٨٧١١٠٨٧٠
٨١٢٠٥

٤٠٤-٣

بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٩٩٦٧

۸۷۷۰/۱۱/۸۷
۸۷_۶۵

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری مهندسی عمران گرایش هیدرولیک

شبیه سازی عددی دو بعدی توزیع حرارت و شوری در مخازن سدها

مرتضی افتخاری

استاد راهنما:
دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری

اساتید مشاور:
دکتر مسعود منتظری نمین
دکتر میرمصدق جمالی

۱۳۸۸/۱۲/۱۱

آذر ماه ۱۳۸۷

۱۰۹۹۶۷

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای **مرتضی افتخاری** رساله ۲۴ واحدی خود را **با عنوان شبیه سازی عددی دوبعدی توزیع حرارت و شوری در مخازن سدها** در تاریخ ۱۳۸۷/۹/۳۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی عمران – مهندسی آب پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری	استاد	
استاد مشاور	دکتر مسعود منتظری نمین	استادیار	
استاد مشاور	دکتر میرمصدق جمالی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر قاسم حیدری نژاد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مهدی شفیعی فر	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر بهار فیروزآبادی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سیدمحمدعلی بنی هاشمی	استادیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی شفیعی فر	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی عمران گرایش هیدرولیک است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری، مشاوره جناب آقایان دکتر مسعود منتظری نمین و دکتر میرمصدق جمالی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب مرتضی افتخاری دانشجوی رشته مهندسی عمران گرایش هیدرولیک مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

مرتضی افتخاری

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

مرتضی افتخاری

تقدیم به همسر و فرزند عزیزم

و

مادر گرانقدرم

و

روح مرحوم پدرم

تشکر و قدردانی

در اینجا فرصت را مغتنم شمرده تا پس از حمد خداوند متعال که همواره این بنده روسیاه و سراپا تقصیر را مورد الطاف و عنایات خود قرار داد، به اقتضای حدیث شریف "من لم یشکر المخلوق، لم یشکر الخالق" تقدیر و سپاسی داشته باشم از اساتید راهنما و مشاورم جناب آقایان دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری، دکتر مسعود منتظری نمین و دکتر میر مصدق جمالی که انجام این تحقیق قطعاً بدون راهنمایی‌های بی‌دریغ و دقیق علمی و زحمات و حمایتهای بی وقفه این بزرگواران امکان‌پذیر نبود. از ایزد منان تقاضای بهترین پاداشها را برای این عزیزان آرزومندم.

همچنین بر خود لازم میدانم از همسر و شریک زندگیم که صبورانه در این راه یاریم کرد و آرامش لازم برای انجام این تحقیق را برایم فراهم آورد و نیز همکاری‌های بیدریغ خانواده محترم ایشان قدردانی و سپاسگزاری کنم. همینطور لازم میدانم از کلیه دوستان و همکارانم که یاور، حامی و پشتیبان من بوده و هستند و در انجام این تحقیق از هیچ کمک و ایثاری به حقیر کوتاهی نکردند، قدردانی و سپاسگزاری کنم. توفیق همه این عزیزان را در تمامی عرصه های زندگی از پروردگار یکتا خواستارم.

در انتها از پروردگار مهربان برای مادر بزرگوارم که مشوق اصلی من در تحصیلات دبستان تا دانشگاه بود طلب طول عمر و عافیت و برای روح مرحوم پدرم که همیشه دعای خیرش را بدرقه راهم می‌نمود طلب مغفرت دارم.

چکیده

در بین مدلهای دو بعدی، مدلهای متوسط گیری شده در عرض با وجود کارآیی نسبتاً خوب، کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. در این مدلها علاوه بر آنکه هزینه‌های محاسباتی تقریبا برابر با مدلهای دو بعدی خالص است، اثر تغییرات عرض هندسه میدان نیز در معادلات وجود داشته و در شبیه سازی جریان لحاظ می‌گردد. در تحقیق حاضر یک مدل متوسط گیری شده در عرض در حالت غیرماندگار و بدون فرض فشار هیدرواستاتیک در سیستم مختصات کارتزین ارائه می‌شود. در منفصل‌سازی معادلات، ضمن استفاده از روش تفکیک زمانی، روش احجام محدود در یک شبکه جابه‌جا شده مورد استفاده قرار گرفت. برای بستن معادلات، از مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استاندارد که تأثیرات شناوری در آن لحاظ گردیده، استفاده شد. در این تحقیق ترمهای جابجایی، با استفاده از روش نیمه‌لاگرانژی مبتنی بر طرح فروم و ترمهای پخش، به کمک روش نیمه‌ضمنی کرانک- نیکلسون منفصل شد. از طرح محدود کننده شار ULTIMATE به منظور جلوگیری از ایجاد نوسانهای غیرفیزیکی استفاده گردید. ترمهای فشار و شناوری در قالب معادله پواسون فشار و با استفاده از الگوریتم بلوکهای سه قطری حل شدند و پس از آن مؤلفه‌های سرعت محاسبه شدند. پس از محاسبه مؤلفه‌های سرعت در گام زمانی جدید، معادلات انتقال مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اتلاف انرژی جنبشی، دما و شوری حل می‌شوند و در نهایت چگالی سیال با استفاده از معادله حالت و بر اساس دما و شوری بدست آمده، تعیین می‌شود. به این ترتیب مدل توسعه داده شده قادر است معادلات انتقال- پخش متوسط‌گیری شده در عرض مربوط به دما و شوری را شبیه‌سازی و اثر تغییرات عرضی هندسه میدان را در انتقال و پخش شوری و دما لحاظ نماید.

در این مدل رقوم سطح آب با استفاده از یکی از اقتصادی‌ترین روشهای تعیین سطح آزاد و بدون نیاز به حل معادلات اضافی، در هر گام زمانی به همراه میدان سرعت و فشار بطور مستقیم از معادلات

حاکم استخراج می‌گردد. همچنین با توجه به استفاده از معادلات متوسط گیری شده در عرض در مدل عددی مذکور، اثر تغییرات عرضی هندسه میدان را می‌توان بر رقوم سطح آب شبیه‌سازی نمود. مدل برای شبیه سازی الگوی جریان، دما، شوری و رقوم سطح آب در مسائل مختلف از جمله جریان عبوری از روی یک پله، جریان عبوری از روی حفره، انتقال شوری در کانال افقی و کانال شیبدار، انتقال حرارت در داخل یک مخزن شیبدار با تغیرات عرضی هندسه میدان و انتشار موج خطی استوکس، انتشار موج تنها و جریان در کانال با تغییرات عرضی در هندسه بکارگرفته شد.

پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل در مقایسه با موارد تحلیلی و آزمایشگاهی مذکور از مدل برای شبیه‌سازی سیکل سالانه شوری و حرارت در مخزن سد پانزده خرداد استفاده شد و نتایج حاصل از مدل با اطلاعات برداشت شده از این سد در سال ۱۳۷۶ مقایسه گردید. در این شبیه‌سازی علاوه بر دقت مناسب مدل، زمان اجرای ان نیز یسیار مناسب بود. در مجموع نتایج حاصل از مدل بیانگر کارآیی مناسب آن در شبیه سازی هیدرودینامیک، شوری، دما و سطح آب در جریانهای با مقیاس کوچک تا بزرگی است که با تغییرات عرضی هندسه میدان نیز همراه می‌باشند.

واژه های کلیدی: شبیه سازی عددی، مدل متوسط‌گیری شده در عرض، فشار هیدرودینامیک، جریان سطح آزاد، تغییرات عرضی، شوری و دما.

فهرست مطالب

فصل اول- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق ۳

۱-۳- چهارچوب تحقیق ۵

۱-۴- اهداف و نوآوری‌های تحقیق ۶

۱-۵- روش انجام تحقیق ۶

۱-۶- نمای کلی و چیدمان رساله ۸

فصل دوم- مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۰

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- تحقیقات آزمایشگاهی ۱۰

۲-۳- تحقیقات عددی ۱۱

۲-۳-۱- مروری بر مدلهای عددی شبیه‌سازی مخزن ۱۳

۲-۳-۲- مدلهای دوبعدی متوسط‌گیری شده در عرض ۲۲

۲-۴- جمع‌بندی ۲۶

فصل سوم- معادلات حاکم و شرایط مرزی ۲۸

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- تقریب بوزینسک ۲۹

۳-۳- معادلات حاکم بر جریان ۳۱

۳-۴- معادله انتقال-پخش ۳۳

۳-۵- آشفتگی ۳۵

۳-۵-۱- اثر تغییرات چگالی در آشفتگی ۳۵

۳-۵-۲- مدلسازی آشفتگی ۳۵

۳-۵-۳- تقسیم بندی مدلهای آشفتگی با توجه به استفاده از فرض بوزینسک ۳۷

۳-۵-۴- مدل آشفتگی مورد استفاده در تحقیق حاضر ۳۷

۳-۵-۵- الگوی تعیین فشار ۳۹

۳-۶- شبیه‌سازی سطح آب ۴۲

۳-۶-۱- مروری بر روشهای مختلف تعیین سطح آب ۴۳

۳-۶-۱-۱- روشهای شبکه ثابت یا اولری ۴۳

۳-۶-۱-۲- روشهای شبکه متحرک یا لاگرانژی ۴۷

۳-۶-۲- روش مورد استفاده در تحقیق حاضر ۴۹

۳-۶-۲-۱- استخراج معادله حاکم بر فشار در سلول سطحی برای مدل عددی حاضر ۴۹

۳-۷- معادله حالت ۵۱

۳-۸- شرایط اولیه و مرزی ۵۳

۳-۸-۱- مرز سطح آزاد ۵۴

۳-۸-۲- مرز جداره جامد ۵۷

۳-۸-۳- مرز ورودی ۵۹

۳-۸-۴- مرز خروجی ۵۹

۳-۸-۵- دیواره های جانبی ۶۰
۳-۸-۶- شرط مرزی فشار ۶۱

فصل چهارم- توسعه مدل عددی و روش‌های مورد استفاده ۶۳

۴-۱- مقدمه ۶۳
۴-۲- شبکه محاسباتی ۶۳
۴-۳- روش تفکیک عملگرها ۶۵
۴-۳-۱- حل معادله انتقال در فضای دو بعدی با تجزیه آن به معادلات یک بعدی ۶۷
۴-۳-۱-۱- حل معادله جابجایی ۶۸
۴-۳-۱-۲- حل معادله پخش ۷۳
۴-۴- شبیه‌سازی میدان جریان ۷۶
۴-۴-۱- حل ترمهای جابجایی ۷۶
۴-۴-۲- حل ترمهای پخش ۷۷
۴-۴-۳- حل ترمهای تنش دیواره‌های جانبی ۷۸
۴-۴-۴- حل ترمهای فشار و شناوری ۷۸
۴-۴-۵- حل دستگاه معادلات سه قطری بلوکی ۷۹
۴-۵- نحوه انفصال مشتق‌ها ۸۱
۴-۶- طرح محدود کننده شار ۸۲
۴-۷- الگوریتم مدل عددی ۸۴
۴-۸- برنامه کامپیوتری ۸۵
۴-۹- محدودیتهای مدل عددی حاضر ۸۵

فصل پنجم- صحت سنجی و ارزیابی مدل عددی ۸۷

۵-۱- مقدمه ۸۷
۵-۲- شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان در حالت آرام ۸۹
۵-۲-۱- جریان عبوری از میان دو صفحه موازی ۸۹
۵-۲-۲- جریان عبوری از روی یک پله ۹۰
۵-۲-۳- جریان در داخل حفره ۹۴
۵-۳- شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان در حالت آشفته ۹۷
۵-۳-۱- جریان در کانال باز ۹۷
۵-۳-۲- جریان عبوری از روی ترانشه ۱۰۰
۵-۴- شبیه‌سازی جریان همراه با تغییرات سطح آزاد ۱۰۲
۵-۴-۱- انتشار موج خطی استوکس با دامنه کوتاه ۱۰۳
۵-۴-۲- انتشار موج تکین در آب با عمق ثابت ۱۰۵
۵-۴-۳- جریان در کانال ونتوری ۱۰۷
۵-۵- شبیه‌سازی شوری و دما در حالت آشفته ۱۱۰
۵-۵-۱- جریان چگال رها شده از مانع در یک کانال محصور ۱۱۱
۵-۵-۲- جریان چگال ناپیوسته رها شده از مانع در کانال باز ۱۱۳
۵-۵-۲-۱- جریان چگال ناپیوسته رها شده از مانع در بستر افقی ۱۱۳
۵-۵-۲-۲- جریان چگال ناپیوسته رها شده از مانع در بستر شیبدار ۱۱۸
۵-۶- شبیه‌سازی هیدرودینامیک، شوری و دما در حالت وجود تغییرات عرضی ۱۲۰
۵-۶-۱- جریان عبوری از یک کانال با عرض متغیر ۱۲۰
۵-۶-۲- جریان چگال معاوضه ای سه لایه در خلال یک تنگ شدگی ۱۲۱
۵-۶-۳- جریان سرد ورودی به یک مخزن ۱۲۴

۵-۶-۴- شبیه‌سازی جریان چگال در فلوم عمومی هیدرودینامیک مخزن ۱۳۰

فصل ششم- شبیه‌سازی هیدرودینامیک، شوری و حرارت در مخزن سد پانزده خرداد ...۱۳۵

۶-۱- مخازن سدها ۱۳۵
۶-۲- رژیم حرارتی مخازن ۱۳۶
۶-۳- چرخه لایه بندی ۱۳۸
۶-۴- طبقه بندی مخازن ۱۳۹
۶-۵- مدیریت مخازن ۱۴۱
۶-۶- شناخت شوری ۱۴۲
۶-۷- روابط مرتبط با شبیه سازی اثر چشمه حرارتی محیط ۱۴۴
۶-۷-۱- شار انرژی حرارتی امواج کوتاه خورشید ۱۴۶
۶-۷-۲- محاسبه برآیند شار انرژی حرارتی در سطح ۱۵۰
۶-۷-۲-۱- شار انرژی حرارتی امواج بلند اتمسفر ۱۵۱
۶-۷-۲-۲- شار انرژی حرارتی امواج برگشتی از سطح آب ۱۵۲
۶-۷-۲-۳- شار انرژی حرارتی ناشی از هدایت ۱۵۲
۶-۷-۲-۴- شار انرژی گرمایی ناشی از تبخیر آب ۱۵۳
۶-۸- شبیه‌سازی عددی سد پانزده خرداد ۱۵۴
۶-۸-۱- سد پانزده خرداد ۱۵۴
۶-۸-۲- اطلاعات و شرایط شبیه‌سازی ۱۵۶
۶-۸-۳- شبیه سازی اثر بارش و تبخیر ۱۵۸
۶-۸-۴- شرایط اولیه جریان و مدت زمان شبیه سازی ۱۵۹
۶-۸-۵- کالیبراسیون مدل ۱۶۲
۶-۸-۶- نتایج حاصل از شبیه سازی ۱۶۲

فصل هفتم- نتایج و پیشنهادها ۱۷۰

۷-۱- نتایج ۱۷۰
۷-۲- پیشنهادات ۱۷۱

مراجع ۱۷۲

فصل اول- کلیات

۱-۱- مقدمه

منابع آب شیرین بسیار مهم و با ارزش بوده، تا حدی که کمبود آب یکی از موانع اصلی بر سر راه توسعه کشورهاست. درحال حاضر سدسازی یکی از راههای ذخیره آب جهت تامین آب شرب، کشاورزی و صنعت است.

در کشور ما در زمینه احداث سدها و ذخیره‌سازی آب، پیشرفتهای بسیار چشمگیری بوجود آمده و پروژه‌های بسیاری نیز در دست اجرا می‌باشد. از آنجا که اجرای چنین پروژه‌هایی مستلزم صرف هزینه بالا، نیروهای انسانی و زمان زیاد می‌باشد، بحث نگهداری این سدها پس از اجرا و بخصوص بحث کنترل کیفیت آب ذخیره شده در پشت آنها از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. خوشبختانه در حال حاضر مسائل زیست‌محیطی و در راس آنها مطالعات مربوط به کیفیت آب مخازن مورد توجه مسوولان، مراکز دانشگاهی و محافل علمی قرار گرفته است.

بطور کلی جهت بررسی پدیده های داخل مخزن ممکن است از یک یا ترکیبی از روش های زیر استفاده شود:

۱- تحقیقات میدانی و اندازه‌گیری‌های صحرایی

تحقیقات میدانی و مشاهدات محلی مربوط به یک زمان خاص بوده و قابلیت پیش‌بینی و بررسی اثرات تغییر در پارامترهای مربوط به هندسه میدان و ورودی‌ها را نداشته و گران هستند. البته تحقیقات میدانی از اطمینان و صحت بسیار بالایی برخوردار هستند.

۲- مدلهای فیزیکی

مدلهای فیزیکی در بررسی الگوی جریان ارزانتر از تحقیقات میدانی می‌باشند، لیکن به علت محدودیت تجهیزات، زمان اجرای طولانی، اندازه‌گیری‌های متعدد لازم، سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی را

می‌طلبند. همچنین در بعضی جریانها، مشکلات ناشی از عدم تشابه کامل مدل با شرایط واقعی استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی را غیر عملی می‌سازد. به هر حال از نتایج آزمایشگاهی برای اثبات درستی حل معادلات ریاضی استفاده می‌شود و اغلب نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسباتی حل معادلات در کنار یکدیگر بکار می‌روند.

۳- مدلهای عددی

پیشرفت چشمگیر در زمینه رایانه در کنار استفاده از ابزار و وسایل جدید مربوط به اندازه‌گیری در مدلهای فیزیکی، پیشرفت های قابل توجهی را در مبحث هیدرودینامیک محاسباتی بوجود آورده بطوری که در حال حاضر برنامه‌های رایانه‌ای متعددی جهت استفاده در حل مسائل آبی تولید شده است.

مدلهای عددی غالباً با هزینه کم و انعطاف پذیری بالا قابل استفاده هستند. اصلی‌ترین مشکل در مدلهای عددی، مربوط به تهیه اطلاعات مورد نیاز جهت صحت سنجی وکالیبراسیون آنها می‌باشند.

با استفاده از مدلهای عددی می‌توان هم در مطالعات اولیه قبل از ساخت سد و هم در دوران بهره‌برداری از سد، کیفیت آب را کنترل نمود وکیفیت آب مصرفی را بسته به نوع مصرف تامین نمود. کنترل کیفیت آب مخزن و بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی کیفیت آب در مخازن جهت پیش‌بینی کیفی و مدیریت بهره‌برداری آب و شناخت پدیده‌هایی همچون یوتریفیکاسیون می‌تواند کمک موثری به کارشناسان و مدیران در پیش‌بینی و پیشگیری مسائل محیطزیستی مرتبط با سدها نماید. در داخل کشورمان نیز طی سالهای اخیر روند مطلوبی در جهت تهیه مدلهای عددی و یا آشنایی با نحوه استفاده و کاربرد نرم‌افزارهای موجود آغاز گردیده است. در این راستا می‌توان به تعداد قابل توجهی از سمینارهای درسی و پایان‌نامه‌های کار شده در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری با موضوعاتی در این زمینه اشاره نمود. به هر ترتیب شرایط بومی کشور اعم از وضعیت مورفولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی رودخانه‌ها و سواحل کشور، شرایط اقلیمی و آب وهوای کشور، جنس خاک و نیز اطلاعات موجود، توسعه مدلهای عددی متناسب با این شرایط را طلب می‌نماید.

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

بطور کلی احداث سد با توجه به شرایط منطقه و مشخصات فیزیکی مخزن، باعث ایجاد تغییر در کیفیت آب مخزن و رودخانه پائین دست آن می‌شود. کیفیت آب مخازن سدها در اثر ایجاد پدیده لایه‌بندی حرارتی و نیز افزایش زمان ماند آب در مخزن، تغییر می‌کند که هردو عامل باعث ایجاد تغییرات شدید کیفیت آب خروجی نسبت به ورودی می‌گردند. تبدیل محیط نسبتاً یک بعدی و متلاطم رودخانه به محیط نسبتاً آرام مخزن عملاً باعث ایجاد یک رژیم حرارتی وابسته به مکان و زمان در مخزن می‌گردد. از آنجا که تمامی فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی در مخزن سد تابعی از دماست لذا شناخت رژیم حرارتی مخزن به عنوان مهمترین پدیده درونی مخزن، و اثرات آن بر کیفیت آب مخزن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو مخازن علاوه بر تامین کمی آب، کنترل کننده تغییرات کیفی آب نیز می‌باشند.

لایه بندی حرارتی مخزن، تعادل محتویات شیمیایی مخزن و به تبع آن فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی وابسته را تغییر می‌دهد. شوری آب پایین دست، کاهش اکسیژن محلول، آسیب به حیات آبزیان، طعم و بوی نامطلوب آب، ایجاد گازهای هیدروژنه و سمی و تغییر رژیم فسفر در آب خروجی از جمله اثرات تشکیل لایه‌بندی حرارتی در مخازن سدهاست.

در لایه‌بندی حرارتی لایه‌های سبکتر (گرمتر) در بالا و لایه‌های سنگین‌تر (سردتر) در پایین قرار می‌گیرند. این فرآیند از ابتدای تابستان و با گرمتر شدن هوا شروع شده و در طول تابستان بر اثر افزایش دمای سطح آب تشدید می‌شود، بطوریکه مخزن در انتهای فصل گرما تقریبا با دو لایه مجزا از هم روبرو خواهد بود. کیفیت آب در این دو لایه با توجه به اختلاف خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آنها تفاوت دارد. با آمدن پاییز لایه‌بندی در اثر بادهای فصلی و تغییر دمای هوا از بین می‌رود. کاهش دمای هوا در زمستان موجب لایه‌بندی دیگری در مخزن می‌گردد که این لایه‌بندی نیز با آمدن بهار و تغییر دمای هوا از بین می‌رود.

مخازن سدها همچنین باعث تعدیل تغییرات شدید مواد محلول در آب همانند شوری (حضور یونهای محلول نمک در آب) می‌شوند. مواد حمل شده توسط جریانهای سطحی (رودخانه‌های منتهی به مخزن) در مخازن جمع شده و باعث شوری آب مخازن سدها می‌شوند.

شوری به لحاظ کیفی به عنوان یک آلاینده مطرح بوده و کنترل غلظت آن در مخازن سدها مورد توجه می‌باشد و لذا آب مخازن بسته به نوع مصرف می‌بایست همواره از لحاظ مقدار شوری در حد استاندارد باشد. شوری بر رسوبات چسبنده نیز اثر می‌گذارد، بطوری که هر چه شوری بیشتر شود لخته شدن رسوبات چسبنده بیشتر شده و برته‌نشینی آنها اثر می‌گذارد.

با بهره‌گیری از مدلهای عددی می‌توان، هیدرودینامیک جریانات داخل مخزن و کیفیت آب خروجی از آن را با توجه به تراز آب مخزن، میزان دبی ورودی و خروجی مخزن هم در مراحل طراحی و هم در طی بهره‌برداری از مخزن شبیه‌سازی نمود.

همچنین می‌توان با توجه به میزان اختلاط و کیفیت آب مخزن، ترازهای مختلف مرتبط با نصب دریچه‌های آبگیری از سد و سناریوهای برداشت آب از آنها را مورد بررسی قرار داد و آب خروجی را از نظر کیفیت متناسب با نوع مصرف تنظیم نمود.

روش اساسی جهت مدل‌سازی در نظرگرفتن یک مدل کاملاً سه‌بعدی هیدرودینامیک به همراه معادلات انتقال و واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی است، لیکن این معادلات یک دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی را تشکیل خواهند داد که معمولا به لحاظ غیرخطی بودن و شکل عمومی آنها و همچنین پیچیدگی شرایط مرزی حاکم بر آنها دارای راه‌حل‌های تحلیلی نبوده و لذا پس از اعمال فرضیات و ساده‌سازی‌ها به کمک روشهای عددی حل می‌گردند.

به لحاظ کاربردی و مهندسی، در اغلب مواردی که به نظر می‌رسد استفاده از مدلهای سه‌بعدی جوابهای دقیق‌تری را به همراه دارد، با استفاده از معادلات دو بعدی و صرفنظر کردن از تغییرات در یکی از جهات، ضمن ساده‌سازی مسئله و کاهش وقت و هزینه، می‌توان معادلات را با تقریب مناسب و در زمان

معقول به صورت عددی حل نمود و به جوابهای با دقت کافی دست یافت. البته باید توجه داشت در بعضی موارد خاص نتیجه چنین مدلهایی از دقت کافی برخوردار نیست. در نگاه اول به نظر می‌رسد اینگونه ساده سازی‌ها به عنوان یک محدودیت، دامنه شبیه‌سازی را محدود به موضوعات کاملاً خاص می‌نماید و مصادیق آنها بسیار محدود باشد، لیکن در عمل استفاده از این مدلها در شرایط مختلف منجر به جوابهای قابل قبول مهندسی شده است. بر این اساس با توجه به اهمیت مخازن سدها درکشور مسلماً توسعه مدلهای عددی که در آنها علاوه بر حذف فرضیات ساده کننده از روشهای جدید و کارا نیز استفاده شده باشد ضروری به نظر می‌رسد.

در حال حاضر مدلهای دو بعدی در عمق در اکثر حالات بهترین مدل جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت مخازن می باشند چرا که این مدلها قادرند در بیشتر شبیه‌سازی‌های مربوط به مخازن سدها، نیازهای مد نظر را با دقت خوبی که از دقت مدلهای یک بعدی بالاتر و در حد دقت مدلهای سه بعدی باشد پاسخگو باشند.

۱-۳- چهارچوب تحقیق

در این تحقیق معادلات غیر خطی و غیر دائم حاکم در سیستم مختصات کارتزین با استفاده از روش احجام محدود و بر روی یک شبکه جا به جا شده، منفصل سازی و حل می‌گردد.

فشار غیر هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده و در کوپل کردن فشار- سرعت با توجه به طبیعت غیر دائمی معادلات از روش تحمیل فشار[1] استفاده می‌شود.

از آنجا که شوری در لایه‌بندی مخزن تاثیر بسزایی دارد و افزایش آن سبب تشدید گرادیان دما در مخازن می‌شود، در بررسی لایه‌بندی مخزن، اثر دما و شوری توامان مد نظر قرار گرفته و در انتخاب معادله حالت، مدل آشفتگی و نحوه برخورد با سطح آزاد آب با مرور کارهای انجام شده توسط دیگران و استفاده از تجربیات آنها مناسب‌ترین روشها انتخاب می‌شود.

[1] Pressure Projection Method

۱-۴- اهداف و نوآوری‌های تحقیق

بطور کلی اهداف و نوآوری‌های تحقیق حاضر را می‌توان در دو بخش زیر خلاصه نمود:

۱) توسعه یک مدل عددی دوبعدی متوسط‌گیری شده در عرض با در نظرگرفتن سطح آزاد و عدم استفاده از فرض فشار هیدرواستاتیک. از این مدل می‌توان به عنوان جایگزینی مناسب برای مدلهای سه‌بعدی در جریانهای سطح آزاد که در آنها چگالی سیال متغیر و شتاب‌ها در جهت قائم با اهمیت است استفاده نمود و به نتایج قابل قبول مهندسی دست یافت.

۲) با توجه به زمانبر بودن محاسبات مربوط به حل معادله فشار به عنوان هسته محاسبات و روش‌های تعیین سطح آب، افزایش راندمان و دقت محاسبات و کاهش زمان اجرای مدل با بکارگیری و استفاده از موارد زیر تا حد ممکن تامین گردید.

۱) استفاده توام از روش تفکیک زمانی و روش تحمیل فشار

۲) استفاده از روش حل مناسب معادله پوآسون فشار

۳) استفاده از الگوی مناسب شبیه‌سازی انتقال کمیتهای اسکالر

۴) استفاده از الگوی مناسب شبیه‌سازی ترم انتشار

۵) استفاده از مدل آشفتگی مناسب با توجه به وجود لایه بندی و ناپایداری مخزن

۶) استفاده از روش مناسب تعیین سطح آب

۷) استفاده از روش مناسب محدودکننده شار

۱-۵- روش انجام تحقیق

مهمترین ویژگی یک مدل عددی مناسب و کارا[1] آنست که اولاً مدل با کمترین هزینه‌ها هم از لحاظ هزینه‌های زمانی جهت ساخت و توسعه و صحت‌سنجی مدل و هم از لحاظ هزینه‌های لازم جهت تهیه اطلاعات مورد نیاز آن همراه باشد. ثانیاً مدل دارای سرعت مناسب اجرا و به تبع آن قابلیت اعتبارسنجی

[1] Performance

از طریق تطابق با سایر نتایج بدست آمده باشد. در این راستا لازم است شبیه‌سازی ترمهای انتقال در معادلات اندازه حرکت و در معادلات انتقال-پخش به عنوان یکی از قسمتهای مهم مدل با استفاده از الگویی مناسب که دارای دقت مناسب و مدت زمان اجرای معقول باشد انجام پذیرد. در این تحقیق تلاش شده است تا مدل توسعه یافته این چنین باشد لذا روند توسعه مدل بدین صورت انجام می‌پذیرد که ابتدا ترم جابجایی مربوط به غلظت در حالت یک بعدی شبیه‌سازی گردید. در این بخش انتقال یک کمیت اسکالر بدون در نظر گرفتن ضریب پخش و تنها تحت اثر پدیده جابجایی و بصورت یک بعدی شبیه‌سازی شد. از آنجا که الگوهای مختلفی نظیر Upwind، Lax-Wendroff ، Fromm، Quickest می‌توانند برای این حالت استفاده شوند این امکان فراهم شد تا اثر استفاده از روشهای مختلف از قبیل پخش عددی، نوسانات کاذب، خطای نسبی فاز[1]، ضریب تقویت[2]، دقت و زمان اجرای مورد نیاز مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. سپس این بخش به حالت دوبعدی توسعه داده شد و نتایج مدل در این بخش، صحت سنجی و الگوی مناسب برای ترم انتقال انتخاب گردید. بدیهی است بخش اعظمی از دقت و کارایی[3] مدل مدیون این انتخاب می‌باشد.

پس از شبیه‌سازی ترم جابجایی، ابتدا معادله انتشار یک بعدی (پدیده پخش) و سپس دو بعدی آن بدون حضور ترم جابجایی شبیه‌سازی شد و نتایج حاصله با نتایج تحلیلی موجود مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. تا این بخش از توسعه مدل این امکان فراهم آمد تا معادله انتقال-پخش مربوط به یک کمیت اسکالر شبیه‌سازی گردد. پس از آن به حل عددی معادلات منفصل شده اندازه حرکت و پیوستگی پرداخته شد.

در ادامه با فرض عدم تغییر عرض هندسه میدان و با در نظر گرفتن چگالی متغیر، معادلات انتقال-پخش مربوط به شوری و دما به همراه بخش هیدرودینامیک مدل مورد شبیه‌سازی قرار گرفت.

این شبیه‌سازی از جریان در یک کانال با سطح افقی شروع و به جریان روی یک کانال شیبدار خاتمه

---

[1] Phase error
[2] Amplification factor
[3] Efficiency

یافت. در خلال این شبیه‌سازی از معادلات حالت مختلفی استفاده شد و مناسب‌ترین معادله انتخاب گردید.

در ادامه پس از اطمینان از عملکرد مدل در جریانهای با عرض ثابت در حالت آشفته و آرام و شبیه‌سازی مناسب دما، شوری و تغییرات چگالی، اثر تغییر عرض هندسه میدان در شرایط مختلف بر هیدرودینامیک جریان، شوری و دما شبیه‌سازی شد، همچنین مدل جهت شبیه‌سازی سطح آزاد جریان در شرایط عرض ثابت و متغیرِ هندسه میدان مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پس از اضافه نمودن چشمه‌های حرارتی سطح به مدل، هیدرودینامیک، دما و شوری در سد پانزده خرداد مورد شبیه‌سازی قرار گرفت.

۱-۶- نمای کلی و چیدمان رساله

در فصول مختلف این رساله مطالب زیر مطرح گردیده است:

در فصل اول، ضرورت انجام تحقیق، چارچوب و اهداف تحقیق و متدولوژی انجام تحقیق تبیین شده است.

در فصل دوم، خصوصیات مدلهای دو بعدی متوسط گیری شده در عرض، پیشینه مدلهای دو بعدی متوسط‌گیری شده در عرض ارائه شده است.

در فصل سوم، معادلات حاکم و فرضیات ساده کننده مربوط به آن نظیر تقریب بوزینسک و شرط تراکم‌ناپذیری سیال ارائه گردید. همچنین روش مدلسازی آشفتگی، معادله انتقال-پخش شوری و دما و معادله حالت مورد استفاده در مدل به همراه شرایط اولیه و مرزی توصیف شده است.

در فصل چهارم، جزئیات و روشهای عددی مورد استفاده در مدل شامل روش تفکیک عملگرها، نحوه حل ترم جابجایی و ترم پخش و سیستم حل معادله پواسون فشار بیان گردیده است. در این فصل به طرح محدود کننده شار، آلگوریتم مدل عددی و محدودیتهای مدل عددی نیز پرداخته شده است.

در فصل پنجم، نتایج حاصل از ارزیابی مدل عددی شامل شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان در حالت