# بررسی اثرتغییر فرکانس کاهیده و دامنه نوسان بر عملکرد آیرودینامیکی بالواره درحرکت فرازوفرود

|  |  |
| --- | --- |
| **عبدالمجید زمانی فرد** | **محمد حسن جوارشکیان** |
| *دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی دانشگاه فردوسی مشهد**Msc.zamani@gmail.com* | *دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد گروه مکانیک**Javareshkian@ferdowsi.um.ac.ir* |

|  |
| --- |
| **امیر باقری**  |
| *دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا دانشگاه فردوسی مشهد**Ba.amir456@gmail.com*  |

**چکیده**

  *آيروديناميك حركت بالواره نوساني امروزه بسيار مورد توجه محققین قرارگرفته و در طراحی ریزپهپادهای نظامی و شبیه سازی ریزپرنده ها کاربردفراوان دارد. در این تحقیق، جریان گذرنده از روی بالواره NACA0012 حین حرکت فرازوفرود (plunging) با استفاده ازحل معادلات ناویر استوکس و تکنیک شبکه های دینامیکی شبیه سازی شده است. جریان لزج، آرام،غیر قابل تراکم در حالت ناپایا مورد بررسی قرار گرفته است. . حركت بالواره به صورت سينوسي مي باشد كه تحت فركانس ودامنه ي متغییر نوسان مي كند. اثر حرکت فرازوفرود خالص آرام درفرکانس مشخص و تاثیردامنه­ی نوسان روی نیروهای آیرودینامیکی بررسی شده است. نتایج نشان می دهندکه در فرکانس مشخص با افزایش دامنه­ی نوسان عملکرد آیرودینامیکی کاهش می­یابد.همچنین در دامنه­ی نوسان ثابت با افزایش فرکانس نوسان ضریب جلوبرندگی افزایش می یابد. بمنظور اعتبارسنجی شبیه سازی انجام شده قسمتی ازمحاسبات با نتایج منتشر شده مقایسه شده که روند شبیه سازی را تایید می نماید.*

**کلمات کلیدی:** حرکت فرازوفرود- بالواره نوسانی- شبکه های دینامیکی – فرکانس کاهیده- عملکردآیرودینامیکی.

**فهرست علائم**

|  |  |
| --- | --- |
| = | میانگین زمانی ضریب جلوبرندگی  |
|  | میانگین زمانی ضریب توان  |   |  عدد رینولدز |
|  | ضریب پسا | =  |  بازدهی جلوبرندگی  |
|  | ضریب برا |  | دامنه­ی بدون بعد حرکت plunging |
|  | طول کورد با­لواره |  | فرکانس کاهیده |
|  | فرکانس نوسان برحسب HZ |  | عدد استروهال برای plunging |

**1. مقدمه**

 هدف از این تحقيق تحليل حركت بالواره نوساني با استفاده از شبکه های دینامیکی است . اين زمينه ي تحقيق بر اساس حركت پرندگان و حشرات الگوبرداري شده است. آيروديناميك حركت نوساني بالواره امروزه بسيار مورد توجه قرارگرفته است. در بسياري از كاربردهاي مهندسي نظير حركت پره­هاي هليكوپتر ، توربو ماشينها ، توربينهاي بادي و با­لواره های تجربي حركت نوساني مشاهده مي شود. همچنین حرکت بالزنی در زمینه ریز پرنده ها[[1]](#footnote-2) یا روبات های پرنده نیز کاربرد فراوان دارد. ریزپرنده­ها زمینه بسیار جدیدی را در علم هوافضا ایجاد کرده­اند. در اين سالها ديناميك سيالات محاسباتي پاسخگوي مسايل پيچيده ا ي در مهندسي بوده است كه روز به روز بر گستره ي اين علم افزوده مي شود. در اكثر وسائل پرنده رژيم هايي از جريان وجود دارد كه نيروهاي غيره دائم در مقابل نيروهاي دائم قابل صرفنظر كردن نيستند. دراین مسائل گاهي با پديده­هايي مواجه مي­شويم كه هندسه دچار تغيير شكل مي شود و يا يكي از مرزها داراي حركت مشخصي مي­باشد .پديده هايي نظير نوسان بالواره­ها، پيش بيني فلاتر[[2]](#footnote-3)، تحليل چترهاي نجات[[3]](#footnote-4)،حركت خطي پيستون در سيلندر ، جريان خون در رگها و پديده­هايي از اين قبيل مثال­هاي خوبي براي مطالب فوق هستند. آنچه مهم به نظرمي آيد شبيه سازي صحيح اين نوع جريان­ها با كمترين هزينه و بالاترين دقت مي باشد. در يك شبيه سازي علاوه بر يك الگوريتم قوي براي حل به يك شبكه ي مناسب هم نيازمنديم. شبكه مناسب داراي پارامترهايي چون تعامد خطوط شبكه ، يكنواخت بودن فواصل گره هاي شبكه و همچنين قابليت تطابق با خصوصيت جريان مي با شد. در تحليل جريان هاي گذرا استفاده از شبكه هاي مناسب با مشخصات بيان شده امري بسيار دشوار مي باشد. ازاينرو بايد از شبكه هايي استفاده كنيم كه علاوه بر مناسب بودن، داراي گره­هايي باشد كه باحل جريان نسبت به زمان درگير باشند. به عبارتي ديگر بايد شبكه هاي انعطاف پذيري ايجاد كنيم كه با حركت جسم قابليت تغيير شكل را داشته باشند و خود را با تغيير شكل جسم تطبيق دهند. بنابراين استفاده از شبكه­هاي دینامیکی امري بسيار ضروري دراين مقوله مي باشد. ظهور تكنيك شبكه هاي ديناميكي به اواخرقرن 20 برمي گردد. براي انجام اين كاريكي از روشهاي پركاربرد و ساده استفاده ازتكنيك فنرهاي خطي[[4]](#footnote-5) براي مدل كردن تغيير حركتها درمرز مي باشد. نوفو درسال 1982 سيستم فنرهاي كششي را معرفي كرد. باتينا[[5]](#footnote-6) در سال 1989 براي اولين بار روش فنرهاي خطي را بكار برد. در ادامه به یکی از کاربردهای این نوع شبکه در بررسی حرکت نوسانی با­لواره پرداخته شده است. درقرن 20 نخستين بار نولرو بتز [[6]](#footnote-7)ايده ي حركت نوساني يك بالواره را مطرح كردند. آنها بيان كردند كه با نوسان يك بال در شرايط زاويه حمله ي مناسب نتايج خوبي براي بردارهاي نيروي جلوبرندگی[[7]](#footnote-8) و برا حاصل شد.[1] و[2]. كاتزماير[[8]](#footnote-9) اولين كسي بوده كه به صورت تجربي درسال 1992 كارهاي نولرو بتز را انجام داد. اويك بالواره ثابت رادر يك جريان سينوسي قرار دادو ميانگين ضريب نيروي جلوبرندگی را اندازه گيري كرد.

همچنین تانسر[[9]](#footnote-10) و همکاران [3]، لای و پلاتزر[[10]](#footnote-11) [4] و مایو[5][[11]](#footnote-12) وهمکاران کارهای متفاوتی را انجام دادند. مك كروسكي [[12]](#footnote-13) به طور تجربي مشاهده كرد كه تراكم پذيري نقش بسزايي را در حركت بالواره اجرا مي كند[6]. مك آلتير[[13]](#footnote-14) ، پوسي[[14]](#footnote-15) ، مك كروسكي و كارِر[[15]](#footnote-16) آزمايشهاي سنگين و هزينه بري را بروي هشت بالواره با مقاطع مختلف برای بررسي پارامترهاي حركت نوساني و ساير پارامترها مثل نيروي برا و پسا ومومنتوم زاويه اي انجام دادند كه تركيب 50 حالت مختلف جريان با عددماخ مادون صوت بود[6]. در سال 1998 فری موس[[16]](#footnote-17) با استفاده از بالواره Naca0015 به صورت تجربی به مشاهده­ی گردابه ها پرداخت. ترینتافیلو[[17]](#footnote-18) و همکاران درسال 1998 یک بالواره­ی Naca 0012 را برای آزمایشهای خود بروی بالواره­ی نوسانی بکار بردند. لنتینک و گریتسما[[18]](#footnote-19) درسال 2003 مطالعات عددی را روی شکل بالواره­ها در حرکت فرازو فرود انجام دادند. درمطالعات آنها عدد رینولدز (Reynolds Number ) جریان 150 و از بالواره­­های Naca0010 و Naca0002 و بیضی شکل با ضخامت 10% استفاده کردند. درسال 2009 سلطانی و همکاران[[19]](#footnote-20) تاثیر فرکانس کاهیده را بروی حرکت فرازوفرود به صورت تجربی بررسی کردند. آنها نشان دادند که نیروهای آیرودینامیکی به زاویه­ی حمله­ی میانگین و فرکانس کاهیده حساس هستند. همچنین تغییرات شدید در ضریب فشار این حساسیت حرکت نسبت به دامنه­ی نوسان و فرکانس کاهیده را تایید می کند. دریک حرکت فرازوفرود زاویه­ی حمله­ی نسبی ،نسبت به جریان بالادست بوجود می آید که این زاویه تحت تاثیر فرکانس کاهیده قراردارد و باافزایش این پارامتر زاویه­ی حمله­ی میانگین تغییر می کند[7].

**2. معادلات و روش شبیه سازی**

**2-1. روش فنر خطي:**

 دراين قسمت مروري بر روش كلاسيك آناليز فنري براي شبكه هاي ديناميكي انجام شده است. دراين روش كه متداولترين روش حركت دادن شبكه الماني مي باشد، هركدام از اضلاع بين دوگره درشبكه به صورت موهومي به فنري با سختي متناسب با عكس فاصله ي بين هر گره تبديل مي شود.كه خطوط با طول بيشترداراي سختي كمتر و خطوط با طول كمتر سختي بيشتر خواهند داشت[8].اين كار سبب مي شود كه در حركت گرهاي شبكه تداخلي در گره هاي مجاور رخ ندهد. در شكل 1 نمونه اي از شبكه ي فنري ارائه گرديده است. از روي شكل نحوه­ي فنر زني و ايجاد شبكه با استفاده از روش فنر خطي قابل مشاهده است. دوگره متوالي i ,jرا درنظر بگيريد. بردارخطي كه جهت آن از i به j مي باشد بدين ترتيب بيان مي شود:

 (1)

كه طول اين بردار برابر است با :

|  |  |
| --- | --- |
| (2)  |  |
|  (3) |  |
| (4)  |  |
| (5)  |  |

(6)

تغيير مكان گره هاي i,j را با و نمايش مي دهيم. كه با اين تعريف مي توانيم كشش فنرخطي رابراي هرضلع ازرابطه ي (4) بدست آورد. درنتيجه نيروي ايجاد شده روي گره i ام درراستاي بردار يكه اعمال مي شود. كه به صورت رابطه­ی (5) مي شود. سختي فنري بوده كه بين دو گرهi, j قراردارد و متناسب با عكس بردار ضلع مي باشد. براساس اين رابطه مشخص مي شود كه اضلاع با طول كوچكتر داراي سختي بيشتري هستند. با استفاده از اين روش كه روش سودمندي است مي توانيم تغيير شكلهاي محلي المان را كنترل كنيم. اگر طول الماني زياد شد سختي آن زياد مي شود كه اين امر موجب مي شود نيروي بيشتري به اين المان وارد مي شود و باعث جمع شدن آن مي شود. اين امر كمك زيادي به تطبيق دادن شبكه مي كند[9] .

شکل 1. نمونه ای از فنرهای خطی بکار رفته در شبکه­ی دینامیکی

**2-2. معادلات حاکم**

 به منظور شبیه سازی عددی جریان اطراف بالواره نوسانی با جریان لزج، آرام، غیر قابل تراکم در حالت ناپایا باید معادلات اساسی حاکم بر میدان جریان (ناویر استوکس) حل شود که شامل بقا جرم، ممنتم می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |
| (8) |  |

تانسور تنش و بردار شار بر اساس متغيرهاي وابسته بيان مي شوند.

چگالي، بردار سرعت و T تنسور تنش می باشند. روش مورد استفاده در این تحقیق برای حل معادلات فوق، روش حجم محدود می باشد که با انتگرال گیری از معادلات فوق روی حجم کنترل و استفاده از قضیه گوس و دیورژانس، معادلات گسسته شده و ترم نفوذ، از طرح تفاضل مرکزی و ترم جابه جایی از طرح اختلاف بالادست مرتبه دوم بدست آمده است. همچنین بالواره حرکت هارمونیک خودرا توسط تابع سینوسی زیرانجام می دهد:

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |
|  |  |

در شکل2 مکانیزم حرکت فرازوفرود نشان داده شده است که جهت جریان و دامنه­ی نوسان روی شکل مشخص است. بالواره با دامنه­ی hc توسط تابع هارمونیک ارائه شده 9 نوسان می کند.



شکل 2. حرکت فرازوفرود یک بالواره تحت حرکت هارمونیک کوسینوسی

**2-3.شبکه بندی و شرایط مرزی**

 حوزه حل جریان و قسمتی ازشبکه حول بالواره در شکل3 نشان داده شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده به این صورت است که شرط مرزی ورودی Velocity inlet و شرط مرزی خروجی Pressur outlet می باشد. شرط مرزی سطح بالا و پایین نیزSymmetric در نظر گرفته شده است. سطح بالواره نیز به عنوان دیواره درنظر گرفته می شود. نوع شبکه ای که در اینجا استفاده شده است از نوع سازمان یافته می­باشد و ابعاد حوزه حل نیز به اندازه کافی مناسب در نظر گرفته شده است.





شکل 3. شبکه­ بندی و حوزه­ی حل معادلات

**2-4. نتایج و بحث روی نتایج**

 به منظور اعتبار سنجی، نتایج حاصل ازشبیه سازی حرکت بالواره NACA0012 با نتایج مرجع[10] مقایسه شده است. دراین شبیه سازی از بالواره­ی با طول کورد 08/0 متراستفاده گردید. عددرینولدز جریان 11000Re =، فرکانس کاهیده 01/2 k=، دامنه­ی نوسان 375/0 h = ، سرعت جریان آزادm/s 2 u = و گام زمانی درنظر گرفته شده برابر100/T می باشد. برای اعتبارسنجی ضریب برا و پسا مقایسه و درشکل 4و5 نشان داده شده است. همچنین برای ادامه­ی شبیه سازی عددی لازم است که استقلال از شبکه مورد بررسی قرار بگیرد. لذا جریان حول بالواره NCA0012برای سه شبکه مختلف حل شد. تغییرات ضریب پسا بر حسب زمان بررسی شده است. عدد رینولدز این جریان برابر ،11000 فرکانس کاهیده 4 k =، دامنه­ی نوسان 25/0h = ، سرعت جریان آزادm/s 59/1 u = و گام زمانی درنظر گرفته شده برابر000996/0 می باشد. همانطور که از شکل6 مشخص است در تعداد سلول های 80019 مسئله به استقلال رسیده و با ریزتر کردن شبکه دیگر تغییرات چندانی ایجاد نمی شود.



شکل 4. اعتبار سنجی با مقایسه ضریب برا برحسب زمان [10] شکل 5. اعتبار سنجی با مقایسه ضریب برا برحسب زمان [10]



شکل 6. بررسی استقلال از شبکه

پس از اعتبار سنجی و بررسی استقلال ازشبکه، تاثیر فرکانس کاهیده و دامنه­ی نوسان برضریب جلوبرندگی بررسی شده است. برای این بررسی از سه مقدار متفاوت 4و3و2 k = درسه دامنه­ی نوسان 25/0 و 375/0 و 5/0 h = استفاده گردیده است. روند بررسی به گونه ای است که به ازای یک فرکانس ثابت ضریب جلوبرندگی در سه دامنه­ی نوسان مختلف بررسی می شود و نمودارهای حاصل از شبیه سازی برحسب و به ازای فرکانسهای مختلف درشکل 7 رسم می شوند. درمرحله­ی بعد به ازای یک دامنه­ی نوسان ثابت سه مقدارمتفاوت فرکانس کاهیده مطابق حالت قبل بررسی و نمودارهای مربوطه درشکل 8 ارائه شده است. مطابق نتایج حاصلی که در نمودارها مشاهده می شود ، در یک فرکانس ثابت با افزایش دامنه­ی نوسان مقدار
 افزایش می یابد اما بازدهی کاهش پیدا میکند. نکته­ی قابل توجه اینکه با افزایش فرکانس کاهیده از 2 به 3 و 4 درهمان دامنه­ی نوسان بازدهی کمتر می شود. درنمودار7و8 تغییرات برحسب به ازای دامنه های مختلف ارائه شده است. درجاییکه افزایش جلوبرندگی بر اثر افزایش فرکانس کاهیده یا دامنه­ی نوسان صورت گرفته بازدهی کاهش یافته است. از این نمودارها نتیجه می شودکه برای نوسان مناسب و بهینه،نمی توان پارامترها را بدون درنظر گرفتن بازدهی افزایش یا کاهش داد.





 

 گروه الف گروه ب

شکل 7. تغییرات فرکانس کاهیده و دامنه­ی نوسان: گروه الف- تغییرات ضریب جلوبرندگی در فرکانس کاهیده ثابت و2و3و4 ، برحسب ، گروه ب- تغییرات بازدهی در فرکانس کاهیده ثابت و2و3و4 ، برحسب

 گروه الف گروه ب

شکل 8. تغییرات فرکانس کاهیده و دامنه­ی نوسان: گروه الف- تغییرات ضریب جلوبرندگی در دامنه نوسان ثابت و25/ و 375/ 5/ ، برحسب ، گروه ب- تغییرات بازدهی در دامنه نوسان ثابت 25/ و 375/ و 5/ ، برحسب



شکل 9. بررسی تغییرات بازدهی و جلوبرندگی، در فرکانس کاهیده­ی ثابت سه دامنه­ی نوسان بررسی می شود

**3. نتیجه­گیری**

 دراین تحقیق به بررسی تاثیر فرکانس کاهیده و دامنه­ی نوسان بر عملکرد آیرودینامیکی یک بالواره­ی نوسانی صلب گونه پرداخته شد. حرکت بالواره (*plunging*) و شبیه سازی به صورت دوبعدی انجام گرفته است. پس از شبیه سازی ، ماکزیمم بازدهی 208/0 در 2 k = و 25/0h = با 09263/0= حاصل شد. همچنین ماکزیمم جلوبرندگی 78/1= در 4k = و 5/0h = رخ می دهد که مقدار بازدهی آن 085/0 می باشد. با توجه به نمودارها و نتایج حاصله می توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس کاهیده ضریب جلوبرندگی افزایش می­یابد اما بازدهی کاهش پیدا می کند . با توجه به شکل 9 در فرکانسهای بالاتر با افزایش دامنه­ی نوسان ضریب جلوبرندگی افزایش یافته، به طوری که شیب این خط نسبت به فرکانسهای پایین­تر، بیشتر می­شود. همچنین شیب منفی نمودار بازدهی در فرکانس­های با لاتر، بیشتر است. به طوری که در فرکانسهای بالاتر با افزایش دامنه­ نوسان بازدهی بیشتر از حالتی که این تغییر درفرکانس کم اتفاق می افتد، کاهش می­یابد. باتوجه به محدودیتهایی که درمسائل عملی وجود دارد باید فرکانس و یا دامنه­ی نوسان را متناسب با محدودیتها تغییر داد. دراین تحقیق نشان داده شدکه فرکانس و دامنه­ی نوسان را نمی توان بدون در نظر گرفتن محدودیت بازدهی خوب، افزایش و یا کاهش داد. در آخر ضرورت طرح دو سوال برای مسائل عملی دراین تحقیق کاملا مشهود است :

اول : برای شبیه سازی حرکت نوسانی فرازوفرود درچه دامنه­ی نوسانی و فرکانس کاهیده ای ماکزیمم جلوبرندگی و بازدهی بهینه بوجود می آید؟

دوم همچنین به ازای مشخص بهترین مقدار برای hو k چقدراست؟

**مراجع**

[1] - Betz, A., 1912, "Ein Beitrag zur Erklarung des Segelfluges," Zeitschrift fur Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, vol. 3, pp. 269-272.

[2] – Knoller R., 1909, Die Gesetze des Luftwiderstandes, Flugund Motortchnik(Wien), vol. 3, pp. 1-7.

[3] - Kaya M., Tuncer .IH., Jones KD. and Platzer MF., 2007, Optimization of flapping motion of airfoils in biplane configuration for maximum thrust and/or efficient, In: 45th aerospace sciences meeting and exhibit,AIAA 2007-484.

[4] –Platzer M.F., Jones K. D., Young J. and Lai J.C.S., 2008, Flapping-wing aero dynamics: progress and challenges.AIAAJournal,46(9).,:2136-2149. 10.2514/1.29263]

[5] -Miao, J.M., Ho, M.H., 2006, Effect of ﬂexure on aerodynamic propulsive efficiency of ﬂapping ﬂexible airfoil,Journal of Fluids­ and Structures,22 .:401419.

[6] - McCroskey W. J., McAlister K. W., Carr, L. W., Pucci, S. L., Lambert O., and Indergrand, R., 1981, Dynamic stall on advanced airfoil sections, Journal of the American Helicopter Society, Vol. 26, , pp. 4050.

[7] - Soltani M . R., Rasi Marzabadi .F, 2009, Effect of Reduced Frequency on the Aerodynamic Behavior of an Airfoil Oscillating in a Plunging Motion, Mechanical Engineering Sharif University of Technology,Vol. 16, No. 1, pp. 40-52.

[8] - Batina J. T., 1990, Unsteady Euler Airfoil Solutions Using Unstructured Dynamic Meshes, AIAA Journal, August, Vol. 28,No. 8.

[9] - Farhat C., Degend C., Koobus B., and Lesoinne M., 1998و An Improved Method of Spring Analogy for Dynamic Unstructured Fluid Meshes. AIAA–2070.

[10]- Mahmoud M., and Taha Ch., and Samir H., and Lairsbulck K., and Larbi L.,2010, Kinematic optimization of 2D plunging airfoil motion using the Resp onse Surface Metho dology.Journal of Zhejiang Univer sity-SCIENCE A (Applied Physics & Engineer ing)., ISSN 1673-565X (Pr int); ISSN 1862-1775 (Online)., www.spr inger link.com.

1. MAV [↑](#footnote-ref-2)
2. flutter [↑](#footnote-ref-3)
3. parachute [↑](#footnote-ref-4)
4. Spring Analogy [↑](#footnote-ref-5)
5. BATINA,j [↑](#footnote-ref-6)
6. Knoller , Betz [↑](#footnote-ref-7)
7. Trust force [↑](#footnote-ref-8)
8. Katzymayr [↑](#footnote-ref-9)
9. Tuncer [↑](#footnote-ref-10)
10. Platzer [↑](#footnote-ref-11)
11. Miao, J [↑](#footnote-ref-12)
12. Mac Crosky [↑](#footnote-ref-13)
13. Mc Alister [↑](#footnote-ref-14)
14. Pucci [↑](#footnote-ref-15)
15. Carr [↑](#footnote-ref-16)
16. Freymuth [↑](#footnote-ref-17)
17. Triantafyllou [↑](#footnote-ref-18)
18. Lentink and Gerritsma [↑](#footnote-ref-19)
19. Soltani [↑](#footnote-ref-20)