



مطالعه میدانی ابعاد درز درب و پنجره‌های رایج ایران و پیشنهاد روابط محاسبه نفوذ هوا از آن‌ها

دانیال حکیمی راد¹، مهدی معرفت^{2*}، بهروز محمد کاری³، هه‌زار رسولی¹

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار مهندسی عمران (فیزیک ساختمان)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، maerefat@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 فروردین 1395

پذیرش: 24 خرداد 1395

ارائه در سایت: 23 تیر 1395

کلید واژگان:

نفوذ هوا

درزهای درب‌ها و پنجره‌ها

اختلاف فشار

مطالعه تجربی

چکیده

مطالعه نفوذ هوا به ساختمان از چند دیدگاه همچون مصرف انرژی، کیفیت هوا، آسایش حرارتی و ورود آلودگی به ساختمان اهمیت بسیاری دارد. در این زمینه پژوهش‌های بسیاری در کشورهای مختلف انجام شده است. در کشور ما به دلیل استفاده از درب و پنجره‌های آهن‌گری‌ساز، انجام تحقیق مستقل در خصوص اندازه درزها و نفوذ هوا ضرورت دارد. در این پژوهش با دیدگاهی کاربردی و به منظور بومی‌سازی نتایج، بر اساس مطالعه میدانی، ابعاد واقعی انواع درزهای اطراف درب و پنجره‌های رایج در ایران اندازه‌گیری شده است. نتایج این اندازه‌گیری برای شبیه‌سازی درزها استفاده شده و سپس به صورت تجربی نرخ نفوذ هوا از این درزها در اختلاف فشارهای مختلف محاسبه شده است. در تحقیق حاضر پس از بررسی تأثیر ابعاد مختلف درز بر نرخ نفوذ هوا، دو معادله رایج توانی و درجه دوم برای برازش داده‌ها مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که معادله توانی تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد. ضرایب لازم معادله توانی برای برآورد نرخ نفوذ هوا از انواع درزهای موجود در درب و پنجره‌های رایج ایران ارائه شده است. همچنین با تحلیل نتایج بدست آمده، با توجه به نزدیکی توان اختلاف فشار به عدد 0.5 در اکثر نتایج، نتیجه گرفته شد که از معادله برنولی نیز می‌توان برای پیش‌بینی نرخ نفوذ هوا از درزها استفاده کرد. این رابطه با قوانین و اصول فیزیکی تطابق بهتری دارد. ضریب تخلیه مربوط به معادله برنولی برای درزها با ابعاد مختلف محاسبه شده است.

Field study of gap dimensions around conventional doors and windows in Iran and relations for calculating air infiltration of them

Danial HakimiRad¹, Mehdi Maerefat^{1*}, Behrouz Mohammad Kari², Hazhar Rasouli¹

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Energy, Acoustic & Light Department of Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran.

*P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 April 2016
Accepted 13 June 2016
Available Online 13 July 2016

Keywords:

Air infiltration
Gaps around doors and windows
Pressure difference
Experimental study

ABSTRACT

Study of air infiltration into a building in several ways such as energy, air quality, thermal comfort and pollution entering in the building is very important. In this context, many studies have been conducted in different countries. In our country due to the use of steel doors and windows, independent research on the gap size and air infiltration is necessary. In this study, by practical view and in order to localize results, based on a field study, the actual dimensions of the gaps around conventional doors and windows in Iran are measured. The results of these measurements are used to simulate gaps, then, with experimental study air infiltration rate of these gaps is calculated at different pressures. In present study, after investigating the effect of different aspects of gaps on air infiltration rate, two common equations, power law and quadratic equation, were compared in order to fit data. Results show that power law equation can adapt better to the experimental data. Coefficients of the power law equation to estimate the air infiltration rate through the gaps were presented. Due to the proximity factor of the pressure difference to the number 0.5 in most of the results, it was concluded that the Bernoulli equation can be used to predict the air infiltration rate through the gaps. This equation is in better compliance with laws and physical principles. Discharge coefficient of the Bernoulli equation for gaps with different dimensions is calculated.

هنگام ورود و خروج اتفاق می‌افتد نفوذ هوا¹ و اگر جریان هوا از داخل ساختمان به خارج باشد به آن نشت هوا² می‌گویند [1].

1- مقدمه

به جریان هوای ورودی کنترل نشده از خارج به داخل ساختمان که از طریق شکاف‌ها، منافذ، بازشوهای غیر عمد و استفاده‌ی عادی از درب‌های بیرونی،

¹ Infiltration

² Exfiltration

Please cite this article using:

D. HakimiRad, M. Maerefat, B. MohammadKari, H. Rasouli, Field study of gap dimensions around conventional doors and windows in Iran and relations for calculating air infiltration of them, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 83-92, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

رابطه پرکاربرد توانی و درجه دوم انجام گرفته است. همچنین با استفاده از تحلیل داده‌ها، نتیجه شد که رابطه تحلیلی بر اساس معادله برنولی نیز می‌تواند با تقریب خوبی نرخ نفوذ هوا را پیش‌بینی کند و ضرایب ثابت آن ارائه شده است. در بخش آخر نیز توصیه‌های کاربردی برای مهندسان تهویه مطبوع و تأسیسات جهت محاسبه نرخ نفوذ هوا از درزها ارائه شده است.

2- شبیه‌سازی تجربی

2-1- دسته‌بندی انواع درز و نام‌گذاری ابعاد درزها

مرسوم‌ترین روش دسته‌بندی درزها، بر اساس هندسه مسیر عبور هوا از درز است [7,3]. بر این اساس درزها به 5 دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارت‌اند از: درز مستقیم، L شکل، Z شکل، U شکل و W شکل. با توجه به اینکه اکثر درزهای رایج در درب و پنجره‌های متداول ایران از نوع درزهای مستقیم، L شکل و Z شکل است؛ لذا در پژوهش حاضر این درزها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

درزها دارای سه بعد عمق، ارتفاع و عرض می‌باشند. کوچک‌ترین بعد درز ارتفاع درز نامیده شده و با h مشخص می‌شود. بعدی که در راستای جریان هوای نفوذی است عمق درز نامیده و با d مشخص می‌شود. و بعد دیگر درز که خیلی بزرگتر از دو بعد ارتفاع و عمق است عرض درز نامیده شده و با w مشخص می‌شود. نامگذاری ابعاد مختلف درزهای مستقیم، L شکل، Z شکل به ترتیب در شکل‌های 1، 2 و 3 آمده است. در این شکل‌ها عرض درز در راستای عمود بر صفحه می‌باشد.

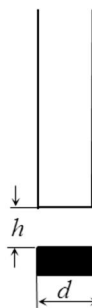


Fig. 1 Different Dimension of straight gap

شکل 1 ابعاد مختلف درز مستقیم

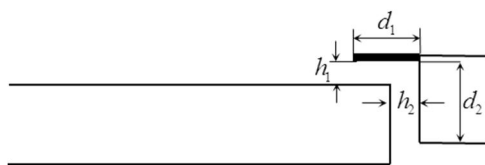


Fig. 2 Different Dimension of L-shape gap

شکل 2 ابعاد مختلف درز L شکل

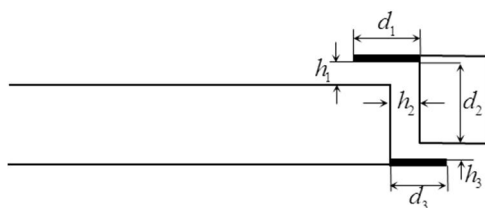


Fig. 3 Different Dimension of Z-shape gap

شکل 3 ابعاد مختلف درز Z شکل

عامل اصلی نفوذ یا نشت هوا، اختلاف فشار بین داخل و خارج ساختمان است این اختلاف فشار ممکن است ناشی از برخورد باد به پوسته خارجی ساختمان، اثر دودکشی¹ و یا تهویه مکانیکی باشد. البته نفوذ هوا، علاوه بر عوامل ذکر شده، به وضع و محل قرارگیری شکاف‌ها و منافذ، کیفیت ساخت و قدمت ساختمان، شرایط آب و هوایی محیط و هندسه ساختمان نیز بستگی دارد [2].

مطالعه نفوذ هوا به داخل ساختمان‌ها از چند دیدگاه دارای اهمیت است که از جمله آنها می‌توان به مصرف انرژی، طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع، کیفیت هوای داخل و آسایش حرارتی، و همچنین طراحی سیستم‌های کنترل دود اشاره کرد. از این رو با توجه به اهمیت بحث نفوذ هوا، تحقیقاتی در این مورد انجام شده است.

بکر و همکاران [3]، به طور تجربی تعدادی درز رایج موجود در درب و پنجره‌ها را مورد آزمایش قرار دادند. آنها چند نوع درز را با فرض اینکه ارتفاع درزها در راستای جریان هوای عبوری ثابت باشد (درز با ارتفاع یکنواخت) مورد آزمایش قرار دادند و با برازش کردن منحنی بر داده‌های تجربی، مقادیر ثابت‌ها در رابطه نفوذ هوا را بدست آوردند.

پارک و همکاران اختلاف فشار داخل و بیرون 62 مدرسه را به مدت یک سال در کشور کره جنوبی اندازه‌گیری کردند، آنها به این نتیجه رسیدند که این اختلاف فشار در شرایط طبیعی بین 1 تا 4 پاسکال متغیر است [4]. بطور کلی اختلاف فشار داخل و بیرون ساختمان‌های مسکونی را در محدوده 0.1 تا 10 پاسکال در نظر می‌گیرند [6,5]. والکر و همکاران [7]، به صورت آزمایشگاهی رابطه توانی را با رابطه درجه دوم برای محاسبه نفوذ هوا از درزهای با ارتفاع یکنواخت مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که رابطه توانی بهتر می‌تواند رابطه بین اختلاف فشار و نرخ جریان هوا را پیش‌بینی کند. آنها همچنین با آنالیز ابعادی نشان دادند که تصحیح دما و فشار در رابطه توانی ساده است و ضریب جریان برای بیشتر درزهای ساختمان مستقل از دما است و این باعث می‌شود که استفاده از این رابطه نسبت به سایر رابطه‌ها برای محاسبه نفوذ هوا آسان‌تر باشد.

در ایران، به دلیل عدم توجه کافی به هوابندی در طراحی و ساخت ساختمان‌ها و همچنین استفاده از درب و پنجره‌های آهن‌گری‌ساز و فولادی، میزان هوای نفوذی به ساختمان‌ها، از شرایط استاندارد فاصله‌ی زیادی دارد. به همین دلیل استفاده از روابط موجود ارائه شده در پژوهش‌های کشورهای دیگر، برای استفاده در محاسبات نرخ نفوذ هوا در شرایط ساختمانی ایران مناسب به نظر نمی‌رسد. به همین منظور در این پژوهش برای بدست آوردن رابطه و ضرایب مناسب نرخ نفوذ هوا، بر اساس مطالعه میدانی، ابعاد واقعی درز درب و پنجره‌های رایج در ایران اندازه‌گیری و ثبت شد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر ابعاد و شکل‌های مختلف درزها بر نرخ نفوذ هوا و همچنین ارائه روابط کاربردی برای محاسبه دقیق‌تر نرخ نفوذ هوا از درز درب‌ها و پنجره‌های ایران می‌باشد.

روند کلی در این تحقیق بدین صورت است که ابتدا با مطالعه میدانی تعداد زیادی نمونه مختلف، ابعاد درز درب و پنجره‌های رایج در ایران اندازه‌گیری شده‌اند. سپس با در نظر گرفتن نوع درزها و بازه تغییرات ابعاد آن، این درزها به صورت تجربی شبیه‌سازی شده و با انجام آزمایش دمنده فشار نرخ نفوذ هوا از درزها محاسبه می‌شوند. با استفاده از نتایج حاصل، با بررسی روابط تجربی موجود برای محاسبه نرخ نفوذ هوا، مقایسه‌ای بین دو

¹ Stack effect

2-2- بررسی میدانی ابعاد درزهای درب‌ها و پنجره‌های رایج

برای اندازه‌گیری ابعاد درزها، باید چندین ساختمان با شرایط ساخت و مصالح مختلف و ترجیحا در چند شهر متفاوت ایران انتخاب می‌شد. با توجه به اینکه عدم هوابندی مناسب ساختمان در مناطق با اقلیم سرد تأثیر و اهمیت بیشتری در اتلاف انرژی دارد، به همین دلیل سعی شده نمونه‌های درب و پنجره انتخاب شده در این پژوهش نیز متناسب با اقلیم سرد ایران باشند. جوکیسالا با مطالعه نفوذ هوا و تحلیل عملکرد انرژی در اقلیم سرد فنلاند به این نتیجه رسید که نفوذ هوا 15 الی 30 درصد بار حرارتی را در بر می‌گیرد [8]. به همین منظور برای تعیین ابعاد درزهای درب و پنجره‌های رایج، در سه شهر تهران، سنندج و ارومیه ابعاد درز درب‌ها و پنجره‌های آهنی، چوبی و آلومینیومی موجود در ساختمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. البته با توجه به اینکه ساخت درب و پنجره در ایران معمولا به صورت بومی و اقلیمی نیست، نتایج این اندازه‌گیری را می‌توان به کل ایران تعمیم داد.

برای اندازه‌گیری ابعاد درزها از خمیر و کولیس دیجیتالی با دقت یک صدم میلی‌متر استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا خمیر به چهارچوب درب یا پنجره چسبانده شده و با بستن لنگه بازشو، خمیر شکل درز را به خود می‌گرفت (شکل 4). سپس ابعاد خمیر که دقیقا به شکل و اندازه درز در آمده است به وسیله کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. این کار در سه مکان مختلف از هر سمت درب یا پنجره (چپ، راست، بالا و پایین) انجام شده و میانگین نتایج برای آزمایش‌ها استفاده شده است. جهت قابل تعمیم بودن نتایج، تعداد زیادی (368 مورد) اندازه‌گیری انجام شد.

2-2-1- درز مستقیم

طبق مشاهدات انجام شده، درزهای مستقیم فقط در پایین درب‌ها وجود دارند. عمق درزهای مستقیم برابر ضخامت درب و ارتفاع آنها وابسته به کف-ساز و نحوه نصب آنها می‌باشد. با بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده نتایج زیر حاصل شده است:

- ارتفاع درزهای مستقیم از 0.81 تا 31.13 میلی‌متر متغیر است.
- میانگین ارتفاع درزهای مستقیم در درب‌های چوبی بیشتر از آهنی و در آهنی بیشتر از آلومینیومی است.
- عمق درزهای مستقیم از 35.08 تا 52.89 میلی‌متر متغیر است.

2-2-2- درز L شکل

درزهای L شکل در پایین و بالای بعضی از درب‌ها و پنجره‌های آهنی، چوبی و آلومینیومی مشاهده می‌شوند که تعداد آنها از درزهای مستقیم و Z شکل کمتر است. با بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده نتایج زیر حاصل شده است:



Fig. 4 The paste is sticking to the door with the same dimensions of gap

شکل 4 خمیر چسبیده شده به درب با ابعاد مشابه درز

- بعد h_1 درزهای L شکل از 1.36 تا 12.03 میلی‌متر و بعد h_2 از 2.06 تا 18.05 میلی‌متر متغیر است.
- میانگین بعد h_1 درزهای L شکل درب و پنجره‌های آهنی بیشتر از آلومینیومی و آلومینیومی بیشتر از چوبی است.
- میانگین بعد h_2 درزهای L شکل درب و پنجره‌های آلومینیومی بیشتر از آهنی و آهنی بیشتر از چوبی است.
- در درزهای L شکل بعد d_1 از 12.95 تا 40.70 میلی‌متر و بعد d_2 از 21.94 تا 47.45 میلی‌متر متغیر است.
- میانگین بعد d_1 درزهای L شکل در درب و پنجره‌های آهنی بیشتر از چوبی و در چوبی بیشتر از آلومینیومی است.
- میانگین بعد d_2 درزهای L شکل در درب و پنجره‌های آلومینیومی بیشتر از چوبی و در چوبی بیشتر از آهنی است.

2-2-3- درز Z شکل

درزهای Z شکل در چهار طرف (لولا، دستگیره، بالا و پایین) درب و پنجره‌ها مشاهده می‌شوند که تعداد آنها از درزهای مستقیم و L شکل بیشتر است و رایج‌ترین درز اطراف درب و پنجره‌ها می‌باشد. با بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده نتایج زیر برای درز Z شکل حاصل می‌شوند:

- بعد h_1 درزهای Z شکل از 0.71 تا 14.81 میلی‌متر، بعد h_2 از 0.81 تا 11.97 میلی‌متر و بعد h_3 از 0.69 تا 14.26 میلی‌متر متغیر است.
- میانگین بعد h_1 درزهای Z شکل در درب و پنجره‌های آهنی بیشتر از آلومینیومی و در آلومینیومی بیشتر از چوبی است.
- در بیشتر درزهای Z شکل، بعد h_1 تقریبا برابر بعد h_3 می‌باشد لذا در شبیه‌سازی‌های تجربی فرض شده h_1 با h_3 برابر است.
- در درزهای Z شکل بعد d_1 از 10.47 تا 27.56 میلی‌متر، بعد d_2 از 23.54 تا 46.00 میلی‌متر و بعد d_3 از 7.75 تا 27.61 میلی‌متر متغیر است.
- در بیشتر درزهای Z شکل، بعد d_1 تقریبا برابر بعد d_3 می‌باشد لذا در شبیه‌سازی‌های تجربی فرض شده d_1 برابر d_3 است.

2-3- دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها به دستگاهی نیاز است که توانایی ایجاد نمونه‌های درزهای مستقیم، L شکل و Z شکل با ابعاد مختلف را داشته باشد. همچنین امکان اعمال اختلاف فشارهای مختلف به طرفین درز و اندازه‌گیری پارامترهای فشار، دما و دبی را نیز داشته باشد.

دستگاه آزمایش طبق استاندارد ملی ایران شماره 7822 تحت عنوان "درها و دیوارهای پرده‌ای و پنجره‌های ساختمانی، تعیین میزان نفوذ هوا-روش آزمون" برای اندازه‌گیری نرخ نفوذ هوا از پنجره‌ها، ساخته شده و در آزمایشگاه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی از آن استفاده می‌شود. آزمایش‌ها مطابق با استاندارد مذکور انجام شده است.

شماتیک کلی المان‌های دستگاه آزمایش و تصویر واقعی دستگاه اعمال اختلاف فشار به طرفین درز به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده‌اند. به منظور بررسی تجربی مقدار نفوذ هوا از درزهای موجود در اطراف درب و پنجره‌ها، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر روی نمونه‌هایی با درزهای مختلف که توسط رایج‌ترین پروفیل‌های درب و پنجره موجود در ایران ایجاد شده انجام گرفت. در این آزمایش‌ها درزهای مستقیم، L شکل و Z شکل استفاده شده و به طرفین آنها اختلاف فشارهای معینی اعمال شده است و نرخ نفوذ هوا

طرفین آزمون و نرخ جریان ورودی به محفظه آزمایش به حالت پایا رسیدند سرعت هوای عبوری از کانال اندازه‌گیری و ثبت شده و سپس از رابطه (1) برای محاسبه دبی هوای عبوری از کانال استفاده شده است.

$$Q = V \times A_{\text{eff}} \quad (1)$$

مقدار A_{eff} برابر 12075.93 mm^2 است.

با توجه به اینکه دستگاه اندازه‌گیری نفوذ هوا و کانال‌کشی بطور کامل هوابند نیستند لذا هنگام انجام آزمایش مقداری هوا از دستگاه و کانال‌کشی نشت پیدا می‌کند که به آن دبی هوای نشت اضافی گفته می‌شود. برای تعیین دبی هوای نشتی واقعی از درز باید دبی هوای نشت اضافی محاسبه شود، برای این منظور ارتفاع درز را برابر صفر کرده (درز بین پرفیل‌ها کاملاً هوابند شده) سپس میزان نشت اضافه در اختلاف فشارهای مختلف اندازه‌گیری و ثبت شده و سپس با استفاده از رابطه (2) دبی هوای نشتی واقعی از درز محاسبه شده است.

$$Q = Q_t - Q_e \quad (2)$$

3- مقایسه نتایج با پژوهش دیگر

به منظور اطلاع خوانندگان محترم، تنها اطلاعات گزارش شده در منابع علمی معتبر که توسط بکر و همکاران [3] انجام شده، برای یک نمونه درز مستقیم، L شکل و Z شکل به ترتیب در شکل‌های 7، 8 و 9 ارائه شده است. ابعاد درزهای مقایسه شده با نتایج بکر و همکاران در جدول 1 آمده است. تفاوت اندک نمودارها در شکل‌های 7، 8 و 9 می‌تواند به علت تفاوت در شرایط آزمایشگاهی مانند اختلاف دما، و یا همچنین اختلاف جزئی در پروفیل‌های مورد استفاده در مرجع [3] و تحقیق حاضر باشد. که با توجه به روش‌های ساخت پروفیل‌ها، تنوع کارخانه و غیره کاملاً محتمل به نظر

جدول 1 ابعاد درزهای مقایسه شده با نتایج مرجع [3]

نوع درز	d_1	d_2	d_3	h_1	h_2	h_3
مستقیم	40	-	-	9	-	-
L شکل	13	25	-	9	9	-
Z شکل	13	25	13	9	9	9

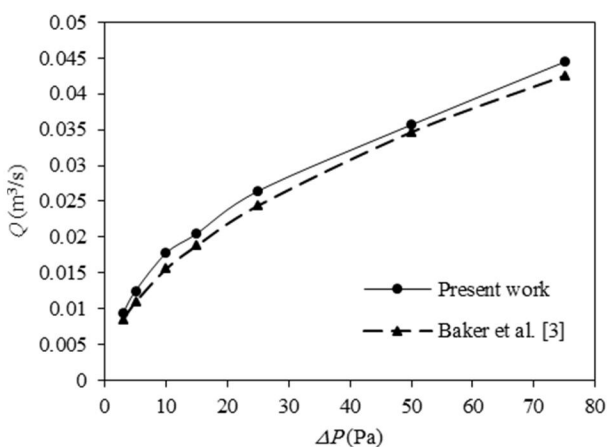


Fig. 7 Compare air infiltration rate obtained from experiments with Baker et al. result for straight gap

شکل 7 مقایسه نرخ نفوذ هوای بدست آمده از آزمایش‌ها با نتیجه بکر و همکاران برای یک نمونه درز مستقیم

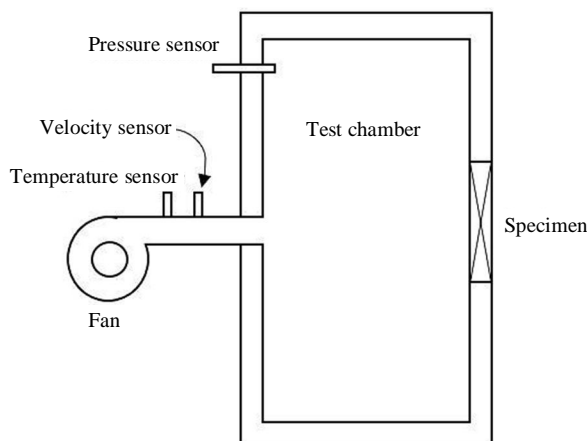


Fig. 5 Schematic of tester device

شکل 5 شماتیک دستگاه آزمایش

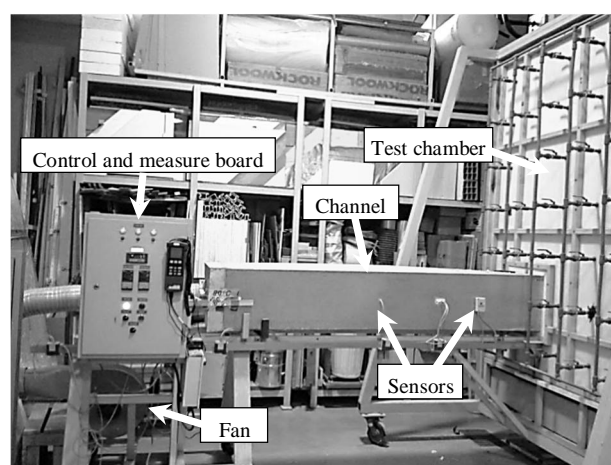


Fig. 6 Actual form of applying pressure device to the side gap

شکل 6 شکل واقعی دستگاه اعمال اختلاف فشار به طرفین درز

اندازه‌گیری و ثبت شده است.

4-2- روش انجام آزمایش

توسط دستگاه آزمایش به طرفین آزمون (که شامل درز با ابعاد دقیق و کنترل شده است) اختلاف فشار مناسب اعمال می‌شود. این اختلاف فشار در استانداردهای مختلف متفاوت است ولی در حالت کلی این اختلاف فشار با مقداری ثابت است و یا به صورت پله‌ای از صفر تا مقدار مشخصی افزایش می‌یابد. در استاندارد ASTM مقدار این اختلاف فشار، ثابت و برابر 75 پاسکال (معادل بادی با سرعت وزش 40 کیلومتر بر ساعت) است [9]. در استاندارد ملی ایران و آلمان این اختلاف فشار به صورت پله‌ای زیاد می‌شود [10, 11]. چون در تحقیق حاضر آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ملی ایران انجام شده‌اند لذا اختلاف فشارهای آزمون مرحله به مرحله ایجاد و در هر گام برای یک فاصله زمانی مطلوب حفظ شده است تا شرایط به حالت پایدار برسد. اطمینان از حالت پایدار با مشاهده تغییرات سرعت هوای عبوری از کانال و اختلاف فشار طرفین آزمون حاصل می‌شود. به این ترتیب نرخ نفوذ هوا از درزها محاسبه خواهد شد.

5-2- نحوه محاسبه نرخ نفوذ هوا

دبی کل هوای عبوری برابر مجموع دبی عبوری از درز، محفظه آزمایش و سیستم کانال‌کشی است. که برای محاسبه آن، هنگامی که اختلاف فشار

10 ارائه شده است. در شکل 10 مشاهده می‌شود که در اختلاف فشار ثابت با افزایش عرض درز، نرخ نفوذ هوا با شیب ثابتی افزایش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد، نرخ نفوذ هوا رابطه خطی با عرض درز داشته باشد. جهت کسب اطمینان از این نتیجه، در شکل 11 نرخ نفوذ هوا بر واحد عرض، بر حسب عرض درز برای اختلاف فشارهای مختلف آمده است. برای درزهای L شکل و شکل Z شکل نیز از همین پارامتر استفاده می‌شود.

برای بررسی تأثیر عرض درز بر نرخ نفوذ هوا در درزهای L شکل، یک نمونه درز L شکل با عمق و ارتفاع داده شده در جدول 2 و عرض‌های 0.5، 0.6، 0.7، 0.8، 0.9 و 1 متر شبیه‌سازی شده و نتیجه در شکل 12 ارائه شده است. عمق و ارتفاع درزهای L شکل آورده شده در جدول 2 برابر میانگین عمق و ارتفاع درزهای اندازه‌گیری شده هستند.

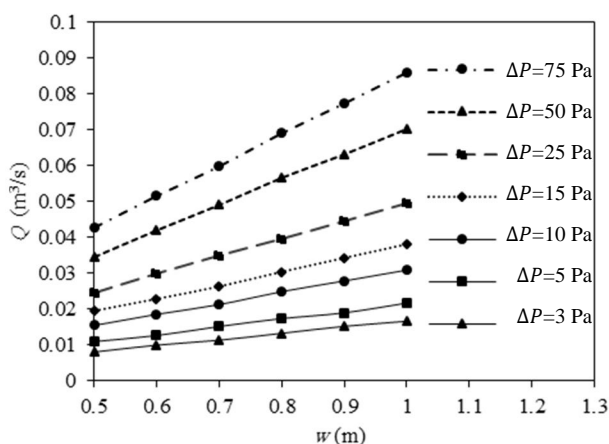


Fig. 10 Air infiltration rate for straight gap with depth and height 43.70 and 9.12 mm and a various widths

شکل 10 نرخ نفوذ هوا برای درز مستقیم با عمق و ارتفاع به ترتیب 43.70 و 9.12 میلی‌متر و عرض‌های مختلف

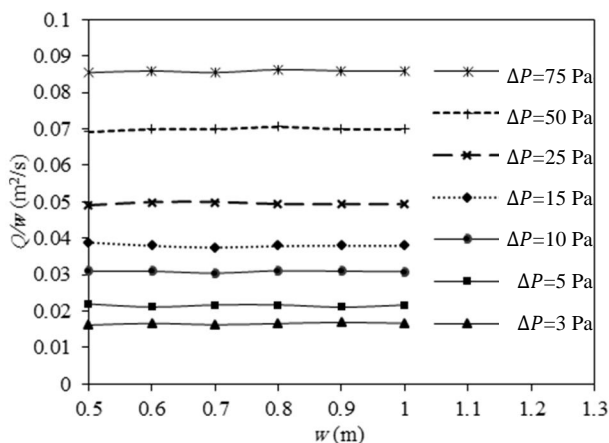


Fig. 11 Air infiltration rate per unit width based on the width of the gap for straight gap

شکل 11 نرخ نفوذ هوا بر واحد عرض بر حسب عرض درز برای درز مستقیم

جدول 2 عمق و ارتفاع درزهای L شکل شبیه‌سازی شده

Table 2 depth and height of L-shape gaps simulated

پارامتر	h_1	h_2	d_1	d_2
اندازه (mm)	4.99	7.68	17.99	35.77

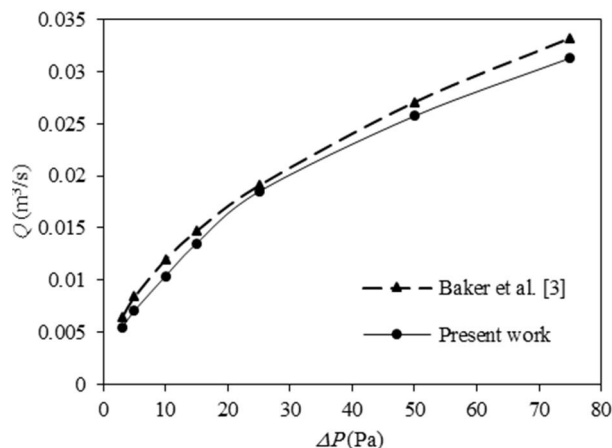


Fig. 8 Compare air infiltration rate obtained from experiments with Baker et al. result for L-shape gap

شکل 8 مقایسه نرخ نفوذ هوای بدست آمده از آزمایش‌ها با نتیجه بکر و همکاران برای یک نمونه درز L شکل

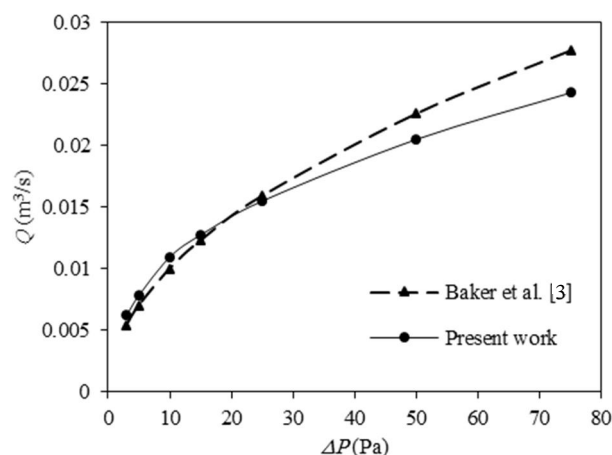


Fig. 9 Compare air infiltration rate obtained from experiments with Baker et al. result for Z-shape gap

شکل 9 مقایسه نرخ نفوذ هوای بدست آمده از آزمایش‌ها با نتیجه بکر و همکاران برای یک نمونه درز Z شکل

می‌رسد. در حالت کلی روند تغییرات و مقدار نرخ نفوذ هوا بر حسب اختلاف فشار بدست آمده از آزمایش‌ها در مقایسه با نتایج مرجع [3]، بسیار خوب ارزیابی می‌شود. دقت شود این تفاوت به معنی خطا نمی‌باشد زیرا آزمایش‌ها کاملاً بر اساس استاندارد و دستگاه مربوطه انجام شده است.

4- نتایج و بحث

4-1- بررسی تأثیر ابعاد مختلف درز بر نرخ نفوذ هوا

اندازه هر کدام از ابعاد ارتفاع، عمق و عرض درز، تأثیر متفاوتی بر نرخ نفوذ هوا دارد. برای تعیین رابطه بین ابعاد مختلف و نرخ نفوذ، تأثیر هر کدام از ابعاد به طور جداگانه بررسی شده‌است.

4-1-1- بررسی تأثیر عرض درز

برای بررسی تأثیر عرض درز بر نرخ نفوذ هوا از درز مستقیم، یک نمونه درز مستقیم با عرض‌های 0.5، 0.6، 0.7، 0.8، 0.9 و 1 متر و عمق و ارتفاع میانگین اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی شدند. میانگین عمق و ارتفاع درزهای مستقیم اندازه‌گیری شده به ترتیب 43.70 و 9.12 میلی‌متر می‌باشند. نتیجه در شکل

نتایج آن در شکل 14 ارائه شده است. همان‌طور که در شکل 14 مشهود است، در اختلاف فشار ثابت با افزایش عمق درز، نرخ نفوذ هوا به میزان بسیار کمی کاهش می‌یابد. که این نتیجه با توجه به افزایش اصطکاک دیواره امری طبیعی است. ولی از شکل 14 می‌توان نتیجه گرفت که در بازه ابعاد درزهای رایج، تغییرات عمق درز تأثیر بسیار ناچیزی بر نرخ نفوذ هوا دارد (حداکثر 3.4 درصد). داده‌های اندازه‌گیری شده برای درزهای L شکل و Z شکل نیز همین نتیجه را می‌دهد. بنابراین در ارائه روابط نفوذ هوا، می‌توان از تأثیر عمق درز صرف‌نظر کرد.

3-1-4- بررسی تأثیر ارتفاع درز

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر نفوذ هوا ارتفاع درز می‌باشد. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده ارتفاع درزهای مستقیم از 0.81 تا 31.13 میلی‌متر متغیر است. به منظور بررسی تأثیر ارتفاع درز مستقیم بر نرخ نفوذ هوا، یک نمونه درز مستقیم با عمق 43.70 میلی‌متر و ارتفاع‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. برای اینکه تأثیر بعد ارتفاع در ارتفاع‌های پایین‌تر بهتر مشاهده شود، نمودار نرخ نفوذ هوا بر حسب ارتفاع درز در دو شکل 15 و 16، یکی برای ارتفاع‌های پایین و دیگری برای ارتفاع‌های بالا ارائه شده است. شیب این نمودارها بیانگر تأثیر بعد ارتفاع بر نرخ نفوذ هوا در درز مستقیم می‌باشد.

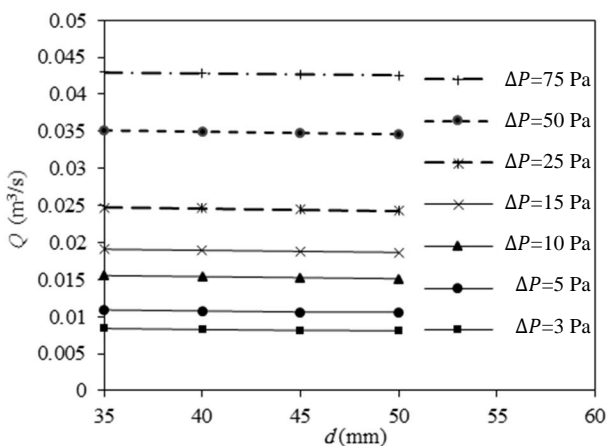


Fig. 14 Air infiltration rate based on the depth of the gap for straight gap in different pressures difference

شکل 14 نرخ نفوذ هوا بر حسب عمق درز در اختلاف فشارهای متفاوت

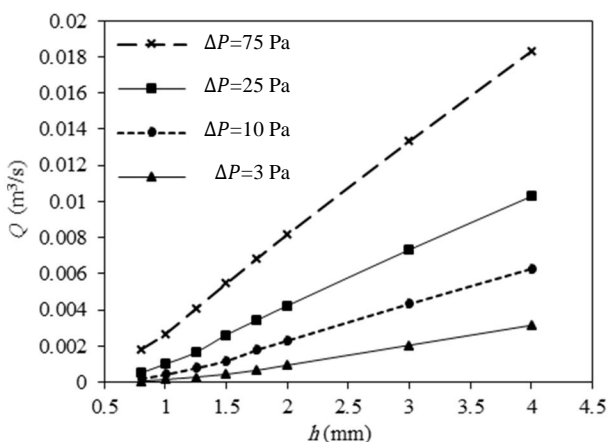


Fig. 15 Air infiltration rate in terms of straight gap height at different pressures for different heights of 0.8 to 4 mm

شکل 15 نرخ نفوذ هوا بر حسب ارتفاع درز مستقیم در اختلاف فشارهای مختلف برای ارتفاع‌های 0.8 تا 4 میلی‌متر

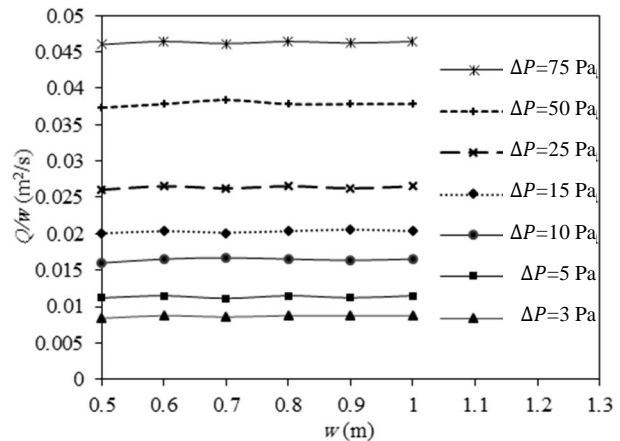


Fig. 12 Air infiltration rate per unit width based on the width of the gap for L-shape gap

شکل 12 نرخ نفوذ هوا بر واحد عرض بر حسب عرض درز برای درز L شکل

برای بررسی تأثیر عرض درز بر نرخ نفوذ هوا در درزهای Z شکل، یک نمونه درز Z شکل با عمق و ارتفاعی که در جدول 3 آمده و عرض‌های 0.5، 0.6، 0.7، 0.8، 0.9 و 1 متر شبیه‌سازی شده و نتیجه در شکل 13 ارائه شده است. توجه شود که عمق و ارتفاع درزهای Z شکل آورده شده در جدول 3 برابر میانگین عمق و ارتفاع درزهای اندازه‌گیری شده هستند.

شکل‌های 11، 12 و 13 نشان می‌دهند که در فشار ثابت، نرخ نفوذ هوا در واحد عرض درز، مستقل از عرض درز است. به بیان واضح‌تر می‌توان نتایج نرخ نفوذ هوا را بر حسب واحد عرض (یک متر) درز بیان کرد و با این کار نتایج مستقل از این بعد می‌شوند. از این پس تمام نمونه‌های آزمایشی دارای عرض 0.5 متر هستند.

2-1-4- بررسی تأثیر عمق درز

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، میانگین ارتفاع درزهای مستقیم 9.12 میلی‌متر بوده و عمق آنها از 35.08 تا 52.89 میلی‌متر متغیر است. بنابراین برای بررسی تأثیر عمق درز بر نرخ نفوذ هوا در درزهای مستقیم، یک نمونه درز مستقیم با ارتفاع 9.12 و عمق‌های مختلف شبیه‌سازی شده است که جدول 3 عمق و ارتفاع درزهای Z شکل شبیه‌سازی شده

Table 3 depth and height of simulated Z-shape gaps

پارامتر	d_1	d_2	d_3	h_1	h_2	h_3
اندازه (mm)	3.92	4.75	3.92	15.18	32.01	14.04

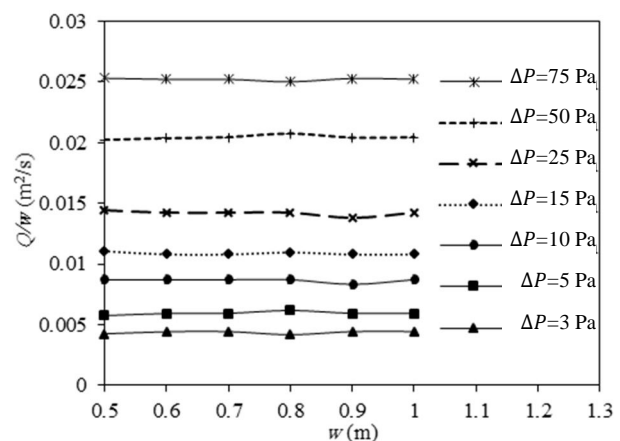


Fig. 13 Air infiltration rate per unit width based on the width of the gap for Z-shape gap

شکل 13 نرخ نفوذ هوا بر واحد عرض بر حسب عرض درز برای درز Z شکل

به ترتیب در جدول‌های 5، 6 و 7 ارائه شده‌اند. البته توجه شود که نتایج ارائه شده بر اساس درزی با عرض 1 متر بدست آمده‌اند و چون نرخ نفوذ هوا بر واحد عرض درز در یک اختلاف فشار مشخص، مقدار ثابتی است از این رو با

جدول 4 ضریب تعیین معادله درجه دوم و معادله توانی برای درزهای مختلف

table 4 The coefficient of determination for power law equation and quadratic equations for different gaps

$\Delta P = aQ + bQ^2$			$Q = c\Delta P^n$			ابعاد درز (mm)	نوع درز
R^2	a	b	R^2	n	c		
0.995	1489.3	309375	0.998	0.6111	0.0010	3	مستقیم
0.961	275.37	90949	0.994	0.5236	0.0028	6	
0.982	42.537	33345	0.993	0.5043	0.0050	9	
0.988	421.02	571150	0.994	0.5506	0.0010	2,4	شکل L
0.994	246.32	123036	0.996	0.5183	0.0025	4,8	
0.997	165.25	78605	0.997	0.5083	0.0033	6,9	
0.995	338.82	623595	0.997	0.5384	0.0011	2,6,2	شکل Z
0.991	338.82	623595	0.995	0.5754	0.0007	4,2,4	
0.996	80.008	113805	0.998	0.5066	0.0028	9,8,9	

جدول 5 ضرایب ثابت c, n برای درز مستقیم با ارتفاع‌های مختلف

Table 5 Constant factor c, n for straight gap with different heights

$Q = c\Delta P^n$		ارتفاع درز (mm)
n	c	
0.9320	0.00008	1
0.7068	0.00104	2
0.6111	0.0020	3
0.5503	0.0034	4
0.5396	0.0044	5
0.5236	0.0056	6
0.5200	0.0070	7
0.5187	0.0076	8
0.5171	0.0096	9
0.5043	0.0100	10

جدول 6 ضرایب ثابت c, n برای درز L شکل با ارتفاع‌های مختلف

Table 6 Constant factor c, n for L-shape gap with different heights

$Q = c\Delta P^n$		ارتفاع درز (mm)	
n	c	h_2	h_1
0.6269	0.0010	2	2
0.5506	0.0020	4	
0.5308	0.0032	6	
0.5303	0.0040	8	
0.5159	0.0054	10	
0.5699	0.0014	2	4
0.5454	0.0028	4	
0.5371	0.0038	6	
0.5183	0.0050	8	
0.5071	0.0062	10	
0.5633	0.0018	2	6
0.5363	0.0036	4	
0.5118	0.0048	6	
0.5106	0.0058	8	
0.5083	0.0066	10	
0.5345	0.0024	2	8
0.5264	0.0038	4	
0.5130	0.0052	6	
0.5090	0.0064	8	
0.5050	0.0076	10	
0.5267	0.0032	2	10
0.5188	0.0044	4	
0.5140	0.0058	6	
0.5054	0.0070	8	
0.5023	0.0084	10	

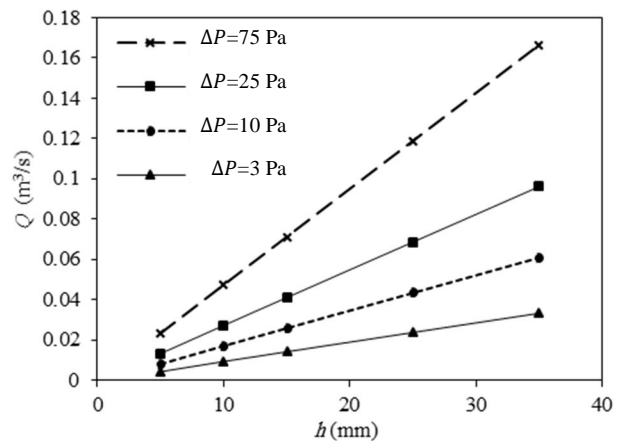


Fig. 16 Air infiltration rate in terms of straight gap for different heights of 5 to 35 mm

شکل 16 نرخ نفوذ هوا بر حسب ارتفاع درز مستقیم برای ارتفاع‌های 5 تا 35 میلی‌متر

با توجه به شکل‌های 15 و 16، ارتفاع درز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نرخ نفوذ هوا دارد. به طوری که با افزایش اختلاف فشار طرفین درز، اثر بعد ارتفاع بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع درز، تغییرات نسبی نرخ نفوذ هوا در اثر تغییرات ارتفاع درز کاهش می‌یابد به عبارت دیگر در ارتفاع‌های کم‌تر، حساسیت نرخ نفوذ هوا نسبت به تغییرات ارتفاع درز بیشتر است. برای درزهای L و Z شکل نیز نمودارهای مشابه با شکل‌های 15 و 16 به دست می‌آید و می‌توان همین نتایج را به دو نوع درز دیگر نیز تعمیم داد.

2-4- بررسی و مقایسه روابط موجود محاسبه نرخ نفوذ هوا

برای برآورد نرخ نفوذ هوا از دو معادله رایج درجه دوم¹ و توانی² استفاده می‌شود [7,3]. در پژوهش حاضر ابتدا به مقایسه این دو معادله برای درزهای با ارتفاع مختلف پرداخته شده و سپس رابطه‌ای برای پیش‌بینی نفوذ هوا از درزها ارائه شده است. بدین منظور بر داده‌های تجربی بدست آمده از آزمایش درزهای مستقیم، L شکل و Z شکل، دو معادله درجه دوم و توانی به ترتیب به شکل رابطه‌های (3) و (4) به روش حداقل مربعات³ برازش شده‌اند.

$$\Delta P = aQ + bQ^2 \quad (3)$$

$$Q = c\Delta P^n \quad (4)$$

به منظور مقایسه این دو معادله از معیار ضریب تعیین⁴ (R^2) استفاده شده است که به صورت رابطه (5) تعریف می‌شود [12]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

که در این رابطه y_i متغیر مستقل بدست آمده از آزمایش‌ها، \hat{y}_i متغیر مستقل پیش‌بینی شده توسط منحنی برازش شده، \bar{y} میانگین متغیر مستقل بدست آمده از آزمایش‌ها و m تعداد داده‌ها می‌باشند. هر چه مقدار متغیر R^2 به عدد 1 نزدیکتر باشد به این معنی است که منحنی برازش شده به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک‌ترند. در جدول 4 ضرایب معادلات نفوذ هوا و معیار ضریب تعیین برای چند نوع درز آمده است. داده‌های جدول 4 نشان می‌دهد که معادله توانی نسبت به معادله درجه دوم به میزان دقیق‌تری نرخ نفوذ هوا را پیش‌بینی می‌کند. با توجه به دقت بیشتر معادله توانی (رابطه 4) در برازش داده‌ها، ضرایب مربوط به این رابطه برای درزهای مستقیم، L شکل و Z شکل

¹ Quadratic equation

² Power law equation

³ Least square

⁴ Coefficient of determination

ارتفاع متفاوت، باید از ارتفاع معادل استفاده شود. از نظر فیزیکی استفاده از ارتفاع کمینه منطقی به نظر می‌رسد ولی این کار در برخی موارد باعث ایجاد ضرایب تخلیه بزرگ‌تر از 1 می‌شود که غیر منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین از میانگین دو ارتفاع استفاده شده است (رابطه 9). این کار در جواب نهایی رابطه (8) تغییری ایجاد نمی‌کند و در نهایت میزان نرخ نفوذ هوا یکسان بدست می‌آید.

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (9)$$

استفاده از رابطه (8) به جای رابطه (4) برای محاسبه نرخ نفوذ هوا، باعث ملموس‌تر شدن روابط می‌شود زیرا یک رابطه تحلیلی است و با قوانین و اصول فیزیکی تطابق بهتری دارد. همچنین تأثیر چگالی هوا که از دمای هوا ناشی می‌شود نیز در نظر گرفته می‌شود، که به دلیل تغییرات دمای فصلی و اقلیمی مزیت مهمی است. به منظور استفاده از رابطه (8) باید مقدار ضریب تخلیه¹ (C_d) برای درزهای مختلف تعیین شود. این ضریب برای درزهای مستقیم، L شکل و Z شکل به ترتیب در جداول 8 تا 10 ارائه شده‌اند. برای

جدول 8 ضریب C_d برای درز مستقیم با ارتفاع‌های مختلف

$Q = C_d h w \sqrt{2\Delta P / \rho}$		
C_d	ارتفاع درز (mm)	
0.1908	1	
0.6743	2	
0.6777	3	
0.7438	4	
0.7503	5	
0.7656	6	
0.8133	7	
0.7702	8	
0.8615	9	
0.7832	10	

جدول 9 ضریب C_d برای درز L شکل با ارتفاع‌های مختلف

$Q = C_d h w \sqrt{2\Delta P / \rho}$, $h = (h_1 + h_2) / 2$			
C_d	h_2 (mm)	h_1 (mm)	
0.5288	2	2	
0.5838	4		
0.6678	6		
0.6669	8		
0.7248	10		
0.4284	2	4	
0.6053	4		
0.6441	6		
0.6750	8		
0.6984	10		
0.4065	2	6	
0.6090	4		
0.6379	6		
0.6588	8		
0.6524	10		
0.4043	2	8	
0.5231	4		
0.5941	6		
0.6337	8		
0.6625	10		
0.4408	2	10	
0.5097	4		
0.5812	6		
0.6108	8		
0.6548	10		

¹ Discharge coefficientجدول 7 ضرایب ثابت c, n برای درز Z شکل با ارتفاع‌های مختلف

Table 7 Constant factor c, n for Z-shape gap with different heights			
$Q = c\Delta P^n$			
ارتفاع درز (mm)		h_2	h_1
		n	c
		2	2
		4	4
		6	6
		8	8
		10	10
		2	4
		4	4
		6	6
		8	8
		10	10
		2	6
		4	4
		6	6
		8	8
		10	10
		2	8
		4	4
		6	6
		8	8
		10	10
		2	10
		4	4
		6	6
		8	8
		10	10

استفاده از نتایج جداول 5 تا 7 می‌توان نرخ نفوذ هوا از درزهای درب و پنجره‌ها را محاسبه نمود.

3-4- پیشنهاد رابطه کاربردی فیزیکی برای برآورد نرخ نفوذ هوا از درز اطراف درب و پنجره‌های رایج

در رابطه 4، ضریب توان (n) بسته به نوع جریان داخل درز بین عدد 1 و 0.5 متغیر است. برای جریان‌های کاملاً آرام برابر 1 و برای جریان‌های کاملاً آشسته برابر 0.5 می‌باشد [13]. با توجه به جداول 5، 6 و 7 با افزایش ارتفاع درز، نرخ جریان هوا در داخل درز بیشتر شده و آشستگی جریان بیشتر می‌شود و به همین دلیل توان جریان به عدد 0.5 نزدیک می‌شود. نتایج جداول 5 تا 7 نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، مقدار ضریب توان بسیار نزدیک به عدد 0.5 است و فقط ضریب توان در درزهای با ارتفاع کم به عدد 1 نزدیک می‌شود. با این وجود به دلیل نزدیک بودن مقدار توان به عدد 0.5 می‌توان نتیجه گرفت که برای محاسبه نرخ نفوذ هوا، می‌توان از رابطه 6 استفاده کرد. رابطه 6 از ترکیب و ساده شدن معادله برنولی و معادله پیوستگی بدست آمده است و برای محاسبه نرخ جریان در بازشو استفاده می‌شود [1]. البته استفاده از رابطه (6) برای درزهای با ارتفاع بسیار کم، همراه با کمی تقریب خواهد بود.

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (6)$$

که در این رابطه، A مساحت درز است که از رابطه (7) بدست می‌آید.

$$A = h \cdot w \quad (7)$$

با توجه به اینکه رابطه نرخ نفوذ هوا بر واحد عرض درز ارائه می‌شود، بهتر است به جای رابطه (6) از رابطه (8) استفاده کرد.

$$Q = C_d h w \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (8)$$

که در این رابطه برای درزهای L شکل و Z شکل به دلیل داشتن دو

جدول 10 ضریب C_d برای درز L شکل با ارتفاع‌های مختلف

Table 10 Discharge coefficient for L-shape gap with different heights

$Q = C_d h w \sqrt{2\Delta P / \rho}$, $h = (h_1 + h_2) / 2$		
C_d	h_2 (mm)	h_1 (mm)
0.3572	2	2
0.3954	4	
0.4676	6	
0.4717	8	
0.4996	10	
0.4342	2	4
0.4625	4	
0.4961	6	
0.4858	8	
0.4960	10	
0.4747	2	6
0.4737	4	
0.5169	6	
0.5184	8	
0.5258	10	
0.4804	2	8
0.4952	4	
0.5251	6	
0.5139	8	
0.5073	10	
0.4894	2	10
0.5089	4	
0.5150	6	
0.5253	8	
0.5136	10	

محاسبه ضریب تخلیه با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها، مقدار چگالی برای هوا در 20 درجه سانتی‌گراد که برابر است با $\rho = 1.202 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ منظور شده است (مقدار واقعی در آزمایشگاه).

4-4- توصیه‌های کاربردی

در این بخش با دیدگاه صرفاً کاربردی و مهندسی، خلاصه‌ای از نتایج به صورت یک دستورالعمل ساده برای استفاده مهندسين ارائه شده است. برای استفاده از جداول 5 تا 10 بایستی اختلاف فشار دو طرف درز اندازه‌گیری شود. به منظور استفاده کاربردی و سریع مهندسين طراح، ممکن است این کار مطلوب نباشد. اختلاف فشار درون و بیرون ساختمان به مقدار بسیار زیادی تحت تأثیر فشار باد است، به همین دلیل توصیه می‌شود در محاسبات مهندسی، برآورد نرخ نفوذ هوا بر اساس سرعت باد صورت گیرد. سه مرحله زیر برای محاسبه سریع و دقیق نرخ نفوذ هوا از طریق درز پنجره‌های ساختمان پیشنهاد می‌شود:

- 1- اندازه‌گیری ارتفاع درز پنجره‌ها. اگر چند ارتفاع متفاوت در مسیر عبور جریان بود (h_1, h_2, h_3) از میانگین آنها استفاده شود.
- 2- برآورد سرعت باد عمود بر دیوارها در اطراف ساختمان.
- 3- استفاده از جدول 11 برای محاسبه نرخ نفوذ هوا از درز پنجره‌ها. این جدول بر اساس اندازه ارتفاع درز و سرعت باد است.

5- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، به صورت میدانی ابعاد سه نوع درز مستقیم، L شکل و Z شکل در سه شهر تهران، سنندج و ارومیه اندازه‌گیری شده و محدوده تغییرات ابعاد درزها در درب و پنجره‌های رایج در ایران مشخص شده است. همچنین از نتایج این اندازه‌گیری‌ها برای شبیه‌سازی درزهای واقعی اطراف درب‌ها و پنجره‌ها استفاده شده است. از مهمترین نتایج حاصله می‌توان به

جدول 11 نرخ نفوذ هوا (m^3/s) بر حسب سرعت باد به ازای یک متر عرض درزTable 11 Air infiltration rate (m^3/s) in terms of wind speed for one meter of gap's width

سرعت باد (m/s)						اندازه درز (mm)
12	10	8	6	4	2	
0.0034	0.0026	0.0018	0.0011	0.0005	0.0002	1
0.0103	0.0083	0.0064	0.0045	0.0026	0.0009	2
0.0167	0.01376	0.0108	0.00784	0.0049	0.0020	3
0.0229	0.0190	0.0150	0.0111	0.0071	0.0032	4
0.0291	0.0241	0.0192	0.0142	0.0093	0.0043	5
0.0351	0.0292	0.0232	0.0173	0.0113	0.0054	6
0.0411	0.0342	0.0273	0.0203	0.0134	0.0065	7
0.0471	0.0392	0.0313	0.0234	0.0154	0.0075	8
0.0531	0.0442	0.0353	0.0264	0.0175	0.0086	9
0.0591	0.0492	0.0393	0.0293	0.0195	0.0102	10

موارد زیر اشاره نمود.

- 1- در اختلاف فشار ثابت نرخ نفوذ هوا بر واحد عرض درز مقدار ثابتی است به عبارت دیگر در اختلاف فشار ثابت نرخ نفوذ هوا رابطه مستقیم با بعد عرض درز دارد.
- 2- ارتفاع درز بیشترین تأثیر را در نرخ نفوذ هوا دارد. همچنین تأثیر عمق درز، بر نرخ نفوذ هوا ناچیز است.
- 3- معادله توانی و درجه دوم با دقت قابل قبولی می‌توانند نرخ نفوذ هوا از درزها را پیش‌بینی کنند ولی معادله توانی بهتر می‌تواند داده‌های تجربی را پیش‌بینی کند.
- 4- ضرایب لازم برای برآورد نرخ نفوذ هوا از انواع درزهای موجود در درب و پنجره‌های رایج ایران بدست آمد.
- 5- با تحلیل نتایج بدست آمده از ضرایب معادله توانی، نتیجه شد که معادله برنولی توانایی تخمین نرخ نفوذ هوا از درز درب و پنجره‌ها را دارد. ضریب تخلیه مربوط به این معادله برای درزهای مختلف محاسبه شد.
- 6- توصیه‌های کاربردی جهت استفاده مهندسين تأسیسات برای برآورد نرخ نفوذ هوا از پنجره‌ها ارائه شد.

6- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
a	ضریب ثابت در معادله درجه دوم $(sPam^{-3})$
b	ضریب ثابت در معادله درجه دوم (s^2Pam^{-6})
c	ضریب ثابت معادله توانی $(m^3s^{-1}Pa^{-n})$
C_d	ضریب تخلیه
d	عمق (mm)
h	ارتفاع (mm)
m	تعداد داده‌ها
n	ضریب توان در معادله توانی
P	فشار (Pa)
Q	دبی حجمی (m^3s^{-1})
R^2	معیار ضریب تعیین
w	عرض (mm)
γ	داده حاصل از آزمایش
$\hat{\gamma}$	داده حاصل از منحنی برازش شده
$\bar{\gamma}$	میانگین داده‌های حاصل از آزمایش

علائم یونانی

 ρ چگالی (kgm^{-3})

زیرنویس‌ها

e اضافی (نشتی)

eff مؤثر

i شمارنده

t کلی

7- مراجع

- [6] K. Qiu, F. Haghighat, Modeling the combined conduction: air infiltration through diffusive building envelope, *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 11, pp. 1140–1150, 2007.
- [7] I. S. Walker, D. J. Wilson, M. H. Sherman, A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations, *Energy and Buildings*, Vol. 27, No. 3, pp. 293-299, 1998.
- [8] J. Jokisalo, J. Kurnitski, M. Korpi, T. Kalamees, J. Vinha, Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 2, pp. 377-387, 2009.
- [9] ASTM, Standard test method for determining rate of air leakage through Exterior windows, curtain walls, and doors under specified pressure differences across the specimen, Standard E283-04, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, US, 1999.
- [10] Iranian national standard, doors and curtain walls and windows of the building, to determine the air infiltration – test method, (Standard number 7822), 1382. (in Persian فارسی)
- [11] DIN, Windows and doors, air permeability – test method, *Standard DIN EN 1026*, 2000.
- [12] D. C. Montgomery, G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 5th edition, pp. 428-430, New York: Wiley, 2010.
- [13] M. H. Sherman, R. Chan, Building airtightness: research and practice state of the art review, Technical Report No. LBNL-53356, *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2004.
- [1] ASHRAE, *Handbook of fundamentals, Chapter 16: ventilation and infiltration*, *USA Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*, 2009.
- [2] M. Cook, Y. Ji, G. Hunt, CFD modeling of buoyancy driven natural ventilation opposed by wind, *Ninth International Building Performance Simulation Association Conference*, Montreal, Canada, Aug 15-18, 2005.
- [3] P. H. Baker, S. Sharples, I. C. Ward, Air flow through cracks, *Building and Environment*, Vol. 22, No. 4, pp. 293-304, 1987.
- [4] J. Park, Y. Jang, Y. Ahn, S. Cheong, J. Lee, Estimation of appropriate capacity of ventilation system based on the air infiltration rate in Korean classrooms, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 4, pp. 788-797, 2008.
- [5] M. O. Abadie, E. U. Finlayson, A. J. Gadgil, Infiltration heat recovery in building walls: computational fluid dynamics investigations results, Technical Report No. LBNL-51324, *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2002.