



**زیربرنامه:**

ConMeanFlow\_CUSP\_Zha

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **توسعه دهندگان** | مرتضی نامور |  |
| **تهیه کنندگان مستند** | مرتضی نامور | |
| **تاییدکنندگان** |  | |
| **تاریخ تنظیم سند** | 22/02/94 | |
| **شناسه سند** | **MC2F091F1** | |
| **زبان برنامه‌نویسی** | **Fortran 90** | |

1. وظایف

در زیربرنامه‌ی حاضر، مقدار ترم مربوط به شار غیرلزج[[1]](#footnote-1) در معادلات حاکم بر جریان سیال با استفاده از روش Zha-CUSP2 محاسبه می‌گردد. این روش از نوع E-CUSP بوده که در آن ترم مربوط به شار غیرلزج به دو بخش جابجایی[[2]](#footnote-2) و فشاری[[3]](#footnote-3) تقسیم می‌شود که در بخش مربوط به جابجایی در معادله‌ی انرژی، کمیت انرژی کل را به جای آنتالپی کل (در روش H-CUSP) خواهیم داشت. روش E-CUSP پیشنهادی توسط ژا[[4]](#footnote-4) مقدار اتلاف[[5]](#footnote-5) کمی داشته و قابلیت تسخیر موج شوک با پروفیل تیز و ناپیوستگی تماسی با دقت بالا را داراست. این زیربرنامه می‌تواند برای جریان‌های غیرلزج، آرام و مغشوش بکار برده شود.

1. توضیحات و تئوری

بخش جابجایی معادلات نشان‌دهندة شار عبوري از مرز‌هاي سلول مي‌باشد. در اینجا نحوه‌ی گسسته‌سازی بخش جابجایی معادلات به کمک روش Zha-Cusp2 شرح داده می‌شود.

معادلات حاکم بر جریان غیرلزج معادلات اویلر می‌باشد که در دو بعد و به فرم ماتریسی به صورت زیر نوشته می‌شود[1] :

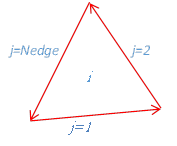
|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که پس از انتگرال گیری به روش حجم محدود بر روی هر سلول خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

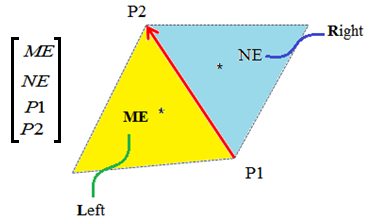
اگر مرزهای حجم کنترل یعنی *s* را در یک شبکه محاسباتی بصورت گسسته شده مانند ‏شکل (1) در نظر بگیریم، بخش جابجایی معادلات برای هر سلول بصورت زير محاسبه می‌شود[2] :

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |



1. مرزهای گسسته شده یک سلول[2]

در رابطه‏(3)، *j* شمارنده اضلاع حجم کنترل مي‌باشد. ذکر این نکته بسیار حائز اهمیت است که فرض می‌شود مقادیر بقایی *W* در یک حجم کنترل برابر مقدار آن در مرکز حجم کنترل است. همچنین با توجه به حساسیت و توجه بسیار به ساختار داده‌ای در هنگام پیاده‌سازی روش Zha-Cusp2، یکبار دیگر نحوه ذخیره‌سازی نقاط و همسایه‌های یک ضلع آورده می‌شود:



1. سلول های سمت چپ و راست یک ضلع[2]

در محاسبه شارها منظور از Lهمان سلول سمت چپ يا در واقع همان سلول اصلی و R نشان‌دهنده سلول سمت راست يا سلولي که در همسايگي سلول اصلی قرار دارد، می باشد.

ماتریس متغیرهای بقایی () و شارهای جابجایی () در دو بعد به صورت زیر می‌باشند:

|  |  |
| --- | --- |
|  | , , |

که در آن برای آنتالپی داریم:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

با در نظر گرفتن رابطه ‏(4)، می توان شار جابجایی عبوری از هر ضلع سلول () را بصورت زیر بازنویسی نمود[2] :

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که در رابطه‌ی ‏(6)، برای ، که سرعت عمود بر ضلع می‌باشد داریم:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

روش جابجایی بالادست تقسیم فشار[[6]](#footnote-6) (CUSP)، همان‌گونه که از اسم آن مشخص است جزو گروه روش‌های بالادست بوده و از تئوری مشخصه‌ها[[7]](#footnote-7) برای محاسبه‌ی شار غیرلزج استفاده می‌کند که خود موجب گردیده تا دقت و پایداری روش به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد[3]. این روش اولین بار در سال 1993 توسط جیمسون[3] ارائه شد. جیمسون روش کاسپ اولیه را بر اساس اضافه نمودن اتلاف مصنوعی[[8]](#footnote-8) به حل پیشنهاد نمود و فرمولی شبیه به روش‌های مرکزی[[9]](#footnote-9) داشت:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که در رابطه‌ی بالا مقدار شار جابجایی عبوری از ضلع سلول بوده و بر اساس عدد ماخ به فرم زیر نوشته می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

نیز ترم مربوط به اتلاف عددی است و شامل یک ترکیب خطی از تفاوت بین مقدار متغیرهای بقایی و شار جابجایی در دو سمت ضلع می‌باشد که برای جلوگیری از نوسانات حل به معادله اضافه می‌شود[6,7]:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که در اینجا برای ترم دو انتخاب وجود دارد. اگر که ترم به صورت انرژی کل (E) بیان گردد روش E-CUSP را خواهیم داشت ولی اگر که به صورت آنتالپی کل (H) در نظر گرفته شود به آن روش H-CUSP گفته می‌شود. در روش H-CUSP به دلیل پایستار باقی ماندن مقدار آنتالپی کل برای استفاده در جریان‌های غیرلزج مناسب‌تر است، ولی روش E-CUSP در جریان‌های لزج از پایداری و دقت بالاتری برخوردار است چرا که مطابقت بیشتری با تئوری مشخصه‌ها و انتشار آشفتگی دارد.

ضریب در جمله‌ی شار اتلافی به صورت زیر می‌باشد:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

حال برای ضریب می‌توان تعریف زیر را در نظر گرفت:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که در آن یک مقدار خیلی کوچک است که در اینجا 0.5 در نظر گرفته می‌شود که علت آن این است که در نواحی نزدیک دیواره ضریب را برای بهتر شدن نتایج کد نویسی تصحیح کنیم. برای ضریب نیز داریم:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که با قرار دادن مقادیر در داریم:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

با توجه به اینکه در میانه‌ی وجوه محاسبه می‌شود، بنابراین تمام ضرایب و و c و باید مقادیر آنها در میانه وجوه حساب شود از طرفی چون ضرایب و به مقدار عدد ماخ در میانه وجوه () نیاز دارد باید با استفاده از عدد ماخ سمت چپ و راست طبق روابط زیر محاسبه گردد:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

در محاسبه‌ی شار­ها منظور از L همان سلول سمت چپ يا در واقع همان سلول اصلی و R نشان دهنده‌ی سلول سمت راست يا سلولي که در همسايگي سلول اصلی قرار دارد، می‌باشد.

پس از آن جیمسون و تاتسومی[8,9] برای بالا بردن دقت روش و بهینه نمودن مقدار ترم اتلاف ضرایب و را به فرم زیر تصحیح نمودند:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

از آنجایی که می‌دانیم ضرایب و مقادیرشان روی ضلع‌های سلول مورد نیاز است به همین خاطر باید مقادیر و را نیز با استفاده مقادیر سلول سمت چپ و راست و بر روی ضلع‌ها محاسبه نمود.

از طرفی هم می دانیم که می‌باشد و مقادیر ویژه و در ضریب نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

و نیز با استفاده از متغیرهای اولیه‌ی میانگین‌گیری به روش Roe محاسبه خواهند شد[10]:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

ژا[11] در سال 2004، با تأکید بر این نکته که مقدار اتلاف عددی روش‌های پیشین کاسپ بیش از میزان مورد نیاز مسئله بوده و باعث کاهش دقت در لایه‌ی مرزی مربوط به جریان‌های لزج و پروفیل شوک در جریان‌های مافوق صوت می‌شود، روش جدیدی را پیشنهاد نمود که بر مبنای روش E-CUSP بوده و مقدار اتلاف به مراتب بسیار کم‌تری را وارد مسئله می‌کند. این روش دو نسخه داشته که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود:

در روش E-CUSP شار غیرلزج به دو بخش جابجایی و فشاری تقسیم می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

در نسخه‌ی اول که Zha-CUSP نامیده می‌شود همانند روش E-CUSP شار غیرلزج شامل دو بخش جابجایی و فشاری بوده که مقدار بخش جابجایی در نواحی مافوق صوت به مانند روش‌های بالادست و بر اساس جهت جریان محاسبه می‌گردد و برای بخش فشاری نیز بر اساس وزنی از مقادیر ویژه در پایین و بالادست جریان میانگین گرفته می‌شود. بنابراین خواهیم داشت[11]:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

شارهای و بوده و از رابطه ‏(6) به‌دست می‌آیند و برای نواحی جریان با سرعت مافوق صوت با توجه به جهت جریان به‌کار می‌روند. مقدار شار در ناحیه‌ی مادون صوت بوده و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که برای ماتریس داریم:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

سرعت صوت از میانگین سرعت صوت در دو سمت ضلع به‌دست می‌آید:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

و برای ضریب شار جرم خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

که در آن:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

برای ضرایب و داریم:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

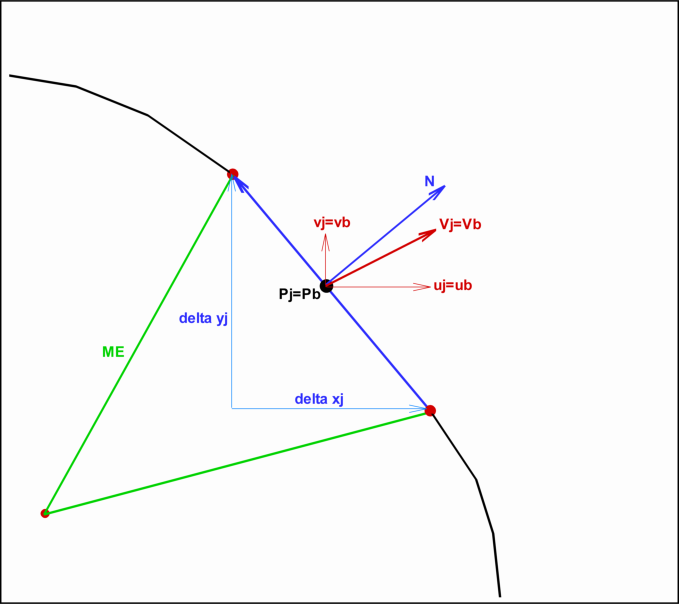
همان‌طور که گفته شد این روابط مربوط به نسخه‌ی اول روش Zha-CUSP بوده و قابلیت تسخیر شوک با پروفیل تیز و ناپیوستگی تماسی را به‌طور دقیق با کم‌ترین میزان اتلاف عددی داراست. مشکل این روش در رابطه با شبکه‌های دارای اضلاع با کجی زیاد است که سبب ایجاد نوسانات در کمیت دما در نزدیکی دیواره می‌شود و در واقع داشتن چنین شبکه‌هایی برای جریان‌های لزج کاملاً معمول و رایج است. بنابراین ژا[12] با انجام تصحیحاتی بر روی نسخه‌ی اول، روش Zha-CUSP2 را ارائه داد. در این روش به‌جای استفاده از کمیت فشار در محاسبه‌ی ضرایب و مربوط به معادله‌ی انرژی از کمیت آنتالپی کل (H) استفاده می‌شود. بنابراین:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

لازم به توضیح و تأکید است که در هنگام محاسبه‌ی شارهای مربوط به معادله‌ی پیوستگی و مومنتوم باید از رابطه‌ی ‏(28) استفاده نمود و رابطه ‏(31) تنها برای معادله‌ی انرژی به‌کار رود.

تمامی آزمایشات با استفاده از روش Zha-CUSP2 انجام خواهند شد و باید بدین نکته توجه داشت که این روش به دلیل داشتن ماهیت E-CUSP و مقدار اتلاف عددی کم، برای جریان‌های لزج مناسب بوده، اگرچه که برای جریان‌های غیرلزج نیز می‌توان آن را به کار برد ولی ممکن است همگرایی تا حدودی با مشکل مواجه گردد.

از آنجایی که در اضلاعی که بر روی مرز دوردست قرار دارند، مقادیر مورد نیاز در میانه ضلع با استفاده از شرایط مرزی دوردست بدست می آید، در اینجا مقادیر بدست آمده از شرایط مرزی دوردست بجای مقادیر میانه ضلع قرار داده می شود و روش Zha-CUSP2 برای اینکار استفاده نخواهد شد. از آنجا که جهت اضلاع همیشه بگونه ای می باشد که میدان محاسباتی در طرف چپ قرار دارد، بنابراین مقادیر محاسبه شده برای بخش جابجایی مستقیما به سلول مجاور آن اضافه می شود. ‏شکل (3) این موضوع را بهتر نشان می دهد.

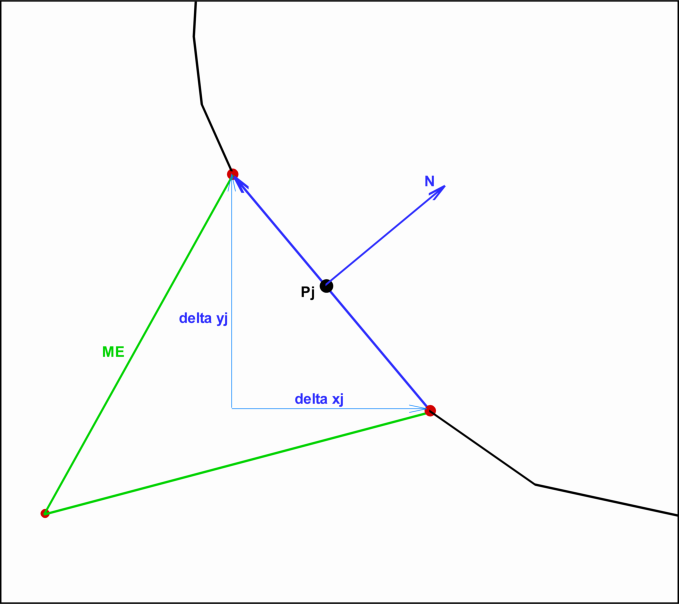


1. محاسبه بخش جابجایی در یک ضلع واقع بر روی مرزی دوردست

از آنجا که شرایط مرزی دیوار در اینجا اعمال می شود بنابراین محاسبه بخش جابجایی سلول های واقع بر روی مرز دیوار با در نظر گرفتن شرایط مرزی دیوار انجام می گردد. با توجه به شرایط مرزی دیوار، برای سلول های واقع بر روی این نوع مرزها فقط بخش شارهای فشار غیرصفر می باشد که باید از رابطه ‏(32) محاسبه گردد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

در اینجا مقدار فشار در میانه ضلع برابر فشار سلول مجاور آن قرار داده می شود.



1. محاسبه بخش جابجایی در یک ضلع واقع بر روی مرز دیوار

جهت پرهیز از استفاده از دستورهای شرطی و در نتیجه صرفه جویی در زمان محاسبات، با توجه به نوع اضلاع، محاسبات در حلقه های جداگانه ای انجام می شود. برای این منظور اضلاعی که بر روی مرز دیوار، دوردست و غیرمرزی می باشند در حلقه های جداگانه ای محاسبه مقدار بخش جابجایی برای آنها انجام می شود.

1. بخش‌های زیربرنامه
2. مقداردهی اولیه به آرایه مربوط به ذخیره بخش جابجایی

از آنجا که محاسبات مربوط به بخش جابجایی هر سلول بر روی اضلاع آن انجام می‌شود و این مقادیر به آرایه مربوط به هر سلول اضافه می‌گردد، بنابراین با یک پروسه اضافه کردن مقادیر به مقادیر قبلی مواجه هستیم. به این دلیل باید آرایه‌ی مربوط به این‌کار در ابتدای زیربرنامه برابر صفر قرار داده شود.

1. محاسبه بخش جابجایی سلول‌های واقع بر روی مرزها

تفاوت محاسبه بخش جابجایی این سلول‌ها با سایر سلول‌های شبکه در اینست که در اینجا با استفاده از شرایط مرزی پارامترهای جریان از قبیل سرعت، فشار و چگالی محاسبه شده است و در این بخش تنها با استفاده از آنها مقدار بخش جابجایی محاسبه می‌گردد. توجه شود که در اینجا اضلاع مرزی نیز وارد محاسبات شده است اما با توجه به اینکه از شرط مرزی دیوار برای محاسبه سرعت و فشار در این اضلاع استفاده شده، تنها شارهای فشاری مخالف صفر خواهد بود.

1. ذخیره اطلاعات ضلع مورد بررسی در پارمترهای محلی

سلول مجاور ضلع مورد بررسی در پارامترهای محلی ذخیره می‌گردد. در اینجا چون سلول همسایه هر کدام از اضلاع مربوط به مرز دیوار برابر صفر است، تنها شماره سلول اصلی ذخیره می‌گردد.

1. محاسبه مولفه‌های سرعت در راستای محورهای مختصات

مقدار مولفه‌های سرعت بر روی ضلع مورد بررسی در جهت محورهای مختصات با استفاده از مقادیر محاسبه شده با استفاده از شرایط مرزی در پارامترهای محلی ذخیره می‌گردد.

1. محاسبه فشار و بردار سرعت عمود بر ضلع

مقدار بردار سرعت در راستای عمود بر ضلع مورد بررسی، تعیین می‌گردد. همچنین مقدار فشار بدست آمده با استفاده از شرایط مرزی در یک پارامتر محلی ذخیره می‌گردد.

1. محاسبه شار جابجایی

شار جابجایی در اضلاع مرزی با توجه به رابطه ‏(6) محاسبه و در پارامترهای محلی ذخیره می‌گردد.

1. تعیین بخش جابجایی معادلات برای سلول‌های واقع بر روی مرزها

مقدار بخش جابجایی معادلات برای سلول‌های واقع بر روی مرزها با توجه به مقادیر محاسبه شده در بخش قبل، در آرایه‌های مربوطه ذخیره می‌گردد.

1. محاسبه بخش جابجایی سلول‌های غیرمرزی

در اینجا بخش جابجایی سلول‌های غیرمرزی محاسبه می‌گردد.

1. ذخیره اطلاعات ضلع مورد بررسی در پارمترهای محلی

شماره دو سلول مجاور ضلع مورد بررسی در پارامترهای محلی ذخیره می‌گردد.

1. ذخیره بردارهای عمود و طول ضلع در پارامترهای محلی

در این روش، به بردارهای عمود یکه نیاز می‌باشد برای این‌کار باید بردارهای عمود بر طول ضلع تقسیم گردد که در اینجا این‌کار انجام می‌شود. بنابراین بردارهای عمود یکه و همچنین طول ضلع در پارامترهای محلی ذخیره می‌شوند.

1. ذخیره اطلاعات سلول‌های سمت چپ و راست ضلع مورد بررسی در پارمترهای محلی

در این قسمت اطلاعات مربوط به متغیرهای اولیه سلول‌های سمت چپ و راست مجاور ضلع مورد بررسی در پارامترهای محلی ذخیره می‌گردد.

1. محاسبه سرعت صوت و آنتالپی

برای محاسبه‌ی شار غیرلزج نیاز داریم تا سرعت صوت و آنتالپی در مرکز سلول‌های سمت چپ و راست ضلع مورد بررسی تعیین گردد.

1. محاسبه سرعت صوت میانگین بر روی ضلع

مقدار میانگین سرعت صوت بر روی ضلع و طبق رابطه ‏(25) محاسبه می‌شود و در پارامترهای محلی ذخیره می‌گردد.

1. محاسبه سرعت عمود بر ضلع

سرعت عمود بر ضلع طبق رابطه‌ی ‏(7) و بر اساس متغیرهای سلول سمت چپ و راست ضلع مورد نظر محاسبه می‌شود.

1. تعیین مقدار عدد ماخ میانگین

مقدار عدد ماخ میانگین با استفاده از سرعت عمود بر ضلع و سرعت صوت و طبق رابطه ‏(29) تعیین می‌گردد.

1. محاسبه مقدار

مقدار عدد طبق رابطه ‏(16) محاسبه می‌شود.

1. محاسبه مقدار

مقدار عدد طبق رابطه ‏(16) محاسبه می‌شود.

1. محاسبه عدد ماخ بر روی ضلع

مقدار عدد ماخ در وسط ضلع و طبق رابطه ‏(15) محاسبه می‌شود.

1. محاسبه شار غیرلزج در حالت

در صورتی که باشد شار غیرلزج طبق مقادیر متغیرهای سمت راست ضلع و بر اساس رابطه ‏(6) محاسبه می‌گردد.

1. محاسبه شار غیرلزج در حالت

در صورتی که باشد شار غیرلزج طبق مقادیر متغیرهای سمت چپ ضلع و بر اساس رابطه ‏(6) محاسبه می‌گردد.

1. محاسبه شار غیرلزج در حالت

در صورتی که باشد شار غیرلزج طبق رابطه ‏(23) محاسبه می‌گردد.

1. تعیین ضرایب و

مقدار ضرایب و طبق رابطه ‏(28) تعیین می‌گردد.

1. تعیین ضرایب و

مقدار ضرایب و طبق رابطه ‏(27) تعیین می‌گردد.

1. تعیین ضریب

مقدار ضریب طبق رابطه ‏(26) و ‏(27) تعیین می‌گردد.

1. محاسبه مقدار بخش جابجایی شار غیرلزج

مقدار بخش جابجایی شار غیرلزج طبق رابطه ‏(23) برای معادلات پیوستگی و مومنتوم محاسبه می‌شود.

1. تعیین ضریب استفاده از نسخه اول یا دوم ژا

در این قسمت تعیین می‌گردد که از روش Zha-CUSP (IZHA=0) یا از روش Zha-CUSP2 (IZHA=1) استفاده گردد. در این پژوهش مقدار این ضریب همواره برابر 1 می‌باشد.

1. تعیین مقدار ضرایب برای معادله انرژی

در صورت استفاده از روش Zha-CUSP2 مقدار ضرایب و بر اساس آنتالپی به جای فشار محاسبه می‌شوند. بنابراین باید ضرایب ، و نیز دوباره محاسبه گردند.

1. محاسبه مقدار بخش جابجایی شار غیرلزج برای معادله انرژی

مقدار بخش جابجایی شار غیرلزج طبق رابطه ‏(23) برای معادله انرژی محاسبه می‌شود.

1. محاسبه مقدار ضرایب ضرایب و

مقدار ضرایب و طبق رابطه ‏(30) محاسبه می‌شود.

1. محاسبه مقدار بخش فشاری شار غیرلزج

مقدار بخش فشاری شار غیرلزج طبق رابطه ‏(23) محاسبه می‌شود.

1. محاسبه شار غیرلزج

مقدار شار غیرلزج طبق رابطه‌ی ‏(23) از حاصل جمع بخش جابجایی و فشاری به‌دست می‌آید.

1. تعیین بخش جابجایی معادلات برای سلول اصلی

مقدار بخش جابجایی محاسبه شده در بخش قبل (با علامت مثبت) به مقادیر سلول اصلی ضلع مورد بررسی اضافه می گردد.

1. تعیین بخش جابجایی معادلات برای سلول همسایه

مقدار بخش جابجایی محاسبه شده در بخش قبل (با علامت منفی) به مقادیر سلول همسایه ضلع مورد بررسی اضافه می گردد. علامت منفی بدلیل اینست که بردار عمود ضلع مورد بررسی، مربوط به سلول اصلی می باشد که این مقدار برای سلول همسایه با علامت منفی ظاهر می شود.

.

1. مراجع

[1] Blazek, J., Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. United Kingdom, Elsevier Science, 2nd Edition, 2005.

[2] Fletcher, C., Computational Techniques for Fluid Dynamics 1.Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2nd Edition, 1998.

[3] Jameson, A., Artificial Diffusion, Upwind Biasing, Limiters and Their Effect on Accuracy and Multigrid Convergence in Transonic and Hypersonic Flows. United States, 11th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, 1993.

[6] Jameson, A., Positive Schemes and Shock Modeling for Compressible Flow. Int. J. Numerical Methods in Fluids, 1995, 20: p. 743-776.

[7] Jameson, A., Analysis and Design of Numerical Schemes for Gas Dynamics II: Artificial Diffusion and Discrete Shock Structure. Int. J. Computational Fluid Dynamics, 1995, 5: p. 1-38.

[8] Tatsumi, S., Martinelli, L., Jameson, A., A Design, Implementation and Validation of Flux Limited Schemes for the Solution of the Compressible Navier-Stokes Equations. AIAA Paper, 1994, 94-0647.

[9] Tatsumi, S., Martinelli, L., Jameson, A., A New High Resolution Scheme for Compressible Viscous Flow with Shocks. AIAA Paper, 1995, 95-0466.

[10] Roe, P., Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes. Journal of Computational Physics, 1981, 43: p. 357-372.

[11] Zha, G., and Hu, J., Calculation of Transonic Internal Flows Using an Efficient High Resolution Upwind Scheme. AIAA Journal, 2004, 42(2): p. 205-214.

[12] Zha, G., A Low Diffusion E-CUSP Upwind Scheme for Transonic Flows. United States, 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2004.

1. Inviscid Flux [↑](#footnote-ref-1)
2. Convective Part [↑](#footnote-ref-2)
3. Pressure Part [↑](#footnote-ref-3)
4. Zha [↑](#footnote-ref-4)
5. Dissipation [↑](#footnote-ref-5)
6. **C**onvective **U**pwind **S**plit **P**ressure (CUSP) [↑](#footnote-ref-6)
7. Charactristic Theory [↑](#footnote-ref-7)
8. Artificial Dissipation [↑](#footnote-ref-8)
9. Central Methods [↑](#footnote-ref-9)