



تحلیل ارتعاشات غیرخطی و پایداری یک میکرو شفت دوار با در نظر گرفتن تئوری تنش کوپل اصلاح شده و اثر میکرواینرسی

سیدعلی قصابی¹، مجید شاه‌قلی^{2*}، محمدرضا ارباب‌تافتی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

*تهران، صندوق پستی 16785-136، majid.shahgholi@srttu.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 دی 1395

پذیرش: 24 بهمن 1395

ارائه در سایت: 19 فروردین 1396

کلید واژگان:

ارتعاشات غیرخطی و پایداری

میکرو شفت دوار

تئوری تنش کوپل اصلاح شده

اثر میکرواینرسی

چکیده

در این پژوهش ارتعاشات غیرخطی و پایداری یک میکرو شفت دوار متقارن و نامتقارن با استفاده از تئوری تنش کوپل اصلاح شده در نزدیکی رزونانس اصلی سیستم مطالعه شده است. به کمک اصل هامیلتون معادلات غیرخطی حرکت استخراج شده و به کمک روش مقیاس‌های چندگانه معادلات حرکت حل شده‌اند و عبارت‌های تحلیلی برای فرکانس‌های طبیعی پیش‌گشت و پس‌گشت ارائه شده که تأثیر تئوری تنش کوپل اصلاح شده و اثرات میکرو اینرسی در آن مشهود است. پاسخ فرکانسی سیستم برای مودهای مختلف، نمودار دامنه برحسب ضریب میرایی خارجی، نمودار دامنه برحسب نابالانسی برای میکرو شفت‌های دوار متقارن و نامتقارن مقایسه و بررسی شده است. مشاهده می‌شود که برای میکرو شفت‌های دوار متقارن و نامتقارن با در نظر گرفتن تئوری تنش کوپل اصلاح شده و اثرات میکرو اینرسی دامنه سیستم کاهش می‌یابد و محل نقاط انشعاب سیستم نیز تغییر خواهد کرد. میکرو شفت متقارن در حضور تئوری کلاسیک و بدون اثرات میکرواینرسی در کم‌ترین مقدار ضریب میرایی و میکرو شفت نامتقارن برای این حالت در بیشترین مقدار ضریب میرایی به حالت کاملاً پایدار می‌رسند. میکرو شفت متقارن در حضور تئوری تنش کوپل اصلاح شده و با اثرات میکرو اینرسی در کمترین مقدار نابالانسی به حالت کاملاً پایدار می‌رسد در حالی که میکرو شفت نامتقارن در حضور تئوری کلاسیک و بدون اثرات میکرواینرسی در بیشترین مقدار نابالانسی به حالت کاملاً پایدار خواهد رسید؛ بنابراین در نظر گرفتن اثرات مربوط به مقیاس کوچک ناشی از گرادیان‌های کرنش و گرادیان‌های سرعت که در تئوری تنش کوپل اصلاح شده منظور شده‌اند، در تحلیل ارتعاشات غیرخطی میکرو شفت‌های دوار اهمیت دارد.

Nonlinear vibrations and stability analysis of a micro rotating shaft by considering the modified couple stress theory and micro inertia effect

Seyed Ali Ghasabi, Majid Shahgholi*, Mohammad Reza Arbabtafti

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16785-136 Tehran, Iran, majid.shahgholi@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 26 December 2016

Accepted 12 February 2017

Available Online 08 April 2017

Keywords:

Nonlinear vibrations and stability

Micro rotating shaft

Modified couple stress theory

Micro inertia effect

ABSTRACT

In this paper stability analysis of a nonlinear micro rotating shaft when the system is near the primary resonances by considering the modified couple stress theory and micro inertia effect is investigated. The geometric nonlinearities due to classical and non-classical theories (the modified couple stress theory) are considered. Using Hamilton principle, the nonlinear equations of motion are obtained. In order to solve the equations of motion the multiple scales method is used and the analytical expressions are presented for forward and backward frequencies which illustrate the effects of modified couple stress theory and micro inertia effect. The frequency response curves, amplitude versus damping coefficient, amplitude versus total eccentricities etc. are reported. It is seen that due to the modified couple stress theory and micro inertia effect the amplitude of the system decreases and the loci of bifurcation points is changed. Symmetrical micro-shaft in the presence of classical theory and without micro inertia effects becomes completely stable in the lowest damping coefficient and asymmetrical micro-shaft in the presence of classical theory and without micro inertia effects becomes completely stable in the highest damping coefficient. Symmetrical micro-shaft in the presence of modified couple stress theory and with micro inertia effects becomes completely stable in the lowest total eccentricity and asymmetrical micro-shaft in the presence of classical theory and without micro inertia effects becomes completely stable in the highest total eccentricity. So, considering the small-scale effects due to strain and velocity gradients for analysis of the system is mandatory.

1- مقدمه

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. A. Ghasabi, M. Shahgholi, M. R. Arbabtafti, Nonlinear vibrations and stability analysis of a micro rotating shaft by considering the modified couple stress theory and micro inertia effect, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 134-142, 2017 (in Persian)

برای فرکانس‌های طبیعی یک میکروتیر غیردوار براساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده برای دو گونه از شرایط مرزی گوناگون به دست آوردند. آگوز و همکاران [11] ارتعاشات آزاد میکروتیرهای تابعی هدفمند اویلربرنولی را براساس تئوری تنش کوپل اصلاح شده مطالعه و بررسی کردند. روش ریلی-ریتز برای حل معادلات حرکت مورد استفاده قرار گرفت. این پژوهشگران [12] ارتعاشات خمشی و کمانش میکروتیرهای تابعی هدفمند را که بر بستر الاستیک وینکلر قرار داشت به کمک تئوری گرادیان کرنش اصلاح شده مطالعه و بررسی کردند. در زمینه ارتعاشات خطی میکروتیرهای دوار نیز کارهایی صورت گرفته است که هاشمی و همکاران [13] ارتعاشات آزاد خطی خمشی میکروتیرهای دوار با سطح مقطع متقارن را براساس تئوری غیرکلاسیک گرادیان کرنش در کلی‌ترین حالت که پنج ثابت مرتبه بالای ماده وجود داشت در نظر گرفتند و به کمک تکنیک حل فضای حالت^{۱۴} برخی از فرکانس‌های طبیعی را در شرایط مرزی مختلف به دست آوردند. مصطفی و ژانگ [14] ارتعاشات خطی یک میکروتیرچرخان را که بر بستر الاستیک قرار داشت به کمک تئوری تنش کوپل اصلاح شده مطالعه و بررسی کردند و با روش المان اسپکترال^{۱۵} پاسخ‌های فرکانسی خطی را به دست آوردند. با مطالعه کارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت که با وجود کارهای بسیاری که در زمینه میکروتیرها انجام شده ولی اثرات غیرخطی مربوط به تنش کوپل اصلاح شده و میکرواینرسی مخصوصاً بر میکروتیرهای دوار (متقارن و نامتقارن) به صورت توأمان بررسی نشده است. در این جا اثرات میکرواینرسی و نیز اثرات هندسه برای یک میکرو شفت دوار که غیرخطی آن از نوع کوتاه‌شدگی است به کمک تئوری گرادیان کرنش و درحالت خاص آن یعنی تئوری تنش کوپل اصلاح شده مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت.

2- استخراج معادلات حرکت

در شکل 1 یک میکروشفت دوار که بر تکیه‌گاه‌های ساده قرار گرفته است و با سرعت زاویه‌ای Ω حول محور X دوران می‌کند نشان داده شده است. XYZ محورهای مختصات عمومی^{۱۶} است که از تار خنثی میکروشفت عبور می‌کند. xyz محورهای مختصات محلی^{۱۷} است که با جسم حرکت می‌کند. به کمک زوایای اویلر^{۱۸} β ، θ و ψ ارتباط بین دو محور مختصات عمومی و محلی معلوم خواهد شد. این زوایا از معادلات (1) به دست خواهند آمد [15].

$$\psi = \sin^{-1} \frac{v'}{\sqrt{v'^2 + (1 + u')^2}}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{-w'}{\sqrt{w'^2 + v'^2 + (1 + u')^2}}$$

$$\beta = \phi + \Omega t \quad (1)$$

باید توجه کنیم که زوایای اویلر تابعی از موقعیت و زمان هستند. دو زاویه اویلر ψ و θ مربوط به خمش و زاویه اویلر β مربوط به پیچش کل است که شامل دو بخش ϕ تغییر شکل برشی^{۱۹} و ترم دیگر مربوط به سرعت زاویه‌ای است. W, V, U به ترتیب جابه‌جایی‌ها در راستای طولی، جابه‌جایی در راستای عرضی V ، جابه‌جایی در راستای عرضی Z و علامت $()'$ نشان‌دهنده مشتق نسبت به X است.

امروزه المان‌های مهم مهندسی مانند تیر در ابعاد کوچک میکرومتر کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. سیستم‌های دوار در مقیاس کوچک کاربردهای بسیار زیادی دارند از جمله در سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی^۱، میکرو توربین‌ها، میکرو کمپرسورها و... وقتی ابعاد یک المان مهم مهندسی مثل تیر به سمت میکرومتر حرکت می‌کند اتفاقاتی خواهد افتاد که تئوری‌های کلاسیک محیط پیوسته قادر به توضیح آن‌ها نیست. محققان بسیاری بر تئوری‌های غیرکلاسیک نظیر تئوری گرادیان کرنش^۲، تئوری تنش کوپل^۳ و حالات اصلاح شده آن‌ها که قادرند اثرات مربوط به مقیاس کوچک و وابسته به اندازه را در نظر بگیرند مطالعه و پژوهش کرده‌اند. در زمینه شفت‌های دوار کاتز و همکاران [1] پاسخ‌های دینامیکی یک شفت دوار که بار محوری و دورانی به آن اعمال می‌شد را با استفاده از تئوری تیر ریلی بررسی کردند. پاسخ‌های حالت گذرای سیستم را به کمک آنالیز مودال^۴ و تبدیلات انتگرالی به دست آوردند. ناگازاکا و همکاران [2] ارتعاشات اجباری یک روتور دوار نامتقارن با غیرخطی هندسی را برای سرعت‌های نزدیک به سرعت بحرانی اولیه و ثانویه مطالعه و بررسی کردند. حسینی و زمانیان [3] ارتعاشات آزاد یک شفت دوار با غیرخطی از نوع کشیدگی^۵ را به کمک روش‌های مقیاس زمانی چندگانه مورد مطالعه و پژوهش قرار دادند. هر دو فرکانس طبیعی پیش‌گشت و پس‌گشت^۶ جهت تحلیل ارتعاشات غیرخطی تحریک شدند. خادم و همکاران [4] رزونانس‌های اصلی یک شفت دوار با غیرخطی از نوع کوتاه‌شدگی^۷ را مورد مطالعه و پژوهش قرار دادند. آن‌ها روش مقیاس‌های زمانی چندگانه را مستقیم بر معادلات حرکت با مشق جزئی اعمال کردند و عباراتی تحلیلی برای فرکانس‌های طبیعی پیش‌گشت و پس‌گشت به دست آوردند. شاهقلی و همکاران [5] رزونانس‌های اصلی و پارامتریک^۸ یک شفت دوار نامتقارن با غیرخطی از نوع کشیدگی را با در نظر گرفتن اثرات اینرسی دورانی وژیروسکوپیک مطالعه و بررسی کردند. آن‌ها معادلات غیرخطی حاصله را به کمک روش مقیاس‌های زمانی چندگانه^۹ حل کردند، همچنین [6] رزونانس‌های داخلی ترکیبی و زیرهارمونیک^{۱۰} شفت دوار نامتقارن را مطالعه کردند. برای حل معادلات غیرخطی از روش بالانس هارمونیک^{۱۱} استفاده کردند. ایشان [7] رزونانس‌های اولیه و اصلی شفت نامتقارن را با در نظر گرفتن نوسانات سرعت^{۱۲} مطالعه کردند و تأثیر نوسانات سرعت بر پاسخ سیستم مطالعه و بررسی شد. در زمینه میکروتیرهای غیردوار شوشتری و همکاران [8] یک میکروتیر یک‌سرگردار ویسکو الاستیک که با یک لایه عملگر پیزوالکتریک تحریک خارجی می‌شد تحلیل ارتعاشاتی کردند. مدل تیرشان مدل کلاسیک اویلر برنولی بود و اثرات مربوط به مقیاس کوچک را که با تئوری‌های غیرکلاسیک بیان می‌شود در نظر نگرفتند. فتحعلی‌لو و همکاران [9] معادلات حرکت یک بعدی میکرو تیرهای اویلر برنولی را به کمک اصل هامیلتون^{۱۳} و تئوری تنش کوپل اصلاح شده برای شرایط مرزی دو سر ساده و دو سر ثابت به دست آوردند. روابطی را برای فرکانس‌های طبیعی خطی و شکل مودها به دست آوردند. کونگ و همکاران [10] روابطی تحلیلی

¹ MEMS

² Strain Gradient Theory

³ Couple Stress Theory

⁴ Modal Analysis

⁵ Stretching

⁶ Forward and backward frequencies

⁷ Shortening

⁸ Primary and Parametric Resonances

⁹ Multiple Scales Method

¹⁰ Sub Harmonic

¹¹ Harmonic Balance

¹² Speed Fluctuations

¹³ Hamilton's Principle

¹⁴ Steady State

¹⁵ Spectral Element Method

¹⁶ Global Coordinates

¹⁷ Local Coordinates

¹⁸ Euler Angles

¹⁹ Shear Deformation

انحنای میکرو شفت یا همان روابط (8) جای گذاری شود و به کمک بسط تیلور⁶ تا مرتبه سوم بسط داده شود روابط انحنای میکرو شفت بر حسب جابه جایی ها به دست خواهد آمد. رابطه (2) انرژی پتانسیل کرنشی را می توان به صورت رابطه (10) نیز نوشت.

$$V_1 = \frac{1}{2} \int_0^l (A_1 e^2 + D_1 k_1^2 + D_2 k_2^2 + D_3 k_3^2) dx \quad (10)$$

در این رابطه A_1, D_1, D_2, D_3 به ترتیب سفتی محوری، سفتی پیچشی، سفتی خمشی حول محور y و سفتی خمشی حول محور z است و از روابط (11) به دست می آیند.

$$\begin{aligned} A_1 &= \int E dA \\ D_1 &= \int G (y^2 + z^2) dA, \\ D_2 &= \int E z^2 dA \\ D_3 &= \int E y^2 dA \end{aligned} \quad (11)$$

بخش دوم انرژی پتانسیل سیستم مربوط به اثرات وابسته به اندازه و مقیاس کوچک است که به کمک تئوری های غیر کلاسیک محیط پیوسته نظیر تئوری گرادیان کرنش به صورت رابطه (12) خواهد شد [18].

$$V_2 = \frac{1}{2} \int_0^l \int (A_1 \varepsilon_{xx,x}^2 + A_2 \varepsilon_{xx,y}^2 + A_3 \varepsilon_{xx,z}^2) dx dA \quad (12)$$

همچنین روابط (13, 14) به صورت زیر بیان می شود.

$$\begin{aligned} A_1 &= 2(a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5), \\ A_2 &= A_3 = 2(a_2 + a_4) \\ a_1 &= G(-\frac{4}{15}l_1^2 + l_2^2) \\ a_2 &= G(l_0^2 - \frac{1}{15}l_1^2 - \frac{1}{2}l_2^2) \\ a_3 &= -G(\frac{4}{15}l_1^2 + \frac{1}{2}l_2^2) \\ a_4 &= G(\frac{1}{3}l_1^2 + l_2^2) \\ a_5 &= G(\frac{2}{3}l_1^2 - l_2^2) \end{aligned} \quad (13)$$

در روابط بالا a_i و $(i = 1, \dots, 5)$ موسوم به ثوابت مرتبه بالاتر ماده⁷ است که به کمک رابطه (14) به سه ثابت l_{i-1} و $(i = 1, 2, 3)$ تقلیل می یابند. یکی از حالات در نظر گرفتن ثوابت مرتبه بالاتر ماده به صورت $l_0 = l_1 = 0$ و $l_2 = l = 2b$ که تئوری غیر کلاسیک به تئوری تنش کوپل اصلاح شده موسوم است.

رابطه (12)، انرژی پتانسیل مربوط به گرادیان های کرنش را می توان به صورت رابطه (15) نیز نوشت.

$$V_2 = \frac{1}{2} \int_0^l (I_4 k_3'^2 + I_5 k_2'^2 + I_6 k_3^2 + I_7 k_2^2) dx \quad (15)$$

رابطه (16) به شرح زیر است.

$$\begin{aligned} I_4 &= \int A_1 y^2 dA \\ I_5 &= \int A_1 z^2 dA \\ I_6 &= \int A_2 dA \\ I_7 &= \int A_3 dA \end{aligned} \quad (16)$$

حال انرژی پتانسیل کل سیستم (V_{total}) از مجموع روابط (15, 10) به دست آورده می شود بنابراین می توان رابطه (17) را به صورت زیر نوشت.

$$V_{total} = V_1 + V_2 \quad (17)$$

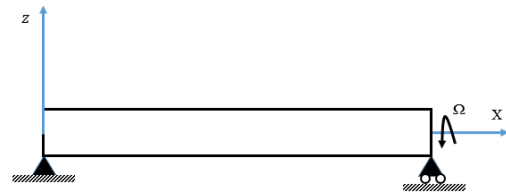


Fig. 1 a schematic of the micro rotating shaft and the attached coordinates on it

شکل 1 شماتیکی از میکرو شفت دوار و محورهای مختصات متصل شده بر آن

انرژی پتانسیل سیستم را می توان به دو بخش تقسیم بندی کرد. نخست انرژی پتانسیل ناشی از کرنش ها و قسمت دوم انرژی ناشی از گرادیان های کرنش ها است که قسمت دوم را به کمک تئوری تنش کوپل اصلاح شده به دست آورده می شود. انرژی پتانسیل مربوط به کرنش ها از رابطه (2) به دست می آید.

$$V_1 = \frac{1}{2} \int_0^l \int (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + \sigma_{xz} \varepsilon_{xz}) dx dA \quad (2)$$

در رابطه بالا $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}$ به ترتیب تنش عمودی، تنش برشی در صفحه yz ، تنش برشی در صفحه xy است.

به کمک قانون هوک¹ برای مواد همسانگرد² روابط تنش از رابطه (3) به دست می آید.

$$\sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx}, \quad \sigma_{xy} = G \varepsilon_{xy}, \quad \sigma_{xz} = G \varepsilon_{xz} \quad (3)$$

E, G به ترتیب مدول یانگ³ و مدول برشی⁴ است. برای محاسبه کرنش ها از روابط (4) می توان استفاده کرد.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= e - yk_3 + zk_2 \\ \varepsilon_{xy} &= zk_1 \\ \varepsilon_{xz} &= yk_1 \end{aligned} \quad (4)$$

در روابط بالا e کرنش محوری تار خنثی است که از رابطه (5) به دست می آید.

$$e = \sqrt{w'^2 + v'^2 + (1 + u')^2} - 1 \quad (5)$$

اگر کرنش محوری تار خنثی تا مرتبه سوم بسط داده شود به صورت رابطه (6) خواهد شد.

$$e = u' + \frac{1}{2}v'^2 + \frac{1}{2}w'^2 + \dots \quad (6)$$

با توجه به این که یک سر میکرو شفت مفصل و سر دیگر آن غلتک و می توان فرض کرد که کرنش محوری تار خنثی صفر است و غیرخطی مسئله از نوع کوتاه شدگی خواهد بود [16]؛ بنابراین رابطه (7) به صورت است.

$$e = 0 \Rightarrow u' = -\frac{1}{2}v'^2 - \frac{1}{2}w'^2 - \dots \quad (7)$$

k_1, k_2, k_3 انحنای شفت در راستای محورهای اصلی⁵ که از طریق طریق روابط (8) به دست می آیند [17].

$$\begin{aligned} k_1 &= \phi' - \psi' \sin \theta \\ k_2 &= q_2 \sin \Omega t + q_1 \cos \Omega t \\ k_3 &= q_2 \cos \Omega t - q_1 \sin \Omega t \end{aligned} \quad (8)$$

همچنین رابطه (9) به صورت زیر بیان می شود.

$$\begin{aligned} q_1 &= \psi' \cos \theta \sin \phi + \theta' \cos \phi \\ q_2 &= \psi' \cos \theta \cos \phi - \theta' \sin \phi \end{aligned} \quad (9)$$

حال اگر روابط مربوط به زوایای اولیه یعنی روابط (1) در روابط مربوط به

¹ Hook's Law

² Isotropic

³ Young's Modulus

⁴ Shear Modulus

⁵ Principle Axes

⁶ Taylor's Expansion

⁷ Higher Order Material Constants

$$\begin{aligned} \tilde{v} &= \frac{v}{\ell}, & \tilde{w} &= \frac{w}{\ell} \\ \tilde{x} &= \frac{x}{\ell}, & \tilde{b} &= \frac{b}{\ell} \\ \tilde{I} &= \frac{I}{m\ell^2}, & \tilde{I}_1 &= \frac{I_1}{m\ell^2} \\ \tilde{e}_y &= \frac{e_y}{\ell}, & \tilde{e}_z &= \frac{e_z}{\ell} \\ \tilde{\Delta}_I &= \frac{\Delta_I}{m\ell^2}, & \tilde{\Delta}_D &= \frac{\Delta_D}{D} \\ \tilde{\Omega} &= \Omega \sqrt{\frac{m\ell^4}{D}}, & \tilde{t} &= t \sqrt{\frac{D}{m\ell^4}} \\ \tilde{z} &= \tilde{v} - i\tilde{w}, & \tilde{z} &= \tilde{v} + i \\ \tilde{\theta}_1 &= \frac{\theta_1}{D}, & \tilde{\theta}_2 &= \frac{\theta_2}{D\ell^2} \\ \tilde{\theta}_3 &= \frac{\theta_3}{D}, & \tilde{\theta}_4 &= \frac{\theta_4}{D\ell^2} \\ \tilde{c} &= \frac{c\ell^2}{\sqrt{mD}} \end{aligned} \quad (25)$$

که $\theta_4, \theta_3, \theta_2, \theta_1, b, \tilde{c}$ پس از حذف کردن علامت $\sim$ جهت سهولت، پارامترهای بدون بعد مناسب مربوط به تئوری تنش کوپل اصلاح شده است. پس معادلات بدون بعد در فضای مختلط به صورت رابطه (26) خواهد شد:

$$\begin{aligned} z^{(4)} + \ddot{z} + c\dot{z} + i\Omega I_1 \ddot{z}'' - \frac{2}{3}b^2 \ddot{z}'' + \frac{1}{3}b^2 I \ddot{z}^{(4)} \\ + \frac{1}{3}b^2 \Delta_I \ddot{z}^{(4)} \\ - I \ddot{z}'' - \Delta_I (\ddot{z}'' + 2i\Omega \ddot{z}'') e^{2i\Omega t} + \Delta_Q \bar{z}^{(4)} e^{2i\Omega t} \\ + \frac{1}{2} \ddot{z}'' \bar{z}' z''' \\ + \frac{3}{2} \ddot{z}'' z' z''' + \ddot{z}'' z'' z''' + 2z'' z' z''' + \frac{1}{2} z^{(4)} \bar{z}' z' \\ + \frac{1}{2} \bar{z}^{(4)} z'^2 \\ + \frac{1}{2} z'' \int_1^x \int_0^x (2\dot{z}' \bar{z}' + \dot{z}' + \ddot{z}' z') dx dx \\ + \frac{1}{2} z' \int_0^x (2\dot{z}' \bar{z}' + \dot{z}' z' + \ddot{z}' z') dx + \theta_1 \bar{z}^{(4)} e^{2i\Omega t} \\ - \theta_2 \bar{z}^{(6)} e^{2i\Omega t} + \theta_3 (\frac{1}{2} \ddot{z}'' \bar{z}' z''' + \frac{3}{2} \ddot{z}'' z' z''') \\ + \bar{z}'' z'' z'^2 \\ + 2z'' z' \bar{z}''' + \frac{1}{2} z^{(4)} \bar{z}' z' + \frac{1}{2} \bar{z}^{(4)} z'^2) \\ + \theta_3 z^{(4)} + \frac{\theta_4}{8} (2z'' z'' z'' - 92z'' z'' z'' z'' \\ - 2\bar{z}'' z'' z^{(4)} \\ - 38z'' z'' \bar{z}^{(4)} - 38z' \bar{z}''' z^{(4)} - 2\bar{z}' \bar{z}''' z^{(4)} \\ - 42z' z'' z''' z^{(4)} + 2\bar{z}' z'' z''' z^{(4)} - 4z'' z' z^{(5)} \\ - 18z'' z' z^{(5)} - 2\bar{z}' z'' z^{(5)} - 26z'' z' z^{(5)} \\ + 2z'' z' \bar{z}^{(5)} - 4z'^2 \bar{z}^{(6)} - 42z'' z'' z^{(4)} \\ + 2z'' \bar{z}'' z^{(4)} - 4z' \bar{z}' z^{(6)}) - \theta_4 z^{(6)} \\ = (ie_z + e_y) \Omega^2 e^{i\Omega t} \end{aligned} \quad (26)$$

شرایط مرزی نیز به صورت رابطه (27) است.

$$z = z'' = 0 \quad @ \quad x = 0, x = 1 \quad (27)$$

باید توجه کنیم برای راحتی علامت $\sim$ حذف شده است.

جهت حل معادلات حرکت غیرخطی بدون بعد از یکی از روش‌های اغتشاشات^۵ موسوم به روش مقیاس‌های زمانی چندگانه استفاده می‌شود [20]. بدین منظور پاسخ معادله به صورت رابطه (28) در نظر گرفته می‌شود.

$$z(x, t) = \varepsilon^1 z_1(x, T_0, T_2) + \varepsilon^3 z_3(x, T_0, T_2) + \dots \quad (28)$$

درجایی که T_0, T_2 به ترتیب مقیاس زمانی سریع^۶ و مقیاس زمانی خیلی کند^۷ است. ε پارامتر بدون بعدی است که مرتبه سایر پارامترها را

انرژی جنبشی سیستم را نیز می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش نخست انرژی جنبشی ناشی از حرکت‌های انتقالی و دورانی و نیز انرژی جنبشی ناشی از توزیع نابالانسی^۱ در سیستم که از روابط (18,19) به‌دست می‌آید [16].

$$K_1 = K_{\text{trans}} + K_{\text{rot}} + K_{\text{ecc}} \quad (18)$$

$$K_{\text{trans}} = \frac{1}{2} \int_0^\ell m(\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) dx$$

$$K_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \int_0^\ell (I_1 \Omega_1^2 + I_2 \Omega_2^2 + I_3 \Omega_3^2) dx$$

$$K_{\text{ecc}} = \frac{1}{2} \int_0^\ell m \Omega^2 (e_y^2 + e_z^2) dx$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^\ell (-2m\Omega(\dot{v}e_z + \dot{w}e_y) \sin \Omega t + (\dot{v}e_y - \dot{w}e_z) \cos \Omega t) dx \quad (19)$$

در روابط بالا $e_z, e_y, I_3, I_2, I_1, m$ به ترتیب جرم واحد طول^۲ ممان اینرسی قطبی^۳، ممان اینرسی جرمی حول محور y ، ممان اینرسی جرمی حول محور z نابالانسی نسبت به محور y و نابالانسی نسبت به محور z است. $\Omega_3, \Omega_2, \Omega_1$ مؤلفه‌های سرعت زاویه‌ای میکروشفیت نسبت به محورهای اصلی هستند و از روابط (20) به‌دست می‌آیند [19].

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= (\dot{\beta} - \dot{\psi} \sin \theta) \\ \Omega_2 &= \dot{\psi} \cos \theta \sin \beta + \dot{\theta} \cos \beta \\ \Omega_3 &= \dot{\psi} \cos \theta \cos \beta - \dot{\theta} \sin \beta \end{aligned} \quad (20)$$

اگر زوایای اویلر روابط (1) در رابطه بالا جای‌گذاری شود و نتایج با سری تیلور تا مرتبه سوم بسط داده شود سرعت‌های زاویه‌ای برحسب جابه‌جایی‌ها به‌دست خواهد آمد. از آنجایی که میکروشفیت دوار در ابعاد میکرومتر است علاوه بر انرژی جنبشی رابطه (18) باید تأثیر مربوط به ابعاد کوچک یا گرادیان‌سرعت نیز بررسی شود. انرژی جنبشی مربوط به گرادیان سرعت یا اثرات میکرو اینرسی از رابطه (21) به‌دست می‌آید [9].

$$K_2 = \int \frac{1}{6} \rho b^2 \dot{u}_{j,i} \dot{u}_{j,i} dV \quad (21)$$

ρ دانسیته^۴ ماده و V حجم ماده است و u_j ها مؤلفه‌های جابه‌جایی است. $b = \frac{l}{2}$ تنها ثابت مرتبه بالاتر در تئوری تنش کوپل اصلاح شده خواهد بود. علامت نقطه نشان‌دهنده مشتق نسبت به زمان است؛ بنابراین انرژی جنبشی کل سیستم (K_{total}) از مجموع روابط (18,21) به صورت رابطه (22) به‌دست خواهد آمد:

$$K_{\text{total}} = K_1 + K_2 \quad (22)$$

با اصل هامیلتون معادلات حرکت به صورت رابطه (23) استخراج خواهد شد.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta K_{\text{total}} - \delta V_{\text{total}}) dt = 0 \quad (23)$$

با تعریف پارامترهای رابطه (24) به صورت زیر

$$\begin{aligned} \Delta_D &= \frac{D_3 - D_2}{2}, & \Delta_I &= \frac{I_3 - I_2}{2} \\ D &= \frac{D_3 + D_2}{2}, & I &= \frac{I_3 + I_2}{2} \\ \theta_1 &= \frac{I_6 - I_7}{2}, & \theta_2 &= \frac{I_4 - I_5}{2} \\ \theta_3 &= \frac{I_6 + I_7}{2}, & \theta_4 &= \frac{I_4 + I_5}{2} \end{aligned} \quad (24)$$

و پارامترهای بدون بعد رابطه (25) به شرح زیر است.

¹ Eccentricity Distribution

² Mass Per unit Length

³ Polar Mass Moment Of Inertia

⁴ Density

⁵ Perturbations

⁶ Fast Time Scale

⁷ Super Slow Time Scale

$$\Phi_f(x) = \Phi_b(x) = 2\sqrt{2} \sin n\pi x \quad (34)$$

که n شماره مود^۳ است. ω_b, ω_f فرکانس‌های پیش‌گشت و پس‌گشت هستند و از رابطه‌های (35-37) به دست می‌آیند.

$$\omega_f = \pi^2 n^2 \frac{I_r \Omega + \sqrt{I_r^2 \Omega^2 + 4I_s(1 + \theta_3 + \pi^2 n^2 \theta_4)}}{2I_s} \quad (35)$$

$$\omega_b = \pi^2 n^2 \frac{I_r \Omega - \sqrt{I_r^2 \Omega^2 + 4I_s(1 + \theta_3 + \pi^2 n^2 \theta_4)}}{2I_s} \quad (36)$$

$$I_r = I_1, \quad I_s = 1 + \pi^2 n^2 I + \frac{2}{3} b^2 \pi^2 n^2 + \frac{1}{3} b^2 \pi^4 n^4 I \quad (37)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود روابط (36,35) عبارت‌های تحلیلی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم ارائه می‌دهند که تأثیر گرادیان‌های کرنش مربوط به تئوری تنش کوپل اصلاح‌شده در فرکانس‌های پیش‌گشت و پس‌گشت با ترم‌های مربوط به θ_3, θ_4 در روابط (36,35) کاملاً مشخص است. اثرات میکرو اینرسی خطی نیز در I_s با ترم‌های مربوط به پارامتر بدون بعد b اثر خود را نشان می‌دهند.

برای تحلیل پایداری سیستم در سرعت‌های نزدیک به سرعت بحرانی^۴ با در نظر گرفتن پارامتر نامیزانی $\sigma = o(1)$ می‌توان رابطه (38) را نوشت.

$$\Omega = \omega_f + \varepsilon^2 \sigma \quad (38)$$

رابطه (39) را با جای‌گذاری روابط (38,33) در رابطه (32) خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} & D_0^2 z_3 - \frac{2}{3} a^2 D_0^2 z_3'' + \frac{1}{3} a^2 ID_0^2 z_3^{(4)} - ID_0^2 z_3'' \\ & + iI_1 \Omega D_0 z_3'' + \theta_3 z_3^{(4)} - \theta_4 z_3^{(6)} \\ & = H_f(x, T_2) e^{i\omega_f T_0} + H_b(x, T_2) e^{i\omega_b T_0} \\ & + N.S.T \end{aligned} \quad (39)$$

در رابطه اخیر N.S.T به ترم‌های غیرسکولار^۵ اشاره دارد. با شرایط حل‌پذیری^۶ رابطه (40) می‌توان پاسخ‌های غیربدیهی^۷ معادله اخیر را به دست به دست آورد.

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \Phi_f(x) H_f(x, T_2) dx = 0, \\ & \int_0^1 \Phi_b(x) H_b(x, T_2) dx = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

با جای‌گذاری شرایط حل‌پذیری رابطه (40) در رابطه (39) می‌توان روابط (41-43) را به صورت زیر نوشت.

$$\begin{aligned} & -4n^6 \pi^6 \theta_3 \bar{A}_1(T_2) A_1(T_2)^2 - 8n^6 \pi^6 \theta_3 A_1(T_2) A_2(T_2) \bar{A}_2(T_2) \\ & + \frac{7}{2} n^8 \pi^8 \theta_4 \bar{A}_1(T_2) A_1(T_2)^2 + 7n^8 \pi^8 \theta_4 A_1(T_2) A_2(T_2) \bar{A}_2(T_2) \\ & - i\Lambda_f D_2 A_1(T_2) - i c A_1(T_2) \omega_f - n^6 \pi^6 \bar{A}_1(T_2) A_1(T_2)^2 \\ & + \Gamma A_1(T_2) \bar{A}_2(T_2) A_2(T_2) + \Psi_f \bar{A}_1(T_2) e^{2i\sigma T_2} \\ & + \Omega^2 (ie_1 + e_2) e^{i\sigma T_2} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} & -8n^6 \pi^6 \theta_3 \bar{A}_1(T_2) A_1(T_2) A_2(T_2) - 4n^6 \pi^6 \theta_3 \bar{A}_2(T_2) A_2(T_2)^2 \\ & + 7n^8 \pi^8 \theta_4 A_1(T_2) A_2(T_2) \bar{A}_1(T_2) + \frac{7}{2} n^8 \pi^8 \theta_4 \bar{A}_2(T_2) A_2(T_2)^2 \\ & - i\Lambda_b D_2 A_2(T_2) - i c A_2(T_2) \omega_b - n^6 \pi^6 \bar{A}_2(T_2) A_2(T_2)^2 \\ & + K A_2(T_2) \bar{A}_1(T_2) A_1(T_2) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

$$\Psi_f = n^6 \pi^6 N_f - n^6 \pi^6 \theta_2 - n^4 \pi^4 \theta_1$$

$$N_f = \Delta_I \omega_f^2 - 2\Delta_I \Omega \omega_f - \Delta_0 n^2 \pi^2$$

$$\Lambda_f = 2I_s \omega_f - \Omega n^2 \pi^2$$

$$I_r \Lambda_b = 2I_s \omega_b - \Omega n^2 \pi^2 I_r$$

نشان می‌دهد. مشتق اول و دوم نسبت به زمان به کمک قاعده زنجیره‌ای از روابط (30,29) به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial}{\partial t} = D_0 + \varepsilon^2 D_2, \quad \frac{\partial}{\partial t^2} = D_0^2 + 2\varepsilon^2 D_0 D_2 \quad (29)$$

$$D_0 = \frac{\partial}{\partial T_0}, \quad D_2 = \frac{\partial}{\partial T_2} \quad (30)$$

با جای‌گذاری روابط (30-28) در معادله (26) و مساوی قرار دادن مراتب مشابه ε روابط (32,31) را خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} o(\varepsilon^1): & D_0^2 z_1 - \frac{2}{3} b^2 D_0^2 z_1'' + \frac{1}{3} b^2 ID_0^2 z_1^{(4)} - ID_0^2 z_1'' \\ & + iI_1 \Omega D_0 z_1'' + z_1^{(4)} + \theta_3 z_1^{(4)} \\ & - \theta_4 z_1^{(6)} = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} o(\varepsilon^3): & D_0^2 z_3 - \frac{2}{3} b^2 D_0^2 z_3'' + \frac{1}{3} b^2 ID_0^2 z_3^{(4)} - ID_0^2 z_3'' \\ & + iI_1 \Omega D_0 z_3'' + \theta_3 z_3^{(4)} - \theta_4 z_3^{(6)} \\ & = \Delta_I (D_0^2 \bar{z}_1'' + 2i\Omega D_0 \bar{z}_1'') e^{2i\Omega T_0} - \Delta_Q \bar{z}_1'' e^{2i\Omega T_0} \\ & - 2D_0 D_2 z_1 - c D_0 z_1 - i\Omega I_1 D_2 z_1'' + 2ID_0 D_2 z_1'' \\ & + \frac{4}{3} b^2 D_0 D_2 z_1'' - \frac{2}{3} b^2 ID_0 D_2 z_1^{(4)} \\ & - \frac{1}{3} b^2 \Delta_I D_0^2 \bar{z}_1^{(4)} \\ & - \frac{1}{2} z_1'' \int_1^x \int_0^x (2D_0 z_1' D_0 \bar{z}_1' + D_0^2 z_1' \\ & + D_0^2 \bar{z}_1' z_1') dx dx \\ & - \frac{1}{2} z_1' \int_0^x (2D_0 z_1' D_0 \bar{z}_1' + D_0^2 z_1' \bar{z}_1' \\ & + D_0^2 \bar{z}_1' z_1') dx \\ & - \frac{1}{2} (z_1'' \bar{z}_1' z_1''' + z_1' \bar{z}_1'' z_1''') \\ & + 3\bar{z}_1'' z_1' z_1''' + 4z_1'' z_1' \bar{z}_1''' \\ & + 2\bar{z}_1'' z_1'^2 + \bar{z}_1^{(4)} z_1'^2) \\ & - \theta_3 (\frac{1}{2} z_1'' \bar{z}_1' z_1''' + \frac{3}{2} z_1'' z_1' z_1''') \\ & + \bar{z}_1'' z_1''^2 + 2z_1'' z_1' \bar{z}_1''' + \frac{1}{2} z_1^{(4)} \bar{z}_1' z_1' \\ & + \frac{1}{2} \bar{z}_1^{(4)} z_1'^2) - \frac{\theta_4}{8} (2z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1''^2 \\ & - 92z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1'' \\ & - 2\bar{z}_1' \bar{z}_1''^2 z_1^{(4)} - 38z_1' \bar{z}_1''^2 \bar{z}_1^{(4)} \\ & - 38z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(4)} \\ & - 2\bar{z}_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(4)} - 42z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' \bar{z}_1^{(4)} \\ & + 2\bar{z}_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' \bar{z}_1^{(4)} - 4z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(5)} \\ & - 26z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(5)} - 18\bar{z}_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(5)} \\ & - 2\bar{z}_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(5)} + 2z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' \bar{z}_1^{(5)} \\ & - 4z_1' \bar{z}_1'^2 \bar{z}_1^{(6)} - 42z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(4)} \\ & + 2z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' \bar{z}_1^{(4)} - 4z_1' \bar{z}_1' \bar{z}_1'' z_1^{(6)} \\ & + \Omega^2 (ie_z + e_y) e^{i\Omega T_0} + \theta_2 \bar{z}_1^{(6)} e^{2i\Omega T_0} \\ & - \theta_1 \bar{z}_1^{(4)} e^{2i\Omega T_0} \end{aligned} \quad (32)$$

باید توجه کرد که مؤلفه‌های $c, \Delta_I, \Delta_D, e_z \Omega^2, e_y \Omega^2$ در معادلات بالا به ترتیب با $c\varepsilon^2, \Delta_I \varepsilon^2, \Delta_D \varepsilon^2, e_z \Omega^2 \varepsilon^3, e_y \Omega^2 \varepsilon^3$ جایگزین شده‌اند. یک حل عمومی از رابطه (31) به صورت رابطه (33) به شرح زیر بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} z_1(x, T_0, T_2) &= \Phi_f(x) A_1(T_2) e^{i\omega_f T_0} \\ &+ \Phi_b(x) A_2(T_2) e^{i\omega_b T_0} \end{aligned} \quad (33)$$

شکل موده‌های پیش‌گشت^۱ و پس‌گشت^۲ میکروشفیت و

برای یک میکروشفیت دو سر ساده به صورت رابطه (34) است.

³ Mode Number

⁴ Critical Speed

⁵ Non-Secular Terms

⁶ Solvability Conditions

⁷ Non-trivial Solutions

¹ Forward Mode Shape

² Backward Mode Shape

می‌شود با در نظر گرفتن تئوری غیرکلاسیک تنش کوپل اصلاح شده و اثرات میکرو اینرسی دامنه نوسان کم می‌شود و سفتی سیستم افزایش می‌یابد. نقطه انشعاب سیستم در پارامترهای نامیزانی بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد. در میکروشفت متقارن پاسخ‌های پایدار و ناپایدار دو بار با هم تلاقی می‌کنند که به نقطه محل تلاقی آن‌ها نقطه انشعاب می‌گویند. در این‌جا نقطه انشعاب از نوع گره-زینی است. پدیده پرش نیز فقط یک بار اتفاق می‌افتد و سیستم می‌تواند به ازای یک پارامتر نامیزانی مشخص حداکثر سه پاسخ داشته باشد که آن پاسخ بسته به شرایط اولیه سیستم می‌تواند پایدار یا ناپایدار باشد. منظور از MCST تئوری تنش کوپل اصلاح شده است.

در شکل 3 نمودار پاسخ فرکانسی یک میکروشفت نامتقارن در مود دوم با در نظر گرفتن نابالانسی‌هایی با دامنه برابر 0.0005 و میرایی خارجی 0.03 در دو حالت مدل تئوری کلاسیک و مدل تئوری غیرکلاسیک تنش کوپل اصلاح شده ترسیم شده است. با در نظر گرفتن اثرات مربوط به متغیرهای کوچک یعنی تئوری تنش کوپل اصلاح شده و اثر میکرو اینرسی دامنه نوسانات کوچک‌تر می‌شود و محل نقاط انشعاب نیز تغییر می‌کند. در مدل کلاسیک انشعاب اول در سرعت‌هایی زیر سرعت بحرانی اتفاق می‌افتد، ولی نخستین انشعاب در سرعت‌هایی بالاتر از سرعت بحرانی با در نظر گرفتن اثرات میکرو اینرسی و تئوری تنش کوپل اصلاح شده اتفاق می‌افتد. مشاهده می‌شود که در میکروشفت نامتقارن دو نقطه انشعاب و دو پدیده پرش رخ می‌دهد و سیستم به ازای یک σ مشخص حداکثر پنج پاسخ می‌تواند داشته باشد که سه تای آن پایدار و دو تای دیگر ناپایدار است، ولی در میکرو شفت متقارن دو نقطه انشعاب، یک بار پدیده پرش و حداکثر سه پاسخ می‌تواند اتفاق افتد؛ بنابراین هم اثرات هندسی و هم اثرات وابسته به اندازه تأثیر به سزایی در پاسخ سیستم و نقاط انشعاب خواهد داشت. افزایش مود سبب می‌شود که انشعاب در σ های بزرگ‌تری رخ دهد.

در شکل 4 پاسخ فرکانسی یک میکروشفت دوار در مود سوم و وجود نابالانسی‌های با دامنه برابر 0.0005 و ضریب میرایی خارجی 0.03 برای دو حالت متقارن و نامتقارن ترسیم شده است. تئوری تنش کوپل اصلاح شده و اثرات میکرو اینرسی نیز در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثرات هندسی تأثیر مهمی در پاسخ سیستم و محل نقاط انشعاب دارد. با افزایش شماره مود انشعاب در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی میکروشفت اتفاق می‌افتد.

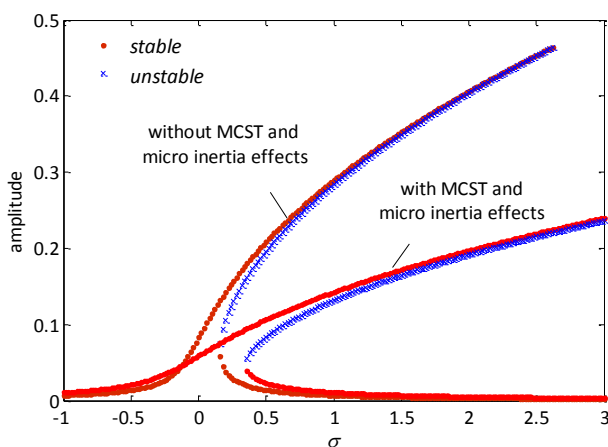


Fig. 2 the amplitude versus frequency curve for the first mode and symmetrical micro shaft

شکل 2 نمودار دامنه برحسب فرکانس در مود اول برای میکروشفت متقارن

$$K = \left(\frac{n^4 \pi^4}{6} - \frac{3n^2 \pi^2}{16} \right) (\omega_f - \omega_b)^2 - 2n^6 \pi^6$$

$$e_1 = \int_0^1 \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \sin n\pi x \right) e_z dx, e_2 = \int_0^1 \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \sin n\pi x \right) e_y dx$$

$$I_r = I_1, I_s = \left(1 + \pi^2 n^2 I + \frac{2}{3} b^2 \pi^2 n^2 + \frac{1}{3} b^2 \pi^4 n^4 I \right) \quad (43)$$

حال به کمک تبدیل زیر رابطه (44) به دست می‌آید.

$$A_1(T_2) = A(T_2)e^{i\sigma T_2} \quad (44)$$

و با جای گذاری آن در روابط (43,42) می‌توان روابط (46,45) را نوشت.

$$-4n^6 \pi^6 \theta_3 A^2 \bar{A} - 8n^6 \pi^6 \theta_3 A A_2 \bar{A}_2 + \frac{7}{2} n^8 \pi^8 \theta_4 A^2 \bar{A} + 7n^8 \pi^8 \theta_4 A A_2 \bar{A}_2 - i\Lambda_f D_2 A + \Psi_f \bar{A} + \sigma \Lambda_f A - n^6 \pi^6 A^2 \bar{A} + K A A_2 \bar{A}_2 - i c \omega_f A + \Omega^2 (e_2 + i e_1) e^{i\sigma T_2} = 0 \quad (45)$$

$$-8n^6 \pi^6 \theta_3 \bar{A} A A_2 - 4n^6 \pi^6 \theta_3 \bar{A}_2 A_2^2 + 7n^8 \pi^8 \theta_4 \bar{A} A A_2 + \frac{7}{2} n^8 \pi^8 \theta_4 \bar{A}_2 A_2^2 - i\Lambda_b D_2 A_2 - i c \omega_b A_2 - n^6 \pi^6 \bar{A}_2 A_2^2 + K \bar{A} A A_2 = 0 \quad (46)$$

A, A_2 را می‌توان به فرم مختصات قطبی به شکل رابطه (47) نوشت.

$$A = \frac{1}{2} a(T_2) e^{i\alpha(T_2)}, A_2 = \frac{1}{2} a_2(T_2) e^{i\beta(T_2)} \quad (47)$$

با جای گذاری رابطه (47) در روابط (46,45) می‌توان روابط (49,48) را نوشت.

$$-\Psi_f a \sin 2\alpha - \Lambda_f D_2 a - c \omega_f a + 2\Omega^2 (e_1 \cos \alpha - e_2 \sin \alpha) = 0,$$

$$-n^6 \pi^6 \theta_3 a^3 + \Psi_f a \cos 2\alpha + \Lambda_f a D_2 \alpha + \Lambda_f a \sigma - \frac{n^6 \pi^6}{4} a^3 + \frac{K}{4} a a_2^2 - 2n^6 \pi^6 \theta_3 a a_2^2 + \frac{7}{4} n^8 \pi^8 \theta_4 a a_2^2 + \frac{7}{8} n^8 \pi^8 \theta_4 a^3 + 2\Omega^2 (e_1 \sin \alpha + e_2 \cos \alpha) = 0 \quad (48)$$

$$-\Lambda_b D_2 a_2 - c \omega_b a_2 = 0,$$

$$\Lambda_b a_2 D_2 \beta - \frac{n^6 \pi^6}{4} a_2^3 + \frac{K}{4} a^2 a_2 - 2n^6 \pi^6 \theta_3 a^2 a_2 - n^6 \pi^6 \theta_3 a_2^3 + \frac{7}{4} n^8 \pi^8 \theta_4 a^2 a_2 + \frac{7}{8} n^8 \pi^8 \theta_4 a_2^3 = 0 \quad (49)$$

در پاسخ حالت ماندگار سیستم¹ تغییرات نسبت به زمان برابر صفر خواهد بود؛ بنابراین در روابط (49,48) با صفر قرار دادن $D_2 a_2, D_2 a, D_2 \alpha, D_2 \beta$ پاسخ‌های ماندگار به دست می‌آیند. از رابطه (49) نتیجه می‌شود که $a_2 = 0$ است. که نشان می‌دهد اثر مربوط به مود پس‌گشت از بین خواهد رفت و برای پاسخ مربوط به مود پیش‌گشت می‌توان رابطه (50) را به صورت زیر نوشت.

$$-\Psi_f a \sin 2\alpha - c \omega_f a + 2\Omega^2 (e_1 \cos \alpha - e_2 \sin \alpha) = 0,$$

$$-n^6 \pi^6 \theta_3 a^3 + \Psi_f a \cos 2\alpha + \Lambda_f a \sigma - \frac{n^6 \pi^6}{4} a^3 + \frac{7}{8} n^8 \pi^8 \theta_4 a^3 + 2\Omega^2 (e_1 \sin \alpha + e_2 \cos \alpha) = 0 \quad (50)$$

3- نتایج عددی

یک میکروشفت دوار با ثوابت مرتبه بالاتر به صورت $l_0 = l_1 = 0$ در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود میکروشفت دوار از اپوکسی² با خواص رابطه (51) ساخته شده باشد.

$$E = 1.44 \text{ GPa}, \quad \nu = 0.38, \quad \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (51)$$

ابعاد هندسی میکروشفت متقارن دایره‌ای به شعاع 17.6 میکرومتر و طول 176 میکرومتر است.

در شکل 2 پاسخ فرکانسی یک میکرو شفت دوار متقارن در مود اول ارتعاشی با وجود نابالانسی‌های برابر با اندازه 0.0005 و میرایی خارجی 0.03 در دو حالت تئوری کلاسیک و تئوری غیرکلاسیک ترسیم شده است. مشاهده

¹ Steady State Response

² Epoxy

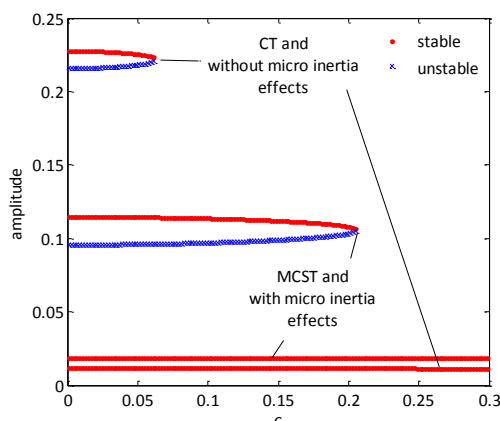


Fig. 5 the amplitude versus external damping coefficient curve for the first mode and symmetrical micro shaft

شکل 5 نمودار دامنه برحسب ضریب میرایی خارجی در مود اول برای میکروشت

مقارن

در شکل 7 نمودار دامنه برحسب نابالانسی در مود اول به ازای $\sigma = 1$ و وجود میرایی خارجی با ضریب 0.03 برای یک میکروشت مقارن در دو حالت با در نظر گرفتن تئوری کلاسیک و با در نظر گرفتن تئوری غیرکلاسیک تنش کوپل اصلاح شده رسم شده است. وقتی نابالانسی صفر است، یعنی میکروشت بالانس و سیستم دارای پاسخ بدیهی پایدار است. با افزایش نابالانسی پاسخ سیستم تغییر می کند و می تواند به ازای برخی نابالانسی های خاص سه پاسخ داشته باشد که باز هم شرایط اولیه تعیین می کند کدام پاسخ قابل قبول است. در نظر گرفتن تئوری تنش کوپل اصلاح شده و اثرات میکرو اینرسی سبب شده که در نابالانسی های کمتری انشعاب اتفاق افتد. در یک نابالانسی مشخص برای نمونه 0.005 در مدل غیرکلاسیک سیستم فقط یک پاسخ پایدار غیربدیهی دارد، در حالی که در مدل کلاسیک سیستم سه پاسخ غیربدیهی دارد که دو تای آن پایدار و یکی ناپایدار است.

در شکل 8 نمودار دامنه برحسب نابالانسی در مود اول با وجود میرایی خارجی 0.03 به ازای $\sigma = 0.6$ برای یک میکروشت دوار نامقارن در دو حالت مدل کلاسیک و مدل غیرکلاسیک رسم شده است.

میکروشت مقارن در میکرو شفت نامقارن نیز در نظر گرفتن تئوری غیرکلاسیک و اثرات میکرو اینرسی سبب شده که انشعاب دوم در نابالانسی های کمتری اتفاق افتد. در یک نابالانسی مشخص مثلاً 0.005 مدل

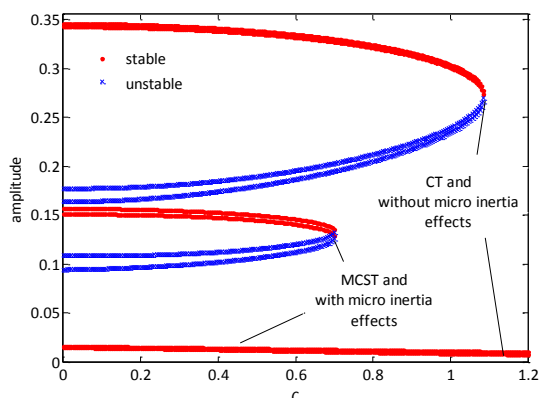


Fig. 6 the amplitude versus external damping coefficient curve for the first mode and asymmetrical micro shaft

شکل 6 نمودار دامنه برحسب ضریب میرایی خارجی در مود اول برای میکروشت

نامقارن

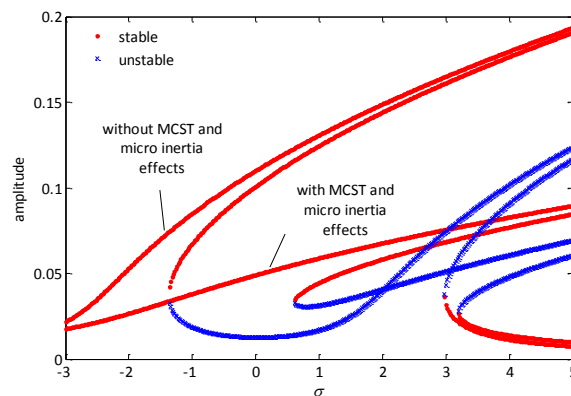


Fig. 3 the amplitude versus frequency curve for the second mode and asymmetrical micro shaft

شکل 3 نمودار دامنه برحسب فرکانس در مود دوم برای میکروشت نامقارن

در شکل 5 نمودار دامنه برحسب ضریب میرایی خارجی برای میکرو شفت دوار مقارن در مود اول ارتعاشی با وجود نابالانسی های برابر با 0.0005 به ازای یک σ مشخص (در این جا برابر با 0.6) در دو حالت تئوری کلاسیک و تئوری غیرکلاسیک ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می شود با در نظر گرفتن اثرات مقیاس کوچک یعنی اثرات میکرو اینرسی و اثر مربوط به تئوری تنش کوپل اصلاح شده انشعاب در ضرایب میرایی بالاتری اتفاق می افتد. اگر یک ضریب میرایی خاص مثلاً 0.15 در نظر گرفته شود با در نظر گرفتن تئوری کلاسیک فقط یک پاسخ پایدار وجود دارد، ولی سیستم با در نظر گرفتن تئوری غیرکلاسیک سه پاسخ دارد که یکی از آن ها ناپایدار و دو تای دیگر پایدار است، و شرایط اولیه تعیین می کند که کدام پاسخ قابل قبول خواهد بود. ضریب میرایی خارجی نیز یک پارامتر تاثیرگذار در پاسخ حالت ماندگار سیستم و نقطه انشعاب است. منظور از CT تئوری کلاسیک است.

در شکل 6 نمودار دامنه برحسب ضریب میرایی خارجی برای یک میکروشت دوار نامقارن در مود اول ارتعاشی با وجود نابالانسی های برابر 0.0005 و به ازای $\sigma = 0.9$ در دو حالت تئوری غیرکلاسیک و تئوری کلاسیک رسم شده است. یکی از پاسخ های سیستم که دامنه کوچکی دارد در هر دو تئوری برهم منطبق شده، و این همان پاسخ پایدار و میراشده سیستم است. برای چهار پاسخ باقی مانده دامنه نوسانات در تئوری غیرکلاسیک کوچک تر از تئوری کلاسیک است. در تئوری کلاسیک و بدون منظور کردن اثرات میکرو اینرسی در ضرایب میرایی بالاتری نقاط انشعاب اتفاق می افتد در حالی که در میکروشت مقارن برعکس چنین حالتی رخ می دهد.

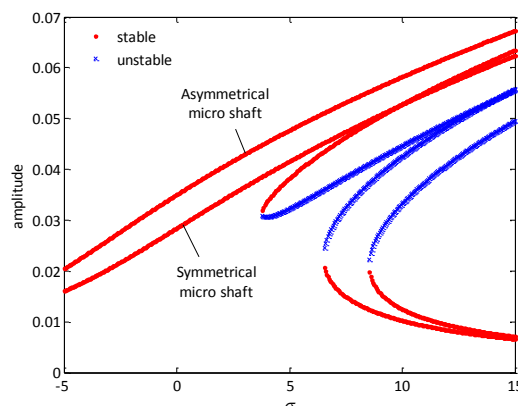


Fig. 4 the comparing of the frequency response between symmetrical and asymmetrical micro shaft on the third mode

شکل 4 مقایسه پاسخ فرکانسی میکروشت مقارن و نامقارن در مود سوم

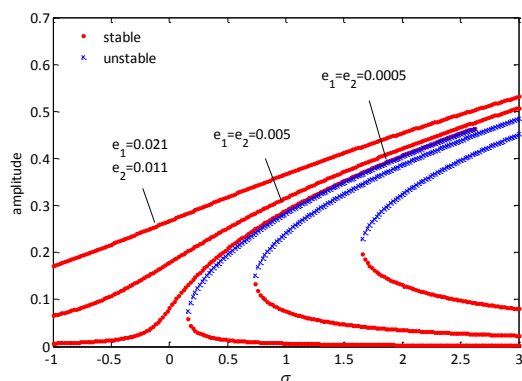


Fig. 9 the frequency response of the symmetrical micro rotating shaft for the first mode and the difference eccentricities

شکل 9 پاسخ فرکانسی میکرو شفت دوار متقارن در مود اول برای مقادیر نابالانسی‌های متفاوت

می‌دهد که سیستم با وجود تئوری غیرکلاسیک و اثر میکرواینرسی در ضرایب میرایی بزرگ‌تری به حالت کاملاً پایدار خواهد رسید، ولی میکرو شفت دوار نامتقارن در ضرایب میرایی کوچک‌تری به حالت کاملاً پایدار خواهد رسید. از نمودار دامنه برحسب نابالانسی می‌توان نتیجه گرفت که برای یک میکرو شفت متقارن با نامتقارن با وجود تئوری غیرکلاسیک و اثر میکرواینرسی، انشعاب بارز مسأله در نابالانسی‌های کوچک‌تری اتفاق خواهد افتاد؛ بنابراین اثرات مربوط به مقیاس کوچک، ضریب میرایی خارجی، نابالانسی و نامتقارنی پارامترهای تأثیرگذاری بر پاسخ سیستم است که در طراحی و ساخت سازه‌های با ابعاد کوچک می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

5- فهرست علائم

m	جرم واحد طول
c	ضریب میرایی خارجی
ℓ	طول میکرو شفت
A	سطح مقطع
E, G	مدول یانگ و مدول برشی
e	کرنش محوری تار خنثی
A_1	سفتی محوری
D_1, D_2, D_3	سفتی پیچشی، سفتی محوری حول محور Y و سفتی محوری حول محور Z
u, v, w	جابجایی طولی، جابجایی عرضی در راستای Y و جابجایی عرضی در راستای Z
k_1, k_2, k_3	انحنای میکرو شفت
I_1, I_2, I_3	ممان اینرسی قطبی، ممان اینرسی حول محور Y و ممان اینرسی حول محور Z
e_y, e_z	نابالانسی نسبت به محور Y و نابالانسی نسبت به محور Z
l_0, l_1, l_2	ثوابت مرتبه بالاتر ماده
علائم یونانی	
ρ	چگالی حجمی
Ω	سرعت زاویه‌ای میکرو شفت
ψ, θ, β	زاوای اوپلر 1-2-3
$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$	مؤلفه‌های بردار سرعت زاویه‌ای

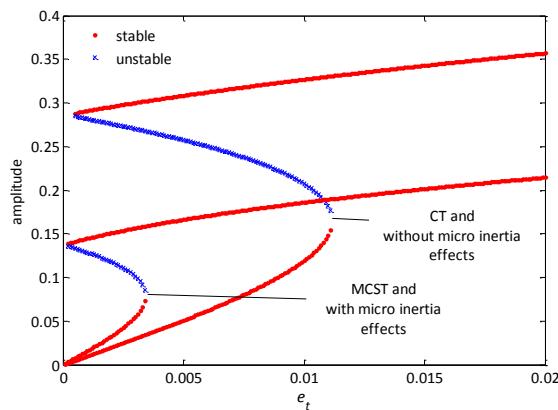


Fig. 7 the amplitude versus eccentricity curve for the first mode and symmetrical micro shaft

شکل 7 نمودار دامنه بر حسب نابالانسی در مود اول برای میکرو شفت متقارن

غیرکلاسیک فقط یک پاسخ پایدار غیربدیهی را پیش‌بینی می‌کند، ولی مدل کلاسیک سه پاسخ را پیش‌بینی می‌کند که دوتای آن پایدار و یکی ناپایدار است. به هر حال شرایط اولیه باز هم تعیین کننده پاسخ خواهد بود.

در شکل 9 پاسخ فرکانسی یک میکرو شفت دوار متقارن در مود اول با وجود میرایی خارجی با ضریب 0.03 و در نظر گرفتن اثرات میکرو اینرسی و تئوری غیرکلاسیک تنش کوپل اصلاح شده برای مقادیر مختلفی از نابالانسی رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که اختلاف بین نابالانسی نیز در پاسخ سیستم و نقطه انشعاب تأثیرگذار خواهد بود به گونه‌ای که افزایش نابالانسی برای حالت دامنه نابالانسی برابر سبب شده که نقطه انشعاب در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی میکرو شفت صورت گیرد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارتعاشات غیرخطی و پایداری میکرو شفت دوار متقارن و نامتقارن با در نظر گرفتن اثرات وابسته به اندازه و مقیاس کوچک مربوط به گرادیان‌های کرنش (حالت خاص آن تنش کوپل اصلاح شده) و میکرو اینرسی به کمک تئوری غیرکلاسیک تنش کوپل اصلاح شده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در نظر گرفتن تئوری غیرکلاسیک و اثر میکرواینرسی سبب خواهد شد محل نقاط انشعاب تغییر کند، همچنین به دلیل تغییر سفتی سیستم دامنه سیستم به طور کلی پایین‌تر از تئوری کلاسیک خواهد بود. نمودار دامنه برحسب ضریب میرایی خارجی برای یک میکرو شفت دوار متقارن نشان

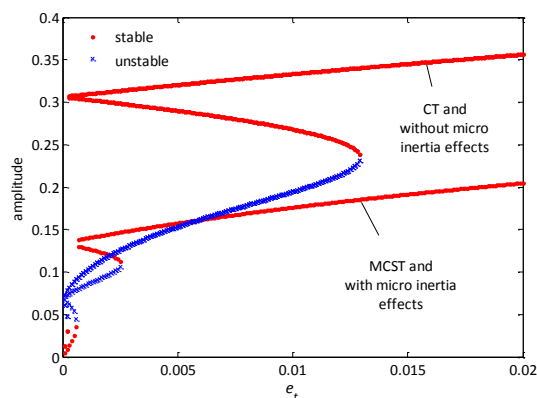


Fig. 8 the amplitude versus eccentricity curve for the first mode and asymmetrical micro shaft

شکل 8 نمودار دامنه برحسب نابالانسی در مود اول برای یک میکرو شفت نامتقارن

6- مراجع

- [10] S. Kong, S. Zhou, Z. Nie, K. Wang, The size-dependent natural frequency of Bernoulli–Euler micro-beams, *Engineering Science*, Vol. 46, pp. 427-437, 2008.
- [11] B. Akgöz, Ö. Civalek, Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Bernoulli–Euler microbeams based on the modified couple stress theory, *Composite Structures*, Vol. 98, pp. 314-322, 2013.
- [12] B. Akgöz, Ö. Civalek, Bending analysis of FG microbeams resting on Winkler elastic foundation via strain gradient elasticity, *Composite Structures*, Vol. 134, pp. 294-301, 2015.
- [13] M. Hashemi, M. Asghari, A Semi-analytical Solution for Flexural Vibration of Micro Beams Based on the Strain Gradient Theory, *Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, Vol. 1, pp. 48-61, 2015.
- [14] K. B. Mustapha, Z. W. Zhong, Spectral element analysis of a non-classical model of a spinning micro beam embedded in an elastic medium, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 53, pp. 66-85, 2012.
- [15] S. E. Khadem, M. Shahgholi, S. A. A. Hosseini, Two-mode combination resonances of an in-extensional rotating shaft with large amplitude, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 65, pp. 217-233, 2011.
- [16] S. A. A. Hosseini, S. E. Khadem, Free vibrations analysis of a rotating shaft with nonlinearities in curvature and inertia, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 44, pp. 272-288, 2009.
- [17] A. H. Nayfeh, P. F. Pai, *Linear and Nonlinear Structural Mechanics*, Second Edition, pp. 195-202, New York: Wiley-Interscience, 2004.
- [18] R. D. Mindlin, N. N. Eshel, On first strain-gradient theories in linear elasticity, *Solids and Structures*, Vol. 4, pp. 109-124, 1968.
- [19] M. Shahgholi, S. E. Khadem, Stability analysis of a nonlinear rotating asymmetrical shaft near the resonances, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 70, pp. 1311-1325, 2012.
- [20] A. H. Nayfeh, *Introduction to Perturbation Methods*, Second Edition, pp. 139-142, New York: Wiley-Interscience, 1981.
- [1] R. Katz, The dynamic response of a rotating shaft subject to an axially moving and rotating load, *Sound and Vibration*, Vol. 246, pp. 757-775, 2001.
- [2] I. Nagasaka, Y. Ishida, J. Liu, Forced oscillations of a continuous asymmetrical rotor with geometric nonlinearity (major critical speed and secondary critical speed), *Vibration and Acoustics*, Vol. 130, pp. 031012-031012, 2008.
- [3] S. A. A. Hosseini, M. Zamanian, Multiple scales solution for free vibrations of a rotating shaft with stretching nonlinearity, *Scientia Iranica*, Vol. 20, pp. 131-140, 2013.
- [4] S. E. Khadem, M. Shahgholi, S. A. A. Hosseini, Primary resonances of a nonlinear in-extensional rotating shaft, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, pp. 1067-1081, 2010.
- [5] M. Shahgholi, S. E. Khadem, Primary and parametric resonances of asymmetrical rotating shafts with stretching nonlinearity, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 51, pp. 131-144, 2012.
- [6] M. Shahgholi, S. E. Khadem, Internal, combinational and sub-harmonic resonances of a nonlinear asymmetrical rotating shaft, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 79, pp. 173-184, 2015.
- [7] M. Shahgholi, S. Esmaeilzadeh Khadem, Resonance analysis of gyroscopic nonlinear spinning shafts with parametric excitations and speed fluctuations, *Mechanical Sciences*, Vol. 64, pp. 94-109, 2012.
- [8] Shoostari, A. n. A. M. Hoseini, S. n. A. N. Mahmoodi, S. n. A. Kalhori, Hamed, Analytical solution for nonlinear free vibrations of viscoelastic microcantilevers covered with a piezoelectric layer, *Smart Materials and Structures*, 2012.
- [9] M. Fathallilou, M. Sadeghi, G. Rezazadeh, Micro-inertia effects on the dynamic characteristics of micro-beams considering the couple stress theory, *Mechanics Research Communications*, Vol. 60, pp. 74-80, 2014.