



زیربرنامه KWSST\_Transition\_Main3D

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **توسعه دهندگان:** | **مرتضی نامور** |  |
| **محمد امین ذوالجناحی** |  |
| **تهیه کننده مستند:** | **مرتضی نامور، محمد امین ذوالجناحی** | |
| **تاریخ تنظیم سند:** |  | |
| **تایید کنندگان:** |  | |
| **شماره سند:** |  | |
| **زبان برنامه نویسی:** | **Fortran 90** | |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **KWSST\_Transition\_Main3D(Dim,Ncyc,INW,X,Y,Z,NX,NY,NZ,NC,NF,NF1,NF2,NFW1,NFW2,NFI1,NFI2,NFO1,NFO2,NFS1,NFS2,NFF1,NFF2,NP,IDS,FaceType,XC,YC,ZC,DW,DT,Vol,MR,NRKS,RKJ,Mu0,Wb,WNP1,Mu,WTNP1,Mut,Kinf,Oinf,Ginf)** | | | |
| **Dimension** | **Variable Type** | **Description** | **Intent** |
|  |  |  | **Input** |
|  | Integer | Maximum **Dim**ension of Arrays | Dim |
|  | Integer | **N**umber of Existing **C**ells | NC |
|  | Integer | **N**umber of **F**aces on **W**all boundary | NFW |
|  | Integer | Index of Last **F**ace on **F**ar **F**ield Boundary | NFF |
|  | Integer | **N**umber of **F**aces Constructing Computational Grid | NF |
| (1:Dim,1:4) | Integer | **I**nformation of Grid **D**ata **S**tructure | IDS |
| (1:Dim) | Real(8) | Normal Vectors of each Face | NX,NY,NZ |
| (1:Dim) | Real(8) | **A**rea of cells | A |
| (1:Dim) | Real(8) | Distance to Nearest Wall | DW |
| (1:Dim,1:5) | Real(8) | Conservative Values and Pressure at **B**oundary Faces | WB |
| (1:Dim,1:4) | Real(8) | Conservative Values at (N+1)th Time Step | WNP1 |
|  | Real(8) | **M**uch Number over **R**eynolds Number of **inf**inite Flow Characteristics | MR |
|  | Real(8) | Molecular Viscosity of Infinite Flow | Mut0 |
|  | Integer | Number of main Iteration | Ncyc |
|  | real | Coordinates of points | X,Y,Z |
|  | Integer | Index of all inner and boundary **F**aces | NF1,…,NFF2 |
|  | real | Coordinates of center of cells | Xc,Yc,Zc |
|  |  |  | **Output** |
| (1:Dim) | Real(8) | Turbulence Viscosity (Eddy Viscosity) | Mut |
| (1:Dim,1:4) | Real(8) | Turbulence Conservative Values at (N+1)th Time Step | WTNP1 |

* 1. وظایف

این زیربرنامه، زیربرنامه اصلی مدل گذار New\_Menter می­باشد که سایر زیربرنامه­ها در آن فراخوانده می­شوند و درنهایت نیز، لزجت گردابه­ای محاسبه می­گردد.

* 1. توضیحات و تئوری­ها

یکی از مسائل مهم در دینامیک سیالات محاسباتی، مساله گذار[[1]](#footnote-1) از رژیم جریان آرام به جریان آشفته می­باشد. بحث ناپایداری جریان[[2]](#footnote-2) و چگونگی تولید و رشد اغتشاشات[[3]](#footnote-3) در جریان سیال، دارای پیچیدگی فراوانی در دینامیک سیالات می­باشد. به دلیل همین پیچیدگی، شبیه­سازی عددی این پدیده از اهمیت اساسی در دینامیک سیالات محاسباتی برخوردار است. لذا استفاده از ابزاری محاسباتی بر مبنای معادلات ناویر-استوکس که قادر به شبیه­سازی پدیده گذار باشد، کاربرد مهم و فراوانی در صنعت، و علی­الخصوص صنعت هوافضا دارد. این پدیده در طراحی ایرفویل هواپیماها، طراحی پره­های توربین باد و همچنین در طراحی پره­های توربوماشین­ها از اهمیت به سزایی برخوردار است. درحقیقت، این پدیده تاثیر فراوانی بر ساختار کلی جریان، چگونگی توزیع فشار روی سطح، محل جدایش جریان و همچنین مقدار نیروی درگ دارد، بنابراین عملاً بدون در نظر گرفتن پدیده گذار، نمی توان نتایج قابل اطمینانی به دست آورد.

اگرچه که در طول دهه­های گذشته پیشرفت­های خیره کننده­ای در زمینه شبیه­سازی عددی جریان­های آشفته[[4]](#footnote-4) به دست آمده، اما پژوهش ها در زمینه گذار از جریان آرام به جریان آشفته، چنین پیشرفتی نداشته. مدل­های آشفتگی­ای که تاکنون توسعه یافته­اند، هیچکدام نمی­توانند به درستی نقطه گذار را پیش­بینی کنند، زیرا در تمامی این مدل­ها فرض بر این است که جریان کاملا آشفته[[5]](#footnote-5) می­باشد. راه حل دیگر، استفاده از روش­هایی نظیر روش ­شبیه­سازی گردابه­ بزرگ[[6]](#footnote-6) (LES) و یا شبیه­سازی عددی مستقیم[[7]](#footnote-7) (DNS) است. اما مشکل بسیار جدی این روش­ها، هزینه و زمان محاسباتی بسیار بالای آنها می­باشد که کاربردشان را در مسائل پیچیده و کاربردی مهندسی عملا غیرممکن می­سازد.

یکی از دلایل پیچیدگی پدیده گذار این است که این پدیده، انواع مختلفی دارد که هر کدام از این انواع، منشا و فیزیک متفاوتی دارند. مطابق یک تقسیم­بندی رایج، سه نوع مختلف پدیده گذار وجود دارد. گذار طبیعی[[8]](#footnote-8)، گذار بایپس[[9]](#footnote-9) و گذار ناشی از جدایش[[10]](#footnote-10) [1] . به طور خلاصه می­توان گفت، گذار طبیعی ناشی از ناپایداری­های موجود در جریان است، گذار بایپس به واسطه بالا بودن شدت آشفتگی جریان آزاد[[11]](#footnote-11) رخ می­دهد و گذار ناشی از جدایش زمانی روی می­دهد که لایه مرزی آرام تحت تاثیر گرادیان فشار از سطح جدا شود. علاوه بر این موارد، عوامل دیگری همچون زبری سطح[[12]](#footnote-12)، مکش[[13]](#footnote-13)/دمش[[14]](#footnote-14)، نیروهای بدنی[[15]](#footnote-15)، انتقال حرارت[[16]](#footnote-16) و گرایان فشار نیز در پدیده گذار اثرگذار می­باشند. معمولا گرادیان فشار دلخواه[[17]](#footnote-17)، گذار را به تاخیر می­اندازد و همچنین طول ناحیه گذار[[18]](#footnote-18) را کوتاه­تر می­کند، در حالیکه گرادیان فشار معکوس[[19]](#footnote-19) باعث می­شود پدیده ­گذار زودتر اتفاق بیفتد. جزییات تاثیر هرکدام از این عوامل بر پدیده گذار را می­توان در منابع [2] و [3] یافت.

* + 1. روش­های مبتنی بر مفهوم اینترمیتنسی

این مدل­ها، مدل­های جدیدی هستند که اخیرا و برمبنای مفهومی به نام اینترمیتنسی ارائه شده­اند. در اینگونه مدل­ها شبیه­سازی جریان­ گذرا با حجم محاسبات قابل قبولی صورت می­پذیرد. اینترمیتنسی، متغیری است بین صفر و یک، که نمایانگر احتمال آشفته شدن یک نقطه از جریان در یک زمان خاص است. در صورتی که مقدار آن در یک نقطه یک باشد به معنای این است که در آن نقطه، جریان کاملا آشفته می­باشد و در صورتی که مقدار آن صفر باشد به این معنی است که جریان در آن نقطه آرام است. در این مدل­ها عموما برای تعیین نقطه و ناحیه گذار، یک سری روابط تجربی نیز وارد معادلات می­شوند. مزیت بسیار مهم این مدل­ها در این است که به راحتی قابلیت کوپل شدن به حلگرهای جریان سیال مبتنی بر معادلات ناویر-استوکس را دارا می­باشند و براساس معادلات RANS حل می­شوند..

مهمترین و پرکاربردترین مدلی که برمبنای این مفهوم ارائه شده، مدل  می­باشد که برای اولین بار توسط منتر و همکارانش [4] در سال 2004 ارائه شد. در این مدل که با مدل کوپل می­شد، دو معادله انتقال جداگانه برای اینترمیتنسی  و عدد رینولدز ضخامت مومنتوم گذار[[20]](#footnote-20)  حل می­شوند و سپس با استفاده از نتایج به دست آمده تغییراتی در ترم­های چشمه معادلات مدل داده می­شود. مدل اولیه منتر که در سال 2004 ارائه شد کاستی­هایی داشت و خصوصا در جریان­های با گرادیان فشار معکوس دچار مشکل می­شد، از این رو منتر و همکارانش در مجموعه مقالاتی تلاش کردند که مدل اولیه­شان را ارتقا دهند و با استفاده از نتایج تجربی، آن را صحت سنجی کنند [4]، [5]، [6]، [7]، [8]. اما با این وجود، نه در صنعت و نه در میان دانشمندان، اقبال گسترده­ای به مدل منتر نشد که مهمترین دلیلش این بود که منتر از سه رابطه بسیار مهم و حیاتی استفاده کرده بود که آنها را منتشر نکرد. اما به هر روی مدل ارئه شده توسط منتر چارچوبی را فراهم آورد که دیگران توانستند تحت آن چارچوب و با استفده از داده ها و تجربیات خودشان، برای آن سه رابطه­ای که منتر ارائه نکرده بود، فرمول هایی را ارائه دهند.

اخیرا تلاش­هایی در راستای ارائه این روابط توسط گروه­های تحقیقاتی مختلف صورت پذیرفته و نتایج خوبی نیز به دست آمده است. یک نمونه مهم از این تلاش های سیتماتیک توسط سولکسنا[[21]](#footnote-21) و همکاران [9]، [10]، [11] در دانشگاه صنعتی تایلند صورت پذیرفته است. آنها این روابط را به نحوی کالیبره کردند که جریان گذرای روی صفحه تخت بدون گرادیان فشار، به دقت شبیه­سازی شود.

بعدها در سال 2011، مدل گذار  توسط مدیدا[[22]](#footnote-22) و همکاران [12] به مدل آشفتگی اسپالارت-آلماراس [13] نیز کوپل شد و نتایج مناسبی حاصل شد و در مسائل مختلف مورد مطالعه قرار گرفت [14]. مدل اسپالارت-آلماراس در قیاس با مدل بیشتر در جریان­های خارجی[[23]](#footnote-23) مورد استفاده قرار می­گیرد و حجم و هزینه محاسباتی کمتری دارد و همچنین از لحاظ عددی نیز خوش­رفتارتر است. در سال های اخیر روش ها و مدل های مختلفی برای شبیه سازی پدیده ی گذار ارائه شد که تمامی آنها بر پایه ی تغییرات اینترمیتنسی استوارند. در سال 2009 سولوکسنا و همکارانش [9]روابط ریاضی را برای تعیین موقعیت و طول ناحیه گذار در مدل  پایه منتر [4] ارائه دادند. محققان دیگری همچون یونتائو [15] ، مالان [11]، وایفانگ [16] و در نهایت منتر [17]در سالیان اخیر روابط دیگری را برای طول ناحیه گذار و موقعیت آن پیشنهاد کردند که در این پروژه به مدلسازی این روابط پرداخته می شود. جزییات مربوط به هر روش در مستندات مربوط به آن روش به طور کامل توضیح داده شده است.

* + 1. معادلات حاکم بر مدل

در سال 2015 مدل جدیدی از پیاده سازی پدیده ی گذار توسط منتر [18]ارائه شد که برخلاف مدل قبلی آن که از دو معادله  برای بدست آوردن ناحیه ی گذار و موقعیت آن استفاده می کرد، از یک معادله استفاده می شد. این مدل بر اساس اصل [[24]](#footnote-24)LCTM نهادینه شده است که در آن روابط تجربی درون معادله استاندارد انتقال جابجایی-پخش با استفاده از متغیر های محلی گنجانده می شوند. بعضی از ناهنجاری های مدل  یا همان Old\_Menter مانند عاری بودن از تغییر ناپذیری گالیله ای در مدل جدید برطرف شده است؛ و مهمتر از همه اینکه معادله مربوط به  حذف شده و تغییرات صرفا برای پیشبینی ناحیه گذار ساده تر شده است. از مزیت های این روش سرعت بالای آن نسبت به مدل قبلی منتر به خاطر کاهش حجم معادلات می توان اشاره کرد از طرفی دقت حل حفظ شده است.

ثوابت و توابع مدل گذار  که در این زیربرنامه محاسبه شده­اند به صورت زیر می­باشند [19]:

* محاسبه 

 عدد رینولدز بحرانی می­باشد که در آن اینترمیتنسی در لایه مرزی شروع به افزایش می­کند و فرایند گذار آغاز می­شود. رابطه ارائه شده برای محاسبه رینولدز بحرانی در هرنقطه به قرار زیر است:

1. 
2. 

* محاسبه 

 به صورت یک ثابت در نظر گرفته می شود محاسبه می­شود:

1. 

* محاسبه 

برای محاسبه ترم  از روابط زیر استفاده می شود:

1. 

که ضرایب آن به این صورت هستند:

1. 

برای جلوگیری از ایجاد جوابهای منفی یک محدود کننده برای  در نظر گرفته می شود:

1. 

* سایر عبارت­ها

اندازه نرخ تنش برشی[[25]](#footnote-25) می­باشد و  نیز اندازه وورتیسیتی[[26]](#footnote-26) است که مطابق روابط زیر محاسبه می­گردند:

1. 

نقطه شروع گذار با استفاده از  کنترل می­شود که به صورت زیر محاسبه می­گردد:

1. 
2. 
3. 

 متغیری است که به نوعی آرام­سازی مجدد[[27]](#footnote-27) جریان را کنترل می­کند و به صورت زیر به دست می­آید:

1. 

ثوابت موجود در معادله انتقال  به صورت زیر می­باشند:

1. 

 شدت آشفتگی موضعی[[28]](#footnote-28) نام دارد و به صورت زیر محاسبه می­شود

1. 

و  نیز پارامتر گرادیان فشار نام دارد و مطابق رابطه زیر محاسبه می­گردد:

1. 

برای نیرومند کردن جوابهای مربوط به لانددا یک محدودیت برای آن تعریف می شود:

1. 

 شتاب در جهت جریان می­باشد که به صورت زیر محاسبه می­گردد:

1. 

و نیز برابر اندازه سرعت در هرنقطه است:

1. 

اما ثوابت موجود در در مدل، از طریق روابط خطی زیر محاسبه می­گردند [20]:

1. 

که در این روابط:

1. 

و همچنین:

1. 

تابع ترکیب  با استفاده از رابطه زیر محاسبه می­گردد:

1. 

که در این رابطه فاصله از نزدیکترین دیوار می­باشد. همچنین:

1. 

 نیز همانند ، یک تابع ترکیب است که به صورت زیر محاسبه می­گردد:

1. 
   1. محاسبه ضریب اصلاحی ترم چشمه معادله 

همانطور که گفته شد، مدل گذار New\_Menter به مدل کوپل می­شود. بدینصورت که ترم تولید و استهلاک معادله انتقال مربوط به تولید انرژی جنبشی آشفتگی  به صورت زیر اصلاح می­گردد:

1. 
2. 

که در این رابطه،  و  ترم­های تولید استهلاک مدل آشفتگی هستند. و  نیز از رابطه زیر محاسبه می گردد:

1. 
2. 
3. 
4. 

همانطور که گفته شد در مدل ، یک معادله انتقال جداگانه برای متغیر نوشته می­شود و سپس این مدل با مدل آشفتگی کوپل می­شود، بدینصورت که با استفاده از نتایج به دست آمده، اصلاحاتی در برخی از ترم­های معادلات مدل صورت می­پذیرد.

معادله انتقال حاکم بر  به صورت زیر ارائه شده است:

1. 

در این معادله، لزجت مولکولی سیال می­باشد و  نیز لزجت گردابه­ای می­باشد. ترم تولید و ترم استهلاک مطابق روابط زیر محاسبه می­گردند:

1. 

لازم به ذکر است که تصحیح ترم F1 در داخل زیربرنامه مربوطه صورت می پذیرد:

1. 

ترم چشمه در مدل آشفتگی به صورت زیر می­باشد [21]:

1. 

به منظور جلوگیری از افزایش غیرفیزیکی  در نقاط سکون[[29]](#footnote-29)، منتر[[30]](#footnote-30) پیشنهاد داده است که برای ترم  در معادله مربوط به ، از یک محدود کننده[[31]](#footnote-31) مطابق رابطه زیر استفاده شود [22]:  نیز توسط روابط زیر محاسبه می­شوند:

1. 
2. 
3. 
4. 
5. 

همانگونه که مشخص است در این زیربرنامه لازم است که مقادیر مشتق اول مولفه­های سرعت و همچنین متغیرهای آشفتگی در مرکز هر سلول معلوم باشد. محاسبه این مشتقات، در زیربرنامه مربوطه صورت پذیرفته است و در این زیربرنامه از نتایج آن استفاده می­شود و به راحتی مقدار ترم چشمه در مرکز هر سلول محاسبه می­گردد.

لازم به ذکر است که روابط بالا برای حالت دو بعد استفاده می شوند، اما برای تبدیل آنها به روابط مورد استفاده در حالت سه بعدی، می توان عبارت های متناظر برای بعد سوم را نیز در آنها اضافه کرد که به راحتی قابل اجرا است.

* + 1. بی بعد سازی معادلات حاکم

یکی از ملاحظات مهم در حل عددی، بی­بعد سازی معادلات حاکم می­باشد. از آنجا که معادلات بکار رفته برای جریان اصلی بی­بعد شده اند، بنابراین در اینجا نیز باید معادلات بی­بعد شوند چرا که باید مقادیر بی­بعد به معادلات اصلی جریان معرفی شود. بدین منظور جهت بی­بعد سازی معادلات حاکم از پارامترهای زیر استفاده می کنیم:

1. 

در این روابط متغیرهایدار، متغیرهای بابعد هستند و زیرنویسمعرف کمیت­های جریان آزاد می­باشند. همچنین ، طول مشخصه مسئله می­باشد. توجه شود که پارامترهای بی بعد سازی برای این معادلات باید دقیقا همان پارامترهایی باشد که برای بی بعد سازی معادلات جریان اصلی استفاده شده است.

* + - 1. بی­بعد سازی معادله 

در اینجا لازم است یادآوری شود که معادلات مربوط به مدل حاضر به صورت با­بعد بوده­اند که تنها به دلیل سادگی بالانویس \* از آنها حذف شده بود. بنابراین با جایگذاری پارامترهای بی­بعد سازی ذکر شده در معادله ‏(30)، شکل بی­بعد این معادله به صورت زیر به دست می­آید:

1. 

با کمی عملیات جبری معادله مربوط به  به صورت زیر در می­آید:

1. 

با استفاده از اعداد بی بعد رینولدز[[32]](#footnote-32) و ماخ[[33]](#footnote-33) نیز می توان نوشت:

1. 

بنابراین با جایگذاری در معادله ‏(41)، شکل بی­بعد معادله به صورت زیر به دست می­آید:

1. 
   * + 1. بی­بعد سازی معادلات مدل

شکل بی­بعد شده معادلات حاکم بر و  به صورت زیر درمی­آید:

1. 

1. 
   * + 1. بی­بعد سازی سایر عبارت ­ها

علاوه بر معادلات مدل آشفتگی، ثابت­ها و سایر متغیرهای بکار رفته در این مدل نیز باید بی­بعد شوند. متغیرهایی که شکل بی­بعد شده­شان تفاوت پیدا می­کند به قرار زیر هستند:

1. 

همچنین شکل بی­بعد شده لزجت گردابه­ای نیز به صورت زیر می­باشد:

1. 
   * 1. شرایط مرزی

در این قسمت، به شرایط مرزی حاکم بر مدل گذرای New\_Menter خواهیم پرداخت.

* + - 1. شرط مرزی دیوار

بر روی دیوار، مقادیر زیر به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته می شوند [4]، [8]:

1. 

که ، فاصله سلول اول از دیوار می­باشد.

* + - 1. شرط مرزی ورودی

در ورودی، شرایط مرزی مطابق رابطه زیر پیشنهاد شده است [4]، [8]، [23]:

1. 

برای محاسبه  نیز، از رابطه زیر استفاده می­شود:

1. 

مقادیر  و  نیز با استفاده از روابط زیر محاسبه می­شوند:

1. 
   * + 1. شرط مرزی خروجی

در خروجی مشتق اول تمامی متغیرها، عمود بر مرز برابر صفر قرار داده می شود [24].

1. 
   * 1. شرایط اولیه

همانطور که گفته شد، شرط اولیه متغیرهای مدل  در اکثر مسائل، برابر شرایط مرزی ورودی قرار داده می­شود [24]:

1. 

که نحوه محاسبه ،  و  در زیر برنامه مورد نظر توضیح داده شده است.

* + 1. شکل ماتریسی معادلات آشفتگی

جهت حل عددی و گسسته­سازی معادلات مدل گذار New\_Menter راحت­تر است که این معادلات را به صورت ماتریسی بنویسم. به این منظور معادلات بی­بعد شده ‏(43), ‏(44) و ‏(45) را به فرم ماتریسی زیر بازنویسی می­شوند:

1. 

در این رابطه  و و، بیانگر بخش­های جابجایی[[34]](#footnote-34) می­باشند،  و  و بیانگر بخش­های پخش­شوندگی[[35]](#footnote-35) و  ترم چشمه[[36]](#footnote-36) می­باشد. هرکدام از این بخش­ها به صورت زیر می­باشند:

1. 
   * 1. نحوه گسسته سازی حجم محدود معادلات

در روش حجم محدود، اولین قدم در گسسته­سازی معادلات، انتگرال­گیری از شکل بقایی معادلات بر روی یک حجم کنترل می­باشد. برای این کار معادله ‏(54) را در نظر بگیرید. با انتگرال گیری از این معادله بر روی یک سلول محاسباتی خواهیم داشت [25]:

1. 

در ترم (1)، مقدار  بر روی یک حجم کنترل ثابت فرض می شود در نتیجه می توان ترم (1) را به صورت زیر ساده کرد:

1. 

که در این رابطه  مساحت حجم کنترل می­باشد.

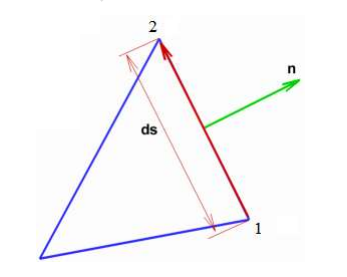
برای ترم (2) و (3)، از قضیه گوس استفاده می شود. مطابق قضیه گوس[[37]](#footnote-37)، می­توان انتگرال روی سطح را به انتگرال روی مرزها تبدیل نمود:

1. 

که در این رابطه، بردار عمود بر مرز حجم کنترل می باشد:

1. 

و نیز طول قطاع­های تشکیل­دهنده مرزهای حجم کنترل می­باشد. مطابق شکل زیر:



1. طول قطاع و بردار عمود بر مرز حجم کنترل

بنابراین با تعریف ، می­توان ترم (2) را به صورت زیر نوشت:

1. 

در این رابطه،  تعداد اضلاع تشکیل دهنده هر یک از سلول های محاسباتی می­باشد.

ترم چشمه را نیز می­توان به صورت زیر ساده کرد:

1. 

بنابراین درنهایت می­توان معادله ‏(56) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

1. 

نحوه گسسته­سازی مکانی بخش جابجایی و بخش پخش­شوندگی در زیربرنامه­های مربوطه به نحو مبسوط توضیح داده خواهد شد.

* + 1. گسسته سازی زمانی

معادله ‏(62) را می توان به فرم یک معادله دیفرانسیل معمولی[[38]](#footnote-38) به صورت زیر بازنویسی کرد:

1. 

در این تحقیق، به منظور افزایش دقت و پایداری از روش صریح چند مرحله­ای رانگ-کوتای[[39]](#footnote-39) مرتبه چهار جهت گسسته­سازی زمانی استفاده شده است. البته جهت بدست آوردن حل جریان­های دائم، می­توان از گام زمانی موضعی[[40]](#footnote-40) استفاده نمود که سرعت همگرایی را تا حد زیادی بهبود می­بخشد. شکل کلی اعمال الگوریتم m مرحله­ای رانگ-کوتا به صورت زیر می­باشد [24]:

1. 

در این رابطه بالانویس نشان­دهنده گام زمانی می­باشد و بالانویس نشان­دهنده مرحله رانگ-کوتا می­باشد. مقدار استاندارد ضرایب  تا  از رابطه زیر محاسبه می­گردد:

1. 

در این تحقیق از روش چهارمرحله­ای استفاده شده است.

* 1. بخش­های زیربرنامه

در این قسمت تمام بخش های زیربرنامه مطابق با شماره گذاری موجود در برنامه کامپیوتری ارائه شده است.

1. تعیین ثوابت موجود در مدل New\_Menter

در این قسمت، ثوابت موجود در مدل مشخص شده است.

2. مقداردهی به آرایه­های مربوط به زمان قبل

در این قسمت، مقادیر بقایی مربوط به زمان قبل جایگذاری می­شوند. همچنین مقدار لزجت آشفتگی مربوط به زمان قبل نیز جهت محاسبه مقدار باقیمانده، جایگذاری می­شود.

3. حل معادلات در حلقه مربوط به روش رانگ-کوتا

در یک حلقه به تعداد مراحل روش رانگ-کوتا معادلات ، و  حل خواهند شد.

4. محاسبه ضرایب روش رانگ-کوتا

با استفاده از معادله ‏(65)، ضریب هرکدام از مراحل روش رانگ-کوتا محاسبه می­گردد.

5. محاسبه شرایط مرزی

در این قسمت، کلیه شرایط مرزی با فراخوانی زیربرنامه KwSST\_Trans\_BC3D تعیین می­گردند.

6. محاسبه مشتق سرعت ها در مرکز سلول

در این قسمت، با فراخوانی زیربرنامه Velocity\_CellGrad3D، مشتق اول مولفه­های سرعت ها در مرکز همه سلول­ها محاسبه می­شوند.

7. محاسبه مشتق متغیر های گذار در مرکز سلول

در این قسمت، با فراخوانی زیربرنامه KwSST\_Trans\_CellGrad3D، مشتق اول مولفه­های متغیرهای مدل گذار، یعنی ،  و  در مرکز همه سلول­ها محاسبه می­شوند.

8. محاسبه مشتق متغیرهای آشفتگی روی اضلاع سلول­

در این قسمت، با فراخوانی زیربرنامه KwSST\_Trans\_FaceGrad3D، مشتق اول متغیرهای مدل ، و  روی اضلاع همه سلول­ها محاسبه می­شوند.

9. محاسبه ثوابت و توابع موجود در مدل New\_Menter

در این قسمت با فراخوانی زیربرنامه KwSST\_Trans\_Func3D، ثوابت و توابع موجود در مدل محاسبه می­شوند.

10. محاسبه بخش جابجایی

بخش جابجایی به صورت بالادست گسسته­سازی شده است. در این قسمت با فراخوانی زیربرنامه KwSST\_Trans\_Con3D، مقدار این بخش محاسبه می­شود.

11. محاسبه بخش پخش­شوندگی

بخش پخش­شوندگی به صورت مرکزی گسسته­سازی شده است. در این قسمت با فراخوانی زیربرنامه KwSST\_Trans\_Dif3D، مقدار این بخش محاسبه می­شود.

12. محاسبه ترم چشمه

در این قسمت با فراخوانی زیربرنامه KwSST\_Trans\_Source3D، ترم چشمه محاسبه می­شود.

13. محاسبه مقادیر بقایی تمام سلول­های شبکه

در یک حلقه تکرار بر روی تمامی سلول­های شبکه، مقادیر بقایی تمام سلول­ها محاسبه می­گردد.

14. اطمینان از مثبت بودن متغیرهای مدل New\_Menter

در صورتی که مقدار هرکدام از متغیرهای بقایی منفی شد، مقدار مثبت زمان قبل جایگزین آن می­شود. به این ترتیب اطمینان حاصل می­شود که متغیرهای بقایی مدل همواره مثبت هستند.

15. محاسبه متغیرهای غیربقایی مدل New\_Menter

در این قسمت با توجه به مقادیر بقایی به دست آمده، مقدار ،  و  محاسبه می­شوند.

16. محاسبه لزجت آشفتگی

لزجت آشفتگی با استفاده از رابطه مربوطه محاسبه می­شود.

17. محاسبه باقیمانده لزجت آشفتگی

در یک حلقه تکرار بر روی تمامی سلول­ها، مقدار ماکزیمم خطای لزجت آشفتگی در کل میدان حل محاسبه می­گردد.

**References**

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | F. M. White, Viscous fluid flow, McGraw-Hill Professional Publishing, 1991. |
| [2] | B. Ye, "Investigation of unsteady transition methods," Delft University of Technology and Energy Research Centre of the Netherlands, 2014. |
| [3] | B. Ye, "The Modeling of Laminar-to-turbulent Transition for Unsteady Integral Boundary Layer Equations with High-order Discontinuous Galerkin Method," Delft University of Technology and Energy Research Centre of the Netherlands, 2015. |
| [4] | F. R. Menter, R. B. Langtry, S. R. Likki, Y. B. Suzen, P. G. Huang and S. Volker, "A Correlation-based Transition Model Using Local Variables Part 1 – Model Formulation," in *Proceedings of the ASME Turbo Expo, Power for Land Sea and Air*, 2004. |
| [5] | F. R. Menter, R. B. Menter, S. Volker and P. G. Huang, "Transition Modelling for General Purpose CFD Codes," in *Int. Symp. Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, 2005. |
| [6] | R. B. Langtry and F. R. Menter, "Transition Modeling for General CFD Applications in Aeronautics," *AIAA Paper,* 2005. |
| [7] | F. R. Menter, R. B. Langtry and S. Volker, "Transition Modelling for General Purpose CFD Codes," *Flow, Turbulence and Combusion,* vol. 77, pp. 277-303, 2006. |
| [8] | R. B. Langtry, "A Correlation-based Transition Model Using Local Variables for Unstructured Parallelized CFD Codes," *AIAA Journal,* vol. 47, pp. 2894-2906, 2009. |
| [9] | K. Suluksna and E. Juntasaro, "Assessment of Intermittency Transport Equations for Modeling Transition in Boundary Layers Subjected to Freestream Turbulence," *International Journal of Heat and Fluid Flow,* vol. 29, pp. 48-61, 2008. |
| [10] | K. Suluksna and E. Juntasaro, "Correlations for Modeling Transitional Boundary Layers Under Influences of Freestream Turbulence and Pressure Gradient," *International Journal of Heat and Fluid Flow,* 2008. |
| [11] | P. Malan, K. Suluksna and E. Juntasaro, "Calibrating the γ-Re Transition Model for Commercial CFD," in *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Florida, 2009. |
| [12] | S. Medida and J. Baeder, "Numerical Prediction of Static and Dynamic Stall Phenomena using the γ − Re Transition Model," in *American Helicopter Society 67th*, Virginia , 2011. |
| [13] | P. R. Spalart and S. R. Allmaras, "A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows," in *30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1992. |
| [14] | A. C. Aranake, V. K. Lakshminarayan and K. Duraisamy, "Assessment of Transition Model and CFD Methodology for Wind Turbine Flows," in *42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, New Orleans, Louisiana, 2012. |
| [15] | Z. Y. Wang Yuntao, "Calibration of a c-Reh transition model and its validation in low-speed flows with high-order numerical method," *Chinese Journal of Aeronautics,* no. 1000-9361, pp. 704-711, 2015. |
| [16] | X. C. Chen Weifang, "Boundary-layer transition prediction using a simplified correlation-based model," *Chinese Journal of Aeronautics,* no. 1000-9361, pp. 66-75, 2016. |
| [17] | P. E. S. Florian R. Menter, "A One-Equation Local Correlation-Based Transition Model," *Flow Turbulence Combust,* vol. 015, no. 10494, pp. 583-619, 2015. |
| [18] | F. R. Menter, "A One-Equation Local Correlation-Based Transition Model," *Flow Turbulence Combust,* vol. 10, no. 1007, pp. 583-619, 2015. |
| [19] | F. R. Menter, R. B. Langtry, S. R. Likki, Y. B. Suzen, P. G. Huang and S. Volker, "A Correlation-based Transition Model Using Local Variables Part 1 – Model Formulation," in *Proceedings of the ASME Turbo Expo, Power for Land Sea and Air*, 2004. |
| [20] | F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journals,* vol. 32, pp. 1598-1605, 1994. |
| [21] | R. B. Langtry, "A Correlation-based Transition Model Using Local Variables for Unstructured Parallelized CFD Codes," *AIAA Journal,* vol. 47, pp. 2894-2906, 2009. |
| [22] | F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal,* vol. 32, pp. 1598-1605, 1994. |
| [23] | C. L. Rumsey and P. R. Spalart, "Turbulence Model Behavior in Low Reynolds Number Regions of Aerodynamic Flowfields," in *38th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit,*, Seatle, 2008. |
| [24] | D. A. Anderson, J. C. Tannehill and R. H. Pletcher, Computational fluid dynamics and heat transfer, Washington: Hemisphere, 1984. |
| [25] | K. A. Hoffmann and S. T. Chiang, Computational Fluid Dynamics Vol 3, 2000. |
| [26] | G. B. Schubauer and H. Skramstad, "Contributions on the mechanics of boundary layer transition," 1956. |
| [27] | H. Schilichting and K. Gersten, Boundary Layer Theory, Springer, 2000. |
| [28] | A. V. Boiko, K. J. A. Westin, B. G. B. Kilngmann and V. Kozlov, "Experiments in a boundary layer subjected to free stream turbulence. part2. the role of ts-waves in the transition process," *Journal of Fluid Mechanics,* vol. 281, pp. 219-245, 1994. |
| [29] | A. M. O. Smith and N. Gamberoni, Transition, pressure gradient and stability, Douglas Aircraft Company, El Segundo Division, 1956. |
| [30] | J. v. Ingen, " Theoretical and Experimental Investigations of Incompressible Laminar Boundary Layers with and Without Suction," 1965. |
| [31] | J. v. Ingen, "A new eN database method for transition prediction Technical report 2006.," Delft University of Technology, 2006. |
| [32] | D. D. Pasquale, A. Rona and S. J. Garrett, "A Selective Review of CFD Transition Models," in *39th AIAA Fluid Dynamics Conference*, San Antonio, 2009. |

1. Transition [↑](#footnote-ref-1)
2. Flow Instabilities [↑](#footnote-ref-2)
3. Perturbation [↑](#footnote-ref-3)
4. Turbulent Flows [↑](#footnote-ref-4)
5. Fully Turbulent [↑](#footnote-ref-5)
6. Large Eddy Simulation [↑](#footnote-ref-6)
7. Direct Numerical Simulation [↑](#footnote-ref-7)
8. Natural Transtion [↑](#footnote-ref-8)
9. Bypass Transition [↑](#footnote-ref-9)
10. Separated Flow Transition [↑](#footnote-ref-10)
11. Free Stream Turbulence Intensity [↑](#footnote-ref-11)
12. Surface Roughness [↑](#footnote-ref-12)
13. Suction [↑](#footnote-ref-13)
14. Blowing [↑](#footnote-ref-14)
15. Body Force [↑](#footnote-ref-15)
16. Heat Transfer [↑](#footnote-ref-16)
17. Favorable Pressure Gradients [↑](#footnote-ref-17)
18. Transition Length [↑](#footnote-ref-18)
19. Adverse Pressure Gradients [↑](#footnote-ref-19)
20. Transition Momentum Thickness Reynolds Number [↑](#footnote-ref-20)
21. Suluksna [↑](#footnote-ref-21)
22. Medida [↑](#footnote-ref-22)
23. External Flow [↑](#footnote-ref-23)
24. Local correlation-based Transition Modeling [↑](#footnote-ref-24)
25. Strain Rate Magnitude [↑](#footnote-ref-25)
26. Vorticity Magnitude [↑](#footnote-ref-26)
27. Re-Laminarization [↑](#footnote-ref-27)
28. Local Turbulence Intensity [↑](#footnote-ref-28)
29. Stagnation Point [↑](#footnote-ref-29)
30. Menter [↑](#footnote-ref-30)
31. Limiter [↑](#footnote-ref-31)
32. Reynolds Number [↑](#footnote-ref-32)
33. Mach Number [↑](#footnote-ref-33)
34. Convective Term [↑](#footnote-ref-34)
35. Diffusion Term [↑](#footnote-ref-35)
36. Source Term [↑](#footnote-ref-36)
37. Guass Theorem [↑](#footnote-ref-37)
38. Ordinary Differential Equation [↑](#footnote-ref-38)
39. Multi-Stage Runge-Kutta Method [↑](#footnote-ref-39)
40. Local Time Step [↑](#footnote-ref-40)