

تحلیل ارتعاشات آئولین خطوط انتقال نیرو با وجود جداکننده

چکیده: در این مقاله ارتعاشات آئولین خطوط انتقال نیرو مورد بررسی قرار گرفته و اثر وجود جداکننده بین هادی ها بررسی شده است. هر کدام از هادی ها بصورت یک تیر اویلر برنولی مدلسازی شده است و جداکننده بصورت یک فنر و دمپر بین آن دو قرار گرفته است. ضریب سفتی و میرایی جداکننده با استفاده از آزمایشات تجربی برای یک جداکننده استفاده شده در خطوط توزیع برق ایران بدست آمده است. معادلات حرکت با استفاده از اصل همپلتون استخراج شده است. این معادلات با استفاده از روش گلرکین به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل شده و سپس با روش رانگ کوتا حل عددی شده است. در ادامه تاثیر استفاده از جداکننده بر ارتعاشات خطوط انتقال و تاثیر پارامترهای مختلف طراحی، اعم از مقدار جرم، ضریب سفتی و میرایی جداکننده، محل قرارگیری جداکننده، طول دهانه خط انتقال و جرم واحد طول کابل بر دامنه ارتعاشات هادی ها بررسی می شود. نتایج شبیه سازی نشان داده است که وجود جداکننده تا چه اندازه برای حفظ ایمنی خطوط لازم است و برخلاف تصور، جداکننده با ساختار بسیار سفت، تاثیر چندانی بر کنترل ارتعاشات ندارد بلکه می تواند تاثیر سوء نیز داشته باشد. همچنین نتایج نشان می دهد که افزایش جرم جداکننده تا ۱۰ برابر، دامنه ارتعاشات را تنها تا ۱۱ درصد کاهش می دهد و حداقل سفتی برابر با ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر برای جداکننده نیاز است؛ چرا که در این مقدار دامنه ارتعاشات تا ۲ برابر نسبت به سفتی های کمتر کاهش می یابد.

واژه‌های راهنما: خطوط انتقال نیرو، جریان هوا، ارتعاشات آئولین، جداکننده

حمیدرضا عسکر پور

دانشجوی کارشناسی ارشد

عباس مزیدی*

دانشیار

منصور رفیعیان

استاد، دانشکده مهندسی

مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

Hamidreza
Askarpour
MSc. Student

Abbas Mazidi*
Associate Professor

Mansour
Rafeeyan
Professor, Faculty of
Mechanical
Engineering, Yazd
University, Yazd

Aeolian vibration analysis of transmission lines with spacers

Abstract: In this paper, aeolian vibrations of power transmission lines are studied and effects of spacers are considered. Each of the conductors is modeled as an Euler-Bernoulli beam and the spacer is placed as a spring and damper between them. The stiffness and damping coefficient of the spacer has been obtained using experimental tests for a spacer used in Iran's transmission lines. The equations of motion are derived using Hamilton's principle. These equations have been converted into ordinary differential equations using the Gelkerkin method and then numerically solved using the Rang-Kutta method. The effect of using the spacer on the transmission lines and the effect of different design parameters, such as the amount of mass, the stiffness and damping coefficient of the spacer, and the location of the spacer on the amplitude of the vibrations of the conductors have been studied. The results of the simulation have illustrated that the existence of the spacer is necessary to maintain the safety of the lines. However, despite our expectations, not only does a hard and heavy spacer have minimal impact on the control of vibrations but also can have adverse effects. It was also shown that increasing the mass of the spacer up to 10 times reduces the range of vibrations by 11% and the minimum stiffness equal to 2×10^6 (N/m) is needed for the spacer. Because in this value, the amplitude of vibrations decreases up to 2 times compared to lower stiffnesses.

Keywords: Power transmission lines, Airflow, Aeolian vibrations, Spacer

۱- مقدمه

محدود و جریان هوا را به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی در اطراف هادی مدل کرده و ویژگی های ارتعاشات آئولین و عمر خستگی خطوط انتقال را بررسی کردند. مشخص شد که با استفاده از روش المان محدود، می توان ارتعاشات آئولین خطوط انتقال را به طور موثر شبیه سازی کرد. همچنین آن ها نشان دادند که به دلیل غیرخطی بودن هندسه خطوط انتقال، فرکانس های تشدید ارتعاشات آئولین دقیقاً برابر با فرکانس های طبیعی خطی خطوط نیستند و روش تعادل انرژی، اثر طول دهانه بر ارتعاشات آئولین را در نظر نمی گیرد و دامنه ارتعاشات را بیش از حد برآورد می کند [۶]. بهرامی در پژوهشی، خطوط انتقال و توزیع هوایی ایران را به صورت تیر اویلر برنولی و با در نظر گرفتن سفتی خمشی و انحنای اولیه هادی تحت نیروی وزن مدل کرده است. در این مطالعه او معادلات هادی را در دو جهت داخل و خارج از صفحه بدست آورده و با بررسی های انجام شده نشان داده است که نوسانات خارج از صفحه در برابر نوسانات صفحه ای قابل صرف نظر کردن است. او همچنین نشان داده است که با افزایش هر یک از پارامترهای طراحی نظیر درجه حرارت محیط، طول دهانه و سرعت باد، دامنه نوسان کابل افزایش می یابد [۷].

در طول سال ها مطالعه، دانشمندان تاثیرات یراق آلات مختلفی اعم از دمپر^۱ و جداکننده در کنترل این ارتعاشات را بررسی کرده اند. یکی از یراق آلاتی که به طور گسترده در خطوط انتقال و توزیع ایران مورد استفاده قرار می گیرد و نقش بسزایی در کنترل ارتعاشات ناشی از وزش باد ایفا می کند، جداکننده ها هستند. کاربرد اصلی جداکننده ها، حفظ فاصله ثابت میان هادی ها می باشد اما تاثیر دیگر آن ها، کاهش دامنه نوسانات ناشی از وزش باد در کابل ها و در نتیجه کنترل ارتعاشات آئولین خطوط است. در بیشتر مطالعاتی که در گذشته در جهت بررسی تاثیر جداکننده بر مهار ارتعاشات کابل ها انجام شده، جداکننده فقط به صورت فنر خطی ایده آل مدل شده است. در این مقاله به منظور ارائه یک مدل یکپارچه و نزدیک شدن مدل به شرایط واقعی، علاوه بر لحاظ شدن جرم، جداکننده به صورت ترکیبی از فنر و دمپر مدل سازی و بررسی می شود.

۱-۲- جداکننده

خطوط انتقال و توزیع در معرض باد، باران و برف قرار می گیرند که می تواند باعث ایجاد نوسان شود. این نوسان ممکن است بنا به نوع هادی بکار رفته، باعث ایجاد جرقه و آسیب

صنعت برق یکی از مهم ترین صنایع هر کشور است که وظیفه تامین انرژی الکتریکی، از تولید تا مصرف را بر عهده دارد. این انرژی به وسیله کابل هایی که به صورت زمینی یا هوایی بین دو نقطه نصب می شوند، منتقل می گردد که به آن شبکه خطوط انتقال نیرو گفته می شود. نصب این خطوط مابین شهرهای با فاصله زیاد، بسیار پرهزینه و دارای مشکلات خاصی است که برای محافظت از آن ها باید تدابیر خاصی را اندیشید. در بین عوامل مخرب خطوط هوایی، نوسانات کابل ناشی از باد، باران و طوفان، از مهم ترین و شایع ترین عوامل تخریب کننده خطوط هستند. ارتعاش آئولین شایع ترین نوع ارتعاش کابل است که ارتعاشی با فرکانس بالا و دامنه کوچک است و منجر به شکست ناشی از فرسودگی کابل ها می شود [۱]. بنابراین یکی از مهم ترین مسائل در جهت حفاظت از خطوط انتقال، شناخت و کنترل این دسته از ارتعاشات است.

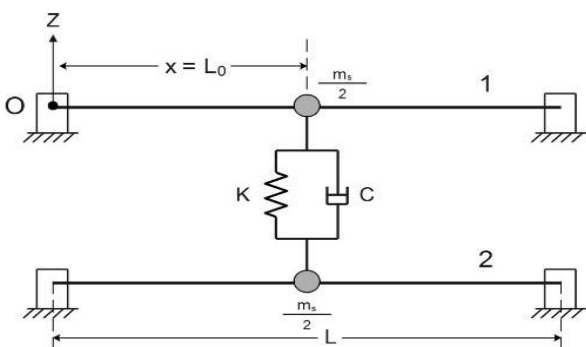
از زمانی که ارتعاشات آئولین هادی مشاهده شد، به دلیل اثرات قابل توجه آن بر خطوط انتقال، سال های زیادی است که مورد بحث و مطالعه قرار گرفته و کارهای گسترده ای برای شناخت و مدل سازی این پدیده انجام شده است که می توان به مطالعات اولیه این پدیده توسط وارنی اشاره کرد. او هادی های با جنس متفاوت را در شرایط های محیطی مختلف مورد آزمایش قرار داد و نشان داد که تمام شکستگی های ناشی از ارتعاش هادی در تکیه گاه ها یا اتصالات رخ داده اند [۲]. اولین مدل ریاضی برای ارتعاشات آئولین خطوط انتقال با استفاده از مفهوم مودهای اصلی هادی، توسط کلارن و دیانا ارائه شد. آن ها هادی را به صورت تیر اویلر برنولی مدل کرده و فرکانس طبیعی هادی را با در نظر گرفتن سفتی خمشی آن مدل کردند [۳]. روش متفاوتی به نام روش تعادل انرژی برای تسهیل در محاسبه ارتعاشات آئولین ایجاد شده در خطوط انتقال توسط هاگدورن ارائه شد. این روش براساس قانون اول ترمودینامیک می باشد که در آن باید مجموع انرژی وارد شده به سیستم با مجموع انرژی خارج شده از آن برابر باشد. در اینجا انرژی وارد شده به سیستم، انرژی باد و انرژی خارج شده از آن شامل انرژی تلف شده حاصل از خود میرایی هادی و دمپرها است. در این روش هادی به صورت یک تیر نیمه نامحدود یا نامحدود مدل می شود [۴]. اولیویرا و فریر با روش تعادل انرژی، برای پیش بینی حرکت پایای هادی یک مدل مکانیکی ارائه کردند. آن ها کابل را به صورت تیر اویلر برنولی مدل کردند و در یک سر آن، گشتاوری متغیر و تابع سفتی خمشی هادی قرار دادند. مدل آن ها نشان داد که برای هادی با طول زیاد نمی توان از اثرات سفتی خمشی چشم پوشی کرد [۵]. لیو و همکاران در مطالعه ای، هادی خطوط انتقال را به صورت یک تیر المان

¹ Damper

و جداکننده های طراحی شده با ساختاری سبک، معقول تر هستند [۱۰]. تاثیرات استفاده از جداکننده در مهار تحریکات ناشی از ریزش یخ توسط فو و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، مدل ریاضی موثری برای کابل و جداکننده ارائه شد. همچنین فرآیند دینامیکی ریزش یخ از کابل، شبیه سازی و بدست آمد. نتایج نشان داد که وجود جداکننده می تواند موجب کاهش دامنه پرش کابل بعد از ریزش یخ و همچنین کاهش کشش نامتعادل طولی روی کابل شود [۱۱]. لو و همکاران در مطالعه ای، بر اساس راه حل های تحلیلی، تاثیرات پارامترهای دینامیکی ساختاری هادی و جداکننده ها را بر دامنه ارتعاشات بررسی و یک جداکننده بین فاز و ویسکوالاستیک برای کاهش دامنه ارتعاشات ارائه کردند و نشان دادند که یک نسبت میرایی بهینه از جداکننده های بین فاز و ویسکوالاستیک برای دستیابی به حداکثر سرعت بحرانی باد در حالت گالوپینگ، برای خط انتقال با دو هادی وجود دارد. همچنین بیان کردند که اثر ضد گالوپینگ یک جداکننده تا حد زیادی به نسبت فرکانس یک خط انتقال دو فاز و سختی نسبی جداکننده بستگی دارد [۱۲].

۲- مدل سازی ریاضی و استخراج معادلات حرکت

با توجه به مطالعات صورت گرفته، مشخص شده است که به دلیل تاثیر سفتی خمشی، مدل کردن هادی به عنوان یک تیر دقیق تر از مدل کردن آن به صورت یک تار محکم است [۱۳]. از این جهت هادی به صورت تیر اویلر-برنولی با طول ۳۰۰ متر و با شرایط مرزی دو سر لولا مدل می شود. مطابق شکل (۲)، سیستم به صورت دو تیر اویلر برنولی با یک جداکننده که به صورت فنر و دمپر مدل شده بیان می شود که می بایست معادلات حاکم بر آن را از طریق اصل همیتون نوشت. به دلیل نوع تکیه گاه و بارگذاری، ارتعاشات غالب از نوع خمشی هستند و از ارتعاشات محوری و پیچشی صرف نظر شده است.



شکل ۲ خط انتقال مدل شده با جداکننده به صورت فنر و دمپر

رسیدن به تجهیزات برقی و خطرات جانی شود. برای پیشگیری از این اتفاقات از جداکننده یا اسپیسرهای بین فاز استفاده می شود. جداکننده بین فاز یک میله کامپوزیتی تقویت شده با الیاف پیوسته محوری [۸] است که مطابق شکل (۱)، یک پوشش تزریقی سیلیکون بر روی آن ایجاد شده و از دو سر کابل ها متصل می شود و از طریق جدا نگه داشتن هادی ها و حفظ فاصله ثابت میان فازها، مانع از بروز اتفاقاتی مانند قوس الکتریکی و اتصال کوتاه که در اثر نوسانات ممکن است رخ دهد، می شود و به ایمن سازی خطوط کمک می کند.



شکل ۱ جداکننده مورد استفاده در خطوط انتقال نیرو ایران

اگر چه در پژوهش های گذشته مطالعات متعددی در زمینه تحلیل ارتعاشات آئولین خطوط انتقال نیرو انجام شده است، اما مطالعات محدودی در زمینه بررسی اثر جداکننده ها بر این ارتعاشات صورت گرفته است. ادواردز و بوید در مطالعه ای، اهمیت استفاده از جداکننده ها در خطوط انتقال برق را مطرح کردند و با بررسی شرایط محیطی مختلف، الزامات فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی مورد نیاز جهت طراحی بهینه جداکننده ها را مورد بحث و بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که جداکننده ها باید تا حد امکان ساده و سبک طراحی شوند و از لحاظ مداومت و طول عمر بتوانند نسبت به حرکات و ارتعاشات عرضی هادی تا ۲۵۰ هزار چرخه مداومت داشته باشند. همچنین آن ها برای جذب انرژی حاصل از ارتعاشات آئولین در کابل ها، قطعات ویسکوالاستیک را در درون ساختمان جداکننده گنجانده و برای اولین بار ایده جداکننده های میراگر را مطرح کردند [۹]. هو و همکاران در مطالعه ای یک مدل دینامیکی برای خطوط انتقال هوایی و چند مدل مکانیکی برای جداکننده های مورد بررسی شان ارائه کردند و از روش عددی نیز برای شبیه سازی ارتعاشات کابل استفاده شد. برای بدست آوردن رابطه بین پارامترهای مکانیکی جداکننده ها و میزان موثر بودن آن ها در کنترل ارتعاشات گالوپینگ، سه نوع جداکننده با ساختار و پارامترهای متفاوت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که صلبیت جداکننده تحت بار فشاری به اندازه ای که تصور می شد مهم نبود و جداکننده های با سختی متفاوت، توانایی یکسانی در کاهش ارتعاشات گالوپینگ داشتند. بنابراین نتیجه گیری شد که بر خلاف تصورات سنتی، ساختار سنگین برای جداکننده ضروری نیست

¹ Interphase Spacer

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \delta w \Big|_0^l + \int_0^l \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \delta w dx \Big] dt$$

رابطه بالا، تغییرات انرژی پتانسیل در کابل را نشان می دهد. این رابطه برای هر دو کابل موجود در مدل بازنویسی می شود.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta U dt = \sum_{i=1}^2 \int_{t_1}^{t_2} \left[EI \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} \delta \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} \right) \Big|_0^l - \frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 w_{i1}}{\partial x^2} \right) \delta w_i \Big|_0^l + \int_0^l \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} \right) \delta w_i dx \right] dt \quad (8)$$

حال انرژی پتانسیل فنر مطابق رابطه (۹) بدست می آید:

$$U = \frac{1}{2} K (\Delta x)^2 \quad (9)$$

که در آن K سفتی فنر است و

$$\Delta x = w_1(l_0, t) - w_2(l_0, t) \quad (10)$$

که در اینجا l_0 محل قرار گیری فنر (جداکننده) و t زمان می باشد. با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۹)، رابطه انرژی کرنش فنر به صورت زیر در می آید.

$$U = \frac{1}{2} K (w_1^2 + w_2^2 - 2w_1w_2) \quad (11)$$

رابطه (۱۱) بر اساس تابع دلتای دیراک به صورت رابطه (۱۲) بازنویسی می شود.

$$U = \int_0^l \frac{1}{2} K (w_1^2 + w_2^2 - 2w_1w_2) \delta(x - l_0) dx \quad (12)$$

تغییرات رابطه (۱۲) به صورت زیر است:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta U dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^l [(Kw_1 - Kw_2) \delta(x - l_0) \delta w_1 + (Kw_2 - Kw_1) \delta(x - l_0) \delta w_2] dx dt \quad (13)$$

۲-۲- محاسبه انرژی جنبشی

انرژی جنبشی سیستم نیز برابر با مجموع انرژی های جنبشی تیرها و جرم جداکننده است. رابطه انرژی جنبشی کابل به صورت زیر بیان می شود [۱۴]:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \int_A \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dA dx = \quad (14)$$

با استفاده از اصل همیلتون، معادلات حرکت برای سیستم مدل شده به دست می آید. اصل همیلتون مطابق رابطه (۱) بیان می شود [۱۴].

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U - \delta T - \delta W_{nc}) dt = 0 \quad (1)$$

که در آن U انرژی پتانسیل، T انرژی جنبشی و W_{nc} کار مربوط به نیروهای ناپایستار می باشد.

۲-۱- انرژی پتانسیل

انرژی کرنشی سیستم برابر با مجموع انرژی های کرنشی کابل ها و انرژی پتانسیل فنر است. انرژی کرنشی کابل ها را می توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد [۱۴].

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + \sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + \sigma_{zx} \varepsilon_{zx}) dv \quad (2)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_{yy} &= \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0 \\ \sigma_{xx} &= -Ez \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \sigma_{yy} &= \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

در اینجا w خیز و E مدول الاستیک جنس تیر می باشد. از طرفی

$$I = I_y = \iint_A z^2 dA \quad (4)$$

حال با جایگذاری روابط (۳) و (۴) در رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (5)$$

تغییرات رابطه (۵) به صورت زیر است:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta U dt = \delta \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx dt \quad (6)$$

با انتگرال گیری جز به جز از رابطه (۶) داریم:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta U dt = \int_{t_1}^{t_2} \left[EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_0^l - \right] \quad (7)$$

تابع دلتای دیراک، کار مجازی نیروهای ناپایستار به صورت زیر بدست می آید.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^l [(C\dot{w}_2 - C\dot{w}_1)\delta w_1 + (C\dot{w}_1 - C\dot{w}_2)\delta w_2] \delta(x - l_0) dx dt \quad (21)$$

حال با جایگذاری روابط (۸)، (۱۳)، (۱۷)، (۱۸) و (۲۱) در اصل همیلتون، معادلات حرکت هر دو کابل به صورت زیر به دست می آید.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} + \left(C \frac{\partial w_1}{\partial t} - C \frac{\partial w_2}{\partial t} + Kw_1 - Kw_2 + \frac{1}{2} m_s \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} \right) \delta(x - l_0) = F(t) \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} + \left(C \frac{\partial w_2}{\partial t} - C \frac{\partial w_1}{\partial t} + Kw_2 - Kw_1 + \frac{1}{2} m_s \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} \right) \delta(x - l_0) = F(t) \quad (23)$$

۲-۴- نیروی باد

ارتعاشات آئولین در خطوط انتقال، بر اثر پدیده رهایی گردابه ایجاد می شود [۱۵]. هنگامی که یک سیال مانند هوا از یک جسم در سرعت های مشخص می گذرد، این پدیده رخ می دهد. از این جهت یک مدل برای مدل سازی نیروی باد انتخاب شده است. مدل انتخاب شده از نوع یک درجه آزادی نوع اول است و به صورت زیر بیان می شود [۱۶].

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho_\infty U^2 D C_L \sin(\omega_s t) \quad (24)$$

که در آن

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (25)$$

$$f_s = \frac{StU}{D}$$

در اینجا D قطر هادی، U سرعت باد، ρ_∞ چگالی هوا، ω_s فرکانس دایره ای پدیده رهایی گردابه با واحد رادیان بر ثانیه، St عدد استروهال، که برای استوانه های با سطح مقطع دایره ای تقریباً ۰/۲ در نظر گرفته می شود، و C_L ضریب بی بعد برآ است.

$$\frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx$$

که تغییرات آن برابر است با

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = \delta \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx \right] dt \quad (15)$$

با انتگرال گیری جز به جز از رابطه (۱۵) خواهیم داشت:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = - \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_0^l \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \delta w dx \right) dt \quad (16)$$

رابطه (۱۶) برای هر دو تیر بازنویسی می شود.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = \sum_{i=1}^2 - \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_0^l \rho A \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} \delta w_i dx \right) dt \quad (17)$$

جرم جداکننده یا m_s به صورت مساوی بر روی هر دو تیر تقسیم می شود. از این رو تغییرات انرژی جنبشی آن براساس تابع دلتای دیراک، مطابق با رابطه (۱۸) بیان می شود.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^l \left[\frac{1}{2} m_s \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} \delta w_1 + \frac{1}{2} m_s \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} \delta w_2 \right] \delta(x - l_0) dx \quad (18)$$

۲-۳- محاسبه کار نیروهای ناپایستار

در این سیستم، کار مجازی نیروهای ناپایستار کاری است که توسط دمپر بر روی هردو تیر اعمال می شود و به صورت زیر تعریف می شود.

$$W = \int_0^l (\vec{f}_1 \cdot \vec{\delta r}_1 + \vec{f}_2 \cdot \vec{\delta r}_2) dx \quad (19)$$

که در آن

$$\begin{aligned} f_1 &= -C(\dot{w}_2 - \dot{w}_1) \\ f_2 &= C(\dot{w}_2 - \dot{w}_1) \\ \delta r_1 &= \delta w_2 \\ \delta r_2 &= \delta w_1 \end{aligned} \quad (20)$$

C ضریب دمپر، f_1 و f_2 به ترتیب نیروهای وارد شده از دمپر به کابل اول و دوم و δr_1 و δr_2 جا به جایی های کابل دوم و اول است. با جایگذاری رابطه (۲۰) در (۱۹) و استفاده از

۳- استخراج تجربی مشخصات فیزیکی جداکننده

در این پژوهش به منظور نزدیک شدن مدل به شرایط واقعی، جداکننده به صورت فنر و دمپر مدل شده است. بنابراین به منظور محاسبه ضرایب سفتی و میرایی جداکننده، آزمایشاتی در دانشگاه یزد بر روی آن انجام شد. به منظور محاسبه ضریب سفتی و تست کشش، جداکننده مطابق شکل (۳)، از یک میلگرد به صورت عمودی آویزان و ساعت اندیکاتور^۱ بر روی چهارچوب فلزی در کنار جداکننده نصب گردید. سپس همانطور که در شکل مشاهده می شود، یک وزنه صد نیوتونی به انتهای جداکننده متصل گشت و مقدار جا به جایی طولی ایجاد شده قرائت شد. برای افزایش دقت آزمایش، این عملیات به تعداد ۱۵ مرتبه انجام و مقدار جا به جایی هر مرتبه داده برداری و متوسط سفتی جداکننده محاسبه شد.



شکل ۳ نحوه نصب جداکننده و شرایط انجام آزمایش کشش

با توجه به شکل (۲)، نحوه اتصال جداکننده در این پژوهش به صورت عمود و بین دو فاز از خطوط انتقال نیرو فرض شده است. از این جهت و به منظور نزدیک بودن شرایط آزمایش به شرایط واقعی، مطابق شکل (۴)، جداکننده در همان وضعیت آزمایش قبلی محکم بسته شده است تا از جا به جایی های عرضی آن تا حد امکان جلوگیری شود. سپس جداکننده تحت بارگذاری قرار می گیرد تا تغییر طول در آن ایجاد شود. برای برداشته شدن همانطور که در شکل مشاهده می شود، وزنه صد نیوتونی با سیم از جداکننده آویزان است و سنسور شتاب سنج نیز به انتهای جداکننده متصل شده است. این سنسور به منظور داده برداری به یک دستگاه داده برداری ارتعاشات متصل است. سپس برای برداشتن آنی نیروی وزنه، سیم رابط با سیم چین قطع می شود و ارتعاشات جداکننده ثبت می گردد. برای افزایش دقت این آزمایش، این فرآیند ده مرتبه انجام و میرایی متوسط جداکننده با استفاده از کاهش لگاریتمی محاسبه شد.



شکل ۴ نحوه اتصال جداکننده و شتاب سنج به منظور بدست آوردن ضریب میرایی

۴- نتایج

به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر ارتعاشات آئولین خطوط انتقال، به حل معادلات حرکت نیاز است. به این منظور، برای حل معادلات حرکت از روش گالرکین استفاده شده است. بر اساس این روش، پاسخ معادلات حرکت به دست آمده در روابط (۲۲) و (۲۳) به صورت بسطی از توابع هندسی مشخص در ضرایب زمانی نامشخص به صورت زیر فرض می شود.

¹ Dial Indicator

اختلاف ناچیزی دارند، که درستی مدل به کار برده شده را نشان می دهد.

جدول ۱ مقایسه فرکانس طبیعی اول و دوم تیر در مرجع [۱۴] و پژوهش حاضر

مود	فرکانس طبیعی	
	مرجع ۱۴	پژوهش حاضر
اول	۷۰۳/۰۱۴۹	۷۰۳/۰۱۱۷
دوم	۲۸۱۲/۰۵۹۸	۲۸۱۲/۰۴۶۸

در ادامه به منظور شبیه سازی اثر وجود جداکننده بر ارتعاشات خطوط انتقال، در این مقاله از کابل لینکس^۱ که از دسته هادی های آلومینیومی تقویت شده با فولاد می باشد و بطور گسترده ای در خطوط توزیع برق ایران بکار گرفته شده است، استفاده می شود. مشخصات کابل، جداکننده و خصوصیات سیال در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ خصوصیات کابل و مدل سیال

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
E	$7/2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	U	15 m/s
I	$7141/326 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	ρ_{∞}	$1/225 \text{ Kg/m}^3$
ρ	$3722/37 \text{ Kg/m}^3$	C_L	$0/6$
A	$2/262 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	C	$2294/5 \text{ N.s/m}$
D	$1/953 \times 10^{-2} \text{ m}$	K	$6/44 \times 10^6 \text{ N/m}$
L	300 m	m_s	$1/5 \text{ Kg}$

همانطور که گفته شد، یکی از دلایل اصلی استفاده از جداکننده، جلوگیری از برخورد فازهای متفاوت به یکدیگر بر اثر وزش باد و ایجاد اتصال کوتاه و آتش سوزی در خطوط انتقال است. به منظور بررسی تأثیرات وجود جداکننده، خطوط انتقال مورد تحریک با دامنه بالا قرار گرفته است و جابه جایی وسط کابل ها با شرایط تحریک یکسان در دو حالت با و بدون وجود جداکننده بدست آمده است. بررسی شکل (۵) نشان می دهد هر دو هادی بدون وجود جداکننده با یکدیگر برخورد دارند و هنگامی که از جداکننده در وسط طول دهانه استفاده شده، مطابق شکل (۶)، ارتعاشات هر دو کابل به خوبی مورد همگام سازی قرار گرفته و ایمنی خطوط حفظ شده است.

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) q_i(t) \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، $\varphi_i(x)$ شکل مود های ارتعاشی تیر (هادی) و $q_i(t)$ ضرایب زمانی هستند. شکل مود برای شرایط مرزی دو سر لولا، که جابجایی و گشتاور خمشی در ابتدا و انتهای تیر برابر صفر است، برای دو تیر به صورت رابطه ی (۲۷) در نظر گرفته می شود [۱۴].

$$\varphi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (27)$$

با جایگذاری رابطه (۲۶) در روابط (۲۲) و (۲۳) و سپس با ضرب طرفین این روابط در شکل مودهای مربوطه و انتگرال گیری در طول تیر و با در نظر گرفتن تعامد شکل مودها، معادلات دیفرانسیل پاره ای که در روابط (۲۸) و (۲۹) نشان داده شده اند، به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل شده اند. سپس با استفاده از روش رانگ-کوتا معادلات حل شده و پاسخ زمانی کابل ها بدست آمده است.

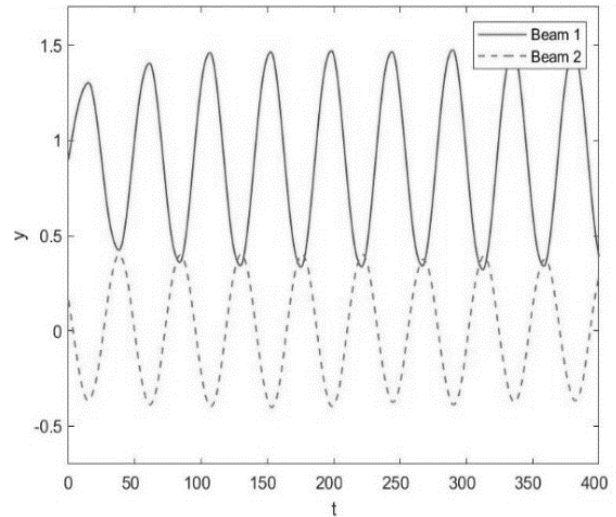
$$\begin{aligned} EI(\varphi_1^{(4)} q_{11} + \varphi_2^{(4)} q_{12}) + \rho A(\varphi_1 \ddot{q}_{11} + \varphi_2 \ddot{q}_{12}) \\ + \left[C(\varphi_1 \dot{q}_{11} + \varphi_2 \dot{q}_{12}) \right. \\ - C(\varphi_1 \dot{q}_{21} + \varphi_2 \dot{q}_{22}) \\ + K(\varphi_1 q_{11} + \varphi_2 q_{12}) \\ - K(\varphi_1 q_{21} + \varphi_2 q_{22}) \\ \left. + \frac{1}{2} m_s (\varphi_1 \ddot{q}_{11} + \varphi_2 \ddot{q}_{12}) \right] \delta(x) \\ - l_0 - \frac{1}{2} \rho_{\infty} U^2 D C_L \sin(\omega_s t) \\ = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} EI(\varphi_1^{(4)} q_{21} + \varphi_2^{(4)} q_{22}) + \rho A(\varphi_1 \ddot{q}_{21} + \varphi_2 \ddot{q}_{22}) \\ + \left[C(\varphi_1 \dot{q}_{21} + \varphi_2 \dot{q}_{22}) \right. \\ - C(\varphi_1 \dot{q}_{11} + \varphi_2 \dot{q}_{12}) \\ + K(\varphi_1 q_{21} + \varphi_2 q_{22}) \\ - K(\varphi_1 q_{11} + \varphi_2 q_{12}) \\ \left. + \frac{1}{2} m_s (\varphi_1 \dot{q}_{21} + \varphi_2 \dot{q}_{22}) \right] \delta(x) \\ - l_0 - \frac{1}{2} \rho_{\infty} U^2 D C_L \sin(\omega_s t) \\ = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

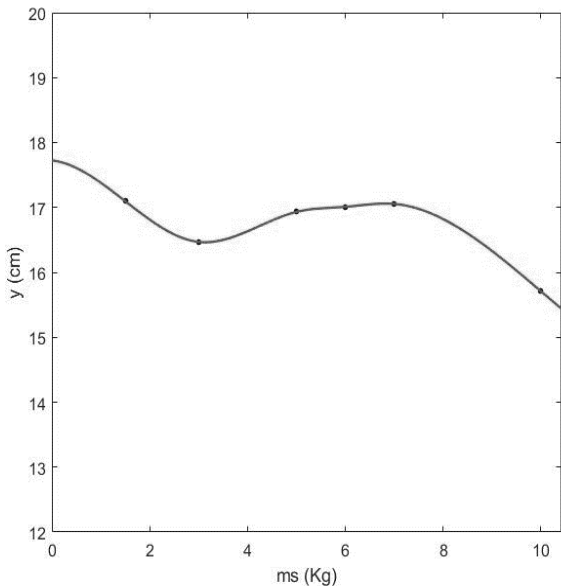
به منظور اعتبارسنجی روش مورد استفاده در این مطالعه، فرکانس های طبیعی یک کابل با توجه به مقادیر داده شده در مرجع (۱۴) بدست آمده است و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، نتایج پژوهش حاضر

¹ Lynx

به منظور بررسی میزان تاثیر پارامترهای جداکننده نظیر جرم، سفتی و میرایی، تاثیر تغییر این پارامترها بر ارتعاشات سیستم بررسی شد. بدین منظور نخست دو پارامتر سفتی و میرایی ثابت و جرم جداکننده متغیر فرض شده و دامنه ارتعاشات سیستم به ازای مقادیر جرم مختلف محاسبه و مطابق شکل (۷) ارائه شده است. همانطور که در شکل مشخص است، با ۱۰ برابر کردن جرم جداکننده، دامنه ارتعاشات کابل در حدود ۱۱ درصد و معادل با ۱ سانتی متر کاهش داشته است که نشان از تاثیر اندک این پارامتر بر مهار ارتعاشات کابل دارد. به منظور بررسی تاثیر سفتی جداکننده در این بررسی، در ادامه تاثیرات تغییر جرم جداکننده این بار با سفتی کمتر و معادل با $1000 \frac{N}{m}$ بررسی شد و نتایج در شکل (۸) نشان داده شده است.

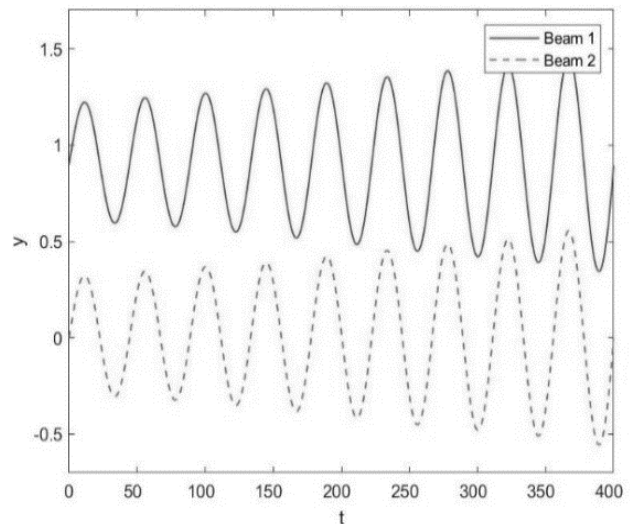


شکل ۵ پاسخ زمانی ارتعاشات دو کابل بدون وجود جداکننده

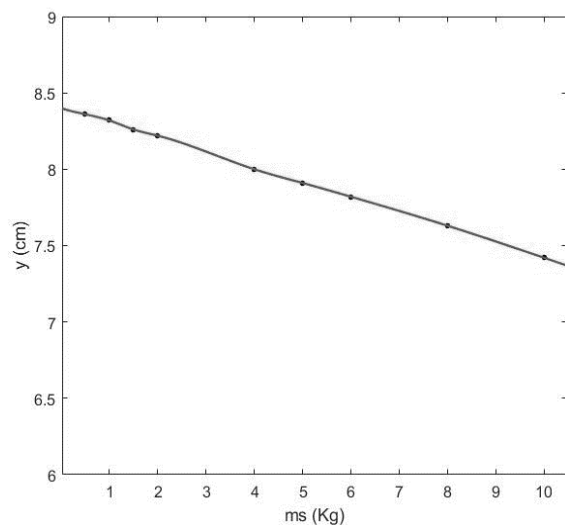


شکل ۸ تاثیر میزان جرم جداکننده در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه با سفتی $1000 \frac{N}{m}$

نتایج نشان می دهد که در سفتی کمتر، بازه کاهش دامنه ارتعاش با تغییرات جرم محسوس تر و حدود ۲ سانتی متر است و همچنین متوسط دامنه نوسانات از حدود ۸ سانتی متر به حدود ۱۷ سانتی متر افزایش می یابد. از این جهت به منظور بررسی تاثیر تغییرات سفتی، با حفظ شرایط بررسی، مانند طول دهانه، سرعت باد و محل نصب جداکننده، بار دیگر دامنه ارتعاشات سیستم به ازای مقادیر مختلف سفتی با ثابت نگه داشتن جرم و میرایی جداکننده به مقدار واقعیشان، محاسبه شده و در شکل (۹) ارائه گردیده است.



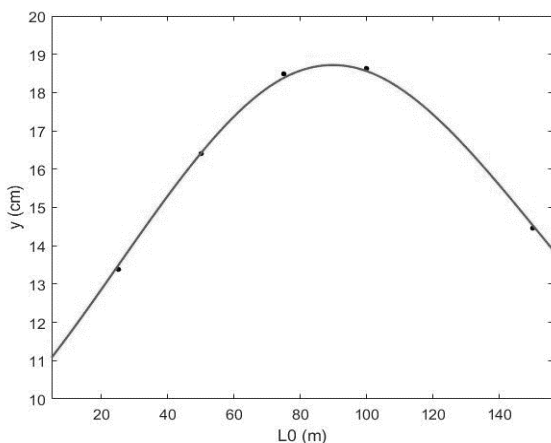
شکل ۶ پاسخ زمانی ارتعاشات دو کابل با وجود جداکننده



شکل ۷ تاثیر میزان جرم جداکننده در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه با سفتی واقعی

مشخص شد که مقدار میرایی جداکننده عملاً تاثیری بر ارتعاشات هادی ندارد و با کاهش میرایی تا مقدار صفر، دامنه ارتعاشات دستخوش تغییر نمی شود. می توان نتیجه گرفت که ارتعاشات آئولین در سیستم، به مقدار میرایی جداکننده وابسته نیست.

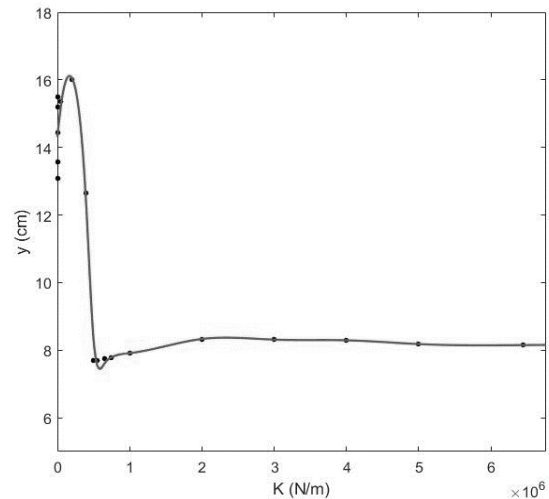
به منظور بررسی تاثیر محل قرارگیری جداکننده بر نوسانات سیستم، با حفظ مشخصات میرایی و جرم جداکننده به مقدار واقعیشان، محل قرارگیری جداکننده از ابتدا تا وسط دهانه، یک بار برای سفتی برابر با $0/01K$ و بار دیگر برای مقدار واقعی سفتی، جا به جا شده است و دامنه نوسان سیستم در وسط دهانه بدست آمده و نتایج در شکل های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ تاثیر موقعیت نصب جداکننده در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه برای جداکننده با سختی $0/01K$

همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، در خطوط انتقال با جداکننده های با سختی کمتر، کمترین دامنه ارتعاش زمانی رخ می دهد که جداکننده در اول یا وسط دهانه باشد و می توان نشان داد که این دو موقعیت بهترین مکان برای نصب یک جداکننده با سفتی کم هستند. اما به منظور رعایت همگام سازی و حفظ فاصله بین خطوط به بهترین نحو، اتصال در وسط دهانه توصیه می گردد.

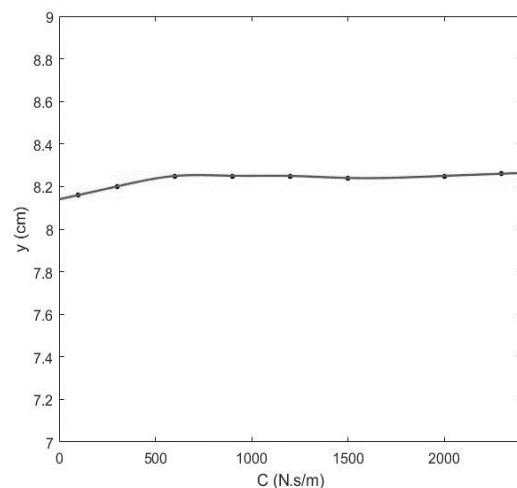
در ادامه با بررسی شکل (۱۲) می توان بیان کرد که اختلاف زیاد دامنه ارتعاشات موجود در حالت قبل که در حدود ۷ سانتی متر است، با زیادتر شدن سختی جداکننده با کاهشی ۸۵ درصدی مواجه شده و به حدود ۱ سانتی متر می رسد و دیگر تفاوت آنچنانی در تاثیر محل نصب جداکننده دیده نمی شود. همچنین در این بررسی، دوباره می توان تاثیر میزان سفتی جداکننده و اثربخشی آن بر کاهش دامنه ارتعاشات را به خوبی دید.



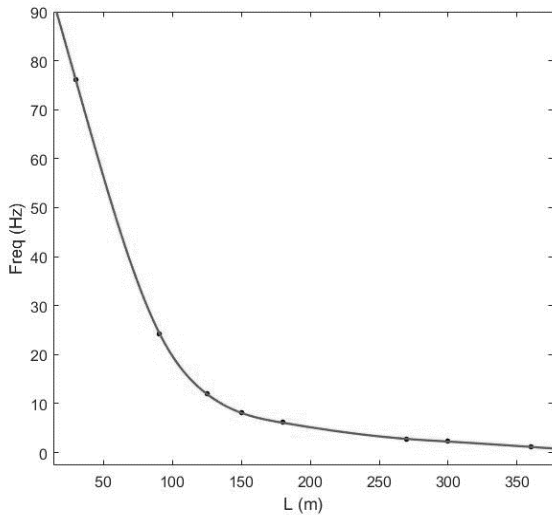
شکل ۹ تاثیر میزان سفتی جداکننده در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه

با بررسی این نتایج، تاثیر تغییرات سفتی جداکننده به خوبی در دامنه ارتعاشات قابل مشاهده است. در سفتی های پایین، دامنه ارتعاش هادی تا ۱۶ سانتی متر هم دیده می شود که به مراتب بیشتر است از جا به جایی با سفتی واقعی جداکننده که در حدود ۸ سانتی متر است و از طرفی با افزایش میزان سفتی، متوسط دامنه ارتعاشات از مقدار سفتی برابر با ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر به بعد، به مقداری ثابت نزدیک شده است و دیگر با افزایش سفتی تغییری در دامنه دیده نمی شود و تاثیرات تغییر سفتی جداکننده ناچیز است.

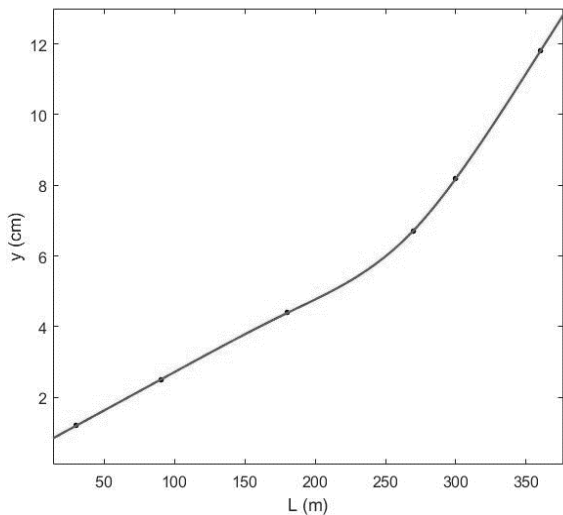
به منظور بررسی اثر دیگر پارامتر جداکننده، یعنی میرایی، بررسی دیگری با ثابت ماندن سفتی و جرم جداکننده به مقدار واقعی انجام گردید و نتیجه آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



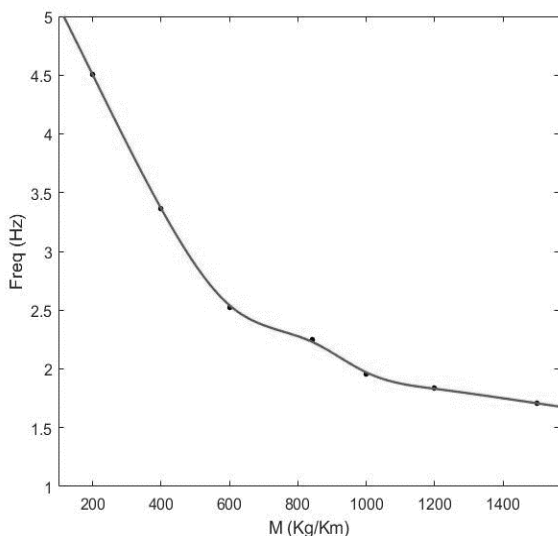
شکل ۱۰ تاثیر میزان میرایی جداکننده در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه



شکل ۱۳ تاثیر طول دهانه در تغییرات فرکانس سیستم



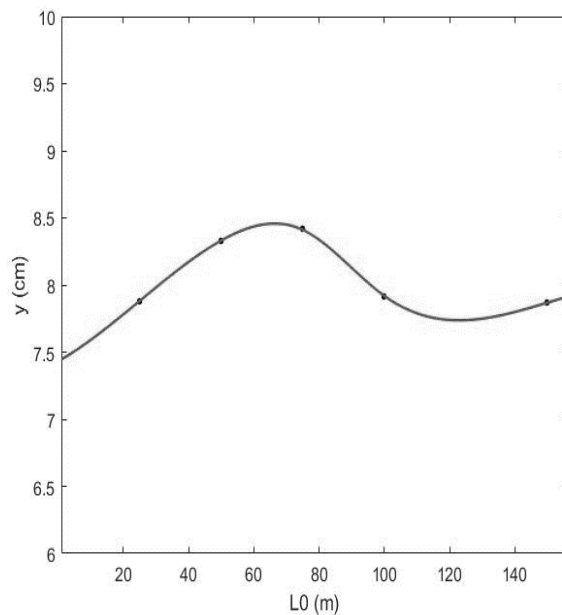
شکل ۱۴ تاثیر طول دهانه در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه



شکل ۱۵ تاثیر جرم واحد طول کابل در تغییرات فرکانس سیستم

به منظور بررسی تاثیر طول دهانه، با حفظ مشخصات جداکننده به مقدار واقعی‌شان، تغییرات فرکانس و دامنه نوسان سیستم در وسط دهانه با تغییر دادن طول دهانه از ۳۰ تا ۳۶۰ متر بدست آمده و این نتایج در شکل های (۱۳) و (۱۴) ارائه گردیده است.

همانطور که مشاهده می شود، با افزایش ۱۲ برابری طول دهانه، فرکانس ارتعاشات از حدود ۷۶ هرتز به ۲ هرتز و دامنه از ۱ سانتی متر به حدود ۱۲ سانتی متر رسیده است که به ترتیب بیانگر کاهش ۳۸ برابری برای فرکانس و افزایش ۱۲ برابری برای دامنه ارتعاشات سیستم است. با این عمل، ارتعاشات آئولین سیستم به سمت ارتعاشات گالوپینگ، یعنی از ارتعاشات با فرکانس بالا و دامنه پایین به ارتعاشاتی با فرکانس پایین اما دامنه نوسان بالا سوق پیدا می کند. پس هر چقدر که طول دهانه بیشتر می شود، دامنه نوسان زیاد و زیادتر می شود که همین مسئله باعث ناپایداری در سیستم می گردد. با این بررسی می توان درستی مطالعات پیشین که برای خطوط انتقال، بهترین طول دهانه را تا حداکثر ۳۰۰ متر بیان کرده بودند را نشان داد.



شکل ۱۶ تاثیر موقعیت نصب جداکننده در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه برای جداکننده با سفتی واقعی

به منظور بررسی تاثیر جرم واحد طول کابل بر نوسانات سیستم، با فرض ثابت ماندن دیگر پارامترهای کابل نظیر قطر و مدول، تغییرات فرکانس و دامنه نوسان سیستم در وسط دهانه با تغییر دادن جرم واحد طول کابل محاسبه شده و نتایج در شکل های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.

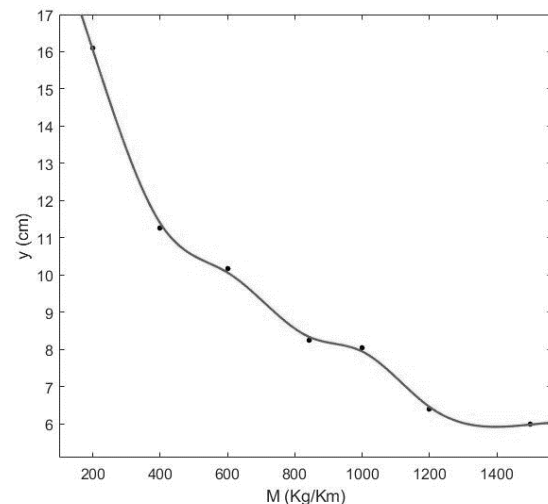
لولا به عنوان توابع هندسی مشخص، معادلات دیفرانسیل پاره ای به معادلات دیفرانسیل معمولی، تبدیل و با استفاده از روش رانگ-کوتا حل گردید. با استفاده از روش ارائه شده تاثیر استفاده از جداکننده بر ارتعاشات خطوط انتقال و تاثیر پارامترهای مختلف طراحی، اعم از مقدار جرم، ضریب سفتی و میرایی جداکننده، محل قرارگیری جداکننده، طول دهانه خط انتقال و جرم واحد طول کابل بر دامنه ارتعاشات هادی ها مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که وجود جداکننده به خوبی می تواند ارتعاشات دو کابل را مهار کرده و با هم فاز و متوسط کردن دامنه هر دو کابل، باعث جلوگیری از برخورد هادی ها به یکدیگر شود. مشخص شد که جداکننده با وزن سنگین تر نیاز نیست. چرا که میزان اثر بخشی آن، که در بیشترین حالت ۱۱ درصد است، در مقابل تاثیرات منفی افزایش جرم و افزایش خیز استاتیک هادی، ناچیز است و بهتر است جداکننده ها نسبت به موقعیت مورد نیاز، به صورت بهینه استفاده شوند. همچنین برای استفاده از جداکننده در خطوط انتقال نیرو، جداکننده باید حداقل سفتی ای به میزان ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر داشته باشد؛ چرا که مشخص شد از این مقدار سفتی به بعد، دامنه ارتعاشات تا ۲ برابر کمتر از سفتی های پایین تر است. با افزایش طول دهانه، فرکانس نوسان به مراتب کاهش اما دامنه افزایش می یابد که به این معنی است که ارتعاشات آئولین سیستم به سمت ارتعاشات گالوپینگ سوق پیدا می کند و برای خطوط انتقال، بهترین طول دهانه تا حداکثر ۳۰۰ متر پیشنهاد می شود. در دهانه های با طول کم، با شرط عدم تغییرات زیاد در سایر مشخصات هادی (در صورت امکان)، استفاده از کابل سنگین تر می تواند به کاهش ارتعاشات سیستم کمک کند. همچنین نتایج این مطالعه پیش بینی نسبتاً خوبی برای موقعیت نصب جداکننده ارائه می دهد.

۶- مراجع

- 799-807, 1928, doi: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1928.5055059>.
- [3] R. Claren and G. Diana, "Mathematical analysis of transmission line vibration," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, no. 12, pp. 1741-1771, 1969, doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1969.292291>.

همانطور که مشخص است، با ۷ برابر کردن جرم کابل، فرکانس و دامنه ارتعاشات سیستم با کاهشی حدود ۲/۵ برابری روبرو خواهند بود. پس می توان بیان کرد که با افزایش جرم و در نتیجه چگالی کابل، به دلیل افزایش اینرسی، تمایل کابل به مرتعش شدن کم و کم تر می شود. در نتیجه در دهانه های با طول کم (جهت جلوگیری از افزایش شکم هادی) و همچنین با شرط عدم تغییرات زیاد در سایر مشخصات هادی (در صورت امکان)، استفاده از کابل سنگین تر می تواند به کاهش ارتعاشات سیستم کمک کند.



شکل ۱۶ تاثیر جرم واحد طول کابل در مقدار دامنه ارتعاش در وسط دهانه

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش ارتعاشات آئولین خطوط انتقال نیرو با وجود جداکننده مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور نزدیک شدن مدل به شرایط واقعی، هادی به صورت تیر اویلر-برنولی دو سر لولا و جداکننده به صورت فتر-دمپر مدل سازی شد و همچنین جرم جداکننده نیز لحاظ گردید. معادلات غیرخطی حاکم بر هادی ها با استفاده از اصل هامیلتون بدست آورده شد و در نهایت با به کار بردن روش گالرکین و در نظر گرفتن مودهای تیر دو سر

- [1] H. Liu, K. Kopsidas, and M. Al Aqil, "Modelling Conductor Life Expectancy for HTLS Conductors," in *2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2021: IEEE, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103904>.
- [2] T. Varney, "The Vibration of Transmission-Line Conductors," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 47, no. 3, pp.

- composite spacer used for controlling conductor galloping," in *2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2007: IEEE, pp. 304-307, doi: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2007.4451479>.
- [11] G. Fu, L. Wang, Z. Guan, and X. Meng, "Study on the prevention of conductor ice-shedding by interphase spacer," in *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009: IEEE, pp. 49-52, doi: <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2009.5252510>.
- [12] W. Lou, C. Huang, M. Huang, H. Liang, and J. Yu, "Galloping suppression of iced transmission lines by viscoelastic-damping interphase spacers," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 146, no. 12, p. 04020135, 2020, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001868](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001868).
- [13] Y. Wang, Z. Liu, C. Yang, J. Brownjohn, X. Hua, J. He, and Z. Chen, "Stagnation point-induced vibration on ultra-long stay cables and the vibration control by using a novel stockbridge damper," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 241, p. 105535, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105535>.
- [14] S. S. Rao, *Vibration of continuous systems*. John Wiley & Sons, 2019.
- [15] M. B. Sityoshwana, "Characterising a transmission line conductor subject to free and forced vibrations," Cape Peninsula University of Technology, 2020.
- [16] E. Simiu and R. H. Scanlan, *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*. John Wiley New York, 1996.
- [4] P. Hagedorn, "Ein einfaches Rechenmodell zur Berechnung winderregter Schwingungen an Hochspannungsleitungen mit dämpfen," *Ingenieur-Archiv*, vol. 49, pp. 161-177, 1980, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01351330>.
- [5] A. R. Oliveira and D. G. Freire, "Dynamical modelling and analysis of aeolian vibrations of single conductors," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1685-1693, 1994, doi: <https://doi.org/10.1109/61.311193>.
- [6] J. Liu, B. Yan, Z. Mou, Y. Gao, G. Niu, and X. Li, "Numerical study of aeolian vibration characteristics and fatigue life estimation of transmission conductors," *Plos one*, vol. 17, no. 1, p. e0263163, 2022, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263163>.
- [7] Z. Bahrami, "Aeolian vibration analysis of power distribution lines," Thesis submitted For the degree of M.Sc, Department Of Mechanical Engineering, Yazd University, 2020.
- [8] A. Moawad, L. E. Kollár, A. Bognár, T. Borbély, and K. Lajber, "Buckling of interphase spacers during vibration following ice shedding," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 213, p. 103904, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103904>.
- [9] A. Edwards and J. Boyd, "Bundle-Conductor-Spacer Design Requirements and Development of `Spacer-Vibration Damper'," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 84, no. 10, pp. 924-932, 1965, doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1965.4766121>.
- [10] L. Hou, L. Wang, Z. Guan, D. Yan, and M. Lu, "Mechanical parameter optimization of interphase