



## شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی آلودگی انتشار یافته از یک منبع گازی درون فضای داخل با اعمال مدل ناحیه‌ای فشار

عزیز عظیمی<sup>۱\*</sup> و احسان دانشگر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

<sup>۲</sup>کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۲/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸

### چکیده

در مقاله حاضر، به منظور دستیابی به روشی با دقت مناسب و سرعت بالا، جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی انتشار آلودگی بر اثر وجود منبع آلودگی گازی در اتاق، روش ناحیه‌ای نسخه فشار توسعه داده شده و دو مسأله انتشار آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است. در مسأله اول که برای اعتبارسنجی نتایج این تحقیق است، شبیه‌سازی انتشار آلودگی به واسطه ورود هوای آلوده به یک اتاق با ابعاد  $3 \times 4 \times 2.5$  متر از طریق دریچه تهویه مطبوع تعبیه شده روی دیوار و نزدیک به سقف انجام شده، نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حل عددی معادلات ناویراستوکس مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که درصد خطای متوسط حل ناحیه‌ای نسبت به داده‌های تجربی، برابر با  $26/8$  و نسبت به حل عددی معادلات ناویراستوکس، برابر با  $10$  است. سپس، با در نظر گرفتن دو نوع منبع آلودگی گازی ثابت و لحظه‌ای در یک اتاق با ابعاد  $3 \times 4 \times 3$  متر، توزیع آلودگی در محیط داخل، مورد بررسی قرار گرفته است. با مشاهده نتایج حاصل از این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که این روش، نتایج قابل قبولی را در زمان بسیار کمتری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی و حل عددی معادلات ناویراستوکس به دست می‌دهد؛ در نتیجه این روش می‌تواند در بررسی مسائل زیست محیطی زمان‌بر، کارآمد باشد.

**کلمات کلیدی:** روش ناحیه‌ای؛ نسخه فشار؛ انتشار آلودگی؛ منبع آلودگی گازی.

## Numerical Simulation of 3-D Pollution Propagated from a Gaseous Source Through Indoor Space by Applying Pressure Zonal Model

A. Azimi<sup>1,\*</sup>, E. Daneshgar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

<sup>2</sup>M.Sc., Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

### Abstract

In this paper, in order to achieve a suitable accuracy and high-speed method for simulating three-dimensional emission propagation in a room due to a gaseous pollution source, a pressure version of the zonal method has been developed and two pollution problems have been investigated. At the first problem, for validating the results of this research, the emission simulation through contaminated air into a room with dimension of  $3 \times 4 \times 2.5$  m via an air-conditioning gate mounted on the wall near the ceiling is done and the results have been compared with those of the numerical solution of Navier-Stokes Equations and the experimental data. According to this comparison, the percentages of average error between the present results and the experimental data, and also between the present results and those of the numerical solution are 26.8 and 10, respectively. After that, considering both constant and instantaneous gaseous pollution sources in a room with dimensions of  $3 \times 4 \times 3$  m, pollution distributions in the room have been evaluated. According to the results of this research, this zonal method can obtain acceptable results in far less time than those of the experimental and computational fluid dynamics methods. Therefore, this method can be efficient for considering time-consuming environmental problems.

**Keywords:** Zonal Method; Pressure Version; Contaminant Distribution; Gaseous Contaminant Source.

## ۱- مقدمه

از آنجا که بخش عمده زندگی بشر امروزی داخل ساختمان می‌گذرد، ایجاد شرایط مطلوب محیطی در ساختمان، دارای اهمیت بالایی است. از طرفی دیگر، بهبود کیفیت هوای داخل، علاوه بر تأمین آسایش و سلامتی ساکنین، باعث افزایش بهره‌وری آن‌ها شده، از بروز برخی از بیماری‌ها، اعم از آسم، التهاب ریه می‌تواند جلوگیری کند.

در دهه‌های گذشته با توجه به قیمت نسبتاً پایین سوخت، طراحی ساختمان‌ها بدون توجه به بازده انرژی آنها انجام گرفته، بدین‌گونه تجهیزات گرمایشی، سرمایشی و تهویه مطبوع اغلب بزرگتر از اندازه مورد نیاز انتخاب می‌شدند؛ اما با بالا رفتن قیمت شدید سوخت‌های فسیلی و بحران انرژی در جهان، جهت کاهش هزینه‌های انرژی در طراحی ساختمان‌های جدید، نفوذ هوا از داخل به خارج و خارج به داخل به حداقل مقدار ممکن کاهش یافته است. بر اثر این تغییرات، به دلیل عدم استفاده کافی از تهویه طبیعی و هوای تازه، آلاینده‌های تولید شده داخل ساختمان هیچ راهی برای خروج نداشته، این مسأله باعث بروز آسیب‌های جدی به ساکنین آن‌ها گردیده است.

به منظور بررسی رفتار آلودگی در محیط داخل می‌بایست، علاوه بر آلودگی‌هایی که از خارج وارد ساختمان می‌شوند، منابع آلودگی مستقر درون ساختمان را نیز مد نظر قرار داد. آلودگی‌ها به صورت، ذرات معلق و یا آلودگی گازی می‌باشند که هر دو این آلودگی‌ها، دارای رفتاری متفاوت نسبت به یکدیگر می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی انتشار آلودگی در محیط داخل می‌توان، از روش تک‌گره‌ای استفاده نمود، ولی این روش توزیع مناسبی از پارامترهای جریان هوای درون فضا بدست نمی‌دهد؛ درحالی‌که توزیع واقعی غلظت آلودگی در محیط داخل تحت شرایط تهویه مختلف، به صورت تابعی از مکان است؛ بنابراین ضروری است که به منظور طراحی بهتر و کنترل مناسب‌تر سیستم‌های تهویه مطبوع، توزیع آلودگی در محیط داخل را بصورت تابعی از مکان بدست آورد.

با توجه به محدود بودن تعداد سنسورهای اندازه‌گیری و همچنین وقت‌گیر و پرهزینه بودن روش‌های آزمایشگاهی، از روش‌های شبیه‌سازی عددی به منظور پیش‌بینی انتشار آلودگی در محیط داخل استفاده می‌شود. در این راستا،

روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (حل عددی معادلات ناویراستوکس)، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، این روش‌ها بسیار وقت‌گیر می‌باشند و با توجه به نیاز مهندسان به مطالعه ساختمان‌های با حجم بالا و در بازه زمانی طولانی (به عنوان مثال سالیانه)، یافتن روش‌هایی حس شده است که به زمان محاسبات کمتری نیاز دارند.

در راستای بهبود سرعت و کاهش زمان محاسبات، برخی محققان از روش ناحیه‌ای جهت دست‌یابی به توزیع جریان هوا و آلودگی در محیط داخل استفاده نمودند. روش ناحیه‌ای یک مدل، بین روش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل تک‌گره‌ای<sup>۱</sup> است. این روش قادر است، پدیده‌های متفاوتی را که توسط مدل‌های تک‌گره‌ای و چندناحیه‌ای در نظر گرفته نمی‌شوند، مانند جریان هوا (میدان‌های سرعت و فشار)، توزیع آلودگی، گرمایش و سرمایش از کف و غیره را شبیه‌سازی نماید. وجه تمایز روش ناحیه‌ای (بعنوان یک مدل ساده) نسبت به روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، در بکارگیری فرضیات ساده کننده در مدل‌سازی معادلات حاکم و سپس حل عددی معادلات دیفرانسیل معمولی با بکارگیری تعداد المان‌های بسیار کمتر و در نتیجه داشتن زمان محاسباتی کمتر است؛ بنابراین، این روش نتایج عددی مورد نیاز را در زمان کوتاه‌تری برای بدست آوردن توزیع جریان هوا (میدان‌های سرعت و فشار و توزیع آلودگی) و رفتار غیرهم دمای هوا به منظور محاسبات بار حرارتی و برودتی و همچنین مصرف انرژی ساختمان با دقت قابل قبول در حد کاربردهای مهندسی، ولی بسیار دقیق‌تر از روش‌های تک‌گره‌ای و چندناحیه‌ای ارائه می‌دهد.

در سال‌های اخیر، کوپل نمودن روش دینامیک سیالات محاسباتی با سایر روش‌ها، به منظور بهبود نتایج شبیه‌سازی انتشار آلودگی، مورد توجه قرار گرفته است. مرور مقالاتی که از این ایده استفاده نموده‌اند، نشان می‌دهد که نویسندگان از نتایج حاصل از این کار رضایت داشته، به جواب‌های دقیقی دست یافته‌اند. با این حال افزایش دقت همراه با افزایش زمان محاسباتی است.

لبرون [۱] با مشاهدات آزمایشگاهی روی یک مجموعه سلول آزمایشی، جریان هوا و انتقال حرارت را برای مدلی با ۶

<sup>۱</sup> One Node Model

مرگی و حقیقت [۸]، مروری بر روند توسعه روش ناحیه‌ای انجام دادند. آن‌ها اصول اولیه روش ناحیه‌ای، توسعه و کاربردهای سه دهه اخیر آن را مورد بررسی قرار دادند. هوانگ و حقیقت [۹]، یک روش ناحیه‌ای برای پیش‌بینی توزیع جریان هوا، دما و توزیع غلظت یک ترکیب آلی سبک<sup>۲</sup> ته‌نشین شده در یک اتاق دوبعدی را ارائه نمودند.

وانگ و همکاران [۱۰]، از کوپل نمودن مدل دینامیک سیالات محاسباتی با روش چندناحیه‌ای جهت پیش‌بینی جریان هوا و توزیع آلودگی در یک ساختمان برای اثرات ممنتم، دما و غلظت آلودگی قوی استفاده نمودند.

وجه تمایز این تحقیق با کارهای انجام شده قبلی و نوآوری آن در این است که انتشار آلودگی درون یک اتاق (سه‌بعدی)، به‌علت هوای آلوده ورودی از طریق دریچه تهویه مطبوع و منابع تولید آلودگی ثابت و متغیر با زمان، توسط روش ناحیه‌ای نسخه فشار انجام گرفته است. در این راستا، یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده تا هندسه مورد بررسی را به نواحی کوچک‌تر (المان) تقسیم نماید و معادلات دیفرانسیل معمولی مربوط به روش ناحیه‌ای را با استفاده از روش‌های عددی حل نماید.

در این مقاله، شبیه‌سازی سه‌بعدی انتشار آلودگی درون فضای داخل با استفاده از مدل ناحیه‌ای نسخه فشار انجام پذیرفته است. به منظور نشان دادن قابلیت برنامه تدوین شده، دو مسأله انتشار آلودگی درون یک اتاق به‌واسطه ورود هوای آلوده به داخل و به‌واسطه وجود منبع آلودگی در اتاق، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مسأله اول، برای اعتبارسنجی نتایج عددی حاصل از اجرای برنامه فوق، ابتدا مطالعه شبکه برای هندسه مورد نظر، یک اتاق با ابعاد  $3 \times 4 \times 2.5$  متر انجام گرفته است. سپس انتشار آلودگی به‌واسطه ورود هوای آلوده به اتاق از طریق دریچه تهویه مطبوع شبیه‌سازی شده، نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی و دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده است [۷]. مقایسه نتایج نشان‌دهنده، قابلیت مدل ناحیه‌ای در پیش‌بینی مناسب توزیع جریان هوا و انتشار آلودگی درون فضای داخل است. در نهایت نتایج مربوط به انتشار آلودگی از یک منبع آلودگی گازی ثابت و متغیر با زمان درون یک اتاق با ابعاد  $3 \times 4 \times 3$  متر ارائه شده است.

سلول بدست آورد که با یک منبع حرارتی تغذیه می‌شد. در این روش جهت اصلی جریان و گردش هوا در سلول نزدیک به سقف اتاق بدست آمد. اینارد و باتی [۲] تحت آزمایش‌های گسترده با تعیین توزیع دما در یک محیط کنترل شده، مدل لبرن را مورد ارزیابی قرار داده، اعتبارسنجی کردند. بعدها این روش برای حل مسائل مختلف در ساختمان استفاده شد.

بویا [۳] و ورتز [۴]، مدل‌های ناحیه‌ای را بر اساس حل دامنه فشار برای پیش‌بینی جریان هوا و توزیع دما در فضاهای داخلی بزرگ توسعه دادند. ورتز [۴] با نوشتن معادلات بالانس انرژی و جرم در هر سلول، یک مدل ناحیه‌ای جدید بدست آورد. در این مدل، جریان جرمی در دیواره سلول‌ها بر اساس قانون توان-فشار محاسبه می‌شود و ورتز نشان داد که این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی و اجباری دوبعدی و سه‌بعدی استفاده شود.

حقیقت و همکاران [۵]، مدل‌های مختلف ناحیه‌ای را بر پایه قانون توانی فشار در مقابل قانون توانی حرارت و دما، مورد بررسی قرار دادند و در نهایت با بررسی گستره وسیعی از حالات مختلف، مدل ناحیه‌ای POMA<sup>۱</sup> را معرفی کردند. مدل ناحیه‌ای فشار، از مدل‌سازی جریان جرمی عبوری از مرزهای سلول استفاده می‌کند. مدل ناحیه‌ای فشار بر پایه معادلات بقای جرم و انرژی، قابلیت پیش‌بینی الگوی جریان هوا و توزیع دما درون اتاق را دارد. نتایج حاصل از مدل ناحیه‌ای فشار با داده‌های آزمایشگاهی و همین‌طور نتایج حاصل از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شدند. خان و همکاران [۶]، به روش دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر محل دریچه ورود و خروج هوا و چگالی گاز در حال انتشار را بر توزیع غلظت آلودگی در محیط داخل، جهت رسیدن به مکان بهینه دریچه‌های هوا، مورد بررسی قرار دادند. ما و همکاران [۷]، به روش دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر شرایط مختلفی مثل آلودگی در هوای ورودی به اتاق، وجود منبع آلودگی و شرایط اولیه توزیع آلودگی در محیط داخل را مورد بررسی قرار داده، در نهایت یک رابطه تحلیلی برای محاسبه توزیع گذرای آلودگی در اتاق در حالت‌های مشابه ارائه نمودند.

<sup>۲</sup> Volatile Organic Compounds (VOCs)

<sup>۱</sup> Pressurized Zonal Model with Air diffuser

## ۲- معادلات حاکم

### ۲-۱- روش ناحیه‌ای

در محیط‌هایی که هوا با سرعت‌های پایین جریان دارد، این امکان را برای ما میسر می‌سازد تا بتوان معادله ممنتم را به گونه‌ای ساده کرد که خطای قابل توجهی در نتایج مساله مورد بررسی ایجاد نگردد. در این حالت اثرات کلیه جملات معادله بقای ممنتم را در یک ضریب خلاصه کرده، آن را در جمله فشار ضرب می‌کنند و بدینگونه معادله ممنتم را به شکل بسیار ساده‌تری بدست می‌آورند [۱۱].

در واقع در این مدل، فرض می‌شود که تنها عامل ایجاد جریان هوا درون فضای داخل، نیروهای فشاری بوده، دبی جرمی عبوری از سطح مشترک نواحی  $i$  و  $j$ ، به اختلاف فشار متوسط، مساحت مرز مشترک، چگالی هوا و ضریب ثابت تجربی فوق ارتباط دارد؛ بنابراین مطابق با شکل ۱، دبی جرمی عبوری از ناحیه  $i$  به ناحیه  $j$ ، با مرز مشترک عمودی، از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۱۱]:

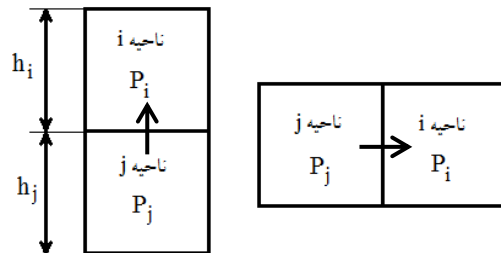
$$\dot{m}_{i,j} = \varepsilon_{i,j} \times A_{i,j} \times |p_i - p_j|^{0.5}$$

$$\varepsilon_{i,j} = \sqrt{2 \rho_i} \times C_d \times \text{sign}(p_i - p_j) \quad (1)$$

برای وارد کردن اثرات ارتفاع بر فشار درون ناحیه، اختلاف فشار هیدرواستاتیکی برای نواحی دارای مرز مشترک افقی، می‌بایست در ترم فشار وارد شوند؛ بنابراین شار جرمی برای این نواحی از معادله (۲) بدست می‌آید (شکل ۱) [۱۲]:

$$\dot{m}_{i,j} = \varepsilon_{i,j} \times A_{i,j} \times \left| p_i - p_j - \frac{1}{2}(\rho_i g h_i + \rho_j g h_j) \right|_{i,j}^{0.5}$$

$$\varepsilon_{i,j} = \sqrt{2 \rho_i} \times C_d \times \text{sign} \left( p_i - p_j - \frac{1}{2}(\rho_i g h_i + \rho_j g h_j) \right) \quad (2)$$



شکل ۱- جریان بین دو ناحیه با سطوح مشترک

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثرات کلیه جملات معادله بقای ممنتم در یک ضریب خلاصه شده، معادله ممنتم ساده‌تر شده است. مقایسه نتایج روش ناحیه‌ای با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای اغلب جریان‌های انتقال حرارت جابجایی، مقدار ضریب ثابت بین  $0.6$  و  $0.8$ ، نتایج قابل قبولی را تولید می‌نماید [۱۳]. در روش ناحیه‌ای، از رابطه گاز ایده‌آل برای محاسبه چگالی استفاده می‌شود.

به‌علت ساده‌سازی انجام شده روی معادله ممنتم، روش ناحیه‌ای به شکل معادلات (۱) و (۲) برای محیط‌های با ممنتم پایین استفاده می‌شود. از طرفی دیگر، روش ناحیه‌ای براساس تقسیم‌بندی فضای مورد بررسی به نواحی محدود بنا شده، فرض می‌کند که توزیع متغیر وابسته مساله مثل غلظت آلودگی در هر ناحیه همگن است.

در این مدل به منظور افزایش دقت نتایج و استفاده آن در مسائل با سرعت جریان نسبتاً بالا و یا به منظور در نظر گرفتن اثراتی مثل، لایه مرزی، جریان جت و پلوم می‌بایست عواملی که باعث تغییر در ممنتم و یا افزایش سرعت جریان می‌شوند، به‌صورت جداگانه مدل‌سازی شده، به‌عنوان سلول‌های ویژه در شبیه‌سازی عددی جریان هوا مد نظر قرار گیرند.

### ۲-۲- معادله بقای جرم و حل عددی آن

معادله بقای جرم برای ناحیه  $i$  به‌صورت رابطه (۱) است:

$$\sum_{j=1}^n \dot{m}_{i,j} + \dot{m}_{source} = 0 \quad (3)$$

معادله (۳) به کمک سری روابط (۱)، به شکل رابطه (۴) بازنویسی می‌شود [۱۴]:

$$\pm \sqrt{2 \rho_i} \times C_d \times A_{i,j-1} \times |p_i - p_{j-1}|^{0.5}$$

$$\pm \sqrt{2 \rho_i} \times C_d \times A_{i,j+1} \times |p_i - p_{j+1}|^{0.5} \pm \dots$$

$$+ \dot{m}_{source} = 0 \quad (4)$$

مشاهده می‌شود که معادله بقای جرم برای حل فشارهای مجهول، به حل یک دستگاه معادلات جبری غیرخطی منجر می‌شود. برای حل این دستگاه می‌توان از روش‌های حل دستگاه غیرخطی مانند، روش نیوتن استفاده کرد. در این روش، ابتدا یک حدس اولیه برای فشار ( $p^*$ ) تخمین زده، سپس مقادیر دبی جرمی حدسی ( $\dot{m}_{i,j}^*$ )، با استفاده از سری معادلات (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند. اگر معادله بقای جرم

از ناحیه  $i$  به  $z$  و دبی حجمی از ناحیه  $z$  به  $i$  می‌باشند.  $S_i$  نیز، توان منبع آلودگی در ناحیه مورد نظر است. در معادله (۸)، ترم اول در سمت چپ نشان‌دهنده تغییرات آلودگی در ناحیه بر حسب زمان است. ترم اول و دوم در سمت راست معادله، نشان‌دهنده آلودگی ورودی و خروجی به ناحیه و ترم سوم در سمت راست معادله نیز، نشان‌دهنده آلودگی تولید شده توسط منبع آلودگی قرار گرفته در ناحیه  $i$  است.

حل معادله (۸)، وابسته به مقدار اولیه آلودگی در اتاق، مقدار آلودگی ورودی به اتاق از طریق دریچه و یا مقدار آلودگی تولید شده در مکان چشمه است. حل این معادله با توجه به اینکه از سطوح دیوار هیچ آلودگی وارد یا خارج نمی‌شود، فقط به مقادیر فوق نیاز دارد که در بخش‌های اعتبارسنجی و نتایج عددی ارائه شده‌اند تا توزیع آلودگی در اتاق را بدست آورد؛ همچنین عدم وجود آلودگی در اتاق به‌عنوان شرط اولیه برای حل معادله فوق در نظر گرفته شده است.

### ۳- اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری

فضای مورد بررسی برای اعتبارسنجی، فضای درون یک اتاق بسته است که در مطالعه صورت گرفته توسط ما و همکاران [۷]، انتشار آلودگی ورودی به این اتاق از طریق دریچه تهویه مطبوع، مورد آزمایش قرار گرفته بود. این اتاق به ابعاد  $۳ \times ۴ \times ۲/۵$  متر مکعب بوده که دریچه‌های ورود هوا و خروج بترتیب، با ابعاد  $۰/۲ \times ۰/۲$  متر مربع و  $۰/۳ \times ۰/۱۸$  متر مربع روی دو دیوار مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده بودند. اتاق فاقد منبع حرارتی و آلودگی بوده، دیوارهای آن در برابر انتشار آلودگی، به صورت آدیاباتیک عمل می‌نمودند. نرخ تعویض هوا در اتاق  $۷/۴$  تعویض در ساعت بوده است. پس از رسیدن توزیع جریان هوا به حالت پایا، گاز دی‌اکسیدکربن در کانال ورودی هوا به اتاق آزاد شده، نرخ انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در دریچه ورودی هوا به اتاق، برابر با ۲۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده بود. سنسورهای سنجش غلظت آلودگی با قابلیت ذخیره‌سازی اطلاعات، تغییرات غلظت آلودگی در اتاق را بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم مخلوط برای زمان‌های مختلف ثبت نموده بودند. محل سنسورها در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

ارضا نشد، آن‌گاه باید فشارها را به میزانی تغییر داد تا دبی‌ها به مقادیر مطلوب برسند. با مشتق‌گیری از معادلات (۱) و (۲)، رابطه بین میزان تغییر دبی جرمی در اثر تغییر میدان فشار به‌دست آورده می‌شود. برای دو ناحیه با مرز مشترک، این رابطه به صورت (۵) است:

$$\delta \dot{m}_{i,j} = \frac{\sqrt{2} \rho_i \times C_d \times A_{i,j}}{2 |p_j - p_i|^{0.5}} (\delta p_j - \delta p_i) \quad (5)$$

دبی و فشارهای جدید ( $\dot{m}_{i,j}$  و  $P$ ) از رابطه (۶) به‌دست آورده می‌شوند:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{i,j} &= \dot{m}_{i,j}^* + \delta \dot{m}_{i,j} \\ p &= p^* + \delta p \end{aligned} \quad (6)$$

حل  $\dot{m}_{i,j}$  از معادله (۶) در رابطه بقای جرم (معادله (۴)) قرار داده شده، مقادیر فشار اصلاحی برای تمامی نواحی محاسبه می‌شود. با استفاده از فشار جدید روند تکرار تا رسیدن به همگرایی با دقت مورد نظر ادامه می‌یابد. برای اینکه بتوان مقادیر فشار اصلاحی را محاسبه نمود و الگوریتم حل همگرا شود، لازم است که برای محاسبه فشار از رابطه (۶)، از ضرایب تخفیف استفاده کرد.

### ۳-۲- مدل‌سازی انتشار آلودگی

معادله بقای پخش آلودگی گازی در هوا به صورت معادله دیفرانسیل پاره‌ای (۷) است [۶]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i C] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] + S_i \quad (7)$$

سمت چپ این معادله، نرخ تغییرات غلظت با زمان و سمت راست آن نیز، جملات جابجایی، نفوذ و توان منبع آلودگی گازی در محیط می‌باشند. به منظور مدل‌سازی انتشار آلودگی به روش ناحیه‌ای فرض می‌شود که هوا در هر ناحیه دارای اختلاط کامل بوده، همه پارامترها در آن ناحیه یکسان می‌باشند. همچنین از پدیده نفوذ صرف‌نظر شده، فرض می‌شود که آلودگی تنها از طریق جابجایی هوا از یک ناحیه به ناحیه مجاور انتقال می‌یابد. بر اساس فرضیات فوق، معادله بالانس جرم برای هر ناحیه (مانند ناحیه  $i$ )، به صورت رابطه (۸) است [۶]:

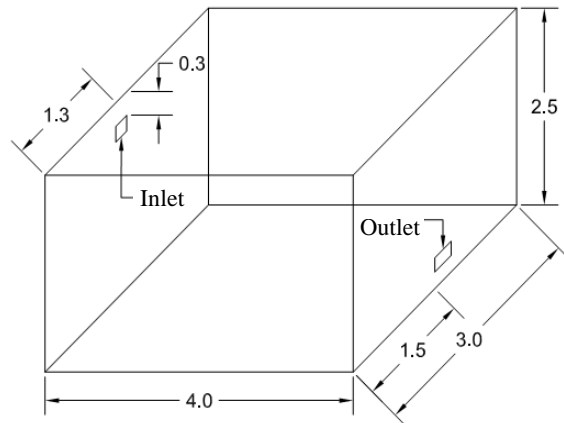
$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_{j=i} V_{j-i} C_i - \sum_{j=i} V_{i-j} C_i + \sum S_i \quad (8)$$

در رابطه (۷)،  $V_i$  و  $C_i$  به ترتیب، حجم و غلظت آلودگی هوا در ناحیه مورد نظر،  $t$  زمان و  $V_{i-j}$  و  $V_{j-i}$  به ترتیب، دبی حجمی

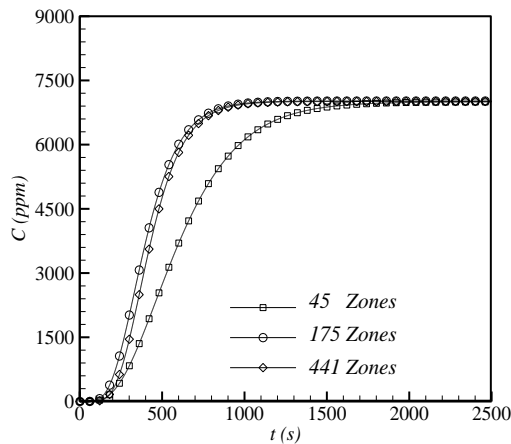
سنسورها، با تقسیم‌بندی اتاق به ۱۷۵ ناحیه، در مقایسه با ۴۴۱ ناحیه بسیار به هم نزدیک می‌باشند. مدت زمان انجام محاسبات برای ۱۷۵ ناحیه برابر با ۲۰۰ ثانیه و برای ۴۴۱ ناحیه برابر با ۵۰ دقیقه است؛ بنابراین با تقسیم‌بندی اتاق به ۱۷۵ ناحیه، علاوه بر به‌دست آوردن نتایج مستقل از تعداد ناحیه، مدت زمان انجام محاسبات نیز بسیار کاهش می‌یابد.

### ۳-۲- مقایسه نتایج عددی

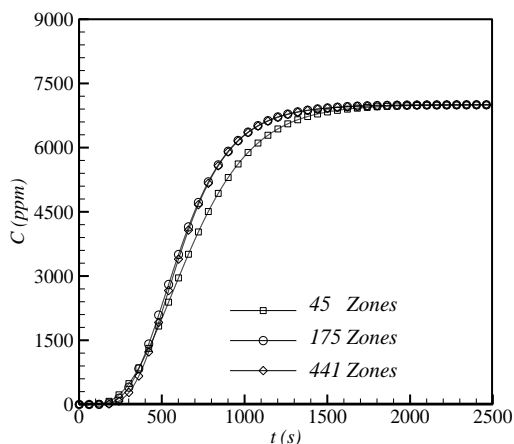
همان‌طور که گفته شد، فضای مورد بررسی برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری تدوین شده، به‌صورت آزمایشگاهی و روش دینامیک سیالات محاسباتی توسط ما و همکاران [۷]، مورد بررسی قرار گرفته است.



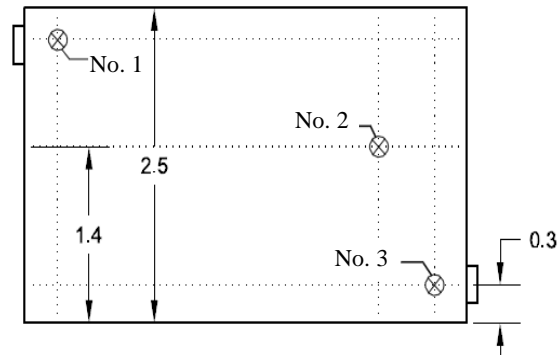
شکل ۲- مشخصات اتاق مورد استفاده جهت شبیه‌سازی [۷] (ابعاد بر حسب متر)



شکل ۴- تغییرات غلظت بر حسب زمان در محل سنسور شماره ۲ برای مطالعه شبکه



شکل ۵- تغییرات غلظت بر حسب زمان در محل سنسور شماره ۳ برای مطالعه شبکه

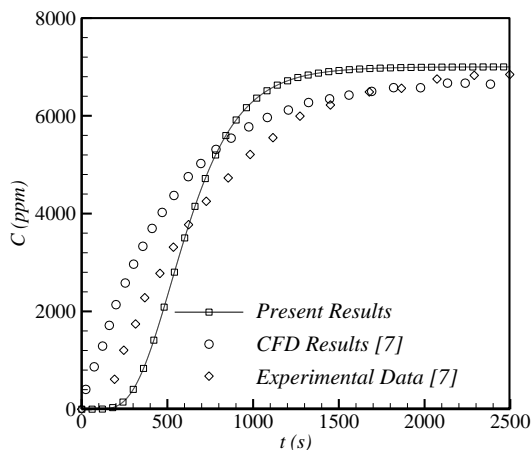


شکل ۳- محل سنسورهای سنجش غلظت آلودگی در اتاق [۷] (ابعاد بر حسب متر)

### ۳-۱- مطالعه شبکه

از آنجا که در روش ناحیه‌ای، هر ناحیه (المان) دارای ابعاد بزرگ بوده، این روش متوسط غلظت در آن ناحیه را محاسبه می‌نماید؛ بنابراین با کاهش ابعاد ناحیه، غلظت آلودگی در آن نیز تغییر خواهد نمود. برای اینکه بتوان فرض همگن بودن غلظت آلودگی در هر ناحیه را به‌طور مناسب بکار برد، می‌بایست ابعاد المان‌ها را در چند مرحله کوچک نمود و زمانی‌که با کوچک‌تر کردن ابعاد ناحیه، تغییری در توزیع غلظت مشاهده نشد، تعداد ناحیه مطلوب به‌دست خواهد آمد که در آن غلظت آلودگی به حالت همگن رسیده است.

در شکل‌های ۴ و ۵، به منظور بررسی استقلال از تعداد ناحیه، تغییرات غلظت در محل سنسورهای شماره ۲ و ۳، برای تقسیم‌بندی اتاق به ۴۵ ناحیه، ۱۷۵ ناحیه و ۴۴۱ ناحیه نشان داده شده است. نتایج ثبت غلظت آلودگی توسط



شکل ۸- مقایسه نتایج تغییرات غلظت- سنسور شماره ۳

جدول ۱- خطاهای بیشینه و متوسط نتایج مدل ناحیه‌ای و معادلات ناویراستوکس [۷] نسبت به داده‌های تجربی [۷].

سنسور	خطای بیشینه		خطای متوسط	
	نتایج حاضر	حل عددی [۷]	نتایج حاضر	حل عددی [۷]
۱	۵۳/۱۶	۲۴/۹۰	۱۹/۷۶	۲۲/۵۷
۲	۹۰/۷۱	۸۰/۳۱	۲۱/۳۴	۱۵/۳۴
۳	۸۹/۷۳	۷۰/۱۷	۲۶/۸۰	۱۶/۱۲

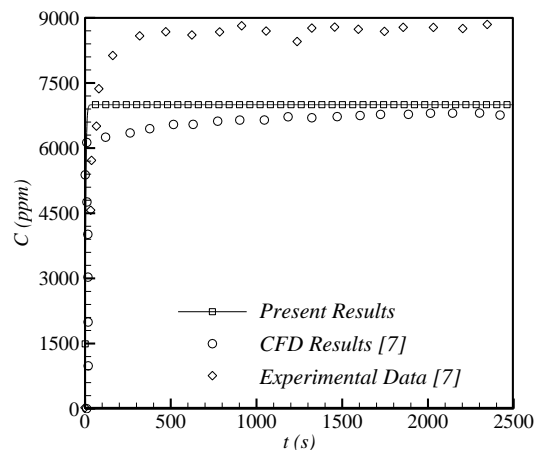
همان‌طور که از اشکال ۶ الی ۸ و جدول ۱ مشاهده می‌شود، روش ناحیه‌ای با توجه به فرضیات و تقریب‌ها و همچنین زمان محاسبات بسیار کم، به‌عنوان یک روش مهندسی، نتایج مطلوبی برای تغییرات غلظت آلودگی در محیط داخل ارائه می‌دهد. با این حال یکی از عوامل اختلاف بین نتایج حاضر و نتایج حل عددی [۷]، به خاطر تقریب‌هایی است که در روش ناحیه‌ای مورد استفاده در این مقاله انجام شده است، بویژه تقریبی که در معادله ممنت‌م انجام شده است که باعث می‌شود، برای مسائل با ممنت‌های پایین، نتایج مناسب‌تری بدست آورد. این بدان معنی است که از اثرات لایه مرزی، جت جریان ورودی به درون فضا و دنباله جریان خروجی از فضا صرف‌نظر شده است.

#### ۴- توزیع غلظت آلودگی در حضور منبع آلودگی

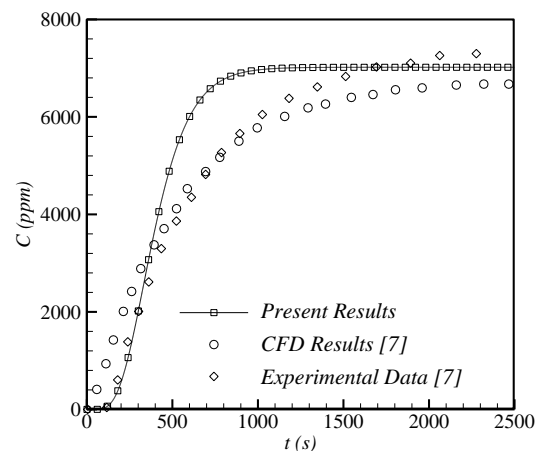
در این بخش از مقاله، با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته در بخش قبل، با در نظر گرفتن یک فضای نمونه و منبع آلودگی نقطه‌ای قرار گرفته در آن، تأثیر تغییر توان منبع آلودگی و سرعت هوای ورودی به اتاق، بر انتشار آلودگی در اتاق مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل‌های ۶ تا ۸ نتایج تغییرات غلظت بر حسب زمان به روش ناحیه‌ای با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حل عددی ارائه شده در مرجع [۷] در محل سنسورهای معرفی شده در شکل ۳، مقایسه شده است. با توجه به آن که توزیع آلودگی در اتاق پس از گذشت ۲۵۰۰ ثانیه به حالت پایا می‌رسد؛ نتایج نیز برای همین مدت زمان نشان داده شده است.

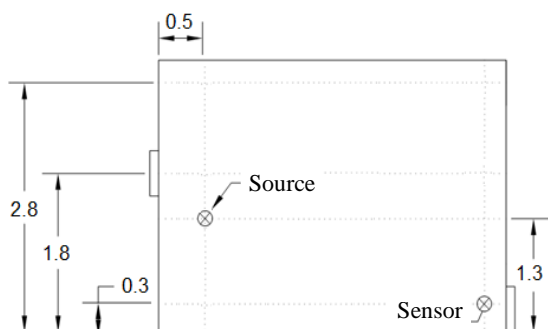
جدول ۱ نیز، مقادیر خطاهای نتایج روش ناحیه‌ای و حل عددی معادلات ناویراستوکس [۷] نسبت به داده‌های تجربی [۷] را ارائه داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم خطای متوسط روش ناحیه‌ای نسبت به داده‌های تجربی ۲۶/۸ درصد است که در سنسور شماره ۳ اتفاق افتاده است؛ اما اختلاف بین مقادیر خطای متوسط حل ناحیه‌ای و حل عددی ناویراستوکس، بیش از ۱۰ درصد نشده است.



شکل ۶- مقایسه نتایج تغییرات غلظت- سنسور شماره ۱



شکل ۷- مقایسه نتایج تغییرات غلظت- سنسور شماره ۲



شکل ۱۰- محل سنسور غلظت و منبع آلودگی در اتاق (ابعاد بر حسب متر)

به‌منظور شبیه‌سازی انتشار آلودگی در اثر نشت دائمی آلودگی در محیط داخل، ابتدا فرض می‌گردد که پس از رسیدن جریان هوا در اتاق به حالت پایا، یک منبع با توان ثابت برابر با ۵ میلی‌گرم بر ثانیه به طور دائم شروع به انتشار آلودگی می‌نماید. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، نتایج این شبیه‌سازی برای نواحی قرار گرفته در صفحه عبوری از مرکز اتاق نشان داده شده است. در این حالت پس از گذشت ۱۰ ثانیه از انتشار آلودگی، حداکثر غلظت آلودگی در محل منبع آلودگی است. پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه از انتشار آلودگی، توزیع غلظت در اتاق به حالت پایا رسیده، بیشترین غلظت آلودگی هم‌چنان در محل منبع آلودگی است.

در شکل ۱۴، تغییرات غلظت آلودگی در محل سنسور سنجش غلظت در اثر نشت دائمی آلودگی در اتاق بر حسب زمان برای ۲۰۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، غلظت آلودگی درون اتاق پس از مدت زمانی به حالت اشباع رسیده، مقدار حدود ۱۸ ppm را دارا می‌شود.

۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۴۸/۶۶	۱۱/۹۵	۲/۱۴	۰/۲۴
۱۹/۵۵	۴/۷۵	۱/۱۰	۰/۲۰
۳/۰۵	۰/۷۱	۰/۲۳	۰

شکل ۱۱- توزیع غلظت آلودگی در اتاق، ۱۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی - منبع دائم

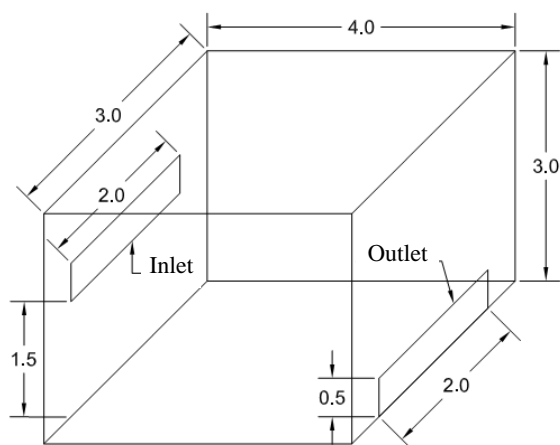
ابعاد اتاق مورد بررسی به همراه دریچه‌های ورود و خروج هوا، در شکل ۹ نشان داده شده است. سرعت هوای ورودی به اتاق از طریق دریچه تهویه مطبوع، ۰/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. هوای ورودی به اتاق فاقد آلودگی بوده و تنها عامل ایجاد و انتشار آلودگی در اتاق، منبع آلودگی نقطه‌ای قرار گرفته در آن است. در شکل ۱۰ نیز، مکان منبع آلودگی و سنسور سنجش غلظت آلودگی در اتاق نشان داده شده است.

#### ۴-۱- مطالعه شبکه

برای حل این مسأله و داشتن نتایج با دقت و زمان محاسباتی مناسب، آنالیز استقلال از تعداد ناحیه برای چند نوع شبکه از المان‌ها انجام گرفته است. مسأله برای این چند شبکه حل شده است و در نهایت به‌منظور تحلیل این مسأله از شبکه‌ای با ۷۲ ناحیه در نظر گرفته شده است، زیرا علاوه بر به‌دست آوردن نتایج مستقل از تعداد ناحیه، زمان کمتری جهت انجام محاسبات به‌دست خواهد آمد.

#### ۴-۲- نتایج عددی

در بخش ۳، اعتبارسنجی روش ناحیه‌ای انجام و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی و روش دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه گردید. در این بخش با در نظر گرفتن منبع آلودگی در اتاق، شبیه‌سازی انتشار آلودگی در محیط داخل انجام شده است.



شکل ۹- مشخصات اتاق و دریچه‌ها (ابعاد بر حسب متر)



از گذشت ۱۰ ثانیه از انتشار آلودگی، غلظت آلودگی در محل منبع آلودگی، بیشترین مقدار خود را دارد. با گذشت زمان، با توجه به وجود تهویه مکانیکی در اتاق و قطع شدن انتشار آلودگی، غلظت آلودگی در محل منبع بتدریج کاهش می‌یابد. در شکل ۱۸، تغییرات غلظت آلودگی در محل سنسور سنجش غلظت در اثر نشت لحظه‌ای آلودگی در اتاق بر حسب زمان برای ۲۰۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که غلظت آلودگی تا ۳۷ ثانیه پس از انتشار آلودگی به سرعت افزایش می‌یابد و به حداکثر مقدار خود می‌رسد. پس از آن غلظت آلودگی در محل سنسور به تدریج کاهش یافته تا در نهایت به صفر می‌رسد.

۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۴۱/۹۸	۲۸/۹۶	۸/۴۳	۱/۳۲
۴۹/۴۳	۱۹/۴۶	۶/۰۰	۱/۳۶
۱۳/۲۷	۴/۱۰	۱/۶۲	۰/۶۹

شکل ۱۵- توزیع غلظت آلودگی در اتاق، ۱۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی - منبع آبی

۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۱/۸۴	۷/۲۲	۶/۴۳	۲/۶۸
۱۶/۰۶	۲۰/۰۰	۱۴/۳۵	۶/۱۹
۲۲/۲۸	۱۷/۵۱	۱۲/۵۲	۶/۱۶

شکل ۱۶- توزیع غلظت آلودگی در اتاق، ۳۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی - منبع آبی

۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۰	۰/۴۰	۰/۷۱	۰/۵۲
۱/۴۷	۳/۷۰	۳/۸۴	۲/۰۶
۱۰/۱۳	۱۲/۳۵	۹/۷۸	۴/۰۶

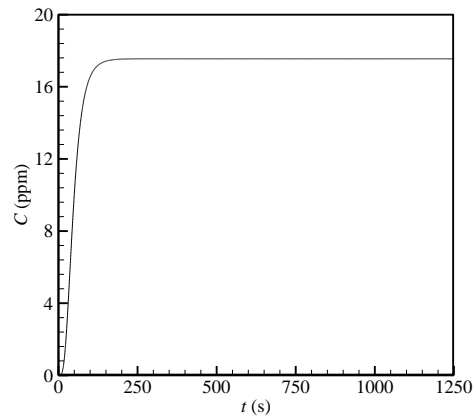
شکل ۱۷- توزیع غلظت آلودگی در اتاق، ۶۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی - منبع آبی

۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۶۱/۵۹	۳۲/۶۲	۱۵/۵۸	۵/۳۰
۶۱/۵۶	۴۶/۲۹	۲۹/۶۱	۱۲/۶۲
۵۸/۷۲	۵۱/۱۹	۳۷/۴۳	۱۶/۵۴

شکل ۱۲- توزیع غلظت آلودگی در اتاق، ۱۰۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی - منبع دائم

۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰
۶۱/۵۹	۳۲/۶۳	۱۵/۵۹	۵/۳۱
۶۱/۵۹	۴۶/۴۲	۲۹/۷۶	۱۲/۷۰
۶۱/۵۹	۵۵/۳۴	۴۰/۴۶	۱۷/۵۵

شکل ۱۳- توزیع غلظت آلودگی در اتاق، ۳۰۰ ثانیه پس از انتشار آلودگی - منبع دائم



شکل ۱۴- تغییرات غلظت آلودگی در محل سنسور سنجش غلظت - منبع دائم

به‌منظور شبیه‌سازی انتشار آلودگی در اثر آزاد شدن ناگهانی مقدار مشخصی آلودگی در محیط داخل، فرض می‌شود که یک منبع به‌طور ناگهانی ۲۰۰ میلی‌گرم آلودگی را در مدت زمان نیم ثانیه آزاد می‌نماید. پس از آن نشر آلودگی از این منبع متوقف شده، جریان هوای ورودی و خروجی به اتاق باعث پخش آلودگی در اتاق می‌شود. در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، نتایج انتشار ناگهانی آلودگی در صفحه عبوری از مرکز اتاق نشان داده شده است. در این حالت پس

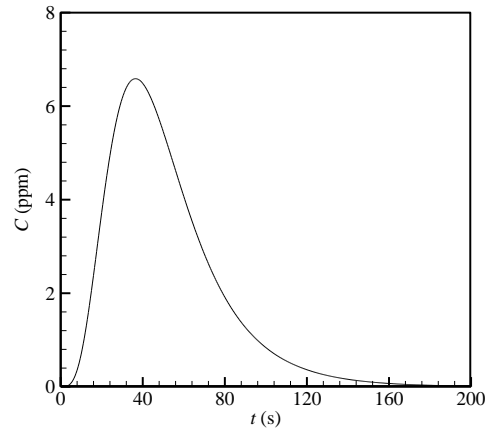
نزدیک به دیوار، جت‌ها، دنباله‌ها و پلوم به منظور افزایش دقت استفاده کرد.

#### ۶- فهرست علائم

سطح مقطع هر المان در هر جهت ( $m^2$ )	$A$
غلظت آلودگی (ppm)	$C$
ضریب تخلیه، یک ثابت تجربی با مقدار $0.8$	$C_d$
ضریب نفوذ آلودگی	$D$
شتاب جاذبه زمین ( $m s^{-2}$ )	$g$
اختلاف ارتفاع دو المان متوالی (m)	$h$
فشار (pa)	$p$
دبی جرمی عبوری از سطوح هر المان ( $kg s^{-1}$ )	$\dot{m}$
زمان (s)	$t$
مولفه سرعت ( $m s^{-1}$ )	$u$
سرعت ( $m s^{-1}$ )	$V$
جمله چشمه آلودگی	$S$
علائم یونانی	
چگالی ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$
بالانویس‌ها و زیرنویس‌ها	
نشان‌دهنده شمارنده هر المان	$i, j$
مقدار حدسی	*

#### ۷- مراجع

- [1] Lebran J, Ngendakumana Ph (1987) Air circulation induced by heating emitters and corresponding heat exchanger along the wall: test-room results and modeling. Proceedings of Roomvent 87, Stockholm, Sweden, Session 2a, Paper 6.
- [2] Inard C, Buty B (1991) Simulation and thermal coupling between a radiator and a room with zonal models. Proceedings of Building Simulation France 113-117.
- [3] Bouia H (1993) Modelisation simplifiee d'ecoulements de convection mixte interne: application aux echanges thermo-aerauliques dans les locaux. Ph.D. Thesis, University of Poitiers France.
- [4] Wurtz E. (1999) Modelisation tridimensionnelle des transfert thermiques et aerauliques dans le batiment en environnement orientte objet. Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées France.
- [5] Haghghat F, Lin Y, Mergy AC (2001) Development and validation of a zonal model- POMA. Build Environ 36(9): 1039-1047.



شکل ۱۸- تغییرات غلظت آلودگی در محل سنسور سنجش غلظت - منبع آبی

#### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با هدف توسعه روش ناحیه‌ای نسخه فشار برای شبیه‌سازی انتشار آلودگی در محیط داخل، یک برنامه کامپیوتری به زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است. در این برنامه در ابتدا با استفاده از روش ناحیه‌ای، توزیع سرعت و دبی جرمی هوای بین نواحی محاسبه گردیده است. برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری نوشته شده، انتشار آلودگی به‌واسطه ورود هوای آلوده به اتاق از طریق دریچه تهویه مطبوع انجام شده، نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی [۷] اعتبارسنجی شده است. پس از اعتبارسنجی نتایج روش ناحیه‌ای مورد استفاده، با در نظر گرفتن دو نوع منبع آلودگی گازی ثابت و لحظه‌ای در اتاق، توزیع آلودگی در محیط داخل، مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که روش ناحیه‌ای مورد استفاده در این مقاله، در مواردی که اثرات ممنتم در محیط داخل ناچیز است؛ نتایج مطلوبی را در زمان بسیار کمتری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی با درصد خطای متوسط  $26/8$  و دینامیک سیالات محاسباتی با درصد خطای متوسط  $10$  به‌دست می‌آورد. با این حال در صورت وجود ممنتم قوی در محیط (جریان هوا با اعداد رینولدز بالا)، می‌بایست از روش‌هایی با پیچیدگی بیشتر و یا از الگوریتم‌هایی به منظور اصلاح پارامترهای مساله در ناحیه

- building air distribution simulations. *Indoor Air* 17(5): 348-361.
- [11] Wurtz E, Mora L, Inard C (2006) An equation-based simulation environment to investigate fast building simulation. *Build Environ* 41:1571-1583.
- [12] Daoud A, Galanis N (2008) Prediction of airflow patterns in a ventilated enclosure with zonal methods. *Appl Energ* 85:439-448.
- [13] Musy M, Winkelmann F, Wurtz E, Sergent A (2002) Automatically generated zonal models for building air flow simulation: principles and applications. *Build Environ* 37: 873-881.
- [14] Musy M, Wurtz E, Winkelmann F, Allard F (2001) Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative, convective heater. *Build Environ* 36: 589-596.
- [6] Khan JA, Feigley CE, Lee E, Ahmed MR, Tamanna S (2006) Effects of inlet and exhaust locations and emitted gas density on indoor air contaminant concentration. *Build Environ* 41: 851-863.
- [7] Ma X, Shao X, Li X, Lin Y (2012) An analytical expression for transient distribution of passive contaminant under steady flow field. *Build Environ* 52: 98-105.
- [8] Mergi AC, Haghighat F (2007) Zonal modeling for simulation indoor environment of buildings: review, recent developments and applications. *HVAC&R Research* 13(6): 887-905.
- [9] Huang H, Haghighat F (2005) An integrated zonal model for predicting indoor airflow, temperature and VOC distributions. *ASHRAE Trans* 111(1): 601-611.
- [10] Wang I, Chen Q (2007) Theoretical and numerical studies of coupling multizone and CFD models for