



پایاننامه کارشناسی ارشد گرایش سازههای هیدرولیکی

عنوان مطالعهی عددی بهینهسازی شکل آبگیرهای نیروگاهی با روش معیار بهینگی

> نگارش رضا يوسفيان

اساتید راهنما: سید فضلالله ساغروانی سید مهدی توکلی

اسفند ۱۳۹۴

		مديريت تحصيلات تكميلي
مدایش:	باسمه تعالى	المفاسنة والمراج
شماره: تتن آرا تاريخ: ۲۲ AOI		(Ph

فرم شماره ۶: صور تجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای رضا یوسفیان به شماره دانشجویی ۹۲۱۵۳۳۴ . رشته عمران گرایش سازه های هیدرولیکی تحت عنوان بهینه سازی عددی آبگیر نیروگاهی با روش معیار بهینگی که در تاریخ ۹۴/۱۳/۲۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

مردود 🗌	دفاع مجدد	(1	_ امتياز	B(c: ~)	قبول (با
88977353390074807944442507353289995288475893999999999999999999	. بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)			_ عالی (۲۰ _ ۱۹)	1
	قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴).	_۴	(۱۹ خوب (۱۷/۹۹ _۱۶	٢

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

	ا المضاء	مرتبة غلمي	نام ونام خاتوادگی	عضو هيأت داوران
	امضاء	مرتبة علمي	نام ونام خانوادگی	اعضای هیأت داوران
<	Cr	استاديار	سيد فضلالله ساغرواني	۱ - استاد راهنمای اول
	T	استاديار	سید مهدی توکلی	۲- استاد راهنمای دوم
	E	1 in is	محن تطرى	. ۳- استاد هلور
	A	استاديار	مهدی گلی	۴_ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
4	light	دانشيار (احمد احمدی	۵۔ استاد ممتحن اول

رئیس دانشکده:

تقديمنامه

تقدیم به خدایی که آفرید جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را ... و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

سپاسگزاری

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطرهای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشههای ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایهسار بندهنوازیهایش پایاننامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم میدانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایاننامه به انجام نمیرسید.

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر ساغروانی که باکرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنماییهای کارساز و سازنده بارور ساختند و در کمال سعهصدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، تقدیر و تشکر نمایم.

با تقدیر و درود فراوان از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر احمدی و جناب آقای دکتر نظری که زحمت داوری این پایاننامه را متقبل شدند؛

و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نمودهاند؛ باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیدہ

در این پژوهش باهدف کاهش افت انرژی در آبگیرهای نیروگاهی، به مطالعهی عددی بهینهسازی شکل این آبگیرها با روش معیاربهینگی پرداخته شده است. معیار بهینهسازی در اینجا، منطبق بودن خط جریان بر مرز جامد و متغیر بهینهسازی، مختصات مرز جامد است. به همین منظور از آنجایی که در آییننامهها، مقاطع ارائهشده برای شکل دهانهی ورودی آبگیر، بر اساس انطباق خطوط جریان بر مرز جامد در مطالعات آزمایشگاهی بوده، یک مقطع برای تمامی آبگیرهای افقی با شرایط محلی متفاوت توصیه میشود که در این پژوهش با توجه به پیشرفت فناوری در مدلسازی عددی، یک برنامهی رایانهای برای حل این مشکل تهیه شده است. این برنامه با زبان ++C نوشته شده و انطباق خط جریان بر مرز جامد را با در نظر گرفتن شرایط هر طرح انجام می دهد. به منظور انجام این فرآیند، جریان پتانسیل در هر طرح مدل می شود و پس از به دست آوردن خطوط جریان، یک خط جریان جهت انطباق بر مرز جامد انتخاب شده و مقطع جدید به دست می آید؛ این فر آیند ادامه پیدا کرده تا مقطع مورد نظر پس از انطباق خط جریان انتخاب شده بر مرز جامد دیگر تغییر نکند. در نهایت با مدلسازی مقاطع به دست آمده بر اساس خطوط جریان مختلف در یک نرمافزار جانبی، مقطع بهینه به دست میآید. جهت اطمینان از صحت برنامهی نوشتهشده، به مقایسهی نتایج این برنامه در یک مسألهی انقباض با نتایج حاصل از مدلسازی همان مسأله در نرمافزار OpenFOAM پرداخته و درستی برنامهی نوشتهشده تأیید شد. همچنین برای اطمینان از صحت عملکرد نرمافزار OpenFOAM در مدلسازی جریان آشفته، یک مسألهی انقباض با نتایج صحتسنجی شده در این نرمافزار مدل شد و نتایج به دست آمده نشان داد، این نرمافزار در مدلسازی جریانهای مشابه در این پژوهش از دقت خوبی برخوردار است. در نهایت جهت بهینهسازی آبگیر نیروگاهی، ابتدا به بهینهسازی یک انقباض که مشابه مقطع آبگیر در صفحهی افق و دارای نتایج آزمایشگاهی معتبر است، پرداخته شد. بر اساس نتایج حاصل از بهینهسازی انقباض، درستی روند بهینهسازی و توانایی آن تأیید شد. برای بهینهسازی آبگیر، یک مسألهی آبگیر طرح شد و پس از بهینهسازی، مقطع بهینه با مقاطع توصیه شده توسط استاندارد کشور هندوستان و سازمان USBR مقایسه شد. با توجه به مقایسه صورت گرفته، مقطع بهینه به دست آمده از این روش، عملکرد آبگیر را در حدود ۲ درصد نسبت به مقاطع توصیهشده بهبود ميبخشد؛ بنابراين با توجه به نتايج كلي، ميتوان نتيجه گرفت اين روش در طراحي هيدروليكي آبگيرها و مسائل مشابه دارای کاربرد بوده و میتواند عملکرد سامانهی مورد نظر را بهبود بخشد.

واژگان کلیدی: بهینهسازی؛ معیاربهینگی؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ انطباق خط جریان بر مرز؛ نرمافزار OpenFOAM؛ جریان آشفته؛ انقباض؛ آبگیر نیروگاهی؛ افت فشار؛ افت انرژی؛ مدلسازی مخزن سد.

ب	چکیدہ
تت	تقديمنامه
ث	سپاسگزاری
ج	فهرست عنوانها
さ ・	فهرست شکلها
ر	فهرست جدولها
ز	فهرست نشانهها
1	فصل ۱ کلیات
۲	۱–۱– مقدمه
۳	1–۲– بیان مسأله
۵	۱–۳– ضرورت انجام پژوهش
۶	۴–۱– هدفها و کاربردهای پژوهش
۶	۱–۵– سازمانبندی پایاننامه
۷	فصل ۲ مطالعات پیشین
٨	۱-۲ مقدمه
٨	۲-۲- روش معیار بهینگی
۹	۲-۲- روش انطباق خطوط جریان بر مرز جامد
11	۲-۴- انقباض در مسیر جریان
۱۳	۲-۵- آبگیر
۲۳	فصل ۳ مواد و روشها
٢۴	۲–۱– مقدمه
7۴	۳-۲- مواد مورد استفاده در این پژوهش
۲۵	۳-۳- روش معیار بهینگی
78	معیار بهینهسازی۳-۳
٣٩	۳-۳-۲ تغییر متغیرهای بهینهسازی
۴	۳-۳-۳ بررسی خط جریان بهینه

فهرست عنوانها

۵۵	فصل ۴ نتایج و بحث
۵۶	۴–۱– مقدمه
۵۶	۲-۴- بررسی صحتسنجی برنامه SPC با کمک نرمافزار OpenFOAM
۵۶	۴-۲-۴ بیان صورت مسأله
۵۷	۲-۲-۴ نتایج حل مسأله در برنامهی SPC۲ نتایج حل مسأله در برنامه ک
۵۹	۴-۲-۴ نتایج مدلسازی مسأله در نرمافزار OpenFOAM
۶۱	۴-۲-۴ مقایسه نتایج به دست آمده جهت صحتسنجی برنامهSPC
۶۵	۴-۳- بررسی صحت مدلسازی، در نرمافزار OpenFOAM
۶۵	۴–۳-۴ بیان صورت مسأله
99	۴-۳-۴ ارائهی نتایج و فرآیند مدلسازی در نرمافزار OpenFOAM
۶۷	۴-۴- بهینهسازی شکل ورودی یک انقباض
۶۸	۴-۴-۱ بیان صورت مسأله
۶۹	۴-۴-۲ ارائهی نتایج بهینهسازی مسأله انقباض توسط SPC
٧٧	۴-۴-۳ مقایسه مقطع به دست آمده از SPC با مقاطع توصیهشده
۸۳	۴-۵- بهینهسازی شکل آبگیر افقی نیروگاهی
۸۳	۴–۵–۱ بیان صورت مسأله
۸۵	۲-۵-۴ ارائهی نتایج بهینهسازی آبگیر توسط SPC
٨۶	۴–۵–۳ مقایسه مقطع آبگیر به دست آمده از SPC با مقاطع توصیهشده
۹۱	فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها
٩٢	۵–۱– مقدمه
۹۲	۵-۲- نتایج به دست آمده از مدلسازی در برنامهی SPC
۹۳	۵–۳- نتایج حاصل از مدلسازی در نرمافزار OpenFOAM
۹۴	۵-۴- بررسی نتایج حاصل از طراحی مقطع انقباض
۹۵	۵-۵- بررسی نتایج حاصل از طراحی مقطع آبگیر
۹۶	۵-۶- پیشنهادها برای مطالعات آتی
٩٧	منبع ها
1+1	پیوست ۱ مشتقها در قلمرو محاسباتی
۱۰۷	پيوست ٢ اطلاعات اوليه مسأله انقباض در نرمافزار OpenFOAM
117	پیوست ۳ اطلاعات اولیه مسألهی آبگیر در نرمافزار OpenFOAM

فهرست شكلها

٣٩	شکل ۳-۱- نمایش محیط حل فیزیکی در مسألهی بهینهسازی
۴۰.	شکل ۳-۲- طریقهی انطباق یک خط جریان بر مرز جامد
۵۰	شکل ۳-۳- دقت نتایج ارائهشده در مدلهای مشهور آشفتگی
۵۷	شکل ۴-۱- مشخصات و ابعاد مسألهی صحتسنجی SPC
۵٨	شکل ۴-۲- شرایط مرزی مسأله صحتسنجی SPC جهت حل در برنامه
۵٨	شکل ۴-۳- نتیجه حاصل از مرحله اول بهینهسازی مسأله در SPC
۵٩	شکل ۴-۴- شبکهی محیط حل در آخرین مرحلهی بهینهسازی در SPC
۵٩	شکل ۴-۵- شکل نهایی دهانهی ورودی و خطوط جریان به دست آمده در مرحلهی آخر بهینهسازی
۶۰.	شکل ۴-۶- شرایط مرزی مسأله در نرمافزار OpenFOAM
۶۰.	شکل ۴-۷- نتایج حاصل از مدلسازی شکل اولیه در نرمافزار OpenFOAM
۶١.	شکل ۴-۸- شبکهی حل تولیدشده در نرمافزار OpenFOAM جهت مدلسازی شکل نهایی
۶١.	شکل ۴-۹- نتایج حاصل از مدلسازی شکل نهایی در نرمافزار OpenFOAM
۶۲.	شکل ۴-۱۰- اختلاف بین مختصات گرهها در راستای محور X و موقعیت اختلافهای بیشینه
۶۲.	شکل ۴-۱۱- اختلاف بین مختصات گرهها در راستای محور Y و موقعیت اختلافهای بیشینه
۶۲.	شکل ۴-۱۲- موقعیت دقیق اختلاف بین مختصات گرهها در راستای محور X
۶٣.	شکل ۴-۱۳- موقعیت دقیق اختلاف بین مختصات گرهها در راستای محور Y
۶۴.	شکل ۴-۱۴-میزان اختلاف بین مقادیر تابع جریان در محیط حل غیرمستطیلی
۶۴.	شکل ۴-۱۵- موقعیت دقیق اختلاف بین مقادیر تابع جریان در محیط حل محاسباتی
۶۵.	شکل ۴-۱۶- مشخصات و ابعاد مسألهی صحتسنجی OpenFOAM
99	شکل ۴-۱۷- شرایط مرزی مسأله در نرمافزار OpenFOAM
۶٨	شکل ۴-۱۸- شرایط مرز و ابعاد مسألهی بهینهسازی شکل ورودی انقباض
٧٠	شكل ۴-۱۹- نتايج ارائهشده توسط SPC براي مسأله بهينهسازي انقباض

مکل ۴-۲۰- شرایط مرزی اعمال شده در OpenFOAM برای جریان آرام مسأله بهینه سازی انقباض۷۱
مکل ۴-۲۱- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدلها با سرعت ۰/۰۰۱
متربر ثانيه
یکل ۴-۲۲- شرایط مرزی اعمال شده در OpenFOAM برای جریان آشفتهی مسأله بهینه سازی انقباض۷۳
لیکل ۴-۲۳- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدلها با سرعت ۳/۰
متربر ثانيه۷۴
مکل ۴-۲۴- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدلها با سرعت ۶/۰
متربر ثانیه۷۴
مکل ۴-۲۵- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدل ها با سرعت ۰/۹ مد
متربرتانيه۷۵
مکل ۴-۲۶- نتایج افت فشار بر حسب تعداد تکرار در مدلهایی با سرعت ورودی ۰/۰۰، ۳/۰، ۶/۰ و ۰/۹ مد
متربر تائية
مکل ۴-۲۷- مدلهای توصیه شده و مدل به دست آمده از SPC در نرمافزار OpenFOAM
مکل ۴-۲۸- مقادیر فشار مدلهای توصیهشده در محل خط تقارن مدلها با سرعت ورودی ۰/۰۰۱
متربر ثانيه٨٠
مکل ۴-۲۹- مقادیر فشار مدلهای توصیهشده در محل خط تقارن مدلها با سرعت ورودی ۲/۰
متربر ثانيه۸۱
مکل ۴-۳۰- مقادیر فشار مدلهای توصیه شده در محل خط تقارن مدلها با سرعت ورودی ۶/۰ مد
متربرتانية
مکل ۴-۳۱- مقادیر فشار مدلهای توصیه شده در محل خط تقارن مدلها با سرعت ورودی ۰/۹ ۲۰
مىربر ئانيە
لیکل ۴-۳۲- ابعاد و مشخصات مسألهی آبگیر در صفحهی افق۸۴
مکل ۴-۳۳- ابعاد و مشخصات مسألهی آبگیر در صفحهی عمودی عمودی ۲۵۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
مکل ۴-۳۴- مقطع بهینهی حاصل از SPC برای آبگیر در صفحهی عمودی

	شکل ۴-۳۵- مدل ارائهشده برای طراحی شکل مقطع آبگیر در استاندارد هندوستان (Bureau of Indian
٨	۲ (Standards, 1995)
٨,	شکل ۴-۳۶- نتایج حاصل از مقطع به دست آمده از SPC
٨	شکل ۴-۳۷- مقایسه مقطع حاصل از SPC و مقاطع توصیه شده در مسأله ی آبگیر

فهرست جدولها

۲۵	جدول ۳-۱- مشخصات رایانهی استفادهشده در پژوهش
۵۱	جدول ۳-۲- ضرایب مدل استاندارد K-۶
۵۷	جدول ۴-۱- مشخصات مرزها و جریان در مسألهی صحتسنجیSPC
۶۵Oper	جدول ۴-۲- مشخصات مرزها و جریان در مسألهی صحتسنجی FOAM
۶۷	جدول ۴-۳- نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی با OpenFOAM
۶۸	جدول ۴-۴- مشخصات و ابعاد مسألهی بهینهسازی شکل ورودی انقباض
ەى USBR	جدول ۴-۵- مقادیر شیب مجاز در مقطع ورودی انقباض بر اساس آییننام
بگیر	جدول ۴-۶- مشخصات و ابعاد مسألهي بهينهسازي شكل دهانهي ورودي آ

فهرست نشانهها

α	ضريب پخش حرارتي	i	شماره گره در راستای x
β	نسبت گامها در شبکهی حل	j	شماره گره در راستای y
β	ضريب انبساط حرارتي	k	شماره تكرار
(ξ,η)	مختصات در قلمرو محاسباتی	K	انرژی جنبش جریان آشفته
ρ	چگالی	Р	فشار
ψ	تابع جريان	t	زمان
ω	پارامتر تخفيف	и	سرعت در راستای x
μ	لزجت	ν	سرعت در راستای y
Е	نرخ اضمحلال انرژی آشفتگی	V_{x}	سرعت در راستای x
		$V_{\mathcal{Y}}$	سرعت در راستای y
		(x, y)	مختصات در دستگاه کارتزین
		Re	عدد رينولدز
		L	طول
		l	طول آشفتگی
		I	شدت آشفتگی
		С	عدد كورانت
		d	عدد انتشار
		Re _c	عدد سلول رينولدز
		g	شتاب ثقل زمين

فصل ۱ **کلیات**

۱–۱– مقدمه

در این فصل کلیاتی در خصوص پژوهش انجامشده شامل تعریف مسأله و ضرورت انجام پژوهش و همچنین ساختار کلی پایاننامه ارائه شده است. در دهههای اخیر، با توجه به پیشرفتهای فناوری محاسباتی، روشهای قدرتمند عددی برای حل معادلههای پیچیدهی مکانیک سیالات، بیشتر مورد استفاده قرار گرفتهاند. از سوی دیگر بهینهسازی در طراحی هیدرولیکی سازههای مختلف نیز از اهمیت ویژهای برخوردار گردیده است. در بین روشهای بهینهسازی میتوان به روش بهینهسازی معیاربهینگی به عنوان یکی از روشهای پرکاربرد بهینهسازی در طراحی هیدرولیکی اشاره کرد؛ که در آن با انطباق شکل جریان بر مقطع^۱ و بررسی قیدهای بهینهسازی، به طراحی هیدرولیکی و بهینهسازی شکل مقطع سازه پرداخته میشود.

در حال حاضر، جهت طراحی هیدرولیکی یک سازه، ابتدا بر اساس طرحهای ارائهشده در آییننامهها و راهنماهای طراحی موجود، چند طرح مختلف ارائه و مورد بررسی قرار می گیرد. سپس در صورت امکان مدل رایانهای طرحها ساختهشده و پس از تحلیل، یکی از طرحها در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار می گیرد. در نهایت با بررسی مدل آزمایشگاهی و اعمال تغییرات مورد نیاز برای رفع اشکالات طرح اولیه، طراحی نهایی ارائه می شود. در این فرآیند، به منظور کاهش هزینهها، مدل سازی عددی طراحی از اهمیت زیادی برخوردار است و با افزایش دقت مدل سازی، می توان تغییرات مورد نیاز در مرحله مدل سازی آزمایشگاهی را کاهش داد که این امر منجر به کاهش هزینه و زمان طراحی خواهد شد. از آنجایی که عدم در نظر گرفتن بسیاری از شرایط منحصربهفرد برای هر طرح مانند شیب بدنهی سد، دیوارههای مخزن در مدل های پیشنهادی آیینامهها و در مرحله مدل سازی عددی طراحی، باعث کاهش دقت مدل سازی عددی می شود مطالعه و بررسی روشهای

یکی از منابع تأمین انرژی پاک، نیروگاههای برقآبی هستند. از جایی که آب توسط آبگیر و لولههای تحت فشار^۲ به توربینها انتقال داده میشود، جلوگیری از اتلاف انرژی در مسیر انتقال، دارای اهمیت زیادی است که حتی میتواند یک طرح را از حالت غیراقتصادی به اقتصادی تبدیل کند. از سوی دیگر عدم طراحی هندسی مناسب آبگیر منجر به تشکیل جریانهای ثانویه شده که به نوبهی خود باعث تشدید هدر رفت انرژی میگردد. به همین دلیل، میتوان آبگیرها را از سازههایی تلقی کرد که بهینهسازی آنها از اهمیت ویژهای برخوردار است.

¹Streamlining

²Penstock

در این پژوهش با توجه به اهمیت آبگیرهای نیروگاهی، مطالعه و بررسی بهینهسازی شکل دهانهی آبگیر با روش بهینهسازی معیاربهینگی صورت گرفته است. در این روش ابتدا با کمک مفاهیم و روشهای عددی مکانیک سیالات به مدل کردن جریان در یک آبگیر پرداخته میشود و سپس با تغییر شکل دهانه بر اساس شکل جریان به دست آمده، شکل دهانهی بهینه به دست میآید. بدین منظور ابتدا یک برنامهی رایانهای^۱ با نام SPC نوشته شده و در طی انجام این پژوهش خطوط جریان در طراحی اولیه تعیین میشود و سپس خطوط اولیهی جریان بر روی مرز، منطبق میشود. پس از به دست آوردن مقطع بهینه از مرحلهی اول، طرح پیشنهادی در نرمافزار OpenFOAM مدل شده و نتایج آنها مورد بررسی قرار میگیرد. همچنین جهت صحتسنجی برنامه نوشتهشده و طرحهای دوبُعدی مدل شده در نرمافزار، نتایج حاصل از این پژوهش، با یک پژوهش مشابه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در نهایت با بهینهسازی شکل دهانهی آبگیر، بازدهی سیستم و سود اجرای طرح افرایش یافت و انتظار میرود زمان مورد نیاز در کاربردهای عملی برای طراحی نیز کاهش یابد.

۲-۱- بیان مسأله

با توجه به اهمیت انرژی که در قسمت قبل ذکر شد، استفاده از سد به منظور تولید نیرو میتواند به عنوان یک راه کار ارزان و سالم برای تولید انرژی به حساب آید (Energy Division of ASCE, 1995) از سیستم آبگیر (Lugt, 1983) از سیستم های اجراشده، عمدتاً از سیستم آبگیر افقی استفاده میشود (Lugt, 1983) آبگیر افقی جهت بررسی در این پژوهش انتخاب شده است.

جهت طراحی دهانهی آبگیر افقی ابتدا اطلاعات مورد نیاز برای برنامهی نوشتهشده که عبارتند از: دبی جریان، هد جریان، تعداد آبگیرها، محل آنها نسبت به مقطع سد، قطر آنها و محدودیت تغییر مقطع در ارتفاع و عمق آبگیر از کاربر پرسیده میشود. سپس با فرض تیزگوشه بودن مقطع آبگیر به حل جریان پتانسیل به منظور به دست آوردن خطوط جریان با کمک حل معادلهی لاپلاس با روش عددی اختلاف محدود^۲ و تکنیک فوق تخفیف یافته نقطه به نقطه^۳ پرداخته میشود.

¹ Streamlining Programming Code

² Finite Difference Method

³ Point Successive Over Relaxation

با توجه به معلوم بودن مقادیر تابع جریان در ورودی و خروجی، شرایط مرزی مسأله از نوع مقدارمعلوم^۱ در نظر گرفته شده است. پس از به دست آوردن خطوط جریان با فرض جریان آرام و لایهای، یک خط جریان نزدیک به مرز جامد را انتخاب کرده و منحنی به دست آمده به عنوان مرز جامد برای مرحله بعدی مدل سازی، اختصاص داده می شود و این عملیات تا زمانی که اختلاف مرز جامد با همان خط جریان در محل دهانه یآبگیر از خطای قابل قبول (دقت مسأله) کمتر شود، ادامه پیدا می کند.

جهت به دست آوردن مقطع بهینه، ابتدا به حل دوبُعدی مسأله که همان انقباض ناگهانی^۲ است پرداختهشده و بعد از به دست آوردن شکل بهینهشده، مقطع ابتدایی و مقطع بهینهشده در نرمافزار MOpenFOAM⁷، جهت صحت سنجی برنامه ینوشته در زمینه ی تحلیل جریان و به دست آوردن خطوط جریان، مدل شده است. این نرمافزار از روش حجم محدود⁴ برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می کند. پس از اطمینان از صحت نتایج نرمافزار نوشته شده، با کمک نرمافزار جانبی ذکرشده به بررسی پدیده آشفتگی دوبعدی در دو مقطع ابتدایی و مقط بهینهشده می کند. پس از اطمینان از صحت نتایج نرمافزار از روش حجم محدود⁴ برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می کند. پس از اطمینان از صحت نتایج نرمافزار نوشته شده، با کمک نرمافزار جانبی ذکرشده به بررسی پدیده آشفتگی دوبعدی در دو مقطع ابتدایی و بهینه شده پرداخته شد. در این مرحله اطلاعات جریان از قبیل دبی، سرعت و فشار ثبت و بررسی اثر شکل دهانه ی آبگیر بر متغیرهای ذکرشده صورت گرفته است. با توجه به اینکه طراحی توربین بر اساس دبی و هد جریان انجام می شود بنابراین با نشان دادن افزایش دبی و کاهش افت فشار در مقطع بهینه شده نسبت به مقطع به بریان از توجه به اینکه طراحی توربین بر اساس دبی و هد جریان انجام می شود بنابراین با نشان دادن افزایش دبی و کاهش افت فشار در مقطع بهینه شده نسبت به مقطع ابتدایی، به اهمیت ایده ی استفاده شده در این پژوهش اشاره می شود.

در نهایت پس از صحتسنجی و بررسی خصوصیات جریان به منظور محاسبهی میزان افزایش بازدهی نیروگاه، باید در قسمتهای ورودی و خروجی برنامهی نوشتهشده، تغییراتی اعمال شود تا کاربران این برنامه بتوانند به راحتی و آسانی هر چه بیشتر^۵ از این برنامه استفاده کنند. به همین دلیل و بر اساس نیاز به سازگاری بیشتر زبان برنامهنویسی استفادهشده با محیط سیستمعامل ویندوز از زبان برنامهنویسی ++C با کمک نرمافزار مبدل⁶ زبان برنامهنویسی استفادهشده با محیط سیستمعامل ویندوز از زبان برنامهنویسی ++C با کمک نرمافزار مبدل⁶ فراهم می کند که از این امکان در نوشتن قسمت ورودی نرمافزار مبدل امکان ساختن فضایی راحت برای کاربران خروجی این نرمافزار، یک پنجره با قابلیت ذخیره تصویر ارائه میشود که در این تصویر، نقشههای مربوط به مقطع بهینهشده با مختصات دقیق و کامل رسم شده است.

¹Drichlet

²Sudden Contraction

³OpenField Operation and Manipulation

⁴ Finite Volume Method

⁵ User Friendly

⁶Compiler

در این پژوهش فرضهایی در خصوص جریان ازجمله: دوبعدی بودن جریان، آرام بودن جریان، یکفاز بودن جریان و در خصوص مرز جامد، صاف بودن سطح اجراشده برای دهانه و توانایی اجرای سطوح منحنی با شعاع انحنا زیاد، جهت آسان شدن شرایط حل مسأله اعمال شده است.

متغیرهای استفادهشده در این پژوهش به دو گروه کلی تقسیم میشود. در گروه یکم دبی جریان، هد جریان و شکل مقطع سد در محل آبگیر به عنوان متغیرهای مستقل معرفی میشوند. در گروه دوم، متغیرهای وابسته هستند که شامل قطر آبگیر، تعداد دهانههای آبگیر و محل قیدهای اجرایی میشوند.

بر اساس فرضهای در نظر گرفتهشده در این پژوهش، محدودیتهایی در آن به وجود میآید که بررسی آبگیرهایی با مشخصات افقی و تحت فشار، طراحی هیدرولیکی، بهینهسازی شکل آبگیر، بررسی جریان به صورت دوبعدی، در نظر گرفتن جریان به صورت آرام و لایهای در مرحله بهینهسازی، بررسی مسائل سهبعدی و آشفتگی توسط نرمافزار جانبی، در نظر گرفتن مسائل اجرایی با روش پرسش از کاربر از آن جمله است. لازم به ذکر است با توجه به اهمیت شکل مرز جامد و تأثیر آن بر جریان، استفاده از این ایده در طراحی بسیاری از سازههای هیدرولیکی ازجمله: کانالها، دیوارهای هدایت کننده، سرریزهای خاص و ... کاربرد داشته و میتواند پیشنهادی برای آغاز پژوهشهایی در این زمینه شود.

۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

بیشتر طراحان سازههای هیدرولیکی، جهت طراحی دهانهی آبگیرهای افقی از مدلهای ارائهشده بر اساس پژوهشهای تجربی و آزمایشگاهی، کمک می گیرند که در این مدلها به وجود آمدن جریان آشفته در هنگام کار آبگیرِ نیروگاهی منجر به ایجاد گردابه در سطح آب مخزن سد شده و این گردابه با کشیدن هوا به داخل توربین باعث از بین رفتن توربین میشود؛ بنابراین برای جلوگیری از این پدیده مخرب عمقی به عنوان عمق استغراق بحرانی تعریف میشود که همواره باید، ارتفاع آب بالا دهانه آبگیر از این عمق بیشتر باشد(, 1987). با توجه به اقتصادی تر بودن نیروگاههایی با هد کم، مدلهای عددی و آزمایشگاهی ارائهشده در این زمینه به مطالعه و بررسی اثر عوامل مختلف از قبیل تقارن جریان، قطر آبگیر، میزان تخلیه جریان، فاصلهی زمینه به مطالعه و بررسی اثر عوامل مختلف از قبیل تقارن جریان، قطر آبگیر، میزان تخلیه جریان، فاصلهی آبگیر پرداختهاند؛ از آنجایی که پژوهش جامعی بر روی بهینهسازی عددی شکل آبگیر و مطالعه اثر آن بر کارایی آبگیر صورت نگرفته است، در این پژوهش با توجه به اهمیتهای ذکرشده به مطالعه و بررسی این ذکرشده توسط روشهای پایهای دینامیک سیالات محاسباتی، قابلیت تعمیم برنامهی نوشتهشده به سازههای مختلف هیدرولیکی، استفاده آسان از برنامه و عدم نیاز به نرمافزار جانبی در مرحله طراحی موجب افزایش کاربرد آن شده و بر ضرورت انجام این پژوهش میافزاید.

۱-۴- هدفها و کاربردهای پژوهش

این پژوهش با هدفهای افزایش بازدهی نیروگاه، کاهش هزینههای تعمیر و نگهداری از نیروگاه، افزایش سود برآمده از اجرای طرح، کمک به مهندسان طراح برای طراحی بهتر و آسانتر، افزایش دقت طراحی، کاهش زمان طراحی و بررسی دقیق ایدهی این پژوهش جهت به کارگیری آن در سازههای هیدرولیکی مختلف، انجام میشود. در میان اهداف ذکرشده تمامی اهداف غیر از کاهش زمان طراحی با یکدیگر سازگار و با هدف ذکرشده ناسازگار میباشند.

این پژوهش دارای کاربرد در طراحی آبگیرهای افقی تحت فشار و سازههای هیدرولیکی مرتبط با خطوط جریان مانند دیوارهای هدایت کننده و غیره، است. همچنین میتوان با توجه به توانایی نرمافزار نوشته شده در رسم و درونیابی خطوط جریان، از نرمافزار فوق به عنوان یک نرمافزار آموزشی در بررسی مدل های آزمایشگاهی مرتبط با خطوط جریان مانند مدل های انقباض و انبساط کانال استفاده کرد.

1–۵– سازمانبندی پایاننامه

این پایاننامه شامل پنج فصل میباشد که در فصل یکم به بیان کلیات پژوهش پرداخته میشود. در فصل دوم به بررسی و بیان پیشینه پژوهش که در رابطه با بهینهسازی تکاملی در طراحی هیدرولیکی، بررسی مدلهای انقباض ناگهانی موجود جهت مدل کردن شکل دوبُعدی آبگیر و طرحهای پیشنهادی برای آبگیرهای افقی در متنهای مختلف پرداخته شده است. فصل سوم با عنوان مواد و روشها، به دو قسمت اصلی تقسیم میشود؛ در قسمت یکم، مشخصات مواد و وسایل استفاده شده در این پژوهش و در قسمت بعد به بیان روشهای عددی مورد استفاده در برنامهی نوشته شده و مشخصات اطلاعات ورودی در نرمافزار مربوط به صحتسنجی پرداخته شده است. در فصل چهارم نتیجههای به دست آمده از این پژوهش در رابطه با بررسی صحتسنجی برنامهی نوشته شده، بررسی قیدهای بهینه سازی در مدل دوبُعدی یا همان انقباض ناگهانی و مدل سه بُعدی آبگیر، بحث شده است. در نهایت بررسی نتایج و نتیجه گیری از پژوهش انجام شده در فصل پنجم با عنوان نتیجه گیری و شده است. در نهایت بررسی نتایج و نتیجه گیری از پژوهش انجام شده در فصل پنجم با عنوان نتیجه گیری و

فصل ۲ مطالعات پیشین

۲–۱– مقدمه

در هر پژوهش با توجه به انجام تحقیقهای مشابه در زمینههای مختلف یک کار علمی، بررسی و مطالعه دقیق کارهای انجامشده در رابطه با یک تحقیق از عوامل مؤثر و ضروری در پیشبرد هدفمند یک پروژه علمی است. به همین منظور این فصل به مطالعات مرتبط با موضوع پژوهش حاضر اختصاص یافته است. جهت بررسی تاریخچه موضوع، با توجه به اهداف پژوهش، مطالعات پیشین در چند قسمت مورد مطالعه قرار گرفت. در قسمت اول این مطالعات بررسی مختصری در رابطه با روش بهینهسازی معیاربهینگی پرداخته میشود. در قسمت اول این مطالعات بررسی مختصری در رابطه با روش بهینهسازی معیاربهینگی پرداخته میشود. در پرداخته شده است. در بخش سوم مطالعات با توجه به بررسی دوبعدی شکل آبگیر در پژوهش و شباهت این مسأله با انقباض ناگهانی جریان، پژوهشهای صورت گرفته در این زمینه بیان شده است. در نهایت با مطالعه و بیان پژوهشهای مرتبط با شکل سهبعدی مسأله، مطالعات پیشین در رابطه با این پژوهش مورد بررسی قرار

۲-۲- روش معیاربهینگی

روش معیاربهینگی برای اولین بار توسط پراگر و شیلد^۱ در سال ۱۹۶۷ بر اساس مفاهیم کلی و با بیان فرضیههای مورد استفاده در این روش مطرح شد (Prager & Shield, 1967). این در حالی است که بنیاد مفاهیم این روش توسط میشل^۲ در سال ۱۹۰۴ پایهگذاری شده بود (Michelle, 1904). بعد از معرفی کلیات روش معیاربهینگی، کاربرد این روش در طراحی سازهها توسط رُزوینی^۳ در کتاب طراحی سازهای بر اساس معیاربهینگی، کاربرد این روش در طراحی سازهها توسط رُزوینی^۳ در کتاب طراحی سازهای بر اساس معیاربهینگی، کاربرد این روش در طراحی سازهها توسط رُزوینی^۳ در کتاب طراحی سازهای بر اساس معیاربهینگی، کاربرد این روش در طراحی سازهها توسط رُزوینی^۳ در کتاب طراحی سازهای بر اساس معیاربهینگی بیان شد. همچنین در فصل نهم این کتاب اطلاعات باارزشی در رابطه با تاریخچه این روش در قبل از سال ۱۹۸۹ ارائه گردیده است (Rozvany, 1989). در اوایل دهه ی ۹۰ میلادی هفتکه و گوردال^۴ به مقایسه روش معیاربهینگی را در ارتباط نزدیک این روش بهینهسازی دیگری به نام روش دوگان پرداختند. آنها ارزش روش معیاربهینگی را در ارتباط نزدیک این روش با دوگانی در روشهای حل دوگان که برای اولین بار توسط فلوری^۵ میان شده بود، مورد مطالعه قراردادند(Haftka & Gurdal, 1993). در سال ۱۹۹۸ حسنی و هینت^۶ به مطالعه بیان شده بود، مورد مطالعه قراردادند(Haftka & Gurdal, 1993). در سال ۱۹۹۸ حسنی و هینت^۶ به مطالعه بیان شده بود، مورد مطالعه قراردادند(Haftka & Gurdal, 1993). در سال ۱۹۹۸ حسنی و هینت^۶ به مطالعه

¹Prager and Shield ²Michelle ³Rozvany ⁴Haftka and Gurdal ⁵Fluery ⁶Hinton این روش برای بهینهسازی توپولوژی^۱ سازهها پرداختند و نتایج پرکاربردی در این زمینه ارائه کردند (Hinton, 1998 & Hassani). در اوایل قرن ۲۱ میلادی با کمک بست سری تیلور ارتباط بین قیدها و متغیرهای طراحی اصلاح شد که این امر موجب افزایش سرعت حل این روش و در نتیجه افزایش کارایی این روش تا به امروز در زمینههای مختلف به خصوص در بهینهسازی توپولوژی و شکل سازهها شده است (Vin & Yang, 2001).

۲-۳- روش انطباق خطوط جریان بر مرز جامد

از این روش با توجه به توانایی آن در ایجاد شکل مرز جامد، در بسیاری از زمینههای طراحی استفاده می شود. اثر استفاده از این روش در طراحی شکل مرز جامد و همچنین میزان بهبود نتایج طراحی آن در پژوهشهای علمی مختلف از دههها پیش، مورد بررسی قرار گرفته است. قبل از دههی ۱۹۶۰ میلادی، طراحی توربینها و متراکم کنندههای محوری بر پایه روش انطباق خطوط جریان بر مرز و بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از این روش صورت می گرفت؛ این فرآیند ِ طراحی با تأثیر گرفتن از پژوهشهای تحلیلی تا اواخر دههی ۱۹۵۰ میلادی، از اهمیت به رزایی برخوردار گردید. با ورود به اوایل دههی ۱۹۶۰ میلادی، این روش با استفاده از علم دینامیک سیالات محاسباتی^۲ بهطور گستردهای مورد استفاده قرار گرفت. از آن دهه به بعد فرآیند طراحی بسیاری از سازههای هیدرولیکی از جمله توربوماشینهای^۲ مدرن با بهره گیری از این روش با گرفته است و امروزه با توجه به پیشرفت فناوری و علوم مربوط به محاسبات عددی، استفاده از این روش با کرفته است و امروزه با توجه به پیشرفت فناوری و علوم مربوط به محاسبات عددی، استفاده از این روش با

در سال ۲۰۰۳ لوند^۴ و همکاران به بررسی روشهای کلی جهت تحلیل و بهینهسازی شکل مسائل پیچیدهی اندرکنش سیال-سازه^۵ پرداختند. آنها جریان تراکمناپذیر را با رژیم جریان آرام و آشفته با کمک معادلات ناویه-استوکس مدل کردند و از آنجایی که جابهجایی قسمت جامد مسائل به صورت جابهجاییهای بزرگ بود، برای هر مرحله از فرآیند بهینهسازی مجبور به ایجاد شبکه^۶ جدیدی در محیط حل^۷ سیال شدند. همچنین

²Computational Fluid Dynamics

- ⁴Lund
- ⁵Fluid-Structure Interaction
- ⁵ Grid
- ⁷Domain

¹Topology

³Turbomachinery

برای تحلیل حساسیت طراحی^۱ از روش دیفرانسیلی مستقیم بهره جستند. آنها برای بهینهسازی یک تابع هدف، برای مرز جامد نقاط کنترلی متعددی در نظر گرفته و بر اساس تحلیل حساسیت به مقطع بهینه دست پیدا کردند. ایشان با اذعان به زمانبر بودن الگوریتم بهینهسازی و با توجه به لزوم انجام تحلیل حساسیت و ایجاد شبکه جدید در هر مرحله از بهینهسازی، به بررسی شکل سادهی این مسائل با شکل به دست آمده از روش پیشنهادی پرداختند و در نهایت تنها با مقایسه نتایج شکل ساده (خطی) و شکل نهایی، بهتر بودن شکل به دست آمده و کارا بودن این روش بهینهسازی را نتیجه گرفتند(Lund, Moller, & Jakobsen, 2003).

در سال ۲۰۰۷ امرنتا و همکاران به بهینهسازی شکل مقطع ورودی یک موتور توربوجت^۲ در مقیاس کوچک پرداختند. آنها برای بهینهسازی از روش تکاملی برپایه گرادیان^۳ (روشهای ریاضی) و برای درونیابی شکل از کدهای آماده[†] استفاده کردند. همچنین جهت کاهش هزینههای محاسباتی، تنها به مدل کردن مقطع ورودی موتور تحت شرایط بار زیاد و سرعت پرواز صفر پرداخته شد. آنها با مدل کردن مقطع تولیدشده توسط شرکت هلندی AMV ایجاد چندین جداشدگی جریان⁶ در مقطع ورودی که موجب کاهش ظرفیت مقطع ورودی شده و در سیستم موتور اخلال ایجاد می کرد را شناسایی کردند. برای بهینهسازی، در هر مرحله از این فرآیند با مدل کردن جریان آشفتهی ایجاده می کرد را شناسایی کردند. برای بهینهسازی، در هر مرحله از این فرآیند با مدل کردن جریان آشفتهی ایجادشده در اطراف مقطع، به تحلیل حساسیت متغیرهای بهینهسازی پرداخته و تابع هدف در فرآیند طراحی بهینه شد. همچنین با به کارگیری کدهای موجود و محدود کردن میزان جابهجاییها با کمک مقطع پیشنهادی از تغییر شبکهی حل در هر مرحله از بهینهسازی خودداری شد و در نتیجه زمان محاسبات کاهش پیدا کرد. در نهایت با مدل کردن و ساختن مقطع بهینه و مقطع پیشنهادی، بهینه بودن مقطع به دست آمده مورد بررسی و تأیید قرار گرفت (عاطی مینه و مقطع بیشنهادی, روامانه, کرای رای رای مطع به دست آمده مورد برسی و تأیید قرار گرفت (Daloiso, 2007).

یاوو^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بهینهسازی شکل منطبق شده بر خط جریان^۷ واگن کشنده قطارهای تندرو پرداختند. با افزایش سرعت قطار، نیروی اصطکاک آئرودینامیکی^۸ یکی از عوامل کلیدی مؤثر در افزایش مصرف انرژی، نیروی مقاوم در برابر حرکت و کاهش سرعت نهایی قطار است. در این پژوهش بهینهسازی شکل واگن کشنده قطار CRH380A با ترکیب یک واگن کشنده و سه واگن معمولی به عنوان مدل انتخابشده و

- ³Gradient-Based Progressive Method
- ⁴Black-Box Codes
- ⁵Seperation
- ⁶Yao
- ⁷Streamlined
- ⁸Aerodynamic

¹Design Sensitivity Analysis

²Turbojet

بهینهسازی برای کاهش نیروی اصطکاک انجام گرفت. آنها بر اساس روش بهینهسازی ژنتیک و با مدل کردن جریان اطراف قطار موفق شدند ۳/۲ درصد نیروی اصطکاک را کاهش دهند. همچنین نتیجه گرفتند که محل مخروطی دماغه و انتهای قطار از عوامل اصلی در کاهش و بهبود عملکرد این قطار است (Yao, Guo, ی .(2012

جانهونگ و جانلیانگ در سال ۲۰۱۵ میلادی به بهینهسازی شکل مقطع پایههای پل با تکنیک انطباق خطوط جریان بر مرز جامد جهت کاهش اثر شستگی پرداختند. با توجه به اثر شدت آشفتگی بر میزان شستگی و کاهش شدت آشفتگی با انطباق هر چه بیشتر مرز جامد با خطوط جریان، آنها تصمیم گرفتن با تغییر شکل مقطع پایهی پل پیشنهادشده توسط HEC-23، اثر این عامل مخرب را کاهش داده و باعث بیشتر شدن عمر و بهبود عملکرد سازهی پل شوند. بدین منظور با کمک منحنیهای بزیه^۲ به تولید ۱۰ مقطع برای پایه پل پرداختند و پس از مدلسازی، مقطعی با کمترین تنش برشی را به عنوان مقطع بهینه از میان آنها، انتخاب کردند. در نهایت با مدل کردن سه بعدی مقطع بهینه و مقطع پیشنهادی به مقایسه دقیق گردابهای ایجادشده و مقدار تنش برشی پرداختند (Junhong & Junliang, 2015).

۲–۴– انقباض در مسیر جریان

در سال ۱۹۸۳ میلادی، درست و لوی^۳ به بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان آرام در یک لوله با انقباض ناگهانی پرداختند تا ساختار جریان در نزدیکی انقباض ناگهانی و میزان افت فشار در اطراف آن را بررسی کنند. همچنین با توجه به امکان اندازه گیری سرعت با جزئیات در این پژوهش، به اصلاح و مقایسه نتایج به دست آمده از این یژوهش یرداخته شده است. آنها در این پژوهش با به کارگیری جریان با عدد رینولدز بین ۲۳ و ۱۲۱۳، به ارائهی یک مدل عددی کالیبره شده جهت مدلسازی جریان در داخل لوله با انقباض ناگهانی یرداختند و در نهایت نتایج به دست آمده از آزمایشهای انجامشده را ارائه کردند(Durst & Loy, 1983) .

¹Junhong and Junliang ²Bezier Curves

³Durst and Loy

میلر ^۱ در کتاب سیستمهای جریان داخلی به مطالعه و بیان جریان سیال در لولهها، آبروها، داکتها، کانالها، تونلهای انتقال آب و همچنین قسمتهای مختلف آن از قبیل خم^۲، پخش کننده^۳ و نازل^۴ در مسیر جریان پرداخته است. در این کتاب، جریان به صورت پایدار و با یک فازِ تقریباً نیوتنی در نظر گرفته شده و به صورت پیشفرض جریان با رژیم آشفته مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با بررسی آزمایشگاهی جریان تراکمناپذیر در قسمتهای ذکرشده به ارائهی نتایج حاصل از ضریبهای افت^۵ و محاسبهی میزان افت فشار پرداخته است (Miller, 1990).

ندیال کُف⁶ به طراحی انقباض و پخش کننده جریان برای یک تونل آب با سرعت زیاد پرداخت. بدین منظور وی با مطالعهی روشهای آزمایشگاهی و عددی، شکل بهینهی قسمتهای ذکرشده را مورد بررسی قرار داد. در قسمت انقباض جریان از شکل ارائهشده توسط ناسا در گزارش شماره ۸۹۱۳۷۵۳ استفاده کرد. این شکل برای طراحی تونلهای باد با سرعت کم قابل استفاده است، اما با توجه به ویژگیهای مشابه جریان در هر دو تونل، در این پژوهش از این شکل برای طراحی انقباض استفاده شده است. در نهایت برای به دست آوردن شکل بهینه، مقاطع در آزمایشگاه ساخته و شکل ارائهشده توسط ناسا که یک معادلهی چندجملهای با درجهی ۵ است، به عنوان بهترین مقطع برای یک انقباض شناخته شد (2012).

در سال ۲۰۱۳، ساتیش^۷ و همکاران به بررسی تحلیل جریان در یک تغییر تدریجی و ناگهانی قطر لوله با کمک نرمافزار FLUENT پرداختند. آنها با کمک این نرمافزار موفق شدند جریان را با مدل آشفتگی K-epsilon در نواحی حساس جریان تحلیل کنند. آنها با ترسیم خطوط همفشار و همسرعت، صحت نتایج عددی به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی ارائهشده در پژوهشهای دیگر، مورد بررسی قرار دادند و موفق به ارائهی نتایج قابلاعتماد جهت انجام کارهای عددی مشابه شدند , Pasha که که می از مان مراد دادند و موفق به ارائهی نتایج (Satish, Ashok Kumar, Vara Prasad, & Pasha)

نارایانه^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی به بررسی تحلیل جریان آب در یک انقباض تدریجی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. هدف اصلی انجام این پژوهش، پیدا کردن یک زاویه به عنوان زاویهی

¹Miller

- ²Bend
- ³Diffuser
- ⁴Nozzle
- ⁵Loss Coefficients
- ⁶Nedyalkov
- ⁷Satish
- ⁸Narayane

بهینه جهت کمینه کردن مقدار افت در مقطع بود. بدین منظور زاویههای مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر افت آنها در آزمایشگاه محاسبه شد. همچنین برای مدلسازی عددی از نرمافزارهای GAMBIT و FLUENT استفاده شد. در نهایت بر اساس تحلیلهای انجامشده، نتیجه گرفته شد که زاویهی بین ۱۵ تا ۴۰ درجه به عنوان زاویه بهینه برای این مقطع تلقی میشود (Narayane, Pathade, & Telrandhe, 2014). در سال ۲۰۱۵ میلادی، کومار و ساها^۱ به مدلسازی قطع جریان سیال^۲ توسط یک نازل انقباضی در یک جریان با رژیم آرام پرداختند. در این پژوهش حل معادلات ناویه۔استوکس توسط روش حجم محدود برای عددهای رینولدز مختلف صورت گرفته است. آنها جهت بررسی صحت پژوهش انجامشده از نرمافزار RNSYS و

FLUENT استفاده کردند. در نهایت در این تحقیق نتیجه گرفته شد که هر چه طراحی نازل دقیق تر باشد، شکل خطوط جریان دارای یکنواختی بیشتر، فشار استاتیکی و تنش برشی دیوارهی نازل کمتر شده و جریان دارای شرایط بهتری خواهد بود(Kumar & Saha, 2015).

کتاب طراحی سدهای کوچک نوشته سازمان احیا اراضی ایالات متحده^۳، در یک بخش از فصل ۱۰ خود به بررسی مسائل مربوط به طراحی هیدرولیکی انقباضها و انبساطها در جریان پرداخته است. در این کتاب با در نظر گرفتن کمینه شدن افت هد و جلوگیری از پدیده کاویتاسیون، تنها پیشنهاد می کند که تغییرات مرز در راستای انقباض یا انبساط جریان باید به صورت تدریجی باشد. بدین منظور برای انقباض با ارائهی رابطهای بر اساس سرعت میانگین و قطر میانگین لولهها، مقدار مجاز شیب دیوارهها را تعیین می کند (The United States Department of The Interior Bureau of Reclamation, 1987).

۲-۵- آبگیر

در سال ۲۰۰۱، واقعی و تابانراد^۴ به بررسی روش حفاری ورودی تونلهای آبگیر نیروگاه کارون ۳ پرداختند. حفاری فضاهای زیرزمینی با دهانه غیرمعمول به ویژه در شرایط ژئومکانیکی نامناسب همواره برای دستاندرکاران این قبیل فعالیتها ناخوشایند بوده و طراحان نیز تا حد امکان از این شرایط اجتناب میکنند. زمانی که احداث چنین فضاهایی گریزناپذیر باشد، لازم است از روشهای حفاری خاص بهره برده شود. از آنجا که بخش ابتدایی تونلهای آبگیر این سد باید با قطر ۲۱ متر حفر می شدند و از سویی نیز شرایط ژئومکانیکی

- ¹Kumar and Saha
- ²Cutting Fluid Flow
- ³USBR

⁴Vaghei and Tabanrad

محدوده بسیار نامناسب بود، اتخاذ روش اجرایی متناسب با شرایط محیط و هندسه طرح از اهمیت بهسزایی برخوردار بود. روش اجرایی به کاررفته به طور خلاصه شامل حفر یک فضای قوسی شکل به ضخامت ۲ متر در تاج تونل و پر کردن آن با بتن طی دو مرحله و سپس حفاری و پر کردن پایههایی به ارتفاع ۱۱ متر و به پهنای ۴/۵ متر در دو مرحله بعد بوده است. این مقاله با ارائهی نقشههای کامل تیپ ۲ سازه آبگیر این سد، روش اجرای فوق و تجارب حاصله را تشریح کرده است (2001)

سعیدپناه^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۳ به حذف جریانهای گردابی در آبگیر نیروگاه سدها پرداختند. پیدایش جریانهای گردابی از جمله مسائل مهم در مهندسی هیدرولیک و طراحی تأسیسات آبی بهشمار میآید؛ سیستمهای آبگیر از جمله مهمترین سازههای آبی میباشند که باید در طراحی آنها اثرات جریانهای گردابی مورد توجه و بررسی قرار گیرد. ورود هوا، چرخش و کاهش راندمان سیستم آبگیر، از جمله مشکلات بهرهبرداری است که باید در موقع طراحی پیشبینی شود؛ بنابراین در این پژوهش توصیههای فنی و طراحی در سیستم آبگیر نیروگاه سدها جهت جلوگیری از ایجاد گرداب بیان گردیده که در تکمیل آن از نتایج مدلهای هیدرولیکی آبگیر نیروگاه سدها جهت جلوگیری از ایجاد گرداب بیان گردیده که در تکمیل آن از نتایج مدلهای هیدرولیکی آبگیر نیروگاه سد کارون ۳، نیروگاه اول و دوم سد شهید عباسپور استفاده شده است (Hajimohamadi, 2003 & Kavianpour

در سال ۲۰۰۵ میلادی فوسامپار و جیهاک^۲ به طراحی و بهینهسازی سازه آبگیر سد واقع در نمن رود^۳ در بلاروس پرداختند. در این تحقیق بهینهسازی بر روی مدل دو بعدی شکل آبگیر صورت گرفت. آنها برای طراحی شکل از پیشنهادها ارائهشده در آییننامهها استفاده کردند و برای بهینهسازی تنها به بررسی زاویه اعمال شکل ارائهشده با دیوار پرداختند. بدین منظور ۵ مقطع انتخاب کردند که در یکی فقط مقدار طول و عرض قوس تغییر کرده و در چهار مقطع دیگر مقدار زاویه بین قوس و دیوارهی عمود اطراف پرداختند. در این نتیجه رسید که در یکی فقط مقدار طول و عرض قوس تغییر کرده و در چهار مقطع دیگر مقدار زاویه بین قوس و دیوارهی عمود اطراف پرداختند. در ایس تنیجه رسیدند که از بین مقاطع، مقطعی که دارای کمترین اختلاف بین شیب خط دیواره و قوس نهایت به این نتیجه رسیدند که از بین مقاطع، مقطعی که دارای کمترین اختلاف بین شیب خط دیواره و قوس است، به عنوان مقطع بهینه جهت طراحی تلقی میشود (Gihak, 2005).

در سال ۲۰۰۶، صالحی و اکبری^۴ به بررسی اثر شرایط جریان ورودی در ایجاد جریانهای گردابی پرداختند. دو پارامتر عمده که تمامی محققان در تشکیل گرداب مؤثر میدانند، عدد فرود و عمق استغراق در دهانه آبگیر است. لیکن در آبگیر نیروگاهها محدود کردن عدد فرود و یا عدد استغراق بحرانی جریان، تأثیر عمدهای بر

- ¹Saeedpanah
- ²Fosumpaur and Gihak
- ³Nemen River
- ⁴Salehi and Akbari

راندمان نیروگاه خواهد داشت. از اینرو در این تحقیق علاوه بر دو مورد فوق، پارامتر دیگری به نام نسبت تقارن توزیع سرعت جریان نزدیک شونده مورد بررسی قرار گرفته است. این نسبت که با ضریب چولگی توزیع سرعت جریان در کانال تقرب مورد استفاده قرار گرفته است، اثر محسوسی بر شکل گیری و تشدید گرداب دارد که این موضوع توسط دادههای آزمایشگاهی نشان داده شده است. در نهایت آنها نتیجه گرفتند هر چه محیط طراحی شده دارای تقارن بیشتری باشد تشکیل گرداب در آن ضعیف تر می باشد و به عبارت دیگر با افزایش عمق استغراق بحرانی، اثر گرداب در محاسبه عدد فرود کاهش یافته و می توان گفت با افزایش عدد فرود گردابهای حاصله دارای قدرت بیشتری هستند (Salehi & Akbari, 2006).

کاویانپور٬ و همکاران به بررسی عملکرد متقابل آبگیرهای مجاور بر مکانیزم تشکیل گرداب پرداختند. اصولاً شکل گیری گردابه و جریان های گردابه ای بر روی سازه های هیدرولیکی خاص و نحوه ی تشکیل آن ها از اهمیت ویژهای برخوردار است. جریان چرخشی قوی در نزدیکی آبگیرها موجب تشکیل گرداب با ورود هوا میگردد که این پدیده به علت اثر متقابل و پیچیدهی بین هندسه اطراف آبگیر و خصوصیات جریان و سیال از قبیل سرعت جریان، کشش سطحی و لزجت شکل می گیرد. سازههای آبگیر معمولاً برای تهیهی آب مورد نیاز جهت مصارف شرب، بهداشتی، صنعتی و تولید نیروی برق به کار میرود. در این میان آبگیر نیروگاه سدها بیشتر در معرض اثرات زیانبار این پدیده قرار می گیرد. در سالهای اخیر محققین مطالعات گستردهای بر روی این پدیده انجام دادهاند. از جمله عوامل مهم شکل گیری گرداب می توان جریان نزدیک شونده به آبگیر، عمق استغراق بحرانی، عدد فرود و غیره را نام برد. تحلیلهای ریاضی همراه با تجربیات، همواره قادر به ارائه اطلاعات کافی جهت تضمين عملكرد صحيح سازه هيدروليكي با هزينههاي كلان نخواهد بود. به همين دليل مدل هيدروليكي می تواند به منظور کسب اطلاعات بیشتر در مورد رفتار آبگیرهای نیروگاه در نمونه واقعی استفاده شود. در این یژوهش به مطالعه موردی آبگیرهای نیروگاه سد گتوند علیا پرداخته شده که به مشاهده و بررسی شرایط جریان ورودی آبگیرها برای ترازهای مختلف سطح آب دریاچه، بررسی تأثیر صفحات آشغال گیر در عدم تشکیل یا کاهش نوع گرداب و اندازهگیری پارامترهای سرعت در محدودهی دهانهی آبگیرها در شرایط مختلف بهرهبرداری پرداخته شده است. آنها در آخر نتیجه گرفتند که وجود صفحه آشغال گیر باعث کاهش قدرت گرداب شده و کمترین قدرت گرداب با باز شدن هر چهار آبگیر همزمان حاصل می شود (Kavianpour, .(Khorasanzade, 2009 & ,Sanati, Roshan

در سال ۲۰۰۹ روشن و همکاران به محاسبه حداقل تراز بهرهبرداری در سدهای نیروگاهی پرداختند. محاسبه عمق استغراق بحرانی از روابط گذشته دارای خطا بوده و به همین دلیل غالباً برای مطالعه گرداب در سدهای نیروگاهی مبادرت به ساخت مدل فیزیکی میشود. در سال ۱۳۸۷ روابط تجربی توسط سرکرده و همکاران برای محاسبه عمق استغراق بحرانی در سدهای نیروگاهی ارائه گردید. در این پژوهش با استفاده از دادههای مدل آزمایشگاهیِ چند سد مهم و بلند نیروگاهی کشور، صحت این روابط مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حاصل از روابط محققان گذشته مقایسه گردید. در نهایت محاسبات نشان داد روابط استخراجشده که تأثیر شیب آبگیر را لحاظ میکنند تطابق بهتری با مشاهدات آزمایشگاهی دارد و همچنین با افزایش شیب پیشانی و تبدیل آن به یک صفحه قائم، گردابهای تشکیل شده ضعیف تر خواهند بود (عمیه به هم می ای کردای گرفت). 2009).

ماروسی^۲ و همکاران با تحلیل آزمایشگاهی تغییرات فشار و تأثیر آن بر تولید انرژی به مطالعه موردی این موضوع در سد و نیروگاه کارون ۳ پرداختند. برآورد میزان تولید انرژی برق آبی برای طراحان سدهای نیروگاهی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و اقتصادی بودن یک پروژه نیروگاهی در گرو کمتر بودن هدر رفت انرژی میباشد. در این پژوهش با استفاده از مدل هیدرولیکی سد کارون ۳. میزان افت انرژی در هر یک از سازههای منتقل کننده آب از مخزن تا نیروگاه با اندازه گیری فشارها محاسبه گردید. آزمایشها در ۳ تراز مختلف و با فشارها در طول سازه رسم گردید و احتمال وقوع کاویتاسیون بررسی گردید. آزمایشها که در حضور دیوارهی فشارها در طول سازه رسم گردید و احتمال وقوع کاویتاسیون بررسی گردید. آزمایشها که در حضور دیوارهی فدگرداب طراحی و انجامشده، نشان داد که با افزایش سطح آب مخزن در دبی ثابت، میزان ضریب تخلیه افزایش میبابد. همچنین مشخص گردید که در تمامی سازههای در مسیر جریان به جز آبگیر (همراه با دیواره ضد گرداب اطراحی و انجامشده، نشان داد که با افزایش سطح آب مخزن در دبی ثابت، میزان ضریب تخلیه نوازیش میبابد. همچنین مشخص گردید که در تمامی سازههای در مسیر جریان به جز آبگیر (همراه با دیواره نوازیش می بابد. همچنین مشخص گردید که در تمامی سازههای در مسیر جریان به جز آبگیر (همراه با دیواره نوازیش می بابد. میوان تا توربینها هیچ گونه احتمال وقوع کاویتاسیون ثبت نگردید. سازه انشعاب را می توان به نوازی یکی از پر استهلاک پذیرترین سازهها در مسیر جریان دانست. همچنین با بررسی فشارها در مسیر تابگیر می توان حساسیت بررسی کاهش افت فشار در آن را مشاهده کرد به طوری که در سد کارون ۳ افت ناشی از دهانه آبگیر در حدود ۲۰ سانتیمتر است که این رقم در حدود یک مگاوات برق تولیدی نیروگاه خواهد لطف اللهی یقین ^۱ و کاردان در سال ۲۰۱۱، به بهینه سازی لوله انتقال آب فشارقوی سد بتنی شهریار با استفاده از الگوریتم اجتماع مورچه ها پرداختند. لوله ی تحت فشار انتقال آب جریان آب را از مخزن سد یا از هر بار آبی بالا به سمت توربین های نیروگاهی هدایت می کند. اهمیت این لوله به دلیل هزینه بالای ساخت، نصب و نگهداری آن می باشد به طوری که درصد قابل توجهی از هزینه های ساخت نیروگاه به این سازه هیدرولیکی اختصاص می یابد لذا طراحی بهینه آن می تواند نقش به سزایی در کاهش هزینه احداث نیروگاه های برق آبی داشته باشد. در سال های اخیر استفاده از روش بهینه سازی کاوشی برای طراحی بهینه ی سازه های مختلف مهم ترین موضوع تحقیق بوده است. از بین الگوریتم های کاوشی، روش بهینه سازی اجتماع مورچه به عنوان یک ابزار قوی و مناسب در بسیاری از زمینه ها مورد توجه بوده است. در این تحقیق ابعاد لوله ها با استفاده از روش اجتماع مورچه ها بهینه شده است. بدین منظور الگوریتم مورد نظر انتخاب شده و لوله ی تحت فشار سد شهریار واقع در میانه به عنوان مطالعه موردی، بررسی شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که الگوریتم اجتماع مورچه از قابلیت بالایی در بهینه سازی برخوردار بوده و توانسته است وزن لوله را به میزان قابل توجهی کاهش مورچه از قابلیت بالایی در بهینه سازی برخوردار بوده و توانسته است وزن لوله را به میزان قابل توجهی کاهش

در سال ۲۰۱۲ کشاورزیان^۲ و همکاران، شبیهسازی جریانهای گردابی در آبگیر نیروگاهی و راهکارهای حذف آن را انجام دادند. جهت انتقال آب از بالادست به پاییندست سد از نوعی سازه هیدرولیکی به نام آبگیر استفاده میشود. سازهی آبگیر برحسب عملکرد به شکلهای افقی و عمودی تقسیم میشود. معمولاً جهت تأمین انرژی برق آبی از آبگیرهای مستغرق افقی استفاده میشود. اجزای تشکیل دهنده اصلی آبگیرها دهانه ورودی، کانال انتقال آب، تأسیساتی مانند توربینها و غیره است. این آبگیرها در تراز بالاتری نسبت به تراز کف مخزن ساخته میشوند. پدیده مهمی معمولاً در آبگیری از سدها رخ میدهد و باعث بروز مشکلاتی برای آبگیر میشود. این پدیده چرخش آب، ایجاد جریانهای گردابی (چرخشی) در دهانه آبگیر و ورود هوا به داخل مجرای آن است. ایشان ابتدا به معرفی آبگیرهای افقی به عنوان پرکاربردترین نوع آبگیر و سپس به بررسی مشکلات به وجود آمده از این نوع آبگیر پرداخته و در نهایت با مدل کردن آبگیر یک نیروگاه و بررسی اثر حضور صفحه مشبک افقی ضد گرداب در نرمافزار TLUENT به این نتیجه رسیدند که استفاده از صفحه افقی مشبک میتواند تأثیر پیشم گیری در حل مشکل به وجود آمدن گرداب در آبگیرهای افقی داشته باشد (Nejad Naderi, 2012 **گ** هر میری در حل مشکل به وجود آمدن گرداب در آبگیرهای افقی داشته باشد (Nejad Naderi, 2012 **گ**

²Keshavarzian

نادری^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی به مطالعه آزمایشگاهی ضریب دبی در دهانهی آبگیرهای عمودی پرداختند. آنها با توجه به کاهش ضریب دبی بر اثر جریانهای گردابی در دهانه آبگیر، با بررسی شکل دهانه آبگیر سعی در حل این مشکل کردند. آنها بر اساس وجود تنها پیشنهادهایی در رابطه با طراحی دهانهی آبگیر، به مطالعه در این زمینه پرداختند. بنابراین با مطالعه ۴ شکل مختلف برای دهانه آبگیر به این نتیجه رسیدند که با کاهش شعاع انحنای دهانهی آبگیر، ضریب دبی افزایش مییابد و در نهایت بهترین مقطع از بین چهار مقطع را به صورت دوبُعدی ارائه کردند (Naderi, Farsadizadeh, Hosseinzade, & Arghavani, (2013)

صدقی و آذرمی^۲ به بررسی تخریب و ترمیم بتن در سازه برج آبگیر سد چراغویس پرداختند. در پروژه سد مخزنی چراغویس واقع در استان کردستان، پیرو اشتباه تیم آرماتوربندی پیمانکار طرح به هنگام ایجاد شبکه آرماتور در سازه آبگیر در قسمت اتصال کف کانال دومین دریچه به شافت جمعآوری سه دریچه، قوس و شکل ارائهشده در نقشهها، اجرا نشده و دستگاه نظارت طرح، دستور به تخریب و ترمیم بتن آن ناحیه میدهد. در نهایت با ارائه کامل تمامی نقشههای سازه آبگیر و عکسهای از محل قوس به بیان نتایج سازهای به دست آمده از ترمیم بتن پرداخته شده است (Sedghi & Azarmi, 2013).

سرکرده و همکاران به مطالعه عددی و تحلیل جریان در یک مخزن در وجود گرداب پرداختند. در این پژوهش با مطالعه و شبیهسازی جریان سعی در بررسی مکانیزم تشکیل گرداب شد. جهت صحتسنجی شبیهسازی عددی به مقایسه نتایج به دست آمده با آزمایشها موجود و همچنین یک آزمایش جدید پرداختند. آنها در آزمایش خود با کمک ابزار اندازه گیری آکوستیکی سرعت^۳ ADV، میدان سرعت را برای یک عمق استغراق ثابت آبگیر و دو عدد مختلف فرود به دست آوردند. در نهایت با بررسی دقت مدل عددی به شبیهسازی جریان گردابی پرداختند و موفق شدند دو جریان گردابی مؤثر در مخزن را مدل کنند و صحت درستی نتایج عدد را با کمک آزمایش صورت گرفته اثبات کنند (2014).

خان آرمویی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر زاویه آبگیری بر عمق استغراق بحرانی و قدرت گرداب را مطالعه کردند. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تشکیل گردابهای سطحی در دهانه آبگیرها برای شرایط مختلف هیدرولیکی پرداخته شده است. در بخش اول این تحقیق، قدرت گردابهای پایدار تشکیل شده در آبگیرهای

²Sedghi and Azarmi

⁴Khanarmuei

¹Naderi

³Acoustic Doppler Velocimeter

منفرد برای سه زاویه آبگیری عمودی، ۴۵ درجه و افقی در شرایط مختلف هیدرولیکی اندازه گیری شده است. قدرت گردابهای تشکیل شده در آبگیرها، برای شش عدد فرود و چهار عمق استغراق مختلف ارائه شده است. نتایج نشان داد که با کاهش زاویه آبگیری نسبت به حالت عمود، قدرت گردابهای تشکیل شده کاهش پیدا می کند. قدرت گرداب در آبگیرهای افقی نسبت به آبگیرهای عمودی به طور میانگین در حدود ۳۱٪ کاهش پیدا کرده است. بر اساس نتایج به دست آمده رابطهای برای تعیین قدرت گردابهای تشکیل شده در آبگیر برای هر زاویه آبگیری استخراج شده است. در بخش دیگر این تحقیق، آزمایش ها برای تعیین عمق استغراق بحرانی آبگیرهای منفرد انجام شده است. نتایج نشان میدهد که با کاهش زاویه آبگیری نسبت به حالت عمود، عمق استغراق بحرانی آبگیرها کاهش پیدا می کند، به طوری که کمترین عمق استغراق بحرانی برای زاویه آبگیری افقی رخ داده است. برای هر زاویه آبگیری معادلهای برای پیش بینی عمق استغراق بحرانی برای زاویه آبگیری افقی رخ داده است. برای هر زاویه آبگیری معادلهای برای پیش بینی عمق استغراق بحرانی برای زاویه قدد فرود آبگیر ارائه شده است. هر زاویه آبگیری معادلهای برای پیش بینی عمق استغراق بحرانی برای زاویه عدد فرود آبگیر ارائه شده است. همچنین نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش های مشابه مقایسه شد که از تطابق خوبی برخوردار بود (Khanarmuei, Rahimzadeh, & Sarkardeh, 2015).

در سال ۲۰۱۵ جلیلی^۱ و همکاران تأثیر شکل دهانهی آبگیر رودخانهای را بر الگوی جریان و گردابهای ایجادشده در اطراف دهانه با استفاده از مدل عددی بررسی کردند. جداشدگی جریان در بالادست دهانهی آبگیر یکی از عمده مشکلاتی است که همواره در آبگیری رخ می دهد. علت اصلی این پدید که موجب کاهش راندمان و همچنین رسوبگذاری در دهانه میشود، اختلاف سرعت جریان بین بالادست و پایین دست دهانه می باشد که این تفاوت سرعت موجب ایجاد گردابهایی در خلاف جهت جریان می گردد که با عنوان جداشدگی جریان شناخته میشود. در این ناحیه جریان چرخشی به وجود آمده و این چرخش مانع عبور جریان از دهانه آبگیر می گردد. این مسأله باعث کاهش دبی ورودی و تجمع رسوب در دهانه میشود. یکی از بهترین روشهای شناخته شراف باعث کاهش دبی ورودی و تجمع رسوب در دهانه میشود. یکی از بهترین روشهای شناخته شده برای افزایش راندمان آبگیری و حذف این گردابها ایجاد شرایط هیدرولیکی بهینه در دهانه آبگیر است. بدین صورت هر اقدامی که یکنواختی سرعت بین بالادست و پایین دست دهانهی آبگیر را بیشتر کند، شیاحت کاهش ابعاد جداشدگی جریان، کاهش رسوب گذاری در دهانه میشود. یکی از بهترین روشهای شیاحت همی ابعاد در این ناحیه می ورودی و مخانه این گردابها ایجاد شرایط هیدرولیکی بهینه در دهانه آبگیر است. بدین صورت هر اقدامی که یکنواختی سرعت بین بالادست و پایین دست دهانهی آبگیر را بیشتر کند، شیاحت کاهش ابعاد جداشدگی جریان، کاهش رسوب گذاری در دهانهی آبگیر و افزایش راندمان آبگیری خواهد شد. در این تحقیق با ساخت ۱۵ شکل مختلف برای دهانهی آبگیر، تأثیر آن را بر گردابهای ایجادشده در باعث کاهش ابعاد ماندگی جریان، کاهش رسوب گذاری دارای انطباق بیشتر با شکل جریان است به عنوان مهترین شکل برای استفاده در آبگیر رودخانهای معرفی شده است (Farsadizadeh 2015) در قسمت ۱۶–۱۰ کتاب طراحی سدهای کوچک، شکل مرزهای ورودی در جریانهای انتقالی ارائه شده است. در این کتاب با بیان کمینه کردن افت هد و جلوگیری کردن از ایجاد کاویتاسیون، شکل ورودی یک مجرای تحتفشار به صورت منطبق بر خطوط جریان که دارای تغییراتی نرم و تدریجی است ارائه میشود. بدین منظور برای به دست آوردن بهترین شکل آبگیر بر اساس کارایی آن، شکل آبگیر را مشابه شکل جریان ورودی یک جت به هوا در نظر گرفته و بیان میشود که اگر منحنی ورودی خیلی تند یا کوتاه باشد، فشار نسبت به محیط هوا منفی شده و احتمال وقوع کاویتاسیون زیاد میشود. در نهایت با بیان این که بهترین شکل برای این مقاطع، شکل دهانه ی زنگ^۱ است، دو فرمول برای ورودیهای دایروی و مستطیلی بر اساس ارتفاع و عرض مقطع ورودی ارائه کرده است. به عبارت دیگر برای طراحی صفحات طولی (بالا و پایین) و عرضی (چپ و راست) The United States Department of The Interior Bureau of June (Reclamation, 1987).

کتاب راهنما برای طراحی آبگیر نیروگاهها، به بررسی جزئیات کامل طراحی انواع مختلف این سازه پرداخته است. در فصل سوم این کتاب طراحی شکل آبگیرها بر اساس مفاهیم هیدرولیکی مطرح می شود. در این بخش بیان می شود که جریان در یک آبگیر از سمت آشغالگیر به سمت لولهی تحت فشار حرکت می کند و تغییرات ناگهانی در این مسیر باعث افت هد (فشار) شده و پتانسیل جریان برای ایجاد پدیده جداشدگی بیشتر می شود. افت هد (فشار) در این مسیر متناسب با میزان شتاب جریان است؛ بنابراین با ایجاد یک انقباض تدریجی و طولانی بر اساس شرایط اجرایی و اقتصادی، می توان افت هد (فشار) را کمینه کرد. اندازه قطر لولهی تحت فشار و ابعاد پایین دست بر اساس مسائل اقتصادی و شرایط طراحی توربین تعیین شده و در این میان طراحی انحنا مرز، طول و موقعیت آبگیر به عنوان بخشهای کلیدی طراحی باید مشخص شوند. بدین منظور در این کتاب با بیان امکان استفاده از فرمول ارائه شده در کتاب طراحی سدهای کوچک برای آبگیرهایی با هد زیاد، به معرفی فرمول ذکر شده می پردازد. همچنین با بیان اثر سرعت بر میزان افت انرژی در یک آبگیر بیان می کند که هر

خواهد بود (The Committee on Hydropower Intakes of the Energy Division of ASCE, 1995). در استاندارد شماره ۹۷۶۱:۱۹۹۵ کشور هندوستان معیارهای طراحی هیدرولیکی آبگیرهای نیروگاهی بیان شده است. در این استاندارد با در نظر گرفتن ۴ عامل، کاهش میزان افت هیدرولیکی، جلوگیری از ورود هوا بر اثر تشکیل گردابها، کمینه کردن میزان رسوبات ورودی به آبگیر و جلوگیری از ورود یخ و اجسام جامد معلق

¹Bell-Mouth Shape

در آب به داخل توربین، به طراحی آبگیرهای نیروگاهی پرداخته شده است. جهت طراحی آبگیر در این آییننامه ابتدا آبگیرها به دو دستهی، آبگیرهای رودخانهای و آبگیرهای مخزنی تقسیم شده و سپس مراحل طراحی هر یک از این آبگیرها به تفضیل بیان میشود. در بخش پنجم این استاندارد، طراحی هیدرولیکیِ دهانهی آبگیر تنها بر اساس زاویهی آبگیر، نسبت به خط افق ارائه شده است. در نهایت بعد از به دست آوردن ابعاد دهانهی آبگیر بر اساس مساحت لولهی تحتفشار و زاویهی آبگیر با خط افق، دو معادله بیضوی برای طراحی دهانهی آبگیر، یکی برای طراحی شکل دهانه در صفحهی افقی و دیگری جهت طراحی شکل دهانه در صفحهی عمودی ارائه شده است (Bureau of Indian Standards, 1995).

در بین نشریات چاپشده در بخش استاندارد صنعت آب و آبفای وزارت نیرو، میتوان به نشریهی شماره ۲۸۲ با عنوان ضوابط هیدرولیکی طراحی ساختمانهای تنظیم سطح آب و آبگیرها در کانالهای روباز اشاره کرد که در این نشریه تنها به بیان رعایت تدریجی بودن مقطع آبگیر در کانالها اشاره شده است. همچنین در نشریه شماره ۱۴۴-ن با عنوان راهنمای روشهای رسوب گیری در آبگیرها، بدون در نظر گرفتن شکل آبگیر تنها به بیان روشهایی از قبیل، نصب تجهیزات مختلف بر سر دهانهها برای کنترل ورود رسوبات، انتخاب محل صحیح برای آبگیر، حوضچههای رسوب گیر و غیره پرداخته است. علاوه بر این دو استاندارد، صنعت آب و آبفای وزارت نیرو در نشریهی شماره ۳۰۹، راهنمای طراحی سازهای تونلهای آببر را بیان کرده و در آن تنها طراحی سازهای آبگیرها مورد بررسی قرار گرفته است.

علاوه بر آییننامههای ذکرشده، کتاب طراحی پمپها و توربینها (Reclamation, 1950) و آییننامهی معیارهای طراحی هیدرولیکی ارتش آمریکا با شماره ۲۱۱ (Reclamation, 1950) و آییننامه معیارهای طراحی هیدرولیکی ارتش آمریکا با شماره ۲۱۱ (The United States Army Corps of Engineers, 1956) به ارائهی مقاطعی جهت طراحی آبگیرها (پرداختهاند که از میان آنها کتاب طراحی سدهای کوچک اطلاعات جدیدتر، کامل تر و دقیق تری برای طراحی شکل دهانهی آبگیرها ارائه کرده است (Division of ASCE, 1995).

فصل ۳ مواد و روشها
۳–۱– مقدمه

جهت بررسی دقیق تر جزئیات مطرحشده در یک پژوهش، نیاز است که مشخصات مواد به کاررفته، دلایل استفاده از هر ماده، روشهای استفاده از مواد و همچنین روشهای نظریهای استفاده شده در پژوهش به تفضیل بیان شود. از این رو در این فصل با بیان مواد و روشهای پژوهش، اطلاعات مورد نیاز برای بررسی و درک دقیق تر نتایج به دست آمده ارائه شده است.

در این بخش پس از تشریح مواد به کاررفته، به بررسی روش معیار بهینگی و نحوهی به کارگیری آن در این پژوهش پرداخته شده است. سپس با بررسی الگوریتم استفاده شده در برنامه SPC جهت انطباق خط جریان بر مرز جامد، روشهای عددی مورد استفاده در این الگوریتم بیان می شود. با توجه به نیاز صحتسنجی کد نوشته شده، از نرمافزار OpenFOAM جهت بررسی درستی نتایج به دست آمده استفاده شده است. از این رو در این بخش به معرفی این نرمافزار و روشهای حل معادلات توسط آن پرداخته می شود. در قسمت بعدی رژیم جریان بر اساس عدد رینولدز بررسی و مقدمه ای از آشفتگی و روشهای حل معادلات آشفتگی ارائه خواهد شد. در نهایت با بیان روشهای بررسی قرار گرفته این ایداری حل عددی، مدل ها و روشهای استفاده شده در مسأله

۲-۲- مواد مورد استفاده در این پژوهش

همان طور که در فصل اول اشاره شد جهت انطباق خطوط جریان بر مرز جامد یک برنامه رایانهای با نام SPC تهیه شده که این برنامه با زبان ++C و با نرمافزار مبدل Visual Studio نسخه Express2013 نوشته شده و برای نمایش نتایج به دست آمده از برنامه SPC از کتابخانه استاندارد SPC از نرمافزار (FLTK) نسخه I.3.3 کمک گرفته شده است. جهت مدلسازی مقاطع ارائه شده توسط SPC از نرمافزار OpenFOAM نسخه OpenFOAM نسخه این برنامه استفاده شده است. همچنین جهت اجرای این نرمافزارها، سیستمعاملهای Windows 7 و Windows بر روی رایانه با مشخصات جدول ۲۰۲ به کار گرفته شده اند.

جفاول ۲۰۱۰ مساحظتات رایانه ی استفادهستاه در پروهس			
مشخصات	قطعهى سختافزارى		
Intel Core i7-4790k CPU@4.00 GHz	پردازشگر		
31.4 GB	حافظه		
Gallium 0.4 on llvmpipe	کارت گرافیک		

جدول ۳-۱- مشخصات رایانهی استفادهشده در پژوهش

۳-۳- روش معیار بهینگی

در روشهای بهینهسازی باید ابتدا یک یا چند تابع هدف، متغیرها و قیدهای بهینهسازی تعیین شوند و سپس بر اساس روابط ریاضی ارائهشده در روش بهینهسازی مورد نظر، فرآیند بهینهسازی انجام میشود؛ اما در میان روشهای بهینهسازی، روش معیار بهینگی با حل تحلیلی مسائل، به بهینهسازی میپردازد. علیرغم این که روشهای جستجوی مبتنی بر کمینهسازی به طور گستردهای در شاخههای مختلف مهندسی، علوم و علوم مدیریت مورد استفاده قرار گرفتهاند؛ ولی روش معیار بهینگی بیشتر در طراحی سازهها مورد استفاده قرار میگیرد. در حالت خاص هنگامی که تنها یک قید (به همراه امکان وجود حد بالا و پایین برای متغیرها) وجود دارد با اطمینان میتوان ادعا کرد که روش معیار بهینگی بهترین روش برای انجام بهینهسازی است. در این پژوهش تابع بهینهسازی به صورت کمینه کردن میزان افت فشار تعریف شده است. متغیرهای بهینهسازی شامل نقاط روی مرز جامد جهت تعیین شکل مرز بوده و قیدهای بهینهسازی به صورت چهار قید مکانی در ورودی مقطع بیان شده است (Gurdal, 1993 & Haftka).

روش معیار بهینگی شامل دو بخش است که یکدیگر را کامل میکنند. اولین جز، معیار بهینهسازی است که می تواند یک عبارت صریح ریاضی یا یک شرط شهودی باشد. در این پژوهش معیار بهینهسازی از نوع شهودی بوده و به صورت انطباق شکل مرز جامد با یک خط جریان تعریف می شود. دومین بخش، الگوریتم مورد استفاده برای تغییر شکل دهانه ورودی به منظور بر آورده شدن معیار بهینهسازی است. شایان ذکر است که برای اطمینان از بر آورده شدن معیار بهینهسازی معمولاً روش صریح ریاضی مورد استفاده قرار می گیرد، در حالی که برای ممکن است روش خاص دیگری نیز ابداع شود که کارا بوده و بر اساس قضاوت مهندسی از درجه اطمینان بالایی نیز برخوردار باشد. همچنین تقسیم روش ها به صریح و شهودی معمولاً بر اساس قضاوت می در الی انتخاب معیار بهینه سازی صورت می گیرد و الگوریتم تعیین مقادیر متغیرها نقش به سزایی در انتخاب روش ندارد (Gurdal, 1993 &

در این روش ابتدا شکل دهانهی آبگیر به صورت یک برش قائم در مقطع که از تداخل دو مستطیل هم راستا تشکیل می شود، در نظر گرفته شده است. سپس با حل جریان پتانسیل در شکل اولیه، خطوط جریان به دست می آید؛ بعد از به دست آوردن خطوط جریان، یک خط جریان نزدیک به مرز به عنوان خط مبنا برای انطباق بر مرز انتخاب می شود. منحنی خط جریان انتخاب شده بر اساس روابط ریاضی معلوم و پس از انطباق، شکل جدیدی به عنوان مرز جامد تعریف می شود. بنابراین با حل معادلات جریان پتانسیل در مسألهی جدید با مرزهای منحنی شکل (در مختصات غیر مستطیلی)، این فر آیند تکرار شده و تا زمانی که اختلاف بین شکل مرز جامد با خط جریان به کمتر از حد مشخص نرسد، ادامه پیدا می کند. در نهایت با بررسی تابع هدف اصلی، از بین خطوط جریان مختلف، یک خط جریان به عنوان خط بهینه جهت منطبق کردن بر مرز جامد به دست می آید. در ادامه به بیان جزئیات روش های استفاده شده در هر قسمت از بهینه سازی پرداخته می شود.

۳-۳-۱ معیار بهینهسازی

همان طور که در قسمت قبل اشاره شد، معیار بهینهسازی در این روش، منطبق بودن بیشینه شکل خطوط جریان بر مرز جامد است. به منظور به دست آوردن خطوط جریان ابتدا بایستی معادلات جریان پتانسیل در محیط مسأله حل شود. بر این اساس در این قسمت ابتدا به بررسی معادلات حاکم در این گونه جریانها پرداخته می شود و سپس با توجه به شکل محیط حل، روش حل معادله ی حاکم در محیطهای حل مستطیلی و غیر مستطیلی بحث می شود.

معادلهی حاکم

با کمک حل معادلات پتانسیل در یک جریان، میتوان خطوط جریان را بر اساس یک تابع ریاضی با نام تابع جریان به دست آورد. تابع جریان، قانون بقای جرم را در یک سیال تراکمناپذیر با جریان دوبُعدی اغنا میکند. قانون بقای جرم، در یک جریان فرض میکند که هیچ فضای خالی در جریان وجود ندارد و به همین دلیل به قانون بقای جرم، قانون پیوستگی نیز گفته میشود که در معادله (۳-۱) به آن اشاره شده است.

$$-\frac{1}{\rho}\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{1-7}$$

در معادلهی بالا ρ نماد چگالی، u نماد سرعت، t نماد زمان و i جهت در دستگاه مختصات است. چنانچه سرعت جریان کمتر از ρ نماد پالا میت میال در راستای جریان ثابت مانده و سیال تراکم ناپذیر تلقی میشود. این شرط که از مهمترین شرایط تراکمناپذیر بودن سیال است به عنوان تقریب بوزینسک i

¹Boussinesq Approximation

شناخته شده و در اغلب جریانهای مایع و جریانهای گاز با سرعت کمتر از ۱۰۰ متربرثانیه صدق میکند. در این جریانها پارامتر $ho^{-1} D
ho/Dt$ نسبت به مشتقهای $\partial u_i/\partial x_i$ تغییر چشم گیری نمیکند و در نتیجه معادله پیوستگی در جریانهای پایدار و ناپایدار به صورت معادله (۲-۳) ارائه میشود.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{(7-7)}$$

چنانچه جریان به صورت صفحهای در نظر گرفته شود، معادلهی پیوستگی دارای دو عبارت خواهد بود. حال چنانچه تابع ریاضی $\psi(x,y,t)$ بر اساس معادلات (۳-۳) تعریف شود (در این پژوهش مقادیر تابع جریان با درصد بیان میشود)، معادله پیوستگی به صورت پیشفرض اغنا شده و بر این اساس تابع $\psi(x,y,t)$ به عنوان تابع جریان تعریف میشود (Kundu & Cohen, 2010).

$$u \equiv \frac{\partial \psi}{\partial y}, v \equiv -\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{(7-7)}$$

شایان ذکر است که تساوی یا معادله ی $0 = d\psi$ در راستای هر خط جریان برقرار است و در نتیجه مقادیر ثابت تابع جریان نشان دهنده ی خطوط جریان مختلف هستند. علاوه بر این، از آن جا که در جریان غیر چرخشی، مقدار حرکت گردابه ای^۱ (معادله (۳-۴)) صفر است، وجود یک تابع اسکالر دیگر برای ارضای این شرط لازم بوده که آن را با نماد ϕ نشان داده و به عنوان تابع پتانسیل سرعت شناخته می شود. این تابع در تمامی جریان های غیر چرخشی وجود داشته و بر همین اساس به چنین جریان هایی، جریان پتانسیل گفته می شود.

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \tag{(f-r)}$$

حال اگر معادلات (۳-۳) در معادله (۳-۴) قرار گیرد، معادلهی اصلی حاکم بر جریانهای پتانسیل (معادله (۵-۳)) حاصل می شود (۲۰۵۹) (۵-۳)).

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \tag{(a-r)}$$

بنابراین معادله (۳-۵) به عنوان معادلهی اصلی حاکم در این مسأله شناخته میشود که در سیالهای تراکمناپذیر با جریانهای دوبعدی و غیرچرخشی کاربرد دارد.

¹Vorticity

حل معادلهی حاکم در شبکههای مستطیلی جهت حل معادلهی حاکم به صورت عددی ابتدا باید بر اساس روشهای تقریبی در محاسبات عددی، معادلهی دیفرانسیل به دست آمده را به معادلهی جبری تبدیل کرده و سپس این معادله را در نقاط مختلف محیط مسأله حل کرد. این نقاط که همان نقاط شبکه^۱ هستند در روشهای عددی برای حل معادلات در آنها تولید میشوند. در این پژوهش از روش اختلاف محدود جهت حل معادلات استفاده شده است. با توجه به نیاز این روش به شبکهی حل ابتدا باید آن را تولید نموده و سپس معادلات جبری در هر گره مورد بررسی قرار گیرند. از آنجایی که در مرحلهی اول بهینهسازی، محیط حل مستطیلی بوده، تولید شبکه تنها بر اساس ابعاد فواصل گرهها به دست میآید و نیاز به محاسبات خاصی ندارد. در ادامه به بیان روش تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری بر اساس روش اختلاف محدود پرداخته میشود.

همان طور که در قسمت قبل به آن اشاره شد، معادلهی حاکم در این مسأله از نوع معادله لاپلاس است که نوعی از معادلات بیضوی محسوب میشود. جهت فرمولبندی تفاضل محدود این معادلات معمولاً از روش پنجنقطهای استفاده میشود که در اینجا برای تقریب مشتقات از تفاضل مرکزی با دقت مرتبه دو استفاده شده است. بنابراین معادلهی حاکم به صورت زیر تقریب زده میشود.

$$\frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} = 0$$
(8-7)

در این معادله ψ نماد تابع جریان و i و j نماد شمارهی گره در شبکهی حل میباشد. فرمول بالا را میتوان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j} + \left[\frac{\Delta x}{\Delta y}\right]^2 \left(\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}\right) = 0 \tag{V-T}$$

چنانچه نسبت گامها β = β باشد، معادلهی (۳-۷) به این صورت نوشته میشود:

$$\psi_{i,j} = \frac{1}{2(1+\beta^2)} \left[\psi_{i+1,j} + \psi_{i-1,j} + \beta^2 \left(\psi_{i,j+1} + \psi_{i,j-1} \right) \right] \tag{A-$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$

حل این معادلات در نقاط شبکهی تولیدشده باعث ایجاد یک دستگاه چند معادلهای خطی می شود که با روش های استاندارد موجود در محاسبات عددی قابل حل است.

برخی از روشها مشهور به روشهای مستقیم عبارتند از روش حذفی گوس که عیب بزرگ این روشها، حجم عملیات ریاضی قابلتوجه برای رسیدن به جواب است. روشهای مستقیم پیشرفتهای پیشنهاد شدهاند که به زمان محاسبات کمتری نیاز دارند ولی تقریباً همه آنها عیبهایی دارند. معمولاً این روشها با یک یا چند شرط محدود میشوند که این شرایط عبارتند از: دستگاه مختصات دکارتی، قلمرو مستطیلی، اندازه ماتریس ضرایب، ظرفیت ذخیره بالا، شرایط مرزی و مشکل برنامهنویسی در آنها. در هر حال برخی از روشهای مستقیم پیشرفته در پارهایی از کاربردها ابزار مفیدی به نظر میرسند. از آنجا که کاربرد کلی روشهای حل مورد نظر است، بررسیها به روشهای ساده و قابل درک تکراری محدود میشود. روشهای تکراری برای حل دستگاه معادلات خطی ساده هستند و به راحتی میتوان آنها را در برنامهی رایانهای وارد کرد. هدف این روشها، به دست آوردن جواب از روش تکراری است. معمولاً جواب نخست حدس زده میشود و مقادیر جدید متغیرها به دست میآید. از مقادیر جدید محاسبه شده، جوابهای جدیدتری به دست میآید و این کار آن قدر ادامه پیدا میکند تا معیار همگرایی موردنظر ارضا شود. بنابراین با تعریف یک پارامتر به نام ۸، شمارهی مرحلهی تکرار در فرمول بالا به صورت زیر ارائه می شود:

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2(1+\beta^2)} \left[\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2 \left(\psi_{i,j+1}^k + \psi_{i,j-1}^{k+1} \right) \right]$$
(9-7)

از آنجایی که جریان در مسألهی مطرحشده به صورت جریان دائمی است، حل معادلهی حالت دائم جریان در نظر گرفته میشود و فرض میشود که از یک روش تکراری برای حل استفاده شده است. تفاوت عمده بین روش حل دائم و غیردائم در این است که روش غیردائم در هر مرحله زمانی دارای اعتبار است (جوابهای به دست آمده در آن مقطع زمانی صحیحاند) از طرف دیگر، هر گونه جواب حل دائم، در مراحل میانی دارای هیچگونه ارزش فیزیکی نبوده و تنها، مقداری در مسیر رسیدن به جواب حالت دائم به شمار میرود.

چنانچه در طی فرآیند حل تشخیص داده شود که مقادیر پارامترها دارای الگوی خاصی به سوی جواب هستند، میتوان از این خصوصیت استفاده کرد و فرآیند حل را سرعت بخشید. این روش را روش تخفیف پی در پی (SOR)^۱ می گویند. نخست معادلهی (۳-۹) در نظر گرفته میشود؛ با افزودن $\psi_{i,j}^k - \psi_{i,j}^k$ به سمت راست معادله و بازآرایی جملات، معادله فوق مطابق با معادلهی (۳-۱۰) خواهد شد.

¹Successive Over Relaxation

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \psi_{i,j}^{k} + \frac{1}{2(1+\beta^2)} \Big[\psi_{i+1,j}^{k} + \psi_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2 \Big(\psi_{i,j+1}^{k} + \psi_{i,j-1}^{k+1} \Big) \\ - 2(1+\beta^2) \psi_{i,j}^{k} \Big]$$
(1.-7)

با پیشروی حل، $\psi_{i,j}^k$ باید به سمت $\psi_{i,j}^{k+1}$ پیش برود. برای شتاب بخشیدن به حل، عبارت داخل پرانتز در ω ، پارامتر تخفیف'، ضرب شده و معادلهی بالا به صورت زیر نوشته میشود:

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \psi_{i,j}^{k} + \frac{\omega}{2(1+\beta^2)} \left[\psi_{i+1,j}^{k} + \psi_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2 \left(\psi_{i,j+1}^{k} + \psi_{i,j-1}^{k+1} \right) - 2(1+\beta^2) \psi_{i,j}^{k} \right]$$
(11-7)

برای اینکه جواب همگرا شود، باید 2 > w > 0 باشد . اگر 1 > w باشد آن را تخفیف زیرین می گویند. گفتنی است اگر 1 = w باشد، روش تکراری گوس-سایدل به دست می آید. حال چنانچه فرمول بندی معادلهی بالا به صورت زیر ارائه شود، معادلهی جبری به دست آمده بر اساس روش فوق تخفیف پی در پی نقطه به نقطه 7 (PSOR) به دست می آید.

$$\psi_{i,j}^{k+1} = (1-\omega)\psi_{i,j}^{k} + \frac{\omega}{2(1+\beta^2)} \left[\psi_{i+1,j}^{k} + \psi_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2 \left(\psi_{i,j+1}^{k} + \psi_{i,j-1}^{k+1}\right)\right] \quad (17-7)$$

برای محاسبه مقدار *w* بهینه هیچ گونه معیار راهنمای کلی وجود ندارد. در پارهای موارد، روابطی برای محاسبه *w* بهینه از سوی پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است. نوعی از این روابط که در حل معادلات بیضوی در یک قلمرو مستطیلی با شرایط مرزی دریکله و اندازهی گامهای ثابت استفاده می شود، در رابطه زیر ارائه شده است.

$$\omega_{opt} = \frac{2 - 2\sqrt{1 - a}}{a} \tag{17-7}$$

$$a = \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{IM-1}\right) + \beta^2 \cos\left(\frac{\pi}{JM-1}\right)}{1+\beta^2}\right]^2 \tag{14-7}$$

در حالت کلی مقدار w بهینه را نمی توان به آسانی محاسبه کرد و در بیشتر موارد بر اساس آزمایش عددی به دست می آید. در نهایت لازم به ذکر است با توجه به توانایی این روش در مدل کردن معادلات دیفرانسیلی با کمک پارامتر تخفیف و افزایش سرعت حل و دقت بالای آن در حل دستگاه معادلات، در این پژوهش از این روش جهت حل معادلهی حاکم استفاده می شود (Hoffmann & Chiang, 2000).

¹Relaxation Parameter

² Point Succesive Over Relaxation

حل معادلهی حاکم در محیطهای غیرمستطیلی

بعد از انجام مرحلهی اول بهینهسازی و حل معادلهی حاکم در محیط مستطیلی بر اساس روش توضیح داده شده در قسمت قبل، یکی از خطوط جریان به عنوان خط مبنا انتخاب شده و بر مرز جامد منطبق می شود. بر این اساس محیط حل از مستطیلی به غیر مستطیلی تبدیل شده و از این مرحله به بعد بایستی از روش های قابل استفاده در محیطهای غیر مستطیلی استفاده شود. جهت حل معادله ی حاکم در یک محیط غیر مستطیلی، ابتدا باید بر اساس شکل مرز جامد، به تولید شبکه ی مناسب در محیط حل پرداخته شود؛ بر همین اساس در ادامه به بررسی انواع شبکه و روش انتخاب شده در این پژوهش پرداخته می شود.

معمولاً قلمرو محاسبات به نحوی انتخاب میشود که نقاط داخلی شبکه بر روی خطوط شبکه توزیع میشوند. بنابراین نقاط شبکه را میتوان به راحتی نسبت به خطوط شبکه مشخص کرد. این نوع شبکه که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است را شبکه با سازمان^۱ مینامند. دستهی دیگری از شبکهها به گونهای ساخته میشود که نقاط شبکهی آنها را نمیتوان بر روی خطوطی از شبکه که به صورت منظم تعریفشدهاند مرتبط کرد؛ این نوع شبکه را شبکهی بیسازمان^۲ گویند. در نتیجه برای حل معادلهی حاکم از روشهای حل معادلات در شبکههای سازمانیافته استفاده میشود.

با توجه به قلمروی محاسباتی غیرمستطیل در این مرحله از بهینهسازی، اعمال قلمرو محاسباتی مستطیلی شکل بر چنین قلمروهای فیزیکی، به نوعی میانیابی، برای اعمال شرایط مرزی نیاز دارد. از آنجا که شرایط مرزی نقشی کلیدی در حل معادلات دارند چنین میانیابیهایی خطاهایی را در نقاط با بیشترین حساسیتها سبب میشود. علاوه بر این در شبکههای غیریکنواخت در نزدیکی مرزها پیچیدگیهای بیشتری در خصوص معادلات تفاضل محدود به وجود می آید زیرا از تقریبهایی با فواصل نامساوی استفاده می شود. این نوع معادلهی تفاضل محدود از گرهای به گرهی دیگر تغییر می کند و برنامهنویسی آن دشواراست. برای غلبه بر این مشکلات فضای فیزیکی به فضای محاسباتی منتقل می شود. این انتقال با معرفی دستگاه مختصات کلی انجام می شود و شبکهی غیر مستطیلی موجود در فضای فیزیکی را به شبکهی یکنواخت مستطیلی در فضای محاسباتی تصویر می کند. روشهای گوناگونی برای بیان دستگاه مختصات کلی وجود دارد که از میان آنها، دستگاه مختصات می منطبق بر بدنهی قلمرو حل، جهت استفاده در این پژوهش انتخاب شده است. در این دستگاه دو محور مختصات

¹Structured

²Unstructured

 ξ و ζ بر سطح منطبق هستند که به ترتیب یکی در امتداد خطوط جریان، دیگری در جهت محیط و محور سوم η نیز عمود بر سطح است.

باید دانست که قلمرو محاسباتی با تغییر شکل قلمرو فیزیکی به دست میآید که این امر با پیچاندن، کشیدن و دیگر تغییرات گرافیکی بر روی قلمروی فیزیکی صورت میگیرد. بحث اصلی در این بخش مشخص کردن نقاط شبکه در قلمرو فیزیکی است؛ به عبارت دیگر، برای نقطهی خاص (i, j) در قلمرو محاسباتی مختصات (x, y) در قلمرو فیزیکی مشخص شود. به همین منظور برای تعیین نقاط شبکه فرضهای زیر به کاربرده میشود:

شبکهسازی یک به یک باشد یعنی خطوط شبکه یه مخانواده نباید یکدیگر را قطع کند.

- ۲) از نظر عددی در مناطقی که گرادیانهای شدید جریان وجود دارد باید توزیع نقاط شبکه هموار و اعوجاج خطوط شبکه کم باشد.
 - ۳) خطوط شبکه باید متعامد یا تقریباً متعامد باشد.

روشن است که فراهم کردن همهی این موارد به صورت یکجا، با یک روش خاص ایجاد شبکه، امکانپذیر نیست. در اینجا به روشهای ایجاد شبکهای که به ترکیبی از این موارد میپردازد اشاره میشود.

روشهای شبکهسازی به طور کلی به صورت زیر دستهبندی میشود:

- ۱- شبکهسازی به روش جبری
- ۲- شبکهسازی با استفاده از معادلات دیفرانسیل
- ۳- شبکه سازی با استفاده از اعداد مختلط و نگاشت همدیس

علاوه بر این، شبکهها به شبکههای ثابت^۲ و قابل تطبیق^۳ نیز تقسیم می شوند. بدیهی است که یک شبکه ثابت پیش از آغاز حل معادلات حاکم بر جریان سیال ایجاد می شود و مستقل از حل، ثابت می ماند. از سوی دیگر در یک شبکهی تطبیقی شبکهی همراه با نتایج حل معادلات سیال شکل می گیرد. به عنوان مثال در یک موج

¹Conformal

²Fixed

³Adaptive

ضربهای نقاط شبکه در حوالی نقاط با گرادیان زیاد متمرکز میشوند. نگاشت همدیس که بر اساس متغیرهای مختلط استوار است به مسائل دو بعدی محدود است و به دانش کافی از متغیرهای مختلط نیاز دارد. از طرفی تعیین تابع نگاشت در پارهای از موارد دشوار و دارای خطا است. بنابراین در این پژوهش، به علت ثابت بودن شبکه در مراحل مختلف حل و نداشتن پیچیدگی خاصی از روش جبری و شبکهسازی با استفاده از معادلات دیفرانسیل استفاده شد. جهت استفاده از این روشها، ابتدا بایستی معادلهی حاکم در دستگاه مختصات فیزیکی را به یک معادلهی محادله مختلف حل و نداشتن پیچیدگی خاصی از روش جبری و شبکهسازی با استفاده از معادلات دیفرانسیل استفاده شد. جهت استفاده از این روشها، ابتدا بایستی معادلهی حاکم در دستگاه مختصات فیزیکی را به یک معادلهی متناظر در دستگاه مختصات محاسباتی تبدیل کرد؛ سپس بر اساس روشهای تولید شبکه، یک شبکه در قلمرو محاسباتی به دست میآید و معادلهی تبدیل شده در یک شبکهی جدید مستطیلی، محاسبه یک شبکه در ماراین در ادامه ابتدا به تشریح مراحل انتقال معادلهی حاکم از دستگاه مختصات فیزیکی محاسبه میشود. بنابراین در ادامه ابتدا به تشریح مراحل انتقال معادلهی حاکم از دستگاه مختصات فیزیکی محاسبه میشود. بنابراین در ادامه ابتدا به تشریح مراحل انتقال معادلهی حاکم از دستگاه مختصات میآید و معادلهی حاکم از دستگاه مختصات فیزیکی به دستگاه مختصات می آید و معادلهی تبدیل شده در یک شبکهی جدید مستطیلی، محاسبه می شود. بنابراین در ادامه ابتدا به تشریح مراحل انتقال معادلهی حاکم از دستگاه مختصات فیزیکی به دستگاه مختصات میراین در ادامه ابتدا به تشریح مراحل انتقال معادلهی حاکم از دستگاه مختصات فیزیکی به دستگاه مختصات فیزیکی به دستگاه مختصات فیزیکی مدر این پژوهش جهت تولید شرکه

تبدیل معادلات دیفرانسیل پارهای حاکم

معادلهی حاکم در این پژوهش، معادلهی جریان پتانسیل از نوع معادلات بیضوی است که در رابطهی (۳-۵) ارائه شده است. گفتنی است که شکل و نوع معادلات تبدیلیافته مانند معادلهی دیفرانسیل پارهای اولیه باقی میماند؛ یعنی معادلهی تبدیل یافته نیز در این پژوهش از نوع بیضوی خواهد بود. حال روابط زیر بین فضای فیزیکی و فضای محاسباتی بیان میشود.

$$\xi \equiv \xi(x, y) \tag{10-7}$$

$$\eta \equiv \eta(x, y) \tag{19-1}$$

با توجه به روابط بالا، قانون زنجیرهای برای مشتقهای پارهای به صورت زیر تعریف می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta}$$
(17-7)

در ادامه مشتقهای پارهای بر اساس رابطهی بالا با استفاده از نمادهای اندیسی نشان داده می شوند.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \tag{1A-W}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \tag{19-7}$$

حال معادله حاکم بر جریان پتانسیل در نظر گرفته می شود. این معادله با استفاده از معادلات (۳-۱۸) و (۱۹-۱۹) از فضای فیزیکی به فضای محاسباتی انتقال داده شده و نتیجه می شود:

$$\frac{\partial^{2}\psi}{\partial\xi^{2}} \left[\left(\frac{\partial\xi}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial\xi}{\partial y} \right)^{2} \right] + \frac{\partial^{2}\psi}{\partial\eta^{2}} \left[\left(\frac{\partial\eta}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial\eta}{\partial y} \right)^{2} \right] + 2 \frac{\partial^{2}\psi}{\partial\xi\partial\eta} \left[\left(\frac{\partial\eta}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial\xi}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial\eta}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial\xi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial\psi}{\partial\xi} \left(\frac{\partial^{2}\xi}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\xi}{\partial y^{2}} \right)$$
(7.-7)
$$+ \frac{\partial\psi}{\partial\eta} \left(\frac{\partial^{2}\eta}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\eta}{\partial y^{2}} \right) = 0$$

این معادله در قلمرو محاسباتی حل میشود. همچنین توجه کنید که مشتقهای تبدیل باید از طریق روابط (۱۵-۳) تا (۱۷-۳) محاسبه شوند. از مقایسه معادلهی دیفرانسیل پارهای حاکم با معادلات تبدیلیافته (۲۰-۲) کاملاً آشکار است که معادلات تبدیلیافته بسیار پیچیدهتر از معادلات اولیه هستند و بنابراین، فایده به کارگیری دستگاه مختصات کلی، به علت پیچیدگیهای حاصل، کمتر است. به هر حال فواید این معادلات در برخی موارد بسیار بیشتر از مشادلات تبدیلیافته (۱۹-۱۹) دستگاه مختصات کلی، به علت پیچیدگیهای حاصل، کمتر است. به هر حال فواید این معادلات در برخی موارد بسیار پیچیدگی معادلات تبدیلیافته (۱۹-۱۹) دستگاه مختصات کلی، به علت پیچیدگیهای حاصل، کمتر است. به هر حال فواید این معادلات در برخی موارد بسیار بیشتر از مشکلات مربوط به پیچیدگی معادلات تبدیلیافته است. در معادلات (۱۹-۱۹) و (۱۹-۱۹) موارد بسیار بیشتر از مشکلات مربوط به پیچیدگی معادلات تبدیلیافته است. در معادلات (۱۹-۱۹) و (۱۹-۱۹) موارد بسیار بیشتر از مشکلات مربوط به پیچیدگی معادلات تبدیلیافته است. در معادلات (۱۹-۱۹) و (۱۹-۱۹) موارد بسیار بیشتر از مشکلات مربوط به پیچیدگی معادلات تبدیلیافته است. در معادلات (۱۹-۱۹) و (۱۹-۱۹) موارد بسیار بیشتر از مشکلات مربوط به پیچیدگی معادلات تبدیلیافته است. در معادلات (۱۹۰۱) میلارد (۱۹۰۱) مالار و یا به صورت جملههایی مانند x، x_i ، x_i ، y، و η ظاهر میشود؛ این مشتقهای تبدیل، متریکهای انتقال و یا به صورت ساده می میده می شوند. تفسیر متریکها با تقریب زیر مشخص می شود.

$$\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x} \cong \frac{\Delta \xi}{\Delta x} \tag{(1-7)}$$

عبارت فوق نشان میدهد که متریکها نسبت طول قوسها در فضای محاسباتی به طول قوسهای مشابه در فضای فیزیکی هستند. اکنون به محاسبات متریکها پرداخته میشود.

با توجه به معادلات (۳-۱۵) تا (۳-۱۹)، روابط زیر به دست میآید:

$$d\xi = \xi_x dx + \xi_y dy \tag{(YY-Y)}$$

$$d\eta = \eta_x dx + \eta_y dy \tag{(YT-T)}$$

که می توان آن ها به صورت فشرده، مطابق با معادلات زیر نوشت.

$$\begin{bmatrix} d\xi \\ d\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}$$
(74-7)

با معکوس کردن متغیرهای مستقل، روابط زیر ارائه میشود.

$$x = x(\xi, \eta) \tag{YD-T}$$

$$y = y(\xi, \eta) \tag{(YP-T)}$$

همچنین می توان روابط زیر را بر اساس روابط تبدیل دستگاههای مختصات ارائه کرد:

¹Metrics of Transformation

$$dx = x_{\xi} d\xi + x_{\eta} d\eta \tag{(17-7)}$$

$$dy = y_{\xi} d\xi + y_{\eta} d\eta \tag{(YA-W)}$$

این معادلات نیز در حالت فشرده به صورت زیر هستند:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\xi} & x_{\eta} \\ y_{\xi} & y_{\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\xi \\ d\eta \end{bmatrix}$$
(Y9-W)

با مقایسهی روابط (۳-۲۴) و (۳-۲۹)، می توان معادلات زیر را نتیجه گرفت:

$$\begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\xi} & x_{\eta} \\ y_{\xi} & y_{\eta} \end{bmatrix}^{-1}$$
(7.-7)

بر این اساس میتوان معادلاتی را برای متریکها، مطابق با روابط زیر ارائه کرد:

$$J = \frac{1}{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi}\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)} \tag{(1-7)}$$

$$\xi_x = J y_\eta \tag{(TT-T)}$$

$$\xi_y = -Jx_\eta \tag{(TT-T)}$$

$$\eta_x = -Jy_{\xi} \tag{(TF-T)}$$

$$\eta_{v} = J x_{\xi} \tag{(°a-r)}$$

در روابط بالا J، ژاکوبیین تبدیل نامیده میشود و عبارت است از نسبت سطح (نسبت حجم در حالت سه بعدی) در فضای فیزیکی به سطح در فضای محاسباتی که برای محاسبهی متریکها با توجه به قرار گرفتن مقادیر $\delta \xi$ و $\delta \eta$ در مخرج کسرها و بر اساس ثابت بودن این مقادیر در محیط حل، میتوان به راحتی مقادیر متریکها را بر اساس روابط اختلاف محدود محاسبه کرد. گفتنی است که مقدار واقعی متریکها و ژاکوبیین میتواند منفی هم باشد، روشن است که مقادیر آن به ویژگیهای دستگاه معادلات فیزیکی و محاسباتی بستگی دارد (Anderson, 1995).

شبکهسازی به روش جبری

یکی از سادهترین روشهای تولید شبکه، روش جبری است که از جمله مزایای آن میتوان به سرعت بالای تولید شبکه اشاره کرد. در این روش یک معادلهی جبری یا یک رابطهی عددی برای ارتباط بین مختصات نقاط شبکه در قلمروی محاسباتی با نقاط متناظر در قلمروی فیزیکی ارائه میشود. برای این منظور یک درونیابی بین مختصات مشخص شده نقاط روی مرز و نقاط درونی در محیط حل صورت می گیرد. جهت درونیابی ابتدا مختصات نقاط بیشینه و کمینه در یک راستا بر روی مرزها را از هم کم کرده و سپس بر اساس تعداد سلولهای موجود در آن راستا، مختصات نقاط درونی به دست میآید؛ بنابراین بهراحتی میتوان مختصات نقاط درونی در یک محیط حل را که دارای مختصات نقاط مرزی معلوم هستند را مشخص کرد و شبکهی ایجادشده را به عنوان شبکهی حل در نظر گرفت. در این پژوهش از این روش برای تولید شبکه در مرحلهی اولیهی بهینهسازی، استفاده شده است (Hoffmann & Chiang, 2000).

شبکهسازی با استفاده از معادلات دیفرانسیل

روش شبکهسازی مورد بحث در این قسمت روش مبتنی بر معادلات دیفرانسیل پارهای است. در این روش یک دستگاه معادله دیفرانسیل پارهای حل میشود تا نقاط شبکه در فضای فیزیکی به دست آید، درحالی که فضای محاسباتی یک شبکه مستطیلی با فواصل یکنواخت است. این کروه از روش ها بسته به نوع معادلهی دیفرانسیل مورد استفاده به روش های معادلات دیفرانسیل بیضوی، سهموی و هذلولوی دستهبندی میشوند. با توجه به توسعه نسبی و کاربرد بیشتر شبکهی بیضوی، در این پژوهش از آن استفاده شده است (Chiang, 2000).

هرگاه مرزهای فیزیکی مشخص باشند، تولید شبکهی بیضوی بسیار مؤثر است. دستگاه معادلات دیفرانسیل بیضوی به صورت معادلات لاپلاس یا معادلات پوآسون معرفی میشود که از حل آن، مختصات شبکه در فضای فیزیکی به دست میآید. برای حل معادلات دیفرانسیل پارهای بیضوی از روشهای تکراری مختلف مانند روش فوق تخفیف پی در پی نقطه به نقطه استفاده میشود.

در اینجا پیش از پرداختن به فرآیندهای ریاضی، آغاز عملیات ریاضی، نخست به اصول تولید شبکه پرداخته میشود. شایانذکر است که معادله جریان پتانسیل برای مسائل دائم دوبعدی به معادلات دیفرانسیل پارهای بیضوی تبدیل میشود. اگر در یک شبکه مستطیلی، مقدار تابع جریان در مرزها معلوم باشد، توزیع تابع جریان در نقاط داخلی با استفاده از روشی تکراری به راحتی به دست میآید. حل این مسأله، همان طور که در قسمت حل معادلهی حاکم در شبکههای مستطیلی تشریح شد، خطوط جریان را میدهد. حال اگر در داخل قلمروی حل جریان ورودی دیگری نیز وجود داشته باشد، خطوط جریان تغییر خواهند کرد و میتوان آنها را به سمت منطقه خاصی سوق داد. بر این اساس با در نظر گرفتن حرکت جریان در راستای محور X و Y دو دسته خطوط جریان تقریباً عمود برهم به دست میآید که میتواند به عنوان خطوط شبکه در محیط حل تلقی شوند. این و y نقاط شبکه در فضای فیزیکی هستند؛ بنابراین در یک فضای بسته، توزیع نقاط روی مرزها مشخص می شود و از حل مجموعهای از معادلات بیضوی توزیع نقاط داخلی به دست می آید. به عنوان مثال برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیلی پارهای زیر می توان به تر تیب گفته شده اقدام نمود:

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = 0 \tag{(97-9)}$$

$$\eta_{xx} + \eta_{yy} = 0 \tag{(9.4)}$$

معادلات بالا، مختصات در قلمرو محاسباتی است. معادلات (۳-۳۶) و (۳-۳۳) را میتوان با روش تکراری فوق تخفیف پی در پی نقطه به نقطه حل کرد. در هر صورت محاسبات باید در یک قلمرو مستطیلی با فواصل یکنواخت انجام شود. برای تبدیل معادلات دیفرانسیل پارهای بیضوی، متغیرهای وابسته و مستقل باید جابهجا شوند. روابط ریاضی مربوط به این کار در پیوست ۱ آورده شده است. با به کارگیری معادلات ارائهشده در پیوست، معادلات بیضوی (۳-۳۳) و (۳-۳۷) به صورت زیر نوشته می شوند.

$$ax_{\xi\xi} - 2bx_{\xi\eta} + cx_{\eta\eta} = 0 \tag{(7.4-7)}$$

$$ay_{\xi\xi} - 2by_{\xi\eta} + cy_{\eta\eta} = 0 \tag{(3.1)}$$

که در این معادلات a، b و c عبارتند از:

$$a = x_n^2 + y_n^2 \tag{(f-r)}$$

$$b = x_{\xi} x_{\eta} + y_{\xi} y_{\eta} \tag{(f1-f)}$$

$$c = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2 \tag{(fT-T)}$$

دستگاه معادلات بیضوی (۳-۳۸) و (۳۹-۳) در فضای محاسباتی (ξ, η) حل میشوند تا مختصات نقاط شبکه در فضای فیزیکی (x, y) به دست آید. از آنجا که این معادلات غیرخطی هستند، باید از یک روش خطیسازی استفاده کرد که در اینجا برای سادگی، از روش تأخیری^۱ برای ضرایب استفاده میشود، بدین معنی که ضرایب a و c از نتایج گام تکرار قبلی محاسبه میشوند.

به طور کلی سه نوع قلمروی فیزیکی برای محیطهای حل تعریف میشود که عبارتند از:

- ۱. ناحیه همبند ساده
- ۲. ناحیه همبند دوگانه

¹Lagging of The Cefficients

۳. ناحیه همبند چندگانه

که با توجه به شرایط مرزی مطرحشده در این پژوهش، قلمروی فیزیکی از نوع ناحیه همبند ساده است. بنا به تعریف ناحیه همبند ساده ناحیهای است که بتوان آن را در یک نقطه متمرکز کرد؛ به عبارت دیگر ناحیهای را همبند ساده میگویند که هیچ جسمی در محیط حل وجود نداشته باشد. حال با در نظر گرفتن روابط (۳-۳۸) و (۳-۳۹)، معادلهی جبری مورد نیاز جهت به دست آوردن مختصات شبکهی محاسباتی در محیط حل فیزیکی بر اساس روش فوق تخفیف پی در پی نقطه به نقطه ارائه میشود. از آنجایی که در قسمت حل معادلهی حاکم در شبکههای مستطیلی روش به دست آوردن معادلات جبری با این روش به طور کامل توضیح داده شد، در این قسمت شکل نهایی معادلات نهایی (معادلهی (۳-۴۳) و (۳-۴۹)) ارائه میشود.

$$\begin{aligned} x_{i,j}^{k+1} &= (1-\omega) x_{i,j}^{k} \\ &+ \frac{\omega}{2(\frac{a}{\Delta\xi^{2}} + \frac{c}{\Delta\eta^{2}})} \bigg[\frac{a}{\Delta\xi^{2}} \big(x_{i+1,j}^{k} + x_{i-1,j}^{k+1} \big) + \frac{c}{\Delta\eta^{2}} \big(x_{i,j+1}^{k} + x_{i,j-1}^{k+1} \big) \\ &- \frac{b}{2\Delta\xi\Delta\eta} \big(x_{i+1,j+1}^{k} - x_{i+1,j-1}^{k} + x_{i-1,j-1}^{k+1} - x_{i-1,j+1}^{k} \big) \bigg] \\ y_{i,j}^{k+1} &= (1-\omega) y_{i,j}^{k} \\ &+ \frac{\omega}{2(\frac{a}{\Delta\xi^{2}} + \frac{c}{\Delta\eta^{2}})} \bigg[\frac{a}{\Delta\xi^{2}} \big(y_{i+1,j}^{k} + y_{i-1,j}^{k+1} \big) + \frac{c}{\Delta\eta^{2}} \big(y_{i,j+1}^{k} + y_{i,j-1}^{k+1} \big) \\ &- \frac{b}{2\Delta\xi\Delta\eta} \big(y_{i+1,j+1}^{k} - y_{i+1,j-1}^{k} + y_{i-1,j-1}^{k+1} - y_{i-1,j+1}^{k} \big) \bigg] \end{aligned}$$
(FF-T)

در این روابط a، b و c بر اساس روابط (۴۰-۴۰) تا (۴۲-۴۲) محاسبه می شود. با داشتن مختصات مرزها و حل معادلات بالا در قلمروی محاسباتی مختصات تمامی نقاط شبکه در محیط حل فیزیکی به دست می آید (Hoffmann & Chiang, 2000).

در نهایت جهت حل جریان پتانسیل، در محیط حل غیرمستطیلی، ابتدا تولید شبکهی مورد نظر انجام می شود. به همین منظور شبکهی حل فیزیکی به دو قسمت تقسیم می شود (شکل ۳-۱)؛ قسمت اول که سطح بزرگ تری دارد قسمت ورودی کلی و قسمت دوم شامل سطح کوچک تر، مقطع انقباض و قسمت بهینه شده فرض می شود. جهت تولید شبکه با سرعت و دقت بیشتر، در قسمت ورودی کلی، از روش جبری و در قسمت بهینه شده از روش حل معادلات دیفرانسیل استفاده می شود. در این روش حل معادلات دیفرانسیل ابتدا به نقاط روی مرز مختصات خط جریان مورد نظر و به تمامی نقاط درونی شبکه یک مقدار اولیه اختصاص داده می شود و پس از تبدیل روابط (۳-۴۰) تا (۳-۴۲) به معادلات جبری بر اساس روش اختلاف محدود و تعیین مقادیر $\delta \Lambda$ و Λ مقادیر متغیرهای b ،a و c به دست میآید. بعد از معلوم شدن این مقادیر، معادلات (۳-۴۳) و (۴۴-۴۳) در کل قلمروی محاسباتی حل میشود، در نهایت با تکرار این فرآیند، مختصات نقاط شبکه تعیین میشود.



شکل ۳-۱- نمایش محیط حل فیزیکی در مسألهی بهینهسازی

بعد از معلوم شدن شبکهی حل، بایستی معادلهی (۳-۲۰) در درون قلمروی محاسباتی حل شود. لذا ابتدا بر اساس روابط (۳۱-۳) تا (۳۵-۳) و روابط پیوست ۱، مقادیر متریکها معلوم می شود و پس از آن معادلهی (۳۰-۳) بر اساس روش فوق تخفیف پی در پی نقطه به نقطه، به یک معادلهی جبری تبدیل شده و در قلمروی محاسباتی قابل حل است.

۳-۳-۲ تغییر متغیرهای بهینهسازی

بعد از بررسی روشهای به دست آوردن خطوط جریان در محیطهای حل گوناگون، در این قسمت روش تغییر متغیرهای بهینهسازی جهت انطباق یک خط جریان بر محیط حل تشریح میشود. به همین منظور ابتدا یک خط جریان جهت انطباق بر مرز جامد انتخاب میشود. در مرحلهی اول بهینهسازی با فرض تیزگوشه بودن مقطع انتقالی، محیط حل فیزیکی، مستطیلی بوده و بر اساس این محیط به راحتی میتوان تمامی خطوط جریان حاکم بر مسأله را به دست آورد. پس از به دست آوردن مختصات این خطوط، خط جریان مورد نظر بر مرز جامد منطبق میشود. برای انجام این کار همان طور که در شکل ۳-۲ مشاهده میشود، با توجه به قیدهای تعیینشده در صورت مسأله، خط مرز جامد و خط جریان مورد نظر از محل قیدها جدا میشود. در اینجا از خطوط جریان متناظر با ۵٪ و ۹۵٪ دبی به عنوان خط مبنا جهت انطباق بر مرز جامد استفاده شده است.



شکل ۳-۲- طریقهی انطباق یک خط جریان بر مرز جامد

همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود پس از به دست آوردن خط جریان (خط آبی)، مختصات نقاط آن با یک جابه جایی بر روی مرز اولیه (خط سیاه) منتقل می شود و سپس یک خط جدید به عنوان مرز جامد (خط قرمز) برای مرحلهی بعد بهینه سازی به دست می آید. این فر آیند تا جایی ادامه پیدا می کند که تفاوت بین مرز جدید (خط قرمز) و مرز موجود (خط مشکی) کمتر از معیار همگرایی شود. بر این اساس با تغییر مختصات نقاط شبکه بر روی مرز، انطباق یک خط جریان بر مرز جامد یا همان معیار بهینه سازی صورت می گیرد.

۳-۳-۳ بررسی خط جریان بهینه

بعد از انجام مراحل توضیح داد شده در قسمت قبل، خط جریانی که دارای بیشترین تأثیر بر تابع هدف اصلی که در اینجا، کمینه کردن افت فشار است، به دست میآید. به همین منظور بایستی بر اساس خطوط جریان مختلف شکل مرزها را به دست آورد و سپس با کمک یک نرمافزار جانبی به مدل کردن تابع هدف اصلی جهت مشخص کردن خط جریان بهینه اقدام کرد. در این پژوهش از نرمافزار MopenFOAM با توجه به توانایی بالا آن در مدلسازی، استفاده شده است. در ادامه به معرفی این نرمافزار پرداخته شده است.

معرفی نرمافزار OpenFOAM

نرمافزار OpenFOAM یک جعبهابزار دینامیک سیالات محاسباتی است که قادر به مدل سازی هر نوع مسأله شامل معادلات دیفرانسیل جزیی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسائل ساده تا بسیار پیچیده است. از نمونه موارد قابل مدل سازی توسط این نرمافزار می توان مسأله های مربوط به جریان های آرام و آشفته، یک فاز و چندفاز، انتقال حرارت، واکنشهای شیمیایی، الکترومغناطیسی و مکانیک جامدات و همچنین به مسألههای مربوط به معادلات اقتصادی نظیر قیمتگذاری و مالی اشاره نمود. این نرمافزار توسط OpenCFD Ltd تحت مجوز عمومی گنو^۱ ایجاد شده و به صورت منبع باز^۲ و آزاد موجود است. این مطلب بدان معناست که کد آن به صورت رایگان در اختیار همه قرار دارد و به سهولت از شبکه جهانی اینترنت قابل دریافت است؛ به علاوه به علت آزاد یا باز بودن منبع کد مذکور امکان بررسی تمام جنبههای کد نویسی از جمله تغییر و توسعه آن برای کرابر فراهم خواهد بود.

هسته انعطاف پذیر و کارآمد OpenFOAM از مجموعهای از کدهای نوشته شده به زبان ++C ایجاد شده است. این مجموعه ها در ایجاد حلگرهایی^۳ برای مدل سازی مسائل مطرح در مهندسی مکانیک و با ایجاد ابزارهایی برای اعمال پیش پردازش و پس پردازش، همچنین به وجود آوردن کتابخانه هایی به منظور ایجاد جعبه ابزارهایی که در حلگرها قابل دسترسی باشند، مورد استفاده قرار گرفته اند. این نرمافزار با تعدادی حلگر از پیش ساخته، مثال های کاربردی و کتابخانه ارائه کرده است که میتواند به عنوان یک بسته مدل سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که علاوه بر باز و آزاد بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب حلگرها، مثال های کاربردی و کتابخانه ارائه کرده است که میتواند به عنوان یک بسته مدل سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که علاوه بر باز و آزاد بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب حلگرها، مثال های کاربردی و کتابخانه ها نیز وجود دارد. نرمافزار MOpenFOAM از روش عددی حجم محدود برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزیی استفاده می کند که در آن به هر شبکه بندی غیر ساختاریافته سه بعدی، سلول های چندوجهی نسبت داده می شود. در این نرمافزار، برای حل جریان سیال از الگوهای تکرار سرعت فشار ضمنی استفاده می شود. موازی سازی^۴ در حل و بخش بندی دامنه ی حل از مبانی به کاررفته در MOpenFOAM است بنابراین به طور کلی حلگرها بدون نیاز به کد نویسی خاصی برای حل موازی قابل توسعه می باشند.

از این رو که این نرمافزار یک کد منبع باز یا آزاد است که به طور پیشفرض بر روی سیستمعامل منبع باز مبتنی بر لینوکس نصب میشود، برای آشنایی بیشتر با این مفاهیم، در ادامه توضیحات مختصری در خصوص آن ارائه میشود.

شناخت ساختار کلی و عملکرد برنامه برای کار با نرمافزاری که امکانات مدلسازی را برای مسائل مختلف فیزیکی فراهم میسازد، مسألهای اساسی است. در این قسمت، سعی در آشنا نمودن مقدماتی کاربر با این

¹GNU ²OpenSource ³Solvers ⁴Parallel Processing نرمافزار و ساختار آن میشود. در هر یک از نمونههای مورد نظر ابتدا صورت مسألهای مطرحشده، سپس با معرفی دستورها و بخشهای مختلف مدلسازی در نرمافزار، گامهای لازم برای شناخت چگونگی مدلسازی مسأله مورد نظر بیان می گردد. فرآیند حل مسأله به کمک سه مرحلهی پیشپردازش^۱، اجرا^۲ و پسپردازش^۳ صورت می گیرد. در مدلهای نمونه این فصل، کلیه دستورهای لازم برای انجام این مراحل، پیشبینی و ارائه شده است. کاربر میتواند با استفاده از آنچه در راهنمای نرمافزار مطرحشده، پس از نصب برنامه مراحل مدلسازی را با رعایت ترتیب دستورهای ذکرشده به صورت گام به گام انجام دهد و این مثالها را به شیوهی خودآموز دنبال نماید.

در خودآموز نرمافزار OpenFOAM نمونههای مختلفی از مسائل، به منظور آموزش مدلسازی شرایط مختلف شامل حالتهای سیال، هندسه و نوع جریان و همچنین انواع شرایط مرزی آورده شده است که موارد استفاده از هر یک از حلگرهای موجود در نرمافزار مذکور را به خوبی نشان میدهد. در این پژوهش ابتدا بایستی بر اساس روابط ارائهشده، نوع رژیم جریان را مشخص کرد و سپس بر اساس آن نوع حلگر مناسب در این نرمافزار را تعیین کرد. به همین منظور در ادامه ابتدا به بیان روابط حاضر در تعیین رژیم جریان، پرداخته می شود و سپس به بررسی مسائل خاص در آشفتگی پرداخته خواهد شد (2013)

رژیم جریان

بر طبق تعریف رژیم جریان در مکانیک سیالات به دو دستهی اصلی، رژیم جریان آرام و آشفته تقسیم بندی می شود. در رژیم جریان آرام، سیال به صورت منظم و تحت لایه ها و مسیرهای مشخص و منظم حرکت می کند، از همین رو برای توصیف این نوع جریان از عبارت Laminar به معنای طبقه طبقه شده استفاده می شود. در یک جریان آرام شکل لایه های سیال کاملاً مشخص است و مسیر حرکت سیال دارای انحناهای ملایم می باشد. در چنین جریانی، مولکول های سیال کاملاً مشخص است و مسیر حرکت همواره در داخل لایه والیه می باشد. در چنین جریانی، مولکول های سیال با پیشروی در طول مسیر حرکت، همواره در داخل لایه اولیه ی خود باقی می مانند. همچنین در این جریان مولکول های نزدیک دیواره، کندترین مولکول ها هستند که در عین حال باقی می مانند. همچنین در این جریان مولکول های نزدیک دیواره، کندترین مولکول ها هستند که در عین حال نزدیک ترین دما را به دمای دیواره دارند؛ اما معمولاً در اغلب جریان های مهندسی، وضع به همین منوال باقی نزدیک ترین دما را به دمای دیواره دارند؛ اما معمولاً در اغلب جریانهای مهندسی، وضع به همین منوال باقی نمی ماند، بلکه تجربه نشان داده است که با حرکت سیال به سمت پاییندست جریان و همزمان با بلوغ جریان

- ¹Pre-Processing
- ²Run
- ³Post-Processing

و انباشته شدن اغتشاشات جریانی بر روی یکدیگر و پس از طی شدن مراحل میانی که اصطلاحاً مرحلهی گذر جریان نامیده میشود، یک جریان آشفته رخ میدهد.

از آن جا که فیزیک حاکم بر جریانهای آشفته به خوبی درک نشده است و طیف وسیعی از عقاید متفاوت در زمینه سینماتیک و دینامیک این جریانها وجود دارد، به سختی میتوان در میان محققینی فردی را یافت که تعریف دقیق و روشنی از این جریانها ارائه داده باشد؛ بنابراین در داخل هر یک از نظرات ارائهشده، تنها میتوان بخشی از حقیقت موجود در مورد جریانهای آشفته و فیزیک حاکم بر آنها را یافت. با یک بررسی جامع در مورد تعاریفی که برای جریانهای آشفته ارائه شده است و جمعآوری نقطه نظرات محققین امر در این زمینه، میتوان برخی از مهمترین خصوصیات جریانهای آشفته را به صورت زیر بیان نمود:

- بینظمی مکانی و زمانی
- طیف پیوسته مکانی و زمانی
 - اعداد رينولدز معمولاً بالا
- اضمحلال افزایشیافتهی^۱ انرژی و ممنتوم
- سه بعدی بودن (حتی در جریانهایی که ظاهراً دوبعدی میباشند ولی با اندکی بررسی دقیق تر می توان دریافت که تمامی جریانهای آشفته ذاتاً جز جریانهای سه بعدی محسوب می گردند)
- حرکت غالب چرخشی^۲ و مملو بودن از ادیهای آشفتگی با ابعاد و اندازههای بسیار متنوع و گسترده
 - تناوبی بودن

البته خصوصیات جریانهای آشفته بسیار متعدد است و در عناوین مزبور تنها برخی از مهمترین خصوصیات جریانهای آشفته ذکر شده است (Saniei Nejad, 2010). همچنین از آنجایی که بسیاری از جریانهای طبیعی رژیم آشفته دارند، در ادامه معیارهای تشخیص جریان آرام از جریان آشفته بررسی می شود.

معیارهای تشخیص جریان آرام از جریان آشفته معمولاً برای تشخیص آرام یا آشفته بودن جریانهای مهندسی از اعداد بدونبعد استفاده میشود. به عنوان نمونه در جریانهای جابهجایی اجباری یکفاز^۳، معمولاً عدد رینولدز مهم^ترین معیار تشخیص یک جریان آرام

- ¹Increased Dissipation
- ²Vorticial

³Single Phase Forced Convection Flows

از یک جریان آشفته میباشد. در کتابهای مکانیک سیالات کلاسیک اشاره شده است که هر جریانی بسته به نوع سیال به کاررفته در آن، اندازهی سرعت جریان عبوری و همچنین طول مقیاس هندسی مسأله، در یک عدد رینولدز خاص (که آن را اصطلاحاً رینولدز بحرانی مینامند) به حالت آشفته میرسد. به طور کلی جهت تعیین آشفتگی یا آرام بودن یک جریان، جریانهای سیالاتی به جریانهای جابهجایی اجباری، جریانهای جابهجایی آزاد^۱ و جریانهای توأم با تغییر فاز^۲ تقسیم میشوند که در ادامه به بررسی هر یک پرداخته میشود.

جریانهای جابهجایی اجباری معمولاً به جریانهای داخلی مانند جریان ورودی به یک آبگیر و جریانهای خارجی مانند جریان حول یک جسم جامد، تقسیم میشوند؛ در این جریانها با استفاده از آزمایشها تجربی و یا روشهای پیچیدهی عددی مقادیر صریحی برای اندازهی رینولدز بحرانی آنها بیان میشود. تجربه نشان داده است که معمولاً برای جریانهای خارجی اگر $2000 \times 5 \times 8$ و یا 20000 < 8 باشد، جریان از نوع آشفته و در جریانهای داخلی اگر $2000 \times 6 \times 8$ برقرار باشد جریان از نوع آشفته خواهد بود. در آشفته و در جریانهای داخلی اگر $2000 \times 8 \times 8$ برقرار باشد جریان از نوع آشفته خواهد بود. در مافته و در جریانهای داخلی اگر $2000 \times 8 \times 8 \times 8$ برقرار باشد جریان از نوع آشفته خواهد بود. در مافته و در جریانهای داخلی اگر $2000 \times 800 \times 10^{-1}$ برقرار باشد جریان از نوع آشفته خواهد بود. در مافته و در تعریف عدد رینولدز، PVL/μ یا داده است کلی در تعریف عدد رینولدز، و PVL/μ و یا قطر هیدرولیکی (D_h) برای معبر جریان در جریانهای داخلی و و یا داخلی در جریانهای داخلی و و یا داده ای داخلی در براین و و میتواند بیانگر و و یا در براین بوده و میتواند بیانگر و و یا در برای باشد جریان از نوع آشفته خواهد در در در در در در بریانهای داخلی اگر را و یا قطر هیدرولیکی (D_h) برای معبر جریان در جریانهای داخلی و و یا جریانهای در براین در جریانهای داخلی داخلی در راستای صفحه در دینولدز، در این در به در در ای در براین معبر جریان در جریانهای داخلی و و یا جریانهای درون کانالهای روباز باشد.

در جریانهای جابهجایی اجباری که در آنها یک عامل خارجی مانند فن، پمپ و غیره عامل اصلی ایجاد جریان میباشد، عدد رینولدز اصلیترین فاکتور تعیینکنندهی آرام یا آشفته بودن جریان است؛ اما در جریانهای جابهجایی آزاد (که نمونهای از آن را میتوان در حرکت هوای گرم روی بخاری به سمت بالا و یا جریان هوای سرد به سمت پایین مشاهده نموده و معمولاً اختلاف چگالی علت اصلی تشکیل این نوع جریانها میباشد) عدد بدون بعد رایلی^۳ نقش اصلی را در تعیین آرام یا آشفته بودن جریان ایفا میکند؛ عدد بدون بعد رایلی را میتوان به صورت رابطهی زیر تعریف نمود:

$$Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T L^3}{\mu \alpha} \tag{4a-7}$$

که در آن، q بیانگر چگالی سیال، g شتاب ثقل زمین، β ضریب انبساط حرارتی، ΔT اختلاف دمای بین دمای صفحه و دمای جریان آزاد، L طول مشخصهی جریان، μ ویسکوزیته جریان و α بیانگر ضریب پخش حرارتی[†] است. در نهایت آزمایشها تجربی نشان دادهاند که چنانچه برای یک صفحه تخت، عدد رایلی در محدودهی

¹Free (Natural) Convection Flows

²Phase Change FLows

³Non-Dimensional Rayleigh Number

⁴Thermal Diffusion Coefficient

 $Ra > 10^8 \sim Ra$ قرار داشته باشد، در این صورت جریان جابهجایی آزاد مورد نظر را میتوان به عنوان جابهجایی آزاد مورد نظر ا

در مسائلی که با تغییر فاز مواجه میباشیم میتوان با استفاده از یک سری اعداد بدون بعد مناسب، معیارهای جدیدی برای تعیین وضعیت و رژیم جریان تعریف نمود. به عنوان مثال در یک چگالش فیلمی^۱ که معمولاً در اثر تماس بخار آب اشباع با یک صفحهی سرد ایجاد می گردد، میتوان به وضوح سه ناحیهی آرام، گذرا و آشفته را در بخار آب میعانیافته مشاهده نمود. برای یک جریان فیلم مایع که در اثر تغییر فاز روی یک صفحه تشکیل مده ادر بخار آب میعانیافته مشاهده نمود. برای یک جریان فیلم مایع که در اثر تغییر فاز روی یک صفحه تشکیل مده ادر بخار آب میعانیافته مشاهده نمود. برای یک جریان فیلم مایع که در اثر تغییر فاز روی یک صفحه تشکیل مده است، میتوان یک عدد رینولدز بر اساس عرض صفحه سرد، سرعت متوسط جریان، چگالی فاز مایع، ضخامت مایع فیلم و ویسکوزیته فیلم مایع تعریف کرد و با مقایسه عدد رینولدز به دست آمده، آشفتگی را در این جریانها بررسی کرد.

با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش و بر اساس خصوصیات جریان، بیش ترین رژیم جریان استفاده شده در این پژوهش از نوع آشفته بوده و بر این اساس کلیات جریان آشفته که در مدل سازی با نرم افزار OpenFOAM مورد نیاز است، در ادامه بررسی می شود (Saniei Nejad, 2010).

جريان آشفته

مدلسازی جریان آشفته یکی از سه عنصر کلیدی در دینامیک سیالات محاسباتی است. نظریههای بسیار دقیق ریاضی برای تکامل دو عنصر کلیدی دیگر یعنی شبکهسازی و الگوریتم حل ایجاد شده است. ابداع مدل ریاضی که رفتار فیزیکی جریانهای آشفته را به شکل تقریبی توضیح دهد (به لحاظ طبیعت آن) در مدلسازی جریان آشفته از دقت بالایی برخوردار نیست، اما در حقیقت این موضوع، شگفت آور نیست، زیرا هدف ما بر آورد تقریبی پدیدهی بسیار پیچیدهای است. حال دو موضوع مدل ایده آل جریان آشفته و پیچیدگی مدل به عنوان دو موضوع کلیدی در ادامه بررسی می شود.

مدل ایدهآل جریان آشفته

به نظر میرسد، ترکیبی از سادگی و بینش عمیق فیزیکی، وجه مشترک مردان بزرگی مانند پرانتل، تیلور و فنکارمان بوده است. اگر کارهای ایشان به عنوان محک استفاده شود، مدل ایدهآل باید با کمترین میزان پیچیدگی، بتواند اساس فیزیکی جریان آشفته را در بر بگیرد. این توصیف از مدل ایدهآل به عنوان توصیف اساسی در مدلسازی عددی جریان آشفته مطرح میشود.

¹Film Condensation

میزان پیچیدگی مدل جریان آشفته

در کنار هر گونه ملاحظات فیزیکی، جریان آشفته ذاتاً سه بعدی و تابع زمان است. بنابراین برای توصیف کامل جریان آشفته اطلاعات زیادی مورد نیاز است. خوشبختانه، برای هر ویژگی جریان، معمولاً به چیزی کمتر از پیشینه زمانی در همه مختصات مکانی نیاز است. بنابراین با توجه به بیان کیفی، زمانی که میزان جزئیات مورد نیاز معلوم شود، متعاقباً درجهی پیچیدگی مدل نیز ظاهر می گردد. برای نیل به این اهداف، در چهارچوب تعالیم پرانتل، تیلور و فن کارمان همواره سعی خواهد شد تا حتی الامکان رویکردی از نظر مفهومی ساده جهت مدل سازی جریان آشفته به کار رود تا دشواریهای عددی و محاسباتی کمتر شوند (Wilcox, 2006).

ویژگیهای عمومی جریان آشفته

تعریف بنیادی در سال ۱۹۳۷، فن کارمان، در سخنرانی همایش به مناسبت بیست و پنجمین یادبود ویلبر رایت تحت عنوان «آشفتگی» به نقل از تیلور، آشفتگی را به شرح زیر تعریف نمود:

"آشفتگی، حرکت منظمی است که عموماً در سیالات، چه در حالت گازها و چه در حالت مایعات، هنگامی ظاهر میشود که جریانی از سیال در تماس با سطح جامدی گذر کند و یا جریانهای سیال مجاور از کنار یکدیگر یا از روی هم عبور نمایند."

با پیشرفت شناخت در مورد جریانهای آشفته، پژوهش گران اصطلاح "حرکت نامنظم" را بسیار نارسا تشخیص دادند. به بیان سادهتر، حرکت نامنظم حرکتی است که نوعاً نامتناوب باشد و نمی تواند به صورت تابعی سرراست از زمان و مختصات مکانی تعریف شود. حرکت نامنظم همچنین ممکن است به شدت و با حساسیت به شرط اولیه وابسته باشد. نارسایی در تعریف تیلور فنکارمان از آشفتگی، این واقعیت است که جریانهای غیرآشفته موجودند که می توان آنها را نامنظم توصیف نمود.

جریان آشفته در واقع نامنظم است از این نظر که میتوان آن را با قوانین احتمالات توصیف نمود. اگرچه خاصیتهای لحظهای جریان آشفته به شدت نسبت به شرایط اولیه حساس است ولی متوسطهای آماری این خاصیتهای لحظهای چنین نیستند. برای بیان تعریف دقیقتری از این پدیده، هینز در سال ۱۹۷۵ تعریف تجدید نظرشده زیر را ارائه میدهد:

"آشفتگی، شرایطی نامنظم از جریان است که در آن کمیتهای مختلف، تغییراتی اتفاقی در زمان و مکان نشان میدهند به نحوی که مقدارهای متوسط آماری متمایزی از آنها را میتوان تشخیص داد." برای تکمیل تعریف جریان آشفته، بردشو، این عبارت که جریان آشفته دارای دامنه گستردهای از مقیاسها است را به آن اضافه میکند. مقیاسهای زمانی و طولی جریان آشفته با فرکانسها و طول موجهایی بیان میشوند که با تحلیل فوریه تاریخچهی زمانی جریان آشفته آشکار میگردند. طبیعت نامنظم جریان آشفته در تضاد با جریان آرام قرار دارد و نام جریان آرام از نظر تاریخی به لحاظ قشرها و لایههای همواری است که در حرکت اینگونه جریانها قابل تصور است. در توصیف جریان آشفته، بسیاری از پژوهشگران جریان آشفته را به عنوان حرکت پیچکها یاد میکنند این پیچکها، حرکتهایی محلی و

ر پررس رای بریان در بای در دامنه در دامنه ای از اندازه های مختلف ظاهر می شوند و موجب بروز آمیختگی چرخشی هستند. پیچکهای آشفته در دامنه ای از اندازه های مختلف ظاهر می شوند و موجب بروز آمیختگی نمایان جریان و ایجاد تنشهای آشفته، مؤثر می گردند (که نتیجه «آمیختگی» اندازه حرکت هستند) که در مقایسه با مقادیر مربوط به جریان آرام بسیار بزرگتر می باشند.

ناپایداری و غیرخطی بودن جریان آشفته

تحلیل جوابهای معادله ناویه-استوکس و به ویژه شکل آن در لایهی مرزی نشان میدهد که آشفتگی به صورت گونهی ناپایداری در جریان آرام رشد میکند. برای تحلیل پایداری جریانهای آرام، در روشهای کلاسیک به خطی کردن معادلههای حرکت، پرداخته میشود. اگرچه تئوریهای خطی تا حدی در پیشبینی شروع ناپایداریهایی که نهایتاً به آشفته شدن جریان منجر میشود، موفقیت داشتهاند، امّا غیرخطی بودن ذاتی معادلههای ناویه-استوکس مانع توصیف تحلیلی کامل روند واقعی این گذار شده و تحلیل حالت کاملاً آشفته جریان را با این روش غیرممکن میسازد. به بیان ریاضی، برای یک سیال حقیقی (سیال لزچ) ناپایداریها، عمدتاً حاصل برهمکنش بین جملههای غیرخطی و جملههای لزجی در معادلههای ناویه-استوکس هستند. این برهمکنش بسیار پیچیده است زیرا چرخش، کاملاً سه بعدی و وابسته به زمان است.

از دید کلی، غیرخطی بودن معادلههای ناویه-استوکس باعث ایجاد برهم کنش بین نوسانهایی با طول موج و جهتهای متفاوت می گردد. این طول موجهای حرکتی معمولاً از اندازهی بیشینهای که قابل مقایسه با پهنای جریان است تا اندازهی کمینهای که با اتلاف انرژی لزجی رابطه دارد، تغییر می کند. فرآیند اصلی فیزیکی که باعث گسترش حرکت با دامنه وسیعی از طول موجها می گردد، کشیدگی گردابی^۱ است. اگر عناصر گرداب در جهتی قرار گیرند که گرادیان سرعت متوسط بتواند آنها را گسترش دهد، آشفتگی، انرژی کسب می کند. از همه مهم تر، طول موجهایی که در مقایسه با پهنای جریان متوسط، خیلی کوچکتر نباشند با شدت زیادی با

¹Vortex Stretching

جریان متوسط تعامل میکنند. در نتیجه، آشفتگی با مقیاس بزرگتر، بیشترین انرژی را حمل نموده و عمدتاً مسئول افزایش پخش و حضور تنشها است. پیچکهای بزرگتر به نوبه خود به شکل اتفاقی عناصر گرداب را که شامل پیچکهای کوچکترند، گسترش داده و انرژی را آبشاروار به آنها وارد میکنند. در طول موجهای کوچکتر، انرژی از طریق لزجت، اتلاف می گردد؛ درحالیکه نرخ اتلاف انرژی با حرکت طول موجهای بزرگ در ابتدای این روند آبشاروار، تعیین و تنظیم می گردد، اما طول موجهای کوچکتر به سادگی با آنها تفاقی عاقری می می

جنبههای آماری

طبیعت وابسته به زمان آشفتگی نیز به مهارناپذیری آن کمک مینماید. پیچیدگیهای آن با دخیل نمودن یک بعد اضافی فراتر میرود. مشخصهی آشفتگی، نوسانهای اتفاقی آن است که بنابراین کاربرد روشهای آماری را برای تحلیل آن اجباری مینماید. از سوی دیگر این جنبه، واقعاً از دید مهندسی مشکلی ایجاد نمی کند. حتی اگر تاریخچهی کامل جریان آشفته وجود داشته باشد، معمولاً ویژگیهای مورد نظر جریان در زمان، انتگرالگیری میشود تا متوسطهای زمانی با مقادیر متوسط حاصل گردد. از طرف دیگر همان طوری که در ادامه بیان میشود، عملیات متوسط یابی زمانی، منتهی به ایجاد جملاتی در معادلههای حرکتی میگردد که نمی توان آنها را بدون دانش قبلی تعیین نمود (Wilcox, 2006).

مدلسازی عددی جریان آشفته

به طور کلی در مدلسازی عددی آشفتگی چند دیدگاه و نقطهنظر متفاوت وجود دارد:

- برخی روش ها مستقیماً معطوف به دینامیک حاکم بر نوسانات آشفتگی و همین طور برهمکنش میان زیرساختارهای آشفتگی (بالاخص میان ادیها و در طیف گسترده و متنوع اندازهی آنها) شدهاند که درعینحال بسیار هزینهبر هستند. از معروفترین و پرکاربردترین این روش ها میتوان به روش «شبیه سازی گردابه های بزرگ^۱» و روش «شبیه سازی عددی مستقیم^۲» اشاره نمود.
- ۲. برخی روشها با استفاده از دینامیک خاص حاکم بر هر مسألهی فیزیکی، معطوف به حل برخی مسائل خاص شده و لذا این روشها دارای محدودهی کاربردی مشخص و محدودی هستند و اغلب هزینهی

¹Large Eddy Simulation (LES)

²Direct Numerical Simulation (DNS)

محاسباتی اندکی نیز به دنبال خواهند داشت. از مهم ترین این روشها می توان به روشهای مر تبط با مفهوم «طول اختلاطی^۱» که بیشتر تحت عنوان مدلهای صفر معادلهای مشهور می باشند، اشاره نمود.

۳. برخی نیز سعی دارند تا در کنار حداقل نگهداشتن هزینهی محاسباتی، طیف وسیعی از فیزیک جریان را نیز در سیطرهی توانمندی محاسباتی خود داخل نمایند. از مهم ترین این روشها و البته معروف ترین آنها می توان به روشهایی که اصطلاحاً از مدلهای ناویه استوکس متوسط گیری شده به روش رینولدز^۲ یا به طور خلاصه «مدلهای RANS» اخذ شده اند، اشاره نمود.

در دیدگاه اول با توجه به توانایی معادلات لحظهای ناویه۔استوکس در توصیف کامل هر نوع جریان اعم از آرام و آشفته، از این معادلات برای مدلسازی انواع جریانهای آشفته استفاده می شود. با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت قبل، پارامترهای جریان آشفته دارای نوسانات زیادی می باشند که جهت استفاده از این معادلات لحظهای ناویه۔استوکس، باید ابعاد شبکهی حل و گام زمانی را طوری انتخاب کرد که بتواند نوسانات موجود در آشفتگی را شناسایی کند. بر این اساس، استفاده از روش شبیه سازی عددی مستقیم منوط به داشتن شبکهی محاسباتی و گام زمانی بسیار کوچک است که این امر باعث ایجاد برخی مشکلات محاسباتی و افزایش هزینه ها می شود (Saniei Nejad, 2010).

جهت کمتر شدن هزینههای محاسباتی با فیلتر کردن ابعاد گردابهها و در نظر گرفتن گردابههای اصلی، روش مدلسازی گردابههای بزرگ پیشنهاد شد. این روش نیز با حل معادلات لحظهای ناویه استوکس و اعمال یک فیلتر (شکل ۳-۳)، نتایج پارامترهای مختلف جریان آشفته را ارائه میکند. اگر چه این روش نسبت به روش شبیهسازی عددی مستقیم دارای هزینههای کمتری است اما همچنان این روش نیز جز روشهای پرهزینه در مدلسازی جریان آشفته مطرح میشود.

به دلیل وجود مشکلات محاسباتی متعدد در روشهای حل مستقیم فرم کامل معادلات ناویه۔استوکس، تقریباً تمام روشهای تئوریک رایج در مدلسازی آشفتگی به نوعی از یکی از روشهای متوسط گیری، جهت مدل کردن نوسانات آشفتگی استفاده میکنند. رینولدز جهت استفاده از متوسط گیری در مدلهای آشفته به ارائهی یک سری از قوانین پرداخت. حال اگر فرم متوسط معادلات حاکم بر جریانهای آشفته را مورد بررسی قرار دهیم، مشاهده میشود که متوسط گیری از جملههای غیرخطی موجود در معادلهی ناویه۔استوکس منجر به ظهور شارهای ممنتمی جدیدی میشود که به آنها اصطلاحاً تانسور تنش آشفتگی بر واحد جرم یا تانسور

¹Mixing Length

²Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

تنش رینولدز می گویند. این جمله از لحاظ فیزیکی یک تنش نیست، بلکه بیانگر تبادل افزایش اینرسی تحت تأثیر آشفتگی جریان است. تنشهای رینولدز در ابتدا مجهول میباشند، اما برای تعیین مقادیر آنها بایستی معادلات جدید و مستقلی معرفی گردند که البته خود این معادلات هم شامل کمیتهای مجهول دیگری میباشند. روند مذکور در واقع نشاندهندهی همان مسألهی بستگی^۱ است: یعنی لازم است که آنقدر معادلات مستقل جدید به معادلات مستقل قبلی اضافه شود تا تعداد معادلات مستقل موجود برابر تعداد مجهولات معرفی شده تا آن مرحله گردد، یا به عبارت بهتر در نهایت دستگاه معادلات بسته شود. در نهایت جهت ساخت و حل این دستگاه معادلات روشهای متنوعی تحت عنوان روشهای RANS ارائه شده است.

بنابراین همان طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می شود به طور کلی جهت حل آشفتگی جریان های اجباری داخلی از سه روش، شبیه سازی عددی مستقیم (DNS)، شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) و RANS استفاده می شود.



شکل ۳-۳- دقت نتایج ارائهشده در مدلهای مشهور آشفتگی

همان طور که در شکل ۳-۳ مشاهده میشود، علیرغم ارائهی جزئیات بیشتر در مدلها شبیهسازی عددی مستقیم و شبیهسازی گردابههای بزرگ امّا به علت هزینههای زیاد و خطاهای محاسباتی، استفاده گسترده از این روشها با محدودیتهایی مواجه شده است. همچنین تئوریهای انتقال آشفتگی^۲ که منطبق بر روش سوم میباشد، با وجود برخی مشکلات و بدون آن که نیازی به مدلسازی جزئیات دینامیک حاکم بر جریانهای آشفته داشته باشد، در حل مسائل واقعی موفقیتهای چشم گیری از خود نشان داده است و درعینحال از دقت قابل توجهی نیز برخوردار میباشد. بنابراین بر اساس توضیحات ارائهشده در قسمت قبل، انتخاب یک مدل با دقت کافی و هزینههای عددی کم از اهمیت ویژهای برخوردار است. به همین منظور از آنجایی که در این پژوهش تنها پارامترهای سرعت و فشار جهت بهینهسازی جریان انتقالی داخلی مورد بررسی قرار گرفته است

¹The Closure Problem

²Turbulence Transport Theory

و بر اساس کفایت جوابهای به دست آمده از مدلهای ناویه۔استوکس متوسط گیریشده با روش رینولدز در مسائل مشابه، از این روش جهت مدلسازی در این تحقیق استفاده شده است.

از میان مدلهای ارائهشده در روش مدلسازی آشفتگی RANS، مدلهای دو معادلهای به عنوان زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدلسازی جریانهای آشفته بالأخص در سالیان اخیر مورد توجه محققین قرار گرفتهاند. با مروری بر شکلهای متنوعی که برای مدلهای کامل دو معادلهای ارائه شده است میتوان فهمید که نقطهی آغاز تمام مدلهای دو معادلهای مجازاً خطی، استفاده از تقریب بوزینسک و نیز ارائهی یک معادلهی انتقالی برای انرژی جنبشی K میباشد. انتخاب متغیر دوم کاملاً دلخواه است و تا امروز پیشنهادها بسیاری برای این انتخاب ارائه شده است که از جملهی مهمترین آنها میتوان به نرخ اضمحلال لزج 3، طول مقیاس آشفتگی I و فرکانس آشفتگی ω میباشد. از میان این مدلها، مدل 3-K رایچترین و پرکاربردترین مدل از دسته مدلهای دو معادلهای میباشد (Saniei Nejad, 2010)، بر این اساس در این پژوهش جهت مدل مدل از دسته مدلهای دو معادلهای میباشد (Saniei Nejad, 2010)، بر این اساس در این پژوهش جهت مدل کردن آشفتگی از مدل 3-K استاندارد و همچنین برای کمتر شدن هزینههای محاسبات از تابع دیوار استادارد

تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد K-E

با مقایسه پیشبینیهای انجامشده توسط مدل استاندارد K-۶ با نتایج به دست آمده از آزمایشهای تجربی انجامشده بر روی لایههای مرزی آشفته تعادلی و نیز با فرض زوال آشفتگی ایزوتروپیک و برای یک جریان هم دمای فاقد انتقال جرم، مقادیر تقریبی ثوابت موجود در مدل استاندارد K-۶ به صورت مقادیر جدول زیر محاسبه خواهند شد.

جدول ۲-۱- صرایب مدل استاندارد K-E						
\mathcal{C}_{μ}	۰/۰۹	$\sigma_{arepsilon}$	۱/۳۰			
$C_{arepsilon1}$	1/44	σ_k	۱/۰۰			
$C_{\varepsilon 2}$	1/97					

حدول ۲-۳- ضرابب مدل استاندار د K-E

علی رغم این که این مقادیر برای طیف وسیعی از جریان های مهندسی قابل استفاده هستند، اما هرچه شرایط جریان مورد نظر با فرضیات به کار گرفته شده در به دست آوردن ضرایب، اختلاف داشته باشد، خطای حاصل از مدل سازی و استفاده از این مدل آشفتگی بیشتر و قابل توجه تر خواهد شد. گرچه می توان ضرایب محاسبه شده

را برای رسیدن به جوابهایی که با نتایج تجربی تطابق بیشتری داشته باشند، تغییر داد. همچنین بایستی $C_{\varepsilon 1}$ و $K_{\varepsilon 1}$ در مقادیر $C_{\varepsilon 1}$ و K- ε داشت که مدل $K_{\varepsilon 2}$ نسبت به تغییرات هر چند ناچیز در برخی از این ضرایب (بالأخص در مقادیر $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$) بسیار حساس است(Coniei Nejad, 2010).

پس از تعریف این ضرایب در این مدل، روابط ارائهشده برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال انرژی بیان میشود. بر این اساس رابطه زیر نشاندهندهی انرژی جنبشی آشفتگی است:

$$K = \frac{3}{2} (UI)^2 \tag{(\%-7)}$$

در این رابطه K انرژی جنبشی آشفتگی، U سرعت متوسط و I شدت آشفتگی میباشد. به طور کلی شدت آشفتگی برابر است با نسبت برآیند نوسانات سرعت به میانگین سرعت در یک جریان آشفته که بر اساس شرایط جریان به دستههای زیر تقسیم میشود.

- ۸. شدت آشفتگی زیاد: در این حالت جریان با سرعت زیاد در یک مسیر با شکل پیچیده مانند حرکت جریان در یک توربین، حرکت میکند. در این جریانها، شدت آشفتگی بین ۵ تا ۲۰ درصد تغییر میکند.
- ۲. شدت آشفتگی متوسط: جریانهایی که در مسیرهای غیرپیچیده مانند لولههای بزرگ یا با سرعت کم در حرکت هستند از این گروه جریانها میباشد که دارای شدت آشفتگی بین ۱ تا ۵ درصد هستند.
- ۳. شدت آشفتگی کم: جریانهایی که از یک سیال ثابت به وجود میآید دارای شدت آشفتگی کم هستند. این جریانها معمولاً در اطراف ماشینها، زیردریاییها و هواپیماها اتفاق میافتد و دارای شدت آشفتگی کمتر از ۱ درصد است.

علاوه بر این، در این مدل بر اساس ضرایب ارائهشده میتوان رابطهی زیر را برای نرخ اضمحلال انرژی بیان کرد.

$$\epsilon = C_{\mu} \frac{K^{\frac{3}{2}}}{l} \tag{(4.17)}$$

در این رابطه K انرژی جنبشی آشفتگی (رابطهی (۳-۴۶))، l مقیاس طولی آشفتگی و \mathcal{L}_{μ} یکی از ثابتهای مدل (جدول ۳-۲) است. جهت به دست آوردن طول آشفتگی در مدلسازی عددی توصیههای متفاوتی ارائه

شده است که یکی از پرکاربردترین آنها استفاده از کوچکترین بُعد المان تولیدشده در شبکهی حل به عنوان طول آشفتگی میباشد (Wilcox, 2006).

تابع ديوار استاندارد

این توابع در واقع یک سری پروفایلهای تحلیل-تجربی مرتبط با لایهی مرزی مجاور دیواره هستند که با استفاده از روشهای تحلیلی و پس از حل صریح معادلات ساده شده یناویه استوکس در نزدیکی دیواره به دست آمده اند. از آنجا که پروفایلهای توابع دیواره به صورت تحلیلی به دست آمده اند، قاعدتاً تا جایی که از فرضیات اولیه خیلی دور نشده ایم، اثری از برخی خطاهای موجود در روشهای عددی در اصل پروفیلهای توابع دیواره به چشم نمی خورد یا بر فرض وجود چنین خطاهایی، تأثیرات منفی آنها نسبت به خطاهای موجود در گسسته سازی معادلات ناویه استوکس متوسط گیری شده و حل آنها در نواحی مورد اشاره به مراتب کاهش یافته است. به طور کلی مزیت استفاده از توابع دیواره را میتوان به صورت زیر در چند عنوان کلی دسته بندی نمود:

- ۱. کاهش حجم محاسبات به واسطهی عدم نیاز به شبکهبندی متراکم در نواحی نزدیک به دیواره
 - ۲. افزایش دقت محاسبات
- ۳. ایجاد امکان انتگرال گیری برای مدل های آشفتگی که قابلیت انتگرال گیری تا لب مرز دیواره های جامد را ندارد.

بنابراین توابع دیواره مجموعهای از پروفیلهای نیمه تجربی میباشند که مقادیر متغیرهای فیزیکی مربوط به المانهای عددی نزدیک دیواره را به مقادیر نظیر بر روی دیواره مرتبط میسازند.

تحليل پايداري مدلسازي عددي

در مدلسازی عددی دو نوع خطا وجود دارد که عبارتند از خطای گرد کردن که خاصیت رایانه است و خطای گسسته کردن که ناشی از روش عددی به کار گرفته است. اگر خطا در مدلسازی عددی کنترل نشود، رشد خطا باعث ناپایداری حل میشود. درک خطاها و کنترل آنها از طریق تحلیل پایداری در داشتن حلی مطلوب برای یک مدلسازی عددی بسیار مؤثر است. پایداری معادلات مدل به همراه آزمون عددی، دید لازم را برای تعیین اندازهی گامهای زمانی و مکانی برای به دست آوردن حلی پایدار ارائه میدهد. از بین روشهای ارائهشده برای تحلیل پایداری، روش وننیومن ^۱ کاربرد بیشتری دارد و از نظر ریاضی سادهتر است. بر این اساس خلاصهای از نتایج و کاربردهای تحلیل پایداری وننیومن در زیر ارائه شده است:

- این روش به راحتی به مسائل سهبعدی تعمیم داده می شود.
- ۲. مقادیر شاخص^۲، برای پایداری مسائل یک بعدی غیر دائم به صورت زیر است:

برای بیشتر فرمول بندی های صریح،

$$c \le 1.0, d \le 0.5, Re_c \le \frac{2}{c}$$

که در این روابط c عدد کورانت، d عدد انتشار و *Re_c* عدد سلول رینولدز می باشد که اگر معادله ی حاکم به صورت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{(fA-T)}$$

باشد، روابط زیر به ترتیب برای عدد کورانت، عدد انتشار و عدد سلول رینولدز ارائه می شود:

$$c = a \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{(49-7)}$$

$$d = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \tag{(\Delta - \tilde{r})}$$

$$Re_c = a \frac{\Delta x}{\alpha} \tag{(a)-r}$$

برای تمامی فرمولبندیهای ضمنی، تمام آنها بیقید و شرط پایدارند.

۳. برای مسائل چندبعدی با اندازههای گام مساوی در تمام جهتهای مختصات مکانی، مقادیر شاخص یادشده را باید بر تعداد مختصات تقسیم کرد.

¹Van Newman

² Benchmark

فصل ۴ نتايج و بحث

۴–۱– مقدمه

همان طور که در فصل قبل به آن اشاره شد، جهت بهینهسازی شکل مقاطع، بر اساس مفاهیم دینامیک سیالات محاسباتی، برنامهی SPC برای انطباق خط جریان بر مرز جامد تهیه شده است. از آنجایی که این برنامه با محاسبه معیار بهینهسازی، مقادیر متغیرهای مکانی را تغییر میدهد تا شکل بهینهشده را ارائه کند، درستی و صحت کار قسمتهای مختلف آن از اهمیت ویژهای برخوردار است. به همین دلیل در این فصل ابتدا به بیان نتایج به دست آمده از مقایسه SPC با نرمافزار OpenFOAM پرداخته میشود و سپس در قسمت بعدی این فصل نتایج حاصل از بهینهسازی شکل دهانهی ورودی یک انقباض با چهار قید مکانی، بیان میشود. در نهایت با ارائهی نتایج مربوط به بهینهسازی دهانهی آبگیر به صورت سهبعدی و مقایسهی نتایج آن با مدلهای ارائهشده

۲-۴- بررسی صحتسنجی برنامه SPC با کمک نرمافزار OpenFOAM

بر اساس توضیحات ارائهشده در فصل سوم، برنامهی نوشتهشده توانایی حل جریان پتانسیل در محیطهای حل مستطیلی و غیرمستطیلی را دارد. از این رو نتایج برنامه میتواند به یافتن شکل بهینهشدهی دهانهی ورودی با کمک معادلات جریان پتانسیل بینجامد. این نتایج شامل رسم خطوط جریان برای هندسه مورد نظر است؛ بنابراین در این بخش ابتدا با بیان صورت یک مسأله، به مقایسه شبکهی تولیدشده توسط برنامه SPC و نرمافزار OpenFOAM پرداخته میشود و سپس با مقایسهی مختصات خطوط جریان به دست آمده در هر دو برنامه، صحت و درستی کد نوشتهشده را مورد بررسی قرار میدهیم.

۴-۲-۲ بیان صورت مسأله

جهت بررسی صحت عملکرد برنامه ی SPC از یک مسأله ی انقباضِ جریان دوبعدی جهت بهینه سازی شکل دهانه ی ورودی آن استفاده شده است. مشخصات و ابعاد این مسأله در شکل ۴-۱ مشخص شده است. در این مسأله چهار قید مکانی که با علامت ضربدر در شکل ۴-۱ مشخص شده در نظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر این قیدها محدوده ی قابل بهینه سازی در مسأله را مشخص می کنند. سیال آب فرض شده و مشخصات مرزها و جریان در جدول ۴-۱ ارائه شده است. در این مسأله ابتدا معادلات جریان در محیط حل مستطیلی حل می شوند و سپس با بهینه کردن شکل مقطع ورودی نتایج مربوط به خطوط جریان داخل محیط حل با

واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر
$\frac{kg}{m^3}$	١٠٠٠	چگالی آب	$\frac{m}{s}$	١	سرعت ورودی در جهت X
$\frac{m^2}{s}$	۱e-۶	لزجت ديناميكى	$\frac{m}{s}$	•	سرعت ورودی در جهت Y
Pa/m	•	گرادیان فشار ورودی	Pa	•	فشار خروجي

جدول ۴-۱- مشخصات مرزها و جریان در مسألهی صحتسنجی SPC



شكل ۴-۱- مشخصات و ابعاد مسألهى صحتسنجى SPC

SPC نتایج حل مسأله در برنامهی

در اولین مرحله از بهینهسازیِ مسأله بالا، محیط حل جریان مستطیلی فرض میشود. این موضوع منجر به سادگی تولید شبکه در این مرحله شده و در نتیجه محاسبات خاصی برای بررسی شبکه تولیدشده نیاز نخواهد بود. با توجه به مشخصات بیان شده در شکل ۴-۱، شرایط مرزی مسأله مطابق با شکل ۴-۲ در برنامه تعریف شده و فرآیند بهینه سازی شروع می شود. در این شکل ۷ مقدار تابع پتانسیل، dy ابعاد المان های محیط حل در راستای Y و i نماد شماره گره مورد نظر در مرز خروجی و ورودی است. در مرز ورودی و خروجی، جریان بر



شکل ۲-۴- شرایط مرزی مسأله صحتسنجی SPC جهت حل در برنامه

در مرحلهی اول، شبکهی حل به صورت ساده و با ابعاد ۰/۰۵ متر در هر دو جهت در صفحه افق تولید شده و معادلات جریان پتانسیل در آن حل می شود. در این مرحله، با توجه به توضیحات فصل سوم، معادلات در محیط مستطیلی حل شده و شکل ۴-۳ به عنوان نتیجهی مرحله اول بهینهسازی ارائه می شود.



شکل ۴-۳- نتیجه حاصل از مرحله اول بهینهسازی مسأله در SPC

بعد از به دست آوردن منحنیهای خطوط جریان، خطوط جریان متناظر با ۹۵ و ۵ درصد دبی به عنوان مبنای بهینهسازی در این مسأله انتخاب شدند. در ادامهی فرآیند بهینهسازی، برای انطباق خطوط جریان ذکرشده بر مرز جامد، شکل محیط حل از مستطیلی به غیر مستطیلی تغییر کرد و جهت حل معادلات، شبکهی مورد نیاز مطابق با روشهای ذکرشده در فصل سوم، تولید شد. به همین منظور در شکل ۴-۴ شبکه تولیدشده توسط SPC نشان داده شده است.



شکل ۴-۴- شبکهی محیط حل در آخرین مرحلهی بهینهسازی در SPC

در نهایت با تعیین معیار همگرایی به مقدار ۱۲–۱۰، فرآیند بهینهسازی کامل شده و اختلاف بین مختصات خطوط جریان ۵ و ۹۵ درصد با شکل مرز جامد به کمتر از معیار همگرایی رسیده و فرآیند بهینهسازی کامل شده است. در شکل ۴-۵، نتایج شکل نهایی مسأله و خطوط جریان آن ترسیم شده است.



شکل ۴-۵- شکل نهایی دهانهی ورودی و خطوط جریان به دست آمده در مرحلهی آخر بهینهسازی در ادامه به بیان نتایج به دست آمده از مدل کردن همین مسأله در نرمافزار OpenFOAM پرداخته می شود.

OpenFOAM نتایج مدلسازی مسأله در نرمافزار OpenFOAM

جهت بررسی صحت کد نوشته شده، شکل حاصل از مرحله ی اول بهینه سازیِ مسأله مطرح شده و شکل نهایی به دست آمده، در نرمافزار OpenFOAM مدل شده است. به همین منظور در این قسمت نتایج حاصل از
مدلسازی مسألهی بالا شامل شبکهی حل تولیدشده، مختصات خطوط جریان در شکل ابتدایی و انتهایی ارائه گردیده است. از کتابخانههای blockMesh و potentialFoam به ترتیب به عنوان مولد شبکه و حلگر این مسأله استفاده شده است. برای اعمال شرایط مرزی بر اساس شرایط مرزی شکل ۴-۱، شرایط مرزی و اولیه میدان سرعت و فشار مطابق با شکل ۴-۶ در هر دو مدل لحاظ گردیده است. در این شکل شرایط zeroGradient به معنی صفر بودن مقدار گرادیان پارامتر مورد نظر در مرز مشخص شده است.



شکل ۴-۶- شرایط مرزی مسأله در نرمافزار OpenFOAM

در شکل ۴-۲، شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ به ترتیب خطوط جریان در شکل اولیه، شبکهی حل و خطوط جریان در شکل نهایی مطرح شده است.



شکل ۴-۷- نتایج حاصل از مدلسازی شکل اولیه در نرمافزار OpenFOAM



شکل ۴-۸- شبکهی حل تولیدشده در نرمافزار OpenFOAM جهت مدلسازی شکل نهایی



شکل ۴-۹- نتایج حاصل از مدلسازی شکل نهایی در نرمافزار OpenFOAM

۴-۲-۴ مقایسه نتایج به دست آمده جهت صحتسنجی برنامه SPC جهت بررسی صحت روش تولید شبکه در برنامه SPC، مختصات گرهها در شبکههای تولیدشده با یکدیگر مقایسه و اختلاف آنها بررسی میشود. با مقایسه مختصات X و Y گرهها در محیطهای حل مستطیلی اختلافی مشاهده نشد؛ اما در محیطهای حل غیرمستطیلی، اختلافاتی در راستای X و Y مشاهده شد که در ادامه به آن پرداخته میشود. همان طور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده میشود بیشترین اختلاف بین مختصات گرهها در راستای X برابر با ۱۸/۰ متر میباشد. در این شکل تفاوت بین مختصات، در محیط حل محاسباتی نشان داده شده و موقعیت اختلافهای بیشینه قابل مشاهده است.



□ Grid Line □ 0-0.005 m □ 0.005-0.01 m □ 0.01-0.015 m □ 0.015-0.02 m





همان طور که در شکل ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۱ مشاهده می شود اختلاف ها در مختصات شبکه ها در محدوده ی کوچکی از شکل قرار دارند، شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۳ جهت نمایش دقیق تر محل اختلاف ها تهیه شده اند.



X شکل ۲-۱۲- موقعیت دقیق اختلاف بین مختصات گرهها در راستای محور X



شکل ۴-۱۳- موقعیت دقیق اختلاف بین مختصات گرهها در راستای محور ۲

بر اساس شکلهای بالا مختصات تعداد اندکی از گرهها در مختصات خود دارای اختلاف هستند که با توجه به کمتر بودن مقدار بیشینه اختلافها از نصف اندازهی یک گام در محیط حل، میتوان روش تولید شبکه در برنامه SPC را از دقت خوبی برخوردار دانست. علاوهبراین علیرغم کمتر بودن مقدار اختلافها از حد مجاز، میتوان اختلاف بین روشهای تولید شبکه در حل به روش اختلاف محدود در برنامهی SPC و حل به روش حجم محدود در نرمافزار OpenFOAM از یک سو و تفاوت در الگوریتمهای حل در نرمافزارها را از سوی دیگر، از جمله عوامل تأثیرگذار در اختلافهای به وجود آمده تلقی کرد.

بعد از بررسی درست بودن روش تولید شبکه، نیاز به بررسی دقیق تر مقادیر تابع جریان در برنامه SPC است. بدین منظور ابتدا مقادیر تابع جریان در هر گره به صورت نتیجه یمدل سازی گزارش شده و سپس با مقایسه نتایج به دست آمده با یافته های OpenFOAM درستی عملکرد برنامه SPC در محاسبه یمقادیر تابع جریان بررسی می شود. بر این اساس با مدل سازی شکل اولیه در برنامه و نرمافزار، بیش ترین میزان اختلاف، ۴–۱/۳ درصد به دست آمد. جهت بررسی مقادیر تابع جریان در شکل نهایی (محیط حل غیرمستطیلی)، شکل ۴–۱/۳ برای نمایش میزان و مقدار اختلاف های بین مقادیر به دست آمده از برنامه SPC و نرمافزار Manutum تهد شد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، بیشتری میزان اختلاف برابر با ۲/۷۴ درصد است. در این شکل موقعیت مکانی اختلاف ها بر اساس شبکه ی حل محاسباتی نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۴-میزان اختلاف بین مقادیر تابع جریان در محیط حل غیرمستطیلی

بر اساس میزان اختلاف محاسبهشده و تعداد گرههای اندکی که دارای تفاوت در این مقادیر هستند، درستی روش محاسبهی معادلات جریان پتانسیل در محیطهای غیرمستطیلی در برنامه SPC محقق میشود. جهت بررسی دقیقتر اختلافهای به وجود آمده، شکل ۴-۱۵ تصویر دقیقتری از موقعیت اختلافهای بیشینه ارائه میدهد.



شکل ۴-۱۵- موقعیت دقیق اختلاف بین مقادیر تابع جریان در محیط حل محاسباتی

بر اساس موقعیتهای مشخصشده برای اختلافهای بین مقادیر مختصات گرهها در شکل ۴-۱۲، شکل ۴-۱۳ و همچنین مقادیر تابع جریان در شکل ۴-۱۵، علی رغم کمتر بودن میزان اختلاف بیشینه از ۳ درصد می توان یکی از دلایل ایجاد اختلاف را عدم یکسان بودن شبکههای حل تولیدشده دانست. علاوه بر این، تفاوت در تقریبهای استفاده شده در روش اختلاف محدود و حجم محدود، تفاوت در الگوریتمهای به کار رفته در حل معادلات جریان و استفاده از روشهای تقریبی برای انتقال نتایج از حجم به یک گره در روش حجم محدود، از عوامل تأثیر گذار در به وجود آمدن اختلافهای مقادیر تابع جریان هستند.

۴-۳- بررسی صحت مدلسازی، در نرمافزار OpenFOAM

همان طور که در فصل دوم اشاره شد، ساتیش و همکاران، جریان دوبعدی داخل یک انقباض را با کمک نرمافزار FLUENT تحلیل و با کمک نتایج آزمایشگاهی درستی و صحت نتایج به دست آمده را تأیید کردند. آنها رژیم جریان مسأله را آشفته و بر اساس مدل ٤-K به مدلسازی پرداختند. آنها سرعت بیشینه، فشار کمینه و فشار بیشینه را به عنوان نتایج پژوهش خود گزارش کردند (Satish, Ashok Kumar, Vara Prasad, & رPasha, 2013). بر این اساس برای تحقیق درستی فرآیند مدلسازی در این تحقیق، ابتدا به مدل کردن مسألهی ذکرشده در تحقیق بالا با کمک نرمافزار OpenFOAM پرداخته شده و سپس با مقایسه نتایج به دست آمده، درستی ضرایب و فرآیندهای مدلسازی جریان آشفته با مدل ٤-K مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۳-۱ بیان صورت مسأله

در این مسأله آب در یک مسیر انقباضی با ابعاد نشان دادهشده در شکل ۴-۱۶ جریان دارد. سرعت آب در این مسیر ۵/۵ متربرثانیه بوده و بر این اساس رژیم جریان آشفته است. مشخصات سیال و جریان مطابق با جدول ۲-۴ در مسأله مطرح شده است. مسیر انقباضی، به صورت انقباض ناگهانی بوده و تحلیل جریان در این مسیر بررسی میشود.



جدول ۲-۴- مشخصات مرزها و جریان در مسألهی صحتسنجی OpenFOAM

۹–۳–۲ ارائهی نتایج و فر آیند مدلسازی در نرمافزار ابتدا با مشخص کردن ابعاد مسأله و رعایت موارد مربوط جهت مدلسازی مسألهی مورد بحث در این نرمافزار ابتدا با مشخص کردن ابعاد مسأله و رعایت موارد مربوط به تحلیل پایداری کارهای عددی که در فصل سوم به آن اشاره شد، شبکه مورد نظر جهت حل مسألهی بالا توسط دستور blockMesh تولید شد. پس از آن جهت انتخاب حلگر مناسب با توجه به کتابخانههای موجود در این نرمافزار، حلگر مافزار، حلگر مافزار دارد انتخاب معادلات آشفتگی را با مدل عدل علی دارد را دارد انتخاب در این نرمافزار، حلگر مافزار دارد دارد انتخاب مدل در این نرمافزار، حلگر متابخانههای موجود در این نرمافزار، حلگر موجود که در این در این حل معادلات آشفتگی را با مدل علی در این در دارد انتخاب شد. این حلگر توانایی مدل سازی سیالهای تراکم پذیر را نیز دارا میباشد.

در این حلگر باید مقادیر لزجت دینامیکی سیال بر اساس روابط ارائهشده در زمینهی سیالهای تراکمپذیر مشخص شود. از آنجایی که ضرایب معادلهی محاسبهی لزجت بر اساس سیال تراکمناپذیر آب به صورت پیشفرض در این حلگر قرار دادهشده، از همان ضرایب جهت حل در این مسأله استفاده میشود. شرایط مرزی استفادهشده در این مسأله مطابق با شکل ۴-۱۷ است. در این شکل مقادیر K و ع در قسمت ورودی بر اساس فرمولهای ارائهشده در بخش تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد *E*-K محاسبه شده است. در این فرمولها شدت آشفتگی بر اساس میزان سرعت ورودی ۵ درصد در نظر گرفتهشده و از ضرایب مدل ع-K استاندارد جهت استفاده در فرمول K استفاده شده است. در این میزان میشانه استاندارد ۶-K محاسبه مده است. در این فرمول ها شدت آشفتگی بر اساس میزان سرعت ورودی ۵ درصد در نظر گرفتهشده و از ضرایب مدل ۶-K استاندارد مهت استفاده در فرمول K استفاده شده است. همچنین مقیاس طول آشفتگی که برابر است با ابعاد المان در



شکل ۴-۱۷- شرایط مرزی مسأله در نرمافزار OpenFOAM

پس از مدلسازی مسألهی بالا در نرمافزار OpenFOAM بر اساس نتایج ارائهشده در تحقیق ساتیش و همکاران، نتایج این مدلسازی نیز جهت بررسی و مقایسه در جدول ۴-۳ ارائه شده است. در این جدول در ستون اول نتایج مربوط به تحقیق ساتیش و همکاران، در ستون دوم نتایج به دست آمده از مدلسازی در نرمافزار OpenFOAM و در ستون آخر درصد خطاها ارائه میشود.

درصد عدم تطابق نتايج	نتايج OpenFOAM	نتایج آزمایشگاهی	پارامترها
' <u>/</u> •/•••	۵/۵۰۰ متربر ثانیه	۵/۵۰۰ متربر ثانیه	سرعت ورودی
<u>/</u> •/•٣•	۱۲/۹۹۴ متربرثانیه	۱۳/۰۳۵ متربرثانیه	سرعت بيشينه
·/.\/A • •	۱/۴۲۸e+۵ پاسکال	۵++۵ + ۱/۴۰ پاسکال	فشار كمينه
7.7/1••	۲/۰۳۲e+۴ پاسکال	۲/۰۰۰e+۴ پاسکال	فشار بيشينه

جدول ۴-۳- نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی با OpenFOAM

همان طور که در جدول بالا نشان داده شده است، درصد عدم تطابق محاسبه شده کمتر از ۲/۵ درصد است که با توجه به مدلسازی عددی، خطاهای آزمایش های فیزیکی و تقریب در روش های حل معادلات آشفتگی، دقت قابل قبولی به دست می دهد. با بررسی و مقایسه ی نتایج مدلسازی در OpenFOAM و نتایج کار پژوهش ساتیش و همکاران، می توان درستی معادلات و روش های به کاررفته در وارد کردن شرایط مرزی و اطلاعات اولیه مورد نیاز برای نرمافزار و همچنین دقت کار نرمافزار OpenFOAM را در مدلسازی این مسأله و مسائل مشابه تأیید کرد؛ همچنین می توان از روش صحت سنجی شده و نرمافزار OpenFOAM در مدلسازی های مسائله و مسائل مشابه بعدی استفاده کرد.

۴-۴- بهینهسازی شکل ورودی یک انقباض

از آنجایی که مقاطع مختلفی برای یک انقباض بدون در نظر گرفتن قید مکانی ارائه شده است، در این قسمت ابتدا به بهینهسازی شکل ورودی با کمک SPC پرداخته شده و سپس بعد از به دست آوردن مقطع بهینه، به مدلسازی این شکل و اشکال توصیه شده در نرمافزار OpenFOAM پرداخته شده است. یادآور می شود برای بهینه سازی با SPC، ابتدا باید خط جریان بهینه را مطابق با توضیحات فصل سوم به دست آورد و سپس نتیجه ی به دست آمده را به عنوان مقطع بهینه ی حاصل از روش معیار بهینگی در نظر گرفت. در نهایت با بیان مقاطع مختلف توصیه شده توسط متون علمی، به مدل سازی این مقاطع و مقطع به دست آمده از SPC، در جریان هایی با سرعتهای مختلف، جهت اطمینان از بهینه بودن مقطع ارائه شده، پرداخته می شود.

۴-۴-۱ بیان صورت مسأله

این مسأله، دارای یک انقباض با چهار قید مکانی است که باهدف بهینهسازی شکل مقطع جهت کمینه کردن افت فشار مطرح شده است. این قیدها که معمولاً در اجرا و ساخت این مقاطع به وجود میآیند دارای اهمیت بسیاری است که بررسی اثر آنها معمولاً در طراحیهای آزمایشگاهی لحاظ میشود. مشخصات و ابعاد مسأله در شکل ۴-۸۱ و جدول ۴-۴ مطرح شده است. لازم به ذکر است سرعتهای ورودی در این مسأله ۰/۰۰، ۳/۰، ۶/۰ و ۹/۰ مترمکعببرثانیه در نظر گرفته شده تا از بهینه بودن مقطع ارائه شده در رژیمهای مختلف جریان اطمینان حاصل شود.

واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر
$\frac{m^2}{s}$	۱/•e-۶	لزجت ديناميكي	$\frac{kg}{m^3}$	۱۰۰۰/۰	چگالی آب
Ра	• / •	فشار خروجى	$\frac{m}{s}$	• / •	سرعت ورودی در جهت Y
-	4	عدد رينولدز	$\frac{m}{s}$	• / • • ١	سرعت ورودی جهت X در مدل ۱
-	17	عدد رينولدز	$\frac{m}{s}$	۰/٣	سرعت ورودی جهت X در مدل ۲
-	74	عدد رينولدز	$\frac{m}{s}$	• 9	سرعت ورودی جهت X در مدل ۳
_	۳۶۰۰۰۰	عدد رينولدز	$\frac{m}{s}$	•/٩	سرعت ورودی جهت X در مدل ۴

جدول ۴-۴- مشخصات و ابعاد مسألهي بهينهسازي شكل ورودي انقباض



شکل ۴-۱۸- شرایط مرز و ابعاد مسألهی بهینهسازی شکل ورودی انقباض

۹-۴-۲ ارائهی نتایج بهینهسازی مسأله انقباض توسط SPC جهت بهینهسازی شکل مقطع ورودی توسط SPC باید در ابتدا شکل مسأله را به عنوان ورودی برنامه در آن اعمال کرد و سپس با مشخص کردن یک خط جریان جهت انطباق بر مرز بالا و یک خط جریان برای انطباق بر مرز پایین، برنامه شروع به منطبق کردن خط جریان بر مرز جامد می کند. بر این اساس با توجه به متقارن بودن شکل مسأله با انتخاب یک خط جریان (به عنوان مثال خط جریان ۵۹ درصد)، خط جریان متناظر با آن (در اینجا خط جریان ۵ درصد) برای انطباق بر مرز مقابل انتخاب شده است. در شکل ۴-۱۹ نتایج به دست آمده از SPC برای خطوط جریان مختلف، نشان داده شده است.





 $\psi_{lower \ boundary} = 45\%$, $\psi_{upper \ boundary} = 55\%$



 $\psi_{lower \; boundary} = 25\%$, $\psi_{upper \; boundary} = 75\%$





 $\psi_{lower\ boundary}=20\%$, $\psi_{upper\ boundary}=80\%$



 $\psi_{lower \ boundary} = 82\%, \psi_{upper \ boundary} = 18\%$



شکل ۴-۱۹- نتایج ارائهشده توسط SPC برای مسأله بهینهسازی انقباض (ادامه)





 $\psi_{lower \; boundary} = 84\%, \psi_{upper \; boundary} = 16\%$







 $\psi_{lower\ boundary} = 90\%, \psi_{upper\ boundary} = 10\%$ $\psi_{lower\ boundary} = 95\%, \psi_{upper\ boundary} = 5\%$ شکل ۲۹-۴- نتایج ارائهشده توسط SPC برای مسأله بهینه سازی انقباض

همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود، جهت به دست آوردن خط جریان بهینه برای انطباق بر مرز جامد ابتدا یک خط جریان جهت انطباق انتخاب شده و بر اساس آن شکل مقطع به دست می آید. با مدل کردن این مقطع در نرمافزار OpenFOAM مقدار افت فشار محاسبه می شود. پس از این مرحله، یک خط جریان دیگر در اطراف خط جریان اولیه انتخاب شده و میزان افت فشار آن محاسبه می شود. در صورتی که افت فشار مقطع جدید کمتر بود، این فرآیند ادامه پیدا کرده تا جایی که در مقطعی افت فشار دیگر کاهش پیدا نکند، در این مرحله خطوط جریان اطراف خط جریانی که دارای کمترین میزان افت فشار بوده، جهت انطباق بر مرز جامد انتخاب می شوند. پس از بررسی این مدل ها، شکل بهینه شده ی مقطع با این روش که دارای کمترین میزان افت فشار است، به دست می آید.

حال جهت پیدا کردن خط جریان بهینه، تمامی مقاطع بالا در نرمافزار OpenFOAM با سرعتهای ارائهشده در جدول ۴-۴ مدل شدند. با توجه به اعداد رینولدز ارائهشده در این جدول از میان چهار سرعت مطرحشده، یک سرعت باعث ایجاد جریان آرام و سه سرعت دیگر باعث ایجاد جریان آشفته می شود. بر این اساس برای مدل کردن تمامی این مقاطع در سرعتهای مختلف از دستور blockMesh جهت تولید شبکهی حل و از حلگر icoFoam جهت مدل سازی جریانهای آرام با سیال تراکمناپدیر، استفاده شد. در شکل ۴-۲۰ شرایط مرزی اعمال شده در نرمافزار OpenFOAM جهت مدل سازی جریان آرام ارائه شده است.



شکل ۴-۲۰- شرایط مرزی اعمال شده در OpenFOAM برای جریان آرام مسأله بهینه سازی انقباض

پس از مدلسازی مقاطع به دست آمده با رژیم جریان آرام در نرمافزار OpenFOAM، جهت به دست آوردن خط جریان بهینه بر اساس تابع هدف بهینهسازی (کمینه کردن افت فشار)، مقادیر افت فشار در هر مدل



محاسبه شده و با مقایسه آنها، خط جریانی که دارای کمترین میزان افت فشار است، به عنوان خط جریان بهینه انتخاب شده است. در شکل زیر مقادیر فشار در محل خط تقارن مسأله ارائه شده است.

شکل ۴-۲۱- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدلها با سرعت ۰/۰۰۱ متربرثانیه همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود، خط جریان ۵۵ درصد با افت فشار ۰/۰۱۷۳۴ کیلوپاسکال، دارای کمترین میزان افت فشار در رژیم جریان آرام است. این مقطع که در شکل ۴-۱۹ نمایش داده شده است، مقطع جمع شدگی را به صورت تقریباً خطی توسط برنامه SPC ارائه می کند. بر اساس نتایج به دست آمده از نمودارهای بالا، این مقطع به عنوان مقطع بهینه در جریان های آرام برای این مسأله شناخته می شود.

 است. لازم به ذکر است که شرایط مرزی برای همین مسأله با سرعتهای ورودی دیگر، مشابه با شکل ۴-۲۲ است با این تفاوت که سرعت ورودی، K و ع بر اساس فرمولهای ارائهشده دارای مقادیر دیگری میشوند.



شکل ۴-۲۲- شرایط مرزی اعمال شده در OpenFOAM برای جریان آشفتهی مسأله بهینه سازی انقباض

پس از مدلسازی این مسأله با سه سرعت ۰/۳، ۶/۰ و ۰/۹ متربرثانیه، مقادیر فشار در محل خط تقارن مسأله در نمودارهای زیر نمایش داده شده است. با مقایسه مقادیر افت فشار در این نمودارها میتوان مقدار خط جریان بهینه را در رژیم آشفته به دست آورد.



شکل ۴-۲۳- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدل ها با سرعت ۰/۳ متربرثانیه



شکل ۴-۲۴- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدل ها با سرعت ۰/۶ متربرثانیه



شکل ۴-۲۵- مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط تقارن مدل ها با سرعت ۰/۹ متربرثانیه

همان طور که در نمودارهای بالا مشاهده می شود، بهترین خط برای انطباق بر مرز جامد، همان خط جریان ۸۳ درصد است. در نتیجه می توان بیان کرد در این مسأله فارغ از مقادیر سرعت ها و به تبع آن شدت آشفتگی، خط جریان ۸۳ درصد باعث ایجاد شکل بهینه می شود.

پس از به دست آوردن خط جریان بهینه، جهت اطمینان از درستی روند بهینهسازی، باید میزان افت فشار در مراحل بهینهسازی با خط جریان بهینه مورد تحقیق قرار گیرد. به عبارت دیگر جهت اطمینان از حرکت درست فرآیند بهینهسازی، بعد از هر ۵ مرحلهی تکرار انطباق خط جریان بهینه بر مرز جامد، شکل مقطع به دست آمده در نرمافزار OpenFOAM مدل شده و مقدار افت فشار در هر مرحله تعیین میشود. از آنجایی که معیار همگرایی در کد SPC، حداکثر تفاوت در محل گرهها ۲۰۰۰/۰ متر بود، جهت انطباق کامل خط جریان بر مرز جامد برای رژیم جریان آرام (خط جریان ۵۵ درصد)، ۱۲ تکرار و برای رژیم جریان آشفته (خط جریان ۳۸ درصد) ۳۶ تکرار صورت گرفت که نتایج افت فشار حاصل از هر ۵ تکرار در مدلهایی با سرعتهای ورودی



شکل ۴-۲۶- نتایج افت فشار بر حسب تعداد تکرار در مدل هایی با سرعت ورودی ۰/۰۰، ۳/۰، ۶/۰ و ۰/۹ متربرثانیه

بر اساس نمودارهای بالا، از آنجایی که خط جریان ۵۵ درصد به عنوان خط جریان بهینه، جهت انطباق انتخاب شد، این خط جریان به علت دور بودن از مرزهای جامد دارای شکل تقریباً خطی است که بر همین اساس در تعداد تکرار کمتری به جواب منتهی میشود. همچنین در رژیم جریان آرام بیشترین کاهش در میزان افت فشار پس از ۱۰ گام تکراری ابتدایی رخ میدهد. همان طور که در شکل ۴-۲۶ مشاهده میشود در جریانهای آشفته تا مرحلهی تکرار ۱۵ تغییرات افت فشار قابل توجه است و پس از این مرحله تا مرحلهی تکرار ۳۰ تغییرات افت فشار با شیب کمتری رخ میدهد و در تکرارهای آخر تقریباً شیب خط میزان افت فشار برابر با صفر میشود. بر این اساس با توجه به تغییر مقطع از مستطیلی به منحنی، انتظار تغییرات قابل توجه افت فشار در مراحل ابتدایی بوده و پس از این مراحل با توجه به تغییرات اندک متغیرهای بهینهسازی، نمودار به دست آمده با آنچه مورد توقع بوده هماهنگی خوبی داشته و در نهایت به علت ناچیز بودن میزان تغییرات متغیرهای بهینهسازی در تکرارهای آخر میتوان انتظار داشت مقدار افت فشار تغییر مصوسی نکند. بنابراین با بررسی حرکت کلی نمودار در کاهش افت فشار و بررسی میزان افت فشار در هر مرحله میتوان از درستی فرآیند.

۴-۴-۳ مقایسه مقطع به دست آمده از SPC با مقاطع توصیه شده

همان طور که در فصل دوم، بخش انقباض در مسیر جریان بیان شد، جهت طراحی مقطع انقباض در مسیر جریان مقاطع مختلفی پیشنهاد شده است. در این قسمت جهت اطمینان از بهینه بودن مقطع به دست آمده، به بررسی میزان افت فشار این مقطع با مقاطع توصیهشده توسط متون علمی مختلف در جریانهایی با سرعتها ورودی ۰/۰۰، ۳/۰، ۶/۰ و ۰/۹ متربرثانیه پرداخته شده است.

به همین منظور در کتاب سامانههای جریان داخلی^۱ نوشته میلر، ضریب افت فشار در مقطع انقباض دایرهای و بیضوی ارائه شده است. در این کتاب کمترین ضریب افت فشار مربوط به مقطع بیضوی بوده و بر این اساس جهت مدل کردن این مقطع از محل قیدهای موجود در مسأله یک بیضی برای شکل مقطع ورودی اختصاص داده شده است. همچنین جهت اطمینان از فرآیند مدلسازی، مقطع ورودی دایروی نیز با توجه به محل قیدها، طراحی و مورد بررسی قرار گرفته است (Miller, 1990).

در کتاب طراحی سدهای کوچک جهت طراحی انقباض از شکل خطی با شیب مشخص استفاده شده است. در این کتاب با ارائهی فرمول (۴-۱) حد نهایی مجاز برای شیب خط ورودی مقطع تعیین شده است.

¹Internal Flow Systems

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{gD}}{v} \tag{1-f}$$

در این رابطه α میانگین اندازه جمع مقطع انقباض، g شتاب گرانش زمین، D میانگین اندازه جمع شدگی و The United States Department of The Interior Bureau of) میانگین سرعت ورودی است (Reclamation, 1987 (یر ارائه شده است.

مقدار tan $lpha$	سرعت ورودی متربرثانیه		
1717/08	•/•• ١		
4/•47	۰/۳		
۲/•۲۱	• /۶		
1/361	٠/٩		

جدول ۴-۵- مقادیر شیب مجاز در مقطع ورودی انقباض بر اساس آیین نامه ی USBR

چنانچه یک خط راست بین دو قید مطرحشده در مسأله رسم شود، شیب این خط برابر با ۱۰/۲۵ است که از تمامی مقادیر بالا کمتر شده و در نتیجه میتوان به عنوان یک مقطع مناسب از نظر USBR، مدل شود. ندیال کُف^۱ از مقطع ارائهشده توسط ناسا برای طراحی یک انقباض ناگهای استفاده کرد. این مقطع که برای طراحی تونلهای بادی با سرعت کم طراحی شده بود در طراحی انقباض ناگهانی نیز نتایج بسیار خوبی کسب کرد. رابطهی ارائهشده برای طراحی این مقطع، مطابق با رابطهی زیر است.

$$y_{C} = y_{CI} - (y_{CI} - y_{CO}) \left[6 \left(\frac{x_{C}}{L_{C}} \right)^{5} - 15 \left(\frac{x_{C}}{L_{C}} \right)^{4} + 10 \left(\frac{x_{C}}{L_{C}} \right)^{C} \right]$$
(7-4)

که در این رابطه y_c و y_c مختصات مرز جامد، y_{c1} نصف قطر ورودی، y_{c0} نصف قطر خروجی و L_c طول کل مقطع طراحی است (Nedyalkov, 2012). با توجه به این که در رابطه یبالا، قیدهای مکانی در نظر گرفته نمی شود، جهت طراحی مقطع ورودی در این مسأله، مقطع پیشنهادشده را در محل قیدها قرار داده و میزان افت فشار با کمک مدلسازی عددی بررسی می شود.

برای اطمینان از بهینه بودن مقطع به دست آمده، مقاطع توصیه شده توسط منابع مختلف در نرمافزار OpenFOAM مدل شدهاند (شکل ۴-۲۷).

¹Nedyalkov



شکل ۴-۲۷- مدل های توصیه شده و مدل به دست آمده از SPC در نرمافزار OpenFOAM

جهت بررسی میزان افت فشار در این مقاطع از حلگر icoFoam برای مدلسازی جریان آرام استفاده شده است. همچنین در این مسأله شرایط مرزی و مشخصات سیال به ترتیب برابر با شکل ۴-۲۰ و جدول ۴-۴ در نظر گرفته شده است. در نمودار زیر نتایج حاصل از میزان فشار بر روی خط تقارن این مدل ها ارائه شده است.



شکل ۴-۲۸- مقادیر فشار مدلهای توصیهشده در محل خط تقارن مدلها با سرعت ورودی ۲۰۰۱ متربرثانیه همان طور که مشاهده می شود، مقطع پیشنهادشده توسط USBR و مقطع به دست آمده از برنامه SPC دارای کمترین میزان افت فشار بوده و تفاوت بین این دو مقطع در مقدار افت فشار کل به ۲۳۷ درصد می رسد. درحالی که که مقاطع دایروی بیش ترین میزان افت فشار را دارد و نزدیک ترین مقطع به مقطع بهینه، مقطع NASA است که در نهایت با مقایسه مقطع بهینه با مقطع دایروی، بیضوی و NASA می توان به این نتیجه رسید که مقدار افت فشار در این مقاطع به تر تیب به میزان ۹۰ ۲۱، ۲۰۹۹ و ۵۰ درصد بهبود یافته است؛ بنابراین در جریانهای آرام هرچه مقطع به حالت خطی نزدیک تر و شیب آن کمتر باشد، میزان افت فشار کمتر شده و جواب بهتری به دست می آید. علاوهبراین می توان نتیجه گرفت، روش استفاده شده در بهینه سازی برای این

علاوه بر بررسی درستی بهینهسازی در جریان آرام، استفاده از این روش در جریانهای آشفته با سرعت و شدتهای متفاوت نیز دارای اهمیت بهسزایی است. به همین منظور جهت بررسی میزان افت فشار در این مقاطع با جریانهای آشفته مطابق آنچه در قسمت قبل توضیح داده شد از حلگر simpleFoam جهت مدلسازی این مقاطع استفاده شده است. همچنین مشخصات سیال و شرایط مرزی برای مدلها با سرعت ورودی ۲/۰ متربرثانیه به ترتیب مطابق با شکل ۴-۲۲ و جدول ۴-۴ اعمال شده است. جهت آشنایی با جزئیات بیشتر مدلسازی این مقاطع در نرمافزار OpenFOAM تمامی فایلهای ورودی استفاده شده در مقطع مستطیلی این مسأله با سرعت ورودی ۰/۳ متربرثانیه در پیوست ۲ قرار داده شده است.

در زیر نمودارهای به دست آمده از مدلسازی این مقاطع با سرعتهای متفاوت در نرمافزار OpenFOAM ارائه شده است. در این نمودارها مقادیر فشار در روی خط تقارن این شکلها جهت محاسبهی میزان افت فشار در هر جریان با سرعت ورودی متفاوت ارائه شده است.



شکل ۴-۲۹- مقادیر فشار مدلهای توصیه شده در محل خط تقارن مدلها با سرعت ورودی ۰/۳ متربر ثانیه



شکل ۴-۳۰- مقادیر فشار مدلهای توصیه شده در محل خط تقارن مدلها با سرعت ورودی ۶/۶ متربر ثانیه



شکل ۴-۳۱- مقادیر فشار مدل های توصیه شده در محل خط تقارن مدل ها با سرعت ورودی ۰/۹ متربر ثانیه

همان طور که مشاهده می شود با مقایسه مقادیر فشارها، در این نوع جریان مقاطع بیضوی پیشنهادشده توسط میلر و مقطع بهینهی به دست آمده دارای بهترین جواب برای تابع هدف بهینهسازی هستند. علی رغم این که در طول محل اندازه گیری فشار، مقادیر فشار به دست آمده در مدل بیضوی کمتر از مقادیر به دست آمده از برنامه SPC است امّا با بررسی میزان افت فشار کل در این دو مقطع، اختلاف بین آنها ۹/۰۰ درصد در سرعت ۲/۰ متربرثانیه، ۶۹/۰ درصد در سرعت ۶/۰ متربرثانیه و ۵۹/۰ درصد در سرعت ۹/۰ متربرثانیه به دست آمد که بر اساس مقادیر این اختلافها میتوان نتیجه گرفت هر دوی این مقاطع با توجه به تابع هدف بهینهسازی دارای نتیجهی خوبی هستند. همچنین مقطع دایرهای به علت ایجاد انقباض در طول کمتر، در قسمت میزان افت فشار کل این اختلافها میتوان نتیجه گرفت هر دوی این مقاطع با توجه به تابع هدف مینهسازی دارای نتیجهی خوبی هستند. همچنین مقطع دایرهای به علت ایجاد انقباض در طول کمتر، در میزان افت فشار کل دارای میزان افت فشار کمتری نسبت به تمامی مقاطع است درحالی که در محاسبهی میزان افت فشار کل دارای عدد بیشتری نسبت به مقاطع دیگر است. شایان ذکر است در جریانهای آشفته برعکس جریانهای آرام مقطع توصیه شده توسط USBR دارای بهترین جواب برای بهینهسازی نبوده امّا نزدیک ترین مدل به مدل بهینه محسوب میشود. در نهایت با مقایسه مقاطع بهینه با مقطعهای دایرهای، نزدیک ترین مدل به مدل بهینه محسوب میشود. در نهایت با مقایسه مقاطع بهینه با مقطعهای دایرهای، ۱۸۵۸ و USBR و ۲/۰۴ درصد در سرعت ۳/۰ متربرثانیه، ۳/۲۹، ۲/۰۸ و ۶/۰ درصد در سرعت ۶/۰ متربرثانیه و ۱۸۹۸، ۲/۱۹ و ۱۹۵۰ درصد در سرعت ۳/۰ متربرثانیه بهبود پیدا کرده است؛ بنابراین هر دو مقطع بهینهی به دست آمده دارای دقت خوبی بوده و توانایی روش بهکاررفته رفته در این پژوهش در ارائهی مقطع بهینه بر اساس رژیم و سرعت جریان از نقاط قوت این روش محسوب میشود.

۴-۵- بهینهسازی شکل آبگیر افقی نیروگاهی

همان طور که در فصل اول اشاره شد، هدف اصلی از انجام این تحقیق، بهینهسازی شکل دهانهی ورودی آبگیرهای افقی نیروگاهی است. بر این اساس از آنجایی که آییننامههای مختلف بدون در نظر گرفتن اثرات محیط اطراف آبگیر، برای تمامی آبگیرها یک مقطع ارائه کردهاند در این قسمت با بیان یک مسئله، مقطع بهینهی حاصل از SPC را با مقاطعی که توسط آییننامههای مختلف ارائه شده است، مقایسه و صحت بهینه بودن مقطع مورد بررسی قرار می گیرد.

۴–۵–۱ بیان صورت مسأله

همان طور که در فصل اول اشاره شد، یک از مهمترین عوامل افت انرژی و کاهش راندمان نیروگاههای برقی آبی افت هد ناشی از شکل دهانهی آبگیر است. بر این اساس در این مسأله به طراحی بهینهی شکل آبگیر یک سد باهدف کاهش افت انرژی پرداخته میشود. جهت محاسبهی افت انرژی از معادلهی برنولی استفاده شد؛ از آنجایی که توربینها با دبی و هد مشخصی میتوانند کار کنند، سرعت خروجی و ورودی در این مسأله معلوم و ثابت فرض شد. بر این اساس در معادلهی برنولی با اعمال سرعتهای معلوم و هد یکسان، اختلاف فشارها برابر با میزان افت انرژی میشود؛ به همین منظور جهت محاسبهی تابع هدف بهینهسازی از اختلاف فشار در ابتدا و انتهای مسیر استفاده شد. در این مسأله یک سد با آبگیر افقی در بدنهی آن جهت طراحی شکل سهبعدی دهانهی آبگیر آن وجود دارد. جهت در نظر گرفتن اثر هوا در این پژوهش، جریان حل شده در اینجا به صورت دوفازه در نظر گرفته شد و مشخصات سیال و جریان در جدول ۴-۶ ارائه شده است.

واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر
$\frac{m^2}{s}$	۱/•e-۶	لزجت دینامیکی آب	$\frac{kg}{m^3}$	۱۰۰۰/۰	چگالی آب
$\frac{m^2}{s}$	$1/\Delta e - \Delta$	لزجت ديناميكى هوا	$\frac{kg}{m^3}$	١/•	چگالی هوا
$\frac{m}{s}$	۲/۰۰	سرعت خروجی در جهت X	$\frac{m}{s}$	•/••\$1	سرعت ورودی در جهت X
$\frac{m}{s}$	• • •	سرعت خروجی در جهت Y	$\frac{m}{s}$	• • •	سرعت ورودی در جهت Y
$\frac{m}{s}$	• / • •	سرعت خروجی در جهت Z	$\frac{m}{s}$	• / • •	سرعت ورودی در جهت Z

جدول ۴-۶- مشخصات و ابعاد مسألهي بهينهسازي شكل دهانهي ورودي آبگير

در ادامه ابعاد و مشخصات مرزی جریان این مسأله در دو شکل در صفحات افق و عمود در زیر نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۲- ابعاد و مشخصات مسألهی آبگیر در صفحهی افق



شکل ۴-۳۳- ابعاد و مشخصات مسألهی آبگیر در صفحهی عمودی

SPC ارائهی نتایج بهینهسازی آبگیر توسط

همان طور که در فصل سوم و در بخش ارائهی نتایج بهینهسازی مسأله انقباض توسط SPC تشریح شد برنامه نوشته شده به صورت دوبًعدی بوده و برای حل مسائل سه بُعدی در آن باید دو صفحهی عمود بر هم را در نظر گرفت و بهینه سازی را در هر صفحه انجام داد و سپس با برهم نهی خطوط به دست آمده شکل بهینه شده را به دست آورد. به همین منظور در این مسأله ابتدا شکل دهانه ورودی در صفحه یافق بهینه شده و سپس شکل بهینه شده ی مقطع در صفحه یا عمود بر آن به دست می آید. با بررسی شکل مقطع در صفحه یافق، شباهت مقطع به دست آمده با یک انقباض به خوبی قابل مشاهده است. علی رغم این شباهت، با توجه به زیاد بودن فاصله یمقطع از دیواره ها، فرآیند بهینه سازی یعنی انتخاب خط جریان بهینه، برای این مسأله به صورت کامل در صفحه ی افق انجام شد که بر اساس نتایج به دست آمده، در این مقطع نیز خط جریان ۳۸ درصد دارای کمترین میزان افت فشار در میان مقاطع تولید شده بود.

جهت بهینهسازی شکل آبگیر در صفحهی عمود (شکل ۴-۳۳) با توجه به شیب بدنهی سد، در برنامهی SPC مرز پایین مقطع ورودی را به صورت ثابت و برای مرز بالا، خطوط جریان مختلف، جهت انطباق در نظر گرفته شدند. پس از ایجاد این مقاطع همان طور که در بخش قبل اشاره شد، هر یک از این مقاطع توسط نرمافزار OpenFOAM مدل شده و خط جریان بهینه به دست میآید. در اینجا برای جلوگیری از تکرار مباحث مشابه، به بیان نتایج نهایی به دست آمده پرداخته میشود. جهت بهینهسازی مرز بالایی در این مسأله نیز خط جریان ۸۳ درصد به عنوان بهترین خط جریان جهت انطباق تعیین شد. برای به دست آوردن خط جریان بهینهی مرز پایینی، مرز بالا بر اساس خط جریان ۳۸ درصد در نظر گرفته شده و برای خط پایینی مقطع، خطوط جریان مختلفی جهت انطباق انتخاب شدند. پس از بررسی مقاطع به دست آمده خط جریان ۷ درصد به عنوان بهترین خط جریان برای انطباق بر مرز پایینی انتخاب شد. علاوه بر این جهت اطمینان از بهینه بودن مقطع، ترکیبی از خطوط جریان ۸۰، ۸۳ و ۸۵ درصد برای مرز بالایی و ۵، ۷ و ۱۰ درصد برای مرز پایینی در برنامهی SPC طراحی شد؛ بر اساس این خطوط، ۹ مقطع برای شکل آبگیر در صفحهی عمودی به دست آمد که با بررسی میزان افت فشار در این مقاطع، مقطع بهینه همان مقطع با مرز بالایی خط جریان ۳۸ درصد و مرز پایینی خط جریان ۷ درصد تعیین شد. در شکل زیر مقطع بهینهی به دست آمده از SPC نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۴- مقطع بهینهی حاصل از SPC برای آبگیر در صفحهی عمودی

در این شکل، خطوط جریان و شکل مقطع آبگیر نمایش داده شده است. همچنین لازم به ذکر است جهت بررسی تمامی این مقاطع از حلگر simpleFoam، مشابه با توضیحات بخش ارائهی نتایج بهینهسازی مسأله انقباض توسط SPC و پیوست ۲ استفاده شده است.

۴-۵−۴ مقایسه مقطع آبگیر به دست آمده از SPC با مقاطع توصیه شده

جهت بررسی کاهش میزان افت فشار و اهمیت پژوهش صورت گرفته، در این قسمت، ابتدا به بیان مقاطع توصیهشده برای یک آبگیر پرداخته شده و سپس با مدلسازی سهبعدی این مقاطع و مقطع بهینهی به دست آمده، میزان بهبود تابع هدف بهینهسازی یعنی کمینه شدن مقدار افت فشار محاسبه می شود. در کتاب طراحی سدهای کوچک، برای شکل مقطع آبگیر بر اساس شکل آن که دایروی یا مستطیلی باشد، معادلاتی ارائه میشوند. در این مسأله از آنجایی که شکل مقطع مستطیلی است معادلهی زیر جهت طراحی دهانهی آبگیر بر اساس این کتاب معرفی میشود.

$$\frac{x^2}{D^2} + \frac{y^2}{(0.33D)^2} = 1 \tag{(7-4)}$$

در این رابطه x و y مختصات شکل دهانه و D برابر با ارتفاع مقطع برای طراحی در صفحهی عمودی و برابر با عرض مقطع برای طراحی در صفحهی افقی است (The United States Department of The Interior) عرض مقطع برای طراحی آبگیرها، از این رابطه Bureau of Reclamation, 1987). شایان ذکر است با توجه به کتاب راهنمای طراحی آبگیرها، از این رابطه می توان در سدهای بلند نیز استفاده کرد (Division of ASCE, 1995).

بر اساس استاندارد شماره ۹۷۶۱:۱۹۹۵ کشور هندوستان، هر مقطع آبگیر دارای یک معادله در صفحهی عمودی و یک معادله در صفحهی افقی است. به همین منظور جهت طراحی مقطع آبگیر در این استاندارد، شکل زیر Bureau of Indian Standards, ارائه شده است (Bureau of Indian Standards, 1995).



شکل ۴-۳۵- مدل ارائه شده برای طراحی شکل مقطع آبگیر در استاندارد هندوستان (Bureau of Indian Standards, 1995)

همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود می توان اثر زاویه ی آبگیری را بر شکل مقطع در نظر گرفت که با توجه به مسأله ی مطرح شده در این قسمت این زاویه عمود بوده و در نتیجه شکل مقطع بر اساس روابط ارائه شده به دست می آید.

در نهایت برای بررسی میزان افت فشار در این مقاطع، تمامی مقاطع در نرمافزار OpenFOAM مدل می شود که نتایج حاصل از طراحی و مدلسازی مقطع بهینه جهت درک بهتر موضوع در این نرمافزار در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۴-۳۶- نتایج حاصل از مقطع به دست آمده از SPC

جهت مدل سازی مقاطع توصیه شده و مقطع بهینه در نرمافزار OpenFOAM از دستور blockMesh جهت تولید شبکهی حل استفاده شد. همچنین جهت حل معادلات این جریان، حلگر interFoam به کار گرفته شد. این حلگر توانایی حل جریانهای دو فازی با سیالات تراکم پذیر را دارد که به صورت پیش فرض از دو سیال آب و هوا استفاده کرده است. علاوه بر این، حلگر interFoam جریان را آشفته در نظر گرفته و برای حل آن از مدل استاندارد ع-K استفاده می کند. اطلاعات و ضرایب اولیه این مدل مطابق با توضیحات بخشهای قبلی در را طول با مدل استاندارد ع-K استفاده می کند. اطلاعات و ضرایب اولیه این مدل مطابق با توضیحات بخشهای قبلی در رابطه با مدل آشفتگی ع-K استاندارد، تعیین شدند. مشخصات سیالهای به کاررفته رفته و همچنین شرایط مرزی این مسأله مطابق با جدول ۴-۶، شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۳۳ در نرمافزار OpenFOAM اعمال شدند.

جهت آشنایی بیشتر با جزئیات مدلسازی حلگر interFoam در نرمافزار OpenFOAM تمامی اطلاعات اولیه و فایلهای ورودی مسألهی آبگیر با شکل مستطیلی در پیوست ۳ ارائه شده است.

پس از مدل کردن مقاطع بالا در نرمافزار OpenFoam مقادیر فشار بر روی خط مرکزی آبگیر به دست آمده و بر اساس این مقادیر، افت فشار در هر مقطع محاسبه میشود. در نمودار زیر مقادیر فشارهای یادشده در بالا برای مقاطع مختلف بیان شده است.



شکل ۴-۳۷- مقایسه مقطع حاصل از SPC و مقاطع توصیهشده در مسألهی آبگیر

همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود، مقادیر فشار در مخزن تا نزدیکی محل آبگیر تغییر چندانی نمی کند، امّا پس از رسیدن به مقطع آبگیر، فشار به میزان قابل توجهی افت می کند و به علت ثابت بودن سرعت در خروجی، فشار در طول مسیر آبگیر و لولهی تحت فشار دوباره فشار خود را افزایش داده و به مقدار مشخصی می ساند. بر این اساس هر چه افت فشار ناگهانی کمتر باشد علاوه بر اتلاف انرژی کمتر، جریان برای رسیدن به فشار انتهایی دارای تغییرات فشار کمتری شده و در نتیجه افت فشار طولی در لولهی تحت فشار نیز کمتر می شود. بر اساس نمودار بالا، مقادیر فشار در مقطع به دست آمده از SPC با کاهش کمتری نسبت به بقیه مقاطع در طول مسیر جریان دارد. همچنین در مقطع توصیهشده توسط استاندارد هند، نتایج بهتری نسبت به مقطع USBR به دست آمد. با توجه به عدم بررسی شیب بدنهی سد در مقاطع توصیهشده، بر اساس انتظار، مقطع به دست آمده از SPC دارای افت فشار کمتری بود. در مقایسه مقطع استاندارد هند و مقطع USBR با توجه به این که در استاندارد هندوستان طول بیشتری برای دهانهی آبگیر در نظر گرفته میشود، میزان افت فشار در این مقطع کمتر به دست آمده است. در نهایت با طراحی مقطع آبگیر بر اساس روش ارائهشده در این پژوهش میتوان مقدار افت فشار را نسبت به مقطع NAP کیلوپاسکال و نسبت به مقطع استاندارد هند و میزون میتوان مقدار افت فشار را نسبت به مقطع USBR، ۱۸۹ کیلوپاسکال و نسبت به مقطع استاندارد هند ۳۹۹ کیلوپاسکال بهبود بخشید؛ به عبارت دیگر با طراحی درست و بهینهی مقطع آبگیر میتوان ۲۰۰۱ درصد و ۱۹۹۵ درصد میزان افت انرژی را نسبت به مقاطع استاندارد هند و MBR کاهش داد که این موضوع باعث کاهش جریانهای گردابی موجود در مسیر توربین شده و به تبع آن علاوه بر افزایش سوددهی اجرای سد و نیروگاه برقآبی موجب کاهش هزینههای نگهداری و افزایش طول عمر سیستم تولید انرژی در سد میشود.

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها

۵–۱– مقدمه

در این فصل با توجه به نتایج ارائهشده در فصل قبل، به بیان نتایج به دست آمده از این پژوهش جهت بهبود و پیشرفت مسائل مربوط به طراحی هیدرولیکی در زمینههای مختلف پرداخته میشود. از آنجایی که هدف از انجام این پژوهش بررسی عددی بهینهسازی آبگیرها با روش معیاربهینگی است در این قسمت نیز ابتدا به نتایج حاصل از کدنویسی این روش و مدلسازی عددی آن پرداخته میشود و سپس به بررسی نتایج به دست آمده از طراحی هیدرولیکی انقباض و آبگیرها پرداخته میشود.

SPC نتایج به دست آمده از مدلسازی در برنامهی

همان طور که در فصلهای قبل به تفضیل بیان شد، جهت انجام بهینهسازی در این پژوهش از روش معیاربهینگی با معیار انطباق خط جریان بر مرز جامد، استفاده شد. برای انجام این روش، با توجه به وجود مقاطع مختلف جهت طراحی، یک برنامه با توانایی مدل کردن هر شکلی با جریان انتقالی تهیه شد. به همین منظور در این برنامه با توجه به جزئیات ارائهشده در فصل سوم، به نوشتن کد برای تولید شبکه و حل معادلات لازم در شبکهها پرداخته شد. بر این اساس در ادامه به بررسی نتایج حاصل از تولید شبکه و حل معادلات دیفرانسیل مربوط به این پژوهش پرداخته میشود.

تولید شبکه در این برنامه، بر اساس مختصات مرز جامد مسأله مطرح می شود. از آنجایی که تمامی مدل ها در اولین گام بهینه سازی به صورت ساده و دارای اشکال تیز گوشه هستند تولید شبکه برای گامهای ابتدایی به راحتی قابل انجام است؛ امّا با انجام گامهای بعدی بهینه سازی، شکل مسأله از حالت ساده خارج شده و نیاز به تولید شبکه جهت حل دقیق تر معادلات می شود. حال با توجه به مسائل مطرح شده در این زمینه و اهمیت زمان محاسبات می توان به نتایج زیر در این قسمت اشاره کرد.

- در مسائلی که مختصات مرزهای جامد به صورت خط راست هستند، استفاده از روشهای جبری که
 در فصل سوم تشریح شدند، در کمترین زمان و بدون نیاز به فرآیندهای تکراری، توصیه می شود.
- در مسائلی که مرزها دارای خطوط منحنی هستند، استفاده از روشهای عددی علی رغم زمان بر بودن،
 از دقت قابل توجهی بر خوردار هستند.

 چنانچه در مسألهای از هر دو روش فوق برای تولید شبکه در یک قلمروی فیزیکی استفاده شود، معمولاً بیشترین خطا در ناحیه تغییر روش تولید شبکه و مقابل شدن دو شبکهی مختلف با یکدیگر اتفاق میافتد.

پس از انتخاب روش تولید شبکه بر اساس نتایج بیانشده در بالا، نتایج زیر بر اساس جزئیات اجرای این روشها به دست میآید.

- بهترین شبکه از دیدگاه انجام محاسبات، شبکهای است که از تغییرات ناگهانی در آن جلوگیری شود؛
 به عبارت دیگر برای تولید یک شبکهی محاسباتی مناسب باید اجزا این شبکه دارای شکل مربعی
 باشند و تغییر ابعاد این المانها در یک راستا با تغییرات نرم انجام شود.
- چنانچه تولید شبکه در یک راستا انجام شود و در راستای دیگر، شبکه بر اساس ابعاد یک جز از شبکه به دست آید، دقت حل عددی کاهش پیدا می کند و به همین دلیل توصیه می شود برای تولید شبکه از یک روش یکسان در تمامی راستاها استفاده شود.

در نهایت با توجه به نتایج ارائهشده در بخش بررسی صحتسنجی برنامه SPC (فصل سوم) میتوان نتیجه گرفت، برنامهی SPC توانایی لازم در تولید شبکه و حل معادلات مربوط به بررسی معیار بهینهسازی را دارد.

۵–۳– نتایج حاصل از مدلسازی در نرمافزار OpenFOAM

همان طور که در بخش اول اشارهشده جهت بررسی و مقایسهی مدلهای ارائهشده و توصیهشده در این پژوهش از نرمافزار بالا استفاده شد. در مدلسازی با این نرمافزار نتایج زیر برای مسائل مختلف حاصل شد.

- از آنجایی که این نرمافزار از روش حجم محدود در حل معادلات دیفرانسیل استفاده می کند، برای حل دوبعدی مسائل باید بُعد سوم مسأله را با اندازهی کوچک در نظر گرفت که برای افزایش دقت محاسبات توصیه می شود ابعاد المان بُعد سوم در مدل سازی دوبعدی برابر با ابعاد المان در راستاهای دیگر باشد.
- در تولید شبکه در این نرمافزار اگر شیب خط مرزها از ۷۰ درجه بیشتر شود، حل مسأله در این نرمافزار
 با مشکل روبهرو می شود. علاوه بر این در هر بلوک در صورت وجود صفحاتی با شیبهای متفاوت نیاز
 به شبکهبندی بسیار ریز است.

- واحد نرمافزاری blockMesh در تولید شبکههایی با مقدار خمشدگی^۱ بیش از حد یکی از صفحات با مشکل روبهرو می شود. همچنین این دستور در اختصاص مختصات مرزها با کمک دستور arc نیاز به شبکهی ریزتری دارد که با کمک دستور polyline می توان این مشکل را حل کرد.
- اگر از تابع دیوار در حل جریان آشفته با این نرمافزار استفاده شود، ریزتر کردن شبکه در نزدیکی مرز
 جامد باعث افزایش قابل توجه دقت حل نمی شود.

در نهایت با بررسی نتایج بخش بررسی صحت مدلسازی، در نرمافزار OpenFOAM میتوان به این نتیجه رسید که این نرمافزار در مدل کردن جریانهای آشفته با مدل استاندارد k-٤ دارای دقت بسیار خوبی است.

۵-۴- بررسی نتایج حاصل از طراحی مقطع انقباض

بعد از بررسی صحت برنامهی SPC و نرمافزار OpenFOAM، جهت اطمینان از بهینه بودن مقطع ارائهشده با این روش به طراحی یک انقباض در مسیر جریان باهدف کاهش افت فشار، پرداخته شد. به همین منظور رژیم جریان در این مسأله به صورت آرام و آشفته در نظر گرفته شد. جهت بررسی اثر سرعت ورودی جریان آشفته در این مسأله، سه سرعت ورودی برای این جریان در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج ارائهشده در فصل ۴ و بررسیهای صورت گرفته می توان موارد زیر را در طراحی یک انقباض مطرح کرد.

- خطوط راست در طراحی شکل مقطع جمعشدگی با رژیم جریان آرام نتایج بهتری نسبت به خطوط منحنی دارند.
- در طراحی یک مقطع انقباض هر چه محل قیدها از هم دورتر باشند، نتایج بهتری به دست میآید؛ به عبارت دیگر هر چه خط راست ناحیهی انقباض طولانی تر باشد نتایج بهتری حاصل می شود.
- در طراحی یک انقباض، روش معیاربهینگی دارای دقت قابل توجهی بوده و از آن می توان در طراحیهای مشابه استفاده کرد.
- از بین مقاطع توصیه شده برای یک انقباض با رژیم آرام، مقطع خطی که بر اساس کتاب سدهای کوچک (USBR) ارائه شد دارای بهترین نتیجه است که با مقطع به دست آمده از SPC دارای تفاوت اندکی است و تفاوت آنها در تابع بهینه سازی ۰/۰۰۹ درصد است.

¹ Skewness

- بدترین مقطع برای طراحی انقباض با جریان آرام مقطع دایروی بوده که نتایج حاصل از آن بیشترین میزان افت فشار را دارد.
- روش معیار بهینگی علاوه بر ارائهی مدل در جریان آرام این مسأله، توانایی ارائهی مقطع بهینه در جریانهای آشفته را با دقت بسیار خوبی دارد.
- در طراحی یک انقباض با جریان آشفته، هرچه مرز جامد دارای انحنای نرمتر باشد نتایج حاصل از آن
 دارای افت فشار کمتری خواهد بود.
- از بین مقاطع توصیه شده برای جمع شدگی با جریان آشفته، مقطع بیضوی ارائه شده توسط میلر دارای بهترین جواب است که با مقطع حاصل شده از SPC، به میزان ۰/۱۸ درصد در مقادیر افت فشار اختلاف دارد.
- بدترین مقطع برای طراحی یک جمع شدگی با جریان آشفته، مقطع دایرهای است که باعث بیشترین مقدار افت فشار می شود.
- در طراحی یک انقباض با جریان آشفته، میزان سرعتهای ورودی و جریان اثری بر میزان افت فشار مقاطع مختلف ندارد؛ به عبارت دیگر، بر اساس خروجی تمامی مدلهای آشفتهی در مقاطع جمعشدگی (مورد مطالعه در این پژوهش) مقطع بیضوی یا مقطع حاصل از SPC به عنوان مقطع بهینه تعیین می شود.
 - فارغ از نوع رژیم جریان، بدترین مقطع برای طراحی یک انقباض، مقطع دایروی است.

در آخر با بررسی نتایج فوق، می توان از درستی و بهینه بودن مقطع ارائهشده توسط این روش اطمینان حاصل کرد و از این روش در بهینهسازی مسائل مشابه استفاده کرد.

۵-۵- بررسی نتایج حاصل از طراحی مقطع آبگیر

پس از اطمینان از درستی روند بهینهسازی با روش معیاربهینگی در طراحی یک انقباض، به بیان نتایج حاصل از بهینهسازی مقطع آبگیر یک سد که هدف اصلی از انجام این پژوهش است، پرداخته شد. بر اساس نمودارهای ارائهشده در بخش مقایسه مقطع آبگیر به دست آمده از SPC با مقاطع توصیهشده نتایج زیر حاصل گردید:

احتمال دارد اثر شیب بدنه یسد در طراحی شکل آبگیر از اهمیت ویژه ای برخوردار باشد در حالی که
 استانداردهای موجود از در نظر گرفتن این پارامتر در مدل های خود، صرفنظر می کنند.
- بر اساس نتایج موجود، روش بحث شده در این پژوهش قادر به بهینه سازی شکل دهانه ی یک آبگیر با
 در نظر گرفتن اثر شیب بدنه یسد برای سدهای مختلف را دارد.
- مقطع ارائهشده در استاندارد کشور هند دارای جواب بهتری نسبت به مقطع توصیهای USBR است.
 - از بین مقاطع موجود بهترین مقطع برای این مسأله، مقطع حاصل از SPC است.
- با بهبود مقطع یک آبگیر، افت فشار کاهش پیدا کرده و اثرات مخرب جانبی جریان مانند ایجاد
 گردابههای کوچک کمتر می شود.

در نهایت میتوان روش استفادهشده در این پژوهش را با توجه به توانایی آن در بهینهسازی مقطع آبگیر به عنوان یک روش کارا و مؤثر در طراحی آبگیرها با در نظر گرفتن شرایط محیطی اطراف آبگیر معرفی کرد.

۵-۶- پیشنهادها برای مطالعات آتی

در این بخش با توجه به مطالعات صورت گرفته و پژوهشهای انجامشده مواردی جهت بهبود عملکرد این روش در زمینههای مختلف و بررسی اثر پژوهش صورت گرفته در بخشهای مختلف طراحی هیدرولیکی معرفی میشوند. در ادامه به بیان مختصری از هر مورد پرداخته میشود.

- اضافه کردن بخشی به برنامه SPC که توانایی حل معادلات جریان آشفته و بررسی تابع هدف بهینه سازی را داشته باشد.
 - بررسی بهینهسازی با کمک برنامهی SPC در طراحی هیدرولیکی مقاطع انتقالی دیگر.
 - بررسی اثر دیواره های جانبی مخزن بر طراحی آبگیر و میزان بهبود طرح با کمک برنامه یSPC.
 - بررسی اثر زاویه آبگیری در یک آبگیر و توانایی برنامه SPC در مدل کردن آن.
 - بررسی طول قیدهای اجرایی در طراحی یک آبگیر و بهینهسازی آن با روش معیاربهینگی.
 - مطالعه یاثر تقارن محیط اطراف آبگیر در بهینه سازی مقطع آبگیر با روش معیار بهینگی.
 - مدلسازی آزمایشگاهی نتایج به دست آمده از برنامهی SPC، در صحتسنجی روش انجامشده.

منبعها

- Amirante, R., Catalano, L. A., Dadone, A., & Daloiso, V. S. (2007). Design optimization of the intake of a small-scale turbojet engine. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 18, 17-30.
- Anderson, J. d. (1995). *Computational fluid dynamics; the basics with applications* (1st ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Bureau of Indian Standards. (1995). Hydropower intakes-Criteria for hydraulic design. Bureau of Indian Standards. New Delhi.
- Christensen, P. W., & Klabring, A. (2009). An introduction to structural optimization. Linkoping: Springer.
- Durst, F., & Loy, T. (1983). Investigations of laminar flow in a pipe with sudden contraction of cross sectional area. *13*, 15-36.
- Fosumpaur, P., & Gihak, F. (2005). Design and optimization of a turbine intake structure. *Acta Polytechnica Journal*, 45(3), 87-91.
- Haftka, R. T., & Gurdal, Z. (1993). *Elements of structural optimization* (3rd ed.). Dordrecht: Kluwer Academic.
- Hassani, B., & Hinton, E. (1998). *Homogenization and structural topology optimization*. Swansea: Springer.
- Herlock, J. H., & Denton, J. D. (2005, January). A review of some early design practice using computational fluid dynamics and a current perspective. *Journal of Turbomachinery*, 127, 5-13.
- Hoffmann, K., & Chiang, S. (2000). *Computational fluid dynamics* (4th ed., Vol. 1). Wichita, Kansas, USA: Engineering Education System.
- Jalili, H., HosseinzadeDalir, A., & Farsadizadeh, D. (2015). Investigating effect of inlet shape on the flow pattern and vortex generation around inlet of intake using numerical method. *Journal of Water and Soil Science*, 24(1), 29-40.
- Junhong, L., & Junliang, T. (2015). Streamlining of bridge piers as scour countermeasures: optimization of cross section. *Transport Research Board 94th Annual Meeting*. Washington.
- Kavianpour, M., Sanati, S., Roshan, R., & Khorasanzade, A. (2009). Investigation of adajcent intakes preformance on formation mechanism of vortices. *The Second National Conference of Dams in Iran.* Zanjan.
- Keshavarzian, I., Khanjani, M., & Nejad Naderi, M. (2012). Vortices simulation in heydropower intakes. *The First International Conference on Dams and Hydropowers*. Kerman.
- Khanarmuei, M., Rahimzadeh, H., & Sarkardeh, H. (2015). Investigating the effect of intake withdrawal direction on critical submergence and strength of vortices. *Modares Mechanic Engineering Journal*, *14*(10), 35-42.
- Knauss, J. (1987). *Swirling Flow Problems at Intakes*. Rotterdam: IAHR Hydraulic Structures Manual.
- Kumar, J., & Saha, S. (2015). Laminar modeling and simulation on cutting fluid flow through sudden contraction nozzle. *Internation Journal of Engineering Research and General Science*, 3(3), 288-294.
- Kundu, K. P., & Cohen, I. M. (2010). *Fluid mechanics* (4th ed.). Burlington, Massachusetts, USA: Academic Press.
- Lotfollahi Yghin, M., & Kardan, N. (2011). Application of ant colony algorithm to optimize the high pressure water conveyance pipe of Shahryar concrete dam. *Journal of water and soil science*, 23(1), 57-69.

Lugt, H. (1983). Vortex Flow in Nature and Technology. New York: Joun Wiley & Sons.

- Lund, E., Moller, H., & Jakobsen, L. A. (2003). Shape design optimization of stationary fluidstructure interaction problems with larg displacements and turbulence. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25, 283-392.
- Marosi, M., Ghomshi, M., Sarkarde, H., & Roshan, R. (2009). Eperimental analysis of pressures and its effect on energy generation. *The First Natinal Confrence of Infrastructures Management and Engineering*. Tehran: Tehran University.
- Michelle, A. G. (1904). The limits of econemy of materials in frame-structures. *Philosophical Magazine*, *8*, 305-316.
- Miller, D. S. (1990). *Internal flow systems*. Bedford: BHRA (INFORAMATION SERVICES).
- Naderi, V., Farsadizadeh, D., Hosseinzade, A., & Arghavani, H. (2013). Eperimental study of bell-mouth intakes on discharge coefficient. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*.
- Narayane, A. V., Pathade, V. C., & Telrandhe, R. G. (2014). CFD analysis of water flow through gradual contraction joint. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 3(6), 1579-1581.
- Nedyalkov, I. (2012). Design of contraction, test section, and diffuser for a high-speed water tunnel. *Master's Thesis*. Gothenburg: Chalmers University of Technology.
- Odgaard, A. (1986). Free-Surface Air Core Vortex. *Journal of Hydraulic Engineering*, 610-620.
- OpenFOAM Foundation. (2013). OpenFOAM User Guide. OpenFOAM Foundation.
- Prager, W., & Shield, R. T. (1967). A general theory of optimal plastic design. Applied Mechanics, 34, 184-186.
- Roshan, R., Sarkarde, H., & Zarati, A. (2009). Calculation of minimum operational head in hydroelectric dams. *Iranian Hydraulic Conference*. Tehran.
- Rozvany, G. I. (1989). *Structural design via optimality criteria*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Saeedpanah, I., Kavianpour, M., & Hajimohamadi, M. (2003). Vortices remove in hydroelectric intake of dams. *National Conference of Hydroelectric Plans of Iran*. Tehran.
- Salehi, A. A., & Akbari, J. (2006). The effect of intake head, wall, and trash rack on vortices. *The International Congress on Civil Engineering*.
- Saniei Nejad, M. (2010). *Fundamentals of Turbulent Flows and Turbulence Modeling*. Tehran: Daneshnegar Publication.
- Sarkarde, H., Zarrati, A., Jabbari, E., & Marosi, M. (2014). Numerical simulation and analysis of flow in a reservoir in the presence of vortex. *Engineerin Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4), 598-608.
- Satish, G., Ashok Kumar, A., Vara Prasad, V., & Pasha, S. M. (2013). Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. *Internationa Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(12), 41-45.
- Sedghi, P., & Azarmi, A. (2013). Concrete restoration of intake tower structure in Cheragh Veis dam. *National Annual Conference of Concrete in Iran*. Tehran.
- The Committee on Hydropower Intakes of the Energy Division of ASCE. (1995). *Guidlines* for Design of Intakes for Hydroelectric Plants. New York: American Society of Civil Engineers.
- The United States Army Corps of Engineers. (1956). *Hydraulic design criteria 211*. The United States Army Corps of Engineers.
- The United States Bureau of Reclamation. (1950). *Turbines and Pumps*. The United States Bureau of Reclamation.

- The United States Department of The Interior Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams* (3rd ed.). A Water Resources Technical Publication.
- Vaghei, S. S., & Tabanrad, R. (2001). Excavation technique of entrance part of Karon 3 intake. *Iranian Rock Mechanics Conference*.
- Wilcox, D. C. (2006). Turbulence Modeling for CFD. DCW Idustries.
- Yao, S., Guo, D., & Sun, Z. (2012). Multi-objective optimization of the streamlined head of high-speed trains based on Kriging model. *Science China technological sciences*, 55(12), 3495-3509.
- Yin, L., & Yang, W. (2001). Optimality criterion method for topology optimization under multiple constraints. *Pergamon*, *79*, 1839-1850.

پیوست ۱ مشتقها در قلمرو محاسباتی

تابع f در نظر گرفته می شود. مشتق های مرتبه اول و دوم آن در فضای محاسباتی به طریق زیر به دست می آید. مشتق های مرتبهی اول بر اساس روابط زیر ارائه شدند.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \tag{1-1}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \tag{(Y-1)}$$

بنابراين:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f_x = \xi_x f_{\xi} + \eta_x f_{\eta} \tag{(7-1)}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = f_y = \xi_y f_{\xi} + \eta_y f_{\eta} \tag{(f-1)}$$

این معادلات به صورت زیر بازنویسی میشوند.

$$f_x = J y_\eta f_\xi - J y_\xi f_\eta = J (y_\eta f_\xi - y_\xi f_\eta)$$

$$f_{y} = -Jx_{\eta}f_{\xi} + Jx_{\xi}f_{\eta} = J(x_{\xi}f_{\eta} - x_{\eta}f_{\xi})$$
^{(F-1})

برای به دست آوردن مشتقات مرتبهی دوم، عملیات ریاضی زیر انجام میشود.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\xi_x f_{\xi} + \eta_x f_{\eta} \right] = \left[\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right] \left[\xi_x f_{\xi} + \eta_x f_{\eta} \right] \\ &= \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi_x f_{\xi} + \eta_x f_{\eta} \right) + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\xi_x f_{\xi} + \eta_x f_{\eta} \right) = \xi_x^2 f_{\xi\xi} \end{aligned}$$

$$(Y - V_{\psi}) \\ &+ \xi_x f_{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\xi_x \right] + \xi_x \eta_x f_{\xi\eta} + \xi_x f_{\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\eta_x \right] + \eta_x \xi_x f_{\xi\eta} \\ &+ \eta_x f_{\xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\xi_x \right] + \eta_x^2 f_{\eta\eta} + \eta_x f_{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta_x) \end{aligned}$$
nalche determine the set of th

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= J^2 \Big(y_\eta^2 f_{\xi\xi} - 2 y_\xi y_\eta f_{\xi\eta} + y_\xi^2 f_{\eta\eta} \Big) + J y_\eta \left[f_\xi \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi_x) + f_\eta \frac{\partial}{\partial \xi} (\eta_x) \right] \\ &+ \Big(-J y_\xi \Big) \left[f_\xi \frac{\partial}{\partial \eta} (\xi_x) + f_\eta \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta_x) \right] \\ &\text{c. In the second se$$

$$\frac{\partial}{\partial\xi}(\xi_{x}) = \frac{\partial}{\partial\xi}(Jy_{\eta}) = \frac{\partial}{\partial\xi}\left(\frac{y_{\eta}}{x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}}\right)$$

$$= J^{2}\left[y_{\xi\eta}\left(x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}\right) - y_{\eta}\left(y_{\eta} x_{\xi\xi} + x_{\xi} y_{\xi\eta} - x_{\eta} y_{\xi\xi} - y_{\xi} x_{\xi\eta}\right)\right]$$
(9-1)

$$\frac{\partial}{\partial\xi}(\xi_{x}) = J^{2}(x_{\xi} y_{\eta} y_{\xi\eta} - x_{\eta} y_{\xi} y_{\xi\eta} - y_{\eta}^{2} x_{\xi\xi} - x_{\xi} y_{\eta} y_{\xi\eta} + x_{\eta} y_{\eta} y_{\xi\xi} \quad (1 \cdot -1)_{\psi}) + y_{\xi} y_{\eta} y_{\xi\eta})$$

$$\frac{\partial}{\partial\xi}(\eta_{x}) = -J^{2}(x_{\xi} y_{\eta} y_{\xi\xi} - x_{\eta} y_{\xi} y_{\xi\xi} - y_{\xi} y_{\eta} x_{\xi\xi} - x_{\xi} y_{\xi} y_{\xi\eta} + x_{\eta} y_{\xi} y_{\xi\xi} (1) - 1 \downarrow)
+ y_{\xi}^{2} y_{\xi\eta})
\frac{\partial}{\partial\eta}(\xi_{x}) = J^{2}(x_{\xi} y_{\eta} y_{\eta\eta} - x_{\eta} y_{\xi} y_{\eta\eta} - x_{\xi} y_{\eta} y_{\eta\eta} - y_{\eta}^{2} x_{\xi\eta} + y_{\xi} y_{\eta} y_{\eta\eta} (1) - 1 \downarrow)
+ x_{\eta} y_{\eta} y_{\xi\eta})
\frac{\partial}{\partial\eta}(\eta_{x}) = -J^{2}(x_{\xi} y_{\eta} y_{\xi\eta} - x_{\eta} y_{\xi} y_{\xi\eta} - y_{\xi} x_{\xi} y_{\eta\eta} - y_{\xi} y_{\eta} x_{\xi\eta} + y_{\xi}^{2} x_{\eta\eta} (1) - 1 \downarrow)
+ x_{\eta} y_{\xi} y_{\xi\eta})$$

با جایگزین کردن معادلات (پ۱-۱) تا (پ۱-۷) در معادله (پ۱-۳) و مرتب کردن جملهها رابطه زیر به دست میآید.

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{19-1}$$

و معادلات (پ۱–۸) و (پ۱–۹) در آن جایگزین میشود. پس از ساده کردن جملهها و جمع چند جملهی دیگر، معادلهی زیر حاصل میشود:

$$\nabla^{2} f = J^{2} [\left(x_{\eta}^{2} + y_{\eta}^{2} \right) f_{\xi\xi} - 2 \left(x_{\xi} x_{\eta} + y_{\xi} y_{\eta} \right) f_{\xi\eta} + \left(x_{\xi}^{2} + y_{\xi}^{2} \right) f_{\eta\eta}] + J^{3} \{ \left[\left(x_{\eta}^{2} + y_{\eta}^{2} \right) y_{\xi\xi} - 2 \left(x_{\xi} x_{\eta} + y_{\eta} y_{\xi} \right) y_{\xi\eta} \right.$$
$$\left. + \left(x_{\xi}^{2} + y_{\xi}^{2} \right) y_{\eta\eta} \right] \left(x_{\eta} f_{\xi} - x_{\xi} f_{\eta} \right) + \left[\left(x_{\eta}^{2} + y_{\eta}^{2} \right) x_{\xi\xi} - 2 \left(x_{\xi} x_{\eta} + y_{\eta} y_{\xi} \right) x_{\xi\eta} + \left(x_{\xi}^{2} + y_{\xi}^{2} \right) x_{\eta\eta} \right] \left(y_{\xi} f_{\eta} - y_{\eta} f_{\xi} \right) \}$$

$$x_{\eta}^{2} + y_{\eta}^{2} = a \tag{(1.1)}$$

$$x_{\xi} x_{\eta} + y_{\xi} y_{\eta} = b \tag{19-1}$$

$$x_{\xi}^{2} + y_{\xi}^{2} = c \qquad (\gamma \cdot y_{\xi})^{2}$$

خواهیم داشت،

$$\nabla^{2} f = J^{2} (a f_{\xi\xi} - 2b f_{\xi\eta} + c f_{\eta\eta}) + J^{3} \{ (a y_{\xi\xi} - 2b y_{\xi\eta} + c y_{\eta\eta}) (x_{\eta} f_{\xi} - x_{\xi} f_{\eta}) + (a x_{\xi\xi} - 2b x_{\xi\eta} + c x_{\eta\eta}) (y_{\xi} f_{\eta} - y_{\eta} f_{\xi}) \}$$
(Y)-1(4)

و سرانجام،

$$\nabla^2 f = J^2 \left(a \, f_{\xi\xi} - 2b \, f_{\xi\eta} + c \, f_{\eta\eta} + d \, f_{\eta} + e \, f_{\xi} \right) \tag{177-1}$$

که در آن،

$$d = J(y_{\xi}\alpha - x_{\xi}\beta) \tag{(Y^{-1}_{\psi})}$$

$$e = J(x_{\eta}\beta - y_{\eta}\alpha) \tag{(14-1)}$$

و

$$\alpha = a x_{\xi\xi} - 2b x_{\xi\eta} + c x_{\eta\eta} \tag{YD-1}$$

$$\beta = a y_{\xi\xi} - 2b y_{\xi\eta} + c y_{\eta\eta} \tag{(79-1)}$$

برای نشان دادن موضوع، دستگاه بیضوی زیر در نظر گرفته میشود.

$$\nabla^2 \xi = 0 \tag{(YV-1)}$$

$$\nabla^2 \eta = 0 \tag{(YA-1)}$$

هدف، تبدیل این دستگاه به قلمرو محاسباتی است. برای انجام این کار از معادله (پ۱-۱۰) استفاده می شود. بنابراین در معادله (پ۱–۱۱)، $\xi = f$ است. مشتقهای مورد نیاز در معادله (پ۱–۱۰) عبارتند از:

$$\xi_{\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial \xi} = 1 \tag{(19-1)}$$

$$\xi_{\eta} = 0 \qquad \qquad (\tilde{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{v})$$

$$\xi_{\xi\xi} = \frac{\partial}{\partial\xi} \left(\frac{\partial\xi}{\partial\xi} \right) = 0 \tag{(71-1)}$$

$$\xi_{\eta\eta} = 0 \tag{(7.17)}$$

$$\xi_{\xi_{\eta}} = 0 \qquad (\forall \forall \neg \neg)$$

در نتیجه معادلهی کلی به صورت زیر نوشته میشود:

$$J^2 e = 0 \tag{(44-1)}$$

يا

$$J^{3}(x_{\eta}\beta - y_{\eta}\alpha) = 0 \qquad (\forall \Delta - 1_{\varphi})$$

به همین ترتیب از ∇²ŋ = 0 نتیجه میشود،

$$J^2 d = 0 \tag{(3.1)}$$

يا

$$J^{3}(y_{\xi}\alpha - x_{\xi}\beta) = 0 \qquad (\forall Y - 1 \downarrow)$$

چون $0 \neq J$ است، پس،

$$x_{\eta}\beta - y_{\eta}\alpha = 0 \tag{(\vec{v}^{\lambda-1})}$$

$$y_{\xi}\alpha - x_{\xi}\beta = 0 \tag{(79-1)}$$

با حذف
$$lpha$$
 بین معادلات بالا نتیجه می شود:
(پ $(x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}) = 0$ (پ $(+ \cdot - \cdot)$

امّا،

$$x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi} = \frac{1}{J}$$
 (*)-)

 $\beta = 0$

پس،

$$\frac{1}{J}\beta = 0 \tag{(FT-1)}$$

یا $a \ y_{\xi\xi} - 2b \ y_{\xi\eta} + c \ y_{\eta\eta} = 0$ (۴۴-۱)

:نشان دادیم که $\beta = 0$ است، بنابراین α هم باید صفر باشد که نتیجه میدهد: (پ $\beta = 0$ است، α $x_{\xi\xi} - 2b x_{\xi\eta} + c x_{\eta\eta} = 0$

پیوست ۲ اطلاعات اولیه مسأله انقباض در نرمافزار OpenFOAM

جهت ارائهی جزئیات بیشتر مدلهای ساختهشده در نرمافزار OpenFOAM با حلگر simpleFoam در مسألهی انقباض، اطلاعات موجود در فایلهای ورودی مدل مستطیلی این مسأله ارائه شده است. بر همین اساس محتوای ۴ فایل اصلی blockMesh در پوشهی "constant"، زیرپوشهی "polyMesh"، فایلهای k ،p ،U و epsilon در پوشهی "0" به ترتیب در زیر نشان داده شده است.

```
-----*- C++ -*-----*\
  _____
                           F ield
  \\ /
                           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
        / O peration
                          | Version: 2.4.0
                       | VC_
| Web:
   \langle \rangle
           A nd
    \backslash \backslash
                                     www.OpenFOAM.org
    \backslash \backslash /
           M anipulation |
\ * _ _ _ _ _ _
                               _____
FoamFile
{
   version
              2.0;
   format
               ascii;
   class
               dictionary;
   object
               blockMeshDict;
convertToMeters 1;
vertices
(
    (0 \ 0 \ 0)
    (0.4 \ 0 \ 0)
    (0 0.15 0)
    (0.4 0.15 0)
    (0 0.35 0)
    (0.4 0.35 0)
    (0 \ 0.5 \ 0)
    (0.4 0.5 0)
    (0.6 \ 0.2 \ 0)
    (0.8 \ 0.2 \ 0)
    (0.6 0.3 0)
    (0.8 \ 0.3 \ 0)
    (0 \ 0 \ 0.05)
    (0.4 0 0.05)
    (0 \ 0.15 \ 0.05)
    (0.4 0.15 0.05)
    (0 0.35 0.05)
    (0.4 \ 0.35 \ 0.05)
    (0 \ 0.5 \ 0.05)
    (0.4 \ 0.5 \ 0.05)
    (0.6 0.2 0.05)
    (0.8 0.2 0.05)
    (0.6 \ 0.3 \ 0.05)
    (0.8 \ 0.3 \ 0.05)
);
blocks
(
   hex (0 1 3 2 12 13 15 14) (200 75 25) simpleGrading (1 1 1)
   hex (2 3 5 4 14 15 17 16) (200 100 25) simpleGrading (1 1 1)
   hex (4 5 7 6 16 17 19 18) (200 75 25) simpleGrading (1 1 1)
```

```
hex (3 8 10 5 15 20 22 17) (100 100 25) simpleGrading (1 1 1)
   hex (8 9 11 10 20 21 23 22) (100 100 25) simpleGrading (1 1 1)
);
edges
(
);
patches
(
   patch inlet
   (
       (12 14 2 0)
       (14 16 4 2)
       (16 18 6 4)
   )
   patch outlet
   (
       (21 23 11 9)
   )
   wall upperWall
   (
       (6 18 19 7)
       (5 17 22 10)
       (10 22 23 11)
   (5 7 19 17)
   )
   wall lowerWall
   (
       (0 \ 1 \ 13 \ 12)
       (3 8 20 15)
       (8 9 21 20)
   (1 3 15 13)
   )
   wall frontAndBack
   (
       (0 2 3 1)
       (2 4 5 3)
       (4 6 7 5)
       (3 5 10 8)
       (8 10 11 9)
       (12 13 15 14)
       (14 15 17 16)
       (16 17 19 18)
       (15 20 22 17)
       (20 21 23 22)
   )
);
mergePatchPairs
(
);
```

/*-----*\ C++ -*------** C++ -*------**

 | =====
 |

 | \\ / F ield
 | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox

 | \\ / O peration
 | Version: 2.4.0

 | \\ / A nd
 | Web:

 | \\ / M anipulation
 |

 -----/ FoamFile { version 2.0; format ascii; class volVectorField; format class object U; } dimensions [0 1 -1 0 0 0 0]; internalField uniform (0 0 0); boundaryField { inlet { type fixedValue; value uniform (0.3 0 0); type } outlet { zeroGradient; type } upperWall { fixedValue; uniform (0 0 0); type value } lowerWall { fixedValue; uniform (0 0 0); type value } frontAndBack { fixedValue;
uniform (0 0 0); type value } }

```
/*-----*\ C++ -*------*--*- C++ -*-------*--*-

      | =====
      |

      | \\ / F ield
      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox

      | \\ / O peration
      | Version: 2.4.0

      | \\ / A nd
      | Web:

      www.OpenFOAM.org

      | \\ / M anipulation

                                                                     \*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
format ascii;
class volScalarField;
object p;
}
dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
   inlet
   {
      type zeroGradient;
   }
   outlet
   {
             fixedValue;
uniform 0;
      type
      value
   }
   upperWall
   {
              zeroGradient;
       type
   }
   lowerWall
   {
               zeroGradient;
      type
   }
   frontAndBack
   {
              zeroGradient;
      type
   }
}
```

```
| ====== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \\ / O peration | Version: 2.4.0
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org
| \\/ M anipulation |
_____
                   \*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
format ascii;
class volScalarField;
location "0";
  object
          k;
dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0.0003375;
boundaryField
{
  inlet
   {
              fixedValue;
uniform 0.0003375;
     type
     value
   }
   outlet
   {
                zeroGradient;
     type
   }
  upperWall
   {
                kqRWallFunction;
     type
                 uniform 0.0003375;
     value
   }
  lowerWall
   {
               kqRWallFunction;
     type
                 uniform 0.0003375;
     value
   }
   frontAndBack
   {
     type
                kqRWallFunction;
                uniform 0.0003375;
     value
   }
}
```

```
/*-----*\ C++ -*------** C++ -*------**

      | =====
      |

      | \\ / F ield
      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox

      | \\ / O peration
      | Version: 2.4.0

      | \\ / A nd
      | Web:

      | \\ / M anipulation
      |

                                                                                1
                                                                                \*-----*/
FoamFile
{
   version 2.0;
format ascii;
class volScalarField;
location "0";
   object epsilon;
dimensions [0 2 -3 0 0 0];
internalField uniform 2.79e-4;
boundaryField
{
    inlet
    {
                    fixedValue;
uniform 2.79e-4;
        type
       value
    }
    outlet
    {
                       zeroGradient;
       type
    }
    upperWall
    {
                       epsilonWallFunction;
       type
                       uniform 2.79e-4;
       value
    }
    lowerWall
    {
                       epsilonWallFunction;
        type
                       uniform 2.79e-4;
       value
    }
    frontAndBack
    {
        type
                       epsilonWallFunction;
                       uniform 2.79e-4;
       value
    }
}
```

پیوست ۳ اطلاعات اولیه مسألهی آبگیر در نرمافزار OpenFOAM

جهت بررسی جزئیات مدل مسأله ی آبگیر در نرمافزار OpenFOAM با حلگر interFoam، اطلاعات موجود در فایلهای ورودی مدل مستطیلی این مسأله ارائه شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که در این پژوهش حلگر بالا بر اساس جریان دو فازه ی آب و هوا مسأله ی آبگیر را کرده است، محتوای ۶ فایل اصلی: blockMesh در پوشه ی "constant"، زیرپوشه ی "polyMesh"، فایلهای alpha.water و k ،p ،U ،alpha.water در پوشه ی "0" به ترتیب در زیر نشان داده شده است.

```
-----*- C++ -*-----*\
 _____
                            | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
        / F ield
  \backslash \backslash

    \
    /
    O peration
    |
    Version: 2.4.0

    \\
    /
    A nd
    |
    Web:
    www.Op

   \backslash \backslash
                                      www.OpenFOAM.org
     \backslash \backslash /
            M anipulation |
\*-----
           _____
                               _____
FoamFile
{
              2.0;
    version
   format
               ascii;
   class
                dictionary;
    object
               blockMeshDict;
convertToMeters 1;
vertices
(
    (0 0 4)
    (100 \ 0 \ 4)
    (0 36 4)
    (172 36 4)
    (0 \ 44 \ 4)
    (188 44 4)
    (0 130 4)
    (360 130 4)
    (0 0 79)
    (100 \ 0 \ 79)
    (0 36 79)
    (172 36 79)
    (0 44 79)
    (188 44 79)
    (0 130 79)
    (360 130 79)
    (0 \ 0 \ 0)
    (100 \ 0 \ 0)
    (0 36 0)
    (172 \ 36 \ 0)
    (0 \ 44 \ 0)
    (188 44 0)
    (0 \ 130 \ 0)
    (360 130 0)
    (222 36 4)
    (222 44 4)
```

```
(222 36 0)
    (222 44 0)
    (0 140 4)
    (360 140 4)
    (0 140 79)
    (360 140 79)
    (0 140 0)
    (360 140 0)
    (0 140 0)
    (360 140 0)
);
blocks
(
    hex (0 1 3 2 8 9 11 10) (360 72 150) simpleGrading (1 1 1)
    hex (2 3 5 4 10 11 13 12) (360 16 150) simpleGrading (1 1 1)
    hex (4 5 7 6 12 13 15 14) (360 172 150) simpleGrading (1 1 1)
    hex (16 17 19 18 0 1 3 2) (360 72 8) simpleGrading (1 1 1)
    hex (18 19 21 20 2 3 5 4) (360 16 8) simpleGrading (1 1 1)
    hex (20 21 23 22 4 5 7 6) (360 172 8) simpleGrading (1 1 1)
    hex (19 26 27 21 3 24 25 5) (100 16 8) simpleGrading (1 1 1)
    hex (22 23 33 32 6 7 29 28) air (360 20 8) simpleGrading (1 1 1)
    hex (6 7 29 28 14 15 31 30) air (360 20 150) simpleGrading (1 1 1)
);
edges
(
);
boundary
(
    inlet
    {
        type patch;
        faces
        (
        (0 2 18 16)
   (0 8 10 2)
        (2 4 20 18)
   (10 \ 12 \ 4 \ 2)
   (4 6 22 20)
   (12 \ 14 \ 6 \ 4)
        );
    }
    outlet
    {
        type patch;
        faces
        (
        (24 26 27 25)
        );
    }
    storageWall
    {
        type wall;
        faces
        (
   (0 16 17 1)
   (0 1 9 8)
   (8 9 11 10)
   (11 13 12 10)
```

(13 15 14 12)

```
);
    }
    dam
    {
        type wall;
        faces
        (
   (1 17 19 3)
   (9 1 3 11)
   (11 3 5 13)
   (5 21 23 7)
   (13 5 7 15)
(24 25 5 3)
   (25 27 21 5)
   (3 19 26 24)
        );
    }
    atmosphere
    {
        type patch;
        faces
        (
        (28 29 33 32)
        (30 31 29 28)
        );
    }
    atmosphereWall
    {
        type wall;
        faces
        (
   (22 6 28 32)
   (6 14 30 28)
   (14 15 31 30)
   (7 23 33 29)
   (15 7 29 31)
     );
    }
    symmetricPlanes
    {
        type symmetryPlane;
       faces
        (
   (16 18 19 17)
   (18 20 21 19)
   (20 22 23 21)
   (22 32 33 23)
   (19 21 27 26)
        );
    }
);
mergePatchPairs
(
);
```

```
/*-----*- C++ -*------

      | =====
      |

      | \\ / F ield
      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox

      | \\ / O peration
      | Version: 2.4.0

      | \\ / A nd
      | Web:

      www.OpenFOAM.org

      | \\ / M anipulation

                                                                      \*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
format ascii;
class volScalarField;
object alpha.water;
}
dimensions [0 0 0 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
   inlet
  {
      type fixedValue;
   value uniform 1;
   }
   outlet
   {
                    fixedValue;
      type
   value uniform 1;
   }
   storageWall
   {
            zeroGradient;
      type
   }
   dam
   {
                    zeroGradient;
      type
    }
   atmosphereWall
   {
      type zeroGradient;
   }
   atmosphere
   {
      type inletOutlet;
inletValue uniform 0;
value uniform 0;
     type
   }
   symmetricPlanes
    {
              symmetryPlane;
      type
   }
   defaultFaces
   {
      type
                    empty;
   }
}
```

```
      | =====
      |

      | \\ / F ield
      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox

      | \\ / O peration
      | Version: 2.4.0

      | \\ / A nd
      | Web:

      | \\ / M anipulation
      |

                                                                            \*-----*/
FoamFile
{
   version 2.0;
format ascii;
class volScalarField;
   format
   class
   object
             p;
}
dimensions [1 -1 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
   inlet
    {
                  fixedFluxPressure;
uniform 0;
       type
       value
    }
   outlet
    {
                   fixedFluxPressure;
uniform 0;
       type
       value
    }
   storageWall
    {
                   fixedFluxPressure;
uniform 0;
       type
       value
    }
   dam
    {
       type fixedFluxPressure;
value uniform 0;
    }
   atmosphereWall
    {
                    fixedFluxPressure;
uniform 0;
       type
       value
    }
   atmosphere
    {
                     totalPressure;
       type
       p0
                      uniform 0;
       U
                      U;
                     phi;
       phi
       rho
                      rho;
                      none;
       psi
                      1;
       gamma
                      uniform 0;
       value
    }
    symmetricPlanes
    {
       type
                     symmetryPlane;
    }
   defaultFaces
    {
```

```
type
                     empty;
   }
}
/*-----*- C++ -*-----
L
 _____
    / F ield
   / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
/ / O peration | Version: 2.4.0
/ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org
  \backslash \backslash
\backslash \backslash
M anipulation |
   \backslash \backslash /
\ * -
FoamFile
{
   version 2.0;
format ascii;
             volScalarField;
"0";
   class
location "O"
-+ k;
   class
}
[0 2 -2 0 0 0 0];
dimensions
internalField uniform 0.001;
boundaryField
{
   inlet
   {
       type
                    fixedValue;
      value
                    uniform 1.44e-7;
   }
   outlet
   {
                    zeroGradient;
       type
   }
   storageWall
   {
       type
                    kqRWallFunction;
                    uniform 0.001;
      value
   }
   dam
   {
                    kqRWallFunction;
       type
                     uniform 0.001;
       value
   }
   atmosphereWall
   {
                    kqRWallFunction;
       type
                    uniform 0.001;
      value
   }
   atmosphere
   {
      type inletOutlet;
inletValue uniform 0.0015;
value uniform 0.0015;
   }
   symmetricPlanes
   {
       type
               symmetryPlane;
   }
```

```
defaultFaces
    {
        type
               empty;
    }
}
/*-----*\ C++ -*------** C++ -*------** C++ -*------**
  ========
                           L

      ========
      |

      \\
      / F ield
      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox

      \\
      / O peration
      | Version: 2.4.0

      \\
      / A nd
      | Web:

      www.OpenFOAM.org
      |

\\ / A nd |
\\/ M anipulation |
L
                               -----*/
\ *_____
FoamFile
{
   version 2.0;
format ascii;
class volScalarField;
location "0";
   object
              epsilon;
}
[0 2 -3 0 0 0 0];
dimensions
internalField uniform 0.00001;
boundaryField
{
   inlet
    {
                     fixedValue;
       type
       value
                       uniform 4.97e-11;
    }
    outlet
    {
                      zeroGradient;
        type
    }
    storageWall
    {
                       epsilonWallFunction;
       type
       value
                       uniform 0.00001;
    }
    dam
    {
                       epsilonWallFunction;
uniform 0.00001;
        type
        value
    }
    atmosphereWall
    {
                       epsilonWallFunction;
uniform 0.00001;
        type
       value
    }
    atmosphere
    {
                     inletOutlet;
uniform 1.04e-5;
uniform 1.04e-5;
       type
       inletValue
       value
    }
    symmetricPlanes
```

Abstract

In this research, the shape of hydropower intakes was optimized by optimality criteria method to reduce the energy loss. The optimization criteria was streamlining and the optimization variables defined as solid boundaries coordinates. Since some aspects of intakes are not specified in the design procedure, proposing a numerical method to such designs was the main goal of this research. To optimize the shape of intakes by optimality criteria method a computer program, called Streamlining Programming Code (SPC), was developed in C++ programming language to streamline the cross sections of transitional sections by solving potential flows in order to obtain the streamlines coordinates and maps a selected streamline to the solid boundaries. To verify SPC, OpenFOAM software was used and modeled the potential flow of a contraction. The results showed that SPC has a good agreement with OpenFOAM software. So after validating the results of OpenFOAM by a similar research in turbulent modeling, the results obtained from OpenFOAM was validated. Finally, for optimizing the shape of intakes, as contractions have similarity with the intakes in horizontal section, first a contraction optimization was carried out. By optimizing the contraction defined in this research, the method used for shape optimization was confirmed to have the ability to present the optimum shape in this field. To optimize the shape of intakes, results from SPC was compared with recommended shapes of USBR and Indian Standard. The results illustrated that the shape obtained from SPC, enhanced the performance of intake about 2 percent in comparison with recommended shapes. In conclusion, the results demonstrated that the method used in this research has the ability of optimizing the hydraulic structures and different applications in the relevant fields.

Keywords: Optimization; Optimality Criteria; Computational Fluid Dynamics; Streamlining; OpenFOAM Software; Turbulent Flows; Contractions; Hydropower Intakes; Pressure Loss; Energy Loss; Reservoir Modeling.



Thesis for Master of Science in Hydraulic Structures Engineering

Title Numerical Study of Shape Optimization for Hydropower Intakes Based on Optimality Criteria Method

> Written by Reza Yousefian

Supervisors Seyed Fazlolah Saghravani Seyed Mehdi Tavakoli

March 2016