



## بررسی تجربی اثرات پروفیل سرعت جریان هوا روی سیم‌ها و کابل‌های خطوط انتقال نیرو و نگهدارنده‌ها

محمد اسحق‌گر جی<sup>۱\*</sup>، عبدالامیر بک خوشنویس<sup>۲</sup>، احسان قلی پور اسرمی<sup>۳</sup> و محسن وحیدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری

### چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی تاثیر نیروی باد در شرایط طوفانی بر کابل‌ها و سیم‌های استاندارد که به عنوان هدایت کننده الکتریکی در خطوط انتقال برق و یا تجهیزات نگهدارنده آنتن‌های رادیویی شناخته می‌شوند، پرداخته شده است. برای این کار از چهار نوع کابل ۲۰ و ۶۳ کیلوولت، سیم نگهدارنده دکل‌ها و کابل روکش دار استفاده شده که هر کدام دارای قطر و زبری متفاوتی است. آزمایش‌ها در تونل باد و اندازه گیری‌ها با استفاده از جریان سنج سیم داغ صورت گرفته است. سرعت‌های مورد استفاده در این تحقیق ۱۷ و ۲۴ متر بر ثانیه می‌باشد که مربوط به سرعت بادهای شدید و طوفان‌هاست. هدف از این تحقیق در واقع بررسی سرعت متوسط، پارامتر کاهش سرعت ( $W_0$ )، مقدار نصف دهانه دنباله سرعت ( $b_{1/2}$ )، ضریب پسا و عدد استروهمال کابل‌ها در شرایط طوفانی است. افزایش اغتشاشات و مومنتوم جریان سبب می‌شود که جریان جدا شده از سطح مدل دوباره به مدل بچسبند. با توجه به نتایج، تقریباً در همه مدل‌ها بجز کابل روکش دار، ضریب پسا در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه کمتر از سرعت ۱۷ متر بر ثانیه می‌باشد. به نظر می‌رسد کابل ۲۰ کیلوولت از بقیه مدل‌ها مناسب‌تر است و می‌توان از الگوی کلاف آن در سرعت‌های مذکور بهره برد.

**کلمات کلیدی:** نیروی باد؛ کابل‌های خطوط انتقال برق؛ جریان سنج سیم داغ؛ تونل باد؛ مشخصات آیرودینامیکی کابل‌ها.

### ۱- مقدمه

جبران ناپذیری به بار آورد. خطوط انتقال نیرو و اتصالاتی مانند طناب‌ها و نگهدارنده‌های آنتن‌های رادیویی و سایر اتصالاتی که بصورت هوایی قرار دارند، به‌طور مستقیم در معرض این نیرو قرار می‌گیرند. هر چند ممکن است تصور شود که قطر کابل‌های خطوط انتقال و اتصالات کم است،

نیروی باد یکی از نیروهای قدرتمند طبیعت است که با مهار آن می‌توان به منبع پایان ناپذیر انرژی دست یافت. اما همین منبع با ارزش انرژی گاه چنان قدرتی پیدا می‌کند که در صورت عدم پیش بینی‌های لازم ممکن است خسارت‌های

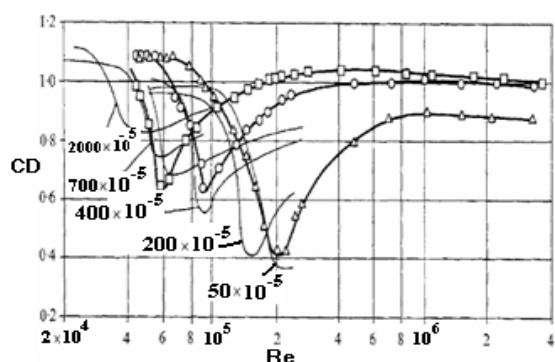
\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۱۱۵۸۵۰۲۵

آدرس پست الکترونیک: [n12b54@yahoo.com](mailto:n12b54@yahoo.com)

## ۲- مروری بر کارهای گذشته

مطالعات تجربی متعددی توسط افراد مختلف در زمینه بررسی تاثیر زبری سطح و یا نیروهای وارد بر سیم‌های برق انجام شده است. از لحاظ تئوری اگر یک جریان که هیچ‌گونه آشفتگی در ساختار خود ندارد، بر روی یک سطح بدون هیچ گونه زبری اعمال گردد، چنانچه عدد رینولدز این جریان به بینهایت هم برسد، باز جریان کماکان آرام و غیر آشفته باقی خواهد ماند. زبری و آشفتگی جریان آزاد بسترهای پرورش آشفتگی در جریان محسوب می‌گردند [۱].

آخنباخ<sup>۴</sup> [۲] با زبر کردن یک استوانه توسط کاغذ سمباده با زبری‌های مختلف توانست تاثیر زبری سطح بر ضریب پسای یک استوانه با ارتفاع زبری‌های متفاوت را اندازه‌گیری کند. او برای تعیین زبری معادل در آزمایش‌های خود از منحنی نیکورادزه<sup>۵</sup> استفاده کرد. شکل ۱ نتایج آزمایش آخنباخ را نشان می‌دهد که با نتایج فیگ<sup>۶</sup> و وارساپ<sup>۷</sup> [۳] مقایسه شده است.



شکل ۱- مقایسه نتایج آخنباخ [۲] با نتایج فیگ و وارساپ [۳]

با توجه به شکل ۱ می‌توان گفت که افزایش زبری نسبی سطح استوانه (که موجب افزایش شدت اغتشاشات و مومنتوم می‌شود) سبب می‌شود که عدد رینولدز بحرانی و در نتیجه افت ناگهانی ضریب پسای در رینولدزهای کمتری اتفاق بیافتد. در نتیجه برای انتقال نقطه جدایش به عقب نیاز به عدد

ولی به دلیل طول زیاد آن‌ها و اینکه به‌طور مستقیم تحت تاثیر نیروی سیال قرار می‌گیرند، در مجموع موجب وارد آمدن نیروی زیادی به این خطوط می‌شود. شکل هندسی کابل‌ها و سیم‌ها و نگهدارنده‌ها با توجه به کاربرد آنها متفاوت است و تفاوت در شکل هندسی آنها خصوصا وجود زبری‌های مارپیچی شکل در سطح آنها موجب تغییر در ساختار دنباله و آشفتگی جریان می‌گردد. این موضوع باعث ایجاد تغییراتی در پروفیل توزیع سرعت<sup>۱</sup> و ضریب پسای<sup>۲</sup> می‌گردد و نیروهای متفاوتی را به کابل‌ها وارد می‌کند. بنابراین بررسی اغتشاشات و پروفیل سرعت جریان در این ناحیه اهمیت زیادی دارد. در خطوط انتقال برق از سیم‌های بدون عایق با قطرهای مختلف استفاده می‌شود که سیم‌ها در آن به‌صورت رشته‌ای به دور هم و به‌طور مارپیچ تنیده شده‌اند. عایق‌ها و یا سیم‌های تنیده شده و مارپیچ با قطرهای مختلف هر کدام دارای ضریب پسای مخصوص به خود می‌باشد. این موضوع در رابطه با طناب‌ها و نگهدارنده‌ها نیز صدق می‌کند. بنابراین برای پیش-بینی نیروی وارد شده به این تجهیزات، باید ضریب پسای هر کدام از آنها را در شرایط طوفانی در آزمایشگاه یافت تا بتوان با ایجاد تکیه‌گاه‌های مناسب و یا تمهیدات لازم مانع از بروز حوادث شد.

هدف از این تحقیق در واقع بررسی اثر شیارهای مارپیچ بر سرعت متوسط، پارامتر کاهش سرعت، مقدار نصف دهانه دنباله سرعت  $(b_{1/2})$ ، ضریب پسای و عدد استروهال<sup>۳</sup> کابل‌های خطوط انتقال نیرو (برق) در شرایط طوفانی است. برای این کار از چهار نوع کابل ۲۰ کیلو ولت، ۶۳ کیلوولت، سیم نگهدارنده دکل‌ها و کابل روکش‌دار استفاده شده است که هر کدام دارای قطر و زبری متفاوتی است. سرعت مورد استفاده در این تحقیق ۱۷ و ۲۴ متر بر ثانیه می‌باشد که مربوط به سرعت بادهای شدید و طوفان‌هاست.

برای انجام آزمایش‌ها، مدل‌هایی از کابل‌های مختلف ساخته شده و جهت اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر از تونل باد استفاده شده است.

<sup>4</sup> Achenbach

<sup>5</sup> Nikoradzeh

<sup>6</sup> Fage

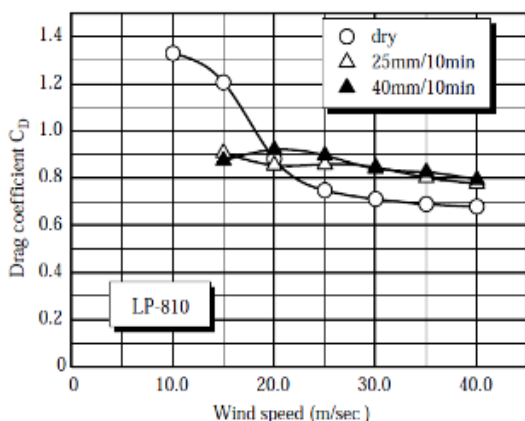
<sup>7</sup> Warsap

<sup>1</sup> Velocity Profile

<sup>2</sup> Drag Coefficient

<sup>3</sup> Strouhal Number

جهت اندازه‌گیری نیروی پسای وارد شده بر مدل نیز از لودسل<sup>۵</sup> استفاده شده است. آنها همچنین برای حالتی که سیم زوایای مختلفی با جهت برخورد باد می‌سازد نتایج دیگری نیز به دست آوردند. قسمتی از نتایج این تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- نتایج بررسی کابل مدل LP-810 در دو حالت هوای خشک و بارانی با ریزش متفاوت [۶]

ایگوچی<sup>۶</sup> و همکاران [۷] نیز مکانیزم کاهش ضریب پسا در کابلهایی با طراحی جدید را بررسی کردند.

هورنر<sup>۷</sup> [۸] در کتاب خود ضریب پسای چند نمونه از سیم‌ها و کابل‌های استاندارد مورد استفاده را به دست آورده است. سوالی که در اینجا مطرح است این است که هرچند زبری ممکن است باعث کاهش ضریب اصطکاک فشاری شود ولی از طرف دیگر باعث افزایش ضریب اصطکاک پوسته‌ای نیز می‌شود. در این مورد چه باید کرد؟ در پاسخ به این سوال می‌توان گفت در جریان روی کره یا استوانه، نسبت  $C_f / C_d$  (ضریب اصطکاک پوسته‌ای به ضریب اصطکاک فشاری) به صورت شکل ۳ می‌باشد و حالت صاف و دو نمونه حالت زبر در این شکل نشان داده شده است [۲].

رینولدز کوچکتری خواهد بود. در واقع زبری موجب می‌شود که نوسان‌های جریان برشی آزاد سیال که از سطح جسم جدا می‌شود و به سرعت شروع به رشد کردن می‌کند در فاصله کوتاه‌تری به سطح جسم بازگردد (بازگشت<sup>۱</sup> جریان) و بدین صورت جدایش روی جسم به تاخیر بیافتد. با توجه به توضیحات فوق، دلیل زبر بودن سطح توپ گلف، توپ تنیس و درز توپ بیسبال واضح می‌گردد [۴].

نکته دیگری که در این شکل دیده می‌شود و باید مورد توجه قرار گیرد این است که پس از گذر جریان از عدد رینولدز بحرانی (افزایش عدد رینولدز در جریان درهم)، ضریب پسا مجدداً شروع به افزایش می‌کند تا اینکه در رینولدزهای بالا مقدار آن ثابت شده و تغییر نمی‌کند. در هر صورت ضریب پسا در جریان درهم کمتر از جریان آرام است.

هانگ<sup>۲</sup> [۵] تاثیر زبری سطح و شیارهای ماریچ را بطور مجزا و همزمان با هم بر روی یک سیلندر در مخزن یکدک کش<sup>۳</sup>، که مربوط به بررسی جریان حول اجسام در درون آب می‌باشد، بررسی و با سیلندر صاف مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که خود شیار هم به عنوان زبری عمل می‌کند. بنابراین افزایش زبری بیشتر در رینولدزهای بالاتر (فوق بحرانی)، همانطور که گفته شد، بتدریج موجب افزایش ضریب پسا می‌شود.

فیگ و وارساپ [۳] سیم‌هایی با قطرهای مختلف را با زوایای مختلف بر روی استوانه‌هایی با قطرهای مشخص قرار دادند تا بتوانند تاثیر اغتشاشات و ضریب پسا را بر روی این سیلندرها بررسی کنند.

کیکوچی<sup>۴</sup> و همکاران [۶] به بررسی مدل جدید طراحی شده کابل برق که ادعا شد در برابر باد و باران شدید از نظر آیرودینامیکی ضریب پسای کمتری دارد، پرداختند (مدل LP-810). آنها از تونل باد جهت انجام آزمایش‌های خود استفاده کردند. برای مدلسازی باران نیز از شبکه‌ای از لوله‌ها در ابتدای تونل باد استفاده کردند. چندین نازل کوچک به لوله‌ها متصل شده و دبی آب خروجی از آنها قابل تنظیم است.

<sup>1</sup> Reattachment

<sup>2</sup> Huang Shan

<sup>3</sup> Towing Tank

<sup>4</sup> Kikuchi

<sup>5</sup> Lode Cell

<sup>6</sup> Eguchi

<sup>7</sup> Horner

داغ مورد استفاده در این تحقیق، ساخت شرکت فرانسجس صبا می‌باشد. برای کسب اطلاعات بیشتر درباره جریان سنج سیم داغ می‌توان به مرجع [۹] مراجعه کرد.

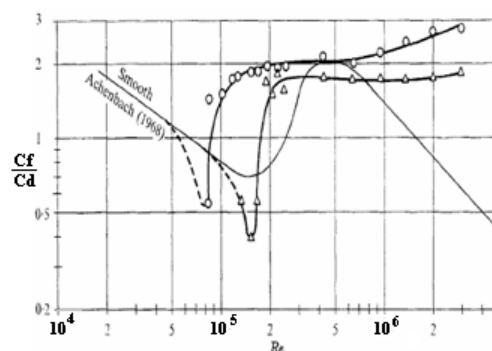


شکل ۴- نمایی از تونل باد آزمایشگاه

نسبت انسداد<sup>۳</sup> دهانه محفظه آزمایش را قطر مدل تقسیم بر ارتفاع دهانه تونل باد معرفی می‌کنند. از نتایج تحقیق‌های انجام شده در این زمینه می‌توان دریافت که اگر برای مدلی نسبت انسداد کمتر از ۰/۰۵ انتخاب شود، خطای آزمایش‌ها ناچیز خواهد بود. به طور مثال طبق تحقیق ماسکل<sup>۴</sup> [۱۰] با انتخاب نسبت انسداد ۰/۰۵، خطای محاسبه ضریب پسا کمتر از ۳ درصد خواهد بود. با توجه به مشخصات تونل باد و سیلندر، نسبت انسداد در آزمایش‌های فوق از ۰/۰۳ تا ۰/۰۴۶ تغییر می‌کند که نیاز به تصحیح ندارد. همچنین اگر نسبت دید<sup>۵</sup> (منظر) را طول مدل تقسیم بر قطر مدل تعریف کنیم، با توجه به ابعاد سیلندر در این آزمایش‌ها مقدار نسبت دید حداقل ۲۲ می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه نسبت دید در آزمایش‌ها را معمولاً بیشتر از ۲۰ در نظر می‌گیرند. برای بررسی بیشتر می‌توان به تحقیق ویلیامسون<sup>۶</sup> [۱۱] رجوع کرد.

مشخصات هر یک از کابل‌ها، نوع و نحوه‌ی قرارگیری آنها در اتاقک آزمون تونل باد در ذیل آمده است:

۱- کابل ۲۰ کیلوولت با شش رشته سیم آلومینیوم که به هم تنیده شده و قطر هر کدام ۵ میلی‌متر است و قطر کلی کابل



شکل ۳- نمودار نسبت  $C_f/C_d$  [۸]

همانطور که دیده می‌شود، این نسبت از ۰/۴ تا ۲ درصد تغییر می‌کند که بسیار ناچیز است. پس می‌توان در اینجا از ضریب اصطکاک پوسته‌ای صرف نظر کرد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که با زبر کردن سطح، اثر منفی افزایش ضریب پسا نسبت به اثر مثبت آن ناچیز است.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش‌ها

دستگاه تونل باد استفاده شده در این تحقیق دارای اتاقک آزمونی از جنس پلکسی گلاس به ابعاد  $۱۶۸ \times ۴۰ \times ۴۰$  سانتیمتر مکعب می‌باشد. با استفاده از موتور ۷ کیلوواتی که برای تولید جریان هوا در دستگاه تونل باد به کار رفته می‌توان به حداکثر سرعت ۳۰ m/s رسید. با توجه به مشخصات تونل باد، حداکثر اغتشاشات اسمی جریان آزاد برای این دستگاه ۱/۱ درصد است که از این حیث دستگاه تونل باد دارای دقت بالایی است. شکل ۴ نمایی از تونل باد دمشی مورد استفاده را نشان می‌دهد. سرعت سنج استفاده شده در این تحقیق از نوع دما ثابت (CTA) می‌باشد که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، اغتشاشات و فرکانس گردابه‌های<sup>۱</sup> خارج شونده از پشت سیلندر را دارد. پراب<sup>۲</sup> یک بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها، دارای حسگری به طول ۱/۲۵ میلی‌متر و قطر ۵ میکرومتر است. برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک مکانیزم دقیق استفاده شده است. دقت این مکانیزم انتقال پراب ۰/۰۱ میلی‌متر است. دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم

<sup>3</sup> Blockage Ratio

<sup>4</sup> Maskell

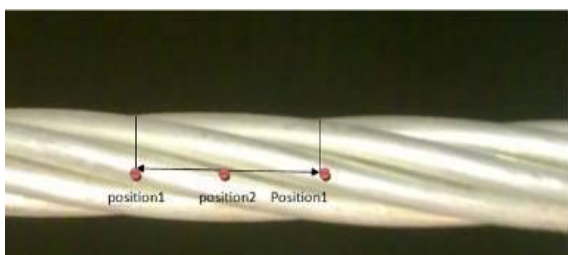
<sup>5</sup> Aspect Ratio

<sup>6</sup> Williamson

<sup>1</sup> Vortex Frequency

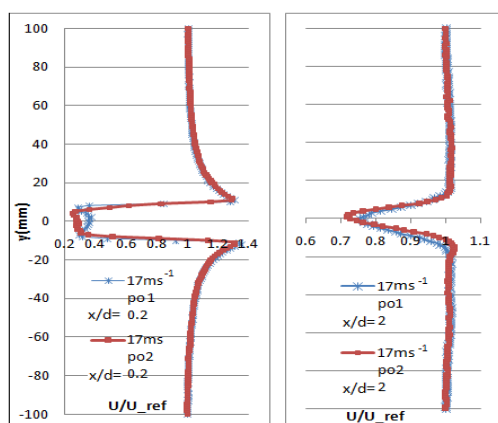
<sup>2</sup> Probe

شکل هندسی مارپیچ مدل باعث می‌شود که ماهیت جریان یک بعدی عمود بر مدل در طول مشخصی از کابل متغیر باشد. این طول در شکل ۶ نشان داده شده است (مانند یک پیچ چند راهه عمل می‌کند). برای بررسی کیفیت جریان و اندازه‌گیری ضریب پسا در هر مدل (به جز مدل کابل روکش‌دار) دو موقعیت مجاور هم که بیشترین تفاوت را با هم دارند، اندازه‌گیری شده‌اند (po1, po2).



شکل ۶- دو موقعیت مجاور هم با بیشترین تفاوت در کیفیت جریان یک‌بعدی

هنگامی که جسم جامدی در یک سیال جاری قرار می‌گیرد، در پشت آن دنباله تشکیل می‌شود. سرعت‌ها در دنباله کوچکتر از جریان اصلی هستند و افت سرعت دنباله به افت مومنوم منجر می‌شود که ناشی از کشش ایجاد شده روی جسم است. مقدار  $U/U_{ref}$  سرعت جریان آزاد یا سرعت مرجع است) و مقایسه نقاط دو موقعیت برای چهار مدل در شکل‌های ۷ تا ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۷- میزان  $U/U_{ref}$  کابل ۲۰KV در سرعت ۱۷ m/s در دو موقعیت و در دو ایستگاه مختلف

نیز ۱۳/۹ میلی‌متر است (در این حالت، سرعت ۱۷ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز (براساس قطر کابل) ۱۵۶۷۰ و سرعت ۲۴ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز  $۲۲/۱ \times 10^3$  می‌باشد).

۲- کابل ۶۳ کیلوولت با ۱۸ عدد سیم مارپیچ آلومینیومی که به هم تنیده شده است و قطر هر کدام ۲.۵ میلی‌متر و قطر کلی کابل ۱۸/۵۵ میلی‌متر است (در این حالت، سرعت ۱۷ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز  $۲۰/۵ \times 10^3$  و سرعت ۲۴ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز  $۲/۹ \times 10^4$  می‌باشد).

۳- کابل روکش‌دار<sup>۱</sup> با قطر ۲۰ میلی‌متر (در این مدل سرعت ۱۷ متر بر ثانیه معادل رینولدز  $۲۱/۵ \times 10^3$  و سرعت ۲۴ متر بر ثانیه معادل رینولدز  $۳ \times 10^4$  می‌باشد).

۴- سیم نگهدارنده<sup>۲</sup> دکل (سیم بکسل) با قطر ۱۲ میلی‌متر (در این مدل سرعت ۱۷ متر بر ثانیه معادل رینولدز ۱۳۰۰۰ و سرعت ۲۴ متر بر ثانیه معادل رینولدز  $۱۸/۳ \times 10^3$  می‌باشد).

داده برداری‌ها در سرعت ۱۷ متر بر ثانیه در نسبت فواصل ۲۰ و ۱۶، ۱۲، ۸، ۴، ۲،  $x/d = 0/2$  و در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه در فواصل ۲۲ و ۲۰، ۱۷، ۱۵، ۱۰، ۵،  $x/d = 0/2$  انجام شده است (x فاصله ی ایستگاههای اندازه‌گیری تا مدل و d قطر کابل است)، که برای جلوگیری از حجم بالای مقاله، تنها نمودارهای چند ایستگاه ارائه می‌گردد.



شکل ۸- شکل تونل باد و یکی از مدل‌ها

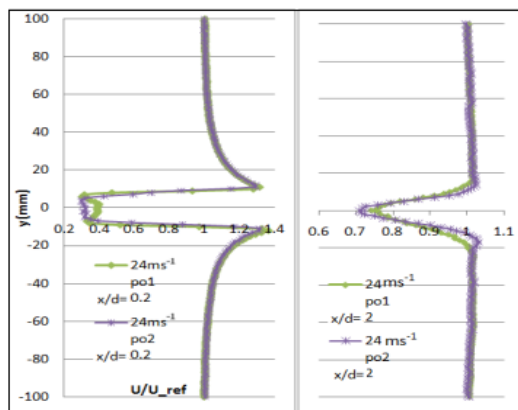
#### ۴- بحث و بررسی نتایج

از چهار مدل استفاده شده در این تحقیق، سه مدل دارای شیارهای مارپیچ هستند. با توجه به اینکه پراب مورد استفاده در این آزمایش جریان را به صورت یک بعدی اندازه می‌گیرد،

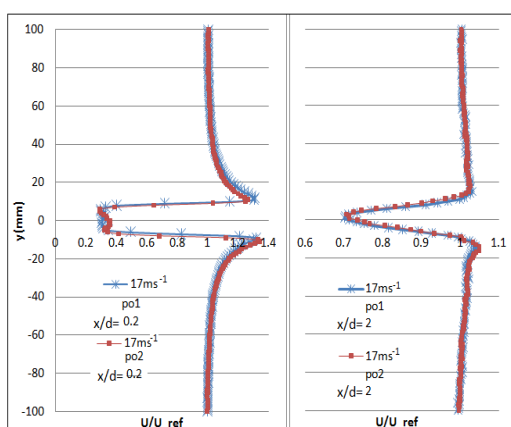
<sup>۱</sup> Recapped Cable

<sup>۲</sup> Supporting Device

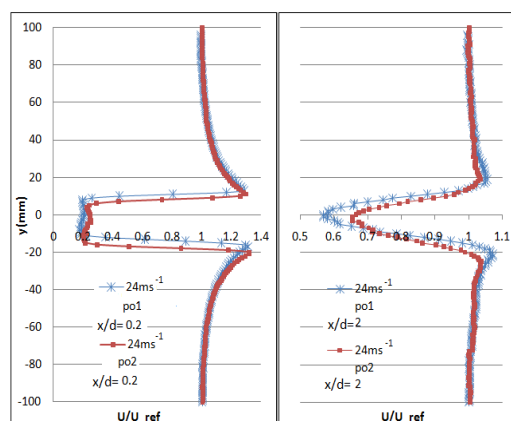
همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود با افزایش فاصله از مدل، توزیع جریان یکنواخت‌تر می‌شود. در ایستگاه اول (دقیقا پشت مدل) به دلیل کم بودن فشار، اختلاف فشار زیاد با جریان پتانسیل به وجود می‌آید. در این حالت تغییرات سرعت از دنباله به جریان پتانسیل در بالا و پایین مدل شدید است. به عبارت دیگر سرعت در بالا و پایین مدل، گرادیان شدیدی پیدا می‌کند و  $U/U_{ref}$  از حدود ۰/۲ تا ۱/۳ تغییر می‌کند. به تدریج با دور شدن از مدل این گرادیان از بین می‌رود.



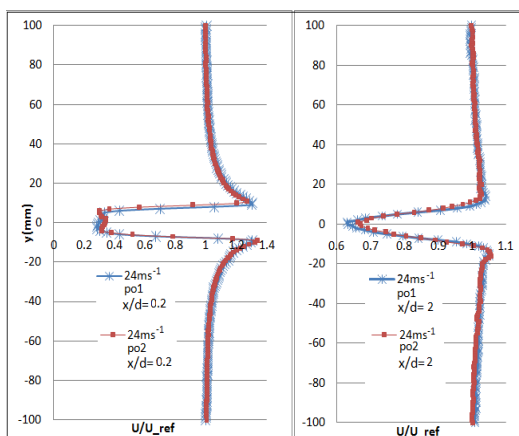
شکل ۸- میزان  $U/U_{ref}$  کابل ۲۰ KV در سرعت ۲۴ m/s در دو موقعیت و در دو ایستگاه مختلف



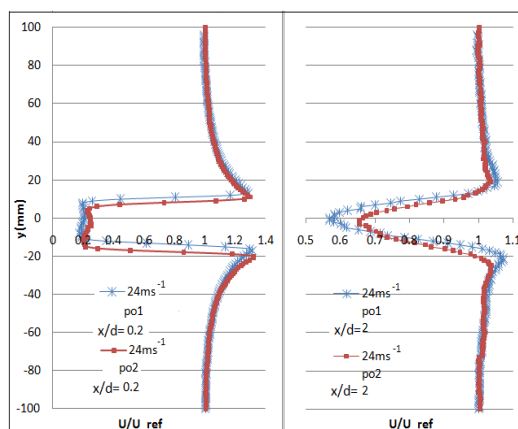
شکل ۱۱- میزان  $U/U_{ref}$  کابل نگهدارنده در سرعت ۱۷m/s در دو موقعیت و در دو ایستگاه مختلف



شکل ۹- میزان  $U/U_{ref}$  کابل ۶۳ KV در سرعت ۱۷ m/s در دو موقعیت و در دو ایستگاه مختلف



شکل ۱۲- میزان  $U/U_{ref}$  کابل نگهدارنده در سرعت ۲۴m/s و در دو موقعیت و در دو ایستگاه مختلف

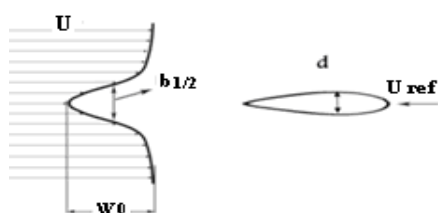


شکل ۱۰- میزان  $U/U_{ref}$  کابل ۶۳ KV در سرعت ۲۴ m/s در دو موقعیت و در دو ایستگاه مختلف

با فاصله گرفتن از مدل بتدریج پروفیل سرعت یکنواخت‌تر شده و به صورت پیوسته‌تری دیده می‌شود و به دلیل بازیافت فشار، جریان و پروفیل به حالت تعادل نزدیک‌تر می‌شوند. همچنین به تدریج پروفیل سرعت کمی در جریان آزاد رسوخ پیدا کرده و باعث افزایش عرض پروفیل سرعت و کاهش آن در راستای محور عمودی می‌شود.

۴-۱- پارامتر کاهش سرعت ( $W_0$ )

شکل زیر را در نظر بگیرید:

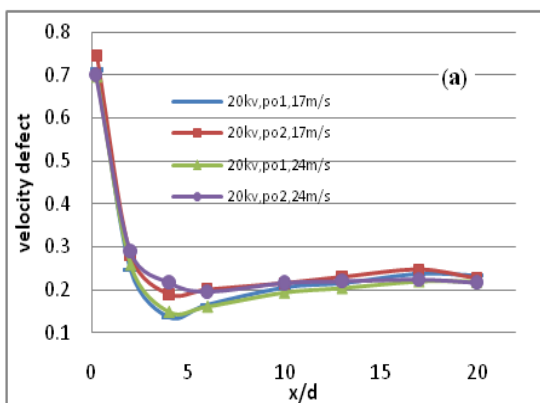


شکل ۱۵: پارامتر کاهش سرعت ( $w_0$ ) و نصف دهانه‌ی دنباله ( $b_{1/2}$ )

پارامتر کاهش سرعت (Velocity Defect) که با  $W_0$  نشان داده می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود:

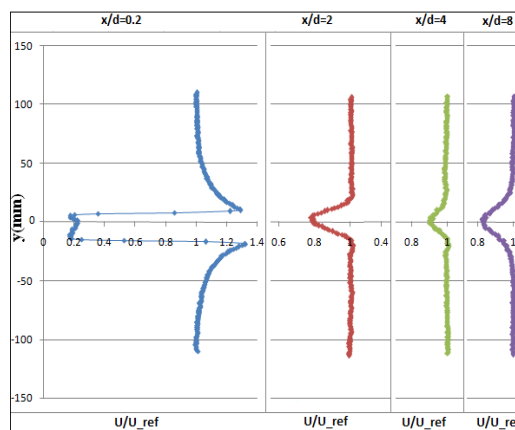
$$W_0 = \frac{U_{ref} - U_{min}}{U_{ref}} \quad (1)$$

که  $U_{min}$  سرعت کمینه‌ی جریان می‌باشد. مقدار پارامتر کاهش سرعت برای چهار مدل مفروض در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

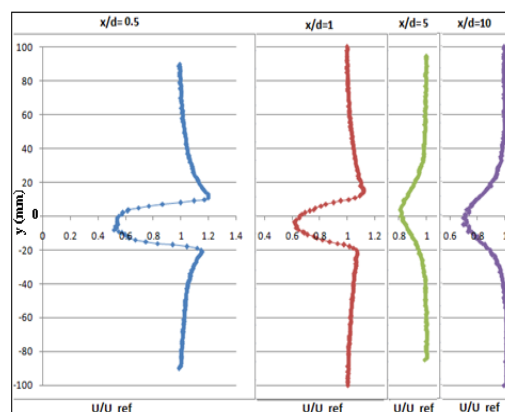


الف) کابل ۲۰KV

به دلیل تغییر در موقعیت زبری، مقدار مینیمم سرعت در دو نقطه (موقعیت‌های اول و دوم) با هم تفاوت دارد. این اختلاف در ایستگاه‌های نزدیک به مدل مشهودتر است. در  $x/d=2$  تا  $x/d=4$  این اختلاف بیشترین مقدار خود را دارد و بعد از آن به تدریج از بین می‌رود و سرعت‌ها تقریباً برابر می‌شوند. در تمامی مدل‌ها مینیمم سرعت از دقیقاً پشت مدل تا ایستگاه مابین  $x/d=2$  و  $x/d=4$  افزایش و سپس تا ایستگاه‌های آخر کاهش و دوباره شروع به افزایش می‌کند. کابل روکش‌دار مانند یک استوانه صاف عمل می‌کند و به همین علت با افزایش سرعت از  $17\text{m/s}$  به  $24\text{m/s}$  به دلیل اینکه در محدوده جریان آرام وجود دارد، میزان ضریب پسا کمی افزایش می‌یابد و  $U/U_{ref}$  در  $24\text{m/s}$  کمتر است.



شکل ۱۳- میزان  $U/U_{ref}$  کابل روکش‌دار در سرعت  $17\text{ m/s}$  و در ۴ ایستگاه مختلف

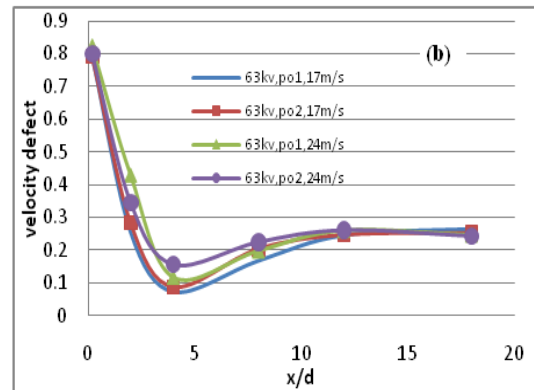
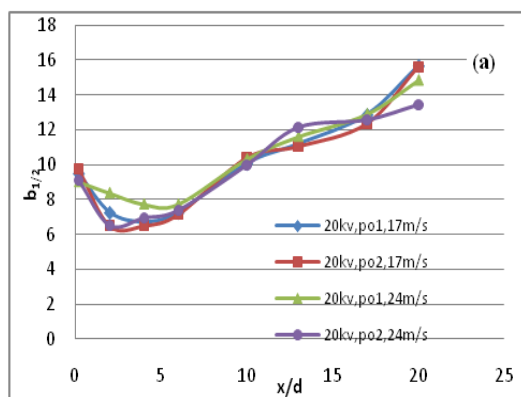


شکل ۱۴- میزان  $U/U_{ref}$  کابل روکش‌دار در سرعت  $24\text{ m/s}$  و در ۴ ایستگاه مختلف

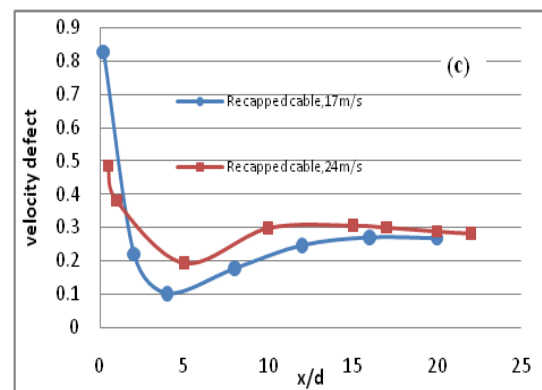
با توجه به شکل‌ها مشخص است که مقدار پارامتر کاهش سرعت در هر چهار مدل و در هر دو موقعیت ابتدا کاهش می‌یابد. این کاهش شدید و ناگهانی  $W_0$  در ایستگاه‌های ابتدایی می‌تواند به علت وجود سرعت عمودی زیاد در این نواحی علاوه بر سرعت افقی (به علت گردابه کارمن) باشد که موجب افزایش سرعت کل و کاهش شدید  $W_0$  می‌شود. با کم شدن سریع سرعت عمودی در ایستگاه‌های بعدی، پارامتر  $W_0$  افزایش می‌یابد و سرانجام در ایستگاه‌های آخر (که به علت اضمحلال گردابه، فقط سرعت افقی داریم که با سرعت کل یکی می‌شود) با افزایش سرعت افقی، دوباره کاهش می‌یابد. مقدار  $W_0$  در تمامی حالت‌ها در کمترین مقدار  $W_0$  بیشترین اختلاف را با یکدیگر دارند (در ایستگاه  $x/d=4$ ). به جز کابل روکش‌دار، در سایر مدل‌ها، در ایستگاه‌های آخر میزان  $W_0$  در سرعت  $24\text{m/s}$  کمی کمتر از سرعت  $17\text{m/s}$  می‌شود. به علت تغییر در موقعیت زبری، میزان  $W_0$  در دو نقطه (موقعیت) مجاور یکدیگر تفاوت دارد. در ایستگاه  $x/d=20$ ، هر چه میزان  $W_0$  کمتر باشد، میزان نفوذ جریان در دنباله بیشتر شده و ضریب پسا کاهش می‌یابد. به عنوان مثال ضریب پسا در  $20\text{KV}$  کمتر از کابل روکش‌دار است.

#### ۲-۴- مقادیر نصف پهنای دنباله $(b_{1/2})$ :

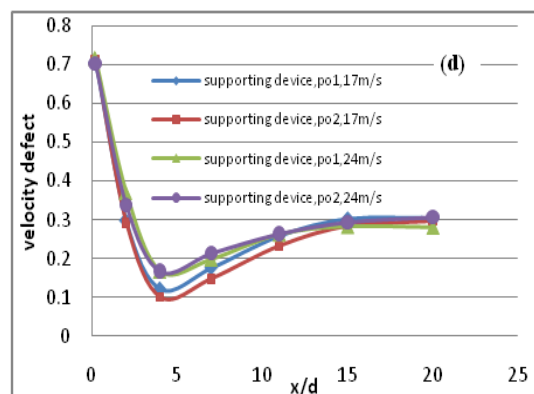
با دور شدن از مدل و نفوذ دنباله به ناحیه بالاتر به تدریج دهانه دنباله و عرض پروفیل سرعت بزرگتر می‌شود.  $b_{1/2}$ ، میزان نصف بازشدگی (پهنای) دهانه دنباله را نشان می‌دهد. مقادیر  $b_{1/2}$  برای مدل‌های مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



ب) کابل ۶۳ KV



ج) کابل روکش‌دار (Recapped cable)



د) سیم نگهدارنده (Supporting Devices)

شکل ۱۶- نمودار پارامتر کاهش سرعت برای چهار مدل



همانطور که از شکل‌ها دیده می‌شود پهنای دنباله در تمامی مدل‌ها ابتدا کاهش و سپس به علت نفوذ دنباله به عرصه‌های بالاتر، افزایش می‌یابد. همچنین مقدار آن معمولاً در ایستگاه‌های میانی در سرعت ۲۴m/s بزرگتر از مقدار آن در سرعت ۱۷m/s می‌باشد و در ایستگاه‌های اول و آخر، میزان  $b_{1/2}$  در سرعت ۱۷m/s بیشتر از مقدار آن در سرعت ۲۴m/s می‌باشد. همچنین مقدار  $b_{1/2}$  در ایستگاه  $x/d=4$  تقریباً در همه مدل‌ها کمترین مقدار خود را دارد.

#### ۳-۴- بررسی تجربی ضریب پسا با استفاده از روش wake-survey

روش wake-survey یک روش تجربی است که برای محاسبه ضریب پسا می‌توان از آن استفاده کرد. اساس این روش بر اختلاف مومنتوم در پشت و جلو جسم است. معادلاتی که برای اندازه‌گیری نیروی پسا استفاده می‌شوند به راحتی با اعمال قوانین مومنتوم و بقای جرم در یک حجم کنترل قابل استخراج می‌باشند.

وندام [۱۲] معادله‌ای برای محاسبه ضریب نیروی پسا به دست آورد که در آن جملات تنش‌های رینولدزی و شدت اغتشاشات جریان وجود داشتند. معادله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_d = \int \left( \frac{P_{s,e} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) + 2 \int \frac{\bar{u}}{U_{ref}} \left( 1 - \frac{\bar{u}}{U_{ref}} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) - 2 \int \frac{\bar{u}^2}{U_{ref}^2} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (2)$$

همانطور که می‌بینیم، معادله (۲) از سه بخش تشکیل شده است:

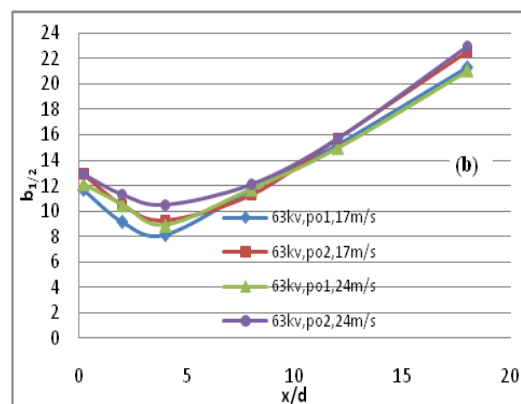
۱- جمله فشار

$$\int \left( \frac{P_{s,e} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (3)$$

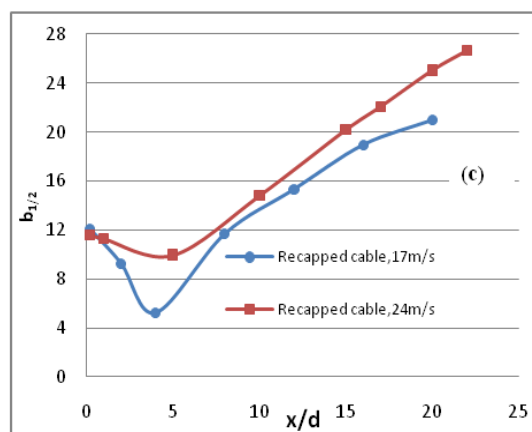
۲- جمله مومنتوم

$$2 \int \frac{\bar{u}}{U_{ref}} \left( 1 - \frac{\bar{u}}{U_{ref}} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (4)$$

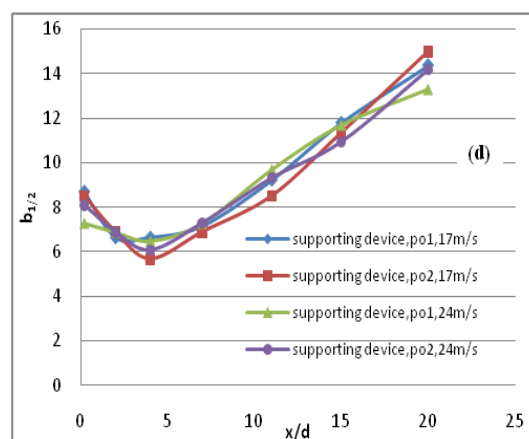
الف) کابل ۲۰ KV



ب) کابل ۶۳ KV



ج) کابل روکش دار (Recapped cable)



د) سیم نگهدارنده

شکل ۱۷- مقادیر نصف پهنای دنباله در چهار مدل

۳- جمله تنش رینولدز

$$2 \int \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (5)$$

اما بر طبق تحلیل گلدستون [۱۶]:

$$p_{s,e} = p_{s,w} + \overline{q'} \quad (6)$$

$$\overline{q'} = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (7)$$

با جایگذاری پارامتر حاضر در رابطه‌ی (۲) خواهیم داشت:

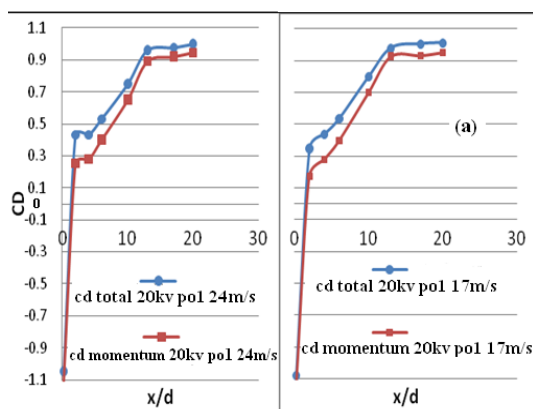
$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\overline{q'}}{q_\infty}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\overline{q'}}{q_\infty}} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) + \frac{1}{3} \int \frac{(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}{U_\infty^2} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (8)$$

و در صورتی که فرض کنیم  $u' = v' = w'$  باشد، به معادله زیر می‌رسیم:

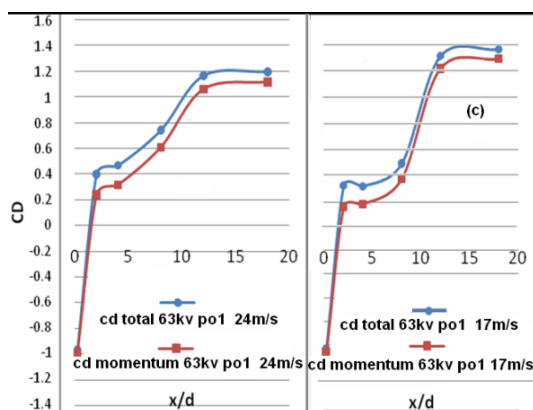
$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\overline{q'}}{q_\infty}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\overline{q'}}{q_\infty}} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) + \frac{1}{3} \int \frac{\overline{q'}}{q_\infty} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (9)$$

در این رابطه اولین انتگرال بیانگر مومنوم و انتگرال دوم نیز شامل نقش شدت اغتشاشات در اندازه گیری ضریب پسا می‌باشد. از این معادله می‌توان برای محاسبه ضریب پسا کلی مدل استفاده نمود. در روابط فوق  $p_{s,a} - p_{s,w}$  نشان دهنده اختلاف فشار در بالادست و پایین دست مدل (ایستگاه‌های اندازه گیری)،  $y/l$  بیانگر نسبت فاصله عمودی از مسیر عبور جریان و از خط مرکزی مدل به حداکثر فاصله عمودی از مسیر عبور جریان و همچنین  $U/U_{ref}$  نشان‌دهنده نسبت سرعت متوسط در یک نقطه به سرعت جریان آزاد و  $\rho$  چگالی سیال می‌باشد. گلدستون [۱۳] اثبات کرده است که از آنجا که اندازه‌گیری دقیق فشار استاتیکی در ناحیه دنباله جسم، دشوار می‌باشد، می‌توان فرض نمود که ناحیه دنباله جسم، یک جریان برشی است. دقت مقدار صحیح ضریب پسا در ایستگاه‌های دورتر از مدل (جایی که فشار استاتیک تقریباً برابر فشار محیط است)، بیشتر است. بنابراین ضریب پسا در این روش در ایستگاه‌های آخر تقریباً ثابت می‌شود.

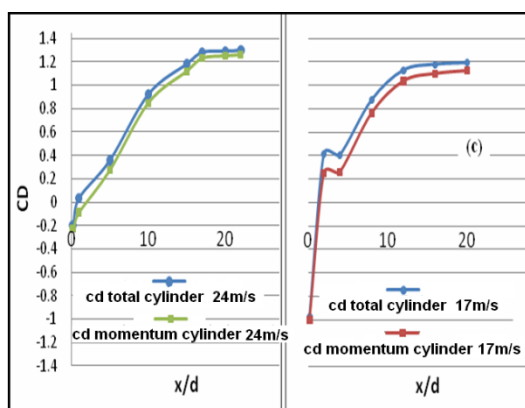
در شکل ۱۸ (الف، ب، ج و د) مقادیر مومنوم و کلی ضریب پسای مدل‌ها به طور جداگانه رسم شده‌اند.



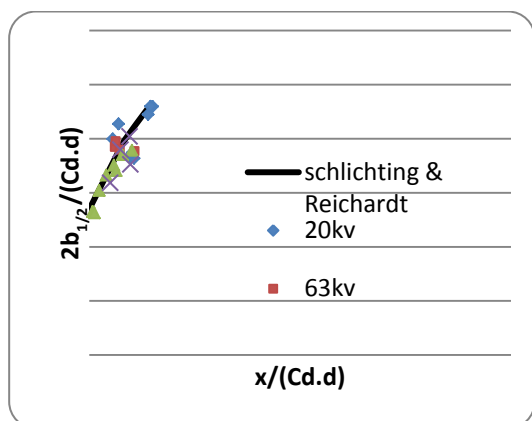
الف) کابل ۲۰ KV



ب) کابل ۶۳ KV



ج) سیلندر استوانه‌ای



شکل ۱۹- مقایسه پهنای دنباله پشت سیلندر دایره ای با نتایج [۱۴ و ۱۵]؛ رابطه  $b_{1/2} = 0.25(x/c_h \times d) \times 0.5b_{1/2}$  برقرار است.

با توجه به شکل ۱۹ ملاحظه می‌شود که نتایج به دست آمده از آزمایش‌های این تحقیق با نتایج [۱۴ و ۱۵] به خوبی مطابقت می‌کند.

#### ۴-۵- عدد استروهاال

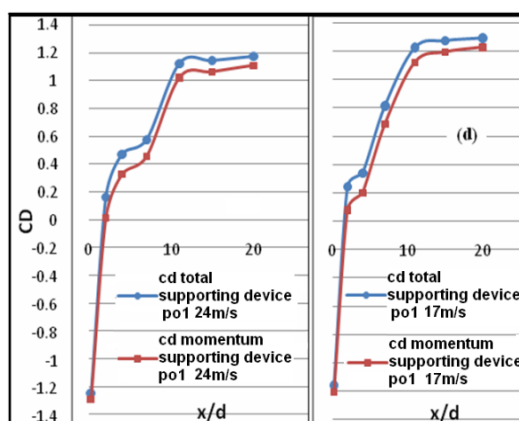
عدد استروهاال از اعداد بی بعد است که فرکانس نوسانات گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل را به صورت بی بعد بیان می‌کند. عدد استروهاال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$St = f \times d / U \quad (10)$$

که  $f$  فرکانس گردابه پشت مدل،  $d$  قطر مدل و  $U$  سرعت جریان آزاد سیال می‌باشد. فرکانس گردابه‌های تشکیل شده پشت مدل را می‌توان بوسیله سنسور جریان سنج سیم داغ در تونل باد بدست آورد.

#### ۴-۵-۱- تعیین فرکانس گردابه توسط حسگر سیم داغ<sup>۳</sup>

حسگر سیم داغ میزان نوسانات جریان سیال در تونل باد را به صورت نوسان در زمان یا به عبارتی در حوزه زمان دریافت می‌کند و با استفاده از تبدیل سریع فوری<sup>۴</sup> آنرا به حوزه فرکانس برده و در نمایشگر برحسب فرکانس نوسان نشان



سیم نگهدارنده (د)

شکل ۱۸- مقادیر ضریب پسای مومنومی و کلی در ۴ مدل

همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود، ضریب پسا در ایستگاه‌های اول به علت اختلاف با فشار جریان آزاد، مقادیر نادرست را نشان می‌دهد و با دور شدن از مدل به تدریج مقدار ضریب پسا به مقدار حقیقی خود نزدیک‌تر شده تا جایی که مقدار آن تقریباً ثابت می‌شود.

مقدار ضریب پسا در همه مدل‌ها به جز کابل روکش‌دار در سرعت ۲۴m/s کوچکتر از سرعت ۱۷m/s می‌باشد. در کابل روکش‌دار احتمالاً به دلیل جدا شدن جریان از سطح و آرام بودن جریان در سرعت ۲۴m/s نسبت به سرعت ۱۷m/s، ضریب پسای آن نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی در کابل ۲۰KV ضریب پسا از سایر مدل‌ها کوچکتر و در سیم نگهدارنده نیز از سایر مدل‌ها بزرگتر است. میزان ضریب پسای مومنومی نیز کمی کمتر از ضریب پسای کل می‌باشد، چون قسمت اغتشاشی آن در نظر گرفته نشده است.

#### ۴-۴- اعتبار سنجی پارامترها

ریچارد<sup>۱</sup> [۱۷] و شلیختینگ<sup>۲</sup> [۱۸] تحقیقاتی در زمینه دنباله جریان سیلندرهای دایروی با قطرهای مختلف  $d$  انجام داده اند. شکل ۱۹ پهنای دنباله محاسبه شده را بر حسب فاصله از مدل ( $x$ ) نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج آن‌ها در شکل ۱۹ مقایسه شده است.

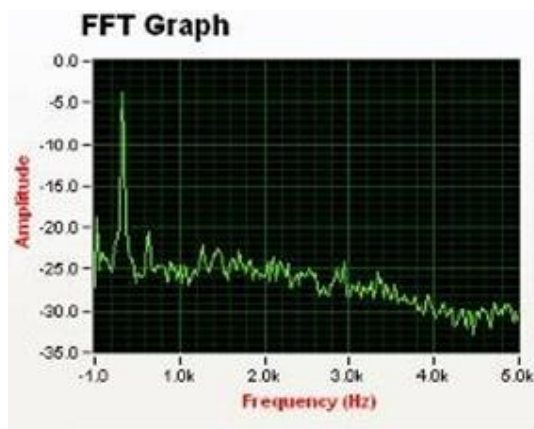
<sup>3</sup> Hot Wire Sensor

<sup>4</sup> Fast Fourier Transform

<sup>1</sup> Richardt

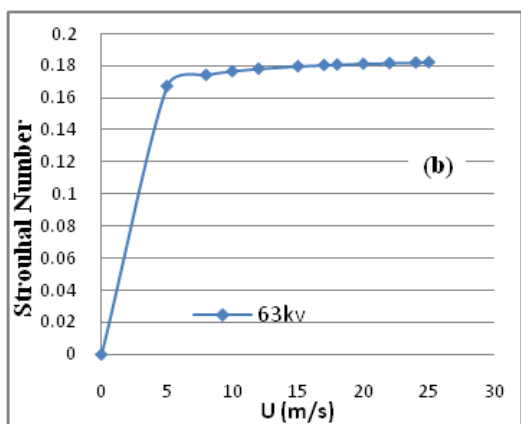
<sup>2</sup> Schlichting

می‌دهد. در تونل باد مورد آزمایش، فرکانس داده برداری  $\Delta KHZ$  انتخاب شده است (شکل ۲۰).

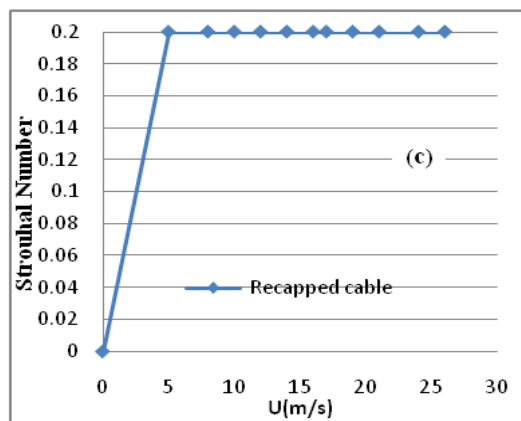


شکل ۲۰- نوسانات جریان در حوزه فرکانس

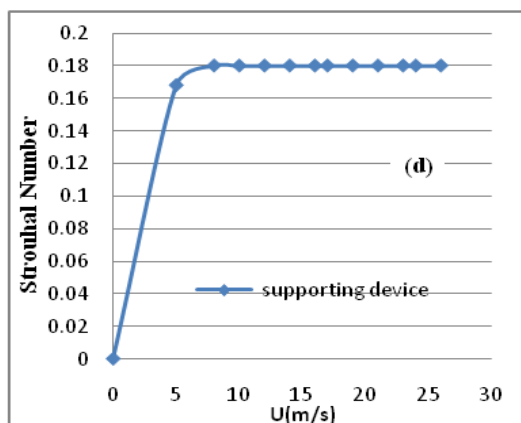
در حوزه فرکانس می‌توان دامنه تمامی نوسانات (با فرکانس‌های مختلف) جریان که توسط حسگر اندازه‌گیری می‌شود را مشاهده کرد. به عبارتی دامنه نوسان بیان کننده فرکانس‌های مختلف جریان است. از بین تمامی نوسانات جریان پشت مدل، مسلم است که نوسانات گردابه‌های کارمن دارای بیشترین دامنه هستند. بنابراین فرکانس مربوط به بیشترین دامنه در واقع همان مقدار فرکانس گردابه است. پس از تعیین فرکانس گردابه در سرعت‌های مختلف عدد استروهاال را می‌توان یافت (شکل ۲۱).



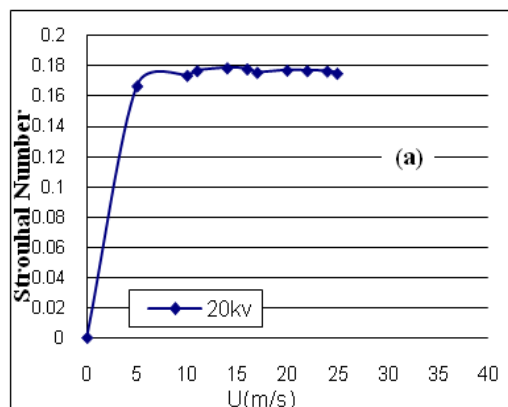
ب) کابل ۶۳ KV



ج) کابل روکش دار

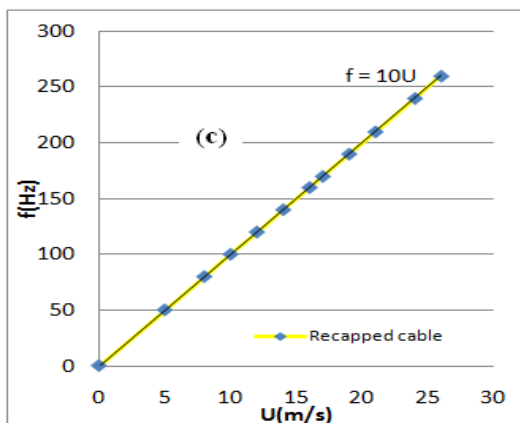


د) سیم نگهدارنده

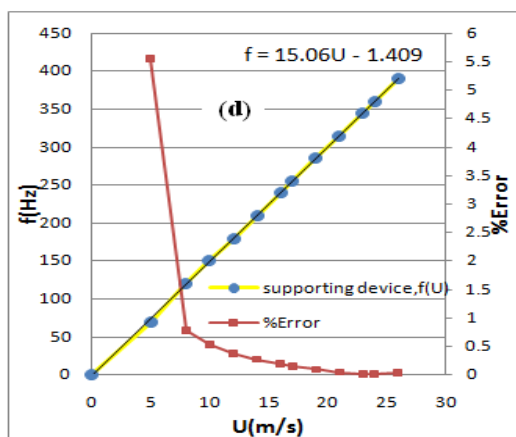


الف) کابل ۲۰ KV

شکل ۲۱- عدد استروهاال در سرعت‌های مختلف در چهار مدل



ج) کابل روکش دار



د) سیم نگهدارنده

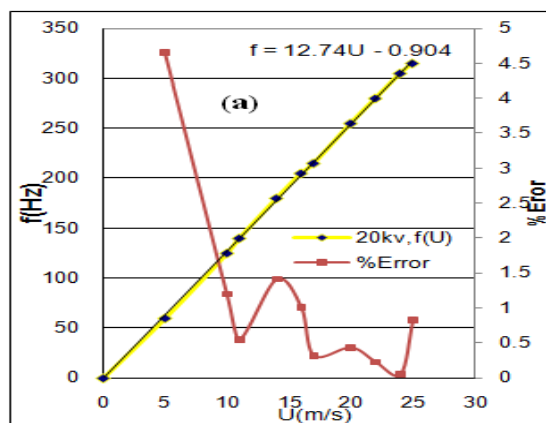
شکل ۲۲- رابطه خطی فرکانس گردابه و سرعت و میزان خطا در چهار مدل (خطا در کابل روکش دار صفر است)

با توجه به شکل ۲۲ در می‌یابیم که می‌توان از رابطه خطی فرکانس گردابه بر حسب سرعت استفاده کرد چون میزان خطای آن خصوصا در سرعت‌های بالاتر ناچیز است و در سرعت‌های پایین به تدریج درصد خطا افزایش می‌یابد. با داشتن این روابط می‌توان فرکانس گردابه‌ها را فقط با داشتن سرعت جریان آزاد با دقت خوبی محاسبه کرد. نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد آن است که میزان خطا در کابل روکش دار صفر است و سرعت نسبتی کاملا خطی با فرکانس گردابه دارد.

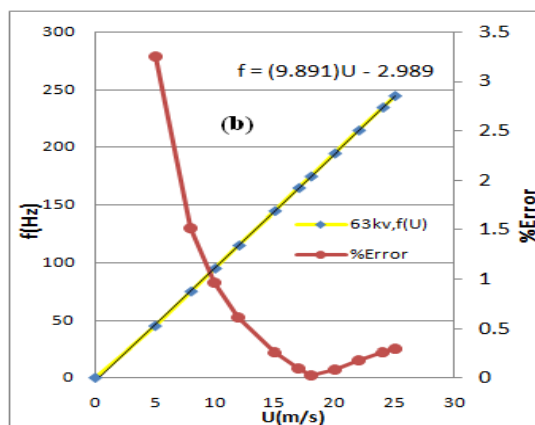
همانطور که در شکل ۲۱ دیده می‌شود، عدد استروهاال در مدل‌ها تقریبا ثابت است و مقدار آن در کابل روکش دار برابر ۰.۲، و در سایر مدل‌ها تقریبا برابر ۰.۱۸ می‌باشد.

#### ۴-۵-۲- رابطه سرعت و فرکانس گردابه

با بررسی سرعت و فرکانس گردابه در مدل‌ها، می‌توان رابطه ای خطی بین سرعت جریان آزاد و فرکانس گردابه تشکیل شده پشت مدل را با درصد کمی خطا یافت. شکل ۲۲ رابطه خطی فرکانس گردابه و سرعت و میزان خطا را در چهار مدل مختلف نشان می‌دهد.



الف) کابل ۲۰ KV



ب) کابل ۶۳ KV

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر سرعت باد بر چهار مدل مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل‌ها از کلاف‌های مارپیچ به هم تنیده تشکیل شده‌اند. این کلاف‌ها موجب ایجاد شیار و در نتیجه ارتفاع زبری متفاوتی در مدل‌ها می‌شود. در بین مدل‌ها به ترتیب سیم ۲۰ کیلوولت، سیم ۶۳ کیلوولت، کابل نگهدارنده (بکسل) و کابل روکش‌دار، دارای بیشترین و کمترین زبری نسبی و در نتیجه اغتشاش هستند. باید توجه داشت که گام کلاف‌ها نیز بر اغتشاش موثر است.

افزایش اغتشاشات و مومنتوم جریان سبب می‌شود که عدد رینولدز بحرانی و در نتیجه افت ناگهانی ضریب پسا، در رینولدزهای کمتری اتفاق بیفتد و برای انتقال نقطه جدایش به عقب، نیاز به عدد رینولدز کوچکتری خواهد بود. ایجاد زبری موجب می‌شود که نوسانات جریان برشی آزاد سیال که از سطح مدل جدا می‌شود و سریع شروع به رشد کردن می‌کند، در فاصله کوتاهی از آن دوباره به سطح مدل بچسبد و بدین صورت جدایش در روی مدل به تاخیر بیافتد.

مقدار پارامتر کاهش سرعت در هر چهار مدل و در هر دو نقطه ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و در ایستگاه‌های آخر دوباره کاهش می‌یابد. این کاهش شدید و ناگهانی  $W_0$  در ایستگاه‌های ابتدایی می‌تواند بعلت وجود سرعت عمودی زیاد در این نواحی علاوه بر سرعت افقی (به علت گردابه کارمن) باشد که موجب افزایش سرعت و کاهش شدید  $W_0$  می‌شود.

هر چند بعلت تفاوت قطر در مدل‌ها و در نتیجه تفاوت عدد رینولدز (با وجود سرعت‌های یکسان) و همچنین تفاوت زبری نسبی و گام مدل‌ها با یکدیگر نمی‌توان دلیل تفاوت ضریب پسای مدل‌ها را با هم صراحتاً بیان کرد، ولی می‌توان گفت علت اینکه ضریب پسا در کابل ۲۰ کیلوولت کمتر از سایر مدل‌ها می‌باشد، زبری نسبی و اغتشاش بیشتر نسبت به سایر مدل‌هاست. همچنین به علت قطر کمتر نسبت به سایر مدل‌ها، نیروی پسای کمتری نیز به این کابل وارد می‌شود. با توجه به نتایج حاصل شده به نظر می‌رسد که کابل ۲۰ کیلوولت از بقیه مدل‌ها مناسبتر است و می‌توان از الگوی کلاف آن در سرعت‌های مذکور بهره برد.

تقریباً در همه مدل‌ها بجز کابل روکش‌دار، ضریب پسا در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه کمتر از سرعت ۱۷ متر بر ثانیه می‌-

باشد. زیرا احتمالاً در آنها زبری موجب چسبیدن مجدد جریان جدا شده، به سطح و تاخیر در جدایش می‌شود. این امر موجب می‌شود افزایش سرعت به کاهش ضریب پسا بیانجامد ولی در کابل روکش‌دار اینطور نیست و ضریب پسا با افزایش سرعت افزایش می‌یابد.

عرض دنباله به علت نفوذ دنباله به عرصه‌های بالاتر با دور شدن از مدل افزایش می‌یابد. ماکزیمم فرکانسی که در اکثر ایستگاه‌ها غالب است، فرکانس گردابه‌های کارمن می‌باشد. فرکانس گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل با افزایش سرعت افزایش می‌یابد و می‌توان رابطه خطی بین سرعت جریان آزاد و تشکیل گردابه پشت مدل برقرار کرد. با معلوم بودن فرکانس گردابه‌ها می‌توان عدد استروهمال را تعیین کرد. عدد استروهمال در جریان حول کابل روکش‌دار ۰/۲ می‌باشد که از بقیه مدل‌ها بزرگتر است.

## ۶- علائم و نشانه‌ها

$b_{1/2}$	نصف پهنای دنباله، mm
Cd	ضریب پسای فشاری
Cf	ضریب اصطکاک پوسته‌ای
d	قطر سیم، mm
f	فرکانس گردابه پشت مدل، KHZ
l	حداکثر فاصله عمودی از مسیر عبور جریان، mm
$P_t$	فشار کلی، Pa
$P_s$	فشار استاتیک، Pa
q	فشار دینامیک، Pa
$\bar{q}$	فشار دینامیک متوسط، Pa
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهمال
%Tu	شدت اغتشاشات جریان سیال
U	سرعت، m/s
$U_{refz}$	سرعت جریان آزاد، m/s
U, V, W	مولفه‌های سرعت در سه جهت فضایی، m/s
U', V', W'	مولفه‌های اغتشاشی سرعت، m/s
x	فاصله طولی حسگر از مدل، mm
y	فاصله عمودی از خط مرکزی مدل، mm
$W_0$	پارامتر کاهش سرعت

## زیر نویس‌ها

- overhead electric wire, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90: 293–304.
- [8] Horner FS (1965) Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance, In: *Fluid-Dynamic Drag*, Hoerner Fluid Dynamics, Bakersfield, CA.
- [۹] اردکانی محمدعلی (۱۳۸۵) جریان سنج سیم داغ، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول، تهران.
- [10] Maskell EC (1963) A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel, Report and Memoranda.
- [11] Williamson CHK (1988) Defining a universal and continuous Strouhal–Reynolds number relationship for the laminar vortex shedding of a circular cylinder. *Phys. & Fluids* 31: 2742–27.
- [12] Van D (1999) Recent experience with different methods of drag prediction. *Progress in aerospace science* 35: 751–798.
- [13] Goldstein S (1936) A Note on the measurement of total head and static pressure on a turbulent stream, *Proceedings of the royal society of London, Series A*: 570–575.
- [14] Rechart H (1951). *Gesetzmabigkeiten der freien Turbulenz*. VDI Forschungsheft: 414.
- [15] Schlichting H (1930) *Über das ebene Wind schatten problem*. Diss Gottingen, *Ing.-Arch1*: 533–571.
- e مقدار در لبه دنباله
- w مقدار در دنباله
- ### مراجع
- [۱] صنیعی‌نژاد، مهدی (۱۳۸۸) مبانی جریان‌های آشفته و مدلسازی آنها، انتشارات دانش نگار، چاپ اول.
- [2] Achenbach E (1971) Interface of surface roughness on the cross-flow around the circular cylinder, *J Fluid Mech.* 321–335.
- [3] Fagea W (1930) The effect of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder, *Aero Res Com Lordom R & M*. No 1283.
- [4] Dunlop J, (2003) Free flight Aerodynamics of ports balls, *Acousto Scan*, 1–4.
- [5] Huang S (2010) Cylinder drag reduction by the use of helical grooves, Department of Naval Architecture and Marine Engineering. University of Strathclyde.
- [6] Kikuchi N, Matsuzaki Y, Yukino T, Ishida H (2003), Aerodynamic drag of new-design electric power wire in a heavy rainfall and wind, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91: 41–51.
- [7] Eguchi Y, Kikuchi N, Kawabata K, Yukino T, Ishikubo Y (2002) Drag reduction mechanism and aerodynamic characteristics of a newly developed