



Experimental Investigation of One-Loop Galloping in Power Transmission Conductors and the Effect of Local Covering to it's Alleviate

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sabbagh-Yazdi S.¹ PhD,
Jamshidi M.^{*1} MSc

How to cite this article

Sabbagh-Yazdi S, Jamshidi M. Experimental Investigation of One-Loop Galloping in Power Transmission Conductors and the Effect of Local Covering to it's Alleviate. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1171-1185.

¹Civil Engineering Faculty, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Civil Engineering Faculty, K.N.Toosi University of Technology, Valiasr Street, Tehran, Iran.
Postal Code: 1996715433
Phone: +98 (21) 88779473
Fax: +98 (21) 88779476
mjamshidi@dena.kntu.ac.ir

Article History

Received: June 26, 2019

Accepted: October 14, 2019

ePublished: May 09, 2020

ABSTRACT

Galloping is a large-amplitude, low frequency, wind-induced oscillation of overhead power transmission lines with one or multi loops of standing waves per span which occurs due to wind flow. Based on the field data, numerous galloping oscillations occurs in the form of one loop oscillation which whereby high dynamic loads are imported to the support structures. In this research, the results of wind tunnel tests have been performed on a two-span distorted scale model with an ice-accreted cross-section under uniform and non-uniform aerodynamic loadings. Dead-end and suspension insulators have been applied to the support points. Then, based on identifying the most critical state of the lines oscillation, a solution has been proposed based on increasing their bending strength through the application of hardening local covering. The results showed that the most critical state of the cables oscillation in the galloping is related to the one-loop oscillation, which occurs as a result of interactions between the cables of adjacent spans under uneven aerodynamic loading and the use of suspended insulators, and the dynamic forces applied to the supports are about 20% more than the case when the cables oscillate due to the dead-end connections attached to the support structure. Also, applying the local covering with a length of 20% of cable span leads to a 27% reduction in dynamic support reaction of one-loop galloping.

Keywords Galloping; Wind Tunnel; Local Covering; Distorted Modelling; Aerodynamic Loading; Insulator

CITATION LINKS

[1] A new damper to solve galloping on bundled ... [2] Galloping data base on single and bundle conductors prediction of maximum ... [3] Galloping simulation of the power transmission line under the fluctuating ... [4] Two-degree-of-freedom analysis of power line galloping by ... [5] Stochastic modelling and stabilization of galloping transmission ... [6] Finite element analysis on dynamic tension of quad-bundle ... [7] Finite element modelling of transmission line ... [8] A cable galloping model for thin ice ... [9] Non-linear galloping of sagged cables in 1:2 internal ... [10] Analytical model for dynamic tension in overhead ... [11] Analytical solution for galloping ... [12] Analytical and numerical approaches to nonlinear galloping ... [13] Analysis of conductor galloping field ... [14] Galloping of a single conductor covered with a D-section on a high-voltage ... [15] Experimental and numerical assessment of EPS wind action on ... [16] Identification of large amplitude wind-induced vibration of ... [17] Field observations on wind induced conductor ... [18] Dynamic behavior of a Pylône à Chaînette line ... [19] Controlling conductor motion with interphase spacers in ... [20] The effect of an added mass on the galloping of an overhead ... [21] Transmission line vibration due to ... [22] Experiments with galloping ... [23] Conductor galloping Part I - Den Hartog ... [24] Conductor galloping-Part II torsional ... [25] State of the art of conductor ... [26] A novel approach for wind tunnel ... [27] Galloping instabilities of two-dimensional triangular ... [28] Galloping of electrical lines in wind tunnel ... [29] A novel elastic suspension system for wind tunnel ... [30] On the quasi-steady analysis of one-degree-of-freedom ... [31] Dynamic loads on transmission line structures ... [32] Dynamics of cable under wind action: Wind tunnel ... [33] The galloping oscillation of a cable of square section ... [34] Guidelines for electrical transmission line ... [35] The linear theory of free vibrations of a suspended ... [36] Modern developments in ... [37] Factors relative to ... [38] Influence of turbulence on the galloping instability of iced ... [39] Comprehensive renewable ... [40] Electric power transmission system engineering ... [41] Low-Speed Wind Tunnel ... [42] Visualization of Supersonic Free and ... [43] A numerical and experimental evaluation of open jet ... [44] Effect of open-jet shear layers on aeroacoustic ... [45] Integrated design process for subsonic open circuit ... [46] Air flow modeling in the wind tunnel of ... [47] Boundary layer ...

بررسی آزمایشگاهی پدیده تاخت‌باد تک‌حلقه در کابل‌های انتقال برق و تاثیر استفاده از روکش‌های موضعی به‌منظور مقابله با آن

سعیدرضا صباغ‌یزدی PhD

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مجتبی جمشیدی MSc

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

تاخت‌باد نوسان با دامنه زیاد و فرکانس کم کابل‌های خطوط انتقال برق است که در اثر وزش باد به‌صورت امواج ایستا با حلقه‌های تکی یا بیشتر در هر دهنه رخ می‌دهد. براساس داده‌های میدانی، تعداد قابل توجهی از رخداد‌های تاخت‌باد به‌صورت نوسانات تک‌حلقه اتفاق می‌افتد که در اثر آن نیروی دینامیکی قابل توجهی به دکل‌ها وارد می‌شود. در این مقاله نتایج آزمایش تونل باد روی یک نمونه مقیاس شده خط انتقال برق شامل دو دهنه کابل تکی با در نظر گرفتن دو نوع مقره انتهایی بسته و معلق و همچنین بارگذاری ایرودینامیکی یکنواخت و غیریکنواخت (با استفاده از تونل باد جریان آزاد) برای بررسی رفتار ایرودینامیکی کابل‌ها در تحت تاثیر پدیده تاخت‌باد ارایه شده است. سپس براساس شناسایی بحرانی‌ترین حالت نوسان کابل‌ها، راهکاری بر مبنای افزایش مقاومت خمشی آنها از طریق به‌کارگیری روکش‌های موضعی سخت‌کننده پیشنهاد شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که بحرانی‌ترین حالت نوسان کابل‌ها در پدیده تاخت‌باد، مربوط به نوسان تک‌حلقه است که در نتیجه اندرکنش بین کابل‌های دهنه‌های مجاور تحت بارگذاری ایرودینامیکی غیریکنواخت و به‌کارگیری مقره‌های معلق رخ می‌دهد و طی آن نیروی‌های دینامیکی وارد بر تکیه‌گاه‌ها حدود ۲۰٪ بیش از حالتی است که کابل‌ها به دلیل اتصال انتهایی بسته به دکل‌ها به صورت دو حلقه نوسان می‌کنند. همچنین به‌کارگیری روکش‌های موضعی به اندازه ۲۰٪ طول دهنه کابل باعث کاهش حدود ۲۷٪ در نیروی دینامیکی وارد بر سازه نگهدارنده نسبت به حالت بدون روکش می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تاخت‌باد، تونل باد، روکش موضعی، مدل‌سازی تحریف‌شده، بار ایرودینامیکی، مقره

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۲

* نویسنده مسئول: m.jamshidi.kntu@gmail.com

۱- مقدمه

ایجاد نیروهای دینامیکی در خطوط فشار قوی انتقال برق در اثر وزش بادهای شدید و در شرایط خاص آب و هوایی یکی از مسایل مهم در طراحی اجزا این خطوط به‌ویژه سازه‌های نگهدارنده (دکل‌ها) است. تاخت‌باد یکی از شناخته‌شده‌ترین پدیده‌های ایرودینامیکی است که می‌تواند نیروی دینامیکی قابل توجهی به دکل‌ها وارد نماید. طبق تعریف، تاخت‌باد عبارت است از نوسان با دامنه زیاد (مقداری برابر یا حتی بیش از خیز کابل) و فرکانس کم (یک چرخه و یا کمتر) که در کابل‌های هوایی تکی (Single-

Conductor) و یا چندتایی (Bundle Conductors) که دارای مقطع غیردایره‌ای باشند به‌صورت امواج ایستا با یک و یا چندحلقه در هر دهنه ایجاد می‌شود[1-4]. در بیشتر مراجع علمی، تنها نوسان قائم که در آن جهت جابجایی کابل عمود بر جهت وزش باد است به‌عنوان تاخت‌باد شناخته می‌شود[4].

تاخت‌باد یک پدیده بسیار پیچیده از اندرکنش باد- سازه و اندرکنش کابل‌های دهنه‌های مجاور بر روی یکدیگر است که به‌صورت گسترده‌ای توسط محققین در قالب مدل‌سازی‌های عددی و روش‌های تحلیلی[3-12]، جمع‌آوری داده از مشاهدات میدانی[2, 13-18] و آزمایش‌های تونل‌باد مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس این مطالعات روش‌های مختلفی نیز برای کاهش و یا رفع کامل اثرات مخرب این پدیده پیشنهاد شده است [1, 19, 20]. با وجود ارایه تئوری‌های مختلف توسط محققین از جمله تئوری‌های "نوسان صرفا در جهت قائم" (Purely Vertical Oscillation)، "نوسان صرفا چرخشی" (Purely Rotational Oscillation)، "نوسان ترکیبی قائم و افقی" (Coupled Vertical and Horizontal Oscillation) و "نوسان ترکیبی قائم، افقی و چرخشی" (Coupled Vertical, Horizontal and Rotational Oscillation) در ساخت برخی ابزارها مورد استفاده قرار گرفته‌اند[21-24]، اما تاکنون هیچ کدام منجر به ارایه راه‌حل فنی و اقتصادی که بتواند به‌صورت موثر و فراگیر در خطوط توزیع برق مورد استفاده قرار گیرد، نشدند. دلیل این امر را می‌توان در پیچیدگی بسیار زیاد طبیعت پدیده تاخت‌باد به‌دلیل رخداد گاه‌وبی‌گاه زمانی و مکانی آن و همچنین وابستگی این پدیده به عوامل متعدد از جمله سرعت، جهت، دما، یکنواختی و شدت آشفتگی جریان باد به‌علاوه طول دهنه، میزان کشش، خیز، قطر، شکل مقطع، تکی و یا چندتایی‌بودن و سایر مشخصه‌های فیزیکی کابل مورد استفاده در خطوط انتقال برق جستجو کرد[8].

با وجود ارایه تئوری‌های گوناگون و مدل‌سازی‌های عددی رفتار ایرودینامیکی کابل‌ها در پدیده تاخت‌باد، نتایج به‌دست‌آمده می‌بایست راستی‌آزمایی شده که این کار به نوبه خود کار بسیار حساس و دشواری است. جمع‌آوری اطلاعات به‌وسیله مشاهدات میدانی از نمونه‌های واقعی و یا مطالعاتی یکی دیگر از روش‌های نسبتا دشوار در زمینه مطالعه فیزیکی پدیده تاخت‌باد است؛ زیرا در اکثر موارد داده‌های جمع‌آوری شده کامل نبوده و به مواردی مانند شکل مقطع یخ‌زده، راستای وزش باد، تغییرات سرعت، میزان آشفتگی جریان و غیره اشاره نمی‌شود. در این بین آزمایش تونل‌باد روش موثری است که به‌وسیله آن می‌توان با فراهم‌کردن شرایط مورد نظر برای ساخت نمونه آزمایشگاهی و ایجاد جریان، به نتایج قابل توجهی دست یافت. هر چند که در این روش نیز مشکلاتی از جمله روش مقیاس‌سازی یک مساله بسیار مهم محسوب می‌شود[25, 26].

برای مطالعه آزمایشگاهی پدیده تاخت‌باد تاکنون آزمایش‌های بسیاری با استفاده از تونل‌باد انجام شده است؛ این مطالعات به



شکل ۱) مقره‌های مورد استفاده در خطوط انتقال برق؛ (راست) مقره انتهایی بسته (کششی)، (چپ) مقره معلق

در یک سیستم متداول انتقال برق تعداد مقره‌های معلق بسیار بیشتر از نوع کششی است. مقره‌های کششی تنها در مکان‌هایی که خط انتقال، تغییر مسیر می‌دهد مورد استفاده قرار می‌گیرند^[34]. ساختار اصلی مقره‌های معلق متشکل از یک میله صلب است که به‌وسیله چند حلقه زنجیر به سازه نگهدارنده متصل می‌شود و یک اتصال مفصلی را به‌وجود می‌آورد. این ساختار موجب می‌شود که کابل در محل این نوع مقره‌ها با هر تحریک خارجی به راحتی و آزادانه دچار نوسان و حرکت شود. بنابراین مطالعه رفتار آیرودینامیکی خطوط انتقال برق بدون در نظر گرفتن اندرکنش کابل‌های دهنه‌های مجاور منجر به نتایج غیرواقعی خواهد شد. نکته مهم دیگری که باید در مطالعه پدیده تاخت‌باد به آن توجه شود و در آیین‌نامه‌های طراحی خطوط انتقال برق نیز مورد تاکید قرار گرفته است، بارگذاری نامتقارن بر روی کابل‌های هوایی است. به‌دلیل وجود عوارض طبیعی زمین، شدت تابش آفتاب (از نظر ایجاد سایه و تغییر در میزان آب‌شدن یخ‌زدگی روی کابل‌ها) و وزش باد می‌تواند بر روی دهنه‌های مختلف، متفاوت باشد و همین موضوع منجر به اعمال بارگذاری‌های غیریک‌نواخت در طول یک خط انتقال برق شود^[34].

براساس داده‌های جمع‌آوری شده توسط لیلین و هاوارد^[2] و راولینز^[13] به‌ترتیب بیش از ۳۵ و ۸۵٪ از تاخت‌باد رخ داده در خطوط انتقال برق در چین و کانادا از نوع نوسان تک‌حلقه بوده است. با در نظر گرفتن طول بسیار زیاد دهنه‌ها و خیز قابل توجه متناظر با آن و همچنین مقاومت خمشی و سطح بادخور بسیار

دو روش کلی تقسیم می‌شوند. در روش نخست که روش دینامیکی نامیده می‌شود طول کوتاهی از یک کابل واقعی به‌عنوان نمونه آزمایشگاهی صلب تحت آزمایش قرار می‌گیرد. در این روش مشخصه‌های الاستیکی مدل، از طریق یک سیستم فنری معلق (Spring Suspension System) در دو نقطه تکیه‌گاه انتهایی شبیه‌سازی می‌شود^[26]. روش دوم، روش استاتیکی نامیده می‌شود و در آن نیروهای آیرودینامیکی و پاسخ‌های دینامیکی از طریق انجام آزمایش تونل‌باد بر روی یک مدل مقیاس شده از یک نمونه کامل واقعی (و نه بخشی از آن) به‌دست‌آمده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد^[26].

با وجود اینکه بیشتر آزمایش‌های انجام شده برای مطالعه پدیده تاخت‌باد از نوع آزمایش‌های دینامیکی هستند^[27-30]، اما روش استاتیکی دارای برتری‌هایی نسبت به روش دینامیکی است. مهم‌ترین برتری روش استاتیکی این است که با رعایت اصول مقیاس‌سازی، این روش قادر به شبیه‌سازی یک مدل انعطاف‌پذیر، دقیقاً مشابه یک نمونه کامل خط انتقال واقعی بوده و می‌تواند پاسخ‌های دینامیکی را به درستی منعکس کند. همچنین در روش استاتیکی امکان مدل‌سازی چنددهنه (حتی بیش از سدهنه) از یک خط انتقال برق وجود دارد؛ که با این ویژگی می‌توان اندرکنش بین کابل‌های دهنه‌های مجاور را مورد مطالعه قرار داد. در حقیقت در روش استاتیکی رفتار مدل و اندرکنش بین کابل‌های مجاور براساس فیزیک طبیعی سیستم شبیه‌سازی می‌شود؛ در حالی که در روش دینامیکی اثر دهنه‌های مجاور در قالب اعمال نیروهای مجازی در دو انتهای تکیه‌گاهی مورد مطالعه قرار می‌گیرد^[31]. با این حال در تحقیقاتی که تا کنون منتشر شده‌اند، آزمایش استاتیکی جامعی که در آن یک خط کامل انتقال برق با شکل مقطع یخ‌زده طبیعی شبیه‌سازی شده و منجر به نوسانی مشابه پدیده تاخت‌باد شود به ندرت یافت می‌شود. دیگر مساله موجود در آزمایش‌های استاتیکی که تاکنون انجام شده‌اند عدم امکان گسترش نتایج حاصل از آزمایش مدل‌های مقیاس شده به نمونه‌های واقعی به‌دلیل عدم به‌کارگیری یک روش معتبر مقیاس‌سازی در ساخت مدل‌ها است. تنها مورد استثنا در این زمینه، تحقیق انجام شده توسط لوردو سوز^[26] است. علاوه بر این در تمامی آزمایش‌های استاتیکی که تاکنون انجام شده‌اند^[31-33] تنها یک مدل تک‌دهنه از خط انتقال برق شبیه‌سازی شده است و هیچ آزمایش استاتیکی متشکل از چنددهنه برای مطالعه اثر اندرکنش بین دهنه‌های مجاور نمی‌توان یافت.

به‌طور کلی یک سیستم انتقال برق فشار قوی متشکل از سه قسمت اصلی شامل سازه‌های نگهدارنده (دکل‌ها)، کابل‌های هوایی و متعلقات سخت‌افزاری است که در بین این متعلقات، مقره‌ها مهم‌ترین اجزا این سیستم محسوب می‌شوند. مقره‌ها دارای دو نوع معلق و بسته (کششی) هستند و کابل‌ها به‌وسیله آنها به سازه‌های نگهدارنده متصل می‌شوند. نمونه‌ای از این دو نوع مقره در شکل ۱ نشان داده شده است.



جدول ۱) مشخصات فیزیکی و ارتعاشی نمونه اصلی و مدل‌های آزمایشگاهی

پارامتر	نمونه اصلی	نمونه معمولی	مدل تحریف شده
		$\lambda_L = 1:3\%$	$\beta = 1:7$
L (m)	۲۱۰	۷	۱
S _L (cm)	۳۴۵	۱۷۵	۱۷۵
M (gr/m)	۱۸۶۰	۲۰۷	۱۴/۵
U (m/s)	۴۵	۸/۲۲	۸/۲۲
C _D B (mm)	۴۶	۱/۵	۱۱
E (MPa)	۹۶۰۰۰	۹۶۰۰۰	۱/۴
D (mm)	۳۳	۰/۲	۳
f _{op(1)} (Hz)	۰/۳	۱/۶۳	۱/۶۴
f _{ipAsym(1)} (Hz)	۰/۶	۳/۲۷	(۳/۰۷) ⁺ ۳/۲۹
f _{ipSym(1)} (Hz)	۰/۶۴	۳/۵	(۳/۳۴) ⁺ ۳/۵۲

ناچیز کابل‌های هوایی، ایجاد یک نوسان تک‌حلقه تاخت‌باد که میزان جابجایی کابل در آن گاهی اوقات به مقداری بیش از خیز کابل نیز می‌رسد، نیازمند شرایط ویژه‌ای است.

هدف از ارایه این مقاله دو موضوع اصلی است؛ نخست انجام یک آزمایش تونل باد استاتیکی جامع برای مطالعه پدیده تاخت‌باد به‌طوری‌که کلیه کمبودهای اطلاعاتی و فنی مطالعات پیشین که در بالا به آنها اشاره شد، رفع شده و نتایج حاصل از آن قابلیت کاربرد در توسعه و صحت‌سنجی مدلسازی‌های عددی و یا تحلیلی را داشته باشد. هر چند ذکر این نکته ضروری است که در این پژوهش از تاثیر وجود دکل‌ها در مسیر جریان باد بر فرکانس نوسان کابل‌ها به‌دلیل ساختار خرابیای آنها و فضای بسیار گسترده وزش باد در طبیعت نسبت به سطح مقطع اجزا دکل‌ها صرف‌نظر شده است. دوم، بررسی تاثیر روکش‌های موضعی سخت‌کننده در کاهش اثر منفی پدیده تاخت‌باد بر روی سازه‌های نگهدارنده با در نظر گرفتن عواملی نظیر نوع مقره، اندرکنش بین کابل‌های دهنه‌های مجاور و همچنین تاثیر بارگذاری نامتقارن، بر روی خطوط دارای کابل‌های تکی از طریق افزایش مقاومت خمشی کابل. آزمایش‌های در نظر گرفته شده بر روی یک مدل مقیاس شده دودهنه انجام شده‌اند و پاسخ دینامیکی داخل صفحه (قایم) مدل و نیروهای اعمال شده به نقاط تکیه‌گاهی و آنالیز طیفی به‌عنوان نتایج حاصله ارایه می‌شوند.

۲- شرایط تونل باد و جریان خروجی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه تونل باد داشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است. برای ایجاد شرایط لازم جهت اعمال بار آیرودینامیکی نامتقارن بر روی مدل، از یک تونل باد دمشی جریان آزاد (Open-Jet/Free- Jet Blow-Down Wind Tunnel) (تونل مدار باز با فضای آزمون باز) با مقطع خروجی جریان باد مستطیلی به ابعاد 30×22 سانتی‌متر استفاده شده است. سرعت جریان باد در این تونل با استفاده از یک اینورتر دیجیتالی و الکتروموتور پره‌ای (Propeller Electromotor) با توان ۵ کیلووات قابل تغییر تا سرعت بیشینه ۱۰ متر بر ثانیه بوده و شدت آشفتگی جریان خروجی کمتر از ۳٪ است.

۳- روش ساخت و برپایی مدل آزمایشگاهی و مقیاس‌سازی آن

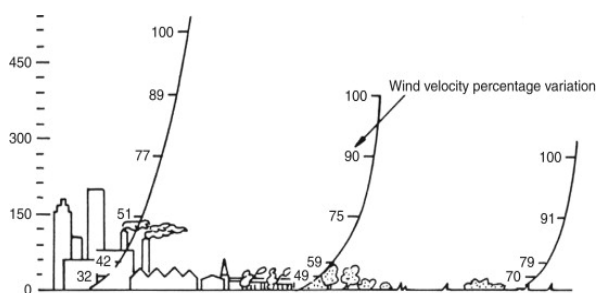
شکل ۲ تصویر واقعی به همراه شمای سه‌بعدی از مدل آزمایشگاهی و نحوه برپایی آن را نشان می‌دهد. سه عدد پایه خریایی به‌عنوان سازه‌های نگهدارنده مدل در نظر گرفته شده‌اند؛ که پایه میانی درست در مقابل خط تقارن مقطع خروجی تونل قرار گرفته است.

مدل آزمایشگاهی شامل دودهنه با نام‌های SA و SB هر یک به طول ۱۰۰ سانتی‌متر است. کابل‌ها از طریق سه نقطه اتصال با نام‌های P1 و P2 و P3 به پایه‌ها متصل شده‌اند که در این بین،

نایلون که معمولاً به‌عنوان روکش غذاها مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای ساختار بسیار ارتجاعی و انعطاف‌پذیر است به دور کل طول مدل پیچانده شد. بنابراین بعد بادخور مدل برابر با B در شکل ۳ و از سوی دیگر، با توجه به وجود فاصله بین این استوانه‌ها و حفظ خاصیت انعطاف‌پذیری مدل، بعد موثر در مقاومت کششی و خمشی مدل، قطر رشته لاستیکی یعنی ۳ میلی‌متر خواهد بود. همان طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود براساس مقادیر فوق که برای ساخت مدل آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است، مقادیر فرکانس‌های محاسبه شده با تقریب بسیار خوبی به یکدیگر نزدیک بوده و این موضوع یکسان‌بودن رفتار دینامیکی بین مدل آزمایشگاهی و نمونه اولیه را تضمین می‌کند.

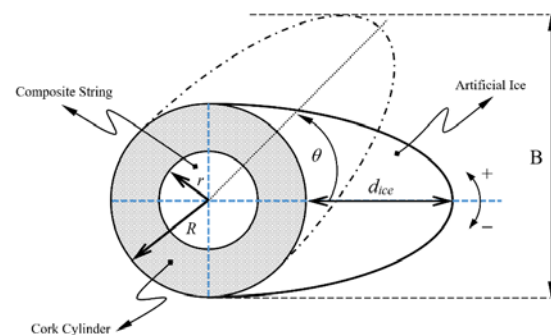
همان طور که اشاره شد شکل مقطع یخ‌زده کابل یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار در ناپایداری آیرودینامیکی در پدیده تاخت‌باد است. با وجود اینکه تاکنون تحقیقات زیادی برای مطالعه اثر پدیده تاخت‌باد بر روی مدل‌هایی با مقطع D شکل انجام شده است و [14, 37, 38]، اما واقعیت این است که این شکل از مقطع به‌وسیله هیچ یک از پدیده‌های طبیعی مانند یخ‌زدگی، بارش برف و غیره ایجاد نمی‌شود [28]. بنابراین براساس شکل‌های بسیار متنوع یخ‌زدگی طبیعی گزارش شده از مشاهدات میدانی در منابع گوناگون، برای ساخت مدل، شکل یخ‌زدگی هلالی مطابق شکل ۳ انتخاب شد. برای ساخت مدل یخ‌زدگی از یک فوم مخصوص با جرم بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن استفاده شد. تکه‌های فوم برای ساخت یخ‌زدگی مصنوعی دارای طولی برابر با استوانه‌های چوبی بوده و دقیقاً بر روی آن‌ها چسبانده شدند.

نوع و میزان ناهمواری منطقه تحت جریان باد در نزدیکی سطح زمین (شهری، جنگلی، دشت و زمین‌های باز و غیره)، موجب تشکیل یک پروفیل سهمی شکل (با معادله توانی و یا لگاریتمی) سرعت مطابق نمودار ۱ می‌شود [39]. اما از سوی دیگر، بررسی پدیده تاخت‌باد با توجه به اهمیت بسیار زیاد امنیت فیزیکی خطوط انتقال برق فشار قوی (سطح ولتاژ ۲۰۰ کیلو ولت و بالاتر با ارتفاع حداقل ۳۵ متر) غالباً بر روی این خطوط مطرح است؛ که محل احداث آنها به‌دلیل رعایت مسایل ایمنی، در مناطقی بسیار دور از مناطق مسکونی (شهرها و روستاها) بوده و برای کاهش هزینه‌های اجرایی در بیشتر موارد در دشت‌ها و زمین‌های هموار است [40].



نمودار ۱) تاثیر نوع ناهمواری‌های زمین بر نحوه گسترش لایه مرزی و تشکیل پروفیل سرعت جریان باد [39]

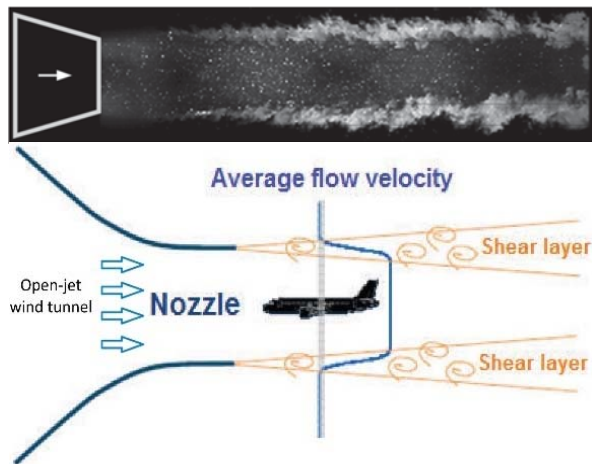
در این جدول λ_L ، نسبت ابعادی بین مدل مقیاس شده معمولی و نمونه اصلی؛ β ، نسبت بین طول دهنه مدل تحریف شده و مدل معمولی؛ L ، طول دهنه کابل؛ S_L ، خیز کابل؛ M ، جرم واحد طول کابل؛ U ، سرعت متوسط جریان باد؛ C_D ، ضریب پسا (Drag Coefficient)؛ B ، بعد شاخص مقطع که در کابل‌های یخ‌زده متناظر با بعدی از کابل است که در معرض نیروی باد قرار می‌گیرد و در شکل ۳ نشان داده شده است؛ E ، مدول الاستیسیته، D ، قطر کابل و $f_{ipSym(1)}$ و $f_{ipAsym(1)}$ به‌ترتیب نخستین فرکانس طبیعی خارج صفحه، داخل صفحه نامتقارن و داخل صفحه متقارن است که مقدار این فرکانس‌ها براساس روش /روین و کافی [35] محاسبه شده‌اند.



شکل ۳) سطح مقطع مدل آزمایشگاهی با پروفیل یخ‌زدگی مصنوعی؛ $r, R = 4$ و $dice = 6$ و $1 = 5$ بر حسب میلی‌متر

ضریب اروین، λ^2 [35] برای هر سه مدل اشاره شده در جدول ۱ مقداری در حدود ۴۸ دارد که تنها کمی بیش از مقدار مرجع $4\pi^2$ است. بنابراین نخستین فرکانس طبیعی داخل صفحه متقارن بیشتر از فرکانس اول طبیعی داخل صفحه نامتقارن بوده و شکل ارتعاشی آن دارای دو نقطه داخلی (سه‌حلقه) خواهد بود [36]. هر چند با توجه به نزدیکی بسیار زیاد مقدار λ^2 به $4\pi^2$ ، مکان فیزیکی دو نقطه داخلی در شکل ارتعاشی نخست داخل صفحه متقارن بسیار به تکیه‌گاه‌ها نزدیک بوده و لذا می‌توان آن را به‌صورت تک‌حلقه در نظر گرفت. براساس روش مقیاس‌سازی تحریف شده برای ایجاد یک رفتار ایروالاستیکی مشابه بین نمونه اولیه و مدل تحریف شده، مدل آزمایشگاهی از یک رشته لاستیکی با روکش پلی‌استر به قطر ۳ میلی‌متر، جرم واحد طول ۶/۸ گرم‌برمتر طول و مدول الاستیسیته تقریبی ۱/۴ مگاپاسکال ساخته شده است. همچنین برای تامین جرم واحد طول و قطر خارجی مدل، رشته لاستیکی از بین ۴۰ عدد استوانه چوبی به قطر خارجی ۸ میلی‌متر، ضخامت دیواره ۲/۵ میلی‌متر، طول ۲۰ میلی‌متر و جرم تقریبی ۰/۲ گرم که در فواصل مساوی از یکدیگر قرار دارند عبور داده شده است. وجود این فواصل باعث می‌شود که مدل خاصیت انعطاف‌پذیری خود را حفظ کند. با توجه به فواصل بین استوانه‌ها، برای ایجاد یک سطح بیرونی کاملاً یکنواخت و در عین حال عدم ایجاد اختلال در خواص مکانیکی و الاستیکی مدل، نوع خاصی از

تدریج پس از طی مسافتی به هم نزدیک و با هم ترکیب می‌شوند [42, 43].



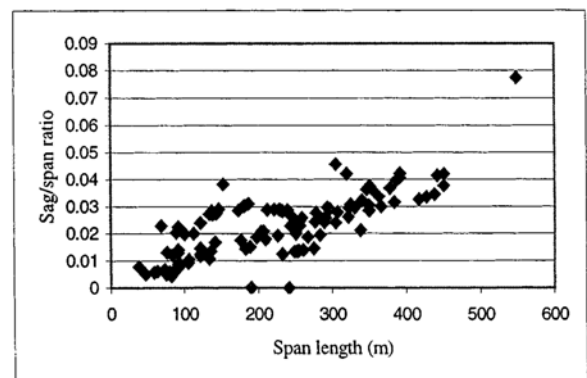
شکل ۴) تصویر ظاهرسازی شده واقعی (بالا) [41] و شکل شماتیک (پایین) [42] الگوی جریان خروجی تونل باد جریان آزاد و ایجاد هسته جریان یکنواخت در محدوده بین لایه‌های برشی

به این ترتیب هسته‌ای از جریان محصور بین لایه‌های برشی تشکیل می‌شود که در آن جریان یکنواخت بوده و نمونه آزمایشگاهی باید در این محدوده جانمایی شود؛ تا تحت تاثیر جریان آشفته لایه برشی قرار نگیرد [43-46]. طول این محدوده، L_c ، مستقل از شکل مقطع خروجی جریان بوده و برای سرعت‌های زیر سرعت صوت که در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی معمول است (تا حدود سرعت ۷۰ متر بر ثانیه) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [47].

$$L_c/R_{exit} = C_1 + C_2 \times Ma^2 \quad (1)$$

در این رابطه، C_1 و C_2 ضرایب تجربی هستند که مقدار آنها به ترتیب برابر با ۴/۲ و ۱/۸ تعیین شده است؛ همچنین Ma ، عدد ماخ جریان خروجی و R_{exit} ، شعاع مقطع خروجی در صورت دایره‌ای بودن و یا شعاع معادل در حالت غیردایره‌ای است؛ که برای مقطع مستطیلی با طول A و ارتفاع H برابر با $H/\pi \times (4 \times A \times H)^{1/2}$ است. همان طور که در تشریح مشخصات مدل آزمایشی و تونل باد بیان شد، مقطع خروجی تونل باد دارای ۲۲۰ سانتی‌متر طول و ۳۰ سانتی‌متر ارتفاع بوده و طول مدل آزمایشگاهی در حالتی که به صورت کامل در مقابل مقطع خروجی تونل قرار گرفته باشد ($\gamma = 0^\circ$) برابر با ۲۰۰ سانتی‌متر است. با توجه به اینکه ارتفاع قرارگیری مدل طوری تنظیم شده است که با در نظر گرفتن خیز حدود ۱۰ سانتی‌متری، موقعیت ارتفاعی آن درست در یک سوم میانی قرار گیرد، در حالت $\gamma = 0^\circ$ ، مدل آزمایشگاهی از هر سمت ۱۰ سانتی‌متر از دیواره‌های مقطع خروجی فاصله خواهد داشت. بدیهی است با چرخش مدل (تغییر زاویه γ به 30° و 60°) فاصله آن از کناره‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر براساس رابطه ۱ کمترین طول هسته جریان یکنواخت، تقریباً ۲۰۰ سانتی‌متر خواهد بود. به این ترتیب در

با انطباق حداقل ارتفاع دکل‌های مورد بحث با نمودار ۱ می‌توان این گونه استنباط و فرض نمود که در ارتفاع قرارگیری کابل‌ها، سرعت جریان باد به حدود ۷۰٪ سرعت نهایی خود رسیده و بنابر این تغییرات پروفیل سرعت، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی کابل نخواهد داشت. همچنین اطلاعات ثبت شده از مشاهدات میدانی بیانگر آن است که در شدیدترین و بحرانی‌ترین حالت پدیده تاخت‌باد که مربوط به نوسان تک‌حلقه است، کابل به اندازه خیز دهنه نوسان خواهد داشت. حال در صورتی که مطابق نمودار ۲ متوسط فاصله بین دکل‌ها ۳۰۰ متر در نظر گرفته شود، دامنه بحرانی‌ترین حالت نوسان کابل، برابر با خیز کابل و در حدود ۲٪ دهنه یعنی ۶ متر خواهد بود [2]؛ که با لحاظ نمودن شکل‌گیری ۷۰ درصدی پروفیل سرعت جریان در ارتفاع قرارگیری کابل‌ها از سطح زمین و اینکه براساس نمودار ۱ این میزان دامنه نوسان، کمتر از ۲٪ درصد ارتفاع پروفیل نهایی سرعت جریان باد را در بر می‌گیرد، می‌توان با یک فرض ساده کننده از اعمال پروفیل سرعت بر روی کابل در حال نوسان صرف‌نظر نمود و سرعت باد را در بازه نوسان کابل تقریباً ثابت در نظر گرفت.



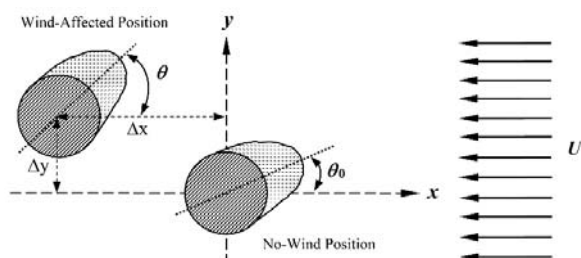
نمودار ۲) داده‌های ثبت شده میدانی از نسبت خیز به دهنه کابل‌ها در خطوط مختلف انتقال برق با فواصل مختلف بین دکل‌ها [2]

بر این اساس آزمایش‌ها در سرعت‌های باد از U برابر ۲ تا ۹ متر بر ثانیه با نمو متر بر ثانیه و 0° ، 30° و 60° که در آن U سرعت متوسط ثابت جریان خروجی باد در فاصله ثابت ۳۰ سانتی‌متر از مقطع خروجی تونل باد و γ ، زاویه بین راستای مقطع خروجی و محور طولی مدل است، انجام شد.

همان طور که در بخش ۲ عنوان شد، تونل باد جریان آزاد دارای یک فضای آزمون باز است؛ بر خلاف تونل‌های دارای اتاق آزمون محصور (Close Test-Section) که یک جریان لایه مرزی بر روی دیواره تشکیل می‌شود، در تونل باد جریان آزاد که به جای اتاق آزمون، دارای یک فضای آزمون باز است، جریان خروجی از نازل موجب تشکیل لایه‌های برشی (Shear Layer) در مرز بین هوای خروجی از تونل باد (که دارای سرعت است) و هوای فضای باز (که تقریباً ساکن است) می‌شود [41]. مطابق شکل ۴ لایه‌های برشی بلافاصله پس از خروج از نازل با زاویه ملایمی گسترش یافته و به

فشاری با بیشینه ظرفیت ۳ کیلوگرم و دقت ۱/۰ گرم و فرکانس داده‌برداری ۲۰ هرتز اندازه‌گیری شده است. مقادیر جابجایی نیز با استفاده از تکنیک پس-پردازش تصاویر یک دوربین با سرعت فیلم برداری ۹۶۰ فریم‌برثانیه با وضوح ۷۲۰ پیکسل انجام شد. هر یک از آزمایش‌ها سه بار تکرار شد و براساس مقادیر ثبت شده، نسبت متوسط نوسان مدل در جهت قائم (عمود بر جهت وزش باد) به مقدار خیز مدل در قالب پارامتر S و تحلیل طیفی متناظر با آن و همچنین نسبت نیروی دینامیکی وارد بر نقطه P2 به نیروی استاتیکی وارد بر آن در قالب پارامتر F به‌عنوان نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است. در ارایه نتایج و ترسیم نمودارها از روش‌های مختلف مانند متوسط‌گیری، برازش نمودار و درون‌یابی استفاده شده است.

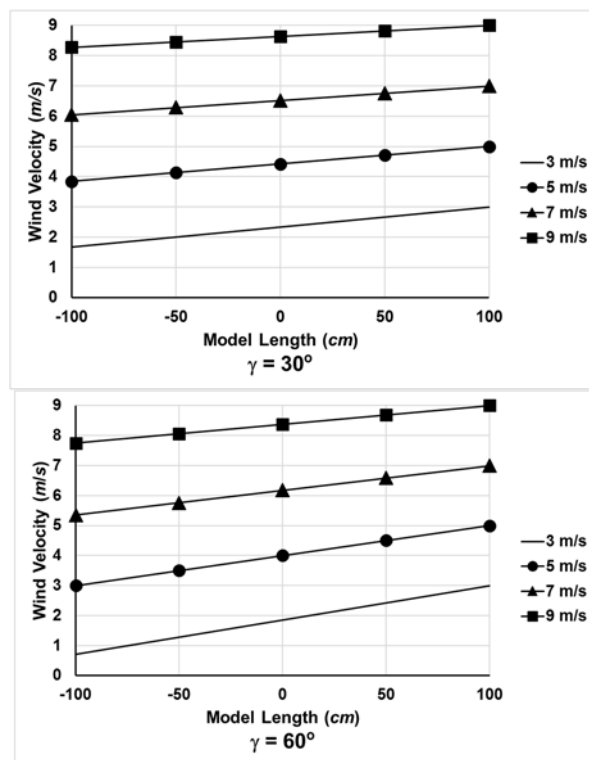
نتایج آزمایش‌های اولیه که پیش از انجام آزمایش‌های اصلی انجام شد نشان داد که در نتیجه تأثیر نیروی باد، مدل به عقب رانده شده و در همین حال به‌علت مقاومت ناچیز پیچشی (مشابه نمونه‌های واقعی^[9])، مقطع یخ‌زده حول محور طولی مدل دوران می‌کند و در موقعیت جدیدی مشابه شکل شماتیک نشان داده شده در شکل ۵ ثابت می‌شود. بنابراین بسته به میزان سرعت باد، مدل در موقعیت جدید با زاویه حمله (Angle of Attack) جدید، θ قرار می‌گیرد که این زاویه با زاویه اولیه یخ‌زدگی، θ_0 متفاوت است.



شکل ۵) شکل شماتیک تأثیر نیروی باد بر مدل آزمایشگاهی و چگونگی دوران و تغییر مکان آن

با توجه به این‌که بررسی تأثیر زاویه حمله بر روی نتایج به‌دست‌آمده، هدف این پژوهش نیست، براساس شکل مقطع یخ‌زده، از نتایج پژوهش انجام شده در مطالعه لیلین و همکاران^[25] برای ایجاد ناپایداری آیرودینامیکی استفاده شده است. به این ترتیب برای هر یک از سرعت‌های باد، زاویه اولیه قرارگیری مقطع یخ‌زده نسبت به جریان، θ_0 طوری تنظیم گردید که پس از تثبیت‌شدن موقعیت کابل، مقطع به اندازه‌ای دچار چرخش شود که زاویه حمله تقریباً برابر با $\theta = +45^\circ$ شود که در آن معیار دن هارتوگ منفی می‌شود. شایان ذکر است در طول آزمایش‌ها هیچ گونه نوسان پیچشی قابل توجهی در مدل مشاهده نشد؛ براساس مطالعات تئوری و آزمایشگاهی ثابت شده است که نوسان پیچشی در ایجاد پدیده تاخت‌باد ضروری نیست^[37].

صورتی که بیشترین فاصله مدل از مقطع خروجی جریان که مربوط به نقطه P3 در زاویه $\gamma = 60^\circ$ است مد نظر قرار گیرد ($200 \times \sin 60^\circ = 173$ سانتی‌متر)، می‌توان نتیجه گرفت که مدل برای حالت‌های مختلف آزمون، در محدوده جریان یکنواخت قرار خواهد داشت. در تونل‌باد دارای مقطع آزمون باز، سرعت موثر جریان باد بر مدل پس از ورود جریان به فضای باز، با افزایش فاصله مدل از خروجی تونل کاهش می‌یابد. بنابراین با تغییر مقدار زاویه γ (حول نقطه P1 که مکان این نقطه در طول آزمایش‌ها ثابت است) از 0° به 30° و 60° ، تأثیر نیروی آیرودینامیک بر روی بخش‌هایی از مدل که فاصله بیشتری از خروجی دارند، کاهش می‌یابد. نمودار ۳ تغییرات سرعت جریان بر روی مدل برای زاویه‌های 30° و 60° نسبت به مقطع خروجی تونل‌باد را نشان می‌دهد. از سوی دیگر باید در نظر داشت که سرعت محرک جریان برای ایجاد ناپایداری آیرودینامیکی، مولفه عمود بر راستای طولی مدل یعنی $U \cos \gamma$ است و از مولفه موازی جریان باد با راستای طولی مدل صرف‌نظر می‌شود. در واقع با افزایش زاویه γ حول نقطه P1 مقدار سرعت محرک جریان بر روی مدل از نقطه P1 تا P3 کاهش می‌یابد؛ و در همین حال بار آیرودینامیکی موثر بر مدل، یکنواختی و توازن خود را از دست می‌دهد.



نمودار ۳) پروفیل سرعت جریان در طول دهانه‌های مدل آزمایشگاهی

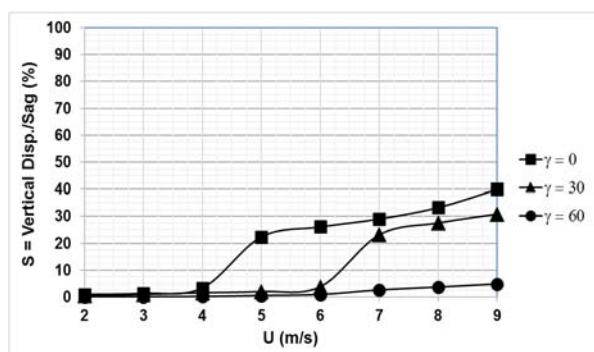
نیروی دینامیکی وارد بر مدل در نقطه P2 و پاسخ جابجایی قائم مدل در دهانه SB به مدت ۱۰ ثانیه داده برداری شده است. نیروی وارد بر نقطه تکیه‌گاهی P2 با استفاده از یک نیروسنج کششی-

۴- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها

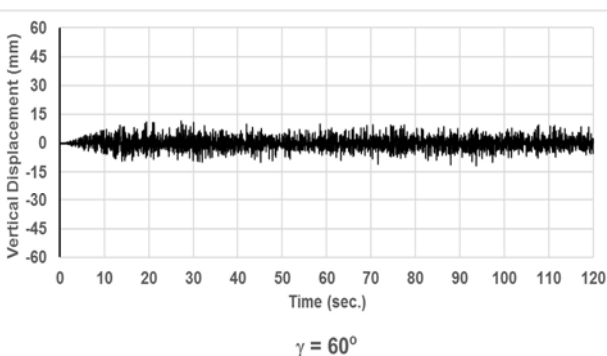
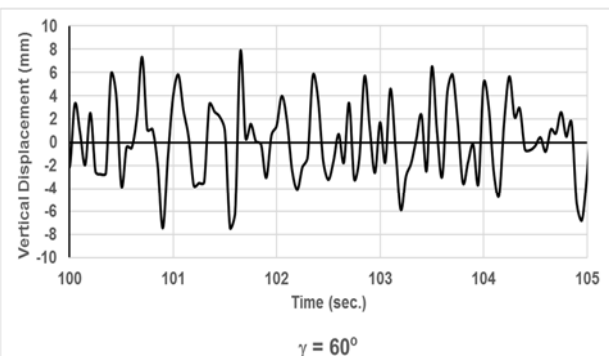
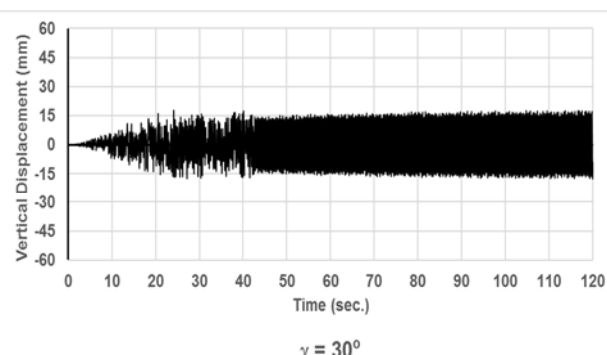
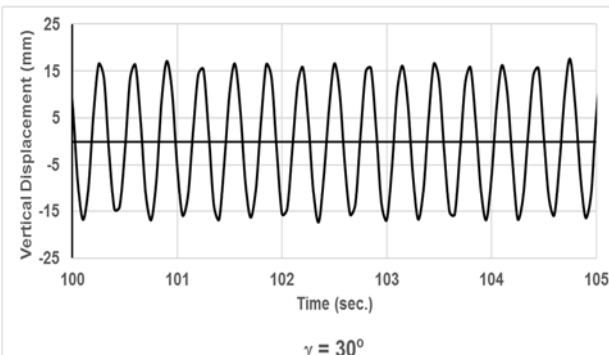
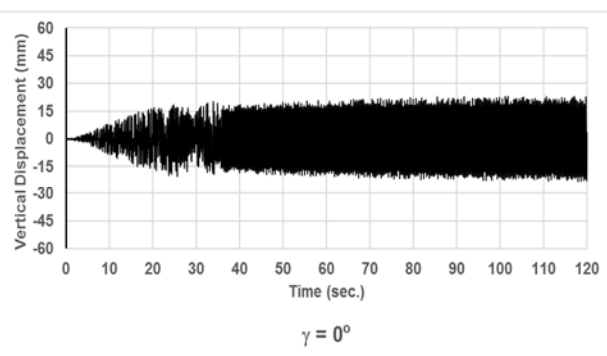
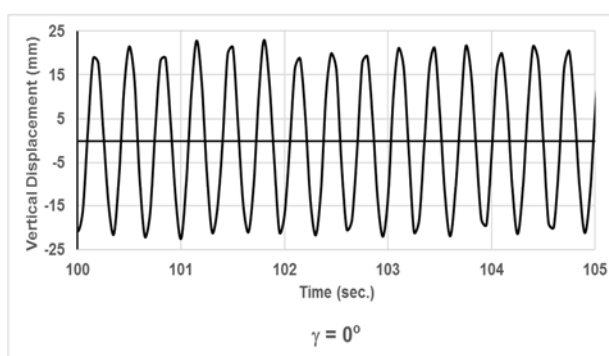
۴-۱- آزمایش‌های انجام شده در حالت تکیه‌گاه‌های بسته

مرحله نخست آزمایش‌ها با تبدیل تکیه‌گاه P2 از حالت معلق به حالت بسته انجام شد. به این ترتیب با توجه به ساختار تکیه‌گاه‌ها، هیچ نوع انتقال نیرو و تغییر مکان بین کابل‌های SA و SB وجود نداشته و کابل هر دهنه به صورت مستقل نوسان می‌کند. براساس داده‌های ثبت شده که در نمودار ۴ نمایش داده شده است با افزایش سرعت باد مقدار کمیت S که مربوط به نقطه یک چهارم طول دهنه SB است از مقدار تقریبی ۰ تا بیشینه مقدار ۴۰٪ در زاویه $\gamma = 0^\circ$ افزایش می‌یابد. با تغییر زاویه γ به 30° و 60° بیشینه مقدار کمیت S به ترتیب به ۳۰ و ۵٪ می‌رسد.

نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان قایم در سرعت بیشینه باد (U):



نمودار (۴) تغییرات پارامتر S در برابر تغییر سرعت باد در حالت تکیه‌گاه بسته در نقطه P2

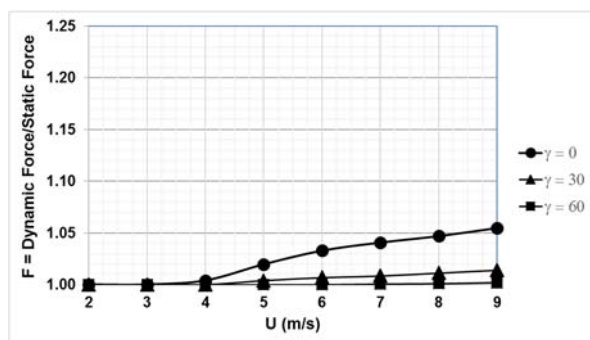


نمودار (۵) نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان قایم نقطه یک چهارم دهنه مدل SB در حالت تکیه‌گاه بسته در نقطه P2 و سرعت جریان باد ۹ متر بر ثانیه: (راست) تصویر بزرگ‌نمایی شده

(کمتر از ۳٪) و مقادیر بیشینه رخ داده در تحلیل طیفی در 3° و 0° در نزدیکی فرکانس نخست طبیعی مدل اتفاق افتاده است، می‌توان نوسان قایم مدل را در نتیجه پدیده تاخت‌باد دانست. اما در مورد نوسان مدل در 60° مساله کمی متفاوت است. براساس نمودار ۳ مقدار سرعت جریان موثر بر دهنه SB در این زاویه برابر با $8/06 \cdot \cos(60^\circ) = 4$ متر بر ثانیه است. با توجه به اینکه نیروی محرک آیرودینامیکی مورد نیاز برای نوسان کابل با توان دوم سرعت باد متناسب است [7]، کاهش سرعت باد تا مقدار محاسبه شده بالا (۴ متر بر ثانیه)، منجر به کاهش شدید نیروی آیرودینامیکی محرک می‌شود. تاریخچه زمانی تغییر مکان برای 60° که در نمودار ۵ نشان داده شده است بیانگر نوسانی با دامنه کم و بسیار نامنظم است.

در نمودار مربوط به تحلیل طیفی متناظر نیز نقاط بیشینه نسبی بهم پیوسته بسیار زیادی دیده می‌شود. با وجود اینکه جریان باد آزمایش کاملاً پایدار و دارای شدت آشفتگی بسیار کمی است، اما با توجه به مقاومت خمشی بسیار کم مدل که می‌تواند با کوچکترین تحریک دچار افت و خیز شود، رفتار آیرودینامیکی آن در 60° را می‌توان نتیجه تاثیر ترکیبی نوسان خود تحریک شونده و گردابه‌های پایین دست ناشی از برخورد جریان با مدل دانست.

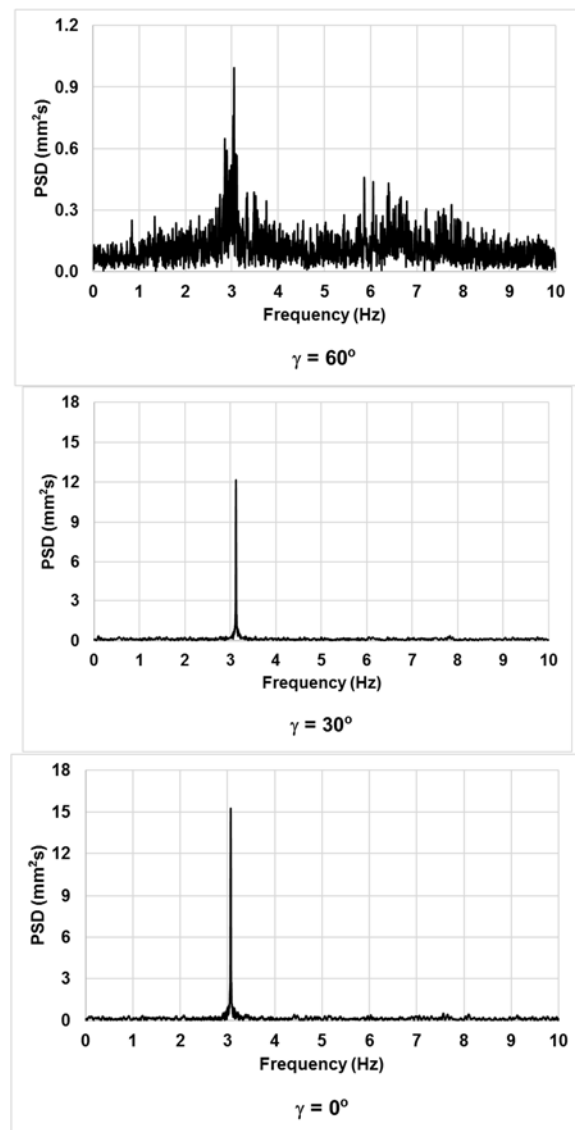
تغییرات کمیت F در برابر سرعت جریان برای زوایای مختلف γ در نمودار ۷ ترسیم شده است. مطابق این نمودار در حالتی که کلیه تکیه‌گاه‌ها از نوع بسته باشند با نوسان مدل در شکل ارتعاشی نخست نامتقارن (دو حلقه‌ای)، تغییر قابل توجهی در نیروی وارد بر نقطه P2 مشاهده نمی‌شود. این تغییر برای 0° کمتر از ۶٪ و برای 60° و 30° قابل صرف نظر کردن است.



نمودار ۷) تغییرات پارامتر F در برابر تغییر سرعت باد در حالت تکیه‌گاه بسته در نقطه P2

۲-۴- آزمایش‌های انجام شده در حالت تکیه‌گاه معلق در نقطه تکیه‌گاهی میانی

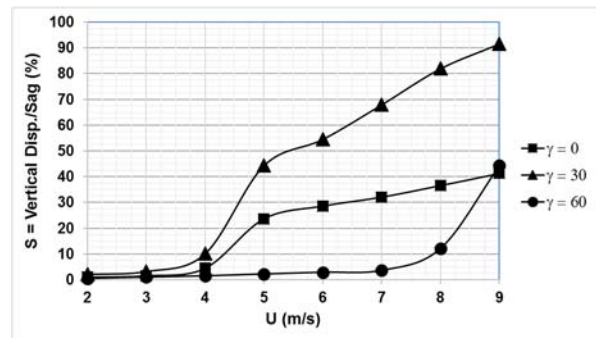
در گام بعدی، آزمایش‌ها با تبدیل تکیه‌گاه P2 به نوع معلق انجام شد. با توجه به نوع ساختار تکیه‌گاه معلق، امکان انتقال نیرو بین کابل دهنه‌های مجاور امکان‌پذیر می‌شود. تغییرات کمیت S در نمودار ۸ و تاریخچه زمانی تغییر مکان قایم (مربوط به نقطه یک



نمودار ۶) نمودار توان طیفی تغییر مکان قایم نقطه یک چهارم دهنه مدل SB در حالت تکیه‌گاه بسته در نقطه P2 و سرعت جریان باد ۹ متر بر ثانیه

همان طور که مشاهده می‌شود پس از تثبیت حرکت نوسانی مدل، نمودار تاریخچه زمانی جابجایی قایم در 0° و 30° یک حرکت نوسانی یکنواخت و منظم را نشان می‌دهد و نتایج حاصل از تحلیل طیفی این جابجایی‌ها بیان کننده یک مقدار بیشینه کاملاً مشخص در فرکانس نزدیک به نخستین فرکانس طبیعی داخل صفحه نامتقارن (شکل نوسانی دو حلقه‌ای) است. پدیده تاخت‌باد یک نوسان خود تحریک شونده با دامنه زیاد است که در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس‌های طبیعی کابل و در سرعت جریانی که بیش از مقدار سرعت بحرانی باشد رخ می‌دهد و طی آن جریان باد انرژی لازم برای نوسان کابل را فراهم می‌کند [25]. به‌طور معمول فرکانس متناظر با پایین‌ترین شکل ارتعاش طبیعی کابل، فرکانس غالب در پدیده تاخت‌باد است؛ زیرا در این حالت انرژی مورد نیاز برای نوسان که به‌وسیله نیروی باد تامین می‌شود، کمترین مقدار ممکن را داراست [25]. با توجه به اینکه در آزمایش‌های این پژوهش شدت آشفتگی جریان بسیار کم بوده

چهارم دهنه) به همراه نتایج تحلیل طیفی متناظر با آنها به ترتیب در نمودارهای ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

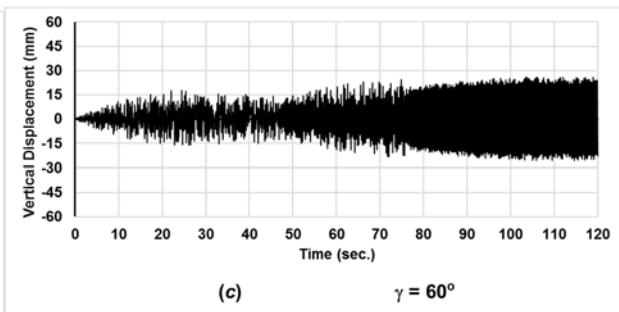
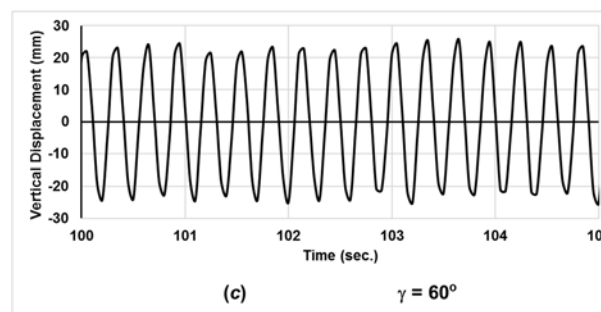
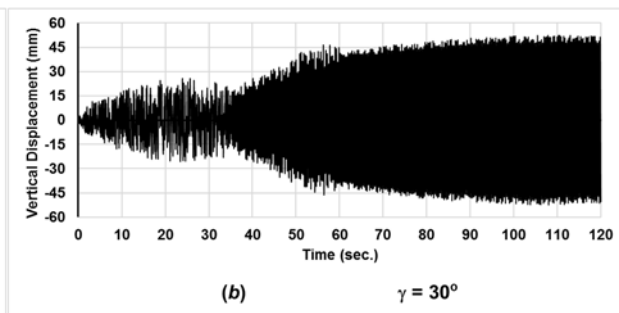
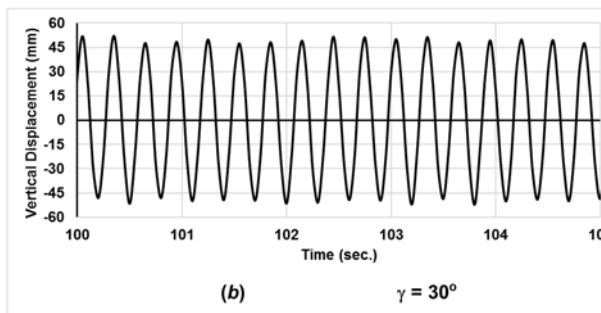
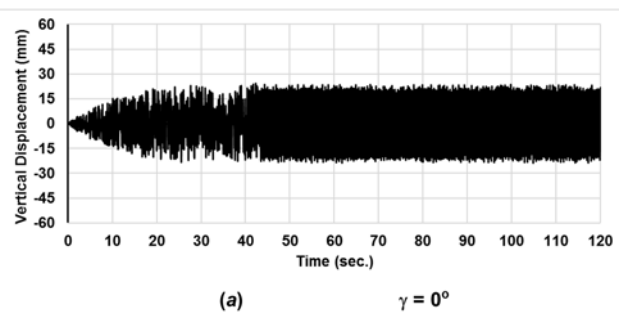
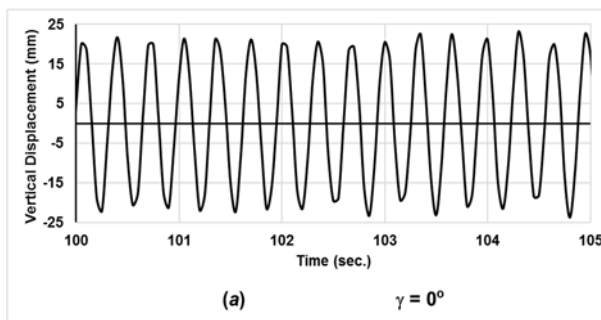


نمودار ۸) تغییرات پارامتر S در برابر تغییر سرعت باد در حالت تکیه‌گاه معلق در نقطه P2

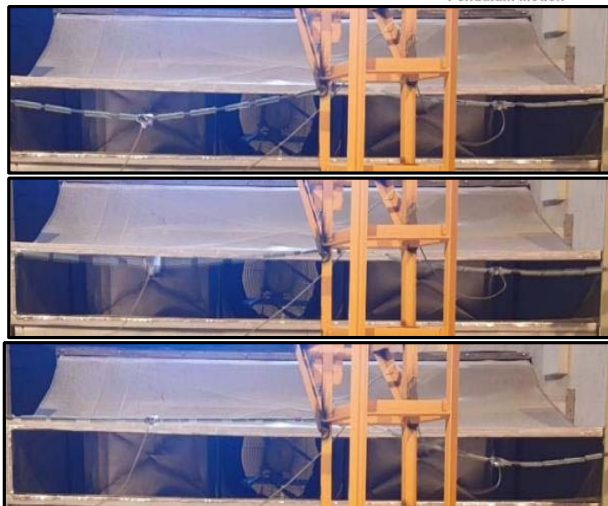
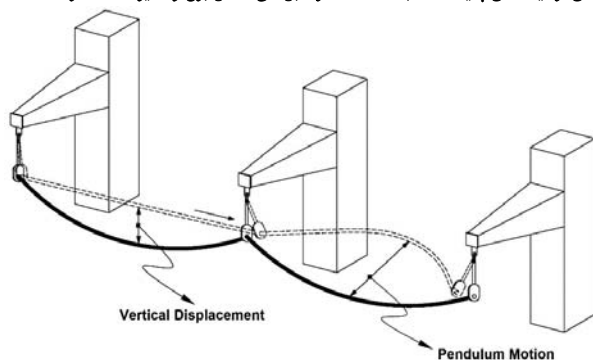
براساس نتایج ترسیم شده در نمودار ۸ در $\gamma = 0^\circ$ با وجود تغییر نوع تکیه‌گاه از بسته به معلق، رفتار آیرودینامیکی مدل در دهنه SB تغییر خاصی نداشته و مشابه حالت بسته است. در نمودار توان طیفی مربوطه (نمودار ۱۰) نیز یک مقدار بیشینه نزدیک به

فرکانس نخست طبیعی نامتقارن مشاهده می‌شود. این رفتار مشابه، می‌تواند به علت تعادل و توازن نیروی یکنواخت آیرودینامیکی وارد بر دودهنه مدل باشد؛ و این موضوع منجر به رفتار آیرودینامیکی مشابه مدل در هر دو نوع تکیه‌گاه در P2 شده است. براساس مطالبی که در بالا بیان شد با تغییر γ از صفر به 30° تعادل و یکنواختی نیروی آیرودینامیک بر روی دهنه‌های مدل از بین می‌رود. در این حالت برای سرعت باد U برابر ۹ متر بر ثانیه متوسط مقدار سرعت محرک جریان بر روی دهنه‌های SA و SB به ترتیب برابر با ۸ و $7/3$ متر بر ثانیه می‌شود. همان طور که در نمودار ۸ مشاهده می‌شود رفتار مدل در $\gamma = 30^\circ$ و در حالت تکیه‌گاه معلق کاملاً با حالت تکیه‌گاه بسته متفاوت بوده و یک افزایش قابل توجه در مقدار کمیت S ایجاد شده است. مطابق نمودار ۹ تاریخچه زمانی پاسخ قایم مدل (مربوط به نقطه میانی دهنه SB) بیانگر یک حرکت متناوب با دامنه زیاد و منظم است.

در نمودار ۱۰ توان طیفی، یک مقدار بیشینه کاملاً مشخص در نزدیکی فرکانس نخست متقارن (تک‌حلقه) مشاهده می‌شود.



نمودار ۹) نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان قایم نقطه یک چهارم دهنه مدل SB در $\gamma = 0^\circ$ و نقطه میانی مدل SB در $\gamma = 30^\circ$ و $\gamma = 60^\circ$ در حالت تکیه‌گاه معلق در نقطه P2 و سرعت جریان باد ۹ متر بر ثانیه؛ (راست) تصویر بزرگ‌نمایی شده

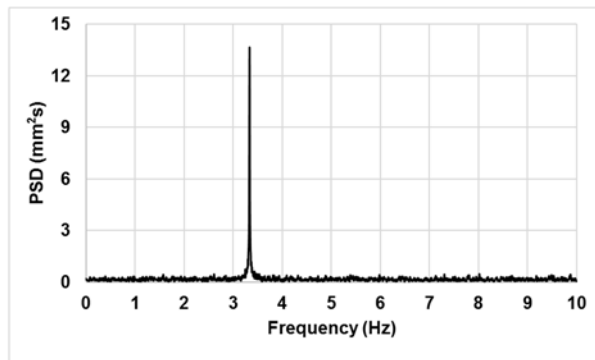


شکل ۶ شکل شماتیک و سه فریم تصویربرداری شده در آزمایشگاه تونل باد مربوط به سازوکار ایجاد نوسان تک‌حلقه تاخت‌باد در اثر اندرکنش دهنه‌های مجاور

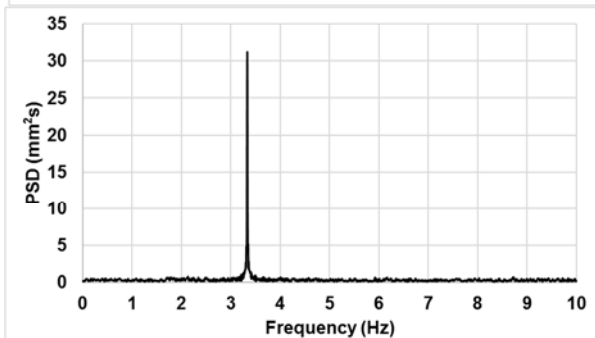
با توجه به جریان پایدار و یکنواخت باد با گذشت زمان، نیروی برهم‌کنش دهنه‌های مجاور در هر گام تجمیع شده و افزایش می‌یابد تا اینکه در نهایت منجر به نوسان مدل به شکل تک‌حلقه با تغییر مکان قایم نقطه میانی مدل با دامنه حدود ۹٪ خیر کابل می‌شود. در نهایت با توجه به تاخیر فاز 180° بین حرکت نوسانی کابل‌های مجاور، حرکت کلی سیستم دودهنه، به شکل الکلنگی (بالا-پایین) شکل می‌گیرد.

با تغییر γ از 30° به 60° با وجود این‌که نیروی جریان باد موثر بر دهنه SB دچار کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌شود، اما براساس سازوکار شرح داده شده بالا، رفتار آیرودینامیکی آن تحت تاثیر مکانیزم غالب تاخت‌باد بوده و در نتیجه همان طور که در نمودار ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود ضمن اینکه تاریخچه زمانی تغییر مکان قایم نقطه میانی، یک حرکت نوسانی با دامنه منظم را نشان می‌دهد، نمودار توان‌طیفی نیز بیان کننده یک بیشینه مقدار مشخص در نزدیکی فرکانس طبیعی نخست متقارن است.

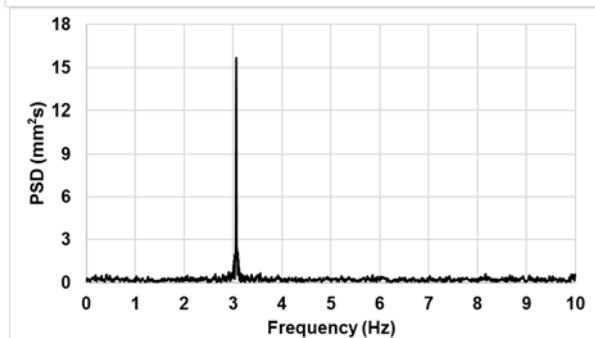
تغییرات کمیت F در مقابل تغییرات سرعت جریان برای مقادیر مختلف γ در نمودار ۱۱ ترسیم شده است. بر این اساس با تغییر نوع تکیه‌گاه از بسته به معلق در محل P2 و تغییر رفتار آیرودینامیکی مدل در دهنه SB از شکل ارتعاشی دو حلقه به تک‌حلقه در 60° و 30° γ افزایش قابل توجهی



(c) $\gamma = 60^\circ$



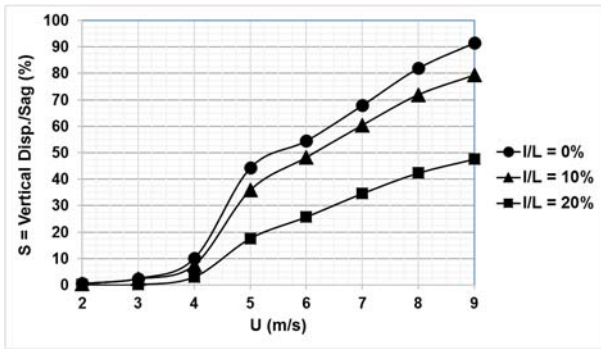
(b) $\gamma = 30^\circ$



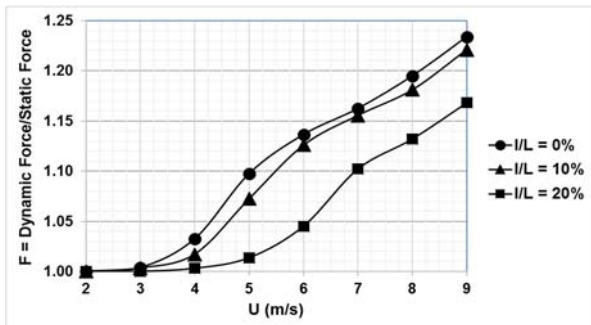
(a) $\gamma = 0^\circ$

نمودار ۱۰ نمودار توان طیفی تغییر مکان قایم نقطه یک چهارم دهنه مدل SB در $\gamma = 0^\circ$ و نقطه میانی مدل SB در $\gamma = 30^\circ$ و $\gamma = 60^\circ$ در حالت تکیه‌گاه معلق در نقطه P2 و سرعت جریان باد ۹ متر بر ثانیه

همان طور که اشاره شد با تغییر γ از 0° به 30° یکنواختی بار آیرودینامیکی بر روی دهنه‌های مدل از بین می‌رود. براساس مشاهدات فیلم‌های ضبط شده از آزمایش‌ها که شمای کلی آن به همراه سه فریم تصویربرداری شده در شکل ۶ نشان داده شده است، در وهله نخست با توجه به نزدیکی دهنه SA به خروجی جریان باد، بار آیرودینامیکی بیشتری به آن وارد می‌شود. این عامل باعث به عقب رانده شدن مدل در این دهنه و متمایل شدن مقرر نقطه تکیه‌گاهی P2 به سمت SA و ایجاد نیروی کششی در SB می‌شود. پس از رسیدن نیروی کشش کابل در SB به مقدار بیشینه خود و بنا به اصل بازگشت به تعادل، مکانیزم مشابهی با تاخیر فاز 180° در مورد دهنه SB اتفاق می‌افتد؛ به این صورت که مقرر تکیه‌گاه P2 به سمت دهنه SB متمایل شده و یک نیروی کششی در دهنه SA ایجاد می‌شود.



نمودار ۱۲) تغییرات پارامتر S در برابر تغییر سرعت باد در حالت استفاده از سخت کننده موضعی بر روی مدل SB و تکیه‌گاه معلق در نقطه P2 و $\gamma = 30^\circ$

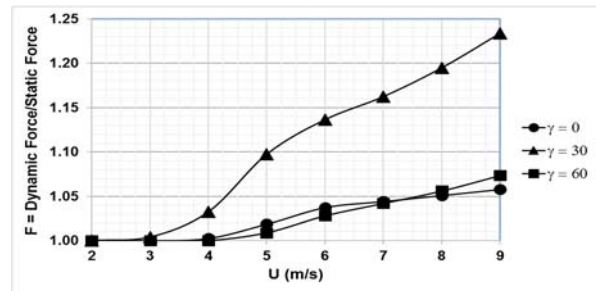


نمودار ۱۳) تغییرات پارامتر F در برابر تغییر سرعت باد در حالت استفاده از سخت کننده موضعی بر روی مدل SB و تکیه‌گاه معلق در نقطه P2 و $\gamma = 30^\circ$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به عدم وجود پژوهش مشابه در تحقیقات پیشین، برای نخستین‌بار نتایج یک آزمایش کامل تونل‌باد بر روی یک مدل شبیه‌سازی شده خط فشار قوی انتقال برق با دودنه کابل انعطاف‌پذیر و شکل یخ‌زدگی طبیعی (منطبق با نمونه‌های واقعی) برای بررسی دقیق فیزیک پدیده تاخت‌باد انجام گرفت؛ که در آن اثر اندرکنش بین دهنه‌ها در شکل‌گیری تاخت‌باد بر روی یک خط کامل مقیاس شده با لحاظ نمودن نوع اتصال بین کابل‌های دهنه‌های مجاور و بارگذاری آیرودینامیکی یکنواخت و غیریکنواخت مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین روش مقیاس‌سازی مورد استفاده در شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی، امکان گسترش نتایج به‌دست‌آمده را به نمونه‌های واقعی فراهم می‌کند. به‌عنوان یک پیشنهاد جهت کنترل اثرات تاخت‌باد به بررسی تاثیر روکش‌های موضعی افزایش دهنده مقاومت خمشی کابل‌های انتقال برق در کاهش میزان تغییر مکان کابل‌ها و نیروهای دینامیکی وارد بر سازه‌های نگهدارنده آن‌ها پرداخته شد. برای این منظور ابتدا شرایط ایجاد بحرانی‌ترین حالت پدیده تاخت‌باد (نوسان تک‌حلقه) در اثر تغییر دو کمیت (۱) نوع تکیه‌گاه‌ها (بسته و معلق) و (۲) یکنواختی بارگذاری آیرودینامیکی مورد آزمایش قرار گرفت. دودنه‌بودن مدل منجر به ایجاد سه نقطه تکیه‌گاهی گردید که دو نقطه ابتدایی و انتهایی از نوع انتهای بسته و نقطه میانی در دو حالت بسته و معلق تغییر یافت. برای امکان ایجاد بار باد یکنواخت و غیریکنواخت، از تونل‌باد مدار

به‌ترتیب به میزان حدود ۲۳ و ۷٪ در عکس‌العمل دینامیکی تکیه‌گاهی رخ می‌دهد؛ که نشان دهنده تاثیر قابل توجه شکل نوسانی کابل (تک‌حلقه یا دو حلقه) در پدیده تاخت‌باد است.



نمودار ۱۴) تغییرات پارامتر F در برابر تغییر سرعت باد در حالت تکیه‌گاه معلق در نقطه P2 و $\gamma = 30^\circ$

۳-۴- آزمایش‌های انجام شده در حالت تکیه‌گاه معلق در نقطه تکیه‌گاهی میانی و به‌کارگیری روکش موضعی

در بخش‌های ۱-۴ و ۲-۴ مشخص شد که وجود مقره معلق باعث اندرکنش دهنه‌های مجاور بر روی یکدیگر شده و شرایط بحرانی پدیده تاخت‌باد را ایجاد می‌کند. در نتیجه این شرایط بحرانی، کابل به‌صورت تک‌حلقه نوسان کرده و نیروی دینامیکی قابل توجهی به نقاط تکیه‌گاهی (مقره‌ها) و متعاقب آن به سازه‌های نگهدارنده وارد می‌شود. لذا براساس سازوکار تشریح شده در بخش ۲-۴ که طی آن بحرانی‌ترین حالت نوسان مدل مربوط به $\gamma = 30^\circ$ و تکیه‌گاه معلق در نقطه P2 بود، در این بخش نتایج حاصل از به‌کارگیری روکش‌های سخت کننده موضعی در مدل دهنه SB برای این حالت ارایه می‌شود.

هدف از پیاده‌سازی روکش سخت کننده، افزایش سختی خمشی کابل و در نتیجه افزایش مقاومت آن در برابر تغییر شکل (مخصوصاً قایم) جهت کنترل جابجایی‌ها و بررسی تاثیر آن بر تغییر نیروی دینامیکی وارد بر تکیه‌گاه P2 است. برای این منظور نوع مخصوصی از چسب مایع که پس از خشک شدن به‌شدت سخت می‌شود برای پوشش دادن ۲۰ و ۱۰٪ از طول متقارن نسبت به نقطه میانی مدل در دهنه SB مورد استفاده قرار گرفت که در آن I و L به‌ترتیب معرف طول روکش و طول دهنه SB است. در این حالت فرض بر این است که نسبت سختی خمشی مدل بدون پوشش نسبت به سختی خمشی روکش شده نزدیک به صفر بوده و از جرم روکش سخت کننده صرف نظر می‌شود. نمودارهای ۱۲ و ۱۳ به‌ترتیب نمودار تغییرات کمیت‌های S و F را نسبت به سرعت وزش باد نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در حالتی که روکش موضعی، ۱۰٪ از طول میانی مدل دهنه را شامل شده است کاهش در حدود ۱۲٪ در مقدار کمیت S و تنها ۵٪ در مقدار کمیت F نسبت به حالتی که از پوشش سخت کننده استفاده نشده است، ایجاد می‌شود. با افزایش طول پوشش سخت کننده به ۲۰٪، میزان کاهش کمیت‌های S و F به‌ترتیب به حدود ۴۸ و ۲۷٪ می‌رسد.

بروز یخ‌زدگی بر روی کابل و ایجاد شرایط برای منفی‌شدن معیار دن هارتوگ، در معرض پدیده تاخت‌باد تک‌حلقه قرار گیرد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از روکش‌های سخت کننده موضعی به طول ۲۰٪ طول دهنه، کاهش در حدود ۲۷٪ در نیروی وارد بر تکیه‌گاه را به همراه دارد؛ اما در سوی مقابل بررسی دقیق‌تر ساختار اتصال کابل‌ها در مقره‌های معلق و ارایه راه‌کاری برای اصلاح ساختار آن در جلوگیری از اندرکنش بین دهنه‌های مجاور باید مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرد. به این ترتیب، ترکیب این اصلاح ساختاری با به‌کارگیری روکش‌های سخت کننده موضعی، می‌تواند به‌عنوان موضوع پژوهش‌های آتی در این زمینه، نتیجه موثری برای کاهش اثرات منفی تاخت‌باد در بر داشته باشد. همچنین تاثیر روکش‌های سخت کننده بر مودهای نوسانی کابل و تعیین طول بهینه برای روکش‌ها، موضوعات مهم دیگری هستند که می‌بایست در طرح‌ریزی این پژوهش‌ها مورد توجه قرار گیرند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از زحمات و همکاری جناب آقای دکتر مسعود میرزایی، استاد محترم دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در فراهم‌نمودن شرایط و امکانات جهت انجام بخشی از آزمایش‌ها که در آزمایشگاه تونل‌باد تحت مدیریت ایشان در دانشکده هوافضا انجام شد، کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مقاله در تهیه آن اصول کامل اخلاقی را مد نظر قرار داده و تأیید می‌نمایند که محتوای علمی آن به‌طور کامل حاصل نوآوری ایشان بوده و از هیچ منبعی کپی برداری نشده است؛ و در صورت استفاده از مطالب علمی پیشین، به‌عنوان منبع به آنها اشاره شده است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافع در این پژوهش وجود نداشته و حقوق کلیه افراد در نظر گرفته شده است.

سهم نویسندگان: سعیدرضا صباغ‌یزدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشن‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)؛ مجتبی جمشیدی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روشن‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۷۰٪).

منابع مالی: این تحقیق طی یک طرح پژوهشی و با حمایت مالی شرکت برق منطقه‌ای فارس (وابسته به وزارت نیرو) با شماره کمک هزینه FREC-488034 انجام شده است.

۶- فهرست علائم

A	طول مقطع مستطیلی خروجی تونل باد
B	بعد شاخص مقطع کابل یخ‌زده
C _D	ضریب پسا
C ₁ و C ₂	ضرایب تجربی رابطه محاسبه کننده طول هسته جریان یکنواخت
d _{ice}	ضخامت یخ‌زدگی مصنوعی
D	قطر کابل
E	مدول الاستیسیته
f _{op(1)}	نخستین فرکانس طبیعی خارج صفحه
f _{ipAsym(1)}	نخستین فرکانس طبیعی داخل صفحه نامتقارن

باز با فضای آزمون باز استفاده شد. به این ترتیب با توجه به زاویه قرارگیری مدل نسبت به راستای خروجی تونل، یکنواختی بار آیرودینامیکی وارد بر دهنه‌های مدل تغییر کرده و امکان اعمال بار غیریکنواخت فراهم گردید. آزمایش‌ها در سرعت‌های مختلف باد از ۲ تا ۹ متر بر ثانیه با نمو امپریترانی و سه زاویه مختلف قرارگیری مدل نسبت به راستای وزش باد برابر با ۰° و ۳۰° و ۶۰° انجام شد. نتایج حاصله نشان داد در حالتی که کلیه تکیه‌گاه‌ها از نوع بسته باشند، در هر دو حالت اعمال نیروی آیرودینامیکی یکنواخت و غیریکنواخت، به دلیل عدم امکان انتقال نیرو بین دهنه‌های مجاور، هر یک از کابل‌ها به‌صورت کاملاً مستقل تحت تاثیر پدیده تاخت‌باد قرار گرفته و براساس مشخصه‌های فیزیکی خود، به شکل دوحلقه‌ای نوسان می‌کنند؛ و نتیجه این نوع نوسان منجر به تغییرات قابل توجهی در افزایش نیروی دینامیکی وارد بر سازه‌های نگهدارنده نمی‌شود. با تغییر نوع تکیه‌گاه میانی از حالت بسته به معلق، چنانچه مدل تحت بارگذاری آیرودینامیکی یکنواخت قرار گیرد، رفتار مدل نتیجه‌ای مشابه تکیه‌گاه بسته خواهد داشت. اما در حالت بارگذاری آیرودینامیکی غیریکنواخت (که در زاویه‌های ۰° و ۳۰° و ۶۰° ایجاد شد) با از بین رفتن تعادل نیروهای وارد بر دهنه‌های مجاور و ایجاد اندرکنش بین آنها، تغییر رفتار آیرودینامیکی در کابل‌ها رخ داده و نوسان تک‌حلقه تاخت‌باد شکل می‌گیرد؛ که این امر افزایش قابل توجه دامنه تغییر مکان قایم و نیروی دینامیکی وارد بر پایه‌های کابل را به همراه دارد.

با توجه به نتایج حاصله و شناسایی حالت بحرانی پدیده تاخت‌باد در شکل‌گیری نوسان تک‌حلقه، آزمون تاثیر روکش‌های سخت کننده موضعی با پوشش ۱۰ و ۲۰٪ از طول میانی دهنه SB در شرایط ۰° و ۳۰° و تکیه‌گاه معلق در نقطه P2 مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد افزایش سختی خمشی ۱۰٪ از طول میانی کابل تاثیر قابل توجهی در کاهش دامنه نوسان کابل و نیروهای وارد بر تکیه‌گاه ندارد و افزایش این طول به مقدار ۲۰٪ طول دهنه در نهایت منجر به کاهش نیروهای دینامیکی وارد بر تکیه‌گاه به میزان بیش از ۲۵٪ نسبت به کابل بدون روکش موضعی می‌شود.

با توجه به این‌که امکان رخداد پدیده تاخت‌باد در شرایط آب و هوایی سرد و به‌علت یخ‌زدگی و یا تجمع برف بر روی کابل‌ها ایجاد می‌شود، بنابراین عبور خطوط انتقال برق در مناطق سردسیر غالباً از مسیرهای کوهستانی که همواره دارای عوارض طبیعی هستند صورت می‌گیرد. وجود این عوارض از طریق جلوگیری از وزش باد با تابش نور خورشید (ایجاد سایه و تاثیر در میزان آب‌شدن یخ‌زدگی روی کابل‌ها) بر روی برخی از دهنه‌های خط انتقال می‌تواند منجر به وارد آمدن نیروی آیرودینامیکی غیریکنواخت شود. بنابراین می‌توان همواره بارگذاری غیریکنواخت آیرودینامیکی بر روی خطوط انتقال برق را متصور بود. از سوی دیگر در یک خط معمول انتقال برق تعداد مقره‌های معلق مورد استفاده بسیار بیش از تعداد مقره‌های بسته است که این امر موجب می‌شود در صورت

7- Desai YM, Yu P, Popplewell N, Shah AH. Finite element modelling of transmission line galloping. *Computers & Structures*. 1995;57(3):407-420.

8- Mc Comber P, Paradis A. A cable galloping model for thin ice accretions. *Atmospheric Research*. 1998;46(1):13-25.

9- Luongo A, Piccardo G. Non-linear galloping of sagged cables in 1:2 internal resonance. *Journal of Sound and Vibration*. 1998;214(5):915-940.

10- Wang D, Li J, Xie Q. Analytical model for dynamic tension in overhead power transmission lines subject to strong wind. *Advances in Structural Engineering*. 2011;14(3):445-456.

11- Kazakevych MI, Vasylenko OH. Analytical solution for galloping oscillations. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*. 1996;122(6):555-558.

12- Luongo A, Zullia D, Piccardo G. Analytical and numerical approaches to nonlinear galloping of internally resonant suspended cables. *Journal of Sound and Vibration*. 2008;315(3):375-393.

13- Rawlins CB. Analysis of conductor galloping field observations - single conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1981;100(8):3744-3753.

14- Van Dyke P, Laneville A. Galloping of a single conductor covered with a D-section on a high-voltage overhead test line. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008;96(6-7):1141-1151.

15- Paluch MJ, Cappellari TTO, Riera JD. Experimental and numerical assessment of EPS wind action on long span transmission line conductors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007;95(1):473-492.

16- Gurung CB, Yamaguchi H, Yukino T. Identification of large amplitude wind-induced vibration of ice-accreted transmission lines based on field observed data. *Engineering Structures*. 2002;24(2):179-188.

17- Hardy C, Van Dyke P. Field observations on wind induced conductor motions. *Journal of Fluids and Structures*. 1995;9(1):43-60.

18- Tsui YT. Dynamic behavior of a Pylône à Chaînette line Part II. Experimental Studies. *Electric Power Systems Research*. 1978;1(4):315-332.

19- Carreira AJ. Controlling conductor motion with interphase spacers in regions of contamination. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008;24(6):35-42.

20- Rowbottom MD. The effect of an added mass on the galloping of an overhead line. *Journal of Sound and Vibration*. 1979;63(2):310-313.

21- Denhartog JP. Transmission line vibration due to sleet. *Electrical Engineering*. 1932;51(6):413-413.

22- Ratkowski JJ. Experiments with galloping spans. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1963;82(68):661-669.

23- Nigol O, Buchan PG. Conductor galloping Part I - Den Hartog mechanism. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1981;100(2):699-707.

24- Nigol O, Buchan PG. Conductor galloping-Part II torsional mechanism. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1981;100(2):708-720.

25- Lilien JL, Van Dyke P, Asselin JM, Farzaneh M, Halsan K, Havard D, et al. State of the art of conductor galloping. *Technical Brochure*. 2007;322:21-25.

26- Loredó-Souza AM, Davenport AG. A novel approach for wind tunnel modelling of transmission lines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.

$f_{ipSym(1)}$	نخستین فرکانس طبیعی داخل صفحه متقارن
F	نسبت نیروی دینامیکی به استاتیکی وارد بر تکیه‌گاه
H	ارتفاع مقطع مستطیلی خروجی تونل باد
l	طول سخت کننده خمشی
L	طول دهنه کابل
L_c	طول هسته جریان یکنواخت
M	جرم واحد طول کابل
Ma	عدد ماخ جریان خروجی از تونل باد
P1 و P2 و P3	نامگذاری مورد استفاده برای نقاط تکیه‌گاهی مدل آزمایشگاهی
r	شعاع مقطع مدل آزمایشگاهی
R	شعاع مقطع مدل آزمایشگاهی همراه با استوانه چوبی
R_{exit}	شعاع مقطع خروجی تونل باد در صورت دایره‌ای بودن
S	نسبت متوسط تغییر مکان عمودی به مقدار خیز مدل
SA و SB	نامگذاری مورد استفاده برای دهنه‌های کابل مدل آزمایشگاهی
S_L	خیز کابل
U	سرعت متوسط جریان باد
علائم یونانی	
β	نسبت بین طول دهنه مدل تحریف شده و مدل معمولی
γ	زاویه بین راستای مقطع خروجی و محور طولی مدل
λ_L	نسبت ابعادی بین مدل مقیاس شده معمولی و نمونه اصلی
λ^2	ضریب اروین
π	عدد ۳/۱۴
θ_o	زاویه اولیه قرارگیری مقطع یخ‌زده نسبت به سطح افقی
θ	زاویه قرارگیری مقطع یخ‌زده نسبت به جهت جریان باد (زاویه حمله)

منابع

1- Keutgen R, Lilien JL. A new damper to solve galloping on bundled lines. Theoretical background, laboratory and field results. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1998;13(1):260-265.

2- Lilien JL, Havard DG. Galloping data base on single and bundle conductors prediction of maximum amplitudes. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2000;15(2):670-674.

3- Kim JW, Sohn JH. Galloping simulation of the power transmission line under the fluctuating wind. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2018;19(9):1393-1398.

4- Byun GS, Egbert RI. Two-degree-of-freedom analysis of power line galloping by describing function methods. *Electric Power Systems Research*. 1991;21(3):187-193.

5- Riaz H, Biswas SK, Ahmed NU. Stochastic modelling and stabilization of galloping transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 1986;10(2):137-143.

6- Hao SY, Zhou K, Chen ZG, Zhang QC. Finite element analysis on dynamic tension of quad-bundle conductor of transmission line galloping. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;48-49:523-526.

galloping. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1968;87(6):1385-1396.

38- Chadha J, Jaster W. Influence of turbulence on the galloping instability of iced conductors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1975;94(5):1489-1499.

39- Sayigh, A. Comprehensive renewable energy. 1st Edition. Amsterdam: Elsevier; 2012.

40- Gonen T. Electric power transmission system engineering, analysis and design. 1st Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 1988.

41- Barlow JB, Rae WH, Pope A. Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3rd Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 1999.

42- Karthick SK, Jagadeesh G, Reddy KPJ. Visualization of Supersonic Free and Confined Jet using Planar Laser Mie Scattering Technique. Journal of the Indian Institute of Science. 2016;96(1):29-45.

43- Mueller J. A numerical and experimental evaluation of open jet wind tunnel interferences using the DrivAer reference model. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems. 2016;9(5):657-679.

44- Sulaiman Z. Effect of open-jet shear layers on aeroacoustic wind tunnel measurements [Dissertation]. South Holland: Delft University of Technology; 2011.

45- Le HHT, Nguyen CC, Le DK, Bui ND, Nguyen NH. Integrated design process for subsonic open circuit wind tunnel from empirical studies to CFD simulation. International Conference on Advanced Technologies for Communications. Vietnam: IEEE; 2015.

46- Sitek MA, Lottes SA, Bojanowski C. Air flow modeling in the wind tunnel of the FHWA aerodynamics laboratory at turner-fairbank highway research center [Technical Report]. Lemont, United States: ARGONNE National Laboratory; 2017.

47- Schlichting H. Boundary layer theory. 7th Edition. United States: McGraw-Hill; 1999.

2001;89(11-12):1017-1029.

27- Alonso G, Meseguer J, Perez-Grande I. Galloping instabilities of two-dimensional triangular cross-section bodies. Experiments in Fluids. 2005;38:789-795.

28- Chabart O, Lilien JL. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1998;74-76:967-976.

29- Sarkar PP, Chowdhury AG, Gardner TB. A novel elastic suspension system for wind tunnel section model studies. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2004;92(1):23-40.

30- Van Oudheusden BW. On the quasi-steady analysis of one-degree-of-freedom galloping with combined translational and rotational effects. Nonlinear Dynamics. 1995;8:435-451.

31- Baenziger MA, James WD, Wouters B, Li L. Dynamic loads on transmission line structures due to galloping conductors. IEEE Transactions on Power Delivery. 1994;9(1):40-49.

32- Bartoli G, Cluni F, Gusella V, Procino L. Dynamics of cable under wind action: Wind tunnel experimental analysis. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2006;94(5):259-273.

33- Mukhopadhyay V. The galloping oscillation of a cable of square section suspended in a smooth wind flow. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1979;5(1-2):35-51.

34- Wong CJ, Miller MD. Guidelines for electrical transmission line structural loading (asce manuals and reports on engineering practice). 3rd Edition. Virginia: American Society of Civil Engineers; 2009.

35- Irvine HM, Caughey TK. The linear theory of free vibrations of a suspended cable. Proceeding of the royal society. 1974;341(1626):299-315.

36- Tsui YT. Modern developments in cable dynamics. Electric Power Systems Research. 1990;18(2):91-98.

37- Ratkowski JJ. Factors relative to high-amplitude