



بررسی رفتار دینامیکی میکروتیر تحت اثر ولتاژ و جریان سیال به عنوان میکروتولیدکننده گردابه

موسی رضائی*، ناصر شرفخانی، محمدتقی شروانی تبار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۱۲
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۲۲
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۷-۰۱

کلمات کلیدی:

میکروتولیدکننده گردابه
میکروتیر
ولتاژ
جریان سیال
قفل‌شدگی

خلاصه: در این تحقیق ارتعاشات غیرخطی میکروتیر یک‌سر گیردار تحت اثر همزمان ولتاژ و جریان سیال به عنوان میکروتولیدکننده گردابه مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه میکروتیر موردنظر در معرض جریان سیال با سرعت معین قرار دارد، علاوه بر نیروی ناشی از جرم افزوده سیال، اثر نیروهای برآ و پسا به عنوان دو پارامتر مهم ناشی از جریان سیال بر ارتعاش میکروتیر با استفاده از معادله واندربیل شبیه‌سازی گردید. از تئوری تیر اویلر-برنولی جهت مدل‌سازی ارتعاش میکروتیر تحت اثر نیروی غیرخطی الکترواستاتیک ناشی از اعمال ولتاژ در جهت عمود بر جریان سیال استفاده گردیده و نشان داده شد که با توجه به اثر متقابل حرکت ساختار و نوسان سیال، معادلات حاکم به هم وابسته می‌باشند. جهت تبدیل معادلات با مشتق جزئی به معادلات دیفرانسیل معمولی از روش عددی گلرکین استفاده نموده و پاسخ سیستم به اثر ولتاژ در حضور جریان سیال مورد بررسی قرار گرفت. اثر جریان سیال بر عدد رینولدز و فرکانس گردابه سیال به عنوان دو عامل مهم در ایجاد پدیده گردابه مورد مطالعه قرار گرفته و پاسخ سیستم به سیال با سرعت‌های جریان مختلف به دست آمد. همچنین اثر ولتاژهای اعمالی مختلف بر پاسخ سیستم تحت اثر جریان سیال معین مورد بررسی قرار گرفته و از آن برای کنترل ناحیه‌ای که در آن پدیده قفل‌شدگی اتفاق می‌افتد استفاده گردید.

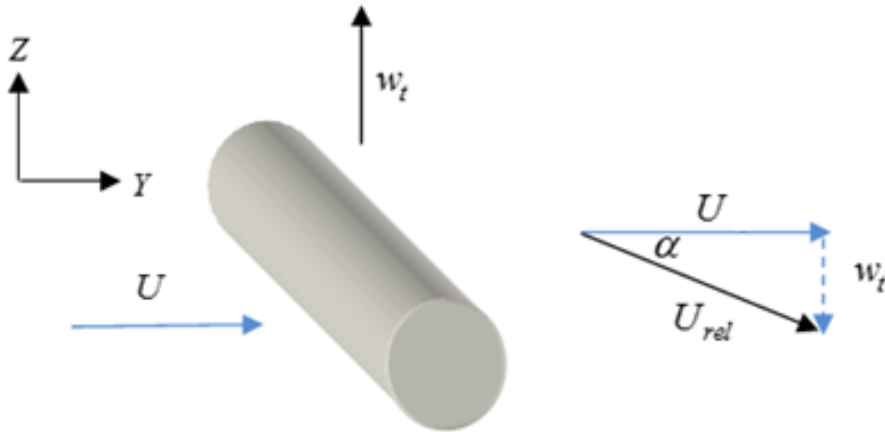
۱- مقدمه

نیروی الکترواستاتیک با توجه به مکانیزم ساده، کارایی بالا، قابلیت اطمینان و مصرف کمتر انرژی، به عنوان نیروی محرک کاربرد زیادی در سیستم‌های مختلف میکروالکترومکانیکی دارد [۱-۴]. در طی سال‌های گذشته، میکروتیرهای تحت اثر نیروی الکترواستاتیک ناشی از اعمال ولتاژ به عنوان یکی از مهمترین اجزای تشکیل دهنده میکروساختارها در سیستم‌های مختلف میکروالکترومکانیکی مورد توجه محققان بسیاری بوده است [۵ و ۶].

در تحقیقاتی که تاکنون در مقیاس میکرو به بررسی اثر سیال بر رفتار دینامیکی ساختار پرداخته شده است عمدتاً محدود به بررسی اثر سیال ساکن بوده است. گلزار و همکاران [۷] به بررسی رفتار دینامیکی و ناپایداری میکروتیر تحت اثر نیروی الکترواستاتیک و سیال میرای تراکم‌ناپذیر پرداختند. آن‌ها با فرض میرا بودن سیال و جایگذاری نیروی معادل ناشی از میرایی فیلم فشرده در معادلات ارتعاش عرضی به بررسی فرکانس طبیعی ساختار کوپل پرداختند و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_rezaee@tabrizu.ac.ir

با اعمال ولتاژهای مختلف مشخصه‌های مربوط به ناپایداری را برای سیال با چگالی‌های مختلف به دست آوردند. چون و همکاران [۸] با استفاده از نتایج تجربی به بررسی صحت روش‌های مورد استفاده در تحلیل فرکانسی میکروتیر در معرض جریان سیال پرداخته و نشان دادند که برای سیال با عدد رینولدز بالا می‌توان از اثر میرایی صرف‌نظر کرد و نتایج به دست آمده برای سیال میرا و غیرمیرا یکسان می‌باشد. تحقیقات معدودی به بررسی میکروساختارهای در معرض جریان سیال پرداخته‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. گوان و همکاران [۹] به بررسی میکرواستوانه تحت اثر جریان سیال و حرارت به صورت مجزا و توأم در یک کانال مستطیل شکل پرداخته و نشان دادند که زاویه و طول ناحیه ایجاد گردابه در پشت میکرواستوانه متأثر از سرعت سیال و ویژگی‌های هندسی میکرواستوانه و کانال می‌باشد. تمایل و همکاران [۱۰] کاهش فشار سیال در داخل میکروکانال ناشی از عبور سیال از میان گروهی از میکرواستوانه‌ها را به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار داده و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. آلفیری و همکاران [۱۱] به بررسی امکان استفاده از پدیده گردابه جهت خنک کردن



شکل ۱: جریان واقعی سیال با در نظر گرفتن ارتعاش میکروتیر

۲- مدل سازی

۲-۱- اثر گردابه

وقتی میکروتیر استوانه‌ای به قطر D در مسیر جریان سیال با سرعت ثابت U قرار می‌گیرد، تحت شرایطی که متأثر از عدد رینولدز سیال، رابطه (۱)، می‌باشد می‌تواند باعث ایجاد گردابه در ناحیه پشت میکروتیر گردد [۱۶].

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

در رابطه اخیر، ν میرایی جنبشی سیال بوده و Re عدد رینولدز سیال می‌باشد که با توجه به ابعاد میکروتیر، مقدار کوچکی خواهد داشت [۱۰]. با توجه به اینکه در این تحقیق، سیال مورد بررسی جریانی با سرعت U دارد علاوه بر اثر نیروی ناشی از جرم افزوده سیال ساکن، f_I ، نیروی برآ، f_L ، و نیروی پسا، f_D ، نیز بر میکروتیر اثر خواهند گذاشت:

$$f_f = f_I + f_D + f_L \quad (2)$$

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است ارتعاش میکروتیر در جهت Z بر بردار سرعت واقعی سیال نسبت به ساختار اثر خواهد گذاشت و خواهیم داشت:

$$\vec{U}_{rel} = U\vec{j} - w_t\vec{k} \quad (3-الف)$$

$$U_{rel} = \sqrt{U^2 + w_t^2} \quad (3-ب)$$

توسط آب پرداخته و با ارائه مدلی تجربی به بررسی اثر پارامترهای هندسی میکرواستوانه‌ها و نحوه قرارگیری آن‌ها در افزایش انتقال حرارت از آب پرداختند. پیرس [۱۲] به مطالعه ایجاد پدیده گردابه با عبور دادن جریان سیال از روی میکروساختارهای استوانه‌ای و مثلی شکل جهت مخلوط کردن و همگن‌سازی مایعاتی که به هر دلیلی محتویات آن‌ها دچار رسوب شده‌اند پرداخت. شنگ و همکاران [۱۳] با استفاده از تحریک پیزوالکتریک و به صورت تجربی به ایجاد پدیده گردابه در میکروساختارها پرداخته است. ونگ و همکاران [۱۴] با کمک ایجاد پدیده گردابه، جداسازی ذرات با اندازه و چگالی مختلف در داخل میکروسیال را مورد مطالعه قرار دادند. لازم به ذکر است که در تحقیقات مذکور، مشخصات فیزیکی پدیده گردابه در میکروساختارها بررسی شده است و رفتار دینامیکی و مشخصه‌های ارتعاشی ساختار مورد بررسی قرار نگرفته است. در زمینه اثر جریان سیال بر رفتار ارتعاشی میکروساختار، رضائی و شرفخانی [۱۵] ارتعاش میکروتیرهای استوانه‌ای شکل تحت اثر همزمان ولتاژ و جریان سیال را به عنوان میکروتولیدکننده انرژی بررسی نموده‌اند.

در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن اثر ولتاژ، رفتار و مشخصه‌های ارتعاشی میکروتولیدکننده گردابه^۱ بررسی شده و معادلات حاکم بر ارتعاشات میکروتیر و نوسان سیال با استفاده از تئوری‌های تیر اویلر-برنولی و واندرپل استخراج و با استفاده از روش‌های عددی و با کمک نرم‌افزار متلب^۲ حل گردید.

1 Micro vortex generator
2 MATLAB

نیز در نظر گرفته شود. با توجه به شرایط ذکر شده، از معادله واندرپیل جهت مدل سازی رفتار سیال به صورت زیر استفاده می گردد [۱۸]:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \eta \omega_{vor} (Q^2 - 1) \frac{\partial Q}{\partial t} + \omega_{vor}^2 Q = \frac{P}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (7)$$

که در آن، $\frac{P}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ ، نیروی اعمالی ناشی از ارتعاش ساختار بر سیال است. مقدار η به عنوان ضریب میرایی جریان سیال اضافه شده، وابسته به ضریب پسای متوسط بوده و مقدار آن تقریباً برابر ۰/۳ است و با توجه به نتایج تجربی $P = 12$ می باشد [۱۸]. بنابراین، نیروی برآ برابر خواهد بود با [۱۸]:

$$f_L = \frac{1}{2} \rho_f C_l D U_{rel}^2, \quad (8)$$

که در آن مقدار C_l با توجه به مدل پیشنهادی فاجیننتی^۴ به صورت زیر به دست می آید [۱۸]:

$$C_l = \frac{1}{2} C_{l_0} Q \quad (9)$$

که در آن C_{l_0} ثابت نیروی برآ بوده و مقدار Q از معادله (۷) به دست می آید.

۳-۱-۲ - نیروی پسا

برخورد سیال بر ساختار میکروتیر علاوه بر نیروی برآ باعث به وجود آمدن نیروی پسا نیز می شود که مقدار آن از رابطه زیر پیروی می کند [۱۷، ۲۰]:

$$f_D = \frac{1}{2} \rho_f C_D D U_{rel}^2, \quad (10)$$

که در آن C_D مقدار میانگین ثابت نیروی پسا می باشد.

۲-۲ - میکروتیر تحت اثر جریان سیال و ولتاژ

شکل ۲ میکروتیر یک سرگردار با سطح مقطع دایره ای با طول l و قطر D را نشان می دهد که محور مرکزی آن در فاصله g از الکتروود ثابت موازی پایینی قرار گرفته است. میکروتیر مورد نظر تحت اثر نیروی پیوسته الکترواستاتیک ناشی از اعمال ولتاژ V و جریان سیال با سرعت U قرار دارد که عمود بر محور مرکزی میکروتیر عبور

$$\sin \alpha = \frac{w_t}{U_{rel}} \quad (3-c)$$

۲-۱-۱ - جرم افزوده

وقتی که میکروتیر در داخل سیال ارتعاش می کند بر سیال پیرامون خود اثر گذاشته و باعث حرکت آن می شود، در نتیجه شتاب ایجاد شده در سیال بر خود میکروتیر نیز اثر گذاشته و باعث به وجود آمدن نیروی عکس العمل بر روی آن می شود که از رابطه زیر به دست می آید [۱۷]:

$$f_I = -m_f \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (4)$$

که در آن m_f جرم افزوده ناشی از اثر سیال است که مقدار آن برای تیرها با سطح مقطع های مختلف متفاوت بوده و برای میکروتیر با سطح مقطع دایره ای به صورت رابطه زیر است [۱۷]:

$$m_f = C_m \rho_f A \quad (5)$$

که در آن C_m ضریب تصحیح اثر جرم افزوده می باشد و مقدار آن با توجه به فاصله میکروتیر از دیواره کناری (الکتروود ثابت پایینی) متغیر خواهد بود.

۲-۱-۲ - نیروی برآ

قرار گرفتن میکروتیر در معرض عبور جریان سیال باعث به وجود آمدن نیروی برآ می شود که در جهت عمود بر جریان سیال و با فرکانسی برابر با فرکانس گردابه سیال، رابطه (۶)، بر میکروتیر عمل می نماید [۱۸]:

$$\omega_{vor} = \frac{2\pi U_{rel} St}{D} \quad (6)$$

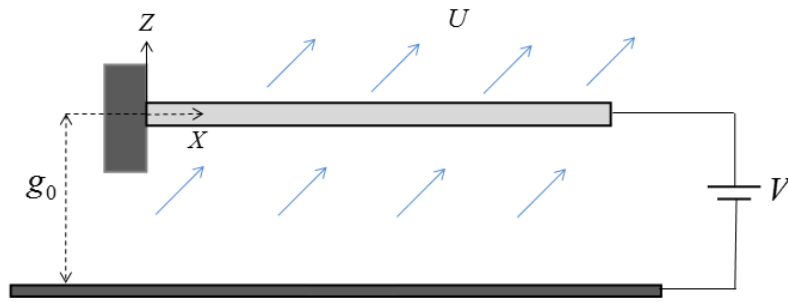
که در آن، U_{rel} ، نشان دهنده سرعت نسبی سیال و St عدد استروهال^۱ می باشد که متغیر با عدد رینولدز سیال است [۱۹].

جهت مدل سازی نوسان سیال، علاوه بر اینکه معادله ارائه شده باید ماهیت خودتحریکی^۲ و خود محدودکنندگی^۳ پدیده گردابه را حفظ نماید، لازم است جهت بالا بردن دقت نتایج، اثر ارتعاش ساختار

1 ¹ Strouhal number

2 ² Self exciting

3 ³ Self limiting



شکل ۲: نمای جانبی میکرو تیر یک سرگردار (میکروتولیدکننده گردابه) تحت اثر ولتاژ و جریان سیال

$$(EI)w_{xxxx} + \rho A \left(1 + \frac{\rho_f}{\rho}\right) w_{tt} + \left[\frac{1}{2} \rho_f C_D D U_{rel}\right] w_t = f_e + \left(\frac{1}{4} \rho_f C_b D U_{rel} U\right) Q \quad (13)$$

که در آن Q نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \eta \omega_{vor} (Q^2 - 1) \frac{\partial Q}{\partial t} + \omega_{vor}^2 Q = \frac{P}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (14)$$

دو معادله (۱۳) و (۱۴) نشان دهنده کوپل بودن ارتعاش میکروتیر و نوسان سیال است.

۳- بی‌بعد سازی معادلات حاکم

برای بی‌بعد کردن معادلات حاکم بر ارتعاش میکروتیر تحت اثر ولتاژ و جریان سیال، پارامترهای بی‌بعد زیر را معرفی می‌کنیم:

$$\hat{x} = \frac{x}{l}, \quad \hat{w} = \frac{w}{g_0}, \quad \hat{r} = \frac{r}{g_0}, \quad \hat{t} = \frac{t}{\bar{t}}, \quad \bar{t} = \sqrt{\frac{\rho A l^4}{EI}}, \quad (15)$$

$$\hat{U}_{rel} = \frac{2\pi U_{rel}}{\omega_{st} D}, \quad \hat{U} = \frac{2\pi U}{\omega_{st} D}, \quad \hat{V} = \sqrt{\frac{\epsilon_e \pi l^4}{EI g_0^2}} V$$

که در آن، ω_{st} ، U و U_{rel} به ترتیب فرکانس ارتعاش میکروتیر، سرعت ویژه سیال و سرعت واقعی ویژه سیال (با در نظر گرفتن اثر حرکت میکروساختار) می‌باشد.

با جایگذاری پارامترهای تعریف شده در روابط (۱۳) و (۱۴) خواهیم داشت:

$$\hat{w}_{xxxx} + C \hat{w}_t + (1 + \rho_{rel}) \hat{w}_{tt} = \hat{f}_e + \Upsilon' Q \quad (16-الف)$$

$$Q_{tt} + \eta \Omega_{vor} (Q^2 - 1) Q_t + \Omega_{vor}^2 Q = \beta \hat{w}_{tt}, \quad (16-ب)$$

که در آن:

می‌نماید. علاوه بر این، سیال مورد نظر نامیرا و غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده و چگالی آن ρ_f فرض می‌شود.

نیروی خارجی F_Z با توجه به شکل ۳ از رابطه زیر به دست می‌آید:

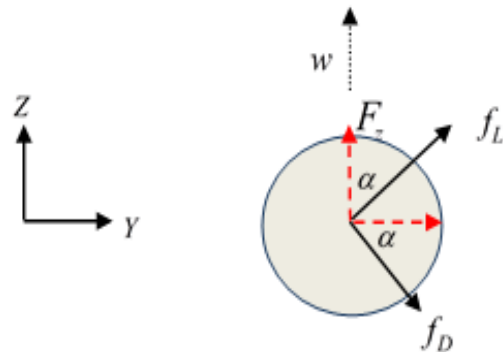
$$F_z = f_L \cos \alpha - f_D \sin \alpha - f_e \quad (11)$$

که در آن، f_e ، نیروی الکترواستاتیک ناشی از اعمال ولتاژ می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$f_e = \frac{\epsilon_e \pi V^2}{\sqrt{[(g_0 - w)^2 + 2(g_0 - w)r] \times \operatorname{arccosh}^2 \left[1 + \frac{(g_0 - w)}{r}\right]}} \quad (12)$$

و ϵ_e و $r = \frac{D}{2}$ به ترتیب نشان‌دهنده ثابت دی‌الکتریک ماده بین الکترودها و شعاع میکروتیر بوده و V ولتاژ اعمالی می‌باشد.

با توجه به رابطه (۱۲)، با در نظر گرفتن تئوری تیر اویلر-برنولی [۲۲]، برای ارتعاش عرضی میکروتیر تحت اثر نیروی الکترواستاتیک و جریان سیال خواهیم داشت:



شکل ۳: اثر نیروهای برآ و پسا بر میکروتیر

جدول ۱: ویژگی‌های مادی [۷] و هندسی میکروساختار مدل سازی شده

مقدار	ویژگی
450 μm	طول (l)
14 μm	قطر (D)
50 μm	فاصله اولیه (g_0)
169 GPa	مدول الاستیسیته (E)
2330 kg/m^3	چگالی میکرو-تیر (ρ)
1020 kg/m^3	چگالی-سیال (ρ_f)
80 \times 8.85 pF/m	ثابت دی الکتریک (ϵ)
1.004 $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	ویسکوزیته دینامیکی (ν)

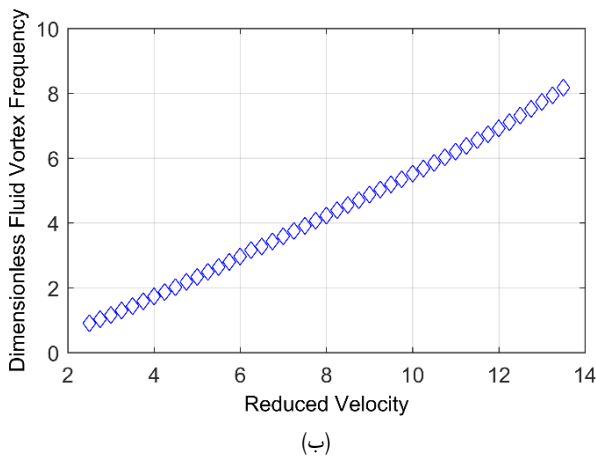
با جایگذاری روابط (۱۸) در معادلات (۱۶) و ضرب طرفین معادلات در $\phi_i(\hat{x})$ و انتگرال گیری در بازه $\hat{x} = 0$ تا $\hat{x} = 1$ خواهیم داشت:

$$\sum_{j=1}^n M_{ij}(\hat{x}) \ddot{q}_j(\hat{t}) + \sum_{j=1}^n C_{ij}(\hat{x}) \dot{q}_j(\hat{t}) + \sum_{j=1}^n K_{ij}(\hat{x}) q_j(\hat{t}) = F_i + \sum_{j=1}^n \gamma'_{ij}(\hat{x}) \chi_j(\hat{t}) \quad (20\text{-الف})$$

$$\sum_{j=1}^n \Lambda_{ij}(\hat{x}) \ddot{\chi}_j(\hat{t}) + \sum_{j=1}^n \Lambda_{ij}(\hat{x}) \dot{\chi}_j(\hat{t}) + \sum_{j=1}^n \Pi_{ij}(\hat{x}) \chi_j(\hat{t}) = F_i + \sum_{j=1}^n \beta_{ij}(\hat{x}) \ddot{q}_j(\hat{t}) \quad (20\text{-ب})$$

که در روابط اخیر:

$$\begin{aligned} \Delta_{ij} &= \int_0^1 \phi_i \phi_j d\hat{x}, \quad M_{ij} = (1 + \rho_{rel}) \Delta_{ij}, \quad C_{ij} = C \Delta_{ij}, \quad K_{ij} = \int_0^1 \phi_i \phi_j'' d\hat{x}, \quad F_i = \int_0^1 \phi_i \hat{f} d\hat{x}, \quad \beta_{ij} = \beta \Delta_{ij}, \\ \Lambda_{ij} &= -\eta \Omega_{vor} \Delta_{ij}, \quad \Pi_{ij} = \Omega_{st}^2 \Delta_{ij}, \quad F_i = \int_0^1 \phi_i \left(-\eta \Omega_{vor} \Omega^2 \frac{\partial Q}{\partial \hat{t}} \right) d\hat{x}, \quad \gamma'_{ij} = \gamma' \Delta_{ij}, \end{aligned} \quad (21)$$



(ب)

$$C = \frac{\rho_f C_D D^2 \dot{U}_{rel} \Omega_{st} t^4}{4EI \pi \bar{t}^2}, \quad \gamma' = \frac{\rho_f C_D \dot{U}_{rel} \Omega_{st}^2 D^3 t^4}{16EI \pi^2 g_0 \bar{t}^2}, \quad \rho_{rel} = \frac{\rho_f}{\rho}, \quad \beta = \frac{P g_0}{D} \quad (17)$$

$$\hat{f}_e = \frac{\hat{v}^2}{\sqrt{\left[(1-\hat{w})^2 + 2(1-\hat{w})\hat{r} \right] \times \text{arccosh}^2 \left[1 + \frac{(1-\hat{w})}{\hat{r}} \right]}}, \quad \Omega_{vor} = \omega_{vor} \bar{t}, \quad \Omega_{st} = \omega_{st} \bar{t}$$

و Ω_{vor} و Ω_{st} به ترتیب نشان دهنده فرکانس بی بعد میکروتیر و فرکانس بی بعد گردابه سیال می باشد.

۴- حل معادلات

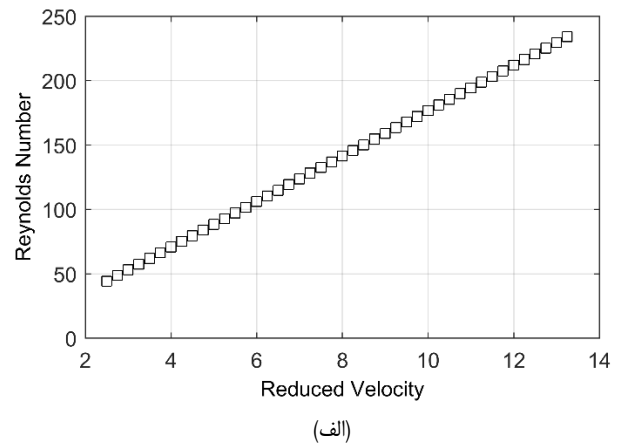
برای تبدیل معادلات با مشتقات جزئی به معادلات دیفرانسیل معمولی از روش باقی مانده وزنی گلرکین [۲۲] استفاده کرده و توابع \hat{w} و Q را به صورت زیر معرفی می کنیم:

$$\hat{w}(\hat{x}, \hat{t}) = \sum_{j=1}^n \phi_j(\hat{x}) q_j(\hat{t}) \quad (18\text{-الف})$$

$$Q(\hat{x}, \hat{t}) = \sum_{j=1}^n \phi_j(\hat{x}) \chi_j(\hat{t}) \quad (18\text{-ب})$$

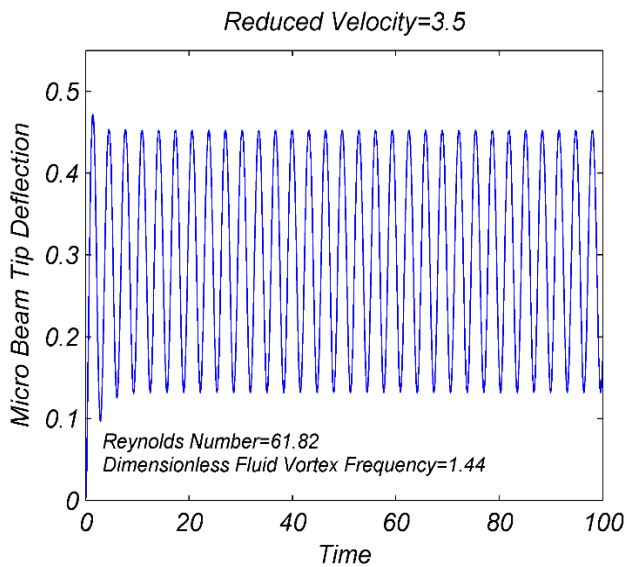
که در آن شکل مود ارتعاشی تیر یک سرگیردار است که از حل معادله مقدار ویژه با توجه به شرایط مرزی زیر به دست می آید و $q_j(\hat{t})$ و $\chi_j(\hat{t})$ مختصات تعمیم یافته هستند:

$$\hat{w}(0, \hat{t}) = \hat{w}_{\hat{x}}(0, \hat{t}) = 0, \quad \frac{\partial^2 \hat{w}(1, \hat{t})}{\partial \hat{x}^2} = \frac{\partial^3 \hat{w}(1, \hat{t})}{\partial \hat{x}^3} = 0, \quad (19)$$

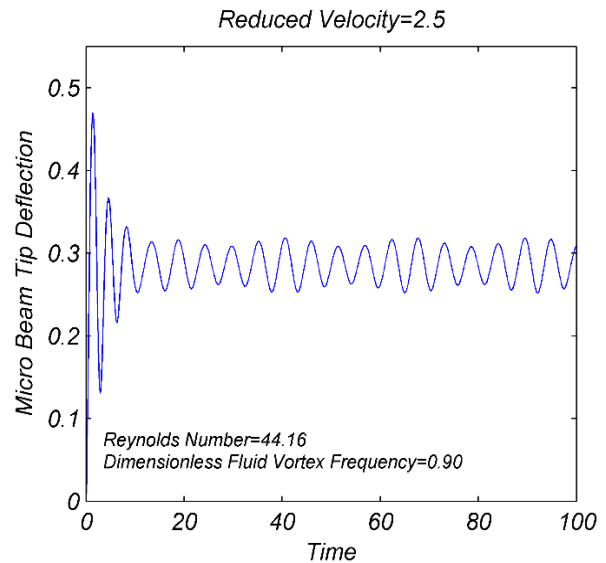


(الف)

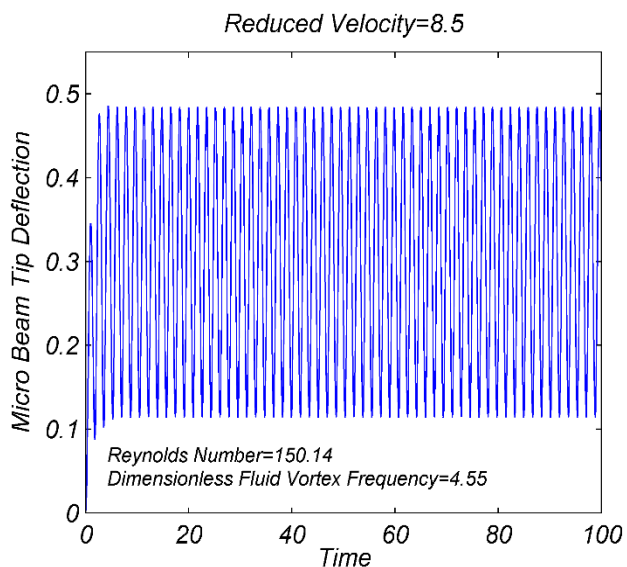
شکل ۴: اثر سرعت ویژه سیال بر (الف) عدد رینولدز سیال (ب) فرکانس گردابه بی بعد سیال



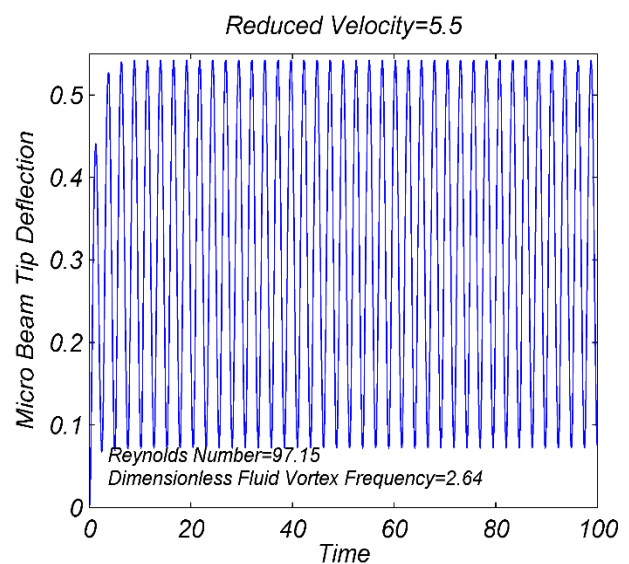
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵: نمودار پاسخ زمانی ارتعاش میکروتیر تحت اثر ولتاژ معین، $\hat{V} = 3/8$ ، و جریان سیال با سرعت‌های ویژه مختلف (الف) $\hat{U} = 2/5$ (ب) $\hat{U} = 3/5$ (ج) $\hat{U} = 5/5$ (د) $\hat{U} = 8/5$

گردابه) تحت اثر ولتاژ در معرض جریان سیال حل و رفتار ارتعاشی آن در جهت عمود بر جریان سیال تحت اثر شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ویژگی‌های هندسی و ماده میکروساختار مورد نظر در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

با حل همزمان معادلات فوق رفتار ارتعاشی میکروتیر و همچنین ثابت‌های مربوط به نوسان‌گر سیال به دست می‌آید.

۵- نتایج

در این قسمت معادلات حاکم بر ارتعاش میکروتیر (میکروتولیدکننده

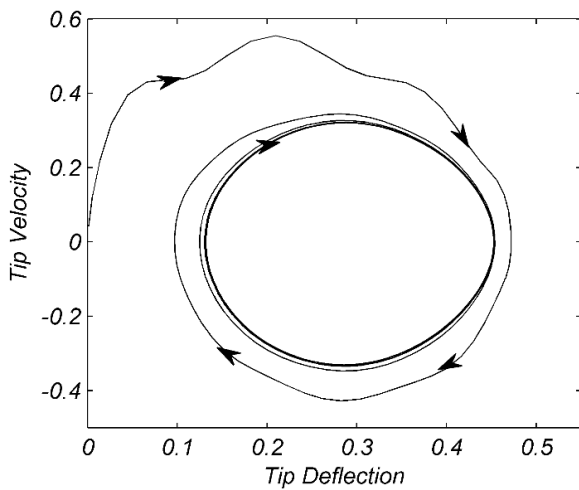
، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقادیر عدد رینولدز و فرکانس سیال گردابه سیال، به صورت دو پارامتر مهم در ایجاد پدیده گردابه و قفل‌شدگی، با افزایش سرعت ویژه سیال به صورت خطی افزایش یافته است.

۲-۵- دامنه ارتعاش میکروتیر بر حسب سرعت جریان سیال

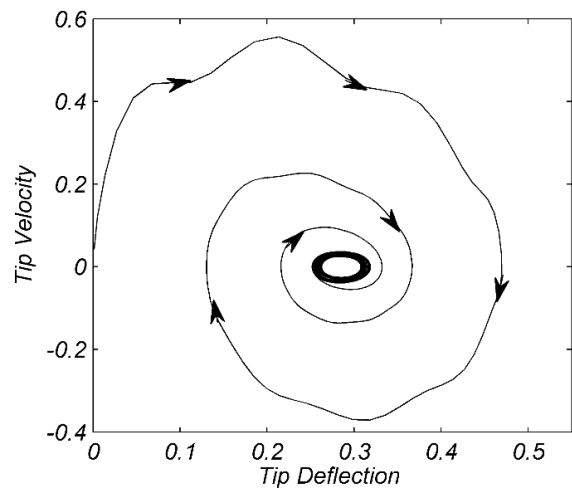
در این قسمت اثر جریان سیال با چهار سرعت ویژه مختلف بر ارتعاش میکروتیر تحت اثر ولتاژ در جهت عمود بر جریان سیال

۱-۵- فرکانس گردابه و عدد رینولدز سیال تابعی از جریان سیال برای سیال با اعداد رینولدز بین ۴۰ و ۲۵۰ که محدوده مورد بررسی در این مقاله نیز است با برخورد سیال به ساختار و در نتیجه فشاری که از طرف آن به سیال وارد می‌شود، ذرات سیال با جدا شدن از لبه‌های استوانه به دو طرف آن هدایت شده و حالت آرامی از گردابه به وجود می‌آید که به کانال گردابه [۲۳] معروف است.

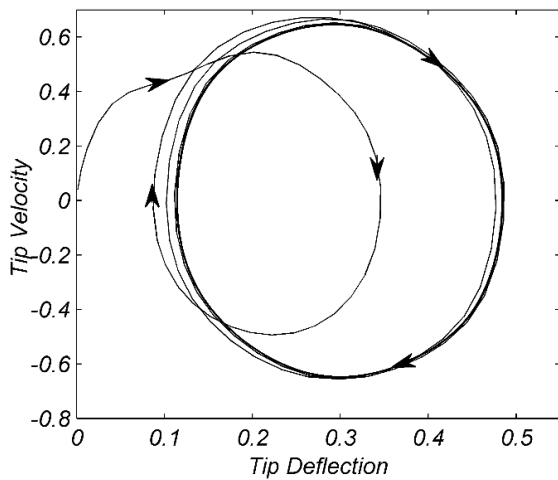
شکل ۴-الف و ۴-ب به ترتیب عدد رینولدز، Re ، و فرکانس گردابه سیال، Ω_{vor} ، را برای سیال با سرعت‌های ویژه مختلف، \hat{U}



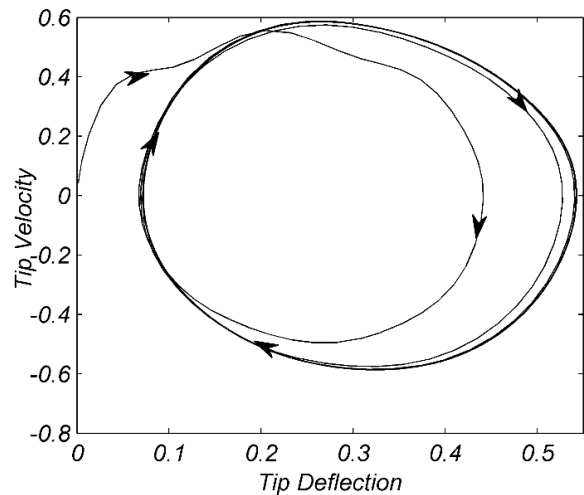
(ب)



(الف)



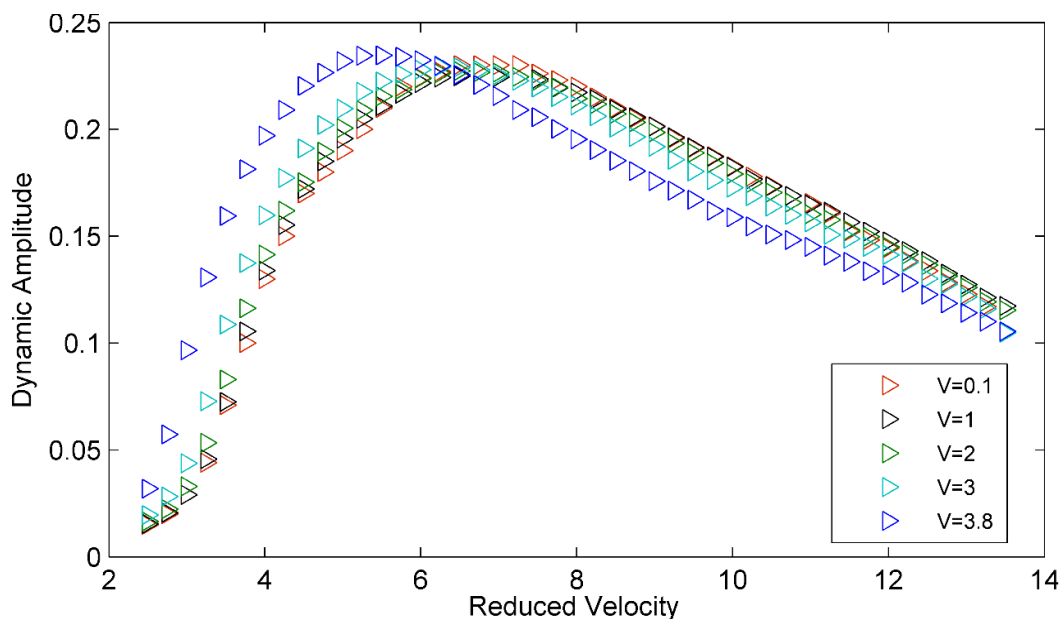
(د)



(ج)

شکل ۶: صفحه فاز ارتعاش میکروتیر تحت اثر ولتاژ معین، $\hat{V} = 3/8$ ، و جریان سیال با سرعت‌های ویژه مختلف

$$\hat{U} = 2/5 \text{ (الف)} \quad \hat{U} = 3/5 \text{ (ب)} \quad \hat{U} = 5/5 \text{ (ج)} \quad \hat{U} = 8/5 \text{ (د)}$$



شکل ۷: دامنه دینامیکی ارتعاش میکروتیر بر حسب سرعت ویژه سیال برای ولتاژهای اعمالی مختلف

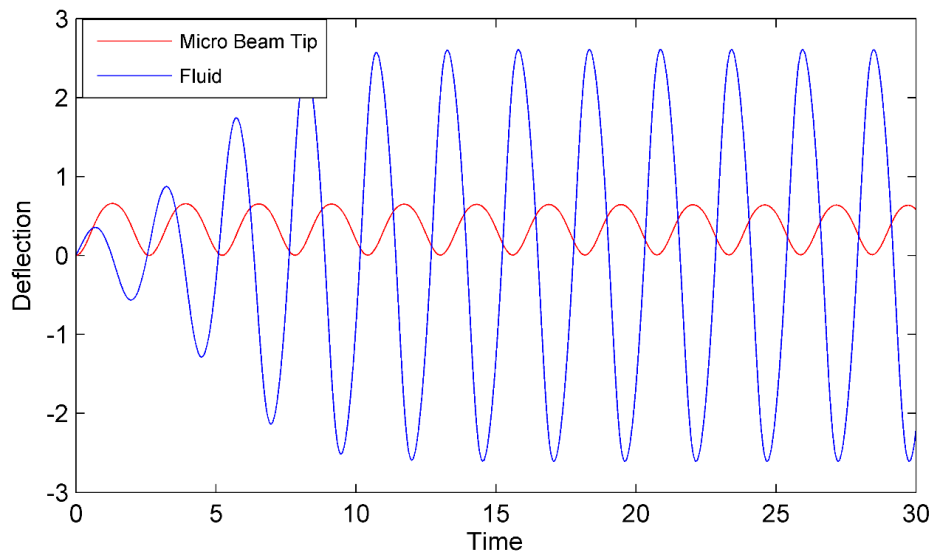
سرعت که نقطه اوج نمودار دامنه بی بعد بر حسب سرعت سیال نیز می باشد دامنه دینامیکی، $(\hat{W}_{\max} - \hat{W}_{\min})/2$ ، به صورت پیوسته افزایش یافته است که نقطه اوج اشاره شده و همچنین شیب افزایش و کاهش دامنه برای ولتاژهای اعمالی مختلف متفاوت می باشد. به عبارت دیگر با افزایش ولتاژ اعمالی، فرکانس ارتعاشی ساختار کاهش یافته و در نتیجه در سرعت های ویژه پایین تری پدیده قفل شدگی اتفاق می افتد. نتایج به دست آمده مشابه رفتار نشان داده شده در نتایج تجربی ارائه شده در تحقیقات گذشته [۱۶ و ۱۸] می باشد.

پدیده قفل شدگی را می توان این گونه نیز تفسیر نمود که با نزدیک شدن فرکانس سیال و ساختار به یکدیگر، نوسان سیال و ارتعاش ساختار اثرات همدیگر را تقویت کرده و باعث افزایش دامنه یکدیگر می شوند، ولی با خروج از ناحیه قفل شدگی، سیال و ساختار اثرات یکدیگر را خنثی نموده و دامنه ارتعاش کاهش می یابد که این پدیده در شکل ۸ نشان داده شده است. نمودارهای نشان داده شده ارتعاش میکروتیر و سیال را بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل و به ترتیب بر اساس ولتاژ و جریان سیال به صورت مجزا نشان می دهد، به عبارت دیگر برای بررسی نوسان سیال، میکروساختار را صلب فرض کرده و جهت بررسی ارتعاش میکروساختار، اثر سیال نادیده گرفته شده است. همان طور که

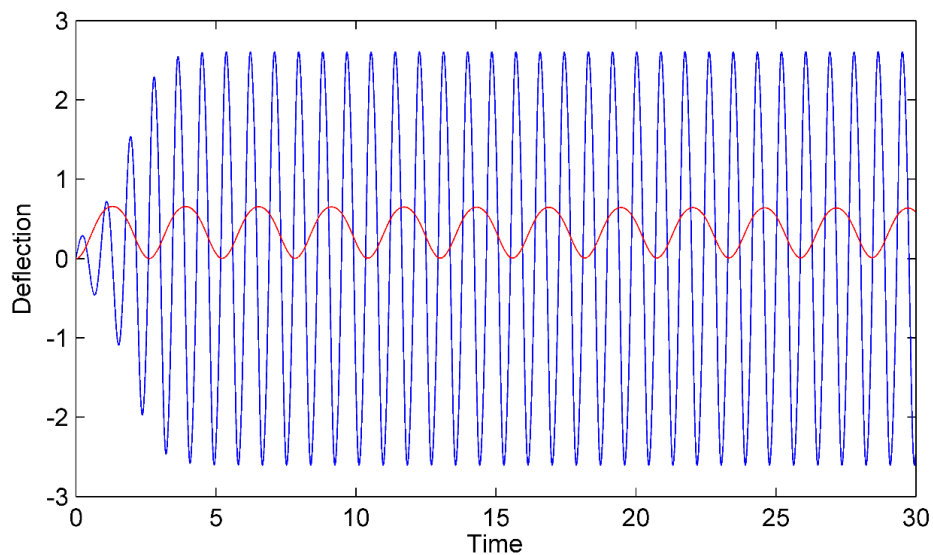
بررسی می شود. فرض می شود که میکروتیر هم زمان تحت اثر ولتاژ معین، $\hat{U} = 3/8$ ، در حال ارتعاش بوده و در معرض سیال با سرعت ویژه ثابت قرار دارد. در این حالت با توجه به ثابت بودن ولتاژ اعمالی، فرکانس ارتعاش ساختار ثابت بوده ولی مقدار فرکانس گردابه سیال و عدد رینولدز با افزایش سرعت جریان سیال افزایش می یابد. این افزایش تا زمانی که فرکانس سیال کوچکتر از فرکانس ساختار باشد سبب افزایش دامنه می شود ولی با گذر از فرکانس ساختار و دور شدن از آن با کاهش دامنه ارتعاش همراه خواهد بود. همان طور که در نمودارهای شکل ۵ نشان داده شده است جریان سیال اثر محسوسی بر رفتار ارتعاشی میکروتیر گذاشته و با افزایش سرعت سیال از $\hat{U} = 2/5$ به $\hat{U} = 3/5$ و سپس به $\hat{U} = 5/5$ ، دامنه بی بعد ارتعاش نیز افزایش می یابد، اما برای سرعت $\hat{U} = 8/5$ دامنه ارتعاش برخلاف روند قبلی دچار کاهش شده است.

سرعت ارتعاش حالت ماندگار نوک میکروتیر نیز همان طور که در نمودارهای شکل ۶ مشخص است برخلاف دامنه ارتعاش با افزایش سرعت جریان سیال به صورت پیوسته افزایش یافته و محدوده پایداری سیستم نیز تغییر یافته است.

همان طور که در نمودار دامنه-سرعت سیال، شکل ۷، نشان داده شده است با افزایش سرعت ویژه سیال، تا حد معینی از



(الف)



(ب)

شکل ۸: مقایسه تاریخچه زمانی بیشترین دامنه ارتعاش میکروتیر تحت اثر ولتاژ، $\hat{V} = 3/8$ ، و ارتعاش سیال بدون در نظر گرفتن اثرات یکدیگر برای دو سرعت ویژه مختلف (الف) $\hat{U} = 5/25$ (ب) $\hat{U} = 12/5$

بودن فرکانس ارتعاش ساختار، فرکانس ارتعاش آن‌ها از هم دورتر شده است. با توجه به وقوع این پدیده، قابل پیش‌بینی خواهد بود که در شرایط معینی از ارتعاش، حرکت میکروساختار و سیال با خنثی کردن اثر یکدیگر، سبب کاهش دامنه ارتعاش کل سیستم شامل میکروساختار و سیال تحت اثر همزمان ولتاژ و جریان سیال گردد.

در شکل ۸-الف مشخص است ارتعاش سیال با سرعت معین، $\hat{U} = 5/25$ ، با ارتعاش میکروساختار تحت اثر ولتاژ معین، $\hat{V} = 3/8$ ، هماهنگ بوده و با فرکانس تقریباً یکسان صورت می‌گیرد. با افزایش سرعت سیال به $\hat{U} = 12/5$ و ثابت نگه داشتن ولتاژ اعمالی به میکروتیر، همان‌طور که در شکل ۸-ب نشان داده شده است، فرکانس ارتعاش سیال افزایش یافته و با توجه به ثابت

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای اولین بار معادلات حاکم بر ارتعاش میکروتولیدکننده گردابه تحت اثر ولتاژ با در نظر گرفتن اثرات ناشی از جریان سیال به صورت نیروهای برآ و پسا، با استفاده از معادله واندریل، اصل همپلتون و تئوری اویلر-برنولی استخراج شده و با کمک روش‌های عددی حل و نتایج زیر حاصل شد:

- جریان سیال تحت شرایطی که متأثر از ویژگی‌های سیال و ساختار می‌باشد می‌تواند باعث تغییر دامنه ارتعاش میکروتیر تحت اثر ولتاژ گردد. به عبارت دیگر، با این فرض که فرکانس ارتعاش میکروتیر بزرگتر از فرکانس سیال در حال جریان می‌باشد، با افزایش سرعت جریان سیال که منجر به افزایش فرکانس گردابه و عدد رینولدز سیال می‌شود، دامنه به تدریج افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه اوج، مجدداً شروع به کاهش می‌نماید. نقطه اوج و سرعت متناظر با آن متغیر بوده و تابع ولتاژ و ویژگی‌های ساختار و سیال است.

- افزایش و کاهش دامنه اشاره شده ناشی از ایجاد پدیده قفل‌شدگی می‌باشد که نتیجه نزدیکی و یا دوری فرکانس ساختار و سیال نسبت به یکدیگر می‌باشد. به عبارت دیگر پدیده قفل‌شدگی زمانی اتفاق می‌افتد که ارتعاش ساختار و سیال از لحاظ دامنه بتوانند اثر یکدیگر را تقویت نمایند.

- با فرض ثابت ماندن جریان سیال، اعمال ولتاژ نیز می‌تواند منجر به افزایش و کاهش دامنه گردد. بدین صورت که ولتاژ اعمالی به میکروتیر علاوه بر اثری که به عنوان نیروی خارجی بر میکروتیر دارد و باعث ارتعاش آن می‌شود، با تغییر سفتی الکتریکی ساختار، موجب تغییر فرکانس ارتعاشی آن نیز می‌گردد، در نتیجه با توجه به نوع و سرعت جریان سیال می‌توان از ولتاژ به عنوان پارامتر تنظیم‌کننده جهت وقوع یا دوری از پدیده قفل‌شدگی استفاده کرد.

- مشخص نمودن نوع و سرعت جریان سیال در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی از این جهت حائز اهمیت است که با تعیین آن‌ها می‌توان دقت اثر ولتاژ اعمالی را با انتخاب مناسب ویژگی‌های هندسی میکروتیر و فرکانس ارتعاشی متناظر با آن بالاتر برد.

مراجع

[1] K. Eom, H.S. Park, D.S. Yoon, T. Kwon, Nanomechanical resonators and their applications in biological/chemical detection: Nanomechanics

- principles, Physics Reports, 503(4) (2011) 115-163.
- [2] W.C. Chuang, H.L. Lee, P.Z. Chang, Y.C. Hu, Review on the modeling of electrostatic MEMS, Sensors, 10 (2010) 6149-6171.
- [3] A. Nisar, N. Afzulpurkar, B. Mahaisavariya, A. Tuantranont, MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications, Sensors and Actuators B: Chemical, 130(2) (2008) 917-942.
- [4] O.Y. Loh, H.D. Espinosa, Nanoelectromechanical contact switches, Nature Nanotechnology, 7 (2012) 283.
- [5] M.I. Younis, E.M. Abdel-Rahman, A. Nayfeh, A reduced-order model for electrically actuated microbeam-based MEMS, Journal of Microelectromechanical Systems, 12(5) (2003) 672-680.
- [6] W.C. Chuang, Y.C. Hu, C.Y. Lee, W.P. Shih, P.Z. Chang, Electromechanical behavior of the curled cantilever beam, Journal of Micro/Nanolithography, MEMS MOEMS, 8 (2009) 033020-033028.
- [7] F.G. Golzar, R. Shabani, H. Hatami, G. Rezazadeh, Dynamic Response of an Electrostatically Actuated Micro-Beam in an Incompressible Viscous Fluid Cavity, Journal of Microelectromechanical Systems, 23(3) (2014) 555-562.
- [8] J.W.M. Chon, P. Mulvaney, J.E. Sader, Experimental validation of theoretical models for the frequency response of atomic force microscope cantilever beams immersed in fluids, Journal of Applied Physics, 87(8) (2000) 3978-3988.
- [9] N. Guan, T. Luan, Z.e.a. Liu, Vortex distribution and mixed convection of liquid flow across micro-cylinders in a rectangular channel, Heat Mass Transfer, 52 (3) (2016) 657-670
- [10] A. Tamayol, J. Yeom, M. Akbari, M. Bahrami, Low Reynolds number flows across ordered arrays of micro-cylinders embedded in a rectangular micro/minichannel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58(1) (2013) 420-426.
- [11] F. Alfieri, M.K. Tiwari, A. Renfer, T. Brunswiler,

- Wake, Annual Review of Fluid Mechanics, 28(1) (1996) 477-539.
- [18] M.L. Facchinetti, E. de Langre, F. Biolley, Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations, Journal of Fluids and Structures, 19(2) (2004) 123-140.
- [19] M.P. Paidoussis, S.J. Price, E. de Langre, Fluid Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities, Cambridge University Press, New York., 2011.
- [20] R.D. Blevins, Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, Florida., 2001.
- [21] C. Ke, H.D. Espinosa, N. Pugno, Numerical Analysis of Nanotube Based NEMS Devices — Part II: Role of Finite Kinematics, Stretching and Charge Concentrations, Journal of Applied Mechanics, 72(5) (2005) 726-731.
- [22] L. Meirovitch, Analytical methods in vibration, Macmillan, New York., 1967.
- [23] J. Lienhard, Synopsis of lift, drag and vortex frequency data for rigid circular cylinder, Washington State University, 1966.
- B. Michel, D. Poulikakos, Computational modeling of vortex shedding in water cooling of 3D integrated electronics, International Journal of Heat and Fluid Flow, 44 (2013) 745-755.
- [12] J. Pierce, Experimental study of micro-vortex generators, The University of Texas, 2010.
- [13] X. Shang, X. Huang, C. Yang, Vortex generation and control in a microfluidic chamber with actuations, Physics of Fluids, 28(12) (2016) 122001.
- [14] X. Wang, J. Zhou, I. Papautsky, Vortex-aided inertial microfluidic device for continuous particle separation with high size-selectivity, efficiency, and purity, Biomicrofluidics, 7(4) (2013) 044119.
- [15] M. Rezaee, N. Sharafkhani, Electrostatically frequency tunable micro-beam-based piezoelectric fluid flow energy harvester, Smart Materials and Structures, 26(7) (2017) 075008.
- [16] S. Kaneko, I. Nakamura, T.F.M. Kato, K. Ishihara, T. Nishihara, N.W. Mureithi, M.A. Langthjem, Fluid-Induced Vibrations, Classifications and lessons from practical experiences, Elsevier, 2014.
- [17] C.H.K. Williamson, Vortex Dynamics in the Cylinder

