# بہینہ سازی یک الگوریتم شبکہ متحرک پیرامون ایرفول نوسانی

سید محمد حسین حسینی زارج<sup>۲</sup>

سید مهدی میرساجدی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، گروه مهندسی هوافضا

#### چکیدہ

در این تحقیق الگوریتمی در زمینه شبکه متحرک دو بعدی جهت انجام حرکات نوسانی (دورانی) جسم بهبود مییابد. بدین منظور پیرامون جسم به دو ناحیه تقسیم می گردد. ناحیه اول بمنظور سادگی در انجام حرکات نوسانی دورانی جسم تعریف می شود. در این ناحیه پیرامون جسم تا یک مرز دایروی با استفاده از المانهای مثلثی بی سازمان شبکهبندی می شود. در صورت نیاز به حرکات انتقالی جسم، می توان پیرامون ناحیه اول را تا یک مرز مربعی (ناحیه دوم) شبکهبندی نمود. بدین ترتیب هم امکان اعمال شرایط مرزی ساده تر می گردد و هم می توان بیرامون ناحیه یک شبکه زمینه حرکات انتقالی را نیز مدل نمود. بهینه سازی صورت گرفته در این روش عبارت است از تبدیل المانه ای مثلثی بین دو مرز دایروی به المانهای چهار گوش که منجر به کاهش تعداد آنها به نصف می گردد. در این تحقیق بدلیل المان بندی مناسب صورت گرفته، به روش های جستجو در میدان نیاز نمی باشد. عدم نیاز به شبکهبندی مجدد، میان یابی، الگوریتمهای جستجو و تستهای بررسی کیفیت شبکه، جزء امتیازات قابل توجه روش معرفی شده است. جهت ارزیابی روش معرفی شده در این تحقیق، میدان جریان پیرامون جسم متحرک نیز حل شده است. بدین منظور از معادلات تراکمپذیر و گذرای اویلر استفاده شده است. با حل چندین مساله نمونه و مقایسه آن با نتایج تجربی و یا سرد است. برین می منظور از معادلات تراکمپذیر و گذرای اویلر استفاده شده است. با حل چندین مساله نمونه و مقایسه آن با نتایج تجربی و یا سرد است. بدین منظور از معادلات تراکمپذیر و گذرای اویلر استفاده شده است. با حل چندین مساله نمونه و مقایسه آن با نتایج تجربی و یا سرد است. بدین منظور از معادلات تراکمپذیر و گذرای اویلر استفاده شده است. با حل چندین مساله نمونه و مقایسه آن با نتایج تجربی و یا

**واژههای کلیدی**: شبکه متحرک، میدان جریان، شبکه باسازمان، شبکه بیسازمان، حل عددی، معادلات تراکمپذیر و گذرای اولر

# Improvement in Moving Mesh Algorithm around a Oscillational Airfoil

#### S.M. Mirsajedi

#### M.H. Hosseini Zarj

Mechanical and Aerospace Eng. Dep't, Science and Research Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran

#### ABSTARCT

In this paper, a moving mesh concept originally introduced to model the general motion of a two-dimensional body is improved. The solution domain is divided into two zones. The first zone, with a circular boundary, includes the moving body and is intended to facilitate the vibrational rotation of the body. This zone is meshed by triangular elements which displace rigidly with the body. The proposed approach suggests replacing the triangular elements in the most exterior layer of the first zone by square ones which reduces their number by half. Present grid configuration also allows the number of nodal points and elements to remain constant. In order to demonstrate the effectiveness of the present method, unsteady and compressible form of the Euler equations are solved for flow over a moving body. The performance of the method is verified by several sample problems and comparing the results with existing numerical and experimental analyses in the literature.

Key words: moving mesh, flow field, structured grid, unstructured grid, numerical solution, unsteady and compressible Euler equation.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: hosseinizarj@gmail.com

nsajedi@srbiau.ac.ir - استادیار:

#### ۱– مقدمه

دینامیک سیالات محاسباتی(CFD) در سالهای اخیر پیشرفت قابل ملاحظهای داشته و بعنوان یک ابزار تکمیلی در کنار تحقیقات آزمایشگاهی قرار گرفته است. اگرچه در سالهای اخیر محققین متعددی موفق به حل میدانهای جریان سه-بعدی برای هندسههای مختلف شدهاند، ولی تولید شبکه برای هندسههای پیچیده همواره یک بحث جدی بوده است.

دربحث تولید شبکه و حل میدان جریان، یکی از مسایل مهم، مواجهه با اجسام متحرک است. مسایلی مانند شبیهسازی تعامل بین نیروهای آیرودینامیکی و سازهای (آیروالاستیسیته)، شبیهسازی جریان اطراف هواپیما هنگام پرواز آن در نزدیکی زمین، شبیهسازی جریان ناشی از حرکت نسبی دو جسم که بصورت تناوبی و پیوسته انجام میشود مانند روتور و استاتور، شبیهسازی بالستیک داخلی موتور سوخت جامد، شبیهسازی جریان اطراف راکت و یا بمب در حال جدایش از زیر بال هواپیما، شبیهسازی آیرودینامیک جدایش موشک، انجماد<sup>7</sup>و یا ذوب<sup>7</sup>، جریانهای با سطح آزاد، جریانهای چند فازی و بسیاری از مسایل دیگر که همگی دارای مرز متحرک و یا مرز در حال تغییر شکل هستند، از جمله مسایل روز و مورد توجه میباشند.

با توجه به اینکه شبکههای سازمان یافته دارای سابقهای بمراتب بیشتر از شبکههای بی سازمان میباشند و بسیاری از روشهای حل بصورت سنتی بر مبنای چنین شبکههایی تهیه شدهاند، روشهای متعددی برای حرکت مرزها بر مبنای شبکه-های سازمان یافته طراحی شدهاند. در اغلب این روشها پس از هر قدم زمانی، فضای بین مرزهای متحرک و ثابت را دوباره شرکهبندی مینمایند [۱]. اینگونه روشها با توجه به لزوم شبکهبندی مینمایند [۱]. اینگونه روشها با توجه به لزوم تولید دوباره کل شبکه و انجام میانیابیهای مکرر، دارای کارایی معددی را ایجاد مینماید. در پارهای از کاربردها نیز سعی شده است که کل شبکه بهمراه مرز متحرک حرکت نماید [۲]. با مشکل مرزهای پیچیده با استفاده از شبکههای بی سازمان و یا سازمانیافته موضعی بطور قابل قبولی حل شدند [۳]. حرکت و یا تغییر شکل اجسام در مقایسه با اندازه فاصله دو جسم از هم

<sup>1</sup> Solidification <sup>2</sup> Melting

و یا فاصله جسم از مرز دوردست، باید کوچک باشد. از طرف دیگر، حرکات موضعی بخصوص وقتی دو جسم به یک دیگر نزدیک باشند، میتواند به سرعت شکل شبکه را چنان نامنظم نماید که کارایی حل جریان را تحت تاثیر قرار دهد. ریشه این محدودیت را باید در استفاده از یک شبکه با شکل ثابت و غیر قابل تغییر بین مرزها جستجو نمود. راهکارهای متعددی برای پیشگیری از ایجاد مشکل بالا و یا دوریجستن از آن پیشنهاد شده است. استفاده از شبکههای بی سازمان کارتزین که میتواند پس از هر قدم زمانی بطور محلی بازسازی شود، بخاطر سادگی ساختار اطلاعاتی آن یکی از راه حلهای مناسب میباشد هر چند که سایر محدودیتهای شبکه کارتزین همچنان در این روش نیز باقی می ماند [۶–۴].

یکی دیگر از روشهای حرکت شبکه بدون تغییر کیفیت شبکه در اطراف مرز متحرک، استفاده از دو شبکه زمینه و متحرک است یکی از معروفترین انواع این شبکهها که در شکل ۱ ملاحظه میشود ، شبکه کایمرا میباشد [۷].



**شکل(۱):** شبکه کایمرا[۷].

مبنای این روش حرکت یک شبکه متحرک محلی بهمراه مرز متحرک بر روی شبکه زمینه میباشد. هدف از این تحقیق تدوین یک الگوریتم مرز متحرک میباشد که بتواند حرکت هر جسم دو بعدی را که شامل نوسان (دوران) میباشد، مدل نماید. دراین تحقیق فرض بر آن است که جسم متحرک، خود بصورت صلب حرکت کرده و بدون تغییر باقی میماند. در این تحقیق عمده فعالیت بر روی شبکه متحرک خواهد بود و بر روی روش حل جریان به میزانی سرمایه گذاری می گردد که بوسیله آن بتوان صحت الگوریتم تدوین شده را مورد بررسی قرار داد.

#### ۲- تدوین الگوریتم تولید شبکه متحرک دو بعدی

در این تحقیق، هدف ارائه الگویی است که بوسیله آن بتوان حداکثر نوسان جسم را بدون حـذف و درج نقطـه مـدلسازی





همانگونه که ذکر گردید، به فاصله تقریبی یک المان در نزدیکی مرز دایروی (مرز دایروی خارجی)، یک دایره مجازی (مرز دایروی داخلی) در نظر گرفته میشود. با حرکت جسم، تمامی المانهای درون دایره مجازی با جسم حرکت میکنند اما نقاط بر روی مرز بیرونی ناحیه بدون حرکت باقی میمانند. بدین ترتیب المانهای مابین دو دایره دچار تغییرشکل میشوند و در عوض در محل اتصال دو ناحیه اول و دوم، نقاط ثابت بوده و بر روی یکدیگر سر نمیخورند. تعداد نقاط بر روی دو دایره داخلی (دایره مجازی) و خارجی (مرز دایروی خارجی) بایستی داخلی (دایره مجازی) و خارجی (مرز دایروی خارجی) بایستی را که دربر گیرنده یک ردیف المان مابین دو دایره میباشد را لایه تغییر شکل پذیر مینامیم. شکل **۴** لایه تغییرشکل پذیر را با ۳۲ نقطه نشان میدهند.

نمود. بدین مظور با معرفی دو ناحیه پیرامون جسم و استفاده از قابلیت های هر دو نوع شبکه بیسازمان مثلثی و کارتزین باسازمان و بعبارت دیگر استفاده از یک شبکه هیبریدی، توانایی روش در جابجاییهای بزرگ جسم به نمایش گذارده خواهد شد. در ناحیه اول پیرامون جسم تا یک مرز دایروی از المان های مثلثی بیسازمان پر میشود. تمامی حرکات نوسانی و یا دورانی جسم در این ناحیه خلاصه می شود. بمنظور جلوگیری از تخريب المانهای نزديک جسم در اين حالت، تمامی المان-های درون این منطقه به همراه جسم حرکت مینمایند. جهت تسریع و سادهسازی در اعمال شرایط مرزی و همچنین حرکات انتقالی جسم (در صورت استفاده از شبکه زمینه)، یک مرز مربعی پیرامون ناحیه اول در نظر گرفته می شود که ناحیه دوم نام دارد. لازم به ذکر است که چنانچه بخواهیم جسم دارای حركت انتقالى نيز باشد مىتوان از يك شبكه زمينه نيز استفاده نمود که در آن صورت دو ناحیه اول و دوم بر روی شبکه زمینه قرار می گیرند. می توان نشان داد که با استفاده از یک چنین شبکهبندی، فرایند حذف و درج و میانیابی میان نقاط کاملاً از بين خواهد رفت.

#### ۲-۱- ناحیه اول

دلیل تعریف این ناحیه تسریع و تسهیل در حرکات دورانی/ نوسانی جسم میباشد. این ناحیه با یک مرز بیرونی دایروی، در برگیرنده جسم میباشد. در واقع در این ناحیه مرز درونی، جسم و مرز بیرونی یک دایره میباشد. علت تعریف مرز دایروی نیز خصوصیتی است که میتوان به دایره در حرکات دورانی نسبت داد. در اعمال حرکات دورانی جسم میتوان به این صورت عمل نمود که به فاصله تقریبی یک المان در نزدیکی مرز دایروی، یک دایره مجازی در نظر گرفته میشود. با حرکت مرز دایروی، یک دایره مجازی در نظر گرفته میشود. با حرکت می کنند اما نقاط بر روی مرز بیرونی ناحیه بدون حرکت باقی میمانند. بدین ترتیب المانهای مابین دو دایره دچار تغییر شکل میشوند و در عوض در محل اتصال دو ناحیه اول و دوم، نقاط ثابت بوده و بر روی یکدیگر سر نمیخورند. شکلهای ۲ و باشد با دو شعاع مختلف نشان میدهند.



شکل(۴): لایه تغییر شکل پذیر را با ۳۲ نقطه.

با در نظر گرفتن ماتریس دوران بصورت زیر تمامی نقاط درون ناحیه، بجز نقاط بر روی مرز دایروی دوران مینمایند.

 $\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ (1)

همانگونه که در شـکل ۵ مـشاهده مـیشـود، بـا حرکـت ایرفویل تمامی المانهای درون دایره مجازی بصورت صـلب بـه همراه جسم حرکت نمودهاند و هیچگونه تغییر شکلی ندادهانـد. اما المانهای حدواسط دایره مجازی و مرز ناحیه، به دلیل آنکـه حداقل یک نقطه از آنها بر روی مرز دایروی بدون حرکت بـاقی میمانند، دچار تغییرشکل شدید شدهاند.



شکل(۵): ۲۰ درجه دوران ایرفویل (بدون اصلاح المانها)

بمنظور رفع این مشکل در حالاتیکه دامنه نوسان جسم از فاصله زاویهای دو نقطه مجاور مرزی بیشتر باشد، به محض آنکه هر یک از نقاط مرزی به جای اولیه نقطه مجاور مرزی خود برسد، با حفظ موقعیت نقاط، شماره المانهای تغییر شکل یافته، اصلاح شده و ترکیب المانهای این لایه به حالت اول



یعنی قبل از شروع دوران باز می گردد. چند المان در ناحیه تغییر شکل پذیر را به همراه نقاط مربوط به خود که در شکل ۶ نمایش داده شده است، در نظر بگیرید.



**شکل(۶):** مکان اولیه نقاط در لایه تغییر شکل پذیر.

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می شود با دوران جسم، المان-های این ناحیه دچار تغییر شکل می شوند.



شکل(۷): نقاط درون ناحیه اول کمی جابجا شدهاند.

بیشترین مقداری که المانهای این لایه دچار تغییر شکل مـی-شوند، در شکل ۸ نمایش داده شده است.



مونیت اولیه نقاط () شکل(۸): بیشترین تغییر شکل المانها در لایه.

در این حالت، همانگونه شکل ۹ مشاهده می شود، با حفظ موقعیت نقاط، شماره گذاری المانهای لایه تغییر شکل پذیر بگونهای تغییر می کند که شکل المانها به حالت اولیه قبل از شروع دوران باز گردد. بدین ترتیب جسم می تواند بدون آنکه تغییر شکل شدیدی در المانهای آن ایجاد شود تا دامنه دلخواه نوسان کرده و یا حتی دوران کامل نماید.



با توجه به آنچه که در مورد شماره گذاری مجدد المانها گفته شد اکنون می توان به سادگی و بدون آنکه المانها دچار تغییر شکل شدید شوند، ایرفول را دوران داد. این موضوع در شکلهای ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



شکل(۱۰): ۲۰ درجه دوران ایرفویل (با اصلاح المانها).



شکل(۱۱): ۸۰ درجه دوران ایرفویل (با اصلاح المانها).

## ۲-۲- ناحیه دوم

با تعریف ناحیه اول، جسم توانایی حرکات دورانی و نوسانی را بطور کامل پیدا میکند. بمنظور تکمیل قابلیت حرکتی جسم و اعمال شرایط مرزی و توانایی انجام حرکات انتقالی (در صورت استفاده از شبکه زمینه)، پیرامون مرز دایروی اول تا یک مرز مربعی المانبندی می گردد. بمنظور استفاده از مزایای شبکه-های کارتزین باسازمان، درون ناحیه دوم از این نوع شبکه استفاده می گردد. المانهای ناحیه اول به همراه ناحیه دوم در شکلهای **۱۲** و **۱۳** نشان داده شده اند.



**شکل(۱۳):** فرم نهایی المانهای ناحیه دوم به همراه ناحیه اول با ۴۸ نقطه روی مرز دایروی.

## ۳- معادلات حاکم

معادلات اویلر که با صرفنظر کردن از ترمهای لزجی و انتقال حرارتی در معادلات ناویر – استوکس بدست میآیند، قادرند تا کلیه پدیدههای جریان بجز آنهایی که در اثر لزجت جریان بوجود میآیند همانند لایه مرزی و جدایش جریان را مدل نمایند. نظر به سادگی نسبی و قابلیت خوب معادلات اویلر، در ایان تحقیق از معادلات اخیار جهت مدل سازی جریان تراکم پذیر، غیر لزج و ناپایا استفاده شده است. این معادلات در تمامی رژیمهای جریانی اعم از زیرصوت، گذرصوتی و بالای-صوت صادق بوده و پدیدههایی همچون شوک را بخوبی مدل مینمایند.

- $\partial_t \rho + \partial_j (\rho u_j) = 0. \tag{(1)}$
- $\partial_{i}(\rho u_{i}) + \partial_{i}(\rho u_{i}u_{j}) + \partial_{i}P = 0.$ (7)

$$\partial_{t}(\rho E) + \partial_{j}(\rho u_{i}H) = 0. \tag{f}$$



محدود<sup>۱</sup> گفته می شود. بدین ترتیب بدون آنکه نیازی به شناسایی المانهای مجاور یک المان باشد، معادلات بر روی تک تک المانها نوشته شده و مقادیر مربوط به هر نقطه بصورت خودکار با هم جمع می شود.

در این قسمت روش حجم محدود بر مبنای المان محدود با استفاده از حجم محدودهای Cell Vertex توضیح داده می شود. برای مثال در شکل **۱۴** یک المان مثلثی انتخاب شده و سه زیر بخش این المان که بعنوان زیر حجم محدود<sup>۲</sup> نامیده می شود از نقطه تلاقی میانه های مثلث بوجود آمده اند. در این حالت هر المان شامل بخشی از حجم محدودی است که حول نقطه گوشه هر المان تشکیل می شود.



**شکل (۱۴):** یک المان مثلثی به همراه زیر حجم محدودهای مربوط به آن.

مطابق با شکل **۱۵** با کنار هم قرار دادن المانها، بخش های مربوط به حجم محدود هر نقطه ازالمانهای مختلف در کنار هم قرار گرفته و حجم محدود کاملی برای هر نقطه تشکیل می شود.



شكل(١٥): تشكيل حجم محدود پيرامون نقطه.

مزیت این روش آن است که در روند نوشتن معادلات برای حجم محدود کامل در هر نقطه، هر المان تنها یک بار بررسی شده و در محاسبه شارها، تنها از اطلاعات همان المان که این مجموعه معادلات توسط دو معادله ذیل کامل میشوند.

$$\rho E = \frac{P}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho \vec{U}^2. \tag{(a)}$$

$$\rho H = \rho E + P. \tag{(?)}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \vec{\nabla}.\vec{F} = 0; \tag{Y}$$

که در آن 
$$W$$
 و  $F$  عبارتند از:

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho \vec{U} \\ \rho u \vec{U} + P \hat{i} \\ \rho v \vec{U} + P \hat{j} \\ \rho H \vec{U} \end{bmatrix}.$$
(A)

حال اگر  $F_n$  برابر با مقدار خالص شار عبوری از واحد سطح کنترل فرض شود، میتوان نوشت:

$$F_{n} = \begin{bmatrix} \rho(u_{n} - \omega_{n}) \\ \rho u(u_{n} - \omega_{n}) + Pn_{x} \\ \rho v(u_{n} - \omega_{n}) + Pn_{y} \\ \rho E(u_{n} - \omega_{n}) + Pu_{n} \end{bmatrix};$$
(9)

که در آن  $u_n = \vec{U}.\vec{n}$  عبارتست از مولفه قائم بر سطح سرعت  $u_n = \vec{U}.\vec{n}$  سیال،  $\vec{n} = \vec{\omega}.\vec{n}$  عبارتست از مولفه قائم بر سطح سرعت مرز و  $\hat{o}_n = \vec{\omega}.\vec{n}$  بردار قائم بر سطح حجم کنترل بوده که جهت آن به سمت خارج میباشد. بنابر این فرم نهایی معادلات حاکم بصورت زیر در میآید.

$$\frac{D}{Dt}\int_{V} WdV + \oint_{s} F_{n} ds = 0.$$
 (1.)

در روش حجم محدود که در این تحقیق مد نظر است کل میدان به المانهای کوچک تقسیم شده و در هر یک از این المانها، معادلات حاکم انتگرالگیری میشوند. یک روش برای محاسبه انتگرال هر حجم کنترل این است که یک حلقه اجزایی بر روی حجم کنترلها قرار گیرد و در این حلقه هر بار مقدار شار عبوری از سطوح کنترل مورد نظر محاسبه شود. به این ترتیب که بر حسب نوع اطلاعات هندسی و البته نوع حجم محدود، حلقه اجزایی بر روی المانهای هندسی بوده و در این محدود، حلقه اجزایی بر روی المانهای هندسی بوده و در این معدود، مقدار شار عبوری از سطوح کنترلی که در المان هندسی مورد نظر قرار دارند محاسبه می شود و برای حجم کنترلهای چپ و راست مربوط به همان سطح کنترل قرار می گیرند. به این روش، روش حجم محدود بر مبنای المان



www.SID.ir

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Control Volume based Finite Element

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Sub Control Volume (SCV)





شکل (۱۶): تشکیل زیر حجم محدودها در یک المان کارتزین.





<sup>2</sup> Hanging Node



حاوى نقطه معلق.

بار دیگر به المان شکل ۱۴ توجه نمایید. این المان شامل سه زیر حجم محدود است و رئوس آن بصورت موضعی شماره گذاری شدهاند. مستقل از اینکه این المان چه ارتباطی با المانهای همسایه خود در کل میدان دارد از معادلات (۱۰) بر روی هر یک از این سه زیر حجم محدود انتگرال گیری می شود. چنانکه مشاهده خواهد شد، تنها اطلاعات مربوط به سه رأس المان برای انتگرال گیری کافی است و این مزیت روش حجم محدود بر مبنای المان محدود است. برای مدلسازی شار آستفاده گردیده است.

#### ۴– نتایج حاصل از حل جریان

در این بخش، نتایج بدست آمده از تحقیق ارائه میشود. این نتایج شامل آزمایشاتی است که بمنظور اثبات روش ارائه شده در متحرکسازی میدان و روش بکار گرفته شده در حل معادلات حاکم، مورد توجه قرار می گیرند. به این منظور صحت عملکرد و دقت نتایج بدست آمده از روش نیز با مقایسه نتایج با مقادیر تجربی و یا سایر نتایج عددی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

# ۴-۱- آزمایش اول: بررسی جریان غیردائم پیرامون ایرفویل نوسانی، مدل CT1

در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از متد در برخی جریانهای غیر دائم پرداخته میشود. دلیل انتخاب این جریان-ها، وجود نتایج تجربی است که در مجموعه مدلها از ایرفویلهای [۸] به چشم میخورد. در این مجموعه مدلها از ایرفویلهای نوسانی در جریانهای گذرصوتی و ضرایب حمله مختلف



<sup>3</sup> Advection Upstream Splitting Method



CT1 شکل(۲۰): بررسی مقایسه ضریب نیروی نرمال درمدل ۲-۴- آزمایش دوم: بررسی جریان غیر دائم پیرامون ایرفویل نوسانی، مدل CT5.

مدل دومی که در این قسمت به آن اشاره می شود یکی دیگر از مدلهای ایرفویل نوسانی از مجموعه تستهای [۸]، یعنی مدل CT5 می باشد. ایرفویل در این حالت از نوعNACA 0012 بوده و در این حالت نوسان پیرامون یک چهارم وتر انجام شده است. در این مدل، که بدلیل بالا بودن عدد ماخ از نمونههای مورد بحث در زمینه شبکه متحرک می باشد، جریان با ماخ ۱۷۵۵ ۰/۱۷ به ایرفویل NACA 0012 برخورد می نماید. شرایط جریان بصورت زیر می باشد.

 $M_{\infty} = 0.755, \alpha_0 = 0.016^{\circ}, \alpha_m = 2.51^{\circ}, k = 0.0814.$  با دقت در ماخ جریان و مقایسه آن با حالت قبل، انتظار می ود که به دلیل بالا بودن ماخ در این مدل همچنین دامنه نوسانات، شوک قویتری در مقایسه با قبل بصورت متناوب در بالا و پایین ایرفویل تشکیل گردد. این موضوع در شکلهای ۲۱ و ۲۲ مشاهده می گردد.

صحت نتایج بدست آمده را می توان با مقایسه ضریب نیروی نرمال بر سطح ایرفویل در شکل ۲۳ با نتایج مرجع [۸] مشاهده نمود. با کمی تأمل در نتایج نکته جالبی حاصل می-شود. همانگونه که اشاره شد، زاویه نصب در این مدل برابر ۱۰۱۶ درجه می باشد. با توجه به کمی این مقدار، انتظار می-رود تا تغییرات ضریب نیروی نرمال در مقابل زاویه حمله تقریباً متقارن باشد. در حالیکه نتایج تجربی، یک جابجایی به سمت بالا را نشان می دهد که حاکی از آن است که جریان با زاویه حمله بیشتری نسبت به آنچه که اشاره شده است به جسم برخورد نموده است. درستی این بیان را می توان بسادگی استفاده شده است. حرکت ایرفویل در این مدل از نوع نوسانی بوده و تغییرات زاویه حمله در آن نسبت به زمان بر اساس رابطه زیر صورت می پذیرد.

$$k = \frac{\omega c}{2U_{\infty}}$$

که در آن c طول وتر ایرفویل و  $w \cup U_{\infty}$  سرعت جریان آزاد می باشد. اولین مدلی که در این قسمت به آن اشاره می شود یکی از مدلهای ایرفویل نوسانی از مجموعه تستهای مرجع [۸]، یعنی مدل CT1 می باشد. ایرفویل در این حالت از نوع یعنی مدل NACA 0012 می باشد. این حالت نوسان پیرامون یک چهارم وتر انجام شده است. در این مدل، شرایط جریان بصورت زیر می باشد.

 $M_{\infty} = 0.6, \alpha_0 = 2.89^{\circ}, \alpha_m = 2.41^{\circ}, k = 0.0808.$ 

پیش بینی می شود که با نوسان ایرفویل، یک شوک در بالای ایرفویل تشکیل گردد که در شکل **۱۹** قابل مشاهده است. همچنین در مقایسهای که میان نتایج بدست آمده در خصوص ضریب نیروی نرمال بر سطح بر حسب زاویه حمله از متد حاضر و مرجع [۸] صورت گرفته است، صحت عملکرد و دقت متـد معرفی شده، مشاهده می شود. نتایج اخیـر در شکل ۲۰ قابـل مشاهده می باشند.



شکل (۱۹): خطوط همتراز ماخ پیرامون ایرفویل مدل CT1.





شکل (۲۴): بررسی مقایسه ضریب نیروی نرمال در حرکت Pitch، مدل CT5 تصحیح زاویه نصب به ۰/۲۵ درجه، مقایسه میان نتایج روش حاضر با مرجع[۸].

۴–۳– آزمایش سوم: بررسی عدم نیاز به میانیابی در حرکات دورانی جسم وهمچنین بهینه بودن الگوریتم ارائه شده

هدف از انجام این آزمایش اثبات این نکته است که در حرکات دورانی جسم که ممکن است فرایند شماره گذاری مجدد به دفعات تکرار شود، نیاز به انجام میانیابی میان المانهای قدیم و جدید وجود ندارد. بعبارت دیگر بدون استفاده از هیچگونه میانیابی، دقت نتایج از بین نمیرود. همچنین سپس نتایج بدست آمده با نتایج مرجع [۹] مقاسیه گردیده و میزان کاهش خطا ملاحظه می گردد. این نکته حائز اهمیت است چرا که در تحقیق نمود. در صورتیکه زاویه برخورد اولیه به جای ۱۶ ۰/۰ درجه، ۲۵/۰ درجه لحاظ شود، بر اساس شکل ۲۴، نتایج بدست آمده کاملا با نتایج اشاره شده در مرجع مزبور منطبق می گردند. با توجه به آنکه زوایای اشاره شده در حد کوچکی می باشند، پدید آمدن خطا در اندازه گیری آنها بعید بنظر نمی رسد.



شکل(۲۱): خطوط همتراز ماخ پیرامون ایرفویل مدل CT5.



شکل(۲۲): خطوط همتراز ماخ پیرامون ایرفویل مدل CT5.



**شکل(۲۵):** بیشترین تغییر شکل در اتدازه المانها تا زاویه





**شکل(۲۶):** بیشترین تغییر شکل در اتدازه المانها تا زاویه ۵/۸ درجه، با شماره *گ*ذاری مجدد.

اکنون نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج موجود در مرجع [۹] مقایسه می گردد. با بررسی این موضوع مشاهده می گردد که میزان خطای ایجاد شده در برخی موارد حتی تا نصف نیز کاهش پیدا کرده است. جدول ۱ مقایسه مقدار خطا بین روش حاضر و مرجع [۹] را بدون شماره گذاری مجدد المانها و جدول ۲ مقایسه مقدار خطا بین روش حاضر و مرجع [۹] را با شماره گذاری مجدد المانها نشان میدهد.

تمامی روشهای موجود در زمینه شبکه متحرک، هنگامی که نوسان یا دوران جسم از یک زاویه معینی فراتر رود، فرایند حذف و درج نقطه و میان یابی از نقاط حذف شده به نقاط اضافه شده، امری اجتناب نایذیر است. همانگونه که در قبل بدان اشاره شد از ویژگیهای متد ارائه شده در این تحقیق آن است که در حرکات نوسانی و یا دورانی، نه تنها هیچ حذف و اضافهای در خصوص نقاط صورت نمی گیرد، حتی احتیاجی به میانیابی نیز نمبیباشد.ایرفویلNACA 0012 را در نظر بگیرید. بر روی مرز ناحیه اول، ۶۴ نقطه درنظر گرفته شده است. بدین ترتیب فاصله زاویه ای نقاط از یکدیگر ۵/۶۲۵ درجه خواهد بود. فرض کنید که ایرفویل بتواند با دامنهای برابر با ۵/۸ درجه نوسان کند. در این حالت دو آزمایش مختلف تعریف می شود. در حالت اول فرض می شود که ایرفویل تا مقدار ماکزیمم دامنه خود نوسان کند بدون آنکه المانهای مورد نظر در ناحیه اول شماره گذاری مجدد شوند. توجه دارید که بر اساس متد ارائه شده، اگر در حین نوسان، دامنه نوسان از فاصله زاویهای بین نقاط مرزی در ناحیه اول بیشتر شود، فرایند شماره گذاری مجدد المان انجام می گیرد. در حقیقت در حالت اول اجازه داده می شود که المان ها تا مقدار ماکزیمم دامنه نوسان حرکت کنند، اما شماره گذاری مجدد صورت نپذیرد. میزان تغییر شکل المانها تا زاویه ۵/۸ درجه در این حالت در شکل ۲۵ نمایش داده شده است. در حالت دوم به شیوه معمول متد عمل می شود. یعنی در حین نوسان، به محض آنکه زاویه نوسان به ۵/۶۲۵ درجه رسید، فرایند شماره گذاری مجدد المانها انجام مي گيرد و سپس تا زاويه ٥/٨ درجه المانها به اندازہ ۱۷۵/۰ درجہ تغییر شکل پیدا مے کننےد. میےزان تغییے شکل المانها تا زاویه ۵/۸ درجه در شکل ۲۶ نـشان داده شـده است. با فرض نوسان سینوسی، شرایط جریان بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

 $M_{\infty} = 0.6, \alpha_0 = 0.0^{\circ}, \alpha_m = 5.8^{\circ}, k = 0.754.$ 

بر روی دایره مجازی در ناحیه اول، چهار نقطه در موقعیتهای ۰، ۹۰، ۱۸۰ و۲۷۰ درجه در نظر بگیرید. این نقاط در حقیقت در سمتهای لبه فرار، بخش بالایی، لبه حمله و بخش پایینی ایرفویل قرار دارند. توزیع فشار برروی نقاط مزبور در دو حالت اشاره شده (با شماره گذاری مجدد المانها و بدون شماره گذاری مجدد) در شکلهای ۲۷ تا ۳۰ ارائه شدهاند.



www.SID.ir

1.0025

البته بایستی به این نکته توجه نمود که میزان خطاهای ایجاد شده بسیار ناچیز هستند. دلیل این موضوع آن است که در متد ارائه شده از هیچگونه میانیابی استفاده نگردیده است. توجه به این نکته ضروری است که در شرایطی که حتی از بهترین روشهای میانیابی نیز استفاده شود، علاوه بر صرف وقت، درصدی خطا در محاسبات وارد می گردد.



**شکل (۲۷):** تغییرات فشار- زمان نقطهای واقع در زاویه صفر درجه بر روی دایره مجازی ناحیه اول.



**۹۰ شکل (۲۸): تغییرات ف**شار – زمان نقطهای واقع در زاویه ۹۰ درجه بر روی دایره مجازی ناحیه اول.







جدول (۱): مقایسه مقدار خطا بین روش حاضر و مرجع [۹] بدون شماره گذاری مجدد المانها.

درصد مقدار کاهش خطا	درصد خطا $(p/p_{\infty})$ نتایج روش حاضر	درصد خطا $(p/p_{\infty})$ نتايج مرجع [۹]	موقعیت زاویهای نقاط بر روی دایره مجازی
۷. ۳۰	% •/1۴	'/. •/Y	•
7. 30/15	7. 1/4	7. 1/80	٩٠
% rv/a	ï/. •/١۵	/ •/۲۴	۱۷۰
'/. FV/•۶	∵/. •/۹	'/. \/Y	77.



www.SID.ir

- 6. Davis, R.L., and Dannenhoffer, J.F. "Three-Dimensional Adaptive Grid-Embedding Euler Technique", AIAA Journal, Vol. 32, No.6, June 1994.
- 7. Steger, J.L., Doughery, F.C., and Beneck, J.A. "A Chimera Grid Scheme", Advances in Grid Generation, Edited by K. Ghia and U. Ghia, ASME FED-5, pp. 59-69, 1983.
- Compendium of unsteady aerodynamic measurements. AGARD-R-702, 1982.

۹. میرساجدی، س.م. "تدوین الگوریتم حرکت شبکه دو

بعدی و سه بعدی به منظور مدل سازی جریان پیرامون یک جسم با حرکت عمومی"، پایان نامه دکتری، دانشکده

مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، اسفند ۱۳۸۴.

جدول (۲): مقایسه مقدار خطا بین روش حاضر و مرجع [۹] با شماره گذاری مجدد المانها.

درصد مقدار کاهش خطا	درصد خطا $(p/p_{\infty})$ نتایج روش حاضر	درصد خطا $(p/p_{\infty})$ نتایج مرجع [۹]	موقعیت زاویهای نقاط بر روی دایره مجازی
7. 10/9	/. •/ <b>\</b> \\	% •/١٣٢	•
·/. ۳۸/۹	7. 1/1	%. N/A	٩٠
7. 38/88	/. •/14	/. •/٢٢	۱۸۰
% 49/84	ï/. •/A1	'/. <b>\</b> /8	77.

## ۵- نتیجهگیری

در این تحقیق الگوریتمی در زمینه شبکه متحرک دوبعدی جهت انجام حرکات نوسانی (دورانی) جسم بهبود یافت. با آزمایش بعمل آمده مشاهده گردید که میزان خطای ایجاد شده بین روش حاضر و مرجع [۹] در برخی موارد حتی تا نصف نیز کاهش پیدا کرده است. البته بایستی به این نکته توجه نمود که میزان خطاهای ایجاد شده بسیار ناچیز هستند. دلیل این موضوع آن است که در متد ارائه شده از هیچگونه میانیابی استفاده نگردیده است.

مراجع

- 1. Giaconda, A.L., and Fiddes, S.P. "A Three-Dimensional Moving Mesh Method for the Calculation of Unsteady Transonic Flows", Aeronautical Journal, Paper 2011, April 1995.
- 2. Lin, C.Q., and Pahlke, K. "Numerical Solution for Euler Equations for Airfoils in Arbitrary Unsteady Motion", Aeronautical Journal, June/July 1994, Paper 1922.
- 3. Batina, J.T. "Unsteady Euler Algorithm with Unstructured Dynamic Mesh for Complex Airfoil Aerodynamic Analysis", AIAA Paper 89-1189, 1989.
- Aerodynamic Analysis ", AIAA Paper 89-1189, 1989.
  4. Bayyuk, A.S., Powell, K.G., and Van Leer, B. "A Simulation Technique for 2-D Unsteady Inviscid Flows Around Arbitrary Moving and Deforming Bodies of Arbitrary Geometry", AIAA-933391-CP,1993.
- 5. Patel, A., Leonard, B., Delaunaye ,M., and Hirsch, C.H. "Unstructured Unsteady Adaptive Simulations for External Aerodynamics", ECCOMAS 2000, 11-14 September.

