

****

**عنوان:**

اعتبارسنجی کد غیرلزج دوبعدی به روش Scalar Dissipation

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **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 12](#_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** | **نوع معادلات** | **غیرلزج** |
| **6** | **الگوریتم حل** | **چگالی محور** |
| **7** | **گسسته سازی بخش زمانی** | **صریح-رانگ کوتا** |
| **8** | **گسسته سازی بخش جابجایی** | **مرکزی+استهلاک مصنوعی جیمسون** |

1. آزمایشات انجام شده برای اعتبارسنجی کد حاضر

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **شماره آزمایش** | **عدد ماخ** | **زاویه حمله** | **عنوان هندسه** | **شبکه مورد استفاده** | |
| 2I1 | 0.95 | 0.0 | NACA0012 | 2I004 |  |
| 2I2 | 1.2 | 0.0 | NACA0012 | 2I004 |  |
| 2I3 | 0.5 | 3.0 | NACA0012 | 2I008 | درشت |
| 2I4 | 0.5 | 0.0 | NACA0012 | 2I004 |  |
| 2I5 | 0.8 | 0.0 | NACA0012 | 2I014 | شبکه یکنواخت |
| 2I004 | شبکه سازگار شده |
| 2I6 | 0.85 | 1.0 | NACA0012 | 2I012 |  |
| 2I7 | 0.8 | 1.25 | NACA0012 | 2I011 |  |
| 2I8 | 1.2 | 7.0 | NACA0012 | 2I009 |  |
| 2I9 | 0.75 | 3.0 | RAE2822 | 2I013 |  |
| 2I10 | 0.721 | -0.194 | NLR7301 | 2I015 |  |
| 2I11 | 0.38 | 0.0 | Cylinder | 2V002 | باسازمان |
| 2I019 | بی سازمان درشت |
| 2I13 | 0.185 | 13.1 | NLR7301+Flap | 2I016 |  |

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** |
| 2I004 | NACA0012 | مثلثی | 3218 | 1679 | 100 | 40 |
| 2I008 | NACA0012 | مثلثی | 2904 | 1522 | 100 | 40 |
| 2I009 | NACA0012 | مثلثی | 11616 | 5948 | 200 | 80 |
| 2I011 | NACA0012 | مثلثی | 15970 | 8115 | 220 | 40 |
| 2I012 | NACA0012 | مثلثی | 21732 | 10999 | 226 | 40 |
| 2I013 | RAE2822 | مثلثی | 14296 | 7277 | 218 | 40 |
| 2I014 | NACA0012 | مثلثی | 22326 | 11279 | 228 | 40 |
| 2I015 | NLR7301 | مثلثی | 7144 | 3696 | 200 | 48 |
| 2I016 | NLR7301+Flap | مثلثی | 10116 | 5262 | 360 | 50 |
| 2I019 | Cylinder | مثلثی | 9408 | 4808 | 144 | 64 |
| 2I021 | Cylinder | مثلثی | 2352 | 1228 | 72 | 32 |
| 2V002 | Cylinder | چهارضلعی | 2600 | 2652 | 52 | 52 |

# جزئیات دقیق هندسه های مورد استفاده جهت اعتبارسنجی کد

## 2I004

نقاط این شبکه با استفاده از یک شبکه باسازمان بدست آمده است بنابراین این شبکه یکی از بهترین شبکه های موجود در اطراف ایرفویل NACA0012 می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I008

در این شبکه سعی شده است در نزدیکی لبه حمله و فرار ایرفویل تراکم نقاط بیشتر باشد. همچنین این شبکه بعنوان یک شبکه درشت در بررسی حساسیت شبکه مورد استفاده قرار می گیرد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I009

این شبکه بعنوان شبکه متوسط (شبکه ریزتر شده) برای شبکه 2I08 می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I011

شبکه اطراف این ایرفویل در محل شوک ریز شده است بنابراین این شبکه تنها برای جریان اطراف ایرفویل NACA0012 که در سطح بالایی و پایینی آن به ترتیب در x=0.65 و x=0.35 شوک وجود دارد مناسب می‌باشد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I012

شبکه اطراف این ایرفویل در محل شوک ریز شده است بنابراین این شبکه تنها برای جریان اطراف ایروفویل NACA0012 که در سطح بالایی و پایینی آن بترتیب در x=0.87 و x=0.65 شوک وجود دارد مناسب می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I013

شبکه اطراف این ایرفویل در محل شوک ریز شده است بنابراین این شبکه تنها برای جریان اطراف ایروفویل RAE2822 که در سطح بالایی آن در x=0.75 شوک وجود دارد مناسب می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I014

شبکه اطراف این ایرفویل در محل شوک ریز شده است بنابراین این شبکه تنها برای جریان اطراف ایروفویل NACA0012 که در سطح بالایی و پایینی آن در x=0. 5 شوک وجود دارد مناسب می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I015

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I016

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I021

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2I019

تفاوت این شبکه با شبکه 2I018 در اینست که در اینجا تعداد سلول های شبکه دو برابر شده است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

## 2V002

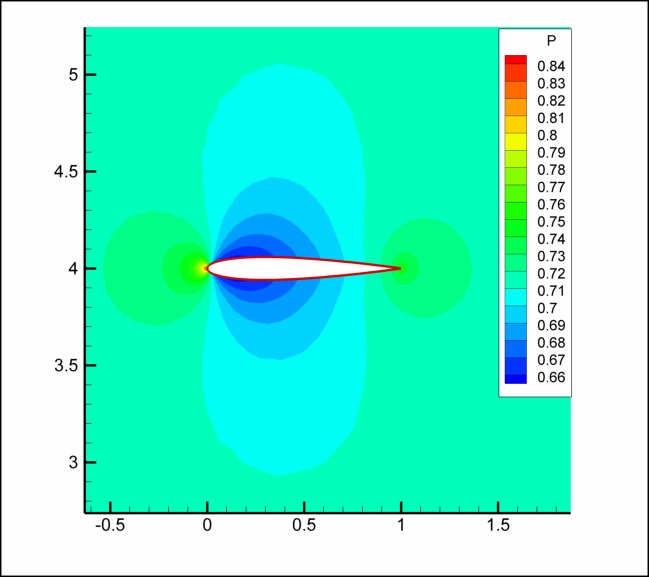
نوع این شبکه باسازمان می باشد اما بصورت بی سازمان ذخیره شده است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. نمای دور از شبکه | 1. نمای نزدیک شبکه |

# نتایج آزمایش های انجام شده جهت اعتبار سنجی کد حاضر

## آزمایش شماره 2I4

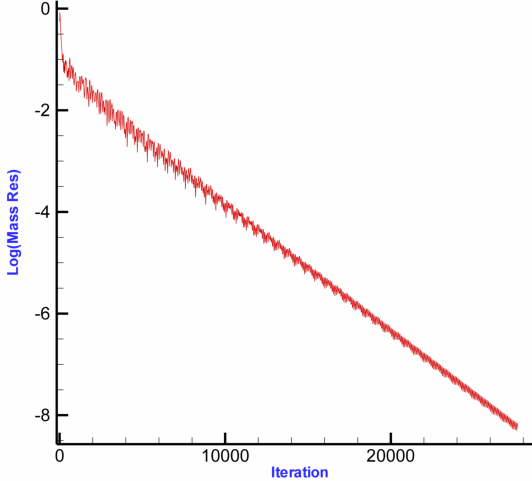
این آزمایش یکی از ساده ترین آزمایشات برای اطمینان از صحت پیاده سازی می باشد زیرا هیچ شوک و یا گرادیان شدیدی در میدان جریان وجود ندارد. همانگونه که مشاهده می شود نمودار ضریب فشار برای سطح بالا و پایین ایرفویل تقریبا یکسان می باشد که با واقعیت موجود در فیزیک این جریان همخوانی دارد. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.25 و 0.008 انتخاب شده است.



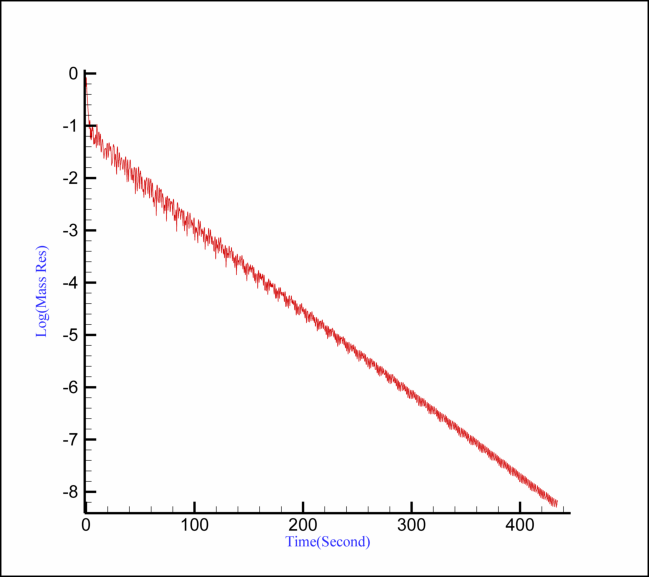
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 0.0 درجه)



1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 0.0 درجه)



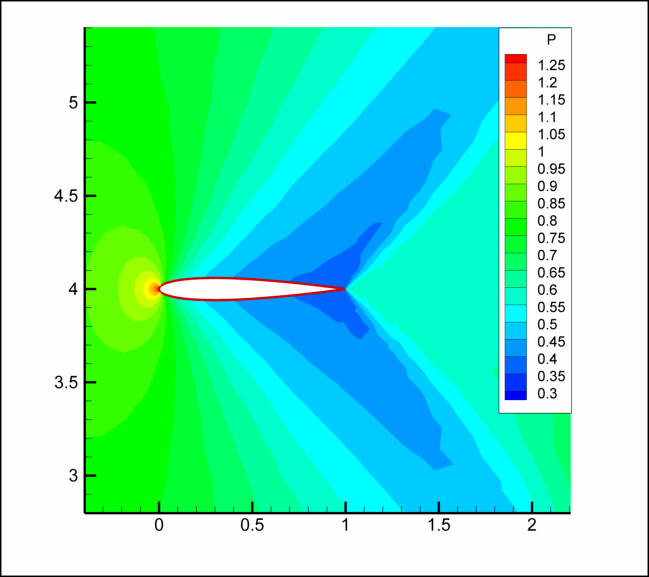
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 0.0 درجه)



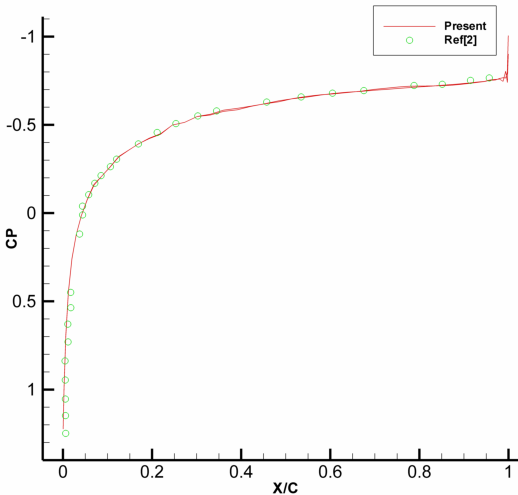
1. نمودار همگرایی-زمان (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I1

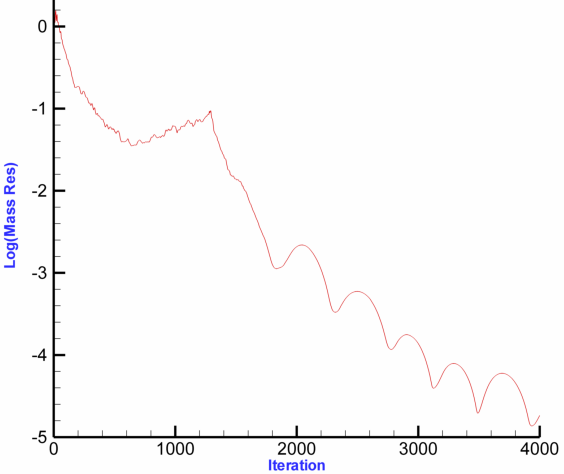
این آزمایش بدلیل زاویه حمله صفر درجه و جریان گذر صوتی می تواند مقیاس خوبی برای اعتبارسنجی کد حاضر باشد. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.25 و 0.008 انتخاب شده است.



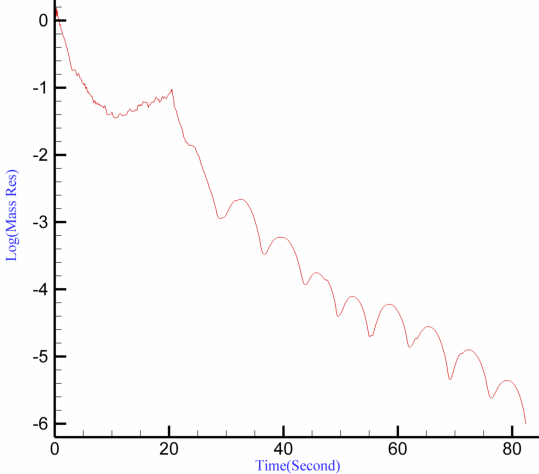
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.95 و زاویه حمله 0.0 درجه)



1. ضریب فشار (عدد ماخ 0.95 و زاویه حمله 0.0 درجه)



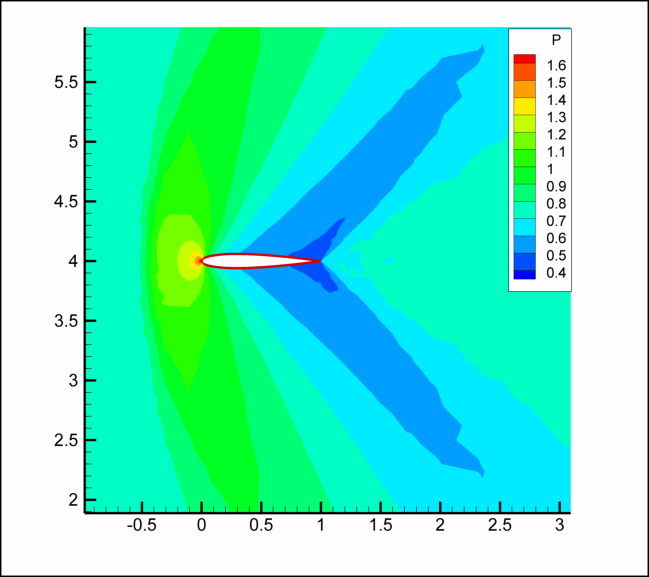
1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.95 و زاویه حمله 0.0 درجه)



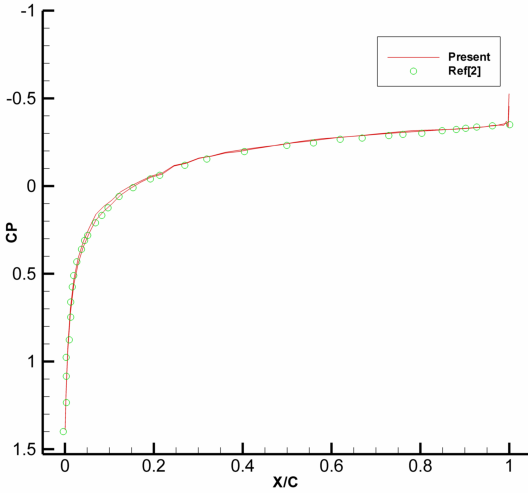
1. نمودار همگرایی بر حسب زمان (عدد ماخ 0.95 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I2

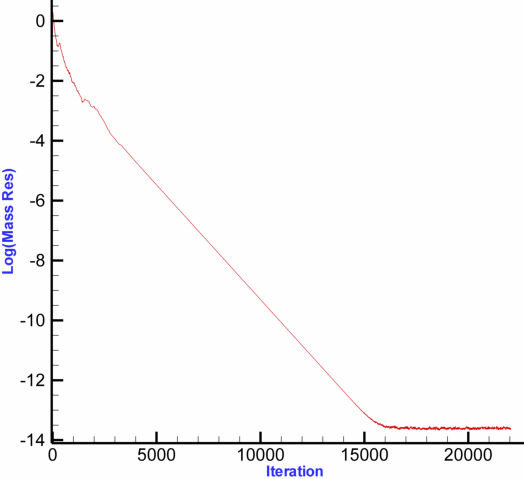
این آزمایش مانند آزمایش قبل می باشد با این تفاوت که جریان مافوق صوت می باشد و می تواند برای اعتبار سنجی شرایط مرزی که در بیشتر موارد وابسته به عدد ماخ می باشد، بکار رود. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.25 و 0.008 انتخاب شده است.



1. کانتور فشار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 0.0 درجه)



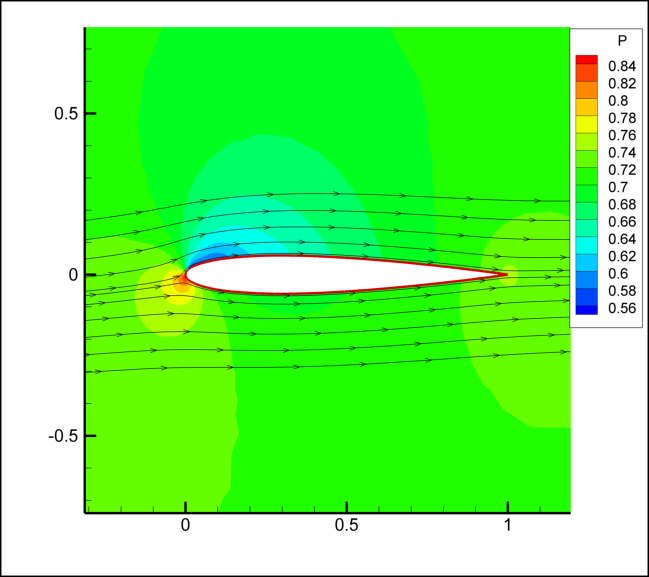
1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 0.0 درجه)



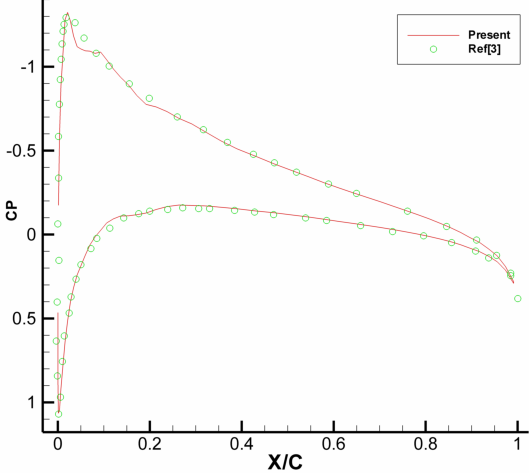
1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I3:

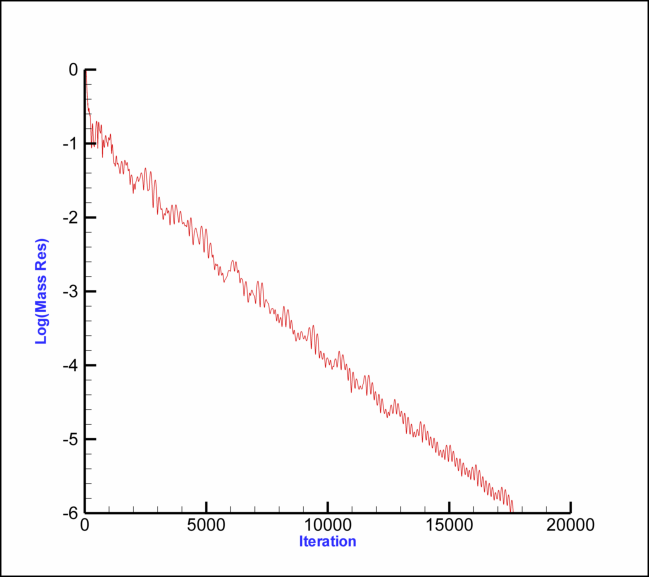
این آزمایش که دارای زاویه حمله نسبتا کمی می باشد یکی از ساده ترین آزمایشات موجود می باشد.



1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 3.0 درجه)



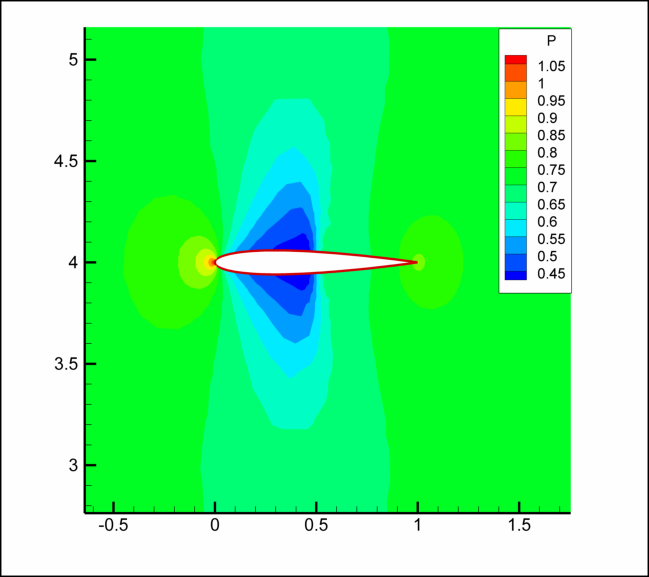
1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 3.0 درجه)



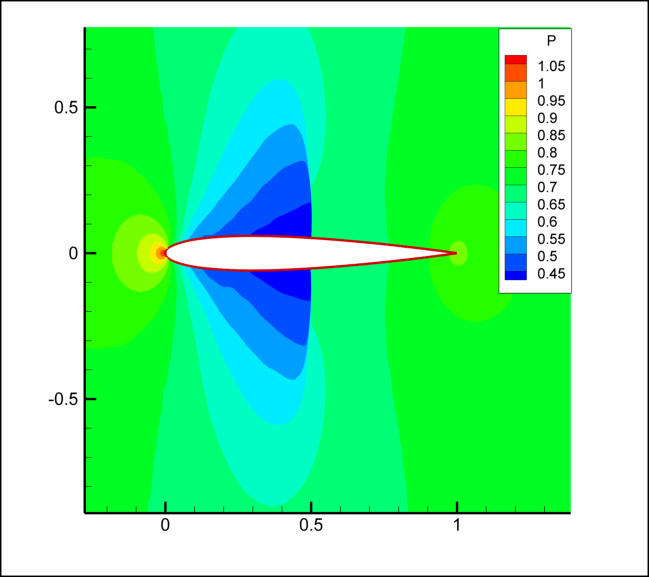
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 3.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I5

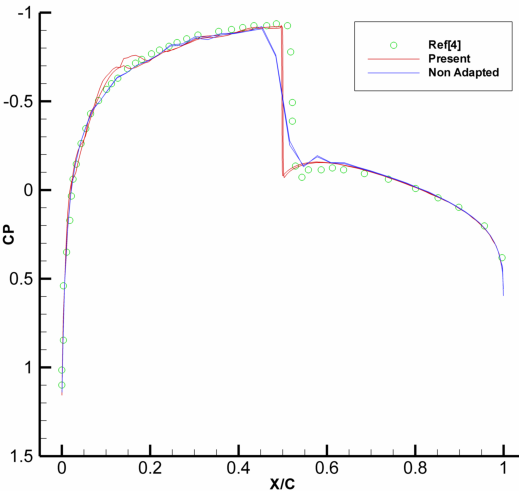
در این آزمایش با وجود زاویه حمله صفر درجه بدلیل عدد ماخ بالا، دو شوک در بالا و پایین ایرفویل تشکیل می گردد. در اینجا از دو شبکه متفاوت استفاده شده است تا تاثیر ریزی شبکه در محل شوک مطالعه شود. همانگونه که در نمودار ضریب فشار مشخص است، استفاده از شبکه ای که در محل شوک ریز شده است، باعث جواب بهتر می شود. لازم است توجه شود که از شبکه2I004 بعنوان شبکه یکنواخت و از شبکه 2I014 بعنوان شبکه سازگار شده استفاده شده است. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.65 و 0.001 انتخاب شده است.

****

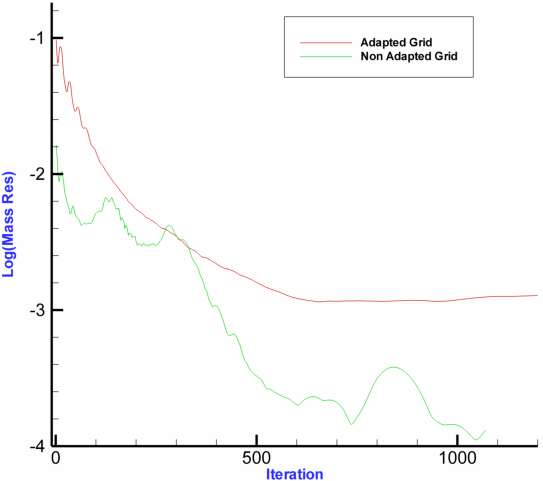
1. کانتور فشار بر روی شبکه یکنواخت (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 0.0 درجه)

****

1. کانتور فشار بر روی شبکه ریز شده در محل شوک (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 0.0 درجه)

****

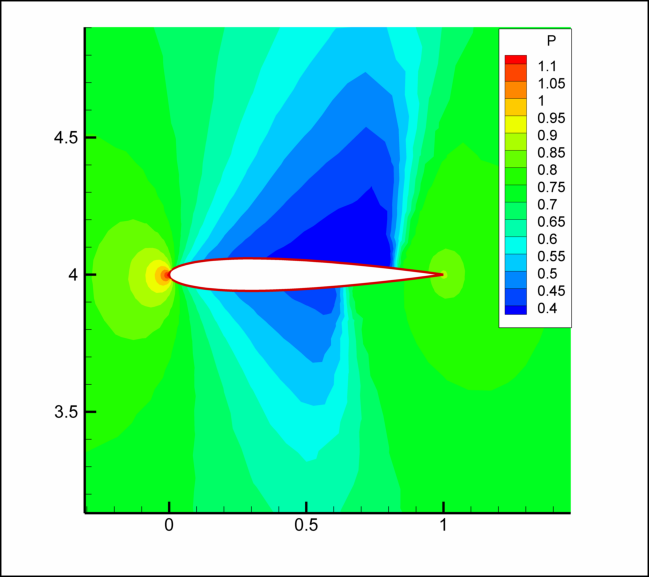
1. مقایسه نمودار ضریب فشار برای شبکه ریز شده و ریز نشده در محل شوک (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 0.0 درجه)

****

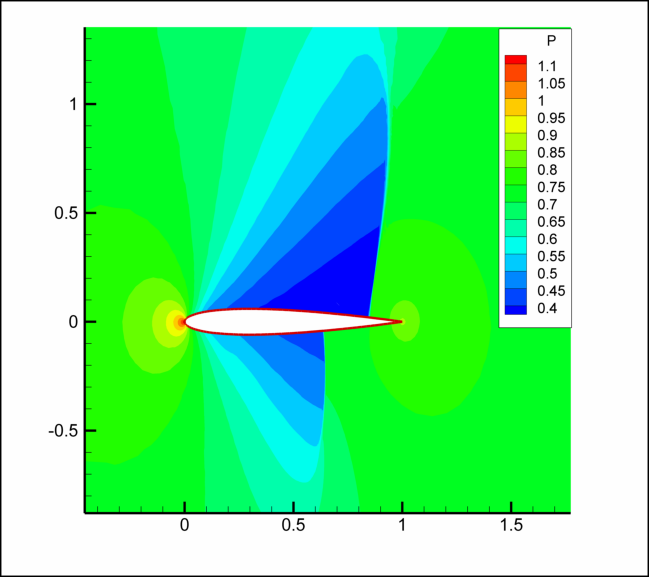
1. مقایسه نمودار همگرایی برای شبکه ریز شده و ریز نشده در محل شوک (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I6

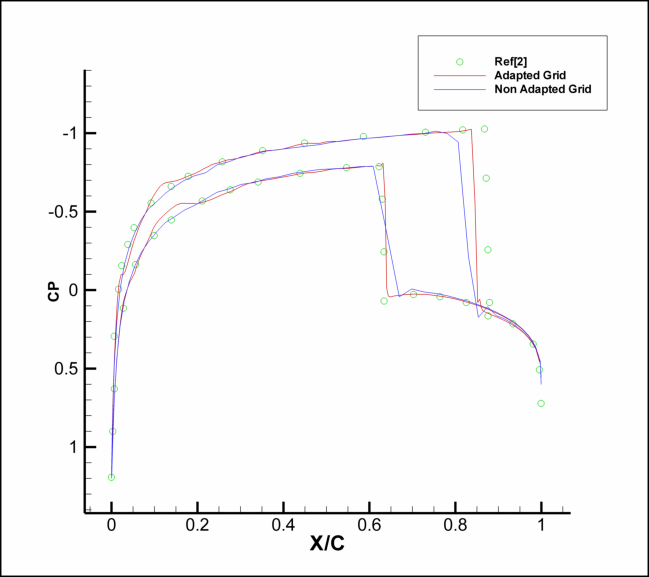
در این آزمایش زاویه حمله 1 درجه می باشد که بدلیل عدد ماخ بالا دو شوک در بالا و پایین ایرفویل در مکان های مختلف تشکیل می گردد. در اینجا از دو شبکه متفاوت استفاده شده است تا تاثیر ریزی شبکه در محل شوک مطالعه شود. همانگونه که در نمودار ضریب فشار مشخص است، استفاده از شبکه ای که در محل شوک ریز شده است باعث جواب بهتر می شود. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.65 و 0.015 انتخاب شده است.

****

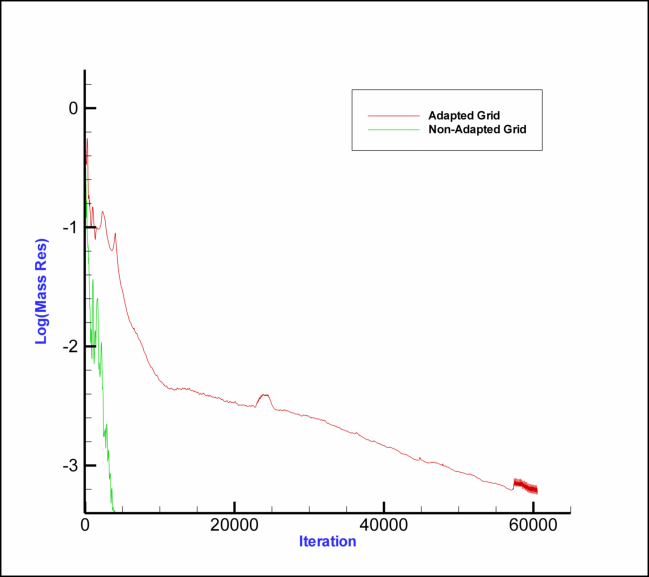
1. کانتور فشار بر روی شبکه یکنواخت (عدد ماخ 0.85 و زاویه حمله 1.0 درجه)

****

1. کانتور فشار بر روی شبکه ریز شده در محل شوک (عدد ماخ 0.85 و زاویه حمله 1.0 درجه)

****

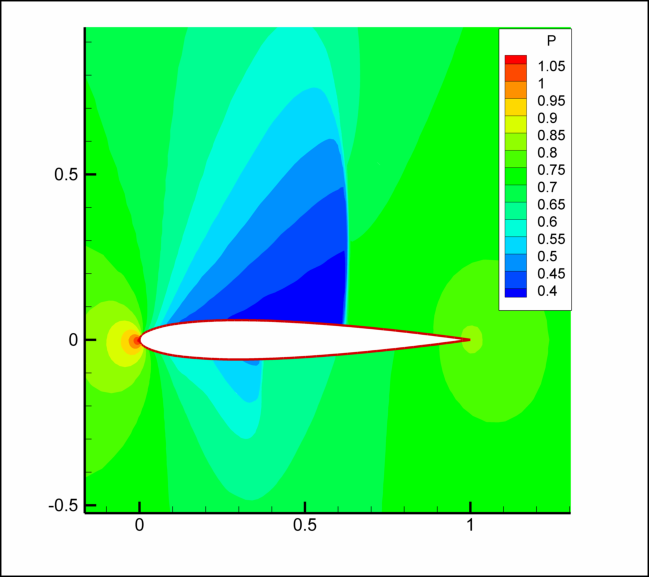
1. مقایسه نمودار ضریب فشار برای شبکه ریز شده و ریز نشده در محل شوک (عدد ماخ 0.85 و زاویه حمله 1.0 درجه)

****

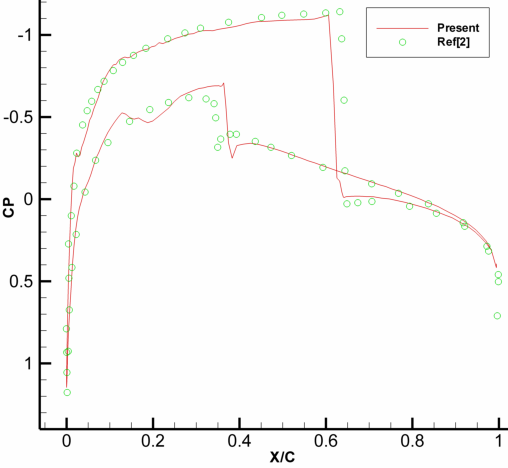
1. مقایسه نمودار همگرایی برای شبکه ریز شده و ریز نشده در محل شوک (عدد ماخ 0.85 و زاویه حمله 1.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I7

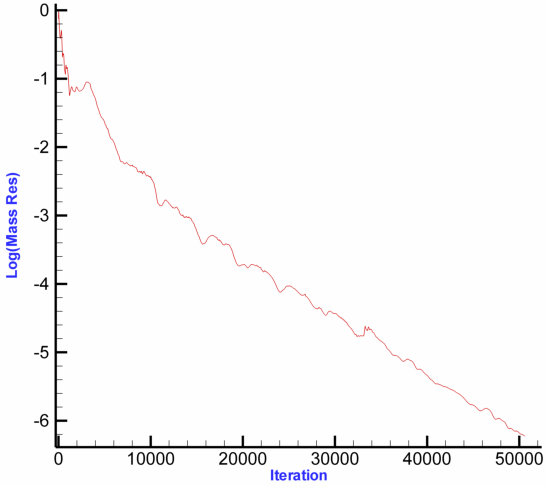
در این آزمایش دو شوک قوی وجود دارد که به این دلیل در محل شوک شبکه های استفاده شده ریزتر شده است. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.25 و 0.008 انتخاب شده است.

****

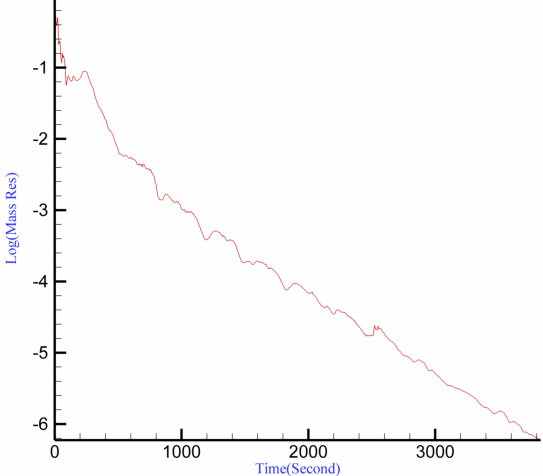
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 1.25 درجه)

****

1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 1.25 درجه)

****

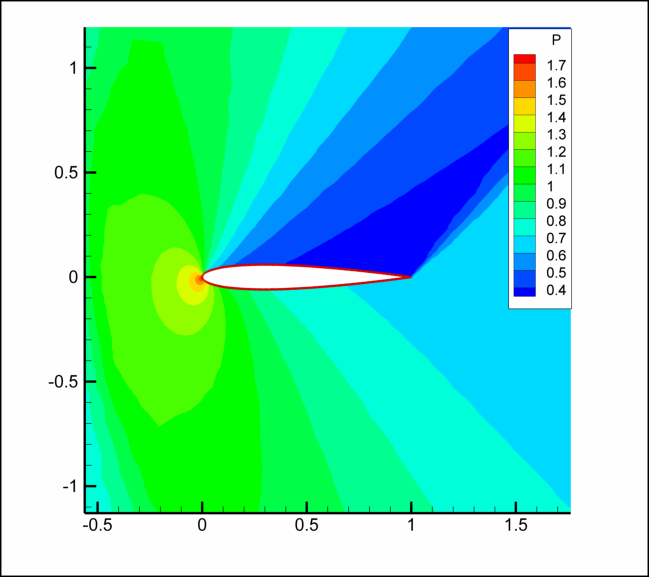
1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 1.25 درجه)

****

1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 1.25 درجه)

## آزمایش شماره 2I8

در این آزمایش زاویه حمله 7 درجه می باشد که می توان آن را یک زاویه حمله بالا دانست. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.65 و 0.016 انتخاب شده است.

****

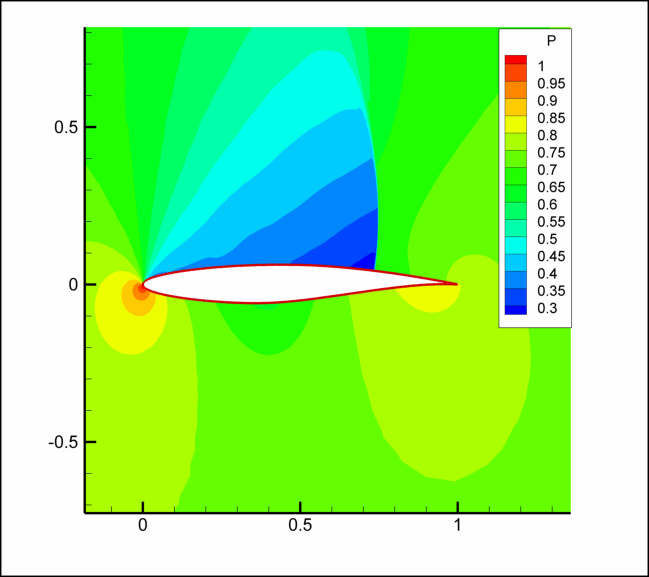
1. کانتور فشار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 7.0 درجه)

****

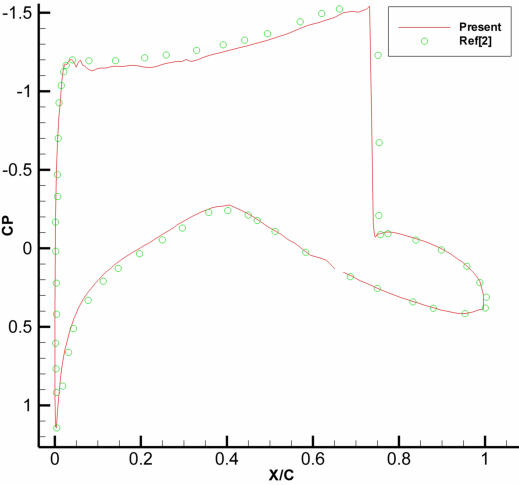
1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 7.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I9

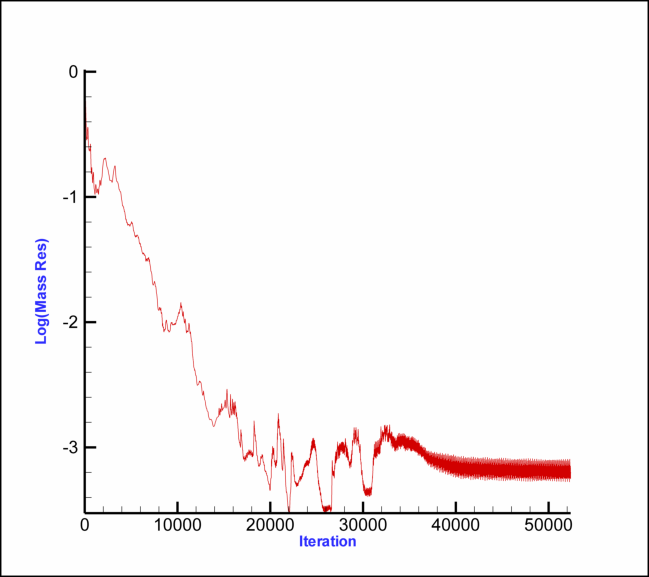
در این آزمایش جریان اطراف ایرفویل فوق بحرانی شبیه سازی شده است که بر روی سطح بالایی ایرفویل یک شوک قوی وجود دارد و به این دلیل در محل شوک شبکه ریزتر شده است. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.25 و 0.008 انتخاب شده است.

****

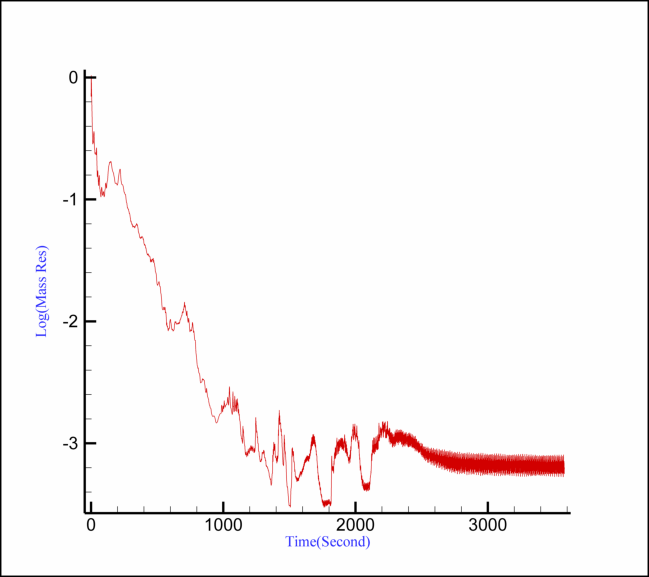
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

****

1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

****

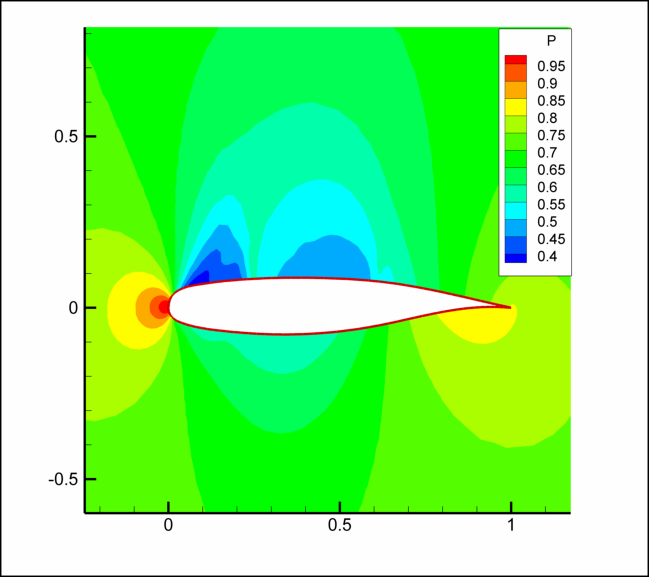
1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

****

1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I10

ایرفویل NLR7301 بدلیل شعاع لبه حمله زیاد آن یکی از سخت ترین آزمایشات جهت اعتبار سنجی کد می باشد. باید بخاطر داشت که کد ارائه شده در این گزارش توانایی بالایی برای شبیه سازی این جریان پیچیده را ندارد هرچند آزمایشات ارائه شده در بخش های قبل موید این مطلب است که این کد بطور صحیحی پیاده سازی شده است. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.25 و 0.008 انتخاب شده است.

****

1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

****

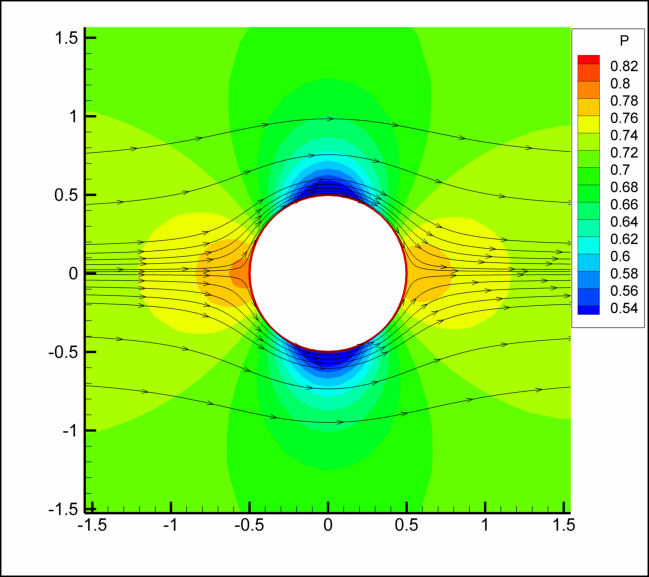
1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

****

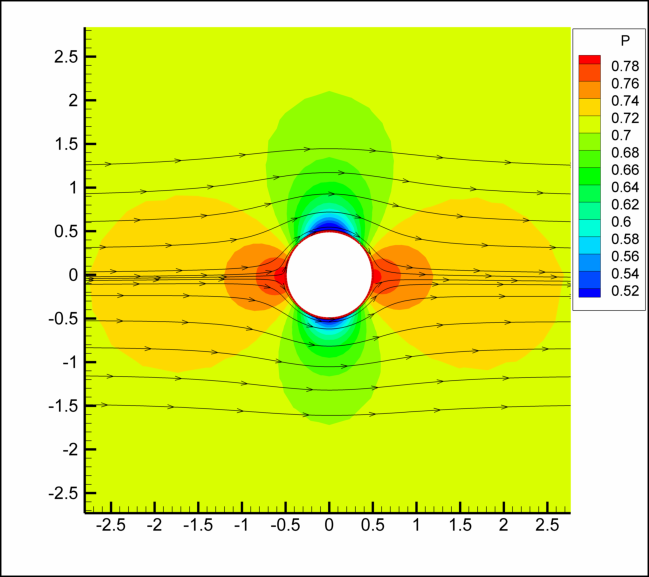
1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I11

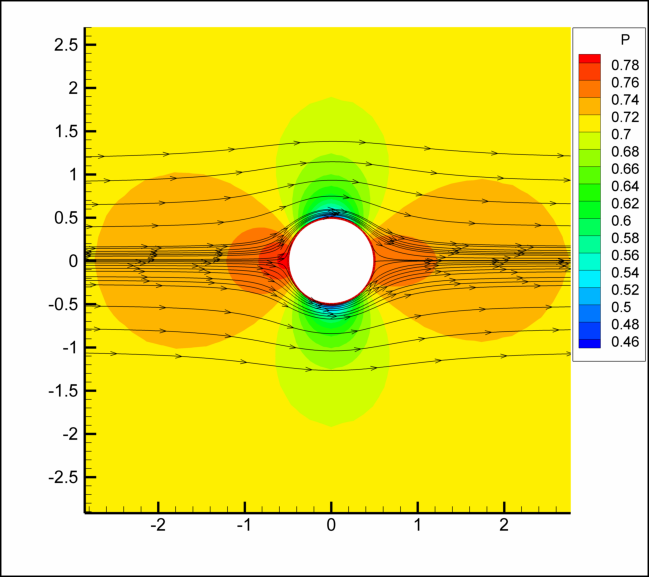
شبیه سازی جریان اطراف استوانه یکی از آزمایشاتی می باشد که مطالعات زیادی بر روی آن برای اعتبارسنجی کدها انجام شده است. در اینجا ضرایب k2 و K4 موجود در روش گسسته سازی مرکزی جیمسون بترتیب برابر 0.65 و 0.008 انتخاب شده است. در این آزمایش جریان نسبت به هر دو محور x و y دارای تقارن می باشد. همانگونه که در نمودار مربوط به ضریب فشار مشخص می باشد نمودار ضریب فشار برای شبکه باسازمان تطابق خوبی با نتایج تحلیلی دارد اما برای شبکه بی سازمان درشت تقارنی نسبت به محور x مشاهده نمی باشد، با ریزتر شدن شبکه اگرچه تقارن ذکر شده اتفاق می افتد اما اعوجاج زیادی اتفاق می اقتد که این موضوع با ریز کردن بیشتر شبکه شدیدتر می شود.

****

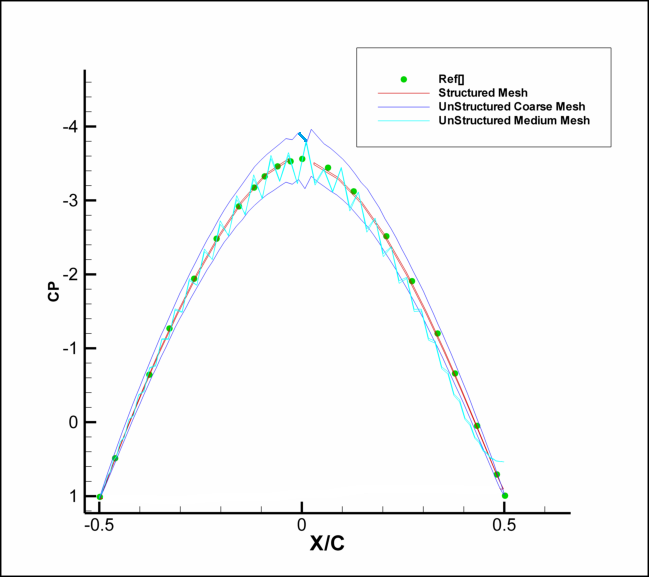
1. کانتور فشار-شبکه باسازمان(عدد ماخ 0.38 و زاویه حمله 0.0 درجه)



1. کانتور فشار-شبکه بی سازمان درشت (عدد ماخ 0.38 و زاویه حمله 0.0 درجه)



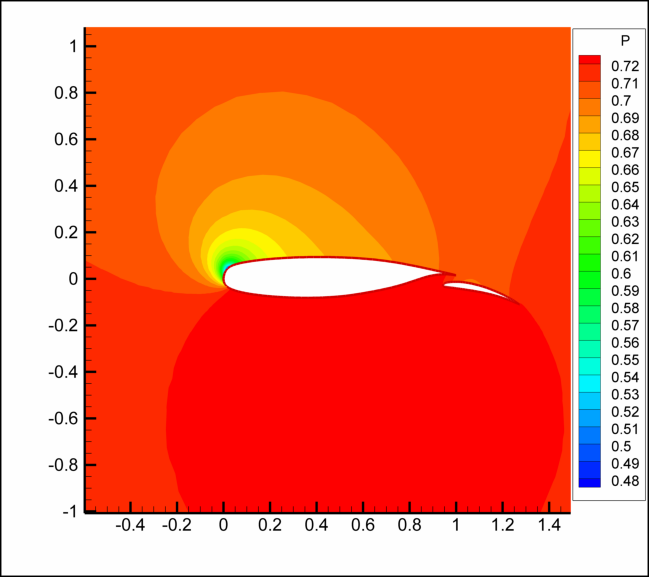
1. کانتور فشار-شبکه بی سازمان ریز (عدد ماخ 0.38 و زاویه حمله 0.0 درجه)

****

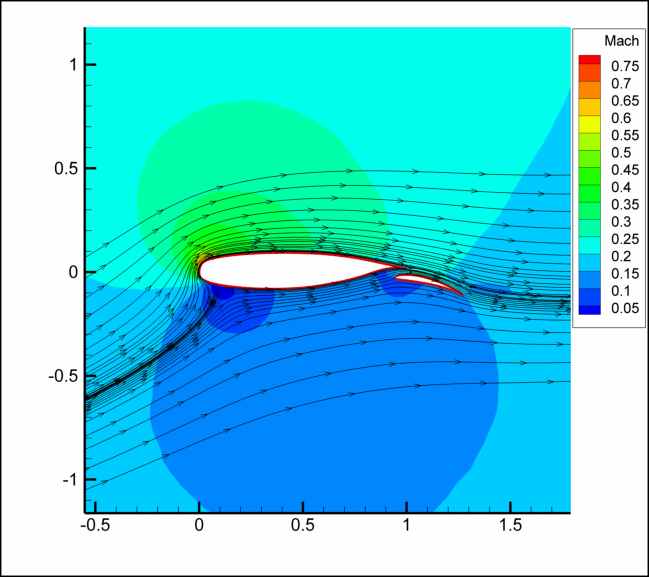
1. نمودار ضریب فشار برای شبکه های مختلف (عدد ماخ 0.38 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I13

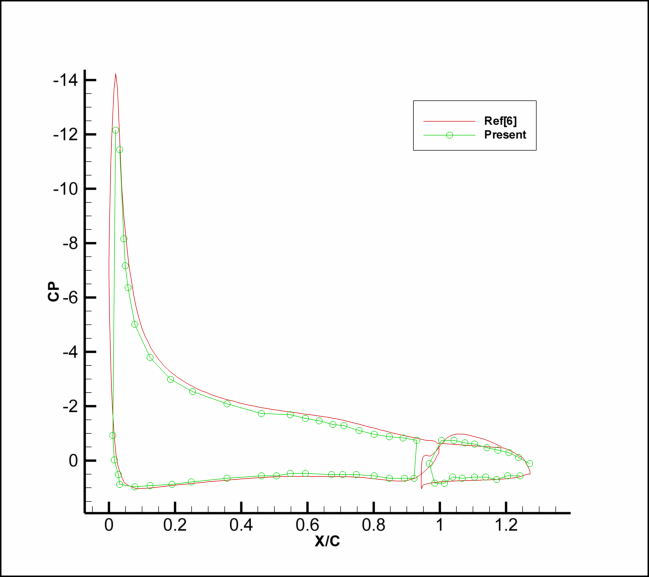
در این آزمایش جریان اطراف یک ایرفویل دو المانه شبیه سازی شده است و نتایج آن با نتایج مربوط به داده های آزمایشگاهی یک جریان مغشوش مقایسه شده است. اگرچه این آزمایش نمی تواند جهت اعتبارسنجی کد بکار رود اما توانایی کد توسعه داده شده برای هندسه های پیچیده را نشان می دهد.



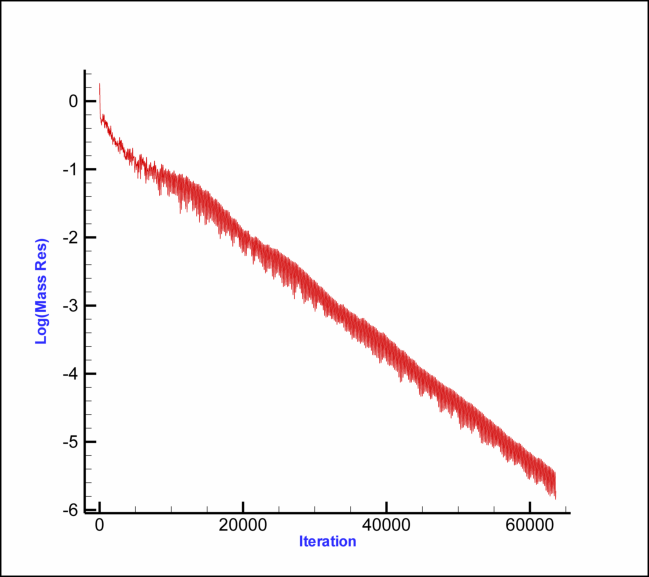
1. کانتور فشار برای شبکه های مختلف (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)



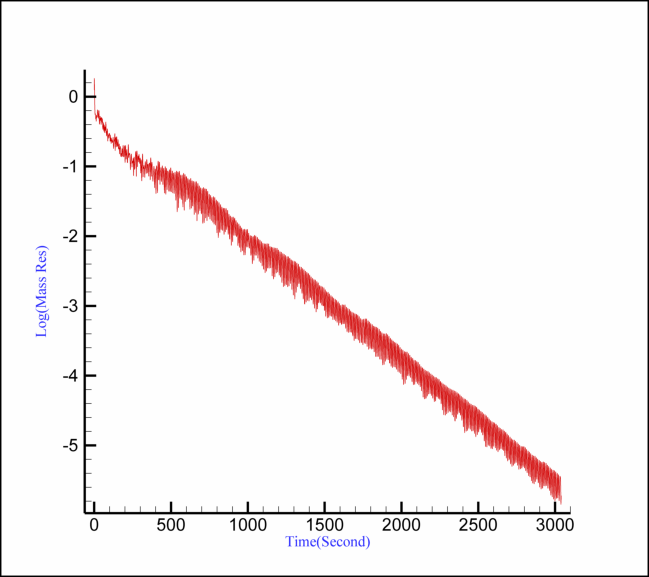
1. کانتور ماخ برای شبکه های مختلف (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)



1. نمودار ضریب فشار برای شبکه های مختلف (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)



1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)

****

1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)