

## اثر وجود یک رشته منعطف بر ضرائب هیدرودینامیکی سیلندر استوانه‌ای

حسین خراسانی اناری

کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد  
Std.mech@chmail.ir

شهرام طالبی

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد  
talebi\_s@yazd.ac.ir

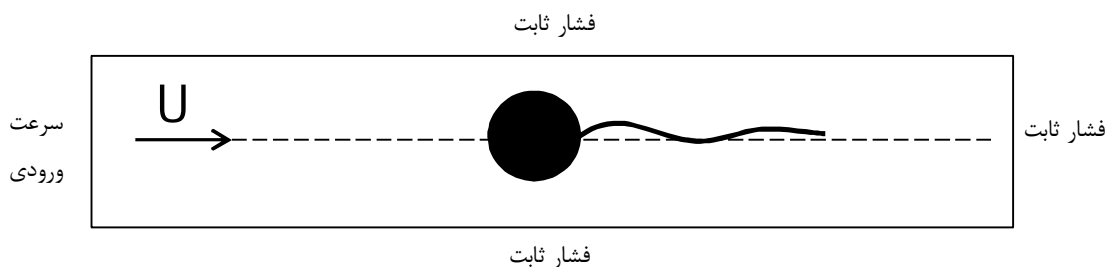
### چکیده

در مقاله حاضر تأثیر اتصال یک رشته منعطف به پشت سیلندر دایروی بر روی ضرائب هیدرودینامیکی، با استفاده از روش شبکه بولتزمن - مرز شناور<sup>1</sup> بررسی شده است. معادله حرکت رشته، یک معادله هذلولوی از مرتبه چهارم مکانی و مرتبه دوم زمانی است. برای حل این معادله از روش اختلاف محدود به همراه رانگ-کاتا مرتبه چهارم استفاده شده است. هنگامی که یک رشته منعطف در پشت سیلندر قرار می‌گیرد بر اثر ریزش گردابه‌های نوسانی از سطح سیلندر، رشته شروع به نوسان‌های می‌کند. ضرائب هیدرودینامیکی با تغییر طول رشته یا سختی رشته و همچنین با تعویض نوع اتصال رشته به سیلندر (مفصلی یا گیردار)، به دلیل عوض شدن ماهیت نوسان رشته در پشت سیلندر، تغییر می‌کنند. با یک رشته به اندازه دو برابر قطر سیلندر و اتصال گیردار می‌توان نسبت به حالت سیلندر تنها، 14% کاهش ضریب متوسط درگ را تجربه کرد. با کاهش سختی رشته، می‌توان نوسانات ضریب لیفت را تا 48% کاهش داد. با رشته‌ای به اندازه قطر سیلندر، می‌توان بیشترین ضریب متوسط لیفت (0.26) را نسبت به حالت سیلندر تنها (صفر)، ایجاد کرد.

**کلمات کلیدی:** روش شبکه بولتزمن، روش مرز شناور، رشته شناور، ضریب سختی، اتصال گیردار و مفصل

### 1- مقدمه

مسئله‌ای که در این مقاله بررسی شده است، شبیه‌سازی عددی اندرکنش سیال با یک رشته شناور<sup>2</sup> چسبیده به جسم برای بررسی تأثیر آن بر روی ضرائب هیدرودینامیکی در یک جریان خارجی است (شکل 1).



شکل 1: طرحواره مسئله مورد بررسی

<sup>1</sup> Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method (IB-LBM)

<sup>2</sup> Flapping Filament

مبحث عبور جریان سیال از روی اجسام جریان‌بند<sup>3</sup> مانند سیلندر دایروی، مسئله‌ای کلاسیک و رایج برای بررسی ضرایب لیفت و درگ است. جریان آرام، با عدد رینولدز 100 و دوبعدی فرض شده است. پدیده جدایی جریان، ایجاد گردابه و ریزش گردابه نیز رخ داده است. عدد رینولدز بر مبنای قطر سیلندر ( $D$ ) و سرعت جریان آزاد ( $U_\infty$ ) تعریف شده است.

$$Re = \frac{\rho_f U_\infty D}{\mu} \quad (1)$$

که  $\rho_f$  چگالی سیال،  $\mu$  لزجت سیال و  $U_\infty$  سرعت جریان آزاد است. تحقیقات تجربی نشان داده است که با افزایش عدد رینولدز از مقدار 49، گردابه‌های متقارن شروع به حرکت می‌کنند یا به اصطلاح ریزش می‌کنند [1]. ریزش گردابه‌ها، نوسانی و متقارن رخ می‌دهد که در نتیجه نیروهای لیفت و درگ نوسانی بر روی سیلندر ایجاد می‌کند. وجود نیروهای نوسانی وارد بر جسم، می‌تواند باعث افزایش اثرات خستگی و کاهش استحکام آن جسم گردد. همچنین نیروی متوسط لیفت در یک جسم متقارن، صفر است. یکی از روش‌های کاهش اثر تخریبی و افزایش نیروی متوسط لیفت، قرار دادن یک رشته منعطف شناور در پشت سیلندر است. با قرارگیری یک رشته شناور، عملاً ارتباط گردابه‌های ایجاد شده در بالا و پایین سیلندر، قطع شده و در نتیجه قدرت گردابه‌ها و فرکانس تشکیل آنها کمتر می‌شود. همچنین با نامتقارن شدن جریان متوسط در پشت سیلندر، نیروی متوسط لیفت بیشتر می‌شود.

تیان و همکاران [2] با استفاده از روش شبکه بولتزمن-مرز شناور به بررسی تأثیر حضور یک رشته شناور در ویک پشت یک سیلندر پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که رشته‌های با جرم و طول کمتر، کاهش درگ بیشتری را باعث. باقری و همکاران [3] به بررسی چگونگی تولید نیروی لیفت بر اثر اتصال مفصلی رشته شناور به سیلندر پرداخته‌اند و دریافته‌اند که رشته بلند ارتعاشی متقارن دارند. در صورتی که رشته‌های کوتاه معمولاً ارتعاش نامتقارنی را انجام می‌دهند. وو و همکاران [4]، خصوصیات جریان عبوری از روی یک سیلندر با دو رشته چسبیده به آن (با اتصال مفصلی) بررسی و بیان کرده‌اند که وجود دو رشته شناور عملکرد بهتری نسبت به تک رشته در کاهش ضریب متوسط درگ و ماکزیمم نوسان ضریب لیفت داشته است. همچنین دریافته‌اند که رشته‌های با انعطاف‌پذیری کمتر، عملکرد بهتری در حذف نوسانات نیروی لیفت خواهند داشت.

در این مقاله جریان آرام عبوری از روی یک سیلندر دایروی که یک رشته شناور به آن چسبیده بررسی شده است. جریان سیال با استفاده از روش شبکه بولتزمن به همراه روش مرز شناور تحلیل شده است. معادله حاکم بر ارتعاش رشته، توسط روش ترکیبی اختلاف محدود-رانگ کوتاه حل شده است. تأثیر طول و جنس رشته بر ضرایب لیفت و درگ و فرکانس ریزش گردابه گزارش شده است.

## 2- روش مرز شناور در چهارچوب شبکه بولتزمن

در روش مرز شناور برهم‌کنش بین جسم و جریان سیال، به وسیله توزیع نیروی مرز در نقاط لاگرانژی روی جسم به نقاط اویلری سیال (گره‌ها) و درون‌یابی سرعت از نقاط اویلری به نقاط لاگرانژی توصیف می‌شود. معادله شبکه بولتزمن به همراه نیروی خارجی مطابق رابطه (2) است:

$$f_\alpha(\vec{x} + \vec{e}_\alpha \delta t, t + \delta t) = f_\alpha(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau} [f_\alpha(\vec{x}, t) - f_\alpha^{eq}(\vec{x}, t)] + (1 - \frac{1}{2\tau}) F_\alpha \Delta t \quad (2)$$

عمده‌ترین مدل استفاده شده برای شبکه بولتزمن دو بعدی،  $D_2Q_9$  است و بیانگر هندسه دو بعدی با 9 مسیر سرعت است. در معادله (2)،  $f_\alpha^{eq}$  تابع توزیع تعادلی،  $\tau$  زمان آسودگی، زیر نویس  $\alpha$  نشان دهنده جهت‌های گسسته شده،  $f_\alpha$  تابع توزیع است و  $F_\alpha$  بیانگر نیروی خارجی محاسبه است. معادله شبکه بولتزمن در دو مرحله برخورد و جاری شدن حل می‌شود. پس از حل آن، سرعت و فشار در همه نقاط میدان حل، تعیین می‌گردد. برای بررسی حرکت رشته درون سیال، و همچنین وجود سیلندر ساکن، از روش مرز شناور استفاده شده است. در روش مرز شناور، روی جسم (سطح استوانه و رشته) نیروهایی اعمال می‌شود تا شرط عدم لغزش سیال روی سطح جسم برقرار گردد. در این روش شبکه میدان حل سیال ثابت است و اثر وجود و حرکت جسم با تغییر مقدار نیرو در گره‌های شبکه میدان حل سیال حاصل می‌شود. نیروهای وارد بر رشته از طرف

<sup>3</sup> Bluff Bodies

سیال، باعث حرکت و تغییر شکل رشته می‌شود. با حل معادله حاکم بر حرکت رشته در هر قدم زمانی، شکل و موقعیت جدید رشته تعیین شده و میدان سیال برای قدم زمانی بعدی حل می‌گردد. روش شبکه بولتزمن-مرز شناور به کار رفته در این مقاله مطابق با الگوریتم ارائه شده در [5] است.

### 3- معادله حاکم بر حرکت رشته شناور

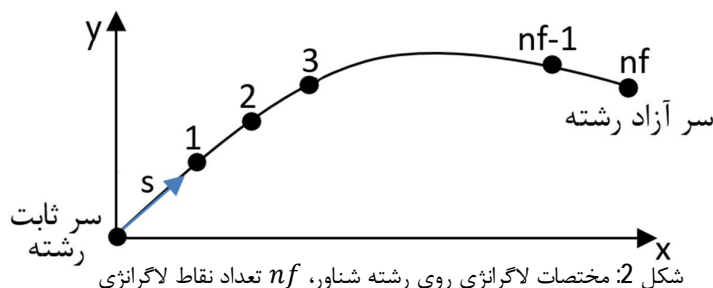
معادله حرکت رشته شناور (شکل 2)، تحت گشتاور خمشی و نیروهای برشی و محوری، به صورت رابطه (3) قابل بیان است [6].

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{X}(s, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial s} \left( T \frac{\partial \mathbf{X}(s, t)}{\partial s} \right) - k_B \frac{\partial^4 \mathbf{X}(s, t)}{\partial s^4} + \rho_0 \mathbf{g} + \mathbf{f} \quad (3)$$

$s$  مختصه طولی رشته،  $\mathbf{X} = (x(s, t), y(s, t))$  بردار مکان نقاط لاگرانژی روی رشته،  $T$  نیروی محوری کششی در طول رشته،  $k_B$  ضریب سختی خمشی (ضریب انعطاف پذیری)،  $\mathbf{f}$  بردار نیروی وارد بر رشته از طرف جریان سیال،  $\rho_0$  چگالی واحد طول رشته و  $\mathbf{g}$  بردار شتاب جاذبه است. در طول رشته به تعداد  $nf$  نقطه لاگرانژی قرار داده شده است. نیروی  $T$  از رابطه (4) حساب می‌شود

$$T = k_s \left( \left| \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial s} \right| - 1 \right) \quad (4)$$

که  $\left| \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial s} \right|$  به معنای اندازه بردار  $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial s}$  و  $k_s$  ضریب کششی است.



جملات حاوی مشتقات مکانی در معادله (3) به روش اختلاف محدود، گسسته‌سازی شده و جمله مشتق زمانی مرتبه دوم آن به روش صریح رانگ کاتا مرتبه چهارم [7]، حل شده است. برای حل معادله (3)، نیاز به چهار شرط مرزی و دو شرط اولیه است. برای ابتدا و انتهای رشته حالات مختلفی می‌تواند اتفاق بیفتد. برای سر آزاد رشته شناور، گشتاور خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری برابر صفر هستند.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial s^2} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial s^2} \right) = 0, \quad T = 0 \quad (5)$$

برای سر ثابت رشته، دو نوع اتصال مفصلی یا گیردار وجود دارد. برای اتصال مفصلی، گشتاور خمشی صفر و تغییر مکان معلوم است.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial s^2} = 0, \quad \mathbf{X} = \mathbf{X}_0 \quad (6)$$

که  $\mathbf{X}_0$  مکان اولیه سر ثابت رشته است. برای اتصال گیردار، رشته بر محور  $x$  مماس و تغییر مکان نیز معلوم است.

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial s} = (+1, 0) \quad \text{و} \quad \mathbf{X} = \mathbf{X}_0 \quad (7)$$

مکان اولیه رشته در ابتدا معلوم است. سرعت اولیه آن نیز صفر در نظر گرفته شده است

$$\frac{\partial \mathbf{X}(s, 0)}{\partial t} = 0, \quad \mathbf{X}(s, 0) = \mathbf{X}_0(s) \quad (8)$$

در هر قدم زمانی میدان جریان سیال به روش شبکه بولتزمن حل می‌شود. سپس با توجه به سرعت‌های به دست آمده و برای برقراری شرط عدم لغزش، نیروهای لازم روی سطح جسم محاسبه می‌شود [5]. با توجه به مقدار این نیروها روی رشته، معادله حرکت رشته حل شده و موقعیت جدید رشته (برای استفاده در قدم زمانی بعدی) تعیین می‌گردد.

#### 4- نتایج

در یک جریان دو بعدی، ضرایب لیفت و درگ و عدد استروهال برای سیلندر به صورت روابط (9) تعریف می‌شود. برای یک سیلندر تنها به دلیل تقارن مسئله، متوسط ضریب لیفت برابر صفر است.

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho_f U_\infty^2 D}, \quad C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_f U_\infty^2 D}, \quad St = \frac{fD}{U_\infty} \quad (9)$$

که  $F_l$  نیروی لیفت،  $F_D$  نیروی درگ،  $\rho_f$  چگالی سیال،  $U_\infty$  سرعت جریان آزاد،  $D$  قطر سیلندر دایروی و  $f$  فرکانس ریزش گردابه‌ها است. به علت وجود پدیده ریزش گردابه، ضرایب لیفت و درگ به صورت نوسانی با زمان تغییر می‌کنند (روابط 10). فرکانس ریزش گردابه با تبدیل فوریه سریع (FFT) از ضریب لیفت تعیین شده است.

$$C_l = \bar{C}_l \pm C'_l, \quad C_D = \bar{C}_D \pm C'_D \quad (10)$$

که  $\bar{C}_l$  و  $\bar{C}_D$  به ترتیب متوسط ضرایب لیفت و درگ و  $C'_l$  و  $C'_D$  بیانگر نوسانات آنها هستند. شکل بدون بعد معادله (3) به صورت رابطه (11) است که متغیرهای بدون بعد در جدول (1) آمده است.

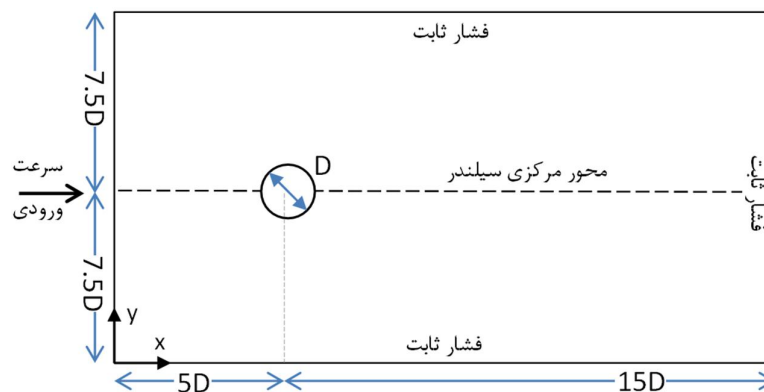
$$\rho^* \frac{\partial^2 \mathbf{X}^*}{\partial t^{*2}} = \frac{\partial}{\partial s^*} \left( T^* \frac{\partial \mathbf{X}^*}{\partial s^*} \right) - k_B^* \frac{\partial^4 \mathbf{X}^*}{\partial s^{*4}} + \rho^* Fr \mathbf{e}_g + \mathbf{f}^* \quad (11)$$

جدول 1: کمیت‌های بی‌بعد

چگالی بر واحد طول رشته $\rho^* = \frac{\rho_s}{\rho_f D}$	ضریب سختی خمشی $k_B^* = \frac{k_B}{\rho_f U_\infty^2 D^3}$	عدد رینولدز $Re = \frac{\rho_f U_\infty D}{\mu}$	طول رشته $l^* = \frac{l}{D}$	زمان بی‌بعد $t^* = \frac{tD}{U_\infty}$
عدد فرود $Fr = \frac{Dg}{U_\infty^2}$	ضریب کششی $k_s^* = \frac{k_s}{\rho_f U_\infty^2 D}$	عدد استروهال $St = \frac{fD}{U_\infty}$	مکان x بی‌بعد $x^* = \frac{x}{D}$	مکان y بی‌بعد $y^* = \frac{y}{D}$

در این مقاله،  $Re = 100$ ،  $k_s^* = 2000$ ،  $k_B^* = 1.5$  در نظر گرفته شده است. همچنین  $Fr=0$ ، یعنی جاذبه در جهت محور z (عمود بر صفحه کاغذ) است.

شرایط مرزی و دامنه حل، در شکل 3 آمده است. برای مرزهای بالا، پایین و سمت راست (خروجی) شرط فشار معلوم در نظر گرفته شده است. در مرز سمت چپ (ورودی) نیز سرعت معلوم (یکنواخت) است. ابعاد دامنه حل به صورت  $15D \times 20D$  در نظر گرفته شده تا کمترین تأثیر را بر جریان عبوری از جسم داشته باشد. بررسی تعداد گره‌ها نیز در جدول (2) آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود برای وقتی فاصله گره‌ها برابر با یک چهلم قطر باشد، نتایج تغییر محسوسی نداشته است. بنابراین در یک قطر استوانه تعداد 40 گره وجود دارد و تعداد کل گره‌ها 480000 است.



شکل 3: ابعاد دامنه حل و شرایط مرزی

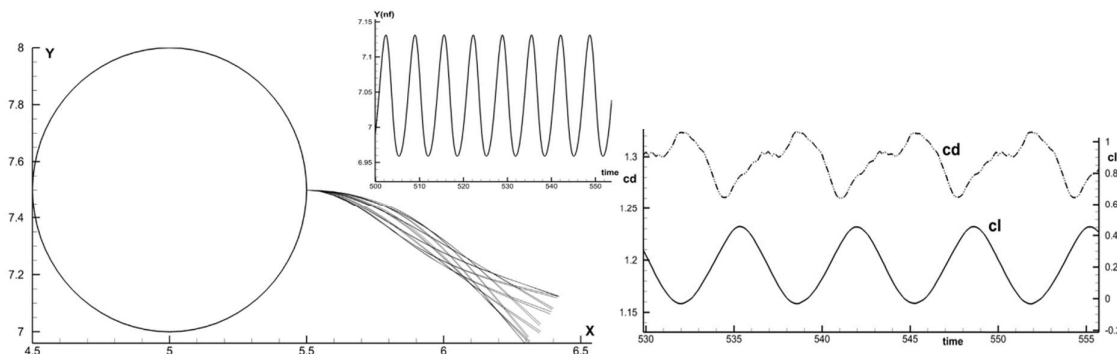
جدول 2: تاثیر تعداد گره‌ها بر نتایج

$\Delta$	$C_D$	$C'_L$	St
D/30	1.484	0.242	0.171
D/35	1.465	0.306	0.169
D/40	1.439	0.327	0.167
D/45	1.440	0.331	0.166

تعداد نقاط لاگرانژی روی اجسام نیز کمیت مهمی است که می‌تواند روی نتایج تأثیر بگذارد. با بررسی‌های انجام گرفته تعداد 60 نقطه روی سطح استوانه و 20 نقطه روی رشته مناسب‌ترین تعداد به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که در این مقاله، رشته مورد بررسی با ضخامت بسیار کم در نظر گرفته شده است. برای جریان روی استوانه، داده‌های معتبر زیادی وجود دارد. به عنوان نمونه برای مقدار ضریب درگ در [8]، [9]، [10]، [11]، [12]، [13]، [14]، [15]، [16]، [17]، [18]، [19]، [20]، [21]، [22]، [23]، [24]، [25]، [26]، [27]، [28]، [29]، [30]، [31]، [32]، [33]، [34]، [35]، [36]، [37]، [38]، [39]، [40]، [41]، [42]، [43]، [44]، [45]، [46]، [47]، [48]، [49]، [50]، [51]، [52]، [53]، [54]، [55]، [56]، [57]، [58]، [59]، [60]، [61]، [62]، [63]، [64]، [65]، [66]، [67]، [68]، [69]، [70]، [71]، [72]، [73]، [74]، [75]، [76]، [77]، [78]، [79]، [80]، [81]، [82]، [83]، [84]، [85]، [86]، [87]، [88]، [89]، [90]، [91]، [92]، [93]، [94]، [95]، [96]، [97]، [98]، [99]، [100]، [101]، [102]، [103]، [104]، [105]، [106]، [107]، [108]، [109]، [110]، [111]، [112]، [113]، [114]، [115]، [116]، [117]، [118]، [119]، [120]، [121]، [122]، [123]، [124]، [125]، [126]، [127]، [128]، [129]، [130]، [131]، [132]، [133]، [134]، [135]، [136]، [137]، [138]، [139]، [140]، [141]، [142]، [143]، [144]، [145]، [146]، [147]، [148]، [149]، [150]، [151]، [152]، [153]، [154]، [155]، [156]، [157]، [158]، [159]، [160]، [161]، [162]، [163]، [164]، [165]، [166]، [167]، [168]، [169]، [170]، [171]، [172]، [173]، [174]، [175]، [176]، [177]، [178]، [179]، [180]، [181]، [182]، [183]، [184]، [185]، [186]، [187]، [188]، [189]، [190]، [191]، [192]، [193]، [194]، [195]، [196]، [197]، [198]، [199]، [200]، [201]، [202]، [203]، [204]، [205]، [206]، [207]، [208]، [209]، [210]، [211]، [212]، [213]، [214]، [215]، [216]، [217]، [218]، [219]، [220]، [221]، [222]، [223]، [224]، [225]، [226]، [227]، [228]، [229]، [230]، [231]، [232]، [233]، [234]، [235]، [236]، [237]، [238]، [239]، [240]، [241]، [242]، [243]، [244]، [245]، [246]، [247]، [248]، [249]، [250]، [251]، [252]، [253]، [254]، [255]، [256]، [257]، [258]، [259]، [260]، [261]، [262]، [263]، [264]، [265]، [266]، [267]، [268]، [269]، [270]، [271]، [272]، [273]، [274]، [275]، [276]، [277]، [278]، [279]، [280]، [281]، [282]، [283]، [284]، [285]، [286]، [287]، [288]، [289]، [290]، [291]، [292]، [293]، [294]، [295]، [296]، [297]، [298]، [299]، [300]، [301]، [302]، [303]، [304]، [305]، [306]، [307]، [308]، [309]، [310]، [311]، [312]، [313]، [314]، [315]، [316]، [317]، [318]، [319]، [320]، [321]، [322]، [323]، [324]، [325]، [326]، [327]، [328]، [329]، [330]، [331]، [332]، [333]، [334]، [335]، [336]، [337]، [338]، [339]، [340]، [341]، [342]، [343]، [344]، [345]، [346]، [347]، [348]، [349]، [350]، [351]، [352]، [353]، [354]، [355]، [356]، [357]، [358]، [359]، [360]، [361]، [362]، [363]، [364]، [365]، [366]، [367]، [368]، [369]، [370]، [371]، [372]، [373]، [374]، [375]، [376]، [377]، [378]، [379]، [380]، [381]، [382]، [383]، [384]، [385]، [386]، [387]، [388]، [389]، [390]، [391]، [392]، [393]، [394]، [395]، [396]، [397]، [398]، [399]، [400]، [401]، [402]، [403]، [404]، [405]، [406]، [407]، [408]، [409]، [410]، [411]، [412]، [413]، [414]، [415]، [416]، [417]، [418]، [419]، [420]، [421]، [422]، [423]، [424]، [425]، [426]، [427]، [428]، [429]، [430]، [431]، [432]، [433]، [434]، [435]، [436]، [437]، [438]، [439]، [440]، [441]، [442]، [443]، [444]، [445]، [446]، [447]، [448]، [449]، [450]، [451]، [452]، [453]، [454]، [455]، [456]، [457]، [458]، [459]، [460]، [461]، [462]، [463]، [464]، [465]، [466]، [467]، [468]، [469]، [470]، [471]، [472]، [473]، [474]، [475]، [476]، [477]، [478]، [479]، [480]، [481]، [482]، [483]، [484]، [485]، [486]، [487]، [488]، [489]، [490]، [491]، [492]، [493]، [494]، [495]، [496]، [497]، [498]، [499]، [500]، [501]، [502]، [503]، [504]، [505]، [506]، [507]، [508]، [509]، [510]، [511]، [512]، [513]، [514]، [515]، [516]، [517]، [518]، [519]، [520]، [521]، [522]، [523]، [524]، [525]، [526]، [527]، [528]، [529]، [530]، [531]، [532]، [533]، [534]، [535]، [536]، [537]، [538]، [539]، [540]، [541]، [542]، [543]، [544]، [545]، [546]، [547]، [548]، [549]، [550]، [551]، [552]، [553]، [554]، [555]، [556]، [557]، [558]، [559]، [560]، [561]، [562]، [563]، [564]، [565]، [566]، [567]، [568]، [569]، [570]، [571]، [572]، [573]، [574]، [575]، [576]، [577]، [578]، [579]، [580]، [581]، [582]، [583]، [584]، [585]، [586]، [587]، [588]، [589]، [590]، [591]، [592]، [593]، [594]، [595]، [596]، [597]، [598]، [599]، [600]، [601]، [602]، [603]، [604]، [605]، [606]، [607]، [608]، [609]، [610]، [611]، [612]، [613]، [614]، [615]، [616]، [617]، [618]، [619]، [620]، [621]، [622]، [623]، [624]، [625]، [626]، [627]، [628]، [629]، [630]، [631]، [632]، [633]، [634]، [635]، [636]، [637]، [638]، [639]، [640]، [641]، [642]، [643]، [644]، [645]، [646]، [647]، [648]، [649]، [650]، [651]، [652]، [653]، [654]، [655]، [656]، [657]، [658]، [659]، [660]، [661]، [662]، [663]، [664]، [665]، [666]، [667]، [668]، [669]، [670]، [671]، [672]، [673]، [674]، [675]، [676]، [677]، [678]، [679]، [680]، [681]، [682]، [683]، [684]، [685]، [686]، [687]، [688]، [689]، [690]، [691]، [692]، [693]، [694]، [695]، [696]، [697]، [698]، [699]، [700]، [701]، [702]، [703]، [704]، [705]، [706]، [707]، [708]، [709]، [710]، [711]، [712]، [713]، [714]، [715]، [716]، [717]، [718]، [719]، [720]، [721]، [722]، [723]، [724]، [725]، [726]، [727]، [728]، [729]، [730]، [731]، [732]، [733]، [734]، [735]، [736]، [737]، [738]، [739]، [740]، [741]، [742]، [743]، [744]، [745]، [746]، [747]، [748]، [749]، [750]، [751]، [752]، [753]، [754]، [755]، [756]، [757]، [758]، [759]، [760]، [761]، [762]، [763]، [764]، [765]، [766]، [767]، [768]، [769]، [770]، [771]، [772]، [773]، [774]، [775]، [776]، [777]، [778]، [779]، [780]، [781]، [782]، [783]، [784]، [785]، [786]، [787]، [788]، [789]، [790]، [791]، [792]، [793]، [794]، [795]، [796]، [797]، [798]، [799]، [800]، [801]، [802]، [803]، [804]، [805]، [806]، [807]، [808]، [809]، [810]، [811]، [812]، [813]، [814]، [815]، [816]، [817]، [818]، [819]، [820]، [821]، [822]، [823]، [824]، [825]، [826]، [827]، [828]، [829]، [830]، [831]، [832]، [833]، [834]، [835]، [836]، [837]، [838]، [839]، [840]، [841]، [842]، [843]، [844]، [845]، [846]، [847]، [848]، [849]، [850]، [851]، [852]، [853]، [854]، [855]، [856]، [857]، [858]، [859]، [860]، [861]، [862]، [863]، [864]، [865]، [866]، [867]، [868]، [869]، [870]، [871]، [872]، [873]، [874]، [875]، [876]، [877]، [878]، [879]، [880]، [881]، [882]، [883]، [884]، [885]، [886]، [887]، [888]، [889]، [890]، [891]، [892]، [893]، [894]، [895]، [896]، [897]، [898]، [899]، [900]، [901]، [902]، [903]، [904]، [905]، [906]، [907]، [908]، [909]، [910]، [911]، [912]، [913]، [914]، [915]، [916]، [917]، [918]، [919]، [920]، [921]، [922]، [923]، [924]، [925]، [926]، [927]، [928]، [929]، [930]، [931]، [932]، [933]، [934]، [935]، [936]، [937]، [938]، [939]، [940]، [941]، [942]، [943]، [944]، [945]، [946]، [947]، [948]، [949]، [950]، [951]، [952]، [953]، [954]، [955]، [956]، [957]، [958]، [959]، [960]، [961]، [962]، [963]، [964]، [965]، [966]، [967]، [968]، [969]، [970]، [971]، [972]، [973]، [974]، [975]، [976]، [977]، [978]، [979]، [980]، [981]، [982]، [983]، [984]، [985]، [986]، [987]، [988]، [989]، [990]، [991]، [992]، [993]، [994]، [995]، [996]، [997]، [998]، [999]، [1000]

#### 4-1- سیلندر دایروی با رشته منعطف

رشته‌ای با طول ثابت  $l^* = 1$  و  $k_B^* = 0.005$  با دو نوع تکیه‌گاه گیردار و مفصل، در جریان سیال قرار گرفته است. مطابق شکل 4، رشته شناور با توجه به ریزش گردابه که از سطح سیلندر اتفاق افتاده است، به سمت پایین حرکت کرده و در همان مکان (زیر محور مرکزی سیلندر) به نوسانات خود ادامه داده است. اینکه رشته به قسمت پایین متمایل شده، صرفاً به علت شرط اولیه بوده است. در حقیقت اولین گردابه از سطح بالایی استوانه، جدا شده و رشته را به طرف پایین منحرف کرده است.

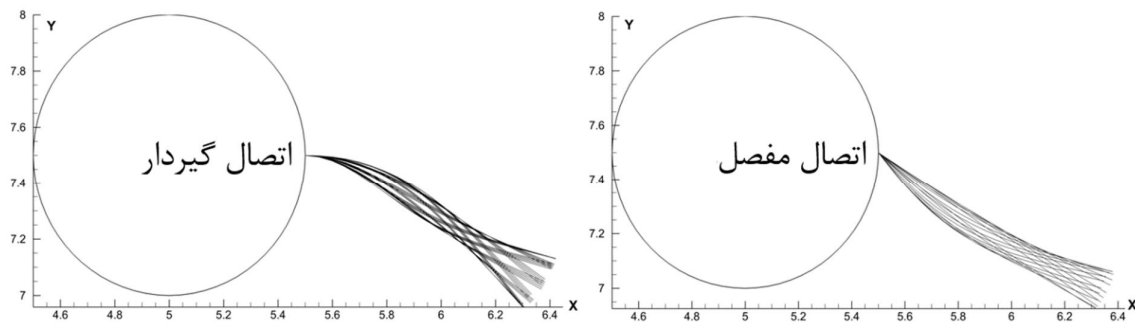


شکل 4: نوسان رشته شناور، تغییر مکان سر آزاد رشته، و تغییرات زمانی ضرایب لیفت و درگ

همچنین در شکل (4) تغییرات مکان سر آزاد رشته،  $Y(nf)$ ، بر حسب زمان نشان داده شده است. نوسانات رشته به حالت تکراری رسیده است. تغییرات ضرایب لیفت و درگ تقریباً هم‌فرکانس هستند در صورتی که برای یک استوانه تنها، یکی از آنها دو برابر دیگری است. همچنین متوسط ضریب لیفت دیگر صفر نیست. این موضوع به علت نامتقارن شدن جریان، ناشی از وجود رشته متحرک، است. این موضوع یکی از کاربردهای مهم وجود رشته است که باعث ایجاد نیروی لیفت روی اجسام متقارن می‌شود. وجود دم در بادبادک‌های کاغذی دست‌ساز نیز به همین علت است.

مقایسه نتایج در دو حالت اتصال گیردار و مفصلی، در شکل 5 و جدول 3 نشان شده است. ضریب متوسط لیفت نسبت به سیلندر تنها افزایش، ضریب متوسط درگ، نوسانات ضریب لیفت و عدد استروهال کاهش یافته است. نوسان رشته در پایین محور مرکزی سیلندر، موجب شده است تا ریزش گردابه‌ها از سطح پایینی سیلندر به شدت قبل صورت نگیرد و ناحیه جدایی جریان کوچکتر شود. همین عامل موجب می‌شود تا ضریب متوسط درگ کمتر شود. با وجود رشته، گردابه‌ها پس از تولید از سطح سیلندر، مجبورند در طول رشته حرکت کنند تا در انتهای رشته از سطح جدا شده و ریزش کنند. به همین علت فرکانس ریزش گردابه‌ها کمتر شده و عدد استروهال نیز کاهش یافته است. در حالت تکیه‌گاه گیردار، افزایش ضریب متوسط لیفت و

کاهش ضریب متوسط درگ در مقایسه با تکیه‌گاه مفصلی بیشتر است. شکل نوسانات رشته در حالت اتصال گیردار، پیچیده‌تر از حالت اتصال مفصلی است. چون اتصال مفصلی گشتاور خمشی تحمل نمی‌کند، راحت‌تر نوسان کرده و مودهای نوسانی



شکل 5: شکل نوسانات رشته برای دو اتصال مفصلی و گیردار

کمتری نسبت به اتصال گیردار نشان داده است.

جدول 3: تأثیر وجود رشته بر ضرایب لیفت و درگ و عدد استروهال

	تکیه‌گاه	$k_B^*$	$\bar{C}_l$	$C'_l$	$\bar{C}_D$	St	$y(nf)$
رشته شناور	گیردار	0.005	0.20	0.24	1.29	0.151	6.95-7.13
	مفصل		0.11	0.23	1.33	0.151	6.93-7.06
سیلندر تنها	—	—	0.0	0.33	1.44	0.167	—

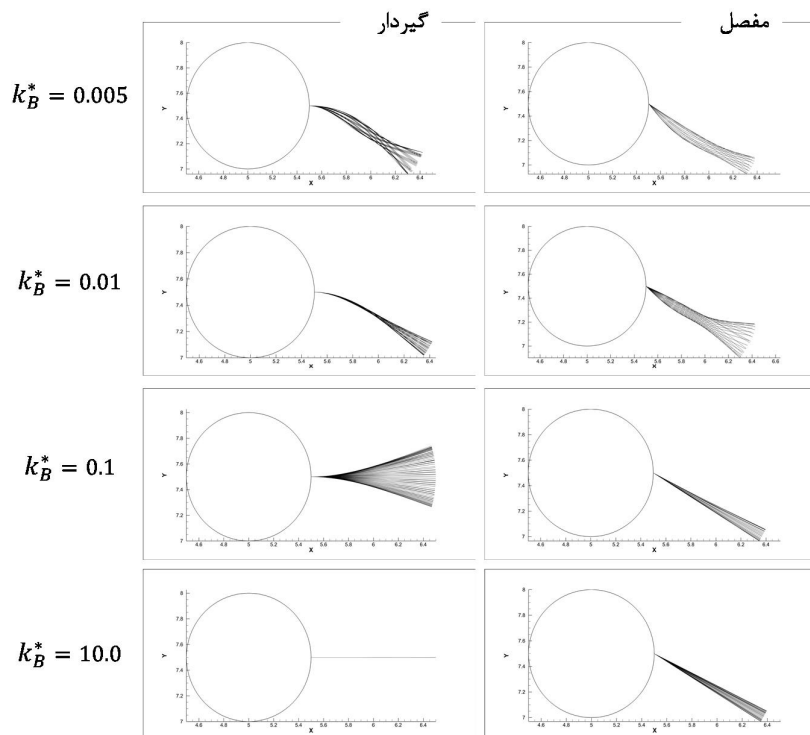
#### 4-2- اثر افزایش سختی خمشی رشته

با در نظر گرفتن طول ثابت ( $l^* = 1$ )، ضریب سختی خمشی  $k_B^*$  از مقدار 0.005 به سه مقدار 0.01 و 0.1 و 10.0 افزایش داده و نتایج در شکل 6 و جدول 4، ارائه شده‌اند. افزایش  $k_B^*$ ، در هر دو حالت گیردار و مفصلی، اثر محسوسی بر روی عدد استروهال نداشته است و فقط، در مورد  $k_B^* = 0.1$ ، احتمالاً به دلیل نوسان متقارن هم‌فاز رشته با ریزش گردابه‌ها، مقدار عدد استروهال افزایشی نسبت به بقیه موارد داشته است. همچنین، برای  $k_B^* = 0.1$ ، دامنه نوسان رشته زیاد بوده، یعنی جنب و جوش رشته بیشتر شده و در نتیجه، گردابه‌ها در امتداد طول رشته، بزرگتر شده که منجر به افزایش نوسانات ضریب لیفت شده است. ضریب متوسط درگ با افزایش  $k_B^*$ ، تقریباً ثابت مانده است. غیر از مورد  $k_B^* = 0.1$  حالت گیردار، که در این حالت ضریب متوسط درگ نسبت به بقیه موارد، افزایش یافته است. در حالت گیردار، کاهش  $C'_l$ ، بیشتر است. مورد دیگری که می‌توان بیان کرد، افزایش  $C'_l$  بر اثر افزایش دامنه نوسان رشته است که احتمالاً به دلیل نوسان هم‌فاز رشته با ریزش گردابه‌ها است. با افزایش  $k_B^*$ ، ضریب متوسط لیفت در حالت گیردار، افزایش یافته است. اما در حالت مفصل تقریباً ثابت مانده است.

جدول 4: اثر افزایش سختی خمشی رشته بر ضرایب هیدرودینامیکی

نوع اتصال	کمیت	$k_B^*$			
		0.005	0.01	0.1	10.0
گیردار	St	0.151	0.152	0.161	0.144
	$\bar{C}_D$	1.29	1.28	1.38	1.29
	$C'_l$	0.24	0.24	0.32	0.17
	$\bar{C}_l$	0.20	0.26	0.0	0.0
	$A^*$	0.18	0.1	0.46	0.001
مفصل	St	0.151	0.149	0.152	0.156
	$\bar{C}_D$	1.33	1.35	1.35	1.35
	$C'_l$	0.23	0.43	0.32	0.31
	$\bar{C}_l$	0.11	0.13	0.12	0.13
	A	0.13	0.29	0.09	0.08

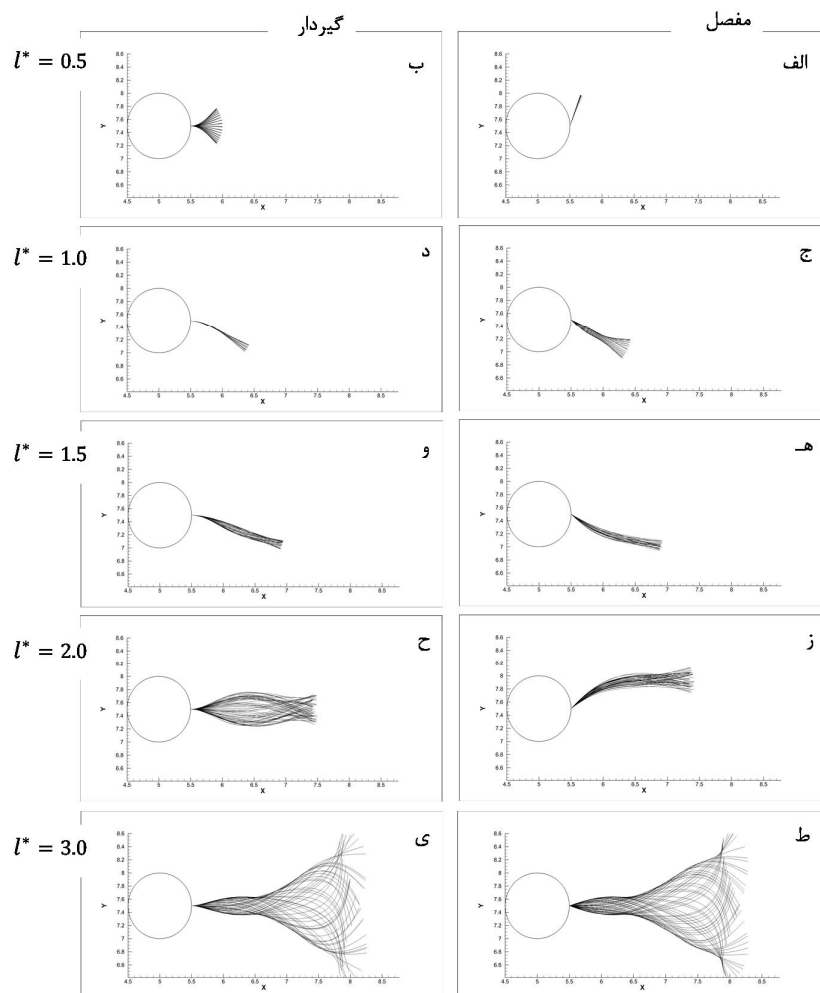
$A^*$ ، دامنه نوسان سر آزاد رشته یعنی اختلاف بیشترین و کمترین مقدار  $y(nf)$  است.



شکل 6: مقایسه نحوه نوسان رشته در اثر افزایش ضریب سختی خمشی ( $k_B^*$ )

#### 4-2- اثر افزایش طول رشته

با در نظر گرفتن ضریب سختی خمشی  $k_B^* = 0.01$  و طول متغیر رشته از مقدار  $l^* = 0.5$  تا  $l^* = 3.0$  با دو حالت تکیه‌گاه مفصل و گیردار، مسائل مختلفی حل شده و نتایج در جدول 5 و شکل 7، ارائه شده‌اند. همچنین در شکل 8 کانتور ورتیسیته در 12 فاصله زمانی متوالی در حالت  $l^* = 2.0$ ، نشان داده شده است. با افزایش طول رشته شناور، برای هر دو حالت مفصل و گیردار، عدد استروهال کاهش یافته است. این کاهش در مورد اتصال مفصلی بیشتر بوده است. در این نوع اتصال، آزادی حرکت رشته بیشتر بوده و گردابه‌ها هماهنگی بیشتری با حرکت رشته داشته و دیرتر ریزش کرده‌اند. ضریب متوسط درگ نیز با افزایش طول رشته برای هر دو حالت مفصل و گیردار، کاهش یافته است. علت این موضوع می‌تواند واگرایی کمتر خطوط جریان در پشت سیلندر به دلیل حضور رشته شناور باشد، که هر چه طول رشته بزرگتر باشد جریان بهتر می‌تواند خودش را با سطح رشته هماهنگ کند و چسبیده‌تر به سطح باشد. در نتیجه، ناحیه پرفشار پشت سیلندر کمتر شده و بنابراین نقطه جدایی دیرتر رخ خواهد داد. نوسانات ضریب لیفت با افزایش طول رشته، رفتار متفاوتی را از خود نشان داده است. می‌توان مشاهده کرد با افزایش دامنه نوسان ( $A$ )، نوسانات ضریب لیفت نیز افزایش یافته است. افزایش دامنه نوسان به معنای جنب‌وجوش بیشتر رشته است که موجب می‌شود گردابه‌ها در امتداد طول رشته، بزرگتر شده و انرژی بیشتری کسب کنند. با افزایش طول رشته، ضریب متوسط لیفت در نوسانات نامتقارن رشته افزایش یافته است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش سطح رشته و در نتیجه، اعمال نیروی بیشتر از طرف جریان سیال به رشته باشد.

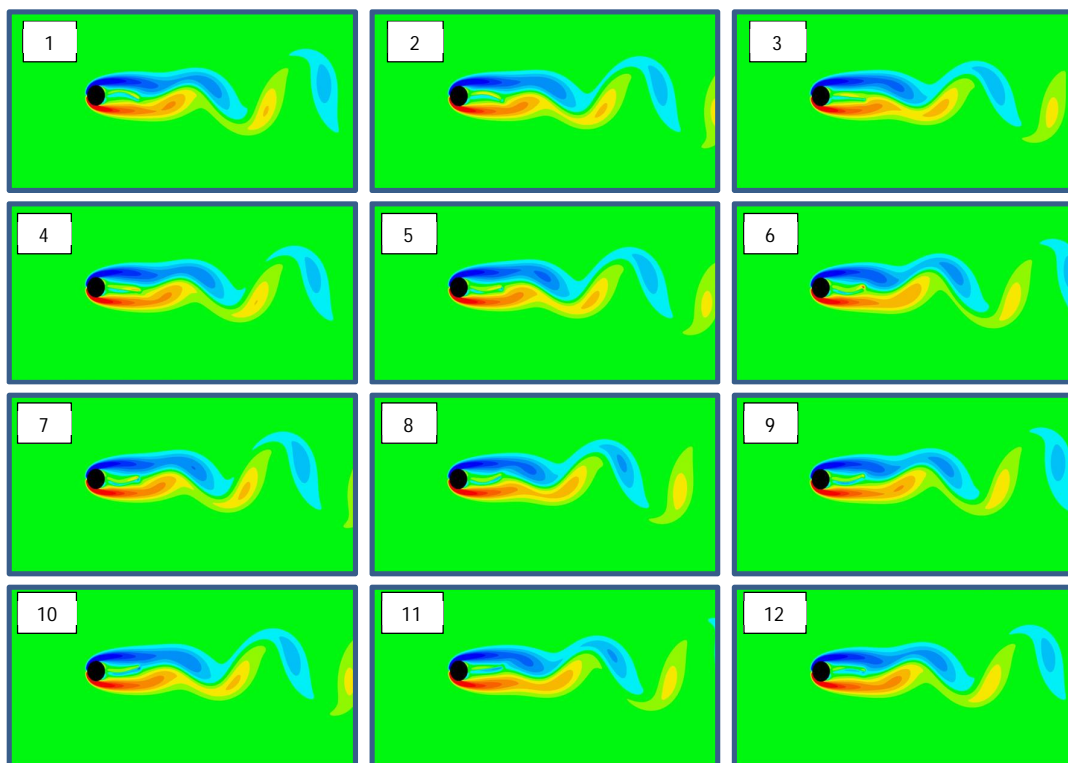


شکل 7: مکان رشته شناور در زمان‌های مختلف برای دو نوع اتصال مفصل و گیردار برای طول‌های مختلف

جدول 5: اثر افزایش طول رشته بر ضرایب هیدرودینامیکی

نوع اتصال	کمیت	$l^*$				
		0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
گیردار	St	0.167	0.152	0.145	0.144	0.140
	$\overline{C_D}$	1.43	1.28	1.27	1.24	2.25
	$C'_l$	0.23	0.24	0.21	0.45	3.06
	$\overline{C'_l}$	0.0	0.26	0.24	0.0	0.0
	A	0.54	0.10	0.13	0.46	2.28
مفصل	St	0.164	0.149	0.144	0.135	0.131
	$\overline{C_D}$	1.41	1.35	1.30	1.28	2.01
	$C'_l$	0.29	0.43	0.25	0.37	2.58
	$\overline{C'_l}$	0.07	0.13	0.19	0.23	0.0
	A	0.01	0.29	0.16	0.41	2.18





شکل 8: کانتور ورتیسسته در زمانهای مختلف

## 5- نتیجه گیری

- \* با وجود رشته، جریان نامتقارن شده و نیروی لیفت متوسط ایجاد می‌شود.
- \* در رشته‌های منعطف، با افزایش ضریب سختی خمشی، غالباً حالت گیردار نسبت به حالت مفصل از کاهش بیشتر ضریب متوسط درگ، نوسانات ضریب لیفت و همچنین عدد استروهال برخوردار است. و همچنین برای حالت گیردار، در نوسانات نامتقارن رشته، ضریب متوسط لیفت بزرگتری نسبت به حالت مفصل ایجاد می‌شود.
- \* با افزایش طول رشته در هر دو حالت گیردار و مفصل، ضریب متوسط درگ و نوسانات ضریب لیفت کاهش می‌یابد.
- \* در صورتی که طول رشته بزرگ باشد، رشته به صورت تقریباً متقارن نوسان می‌کند.

## مراجع

- [1] Yuan H., Niu X., Shu S., Li M., Yamaguchi H., 2014, A momentum exchange-based Immersed Boundary–Lattice Boltzmann Method for simulating a flexible filament in an incompressible flow, *Computers and Mathematics with Applications* **67**, 1039–1056.
- [2] Tian F., Luo H., Zhu L., Liao J., Lu X., 2011, An efficient Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method for the hydrodynamic interaction of elastic filaments, *Journal of Computational Physics* **230**, 7266–7283.
- [3] Bagheri S., Mazzino A., Bottaro A., 2012, Spontaneous symmetry breaking of a hinged flapping filament generates lift, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 154502.

- [4] Wu J., Wu J., Zhan J., 2016, Characteristics of flow over a circular cylinder with two attached filaments, *Journal of Fluids and Structures* **66**, 269–281.
- [5] Kang, S., Hassan, Y., 2011, A direct-forcing immersed boundary method for the thermal lattice Boltzmann method, *Computers & Fluids*, **49**(1), 36-45.
- [6] Rao S., 2018, *Mechanical Vibrations*, Pearson Education.
- [7] Sigai G., 2005, On High Order Strong Stability Preserving Runge-Kutta and Multi Step Time Discretizations, *Journal of Scientific Computing* **5**, 105-128.
- [8] Lai M., Peskin C., 2000, An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical viscosity, *Journal of Computational Physics* **160**, 705–719.
- [9] Russell D., Wang Z., 2003, A Cartesian grid method for modeling multiple moving objects in 2D incompressible viscous flow, *Journal of Computational Physics* **191**, 177–205.
- [10] Hai-Zhuan Yuan, .Xiao-Dang Niu, .Shi Shu, .Mingjun Li, and .Hiroshi Yamaguchi, 2014, A momentum exchange-based Immersed Boundary–Lattice Boltzmann Method for simulating a flexible filament in an incompressible flow, *Computers and Mathematics with Applications* **67**, 1039–1056.