

بررسی ارتعاشات ناشی از جریان سیال در اطراف خطوط انتقال برق فشارقوی (گالوپینگ)

سعید عنبرستانی^۱، انوشیروان فرشیدیان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، s.anbarestani@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، farshid@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله، شبیه سازی ارتعاشات ناشی از باد و باران و عوامل محیطی روی خطوط انتقال نیرو و فرمول بندی آنها در سیستم های یک و دو درجه آزادی می باشد. بدین منظور برای یک کابل خمیده که در معرض سیالی مثل باد قرار دارد، به کمک مقادیر ویژه یک عبارت صریح برای مینیمم کردن نسبت میرایی مورد نیاز به منظور جلوگیری از گالوپینگ^۱ برای یک سیستم یک درجه آزادی پیدا می کنیم. سپس ترکیب ارتعاشات در دو صفحه عمود برهم را که سبب می شود مسیر حرکت کابل به شکل بیضی شود را در یک سیستم دو درجه آزادی مورد بررسی قرار می دهیم. در این مورد تحلیل را با تغییر عواملی چون زاویه حمله، زاویه کابل- باد و... در نظر می گیریم. طوری که بتوان تحلیل را برای هر شرایطی بکار بست. در پایان نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده در نرم افزار مطلب را با نتایج گزارش شده تاکنون مقایسه کرده که تطابق خوبی را با آنها نشان می دهد.

واژه های کلیدی: گالوپینگ، ارتعاشات ناشی از باد، خطوط انتقال

نیرو، میرایی

مقدمه

اولین نکته در طراحی خطوط هوایی انتقال نیرو مشخصات الکتریکی و هزینه لازم برای احداث شبکه می باشد. در بین عوامل مخرب خطوط هوایی نوسانات ناشی از باد، باران، برف و طوفان از مهمترین و شایع ترین عوامل تخریب کننده ی خطوط می باشند. چرا که باعث تنش های بسیار زیاد و در نتیجه پارگی کابل و فرسودگی و خستگی مکانیکی در کابل های هوایی خطوط نیرو و همچنین باعث اتصال و به هم خوردن کابل ها و یا سقوط دکل ها می شوند. عامل اصلی ایجاد نوسانات در خطوط هوایی انتقال را می توان برخورد جریان پایای باد به خط انتقال نیرو و گردابه هایی دانست که در پشت کابل تشکیل و منجر به تولید نیروهای نوسانی در جهت عمود بر جریان و فشار متناوب بر طرفین کابل و در نهایت حرکت تناوبی کابل می شوند. ارتعاشات ناشی از باد بدون وابستگی به تعداد خطوط عبوری و حتی گاهی سرعت باد در همه ی حالات وجود دارد که در تمامی خطوط منفرد و جفتی و در محدوده ی فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز مشاهده شده است [۱]. دامنه ی ارتعاشات عرضی خطوط نیرو با توجه به

شرایط فوق حدود یک صدم تا یک برابر قطر کابل گزارش شده است [۲]. اغلب روش های مورد استفاده برای جلوگیری و رفع خرابی های ناشی از خستگی در کابل های خطوط انتقال نیرو در اثر ارتعاشات، بر مبنای جذب انرژی مکانیکی انتقال یافته توسط نیروی باد است که با بکارگیری و نصب دمپرهای مکانیکی در محل مناسب تحقق می یابد.

تعداد زیادی جذب کننده ی انرژی برای کاهش نوسانات خطوط انتقال نیرو وجود دارد که متداول ترین آن ها دمپر استاک بریج^۲ می باشد. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص مدل سازی ارتعاشات خطوط انتقال نیرو صورت گرفته است که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد:

تئوری کلاسیک پدیده ی گالوپینگ برای اولین بار توسط دن هاتوگ^۳ در سال ۱۹۵۶ پایه ریزی شد. بعدها در سال ۱۹۷۲ نوک^۴ یک مدل چند درجه ی آزادی را برای ارتعاشات صرفاً عمودی ارائه کرد که در آن از معادله ی عمودی حرکت برای هر مد استفاده شده بود [۳]. در سال ۱۹۷۳ مایرسکوه^۵ با استفاده از معادله ی موج غیر خطی مرتبه ی دوم ارتعاش صرفاً عمودی را مدل کرد و جواب را به فرم سری بدست آورد [۴]. در سال ۱۹۷۴ آلنوت^۶ و همکارانش ارتعاشات خطوط انتقال را با مدلسازی یک دمپر دینامیکی به صورت جرم و فنر میراکننده بررسی کردند و در نهایت محدوده ی کار مفید دمپر بر روی خطوط انتقال را تعیین کردند [۵]. در سال ۱۹۹۵ استرومن و هانسن^۷ یک هندسه ی سه بعدی را برای تجزیه و تحلیل جریان به کار بردند و فرمول های آنها شامل ماتریس میرایی شبه پایدار آبرودینامیکی بود. یعنی فرض شد که ضرایب نیرویی به مولفه ی جریان که فقط با زاویه ی قائم برخورد تغییر می کند، بستگی دارد [۶]. در سال ۱۹۹۷ کاستلو^۸ آنالیز خطی کابل های انتقال را که تنش محوری، پیچشی و خمشی در آن در نظر گرفته شده بود را مورد بررسی قرار داد [۷].

اخیراً نیز در سال ۲۰۰۶ لاروس و مک دونالد^۹ یک فرمول بندی کلی ارائه کردند و در آن آنالیز غیر خطی کابل را در نظر گرفتند [۸].

² Stock Bridge Damper

³ Den hatug

⁴ Novak

⁵ Myerscough

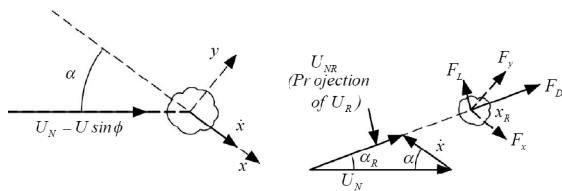
⁶ Allnut

⁷ Strommen & Hjorth-Hansen

⁸ Castello

⁹ Mac Donald & Larose

¹ Galloping



شکل ۲: نیروهای برآیند وارد بر استوانه [۷]

بطور مشابه می توان گفت:

$$F_y = \frac{1}{2} \rho U_R^2 D (C_D \sin \alpha_R - C_L \cos \alpha_R) \quad (2)$$

برای α های کوچک که مقدار آنها با $\dot{x}/U_R$ برابر است. از معادله نسبت به α مشتق می گیریم. برای پایداری باید این مقدار بزرگتر از صفر و برای ناپایداری باید کوچکتر از صفر باشد. با ساده سازی داریم:

$$\frac{dL}{d\alpha} < -D \quad (3)$$

در آغاز ارتعاشات نسبت آیرودینامیکی خطی معادل به وسیله ی معادله زیر بیان می گردد:

$$\zeta_a = \frac{-1}{2m\omega_n} \frac{dF_x}{d\dot{x}} \Big|_{\dot{x}=0} \quad (4)$$

که در آن m جرم استوانه بر واحد طول و ω_n فرکانس طبیعی استوانه است. با مشتق گیری و جایگذاری در معادلات فوق، نسبت آیرودینامیکی کلی به صورت زیر به دست می آید:

$$Z_a = \frac{\text{Re}}{8\pi} [g(C_D) \cos^2 \alpha - g(C_L) \sin \alpha \cos \alpha + \frac{1}{\sin \phi} (C_D - C'_D \sin \alpha \cos \alpha + C'_L \sin^2 \alpha)] \quad (5)$$

قسمت راست معادله ی فوق تابعی از عدد رینولدز و دو زاویه α و ϕ می باشد. پارامتر میرایی ساختاری بدون بعد Z_s را نیز می توان برحسب اعداد بدون بعد آشنا به صورت زیر بیان نمود:

$$Z_s \equiv \frac{\zeta_s m f_n}{\mu} = Sc \frac{\text{Re}}{U_r} \quad (6)$$

که در آن ζ_s نسبت میرایی ساختاری، $Sc = m \zeta_s / \rho D^2$ عددا سکوئن و $U_r = U / f_n D$ سرعت کاهش یافته می باشد. برای شرایط پایداری در مقابل ارتعاشات یک درجه آزادی می بایست:

$$Z_a + Z_s > 0 \quad (7)$$

ماتریس میرایی آیرودینامیکی بر واحد طول در حرکت دودرجه آزادی

برای ارتعاشات با دامنه کم می توان ماتریس میرایی آیرودینامیکی را به شکل ترکیبی به صورت زیر بیان نمود:

$$C_a = \begin{bmatrix} c_{xxa} & c_{xya} \\ c_{yxa} & c_{yya} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial F_x}{\partial \dot{y}} \\ \frac{\partial F_y}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial F_y}{\partial \dot{y}} \end{bmatrix} \Big|_{\dot{x}=\dot{y}=0} \quad (8)$$

که هر کدام از درایه های ماتریس می توانند مانند آن چه در بالا گفته شد محاسبه شوند. حاصل این عبارت برای ارتعاشات دو درجه آزادی بر واحد طول استوانه به شکل زیر در می آید:

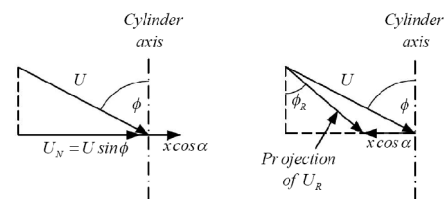
هدف از این تحقیق بررسی ارتعاشات موجود در خطوط انتقال برق و تعیین مینیمم نسبت میرایی مورد نیاز به منظور جلوگیری از پدیده گالوپینگ در مختصات یک و دو درجه آزادی و مقایسه آن با نتایج قبل می باشد.

فرمول بندی کلی مسئله

در تحلیل گالوپینگ معمولاً از ضرایب نیرو سخن به میان می آید که این ضرایب با عدد رینولدز تغییر می کند و به مولفه ی نوسان سرعت جریان نیز بستگی دارند. اما این فرض در محدوده ی اعداد رینولدز بحرانی برقرار نیست. از این رو یک فرمول بندی کلی از نیروهای آیرودینامیکی نیاز است تا هر نوع هندسه ی جریان و تغییرات در ضرایب نیرو را در بر گیرد.

بر خلاف مواردی از گالوپینگ که بسیار اتفاق افتاده و در سرعت های بالاتر از حد بحرانی باد بوده است، گالوپینگ در کابل های خشک و خمیده در سرعت های پائین تری از باد اتفاق می افتد. مثلاً برای کابل های مهار کننده ی پل مسطح، در سرعت بادی حدود ۳۰ m/s این اتفاق می افتد. حتی اگر سطح بیشتری داشته باشد یا جریان آشفتگی بیشتری داشته باشد در سرعت پائین تری ممکن است رخ دهد. در حقیقت به دنبال مینیمم میرایی ساختاری مورد نیاز برای جلوگیری از گالوپینگ به عنوان تابعی از ضرایب نیروی استاتیکی می باشیم. البته زمانی که سرعت پیچشی نادیده گرفته شود.

کابل را یک استوانه فرض می کنیم که در معرض عبور سیالی مثل باد قرار گرفته است. یک جریان باد با سرعت U و تحت یک زاویه نسبت به محور استوانه به نام ϕ که از آن در مقالات به عنوان زاویه ی کابل- باد یاد می کنند را در نظر می گیریم که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: چگونگی برخورد باد تحت زاویه با محور استوانه (مدل کابل) [۷]

اگر استوانه با سرعت $\dot{x}$ در جهتی که با صفحه ی کابل باد زاویه ی α می سازد حرکت کند مولفه نیروی برآیند بر واحد طول در جهت سرعت استوانه اتفاق می افتد که در شکل ۲ دیده می شود و به صورت معادله زیر بیان می گردد:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho U_R^2 D (C_D \cos \alpha_R - C_L \sin \alpha_R) \quad (9)$$

که در آن ρ دانسیته سیال، U_R بزرگی سرعت نسبی، D معرف طول مشخصه سطح مقطع (قطر هیدرولیکی)، C_D و C_L به ترتیب ضرایب درگ و لیفت می باشند که به آنها پارامترهای آیرودینامیکی نیز می گویند. α_R نیز زاویه نسبی برخورد می باشد.

$$\zeta_{crit} = \frac{-(c_{xxa} + c_{yya})}{4m\omega_n} \quad (17)$$

با به کار بستن معادلات فوق برای یک سطح مقطع دایروی برای ارضاء شرط پایداری می بایست:

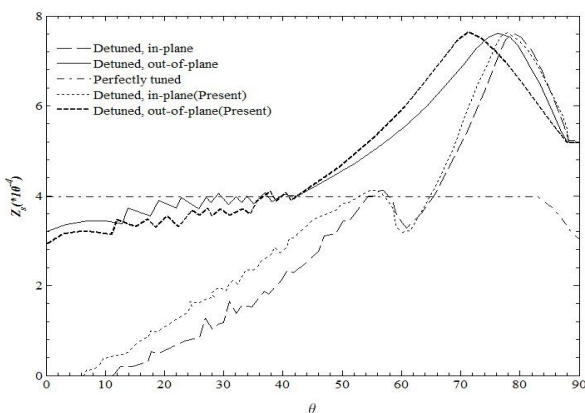
$$Z_s > \Re \left[\frac{\Re}{16\pi} \left\{ -h(C_D) + \sqrt{g^2(C_D) + g^2(C_L) - h^2(C_L)} \right\} \right] \quad (18)$$

که در آن $\Re$ قسمت حقیقی رانشان می دهد.

نتایج

همانطور که دیده می شود مقدار مورد نیاز Z_s تابعی از $\Re$ و ϕ است و مستقل از α می باشد. این به خاطر آن است که مدل استوانه از لحاظ دورانی قرینه است.

همانطور که گفته شد ترکیب ارتعاشات در دو صفحه عمود بر هم سبب می شود که مسیر حرکت کابل به شکل بیضی در آید. می توان گفت که برای کابلها دو نوع گالوپینگ اتفاق می افتد. یکی در راستای افقی که به آن حرکت ماری نیز می گویند و دیگری در راستای عمودی. بسته به این دونوع حرکت مدشپ نیز داریم. یک نوع آن مدهایی هستند که در صفحه عمودی که شکم کابل در آن قرار دارد ایجاد می شوند که به آنها اصطلاحاً مدهای داخل صفحه‌ای¹⁰ می گویند و نوع دیگر مدهایی هستند که در صفحه ای که شامل وتر کابل است ایجاد می گردند و بر صفحه بالا عمود است و به آنها اصطلاحاً مدهای خارج صفحه ای¹¹ گویند. ارتعاشات نوع دوم از نوع اول بحرانی تر هستند. در این مقاله ارتعاشات داخل و خارج صفحه ای یک مدل خاص که در جدول ۱ نشان داده شده است [۸]، توسط نرم افزار مطلب شبیه سازی شده است و مینیمم میرایی ساختاری مورد نیاز بر حسب تغییر زاویه خمیدگی کابل محاسبه شده است. شکل ۳ این موضوع را به خوبی بیان می کند. در جدول ۲ نیز مقادیر زاویه θ و مینیمم میرایی ساختاری مورد نیاز در دو حالت ارتعاشات برای مرجع فوق و شبیه سازی انجام شده داده شده است. مقایسه بین آن دو تطابق خوبی را با مرجع مذکور بیان می کند.



شکل ۳: مقایسه مینیمم میرایی ساختاری مورد نیاز در دو حالت ارتعاشات برای مرجع [۸] و شبیه سازی انجام شده، بر حسب زاویه θ

$$C_a = \frac{\mu Re}{2} (GB_1 + C_{F\phi} + C'_{F\phi} B_2) \quad (9)$$

درجایی که برای هر کدام از ضرایب داریم:

$$C_{F\phi} = \frac{1}{\sin \phi} \begin{bmatrix} C_D & -C_L \\ C_L & C_D \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} g(C_D) & -g(C_L) \\ g(C_L) & g(C_D) \end{bmatrix}$$

$$C'_{F\phi} = \frac{1}{\sin \phi} \begin{bmatrix} C'_D & -C'_L \\ C'_L & C'_D \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha \\ -\sin^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \end{bmatrix}$$

معادله را می توان برای کل کابل به صورت زیر براساس دو متغیر مکانی و زمانی تعریف نمود:

$$x(z, t) = \sum_i \psi_{xi}(z) X_i(t)$$

$$y(z, t) = \sum_i \psi_{yi}(z) Y_i(t) \quad (11)$$

که در آن ψ_{xi} و ψ_{yi} ، i امین مدشپ کابل در صفحه X و Y هستند و X_i و Y_i نیز به ترتیب جابجایی های کلی در مدهای فوق می باشند.

نیروی کلی Z امین مد در صفحه X به صورت زیر بیان می گردد:

$$F_{xj}(t) = - \int (c_{xxa} \dot{x} + c_{xya} \dot{y}) \psi_{xj}(z) dz \quad (12)$$

باجایگذاری معادلات قبل داریم:

$$F_{xj}(t) = -c_{xxa} \sum_i [\dot{X}_i(t) \int \psi_{xi}(z) \psi_{xj}(z) dz] - c_{xya} \sum_i [\dot{Y}_i(t) \int \psi_{yi}(z) \psi_{xj}(z) dz] \quad (13)$$

براساس خاصیت انتگرال ها بجز زمانی که $i=j$ است، انتگرال اول صفر است. یعنی ترکیبی بین مدهای موجود در یک صفحه یکسان وجود ندارد. عبارت دوم Z امین مد در صفحه X را با همه مدهای صفحه Y ترکیب می کند. در نهایت بنا بر همین خاصیت داریم:

$$F_{xj}(t) = -(c_{xxa} \dot{X}_j(t) + c_{xya} \dot{Y}_j(t)) \int \psi_{xj}^2(z) dz \quad (14)$$

به طریق مشابه نیرو در جهت Y نیز همانند معادله بالا بدست می آید. برای بدست آوردن میرایی مورد نیاز برای پایداری سیستم در یک کابل کاملاً کشیده شده با دو انتهای ثابت، اگر فرض شود که $\omega_x = \omega_y = \omega_n$ بعد از ساده سازی به معادله زیر می رسیم:

$$(c_{xxa} + 2m\omega_n \zeta_s)(c_{yya} + 2m\omega_n \zeta_s) - c_{xya} c_{yxa} = 0 \quad (15)$$

بازل این معادله ζ_{crit} یابه عبارتی نسبت میرایی بحرانی به شکل زیر بدست می آید:

$$\zeta_{crit} = \frac{1}{2m\omega_n} \left\{ - \left(\frac{c_{xxa} + c_{yya}}{2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{c_{xxa} - c_{yya}}{2} \right)^2 + c_{xya} c_{yxa}} \right\} \quad (16)$$

در معادله (۱۶) ریشه مثبت جذر مقدار مورد نیاز برای پایداری سیستم و ریشه منفی جذر نسبت میرایی ساختاری حداقل را می دهد. این درحالتی است که در حل معادلات بالا به کمک مقادیر ویژه ممکن است یکی از دو مقادیر ویژه برای حل پایدار شده باشد و دیگری هنوز ناپایدار باشد. بابت معادله فوق به مولفه های آیرودینامیکی و ساختاری به معادله زیر می رسیم:

جدول ۱: مشخصات مدل بکار رفته در مرجع [۸]

0.16 m	قطر، D
60.8 kg/m	جرم بر واحد طول، m
60°	زاویه کابل- باد، Φ
-35.3°	زاویه حمله، α
1.4 Hz	فرکانس طبیعی در راستای x، f_x
1.415 Hz	فرکانس طبیعی در راستای y، f_y
32 m/s	سرعت باد
3.4×10^5	عدد رینولدز، Re

جدول ۲: مقادیر مینیمم میرایی ساختاری در زوایای مختلف در دو حالت ارتعاشات و بیان مقادیر اختلاف بر حسب درصد

ارتعاشات خارج صفحه ای			
θ	$z_s \times 10^4$ برای مرجع [8]	$z_s \times 10^4$ برای شبیه سازی انجام شده	درصد اختلاف
0.0	3.17681	2.89855	-8.75
10	3.40870	3.10725	-8.84
19	3.87246	3.29275	-14.9
26	3.94203	3.54783	-9.9
37	4.03478	4.08116	1.14
45	4.38261	4.12754	-5.82
60	5.79710	5.49565	-5.2
72	7.58261	7.25797	-4.28
81	5.84348	6.50290	11.2
90	5.17101	5.19420	0.44
ave = 7%			
ارتعاشات داخل صفحه ای			
θ	$z_s \times 10^4$ برای مرجع [8]	$z_s \times 10^4$ برای شبیه سازی انجام شده	درصد اختلاف
0.0	0.00	0.00	0
10	4.41E-01	0.00	-1
19	9.01E-01	5.85E-01	-35*
26	1.70E+00	1.30E+00	-23.5
37	2.50E+00	1.97E+00	-21.2
45	3.31E+00	2.75E+00	-16.9
60	3.22E+00	3.30E+00	2.4
72	6.63E+00	6.02E+00	-9.2
81	7.05E+00	7.31E+00	3.6
90	5.19E+00	5.16E+00	-0.57
ave = 8.7%			

- برای نسبت فرکانس های متفاوت بین دو صفحه ارتعاشات ، ضرایب نیروی استاتیکی در یک محدوده ای از عدد رینولدز بحرانی قابل اندازه گیری است.

- در ارتعاشات خطوط انتقال نیرو هر چه سیستم با فرکانس تحریک بالاتری توسط عوامل طبیعی محرک از قبیل باد و ... تحریک شود ، دامنه نوسان آن کاهش می یابد.

- باران بر روی کابل زبری سطح آن را افزایش می دهد و عدد رینولدز بحرانی را کاهش داده و سبب می شود سرعت بحرانی باد به حدود 10 m/s برای کابل های پایدار برسد.

- محل نصب دمپر در کاهش یا افزایش دامنه نوسانات خط بسیار حائز اهمیت است. چرا که نصب دمپر در محل هایی خاص از طول دهانه خط باعث افزایش ناگهانی دامنه نوسانات نسبت به خط بدون دمپر می گردد .

- ترکیب پیچش و کشش وخمش در کابل سبب می شود که خط مسیر حرکت کابل دو درجه آزادی به صورت بیضی شکل در آید.

- در کابل هایی با شکم بزرگ تغییرات ناپایداری نوسانات در اولین فرکانس طبیعی می تواند در مقایسه با نتایج عددی خطی و غیر خطی مورد توجه قرار بگیرد که این تغییرات به شکم و بار به کار رفته روی این کابل بستگی دارد.

- با افزایش دامنه ارتعاش فرض ثابت بودن نیروی کششی سیم اعتبار خود را از دست می دهد و معادلات کلاسیک دیگر ثابت نخواهند بود.

- ارتعاشات خارج صفحه ای باتوجه به جدول ۲ و شکل ۳ از ارتعاشات داخل صفحه ای بحرانی تر هستند.

- مقایسه بین مقادیر شبیه سازی شده در این تحقیق و حل تحلیلی مرجع [۸] تطابق خوبی را نشان می دهد.

منابع

- [1] Elizabeta Bahtovska, 1973. "The Energy Balance for Damped Wind-Excited Vibration", *Mechanical Engineering*, Vol.1, No. 7, pp. 769-773.
- [2] Agamenon R. E. Olivera, Denise G. Freire, July 1994. "Dynamical Modeling and Analysis Vibrations of Single Conductors", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, pp. 1685.
- [3] M. Novak, 1972. "Galloping Oscillations of Prismatic Structures", *J. Eng. Mech.*, Vol.88, pp. 27-45.
- [4] J. Myerscough, 1973. "A Simple Model of the Growth of Wined Excited Oscillations in Overhead Lines", *J. Sound and Vib.*, Vol. 28, pp. 699-713.
- [5] J. G. Allnut, B.Sc., D.Phil. and M.D. Rowebottom, 1974. "Damping of Aeolian on Overhead Lines by Vibration Dampers", *Proc. IEEE*, Vol. 121, No. 10, pp.1174.
- [6] Strommen, E., Hjorth-Hansen, E., 1995. "The buffeting wind loading of structural members at an arbitrary attitude in the flow", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 56, 267-290.
- [7] G.A. Costello, 1997. "Theory of Wire Rope", *second ed.*, Springer, New York.
- [8] Macdonald, J.H.G., Larose, G.L., 2006. "A unified approach to aerodynamic damping and drag/lift instabilities, and its application to dry inclined cable galloping", *J. Fluids Struct.* 22, 229-252.

نتیجه گیری و جمع بندی

به کمک روابط ذکر شده در رابطه با ماتریس میرایی آیرودینامیکی شبه پایدار دو درجه آزادی ، نیروهای آیرودینامیکی روی هر استوانه و با هر جهت دلخواهی به دست می آید و تغییرات ضرایب نیرو با عدد رینولدز و زاویه کابل- باد و نیز زاویه حمله α به وضوح دیده می شود. مسئله مقادیر مشخصه برای سیستم دو درجه آزادی کاملاً متعادل به کار رفته تا به کمک آن نسبت میرایی ساختاری مورد نیاز جهت جلوگیری از گالوپینگ به دست آید.

- برای کابل هایی که عدد رینولدز در آن ها در محدوده ی بحرانی است کمی تغییرات در ضرایب نیرو می تواند منجر به ناپایداری حاصل از گالوپینگ گردد.

- اگر مد شیب های نامیرا در دو صفحه یکسان باشد ، به عنوان مثال برای کابل سفت و کشیده شده دو درجه آزادی ، ماتریس میرایی به طور مستقیم می تواند به کار رود بدون این که ترکیبی بین دو جفت صورت گیرد.