

# بررسی نوسانات گالوپینگ در خطوط هوایی انتقال انرژی؛ مدلسازی، محاسبه نقطه تعادل و ارائه مدل الکتریکی

احمد غلامی و محمد میرزایی

در ضمن به علت نیروهای باد و یخ، کشش قابل ملاحظه‌ای بر روی هادی ایجاد گردیده و می‌تواند باعث فرسودگی هادی‌ها و خسارت دکل‌ها شود. این پدیده، بارگذاری دینامیکی شدیدی را بر روی هادیها، براق آلات مقره‌ها، جامپرها، کلمپ‌ها، اسپیسرها و دمپرهای نوسانی استوک بریج ایجاد کرده و می‌تواند باعث شل شدن و درآمدن پیچ‌های دکل و در نهایت تخلیه‌های الکتریکی که عملکرد کلیدهای قدرت و همچنین خسارت به هادی (ناشی از جرقه) را موجب می‌شود، گردد. حاصل موارد فوق، خروج خط و هزینه‌های زیادی برای شرکت‌های برق است. تاکنون مطالعات زیادی در مورد گالوپینگ و طرق مختلف مقابله با این نوع نوسانات و همچنین حفاظت هادی در برابر آن انجام شده است. [۱]، اثرات آیرودینامیکی ناشی از نوسان گالوپینگ، اتلاف انرژی بخاطر نیروهای پسای آیرودینامیکی، مقدار دامنه گالوپینگ و تاثیر دمپرهای آیرودینامیکی را بر میزان کاهش دامنه نوسان تشریح کرده است. همچنین Rawlins تحلیلی را بر روی گالوپینگ هادی‌های منفرد خطوط هوایی با توجه به مشاهدات میدانی انجام داده است [۲]. علاوه بر موارد فوق، هدف اصلی در تحلیل نوسان گالوپینگ، تخمین حداکثر دامنه نوسان در شرایط منطقه است [۲]. معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت هادی را در سه جهت عمودی، افقی و پیچشی مورد شبیه‌سازی کامپیوتری قرار داده و جایابی در سه مد مذکور محاسبه گردیده است. همچنین مقاله‌ای دیگر، روابطی با توجه به مشاهدات عینی از گالوپینگ هادی‌های منفرد و باندل، جهت پیش‌بینی دامنه گالوپینگ ارائه کرده است [۳]. علاوه بر موارد فوق، طرق مختلفی جهت حفاظت هادی در برابر گالوپینگ وجود دارند. [۴] وسیله ضد گالوپینگ نوبنی را برای کنترل و تعدیل گالوپینگ ارائه کرده است. همچنین روش‌های اساسی تکنولوژی و بکارگیری وسایل ضد گالوپینگ به همراه اطلاعات میدانی و آزمایشی ارائه شده است [۵]. همچنین در این مقاله روش‌های مختلف افزایش سرعت بحرانی باد جهت حفاظت هادی، از قبیل افزایش فرکانس طبیعی، میرایی مکانیکی، قطر هادی، نیروی پسای آیرودینامیکی و همچنین کاهش نیروی برای آیرودینامیکی ارائه گردیده است. [۴] و [۶] روش‌های جدید در طراحی اسپیسرها، باندل و دمپر را در اسپن‌های گالوپینگ نشان داده و تشریح کرده‌اند. همچنین [۷] نیروهای وارده بر مقره و کراس آرمها را با توجه به دامنه بزرگ گالوپینگ تعیین کرده است.

این مقاله مدل دینامیکی متمرکز از سطح مقطع هادی را ارائه می‌نماید، طوری که در این مدلسازی، هادی مانند میله‌ای صلب که از فنر و دمپرهای آویزان و حرکت عمودی ناشی از گالوپینگ را تحمل می‌نماید، در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی این مقاله، شبیه‌سازی دقیق گالوپینگ، جهت تخمین میزان دامنه این نوسان به روش کنترلی تابع توصیفی و همچنین شبیه‌سازی مستقیم است و همانطور که بیان شد پاسخ این روش‌ها بسیار به یکدیگر و همچنین به مشاهده میدانی نزدیک بوده که نشان از دقت و ابتکار مناسب جهت استفاده از این روش است و با روش شبیه‌سازی مستقیم انجام شده، مطابقت مناسبی دارد. همچنین

چکیده: یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی خطوط هوایی انتقال انرژی، نوسان هادیها می‌باشد که نقش اصلی در تعیین فواصل فازی دارد. یکی از انواع نوسانات هادی در یک اسپن، نوسان گالوپینگ می‌باشد که هر ساله ضررهای اقتصادی شدیدی را متوجه شرکت‌های برق منطقه‌ای کرده است. در این مقاله مدل دینامیکی برای هادی‌های منفرد خطوط هوایی انتقال نیرو که دارای نوسان گالوپینگ عمودی هستند، ارائه گردیده و با توجه به معادلات دیفرانسیل حاکم بر آن، این مدل به روش‌های مختلف بر روی اسپن نمونه، جهت تخمین میزان دامنه گالوپ، شبیه‌سازی شده است. همچنین با استفاده از تئوری‌های کنترل و تقریب‌های ریاضی، مدل جدیدی بر اساس پارامترهای الکتریکی، ارائه شده است. در ضمن با استفاده از دانش کنترل غیر خطی، نقطه تعادل سیستم محاسبه شده و تاثیر میزان میرایی دمپر در کاهش دامنه این نوع نوسان ارزیابی می‌گردد.

کلیدواژه: خطوط هوایی، نوسانات هادی، گالوپینگ، مدلسازی.

## ۱- مقدمه

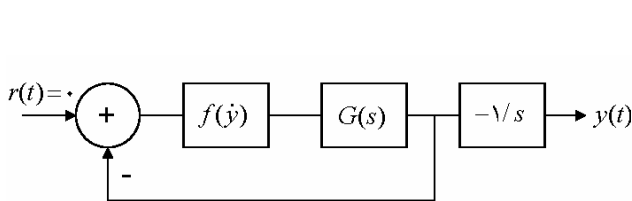
یکی از پارامترهای مهم مکانیکی که نقش اساسی در تعیین حد مجاز فاصله فاز تا فاز و یا فاز با زمین دارد نوسانات هادیها است. این نوسانات در سه دسته آئولین، گالوپینگ و نوسانات هادی‌های فرعی (یا به نوعی نوسان swing) طبقه‌بندی می‌شوند. آئولین دارای فرکانس بالا (۵ تا ۱۰۰ هرتز) و دامنه کم (در حدود چند سانتی‌متر) و گالوپینگ دارای فرکانس کم (۰/۱ تا ۰/۳ هرتز) و دامنه بالا (در حدود فلش اسپن) می‌باشد. همچنین نوسان هادی‌های فرعی که اکثراً در خطوط باندل رخ می‌دهد، وقتی است که یک هادی در گرداب‌های بادخور هادی دیگر قرار گرفته که این حفاظ آیرودینامیکی، نیروهایی که منجر به حرکت هادی می‌شود را باعث می‌گردد. (نوسان swing نیز با این مکانیزم، باعث حرکت افقی هادی می‌شود.)

با توجه به موارد فوق، گالوپینگ به علل گوناگون به وقوع می‌پیوندد. به عبارتی دیگر، گالوپینگ در اثر ریزش یخ از روی سطح هادی، وزش بادهایی با سرعت بیش از ۷ متربرثانیه و یا هر دو عامل می‌تواند اتفاق بیافتد و حرکت به سمت بالا و پائین هادی را موجب شود. این پدیده می‌تواند مشکلات زیادی را برای خطوط هوایی انتقال نیرو، بخصوص در نواحی کوهستانی و باد خیز ایجاد کند. برخی از خطوط انتقال در نواحی کوهستانی، به علت گالوپینگ در برخی از اسپن‌ها قطع می‌شوند. وقوع این نوسان، افزایش فلش اسپن و برخورد هادی‌های فاز با یکدیگر یا با سیم محافظ (بخصوص در جای‌گذاری عمودی هادی‌ها) را در بر خواهد داشت.

این مقاله در تاریخ ۶ اسفند ماه ۱۳۸۰ دریافت و در تاریخ ۱۰ دی ماه ۱۳۸۱ بازنگری شد.

احمد غلامی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، نارمک، کد پستی ۱۶۸۴۴.

محمد میرزایی، دانشجوی دکتری برق قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، نارمک، کد پستی ۱۶۸۴۴.



شکل ۲: بلوک دیاگرام کنترلی ساده.

عنصر متمرکز در نظر گرفته و مدل دینامیکی آن را بدست می‌آوریم. در این مدل‌سازی، طبق تعریف، نوسان گالوپینگ صرفاً در جهت عمودی عمل می‌نماید. در این مدل، هادی به مانند 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 ۱ مشاهده می‌شود. حال می‌توان معادله حرکت حاکم بر این سیستم را با فرض اینکه فقط به نیروهای آیرودینامیکی وابسته باشد بصورت رابطه (۵) ارائه نمود. شایان ذکر است که در این مدل، سختی سیستم ناچیز فرض می‌گردد.

$$(m + m_i)y'' + k_1 y' + \frac{1}{\gamma} \rho d \sqrt{(v - y' \sin \theta_0)^2 + (y' \cos \theta_0)^2} \times (c_D(\alpha)(y' \cos \theta_0) - c_L(\alpha)(v - y' \sin \theta_0)) + T \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 y = 0 \quad (5)$$

در رابطه فوق:  $m$  جرم واحد طول هادی (kg/m)،  $y$  جابجایی عمودی هادی (m)،  $\rho$  چگالی هوا (kg/m<sup>3</sup>)،  $v$  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)،  $y'$  سرعت عمودی هادی (m/sec)،  $d$  قطر هادی (m)،  $\theta_0$  زاویه حالت سکون هادی (Rad)،  $T$  کشش هادی (N) و  $n$  شماره فرکانس هارمونیک یا  $n$  امین مد نرمال هادی است.

رابطه فوق یک معادله غیرخطی است که توسط آن می‌توان هر نوسان خاصی را با توجه به شرایط اولیه آن مشخص کرد. روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل غیرخطی، از جمله سیستم مورد مطالعه بسیار کارآمد و مفید است. لذا می‌توان معادلات بدست 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 صرفه نظر می‌شود.)

با توجه به موارد فوق و با توجه به شکل ۱، زاویه برخورد باد به هادی ( $\alpha$ ) بصورت رابطه زیر خواهد بود:

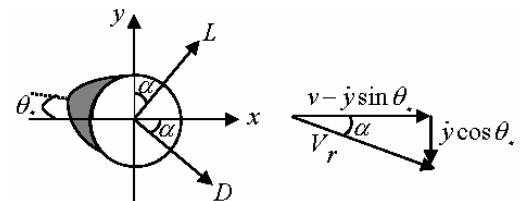
$$\alpha = -\tan^{-1} \left( \frac{y' \cos \theta_0}{v - y' \sin \theta_0} \right) \quad (6)$$

لذا رابطه (۵) را می‌توان بصورت بلوک دیاگرام ساده‌ای مطابق شکل ۲ نشان داد که در آن:

$$G(s) = \frac{s}{(m + m_i)s^2 + k_1 s + T \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \quad (7)$$

در این رابطه S اپراتور لاپلاسی است.

$$f(y') = \frac{1}{\gamma} \rho d \sqrt{(v - y' \sin \theta_0)^2 + (y' \cos \theta_0)^2} \times (c_D(\alpha)(y' \cos \theta_0) - c_L(\alpha)(v - y' \sin \theta_0)) \quad (8)$$



شکل ۱: مدل سطح مقطع هادی با لایه یخ.

با توجه به معادلات حالت استخراج شده ناشی از حرکت گالوپینگ، تصویر فاز-صفحه‌ای<sup>۱</sup> بر روی اسپن نمونه پیاده‌سازی شده و با توجه به تئوری‌های کنترلی، نقطه تعادل آن محاسبه و با میزان میرایی دمپر در کاهش دامنه نوسان، مقایسه شده است. در ضمن، مدل الکتریکی جدیدی از نوسان دینامیکی گالوپینگ که نتایج بدست آمده از آن در قیاس با دیگر روش‌های انجام شده بسیار مطلوب و نشان از صحت آن است، ارائه می‌گردد.

## ۲- مدل‌سازی دینامیکی نوسان گالوپینگ

بطور کلی نوسان گالوپینگ هادی، به علت غیر متقارن شدن سطح مقطع هادی است که نتیجه آن ایجاد نیروهای آیرودینامیکی پسا<sup>۲</sup> و برا<sup>۳</sup> است که بر هادی اعمال می‌گردد. مقادیر این نیروها مطابق روابط (۱) و (۲) می‌باشند.

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

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

$D$  نیروی پسا،  $L$  نیروی برا،  $\rho$  چگالی هوا،  $v_r$  سرعت ظاهری باد بر هادی،  $d$  قطر هادی،  $c_D(\alpha)$  ضریب پسای آیرودینامیکی هادی و  $c_L(\alpha)$  ضریب برا برای آیرودینامیکی هادی است. از آنجایی که نیروی آیرودینامیکی برا بصورت یک منحنی با شیب مثبت و منفی بر حسب زاویه حمله باد تغییر می‌کند، لذا اگر سرعت رو به بالای هادی با نیروی برای آیرودینامیکی مثبت و سرعت رو به پائین آن با نیروی برای آیرودینامیکی منفی همزمان باشد، گالوپینگ اتفاق می‌افتد. به عبارت کلی در شرایط ذیل، گالوپینگ رخ می‌دهد:

$$\frac{dL}{d\alpha} + D \leq 0 \quad (3)$$

$$\frac{dc_L}{d\alpha} + c_D \leq 0 \quad (4)$$

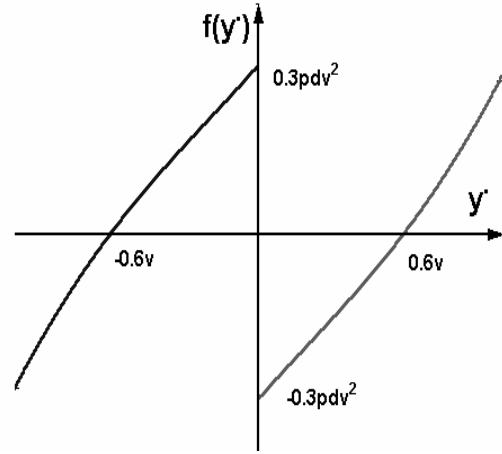
شرایط فوق، وقوع نوسان گالوپینگ را نشان داده و به معیار دن هارتوگ معروف است [۸].

با توجه به موارد فوق، 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 بدست آوردن اطلاعات در مورد آن مخاطره ساز است. لذا لازم است مدلی دقیق را با توجه به خاصیت سازه و شرایط محیطی در نظر گرفت تا بتوان با کمک آن، میزان دامنه نوسان گالوپینگ را با شبیه سازی مدل مربوطه، محاسبه نمود. اکنون جهت شبیه سازی نوسان گالوپینگ، به منظور تخمین ماکزیموم دامنه نوسان، هادی را بصورت یک

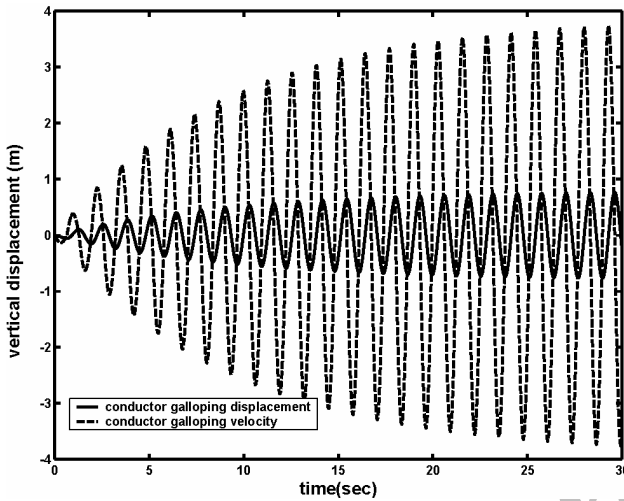
1. Phase\_Plane
2. Drag
3. Lift

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

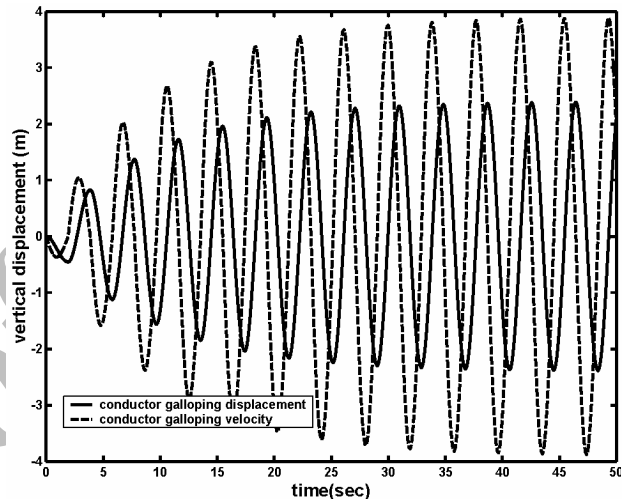
ACSR Drake	نوع هادی
۲۶/۷	
۱/۶۲۸	جرم واحد طول هادی (kg/m)
۲۸/۱۴۲	قطر هادی (mm)
۲۴۴	طول اسپن (m)
۲۶۰۰۰	کشش هادی (N)
۰/۱۸۲	ضریب میرایی عمودی هادی (kg/m.sec)
۱۰	سرعت باد (m/sec)
۱/۲۹۲۹	چگالی هوا (kg/m <sup>۳</sup> )



شکل ۳: عنصر غیرخطی  $f(y^*)$  بر حسب  $y^*$ ،  $(\theta_0 = 0)$ .



(ب)



(الف)

شکل ۴: تغییرات جابجایی و سرعت عمودی هادی بر حسب زمان، (الف) مد اول، (ب) مد سوم.

نشان داده است که احتمال توزیع چهار حلقه و بیشتر از آن چیزی در حدود ۲٪ است.

### ۳- شبیه سازی مدل مربوط به نوسان گالوپینگ

حال از معادلات و روابط فوق استفاده نموده و با توجه به بلوک دیاگرام شکل ۲، نوسان گالوپینگ به روش مستقیم و به کمک روش کنترلی تابع توصیفی مورد شبیه سازی قرار می‌گیرد. نکته مهم این است که مقدار کشش هادی به علت تغییر فلش در حین جهش، در حال تغییر می‌باشد، اما به علت چشمگیر نبودن این تغییرات و همچنین ساده شدن تحلیل، از آن چشم پوشی 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.

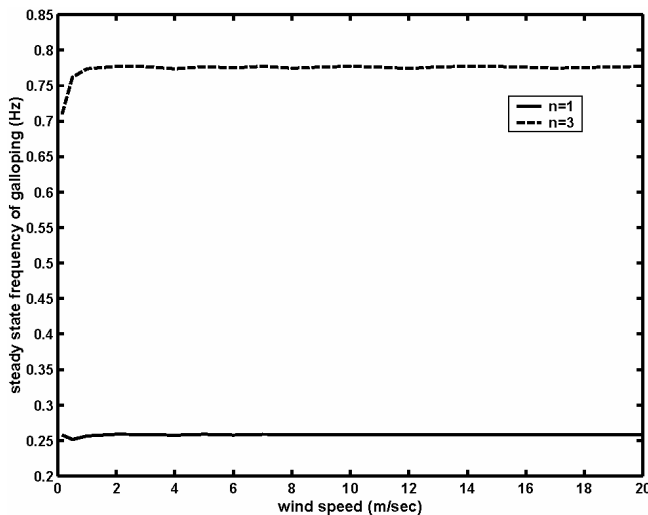
#### ۳-۱ شبیه سازی مستقیم از معادلات دیفرانسیل

در این حالت، بطور مستقیم از معادله دیفرانسیل (۵) و روابط ارائه شده مذکور، استفاده و به کمک نرم‌افزار Matlab و با توجه به بلوک دیاگرام ساده شده فوق، مدل ارائه شده شبیه‌سازی می‌گردد. در اینجا فرض می‌شود که بر روی هادی مورد نظر هیچ لایه یخی نبوده و سرعت باد، مقدار ثابت ۱۰ متر بر ثانیه را دارا باشد. در این حالت، با انجام شبیه‌سازی، میزان جابجایی و سرعت عمودی هادی مطابق شکل ۴ خواهد بود.

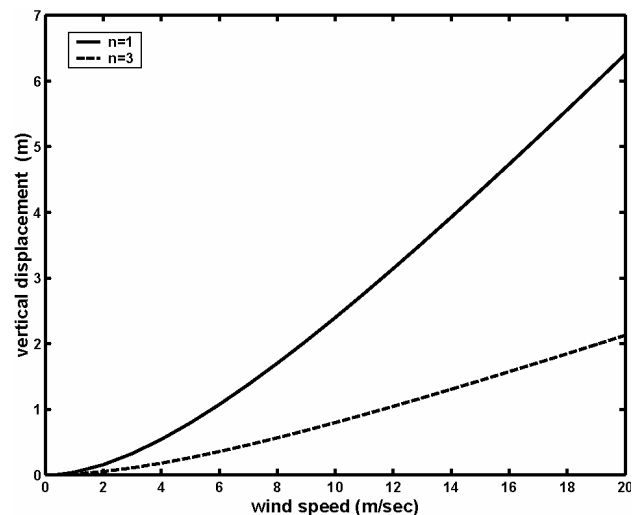
در این جا با فرض بدترین حالت ممکن، از نظریه هانت-ریچاردز استفاده می‌شود. مطابق این نظریه،  $C_D(\alpha)$  به ازای تمام مقادیر  $\alpha$ ، برابر یک است ولی مقدار  $C_L(\alpha)$  به ازای  $\alpha \geq 0$  برابر  $-0.16$  و  $\alpha < 0$  برابر  $0.16$  فرض می‌گردد. با توجه به موارد فوق، رابطه (۸) را می‌توان بصورت رابطه دو ضابطه‌ای (۹) نشان داد که در آن  $f(y^*)$  یک تابع غیر خطی بر حسب  $y^*$  است. شکل ۳،  $f(y^*)$  را بر حسب  $y^*$  نشان می‌دهد.

$$f(y^*) = \begin{cases} \alpha < 0 \\ \frac{1}{4} \rho d \sqrt{(v - y^* \sin \theta_0)^2 + (y^* \cos \theta_0)^2} \times \\ ((y^* \cos \theta_0) - 0.16(v - y^* \sin \theta_0)) \\ \alpha \geq 0 \\ \frac{1}{4} \rho d \sqrt{(v - y^* \sin \theta_0)^2 + (y^* \cos \theta_0)^2} \times \\ ((y^* \cos \theta_0) + 0.16(v - y^* \sin \theta_0)) \end{cases} \quad (9)$$

حال می‌توان از روابط فوق استفاده نموده و هادی‌های منفرد خطوط را تحلیل کرد که در ذیل نتایج شبیه‌سازی انجام شده بر روی یک اسپن نمونه بررسی می‌گردد. نکته حائز اهمیت این است که بیشتر نوسانات گالوپینگ در یک اسپن، با یک، دو و یا چند حلقه رخ می‌دهد و مشاهدات



(ب)



(الف)

شکل ۵: (الف) جابجایی عمودی حالت ماندگار هادی بر حسب سرعت باد، (ب) فرکانس ماندگار نوسان گالوپینگ هادی بر حسب سرعت باد.

در تحلیل تابع توصیفی فرض می‌شود که تنها مولفه هارمونی اصلی خروجی اهمیت دارد. چنین فرضی اغلب معتبر است. زیرا دامنه هارمونی‌های بالاتر در خروجی عنصر غیرخطی، اغلب از دامنه مولفه هارمونی اصلی کوچکتر است. علاوه بر آن، اکثر سیستم‌های کنترل خطی، فیلترهای پائین‌گذر می‌باشند. در نتیجه هارمونی‌های بالاتر آنها، نسبت به مولفه‌های هارمونی اصلی، بیشتر تضعیف می‌شوند. لذا فقط اولین هارمونیک  $u(t)$  از میان  $G(s)$  می‌گذرد و با فیدبک به سوی  $f$  بر می‌گردد.

تابع توصیفی یک عنصر غیرخطی  $(f(e))$  بصورت نسبت مختلط هارمونی اصلی خروجی به ورودی تعریف می‌شود. بدین منظور، برای محاسبه تابع توصیفی عنصر غیرخطی فوق، باید مولفه هارمونی اصلی خروجی بدست آید. اگر سیگنال  $e(t) = E_m \sin \omega t$  به عنصر غیرخطی اعمال شود، خروجی  $u(t)$  می‌تواند توسط بسط سری فوریه به صورت رابطه (۱۰) ارائه شود.

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (10)$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

که در آن:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (11)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin n\omega t d(\omega t)$$

$$u_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{b_n} \right)$$

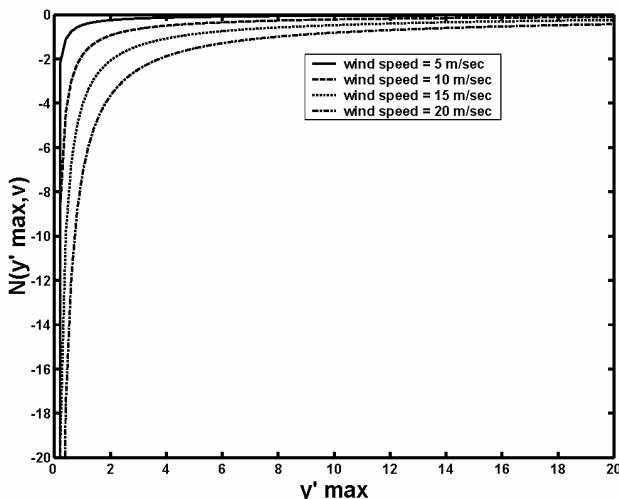
چنانچه عنصر غیر خطی، متقارن باشد  $a_0 = 0$  خواهد شد. در نتیجه مطابق تعریف تابع توصیفی، می‌توان آن را چنین نوشت:

$$N = \frac{u_n \angle \varphi_n}{E_m \angle \omega} = \frac{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}{E_m} \angle \left( \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{b_n} \right) \right) \quad (12)$$

با توجه به این شکل، دامنه نوسان در مد سوم به مراتب 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. زیرا 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، در مد اول دارای دامنه جهش هادی حدود ۲/۴۴ متر بوده که نتیجه شبیه‌سازی با این مقدار توافق خوبی را از خود نشان داده و دقت مدل ارائه شده را به نحو بسیار مطلوبی نمایان می‌سازد. از طرف دیگر این شکل نشان می‌دهد که در مدهای مختلف، دامنه ماندگار سرعت عمودی هادی، ۳/۸۹ متر بر ثانیه می‌باشد. 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 ۵ میزان جابجایی و فرکانس نوسانات حالت ماندگار هادی را بر حسب تغییرات سرعت باد و در مدهای اول و سوم نشان می‌دهد [۹].

### ۳-۲ استفاده از روش تابع توصیفی<sup>۱</sup>

یکی از روش‌های تحلیلی و طراحی سیستم‌های کنترل غیر خطی، خطی‌سازی با استفاده از روش تابع توصیفی است. به کمک این روش، می‌توان بسیاری از سیستم‌های کنترل غیرخطی ساده را از نظر فرکانسی بررسی نمود. این روش مشابه روش موازنه انرژی، مبتنی بر موازنه فرکانس هارمونیک در سیستم‌های غیر خطی و دینامیکی است. لذا به آن، روش موازنه انرژی نیز گفته می‌شود. روش تابع توصیفی، برای سیستم‌هایی همانند شکل ۶ که در آن  $G$  یک عنصر دینامیک خطی است، قابل اجرا است. مطابق این ایده، فرض می‌شود که سیگنال ورودی عنصر غیر خطی، یک سیگنال سینوسی به شکل  $e(t) = E_m \sin \omega t$  باشد. خروجی عنصر غیرخطی در حالت کلی سینوسی نیست. همچنین فرض می‌شود که خروجی متناوب است و دوره تناوب آن، همان دوره تناوب ورودی است. نکته مهم این است که خروجی، علاوه بر فرکانس اصلی، فرکانس‌های بالاتری نیز دارد.



شکل ۷: تغییرات  $N(y^*_{max}, v)$  بر حسب سرعت عمودی هادی.

$$S^2 + \left(\frac{K_1 + N(y^*_{max}, v)}{m}\right)S + \frac{T}{m} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 = 0 \quad (17)$$

در رابطه فوق به وضوح مشخص است که نوسانات در شرایط زیر اتفاق می‌افتند:

$$N(y^*_{max}, v) = -k_1 \quad (18)$$

با توجه به رابطه (۱۸) از آنجایی که  $k_1$  مثبت است، مقادیر منفی  $N(y^*_{max}, v)$  جهت نوسانی بودن سیستم لازم است. شکل ۷ تغییرات  $N(y^*_{max}, v)$  را بر حسب  $y^*_{max}$  در سرعت‌های مختلف باد، بر روی سیستم مورد مطالعه که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است نشان می‌دهد. حال اگر در سرعت باد مفروض  $V_0$ ، رابطه (۱۹) برقرار باشد، یک سیکل حدی با فرکانس  $\omega$  و دامنه سرعت  $\dot{y}_{max}$  بوجود خواهد آمد. مقدار  $\omega$  با توجه به روابط بالا و مطابق رابطه (۲۰) قابل محاسبه می‌باشد و همانطور که مشخص است تنها به کشش هادی، جرم هادی، طول اسپین و شماره مد نوسانی بستگی دارد و به سرعت باد و قطر هادی وابسته نیست.

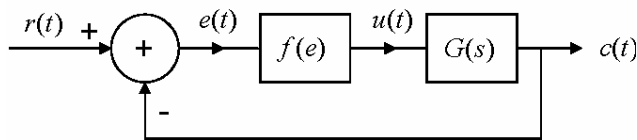
$$N(y^*_{max}, v) = -k_1 \quad (19)$$

$$s = \pm j \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{m}} = \pm j\omega_0 \quad (20)$$

با توجه به روابط فوق و در اسپین مورد مطالعه مقدار فرکانس زاویه‌ای حالت ماندگار نوسانات  $1/627$  رادیان بر ثانیه خواهد شد که فرکانس متناظر آن  $0/259$  هرتز است. حال با توجه به رابطه (۱۸) و شکل ۷ مقدار سرعت ماندگار هادی برابر  $3/685$  متر بر ثانیه و در نتیجه دامنه جابجایی عمودی هادی در حالت ماندگار حاصل تقسیم  $3/685$  بر  $1/627$  یعنی  $2/27$  متر خواهد شد. این نتیجه با مقادیر بدست آمده از طریق شبیه‌سازی مستقیم و همچنین مشاهدات میدانی که به ترتیب  $2/4$  و  $2/44$  متر بوده‌اند، نزدیک است که توافق مناسب و خوب این روش را نشان می‌دهد.

#### ۴- مدل الکتریکی جدید برای نوسان گالوپینگ

در این قسمت با توجه به اینکه  $|y^*|/v \ll 1$  و همچنین با استفاده از تقریب ریاضی مناسب، رابطه (۵) بصورت زیر تقریب زده می‌شود:



شکل ۶: سیستم غیرخطی جهت تشریح روش تابع توصیفی.

حال می‌توان بجای تابع  $(f(e))$  تابع  $N$  را قرار داد. اگر هارمونی‌های بالا به اندازه کافی تضعیف شوند، تابع توصیفی  $N$  را می‌توان همچون بهره متغیر حقیقی یا مختلط در نظر گرفت. آنگاه پاسخ فرکانسی حلقه بسته شکل ۶ چنین می‌شود:

$$\frac{C(j\omega)}{r(j\omega)} = \frac{NG(j\omega)}{1 + NG(j\omega)} \quad (13)$$

در نتیجه معادله مشخصه سیستم چنین است:

$$G(j\omega) = -\frac{1}{N} \quad (14)$$

حال اگر معادله (۱۴) برقرار باشد، یعنی مکانهای  $\frac{-1}{N}$  و  $G(j\omega)$  متقاطع باشند، خروجی سیستم، چرخه حدی<sup>۱</sup> یا نوسان دائمی خواهد داشت. نوسان دائمی با مقدار  $E_m$  روی مکان  $\frac{-1}{N}$  و مقدار  $\omega$  روی مکان  $G(j\omega)$  در محل تقاطع با منحنی  $\frac{-1}{N}$  مشخص می‌شود. (مکانها در صفحه اعداد مختلط مشخص می‌شوند).

لذا با استفاده از تئوری کنترل غیر خطی مذکور سیستم کنترلی مورد بحث (مدل غیرخطی گالوپینگ) آنالیز می‌گردد. حال فرض می‌شود که  $y^*$  در شکل ۲ بصورت معادله زیر باشد:

$$y^* = y^*_{max} \sin \omega t \quad (15)$$

از طرفی منحنی  $f(y^*)$  مذکور در شکل ۳ رامی‌توان با چهار پاره خط یعنی در نواحی  $0 < y^* \leq 0/6v$ ،  $0 < y^* \leq 0/6v$ ،  $0 < y^* \leq 0/6v$  و  $-0/6v < y^* \leq 0$  و  $y^* \leq -0/6v$  بر حسب  $y^*$  تقریب زد. از آنجایی که این تابع، تابع فرد با تقارن نیم موج است، طیف فرکانس  $u(t)$ ، فقط هارمونیک فرد را به همراه ضرایب داده شده در رابطه (۱۱) دارا می‌باشد. در نتیجه تابع توصیفی هارمونیک اول  $u(t)$ ، ممکن است بصورت زیر ارائه گردد:

$$N(y^*_{max}, v) = \frac{2}{\pi y^*_{max}} \left[ \frac{-143}{5000} \rho dv^2 \sqrt{\frac{25 y^*_{max}{}^2 - 9v^2}{y^*_{max}{}^2}} - \frac{281}{2000} \rho dv y^*_{max} \sin^{-1}\left(\frac{0/6v}{y^*_{max}}\right) - \frac{3843}{5000} \rho dv^2 + \frac{781}{2000} \rho dv \pi y^*_{max} \right] \quad (16)$$

نکته مهم در مورد رابطه فوق این است که  $N$  مستقل از  $\omega$  است اما سرعت باد ( $v$ ) و پارامترهایی نظیر قطر هادی ( $d$ ) در آن دخالت دارند. حال اگر در شکل ۲ بجای  $f$  مقدار  $N$  جایگزین شود، معادله مشخصه سیستم بصورت زیر در خواهد آمد:

## ۵- بررسی رفتار غیرخطی و محاسبه نقطه تعادل گالوپینگ

با توجه به معادله حرکت حاکم بر گالوپینگ هادی، معادله حالت سیستم را می‌توان بصورت رابطه (۲۴) ارائه کرد که در آن  $y = x_1$  و  $\dot{y} = x_2$  می‌باشد.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-1}{m}(k_1 x_1 + \frac{1}{\rho} \rho d \sqrt{x_1^2 + v^2} (-C_L(\alpha)v + C_D(\alpha)x_2) + T(\frac{n\pi}{l})^2 x_1) \end{cases} \quad (24)$$

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، مطابق نظریه هانت-ریچاردز، مقدار  $C_D(\alpha)$  به ازاء همه مقادیر  $\alpha$  برابر یک است ولی مقدار  $C_L(\alpha)$  متناظر به ازای  $x_2 > 0$  برابر  $0/6$  و  $x_2 \leq 0$  برابر  $-0/6$  می‌باشد.

حال مطابق تحلیل فاز-صفحه‌ای می‌توان منحنی مسیر معادلات مذکور را در صفحه  $x_1 - x_2$  (صفحه حالت یا صفحه فاز) رسم نمود (بر روی اسپن نمونه). بر روی این صفحه برای هر حالت سیستم نقاط متناظر وجود دارد. این روش برای تحلیل سیستم‌هایی با عوامل غیرخطی بسیار مفید است. منحنی مذکور برای اسپن مورد مطالعه، مطابق شکل ۱۰ خواهد شد. همانطوریکه از این شکل پیداست، این نوسانات به یک چرخه حدی می‌رسند.

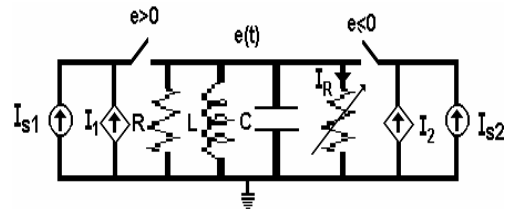
چرخه حدی نمایانگر نوسان حالت ماندگاری است که مسیر مزبور به آن نزدیک یا دور می‌شود. در سیستم مورد مطالعه، چرخه حدی پایدار است. چرا که اگر نقطه کاری در بیرون یا درون این چرخه حدی شروع شود، به چرخه حدی نزدیک می‌شود (با وجود باد ثابت). حال می‌توان بر پایه تئوری‌های کنترل غیر خطی، نقطه تعادل را برای سیستم مورد مطالعه تعیین نمود. بر این اساس، با صفر کردن  $\dot{x}_1$  و  $\dot{x}_2$ ، نقطه کار تعادل سیستم بدست می‌آید. لذا در سیستم مورد مطالعه، نقطه تعادل بصورت رابطه (۲۵) قابل محاسبه خواهد بود. با توجه به موارد فوق، در این سیستم، برای باد با سرعت ثابت ۱۰ متربرثانیه و در مد اول، نقطه تعادل دارای مقادیر  $x_1 = -0/253$  و  $x_2 = 0$  خواهد بود. این بدان معناست که تحت شرایط فوق، نقطه کار سیستم را باید به نقطه مذکور نزدیک کرد

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0/3 \rho d (\frac{vl}{n\pi})^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

این امر، با استفاده از دمپرها که ضرایب میرایی هادی را افزایش می‌دهند، صورت می‌پذیرد. با بکارگیری دمپرها، در مجموع ضریب میرایی هادی افزایش خواهد یافت. از طرفی دیگر، مطابق رابطه (۲۵) نقطه تعادل سیستم به سرعت باد، طول اسپن، چگالی هوا، قطر هادی، کشش هادی و شماره مد نوسانی بستگی دارد. شکل ۱۱ اندازه تغییرات جابجایی عمودی ماکزیموم حالت ماندگار هادی را برحسب تغییرات ضریب میرایی دمپر در اسپن مورد مطالعه و شرایط مذکور، نشان می‌دهد. مطابق این شکل، هر چه ضریب میرایی در واحد طول هادی افزایش می‌یابد، میزان نوسانات حالت ماندگار کاهش می‌یابد و در نهایت به حدود  $0/25$  متر می‌رسد. به عبارت دیگر با استفاده از دمپرها، حداکثر می‌توان دامنه گالوپینگ را به  $0/253$  متر رساند و بیشتر از این، نمی‌توان دامنه گالوپینگ را با باد ۱۰ متربرثانیه کاهش داد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، با توجه به مدل متمرکز سطح مقطع هادی و استخراج معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت گالوپینگ هادی که از دسته معادلات



شکل ۸: مدل الکتریکی نوسان گالوپینگ هادی.  
 $I_{S1} = +0/3 \rho d v^2$ ,  $I_{S2} = -0/3 \rho d v^2$ ,  
 $I_1 = 0/6 v [(\frac{1}{\rho} \frac{\rho d}{v}) e^{\gamma} - (\frac{1}{16} \frac{\rho d}{v^2}) e^{\epsilon} + (\frac{1}{33} \frac{\rho d}{v^5}) e^{\delta}]$   
 $I_2 = -0/6 v [(\frac{1}{\rho} \frac{\rho d}{v}) e^{\gamma} - (\frac{1}{16} \frac{\rho d}{v^2}) e^{\epsilon} + (\frac{1}{33} \frac{\rho d}{v^5}) e^{\delta}]$   
 $I_R = [(\frac{1}{\rho} \frac{\rho d}{v}) e^{\gamma} - (\frac{1}{16} \frac{\rho d}{v^2}) e^{\epsilon} + (\frac{1}{33} \frac{\rho d}{v^5}) e^{\delta}]$

$$\begin{aligned} m \dot{y}'' + k_1 y' + (\frac{1}{\rho} \rho d v) y'' + (\frac{1}{\rho} \rho d) y'' - (\frac{1}{16} \frac{\rho d}{v^2}) y'' + (\frac{1}{33} \frac{\rho d}{v^5}) y'' \\ - C_L(\alpha) [\frac{1}{\rho} \rho d v + (\frac{1}{\rho} \rho d) y'' - (\frac{1}{16} \frac{\rho d}{v^2}) y'' + (\frac{1}{33} \frac{\rho d}{v^5}) y''] + T(\frac{n\pi}{l})^2 y = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

حال می‌توان بجای بررسی یک سیستم مکانیکی، با استفاده از همانندی جریان-نیرو، سیستم را بصورت الکتریکی که کار تجربی با آن ساده‌تر است، مورد بررسی قرار داد. در این حالت جرم ( $m$ )، سرعت هادی ( $y'$ )، ثابت میرایی ( $k_1$ ) و ضریب اصطکاک ( $f$ ) به ترتیب با ظرفیت خازن ( $C$ )، ولتاژ ( $e$ )، عکس اندوکتانس ( $\frac{1}{L}$ ) و رسانایی ( $\frac{1}{R}$ ) جایگزین می‌گردند. بنابراین رابطه فوق را می‌توان بصورت رابطه الکتریکی زیر درآورد:

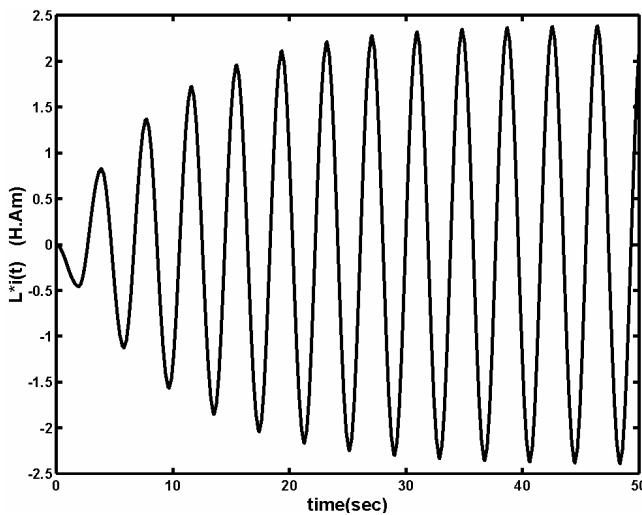
$$\begin{aligned} C \frac{de}{dt} + \frac{e}{R} + [(\frac{1}{\rho} \rho d) e^{\gamma} - (\frac{1}{16} \frac{\rho d}{v^2}) e^{\epsilon} + (\frac{1}{33} \frac{\rho d}{v^5}) e^{\delta}] - C_L(\alpha) [\frac{1}{\rho} \rho d v + \\ (\frac{1}{\rho} \rho d) e^{\gamma} - (\frac{1}{16} \frac{\rho d}{v^2}) e^{\epsilon} + (\frac{1}{33} \frac{\rho d}{v^5}) e^{\delta}] + \frac{1}{L} \int e(t) dt = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

در رابطه فوق  $\rho$ ،  $d$  و  $v$  اعداد ثابت هستند و در شرایط زیر برقرار است:

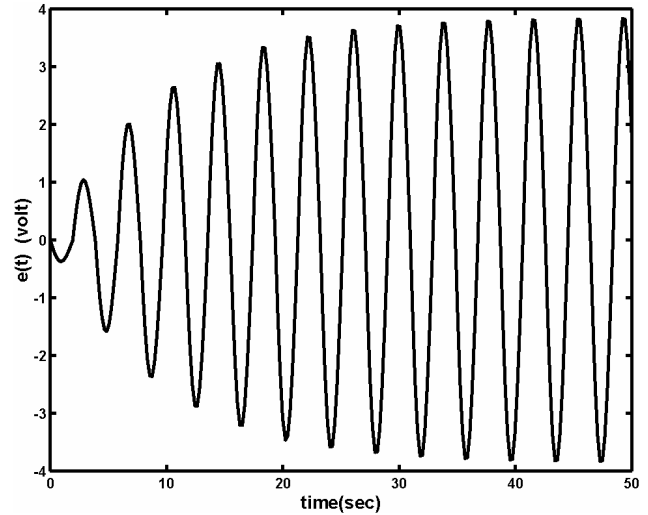
$$\begin{aligned} T(\frac{n\pi}{l})^2 &= \frac{1}{L} \\ k_1 + \frac{1}{\rho} \rho d v &= \frac{1}{R} \end{aligned} \quad (23)$$

$$m = C$$

لذا مدل گالوپینگ براساس پارامترهای الکتریکی را می‌توان با تقریب مناسبی، بصورت مدار غیرخطی نشان داد که در آن ولتاژ دو سر خازن، معادل سرعت عمودی هادی و همچنین جریان گذرنده از سلف معادل جابجایی عمودی هادی است. شکل ۸ مدل گالوپینگ یک اسپن را براساس پارامترهای الکتریکی نشان می‌دهد. مدار الکتریکی مذکور، با توجه به پارامترهای اسپن نمونه، به کمک نرم‌افزار Matlab مورد شبیه‌سازی کامپیوتری قرار گرفته که نتایج مربوطه در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این آنالیز، ولتاژ دو سر خازن (معادل سرعت عمودی هادی) و  $L$  برابر جریان گذرنده از سلف (معادل جابجایی عمودی هادی) به ترتیب در حالت ماندگار  $3/7$  متربرثانیه ( $3/7$  ولت) و  $2/4$  متر می‌باشد که به مشاهدات میدانی و همچنین مقدار محاسبه شده از روشهای قبلی بسیار نزدیک است و نشان از معادل سازی خوب آن است.

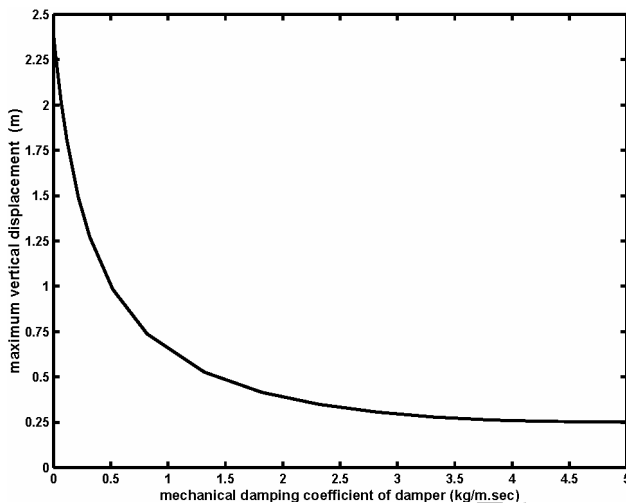


(ب)

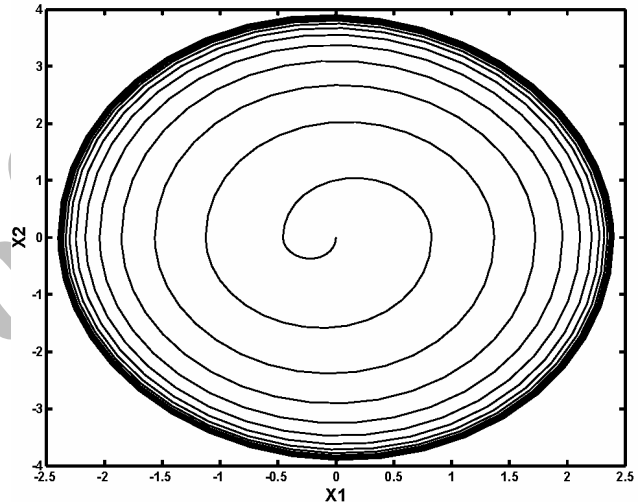


(الف)

شکل ۹: (الف) ولتاژ دو سر خازن معادل سرعت عمودی هادی (مد اول)، (ب)  $L$  برابر جریان گذرنده از سلف معادل جابجایی عمودی هادی (مد اول).



شکل ۱۱: تغییرات جابجایی عمودی هادی بر حسب ضریب میرایی دمپر (در مد اول با باد ثابت ۱۰ متربرثانیه).



شکل ۱۰: تصویر فاز - صفحه ای سیستم توصیف شده (مد اول).

شد با کمک دمپره‌های دارای ثابت میرایی مناسب، در اسپن مورد مطالعه و تحت باد ثابت ۱۰ متربرثانیه، می‌توان دامنه گالوپینگ را به  $۰/۲۵۳$  متر کاهش داد. بر طبق این محاسبات می‌توان با استفاده از دمپره‌های مناسب که ثابت میرایی آنها توسط شرکت‌های سازنده ارائه می‌گردد، دامنه گالوپینگ را به نقطه تعادل که تابعی از چگالی هوا، قطر هادی، کشش هادی، شماره مد نوسانی، سرعت باد و طول اسپن است نزدیک نمود. از طرفی دیگر نشان داده شد که فرکانس نوسان حالت ماندگار تابعی از طول اسپن، کشش هادی، جرم واحد طول هادی و شماره مد نوسانی است. بنابراین افزایش فرکانس عمودی، باعث کاهش دامنه جابجایی عمودی هادی می‌شود که یکی از روش‌های انجام آن، افزایش کشش هادی است.

## مراجع

- [1] J. C. R. Hunt and D. J. W. Richards, "Overhead line oscillations and the effect of aerodynamic damper," in *Proc. IEE.*, vol. 116, no. 11, pp. 1869-1874, Nov. 1969.
- [2] C. B. Rawlins, "Conductor galloping field observation analysis update," *ALCOA Conductor Products Company, Technical Note*, no. 26, Jan. 1986.

غیرخطی هستند، شبیه‌سازی‌های مستقیم انجام و بر روی نمونه مفروض، پیاده سازی و بررسی گردید. بدین ترتیب که با باد ۱۰ متربرثانیه، میزان دامنه نوسان گالوپینگ در مد اول به  $۲/۴$  متر و فرکانس آن به  $۰/۲۵۹$  هرتز رسید که این میزان به مشاهدات میدانی (حدود  $۲/۴۴$  متر) نزدیک است. نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی این است که افزایش سرعت باد، افزایش دامنه گالوپینگ را به همراه خواهد داشت. ضمناً دامنه مد سوم به مراتب کمتر از مد اول است و فرکانس سه حلقه، سه برابر سریعتر از تک حلقه رشد می‌کند. روش دیگر شبیه‌سازی شده در این مقاله، روش کنترلی تابع توصیفی است. این روش که جهت تخمین حداکثر دامنه جهش گالوپینگ استفاده شده، بر روی اسپن نمونه شبیه‌سازی گردیده و مقدار دامنه‌ای در حدود  $۲/۲۷$  متر را نتیجه داده که در قیاس با مشاهده میدانی، دقت مناسبی را از خود نشان داده است. از طرفی یک مدار معادل الکتریکی نیز برای نوسان گالوپینگ ارائه گردید که با شبیه‌سازی آن، با توجه به اطلاعات اسپن نمونه، دامنه گالوپینگ  $۲/۴$  متر بدست آمد که این مقدار به مشاهدات میدانی نزدیک و با پاسخ حاصله از شبیه‌سازی مستقیم عینیت دارد، که نشان از دقت خوب هر یک از حالات انجام شده است. در ضمن نقطه تعادل سیستم محاسبه گردیده است. بطوریکه مشاهده

**احمد غلامی** در سال ۱۳۵۳ دوره کارشناسی مهندسی برق قدرت را در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانید. در سال ۱۳۶۵ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت خود را از دانشگاه یومیست انگلستان اخذ نمود و دوره دکتری خود را در گرایش قدرت در سال ۱۳۶۸ از دانشگاه یومیست انگلستان دریافت نمود. وی پس از اتمام مقطع کارشناسی به عنوان فارغ التحصیل ممتاز در دانشگاه علم و صنعت ایران مشغول به فعالیت گردیده و در حال حاضر در مرتبه دانشیاری به فعالیت‌های علمی در زمینه عایق‌های الکتریکی و فشار قوی مشغول می‌باشد.

**محمد میرزایی** در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق قدرت خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. پس از آن، نامبرده به دوره دکترای مهندسی برق قدرت در دانشگاه علم و صنعت ایران وارد گردید و در این رشته مشغول به تحصیل است. ایشان هم‌اکنون، به فعالیت آموزشی در دانشگاه مازندران مشغول و زمینه‌های علمی و تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند طراحی خطوط انتقال نیرو، تجهیزات پست‌های فشار قوی و عایق می‌باشد.

- [3] 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, Apr. 2000.
- [4] R. Keutgen and J. -L. Lilien. "A new damper to solve galloping on bundled lines. theoretical background. laboratory and field results," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 260-265, Jan. 1998.
- [5] A. S. Richardson, "A study of galloping conductors on a 230 kV transmission line", *Electric Power System Research 21*, pp. 43-55, 1991.
- [6] T. Nojima, M. Shimizu, I. Ogi, T. Okumura, K. Nagatomi, and H. Ito, "Development of galloping endurance design for extra large 6-conductor bundle spacers by the experience of the full scale 500 kV test line," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1824-1829, Oct. 1997.
- [7] M. A. Baenziger, W. D. James, B. Wouters, and L. Li, "Dynamic load on transmission line structure due to galloping conductors," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 40-46, Jan. 1994.
- [8] *Transmission Line Reference Book* (Wind Induced Conductor Motion), EPRI Research Project 792.

[۹] احمد غلامی و محمد میرزایی، "مدلسازی دینامیکی نوسانات گالوپینگ خطوط انتقال هوایی"، مجموعه مقالات دهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، صفحات ۳۹۵-۳۸۷، ۱۳۸۱.

Archive of SID