مدلسازی دینامیکی نوسانات گالوپینگ خطوط انتقال هوایی

احمد غلامی — استادیار دانشکدهٔ برق، دانشگاه علم و صنعت ایران
محمد میرزایی — دانشجوی دکترای برق، دانشگاه علم وصنعت ایران

چکیده
در این مقاله، یک مدل دینامیکی برای هادیهای منفرد خطوط هوایی که دارای حرکت عمودی هستند، ارائه گردیده و به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر این مدل بهدست آمده، این روابط شبیهسازی شده و انواع نوسانات گالوپینگ مهم مورد بحث واقع می‌شوند. در ضمن با انجام شبیهسازی این مدل، می‌توان ماکزیموم دامنه هادی را در شرایط مختلف تخمین زده و تأثیر سرعت باد بر میزان ماکزیموم دامنه گالوپینگ هادی و فرکانس نوسانات را مورد بررسی قرار داد.

کلمات کلیدی: **نوسانات، گالوپینگ، هادی، خطوط انتقال هوایی، مدلسازی.**

Dynamic Modeling of Galloping in Overhead Transmission Lines

A. Gholami and M. Mirzai
Faculty of Elec. Eng., Iran University of Science & Technology (IUST)

Abstract
In this paper, a dynamic model of single conductor overhead lines with vertical motion is investigated and according to applicable differential equations, this model is simulated for important types of galloping. Therefore by doing this simulation, maximum galloping amplitude is estimated and the effect of wind velocity on maximum galloping amplitude and its frequency is also evaluated.

Key words: Oscillations, Galloping, Overhead lines and modeling.

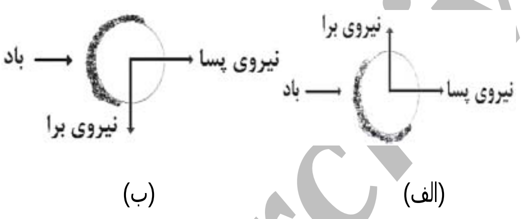
۱- مقدمه

یکی از نوسانات هادیهای خطوط انتقال هوایی، گالوپینگ می‌باشد که به‌علل گوناگون به‌وقوع می‌پیوندد. به‌عنوان مثال تشکیل یخ بر روی هادیها در مدت بارش برف و یا باران یخساز و یا طوفانهای همراه با تگرگ سبب می‌شود تا یک لایه یخ دور هادی را احاطه کند. حال در اثر ریزش یخ از روی سطح هادی و وزش بادهایی با سرعت بیش از ۷ متر برثانیه و یا هر دو عامل، جهش هادی بهسمت بالا و پائین رخ می‌دهد. این نوع نوسانات که ممکن است در همه خطوط انتقال نیرو اتفاق بیفتد، دارای فرکانس کم، در حدود ۰/۱ تا ۰/۳ هرتز و دامنهای زیاد در حدود ۲/۵ تا ۱۵۰ برابر قطر هادی می‌باشد. گزارشهای منتشر شده حاکی از آن است که دامنه گالوپینگ حتی ممکن است بهمیزان فلش هادی و یا بالاتر از آن نیز برسد. وقوع این نوسانات علاوه بر افزایش فلش هادی، باعث برخورد هادیها با یکدیگر (در وضعیت جایگذاری عمودی هادیها) و یا با سیم محافظ خواهد شد. همچنین برآیند نیروهای ناشی از یخ و باد باعث می‌شود تا کشش قابل توجهی بر هادی تحمیل شود که چه بسا پارگی هادیها و تخریب برجها را ممکن خواهد ساخت. علاوه بر موارد فوقالذکر، در صورت وقوع این نوسان، بارگذاریهای دینامیکی شدیدی بر هادی، یراق آلات مقرهها، جامپرها، اسپیسرها، دمپرها و سازههای برج ایجاد می‌گردد. در نتیجه این عوامل می‌توانند ضررهای اقتصادی شدیدی را بهشرکتهای برق تحمیل نمایند. لذا جهت افزایش قابلیت اطمینان شبکه قدرت، تخمین ماکزیموم دامنه گالوپینگ بهمنظور تعیین حد مجاز فاصله فازها و همچنین فاز با زمین در خطوط انتقال هوایی، ضروری بهنظر می‌رسد. طراحان خطوط هوایی غالباً با مسئله تعیین حد مجاز فاصله فاز تا فاز یا فاز با سیم زمین در خطوط با توجه بهتخلیههای الکتریکی و دیگر خسارات ایجاد شده ناشی از پدیده گالوپینگ مواجه هستند. تلاشهای فراوانی جهت برآورد حداکثر دامنه گالوپینگ بهمنظور تعیین حد مجاز فواصل فازی انجام شده است که بر اساس اطلاعات بهدست آمده از مشاهدات میدانی خطوط گالوپینگی می‌باشد. همچنین روشهای متنوعی از قبیل روش هانت - ریچاردز، روش موازنه انرژی و روش انتگرالگیری مستقیم از معادلات دینامیکی حرکت هادی و ... وجود دارند که می‌توان بهکمک آنها و بهصورت تقریبی، مقدار دامنه نوسان گالوپینگ را محاسبه نمود [۱ و ۲].

در این مقاله، مدل دینامیکی متمرکز سطح مقطع هادی که از فنر و دمپرهایی آویزان بوده و حرکت عمودی را تحمل می‌نماید ارائه و از آن استفاده می‌گردد. لذا با این روش دقیق و همچنین با استفاده از اطلاعات مدل ریاضی هادی نوسانی، می‌توان ماکزیموم دامنه نوسان را بهطور مناسبی در هر شرایط منطقه برآورد نمود. در این روش، مدل ریاضی دینامیکی غیرخطی که بر حرکت هادی حاکم است، استخراج شده و از آن، جهت شبیهسازی استفاده می‌گردد. ضمناً یک خط نمونه، با توجه بهاطلاعات مورد نیاز، انتخاب و شبیهسازی بر روی آن انجام می‌گیرد و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۲- عوامل مؤثر بر نوسان گالوپینگ

بهطور کلی نوسان گالوپینگ هادی، بهعلت غیر متقارن شدن سطح مقطع هادی و در نتیجه اعمال نیروهای آیرودینامیکی پسا (Drag) و برا (Lift) بر آن صورت می‌گیرد. نمونهای از تأثیر باد بر هادی یخ زده در شکل (۱) آمده است. مقادیر این نیروها مطابق روابط (۱) و (۲) می‌باشند.



شکل ۱- نیروهای برا و پسا بر روی هادی یخزده

$$D = \frac{1}{2} \rho d v_r^2 c_D(\alpha) \qquad (۱)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho d v_r^2 c_L(\alpha) \qquad (۲)$$

که در آن D نیروی پسا، L نیروی برا، ρ چگالی هوا، v_r سرعت ظاهری باد بر هادی، d قطر هادی، $c_D(\alpha)$ ضریب پسای آیرودینامیکی هادی و $c_L(\alpha)$ ضریب برای آیرودینامیکی هادی است.

از آنجایی که نیروی آیرودینامیکی برا بهصورت یک منحنی با شیب مثبت و منفی بر حسب زاویه حمله باد تغییر میکند، لذا اگر سرعت رو بهبالای هادی با نیروی برای آیرودینامیکی مثبت و سرعت رو بهپائین آن با نیروی برای آیرودینامیکی منفی همزمان باشد، گالوپینگ اتفاق میافتد. بهعبارت کلی در شرایط ذیل گالوپینگ میتواند رخ دهد:

$$\frac{dL}{d\alpha}+D\le 0 \qquad (۳)$$

$$\frac{dc_L}{d\alpha}+c_D\le 0 \qquad (۴)$$

شرایط فوق، معیاری جهت وقوع نوسان گالوپینگ بوده و بهمعیار دن هارتوگ معروف است [۳].

با توجه بهموارد فوق، مؤثرترین عوامل خارجی ایجاد نوسان گالوپینگ، باد و یخ میباشند که تأثیر هر کدام در ذیل تشریح میگردند:

۱-۲- تأثیر باد

باد یکی از عوامل مهم در ایجاد نوسان گالوپینگ است، بهطوری که با افزایش آن، دامنه جهش نیز افزایش مییابد. چرا که با افزایش سرعت باد، نیروی برای وارده بر هادی افزایش مییابد. (معمولاً برای محاسبه و پیشبینی جهش هادی، از آزمایش تونل باد استفاده میشود.) لذا در شرایط محیطی مفروض، اگر سرعت باد از سرعت خاصی که بهآن سرعت بحرانی باد میگویند تجاوز نماید، هادی شروع به نوسان خواهد نمود که مرز این سرعت بحرانی مطابق رابطه زیر است:

$$v_c=-\frac{\omega d\mu c}{\dfrac{dc_L}{d\alpha}+c_D}$$

$$\mu=\frac{m}{1/2\rho d^2} \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، v_c سرعت بحرانی باد، ω فرکانس طبیعی، d قطر هادی، c ثابت میرایی مکانیکی (تلفات)، m جرم واحد طول هادی، ρ چگالی هوا، μ چگالی نسبی، c_D ضریب پسا، C_L ضریب برا و α زاویه حمله است. پارامتر چگالی نسبی بعد ندارد و برای هادیهای ACSR معمولاً بین ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ میباشد. ثابت میرایی مکانیکی بهاصطکاک داخلی، اصطکاک اتصالات، کشش هادی و دما وابسته است. فرکانس طبیعی نیز بطور معکوس با طول اسپن، نوع برج و سختی برج متناسب است. مطابق رابطه فوق، روشهای مختلف بهشرح ذیل جهت افزایش حد سرعت بحرانی باد وجود دارند:

- فرکانس طبیعی

با افزایش فرکانس طبیعی، حد سرعت بحرانی باد افزایش مییابد. بهترین روش برای افزایش فرکانس طبیعی، افزایش کشش هادی است. البته میتوان با ثابت نگه داشتن کشش هادی و کاهش جرم واحد طول هادی نیز بهاین هدف دست یافت.

- چگالی نسبی

یکی دیگر از روشهای افزایش حد سرعت بحرانی باد، افزایش چگالی نسبی است. لذا سرعت بحرانی باد با کاهش جرم واحد طول هادی میتواند کاهش یابد.

- میرایی مکانیکی

افزایش میرایی مکانیکی، اثر مفیدی بر سرعت بحرانی باد خواهد داشت. وسایل و تجهیزات مختلفی برای استفاده از این روش وجود دارند. بهعبارتی با این روش، باید ثابت میرایی میراکننده بهکار رفته در خط را افزایش داد.

- عدد دن هارتوگ $\left(\frac{dc_L}{d\alpha}+c_D\right)$

روش دیگر افزایش سرعت بحرانی باد، کاهش عدد دن هارتوگ است. این روش بر دو اصل مهم متکی است. یکی نیروی پسای آیرودینامیکی و دیگری نیروی برای آیرودینامیکی است. با تغییر بر روی یک یا هر دوی آنها، ممکن است سرعت بحرانی باد افزایش یابد.

- قطر هادی

کاهش قطر هادی، باعث افزایش چگالی نسبی شده و سرعت بحرانی باد را افزایش می دهد [۳].

۲-۲- تأثیر یخ

یخ بهشکلهای مختلفی از جمله بهصورت یخ آبدار، خشک و بلوری بـر روی هادی می‌نشینند. در نوع اول چگالـی یخ کمتر از ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، نوع دوم دارای چگالی ۰/۹-۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نوع سوم دارای چگالی ۰/۹۲ - ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که نسبت به دو نوع اول خاصیت چسبندگی فوقالعاده بیشتری دارد. شایان ذکر است که اغلب نوسانات گالوپینگ، با حضور یخهای خشک و بلوری اتفاق می‌افتند. بدین ترتیب، ریزش یخ از روی سطح هادی (بهعلت باد و یا گرمای هادی) نیروی زیادی را بر هادی جهت نوسان عمودی اعمال می‌نماید. با توجه بهموارد فوق، نوسان گالوپینگ می‌تواند با وجود باد، ریزش یخ و همچنین با وجود توأم باد و ریزش یخ صورت گیرد که نوع آخر در طبیعت نسبتاً بیشتر از انواع دیگر رخ می‌دهد [۲].

۳- روشهای موجود جهت تخمین حداکثر دامنه نوسانات گالوپینگ

پیشبینی ماکزیموم دامنه نوسان گالوپینگ بهصور مختلفی می‌تواند انجام شود که برخی از مهمترین آنها بهشرح ذیل می‌باشند:

- با استفاده از رابطه تقریبی و براساس اطلاعات و مشاهدات میدانی نوسان گالوپینگ هادیهای منفرد و با صرفنظر کردن از سرعت باد، جرم هادی و دیگر پارامترها، می‌توان حداکثر دامنه گالوپینگ را تخمین زد (رابطه (۶)). در این رابطه، y_m حداکثر دامنه جهش (m)، d قطر هادی (m) و F فلش بارگذاری (m) است [۴].

$$y_m = 40dLn(\frac{8F}{50d}) \quad (۶)$$

- با استفاده از روش موازنه انرژی که مطابق این روش، ماکزیموم دامنه تقریبی گالوپینگ هادیهای منفرد با رابطه زیر بیان می‌گردد. در این رابطه y_m حداکثر دامنه گالوپینگ (m)، ω فرکانس زاویهای نوسان $(Rad/\sec)$ و v سرعت باد $(m/\sec)$ است.

$$\frac{\omega y_m}{v} = 0.8 \quad (۷)$$

- با استفاده از روش هانت - ریچاردز که مطابق این روش می‌توان دامنه گالوپینگ را در بدترین شرایط آیرودینامیکی و با توجه بهخواص دینامیکی اسپن و مسائل آیرودینامیکی تخمین زد. مطابق این روش و با توجه بهمشخصه نیروی برای آیرودینامیکـی در بدترین حالت، مقدار c_L برای $\alpha\rangle 0$ بـرابـر ۰/۶ و برای $\alpha\langle 0$ مقدار ۰/۶- است. همچنین برای تمام مقادیر α ، مقدار c_D واحد در نظر گرفته می‌شود. لذا مقدار پیک تا پیک دامنه گالوپینگ عمودی هادی با توجه بهرابطه زیر بهدست می‌آید [۲].

$$y_{\max} = 0.26\frac{v}{f} \quad (۸)$$

در رابطه فوق، v سرعت باد $(m/\sec)$، f فرکانس (Hz) و $y_{\max}$ ماکزیموم مقدار پیک تا پیک گالوپینگ (m) می‌باشد. البته آزمایشات نشان داده است که رابطه فوق دقت لازم را ندارد. در نتیجـه رابطه دقیقتر، بهصورت زیر می‌باشد[۵].

$$\begin{aligned} y_{\max} &= 0.26\frac{v}{f} \quad \leftarrow \quad 0 \le \frac{v}{f} \le 125d \\ y_{\max} &= 33d \quad \leftarrow \quad \frac{v}{f}\rangle 125d \end{aligned} \quad (۹)$$

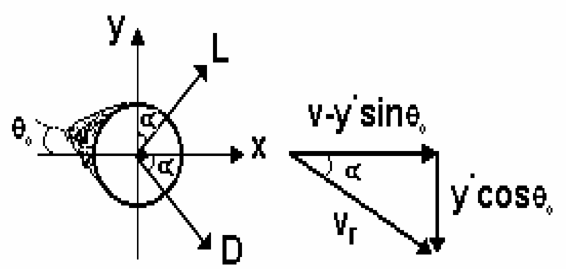
(d قطر هادی است.)

همچنین روشهای دیگری همانند استفاده از بیضی گالوپینگ وجود دارد که بر اساس آن می‌توان حد مجاز فاصله بین فازی را محاسبه نمود. با محاسبه ابعاد این بیضی، اگر فاصله فازهای مجاور از حد مجاز کمتر باشد، می‌بایست با تغییر و اصلاح جایگذاری هادیها، از ایجاد تخلیه الکتریکی بین هادیها جلوگیری نمود [۲].

۴- مدلسازی دینامیکی خطوط انتقال هوایی منفرد

از آنجایی که پدیده گالوپینگ، کم و بیش در مکان و زمان خاصی رخ می‌دهد، لذا مطالعه عملی آن در طبیعت مشکل بوده

و گاهی اوقات بهدست آوردن اطلاعات در مورد آن مخاطرهساز است. لذا لازم است تا مدلی دقیق را با توجه بهخاصیت سازه و شرایط محیطی در نظر گرفت تا بتوان با کمک آن، میزان دامنه نوسان گالوپینگ را با شبیهسازی مدل مربوطه، محاسبه نمود. اکنون جهت شبیهسازی نوسان گالوپینگ، بهمنظور تخمین ماکزیموم دامنه نوسان، هادی را بهصورت یک عنصر متمرکز در نظر گرفته و مدل دینامیکی آن را بهدست می‌آوریم. در این مدلسازی و طبق تعریف، نوسان گالوپینگ صرفاً در جهت عمودی عمل می‌نماید. در این مدل، هادی بهمانند یک میله صلب که از فنر و دمپرهایی آویزان است در نظر گرفته می‌شود که فقط حرکت عمودی را تحمل می‌نماید. نمایی از سطح مقطع مدل دینامیکی هادی با پارامتر متمرکز که بر روی آن لایه‌ای از یخ نیز پوشیده شده است در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



شکل ۲- مدل سطح مقطع هادی با لایه یخ

حال می‌توان معادله حرکت حاکم بر این سیستم را با فرض اینکه فقط بهنیروهای آیرودینامیکی وابسته باشد بهصورت رابطه (۱۰) ارائه نمود. شایان ذکر است که در این مدل، سختی سیستم ناچیز فرض می‌گردد [۶ و ۷].

$$(m+m_i)y^{\bullet\bullet}+k_1y^{\bullet}+$$
$$\frac{1}{2}\rho d\sqrt{(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ})^2+(y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})^2}$$
$$\times(c_D(\alpha)(y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})-c_L(\alpha)(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ}))$$
$$+T(\frac{n\pi}{l})^2y=0 \qquad (۱۰)$$

در رابطه فوق: m جرم واحد طول هادی (kg/m)، y جابجایی عمودی هادی (m)، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، v سرعت باد $(m/\sec)$، l طول هادی در یک اسپن (m)، c_D ضریب پسا در واحد طول هادی $(1/m)$، c_L ضریب برا در واحد طول هادی $(1/m)$، k_1 ضریب میرایی مکانیکی در واحد طول هادی $(kg/m.\sec)$، m_i جرم یخ در واحد طول هادی (kg/m)، $y^{\bullet}$ سرعت عمودی هادی $(m/\sec)$، d قطر هادی (m)، $\theta_{\circ}$ زاویه حالت سکون هادی (Rad)، T کشش هادی (N)، α زاویه حمله باد بههادی (Rad) و n شماره فرکانس هارمونیکی یا n امین مد نرمال هادی است.

رابطه فوق یک معادله غیرخطی است که توسط آن می‌توان هر نوسان خاصی را با توجه بهشرایط اولیه آن مشخص کرد.کامپیوترهای جدید برای حل مسائل غیرخطی بهروشهای نوینی مجهزند. روشهای شبیهسازی کامپیوتری در تحلیل و طراحی سیستمهای کنترل غیرخطی، از جمله سیستم مورد مطالعه بسیار کارآمد و مفید است. لذا می‌توان معادلات بهدست آمده فوق را با شبیهسازی کامپیوتری که با نرم افزار MATLAB انجام می‌شود، تحلیل و نتایج مربوطه را استخراج کرد. (در این مطالعه از ضخامت یخ جهت پیچش هادی صرفنظره‌می‌شود.)

با توجه بهموارد فوق و با توجه بهشکل (۲)، زاویه برخورد باد بههادی (α) بصورت رابطه زیر خواهد بود:

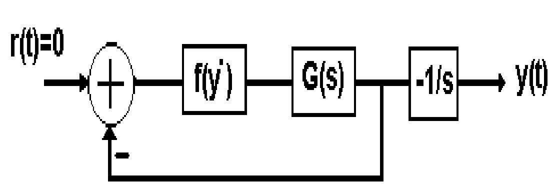
$$\alpha=-Tan(\frac{y^{\bullet}\cos\theta_{\circ}}{v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ}}) \qquad (۱۱)$$

لذا رابطه (۱۰) را می‌توان بهصورت بلوک دیاگرام ساده‌ای مطابق شکل (۳) نشان داد که در آن:

$$G(s)=\frac{s}{(m+m_i)s^2+k_1s+T(\frac{n\pi}{l})^2}) \qquad (۱۲)$$

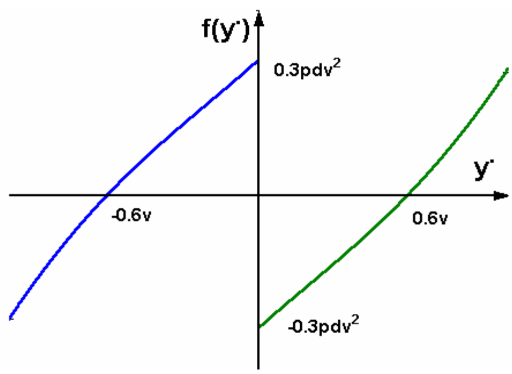
در این رابطه s اپراتور لاپلاسی است.

$$f(y^{\bullet})=\frac{1}{2}\rho d\sqrt{(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ})^2+(y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})^2}$$
$$\times(c_D(\alpha)(y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})-c_L(\alpha)(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ}))$$
(۱۳)



شکل ۳- بلوک دیاگرام کنترلی ساده

در این جا با فرض بدترین حالت ممکن، از نظریه هانت-ریچاردز استفاده می‌شود. با توجه بهموارد فوق، رابطه (۱۳) را می‌توان بهصورت رابطه دو ضابطهای (۱۴) نشان داد که در آن $f(y^{\bullet})$ یک تابع غیر خطی بر حسب $y^{\bullet}$ است. شکل (۴)، $f(y^{\bullet})$ را بر حسب $y^{\bullet}$ نشان می‌دهد.



شکل ۴- رسم عنصر غیر خطی $f(y^{\bullet})$ برحسب $y^{\bullet}$

$$f(y^{\bullet})=\begin{cases}\frac{1}{2}\rho d\sqrt{(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ})^2+(y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})^2}\times & \alpha\langle 0\\ \quad((y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})-0.6(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ})) & \\ \frac{1}{2}\rho d\sqrt{(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ})^2+(y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})^2}\times & \alpha\ge 0\\ \quad((y^{\bullet}\cos\theta_{\circ})+0.6(v-y^{\bullet}\sin\theta_{\circ})) & \end{cases}\qquad(۱۴)$$

حال می‌توان از روابط فوق استفاده و هادیهای منفرد خطوط را تحلیل کرد که در ذیل نتایج شبیهسازی انجام شده بر روی یک اسپن نمونه بررسی می‌گردند. نکته حائز اهمیت این است که بیشتر نوسانات گالوپینگ در یک اسپن، با یک، دو و یا چند حلقه رخ می‌دهد و مشاهدات نشان داده است که احتمال توزیع چهار حلقه و بیشتر از آن چیزی در حدود ۲% است.

۵- شبیهسازی دو حالت مهم نوسان گالوپینگ بر روی خط نمونه

حال از معادلات و روابط فوق استفاده و با توجه بهبلوک دیاگرام شکل (۳)، دو حالت مهم نوسان گالوپینگ یعنی با باد و همچنین با ریزش یخ مورد شبیهسازی قرار می‌گیرند. نکته مهم این است که مقدار کشش هادی بهعلت تغییر فلش در حین جهش، در حال تغییر می‌باشد، اما بهعلت چشمگیر نبودن این تغییرات و همچنین ساده شدن تحلیل، از آن چشمپوشی می‌گردد. همچنین در این مطالعه، زاویه حالت سکون هادی صفر فرض می‌شود. بدین منظور پارامترهای هادی در یک اسپن نمونه واقعی که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است، انتخاب می‌گردند.

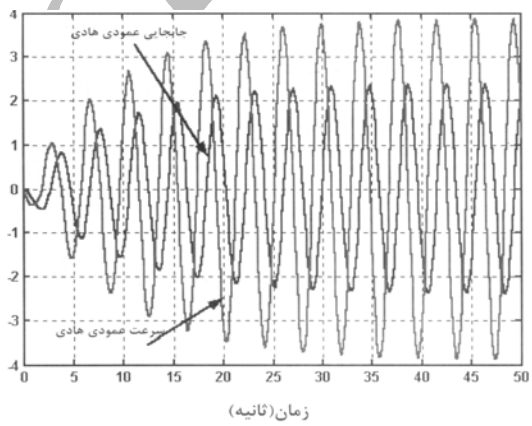
جدول (۱):خواص هادی و شرایط محیطی در اسپن مورد مطالعه

نوع هادی	ACSR Drake۲۶/۷
جرم واحد طول هادی (kg/m)	۱/۶۲۸
قطر هادی (mm)	۲۸/۱۴۲
طول اسپن (m)	۲۴۴
کشش هادی (N)	۲۶۰۰۰
ضریب میرایی عمودی هادی (kg/m.sec)	۰/۱۸۲
سرعت باد (m/sec)	۱۰
جرم یخ در واحد طول هادی (kg/m)	۰/۱۷
چگالی هوا (kg/m^3)	۱/۲۹۲۹

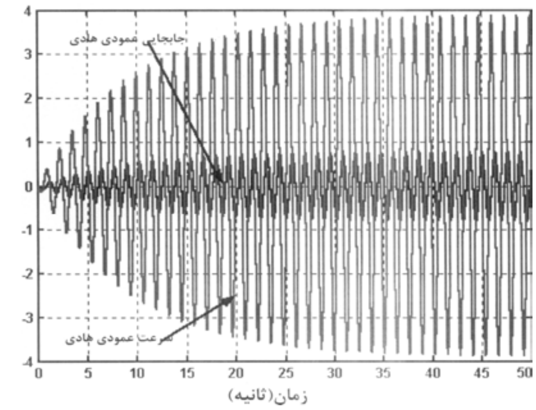
۵-۱- نوسان گالوپینگ با باد

در اینجا فرض می‌شود که بر روی هادی مورد نظر هیچ لایه یخی نبوده و سرعت باد، مقدار ثابت ۱۰ متر برثانیه را دارا باشد. در این حالت، با انجام شبیهسازی، میزان جابجایی و سرعت

عمودی هادی مطابق شکل (۵) خواهد بود. با توجه بهاین شکل، دامنه نوسان در مد سوم بهمراتب کمتر از مد اول می‌باشد. یعنی میزان دامنه جابجایی ماندگار هادی در مد سوم حدود ۰/۸ و در مد اول ۲/۴ متر است. چرا که هادی در مد اول دارای دو گره و در مد سوم دارای چهار گره نوسانی است. نکته قابل توجه این است که در مشاهده میدانی، با شرایط مذکور بر روی این اسپن، هادی در مد اول دارای دامنه جهشی حدود ۲/۴۴ متر بوده که نتیجه شبیهسازی با این مقدار، توافق خوبی را از خود نشان و دقت مدل ارائه شده را بهنحو بسیار مطلوبی نمایان می‌سازد. از طرفی این شکل نشان می‌دهد که در مدهای مختلف، دامنه ماندگار سرعت عمودی هادی، ۳/۸۹ متر برثانیه می‌باشد.



(الف)

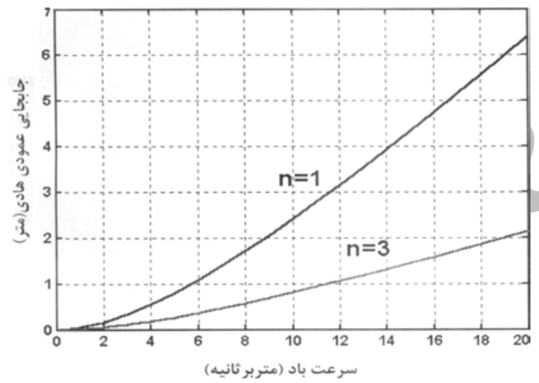


(ب)

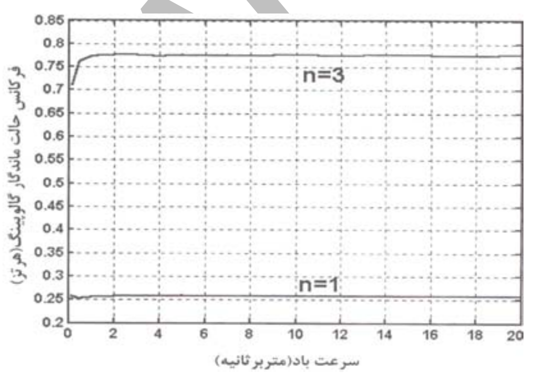
شکل ۵- تغییرات جابجائی (متر) و سرعت عمودی هادی (متر بر ثانیه) برحسب زمان الف) مد اول ب) مد سوم

لذا تغییر مدهای نوسانی، تأثیری بر دامنه سرعت عمودی هادی نداشته، بلکه فقط فرکانس نوسانات مذکور را تغییر می‌دهد. بدین ترتیب در حالت ماندگار نوسانات هادی، فرکانس نوسانات در مد اول و سوم به ترتیب ۰/۲۵۹ و ۰/۷۷۷ هرتز خواهد شد. با توجه به موارد فوق، شکل (۶) میزان جابجایی و فرکانس نوسانات حالت ماندگار هادی را برحسب تغییرات سرعت باد و در مدهای اول و سوم نشان می‌دهد.

لذا همانطور که بیان شد، نتیجه شبیهسازی در این حالت، به مشاهده عینی بسیار نزدیک است. از طرف دیگر، مطابق نظریه هانت- ریچاردز و با توجه بهشرایط اسپن مورد مطالعه، ماکزیموم دامنه گالوپینگ ۵/۰۴ متر و در مرجع [۹] این مقدار بهروش کنترلی تابع توصیفی ۲/۷۶۵ متر محاسبه گردیده است. این نشان می‌دهد که نتیجه حاصل از این شبیهسازی در مقایسه با دیگر نظریهها و مراجع بهواقعیت نزدیکتر است.



(الف)



(ب)

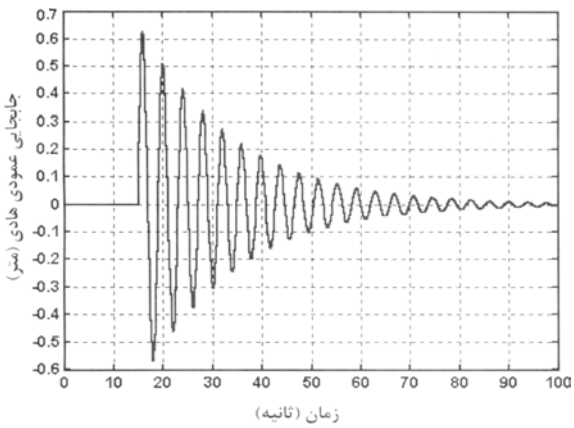
شکل ۶- الف) جابجایی عمودی هادی برحسب سرعت باد ب) فرکانس ماندگار گالوپینگ برحسب سرعت باد

۵-۲- گالوپینگ با ریزش یخ

ریزش یخ باعث می‌شود که یک نیروی ضربه‌ای در لحظه ریزش به‌هادی اعمال گردد که عکس‌العمل آن جهش هادی خواهد بود. در اینجا فرض می‌شود که سرعت باد صفر و یخ به‌میزان ۰/۱۷ کیلوگرم بر متر از روی هادی بریزد. لذا رابطه (۱۰) بعد از ریزش یخ به‌صورت رابطه (۱۵) تغییر می‌یابد.

$$my^{\bullet\bullet} + k_1 y^{\bullet} + \frac{1}{2}\rho d {y^{\bullet}}^2 + T(\frac{n\pi}{l})^2 y = 0$$
(۱۵)

شایان ذکر است که در این حالت، جابجایی هادی به‌طور آنی تغییر نمی‌کند، لیکن سرعت عمودی هادی در لحظه‌ای کوتاه تغییر می‌نماید، به‌طوری که مقدار آن در لحظه‌ای بسیار کوتاه بعد از ریزش به‌مقدار تقریبی $m_i g / m$ خواهد رسید. لذا رابطه فوق با توجه به‌شرایط مذکور و بر روی اسپن نمونه، مورد شبیه‌سازی قرار گرفته که نتیجه آن در شکل (۷) مشاهده می‌شود. با توجه به‌این شکل، مقدار جهش هادی به حدود ۰/۶ متر خواهد رسید. نکته حائز اهمیت این است که هر چه یخ بیشتری از روی هادی بریزد، جهش هادی نیز متناظر است بیشتر خواهد شد [۸].



شکل ۷- جابجایی عمودی هادی برحسب زمان در مد اول

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل متمرکز سطح مقطع هادی ارائه و مورد مطالعه قرار گرفت. سپس با استخراج معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت هادی در حین نوسان گالوپینگ که از دسته معادلات غیرخطی هستند، شبیه‌سازیهای لازم انجام شد و بر روی خط نمونه مفروض، پیاده‌سازی و بررسی گردید. بدین ترتیب که در حالت نخست گالوپینگ (نوسان گالوپینگ با باد ۱۰ متر برثانیه)، میزان دامنه نوسان در مد اول به ۲/۴ متر و فرکانس آن به ۰/۲۵۹ هرتز رسید که این میزان به‌مقدار مشاهده میدانی (حدود ۲/۴۴ متر) نزدیک است. حالت دوم گالوپینگ، با صرفنظر کردن از تغییرات کشش هادی، مورد شبیه‌سازی و آنالیز واقع شد. در نتیجه با ریزش یخ به‌میزان ۰/۱۷ کیلوگرم بر متر از روی هادی در اسپن نمونه، مقدار دامنه گالوپینگ به ۰/۶ متر رسید. نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی این است که افزایش سرعت باد، افزایش دامنه گالوپینگ را به‌همراه خواهد داشت. ضمناً دامنه مد سوم به‌مراتب کمتر از مد اول است و فرکانس سه حلقه، سه برابر سریعتر از تک حلقه رشد می‌کند. (به‌منظور ایجاد نوسان گالوپینگ با مد بیش از تک حلقه، جهت کاهش دامنه، می‌توان از اسپیسرهای بین فازی استفاده کرد تا یک اسپن به‌چند اسپن کوچکتر تقسیم شود.) بنابراین به‌طورکلی، افزایش فرکانس طبیعی عمودی نوسان هادی، باعث می‌شود تا دامنه جابجایی هادی کاهش یابد. به‌عبارت دیگر، افزایش فرکانس مذکور باعث می‌شود تا هادی با سرعت باد بالاتری به‌این نوسان برسد که یکی از این راه حلها می‌تواند افزایش کشش هادی باشد. البته با کشش ثابت و کاهش جرم واحد طول هادی نیز می‌توان به‌این هدف دست یافت. در ضمن با استفاده از برخی وسایل ضدنوسان گالوپینگ، همچون دمپرهای پسای آیرودینامیکی و همچنین بکارگیری اسپنهای انتهایی می‌توان به‌این هدف دست یافت.

مراجع

[۱] حیدری، قدرت ا... "طراحی الکتریکی خطوط انتقال نیرو"، چاپ اول، دانشکده صنعت آب و برق، اردیبهشت ۱۳۷۹

[2] Transmission Line Reference Book (Wind–Induced – Conductor motion), EPRI research project 792.

[3] As. Richardson, “A Study of Galloping Conductor on A 230 kv Transmission Line”, Electrical Power System Research, 21 (1991), pp. 43-55.

[4] J.L. Lilien and D.G. Havard, “Galloping Data Base on Single and Bundle Conductors Prediction of Maximum Amplitude”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp. 670-674, April 2000.

[5] M. A. Baenziger, W.D.James, B. Wouters, L.Li, “Dynamic Load on Transmission Line Structure due to Galloping Conductors “, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 19, No.1, pp. 40-46, January 1994.

[6] J.C.R.Hunt, Ph.D and D.J. W.Richards, B.Sc. “Overhead Line Oscillations and the Effect of Aerodynamic Damper”, Proc. IEE. Vol. 116, No. 11, pp. 1869-1874, November 1969.

[7] Jianwel Wang and Jean-Louis Lilien, “Overhead Electrical Transmission Line galloping, a Full Multi-Span 3-DOF Model. Some Application and Design Recommendation”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 13, pp. 909-916, July 1998.

[8] میرزایی، محمد "بررسی پدیده گالوپینگ در منطقه مازندران و ارائه روشهایی جهت تعدیل آن" پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، بهمن ۱۳۷۹.

[9] GL SIG BYUN and ROBERT I.EGBERT, “Two-Degree-of-freedom analysis of Power line galloping by Describing Function methods”, Electric Power systems Research. 21 (1991) 187-193.