دانشگاه هرمزگان

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

تحلیل حرکت سیال غیر لزج در شبکه ساختارنیافته با اعمال روش های مختلف محاسبه شار

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک،

گرایش تبدیل انرژی

مهدی ربیعی

استاد راهنما :

دکتر سعید نیازی

استاد مشاور:

دکتر جمشید خورشیدی

شهریور 1390

کلیهٔ حقوق اعم از چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس و... ازاین پایان‌نامه برای نویسندگان و دانشگاه هرمزگان محفوظ است. نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.

چکیده :

در این مطالعه مقایسه ای بین روش های مختلف محاسبه شار در شبکه ساختار نیافته دو بعدی با در نظر گرفتن معادله اویلر شامل روش های FDS و FVS انجام گرفته است . از روش حجم محدود جهت حل معادلات استفاده شده است. از روش صریح جهت حل انتگرال زمانی بهره برده ایم. در حالت جریان دائمی از روش گام زمانی محلی به عنوان روش شتاب بخشی استفاده کرده ایم. در بخش منطبق سازی شبکه از یک سنسور براساس عدد ماخ برای شناسائی سلول های با گرادیان بالا استفاده کرده ایم. در این مطالعه برای روش های تفکیک بردار شار شامل VanLeer ، AUFS و +AUSM و روش های تفکیک اختلاف شار شامل Roe ، HLL ، HLLC، HLLE و Ruzanov مورد مقایسه قرار داده ایم. مقایسه برای جریان های دائمی و غیر دائمی انجام گرفته است. مطالعه برای جریان غیر دائم روی یک لوله شاک انجام گرفته و نتایج با حل دقیق تحلیلی مقایسه شده است. مطالعه برای حالت دائمی در جریان داخلی گذرنده از یک کانال با برآمدگی و همچنین جریان آزاد روی ایرفویل NACA0012 در سه رژیم جریان یعنی مادون صوت، گذرا و مافوق صوت بررسی شده و با حل تقریبی معتبر و یا داده های آزمایشی مقایسه شده است. و در نهایت مزایا و معایب روش های مورد مطالعه ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی :

شبکه ساختار نیافته، محاسبه شار ، معادله اویلر دو بعدی ، جریان غیر لزج تراکم پذیر، روش تفکیک بردار شار ، روش تفکیک اختلاف شار

Hormozgan University
College of Engineering

CERTIFICATION OF SUPERVISOR/BOARD OF EXAMINERS

The undersigned boards of examiners hereby, certify that

Mr./Ms. .....

Candidate for the degree of B.S./M.S. in Mechanical Engineering has successfully defended this dissertation entitled

.....

The board considers the dissertation acceptable in form and content; And that the candidate through an oral examination, held on ... ..., ..., demonstrated a satisfactory knowledge of the field covered by the dissertation.

The examining body: .....Signature

Supervisor: ..... Dr. .....
Advisor: ..... Dr. .....

..... Dr. .....

External Examiner..... Dr. .....

..... Dr. .....

Internal Examiner..... Dr. .....

..... Dr. .....

Representative of the Dept. of IE:..... Dr. .....

Abstract :

In this study we compare several flux calculation methods (vector splitting (FVS) method and Flux difference splitting (FDS) method) in two dimensional inviscid compressible flow using Euler equations in unstructured triangular mesh. A finite volume approach was employed to solve the governing equations. And we use explicit Strategy for integration of time derivative. We also use local time stepping as time acceleration technic. In the mesh adaptation technic we use a Mach sensor to capture the cells with high gradient. in the FVS methods we study the Van Leer(VL), Artificially Upstream Flux Vector Splitting Method(AUFS) And Advection Upstream Splitting Method(AUSM+) . in the FDS methods we study Harten,Lax,vanLeer Method(HLL) , Ruzanov method , Harten,Lax,vanLeer/Contact Method(HLLC) , Harten,Lax,vanLeer/ Einfildt Method(HLLE) and finally Roe Method. The flux calculation methods were tested in unsteady and steady Flows. We use shock tube for unsteady test case and flow in a bump and flow around a NACA0012 airfoil for steady case. We study subsonic, transonic and supersonic test cases. Finally we compare the results with analytical , experimental or validate numerical data and find the advantage and disadvantage of the methods.

Keywords :

Unstructured Grid, Flux Solver, two-dimensional Euler equation, Inviscid Compressible Flow, Flux vector splitting method, Flux difference splitting method

Hormozgan Unversity
Engineering college

Inviscid Fluid Flow Solvers In Unstructured Grid and Implementation of Different Flux Calculation Method

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment Of the Requirements for The Degree of Master of Science in Mechanical Engineering

Author: **Mehdi Rabiee**

Supervisor : **Dr.Saied Niazi**

September 2011

فهرست مطالب

عنوان صفحه

۱- مقدمه ۱

1-1- دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) 1

2-1- مروری بر مطالعات پیشین 3

3-1- چشم انداز مطالعه حاضر 10

۲- تولید شبکه ۱۲

2-1- انواع شبکه 13

2-1-1- شبکه ساختار یافته 13

2-1-2- شبکه ساختار نیافته 14

2-2- تولید شبکه ساختار نیافته مثلثی 18

2-2-1- روش تولید شبکه مثلثی دلانی 18

2-2-2- روش تولید شبکه مثلثی لبه پیشرونده 24

۳- تئوری و تعریف مسئله ۲۹

3-1- معادلات حرکت سیال 29

3-1-1- معادلات اویلر 30

3-1-2- روابط ترمودینامیکی 30

3-1-3- معادلات جریان تراکم ناپذیر 31

3-2- روش حل معادلات حرکت سیال 31

3-2-1- روش اختلاف محدود 32

3-2-2- روشش المان محدود 33

3-2-3- روش حجم محدود 34

3-2-4- روش بدون شبکه ای 34

3-3- مکان قرار گیری متغییر ها در شبکه 35

3-3-1- روش Co-Located 36

3-3-2- روش Staggered 37

3-4- گسسته سازی مکانی 38

3-4-1- الگوریتم حل در گسسته سازی مکانی 43

3-4-2- روش گسسته سازی شار جابجائی : 45
3-5- گسسته سازی زمانی 56
3-5-1- روش حل زمانی صریح چند مرحله ای "رانگه-کوتا" 57
3-6- شرایط مرزی 59
3-6-1- دیوار جامد 59
3-6-2- مرز دوردست 59
3-6-3- مرز ورودی و خروجی جریان 62
3-7- زبان برنامه نویسی 63
٤- اعتبار سنجی، نتایج و بحث در نتایج **٦٧**
4-1- اعتبار سنجی 69
4-1-1- جریان مادون صوت روی ایرفویل 69
4-2- نتایج 75
4-2-1- لوله شاک 75
4-2-2- جریان عبوری از داخل کانل با برآمدگی 94
4-2-3- جریان عبوری از داخل کانل با سطح شیب دار 10 درجه 115
4-2-4- جریان آزاد روی ایرفویل 117
٥- نتیجه گیری و پیشنهادات **١٣٧**
٦- ضمیمه **١٣٩**
6-1- روند نمای انجام کار 139
6-1-1- روند نمای برنامه اصلی 139
6-1-2- روند نمای ایجاد شبکه ساختار نیافته دو بعدی (مثلثبندی دلانی) 140
6-1-3- روند نمای افزایش نقاط جهت بهبود شبکه مثلثی 142
6-1-4- روند نمای حلگر برنامه 144
6-1-5- روند نمای محاسبه شار سیال عبوری از سطح حجم کنترل 146
٧- فهرست منابع **١٤٧**

فهرست علائم و نشانه ها

A	مساحت المان	n	بردار عمود بر سطح
AFT	روش شبکه بندی لبه پیش رونده	P	فشار
A.R.	نسبت منظری مثلث	r	شعاع دایره
c	سرعت صوت	R	ثابت جهانی گازها، سلول سمت راست
CFL	عدد کورانت	s	یک دوم برابر محیط مثلث
Cl	ضریب بالابری	t	زمان
Cd	ضریب کششی	T	دما
Cp	ضریب فشار	u	مولفه سرعت در جهت x
e	انرژی مخصوص داخلی	U	بردار حل (متغییر های پایستار)
E	انرژی کل	v	مولفه سرعت در جهت y
F	بردار شار در جهت x	V	سرعت کل
G	بردار شار در جهت y	x,y	مختصات کارتزین
h	آنتالپی مخصوص	α	زاویه حمله ایرفویل
H	آنتالپی کل	β	چگالی نقاط در تولید شبکه
$\tilde{H}$	بردار شار در فضای مختصات عمومی	β'	چگالی اصلاح شده نقاط شبکه
L	سلول سمت چپ	γ	نسبت گرمای مخصوص
M	عدد ماخ	λ	مقادیر ویژه ماتریس

فهرست جدول ها

عنوان صفحه

جدول 2-1 ضرایب معادله Runge-Kutta 58
جدول 4-1 مقایسه بین نتایج روش حل HLLC در شبکه ساختار یافته با روش تحلیلی در نقاط مختلف 116

فهرست نمودار ها

عنوان صفحه

نمودار 4-1 مقایسه بین ضریب فشار روی دیواره های ایرفویل NACA0012 بین روش های مختلف با نتایج آزمایشی "آمیک" عدد ماخ 0.6..... 70
نمودار 4-2 مقایسه بین ضریب فشار روی دیواره های ایرفویل 0012NACA در روش های مختلف عدد ماخ 0.6 (نمای نزدیک) 71
نمودار 4-3 مقایسه سرعت بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک در t=6.1ms 79
نمودار 4-4 مقایسه سرعت بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک با نمایی نزدیک در t=6.1ms 79
نمودار 4-5 مقایسه سرعت بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک با نمایی نزدیک در نقطه وقوع موج ضربه ای در t=6.1ms 80
نمودار 4-6 مقایسه خطای سرعت بین روشهای مختلف عددی با حالت تحلیلی در لوله شاک در t=6.1ms 80
نمودار 4-7 مقایسه خطای سرعت بین روشهای مختلف عددی با حالت تحلیلی در لوله شاک در محل وقوق موج ضربه ای در نمای نزدیک در t=6.1ms 81
نمودار 4-8 مقایسه خطای سرعت بین روشهای مختلف عددی با حالت تحلیلی در محل وقوع موج انبساطی لوله شاک با نمای نزدیک در t=6.1ms 81
نمودار 4-9 مقایسه چگالی بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک در t=6.1ms 82
نمودار 4-10 مقایسه چگالی بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک با نمای نزدیک در t=6.1ms 82
نمودار 4-11 مقایسه چگالی بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک در محل وقوع ناپیوستگی تماسی با نمای نزدیک در t=6.1ms 83
نمودار 4-12 مقایسه فشار بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک در t=6.1ms 83
نمودار 4-13 مقایسه دما بین روشهای مختلف عددی با حل تحلیلی برای لوله شاک در t=6.1ms 84
نمودار 4-14 مقایسه بین هزینه محاسباتی برای روش های مختلف بر اساس ثانیه به ازای هر تکرار در لوله شاک 84

نمودار 4-15 مقایسه سرعت با روش محاسباتی Roe در شبکه های ساختار یافته و ساختار نیافته با حل تحلیلی برای لوله شاک در t=6.1ms 92
نمودار 4-16مقایسه سرعت با روش محاسباتی Roe در شبکه ساختار یافته و ساختار نیافته با حل تحلیلی برای لوله شاک در نمای نزدیک در t=6.1ms..... 93
نمودار 4-17 مقایسه فشار با روش محاسباتی Roe در شبکه های ساختار یافته و ساختار نیافته با حل تحلیلی برای لوله شاک در t=6.1ms 93
نمودار 4-18 مقایسه بین خطای سرعت با روش تحلیلی در روش محاسباتی Roe با به کار گیری شبکه های ساختار یافته و ساختار نیافته برای لوله شاک در t=6.1m..... 94
نمودار 4-19 مقایسه بین اعمال روش های مختلف محاسبه شار در کانال با برآمدگی 10 درصد و نتیجه ارائه شده..... 97
نمودار 4-20 مقایسه بین اعمال روش های مختلف محاسبه شار در کانال با برآمدگی 10 درصد در جریان مادون صوت با عدد ماخ 0.5 97
نمودار 4-21 مقایسه بین هزینه محاسباتی برای روش های مختلف بر اساس ثانیه به ازای هر تکرار در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان مادون صوت..... 101
نمودار 4-22 مقایسه بین اعمال روش های مختلف محاسبه شار در کانال با برآمدگی 10 درصد 103
نمودار 4-23 مقایسه بین اعمال روش های مختلف محاسبه شار در کانال با برآمدگی 10 درصد در 103
نمودار 4-24 مقایسه بین هزینه محاسباتی برای روش های مختلف بر اساس ثانیه به ازای هر تکرار در کانال با برآمدگی 10درصد در جریان گذرا..... 108
نمودار 4-25 مقایسه بین اعمال روش های مختلف محاسبه شار در کانال با برآمدگی 4 درصد و نتیجه ارائه شده توسط "فاوینی و همکاران" 113
نمودار 4-26 مقایسه بین اعمال روش های مختلف محاسبه شار در کانال با برآمدگی 4 درصد 114
نمودار 4-27 مقایسه بین هزینه محاسباتی برای روش های مختلف بر اساس ثانیه به ازای هر تکرار در کانال با برآمدگی 4 درصد در جریان مادون صوت 114
نمودار 4-28 مقایسه بین نتایج تحلیل کانال شیبدار با استفاده از شبکه ساختارنیافته (روش HLLC) با نتایج ارائه شده توسط "ریپلی" 116
نمودار 4-29 مقایسه بین ضریب فشار روی دیواره های ایرفویل NACA0012 بین روش های مختلف..... 119
نمودار 4-30 مقایسه بین ضریب فشار روی دیواره های ایرفویل NACA0012 در روش های مختلف با عدد ماخ 0.63 و زاویه حمله 2 درجه (نمای نزدیک)..... 120
نمودار 4-31 مقایسه بین ضریب فشار روی دیواره های ایرفویل NACA0012 بین روش های مختلف با نتایج "وو و همکاران" عدد ماخ 0.8..... 126
نمودار 4-32 مقایسه بین ضریب فشار روی دیواره های ایرفویل NACA0012 در روش های مختلف عدد ماخ 0.8 (نمای نزدیک) 126
نمودار 4-33 مقایسه بین ضریب فشار روی دیواره های ایرفویل NACA0012 بین روش های مختلف با نتایج "اندرسون و همکاران" عدد ماخ 1.2..... 132

فهرست شکل ها

عنوان صفحه

شکل 2-1 شکل راست : شبکه ساختار نیافته بهینه شده حول ایرفویل شکل چپ : شبکه ساختار یافته بهینه شده حول ایرفویل و امتداد دامنه بهینه سازی به مرز دور دست.....14
شکل 2-2 معیار دلانی در حالت دو بعدی درشکل (a) معیار صدق میکند ولی در شکل (b) معیار صدق نمی کند. 15
شکل2-3 مثلث بندی دلانی با خطوط ممتد و مجموعه چند ضلعی های ورونی منطبق بر آن با خط چین 16
شکل 2-4 مثالی از ایجاد شبکه مثلثی دو بعدی به روش لبه پیشرونده (خط چین نمایانگر لبه فعال می باشد). 17
شکل 2-5 تولیدشبکه دوبعدی به روش اکتری 17
شکل 2-6 کاشی کاری Dirichlet با نواحیVoronoi 19
شکل 2-7 ایجاد مثلث بندی Delaunay از اتصال نقاط چند ضلعی های همجوار کاشی کاری Dirichlet 19
شکل 2-8 دایره محاطی نقاط N5 و N6 و N7 20
شکل 2-9 مشخصه دایره محاطی.....20
شکل 2-10 اضافه کردن نقاط جدید به مثلث بندی دلانی 22
شکل 2-11 دایره محاطی و محیطی مثلث ABC 23
شکل 2-12 روند ایجاد شبکه مثلثی به روش لبه پیشرونده 27
شکل 2-13 روند ایجاد شبکه مثلثی به روش لبه پیش رونده 28
شکل 3-1 حالت Median-Dual برای ذخیره متغییر ها در روش Co-Located 36
شکل 3-2 حالت Cell-Centered برای ذخیره متغییر ها در روش Co-Located 37
شکل 3-3 جانمائی متغییرهای جریان و حجم کنترل های مربوطه درروش staggered.....38
شکل 3-4 نمونه قرار گیری یک وجه از حجم کنترل مثلثی 40
شکل 3-5 نحوه ذخیره سازی متغییر ها در حالت Cell-Centered 42
3-6 نحوه قرار گیری متغییرها و تشکیل حجم کنترا در حالت Dual-Grid.....43
شکل 3-7 جریان ورودی و نحوه قرار گیری نقاط برای اعمال شرایط مرزی 60
شکل 3-8 جریان خروجی و نحوه قرار گیری نقاط برای اعمال شرایط مرزی 61
شکل 4-1 شبکه نهای منطبق سازی شده برای جریان آزاد با عدد ماخ 0.6 حول ایرفویل NACA0012 با 7360 سلول.....69
شکل 4-2 نمایش خطوط جریان و عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6.....70
شکل 4-3 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش AUFS 71
شکل 4-4 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش AUSM+ 72
شکل 4-5 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش HLL 72
شکل 4-6 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش HLLC 73
شکل 4-7 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش HLLE.....73
شکل 4-8 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش Roe 74

شکل 4-9 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش Ruzanov.....74
شکل 4-10 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.6 در روش VanLeer.....75
شکل 4-11 روش بهینه سازی و کوچک کردن سلول های مثلثی برای حل دقیق تر جریان.....77
شکل 4-12شبکه اولیه برای لوله شاک با طول 10 و عرض 0.2 متر 77
شکل 4-13 نمایش اختلاف عدد ماخ در هر سلول نسبت به سلول های مجاور 77
شکل 4-14 نمایش شبکه مثلثی با 2666 سلول و 1556 نقطه و اختلاف عدد ماخ در هر سلول نسبت به سلول های مجاور پس از یک بار انجام عملیات منطبق سازی شبکه 78
شکل 4-15 نمایش شبکه مثلثی با 13777 سلول و 7232 نقطه پس از 4 بار انجام عملیات منطبق سازی شبکه 78
شکل 4-16 خطوط هم تراز ماخ در روشAUFS در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای.....85
شکل 4-17 خطوط همتراز عدد ماخ در روش+AUSM در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای.....85
شکل 4-18 خطوط همتراز عدد ماخ در روش HLL در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای.....86
شکل 4-19 خطوط همتراز عدد ماخ در روش HLLE در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای.....86
شکل 4-20 خطوط همتراز عدد ماخ در روش HLLC در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای.....87
شکل 4-21 خطوط همتراز عدد ماخ در روش Roe در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای 88
شکل 4-22 خطوط همتراز عدد ماخ در روش Ruzanov در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای.....88
شکل 4-23 خطوط همتراز عدد ماخ در روش Van Leer در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای.....89
شکل 4-24 نمایی نزدیک از محل وقوع ناپیوستگی موج ضربه ای با شبکه ساختار نیافته و اعمال روش AUFS 91
شکل 4-25 شبکه بندی اولیه برای حالت مادون صوت و گذرا درون کانال با برآمدگی با 3452 سلول 95
شکل 4-26شبکه بندی نهائی منطبق سازی شده برای حالت مادون صوت درون کانال با برآمدگی با 8243 سلول.....96
شکل 4-27 خطوط جریان در حالت مادون صوت با عدد ماخ 0.5 درکانال با برآمدگی 10درصد 96
شکل 4-28 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 ارائه شده توسط "جاوارشکیان" 98
شکل 4-29خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش AUFS 98
شکل 4-30خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش +AUSM.....98
شکل 4-31خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش HLL.....99
شکل 4-32 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش HLLC.....99
شکل 4-33 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش HLLE.....99
شکل 4-34 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش Roe 100
شکل 4-35 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش Ruzanov 100
شکل 4-36 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5 در روش VanLeer.....100
شکل 4-37 نمایش عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.5.....101
شکل 4-38 شبکه بندی نهائی منطبق سازی شده برای حالت گذرا درون کانال با برآمدگی با 8311 سلول.....102
شکل 4-39خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 ارائه شده توسط "جاوارشکیان" 104
شکل 4-40 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روش AUFS 104
شکل 4-41 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روش +AUSM.....104
شکل 4-42 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روشHLL.....105
شکل 4-43 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روش HLLC.....105
شکل 4-44 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روش HLLE.....105
شکل 4-45 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روش Roe 106
شکل 4-46 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روش Ruzanov 106
شکل 4-47 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 10درصد و جریان با عدد ماخ 0.675 در روش VanLeer.....106

شکل 4-48 نمایش خطوط همتراز عدد ماخ در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای درون کانال با برآمدگی 10درصد با عدد ماخ 0.675 107
شکل 4-49 نمایش خطوط همتراز عدد ماخ در نزدیکی محل وقوع موج ضربه ای درون کانال با برآمدگی 10درصد با عدد ماخ 0.675 108
شکل 4-50 نمایش خطوط جریان و عدد ماخ در حالت گذرا با عدد ماخ 0.675 درکانال با برآمدگی 10درصد 108
شکل 4-51 شبکه بندی اولیه برای حالت مافوق صوت درون کانال با برآمدگی با 2878 سلول 109
شکل 4-52 شبکه بندی نهائی منطبق سازی شده برای حالت مافوق صوت درون کانال با برآمدگی با 12595 سلول 110
شکل 4-53 نمایش خطوط جریان و عدد ماخ در حالت گذرا با عدد ماخ 1.4 درکانال با برآمدگی 4درصد 110
شکل 4-54 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4 درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 ارائه شده توسط "ریپلی و همکاران" 110
شکل 4-55 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روشAUFS 111
شکل 4-56 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روش +AUSM 111
شکل 4-57 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روش HLL 111
شکل 4-58 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روش HLLC 112
شکل 4-59 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روش HLLE 112
شکل 4-60 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روش Roe 112
شکل 4-61 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روش Ruzanov 113
شکل 4-62 خطوط همتراز عدد ماخ در کانال با برآمدگی 4درصد و جریان با عدد ماخ 1.4 در روش VanLeer 113
شکل 4-63 شبکه بندی نهائی منطبق سازی شده برای حالت مافوق صوت درون کانال با سطح شیبدار با 20175 سلول 115
شکل 4-64 نمایش خطوط همتراز عدد ماخ برای جریان داخل کانال با سطح شیبدار 10 درجه با عدد ماخ جریان آزاد 2 116
شکل 4-65 شبکه اولیه برای جریان آزاد حول ایرفویل NACA0012 با 4136 سلول (a) نمای کلی از دامنه حل (b) نمای نزدیک 117
شکل 4-66 شبکه نهای منطبق سازی شده برای جریان آزاد با عدد ماخ 0.63 و زاویه حمله 2 درجه حول ایرفویل NACA0012 با 6736 سلول 118
شکل 4-67 نمایش خطوط جریان و فشار در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.63 و زاویه حمله 2 درجه 119
شکل 4-68 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 120
شکل 4-69 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 121
شکل 4-70 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 121
شکل 4-71 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 122
شکل 4-72 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 122
شکل 4-73 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 123
شکل 4-74 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 123
شکل 4-75 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مادون صوت حول ایرفویل NACA0012 با 124
شکل 4-76 شبکه نهایی منطبق سازی شده برای جریان آزاد با عدد ماخ 0.8 حول ایرفویل NACA0012 با 9074 سلول 125
شکل 4-77 نمایش خطوط جریان و عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 125
شکل 4-78 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش AUFS 127
شکل 4-79 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش AUSM+ 127
شکل 4-80 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش HLL 128

شکل 4-81 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش HLLC 128
شکل 4-82 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش HLLE..... 129
شکل 4-83 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش Roe 129
شکل 4-84 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش Ruzanov..... 130
شکل 4-85 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد گذرا حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 0.8 در روش Van Leer 130
شکل 4-86 شبکه نهایی منطبق سازی شده برای جریان آزاد با عدد ماخ 1.2 حول ایرفویل NACA0012 با 14113 سلول 131
شکل 4-87 نمایش خطوط جریان و عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2... 132
شکل 4-88 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روش AUFS 133
شکل 4-89 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روش AUSM+..... 133
شکل 4-90 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روشHLL 134
شکل 4-91 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روش HLLC 134
شکل 4-92 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روش HLLE 135
شکل 4-93 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روش Roe 135
شکل 4-94 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روش Ruzanov 136
شکل 4-95 خطوط جریان همتراز عدد ماخ در حالت جریان آزاد مافوق صوت حول ایرفویل NACA0012 با عدد ماخ 1.2 در روش VanLeer 136

۱- مقدمه

۱-۱-دینامیک سیالات محاسباتی[1] (CFD)

با توجه به پیشرفت های مختلف در حوزه فناوری رایانه و همچنین پیشرفت‌های اخیر در روش‌های محاسباتی و به کار گیری هرچه بیشتر آن‌ها در رایانه با استفاده از زبان‌های مختلف برنامه نویسی، ما امروزه شاهد ایجاد روش‌های جدید و سریع در زمینه‌های کاربردی در زندگی روزمره‌مان می‌باشیم. می‌توان گفت امروزه زبان‌های برنامه نویسی و کاربردهای آن بخش مهمی را در صنعت و سلامت جامعه بشر ایفا می‌کنند و با توجه به سرعت بالا و برنامه پذیر بودن آن‌ها جایگزین یا متمم بسیاری از روش‌های کلاسیک شده اند.

علم مکانیک به عنوان یکی از علوم پایه در صنعت محسوب می‌شود و کاربرد زیادی در ابعاد مختلفی از جامعه بشری دارد. تحلیل حرکت سیالات و بررسی جنبه‌های مختلف جریان سیال به عنوان یکی از بخش‌های مهم و پیچیده در این علم محسوب می‌شود، که با توجه به حجم زیاد محاسبات در تحلیل حرکت سیال به دلیل پیچیدگی معادلات حاکم بر حرکت سیال نیاز به ابزارهای پیشرفته در این خصوص می‌باشد؛ لذا پیشرفت‌های اخیر در علوم رایانه زمینه ساز خوبی جهت ایجاد الگوریتم‌های مناسب و روش‌های جدید جهت حل دقیق جریان سیال می‌باشد.

روش معمول در حل دینامیک سیالات محاسباتی(CFD) تجزیه دامنه حل به زیر دامنه‌های کوچک‌تر یا سلول[2] و حل معادلات حرکت سیال با استفاده از گسسته سازی[3] معادلات حاکم در این زیر دامنه‌های کوچک می‌باشد. با توجه به اینکه نحوه تقسیم زیر دامنه یا تولید شبکه[4] تأثیر مستقیمی بر نحوه گسسته سازی معادلات و نحوه تحلیل دارد، لذا این مقوله به عنوان یک پارامتر مهم در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مطرح می‌شود.

[1] Computational Fluid Dynamic
[2] Cell
[3] Discretisation
[4] Grid /Mesh Generation

روش تولید شبکه به دو نوع کلی شبکه ساختار یافته[1] و شبکه ساختار نیافته[2] تقسیم بندی می‌شود. تجربه نشان داده است که با وجود پیشرفت در روش‌های تولید شبکه ساختار یافته، نقش انسان به عنوان یک عامل تصمیم گیرنده نهایی همچنان به چشم می‌خورد؛ لذا با توجه به اینکه تلاش ما ایجاد روش‌هایی با حداقل دخالت انسان می‌باشد، استفاده از این روش تولید شبکه برای مسائلی با هندسه پیچیده مناسب نمی‌باشد. یکی دیگر از معایب استفاده از شبکه‌های ساختار یافته مشکلاتی است که در بهینه سازی شبکه به صورت محلی وجود دارد که این خصوصیت به صورت ذاتی در این نوع شبکه وجود ندارد، لذا در هنگام تحلیل حرکت سیال با شبکه ساختار یافته چنانچه در محل‌هایی نیاز به بهینه سازی[3] و انطباق شبکه[4] جهت تحلیل دقیق‌تر وجود داشته باشد، عملاً با مشکلاتی روبرو خواهیم شد.

وجود چنین مشکلاتی در شبکه‌های ساختار یافته منجر به تولید و توسعه شبکه‌های ساختار نیافته در حل جریان سیالات گشته است. تولید شبکه‌های ساختار نیافته در ابتدا برای تحلیل مکانیک سازه، سپس برای مکانیک جامدات و در نهایت در حل مسائل مکانیک سیالات به کار گرفته شد. این نوع شبکه به صورتی گسترده و اتوماتیک نسبت به شبکه ساختار یافته قابل استفاده است و بهینه سازی و انطباق پذیری در این نوع شبکه به صورت محلی بسیار ساده‌تر و قابل فهم تر از شبکه ساختار یافته می‌باشد.

شبکه ساختار نیافته اصولاً به شبکه‌ای گفته می‌شود که الگوریتم اتصال نقاط شبکه به هم از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت باشد، بنابراین نیاز به یک الگوریتم پیچیده جهت حل معادلات حرکت سیال و گسسته سازی آن‌ها در این نوع شبکه نیز می‌باشد. بنابراین می‌بایست پیچیدگی و افزایش هزینه‌ها جهت حل چنین شبکه‌هایی با توجه به مزایای استفاده از این نوع شبکه‌ها قابل توجیه باشد.

[1] Structured grid
[2] Unstructured grid
[3] Grid/Mesh Refinement
4 Grid Adaptation

در بین روش‌های تولید شبکه ساختار نیافته شبکه‌های مثلثی[1] (در مسائل دو بعدی) و یا چهار وجهی(در مسائل سه بعدی) به دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری بالا از عمومیت و کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشند.

فرمول بندی ریاضی قوانین حاکم بر حرکت سیال، شامل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل کوپلشده می‌باشد که به عنوان معادلات ناویر-استوکس[2] شناخته می‌شوند. حل چنین معادلات پیچیده ریاضی به روش تحلیلی امکان پذیر نمی‌باشد. یک راه حل چنین مسائلی استفاده از روش‌های ساده سازی و تفکیک فضای حل و گسسته سازی معادلات از روش‌های مختلف در فضای حل و حل عددی آن‌ها می‌باشد که چنین علمی در حوزه مکانیک سیالات به اصطلاح دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD گفته می‌شود. بنابراین هسته اصلی یک کد برنامه نویسی شده CFD، شامل نحوه گسسته سازی معادلات حاکم و نحوه حل تقریبی معادلات می‌باشد؛ لذا جنبه‌هایی از قبیل کارائی، سادگی و قابلیت استفاده در شرایط مختلف نقش مهمی را در انتخاب الگوریتم مناسب حل ایفا می‌کند.

1-2-مروری بر مطالعات پیشین

با توجه به اینکه تولید شبکه به عنوان نقش تعیین کننده در نحوه برخورد با مسئله و نحوه گسسته سازی معادلات می‌باشد بنابراین می‌بایست انواع روش‌ها مختلف تولید شبکه و مزایا و معایب آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. امروزه با تکیه بر پیشرفت در تکنولوژی کامپیوتر و الگوریتم‌های عددی بهینه، توانائی CFD در حل مسائل پیچیده روز به روز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال حل یک جریان 3 بعدی حول یک مقطع بال[3] که تا حدود 25 سال پیش در بیشتر نقاط جهان به عنوان مسئله ای پیچیده و بحث برانگیز مطرح بود ، امروزه یک بخش روزمره و ساده از صنعت هوا فضا را تشکیل می‌دهد.

روش های تولید شبکه ساختار نیافته به دو دسته مهم 1- مثلثی،چهار وجهی و 2- مربعی، شش وجهی تقسیم بندی می شوند که در این بین، روش مثلثی(در دو بعدی) و چهار وجهی (در سه

[1] Triangular Grid
[2] Navier-Stokes
[3] Airfoil

بعدی) به دلیل انعطاف پذیری بالا و راحتی تولید شبکه از محبوبیت بیشتری برخودار می باشند. روش تولید شبکه مثلثی شامل سه دسته بندی عمده می شود که عبارتند از :

1- روش "اکتری"[1]

2- روش مثلثبندی "دلانی" [2]

3- روش لبه پیش "رونده" [3]

روش "اکتری" برای نخستین بار توسط "مارک شفرد"[4] [1] در سال 1980 با اعمال یک روش بازگشتی و تجزیه زیر دامنه های مربعی به مثلث انجام گرفت . از مزایای این نوع شبکه می توان به روش تولید سریع و الگوریتم ساده آن اشاره نمود اما شبکه "اکتری" به دلیل ایجاد مثلث های کشیده با نسبت منظر[5] بالا که موجب افزایش خطاهای محاسباتی می گردد، در مسائل با تحلیل حجم محدود کمتر مورد توجه قرار گرفته است. روش مثلثبندی "دلانی" که از معیار "دلانی" یا همان کره توخالی برای ایجاد شبکه های مثلثی استفاده میگردد و اولین بار توسط "واتسون"[6] [2] در سال 1981 و با به کارگیری چند ضعلی های "ورونی"[7] انجام گرفت، نسبت به بقیه روش ها از مقبولیت بیشتری برخوردار می باشد . استفاده از این روش همچنین اعمال یک الگوریتم افزایش نقطه موجب ایجاد یک شبکه مثلثی هموار و یکپارچه در دامنه حل می گردد. روش های زیادی برای افزایش نقاط در شبکه دلانی وجود دارد که در این بین الگوریتم افزایش نقاط "بویر-واتسون"[8] ذکر شده در [3] ساده تر و مقبول تر می باشد. از مزایای روش دلانی تولید شبکه یا الگوریتمی ساده و همچنین یگانه بودن شبکه به ازای نقاطی مشخص می باشد و از معایب آن عدم توانائی ذاتی این الگوریتم در پیوستگی دامنه حل در نقاط مرزی می باشد. روش دیگری در ایجاد شبکه مثلثی روش لبه پیشرونده می باشد که با استفاده از گسترش یک لبه فعال در طول دامنه یک شبکه مثلثی یکنواخت ایجاد می

[1] Octree
[2] Delaunay
[3] Advancing Front
[4] Mark Shephard
[5] Aspect Ratio
[6] Watson
[7] Voronoi Polygon
[8] Bowyer-Watson

کند. این روش نخستین بار توسط "راینالد و همکاران"[4] در سال 1988 ارائه شد. از مزایای این روش، تولید شبکه با کیفیت بالا و حداقل نسبت منظر (حداقل نسبت منظر عدد یک می باشد) و از معایب آن پیچیدگی الگوریتم و عدم توانائی تولید شبکه با کیفیت در نقاط اتصالی لبه ها می باشد. مروری کاملی بر الگوریتم های تولید شبکه ساختار نیافته در مرجع [5] آورده شده است.

مهمترین روش های گسسته سازی مکانی معادلات به سه فرم عمده اختلاف محدود، المان محدود و حجم محدود تقسیم بندی می شوند. در روش اختلاف محدود تنها جریان سیال روی نقاطی از دامنه تحلیل می گردند و لذا در استفاده و تعمیم این روش در شبکه های ساختار نیافته با توجه به آدرس دهی های ساختاریافته ی روش اختلاف محدود با مشکل مواجه هستیم و همچنین یکی از معایب این روش عدم توانایی آن در تحلیل شکل بقائی معادلات حرکت سیال می باشد که نقش مهمی در تحلیل ناپیوستگی های جریان از قبیل موج ضربه ای[1] دارد. در روش المان محدود معادلات جریان در یک تابع تست ضرب شده و در محدوده گسسته سازی شده انتگرال گیری می شود . روش المان محدود بسیار انعطاف پذیر بوده و لذا به راحتی می توان آنرا در شبکه ساختار نیافته اعمال نمود اما همان مشکلی که در حل معادلات به روش اختلاف محدود یعنی گسسته سازی شکل بقائی معادلات و همچنین پیچیدگی و هزینه بر بودن اعمال آن در این روش نیز به چشم می خورد . در روش حجم محدود علاوه بر تحلیل شکل بقائی معادلات با توجه به انعطاف پذیری بالای این روش می توان آن را در حجم کنترل های انتخابی و پیچیده اعمال نموده لذا این روش می تواند گزینه ای مناسب برای حل جریان سیال در شبکه ساختار نیافته باشد.

شبکه ساختارنیافته برای نخستین بار توسط "جیمسون و مارویپلیس"[2] [6] در سال 1986 از طریق حل به روش حجم کنترل حول سلول های مثلثی در مکانیک سیالات به کار گرفته . الگوریتم های ارائه شده برای حل چنین شبکه ای از طریق بسط مستقیم و یا غیر مستقیم روش های مورد استفاده در شبکه های ساختاریافته حاصل شده است. به عنوان مثال روش ارائه شده در [6] برای حل شارهای جریان ، روش تفاضل محدود مرکزی به همراه ترم پخش مصنوعی (جهت جلوگیری از ایجاد ناحیه های منفصل و نوسانات در محدوده حل و همچنین ارائه کیفیت مناسب حل

[1] Shock wave
[2] Jameson and Marviplis