

## بررسی روش های محاسبه نرخ نفوذ هوا به ساختمان جهت کاربرد در تهویه مطبوع و محاسبات انرژی ساختمان

دانیال حکیمی راد<sup>۱\*</sup>، مهدی معرفت<sup>۲</sup>، بهروز محمدکاری<sup>۳</sup>

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

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

۳- استادیار، مهندسی عمران، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، تهران

\* صندوق پستی: ۱۱۱-۱۴۱۱۵، daniel.hakimi@modares.ac.ir

### چکیده

به جریان هوای ورودی کنترل نشده از خارج به داخل ساختمان که از طریق شکافها و منافذ ساختمان اتفاق می افتد، نفوذ هوا می گویند. بررسی نفوذ هوا به ساختمان از چند دیدگاه همچون مصرف انرژی، طراحی سیستم های تهویه مطبوع، آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل و ورود آلودگی و رطوبت اهمیت زیادی دارد. طبق تحقیقات متعددی که انجام گرفته است، نفوذ هوا ۱۵ الی ۳۰ درصد از بار حرارتی و مصرف انرژی ساختمان را به خود اختصاص می دهد که نشان دهنده لزوم تحقیق و شناخت بیشتر در این موضوع است. به طور کلی سه عامل فشار باد، پدیده دودکشی و سیستم های تهویه مطبوع باعث ایجاد نفوذ هوا در ساختمان می شوند، که باید تأثیر هر سه عامل در محاسبات لحاظ شود. از دیدگاه تهویه مطبوع، مسأله اصلی، چگونگی محاسبه نرخ نفوذ هوا در ساختمان است. تاکنون چندین رابطه تحلیلی و تجربی و همچنین آزمون های استاندارد برای محاسبه نرخ نفوذ هوا از اجزای مختلف ساختمان ارائه شده اند. در این مقاله چند مورد از روابط و معادلات پرکاربرد ارائه شده در این زمینه بررسی شده اند. در نهایت استفاده از معادله توانی به دلیل دقت مناسب مهندسی و کاربرد بیشتر در پژوهش های اخیر، برای محاسبه نرخ نفوذ هوا در ساختمان توصیه شده است.

**کلیدواژه ها:** نفوذ هوا، منافذ ساختمان، فشار باد، هواپبندی، مصرف انرژی

## Methods of calculating the rate of air infiltration into the building for the use of HVAC and building energy calculations

Danial HakimiRad<sup>1\*</sup>, Mehdi Maerefat<sup>1</sup>, Behruz MohammadKari<sup>2</sup>

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

2- Energy & Environmental Design, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran.

\*P.O.B. 14115-111 Tehran, daniel.hakimi@modares.ac.ir

Received: 7 May 2016 Accepted: 13 August 2016

### Abstract

The uncontrolled flow of air from outside into the building through cracks and pores of the building happens, say air infiltration. Air infiltration into the building in several viewpoints, such as energy consumption, HVAC systems design, thermal comfort, indoor air quality and pollution and humidity is very important. According to many studies that have been conducted, air infiltration the reason 15 to 30 percent of and energy consumption and the heat load of the building, indicating the necessity of research on the subject. In general, three operating wind pressure, stack effect and HVAC systems has caused air infiltration in buildings, the impact of all three factors must be considered in the calculations. From the viewpoint of HVAC, the main issue is how to calculate the rate of air infiltration in the building. Heretofore several related analytical and experimental and standard tests for air infiltration rate of the different components of the building are presented. In this paper, some of the relations and equations presented in this issue have been studied. Finally the power low equation because of the accuracy and more applied to recent research, for calculating the rate of air infiltration in buildings is recommended.

**Keywords:** Air infiltration, Pore building, Wind pressure, Air sealing, Energy consumption



## ۱- 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، هنگام ورود و خروج اتفاق می‌افتد نفوذ هوا<sup>۱</sup> گفته می‌شود و اگر جریان هوا از داخل ساختمان به خارج باشد به آن نشت هوا<sup>۲</sup> می‌گویند [۱]. عامل اصلی نفوذ یا نشت هوا، اختلاف فشار بین داخل و خارج ساختمان است که در بخش‌های بعد به طور مفصل به آن پرداخته می‌شود.

مطالعه نفوذ و نشت هوا در ساختمان‌ها از چند دیدگاه دارای اهمیت است، که از این جمله می‌توان موارد زیر را نام برد:

۱) مصرف انرژی و طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع؛ که مهم‌ترین بحثی است که ضرورت مطالعه بر روی نفوذ هوا را ایجاب می‌کند. نفوذ هوا به داخل ساختمان و همچنین نشت آن به بیرون، عملکرد حرارتی ساختمان را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش بار گرمایشی در زمستان و بار سرمایشی در تابستان می‌شود [۳، ۲]. افزایش بارهای حرارتی ساختمان، بالطبع باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود که امروزه با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی اهمیت زیادی پیدا کرده است. جوکیسالو<sup>۳</sup> و همکاران نشان دادند که نفوذ هوا در حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد از بار حرارتی ساختمان‌ها در فنلاند را به خود اختصاص می‌دهد [۴]. همچنین در مراجع دیگر این میزان تا ۵۰ درصد نیز اعلام شده است [۵]. شهریاری در پژوهشی تجربی بر روی دو خانه کاملاً مشابه در تهران که یکی بدون درزبندی و دیگری با هوابندی کامل بود، نشان داد که درزبندی ساختمان تا ۳۸ درصد باعث کاهش بارهای حرارتی ساختمان می‌شود [۶].

۲) آسایش حرارتی؛ یکی دیگر از بحث‌های مهمی است که در زمینه نفوذ هوا مطرح می‌شود. نفوذ هوا از یک طرف باعث تهویه طبیعی ساختمان می‌شود و درصدی از هوای تازه داخل را تأمین می‌کند که باعث بالا رفتن کیفیت هوا (IAQ) در فضای داخل می‌شود. و از طرف دیگر افزایش ناخواسته نفوذ هوا (خصوصاً زمانی که ساختمان در معرض باد باشد) باعث ایجاد پدیده کوران و پایین آمدن معیارهای آسایش حرارتی (PMV) می‌شود که این عامل وقتی اختلاف دمای داخل و بیرون ساختمان زیاد باشد بیشتر نمود پیدا می‌کند [۷].

۳) ورود یا تأثیر عوامل ناخواسته و نامطلوب به ساختمان؛ وجود درزها و منافذ کنترل نشده در ساختمان، باعث ورود آلاینده‌های موجود در محیط بیرون به درون ساختمان می‌شود. از جمله این آلاینده‌ها می‌توان دوده، ذرات ریز صنعتی، میکروبا، گرد و غبار و غیره را نام برد که آلاینده‌های شهری محسوب می‌شوند و می‌توانند بر سلامتی انسان اثر سوء داشته باشند [۹، ۸]. عوامل ناخواسته دیگری نیز مانند سر و صدا و رطوبت بر فضای داخلی ساختمان اثر می‌گذارند که باید مورد توجه قرار گیرند [۲].

به دلیل اهمیت زیاد بحث نفوذ هوا، تلاش‌های زیادی در جهت شناخت، اندازه‌گیری و مدل‌سازی این پدیده صورت گرفته است. عمده مطالعات انجام شده در این زمینه در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ بوده است که اکثر روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌های محاسباتی نیز در همین دوره معرفی شده‌اند. در دو دهه اخیر نیز، پژوهش‌های زیادی در زمینه اندازه‌گیری نفوذ هوا از کل ساختمان و یا اجزای آن صورت گرفته است.

در سال ۲۰۰۸، رلاندر<sup>۴</sup> [۱۱، ۱۰]، به صورت تجربی تأثیر درزبندی پنجره‌ها در نشت هوای کلی ساختمان‌های چوبی را بررسی کرد. او با آزمایش بر روی چند ساختمان متفاوت به این نتیجه رسید که طراحی ساختمان نقش بسزایی در میزان نفوذ دارد. در یک ساختمان با شرایط مطلوب، نشتی هوا تا ۲۴ درصد نسبت به حد متوسط کاهش دارد همچنین برای یک ساختمان نامطلوب این میزان ۱۶ درصد از حد متوسط بیشتر است.

در سال ۲۰۰۸، اسفکیاناک<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲] در پژوهشی تجربی میزان نفوذ هوا در ۲۰ مورد از خانه‌های کشور یونان را با دو روش گاز ردیاب و تست فشار اندازه گرفتند. همچنین نرخ تعویض هوا برای ساختمان‌ها در فشارهای مختلف اندازه‌گیری و نتایج دو روش مقایسه شد.

مونتویا<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۳] تعدادی خانه با شرایط متفاوت در کشور اسپانیا را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با انجام آزمایشات با روش تست فشار، نرخ تعویض هوا در شرایط مختلف ساختمان مثل آب و هوا، مصالح، تعداد طبقه و ... را محاسبه کردند.

در سال ۲۰۱۲، چن<sup>۷</sup> و همکاران [۹] در پژوهشی تجربی و تحلیلی، روشی را برای پیش‌بینی نفوذ ذرات آلاینده از طریق درز درب و پنجره ارائه دادند. آنها با برآورد هندسه و ابعاد درز، سرعت هوا درون درز و ضریب نفوذ ذرات آلاینده با ابعاد مختلف را پیش‌بینی کردند و نشان دادند نتایج تحلیلی و تجربی با هم مطابقت دارند.

هان<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۳] در پژوهشی در کشور آمریکا، استراتژی‌های مختلف مدل‌سازی عددی نرخ نفوذ هوا با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس<sup>۹</sup> را بررسی کردند. با مقایسه نتایج تجربی و عددی نتیجه شد که مدل‌های مختلف ۲ تا ۱۱ درصد در میزان محاسبه نرخ نفوذ اختلاف دارند.

## ۲- عوامل نفوذ یا نشت هوا

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 دودکشی<sup>۱۰</sup> و یا تهویه مکانیکی باشد، که هر یک از این عوامل به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند [۵]. البته نفوذ هوا، علاوه بر عوامل ذکر شده، به وضعیت و محل قرارگیری شکاف‌ها و منافذ، کیفیت ساخت و قدمت ساختمان، شرایط آب و هوایی محیط و هندسه‌ی ساختمان نیز بستگی دارد [۱۵-۱۳].

### ۲-۱- فشار باد

با برخورد باد به سطح خارجی ساختمان، توزیعی از فشار استاتیکی در سطح خارجی ساختمان ایجاد می‌شود که به جهت و سرعت باد، چگالی هوا، جهت‌گیری سطح و شرایط محیطی بستگی دارد. معمولاً فشار ناشی از باد در جهت وزش، مثبت و برای سمت پشت به باد منفی است. اگر چه بسته به زاویه برخورد باد و شکل ساختمان، فشار ایجاد شده در طرفین ساختمان می‌تواند منفی یا مثبت باشد.

فشار استاتیکی ایجاد شده در سطح ساختمان، تقریباً متناسب با فشار دینامیکی جریان هوا در بالا دست جریان است [۱]. به طور کلی، سرعت باد

<sup>4</sup> Relander  
<sup>5</sup> Sfakianaki  
<sup>6</sup> Montoya  
<sup>7</sup> Chen  
<sup>8</sup> Han  
<sup>9</sup> Energy Plus  
<sup>10</sup> Stack effect

<sup>1</sup> In filtration  
<sup>2</sup> Ex filtration  
<sup>3</sup> Jokisalo





شود ضریب فشار منفی خواهد بود یعنی در آن سطح فشار کم شده و در نتیجه از درزهای موجود در آن سطح نشت هوا از داخل ساختمان به بیرون اتفاق می‌افتد [۱۶].

برای محاسبه ضرایب فشار و سرعت باد، معمولاً سرعت باد در ارتفاع ساختمان لحاظ می‌شود. سرعت باد در ایستگاه هواشناسی محلی و معمولاً در ارتفاع ۱۰ متری اندازه‌گیری می‌شود. جهت استفاده از این سرعت، باید تصحیحاتی در اثر اختلاف ارتفاع بین محل اندازه‌گیری و ارتفاع ساختمان، تصحیح ناحیه جغرافیایی و اثرات پناهگاهی اعمال شود. سرعت متوسط باد در ارتفاع  $H$  از سطح زمین، با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱].

$$\frac{U_H}{U_{avg}} = dH^m \quad (2)$$

در این رابطه  $U_H$  سرعت متوسط باد در ارتفاع  $H$ ،  $U_{avg}$  سرعت متوسط باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی در ارتفاع ۱۰ متری بالای سطح زمین، و  $m$  و  $d$  نیز فاکتورهایی هستند که به مشخصات ناحیه‌ای که ساختمان در آن واقع است بستگی دارند. مقادیر  $m$  و  $d$  برای مکان‌های مختلف در جدول ۱ آمده‌اند.

## ۲-۲- اثر دودکشی

فشار دودکشی، فشار هیدرواستاتیکی است که در اثر وزن ستونی از هوا که در داخل یا خارج ساختمان قرار گرفته است، به وجود می‌آید. این فشار همچنین می‌تواند در اثر یک جریان درون مجرا مثل کانال، بخاری یا شومینه نیز ایجاد شود. این فشار در طول ارتفاع ساختمان، با فاصله از نقطه مرجع، به طور خطی تغییر می‌کند. فشار هیدرواستاتیکی در هوا، به چگالی و ارتفاع آن از یک نقطه مرجع بستگی دارد. چگالی نیز تابعی از فشار بارومتریک محلی، دما و نسبت رطوبت است و با تغییر هر کدام از این پارامترها، چگالی نیز می‌تواند به مقدار قابل توجهی تغییر کند. اثر دودکشی، در نتیجه اختلاف چگالی بین هوای داخل و بیرون ساختمان به وجود می‌آید. این اختلاف چگالی از اختلاف دمای بین هوای داخل و خارج ساختمان ناشی می‌شود که باعث اختلاف فشار بین داخل و بیرون ساختمان و در نتیجه نفوذ هوا می‌شود [۷].

در زمستان، هوای گرم درون ساختمان به دلیل سبکی و تمایل حرکت به بالا، از طریق شکاف‌ها و منافذ موجود در سقف و نواحی بالای ساختمان مانند کانالهای هوا و درزهای بالای پنجره از ساختمان خارج شده و در عوض هوای سرد از طریق منافذ کف مانند کانال‌های فاضلاب، شکاف زیر درها و پنجره‌ها و غیره وارد ساختمان می‌شود. در فصل سرماش (تابستان) که هوای داخل سردتر از بیرون ساختمان است، تأثیر این پدیده بر عکس است [۷]. اختلاف فشار در اثر پدیده دودکشی در حدود  $0.02$  پاسکال به ازای یک درجه اختلاف دمای داخل و خارج در یک متر ارتفاع ساختمان می‌باشد [۸]. در شکل ۳ اثر دودکشی نشان داده شده است.

در ساختمان‌های کوتاه اثر دودکشی در مقابل اثر برخورد باد ناچیز است ولی در ساختمان‌های مرتفع اثر آن جدی است و مشکلات عدیده‌ای از جمله

کم ( $2/5$  متر بر ثانیه یا کمتر) فشاری در حدود  $1$  تا  $2$  پاسکال و سرعت باد زیاد ( $10$  متر بر ثانیه یا بیشتر) می‌تواند فشار  $25$  پاسکال را ایجاد کند [۸].

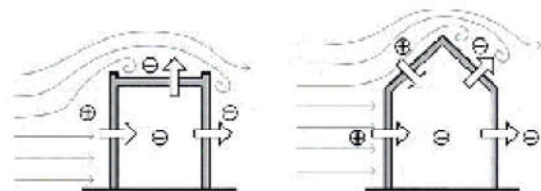
یک نمونه الگوی جریان باد در شکل ۱ آورده شده است. این شکل حالت کلی و ساده‌ای را نشان می‌دهد که جهت باد عمود بر ساختمان است. در حالت واقعی اثر مکان ساختمان و موانع اطراف آن ممکن است الگوی جریان را به شیوه‌ی غیر قابل پیش‌بینی تغییر دهند. با توجه به شکل ۱، با برخورد باد به سطح خارجی ساختمان در سطحی که باد مستقیم به آن برخورد می‌کند فشار بالا می‌رود در نتیجه از طریق درزهای موجود در این سطح هوا به داخل ساختمان نفوذ می‌کند و در سطح پشت به باد ساختمان فشار نسبت به داخل ساختمان منفی می‌شود در نتیجه از طریق درزهای موجود در این سطح هوا از داخل ساختمان به بیرون نشت می‌کند [۱۴].

فشار باد وارد بر سطح خارجی ساختمان از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱].

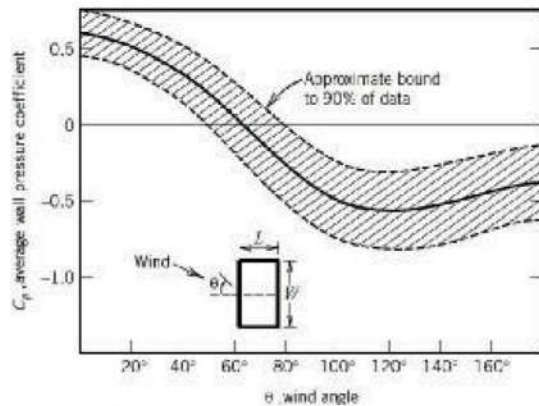
$$p_w = C_p \rho \frac{U^2}{2} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $p_w$  فشار نسبی باد بر سطح خارجی ساختمان است.  $\rho$  چگالی هوای بیرون،  $U$  سرعت جریان باد و  $C_p$  ضریب فشار است. البته رابطه ۱ برای ساختمان‌های با ساختار ساده کاربرد دارد. در صورتی که ساختمان پیچیدگی هندسی داشته باشد، باید از روابط تجربی دیگر و یا شبیه‌سازی دقیق‌تر استفاده کرد.

ضریب فشار تابعی از هندسه و محل قرارگیری ساختمان و جهت وزش باد است. در مورد ضریب فشار باد برای حالتی که جهت باد عمود بر سطح ساختمان است اطلاعات کافی موجود می‌باشد. ولی متأسفانه برای یک ساختمان واقعی، معمولاً وزش باد به صورت عمودی اتفاق نمی‌افتد [۱]. در شکل ۲ مقدار ضریب فشار ( $C_p$ ) به عنوان تابعی از زاویه بین جهت برخورد خط عمود بر سطح رسم شده است. به طور معمول، مقدار  $C_p$  بین  $-0.16$  و  $+0.16$  بر حسب زاویه برخورد باد متغیر است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود اگر زاویه برخورد باد نسبت به خط عمود بر سطح بیشتر از  $80$  درجه



شکل ۱ الگوی جریان باد در اطراف یک ساختمان [۱۴]

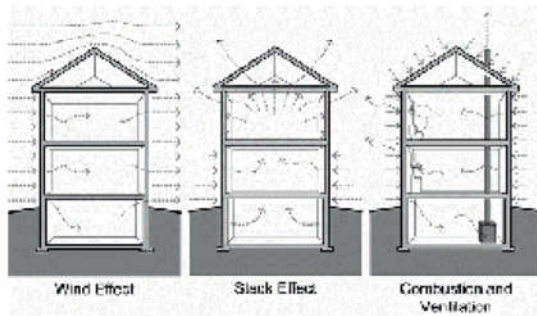


شکل ۲ ضریب فشار ( $C_p$ ) بر حسب زاویه برخورد باد [۱۶]

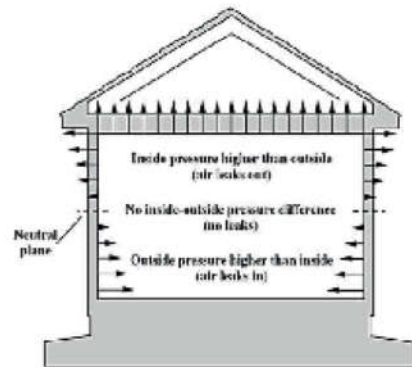
جدول ۱ مقادیر ضرایب  $m$  و  $d$  استفاده شده در رابطه ۲ [۱]

$d$	$m$	ناحیه
۰/۶۸	۰/۱۷	زمین مسطح و باز
۰/۵۲	۰/۲۰	زمین با مقاومت در برابر باد
۰/۳۵	۰/۲۵	ناحیه شهری و برون شهری
۰/۲۱	۰/۳۳	شهرهای بزرگ





شکل ۴ توزیع فشار در داخل و خارج ساختمان نسبت به ارتفاع ناشی از اثر دودکشی، برخورد باد و برآیند آنها [۱۴]



شکل ۳ تأثیر اثر دودکشی در ورود و خروج هوا در ساختمان [۷]

که در رابطه ۴، مقدار کل نفوذ هوا،  $Q$ ، مقدار کل نفوذ در اثر پدیده دودکشی و  $Q_w$  نفوذ در اثر فشار باد است.

همانطور که اشاره شد اختلاف فشار داخل و بیرون در ساختمان‌های مسکونی به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. پارک<sup>۲</sup> و همکاران اختلاف فشار داخل و بیرون ۶۲ مدرسه را به مدت یک سال در کشور کره اندازه‌گیری کردند، آنها به این نتیجه رسیدند که این اختلاف فشار در شرایط طبیعی بین ۱ تا ۴ پاسکال متغیر است [۱۵]. مراجع مختلف بطور کلی اختلاف فشار داخل و بیرون ساختمان‌های مسکونی را در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ پاسکال در نظر گرفته‌اند [۱۸].

### ۳- محاسبه و اندازه‌گیری نرخ نفوذ هوا

در سال‌های اخیر و در نتیجه تلاش‌های زیاد پژوهشگران تهیه مطبوع، پیشرفت‌های بسیاری در زمینه اندازه‌گیری میزان نفوذی صورت گرفته است.

در حال حاضر روش‌های زیادی جهت اندازه‌گیری میزان نفوذی به ساختمان وجود دارد. پیشرفت‌هایی نیز در زمینه اندازه‌گیری میزان نفوذ بین بخش‌های داخلی ساختمان صورت گرفته است. روابط ارائه شده برای محاسبه نرخ نفوذ هوا را می‌توان به دو دسته روابط تحلیلی و تجربی تقسیم کرد.

#### ۳-۱- مدل‌ها و روابط تحلیلی نفوذ هوا

برای بازشوها مانند درب‌ها، پنجره‌ها و دریچه‌ها، اگر مساحت مجرای عبور هوا و اختلاف فشار را داشته باشیم، می‌توانیم از رابطه برنولی بدست آمده استفاده کنیم [۱].

$$Q = C_D A \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (5)$$

که در رابطه فوق،  $C_D$  ضریب تخلیه می‌باشد. محاسبه ضریب تخلیه با توجه به ابعاد بازشو و مقدار عدد رینولدز صورت می‌گیرد. والتون در سال ۱۹۸۴ با شبیه‌سازی جریان در بازشو به صورت جریان اوریفیس، مقادیر ضریب تخلیه را بر حسب عدد رینولدز به صورت شکل ۵ ارائه داده است [۱۹]. همچنین اگر اختلاف فشار، ناشی از اثر دودکشی (اختلاف دما) باشد، رابطه ۵ تبدیل به رابطه ۶ خواهد شد [۱].

$$Q = C_D A \sqrt{2g\Delta H_{NPL} \frac{(T_i - T_o)}{T_i}} \quad (6)$$

که در رابطه فوق،  $\Delta H_{NPL}$  اختلاف ارتفاع از سطح فشار خنثی است. سایر

تلفات انرژی، عدم آسایش در اثر جریان هوا و غیره ایجاد می‌کند [۱۷]. همچنین در پژوهشی که توسط جوکیسالو و همکاران در سال ۲۰۰۹ در فنلاند انجام گرفت، نشان داده شد که در شرایط آب و هوایی بسیار سرد که اختلاف دمای داخل و خارج ساختمان زیاد است، پدیده دودکشی، عامل غالب در نفوذ یا نشت هوا است [۴]. اختلاف فشار ناشی از اثر دودکشی از رابطه‌ی ۳ بدست می‌آید [۱].

$$\Delta P_s = \rho_o \left( \frac{T_o - T_i}{T_i} \right) g(H_{NPL} - H) \quad (3)$$

که در رابطه فوق  $H_{NPL}$  ارتفاع سطح فشار خنثی و  $H$  ارتفاع می‌باشد. سطح فشار خنثی<sup>۱</sup> (NPL) موقعیتی از ساختمان است که در آن، اختلاف فشار بیرون و داخل ساختمان وجود ندارد و ارتفاع آن وابسته به نحوه توزیع بازشوها در ارتفاع ساختمان است [۱].

### ۳-۲- سیستم‌های مکانیکی

یکی دیگر از عواملی که باعث اختلاف فشار بین داخل و خارج ساختمان و در نتیجه نفوذ هوا می‌شود عملکرد سیستم‌های مکانیکی (سیستم‌های تامین و تخلیه هوا) می‌باشد. در ساختمان‌های دارای تهویه مکانیکی، در صورتی که میزان هوای ورودی و خروجی برابر نباشد، اختلاف فشار به وجود می‌آید که باعث نفوذ هوا می‌شود [۸]. سیستم‌های تخلیه مکانیکی معمولاً فشار هوای داخل ساختمان را به ۵ الی ۱۰ پاسکال کمتر از فشار بیرون می‌رسانند. به طور متوسط اختلاف فشار داخل و بیرون ساختمان که در اثر سیستم‌های مکانیکی ایجاد می‌شود بین ۳ تا ۶ پاسکال متغیر است [۱۵].

### ۳-۲-۲- ترکیب اثر عوامل به وجود آورنده نفوذ هوا

برای بدست آوردن نرخ نفوذ هوا، باید اختلاف فشارهای ناشی از باد، اثر دودکشی و سیستم‌های مکانیکی را با هم جمع کرد تا اختلاف فشار کلی به دست آید. به خاطر خاصیت غیر خطی بودن نفوذ، نمی‌توان جریان ایجاد شده توسط هرکدام از این ترم‌ها را به طور جداگانه محاسبه کرد و سپس برای به دست آوردن کل جریان هوای ورودی آنها را با هم جمع کرد.

شکل ۴، تأثیر فشار ناشی از اثرات باد و دودکشی در ورود و خروج هوا از ساختمان را به طور جداگانه نشان می‌دهد [۱۴]. هنگامی که ترکیب عوامل فشار باد و اثر دودکشی موجب نفوذ هوا می‌شود، باید توجه داشته باشیم که برآیند آنها به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱].

$$Q = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} \quad (4)$$

<sup>2</sup> Park

<sup>1</sup> Neutral Pressure Level





در مقایسه با قانون توانی، حالت اول متناظر با  $n = 0.5$  و حالت دوم متناظر با  $n = 1$  است. این موضوع که در اندازه‌گیری‌ها،  $n$  بین این دو مقدار است، نشان می‌دهد که هیچکدام از دو وضعیت فوق برقرار نمی‌باشد. در واقع، زمانی که ماهیت جریان کاملاً آشفته باشد،  $n = 0.5$  و زمانی که جریان به صورت آرام باشد،  $n = 1$  است. در اکثر مواقع حالتی بینابین وجود دارد (حالت گذار) و  $n$  مقدار بین  $0.6$  تا  $0.7$  دارد [۲۱].

استانداردهای مختلف اندازه‌گیری و تهویه و اکثر مدل‌های تئوری، از قانون توانی به عنوان پایه و اساس کار خود استفاده می‌کنند. برخی از محققان، استفاده از یک معادله جبری برای برقراری ارتباط بین نرخ جریان هوا و اختلاف فشار در درزها و منافذ را توصیه کرده‌اند. همانطور که گفته شد، برای جریان آرام رابطه خطی بین دبی و اختلاف فشار برقرار است (معادله ۹) و برای جریان آشفته،  $Q$  با ریشه دوم اختلاف فشار متناسب است (معادله ۱۰).

$$Q = k_1 \Delta P \quad (9)$$

$$Q = k_2 \Delta P^{0.5} \quad (10)$$

با ترکیب دو معادله ی فوق به معادله ۱۱ می‌رسیم:

$$\Delta P = aQ + bQ^2 \quad (11)$$

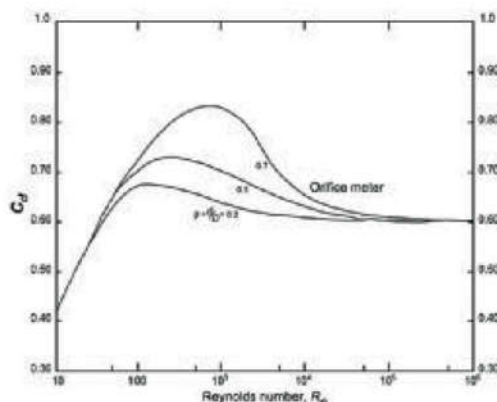
$a$  ضریب جریان آرام و ضریب  $b$  مربوط به جریان آشفته است. اهمیت ترم اول در سمت راست معادله (جریان آرام)، در دبی‌های پایین بیشتر است و در دبی‌های زیاد، ترم دوم (جریان آشفته) دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. مقادیر  $a$  و  $b$  با تست‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند. این ضرایب به ویسکوزیته دینامیکی هوا، طول و ضخامت درز، چگالی هوا بستگی دارند [۷،۵].

هر دو رابطه قانون توانی و معادله جبری به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مقایسه‌ای که بین این دو روش صورت گرفته، نشان داده شده است که در اختلاف فشارهای بالاتر از  $2.0 \text{ Pa}$ ، هر دو رابطه نتایج تقریباً یکسانی را ارائه می‌دهند، اما در اختلاف فشارهای کم، قانون توانی دارای نتایج دقیق‌تری است [۲۲،۸].

### ۳-۳- آزمون‌های تجربی

استاندارد ASTM روشی را جهت بررسی نشت هوا در درب‌ها و پنجره‌ها ارائه کرده است. روش انجام این تست بدین صورت است که پس از نصب یک محفظه در سمت داخلی نمونه (شکل ۶) توسط فن یا دمنده، هوا به داخل محفظه وارد می‌شود تا در طرفین نمونه اختلاف فشار ایجاد شود و سپس نرخ هوای ورودی به محفظه را در اختلاف فشارهای مختلف اندازه می‌گیرند. نتایج چنین تستی معمولاً به صورت نرخ نشت هوا بر واحد مساحت نمونه بیان می‌شود. به خاطر کم بودن نشت هوا از درها و پنجره‌ها، تست در اختلاف فشارهای بالاتر از حد طبیعی (حدود  $200 \text{ Pa}$ ) انجام می‌گیرد.

تست فوق را هم در محل نصب در و پنجره و هم در آزمایشگاه می‌توان انجام داد. مزیت انجام تست در آزمایشگاه این است که بدون تأثیر از شرایط آب و هوایی محیط و در شرایط یکسان، می‌توان تعداد زیادی نمونه را مورد بررسی و مقایسه قرارداد. نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی ممکن است با نتایج تست انجام شده در محل نصب به دلیل وجود شرایط کنترلی متفاوت، فرق داشته باشد. با انجام این تست می‌توان مکان نقاط نشت‌دار در نمونه را تعیین کرد و جهت درزبندی یا از بین بردن آنها، اقدامات لازم را انجام داد [۲۳].



شکل ۵ مقادیر ضریب تخلیه بر حسب عدد رینولدز در مجرای بازشو [۱۹]

پارامترها نیز مانند رابطه ۶ هستند. رابطه ۶ زمانیکه دمای داخل از بیرون بزرگتر است اعتبار دارد. در غیر اینصورت باید جای دو دما در رابطه عوض شود. در رابطه فوق ضریب تخلیه به شکل زیر محاسبه می‌شود [۱].

$$C_D = 0.40 + 0.0045|T_i - T_o| \quad (7)$$

علاوه بر روابط گفته شده، مدل‌های تحلیلی دیگری نیز بر اساس سطح نشستی مؤثر<sup>۱</sup> برای محاسبه نرخ نفوذ هوا وجود دارد. در این مدل‌ها بر اساس نمودارهای تجربی بدست آمده از اعمال اختلاف فشار در چند فشار مرجع به دو طرف شکاف، مقدار سطح نشستی مؤثر بدست می‌آید و سپس در هر اختلاف فشاری می‌توان نرخ نفوذ هوا را محاسبه کرد [۲۰].

### ۲-۲- روابط تجربی محاسبه نفوذ هوا

روابط و مدل‌های تحلیلی گرچه ارزش و اهمیت بالایی دارند، ولی در عمل استفاده کمی از آنها می‌شود. مهندسی بیشتر ترجیح می‌دهند از آزمون‌های تجربی و روابط ساده بدست آمده از آن برای محاسبه نرخ هوای نفوذی از درزها استفاده کنند.

رابطه ۸، یکی از رایج‌ترین روابطی است که برای محاسبه نرخ هوای نفوذی استفاده می‌شود. در این رابطه، نرخ جریان هوا بر حسب اختلاف فشار به صورت یک قانون توانی<sup>۲</sup> بیان می‌شود [۵،۱].

$$Q = C(\Delta P)^n \quad (8)$$

که در رابطه فوق،  $C$  ضریب جریان و  $n$  نمای فشار نامیده می‌شوند. مقدار  $n$  بین  $0.5$  تا  $1$  است و معمولاً مقدار آن را  $0.65$  در نظر می‌گیرند. اگر چه استفاده از قانون توانی، روش تجربی مناسبی جهت تخمین نرخ نفوذ هوا است، اما استفاده از این رابطه برای رژیم‌های جریان مختلف و برای محدوده‌های مختلف اختلاف فشار، به راحتی امکان‌پذیر نیست [۱].

در صورتی که درز یا شکاف خیلی باشد، نیروهای اصطکاکی قابل صرف‌نظرند و نشت هوا از درزها، شبیه عبور جریان از اوریفیس است (جریان آشفته). در این حالت،  $Q$  متناسب با ریشه دوم اختلاف فشار می‌باشد. برای درزهای بلند در رینولدزهای بالا (دبی زیاد) نیز چنین وضعیتی برقرار است. در صورتی که نرخ جریان یا عدد رینولدز کم باشد، نیروهای اصطکاکی تأثیرگذارند. در این حالت،  $Q$  با اختلاف فشار به طور خطی تغییر می‌کند (جریان آرام).

<sup>1</sup> Effective leakage area

<sup>2</sup> Power law



### ۵- فهرست علائم

A	مساحت (m <sup>2</sup> )
a	ضریب ثابت در معادله درجه دوم (sPam <sup>-3</sup> )
b	ضریب ثابت در معادله درجه دوم (s <sup>2</sup> Pam <sup>-6</sup> )
c	ضریب ثابت معادله توانی (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>n</sup> )
C <sub>D</sub>	ضریب تخلیه
c <sub>p</sub>	ضریب فشار باد
d	ضریب تصحیح سرعت (m <sup>-1</sup> )
g	شتاب جاذبه (ms <sup>-2</sup> )
H	ارتفاع (m)
k <sub>1</sub>	ضریب فشار برای جریان آرام
k <sub>2</sub>	ضریب فشار برای جریان آشفته
m	نمای تصحیح سرعت
n	ضریب توان در معادله توانی
P	فشار (Pa)
Q	دبی حجمی (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
T	دما (K)
U	سرعت (ms <sup>-1</sup> )

### علائم یونانی

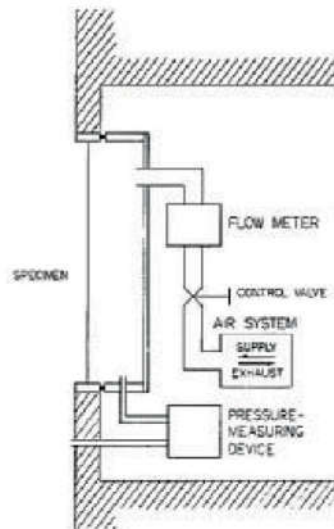
$\rho$	چگالی (kgm <sup>-3</sup> )
$\Delta$	اختلاف

### زیرنویس‌ها

avg	میانگین
H	در ارتفاع مطلوب
i	فضای داخل ساختمان
NPL	ارتفاع سطح فشار خنثی
o	فضای بیرون ساختمان
s	پدیده دودکشی
w	باد

### ۶- مراجع

- [1] ASHRAE. Handbook of fundamentals. Chapter 16: ventilation and infiltration. USA Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [2] K. Hassouneh, A. Alshboul, and A. Al-Salaymeh, Influence of infiltration on the energy losses in residential buildings in Amman, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 5, pp. 2-7, 2012.
- [3] G. Han, J. Srebric, and E. Enache-Pommer, Different modeling strategies of infiltration rates for an office building to improve accuracy of building energy simulations, *Energy and Buildings*, 86, 2015, pp. 288-295.
- [4] J. Jokisalo, et al., Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses, *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 377-387, 2009.
- [5] C. Younes, C.A. Shdid, and G. Bitsuamlak, Air infiltration through building envelopes: A review, *Journal of Building physics*, Vol. 35, pp. 267-302, 2012.
- [6] شهریار، غ.، بررسی تاثیر درزگیری بر بار حرارتی و برودتی مصرفی خانوار در یک منزل مسکونی نمونه، ۱۳۸۵.
- [7] نوروزی، ج.، تحلیل اثر نفوذ هوا از طریق درزهای در و پنجره به فضای اقامتی بر کیفیت هوای داخل، دانشگاه تربیت مدرس، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۹.
- [8] S.B. Sadinani, S. Madala, and R.F. Boehm, Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 3617-3631, 2011.



شکل ۶ دستگاه تست فشار برای اندازه‌گیری نرخ نفوذ هوا [۲۳]

استاندارد شماره ۷۸۲۲ ملی ایران با عنوان "درها و دیوارهای پرده‌ای و پنجره‌های ساختمانی، تعیین میزان نفوذ هوا - روش آزمون" نیز روشی تجربی را برای محاسبه میزان نفوذ هوا از درب و پنجره بیان کرده است [۲۴]. استاندارد مذکور توسط کمیسیون‌های مربوطه در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تهیه و تدوین شده و در هشتاد و نهمین جلسه کمیته ملی استاندارد ساختمان و مصالح ساختمانی سال ۱۳۸۲ مورد تأیید قرار گرفته است. این استاندارد، یک روش مشخص برای انجام آزمون اندازه‌گیری میزان نفوذ هوا از در و پنجره‌های نصب نشده از هر نوع و جنس را موقعی که تحت اختلاف فشار مشخص مثبت یا منفی قرار گیرند را ارائه می‌کند.

### ۴- جمع‌بندی

در این تحقیق به طور کلی، عوامل نفوذ هوا در ساختمان‌ها و چند مورد از روش‌های محاسبه و اندازه‌گیری نرخ نفوذ هوا بررسی شدند. مشاهده شد که از عوامل نفوذ هوا، عامل فشار باد نسبت به اثر دودکشی و سیستم‌های تهویه مطبوع تأثیر بیشتری دارد و عامل غالب در نفوذ هوا محسوب می‌شود. البته در ساختمان‌های مرتفع و یا در مناطق بسیار سرد، پدیده دودکشی نیز تأثیر قابل توجهی دارد.

از بررسی روش‌های اندازه‌گیری نرخ نفوذ نیز مشاهده شد که هم مدل‌ها و روابط تحلیلی و هم روابط تجربی در این محاسبات نقش دارند. که هر کدام از این روابط در جای مخصوص خود کاربرد بیشتری دارد. در میان روابط ذکر شده، رابطه توانی (رابطه ۸)، نسبت به سایر روابط برای محاسبات تأسیسات و انرژی ساختمان در بین مهندسين پرکاربردتر و محبوب‌تر است. مراجع [۲۵، ۱۸، ۱۳] چند مورد از آخرین پژوهش‌هایی هستند که از این رابطه استفاده کرده‌اند.

با محاسبه نرخ نفوذ هوا به ساختمان با روابط مناسب، می‌توان برآورد بهتری از چگونگی مصرف انرژی در ساختمان داشت. همچنین با داشتن اطلاعات کافی در این زمینه، می‌توان با درزبندی و هوابندی ساختمان در صورت لزوم، اقدامات لازم جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی را انجام داد.



- [9] C. Chen, et al., A methodology for predicting particle penetration factor through cracks of windows and doors for actual engineering application, *Building and Environment*, Vol. 47, pp. 339-348, 2012.
- [10] T. O. Relander, J.V. Thue, and A. Gustavsen, Air tightness performance of different sealing methods for windows in wood-frame buildings, *8th Nordic Symposium on Building Physics*, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [11] T. O. Relander, J.V. Thue, and A. Gustavsen, The influence of different sealing methods of window and door joints on the total air leakage of wood-frame buildings, *Proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics*, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [12] A. Sfakianaki, et al., Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece, *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 398-405, 2008.
- [13] M. I. Montoya, et al., Air leakage in Catalan dwellings: developing an airtightness model and leakage airflow predictions, *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 1458-1469, 2010.
- [14] J. Straube. *Air Flow Control in Buildings*, Accessed 2 September 2015; <http://www.http://buildingscience.com>.
- [15] [رسولی، ه.، مطالعه عددی و تجربی نرخ نفوذ هوا از درها و پنجره های رایج داخل ایران، دانشگاه تربیت مدرس، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱.
- [16] ASHRAE, Handbook of fundamentals, Chapter 27: ventilation and infiltration. *USA Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*, 2005.
- [17] N. Van Den Bossche, A. Janssens, and J. Moens, Watertightness of window frames: experience of notified bodies, *4th International Building Physics Conference (IBPC)*, Istanbul Technical University, 2009.
- [18] G. Finch, J. Straube, and C. Genge, Air leakage within multi-unit residential buildings—Testing and implications for building performance, *Proceedings of the 12th Canadian conference on building science and technology*, 2009.
- [19] G. N. Walton, A computer algorithm for predicting infiltration and interroom airflows, *ASHRAE Trans; (United States)*, 1984.
- [20] T. Qi, Z. O'Neill, and G.L. Augenbroe, *Inverse modeling to estimate the effective leakage area in buildings*, 2014.
- [21] M. H. Sherman and W.R. Chan, Building air tightness: research and practice, *Building Ventilation: the state of the Art*, pp. 137-162, 2006.
- [22] I. S. Walker, D.J. Wilson, and M.H. Sherman, A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations, *Energy and Buildings*, Vol. 27, pp. 293-299, 1998.
- [23] ASTM E283-91, Standard Test Method for Determining the Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 1999.
- [24] [استاندارد شماره ۷۸۲۲ ایران، درها و دیوارهای پرده‌ای و پنجره‌های ساختمان، تعیین میزان نفوذ هوا-روش آزمون، ۱۳۸۲.
- [25] M. H. Kim, J.-H. Jo, and J.-W. Jeong, Feasibility of building envelope air leakage measurement using combination of air-handler and blower door. *Energy and Buildings*, Vol. 62, pp. 436-441, 2013.