

مقدمه

در حال حاضر نزدیک به دو میلیارد انسان از دسترسی به آب مناسب و شیرین که برای بهداشت و زندگی، یک عنصر اساسی بشمار می‌رود، محرومند. خشکسالی، آلودگی منابع آب و کمبود آن، میلیون‌ها انسان را با مشکلات فراوانی روبرو ساخته و عرصه را بر آنان تنگ کرده است. در بسیاری از نقاط دنیا، تقاضا برای آب از مرز منابع قابل استحصال عبور نموده و اگر در گذشته مشکلات استحصال آب در مقیاس محلی مطرح بود، اکنون و در آینده این مشکلات در مقیاس ملی، منطقه‌ای و حتی جهانی شدن بروز خواهد کرد و کمبود آب شیرین موجب خواهد شد که حفظ صلح، تامین امنیت و تهیه غذا و توسعه پایدار در سطح جهانی با چالش‌های بزرگی مواجه گردد. حتماً اصلی‌ترین قربانیان این وضع، کشورهای در حال توسعه و جهان سوم خواهند بود، چرا که بخش عمده زمین‌های آن‌ها در نواحی کم آب جهان قرار داشته، جمعیت فراوان و فن‌آوری ضعیف، تنش‌های سیاسی و اقتصادی و محدودیت‌های شدید منابع مالی، امکان مقابله با بحران ناشی از منابع آب را برای آن‌ها به شدت محدود می‌سازد.

با این وجود یکی از راه‌های مقابله با کمبود آب، ساخت سد و ذخیره‌سازی و انتقال آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. طرح‌های سدسازی از جمله طرح‌های مهم مهندسی هستند که نقش انکارناپذیری در اقتصاد ملی ایفا می‌کنند. این طرح‌ها به لحاظ پیچیدگی‌های فنی، ساختمانی و آثار زیست محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و احداث آن‌ها مستلزم سرمایه‌گذاری‌های هنگفتی می‌باشد. به همان نسبت که اجرای طرح‌های سدسازی نقش پر اهمیت خود را در اقتصاد کشور و منطقه بجای می‌گذارند، عملکرد ناصحیح آن‌ها بویژه در شرایطی که رفتار نامطلوب سد منجر به خرابی‌ها و تلفات جانی و مالی شود، فاجعه‌آمیز خواهد بود. به این لحاظ حصول اطمینان از عملکرد صحیح و ایمن طرح‌های سدسازی امری است که مسئولیت سنگینی را بر دوش مطالعه‌کنندگان، طراحان و سازندگان طرح‌های یاد شده قرار می‌دهد. لذا شناخت عملکرد صحیح یک سازه آبی پُرخرج، قبل از احداث آن، از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

از ابزارهای مهم شناسایی رفتار جریان در سیالات، استفاده از مدل‌های فیزیکی و عددی می‌باشد. که در این بین مدل‌های عددی به دلیل سرعت کار، هزینه کم و قابلیت آن‌ها در مدل‌سازی با مقیاس واقعی، در جایگاه ویژه‌ای برای طراحان قرار گرفته است. نرم‌افزار Flow-3D یکی از مدل‌های قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که امروزه محدوده کاربرد بسیار وسیعی در زمینه‌هایی چون هیدرولیک، ریخته‌گری، خودروسازی، محیط زیست، هوافضا، علوم دریایی و نفت و گاز پیدا کرده است. این مدل با وجود امکان کاربرد در انواع سیالات، بدلیل ویژگی‌هایی که دارد، به طور خاص در کاربردهای هیدرولیکی راه یافته و جواب‌های قابل قبولی نیز در این زمینه ارائه داده

است. همین امر باعث گسترش کاربران این مدل و رفع نواقص و محدودیت‌های آن شده است. مدل Flow-3D، در مقایسه با سایر مدل‌های موجود در زمینهٔ دینامیک سیالات محاسباتی، دارای دامنهٔ وسیعی از کاربردها و قابلیت‌ها است. این نرم‌افزار کاربر دوست بوده و رابط گرافیکی بسیار قوی دارد که کار با آن را آسان‌تر می‌کند.

مترجمین این کتاب امید دارند که این مجموعه بتواند راهگشایی برای محققین، کارشناسان و دانشجویان در شبیه‌سازی مسائل سیالاتی بوده و گامی هر چند کوچک در راستای ارتقای علمی ایشان بردارد. در ترجمه کتاب سعی شده است که ضمن حفظ امانت، انتقال مفاهیم بطور صحیح صورت گیرد. بدیهی است متن بدین لحاظ خالی از اشکال نمی‌باشد. موجب امتنان مترجمین خواهد بود، که همکاران و دانشجویان ارجمند اشکالات و ایرادات کتاب را به مترجمین متذکر شوند.

مرتضی ماروسی، رضا روشن، حامد سرکرده

فروردین ۱۳۹۳

فهرست مطالب

فصل ۱ کلیات ۱

۱.۱ مقدمه ۲

فصل ۲ تئوری‌های حل معادلات در دینامیک سیالات محاسباتی ۷

۱.۲ معادلات حاکم بر جریان سیال و مفاهیم اولیه در مدل‌سازی عددی ۸

۲.۲ جریان آرام و آشفتنه، کلیات ۸

۱.۲.۲ جریان آرام ۸

۲.۲.۲ جریان آشفتنه ۸

۳.۲.۲ تشخیص آرام یا آشفتنه بودن یک جریان ۸

۴.۲.۲ معادلات حاکم بر جریان سیالات ۹

۵.۲.۲ معیار صاف بودن یا زبر بودن یک سطح ۱۰

۶.۲.۲ توابع دیواره ۱۱

۳.۲ معادلات حاکم بر جریان آشفتنه ۱۳

۱.۳.۲ متوسط‌گیری زمانی ۱۳

۲.۳.۲ معادلات حرکت جریان‌های آشفتنه ۱۴

۳.۳.۲ معادله پیوستگی برای جریان آشفتنه ۱۵

۴.۳.۲ معادله ممنتوم برای جریان آشفتنه ۱۵

۴.۲ کلیات مدل‌سازی عددی ۱۷

۱.۴.۲ طبقه‌بندی معادلات دیفرانسیل جزئی مرتبه دوم ۱۷

۲.۴.۲ مولفه‌های مدل‌سازی عددی ۱۸

۳.۴.۲ خصوصیات مشترک روش‌های عددی ۱۹

۴.۴.۲ روش تفاضل محدود ۱۹

۵.۴.۲ الگوهای حل صریح و ضمنی ۲۴

فصل ۳ **مروری بر مبحث تئوری در نرم‌افزار Flow-3D** ۲۷

سیستم‌های مختصات ۲۸	۱.۳
معادلات بقای جرم و تغییرات آن ۲۸	۲.۳
معادلات مومنتم ۳۰	۳.۳
تنش برشی دیواره ۳۲	۴.۳
ارزیابی ویسکوزیته ۳۲	۵.۳
افت ناشی از صفحات متخلخل ۳۳	۶.۳
سیستم مختصات شتابدار ۳۴	۷.۳
مرزهای سیال و سطح آزاد ۳۵	۸.۳
مدل‌های کمکی ۳۶	۹.۳
مدل‌های حباب و مناطق تهی ۳۶	۱.۹.۳
مقدار باقی‌مانده تبخیر ۴۰	۲.۹.۳
مدل جریان‌های بویانسی (شناور) ۴۰	۳.۹.۳
مدل <i>Drift – Flux</i> ۴۱	۴.۹.۳
مدل پروانه و پره ۴۵	۵.۹.۳
مدل شی متحرک (GMO) ۴۶	۶.۹.۳
مدل محیط‌های متخلخل ۴۷	۷.۹.۳
مدل فرسایش رسوب ۵۴	۸.۹.۳
مدل آب‌های کم عمق ۶۰	۹.۹.۳
مدل‌های آشفستگی ۶۲	۱۰.۳
مدل طول اختلاط پراندتل ۶۲	۱.۱۰.۳
مدل گردابه‌های بزرگ ۶۶	۲.۱۰.۳

فصل ۴ **رابط کاربری** ۶۹

مرور کلی ۷۰	۱.۴
منوی اصلی ۷۰	۲.۴
منوی فایل (FILE MENU) ۷۱	۱.۲.۴
منوی DIAGNOSTICS ۷۵	۲.۲.۴
منوی PREFERENCE ۷۶	۳.۲.۴
منوی UTILITIES ۷۷	۴.۲.۴
منوی SIMULATE ۷۹	۵.۲.۴
منوی HELP ۸۰	۶.۲.۴
سربرگ NAVIGATOR یا هدایتگر ۸۰	۳.۴
آماده‌کردن مدل (MODEL SETUP) ۸۱	۴.۴

۸۱ GENERAL	۱.۴.۴
۸۴ PHYSICS	۲.۴.۴
۸۷ FLUIDS	۳.۴.۴
۸۸ MESHING & GEOMETRY سربرگ	۴.۴.۴
۱۱۳ انتخاب شرایط مرزی	۵.۴.۴
۱۱۵ تعیین شرایط اولیه	۶.۴.۴
۱۱۶ خروجی	۷.۴.۴
۱۱۹ تعیین مشخصات عددی مدلسازی	۸.۴.۴
۱۲۰ سربرگ شبیه‌سازی	۵.۴
۱۲۳ ANALYZE سربرگ	۶.۴
۱۲۷ CUSTOM PLOTS	۱.۶.۴
۱۲۷ PROBE DATA	۲.۶.۴
۱۲۹ ONE-DIMENSIONAL PLOTS	۳.۶.۴
۱۳۰ TWO-DIMENSIONAL PLOTS	۴.۶.۴
۱۳۲ THREE-DIMENSIONAL PLOTS	۵.۶.۴
۱۳۵ TEXT OUTPUT قسمت	۶.۶.۴
۱۳۵ NEUTRAL FILE	۷.۶.۴
۱۳۷ DISPLAY سربرگ	۷.۴
۱۳۷ 2-D FORMAT DISPLAY MODE قسمت	۱.۷.۴
۱۴۱ 3-D FORMAT DISPLAY MODE	۲.۷.۴

فصل ۵ معرفی مدل‌های موجود در نرم‌افزار ۱۵۱

انتخاب مدل آشفستگی و تنظیمات آن	۱.۵
تعیین شتاب گرانش در شبیه‌سازی	۲.۵
شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد	۳.۵
ورود هوا به جریان	۴.۵
تعیین زبری قسمت‌های مختلف مدل	۵.۵
انتخاب شرایط مرزی	۶.۵
شبیه‌سازی جریان‌های با عمق کم	۷.۵
فعال کردن مدل فرسایش رسوب	۸.۵
تنش سطحی	۹.۵
تبخیر از سطح آزاد	۱۰.۵
تنش دیواره	۱۱.۵
مش‌های چند بلوکه‌ای	۱۲.۵
ذرات جرم دار و ردیاب	۱۳.۵

مدل DRIFT FLUX ۱۷۸	۱۴.۵
جریان بویانسی ۱۸۰	۱۵.۵
عبور جریان از صفحات متخلخل ۱۸۱	۱۶.۵
جریان با دانسیته متغیر ۱۸۶	۱۷.۵
سطوح گذرنده جریان ۱۸۷	۱۸.۵
جریان تراکم‌پذیر ۱۸۸	۱۹.۵
مسیر طی شده به وسیله سیال ۱۹۰	۲۰.۵
موج‌های صوتی ۱۹۰	۲۱.۵
حباب‌های آدیاباتیک ۱۹۱	۲۲.۵
تقریب مواد بینگهام ۱۹۳	۲۳.۵
کاویتاسیون و تشکیل حباب (جوشش) ۱۹۴	۲۴.۵
تبخیر/ میعان (یک سیال با حباب‌هاب حرارتی) ۱۹۶	۲۵.۵
تبخیر/ میعان (مدل دوسیاله) ۱۹۸	۲۶.۵
تبخیر/ میعان (دو سیال با گاز غیر قابل میعان) ۱۹۹	۲۷.۵
جریان محدود شده (CONFINED FLOW) ۲۰۱	۲۸.۵
کانال‌های خنک کننده ۲۰۱	۲۹.۵
مدل DROPLET SOURCE ۲۰۳	۳۰.۵
مواد الاستیک و پلاستیک ۲۰۳	۳۱.۵
غشای الاستیک ۲۰۴	۳۲.۵
دیوار الاستیک یا قابل ارتجاع ۲۰۷	۳۳.۵
گریز گاز از سطح آزاد ۲۱۰	۳۴.۵
مدل پروانه و پره ۲۱۱	۳۵.۵
زمان پر شدن ۲۱۲	۳۶.۵
زمان ماندگاری سیال ۲۱۳	۳۷.۵
پنجره‌های نیرو ۲۱۳	۳۸.۵
مدل اشیاء متحرک ۲۱۴	۳۹.۵
اشیاء متحرک، برخورد ۲۲۵	۴۰.۵
منابع گرمایی ۲۲۶	۴۱.۵
ابزار HISTORY PROBES ۲۳۵	۴۲.۵
داده‌های هیدرولیکی ۲۳۶	۴۳.۵
مناطق حرارتی ۲۳۶	۴۴.۵
جریان‌های دوفازی ۲۳۷	۴۵.۵
شیرها ۲۳۹	۴۶.۵
جای‌گذاری حجمی از سیال ۲۴۱	۴۷.۵
تنش برشی باد ۲۴۲	۴۸.۵

فصل ۶ تنظیمات عددی ۲۴۳

مقدمه ۲۴۴	۱.۶
محاسبه فشارها ۲۴۵	۲.۶
حل فشار برای جریان قابل تراکم ۲۴۷	۳.۶
محاسبه دما ۲۴۷	۴.۶
محاسبه تنش‌های ویسکوزیته ۲۴۸	۵.۶
انتقال دانسیته ۲۵۰	۶.۶
انتقال انرژی ۲۵۰	۷.۶
الگوریتم F-PACKING ۲۵۱	۸.۶
تقریب‌های مرز سیال ۲۵۲	۹.۶
انتقال مومنتم ۲۵۴	۱۰.۶
انتقال ضمنی ۲۵۴	۱۱.۶
شرایط مرزی فشار ۲۵۵	۱۲.۶
همگرایی تکرارهای فشار ۲۵۶	۱۳.۶
جریان ماندگار ۲۵۶	۱۴.۶

فصل ۷ ساخت هندسه مسئله و شبکه‌بندی ۲۵۹

ساخت ژئومتری ۲۶۰	۱.۷
روش‌های ساخت ژئومتری در FLOW-3D ۲۶۱	۲.۷
تولید ژئومتری با استفاده از مدل‌کننده جامدها ۲۶۱	۱.۲.۷
بازیابی کردن فایل‌های I-DEAS ۲۶۲	۲.۲.۷
ساخت فایل‌های STL ۲۶۳	۳.۲.۷
بازیابی فایل‌های ANSYS ۲۶۳	۴.۲.۷
بازیابی فایل‌های توپوگرافی ۲۶۴	۵.۲.۷
انجام عملیات بر روی ژئومتری (محدودکننده‌ها و انتقال‌دهنده‌ها) ۲۶۴	۳.۷
محدودیت‌های ساخت ژئومتری ۲۶۴	۴.۷
ساخت ژئومتری با استفاده از رابط گرافیکی کاربر ۲۶۵	۵.۷
ساخت ژئومتری ۲۶۵	۱.۵.۷
محل نگه‌داری فایل‌های STL ۲۷۰	۶.۷
انتقال یک مولفه یا زیر مولفه ۲۷۰	۱.۶.۷
اصلاح ژئومتری در ساختار درختی ۲۷۱	۲.۶.۷
استفاده از ساختار درختی ۲۷۲	۳.۶.۷
زیر شاخه‌های مختلف در شاخه GEOMETRY ۲۷۲	۴.۶.۷
ایجاد و اصلاح بافل‌ها ۲۷۲	۵.۶.۷

پاک کردن ژئومتری ۲۷۳	۶.۶.۷
موانع با انسداد صفر ۲۷۳	۷.۶.۷
مش بندی ۲۷۴	۷.۷
مش های یکنواخت ۲۷۴	۱.۷.۷
مش های غیر یکنواخت ۲۷۴	۲.۷.۷
مش های چند بلوک های ۲۷۴	۳.۷.۷
مکانیسم ساخت مش ۲۷۵	۴.۷.۷
قواعد کلی برای مش بندی ۲۸۲	۵.۷.۷
کم کردن حافظه مورد استفاده ۲۸۴	۶.۷.۷
مروری دوباره بر عملیات FAVORIZE بر روی ژئومتری و مش ۲۸۴	۷.۷.۷
بازبینی فایل های ژئومتری ۲۸۶	۸.۷.۷

فصل ۸ پیغام های خطا در حین شبیه سازی و حل آن ۲۸۷

پیغام های تشخیصی ۲۸۸	۱.۸
راهنما ۲۸۸	۲.۸
پیغام های پیش پردازنده ۲۸۸	۳.۸
پیغام: OPEN AREA MISMATCH AT INTER-BLOCK BOUNDARIES OF ALL ۲۸۸ BLOCKS	۱.۳.۸
پیغام ۲۸۹ OPEN AREAS BETWEEN BLOCKS DIFFER BY MORE THAN 5%	۲.۳.۸
پیغام ۲۸۹ NO OPEN AREA AT BOUNDARY	۳.۳.۸
پیغام ۲۸۹ MULTIBLOCK INCONSISTENT WITH VLIN	۴.۳.۸
پیغام های پردازشگر ۲۹۰	۴.۸
پیغام: ۲۹۰ Convective Flux Exceeded Stability Limit	۱.۴.۸
پیغام: ۲۹۰ Excessive Convection Failures – Calculation Terminated	۲.۴.۸
پیغام: ۲۹۰ Pressure Iteration Did Not Converge in It max = IMAX Iterations	۳.۴.۸
پیغام: ۲۹۱ Excessive Iteration Failures – Calculation Terminated	۴.۴.۸
پیغام: ۲۹۲ Pressure Iteration Diverging – Restarting Cycle with Smaller Omega	۵.۴.۸
پیغام: ۲۹۲ Excessive Pressure Convergence Failures – Calculation Terminated	۶.۴.۸
پیغام: ۲۹۲ TIME-STEP SIZE < DTMIN	۷.۴.۸

فصل ۹ شروع دوباره یک شبیه سازی (Restarts) ۲۹۵

انجام دوباره شبیه سازی ۲۹۶	۱.۹
----------------------------	-----

گزینه‌های قابل تغییر در RESTART ۲۹۹	۲.۹
پیکربندی سیال ۲۹۹	۱.۲.۹
همپوشانی شبکه (GRID OVERLAY) ۲۹۹	۲.۲.۹
انتقال حرارت، انتقال کمیت‌ها، توربولانس و ذرات ۳۰۰	۳.۲.۹

فصل ۱۰ مثال هیدرولیکی - استهلاک انرژی در جریان از روی یک پله

۳۰۱ (Drop)

مشخصات مساله ۳۰۳	۱.۱.۰
مشخصات هندسه مساله ۳۰۳	۱.۱.۱.۰
شرایط جریان ۳۰۳	۲.۱.۱.۰
مشخصات شبیه‌سازی ۳۰۳	۳.۱.۱.۰
ساخت پوشه برای شبیه‌سازی ۳۰۳	۲.۱.۰
ساخت شبیه‌سازی جدید ۳۰۴	۱.۲.۱.۰
ساخت هندسه پله ۳۰۴	۳.۱.۰
ساخت هندسه پله ۳۰۴	۱.۳.۱.۰
مشخص کردن دامنه محاسباتی (مش‌بندی) ۳۰۶	۴.۱.۰
اضافه کردن نقاط ثابت در مش بلوک ۳۰۸	۱.۴.۱.۰
مشخصات جریان ۳۱۰	۲.۴.۱.۰
تعیین شرایط مرزی ۳۱۱	۵.۱.۰
تعیین شرط مرزی فشار ۳۱۲	۱.۵.۱.۰
تعیین شرط مرزی OUTFLOW ۳۱۲	۲.۵.۱.۰
انتخاب شرط مرزی دیوار (WALL) ۳۱۳	۳.۵.۱.۰
شرط مرزی تقارن، SYMMETRY ۳۱۳	۴.۵.۱.۰
تعیین مشخصات سیال ۳۱۳	۶.۱.۰
اضافه کردن مشخصات سیال ۳۱۳	۱.۶.۱.۰
تعیین شرایط اولیه ۳۱۴	۷.۱.۰
انتخاب مدل‌های فیزیکی مناسب ۳۱۵	۸.۱.۰
فعال کردن مدل شتاب جاذبه ۳۱۶	۱.۸.۱.۰
فعال کردن ویسکوزیته و توربولانس ۳۱۷	۲.۸.۱.۰
انتخاب زمان اتمام شبیه‌سازی ۳۱۸	۹.۱.۰
تنظیم قسمت عددی شبیه‌سازی ۳۱۸	۱۰.۱.۰
ران کردن شبیه‌سازی با مش درشت ۳۱۹	۱۱.۱.۰
بررسی وابستگی مش برای تعیین نرخ جریان ۳۲۰	۱۲.۱.۰
تعیین نرخ حجمی جریان به صورت گرافیکی ۳۲۰	۱.۱۲.۱.۰
تعیین نرخ حجمی جریان (دبی) به صورت عددی ۳۲۲	۲.۱۲.۱.۰

استفاد از نتایج شبیه‌سازی با مش درشت جهت تعیین ضخامت جت	۳۲۳	۱۳.۱۰
تغییر اندازه مش‌ها با توجه به ضخامت جت	۳۲۴	۱۴.۱۰
انتخاب ماکزیمم طول اختلاط	۳۲۵	۱۵.۱۰
اضافه کردن صفحات جریان برای آنالیز بهتر جریان	۳۲۵	۱۶.۱۰
تعیین یک FLUX SURFACE در لبه پله	۳۲۶	۱.۱۶.۱۰
انتخاب خروجی‌ها	۳۲۹	۱۷.۱۰
تعیین خروجی‌های مورد نظر	۳۲۹	۱.۱۷.۱۰
ران کردن شبیه‌سازی با مش جدید	۳۳۰	۱۸.۱۰
تحلیل نتایج شبیه‌سازی	۳۳۱	۱۹.۱۰
تعیین طول حوضچه، L	۳۳۳	۱.۱۹.۱۰
تعیین عمق پایاب Y_1	۳۳۳	۲.۱۹.۱۰
تعیین عمق حوضچه Y_p	۳۳۵	۳.۱۹.۱۰
تعیین عمق بحرانی (y_c) و محل وقوع آن (x_c) بر روی سازه پله	۳۳۹	۴.۱۹.۱۰
تعیین افت انرژی	۳۴۲	۵.۱۹.۱۰
مقایسه نتایج FLOW-3D با معادلات تجربی	۳۴۳	۲۰.۱۰

منابع و مراجع ۳۴۵

فصل اول

کلیات