

## محاسبه تهویه طبیعی ساختمان با استفاده از تحلیل حلقوی\*

فرزاد مرادی<sup>(۲)</sup>محمد مقیمان<sup>(۱)</sup>

چکیده در این مقاله تهویه طبیعی ساختمان با استفاده از تحلیل حلقوی یک بعدی محاسبه شده و اثر عوامل مختلف بر آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر پایه موازنه نیروهای شناوری و افتهای فشار اصطکاکی و موضعی حول حلقه جریان نوشته شده و برای امکان محاسبه اثر فشار باد و خاصیت دودکش در ساختمانهای با طبقات متعدد، به معادلات کلی بسط داده شده است. معادلات نشان می‌دهند که نرخ جریان تهویه، بسته به شرایط حاکم بر ساختمان، با توانهای مختلف گرمای دریافتی (دمای داخل) متناسب است: در حالت غالب بودن افت فشارهای مقاطع ورودی و خروجی بر افت فشار اصطکاکی با توان  $0.33/0$ ، در حالت غالب بودن افت فشار اصطکاکی با توان  $0.5/0$  و در حالت غالب بودن اثر باد با توان  $1/0$ . حل معادلات ساده و سریع است و برای ساختمانهای با فضاهای مختلف به علت تداخل متغیرهای حلقه‌ها حل با استفاده از روش تکرار انجام می‌شود. در حالت تهویه با جریان مغشوش ضریب اصطکاک از یک رابطه تجربی تعیین شده است. اثر عوامل مختلف از جمله اندازه مقاطع ورودی و خروجی، گرمای دریافتی ساختمان (دمای هوای داخل)، سرعت و جهت باد و همچنین، پدیده خاصیت دودکش بر تهویه طبیعی ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج روش تحلیل حلقوی با نتایج مدل‌های تجربی رضایتبخش است.

واژه‌های کلیدی تهویه طبیعی، تحلیل حلقوی، اثر باد، اثر دودکش.

## Computation of Natural Ventilation of Building Using Loop Analysis

M. Moghiman

F. Moradi

**Abstract** In this paper the flow rates in naturally ventilated buildings are calculated using one dimensional loop analysis in which the buoyancy forces are balanced by the pressure drops due to friction. The equations are extended to take into account the effects of wind and stack in multiple floor buildings. The procedure is straight forward and yields the zone air change rates without recourse to a complicated and time consuming calculation. Interaction between loops of multiple zone of multiple floor buildings requires iterations. For turbulent natural ventilation, the friction factor is determined from an experimental formulation. The results show that the ventilation air change rates depend on the net heat gain to the power 0.33 for entrance/exist duct domination over internal friction, 0.5 for internal friction dominated conditions, and 1 for wind dominated conditions. The results of the procedure also reveals the significant effects of inlet and outlet surface areas on the ventilation of naturally ventilated buildings. The comparison of loop analysis results with empirical methods shows good agreement.

**Key Words** Natural Ventilation, Loop Analysis, Wind Effect, Stack Effect.

\* - نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۵/۲۰ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۱/۴/۱۵ به دفتر نشریه رسیده است.

۱ - دانشیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲ - گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

در بسیاری از کشورها مصرف انرژی در ساختمانها بیش از مصرف آن در فرآیندهای صنعتی و وسایل نقلیه است. مصرف بالای انرژی در سیستمهای گرمایش و تهویه مطبوع ساختمانها موجب شده است که همواره طراحان و مهندسان تکنیکهای جدیدی را برای کاهش مصرف انرژی مورد مطالعه قرار دهند [1,2,3]. در مرجع [1] با استفاده از روش تفاضل محدود نقش محفظه هوا در شیشه‌های دو جداره بر کاهش اتلاف حرارت از پنجره‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده اطلاعات لازم درباره الگوی جریان و خطوط همدمای در داخل محفظه هوا و انتقال حرارت از این نوع پنجره‌ها را فراهم می‌کند. همچنین نتایج راهنمای مناسبی برای انتخاب اندازه‌های محفظه هوا (نسبت هم ارزی) جهت کاهش اتلاف انرژی از ساختمان است. مرجع [2] تکنیکی را برای بازیافت انرژی حرارتی از هوای تخلیه (اگزوز) شده از مکانهای مولد رطوبت و بو مانند سرویسها و آشپزخانه ارائه می‌کند. تکنیک ارائه شده نشان می‌دهد که با استفاده از مبدل‌های حرارتی مناسب می‌توان حدود ۶۰٪ تا ۷۰٪ انرژی حرارتی اتلافی به طریق فوق را بازیابی نمود. در مرجع [3] یک فرآیند برای کنترل رطوبت هوای داخل ساختمان با مصرف انرژی بسیار کمتر نسبت به روشهای معمول دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تکنیک جذب رطوبت هوا یا استفاده از وسایل کنترلی محدودتر و تولید صدای کمتر نسبت به سایر روشها انجام می‌شود.

یکی از روشهای کاهش مصرف انرژی و همچنین کاهش صدا در ساختمانها، استفاده از تهویه طبیعی بجای تهویه اجباری و مکانیکی است. اگرچه پژوهشگران مطالعات زیادی در مورد جریان طبیعی هوا در فضاها بسته انجام داده‌اند [4,5,6] اما جابجایی طبیعی هوا بین فضاهای داخل و خارج کمتر مورد توجه قرار گرفته

است [7,8]. در مراجع [4,5] جابجایی طبیعی و انتقال حرارت در محفظه‌های بسته با مقطع مستطیلی در شرایط مرزی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی در مرجع [4] توانایی روشهای محاسباتی را در پیشگویی جابجایی طبیعی در محفظه‌های بسته نشان می‌دهد. در مرجع [5] اورهان ایدین به روش عددی نشان داده است که در اعداد ریلی به اندازه کافی بزرگ، انتقال حرارت در محفظه بسته‌ای که دو جدار مجاور آن حرارت داده شوند، به صورت نوسانی انجام می‌شود. نتایج او نشان می‌دهد که با افزایش عدد پرانتل پیچیدگی تغییر شکل جریان بیشتر شده و جریان برای پایدار شدن به زمان بیشتری نیاز دارد. در مرجع [6] جابجایی طبیعی در محفظه بسته با شارژ حرارتی ثابت از جدار عمودی با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار Ansys مورد مطالعه قرار گرفته و اثر تغییر ضریب هدایت و گرانروی بر میدانهای سرعت و دما و نیز بر انتقال حرارت، تجزیه و تحلیل شده است. در مرجع [7] مقالات ارائه شده در دومین همایش بین‌المللی تهویه در سال ۱۹۹۸ مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مقایسه تکنیکهای ارائه شده برای تهویه داخل ساختمان، نشان دهنده توجه پژوهشگران به روشهای تهویه اجباری و استفاده از سیرکولاسیون و تصفیه هوای داخل با استفاده از وسایل مکانیکی می‌باشد. مرجع [8] کاهش تهویه طبیعی در اثر ایزولاسیون دقیقتر ساختمانهای جدید و در نتیجه کاهش درزها و شکافها در پنجره‌ها و درها و همچنین، کاهش تعداد دودکشها را در ساختمانهای جدید مطرح کرده و به تهویه مکانیکی توجه بیشتری نموده است. روابط ارائه شده در مراجع برای محاسبه تهویه آزاد اغلب برای نمونه‌های ساده ساختمانها بوده و دربرگیرنده تمام عوامل مؤثر بر آن نمی‌باشد [8,9].

برای استفاده از تهویه طبیعی در ساختمان لازم است

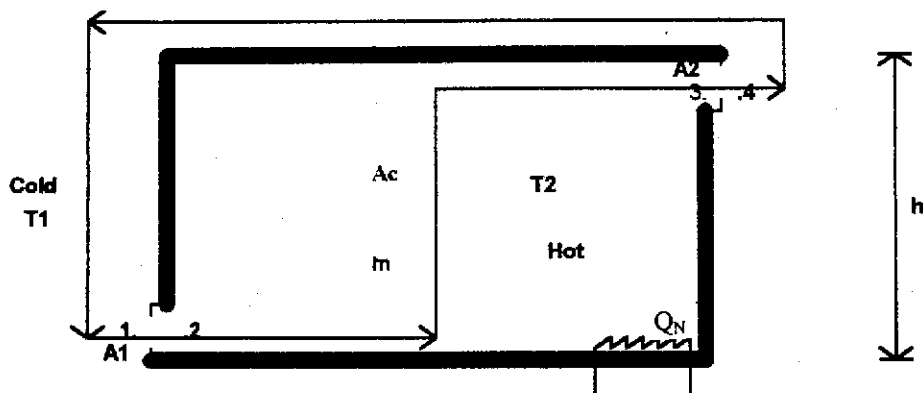
حلقوی و بررسی اثر عوامل مختلف در تعداد تعویض هوای داخل ساختمان می‌باشد. در روش تحلیل حلقوی، مسیر جریان هوا در ساختمان به صورت یک تونل یا کانال بسته در نظر گرفته می‌شود و معادلات حاکم از موازنه نیروهای شناوری و افتهای فشار حول حلقه بدست می‌آید. در این مطالعه افزون بر عوامل اصلی موثر بر تهویه ساختمان مانند گرمای دریافتی ساختمان (اختلاف دمای هوای داخل و خارج) که نیروهای شناوری را ایجاد می‌کند، اثر باد که می‌تواند بر جابجایی هوا در ساختمان بسیار موثر باشد، و پدیده خاصیت دودکش که به علت اختلاف چگالی هوا در داخل ساختمان در زمستان موجب ورود هوای خارج از پائین و خروج هوای داخل از بالا می‌شود، عوامل دیگر مانند اندازه سطوح مقاطع ورودی و خروجی و سرعت و جهت باد نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### محاسبه جریان جرم برای حلقه جریان

در شکل (۱) مقطع شماتیک ساختمان یک طبقه‌ای به ارتفاع  $h$  نشان داده شده است. دمای هوای سرد خارج از ساختمان با  $T_1$  و دمای هوای گرم داخل ساختمان با  $T_2$  مشخص شده است. خالص گرمای دریافتی ساختمان ( $Q_N$ )

طراحی ساختمان بر مبنای عوامل مؤثر بر جریان طبیعی هوا از جمله نیروهای شناوری، اثر باد، اندازه مقاطع جریان هوا و همچنین، اثر پدیده خاصیت دودکش صورت گیرد. نیروی شناوری حاصل از اختلاف دمای هوا در داخل و خارج ساختمان موجب برقراری جریان هوا بین داخل و خارج ساختمان می‌شود؛ بطوری که جریان هوا از منافذ و مقاطع یک طرف ساختمان وارد و از منافذ و مقاطع طرف دیگر آن خارج می‌شود. در تحلیل حلقوی، این جریان به صورت یک حلقه بسته در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). با توجه به اینکه در جریان حلقوی جمع جبری افت فشار حول حلقه بسته وقتی در جهت ثابت حرکت کنیم صفر است [10]، رابطه‌ای بین نیروی شناوری و افتهای فشار اصطکاکی و موضعی به دست می‌آید. در طراحی تونلهای جاده‌ای که تمام یا بخش مهمی از تعویض هوای داخل آنها بوسیله تهویه طبیعی انجام می‌شود، از اثر نیروی شناوری و همچنین اثر باد حداکثر استفاده به عمل می‌آید. در این تونلها برای استفاده از نیروی شناوری، دو انتهای تونل در دو ارتفاع مختلف ساخته می‌شود و بطور معمول اثر باد نیز به تهویه طبیعی تونل کمک می‌کند.

هدف این مقاله بدست آوردن روابط حاکم بر جریان طبیعی هوا در ساختمان با استفاده از روش تحلیل



شکل ۱ حلقه جریان برای یک ساختمان ساده

$$(P_1 - P_2) + (P_3 - P_4) = gh(\rho_o - \rho_2) - F \quad (5)$$

افت فشارهای  $(P_1 - P_2)$  و  $(P_3 - P_4)$  را می‌توان برحسب ضرایب تخلیه نوشت. با استفاده از رابطه  $\Delta P = C \rho (U^2/2)$  که در آن  $U$  سرعت متوسط هوا از مقاطع ورودی یا خروجی است. برای محاسبه  $U$ ، اگر سطح مقطع جریان را با  $A$ ، چگالی هوا در سطح مقطع  $A$  را با  $\rho$  و دبی جرمی در حلقه که طبق اصل بقا جرم ثابت است، را با  $m$  نشان دهیم داریم:  $U = (m/(A\rho))$ . بنابراین معادله (5) به شکل زیر در می‌آید:

$$gh(\rho_o - \rho_2) = \frac{1}{\gamma} C_{d1} \frac{\rho_o m^2}{\rho_o^2 A_1^2} + \frac{1}{\gamma} C_{d2} \frac{\rho_2 m^2}{\rho_2^2 A_2^2} - \frac{1}{\gamma} f \frac{L}{D} \frac{\rho_o m^2}{\rho_o^2 A_o^2} \quad (6)$$

با توجه به اینکه جریان اساساً تراکم‌ناپذیر است در جملات افت فشار می‌توان از تغییر چگالی هوا در اثر تغییر فشار چشم‌پوشی کرد  $(\rho_o \approx \rho_2)$ ، البته چگالی هوا با تغییر دما تغییر می‌کند و با به کار بردن فرضیه بوسینسک در جمله شناوری داریم:

$$(\rho_o - \rho_2) = \rho_o \beta (T_2 - T_1) \quad (7)$$

که در آن  $T = (T_1 + T_2)/2$ ،  $\beta = 1/T$  و  $T$  دمای مطلق بر حسب درجه کلرین است.

از معادله انرژی برای حجم کنترل فضای ساختمان داریم:  $m c_p (T_2 - T_1) = Q_N$  بطوریکه می‌توان نوشت:

$$gh\beta(T-T) = (gh\beta Q_N)/(mC_p) \quad (8)$$

که در آن  $c_p$  گرمای ویژه هوا است. بنابراین داریم:

$$m^2 = \frac{\gamma \rho_o^2 gh \beta Q_N}{c_p \left[ \frac{C_{d1}}{A_1^2} + \frac{C_{d2}}{A_2^2} + \frac{f(L/D_h)}{A_o^2} \right]} \quad (9)$$

معادله (9) نشان می‌دهد در حالتیکه اصطکاک قابل

که موجب گرم شدن هوای داخل تا دمای  $T_2$  می‌شود، مساوی با مجموع گرماهای دریافتی شامل انرژی خورشیدی، حرارت حاصل از وسیله گرم‌کننده، گرمای سیستم روشنایی، گرمای حضور افراد و غیره منهای اتلاف حرارت از طریق جدار و جابجایی هوا به خارج می‌باشد. مقدار  $Q_N$  با توجه به بارهای حرارتی اشاره شده در بالا از روابط تهویه مطبوع برآورد می‌شود [11]. در حلقه نشان داده شده در شکل (1)،  $A_1$  سطح مقطع هوای ورودی ( $A_1 = A_2$ )،  $A_3$  سطح مقطع هوای خروجی ( $A_3 = A_4$ ) و  $A_o$  سطح مقطع حجم کنترل (فضای داخل ساختمان) است. طبق اصل بقای جرم نرخ جریان جرم در طول حلقه ثابت است. در حالت ماندگار، طبق معادله اندازه حرکت نیروی شناوری حاصل از تغییر چگالی در اثر تغییر دما مساوی با مجموع افتهای فشار در طول حلقه می‌باشد. با توجه به آنچه در بالا آورده شد، موازنه فشار حول حلقه بسته می‌شود:

$$\Sigma \Delta P = (P_1 - P_2) + (P_3 - P_4) + (P_3 - P_4) + (P_4 - P_1) = 0 \quad (1)$$

اگر افت فشار اصطکاک حاصل از واحد وزن هوا در عبور از داخل اتاق را با  $h_{L,2-3}$  نشان دهیم، با به کار بردن معادله برنولی بین نقاط ۲ و ۳ داریم:

$$P_2 - P_3 = \rho_2 gh + F \quad (2)$$

که در آن چگالی هوا در دمای  $T_2$ ،  $g$  شتاب ثقل و  $F = \rho_2 g h_{L,2-3}$  می‌باشد. از طرفی می‌توان نوشت:

$$F = f(L/D_h) \rho_2 (U^2/2) \quad (3)$$

که در آن  $D_h$  قطر هیدرولیکی است. همچنین، با استفاده از معادله برنولی بین نقاط ۱ و ۴ و با فرض اینکه چگالی هوای خارج ساختمان  $\rho_o$  باشد، داریم:

$$P_4 - P_1 = -\rho_o gh \quad (4)$$

از جمع دو معادله (۲) و (۴) و تنظیم رابطه حاصل نتیجه می‌شود:

$$P'_f = P_1 \pm \frac{1}{\gamma} C_{p2} \rho_2 W_{out}^2 \quad (12)$$

و با توجه به اینکه  $\rho_2 \approx \rho_1$  می‌توان نوشت:

$$gh\rho_0 \beta \frac{Q_N}{mc_p} \pm \frac{1}{\gamma} \rho_0 C_{p1} W_{in}^2 = \frac{1}{\gamma} C_{d1} \frac{m^2}{A_1^2 \rho_0} +$$

$$\frac{1}{\gamma} C_{d2} \frac{m^2}{A_2^2 \rho_0} + \frac{1}{\gamma} \frac{fL}{D} \frac{m^2}{A_c^2 \rho_0} \pm \frac{1}{\gamma} \rho_0 C_{p2} W_{out}^2 \quad (13)$$

در معادله (۱۳) دیده می‌شود که ضریب فشار مثبت باد در ورود ( $+C_{p1}$ ) و ضریب فشار منفی (مکش) در خروج ( $-C_{p1}$ ) نرخ جریان جرم را افزایش می‌دهند. با تنظیم معادله (۱۳) می‌توان شکل کلی معادله نرخ جریان جرم در حلقه منفرد را با در نظر گرفتن اثر باد به دست آورد:

$$m^2 \left[ \frac{C_{d1}}{A_1^2} + \frac{C_{d2}}{A_2^2} + \frac{fL/D}{A_c^2} \right] - \rho_0^2 m \left[ \pm C_{p2} W_{out}^2 \pm C_{p1} W_{in}^2 \right] - \frac{\gamma \rho_0^2 gh \beta Q_N}{c_p} = 0 \quad (14)$$

معادله (۱۴) یک معادله درجه سوم است که نشان می‌دهد برای فشارهای خیلی زیاد باد، نرخ جریان جرم متناسب با خالص گرمای دریافتی توسط فضای مورد نظر ( $m \propto Q_N^{1/3}$ ) است و در صورت ثابت بودن  $Q_N$  نرخ جریان جرم با سرعت باد متناسب می‌باشد ( $m \propto W$ ). سرعت متوسط باد تابعی از ارتفاع از سطح زمین است و افزون بر این به موانع اطراف ساختمان بستگی دارد [8]:

$$W/W_f = \varphi H^\alpha \quad (15)$$

چشم‌پوشی باشد ( $F=0$ )، نرخ جریان جرم متناسب با ریشه سوم خالص حرارت دریافتی ( $Q_N$ ) می‌باشد (  $m \propto Q_N^{1/3}$ ). نرخ جریان جرم بر حسب عدد گراشف می‌شود [12]:

$$m = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{2G_{th}}{\frac{C_{d1}}{A_1^2} + \frac{C_{d2}}{A_2^2} + \frac{f(L/D)_h}{A_c^2}}} \quad (10)$$

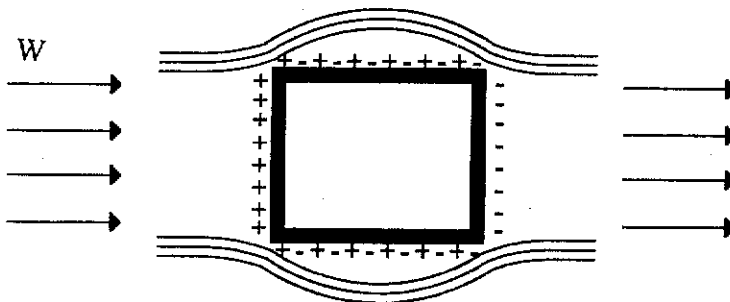
### ترکیب نیروی شناوری و اثر باد

برخورد باد با ساختمان موجب افزایش فشار استاتیکی هوا در سطوح یک طرف ساختمان و کاهش آن در سطوح طرف دیگر می‌شود (شکل ۲) [2]. اختلاف فشار ایجاد شده جابجایی طبیعی هوا را از طریق درها و پنجره‌ها افزایش می‌دهد. متوسط فشار تولید شده از تغییر سرعت باد از رابطه زیر به دست می‌آید [8]:

$$P\omega = \frac{1}{\gamma} C_p \rho W^2 \quad (11)$$

که در آن  $C_p$  ضریب فشار استاتیک و  $W$  سرعت باد (m/s) می‌باشد. مقدار  $C_p$  در هر نقطه از سطح ساختمان به هندسه ساختمان، سرعت و جهت باد و به موانع اطراف ساختمان بستگی دارد. مقادیر  $C_p$  برای ساختمانهای با هندسه ساده در مرجع [12] داده شده است. با در نظر گرفتن اثر باد، فشارهای کلی در مقاطع ورودی و خروجی ساختمان می‌شود:

$$P'_1 = P_1 \pm \frac{1}{\gamma} C_{p1} \rho_0 W_{in}^2$$

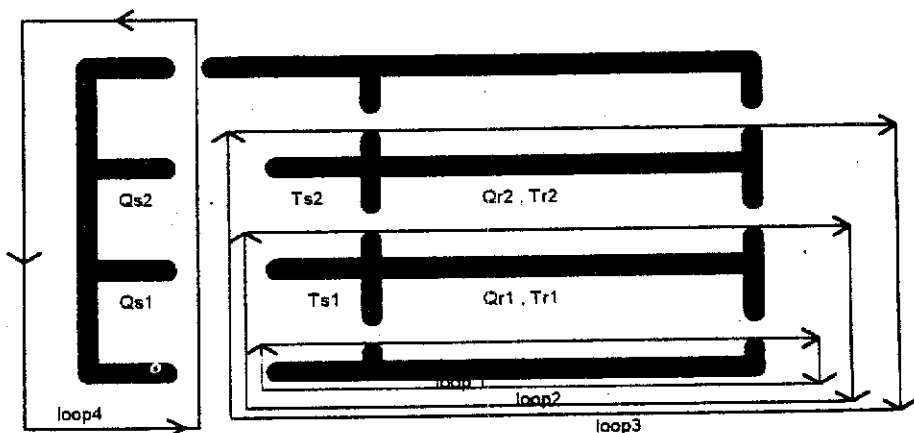


شکل ۲ اثر باد بر فشار استاتیکی سطوح ساختمان (نمای افقی)

دودکش معروف است موجب افزایش تهویه طبیعی در ساختمانها می‌شود. در شکل (۳) جریان مربوط به خاصیت دودکش با حلقه ۴ نشان داده شده است. نتیجه مهم خاصیت دودکش گرمتر شدن طبقات بالای ساختمان نسبت به طبقات پایینتر در اثر جریان بیشتر هوای گرم در آنها می‌باشد. اگر نشان دهنده طبقه اتاقها و نشان دهنده طبقات در مسیر راه‌پله باشد، در شکل (۳)،  $T_{ii}$  دمای اتاق در طبقه  $i$ ،  $Q_{ii}$  گرمای دریافتی اتاقهای طبقه  $i$  (بجز گرمای دریافتی از خاصیت دودکش)  $T_{sj}$  دمای راه‌پله در طبقه  $j$  و  $Q_{sj}$  گرمای حاصل از خاصیت دودکش در طبقه  $j$  راه‌پله است که در واقع این گرما به اتاقها داده می‌شود. چنانچه کل گرمای منتقل شده در اثر خاصیت دودکش مساوی  $Q_s$  باشد با توجه به آنچه بیان شد، حرارت دریافتی هر طبقه به نرخ جریان جرمی آن طبقه بستگی داشته و از رابطه  $Q_{ii} = Q_s (m_{ii}/m)$  بدست می‌آید، و سطح مقطع جریان موثر مربوط به آن خواهد شد:  $A_{si} = A_s (m_{ii}/m)$  که در آن  $A_s$  مقطع اصلی جریان مربوط به خاصیت دودکش است (معمولاً مساوی مقطع افقی مسیر راه پله ساختمان). بنابراین، کل نرخ جریان جرمی هوا از اتاقهای طبقه  $i$  (یا حلقه  $i$ ) با در نظر گرفتن اثر خاصیت دودکش

که در آن  $W$  سرعت متوسط باد (m/s) در ارتفاع  $H$ ،  $W_p$  سرعت متوسط باد در ارتفاع مشخص از سطح زمین (معمولاً ۱۰ متر) و ضرایب  $\varphi$  و  $\alpha$  با توجه به شرایط موانع اطراف ساختمان تعیین می‌شوند [8]. در این مقاله برای  $\varphi$  و  $\alpha$ ، به ترتیب، از مقادیر ۰/۳۳ و ۰/۲۱ استفاده شده است.

نرخ جریان جرم با در نظر گرفتن خاصیت دودکش تحلیل بیان شده برای حلقه منفرد ساختمان یک طبقه را می‌توان برای محاسبه نرخ جریان جرم در ساختمانهای با طبقات متعدد بسط داد. در شکل (۳) برای هر یک از طبقات یک ساختمان چند طبقه که دارای گرمای خالص دریافتی متفاوت می‌باشند، یک حلقه مجزا در نظر گرفته شده است. در ساختمانهای با طبقات متعدد در زمستان هوای گرم داخل ساختمان به علت کاهش دانسیته به طرف بالا حرکت می‌کند (به عنوان مثال از طریق راه پله) و در نتیجه فشار هوا در طبقات بالا افزایش و در پایین ساختمان کاهش می‌یابد. در اثر این تغییر فشار، هوای سرد خارج از قسمت پایین ساختمان وارد و هوای گرم داخل از منافذ طبقات بالا به خارج جریان پیدا می‌کند. این پدیده که به خاصیت



شکل ۳ حلقه‌های ساختمان با فضاهای مختلف

هلندز [14]،  $f = 0.073(L/D_h) + 0.059R_e^{-1/4}$  محاسبه می شود.

معادله (۱۷) را می توان به شکل  $Am_1^2 + Bm_1 - C = 0$  نوشت که یک معادله درجه سوم است. این معادله با استفاده از روش نیوتون - رافسون به ترتیب برای هر یک از حلقه ها حل می شود. با توجه به اینکه گرمای منتقل شده توسط خاصیت دودکش ( $Q_{ds}$ ) و همچنین سطح مقطع مؤثر آن ( $A_{sn}$ ) به نرخ جریان جرم طبقه و نیز نرخ جریان جرم کلی ساختمان بستگی دارد، نرخ جریانهای جرم تصحیح شده از تکرار حل معادله (۱۷) بدست می آید.

### روابط نمونه های ساده تجربی

در مرجع [8] برای تهویه طبیعی وضعیتهای هندسی ساده ساختمان براساس استاندارد B.V.5925 [14] و نیز برپایه کتاب ASHRAE [9] روابطی تجربی داده شده است. در زیر دو رابطه از روابط یادشده که با هندسه ساختمان مورد مطالعه در این مقاله تطابق بیشتری دارند، ارائه و نتایج آنها در بخش بررسی نتایج با نتایج تحلیل حلقوی مقایسه خواهد شد.

متد استاندارد B.S.5925. در مرجع [8] رابطه زیر (در اینجا رابطه مذکور با توجه به علائم و مشخصات هندسه شکل های ۱ و ۲ نوشته می شود) برای نرخ جریان حجمی تهویه طبیعی ساختمان وقتی فقط فشار باد وجود داشته باشد، داده شده است:

$$Q_w = C_d \left( \frac{A_1 A_f}{A_1^2 + A_f^2} \right) W (\Delta C_p)^{1/2} \quad m^3/s \quad (19)$$

متد اشاره. در مراجع [8,9] رابطه زیر برای نرخ جریان حجم تهویه طبیعی ساختمان وقتی اثرات باد و نیروی شناوری وجود داشته باشد، داده شده است:

از رابطه زیر بدست می آید:

$$m_1^2 = \frac{\gamma \rho_o^2 g h \beta \left[ \left( \sum_{n=1}^{n=j} Q_{sn} \right) + Q_{ri} \right]}{C_p \left[ \left( \sum_{n=1}^{n=j} \frac{C_{dsn}}{A_{sn}^2} \right) + \left( \sum_{n=1}^{n=j} \frac{f_{in} L}{A_{in}^2 D} \right) + \frac{C_{dri,1}}{A_{ri,1}^2} + \frac{C_{dri,2}}{A_{ri,2}^2} \right]} \quad (16)$$

با داشتن نرخ جریان جرم کلی ( $m$ ) می توان از معادله (۱۶) نرخ جریان جرم هر طبقه را از حل مستقیم معادله بالا بدست آورد.

### معادله کلی تهویه طبیعی

اگر اثر جریان باد بر تهویه طبیعی ساختمانهای بلند نیز در نظر گرفته شود، معادله (۱۶) به شکل کلی زیر نوشته می شود:

$$m_1^2 \left[ \left( \sum_{n=1}^{n=j} \frac{C_{dsn}}{A_{sn}^2} \right) + \sum_{n=1}^{n=j} \frac{f_{in} L}{A_{in}^2 D} + \frac{C_{dri,1}}{A_{ri,1}^2} + \frac{C_{dri,2}}{A_{ri,2}^2} \right] - \rho_o^2 m_1 \left[ \pm C_{pout} W_{out}^2 \pm C_{pin} W_{in}^2 \right] \times \frac{\gamma \rho_o^2 g \beta \left[ \left( \sum_{n=1}^{n=j} Q_{sn} \right) + Q_{ri} \right]}{C_p} = 0 \quad (17)$$

در حالت عدم وجود اثر باد، جریان هوا در داخل ساختمان آرام فرض می شود و ضریب اصطکاک ( $f$ ) از رابطه  $f = 64/R_e$  که در آن  $R_e = (m/(\rho A_e))(D_h/\nu)$  می باشد، محاسبه می گردد. بنابراین داریم:

$$F = \left[ 64 / (m / (\rho A_e) D_h / \nu) \right] (L / D_h) \rho U^2 / 2 \quad (18)$$

اگر در معادله (۹) بجای  $f$  مقدار قرار دهیم، یک معادله درجه دوم بر حسب  $m$  بدست می آید و چنانچه اثر مقاطع ورودی و خروجی ناچیز باشد وابستگی  $m$  به  $Q_N$  می شود:  $m \propto (Q_N)^{0.5}$  در حالت وجود اثر باد، جریان هوا مغشوش فرض شده و مقدار  $f$  از رابطه پیشنهاد شده بوسیله

باشد تهویه طبیعی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در شکل (۵) اثر گرمای دریافتی (دمای داخل) بر نرخ تعویض هوای طبقه برای مقادیر مختلف مقاطع جریان نشان داده شده است (مساحت مقاطع ورودی و خروجی مساوی است). مشاهده می‌شود با افزایش گرمای خالص دریافتی یا در واقع افزایش دمای داخل ساختمان، نرخ تعویض افزایش پیدا می‌کند. همچنین دیده می‌شود برای اتاق مورد نظر، مساحت ۱ متر مربع برای سطوح مقاطع ورودی و خروجی، جریان نسبتاً کمی را اجازه می‌دهند و چنانچه سطوح یادشده بیش از ۳ متر مربع باشد، افزایش سطح آنها اثر قابل توجهی بر تهویه طبیعی ندارد. این نتایج با ملزومات ارائه شده در استاندارد B.S. ۵۹۲۵ در مورد اثر اندازه پنجره‌ها بر تهویه طبیعی فضاها مطابقت دارد [15].

در شکل (۶) اثر گرمای خالص دریافتی (دمای داخل) بر نرخ تعویض هوای داخل طبقات مختلف ساختمان با در نظر گرفتن خاصیت دودکش نشان داده شده است (اندازه سطوح مقاطع ورودی و خروجی برای هر یک از طبقات ۱ متر مربع و سرعت باد صفر است). مشاهده می‌شود با افزایش گرمای خالص دریافتی، نرخ تعویض هوای جابجایی آزاد در طبقات ساختمان افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود نرخ تعویض هوا در طبقات بالاتر بیشتر است که علت آن اثر خاصیت دودکش می‌باشد. البته باید توجه داشت که اثر خاصیت دودکش در ساختمانهای با تعداد طبقات زیاد (با ارتفاع بیش از ۳۰ متر) قابل توجه است. در این مطالعه از مدل ساختمان سه طبقه با فرض وجود خاصیت دودکش استفاده شده است، که به علت کوتاه بودن ساختمان اثر دودکش قابل توجه نمی‌باشد.

شکل (۷) اثر اندازه در ارتباطی طبقه به راه پله را بر نرخ تعویض هوای داخل به روش تهویه طبیعی در طبقات مختلف نشان می‌دهد (سرعت باد صفر است). ارتباط فضای طبقه به راه پله موجب می‌شود که جریان

$$Q = A\sqrt{(a\Delta T + bW^2)} \quad \text{m}^3/\text{hr} \quad (20)$$

که در آن A سطح مقطع جریان هوا (سطوح مقاطع ورودی و خروجی یکسان) بر حسب سانتیمتر مربع، a ضریب دودکش، b ضریب باد،  $\Delta T$  اختلاف دمای داخل و خارج (K) و W سرعت باد (m/s) است. مقادیر a و b برای طبقات مختلف ساختمان در مرجع [8] داده شده است. برای ساختمان سه طبقه مقدار a مساوی  $0.00564 \text{ m}^6 \text{ hr}^{-2} \text{ cm}^{-4} \text{ k}^{-1}$  و مقدار b مساوی  $0.00640 \text{ m}^4 \text{ s}^2 \text{ hr}^{-2} \text{ cm}^{-4}$  می‌باشد.

### بررسی نتایج

محاسبات برای یک ساختمان سه طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳ متر (مساحت هر طبقه ۲۰۰ مترمربع) و حرارت خالص دریافتی هر متر مربع ساختمان  $0.125 \text{ Kw}$  (یعنی حرارت دریافتی یک اتاق به مساحت ۱۲ مترمربع  $1/5 \text{ Kw}$ ) در شرایط مختلف انجام شده است. اختلاف دمای داخل و خارج  $25^\circ\text{C}$  می‌باشد. ابتدا محاسبات برای فضای طبقه همکف انجام می‌شود و اثر باد در نظر گرفته نمی‌شود. با توجه به اینکه به علت عدم وجود باد سرعت جریان هوا در داخل ساختمان کم است و می‌توان انتظار داشت که افت فشار در مقاطع ورود و خروج هوا در مقابل افت فشار حاصل از اصطکاک داخلی قابل توجه باشد، در شکل (۴) اثر اندازه سطوح مقاطع ورودی و خروجی بر نرخ یا تعداد تعویض هوای داخل در ساعت مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل، مقطع خروجی با  $A_p$  مشخص شده است. مشاهده می‌شود در صورتیکه سطح یکی از دو مقطع (ورودی یا خروجی) کوچک باشد، نرخ تعویض هوا تابع آن (کم) خواهد بود و برای افزایش نرخ جریان تهویه طبیعی لازم است سطوح مقاطع ورودی و خروجی با هم افزایش پیدا کنند. همچنین دیده می‌شود اگر اندازه مقطع ورودی یا مقطع خروجی برای اتاق مورد نظر از حد معینی کمتر



متد استاندارد ۵۹۲۵ B.S. برای حالتی که فقط اثر باد عامل جابجایی هوای داخل ساختمان (طبقه اول) باشد، مقایسه شده است. سطوح مقاطع ورودی و خروجی  $1m^2$  می باشد. مشاهده می شود که نتایج دو روش بویژه در سرعتهای پایین باد بسیار بهم نزدیک می باشد. در واقع، روش تحلیل حلقوی تعداد تعویض هوای داخل ساختمان را در تمام مقادیر سرعتهای باد قدری کمتر از روش استاندارد ۵۹۲۵ B.S. محاسبه کرده است. حداکثر اختلاف مقادیر محاسبه شده بوسیله دو روش حدود ۱۵٪ است.

در شکل (۱۱) نتایج مدل تحلیل حلقوی با نتایج متد تجربی اشاره برای حالتی که ترکیب اثرات باد و نیروی شناوری هر دو اعمال شود، مقایسه شده است. محاسبات برای طبقه سوم ساختمان، سرعت باد ۴ متر بر ثانیه و اندازه سطوح مقاطع ورودی و خروجی یکسان هوا انجام شده است. مقایسه دو روش نشان می دهد که بطور کلی روش تحلیل حلقوی تهویه طبیعی را بسیار بیشتر (بیش از حدود ۱۰۰٪) از متد اشاره محاسبه می کند. علت اختلاف نتایج دو مدل می تواند وجود ضرایب ثابت تجربی اثر دودکش و اثر باد در روش اشاره باشد. با توجه به اینکه خاصیت دودکش و رفتار باد به پارامترهای زیادی از جمله شرایط هندسی ساختمان بستگی دارد، استفاده از ضرایب ثابت برای ساختمانهای مختلف منطقی بنظر نمی رسد. بررسی دو شکل (۱۰ و ۱۱) نشان می دهد که مدل حلقوی نتایجی بین دو متد استاندارد ۵۹۲۵ B.S. و اشاره و البته بسیار نزدیکتر به نتایج متد استاندارد، محاسبه می کند.

### نتیجه گیری

برپایه تحلیل حلقوی یک بعدی و در نظر گرفتن اثر عوامل مختلف، روابط ساده ای برای محاسبه و تجزیه و تحلیل تهویه طبیعی ساختمان ارائه شده است. معادلات حاکم از موازنه نیروهای شناوری و افتهای فشار اصطکاک و

حاصل از خاصیت دودکش وارد اتاقها شده و تهویه طبیعی طبقه را افزایش دهد. همانگونه که انتظار می رود، مشاهده می شود که افزایش سطح مقطع ارتباطی موجب افزایش نرخ جریان تهویه طبیعی می شود و این افزایش در ابتدای افزایش سطح دارای شدت بیشتری می باشد.

شکل (۸) اثر سرعت باد را بر تعداد تعویض هوای داخل هر یک از سه طبقه ساختمان نشان می دهد (محاسبات برای سطح مقاطع ورودی و خروجی ۱ متر مربع انجام شده است). مشاهده می شود سرعت باد اثر قابل توجهی بر افزایش نرخ تعویض هوا در اثر تهویه طبیعی در داخل ساختمان دارد. با توجه به اینکه ساختمان سه طبقه است، سرعت باد مقادیر نسبتاً کمی دارد. بدیهی است در طبقات بالاتر ساختمان که سرعت باد بیشتر است، می تواند اثرات بیشتری بر جریان طبیعی هوا در داخل ساختمان داشته باشد.

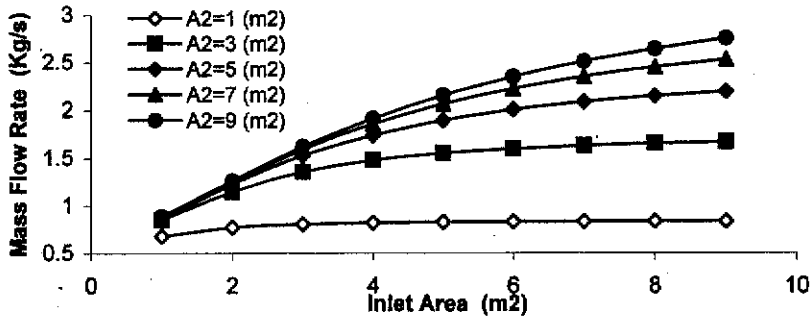
شکل (۹) اثر مقدار و جهت سرعت باد بر نرخ جریان تهویه طبیعی برای دو حالت نشان می دهد: در حالت اول باد مستقیماً بر ورودی ساختمان برخورد می کند (فشار استاتیکی در مقطع ورودی ساختمان مثبت)، در حالت دوم جهت باد عکس می باشد (فشار استاتیکی در سطح ورودی منفی). محاسبات برای طبقه اول ساختمان سه طبقه با در نظر گرفتن اثر خاصیت دودکش انجام شده است. مشاهده می شود در حالت اول، بر خورد باد با ساختمان موجب افزایش نرخ جریان طبیعی هوا می شود در حالیکه در حالت دوم جریان معکوس باد نه تنها تهویه طبیعی را افزایش نمی دهد بلکه تهویه طبیعی ناشی از نیروی شناوری و خاصیت دودکش را نیز کاهش می دهد.

برای ارزیابی نتایج مدل حلقوی، در شکلهای (۱۰ و ۱۱) نتایج این مدل با نتایج روابط تجربی ارائه شده در مرجع [8] برای نمونه های ساده از هندسه ساختمانها مقایسه شده است. در شکل (۱۰) نتایج روش تحلیل حلقوی با نتایج

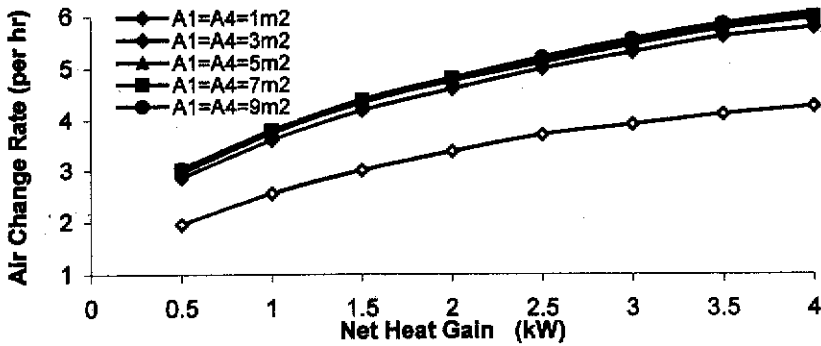
$g$ ( $m/s^2$ )	شتاب ثقل	موضعی بدست آمده و برای محاسبه اثرات باد و خاصیت
$G_{rh}$	عدد گراشف	دودکش در ساختمانهای با طبقات متعدد بسط داده شده
$h$ (m)	ارتفاع ساختمان	است. روابط بدست آمده چگونگی ارتباط نرخ جریان هوا
$h_L$ (m)	افت ارتفاع اصطکاکی	در تهویه طبیعی ساختمان را به عوامل مختلف از جمله
$H$ (m)	ارتفاع از سطح زمین	گرمای خالص دریافتی (دمای داخل)، سرعت و جهت باد،
$i$	شماره طبقات	اندازه مقاطع ورودی و خروجی، و افتهای اصطکاکی و
$j$	شماره طبقات در مسیر راه پله	موضعی نشان می دهد. با توجه به اینکه کاربرد تهویه
$L$ (m)	طول مسیر برای جریان هوا	طبیعی در ساختمان مصرف انرژی و تولید صدا را به مقدار
$m$ ( $m^3/s$ )	جریان حجمی هوا	قابل توجهی کاهش می دهد، استفاده از تحلیل حلقوی
$P$ ( $N/m^2$ )	فشار استاتیکی	بوسیله طراح ساختمان امکان بررسی سریع طرحهای
$P_w$ ( $N/m^2$ )	فشار باد	مختلف و انتخاب طرح بهینه را فراهم می کند. نتایج نشان
$P'$ ( $N/m^2$ )	فشار کلی	می دهد سه عامل: دمای داخل (گرمای دریافتی)، سرعت
$Q_N$ (W)	خالص گرمای دریافتی ساختمان	باد (مقدار و جهت باد) و اندازه مقاطع ورودی و خروجی
$Q_n$ (W)	خالص گرمای دریافتی طبقه $i$	نقش بسیار مهمی در تهویه طبیعی ساختمان دارند. مقایسه
$Q_{ai}$ (W)	گرمای دودکش در طبقه	نتایج مدل حلقوی با دو متد استاندارد B.S.5925 و اشهره
$Q_s$ (W)	کل گرمای دودکش	برای ساختمانهای ساده نشان می دهد نتایج بدست آمده از
$R_e$	عدد رینالدز	تحلیل حلقوی بین نتایج دو متد یادشده قرار دارد ولی به
$T$ (K)	دمای متوسط	مدل استاندارد بسیار نزدیک می باشد.
$T_1$ (K)	دمای هوای خارج	
$T_2$ (K)	دمای هوای داخل	
$T_{ri}$ (K)	دمای هوای اتاق در طبقه $i$	
$T_{sj}$ (K)	دمای راه پله در طبقه $j$	
$U$ (m/s)	سرعت متوسط هوای داخل	
$W$ (m/s)	سرعت متوسط باد	
$W_r$ (m/s)	سرعت متوسط باد در ارتفاع مشخص	
$\alpha$	ضریب موانع مسیر باد.	
$\beta$ ( $1/K$ )	معکوس دمای متوسط	
$\rho$ ( $kg/m^3$ )	چگالی جرمی هوا	
$\rho_o$ ( $kg/m^3$ )	چگالی جرمی هوای خارج	
$\rho_2$ ( $kg/m^3$ )	چگالی جرمی هوای داخل	
$\varphi$	ضریب موانع مسیر باد	

## فهرست علائم

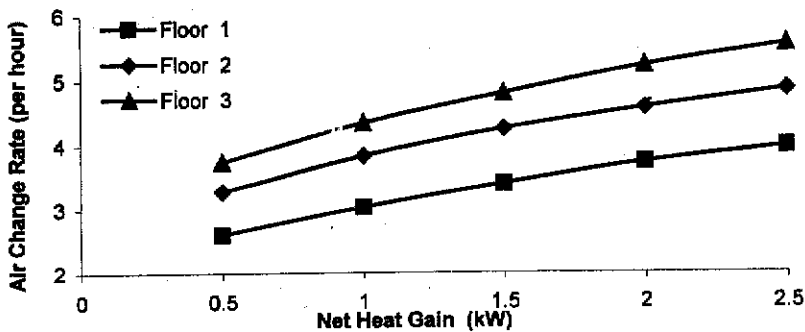
$a$ ( $m^6 hr^{-2} cm^{-4} K^{-1}$ )	ضریب دودکش
$A$ ( $m^2$ )	سطح مقطع جریان
$A_c$ ( $m^2$ )	سطح مقطع اتاق
$A_s$ ( $m^2$ )	سطح مقطع دودکش
$b$ ( $m^4 s^2 hr^{-2} cm^{-4}$ )	ضریب باد
$C_d$	ضریب افت
$c_p$ (J/kg.K)	گرمای ویژه
$C_p$	ضریب فشار استاتیکی
$D_h$ (m)	قطر هیدرولیکی
$f$	ضریب اصطکاک
$F$ ( $N/m^2$ )	افت فشار اصطکاکی



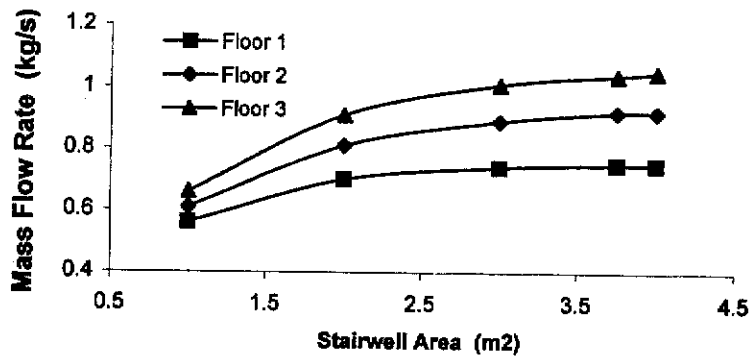
شکل ۴ اثر مساحت مقاطع ورودی و خروجی بر تعداد تعویض هوای داخل در ساعت



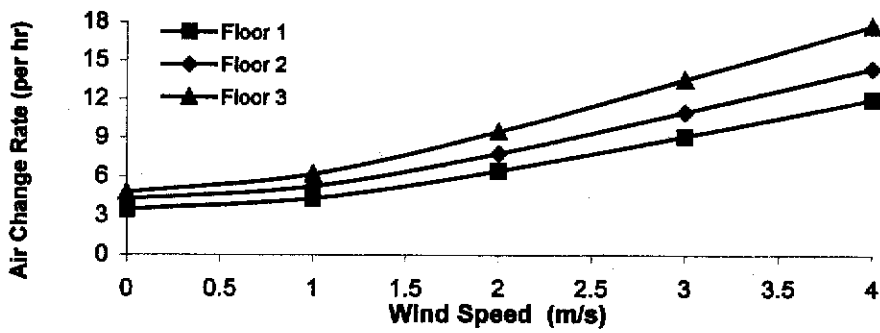
شکل ۵ اثر گرمای دریافتی خالص (دمای داخل) بر تعداد تعویض هوای داخل در ساعت



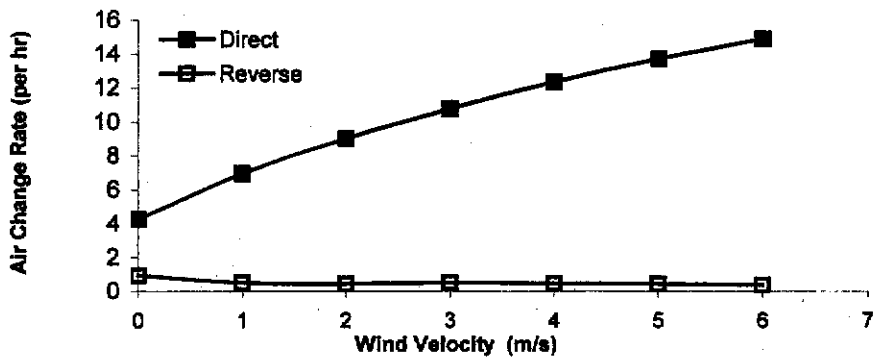
شکل ۶ اثر گرمای دریافتی (دمای داخل) بر تعداد تعویض هوای داخل در طبقات مختلف



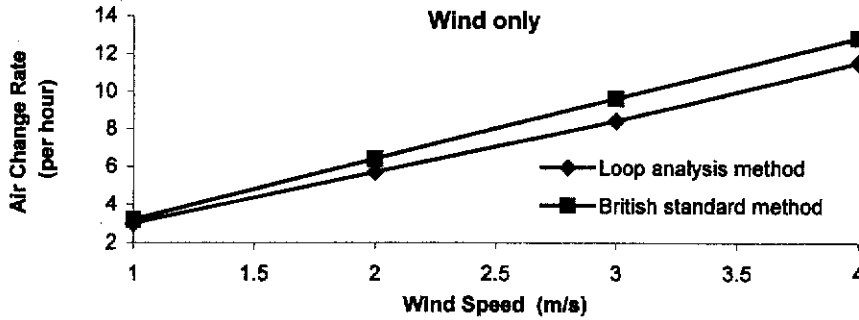
شکل ۷ اثر مساحت در ارتباطی راه پله با طبقه بر تعداد تعویض هوای داخلی



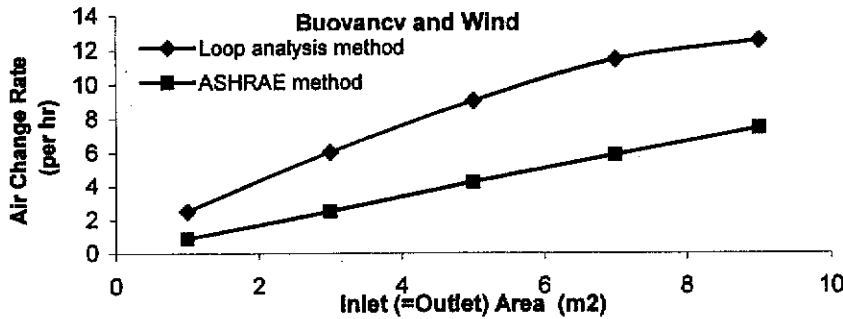
شکل ۸ اثر سرعت باد بر تعداد تعویض هوای داخلی هر طبقه در ساعت



شکل ۹ اثر جهت باد بر تعداد تعویض هوای داخلی طبقه اول



شکل ۱۰ مقایسه نتایج روش تحلیل حلقوی با روش استاندارد BS۵۹۲۵



شکل ۱۱ مقایسه نتایج روش تحلیل حلقوی با روش ASHRAE

مراجع

1. Korpela, S. A., Lee, Y., and Drummond, J. E., "Heat transfer through a double pane window", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 539-544, (1982).
2. Awbi, H. B., and Allwinkle, S. J., "Domestic ventilation with heat recovery to improve indoor air quality", *Energy Build*, 9, 305-12, (1986).
3. Crooks, K. W., and Banks, N. J., "Controlling rotary desiccant wheels for dehumidification and cooling", *ASHRAE Transactions*, Vol. 102, No. 2, pp. 633-638, (1996).
4. Bauman, F., Gadgil, A., Kammerud, R., and Grief, R., "Buoyancy driven convection in rectangular enclosures: Experimental results and numerical calculations", *ASME Paper*, No. 80, HT- 66, (1980).

5. Aydın, O, "Transient natural convection in rectangular enclosures heated from one side and cooled from above", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, No. 1, pp. 135-144, (1999).
6. Emery, A. F., and Lee, J. W, "Effects of property variations on natural convection in a square enclosure", *ASME Trans., J. Heat Transfer*, Vol. 121, No. 1, pp. 57-62, (1999).
7. Goodfellow, H. D, "Key note address: Ventilation-past present and future", Proc. 2nd, Int. Symp. On *Ventilation for Contaminant Control (Ventilation' 88)*, London (1988).
8. Awbi, H. B, "*Ventilation of Buildings*", Chapman and Hall, London, (1991).
9. *ASHRAE Fundamental Handbook*, Ch. 22 Natural Ventilation and infiltration, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, G. A., (1985).
10. Streeter, V. L., Wylie, B. E., and Bedford, K. W., "*Fluid Mechanics*", 9th ed., McGraw Hill, (1998).
11. Jones, W. P, "*Air Conditioning Engineering*", 4 th, Edition, Edmunds bury press, (1996).
12. Incropera, F. P., and DeWitt, D. P, "*Fundamentals of Heat and mMs Transfer*", 4th Edition, John Wiley & Sons, (1996).
13. Liddament, M. W, "*Air Infiltration Calculation Techniques-An Application Guide*", Air Infiltration Center, Coventry, UK, (1986).
14. Hollands, H. G., and Schewen, E. C, "Optimization of flow passage geomoetry for air-heating, plate-type solar collectors", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 103, pp. 323-330, (1981).
15. B.S.5925 Code of practice for design of buildings: Ventilation principles and designing for natural ventilation, British Standards Institution, London, (1980).