

اصلاح و کاربرد روش ناحیه‌ای با قانون توانی برای پیش‌بینی میدان جریان توسعه یافته درون فضایی با مقیاس واقعی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، rahimi@uma.ac.ir
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، f_moghanlou@uma.ac.ir
 دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، samandarikh62@gmail.com
مصطفی رحیمی
فرهاد صادق مغانلو*
خدیدجه سمندری

چکیده

بررسی جریان توسعه یافته درون فضاهای با مقیاس واقعی از اهمیت خاصی برخوردار است و به کمک آن می‌توان در خصوص پخش ذرات آلاینده و نیز توزیع دما اظهار نظر نمود. در تحقیق حاضر معادلاتی مشابه با گذر جریان یک بعدی از درون یک روزنه که به نام روش توانی ناحیه‌ای شناخته می‌شود برای بررسی الگوی جریان در درون یک اتاقک استفاده شد. این معادله به همراه معادله بقای جرم برای سلولهای تعریف شده درون دامنه مورد نظر با یک روش تکراری و عددی ابتکاری حل شده و نتایج بصورت توزیع سرعت بدست آورده شد. دامنه دوبعدی مورد مطالعه دارای ارتفاع ۱ متر و طول های ۰/۵ و ۱/۵ متر بود که در آن دریچه‌های ورود و خروج هوا در موقعیت‌های متفاوتی لحاظ شدند. به منظور ایجاد مطابقت بهتر با نتایج تجربی، از ضرایب افت متغیر مابین سلولها استفاده گردید و نشان داده شد که در این صورت می‌توان در نتایج بدست آمده اصلاحات قابل توجهی ایجاد نمود. با وجود اصلاحات ایجاد شده در توزیع سرعت، وجود جریانهای چرخشی و برگشتی با استفاده از روش استفاده شده حتی با ضرایب متغیر قابل پیش‌بینی نبود.

واژه‌های کلیدی: مدل ناحیه‌ای، الگوی جریان، حل دستگاه معادلات غیرخطی، قانون توانی، روشهای عددی.

Modification and application of zonal method with power law in predicting the developed flow field inside a real scale space

M. Rahimi Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
F. Sadegh Moghanlou Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
Kh. Samandari Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

Investigating the flow pattern developed within spaces with relatively large scales that can be caused by forced or natural convection is of particular importance based on which, one can comment on the spread of polluting particles, temperature distribution and thermal comfort conditions. Calculating the developed flow field within such spaces using numerical methods, requires relatively large memory and long calculation time. Whereas, suitable zonal methods can predict accurate flow patterns with a very small amount of calculations. In the present research, equations similar to that of one-dimensional flow passing through an orifice, which is known as the zonal power law method, were used to predict the flow between the adjacent cells. These equations along with the mass conservation equation defined for each cell of the domain were solved using an innovative numerical method and the velocity distribution was specified. The 2-D sample domain had 1 m height and two different lengths of 0.5 and 2 m where the air inlet and outlet were considered at different positions. The air velocity at the inlet was 2 m/s. In order to make a better match with the experimental results, variable loss coefficients between the cells were used and significant improvement was found in the results. Despite the conformity made in the velocity distribution, the existence of recirculating flows predicted by the numerical methods could not be obtained using the employed method even with the variable coefficients.

Keywords: Zonal Method, Flow Pattern, Solving Nonlinear Set of Equation, Power Law, Numerical Methods.

۱- مقدمه

به دلیل بزرگ بودن ابعاد در فضاها با مقیاس واقعی، استفاده از روش‌های دینامیک سیالات عددی اغلب مقدور نخواهد بود. زیرا لازمه چنین تحلیلی در نظر گرفتن تعداد بسیار زیادی نقطه در درون دامنه محاسباتی می‌باشد و در صورت انجام یک تحلیل سه‌بعدی، حافظه و زمان اجرای نسبتاً زیادی لازم خواهد بود. برای حل این مشکل یک روش جایگزین استفاده از روش‌های عددی با شبکه بندی در مقیاس بزرگ می‌باشد. روش تحلیل ناحیه‌ای یکی از این روش‌ها می‌باشد که در طول چند دهه گذشته توسعه داده شده است.

مدل ناحیه‌ای به عنوان یک دیدگاه میانی بین روش‌های دینامیک سیالات کاربردی (CFD) و مدل‌های گرهی در ۵۰ سال اخیر توسعه یافته است. اولین مدل‌های ناحیه‌ای (در سال ۱۹۷۰ لبرن، در ۱۹۸۰

بررسی الگوی جریان در درون فضاهایی با مقیاس واقعی، می‌تواند در مباحثی مانند تهویه، سرمایش و گرمایش و نیز بررسی شرایط آسایش حرارتی مفید باشد. بطوری که میزان تمرکز آلاینده‌گی و یا توزیع دما را می‌توان از آن طریق مورد بررسی قرارداد. برقراری شرایط آسایش حرارتی در یک فضا بطور عمده با الگوی جریان هوا و توزیع دما در آن فضا بررسی می‌شود، میزان انتشار آلاینده‌ها و تهویه نیز به میزان قابل توجهی تحت تاثیر توزیع دما و سرعت جریان هوا قرار می‌گیرند [۱]. موقعیت دریچه‌های ورود هوا نیز تاثیر قابل توجهی بر شرایط آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل یک فضا خواهد داشت [۲].

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f_moghanlou@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰۱۳/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۲۰۱۵/۰۲/۰۲

هوارس، در ۱۹۸۸ اینارد) بر پایه اطلاعات قبلی از الگوی جریان هوا توسعه یافتند [۳]. در مدل اولیه لبرن یک اتاق به ۶ ناحیه تقسیم شد تا لایه بندی حرارتی اتاق بررسی شود [۴]. به عنوان یک تحول بزرگ، در سال ۱۹۹۳ بویا توسعه نسل جدیدی از مدل‌های ناحیه‌ای را آغاز کرد که در آن میدان فشار برای تعیین رفتار جریان هوا و لایه بندی حرارتی در فضاها استفاده می‌شد. او در ادامه در سال ۱۹۹۵ مدل ناحیه ای جدیدی ارائه کرد که در آن موازنه جرم و انرژی در هر ناحیه (سلول) اعمال می‌شد، در حالی که دبی جرمی در مرزها با استفاده از قانون توانی محاسبه می‌گردید.

در سال ۱۹۹۹، لین [۵] روش جدیدی را برای مدل فشار-ناحیه ای ارائه نمود. وی فرض کرد که بجای در نظر گرفتن فشار ثابت در ورودی هر سلول، تغییرات فشار در داخل هر سلول را می‌توان متغیر با تغییرات خطی در نظر گرفت. در تحقیقی دیگر ماسی و همکارانش با روش ناحیه‌ای فضای یک اتاق را به ۲۴ سلول تقسیم کردند و این فضا را در محیط SPARK^۱ شبیه‌سازی نمودند [۶]. در سال ۲۰۰۵ غربی با ابزارهای شبیه سازی یک کد مدولار ۳ بعدی برای مدل ناحیه‌ای به نام ZAER^۲ را توسعه داد که قادر به ارزیابی توزیع دما و الگوی جریان هوا در یک اتاق با ابعاد واقعی بود [۷].

در تحقیقات جدید تجربی از روش سرعت سنجی ذرات در هوا (PIV^۳) برای بدست آوردن الگوی جریان هوا استفاده می‌شود. با توجه به دقت بالای این روش، معمولاً از نتایج آن برای صحت سنجی مدل‌های شبیه‌سازی استفاده می‌شود [۸]. حسگرهای دقیق نیز برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفته‌است. نیلسن در سال ۱۹۹۸ اتاقی با ابعاد مشخص و دارای دریچه‌های ورودی و خروجی با هندسه را در نظر گرفت [۹]. نتایج حاصل از آن تحقیق برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده در چندین تحقیق دیگر مورد از جمله تحقیق مورا و همکاران [۱۰] مورد استفاده قرار گرفته‌است.

گرفیسی و چن در سال ۲۰۰۳ برای توسعه روش‌های ناحیه‌ای، معادلات ناویر-استوکس را با فرض جریان غیرلزج (معادلات اوپلر) ساده کردند. در این روش تعداد نقاط شبکه بندی تا حدودی کاهش داده‌شد که بر آن اساس یک مدل مومنتوم-ناحیه‌ای برای پیش‌بینی جریان هوا و توزیع دما پیشنهاد کردند [۱۱]. با این وجود ابعاد شبکه‌بندی نمی‌توانست به مقدار لازم بزرگتر انتخاب گردد.

مدل‌های ناحیه‌ای متداول می‌توانند جریان هوا، انتقال گرما و آلاینده‌ها را به سرعت و با حجم محاسبات ناچیز با در نظر گرفتن داده‌های ورودی تخمین بزنند [۱۲]. این روش همچنین برای پیش‌بینی جریان هوا و توزیع آلاینده‌ها در فضاهای حساس مانند بخش‌هایی از بیمارستان به کار رفته است. در تحقیقی که توسط مندوزا و همکارانش در سال ۲۰۱۲ انجام شد توزیع غلظت آلاینده ها در اتاقهای بیمارستان که دارای تهویه مکانیکی بودند، با روش ناحیه‌ای پیش‌بینی گردید [۱۲]. برای این کار اتاقکی با ابعاد مشخص و دریچه‌های ورودی و خروجی هم اندازه در مقیاس واقعی در نظر گرفته‌شد.

روش PLM^۴ به عنوان یکی از روشهای قدیمی، توسط محققانی همچون فاکونیر، بویا، دالیسیکس و ورتز از سال ۱۹۸۹ به بعد توسعه یافته‌است [۳]. مدل‌های ناحیه‌ای مختلفی بعد از سال ۲۰۰۰ با حفظ مزیت اولیه (تعادل بین دقت و کارایی) توسعه داده شده است و تلاش گردیده تا بر معایب مدل‌های قبلی غلبه شود. در سال ۲۰۱۲، مدل VEPZO^۵ با لحاظ نمودن نیروهای وارد بر یک المان، مسیر جریان به شکل یک معادله دیفرانسیلی معمولی به دست آمد و به کمک محیط نرم‌افزاری به نام Modelica^۶ پیاده سازی گردید [۱۳].

یکی دیگر از روش‌های مرسوم مدل ناحیه‌ای بر مبنای فشار، روش POMA^۶ می‌باشد و پژوهش‌های متعددی به منظور بهبود نتایج این روش در مدل‌سازی ناحیه‌ای انجام شده‌است. این روش هم برای تهویه طبیعی و هم اجباری قابل کاربرد است و تفاوتش در معادلات با PLM این است که از معادلات نوشته شده برای دیفیوزر در یک فضا استفاده می‌کند [۱۴]. در مدل ناحیه‌ای اصلی POMA (حقیقت و همکاران، ۲۰۰۱)، نرخ جریان جرمی با رابطه قانون توانی فشاری مشخص می‌شود [۱۰]:

$$\dot{m}_j = \rho k A (\Delta P)^n \quad (1)$$

در این معادله نرخ دبی جرمی بر حسب کیلوگرم بر ثانیه بوده، k ضریب جریان است که برابر ۰/۸۳ در نظر گرفته می‌شود و n توان اختلاف فشار جریان می باشد که برابر ۰/۵ فرض می‌شود.

در روش ناحیه‌ای علاوه بر ناحیه اصلی که با استفاده از معادله‌ای مانند قانون توانی مورد تحلیل قرار می‌گیرد نواحی خاصی نیز مانند ناحیه دارای جت جریان تعریف می‌شود. این نواحی با معادلات ویژه‌ای از ناحیه اصلی متمایز می‌گردد. در این خصوص یاماساوا و همکارانش [۱۵] توزیع دما و آلاینده ها را در یک اتاق مجهز به سیستم تهویه جت بر خوردی را مورد مطالعه قرار دادند. هو و همکارانش [۱۶] انتقال حرارت بین ناحیه‌ای در ساختمان‌های بزرگ را شبیه سازی نموده و با استفاده از آن تفاوت دو سیستم تهویه مطبوع بکار گرفته شده را بررسی نمودند.

همان طور که اشاره گردید، طیف گسترده ای از مدل‌های مختلف برای پیش بینی توزیع سرعت و دما در یک فضا موجود می‌باشد که با استفاده از آنها تحقیقات متعددی با اهداف مختلف در مقیاس واقعی انجام شده است. هدف از پژوهش حاضر انجام اصلاحاتی در نحوه بکارگیری و نیز نتایج بدست آمده از روش ناحیه‌ای با قانون توانی می‌باشد. به این صورت که بر خلاف تحقیقات قبلی، کل ناحیه با استفاده از معادلات واحدی مورد تحلیل قرار گرفته و نیاز به تعریف نواحی متعدد مانند ناحیه دارای جت جریان نمی‌باشد. همچنین استفاده از ضریب افت متغیر بین سلولها به عنوان یک نوآوری در این تحقیق به منظور بهبود نتایج مورد توجه قرار گرفته است.

۲- روش تحلیل و معادلات

روش PLM دومین نسل از مدل‌های ناحیه‌ای است که عمدتاً توسط اینارد از سال ۱۹۹۶ توسعه یافته است. این روش از قانون جریان از

⁴ Power Law Model

⁵ Velocity Propagating Zonal

⁶ Pressurized zonal model with air diffuser

¹ The Simulation Problem Analysis and Research Kernel

² Zonal Aerial model

³ Particle Image Velocimetry Measurement

و Δ مساوی در نظر گرفته شده است. همچنین از تاثیر نیروی وزن در صورتی که جهت Δ منطبق بر جهت قائم باشد صرف نظر شده است. در صورت لزوم می توان به سادگی اثر نیروی وزن را بصورت فشار هیدروستاتیک در معادله حتی در تحلیل سه بعدی لحاظ نمود. پرواضح است که معادلات مذکور شبیه به معادله عبور جریان در حالت یک بعدی از درون یک روزنه یک روزنه می باشد. لازم به ذکر است که عبارت زیر رادیکال بایستی مثبت باشد و جهت جریان بسته به علامت عبارت زیر رادیکال تعیین می گردد. همانگونه که ذکر شد معادله مذکور برای نواحی نرمال پیشنهاد شده و ضریب افت جریان در آن، مقدار ثابت 0.83 پیشنهاد شده است. تحقیقات پیشین نشان داده است که با استفاده از ضریب ثابت در تمامی سلولها الگوی جریان هوای نتیجه شده مغایرت زیادی با روشهای دقیق تری همچون CFD را خواهد داشت [۱۷]. در تحقیق حاضر بر خلاف مطالعات قبلی، معادلات مشابه برای تمامی نواحی مورد استفاده قرار گرفته و در عوض مقدار ضریب مذکور بصورت متغیر لحاظ گردیده است تا مشابهت لازم بین میدان جریان واقعی و نتایج حاصل از این تحلیل افزایش یابد.

برای تحلیل یک دامنه دوبعدی مانند آنچه در شکل شماره ۲ نشان داده شده، در نظر گرفته شده است. بین هر دو نقطه مجاور معادله جریان جرم نوشته می شود. به این ترتیب برای یک مسئله دوبعدی با تعداد $M \times N$ سلول به تعداد $(M-1) \times (N-1)$ معادله حاصل می گردد. با نوشتن معادله بقای جرم در مورد هر سلول به تعداد $M \times N$ معادله جدید خواهیم داشت. با استفاده از حل این دستگاه معادلات می توان به تعداد $M \times N$ مقدار فشار برای مراکز سلولها و نیز $(M-1) \times (N-1)$ مولفه سرعت در مرز سلولها دسترسی پیدا کرد. لازم به ذکر است که مولفه های سرعت در روی دیوارهای کناری به عنوان شرایط مرزی برابر صفر لحاظ شده و برای دریچه های ورودی و یا خروجی مقادیر معین و در موقعیت دلخواه می توان در نظر گرفت.

واضح است که دستگاه معادلات حاصل برای تحلیل، یک دستگاه معادلات غیرخطی می باشد و با روش های گوناگون می تواند بصورت عددی حل شود. در تحقیق حاضر از یک روش تکراری برای انجام این تحلیل استفاده گردید. نقطه ای دلخواه از درون دامنه به مختصات (i, j) را در نظر بگیرید. معادله بقای جرم برای این نقطه بصورت زیر نوشته می شود:

$$mx(i, j) + mx(i+1, j) + my(i, j) + my(i, j+1) = 0 \quad (6)$$

با استفاده از معادلات جریان و اختلاف فشار می توان این معادله را

بصورت زیر بازنویسی نمود:

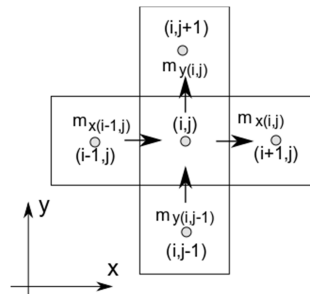
$$\sqrt{2\rho C_x A} \sqrt{|p(i-1, j) - p(i, j)|} + \sqrt{2\rho C_x A} \sqrt{|p(i+1, j) - p(i, j)|} + \sqrt{2\rho C_y A} \sqrt{|p(i, j-1) - p(i, j)|} + \sqrt{2\rho C_y A} \sqrt{|p(i, j+1) - p(i, j)|} = 0 \quad (7)$$

در صورتی که هر جمله را به عبارت رادیکال مجددا ضرب و تقسیم کنیم می توان رابطه را بصورت زیر بیان نمود:

$$\frac{2\rho C_x^2 A^2}{mx(i, j)} [p(i-1, j) - p(i, j)] + \frac{2\rho C_x^2 A^2}{mx(i+1, j)} [p(i+1, j) - p(i, j)] + \frac{2\rho C_y^2 A^2}{my(i, j)} [p(i, j-1) - p(i, j)] + \frac{2\rho C_y^2 A^2}{my(i, j+1)} [p(i, j+1) - p(i, j)] = 0 \quad (8)$$

این معادله فرم نهایی معادله مورد استفاده در تحلیل حاضر خواهد

درون یک روزنه استفاده می کند و با کمک اختلاف فشار بین سلولها، نرخ دبی جرمی تبدیلی بین سلولها را پیش بینی می کند. در شکل ۱ شماتیکی از چند سلول مجاور هم در یک دامنه دوبعدی نشان داده شده است.



شکل ۱- جریان سیال بین مرزهای یک سلول

بر اساس این شکل، معادلات اصلی در مرزهای یک سلول داخل فضای مورد نظر با روش قانون توانی بصورت زیر می باشد [۱۶]:

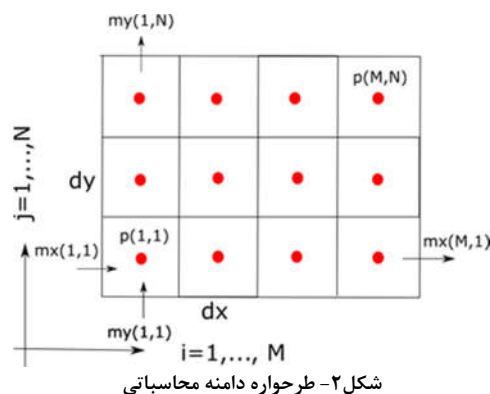
$$m_{x(i,j)} = K \Delta y l (2\rho_{i,j} (P_{i,j} - P_{i+1,j}))^{1/2} \quad (2)$$

$$m_{y(i,j)} = K \Delta x l (2\rho_{i,j} (P_{i,j} - P_{i,j+1}))^{1/2} \quad (3)$$

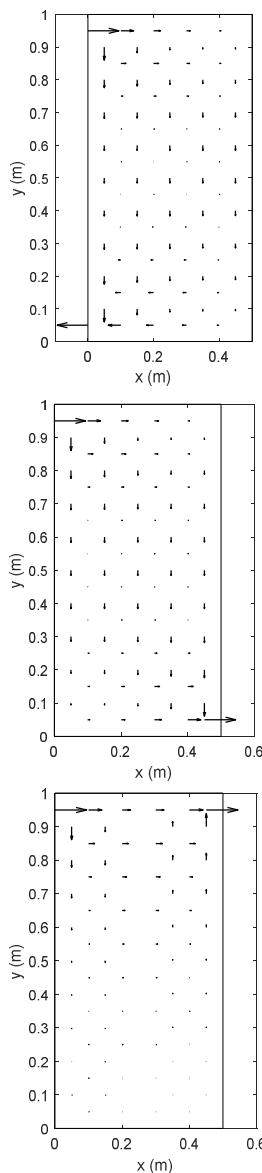
در این معادلات، K یک ضریب ثابت و l بعد عمود بر صفحه می باشد. روش قانون توانی یکی از روش های توسعه داده شده در تحلیل عددی ناحیه ای می باشد که برای نواحی نرمال و خارج از جت دیوار توصیه شده است. این معادله جایجایی جریان جرمی بین دو سلول مجاور را در اثر اختلاف فشار بین مراکز آن دو سلول پیش بینی می کند. در پژوهش حاضر شکل ساده شده فضای یک اتاق با ورودی و خروجی معین در نظر گرفته می شود تا با کمک مدل قانون توانی، شبیه سازی فضا بسط و توسعه یابد. همانطوری که در شکل ۲ مشاهده می شود دبی جرمی جایجا شده بین سلول مرکزی با دو سلول سمت چپ و پایین با روابط زیر بیان می شود:

$$my(i, j) = \sqrt{2\rho} C_y A \sqrt{|p(i, j-1) - p(i, j)|} \quad (4)$$

$$mx(i, j) = \sqrt{2\rho} C_x A \sqrt{|p(i-1, j) - p(i, j)|} \quad (5)$$



در این معادلات به منظور سادگی ابعاد شبکه بندی در دو جهت X



شکل ۳- میدان‌های جریان توسعه‌یافته برای هئدسه اول به ازای محل‌های خروجی با موقعیت متفاوت

بود و با استفاده از مراحل محاسباتی و تکراری زیر می‌توان به توزیع سرعت همگرا شده رسید. به این صورت که:

- ۱- ابتدا توزیع فشار در مراکز سلول‌ها حدس زده می‌شود.
- ۲- جریان جرمی در مرز بین هر دو سلول مجاور بر حسب توزیع فشار مفروض محاسبه می‌شود.
- ۳- دستگاه معادلات خطی برای محاسبه توزیع فشار با استفاده از معادله اصلی تشکیل داده می‌شود (ضرایب این معادلات خطی شامل جریان جرمی می‌باشد که در مرحله قبل تعیین شده‌است).
- ۴- با حل دستگاه معادلات خطی، توزیع فشار جدید بدست آورده می‌شود.

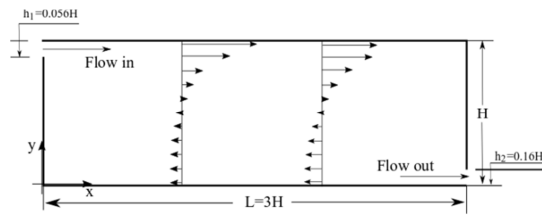
مراحل فوق با مقادیر جدید فشار تکرار می‌شود تا همگرایی با دقت لازم حاصل گردد. ثابت ماندن فشار در مراکز تعدادی سلول از جمله مرکز دامنه با دقت یک درصد ملاک همگرایی در نظر گرفته شد. همچنین به منظور اطمینان از عدم واگرایی جواب، از ترکیب خطی بین مقادیر فشار بدست آمده در دو مرحله از تکرار نیز استفاده شد.

۳- بیان نتایج

به عنوان یک مطالعه موردی، دامنه‌ای دوبعدی به ارتفاع یک متر و به طول‌های 0.5 و $1/5$ متر در نظر گرفته شد. محفظه ورودی جریان به عرض 0.1 متر در قسمت بالای سمت چپ منظور گردید در حالی که خروج جریان از سه موقعیت مختلف مورد بررسی قرارگرفت تا در هر مورد میدان جریان توسعه‌یافته در حالت پایدار بدست آورده‌شود. سرعت جریان در قسمت ورودی برابر 2 متر در ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده برای میدان جریان برای هندسه اول در شکل شماره ۳ آورده شده‌است. بردارهای نشان داده‌شده در این شکل میزان دبی جریان جابجا شده بین دو سلول مجاور را نشان می‌دهد و دبی جریان متناسب با سرعت 2 متر در ثانیه در مقاطع ورودی و خروجی از دامنه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در حالت سوم یعنی زمانی که دریچه خروجی در مقابل دریچه ورودی قرار گرفته‌است جریان هوا فقط در قسمت‌های بالایی محفظه برقرار بوده و قسمت‌های پایینی به مقدار خیلی کمی متاثر شده است. تحلیل عددی حاضر برای هندسه دوم با همان دریچه‌های ورودی و خروجی نیز انجام گردید. نتایج بصورت توزیع بردارهای سرعت در شکل شماره ۴ نشان داده شده‌است. به منظور وضوح بیشتر در تصور میدان جریان برقرار شده، مقادیر متوسط بردارهای سرعت در مراکز سلول‌ها محاسبه شده و در این شکل نشان داده شده‌است.

این نتایج نشان می‌دهد که همانند هندسه قبلی، جریان از مسیرهای کوتاه‌تر بین ورودی و خروجی برقرار شده و قسمت‌هایی از دامنه که در فاصله‌های دورتر قرار دارند کمتر متاثر می‌شوند. همچنین جریانی که در مسیر کوتاه‌تر بین ورودی و خروجی شکل می‌گیرد دارای شدت بیشتری می‌باشد. هرچند این نتایج توزیع سرعت به سهولت حاصل شده و به لحاظ منطقی توزیع قابل قبولی را درون دامنه در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد اما می‌توان گفت که در هیچکدام از حالت‌های بررسی شده چرخشی برای جریان مشاهده نمی‌شود. زیرا منطبق معادله، رسیدن از ورودی به خروجی با اولویت مسیرهای نزدیک‌تر می‌باشد.

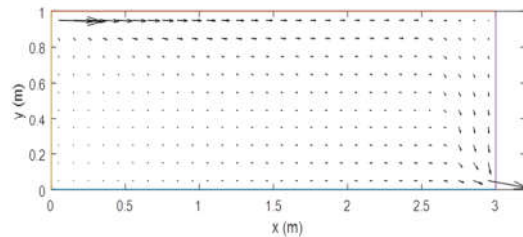
اظهار نمود که نتایج بدست آمده از روش ناحیه‌ای همانگونه که در شرایط مشابه و در شکل شماره ۴ نشان داده شده است نه تنها برگشت جریان را در درون اتاقک پیش‌بینی نمی‌کند بلکه توزیع سرعت نسبتاً یکنواختی را در جهت جریان از دریچه ورود به خروج لحاظ می‌کند.



شکل ۵- نتایج تجربی توزیع سرعت در صفحه مرکزی در درون

اتاقک آزمایش نیلسن [۱۸]

به منظور انجام اصلاحاتی در روش ناحیه‌ای توضیح داده شده، کد نوشته‌شده به قابلیت لحاظ نمودن ضرایب افت متغیر ارتقا داده شد و در شرایط ذکر شده برای تحقیق تجربی مورد بحث اجرا گردید. در این حالت ضرایب افت بین سلول‌های حاوی جریان ورودی با سلول‌های قرارگرفته در ردیف‌های پایین‌تر متغیر در نظر گرفته شد. این تغییرات از مقدار صفر در نزدیکی دریچه تا مقدار 0.83 در انتها و بصورت خطی در طول اتاقک اعمال گردید. نتایج بصورت توزیع سرعت در شکل شماره ۶ آورده شده است.

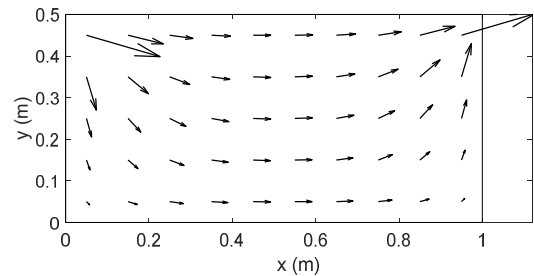
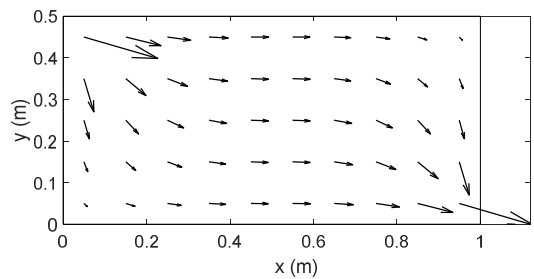
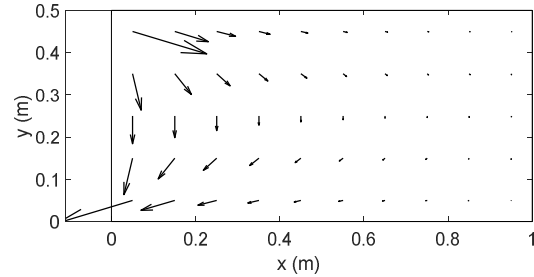


شکل ۶- توزیع سرعت بدست آمده با ضرایب افت متغیر

این شکل نشان می‌دهد که جریان خروجی از دریچه همانند نتایج تجربی نشان داده‌شده در شکل شماره ۵ در طول اتاقک و به موازات سقف به حرکت خود ادامه داده‌است. در حالیکه جریان ضعیف‌تری در لایه‌های پایین ایجاد شده‌است. علیرغم نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی به نتایج تجربی که در اثر اعمال ضرایب متغیر خطی حاصل شده‌است می‌توان مشاهده نمود که پدیده چرخش جریان در درون اتاقک پیش‌بینی نشده‌است.

۴- نتیجه‌گیری

روش توانی ناحیه‌ای که براساس عبور جریان یک‌بعدی از درون یک روزنه توسعه داده‌شده می‌تواند برای پیش‌بینی توزیع سرعت در درون فضاهای مختلف در مقیاس واقعی استفاده شود و با حجم محاسبات بسیار ناچیز در مقایسه با تحلیل عددی، توزیع سرعت در درون یک فضای نسبتاً بزرگ بدست آورده شود. برخلاف روش‌های قبلی که در درون یک فضا، ناحیه‌های خاصی تعریف و از الگوهای از پیش تعیین شده استفاده می‌شود در روش ارائه شده در تحقیق حاضر



شکل ۴- میدان‌های جریان توسعه‌یافته برای هندسه دوم به ازای

محل‌های خروجی با موقعیت متفاوت

به منظور ارزیابی نتایج بدست آمده و نیز اعمال اصلاحات ممکن در روش استفاده‌شده، نتایج تجربی برای یک هندسه مشابه مورد بررسی قرارگرفت. شکل ۵ یک دامنه دو بعدی را نشان می‌دهد که نیلسن و همکاران [۸] توزیع سرعت در درون آن را در قسمت‌هایی بصورت تجربی اندازه گرفته‌اند. دامنه دو بعدی نشان داده شده، صفحه مرکزی یک اتاقک می‌باشد که در آن جریان هوا با عدد رینولدز برابر 5000 که بر اساس ارتفاع دریچه ورودی تعیین می‌شود وارد اتاقک شده و از طریق دریچه خروجی به بیرون هدایت می‌شود. در دو موقعیت $x=H, 2H$ ، مقادیر سرعت افقی جریان اندازه‌گیری شده و بصورت بی‌بعد (نسبت به سرعت ورود جریان) بیان شده است. در این شکل که بر اساس نتایج پژوهش مذکور تهیه شده‌است مقادیر سرعت بی‌بعد نیز در درون شکل با مقیاس نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که جریان ورودی به درون اتاقک تا فواصل قابل توجهی به موازات سقف با سرعت نسبتاً زیاد پیشروی کرده است. این جریان که در اصطلاح جریان جت به موازات دیوار نامیده می‌شود رفتاری شبیه جت آزاد دارد. بر اساس مطالعات انجام گرفته بسته به عرض جت (h_1) هسته مرکزی که دارای سرعتی برابر با سرعت ورود جریان هست به اندازه حدود شش برابر h_1 می‌تواند ادامه پیدا کند و سپس کاهش جریان در قسمت‌های مرکزی نیز اتفاق بیفتد [۱۸]. به هرحال می‌توان

- [9] Nielsen J., The influence of office furniture on the air movements in a mixing ventilation room, Ph.D Thesis, Aalborg University, Denmark, 1998.
- [10] Mora L., Gadgil A. J., Wurtz E., Comparing zonal and CFD model predictions of isothermal indoor airflows to experimental data. *Indoor Air*, Vol. 13, pp. 77-85, 2003.
- [11] Yu Y., Megri A. C., A novel pressurized zonal model using the momentum equation. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 77-87, 2014.
- [12] Mendonça K. C., Abadie M. O., Blondeau P., MODELING PARTICLE DISTRIBUTION USING THE ZONAL APPROACH. In 10th International Conference on Industrial ventilation, Paris, 2012, as
- [13] Norrefeldt V., Grun G., Sedlbauer K., VEPZO – Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space. *Building and Environment*, Vol. 48, pp. 183-194, 2012.
- [14] Yu Y., Megri A. C., New calibrated zonal model (POMA) for temperature and airflow predictions. *Building and Environment*, Vol. 94, pp. 109-121, 2015.
- [15] Yamasawa H., Kobayashi T., Yamanaka T., Choi N., Cehlin M., Ameen A., Prediction of thermal and contaminant environment in a room with impinging jet ventilation system by zonal model. *Building and Environment*, Vol. 221, p. 109298, 2022.
- [16] Hu H., Wang H., Zou Z., Zhu Z., Investigation of inter-zonal heat transfer in large space buildings based on similarity: Comparison of two stratified air-conditioning systems, *Energy and Buildings*, Vol. 254, p. 111602, 2022.
- [17] Jiro T. E., A New Generation of Zonal models: Development, Verification and Application, Ph.D Thesis, Concordia University, Canada, 2006.
- [18] Mora L., Gadgil A. J., Wurtz E., Comparing zonal and CFD model predictions of isothermal indoor airflows to experimental data. *Indoor Air*, Vol. 13, pp. 77-85, 2003.

کل فضا با استفاده از معادله جریان-اختلاف فشار بین هر دو سلول مجاور و نیز معادله بقای جرم برای هر سلول با یک روش عددی تکراری مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، میدان جریان حاصل شده همواره مسیرهای جریان را از مقطع ورودی به سمت خروجی با اولویت مسیرهای کوتاه پیش‌بینی می‌کند. در صورت استفاده از ضرایب افت متغیر و مناسب بین سلول های تعریف شده در درون یک فضا، می‌توان توزیع سرعتی مشابه با نتایج تجربی بدست آورد. مهم‌ترین اشکالی که بر توزیع سرعت بدست آمده وارد خواهد بود عدم پیش‌بینی جریان‌های چرخشی و برگشتی در صورت استفاده از این روش خواهد بود.

۵- نمادها

ρ	چگالی (kg/m^3)
C_x	ضریب افت در جهت X
C_y	ضریب افت در جهت Y
m_x	دبی جرمی در جهت X (kg/s)
A	مساحت (m^2)
m_y	دبی جرمی در جهت Y (kg/s)
P	فشار (Pa)

۶- مراجع

- [1] Boukhris Y., Gharbi L., Ghrab-Morcos N., Simulating Air Flow with a Zonal Model for Natural Convection. *International Journal of Ventilation*, Vol. 7, No. 3, pp. 207-219, 2008.
- [۲] افضلیان م. و ذوالفقاری س. ع.، تأثیر جانمایی دریچه های ورود هوا بر عملکرد سیستم تهویه جابجایی بر اساس شرایط آسایش گرمایی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی در یک مکان پرجمعیت. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۹، ش. ۱، ص ۳۰-۲۱، ۱۳۹۸.
- [3] Megri A. C., Haghighat F., Zonal Modeling for Simulating Indoor Environment of Buildings: Review, Recent Developments, and Applications. *HVAC&R Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 887-905, 2007.
- [4] Yu Y., Megri A. C., Jiang S., A review of the development of airflow models used in building load calculation and energy simulation. *Building simulation*, Vol. 12, pp. 347-363, 2019.
- [5] Lin Y., POMA-A Zonal Model for Airflow and Temperature Distribution Analysis, MSc. Thesis, Concordia University, 1999.
- [6] Musy M., Wurtz E., Winkelmann F., Allard F., Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative/convective heater., *Building and Environment*, Vol. 36, No. 5, pp. 589-596, 2001.
- [7] Gharbi L., Ghrab-Morcos N., Roux J. J., ZAER: A Zonal Model for Heat Transfer and Air Flow in Unconditioned Buildings. - An Experimental Validation. *International Journal of Ventilation*, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2004.
- [8] Lu Y., Dong J., Wang Z., Wang Y., Wu Q., Wang L., Liu J., Evaluation of stack ventilation in a large space using zonal simulation and a reduced-scale model experiment with particle image velocimetry. *Journal of Building Engineering*, Vol. 34, 101958, 2021.