

## بررسی تجربی افت فشار توری محافظ در تونل باد عمودی

به منظور جلوگیری از سقوط افراد و یا مدل در تونل باد عمودی از توری محافظ در ورودی محوطه پرواز استفاده می‌شود. با توجه به اینکه سرعت جریان هوا در محوطه پرواز بالا می‌باشد، لذا افت فشار در توری محافظ نیز بالا خواهد بود. این افت فشار حدود ۲۵٪ افت فشار کل تونل باد می‌باشد. سیم‌های چندرشته‌ای در برابر خستگی مقاوم بوده، از این رو سیم‌های توری محافظ از نوع چندرشته‌ای می‌باشند. به منظور انتخاب مناسب توری و سیم‌های مربوط به آن، مدل توری محافظ ساخته شده و با استفاده از تونل باد، تحقیقات لازم انجام گرفت. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ضریب افت فشار توری محافظ بستگی شدیدی به نسبت سطح باز به سطح کل توری دارد. هنگامی که این نسبت ۰/۹۵ است، افت فشار توری محافظ ۰/۰۵ بوده، با کاهش این نسبت به مقدار ۰/۷۳ افت فشار توری محافظ به مقدار ۰/۳۱ افزایش می‌یابد. همچنین ضریب افت فشار توری با سیم چند رشته‌ای و توری با سیم مفتول نزدیک به یکدیگر می‌باشد. برای توری‌هایی که قطر سیم آنها کمتر از ۰/۶ میلی‌متر است، نتایج به دست آمده با نتایج سایر پژوهشگران هم‌خوانی دارد.

محمدعلی اردکانی<sup>۱</sup>

دانشیار

واژه‌های راهنما: توری محافظ، ضریب افت فشار، سیم چند رشته‌ای، توزیع سرعت جریان هوا، توزیع شدت اغتشاش

### ۱- مقدمه

تونل بادهای با سرعت کم را می‌توان به صورت‌های مختلف تقسیم‌بندی نمود. یکی از روش‌های تقسیم‌بندی، نوع عمودی و یا افقی تونل باد است. تونل باد عمودی برای آزمایش‌هایی نظیر اسپین هواپیما و یا آموزش سقوط آزاد چتربازان کاربرد دارد. به منظور جلوگیری از سقوط افراد و یا مدل در تونل باد عمودی، در دهانه خروجی نازل و یا به عبارت دیگر دهانه ورودی به محوطه پرواز، از توری محافظ استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در محوطه پرواز سرعت جریان هوا و در نتیجه فشار دینامیکی بیشترین مقدار خود را دارا است، از این رو افت فشار بسیار زیادی در این قسمت از تونل باد ایجاد می‌شود. این افت فشار احتمال دارد حدود ۲۰٪ الی ۳۰٪ افت فشار کل تونل باد باشد [۱]. از این رو باید سعی نمود که این افت فشار را کاهش داد. افت فشار توری طبق رابطه  $\Delta P = kq$  محاسبه می‌شود که  $q$  فشار دینامیکی می‌باشد و مقدار آن بستگی به سرعت جریان هوا و چگالی آن دارد.  $k$  ضریب افت فشار توری است که بستگی به اندازه سیم

توری و عدد مش (تعداد سوراخ توری در یک اینچ) آن دارد. بدیهی با کاهش مش توری، افت فشار ناشی از توری کاهش می‌یابد. با کاهش مش توری فاصله بین سیم‌های توری افزایش یافته به طوری که احتمال گیر کردن پای افراد در توری وجود دارد، از این رو نمی‌توان آن را بیش از حد معمول کوچک کرد. شکل سیم نیز تاثیر زیادی می‌تواند در کاهش نیروی پسا و در نتیجه کاهش افت فشار توری داشته باشد. بهترین شکل برای توری، شکلی است که ضریب پسا آن کم باشد، این شکل ایرفیل است، ولی با توجه به کاربرد آن در توری، احتمال تغییر زاویه حمله آن وجود داشته و در نتیجه نیروی پسا آن شدیداً افزایش می‌یابد، از این رو استفاده از آن مناسب نمی‌باشد. بنابراین نیاز است که سیم توری به شکل متقارن باشد، که تنها سطح مقطع متقارن دایره می‌باشد.

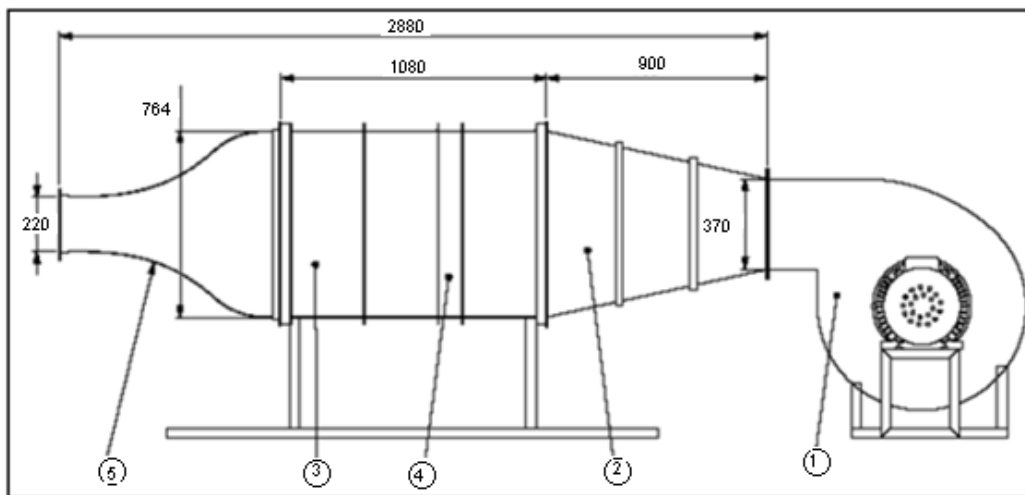
کاربرد دیگر توری، استفاده از آن در اتاق آرامش تونل باد می‌باشد [۲]. این نوع توری، توری متداول بوده و هدف از استفاده از آن کاهش شدت اغتشاش‌های محوری جریان هوا می‌باشد. مکانیزم کار این نوع توری، بدین صورت است که گردابه‌های موجود در جریان هوا که بزرگتر از سوراخ توری می‌باشند، را پس از عبور از توری، خرد نموده و به گردابه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کند [۳]. این گردابه‌های کوچک نیز در پایین دست توری‌ها از بین می‌روند. به همین دلیل عدد مش این نوع توری‌ها بزرگ بوده و حدود ۱۶ تا ۲۴ می‌باشد، این درحالی است که مش توری محافظ حدود ۰/۵ و یا کمتر از آن می‌باشد. در ارتباط با افت فشار و تاثیر توری متداول بر کاهش شدت اغتشاش‌ها، تحقیقات وسیعی در سال‌های گذشته توسط محققین مختلف انجام گرفته است. ویگ‌هارد و همکارش [۴] ضریب افت فشار توری متداول را به صورت تابعی از نسبت سطح باز به سطح کل توری و عدد رینولدز بیان نموده و روابط نیمه تجربی آن را مشخص کرد. همچنین دیول و همکارش [۵] روابط نیمه تجربی دیگری برای افت فشار توری متداول برحسب عدد رینولدز و نسبت سطح باز به سطح کل ارائه نمود. پرانتل [۶]، درآیدن و همکارش [۷] روابط نیمه تجربی را ارائه دادند که بیانگر کاهش شدت اغتشاش‌های سرعت جریان هوا توسط توری است. آنها نشان دادند که کاهش شدت اغتشاش‌ها نسبت معکوس با ضریب افت فشار توری دارد. اردکانی و همکارش [۸] جریان هوا در پایین دست سیم چندرشته‌ای را به صورت تجربی با استفاده از جریان سنج سیم داغ بررسی نمودند. برای اعداد رینولدز بالاتر از ۹۵۰۰، ضریب نیروی پسا سیم‌های چند رشته‌ای نزدیک به سیم‌های مفتول می‌باشد.

همانگونه که بیان شد، توری محافظ در مقایسه با توری متداول دارای عدد مش کوچک بوده (تعداد سوراخ‌های آن در یک اینچ کم است) و یا به عبارت دیگر نسبت مساحت باز توری به مساحت کل آن بزرگ است، لذا ضریب افت فشار آن می‌تواند بستگی به پارامترهای دیگر نظیر نوع سیم توری داشته باشد و روابط ارائه شده توسط پژوهشگران برای توری محافظ قابل استفاده نمی‌باشد. از سوی دیگر همان‌گونه که بیان شد، هدف از استفاده توری محافظ، ممانعت از سقوط افراد در تونل باد است، با توجه به اینکه نیروهای مختلف و متناوبی به توری وارد می‌شود، لذا سیم توری باید طوری باشد که مقاومت مناسبی را در برابر خستگی و یا نیروهای متناوبی که بر آن اعمال می‌شود داشته باشد. معمولاً سیم توری محافظ را از نوع سیم چند رشته‌ای انتخاب می‌کنند. سیم‌های چند رشته‌ای دارای انواع مختلف بوده و زبری روی سطح آنها بستگی به قطر الیاف آن و نحوه ساخت آن دارد.

در این مقاله، افت فشار توری محافظ اندازه‌گیری شده، با روابط ارائه شده برای توری متداول مقایسه می‌شوند. همچنین ضریب افت فشار توری محافظ برای انواع سیم‌های چند رشته‌ای به‌دست آمده و مقایسه می‌شوند. در خاتمه نیز توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در پایین‌دست سیم چند رشته‌ای با مفتول مقایسه و بررسی می‌شوند.

## ۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

تمامی آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد کوچک مطابق شکل (۱) انجام شده است. همان‌گونه که در شکل پایین نشان داده شده است، این تونل باد از نوع مدار باز دمنده است. فن مورد استفاده در این تونل باد از نوع سانتریفوژ بوده و توسط کنترل دور، سرعت دورانی آن و در نتیجه سرعت جریان هوا تنظیم می‌شود. به‌منظور به‌دست آوردن جریان یکنواخت و با شدت اغتشاش کم، این تونل باد دارای ۴ عدد توری، با عدد مش ۲۰ می‌باشد که ۲ عدد آن در دیفیوزر زاویه باز بین فن و اتاق آرامش قرار داشته و ۲ عدد نیز در اتاق آرامش قرار دارد. همچنین به‌منظور یکنواخت نمودن جریان هوا در اتاق آرامش، از لانه زنبوری استفاده شده است.



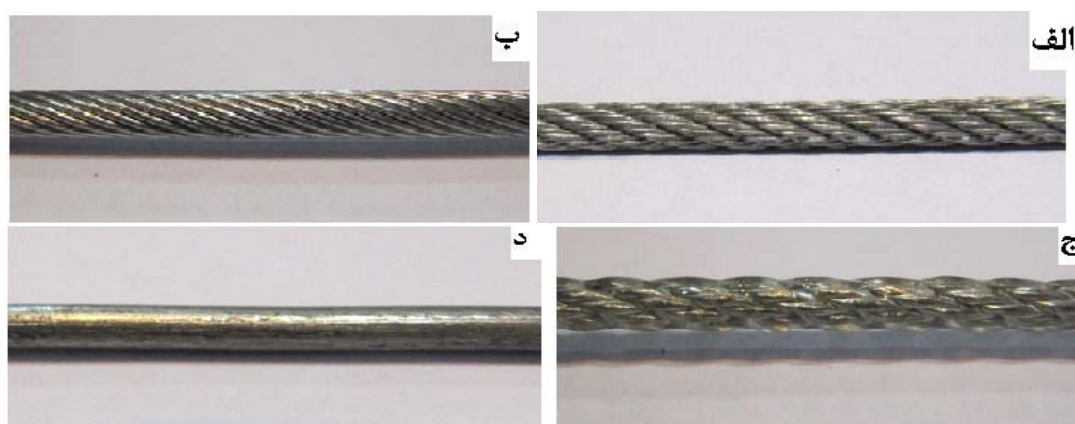
شکل ۱- تونل باد دمنده مورد استفاده در آزمایش

شامل اجزاء: ۱- فن سانتریفوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- نازل

مدل توری مطابق شکل (۲) در مرکز اتاق آزمون به طول ۰/۵ متر قرار می‌گیرد. ابعاد مدل توری فوق  $22\text{cm} \times 22\text{cm}$  بوده، به طوری که می‌توان نوع سیم و مش توری را عوض نمود. مطابق شکل (۲) در فاصله  $5\text{cm}$  بالادست و پایین‌دست مدل توری، فشار استاتیکی در چهار سمت اتاق آزمون که به یکدیگر متصل می‌باشند، اندازه‌گیری شده و در نتیجه افت فشار ناشی از توری به‌دست می‌آید.



شکل ۲ - تصویر از چگونگی نصب اتاق آزمایش، مدل توری و اوریفیس های فشار



شکل ۳ - تصویرهای سیم‌های توری محافظ (الف) بافت درشت، (ب) بافت ریز، (ج) بافت درشت با روکش پلاستیکی و (د) سیم مفتول

در این تحقیقات توری محافظ با سیم‌های ساده و انواع سیم‌های چند رشته‌ای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. سیم‌های مورد استفاده در توری محافظ دارای قطرهای  $0/6$  تا  $3/5$  میلی‌متر می‌باشند. با توجه به اینکه فاصله سیم‌های توری از یکدیگر  $5\text{cm}$  می‌باشند، لذا عدد مش توری محافظ  $0/51$  است. در شکل‌های (الف-۳) الی (د-۳) تصویر سیم‌های توری محافظ را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌های فوق نشان داده شده است، بافت سیم‌های چند رشته‌ای با یکدیگر متفاوت بوده و تعداد الیاف مورد استفاده در آن تغییر می‌کند. به منظور اندازه‌گیری افت فشار در امتداد توری از فشارسنج الکترونیکی از نوع Omega با دقت  $0/5 \pm \%$  (برای بازه ۱۰ تا ۱۲۵۰ پاسکال) استفاده شده است که داده‌های اندازه‌گیری شده، از طریق کارت A/D به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار مربوطه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان هوا و اغتشاش‌های آن در پایین دست سیم‌های توری محافظ، از جریان‌سنج سیم داغ [۹] ساخت شرکت فراسنجش صبا استفاده شده است. پراب جریان‌سنج سیم داغ از نوع یک بعدی بوده و سنسور آن از جنس تنگستن ۵ میکرونی می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم داغ، از طریق کارت A/D به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار Flowwave تجزیه و تحلیل می‌شوند. برای جابه‌جایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده می‌شود. این مکانیزم دارای دقت جابه‌جایی ۰/۱ میلی‌متر در سه بعد می‌باشد که توسط رایانه حرکت آن کنترل می‌شود. به منظور بررسی صحت نتایج این تحقیق نیاز است که عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده بررسی شود. منشأ عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم داغ در جدول (۱) ارایه شده است. در صورتی که مقدار سرعت اندازه‌گیری شده با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ، تابعی از متغیرهای مستقل باشد، متغیر خروجی  $y_i = f(x_i)$  خواهد بود. عدم قطعیت نسبی  $U(y_i)$  تابعی از انحراف معیار واریانس ورودی است و طبق رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$U(y_i) = \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \left( \frac{\Delta x_i}{k_i} \right) = \frac{1}{k_i} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i \quad (1)$$

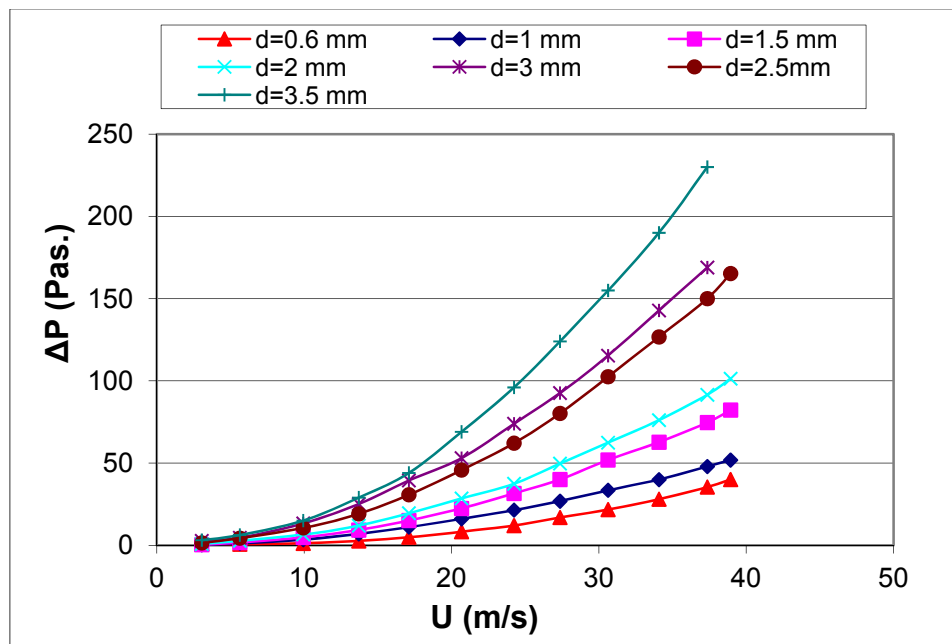
k فاکتور هم‌پوشان در منحنی توزیع نرمال گوس می‌باشد که برای سطح اطمینان ۹۵٪، مقدار آن ۲ در نظر گرفته شده است. مقادیر عدم قطعیت نسبی طبق جدول (۱) محاسبه و عدم قطعیت کلی طبق رابطه  $2 \cdot \sqrt{\sum \left( \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \Delta y_i \right)^2}$  مشخص می‌شود که با محاسبات انجام شده این عدم قطعیت حدود ۲٪ می‌باشد.

جدول ۱- منشأ خطا و عدم قطعیت

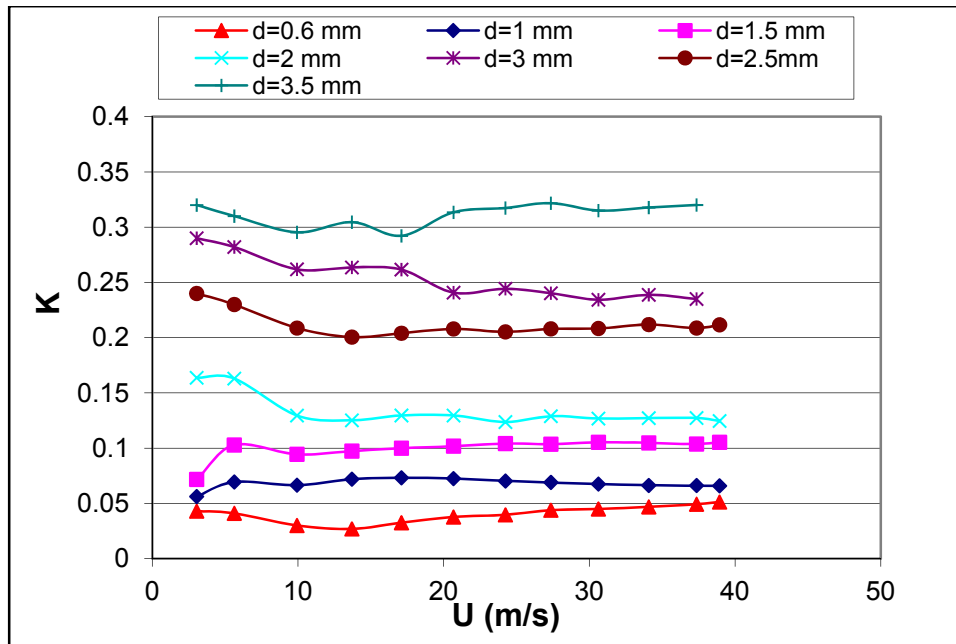
منشأ خطا	متغیر ورودی	مقدار نوعی	واریانس خروجی نسبی	مقدار نوعی	فاکتور دامنه خطا در منحنی گوس	عدم قطعیت نسبی
	$\Delta x_i$	$\Delta x_i$	$\frac{1}{U} \Delta y_i$	$\frac{1}{U} \Delta y_i$	k	$\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$
۱ اندازه‌گیری سرعت با استفاده از لوله پیتوت و فشارسنج الکترونیکی برای $U > 2.5m/s$	$\Delta U_{cal}$	٪/۴	$2\sqrt{(U - U_{cal})^2} = 2\sqrt{(\Delta U_{cal})^2}$	۰/۰۰۸	۲	۰/۰۰۴
۲ برازش منحنی با استفاده از روش چندجمله‌ای	$\Delta U_{fit}$	٪/۵	$2\sqrt{(U - U_{fit})^2} = 2\sqrt{(\Delta U_{fit})^2}$	۰/۰۱	۲	۰/۰۰۵
۳ کارت A/D	$E_{AD}$ n	۱۰ ولت ۱۲ بیت	$\frac{1}{U} \cdot \frac{E_{AD}}{2^n} \cdot \frac{\partial U}{\partial E}$	۰/۰۰۰۸	$\sqrt{3}$	۰/۰۰۰۵
۴ تغییرات دما	$\Delta T$	۱°	طبق مرجع [۱۲]	۰/۰۰۲	$\sqrt{3}$	۰/۰۰۱۲

### ۳- نتایج آزمایش

در ابتدا توری محافظ با سیم‌های ساده (مفتولی شکل) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با نتایج سایر پژوهشگران مقایسه می‌شود. شکل (۴) افت فشار ناشی از توری با سیم‌های ساده و قطرهای مختلف را بر حسب سرعت نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، منحنی افت فشار بر حسب سرعت جریان هوا به شکل درجه دوم بوده که مقدار آن بستگی به قطر سیم توری دارد. این افت فشار در توری حدود ۴۰ الی ۲۵۰ پاسکال برای سیم با قطرهای مختلف می‌باشد. به‌منظور بررسی بهتر افت فشار توری‌های مختلف، آن را به‌صورت رابطه  $k = \frac{\Delta p}{q}$  بی‌بعد نموده، که در این رابطه  $k$  ضریب افت فشار،  $\Delta p$  افت فشار استاتیکی ناشی از توری،  $q$  نیز فشار دینامیکی است که طبق رابطه  $\frac{1}{2}\rho U^2$  محاسبه می‌شود. شکل (۵)، این ضریب افت فشار را بر حسب سرعت جریان هوا نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، در سرعت‌های بالاتر از ۱۰ m/s این ضریب تقریباً ثابت می‌شود. شایان ذکر است، مطابق شکل (۴) افت فشار ناشی از توری برای سرعت‌های کمتر از ۱۰ m/s ناچیز بوده و با توجه به دقت فشارسنج در اندازه‌گیری فشارهای پایین، داده‌های اندازه‌گیری شده در سرعت‌های کمتر از ۱۰ m/s از عدم قطعیت بیشتری برخوردار است. این ضریب افت فشار بستگی به قطر سیم و یا به عبارت دیگر بستگی به سطح مقطع انسداد دارد.



شکل ۴- افت فشار ناشی از توری با سیم‌های ساده و با قطرهای مختلف بر حسب سرعت جریان هوا



شکل ۵- ضریب افت فشار توری با سیم‌های ساده و با قطرهای مختلف بر حسب سرعت جریان هوا

شکل (۶) ضریب افت فشار بر حسب قطر سیم در سرعت ۱۰ m/s را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، با افزایش قطر سیم توری، افت فشار افزایش می‌یابد. در این حالت ضریب انسداد افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر پارامتر  $\beta$  که بیان‌کننده نسبت سطح باز به سطح کل توری است و طبق رابطه  $\beta = (1 - \frac{d}{l})^2$  مشخص می‌شود، بیان‌کننده افت فشار می‌باشد. در رابطه فوق  $d$  قطر سیم و  $l$  فاصله دو سیم توری از یکدیگر بوده که طبق رابطه  $l = \frac{25/4}{Mesh}$  تعریف می‌شود. مش تعداد سوراخ‌های توری در یک اینچ می‌باشد. ضریب افت فشار توری بر حسب  $\beta$  توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. ویگ‌هارد و همکارش [۴] ضریب افت فشار توری را به صورت تابعی از عدد  $\beta$  و عدد رینولدز مطابق معادله نیمه تجربی زیر مشخص نمود.

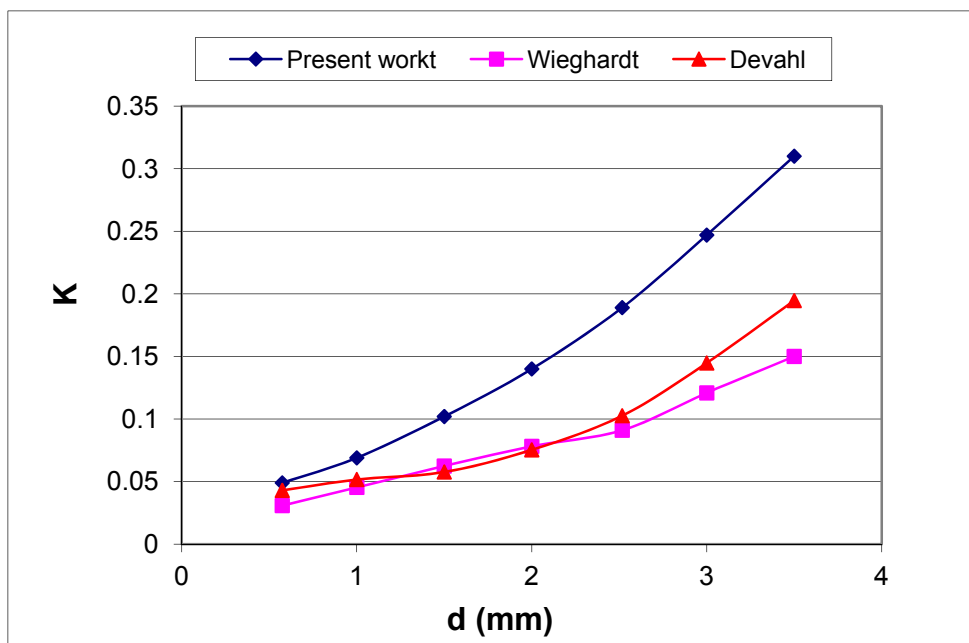
$$k = 6(1 - \beta)\beta^{\frac{5}{3}} \left(\frac{U_s d}{\nu}\right)^{-1} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $U_s$  سرعت جریان هوا حین عبور از توری و  $\nu$  لزجت دینامیکی است. معادله فوق برای  $60 < \frac{U_s d}{\nu} < 600$  قابل استفاده می‌باشد. روش دیگر محاسبه ضریب افت فشار توری، استفاده از رابطه‌ای است که توسط دیول و همکارش [۵] ارائه شده است.

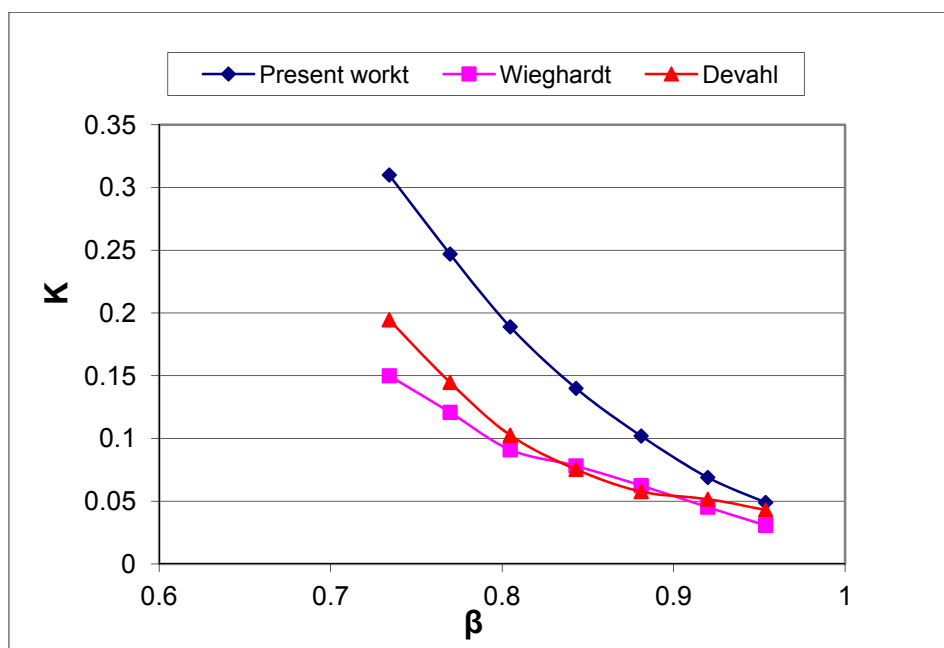
$$k = k_0 + \frac{55.2}{R_{ed}} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $k_0 = \left[\frac{1 - 0.95\beta}{0.95\beta}\right]^2$  می‌باشد.  $R_{ed}$  عدد رینولدز بر مبنای قطر سیم توری است. کل (۷) ضریب افت فشار بر حسب  $\beta$  را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان تشخیص داد که نتایج ضریب افت فشار مربوط به توری محافظ برای سیم با قطرهای بالاتر از ۱ میلی‌متر به مراتب بیشتر از داده‌های

به دست آمده از نتایج سایر پژوهشگران می باشد. هنگامیکه قطر سیم مفتول توری محافظ ۰/۶ میلی متر است. اختلاف قابل توجهی بین داده های به دست آمده در این تحقیق با داده های به دست آمده از سایر پژوهشگران وجود ندارد. با افزایش قطر سیم توری محافظ این اختلاف زیاد شده و برای قطر سیم توری محافظ ۲/۵ میلی متری، ضریب افت فشار حدود دو برابر ضریب افت فشار به دست آمده از نتایج ویگ هارد و دیول است.



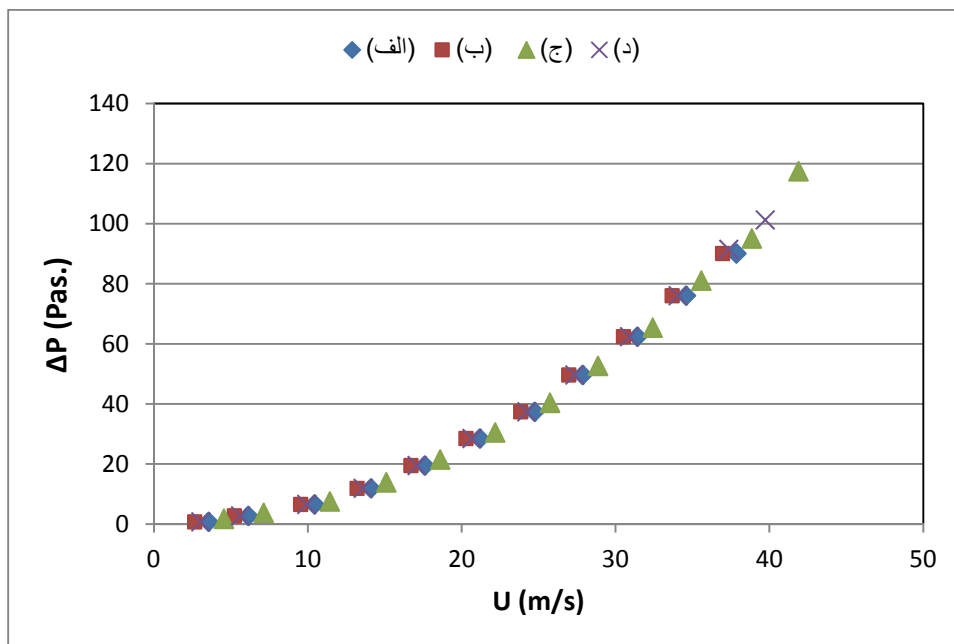
شکل ۶- ضریب افت فشار توری محافظ بر حسب قطر سیم در سرعت ۱۰ m/s و مقایسه آن با نتایج روابط نیمه تجربی سایر پژوهشگران برای توری متداول



شکل ۷- ضریب افت فشار توری محافظ بر حسب  $\beta$  در سرعت های بالاتر از ۱۰ m/s و مقایسه آن با نتایج روابط نیمه تجربی سایر پژوهشگران برای توری متداول

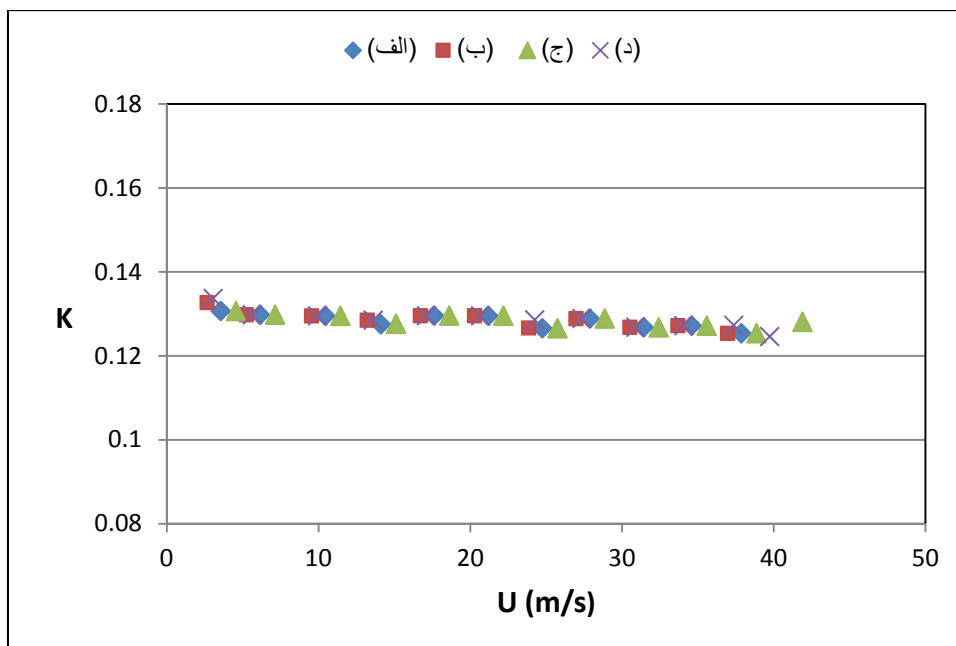


با توجه به بحث‌های ایمنی در ارتباط با توری محافظ، قطر سیم آن حداقل ۲ تا ۳ میلی‌متر است. لذا افت فشار توری محافظ را نمی‌توان با استفاده از نتایج ویگ‌هارد و دیول محاسبه نمود. گرچه روابط ارائه شده توسط ویگ‌هارد و دیول برای محاسبه ضریب افت فشار توری‌های متداول با یکدیگر هم‌خوانی خوبی دارند. به‌منظور توجیه مطلب فوق می‌توان به شرایط استفاده از رابطه تجربی سایر پژوهشگران اشاره نمود. همان‌گونه که در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است، این اختلاف در مقادیر کم  $\beta$  و یا در حالتی که قطر سیم افزایش می‌یابد، اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که داده‌های به‌دست آمده برای سایر پژوهشگران برای سیم‌های با قطر کم حدود ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌متر است. این در حالی است که قطر سیم توری محافظ حدود ۲ تا ۳ میلی‌متر می‌باشد. همان‌گونه که بیان شد، روابط سایر پژوهشگران برای مقادیر  $\frac{U_s d}{\nu} < 600$  قابل قبول است. هنگامی که قطر سیم حدود ۰/۶ میلی‌متر است، شرط فوق برقرار است. ولی هنگامی که قطر سیم بالاتر از ۱ میلی‌متر است، شرط فوق صادق نمی‌باشد. همان‌گونه که بیان شد، سیم‌های چند رشته‌ای مقاومت بیشتری نسبت به خستگی و پاره شدن دارند، لذا استفاده از آن برای توری محافظ از لحاظ ایمنی مناسب‌تر است. شکل (۸) منحنی افت فشار بر حسب سرعت جریان هوا برای انواع سیم‌های چند رشته‌ای مختلف که معرفی شده‌اند، را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که اختلاف افت فشار ناشی از انواع سیم‌های چند رشته‌ای و مفتول بالا نبوده و نزدیک به هم می‌باشند. شکل (۹) ضریب افت فشار بر حسب سرعت جریان هوا را برای شکل (۸) نشان می‌دهد. تغییرات ضریب افت فشار تقریباً ثابت است. با توجه به شکل‌های فوق می‌توان دریافت که افت فشار ناشی از انواع سیم‌های چند رشته‌ای و سیم مفتولی تفاوت ندارد. به‌منظور بررسی تأثیر زبری بر روی افت فشار ناشی از سیم چند رشته‌ای، از نوع بافت ریز (شکل ۳ الف) را انتخاب نموده و با خالی نمودن لایه‌های آن، تأثیر سیم‌های جدید بر افت فشار توری مورد بررسی قرار گرفت.



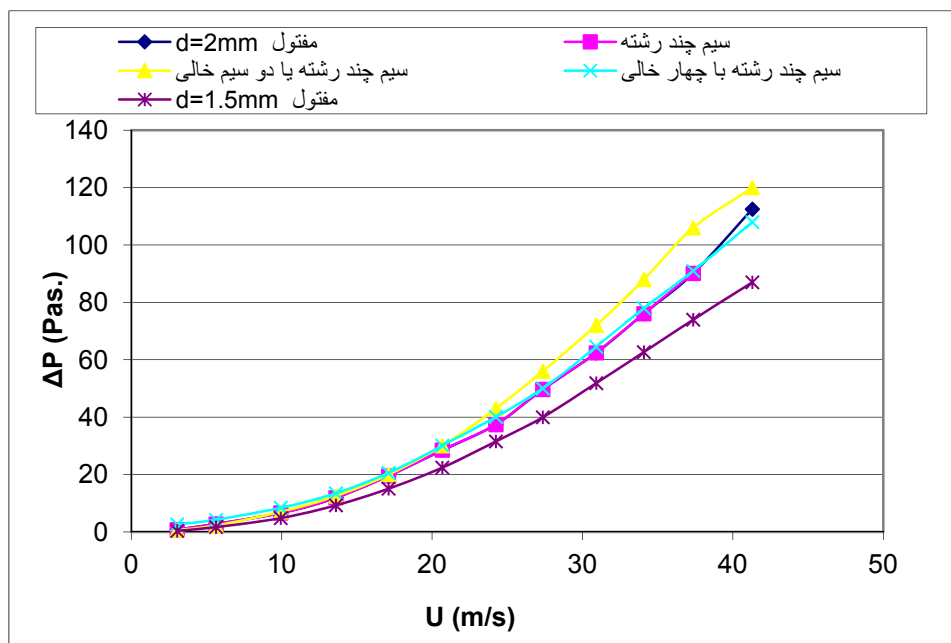
شکل ۸ - منحنی افت فشار بر حسب سرعت جریان هوا برای انواع سیم‌های مختلف

توری معرفی شده در شکل ۳

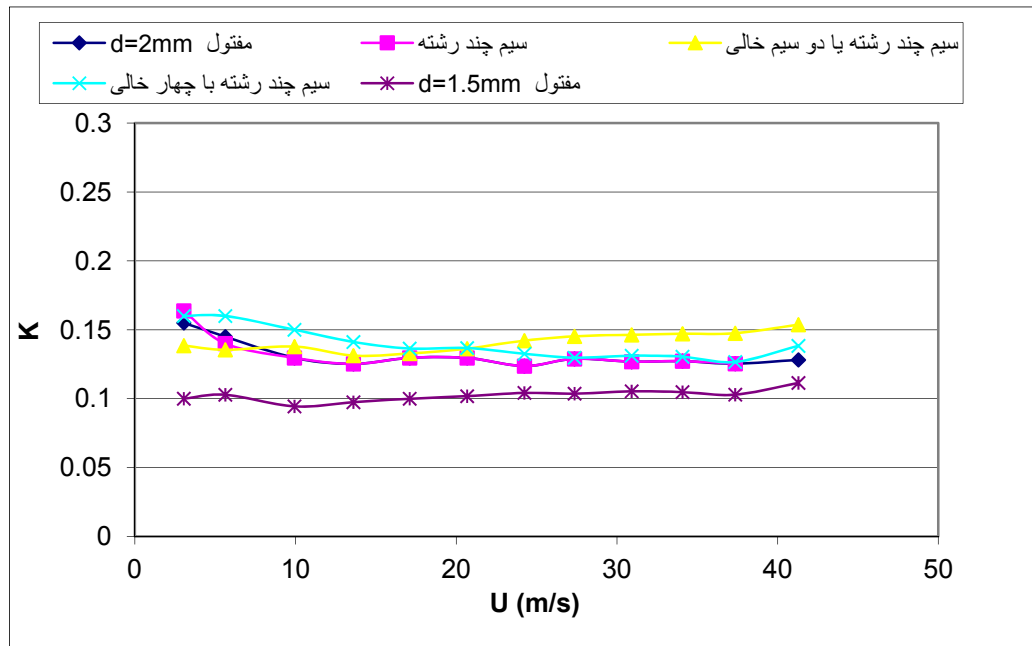


شکل ۹ - منحنی ضریب افت فشار بر حسب سرعت جریان هوا برای انواع سیم های مختلف توری معرفی شده در شکل ۳

شکل (۱۰) افت فشار توری محافظ با سیم چند رشته‌ای از نوع بافت ریز (شکل ۳ الف) با قطر ۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همچنین در شکل فوق افت فشار توری محافظ با سیم مفتول با قطرهای ۲ میلی‌متر و ۱/۵ میلی‌متر نیز نشان داده شده است. به منظور بررسی زبری‌های مختلف بر روی سیم چند رشته‌ای، لایه‌های سیم چند رشته‌ای را کم کرده و افت فشار توری محافظ با سیم‌های فوق نیز اندازه‌گیری شده است.

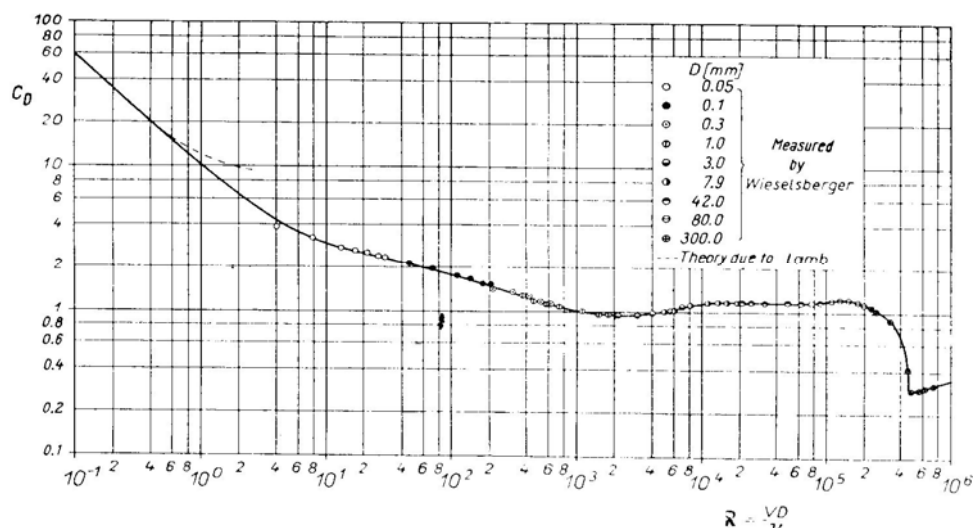


شکل ۱۰ - افت فشار توری محافظ با سیم چند رشته‌ای، بافت ریز (شکل ۳ الف) و کاهش سیم‌های تشکیل‌دهنده آن بر حسب سرعت جریان هوا



شکل ۱۱- ضریب افت فشار توری محافظ با سیم چند رشته‌ای، بافت ریز (شکل ۳ الف) و کاهش سیم‌های تشکیل‌دهنده آن بر حسب سرعت جریان هوا

شکل (۱۱) تغییرات ضریب افت فشار توری محافظ برای شکل (۱۰) را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است، افت فشار سیم‌های مفتول و چند رشته‌ای نزدیک به یکدیگر می‌باشند. با کاهش دو سیم از سیم‌های دو رشته‌ای، ضریب افت فشار توری محافظ با سیم چند رشته‌ای در سرعت‌های بالاتر از  $25 \text{ m/s}$ ، حدود  $20\%$  افزایش می‌یابد. عدد رینولدز بر مبنای قطر سیم‌های مورد استفاده در توری بستگی به سرعت داشته و حدود  $425$  برای سرعت  $3 \text{ m/s}$  و حدود  $5600$  برای سرعت  $40 \text{ m/s}$  است. در صورتی که زبری بر روی سطح مفتول افزایش یابد، سبب افزایش شدت اغتشاش‌های جریان هوا در لایه مرزی روی مفتول می‌شود. به عبارت دیگر عملکرد سیم مشابه مفتولی خواهد بود که عدد رینولدز آن بالاتر است. با توجه به شکل (۱۲)، ضریب نیروی پسا برای اعداد رینولدز بین  $1000$  تا  $5000$ ، حدود  $1$  است. با افزایش عدد رینولدز از  $5000$  به  $10000$ ، مقدار ضریب پسا از  $1$  به  $1/2$  افزایش می‌یابد. لذا هنگامی که دو سیم از سیم چند رشته‌ای کم می‌شود، زبری سیم چند رشته‌ای افزایش یافته و عملکرد آن مشابه سیم در اعداد رینولدز بالاتر خواهد بود، که با توجه به شکل (۱۲) ضریب پسا سیم بیشتر و در نتیجه افت فشار توری محافظ افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۱۰) و (۱۱)، هنگامی که چهار لایه از سیم چند رشته‌ای کم می‌شود، ضریب افت فشار کاهش می‌یابد، که این موضوع ناشی از کاهش قطر سیم چند رشته‌ای است.



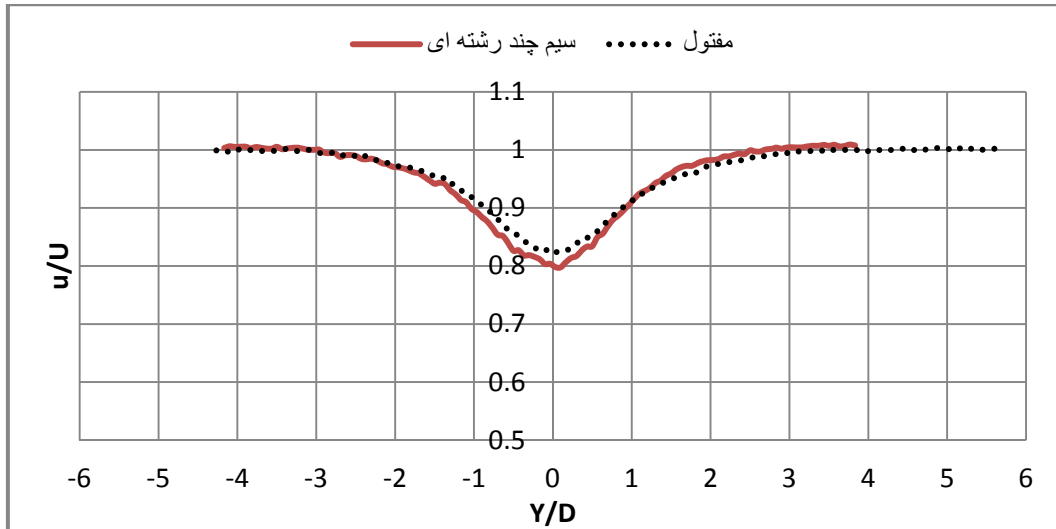
شکل ۱۲- ضریب پسا استوانه بر حسب عدد رینولدز [۱۰]

با اندازه‌گیری سرعت جریان هوا، می‌توان اختلاف ممنتوم جریان هوا در بالادست و پایین‌دست سیم را اندازه‌گیری نمود و در نتیجه قسمتی از نیروی پسا ناشی از سیم را مشخص کرد. ضریب نیروی پسا طبق معادله (۴) بیان می‌شود [۱۱]:

$$C_d = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) d\left(\frac{y}{d}\right) - 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u'^2}{U^2} d\left(\frac{y}{d}\right) + \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{p_e - p_w}{q}\right) d\left(\frac{y}{d}\right) \quad (4)$$

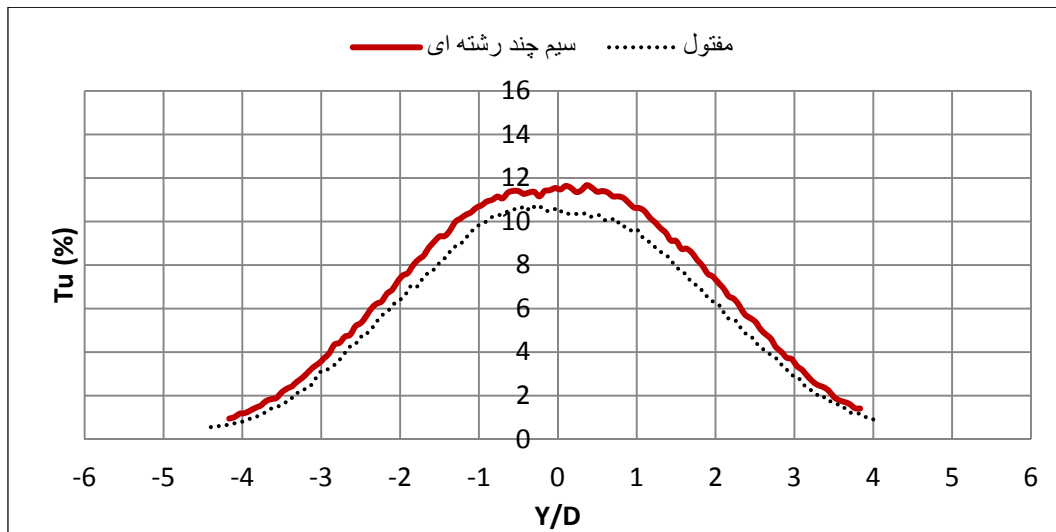
در رابطه فوق  $u$  سرعت محلی،  $u'$  اغتشاش‌های محوری جریان هوا و  $U$  سرعت جریان آزاد می‌باشد.  $P_e$  فشار استاتیکی خارج از ناحیه دنباله و  $p_w$  فشار در ناحیه دنباله است و  $q$  فشار دینامیکی جریان آزاد می‌باشد. در رابطه فوق ضریب پسا دارای سه انتگرال می‌باشد. عبارت اول مربوط به اختلاف ممنتوم، عبارت دوم مربوط به تنش رینولدز می‌باشد و عبارت سوم مربوط به اختلاف فشار است.

شکل (۱۳) توزیع سرعت جریان هوا در پایین‌دست سیم چند رشته‌ای و مفتول را در فاصله  $\frac{x}{d} = 20$  در سرعت  $10 \text{ m/s}$  نشان می‌دهد. شکل (۱۴) توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست سیم چند رشته‌ای و مفتول را در فاصله  $\frac{x}{d} = 20$  در سرعت  $10 \text{ m/s}$  نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۱۳) و (۱۴) می‌توان دریافت که توزیع سرعت پایین‌دست سیم مفتول و سیم چند رشته‌ای مشابه یکدیگر می‌باشند. با انتگرال‌گیری از توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن می‌توان ترم‌های اول و دوم را برای سیم مفتول و سیم چند رشته‌ای به‌دست آورد. با توجه به شکل (۱۳)، ترم اول معادله (۳) برای سیم مفتول برابر  $0.723$  و برای سیم چند رشته‌ای  $0.735$  است. با توجه به شکل (۱۴) ترم دوم معادله (۳) برای سیم مفتول برابر  $-0.04$  و برای سیم چند رشته‌ای  $-0.05$  بوده، لذا مجموع ترم‌های اول و دوم برای سیم مفتول و سیم چند رشته‌ای حدود  $0.69$  است.



شکل ۱۳- توزیع سرعت جریان هوا در پایین دست سیم چند رشته‌ای و

مفتول در فاصله  $\frac{x}{d} = 20$  و سرعت  $10 \text{ m/s}$



شکل ۱۴- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست سیم چند رشته‌ای و

مفتول در فاصله  $\frac{x}{d} = 20$  و سرعت  $10 \text{ m/s}$

### جمع بندی

توری محافظ یکی از اجزای مهم تونل باد عمودی می باشد. این توری در قسمت ورودی محوطه پرواز نصب می شود، و به منظور جلوگیری از سقوط مدل و یا افراد در نازل از آن استفاده می شود. با توجه به بحث‌های انجام گرفته در این مقاله، نتایج زیر حاصل شده است:

- با توجه به اینکه بیشترین سرعت تونل باد در محوطه پرواز است، لذا افت فشار در توری محافظ بسیار بالا بوده و حدود  $20\%$  تا  $30\%$  از افت کل تونل باد، مربوط به این قسمت می باشد.

- سیم‌های قابل استفاده در توری می‌تواند به شکل مفتول و یا سیم چند رشته‌ای با بافت‌های مختلف و یا زبری‌های گوناگون باشد. با توجه به اینکه سیم چند رشته‌ای در برابر خستگی مقاوم‌تر است، برای ضریب ایمنی بالاتر از سیم چند رشته‌ای استفاده می‌شود.
- ضریب افت فشار توری محافظ بستگی شدیدی به نسبت سطح باز به سطح کل توری دارد. ضریب افت فشار برای توری که سطح باز به سطح کل آن ۰/۹۵ است، حدود ۰/۰۵ و برای توری که این مقدار ۰/۷۳ است، حدود ۰/۳۱ می‌باشد.
- هنگامیکه نسبت سطح باز به سطح کل توری حدود ۰/۹۵ بوده و یا به عبارت دیگر سیم توری ۰/۶ میلیمتر است، نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج سایر محققان که برای توری متداول به دست آورده‌اند، هم‌خوانی مناسبی دارد. ولی هنگامیکه قطر سیم توری افزایش می‌یابد، ضریب افت فشار توری محافظ به مراتب بالاتر از نتایج سایر محققان خواهد بود. لازم به ذکر است نتایج سایر محققان برای اعداد رینولدز بر مبنای قطر سیم کمتر از ۶۰۰ قابل قبول است.
- ضریب افت فشار توری با سیم چند رشته‌ای و یا سیم مفتول نزدیک به هم می‌باشد. همچنین با بررسی توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در پایین‌دست سیم چند رشته‌ای و مفتول می‌توان دریافت که ترم‌های ممنوم و تنش‌های رینولدز هر دو سیم نزدیک به یکدیگر می‌باشند.
- هنگامیکه دو لایه از سیم چند رشته‌ای کم می‌شود، ضریب افت فشار توری در اعداد رینولدز بر مبنای قطر سیم حدود ۵۰۰۰، حدود ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

## مراجع

- [۱] اردکانی محمدعلی، گزارش علمی طرح تونل باد عمودی بخش امکان‌سنجی، سازمان پژوهش‌های علمی ایران (۱۳۹۰).
- [2] 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).
- [3] Ardakani, M. A.S., "Low-speed wind Tunnel (Design Principles and Application)", KN Toosi University, (in Persian) (2008).
- [4] Wieghardt, K. E. G., "On the Resistance of Screens", Aeron. Quart., Vol. 4, pp. 186-192, (1953).
- [5] Devahl-Davis, G., "The Flow of Air through Wire Screens", Proceedings of the First. Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanic, pp. 191-212, (1964).
- [6] Prandtl, L., "Herstellung Einwandfreier Luftstrome, Handbuch der Experimentalphysik", Bd. 4, 2 Teil Akademische Verlagsgesellschaft, S. 65-106, (1932).
- [7] Dryden, H.L., and SchuBauer, G.G., "The use of Damping Screens for the Reduction of Wind Tunnel Turbulence", J. Aero Sci, Vol. 14, pp. 221-228, (1947).

[۸] اردکانی محمدعلی، ایروانی عیسی ، بررسی تجربی جریان هوا در پایین دست سیم‌های چند رشته‌ای، مجله تربیت مدرس دوره ۱۳، شماره ۷، صفحه ۵۴ تا ۶۳، (۱۳۹۲).

[۹] اردکانی محمد علی، "جریان سنج سیم داغ"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (۱۳۸۵).

[10] Schlichting, H., "*Boundary-Layer Theory*", Mcgraw-Hill, New York, (2004).

[11] Biao Lu and Michael B. Bragg, "Experimental Investigation of the Wake-survey Method for a Bluff Body with a Highly Turbulent Wake", AIAA J, 2002-3060, (2002).

**Abstract**

In order to prevent the fall of model in a vertical wind tunnel protective screen is used in the input area of the flight chamber. As regards the air flow velocity in the flight chamber is very high, the pressure drop in the protective screen will be high. In order to select the appropriate protective screen and its associated wires,

protective screen models was constructed and the experimental investigation was carried out by using wind tunnel. Due to the wire woven is more resistant against fatigue, for higher safety factor wire woven is used. Pressure loss coefficient of protective screen depends strongly to the mesh net porosity. When the wire diameter of protective screen is less than 0.6 mm, the results of present work are consistent with the results of other researchers. Pressure loss coefficient of protective screen with woven wire and protective screen with wire rod are close together.