

****

**عنوان:**

پیاده سازی کد AirFlow\_Inviscid\_ALE\_MinTimStp

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **توسعه دهندگان** | مرتضی نامور |  |
| سامان کاووسی |  |
| علیرضا رضایی |  |
| **تهیه کنندگان مستند** |  | |
| **تاییدکنندگان** | مرتضی نامور | |
| **تاریخ تنظیم سند** | 7/1/1397 | |
| **شناسه سند** | **MC5F001F1** | |
| **زبان برنامه‌نویسی** | **Fortran 90** | |

1. راهنمای کاربری

در این فصل فایل های ورودی و تنظیمات لازم جهت اجرا نمودن برنامه و خروجی های آن آورده می شود. همپچنین نرم افزارهای مورد استفاده برای اجرای برنامه آورده می شود. لازم بذکر است که برنامه حاضر بگونه ای نوشته شده است که کاربر تنظیمات لازم را تنها از طریق فایل های ورودی به برنامه معرفی نماید. اما در مواردی نیز برخی کارها همانند تغییر در ساختار کد باید درون کد انجام شود که در هنگام پیاده سازی این موارد گفته شده است.

* 1. نرم افزارهای مورد نیاز

این برنامه با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن تدوین و از کامپایلر *Intel Parallel Studio XE 2015* در محیط برنامه نویسی *Microsoft visual studio 2012*استفاده شده است. همچنین جهت پس پردازش اطلاعات و مشاهده فایل های خروجی از نرم افزار *Tecplot 360* استفاده گردیده است. بنابراین لازم است تمام این نرم افزارها نصب شده باشد تا امکان اجرای برنامه وجود داشته باشد.

جهت استفاده *بهتر* از مستندات سابروتین ها و کدها باید از نرم افزار *Mocrosoft Word 2007* استفاده شود و برای جلوگیری از بهم ریختگی روابط نرم افزار *Mathtype* باید نصب شده باشد. در اینجا لازم است توصیه اکید گردد که جهت استفاده از مستندات کدها باید *افزونه X* نصب شده باشد. جهت دانلود این افزونه و *نحوه کار با آن* توصیه می شود فیلم آموزشی مربوطه مشاهده شود.

* 1. تنظیمات لازم

توصیه می شود که تمام زیربرنامه ها را از سایت نرم افزار تهیه نمایید و جهت استفاده از کدها از فایل project تهیه شده استفاده کنید چرا که تمام تنظیمات لازم بر روی این project انجام شده است. تنها نکته قابل ذکر در اینجا مربوط به انتخاب بعد آرایه ها می باشد. از آنجا که سعی شده است برنامه به ساده ترین شکل نوشته شود، از بکار بردن دستورات مربوط به اختصاص حافظه[[1]](#footnote-1) بر طبق اطلاعات شبکه صرفنظر شده است. بنابراین در ابتدای برنامه یک پارامتر بنام Dim تعریف شده که مقدار حداکثر بعد آرایه های استفاده شده را تعیین می کند. بهتر است این مقدار برابر تعداد اضلاع یا فیس های شبکه باشد و حداکثر مقدار آن باید در حدی انتخاب شود که Stack برنامه اجازه می دهد.

* 1. فایل‌های ورودی

در این برنامه سعی شده است تمام ورودی های لازم از طریق فایل های ورودی به برنامه معرفی شود. دو فایل ورودی که حاوی مشخصات جریان آزاد و شبکه محاسباتی است، باید برای اجرای برنامه تهیه شده و در پوشه حاوی برنامه اصلی قرار داده شود. فایل حاوی شبکه محاسباتی بنام Mesh.gid می باشد که ساختار آن در مستندات زیربرنامه مربوط به خواندن شبکه بطور کامل گفته شده است. جهت تهیه فایل شبکه می توانید با استفاده از *نرم افزار ReadMshFile* فایل خروجی نرم افزارهای تولید شبکه را به فرمت مورد نیاز این برنامه تبدیل کنید. لازم است توجه شود که شرایط مرزی باید در فایل شبکه، توسط کاربر اعمال شود.

جهت اجرای برنامه لازم است تنظیماتی مطابق با نظر کاربر از طریق فایل ورودی به برنامه معرفی گردد. این تنظیمات (بترتیب) باید در یک فایل به نام Setting.txt تهیه شود. جزئیات کامل این فایل در مستندات زیربرنامه Read\_Setting آورده شده است.

بطور پیش فرض مقدار دهی اولیه بر اساس شرایط جریان آزاد انجام می شود. اما ممکن است کاربر بخواهد مقدار دهی اولیه را بر اساس نتایج قبلی انجام دهد. اینکار باعث می شود کاربر بتواند در هر زمانی اجرای برنامه را متوقف نموده و به انجام برخی اصلاحات بپردازد و سپس اجرای برنامه را مجددا پیگیری نماید. بنابراین در صورتیکه مقدار پارامتر مربوط به اینکار در فایل Setting.txt برابر صفر باشد مقدار دهی در خود برنامه و بر اساس جریان آزاد انجام می گیرد و در غیر اینصورت بر اساس نتایج موجود که در فایل ConservativeVariables.txt وجود دارد، انجام خواهد شد. توجه شود که در صورتیکه برای اولین بار یک مسئله حل می شود باید مقدار پارامتر اشاره شده برابر صفر باشد و در غیر اینصورت برنامه اجرا نخواهد شد.

* 1. فایل‌های خروجی

پس از اجرای برنامه فایل های خروجی Contours.Plt و CP.Plt که بترتیب شامل مقادیر بی بعد جریان در هر کدام از نقاط شبکه و مقدار ضریب فشار در نقاط روی مرز دیوار می باشد، چاپ خواهد شد. در این برنامه به ازای هر 100 گام زمانی یکبار این فایل ها چاپ خواهد شد که این مقدار می تواند بطور دلخواه توسط کاربر از طریق فایل setting.txt به برنامه معرفی شود. جهت مشاهده نمونه این فایل ها به بخش نتایج مراجعه شود. همچنین مقدار باقیمانده های معادله جرم در یک فایل بنام ResMass.Plt چاپ خواهد شد.

همانگونه که قبلا نیز اشاره شد، نتایج مربوط به حل یعنی مقادیر بقایی در فایل ConservativeVariables.txt چاپ خواهد شد تا در ادامه بتوان مقداردهی اولیه را از طریق این فایل انجام داد. برای اطلاعات بیشتر در مورد فایل های خروجی به مستندات زیربرنامه های مربوطه مراجعه نمایید.

* 1. زیربرنامه‌های مورد استفاده

برنامه حاضر بگونه ای تدوین شده است که تمام قسمت های آن بصورت زیربرنامه بوده تا فهم آن راحتتر باشد و بتوان در برنامه های مختلف از این زیربرنامه ها استفاده کرد. برای مثال براحتی می توان بجای روش AUSM از هر نوع دیگری از روش های گسسته سازی بخش جابجایی استفاده نمود.

1. پیاده سازی

در برنامه اصلی پس از تعریف پارامترها و آرایه­های لازم، موارد زیر بترتیب اجرا خواهد شد. لازم بذکر است که شماره گذاری زیر بر اساس شماره گذاری موجود در فایل فرترن برنامه می باشد.

1. خواندن فایل شبکه

شبکه محاسباتی در این کد در نرم افزار های تولید شبکه مانند گمبیت ،ICEM و...تولید می شود و سپس توسط یک کد اینترفیس به فرمت مورد نظر در این کد تبدیل می شود و بعنوان ورودی به این کد معرفی می شود. لازم است توجه شود که شرایط مرزی در این فایل (فایل مربوط به شبکه) باید اعمال گردد که در مستندات این زیربرنامه بطور مفصل به آن پرداخته شده است.

1. خواندن پارامترهای لازم برای حل معادلات

با توجه به الگوریتم حل اشاره شده، با فراخوانی این زیر برنامه اطلاعات لازم برای حل معادلات از کاربر گرفته و ذخیره می­شود.

1. خواندن موقعیت­های مورد نظر مرز متحرک برای چاپ نتایج

در تست­های آزمایشگاهی در موقعیت­های مشخصی توزیع فشار بر روی ایرفویل متحرک ثبت و در مقالات گزارش شده است، بنابراین برای مقایسه نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی نیاز است در همان موقعیت­ها نتایج توزیع فشار چاپ شود. همچنین اغلب جابجایی­های آیرودینامیک اجسام متحرک بصورت نوسانی می­باشند، بنابراین موقعیت­های مشخص شده برای چاپ نتایج بصورت زاویه فاز (بر حسب درجه بین 0 تا 360) و بترتیب صعودی در فایل ورودی Write\_Positions.txt ارائه شده است.

با فراخوانی زیربرنامه Read\_Write\_Positions فایل ورودی Write\_Positions.txt خوانده می­شود و شماره تست کیس (Test\_Case)، تعداد موقعیت­هایی که در یک نوسان باید چاپ شود (N\_Positions) و زاویه فاز موقعیت­ها بترتیب صعودی در آرایه phi\_Write به برنامه معرفی می­شود.

1. شماره گذاری مجدد اضلاع برای اعمال شرایط مرزی

با فراخوانی زیربرنامه MeshBC اضلاع غیر مرزی به ابتدای آرایه مربوط به ذخیره اطلاعات اضلاع تشکیل دهنده شبکه منتقل شده و همچنین سایر نواحی شبکه متناسب با شرایط مرزی مربوطه شماره گذاری مجدد می گردد.

1. تشخیص تعداد و شماره اضلاع تشکیل دهنده هر سلول

در اینجا تعداد و شماره اضلاع تشکیل دهنده هر سلول پیدا می شود تا در مراحل بعدی از این اطلاعات استفاده گردد.

1. پیدا کردن شماره نقاط تشکیل دهنده هر سلول

پس از تشخیص تعداد و شماره اضلاع تشکیل دهنده یک سلول نقاط تشکیل دهنده هر سلول پیدا می شود در در هنگام چاپ اطلاعات در فایل های tecplot از آنها استفاده گردد

1. مشخص کردن نقاط مرزی از نقاط غیر مرزی

در زیر برنامه BoundPointLabeling تعداد نقاط مرزی و شماره نقاط مرزی به ترتیب در متغیر NBP و آرایه IBP مشخص و ذخیره می­شوند.

1. محاسبه مساحت سلول ها و مختصات مرکز آنها

با فراخوانی زیربرنامه GeoCal2Dمساحت، بردارهای عمود با بعد، طول اضلاع و مختصات مرکز هر کدام از سلول های شبکه محاسبه شده و در آرایه های مربوطه ذخیره می­شود.

1. مقداردهی اولیه

در اینجا با فراخوانی زیربرنامه InitMeanFlow\_Inviscid برخی از آرایه ها و پارامترها که در ادامه مورد استفاه قرار خواهند گرفت، از جمله مقادیر بقایی مقداردهی می شود. باید بخاطر داشت در صورتیکه مقدار پارمتر init، که یکی از ورودی های این زیربرنامه می باشد، برابر 1 باشد، مقادیر بقایی با استفاده از فایل SolutionData.txt که در تکرارهای قبل ذخیره شده است، مقداردهی می شود.

1. محاسبه فشار

مقدار فشار طبق رابطه زیر برای هر کدام از سلول ها محاسبه می گردد.



1. مقداردهی اولیه به برخی پارامترها

به دلیل اینکه در ابتدای حل شبکه ساکن می­باشد، به آرایه­های شار اضلاع شبکه (GF) و سرعت اضلاع (Face\_Velocity) مقدار دهی اولیه صفر داده می­شود.

در اینجا از مقدار باقیمانده معادله جرم برای اطمینان از همگرایی استفاده شده است. بنابراین پروسه شبیه سازی جریان پایا تا زمانی ادامه می­یابد که مقدار باقیمانده معادله جرم از یک مقدار تعیین شده توسط کاربر بزرگتر باشد. در اینجا از یک مقدار دهی اولیه نسبتاً بزرگ مانند استفاده می­شود.

یک شمارنده به نام Ncyc وجود دارد که تعداد گام­های زمانی را شمارش می­کند که در اینجا لازم است مقدار اولیه صفر به آن اختصاص داده شود. متغیر زمان یعنی Real­\_Time مقدار اولیه صفر می­گیرد و زمان نهایی شبیه سازی نیز توسط متغیر Total\_Time مقدار دهی می­شود.

متغیری به نام Unsteady وجود داد که در اینجا مقدار اولیه صفر به آن اختصاص داده می­شود. با استفاده از این متغیر تا زمانی که Unsteady برار صفر باشد ابتدا حل جریان پایا و بدون حرکت مرز شبیه سازی می­شود، پس از همگرا شدن حل جریان پایا مقدار Unsteady به یک تغییر می­کند در این هنگام حل جریان ناپایا همراه با حرکت مرز آغاز می­شود.

برای دسترسی ترتیبی به موقعیت­های مورد نظر برای چاپ نتایج از شمارنده­ای به نام Position\_Num با مقدار اولیه یک استفاده می­شود.

1. تعیین شرایط مرزی

با فراخوانی زیربرنامه های مربوط به اعمال شرایط مرزی، مقادیر بقایی و همچنین فشار در میانه اضلاع مرزی تعیین و در آرایه مربوطه ذخیره می گردد. این کار قبل از شروع حلقه تکرار مربوط به گام زمانی انجام می گیرد تا مقادیر مربوط به شرایط مرزی مقداردهی اولیه شوند و همچنین از این مقادیر برای محاسبه گام زمانی در بخش های بعدی استفاده گردد. همانگونه که قبلا گفته شد تعیین شرایط مرزی در فایل شبکه توسط کاربر انجام می شود.

1. باز کردن فایل­هایی برای چاپ نتایج

فایل­هایی به نام cd.plt و CL\_Alpha.plt در این قسمت ایجاد و باز می شوند تا در طی اجرای برنامه نتایج ضریب درگ و ضریب لیفت در این فایل­ها چاپ شوند.

1. پیشروی در زمان در یک حلقه تکرار

تا زمانی که زمان شبیه سازی Real\_Time کمتر از زمان نهایی شبیه سازی Total\_Time باشد، اجرای برنامه ادامه می­یابد.

1. بروز رسانی تعداد گام زمانی طی شده

با شروع اجرای حلقه تکرار یک واحد به پارامتر نشاندهنده تعداد گام های زمانی اضافه می­گردد.

1. مقدار دهی به برخی آرایه­های بکار رفته در روش رانگ-کوتا

همانگونه که گفته شد در روش رانگ-کوتا از مقادیر گام زمانی قبل استفاده می­شود که لازم است قبل از شروع حلقه تکرار مربوط به روش رانگ-کوتا این مقادیر مقداردهی شوند. همچنین این مقادیر برای محاسبه باقیمانده معادله جرم یا هر معادله دیگری می­تواند بکار رود.

1. تعیین گام زمانی

با فراخوانی زیربرنامه TimSTP\_Inviscidگام زمانی پیشنهادی هر کدام از سلول­های شبکه محاسبه می­گردد. در اینجا از گام زمانی متغیر (محلی) (Local Time stepping) استفاده شده است به این معنی که هر سلول با گام زمانی مربوط به خود در زمان پیشروی خواهد کرد تا سرعت همگرایی جهت بدست آوردن حل پایدار افزایش یابد. همچنین برای شبیه سازی جریان ناپایا باید پس از اجرای این زیربرنامه کوچکترین گام زمانی را به عنوان گام زمانی تمام سلول­ها انتخاب نمود، این کار در حل قسمت ناپایای مرز متحرک مورد استفاده قرار می­گیرد.

1. مجموعه دستورات جریان ناپایای حرکت مرز و شبکه

پس از همگرا شدن حل جریان پایا مقدار پارامتر Unsteady به یک تغییر می­کند و در این هنگام مجموعه دستورات جریان ناپایای حرکت مرز و شبکه قابل اجرا می­شود.

1. محاسبه کوچکترین گام زمانی در حل جریان ناپایا

پس از همگرا شدن حل جریان پایا، حل جریان ناپایا همراه با حرکت مرز آغاز می­شود و چون در حل ناپایا از گام زمانی محلی نمی­توان استفاده کرد، بنابراین باید کوچکترین گام زمانی را به عنوان گام زمانی تمام سلول­ها در نظر گرفت.

1. بروز رسانی زمان شبیه سازی

زمان شبیه سازی با اضافه کردن مقدار گام زمانی در هر تکرار به متغیر Real\_Time پیش می­رود.

1. تعیین میزان جابجایی مرز دیواره

با استفاده از زیر برنامه Define­\_BoundPoint\_Displac با توجه به تست کیس مورد نظر میزان جابجایی نقاط مرزی (مانند حرکت نوسانی ایرفویل) در هر گام جابجایی تعیین می­شود.

1. حرکت شبکه با استفاده از الگوریتم RBF

در زیر برنامه RBF\_Moving\_Mesh با استفاده از الگوریتم RBF و جابجایی تعیین شده نقاط مرزی (مرحله قبل)، میزان جابجایی نقاط داخلی شبکه تعیین می­شود. به جای این الگوریتم می­توان از سایر الگوریتم­های moving mesh نیز استفاده کرد. الگوریتم RBF بخوبی می­تواند جابجایی­های بزرگ را انجام دهد اما زمان محاسبات نسبتا بالایی دارد.

1. ذخیره مختصات پیشین و جدید هر یک از نقاط شبکه

مختصات پیشین نقاط در آرایه­های و مختصات جدید نقاط در آرایه­های ذخیره می­شوند.

1. محاسبه شار و سرعت اضلاع شبکه

با استفاده از زیر برنامه GridFlux و مختصات پیشین و جدید هر یک از نقاط شبکه، شار اضلاع و سرعت اضلاع شبکه متحرک محاسبه می­شود.

1. محاسبه مجدد مشخصات هندسی سلول­های شبکه

به دلیل جابجایی نقاط شبکه باید مشخصات هندسی هر سلول مجدداً بروز رسانی شود. با فراخوانی زیربرنامه GeoCal2D مساحت و مختصات مرکز هر یک از سلول­های شبکه محاسبه و بترتیب در آرایه­های A و ذخیره می­شوند، همچنین طول هر یک از اضلاع و بردارهای بابعد عمود بر هر یک از اضلاع محاسبه و بترتیب در آرایه­های DA و ذخیره می­شوند.

1. بررسی شبکه نسبت به وجود سلول با حجم منفی

در اینجا مساحت سلول­های شبکه به منظور اطمینان از عدم ایجاد سلول با حجم منفی در طی جابجایی شبکه مورد بررسی قرار می­گیرد. در صورتی که حجم منفی پس از جابجایی شبکه مشاهده شود، اجرای برنامه متوقف خواهد شد.

1. حل معادلات در حلقه مربوط به روش رانگ-کوتا

در یک حلقه به تعداد مراحل رانگ-کوتا معادلات حل خواهند شد.

1. محاسبه ضرائب روش رانگ-کوتا

ضریب هر کدام از مراحل رانگ-کوتا محاسبه می­شود و در یک پارامتر محلی ذخیره می­گردد.

1. محاسبه بخش جابجایی در توصیف ALE

همانگونه که قبلاً اشاره شد، بخش جابجایی معادلات از دیدگاه ALE بصورت تفاضل مرکزی و با استفاده از روش جیمسون گسسته سازی شده است. البته می توان از زیر برنامه سایر روش­های گسسته سازی بخش جابجایی که دیدگاه ALE بر روی آن­ها پیاده سازی شده است نیز استفاده کرد.

1. محاسبه مقادیر بقایی و فشارتمام سلول­های شبکه

در یک حلقه تکرار بر روی تمام سلول­های شبکه مقادیر بقایی تمام سلول­های شبکه با توجه به روش گسسته سازی صریح رانگ کوتا محاسبه می­گردد. سپس مقدار فشار طبق رابطه ذکر شده در بخش (10) محاسبه می­گردد.

1. تعیین شرایط مرزی

با فراخوانی زیربرنامه های مربوط به اعمال شرط مرزی مقادیر بقایی و همچنین فشار در میانه اضلاع مرزی تعیین و در آرایه مربوطه ذخیره می­گردد تا در مراحل بعدی از آنها استفاده گردد.

1. چاپ نتایج در تکرارهای مشخص

در تکرارهای خاصی نتایج حل جریان در فایل­های مربوطه چاپ خواهد شد که این مقدار توسط کاربر تعیین و توسط فایل ورودی به برنامه معرفی می­شود. در این قسمت بترتیب دستورهای زیر اجرا می­شود:

با فراخوانی زیربرنامه ResMass مقدار باقیمانده معادله جرم محاسبه و چاپ می­گردد.

شماره گام زمانی، باقی مانده حل و زمان شبیه سازی در صفحه نمایش چاپ می­شود.

در صورتیکه مقدار باقی مانده محاسبه شده به کمتر از مقدار ERmx کاهش یابد، حل جریان پایا حاصل شده است و مقدار متغیر Unsteady به یک تغییر می­کند.

زاویه حمله ایرفویل با جریان در طی انجام جابجایی بر روی صفحه نمایش چاپ می­شود.

1. محاسبه و چاپ ضریب درگ و لیفت

در هر یک از تست کیس­ها ضریب لیفت و درگ بر اساس یکی از موارد مانند: زاویه حمله، ارتفاع نوسان، زمان، و ... ارئه می­شوند، بنابراین در ابتدا باتوجه به نوع تست کیس و نتایجی که در مقاله مرجع هر یک از تست کیس­ها ارائه شده است محور افقی مناسب انتخاب می­شود، سپس زیر برنامه محاسبه ضریب لیفت و درگ فراخوانی و پس از محاسبه در فایل­های مربوطه چاپ می­شوند.

1. چاپ نتایج در موقعیت های مشخص از جابجایی مرز

بدلیل اینکه اغلب جابجایی­های آیرودینامیک اجسام متحرک بصورت نوسانی می­باشند، موقعیت­های مشخص شده برای چاپ نتایج بصورت زاویه فاز (بر حسب درجه بین 0 تا 360) و بترتیب صعودی در فایل ورودی Write\_Positions.txt ارائه شده است. این قسمت بترتیب شامل دستورهای زیر می باشد:

با استفاده از شمارنده موقعیت­ها (Position\_Num) مقدار آرایه phi\_Write را در متغیر محلی phiWrite ذخیره می­شود.

با ضرب زمان در فرکانس نوسان (ایرفویل)، زاویه فاز لحظه­ای بر حسب درجه (phi) محاسبه می­شود.

بدلیل اینکه در فایل ورودی زاویه فاز یک نوسان برای چاپ نتایج ارائه شده است ولی در شبیه سازی برای اطمینان از همگرا شدن حل حداقل 3 نوسان نیاز است انجام شود، بنابراین از باقیمانده تقسیم زاویه فاز لحظه­ای بر عدد 360 استفاده می­شود و در متغیر phi1 ذخیره می­شود.

زمانی که مقدار متغیر phi1 به مقدار کافی به موقعیت phiwrite نزدیک شود، عمل چاپ نتایج با فراخوانی زیر برنامه write\_ResultsV1 انجام می­شود. همچنین به مقدار شمارنده Position\_Num یکی اضافه می­شود تا موقعیت بعدی را برای چاپ مورد بررسی قرار دهد. هنگامی که تعداد کل موقعیت­های مورد نظر یک نوسان برای چاپ به پایان برسد مجدداً مقدار شمارنده Position\_Num به یک تغییر می­کند تا نتایج نوسان­های بعدی نیز به چاپ برسند.

1. Allocation [↑](#footnote-ref-1)