

****

**عنوان:**

اعتبارسنجی کد غیرلزج دوبعدی به روش AUSM+up

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **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 7](#_Toc510806613)

# مشخصات کد، شبکه های استفاده شده و آزمایشات

* + - * 1. 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 | AUSM+up |

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 |
| 2I009 | متوسط |
| 2I010 | ریز |
| 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 |  |
| 2I11 | 0.38 | 0.0 | Cylinder | 2V002 | باسازمان |
| 2I019 | بی سازمان درشت |
| 2I020 | بی سازمان متوسط |
| 2I021 | بی سازمان ریز |
| 2I13 | 0.185 | 13.1 | NLR7301+Flap | 2I016 |  |
| 2I17 | 0.05 | 2.0 | NACA0012 | 2I004 |  |

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 |
| 2I0010 | NACA0012 | مثلثی | 46468 | 23512 | 400 | 160 |
| 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 |
| 2I020 | Cylinder | مثلثی | 37632 | 19024 | 288 | 128 |
| 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

* + - * 1. 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

* + - * 1. این شبکه بعنوان شبکه متوسط (شبکه ریزتر شده) برای شبکه 2I08 می باشد.

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

## 2I010

* + - * 1. این شبکه بعنوان شبکه ریز (شبکه ریزتر شده) برای شبکه 2I008 می باشد.

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

## 2I011

* + - * 1. 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

* + - * 1. 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

* + - * 1. 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

* + - * 1. 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

* + - * 1. 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 |

## 2I020

* + - * 1. تفاوت این شبکه با شبکه 2I019 در اینست که در اینجا تعداد سلول های شبکه دو برابر شده است.

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

## 2V002

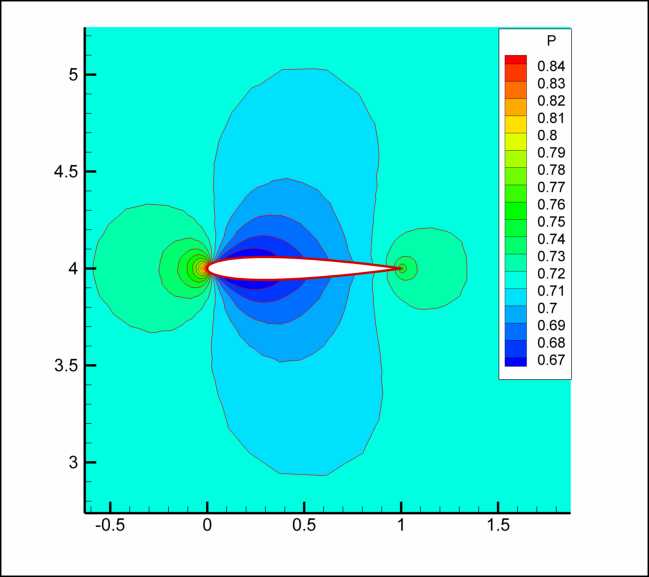
* + - * 1. نوع این شبکه باسازمان می باشد اما بصورت بی سازمان ذخیره شده است.

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

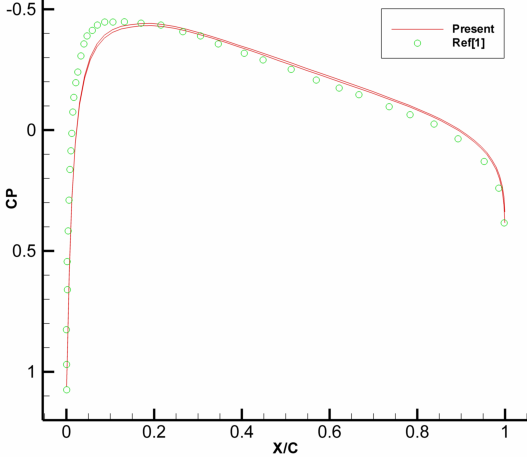
# نتایج آزمایش های انجام شده جهت اعتبار سنجی کد حاضر

## آزمایش شماره 2I4

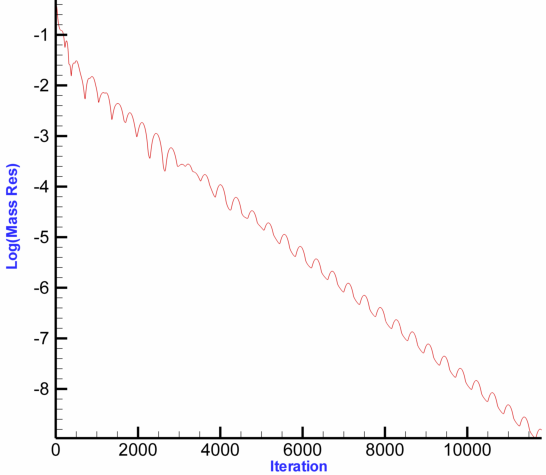
* + - * 1. این آزمایش یکی از ساده ترین آزمایشات برای اطمینان از صحت پیاده سازی می باشد زیرا هیچ شوک و یا گرادیان شدیدی در میدان جریان وجود ندارد. همانگونه که مشاهده می شود نمودار ضریب فشار برای سطح بالا و پایین ایرفویل تقریبا یکسان می باشد که با واقعیت موجود در فیزیک این جریان همخوانی دارد.



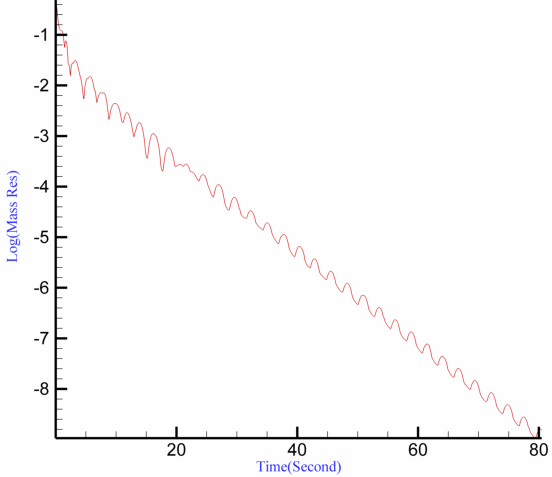
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 0.0 درجه)



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



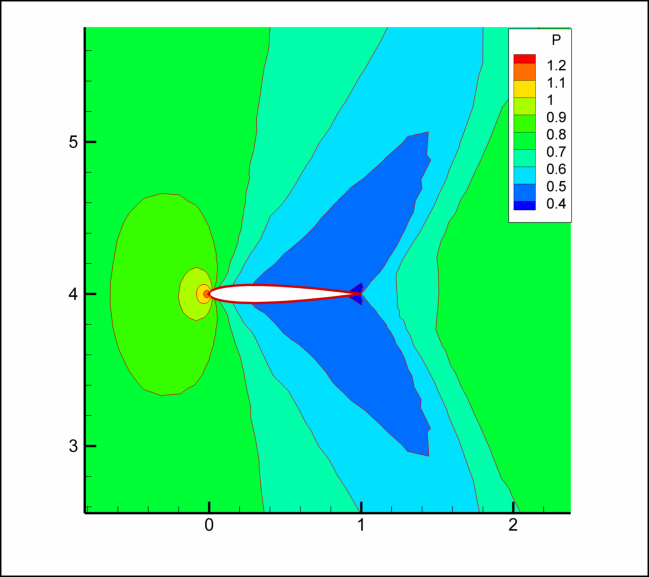
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 0.0 درجه)



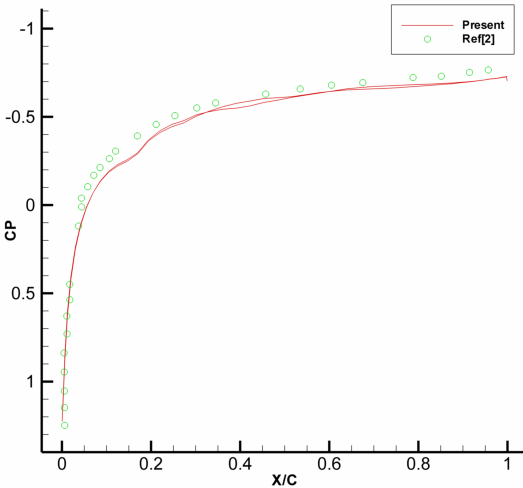
1. نمودار همگرایی-زمان (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I1

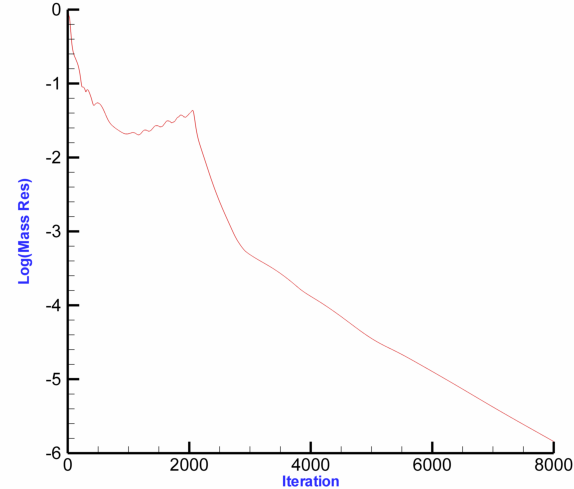
* + - * 1. این آزمایش بدلیل زاویه حمله صفر درجه و جریان گذر صوتی می تواند مقیاس خوبی برای اعتبارسنجی کد حاضر باشد.



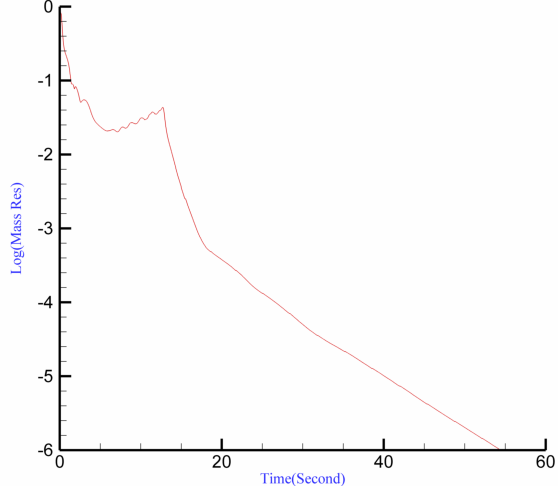
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.95 و زاویه حمله 0.0 درجه)



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



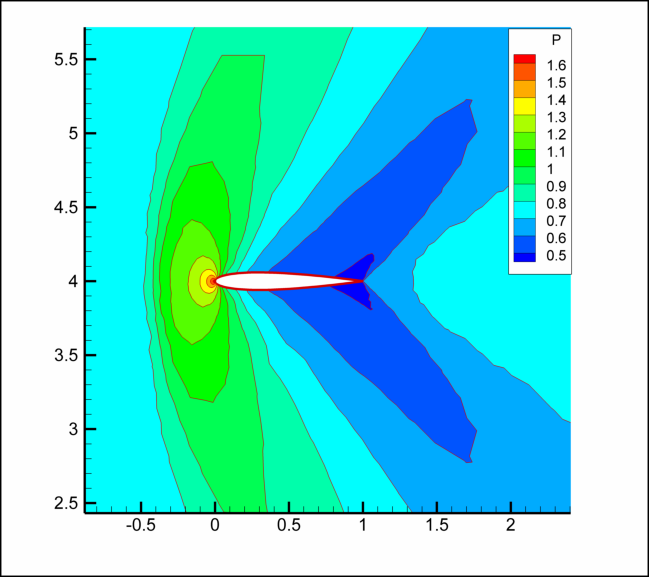
1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 0.95 و زاویه حمله 0.0 درجه)



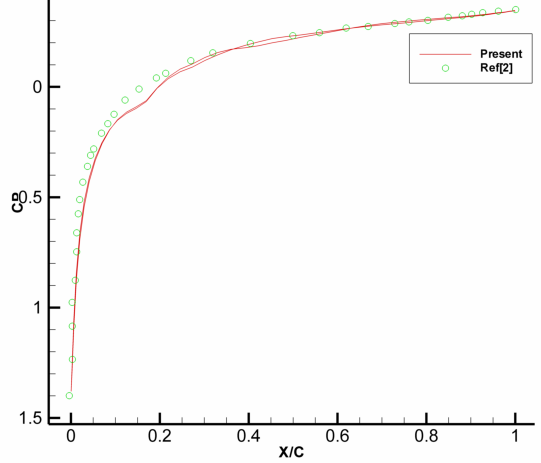
1. نمودار همگرایی بر حسب زمان (عدد ماخ 0.95 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I2

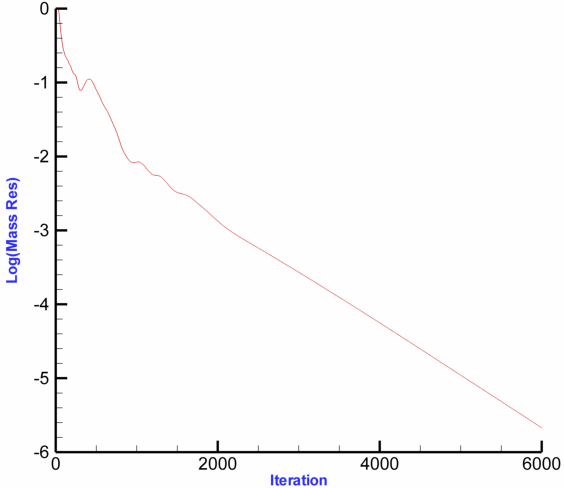
* + - * 1. این آزمایش مانند آزمایش قبل می باشد با این تفاوت که جریان مافوق صوت می باشد و می تواند برای اعتبار سنجی شرایط مرزی که در بیشتر موارد وابسته به عدد ماخ می باشد، بکار رود.



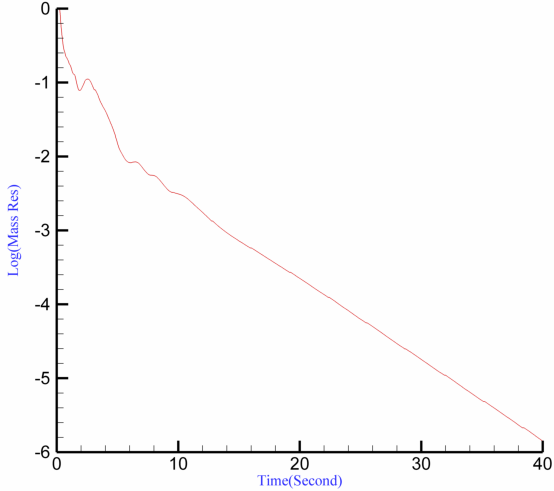
1. کانتور فشار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 0.0 درجه)



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



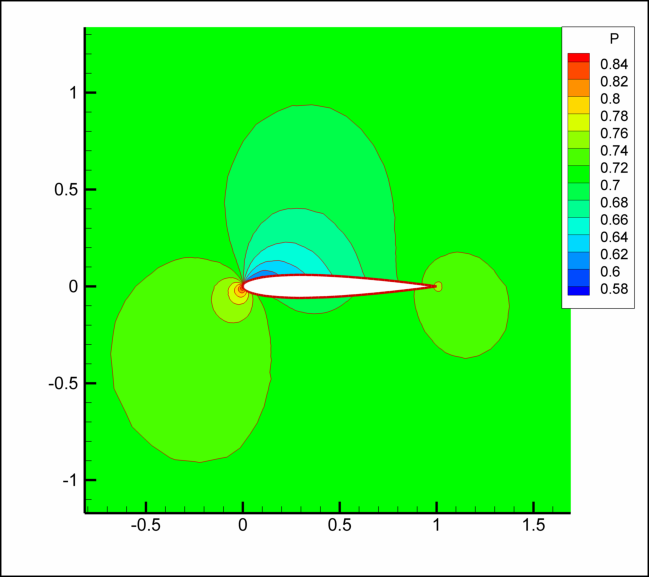
1. نمودار همگرایی بر حسب تکرار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 0.0 درجه)



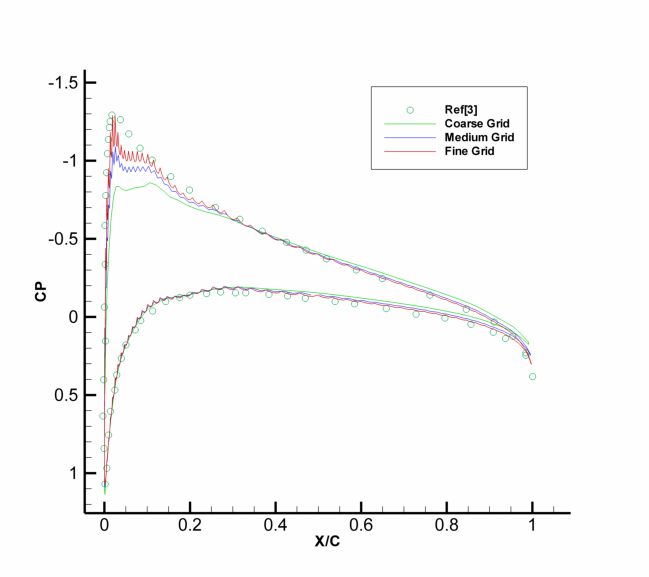
1. نمودار همگرایی بر حسب زمان (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I3

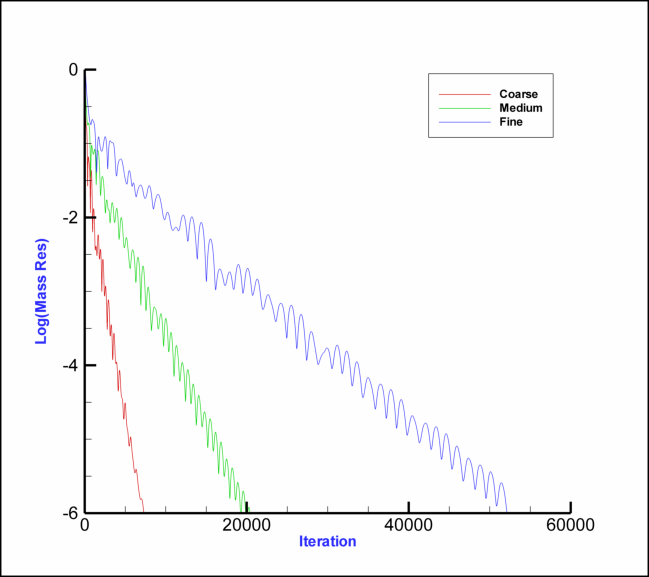
* + - * 1. در این آزمایش تاثیر ریزی شبکه بررسی می شود. شبکه درشت دارای 2904 سلول بوده، شبکه متوسط 11616 و شبکه ریز دارای 46468 سلول می باشد. همانگونه که از نمودار ضریب فشار مشاهده می شود، با ریز شده شبکه نمودار ضریب فشار دقیق تر می شود اما بدلیل خطای عددی با ریز شدن شبکه در لبه حمله این نمودار دارای نوسانات شدیدی می شود.



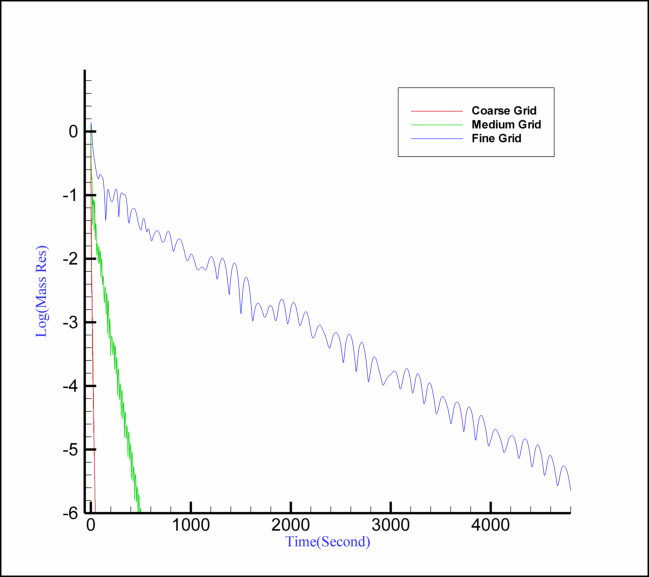
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 3.0 درجه)



1. مقایسه نمودار ضریب فشار برای شبکه های مختلف (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 3.0 درجه)



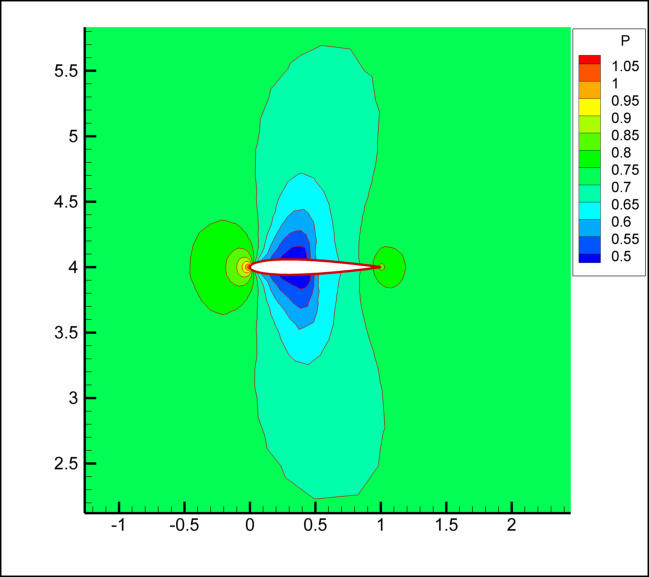
1. نمودار همگرایی-تکرار برای شبکه­های مختلف (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 3.0 درجه)



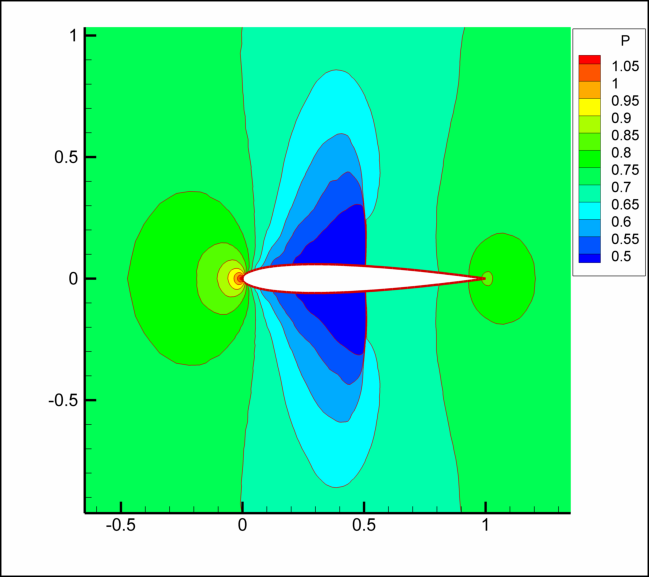
1. نمودار همگرایی-زمان برای شبکه های مختلف (عدد ماخ 0.5 و زاویه حمله 3.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I5

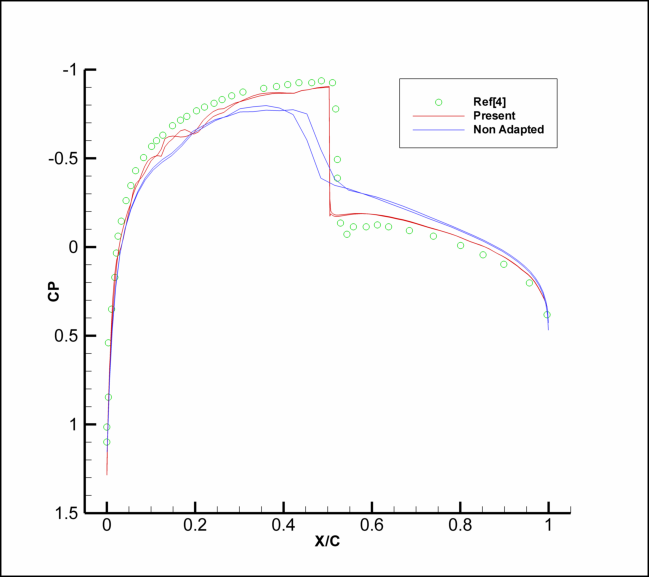
* + - * 1. در این آزمایش با وجود زاویه حمله صفر درجه بدلیل عدد ماخ بالا، دو شوک در بالا و پایین ایرفویل تشکیل می گردد. در اینجا از دو شبکه متفاوت استفاده شده است تا تاثیر ریزی شبکه در محل شوک مطالعه شود. همانگونه که در نمودار ضریب فشار مشخص است، استفاده از شبکه ای که در محل شوک ریز شده است، باعث جواب بهتر می شود. لازم است توجه شود که از شبکه2I004 بعنوان شبکه یکنواخت و از شبکه 2I014 بعنوان شبکه سازگار شده استفاده شده است.

****

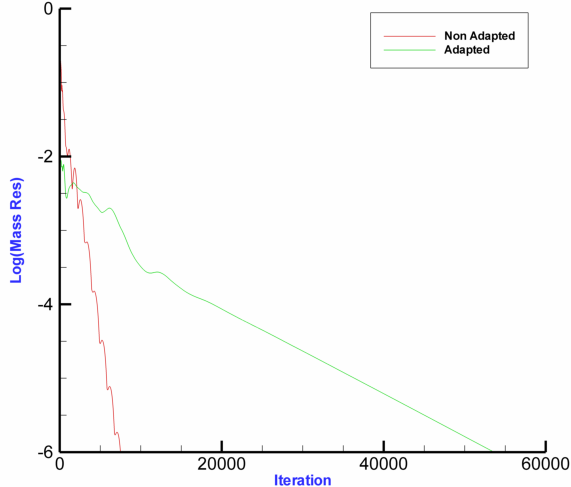
1. کانتور فشار بر روی شبکه یکنواخت (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 0.0 درجه)

****

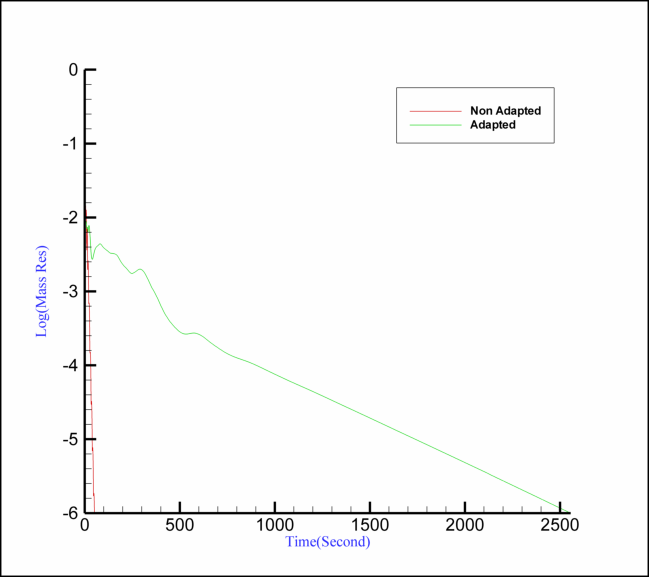
1. کانتور فشار بر روی شبکه ریز شده در محل شوک (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 0.0 درجه)

****

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

****

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



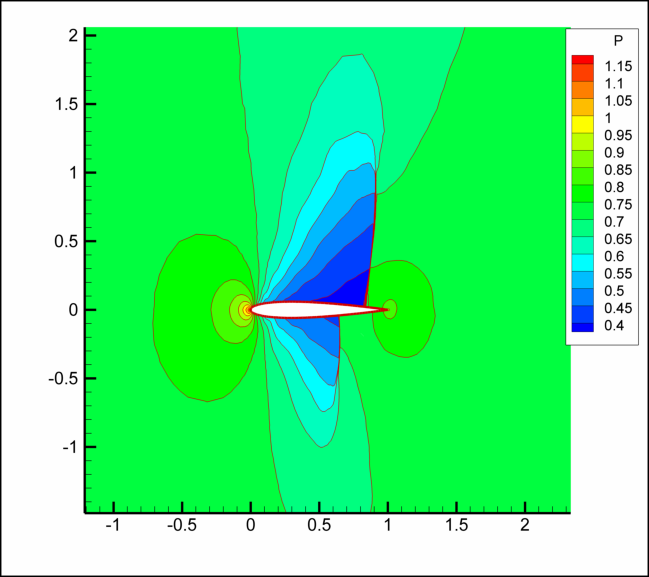
1. نمودار همگرایی-زمان برای شبکه ریز شده و ریز نشده در محل شوک (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I6

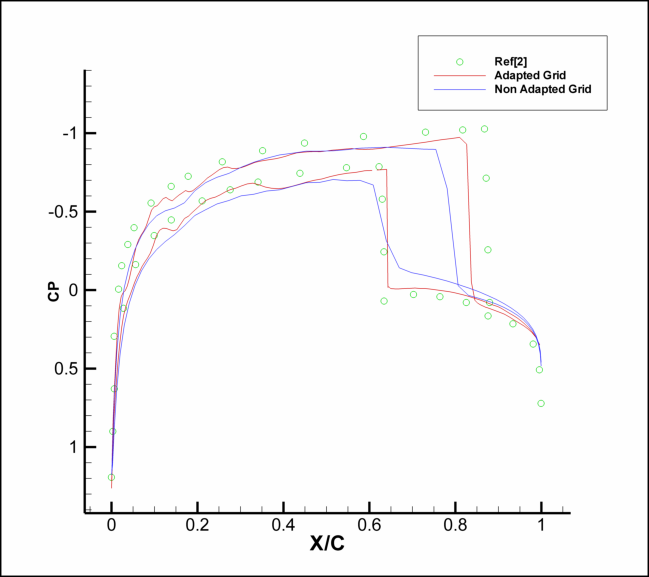
* + - * 1. در این آزمایش زاویه حمله 1 درجه می باشد که بدلیل عدد ماخ بالا دو شوک در بالا و پایین ایرفویل در مکان های مختلف تشکیل می گردد. در اینجا از دو شبکه متفاوت استفاده شده است تا تاثیر ریزی شبکه در محل شوک مطالعه شود. همانگونه که در نمودار ضریب فشار مشخص است، استفاده از شبکه ای که در محل شوک ریز شده است باعث جواب بهتر می شود.

****

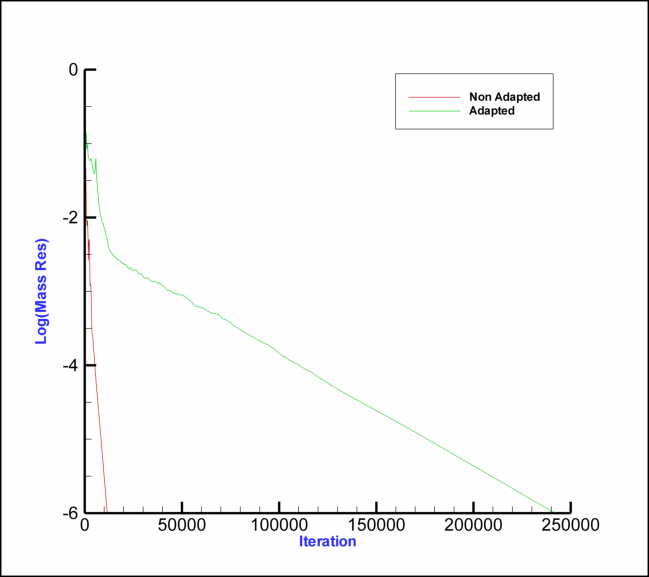
1. کانتور فشار بر روی شبکه یکنواخت (عدد ماخ 0.85 و زاویه حمله 1.0 درجه)

****

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

****

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

****

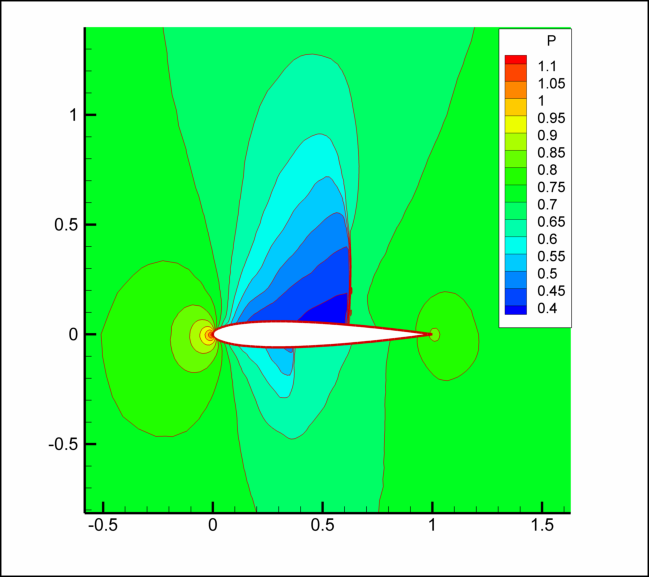
1. نمودار همگرایی برای شبکه ریز شده و ریز نشده در محل شوک (عدد ماخ 0.85 و زاویه حمله 1.0 درجه)



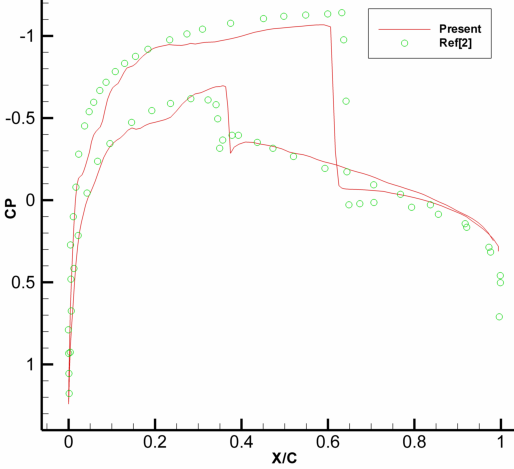
1. نمودار همگرایی برای شبکه ریز شده و ریز نشده در محل شوک (عدد ماخ 0.85 و زاویه حمله 1.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I7

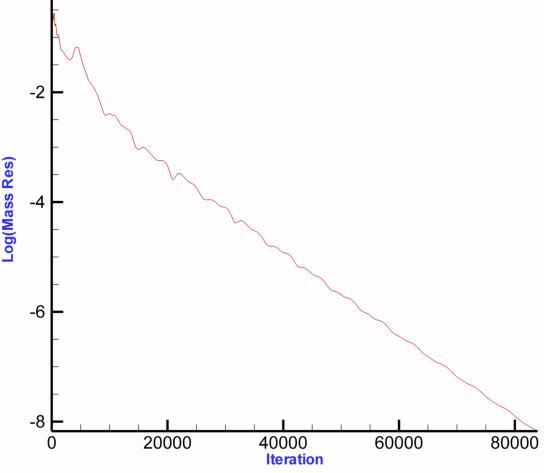
* + - * 1. در این آزمایش دو شوک قوی وجود دارد که به این دلیل در محل شوک شبکه های استفاده شده ریزتر شده است.

****

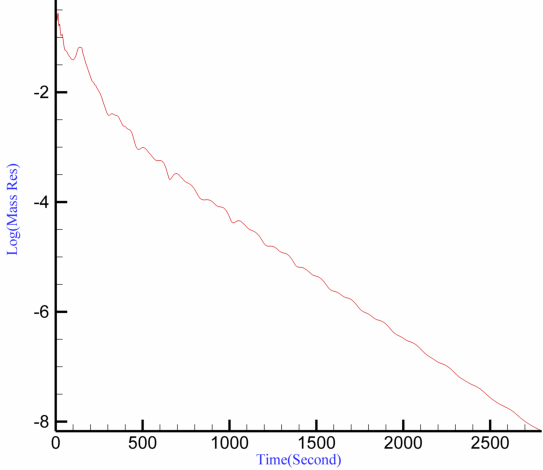
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 1.25 درجه)

****

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

****

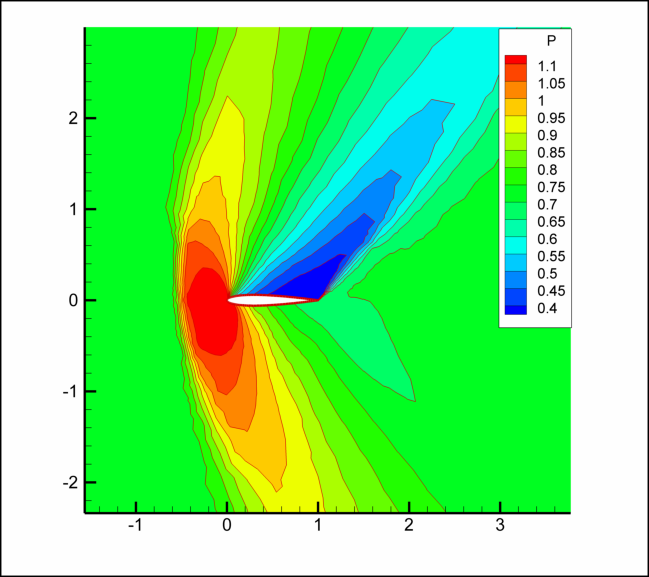
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 1.25 درجه)



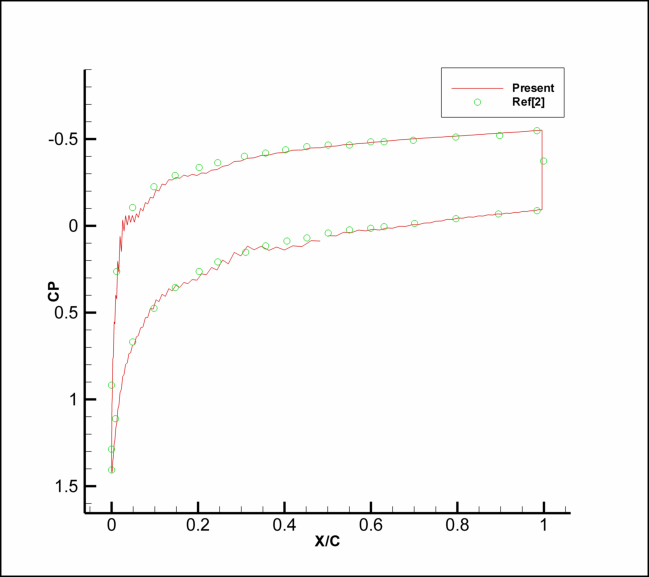
1. نمودار همگرایی-زمان (عدد ماخ 0.8 و زاویه حمله 1.25 درجه)

## آزمایش شماره 2I8

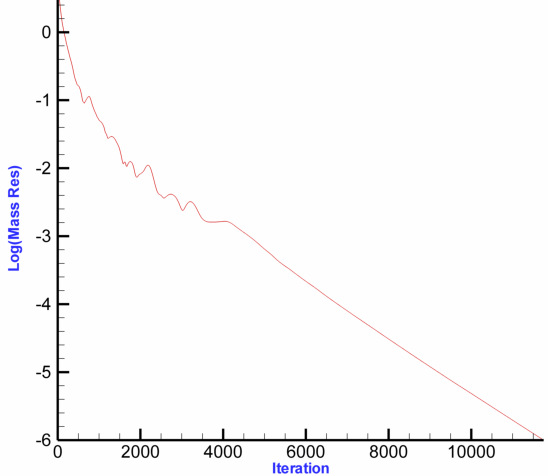
* + - * 1. در این آزمایش زاویه حمله 7 درجه می باشد که می توان آن را یک زاویه حمله بالا دانست.

****

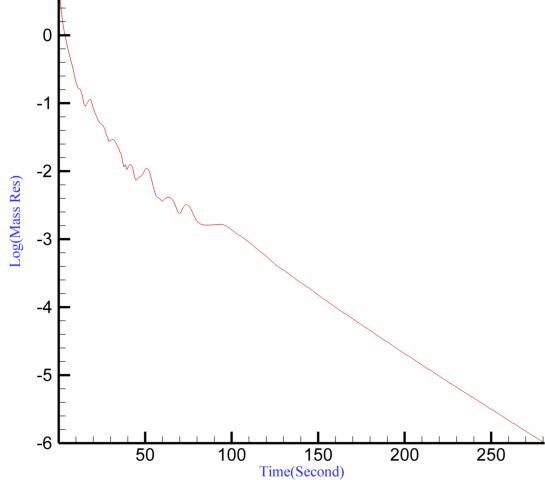
1. کانتور فشار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 7.0 درجه)

****

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

****

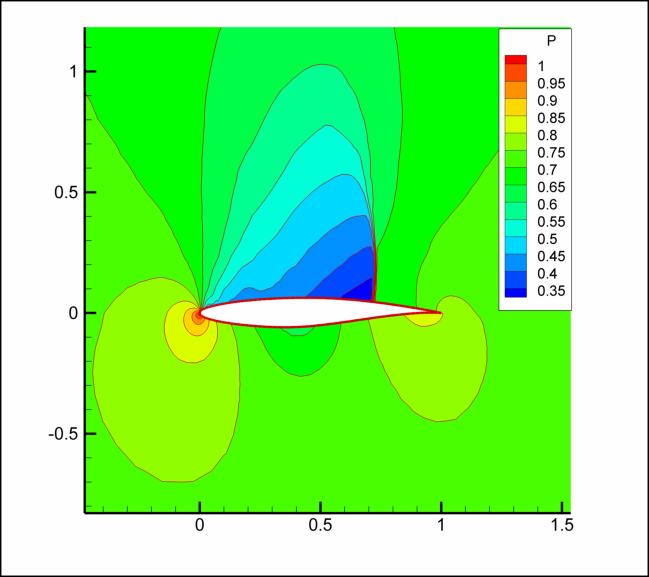
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 7.0 درجه)



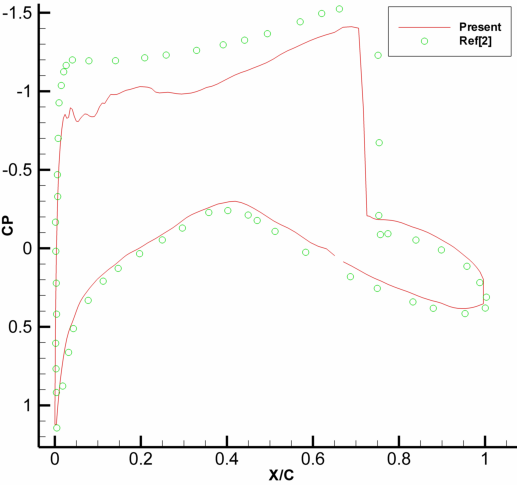
1. نمودار همگرایی-زمان (عدد ماخ 1.2 و زاویه حمله 7.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I9

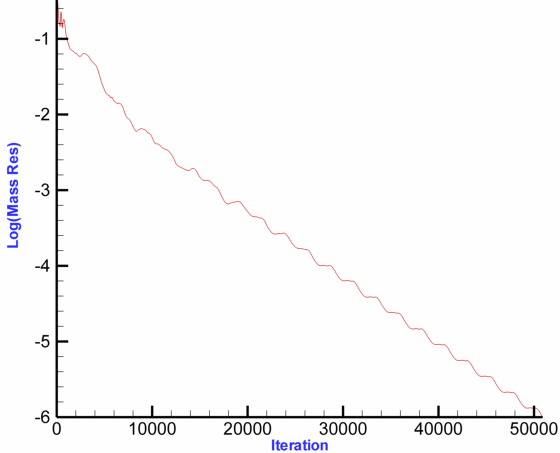
* + - * 1. در این آزمایش جریان اطراف ایرفویل فوق بحرانی شبیه سازی شده است که بر روی سطح بالایی ایرفویل یک شوک قوی وجود دارد و به این دلیل در محل شوک شبکه ریزتر شده است.

****

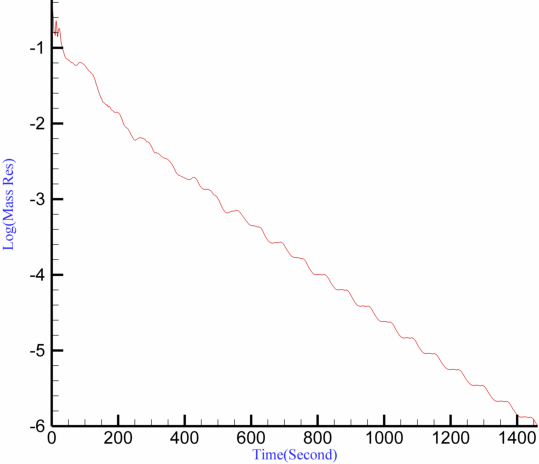
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

****

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

****

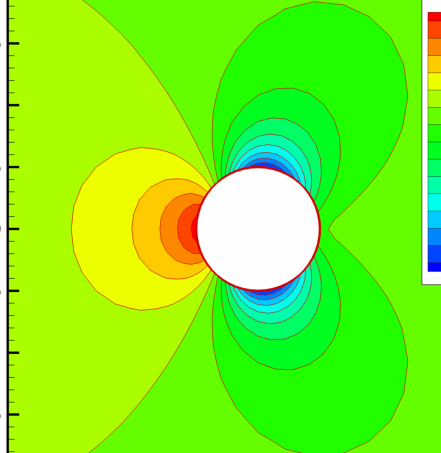
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)



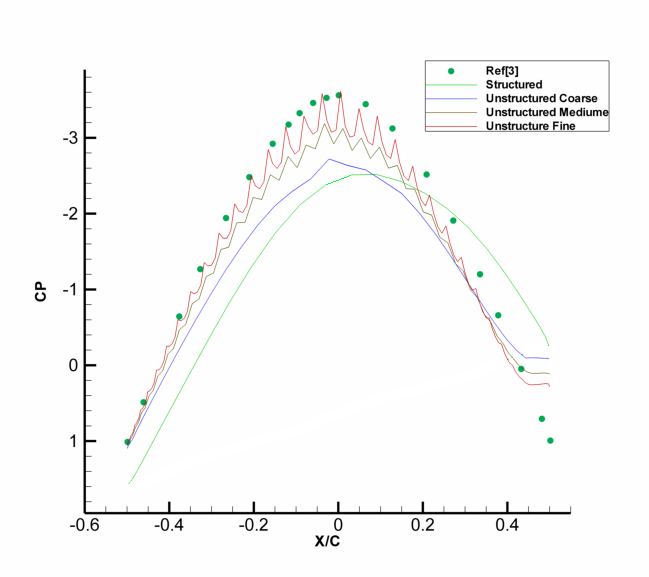
1. نمودار همگرایی-زمان (عدد ماخ 0.75 و زاویه حمله 3.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I11

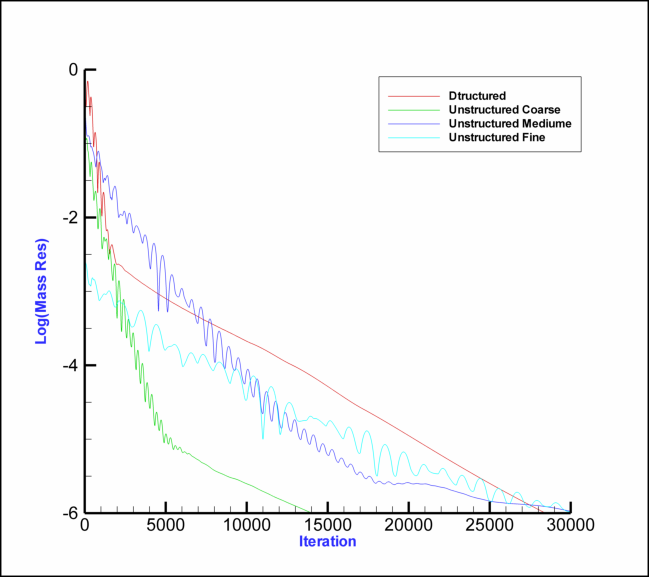
* + - * 1. شبیه سازی جریان اطراف استوانه یکی از آزمایشاتی می باشد که مطالعات زیادی بر روی آن برای اعتبارسنجی کدها انجام شده است. در این آزمایش جریان نسبت به هر دو محور x و y دارای تقارن می باشد. این آزمایش یکی از پیچیده ترین آزمایشات می باشد و اغلب روش های مرتبه اول از مدلسازی صحیح آن ناتوانند. با توجه به تقارت ذکر شده، کانتور فشار باید نسبت به محورهای مختصات متقارن باشد که این مورد در نتیجه بدست آمده دیده نمی شود. بنابراین برای مدلسازی چنین جریان پیچیده ای ناگزیر باید روش های با مرتبه دقت بالاتر مورد استفاده قرار گیرد.

****

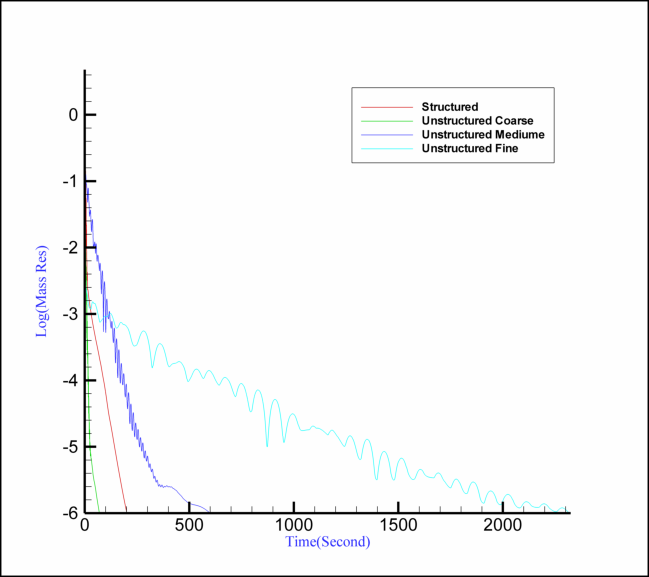
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.38 و زاویه حمله 0.0 درجه)

****

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

****

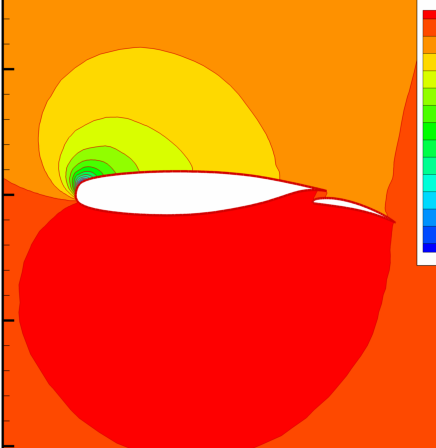
1. مقایسه نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.38 و زاویه حمله 0.0 درجه)



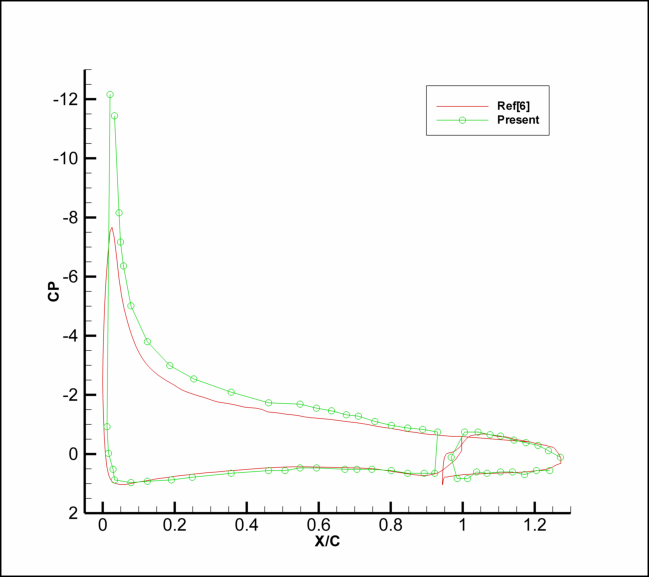
1. مقایسه نمودار همگرایی-زمان (عدد ماخ 0.38 و زاویه حمله 0.0 درجه)

## آزمایش شماره 2I13

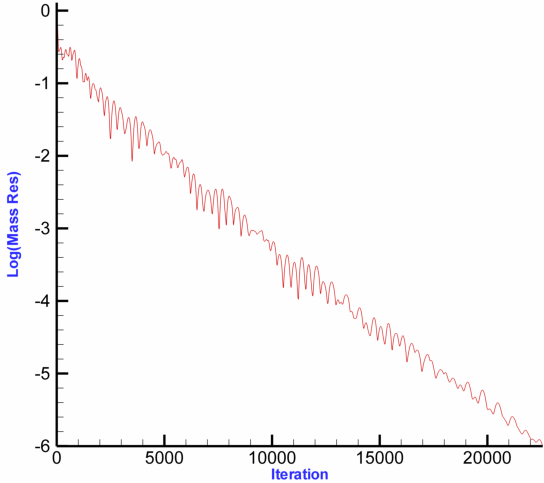
* + - * 1. در این آزمایش جریان اطراف یک ایرفویل دو المانه شبیه سازی شده است و نتایج آن با نتایج مربوط به داده های آزمایشگاهی یک جریان مغشوش مقایسه شده است. اگرچه این آزمایش نمی تواند جهت اعتبارسنجی کد بکار رود اما توانایی کد توسعه داده شده برای هندسه های پیچیده را نشان می دهد.



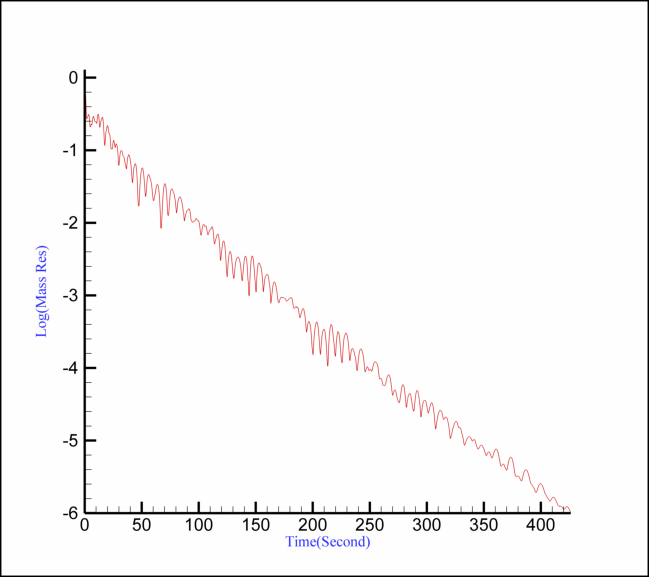
1. کانتور فشار برای شبکه های مختلف (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)



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

****

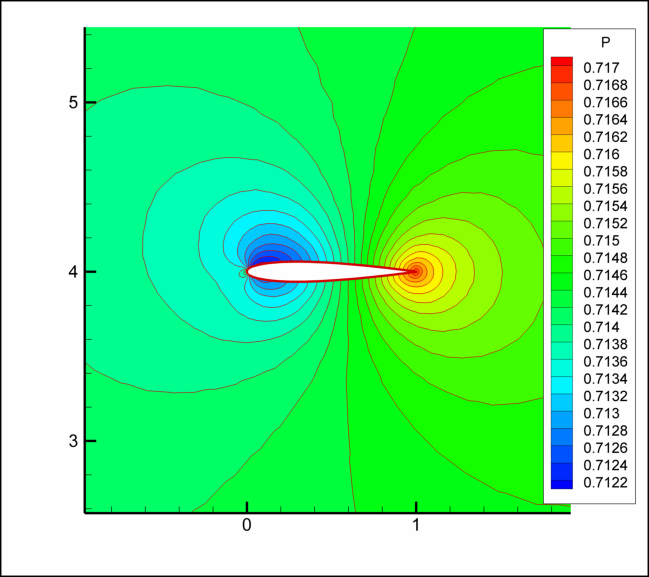
1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)



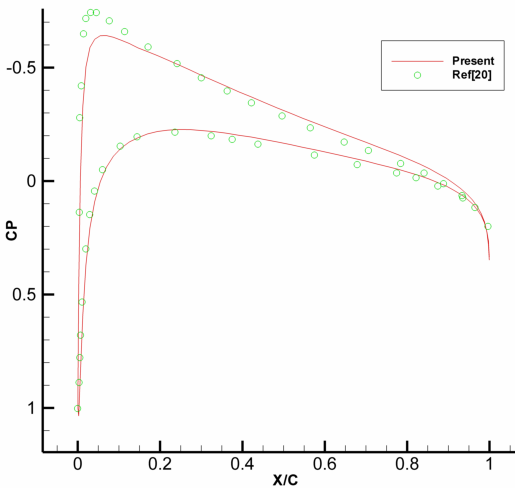
1. نمودار همگرایی-زمان (عدد ماخ 0.185 و زاویه حمله 13.1 درجه)

## آزمایش شماره 2I17

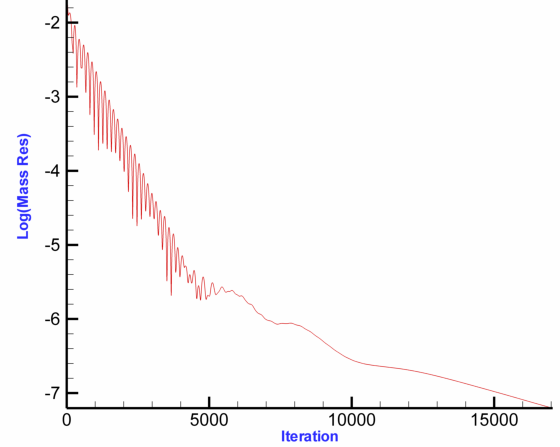
* + - * 1. این آزمایش بدلیل بررسی جریان در حال سرعت خیلی پایین است. همانگونه که نتایج مشخص است این روش بدون اعمال روش های پیش شرطی جواب های خوبی نشان می دهد.



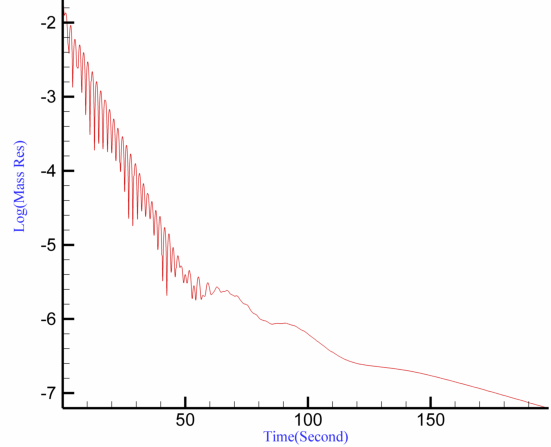
1. کانتور فشار (عدد ماخ 0.05 و زاویه حمله 2.0 درجه)



1. نمودار ضریب فشار (عدد ماخ 0.05 و زاویه حمله 2.0 درجه)



1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.05 و زاویه حمله 2.0 درجه)



1. نمودار همگرایی-تکرار (عدد ماخ 0.05 و زاویه حمله 2.0 درجه)