



ارائه یک شیوه جایگزین برای طراحی کانال‌های انتقال هوا از طریق برنامه‌نویسی در نرم‌افزار EES

ایمان زحمتکش^۱

۱. دانشیار گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

*نویسنده مسئول: Zahmatkesh5310@mshdiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲

چکیده

در طراحی کانال‌های هوا ابتدا یک سرعت مجاز برای هوا در شاخه اصلی در نظر می‌گیرند. سپس، بر اساس این سرعت و دبی در شاخه اصلی، قطر کانال و اتلاف هد در آن تعیین می‌شود. البته، برای کانال‌های مستطیلی، ابعاد را با توجه محدودیت ارتفاع کانال مشخص می‌کنند. سپس، قطر کانال (یا ابعاد کانال مستطیلی) در شاخه‌های دیگر بر پایه دبی در هر شاخه و مقدار اتلاف هد شاخه اصلی به دست می‌آید. در پایان، هد فن بر پایه اتلاف هد در پراتلاف‌ترین شاخه تعیین می‌شود. بدیهی است که در صورت تغییر در شرایط، همه محاسبات باید تکرار شود. برای رفع این مشکل، در مقاله حاضر یک شیوه جایگزین از طریق برنامه‌نویسی در نرم‌افزار EES پیشنهاد گردیده است. در این روش، کافی است یک بار، شاخه‌ها به نرم‌افزار معرفی شوند. در ادامه با تغییر شرایط، تنها لازم است برنامه دوباره اجرا شود. به منظور نمایش برتری این روش، از آن برای طراحی یک کانال نمونه استفاده می‌شود. سپس، یک تحلیل پارامتری برای تحلیل اثر ارتفاع کانال و سرعت در شاخه اصلی بر سطح ورق مصرفی انجام گردید. این تحلیل با استفاده از روش سطح پاسخ صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: کانال هوا، تعیین اندازه، فن، نرم‌افزار EES، روش سطح پاسخ.

مقدمه

کانال‌های انتقال هوا کاربرد فراوانی در صنعت تهویه مطبوع دارند. از این رو، تا کنون مطالعات فراوانی بر روی آنها انجام شده است. به عنوان نمونه، اثر پارامترهای تهویه مطبوع بر رشد میکروبی در کانال‌های رفت هوا توسط لی و همکاران [۱] بررسی شد. لو و لو [۲] به مطالعه نشست ذرات در کانال‌های انتقال هوا پرداختند. در ادامه، این تحلیل برای کانال‌های دارای انقباض و انبساط توسعه داده شد [۳]. چن و همکاران [۴] و کوی و همکاران [۵] روش‌هایی برای بالانس کانال‌های انتقال هوا پیشنهاد دادند. پرزیدروزی و همکاران [۶] دمای مناسب برای هوای رفت در یک سیستم تهویه مطبوع دوکاناله را تعیین کردند. طاهری و همکاران [۷] اثر انحنای دیوار و گرادیان فشار نامطلوب را بر کانال‌های انتقال هوا بررسی کردند. پارک و باج [۸] به بررسی تجهیزات اختلاط در کانال‌های انتقال هوا پرداختند. زی و همکاران [۹] مکان بهینه برای کانال انتقال هوا را در حین حفاری در یک تونل زیرزمینی مطالعه کردند. در پژوهش لی و همکاران [۱۰]، حذف مواد آلی فرار از جریان هوای درون کانال‌های انتقال هوا مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، نیه و همکاران [۱۱] به تعیین مکان بهینه جهت تمیز کردن کانال‌های انتقال حفاری تونل پرداختند. اخیراً نیز حیدرشناس و همکاران [۱۲] به بررسی اثر آرایش زیگزاگی باتری‌های لیتیومی جاسازی شده در داخل کانال انتقال هوا بمنظور گرمایش یک دفتر اداری پرداختند. همچنین، جعفریار و همکاران [۱۳] ذخیره‌سازی انرژی در یک کانال سینوسی انتقال هوا با کمک پارافین را بررسی کردند.

در کانال‌های انتقال هوا، تعیین اندازه و همچنین، تعیین هد فن مورد نیاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در طراحی کانال‌های انتقال هوا، پس از آن که محل دریچه‌ها مشخص شد لازم است که با توجه به محدودیت‌های موجود، مسیر کانال بر روی نقشه رسم شده و در ادامه، نسبت به تعیین اندازه شاخه‌های مختلف اقدام شود. برای تعیین اندازه کانال‌های هوا روش‌های مختلفی از قبیل روش کاهش سرعت، روش اصطکاک یکسان و روش بازیابی دوباره فشار استاتیکی ارائه شده است؛ که در



کاربردهای تهویه مطبوع، روش اصطکاک یکسان بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت مهم این روش در آن است که با استفاده از آن، سرعت در طول کانال کاهش خواهد یافت؛ که مشکل تولید سر و صدا را کم می‌کند. البته باید در نظر داشت که با این روش، یک فشار استاتیکی یکسان در سرتاسر شاخه‌های کانال و دریچه‌های ورود هوا برقرار نخواهد شد. از این رو، لازم است که در ابتدای هر انشعاب، یک دمپر حجمی برای تنظیم جریان نصب شود. گام‌های اجرای روش اصطکاک یکسان از قرار زیر است:

- گام (۱) تعیین سرعت مجاز هوا در شاخه اصلی بر پایه کاربری فضا از جدول (۱)
- گام (۲) تعیین قطر کانال گرد و اتلاف هد استاتیکی در شاخه اصلی با توجه به سرعت مجاز (از گام قبل) و دبی هوای عبوری از آن. البته در صورت نیاز به مستطیلی بودن مقطع شاخه اصلی لازم است که ابعاد آن با در نظر گرفتن محدودیت‌های احتمالی در ارتفاع کانال و محدوده مجاز برای نسبت منظری کانال تعیین شود.
- گام (۳) تعیین قطر کانال گرد و یا، ابعاد کانال مستطیلی در شاخه‌های کانال بر پایه دبی هوا در هر شاخه و مقدار اتلاف هد استاتیکی ($h_{f,1..}$) به دست آمده در گام قبل
- گام (۴) محاسبه هد استاتیکی لازم برای فن بر پایه اتلاف هد استاتیکی در پراتلاف‌ترین شاخه

جدول (۱): سرعت مجاز هوا در شاخه اصلی کانال‌های انتقال هوا

| سرعت (fpm) | | کاربری |
|----------------|-----------|--------------------------------|
| کانال برگشت | کانال رفت | |
| ۸۰۰ | ۱۰۰۰ | مسکونی |
| ۱۳۰۰ | ۱۵۰۰ | اتاق هتل/بیمارستان |
| ۱۵۰۰ | ۲۰۰۰ | کتابخانه |
| ۱۱۰۰ | ۱۳۰۰ | سالن نمایش/سینما |
| ۱۵۰۰ | ۲۰۰۰ | دفتر اداری، بانک، فروشگاه لوکس |
| ۱۵۰۰ | ۲۰۰۰ | فروشگاه متوسط |

در حال حاضر، این گام‌ها اغلب با کمک نرم‌افزارهای تعیین اندازه کانال هوا انجام می‌شود. مشکل عمده در استفاده از چنین نرم‌افزارهایی در این است که تعیین اندازه تک تک شاخه‌ها در نرم‌افزار باید به طور جداگانه انجام شود و در صورت تغییر شرایط از قبیل عوض کردن سرعت انتخاب شده برای جریان هوا در کانال اصلی و یا تغییر در دبی هوا در هر یک از شاخه‌ها، لازم است که همه محاسبات از ابتدا تکرار شوند. برای رفع این مشکل، در مقاله حاضر یک شیوه جایگزین از طریق برنامه‌نویسی در نرم‌افزار EES پیشنهاد می‌شود. در این روش، کافی است یک بار، شاخه‌های کانال انتقال هوا به نرم‌افزار معرفی شوند. در ادامه، با تغییر شرایط، تنها لازم است برنامه را دوباره اجرا کرد.

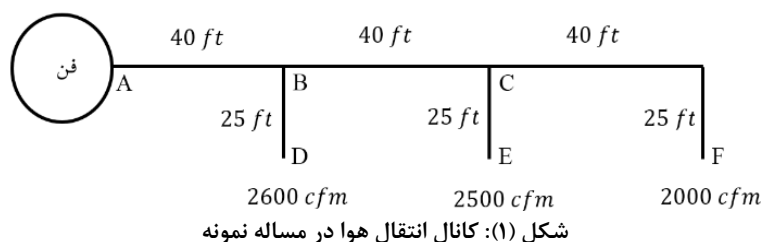
حل یک مساله نمونه به روش مرسوم

در شکل (۱) کانال انتقال هوا برای سیستم تهویه مطبوع یک دفتر اداری رسم شده است. در این جا، ارتفاع مجاز سقف کاذب 16 in و اتلاف هد استاتیکی هر یک از دریچه‌ها 0.4 inwg می‌باشد. به منظور تعیین اندازه شاخه‌های مختلف و همچنین هد استاتیکی لازم برای فن، گام‌های ذکر شده در بخش قبل باید به صورت زیر انجام شود.

ابتدا، با توجه به جدول ۱، مقدار حداکثر سرعت در شاخه اصلی در دفاتر اداری برابر با 2000 fpm به دست می‌آید. از طرف دیگر، دبی کلی جریان هوا در این کانال (شاخه AB) برابر می‌شود با:

$$2600 + 2500 + 2000 = 7100\text{ cfm}$$

(۱)



در ادامه، با توجه به سرعت مجاز و دبی هوای عبوری از آن و با مراجعه به نرم افزارهای تعیین اندازه کانال هوا و نظر به این که ارتفاع مجاز سقف کاذب 16 in اعلام شده است، اندازه ضلع دیگر کانال $35/5 \text{ in}$ به دست خواهد آمد. البته چون ابعاد کانال باید زوج باشد، ضلع کانال برابر با 36 in در نظر گرفته می‌شود. همچنین، اتلاف هد استاتیکی در شاخه اصلی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$h_{f,100} = 0/183 \text{ inwg} \quad (2)$$

اکنون، با توجه به دبی هوا در هر شاخه و مقدار اتلاف هد استاتیکی بالا، عرض کانال مستطیلی در شاخه‌های باقیمانده از کانال انتقال هوا تعیین می‌شود. نتایج در جدول (۲) گردآوری شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع این شاخه‌ها برابر با ارتفاع شاخه اصلی در نظر گرفته می‌شود.

در پایان، هد استاتیکی لازم برای فن بر پایه اتلاف هد استاتیکی در پراتلاف‌ترین شاخه (شاخه AF) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$h_{fan} = 1/3 \times \left(0/183 \times \frac{40 + 40 + 40 + 25}{100} + 0/04 \right) = 0/397 \text{ inwg} \quad (3)$$

در اینجا فرض شده است که اتصالات در حدود ۳۰٪ مقاومت اضافی در کانال ایجاد می‌کنند.

جدول (۲): مشخصات شاخه‌های کانال انتقال هوا در مثال نمونه

| ابعاد کانال (in × in) | سرعت (fpm) | دبی (cfm) | طول شاخه (ft) | $h_{f,100}$ (inwg) | شاخه |
|--------------------------|---------------|--------------|------------------|-----------------------|------|
| 16 × 16 | 1526/3 | 2600 | 25 | 0/183 | BD |
| 26 × 16 | 1742/6 | 4500 | 40 | 0/183 | BC |
| 16 × 16 | 1511/9 | 2500 | 25 | 0/183 | CE |
| 14 × 16 | 1432/1 | 2000 | 65 | 0/183 | CF |

نرم‌افزار EES

نرم‌افزار EES یک برنامه رایانه‌ای است که به منظور حل عددی معادلات جبری و دیفرانسیلی مربوط به سامانه‌های ترمودینامیکی طراحی شده است. این نرم‌افزار قادر است که هماهنگی ابعادی و واحدی در معادلات را ارزیابی کند؛ تا خطاهای احتمالی در حین برنامه‌نویسی مشخص شوند. علاوه بر این، EES به خواص ترمودینامیکی بسیاری از سیالات دسترسی دارد. این نرم‌افزار همچنین دارای امکانات ویژه‌ای جهت انجام مطالعه پارامتری و رسم نمودار می‌باشد. ترکیب قابلیت‌های این نرم‌افزار در حل معادلات به همراه دسترسی آسان به خواص ترمودینامیکی و عدم نیاز به روش‌های برنامه‌نویسی پیشرفته، EES را به عنوان ابزاری مناسب در انجام تحلیل‌های ترمودینامیکی در کاربردهای پژوهشی و صنعتی مطرح ساخته است. جزئیات بیشتر در مورد این نرم‌افزار را می‌توان در مراجع [۱۴] و [۱۵] مشاهده کرد. در استفاده از EES نکات زیر باید مدنظر قرار گیرند:

(۱) ترتیب معادلات در آن مهم نیست.

(۲) دستگاه واحدهای متریک و انگلیسی در آن قابل استفاده هستند.

(۳) از توضیحات آورده شده میان علامت‌های {} و " " صرفنظر می‌شود.

(۴) تا ۳۰ کاراکتر می‌تواند برای نام یک متغیر استفاده شود.



(۵) با بهره‌گیری از علامت z می‌توان در هر سطر، تعداد زیادی معادله نوشت.

(۶) هر خط می‌تواند تا ۲۵۵ کاراکتر داشته باشد.

(۷) زیرنویس به صورت زیرخط معرفی می‌شود؛ به عنوان نمونه، P_1 معرف P_1 است.

شیوه جایگزین برای طراحی کانال در نرم افزار EES

شیوه پیشنهادی در این مقاله بر پایه رابطه (۴) استوار است؛ که البته نرم‌افزارهای تعیین اندازه کانال‌های انتقال هوا نیز بر مبنای آن نوشته شده‌اند. این رابطه، اتلاف هد استاتیکی در طول کانال‌های گرد را بر حسب سرعت هوا، قطر کانال و زبری سطح داخلی آنها برای جریان هوا در سطح دریا و با دمای 70°F ارائه می‌کند:

$$h_f = 0.03 \varepsilon \frac{L}{d^{1/22}} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1/82} \quad (4)$$

در این رابطه، h_f اتلاف هد استاتیکی بر حسب $inwg$ ، ε ضریب زبری سطح داخلی کانال (برای فولاد گالوانیزه: $\varepsilon = 0.00015$)، L طول کانال بر حسب ft ، d قطر داخلی کانال بر حسب in و V سرعت هوا بر حسب fpm می‌باشند.

لازم به ذکر است که با تعریف قطر معادل به صورت زیر، می‌توان رابطه (۳) را برای کانال‌هایی با مقطع مستطیلی نیز به

کار برد:

$$d = 1/3 \frac{(a \times b)^{0.625}}{(a + b)^{0.25}} \quad (5)$$

باید توجه داشت که در هر شاخه از کانال‌های انتقال هوا، رابطه زیر میان سرعت و دبی جریان برقرار است.

$$\dot{V} = V \frac{\pi d^2}{4} \times \left[\frac{1}{144} \right] \quad (6)$$

در اینجا با بهره‌گیری از قابلیت حل همزمان معادلات در نرم‌افزار EES می‌توان تک‌تک شاخه‌های یک کانال انتقال هوا را اندازه‌گذاری نمود. همچنین، اتلاف هد استاتیکی در کانال را به دست آورد؛ تا انتخاب فن مناسب امکان‌پذیر شود. علاوه بر این، می‌توان سطح ورق مصرفی در کانال انتقال هوا را تعیین کرد. در این راستا، برای یک کانال مستطیلی انجام گام‌های زیر لازم است:

(۱) ورود دبی هوا، سرعت مجاز جریان هوا، طول و ارتفاع کانال در شاخه اصلی

(۲) تعیین اتلاف هد استاتیکی و عرض کانال در شاخه اصلی از طریق حل همزمان روابط (۴) تا (۶)

(۳) تعیین اتلاف هد استاتیکی به ازای 100 ft از شاخه اصلی (که در روش اصطکاک یکسان، برای سرتاسر کانال هوا برقرار خواهد بود).

(۴) ورود دبی هوا، طول و ارتفاع کانال در شاخه بعدی

(۵) محاسبه اتلاف هد استاتیکی در آن شاخه بر مبنای طول شاخه و اتلاف هد محاسبه شده در گام ۳

(۶) تعیین سرعت جریان هوا و عرض کانال در آن شاخه از طریق حل همزمان روابط (۱) تا (۳)

(۷) تحلیل سایر شاخه‌های کانال انتقال هوا از طریق تکرار گام‌های ۴ تا ۶ برای تک‌تک آن‌ها

(۸) محاسبه هد استاتیکی لازم برای فن بر پایه اتلاف هد استاتیکی در پراتلاف‌ترین شاخه

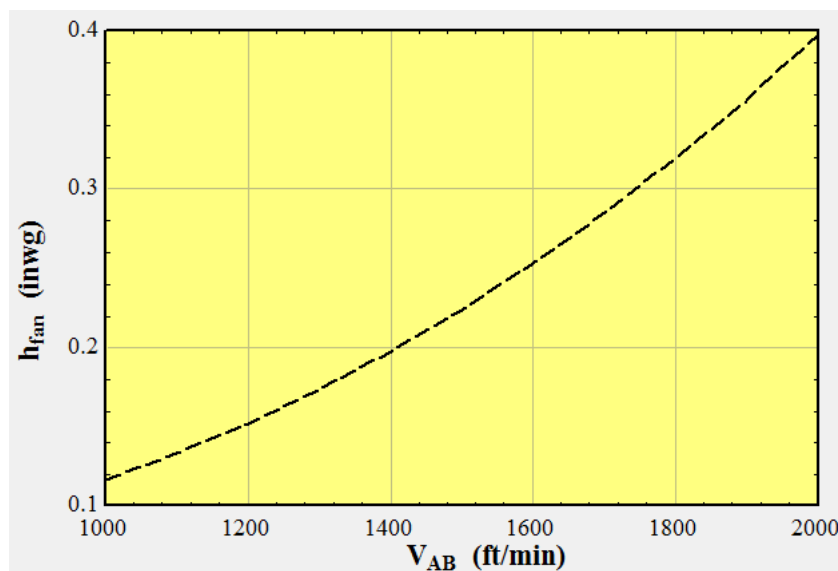
(۹) محاسبه سطح ورق مصرفی با توجه به ابعاد مشخص شده برای شاخه‌های مختلف کانال انتقال هوا

مراحل ذکر شده برای کانالی که در بخش ۲ بررسی شد، در نرم‌افزار EES طی شده است و نتایج آن در جدول (۳) آمده است. همانگونه که پیشتر نیز بیان شد، مزیت مهم شیوه پیشنهادی در این است که در صورت تغییر شرایط، تنها لازم است که دوباره برنامه اجرا شود که امکان مطالعه پارامتری را فراهم می‌آورد. با توجه به این قابلیت، در شکل (۲) اثر سرعت جریان هوا در کانال اصلی بر هد استاتیکی لازم برای فن مطالعه شده است. قابل مشاهده است که با افزایش سرعت، هد استاتیکی لازم برای فن بیشتر می‌شود.



جدول (۳): نتایج مساله نمونه در نرم‌افزار EES

| | | | |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| $A_{AB} (ft^2)$ | $A_{BC} (ft^2)$ | $A_{BD} (ft^2)$ | $A_{CE} (ft^2)$ |
| ۳/۵۵ | ۲/۵۲۳ | ۱/۶۷۳ | ۱/۶۲۴ |
| $A_{CF} (ft^2)$ | $b_{AB} (in)$ | $b_{BC} (in)$ | $b_{BD} (in)$ |
| ۱/۳۷۴ | ۳۵/۳۷ | ۲۴/۴۶ | ۱۶/۰۴ |
| $b_{CE} (in)$ | $b_{CF} (in)$ | cfm_{AB} | cfm_{BC} |
| ۱۵/۵۸ | ۱۳/۲۱ | ۷۱۰۰ | ۴۵۰۰ |
| cfm_{BD} | cfm_{CE} | cfm_{CF} | D_{AB} |
| ۲۶۰۰ | ۲۵۰۰ | ۲۰۰۰ | ۲۵/۵۱ |
| $D_{BC} (in)$ | $D_{BD} (in)$ | $D_{CE} (in)$ | $D_{CF} (in)$ |
| ۲۱/۵۱ | ۱۷/۵۱ | ۱۷/۲۶ | ۱۵/۸۷ |
| $h_{f,100} (inw)$ | $h_{f,AB} (inw)$ | $h_{f,BC} (inw)$ | $h_{f,BD} (inw)$ |
| ۰/۱۸۳۲ | ۰/۰۷۳۲۹ | ۰/۰۷۳۲۹ | ۰/۰۴۵۸۱ |
| $h_{f,CE} (inw)$ | $h_{f,CF} (inw)$ | $h_{fan} (inw)$ | $V_{AB} (fpm)$ |
| ۰/۰۴۵۸۱ | ۰/۱۱۹۱ | ۰/۳۹۷۴ | ۲۰۰۰ |
| $V_{BC} (fpm)$ | $V_{BD} (fpm)$ | $V_{CE} (fpm)$ | $V_{CF} (fpm)$ |
| ۱۷۸۴ | ۱۵۵۴ | ۱۵۳۹ | ۱۴۵۵ |



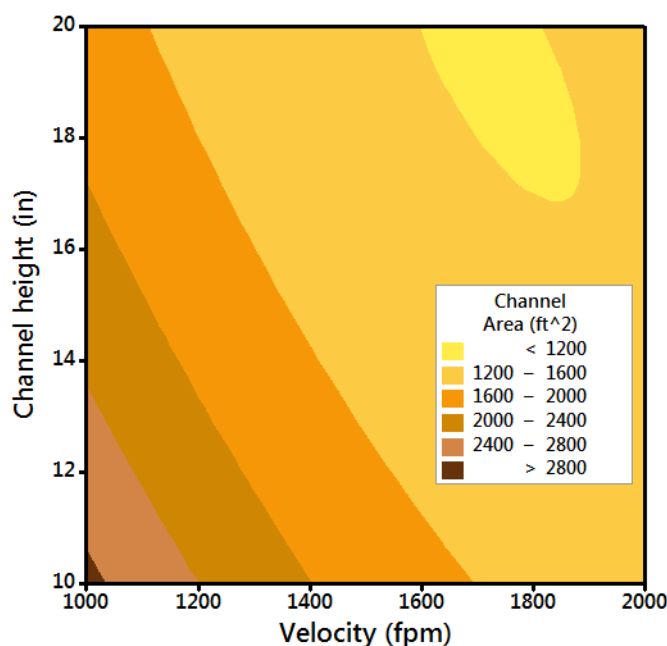
شکل (۲): اثر سرعت جریان هوا در کانال اصلی بر هد استاتیکی لازم برای فن

سطح ورق مورد نیاز برای کانال انتقال هوا یکی از متغیرهای مهم در طراحی آنها به شمار می‌رود. این به آن علت است که با افزایش سطح ورق، هزینه کانال کشی بیشتر می‌شود. علاوه بر این، اتلاف حرارت از کانال با سطح آن متناسب است. از این رو، در ادامه، اثر سرعت جریان هوا در شاخه اصلی و همچنین، ارتفاع کانال بر مساحت ورق مورد نیاز برای کانال کشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور، در این جا روش سطح پاسخ به کار گرفته می‌شود. جزئیات این روش در مرجع [۱۶] آورده شده است. جدول طراحی آزمایش در این روش در جدول (۴) آمده است که بر مبنای روش ترکیب مرکزی می‌باشد. نتایج در شکل (۳) به صورت وابستگی مقدار ورق مصرفی در کانال کشی به سرعت جریان هوا در شاخه اصلی و ارتفاع کانال آورده شده است. مشخص است که با افزایش سرعت جریان هوا در شاخه اصلی و همچنین، ارتفاع کانال، مقدار ورق مصرفی در کانال کشی کاهش می‌یابد. بر پایه روش سطح پاسخ، سرعت بهینه جریان برابر با ۱۷۲۷/۲۷ فوت بر دقیقه و ارتفاع بهینه کانال برابر با ۲۰ اینچ به دست می‌آید.



جدول (۴): جدول طراحی آزمایش در روش سطح پاسخ

| شماره آزمایش | سرعت در شاخه اصلی (fpm) | ارتفاع کانال (in) | مساحت کانال (ft ²) |
|--------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| ۱ | ۲۰۰۰ | ۱۰ | ۱۵۲۰ |
| ۲ | ۱۵۰۰ | ۱۵ | ۱۴۷۶ |
| ۳ | ۱۰۰۰ | ۲۰ | ۱۷۴۵ |
| ۴ | ۱۵۰۰ | ۲۰ | ۱۳۶۵ |
| ۵ | ۱۵۰۰ | ۱۵ | ۱۴۷۶ |
| ۶ | ۱۰۰۰ | ۱۵ | ۲۰۵۰ |
| ۷ | ۱۵۰۰ | ۱۵ | ۱۴۷۶ |
| ۸ | ۱۰۰۰ | ۱۰ | ۳۰۹۷ |
| ۹ | ۲۰۰۰ | ۲۰ | ۱۱۸۵ |
| ۱۰ | ۱۵۰۰ | ۱۵ | ۱۴۷۶ |
| ۱۱ | ۱۵۰۰ | ۱۰ | ۱۵۲۰ |
| ۱۲ | ۲۰۰۰ | ۱۵ | ۱۲۱۱ |
| ۱۳ | ۱۵۰۰ | ۱۵ | ۱۴۷۶ |



شکل (۳): وابستگی مقدار ورق مصرفی در کانال کشی به سرعت جریان هوا در شاخه اصلی و ارتفاع کانال

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، یک شیوه جایگزین برای طراحی کانال‌های انتقال هوا از طریق برنامه‌نویسی در نرم‌افزار EES پیشنهاد شد. در روش پیشنهادی کافی است یک بار، شاخه‌های کانال انتقال هوا به نرم‌افزار معرفی شوند. در ادامه، با تغییر شرایط، تنها لازم است برنامه را دوباره اجرا کرد. به منظور نمایش برتری این روش، از آن برای طراحی یک کانال نمونه استفاده شد. در ادامه، اثر سرعت جریان هوا در کانال اصلی بر هد استاتیکی لازم برای فن مطالعه شد. مشخص گردید که با افزایش سرعت، هد استاتیکی لازم برای فن بیشتر می‌شود. همچنین با استفاده از روش سطح پاسخ، وابستگی مقدار ورق مصرفی در کانال کشی به سرعت جریان هوا در شاخه اصلی و ارتفاع کانال بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت جریان هوا در شاخه اصلی و همچنین، ارتفاع کانال، مقدار ورق مصرفی در کانال کشی کاهش می‌یابد. به منظور معرفی شیوه پیشنهادی، در این مقاله تنها



یک کانال انتقال هوای کوچک مورد بررسی قرار گرفت. با این وجود، این روش به آسانی قابل استفاده در کانال‌های بزرگتر خواهد بود.

مراجع

- [1] Li, A., Liu, Z., Zhu, X., Liu, Y., Wang, Q., (2010), The Effect of Air-conditioning Parameters and Deposition Dust on Microbial Growth in Supply Air Ducts, *Building and Environment* 42, pp 449–454.
- [2] Lu, H., Lu, L., (2016), CFD Investigation on Particle Deposition in Aligned and Staggered Ribbed Duct Air Flows, *Applied Thermal Engineering* 93, pp. 697–706.
- [3] Lu, H., Lu, L., Jiang, Y., (2016), Numerical Simulation of Particle Deposition in Duct Air Flows with Uniform, Expanding or Contracting Cross-section, *Energy and Buildings* 128, pp. 867–875.
- [4] Chen, H., Cai, W., Chen, C., (2016), Fan-independent Air Balancing Method Based on Computation Model of Air Duct Systems, *Building and Environment* 105, pp. 295–306.
- [5] Cui, C., Zhang, X., Cai, W., Jing, G., (2018), A Novel Online Air Balancing Method for the Ventilation Duct System via Distributed Cooperative Control, *Building and Environment* 146, pp. 177–189.
- [6] Przydrozny, E., Przydrozna, A., Szczesniak, S., (2018), Energy Efficient Setting of Supply Air Temperature in Dual-duct Dual-fan Ventilation Systems with Extract Air Circulation, *Thermal Science and Engineering Progress* 5, pp. 69–85.
- [7] Taheri, A., Khoshnevis, A.B., and Lakzian, E., (2020), The Effects of Wall Curvature and Adverse Pressure Gradient on Air Ducts in HVAC Systems Using Turbulent Entropy Generation Analysis, *International Journal of Refrigeration* 113, pp. 21–30.
- [8] Park, H., Bach, C.K., (2021), Performance Characterization of Air Mixing Devices for Square Ducts, *Applied Thermal Engineering* 199, 117495.
- [9] Xie, Z., Xiao, Y., Jiang, C., Ren, Z., Li, X., Yu, K., (2021), Numerical Research on Airflow-dust Migration Behavior and Optimal Forced Air Duct Installation Position in a Subway Tunnel during Drilling Operation, *Powder Technology* 388, pp 176–191.
- [10] Lee, C.S., Shayegan, Z., Haghghat, F., Zhong, L., Bahloul A., Huard, M., (2021), Experimental Evaluation of In-duct Electronic Air Cleaning Technologies for the Removal of Ketones, *Building and Environment* 196, 107782.
- [11] Nie, W., Guo, L., Liu, Q., Hua, Y., Xue, Q., Sun, N., (2022), Study on the Coupling Pollution Law of Dust and Gas and Determination of the Optimal Purification Position of Air Duct during Tunnel Excavation. *Powder Technology* 411, 117843.
- [12] Heidarshenas, B., Sina, N., El-Shafay, A.S., Saleem, S., and Sharifpur, M., (2022), The Effect of the Zigzag Arrangement of Lithium-ion Batteries inside the Air Duct of an Office Building for Heating and Evaluation of the Impact of the Number of Air Outlets in Different Seasons of the Year, *Journal of Energy Storage* 50, 104204.
- [13] Jafaryar, M., Majidi, H.S., Besam, A., Saad, H.A., Hussin, A.M., and Alawee, W.H., (2022), Heat Storage Modeling for Air Ventilation Usage Considering Freezing of Paraffin through a Sinusoidal Duct, *Journal of Energy Storage* 55, 105296.
- [14] Orosa, J.A., Oliveira, A.C., (2011), *Engineering Thermodynamics with EES: Concepts and Applications*, Lap Lambert Academic Publishing.
- [15] Klein, S., Nellis, G., (2012), *Thermodynamics*. Cambridge University Press.
- [16] Zahmatkesh, I., (2021), Optimization of Natural Convection in a Trapezoidal Enclosure Filled with a Bidisperse Porous Medium (BDPM) Using Response Surface Methodology (RSM), The 9th Fluid Dynamics Conference, Tehran.