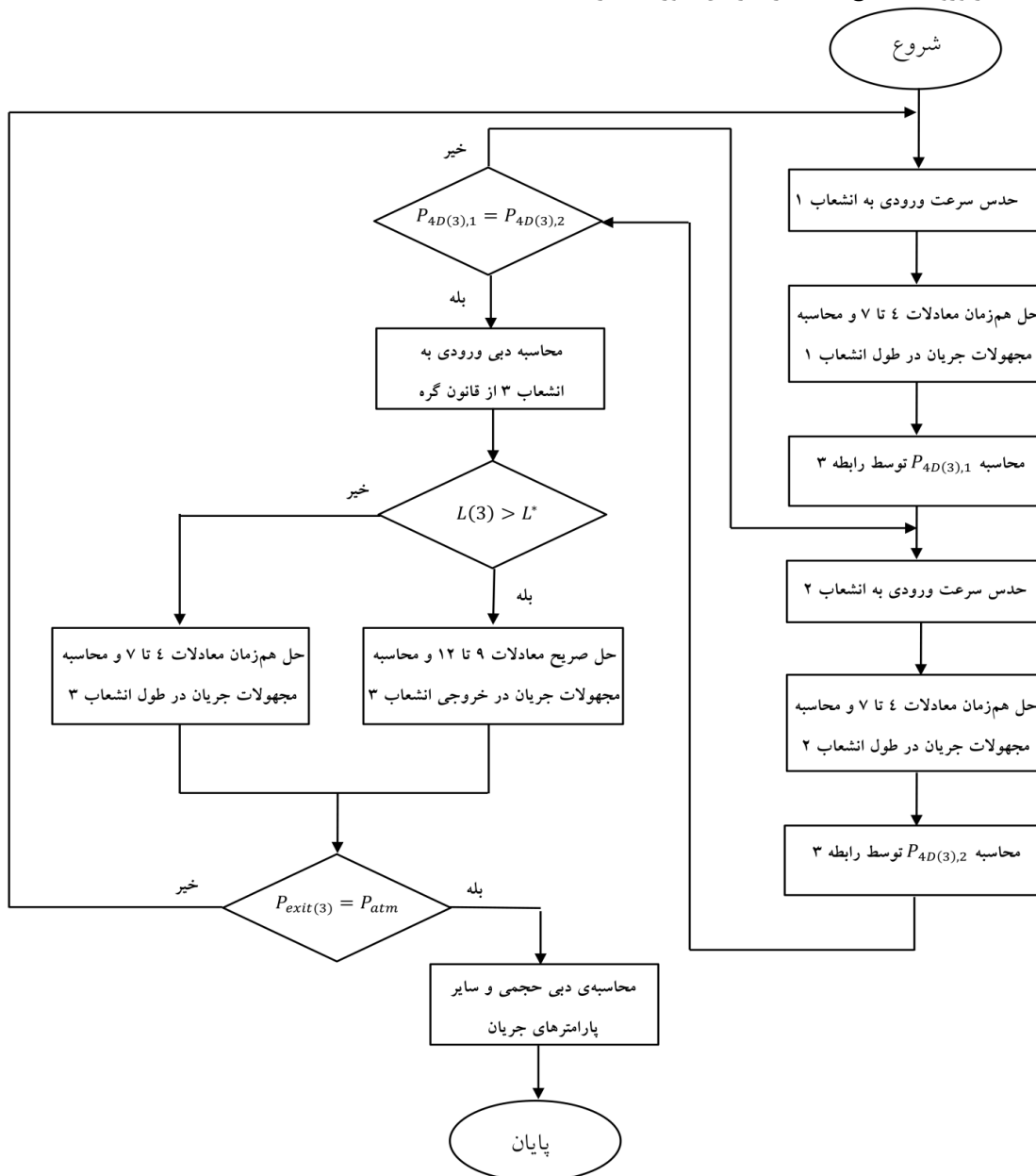
$$\frac{\rho}{\rho_{exit(M=1)}} = \frac{1}{M} \left[\frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \right]^{-1/2} \quad (11)$$

$$\frac{T}{T_{exit(M=1)}} = \frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \quad (12)$$

۳-۲- الگوریتم عددی به‌کاررفته برای یک شبکه نمونه در این قسمت، به‌منظور شبیه‌سازی جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا درون شبکه‌های شاخه‌ای شامل، اتصالات T- شکل نشان داده شده در شکل ۱ از روش افت فشار استفاده شده است. در این روش، برای در نظر گرفتن اثرات افت موضعی از رابطه (۳) به‌عنوان شرط مرزی در محل اتصال استفاده شده است. بدین صورت که با معلوم بودن فشار کل و عدد ماخ در ورودی به اتصال و به فاصله ۱ قطری از آن، فشار کل در خروجی از اتصال و به فاصله ۴ قطری از آن مشخص

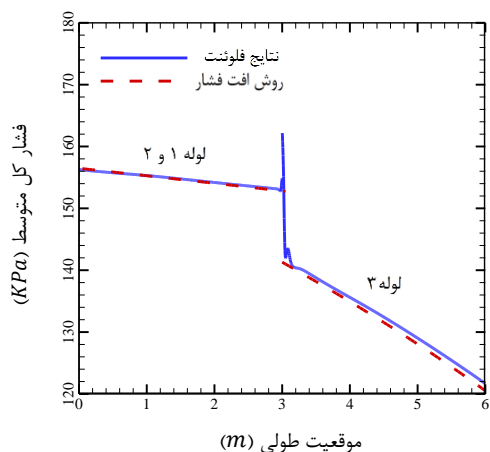
در ورودی لوله شماره ۱ به گونه‌ای تغییر داده می‌شود که فشار در خروجی لوله شماره ۳ به فشار اتمسفر برسد. در انتها با توجه به پارامترهای جریان، میزان دبی عبوری از هر انشعاب محاسبه می‌شود. در ادامه شکل ۹، الگوریتم روش افت فشار را برای محاسبه دبی هدررفت درون اتصال T- شکل مربوطه را نشان می‌دهد.

(۱۲) مقادیر مجهولات در خروجی لوله مربوطه را به صورت صریح محاسبه کرد. در غیر این صورت، جریان زیرصوتی بوده، برای محاسبه مجهولات در طول لوله باید معادلات (۴) تا (۷) را به صورت همزمان حل کرد. در صورتی که فشار خروجی از لوله شماره ۳ برابر با فشار اتمسفر شود، آن‌گاه حل عددی همگرا شده، سرعت حدس زده شده در ورودی صحیح است. در غیر این صورت، سرعت

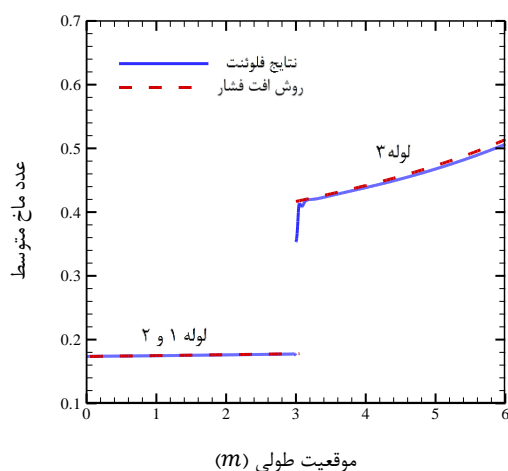


شکل ۹- الگوریتم روش افت فشار برای شبیه‌سازی عددی جریان درون اتصال T- شکل مربوطه

بوده، ماکزیمم خطای نسبی ۳/۴ درصد میان نتایج، حاکی از صحت برنامه نوشته شده و کارایی رابطه افت ارائه شده است. پس از اطمینان یافتن از مقادیر دبی حجمی، در ادامه پارامترهای فشار کل و عدد ماخ محاسبه شده توسط برنامه عددی نیز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ با نتایج CFD مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامتر فشار کل در طول لوله به دلیل افت‌های طولی، دچار یک کاهش تدریجی و در محل اتصال به دلیل افت‌های موضعی، دچار یک کاهش ناگهانی شده است. در صورتی‌که عدد ماخ در طول لوله مطابق با جریان فانو به صورت تدریجی افزایش یافته، در محل اتصال به دلیل ترکیب شدن جریان‌ها، دچار پرش ناگهانی می‌شود.



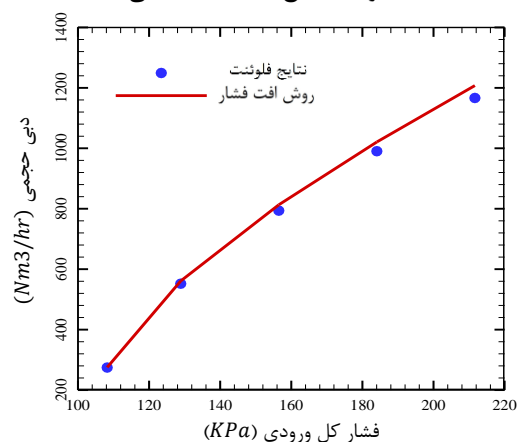
شکل ۱۲- تغییرات فشار کل متوسط در راستای طول انشعاب‌ها



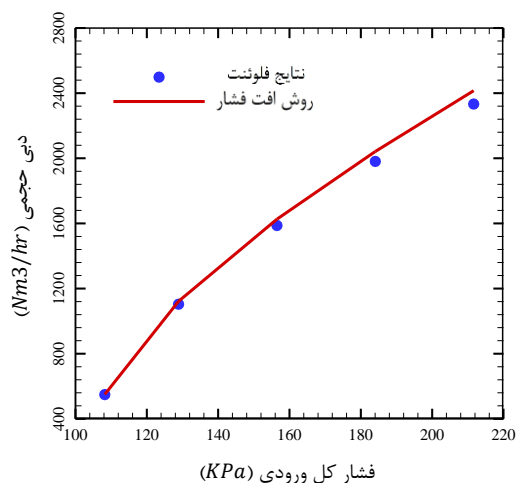
شکل ۱۳- تغییرات عدد ماخ متوسط در راستای طول انشعاب‌ها

۳-۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، در کار حاضر به منظور واقعی‌تر کردن نتایج برنامه عددی، از رابطه افت به دست آمده در بخش ۲-۳، به عنوان شرط مرزی در محل اتصال استفاده شده است؛ لذا در این قسمت جهت بررسی کارایی رابطه افت به دست آمده، یک شبکه شاخه‌ای نمونه (شکل ۱) شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده برای فشار ورودی ۱۵۶/۵ KPa با نتایج CFD مقایسه شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مقادیر دبی حجمی به دست آمده از برنامه عددی را برای شبکه شاخه‌ای نمونه با نتایج CFD مقایسه می‌کند.



شکل ۱۰- مقادیر دبی حجمی شاخه‌های شماره ۱ و ۲ شبکه مربوطه



شکل ۱۱- مقادیر دبی حجمی شاخه شماره ۳ شبکه مربوطه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر دبی حجمی به دست آمده از برنامه عددی خوبی بر نتایج CFD منطبق

۶- فهرست علائم و اختصارها

ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$)	C_p
قطر داخلی لوله (m)	D
زبری دیواره لوله (m)	e
ضریب اصطکاک لوله	f
ضریب افت فشار مربوط به گارسیا	\bar{K}
ضریب افت فشار در کار حاضر	K_i
طول لوله (m)	L
طولی از لوله که به ازای آن جریان درون لوله صوتی می‌شود (m)	L^*
عدد ماخ سیال در فاصله ۱ قطری ورودی اتصال	M_i
عدد ماخ برون‌یابی شده در شاخه‌های اتصال	M_i^*
دبی جرمی سیال در شاخه‌های اتصال (kg/s)	\dot{m}_i
فشار کل سیال در شاخه‌های اتصال (N/m^2)	P_{0i}
فشار استاتیک سیال (N/m^2)	P
ثابت ویژه گازها ($J/kg \cdot K$)	R
عدد رینولدز	Re
دمای استاتیک سیال ($^\circ C$)	T
سرعت سیال (m/s)	u
موقعیت طولی (m)	x
ضریب تراکم‌پذیری گازها	Z
نسبت گرماهای ویژه	Γ
چگالی سیال (kg/m^3)	ρ

۷- مراجع

- [1] Miller DS (1971) Internal Flow—A Guide to Losses in Pipe and Duct Systems. 2ed edn.
- [2] Sierra-Espinosa FZ, Bates CJ, O'Doherty T (2000) Turbulent flow in a 90-pipe junction: Part1: Decay of Fluctuations Upstream the Flow Bifurcation. Comput Fluids 197–213.
- [3] Sierra-Espinosa FZ, Bates CJ, O'Doherty T (2000) Turbulent Flow in a 90-Pipe Junction: Part 2: Reverse Flow at the Branch Exit. Comput Fluids 215–233.
- [4] Oka K, Ito H (2005) Energy Losses at Tees with Large Area Ratios. Trans ASME J Fluid Eng 110–116.
- [5] Costa NP, Maia R, Pinho PT, Proença MF (2006) Edge Effects on the Flow Characteristics in a 90-Tee Junction. Trans ASME J Fluid Eng 1204–1217.

همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که روش افت فشار به‌خوبی تغییرات مذکور را برای پارامترهای فشار کل و عدد ماخ پوشش داده، به‌گونه‌ای که ماکزیمم خطای نسبی برای فشار کل، ۱/۶ درصد و برای عدد ماخ، ۲/۱ درصد بوده است. لازم به ذکر است که مقایسه صورت گرفته میان مقادیر متوسط پارامترهای مذکور در هر مقطع بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جریان‌های تراکم‌پذیر سرعت بالا درون اتصالات T-شکل، به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و با توجه به تعریف جدید پیشنهادی، رابطه‌ای برای محاسبه افت‌های موضعی تابع اثرات تراکم‌پذیری ارائه شده است. این رابطه، علاوه بر سادگی و سهولت استفاده در تحلیل شبکه‌های گازرسانی، به‌صورت مستقیم معیاری از میزان افت فشار درون اتصال را در بر خواهد داشت. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص گردید، این ضرایب افت اتصال، وابستگی بسیار کمی به نسبت دبی جرمی انشعابات داشته، تنها تابع عدد ماخ ورودی به اتصال است. از سوی دیگر، شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، نشان می‌داد با افزایش عدد ماخ ورودی به اتصال، نسبت فشار کل بعد از اتصال به فشار کل قبل از اتصال (ضریب افت فشار) کاهش یافته، از یک عدد ماخ بحرانی به بعد، دیگر این نسبت تغییری نمی‌یابد و تقریباً ثابت می‌ماند. در ادامه توسط الگوریتمی جدید و با استفاده از رابطه افت به‌دست آمده، برنامه عددی به زبان فورترن نوشته شده، میزان گاز هدررفت از شبکه شاخه‌ای نمونه محاسبه شده است. انطباق بسیار خوب نتایج به‌دست آمده از برنامه عددی و حل CFD با یکدیگر، صحت شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته، کارایی رابطه افت به‌دست آمده برای این‌گونه جریان‌ها را نشان می‌دهد.

۵- تشکر و قدردانی

نگارندگان از شرکت گاز استان خوزستان و دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل فراهم کردن امکانات علمی و پژوهشی جهت به ثمر رسیدن این تحقیق تشکر و قدردانی می‌کنند.

- [11] Pretorius JJ, Malan AG, Visser JA (2007) A flow network formulation for compressible and incompressible flows. *Int J Numer Method H* 18(2): 185–201.
- [۱۲] یوسف‌زاده علیرضا (۱۳۸۲) شبیه‌سازی کامپیوتری توزیع گاز در شبکه شهری. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- [13] Kostowski WJ, Skorek J (2012) Real gas flow simulation in damaged distribution pipelines. *Energy* 45(1): 481–488.
- [14] Yuhua D, Huilin G, Zhou J, Yaorong F (2002) Evaluation of gas release rate through holes in pipelines. *J Loss Prevent Proc* 15(6): 423–428.
- [15] *Fluent User's Guide v 6.3.26*.
- [16] Anderson JD (2002) *Modern Compressible flow with historical perspective*. McGraw-Hill.
- [6] Benson RS, Woollatt D, Woods WA (1964) Unsteady flow in simple branch systems. *Proc Inst Mech Eng* 285–296.
- [7] Morimune T, Hirayama N, Maeda T (1981) Study of compressible high speed gas flow in piping system. *Bull JSME I24* 2082–2089.
- [8] Abou-Haidar NI, Dixon SL (1994) Pressure losses in combining subsonic flows through branched ducts. *Trans ASME J Turbomach* 114(1): 264–270.
- [9] Pérez-García J, Sanmiguel-Rojas E, Viedma A (2006) Numerical and experimental investigations on internal compressible flow at T-type junctions. *Exp Thermal Fluid Sci* 61–74.
- [10] Pérez-García J, Sanmiguel-Rojas E, Viedma A (2010) New coefficient to characterize energy losses in compressible flow at T-junctions. *Appl Math Model* 4289–4305.