

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران  
رشته عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

## بهینه‌سازی شکل دیواره‌های هدایت با روش معیار بهینگی

نگارنده: زینب علمی

اساتید راهنما

دکتر سید فضل‌الله ساغروانی

دکتر سید مهدی توکلی

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۹۵  
تاریخ: ۱۳۹۲/۰۶/۲۷  
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه 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 زینب علمی به شماره دانشجویی ۹۲۱۰۰۸۴ رشته عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان بهینه‌سازی شکل دیواره‌های هدایت با روش معیاربهینگی که در تاریخ ۹۵/۰۶/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه: عالی - امتیاز: ۱۹,۲۲)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
---	------------------------------------	--------------------------------

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاداراهمای اول	سید فضل‌الله ساغروانی	دانشیار	
۲- استاداراهمای دوم	سید مهدی توکلی	استادیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	ایمان آقاییان	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	امیرعباس عابدینی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	احمد احمدی	دانشیار	

رئیس دانشکده:

تقدیم به روح بلند پدر بزرگواری که در سایه‌ی وجودش زیستن آموختم.

مادرم، بلند تکیه‌گاهم، که دامن پرمهرش یگانه پناهم است.

به خانواده عزیزم و تمام کسانی که دوستشان دارم.

## سپاس‌گزاری

حمد و سپاس خداوند را که لطف و بخشایش او نصیب این بنده حقیر گشت و یاری نمود تا بتوانم این مجموعه را به تحریر در آروم.

نخست بر خود لازم می‌دانم تا از اساتید راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر سید فضل‌الله ساغروانی و جناب آقای دکتر توکلی، به دلیل زحمات و حمایت‌های پیوسته، آموزش‌ها و رهنمودهای ارزشمند، تشویق‌ها و دلگرمی‌هایشان در تمام مدت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از زحمات و الطاف پدر و مادر مهربان و سایر اعضای خانواده که همواره حامی و مشوق بنده در دوران تحصیل بوده‌اند، تشکر نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب **زینب علمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - گرایش سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بهینه‌سازی شکل دیواره‌های هدایت با روش معیار بهینگی** تحت راهنمایی دکتر سیدفضل الله ساغروانی و دکتر سید مهدی توکلی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا <<shahrood university of technology>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## مقالات مستخرج از پایان نامه

- علمی، زینب؛ سیدفضل‌الله ساغروانی،(۱۳۹۵)، بهینه سازی شکل پله رو به جریان، دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان
- علمی، زینب؛ سیدفضلالله ساغروانی،(۱۳۹۵) ، بهینه‌سازی شکل دیواره‌هدایت سرریز سد، دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان
- علمی، زینب؛ سیدفضل‌الله ساغروانی،(۱۳۹۵) ، بهینه سازی شکل پله‌ها و سرریزها، اولین کنگره بین المللی نوآوری در مهندسی و تکنولوژی، دانشگاه تبریز

## چکیده

شناسایی وضعیت خطوط جریان با استفاده از مدل‌سازی عددی به مهندسين کمک می‌کند تا سازه‌های هیدرولیکی با کارایی بالاتری را طراحی کنند. هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی شکل هندسی دیواره هدایت و پله‌ی رو به جریان با روش معیار بهینگی به منظور کاهش افت انرژی و حذف امواج عرضی است. معیار بهینه‌سازی، منطبق بودن خط جریان بر مرز جامد و متغیر بهینه‌سازی، مختصات مرز جامد است. برای بهبود شکل هندسی دیواره هدایت و پله‌ی رو به جریان با روش معیار بهینگی برنامه‌ای با همسازی خطوط نوشته و SPC نام‌گذاری شد. این برنامه با حل معادلات خطوط جریان در نرم‌افزاری به زبان ++C نوشته شد تا مختصات خطوط جریان را به دست آورد و با انتقال مختصات یکی از خطوط جریان انتخابی به مرز جامد سازه، هندسه‌ی سازه را تغییر دهد. برای آزمودن عملکرد این که کدام شکل خط جریان بیشترین تأثیر را بر تابع هدف اصلی دارد، ابتدا کانال بسته تک فازی که در مسیر آن، یک پله رو به جریان قرار داشت و مدل دوفازی مخزن سد بالارود به منظور ارزیابی تأثیر هندسه‌ی شکل بهبودیافته بر الگوی خط جریان به کمک نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM مدل‌سازی گردید و نتایج آن‌ها با مدل آزمایشگاهی موجود، صحت‌سنجی شد. سپس مدل‌های مختلف با مدل پیشنهادی مقایسه گشت. نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار OpenFOAM کاهش سی‌درصدی افت فشار را در مدل پله با شکل بهبودیافته نسبت به مدل مستطیلی (آزمایشگاهی) را نشان داد. در مدل بهبودیافته دیواره هدایت تراز ارتفاع آب در مخزن کمینه شد و امواج عرضی حذف و گردابه‌ای حذف گشت.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، OpenFOAM، دیواره هدایت، پله‌ی رو به جریان، معیار بهینگی، امواج عرضی.



## فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ بیان مسئله.....	۳
۳-۱ ضرورت انجام پژوهش.....	۴
۴-۱ هدف‌ها و کاربردهای پژوهش.....	۵
۵-۱ فصل‌بندی پایان‌نامه.....	۵
فصل ۲ مطالعات پیشین.....	۷
۱-۲ مقدمه.....	۸
۲-۲ روش معیار بهینگی.....	۸
۳-۲ روش انطباق خطوط جریان بر مرز جامد.....	۹
۴-۲ دیواره هدایت.....	۱۲
۵-۲ پله‌ی رو به جریان.....	۲۱
فصل ۳ مواد و روش‌ها.....	۲۳
۱-۳ مقدمه.....	۲۴
۲-۳ مواد مورد استفاده.....	۲۴
۳-۳ روش معیار بهینگی.....	۲۵
۱-۳-۳ معیار بهینه‌سازی.....	۲۶
۲-۳-۳ متغیرهای بهینه‌سازی.....	۴۱
۳-۳-۳ بررسی خط جریان بهینه.....	۴۲
۴-۳ نرم‌افزار OPENFOAM.....	۴۲
۵-۳ آشفستگی.....	۴۴
۱-۵-۳ رژیم جریان.....	۴۴
۲-۵-۳ انواع مدل‌های آشفستگی.....	۴۶
۳-۵-۳ تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد K-E.....	۵۰

۵۱	۳-۵-۴ تابع دیوار استاندارد
۵۲	۳-۵-۵ تحلیل پایداری مدل سازی عددی
۵۳	۳-۶ کاویتاسیون
۵۷	فصل ۴ نتایج و بحث
۵۸	۴-۱ مقدمه
۵۸	۴-۲ پله رو به جریان
۵۸	۴-۲-۱ صورت مسئله
۵۹	۴-۲-۲ بررسی صحت مدل سازی در نرم افزار OPENFOAM
۶۲	۴-۳ بهینه سازی شکل پله رو به جریان
۶۲	۴-۳-۱ بیان صورت مسئله
۶۳	۴-۳-۲ ارائه ی نتایج بهینه سازی پله ی رو به جریان
۶۵	۴-۳-۳ مقایسه مقطع به دست آمده از SPC با مقاطع دیگر
۶۹	۴-۴ دیواره های هدایت سرریز سد
۶۹	۴-۴-۱ بیان صورت مسئله
۷۳	۴-۴-۲ ارائه ی نتایج صحت سنجی آزمایشگاهی
۷۵	۴-۵ بهینه سازی دیواره های هدایت
۸۱	فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها
۸۲	۵-۱ مقدمه
۸۲	۵-۲ بررسی نتایج حاصل از مدل سازی پله ی رو به جریان
۸۳	۵-۳ بررسی نتایج حاصل از طراحی دیواره هدایت
۸۴	۵-۴ پیشنهادها برای مطالعات آتی
۸۶	منابع
۹۱	پیوست ها

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ نامتقارن بودن کانال ورودی سد یوتانگ (Wang & Chen, 2010)..... ۱۳
- شکل ۲-۲ هندسه‌ی پیشنهادی دیواره هدایت سد یوتانگ (Wang & Chen, 2010)..... ۱۴
- شکل ۳-۲ ویژگی‌های دیواره هدایت سرریز سد بالارود (دورقی، ۱۳۸۸)..... ۱۵
- شکل ۴-۲ الگوی جریان در راستای دیواره‌های هدایت (Parsaie, et al., 2015)..... ۱۶
- شکل ۵-۲ شمای کلیه‌ی زوایای پلان (فرودی خور و همکاران، ۱۳۹۴)..... ۱۸
- شکل ۶-۲ تأثیر هندسه‌ی دیواره هدایت سمت چپ بر رفتار جریان (Martinerie, et al, 2007)..... ۲۰
- شکل ۱-۳ شبکه‌ی نقاط در یک معادله پنج نقطه‌ای (Hoffmann & Chiang, 2000)..... ۲۸
- شکل ۲-۳ مختصات اولیه و ثانویه..... ۴۱
- شکل ۳-۳ دقت نتایج ارائه‌شده در مدل‌های مشهور آشفتگی..... ۴۸
- شکل ۴-۳ مقادیر فشار بخار (Falvey, 1990)..... ۵۵
- شکل ۱-۴ شکل مشخصات و ابعاد مسئله‌ی صحت‌سنجی OpenFOAM..... ۵۹
- شکل ۲-۴ شکل شرایط مرزی مسئله در نرم‌افزار OpenFOAM..... ۶۰
- شکل ۳-۴ هندسه‌های ایجادشده توسط SPC برای خطوط جریان مختلف مسئله بهینه‌سازی در محیط OpenFOAM..... ۶۳
- شکل ۴-۴ مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط  $y=0.08, z=0.004$ ..... ۶۵
- شکل ۵-۴ مدل‌های توصیه‌شده و مدل به‌دست‌آمده از SPC در نرم‌افزار OpenFOAM..... ۶۶
- شکل ۶-۴ مقادیر فشار مدل‌های توصیه‌شده در محل خط  $y=0.08, z=0.004$ ..... ۶۷
- شکل ۷-۴ گردابه‌های تشکیل‌شده در هندسه‌ی مستطیلی در محیط OpenFOAM..... ۶۸
- شکل ۸-۴ گردابه‌های تشکیل‌شده در هندسه‌ی مستطیلی در مدل آزمایشگاهی (Ando & Shakouchi, 2004)..... ۶۸
- شکل ۹-۴ خطوط جریان مدل بهینه‌سازی شده..... ۶۹

- شکل ۴-۱۰ ابعاد و مشخصات مسئله‌ی دیواره هدایت دایره‌ای در صفحه‌ی افق (فاز آب)..... ۷۲
- شکل ۴-۱۱ ابعاد و مشخصات مسئله‌ی دیواره هدایت دایره‌ای در صفحه‌ی افق (فاز هوا)..... ۷۲
- شکل ۴-۱۲ هندسه‌ی سه‌بعدی مسئله‌ی آزمایشگاهی در محیط OpenFOAM..... ۷۲
- شکل ۴-۱۳ شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان با دبی ۰,۱۶ مترمکعب بر ثانیه..... ۷۳
- شکل ۴-۱۴ تلاطم ایجادشده در دیواره هدایت سمت چپ (دیواره هدایت دایره‌ای)..... ۷۴
- شکل ۴-۱۵ منحنی دبی-اشل دیواره هدایت دایره‌ای..... ۷۴
- شکل ۴-۱۶ منحنی دبی اشل دیواره هدایت..... ۷۵
- شکل ۴-۱۷ منحنی دبی اشل دیواره هدایت..... ۷۵
- شکل ۴-۱۸ منحنی دبی اشل دیواره هدایت..... ۷۶
- شکل ۴-۱۹ منحنی دبی اشل دیواره هدایت بیضوی..... ۷۶
- شکل ۴-۲۰ منحنی دبی اشل دیواره هدایت مستطیلی..... ۷۷
- شکل ۴-۲۱ خطوط جریان در کناره‌ی دیواره هدایت مستطیلی..... ۷۸
- شکل ۴-۲۲ شکل خطوط جریان در مجاور دیواره هدایت بهینه..... ۷۸
- شکل ۴-۲۳ شکل خطوط جریان در مجاور دیواره هدایت بیضوی..... ۷۸
- شکل ۴-۲۴ شاخص کاویتاسیون در راستای سرریز با دیواره هدایت بهینه..... ۸۰
- شکل ۴-۲۵ شاخص کاویتاسیون در راستای سرریز با دیواره هدایت دایره‌ای..... ۸۰

## فهرست جداول

- جدول ۱-۳ مشخصات رایانه ی استفاده شده در پژوهش.....۲۴
- جدول ۲-۳ ضرایب مدل استاندارد K-ε.....۵۰
- جدول ۱-۴ مشخصات مرزها و جریان در مسئله ی صحت سنجی OpenFOAM.....۵۹
- جدول ۲-۴ نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی با OpenFOAM.....۶۱
- جدول ۳-۴ مشخصات و ابعاد مسئله ی بهینه سازی.....۶۲
- جدول ۴-۴ مشخصات و ابعاد مسئله ی بهینه سازی شکل دیواره هدایت در دبی ۰,۱۶ مترمکعب بر ثانیه.....۷۱
- جدول ۵-۴ مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی و نتایج OpenFOAM.....۷۳
- جدول ۶-۴ نتایج دبی - اشل دیواره هدایت دایره ای.....۷۴
- جدول ۷-۴ نتایج دبی - اشل دیواره هدایت با هندسه ی خط جریان ۱۰ درصد.....۷۵
- جدول ۸-۴ نتایج دبی - اشل دیواره هدایت با هندسه ی خط جریان ۲۰ درصد.....۷۵
- جدول ۹-۴ نتایج دبی - اشل دیواره هدایت با هندسه ی خط جریان ۳۰ درصد.....۷۶
- جدول ۱۰-۴ نتایج دبی - اشل دیواره هدایت بیضوی شکل.....۷۶
- جدول ۱۱-۴ نتایج دبی - اشل دیواره هدایت مستطیلی شکل.....۷۷

## فهرست نشانه‌ها

$i$	شماره گره در راستای $x$
$j$	شماره گره در راستای $y$
$k$	شماره تکرار
$K$	انرژی جنبش جریان آشفته
$P$	فشار
$t$	زمان
$u$	سرعت در راستای $x$
$v$	سرعت در راستای $y$
$V_x$	سرعت در راستای $x$
$V_y$	سرعت در راستای $y$
$(x, y)$	مختصات در دستگاه کارتزین
$Re$	عدد رینولدز
$L$	طول
$l$	طول آشفتگی
$I$	شدت آشفتگی
$c$	عدد کورانت
$d$	عدد انتشار

$Re_c$	عدد سلول رینولدز
$g$	شتاب ثقل زمین
$\beta$	نسبت گام‌ها در شبکه‌ی حل
$(\xi, \eta)$	مختصات در قلمرو محاسباتی
$\rho$	چگالی
$\psi$	تابع جریان
$\omega$	پارامتر تخفیف
$\mu$	لزجت
$\varepsilon$	نرخ اضمحلال انرژی آشفتگی
$Z$	تراز ارتفاع
$C_p$	ضریب فشار
$U$	سرعت متوسط
$\sigma$	شاخص کاویتاسیون





## فصل ۱ مقدمه

در این فصل به کلیات پژوهش انجام شده شامل تعریف مسئله، اهمیت و ضرورت انجام پژوهش، اهداف و فرضیه‌های پژوهش و همچنین ساختار کلی پایان‌نامه پرداخته شده است.

انجام آزمایش به‌عنوان دقیق‌ترین روش‌ها در بررسی مسائل و مشکلات مربوط به سازه‌های هیدرولیکی است. بررسی رفتار و خصوصیات هیدرولیکی جریان در سد و سازه‌های هیدرولیکی آن، از پدیده‌های پیچیده است که با صرف هزینه و وقت زیاد توأم است. به‌منظور کاهش هزینه‌ها، مدل‌سازی عددی از اهمیت زیادی برخوردار است. دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> یکی از زمینه‌هایی است که مکانیک سیالات را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی آن وصل می‌کند. امروزه دسترسی به برنامه‌های دینامیک سیالات محاسباتی و کامپیوترهای پیشرفته‌تر، باعث افزایش روزافزون کاربرد روش‌های عددی در تجزیه و تحلیل جریان سیال شده است. یکی از نرم‌افزارهای عرضه شده در زمینه CFD، نرم‌افزار OpenFOAM<sup>۲</sup> بوده که ضمن توانایی‌های دیگر، قابلیت تحلیل جریان‌های دوبعدی و سه‌بعدی سیالات را نیز دارا است.

رفتار آب بر روی سرریز به‌شدت تحت تأثیر الگوی جریان در کانال تقرب<sup>۳</sup> است. شکل‌پذیری جریان در کانال تقرب تحت تأثیر شکل هندسی دیواره هدایت<sup>۴</sup> است. انتخاب حالت بهینه برای هندسه دیواره هدایت باعث بهبود شکل خطوط جریان، کاهش افت انرژی و از بین بردن اغتشاش و آشفتگی در جریان در نتیجه کاهش هزینه و عملکرد بهتر سرریز خواهد شد.

امروزه به‌منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش بازدهی اقتصادی بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده است. در بین روش‌های بهینه‌سازی می‌توان به روش بهینه‌سازی معیار بهینگی<sup>۵</sup> به‌عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد بهینه‌سازی در طراحی هیدرولیکی اشاره کرد، در این

<sup>۱</sup> CFD

<sup>۲</sup> Open Field Operation and Manipulation

<sup>۳</sup> Approach Channel

<sup>۴</sup> Guide Wall

<sup>۵</sup> Optimality Criteria

پژوهش به کمک این روش، با انطباق شکل جریان بر مرز<sup>۱</sup> مقطع و بررسی قیده‌های بهینه‌سازی، به طراحی هیدرولیکی و بهینه‌سازی شکل سازه دیواره هدایت پرداخته شده است.

## ۲-۱ بیان مسئله

سرریز یک سازه هیدرولیکی برای عبور دادن سیلاب طراحی ساخته می‌شود. ابعاد و هندسه سرریز به نحوی تعیین می‌شود که با ورود سیلاب طراحی به مخزن آسیبی به آن وارد نشود. هدف بعدی از طراحی سرریز، ذخیره حداکثری سیلاب برای استفاده بعدی است. برای طراحی یک سرریز، این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که جریان یکنواخت و بدون تلاطم برای شرایط مختلف جریان در کانال تقرب، باعث عبور دبی سیلاب به صورت ایمن و مطلوب خواهد گردید. از طرفی سرعت بیشینه در شرایط حاد نباید باعث آب شستگی مصالح بستر در کانال تقرب با بستر متحرک گردد. هرگونه اغتشاش جریان و تشکیل امواج عرضی<sup>۲</sup> در قسمت کانال تقرب می‌تواند تلاطم جریان روی سرریز و کاهش ضریب دبی و حتی افزایش احتمال کاویتاسیون را به همراه داشته باشد. شرایط نامساعد در کانال جریان می‌تواند باعث توزیع غیریکنواخت سرعت و تولید امواج قوی گردد که می‌تواند تا روی تنداب ادامه یافته و باعث توزیع نامتقارن جریان در انتهای سازه و بروز مشکلات اساسی گردد. از این رو انحنای جریان در پلان، در طول کانال تقرب باید تدریجی باشد به گونه‌ای که باعث تولید امواج سطحی و اغتشاش روی سرریز نشود. دیواره‌های هدایت که جریان ورودی را به سازه کنترل (آستانه سرریز) منتقل می‌نمایند باید از تاج به سمت بالادست تا جایی ادامه یابند که سرعت جریان به قدر کافی که باشد، به طوری که از تشکیل گردابه‌های قوی و انتقال آن‌ها به روی تاج سرریز جلوگیری شود. در صورت لزوم دیواره‌های هدایت در انتهای بالادست خود باید به شکلی انحنای داشته باشند که در پلان از شکل خطوط جریان پیروی نمایند (سامانی، ۱۳۹۳). با توجه به تجربیات مهندسی، همسازی خطوط جریان و بدنه در نزدیکی مرز جامد باعث کاهش چشم‌گیر افت انرژی ناشی از تولید گردابه‌ها می‌شود. انتخاب حالت بهینه برای شکل

<sup>1</sup> Streamlining

<sup>2</sup> Cross Wave

هندسی دیواره هدایت نقش بسزایی در عملکرد جریان روی سرریز دارد. به همین دلیل بهینه کردن دیواره هدایت جریان می‌تواند باعث از بین رفتن این‌گونه امواج روی سرریز شود.

در این پژوهش بهینه‌سازی شکل دیواره هدایت سرریز سد و پله‌ی رو به جریان<sup>۱</sup> با روش بهینه‌سازی معیاربهینگی انجام شده است. ابتدا با روش‌های عددی دینامیک سیالات به مدل کردن جریان در پله‌ی رو به جریان و در کانال تقرب یک سرریز پرداخته شد و سپس با تغییر هندسه دیواره هدایت و پله بر اساس شکل جریان به دست آمده، هندسه بهینه به دست می‌آید. بدین منظور ابتدا یک برنامه‌ی رایانه‌ای بانام SPC<sup>۲</sup> با فرض جریان پتانسیل نوشته شده و معادلات مربوطه حل شده‌اند. 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 برنامه، طرح پیشنهادی در نرم‌افزار Open FOAM مدل شده و نتایج آن‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد. جهت صحت‌سنجی طرح‌های مدل شده در نرم‌افزار، نتایج حاصل از این پژوهش، با یک پژوهش مشابه آزمایشگاهی موردبررسی و مقایسه قرار گرفته است. بهینه‌سازی پله باعث افت فشار کمتر در مقایسه با هندسه‌ی اولیه و حذف جریان گردابی شد. با بهینه‌سازی شکل دیواره هدایت، دبی سرریز افزایش یافت و از تشکیل گردابه و جدایی جریان جلوگیری شد.

### ۱-۳ ضرورت انجام پژوهش

دیواره هدایت بالادست سرریزها، از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که نقش مهمی در یکنواختی جریان ورودی به سرریز دارند. بهتر شدن شکل دیواره هدایت جریان می‌تواند باعث کاهش امواج عرضی و نیز افزایش دبی روی سرریز شود؛ که غالباً این کار به صورت آزمایشگاهی با تطبیق مختصات خطوط جریان و دیواره هدایت، انجام می‌شود. از آنجایی که پژوهش جامعی بر روی بهینه‌سازی عددی شکل

<sup>1</sup> Forward facing Step

<sup>2</sup> Streamlining Programming Code

دیواره هدایت و مطالعه اثر آن بر کارایی سرریز صورت نگرفته است و همچنین به دلیل قابلیت تعمیر برنامه‌ی نوشته‌شده به سازه‌های مختلف هیدرولیکی مانند سرریز، در این پژوهش به مطالعه و بررسی این موضوع پرداخته شده است.

علاوه بر ضرورت ذکرشده مواردی از جمله: نوآوری ایده‌ی پژوهش، استفاده آسان از برنامه موجب افزایش کاربرد آن شده و بر ضرورت انجام این پژوهش می‌افزاید.

#### ۴-۱ هدف‌ها و کاربردهای پژوهش

این پژوهش باهدف‌های افزایش دبی تخلیه سرریز، کمک به مهندسان طراح برای طراحی بهتر، بررسی ایده‌ی این پژوهش جهت به‌کارگیری آن در سازه‌های هیدرولیکی مختلف، انجام می‌شود.

هدف‌هایی که با مدل‌سازی‌ها و آنالیز جریان روی سرریز سد و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انتظار خواهیم داشت، شامل:

- بهینه‌سازی شکل دیواره هدایت و پله‌ی رو به جریان

- کاهش افت فشار

- کمینه شدن تراز سطح آب مخزن

- کاهش امواج عرضی و عدم تشکیل گردابه

#### ۵-۱ فصل‌بندی پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است که در فصل اول کلیات پژوهش، فرضیات صورت گرفته در پایان‌نامه و خلاصه‌ای از اهداف اصلی تحقیق بیان شد.

در فصل دوم، مطالعات ادبیات فنی موجود، به بیان پیشینه مختصری از فعالیت‌هایی که محققان در زمینه‌ی معیاربهینگی و انطباق خطوط جریان بر مرز جامد انجام داده‌اند، پرداخته شده است. سپس

طرح‌های پیشنهادی سایرین برای بهبود عملکرد دیواره هدایت و مطالعات آزمایشگاهی پله‌ی رو به جریان بیان شد تا جایگاه تحقیق حاضر بین آن‌ها مشخص شود.

فصل سوم، مواد و روش‌ها، به دو قسمت اصلی تقسیم می‌شود؛ در قسمت یکم، مشخصات مواد و وسایل استفاده‌شده در این پژوهش و در قسمت بعد به بیان روش‌های عددی مورد استفاده در برنامه‌ی نوشته‌شده و معرفی نرم‌افزار پرداخته‌شده است.

در فصل چهارم، نتایج و بحث، دیواره هدایت سد بالارود و پله‌ی رو به جریان جهت صحت‌سنجی نرم‌افزار OpenFOAM مدل‌سازی شد، سپس به مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی پله با شکل بهینه و دیواره هدایت بهینه‌سازی شده با نتایج مدل‌های اولیه، پرداخته‌شده است.

نتیجه‌گیری از پژوهش انجام‌شده و ذکر پیشنهادها در فصل پنجم مطرح خواهد شد.

## فصل ۲ مطالعات پیشین

مطالعه‌ی تحقیقات انجام‌شده در رابطه با پژوهش، با هدف برقراری ارتباط میان اطلاعات تحقیقات گذشته با پژوهش حاضر، آشنایی با روش‌های تحقیق مورد استفاده در پژوهش‌های گذشته و دستیابی به چهارچوبی کلی نسبت به موضوع پژوهش از عوامل ضروری در پیشبرد هدفمند یک پروژه‌ی علمی است. جهت بررسی تاریخچه‌ی موضوع، مطالعات پیشین در چند قسمت مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا بررسی مختصری در رابطه با پیشینه‌ی روش بهینه‌سازی معیار بهینگی صورت گرفته است و در قسمت بعدی به بررسی معیار مهندسی انطباق شکل جریان بر مرز جامد و پژوهش‌های صورت گرفته در آن پرداخته شده است. در نهایت با بیان پژوهش‌های مرتبط با بهبود طراحی دیواره هدایت سرریز سد و مطالعاتی در زمینه‌ی پله‌ی رو به جریان، مطالعات پیشین در رابطه با این پژوهش به‌طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲ روش معیار بهینگی

روش معیار بهینگی برای اولین بار توسط پراگر و شیلد<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۷ بر اساس مفاهیم کلی و با بیان فرضیه‌های مورد استفاده در این روش مطرح شد (Prager & Shield, 1967). در حالی که بنیاد مفاهیم این روش توسط میشل<sup>۲</sup> در سال ۱۹۰۴ پایه‌گذاری شده بود (Michelle, 1904). امروز<sup>۳</sup> شرایط بهینگی را به صورت جامع‌تری نسبت به روش‌های پراگر و شیلد بیان نمود (Mroz, 1972). تکنیک‌های تغییر اندازه برای قیدهای جابجایی بر پایه‌ی معیار بهینگی توسط برک<sup>۴</sup> معرفی شد (Berke, 1976). بعد از معرفی کلیات روش معیار بهینگی، کاربرد این روش در طراحی سازه‌ها توسط روزوانی<sup>۵</sup> در کتاب طراحی سازه‌ای بر اساس معیار بهینگی بیان شد (Rozvany, 1989). در اوایل دهه‌ی ۹۰ میلادی هفتکه و

---

<sup>۱</sup>Shield

<sup>۲</sup>Michelle

<sup>۳</sup>Mroz

<sup>۴</sup>Berke

<sup>۵</sup>Rozvany



گوردال<sup>۱</sup> به مقایسه روش معیار بهینگی و روش بهینه‌سازی دیگری به نام روش دوگان<sup>۲</sup> پرداختند. آن‌ها ارزش روش معیاربهینگی را در ارتباط نزدیک این روش با دوگانی برای اولین بار توسط فلوری<sup>۳</sup> بیان شده بود، اعلام کردند (Haftka & Gurdal, 1993). برک و همکاران در سال ۱۹۹۵ محدودیت‌های روش معیاربهینه را برای بهینه‌سازی سازه‌ها بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که روش معیار بهینگی در حالت کلی برای مسائل با تعداد قیدهای کم و یا متغیر طراحی با تعداد کم رضایت‌بخش است. (Berke et al., 1995). در سال ۱۹۹۸ حسنی و هینتن<sup>۴</sup> به مطالعه این روش برای بهینه‌سازی توپولوژی<sup>۵</sup> سازه‌ها پرداختند و نتایج پرکاربردی در این زمینه ارائه کردند (Hassani & Hinton, 1998). در اوایل قرن ۲۱ میلادی با کمک بسط 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 به‌خصوص در بهینه‌سازی توپولوژی و شکل سازه‌ها شده است (Christensen & Klabring, 2009) (Yin & Yang, 2001).

### ۳-۲ 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 می‌شود. اثر استفاده از این روش در طراحی شکل مرز جامد و همچنین میزان بهبود نتایج طراحی در پژوهش‌های علمی مختلف از چندین دهه پیش مورد بررسی قرار گرفته است. قبل از دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی طراحی توربین‌ها و متراکم‌کننده‌های محوری بر پایه روش انطباق خطوط جریان بر مرز جامد و بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از این روش صورت می‌گرفت. این فرآیند طراحی با تأثیر گرفتن از پژوهش‌های تحلیلی تا اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی، از اهمیت بسزایی برخوردار گردید. با ورود به

---

<sup>1</sup>Haftka and Gurdal

<sup>2</sup> Binary

<sup>3</sup> Fluery

<sup>4</sup> Hassani & Hinton

<sup>5</sup> Topology

اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی، این روش با استفاده از علم دینامیک سیالات محاسباتی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت. از آن دهه به بعد فرآیند طراحی بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی از جمله توربوماشین‌های<sup>۱</sup> مدرن با بهره‌گیری از این روش صورت گرفته است و امروزه با توجه به پیشرفت فناوری و علوم مربوط به محاسبات عددی، استفاده از این روش با کمک نتایج آزمایشگاهی و عملی، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در طراحی بهینه‌ی سازه‌ها تلقی می‌شود ( Herlock & Denton, 2005).

در سال ۲۰۰۳ لوند<sup>۲</sup> و همکاران به بررسی روش‌های کلی جهت تحلیل و بهینه‌سازی شکل مسائل پیچیدی اندرکنش سیال-سازه<sup>۳</sup> پرداختند. آن‌ها جریان تراکم ناپذیر را با رژیم جریان آرام و آشفته با کمک معادلات ناویه-استوکس مدل کردند و از آنجایی که جابه‌جایی قسمت جامد در آن‌ها از نوع جابه-جایی‌های بزرگ بود، برای هر مرحله از فرآیند بهینه‌سازی مجبور به ایجاد شبکه<sup>۴</sup> جدیدی در محیط حل<sup>۵</sup> سیال شدند. همچنین برای تحلیل حساسیت طراحی<sup>۶</sup> 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 زمان بر 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 به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی پرداختند و در نهایت تنها با مقایسه نتایج شکل ساده (خطی) و شکل نهایی، بهتر بودن شکل به‌دست‌آمده و کارا بودن این روش بهینه‌سازی را نتیجه گرفتند (Lund, Moller, & Jakobsen, 2003).

---

<sup>1</sup> Turbomachiney

<sup>2</sup> Lund

<sup>3</sup> Fluid-Structure Interaction

<sup>4</sup> Grid

<sup>5</sup> Domain

<sup>6</sup> Design Sensitivity Analysis

در سال ۲۰۰۷ امرنتا<sup>۱</sup> و همکاران به بهینه‌سازی شکل مقطع ورودی یک موتور توربوجت<sup>۲</sup> در مقیاس کوچک پرداختند. آن‌ها برای بهینه‌سازی از روش تکاملی بر پایه گرادیان<sup>۳</sup> (روش‌های ریاضی) و برای درون‌یابی شکل از کدهای آماده<sup>۴</sup> 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 جدانشدگی جریان<sup>۵</sup> در مقطع ورودی که موجب کاهش ظرفیت مقطع ورودی شده و در سیستم موتور اختلال ایجاد می‌کرد را شناسایی کردند. برای بهینه‌سازی، در هر مرحله از این فرآیند با مدل کردن جریان آشفتگی ایجادشده در اطراف مقطع، به تحلیل حساسیت متغیرهای بهینه‌سازی پرداخته و تابع هدف در فرآیند طراحی بهینه شد. همچنین با به‌کارگیری 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 به‌دست‌آمده مورد بررسی و تأیید قرار گرفت (Amirante, Catalano, Dadone, & Daloso, 2007).

یاوو<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بهینه‌سازی شکل منطبق شده بر خط جریان واگن کشنده قطارهای تندرو پرداختند. با افزایش سرعت قطار، نیروی اصطکاک آئرونامیکی<sup>۷</sup> 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 به‌عنوان مدل انتخاب‌شده و 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

---

<sup>1</sup> Amirante

<sup>2</sup> Turbojet

<sup>3</sup> Gradient-Based Progressive Method

<sup>4</sup> Black-Box Codes

<sup>5</sup> Separation

<sup>6</sup> Yao

<sup>7</sup> Aerodynamic

دهند. همچنین نتیجه گرفتند که محل مخروطی دماغه و انتهای قطار از عوامل اصلی در کاهش و بهبود عملکرد این قطار است (Yao, Guo, & Sun, 2012).

جانیهونگ و جانلیانگ<sup>۱</sup> 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 آشفستگی بر میزان شستگی و کاهش شدت آشفستگی با انطباق هر چه بیشتر مرز جامد با خطوط جریان، آن‌ها تصمیم گرفتند 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<sup>۲</sup> به تولید ۱۰ مقطع برای پایه پل پرداختند و پس از مدل‌سازی، مقطعی با کمترین تنش برشی را به‌عنوان مقطع بهینه از میان آن‌ها، انتخاب کردند. درنهایت با مدل کردن سه‌بعدی مقطع بهینه و مقطع پیشنهادی به مقایسه دقیق گرداب‌های ایجادشده و مقدار تنش برشی پرداختند (Junhong & Junliang, 2015).

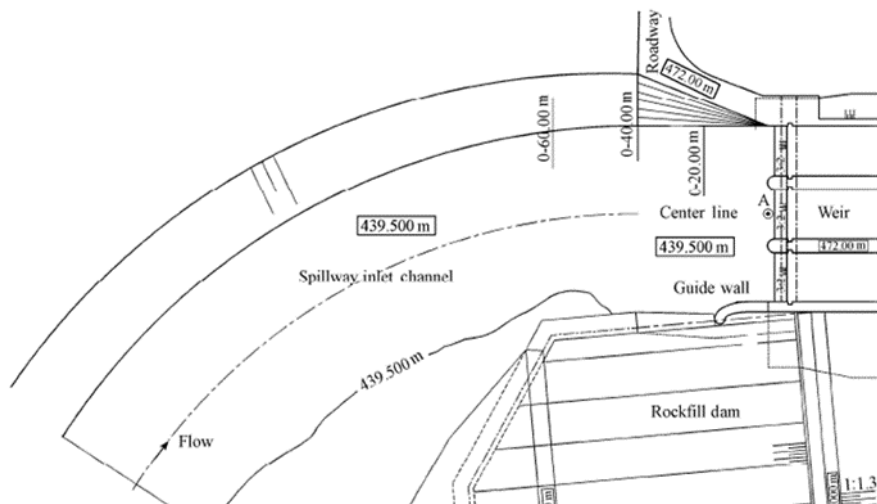
## ۲-۴ دیواره هدایت

با توجه به تجربیات مهندسی همسازی خطوط جریان و بدنه در نزدیکی مرز جامد باعث کاهش چشم‌گیر افت انرژی ناشی از تولید گردابه‌ها می‌شود. انتخاب حالت بهینه برای شکل هندسی دیواره هدایت نقش بسزایی در عملکرد جریان روی سرریز دارد. به همین دلیل هرگونه اغتشاش جریان و تشکیل امواج عرضی در قسمت کانال تقرب می‌تواند تلاطم جریان روی سرریز و کاهش ضریب دبی و حتی افزایش احتمال کاویتاسیون را به همراه داشته باشد. بهینه کردن دیواره هدایت جریان می‌تواند باعث از بین رفتن این‌گونه امواج روی سرریز شود.

---

<sup>1</sup> Junhong and Junliang

<sup>2</sup> Bezier Curves



شکل ۱-۲ نامتقارن بودن کانال ورودی سد یوتانگ (Wang & Chen, 2010)

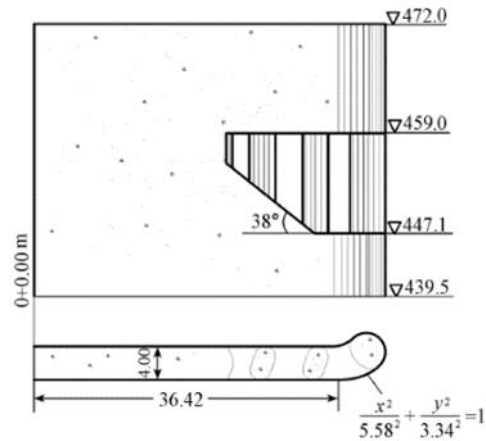
در بخش بهینه‌سازی شکل دیواره هدایت سرریز سد، با توجه به مطالعات انجام‌شده، می‌توان به آزمایش مدل فیزیکی سرریز سد یوتانگ<sup>۱</sup> که توسط ونگ و چن<sup>۲</sup> انجام‌شده است نام برد. پروفیل دیواره هدایت برای حذف گردابه‌ها و جدایی جریان چندین بار طراحی شد. در سرریز یادشده به دلیل سرعت بالا و نامتقارن بودن ساختار کانال ورودی، توزیع سرعت جریان در مقطع عرضی غیریکنواخت بود. با جریان یافتن آب در اطراف دیواره هدایت جریان، جدایی جریان و گردابه در بالادست انتهای دیواره تشکیل شد که به‌طور مستقیم بر شرایط جریان در کانال ورودی تأثیرگذار است.

گام اصلی موردنیاز برای بهینه‌سازی طراحی، اصلاح پروفیل دیواره هدایت در ورودی کانال است. در آزمایش اول در طراحی بهبودیافته، طول گسترش‌یافته دیواره هدایت  $1/8$  برابر ارتفاع آب در نظر گرفته شد. در این مدل منحنی دیواره هدایت ترکیبی متشکل از کمان دایره‌ای و بیضوی در نظر گرفته شد. در این حالت شرایط جریان در ورودی کانال آرام و جریان به‌طور منظم‌تری از سرریز عبور کرد. با این حال گردابه‌های بزرگ و کمی جدایی جریان در امتداد دیواره هدایت شکل گرفت. پس از انجام مطالعات تجربی، در آزمایش دوم با قرار دادن چندین شکاف در دیواره هدایت از جدایی جریان جلوگیری شد.

<sup>1</sup> Yutang

<sup>2</sup> Wang and Chen

بطوریکه آب از شکاف‌ها عبور کرده و در سراسر طول آن به سطح بالایی دیواره چسبید و به‌طور مؤثری از ایجاد جدایی جریان جلوگیری کرد (Wang & Chen, 2010).



شکل ۲-۲ هندسه‌ی پیشنهادی دیواره هدایت سد یوتانگ (Wang & Chen, 2010)

بهبودسازی دیواره‌های هدایت سرریز سد بالارود توسط دورقی در سال ۱۳۸۸ به‌صورت آزمایشگاهی مدل‌سازی شد. برای این منظور مطالعات روی ۵ دیواره هدایت با شکل‌های هندسی متفاوت انجام شد. هریک از دیواره‌ها با سه ویژگی تعیین شدند که عبارت‌اند از: طول مستقیم، شعاع انحنای قوس و زاویه‌ی انحنای قوس.

پس از بررسی نتایج آزمایشات مشخص گردید که دیواره هدایت پنجم با مشخصات طول مستقیم ۴ و شعاع ۱۶ متر و زاویه انحنای ۱۱۰ درجه بهترین الگوی جریان در کانال تقرب و روی سرریز را دارا است. کاهش طول مستقیم دیواره به ۴ متر باعث کاهش چشمگیر جداشدگی جریان از مجاورت دیواره هدایت شد به‌گونه‌ای که حتی در حداکثر دبی عبوری از مدل هیچ‌گونه تلاطم قابل‌ملاحظه‌ای در کانال تقرب سرریز مشاهده نشد. از طرف دیگر افزایش زاویه انحنای ۱۱۰ درجه باعث کاهش ضربه‌های ناشی از برخورد آب به دیواره هدایت شد و تلاطم و امواج عرضی به حداقل خود رسید. به این ترتیب ورود جریان به سرریز به‌صورت یکنواخت و کاملاً آرام صورت گرفت (دورقی، ۱۳۸۸).



شکل ۲-۳ ویژگی‌های دیواره هدایت سرریز سد بالارود (دورقی، ۱۳۸۸)

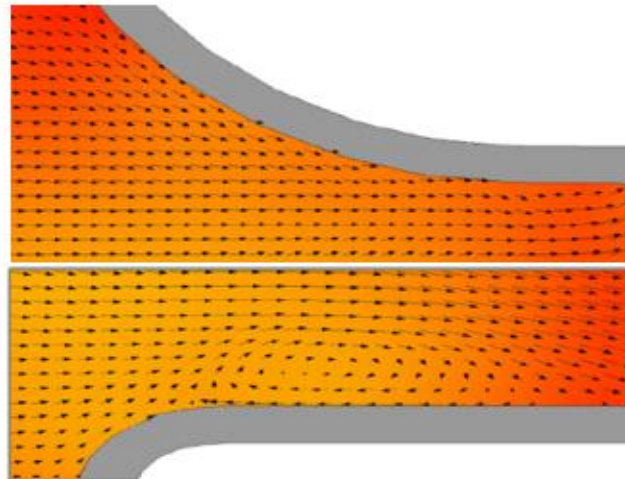
بهبهانی و همکاران سرریز سد بالارود را با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D مدل‌سازی کردند. ۹ نوع دیواره هدایت‌کننده‌ی جریان به ازای طول مستقیم و شعاع انحنای متفاوت و زاویه انحنای ثابت ۱۱۰ درجه، برای بررسی بهترین نوع دیواره شبیه‌سازی گشتند؛ تا علاوه بر مشاهده‌ی الگوی جریان در کانال تقرب و روی سرریز با استفاده از منحنی‌های دبی - اشل مربوط به هرکدام از دیواره‌ها، بتوان بهترین گزینه را برای ساخت دیواره بالادست سرریز انتخاب کرد. پس از بررسی نتایج، دیواره هدایت‌کننده با طول افقی ۰/۱ متر، شعاع قوس ۰/۴۵ متر و زاویه‌ی انحنای ۱۱۰ درجه، به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب گشت (بهبهانی، فتحی مقدم، فاضلی پور و حسینی، ۱۳۹۱).

پارسایی<sup>۱</sup> و همکاران الگوی جریان را در دیواره هدایت سد کمال صالح<sup>۲</sup> توسط نرم‌افزار Flow3D مدل کردند. هندسه‌ی دیواره هدایت سمت چپ منجر به ایجاد ناپایداری در الگوی جریان و ایجاد جریان‌های ثانویه و گردابی در ورودی کانال تقرب شد و در نتیجه دبی حداکثر تخلیه در سرریز کاهش یافت. با توجه به اینکه جریان در دیواره هدایت سمت راست یکنواخت بود، دیواره هدایتی مشابه با دیواره هدایت سمت راست برای سمت چپ کانال در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که هندسه‌ی پیشنهادی برای

<sup>۱</sup> Parsaie

<sup>۲</sup> Kamal Saleh

دیواره هدایت برای حذف گردابه ها و جریان‌های ثانویه مناسب بود ( Parsaie, Haghiabi, & Moradinejad, 2015).



شکل ۲-۴ الگوی جریان در راستای دیواره‌های هدایت (Parsaie, et al., 2015)

فرسیو مدل عددی سد کارون ۴ را به منظور بررسی تأثیر شکل دیواره هدایت جریان بالادست سرریز مورد مطالعه قرارداد. جریان از مخزن به طرف دهانه‌ی سرریز با اشکال مختلف دیواره هدایت جریان مدل‌سازی گردید. مدل‌سازی با روش حجم محدود معادلات آب‌های کم عمق انجام شد و از شیوه مرکز سلول روش جهت‌مند تحلیلگر ریمان (گودونوف) برای تخمین پایداری و دقت محاسبات استفاده گشت. بهترین هندسه‌ی دیواره هدایت، هندسه‌ای است که کمترین تأثیر سو را بر میزان تخلیه از سرریز داشته باشد. تحلیل نتایج مدل عددی برابر شدن دبی تخلیه در سه دهانه سرریز در طرح نهایی دیواره هدایت مدل‌سازی شده را با گزینه‌ی آزمایشگاهی نشان داد (فرسیو، ۱۳۸۴).

کیم<sup>۱</sup> و همکاران پایداری جریان در ابتدای کانال ورودی به سرریز سد کاریان<sup>۲</sup> را با نرم‌افزار Flow3D مورد بررسی قراردادند. جریان در کانال ورودی به سرریز ابتدا توسط یک طرح اولیه‌ی آزمایشگاهی مدل

<sup>1</sup> Kim

<sup>2</sup> Karian



گردید و نتایج نشان داد که جریان در ابتدای کانال در طرح اولیه ناپایدار است. نتایج تحلیل عددی نشان داد که جریان روی کانال تقرب به دلیل بالا بودن ارتفاع سیلاب از ارتفاع دیواره هدایت، از روی دیواره هدایت سرریز گشت. برای بهبودی جریان بر روی سرریز طرح اصلاح شده‌ای تنظیم گشت، در طرح اصلاح شده شعاع انحنا و طول قوس ثابت باقی ماند، ارتفاع دیواره هدایت کانال به اندازه‌ی ارتفاع تاج سد افزایش یافت. با توجه به دبی سیلاب، نتایج نشان داد که جریان بر روی سرریز در طرح اصلاح شده نسبت به طرح قبلی پایدارتر گردید (Kim, Lee & An, 2010).

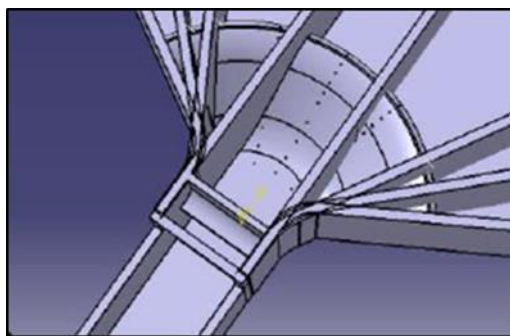
روشن و همکاران با استفاده از مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۳۰ سرریز سد گلابر، به بررسی شرایط جریان بالادست سرریز پرداختند که شامل مخزن بالادست، سرریز، تنداب و حوضچه آرامش می‌باشد. جهت بهینه‌سازی الگوی جریان در کانال تقرب گزینه‌های مختلفی از دیواره‌های هدایت جریان مورد آزمایش قرار گرفت. هر گزینه با توجه به عملکرد گزینه قبلی و تأثیر آن روی شرایط جریان طراحی گردید و در نهایت بهترین گزینه جهت استقرار در بالادست سرریز به دست آمد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که دیواره هدایتی با طول بازوی ۱۶/۵ متر و شعاع انحنای قوس ۲۵ متر مناسب‌ترین گزینه برای برقراری توزیع یکنواخت جریان روی سرریز بود. با توجه به ضریب آبگذری جریان قبل و بعد از بهینه‌سازی، استفاده از دیواره هدایت باعث کاهش ضریب آبگذری نگردیده و در برخی موارد افزایش ضریب دبی نیز مشاهده گشت. همچنین، ضرایب کاویتاسیون<sup>۱</sup> در طول سرریز محاسبه شده است که نشان‌دهنده عدم احتمال وقوع کاویتاسیون روی سرریز است (روشن، عبدالله پور، کرمی نژاد و سرکرده، ۱۳۹۰).

فرودی خور و همکاران به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر تغییرات زاویه همگرایی دیواره هدایت بر عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی با قوس در پلان پرداختند. آزمایش‌ها در دو مرحله صورت گرفته بود، در مرحله اول مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۵۰ از طرح نمونه واقعی برای سایتی خاص مورد آزمایش قرار دادند، در این مرحله آزمایش‌ها به ازای هشت دبی مختلف شامل مقادیر ۲۵ تا ۱۵۰ درصد دبی

---

<sup>۱</sup> Cavitation Coefficient

طراحی معادل نمونه واقعی در طبیعت انجام گشت. سرریز عملکرد مناسبی را تا دبی خاص از خود نشان داد. به تدریج با افزوده شدن دبی، کارایی سرریز کاهش پیدا کرد، پس از آن سرریز به طور کامل مستغرق شد و کانال پایین دست کنترل کننده دبی عبوری شد. مشاهدات و آزمایش آن‌ها نشان داد که یکی از عوامل مستغرق شدن سرریز تغییر زاویه شدید دیواره‌های هدایت و کاهش قابل ملاحظه نسبت عرض کانال به طول تاج معادل بود. در مرحله‌ی دوم تأثیر تغییر زاویه همگرایی دیواره‌های هدایت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور مدل فیزیکی تحت چهار زاویه همگرایی دیواره‌های هدایت شامل صفر درجه، زاویه ۶۰ درجه، زاویه ۹۰ درجه و زاویه ۱۲۰ درجه با نسبت‌های مختلف عرض کانال به طول تاج مورد آزمایش قرار گرفت. تأثیر تغییر زوایا بر ضریب دبی تا قبل از استغراق قابل اغماض گزارش شد. در زاویه صفر درجه با نسبت عرض کانال به طول تاج ۰/۹۸ بالاترین ضریب دبی را به خود اختصاص داد و علت آن نیز عدم استغراق در دبی معادل دبی PMF در نمونه واقعی بود. در زوایای مذکور زاویه ۶۰ درجه با نسبت عرض کانال به طول تاج ۰/۳۲، با توجه به طول تاج کمتر (۴۵ درصد کاهش طول تاج نسبت به زاویه ۱۲۰ درجه و نسبت عرض کانال به طول تاج ۰/۲۱۴) به عنوان زاویه مناسب در بین این زوایا انتخاب شد (فرودی خور، اژدری مقدم و صانعی، ۱۳۹۴).



شکل ۲-۵ شمای کلیه‌ی زوایای پلان (فرودی خور و همکاران، ۱۳۹۴)

فرودی خور و همکاران مقایسه آزمایشگاهی تأثیر تقارن و عدم تقارن دیواره‌های هدایت بر عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی قوس دار در پلان با مقیاس ۱:۵۰ را انجام دادند، سرریز در دو حالت تقارن و

عدم تقارن دیواره‌های هدایت نسبت به یکدیگر که هر حالت خود شامل ۲ زاویه ۶۰ و ۹۰ درجه بود، مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی در هر ۴ زاویه به ازای ۶ دبی انجام شد، عمق جریان ایستگاه در زاویه ۹۰ درجه متقارن ۳,۴۷ برابر عمق جریان در زاویه ۶۰ درجه نامتقارن بود. نتایج نشان داد که تقارن و عدم تقارن سرریز تأثیری بر فشار استاتیکی نداشت و عامل مؤثر تغییر زاویه تشخیص داده شد. با توجه به رژیم فوق بحرانی جریان عبوری از روی سرریز تا قبل از پدیده استغراق، ضریب دبی مستقل از تقارن و عدم تقارن رفتار نمود و هنگام استغراق نیز پایین‌دست کنترل‌کننده دبی عبوری از سرریز و ضریب دبی معین گردید (فرودی خور، صانعی و حاجی پور لیمویی، ۱۳۹۲).

ونگ<sup>۱</sup> و همکاران با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بهینه‌سازی دیواره هدایت سرریز سد باشان<sup>۲</sup> پرداختند. آن‌ها برای اصلاح شکل خطوط جریان و افزایش ظرفیت تخلیه، شکل دیواره هدایت سمت چپ کانال ورودی سرریز را توسط چندین سری از مدل‌های آزمایشی بهینه ساختند. با توجه به تجربه‌های مهندسی و وضعیت موجود پروژه‌ی مورد مطالعه، از بین نه طرح آزمایشی موجود، دیواره هدایتی با قوس بیضوی انتخاب گشت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که الگوی خط جریان و ظرفیت تخلیه رضایت‌بخش است. (Wang, Cheng & Ze, 2005).

ارپیکام<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بهینه‌سازی شکل دیواره هدایت پرداختند. روش بهینه‌سازی آن‌ها بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> بود. بر پایه‌ی نتایج تحلیل عددی سرعت در کانال تقرب بهینه‌سازی شده نسبت به بقیه‌ی مدل‌های شبیه‌سازی شده یکنواخت‌تر گشت و تشکیل گردابه نیز مشاهده نشد (Erpicum, Archambeau, Dewals & Piroton, 2009).

مارتینیه<sup>۵</sup> و همکاران به مطالعه‌ی آزمایشگاهی سرریز سد شهریار در ایران پرداختند. سرریز دریچه دار سد شهریار در راستای ۴۵ درجه از محور دره قرار دارد که باعث ایجاد جریان غیریکنواخت در سمت

---

<sup>1</sup> Wang

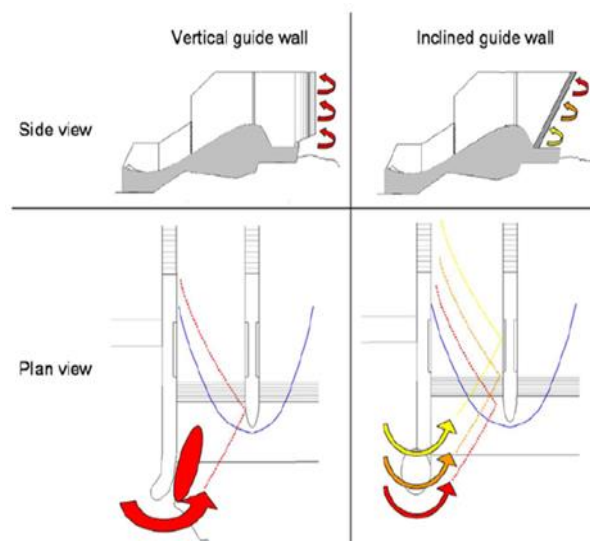
<sup>2</sup> Bashan

<sup>3</sup> Erpicum

<sup>4</sup> Genetic Algorithm

<sup>5</sup> Martinerie

چپ سرریز و تشکیل گردابه ی طولی<sup>۱</sup> در راستای دیواره هدایت سمت چپی می‌گشت. برای جلوگیری از ایجاد چنین شرایطی در ورودی کانال تقرب مارتینریه و همکاران به بهبود شکل دیواره هدایت پرداختند. پس از انجام آزمایش‌های مختلف نتایج نشان داد که هرچه خمیدگی<sup>۲</sup> روبه‌جلو دیواره هدایت بیشتر، رفتار جریان آب بهتر و هرچه شعاع انحنا بیشتر شرایط جریان بهتر گشت و ناحیه‌ی جدایی جریان کاهش یافت. برای کاهش آسیب‌پذیری این دیواره در مقابل بار لرزه‌ای<sup>۳</sup> و به‌منظور تسهیل ساخت، خمیدگی روبه‌جلوی دیواره تا حد امکان کاهش یافت. خمیدگی با زاویه‌ی ۶۰ درجه انتخاب گشت که در آن امواج ضربه‌ای<sup>۴</sup> کاهش و گرداب افقی حذف گردید (Martinerie, Boillat, Schleiss, & Parvaresh Rizi, & Whonlich, 2007).



شکل ۲-۶ تأثیر هندسه‌ی دیواره هدایت سمت چپ بر رفتار جریان (Martinerie, et al, 2007)

<sup>1</sup> longitudinal Vortex

<sup>2</sup> Inclination

<sup>3</sup> Seismic load

<sup>4</sup> Shock Waves

## ۲-۵ پله‌ی رو به جریان

در گذشته مطالعات متعددی به صورت تجربی، محاسباتی و نظری در رابطه با ناحیه جدایی<sup>۱</sup> و اتصال جریان<sup>۲</sup> در گذار از پله پشت به جریان صورت گرفته است (Awasthi, 2012). با این حال مطالعات کمی در حیطه‌ی پله‌ی رو به جریان وجود دارد. در پله‌ی رو به جریان، جدایی و اتصال جریان در دو ناحیه رخ می‌دهد در حالی که در گذر از پله پشت به جریان<sup>۳</sup> یک ناحیه وجود دارد. در پله رو به جریان، جریان در بالادست پله جدا شده و دوباره متصل می‌گردد. ناحیه جدایی-اتصال لایه‌ی مرزی گردابه‌ای در بالادست و پایین دست جریان ایجاد می‌کند. در این زمینه، فیورنتی<sup>۴</sup> و همکاران (Fiorentini et al., 2007) با اعداد رینولدز مختلف به دست آمده بر مبنای ارتفاع پله کار کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جدایی بالادست پله مستقل از عدد رینولدز است. طول جدایی جریان به اندازه‌ی ارتفاع پله در بالادست پله بوده و محل اتصال حدوداً در نصف ارتفاع پله است. نتایج مشابهی توسط کاموسی<sup>۵</sup> و همکاران (Camussi et al., 2008) با عدد رینولدزهای مختلف به دست آمد. لکرک<sup>۶</sup> و همکاران (Leclercq et al., 2009) مطالعات خود را بر روی یک جفت پله‌ی رو به جریان و پشت به جریان در تونل باد انجام دادند. آن‌ها طول جدایی جریان را ۰,۸، ارتفاع پله و ارتفاع اتصال را ۰,۶، ارتفاع پله به دست آوردند. آداد<sup>۷</sup> و همکاران (Addad et al., 2003) طول جدایی را ۱,۲، ارتفاع پله و ارتفاع اتصال را ۰,۶، ارتفاع پله گزارش دادند.

جریان بعد از پله دوباره در پایین دست از گوشه‌ی پله جدا می‌شود. این جدایی منجر به ایجاد گردابه دیگری در نزدیکی گوشه بالایی پله می‌شود. این جدایی و اتصال جریان در بالادست و پایین دست جریان باعث ایجاد لایه‌ی برشی مخلوط آزاد<sup>۸</sup> می‌شود. طول ناحیه‌ی جدایی جریان پایین دست برخلاف

---

<sup>1</sup> Separation Region

<sup>2</sup> Reattachment Region

<sup>3</sup> Backward Facing Step

<sup>4</sup> Fiorentini

<sup>5</sup> Camussi

<sup>6</sup> Leclercq

<sup>7</sup> Addad

<sup>8</sup> Free Shear Mixing Layer

بالادست در مطالعات دانشمندان کاملاً متفاوت گزارش شده است (Awasthi,2012). مطالعات شری<sup>۱</sup> و همکاران (Sherry et al.,2009) نشان می‌دهد که برای پله‌های با ارتفاع کم ناحیه‌ی جدایی جریان تابعی از نسبت ارتفاع پله به ارتفاع لایه‌ی مرزی است درحالی‌که در پله‌های با ارتفاع بزرگ نسبت یادشده تأثیر بسیار کمی دارد.

آندو و شاکوچی<sup>۲</sup> پله‌ی رو به جریان را به‌صورت آزمایشگاهی مدل‌سازی کردند، در نتایج آزمایشگاهی دو ناحیه‌ی قبل و بعد از پله تشکیل گردابه مشاهده شد. گردابه‌ی ایجادشده بعد از پله باعث ایجاد اصطکاک قابل‌توجهی در جریان عبوری گردید. در مرحله‌ی بعد، با ایجاد یک مانع کوچک در فاصله‌ای مشخص قبل از پله، عبور جریان کنترل و گردابه‌ی بعد از پله حذف گشت ( Ando & Shakouchi, 2004).

---

<sup>1</sup>Sherry

<sup>2</sup>Ando & Shakouchi

## فصل ۳ مواد و روش ها

### ۱-۳ مقدمه

این فصل به بیان نرم‌افزارها، سخت‌افزارها و روش‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر اختصاص دارد. همچنین به بررسی روش معیار بهینگی و نحوه‌ی به‌کارگیری آن در این پژوهش پرداخته‌شده است. سپس با بررسی الگوریتم استفاده‌شده در برنامه‌ی SPC جهت انطباق خط جریان بر مرز جامد، روش‌های عددی مورد استفاده در الگوریتم بیان می‌شود. در بخش بعدی نرم‌افزار OpenFOAM معرفی می‌شود و روش‌های حل معادلات توسط این نرم‌افزار توضیح داده خواهد شد. در قسمت بعدی رژیم جریان بر اساس عدد رینولدز بررسی و مقدمه‌ای از آشفتگی و روش‌های حل معادلات آشفتگی ارائه خواهد شد.

### ۲-۳ مواد مورد استفاده

جهت انطباق خطوط جریان بر مرز جامد یک برنامه‌ی رایانه‌ای با نام SPC تهیه‌شده که این برنامه با زبان C++ و با نرم‌افزار مبدل Visual Studio نسخه Express2013 نوشته‌شده است. جهت مدل‌سازی مقاطع ارائه‌شده توسط SPC از نرم‌افزار OpenFOAM نسخه‌ی ۲,۴,۰ و از نرم‌افزار ParaView نسخه‌ی ۴,۱۰,۰ برای پس پردازش در این برنامه استفاده‌شده است. همچنین جهت اجرای این نرم‌افزارها، سیستم‌عامل‌های Windows 8 و Ubuntu 14.04 بر روی رایانه‌ای با مشخصات جدول زیر به کار گرفته شده‌اند.

جدول ۱-۳ مشخصات رایانه‌ی استفاده‌شده در پژوهش

مشخصات	قطعه‌ی سخت‌افزاری
Intel Core i7-4790k CPU@4.00 GHz	پردازشگر
31.4 GB	حافظه
Gallium 0.4 on llvmpipe	کارت گرافیک



### 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 موردنظر، فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود؛ اما در میان روش‌های بهینه‌سازی، روش معیار بهینگی با حل تحلیلی مسائل، به بهینه‌سازی می‌پردازد. علیرغم اینکه روش‌های جستجوی مبتنی بر کمینه‌سازی به‌طور گسترده‌ای در شاخه‌های مختلف مهندسی 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 (Haftka & Gurdal, 1993).

در این پژوهش تابع هدف بهینه‌سازی به‌صورت کمینه کردن میزان افت فشار و کمینه کردن تراز ارتفاع آب در مخزن تعریف شده است. متغیرهای بهینه‌سازی شامل نقاط روی مرز جامد جهت تعیین شکل مرز بوده و قیدهای بهینه‌سازی به‌صورت دو قید مکانی در پله‌ی رو به جریان و چهار قید مکانی در دیواره‌های هدایت بیان شده است.

روش معیار بهینگی از دو بخش تشکیل شده است که یکدیگر را کامل می‌کنند. اولین بخش، معیار بهینه‌سازی است که می‌تواند یک عبارت صریح ریاضی یا یک شرط شهودی باشد. دومین بخش، الگوریتم مورد استفاده برای تغییر شکل دیواره‌های هدایت به‌منظور برآورده شدن معیار بهینه‌سازی است. شایان‌ذکر است که برای اطمینان از برآورده شدن معیار بهینه‌سازی معمولاً روش صریح ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد، درحالی‌که 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 روش‌ها به صریح و شهودی معمولاً بر اساس انتخاب معیار بهینه‌سازی صورت می‌گیرد و الگوریتم تعیین مقادیر متغیرها نقش به‌سزایی در انتخاب روش ندارد (Haftka & Gurdal, 1993).

در این پژوهش معیار بهینه‌سازی از نوع شهودی بوده و به‌صورت انطباق شکل مرز جامد با یک خط جریان تعریف می‌شود. در این روش ابتدا شکل هندسی اولیه دیواره هدایت در نظر گرفته می‌شود. سپس با حل جریان پتانسیل در شکل اولیه، خطوط جریان به دست می‌آید؛ بعد از به دست آوردن خطوط جریان، یک خط جریان نزدیک به مرز به‌عنوان خط مبنا برای انطباق بر مرز انتخاب می‌شود. منحنی خط جریان انتخاب‌شده بر اساس روابط ریاضی معلوم و پس از انطباق، شکل جدیدی به‌عنوان مرز جامد تعریف می‌شود؛ بنابراین با حل معادلات جریان پتانسیل در مسئله‌ی جدید با مرزهای منحنی شکل (در مختصات غیر مستطیلی)، این فرآیند تکرار شده و تا زمانی که اختلاف بین شکل مرز جامد با خط جریان به کمتر از حد مشخص نرسد، ادامه پیدا می‌کند. درنهایت با بررسی تابع هدف اصلی، از بین خطوط جریان مختلف، یک خط جریان به‌عنوان خط بهینه جهت منطبق کردن بر مرز جامد به دست می‌آید. در ادامه به بیان جزئیات روش‌های استفاده‌شده در هر قسمت از بهینه‌سازی پرداخته می‌شود.

### ۳-۳-۱ معیار بهینه‌سازی

همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، معیار بهینه‌سازی در این روش، انطباق بیشینه شکل خطوط جریان بر مرز جامد است. به‌منظور به دست آوردن خطوط جریان با فرض جریان پتانسیل ابتدا بایستی معادلات جریان پتانسیل در محیط مسئله حل شود. بر این اساس در این قسمت ابتدا به بررسی معادلات حاکم در این‌گونه جریان‌ها پرداخته می‌شود و سپس با توجه به شکل محیط حل، روش حل معادله‌ی حاکم در محیط‌های حل مستطیلی و غیر مستطیلی بحث می‌شود.

### معادله‌ی حاکم

با کمک حل معادلات پتانسیل در یک میدان محاسباتی، می‌توان مقدار تابع جریان را در هر نقطه از شبکه‌ی میدان محاسباتی به دست آورد.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (1-3)$$

معادله (۱-۳) به عنوان معادله‌ی اصلی حاکم در این مسئله شناخته می‌شود که در سیال‌های تراکم ناپذیر با جریان‌های دوبعدی و غیر چرخشی کاربرد دارد.

### حل معادله‌ی حاکم در شبکه‌های مستطیلی

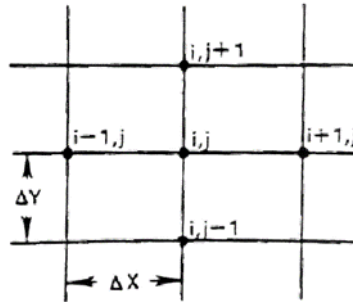
جهت حل معادله‌ی حاکم به صورت عددی ابتدا باید بر اساس روش‌های تقریبی در محاسبات عددی، معادله‌ی دیفرانسیل به دست آمده را به معادله‌ی جبری تبدیل کرده و سپس این معادله را در نقاط مختلف محیط مسئله حل کرد. این نقاط که همان نقاط شبکه<sup>۱</sup> هستند در روش‌های عددی برای حل معادلات در آن‌ها تولید می‌شوند. 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.

معادله‌ی حاکم در این مسئله از نوع معادله لاپلاس است که نوعی از معادلات بیضوی محسوب می‌شود. جهت فرمول‌بندی تفاضل محدود این معادلات معمولاً از روش پنج نقطه‌ای 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.

$$\frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} = 0 \quad (2-3)$$

<sup>۱</sup> Grid Points

در این معادله  $\psi$  نماد تابع جریان و  $i$  و  $j$  نماد شماره‌ی گره در شبکه‌ی حل می‌باشد. نقاط مربوط به شبکه‌بندی در شکل زیر آمده است.



شکل ۳-۱ شبکه‌ی نقاط در یک معادله پنج نقطه‌ای (Hoffmann & Chiang, 2000)

فرمول (۳-۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j} + \left[\frac{\Delta x}{\Delta y}\right]^2 (\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}) = 0 \quad (3-3)$$

چنانچه نسبت گام‌ها  $\beta = \frac{\Delta x}{\Delta y}$  باشد، معادله‌ی ۳-۲ به این صورت نوشته می‌شود:

$$\psi_{i,j} = \frac{1}{2(1 + \beta^2)} [\psi_{i+1,j} + \psi_{i-1,j} + \beta^2(\psi_{i,j+1} + \psi_{i,j-1})] \quad (4-3)$$

حل این معادلات در نقاط شبکه‌ی تولیدشده باعث ایجاد یک دستگاه چند معادله‌ای خطی می‌شود که با روش‌های استاندارد موجود در محاسبات عددی قابل حل است.

برخی از این روش‌ها که مشهور به روش‌های مستقیم هستند عبارت‌اند از روش کرامر و روش حذفی گوس. عیب بزرگ این روش‌ها، حجم عملیات ریاضی قابل توجه برای رسیدن به جواب است. روش‌های مستقیم پیشرفت‌های پیشنهادشده‌اند که به زمان محاسبات کمتری نیاز دارند ولی تقریباً همه آن‌ها معایب خاص خود را دارند. معمولاً این روش‌ها با یک یا چند شرط محدود می‌شوند که این شرایط عبارت‌اند از: دستگاه مختصات دکارتی، قلمرو مستطیلی، اندازه ماتریس ضرایب، ظرفیت ذخیره بالا، شرایط مرزی. در هر حال برخی از این روش‌های مستقیم پیشرفته در کاربردهای خاصی مفید به نظر

می‌رسند. از آنجاکه کاربرد کلی روش‌های حل موردنظر است، بررسی‌ها به روش‌های ساده و قابل‌درک تکراری محدود می‌شود. حل روش‌های تکراری در دستگاه معادلات خطی ساده هستند و به راحتی می‌توان آن را برنامه‌نویسی کرد.

جریان سیال در پژوهش حاضر به صورت دائمی فرض شده است که روش تکراری برای حل آن مفید است. تفاوت عمده بین روش حل دائم و غیر دائم در این است که روش غیر دائم در هر مرحله زمانی دارای اعتبار است (یعنی جواب‌های به دست آمده در آن مقطع زمانی صحیح‌اند) از طرف دیگر، هرگونه 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 پی‌درپی (SOR<sup>1</sup>) می‌گویند. نخست معادله‌ی ۳-۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \psi_{i,j}^k + \frac{1}{2(1+\beta^2)} [\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2(\psi_{i,j+1}^k + \psi_{i,j-1}^{k+1}) - 2(1+\beta^2)\psi_{i,j}^k] \quad (5-3)$$

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  $\omega$ ، پارامتر تخفیف<sup>۲</sup>، ضرب شده و معادله‌ی بالا به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \psi_{i,j}^k + \frac{\omega}{2(1+\beta^2)} [\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2(\psi_{i,j+1}^k + \psi_{i,j-1}^{k+1}) - 2(1+\beta^2)\psi_{i,j}^k] \quad (6-3)$$

برای اینکه جواب همگرا شود، باید  $0 < \omega < 2$  باشد اگر  $\omega < 1$  اشد آن را تخفیف‌زیرین می‌گویند. گفتنی است اگر  $\omega = 1$  باشد، روش تکراری گوس-سایدل به دست می‌آید. حال چنانچه فرمول‌بندی

<sup>1</sup> Successive Over Relaxation

<sup>2</sup> Relaxation Parameter

معادله‌ی بالا به صورت زیر ارائه شود، معادله‌ی جبری به دست آمده بر اساس روش فوق تخفیف پی در پی نقطه به نقطه<sup>۱</sup> (PSOR) به دست می‌آید.

$$\psi_{i,j}^{k+1} = (1 - \omega)\psi_{i,j}^k + \frac{\omega}{2(1 + \beta^2)} [\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2(\psi_{i,j+1}^k + \psi_{i,j-1}^{k+1})] \quad (۷-۳)$$

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

$$\omega_{opt} = \frac{2 - 2\sqrt{1 - a}}{a} \quad (۱-۳)$$

$$a = \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi}{JM - 1}\right) + \beta^2 \cos\left(\frac{\pi}{JM - 1}\right)}{1 + \beta^2} \right]^2 \quad (۲-۳)$$

در حالت کلی مقدار  $\omega$  بهینه را نمی‌توان به آسانی محاسبه کرد و در بیشتر موارد بر اساس آزمایش عددی به دست می‌آید. 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 می‌شود (Hoffmann & Chiang, 2000).

### حل معادله‌ی حاکم در محیط‌های غیر مستطیلی

بعد از حل معادله‌ی حاکم در محیط مستطیلی بر اساس روش توضیح داده شده در قسمت قبل، یکی از خطوط جریان به عنوان خط مبنا برای انطباق بر مرز جامد انتخاب می‌شود. بر این اساس محیط حل از مستطیلی به غیر مستطیلی تبدیل شده و از این مرحله به بعد بایستی از روش‌های قابل استفاده در محیط‌های غیر مستطیلی استفاده شود. جهت حل معادله‌ی حاکم در یک محیط غیر مستطیلی، ابتدا

<sup>۱</sup> Point Successive Over Relaxation

باید بر اساس شکل مرز جامد، به تولید شبکه‌ی مناسب در محیط حل پرداخته شود؛ بر همین اساس در ادامه به بررسی انواع شبکه و روش انتخاب‌شده در این پژوهش پرداخته می‌شود.

در محیط غیر مستطیلی دو مسئله مطرح می‌شود، برای حل معادلات مشخصه جریان در محیط غیر مستطیلی شبکه غیریکنواخت است. روش اختلاف محدود استاندارد به یک شبکه یکنواخت نیاز دارد. در نتیجه شبکه غیریکنواخت باید به نحوی به شبکه یکنواخت و مستطیل شکل تبدیل شود. بعلاوه هم‌زمان با این تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی به معادلات قابل‌استفاده در شبکه تبدیل یافته و مستطیل شکل تغییر خواهد یافت. اگر شکل جسم فضایی غیریکنواخت و منحنی شکل در یک شبکه مستطیل شکل قرار داده شده است. خصوصیات این شبکه به شرح زیر است.

- بعضی از نقاط شبکه در داخل جسم فضایی واقع می‌شوند، درحالی‌که کاملاً خارج از جریان هستند.

- ممکن است تعدادی از نقاط شبکه روی سطح جسم فضایی قرار نگیرند. این مطلوب نیست، زیرا سطح جسم فضایی یک شرط مرزی حیاتی برای تعیین جریان بوده و لذا باید به‌طور واضح و قوی به‌وسیله حل عددی دیده شود.

در نتیجه شبکه مستطیل شکل برای محاسبه میدان جریان چنین شکلی مناسب نیست. در مقابل، شبکه مناسب برای این مسئله یک شبکه غیریکنواخت و منحنی شکل است که جسم فضایی را در بر گرفته است. خطوط جدید مختصات  $\xi$  و  $\eta$  طوری تعریف می‌شوند که سطح جسم فضایی یک خط مختصات باشد،  $\eta = \text{const}$ . به این سیستم مختصات، سیستم مختصات منطبق بر مرز گفته می‌شود (Anderson, 1995).

هنگامی که قلمرو محاسبات به نحوی انتخاب می‌شود که نقاط داخلی شبکه بر روی خطوط شبکه توزیع شوند. 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<sup>۱</sup> می‌نامند.

در فضای فیزیکی شبکه مستطیل شکل نیست و به طور یکنواخت ترسیم نشده است. در نتیجه عبارت‌های مرسوم اختلاف را به سختی می‌توان به کاربرد. (Anderson, 1995) با توجه به قلمرو محاسباتی غیر مستطیل در این مرحله از بهینه‌سازی، اعمال قلمرو محاسباتی مستطیلی شکل بر چنین قلمروهای فیزیکی، به نوعی میانجی‌گری، برای اعمال شرایط مرزی نیاز دارد. در شبکه‌های غیر یکنواخت در نزدیکی مرزها پیچیدگی‌های بیشتری در خصوص معادلات تفاضل محدود به وجود می‌آید زیرا از تقریب‌هایی با فواصل نامساوی استفاده می‌شود. این نوع معادله‌ی تفاضل محدود از گره‌های به گره‌ی دیگر تغییر می‌کند و برنامه‌نویسی آن دشوار است. (Anderson, 1995) کاری که می‌توان انجام داد این است که شبکه منحنی الخط را در فضای فیزیکی به یک شبکه مستطیل شکل برحسب  $\xi$  و  $\eta$  تبدیل نمود. این شبکه مستطیل شکل صفحه محاسباتی نامیده می‌شود. بنا به تعریف وقتی شبکه منحنی الشكل (صفحه فیزیکی) به شبکه مستطیل شکل (صفحه محاسباتی) تبدیل می‌شود، بین نقاط دو شبکه باید تطابق کامل وجود داشته باشد. معادلات دیفرانسیل جزئی با استفاده از روش اختلاف محدود اعمال شده در صفحه محاسباتی حل می‌شوند. سپس خواص محاسبه شده مستقیماً از طریق تطابق نقطه به نقطه بین نقاط دو شبکه به صفحه فیزیکی منتقل می‌گردد. وقتی معادلات مشخصه در فضای محاسباتی حل می‌شوند باید آن‌ها را برحسب  $\xi$  و  $\eta$  بیان نمود و نه برحسب  $x$  و  $y$  و به عبارت دیگر معادلات مشخصه که قبلاً برحسب  $x$  و  $y$  بوده‌اند بایستی به معادلاتی تبدیل شوند که در آن‌ها  $\xi$  و  $\eta$  متغیرهای مستقل باشند. (Anderson, 1995)

---

<sup>1</sup> Structured



این انتقال با معرفی دستگاه مختصات کلی انجام می‌شود و شبکه‌ی غیر مستطیلی موجود در فضای فیزیکی را به شبکه‌ی یکنواخت مستطیلی در فضای محاسباتی تصویر می‌کند. روش‌های گوناگونی برای بیان دستگاه مختصات کلی وجود دارد که از میان آن‌ها، دستگاه مختصات منطبق بر بدنه‌ی قلمرو حل، جهت استفاده در این پژوهش انتخاب شده است. در این دستگاه دو محور مختصات  $\xi$  و  $\eta$  بر سطح منطبق هستند که به ترتیب یکی در امتداد خطوط جریان، دیگری در جهت محیط و محور سوم  $\eta$  نیز عمود بر سطح است.

برای تعیین نقاط شبکه فرض‌های زیر به کار برده می‌شود:

- شبکه‌سازی یک‌به‌یک باشد یعنی خطوط شبکه‌ی هم‌خانواده نباید یکدیگر را قطع کند.
  - از نظر عددی در مناطقی که گرادیان‌های شدید جریان وجود دارد باید توزیع نقاط شبکه هموار و اعوجاج خطوط شبکه کم باشد.
  - خطوط شبکه باید متعامد یا تقریباً متعامد باشد.
- در اینجا به روش‌های ایجاد شبکه‌ای که به ترکیبی از این موارد می‌پردازد اشاره می‌شود.
- روش‌های شبکه‌سازی به‌طور کلی به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:
- شبکه‌سازی به روش جبری
  - شبکه‌سازی با استفاده از معادلات دیفرانسیل
  - شبکه‌سازی با استفاده از اعداد مختلط و نگاشت هم‌دیس<sup>۱</sup>

علاوه بر این، شبکه‌ها به شبکه‌های ثابت<sup>۲</sup> و قابل تطبیق<sup>۳</sup> نیز تقسیم می‌شوند. بدیهی است که یک شبکه ثابت پیش از آغاز حل معادلات حاکم بر جریان سیال ایجاد می‌شود و مستقل از حل، ثابت می‌ماند. از سوی دیگر در یک شبکه‌ی تطبیقی شبکه‌ی همراه با نتایج حل معادلات سیال شکل می‌گیرد.

---

<sup>۱</sup> Conformal

<sup>۲</sup> Fixed

<sup>۳</sup> Adaptive

نگاشت همدیس که بر اساس متغیرهای مختلط استوار است به مسائل دوبعدی 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 (Hoffmann & Chiang, 2000).

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 متناظر در دستگاه مختصات محاسباتی تبدیل کرد؛ سپس بر اساس روش‌های تولید شبکه، یک شبکه در قلمرو محاسباتی به دست می‌آید و معادله‌ی تبدیل‌شده در یک شبکه‌ی جدید مستطیلی، محاسبه می‌شود. بنابراین در ادامه ابتدا به تشریح مراحل انتقال معادله‌ی حاکم از دستگاه مختصات فیزیکی به دستگاه مختصات محاسباتی ارائه می‌شود و سپس به بررسی روش‌های استفاده‌شده در این پژوهش جهت تولید شبکه پرداخته می‌شود.

### 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. حال روابط زیر بین فضای فیزیکی و فضای محاسباتی بیان می‌شود.

$$\xi \equiv \xi(x, y) \quad (۸-۳)$$

$$\eta \equiv \eta(x, y) \quad (۹-۳)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (۱۰-۳)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x} = \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (11-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (12-3)$$

حال معادله حاکم بر جریان پتانسیل در نظر گرفته می‌شود. این معادله با استفاده از معادلات (11-3) و

(12-3) از فضای فیزیکی به فضای محاسباتی انتقال داده شده و نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \left[ \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} \left[ \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right] \\ & + 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi \partial \eta} \left[ \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) \\ & + \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (13-3)$$

این معادله در قلمرو محاسباتی حل می‌شود. همچنین توجه کنید که مشتق‌های تبدیل باید از طریق

روابط (8-3) تا (10-3) محاسبه شوند. در معادلات (11-3) و (12-3) جمله‌هایی مانند  $\xi_x$ ،  $\xi_y$ ،  $\eta_x$  و

$\eta_y$  ظاهر می‌شود؛ این مشتق‌های تبدیل، متریک‌های انتقال<sup>1</sup> و یا به صورت ساده‌تر، متریک نامیده

می‌شوند. تفسیر متریک‌ها با تقریب زیر مشخص می‌شود.

$$\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x} \cong \frac{\Delta \xi}{\Delta x} \quad (14-3)$$

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 8-3 تا 12-3، روابط زیر به دست می‌آید:

$$d\xi = \xi_x dx + \xi_y dy \quad (15-3)$$

$$d\eta = \eta_x dx + \eta_y dy \quad (16-3)$$

<sup>1</sup> Metrics of Transformation

که می‌توان آن‌ها به صورت فشرده، مطابق با معادلات زیر نوشت.

$$\begin{bmatrix} d\xi \\ d\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (۱۷-۳)$$

با معکوس کردن متغیرهای مستقل، روابط زیر ارائه می‌شود.

$$x = x(\xi, \eta) \quad (۱۸-۳)$$

$$y = y(\xi, \eta) \quad (۱۹-۳)$$

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

$$dx = x_\xi d\xi + x_\eta d\eta \quad (۲۰-۳۳)$$

$$dy = y_\xi d\xi + y_\eta d\eta \quad (۲۱-۳۳)$$

این معادلات نیز در حالت فشرده به صورت زیر هستند:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_\xi & x_\eta \\ y_\xi & y_\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\xi \\ d\eta \end{bmatrix} \quad (۲۲-۳)$$

با مقایسه‌ی روابط ۱۷-۳ و ۲۲-۳، می‌توان معادلات زیر را نتیجه گرفت:

$$\begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_\xi & x_\eta \\ y_\xi & y_\eta \end{bmatrix}^{-1} \quad (۲۳-۳)$$

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

$$J = \frac{1}{\left( \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \right)} \quad (۲۴-۳)$$

$$\xi_x = J y_\eta \quad (۲۵-۳)$$

$$\xi_y = -J x_\eta \quad (۲۶-۳)$$

$$\eta_x = -J y_\xi \quad (۲۷-۳)$$

$$\eta_y = Jx_\xi$$

در روابط بالا  $J$ ، ژاکوبین تبدیل نامیده می‌شود و عبارت است از نسبت سطح (نسبت حجم در حالت سه‌بعدی) در فضای فیزیکی به سطح در فضای محاسباتی که برای محاسبه‌ی متریک‌ها با توجه به‌قرار گرفتن مقادیر  $\partial\xi$  و  $\partial\eta$  در مخرج کسرها و بر اساس ثابت بودن این مقادیر در محیط حل، می‌توان به‌راحتی مقادیر متریک‌ها را بر اساس روابط اختلاف محدود محاسبه کرد. این مقادیر برای متریک‌ها مستقیماً در معادلات (تبدیل‌شده) مشخصه جریان وارد می‌شوند (Anderson, 1995).

### شبکه‌سازی به روش جبری

یکی از ساده‌ترین روش‌های شبکه‌سازی، روش جبری است که از مزایای آن می‌توان به‌سرعت بالای تولید شبکه اشاره کرد (Hoffmann & Chiang, 2000). در این پژوهش از این روش برای تولید شبکه در مرحله‌ی اولیه، استفاده شد، به این صورت که یک رابطه‌ی عددی برای ارتباط بین مختصات نقاط شبکه در قلمرو محاسباتی با نقاط متناظر در قلمرو فیزیکی ارائه شد. برای این منظور یک درون‌یابی بین مختصات مشخص شده نقاط روی مرز و نقاط درونی در محیط حل صورت گرفت. جهت درون‌یابی ابتدا مختصات نقاط پیشینه 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 آمد؛ مختصات نقاط درونی در محیط حل، که دارای مختصات نقاط مرزی معلوم هستند، مشخص شدند و شبکه‌ی ایجادشده به‌عنوان شبکه‌ی حل در نظر گرفته شد.

### شبکه‌سازی با استفاده از معادلات دیفرانسیل

روش شبکه‌سازی مورد بحث در مرحله دوم روش مبتنی بر معادلات دیفرانسیل پاره‌ای است. در این روش یک دستگاه معادله دیفرانسیل پاره‌ای حل شد تا نقاط شبکه در فضای فیزیکی به دست آید، درحالی‌که فضای محاسباتی یک شبکه مستطیلی با فواصل یکنواخت است. این گروه از روش‌ها بسته به نوع معادله‌ی دیفرانسیل مورد استفاده به روش‌های معادلات دیفرانسیل بیضوی، سهموی و هذلولوی

دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به توسعه نسبی و کاربرد بیشتر شبکه‌ی بیضوی، در این پژوهش از آن استفاده‌شده است (Hoffmann & Chiang, 2000).

هرگاه مرزهای فیزیکی مشخص باشند، تولید شبکه‌ی بیضوی بسیار مؤثر است. دستگاه معادلات دیفرانسیل بیضوی به صورت معادلات لاپلاس یا معادلات پواسن 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 پی‌درپی نقطه‌به‌نقطه استفاده می‌شود.

متغیرهای مستقل، مختصات  $x$  و  $y$  نقاط شبکه در فضای فیزیکی هستند. بنابراین در یک فضای بسته، توزیع نقاط روی مرزها مشخص می‌شود و از حل مجموعه‌ای از معادلات بیضوی توزیع نقاط داخلی به دست می‌آید. به‌عنوان مثال برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای زیر می‌توان به ترتیب گفته‌شده اقدام نمود:

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = 0 \quad (29-3)$$

$$\eta_{xx} + \eta_{yy} = 0 \quad (30-3)$$

معادلات بالا، مختصات در قلمرو محاسباتی است. معادلات (29-3) و (30-3) را می‌توان با روش تکراری فوق تخفیف پی‌درپی نقطه‌به‌نقطه حل کرد. برای تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای بیضوی، متغیرهای وابسته و مستقل باید جابه‌جا شوند. روابط ریاضی در پیوست ۱ آورده شده است. با به‌کارگیری معادلات ارائه‌شده در پیوست، معادلات بیضوی (29-3) و (30-3) به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$ax_{\xi\xi} - 2bx_{\xi\eta} + cx_{\eta\eta} = 0 \quad (31-3)$$

$$ay_{\xi\xi} - 2by_{\xi\eta} + cy_{\eta\eta} = 0 \quad (32-3)$$

که در این معادلات  $a$ ،  $b$  و  $c$  عبارت‌اند از:

$$a = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2 \quad (33-3)$$

$$b = x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta} \quad (34-3)$$

$$c = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2 \quad (35-3)$$

دستگاه معادلات بیضوی (۳-۳۱) و (۳-۳۲) در فضای محاسباتی  $(\xi, \eta)$  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 خطی سازی استفاده کرد که در اینجا برای سادگی، از روش تأخیری<sup>۱</sup> برای ضرایب استفاده می‌شود، بدین معنی که ضرایب  $a$ ،  $b$  و  $c$  از نتایج گام تکرار قبلی محاسبه می‌شوند.

به‌طور کلی سه نوع قلمروی فیزیکی برای محیط‌های حل تعریف می‌شود که عبارت‌اند از:

- ناحیه همبند ساده
- ناحیه همبند دوگانه
- ناحیه همبند چندگانه

که با توجه به شرایط مرزی مطرح‌شده در این پژوهش، قلمروی فیزیکی از نوع ناحیه همبند ساده است. ناحیه‌ای را همبند ساده می‌گویند که هیچ جسمی در محیط حل وجود نداشته باشد. حال با در نظر گرفتن روابط (۳-۳۱) و (۳-۳۲)، معادله‌ی جبری موردنیاز جهت به دست آوردن مختصات شبکه‌ی محاسباتی در محیط حل فیزیکی بر اساس روش فوق تخفیف پی‌درپی نقطه‌به‌نقطه ارائه می‌شود. در این قسمت شکل نهایی معادلات (۳-۳۶ و ۳-۳۷) ارائه می‌شود.

$$x_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2\left(\frac{a}{\Delta\xi^2} + \frac{c}{\Delta\eta^2}\right)} \left[ \frac{a}{\Delta\xi^2} (x_{i+1,j}^k + x_{i-1,j}^{k+1}) + \frac{c}{\Delta\eta^2} (x_{i,j+1}^k + x_{i,j-1}^{k+1}) - \frac{b}{2\Delta\xi\Delta\eta} (x_{i+1,j+1}^k - x_{i+1,j-1}^k + x_{i-1,j-1}^{k+1} - x_{i-1,j+1}^k) \right] \quad (36-3)$$

<sup>1</sup> Lagging of The Cefficients

$$y_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2\left(\frac{a}{\Delta\xi^2} + \frac{c}{\Delta\eta^2}\right)} \left[ \frac{a}{\Delta\xi^2} (y_{i+1,j}^k + y_{i-1,j}^{k+1}) + \frac{c}{\Delta\eta^2} (y_{i,j+1}^k + y_{i,j-1}^{k+1}) \right. \\ \left. - \frac{b}{2\Delta\xi\Delta\eta} (y_{i+1,j+1}^k - y_{i+1,j-1}^k + y_{i-1,j-1}^{k+1} - y_{i-1,j+1}^k) \right] \quad (37-3)$$

در این روابط  $a$ ،  $b$  و  $c$  بر اساس روابط (33-3) تا (35-3) محاسبه می‌شود. با داشتن مختصات مرزها و حل معادلات بالا در قلمروی محاسباتی مختصات تمامی نقاط شبکه در محیط حل فیزیکی به دست می‌آید (Hoffmann & Chiang, 2000).

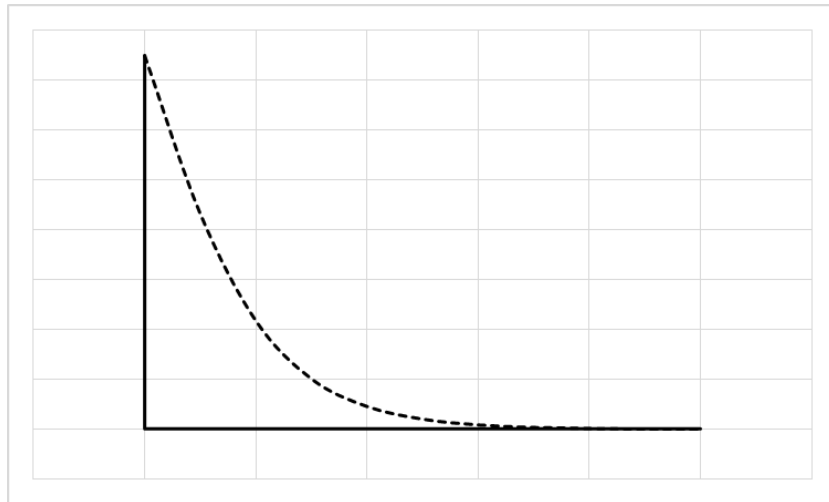
این معادلات روابط تبدیل از صفحه فیزیکی به صفحه محاسباتی را تشکیل می‌دهند و تبدیل بین نقاط نظیر شبکه انجام می‌شود. چون این تبدیل به وسیله معادلات بیضوی انجام می‌شود، نمونه‌ای از یک روش کلی تولید شبکه موسوم به تولید شبکه بیضوی می‌باشد (Anderson, 1995).

در نهایت جهت حل جریان پتانسیل، در محیط حل غیر مستطیلی، ابتدا تولید شبکه‌ی موردنظر انجام شد. در این روش حل معادلات دیفرانسیل ابتدا به نقاط روی مرز مختصات خط جریان موردنظر و به تمامی نقاط درونی شبکه یک مقدار اولیه اختصاص داده شد و پس از تبدیل روابط (33-3) تا (35-3) به معادلات جبری بر اساس روش اختلاف محدود و تعیین مقادیر  $\Delta\xi$  و  $\Delta\eta$ ، مقادیر متغیرهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  به دست آمد. بعد از معلوم شدن این مقادیر، معادلات 36-3 و 37-3 در کل قلمروی محاسباتی حل گشت، در نهایت با تکرار این فرآیند، مختصات نقاط شبکه تعیین شد.

بعد از معلوم شدن مختصات شبکه‌ی حل، معادله‌ی (13-3) در درون قلمروی محاسباتی حل شد. به این ترتیب که ابتدا بر اساس روابط (24-3) تا (28-3) و روابط پیوست 1، مقادیر متریک‌ها معلوم شد و پس از آن معادله‌ی (13-3) بر اساس روش فوق تخفیف پی‌درپی نقطه‌به‌نقطه، به یک معادله‌ی جبری که در قلمرو محاسباتی قابل حل است، تبدیل شد.



### ۲-۳-۳ متغیرهای بهینه‌سازی



شکل ۲-۳ مختصات اولیه و ثانویه

بعد از به دست آوردن خطوط جریان، 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 تیز گوشه بودن مقطع انتقالی در نقاط مرزی (خط مشکی در شکل ۲-۳)، محیط حل فیزیکی مستطیلی بود و بر اساس این محیط به راحتی می‌توان تمامی خطوط جریان حاکم بر مسئله را به دست آورد. پس از به دست آوردن مختصات خطوط جریان، خط جریان انتخابی بر مرز جامد منطبق می‌شود. برای انجام این کار، با توجه به قیدهای تعیین شده در صورت مسئله، خط مرز جامد و خط جریان موردنظر از محل قیدها جدا می‌شود.

سپس مختصات نقاط خط جریان موردنظر با یک جابه‌جایی بر روی مرز اولیه منتقل می‌شود و سپس خط جدید (خط تیره در شکل ۲-۳) به عنوان مرز جامد برای مرحله‌ی بعد به دست می‌آید. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تفاوت بین مرز جدید و مرز موجود 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 بهینه‌سازی صورت می‌گیرد.

### 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، در سازه اول کمینه کردن افت فشار و در سازه دوم کمینه کردن تراز سطح رودخانه است، به دست آمد. به همین منظور بر اساس خطوط جریان مختلف شکل مرزها به دست آمد. جهت مشخص کردن خط جریان بهینه با کمک یک نرم‌افزار جانبی هندسه‌ی ایجادشده با خطوط جریان مختلف مدل‌سازی گشت. در این پژوهش از نرم‌افزار OpenFOAM در مدل‌سازی استفاده شد.

در شکل پله‌ی رو به جریان انحنای خطوط جریان در مجاور پله بیشتر و هرچه به خطوط جریان صد درصد نزدیک تر گردد این انحنا تبدیل به خط راست می شود دلیل انتخاب خطوط جریان ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد به دلیل نزدیکی بیشتر خطوط جریان یاد شده به پله است و به هدف پروژه که انطباق خطوط جریان بر مرز جامد است نزدیکتر می شود.

در شکل دیواره هدایت به دلیل تقارن شکل دیواره های هدایت خط جریان ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد به ترتیب مشابه خطوط جریان ۹۰، ۸۰، ۷۰ درصد است. در واقع انطباق خط جریان ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد برای دیواره هدایت سمت راست و انطباق خطوط جریان ۹۰، ۸۰، ۷۰ درصد برای دیواره هدایت سمت چپ است و مشابه حالت قبل با نزدیک شدن خطوط جریان به خط جریان وسطی (۵۰ درصد)، خط جریان به خط راست تبدیل می شود بنابراین به دلیل تاثیر خطوط نزدیک به دیواره از خطوط یاد شده انتخاب گشت.

### ۳-۴ نرم‌افزار OpenFOAM

نرم‌افزار OpenFOAM یک جعبه‌ابزار دینامیک سیالات محاسباتی است که قادر به مدل‌سازی هر نوع مسئله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسائل ساده تا بسیار پیچیده است. از نمونه موارد قابل مدل‌سازی توسط این نرم‌افزار می‌توان مسئله‌های مربوط به جریان‌های آرام و آشفته، یک‌فاز و چند فاز، انتقال حرارت، واکنش‌های شیمیایی، الکترومغناطیسی و مکانیک جامدات و همچنین به مسئله‌های مربوط به معادلات اقتصادی نظیر قیمت‌گذاری و مالی اشاره نمود. این نرم‌افزار

توسط OpenCFD Ltd تحت مجوز عمومی گنو<sup>۱</sup> ایجاد شده و به صورت منبع باز<sup>۲</sup> 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 کاربر فراهم خواهد بود.

هسته انعطاف‌پذیر و کارآمد OpenFOAM از مجموعه‌ای از کدهای نوشته‌شده به زبان ++C ایجاد شده است. این مجموعه‌ها در ایجاد حلگرهایی<sup>۳</sup> برای مدل‌سازی مسائل مطرح در مهندسی مکانیک و با ایجاد ابزارهایی برای اعمال پیش‌پردازش و پس‌پردازش، همچنین به وجود آوردن کتابخانه‌هایی به منظور ایجاد جعبه‌ابزارهایی که در حلگرها قابل دسترسی باشند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزار با تعدادی حلگر از پیش ساخته، مثال‌های کاربردی و کتابخانه ارائه کرده است که می‌تواند به عنوان یک بسته مدل‌سازی 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، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها نیز وجود دارد. نرم‌افزار OpenFOAM از روش عددی حجم محدود برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار، برای حل جریان سیال از الگوهای تکرار سرعت-فشار ضمنی استفاده می‌شود. موازی‌سازی<sup>۴</sup> در حل و بخش‌بندی دامنه‌ی حل از مبانی به کاررفته در OpenFOAM است بنابراین به طور کلی حلگرها بدون نیاز به کد نویسی خاصی برای حل موازی قابل توسعه می‌باشند.

از این رو که این نرم‌افزار یک کد منبع باز یا آزاد است که به طور پیش فرض بر روی سیستم عامل منبع باز مبتنی بر لینوکس نصب می‌شود، ولی اخیراً نسخه قابل اجرا در محیط ویندوز نیز ارائه شده

---

<sup>1</sup> GNU

<sup>2</sup> OpenSource

<sup>3</sup> Solvers

<sup>4</sup> Parallel Processing

است. فرآیند حل مسئله به کمک سه مرحله‌ی پیش‌پردازش<sup>۱</sup>، اجرا<sup>۲</sup> و پس‌پردازش<sup>۳</sup> صورت می‌گیرد (OpenFOAM Foundation, 2013).

### ۳-۵ آشفتگی

#### ۳-۵-۱ رژیم جریان

بر طبق تعریف رژیم جریان در مکانیک سیالات به دودسته‌ی اصلی، رژیم جریان آرام و آشفته تقسیم‌بندی می‌شود. در جریان آرام ذرات سیال مسیرهای منظم و همواری را طی می‌کنند به طوری که هر لایه به آرامی روی لایه‌ی مجاور سر می‌خورد، از همین رو برای توصیف این نوع جریان از عبارت *Laminar* به معنای طبقه طبقه شده استفاده می‌شود. در یک جریان آرام شکل لایه‌های سیال کاملاً مشخص است و مسیر حرکت سیال دارای انحنای ملایم می‌باشد. در چنین جریانی، مولکول‌های سیال با پیشروی در طول مسیر حرکت، همواره در داخل لایه‌ی اولیه‌ی خود باقی می‌مانند. در این جریان هرگونه گرایش به آشفتگی توسط لزجت سیال مستهلک می‌شود. اما معمولاً در اغلب جریان‌های مهندسی، وضع به همین منوال باقی نمی‌ماند، بلکه تجربه نشان داده است که با حرکت سیال به سمت پایین دست جریان و هم‌زمان با بلوغ جریان 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. در صورتی که مقدار لزجت سیال کم و مقادیر سرعت جریان و طول مشخصه زیاد باشند، جریان به جریان آشفته تبدیل خواهد شد. در این جریان ذرات سیال، به علت انرژی جنبشی بالا و غلبه بر نیروی لزجت مسیرهای نامنظمی طی می‌کنند.

تلاطم یا آشفتگی عبارت است از حرکت بی‌نظم و ناپایدار سیالات و زمانی اتفاق می‌افتد که نیروهای کافی برای پایدار کردن جریان وجود نداشته باشد. اکثر جریان‌های موجود در طبیعت از نوع آشفته

---

<sup>1</sup> Pre-Processing

<sup>2</sup> Run

<sup>3</sup> Post-Processing

هستند. در جریان آشفته، یک حالت تصادفی از حرکت ذرات سیال درجایی که سرعت و فشار به طور پیوسته نسبت به زمان تغییر می کنند اتفاق می افتد. جریان های آشفته دارای خصوصیات زیر هستند:

- بی نظمی مکانی و زمانی
- طیف پیوسته مکانی و زمانی
- به شدت غیریکنواخت و ناپایدار هستند.
- اعداد رینولدز معمولاً بالا
- سه بعدی بودن
- متشکل از گرداب های کوچک بسیار زیاد است که شکل آنها نامتقارن است و تغییرات آنها با شدت نوسانات فشار متناسب است.
- به دلیل آشفتگی جریان و نوسانات شدید در مقادیر مشخصه های جریان، شدت جریان های چرخشی نیز زیاد است.
- تناوبی بودن
- در جریان آشفته، جریان هایی با مقادیر مختلف اندازه ی حرکت به هم برخورد می کنند و در اثر لزجت، گرادیان های سرعت کاهش می یابد. این امر باعث کاهش انرژی جنبشی سیال می شود لذا تلاطم یک پدیده ی مستهلک کننده ی انرژی خواهد بود. انرژی تلف شده در اثر اختلاط و تلاطم در یک فرآیند به انرژی داخلی (حرارت) سیال تبدیل می شود.
- البته خصوصیات جریان های آشفته بسیار متعدد است و در عناوین مزبور تنها برخی از مهم ترین خصوصیات جریان های آشفته ذکر شده است (صنیعی نژاد، ۱۳۸۵).

### ۳-۵-۲ انواع مدل‌های آشفتگی

مدل‌های آشفتگی زیادی توسط محققین مختلف برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته تدوین شده است. این مدل‌ها بر اساس روش عمل و تعداد معادلات دیفرانسیل مورد استفاده برای کمیت‌های آشفتگی به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲):

- مدل‌های صفر معادله‌ای
- مدل‌های تک معادله‌ای
- مدل‌های دو معادله‌ای
- مدل‌های دارای معادله‌ی تنش
- مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

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

برخی روش‌ها مستقیماً معطوف به دینامیک حاکم بر نوسانات آشفتگی و همین‌طور برهمکنش میان زیرساختارهای آشفتگی (بالأخص میان ادی‌ها و در طیف گسترده و متنوع اندازه‌ی آن‌ها) شده‌اند که درعین حال بسیار هزینه‌بر هستند. از معروف‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها می‌توان به روش «شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۱</sup>» و روش «شبیه‌سازی عددی مستقیم<sup>۲</sup>» اشاره نمود.

برخی روش‌ها با استفاده از دینامیک خاص حاکم بر هر مسئله‌ی فیزیکی، معطوف به حل برخی مسائل خاص شده و لذا این روش‌ها دارای محدوده‌ی کاربردی مشخص و محدودی هستند و اغلب هزینه‌ی محاسباتی اندکی نیز به دنبال خواهند داشت. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های مرتبط با مفهوم «طول اختلاطی<sup>۳</sup>» که بیشتر تحت عنوان مدل‌های صفر معادله‌ای مشهور می‌باشند، اشاره نمود.

<sup>1</sup> Large Eddy Simulation (LES)

<sup>2</sup> Direct Numerical Simulation (DNS)

<sup>3</sup> Mixing Length

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 مهم‌ترین این روش‌ها و البته معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌هایی که اصطلاحاً از مدل‌های ناویه-استوکس متوسط‌گیری شده به روش رینولدز یا به‌طور خلاصه «مدل‌های RANS»<sup>۱</sup> اخذ شده‌اند، 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 می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه‌شده در قسمت قبل، پارامترهای جریان آشفته دارای نوسانات زیادی می‌باشند 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 شبیه‌سازی عددی مستقیم منوط به داشتن شبکه‌ی محاسباتی و گام زمانی بسیار کوچک است که این امر باعث ایجاد برخی مشکلات محاسباتی و افزایش هزینه‌ها می‌شود (صنیعی نژاد، ۱۳۸۵).

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، نتایج پارامترهای مختلف جریان آشفته را ارائه می‌کند. اگرچه 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.

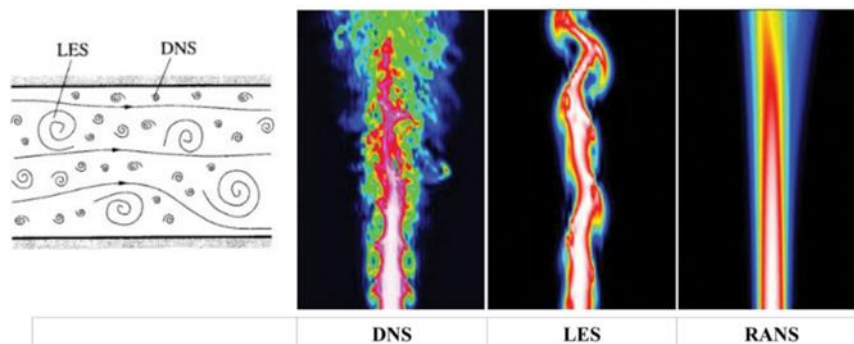
به دلیل وجود مشکلات محاسباتی متعدد در روش‌های حل مستقیم فرم کامل معادلات ناویه-استوکس، تقریباً تمام روش‌های تئوریک رایج در مدل‌سازی آشفتگی به‌نوعی از یکی از روش‌های متوسط‌گیری، جهت مدل کردن نوسانات آشفتگی استفاده می‌کنند. رینولدز جهت استفاده از متوسط‌گیری در مدل‌های آشفته به ارائه‌ی یک سری از قوانین پرداخت. حال اگر فرم متوسط معادلات حاکم بر جریان‌های آشفته

---

<sup>۱</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

را مورد بررسی قرار دهیم، مشاهده می‌شود که متوسط‌گیری از جمله‌های غیرخطی موجود در معادله‌ی ناویه-استوکس منجر به ظهور شارهای ممنتمی جدیدی می‌شود که به آن‌ها اصطلاحاً تانسور تنش رینولدز می‌گویند. 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 مسئله‌ی بستگی<sup>۱</sup> 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 همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود به‌طور کلی جهت حل آشفتگی جریان‌های اجباری داخلی از سه روش، شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) و RANS استفاده می‌شود.



شکل ۳-۳ دقت نتایج ارائه شده در مدل‌های مشهور آشفتگی

همان‌طور که در شکل (۳-۳) مشاهده می‌شود، علی‌رغم ارائه‌ی جزئیات بیشتر در مدل‌ها شبیه‌سازی عددی مستقیم و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اما به علت هزینه‌های زیاد و خطاهای محاسباتی، استفاده

<sup>1</sup> The Closure Problem



گسترده از این روش‌ها با محدودیت‌هایی مواجه شده است. همچنین تئوری‌های انتقال آشفتگی<sup>۱</sup> که منطبق بر روش سوم می‌باشد، با وجود برخی مشکلات و بدون آن‌که نیازی به مدل‌سازی جزئیات دینامیک حاکم بر جریان‌های آشفته داشته باشد، در حل مسائل واقعی موفقیت‌های چشم‌گیری از خود نشان داده است و در عین حال از دقت قابل‌توجهی 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 مدل‌های ناویه-استوکس متوسط‌گیری‌شده با روش رینولدز جهت مدل‌سازی در این تحقیق استفاده شده است.

از میان مدل‌های ارائه‌شده در روش مدل‌سازی آشفتگی RANS، مدل‌های دو معادله‌ای به‌عنوان 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 ارائه‌شده است می‌توان فهمید که نقطه‌ی آغاز تمام مدل‌های دو معادله‌ای، 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 ارائه‌شده است که از جمله‌ی مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نرخ اضمحلال لزج  $\epsilon$ ، طول مقیاس آشفتگی  $l$  و فرکانس آشفتگی  $\omega$  می‌باشد. از میان این مدل‌ها، مدل  $K - \epsilon$  رایج‌ترین و پرکاربردترین مدل از دسته مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشد (صنّعی نژاد، ۱۳۸۵)، بر این اساس در این پژوهش جهت مدل کردن آشفتگی از مدل  $K - \epsilon$  استاندارد و همچنین برای کمتر شدن هزینه‌های محاسبات از تابع دیوار استاندارد برای مدل‌سازی پروفیل‌های مرتبط با لایه‌ی مرزی مجاور دیوار، استفاده شده است.

---

<sup>1</sup> Turbulence Transport Theory

### ۳-۵-۳ تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد K-ε

با مقایسه پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل استاندارد K-ε با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی انجام‌شده، مقادیر تقریبی ثوابت موجود در مدل استاندارد K-ε به‌صورت مقادیر جدول زیر است.

جدول ۲-۳ ضرایب مدل استاندارد K-ε

$C_\mu$	۰/۰۹	$\sigma_\epsilon$	۱/۳۰
$C_{\epsilon 1}$	۱/۴۴	$\sigma_k$	۱/۰۰
$C_{\epsilon 2}$	۱/۹۲		

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 نشان‌دهنده انرژی جنبشی آشفتگی است:

$$K = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (3-38)$$

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

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.

شدت آشفتگی متوسط: جریان‌هایی که در مسیرهای غیر پیچیده 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.

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.

$$\epsilon = C_{\mu} \frac{K^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (3-39)$$

در این رابطه  $K$  انرژی جنبشی آشفتگی،  $l$  مقیاس طولی آشفتگی و  $C_{\mu}$  یکی از ثابت‌های مدل (جدول ۳-۲). جهت به دست آوردن طول آشفتگی در مدل‌سازی عددی توصیه‌های متفاوتی ارائه‌شده است که یکی از پرکاربردترین آن‌ها استفاده از کوچک‌ترین بُعد المان تولیدشده در شبکه‌ی حل به‌عنوان طول آشفتگی می‌باشد (Wilcox, 2006).

### ۳-۵-۴ تابع دیوار 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 ساده‌شده‌ی ناویه-استوکس در نزدیکی دیواره به دست آمده‌اند. به‌طور کلی مزیت استفاده از توابع دیواره را می‌توان به‌صورت زیر در چند عنوان کلی دسته‌بندی نمود:

- کاهش حجم محاسبات به‌واسطه‌ی عدم نیاز به شبکه‌بندی متراکم در نواحی نزدیک به دیواره
- افزایش دقت محاسبات
- ایجاد امکان انتگرال‌گیری برای مدل‌های آشفتگی که قابلیت انتگرال‌گیری تا لب مرز دیواره‌های 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. (صنعی نژاد، ۱۳۸۵)

### ۳-۵-۵ تحلیل پایداری مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی عددی دو نوع خطا وجود دارد که عبارت‌اند 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<sup>۱</sup> کاربرد بیشتری دارد و از نظر ریاضی ساده‌تر است. بر این اساس خلاصه‌ای از نتایج و کاربردهای تحلیل پایداری ون‌نیومن در زیر ارائه‌شده است:

- این روش به راحتی به مسائل سه‌بعدی تعمیم داده می‌شود.
- مقادیر شاخص<sup>۲</sup>، برای پایداری مسائل یک‌بعدی غیر دائم به صورت زیر است:

برای بیشتر فرمول‌بندی‌های صریح،

$$c \leq 1.0, d \leq 0.5, Re_c \leq \frac{2}{c} \quad (۳-۴۰)$$

که در این روابط  $c$  عدد کورانت،  $d$  عدد انتشار و  $Re_c$  عدد سلول رینولدز می‌باشد که اگر معادله‌ی حاکم به صورت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (۳-۴۱)$$

<sup>۱</sup> Van Newman

<sup>۲</sup> Benchmark

باشد، روابط زیر به ترتیب برای عدد کورانته، عدد انتشار و عدد سلول رینولدز ارائه می‌شود:

$$c = a \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (42-3)$$

$$d = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (43-3)$$

$$Re_c = a \frac{\Delta x}{\alpha} \quad (44-3)$$

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

- برای مسائل چندبعدی با اندازه‌های گام مساوی در تمام جهت‌های مختصات مکانی، مقادیر شاخص یادشده را باید بر تعداد مختصات تقسیم کرد (صنیعی نژاد، ۱۳۸۵).

### ۳-۶ کاویتاسیون

اصولاً فرایند تبخیر در اثر کاهش فشار موضعی در دمای ثابت، کاویتاسیون نامیده می‌شود. به‌عنوان نمونه هنگامی که با افزایش سرعت جریان، فشار جریان آب کاهش یابد، شرایط آغاز کاویتاسیون پیش خواهد آمد. معمولاً هنگامی که سرعت جریان در قسمتی از سازه هیدرولیکی (مانند تنداب سرریز) از یک حد مجاز فراتر رود، آن سازه در معرض خسارت ناشی از کاویتاسیون قرار می‌گیرد. برجستگی‌ها و ناصافی‌های سطوح بتنی که به هنگام ساخت و یا پس‌از آن ایجاد می‌گردد، باعث ایجاد انحراف در خطوط جریان و کاهش فشار در بعضی نقاط می‌گردد. چنانچه این کاهش فشار بر اثر افزایش سرعت باشد شرایط آستانه یا آغاز کاویتاسیون پیش خواهد آمد. در اثر این پدیده حفره‌های کوچکی بر سطح بتن به وجود می‌آید، که خود این حفره‌ها به‌عنوان یک ناهمواری ثانویه عمل نموده و باعث جدایی بیشتر و درنهایت تخریب سازه می‌گردند.

برای جلوگیری از پدیده‌ی کاویتاسیون باید موقعیت نقاطی را که در آن‌ها ممکن است با افزایش سرعت، فشار تا حد فشار بخار کاهش یابد شناسایی کرد. در این راستا، برای دستیابی به یک معیار کمی، بایستی معادله انرژی (معادله برنولی) بین دونقطه در یک جریان دائمی نوشته شود.

$$\frac{\rho V_0^2}{2} + P_0 + Z_0 \rho g = \frac{\rho V^2}{2} + P + Z \rho g \quad (45-3)$$

که در آن P فشار،  $P_0$  فشار اولیه، V سرعت جریان،  $V_0$  سرعت اولیه، Z ارتفاع،  $Z_0$  ارتفاع مبنا،  $\rho$  چگالی آب می‌باشد. غالباً به دلیل برابری تراز ارتفاع و ناچیز بودن تأثیر ثقل معادله بالا به صورت زیر است:

$$C_p = \frac{P_0 - P}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (46-3)$$

ضریب فشار  $C_p$  را به عنوان پارامتر فشار و یا عدد اولر Euler Number نیز می‌نامند.

اگر ضمن تعویض علامت  $C_p$  به جای P، فشار بخار مایع در دمای محیط قرار داده شود خواهیم داشت:

$$\sigma = \frac{P_v - P_0}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (47-3)$$

بنابراین، شاخص کاویتاسیون  $\sigma$  نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب به پتانسیل کاهش فشار جریان از طریق انرژی جنبشی می‌باشد. هنگامی که شاخص کاویتاسیون کمتر از ۰/۲ شود خسارت‌های قابل توجهی بر روی شوت سرریزها مشاهده شده است. خسارت‌های جزئی در شاخص‌های کاویتاسیون بالاتر از ۰/۲ مشاهده شده است، اما میزان خسارت به اندازه‌ای نبوده است که نیاز به تعمیرات باشد. از این رو، از دید طراحی، جریان‌های با شاخص کاویتاسیون بزرگ‌تر از ۰/۲ باعث آسیب سازه نخواهند شد (Falvey, 1990).

Temperature °C	Density kg/m <sup>3</sup>	Vapor pressure kPa	Kinematic viscosity m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>6</sup>
0	999.868	0.61	1.787
5	999.992	0.87	1.519
10	999.726	1.23	1.307
15	999.125	1.70	1.140
20	998.228	2.33	1.004
25	997.069	3.16	0.893
30	995.671	4.23	.801
35	994.055	5.62	.724
40	992.238	7.38	.658
45	990.233	9.58	.602
50	988.052	12.3	.553
60	983.20	19.9	.475
70	977.77	31.1	.413
80	971.80	47.3	.365
90	965.31	70.1	.326
100	958.36	101.3	.294

شکل ۳-۴ مقادیر فشار بخار (Falvey, 1990)





## فصل ۴ نتایج و بحث

#### ۴-۱ مقدمه

جهت بهینه‌سازی شکل دیواره هدایت و پله‌ی رو به جریان، برنامه‌ی SPC بر اساس مفاهیم دینامیک سیالات محاسباتی، برای انطباق خط جریان بر مرز جامد تهیه شده است. در این فصل پس از به دست آوردن مختصات خطوط جریان موردنیاز در مسائل، مسئله‌ی پله‌ی رو به جریان صحت سنجی شده است. سپس نتایج حاصل از بهینه‌سازی شکل پله‌ی رو به جریان با دو قید مکانی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. در مسئله‌ی بعدی، مدل دیواره هدایت صحت سنجی شده است که در آن حالت بهینه با سه خط جریان مختلف موردبررسی قرار گرفته آنگاه نتایج مربوط به دیواره هدایت با شرایط بهینه و مدل‌های دیگر مقایسه و موردبحث قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲ پله رو به جریان

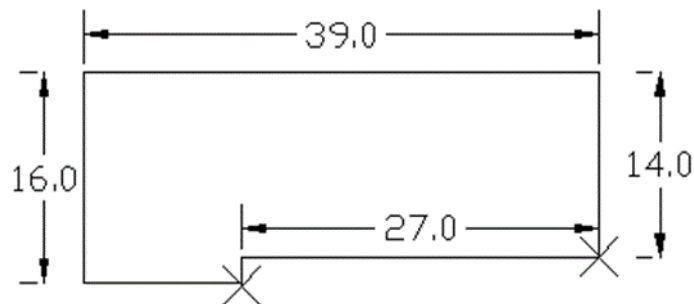
همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، آندو و شاکوچی، پله‌ی رو به جریان را به‌صورت آزمایشگاهی مدل‌سازی و تحلیل کردند. آن‌ها ارتفاع و طول ناحیه‌ی گردابی قبل و بعد از پله را به‌عنوان نتایج پژوهش خود گزارش کردند (Ando & Shakouchi, 2004). بر این اساس برای تحقیق درستی فرآیند مدل‌سازی در این تحقیق، ابتدا به مدل کردن مسئله‌ی ذکرشده در تحقیق بالا با کمک نرم‌افزار OpenFOAM پرداخته شده و سپس با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در نرم‌افزار OpenFOAM با نتایج آزمایشگاهی، درستی فرآیندهای مدل‌سازی جریان آشفته با مدل  $K-\epsilon$  موردبررسی قرار گرفت.

#### ۴-۲-۱ صورت مسئله

در این مسئله آب در مسیر یک پله‌ی رو به جریان با سطح مقطع  $۱۶۰ \times ۸۰$  میلی‌متر و ابعاد نشان داده شده در شکل ۴-۱ جریان دارد. سرعت آب در این مسیر ۲٫۵ متر بر ثانیه بوده و عدد رینولدز  $۵ \times ۱۰^۴$ ، بر این اساس رژیم جریان آشفته است. مشخصات سیال و جریان مطابق با جدول ۴-۱ در مسئله مطرح شده است.

جدول ۱-۴ مشخصات مرزها و جریان در مسئله‌ی صحت‌سنجی OpenFOAM

واحد	مقدار	پارامتر
$\frac{m}{s}$	۲/۵	سرعت ورودی در جهت X
$\frac{m}{s}$	۰/۰	سرعت ورودی در جهت Y
Pa	۰/۰	فشار خروجی
$\frac{kg}{m^3}$	۱۰۰۰/۰	چگالی آب
$\frac{m^2}{s}$	۱/۰e-۶	لزجت دینامیکی
Pa/m	۰/۰	گرادیان فشار ورودی

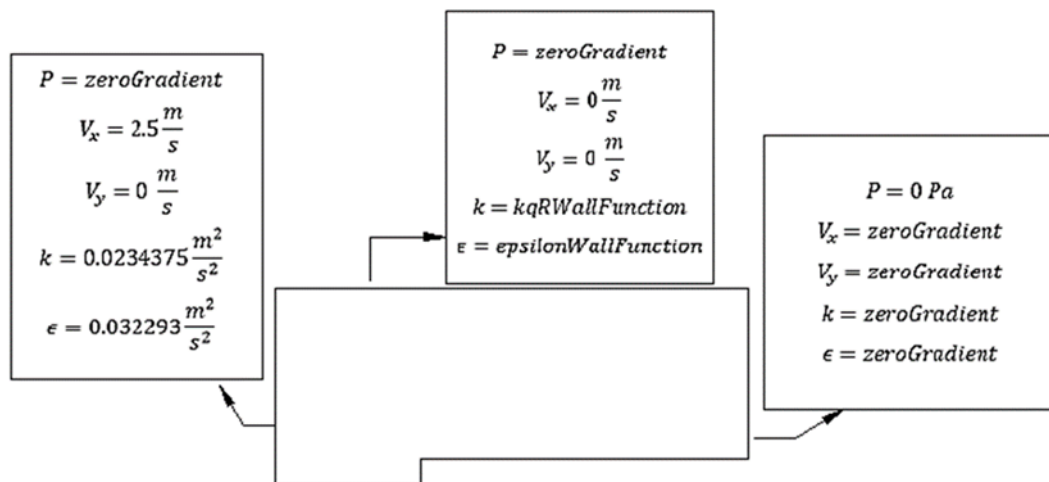


شکل ۱-۴ مشخصات و ابعاد مسئله‌ی صحت‌سنجی OpenFOAM

#### ۲-۲-۴ بررسی صحت مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenFOAM

جهت مدل‌سازی مسئله‌ی اول در OpenFOAM ابتدا با مشخص کردن ابعاد مسئله و رعایت موارد مربوط به تحلیل پایداری عددی، شبکه حل توسط دستور blockMesh تولید شد. پس‌از آن با توجه به کتابخانه‌های موجود در این نرم‌افزار، حلگر simpleFoam که توانایی حل معادلات آشفته‌گی را با مدل

K-ε استاندارد را دارد انتخاب شد. این حلگر توانایی مدل‌سازی سیال با جریان پایدار، نیوتنی، تراکم‌ناپذیر، تک‌فاز و سه‌بعدی را دارا می‌باشد.



شکل ۴-۲ شرایط مرزی مسئله در نرم‌افزار OpenFOAM

در این حلگر باید مقادیر لزجت دینامیکی سیال بر اساس روابط ارائه‌شده در زمینه‌ی سیال‌های تراکم‌ناپذیر مشخص شود. از آنجایی‌که ضرایب معادله‌ی محاسبه‌ی لزجت بر اساس سیال تراکم‌ناپذیر آب به‌صورت پیش‌فرض در این حلگر قرار داده‌شده، از همان ضرایب جهت حل در این مسئله استفاده می‌شود. شرایط مرزی استفاده‌شده در این مسئله مطابق با شکل (۴-۲) است. در این شکل مقادیر K و ε در قسمت ورودی بر اساس فرمول‌های ارائه‌شده در فصل سوم محاسبه‌شده است. در این فرمول‌ها شدت آشفتگی ۵ درصد در نظر گرفته‌شده و از ضرایب مدل K-ε استاندارد جهت استفاده در فرمول K استفاده‌شده است. همچنین مقیاس طول آشفتگی، برابر ابعاد اجزای شبکه‌ی حل است، ۰/۰۱ متر در نظر گرفته شد.

پس از مدل‌سازی مسئله‌ی بالا در نرم‌افزار OpenFOAM بر اساس نتایج ارائه‌شده در تحقیق آندو و شاکوچی، نتایج این مدل‌سازی جهت بررسی و مقایسه در جدول (۴-۲) ارائه‌شده است. در این جدول در ستون اول نتایج مربوط به تحقیق آندو و شاکوچی، در ستون دوم نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی

در نرم‌افزار OpenFOAM و در ستون آخر درصد عدم تطابق نتایج ارائه شد. در این جدول، نسبت طول جدایی جریان در بالادست و پایین‌دست پله به ارتفاع پله ( $L/H$ ) و نسبت ارتفاع اتصال به ارتفاع پله ( $h/H$ ) در دو مدل آزمایشگاهی و مدل‌سازی در نرم‌افزار مقایسه شده است.

جدول ۲-۴ نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی با OpenFOAM

پارامترها	نتایج آزمایشگاهی	نتایج OpenFOAM	درصد عدم تطابق نتایج
بالادست پله			
$L$	۰/۰۴۵ متر	۰/۰۴۳ متر	٪۴/۴۴
$h$	۰/۰۱۵ متر	۰/۰۱۴۷۰۵۲ متر	٪۱/۶۵
$\frac{h}{H}$	۰/۰۷۵	۰/۰۷۳۲۵۲۶	-
$\frac{L}{H}$	۲/۲۵	۲/۱۵	-
پایین‌دست پله			
$L$	۰/۰۳۸ متر	۰/۰۴ متر	٪۵/۲۶
$h$	۰/۰۰۶ متر	۰/۰۰۵۶۳ متر	٪۶/۱
$\frac{h}{H}$	۰/۳	۰/۲۸	-
$\frac{L}{H}$	۱/۹	۲	-

همان‌طور که در جدول بالا نشان داده شده است، درصد عدم تطابق محاسبه شده کمتر از ۶/۱ درصد است که با بررسی و مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی در OpenFOAM و نتایج کار پژوهش آندو و شاکوچی، می‌توان درستی معادلات و روش‌های به‌کاررفته در وارد کردن شرایط مرزی و اطلاعات اولیه موردنیاز برای نرم‌افزار و همچنین دقت کار نرم‌افزار OpenFOAM را در مدل‌سازی این مسئله و مسائل مشابه تأیید کرد.

#### ۳-۴ بهینه‌سازی شکل پله رو به جریان

در این قسمت ابتدا به بهینه‌سازی شکل پله با کمک SPC پرداخته‌شده و سپس بعد از به دست آوردن مقطع بهینه، به مدل‌سازی چند مقطع بهینه با خطوط جریان مختلف در نرم‌افزار OpenFOAM پرداخته‌شده است. یادآور می‌شود برای بهینه‌سازی با SPC، ابتدا باید خط جریان بهینه را مطابق با توضیحات فصل سوم به دست آورد و سپس نتیجه‌ی به‌دست‌آمده را به‌عنوان مقطع بهینه‌ی حاصل از روش معیار بهینگی در نظر گرفت. درنهایت بابیان مقاطع مختلف، به مدل‌سازی این مقاطع و مقطع به‌دست‌آمده از SPC، در جریان‌هایی با سرعت ذکرشده در نتیجه آزمایشگاهی، جهت اطمینان از بهینه بودن مقطع ارائه‌شده، پرداخته می‌شود.

#### ۱-۳-۴ بیان صورت مسئله

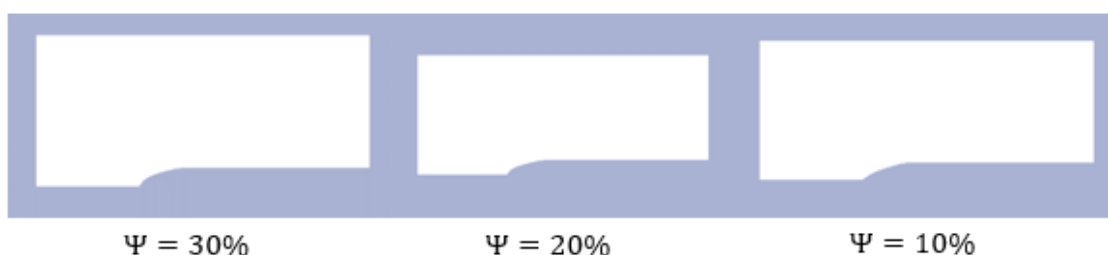
این مسئله، دارای یک پله‌ی رو به جریان با دو قید مکانی است که باهدف بهینه‌سازی شکل مقطع جهت کمینه کردن افت فشار مطرح‌شده است. دو قید مکانی در شکل ۱-۴ مشخص‌شده‌اند. برای صحت سنجی مدل هیدرولیکی، مشخصات جریان به‌کاررفته در مدل آزمایشگاهی اندو و شاکوچی برای پله‌ی رو به جریان مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات در جدول ۳-۴ مطرح شده است.

جدول ۳-۴ مشخصات و ابعاد مسئله‌ی بهینه‌سازی

واحد	مقدار	پارامتر
$\frac{kg}{m^3}$	۱۰۰۰/۰	چگالی آب
$\frac{m}{s}$	۲/۵	سرعت ورودی جهت X در مدل ۱
$\frac{m^2}{s}$	۱/۰e-۶	لزجت دینامیکی
Pa	۰/۰	فشار خروجی
-	۱/۰e+۵	عدد رینولدز

### ۴-۳-۲ ارائه‌ی نتایج بهینه‌سازی پله‌ی رو به جریان

جهت بهینه‌سازی شکل مقطع ورودی توسط SPC باید در ابتدا شکل مسئله را به‌عنوان ورودی برنامه در آن اعمال کرد و سپس با مشخص کردن یک خط جریان جهت انطباق بر مرز، برنامه شروع به منطبق کردن خط جریان بر مرز جامد می‌کند. بر این اساس یک خط جریان (در اینجا خط جریان ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۳۰ درصد) برای انطباق بر مرز انتخاب شده است.



شکل ۴-۳ هندسه‌های ایجادشده توسط SPC برای خطوط جریان مختلف مسئله بهینه‌سازی در محیط OpenFOAM

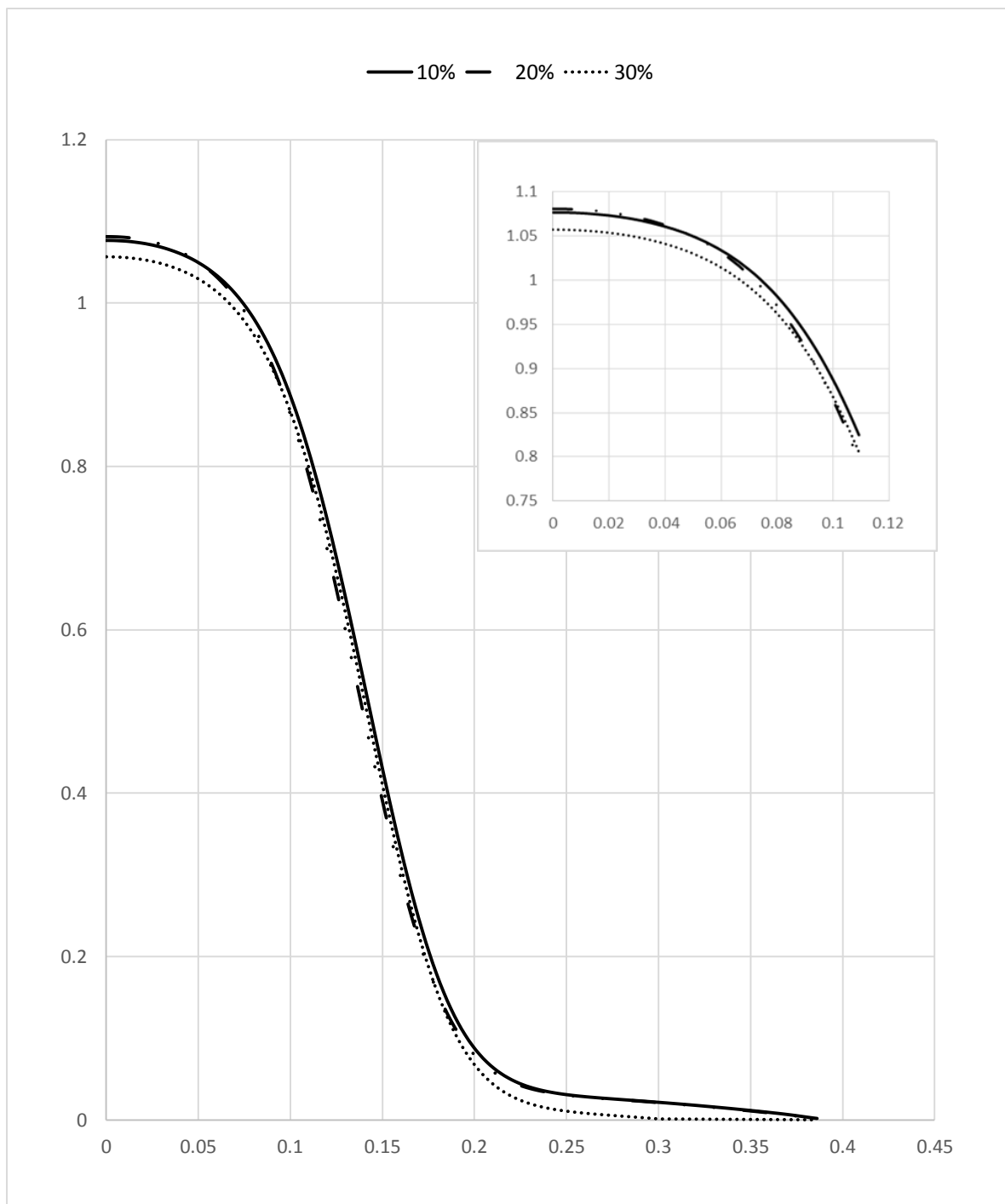
جهت به دست آوردن خط جریان بهینه برای انطباق بر مرز جامد ابتدا یک خط جریان جهت انطباق انتخاب شد و بر اساس آن شکل مقطع به دست آمد. با مدل کردن این مقطع در نرم‌افزار OpenFOAM مقدار افت فشار محاسبه شد. پس از این مرحله، یک خط جریان دیگر در اطراف خط جریان اولیه انتخاب شد و میزان افت فشار آن محاسبه شد. در این مرحله خطوط جریان اطراف خط جریانی که دارای کمترین میزان افت فشار بود، جهت انطباق بر مرز جامد انتخاب شد. پس از بررسی این مدل‌ها، شکل بهینه‌شده‌ی مقطع با این روش که دارای کمترین میزان افت فشار است، به دست آمد.

بر این اساس برای مدل کردن تمامی این مقاطع از دستور blockMesh جهت تولید شبکه‌ی حل و از حلگر simpleFoam جهت مدل‌سازی جریان‌های آشفته با سیال تراکم‌ناپذیر، استفاده شد. شرایط مرزی اعمال‌شده در نرم‌افزار OpenFOAM جهت مدل‌سازی جریان آشفته مانند مسئله‌ی صحت سنجی ذکرشده در قسمت قبل است.

پس از مدل‌سازی مقاطع به‌دست‌آمده 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 محاسبه‌شده و با مقایسه آن‌ها، خط جریانی که دارای کمترین میزان افت فشار است، به‌عنوان خط جریان بهینه انتخاب‌شده است. در شکل زیر مقادیر فشار در چندین راستای ثابت انتخابی در مسئله ارائه‌شده است.

همان‌طور که در شکل (۴-۴) مشاهده می‌شود، خطوط جریان یادشده تفاوت چندانی در مقدار افت فشار مشاهده نگردید با این حال، خط جریان ۳۰ درصد با افت فشار  $1/0.568$  کیلو پاسکال، دارای کمترین میزان افت فشار است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نمودارهای بالا، این مقطع به‌عنوان مقطع بهینه برای این مسئله شناخته می‌شود. خط افقی در نمودار شکل (۴-۴) فاصله از ابتدای مقطع و خط عمودی فشار را برحسب کیلو پاسکال نشان می‌دهد.

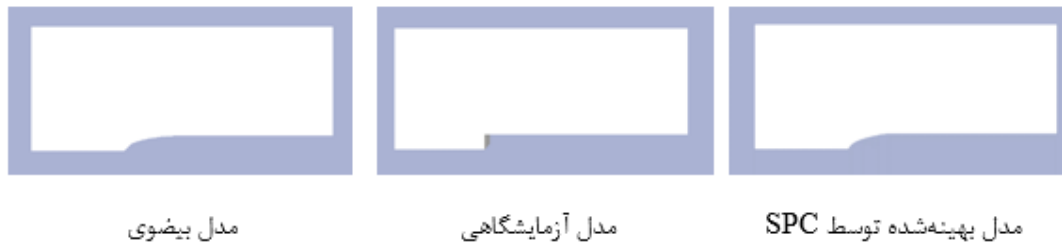




شکل ۴-۴ مقادیر فشار بر اساس خطوط جریان مختلف بر روی خط  $y=0.08, z=0.004$

### ۳-۳-۴ مقایسه مقطع به دست آمده از SPC با مقاطع دیگر

در این قسمت جهت اطمینان از بهینه بودن مقطع به دست آمده، به مقایسه میزان افت فشار این مقطع با مقطع آزمایشگاهی و مقطع بیضوی پرداخته شده است.

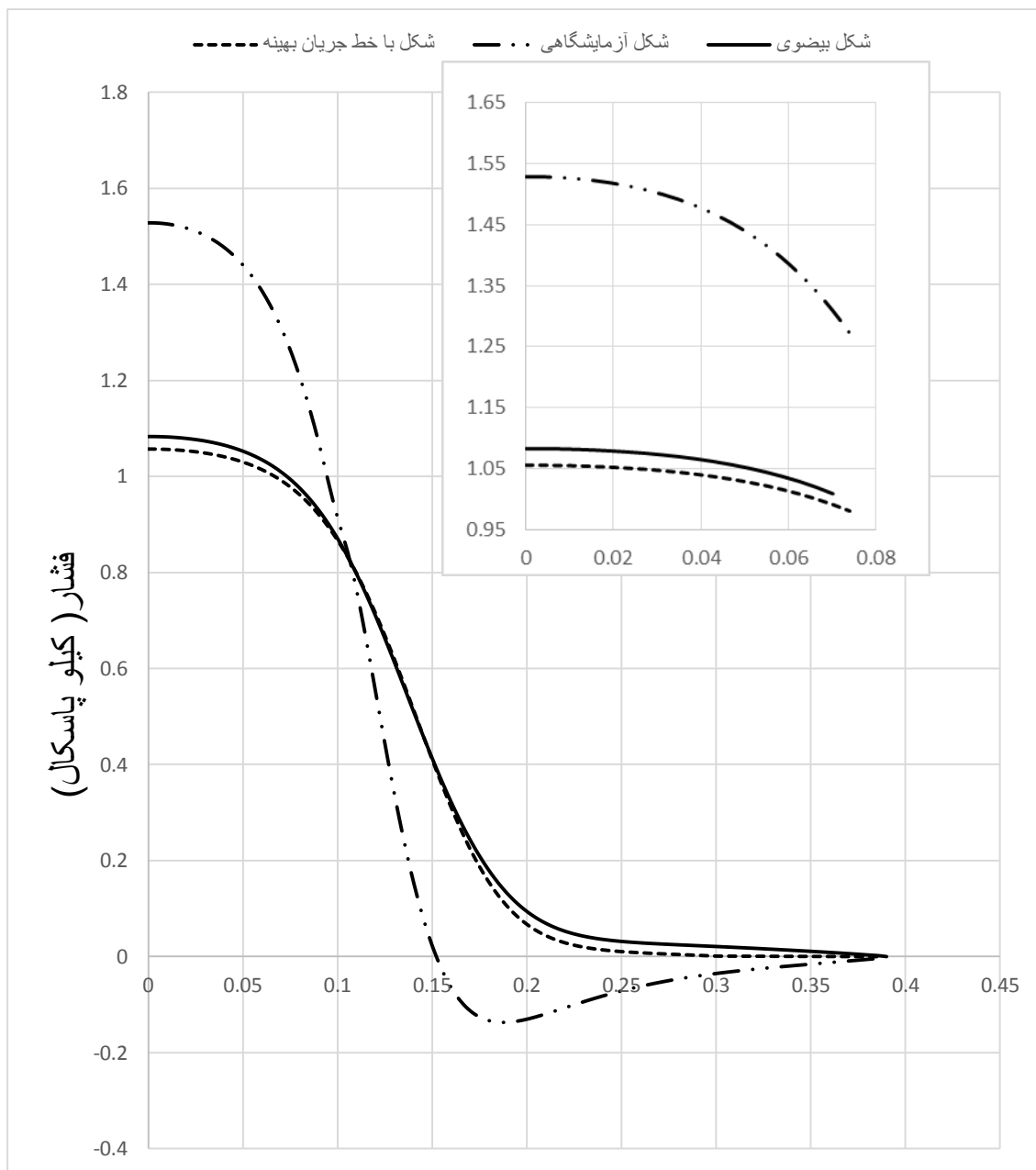


شکل ۴-۵ مدل‌های توصیه‌شده و مدل به‌دست‌آمده از SPC در نرم‌افزار OpenFOAM

جهت بررسی میزان افت فشار در این مقاطع از حلگر simpleFoam برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شد. همچنین در این مسئله شرایط مرزی و مشخصات سیال مشابه با آنچه ذکر شد در نظر گرفته شد. در نمودار زیر نتایج حاصل از میزان فشار بر روی مقاطع مختلف ارائه گردید.

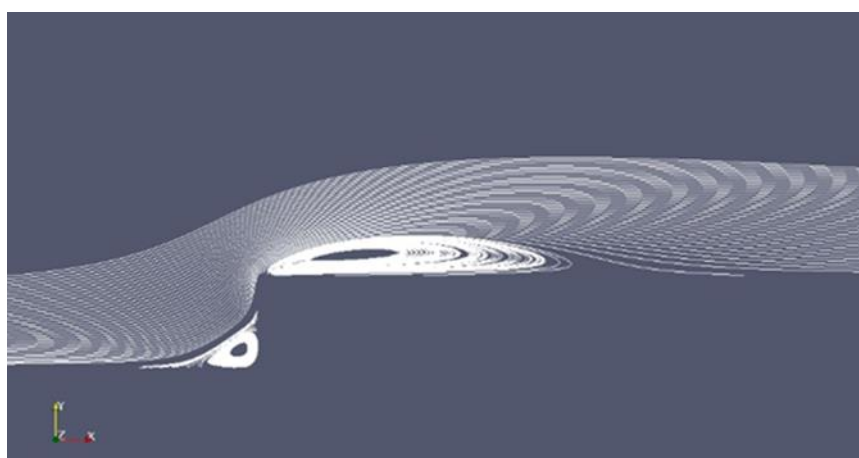
همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقطع پیشنهادشده بیضوی و مقطع به‌دست‌آمده از برنامه SPC دارای کمترین میزان افت فشار است. درحالی‌که که مقطع آزمایشگاهی بیش‌ترین میزان افت فشار را دارد و با مقایسه مقطع بهینه با مقطع آزمایشگاهی و بیضوی می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار افت فشار در این مقاطع به ترتیب به میزان ۳۰ و ۲/۴۱ درصد بهبودیافته است. فشار منفی مشاهده در شکل مربوط به جداشدگی ایجادشده در پایین‌دست پله است. خط افقی در نمودار شکل ۴-۶ فاصله از ابتدای مقطع و خط عمودی فشار را برحسب کیلو پاسکال نشان می‌دهد.

جهت آشنایی با جزئیات بیشتر مدل‌سازی این مقاطع در نرم‌افزار OpenFOAM تمامی فایل‌های ورودی استفاده‌شده در مقطع مستطیلی این مسئله در پیوست ۲ قرار داده‌شده است.

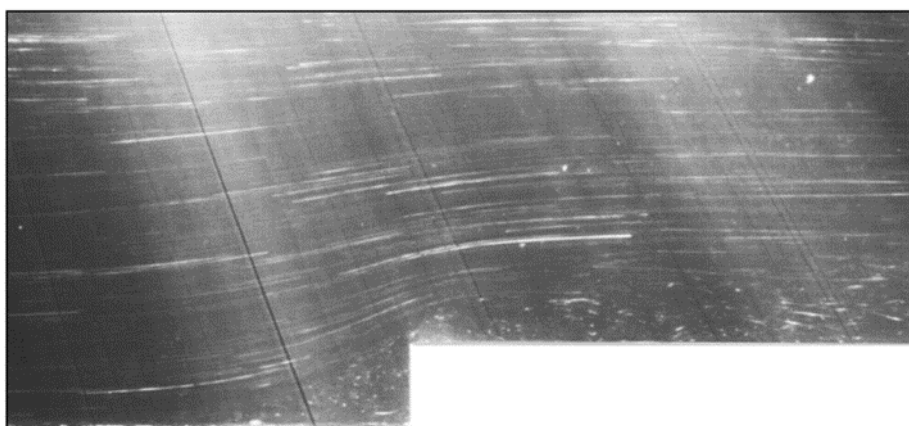


شکل ۴-۶ مقادیر فشار مدل‌های توصیه‌شده در محل خط  $y=0.08, z=0.004$

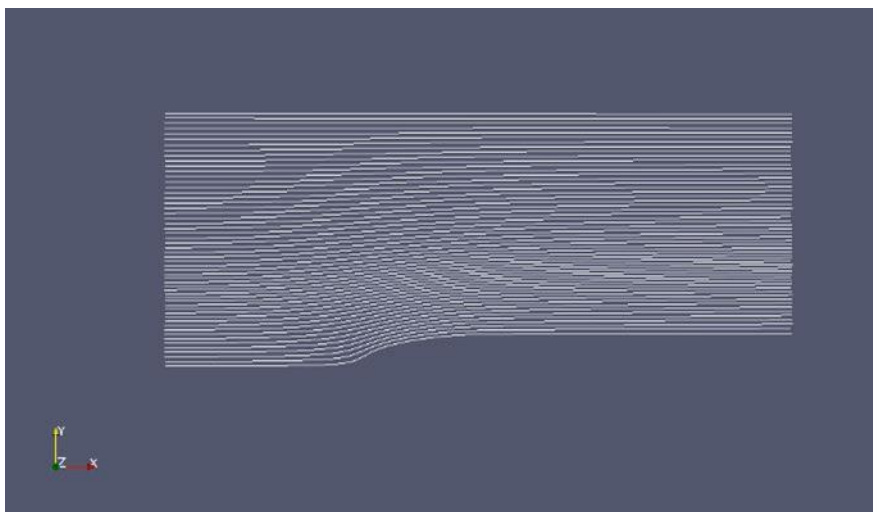
در نتایج مدل‌سازی نرم‌افزار OpenFOAM قبل و بعد از پله، جریان‌های گردابه‌ای مشاهده شد شکل (۷-۴) که باعث افت فشار قابل‌ملاحظه در هندسه‌ی مستطیلی شکل گردید. قبل و بعد از پله‌ی رو به جریان در مدل آزمایشگاهی در شکل (۸-۴) تشکیل گردابه را می‌توان مشاهده کرد. همسازی خطوط جریان و بدنه در نزدیکی مرز جامد باعث کاهش چشم‌گیر افت انرژی ناشی از تولید گردابه‌ها می‌شود. در مسئله‌ی بهینه‌سازی شده در شکل (۹-۴) با حذف جریان‌های گردابه‌ای افت فشار در مقاطع پله‌ای بهبود یافت.



شکل ۷-۴ گردابه‌های تشکیل‌شده در هندسه‌ی مستطیلی در محیط OpenFOAM



شکل ۸-۴ گردابه‌های تشکیل‌شده در هندسه‌ی مستطیلی در مدل آزمایشگاهی (Ando & Shakouchi, 2004)



شکل ۴-۹ خطوط جریان مدل بهینه‌سازی شده

#### ۴-۴ دیواره‌های هدایت سرریز سد

در این بخش ابتدا به صحت سنجی مدل آزمایشگاهی دیواره هدایت سرریز سد بالارود پرداخته سپس، دیواره هدایت بهینه‌ی حاصل از SPC را با مقاطع مختلف ارائه‌شده، مقایسه و صحت بهینه بودن مقطع موردبررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۴-۱ بیان صورت مسئله

یک از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار برافت انرژی و ایجاد آشفتگی و اغتشاش در جریان، هندسه‌ی دیواره هدایت است که بر روی الگوی جریان در کانال تقرب و در نتیجه بر رفتار آب روی سرریز تأثیرگذار است. به همین دلیل بهینه کردن دیواره هدایت جریان می‌تواند باعث از بین رفتن این‌گونه امواج روی سرریز شود.

در بین مقاطع دیواره هدایت، دیواره هدایتی که کمترین تراز ارتفاع آب در مخزن سد را داشته باشد، ظرفیت تخلیه‌ی بیشتر سرریز و عملکرد بهتر آن را نشان می‌دهد. به همین منظور جهت محاسبه‌ی تابع هدف بهینه‌سازی از مقایسه‌ی تراز سطح آب در مخزن مقاطع مختلف استفاده شد.

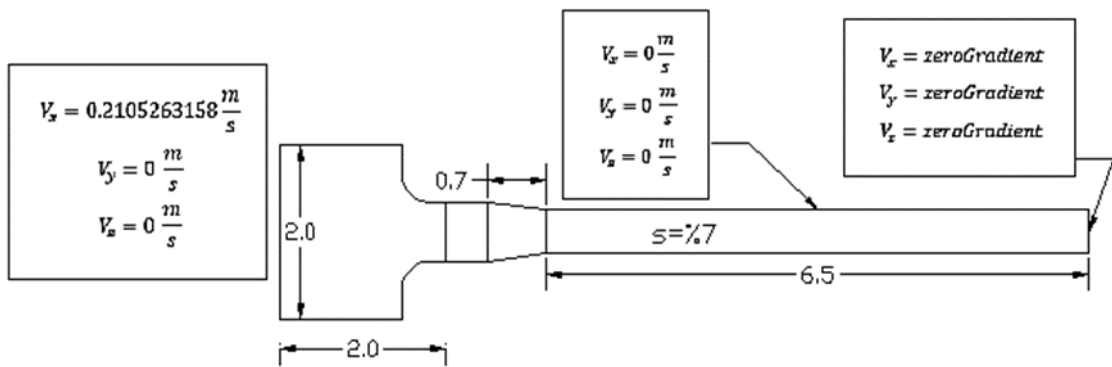
همان‌طور که در فصل ۲ اشاره شد دورقی به مدل‌سازی هندسه‌های مختلف دیواره هدایت سرریز سد بالارود با مقیاس ۱:۴۰ پرداخت، در مسئله حاضر ابتدا به صحت سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی یکی از دیواره‌های هدایت پرداخته شد.

اطلاعات ورودی در این مسئله به نرم‌افزار شامل هندسه دیواره‌های هدایت، دبی‌های مختلف، تراز سطح مخزن در دبی‌های یادشده و ابعاد شوت است. با توجه به کتابخانه‌های موجود در این نرم‌افزار، حلگر interFoam که توانایی حل معادلات آشفتگی را با مدل K- $\epsilon$  استاندارد را دارد برای حل مدل‌های دیواره هدایت انتخاب شد. این حلگر توانایی مدل‌سازی سیال با جریان پایدار، نیوتنی، تراکم‌ناپذیر و دوسیالی غیرقابل امتزاج را دارا می‌باشد.

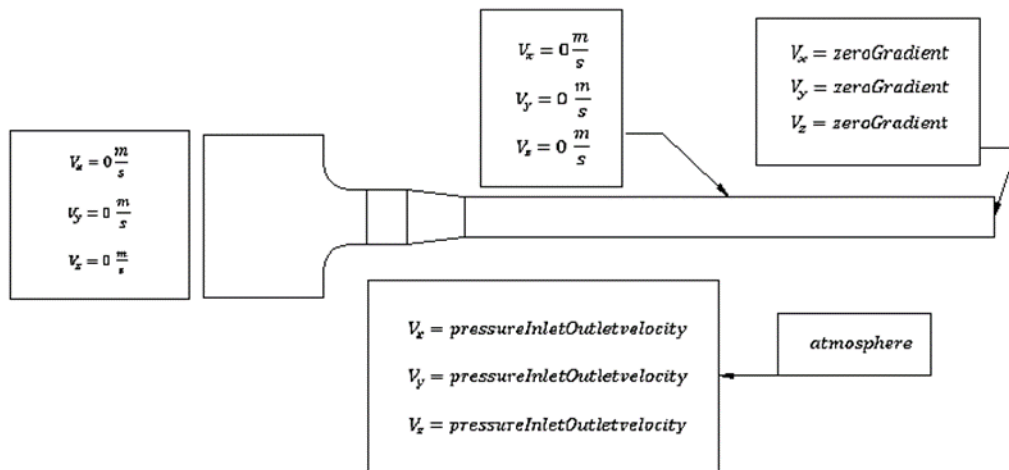
هندسه‌ی دیواره هدایت در آزمایش با سه ویژگی طول مستقیم، شعاع انحنای قوس و زاویه‌ی انحنای قوس تعیین شد. جهت در نظر گرفتن اثر هوا در این پژوهش، جریان به‌صورت دوفازی در نظر گرفته شد و مشخصات سیال و جریان در جدول (۴-۴) ارائه شده است. در این تحقیق از ۴ دبی شامل ۰/۰۶۶۷، ۰/۰۸۵۹، ۰/۰۱۹۰۳/۱۶، مترمکعب بر ثانیه که به ترتیب دبی با دوره بازگشت ۲، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ ساله مربوط به سد بالارود است، در شبیه‌سازی استفاده شد.

جدول ۴-۴ مشخصات و ابعاد مسئله‌ی بهینه‌سازی شکل دیواره هدایت در دبی ۰٫۱۶ مترمکعب بر ثانیه

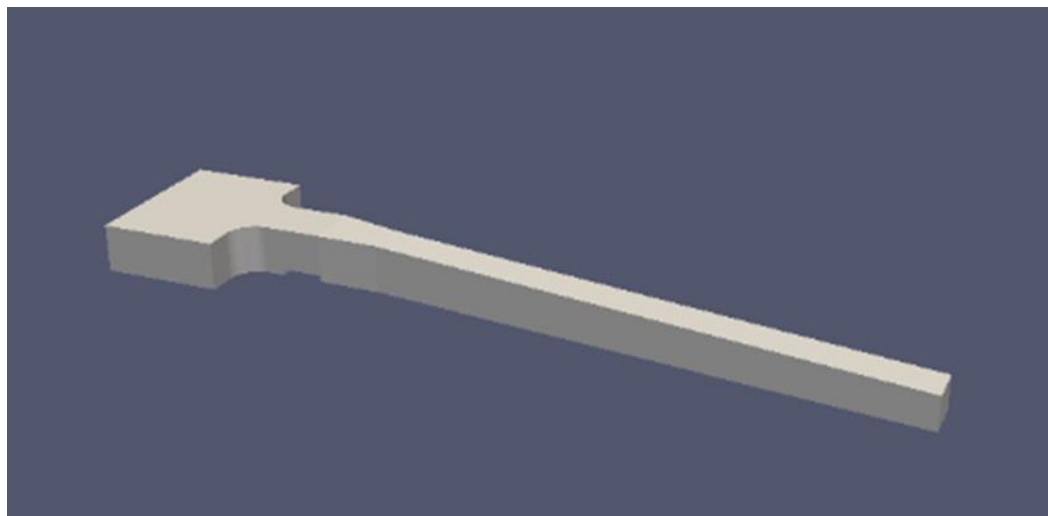
واحد	مقدار	پارامتر
$\frac{kg}{m^3}$	۱۰۰۰/۰	چگالی آب
$\frac{kg}{m^3}$	۱/۰	چگالی هوا
$\frac{m}{s}$	۰/۲۱۰۵۳	سرعت ورودی در جهت X
$\frac{m}{s}$	۰/۰۰	سرعت ورودی در جهت Y
$\frac{m}{s}$	۰/۰۰	سرعت ورودی در جهت Z
$\frac{m^2}{s}$	$۱/۰e-۶$	لزجت دینامیکی آب
$\frac{m^2}{s}$	$۱/۵e-۵$	لزجت دینامیکی هوا
$\frac{m}{s}$	zeroGradient	سرعت خروجی در جهت X
$\frac{m}{s}$	zeroGradient	سرعت خروجی در جهت Y
$\frac{m}{s}$	zeroGradient	سرعت خروجی در جهت Z



شکل ۴-۱۰ ابعاد و مشخصات مسئله‌ی دیواره هدایت دایره‌ای در صفحه‌ی افق (فاز آب)

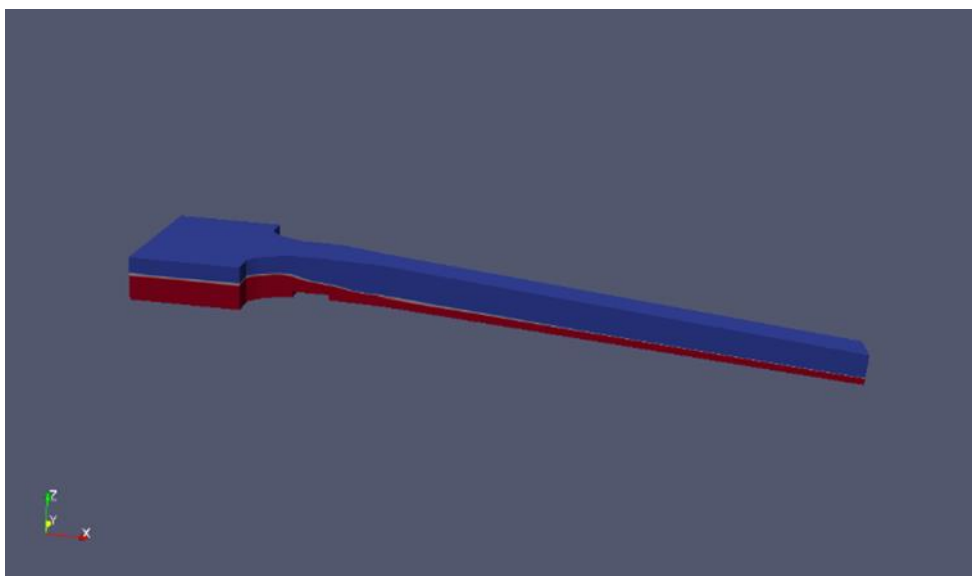


شکل ۴-۱۱ ابعاد و مشخصات مسئله‌ی دیواره هدایت دایره‌ای در صفحه‌ی افق (فاز هوا)



شکل ۴-۱۲ هندسه‌ی سه‌بعدی مسئله‌ی آزمایشگاهی در محیط OpenFOAM





شکل ۴-۱۳ شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان با دبی ۰,۱۶ مترمکعب بر ثانیه

#### ۴-۴-۲ ارائه‌ی نتایج صحت سنجی آزمایشگاهی

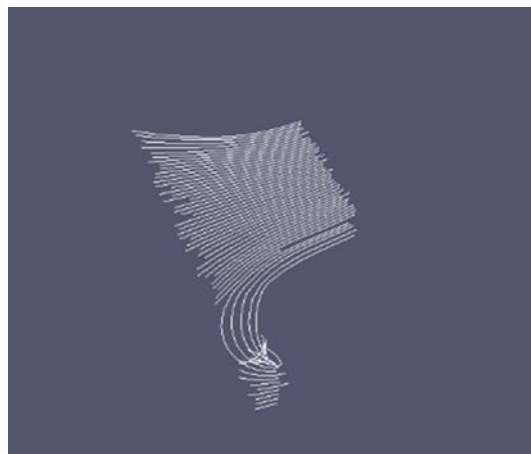
جهت صحت سنجی مقطع آزمایشگاهی، ابتدا مدل با شرایط یادشده در قسمت قبل به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی گردید. مدل آزمایشگاهی دارای دیواره هدایت دایره‌ای با طول مستقیم ۰/۲ شعاع ۰/۳۳۵ بود. مقادیر  $K$  و  $\varepsilon$  در قسمت ورودی بر اساس فرمول‌های ارائه‌شده در فصل ۲ محاسبه‌شده است. از ضرایب مدل  $K$ - $\varepsilon$  استاندارد در رابطه فرمول  $K$  استفاده‌شده است. در جدول (۴-۵) با داشتن دبی‌های مختلف با دوره بازگشت‌های متفاوت، تراز سطح آب مخزن در مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی‌شده در OpenFoam به دست آمد و درصد عدم تطابق نتایج در جدول درج گشت.

جدول ۴-۵ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و نتایج OpenFOAM

دوره بازگشت	$Q(\frac{m^3}{s})$	نتایج آزمایشگاهی (رقوم سطح آب دریاچه)	نتایج OpenFOAM	درصد عدم تطابق نتایج
۲	۰/۰۶۶۷	۰/۲۲۷۵ متر	۰/۲۳۳۰۹۷ متر	۰/۲/۴
۱۰۰	۰/۰۸۵۹	۰/۲۶۹۵ متر	۰/۲۶۰۳۳ متر	۰/۳/۴
۱۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۷۱۵ متر	۰/۳۵۲۱ متر	۰/۵/۲
۱۰۰۰۰	۰/۱۹۰۳	۰/۴۱۶ متر	۰/۳۸۳۷۷ متر	۰/۶/۳

مخزن تا ارتفاع مشخصی دارای آب بوده و با شروع حل با دبی مشخصی جریان یافت. با جریان یافتن آب در تنداب پس از همگرا شدن حل، تراز سطح آب در مخزن ثابت شد. با مقایسه‌ی تراز سطح آب در مدل آزمایشگاهی و نرم‌افزار بیشترین درصد خطا ۳،۶ به دست آمد.

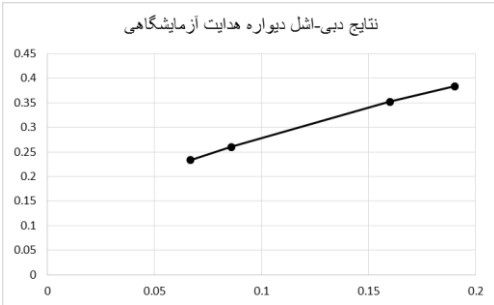
در شکل (۴-۱۴) خطوط جریان در اطراف دیواره هدایت دایره‌ای نشان داده شد. در اطراف دیواره هدایت در ورودی کانال تقرب جریان آب با برخورد به دیواره هدایت دایره‌ای متلاطم شده و امواج عرضی تشکیل شده و شاهد ایجاد جداشدگی‌های نسبتاً شدیدی در مجاورت دیواره هدایت هستیم.



شکل ۴-۱۴ تلاطم ایجادشده در دیواره هدایت سمت چپ (دیواره هدایت دایره‌ای)

جدول ۴-۶ نتایج دبی-اشل دیواره هدایت دایره‌ای

دوره بازگشت	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز سطح آب مخزن (متر)
۲	۰/۰۶۶۷	۰/۲۳۳۰۹۷
۱۰	۰/۰۸۵۹	۰/۲۶۰۳۳۰۸
۱۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۵۲۱
۱۰۰۰۰	۰/۱۹۰۳	۰/۳۸۳۷۷



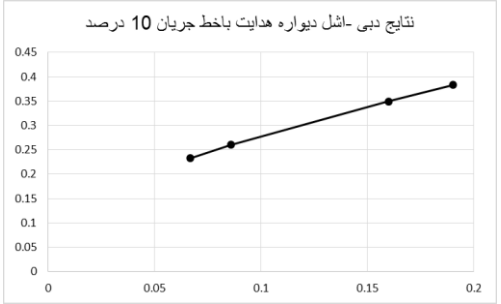
شکل ۴-۱۵ منحنی دبی-اشل دیواره هدایت دایره‌ای

#### ۵-۴ بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت

در مرحله‌ی بعدی مدل‌سازی دیواره هدایت‌ها با هندسه‌ی ایجادشده با SPC با خطوط جریان ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد و مدل‌های مستطیلی و بیضوی شکل برای مقایسه‌ی دقیق‌تر نتایج انجام گردید و منحنی دبی-اشل برای هر یک رسم گردید.

جدول ۷-۴ نتایج دبی-اشل دیواره هدایت با هندسه‌ی خط جریان ۱۰ درصد

دوره بازگشت	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز سطح آب مخزن (متر)
۲	۰/۰۶۶۷	۰/۲۳۲۹
۱۰	۰/۰۸۵۹	۰/۲۶۰۱۷
۱۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۴۹۴۶
۱۰۰۰۰	۰/۱۹۰۳	۰/۳۸۳۴۶۵



نتایج دبی-اشل دیواره هدایت با خط جریان ۱۰ درصد

شکل ۴-۱۶ منحنی دبی اشل دیواره هدایت

جدول ۸-۴ نتایج دبی-اشل دیواره هدایت با هندسه‌ی خط جریان ۲۰ درصد

دوره بازگشت	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز سطح آب مخزن (متر)
۲	۰/۰۶۶۷	۰/۲۳۱۸۵۴
۱۰	۰/۰۸۵۹	۰/۲۵۹۷۲۴
۱۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۴۸۳۷۴
۱۰۰۰۰	۰/۱۹۰۳	۰/۳۸۲۳۶۹

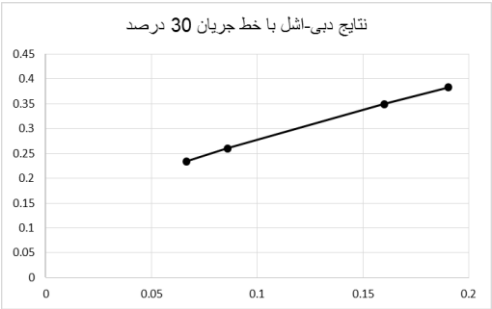


نتایج دبی-اشل دیواره هدایت با خط جریان ۲۰ درصد

شکل ۴-۱۷ منحنی دبی اشل دیواره هدایت

جدول ۹-۴ نتایج دبی- اشل دیواره هدایت با هندسه‌ی خط جریان ۳۰ درصد

دوره بازگشت	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز سطح آب مخزن (متر)
۲	۰/۰۶۶۷	۰/۲۳۴۱۳۴
۱۰	۰/۰۸۵۹	۰/۲۶۰۰۲۷
۱۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۴۹۶۰۹
۱۰۰۰۰	۰/۱۹۰۳	۰/۳۸۳۳۴۶



جدول ۱۰-۴ نتایج دبی- اشل دیواره هدایت بیضوی شکل

دوره بازگشت	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز سطح آب مخزن (متر)
۲	۰/۰۶۶۷	۰/۲۳۱۷۷
۱۰	۰/۰۸۵۹	۰/۲۵۸۹۳
۱۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۴۱۸۷
۱۰۰۰۰	۰/۱۹۰۳	۰/۳۸۰۳۷۷



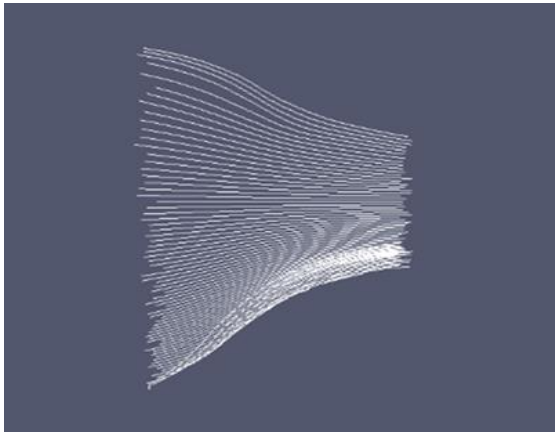
جدول ۴-۱۱ نتایج دبی-اشل دیواره هدایت مستطیلی شکل

دوره بازگشت	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز سطح آب مخزن (متر)
۲	۰/۰۶۶۷	۰/۲۳۵۹۱۴
۱۰	۰/۰۸۵۹	۰/۲۶۶۱۳۷
۱۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۶۰۸۹
۱۰۰۰۰	۰/۱۹۰۳	۰/۳۹۵

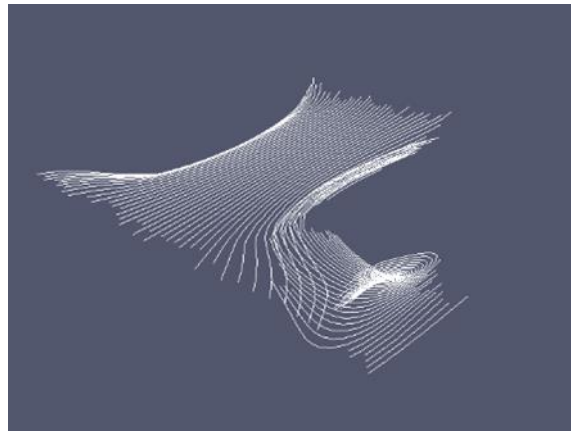


شکل ۴-۲۰ منحنی دبی اشل دیواره هدایت مستطیلی

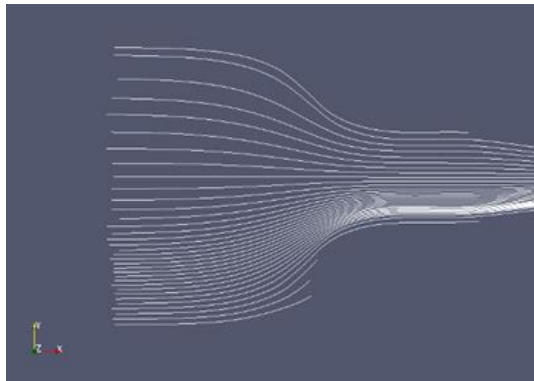
با مقایسه‌ی نتایج دیواره هدایت‌های بهینه‌سازی شده، تراز سطح آب در مخزن با دیواره هدایت بهینه‌شده با خط جریان ۲۰ درصد کمترین مقدار را داشت. تراز سطح آب مخزن نسبت به دیواره‌های هدایت دایروی و مستطیلی شکل به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر است. تراز سطح آب در دیواره هدایت بیضوی بسیار مشابه با دیواره هدایت بهینه بوده و در بیشترین نقاط ۱,۸ درصد تفاوت دارد. در ادامه شکل خطوط جریان در اطراف دیواره هدایت مستطیلی و دیواره هدایت بهینه نشان داده شده است. دیواره هدایت مستطیلی به دلیل برخورد امواج با ورودی دیواره باعث ایجاد گردابه، اغتشاش جریان و افزایش تراز مخزن و کاهش خروجی از سرریز سد می‌شود. شکل (۴-۲۱) گردابه‌های تشکیل‌شده در اطراف دیواره هدایت مستطیلی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۲-۴ شکل خطوط جریان در مجاور دیواره هدایت بهینه



شکل ۲۱-۴ خطوط جریان در کناره‌ی دیواره هدایت مستطیلی



شکل ۲۳-۴ شکل خطوط جریان در مجاور دیواره هدایت بیضوی

با مقایسه خطوط جریان در مجاور دیواره هدایت‌ها با هندسه‌های متفاوت، می‌توان نتیجه گرفت دیواره هدایت بهینه عملکرد خوبی نشان داده است. خطوط جریان در مجاور دیواره هدایت بهینه بدون اغتشاش بوده و گردابه‌ها حذف شده‌اند.

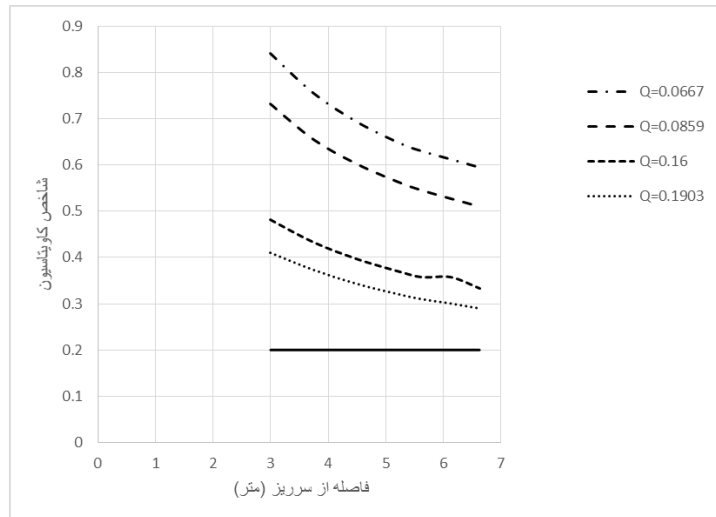
### کاویتاسیون

برای اطمینان از عملکرد مناسب تنداب در مدل با دیواره هدایت بهینه، شاخص کاویتاسیون در راستای سرریز تا انتهای تنداب محاسبه و با شاخص کاویتاسیون بحرانی مقایسه گشت. خلأ زایی هنگامی رخ می‌دهد که شاخص کاویتاسیون برابر یا کوچک‌تر از شاخص کاویتاسیون بحرانی (۰/۲) شود. جهت

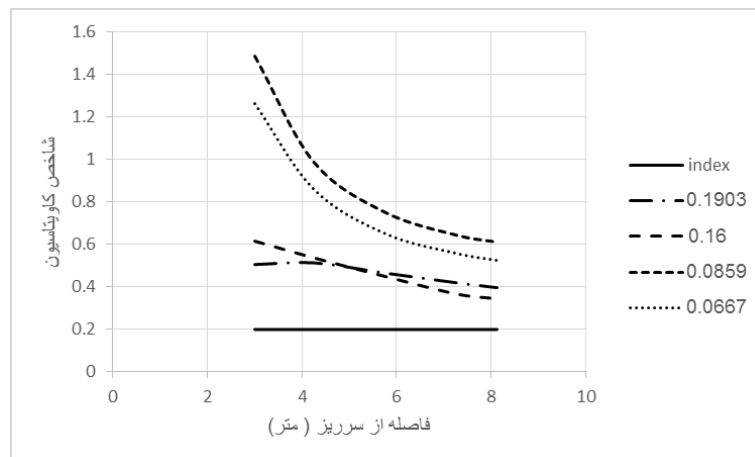
بررسی و کنترل وقوع خلأ زایی، نیاز به اطلاعاتی نظیر سرعت متوسط و فشار وارده بر کف در قسمت‌های مختلف کف تندآب می‌باشد.

از این رو چندین مقطع در راستای تندآب برای به دست آوردن ضریب کاویتاسیون استفاده شد. با به دست آوردن کوچک‌ترین شاخص کاویتاسیون در هر مقطع، نمودار شاخص کاویتاسیون با دبی‌های مختلف رسم شد. در نمودار شکل (۴-۲۴) محور عمودی شاخص کاویتاسیون و محور افقی فاصله مقاطع از سرریز سد است. در این شکل خط توپر شاخص کاویتاسیون بحرانی است که با توجه به مطالب ذکر شده در فصل ۳ مقدار آن  $0/2$  است.

با مقایسه دو شکل ۴-۲۴ و ۴-۲۵، کمترین شاخص کاویتاسیون در شکل ۴-۲۴ با دبی  $0/1903$  در انتهای تندآب با مقدار  $0/2888$  به دست آمد. با وجود افزایش دبی در مسئله با دیواره هدایت بهینه و کاهش عدد کاویتاسیون نسبت به مسئله با دیواره هدایت دایره‌ای، بر مبنای اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و با توجه به شاخص کاویتاسیون بحرانی، احتمال رخ دادن این پدیده در طول تندآب سرریز سد وجود ندارد. در این راستا استفاده از سازه‌های هواده برای پیشگیری از خسارت و عواقب احتمالی حاصل از پدیده خوردگی ضروری به نظر نمی‌رسد. با این حال برای توصیه قطعی در مورد استفاده یا عدم استفاده از سازه‌ی هواده، بستگی به عوامل دیگری از جمله: غلظت هوای موجود در مجاورت سطوح بتنی تندآب، کیفیت اجرای طرح بتنی تندآب، کیفیت اجرای سطوح بتنی و درزهای انقباضی دارد.



شکل ۴-۲۴ شاخص کایتاسیون در راستای سرریز با دیواره هدایت بهینه



شکل ۴-۲۵ شاخص کایتاسیون در راستای سرریز با دیواره هدایت دایره‌ای



## فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی پله‌ی رو به جریان در دو حالت بهینه‌سازی شده و آزمایشگاهی می‌پردازیم. در قسمت بعدی به بررسی و مقایسه نتایج طراحی دیواره‌های هدایت با هندسه‌های مختلف می‌پردازیم. در آخر پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

## ۵-۲ بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی پله‌ی رو به جریان

برای اطمینان از بهینه بودن مقطع به دست آمده با SPC در طراحی پله‌ی رو به جریان به مدل‌سازی مقاطع بهینه، مستطیلی، بیضوی باهدف کاهش افت فشار، پرداخته شد. رژیم جریان در این مسئله به صورت آشسته و تک فازی و دوبعدی در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج ارائه شده در فصل ۴ و بررسی‌های صورت گرفته می‌توان موارد زیر را در طراحی یک پله‌ی رو به جریان مطرح کرد.

- در پله‌ی رو به جریان با مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی آندو و شاکوچی با نتایج حاصل از مدل‌سازی در OpenFOAM تا حدودی یکسان به دست آمد. طول جدایی جریان و ارتفاع اتصال، در بالادست و پایین دست پله در بیشترین حالت ۶/۱ درصد اختلاف داشتند.
- در طراحی پله‌ی رو به جریان سه مرز مختلف برای مقطع بهینه‌سازی با سه خط جریان ۳۰، ۲۰، ۱۰ درصد تعریف شد. پس از مدل‌سازی مقاطع در OpenFOAM گردابه‌های ایجاد شده در مقطع مستطیلی (شکل آزمایشگاهی) در هر سه مدل حذف گردید. مقایسه‌ی نتایج افت فشار تفاوت چندانی با یکدیگر مشاهده نشد ولی مقطع ایجاد شده با خط جریان ۳۰ درصد افت فشار کمتری نسبت به دو مقطع دیگر داشت.
- از بین مقاطع بهینه شده با روش SPC، مستطیلی (شکل آزمایشگاهی) و بیضوی برای پله‌ی رو به جریان مقطع بهینه با خط جریان ۳۰ درصد کمترین میزان افت فشار را در بین مقاطع داشت. مقطع بهینه شده در میزان افت فشار نسبت به مقطع مستطیلی شکل ۳۰ درصد و نسبت به مقطع بیضوی شکل ۲/۴۱ درصد بهبود داشت. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در طراحی

پله‌ی رو به جریان، روش معیاربهبینی دارای دقت قابل‌توجهی بوده و از آن می‌توان در طراحی‌های مشابه استفاده کرد.

- بدترین مقطع برای طراحی پله‌ی رو به جریان مقطع مستطیلی بوده که نتایج حاصل از آن بیش‌ترین میزان افت فشار به مقدار  $1/528$  کیلو پاسکال را دارد. در این مقطع فشار منفی مشاهده‌شده در نمودار به دلیل جداشدگی جریان و گردابه تشکیل‌شده در پله است.

### ۳-۵ بررسی نتایج حاصل از طراحی دیواره هدایت

برای اطمینان از بهینه بودن مقطع به‌دست‌آمده با SPC در طراحی دیواره هدایت به مدل‌سازی سه مقطع مختلف با هدف کمینه شدن تراز سطح رودخانه، پرداخته شد. رژیم جریان در این مسئله به‌صورت آشفته و دوفازی و سه‌بعدی در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج ارائه‌شده در فصل ۴ نتایج زیر حاصل گردید:

- دیواره هدایت آزمایشگاهی متشکل از یک طول مستقیم و مقطع دایروی بود. مقایسه نتایج مدل‌سازی دیواره‌های هدایت سرریز سد بالارود در نرم‌افزار OpenFOAM با نتایج آزمایشگاهی در بیشترین حالت  $6,3$  درصد اختلاف داشت. در ورودی کانال تقرب، با برخورد جریان آب به دیواره هدایت دایره‌ای متلاطم شده و تشکیل گردابه در این ناحیه مشاهده شد.
- در بین دیواره‌های هدایت با هندسه بهینه‌سازی شده و ایجادشده با خطوط جریان  $20$ ،  $30$ ،  $10$  درصد، دیواره هدایت با هندسه‌ی تشکیل‌شده با خط جریان  $20$  درصد کمترین تراز سطح آب را در مخزن داشت، بنابراین بیشترین دبی عبوری را از سرریز دارد. با بهبود هندسه‌ی دیواره هدایت، گردابه‌ها در راستای دیواره هدایت حذف می‌شود، اغتشاش جریان مشاهده نمی‌شود و الگوی جریان مناسبی در محل دیواره هدایت برقرار می‌شود.
- دیواره هدایت با هندسه بهینه‌سازی شده سطح تراز آب کمتری نسبت به دیواره هدایت دایره‌ای و مستطیلی داشت. در این حالت برخلاف دو حالت یادشده الگوی جریان منظمی در راستای

دیواره هدایت تشکیل و گردابه ها حذف شد. بیشترین تلاطم و بیشترین تراز سطح رودخانه در دیواره هدایت با هندسه‌ی مستطیلی مشاهده شد؛ بنابراین بدترین مقطع ممکن، دیواره هدایت با هندسه‌ی مستطیلی شکل است.

- دیواره هدایت بیضوی شکل نتایج نزدیکی با دیواره هدایت بهینه‌سازی شده دارد و بیشترین تفاوت تراز آب در دو حالت به  $1/8$  درصد رسید. مقطع بیضوی در تمام دبی‌ها کمترین تراز سطح آب را داشت و امواج عرضی و گردابه‌ها در راستای ورودی کانال تقرب حذف شد. از این رو دیواره هدایت بیضوی نیز می‌تواند طرح مناسبی برای دیواره هدایت باشد.

- کمترین شاخص کاویتاسیون در دبی  $0/1903$  متر مکعب بر ثانیه رخ داد، مقدار آن  $0/2888$  است. با توجه به مشخصات تندآب در سد بهینه‌سازی شده، شاخص کاویتاسیون بحرانی  $0/2$  است که نشان از عدم وقوع کاویتاسیون دارد.

در نهایت می‌توان گفت، روش استفاده‌شده در این پژوهش، روشی کاملاً مناسب برای طراحی بهینه دیواره هدایت، پله‌ها و سرریزها است.

#### ۴-۵ پیشنهادها برای مطالعات آتی

- بررسی طول قیدهای اجرایی در طراحی دیواره هدایت و بهینه‌سازی آن با روش معیاربهینگی: در تحقیق حاضر قیدهای بهینه‌سازی در روش معیار بهینگی در نقاط خاصی در نظر گرفته شده است. در مثال پله‌ی رو به جریان در ابتدا و انتهای پله و در مثال مخزن سد در انتهای دیواره‌های هدایت و حدود  $0,2$  بعد از خط مستقیم دیواره‌های هدایت. پیشنهاد می‌شود نقاط قیدها تغییر کند تا هندسه‌های متفاوت با طول دیواره‌های هدایت متفاوت و طول متفاوت پله‌ی رو به جریان مدل‌سازی شده و تأثیر آن در تابع هدف بهینه‌سازی تعیین شود.

- با توجه به اینکه برنامه نوشته‌شده معادلات با جریان آرام را حل می‌کند و تابع هدف بهینه‌سازی در نرم‌افزار OpenFOAM بعد از مدل‌سازی بررسی می‌شد پیشنهاد می‌شود قسمت‌هایی به

برنامه SPC اضافه شود که توانایی حل معادلات جریان آشفته و بررسی تابع هدف بهینه‌سازی را داشته باشد.

- پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی ترکیبی از مدل‌سازی سرریز با هندسه‌ی بهینه‌سازی شده و دیواره هدایت با هندسه‌ی بهینه‌سازی شده و مقایسه‌ی آن با ترکیب بهینه‌سازی نشده پرداخت تا تأثیر بهینه‌سازی هر دو سازه در کمینه‌سازی تراز سطح رودخانه و حذف گردابه‌ها مشخص شود.

## منابع

ابریشمی ج و حسینی م، (۱۳۸۶)، " هیدرولیک کانال‌های روباز "، چاپ هفدهم، انتشارات آستان

قدس رضوی

دورقی ا، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "رفتار هیدرودینامیکی آب بر روی سرریز اوجی سه دهانه و تعیین رابطه دبی- اشل و بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت (مطالعه‌ی موردی سرریز سد بالارود)"،

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز

دهدار بهبهانی ص، فتحی مقدم م، فاضلی پور ش و حسینی ح، (۱۳۹۱)، "بررسی اثرهندسه دیواره هدایت برالگوی جریان و منحنی دبی - اشل سرریزسد بالا رود با مدل "FLOW3D"، نهمین سمینار

بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز

روشن ر، عبدالله پور م، کرمی نژاد ع و سرکرده ح، (۱۳۹۰)، "طراحی دیواره‌های هادی جریان در سرریزها (مطالعه موردی سد گلابر)"، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، رشت، انجمن هیدرولیک ایران،

دانشگاه گیلان

سامانی ح، (۱۳۹۳)، " طراحی سازه‌های هیدرولیکی "، چاپ سوم، شرکت مهندسی مشاور دز آب

صنعتی نژاد م، (۱۳۸۵)، "مبانی جریان های آشفته و مدل سازی آنها "، انتشارات دانش نگار

فرسیو ع، (۱۳۸۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "تدوین مدل عددی به منظور بررسی تاثیر شکل دیوار هدایت جریان بالادست سرریز، بر جریان عبوری از سرریز "، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه

صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

فرودی خور ع، اژدری مقدم م و صانعی م، (۱۳۹۴)، "بررسی تاثیر تغییرات زاویه همگرایی دیواره های هادی بر عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی با قوس در پلان "، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و

مدیریت آبخیز، جلد ۷، شماره ۱، صفحات ۶۴-۷۶

فرودی خورع، صانعی م و حاجی پور لیمویی ح، (۱۳۹۲)، "مقایسه آزمایشگاهی تاثیر تقارن و عدم تقارن دیواره های هادی بر عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی با قوس در پلان"، اولین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه ترویجی دستداران محیطزیست و انجمن حمایت از طبیعت ایران

قاسمزاده ف، (۱۳۹۲)، "شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در **FLOW-3D**"، چاپ دوم، انتشارات

نوآور

- 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.
- Ando, T., & Shakouchi, T., (2004), “**Flow characteristics over forward facing step and through abrupt contraction pipe and drag reduction**”. *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ*, 29, 1-8.
- Awasthi, M. (2012). “**High Reynolds number turbulent boundary layer flow over small forward facing steps**”.
- Camussi, R., Felli, M., Pereira, F., Aloisio, G., & Di Marco, A. (2008). “**Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing step**”. *Physics of Fluids (1994-present)*, 20(7), 075113.
- Christensen, P. W., & Klabring, A. (2009). “**An introduction to structural optimization**”. Linkoping: Springer.
- Dehdar-Behbahani, S., & Parsaie, A. (2016). “**Numerical modeling of flow pattern in dam spillway’s guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran**”. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 467-473.
- Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., & Piroton, M. (2009). “**Automatic geometrical optimization by way of numerical flow models**”. In *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering* (pp. 1663-1668). Springer Berlin Heidelberg.
- Falvey, H. T. (1990). “*Cavitation in chutes and spillways*”. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- 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.
- Junhong, L., & Junliang, T. (2015). **“Streamlining of bridge piers as scour countermeasures: optimization of cross section”**. *Transport Research Board 94th Annual Meeting*. Washington.
- Kim, S. D., Lee, H. J., & An, S. D. (2010). **“Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model”**. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(6), 774-780.
- Leclercq, D. J., Jacob, M. C., Louisot, A., & Talotte, C. (2001). **“Forward-backward facing step pair: aerodynamic flow, wall pressure and acoustic characterisation”**. *AIAA paper, 2249*, 2001.
- Lund, E., Moller, H., & Jakobsen, L. A. (2003). **“Shape design optimization of stationary fluid-structure interaction problems with large displacements and turbulence”**. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25, 283-392.
- Martinerie, R., Boillat, J., Schleiss, A., Rizi, A. P., & Wohnlich, A. (2007). **“Experimental Study of the Gated Spillway of the Shahryar Dam in Iran”**. *INPROCEEDINGS OF THE CONGRESS INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH* (Vol. 32, No. 2, p. 691).
- Michelle, A. G. (1904). **“The limits of economy of materials in frame-structures”**. *Philosophical Magazine*, 8, 305-316.
- OpenFOAM Foundation. (2013). *OpenFOAM User Guide*. OpenFOAM Foundation.
- Parsaie, A., Haghiabi, A. H., & Moradinejad, A. (2015). **“CFD modeling of flow pattern in spillway’s approach channel”**. *Sustainable Water Resources Management*, 1(3), 245-251.
- Prager, W., & Shield, R. T. (1967). **“A general theory of optimal plastic design. Applied Mechanics”**, 34, 184-186.
- Rozvany, G. I. (1989). **“Structural design via optimality criteria”**. Dordrecht: Kluwer Academic.

- Sherry, M. J., Jacono, D. L., Sheridan, J., Mathis, R., & Marusic, I., (2009), “**Flow separation characterisation of a forward facing step immersed in a turbulent boundary layer**”. In *TSFP DIGITAL LIBRARY ONLINE*. Begel House Inc.
- Wang, J. B., & Chen, H. C. (2010). “**Improved design of guide wall of bank spillway at Yutang Hydropower Station**”. *Water Science and Engineering*, 3(1), 67-74.
- WANG, J. X., BAI, C. F., & LI, Z. (2005). “**Experimental research on form optimization for guide wall of spillway of Bashan Hydropower Project**” [J].*Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 4, 001.
- Wilcox, D. C. (2006). “**Turbulence Modeling for CFD**”. DCW Industries.
- Yin, L., & Yang, W. (2001). “**Optimality criterion method for topology optimization under multiple constraints**”. *Pergamon*, 79, 1839-1850.
- 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.

## پیوست‌ها

### پیوست ۱

تابع  $f$  در نظر گرفته می‌شود. مشتق‌های مرتبه اول و دوم آن در فضای محاسباتی به طریق زیر به دست می‌آید. مشتق‌های مرتبه‌ی اول بر اساس روابط زیر ارائه شدند.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (\text{پ-۱-۱})$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (\text{پ-۱-۲})$$

بنابراین:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f_x = \xi_x f_\xi + \eta_x f_\eta \quad (\text{پ-۱-۳})$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = f_y = \xi_y f_\xi + \eta_y f_\eta \quad (\text{پ-۱-۴})$$

این معادلات به صورت زیر بازنویسی می‌شوند.

$$f_x = J y_\eta f_\xi - J y_\xi f_\eta = J (y_\eta f_\xi - y_\xi f_\eta) \quad (\text{پ-۱-۵})$$

$$f_y = -J x_\eta f_\xi + J x_\xi f_\eta = J (x_\xi f_\eta - x_\eta f_\xi) \quad (\text{پ-۱-۶})$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial x} [\xi_x f_\xi + \eta_x f_\eta] = [\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta}] [\xi_x f_\xi + \eta_x f_\eta] \\ &= \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi_x f_\xi + \eta_x f_\eta) + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} (\xi_x f_\xi + \eta_x f_\eta) = \xi_x^2 f_{\xi\xi} \\ &+ \xi_x f_\xi \frac{\partial}{\partial \xi} [\xi_x] + \xi_x \eta_x f_{\xi\eta} + \xi_x f_\eta \frac{\partial}{\partial \xi} [\eta_x] + \eta_x \xi_x f_{\xi\eta} \\ &+ \eta_x f_\xi \frac{\partial}{\partial \eta} [\xi_x] + \eta_x^2 f_{\eta\eta} + \eta_x f_\eta \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta_x) \end{aligned} \quad (\text{پ-۱-۷})$$

معادله‌ی بالا را می‌توان به صورت زیر ساده کرد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= J^2 (y_\eta^2 f_{\xi\xi} - 2 y_\xi y_\eta f_{\xi\eta} + y_\xi^2 f_{\eta\eta}) \\ &+ J y_\eta \left[ f_\xi \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi_x) + f_\eta \frac{\partial}{\partial \xi} (\eta_x) \right] \\ &+ (-J y_\xi) \left[ f_\xi \frac{\partial}{\partial \eta} (\xi_x) + f_\eta \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta_x) \right] \end{aligned} \quad (\text{پ-۸-۱})$$

در این مرحله مشتق متریک‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi_x) &= \frac{\partial}{\partial \xi} (J y_\eta) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{y_\eta}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \right) \\ &= J^2 [y_{\xi\eta} (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) \\ &- y_\eta (y_\eta x_{\xi\xi} + x_\xi y_{\xi\eta} - x_\eta y_{\xi\xi} - y_\xi x_{\xi\eta})] \end{aligned} \quad (\text{پ-۹-۱})$$

یا

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi_x) &= J^2 (x_\xi y_\eta y_{\xi\eta} - x_\eta y_\xi y_{\xi\eta} - y_\eta^2 x_{\xi\xi} - x_\xi y_\eta y_{\xi\eta} \\ &+ x_\eta y_\eta y_{\xi\xi} + y_\xi y_\eta y_{\xi\eta}) \end{aligned} \quad (\text{پ-۱۰-۱})$$

به همین ترتیب

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} (\eta_x) &= -J^2 (x_\xi y_\eta y_{\xi\xi} - x_\eta y_\xi y_{\xi\xi} - y_\xi y_\eta x_{\xi\xi} - x_\xi y_\xi y_{\xi\eta} \\ &+ x_\eta y_\xi y_{\xi\xi} + y_\xi^2 y_{\xi\eta}) \end{aligned} \quad (\text{پ-۱۱-۱})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \eta} (\xi_x) &= J^2 (x_\xi y_\eta y_{\eta\eta} - x_\eta y_\xi y_{\eta\eta} - x_\xi y_\eta y_{\eta\eta} - y_\eta^2 x_{\xi\eta} \\ &+ y_\xi y_\eta y_{\eta\eta} + x_\eta y_\eta y_{\xi\eta}) \end{aligned} \quad (\text{پ-۱۲-۱})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta_x) &= -J^2 (x_\xi y_\eta y_{\xi\eta} - x_\eta y_\xi y_{\xi\eta} - y_\xi x_\xi y_{\eta\eta} - y_\xi y_\eta x_{\xi\eta} \\ &+ y_\xi^2 x_{\eta\eta} + x_\eta y_\xi y_{\xi\eta}) \end{aligned} \quad (\text{پ-۱۳-۱})$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = & J^2 (y_n^2 f_{\xi\xi} - 2 y_\xi y_n f_{\xi n} + y_\xi^2 f_{nn}) \\ & + J^3 \{ (y_n^2 y_{\xi\xi} - 2 y_n y_\xi y_{\xi n} + y_\xi^2 y_{nn}) (x_n f_\xi - x_\xi f_n) \\ & + y_n^2 x_{\xi\xi} - 2 y_n y_\xi x_{\xi n} + y_\xi^2 x_{nn} \} (y_\xi f_n - y_n f_\xi) \end{aligned} \quad (\text{پ ۱۴-۱})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = & J^2 (x_n^2 f_{\xi\xi} - 2 x_\xi x_n f_{\xi n} + x_\xi^2 f_{nn}) \\ & + J^3 \{ (x_n^2 y_{\xi\xi} - 2 x_\xi x_n y_{\xi n} + x_\xi^2 y_{nn}) (x_n f_\xi - x_\xi f_n) \\ & + (x_n^2 x_{\xi\xi} - 2 x_\xi x_n x_{\xi n} + x_\xi^2 x_{nn}) (y_\xi f_n - y_n f_\xi) \} \end{aligned} \quad (\text{پ ۱۵-۱})$$

در ادامه حل معادله‌ی لاپلاس به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (\text{پ ۱۶-۱})$$

و معادلات (پ ۱-۸) و (پ ۱-۹) در آن جایگزین می‌شود. پس از ساده کردن جمله‌ها و جمع چند جمله‌ی

دیگر، معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \nabla^2 f = & J^2 [ (x_n^2 + y_n^2) f_{\xi\xi} - 2(x_\xi x_n + y_\xi y_n) f_{\xi n} \\ & + (x_\xi^2 + y_\xi^2) f_{nn} ] + J^3 \{ [ (x_n^2 + y_n^2) y_{\xi\xi} \\ & - 2(x_\xi x_n + y_n y_\xi) y_{\xi n} + (x_\xi^2 + y_\xi^2) y_{nn} ] (x_n f_\xi - x_\xi f_n) \\ & + [(x_n^2 + y_n^2) x_{\xi\xi} - 2(x_\xi x_n + y_n y_\xi) x_{\xi n} \\ & + (x_\xi^2 + y_\xi^2) x_{nn} ] (y_\xi f_n - y_n f_\xi) \} \end{aligned} \quad (\text{پ ۱۷-۱})$$

با تعریف عبارات زیر،

$$x_n^2 + y_n^2 = a \quad (\text{پ ۱۸-۱})$$

$$x_\xi x_n + y_\xi y_n = b \quad (\text{پ ۱۹-۱})$$

$$x_\xi^2 + y_\xi^2 = c \quad (\text{پ ۲۰-۱})$$

خواهیم داشت،

$$\begin{aligned} \nabla^2 f = J^2(a f_{\xi\xi} - 2b f_{\xi\eta} + c f_{\eta\eta}) \\ + J^3\{ (a y_{\xi\xi} - 2b y_{\xi\eta} + c y_{\eta\eta})(x_\eta f_\xi - x_\xi f_\eta) \\ + (a x_{\xi\xi} - 2b x_{\xi\eta} + c x_{\eta\eta})(y_\xi f_\eta - y_\eta f_\xi) \} \end{aligned} \quad (\text{پ ۱-۲۱})$$

و سرانجام،

$$\nabla^2 f = J^2(a f_{\xi\xi} - 2b f_{\xi\eta} + c f_{\eta\eta} + d f_\eta + e f_\xi) \quad (\text{پ ۱-۲۲})$$

که در آن،

$$d = J(y_\xi \alpha - x_\xi \beta) \quad (\text{پ ۱-۲۳})$$

$$e = J(x_\eta \beta - y_\eta \alpha) \quad (\text{پ ۱-۲۴})$$

و

$$\alpha = a x_{\xi\xi} - 2b x_{\xi\eta} + c x_{\eta\eta} \quad (\text{پ ۱-۲۵})$$

$$\beta = a y_{\xi\xi} - 2b y_{\xi\eta} + c y_{\eta\eta} \quad (\text{پ ۱-۲۶})$$

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

$$\nabla^2 \xi = 0 \quad (\text{پ ۱-۲۷})$$

$$\nabla^2 \eta = 0 \quad (\text{پ ۱-۲۸})$$

هدف، تبدیل این دستگاه به قلمرو محاسباتی است. برای انجام این کار از معادله (پ ۱-۱۰) استفاده

می‌شود؛ بنابراین در معادله (پ ۱-۱۱)،  $f = \xi$  است. مشتق‌های مورد نیاز در معادله (پ ۱-۱۰) عبارتند

از:

$$\xi_\xi = \frac{\partial \xi}{\partial \xi} = 1 \quad (\text{پ ۱-۲۹})$$

$$\xi_\eta = 0 \quad (\text{پ ۱-۳۰})$$

$$\xi_{\xi\xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \xi}{\partial \xi} \right) = 0 \quad (\text{پ ۱-۳۱})$$

$$\xi_{\eta\eta} = 0 \quad (\text{پ ۱-۳۲})$$

$$\xi_{\xi\eta} = 0 \quad (\text{پ} ۳۳-۱)$$

در نتیجه معادله‌ی کلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$J^2 e = 0 \quad (\text{پ} ۳۴-۱)$$

یا

$$J^3(x_\eta\beta - y_\eta\alpha) = 0 \quad (\text{پ} ۳۵-۱)$$

به همین ترتیب از  $\nabla^2\eta = 0$  نتیجه می‌شود،

$$J^2 d = 0 \quad (\text{پ} ۳۶-۱)$$

یا

$$J^3(y_\xi\alpha - x_\xi\beta) = 0 \quad (\text{پ} ۳۷-۱)$$

چون  $J \neq 0$  است، پس،

$$x_\eta\beta - y_\eta\alpha = 0 \quad (\text{پ} ۳۸-۱)$$

$$y_\xi\alpha - x_\xi\beta = 0 \quad (\text{پ} ۳۹-۱)$$

با حذف  $\alpha$  بین معادلات بالا نتیجه می‌شود:

$$\beta(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) = 0 \quad (\text{پ} ۴۰-۱)$$

اما،

$$x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi = \frac{1}{J} \quad (\text{پ} ۴۱-۱)$$

پس،

$$\frac{1}{J} \beta = 0 \quad (\text{پ} ۴۲-۱)$$

چون  $J \neq 0$  است، بنابراین،

$$\beta = 0 \quad (\text{پ} ۴۳-۱)$$

یا

$$a y_{\xi\xi} - 2b y_{\xi\eta} + c y_{\eta\eta} = 0 \quad (\text{پ-۴۴})$$

نشان دادیم که  $\beta = 0$  است، بنابراین  $\alpha$  هم باید صفر باشد که نتیجه می‌دهد:

$$a x_{\xi\xi} - 2b x_{\xi\eta} + c x_{\eta\eta} = 0 \quad (\text{پ-۴۵})$$



## Abstract

Flow pattern recognition by the use of the numerical simulation may help designers to propose optimal shape for hydraulics structures to increase their performance. In this study, the shape of guide walls and forward facing step was optimized by optimality criteria method to reduce energy loss and removing the cross waves and non-uniformity of the flow. The optimization criteria was streamlining and the optimization variables defined as solid boundaries coordinates. To optimize the shape of guide walls and steps by optimality criteria method a programming code was developed to streamline the cross sections of transitional sections and called Streamlining Programming Code (SPC) .

SPC used C++ programming language and is able to solve the potential flows in order to obtain the streamlines coordinates and to map a selected streamline to the solid boundaries. At the first step, the initial shape is solved by the mean of potential flow using SPC. At repeating the process by mapping the streamline of interest onto the boundary, the energy loss was evaluated using OpenFOAM. Then to evaluate the effect of new geometries of guide walls on the flow pattern and rating curve of Balaroud dam spillway's (Iran), several plans for the guide walls were simulated .

After validating the results of OpenFOAM by a same experimental models in both step and guide wall, those were validated. Those results illustrated that the step's shape obtained from SPC, decreases the energy loss as much as 30% in comparison with rectangular (experimental) model and eliminate vortex over the forward facing step. Also, optimum SPC plan in guide walls had very good performance for removing cross waves and smoothly passing the flow through the approach channel and over the spillway .

**Keywords:** Optimization, OpenFOAM, Guide Wall, Forward Facing Step, Optimality Criteria, Cross Waves.





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Civil Engineering**  
**MSc Thesis in Hydraulic Structures Engineering**

**Shape Optimization of Guide Walls Based on Optimality  
Criteria Method**

By: Zeinab Elmi

Supervisor(s)  
Dr Seyed Fazlolah Saghravani  
Dr Seyed Mehdi Tavakoli

September 2016