

****

**عنوان:**

اعتبارسنجی کد مدل توربولانسی Prantl

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **نویسندگان** | مرتضی نامور |  |
| **تاریخ تنظیم سند** | 7/1/1397 | |
| **شناسه سند** | **MC5F001F1** | |

**فهرست مطالب**

[فصل 1- مشخصات کد، شبکه های استفاده شده و آزمایشات 1](#_Toc510806611)

[فصل 2- جزئیات دقیق هندسه های مورد استفاده جهت اعتبارسنجی کد 5](#_Toc510806612)

[فصل 3- نتایج آزمایش های انجام شده جهت اعتبار سنجی کد حاضر 11](#_Toc510806613)

# مشخصات کد، شبکه های استفاده شده و آزمایشات

بحث و بررسی پیرامون هر روش بدون شک به اعمال آن بر روی نمونه های مختلف و برای شرایط متفاوت و ارائه نتایج حاصله از آن بستگی دارد. در مورد روش های عددی سعی می شود نتایج برای نمونه مسائلی ارائه گردد که بصورت تجربی یا تئوری نتایج آنها موجود باشد تا بتوان در مورد عملکرد صحیح آن روش اظهار نظر کرد. بر این اساس آزمایشات مختلفی در نظر گرفته شده است تا علاوه بر اعتبار سنجی کدهای تدوین شده بتوان در مورد دقت و کارآمدی هر کدام و مقایسه آنها بحث و بررسی نمود. همچنین تعدادی شبکه محاسباتی تولید شده است که تا جای ممکن سعی می شود برای هر کدام از آزمایشات عددی تنها از این شبکه ها استفاده شود تا هنگام مقایسه روش های مختلف با دقت بیشتری بتوان نتیجه گیری نمود. لازم به ذکر است جزئیات دقیق آزمایشات و شبکه های محاسباتی مورد استفاده در جداول (2) و (3) آورده شده اند. همچنین جهت دسترسی به شبکه ها و اطلاعات دادهای مورد استفاده می توان به سایت مربوط به مجموعه کدهای حاضر مراجعه نمود. در پایان لازم است توجه شود کد مربوط به نتایج حاضر داری مشخصات ارائه شده در جدول (1) می باشد.

1. مشخصات کد

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ردیف** | **مشخصات کد پیاده سازی شده** | |
| **1** | **بعد شبکه** | **دوبعدی** |
| **2** | **نوع شبکه** | **بی سازمان** |
| **3** | **ساختار داده ای شبکه** | **ضلع محور** |
| **4** | **روش حجم محدود** | **سلول مرکز** |
| **5** | **الگوریتم حل** | **چگالی محور** |
| **6** | **نوع معادلات** | **مغشوش (RANS)** |
| **7** | **گسسته سازی بخش زمانی** | **صریح** |
| **8** | **گسسته سازی بخش جابجایی** | **AUSM، استهلاک مصنوعی جیمسون** |
| **9** | **نحوه محاسبه مشتقات** | **روش سلول مجازی** |
| **10** | **مدل توربولانسی** | **مدل جبری پرنتل** |

1. آزمایشات انجام شده برای اعتبارسنجی کد حاضر

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **شماره آزمایش** | **ماخ** | **رینولدز** | **زاویه حمله** | **نقطه گذار** | **هندسه** | **شبکه مورد استفاده** | |
| 2T1 | 0.3 | 1.0e6 | 0.0 | ندارد | Flat Plate | 2V013 | شبکه چهارضلعی |
| 2T2 | 0.3 | 1.85e6 | 0.0 | ندارد | NACA0012 | 2V009 | شبکه بی سازمان+لایه مرزی |
| 2V008 | شبکه چهارضلعی |
| 2T3 | 0.7 | 9.0e6 | 1.49 | ندارد | NACA0012 | 2V009 |  |
| 2T4 | 0.16 | 2.88e6 | 6.0 | ندارد | NACA0012 | 2V009 |  |
| 2T5 | 0.16 | 2.88e6 | 12.0 | ندارد | NACA0012 | 2V009 |  |
| 2T9 | 0.729 | 6.5e6 | 2.31 | ندارد | RAE2822 | 2V015 |  |
| 2V016 | در محل شوک ریز شده |
| 2T12 | 0.3 | 1.86e6 | 4.04 | ندارد | NACA0012 | 2V009 |  |

1. شبکه های مورد استفاده

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **شماره شبکه** | **عنوان هندسه** | **نوع سلول ها** | **تعداد سلول ها** | **تعداد نقاط** | **تعداد نقاط روی دیوار** | **تعداد نقاط روی مرز دوردست** | **فاصله اولین گره از دیوار** |
| 2V008 | NACA0012 | چهارضلعی | 50400 | 50760 | 360 | 360 | 3\*10e-6 |
| 2V009 | NACA0012 | مرکب | 29869 | 23563 | 424 | 40 | 5\*10e-6 |
| 2V013 | Flat Plate | چهارضلعی | 16500 | 16761 | 110 | 410 | 1\*10e-6 |
| 2V014 | Flat Plate | مثلثی | 33000 | 16761 | 110 | 410 | 1\*10e-6 |
| 2V015 | RAE2822 | مرکب | 29507 | 23348 | 421 | 40 | 1\*10e-6 |
| 2V016 | RAE2822 | مرکب | 37774 | 27694 | 438 | 40 | 1\*10e-6 |

# جزئیات دقیق هندسه های مورد استفاده جهت اعتبارسنجی کد

## 2V008

این شبکه باسازمان می باشد اما ساختار داده ای آن بصورت بی سازمان ذخیره شده است. هرچند که در برخی از نواحی نزدیک دیوار شبکه بر مرز عمود نمی باشد اما می توان با حل جریان بر روی این شبکه مقایسه ای بین شبکه باسازمان و شبکه ای که تنها در نواحی لایه مرزی باسازمان است، انجام داد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دورشبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |
|  |  |
| 1. نمای نزدیک لبه فرار | 1. نمای نزدیک لبه حمله |

## 2V009

با توجه به شکل ناحیه دنباله این شبکه برای زوایای حمله کوچک (بین -3 تا 3 درجه) مناسب تر می باشد هرچند می توان از آن برای زوایای حمله بالاتر نیز استفاده نمود.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای نزدیک شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای نزدیک لبه فرار | 1. نمای نزدیک لبه حمله |

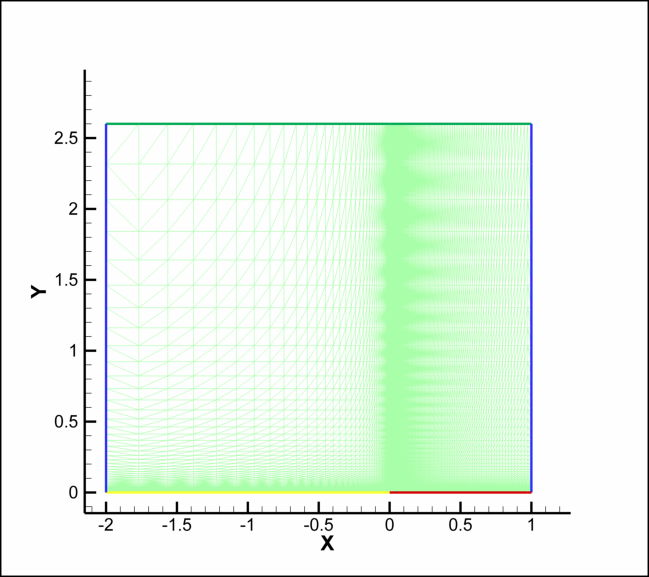
## 2V013

برای این شبکه شرایط مرزی مختلفی باید تعریف شود که به این منظور هر کدام از مرزها بطور جداگانه تعریف شده است (هر کدام از منحنی های مرزی توسط رنگ خاصی نشان داده شده است). همچنین توزیع نقاط بر روی صفحه تخت و بر روی مرز متقارن که بلافاصله بعد از صفحه تخت شروع می شود متناسب با فیزیک جریان در نظر گرفته شده است. از آنجا که این شبکه را می توان یک شبکه باسازمان در نظر گرفت که تنها ساختار داده ای آن بی سازمان است، خطای عددی کمی در هنگام حل جریان بر روی آن بوجود می آید.

|  |
| --- |
|  |
| 1. شبکه مناسب برای تحلیل جریان مغشوش بر روی صفحه تخت |

## 2V014

تفاوت این شبکه با شبکه 2V013 در اینست که تمام المان های این شبکه مثلثی می باشد. برای این شبکه شرایط مرزی مختلفی باید تعریف شود که به این منظور هر کدام از مرزها بطور جداگانه تعریف شده است (هر کدام از منحنی های مرزی توسط رنگ خاصی نشان داده شده است). همچنین توزیع نقاط بر روی صفحه تخت و بر روی مرز متقارن که بلافاصله بعد از صفحه تخت شروع می شود متناسب با فیزیک جریان در نظر گرفته شده است. از آنجا که این شبکه را می توان یک شبکه باسازمان در نظر گرفت که تنها ساختار داده ای آن بی سازمان است، خطای عددی کمی در هنگام حل جریان بر روی آن بوجود می آید.



1. شبکه مثلثی مناسب برای تحلیل جریان مغشوش بر روی صفحه تخت

## 2V015

این شبکه برای جریانی مناسب است که در آن هیچ شوکی وجود ندارد اما می توان برای سایر جریان هایی که در آنها شوک وجود دارد نیز مورد استفاده قرار گیرد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور شبکه | 1. نمای دور شبکه |
|  |  |
| 1. نمای نزدیک لبه فرار | 1. نمای نزدیک لبه حمله |

## 2V016

همانگونه که در شکل مشخص است، در x/c=0.55 و در سطح بالایی ایرفویل شبکه ریزتر شده است. با این دلیل این شبکه برای جریانی مناسب است که در این ناحیه شوک وجود دارد.

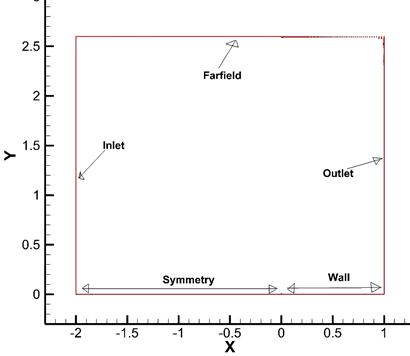
|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |
|  |  |
| 1. نمای نزدیک لبه فرار | 1. نمای نزدیک لبه فرار |

# نتایج آزمایش های انجام شده جهت اعتبار سنجی کد حاضر

در اینجا علاوه بر اعتبارسنجی مدل توربولانسی پرنتل، به تاثیر نحوه گسسته سازی بخش جابجایی بر دقت نتایج نیز پرداخته شده است. برای اینکار روش بالادستی AUSM و روش مرکزی جیمسون بکار برده شده است. در هر کدام از آزمایشات کانتور های فشار، خطوط جریان و مقدار لزجت توربولانسی بی بعد شده آورده شده است.

## آزمایش شماره 2T1

جریان آشفته روی صفحه تخت یکی از معروف­ترین مسائل جهت اعتبارسنجی کدهای آشفتگی می­باشد. برای این مسئله، هم نتایج عددی فراوانی موجود است و هم مسئله دارای حل تحلیلی می­باشد.همانگونه که مشخص است در این مسئله، انواع مرزها وجود دارند و بنابراین مسئله­ای مناسب برای اعتبارسنجی کد نوشته شده می­باشد. شرایط مرزی مناسب جهت شبیه سازی این جریان در ‏شکل (19) نشان داده شده است.

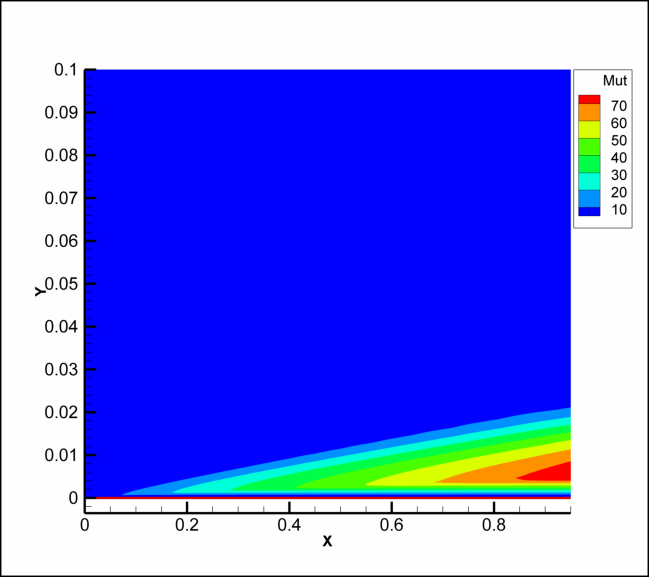


1. انواع شرایط مرزی جهت شبیه سازی جریان روی صفحه تخت

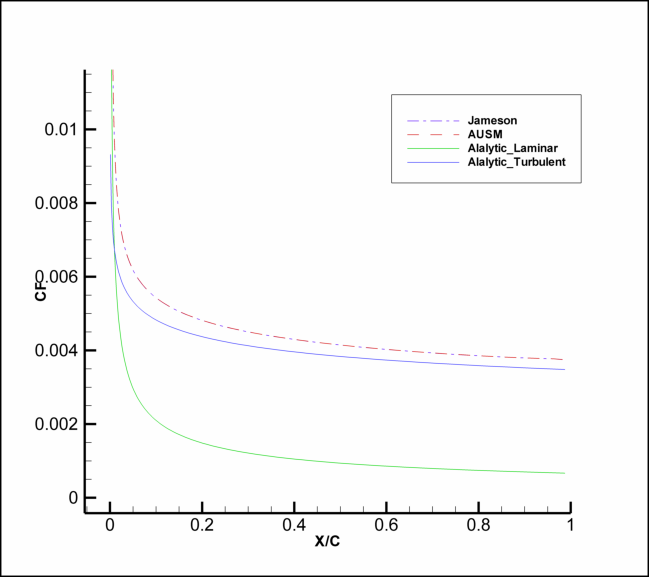
در این مسئله، جریان از ورودی با عدد رینولدز  و عدد ماخ  وارد می­شود، سپس به صفحه تخت برخورد می­کند و یک لایه مرزی آشفته روی صفحه تخت ایجاد می­شود و درنهایت از مرز خروجی، خارج می­شود. نتایج حاصل از کد نوشته شده، با نتیجه تحلیلی ارائه شده برای توزیع ضریب اصطکاک روی صفحه تخت که بصورت زیر می باشد، مقایسه شده است.

1. 

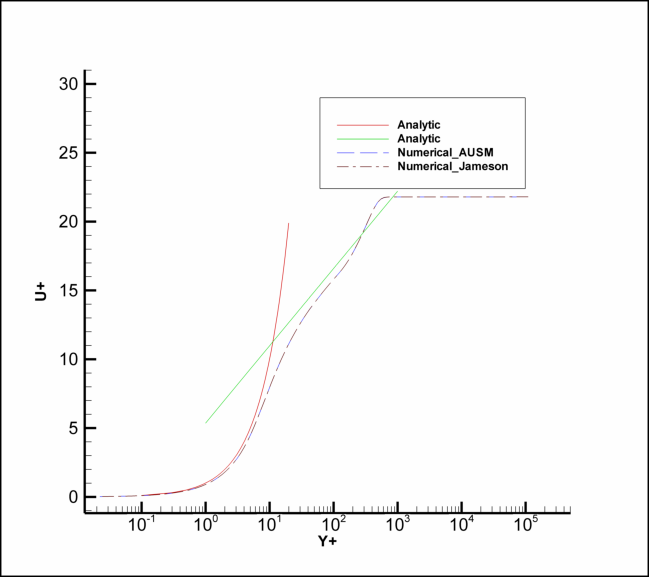
‏شکل (20) ، کانتور لزجت آشفتگی در نزدیکی صفحه تخت را با استفاده از کد حاضر نشان می­دهد. مقایسه توزیع ضریب اصطکاک و پروفایل سرعت بی بعد شده روی صفحه تخت در مقایسه با حل تحلیلی در ‏شکل (21) آورده شده است. در اینجا جهت بررسی دقت گسسته سازی بخش جابجایی معادلات و تاثیر آن بر نتایج از روش AUSM و استهلاک مصنوعی جیمسون استفاده شده است. همانگونه که در ‏شکل (21) و ‏شکل (22) مشخص است نتایج تفاوت چندانی با هم ندارند ولی همانگونه که در ادامه خواهیم دید برای جریان های پیچیدتر نوع گسسته سازی و در نتیجه دقت حل عددی تاثیر چشمگیری بر روی نتایج خواهد داشت. از این نظر می توان صفحه تخت را یکی از بهترین نمونه ها برای اعتبازسنجی و تدوین کدهای توربولانسی دینامیک سیالات محاسباتی دانست چرا که فارغ از نوع دقت گسسته سازی می توان به تحلیل و بررسی مدل های توربولانسی پرداخت. البته باید در نظر داشت که برای مدل های توربولانسی دقیق تر دقت گسسته سازی بر نتایج تاثیرگذار خواهد بود اما نمای کلی نتایج که نشان دهنده صحت پیاده سازی مدل توربولانسی می باشد را می توان از مدل های ساده گسته سازی نیز اثبات کرد.



1. کانتور لزجت توربولانسی (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106و زاویه حمله 0.0 درجه)



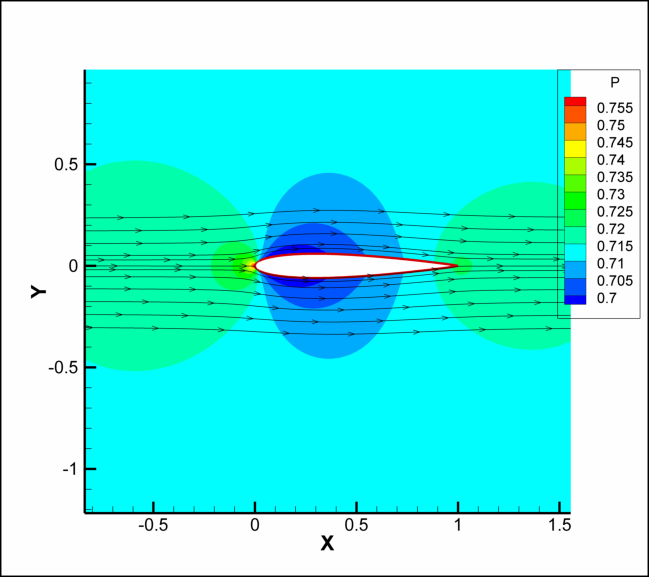
1. نمودار ضریب اصطکاک (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106و زاویه حمله 0.0 درجه)



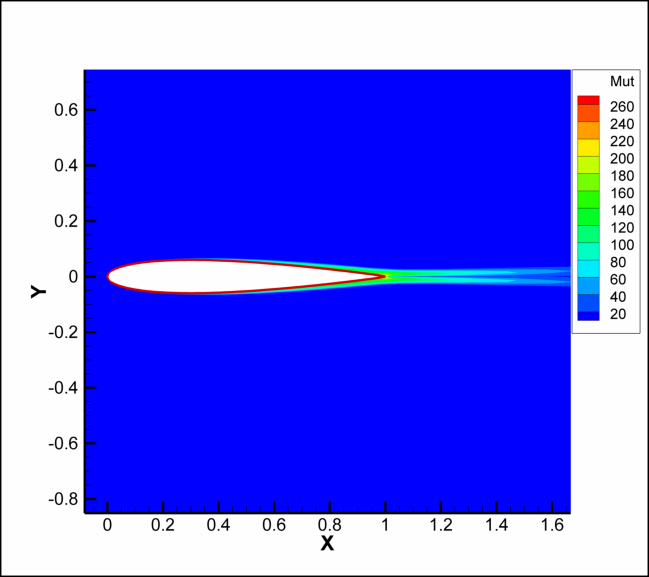
1. پروفایل سرعت بی بعد (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2T2

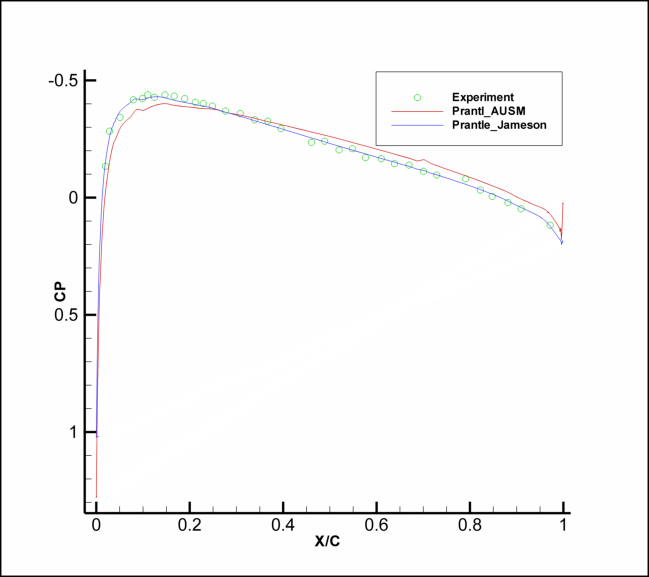
این آزمایش بدلیل زاویه حمله صفر درجه می تواند مقیاس خوبی برای اعتبارسنجی کد حاضر باشد. کانتور فشار و لزجت توربولانسی در ‏شکل (23) و ‏شکل (24) نشان داده شده است که بطور کیفی مشخص می شود که میزان لزجت توربولانسی در نزدیکی دیوار و در ناحیه دنباله بدرستی محاسبه شده است. در این آزمایش ابتدا از دو روش گسسته سازی بخش جابجایی یعنی روش AUSM و استهلاک مصنوعی جیمسون استفاده شده است. همانطور که از نمودار ضریب فشار و ضریب اصطکاک(‏شکل (25) و‏شکل (26) ) مشخص است نحوه گسسته سازی بر روی نتایج تاثیرگذار می باشد. نمودار ضریب فشار با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است که نشان از صحت پیاده سازی مدل توربولانسی حاضر می باشد. همچنین نمودار همگرایی بر حسب تعداد تکرارنیز در ادامه نشان داده شده است. توجه شود که در اینجا از گام زمانی متغیر استفاده شده است تا همگرایی بسمت حالت پایدار سریعتر اتفاق بیفتد. همچنین جهت بررسی تاثیر شبکه نتایج بدست آمده از روش جیمسون بر روی یک شبکه باسازمان نسبتا ریز (شبکه 2V009) و یک شبکه بی سازمان که در ناحیه لایه مرزی و دنباله دارای المان های چهارضلعی باسازمان می باشد (شبکه 2V008) آورده شده است. همانگونه که در ‏شکل (28) مشاهده می شود همگرایی بر روی شبکه بی سازمان به مراتب سریعتر می باشد اما نمودارهای ضریب فشار و ضریب اصطکاک پوسته (‏شکل (29) و‏شکل (30) ) در نزدیکی لبه حمله و لبه فرار دقت کمتری دارد که می تواند ناشی از درشت بودن شبکه در این ناحیه باشد.



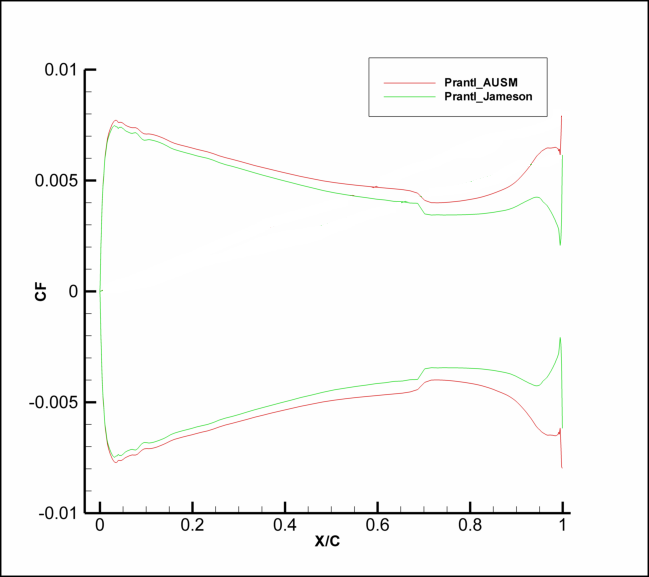
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)



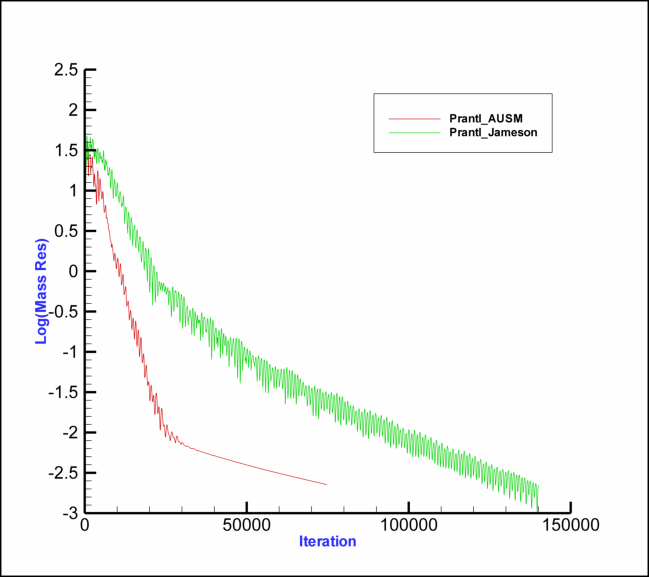
1. کانتور لزجت توربولانسی (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)



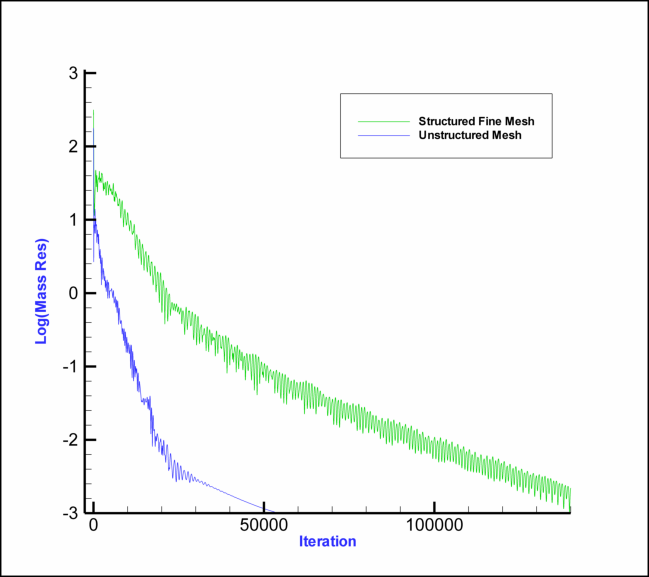
1. ضریب فشار (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)



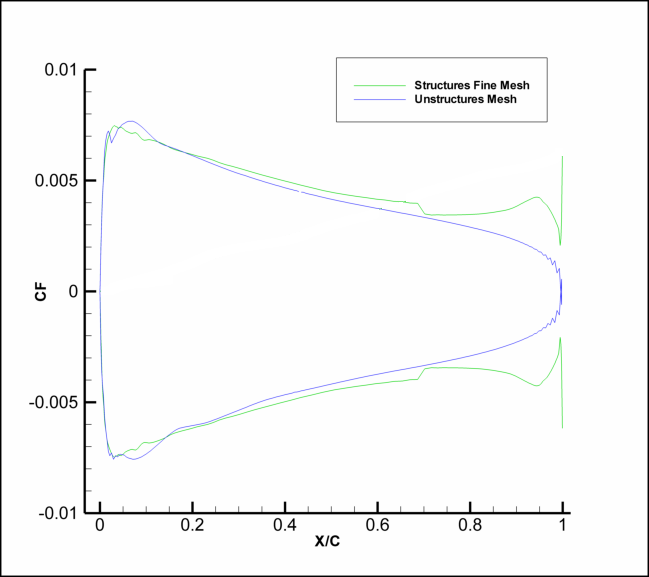
1. نمودار ضریب اصطکاک (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)



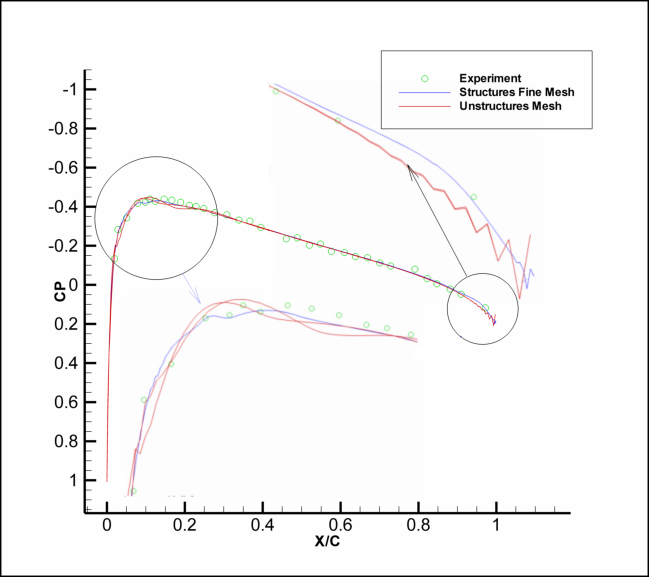
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)



1. مقایسه همگرایی حل بر روی شبکه باسازمان ریز و بی سازمان (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)



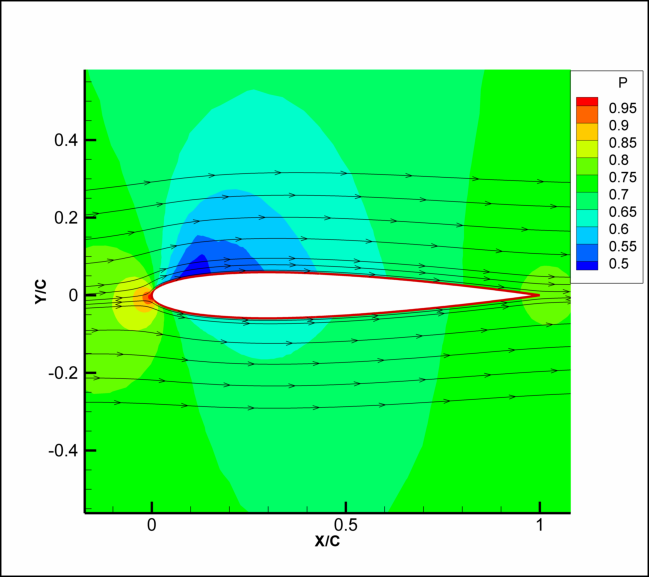
1. مقایسه نمودار ضریب اصطکاک بر روی شبکه باسازمان ریز و بی سازمان (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)



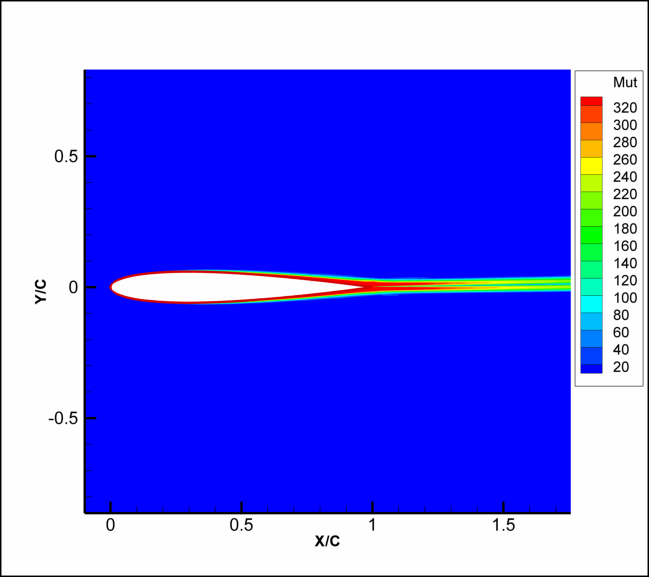
1. مقایسه نمودار ضریب فشار بر روی شبکه باسازمان ریز و بی سازمان (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.85و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2T3

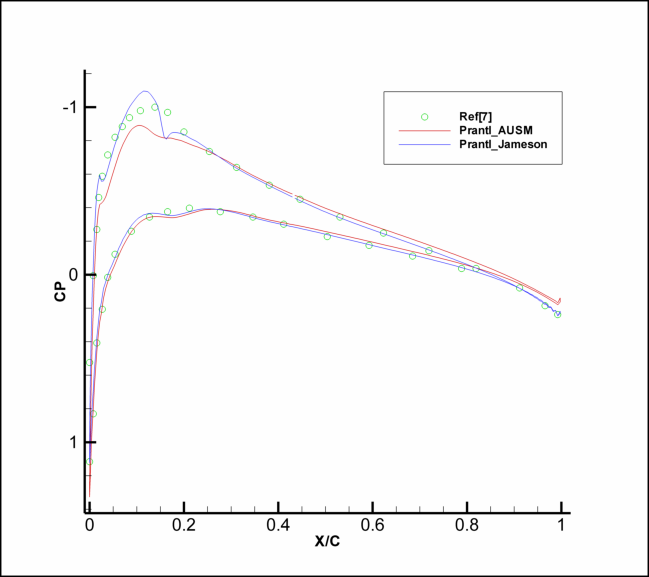
این آزمایش دارای نتایج آزمایشگاهی نیست و نتایج با مرجع ]15[ مقایسه می گردد. عدد رینولدز بالای این آزمایش و وجود یک شوک ضعیف در نزدیکی لبه حمله یکی از ویژگی های این آزمایش می باشد. کانتور های فشار و لزجت توربولانسی برای گسسته سازی به روش جیمسون و مقایسه نمودار ضریب فشار و ضریب اصطکاک برای دو روش گسسته سازی ذکر شده در اینجا آورده شده است. در اینجا نیز از گام زمانی متغیر استفاده شده است تا همگرایی بسمت حالت پایدار سریعتر اتفاق بیفتد. همچنین نمودار همگرایی بر حسب تعداد تکرار نشان داده شده است. ضرایب بکار رفته در روش استهلاک مصنوعی جیمسون یعنی k2 و k4 بترتیب برابر 0.65 و 0.008 انتخاب شده است.



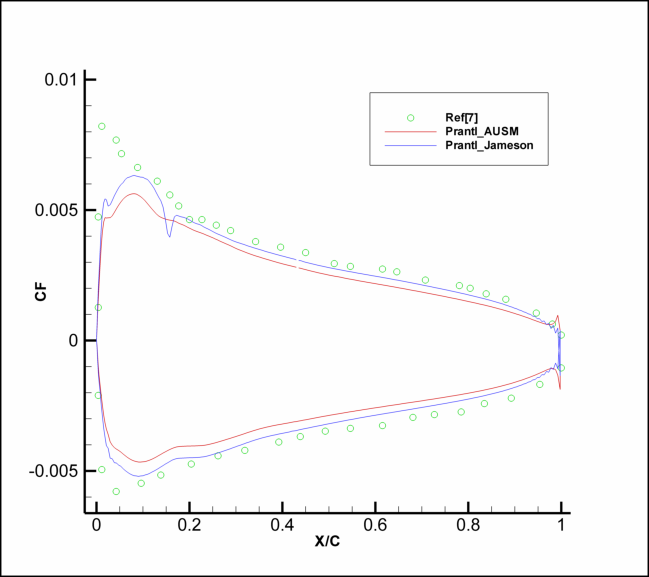
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.7 عدد رینولدز 106×9.0و زاویه حمله 1.49 درجه)



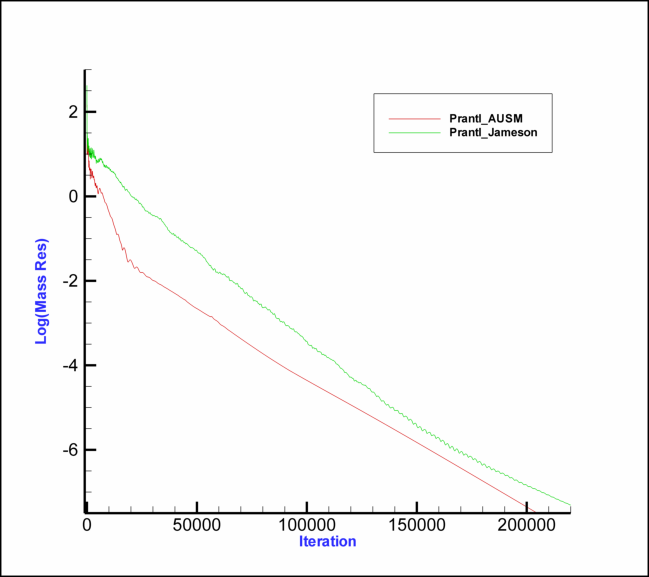
1. کانتور لزجت توربولانسی (عدد ماخ 0.7 عدد رینولدز 106×9.0و زاویه حمله 1.49 درجه)



1. ضریب فشار (عدد ماخ 0.7 عدد رینولدز 106×9.0و زاویه حمله 1.49 درجه)



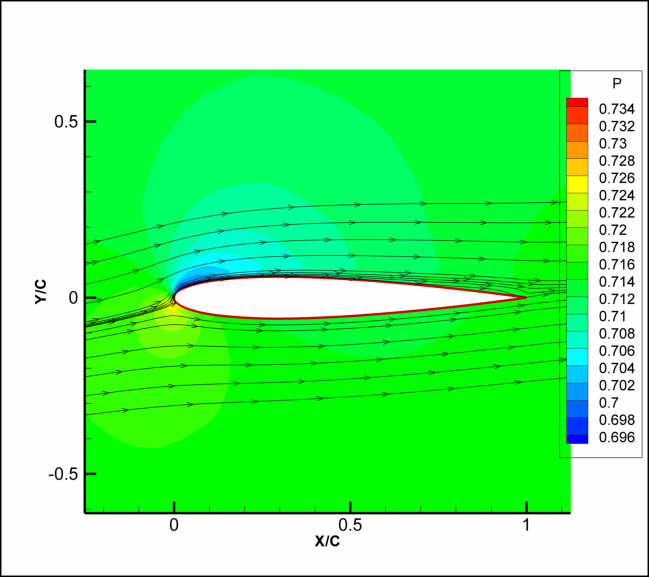
1. نمودار ضریب اصطکاک (عدد ماخ 0.7 عدد رینولدز 106×9.0و زاویه حمله 1.49 درجه)



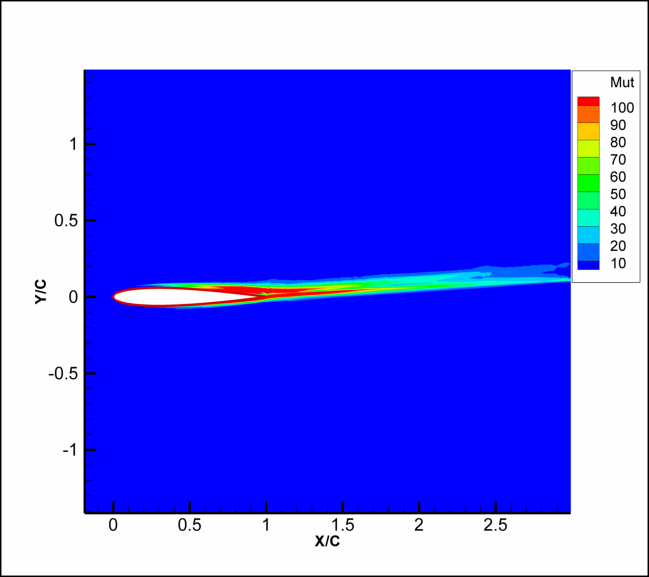
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.7 عدد رینولدز 106×9.0و زاویه حمله 1.49 درجه)

## آزمایش شماره 2T4

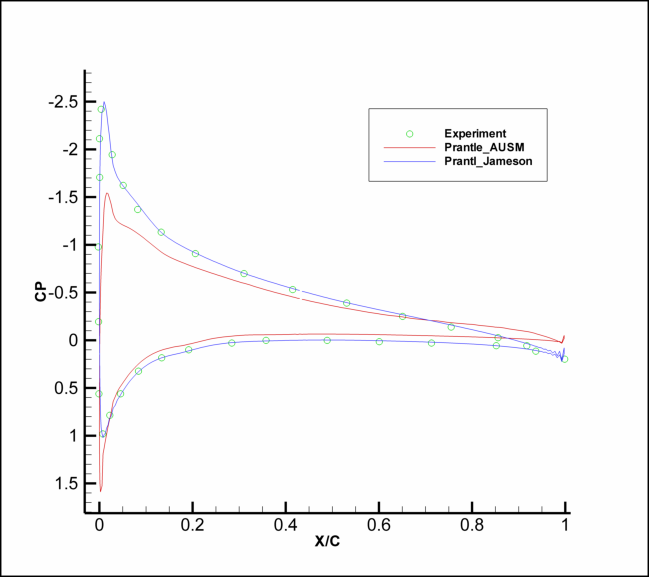
این آزمایش دارای یک ویژگی خاص می باشد که مربوط به عد ماخ پایین آن می باشد. در اینجا جریانی با عدد ماخ 0.16 شبیه سازی شده است. از آنجا که در اینجا از الگوریتم چگالی محور استفاده شده است با پایین بودن سرعت وابستگی بین معادلات که از طریق چگالی انجام می شود کمتر می شود که باعت همگرایی کندتر می شود. زاویه حمله در اینجا 6 درجه می باشد که هیچ جدایشی در جریان اتفاق نمی افتد. کانتور های فشار و لزجت توربولانسی نشان داده شده بطور کیفی مشخص می شود که میزان لزجت توربولانسی در نزدیکی دیوار و در ناحیه دنباله بدرستی محاسبه شده است البته باید در نظر داشت که حداکثر میزان لزجت توربولانسی بیشتر از آنچه می باشد که در شکل نشان داده شده است ولی بدلیل آشکار کردن کانتور لزجت این مقدار تنها در نمایش شکل تغییر داده شده است. همانطور که از نمودار ضریب فشار و ضریب اصطکاک مشخص است نحوه گسسته سازی بر روی نتایج تاثیر چشمگیری دارد که بدلیل پیچیده تر بودن جریان و نیاز به دقت بالاتر می باشد. نمودار ضریب فشار با داده های مرجع ]15[ مقایسه شده است که نشان از صحت پیاده سازی مدل توربولانسی حاضر می باشد. همچنین نمودار همگرایی بر حسب تعداد تکرار نشان داده شده است. توجه شود که در اینجا از گام زمانی متغیر استفاده شده است تا همگرایی بسمت حالت پایدار سریعتر اتفاق بیفتد و یکی از دلایل نوسانات شدید در نمودار همگرایی بدلیل این موضوع می باشد. همانگونه که در نتایج زیرمشخص است همگرایی در روش گسسته سازی به روش جیمسون دیرتر اتفاق می افتد و نوسانات بیشتر در این نمودار مشاهد می شود باید توجه داشت که روش جیمسون دارای دو ضریب می باشد (که در مستندات این روش بطور مفصل در مورد آنها بحث شده است) که تاثیر زیادی در دقت نتایج و نمودار همگرایی دارد. این ضرایب یعنی k2 و k4 بترتیب برابر 0.65 و 0.008 انتخاب شده است.



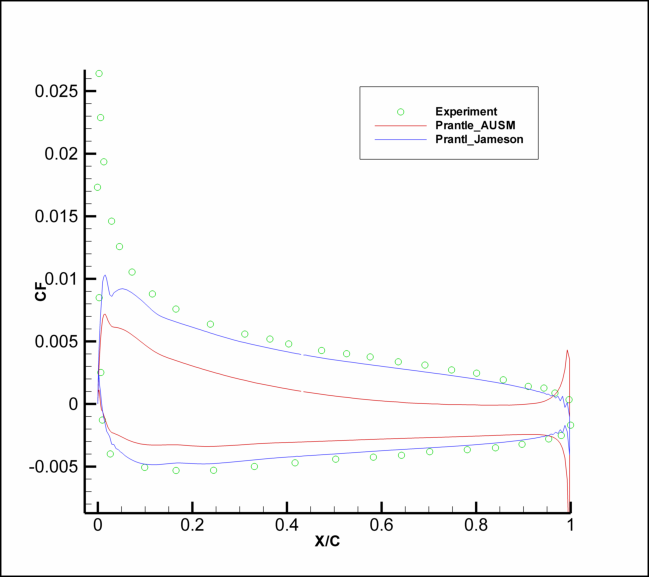
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 6.0 درجه)



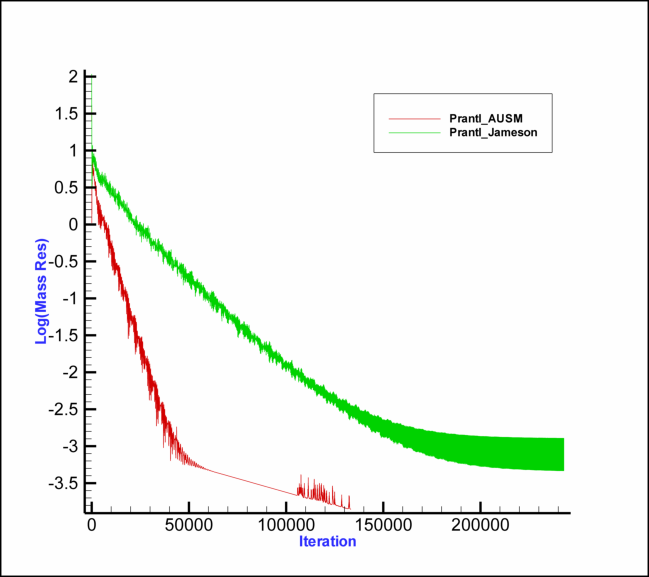
1. کانتور لزجت توربولانسی (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 6.0 درجه)



1. ضریب فشار (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 6.0 درجه)



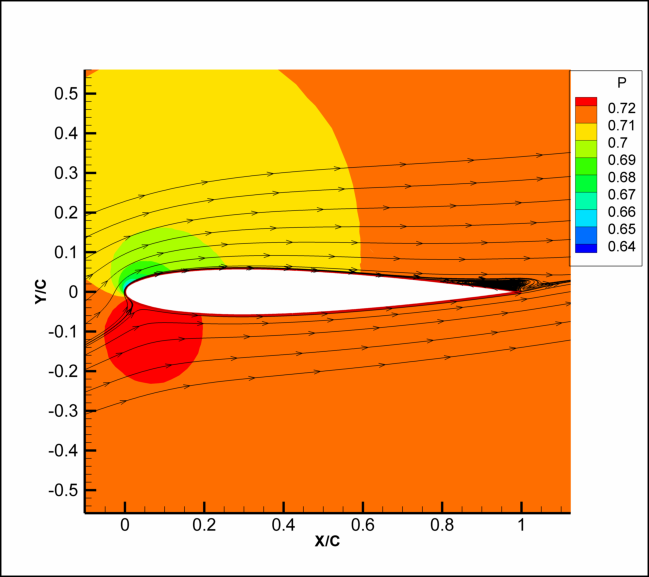
1. نمودار ضریب اصطکاک (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 6.0 درجه)



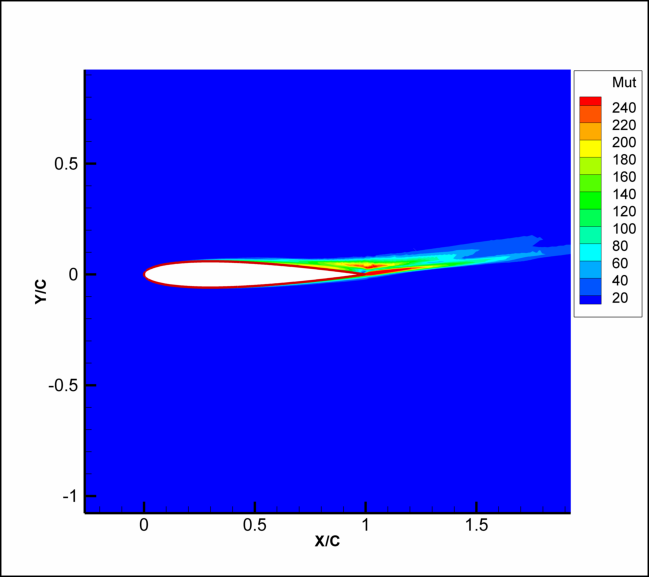
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 6.0 درجه)

## آزمایش شماره 2T5

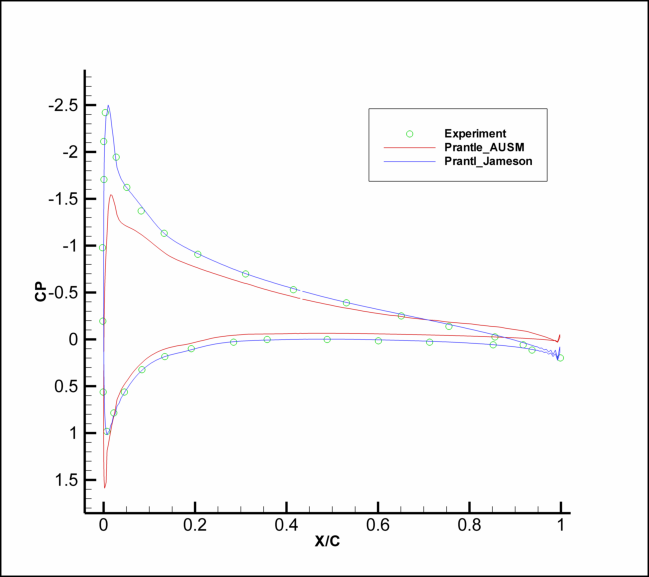
تفاوت این آزمایش با آزمایش 2T4 در زوایه حمله جریان می باشد که در اینجا 12 درجه می باشد که باعث ایجاد جدایشی در نزدیکه لبه فرار شده است. کانتور های فشار و خطوط جریان این جدایش را بخوبی نشان می دهد. لزجت توربولانسی نشان داده شده بطور کیفی مشخص می شود که میزان لزجت توربولانسی در نزدیکی دیوار و در ناحیه دنباله بدرستی محاسبه شده است در اینجا نیز حداکثر میزان لزجت توربولانسی بیشتر از آنچه می باشد که در شکل نشان داده شده است ولی بدلیل آشکار کردن کانتور لزجت این مقدار تنها در نمایش شکل تغییر داده شده است. همانطور که از نمودار ضریب فشار و ضریب اصطکاک مشخص است نحوه گسسته سازی بر روی نتایج تاثیر چشمگیری دارد که بدلیل پیچیده تر بودن جریان و نیاز به دقت بالاتر می باشد. نمودار ضریب فشار با داده های مرجع ]15[ مقایسه شده است که نشان میدهد گسسته سازی مرکزی جیمسون نسبت به روش AUSM استفاده شده در این گزارش برتری چشمگیری دارد. البته مقایسه نموار ضریب اصطکاک نشان می دهد که نتایج روش AUSM بطور کلی قابل قبول نمی باشد اما روش جیمسون نتایج نسبتا بهتری ارائه می دهد. البته بطور کلیمدل های توربولانسی جبری توانایی پایینی در محاسبه ضریب اصطکاک دارند. همچنین نمودار همگرایی بر حسب تعداد تکرار نشان داده شده است. توجه شود که در اینجا از گام زمانی متغیر استفاده شده است تا همگرایی بسمت حالت پایدار سریعتر اتفاق بیفتد و یکی از دلایل نوسانات شدید در نمودار همگرایی بدلیل این موضوع می باشد. همانگونه که در شکل مشخص است همگرایی در روش گسسته سازی به روش جیمسون دیرتر اتفاق می افتد و نوسانات بیشتر در این نمودار مشاهد می شود باید توجه داشت که روش جیمسون دارای دو ضریب می باشد (که در مستندات این روش بطور مفصل در مورد آنها بحث شده است) که تاثیر زیادی در دقت نتایج و نمودار همگرایی دارد. این ضرایب یعنی k2 و k4 بترتیب برابر 0.65 و 0.008 انتخاب شده است.



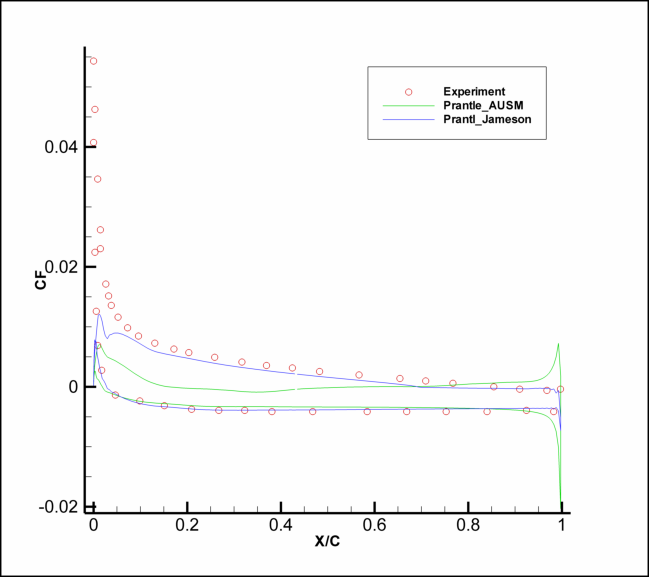
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 12.0 درجه)



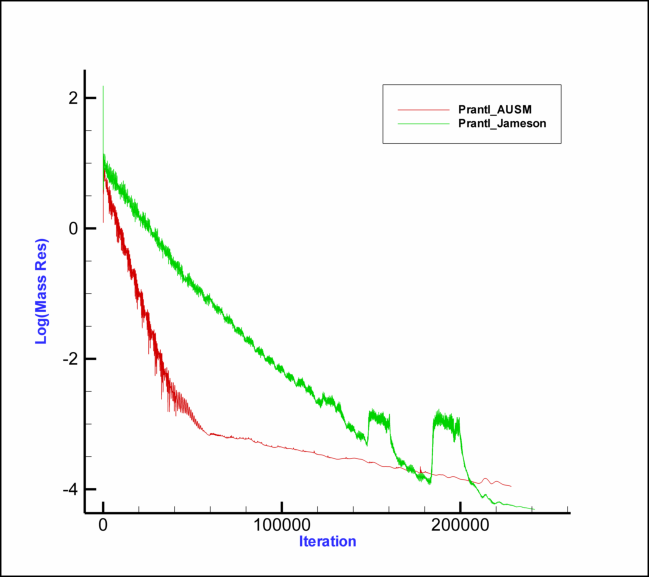
1. کانتور لزجت توربولانسی (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 12.0 درجه)



1. ضریب فشار (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 12.0 درجه)



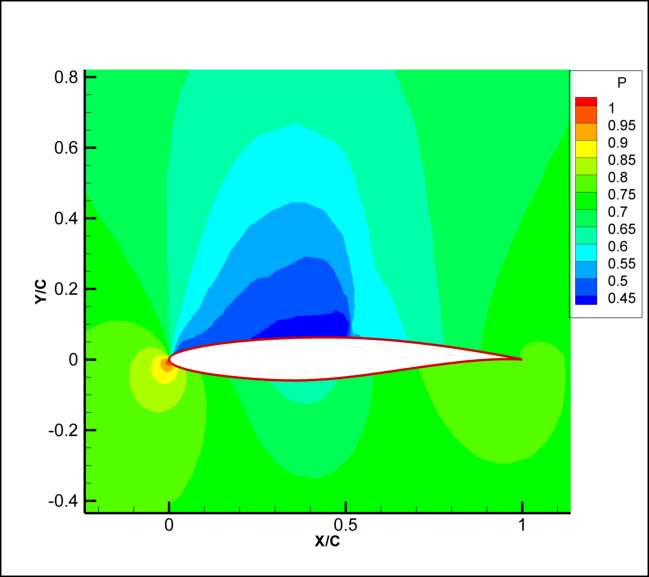
1. نمودار ضریب اصطکاک (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 12.0 درجه)



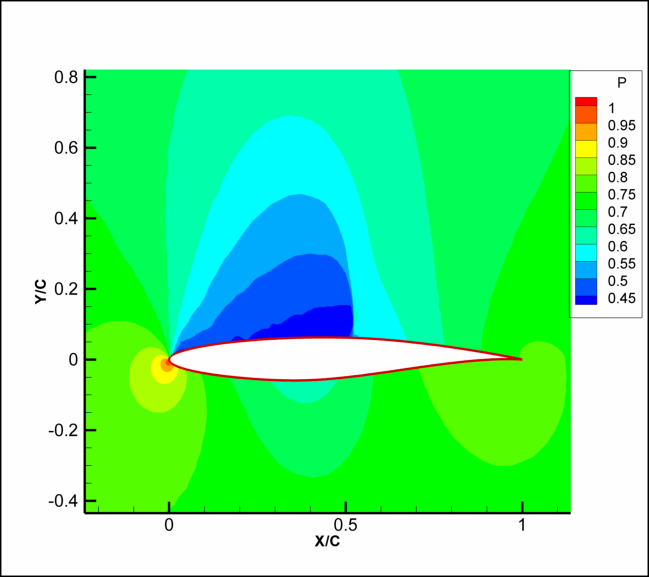
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.16 عدد رینولدز 106×2.82و زاویه حمله 12.0 درجه)

## آزمایش شماره 2T9

در این آزمایش تاثیر ریز بودن شبکه در محل شوک بررسی شده است. نحوه گسسته سازی بخش جابجایی بصورت مرکزی یا همان روش استهلاک مصنوعی جیمسون می باشد. در اینجا ابتدا از یک شبکه یکنواخت که در محل شوک ریز نشده است استفاده شد و مقدار ضرایب k2 و k4 بترتیب برابر 0.65 و 0.008 انتخاب شد سپس شبکه در محل شوک ریز شد و ضرایب k2 و k4 بترتیب برابر 0.25 و 0.008 استفاده شد. مشاهده می شود که بهبود نسبی در نمودار ضریب فشار اتفاق افتاده است ]15[. در اینجا کانتورهای فشار و لزجت توربولانسی ارائه شده است که نشان از دقت بیشتر در هنگام استفاده از شبکه ریز شده می دهد. بنظر می رسد که استفاده از روش های انطباق سازی شبکه و حلگر جهت تسخیر بهتر شوک گریزناپذیر می باشد.

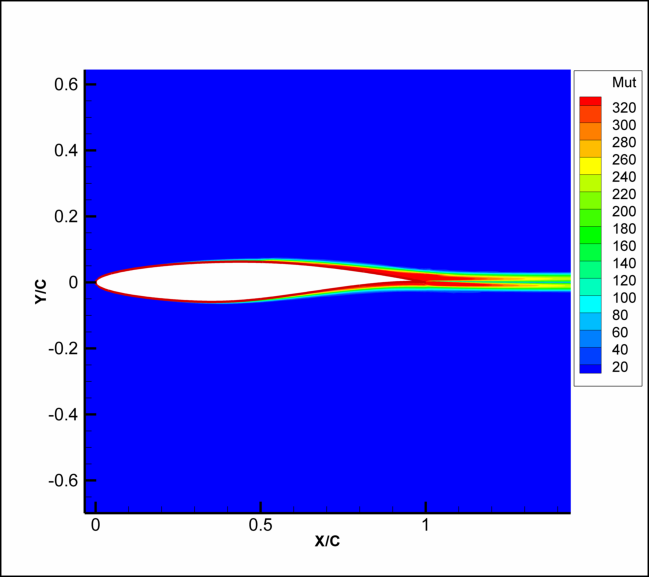


الف) شبکه یکنواخت

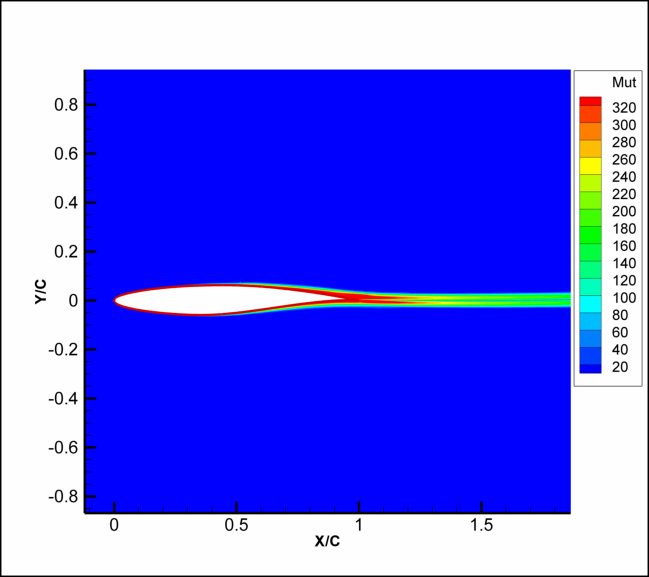


ب) شبکه ریز شده در محل شوک

1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.729 عدد رینولدز 106×6.5و زاویه حمله 2.31 درجه)

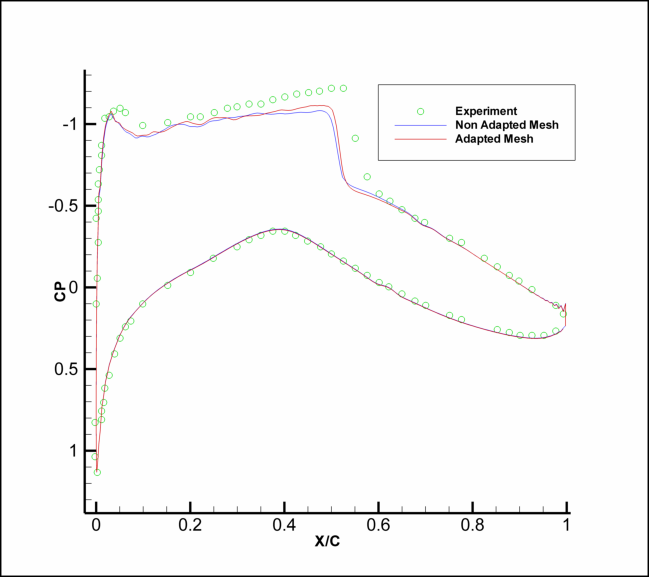


الف) شبکه یکنواخت

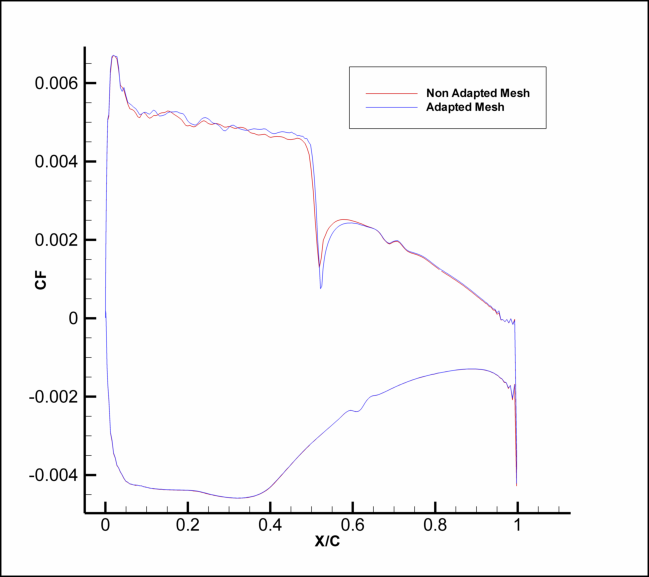


ب) شبکه ریز شده در محل شوک

1. کانتور لزجت توربولانسی (عدد ماخ 0.729 عدد رینولدز 106×6.5و زاویه حمله 2.31 درجه)



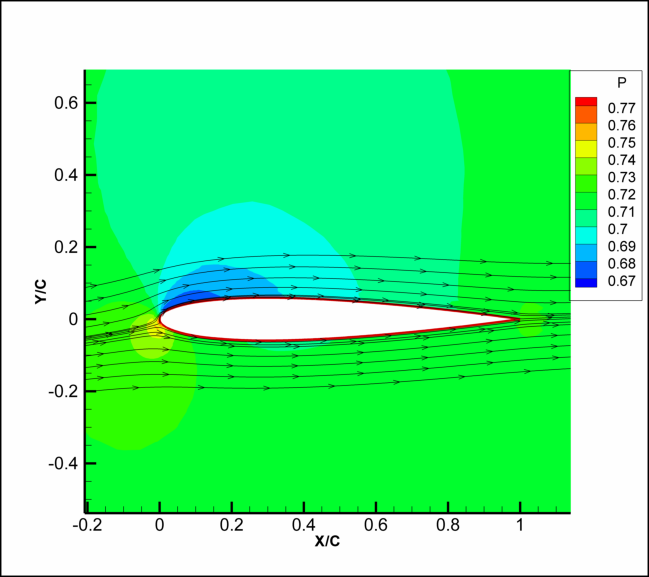
1. مقایسه ضریب فشار برای شبکه یکنواخت و شبکه ریز شده در محل شوک (عدد ماخ 0.729 عدد رینولدز 106×6.5و زاویه حمله 2.31 درجه)



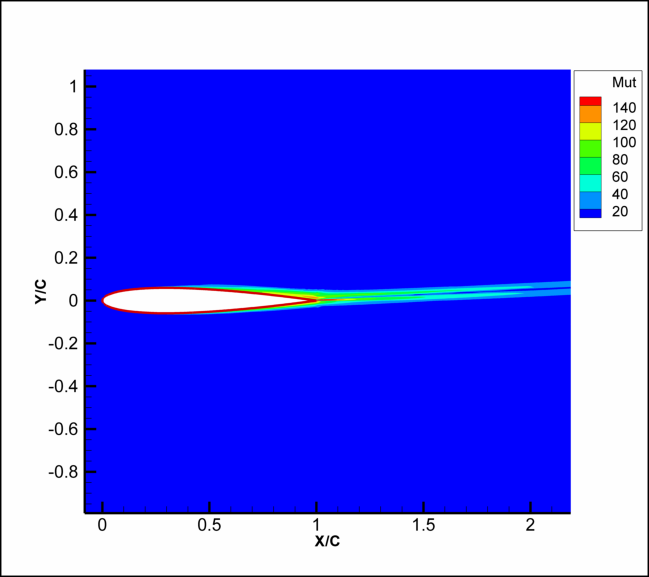
1. مقایسه ضریب اصطکاک برای شبکه یکنواخت و شبکه ریز شده در محل شوک (عدد ماخ 0.729 عدد رینولدز 106×6.5و زاویه حمله 2.31 درجه)

## آزمایش شماره 2T12

این آزمایش جریانی با عدد ماخ نسبتا پایین و زاویه حمله ای کم مورد مطالعه قرار گرفته است. کانتور های فشار و خطوط جریان و لزجت توربولانسی نشان داده شده است در اینجا نیز حداکثر میزان لزجت توربولانسی بیشتر از آنچه می باشد که در شکل نشان داده شده است ولی بدلیل آشکار کردن کانتور لزجت این مقدار تنها در نمایش شکل تغییر داده شده است. نمودار ضریب فشار با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. ضرایب بکار رفته در روش جیمسون یعنی k2 و k4 بترتیب برابر 0.65 و 0.008 انتخاب شده است.



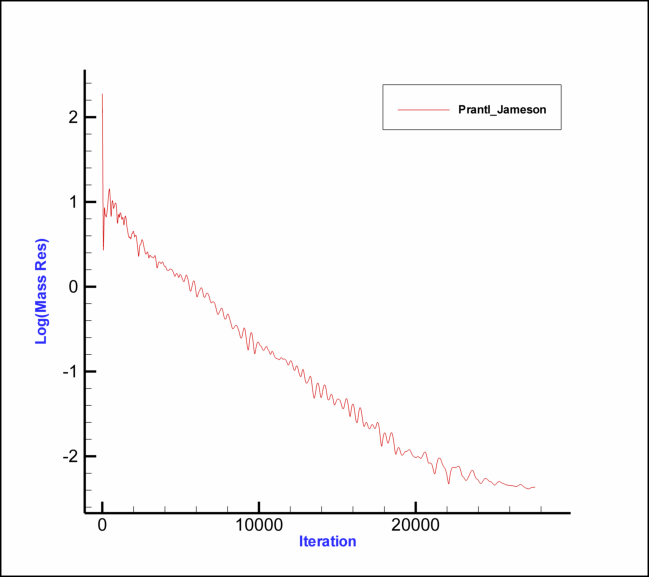
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.86و زاویه حمله 4.04 درجه)



1. کانتور لزجت توربولانسی (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.86و زاویه حمله 4.04 درجه)



1. ضریب فشار (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.86و زاویه حمله 4.04 درجه)



1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.3 عدد رینولدز 106×1.86و زاویه حمله 4.04 درجه