

بررسی تاثیر پارامترهای کابل در وقوع پدیده گالوپینگ

ياسر فعله گری^۱، سعيد ضيایی راد^۲

^۱ کارشناس ارشد- موسسه آموزش عالی جامی yaserfelegary@yahoo.com

^۲ استاد تمام - دانشگاه صنعتی اصفهان szrad@cc.iut.ac.ir

چکیده

نهایتا به نوسانات حدی با دامنه‌ی بالا و فرکانس پایین می‌رسند. انتقال توان الکتریکی تولید شده در نیروگاه‌ها به مراکز مصرف یکی از مسائلی است که در هر کشوری از اهمیت خاصی برخوردار است. پس از تولید توان الکتریکی، طراحی و ساخت تجهیزات مربوط به آماده کردن این توان برای انتقال، نظیر ترانسفورماتورها طراحی و ساخت تجهیزات مربوط به انتقال این توان مورد توجه قرار می‌گیرد.

گالوپینگ اولین بار در سال ۱۹۳۰ مشاهده شده است و علی‌رغم تحقیق‌های بسیار در این زمینه تا کنون مسئله مربوط به این پدیده به طور کامل حل نشده است. مهم ترین دلایلی که می‌توان به آن اشاره کرد نداشتن یک مدل ساده و کامل برای این پدیده می‌باشد. گالوپینگ هم در کابل‌های تک و هم در کابل‌های باندول می‌تواند به وجود آید. استفاده از کابل‌های باندول شده برای انتقال برق بهترین و اقتصادی ترین راه حل می‌باشد اما مشکل اصلی این است که کابل‌های باندول شده به دلیل الاستیسته زیادی که دارند تحریک پذیر ترند و نسبت به سرعت باد بسیار حساس می‌باشند و گزارشات نشان می‌دهد که کابل‌های باندول شده بیشتر از هادی‌های تک دچار پدیده گالوپینگ می‌شوند. اولین بار در سال ۱۹۳۲ دن هارتگ^۱ [1] مدلی یک درجه آزادی برای بررسی گالوپینگ ارائه کرد. او تنها حرکات در راستای عمودی کابل را محاسبه کرد. مورگان در سال ۱۹۶۴ [2] نحوه ریزش یخ و جهش کابل را با نتایج آزمایشگاهی به دست آورد. پارکینسون [3] نیز در سال ۱۹۶۴ یک مدل یک درجه آزادی به کمک جرم متمرکز برای بررسی حرکت عمودی یک هادی با سطح مقطع مربعی با فرض حرکت تک مودی بکار برد. ریچاردسون در سال ۱۹۸۱ [4] و گورماکر در سال ۱۹۸۴ [5] به وجود آمدن گالوپینگ (نا پایداری پروفیل استاتیکی اولیه کابل) را برای یک کابل که گالوپینگ بین حرکات عمودی و پیچشی دارد را بررسی کردند. در سال ۱۹۹۰ نیز دیانا و همکارانش [6] یک روش تحلیلی را برای بررسی رفتار دینامیکی کابل‌های باندول شده ارائه دادند. دزایی در سال ۱۹۹۶ [7] برای به دست آوردن رفتار دینامیکی کابل بر اثر پدیده گالوپینگ از روش اجزای محدود استفاده کرد و با

گالوپینگ^۱ در لغت به معنای تاختن و چهار نعل رفتن اسب است و در اصطلاح فنی به نوسانات غیر خطی بر انگیخته با فرکانس پایین و دامنه نوسان بالا اطلاق می‌شود که بر روی خطوط انتقال انرژی الکتریکی اتفاق می‌افتد. معمولا برای طراحی یک مجموعه از خطوط انتقال برق از روش سه درجه آزادی کمک می‌گیرند. در مدل سه درجه آزادی نوسان، پیچش و همچنین شکل یخ ایجاد شده بر روی کابل شبیه سازی شده است. مدل سازگار برای رسیدن به حالت مطلوب استفاده از ماتریس‌های جرم، استهلاک، سختی و ضرایب مربوط به نیروهای آیرودینامیکی کابل است. نتایج به‌دست آمده برای سرعتی که در آن گالوپینگ رخ می‌دهد از روش مودهای فرضی با نتایج تجربی انجام شده توسط دیگر محققین مقایسه گردیده است. در قسمت آخر به بررسی عواملی که باعث تغییرات در سرعت بحرانی می‌شود پرداخته و دلایل تاثیر هر کدام از این عوامل عنوان خواهد شد.

واژه های کلیدی

گالوپینگ، مودهای فرضی، سرعت بحرانی.

مقدمه

وجود صفحه یک پارچه از یخ بر روی کابل‌های خط انتقال مشکل رایجی در مناطق سردسیر می‌باشد. ارتعاش با دامنه بالا در کابل‌های یخ زده و ایجاد نیروهای مهم دینامیکی وارد بر خطوط انتقال از نتایج ریزش تکه‌های بزرگ یخ است. هنگامی که یک هادی به صورت زیر مجموعه چند هادی (باندول) قرار گرفته شده باشد نیز ممکن است گالوپینگ اتفاق بیفتد و در نتیجه منجر به سقوط دکل گردد. سقوط دکل زمانی اتفاق می‌افتد که چرخش مجموعه از یک زاویه بحرانی خارج شود و مجموعه ثبات خود را از دست دهد. ابتدا میل گالوپینگ متقاطع است اما نوسانات زمانی که یخ به صورت یکپارچه بر روی کابل قرار بگیرد حرکتی تقریبا دایره ای شکل دارد. این پدیده به علت ناپایداری حالت تعادل استاتیکی کابل‌ها و در اثر اغتشاشات اولیه به وجود می‌آید. اگر سرعت باد که در راستای عمود بر کابل می‌وزد از یک سرعت بحرانی بیشتر شود، حالت تعادل استاتیکی کابل ناپایدار شده و نوسانات کوچک اولیه به تدریج رشد می‌کنند و

² Den Hartog

¹ Galloping

معادلات حرکت با استفاده از اصول تغییرات به صورت:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta (T_{kin} - V_e) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta w_{nc} dt = 0 \quad (1)$$

که در اینجا T_{kin} و V_e انرژی جنبشی کل و انرژی پتانسیل می باشد. w_{nc} کارانجام شده توسط نیروهای ناپایستار و δ نشان دهنده تغییرات است. می توان V_e را این گونه نشان داد:

$$V_e = \int_0^L [EA\varepsilon_s^2 + 2B_T\varepsilon_\theta\varepsilon_s + GJ\varepsilon_\theta^2 + T\varepsilon_s] ds \quad (2)$$

ε_s کرنش کششی، ε_θ کرنش پیچشی، T تنش اولیه، EA استحکام کششی، GJ استحکام پیچشی و B_T پارامتر امتزاج بین کشش و پیچش می باشد که باعث اثر گذاری متقابل نوسانات پیچشی و نوسانات عمودی و عرضی می شود. انرژی جنبشی کل را به صورت زیر می توان بیان کرد:

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T \begin{bmatrix} 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & M \end{bmatrix} \dot{q} \quad (3)$$

در رابطه فوق q بردار مختصات تعمیم یافته و 0_3 ماتریس سه بعدی است که همه درایه های آن صفر می باشد.

ماتریس M با رابطه زیر بیان می شوند:

$$M_{ij} = \int_0^L f_{(i+3)} f_{(j+3)} \mu_{ij} ds \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

f مود شیپ و ماتریس μ با رابطه زیر بیان می شود:

$$\mu_{ij} = \begin{bmatrix} m & 0 & -S_y \\ 0 & m & S_z \\ -S_y & S_z & I_\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

ماتریس سختی K_T به صورت زیر می باشد:

$$K_T = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{22} \\ K_{22}^T & K_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

در رابطه بالا درایه های ماتریس K_T بلوک های 3×3 هستند و با توجه به رابطه انرژی پتانسیل و فنرهای دو طرف به دست می آیند.

برای رسیدن به حالت سه درجه آزادی از رابطه زیر استفاده می شود:

$$K = K_{33} - K_{22}^T K_{11}^{-1} K_{22} \quad (7)$$

نیروهای ناپایستار با بارهای باد و میرایی ویسکوز همراه است. اگر هر یک از اجزای خالص خود را که در جهت طولی است نادیده گرفته شود، w_{nc} به شکل زیر در می آید:

$$w_{nc} = \int_0^L [\dot{F}_y(s) \delta V + \dot{F}_z(s) \delta W + \dot{F}_\theta(s) \delta \theta] ds \quad (8)$$

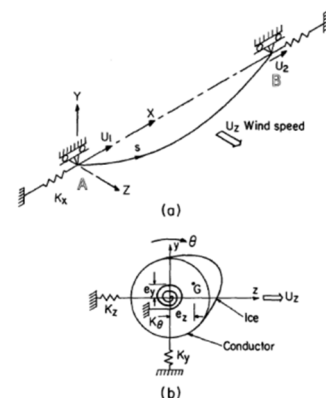
$$- \delta \dot{q}^T C_T \dot{q}$$

استفاده از یک روش اختلالات نوسانات پرودیک و شبه پرودیک نهایی کابل ها را بدست آورد. کلور در سال ۱۹۹۸ [8] مطالعه بر روی مواردی چون ضخامت یخ، ریختن ناقص، و پارامترهای مختلفی توسط روش عددی امسعود فرزانه در سال ۲۰۰۸ [9] مدلی المان محدود از پدیده گالوپینگ را مورد بررسی قرار داد. وی سه نتیجه برای کار خود داشت: (۱) پیش بینی حرکت عرضی کابل در نتیجه چرخش مجموعه. (۲) شبیه سازی ریختن بار (یخ) بر روی کابل. (۳) نوسانات کابل و راه های مختلف ارائه واقعی تر نتایج در سال ۲۰۰۹ باروگیل و همکارانش [10] ارتعاشات عرضی در یک کابل را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که رینولدز جریان هوا نیز در ایجاد گالوپینگ تاثیر گذار است. آنها به این مهم دست یافتند که در محدوده رینولدز هوا ۱۵۹ - ۲۰۰ گالوپینگ اتفاق می افتد. در سال ۲۰۱۳ وان لی زونگ و همکارانش [11] نیز روش هایی برای جلوگیری از پدیده گالوپینگ به دست آوردند. آنها گونه ای جدید از دمپر را اختراع کردند که قادر است ارتعاش خطوط، تنش دینامیکی برج ها، خسارت و خستگی سیستم را کاهش دهد.

فرمول بندی مدل سه درجه آزادی [12].

همانطور که گفته شد، برای طراحی یک مجموعه از خطوط انتقال برق از روش سه درجه آزادی کمک می گیرند و معادلات را براساس این حالت به دست می آورند. ابتدا معادلات در حالت شش درجه آزادی محاسبه می شوند و چون تغییر مکان های کابل در راستای افقی (X) بسیار ناچیز است ادامه کار را برای حالت سه درجه آزادی ادامه می دهیم.

شماتیک کابل مربوط به یک خط انتقال الکتریکی در شکل (۱) نشان داده شده است. فنرهای دو طرف کابل که دارای مقدار K_X می باشند بیانگر جمع سختی مربوط به کابل های کناری و سختی سیم های عایق است. فرض بر این است که اثر اینرسی از دهانه مجاور قابل چشم پوشی است و برج های حمایت سفت و سخت می باشند. معادلات به نحوی فرمول بندی شده که یخ می تواند هر توزیعی در امتداد طول داشته باشد.



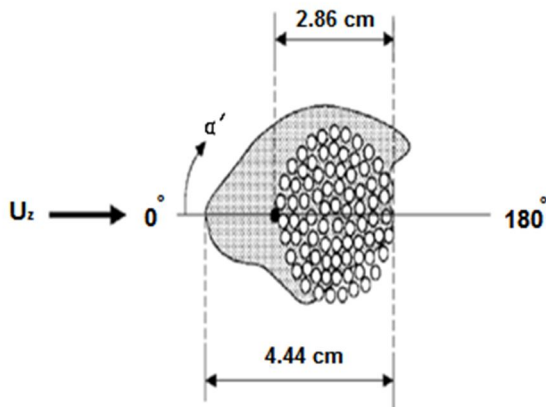
شکل (۱) شماتیک کابل مربوط به یک خط انتقال الکتریکی [12].

$$g_i > 0 \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (15)$$

برای به دست آوردن سرعت بحرانی باد لازم است منحنی‌های g_i ها بر حسب سرعت باد رسم شوند و در محدوده‌هایی از سرعت باد که حداقل یکی از g_i ها منفی می‌باشد حالت تعادل استاتیکی کابل ناپایدار خواهد بود. البته ممکن است برای یک محدوده از سرعت باد حالت تعادل اولیه کابل ناپایدار باشد و با افزایش سرعت باد به سرعتی برسیم که از آن سرعت بالاتر دوباره حالت تعادل اولیه کابل پایدار باشد. این محدوده‌ها با رسم g_i ها بر حسب U_z مشخص می‌شوند.

نتایج عددی

نتایج عددی به دست آمده برای این کابل که یخ با پوشش‌های متفاوتی روی آن شکل گرفته ارائه می‌گردد. کابل دارای سطح مقطعی است که شکل و مشخصات آن در شکل (۲) ارائه شده است. برای این کابل با این پوشش یخ نیروهای آیرودینامیکی برای زوایای مختلف حمله اندازه گیری شده و ضرایب نیروهای آیرودینامیکی به صورت توابعی از زاویه حمله به دست آمده است.



شکل (۲) سطح مقطع کابل [13].

جدول (۱) ضرایب نیروهای آیرودینامیکی و پارامترهای فیزیکی [13].

ضرایب	مقدار	پارامتر فیزیکی	مقدار
a_{y1}	-2.0821	EA(N)	$25.53 * 10^6$
a_{y2}	-0.0288	$B_T(Nm/rad)$	0
a_{y3}	5.077	$GJ(Nm^2/rad)$	153
a_{z1}	-0.6644	H(N)	$15 * 10^3$
a_{z2}	0.2196	$\zeta_y - \zeta_z$	$1.6 * 10^{-2}$
a_{z3}	0.3095	ζ_θ	$5.7 * 10^{-2}$
$a_{\theta 1}$	0.1874	l(m)	125
$a_{\theta 2}$	0.6924	$K_X(N/m)$	$54.16 * 10^3$
$a_{\theta 3}$	0.0323	m(Kg/m)	1.66
		$I_\theta(Kgm^2/m)$	$1.56 * 10^{-4}$
		S_y	$2.72 * 10^{-3}$
		S_z	$-8.3 * 10^{-2}$

V جابجایی در جهت W، Y جابجایی در جهت Z و θ چرخش مجموعه می‌باشد. تغییرات کار نیروهای ناپایستار از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\delta W = \int_0^L (\vec{F}_y \delta V + \vec{F}_z \delta W + \vec{F}_M \delta \theta) ds \quad (9)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho_{air} U_z^2 d \text{diag}(1 \ 1 \ d) \mathbf{A} \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha^2 \\ \alpha^3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

در بالا داریم:

$$A_{ij} = \int_0^L a_{ij} f_6^{j+1} ds \quad i = y, z, \theta \quad j = 1, 2, 3 \quad (11)$$

در روابط بالا ρ_{air} چگالی هوا، U_z سرعت جریان پایدار هوا در راستای محور Z، d قطر کابل و α زاویه حمله باد با محور تقارن کابل است.

$$C_T = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (12)$$

C یک ماتریس قطری است و درایه‌های آن بر حسب فرکانس‌های طبیعی مربوط به سیستم $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0}$ ، ماتریس جرم و ζ_i ضریب میرایی که در جهت‌های مورد نظر هستند که به صورت تقریبی و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی محاسبه می‌شوند.

اولین گام برای بررسی پدیده گالوپینگ این است که آیا حالت تعادل اولیه کابل پایدار است یا خیر. با توجه به رابطه (۱۰) می‌توان گفت که $\mathbf{q} = \mathbf{0}$ یک حل تعادلی است. دیگر حل‌های تعادلی را می‌توان از معادله $\mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}(\mathbf{q})$ پیدا کرد.

بردار مختصات تعمیم یافته را می‌توان اینگونه نوشت:

$$\mathbf{q} = [v \ w \ \theta]^T \quad (13)$$

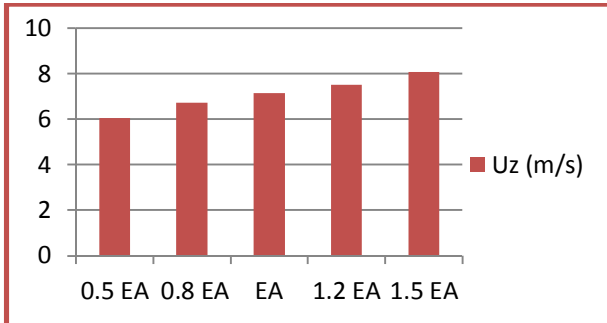
گالوپینگ زمانی اتفاق می‌افتد که حالت تعادل اولیه معادله زیر ناپایدار باشد.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (14)$$

روابط به دست آمده برای بردار F نشان می‌دهد که این بردار شامل جملات خطی و غیرخطی بر حسب درایه‌های بردارهای \mathbf{q} و $\dot{\mathbf{q}}$ می‌باشد. برای نوسانات کوچک جملات غیرخطی این بردار کوچک می‌باشند و نسبت به جملات طرف چپ معادله (۱۳) قابل صرف نظر کردن می‌باشند اما جملات خطی این بردار در مقابل جملات طرف چپ معادله (۱۳) قابل صرف نظر کردن نیست و با بالا رفتن سرعت باد این جملات دارای اثر بیشتری در مشخص کردن رفتار دینامیکی کابل خواهند بود. با استفاده از معیار هوریتز یا جدول راث شرایطی که برای منفی بودن قسمت حقیقی همه مقادیر ویژه لازم است را می‌توان به دست آورد. با استفاده از جدول راث g_i به دست می‌آید.

استحکام کششی کابل (EA)

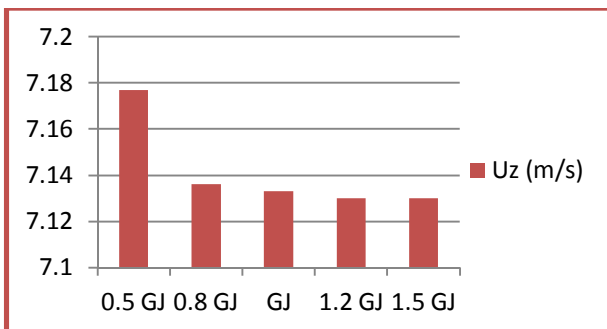
با زیاد شدن EA سختی مربوط به K_{11} زیاد می‌شود بنابراین کل K اصلی هم زیاد می‌شود. در نتیجه با زیاد شدن ماتریس سختی سیستم، سرعت بحرانی نیز زیاد می‌شود.



شکل (۴) تغییرات U_z بر حسب تغییرات EA

استحکام پیچشی کابل (GJ)

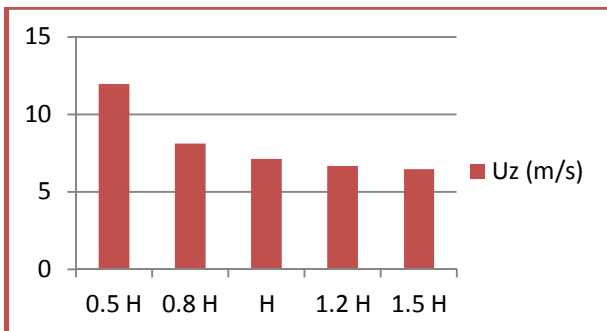
با زیاد شدن استحکام پیچشی، نوسان در جهت های عمودی و عرضی زیاد شده و نوسانات پیچشی کوچک می‌شود و سرعت بحرانی هم کوچک می‌شود.



شکل (۵) تغییرات U_z بر حسب تغییرات GJ

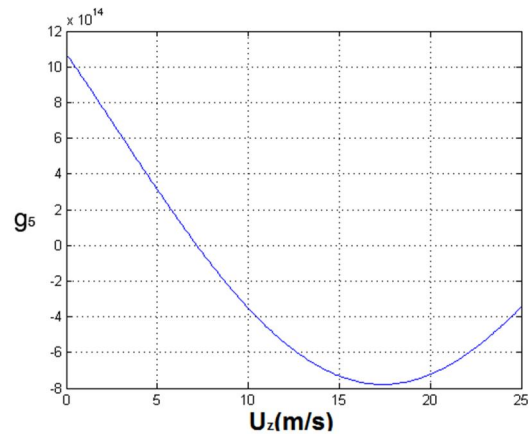
مولفه افقی کشش کابل (H)

مولفه افقی کشش کابل به طور مستقیم بر روی تنش کابل تاثیر گذار است و تنش نیز بر روی تمام مولفه های ماتریس سختی تاثیر می‌گذارد. با زیاد شدن H ماتریس سختی به مراتب کوچک می‌شود.



شکل (۶) تغییرات U_z بر حسب تغییرات H

منظور از شبیه سازی عددی حل معادلات دیفرانسیل کابل و به دست آوردن رفتار کابل پس از خروج از حالت تعادل اولیه می‌باشد. برای این منظور ماتریس های جرم، سختی، میرایی و بردار نیروهای تعمیم یافته مربوط به نیروهای آیرودینامیکی را می‌توان با استفاده از روابط ارائه شده به دست آورد. با استفاده از روابط فوق می‌توان ضرایب معادله مشخصه و از روی آنها g_i ها را به دست آورد. همان گونه که گفته شد پدیده گالوپینگ زمانی رخ می‌دهد که حداقل یکی از g_i ها دارای علامت منفی شود.



شکل (۳) g_5 ، منحنی ستون اول جدول راث بر حسب سرعت باد

با توجه به نتایج به دست آمده (شکل ۳) سرعت بحرانی که بعد از آن کابل دچار ناپایداری می‌گردد برابر $7/13$ متر بر ثانیه است. از مقایسه این نتیجه با نتایج المان محدود مشخص می‌گردد که نتایج تطابق خوبی با نتایج عددی دیگر دارد.

بررسی اثر پارامترهای کابل

در این قسمت بررسی مختصری بر روی اثر گذاری پارامترهای کابل در سرعت بحرانی کابل انجام می‌شود. برای نشان دادن اثر هر کدام از این پارامترهای تاثیر گذار، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند و با تغییر پارامتر مورد نظر به ازای چند مقدار از آن، سرعت بحرانی به دست می‌آید و نتایج در نموداری نشان داده شده و با هم مقایسه می‌شود (برای پنج مقدار مختلف هر پارامتر).

پارامترهایی که بر روی ماتریس سختی اثر می‌گذارند:

$$EA - GJ - H - K_x$$

پارامترهایی که بر روی ماتریس جرم اثر می‌گذارند:

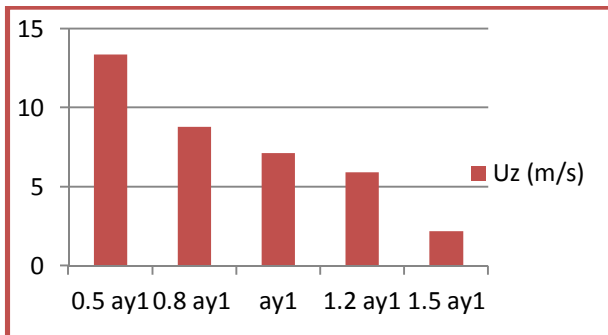
$$m - L$$

پارامترهایی که بر روی نیروهای آیرودینامیکی باد اثر می‌گذارند:

$$a_{y1} - a_{z1} - a_{\theta 1}$$

ضریب جمله درجه اول C_y (a_{y1})

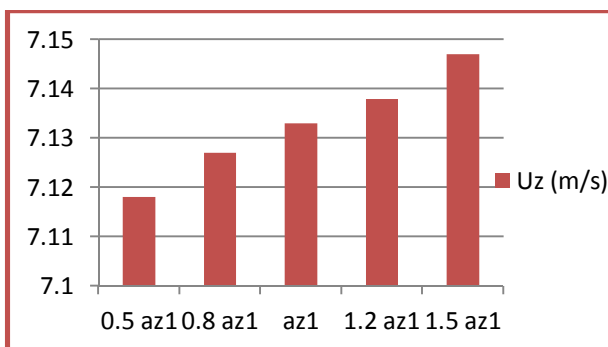
هر چه این ضریب بیشتر باشد بدین معناست که با افزایش وزش باد، نیروهای آیرودینامیکی بیشتر می شود به همین دلیل است که افزایش a_{y1} باعث زیاد شدن سرعت بحرانی می شود.



شکل (۱۰) تغییرات U_z برحسب تغییرات a_{y1}

ضریب جمله درجه اول C_z (a_{z1})

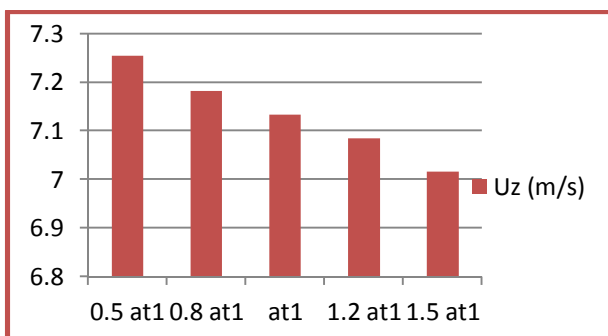
با افزایش وزش باد، نیروهای آیرودینامیکی در جهت Z بیشتر می شود. همانطور که در شکل زیر می بینیم a_{z1} تاثیر به سزایی در سرعت بحرانی ندارد (به علامت این ضریب دقت کنید).



شکل (۱۱) تغییرات U_z برحسب تغییرات a_{z1}

ضریب جمله درجه اول C_θ ($a_{\theta1}$)

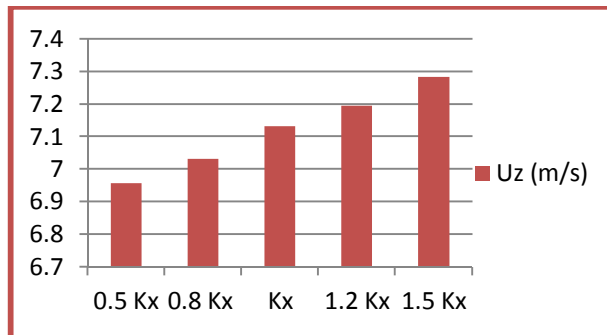
$a_{\theta1}$ در حقیقت بیانگر کوپلینگ بین ارتعاشات عرضی و پیچشی سیستم است و هر چه زیادتر شود باعث می شود که انرژی باد بصورت ارتعاشات پیچشی و عرضی مساوی به سیستم انتقال یابد.



شکل (۱۲) تغییرات U_z برحسب تغییرات $a_{\theta1}$

سختی فنرهای دو طرف (K_x)

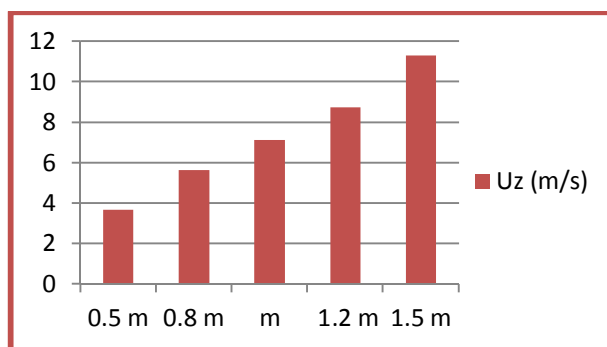
با زیاد شدن K_x ، ماتریس K_{11} بزرگ شده در نتیجه K کل سیستم زیاد می شود بنابراین انتظار می رود با سخت تر شدن سیستم، سرعت بحرانی نیز افزایش پیدا کند.



شکل (۷) تغییرات U_z برحسب تغییرات K_x

جرم کابل در واحد طول (m)

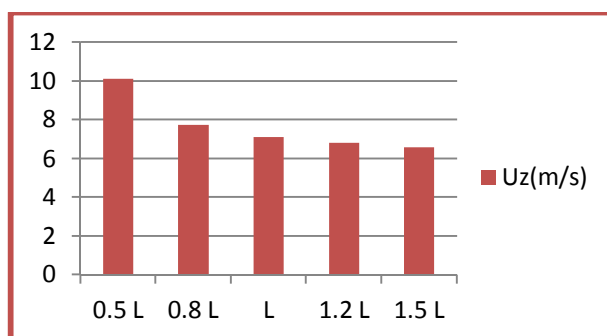
با افزایش جرم، دامنه نوسانات عمودی کابل افزایش و دامنه نوسانات عرضی و پیچشی کابل کاهش پیدا می کند. هر مقدار جرم کابل بیشتر، نیروی بیشتری برای جابجایی کابل نیاز است.



شکل (۸) تغییرات U_z برحسب تغییرات m

طول کابل (L)

L به طور مستقیم در انتگرال ها، چه در ماتریس جرم و چه ماتریس سختی اثر می کند. هر چه دهانه دکل ها بزرگتر باشد کابل تحریک پذیری تر است.



شکل (۹) تغییرات U_z برحسب تغییرات L

1. Den Hartog, J.P. Transmission line vibration due to sleet. AIEE Trans., 51, part4. pp. 1074-1086. 1932.
2. V. T. Morgan and D. A. Swift, "Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 111, no. 10, pp. 1736-1746, 1964.
3. Parkinson, G.V., and Smith, J. D. The square prism as an airoelastic nonlinear oscillator. Q. J. Math., 17(2), pp. 225-239.1964.
4. Richardson, A. S., Jr. Dynamic analysis of Lightly iced conductor galloping in two degrees of freedom. Proc., IEE, Pt. C, 128(4). Pp.211-218. 1981.
5. Goremaker, P. C. M. Galloping conductor and evaluation of the effectiveness of in span dampers. Kema Sci. Tech. Report, 2(4), pp.27-39. 1984.
6. Diana, G. and Cheli, F Oscillation of bundle conductures in overhead lines due to turbulent wind. IEEE Trans.Pow.Del. 5(4). pp. 1910-1922. 1990.
7. Desai. Y. M., Yu. P., Shah. A. H. and Popplewell. N. Perturbation-based finite element analysis of transmission line galloping. J. Sound.vib, 191(4). pp. 469-489. Apr 1996.
8. M. R. Fekr and G. McClure, "Numerical modelling of the dynamicresponse of ice shedding on electrical transmission lines," Atmospher. Res., vol. 46, pp. 1-11, 1998.
9. L. E. Kollár and M. Farzaneh, "Vibration of bundled conductors following ice shedding," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 1097-1104, Apr. 2008.
10. Barrero-Gil, A. ,Sanz-Andre' s, A.,Roura,M. Transverse galloping at low Reynolds numbers. Journal of Fluids and Structures 25, 1236 – 1242. 2009.
11. W. Zhong, W. Wang, H. Chen, W. Luo and Y. Song, "A New Type of Damper and Its Field Tests on Ice-coating Transmission Lines," Engineering, Vol, pp. 101-103. 2013.
12. P. Yu, Y. M. Desai, A. H. Shah and N. Popplewell, Three degrees-of-freedom model for galloping, Part I: formulation. J. Engng Mech. ASCE 119 (12), 2404 2425 .1993.
13. P. Yu, Y. M. Desai, N. Popplewell and A. H. Shah, Three degrees-of-freedom model for galloping. Part II, solutions and applications. J. Engng Mech. ASCE 119 (12), 2426-2448 1993.

گالوپینگ در اصل به دلیل خروج ناگهانی کابل از شرایط پایدار به وجود می‌آید. این ناپایداری نیز به لایه‌ی یخ تشکیل شده بر روی کابل و نیروهای آیرودینامیکی که به کابل وارد می‌شوند و موجب رشد نوسانات در چهار جهت می‌شود بستگی دارد. این مقاله به بررسی پدیده گالوپینگ در کابل‌های مورد استفاده در صنعت برق و انتقال انرژی الکتریکی می‌پردازد. برای این منظور یک مسئله ارائه گردیده است. برای نتایج حاصل از موارد کاربردی می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را جهت بهبود وضعیت ناپایداری سیستم بیان نمود.

- ۱- استفاده از برج‌های کششی .
- ۲- استفاده از جداکننده میان فازها برای کاهش دامنه گالوپینگ.
- ۳- استفاده از جدا کننده‌های حلقوی به جای اسپیسرها در خطوط باندول.
- ۴- کنترل فواصل میان فازها در روی برج، برای بدترین شرایط و نوسان هادی‌ها.

گالوپینگ پدیده‌ای است که با باد و سرما همیشه همراه بوده و خواهد بود، انسان هرگز نتوانسته از پدیده‌های طبیعی اطراف خود چشم پوشی کند. پیشنهادهای زیر برای ادامه کار در این زمینه ارائه می‌گردد.

- ۱- در مورد مزایا و معایب جداسازها تحقیقاتی انجام شود.
- ۲- بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی جهت اندازه گیری ضرایب آیرودینامیکی و تاثیر عدد رینولدز هوا بر روی ضرایب آیرودینامیکی.
- ۳- مدل نمودن دکل‌های واقعی به همراه کابل‌های موجود.

قدردانی

در پایان بر خود لازم می‌دانم از پدر و مادر مهربانم، اساتید بزرگوار بخصوص جناب آقای دکتر سعید ضیایی راد، کارکنان موسسه آموزش عالی جامی، دوستان و هم کلاسی‌های عزیز تر از جانم به ویژه جناب آقای مهندس آرمین باغی باغبان کمال تشکر و دست بوسی را داشته و از خداوند منان خواهان سلامتی و سربلندی برای همه آنها را دارم. باتشکر