

## شبیه سازی انواع نوسانات جهشی هادیهای منفرد و برآورد حداکثر دامنه آنها

احمد غلامی\* و محمد میرزایی\*\*

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله ۸۰/۶/۲۵ - دریافت نسخه نهایی ۸۱/۱۰/۲۱)

**چکیده** - خطوط انتقال نیرو به علت عوامل مختلفی که عمدتاً الکتریکی و مکانیکی اند، تحت تأثیر قرار دارند. این عوامل می‌توانند باعث بروز اشکال در کار خطوط، اختلال در شبکه و حتی خروج خط شوند. در طراحی خطوط انتقال، همواره پس از انتخاب هادی مناسب و محاسبه فواصل فازی به لحاظ خصوصیات الکتریکی، آنها را از نظر مکانیکی هم مورد ارزیابی قرار می‌دهند. یکی از پارامترهای مهم مکانیکی در طراحی خط به عنوان عامل اصلی در تعیین فواصل فازی، نوسانات خط است. وزش بادهای تند یا ریزش یخ از روی هادیها یا وجود همزمان یخ و باد، ممکن است باعث بروز نوسانات گوناگون در هادی بشود. این نوسانات به سه دسته، موجی<sup>۱</sup>، جهشی<sup>۲</sup>، افقی<sup>۳</sup> (تاب خوردن) تقسیم بندی می‌شوند. نوسان موجی دارای فرکانس بالا (۵ تا ۱۰۰ هرتز) و دامنه‌ای کم (در حدود چند سانتی متر)، نوسان جهشی دارای فرکانس کم (۰/۱ تا ۰/۳ هرتز) و دامنه‌ای بالا (تا فلش اسپین) است. در ضمن نوسان افقی، به تاب خوردن هادی اطلاق می‌شود. در این مقاله، معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت هادی، بر اساس مدل جرم متمرکز سطح مقطع هادی استخراج و از آنها برای شبیه سازی انواع نوسانات جهشی استفاده می‌شود. بدین ترتیب می‌توان میزان دامنه نوسان جهشی را در هر شرایط محیطی برآورد کرد.

واژگان کلیدی: گالوپینگ - خطوط انتقال هوایی - هادیهای منفرد - مدل‌سازی

## Simulation of Single Conductors Galloping Oscillations and Estimation of their Maximum Amplitudes

A. Gholami and M. Mirzai

Department of Electrical Engineering, Iran, University of science of Technology

**Abstract:** *Overhead transmission lines are influenced by different factors which are mostly electrical and mechanical. These factors can cause problems for lines, distortions in network and outage of line. In designing transmission lines mechanical properties are evaluated after selecting a suitable conductor and clearance with regard to electrical properties. In lines designing, an important mechanical parameter for estimating of phase distance is oscillations. Strong wind or ice fall from conductor surfaces or simultaneous presence of ice and wind may cause different oscillations. These oscillations are classified to aeoliane, galloping, and swing. Aeoliane is of high frequency (5-100Hz) and low amplitude (about a few centimeters), galloping is of low frequency (0.1 to 0.3Hz) and high amplitude (about of span sagging), also swing is of horizontal oscillation. In this paper, the mechanism of conductor galloping oscillation and its different types are described. Also these oscillations are simulated on the typical span by personal computer.*

**Keywords:** *Galloping, Overhead transmission lines, Single conductors, Modeling*

\*\* دانشجوی دکترا

\* دانشیار

D	نیروی پسا (N)	m	جرم واحد طول هادی (kg/m)
L	نیرو برا (N)	$m_i$	جرم یخ در واحد طول هادی (kg/m)
$\rho$	چگالی هوا ( $\text{kg/m}^3$ )	y	جا به جایی عمودی هادی (m)
$V_r$	سرعت ظاهری باد بر هادی (m/sec)	$y^*$	سرعت عمودی هادی (m/sec)
f	فرکانس (Hz)	$y_{\max}$	پیک تا پیک جهش عمودی هادی (m)
d	قطر هادی (m)	$y_m$	حداکثر جهش هادی (m)
$C_D(\alpha)$	ضریب پسای آیرودینامیکی ( $\text{m}^{-1}$ )	v	سرعت باد (m/sec)
$C_L(\alpha)$	ضریب برای آیرودینامیکی ( $\text{m}^{-1}$ )	$\theta_0$	زاویه حالت سکون <sup>۱</sup> هادی (Rad)
l	طول هادی در یک اسپن (m)	F	فلش بار گذاری (m)
$k_1$	ضریب دمپینگ مکانیکی در واحد طول هادی (kg/m.sec)	T	کشش هادی (N)
n	شماره فرکانس هارمونیک یا شماره مد نرمال هادی		

## ۱- مقدمه

می‌شود. در نتیجه عوامل مذکور می‌توانند ضررهای اقتصادی شدیدی را به شرکت‌های برق تحمیل کنند [۱-۳]. لذا در این مقاله، با تشریح مکانیزم نوسان جهشی و روش‌های مختلف پیش بینی میزان دامنه آن، معادله حرکت عمودی هادی بررسی شده و با استفاده از این معادله، انواع مختلف نوسان جهشی هادی بر روی اسپن نمونه، مورد شبیه سازی رایانه ای قرار گرفته است. بدین ترتیب می‌توان در شرایط منطقه و با محاسبه میزان فلش هادی (و از طرفی با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی) فواصل فازی را به طور مناسب تنظیم کرد.

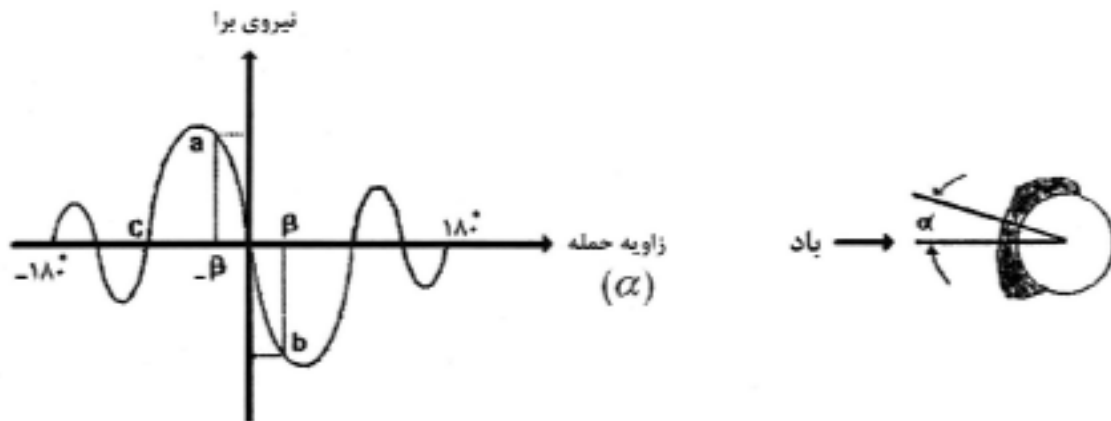
## ۲- مکانیزم نوسان جهشی هادی

اجسام معلق در هوا، تحت تاثیر نیروهای آیرودینامیکی برآ، پسا<sup>۲</sup> و یا ممان پیچشی<sup>۳</sup> قرار دارند که دو مورد نخست بر مرکز آیرودینامیکی سطح مقطع جسم تاثیر می‌گذارند. همچنین ممان پیچشی، باعث چرخشی هادی حول محور آن می‌شود. هادیهای لخت (بدون یخ) فقط تحت تاثیر نیروی پسای آیرودینامیکی قرار دارند و در صورتی که بر سطح هادی یخ بنشینند، به علت نامتقارن شدن سطح مقطع، نیروی برای

نوسان جهشی هادی در اثر ریزش یخ از روی سطح هادی، وزش بادهایی با سرعت بیش از ۷ متر بر ثانیه و یا هر دو عامل به وقوع می‌پیوندد. 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 دامنه ای زیاد (در حدود ۲/۵ تا ۱۵۰ برابر قطر هادی) است. گزارش‌های منتشر شده حاکی از آن است که دامنه جهش هادی ممکن است به میزان فلش اسپن و بالاتر از آن نیز برسد که عمدتاً به تخلیه‌های الکتریکی بین فازها و قطع موقت خطوط منجر می‌شود. شایان ذکر است که برآیند نیروهای ناشی از یخ و باد، باعث می‌شود تا کشش قابل توجهی بر هادی تحمیل شود که گاهی پارگی هادیها و تخریب برجها را در پی داشته باشد. علاوه بر آن، افزایش فلش هادی، به علت بار یخ، ممکن است موجب برخورد فاز با سیم محافظ و یا دیگر هادیها (در هنگام جای گذاری عمودی) بشود. علاوه بر موارد فوق، در صورت وقوع این نوسان، بارگذارهای دینامیکی شدیدی بر هادی، یراق آلات مقرره ها، جامپرها، اسپسرها، دمپرها و برجها اعمال



شکل ۱- نیروهای برا و پسا بر روی هادی با پوشش یخ



شکل ۲- تغییرات نیروی برای آیرودینامیکی بر حسب زاویه حمله

( $V$ ) و سرعت هادی ( $y^*$ ), سرعت ظاهری باد را به وجود می‌آورد که به طور متناوب و در محدوده معینی، به طرف بالا و پایین نوسان می‌نماید. شکل (۳) موقعیت بردار سرعت ظاهری باد را با توجه به سرعت رو به پایین و بالای هادی نشان می‌دهد.

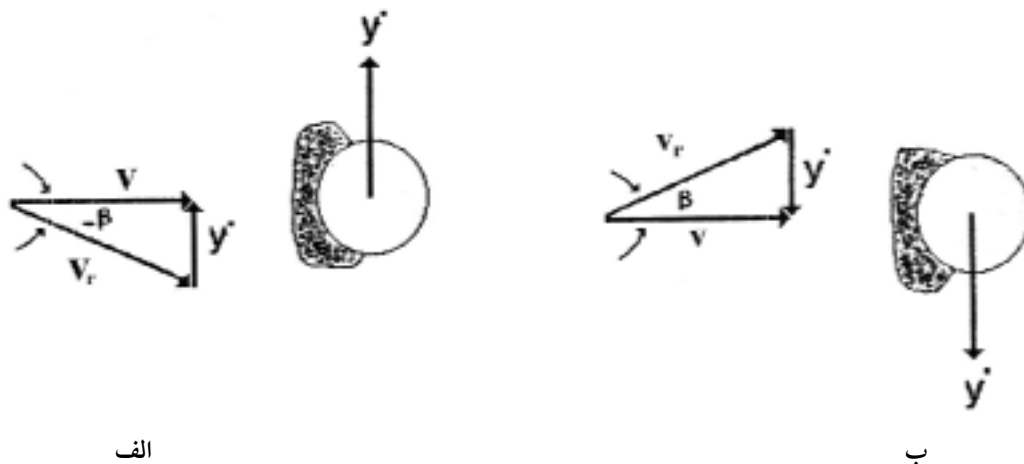
در شکل (۳) مشخص است که سرعت هادی، هم با دامنه و هم با جهت نسبی باد ارتباط دارد. اگر لایه یخ بر روی هادی نشسته باشد، چنانچه نوسان جهشی اتفاق نیفتد، زاویه حمله ( $\alpha$ ) صفر است. بنابراین نیرو صفر خواهد شد. اگر هادی مطابق شکل (۳-الف) سرعت رو به بالایی داشته باشد، یک زاویه حمله ای را با توجه به سرعت ظاهری باد و به اندازه  $\beta$  - احساس می‌کند. در نتیجه، نیروی برا مطابق شکل (۲)، مقدار مثبت  $a$  را خواهد داشت. لذا سرعت رو به بالای هادی، یک نیروی برای رو به بالا، بر آن ایجاد می‌کند. همچنین مطابق شکل (۳-ب)، سرعت رو به پایین هادی، یک نیرو برای رو به

آیرودینامیکی نیز بر آن اعمال می‌شود که با توجه به زاویه حمله  $\alpha$  باد به قسمت یخ زده و همچنین با توجه به سرعت باد تغییر می‌کند. شکل (۱) نمونه‌هایی از تاثیر باد بر روی هادی پوشیده از یخ نشان می‌دهد. مقادیر نیروهای پسا و برا از معادلات زیر به دست می‌آیند:

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

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

حال چنانچه لایه یخ بر روی هادی شکل خاصی داشته باشد، باعث می‌شود که تغییراتی در نیروی برای وارده بر هادی ایجاد شده و می‌تواند نوسان عمودی هادی را ایجاد کند. این نیروی برا در واحد طول هادی، به صورت تابعی از زاویه حمله ( $\alpha$ ) است که در شکل (۲) مشخص شده است. از طرفی، سرعت عمودی هادی ( $y^*$ ) می‌تواند زاویه حمله متناظر با سرعت ظاهری باد ( $V_r$ ) را تعدیل کند. جمع برداری سرعت واقعی باد



الف

ب

شکل ۳- تأثیر حرکت هادی بر سرعت ظاهری باد

الف - حرکت هادی به سمت بالا    ب - حرکت هادی به سمت پایین

مشخصه آیرودینامیکی پیدا کنند که اجازه دهد جهش در غیاب یخ رخ دهد. این مشخصه بخاطر حفاظ آیرودینامیکی<sup>۹</sup> هادیهای یک طرف نسبت به هادیهای طرف دیگر که باد خورند، ایجاد می‌شوند. لذا هادیهای مخالف باد که در گردابه‌های<sup>۹</sup> هادیهای طرف باد قرار دارند، با نیروی معینی تحت تاثیر قرار می‌گیرند [۳].

### ۳-۲ - جهش تحت ریزش یخ

در هنگامی که یخ (به طور نایکخواخت) بر روی سطح هادی می‌نشیند، این امکان وجود دارد که گرمای هادی، باعث ذوب یکباره یخ و ریزش آن شود. لذا در این لحظه یک نیروی ضربه‌ای به هادی وارد شده و موجب می‌شود تا هادی، حرکتی به سمت بالا داشته باشد. به این حرکت، حرکت جهشی با ریزش یخ می‌گویند.

### ۳-۳ - جهش تحت وزش باد و ریزش یخ

به هنگام بارش بارانهای یخی یا برف، سطح هادی با لایه یخ پوشیده می‌شود. نشست یخ، باعث می‌شود که سطح مقطع هادی، نامتقارن شود. در عین حال، اگر باد با سرعت ملایم و پایدار به هادی بوزد، چرخش هادی را باعث می‌شود. در نتیجه در نیروی برای وارده بر هادی، تغییراتی ایجاد می‌شود. لذا

پایین را ایجاد می‌کند که مقدار آن  $b$  - است. با توجه به موارد فوق، اگر سرعت رو به بالای هادی با نیروی برای آیرودینامیکی مثبت و سرعت رو به پایین آن با نیروی برای آیرودینامیکی منفی همزمان باشد، جهش رخ می‌دهد. به عبارتی دیگر، در شرایط ذیل جهش هادی اتفاق می‌افتد.

$$\frac{dL}{d\alpha} + D \leq 0$$

$$\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \leq 0 \quad (3)$$

این شرایط، معیاری برای وقوع نوسان جهشی است و به معیار دن هارتوگ معروف است [۳].

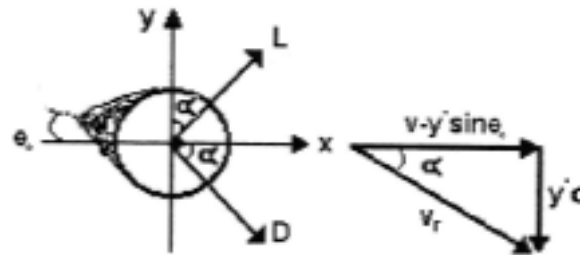
### ۳ - انواع نوسانات جهشی

نوسان جهشی هادی می‌تواند به صور مختلف به شرح ذیل رخ دهد :

#### ۳-۱ - جهش تحت وزش باد

هادیهای بدون یخ که دارای قطر و رشته سیمهای زیاد (بیش از ۳۰ رشته) هستند، می‌توانند شرایط آیرودینامیکی لازم را برای جهش ایجاد کنند. این حالت که عملاً کمتر اتفاق می‌افتد به جهش بدون یخ (یا جهش هادی لخت و یا با وزش باد) موسوم است. همچنین هادیهای گروهی (باندل) نیز ممکن است

لازم به ذکر است که هیچ کدام از روشهای مذکور قادر به ارائه پاسخ دقیق و جامع (تحت شرایط گوناگون) نیستند. بنابراین لازم است به روشهای تحلیلی و ریاضی و با استفاده از مدل حاکم بر هادی، پیش بینی دامنه نوسانات انجام شود. در این مقاله پیش بینی دامنه نوسان جهشی هادی با اعمال کلیه پارامترهای موثر به شرح ذیل انجام می‌گیرد.



شکل ۴- مدل سطح مقطع هادی با لایه یخ

نوسان عمودی هادی نیز به وجود می‌آید. این امر ناشی از تغییر مشخصه آیرودینامیکی است که به واسطه نامتقارن شدن سطح مقطع هادی ایجاد می‌شود. این نوع جهش در طبیعت بیشتر از انواع دیگر رخ می‌دهد [۳].

#### ۴- روشهای تخمین حداکثر دامنه نوسانات جهشی

روشهای مختلفی برای تعیین حداکثر دامنه جهش هادی به صورت تجربی و تقریبی معرفی شده اند که به عنوان مثال می‌توان معادله تقریبی (۴) مبتنی بر مشاهدات عینی از نوسانات جهشی هادی منفرد را ذکر کرد [۴].

$$y_m = 40d \ln\left(\frac{8F}{50d}\right) \quad (4)$$

همچنین در بدترین حالت ممکن، نظریه هانت-ریچاردز، که مطابق این نظریه، به ازای همه مقادیر  $\alpha$ ، ضریب پسا برابر واحد و ضریب برا به ازای  $\alpha \geq 0$  برابر  $0.76$  - و به ازای  $\alpha < 0$  برابر  $0.76$  است. مقدار پیک تا پیک جهش عمودی هادی از معادله زیر قابل محاسبه است [۳].

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

علاوه بر موارد فوق، با استفاده از روش موازنه انرژی، ماکزیمم دامنه جهش هادیهای منفرد با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\frac{2\pi f y_m}{v} = 0.8 \quad (6)$$

همچنین با استفاده از بیضی‌های نوسان جهشی و با توجه به میزان دامنه جهش هادی، نیز می‌توان فاصله مجاز بین هادیها را تنظیم کرد.

#### ۵- مدلسازی حرکت هادی

روشهای تحلیلی و مدل‌های ریاضی مختلفی وجود دارند که به کمک آنها می‌توان میزان دامنه جهش هادی را محاسبه کرد که یکی از آنها ذیلاً تشریح می‌شود.

در ابتدا فرض می‌شود که هادی فقط در جهت عمودی یا به عبارتی دیگر با یک درجه آزادی نوسان کند. مطابق مدل جرم متمرکز، هادی را می‌توان به صورت یک میله صلب که از فنر و دمپرهایی آویزان است، در نظر گرفت که فقط حرکت عمودی را تحمل می‌کند. نمایی از سطح مقطع مدل دینامیکی هادی با پارامتر متمرکز که بر روی آن لایه ای از یخ نیز پوشیده شده است، در شکل (۴) مشاهده می‌شود. حال می‌توان معادله حرکت حاکم بر این سیستم را با فرض اینکه فقط به نیروهای آیرودینامیکی وابسته باشد، به صورت معادله (۷) ارائه کرد.

$$(m + m_i)y'' + k_1 y' + \frac{1}{2} \rho d \sqrt{(v - y' \sin \theta_0)^2 + (y' \cos \theta_0)^2} \times ((C_D(\alpha)(y' \cos \theta_0) - C_L(\alpha)(v - y' \sin \theta_0)) + T\left(\frac{n\pi}{1}\right)^2 y) = 0 \quad (7)$$

معادله فوق یک معادله غیر خطی است که توسط آن می‌توان هر نوسان خاصی را با توجه به شرایط اولیه آن مشخص کرد. ضمناً در این حالت، از ضخامت یخ صرفه نظر می‌شود. مطابق شکل (۴)، زاویه برخورد باد به هادی ( $\alpha$ ) به صورت زیر خواهد بود:

$$\alpha = -\tan^{-1}\left(\frac{y' \cos \theta_0}{v - y' \sin \theta_0}\right) \quad (8)$$

$$f(y^*) = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho d \sqrt{(v - y^* \sin \theta_0)^2 + (y^* \cos \theta_0)^2} \times ((y^* \cos \theta_0) - 0.6(v - y^* \sin \theta_0)) & \alpha < 0 \\ \frac{1}{2} \rho d \sqrt{(v - y^* \sin \theta_0)^2 + (y^* \cos \theta_0)^2} \times ((y^* \cos \theta_0) + 0.6(v - y^* \sin \theta_0)) & \alpha \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

حال از معادلات فوق استفاده شده و سیستم تحلیل می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که بیشتر جهش‌های هادی در یک اسپن، با یک، دو یا چند حلقه رخ می‌دهد و مشاهدات نشان داده است که احتمال توزیع چهار حلقه و بیشتر از آن چیزی در حدود ۲٪ است.

## ۶- نتایج شبیه سازی نوسان جهشی هادی

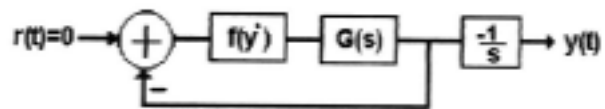
حال از معادلات فوق برای شبیه سازی نوسان جهشی هادی استفاده می‌شود. بدین منظور پارامترهای هادی در یک اسپن که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است انتخاب می‌شوند [۵]. با توجه به موارد فوق، انواع نوسانات جهشی هادی مورد ارزیابی واقع می‌شوند. نکته حائز اهمیت این است که مقدار کشش هادی به علت تغییر فلش آن در حین جهش، در حال تغییر است. اما به علت چشمگیر نبودن این تغییرات و همچنین به خاطر ساده کردن تحلیل، این تغییر در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین زاویه حالت سکون هادی، صفر فرض شده است.

### ۶-۱- جهش تحت وزش باد

در اینجا فرض می‌شود که بر روی هادی مورد مطالعه هیچ لایه یخی نبوده، سرعت باد نیز ثابت و مقدار آن ۱۰ متر بر ثانیه باشد. در این حالت با انجام شبیه سازی، میزان جابه جایی و سرعت عمودی هادی مطابق شکل‌های (۶) و (۷) است. با توجه به این شکل‌ها، دامنه نوسان در مد سوم به مراتب کمتر از مد اول است، یعنی میزان دامنه جابه جایی 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.

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

ACSR Drake ۲۶۷۷	نوع هادی
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)
۰/۱۷	جرم یخ در واحد طول هادی (kg/m)
۱/۲۹۲۹	چگالی هوا (kg/m <sup>3</sup> )



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای کنترلی ساده

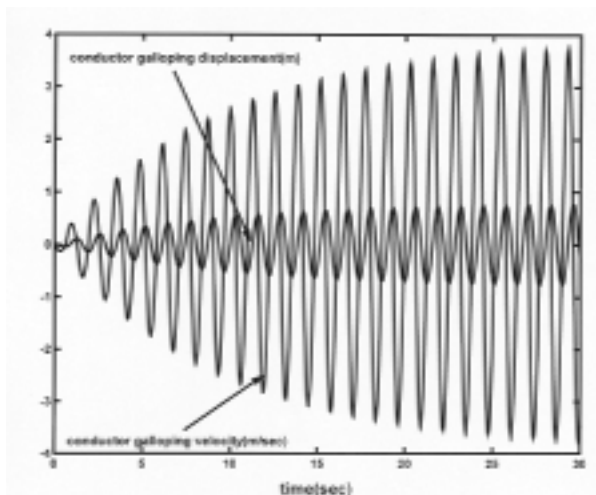
لذا معادله (۷) را می‌توان به صورت نمودار جعبه ای ساده ای مطابق شکل (۵) نشان داد که در آن :

$$G(s) = \frac{1}{(m + m_i)s^2 + k_1s + T(\frac{n\pi}{1})^2} \quad (9)$$

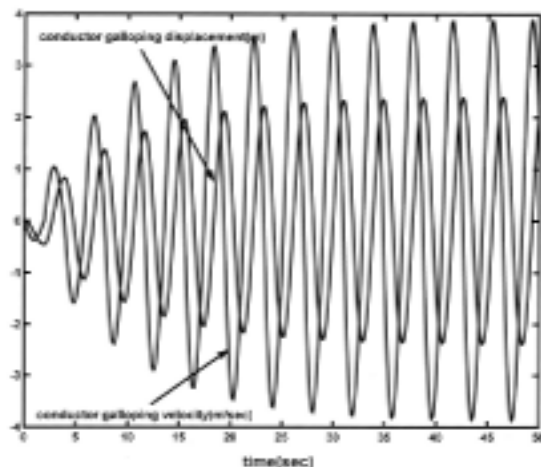
در این معادله s اپراتور لاپلاسی است.

$$f(y^*) = \frac{1}{2} \rho d \sqrt{(v - y^* \sin \theta_0)^2 + (y^* \cos \theta_0)^2} \times ((C_D(\alpha)(y^* \cos \theta_0) - C_L(\alpha)(v - y^* \sin \theta_0)) \quad (10)$$

در اینجا ضرایب برا و پسا در بدترین حالت، مطابق نظریه هانت و ریچاردز، در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به موارد فوق، معادله (۱۰) را می‌توان به صورت یک معادله دو ضابطه ای نشان داد که در آن  $f(y^*)$  یک تابع غیر خطی بر حسب  $(y^*)$  است.



شکل ۷- تغییرات جابه‌جایی و سرعت عمودی هادی  
بر حسب زمان (مد سوم)



شکل ۶- تغییرات جابه‌جایی و سرعت عمودی هادی  
بر حسب زمان (مد اول)

هادی خواهد بود. در اینجا فرض می‌شود که سرعت باد صفر و یخ به میزان  $0/17$  کیلوگرم بر متر از روی هادی بریزد. لذا معادله (۷) بعد از ریزش یخ به صورت زیر تغییر می‌یابد. شایان ذکر است که در این حالت، جا به جایی هادی به طور آنی تغییر نمی‌کند، لیکن سرعت عمودی هادی در لحظه‌ای کوتاه تغییر می‌کند، به طوری که مقدار آن در لحظه‌ای بسیار کوتاه بعد از ریزش به مقدار تقریبی  $\frac{m_i g}{m}$  خواهد رسید. لذا معادله فوق با توجه به شرایط مذکور و بر روی اسپن نمونه، مورد شبیه سازی قرار گرفته که نتیجه آن در شکل (۸) مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، مقدار جهش هادی به حدود  $0/6$  متر خواهد رسید. نکته حائز اهمیت این است که هرچه یخ بیشتری از روی هادی بریزد، جهش هادی نیز متناظر بیشتر خواهد شد.

### ۶-۳- جهش تحت وزش باد و ریزش یخ

در این حالت که ترکیبی از دو حالت پیشین است، با فرض اینکه در حین وزش باد با سرعت  $10$  متر بر ثانیه، مقداری یخ به میزان  $0/17$  کیلوگرم بر متر، در ثانیه  $15$  ام از روی هادی مورد مطالعه بریزد، میزان جهش هادی مطابق شکل (۹) خواهد بود. ضمناً در این شکل، باد در ثانیه  $40$  ام قطع می‌شود [۷].

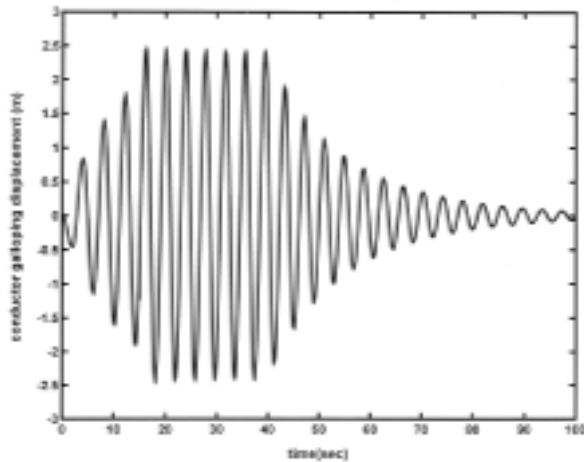
نکته قابل توجه این است که در مشاهدات میدانی، میزان دامنه جهش هادی در خط مزبور و در مد اول، حدود  $2/44$  متر اندازه‌گیری شده است. ولی مراجع [۵] و [۶]، با استفاده از روش کنترلی تابع توصیفی<sup>۱۱</sup> و تحت شرایط مورد مطالعه مقادیر آن را به ترتیب  $0/4$  و  $2/756$  متر محاسبه کرده‌اند.

حال با توجه به موارد فوق، نتیجه به دست آمده از شبیه سازی در این مقاله، مطابقت خوبی با اندازه گیری میدانی و همچنین با دیگر روشها از خود نشان می‌دهد. شایان ذکر است که اختلاف این تحقیق نسبت به مشاهده میدانی، در حدود  $1/64\%$  بوده در حالی که در مقالات دیگر، این تفاوت خیلی بیشتر از حد قابل قبول است.

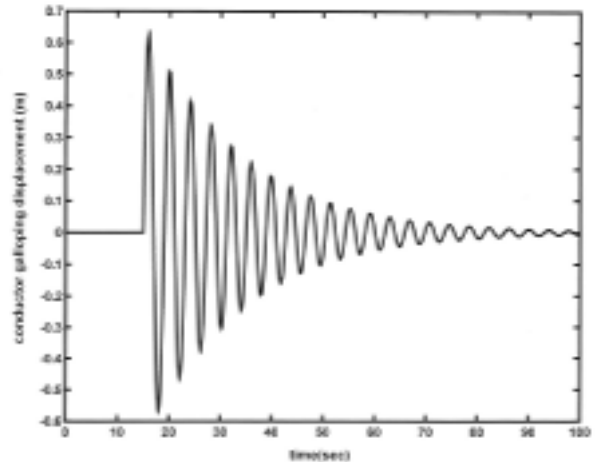
از طرفی شکل (۷) نشان می‌دهد که در مدهای مختلف، دامنه ماندگار سرعت عمودی هادی،  $3/89$  متر بر ثانیه است. لذا تغییر مدهای نوسانی، تاثیری بر دامنه سرعت عمودی هادی نداشته، بلکه فقط فرکانس نوسانات مذکور را تغییر می‌دهد. بدین ترتیب در حالت ماندگار نوسانات هادی، فرکانس نوسانات مد اول و سوم به ترتیب  $0/259$  و  $0/777$  هرتز خواهد شد.

### ۶-۲- جهش تحت ریزش یخ

ریزش یخ باعث می‌شود که یک نیروی ضربه ای در لحظه ریزش به هادی اعمال شود که عکس العمل آن جهش



شکل ۹- جابه‌جایی عمودی هادی بر حسب زمان در مد اول (ریزش یخ در ثانیه ۱۵ ام)



شکل ۸- جابه‌جایی عمودی هادی بر حسب زمان در مد اول

مضاعفی در حدود  $0.7$  متر را خواهد داشت و در مجموع دامنه نوسان در این لحظه به  $2.6$  متر خواهد رسید. نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی این است که افزایش سرعت باد، افزایش دامنه جهش هادی را به همراه خواهد داشت. ضمناً دامنه مد سوم به مراتب از مد اول کمتر است و فرکانس سه حلقه، سه برابر سریعتر از تک حلقه رشد می‌کند. بنابراین به طور کلی، افزایش فرکانس طبیعی عمودی نوسان هادی، باعث می‌شود تا دامنه جابه‌جایی هادی کاهش یابد. به عبارت دیگر، افزایش فرکانس مذکور باعث می‌شود تا هادی با سرعت باد بالاتری به این نوسان برسد که یکی از روشهای انجام آن، افزایش کشش هادی است. البته با کشش ثابت و کاهش جرم واحد طول هادی نیز می‌توان به این هدف دست یافت.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از معادله دیفرانسیل دینامیکی حاکم بر حرکت هادی در حین جهش، استفاده شده و بر روی اسپن نمونه پیاده‌سازی و شبیه‌سازی رایانه‌ای شده است. در حالت نخست جهش هادی (تنها با وجود باد  $10$  متر بر ثانیه)، میزان جهش هادی در مد اول به  $2/4$  متر و فرکانس آن به  $0.259$  هرتز رسید که این میزان جهش، به مقدار مشاهده عینی (حدود  $2/44$  متر) نزدیک است. حالت دوم جهش هادی با صرفه نظر کردن از تغییرات کشش آن، مورد شبیه‌سازی و تحلیل واقع شد. در نتیجه با ریزش یخ به میزان  $0.17$  کیلوگرم بر متر از روی هادی در اسپن نمونه، مقدار جهش هادی به  $0.6$  متر رسید. همچنین حالت سوم نوسان جهش هادی که توأم با باد ثابت  $10$  متر بر ثانیه و ریزش یخ  $0.17$  کیلوگرم بر متر است، نشان می‌دهد که در لحظه ریزش یخ (ثانیه ۱۵ ام)، هادی جهش

## واژه‌نامه

- |              |                         |                         |
|--------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. aeoliane  | 5. Drag                 | 9. wakes                |
| 2. galloping | 6. Torsional moment     | 10. at-rest of angle    |
| 3. swing     | 7. Angle of attack      | 11. describing function |
| 4. lift      | 8. aerodynamic shieding |                         |



۱. حیدری، ق.، طراحی الکتریکی خطوط انتقال نیرو، چاپ اول، دانشکده صنعت آب و برق، اردیبهشت ۱۳۷۹
۲. پور رفیع عربانی، م.، و اسلام زاده، پ.، دیدگاه مهندسی در طراحی خطوط انتقال انرژی، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پائیز ۱۳۷۷.
3. Transmission Line Reference Book(Wind-Induced-Conductor motion), EPRI Research project 792.
4. LILien, J. L., and Havard, D. G., "Galloping Date 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. Egbert, I. R., "Estimation of maximum amplitude of conductor galloping by describing function", IEEE Trans. On power Delivery, Vol.1, No.1, pp. 251-257, January 1986.
6. Byun, G. S., and Egbert, R. I., "Two-Degree-of-freedom analysis of power line galloping by Describing Function methods", Electric power systems. Research. 21, pp. 187-193, 1991.
۷. میزایی، م. "بررسی پدیده نوسان گالوپینگ در منطقه مازندران و ارائه روشهایی جهت تعدیل آن" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده برق، بهمن ۱۳۷۹.