به نام خدا

نرم افزار تحلیل جریان آرام
مبتنی بر معادلات ناویر–استوکس دوبعدی تراکم پذیر ناپایا
در جریان داخلی بر روی شبکه سازمان یافته

نسخه ۱/۱

تهیه‌کننده مستند:	جواد طهماسبی، کارشناسی ارشد هوافضا	
	فرهاد قدک، گروه مهندسی هوافضا، دانشیار	
تبدیل کننده کد: (از به)	ملیکه حیدری	
تاریخ تنظیم:	۱۳۹۳/۰۵/۲۶	

Market Code

فهرست مطالب

۱- چکیده ۱
۲- راهنمای کاربری ۲
نمونه اجرا ۴
۳- مستندات آموزشی ۱۰
متن اصلی Main ۱۰
سابروتین Grid ۱۲
سابروتین STRCH ۱۵
سابروتین BoundaryStretching ۱۶
سابروتین Spline ۱۷
سابروتین Initial ۱۸
سابروتین BC ۱۹
سابروتین Areas ۲۱
سابروتین DeltaTime ۲۲
سابروتین AUSM ۲۴
AUSM: Part_۱ ..... ۲۴
AUSM: Part_۲ ..... ۲۷
AUSM: Part_۳ ..... ۲۷
سابروتین Viscous_RHS ۳۰
Viscous_RHS: Part_۱ ..... ۳۱
Viscous_RHS: Part_۲ ..... ۳۳
Viscous_RHS: Part_۳ ..... ۳۵
سابروتین Output ۳۸
output: Part_۱ ..... ۳۸
output: Part_۲ ..... ۳۸
output: Part_۳ ..... ۳۸
output: Part_۴ ..... ۳۹
output: Part_۵ ..... ۳۹
output: Part_۶ ..... ۳۹
مراجع ۴۰

Market Code

۱- چکیده

آنچه در این برنامه ارایه گردیده است حل معادلات اویلر (ناویر-استوکس) دو بعدی تراکم‌پذیر ناپایا می‌باشد. نوع روش عددی در این برنامه، روش حجم محدود است. برای محاسبه مقادیر فلاکس نیز از روش $AUSM^+$ با دقت مرتبه یک بهره گرفته شده است. معادلات به صورت صریح حل شده است. این برنامه برای جریان‌های داخلی مورد استفاده قرار گرفته و شبکه‌ی تولید شده نیز از نوع شبکه‌ی باسازمان می‌باشد. به دلیل عملکرد خوب روش $AUSM^+$ در سرعت‌های پایین، این نرم‌افزار قابلیت آشکار سازی لایه‌مرزی سرعت در نزدیکی دیواره‌ها را در حد بالایی دارا می‌باشد. همچنین با توجه به استفاده از روش صریح، سرعت بالا از دیگر ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌باشد.

کلمات کلیدی: معادلات ناویر-استوکس دوبعدی، جریان داخلی، حجم محدود، $AUSM^+$، روش صریح

Market Code

۲- راهنمای کاربری

این نرم افزار توسط مهندس جواد طهماسبی و دکتر فرهاد قدک نگارش شده است. نسخه حاضر Version:۱.۰ می‌باشد جهت اجرای برنامه لازم است تا برخی تنظیمات اولیه برای نرم‌افزار انجام گیرد. لذا در این بخش به طور خلاصه به این موارد اشاره خواهد شد. لازم به ذکر است این قسمت مخصوص کاربرانی است که فقط می‌خواهند نرم‌افزار را اجرا نموده و استفاده نمایند. لذا هیچ اشاره‌ای به محتوای برنامه اعم از سابروتین‌ها و روش حل نشده است.

نرم‌افزار به گونه‌ای طراحی شده است که کاربر می‌تواند کلیه تنظیمات را در متن اصلی برنامه (Main Program) انجام دهد. این بخش با Input Section در برنامه مشخص شده است. در ابتدای این بخش (Physical value) مقادیر فیزیکی تعیین می‌گردد. این مقادیر در جدول۲-۱ تعریف شده است.

جدول۲-۱: تعریف متغیرهای فیزیکی ورودی به برنامه

متغیر داخل برنامه	تعریف متغیر	واحد
T۰	دمای سکون ورودی	K
Gama	نسبت ثابت گازها γ	-
Miyou	ضریب لزجت μ	Kg/(m sec)
MachEntrance	ماخ ورودی سیال	-
Pentrance	فشار استاتیک جریان ورودی	N/m^2
Pback	فشار پشت (دهانه خروجی) مجرا	N/m^2
Tstatic	دمای استاتیک جریان ورودی - روابط ترمودینامیکی	K
RhoEntrance	چگالی جریان ورودی یا - روابط ترمودینامیکی	Kg/m^3

لازم به توضیح است در صورتی که ضریب لزجت صفر باشد قسمت مربوط به معادلات ناویر-استوکس اجرا نشده و سیال به صورت غیرلزج (معادلات اویلر) تحلیل می‌شود.

در بخش بعدی (Geometry Value) مقادیر مربوط به هندسه و تولید شبکه مطابق جدول۲-۲ تنظیم می‌گردد. دقت شود که Nx و Ny در ابتدای برنامه تعیین می‌شود. نام فایل ورودی و پسوند آن نیز بایستی به زبان لاتین و حداکثر ۳۰ حرف بوده و داخل " " باشد. پارامتر XDense محل فشردگی به صورت درصدی از طول میدان در جهت i بوده و در غالب عددی بین صفر و یک می‌باشد. متغیرهای DsDense، DsDown و DsUp معرف نرخ فشردگی می‌باشد. بازه این متغیرها بزرگ‌تر از صفر و

Market Code

کوچک‌تر مساوی یک می‌باشد. در صورت تنظیم عدد صفر خطا رخ داده و در صورت تنظیم عدد یک شبکه بدون فشردگی خواهد بود.

جدول۲-۲: تعریف متغیرهای هندسی ورودی به برنامه

متغیر داخل برنامه	تعریف متغیر	واحد
Nx	تعداد سلول‌ها در جهت X	عدد طبیعی
Ny	تعداد سلول‌ها در جهت محور Y	عدد طبیعی
FileName	نام فایل هندسه ورودی به برنامه	حداکثر ۳۰ حرف
N_inputFile	تعداد نقاط موجود در فایل هندسه ورودی	عدد طبیعی
XDense	محل فشردگی شبکه در جهت i	۰≤ عدد ≤۱
DsDense	نرخ فشردگی شبکه در جهت i	۰< عدد ≤۱
DsDown	نرخ فشردگی شبکه در نزدیک دیواره پایین (درجهت j)	۰< عدد ≤۱
DsUp	نرخ فشردگی شبکه در نزدیک دیواره بالا (درجهت j)	۰< عدد ≤۱

در قسمت بعدی (Convergence Value) پارامترهای مربوط به فرآیند همگرایی برنامه و تعداد تکرار محاسبات طبق جدول۲-۳ تعیین می‌گردد. در برنامه دو شرط برای توقف در نظر گرفته شده است. اگر لگاریتم باقیمانده (Residual) محاسبه شده از پارامتر Eps کوچک‌تر شود برنامه متوقف می‌شود. همچنین اگر تعداد تکرار حلقه محاسبات اصلی از Ncycle بزرگ‌تر شود، برنامه متوقف می‌شود. متغیر CFL نیز پارامتری جهت کنترل بر روی گام زمانی (Time-Step) می‌باشد.

جدول۲-۳: تعریف متغیرهای مربوط به همگرایی برنامه

متغیر داخل برنامه	تعریف متغیر	واحد
Ncycle	حداکثر تکرار محاسبات	عدد طبیعی
CFL	Courant number	عدد حقیقی مثبت
Eps	لگاریتم باقیمانده مورد نیاز جهت توقف حل	عدد حقیقی

به منظور مشاهده تعداد تکرار، لگاریتم باقیمانده(Residual) و زمان سپری شده در صفحه اجرای برنامه بایستی متغیر NScreen تعیین گردد. بدین ترتیب به صورت متناوب در تعداد تکرار مشخص شده مقادیر فوق چاپ خواهد.

MarketCode

در صورتی که تمامی موارد فوق به صورت صحیح تنظیم شده باشد اکنون برنامه آماده اجرا می‌باشد. **با توجه به اینکه برنامه دارای ماژول می‌باشد برای اجرا همه فایل‌ها را همزمان باز نموده و سپس بایستی ماژول‌ها کامپایل شود. در نهایت فایل اصلی(شماره یک) را کامپایل کرده و سپس می‌توان کد را اجرا نمود.** پس از اجرا و همگرایی برنامه چندین فایل خروجی تشکیل می‌گردد. این فایل‌ها شامل نرخ و زمان همگرایی، هندسه و پارامترهای فیزیکی، تغیرات فشار و ماخ جریان بر روی دیواره‌ها و پروفیل سرعت در چندین مقطع سیال خواهد بود که در نمونه اجرا نمایش داده خواهد شد.

نمونه اجرا

در این بخش به منظور تمرین عملی موارد بالا به یک مثال اشاره می‌شود. این نمونه شامل یک نازل مافوق صوت همراه با شوک می‌باشد. مقادیر ورودی به صورت زیر وارد می‌گردد. مرزهای میدان توسط فایل ورودی وارد برنامه می‌گردد و شبکه ۴۰*۶۰ می‌باشد.

```
Nx=۶۰,Ny=۴۰
!                Physical value
T۰ = ۲۱۲.۵۷
Gama  = ۱.۴
!Miyou = ۰
Miyou = ۱.۷۷۷D-۵
MachEntrance =۱.۰۵
Pentrance = ۵D۴
Pback = ۷D۴
Tstatic =T۰/(۱+(Gama-۱)/۲*MachEntrance**۲)      =۱۷۴.۲
RhoEntrance  = Pentrance/۲۸۷.۰۵/Tstatic          =۱
```

دقت شود به منظور ایجاد شوک بایستی فشار خروجی از ورود بیشتر باشد.

```
!                Geometry Value
FileName="SuperSonicNozzle۱.plt"
N_inputFile = ۶۶
XDense = ۰.۵۲
DsDense= ۰.۱
```

Market Code

DsDown = ۰.۱

DsUp = DsDown

نام فایل ورودی هندسه (شکل ۲-۱) اشاره شده در بالا بایستی در دایرکتوری نرم‌افزار با همان نام موجود باشد. XDense (با چندین با اجرا) در محل شوک برابر با ۰.۵۲ و با نرخ فشردگی ۰.۱ تنظیم شده است. نرخ فشردگی شبکه در نزدیکی دیواره بالا و پایین نیز ۰.۱ می‌باشد.

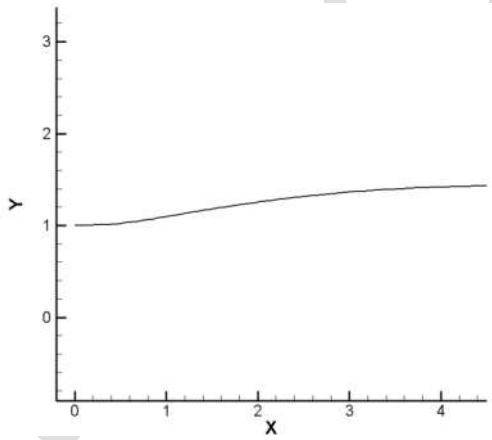
! Convergence Value

Ncycle=۱۰۰۰۰۰۰

CFL = ۰.۵

Eps = -۸

به علت ایجاد شوک و ناپایداری حل مقدار CFL=۰.۵ تنظیم شده است. همچنین شرط همگرایی ۸ مرتبه می‌باشد.



شکل ۲-۱: هندسه ورودی به برنامه

پس از اجرای برنامه مقادیر اشاره شده در بالا در هر ۱۰۰ تکرار به صورت شکل ۲-۲ چاپ می‌شود.

Ma...Code

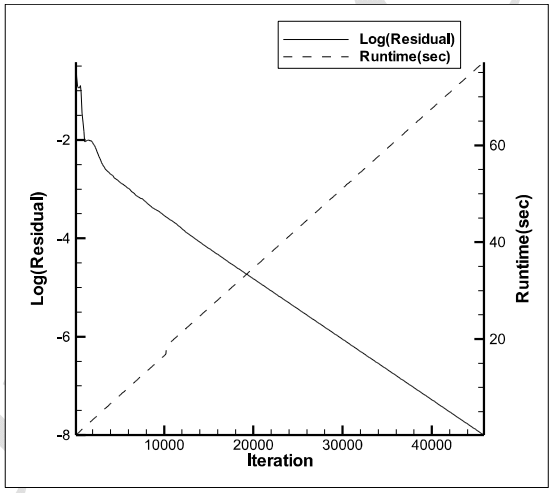
```
Nx=          60      Ny=          40

Log(Residual)             Iteration  Elapsed Time (sec)

-0.316604120656208             100  0.1880000
-0.706788156997650             200  0.3600000
-0.914551628258536             300  0.5470000
-0.934590914918813             400  0.7190000
-0.938481114708780             500  0.9070000
-0.893957762671849             600   1.094000
-0.955103664199189             700   1.266000
 -1.19659568547487             800   1.453000
 -1.59583403826684             900   1.625000
 -1.86105266968893            1000   1.813000
 -1.87734781305729            1100   2.000000
 -1.85379453357988            1200   2.172000
 -1.83518016657382            1300   2.360000
 -1.82882189938446            1400   2.532000
 -1.82597612176297            1500   2.719000
 -1.83142416626608            1600   2.891000
 -1.83923220240310            1700   3.078000
 -1.84135578560640            1800   3.250000
 -1.84928664039055            1900   3.438000
 -1.86971464643209            2000   3.610000
 -1.87990994366977            2100   3.797000
 -1.90011779574381            2200   3.969000
 -1.92860549897492            2300   4.157000
 -1.94883544053109            2400   4.328000
 -1.98314486222430            2500   4.516000
 -2.00823704529897            2600   4.703000
 -2.04576957824356            2700   4.875000
 -2.07569744031853            2800   5.063000
 -2.10768178157758            2900   5.250000
```

شکل ۲-۲: چاپ مقادیر در حین اجرای برنامه

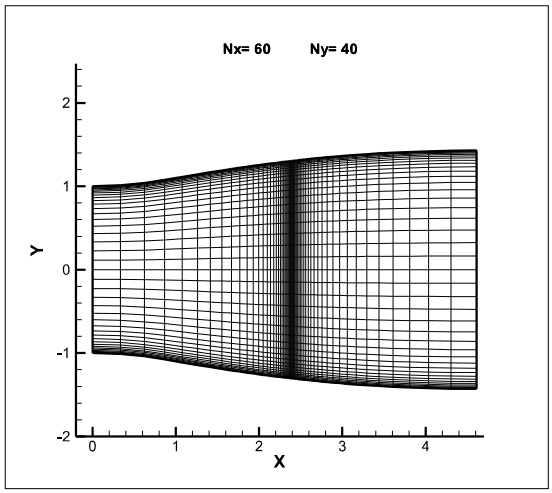
پس از همگرایی و اتمام فرآیند حل نتایج به دست آمده در چند فایل ایجاد می‌گردد. فایل "۱_Itration_Res" حاوی اطلاعات مربوط به نرخ همگرایی و زمان حل بر حسب تعداد تکرار می‌باشد. نمودار فایل اشاره شده برای مثال مذکور در شکل ۲-۳ آمده است.



شکل ۲-۳: نمودار نرخ همگرایی و زمان حل بر حسب تعداد تکرار

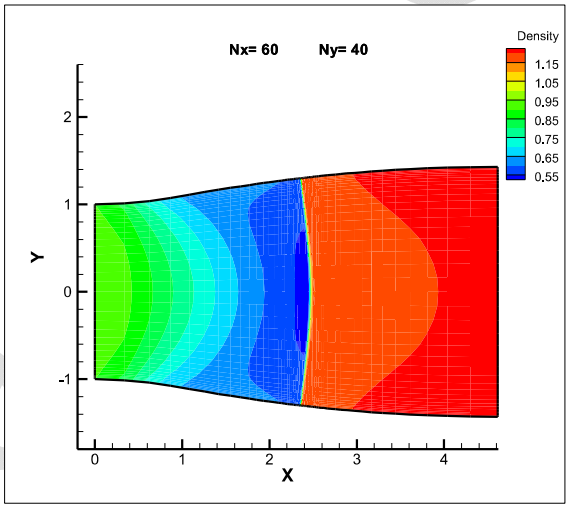
فایل "۲_Geometry" شامل هندسه و شبکه تولید شده می‌باشد. در شکل ۲-۴ میدان حل به همراه شبکه تولید شده نمایش داده شده است. فشردگی شبکه در داخل میدان (محل شوک) و نزدیکی دیواره‌ها مشاهده می‌شود.

Ma Code



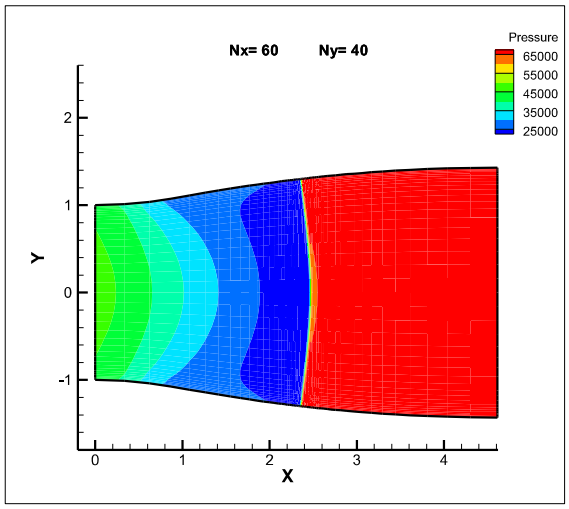
شکل ۲-۴: هندسه و شبکه تولید شده

در فایل "۳_Contour" علاوه بر هندسه مقادیر فیزیکی کل میدان شامل چگالی، سرعت مؤلفه x و y ، انرژی، فشار استاتیک، سرعت و ماخ با فرمت حجم محدود چاپ می‌شود. در شکل‌های زیر توزیع چند پارامتر فیزیکی در میدان نمایش داده می‌شود.

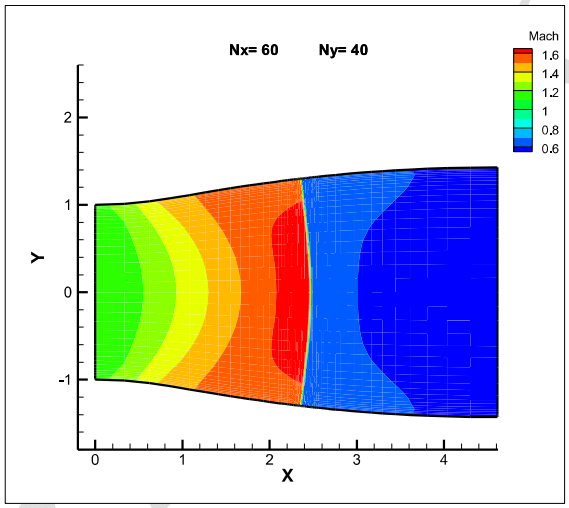


شکل ۲-۵: توزیع چگالی بر روی نازل مافوق صوت همراه با شوک

Ma Code



شکل ۲-۶: توزیع فشار بر روی نازل مافوق صوت همراه با شوک



شکل ۲-۷: توزیع ماخ بر روی نازل مافوق صوت همراه با شوک

داده‌های مربوط به تغییرات فشار بر روی دیواره‌های بالا و پایین و خط مرکز نازل در فایل "۴_Wall_Pressure" ذخیره می‌گردد. نمودار مربوط به این فایل خروجی را نمایش می‌دهد.

Ma code