مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16، ص‌ص 291-301

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی اثرات تغییر فرکانس و دامنه بر جریان حول یک باله نوسانگر به وسیله یک روش مرز غرق شده بهبود یافته

علی‌اکبر حسینجانی[1]، علی اشرفی‌زاده[2*]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، 19395-1999، ashrafizadeh@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 فروردین 1393
پذیرش: 19 خرداد 1393
ارائه در سایت: 24 آبان 1393

کلید واژگان:
باله‌های نوسان‌گر
روش مرز مستغرق
کانتورهای ورتیسته
کانتورهای انرژی جنبشی

چکیده

در این مقاله به بررسی عددی تغییر فرکانس و دامنه نوسان بر جریان حول باله در حرکت نوسان پیچشی پرداخته شده است. یک روش حل عددی برای بررسی این جریان ارائه شده که می‌توان آن‌را شکل بهبود یافته خانواده‌ای از روش‌های مرز غرق شده موسوم به روش‌های نیرو مستقیم تلقی نمود. در این روش پیشنهاد شده است که از تقریب مرتبه اول زمانی به جای حل دستگاه معادلات، برای محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی استفاده شود. روش‌های مرز غرق شده به دلیل استفاده از یک شبکه کارتزینی ثابت، در مسایل با مرز متحرک بسیار کارآمد می‌باشند. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، از داده‌های معتبر مربوط به جریان حول استوانه‌های ثابت و نوسانی استفاده شده است. در این پژوهش علاوه بر کانتورهای ورتیسته و نمودارهای ضرایب برآ و پسا، نحوه توزیع انرژی جنبشی منتقله به میدان جریان و تغییرات آن به واسطه تغییر دامنه و فرکانس حرکت باله نیز ارائه شده است. نتایج حاصل شده از این تحقیق نشان می دهد که با افزایش دامنه نوسان به بالاتر از 1/77 در یک عدد استروهال ثابت،22 /0 الگوی ایجاد گردابه‌های دنباله باله به هم خورده و در دامنه نوسان،2/80 جریان عملا ماهیت آشوبناک به خود می‌گیرد. علاوه بر این در دامنه نوسان ثابت0/71 با افزایش عدد استروهال به بالاتر از،0/3 نظم ایجاد گردابه‌ها به هم خورده و درعدد استروهال 0/4 رفتار غیر متقارن گردابه‌ها قابل مشاهده است. کانتورهای انرژی جنبشی نشان می‌دهند که در عدد استروهال کوچک، 0/1، هرچند باله بر میدان جریان کار انجام می‌دهد ولی افزایش تلفات ناشی از بزرگ شدن ناحیه جدایش، باعث می‌شود که ممنتم و انرژی جنبشی در پشت باله کم شده و نیروی پسا افزایش یابد. از طرف دیگر، افزایش دامنه و فرکانس نوسان، منجر به افزایش انرژی جنبشی و ممنتم در پشت باله و کاهش نیروی پسا می‌شود.

A Numerical Study on the Effects of Oscillation Frequency and Amplitude on Flow around a Flapping Airfoil via an Improved Immersed Boundary Method

Ali Akbar Hosseinjani[1], Ali Ashrafizadeh[1*]

1- Department of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
*P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, ashrafizadeh@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 April 2014
Accepted 09 June 2014
Available Online 15 November 2014

Keywords:
Immersed boundary method
Vorticity contours
Flapping airfoil
Kinetic energy contours

ABSTRACT

In this paper an improved immersed boundary method is used for simulating sinusoidal pitching oscillations of a symmetric airfoil. Immersed boundary methods which employ fixed Cartesian grids are well suited for such moving boundary problems. Two test cases are used to validate the proposed method and the effects of oscillation frequency and amplitude on the flow field are investigated. Flow field vorticity and kinetic energy contours are reported in this paper. It is found that the deflected wake appears at a Strouhal number around 0.4 for a fixed pitching amplitude equal to 0.71. A chaotic flow can be observed at oscillation amplitude equal to 2.80, for St=0.22. Kinetic energy contours at St=0.1 show that the airfoil transfers momentum to the flow but the drag force also increases due to the energy loss associated with the enlargement of separation zone behind the airfoil. By increasing the oscillation frequency and amplitude, momentum transfer to the flow increases and the drag force is, therefore, reduced.

1- مقدمه

حرکت نوسانی یک باله می‌تواند به سه صورت انجام شود: حرکت نوسانی انتقالی به سمت بالا و پایین[1]، حرکت نوسانی دورانی یا چرخشی[2] و بالاخره حرکت نوسانی ترکیبی یا انتقالی-چرخشی. در ارتباط با این حرکات نوسانی

1- Pure Plunging
2- Pure Pitching

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. A. Hosseinjani, A. Ashrafizadeh, A Numerical Study on the Effects of Oscillation Frequency and Amplitude on Flow around a Flapping Airfoil via an Improved Immersed Boundary Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 291-301, 2015 (In Persian)

سه وضعیت از نظر تبادل انرژی وجود دارد که عبارتند از ارسال انرژی به سیال[1]، اخذ انرژی از سیال[2] و بال زدن خنثی[3] [1]. در وضعیت ارسال انرژی به سیال، حرکت نوسانی باعث انجام کار روی سیال، ایجاد نیروی جلوبری و افزایش انرژی جنبشی سیال می‌شود. در شرایط اخذ انرژی از میدان جریان، نظیر پدیده فلاتر در بال هواپیماها، سیال روی باله کار انجام می‌دهد و در نتیجه انرژی جنبشی میدان کاهش می‌یابد. این وضعیت در سالهای اخیر در طراحی ژنراتورها و تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است[2]. در بال زدن خنثی هیچ گونه انرژی بین سیال و جسم رد و بدل نمی‌شود.

باله‌های با حرکت نوسانی دورانی، یا باله‌های نوسانگر، به عنوان ابزار اصلی پرندگان برای پرواز طبیعی[4] و تامین نیروی برآ[5] و جلوبری[6] شناخته می‌شوند. علاوه بر این ماهی‌ها و جانوران آبزی[7] نیز از این باله‌ها برای ایجاد نیروی رو به جلو و تغییر مسیر یا ارتفاع استفاده می‌کنند. به علاوه مطالعات نشان می‌دهند که در اعداد رینولدز پایین، مکانیزم های کلاسیک پرواز نظیر استفاده از بال ثابت و یا دوار به اندازه بالزنی موثر نیستند. بالزن‌ها از جدایش جریان بهره برده و با ایجاد ورتیسیته‌های ناشی از برخاستگی جریان، به طور متناوب نیروی برآ تولید می‌کنند. بالزن ها و پرندگان حتی این امکان را دارند که با تغییر مناسب نحوه بال زدن نیروی جاذبه را دقیقا خنثی و در ارتفاع معینی باقی بمانند[8].

قابلیت‌های پروازی بالزن‌های کوچکی نظیر میکروروبوت‌ها و نانوروبوت‌های بالزن در اعداد رینولدز پایین سبب شده است که امکان بکارگیری آنها در محیط‌های بسته و شهری امکان‌پذیر باشد [3]. از طرف دیگر روبوت‌های شناگر در ابعاد نانو نیز که امروزه در حوزه‌های گوناگون بایو مکانیک در حال کسب محبوبیت هستند از مکانیزم بال زدن استفاده می‌کنند. در حال حاضر تحقیقات گسترده‌ای برای کاربرد این نانو روبوت‌های شناگر در محیط‌های داخلی بدن برای اهداف گوناگون تشخیصی و درمانی در حال انجام است [4].

با توجه به اهمیت فراوان باله‌های نوسانگر، چه از نظر پدیده شناسی جریان سیالات حول آنها و چه از نظر کاربردهای صنعتی، تحقیقات دامنه‌دار و گسترده‌ای در ارتباط با آنها انجام گرفته است [۵،6]. شناخت طبیعت حرکت پرندگان و حشرات، انگیزه بخش عمده‌ای از پژوهشگران در مطالعه رفتار باله‌های نوسانگر بوده است[7]. علاوه بر این، پدیده‌شناسی حرکت ماهی‌ها و جانوران آبزی نیز توسط برخی محققین صورت گرفته است[8]. بیشتر پژوهش‌ها در این زمینه مربوط به یافتن دامنه، فرکانس و مودهای نوسان بهینه و همین‌طور شکل باله بهینه برای ایجاد بیشترین مقدار نیروی جلوبری و/یا بالابری بوده است [6]. این پژوهش‌ها عمدتا برای دامنه‌های نوسان کوچک انجام شده است.

پژوهش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی گوناگونی در ارتباط با جریان حول باله‌های نوسان کننده از هر سه نوع حرکت انتقالی، دورانی و ترکیبی صورت گرفته است. اولین پژوهش‌های تئوریک برای توضیح چگونگی ایجاد جلوبری توسط باله‌های نوسانگر به کارهای بتز در اوایل قرن بیستم بر می‌شود[9] . ویس-فوگ جزء اولین کسانی است که در پژوهش‌های تجربی خود مکانیزم تولید برآ را در پرواز حشرات توضیح داده است [10]. اندرسون و همکاران ترکیب حرکت نوسان چرخشی و انتقالی را برای باله NACA0012 در جریان تونل آب به‌صورت آزمایشگاهی بررسی نموده‌اند[11]. آنها نتیجه گرفتند که در عدد استروهال بین 0/25 تا 0/4 بیشترین مقدار برآی پریودیک حاصل می‌شود. در مطالعه تیلور و همکاران پرواز 14 پرنده، 6 نوع خفاش و 2 دسته از حشرات مورد مطالعه قرار گرفته است[12]. در این مطالعه نتیجه گرفته شد که عمده پروازها در محدوده عدد استروهال 0/19 تا 0/41 صورت می‌گیرد. همان گونه که مشخص است این محدوده عدد استروهال به محدوده عدد استروهال بیشینه برآ، حاصل شده از مطالعه اندرسون و همکاران، بسیار نزدیک است. وانگ جریان حول باله در حرکت نوسانی انتقالی خالص را برای یک باله متقارن در رینولدز 1000 مورد بررسی قرار داد. او نتیجه گرفت که در این رینولدز به ازای یک فرکانس نوسان بهینه جدایش جریان از هر دو لبه حمله و فرار اتفاق می‌افتد[13]. لنتیک و همکاران به‌صورت آزمایشگاهی جریان حول باله نوسانگر را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که در حالتی که دامنه نوسان نسبتا بزرگ است جریان های گردابی بزرگی با افزایش فرکانس نوسان شکل می‌گیرند که توپولوژی جریان را تحت تاثیر قرار داده و این امر تقارن پریودیک جریان را بر هم می زند [14]. صرف نظر از مطالعه اخیر، عمده مطالعات تجربی در دامنه های نوسان‌کوچک که منجر به نواحی جدایش کوچک می‌شوند انجام گرفته‌اند. مطابق بررسی‌های حاج‌حریری در دامنه نوسان‌های بزرگ جریان حالت آشوبناک[9] به خود می‌گیرد[15]. بدیهی است که شناخت فیزیک جریان و نیروهای پریودیک تا حدود زیادی وابسته به شناخت رفتار گردابه‌هایی است که در این جریان تشکیل می‌شود. از این رو در پژوهش‌های آزمایشگاهی گودی-دیانا و همکاران صرفا به مطالعه رفتار این گردابه‌ها در جریان حول باله‌های نوسانگر پرداخته شده است[16] .

بررسی عددی جریان حول باله‌های نوسانگر جزئیات بیشتری از رفتار آنها و اطلاعات جدیدی پیرامون حالت‌های گوناگون این گونه جریان‌ها در اختیار می‌گذارد. بر اساس نتایج دیکنسون و همکاران پدیده بر همکنش اثر باله و گردابه[10] سبب می‌شود که نیروهای ایرودینامیکی افزایش یابند[17]. در این حالت وقتی جهت حرکت باله در طی حرکت نوسانی تغییر می‌کند باله با گردابه‌ای که در حرکت قبل تولید شده است برخورد کرده و سرعت محلی جریان افزایش می‌یابد. به همین دلیل نیروی ایرودینامیکی نیز به طور محلی افزایش می‌یابد. جونس و پلاتزر از روش پانل برای بررسی جریان دو بعدی غیر قابل تراکم و غیر لزج بر روی باله‌ها با سطوح مقاطع گوناگون در حرکت نوسان انتقالی استفاده نمودند[18]. آنها دریافتند که ضخامت باله اثر ناچیزی در نیروی جلوبری تولیدی در دامنه و فرکانس نوسان مورد مطالعه دارد. لای و یانگ جریان حول باله NACA0012 در حرکت نوسان انتقالی در رینولدز 20000 را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند[19]. آنها اثر جدایش جریان در ناحیه لبه فرار بر روی نیروی تولید شده را در دامنه ها و فرکانس های نوسان مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. ویزبال جریان حول باله همراه با حرکت نوسان انتقالی را در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی به ازای دو عدد رینولدز 40000 و10000 مورد مطالعه قرار داد[20]. او مشاهده کرد که در رینولدز 10000 گردابه‌هایی که از حرکت باله حاصل می‌شود اساسا به‌صورت دو بعدی باقی می‌مانند ولی در رینولدز 40000 گردابه‌ها به ساختارهای گردابه‌ای کوچک‌تر شکسته شده و جریان را ناپایدار می‌کنند.

در این پژوهش به مطالعه عددی جریان حول یک باله متقارن با حرکت

1- Power derivation
2- Power extraction
3- Feathering
4- Natural flying
5- lift
6- Thrust
7- Marine mammals
8- Hovering
9- Chaotic
10- Wing vortex interaction

نوسانی پیچشی و وضعیتی که در آن انرژی جنبشی از باله به سیال منتقل می‌شود، پرداخته می‌شود. جریان حول چنین باله‌ای پیش از این به‌صورت آزمایشگاهی در [16] مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل عددی از یک روش مرز غرق شده بهبود یافته استفاده شده و نتایج محاسباتی در چندین دامنه و فرکانس نوسان ارائه می شوند. تمامی مطالعات در عدد رینولدز ثابت 255، مطابق مرجع [16] انجام گرفته است. همچنین کانتورهای ورتسیته، نمودارهای ضرایب برآ و پسا نیز ارائه شده‌اند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که چگونگی انتقال انرژی جنبشی از باله به سیال تاکنون به طور مستقل مورد بحث قرار نگرفته است. اهمیت این موضوع از آن جهت است که امروزه باله‌های نوسانی به عنوان یک موتور ایجاد نیرو جلوبری[1] کاربردهای متفاوتی پیدا کرده‌اند[4]. این موتورها با انجام کار برروی سیال و انتقال ممنتم و انرژی جنبشی، سبب ایجاد نیروی جلوبری می‌گردند. از این رو تحلیل انرژی جنبشی جریان حول این باله‌ها در ارزیابی کارایی این موتورها اهمیت ویژه‌ای خواهند داشت. اهمیت دیگر این بررسی آن است که حرکت باله در سیال می‌تواند موجب ایجاد دو اثر متفاوت شود. از یک طرف این حرکت با انجام کار بر روی جریان سبب افزایش انرژی جنبشی جریان می‌شود و از طرف دیگر حرکت باله سبب بزرگ شدن ناحیه جدایش و افزایش تلفات جریان خواهد شد. با تحلیل انرژی جنبشی حول باله می‌توان دریافت که در چه دامنه و فرکانس نوسان، حرکت باله سبب افزایش انرژی جنبشی و ممنتم میدان جریان خواهد شد. به عبارت دیگر کار انجام شده توسط باله بر تلفات لزجتی غلبه نموده و موجب ایجاد نیروی جلوبری خواهد شد. قابل ذکر است که افزایش انرژی جنبشی میدان جریان به معنی افزایش انتقال ممنتم از باله به جریان و افزایش ایجاد نیروی جلوبری می‌باشد. به همین دلیل کانتورهای انرژی جنبشی و نمودار تغییرات انرژی جنبشی منتقله به سیال بر حسب دامنه و فرکانس حرکت نوسانی باله نیز ارائه شده‌اند.

برای اعتبارسنجی روش عددی پیشنهادی در این پژوهش، مسئله جریان حول استوانه ثابت و نوسانی حل و نتایج حاصل با نتایج موجود در مراجع [21] و [22] مقایسه شده‌اند.

2- روش مرز غرق شده

2-1- کلیات روش

روش مرز غرق شده از یک شبکه منظم کارتزینی با سلول‌های قائم یکنواخت، که از این پس شبکه نامیده می‌شود، برای مدل‌سازی جریان حول یک جسم دلخواه استفاده می‌کند. در این روش معادلات حاکم بر روی شبکه گسسته‌سازی و شرایط مرزی به‌صورت غیر مستقیم بوسیله یک سری نیروی متمرکز در نقاط واقع بر روی مرز مدل‌سازی می‌شوند. در صورت تغییر مکان مرز جسم، نقاط واقع بر روی مرز که اصطلاحا نقاط لاگرانژی نامیده می‌شوند نیز تغییر می‌کنند. مزیت اصلی روش‌های مرز غرق شده نسبت به سایر روش های کلاسیک حل عددی، عدم نیاز به ایجاد یک شبکه منطبق بر مرز است. این مزیت سبب شده است که روش‌های مرز غرق شده به‌صورت گسترده‌ای برای مسایل با هندسه‌های پیچیده، مسایل با هندسه‌های متحرک و مسایل اندرکنش سیال- جامد بکار گرفته شوند.

در روش مرز غرق شده دو نوع نقطه یا گره محاسباتی داریم. نوع اول نقاط شبکه هستند که نقاط اویلری خوانده شده و مختصات آنها با بردار $\vec{x}$ بیان می‌شود. نوع دوم، نقاط قرار گرفته روی مرز مشترک سیال- جامد هستند که نقاط لاگرانژی نامیده شده و مختصات آنها با بردار $\vec{X}$ نشان داده می‌شوند. در حالت کلی جسم جامد در مرز مشترک جامد- سیال بر سیال نیرو وارد می‌کند و طبق قانون دوم نیوتن از آن نیز نیرو می‌پذیرد. نیرو در فصل مشترک جامد سیال مطابق شکل 1 با $\vec{F}$ نشان داده می‌شود. محاسبه این نیرو چنانچه جسم الاستیک باشد با روش‌های مقاومت مصالح انجام می‌شود ولی اگر جسم صلب باشد باید بر اساس تمهیداتی که در ادامه بیان خواهد شد عمل نمود. پس از آن، این نیروهای متمرکز در نقاط لاگرانژی که در حالت کلی منطبق بر نقاط شبکه نیستند باید بر روی نقاط شبکه توزیع گردند. نیروی توزیع شده $\vec{F}$ بر روی نقاط شبکه با $\vec{f}$ نشان داده شده و این همان نیرویی است که به عنوان ترم منبع در معادله ممنتم اعمال و جایگزین شرایط مرزی می شود.

با توجه به آنچه گفته شد یکی از کارهای مهم در روش مرز غرق شده این است که نیروهای $\vec{F}$ که در نقاط $\vec{X}$ اعمال می‌شوند به نحو مناسب و به‌صورت نیروهای $\vec{f}$ در نقاط $\vec{x}$ اعمال گردند.

در روش کلاسیک مرز غرق شده که توسط پسکین ابداع شده است توزیع نیروها در نقاط اویلری بوسیله یک تابع دلتای هموار، d ، انجام می‌گیرد. این تابع متناسب با مقدار نیرو $\vec{F}$ و دوری و نزدیکی آن از یک نقطه اویلری، نیروی $\vec{f}$ در آن نقطه از شبکه را تعیین می‌کند. پیشنهادات مختلفی پیرامون نحوه انتخاب این تابع دلتای هموار در مراجع ارائه شده است [23]. نیروی اعمالی $\vec{f}$ بر نود واقع در موقعیت $\vec{x}$ از جمع اثرات تمام نیروهای اعمالی در نقاط لاگرانژی و با ضرایب وزنی که از طریق تابع d بدست می‌آیند تعیین می‌شود رابطه (1).

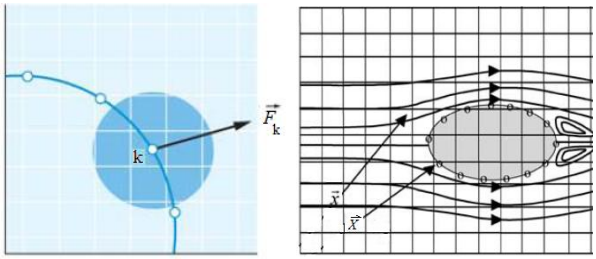
$$\vec{f}(\vec{x},t)=\int_{\Gamma_b}\vec{F}(s,t)\ d(\vec{x}-\vec{X}(s,t))ds \qquad (1)$$

متغیر s در رابطه فوق به گونه‌ای انتخاب می‌شود که یک مقدار مشخص برای آن معین کننده یک نقطه فیزیکی از مرز برای همه زمان‌ها باشد. نیرویی که توزیع آن بدین صورت در نقاط شبکه محاسبه می‌شود در معادله ممنتم به‌صورت ترم منبع اعمال و برای محاسبه سرعت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از محاسبه سرعت سیال در نقاط اویلری، سرعت در نقاط روی مرز (نقاط لاگرانژی) با استفاده از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$\vec{U}(\vec{X}(s,t))=\int_{\vec{x}\varepsilon g}\vec{u}(\vec{x},t)\ d(\vec{x}-\vec{X}(s,t))d\vec{x} \qquad (2)$$

در رابطه فوق $\vec{U}(\vec{X}(s,t))$ سرعت محاسبه شده در نقاط لاگرانژی است. واضح است که برای یک جسم صلب ساکن، سرعت در نقاط لاگرانژی باید صفر بدست آید. تذکر این نکته مفید است که در روش مرز غرق شده معادلات



(ب) (الف)

شکل 1 الف- نمایش نقاط اویلری و نقاط لاگرانژی. ب- نیرو در نقطه لاگرانژی.

1- Thrust engine

گسسته برای نودهای موجود در کل ناحیه، اعم از سیال و جامد، حل می‌شوند. طبیعتا حل‌های بدست آمده در نودهای درون جسم جامد، فیزیکی نبوده و ارزش کاربردی ندارند.

روش کلاسیکی که شرح آن گذشت بیانگر یکی از دیدگاه‌های مطرح در روش‌های مرز غرق شده می‌باشد. اقدامات اصلی در این دیدگاه شامل محاسبه نیروها در نقاط لاگرانژی ($\vec{F}$ها)، توزیع اثرات $\vec{F}$ها و تعیین نیروها در نقاط اویلری ($\vec{f}$ها)، محاسبه سرعت‌ها در نقاط اویلری و سپس محاسبه سرعت‌ها در نقاط لاگرانژی است[23]. این دیدگاه تحت عنوان کلی روش‌های اعمال شرایط مرزی از طریق تابع پیوسته هموار[1] در مراجع شناخته می‌شود. عمده کاربرد این روش‌ها در مسایل با مرزهای الاستیک است که در آنها نیرو به وسیله روش‌های مقاومت مصالح قابل محاسبه است.

دیدگاه‌های بکار رفته در روش‌های گوناگون مرز غرق شده به همین دیدگاه محدود نمی‌شوند. روش‌های نیرو مستقیم[2] دیدگاه دیگری است که توسط محققین توسعه یافته و به تدریج کاملتر شده است. اساس این روش را می‌توان به پژوهش‌های موهد- یوسف نسبت داد[24]. کار موهد-یوسف مبتنی بر این ایده بود که بجای اینکه در هر مرحله زمانی نیرو در بعضی نقاط اویلری اعمال شود، مقادیر معینی از سرعت و یا فشار به این نقاط تحمیل شوند. در واقع سرعت سیال در بعضی نقاط اویلری (نقاط اعمال[3]) به نحوی تعیین می‌شود که شرایط مرزی سرعت در نقاط لاگرانژی (مرزی) ارضا گردند. برای تعیین این مقادیر سرعت یا فشار در نقاط اویلری از درون‌یابی‌های هندسی استفاده می‌شود. روش‌هایی نظیر روش سلول شبح[4] [25] و روش ارائه شده توسط بالاراس و همکاران [26] نیز بر پایه همین روش توسعه یافته‌اند.

در دیدگاه دیگری که در قالب روش‌های حجم کنترلی شکل گرفته است، بعضی سلول‌های شبکه بریده شده و معادلات حجم کنترل برای این سلول‌های بریده شده نوشته می‌شوند. روش سلول بریده[5] [27] در این دسته قرار دارد. اعمال شرایط مرزی در این دسته از روش ها به طور نسبی پیچیده‌تر است.

در بعضی از روش‌های مرز غرق شده نیز از ترکیبی از دو دیدگاه اعمال شرط مرزی بکمک تابع پیوسته هموار و روش نیرو مستقیم استفاده می‌شود. روش‌های ارائه شده توسط یولمن [28] و روش ارائه شده توسط سو [29] را می‌توان جزء این روش‌ها دانست. در این پژوهش نیز از این گونه روش‌ها استفاده شده است.

2-2- روش مرز غرق شده بکار رفته در این پژوهش

در این پژوهش از ترکیب روش‌های ارائه شده توسط یولمن [28] و روش ارائه شده توسط سو و همکاران [29] برای دست‌یابی به یک الگوریتم قابل اطمینان در حل مسئله جریان حول جسم صلب متحرک استفاده شده است. تفاوت روش بکار رفته در این پژوهش با روش سو و همکاران در نحوه محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی می‌باشد. قابل ذکر است که در روش ارائه شده توسط سو و همکاران برای محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی از یک دستگاه معادلات به‌صورت معادله (3) استفاده می‌شود [29].

1- Continuous forcing method
2- Direct forcing method
3- Forcing points
4- Ghost cell
5- Cut cell

$$\sum_{j=1}^{M}\left(\sum_{\vec{x}\epsilon g} d_h(\vec{x}-\vec{X}_j)d_h(\vec{x}-\vec{X}_k)\Delta s h^2\right)F(\vec{X_k}) = \frac{\vec{U}(\vec{X}_k)-\tilde{U}(\vec{X}_K)}{\Delta t} \quad (3)$$

حل این دستگاه معادلات به سادگی قابل انجام نیست به عبارت دیگر ضعف روش سو و همکاران آن است که با افزایش تعداد نقاط روی مرز این دستگاه معادلات نزدیک به منفرد[6] خواهد شد. از طرف دیگر چنانچه نقاط روی مرز کم باشد، احتمال نفوذ جریان جرم به داخل جسم و در نتیجه ایجاد خطای پایستاری جرم متصور می‌باشد. در این مقاله پیشنهاد شده است که بجای استفاده از این دستگاه معادلات، از تقریب مرتبه اول زمانی برای محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی استفاده شود. در نتیجه از مزیت سادگی الگوریتم سو و همکاران استفاده و ضعف این روش نیز مرتفع می‌شود. حلگر استفاده شده دراین پژوهش یک حل‌گر کسر زمانی[7] ارائه شده توسط کیم و معین می‌باشد که بر روی شبکه جابجا بوسیله روش تفاضل محدود حل شده است[30]. در این حل‌گر برای ترم‌های غیر خطی جابجایی روش آدامز-باشفورت مرتبه دوم به‌صورت صریح و برای ترم‌های خطی لزجت از کرانک-نیکلسون استفاده می‌شود. در اینجا بخشی از ترم لزجت به‌صورت صریح و بخشی از آن به‌صورت ضمنی وارد معادلات می‌شوند. همچنین از تفاضل محدود مرکزی برای گسسته سازی ترم‌های مشتق استفاده شده است. معادلاتی که در مرحله زمانی **n** ام حل می‌شوند را می‌توان به‌صورت روابط (4) تا (10) نوشت.

$$\frac{\tilde{u}-u^n}{\Delta t} = -\frac{3}{2}\nabla(uu)^n + \frac{1}{2}\nabla(uu)^{n-1} + \frac{1}{2Re}\nabla^2(\tilde{u}+u^n) \quad (4)$$

$$\tilde{U}(\vec{X}_l) = \sum_{\vec{x}\epsilon g}\tilde{u}(\vec{x})d_h(\vec{x}-\vec{X}_l^n)h^2 \quad (5)$$

$$F(\vec{X}_l) = \frac{U^d(\vec{X}_l)-\tilde{U}(\vec{X}_l)}{\Delta t} \quad (6)$$

$$f_\beta(\vec{x}) = \sum F(\vec{X}_l^n)d_h(\vec{x}-\vec{X}_l^n)\Delta V_l \quad (7)$$

$$\frac{\vec{u}^*(\vec{x})-\tilde{u}(\vec{x})}{\Delta t} = f_\beta(\vec{x}) \quad (8)$$

$$\nabla^2 P^{n+1} = \nabla\vec{u}^* \quad (9)$$

$$\frac{\vec{u}(\vec{x})^{n+1}-\vec{u}^*(\vec{x})}{\Delta t} = -\nabla P^{n+1} \quad (10)$$

در این معادلات $\tilde{u}$ و $\vec{u}^*$ سرعت‌های میانی هستند که از نظر کلی دارای مفهوم فیزیکی معینی نمی‌باشند. ارضای شرط پیوستگی از طریق حل معادله پوآسون فشار، معادله 9، صورت می‌گیرد. معادلات در یک مرحله زمانی از معادله 4 تا معادله 10 به ترتیب حل می‌گردند. برای حل دستگاه های معادلاتی که از معادلات 4 و 9 حاصل می‌شوند، از روش Bi-CGSTAB8 استفاده شده است [29]. رابطه 5 در حقیقت همان رابطه 2 است که برای انتقال سرعت‌ها از نقاط اویلری به سمت نقاط لاگرانژی روی بدنه استفاده می‌شود. در این رابطه d_h یک تابع دلتای هموار شده است که در مرجع [31] معرفی شده است. رابطه 6 تقریب مرتبه اول زمانی برای محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی است. سرعت $\vec{U}^d(\vec{X}_l)$ در این رابطه سرعتی است که از شرط مرزی دیریشله در نقطه لاگرانژی مورد نظر بدست می‌آید. در رابطه 7، $\Delta V_l = hds$

6- Near singular
7- Fractional step
8- Bi conjugate gradient stabilizer method

تعریف می‌شود که ds فاصله هر دو نقطه لاگرانژی و h اندازه شبکه محاسباتی است.

الگوریتم حل را می‌توان به‌صورت‌زیرخلاصه نمود:

۱- سرعت در نقاط میدان حدس زده می شود (حدس اولیه). بهتر است در این مرحله سرعت ورودی به عنوان سرعت اولیه در نظر گرفته شود.

۲- معادله ۴ به‌صورت ضمنی برای محاسبه سرعت $\tilde{u}(\vec{x})$ بکار گرفته می‌شود. سرعتی که از این رابطه حاصل می‌شود یک سرعت میانی است و شرط مرزی را ارضا نمی‌کند.

۳- سرعت $\tilde{U}(\vec{X}_l)$ در نقاط لاگرانژی از روی سرعت $\tilde{u}(\vec{x})$ روی نقاط شبکه (نقاط اویلری) با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

۴- نیرو در نقاط لاگرانژی با استفاده از رابطه ۶ بدست می‌آید. در این رابطه $\vec{U}^d(\vec{X}_l)$ سرعتی است که از شرط مرزی دیریشله در نقاط لاگرانژی حاصل می‌شود.

۵- رابطه ۷ برای توزیع نیرو از نقاط لاگرانژی به سمت نقاط اویلری بکار گرفته می‌شود.

۶- سرعت میانی $\vec{u}^*$ با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

۷- رابطه ۹ برای محاسبه فشار به کار رفته و مشتمل بر حل معادله پوآسون است.

۸- رابطه ۱۰ با استفاده از فشار محاسبه شده در رابطه ۹، سرعت $\vec{u}^{n+1}$ را تعیین می‌کند.

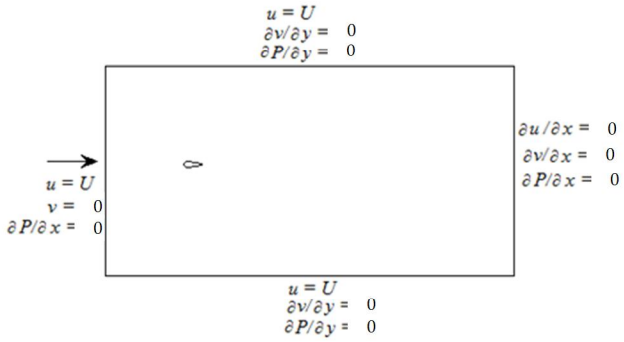
۹- الگوریتم برای مرحله زمانی بعدی از مرحله دوم تکرار می‌شود.

برای ارضای دقیق تر شرایط مرزی، مراحل سوم تا ۸ ام دو تا سه بار در هر گام زمانی تکرار می شوند[۳۲]. حل عددی نشان می دهد که بعد از ۳ بار تکرار مراحل سوم تا ۸ ام، نیرو در نقاط لاگرانژی تقریبا برابر صفر بدست می‌آید. صفر شدن نیرو در نقاط لاگرانژی به معنی برقراری شرط مرزی سرعت در این نقاط خواهد بود. در این پژوهش $\max|F(\vec{X}_k)| \leq 0.001$ به عنوان معیار توقف تکرارهای مراحل سوم تا ۸ ام در نظر گرفته شده است.

الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش ارائه شده در مرجع [۲۸] سر راست تر عمل می‌کند. دلیل این امر آن است که در مرحله چهارم الگوریتم بجای استفاده از یک دستگاه معادلات که همواره در معرض خطر منفرد شدن قرار دارد، از تقریبی مرتبه اول زمانی برای محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی استفاده می‌شود. در این تقریب دیگر نیاز به حل یک دستگاه معادلات نزدیک به منفرد برای محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی وجود ندارد و از این رو روش پیشنهادی ساده‌تر عمل می‌کند. از طرف دیگر در روش سو و همکاران امکان افزایش نقاط لاگرانژی بر روی مرز وجود ندارد. این امر سبب می شود که امکان نفوذ جریان جرم به داخل مرز افزایش یابد. نفوذ جریان جرم به داخل مرز سبب پتانسیل ایجاد خطای پایستاری جرم را در حل عددی تقویت می‌کند. ولی در روش پیشنهادی این امکان وجود دارد که با افزایش نقاط لاگرانژی روی مرز، پتانسیل ایجاد این خطا را کاهش داد. در حقیقت نوآوری روش پیشنهادی آن است که ترکیبی از دو روش بیان شده در [۲۸] و [۲۹] ارائه نموده است که در عین سادگی نتایج قابل اعتمادی را ارائه می‌کند.

۳- فرضیات مسئله

در این تحقیق جریان آرام، تراکم ناپذیر، گذرا و دو بعدی فرض شده است. از اثرات سه بعدی کاملا صرف نظر شده است. رینولدز جریان ثابت است. شرایط مرزی مطابق شکل ۲ می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است که ستاپ آزمایشگاهی مرجع [۱۶] به‌صورتعددی شبیه سازی شود از این رو سایر



شکل ۲ شرایط مرزی در اطراف میدان محاسباتی و جهت جریان.

فرضیات مشابه فرضیات ارائه شده در این مرجع می باشد.

۴- تشریح مسئله حل شده در این پژوهش

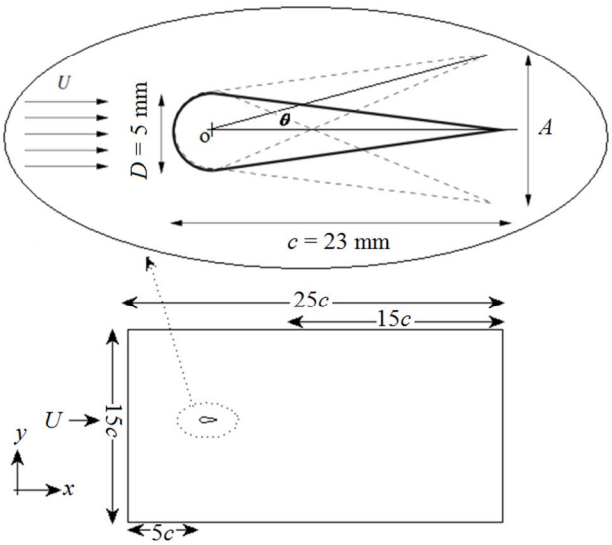
در این مطالعه مسئله جریان حول یک باله متقارن نوسانگر، مطابق مرجع [۱۶]، مورد بررسی قرار می‌گیرد. میدان محاسباتی و باله مورد نظر در شکل ۳ نشان داده شده اند. باله مورد نظر یک باله متقارن به‌صورتشکل ۳ است که حول نقطه o نوسان پیچشی منظم انجام می‌دهد. این باله جزء باله‌های استاندارد محسوب نمی‌شود با این وجود از آنجا که در این پژوهش سعی شده است که ستاپ آزمایشگاهی مرجع [۱۶] به‌صورت عددی شبیه سازی شود، این باله انتخاب شده است.

عدد رینولدز به‌صورت $\mathrm{Re} = \rho UD/\mu$ و نسبت $\mathrm{A_D}$ و عدد استروهال به‌صورت روابط (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌شوند.

$$\mathrm{A_D} = \frac{A}{D} \tag{۱۱}$$

$$\mathrm{St} = fD/U \tag{۱۲}$$

عدد رینولدز جریان، به تبعیت از مرجع [۱۶]، ۲۵۵ در نظر گرفته شده است. این عدد رینولدز در محدوده اعداد رینولدز نسبتا پایین دسته‌بندی می‌شود. حرکت باله و دم ماهی‌ها و جانوران آبزی در این محدوده از اعداد رینولدز قرار دارد. مسئله در حالت اول برای عدد استروهال ثابت $\mathrm{St} = 0.22$ و پنج دامنه نوسان $\mathrm{A_D} = 0.36, 0.71\ 1.07, 1.77, 2.80$ حل شده است. حرکت نوسانی این باله متقارن به وسیله رابطه (۱۳) مشخص می‌شود. در این رابطه θ مشخص



شکل ۳ جزئیات باله متقارن و میدان حل مورد بحث در این پژوهش.

کننده زاویه ای است که باله با راستای افق می‌سازد.

$$\theta = \theta_0 + \theta_A \sin(2\pi f t) \qquad (13)$$

دررابطه فوق θ_0 زاویه حمله اولیه، θ_A زاویه‌ای متناسب با دامنه نوسان و f نیز فرکانس نوسان است. در حالت دوم مسئله به ازای دامنه نوسان ثابت $A_D = 1.07$ و با ایجاد تغییر در عدد استروهال، St = 0.1,0.22,0.3,0.4، حل خواهد شد. در نهایت نیز تاثیر وجود زاویه حمله اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول 1 خلاصه اطلاعات مسئله حل شده در این پژوهش آورده شده است.

5- اعتبار سنجی روش عددی به‌کار رفته در این پژوهش

برای اعتبار سنجی روش عددی بکار رفته در این پژوهش، مسئله جریان حول استوانه ساکن [21]، به وسیله این روش حل شده و ضرایب پسا مطابق جدول 2 مقایسه شده‌اند. رابطه درصد خطا در این جدول به‌صورت رابطه (14) است.

$$\text{Error} = \left|\frac{C_D(\text{num}) - C_D([21])}{C_D([21])}\right| \times 100 \qquad (14)$$

در رابطه فوق $C_D(\text{num})$ ضریب پسای حاصل شده از حل عدد، $C_D([21])$ ضریب پسای ارائه شده در مرجع [21] و Error درصد خطا را نشان می‌دهد.

عوامل مختلفی در ایجاد خطای حل عددی تاثیر دارند. ارضای شرایط مرزی به‌صورت غیر دقیق با استفاده از منابع نیروی متمرکز، استفاده از توابع هموار برای انتقال این نیروها، استفاده از تقریب‌های مرتبه دوم مکانی و مرتبه اول زمانی، تبدیل انتگرال‌ها به‌صورتمجموعه‌های گسسته از جمله این عوامل هستند. در مورد اجسام نوسانگر منبع خطای دیگری نیز در روش مرز غرق شده وجود دارد که ناشی از اثر حل‌های غیر فیزیکی در نودهای داخل جسم صلب در یک مرحله زمانی است که در مرحله زمانی بعد به واسطه حرکت جسم صلب وارد ناحیه سیال می‌شوند.

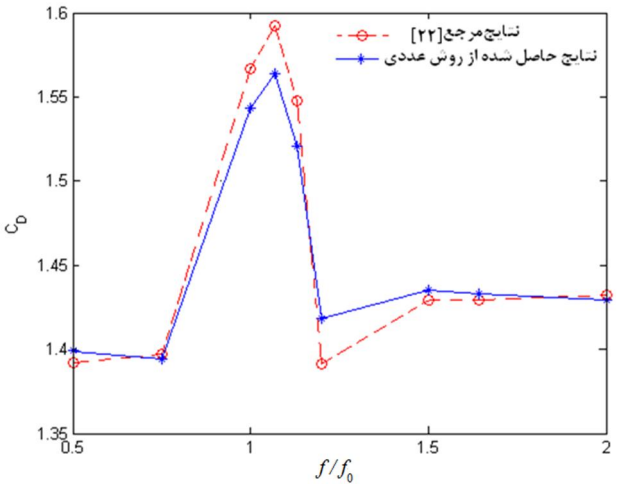
از آنجا که روش عددی بکار رفته در این پژوهش برای مسئله جریان حول جسم صلب متحرک مورد استفاده قرار گرفته است، مسئله جریان حول استوانه با نوسان طولی، ارائه شده در مرجع [22]، برای اعتبار سنجی محاسبات مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل در نمودار شکل 4 ارائه شده‌اند.

جدول 1 خلاصه اطلاعات مسئله حل شده در این پژوهش

عدد رینولدز مور مطالعه	255
اعداد استروهال مورد مطالعه	0/1، 0/22 ، 0/3، 0/4
دامنه های نوسان مورد مطالعه	2/8، 1/77، 1/07، 0/71، 0/36
چگالی سیال	$\rho = 1\ \text{kg/m}^3$
سرعت ورودی	$U = 1\ \text{m/s}$
لزجت دینامیکی سیال	$\mu = 5.1 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$

جدول 2 مقایسه ضریب پسای حاصل شده از حل عددی و مرجع [21]

Re	روش عددی به‌کار رفته در این مقاله $C_D(\text{num})$	نتایج مرجع [21] $C_D([21])$	در صد خطا Error
20	2/24	2/2	1/8
40	1/522	1/54	1/18
100	1/408	1/4	0/56
150	1/385	1/37	1/08



شکل 4 مقایسه ضریب پسای حاصل از حل عددی و مرجع [22] به ازای تغییر در فرکانس نوسان طولی استوانه.

در این نمودار و جدول مربوطه (جدول 3)، f/f_o، نسبت فرکانس نوسان طولی استوانه به فرکانس ایجاد گردابه حول استوانه ثابت متناظر می‌باشد. علاوه بر این $C_D(\text{num})$ ضریب نیروی پسای حاصل شده از حل عددی و $C_D([22])$ ضریب پسای ارائه شده در مرجع [22] است. درصد خطا نیز مشابه رابطه 14 محاسبه شده است.

6- نتایج عددی حاصل از این پژوهش

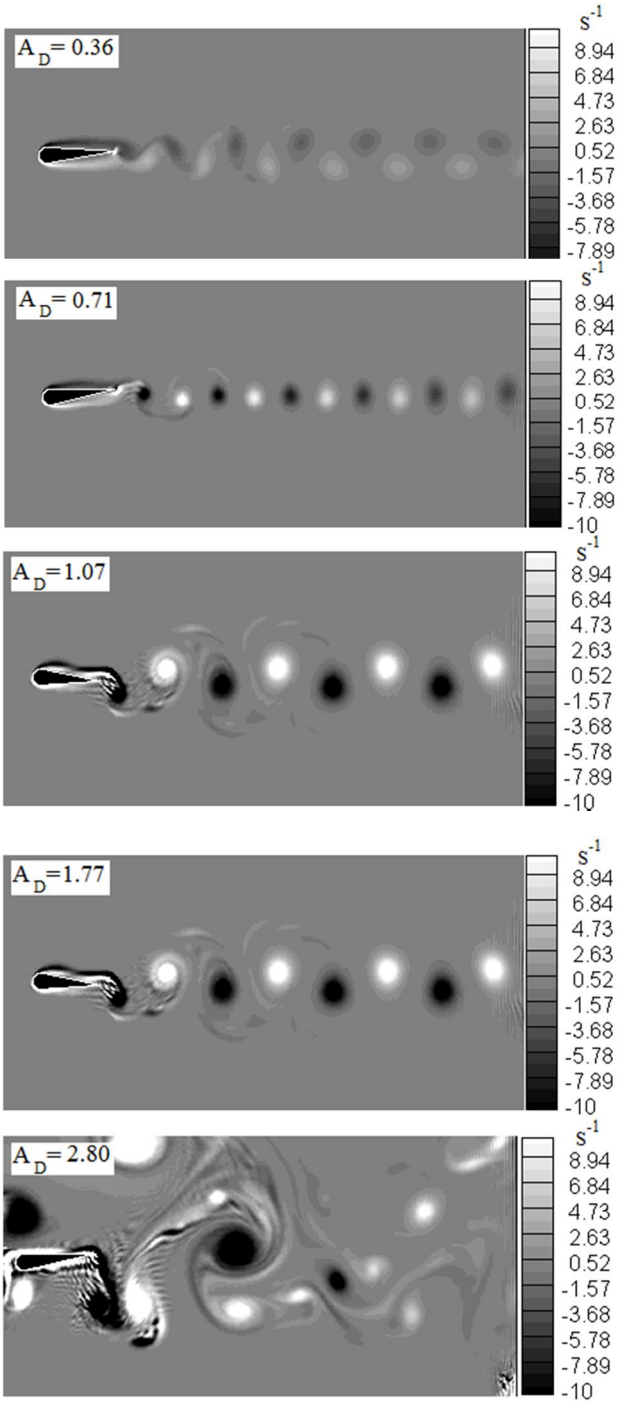
در این بخش نتایج کانتورهای ورتسیته و انرژی جنبشی حاصل از حل جریان حول باله نوسانگر ارائه شده‌اند. در این تحقیق از نرم افزار Tecplot به عنوان واسط گرافیکی استفاده شده است. در شکل 5 کانتورهای ورتسیته حاصل شده از حل عددی برای پنج دامنه نوسان مختلف نشان داده شده اند.

همان گونه که از شکل 5 بر می‌آید، به ازای دامنه نوسان‌های کوچک، تولید ورتسیته‌های دنباله به‌صورت کاملا منظم انجام می‌گیرد. با افزایش دامنه نوسان، جریان رفته رفته ماهیت آشوبناک به خود می‌گیرد به‌گونه‌ای که در دامنه نوسان متناظر با $A_D = 2.80$ جریان آشکارا ماهیت آشوبناک از خود بروز می‌دهد. قابل ذکر است که منظور از آشوبناک بودن جریان در اینجا این است که تولید گردابه‌های دنباله هیچ گونه الگوی منظم شناخته شده‌ای ندارد. علت آشوبناک شدن جریان و ایجاد گردابه‌های نامنظم[1]، قوی شدن

جدول 3 مقایسه ضریب پسای حاصل شده از حل عددی و مرجع [22]

f/f_o	روش عددی بکار رفته در این مقاله $C_D(\text{num})$	نتایج مرجع [21] $C_D([22])$	در صد خطا Error
0/5	1/4	1/392	0/57
0/75	1/397	1/394	0/21
1	1/544	1/567	1/46
1/07	1/563	1/592	1/82
1/14	1/52	1/547	1/74
1/2	1/411	1/395	1/14
1/5	1/432	1/429	0/2
1/65	1/434	1/427	0/49
2	1/431	1/433	0/14

1- Deflected vortex



شکل 5 کانتورهای ورتسیته به ازای عدد استروهال ثابت ($St = 0.22$) در پنج دامنه نوسان مختلف.

گردابه‌های لبه حمله[1] و برخورد آن با گردابه‌های ایجاد شده در لبه دم[2] می‌باشد. به عبارت دیگر با برخورد گردابه‌های قوی ایجاد شده در لبه حمله با گردابه‌های ضعیف ایجاد شده در لبه دم، گردابه های لبه حمله تغییر مسیر داده و موجب ایجاد ساختار گردابه ای نا منظم می‌شود.

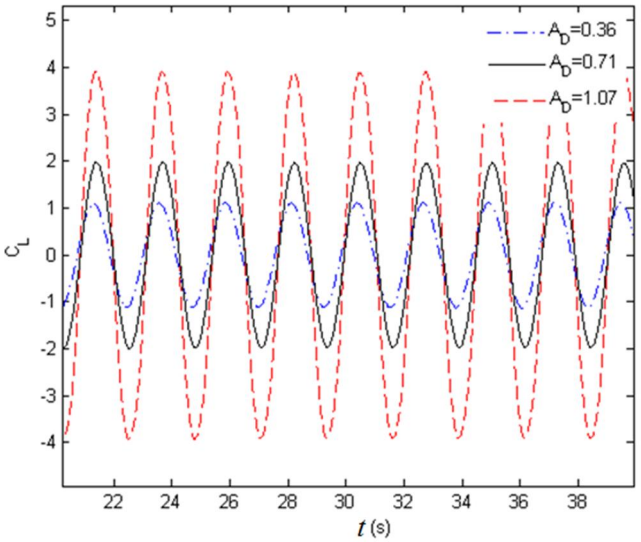
در باله‌های نوسانگر، دامنه نیروی پریودیک برآ اهمیت ویژه‌ای دارد. همان گونه که در مقدمه تشریح شد، این نیروی برآی گذرا سبب چابکی وسیله پرنده و افزایش قابلیت مانوردهی آن خواهد شد. قابل ذکر است که متوسط دامنه نوسان نیروی برآی گذرا در پرواز هاور از اهمیت بیشتری برخوردار است ولی دامنه این نوسانات در قابلیت مانوردهی و امکان تغییر جهت و چابکی از اهمیت بیشتری برخوردار است[6]. در نمودار شکل 6 تغییر دامنه ضریب برآ، که به‌صورترابطه (15) تعریف می‌شود، نسبت به زمان و به ازای سه دامنه نوسان مختلف نشان داده شده است. در شکل 7 نیز تغییر در دامنه ضریب برآ به ازای تغییر در دامنه نوسان باله ارائه شده است.

$$C_L = \frac{\sum_{x\epsilon g} \vec{f_y}(\vec{x}) h^2}{1/2\, \rho U_o^2 h} \qquad (15)$$

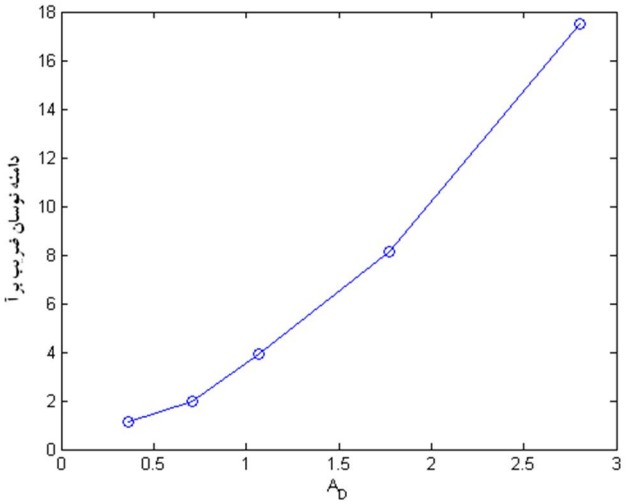
ضریب پسا، که در اینجا به‌صورت رابطه (16) تعریف می‌شود، نیز به ازای تغییر در دامنه و فرکانس نوسان باله تغییر می‌کند.

$$C_D = \frac{\sum_{x\epsilon g} \vec{f_x}(\vec{x}) h^2}{1/2\, \rho U_o^2 h} \qquad (16)$$

در نمودار شکل 8 تغییر ضریب پسا برای سه فرکانس نوسان مختلف به ازای تغییر در دامنه نوسان نشان داده شده است. این نتایج با حل عددی انجام شده در [33] نیز مقایسه شده است.

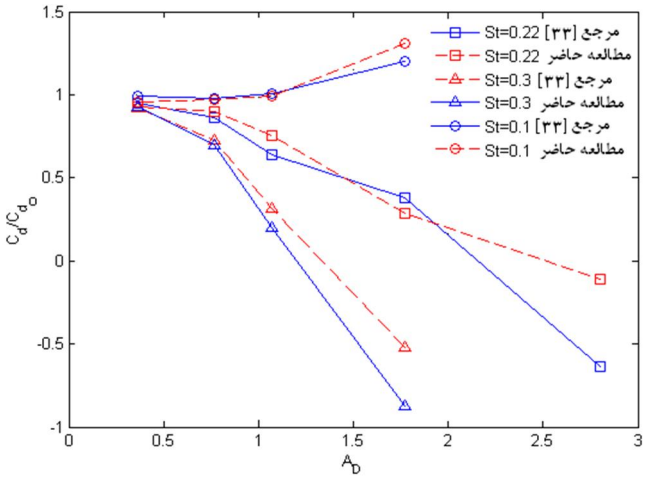


شکل 6 تغییر ضریب برآ نسبت به زمان در سه دامنه نوسان مختلف.



شکل 7 تغییر دامنه ضریب برآ به ازای پنج دامنه نوسان مختلف.

1- Leading edge vortex
2- Trailing edge vortex

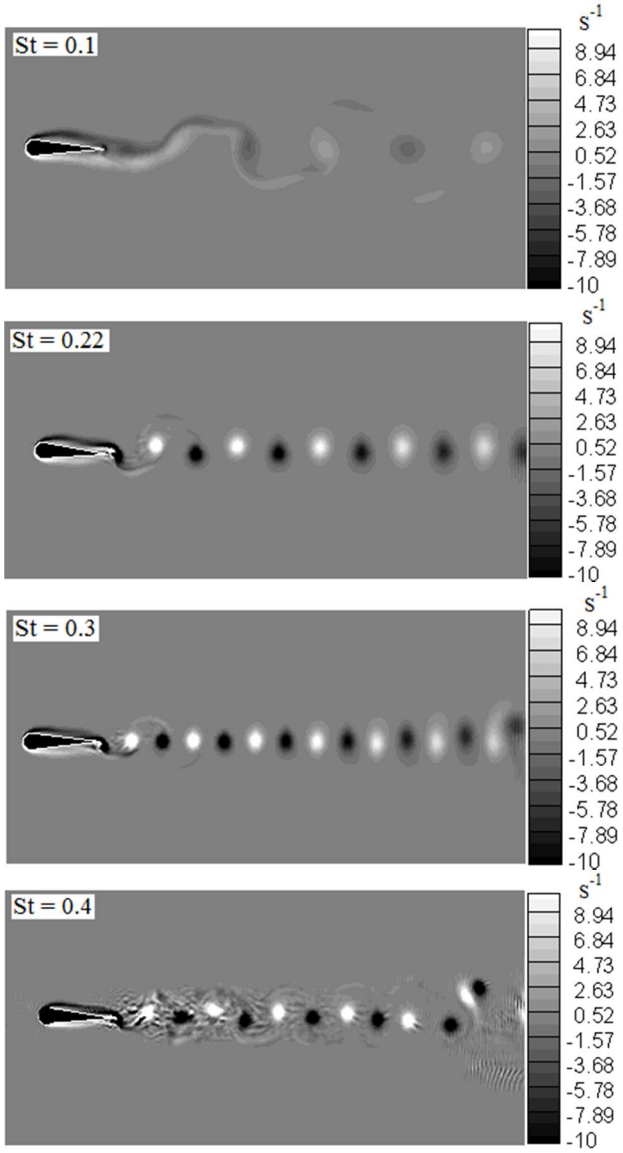


شکل 8 تغییر ضریب پسا با تغییر در دامنه نوسان در سه عدد استروهال مختلف.

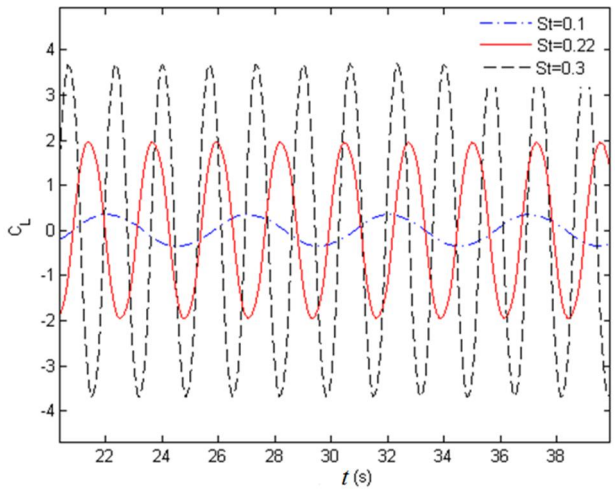
در شکل 8 C_{d_o} ضریب پسای باله ساکن است که مقدار آن $C_{d_o} = 0.86$ به‌دست آمده است. در عدد استروهال St = 0.1 ، با ایجاد حرکت نوسانی در باله، با وجود آنکه باله بر میدان جریان کار انجام می دهد و از این رو انتظار می رود که با انتقال ممنتم به جریان مقدار نیروی درگ کاهش یابد ولی افزایش تلفات لزجتی ناشی از بزرگ شده ناحیه جدایش پشت باله سبب می‌شود که ممنتم در ناحیه پشت باله کاهش یابد. به عبارت دیگر تلفات لزجتی ناشی از بزرگ شدن ناحیه جدایش در این حالت بر ممنتم انتقال یافته از باله به جریان غالب شده و در نتیجه ممنتم در پشت باله کاهش یافته است. کاهش ممنتم در این حالت به معنی افزایش نیروی درگ خواهد بود.

تغییر در الگوی ورتسیته‌های ایجاد شده در جریان به ازای تغییر در فرکانس نوسان در شکل 9 ارائه شده است. در اینجا دامنه نوسان $A_D = 0.71$ بوده و نتایج به ازای چهار عدد استروهال مختلف گزارش شده اند. همان گونه که مشخص است با افزایش فرکانس حرکت باله، تعداد ورتسیته‌های ایجاد شده افزایش یافته است ولی در عدد استروهال St = 0.4 نظم الگوی ایجاد ورتسیته به هم خورده و ورتسیته‌های کوچک حول ورتسیته‌های بزرگ ایجاد می‌شوند.

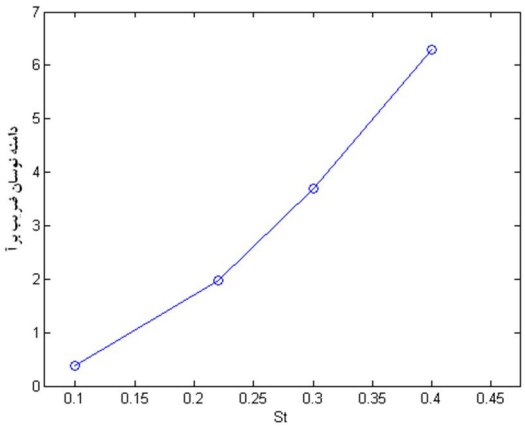
قابل ذکر است که به ازای سه عدد استروهال مورد بررسی (St = 0.1، St = 0.22 و St = 0.3) افزایش فرکانس حرکت باله نه تنها باعث تغییر چشمگیر فرکانس نوسان ضریب برآ می‌شود بلکه دامنه این نوسانات منظم را نیز به مقدار قابل توجهی تغییر می دهد. دلیل این امر آن است که ایجاد تغییر در فرکانس نوسان باله سبب می‌شود که سرعت در نزدیکی جسم به‌صورت محلی افزایش یابد. این افزایش سرعت محلی به‌دلیل افزایش سرعت حرکت نوسانی باله رخ داده و موجب افزایش سرعت محلی جریان و در نتیجه مقدار نیروی برآ می شود. از این روست که با وجود ثابت ماندن دامنه نوسان باله، دامنه نوسان ضریب برآ افزایش یافته است. این مطلب را می توان به گونه دیگری نیز بیان نمود و آن اینکه حرکت نوسانی باله سبب ایجاد یک جریان القایی می‌شود. سرعت این جریان القایی با افزایش فرکانس نوسان افزایش یافته و این امر در نهایت منجر به افزایش دامنه نیروی پریودیک خواهد شد. در شکل‌های 10 و 11 این تغییرات نشان داده شده‌اند.



شکل 9 تغییر ورتسیته به ازای تغییر در عدد استروهال در دامنه نوسان ثابت، $A_D = 0.71$.



شکل 10 تغییر ضریب برآ نسبت به زمان در سه عدد استروهال مختلف.



شکل 11 تغییر دامنه ضریب برآ به ازای چهار عدد استروهال مختلف.

کانتورهای انرژی جنبشی مورد دیگری است که در این مقاله ارزیابی شده‌اند. این کانتورها از آن جهت ارائه شده‌اند که دیدگاه روشنی از چگونگی انتقال انرژی جنبشی به واسطه حرکت باله در اختیار می‌گذارند. اهمیت این موضوع از آن جهت است که امروزه باله‌های نوسانی به عنوان یک موتور ایجاد نیرو جلوبری[1] کاربردهای متفاوتی پیدا کرده‌اند[4]. این موتورها با انجام کار برروی سیال و انتقال ممنتم و انرژی جنبشی، سبب ایجاد نیروی جلوبری می‌گردند. از این رو تحلیل انرژی جنبشی جریان حول این باله‌ها در ارزیابی کارایی این موتورها اهمیت ویژه‌ای خواهند داشت. اهمیت دیگر این بررسی آن است که حرکت باله در سیال می‌تواند موجب ایجاد دو اثر متفاوت شود. از یک طرف این حرکت با انجام کار بر روی جریان سبب افزایش انرژی جنبشی جریان می‌شود و از طرف دیگر حرکت باله سبب بزرگ شدن ناحیه جدایش و افزایش تلفات جریان خواهد شد. با تحلیل انرژی جنبشی حول باله می‌توان دریافت که در چه دامنه و فرکانس نوسان، حرکت باله سبب افزایش انرژی جنبشی و ممنتم میدان جریان خواهد شد. به عبارت دیگر کار انجام شده توسط باله بر تلفات لزجتی غلبه نموده و موجب ایجاد نیروی جلوبری خواهد شد. قابل ذکر است که افزایش انرژی جنبشی میدان جریان به معنی افزایش انتقال ممنتم از باله به جریان و افزایش ایجاد نیروی جلوبری می‌باشد. برای بررسی انرژی جنبشی میدان جریان فرض می‌کنیم که جریانی در اختیار داریم که تک تک سلول‌های شبکه مربوط به آن دارای سرعتی ثابت برابر سرعت جریان یکنواخت، U، هستند. حضور یک باله ساکن در این میدان جریان سبب خواهد شد که انرژی جنبشی میدان جریان به واسطه وجود تلفات لزجتی و فشاری کاهش یابد. ولی اگر این باله دارای حرکت نوسانی باشد، انرژی جنبشی از جسم صلب به میدان منتقل می‌شود. به عبارت دیگر یک باله نوسانگر از یک طرف به دلیل انتقال انرژی حرکتی موجب افزایش انرژی جنبشی میدان و از طرف دیگر به دلیل تلفات لزجتی و فشاری موجب کاهش انرژی جنبشی میدان می‌شود.

انرژی جنبشی موجود در سیال واقع در یک سلول شبکه را می‌توان به‌صورت رابطه (17) تخمین زد.

$$E_K = \frac{1}{2}\rho h^2(u^2 + v^2) \tag{17}$$

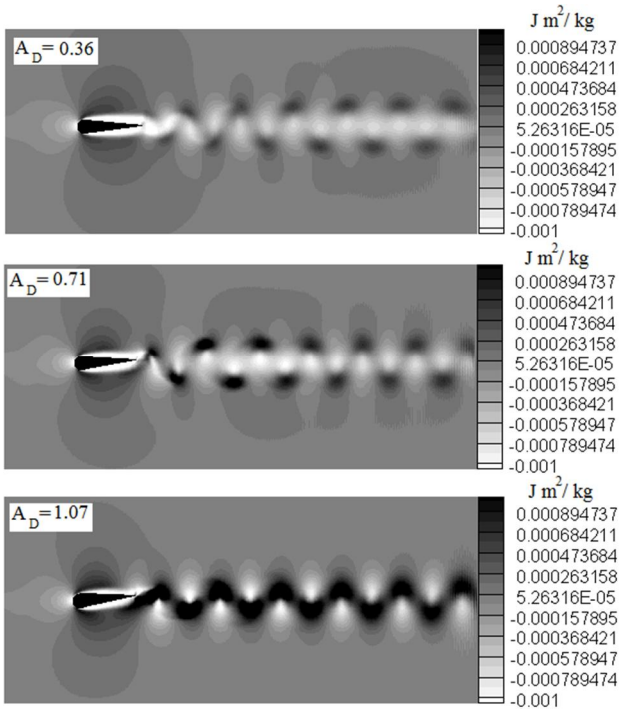
ملاحظه می‌شود که با داشتن سرعت در مرکز یک سلول، (u, v)، و اندازه شبکه، h، می‌توان تخمینی از انرژی جنبشی موجود در یک سلول محاسباتی بدست آورد. از آنجا که هدف، مقایسه انرژی جنبشی جریان یکنواخت بدون حضور باله نوسانگر و انرژی جنبشی در حالت حضور این باله است پارامتر انرژی جنبشی به‌صورت رابطه (18) تعریف می‌شود.

$$ME_{K\rho} = \frac{1}{2}h^2(u^2 + v^2 - U^2) \tag{18}$$

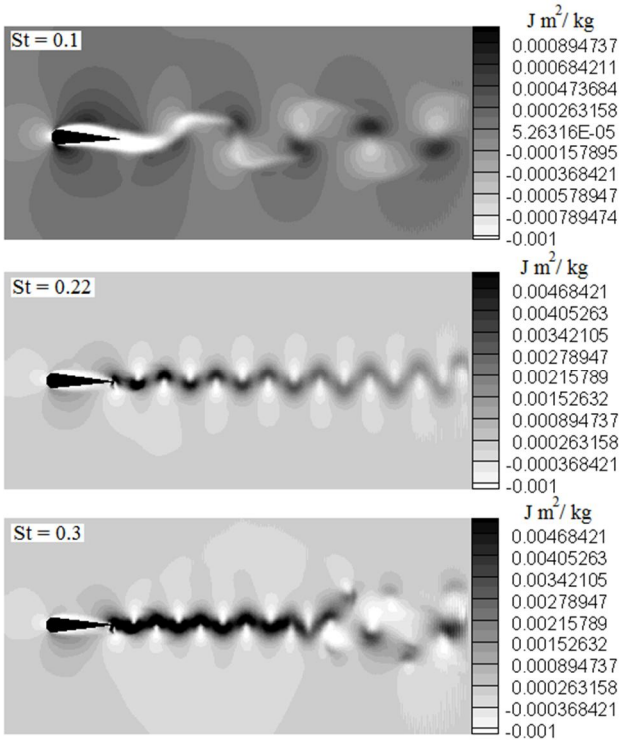
در این رابطه U سرعت جریان یکنواخت می باشد. همان گونه که از رابطه 17 مشخص است، پارامتر انرژی جنبشی هر سلول مستقل از چگالی جریان سیال تعریف شده است. با توجه به تعریف این پارامتر، به جای بررسی کانتورهای انرژی جنبشی، کانتورهای پارامتر $ME_{K\rho}$ رسم می‌شوند. این پارامتر دیدگاه روشنی از تغییرات انرژی جنبشی موجود در جریان در اختیار می‌گذارد و اثر وجود باله نوسانی را بر این تغییرات به روشنی نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد حرکت نوسانی باله باعث ایجاد دو پدیده متضاد می‌شود. از یکسو این نوسانات سبب افزایش انرژی جنبشی میدان جریان می‌شوند. به عبارت دیگر انرژی جنبشی ناشی از حرکت نوسانی باله به میدان جریان منتقل می‌شود و این امر افزایش انرژی جنبشی میدان جریان را به همراه دارد. بنابراین انتظار داریم که میدان جریان پشت باله نوسانگر یک میدان پر انرژی باشد. از سوی دیگر حرکت باله پدیده دیگری را نیز موجب می‌شود. این حرکت سبب ایجاد ناحیه جدایش نسبتا بزرگی در پشت باله خواهد شد. ناحیه جدایش بزرگ اتلافات لزجتی و فشاری جریان را افزایش می‌دهد. این امر سبب می‌شود که ناحیه پشت جریان یک ناحیه کم انرژی باشد. شکل 12 و همین طور شکل 13 به خوبی این دو اثر متناقض را نشان می‌دهند. در دامنه نوسان‌های کوچک، اثر دوم اثر غالب است. به عبارت دیگر در دامنه نوسان کوچک ناحیه جدایش بزرگ باعث افزایش تلفات شده و ناحیه پشت باله یک ناحیه کم انرژی خواهد بود. وقتی دامنه نوسان بزرگ می شود، با وجود اینکه ناحیه جدایش نسبت به قبل بزرگ‌تر است و در نتیجه تلفات لزجتی افزایش یافته است ولی انتقال انرژی جنبشی از باله در حال نوسان به میدان جریان سبب می‌شود که انرژی میدان جریان در دنباله باله افزایش یابد. این امر در مورد فرکانس نوسان نیز به وضوح قابل مشاهده است. به عبارت دیگر در فرکانس نوسان کوچک اثر افزایش تلفات لزجتی، سبب ایجاد ناحیه کم انرژی در پشت باله خواهد شد. ولی در فرکانس‌های نوسان بالاتر، اثر افزایش انرژی جنبشی به واسطه انتقال انرژی جنبشی از باله به سیال سبب می‌شود که انرژی جنبشی میدان جریان در دنباله باله افزایش یابد.

به دو شکل 12 و 13 در دامنه نوسان و عدد استروهال کوچک توجه کنید. در نزدیکی سطح باله وجود لایه مرزی سبب کاهش انرژی جنبشی میدان می‌شود. در دنباله جریان به واسطه بزرگ بودن ناحیه برخاستگی با یک ناحیه کم انرژی روبرو هستیم. با این وجود به علت حرکت باله، انرژی جنبشی از باله به میدان جریان اضافه شده و ناحیه‌های پر انرژی در حول ناحیه کم انرژی قابل مشاهده است. در این حالت با وجود آنکه حرکت نوسانی باله باید باعث افزایش انرژی کلی میدان شود، وجود ناحیه جدایش نسبتا بزرگ باعث افزایش تلفات لزجتی شده و انرژی کلی میدان را کاهش می‌دهد. در شکل‌های 12 و 13 در دامنه نوسان و عدد استروهال بزرگ، در نزدیکی سطح باله به واسطه حضور لایه مرزی انرژی جنبشی کاهش یافته است. در پایین دست باله هر چند ناحیه جدایش بزرگ است و در نتیجه اتلافات لزجتی بیشتر است، ولی به دلیل افزایش دامنه و فرکانس نوسان، مقدار انرژی جنبشی انتقال یافته از باله به سیال به‌صورتچشمگیری افزایش یافته است. این امر سبب شده است که در ناحیه پشت باله نه تنها کاهش در انرژی جنبشی دیده نشود، بلکه انتقال انرژی جنبشی از باله به جریان باعث ایجاد

1- Thrust engine



شکل 12 کانتورهای پارامتر انرژی جنبشی بر حسب دامنه نوسان در عدد استروهال ثابت، St = 0.22 .

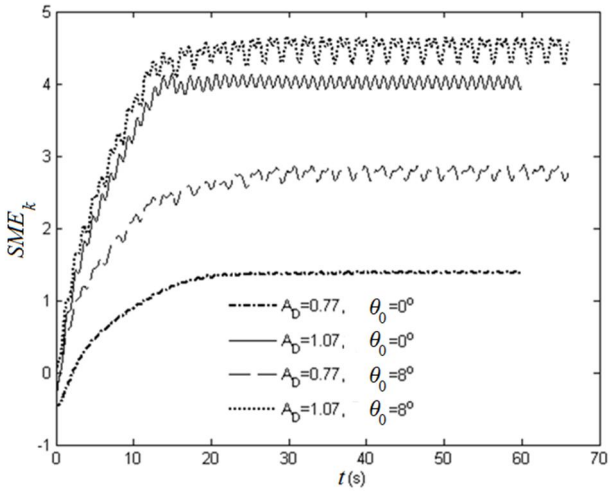


شکل 13 کانتور های انرژی جنبشی بر حسب عدد استروهال در دامنه نوسان ثابت A_D = 0.71،

ناحیه پر انرژی در پایین دست باله شود. انرژی کل میدان جریان با SME_K نشان داده شده و به‌صورت رابطه (19) تعریف می‌شود. این پارامتر به معنای مجموع انرژی جنبشی تک تک سلول‌های میدان خواهد بود که معیاری از افزایش و کاهش انرژی جنبشی کلی میدان را در اختیار می‌گذارد.

$$SME_K = \sum_{x\epsilon g} ME_{K\rho} \tag{19}$$

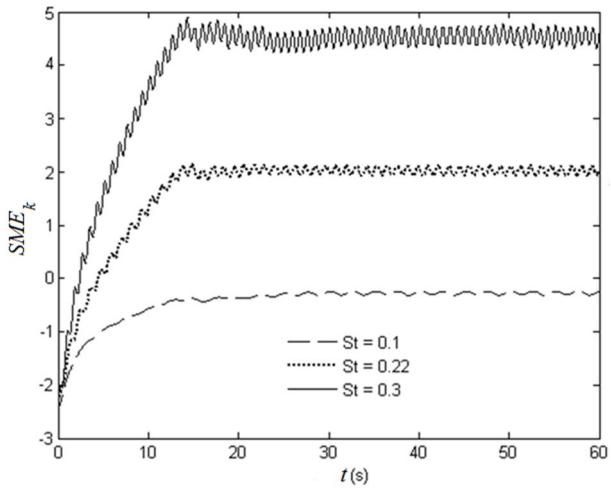
در شکل 14، نمودار تغییرات انرژی کلی میدان با زمان برای چند حالت



شکل 14 نمودار تغییرات انرژی جنبشی کلی میدان به واسطه تغییر در دامنه نوسان در دو حالت بدون زاویه حمله اولیه و با وجود زاویه حمله اولیه.

مختلف ارائه شده است. همان گونه که قابل مشاهده است مقدار انرژی از یک زمان معین به بعد نوسانات پایداری به خود می‌گیرد.

شکل 14 نشان می‌دهد که با افزایش دامنه نوسان، انرژی جنبشی کلی میدان افزایش یافته است. نکته دیگر این است که وجود زاویه حمله اولیه سبب می‌شود که انرژی جنبشی که به میدان انتقال می‌یابد افزایش یابد. در شکل 15 افزایش فرکانس نوسان نیز مقدار انرژی جنبشی کلی میدان را افزایش داده است. افزایش انرژی جنبشی میدان به واسطه افزایش دامنه و فرکانس نوسان تقریبا به‌صورت خطی رخ می دهد. همان گونه که از شکل 15 مشخص است، در عدد استروهال St = 0.1 حرکت نوسانی باله نه تنها باعث انتقال انرژی جنبشی از باله به جریان نمی‌شود بلکه افزایش تلفات ناشی از بزرگتر شدن ناحیه جدایش، سبب کاهش انرژی جنبشی میدان جریان نیز شده است. کاهش انرژی جنبشی میدان جریان به معنی این است که حرکت باله نه تنها سبب انتقال انرژی جنبشی و ممنتم و در نتیجه کاهش نیروی پسا نشده است بلکه به سبب کاهش ممنتم و انرژی جنبشی پشت باله، مقدار پسا افزایش نیز یافته است. افزایش پسا در شکل 7 در عدد استروهال St = 0.1 نیز به همین سبب اتفاق افتاده است.



شکل 15 نمودار تغییرات انرژی جنبشی کلی میدان به واسطه تغییر در فرکانس نوسان پیچشی.

7- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش مرز غرق شده بهبود یافته برای حل جریان حول باله نوسانگر به‌کار گرفته شده است. در این روش از تقریب مرتبه اول زمانی ، مشابه رابطه 6، برای محاسبه نیرو در نقاط لاگرانژی استفاده می‌شود. برای ارزیابی دقت روش عددی به‌کار رفته، دو مسئله جریان حول استوانه ساکن و متحرک به وسیله این روش حل شده اند. نتایج حاصل از حل عددی به خوبی با نتایج موجود در مراجع مطابقت دارند.

کانتورهای ورتسیته نشان می‌دهند که با افزایش دامنه نوسان اولا قدرت ورتسیته‌های دنباله افزایش می‌یابد و ثانیا نظم پریودیک ایجاد این گردابه‌ها تا یک دامنه نوسان مشخص حفظ شده و از آنجا به بعد تقارن گردابه ها به هم می خورد. با افزایش دامنه نوسان به بالاتر از 1/77 در یک عدد استروهال ثابت، 0/22، الگوی ایجاد گردابه‌های دنباله به هم خورده و در دامنه نوسان، 2/80 جریان عملا ماهیت آشوبناک به خود می‌گیرد. علاوه بر این در دامنه نوسان ثابت، 0/71، با افزایش عدد استروهال به بالاتر از، 0/3 نظم ایجاد گردابه‌ها به هم خورده و در، 0/4 رفتار غیر متقارن گردابه‌ها قابل مشاهده است. کانتورهای انرژی جنبشی نشان می دهند که در عدد استروهال0/1، هرچند باله بر میدان جریان کار انجام می‌دهد ولی افزایش تلفات ناشی از بزرگتر شدن ناحیه جدایش، سبب می‌شود که ناحیه پشت باله یک ناحیه کم انرژی شده و انرژی جنبشی کل میدان جریان به واسطه افزایش تلفات در مقایسه با کار باله، کاهش یابد. از طرف دیگر، با افزایش دامنه و فرکانس نوسان، کار انجام شده توسط باله بر افزایش تلفات غلبه کرده و این امر منجر به افزایش انتقال انرژی جنبشی و ممنتم به جریان پشت باله می‌شود. افزایش ممنتم و انرژی جنبشی در پشت باله سبب کاهش نیروی پسا و ایجاد نیروی جلوبری خواهد شد. افزایش دامنه نوسان در دامنه ضریب برآ اثر غالب دارد ولی فرکانس آن را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. با افزایش فرکانس نوسان باله، فرکانس تولید گردابه‌ها تغییر می‌کند به‌گونه‌ای که فرکانس این نوسانات در تولید گردابه‌ها اثر غالب دارد ولی از یک فرکانس نوسان مشخص به بعد ورتسیته‌های کوچکی در نزدیکی ورتسیته‌های بزرگ تشکیل می‌شوند که توپولوژی جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهند. علاوه بر این، افزایش فرکانس نوسان جسم صلب نه تنها موجب افزایش فرکانس نوسان ضریب برآ می‌شود بلکه دامنه نوسان این ضریب را نیز افزایش می‌دهد. علت این امر را می‌توان به افزایش سرعت محلی جریان در اثر افزایش فرکانس نوسان جسم صلب مربوط دانست.

8- مراجع

[1] T. Kinsey, G. Dumas, Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime, *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 6, pp. 1318-1330, 2008.

[2] M. F. Platzer, M. A. Ashraf, J. C. S. Lai, J. Young, Development of a New Oscillating-Wing Wind and Hydropower Generator, *In 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida,* 5 - 8 January, 2009.

[3] W. A. Davis, Nano air vehicle a technology forecast, Blue Horizons Paper, Centre for Strategy and technology Air War College, 2007.

[4] G. V. Lauder, E. J. Anderson, J. Tangorra and P. G. A. Madden, Fish biorobotics: kinematics and hydrodynamics of self-propulsion, *J. Exp. Biol.,* Vol. 210, pp. 2767-2780, 2007.

[5] T. B. Apker, *Experimental investigation and modeling of time resolved thrust of a flapping wing aircraft,* Ph.D thesis, University of Notre Dame, 2009.

[6] M. A. Ashraf, *numerical simulation of the flow over flapping airfoils in propulsion and power extraction regimes,* Ph.D thesis, The University of New South Wales Australian Defence Force Academy, 2010.

[7] J. Young, S. M. Walker, R. J. Bomphrey, G. K. Taylor, A. L. R Thomas, Details of insect wing design and deformation enhance aerodynamic function and flight efficiency, *Science,* Vol. 325, No. 5947, pp. 1549-1552, 2009.

[8] R. W. Blake, Fish functional design and swimming performance, *J. Fish Biol.* Vol. 27, pp. 1165-1193, 2004.

[9] A. Betz, Ein beitrag zur erklarung des segelfluges, *Zeitschrift fur Flugtechnik und Motorluftschiffahrt,* Vol 3, pp. 269-272. 1912.

[10] T. Weis-Fogh, Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanism for lift production, *J. Exp Biol*. Vol. 59, pp. 169-230, 1973.

[11] J. M. Anderson, K. Streitlien, D. S. Barrett, M. S. Triantafyllou, Oscillating foils of high propulsive efficiency, *Journal of Fluid Mechanics* Vol. 360, pp. 41-72, 1998.

[12] G. K. Taylor and R. L. A. Nudds, Flying and swimming animals cruise at a strouhal number tuned for high power efficiency, Nature, Vol. 425, pp. 707-711, 2003.

[13] Z. J. Wang, Vortex shedding and frequency selection in flapping flight. *J. Fluid Mech.* Vol. 410, pp. 323-341, 2000.

[14] D. Lentink, T. F. Muijres, J. F. Donker-Duyvis, L. J. Van Leeuwen, Vortex-wake interactions of a flapping foil that models animal swimming and flight, *Journal of Experimental Biology,* Vol. 211, pp. 267-273, 2007.

[15] G. C. Lewin, H. Haj-Hariri, Modeling thrust generation of a two dimensional heaving airfoil in a viscous flow, *J.Fluid Mech.* Vol. 492, pp. 339-362, 2003.

[16] R. Godoy-Diana, J. L. Aider, J. E. Wesfreid, Transitions in the wake of a flapping foil, *Physical Review Energy,* Vol. 77, pp. 207-221, 2008.

[17] M. H. Dickinson and K. G. Gotz, Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers, *J. Exp Biol*., Vol. 174, pp. 45-64, 1993.

[18] K. D. Jones, M. F. Platzer, Numerical computation of flapping-wing propulsion and power extraction, *In 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit Reno,* Nevada. January 6-10. 1997.

[19] J. Young, J. C. S. Lai, Mechanisms influencing the efficiency of oscillating airfoil propulsion, *AIAA Journal,* Vol. 45, NO. 7, pp. 1695-1702, 2007.

[20] M. R. Visbal, High-fidelity simulation of transitional flows past a plunging airfoil, *AIAA Journal* , Vol. 47, No. 11, pp. 2685-2697, 2009.

[21] C. H. K. Williamson, Vortex dynamics in the cylinder wake, *Annual Review of Fluid Mechanics,* Vol. 28, pp. 477-539, 1996.

[22] T. T. Do, L. Chen, J. Y. Tu, Numerical Simulations of Flows over a Forced Oscillating Cylinder, 16th *Australasian Fluid Mechanics Conference Crown Plaza,* Gold Coast, Australia. 2007.

[23] C. S. Peskin, The immersed boundary method, *Acta Numerica,* Vol. 11, pp. 479-517, 2002.

[24] J. Mohd-Yusof, Combined immersed-boundary/B-spline methods for simulations of flow in complex geometries, *Center for turbulence research annual research briefs,* Vol. 161, No. 1, pp. 317-327, 1997.

[25] Y. H. Tseng, J. H. Ferziger, A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry, *Computational Physics,* Vol. 192, No. 2, pp. 593-623. 2003.

[26] E. Balaras, Modeling complex boundaries using an external force field on fixed Cartesian grids in large eddy simulations, *Computers & Fluids,* Vol. 33, No. 3, pp. 375-404, 2004.

[27] M. H. Chung, Cartesian cut cell approach for simulating incompressible flows with rigid bodies of arbitrary shape, *Computers & Fluids,* Vol. 35, No. 6, pp. 607-623, 2006.

[28] M. Uhlmann, An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows, *Computational Physics,* Vol. 209, No. 2, pp. 448–476, 2005.

[29] S. Wei Su, M. C. Lai, C. A. Lin, An immersed boundary technique for simulating complex flows, *Computers & Fluids,* Vol. 36, pp. 313–324, 2007.

[30] J. Kim, P. Moin, Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, *Computational Physics,* Vol. 59, pp. 308–323, 1985.

[31] MC. Lai, C.S. Peskin, An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical viscosity, *Computational Physics,* Vol. 160, No. 2, pp. 705-719, 2000.

[32] Z. Wang, J. Fan, K. Luo, Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles, *Int. J. Multiphase Flow,* Vol. 34, pp. 283–302, 2008.

[33] G. Yi He, Q. Wang, X. Zhang, S. G. Zhang, Numerical analysis on transitions and symmetry-breaking in the wake of a flapping foil, *Acta Mechanica Sinica,* Vol.28, No. 6, pp. 1551–1556, 2012.