

# بررسی خطی پدیده گالوپینگ در خطوط انتقال

یاسر فعله گری<sup>1</sup>، سعید ضیایی راد<sup>2</sup>

yaserfelegary@yahoo.com

szrad@cc.iut.ac.ir

## خلاصه

گالوپینگ<sup>3</sup> پدیده‌ای است که در اثر آن نوسانات با دامنه بالا و فرکانس پایین بر روی کابل‌های انتقال جریان فشار قوی به وجود می‌آید. 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 نهایتاً به نوسانات حدی با دامنه‌ی بالا و فرکانس پایین می‌رسند. در این مقاله معادلات حرکت کابل‌ها با استفاده از روش تقریبی مودهای فرضی استخراج می‌گردند و از روش سه درجه آزادی برای پیدا کردن نوسانات کابل کمک گرفته خواهد شد. 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. تطابق مناسب بین نتایج تحلیلی و تجربی بیانگر صحت روابط ارائه شده و برنامه‌های نوشته شده می‌باشد.

کلمات کلیدی: گالوپینگ، خطوط انتقال نیرو، روش لاگرانژ، مودهای فرضی.

## مقدمه

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. طراحی دکل‌ها، کابل‌ها، کمربندهای برج‌ها و فاصله مورد نیاز برای هادی‌ها از مواردی است که در این مرحله به آن پرداخته می‌شود. نظر به اهمیت موضوع و فاجعه آمیز بودن وقایعی که در صورت طراحی نادرست این تجهیزات در راه انتقال انرژی الکتریکی ممکن است اتفاق بیفتد، موارد زیادی در طراحی این تجهیزات باید مورد توجه قرار گیرد. به عنوان مثال اگر فاصله مورد نیاز بین هادی‌ها لحاظ نشود در اثر حرکت هادی‌ها برخورد بین دو فاز بوجود آید، جرقه‌های بوجود می‌آید که سبب ضعیف شدن منبع تولید توان می‌شوند و یا در مناطق سردسیر که هادی‌ها با یخ پوشیده می‌شوند در صورت جدا شدن یخ، کابل‌ها به نوسان در می‌آیند که این نوسانات به سازه‌های فولادی نگهدارنده کابل‌ها صدمه می‌زند و آنها را دچار خستگی می‌کند. همچنین اگر به هر علت کابل‌ها پاره شوند فشار زیادی به سایر کابل‌ها و دکل‌ها وارد می‌شود.

در سال 1932 دن هارتگ<sup>4</sup> [1] یک مدل یک درجه آزادی برای بررسی گالوپینگ ارائه کرد. او در این مدل تنها حرکات در راستای عمودی کابل را در معادلات وارد کرد. رودی در سال 1948 [2] معتقد بود که حرکت پیچشی یک جزء مهم پدیده گالوپینگ است. نواک در سال 1972 [3] مدلی با چند درجه آزادی برای نوسانات عمودی با بکار بردن معادله تعمیم یافته انرژی برای هر کدام از مودها ارائه کرد. واندربارگ [4] در سال 1984 یک مدل جرم و فنر برای نوسانات کابل ارائه کرد و جواب‌های مربوط به نوسانات عمودی و عرضی (در راستای حرکت باد) کابل را به‌دست آورد. دزایی در سال 1996 [5] برای به دست آوردن رفتار دینامیکی کابل بر اثر پدیده گالوپینگ از روش اجزای محدود استفاده کرد و با استفاده از یک

<sup>1</sup> کارشناس ارشد - موسسه آموزش عالی جامی  
<sup>2</sup> استاد تمام - دانشگاه صنعتی اصفهان

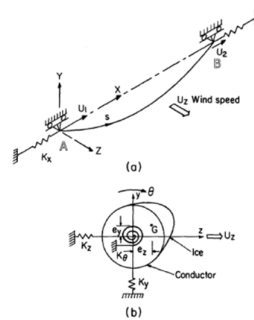
<sup>3</sup> Galloping  
<sup>4</sup> Den Hartog

روش اختلالات نوسانات پرلودیک و شبه پرلودیک نهایی کابل‌ها را بدست آورد. در سال 1998 کیتنگ و لیلین [6] یک وسیله جدید برای مقابله با پدیده گالوپینگ معرفی کردند و کارایی آن را به صورت تحلیلی و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. مسعود فرزانه در سال 2008 [7] مدلی المان محدود از پدیده گالوپینگ را مورد بررسی قرار داد. وی سه نتیجه برای کار خود داشت: (1) پیش بینی حرکت عرضی کابل در نتیجه چرخش مجموعه. (2) شبیه سازی ریختن بار (یخ) بر روی کابل. (3) نوسانات کابل و راه‌های مختلف ارائه واقعی تر نتایج. مسعود فرزانه در سال 2009 [8] مدلی المان محدود از پدیده گالوپینگ با مجموعه ای دو، سه و چهار تایی را مورد بررسی قرار داد و دلایل خود را به اثبات رسانید. در سال 2009 بارروگیل و همکارانش [9] 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 159 - 200 گالوپینگ اتفاق می‌افتد. در سال 2013 وان لی زونگ و همکارانش [10] نیز روش‌هایی برای جلوگیری از پدیده گالوپینگ به دست آوردند. آنها گونه ای جدید از دمپر را اختراع کردند که قادر است ارتعاش خطوط، تنش دینامیکی برج‌ها، خسارت و خستگی سیستم را کاهش دهد. در نهایت دمپر آنها در یک خط انتقال 220KV در استانی در چین نصب شد.

در این مقاله هدف بررسی تحلیلی پدیده گالوپینگ می‌باشد. برای پیش بینی سرعتی که در آن گالوپینگ رخ می‌دهد از روش سه درجه آزادی کمک و با استفاده از روش تقریبی مودهای فرضی سرعت گالوپینگ محاسبه شده است.

### فرمول‌بندی مدل سه درجه آزادی [11].

شماتیک کابل مربوط به یک خط انتقال الکتریکی در شکل (1) نشان داده شده است. فنرهای دو طرف کابل که دارای مقدار  $K_x$  می‌باشند بیانگر جمع سختی مربوط به کابل‌های کناری و سختی سیم‌های عایق است. فرض بر این است که اثر اینرسی از دهانه مجاور قابل چشم پوشی است و برج‌های حمایت سفت و سخت می‌باشند. معادلات به نحوی فرمول‌بندی شده که یخ می‌تواند هر توزیعی در امتداد طول داشته باشد.



شکل (1) شماتیک کابل مربوط به یک خط انتقال الکتریکی [11].

در صورت حرکت کردن نقاط  $A, B$  شکل (1) کل نقاط سیستم متناسب با حرکت این دو نقطه حرکت می‌کنند پس جابجایی دینامیکی در هر نقطه  $(Z, Y, S)$  از هادی، در پیکربندی استاتیکی را می‌توان این گونه توصیف کرد:

$$u(s, y, z, t) = U_1(t)f_1(s) + U_2(t)f_2(s) + U(s, t) \quad (1)$$

$$v(s, y, z, t) = V(s, t) - z\theta(s, t) \quad (2)$$

$$w(s, y, z, t) = W(s, t) + y\theta(s, t) \quad (3)$$

در روابط بالا  $u, v, w$  و جابجایی در دستگاه مختصات محلی، همچنین  $U, V, W$  و جابجایی‌های مرکز دوران در دستگاه مختصات اصلی و در راستای محور  $X, Y, Z$  و همچنین  $\theta$  دوران کابل حول مرکز دوران می‌باشد.  $f_1$  را برابر با  $1 - s/L$  و  $f_2$  را برابر  $s/L$  در نظر می‌گیریم. در روابط فوق  $L$  طول کابل می‌باشد.  $U_1$  و  $U_2$  به ترتیب حرکت افقی نقاط  $A, B$  می‌باشد. با استفاده از روش تقریبی مودهای فرضی می‌توان نوشت:

$$U = \sum_m u_m(t)f_{3m}(s) \quad (4)$$

$$V = \sum_m v_m(t)f_{4m}(s) \quad (5)$$

$$W = \sum_m w_m(t) f_{5m}(s) \quad (6)$$

$$\theta = \sum_m \theta_m(t) f_{6m}(s) \quad (7)$$

در روابط بالا  $u_m, v_m, w_m$  و  $\theta_m$  را مختصات تعمیم یافته و  $f_{3m}, f_{4m}, f_{5m}$  و  $f_{6m}$  نیز شکل مودهای مربوط به این مختصات می باشند. نوسانات کابل‌ها به گونه‌ای است که این نوسانات را تنها می‌توان با یک شکل مود بیان کرد. مودهایی که اغلب برای توابع شکل فوق مورد استفاده قرار می‌گیرند به شکل زیر می‌باشند:

$$f_3(s) = f_4(s) = f_5(s) = f_6(s) = \sin\left(\frac{\pi s}{L}\right) \quad (8)$$

معادلات حرکت با استفاده از اصول تغییرات اینگونه به دست می‌آید.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta (T_{kin} - V_e) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta w_{nc} dt = 0 \quad (9)$$

که در اینجا  $T_{kin}$  و  $V_e$  انرژی جنبشی کل و انرژی پتانسیل می‌باشد.  $w_{nc}$  کار انجام شده توسط نیروهای ناپایستار می‌باشد و  $\delta$  نشان دهنده تغییرات است. با صرف نظر کردن از اثرات اینرسی،  $T_{kin}$  به صورت زیر در می‌آید:

$$T_{kin} = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \rho (\dot{v}^2 + \dot{w}^2) dA ds \quad (10)$$

$\rho(y, z)$  جرم مخصوص کابل و یخ بر روی سطح  $A$  می‌باشد و نقطه‌های بالا نویسنده مشتقات زمانی  $\dot{}$  می‌باشد. تغییرات انرژی پتانسیل  $\delta V_e$  را که در فرمول (9) نشان داده شده بصورت زیر لحاظ می‌شود:

$$\delta V_e = \int_0^L \int_A \delta \varepsilon^T \sigma dA ds \quad (11)$$

که  $\varepsilon$  و  $\sigma$  به ترتیب بردار کرنش و تنش می‌باشند. این بردارها به صورت زیر قابل تعریف‌اند:

$$\varepsilon = [\varepsilon_s \quad \varepsilon_\theta]^T \quad (12)$$

$$\sigma = \mathbf{D} \varepsilon + 2\sigma_0 \quad (13)$$

کرنش کششی  $\varepsilon_s$  را می‌توان اینگونه بیان کرد:

$$\varepsilon_s = \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial w}{\partial s} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial s} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial s} \right)^2 \right] \quad (14)$$

در رابطه فوق مشتقات مختصات نسبت به متغیر  $S$  در حالت تعادل استاتیکی کابل محاسبه می‌شوند. کرنش پیچشی  $\varepsilon_\theta$  را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\partial \theta}{\partial s} \quad (15)$$

علاوه بر این بر اساس فرمول (12) و (13) می‌توان گفت که  $\mathbf{D}$  ماتریس الاستیسیته و  $\sigma_0$  تنش اولیه می‌باشد.

$$\mathbf{D} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} EA & B_T \\ B_T & GJ \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{A} [T \quad M_0]^T \quad (17)$$

که در آن  $M_0$  پیچش اولیه داخلی هادی است که در برابر ممان‌های خارجی قابل چشم پوشی می‌باشد.  $T$  نیروی کشش کابل در حالت تعادل استاتیکی،  $EA$  استحکام کششی،  $GJ$  استحکام پیچشی و  $B_T$  پارامتر امتزاج بین کشش و پیچش می‌باشد که باعث اثر گذاری متقابل نوسانات پیچشی و نوسانات عمودی و عرضی می‌شود.

با استخراج معادلات، می توان  $\delta V_e$  را این گونه نشان داد:

$$V_e = \int_0^L [EA\varepsilon_s^2 + 2B_T\varepsilon_\theta\varepsilon_s + GJ\varepsilon_\theta^2 + T\varepsilon_s] ds \quad (18)$$

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،  $\delta W_{nc}$  به شکل زیر در می آید:

$$w_{nc} = \int_0^L [ \dot{F}_y(s) \delta V + \dot{F}_z(s) \delta W + \dot{F}_\theta(s) \delta \theta ] ds - \delta \mathbf{q}_T^T \mathbf{C}_T \mathbf{q}_T \quad (19)$$

که داریم:

$$\mathbf{C}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$\mathbf{C}$  یک ماتریس قطری است و درایه های آن به صورت:

$$C_{11} = 2\omega_y \zeta_y m_{11} \quad (21)$$

$$C_{22} = 2\omega_z \zeta_z m_{22} \quad (22)$$

$$C_{33} = 2\omega_\theta \zeta_\theta m_{33} \quad (23)$$

$m_{11}$ ،  $m_{22}$  و  $m_{33}$  درایه های قطری ماتریس جرم می باشد و  $\omega_y$ ،  $\omega_z$  و  $\omega_\theta$  فرکانس های طبیعی مربوط به سیستم  $M\ddot{q} + Kq = 0$  می باشد. به عبارت دیگر این سه فرکانس، فرکانس های طبیعی غیر کوپل، غیر میرا می باشند.  $\zeta_y$ ،  $\zeta_z$  و  $\zeta_\theta$  ضرایب میرایی در جهت های مورد نظر هستند که به صورت تقریبی و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی محاسبه می شوند. نیروهای آبرودینامیکی در جهت های عمودی و عرضی و همچنین کوپل آبرودینامیکی در جهت  $\theta$  را با  $F'_y$ ،  $F'_z$  و  $F'_M$  نشان می دهیم. این نیروها را به صورت زیر می توان بیان کرد:

$$(F'_y \quad F'_z \quad F'_M) = \frac{\rho_{air} U_z^2 d}{2} [C_y(\alpha) \quad C_z(\alpha) \quad dC_M(\alpha)] \quad (24)$$

$$\alpha(s, t) = \theta - \left( \frac{R\dot{\theta}}{U_z} + \frac{\dot{v}}{U_z} \right) \quad (25)$$

در روابط بالا  $\rho_{air}$  چگالی هوا،  $U_z$  سرعت جریان پایدار هوا در راستای محور  $Z$ ،  $d$  قطر کابل  $(R \cong \frac{d}{2})$  و  $C_y$ ،  $C_z$  و  $C_M$  ضرایب آبرودینامیکی می باشند که به صورت توابعی غیر خطی از  $\alpha$  و با آزمایش های مختلف برای زوایای مختلف  $\alpha$  به دست می آیند. توابعی که بیشتر برای این ضرایب به کار می روند توابع چند جمله ای درجه سه می باشند.

$$C_i = a_{i0} + a_{i1}\alpha + a_{i2}\alpha^2 + a_{i3}\alpha^3 \quad i = y, z, \theta \quad (26)$$

ضرایب  $a_{ij}$  طوری تعیین می شوند که ضرایب به دست آمده از این توابع با دقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته باشند. انرژی جنبشی کل را به صورت زیر می توان بیان کرد:

$$T = \frac{1}{2} \mathbf{q}_T^T \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{M} \end{bmatrix} \mathbf{q}_T \quad (27)$$

در رابطه فوق  $\mathbf{0}_3$  ماتریس سه بعدی است که همه درایه های آن صفر می باشد. ماتریس  $\mathbf{M}$  با رابطه زیر بیان می شوند:

$$\mathbf{M}_{ij} = \int_0^L f_{(i+3)} f_{(j+3)} \mu_{ij} ds \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (28)$$

ماتریس  $\mu$  با رابطه زیر بیان می شود:

$$\mu_{ij} = \begin{bmatrix} m & 0 & -S_y \\ 0 & m & S_z \\ -S_y & S_z & I_\theta \end{bmatrix} \quad (29)$$

ماتریس سختی  $K_T$  به صورت زیر می باشد:

$$K_T = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{22} \\ K_{22}^T & K_{33} \end{bmatrix} \quad (30)$$

در رابطه بالا  $K_{11}$ ،  $K_{22}$  و  $K_{33}$  بلوک های  $3 \times 3$  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:

$$K = K_{33} - K_{22}^T K_{11}^{-1} K_{22} \quad (31)$$

تغییرات کار نیروهای ناپایستار از رابطه زیر به دست می آید.

$$\delta W = \int_0^L (\dot{F}_y \delta V + \dot{F}_z \delta W + \dot{F}_M \delta \theta) ds \quad (32)$$

که داریم:

$$F = \frac{1}{2} \rho_{air} U_z^2 d \text{diag} (1 \ 1 \ d) A \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha^2 \\ \alpha^3 \end{bmatrix} \quad (33)$$

در روابط بالا:

$$A_{ij} = \int_0^L a_{ij} f_6^{j+1} ds \quad i = y, z, \theta \text{ و } j = 1, 2, 3 \quad (34)$$

اولین گام برای بررسی پدیده گالوپینگ این است که آیا حالت تعادل اولیه کابل پایدار است یا خیر. با توجه به رابطه (35) می توان گفت که  $q=0$  یک حل تعادلی است. دیگر حل های تعادلی را می توان از معادله  $Kq = F(q)$  پیدا کرد. گالوپینگ زمانی اتفاق می افتد که حالت تعادل اولیه معادله زیر ناپایدار باشد.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F \quad (35)$$

روابط به دست آمده برای بردار  $F$  نشان می دهد که این بردار شامل جملات خطی و غیرخطی بر حسب درایه های بردارهای  $q$  و  $\dot{q}$  می باشد. برای نوسانات کوچک جملات غیرخطی این بردار کوچک می باشند و نسبت به جملات طرف چپ معادله (35) قابل صرف نظر کردن می باشند اما جملات خطی این بردار در مقابل جملات طرف چپ معادله (35) قابل صرف نظر کردن نیست و با بالا رفتن سرعت باد این جملات دارای اثر بیشتری در مشخص کردن رفتار دینامیکی کابل خواهند بود. لذا معادله (35) را به صورت زیر می توان نوشت:

$$M\ddot{q} + C_L \dot{q} + K_L q = F_H \quad (36)$$

که داریم

$$C_L = C - C_U \quad K_L = K - K_U \quad (37)$$

$F_H$  نشان دهنده شرایط نیروهای آبرودینامیکی می باشد که نسبت به  $\alpha$  از درجه بالاتر از یک است. اگر جواب معادله را به صورت  $q=v e^{\lambda t}$  در نظر بگیریم می توان نشان داد:

$$G(\lambda) = \det (M \lambda^2 + C_L \lambda + K_L) v = 0 \quad (38)$$

$$a_0 (\lambda^6 + \sum_{i=1}^6 a_i \lambda^{6-i}) = 0 \quad (39)$$

ضرایب  $a_i$  را به صورت صریح می‌توان بر حسب درایه‌های ماتریس‌های  $M$ ،  $C_L$  و  $K_L$  به دست آورد. 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.

$$g_i > 0 \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (40)$$

در اینجا

$$g_0 = a_1 a_4 - a_5 \quad (41)$$

$$g_1 = a_1 \quad (42)$$

$$g_2 = g_1 a_2 - a_3 \quad (43)$$

$$g_3 = g_2 a_3 - a_1 g_0 \quad (44)$$

$$g_4 = g_3 a_4 + (g_1 a_6 - a_2 a_5) g_2 + g_0 a_5 \quad (45)$$

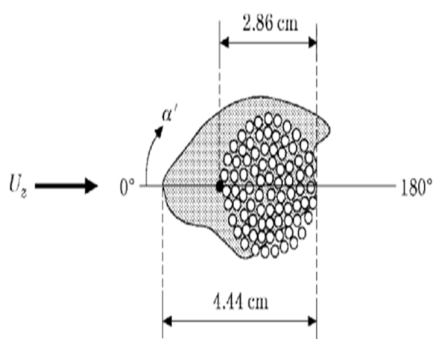
$$g_5 = a_5 g_4 - a_6 (g_3 a_3 - a_1 (g_2 a_5 - g_1^2 a_6)) \quad (46)$$

$$g_6 = a_6 g_5 \quad (47)$$

فرض کنید که در ابتدا تعادل کابل پایدار است. اگر حداقل یکی از مقادیر ویژه از محور موهومی عبور کند (یک نقطه بحرانی) تعادل کابل ناپایدار می‌شود و گالوپینگ ممکن است شروع شود. برای به دست آوردن سرعت بحرانی باد لازم است منحنی‌های  $g_i$  را بر حسب سرعت باد رسم می‌شوند و در محدوده‌هایی از سرعت باد که حداقل یکی از  $g_i$  ها منفی می‌باشند 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.

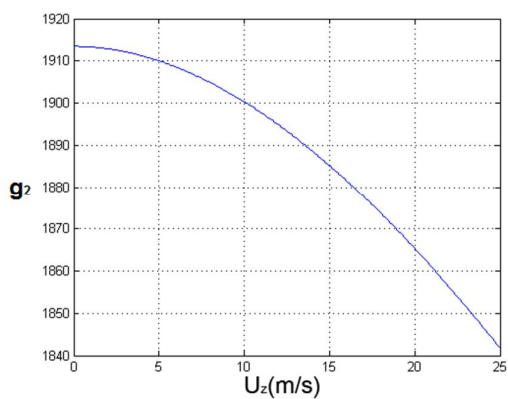
### جدول (1) ضرایب نیروهای آیرودینامیکی و پارامترهای فیزیکی

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 <sup>2</sup> /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	$\zeta_\theta$	$5.7 * 10^{-2}$
$a_{\theta 1}$	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
		$I_\theta$ (Kg m <sup>2</sup> /m)	$1.56 * 10^{-4}$
		$S_y$	$2.72 * 10^{-3}$
		$S_z$	$-8.3 * 10^{-2}$

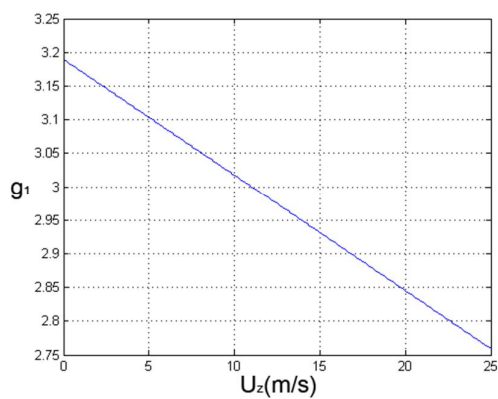


شکل (2) سطح مقطع کابل اول [14].

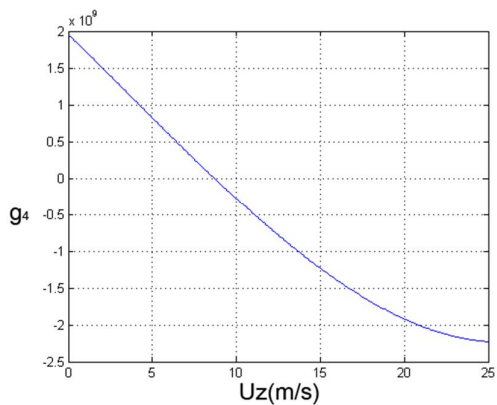
با توجه به نتایج به دست آمده برای کابل (شکل 7) سرعت بحرانی که بعد از آن کابل دچار ناپایداری می گردد برابر  $7/13$  متر بر ثانیه است. از مقایسه این نتیجه با نتایج المان محدود مشخص می گردد که نتایج تطابق خوبی با نتایج عددی دیگر دارد.



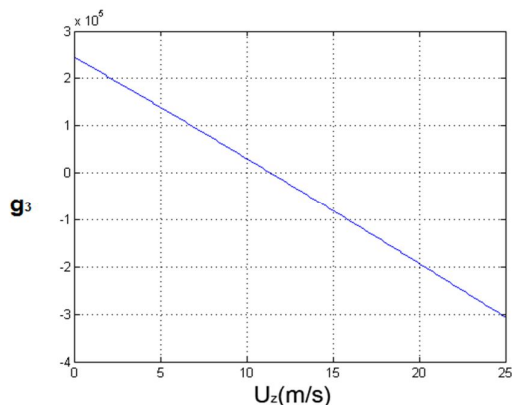
شکل (4)  $g_2$ ، منحنی درایه جدول راث بر حسب سرعت باد



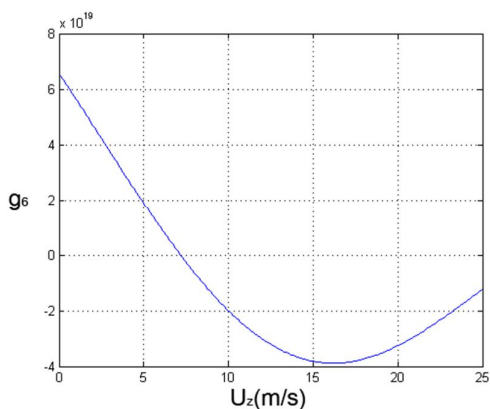
شکل (3)  $g_1$ ، منحنی درایه جدول راث بر حسب سرعت باد



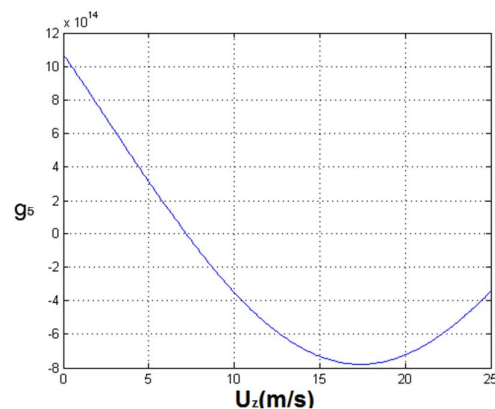
شکل (6)  $g_4$ ، منحنی درایه جدول راث بر حسب سرعت باد



شکل (5)  $g_3$ ، منحنی درایه جدول راث بر حسب سرعت باد



شکل (8)  $g_6$ ، منحنی درایه جدول راث بر حسب سرعت باد



شکل (7)  $g_5$ ، منحنی درایه جدول راث بر حسب سرعت باد

## نتیجه گیری

گالوپینگ در اصل به دلیل خروج ناگهانی کابل از شرایط پایدار به وجود می آید. این ناپایداری نیز به لایه ی یخ تشکیل شده بر روی کابل و نیروهای آیرودینامیکی که به کابل وارد می شوند و موجب رشد نوسانات در چهار جهت می شود بستگی دارد. این پدیده به بررسی پدیده گالوپینگ در کابل- های مورد استفاده در صنعت برق و انتقال انرژی می پردازد. برای این منظور دو مسئله ارائه گردیده است. کابل به صورت یک سیستم سه درجه آزادی مدل سازی شده و معادلات حاکم استخراج گردیده است. با توجه به ریشه های معادله مشخصه، شرایطی که باعث ایجاد ریشه با قسمت حقیقی مثبت و در نتیجه ناپایداری سیستم می گردد محاسبه و از روی آن سرعت بحرانی باد جهت ایجاد گالوپینگ به دست آمده است. با توجه به مقالات ارائه شده در این زمینه و نتایج حاصل از موارد کاربردی می توان نتیجه گیری های زیر را برای بهبود وضعیت ناپایداری سیستم بیان نمود.

- 1- در بیشتر موارد از برج های کششی استفاده شود.
- 2- فواصل میان فازها در روی برج (مخصوصاً در برج های دو مداره) برای بدترین شرایط و نوسان هادی ها کنترل شود.
- 3- از جداکننده میان فازها برای کاهش دامنه گالوپینگ می توان استفاده نمود.
- 4- در خطوط باندول به جای اسپیسرها، از جدا کننده های حلقوی استفاده شود.

## مراجع

1. Den Hartog, J.P. Transmission line vibration due to sleet. AIEE Trans., 51, part4. pp. 1074-1086. 1932.
2. Ruedy, R., Galloping of Transmission lines, NRC Rep. No.1751, Nat. Res. Council of Can., Ottawa, Ont. 1948.
3. Novak, M. Galloping oscillation of prismatic structures. J.Engng. Mech., ASCE, 88(1), pp. 27-45.1972.
4. Van der Burgh , A. H. P. Simple Airoelastic oscillator as amodel for conductor galloping. Report No. 84-17, Dept. of mathematics and information, Technical University if Delft, Netherlands.1984.
5. 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.
6. Keutgen, R. and Lilien, J. L. A new damper to solve galloping on bundle lines. Theoretical background, laboratory and field results. IEEE Trans.Pow.Del. 13(1). Jan1998.
7. 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.
8. L. E. Kollár and M. Farzaneh, "Modeling the dynamic effects of ice shedding on spacer dampers," *Cold Regions Sci. Technol.*, vol. 57, pp. 91-98. 2009.
9. Barrero-Gil, A. ,Sanz-Andre´ s, A.,Roura,M. Transverse galloping at low Reynolds numbers. Journal of Fluids and Structures 25, 1236 -1242. 2009.
10. 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
11. 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.
12. 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.