به نام خدا

Market Code

تحلیل هیدرودینامیک دوفازی (سطح آزاد) برای شناورهای سطحی و مقایسه تطبیقی دقت مدل Flow3D

تهیه‌کننده مستند:	علی سیف‌اللهی: کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک	دانشگاه صنعتی شریف
تاریخ تنظیم:	۱۳۹۴/۰۲/۱۶	

Market Code

چکیده

در حل مسائل به روش دینامیک سیالات محاسباتی عموماً بخش بسیار مهم و زمان‌بری از کار به فرایند تولید شبکه‌بندی دقیق و منطبق با روش حل اختصاص خواهد یافت. دقت نتایج حاصله و استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی نیز به‌شدت وابسته به شبکه‌بندی ارائه‌شده است. در پژوهش حاضر برای دستیابی به نیروهای هیدرودینامیک یک شناور رزمی از یک مدل سه‌بعدی جریان سیال دارای سطح آزاد استفاده شده است. برای اجرای این مدل از شبکه‌بندی منظم متعامد استفاده شده که فرایند تولید شبکه را به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. این شبکه برای یک شناور رزمی تحقیقاتی بین‌المللی که نتایج تست آن موجود است اجرا شده و پس‌ازآن با استفاده از **مدل هیدرودینامیکی نرم‌افزار Flow3d** در سرعت‌های مختلف، مدل‌سازی جریان پیرامون این شناور صورت گرفته و نتایج آن با داده‌های تست حوضچه کشش این شناور، تطبیق داده شده است و با استفاده از این چرخه و تکرار آن به پارامترهای بهینه مدل‌سازی، شبکه متناسب برای مدل و دقت بالای نتایج، دست یافته‌ایم.

نکته کلیدی در روند انجام این پژوهش، آموزشی بودن آن است به طوری‌که روند اجرا به طور کامل در آن شرح داده شده و می توان از آن به‌عنوان یک **خودآموز** سود جست، ضمن اینکه **قابلیت تکرار** این حل با شبکه بندی و مدل موجود برای شناورهای دیگر در این ابعاد نیز درکمترین زمان ممکن فراهم گردیده است.

کلمات کلیدی: هیدرودینامیک، دوفازی، سطح آزاد، شناور، تست مدل Flow3D

Market Code

فهرست

فصل ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- معادلات حاکم ۲

۱-۲-۱- سیستمهای مختصات ۲

۱-۲-۲- روش VOF ۳

۱-۲-۳- روش FAVOR ۴

۱-۲-۴- معادله پیوستگی ۴

۱-۲-۵- معادلات مومنتم ۶

۱-۳- تنش برشی دیواره ۸

۱-۴- ارزیابی لزجت ۹

۱-۵- سطوح مشترک سیال و سطوح آزاد ۱۰

۱-۶- معادله انرژی سیال ۱۱

۱-۷- روابط ورود هوا ۱۱

فصل ۲

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- جریان آشفته ۱۳

۲-۳- مدلهای حل آشفتگی ۱۴

۲-۳-۱- معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شدهٔ زمانی (RANS) ۱۴

۲-۳-۲- فرضیهٔ بوزینسک ۱۶

۲-۳-۳- انواع مدلهای آشفتگی ۱۷

۲-۳-۳-۱- مدلهای صفر معادلهای ۱۸

۲-۳-۳-۲- مدلهای یک معادلهای ۱۸

۲-۳-۳-۳- مدلهای دو معادلهای ۱۹

۲-۳-۳-۴- مدلهای دارای معادلهٔ تنش ۱۹

۲-۳-۳-۵- مدلهای شبیهسازی گردابههای بزرگ ۲۰

۲-۳-۴- مدلهای آشفتگی مورد استفاده در FLOW-3D ۲۰

۲-۳-۴-۱- مدل طول اختلاط پرانتل ۲۰

Market Code

۲-۳-۴-۲- مدلهای انتقال آشفتگی ۲۲
۲-۳-۴-۳- مدل شبیهسازی گردابههای بزرگ ۲۶
۲-۳-۴-۴- شرایط مرزی آشفته ۲۷

فصل ۳

۳-۱- مقدمه ۲۹
۳-۲- ورود به محیط برنامهٔ FLOW-3D ۲۹
۳-۳- نام‌گذاری منوهای برنامهٔ FLOW-3D ۳۰
۳-۴- ایجاد یک پروژهٔ جدید در نرمافزار FLOW-3D ۳۳
۳-۵- تعریف مشخصات مدل مورد نظر برای شبیهسازی ۳۶
۳-۵-۱- زبانهٔ General ۳۶
۳-۵-۱-۱- زمان شبیهسازی ۳۷
۳-۵-۱-۲- انتخاب سیستم آحاد ۳۹
۳-۵-۱-۳- تعداد هستههای پردازندهٔ درگیر در شبیهسازی ۴۰
۳-۵-۲- زبانهٔ Physics ۴۰
۳-۵-۳- زبانهٔ Fluids ۴۸
۳-۵-۴- زبانهٔ Meshing & Geometry ۵۱
۳-۵-۴-۱- روش کار با زبانه Meshing and Geometry ۵۳
۳-۵-۴-۲- ایجاد شبکهٔ حل ۵۴
۳-۵-۴-۳- تعریف شرایط مرزی ۶۰
۳-۵-۵- زبانهٔ Output ۶۶
۳-۵-۶- زبانهٔ Numerics ۶۸
۳-۶- اجرای شبیهسازی ۶۹
۳-۷- مشاهدهٔ نتایج ۷۲
۳-۷-۱- نحوهٔ تولید خروجی در Probe ۷۴
۳-۷-۱-۱- تولید خروجی با استفاده از گزینهٔ General history ۷۵

فصل ۴

۴-۱- مقدمه و شرح موضوع ۷۶
۴-۱-۱- اهمیت و جایگاه CFD در طراحی شناورها ۷۶

Market Code

۴-۱-۲- موضوع و هدف این پژوهش ۷۷
۴-۲- مراحل شبیه سازی ۷۸
۴-۲-۱- آماده‌سازی و ورود هندسه به مدل ۷۸
۴-۲-۲- سرعت‌های انتخابی ۸۰
۴-۲-۳- دامنه حل و شبکه‌بندی ۸۱
۴-۲-۳-۱- شبکه بندی ۸۲
۴-۲-۴- تعریف مساله به مدل ۸۴
۴-۲-۴-۱- بخش Model Setup-General ۸۴
۴-۲-۴-۲- بخش Model Setup-Physics ۸۵
۴-۲-۴-۳- بخش Model Setup-Fluids ۸۶
۴-۲-۴-۴- بخش Model Setup-Meshing and Geometry ۸۶
۴-۲-۴-۵- بخش Model Setup-Output ۸۸
۴-۲-۴-۶- بخش Model Setup-Numerics ۸۸
۴-۲-۵- اجرای شبیه‌سازی ۸۹

فصل ۵

۵-۱- مشاهده نتایج ۹۰
۵-۲- خروجی کانتورهای سرعت و فشار ۹۲
۵-۳- نتایج و مقایسه نیروها ۹۶
۵-۳-۱- مقدمه ۹۶
۵-۳-۲- نمودارهای همگرایی نیروها و مقایسه نتایج ۹۷
۵-۴- نتیجه‌گیری و توضیحات پایانی ۱۰۱
۵-۵- توضیحات مدارک پیوست ۸۷

Market Code

فصل ۱ :

مبانی نظری

۱-۱- مقدمه

مدل Flow-3d یکی از مدل های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science,Inc صورت گرفته است. اخیراً این مدل توانسته در تحقیقات و صنعت کاربرد زیادی پیدا کند. این مدل قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان را دارد و محدوده کاربردی بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات دارد. معادلات حاکم در این مدل، معادلات ناویراستوکس و معادله بقای جرم است و برای حل آشفتگی نیز از پنج روش مختلف استفاده می‌شود.

مدل FLOW-3D شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آبهای کم‌عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفتگی، محیط‌های متخلخل و غیره است. این مدل در زمینه‌هایی چون ریخته‌گری، مهندسی فرآیند، هیدرولیک، محیط زیست، هوافضا، علوم دریایی، نفت، گاز و غیره کاربرد دارد.

شبکهٔ حل در این مدل متشکل از سلول‌های مکعب مستطیلی است. شاید این نوع شبکه در نگاه اول به‌عنوان یک محدودیت مطرح شود. در صورتی که، اولاً به دلیل تولید آسان این نوع شبکه، نظم مناسب و نیاز به حافظهٔ کمتر در آن و ثانیاً به دلیل بکارگیری دو ابزار مفید VOF و FAVOR درمدل FLOW-3D، شبکهٔ حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود.

به دلیل قابلیت هایی که مدل FLOW-3D در زمینهٔ شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش حجم سیال یا VOF در مدل کردن جریانهای با سطح آزاد است که مسائل موجود در روشهای قبلی (روش‌های مبتنی بر آزمون و خطا) را برطرف کرده است.

در این فصل به شرح تئوری بکار گرفته شده در مدل FLOW-3D پرداخته می‌شود. روابط مورد استفاده در این

Market Code

فصل شامل پارامترهای اضافی نسبت به فرم معمولی‌اشان است. دلیل این تفاوت، اعمال عبارت‌های مربوط به تکنیک‌های VOF و FAVOR در روابط است.

در انتهای فصل، شرح مختصری از تئوری مدل‌های کمکی مورد استفاده در FLOW-3D برای شبیه‌سازی پدیده های هیدرولیکی نیز ارائه شده است. به دلیل اهمیت مدل‌های آشفتگی، مباحث تئوری مربوط به آن‌ها، به‌صورت مجزا، در فصل دوم ارائه شده است.

۱-۲- معادلات حاکم

قبل از معرفی معادلات حاکم در مدل FLOW-3D ، ابتدا بهتر است سیستم‌های مختصات موجود در این مدل و روشهای VOF و FAVOR معرفی شوند.

۱-۲-۱- سیستم‌های مختصات

معادلات دیفرانسیلی که در مدل FLOW-3D باید مورد حل قرار بگیرند، می‌توانند در هر دو قالب مختصات کارتزین (x,y,z) و استوانه‌ای (r,Θ,z) نوشته شوند. فرم استوانه‌ای دارای عبارت‌های اضافی است که این عبارت‌ها دارای یک ظریب بنام ξ باشد مختصات مربوط به هندسه کارتزین است و وقتی ξ=1 است هندسه استوانه‌ای حاصل می‌شود. در مختصات استوانه‌ای، مختصات x بجای امتداد شعاعی تعبیر می‌شود، مختصات y به مختصات زاویه‌ای انتقال داده می‌شود و z مختصات محوری است. تمام معادلات با تابع تخلخل مساحت و حجم فرموله می‌شوند. این روش فرموله‌کردن که به روش FAVOR (روش نمایندهٔ کسر مساحت–حجم مانع) نامیده می‌شود برای مدلسازی هندسه‌های پیچیده استفاده می‌شود. توابع تخلخل همچنین برای بیان برخی ساده‌سازی‌ها در مشخصات سطوح آزاد و شرایط مرزی دیوار استفاده می‌شوند.

به‌طور کلی در FLOW-3D کسرهای مساحت و حجم مستقل از زمان هستند. اما زمانیکه با مدل موانع متحرک

روبرو هستیم، ممکن است این کمیت‌ها با زمان تغییر کنند.

۱-۲-۲- روش VOF

روش‌های VOF و FAVOR مثالهایی از روش‌های جز حجمی هستند. در این روش‌ها، ناحیه‌ای که باید مدل شود، ابتدا به شبکه‌ای از المان‌های کوچکتر و یا حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌شود. برای المان‌های حاوی سیال، مقادیر عددی برای هر کدام از متغیرهای جریان نظیر فشار، دما و سرعت در داخل آن‌ها نگهداشته می‌شود. معمولاً این مقادیر نشانگر میانگین حجمی مقادیر در هر المان هستند.

زمانیکه جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول‌ها پر از سیال نیستند و تعدادی از سلولها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه پر هستند. روش مناست برای نشان دادن وضعیت سلول‌ها این است که کمیتی به نام F، که بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است، تعریف شود. این کمیت تابع حجم سیال (Volume of fluid) نامیده می‌شود.

با دانستن مقادیر F، می‌توان محل سطح آزاد و زاویهٔ آن را در میان سلول‌های میدان حل مشخص کرد. این عمل با کنترل کردن مقدار سیال در سلول‌های مجاور انجام‌پذیر است. بخش عمدهٔ سیال در داخل یک سلول سطحی به سلول مجاور با سیال بیشتر نزدیک است.

بعد از تعیین موقعیت و زاویهٔ سطح جریان، اعمال شرایط مرزی مناسب در سطح جریان برای محاسبهٔ حرکت سیال مقدور خواهد بود. با حرکت سیال، مقادیر F نیز با آن حرکت می‌کنند. سطوح آزاد به‌طور اتوماتیک با حرکت سیال در داخل یک شبکه ثابت رصد می‌شود. البته این فرآیند باید به گونه‌ای باشد که پله‌ای بودن تابع F حفظ شود.

مزیت بزرگ روش VOF این است که سیال در داخل یک شبکهٔ ثابت جریان دارد و هیچگونه تغییر شکل و جایجایی شبکه وجود ندارد. همچنین توده‌های سیال می‌توانند بر اساس اثر نیروها با هم مخلوط یا از هم جدا شوند بدون اینکه منطق خاصی برای تعیین سطوح مشترک نیاز باشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود تا روش VOF

Market Code

در مدلسازی فرآیندهای با تر و خشک‌شدن متناوب، نظیر موج در سواحل یا امواج جزر و مدی، روش مناسب-تری باشد.

۱-۲-۳- روش FAVOR

روش FAVOR یکی از فنون جز حجمی است که برای تعیین هندسه بکار برده می‌شود.همان‌طور که جز حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال بکار برده می‌شود، یک کمیت جز حجمی دیگر نیز می‌تواند برای تعیین سطح بدنهٔ صلب استفاده شود. از طرفی، این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنهٔ صلب اشغال نشده‌است (V_f) نیز استفاده شود. زمانیکه، در هر سول، حجم اشغال شده توسط بدنهٔ صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را داخل شبکهٔ ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، بکار برده می‌شود.

از آنجا که هندسهٔ مجرای یک جریان ثابت است لذا جز حجمی V_f و جز سطحی A_f در طول مدلسازی تغییر نمی‌کند. زمانیکه دو روش VOF و FAVOR با هم ترکیب می‌شوند، جز حجمی سیال، F، به‌عنوان بخشی از جز خالی سلول (V_f) که توسط بدنهٔ صلب اشغال نشده‌است تعریف می‌شود، لذا اگر حجم یک سلول برابر $\Gamma(FV_f)$ نه $\Gamma(F)$.

۱-۲-۴- معادله پیوستگی

به‌طور کلی، معادله پیوستگی جرم به‌صورت زیر است:

$$V_F + \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u A_x) + \mathrm{R}\frac{\partial}{\partial y}(\rho A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi\frac{\rho u A_x}{X} = \mathrm{R}_{DIF+}\mathrm{R}_{SOR} \qquad (۱-۱)$$

که V_f کسر حجمی جریان، ρ دانسیته سیال، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی و R_{SOR} منبع جرم هستند. اجزا

Market Code

سرعت (u,v,w) در جهات(x,y,z) یا (r,Θ,z) هستند. A_x، A_y و A_z برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهت-های x و y و z است و مقدار ضریب R بستگی به نوع سیستم مختصات دارد. وقتی که مختصات استوانه‌ای استفاده شود مشتقات y باید به مشتقات قطبی تبدیل شود:

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta} \qquad (۲-۱)$$

این تبدیل با استفاده از معادله زیر صورت می‌گیرد:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{r_m}{r}\frac{\partial}{\partial y} \qquad (۳-۱)$$

به‌طوریکه $y = r_m\theta$ و r_m برابر شعاع مرجع ثابت است.

انتقالی که با معادله بالا نشان داده شده بسیار راحت و آسان است، برای اینکه برای انجام آن فقط ضرب $R = r_m/r$ روی هر مشتق y در معادلات کارتزینی اصل انجام می‌شود. در مختصات کارتزین، R برابر ۱ و ξ برابر صفر است. در مختصات استوانه‌ای ξ برابر ۱ است.

عبارت اول در طرف راست معادله پیوستگی جرم برابر با عبارت پخش آشفتگی است:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\upsilon_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + R\frac{\partial}{\partial y}\left(\upsilon_\rho A_y\, R\frac{\partial}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\upsilon_\rho A_z\, \frac{\partial}{\partial z}\right) + \xi\frac{\rho \upsilon_\rho A_x}{X} \qquad (۴-۱)$$

به‌طوریکه ضریب υ_ρ برابر $C_p\mu/\rho$ است که μ برابر ضریب پخش مومنتم (لزجت) و C_p یک ثابت است که معکوس آن مربوط به عدد آشفتگی اشمیت است. این نوع پخش جرم تنها برای فرآیندهای اختلاط آشفتگی در سیالاتی که دارای گرادیان غیریکنواخت چگالی هستند، کاربر دارند. عبارت آخری در سمت راست معادله پیوستگی جرم، R_{SOR}، عبارت به دانسیته است که به‌عنوان مثال برای مدلسازی تزریق جرم از خلل و فرج یک

Market Code