

بررسی تجربی اثر انسداد مدل در اتاق آزمون تونل باد بر عملکرد آن

یکی از اهداف استفاده از تونل باد عمودی، آموزش سقوط آزاد چتربازان می‌باشد. با توجه به اینکه افراد در محوطه پرواز تونل باد شناور می‌باشند، در محوطه تونل باد ایجاد انسداد شده که بر عملکرد تونل باد تأثیر خواهد گذاشت. لذا برای طراحی این نوع تونل باد، شناخت این تأثیر و افت فشار ناشی از افراد شناور مهم می‌باشد. در این تحقیق تجربی، با استفاده از مدل‌های استوانه‌ای شکل، تأثیر ضریب انسداد در تونل بادی با ابعاد مقطع آزمون $1\text{ m} \times 1/2\text{ m}$ بررسی شده است. هنگامی که ضریب انسداد در تونل باد کمتر از $0/15$ می‌باشد، تأثیر زیادی بر عملکرد تونل باد به وجود نیامده و کاهش سرعت جریان هوا حدود 7% می‌باشد. با افزایش ضریب انسداد بیش از $0/2$ ، کاهش سرعت جریان هوا در اتاق آزمون بسیار شدید می‌شود. همچنین آرایش مدل‌ها نقش زیادی در افت فشار داشته که در این مقاله به آن اشاره شده است.

محمدعلی اردکانی^۱
دانشیار

واژه‌های راهنما: تونل باد مکنده، ضریب انسداد، افت فشار، مدل استوانه‌ای، ضریب انرژی

۱- مقدمه

هدف از استفاده از تونل باد، ایجاد جریان کنترل شده در اطراف مدل و بررسی تأثیر آن بر روی پارامترهای مختلف مدل می‌باشد. در طراحی تونل باد، افت فشار اجزای آن در بیشترین سرعت، محاسبه شده و بر مبنای این افت فشار و سرعت جریان هوا (دبی جریان هوا) فن انتخاب می‌شود. افت فشار تونل باد مدار باز شامل افت فشار در اتاق آرامش، نازل، اتاق آزمون، دیفیوزرها و انرژی خارج شده از تونل باد می‌باشد. بر همین مبنا ضریب انرژی تونل باد تعیین می‌شود، به عبارت دیگر هنگامی که تونل باد فاقد مدل است، ضریب انرژی تونل باد محاسبه می‌شود. با قرار گرفتن مدل در اتاق آزمون، افت فشار تونل باد افزایش یافته و در نتیجه سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد. افت فشار مدل، بستگی به دو پارامتر مهم نسبت انسداد (سطح مقطع مدل به سطح مقطع اتاق آزمون) و ضریب نیروی پسای مدل دارد [۱]. همچنین نحوه آرایش مدل در تونل باد نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. معمولاً در تونل بادهای افقی نسبت انسداد مدل به سطح مقطع اتاق آزمون حدود 10% تا حداکثر 20% در نظر گرفته می‌شود.

یکی از مشکلات مهم و ناشناخته در طراحی تونل باد عمودی جهت عملیات سقوط آزاد، مقدار افت فشار افراد شناور بوده و تأثیر آن بر عملکرد تونل باد می‌باشد. همچنین نحوه قرارگیری افراد در تونل باد نیز

^۱ دانشیار، پژوهشگر مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ardekani@irost.ir

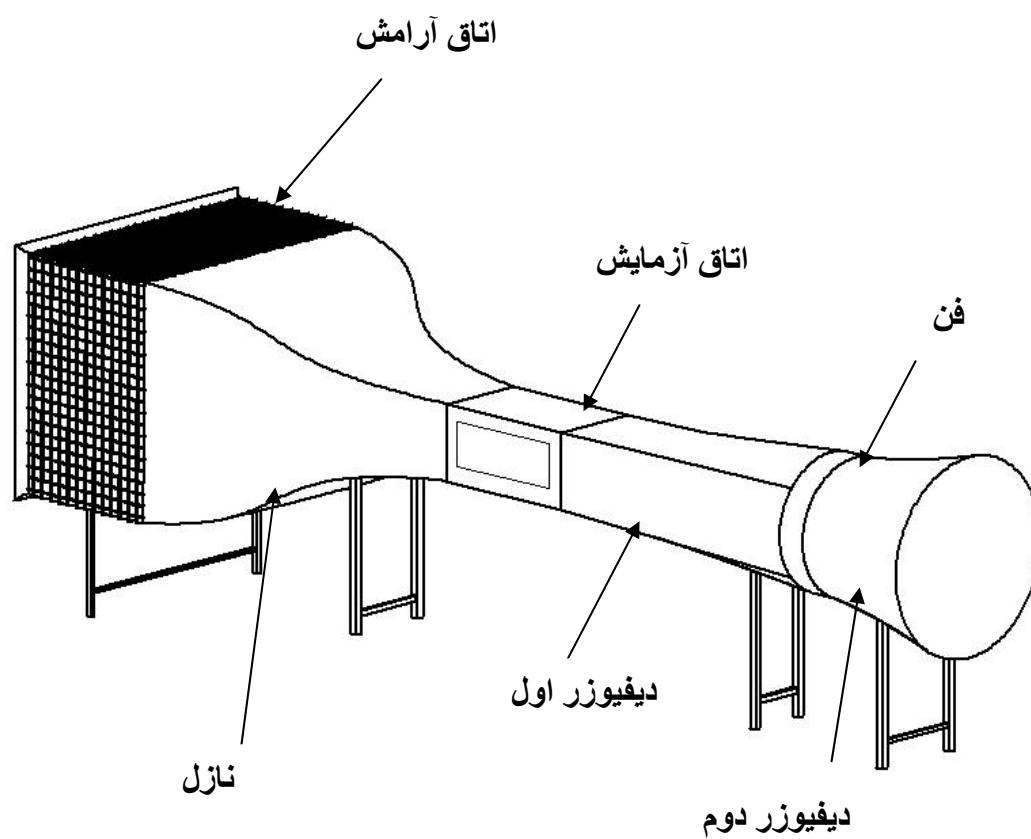
اهمیت داشته و بر عملکرد تونل باد تأثیر دارد. گاهی از مواقع امکان دارد که انسداد ایجاد شده افت فشار زیادی را به تونل باد تحمیل و در نتیجه سبب شود که فن‌ها در حالت واماندگی کار کرده و طرح نتواند دارای عملکرد مناسب بوده و شناوری افراد در تونل باد با مشکل ایجاد شود. بدین منظور برای طراحی تونل باد نیاز است، که اثر انسداد به خوبی بررسی شود. در این تحقیقات تجربی، تعداد ۱ تا ۴ عدد استوانه را درون اتاق آزمون تونل باد قرار داده و اثر آن را بر عملکرد تونل باد بررسی شده است. همچنین ترکیب آرایش استوانه‌ها نیز بررسی شده‌اند.

۲- روش آزمایش

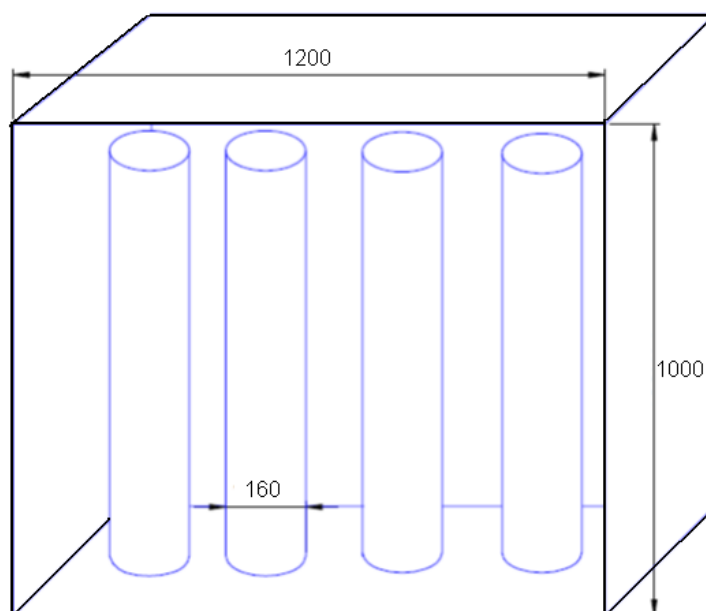
کلیه آزمایش‌ها در تونل باد دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است. شکل (الف) این تونل باد را به صورت مونتاز شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، تونل باد فوق از نوع مدار باز مکنده است که شامل دهانه ورودی به شکل ناقوس، اتاق آرامش، نازل، اتاق آزمون، دیفیوزر اول، فن و دیفیوزر دوم می‌باشد.

اتاق آرامش تونل باد دارای طول ۲ متر، ارتفاع ۳/۱۶ متر و عرض ۳/۸ متر می‌باشد. در داخل اتاق آرامش ۳ عدد توری با مش‌های ۲۰، ۲۰ و ۲۴ وجود دارد. همچنین در قسمت ورودی به اتاق آرامش لانه زنبوری قرار دارد. طول نازل ۴ متر بوده و نسبت ورودی به خروجی آن ۱۰ است. اتاق آزمون تونل باد فوق دارای طول ۲/۵ متر بوده، همچنین عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۱/۲ و ۱ متر می‌باشد. برای جلوگیری از اثر لایه مرزی و شناوری طولی است. اتاق آزمون با زاویه 5° بزرگ شده است. طول دیفیوزر اول ۷/۵ متر بوده، که ورودی آن اتاق آزمون و خروجی آن فن می‌باشد. قطر فن ۱/۸ متر و طول آن نیز ۲ متر بوده و در خروجی آن نیز یک دیفیوزر قرار دارد که طول این دیفیوزر ۲ متر و قطر خروجی آن نیز ۱/۹۱ متر است. با استفاده از دیفیوزر فوق سرعت جریان هوای خروجی از تونل باد را کاهش می‌دهیم، که این کاهش سبب می‌شود، انرژی خروجی از تونل باد کاهش یافته و ضریب انرژی تونل باد و در نتیجه سرعت تونل باد افزایش یابد. موتور فن تونل باد فوق دارای توان مصرفی ۱۱۰ kW بوده که با استفاده از فرکانس دستگاه کنترل دور، سرعت دورانی آن تنظیم می‌شود.

برای بررسی اثر انسداد بر افت فشار از استوانه‌هایی به قطر ۱۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۳۰ میلی‌متر استفاده شده است. این استوانه‌ها را به صورت تکی، دوتایی، سه‌تایی، چهارتایی در اتاق آزمون قرار داده و با اندازه‌گیری سرعت تونل باد و توان مصرفی آن، می‌توان افت فشار ناشی از مدل‌ها را بررسی نمود. همچنین استوانه‌ها را به صورت موازی، مربع، مستطیل و دوزنقه چیدمان نموده و افت فشار ناشی از مدل‌ها بررسی می‌شود. شکل (ب) نحوه قرارگیری استوانه‌ها در اتاق آزمون را نشان می‌دهد که به صورت چهارتایی می‌باشند. سرعت جریان هوا با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت اندازه‌گیری شده است. لوله استاتیکی پیتوت به فشارسنج الکترونیکی متصل بوده و خروجی فشارسنج از طریق کارت A/D به رایانه ارسال می‌شود. با استفاده از دستگاه کنترل دور، سرعت دورانی فن و در نتیجه سرعت جریان هوا را در اتاق آزمون تغییر داده و آزمایش انجام می‌شود.



شکل ۱ الف- تونل باد مکنده با مقطع آزمون $1 \times 1/2$ متر مربع



شکل ۱ ب- نحوه قرارگیری استوانه‌ها در اتاق آزمون

۳- محاسبات افت فشار تونل باد

همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، اجزای تونل باد شامل اتاق آرامش، نازل، اتاق آزمون و دیفیوزر می‌باشد. افت فشار در اتاق آرامش ناشی از توری و لانه زنبوری است. ضریب افت فشار ناشی از لانه زنبوری کم بوده و برابر 0.2 در نظر گرفته می‌شود. ضریب افت فشار ناشی از توری طبق رابطه (۱) به دست می‌آید [۲]:

$$K = 6(1 - \beta)\beta^{-5/3} \left(\frac{U_s d}{v} \right)^{-1/3} \quad (1)$$

در رابطه فوق v لزجت سینماتیکی،

β نسبت سطح باز به سطح کل توری است که طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\beta = \left(1 - \frac{d}{l} \right)^2 \quad (2)$$

در رابطه‌های فوق U_s سرعت در اتاق آرامش، d قطر سیم، l فاصله دو سیم توری از یکدیگر بوده و طبق این رابطه $l = 25.4 / \text{Mesh}$ تعریف می‌شود. معادله (۱) برای بازه $60 < U_s / \beta v < 600$ قابل استفاده می‌باشد.

ضریب افت فشار نازل طبق رابطه (۳) به دست می‌آید [۳] [۴]:

$$K = \frac{\lambda}{8} \cdot e \cdot f \quad (3)$$

λ ضریب افت در واحد طول بوده و مقادیر e و f مطابق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$e = 1 - \left(\frac{A_t}{A_s} \right)^2 \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{\sin(\alpha/2)} \quad (5)$$

A_s مساحت مقطع ورودی به نازل، A_t مساحت مقطع اتاق آزمون و α زاویه مخروط نازل است.

ضریب افت فشار اتاق آزمون طبق رابطه (۶) به دست می‌آید [۳]:

$$K = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \quad (6)$$

L طول اتاق آزمون و D قطر آن است. ضریب افت فشار در دیفیوزر ناشی از ترکیب افت فشار اصطکاکی و انبساطی می‌باشد و طبق رابطه (۷) به دست می‌آید [۴] [۵]:

$$K = \left[\frac{\lambda}{8 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + 0.6 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right] \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \right) \quad (7)$$

α زاویه دیفیوزر، D_1 قطر کوچک و D_2 قطر بزرگ دیفیوزر است. افت فشار هر یک از اجزای تونل باد طبق رابطه $\Delta p_i = k q_i$ به دست می‌آید که در رابطه فوق $q_i = \frac{1}{2} \rho U_i^2$ بوده و U_i سرعت جریان هوا در آن قسمت از تونل باد می‌باشد. با توجه به اینکه تونل باد از نوع مدار باز است، لذا فشار دینامیکی جریان هوای

خروجی از آن، برابر افت فشار ناشی از تخلیه جریان هوا است. با استفاده از روابط ارائه شده، در سرعت 50 m/s ، افت فشار ناشی از اجزای تونل باد فوق طبق جدول (۱) به دست می‌آید.

جدول ۱- افت فشار اجزای تونل باد در سرعت $U = 50 \text{ m/s}$

نام قسمت تونل باد	ضریب افت فشار (k_i)	ضریب افت فشار بر مبنای سرعت در اتاق آزمون (k_{it})	سرعت (m/s)	افت فشار (pas)	درصد افت (%)
۱ اتاق آرامش	۳/۳۲	۰/۰۳۳	۵	۴۳/۱	۱۲/۲
۲ نازل	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۵۰	۱۵/۸	۳/۴
۳ اتاق آزمون	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۵۰	۲۷/۵	۷/۱
۴ دیفیوزر اول	۰/۰۵۹	۰/۰۵۸	۵۰	۷۵/۳	۱۹/۴
۵ دیفیوزر دوم	۰/۰۱۷	۰/۰۰۳	۲۲	۴	۱
۴ تخلیه جریان هوا	۱	۰/۱۶۸	۲۰	۲۲۱	۵۶/۲
مجموع	-	۰/۲۹۹	-	۳۸۷	

مطابق جدول (۱) بیشترین افت فشار مربوط به تخلیه انرژی از تونل باد است که حدود $56/2\%$ می‌باشد. لذا ضعف طراحی، مقدار تخلیه جریان هوا به محیط است. افت فشار ناشی از دیفیوزر اول که پس از اتاق آزمون است حدود $19/4\%$ می‌باشد. همچنین در جدول فوق ضریب افت فشار بر مبنای سرعت در اتاق آزمون ارائه شده است. افت فشار طبق رابطه $\Delta p_i = k_{it} \cdot q_t$ محاسبه می‌شود. در رابطه فوق q_t فشار دینامیکی در اتاق آزمون می‌باشد. برای تبدیل ضریب افت فشار به ضریب افت فشار بر مبنای سرعت در اتاق آزمون، باید ضریب افت فشار را در $(A_i/A_t)^2$ ضرب نمود. مجموع افت فشار تونل باد برابر 387 پاسکال می‌باشد. این افت فشار را فن باید جبران نماید. با توجه به سطح مقطع فن که $2/5 \text{ m}^2$ می‌باشد، هنگامی که سرعت جریان در اتاق آزمون 50 m/s است، سرعت در مقطع فن حدود 24 m/s و در نتیجه فشار دینامیکی فن 303 پاسکال خواهد بود.

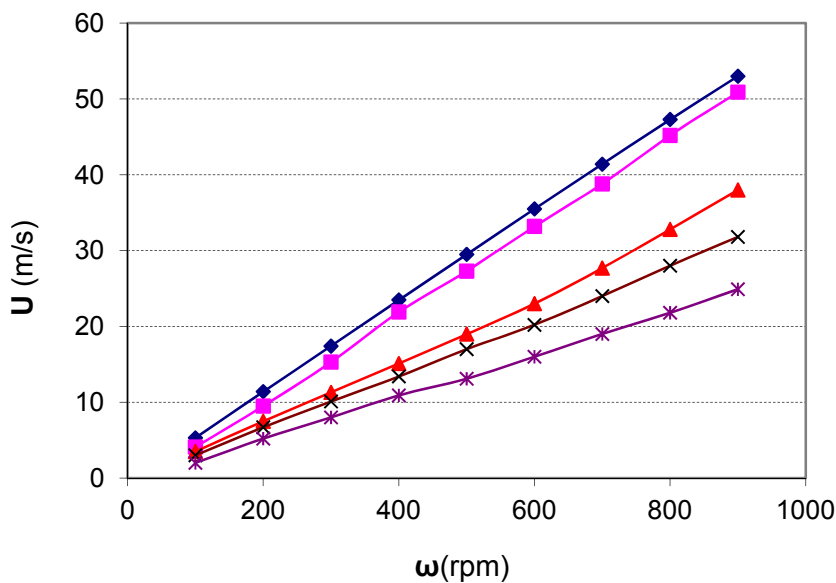
کیفیت یک تونل باد با ضریب انرژی آن سنجیده می‌شود. نسبت انرژی جنبشی جریان هوا در اتاق آزمون به توان خروجی فن را ضریب انرژی می‌نامند. ضریب انرژی طبق رابطه (۸) تعریف می‌شود [۳]:

$$E.R = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot A_t \cdot U_t^3}{\Delta P \cdot Q} = \frac{1}{\sum k_{it}} \quad (8)$$

در رابطه فوق Δp افت فشار استاتیکی مورد نیاز تونل باد و Q دبی حجمی جریان هوا می‌باشند. با توجه به مجموع ضریب افت فشار در رابطه (۸)، ضریب انرژی تونل باد برابر $3/34$ خواهد بود.

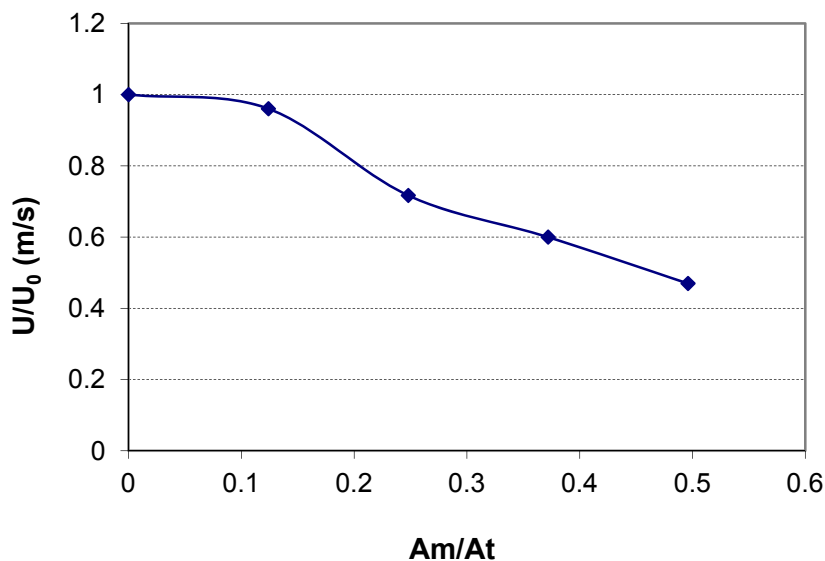
۴- نتایج آزمایش

به منظور بررسی اثر انسداد مدل بر روی عملکرد تونل باد، مدل‌های استوانه‌ای را در تونل باد قرار داده و عملکرد تونل باد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. مدل‌های استوانه‌ای به صورت تکی، دوتایی، سه تایی و چهارتایی در اتاق آزمون قرار گرفته و تأثیر آن بر روی افت فشار تونل باد مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به سطح مدل استوانه‌ای و سطح مقطع اتاق آزمون، ضریب انسداد مدل فوق $\frac{A_m}{A_t}$ برابر $0/124$ می‌باشد. هنگامی که دو عدد مدل استوانه‌ای به صورت موازی در اتاق آزمون تونل باد قرار می‌گیرد، ضریب انسداد مدل‌های فوق برابر $0/248$ ، برای سه عدد مدل استوانه‌ای موازی ضریب انسداد $0/372$ ، برای چهار عدد مدل استوانه‌ای موازی ضریب انسداد $0/496$ خواهد بود. لازم به ذکر است که مقدار ضریب نیروی پسا برای استوانه در محدوده عدد رینولدز $10^4 \times 1$ تا $10^5 \times 1$ برابر $1/2$ می‌باشد. شکل (۲) منحنی تغییرات سرعت جریان هوا در اتاق آزمون را بر حسب سرعت دورانی فن، برای حالت‌های مختلف، نشان می‌دهد. رابطه سرعت جریان هوا و سرعت دورانی فن به صورت خطی می‌باشد که شیب خط آن بستگی به تعداد مدل و یا به عبارت دیگر ضریب انسداد دارد. شکل (۳) افت سرعت جریان هوا در اتاق آزمون بر حسب ضریب انسداد را نشان می‌دهد، همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، با افزایش ضریب انسداد، سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد. مطابق شکل فوق تأثیر ضریب انسداد تا حدود $0/15$ کم بوده ولی با افزایش آن بیشتر از مقدار فوق، افت سرعت جریان هوا در اتاق آزمون به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۲- منحنی تغییرات سرعت جریان هوا بر حسب سرعت دورانی فن هنگامی که مدل‌های استوانه‌ای در آن قرار گرفته

است. ♦ بدون مدل، ■ یک مدل، ▲ دو مدل، × سه مدل، * چهار مدل



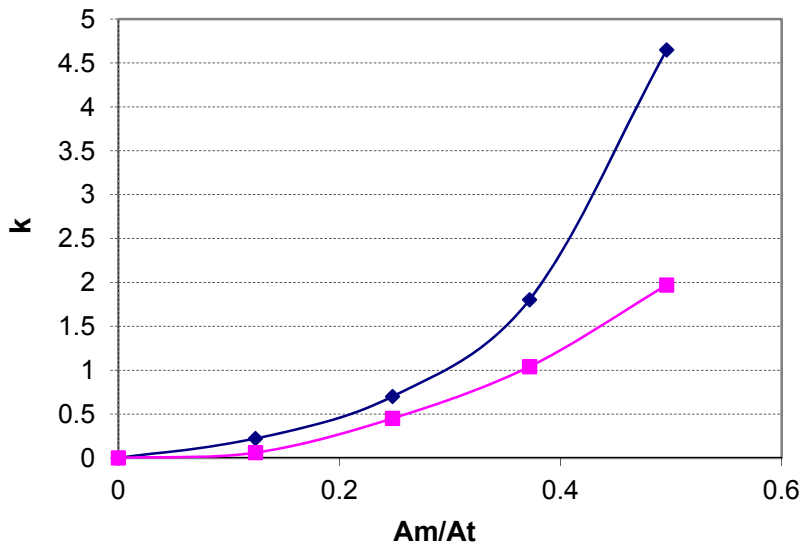
شکل ۳- افت سرعت جریان هوا در اتاق آزمون برحسب ضریب انسداد

افت فشار مدل در تونل باد بستگی به ۲ پارامتر دارد که اولین آن ضریب نیروی پسا مدل بوده و دومین آن ضریب نسبت انسداد $\frac{A_m}{A_t}$ است. ضریب افت فشار طبق رابطه زیر [۱]:

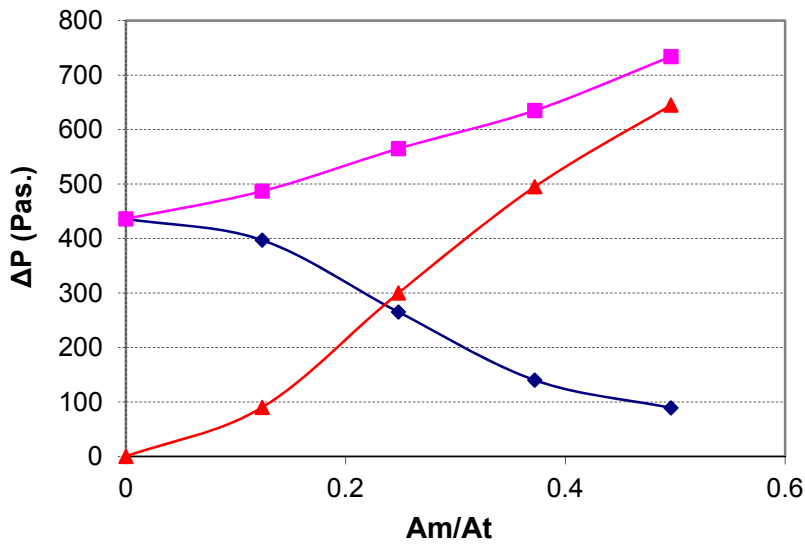
$$K = C_d \frac{A_m}{A_t} \frac{1}{\left(1 - \frac{A_m}{A_t}\right)^3} \quad (9)$$

بیان شده است. طبق رابطه فوق در صورتی که مقدار ضریب انسداد کم باشد، افت فشار ناچیز بوده و بستگی زیادی به C_d ندارد. با افزایش $\frac{A_m}{A_t}$ افت فشار نیز بستگی زیادی به C_d پیدا می‌کند.

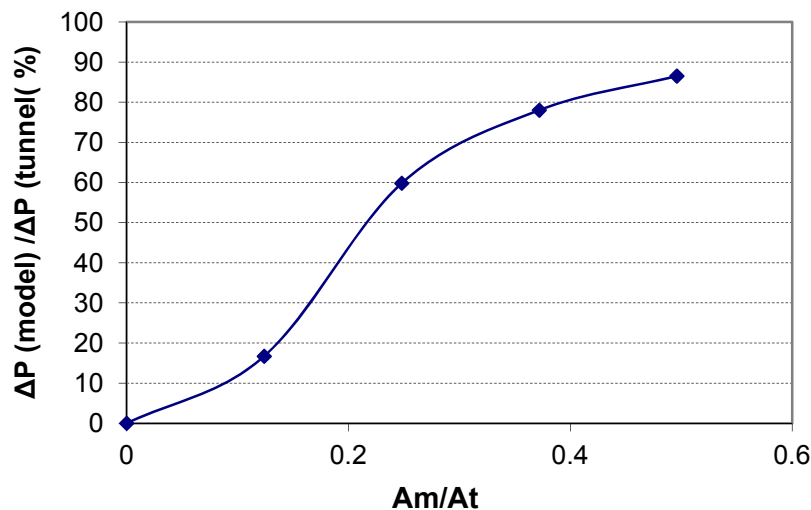
شکل (۴) ضریب افت فشار ناشی از مدل را برای حالت تئوری طبق رابطه (۹) و همچنین ضریب افت فشار که با استفاده از اندازه‌گیری به دست آمده است، را نشان می‌دهد. اختلاف اندازه‌گیری و تئوری برای حالت‌های بالاتر از ضریب انسداد ۰/۲۵ به شدت افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که منحنی‌های فوق را می‌توان با منحنی درجه سوم برازش نمود. لذا رابطه (۹) تا نسبت انسداد ۰/۲۵ قابل قبول می‌باشد. شکل (۵) افت فشار تونل باد که مجموع افت فشار ناشی از مدار تونل باد و مدل است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است با افزایش ضریب انسداد، افت فشار در تونل باد افزایش می‌یابد. این افزایش تقریباً به صورت خطی بوده به طوری که برای افزایش ضریب انسداد از ۰ تا حدود ۰/۵ افت فشار حدود ۳۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد. همچنین در شکل فوق افت فشار ناشی از مدل و مدار تونل باد نیز به طور جداگانه نشان داده شده است. با افزایش ضریب انسداد افت فشار ناشی از مدل به شدت افزایش یافته ولی افت فشار ناشی از مدار تونل باد کاهش می‌یابد. علت این کاهش هم کاملاً مشخص می‌باشد که ناشی از کاهش سرعت جریان هوا می‌باشد. شکل (۶) نیز درصد افت فشار ناشی از مدل به افت فشار کل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، این درصد افت فشار برای حالتی که ضریب انسداد به ۰/۵ می‌رسد حدود ۸۵٪ خواهد بود.



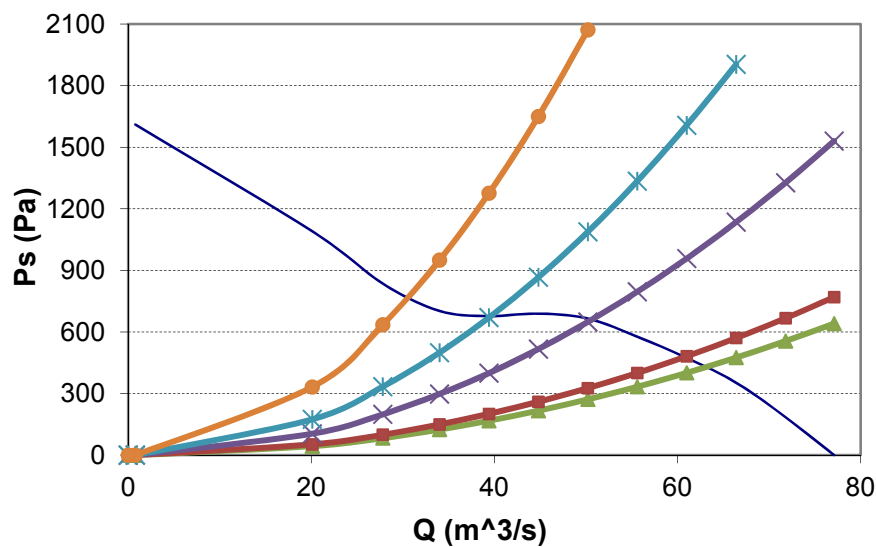
شکل ۴- ضریب افت فشار ناشی از مدل برای حالت‌های تئوری و واقعی، \blacklozenge تئوری، \blacksquare اندازه‌گیری



شکل ۵- مقدار افت ناشی از تونل باد و مدل، \blacklozenge تونل، \blacksquare مجموع مدل و تونل باد، \blacktriangle مدل



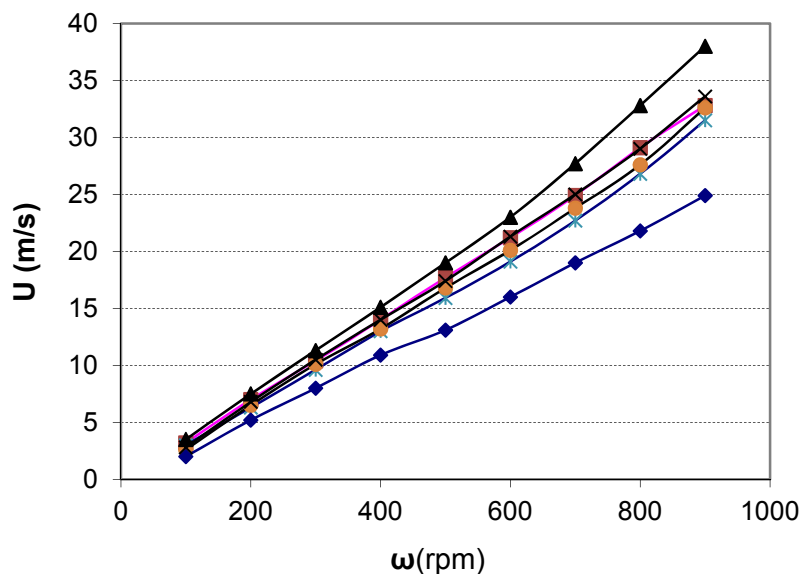
شکل ۶- درصد افت فشار ناشی از مدل به افت فشار کل



شکل ۷- منحنی عملکرد فن و منحنی مقاومت تونل باد، ▲ بدون مدل، ■ یک مدل، × دو مدل، * سه مدل، ● چهار مدل

شکل (۷) منحنی عملکرد فن مورد استفاده به همراه منحنی مقاومت تونل باد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷) می‌توان تشخیص داد که نقطه واماندگی فن در دبی $40 \text{ m}^3/\text{s}$ اتفاق می‌افتد. منحنی مقاومت تونل باد با افزایش دبی فن افزایش یافته و به صورت معادله درجه دوم می‌باشد. نقطه تلاقی منحنی عملکرد فن و منحنی مقاومت تونل باد، نقطه کارکرد تونل باد می‌باشد. مطابق شکل (۷) با افزایش تعداد مدل‌ها، منحنی مقاومت تونل باد دارای شیب بیشتری می‌شود. به منظور بررسی نحوه قرارگیری افراد آموزش گیرنده در محوطه پرواز، به طوری که در یک راستا قرار نداشته باشند، مدل‌های استوانه‌ای شکل را به صورت چیدمان‌های مختلف نظیر مستطیل شکل، مثلثی و دوزنقه‌ای در اتاق آزمون قرار داده و افت جریان هوا در

اتاق آزمون را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل (۸) منحنی تغییرات سرعت جریان هوا بر حسب دور فن را برای چیدمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، افت سرعت برای حالتی که چهار مدل در یک راستا می‌باشند، دارای بیشترین مقدار است. هنگامی که آرایش چهار مدل به صورت مستطیل، متوازی الاضلاع و یا دوزنقه می‌باشد، افت سرعت جریان هوا در اتاق آزمون، مشابه حالتی است که سه مدل به حالت موازی در اتاق آزمون قرار گرفته اند. با توجه به شکل (۸) می‌توان دریافت که کاهش سرعت جریان هوا در اتاق آزمون، برای حالتی که چیدمان به صورت مستطیل می‌باشد، کمتر از حالت‌های دوزنقه و متوازی الاضلاع می‌باشد. با توجه به شکل (۸) می‌توان نتیجه گرفت، در صورتیکه افراد شناور در تونل باد، در دو سطح مختلف تمرین کنند، افت فشار ناشی از شناوری آنها حدود ۷۵٪، افت فشاری است که افراد شناور در یک راستا تمرین می‌کنند. لذا تونل بادی که برای شناوری ۶ نفر طراحی شده است، می‌توان ظرفیت آن را به ۸ نفر افزایش داد، مشروط بر آنکه افراد شناور در سطوح مختلف پرواز کنند.



شکل ۸- منحنی تغییرات سرعت جریان هوا بر حسب دور فن برای مقایسه چیدمان‌های مختلف مدل، ▲ دو مدل موازی با آرایش عمود بر جریان، × سه مدل موازی با آرایش عمود بر جریان، ■ چهار مدل با آرایش مستطیل، * چهار مدل با آرایش متوازی الاضلاع، ● چهار مدل با آرایش دوزنقه، ◆ چهار مدل موازی با آرایش عمود بر جریان

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیقات، مشخص نمودن افت فشار ناشی از انسداد در اتاق آزمون می‌باشد، که با استفاده از نتایج آن بتوان افت فشار ناشی از افراد شناور در محوطه پرواز را تعیین کرده و تونل باد عمودی را که برای شبیه‌سازی عملیات سقوط آزاد است، طراحی نمود.

➤ افت فشار تونل باد را می‌توان ناشی از افت مدار تونل باد و مدل واقع در آن دانست. به منظور به‌دست آوردن ضریب انسداد بالاتر، نیاز است که طراحی تونل باد به‌گونه‌ای باشد که افت فشار و یا تلفات تونل باد

کم باشد. در تونل بادهای مدار باز، تلفات ناشی از تخلیه جریان هوا بسیار مهم بوده و باید آن را تا حد ممکن کاهش داد. بدین منظور نیاز است که سرعت جریان هوای خروجی از تونل باد را تا حد ممکن کاهش داد.

➤ برای ایجاد افت فشار و همچنین ایجاد انسداد در اتاق آزمون از استوانه های به قطر ۱۶ cm و طول ۹۳ cm استفاده شده است. هنگامی که ضریب انسداد تا ۰/۱۵ افزایش می یابد. تغییرات قابل ملاحظه ای در کاهش سرعت بوجود نمی آید. با افزایش ضریب انسداد به مقدار بیشتر از ۰/۲۰، کاهش سرعت و یا به عبارت دیگر تلفات تونل باد زیاد می شود.

➤ ضریب افت فشار ناشی از انسداد مدل در اتاق آزمون اندازه گیری شده و با رابطه (۹) که در مرجع [۱] ارائه شده، مقایسه گردید. هنگامی که ضریب انسداد کمتر از ۰/۲۵ تا ۰/۳ می باشد، هم خوانی خوبی وجود دارد.

➤ هنگامی که ضریب انسداد کمتر از ۰/۱۵ می باشد، درصد افت فشار ناشی از انسداد به افت فشار کل تونل باد کمتر از ۰/۲۰ بوده ولی هنگامی که این مقدار به ۰/۵ می رسد، افت فشار ناشی از انسداد حدود ۰/۸۵ می باشد. برای حالتی که ضریب انسداد حدود ۰/۲۵ می باشد، افت فشار ناشی از انسداد به افت فشار کل تونل باد حدود ۰/۶۰ است.

➤ نحوه قرارگیری مدل ها در تونل باد بسیار مهم است. هنگامی که چهار استوانه به شکل متوازی الاضلاع، مستطیل و یا دوزنقه در امتداد جریان قرار می گیرد. افت سرعت جریان هوا در تونل باد به مراتب کمتر از چهار استوانه کنار هم می باشد. در این حالت عملکرد چهار استوانه ای که واقع در یک راستا نمی باشند، مشابه سه استوانه ای است که در یک راستا واقع است. به عبارت دیگر ضریب انسداد و در نتیجه افت فشار ناشی از انسداد به ۰/۷۵ آن کاهش می یابد.

با توجه به بحث های انجام گرفته، برای تونل باد عمودی، که سطح مقطع محوطه پرواز آن 20 m^2 می باشد، ضریب انسدادی حدود ۰/۲ مناسب است. در این حالت سطح افراد شناور در محوطه پرواز حدود 4 m^2 خواهد بود. در صورتی که هر فرد دارای سطح مؤثر حدود 0.7 m^2 باشد، حدود ۶ نفر قابلیت تمرین در یک سطح را خواهند داشت. در صورتی که افراد در یک سطح نباشند، تعداد افراد شناور به حدود ۸ نفر خواهد رسید. افت فشار مدل در تونل باد بستگی به ۲ پارامتر دارد که اولین آن ضریب نیروی پسا مدل بوده و دومین آن ضریب نسبت انسداد $\frac{A_m}{A_t}$ است. ضریب افت فشار طبق رابطه زیر [۱]:

$$K = C_d \frac{A_m}{A_t} \frac{1}{\left(1 - \frac{A_m}{A_t}\right)^3} \quad (9)$$

بیان شده است. طبق رابطه فوق در صورتی که مقدار ضریب انسداد کم باشد، افت فشار ناچیز بوده و بستگی زیادی به C_d ندارد. با افزایش $\frac{A_m}{A_t}$ افت فشار نیز بستگی زیادی به C_d پیدا می کند.

مراجع

- [1] Gorlin, S. M., and Slezinger, I. I., "Wind Tunnel and Their Instrumentations", Israel Program for Scientific Tranlations, Jerusalem, U.S. Department of Commerce. Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information Springfield, (1966).
- [2] Wieghardt, K. E. G., "On the Resistance of Screens", Aeron. Quart, Vol. 4, pp 186-192. (1953).
- [۳] اردکانی، م. ع. "تونل باد با سرعت پایین (اصول طراحی و کاربرد)", انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، (۱۳۸۸).
- [4] Barlow, J. B., Rae, W. H., and Pope, A., "Low Speed Wind Tunnel Testing", A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc, New York, (1999).
- [5] Rae, W. H., and Pope, A., "Low Speed Wind Tunnel Testing", 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc, New York, (1984).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A_s : مساحت مقطع ورودی به نازل
 A_t : مساحت مقطع اتاق آزمون
 A_m : سطح مدل
 C_d : ضریب انرژی پسا
 D_1 : قطر کوچک دیفیوزر
 D_2 : قطر بزرگ دیفیوزر
 d : قطر سیم
 K : ضریب افت فشار ناشی
 L : طول اتاق آزمون
 l : فاصله دو سیم توری از یکدیگر
 q_t : فشار دینامیکی در اتاق آزمون
 Q : دبی حجمی جریان هوا
 U_s : سرعت در اتاق آرامش
 v : لزجت سینماتیکی
 β : نسبت سطح باز به سطح کل توری
 λ : ضریب افت فشار در واحد طول
 ΔP : افت فشار استاتیکی مورد نیاز تونل باد

Abstract

One of the aims of using vertical wind tunnel is skydiving. Since the persons are floating in the flight chamber of wind tunnel, the blockage of them will be affect on the performance of wind tunnel. So for designing of this type of wind tunnel, pressure drop due to the floating persons is important. In this experimental study, using a cylindrical model, the blockage effects have been investigated. When the blockage ratio in the test section is less than 0.15, flow rate reduce about 7% and there is no important effect on the performance of wind tunnel. With increasing blockage ratio in the test section up to 0.2, reducing the flow rate is very high. Also, the arrangement of models in the test section is very important on the pressure drop that we will discuss in this paper.