# شبیه­سازی حرکت فرازوفرود خالص با روش­های شبکة دینامیکی و حرکت کل دامنه و مقایسة آن­ها

|  |  |
| --- | --- |
| **محمدحسن جوارشکیان** | **هانیه عظیمی** |
| *استاد دانشگاه فردوسی مشهد*  [*javareshkian@um.ac.ir*](mailto:javareshkian@um.ac.ir) | *دانشجو دانشگاه فردوسی مشهد*  *hanyeazimi@gmail.com* |

**چکیده**

*در این تحقیق دو روش مدل­سازیِ حرکت ناپایای فرازوفرود بالواره شامل حرکت بالواره با شبکة متحرک و حرکت کل دامنة حل از نقطه نظر دقت و هزینة محاسباتی با هم مقایسه شد. در این شبیه­سازی از یک روش عددی برمبنای حجم محدود جهت گسسته­سازی معادلات حاکم و الگوریتم سیمپل برای حل معادلات گسسته استفاده شد. برای شبیه­سازی از نرم­افزار انسیس فلوئنت 17 بهره گرفته شد. در این تحقیق، پس از گرفتن استقلال از شبکه، گام زمانی و اعتبارسنجی نتایج، عملکرد این دو روش از نقطه نظر دقت و هزینة محاسباتی در مقام مقایسه قرار گرفت. همچنین اثر دامنة نوسان، بسامد و رینولدز بررسی شد. نتیجة حاصل از این دو شبیه­سازی نشان می­دهد که نتایج ضریب­برآ و ضریب­رانش در هر دو روش یکسان است ولی هزینة محاسباتی روش حرکت کل دامنة حل کمتر است. علاوه بر آن، در روش شبکة متحرک امکان فروپاشی شبکه در زوایای بزرگ وجود دارد. بنابراین روش حرکت کل دامنة حل از نظر دقت، هزینة محاسباتی و عدم محدودیت زاویه، نسبت به روش شبکة متحرک بهینه است.*

**کلمات کلیدی:** حرکت نوسانی، فرازوفرود خالص، دامنة فرازوفرود، شبکة دینامیکی

**فهرست علائم**

|  |  |
| --- | --- |
|  | ارتفاع اولیة بالواره |
| H | دامنة فرازوفرود |
| h | ارتفاع در هر لحظه |
| **علائم يوناني** | |
|  | بسامد زاویه­ای |

**1- مقدمه**

تاکنون محققان بسیاری در زمینة حرکت نوسانی فرازوفرود تحقیقات آزمایشگاهی یا عددی انجام داده­اند. از جمله کاربردهای مهم حرکت نوسانی، پرة توربین، شبیه­سازی حرکت پرندگان، استخراج انرژی حاصل از نوسان سیال و ارتقای بازدة رانش است. تعدادی از این پژوهشگران تأثیر هندسة جسم نوسانی، بسامد نوسان و دامنة نوسان را مطالعه کرده­اند. میلین و همکاران اثر ضخامت بالواره را بر تولید رانش یک­سری بالواره­های متقارن در حال فرازوفرود در بازة ضخامت 4 تا 20 درصدِ طول وتر، بررسی کردند و دریافتند ضخامت بالواره بر ساختار گردابة ناپایایِ اطراف بالواره اثر زیادی می­گذارد. در بالواره­هایی با ضخامت بیش از 9 درصد، نیروی فشاری نقش اصلی را در تولید رانش ایفا می­کند و نیروی لزجت در تولید رانش قابل صرف نظر است. درواقع، در این بالواره­ها نقش اصلی نیروی لزجت، تولید نیروی پسا است. در مورد بالواره­های نازک نقش نیروی لزجت در تولید نیروی رانش قابل صرف نظر نیست بلکه بیش از 20 درصد رانش را تولید می­کنند [1]. باقری و همکاران نیز اثر ضخامت بالواره را بر ضرایب آیرودینامیکی بررسی کردند. آن­ها به این نتیجه رسیدند که ضخامت منجر به تأخیر در جدایش گردابه­ها می­شود و متوسط زمانی ضریب­رانش تغییر می­کند[2].

یانگ و لای با استفاده از معادلات تراکم­پذیر ناویراستوکس، حرکت فرازوفرود را در جریان کاملا ً آرام به­صورت عددی شبیه­سازی کردند. آن­ها دریافتند که جدایش لبةحمله، در بسامد کاهیده­های کمتراز 4، مهم­ترین نقش را در تولید نیروهای آئرودینامیکی ایفا می­کند. اما در در بسامد­های بیشتر، جدایش لبة حمله نقش دوم را به عهده دارد. ساختار گردابه در همة بسامد­های مطالعه شده، توسط اثرات لبةفرار کنترل می­شود. نتایج نیروهای آئرودینامیکی در بسامدهای زیاد با نتایج پیش­بینی شده توسط تحلیل جریان پتانسیل متفاوت است اما در بسامدهای کم، نتایج با پیش­بینی­های جریان پتانسیل مشابه است[3]. باقری و جوارشکیان در [4] اثر هم­زمان بسامدکاهیده و دامنة نوسان را با روش حرکت جسم صلب و با کمک شبکة دینامیکی بررسی کردند. با افزایش بسامدکاهیده و دامنة نوسان، زاویة حمله نسبی افزایش می­یابد که خود منجر به افزایش اختلاف فشار در اطراف جسم می شود. افزایش بسامد کاهیده به علت شتاب بالاتر، اثر بیشتری در تولید نیروی رانش دارد.

در کار پژوهشی اشرف و همکاران اثر تغییر دامنة فرازوفرود و بسامد بر بازدة رانش بررسی شده­است. آنها با الهام گرفتن از دوماس [5] بالواره را ساکن در نظر گرفتند بنابراین از هیچ تکنیکی برای حرکت بالواره، قسمتی از شبکه و یا کل دامنة حل بهره برده نمی­شود. حرکت نوسانی فرازوفرود به جریان اطراف بالواره اعمال می­شود. در این روش، شرط مرزی ورودی از نوع سرعت نوسانی است. درواقع نوسان به صورت شرط مرزی سرعت ورودی تعریف می­شود[6]. سمیعی و همکاران روشی دیگر برای شبیه­سازی حرکت فرازوفرود به کار بردند. آن­ها به جای آنکه حرکت نوسانی را به بالواره اعمال کنند، ناحیة محاسباتی را به دو قسمت تقسیم کردند. ناحیة داخلی شامل بالواره و قسمت نزدیک به بالواره می­شد. قسمت دیگر، ناحیة خارجی محسوب می­شد. ناحیة داخلی درون ناحیة خارجی نوسان می­کرد. آنها با استفاده از تکنیک شبکة متحرک و به کاربردن روش حجم محدود، اثر حرارت را بر الگوی گردابه­ها در لبة انتهایی بالواره و تأثیر آن بر ضرایب آیرودینامیکی بررسی کردند[7].

تا کنون برای شبیه­سازی عددی حرکت فرازوفرود از روش­های شبکة متحرک، اسلایدینگ مش، حرکت کل دامنة حل و نوسان ورودی استفاده شده­است اما مقایسه­ای بین نتایج این روش­ها صورت نگرفته­است. در این مقاله حرکت فرازوفرود با دو روش مدل­سازی، به صورت عددی شبیه­سازی می­شود و نتایج آن­ها با هم مقایسه می­شود و بهترین روش از نظر دقت و هزینة محاسباتی معرفی می­شود.

**2- شبیه­سازی عددی**

**2-1- مدل­سازی**

در حرکت فرازوفرود، جسم به­صورت رفت و برگشتی حول یک محور افقی، بالا و پایین می­رود. ارتفاع محور است. اگر مبدأ مختصات محور نوسان باشد، مقدار برابر با صفر است. معادلة 1 حرکت فرازوفرود سینوسی را نشان می­دهد. در این معادله، H نشان دهندة دامنة فرازوفرود است.

جریان حول یک بالوارة ناکا0012 در حال فرازوفرود، توسط معادلات ناویراستوکس تراکم­پذیر و با روش حجم­محدود در رژیم کاملاً آرام و با استفاده از نرم­افزار انسیس فلوئنت 17 شبیه­سازی شده­است. همچنین الگوریتم سیمپل مبنای کار قرار گرفته­است. برای چگالی و مومنتوم از طرح مرتبة سوم[[1]](#footnote-2) و برای انرژی جنبشی و فشار طرح مرتبة دوم و برای جابه­جایی و از طرح مرتبة اول برای دو روش مدل­سازی بهره گرفته شده ­است. در پژوهش حاضر، حرکت خالص فرازوفرود با دو روش، مدل­سازی شد. در روش اول، بالواره به­همراه همة دامنة حل دچار نوسان می­شود. در روش دوم یعنی روش شبکة متحرک، بالواره و سلول­های اطراف آن هماهنگ با هم حرکت می­کنند. سلول­های اطراف بالواره تغییر شکل می­دهند. تغییرشکل سلول­ها این­گونه است که هر چه از بالواره دورتر شویم میزان تغییر شکل­شان کمتر می­شود یعنی سلول­های نزدیک به بالواره دچار تغییر شکل زیادی می­شوند و سلول­های نزدیک به مرزها درعمل تغییر شکل نمی­دهند. شکل 1-الف مدل­سازی حرکت کل دامنة حل و شکل1-ب مدل­سازی شبکة متحرک را نمایش می­دهند.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

در این مقاله از شبکة نوع C استفاده شده­است. شرط مرزی سرعت ورودی[[2]](#footnote-3) برای مرزهای ورودی، شرط مرزی فشار ثابت[[3]](#footnote-4) برای مرز خروجی و شرط مرزی غیرلغزشی[[4]](#footnote-5) برای بالواره انتخاب شده­است. مرزها در فاصلة 21 برابر طول وتر از بالواره هستند بنابراین مرزها اثرات نامطلوب بر روی بالواره ندارند.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| الف | ب |
| شکل1: شرایط مرزی و هندسة شبکه | |

**2-2- اعتبارسنجی**

حرکت فرازوفرود خالص با مقالة [3] اعتبارسنجی شده­است. در جدول 1 مقادیر مرجع مقاله ارائه شده­است. در راستای استقلال نتایج از شبکه و گام­زمانی پنج شبکه تولید شدند. در جدول 2 مشخصات این شبکه­ها آورده شده­است. نتایج استقلال از شبکه در شکل 2 و نتایج استقلال از گام­زمانی در شکل 3 قابل مشاهده است.

جدول 1: مقادیر مرجع

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| رديف | عدد رینولدز | 20000 |
| 1 | سرعت جریان ورودی() | 292/0 |
| 2 | طول وتر بالواره(m) | 1 |
| 3 | بسامد | 375/0 |
| 4 | دامنة نوسان | 075/0 |

جدول 2: استقلال از شبکه برای روش­های حرکت کل دامنة حل و شبکة متحرک

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | تعداد سلول­ها اطراف بالواره | تعداد کل سلول­­ها |
| شبکة یکم | 86 | 8968 |
| شبکة دوم | 130 | 17258 |
| شبکة سوم | 170 | 34658 |
| شبکة چهارم | 290 | 80648 |

|  |
| --- |
|  |
| شکل2: نمودار ضریب­برآ بر حسب زمان، استقلال از شبکه |

|  |
| --- |
|  |
| شکل3: نمودار ضریب­برآ برحسب زمان، استقلال از گام­زمانی |

با داشتن شبکه و گام­زمانی مناسب، نتایج شبیه­سازی را با نتایج کار عددی یانگ و لای [3] مقایسه می­کنیم. مقایسة نتایج ضریب­فشار در طول وتر بالواره با استفاده از روش حرکت کل دامنة حل با مقاله [3] در شکل 4 و مقایسة روش شبکة متحرک با مقاله[2] در شکل 5 ارائه شده­است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| روش حرکت کل دامنة حل | روش شبکة متحرک |
| شکل4: نمودار ضریب­فشار در طول وتر بالواره، اعتبارسنجی با [3] | |

**2-3- مقایسة نتایج دو روش مدل­سازی**

شکل 5 نمودار ضریب­فشار در طول وتر در یک­چهارم چرخة نوسان و شکل 6 نمودار ضریب­رانش نسبت به زمان را نشان می­دهند. در این شکل­ها نتایج حاصل از دو روش حرکت کل دامنة حل و روش شبکة متحرک آورده شده­است. همان­طور که دیده می­شود نتایج کاملاً بر هم منطبق هستند بنابراین دقت حل روش­های شبکة متحرک و حرکت کل دامنه یکسان هستند.

|  |
| --- |
|  |
| شکل5: نمودار ضریب فشار در طول وتر بالواره مقایسة دو روش حرکت کل دامنه و شبکة متحرک |

|  |
| --- |
|  |
| شکل6: نمودار ضریب­رانش برحسب زمان، مقایسة دو روش حرکت کل دامنه و شبکة متحرک |

در جدول 3 هزینة محاسباتی شبیه­سازی مذکور برای دو روش اشاره شده ارائه شده­است. میزان استفاده از سی.پی.یو، استفاده از حافظة جایگزین چه در اوج محاسبات و چه در حالت میانه، در روش شبکة متحرک بیشتر از روش حرکت کل دامنة حل است. زیرا در روش شبکة متحرک سلول­ها دچار تغییرشکل می­شوند و برای هر سلول باید معادلة تغییر شکل در هر تکرار حل شود. بنابراین زمان محاسبه طولانی­تر است.

جدول3: هزینة محاسباتی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | روش حرکت کل دامنة حل | روش شبکة متحرک |
| Virtual Memory usage Current (GB) | 142399/0 | 14933/0 |
| Virtual Memory usage Peak (GB) | 143372/0 | 200142/0 |
| CPU time usage (s) | 83/6966 | 47/8021 |

در این پژوهش، سه متغیر دامنة فرازوفرود، بسامد نوسان و عدد رینولدز مطالعه شده­اند. اثر تغییرات دامنة فرازوفرود بر ضرایب برآ و رانش نسبت به زمان در شکل­های 7 و 8 دیده می­شود. با افزایش دامنة نوسان نیروهای برآ و رانش زیاد می­شوند. افزایش بسامد نیز باعث زیادشدن نیروهای برآ و رانش می­شود که در شکل­های 9 و 10 ارائه شده­است. در رینولدزهای کمتر، نیروهای رانش و برآ مقادیر بیشتری نسبت به جریان­هایی با رینولدز بیشتر دارند. در شکل­های 11 و 12 اثر تغییر عدد رینولدز بر ضرایب برآ و رانش قابل مشاهده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل7: نمودار ضریب­برآ برحسب زمان در دامنه­های متفاوت نوسان |

|  |
| --- |
|  |
| شکل8: نمودار رانش برحسب زمان در دامنه­های متفاوت نوسان |

|  |
| --- |
|  |
| شکل9: نمودار ضریب­برآ برحسب زمان در بسامدهای متفاوت |

|  |
| --- |
|  |
| شکل10: نمودار ضریب­رانش برحسب زمان در بسامدهای متفاوت |

|  |
| --- |
|  |
| شکل11: نمودار ضریب­برآ بر حسب زمان در عدد رینولدزهای متفاوت |

|  |
| --- |
|  |
| شکل12: نمودار ضریب­رانش برحسب زمان در عدد رینولدزهای متفاوت |

**3- نتیجه­گیری**

در این پژوهش عددی، با کمک نرم­افزار انسیس فلوئنت 17 حرکت فرازوفرود خالص با دو روش حرکت کل دامنة حل و روش شبکة متحرک شبیه­سازی شد. اثر متغیرهای دامنة نوسان، بسامد و عدد رینولدز هم مطالعه شد. نتایج و هزینة محاسباتی این دو شبیه­سازی در مقام مقایسه قرار گرفت. ضرایب­برآ و رانش نتایج کاملاً یکسان دارند یعنی دقت حل این دو روش یکسان است. هزینة محاسباتی روش شبکة دینامیکی بیشتر از روش حرکت کل دامنة حل است.

با توجه به آن­که دقت حل روش حرکت کل دامنة حل با روش شبکة متحرک یکسان است و هزینة محاسباتی روش حرکت کل دامنه کمتر است، مقرون به صرفه است تا برای شبیه سازی حرکت فرازوفرود، از این روش استفاده کنیم.

**مراجع**

[1] Meilin Yu, Z. J. Wang and Hui Hu, 2012, Airfoil Thickness Effects on the Thrust Generation of Plunging Airfoils, Journal of Aircraft, vol. 49, No. 5.

]2 [امیر باقری، علی اسماعیلی، محمد حسن جوارشکیان و عبدالمجید زمانی­فرد، 1393، بررسی آیرودینامیکی و بهینه­سازی پارامترهای هندسی و نوسانی بالواره­ها در حرکت فرازوفرود با روش پاسخ سطح، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دورة 14، شمارة16،ص­ص 111-101.

[3] J. Young, Z. C. S. Lai, 2004, Oscillation Frequency and Amplitude Effects on the Wake of a plunging Airfoil, AIAA Journal, vol. 42, No. 10.

[5] T. Kinsey and G. Dumas, 2008, parametric study of an oscillation airfoil in power extraction region, AIAA Journal, vol. 46, No. 6.

[6] M. A. Ashraf, J. Young and Z. C. S. Lai, 2012, Oscillation Frequency and Amplitude Effects on Plunging Airfoil Propulsion and Flow Periodicity, AIAA Journal, vol. 50, No. 11.

]7 [احمد سمیعی، محمدحسن جوارشکیان، مجتبی هنرمند، 1397، بهبود عملکرد آیرودینامیکی بالواره­های نوسانی با حرکت فراز و فرود در اعداد رینولدز پایین با استفاده از انتقال حرارت، نشریة علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، سال سی­ام، شمارة یک (پذیرفته­شده).

1. Third-Order MUSCL [↑](#footnote-ref-2)
2. Velocity inlet [↑](#footnote-ref-3)
3. Pressure outlet [↑](#footnote-ref-4)
4. wall [↑](#footnote-ref-5)