

مدلسازی دینامیکی و پیش بینی دامنه گالوپینگ عمودی و پیچشی در خطوط هوایی

محمد میرزایی^(۱)

احمد غلامی^(۲)

(۱) دانشکده برق- دانشگاه علم و صنعت ایران (دانشکده فنی - دانشگاه مازندران)

(۲) دانشکده برق- دانشگاه علم و صنعت ایران

تهران - نارمک - دانشگاه علم و صنعت ایران- دانشکده برق- فاکس: ۷۴۵۴۰۵۵

کلمات کلیدی: مدلسازی، نوسانات مکانیکی، گالوپینگ، خطوط انتقال هوایی

چکیده:

یکی از نوسانات مکانیکی خطوط انتقال نیروی هوایی، گالوپینگ می باشد که تخمین میزان دامنه آن، نقش مهمی در تعیین حد مجاز فاصله فازها با یکدیگر و همچنین فاز با زمین دارد. اصولاً پدیده گالوپینگ به نوسانات عمودی هادی اطلاق می گردد، اما ممکن است این پدیده با حرکت پیچشی نیز توأم باشد.

در این مقاله، ضمن تشریح نوسان گالوپینگ، مدل دینامیکی برای هادی های منفرد که در جهات عمودی و پیچشی نوسان می نمایند ارائه و معادلات حالت بدست می آید. سپس با توجه به معادلات مذکور نرم افزاری تهیه و در این مقاله بدان اشاره می گردد. در نتیجه به کمک نرم افزار تهیه شده، می توان چگونگی حرکات هادی در جهات عمودی و پیچشی و همچنین میزان ماکزیموم دامنه و همچنین فرکانس هر یک از حرکات را بصورت دقیق محاسبه و پیش بینی نمود.

۱) مقدمه

یکی از پارامترهای مهم مکانیکی در تعیین حد مجاز فاصله فاز تا فاز و یا فاز با زمین، نوسانات هادی ها است. یکی از انواع این نوسانات، گالوپینگ بوده که دارای فرکانس کم ($0.1-0.3$ هرتز) و دامنه بالا (حتی در حدود فلش اسپین) می باشد. نوسان گالوپینگ به علت غیر متقارن شدن سطح مقطع هادی (به واسطه یخ) که نتیجه آن، اعمال نیروهای آیرودینامیکی پسا (Drag) و برا (Lift) بر روی هادی است، رخ داده و در پی آن نوسان عمودی هادی با دامنه بالا و فرکانس کم و همچنین نوسان پیچشی ایجاد می گردد. وقتی این دامنه به اندازه کافی بزرگ باشد، می تواند باعث تخلیه الکتریکی، عملکرد بریکرها، افزایش فلش اسپین، برخورد فازهای مجاور با یکدیگر و یا با سیم محافظ، خرابی و آسیب هادی ها شود. در ضمن، به علت نیروهای آیرودینامیکی ناشی از باد و یخ، کشش زیادی بر روی هادی ایجاد شده که می تواند آن را در محل اتصال به کلمپ مقرر، دچار خوردگی نماید و موجب رشته رشته شدن هادی و خرابی دکل ها شود. علاوه بر موارد فوق، این پدیده، بارگذاری

۲) تحلیل نوسان عمودی و پیچشی هادی

هادی در یک اسپن می تواند بصورت یک میله صلب آویزان از فنر و دمپرهایی مدل گردیده و حرکات عمودی و پیچشی به شرح ذیل را تحمل نماید:

۱-۲) نوسان عمودی هادی

گالوپینگ به علت اعمال نیروهای برا و پسا بر سطح مقطع غیرمقارن هادی، می تواند ایجاد شود. از آنجایی که نیروی آیرودینامیکی برا بر حسب زاویه حمله (α) متغیر است، 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 می افتد. به عبارت کلی در شرایط ذیل، گالوپینگ رخ می دهد. در روابط زیر L ، D ، $c_L(\alpha)$ و $c_D(\alpha)$ به ترتیب نیروی برا، نیروی پسا، ضریب آیرودینامیکی برا و ضریب آیرودینامیکی پسا است.

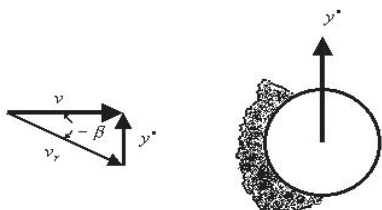
$$\frac{dL}{d\alpha} + D \leq 0 \quad (1)$$

$$\frac{dc_L}{d\alpha} + c_D \leq 0 \quad (2)$$

(معیار Denhartog)

در روابط فوق α زاویه حمله باد بوده که با توجه به شکل (۱) و از رابطه (۳) می تواند بدست آید. در این رابطه، y^* سرعت هادی، v سرعت باد و v_r سرعت ظاهری باد به هادی است.

$$\alpha = \frac{-y^*}{v} \quad (3)$$



شکل (۱): حرکت هادی با توجه به سرعت ظاهری باد

۲-۲) حرکت پیچشی هادی

طبق معیار Denhartog جهت تقویت نوسان گالوپینگ، نیروی برای متغیر سینوسی مورد نیاز است تا بتواند با تغییر در زاویه حمله نوسان عمودی هادی را موجب

دینامیکی شدیدی را بر روی هادی ها، یراق آلات مقره ها، جامپرها، کلمپ ها، اسپسرها، دمپره های استوک بریج، کراس آرم ها ایجاد کرده و می تواند باعث شل شدن پیچ های دکل شود که حاصل موارد فوق، خاموشی خط و خسارت برای شرکت های برق است.

تاکنون مطالعات و تحقیقات فراوانی در مورد گالوپینگ، تخمین دامنه آن و طرق مختلف مقابله با آن انجام شده است. در [۱] Rawlins، گالوپینگ هادی های منفرد خطوط هوایی را با توجه به مشاهدات میدانی، تحلیل و تعیین نموده است. علاوه بر این مورد، هدف اصلی در آنالیز گالوپینگ، پیش بینی حداکثر دامنه نوسان آن می باشد. لذا می توان با کمک روابطی که از مشاهدات میدانی گالوپ خطوط منفرد و باندل بدست می آید، دامنه گالوپینگ را پیش بینی نمود [۲]. همچنین می توان ماکزیمم دامنه گالوپ را بر اساس اطلاعات حاصل از مدل های ریاضی غیرخطی که بر حرکت دینامیکی هادی استوار است، به روش های متفاوت محاسبه کرد. یکی از این روش ها، بر اساس اصل موازنه انرژی است که به وسیله Richardson و همچنین Hunt و Richards بکار گرفته شده است [۳، ۴]. از دیگر روش ها، استفاده از انتگرال گیری مستقیم از معادلات دینامیکی حرکت هادی است که به صورت تحلیل عددی صورت می گیرد [۵]. همچنین در [۶] از روش تابع توصیفی برای تخمین ماکزیمم دامنه گالوپینگ عمودی هادی استفاده شده است.

در این مقاله، مدل دینامیکی متمرکز از سطح مقطع هادی ارائه و در مدلسازی مربوطه، در نظر گرفته می شود. سپس با استفاده از معادلات حاکم بر نوسانات عمودی و پیچشی هادی در هنگام گالوپینگ، از آن برای شبیه سازی و تهیه نرم افزار استفاده گردیده است. در نتیجه با اجرای این برنامه نرم افزاری، می توان چگونگی حرکات هادی در جهات عمودی و پیچشی و همچنین ماکزیمم دامنه آنها بهمراه فرکانس هایشان را تخمین و تعیین نمود.

شود. علیرغم نوسان عمودی هادی، نوسان پیچشی نیز اتفاق افتاده (بطور همزمان) که زاویه حمله را می تواند به صورت زیر تغییر دهد:

$$\alpha = \frac{-\dot{y}}{v} + \theta \quad (4)$$

(θ جابجایی پیچشی هادی است.)

به کمک روابط ریاضی و با محاسبه انرژی اعمالی به هادی در یک پریودیک، نشان داده می شود که انرژی ورودی باد به هادی، ناشی از حرکت پیچشی، صفر می باشد. یعنی حرکت θ بر مقدار انرژی ورودی باد به هادی تاثیر نمی گذارد، بلکه فقط می تواند فرکانس عمودی نوسان را اندکی تغییر می دهد [۷]. به عبارتی، هنگامی که یخ بر روی هادی می نشیند و سطح مقطع هادی غیر متقارن می گردد مرکز ثقل هادی تغییر مکان یافته که حاصلضرب این فاصله در جرم واحد طول هادی، پاسخ پیچشی هادی را ایجاد می نماید که فرکانس طبیعی آن چند برابر فرکانس طبیعی عمودی خواهد شد.

۳) روش های تخمین ماکزیمم دامنه گالوپینگ

تخمین ماکزیمم دامنه گالوپ، نیازمند به دانش وسیع در مورد خواص آیرودینامیکی اسپن و همچنین خواص آیرودینامیکی هادی یخ زده می باشد. در ذیل برخی از روش های موجود معرفی می شوند:

• روش Hunt-Richards

مطابق این روش، حداکثر دامنه گالوپ هادی در بدترین شرایط، با توجه به خواص دینامیکی اسپن و مسائل آیرودینامیکی تخمین زده می شود. مطابق این حالت $c_L(\alpha)$ برای $\alpha < 0$ برابر 0.6 و $\alpha > 0$ برابر $0.6 - \alpha$ است و همچنین $c_D(\alpha)$ برای تمام مقادیر α برابر واحد است. لذا مقدار پیک تا پیک گالوپ عمودی هادی مطابق رابطه ذیل قابل محاسبه است:

$$y_{\max} = 0.26 \frac{v}{f} \quad (5)$$

که در آن، v سرعت باد، f فرکانس و y_{\max} مقدار پیک تا پیک گالوپ هادی می باشد [۷].

• روش موازنه انرژی

با استفاده از روش موازنه انرژی، ماکزیمم دامنه گالوپ هادی های منفرد و باندل به ترتیب مطابق روابط (۶) و (۷) بدست می آیند:

$$\frac{\omega y_m}{v} = 0.8 \quad (6)$$

$$\frac{\omega y_m}{v} = 0.2 \quad (7)$$

در روابط فوق، ω فرکانس زاویه ای نوسان، y_m ماکزیمم دامنه گالوپ و v سرعت باد است.

• به کمک مشاهدات میدانی

در این روش به کمک مشاهدات میدانی، ماکزیمم دامنه گالوپ هادی های منفرد و باندل مطابق روابط (۸) و (۹) قابل محاسبه خواهند بود. در این روابط، y_m ماکزیمم دامنه گالوپ، d قطر هادی و F فلش بارگذاری است [۲].

$$y_m = 40 d \ln \left(\frac{8F}{50d} \right) \quad (8)$$

$$y_m = 85 d \ln \left(\frac{8F}{500d} \right) \quad (9)$$

• به کمک معادلات حرکت هادی

از دیگر روش های مفید، کارآمد و دقیق برای محاسبه دامنه نوسان هادی، آنالیز و تحلیل معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت هادی است. در این روش ها که نمونه ای از آن در این مقاله ارائه می گردد، به کمک معادلات حرکت حاکم بر مدل مفروضی از هادی و با شبیه سازی کامپیوتری میزان دامنه هادی در جهات مختلف محاسبه می شود [۸،۹].

۴) مدلسازی دینامیکی حرکت هادی

از آنجایی که پدیده گالوپینگ در مکان و زمان خاص رخ داده و پدیده ای گذرا است، لذا مطالعه عملی و مشاهده عینی آن در طبیعت مشکل است. بنابراین لازم است که این پدیده را با بکارگیری روابط آیرودینامیکی، خواص هادی، خواص اسپن و شرایط محیطی و به کمک روابط ریاضی مدل نمود تا بتوان حداکثر دامنه نوسان

(۱۰)

$$(m + m_i)y'' + k_1 y' + T \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 y + \frac{1}{2} \rho d ((v - \sin \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta'))^2 + (\cos \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta'))^2)^{0.5} \times (-c_L(\alpha)(v - \sin \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta')) + c_D(\alpha)(\cos \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta'))) + m_i r \cos \theta_0 \theta'' = 0$$

(۱۱)

$$J\theta'' + k_3 \theta' + (P \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 - m_i r g \sin \theta_0) \theta - \frac{1}{2} \rho d^2 ((v - \sin \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta'))^2 + (\cos \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta'))^2) \times c_M(\alpha) + m_i r \cos \theta_0 y'' = 0$$

تعریف هر یک از پارامترهای فوق، در جدول ضمیمه آمده است.

روابط فوق، معادلات غیرخطی محسوب شده که توسط آنها می توان هر نوسان خاصی را با توجه به شرایط اولیه آن مشخص کرد. روش شبیه سازی کامپیوتری در تحلیل و آنالیز سیستم های غیر خطی، از جمله سیستم مورد مطالعه بسیار مفید و کارآمد است. لذا می توان به کمک معادلات حاصله و با آنالیز آن جهت تهیه نرم افزار مربوطه که در این مقاله بدان اشاره شده است، استفاده نمود. با توجه به موارد مذکور و در نظر گرفتن شکل (۳)، زاویه حمله باد به هادی (α) مطابق رابطه زیر خواهد بود:

(۱۲)

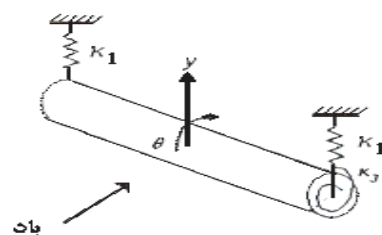
$$\alpha = -\tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta)}{v - \sin \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta)} \right)$$

بنابراین معادلات (۱۱) و (۱۲) را می توان بصورت بلوک دیاگرام کنترلی ساده ای مطابق شکل (۴) نشان داد که در آن:

(۱۳)

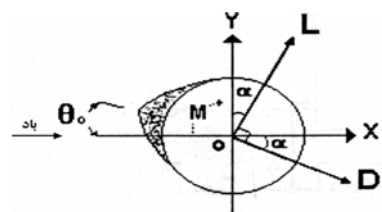
$$G_1(s) = \frac{(1/(m + m_i))s}{s^2 + (k_1/(m + m_i))s + T/(m + m_i)(n\pi/l)^2}$$

هادی را تخمین و از نتیجه آن در طراحی خطوط استفاده نمود. در این مقاله از مدل جرم متمرکز هادی استفاده و مدل دینامیکی آن با در نظر گرفتن حرکت هادی در دو جهت عمودی و پیچشی بدست می آید. در این مدل سازی، هادی به مانند یک میله صلب که از فنر و دمپرها آویزان است در نظر گرفته می شود که این فنر و دمپرها، حرکات عمودی و پیچشی هادی را تحمل می نمایند. این مدل در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل جرم متمرکز هادی در یک اسپن

در شکل فوق، هادی در دو جهت عمودی و پیچشی توسط دو دمپر با ضریب دمپینگ k_1 و k_2 و همچنین فنرها حمایت می گردد. در شکل (۳) نمایی از سطح مقطع مدل دینامیکی هادی با پارامتر متمرکز که بر روی آن لایه ای از یخ نیز وجود دارد، نشان داده شده است. حال می توان معادلات حرکت حاکم بر این سیستم را با فرض اینکه فقط به نیروهای آیرودینامیکی وابسته باشند بصورت روابط (۱۰) و (۱۱) ارائه نمود. نکته قابل ذکر اینکه، در این مدل سختی سیستم ناچیز فرض گردیده است.



$$v - \sin \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta')$$

$$v_r \cos \theta_0 (y' + (r + t_i)\theta')$$

شکل (۳): مدل سطح مقطع هادی با لایه یخ، با توجه به حرکات عمودی و پیچشی

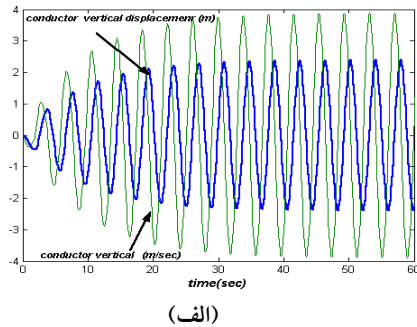
۶) انواع نوسان گالوپینگ

۶-۱) گالوپینگ با باد

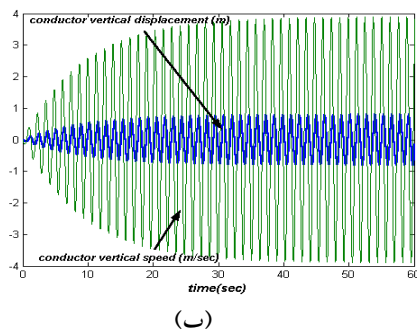
در این حالت فرض می شود که بر روی هادی هیچ لایه یخی نبوده، زاویه حالت سکون هادی (θ_0) برابر صفر و همچنین سرعت باد مقدار ثابت ۱۰ متربرثانیه را داشته باشد. در این شرایط میزان جابجایی و سرعت عمودی هادی در مدهای اول و سوم و در جهات عمودی و پیچشی مطابق شکل های (۶) و (۷) خواهد بود.

با اجرای نرم افزار، جابجایی عمودی ماندگار هادی در مدهای اول و سوم به ترتیب برابر $2/4$ و $0/8$ متر نشان داده می شود. این نتیجه نشان می دهد که اطلاعات بدست آمده، با آنچه که از روش های تخمین دامنه گالوپینگ با یک درجه آزادی و مشاهدات میدانی بدست آمده ($2/44$ متربرده)، سازگاری مناسبی دارد [۶، ۱۰، ۱۱]. همچنین در مدهای مختلف، دامنه ماندگار سرعت عمودی هادی (γ^0) برابر $3/9$ متربرثانیه می باشد. لذا تغییر مدهای نوسانی، تاثیری بر دامنه سرعت عمودی هادی نداشته، بلکه فقط فرکانس نوسانات را تغییر می دهد. ضمناً جابجایی و سرعت پیچشی هادی در حالت ماندگار و در مد اول به ترتیب $0/438$ رادیان (۲۵ درجه) و $0/878$ رادیان بر ثانیه ($50/3$ درجه بر ثانیه) می باشد. بدین ترتیب در حالت ماندگار نوسانات، فرکانس عمودی (f_v) و پیچشی (f_θ) هادی به ترتیب برابر $0/259$ و $0/319$ هرتز است و در نتیجه $\frac{f_\theta}{f_v} = 1/232$ می باشد.

با توجه به موارد فوق، شکل (۸) تغییرات جابجایی عمودی هادی را بر حسب جابجایی پیچشی (در حالت ماندگار) و در مد اول، در صفحه $\gamma - \theta$ نشان می دهد. مطابق این شکل می توان در هر مقدار تغییرات عمودی هادی، مقدار تغییرات پیچشی را محاسبه نمود.



(الف)



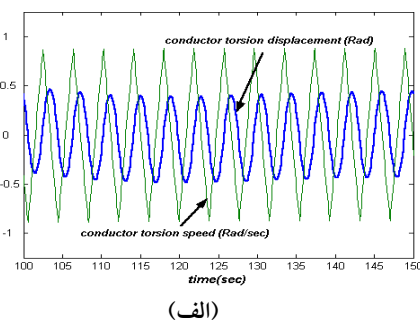
(ب)

شکل (۶): الف) تغییرات جابجایی و سرعت عمودی هادی

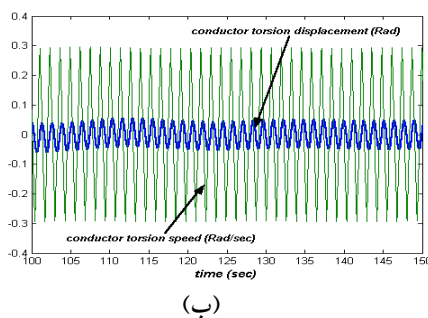
بر حسب زمان در مد اول

ب) تغییرات جابجایی و سرعت عمودی هادی

بر حسب زمان در مد سوم



(الف)



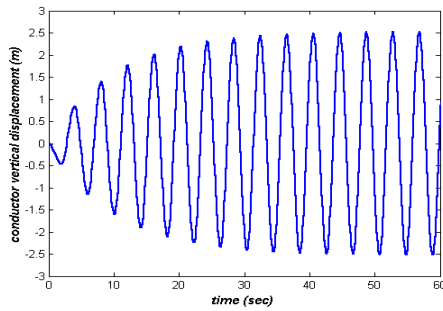
(ب)

شکل (۷): الف) تغییرات جابجایی و سرعت پیچشی هادی بر

حسب زمان در مد اول

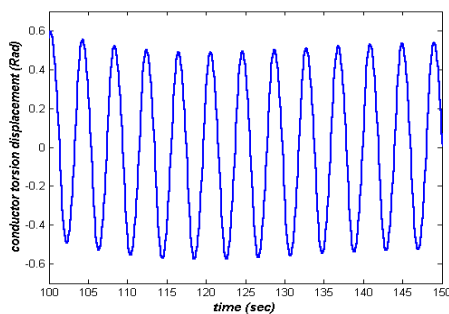
ب) تغییرات جابجایی و سرعت پیچشی

هادی بر حسب زمان در مد سوم



شکل (۹): جابجایی عمودی هادی بر حسب زمان با باد ثابت ۱۰ متر بر ثانیه و زاویه حالت سکون صفر

$$(n = 1) \text{ و } m_i = 0.17 \text{ Kg/m} \text{ و } t_i = 5 \text{ mm}$$

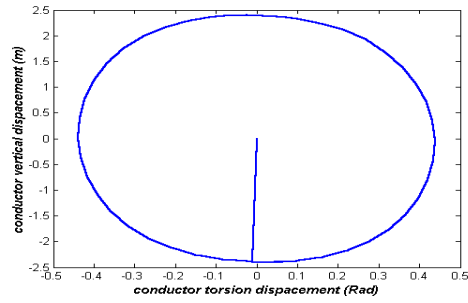


شکل (۱۰): جابجایی پیچشی هادی بر حسب زمان با باد ثابت ۱۰ متر بر ثانیه و زاویه حالت سکون صفر

$$(n = 1) \text{ و } m_i = 0.17 \text{ Kg/m} \text{ و } t_i = 5 \text{ mm}$$

پیچشی برای هادی گالوپ که معادلات آنها بصورت غیرخطی هستند، نرم افزاری تهیه و بر روی اسپن نمونه واقعی پیاده سازی گردیده است. بدین ترتیب که با باد ثابت ۱۰ متر بر ثانیه و بدون یخ در مد اول، میزان دامنه نوسانات عمودی و پیچشی گالوپینگ به ترتیب برابر ۲/۴ متر و ۰/۴۳۸ رادیان بر ثانیه نشان داده شده است. همچنین دامنه نوسان در مد سوم به مراتب کمتر از مد اول و فرکانس سه حلقه سه برابر سریعتر از تک حلقه رشد نموده که نتایج حاصله، با مشاهدات میدانی و نتایج تحقیقاتی قبلی مطابقت داشته و نشان از دقت و صحت این مدلسازی دارد.

در حالت دیگر، جابجایی عمودی و پیچشی هادی با وجود باد ۱۰ متر بر ثانیه و یخ ۰/۱۷ کیلوگرم بر متر (با ضخامت ۵ میلی متر) به ترتیب برابر ۲/۵۲۹ متر و ۰/۵۳۷ رادیان بدست آمد. نکته قابل توجه اینکه، این



شکل (۸): تغییرات جابجایی عمودی هادی بر حسب تغییرات جابجایی پیچشی در مد اول (در حالت ماندگار)

۶-۲) گالوپینگ با یخ و باد

در قسمت قبل، فرض بر این بود که هیچ لایه یخی بر روی هادی تشکیل نشده و سرعت وزش باد ثابت و ممتد باشد. حال اگر بر روی هادی مورد مطالعه، مقداری یخ به جرم ۰/۱۷ کیلوگرم بر متر و ضخامت ۵ میلی متر نشسته باشد، تحت شرایطی که زاویه حالت سکون هادی (θ_0) صفر و باد نیز با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و بطور ممتد بوزد و همچنین یخ نیز از روی هادی نریزد، با اجرای این برنامه میزان جابجایی عمودی و پیچشی هادی در مد اول مطابق شکل های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این حالت، جابجایی عمودی و پیچشی هادی در حالت ماندگار، به ترتیب ۲/۵۲۹ متر و ۰/۵۳۷ رادیان (۳۰/۸ درجه) می باشد. ملاحظه می شود که با وجود یخ بر روی هادی که نتیجه آن افزایش جرم و قطر هادی است، میزان جابجایی عمودی و پیچشی، به مقدار ناچیزی افزایش می یابد.

نکته قابل توجه اینکه، مقادیر محاسبه شده در شبیه سازی فوق، در مقایسه با نتایج بدست آمده از [۱۰، ۱۱، ۱۲] که با تقریب به روش تابع توصیفی محاسبه شده بود، به واقعیت نزدیکتر می باشد، که نشانگر مناسب بودن مدل و دقت آن است.

(۷) نتیجه گیری

در این مقاله، با توجه به مدل جرم متمرکز هادی و استخراج معادلات دیفرانسیل در دو جهت عمودی و

Trans. On Power Delivery, Vol.15, No.2, pp. 670-674, April 2000

[3] A.S.Richardson, "Design and Performance of An Aerodynamic

Antigalloping Device" Cigre, Paris, 1968, Paper, No.CSC-6-68-8

[4] 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.

[5] K.Goto and T.Koike, "A Numerical Calculation Method and Prevention of Galloping", Electr.Eng.Jpn. 97 (1997)

[6] R.I.Egbert, "Estimation of Maximum Amplitude of Conductor Galloping by Describing Function Analysis", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.1, No.1, pp. 251-257, January 1986

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

[8] 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.

[9] H.Wang, A.R.Elecrat and R.I.Egbert, "Modeling and Boundary Control of Conductor Galloping", Journal of Sound and Vibration, 161(2), pp.301-315, 1993

[۱۰] احمد غلامی، محمد میرزایی، "مدلسازی دینامیکی نوسانات گالوپینگ خطوط انتقال هوایی"، مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، جلد ۲۸، بهار و تابستان ۱۳۸۱، صفحه ۴۹-۵۷.

[۱۱] احمد غلامی، محمد میرزایی، "شبیه سازی انواع نوسانات جهشی هادی های منفرد و برآورد حداکثر دامنه آنها"، مجله مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، سال ۲۲، شماره ۱، شهریور ۱۳۸۲، صفحه ۴۷-۵۵.

[۱۲] احمد غلامی، محمد میرزایی، "بررسی نوسانات گالوپینگ در خطوط هوایی انتقال انرژی: مدلسازی، محاسبه نقطه تعادل و ارائه مدل الکتریکی"، مجله مهندسی برق و کامپیوتر ایران، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران، سال ۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۸۲، صفحه ۴۴-۳۷.

روش با روش تخمین گالوپ با یک درجه آزادی

مطابقت داشته و حتی می تواند زاویه پیچشی هادی را

نیز محاسبه نماید

۸ ضمیمه

جدول: تعریف پارامترهای اسپین نمونه و مقادیر

لازم برای شبیه سازی

پارامتر	تعریف	مقادیر لازم برای شبیه سازی
m	جرم واحد طول هادی (Kg/m)	۱/۶۲۸
m_i	جرم یخ در واحد طول هادی (Kg/m)	۰/۱۷
y	جابجایی عمودی هادی (m)	قابل محاسبه
y^{\bullet}	سرعت عمودی هادی (m/sec)	قابل محاسبه
k_1	ضریب دمپینگ عمودی هادی ($Kg/m.sec$)	۰/۱۸۲
T	کشش هادی (N)	۲۶۰۰۰
n	شماره مد نوسانی	متغیر
l	طول اسپین (m)	۲۴۴
ρ	چگالی هوا (Kg/m^3)	۱/۲۹۲۹
d	قطر هادی (mm)	۲۸/۱۴۲
v	سرعت باد (m/sec)	۱۰
θ_0	زاویه حالت سکون هادی (Rad)	متغیر
r	شعاع هادی (mm)	۱۴/۰۷۱
t_i	شعاع معادل ضخامت یخ (mm)	۵
θ	جابجایی پیچشی هادی (Rad)	قابل محاسبه
θ^{\bullet}	سرعت پیچش هادی (Rad/sec)	قابل محاسبه
J	ممان جرم قطبی اینرسی در واحد طول هادی ($Kg.m$)	۰/۰۳۰۳۷۰
k_3	ضریب دمپینگ پیچشی هادی ($Kg/m.sec$)	۰/۰۰۲۵۴۱
P	سختی پیچشی هادی در واحد طول ($N.m/Rad$)	۴۳۲
g	شتاب گرانش (m/sec^2)	۹/۸۱

مراجع

[1] C.B.Rawlins, "Conductor Galloping Field Observation Analysis Update", ALCOA Conductor Products Company, Technical Note No.26, Jan.1986.

[2] J.L.Lilien and D.G.Havard, "Galloping Data Base on Single and Bundle Conductors Prediction of Maximum Amplitude", IEEE