



دانشکده: عمران و معماری گروه: عمران

تعیین مدل توربولانسی مناسب برای تعیین افت انرژی در سرریزهای پلکانی

دانشجو: سعید براری

استاد راهنما: دکتر رامین امینی

استاد مشاور: دکتر امیر عباس عابدینی

پایاننامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن 91

تقدیم به پدر و مادرم:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسبیم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستیام بودهاند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

تشكر و قدرداني

خداوند یکتا را سپاس می گویم که به من امکان داد تا بتوانم این مرحله از تحصیل خود را نیز با موفقیت پشت سر بگذارم.

در اینجا لازم میدانم از استاد راهنمای بزرگوارم دکتر رامین امینی که همواره و در تمامی مراحل، من را یاری و راهنمایی نمودند تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از استاد مشاورم دکتر امیرعباس عابدینی تشکر میکنم که به خوبی من را در خلال این پروژه راهنمایی کردند.

در انتها از کمکهای بیدریغ و راهنماییهای ارزنده پدر و مادرم تشکر و قدردانی میکنم.

تعهد نامه

اینجانب سعید براری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران- هیدرولیک دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین مدل توربولانسی مناسب برای تعیین افت انرژی در سرریزهای پلکانی تحت راهنمائی دکتر رامین امینی به عنوان استاد

راهنما متعهد مي شوم:

- تحقيقات در اين پايان نامه / رساله توسط اينجانب انجام شده و از صحت و اصا لت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدر کی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد 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 / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، 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 / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا
 استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاريخ:

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 می باشد. 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 نمی باشد.

ً #متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیرشده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد.

چکیدہ:

دلایل اصلی استفاده از سرریز پلکانی اتلاف انرژی و هوادهی جریان میباشد. اتلاف انرژی سرریز پلکانی باعث کاهش هزینههای ساخت حوضچه آرامش و هوادهی جریان باعث جلوگیری از خسارتهای کاویتاسیون میشود. در پلههای ابتدائی سرریز، در نزدیکی دیوارهها، آشفتگی تولید می شود و لایه مرزی تا زمانی که لبه بیرونی لایه مرزی به سطح آب برسد، رشد می کند. زمانی که لبه بیرونی لایهمرزی به سطح آب برسد، آشفتگی میتواند به صورت طبیعی شروع به هوادهی سطح آزاد کند. بنابراین جریان بر روی این نوع از سرریزها به شدت آشفته میباشد و در شبیهسازی آن مدل آشفتگی تأثیر بسزایی در نتایج دارد. برای مدلسازی جریان از نرمافزار انسیس فلوئنت استفاده شده است. این نرمافزار با استفاده از روش حجم محدود معادلات حاکم بر جریان را حل مینماید. در این تحقیق شبیهسازی سطح آزاد با استفاده از روش حجم سیال (VOF) می باشد. مدل های آشفتگی k-٤ استاندارد، $k-\varepsilon$ ، RNG k- ε باهم مقایسه شدهاند. برای صحت k- ε ، RNG k- ε سنجی شبیهسازی از نتایج مدل آزمایشگاهی سرریز سد سیاهبیشه بالا استفاده شده است. پروفیل فشار سطح افقی پلهها رسم شده و نتایج شبیهسازی با آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان میدهند که سه مدل RNG k-ε و k-ω استاندارد و SST k-۵ به دادههای آزمایشگاهی نزدیکتر میباشند. مدل RNG k-E در نواحی نزدیک دیوار (برای این مدل باید تابع دیوار مناسب انتخاب شود) و مدل k-۵ استاندارد در نواحی دور از دیوار و جریان برشی آزاد ضعیف عمل مینمایند. مدل -k در نواحی نزدیک دیوار به صورت مدل k- ω استاندارد و در نواحی دور از دیوار به صورت مدل SST ω استاندارد عمل می کند، در نتیجه این مدل نقاط ضعف دو مدل k- ω استاندارد و k- ϵ استاندارد و k- ϵ پوشش داده و مناسبتر میباشد. در ادامه اتلاف انرژی برای دبیهای در واحد عرض 4/5، 7/5، 9 و در شیب $^{21/8}$ بررسی شده است. نتایج نشان میدهند بیشترین میزان اتلاف انرژی m^2/s 10/15 85/86 و كمترين آن 72/70 درصد مىباشند. همچنين با افزايش دبى در واحد عرض از ميزان افت

انرژی کاسته میشود. بنابراین در سرریز پلکانی انرژی قابل توجهی اتلاف میشود و این امر میتواند باعث کاهش هزینههای ساخت حوضچه آرامش و یا حتی حذف آن شود.

واژههای کلیدی: روش حجم سیال(VOF)، سرریز پلکانی، شبیهسازی عددی، مدل آشفتگی، نرمافزار انسیس فلوئنت

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

1-1 مقدمه
2-1 پیشینه تاریخی سرریز و شوتهای پلکانی
3-1 دلایل استفاده از سرریز پلکانی و مشکلات آن
4-1 تاریخچه کارهای انجامشده
1-4-1 مطالعات آزمایشگاهی سرریزهای پلکانی
2-4-1 مطالعات عددی سرریزهای پلکانی
فصل دوم: هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای پلکانی
1-2 رژیم جریان بر روی سرریزهای پلکانی 10
2-2 مشخصههای جریان هوادهی نشده
1-2-2 جريان ريزشي
1-1-2-2 پارامتر های جریان
2-1-2-2 اتلاف انرژی
3-1-2-2 شرایط رژیم جریان ریزشی
2-2-2 جريان رويه اي 18
2-2-2 شروع جريان رويهاي 19
2-2-2-2 شرايط جريان يكنواخت 19

2-2-2 اتلاف انرژی 21
3-2 تأثیر هوادهی بر جریانهای سرریز پلکانی 22
1-3-2 مكانيسم هوادهى
2-3-2 تعاريف
3-3-2 نقطه شروع
26-3-2 ناحیه جریان یکنواخت
26-3-4 غلظت هوا
2-4-3-2 ضریب اصطکاک
3-4-3-2 پارامترهای جریان یکنواخت بر روی سرریزهای پلکانی
4-4-3-2 اتلاف انرژی
فصل سوم: معادلات حاکم بر جریان آشفته
1-3 مقدمه
2-3 معادلات حاكم بر جريان
2-3-1 متوسط گیری رینولدز
2-2-3 معادله متوسط رينولدز ناوير استوكس (RANS)
3-2-3 معادله تنش رينولدز 43
4-2-3 معادله انرژی آشفتگی 44
3-3 مدل های آشفتگی

3-3-1-1 مدل های جبری
48 مدل های تک معادله ای
3-1-3-3 مدل های دو معادله ای
3-3-4 مدلهای انتقال تنش 50
2-3-3 مدل k-ɛ مدل 2-3-3
1-2-3-3 مدل <i>k-ε</i> استاندارد
2-2-3-3 مدلRNG <i>k</i> - <i>ε</i> مدل2-2-3-3
3-2-3-3 مدلk-æ تحقق پذیر 53
3-3-3 مدل <i>k</i> - <i>w</i> استاندارد
55 SST <i>k-w</i> مدل 4-3-3
4-3 قانون ديوار
5-3 مدل کردن نواحی نزدیک دیوار
6-3 تابع استاندارد دیوار
7-3 روش VOF روش 7-3
فصل چهارم: شبیهسازی عددی
1-4 مقدمه
2-4 دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
3-4 شرح مدل آزمایشگاهی
4-4 آشنایی با نرمافزار انسیس فلوئنت

5-4 هندسه مدل عددی و شبکهبندی آن
6-4 تنظيمات حل
1-6-4 مدل چند فازی و آشفتگی 74
2-6-4 شرایط مرزی
1-2-6-4 شرايط مرزى سرعت ورودى
2-2-6-4 شرایط مرزی فشار ورودی و فشار خروجی
3-2-6-4 شرايط مرزی ديوار
3-6-4 روش های حل و گسسته سازی معادلات 79
1-3-6-4 روشهای حل عددی 79
2-3-6-4 گسسته سازی معادله انتقال کلی
3-6-4 روشهای اعمالشده در مدل 82
3-6-4 شرايط اوليه
فصل پنجم: تجزيهوتحليل نتايج
1-5 مقدمه
2-5 صحت سنجی مدل عددی
1-2-5 مقايسه پروفيل فشار
2-2-5 مقايسه پروفيل سطح آب
3-5 بررسی رژیم جریان
4-5 کانتورهای فشار

5-5 غلظت هوا
6-5 بررسی پارامتر های آشفتگی
1-6-5 انرژی جنبشی آشفتگی
2-6-5 نرخ اتلاف مخصوص انرژی جنبشی آشفتگی (w)
3-6-5 شدت آشفتگی
7-5 بررسی میزان اتلاف انرژی
صل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
1-6 نتيجه گيرى
2-6 پیشنهادات
براجع

فهرست اشكال

شکل 1-1: سرریز پلکانی سد خاکی اوپیوها[2]
شكل 1-2 : سرريز فرعى سد ملتون[2]5
شكل 2-1 : جريان ريزشي با پرش هيدروليكي كامل [10] 10
شكل 2-2 : جريان ريزشي با پرش هيدروليكي نسبتاً توسعهيافته
شكل 2-3 : جريان رويهاي [10] 12
شكل 2-4: پروفيل سطح آزاد طولى در جريان انتقالى
شكل 2-5 : مناطق جريان بر روى يك سرريز بلند [10]
شکل 2-6 : پارمترهای جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل 15
شکل 2-7 : اتلاف انرژی در جریان ریزشی به عنوان تابعی از تعداد پلهها [10] 17
شکل 2-8: شرایط جریان برای تغییر از حالت ریزشی به انتقالی (NA-TRA) و انتقالی به
رويەاى (TRA-SK) [26] 18
شکل 2-9 : موقعیت بی بعد نقطه شروع هوادهی سطح آزاد بر روی سرریز پلکانی با شیب
متوسط [26]
شكل 2-10 : خواص جريان آب و هوا در جريانهاي رويهاي [42] 28
شکل 2-11: نتایج آزمایشها بر روی جریان انتقالی برای هوادهی و توزیع سرعت[4] 29
شکل 2-12 : توزیع طولی متوسط غلظت هوا C_{mean} و عمق بی بعد آب و هوا Y_{90}/d_c برای
جريان انتقالي [4]

شکل 2-13 : توزیع طولی متوسط غلظت هوا C_{mean} و عمق بی بعد آب و هوا Y_{90}/d_c برای
جريان رويه اي [4]
شکل 2-14 : ضریب اصطکاک نسبی f_e/f به صورت تابعی از غلظت هوای متوسط \mathcal{C}_{mean} در
سرریزهای صاف[4]
شکل 2-15: تأثیر غلظت هوا و شیب سرریز بر روی انرژی باقیمانده (معادله 2-46)[10] . 35
شكل 3-1 سرعت وابسته به زمان سيال در يك نقطه[50]
شکل 3-3 متوسط زمانی برای آشفتگی ایستا [51]
شکل 3-3 تقسیم بندی منطقه نزدیک دیوار [52]
شکل 3-4 رفتار نزدیک دیوار [52]
شکل 4-1 هندسه مدل آزمایشگاهی
شکل 4-2 هندسه مدل عددی 70
شکل 4-3 شبکهبندی در نرمافزار گمبیت 72
شکل 4-4 تغییرات شبکهبندی در نرمافزار انسیس فلوئنت
شكل 4-5 شكل كلى شبكەبندى مدل 73
شکل 4-6 شرایط مرزی محدوده حل 74
شكل 4-7 تنظيمات مدل چند فازى
شكل 4-8 تنظيمات مدل آشفتگی
شكل 4-9 تنظيمات شرايط مرزى سرعت ورودى براى فاز مختلط
شكل 4-10 تنظيمات شرايط مرزى سرعت ورودى براى فاز دوم

شكل 4-11 تنظيمات شرايط مرزى فشار خروجي
شكل 4-12 تنظيمات شرايط مرزى ديوار 79
شکل 4-13 حجم کنترلی که برای نشان دادن گسسته سازی یک معادله انتقال اسکالر استفاده
مىشود[52]
شكل 5-1 محل نصب پيزومترها 88
شکل 5-2 پروفیل فشار بر روی پله 10 در دبی در واحد عرض 1/6 m²/s
شکل 5-3 پروفیل فشار بر روی پله 12 در دبی در واحد عرض 1/6 m ² /s
شکل 5-4 پروفیل فشار بر روی پله 19 در دبی در واحد عرض 1/6 m ² /s /s س 90
شکل 5-5 پروفیل فشار بر روی پله 27 در دبی در واحد عرض 1/6 m ² /s 90
شکل 5-6 پروفیل فشار بر روی پله 34 در دبی در واحد عرض 1/6 m ² /s /s س
شکل 5-7 پروفیل فشار بر روی پله 43 در دبی در واحد عرض 1/6 m ² /s 91
شکل 5-8 پروفیل فشار بر روی پله 10 در دبی در واحد عرض 1/5 m ² /s
شکل 5-9 پروفیل فشار بر روی پله 12 در دبی در واحد عرض 1/5 m ² /s
شکل 5-10 پروفیل فشار بر روی پله 19 در دبی در واحد عرض 1/5 m ² /s
شکل 5-11 پروفیل فشار بر روی پله 27 در دبی در واحد عرض 1/5 m ² /s 94
شکل 5-12 پروفیل فشار بر روی پله 34 در دبی در واحد عرض 1⁄5 m ² /s
شکل 5-13 پروفیل فشار بر روی پله 43 در دبی در واحد عرض 1⁄5 m ² /s
شکل 5-14 مقایسه ارتفاع آب در 13 پله اول در دبی در واحد عرض <i>1</i> /8 m ² /s /s
شکل 5-15 مقایسه ارتفاع آب از پله 19 تا پله 35 در دبی در واحد عرض 4/6 m^2/s

پروفیل فشار بر روی پله 27 در دبی در واحد عرض 1/5 m²/s با استفاده از مدل	16-5	شكل
100	RNC	3 <i>к-</i> ε
خطوط جریان بر روی پله چهاردهم	17-5	شکل
بردارهای سرعت در پله چهاردهم	18-5	شکل
مقایسه توزیع سرعت بی بعد میان اطلاعات عددی و قانون توانی به ازای 102. <i>N</i> =5	19-5	شکل
مقایسه توزیع سرعت بی بعد میان اطلاعات آزمایشگاهی و قانون توانی به ازای	20-5	شكل
103	. [42]	N=6
کانتورهای رنگی فشار بر روی پله 14 و 15 بر حسب Pa	21-5	شکل
کانتورهای فشار بر روی پله 14 بر حسب <i>kPa</i>	22-5	شکل
کانتورهای فشار بر روی پله 15 بر حسب <i>kPa</i> 104	23-5	شکل
پروفیل فشار بر روی سطح افقی پله 14	24-5	شکل
پروفیل فشار بر روی سطح عمودی پله 14	25-5	شكل
نمودار بی بعد توزیع غلظت هوا برای دبی در واحد عرض m²/s 4/6 106	25-5	شكل
کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در پله 14 107	27-5	شكل
کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در پله 24	28-5	شكل
کانتورهای انرژی جنبشی در پله 34	29-5	شکل
کانتورهای انرژی جنبشی در پله 44	30-5	شکل
کانتورهای رنگی نرخ اتلاف انرژی جنبشی، ۵، در پلههای 14 و 15	31-5	شکل
110 m^2/s 4/6 توزیع شدت آشفتگی برای جریان رویهای در طول سرریز در دبی	32-5	شکل

دبیهای مختلف110	شکل 5-33 توزیع شدت آشفتگی برای جریان رویهای برای
111	شکل 5-34 توزیع شدت آشفتگی در جریان رویهای[57]

فهرست جداول

جدول 1-1 جزئیات تحقیقات آزمایشگاهی در زمینه ورود هوا در تند آبراه پلکانی[4] 6
جدول 1-2 تعدادی از مشخصههای تحقیقات عددی بر روی سرریز پلکانی [17]8
جدول 5-1 مقایسه آماری مدلهای مختلف
جدول 5-2 بررسی میزان افت انرژی در دبیهای مختلف

علائم و اختصارات

علائم	تعريف
A	سطح مقطع
\vec{A}	بردار مساحت سطح
С	غلظت هوا تعريفشده به صورت حجم هوا در واحد حجم
C _e	متوسط غلظت هوا براى جريان يكنواخت
$C_{\varepsilon 1}$	ضرایب ارتباطدهنده
C_{ε^2}	ضرایب ارتباطدهنده
C_{μ}	ضرایب ارتباطدهنده
C _{mean}	غلظت هوا عمق متوسط که به صورت $d = (1 - \mathcal{C}_{mean}) imes Y_{90}$ تعريف می شود.
D_H	قطر هیدرولیکی که به صورت $D_H = 4A/P_w$ تعریف می شود.
D_o	ضریب ہی بعد
-1	1- عمق آب عمود بر شیب کانال در لبه پله
a	عمق مشخصه (عمق خالص) که به صورت $dy = \int_0^{Y_{90}} (1-C) dy$ تعريف می شود2
d_{ab}	قطر حباب هوا
d_b	عمق جریان در لبه پله
d_c	عمق بحراني جريان
d_e	عمق جريان هوادهي شده يكنواخت
d_I	عمق جریان در نقطه شروع
d_o	عمق جريان هوادهي نشده يكنواخت
d_p	عمق آب در استخر چرخشی
d_1	عمق جریان قبل از پرش هیدرولیکی
d_2	عمق جریان بعد از پرش هیدرولیکی
E	ضریب تصحیح انرژی جنبشی
h	ارتفاع پله
Н	هد کل
F	عدد فرود که به صورت $F=q_w/\sqrt{gd^3}$ تعريف مىشود.

<i>F</i> _*	عدد فرود که به صورت $F_* = q_w/\sqrt{g imes sin lpha imes k_s^3}$ تعریف میشود.
f	ضریب اصطکاک جریان هوادهی نشده
f_e	ضریب اصطکاک برای جریان هوادهی شده
g	شتاب ثقلی
H _{dam}	ار تفاع سد
H _{max}	$H_{max} = H_{dam} + 1/5 d_c$ ماکزیمم هد در دسترس: ماکزیمم م
H _{res}	هد باقیمانده در پایین سرریز
$(H_{res})_e$	هد باقیمانده در پایین سرریز برای جریان هوادهی شده یکنواخت
Ι	شدت آشفتگی
k	انرژی جنبشی نوسانات آشفتگی در واحد جرم
k _s	ارتفاع زبری
<i>K''</i>	ثابت انتگرال گیری
<i>K</i> ^{""}	$K^{'''} = rac{0/9}{1 - exp(-\lambda)}$ ضریبی ثابت که برابر است با:
<i>K</i> *	$K^* = tanh^{-1}\left(\sqrt{0/1} ight) = 0/32745015$ ضریبی ثابت که برابر است با:
L	مقیاس طول مشخصه برای یک سیستم
L _I	فاصله میان شروع رشد لایهمرزی تا نقطه شروع
1	طول افقی پله
\dot{m}_{qp}	انتقال جرم از فاز <i>q</i> به فاز <i>p</i>
Ν	توان قانون توانی سرعت
N _{faces}	تعداد صفحاتی که یک سلول محاسباتی را محاصره کردهاند.
$\mathcal{N}(u_i)$	عملگر معادلات ناویر استوکس
Ρ	فشار استاتيكي متوسط
p	فشار استاتیکی لحظهای
P_w	پيرامون مرطوب
p'	فشار استاتیکی نوسانی
q	دبی در واحد عرض
Re	عدد رینولدز که به صورت Re = UL/v تعریف می شود.
S	اندازه نرخ کرنش

S _{ij}	تانسور نرخ کرنش متوسط
S_{α_q}	$lpha_q$ عبارت چشمه برای سیال با کسر حجمی
S_{φ}	عبارت چشمه برای کمیت $arphi$ در واحد حجم
S	محور منطبق بر لبه پلهها در جهت جریان
S _{ij}	تانسور نرخ کرنش لحظهای
t	زمان
t _{ij}	تانسور تنش لزجت لحظهای
U	مقیاس سرعت مشخصه برای یک سیستم
U _i	سرعت متوسط
U _w	سرعت متوسط آب یا سرعت جریان آب خالص
u _i	سرعت لحظهای
u'_i	سرعت نوسانی
u _r	سرعت افزايش حباب
$u_{ au}$	$u_{ au}= au_w/ ho$ سرعت اصطکاکی برابر است با: $u_{ au}= au_w/ ho$
u^+	$u^+\equiv {U\over u_ au}$ سرعت ہی بعد برابر است با: $u^+\equiv {u\over u_ au}$
V _c	سرعت بحرانى
V_o	سرعت جريان هوادهى نشده يكنواخت
V ₉₀	سرعت مشخصهای که غلظت هوا در آنجا 90 درصد میباشد.
V	سرعت نرمال آشفتگی در سطح آزاد
$ec{ u}$	بردار سرعت
Y ₉₀	عمق مشخصهای که غلظت هوا در آنجا 90 درصد میباشد.
у	فاصله اندازهگیری شده عمود بر کف فرضی
<i>y</i> +	$y^+ = rac{u_ au y}{v}$ فاصله بی بعد برابر است با: y^+
<i>y</i> *	فاصله بی بعد از دیوار
α	شيب سرريز
α_q	کسر حجمی سیال q
δ	ضخامت لايهمرزى
δ_{ij}	دلتای کرونکر

Δt	گام زمانی
ε	اتلاف در واحد جرم
ε _{ij}	تانسور اتلاف
η	مقياس طولى كولموگروف
К	ثابت ون كارمن
μ	لزجت ديناميكي
ν	لزجت سينماتيكى
ν_T	لزجت گردابی سینماتیکی
Π_{ij}	تانسور همبستگی کرنش- فشار
ρ	چگالی
σ	کشش سطحی میان آب و هوا
σ_k	ضرایب ارتباطدهنده
σ_{ε}	ضرایب ارتباطدهنده
το	تنش برشی میان جریان اصلی و سیال چرخشی در جریان رویهای
$ au_w$	تنش برشی سطح
$ au_{ij}$	تانسور تنش رينولدز
$arOmega_{ij}$	تانسور نرخ چرخش
arphi	كميت اسكالر
Γ_{arphi}	arphi ضریب انتشار برای کمیت
ω_k	سرعت زاویهای
ω	نرخ اتلاف مخصوص

فصل اول مقدمه

1-1 مقدمه

سرریز یک سازه هیدرولیکی است که در سدهای مخزنی و انحرافی برای آزادسازی آب اضافه یا سیلابی که مخزن به طور ایمن نمیتواند آن را ذخیره کند، ساخته میشود. هنگامی که آب درون مخزن از حد مجاز فراتر رود، آب بر روی تاج سرریز به سمت پایین تند آبراه جریان میگیرد و سرعتهای بالایی در پنجه سرریز تولید میکند. این شرایط ممکن است باعث شستگی خطرناکی در کانال طبیعی پاییندست سرریز شود. در عمل چاره کار استفاده از شکلهای مختلف مکانیسم اتلاف انرژی، مانند: حوضچه آرامش، حوضچه استغراق و غیره میباشد. اگرچه این روشها ثابت کردهاند که راه حل ممکن استفاده از یک سرریز اوجی پلکانی به جای سرریز اوجی صاف میباشد. از سرریز پلکانی انتظار میرود که اتلاف انرژی قابل توجهی در دامنه وسیعی از دبیهای جریان ایجاد کند که

روشهای طراحی کارآمد و ایمن برای سرریزها تنها میتواند از طریق درک کامل پیچیدگیهای جریان به دست آید. در گذشته مهندسان و دانشمند به بررسی جریان از طریق آزمایشهای آزمایشگاهی مدل های سرریز در مقیاس کوچک متوسل شده بودند. این کار با سادهسازی مفروضات جریان بر اساس مفاهیم مکانیک سیالات انجام میگیرد. با ظهور رایانههایی با کارایی بالا و توسعه نرمافزارهای قوی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD¹)، برای پژوهشگران ابزار تجزیهوتحلیل مناسبی فراهم شد. این ابزار محاسباتی قادر به حل پیچیدگیهای جریان میباشد [1]. یکی از این ابزارهای قدر تمند نرمافزار انسیس فلوئنت² میباشد که با استفاده از روش حجم محدود اقدام به حل معادلات حاکم بر جریان مینماید.

¹⁻ Computational Fluid Dynamics

²⁻ANSYS FLUENT



شکل 1-1 : سرریز پلکانی سد خاکی اوپیوها¹[2]

جریان بر روی سرریز پلکانی به شدت آشفته و همراه با هوادهی زیاد میباشد، بنابراین در شبیه سازی این جریان مدل آشفتگی نقش بسزایی در دقت جواب های بدست آمده دارد. به همین دلیل در این تحقیق به بررسی مدل آشفتگی مناسب برای شبیه سازی جریان بر روی سرریز پلکانی می پردازیم تا میزان افت انرژی در این از نوع سرریزها مشخص شود.

2-1 پیشینه تاریخی سرریز و شوتهای پلکانی

شوتهای پلکانی بیش از 3500 سال است که مورد استفاده قرار می گیرند. اگرچه مطالعات اخیر نشان میدهد که قدیمی ترین شوت پلکانی در قرن هفتم ساخته شده بود. در گذشته شوتهای پلکانی برای سه هدف ساخته می شدند؛ 1- سرریزهای پلکانی² 2- آبراهههای پلکانی³ 3- سیستم تأمین آب

۱ - Opuha

²⁻ Stepped Spillway

³⁻ Stepped waterway

شهری. قدیمی *ت*رین شوتهای یلکانی در یونان و در جزیره کرت¹ آن ساخته شده بود. مهارت ساخت شوتهای پلکانی در اطراف دریای مدیترانه به وسیله رومیها، مسلمانان و اسپانیاییها پشت سر هم منتشر شده بود. اگرچه اولین سرریزهای پلکانی از سنگهای تراشیده بنایی و الوار ساخته شدهاند، اما پهنهی وسیعی از مصالح ساختمانی در قرن نوزدهم در ساخت این نوع از سرریزها مرسوم شده بود. در فواصل قرن 16 تا 18 هدف ساخت تعدادي از اين سرريزها براي زيباسازي منطقه مورد نظر بود [3]. در طول قرن نوزدهم، این روش طراحی سرریز در اروپا، شمال آمریکا و استرالیا معمول بود. در پایان قرن نوزدهم، محققان متوجه شدند که تند آبراه پلکانی کمک قابلتوجهی به اتلاف انرژی جریان می کند. نیمه اول قرن بیستم با پیشرفتهای جدید در مشخصههای اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی، تمایل به طراحی حوضچه آرامش با پرش هیدرولیکی موجب شد تا از علاقه به سرریزهای پلکانی کاسته شود. حوضچه آرامش اجازه اتلاف انرژی بیشتر و سازههای کوچکتر را میدهد که باعث می شود هزینه های ساخت ارزان تر شود. از سال 1970، طراحی سرریزهای پلکانی بخاطر پیشرفت مصالح ساختمانی جدید (مانند بتن متراکم غلتکی RCC²، گابیون هایی با پوشش پلیمری)، معرفی تکنیکهای جدید طراحی (به عنوان مثال سیستم های حفاظت از سرریز شدن آب بر روی سد خاکی با RCC و بلوکهای پیش ساخته بتنی که باعث می شوند سرعت ساخت افزایش یابد) و پیشرفت كاربردهاى جديد (به عنوان مثال اكسيژن دهي آبشاري) دوباره مورد توجه قرار گرفتند [4].

3-1 دلایل استفاده از سرریز پلکانی و مشکلات آن

دلایل اصلی استفاده از سرریز پلکانی اتلاف انرژی و هوادهی جریان میباشد. اتلاف انرژی سرریز پلکانی باعث کاهش هزینههای ساخت حوضچه آرامش و هوادهی جریان باعث جلوگیری از خسارتهای کاویتاسیون میشود.

¹⁻ Crete

²⁻ Roller Compacted Concrete

از دیگر فواید این سرریزها، میتوان به هزینه ساخت کم آنها اشاره کرد که به دلیل استفاده از مصالح بتن متراکم غلتکی میباشد. هوادهی جریان در این نوع سرریزها باعث اکسیژن دهی آب میشود تا آبزیان پاییندست سرریز از آب تمیزتری بهره ببرند.



شكل 1-2 : سرريز فرعى سد ملتون²[2]

۱- Spray

۲- Melton

4-1 تاریخچه کارهای انجامشده

1-4-1 مطالعات آزمایشگاهی سرریزهای پلکانی

بسیاری از محققان بر روی تحقیقات آزمایشگاهی مشخصههای جریان بر روی سرریز یا کانال پلکانی متمرکز شدهاند. اولین آزمایشها را اسری و هرنر [6] انجام دادهاند که پیشنهاد دادند جریان بر روی سرریز پلکانی را میتوان به سه رژیم، جریان ریزشی، جریان رویهای و جریان انتقالی تقسیم بندی نمود. مشاهدات آزمایشگاهی سورنسن [7] اکثر رژیمهای جریان بر روی سرریز پلکانی را تأیید کرد. راجاراتنام [8] تنش برشی و اتلاف انرژی را در جریان رویهای تجزیهوتحلیل نمود. در اغلب تحقیقات قبل از سال 1992 میلادی، اثرات هوادهی سطح جریان آزاد (آب خالص) نادیده گرفته شد، تا اینکه اولین دادهها به وسیله روف و فریزل [9] و تحلیل چانسون [10] ارائه شد. در جدول 1-1 جزئیات تحقیقات آزمایشگاهی در زمینه ورود هوا در تند آبراه پلکانی مشخص شده است.

رژیم جریان	ارتفاع پله، <i>h</i> ، بر حسب <i>m</i>	بر حسب، q_w ، بر m^2/s	شیب، α، درجه	مرجع
جریان رویهای	0/053	0/23	52/2	توزى و همكاران (1998)
جریان رویهای	0/313 تا 0/125	0/07 تا 0/07	51/3 و 59	چمنی و راجاراتنام (1999)
جریان رویهای	0/08	0/08 تا 0/08	53/1	ماتوز (2000)
جریان رویهای	0/023 تا 0/023		30 و 50	بوس (2000)
جریان رویهای	0/025	0/01 تا 0/016	55	اوه تسو و همکاران (2000)
جریان انتقالی و روی ^م ای	0/1	0/04 تا 0/04	21/8	چانسون و تومبيز (2000)

[4]	اہ پلکانی	تند آبر	هوا در	ورود	در زمینه	آزمایشگاهی	تحقيقات	جزئيات	1-1	جدول
-----	-----------	---------	--------	------	----------	------------	---------	--------	-----	------

در 10 سال اخیر، مطالعات بر روی سرریز یا کانال پلکانی فعال تر شده است. لی[11] یک مدل فیزیکی و یک مدل ریاضی برای کانال جانبی پلکانی ساخته است. آیو و همکاران[12]، تحقیقات آزمایشگاهی در خصوص ضریب اصطکاک و انرژی مخصوص در شیبهای ملایم 10، 15/7 و 20 درجه برای هر سه رژیم جریان انجام دادهاند.

1-4-2 مطالعات عددی سرریزهای پلکانی

اخیراً تعدادی از محققان شبیهسازی عددی جریان پلکانی را انجام دادهاند. اولین کار عددی در دسترس با استفاده از مدل های آشفتگی توسط چن، دای و همکاران[13-14-15] انجام شده است که مدل آشفتگی ٤-k را برای شبیهسازی جریان آشفته بکار برده است. چنگ، لیو و ژائو[16] کسر حجمی جریان دو فازی آب و هوا بر روی سرریز پلکانی را با استفاده از مدل آشفتگی ٤-k شبیهسازی کردند. در جدول 1-2 تعدادی از مشخصههای تحقیقات عددی بر روی سرریز پلکانی نمایش داده شده است.

مدل آشفتگی	روش سطح آزاد	روش عددی	نرمافزار	شیب، افقی: عمودی	مرجع
k-e	VoF	حجم محدود		1 :0/75	چن و همکاران (2002)
k-e	VoF	حجم محدود		1 :2/5	چنگ و همکاران (2004)
k-ε	شبکهبندی مجدد	اجزاء محدود	آدينا-اف ¹	1 :0/58	تابارا و همکاران (2005)
تنش رينولدز	VoF	اجزاء محدود و حجم محدود	انسیس سی اف ایکس ² 10	1 :0/75	آرانتس (2007)
ت ع یین نشدہ	VoF	حجم محدود و تفاضل محدود		1 :0/8	کارواليو و آمادور (2008)
k-ε RNG	VoF	حجم محدود و تفاضل محدود	فلو تری دی ³	1 :0/75	بمباردلی و همکاران (2011)

جدول 1-2 تعدادی از مشخصههای تحقیقات عددی بر روی سرریز پلکانی [17]

1-ADINA-F 2-ANSYS CFX 3-FLOW-3D

فصل دوم

هیدرولیک جریان بر روی سرریز پلکانی

1-2 رژیم جریان بر روی سرریزهای پلکانی

سه نوع رژیم جریان می تواند بر روی سرریز پلکانی اتفاق بیفتد. جریان ریزشی¹، جریان رویهای² و جریان انتقالی³.

پیرس⁴ و همکاران[18-19] دو نوع جریان ریزشی را مشخص کردهاند : جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل برای دبی تخلیه و عمق جریان کم (شکل2-1) و جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی نسبتاً توسعهیافته (شکل2-2).



شکل 2-1 : جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل [10]

- 3- Transition Flow
- 4- Peyras

¹⁻ Nappe Flow

²⁻ Skimming Flow



شكل 2-2 : جريان ريزشي با پرش هيدروليكي نسبتاً توسعهيافته

در رژیم ریزشی، جریان از روی هر پله به صورت جت ریزشی به پایین برخورد می کند، همراه با اتلاف انرژی که به وسیله فروپاشی جت در هوا، مخلوط شدن جت بر روی پله و تشکیل پرش کاملاً یا نسبتاً توسعهیافته بر روی پله بوجود می آید [8]. این رژیم در دبی های پایین اتفاق می افتد.

در رژیم رویه ای، آب به سمت پایین سطح پلکانی به صورت یک جریان پیوسته جاری و روی پله ها جابجا شده و به وسیله چرخش سیال محبوس شده بین آنها (پله و جریان اصلی) انرژی آن مستهلک می شود (شکل 2-3). این رژیم در دبی های نسبتاً بالا اتفاق می افتد.



شكل 2-3 : جريان رويهاي [10]

در طول پلههای بالادست جریان آرام و بدون هوادهی میباشد. جریان پاییندست را میتوان با هوادهی بالای جریان و گردابه های قوی در پنجه پلهها توصیف کرد. اکثر انرژی توسط انتقال مومنتوم میان جریان اصلی و سیال چرخشی اتلاف میشود[10].

نوع سوم جریان انتقالی است که در آن جریان بین حالت ریزشی و رویهای قرار دارد و درصد قابل توجهی هوا با آب مخلوط شده و حالت ناپایدار دارد. از ویژگیهای بارز این جریان ظهور بینظمی و پاشیدن قوی آب همراه با پرتاب نامنظم قطرات میباشد به طوری که به ارتفاع 3 تا 5 برابر ارتفاع پله میرسند[4]. این رژیم در دبیهای متوسط اتفاق میافتد (شکل 2-4).



شکل 2-4 : پروفیل سطح آزاد طولی در جریان انتقالی



شکل 2-5 : مناطق جریان بر روی یک سرریز بلند [10]

اگر d_c عمق بحرانی و h ارتفاع پله باشد، در این صورت می توان گفت که برای $(0.53 - \frac{d_c}{h})^2 = \frac{d_c}{h}$ جریان رویه می باشد [4]. ریزشی، 97 / 0 $(0.53 - \frac{d_c}{h})^2 = \frac{d_c}{h}$ جریان رویه می باشد [4].

برای سدها و بندهای کوچک الیس¹[20] و پیرس و همکاران[18-19] پیشنهاد دادهاند که اتلاف انرژی میتواند در رژیم جریان ریزشی بیشتر از رژیم جریان رویهای باشد. هر چند وضعیتهای جریان ریزشی نیازمند پلههای نسبتاً بزرگ میباشد. چنین هندسهای اغلب قابل استفاده نمیباشد.

2-2 مشخصههای جریان هوادهی نشده

2-2-1 جريان ريزشى

2-2-1-1 پارامتر های جریان

مور²[21] و رند³[22] یک سازه شیب شکن تک پلهای⁴ را تحلیل کردهاند. چنین سازهای را میتوان به عنوان یک سرریز تک پلهای در نظر گرفت. برای یک پله افقی، در قسمتهایی در نزدیکی انتهای پله که در فاصله کمی از پشت لبه قرار دارند، شرایط جریان از زیربحرانی به بحرانی تغییر میکند. بکارگیری معادله مومنتوم در پایین سرریز نتیجه میدهد[23]:

$$\frac{d_1}{d_c} = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{\sqrt{8}} + \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{h}{d_c}}}$$
(1-2)

که d_1 عمق جریان قبل از پرش در شکل 2-6 و h ارتفاع پله میباشد. هد کلی در قسمت 1، H_1 ، (قبل از پرش در شکل 2-6) را میتوان به صورت بی بعد زیر بیان نمود:

$$\frac{H_1}{d_c} = \frac{d_1}{d_c} + \frac{1}{2} \times \left(\frac{d_c}{d_1}\right)^2 \tag{2-2}$$

عمق جریان و هد کلی در قسمت 2 (بعد از پرش در شکل 2-6) با معادله کلاسیک پرش هیدرولیکی بدست میآید:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \times \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1\right) \tag{3-2}$$

1- Ellis

- 3- Rand
- 4- Single-Step Drop

²⁻ Moore

$$\frac{H_1 - H_2}{d_c} = \frac{(d_2 - d_1)^3}{4 \times d_1 d_2 d_c} \tag{4-2}$$

. $F_1 = q_w/\sqrt{gd_1^3}$. كه F_1 عدد فرود تعريفشده در قسمت 1 مىباشد. F_1

شکل 2-6 : پارمترهای جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل

رند[22] مجموعهای از دادههای آزمایشگاهی را جمعآوری کرده و روابط زیر را بدست آورده است:

 $\frac{d_1}{h} = 0/54 \times (\frac{d_c}{h})^{1/275}$ (5 - 2)

$$\frac{d_2}{h} = 1/66 \times \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0/81}$$
(6 - 2)

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0/66}$$
(7-2)

که d_p ارتفاع آب در آبگیر چرخشی پشت جت ریزشی میباشد.

در طول سرریز پلکانی شرایط جریان بحرانی در نزدیکی انتهای هر پله اتفاق میافتد و معادلات 2-1 تا 2-7 پارامترهای اصلی جریان برای رژیم جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل را تولید میکنند[10]. پیرس و همکاران[18-19] مشخص کردند که این معادلات میتوانند با دقت قابل قبول برای جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی نسبتاً توسعهیافته نیز بکار برده شوند.
2-2-1-2 اتلاف انرژی

در جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً توسعهیافته هد تلفشده در هر پله میانی برابر با ارتفاع H_{max} پله میباشد. هد تلفشده کل در طول سرریز ΔH برابر اختلاف میان ماکزیمم هد در دسترس

و هد باقیمانده در پایین سرریز، H_1 ، میباشد و در فرم بی بعد میتوان به صورت زیر نوشت[10]: $\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \left(\frac{\frac{d_1}{d_c} + \frac{1}{2} \times \left(\frac{d_c}{d_1}\right)^2}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d}}\right)$ (8 - 2)

که H_{dam} ارتفاع سد میباشد و d_1 با معادلات 2-1 یا 2-5 بدست میآید. ماکزیمم هد در دسترس و ارتفاع سد با رابطه $H_{dam} + 1/5 d_c + H_{max}$ با یکدیگر ارتباط دارند. انرژی باقیمانده در پنجه سرریز با پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مستهلک میشود. با ترکیب معادلات 2-5 و 2-8 اتلاف انرژی کل میشود :

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \left(\frac{0/54 \times \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0/275} + \frac{3/43}{2} \times \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0/55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}}\right)$$
(9 - 2)

در شکل 2-7 هد تلفشده به صورت تابعی از عمق جریان بحرانی و تعداد پلهها رسم شده و با دادههای آزمایشگاهی[22-22-24] مقایسه شده است. شکل 2-7 مشخص می کند که بیشتر انرژی جریان، در سرریزهای پلکانی سدهای بزرگ مستهلک می شود. بعلاوه، معادله 2-9 سازگاری مناسبی با دادههای سازه تک پلهای دارد. معادلات 2-8 و 2-9 از جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته بدست می آید. پیرس و همکاران[18-19] آزمایش هایی بر روی جریان های ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً و نسبتاً توسعه یافته انجام دادهاند. میزان اتلاف انرژی جریان های ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً و نسبتاً توسعه یافته انجام دادهاند. میزان اتلاف انرژی جریان های ریزشی با پرش برش هیدرولیکی کاملاً و نسبتاً توسعه یافته انجام دادهاند. میزان اتلاف انرژی جریان های ریزشی با پرش برش هیدرولیکی کاملاً و نسبتاً توسعه یافته انجام دادهاند. میزان اتلاف انرژی حریان های ریزشی با پرش



شکل 2-7 : اتلاف انرژی در جریان ریزشی به عنوان تابعی از تعداد پلهها [10]

2-2-1-3 شرايط رژيم جريان ريزشي

تعدادی از سدهای آفریقای شمالی با سرریز پلکانی ساخته شدهاند. از این تجربیات استیفنسون¹[25] پیشنهاد کرده است که در اکثر موارد شرایط مناسب برای وضعیتهای جریان ریزشی به صورت زیر است:

 $tan\alpha = \frac{h}{l} < 0/20 \tag{10a-2}$

 $\frac{d_c}{h} < \frac{1}{3} \tag{10b-2}$

در شکل 2-8 یک مقایسه میان دادههای سرریز پلکانی با شیب متوسط (استفان فلدر² و هابرت چانسون³ [26]) با دادههای چانسون [27] برای شیبهای تند و همچنین روابط تجربی پیشنهاد شده

1- Stephenson

2- Stefan Felder

³⁻ Hubert Chanson

توسط چانسون [27] صورت پذیرفته است. این شکل نشان میدهد که نتایج شیب متوسط، شیب تند و روابط تجربی تقریباً نزدیک به هم میباشند.



شکل 2-8: شرایط جریان برای تغییر از حالت ریزشی به انتقالی (NA-TRA) و انتقالی به رویهای (TRA-SK) [26]

2-2-2 جريان رويهاى

در رژیم جریان رویهای، بر روی لبههای خارجی پلهها یک کف فرضی که جریان بر روی آن عبور میکند، شکل می گیرد (شکل 2-3). در زیر این کف فرضی، محور افقی گردابه ها توسعه یافته و ناحیه میان جریان اصلی و پله را پر میکنند. این گردابه ها از طریق انتقال تنش برشی از جریان اصلی عبوری بر روی کف فرضی به آنها، ابقاء می شوند. بعلاوه گردابه های کوچکی به طور پیوسته در گوشه پلهها تولید می شوند[10].

2-2-2 شروع جريان رويهاي

شروع جریان رویه ی تابعی از دبی تخلیه (عمق جریان)، ارتفاع و طول پله میباشد. دادههای آزمایشگاهی بدست آمده توسط اسری¹ و هرنر² [6] و پیرس و همکاران [18] نشان میدهند که شرایط شروع جریان را میتوان با معادله زیر تخمین زد:

$$\left(\frac{d_c}{h}\right)_{onset} = 1/01 - 0/37 \times \frac{h}{l}$$
(11-2)
e جریانهای رویه یای برای $\frac{d_c}{h} > \left(\frac{d_c}{h}\right)_{onset}$

به این مورد باید توجه شود که دادههای پیرس و همکاران بر روی یک مدل سرریز پلکانی گابیونی بدست آمده است و تراوش از میان گابیون احتمالاً بر روی شرایط جریان تأثیر میگذارد.

2-2-2-2 شرايط جريان يكنواخت

یک سرریز پلکانی بلند را فرض کنید که قبل از انتهای سرریز شرایط جریان یکنواخت بدست آمده باشد، عمق جریان یکنواخت را میتوان از معادله مومنتوم نتیجه گرفت :

 $au_o imes P_w =
ho_w imes g imes A imes sina$ (12 - 2) $au_o imes P_w =
ho_w imes g imes A$ made a bill e_0 au_o ritim au_o π_o au_w p_w yulo p_w q solutions of p_w p_w q results p_w p_w q results p_w p_w q results p_w q results q results p_w q results q

$$\tau_o = \frac{f}{8} \times \rho_w \times V_o^2 \tag{13-2}$$

که f ضریب دارسی (یا ضریب اصطکاک) و V_o سرعت جریان یکنواخت هوادهی نشده میباشد. برای کانالهای عریض پارامترهای جریان یکنواخت V_o و d_o از طریق معادلات مومنتوم و پیوستگی بدست میآیند و در شکل بی بعد میتوان نوشت :

1- Essery

²⁻ Horner

$$\frac{V_o}{V_c} = \sqrt[3]{\frac{8sin\alpha}{f}}$$
(14 - 2)

$$\frac{d_o}{d_c} = \sqrt[3]{\frac{f}{8sin\alpha}}$$
(15 – 2)

که V_c سرعت بحرانی میباشد. این نکته باید تاکید شود که نتایج بدست آمده از جریان هوادهی نشده میباشد.

موریس¹ [28]و نایت² و همکاران[29] جریان رویهای بر روی المانهایی با زبری بالا در سطح مقطع مستطیلی را تحلیل کردهاند. نتایج آنها نشان میدهد که محاسبه مقاومت جریان به صورت کلاسیک باید با در نظر گرفتن شکل المان زبری اصلاح شود. تنش برشی متوسط τ_0 که در معادله 2-13 استفاده شده است، تنش برشی توربولانسی میان جریان اصلی و سیال چرخشی محبوس شده میان پلهها و سرریز را مشخص میکند.

برای یک سرریز پلکانی، پلهها تشکیل زبری سطح را میدهند[7]. اگر ارتفاع زبری $k_{\rm s}$ از طریق عمق عمود یک پله نسبت به جریان تخمین زده شود (یعنی $k_{\rm s} = hcosa$)، ابعاد پله کاملاً به وسیله $k_{\rm s}$ و شیب سرریز تعریف میشوند. تحلیل ابعادی پیشنهاد میکند که ضریب اصطکاک تابعی از عدد رینولدز، ارتفاع زبری $k_{\rm s}$ و شیب سرریز میباشد.

$$f = f_1\left(Re; \frac{k_s}{D_H}; \alpha\right) \tag{16-2}$$

که Re عدد رینولدز است که به صورت $Re = \rho_w V_o D_H / \mu_w$ تعریف می شود و D_H قطر هیدرولیکی میباشد $(D_H = 4A/P_w)$ و μ_w لزجت دینامیکی آب است. اگر شرایط جریان یکنواخت حاکم باشد، ضریب دارسی را می توان از معادله مومنتوم بدست آورد.

$$f = \frac{8 \times g \times \sin \alpha \times d_o^2}{q_w^2} \times \frac{D_H}{4}$$
(17-2)
 $\sum q_w \, q_w \, c_w \,$

1- Morris

2- Knight

هارتیونگ¹ و اسچورلین² [30] جریان کانال باز بر روی سدهای سنگریزهای با زبری طبیعی بالا و شیبهای تند را مورد مطالعه قراردادند. برای شیبهایی در محدودهی 6 تا 34 درجه و در غیاب هوادهی نتایج آنها نشان میدهد که :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -3/2 \times \log_{10}[(1/7 + 8/1 \times \sin \alpha) \times \frac{k_s}{D_H}]$$
(18 - 2)

برای شیب 30 درجه و f = 1/7 ، معادله 2-18 مقدار f = 1/7 برای ضریب اصطکاک $k_s/D_H = 0/1$ برای ضریب اصطکاک تولید می کند که از لحاظ اندازه شبیه به نتایج بدست آمده بر روی سرریزهای پلکانی می باشد.

2-2-2 اتلاف انرژی

در جریان رویهای اغلب انرژی در ابقاء گردابه بین جریان اصلی و پله اتلاف می شود. اگر شرایط جریان یکنواخت در انتهای پایین دست سرریز حاصل شود، هد تلف شده کل برابر است با :

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \left(\frac{\frac{d_o}{d_c} \times \cos \alpha + \frac{E}{2} \times \left(\frac{d_c}{d_o}\right)^2}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}}\right)$$
(19 - 2)

با استفاده از معادله 2-15 هد ازدسترفته می تواند بر حسب ضریب اصطکاک، شیب سرریز، عمق بحرانی و ارتفاع سد بازنویسی شود.

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \left(\frac{\left(\frac{f}{8\sin\alpha}\right)^{1/3} \times \cos\alpha + \frac{E}{2} \times \left(\frac{f}{8\sin\alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}}\right)$$
(20 - 2)

معادله 20-2 برای شیب 52 = α درجه با هندسهای نزدیک به هندسه استفاده شده توسط سورنسن [7] و دیزکسکن³ [31] و استفاده از دو مقدار 1/3 f = 0/03 و f = 1/3 برای ضریب اصطکاک محاسبه شده است که مقاومت جریان اصلی بر روی سرریزهای صاف و پلکانی را نشان میدهد.

1- Hartung

2- Scheuerlein

³⁻ Diez-Cascon

مقایسه میان اتلاف انرژی بر روی سرریزهای پلکانی و صاف، اتلاف انرژی قابل توجه بر روی سرریزهای پلکانی را نشان میدهد. برای سدهای بلند، انرژی باقیمانده کوچک و معادله 2-20 شبیه به عبارت بدست آمده توسط استیفنسون [25] میباشد:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \left(\left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \times \cos \alpha + \frac{E}{2} \times \left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \right) \times \frac{d_c}{H_{dam}}$$
(21 - 2)

معادله 2-21 نشان میدهد که میزان انرژی ازدسترفته با ارتفاع سد افزایش مییابد. برای سدهای بلند، بهتر است از هد باقیمانده *H_{res} به ج*ای هد تلفشده کل استفاده شود:

$$\frac{H_{res}}{d_c} = \left(\frac{f}{8\sin\alpha}\right)^{1/3} \times \cos\alpha + \frac{E}{2} \times \left(\frac{f}{8\sin\alpha}\right)^{-2/3}$$
(22 - 2)

معادلات 2-20 و 2-22 نشان میدهند که اتلاف انرژی کل بر روی سرریز و انرژی باقیمانده در پایین سرریز تابعی از ضریب اصطکاک، شیب سرریز، دبی تخلیه (یعنی عمق بحرانی) و ارتفاع سد میباشند. این محاسبات به صورت بحرانی وابسته به تخمین ضریب اصطکاک میباشند. پراکندگی زیادی در مقادیر ضریب اصطکاک مشاهده شده در مدل آزمایشگاهی وجود دارد. بعلاوه میتوان نشان داد که ضریب اصطکاک به طور قابلتوجهی تأثیرپذیر از میزان هوادهی میباشد. در نتیجه معادلات 22-22 و 2-22 باید با احتیاط استفاده شوند.

3-2 تأثير هوادهى بر جريانهاى سرريز پلكانى

هوادهی جریان، همچنین خود هوادهی نیز گفته میشود، به دلیل تأثیرات ورود هوا بر روی ضخامت جریان مورد مطالعه قرار گرفته است. ورود هوا باعث افزایش اندازه عمق جریان شده و این عمق به عنوان پارامتر طراحی برای ارتفاع دیوار کناری سرریز استفاده میشود[32]. همچنین، وجود هوا در لایهی مرزی تنشهای برشی میان لایههای جریان را کاهش و ازاینرو نیروی برشی را کاهش میدهد. در اثر تقلیل نیروی درگ اتلاف انرژی کاهش و ازاینرو بازده سرریز کاهش مییابد. بعلاوه وجود هوا درون جریانهایی با سرعت بالا میتواند باعث جلوگیری و یا کاهش خسارت ناشی از کاویتاسیون شود[33]. هوادهی بر روی سرریزها و شوتها برای کمک به انتقال گازهای اتمسفری مانند اکسیژن و هیدروژن در جریان آب و هوا نیز شناخته میشود. این فرآیند برای اکسیژن دهی مجدد رودخانهها و جویبارهای آلودهشده و همچنین برای برطرف کردن تلفات بالای ماهیان در پاییندست سازههای هیدرولیکی میباشد[34]. در جریانهای ریزشی ورود هوا در نزدیکی برخورد جت ریزشی با پله افقی و در پرش هیدرولیکی به وقوع میپیوندد. هوادهی مجدد بالایی نیز در پاییندست محل برخورد جت ریزشی و پاییندست برش اتفاق میافتد. رویهمرفته هوادهی خالص جریان ناچیز است و معتقدیم که از اثر ورود هوا به جریان ریزشی میتوان صرف نظر کرد. در اینجا اثرات ورود هوا در جریان رویهای و انتقالی را بررسی میکنیم. اگرچه شرایط جریان بین سرریز صاف و پلکانی متفاوت است اما مکانیسم ورود هوا در هر دو مشابه هم میباشد[10].

2-3-1 مكانيسم هوادهي

هوادهی به دلیل اثر سرعتهای آشفتگی بر سطح آزاد آب-هوا میباشد. از طریق این سطح مشترک، هوا به طور مستمر محبوس و آزاد میشود. هوادهی زمانی اتفاق میافتد که انرژی جنبشی آشفتگی به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند هم بر کشش سطحی و هم بر اثرات گرانشی غلبه کند. سرعت نرمال آشفتگی در سطح آزاد 'V باید بر فشار کشش سطحی غلبه کرده و بزرگتر از مؤلفه سرعت افزایش حجم حباب باشد. این شرایط عبارتند از [35]:

$$V' > \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_w \times d_{ab}}}$$
(23 - 2)

 $V' > u_r \cos \alpha \tag{24-2}$

.كه σ كشش سطحى، d_{ab} قطر حباب هوا، u $_r$ سرعت افزايش حباب مىباشند

برای اندازه حباب در محدوده 1 تا 100 mm، در محاسبات از معادلات 2-23 و 2-24 استفاده می شود که پیشنهاد داده هوادهی برای سرعتهای آشفتگی بزرگتر از 0/1 تا 3/3 m/s اتفاق می افتد [36]. شرایط جریان بر روی سرریز پلکانی به وسیله درجه بالایی از آشفتگی و برقرار بودن هر دو شرط سرعت توصیف می شود. به عنوان یک نتیجه منطقی مقدار زیادی از هوا در طول سرریز پلکانی وارد جریان می شود.

برای جریان رویهای در سرریز پلکانی، ناحیه ورود هوا بعد از منطقهای است که جریان بر روی سرریز صاف و زلال است. اگرچه نزدیک دیواره، آشفتگی تولید میشود و لایهمرزی تا زمانی که لبه بیرونی لایهمرزی به سطح بیرونی برسد، رشد میکند. زمانی که لبه بیرونی لایهمرزی به سطح بیرونی برسد آشفتگی میتواند به صورت طبیعی شروع به هوادهی سطح آزاد کند. مکان شروع هوادهی به عنوان نقطه شروع گفته میشود. پاییندست نقطه شروع یک لایه شامل مخلوط آب و هوا به تدریج در سراسر سیال امتداد مییابد. در پاییندست جریان که فاصله زیادی با نقطه شروع هوادهی دارد، جریان یکنواخت میشود و برای دبی تخلیه دادهشده، عمق جریان، غلظت هوا و توزیع سرعت در طول شوت تغییر نمیکنند. این ناحیه به عنوان ناحیه جریان متعادل یکنواخت تعریف میشود[10].

2-3-2 تعاريف

غلظت هوای محلی C به عنوان حجمی از هوا در واحد حجم آب و هوا تعریف می شود. مشخصه عمق جریان آب d (عمق خالص) به صورت زیر تعریف می شود :

$$d = \int_0^{Y_{90}} (1 - C) dy \tag{25-2}$$

که y به صورت عمود نسبت به کف فرضی اندازه گیری می شود و Y_{90} عمقی است که غلظت هوای محلی 90% می باشد. میانگین عمق که از غلظت هوای متوسط C_{mean} بدست می آید برابر است با : $d = (1 - C_{mean}) \times Y_{90}$ (26 – 2) سرعت متوسط آب U_w به صورت زیر معرفی می شود:

$$U_w = \frac{q_w}{d} \tag{27-2}$$

2-3-3 نقطه شروع

در سرریزهای صاف موقعیت نقطه شروع اصولاً تابعی از دبی تخلیه و زبری سرریز میباشد. کلر¹ و راستوجی²[37] پیشنهاد کردهاند که : $\frac{L_I}{k_a} = f_2(F_*; \sin \alpha)$ (28a - 2) $\frac{d_I}{k_*} = f_2(F_*; \sin \alpha)$ (28b - 2)که L_I فاصله میان شروع رشد لایهمرزی تا نقطه شروع و d_I عمق در نقطه شروع که عمود بر سطح L_I آزاد جریان اندازه گیری شده است و F_* عدد فرود تعریف شده بر حسب ارتفاع زبری مے باشند. $F_* = q_w / \sqrt{g \times \sin \alpha \times k_s^3}$ برای سرریزهای بتنی صاف وود³ و همکاران[38] از معادله 2-28 معادله زیر را تخمین زدهاند : $\frac{L_I}{k_*} = 13/6 \, (\sin \alpha)^{0/0796} \times F_*^{0/713}$ (29 - 2) $\frac{d_I}{k_c} = \frac{0/223}{(\sin \alpha)^{0/04}} \times F_*^{0/643}$ (30 - 2)در سرریزهای پلکانی، موقعیت نقطه شروع هوادهی تابعی از دبی تخلیه، زبری سرریز، هندسه پله و هندسه سرريز مي باشد. معادله 2-29 موقعيت نقطه شروع را با تقريب 40 درصد بدست مي آورد. اين نتايج نشان ميدهند كه رشد لايهمرزي ميتواند با هندسه يلهها افزايش يابد.

مکان نقطه شروع هوادهی سطح آزاد در جریانهای انتقالی و رویهای در شکل 2-9 ثبت شده L_I است. در این شکل نتایج به صورت $L_I/(h\cos\theta)$ به عنوان تابعی از عدد فرود F_* رسم شده است. L_I فاصله در جهت جریان از انتهای تاج، $h\cos\theta$ ارتفاع گردابه عمود بر جهت جریان، F_* عدد فرود که

- 1- Keller
- 2- Rastogi
- 3- Wood

در رابطه 28-2 استفاده شده است. در شکل 2-9 اطلاعات آزمایشگاهی[26] با دو رابطه تجربی
چانسون[39] (معادله 2-31) و کاروزی¹ و چانسون[40] (معادله 2-32) مقایسه شده است.
$$\frac{L_I}{h \cos \theta} = 9/72 (\sin \theta)^{0/0796} F_*^{0/713}$$

 $\frac{L_I}{h\cos\theta} = 1/05 + 5/11F_* \quad \theta = 21/8^\circ \quad , \qquad 0/45 < \frac{d_c}{h} < 1/6 \tag{32-2}$



شکل 2-9: موقعیت بی بعد نقطه شروع هوادهی سطح آزاد بر روی سرریز پلکانی با شیب متوسط [26]

2-3-4 ناحیه جریان یکنواخت

2-3-1 غلظت هوا

در سرریزهای پلکانی، مقدار زیادی از هوا در طول کانال وارد جریان می شود و مقدار هوادهی معمولاً بر حسب متوسط غلظت هوا تعریف می شود. تحلیل هوادهی جریان، اندازه گیری شده در سرریز پلکانی، نشان می دهد که متوسط غلظت هوا برای شرایط جریان یکنواخت C_e مستقل از هندسه و

شرایط جریان بالا دست میباشد (یعنی دبی تخلیه، عمق جریان و زبری) و تنها تابعی از شیب سرریزمی باشد. برای شیبهای پایینتر از 50 درجه متوسط غلظت هوا را میتوان به صورت زیر تخمین زد:

$$C_e = 0 / 9 \sin \alpha$$
 (3 - 2)
با استفاده از دادههای هارتیونگ و اسچورلین[30] بدست آمده با زبری طبیعی بزرگ و شیبهای
تند، نوس¹[41] مشخص کرد که مقدار هوادهی را میتوان به صورت زیر تخمین زد :
 $C_e = 1/44 \times \sin \alpha - 0/08$ (2 - 2)
این نتیجه مشابه شکل معادله 2-33 میباشد. بر روی سرریزهای پلکانی غلظت هوای یکنواخت
مشابه نتایج بدست آمده از سرریزهای صاف میباشد که متوسط غلظت تنها تابعی از شیب سرریز
میباشد. البته این مقدار برای شرایط جریان یکنواخت میباشد.

برای جریان رویهای پاییندست نقطه شروع هوادهی، هوادهی سطح آزاد سریعی مشاهده می شود. توزیع غلظت هوا در لبه پلهها اندازه گیری شده است. نتایج تجربی[42] در شکل 2-10 ارائه شده و با راه حل تحلیلی معادله انتشار جابجایی حباب هوا مقایسه شده است:

$$C = 1 - tanh^{2} \left(K'' - \frac{\frac{y}{Y_{90}}}{2 \times D_{o}} + \frac{\left(\frac{y}{Y_{90}} - \frac{1}{3}\right)^{3}}{3 \times D_{o}} \right)$$
(35 - 2)

K''، C = 90 ناصله اندازه گیری شده عمود کف فرضی، Y_{90} فاصله مشخصه که در آن % 90 K''، C تابعی از متوسط غلظت هوا C_{mean} است.

$$K'' = K^* + \frac{1}{2 \times D_o} - \frac{8}{81 \times D_o} , K^* = tanh^{-1}\left(\sqrt{0/1}\right) = 0/32745015$$
 (36 - 2)

$$C_{mean} = 0/7622 \times (1/0434 - exp(-3/614 \times D_o))$$
(37 - 2)

1- Knauss



در جریان انتقالی هوادهی سطح آزاد بسیار شدید، برای تمام دبیها یافت می شود. پایین دست نقطه شروع هوادهی، متوسط غلظت هوا به طور معمول در محدوده 0/2 و 0/6، با حداکثر متوسط حجم هوا تا 78 ٪ اندازه گیری شده در لبه یک پله می باشد. عمده توزیع مجدد حجم هوا و سرعت بین لبه پله های پی در پی و مجاور مشاهده شده است [4].

در اكثر لبه پلهها، توزيع غلظت هوا برابر است با:

$$C = K''' \times \left(1 - ex \, p\left(-\lambda \times \frac{y}{Y_{90}}\right)\right) \tag{38-2}$$

$$K''' = \frac{0/9}{1 - \exp(-\lambda)}$$
, $C_{mean} = K''' - \frac{0/9}{\lambda}$, $C_{mean} > 0/45$ (39-2)

که در آن K''' و λ تابعی از C_{mean} می باشند. C_{mean} نیز از رابطه 2-33 و 2-34 بدست می آید. نتایج آزمایشها بر روی جریان انتقالی برای توزیع غلظت هوا و توزیع سرعت در شکل 2-11 نشان داده شده است.



شکل 2-11: نتایج آزمایشها بر روی جریان انتقالی برای هوادهی و توزیع سرعت [4] توزیع طولی متوسط غلظت هوا C_{mean} و عمق بی بعد جریان آب و هوا $\frac{Y_{90}}{d_c}$ برای جریان انتقالی و رویهای به ترتیب در شکلهای 2-12 و 2-13 نشان داده شده است، که در آن محور افقی J / c م نسبت فاصله از تاج سرریز در امتداد جریان به عمق بحرانی است. توجه داشته باشید که تند آبراه نسبتاً کوتاه بوده و شرایط جریان یکنواخت متعادل در انتهای پاییندست بدست نیامده است. در جریان رویهای، هوادهی سریع در نقطه شروع مشاهده می شود، سپس از یک افزایش تدریجی (شکل (شکل وود [43] و گسترشیافته توسط چانسون [10] مقایسه شده است. محاسبات با فرض ضریب اصطکاک f = 0/3

دادههای جریان انتقالی در شکل 2-12 ارائه شده است. توجه داشته باشید میاندامنه افقی و عمودی شکلهای 2-12 و 2-13 تفاوت وجود دارد. در جریان انتقالی هوادهی بسیار بزرگ مشاهده

می شود، که بیشتر از محدوده های مشاهده شده در جریان سرریز صاف می باشد (مانند وود [44]، چانسون [45]).







[4] شکل 2-13 : توزیع طولی متوسط غلظت هوا C_{mean} و عمق بی بعد آب و هوا $rac{Y_{90}}{d_c}$ برای جریان رویه ای

2-4-3-2 ضریب اصطکاک

برای جریان هوادهی شده یکنواخت معادله مومنتوم نتیجه میدهد:

$$f_{e} = \frac{8 g \sin a \, d_{e}^{2}}{q_{w}^{2}} \left(\frac{D_{H}}{4}\right)$$
(40 - 2) (40 - 2) میاند. از و هوای یکنواخت و g_{h} عمق جریان آب در جریان متعادل که f_{e} مریب اصطکاک جریان هوادهی نشده باشد، آنالیز یکنواخت (یعنی معادله 2-26) میباشد. اگر f ضریب اصطکاک جریان هوادهی نشده باشد، آنالیز یکنواخت (یعنی معادله 2-26) میباشد. اگر f ضریب اصطکاک جریان هوادهی نشده باشد، آنالیز $\frac{f_{e}}{f} = f_{A}(C_{e}$; R_{e} ; $\frac{k_{s}}{D_{H}}$ (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 - 2) (41 - 2) (42 - 2) (41 -

آشفته با هوادهی بالا را بوجود میآورد. در این هوادهی، نتایج آنها نشان میدهد که :

- 2- Levin
- 3- Straub
- 4- Anderson
- 5- Colebrook-White

¹⁻ Jevdjevich

$$\frac{f_e}{f} = \frac{1}{\left(1 - 3 / 2\sqrt{f} \log_{10}(1 - C_e)\right)^2}$$
(43 - 2)

که $_{Q}^{O}$ از معادله 2-34 تخمین زده می شود و f ضریب اصطکاک برای جریان هوادهی نشده است، که با استفاده از معادله 2-19 تخمین زده می شود. همچنین نتایج آنها نشان می دهد که کاهشی در نسبت $\frac{f_e}{f}$ با افزایش در غلظت هوا اتفاق می افتد. در جریان های آ شفته کاملاً زبر معادله 2-43 پیشنهاد می کند که نسبت $\frac{f_e}{f}$ با افزایش در غلظت هوا اتفاق می افتد. در جریان های آ شفته کاملاً زبر معادله 2-43 پیشنهاد می کند که نسبت $\frac{f_e}{f}$ با افزایش در غلظت هوا اتفاق می افتد. در جریان های آ شفته کاملاً زبر معادله 2-43 پیشنهاد می کند که نسبت $\frac{f_e}{f}$ با افزایش زبری کاهش می یابد. یک روند کاملاً مشابه در هر دو حالت کانال های به شدت زبر و صاف وجود دارد، یعنی کاهش در نیروی درگ ذاتی هنگامی که غلظت هوا به بیش از می کند که نسبت 10 تا 20 درصد افزایش یابد (یعنی 10 $< \alpha$ درجه). این مورد این باور را به وجود می آورد که مکانیسم های یکسانی از کاهش نیروی درگ در سرریزهای پلکانی نیز اعمال می شود و معادلات 2014 تا 2000 وی می می در بریزهای پلکانی نیز اعمال می شود و معادلات 2000 وی سریزهای پلکانی نیز اعمال می شود و می آورد که مکانیسم های یکسانی از کاهش نیروی درگ در سرریزهای پلکانی نیز اعمال می شود و معادلات 2000 وی سریزهای پلکانی نیز اعمال می شود و معادلات 2000 وی سریزهای پلکانی نیز اعمال می شود و می آورد که در وی سریزهای پلکانی استفاده کرد.

چانسون[48] فرمول زیر را برای نسبت
$$\frac{f_e}{f}$$
 در سرریزهای صاف پیشنهاد داده است:
 $\frac{f_e}{f} = 0 / 5 \left(1 + tanh\left(0 / 628 \times \frac{0 / 514 - C_{mean}}{C_{mean}(1 - C_{mean})}\right)\right) + 1 \right) \frac{1}{2} / 0 = \frac{1}{2}$
(44 - 2)
تحلیل جزئیات غلظت هوا، اندازه گیری شده در جریان رویه ای نشان می دهد ضریب اصطکاک
جریان هوادهی شده با افزایش متوسط غلظت هوا کاهش می یابد. چانسون و تومبیز [49] رابطه زیر را
برای جریان رویه ای پیشنهاد داده اند:

$$\frac{f_e}{f_d} = 0 / 5 \left(1 + tanh \left(0 / 68 \times \frac{0 / 5 - C_{mean}}{C_{mean}(1 - C_{mean})} \right) \right)$$
(45 - 2)

$$\sum_{b=1}^{n} f_d = 0 / 5 \left(1 + tanh \left(0 / 68 \times \frac{0 / 5 - C_{mean}}{C_{mean}(1 - C_{mean})} \right) \right)$$

$$f_d = \frac{8\tau_o}{\rho_w U_w^2} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{K}$$
(46 - 2)

که 1/K نرخ افزایش بی بعد لایه برشی میباشد. در شکل 2-14 معادلات 2-44 و 2-45 با دادههای آزمایشگاهی مقایسه شدهاند.



[4] شکل 2-14 : ضریب اصطکاک نسبی $\frac{f_e}{f}$ به صورت تابعی از غلظت هوای متوسط c_{mean} در سرریزهای صاف

2-3-4-3 پارامترهای جریان یکنواخت بر روی سرریزهای پلکانی

در جریانهای هواده یکنواخت، پارامترهای جریان و اتلاف انرژی را میتوان از هندسه تند آبراه (یعنی شیب، زبری و عرض) و دبی تخلیه نتیجه گرفت. اگر مقدار ضریب اصطکاک برای جریان هوادهی نشده f، در دسترس باشد، از شکل 2-14 میتوان برای تولید ضریب اصطکاک برای جریان هواده f_e استفاده کرد، بطوریکه تابعی از متوسط غلظت هوا C_{mean} باشد. عمق مشخصه d_e را میتوان از معادله 2-40 بدست آورد. برای کانال عریض (یعنی $D_H \sim 4d_e$) نتیجه می شود:

$$d_e = \left(\frac{q_w^2 f_e}{8 g \sin \alpha}\right)^{1/3} \tag{47-2}$$

 Y_{90} آگاهی از متوسط غلظت هوا C_{mean} ، ضریب اصطکاک f_e و عمق جریان d_e مشخصههای عمق Y_{90} را می از می از می از می از مراحی برای را فراهم می کند ($Y_{90} = d_e/1 - C_{mean}$). عمق Y_{90} را می توان به عنوان یک پارامتر طراحی برای ار تفاع دیوارههای اطراف استفاده کرد.

4-4-3-2 اتلاف انرژی

اگر جریان در انتهای پاییندست سرریز یکنواخت باشد، اتلاف انرژی در طول سرریز پلکانی با جریان هوادهی شده، ΔH_e، برابر است با :

$$\frac{\Delta H_e}{H_{max}} = 1 - \left(\frac{\left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{1/3} \times \cos\alpha + \frac{E}{2} \times \left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}}\right)$$
(48 - 2)

معادله 2-48 با معادله 2-20 بدلیل استفاده از ضریب اصطکاک برای جریان هواده متفاوت است. در سرریزهای پلکانی به نظر میرسد هوادهی تأثیرات کمی بر روی اتلاف انرژی داشته باشد. اما مناسب تر است که انرژی باقیمانده را در نظر بگیریم. برای جریان هوادهی شده انرژی باقیمانده در پایین سرریز (H_{res}) برابر است با :

$$\frac{(H_{res})_e}{d_c} = \left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{\frac{1}{3}} \times \cos\alpha + \frac{E}{2} \times \left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{-\frac{2}{3}}$$
(49 - 2)

افزایش نسبی در انرژی باقیمانده ناشی از هوادهی جریان برابر است با :

$$\frac{(H_{res})_e}{H_{res}} = \left(\frac{f_e}{f}\right)^{1/3} \times \left(\frac{1 + 4\frac{E}{f}\tan\left(\frac{f}{f_e}\right)}{1 + 4\frac{E}{f}\tan\alpha}\right)$$
(50 - 2)

که H_{res} از معادله 22-2 به دست میآید و $rac{f_e}{f}$ از معادلات 2-42، 2-43، 2-44 و 2-45 تخمین زده H_{res}

می شود.



شكل 2-15: تأثير غلظت هوا و شيب سرريز بر روى انرژى باقىمانده (معادله 2-46)[10]

هوادهی جریان ضریب اصطکاک را کاهش و انرژی جنبشی جریان را افزایش میدهد. در نتیجه انرژی باقیمانده با هوادهی افزایش مییابد. معادله 2-47 به عنوان یک تابع از متوسط غلظت هوا برای سرریزهای صاف (یعنی 2003 f = 1/3 و سرریزهای پلکانی (یعنی 1/3 f = 1/3) در شکل 2-15 رسم شده اسرریزهای صاف (یعنی 2-15 نشان میده که انرژی باقیمانده تأثیرپذیر از هوادهی جریان برای متوسط غلظت هوای بیش از 40 درصد است[10].



1-3 مقدمه

جریان در کانال باز را می توان با توجه به یارامتر های مختلف به چند دسته طبقه بندی نمود. یکی از این طبقه بندی ها که برای هر هندسهای اتفاق میافتد، جریان آرام، انتقالی و آشفته است. این طبقه بندی بر اساس تأثیر نیروی لزجت و اینرسی است. نسبت نیروهای اینرسی به لزجت عدد رینولدز را تشکیل می دهد. با داشتن مقیاس سرعت مشخصه، U، و مقیاس طول مشخصه، L، برای یک سیستم، عدد رینولدز از رابطه Re = UL/v بدست میآید، که v لزجت سینماتیکی سیال است. جریان آرام زمانی اتفاق میافتد که تأثیر نیروی لزجت بیشتر از نیروی اینرسی باشد. در جریان آرام ذرات سیال بر روی لایههای هموار یا ورقههای نازک حرکت میکنند. در جریان آرام Re < 500 است. در جریان آشفته نیروی اینرسی تأثیر بیشتری نسبت به نیروی لزجت دارد. در جریان آشفته ذرات سیال به سرعت باهم مخلوط می شوند به طوری که در سه جهت با سرعت های نوسانی حرکت می کنند. در جریان آشفته Re > 2000 است. جریان انتقالی یک حالت واسط است که جریان از حالت آرام به آشفته و بالعكس تبديل مي شود. در جريان انتقالي 800 < Re < 800 است. البته اين مقادير عدد رینولدز برای تقسیمبندی جریان آرام، انتقالی و آشفته کاملاً دقیق نبوده و باید اطلاعات دقیقی از هندسه کانال برای تعیین این مقادیر در دسترس باشد. در شکل 3-1 نمودار سرعت به مسیر حرکت در این سه نوع جریان رسم شده است.

در بسیاری از کانالهای طبیعی و مصنوعی مقدار طول مشخصه زیاد بوده و عملاً در این نوع مجراها جریان آرام اتفاق نمیافتد.



شکل 3-1 سرعت وابسته به زمان سیال در یک نقطه[50] گردابه های جریان آشفته باعث نوسانی شدن سرعت حرکت سیال میشوند. برای مدل کردن این نوع جریانها از رویکرد متوسط گیری رینولدز استفاده میشود.

2-3 معادلات حاکم بر جریان

2-3-1 متوسط گیری رینولدز

مفاهیم متوسط گیری توسط رینولدز در سال 1895 میلادی شروع شده است. در حالت کلی متوسط گیری رینولدز شکلهای متنوع را فرض می کند که شامل انتگرال و مجموعیابی می باشد. سه شکل اغلب مناسب برای تحقیقات پیرامون مدل آشفته، متوسط زمانی¹، متوسط فضایی² و متوسط مجموع⁸ می باشند[51].

¹⁻Time Average

²⁻Spatial Average

³⁻Ensemble Average

متوسط زمانی برای آشفتگی ایستا¹ مناسب میباشد، یعنی جریان آشفتهای که در حالت متوسط، با زمان تغییر نمیکند، مانند جریان در داخل یک لوله که با سرعت ثابت در حال حرکت میباشد. برای چنین جریانی، یک متغیر جریان لحظهای به صورت f(x,t) بیان میشود. متوسط زمانی این متغیر، F_T ، به صورت زیر تعریف میشود:

$$F_T(x) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, t) dt$$
(1-3)

برای مثال پروفیل سرعتی که در شکل 3-2 نشان داده شده است، با استفاده از متوسط گیری برای اندازه گیری دقیق یک لایه مرزی مشابه بدست آمده است. کاربرد متوسط گیری رینولدز (هر سه نوع) به صورت ضمنی وابسته به یکنواختی مقادیر متوسط دارد. متوسط زمانی اغلب فرم معمول متوسط گیری رینولدز میباشد، چون اغلب جریانهای آشفته پرکاربرد در مهندسی به صورت ایستا هستند. البته استثناهای مهمی مانند اتمسفر نیز وجود دارند.



شکل 3-2 متوسط زمانی برای آشفتگی ایستا [51]

در اینجا از میان مفاهیم بالا فقط از متوسط زمانی استفاده می شود. در این مورد اشکالی وجود ندارد چون نتایج برای دیگر متوسط گیری های رینولدز معتبر هستند. یک جریان آشفته ایستا را همان طور که در معادله 3-2 اشاره شد، فرض کنید. برای چنین جریانی، سرعت لحظه ای به صورت $u_i(x,t)$ بیان می شود که مجموع جزء متوسط $U_i(x)$ و جزء نوسانی $u'_i(x,t)$ است، به طوریکه:

¹⁻Stationary Turbulence

$$u_i(x,t) = U_i(x) + u'_i(x,t)$$
(4-3)

با توجه به معادله 1-3 ، کمیت $U_i(x)$ متوسط زمانی یا سرعت متوسط میباشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$U_{i}(x) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{t}^{t+T} u_{i}(x, t) dt$$
 (5-3)

متوسط زمانی سرعت متوسط، دوباره مقدار متوسط زمانی یکسانی دارد، یعنی:

$$\overline{U}_{i}(x) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{t}^{t+T} U_{i}(x) dt = U_{i}(x)$$
(6-3)

که علامت خط تیره بالا نشانه متوسط زمانی است. متوسط زمانی برای جزء نوسانی سرعت صفر می اشد. یعنی با استفاده از معادله 3-6 داریم:

$$\overline{u_{i}}'(x,t) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{t}^{t+T} [u_{i}(x,t) - U_{i}(x)] dt = U_{i}(x) - \overline{U}_{i}(x) = 0 \qquad (7-3)$$
c, c - 1 by a solution of the set of the

(RANS) معادله متوسط رينولدز ناوير استوكس (RANS)

برای سادهسازی بیشتر، جریان سیال را با خواص ثابت و تراکم ناپذیر فرض میشود. معادلات ناویر استوکس برابر است با:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{8-3}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j}$$
(9-3)

که بردارهای u_i و u_i بترتیب سرعت و موقعیت، t زمان، P فشار و ρ چگالی میباشند و t_{ij} تانسور تنش لزجت است، که به صورت زیر تعریف میشود: $t_{ij} = 2\mu s_{ij}$ (10 - 3) که μ لزجت مولکولی و s_{ij} تانسور نرخ کرنش:

¹⁻Reynolds Averaged Navier Stokes

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
(11 - 3)

توجه کنید که $s_{ij} = s_{ji}$ ، بنابراین $t_{ij} = t_{ji}$ برای سیالهای لزج میباشد (اما برای تعدادی از مایعات ناهمسان گرد صحیح نمیباشد).

برای سادهسازی بیشتر ترم انتقال را به شکل زیر بازنویسی میکنیم:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) - u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i)$$
(12-3)

در اینجا با توجه به معادله 3-8 (پیوستگی) تابع $u_i \partial u_j / \partial x_j$ برابر صفر میباشد. بنابراین معادلات ناویر استوکس به شکل زیر بازنویسی میشود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{13-3}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij})$$
(14-3)

حال از این معادلات متوسط زمانی می گیریم. بنابراین داریم:

$$\frac{\overline{\partial u_{\iota}}}{\partial x_{\iota}} = \frac{\overline{\partial (U_{\iota} + u_{\iota}')}}{\partial x_{\iota}} = \frac{\partial}{\partial x_{\iota}} (\overline{U_{\iota} + u_{\iota}'}) = \frac{\partial}{\partial x_{\iota}} (\overline{U_{\iota} + u_{\iota}'}) = \frac{\partial}{\partial x_{\iota}} (\overline{U_{\iota} + u_{\iota}'}) = \frac{\partial}{\partial x_{\iota}} (15 - 3)$$

ترم ناپايداري:

$$\overline{\rho \frac{\partial u_{l}}{\partial t}} = \overline{\rho \frac{\partial (U_{l} + u_{l}')}{\partial t}} = \rho \frac{\partial}{\partial t} (\overline{U_{l} + u_{l}'}) = \rho \frac{\partial}{\partial t} (\overline{U_{l}} + \overline{u_{l}'}) = \rho \frac{\partial U_{l}}{\partial t}$$
(16 - 3)

ترم انتقال:

$$\overline{\rho \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i)} = \overline{\rho \frac{\partial}{\partial x_j}[(U_j + u_j')(U_i + u_i')]} = \rho \frac{\partial}{\partial x_j}[(\overline{U_j + u_j'})(\overline{U_i + u_i'})] =$$
$$= \rho \frac{\partial}{\partial x_j}[\overline{U_j U_i} + \overline{U_j u_i'} + \overline{u_j' U_i} + \overline{u_j' u_i'}] = \rho \frac{\partial}{\partial x_j}(U_j U_i + \overline{u_j' u_i'}) \qquad (17 - 3)$$

ترم گرادیان فشار:

$$\frac{\overline{\partial p}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{P + p'}) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{P} + \overline{p'}) = \frac{\partial P}{\partial x_i}$$
(18 - 3)

ترم لزجت:

$$\overline{\frac{\partial}{\partial x_{j}}(2\mu s_{ij})} = \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\overline{\left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right)} \right] = \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial (\overline{U_{i} + u_{i}'})}{\partial x_{j}} + \frac{\partial (\overline{U_{j} + u_{j}'})}{\partial x_{i}} \right] = \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial}{\partial x_{j}} (\overline{U_{i}} + \overline{u_{i}'}) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\overline{U_{j}} + \overline{u_{j}'}) \right] = \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{i}} \right] = \frac{\partial}{\partial x_{j}} (2\mu S_{ij}) \quad (19 - 3)$$

$$= \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial}{\partial x_{j}} (\overline{U_{i}} + \overline{u_{i}'}) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\overline{U_{j}} + \overline{u_{j}'}) \right] = \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{i}} \right] = \frac{\partial}{\partial x_{j}} (2\mu S_{ij}) \quad (19 - 3)$$

$$= c_{ij} \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\frac{\partial}{\partial x_{i}} (\overline{U_{i}} + \overline{u_{i}'}) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\overline{U_{j}} + \overline{u_{j}'}) \right] = \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{i}} \right] = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\frac{\partial}{\partial x_{j}} (2\mu S_{ij}) - \frac{\partial}{\partial x_{i}} (19 - 3) \right]$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{20-3}$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i})$$
(21-3)

در اینجا گذشته از جایگزینی متغیرهای لحظه ای با متغیرهای متوسط، تنها فرق میان متوسط زمانی با معادلات مومنتوم ایستایی عبارت $\overline{u'_{l}u'_{l}}$ میباشد. این عبارت نرخ متوسط زمانی انتقال مومنتوم ناشی از آشفتگی میباشد. این عبارت، پایه و اساس مسائل آشفتگی را تشکیل میدهد. برای محاسبه تمامی خواص متوسط جریان آشفته، نیاز به دستورالعملی برای محاسبه $\overline{u'_{l}u'_{l}}$ می باشد.

معادلات 3-20 و 3-21 به عنوان معادلات متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS) شناخته معادلات 3-00 و $\rho \tau_{ij}$ به عنوان تانسور تنش رینولدز¹ تعریف می شود و در اینجا با علامت $\rho \tau_{ij}$ می شوند. کمیت $\overline{\rho u'_{j} u'_{i}}$ - به عنوان تانسور تنش رینولدز is عریف می شود و در اینجا از علامت (51]: نشان می دهیم، بنابراین τ_{ij} تانسور تنش رینولدز مخصوص می باشد و برابر است با [51]: $\tau_{ij} = -\overline{u'_{j} u'_{i}}$

در دیدگاه متوسط گیری رینولدز در مدل کردن آشفتگی نیاز است که تانسور تنش رینولدز به درستی مدل شود. روش معمول به کارگیری فرضیه بوزینسک با ارتباط دادن تانسور تنش رینولدز با گرادیانهای سرعت متوسط میباشد[52]:

$$\tau_{ij} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$
(23 - 3)
(24 - 3)

¹⁻Reynolds Stress Tensor

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i \neq j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases}$$
(25 - 3)

فایده این دیدگاه هزینه محاسباتی نسبتاً کم در مقایسه با محاسبه لزجت گردابی v_T میباشد. به عنوان مثال در مدل z-k دو معادله انتقال اضافی انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی حل شده و به صورت تابعی از k و z محاسبه میشود. فایده فرضیه بوزینسک در اینجا این است که v_T به صورت کمیت اسکالر ایزوتروپیک فرض میشود، که در واقع درست نمیباشد[52].

3-2-3 معادله تنش رينولدز

در اینجا با ضرب معادله ناویر استوکس در خواص نوسانی و متوسط گیری رینولدز، به معادله دیفرانسیلی بر حسب تانسور تنش رینولدز میرسیم. برای این کار معادله ناویر استوکس را با عملگر زیر نشان می دهیم[51].

$$\mathcal{N}(u_i) = \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} = 0$$
(26-3)

برای بدست آوردن معادله تنش رینولدز، متوسط زمانی زیر را تشکیل میدهیم: $\overline{u_l'\mathcal{N}(u_l) + u_j'\mathcal{N}(u_l)} = 0$ (۲۷ – ۳) بعد از متوسط گیری به معادلهای به فرم زیر میرسیم:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + 2\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + \overline{u_i' u_j' u_k'} \right]$$
(1.1)

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \varepsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ij} \right] \qquad (\Upsilon - \Upsilon)$$

$$\Pi_{ij} = \frac{\overline{p'}}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right), \varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}, C_{ij} = \frac{1}{\rho} \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \qquad (30 - 3)$$

2-3-4 معادله انرژی آشفتگی

اگر سه تنش رینولدز نرمال را باهم جمع کنیم و در 0/5 ضرب کنیم، انرژی جنبشی آشفته تشکیل می شود که با علامت k نشان داده می شود. بنابراین:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$$
(31 - 3)

این متغیر انرژی جنبشی نوسانات آشفتگی در واحد جرم میباشد. برای بدست آوردن معادله انرژی

جنبشی از تریس (مجموع قطر اصلی ماتریس) تانسور تنش رینولدز استفاده میشود. یعنی:
$$au_{ii} = -\overline{u_i'u_i'} = -2k$$

با استفاده از همان روشی که از آن معادله 3-29 حاصل شد، میتوان برای تریس تانسور تنش رینولدز

استفاده نمود. در اینجا از تانسور П_{ij} برای جریان تراکم ناپذیر صرف نظر میکنیم. بنابراین داریم:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} \right]$$
(rr - r)

کمیت ٤ اتلاف در واحد جرم میباشد و به صورت زیر تعریف میشود:

$$\varepsilon = \nu \, \frac{\partial u'_l}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \tag{(r \varepsilon - r)}$$

همچنین تقریب زیر، که از شبیهسازی عددی مستقیم بدست آمده، اعمال میشود:

$$\frac{1}{2}\overline{u_i'u_i'u_j'} + \frac{1}{\rho}\overline{p'u_j'} = -\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}$$
(35 - 3)

در نهایت معادله به صورت زیر فرض می شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$
(36 - 3)
(36 - 3)
برای بستن این معادله عبارت τ_{ij} با تقریب بوزینسک (معادله 3-23) بدست می آید[51].

3-3 مدل های آشفتگی

3-3-1 تاریخچه کوتاهی از نحوهی مدل کردن آشفتگی

¹منشأ معادله ناویر استوکس متوسط زمانی به اواخر قرن نوزدهم برمی گردد زمانی که رینولدز (1895) نتایج تحقیقاتش را بر روی آشفتگی چاپ کرد. کار پیشقدم او ثابت کرد که چنان اهمیت عمیقی برای همه یپیشرفتهای آینده دارد که در اینجا از روش متوسط زمانی استاندارد به عنوان یک نوع از متوسط گیری رینولدز یاد می کنیم.

اولین کارها برای پیشرفت بیان ریاضی تنشهای آشفتگی را باید در پیروی از روش نفوذ گرادیان مولکولی جستجو کرد. در این مورد بوزینسک² (1877) مفاهیمی که به آن لزجت گردابی گفته می شد را نشان داد. همانند رینولدز، بوزینسک نیز در ادبیات آشفتگی معروف شد. تقریب لزجت گردابی بوزینسک به طور وسیعی شناخته شد.

هم رینولدز و هم بوزینسک برای حل معادله ناویر استوکس متوسط رینولدز با روش قانونمند، تلاشهای زیادی کردند. در قرن نوزدهم تقریباً فیزیک جریانهای لزج به صورت یک راز بوده است، و بعلاوه پیشرفت کار منتظر کشف لایهمرزی توسط پرانتل³ در سال 1904 ماند. توجه زیاد به جریانهای آشفته باعث شد پرانتل (1925) طول اختلاط (مقیاسی برای مسیر آزاد اصلی یک گاز) و یک بیان آسان برای محاسبه لزجت گردابی بر حسب طول اختلاط نشان داد. فرضیه طول اختلاط، که به طور دقیقی مرتبط با مفاهیم لزجت گردابی است، حقیقتاً اساس همهی تحقیقات مدل کردن آشفتگی در 20 سال بعد را تشکیل داده بود. مشارکتهای اولیه مهم به طور قابل ملاحظهای توسط ون کارمن⁴ (1930) صورت گرفت. در اصطلاحات علمی جدید، به مدلهایی که بر مبنای فرضیه طول

3-Prandtl

¹⁻Reynolds

²⁻Boussinesq

⁴⁻Von Kármán

اختلاط است به صورت مدل جبری یا مدل آشفتگی صفر معادلهای یاد میکنند. در غالب تعریف، یک مدل n معادلهای مدلی را نشان میدهد که نیازمند حل n معادله انتقال دیفرانسیلی اضافی، علاوه بر آنهایی میباشد که به عنوان بقاء جرم، مومنتوم و انرژی برای جریان متوسط بیان شده است.

برای بهبود توانایی پیشبینی خواص جریانهای آشفته و پیشرفت بیان ریاضی بسیار واقع گرایانه از تنشهای آشفتگی، پرانتل (1945) فرض کرد یک مدل با لزجت گردابی، وابسته به انرژی جنبشی نوسانات آشفتگی، k، میباشد. هدف او یک مدل معادله دیفرانسیل جزئی با تقریب درست معادله k بود. این پیشرفت در یک سطح مفهومی، این حقیقت را در بر می گیرد که تنشهای آشفتگی، و در نتیجه لزجت گردابی، تحت تأثیر مکانی که جریان در آن وجود داشت، یعنی تاریخچه جریان قرار دارند. بنابراین مفهومی که به آن مدل آشفتگی تک معادلهای گفته میشود، متولد شد.

تا زمانی که داشتن یک لزجت گردابی وابسته به تاریخچه جریان، بیشتر مدل واقع گرایانه فیزیکی را فراهم میکند، نیاز به تعیین یک مقیاس طول آشفتگی باقی میماند. یعنی طبق آنالیز ابعادی، لزجت از لحاظ ابعادی سرعت ضربدر طول میباشد. چون مقیاس طول میتواند مشخصهای از اندازه گردابه باشد و چون این مقیاسها برای هر جریان متفاوت میباشند، مدل های آشفتگی که مقیاس طولی را فراهم نمیکنند، ناقص هستند. یعنی برای اینکه سریعتر به جواب برسیم، باید از چیزهایی در مورد جریان مانند شرایط مرزی و اولیه آگاه باشیم. مدل های ناقص بدون شایستگی نمیباشند و در

نوع مطلوب مدل آشفتگی آنهایی هستند که بتوان به جریان آشفته دادهشده با تعیین کردن مرز مناسب و یا شرایط اولیه، اعمال کرد. بطوریکه هیچ اطلاعاتی در خصوص خواص آشفتگی برای بدست آوردن حل مورد نیاز نمیباشد. ما چنین مدلی را به عنوان کامل تعریف میکنیم. توجه کنید که تعریف ما دلالت بر چیزی راجع به دقت یا عمومیت مدل ندارد، تنها میتوان برای محاسبات جریان بدون هیچ شناخت قبلی از جزئیات جریان از آن استفاده کرد. کولموگرو¹ (1942) اولین مدل کامل آشفتگی را بیان کرد، که علاوه بر داشتن معادله k، پارامتر دومی به نام w را بیان کرد، که از آن به عنوان نرخ اتلاف انرژی در واحد حجم و زمان یاد کرد. در این مدل، که به نام مدل w - w معروف است، w نقش یک معادله دیفرانسیل تا حدی شبیه به معادله kرا ایفا میکند. این مدل به صورت مدل آشفتگی دو معادلهای نامگذاری می شود. این مدل برای ربع قرن بدون کاربرد بود، چون رایانه برای حل این معادلات دیفرانسیل غیرخطی در در سترس نبود.

چو² (1945) و روتا³ (1951) مبنایی برای مدل های آشفتگی در نظر گرفتند که استفاده از تقریب بوزینسک را پیشنهاد میکنند. روتا مدل تانسور تنش رینولدز را ارائه کرد. چنین مدلهایی به عنوان مدلهای انتقال تنش توصیف میشوند. اکثر مؤلفین این رویکرد را به عنوان بستن مرتبه دوم یا بستن مومنتوم دوم بیان میکنند.

چنین مدلهایی به صورت خودکار اثرات پیچیدگی مانند تغییرات ناگهانی در نرخ کرنش، منحنی خط جریان، چرخش جسم صلب و نیروهای حجمی را اصلاح میکنند. برای جریان سه بعدی مدل انتقال تنش هفت معادله را نشان میدهد، یکی برای مقیاس آشفتگی (طول یا هم ارز آن) و شش تا برای مؤلفههای تانسور تنش رینولدز میباشد. همانند مدل w - k کولموگرو، مدلهای انتقال تنش، منتظر منابع رایانهای مناسب ماند.

بنابراین در ابتدای سال 1950 چهار طبقه بندی اصلی مدلهای آشفتگی شامل موارد زیر میباشد:

- مدل های جبری (صفر معادلهای)
 - 2. مدلهای تک معادلهای
 - 3. مدلهای دو معادلهای
 - 4. مدلهای انتقال تنش

3-Rotta

¹⁻Kolmogorov

²⁻Chou

با ورود رایانه از سال 1960 پیشرفتهای زیادی برای هر چهار مدل کلاسیک آشفتگی اتفاق افتاد. در لیست زیر تعدادی از پیشرفتهای جدید مهم برای هر چهار مدل فراهم شده است.

3-3-1-1 مدل های جبری

ون درایست¹ (1956) اصلاحیه تعدیل لزجت برای مدل طول اختلاط را اختراع کرد که در حقیقت شامل مدلهای جبری مورد استفاده امروزی نیز میشود. سبسی² و اسمیت³ (1974) مدل لزجت گردابی طول اختلاط را در یک نقطه دوباره تعریف کردند که میتوان آن را با اطمینان زیادی برای اغلب لایههای مرزی استفاده کرد. برای از بین بردن مشکلات تعریف مقیاس طول آشفتگی برای لایه اغلب یادهای مرزی استفاده کرد. برای از بین بردن مشکلات تعریف مقیاس طول آشفتگی برای دورد استفاده امرونی ایک مدل جری میشود. سبسی² و اسمیت³ (۱۹۶۹) مدل لزجت گردابی طول اختلاط را در یک نقطه دوباره تعریف کردند که میتوان آن را با اطمینان زیادی برای اغلب لایههای مرزی استفاده کرد. برای از بین بردن مشکلات تعریف مقیاس طول آشفتگی برای لایه ایک برشی نازک، بلد وین⁴ و لوماکس⁵ (۱۹۶۹) یک مدل جبری متناوب که برای سالهای زیادی مورد استفاده قرار گرفت را پیشنهاد دادند.

3-3-1-2 مدلهای تک معادلهای

از چهار نوع مدل آشفتگی توصیفشده در بالا، مدل تک معادلهای موفقیت و عمومیت کمتری دارد. شاید موفقترین مدل اخیر از این نوع به وسیله برادشو⁶، فریس⁷ و اتول⁸ (1967) فرمول بندی شده است. علاقهمندی جدیدی در مدلهای تک معادلهای بر مبنای معادله منطقی برای لزجت گردابی ایجاد شده است. این کار در ابتدا به واسطه سهولت حل عددی این معادلات نسبت به مدلهای دو معادلهای و مدلهای انتقال تنش مورد توجه قرار گرفت. از مدلهای تک معادلهای اخیر،

- 5-Lomax
- 6-Bradshaw
- 7-Ferriss
- 8-Atwell

¹⁻Van Driest

²⁻Cebeci

³⁻Smith

⁴⁻Bladwin

مدل اسپالارت¹ و آلمارس² به نظر میرسد دقت بیشتری برای موارد کاربردی جریان آشفته مخصوص دارد.

3-3-1-3 مدلهای دو معادلهای

درحالی که مدل w - w کولموگرو اولین نوع از این مدل بود، تا ظهور رایانه مبهم باقی ماند. کار گستردهای بر روی مدلهای دو معادلهای توسط لاندر³ و اسپالدینگ⁴ (1972) صورت گرفت و موفقیتی ادامهدار توسط دانشجوها و همکارانشان بدست آمد. مدل z - s لاندر به عنوان مدل طول اختلاط شناخته میشد و تا دههی آخر قرن بیستم، به طور گستردهای به عنوان مدل دو معادلهای مورد استفاده قرار می گرفت. نارسایی قابل اثبات این مدل، برای جریانهایی با گرادیان فشار معکوس، در ابتدا پهنهی استفاده از آن را کمی کم رنگ کرده بود.

بدون شناخت قبلی از کار کولموگرو، سافمن⁵ (1970) مدل w - k را شبیهسازی کرد که از فواید مدل $k - \epsilon$ ، خصوصاً برای انتگرالگیری از طریق زیر لایه لزج و برای پیشبینی اثرات گرادیان فشار معکوس، بهرهمند شد. برای مثال ویلکاکس⁶ و آلبر⁷ (1972)، سافمن و ویلکاکس (1974)، ویلکاکس و تریسی⁸ (1976)، ویلکاکس (1988 و 1998)، منتر⁹ (1992) و هلستن¹⁰ (2005)، مدلهای k - w

1-Spalart

2-Allmaras

3-Launder

4-Spalding

5-Saffman

6-Wilcox

7-Alber

8-Traci

9-Menter

10-Hellsten

3-3-1-4 مدلهای انتقال تنش

از سال 1970 منابع رایانهای کافی در دسترس باعث پیشرفتهای جدی در این مدل شد. اما به خاطر تعداد زیاد معادلات و پیچیدگیهای موجود در مدلهای انتقال تنش، راهی برای برطرف کردن میزان کاربرد نسبتاً کم در مقایسه با مدلهای جبری و دو معادلهای پیدا نشد.

k-ε مدل 2-3-3

سادهترین مدل های کامل آشفته، مدل های دو معادله ای می باشند که دو معادله انتقال جداگانه را حل می کنند، تا سرعت آشفتگی و مقیاس طولی به صورت مستقل بدست آیند. مدل دو معادله ای که در دههی آخر قرن بیستم بسیار عمومی شده بود، مدل $\varepsilon - k$ بوده است. اولین تلاش ها برای توسعه این مدل توسط چو¹ (1945)، داویدو² (1961) و هارلو³ و ناکایاما⁴ (1968) انجام پذیرفته است. گسترش استفاده از این مدل به وسیله نسخه ارائه شده توسط جونز⁵ و لاندر⁶ (1972) می باشد. لاندر و شارما⁷ (1974) متعاقباً ضرایب مدل بسته را دوباره تنظیم کردند و مدلی به وجود آورده اند که معمولاً به عنوان مدل ε استاندارد به آن اشاره می شود[51]. در اینجا سه نوع استاندارد⁸، RNG⁹ و

هر سه مدل شکلهای مشابهی در معادلات انتقال برای k و z دارند. فرق های اساسی در مدل ها در روش محاسبه لزجت آشفتگی و ترمهای تولید و اتلاف در معادله z میباشد[52].

¹⁻ Chou

²⁻ Davidov

³⁻ Harlow

⁴⁻ Nakayama

⁵⁻ Jones

⁶⁻ Launder

⁷⁻ Sharma

⁸⁻Standard

⁹⁻Renormalization Group

¹⁰⁻Realizable

k-ε مدل *k-2*-3-3 استاندارد

مدل استاندارد زیر به وسیله لاندر و اسپالدینگ تهیه شده است. توانمندی، اقتصادی بودن و دقت معقولانه این مدل برای پهنه وسیعی از جریانهای آشفته، این مدل را در شبیهسازی جریانهای صنعتی و انتقال گرما محبوب کرده است. مدل k- ε استاندارد مدلی نیمه تجربی بر مبنای مدل کردن معادلات انتقال برای انرژی جنبشی (k) و نرخ اتلاف آن (ε) میباشد. معادله انتقال مدل برای k از معادله دقيق حاصل مي شود (به قسمت 3-2-4 مراجعه كنيد)، در حالي كه معادله انتقال مدل براي ع با استفاده از استدلالهای فیزیکی و در نظر گرفتن شباهت اندک آن با همتای دقیقش (بدست آمده از قوانين رياضي)، بدست مي آيد [52]. معادلات این مدل به صورت زیر می باشد. لزجت گردایی $v_T = \frac{C_\mu k^2}{c}$ (37 - 3)انرژی جنبشی آشفتگی $\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_i} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_V} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$ (38 - 3)نرخ اتلاف آشفتگی $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right]$ (39 - 3)ضرایب ار تباطدهنده $C_{\varepsilon 1} = 1/44$, $C_{\varepsilon 2} = 1/92$, $C_{\mu} = 0/09$, $\sigma_k = 1/0$, $\sigma_{\varepsilon} = 1/3$ (40 - 3)این معادلات فقط بر جریان برشی آزاد اعمال می شود. برای جریان های لایه مرزی نزدیک دیوار، برای به حساب آوردن وجود ديوار معادلات نيازمند تغييرات مم باشند [51].
RNG k-ε مدل 2-2-3-3

این مدل از یک تکنیک آماری سخت بدست میآید. شکل این مدل شبیه به مدل استاندارد میباشد، اما در موارد زیر باهم تفاوت دارند:

- مدل RNG یک ترم اضافی در معادله *ε* دارد که باعث افزایش دقت می شود.
 - ثابتهای مدل RNG با مدل استاندارد متفاوت میباشد.
- تأثیر گردابه متحرک در آشفتگی در مدل RNG در نظر گرفته می شود، برای جریانهای چرخشی به دقت کار کمک می کند.
- درحالی که مدل استاندارد برای عدد رینولدز بالا مناسب میباشد، مدل RNG برای اثرات لزجت در عدد رینولدز پایین میباشد[52].

معادلات این مدل به صورت زیر میباشند [51].

لزجت گردابی سینماتیکی
$$u_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon}$$
(41 – 3)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$
(42-3)

نرخ اتلاف آشفتگی

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - R_{\varepsilon}$$
(43 - 3)

ضرایب ارتباطدهنده

$$R_{\varepsilon} = \frac{C_{\mu}\eta^{3}\left(1-\frac{\eta}{\eta_{o}}\right)}{1+\beta\eta^{3}}\frac{\varepsilon^{2}}{k}, \eta \equiv \frac{Sk}{\varepsilon}, \eta_{o} = 4/38, \beta = 0/012, C_{\varepsilon 2} = 1/68$$
(44-3)

$$C_{\varepsilon 1} = 1/42, C_{\mu} = 0/0845, \sigma_k = \sigma_{\varepsilon} = 0/72$$
 (45-3)

3-2-3-3 مدل *k-E* تحقق پذیر

این مدل با مدل استاندارد در دو طریق زیر متفاوت میباشد:

- مدل تحقق پذیر شامل فرمول جدیدی برای لزجت گردابی میباشد.
 - همچنین شامل معادله انتقال جدید برای نرخ اتلاف، ٤، می باشد.

 $v_{T} = \frac{C_{\mu}k^{2}}{\varepsilon}$ (46 - 3) $i_{\xi}(z) = \tau_{ij}\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} = \tau_{ij}\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\left(\nu + \frac{v_{T}}{\sigma_{k}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_{j}}\right]$ (47 - 3) (47 - 3) (47 - 3) (47 - 3) (48 - 3) (48 - 3) (48 - 3) (48 - 3) (49 - 3) $\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_{k}$ $(A_{0} = 4/04 \quad A_{s} = \sqrt{6}\cos \phi \quad \phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W)$ (50 - 3)

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ji}}, S_{ij} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right), C_2 = 1/9, \sigma_k = 1, \sigma_{\varepsilon} = 1/2(51-3)$$

3-3-3 مدل *k-ω* استاندارد

کولموگورو¹ (1942) اولین مدل دو معادلهای آشفتگی را پیشنهاد کرده بود. کولموگورو انرژی جنبشی آشفتگی را به عنوان یک پارامتر آشفتگی انتخاب کرد و، مانند پرانتل (1945)، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار آن را شبیهسازی کرد. پارامتر دوم، اتلاف در واحد انرژی جنبشی، ۵۰، بود.

1- Kolmogorov

در مدل ω -k, ω به عنوان یک معادله دیفرانسیلی شبیه به معادله k رفتار می کند. سافمن¹ (1970) بدون توجه به کارهای کولموگورو یک مدل ω -k را فرمول بندی نمود که استدلال بهتری نسبت به مدل کولموگورو داشت. سپلینگ² مدل بهتری از مدل ω -k پیشنهاد کرد که تعدادی از نقصهای آن برطرف شد. روش زیر برای مدل ω -k، به طور چشمگیری دقت پیش بینی مدل ویلکاکس³ (1988) برای جریانهای برشی و جریانهای جداشده قوی را بهبود بخشیده است. مدل ویلکاکس اصلاحاتی برای اثرات عدد رینولدز پایین، تراکم پذیری و انتشار جریان برشی انجام داد. این مدل یک مدل تجربی بر مبنا معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ اتلاف مخصوص (ω) میباشد.

$$v_T = \frac{k}{\widetilde{\omega}}, \qquad \widetilde{\omega} = \max\left\{\omega, C_{lim}\sqrt{\frac{2S_{ij}S_{ij}}{\beta^*}}\right\}, \quad C_{lim} = \frac{7}{8}$$
(52-3)

انرژی جنبشی آشفتگی

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$
(53-3)

نرخ اتلاف

ضرایب ار تباطدهنده

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^{\mathsf{T}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \qquad (\mathfrak{s} \mathfrak{t} - \mathfrak{T})$$

$$\alpha = 1, \beta = \beta_o f_\beta, \beta^* = \beta_o^* f_{\beta^*}, \sigma_k = \frac{1}{2}, \sigma_\omega = \frac{1}{2}, \beta_o^* = 0 / 09$$
(55-3)

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \chi_k \le 0\\ \frac{1+680\chi_k^2}{1+400\chi_k^2} & \chi_k > 0 \end{cases}, \quad \chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$
(54-3)

$$\beta_o = 0/072, \quad f_\beta = \frac{1+70\chi_\omega}{1+80\chi_\omega}, \quad \chi_\omega \equiv \left|\frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_o^*\omega)^3}\right| \quad , \qquad \omega = \frac{\varepsilon}{k} \tag{55-3}$$

1- Saffman

2- Sapling

3- Wilcox

تانسورهای Ω_{ij} و S_{ij} در متغیر χ_{ω} ، تانسورهای چرخش متوسط و نرخ کرنش متوسط هستند که برابرند با :

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad S_{ij} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$
(°7 – °)

کمیت χ_{ω} را برای سادهسازی میتوان در جریانهای دو بعدی صفر در نظر گرفت. وابستگی β به χ_{ω} ، از کارهای پاپ 1 (1978) الگو گرفته شد که تأثیر موثری بر روی جتهای مدور و شعاعی دارد[51].

²SST *k-w* مدل 4-3-3

مدل انتقال تنش برشی (SST) توسط منتر³ توسعه یافت تا به صورت موثری فرمول دقیق و نیرومند مدل w-k در نزدیکی ناحیه دیوار با جریان آزاد مستقل مدل z-k در میدان دور از دیوار را باهم ترکیب کند. مدل SST آقای منتر ترکیبی از عناصر مطلوب موجود در مدلهای دو معادلهای باهم ترکیب کند. مدل محدودیت در رشد لزجت گردابی در جریانهایی با k-w میباشد. یکی از ویژگی عمده این مدل محدودیت در رشد لزجت گردابی در جریانهایی با تغییر شکل سریع میباشند. مدل انتقال تنش برشی (SST)، لزجت گردابی را اصلاح میکند. این اصلاح، که شبیه به ایده اصلی مدل جانسون -کینگ⁴ است، پیشبینی جریانهایی با گرادیان فشار معکوس قوی و جداشدگی را بهبود میبخشد.

برای مخلوط کردن مدل $\omega - k$ و مدل s - k ، مدل s - k به فرمول w - k تبدیل می شود. تفاوت بین این فرمول و مدل اصلی w - k این است که ترم انتشار عرضی اضافی در معادله w ظاهر می شود و اینکه ثابتهای مدل متفاوت می باشند. برخی از پارامترهای ظاهر شده در مدل w - k با تابع F_1 و برخی از پارامترها ی مدل متفاوت می باشند. برخی از پارامترهای ظاهر شده در مدل w - k با تابع را و برخی از پارامترها ی مدل تبدیل شده s - k با تابع $(F_1 - F_1)$ ضرب می شوند و معادلات متناظر هر یک از مدل ها باهم جمع می شوند. تابع F_1 در منطقه نزدیک به دیوار مقدار واحد (فعالیت مدل اصلی) و دور از دیوار صفر در نظر گرفته شده است.

3- Menter

¹⁻ Pope

²⁻ Shear-Stress Transport

⁴⁻ Johnson-King

همچنین مدل SST تابع لزجت گردابی آشفته را به منظور بهبود پیش بینی جریانهای جداشده
اصلاح میکند[53].

$$v_T = \frac{a_1k}{\max(a_1\omega, SF_2)}$$
 (57 - 3)
 $v_T = \frac{a_1k}{\max(a_1\omega, SF_2)}$ (57 - 3)
 $v_T = \frac{a_1k}{(c_1 + c_1)}$ (57 - 3)
 $v_T = \frac{a_1k}{(c_1 + c_1)}$ (58 - 3)
 $\Phi_2 = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{2(0/09\,\omega y}; \frac{500v}{y^2\omega}\right)$ (58 - 3)
 $\Phi_2 = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{2(0/09\,\omega y}; \frac{500v}{y^2\omega}\right)$ (59 - 3)
 $v_T = \frac{\sqrt{k}}{2(c_1 + c_1)}$ (60 - 3)
 $v_T = \frac{\sqrt{k}}{2(c_1 + c_1)}$ (60 - 3)
 $v_T = \frac{\sqrt{k}}{2(c_1 + c_1)}$ (61 - 3)
 $v_T = \frac{\alpha}{pv_T} G_k$ (62 - 3)
 $G_\omega = \frac{\alpha}{pv_T} G_k$ (63 - 3)

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1)\sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$
(65 - 3)

ترم آخر در معادله (41-3) نشان دهنده ترم انتشار عرضی (D_{ω}) است[52]. تابع F_1 برای ترکیب ضرایب مدل، برای مدل اصلی $\omega - k$ در مناطق لایهمرزی با مدل تبدیل شده k- ε در لایه برشی و مناطق جریان آزاد طراحی شده است. مقدار این تابع در سطوح بدون لغزش واحد و بر روی بخش

بزرگی از لایهمرزی نزدیک به واحد، در لبه لایهمرزی صفر میباشد[53]. تابع کمکی
$$F_1$$
 به صورت زیر
تعریف میشود[12] :
 $F_1 = tanh(arg_1^4)$ (66 – 3)

$$arg_{1} = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0/09\,\omega y};\frac{500\nu}{y^{2}\omega}\right);\frac{4k}{\sigma_{\omega 2}D_{\omega}^{+}y^{2}}\right]$$
(67 - 3)

: که D^+_{ω} قسمت مثبت ترم انتشار عرضی معادله (3-41) میباشد D^+_{ω}

$$D_{\omega}^{+} = \max\left(2\frac{1}{\sigma_{\omega 2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_{j}}\frac{\partial \omega}{\partial x_{j}}; 10^{-10}\right)$$
(68 - 3)

ضرایب مدل σ_k ، γ ، β و σ_{ω} ، با علامت ϕ مشخص می شوند که به وسیله ترکیب ضرایب مدل اصلی σ_k ، γ ، β با مدل κ - ε با علامت ϕ_1 با علامت k- ω

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 , \qquad \phi = \{\sigma_{\omega}, \sigma_k, \gamma, \beta\}$$
(69-3)

$$\sigma_k = \frac{F_1}{\sigma_{k1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{k2}} , \sigma_\omega = \frac{F_1}{\sigma_{\omega 1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{\omega 2}}, \beta = F_1 \beta_1 + (1 - F_1) \beta_2$$
(70 - 3)

$$\alpha_{1} = \frac{\beta_{1}}{\beta^{*}} - \frac{\kappa^{2}}{\sigma_{\omega 1} \sqrt{\beta^{*}}} = 0/553 \quad , \alpha_{2} = \frac{\beta_{2}}{\beta^{*}} - \frac{\kappa^{2}}{\sigma_{\omega 2} \sqrt{\beta^{*}}} = 0/44$$
(71 - 3)

با ضرایب تعریفشده به صورت زیر:

 $eta^* = 0/09$, $\kappa = 0/41$ (72 - 3) $\sigma_{\omega 1} = 1/176$, $\sigma_{\omega 1} = 2$, $\beta_1 = 0/075$ (73 - 3) $\sigma_{\omega 1} = 1/168$, $\beta_2 = 0/0828$ (74 - 3)

4-3 قانون ديوار

قانون دیوار یکی از مشهورترین روابط محاسبه شده از روی آزمایش در جریان های آشفته نزدیک مرزهای صلب میباشد. اندازه گیری ها نشان میدهند که برای هر دو جریان درونی و بیرونی، سرعت جریان در نزدیکی دیوار به صورت لگاریتمی بافاصله از سطح تغییر می کند. این رفتار به عنوان قانون دیوار شناخته می شود.

مشاهدات لایههای مرزی آشفته در عدد رینولدز بالا، تعریف تقریبی کاربردی از استاتیک آشفتگی در نزدیکی سطح را آشکار می سازد. اثرات اینرسی سیال و افت فشار در نزدیک سطح اندک می باشد. در نتیجه استاتیک جریان نزدیک سطح در لایه مرزی آشفته با دو مکانیسم اولیه ساخته می شود. اول سرعت در جایی که مومنتوم به سطح انتقال می یابد، در سطح واحد در زمان واحد، که معادل با تنش برشی محلی τ ، می باشد. دوم نفوذ مولکولی مومنتوم که نقش مهمی در نزدیکی سطح بازی می کند. مشاهدات همچنین نشان می دهد که جزئیات گردابه های دور از سطح اهمیت کمی در استاتیک جریان نزدیک دیوار دارند.

اعتبار این تقریب توصیفشده با کاهش y/δ افزایش می یابد، که δ ضخامت لایهمرزی می باشد. این موضوع درست می باشد زیرا نسبت اندازه گردابه دور از سطح به اندازه گردابه نزدیک به سطح با کاهش y/δ افزایش می یابد.

اگرچه τ در نزدیکی سطح تغییر می کند، اما تغییرات بافاصله از سطح، v، به طور واضح کم می شود. ازاینرو برای آنالیز ابعادی زیر، از تنش برشی سطح π_w ، به جای تنش برشی محلی استفاده شده است. همچنین لزجت سیال را با نماد μ نشان می دهیم. چون رفتار آشفتگی در گاز و مایع یکسان می باشد، عاقلانه است که با τ_w/ρ و لزجت دینامیکی $\nu = \mu/\rho$ به عنوان کمیتهای ابعادی اولیه شروع کنیم، و در نتیجه چگالی سیال از کمیت ابعادی اولیه حذف می شود.

چون بعد کمیت
$$au_w/
ho$$
 زمان 2 l طول 2 میباشد، درحالی که v زمان/ طول 2 میباشد، میتوان یک
مقیاس سرعت، $u_{ au}$ را با تعریف زیر بدست آورد:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{75-3}$$

و $v/u_{ au}$ را به عنوان مقیاس طول در نظر گرفت. کمیت $u_{ au}$ به عنوان سرعت جزئی شناخته می شود، و مقیاس سرعتی است که سرعتهای نزدیک مرز صلب را نشان میدهد. اگر گرادیان سرعت متوسط به صورت $\partial U/\partial y$ فرض شود، با استفاده از آنالیز ابعادی میتوان توابع $v_{ au}$ ، $u_{ au}$ و v را به صورت زیر به هم مرتبط ساخت.

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{u_{\tau}}{y} F(u_{\tau} y / v) \tag{76-3}$$

که به صورت یک تابع کلی فرض شده است. بررسی دادههای آزمایشگاهی برای محدودهی وسیعی از لايههاى مرزى به عنوان يک تقريب خوب نشان مىدهد كه:

$$u_{\tau}y/\nu \to \infty \implies F(u_{\tau}y/\nu) \to \frac{1}{\kappa}$$
 (77-3)

که *ห* ثابت کارمن میباشد. با انتگرالگیری نسبت به *y*، قانون مشهور دیوار بدست میآید:

$$\frac{U}{u_{\tau}} = \frac{1}{\kappa} ln(u_{\tau}y/\nu) + C$$
(78 - 3)

1

که C ثابت انتگرال گیری بی بعد میباشد. اندازه گیری های مرتبط نشان میدهد که 5 pprox 5 برای Cسطوح صاف و $0/41 \approx \kappa \approx 0/41$ برای سطوح صاف و زبر می باشد [51].

آزمایشهای متعدد نشان داده است که منطقه نزدیک به دیوار را می توان اساساً به سه لایه تقسیم کرد. در لایه درونی، به نام زیر لایه لزج، جریان تقریباً آرام است، و لزجت (مولکولی) نقش غالب در حرکت و حرارت و انتقال جرم دارد. در لایه بیرونی، به نام لایه کاملاً آشفته، آشفتگی نقش عمدهای را بازی می کند. در نهایت، منطقه بین زیر لایه لزج و لایه کاملاً آشفته (لایه بافر) وجود دارد که اثرات لزجت مولکولی و آشفتگی اهمیت یکسانی دارند. شکل 2-3 این قسمتها را در منطقه نزدیک به دیوار نشان میدهد، که در محور مختصات نیمه لگاریتمی رسم شده است[52].



شكل 3-3 تقسیم بندی منطقه نزدیک دیوار [52]

گراف موجود در شکل سرعت بی بعد را به صورت u^+ و فاصله بی بعد را به صورت y^+ نشان میدهد و به صورت زیر تعریف می شوند:

$$u^+ \equiv \frac{U}{u_\tau} \quad , \quad y^+ = \frac{u_\tau y}{v} \tag{79-3}$$

پروفیل سرعت با قانون دیوار برای مقادیر y^+ بزرگتر از 30 مطابقت میکند. با افزایش عدد رینولدز، ماکزیمم مقدار y^+ که در آن پروفیل سرعت واقعی با مقدار قانون دیوار مطابقت میکند، افزایش مییابد[12].

5-3 مدل کردن نواحی نزدیک دیوار

به طور کلی دو رویکرد برای مدل کردن نواحی نزدیک دیوار وجود دارند. در رویکرد اول، تأثیرات لزجت در ناحیه زیر لایه لزج در نظر گرفته نمیشود. در عوض، فرمول نیمه تجربی قانون دیوار برای ارتباط اثرات زیر لایه لزج بین دیوار و لایه لگاریتمی استفاده میشود. استفاده از قانون دیوار، نیاز به اصلاح مدلهای آشفتگی برای به حساب آوردن حضور دیوار را مرتفع میسازد. در رویکرد دوم، مدلهای آشفتگی با در نظر گرفتن ناحیه لزج در فرآیند حل اصلاح می شوند، که این کار را با مشهایی در مسیر دیوار با در نظر گرفتن زیر لایه لزج صورت می گیرد. این رویکرد را مدل کردن در نزدیک دیوار می نامند. این دو رویکرد در شکل 3-2 نشان داده شده است.



شكل 3-4 رفتار نزديك ديوار [52]

رویکرد تابع دیوار عمومیت بیشتری دارد، زیرا اقتصادی، نیرومند و دقت معقولانهای دارد[52].

6-3 تابع استاندارد دیوار

تابع استاندارد دیوار بر مبنای کار لاندر و اسپالدینگ میباشد، و اغلب به طور وسیعی در جریانهای صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد.

قانون دیوار برای معادله مومنتوم به صورت زیر میباشد.

 $U^* = \frac{1}{\kappa} ln(Ey^*)$ (80 - 3)

که:

$$U^* \equiv \frac{U_P C_{\mu}^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho}$$
(81 - 3)

سرعت بي بعد ميباشد و:

$$y^* \equiv \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu}$$
(82 - 3)

$$\begin{split} & U_{p} \,, explicit (explice a a constraint of the explicit a constr$$

7-3 روش VOF

روش VOF می تواند دو یا چند سیال مخلوط نشدنی را با حل دستگاه منفرد معادلات حرکت و روش VOF می تواند دو یا چند سیال مخلوط نشدنی را با حل دستگاه منفرد معادلات درون دامنه حل، مدل کند. نمونههای کاربردی آن شامل

پیشبینی فروپاشی جت، حرکت حبابهای بزرگ در یک سیال، حرکت سیال پس از شکست سد، و ردیابی پایدار و یا ناپایدار هر سطح مشترک مایع و گاز میباشد.

فرمول VOF متکی بر این واقعیت است که دو یا چند سیال (یا فاز) در یکدیگر نفوذ نمی کنند. برای هر فاز اضافی که به مدل اضافهشده، یک متغیر به صورت، کسر حجمی فاز در سلولهای محاسباتی معرفی میشود. در هر حجم کنترل، مجموع کسر حجم همگی فازهای واحد است. نواحی برای تمامی متغیرها و خصوصیات به وسیله فازها و نشان دادن مقادیر حجم متوسط تقسیم بندی میشوند، تا زمانی که کسر حجمی هر یک از فازها در هر مکان شناخته شود. بنابراین متغیرها و خصوصیات در هر سلول دادهشده یا کاملاً بیانگر یکی از فازها است، و یا بیانگر ترکیبی از فازها، بسته به مقدار کسر حجمی می باشد. به عبارت دیگر، اگر کسر حجمی سیال q^{th} در سلول به صورت α_q مشخص شود، بنابراین شرایط زیر امکان پذیر می باشند:

- $\left(\, q^{th} \,$ سلول خالی است (از سیال $lpha_q = 0$
 - $\left(\, q^{th} \,$ سلول پر است (از سیال $lpha_q = 1$ •
- $0 < lpha_q < 1$ سلول شامل سطح مشترکی از سیال q^{th} و یک یا چند سیال دیگر میباشد.

بر اساس مقادیر محلی α_q ، خصوصیات و متغیرهای مناسب به هر حجم کنترل درون دامنه حل اختصاص داده می شود.

ردیابی سطح مشترک بین فازها به وسیله حل معادله پیوستگی برای کسر حجمی یک (یا چند) فاز انجام میشود. برای فاز *qth*، این معادله به صورت زیر است:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right]$$
(87 - 3)

که در آن m_{qp} انتقال جرم از فاز q به فاز p_q و m_{pq} انتقال جرم از فاز p به فاز q است. به طور پیشفرض، عبارت منبع در سمت راست معادله 1-4، S_{α_q} ، صفر است، اما میتوان یک منبع جرم ثابت یا تعریفشده برای هر فاز تعیین کرد.

معادله کسر حجمی برای فاز اولیه حل نخواهد شد، کسر حجمی فاز اولیه بر اساس محدودیت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\sum_{q=1}^{n} \alpha_q = 1 \tag{88-3}$$

معادله کسر حجمی ممکن است از طریق گسسته سازی زمان بر اساس طرح ضمنی و یا صریح حل شود.

طرح ضمنى

$$\frac{\alpha_q^{n+1}\rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V \quad (89-3)$$

$$d_{\ell,\tau} = 0$$

$$\frac{\alpha_q^{n+1}\rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^n U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V$$
(90-3)

که در آن n + 1 شاخص گام زمانی جدید (فعلی)، n شاخص گام زمانی قبلی، $\alpha_{q,f}^n$ مقدار سطحی کسر حجمی، N حجم سلول و U_f حجم شار عبوری از سطح بر اساس سرعت نرمال، میباشند. خواص ظاهرشده در معادلات انتقال با حضور مؤلفه فازها در هر حجم کنترل تعیین میشود. به عنوان مثال، در یک سیستم دو فازی، اگر فازها با اندیس 1 و 2 نشان داده شوند، و درصورتی که کسری مثال، در یک سیستم دو فازی، اگر فازها با اندیس 1 و 2 نشان داده شوند، و درصورتی که کسری مثال، در یک سیستم دو فازی، اگر فازها با اندیس 1 و 2 نشان داده شوند، و درصورتی که کسری حجمی هر فاز دوم مشخص شود، چگالی در هر سلول توسط فرمول زیر بدست میآید: $\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1$ به طور کلی، برای یک سیستم n فازی، چگالی متوسط کسری حجمی به صورت زیر محاسبه میشود:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \tag{92-4}$$

بقيه خصوصيات (مانند لزجت) نيز با همين روش بدست ميآيند.

معادله حرکت منفرد در سراسر دامنه حل شده، و در نتیجه میدان سرعت میان فازها تقسیمبندی میادله حرکت، وابسته به کسر حجمی تمامی فازها از طریق خواص ho و μ میباشد. یکی از

محدودیتهای این تقریب در مواردی است که تفاوت زیادی بین سرعت فازها وجود داشته باشد و میتواند دقت سرعتهای محاسبه شده در نزدیکی سطح مشترک را تحت تأثیر قرار دهد [52].

فصل چهارم شبیهسازی عددی

1-4 مقدمه

در این فصل در ابتدا دینامیک سیالات محاسباتی تعریفشده و به اهمیت آن در علم سیالات اشاره میشود. در علم سیالات سه روش آزمایشگاهی، تئوری و عددی برای مطالعه جریان وجود دارد. یک تحقیق آزمایشگاهی گران، کند و تنها برای یک هدف میباشد درحالیکه یک تحقیق عددی ارزانتر و سریعتر بوده و میتوان برای اهداف مختلفی از آن استفاده نمود. در یک تحقیق عددی برای اطمینان از نتایج آن نیازمند دادههای آزمایشگاهی میباشیم. به همین منظور مدل آزمایشگاهی مورد نظر شرح داده میشود و در ادامه به بررسی نرمافزار انسیس فلوئنت و بیان هندسه مدل و نحوه شبکهبندی آن پرداخته میشود. سپس تنظیمات حل در نرمافزار انسیس فلوئنت مانند تعیین پایداری و ناپایداری، مدل چند فازی، مدل آشفتگی، اعمال شرایط مرزی و روشهای گسسته سازی معادلات بیان میشود.

(CFD) دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

از لحاظ فیزیکی، جریان سیالات از سه اصل اساسی زیر تبعیت میکند:

(1) بقای جرم

(قانون دوم نيوتن) F = MA (2)

(3) بقای انرژی

این اصول بنیادی را میتوان بر حسب معادلات ریاضی بیان کرد، که در کلیترین شکل خود معمولاً به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی میباشند. دینامیک سیالات محاسباتی تا اندازهای هنر جایگزینی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان سیال با اعداد میباشد، و پیشبرد این اعداد در فضا و یا زمان برای به دست آوردن شرح عددی نهایی میدان کلی جریان میباشد. این یک تعریف فراگیر از CFD نیست؛ برخی مسائل وجود دارند که اجازه حل فوری میدان جریان بدون پیشبرد در زمان یا مکان را میدهند، و برخی موارد کاربردی وجود دارند که شامل معادلات انتگرالی به جای معادلات دیفرانسیل جزئی میباشند. درهرصورت، در تمامی این نوع مسائل محاسبات عددی و راهحلهای عددی در آنها دخیل میباشند. محصول نهایی CFD در واقع یک مجموعه از اعداد، در مقابل شکل بسته حل تحلیلی میباشد.

دستگاهی که اجازه رشد عملی CFD را داده است رایانه دیجیتالی با سرعت بالا میباشد. راهحلهای CFD به طور کلی نیاز به هزاران یا حتی میلیونها محاسبات تکراری اعداد دارند، این امر مهم برای انسان بدون کمک رایانه غیرممکن میباشد. بنابراین، پیشرفت در CFD و کاربرد آن در بسیاری از مسائلی که جزئیات فراوان و پیچیده دارند، رابطه بسیار نزدیکی با پیشرفت در سختافزار رایانهای، به ویژه در رابطه با ذخیرهسازی و سرعت اجرا دارد[54].

از فواید CFD می توان به چند مورد زیر اشاره کرد:

- هزینه نسبتاً کم: استفاده از آزمایشهای فیزیکی برای بدست آوردن اطلاعات ضروری مهندسی برای طراحی، پر هزینه میباشند، درحالی که مدلهای عددی به مراتب کم هزینه تر از مدل فیزیکی بوده و هزینه های آن مربوط به تهیه رایانه ای باقدرت بالا میباشد.
- سرعت بالا: شبیهسازی عددی را میتوان در یک بازه زمانی کوتاه انجام داد، ولی مدل
 آزمایشگاهی زمان زیادی برای ساخت آن نیاز میباشد.
- توانایی در شبیه سازی اکثر شرایط: بعضی از جریان ها در طبیعت وجود دارند که مدل
 کردن آنها به سادگی امکان پذیر نمی باشد، مانند جریان مافوق صوت، در شبیه سازی عددی
 این نوع جریان ها را می توان با استفاده از قواعد تئوری شبیه سازی کرد.
- اطلاعات جامع: در یک تحقیق آزمایشگاهی فقط چند مشخصه جریان آن هم در نقاطی معدود را می توان مشخص نمود، در حالی که در شبیه سازی عددی می توان اکثر مشخصه های جریان، نیروها، تنش ها و دیگر پارامترها را در نقاط زیادی از دامنه حل تعیین نمود.

3-4 شرح مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد بررسی مدل هیدرولیکی سرریز پلکانی سد سیاهبیشه بالا میباشد، که در موسسه تحقیقات آب اجرا شده است. این مدل با مقیاس 1:15 در آزمایشگاه ساخته شده است. سرریز سد سیاهبیشه بالا شامل دو قسمت است. قسمت اول شامل کانال ورودی، سرریز اوجی، تنداب پلکانی و حوضچه آرامش است. قسمت اول و دوم توسط یک کانال رابط مارپیچ با مقطع ذوزنقهای به عرض کف 20 متر و شیب دیواره 1:2به همدیگر متصل میشوند. قسمت دوم شامل چهار بخش: 1- تند آب پلکانی اول 2- حوضچه آرامش 3- تند آب پلکانی دوم (منتهی به رودخانه) و 4- حوضچه آرامش میباشد. در اینجا تند آب پلکانی اول در قسمت دوم، بررسی میشود. این تند آب شامل 52 پله به طول 2/2 متر است. پله اول 25/0 متر، پله دوم 70/0 متر و پلههای باقیمانده دارای ارتفاع 1 متر میباشند. عرض تند آب نیز 20 متر، طول افقی 129/96 و طول شیبدار 139/61 متر است.

در شکل 4-1 هندسه حوضچه آرامش مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به مستغرق شدن پرش هیدرولیکی، در صورت مدل کردن حوضچه آرامش زمان زیادی برای همگرایی مدل نیاز است، بنابراین در مدل عددی از مدل کردن پرش صرف نظر میشود و حوضچه آرامش حذف میشود. هندسه مدل عددی در شکل 4-2 نشان داده شده است.



شکل 4-1 هندسه مدل آزمایشگاهی



شكل 4-2 هندسه مدل عددى

4-4 آشنایی با نرمافزار انسیس فلوئنت

انسیس فلوئنت برنامه رایانهای با جدیدترین تکنولوژی برای شبیهسازی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی در هندسههای پیچیده میباشد. این نرمافزار در زبان برنامهنویسی C نوشتهشده و با استفاده کامل از انعطاف پذیری و قدرت ارائهشده توسط زبان C ساخته شده است. انسیس فلوئنت مسائل جریان را از طریق روش حجم محدود و با استفاده از شبکههای بدون ساختار حل مینماید. انواع مشهای پشتیبانی شده عبارتند از دو بعدی (مثلثی¹ و چهارضلعی²)، سه بعدی (چهاروجهی³، شش گوشه⁴، هرمی⁵، گوهای⁶، چندوجهی⁷) و مش مختلط (ترکیبی⁸) میباشد. انسیس فلوئنت همچنین، اجازه اصلاح و یا زمخت کردن مش بر اساس حل جریان را میدهد [52].

- 2- Quadrilateral
- 3- Tetrahedral
- 4- Hexahedral
- 5- Pyramid
- 6- Wedge
- 7- Polyhedral
- 8- Hybrid

¹⁻ Triangular

این نرمافزار قابلیت ساخت هندسه و مش بندی آن را ندارد و باید از یک نرمافزار جانبی استفاده نمود. پس از آنکه مش توسط نرمافزار خوانده شد، عملیاتی مانند تعیین شرایط مرزی، تعریف خواص سیال، اجرای حل، پالایش مش، پس پردازش و مشاهده نتایج در انسیس فلوئنت صورت می گیرد.

برای حل یک مسئله در انسیس فلوئنت باید مراحل زیر انجام شود:

- تعريف اهداف شبيهسازى
- 2. ایجاد هندسه مدل و شبکهبندی آن
- 3. تنظیم حل کنندهها، مدلهای فیزیکی، شرایط مرزی، شرایط اولیه و ...
 - 4. اجرا و نظارت بر حل
 - 5. بررسی و ذخیره کردن نتایج

5-4 هندسه مدل عددی و شبکهبندی آن

نرمافزار انسیس فلوئنت قادر به ساخت هندسه و شبکهبندی آن نمیباشد و برای این کار باید از یک نرمافزار جانبی استفاده نمود. در این تحقیق از نرمافزار گمبیت برای ساخت هندسه و شبکهبندی آن استفاده شده است. در این مرحله شبکهبندی انجامشده کمی درشت بوده و توسط نرمافزار انسیس فلوئنت شبکهها در محدوده حساستر، ریز میشوند. شکل شبکهبندی در نرمافزار گمبیت در شکل



شکل 4-3 شبکهبندی در نرمافزار گمبیت

با استفاده از قابلیتهای نرمافزار انسیس فلوئنت شبکهبندی در نواحی نزدیک به پلهها ریزتر میشوند تا دقت محاسبات افزایش یابد. شکل شبکهبندی در انسیس فلوئنت به صورت شکل 4-4 تغییر مییابد.



شکل 4-4 تغییرات شبکهبندی در نرمافزار انسیس فلوئنت

شبکهها به صورت مربع و مستطیلی و چهارضلعی غیر منتظم میباشند. اندازه بزرگترین شبکه در گمبیت 0/5 متر و کوچکترین آن 0/25 میباشد. همان طور که قبلاً گفته شد در انسیس فلوئنت دوباره این شبکهبندی تغییر میکند و در مناطق حساس شبکهها ریزتر میشوند. در شکل 4-5 حالت کلی شبکهبندی مدل نشان داده شده است.



شكل 4-5 شكل كلى شبكەبندى مدل

بعد از شبکهبندی نوبت به اعمال نوع محدوده حل (جامد یا سیال) و شرایط مرزی میباشد. در این تحقیق شرایط مرزی در نرمافزار گمبیت به صورت شکل 4-6 میباشد. البته در انسیس فلوئنت میتوان نوع شرایط مرزی را تغییر داد. ورودی به صورت دو مرز مجزا یکی برای ورود آب و دیگری برای ورود هوا از نوع ورودی سرعت¹، کف کانال به صورت دیوار²، سطح بالایی کف کانال به صورت ورودی فشار³ و خروجی به صورت خروجی فشار⁴ تعریف شده است.

2- Wall

¹⁻ Velocity Inlet

³⁻ Pressure Inlet

⁴⁻ Pressure Outlet



شكل 4-6 شرايط مرزى محدوده حل

6-4 تنظيمات حل

در ابتدا کیفیت مش مورد نظر بررسی می شود. در صورتی که مینیمم حجم مش منفی باشد، باید اصلاح شود. حجم منفی بدین معنی می باشد که یک یا چند سلول به صورت نامناسب به یکدیگر متصل شدهاند. حل بر اساس فشار و به صورت وابسته به زمان تنظیم و نیروی ثقلی 9/806 وارد می شود.

4-6-1 مدل چند فازی و آشفتگی

در ادامه مدل چند فازی و مدل آشفتگی انتخاب می شود. در این نرمافزار چند مدل برای شبیه سازی سطح جریان چند فازی وجود دارد که مدل VOF با تعداد فاز 2 انتخاب شده و از طرح ضمنی برای حل معادلات استفاده می شود. برای مدل آشفتگی، در حالت دو بعدی 8 گزینه وجود دارد. در این تحقیق مدل های k - k (سه مدل) و w - k (دو مدل) بررسی می شود. در شکل های 4- 7 و 4-8 تنظیمات مربوط به مدل چند فازی و آشفتگی نشان داده شده است.

Multiphase Model	×
Model Off Volume of Fluid Mixture Eulerian Wet Steam Volume Fraction Parameters Scheme Explicit Open Channel Flow Open Channel Flow Open Channel Wave BC Body Force Formulation Implicit Body Force	Number of Eulerian Phases
OK Canc	

شکل 4-7 تنظیمات مدل چند فازی

Viscous Model	×
Model Inviscid Laminar Spalart-Allmaras (1 eqn) k-epsilon (2 eqn) k-omega (2 eqn) Transition k-kl-omega (3 eqn) Transition SST (4 eqn) Reynolds Stress (5 eqn) k-omega Model Standard SST k-omega Options Low-Re Corrections	Model Constants Alpha*_inf 1 Alpha_inf 0.52 Beta*_inf 0.09 Zeta* 1.5 User-Defined Functions Turbulent Viscosity none
ОК	Cancel Help

شکل 4-8 تنظیمات مدل آشفتگی

2-6-4 شرايط مرزى

بعد از تعیین مدل چند فازی و آشفتگی، شرایط مرزی تنظیم می شود. شرایط مرزی که در گمبیت انتخاب شد، در انسیس فلوئنت نیز اعمال می شود.

1-2-6-4 شرایط مرزی سرعت ورودی

در پنجره شرایط مرزی سرعت همان طور که در شکل 4-9 نشان داده شده است، سرعت ورودی آب و مشخصههای آشفتگی به صورت شدت تلاطم و قطر هیدرولیکی به عنوان شرایط ورودی در فاز مختلط نیاز است. سرعت ورودی آب برای دبی در واحد عرض m^2/s 4/6 با ارتفاع 1/48 متر است، مختلط نیاز است. سرعت ورودی آب 1/48 در نظر گرفته شده است. هنگامی که پیش از این در نرمافزار گمبیت ارتفاع مرز ورودی آب 1/48 در نظر گرفته شده است. هنگامی که جریان وارد دامنه ورودی و خروجی می شود، انسیس فلوئنت نیاز به مشخصههایی که آشفتگی را منتقل میکنند، دارد. چند روش برای انجام این کار وجود دارد که در اینجا از شدت تلاطم و قطر هیدرولیکی استفاده شده است. هنگامی که منتقل میکنند، دارد. چند روش برای انجام این کار وجود دارد که در اینجا از شدت تلاطم و قطر هیدرولیکی استفاده شده است.

بعد تنظیم فاز مختلط، کسر حجمی فاز یک و فاز دو تعیین می شود. در انسیس فلوئنت فقط می توان کسر حجمی فاز دوم را تغییر داد، بدین تر تیب که اگر در قسمت کسر حجمی فاز دو، مقدار صفر وارد شود، به این معنا می باشد که در این ناحیه فاز دوم وجود ندارد و فقط فاز یک موجود است، و اگر مقدار یک وارد شود یعنی کل این ناحیه شامل فاز دوم می باشد. بنابراین چون آب به عنوان فاز دوم در نظر گرفته شده، برای ورودی آب کسر حجمی یک و برای ورودی هوا کسر حجمی صفر وارد می شود. در شکل 4-10 تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی برای فاز دوم نشان داده شده است.

one Name		Phase
waterinlet		mixture
Momentum Thermal Radia	tion Species DPM Mu	tiphase UDS
Velocity Specification Method	Magnitude, Normal to Bound	dary 👻
Reference Frame	Absolute	•
Velocity Magnitude (m/s)	2.71	constant 👻
Turbulence		
Specification Method	ntensity and Hydraulic Diame	eter 👻
	Turbulent Intensity	(%) 2.4
	Hydraulic Diameter	(m) 5
	OK Cancel He	

شكل 4-9 تنظيمات شرايط مرزى سرعت ورودى براى فاز مختلط

Q Velocity Inlet	×
Zone Name	Phase
waterinlet	phase-2
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Volume Fraction 1 constant	UDS
OK Cancel Help	

شکل 4-10 تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی برای فاز دوم

2-2-6-4 شرایط مرزی فشار ورودی و فشار خروجی

شرایط مرزی فشار خروجی و ورودی باهم یکسان میباشند. در اینجا باید مقدار فشار در مرز وارد شود. برای مرز خروجی و مرز بالایی مقدار فشار صفر وارد شده است. مشخصه آشفتگی مانند مرز سرعت ورودی تعیین میشود. کسر حجمی نیز در مرز خروجی و در مرز بالایی صفر وارد شده است. در شکل 4-11 پنجره شرایط مرزی فشار خروجی نشان داده شده است.

Pressure Outlet	×
Zone Name	Phase
outlet	mixture
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase	UDS
Gauge Pressure (pascal)	constant 💌
Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary	
Turbulence	
Specification Method Intensity and Hydraulic Dian	neter 👻
Backflow Turbulent Intensity	/ (%) 2.4
Backflow Hydraulic Diamete	er (m) 5
OK Cancel Help	

شكل 4-11 تنظيمات شرايط مرزى فشار خروجي

4-6-2-3 شرايط مرزى ديوار

مرز دیوار (کف کانال و تند آبراه) به صورت ثابت و بدون لغزش تنظیم میشود. در قسمت ارتفاع زبری مقدار 1 میلیمتر وارد میشود. در شکل 4-12 تنظیمات مربوط به این مرز نشان داده شده است.

	Phase
vall	mixture
ijacent Cell Zone	
nterior	
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiph	ase UDS
Nall Motion Motion	
Stationary Wall Relative to Adjacent Cell Zone	
Moving Wall	
Shear Condition	
No Slip	
Specified Shear	
Marangoni Stress	
Vall Roughness	
Nall Roughness Roughness Height (m) 0.001 constant	•
Nall Roughness Roughness Height (m) 0.001 Constant	•
Wall Roughness Roughness Height (m) 0.001 Constant Roughness Constant 0.5	• •

شكل 4-12 تنظيمات شرايط مرزى ديوار

3-6-4 روش های حل و گسسته سازی معادلات

1-3-6-4 روشهای حل عددی

انسیس فلوئنت اجازه انتخاب یکی از دو روش عددی زیر را برای حل مسئله میدهد:

- حل کنندہ مبتنی بر فشار
- حل کننده مبتنی بر چگالی

در گذشته رویکرد مبتنی بر فشار برای جریان تراکم ناپذیر با سرعت کم توسعه یافته بود، درحالیکه رویکرد مبتنی بر چگالی عمدتاً برای جریان تراکم پذیر با سرعت بالا مورد استفاده قرار می گرفت. بااین حال، به تازگی هر دو روش توسعه یافته و دوباره برای حل مسئله فرمول بندی شده و برای طیف گستردهای از شرایط جریان اعمال می شود.

در هر دو روش میدان سرعت از معادلات حرکت به دست میآید. در رویکرد مبتنی بر چگالی، معادله پیوستگی برای به دست آوردن میدان چگالی مورد استفاده قرار گیرد درحالیکه میدان فشار از معادله حالت محاسبه میشود. در رویکرد مبتنی بر فشار، میدان فشار با حل معادله فشار یا فشار اصلاحشده استخراج میشود که با دستکاری معادلات پیوستگی و حرکت به دست میآید. در هر دو مورد روش مبتنی بر حجم کنترل استفاده میشود، که شامل موارد زیر میباشند:

- ✓ بخش دامنه به حجم کنترلهای گسسته با استفاده از یک شبکه محاسباتی تقسیم می شود.
 ✓ انتگرالگیری از معادلات حاکم بر حجم کنترل منفرد برای ساخت معادلات جبری برای
 ✓ گسسته سازی متغیرهای وابسته (مجهولات) مانند سرعت، فشار، درجه حرارت و غیره می باشد.
- ✓ خطی سازی معادلات گسسته و حل سیستم معادله خطی حاصل برای بدست آوردن مقادیر
 جدید متغیرهای وابسته میباشد.

دو روش عددی مذکور یک فرآیند گسسته سازی مشابه (حجم محدود) را بکار می گیرند، اما روش مورد استفاده برای خطی سازی و حل معادلات گسسته متفاوت است. در این تحقیق روش مبتنی بر فشار مورد استفاده قرار می گیرد[52].

2-3-6-4 گسسته سازی معادله انتقال کلی

انسیس فلوئنت با استفاده از روشی که بر اساس حجم کنترل است، اقدام به تبدیل معادله انتقال اسکالر کلی به یک معادله جبری میکند که میتوان آن را به صورت عددی حل نمود. این روش حجم کنترل که شامل انتگرالگیری از معادله انتقال مربوط به هر حجم کنترل میباشد، یک معادله گسسته که بیانگر قانون بقاء در حجم کنترل پایه است را نتیجه میدهد. گسسته سازی معادلات حاکم را میتوان به راحتی با در نظر گرفتن معادله بقاء ناپایدار برای انتقال کمیت اسکالر ϕ نشان داد. این مورد توسط معادله زیر در فرم انتگرالی برای یک حجم کنترل اختیاری V نشان داده شده است:

$$\int_{V} \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} \, dV + \oint \rho \varphi \vec{v} \, d\vec{A} = \oint \Gamma_{\varphi} \nabla \varphi \, d\vec{A} + \int_{V} S_{\varphi} dV \qquad (1-4)$$

arphi که در آن ho غلظت، artinlow بردار سرعت، artinlow بردار مساحت سطح، Γ_{arphi} ضریب انتشار برای arphi، که در آن artinlow غلظت، artinlow بردار artinlow بردار artinlow و artinlow جشمه arphi در واحد حجم می باشد. $abla = (\partial arphi/\partial x)i + (\partial arphi/\partial y)j$

معادله 4-1 به هر حجم کنترل، یا سلول، مورد استفاده در دامنه محاسباتی اعمال می شود. سلول ماد م عادله 4-1 به هر حجم کنترل است. گسسته سازی مثلثی دو بعدی نشان داده شده در شکل 4-13، نمونه ای از چنین حجم کنترل است. گسسته سازی معادله 4-1 در یک سلول نتیجه می دهد:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} \mathsf{V} + \sum_{f}^{N_{faces}} \rho_{f} \varphi_{f} \vec{v}_{f} \cdot \vec{A}_{f} = \sum_{f}^{N_{faces}} \Gamma_{f} \nabla \varphi_{f} \cdot \vec{A}_{f} + S_{\varphi} \mathsf{V}$$
(2-4)

f که در آن N_{faces} تعداد صفحاتی که سلول را احاطه کردهاند، φ_f مقداری از φ که از طریق صفحه f منتقل می شود، $\rho_f \varphi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ شار جرمی عبوری از صفحه، \vec{A}_f سطح صفحه f ، $f \varphi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ گرادیان در صفحه f و V حجم سلول می باشد[52].



شکل 4-13 حجم کنترلی که برای نشان دادن گسسته سازی یک معادله انتقال اسکالر استفاده می شود [52]. **3-3-6-4 روش های اعمال شده در مدل**

انتخاب روشهای گسسته سازی معادلات برای حل عددی آنها بسیار مهم میباشد. در ابتدای شبیه سازی برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت از طرح SIMPLE استفاده شد. با مطالعه راهنما نرم افزار مشخص شد که طرح PISO¹ برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت حافظه کمتری را مصرف می کند و سریعتر همگرا می شود. بنابراین از این طرح برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت استفاده شده است.

برای گسسته سازی گرادیان، نرمافزار انسیس فلوئنت به صورت پیش فرض در حالت گرین -گوس بر مبنای سلول² قرار دارد. برای شبیه سازی در این تحقیق نیز در ابتدا از این روش استفاده شد. سپس برای بررسی روش های دیگر از روش گرین -گوس بر مبنای نود³ استفاده شد. با مقایسه نتایج دو روش با داده های آزمایشگاهی مشخص شد نتایج روش گرین -گوس بر مبنای سلول به داده های آزمایشگاهی نزدیک تر می باشد.

¹⁻ Pressure Implicit with Splitting of Operators

²⁻ Green-Gauss Cell-Based

Green-Gauss Node-Based

برای گسسته سازی معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی از طرح بالادست مرتبه دوم¹ استفاده شد. طرحهای دیگر نیز آزمایش شدند ولی تأثیر زیادی در نتایج نداشتهاند. برای گسسته سازی معادلات فشار نیز طرح PRESTO² که پیشفرض نرمافزار میباشد، استفاده شد.

انتخاب طرح گسسته سازی معادلات روش VOF بیشترین تأثیر را در دقت نتایج داشته است، زیرا در سرریز پلکانی هوادهی سطح آزاد جریان اتفاق میافتد، بنابراین انتخاب روش حل سطح آزاد جریان و گسسته سازی آن بسیار مهم میباشد. در این تحقیق برای گسسته سازی معادلات کسر حجمی از تمامی طرحهای موجود در نرمافزار استفاده شد. در نهایت با بررسی نتایج، طرح کوئیک³ برای این کار انتخاب شد.

برای حل جریانهای آشفته بهتر از حالت وابسته به زمان (ناپایدار) استفاده شود تا دقت محاسبات افزایش یابد. در نرمافزار انسیس فلوئنت، برای گسسته سازی زمانی در حالت ضمنی دو روش ضمنی مرتبه اول و ضمنی مرتبه دوم وجود دارد. در روش ضمنی مرتبه اول میتوان گامهای زمانی را بزرگ انتخاب نمود ولی با این کار دقت محاسبات کاهش مییابد. در روش ضمنی مرتبه دوم گام زمانی باید کوچک انتخاب شود. انتخاب گام زمانی کوچک باعث افزایش دقت محاسبات میشود ولی زمان کل حل مسئله را افزایش میدهد. در این تحقیق ترکیبی از این دو روش استفاده شده است. ابتدا از روش ضمنی مرتبه اول برای حل مسئله استفاده شد و سپس از روش ضمنی مرتبه دوم استفاده شد. با این

¹⁻Second Order Upwind

²⁻ PREssure STaggering Option

³⁻ QUICK

3-6-4 شرايط اوليه

شرایط اولیه برای همگرایی مسئله بسیار مهم میباشد. در این تحقیق در ابتدا شرایط اولیه به صورتی در نظر گرفته شد که تمامی ناحیه حل را فاز اول یعنی هوا تشکیل میدهد. بعد از گذشت زمان زیادی از حل مسئله، پنجره خطا در نرمافزار ظاهرشده و حل واگرا شد. برای برطرف شدن خطای باید گام زمانی بسیار کوچک اختیار میشد اما با این کار زمان کل حل مسئله حتی چندین روز به طول میانجامید. در ادامه شرایط اولیه به صورتی در نظر گرفته شد که تمامی ناحیه حل را فاز اوز به طول میانجامید. در ادامه شرایط اولیه به صورتی در نظر گرفته شد که تمامی ناحیه حل را فاز معنی آب تشکیل میدهد. با این شرایط اولیه نیز حل مسئله با همان مشکل قبلی مواجه شد. با استفاده از امکانات نرمافزار انسیس فلوئنت مشهای بین کف کانال تا 1 متر بالای کف کانال مارک شده و در هنگام اعمال شرایط اولیه سرعت مشهای مارک شده 3 m و کسر حجمی آنها 1 عمال شده است، یعنی در این محدوده آب با سرعت 3 m/s وجود دارد و بقیه نواحی حل را هوا با سرعت 00/00 تشکیل میدهد. با این کار مسئله سریعتر همگرا شده و زمان کل حل دا نیز کاهش

برای همگرایی بیشتر، ابتدا حل مسئله با گام زمانی 0/1 آغازشده که در این گام زمانی از روش ضمنی مرتبه اول برای گسسته سازی زمانی استفاده شده است. سپس مقدار گام زمانی به 0/005 تغییریافته و در این گام زمانی از روش ضمنی مرتبه دوم برای گسسته سازی زمانی استفاده شده است. نرمافزار از جوابهای بدست آمده از گام زمانی 0/1 به عنوان شرایط اولیه برای گام زمانی 1005 استفاده می کند. در گام زمانی اول باقیماندهها در حدود ³⁰ 10 و در گام زمانی دوم ⁵ 10 بدست آمد. باقیماندهها در نرمافزار انسیس فلوئنت برای حل کننده بر مبنای فشار از فرمول زیر بدست می آید:

$$R^{\varphi} = \sum_{cells\,P} \left| \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b - a_P \varphi_P \right| / \sum_{cells\,P} a_P \varphi_P \tag{3-4}$$

 φ_{nb} متغیر کلی در سلول P ، P ضریب مرکزی، a_{nb} ضریب تأثیر سلولهای مجاور، φ_P می S_r مر آن φ_P متغیر کلی در سلولهای مجاور، b سهم قسمت ثابت عبارت چشمه، S_c در $S_c + S_P \varphi$ می باشد[52].

فصل پنجم تجزيەوتحليل نتايج

1-5 مقدمه

یکی از عوامل مهمی که در صحت شبیهسازی عددی تأثیر گذار است، تعیین مدل آشفتگے، مناسب میباشد. این مدل آشفتگی باید عملی باشد، به این معنی که در عمل بتوان آن را برای مسئله مورد نظر با حجم و ابعاد موجود استفاده نمود. به عنوان نمونه مدل شبیه سازی مستقیم¹ و یا شبیه سازی چرخشهای بزرگ² مدلهای قوی و دقیقی میباشند ولی این روشها برای حوزههای بسیار محدود با اعداد رینولدز پایین قابل کاربرد میباشند و برای مسئله سرریز پلکانی که مورد نظر در این پایاننامه میباشد، قابل کاربرد نیستند. با توجه به ابعاد سرریز یلکانی و همچنین مقدار عدد رینولدز، مدلهای دو معادلهای مناسب این تحقیق میباشند. از میان مدلهای دو معادلهای، معروفترین و پر کاربردترین آنها در این تحقیق مورد استفاده و بررسی قرار گرفت. این مدلها عبارتند از: k-ɛ استاندارد، k-ε ، RNG k-ε. در این تحقیق هر بار از یکی از k-ω استاندارد و SST k-ω. در این تحقیق هر بار از یکی از این مدل ها برای شبیه سازی سرریز استفاده گردید و جواب ها با جواب های آزمایشگاهی مقایسه گردید تا مشخص شود كدام مدل آشفتگی برای سرریزهای پلکانی مناسب است. نتایج این تحقیق میتواند برای سایر طراحان سرریزهای پلکانی مفید باشد تا مستقیماً از بهترین مدل آشفتگی برای شبیهسازی استفاده نمایند. معمولاً هر مدل آشفتگی در مسائل خاصی جواب میدهد و برای هر مسئله باید بهترین مدل آشفتگی تعیین گردد. برای بررسی اعتبار جوابهای یک مسئله عددی آنها را با دادههای یک تحقیق آزمایشگاهی مقایسه میکنند. برای بررسی صحت عملکرد عددی، در این پایاننامه از اطلاعات آزمایشگاهی سرریز سد سیاهبیشه بالا استفاده گردیده است. در این فصل در ابتدا به بررسی صحت جوابهای مدل عددی با مقایسه پروفیل فشار بر روی سطح افقی چند پله در دبی در واحد عرض 4/6، 7/5، 9 و 10/15 m²/s با استفاده از دادههای آزمایشگاهی و جوابهای عددی می پردازیم.

¹⁻Direct Numerical Simulation-DNS

²⁻Large Eddy Simulation-LES
در ادامه کانتور های فشار، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف مخصوص آن بر روی پلهها رسم گردید. توزیع سرعت و شدت آشفتگی و بردارهای سرعت بر روی سرریز نیز نشان داده شده است. در نهایت میزان اتلاف انرژی بر روی سرریز بررسی شده است.

2-5 صحت سنجى مدل عددى

5-2-1 مقايسه پروفيل فشار

در این قسمت نتایج بدست آمده از نرمافزار با نتایج مدل آزمایشگاهی مدل سرریز سد سیاهبیشه بالا اجراشده در موسسه تحقیقات آب، مقایسه می شود. برای این کار فشار استاتیکی در پلههای 10، 12، 19، 27، 34 و 43 که توسط نرمافزار با استفاده از مدلهای مختلف آشفتگی بدست آمده است، با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه می شود. در مدل آزمایشگاهی برای تعیین فشار استاتیکی، در هر پله در چهار مقطع پیزومتر نصب شده است. شکل 5-1 محل نصب پیزومتر ها را نشان می دهد.



شكل 5-1 محل نصب پيزومترها

در شکلهای 5-2 تا 5-7 نتایج 5 مدل آشفتگی مختلف با نتایج آزمایشگاهی، به ترتیب روی پلههای 10، 12، 19، 27 مالیت. 10، 12، 14 و 4/3 باهم مقایسه شدهاند. در این اشکال دبی عبوری از سرریز 4/6 ست.



 m^2/s 4/6 شکل 3-5 پروفیل فشار بر روی پله 12 در دبی در واحد عرض 3/6 m^2/s



 m^2/s 4/6 شکل 5-5 پروفیل فشار بر روی پله 27 در دبی در واحد عرض m^2/s



 $K-\omega$ با بررسی شکلهای 5-2 تا 5-7 به این نتیجه میرسیم که به ترتیب نتایج سه مدل SST $k-\omega$ و RNG $k-\omega$ استاندارد و $k-\omega$ استاندارد و $k-\omega$

می شود این است که نتایج مدل های w-w استاندارد و w-k SST k- ω در پله های اولیه باهم فاصله داشته ولی در پله های پایین تر کاملاً منطبق بر روی یکدیگر می باشند. دلیل این امر می تواند به این خاطر باشد که چون در پله های ابتدایی ارتفاع آب زیاد می باشد، مدل w-k- ω در نواحی نزدیک دیوار به مورت مدل w-k استاندارد عمل می کند ولی در صورت مدل w-k استاندارد عمل می کند ولی در پله های پایین تر چون ارتفاع آب کم می شود مدل w-k- ω کاملاً به صورت مدل k- ω استاندارد عمل می کند ولی در می کند.

حال برای آنکه اثر دبی در نتایج شبیهسازی مشخص شود، مقدار دبی در مدلها را تغییر داده و این بار برای دبی SST k- ω و ω -k- ω RNG k- ε تحقق باهم در شکل 5-8 تا 3-5 باهم مقایسه شدهاند. در این دبی با توجه به اینکه جوابهای دو مدل z-k استاندارد و k- ε تحقق پذیر با دادههای آزمایشگاهی اختلاف زیادی دارند از بررسی این دو مدل در این قسمت خودداری شده است.



 m^2/s 7/5 پروفیل فشار بر روی پله 10 در دبی در واحد عرض m^2/s



 m^2/s 7/5 پروفیل فشار بر روی پله 19 در دبی در واحد عرض 1/5 m^2



 m^2/s 7/5 پروفیل فشار بر روی پله 34 در دبی در واحد عرض 12-5 شکل 12-5



شکل 5-13 پروفیل فشار بر روی پله 43 در دبی در واحد عرض 7/5 m²/s

k- ω ، SST k- ω مدل w مدل w-w، SST k- ω استاندارد و m^2/s 7/5 استاندارد و m^2/s 8/5 استاندارد و RNG سازگاری خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. در این دبی با توجه به افزایش ارتفاع آب جوابهای and مدلهای w-w استاندارد و SST k- ω نسبت به هم تفاوت بیشتری دارند، بنابراین هر چه دبی افزایش یابد اختلاف این دو مدل بیشتر خواهد شد.

برای بررسی آماری نتایج مدلها، در جدول 5-1 مقادیر خطای مطلق، خطای جذر میانگین مربعها و $AE = \sum_{i=1}^{n} |exprimental - model|$ مقادیر R^2 نشان داده شده است. خطای مطلق از رابطه Retarrow Re

		پله 10				
دادههای آماری مدل های آشفتگی	R ²	RMSE	AE			
k-ε استاندارد	0/661	2311/21	7917/42			
RNG k-ε	0/964	1329/17	4818/28			
k-ε تحقق پذير	0/711	2186/36	7910/77			
k-۵ استاندارد	0/982	1501/46	5483/87			
SST k-w	0/988	1729/52	6168/92			
	پله 12					
دادههای آماری مدل های آشفتگی	R ²	RMSE	AE			
k-ε	0/744	3381/51	11420/13			
RNG k-ε	0/968	1242/44	4091/91			
k-ε تحقق پذير	0/76	3263/35	10943/68			
k-w استاندارد	0/977	1007/07	3384/68			
SST k-ω	0/975	1040/84	3056/14			
	پله 19					
دادههای آماری مدل های آشفتگی	R ²	RMSE	AE			
k-ε استاندارد	0/802	2432/35	8548/01			
RNG k-ε	0/954	1037/97	3587/63			
k-ε تحقق پذير	0/828	2317/89	7677/58			
k-0 استاندارد	0/999	573/65	1864/64			
SST k-ω	0/999	769/5	2508/21			
	پله 27					
دادههای آماری مدل های آشفتگی	R ²	RMSE	AE			
k-ε استاندارد	0/802	2039/28	7124/5			
RNG k-ε	0/949	964/72	2773/23			
k-ε تحقق پذير	0/813	2079/69	7402/84			
k-w استاندارد	0/999	1028/1	3414/4			
SST k-ω	0/999	1165/85	3785/27			
	پله 34					
دادههای آماری مدلهای آشفتگی	R ²	RMSE	AE			
k-٤ استاندارد	0/858	2339/99	8349/85			

جدول 5-1 مقایسه آماری مدلهای مختلف

RNG k-ε	0/975	1124/18	4169/58		
k-ε تحقق پذیر	0/873	2338/54	7590/71		
k-@ استاندارد	0/994	750/20	2562/75		
SST k-ω	0/994	873/93	3148/2		
	پله 43				
دادههای آماری مدلهای آشفتگی	R^2	RMSE	AE		
k-ε استاندارد	0/775	2849/09	9216/33		
RNG k-ε	0/93	1463/9	5164/36		
k-ε تحققپذیر	0/785	2913/05	9981/36		
k-@ استاندارد	0/995	400/16	1116/45		
SST k-ω	0/995	389/65	1178/55		

2-2-5 مقايسه پروفيل سطح آب

یکی از مراحل طراحی سرریزها، طراحی ارتفاع دیواره سرریز میباشد. طراحان با توجه به ارتفاع آب در تند آبراه سرریز، ارتفاع دیواره را تعیین میکنند. در سرریز پلکانی به دلیل هوادهی سطح آزاد جریان، مشخصه طراحی دیواره سرریز، ارتفاعی است که در آنجا غلظت هوا 90 درصد میباشد. در ادامه بررسی صحت سنجی مدل عددی، ارتفاع آب بر روی سرریز بررسی میشود. در این تحقیق ارتفاع آب در V_{90} باهم مقایسه شدهاند. در شکل ادامه برسی می می وا 90 درصد میباشد. در شراع ای آب در آن غلظت هوا 90 درصد میباشد. در ارتفاع آب در V_{90} باهم مقایسه شدهاند. V_{90} ارتفاعی که در آن غلظت هوا 90 درصد میباشد. در شکل ارتفاع آب در V_{90} باهم مقایسه شدهاند. در این تحقیق ای آب در آن غلظت هوا 90 درصد میباشد. در این تحقیق آب در V_{90} باهم مقایسه شدهاند. در این ای ارتفاعی که در آن غلظت هوا 90 درصد میباشد. در این ارتفاع آب در وا باهم مقایسه شدهاند. در این ای ارتفاع آب در وا تا باهم مقایسه شدهاند. در این ارتفاعی که در آن غلظت هوا 90 درصد میباشد. در این ارتفاع آب در وا باهم مقایسه شدهاند. در این ای ارتفاع که در آن غلظت هوا 90 درصد میباشد. در این ارتفاع آب در وا تا با با در 30 در میباشد. در این ارتفاع آب در وا در شکل از این از این از از از از ای از این این از ای ای از این ای 30 در این ای 30 در این این از این از ای ای 30 در 30 در



 m^2/s 4/6 مقايسه ارتفاع آب از پله 19 تا پله 35 در دبی در واحد عرض 15-5 شکل 5-5

k- همان طور که در شکلهای مشخص میباشد، جوابهای مدلهای k-w، RNG k- ε استاندارد و SST w solution می از کاری خوبی با نتایج SST w آزمایشگاهی دارند و هر سه مدل در پیشبینی سطح جریان مناسب میباشند.

در بررسیهای بالا، نتایج سه مدل k-w, RNG k-w استاندارد و w-kSST k-w انزدیک تر می باشند. در مدل های z-k تابع دیوار تأثیر بسزایی در نتایج دارد. در ابتدا برای مدل های k-z نزدیک تر می باشند. در مدل های z-k تابع دیوار تأثیر بسزایی در نتایج دارد. در ابتدا برای مدل های z-k از تایج دیوار استاندارد استفاده گردید. بعد از مقایسه نتایج، اختلاف زیادی میان جوابها و نتایج k-z ازمایشگاهی مشاهده شد. با انتخاب تابع دیوار غیر تعادلی¹, از میان مدل های z-k نتایج مدل z-z ازمایشگاهی مشاهده شد. با انتخاب تابع دیوار غیر تعادلی¹, از میان مدل های z-k نتایج مدل z-z ازمایشگاهی مشاهده شد. با انتخاب تابع دیوار غیر تعادلی¹, از میان مدل های z-k-z نتایج مدل z-z بریان آزمایشگاهی مشاهده شد. با انتخاب تابع دیوار غیر تعادلی¹ می در ایر میان مدل های z-z-z نتایج مدل z-z ارزمایشگاهی مشاهده شد. با انتخاب تابع دیوار خیر تعادلی¹ مدل w-z استاندارد نیز در نواحی جریان آزمایشگاهی آزاد و دور از دیوار ضعیف عمل می کند. مدل w-z استاندارد نیز در نواحی می برشی آزاد و دور از دیوار ضعیف عمل می کند. مدل w-z استاندارد ضعیف عمل می کند به مدل z-z استاندارد فیز z مدل z-z استاندارد و در جایی که مدل z-z استاندارد z به می خد به می کند به استاندارد و می خده بنابراین مدل w-z استاندارد z مدل z-z استاندارد را برطرف می کند.

با توجه به نکات مطرحشده می توان به این نتیجه رسید باآنکه سه مدل RNG k- ε استاندارد ولی مدل k- ω ممگی جوابهای قابل قبولی برای شبیه سازی سرریز پلکانی ایجاد می کنند ولی مدل SST k- ω و SST k- ω از بین این سه مدل بهترین جوابها را ارائه می دهد، بنابراین در ادامه، دیگر پارامتر های جریان با استفاده از نتایج مدل SST k- ω بررسی شده است.

¹⁻ Non-Equilibrium Wall Function



RNG k- ε با استفاده از مدل m^2/s 4/5 شکل 5-16 پروفیل فشار بر روی پله 27 در دبی در واحد عرض m^2/s 4/5 با استفاده از مدل

3-5 بررسی رژیم جریان

سه نوع رژیم جریان میتواند بر روی سرریز پلکانی اتفاق بیفتد: جریان ریزشی، جریان رویهای و جریان انتقالی. در رژیم رویهای، آب به سمت پایین سطح پلکانی به صورت یک جریان پیوسته جاری و روی پلهها جابجا شده و به وسیله چرخش سیال محبوس شده بین آنها (پله و جریان اصلی) انرژی آن مستهلک میشود[10]. اگر d_c عمق بحرانی و h ارتفاع پله باشد، در این صورت برای 97 / 0 < $\frac{d_c}{h}$ جریان رویهای میباشد[4]. اگر d_c عمق بحرانی و h ارتفاع پله باشد، در این صورت برای 90 / 0 < $\frac{d_c}{h}$ جریان رویهای میباشد [4]. اگر d_c مقدار d_c مقدار d_c برابر 109 و ارتفاع پله برابر یک متر است، جریان رویهای میباشد[4]. در دبی m^2/s 4/6 مقدار d_c برابر 109 و ارتفاع پله برابر یک متر است، بنابراین در این دبی رژیم جریان، رویهای میباشد. در شکل 5-17 خطوط جریان اصلی و پله پهاردهم رسم شده است. از مشخصههای اصلی این رژیم تشکیل گردابه ای میان جریان اصلی و پله میباشد که در شکل 5-17 این گردابه نشان داده شده است. در شکل 5-18 بردارهای سرعت در پله میباشد که در شکل 5-17 این گردابه نشان داده شده است. در شکل 5-18 بردارهای سرعت در پله



شکل 5-17 خطوط جریان بر روی پله چهاردهم



در جریان رویهای دادههای سرعت، اندازهگیری شده در لبه پلهها، به طور مناسبی با قانون توانی زیـر مطابقت دارند:

$$\frac{V}{V_{90}} = \left(\frac{y}{Y_{90}}\right)^{1/N} \quad 0 < \frac{y}{Y_{90}} < 1 \tag{5-1}$$

که V سرعت متوسط زمانی، V_{90} مشخصه سرعت در جریان هوادهی شده در $Y_{90} = Y$ و N عدد ثابتی میباشد. بوز¹[55] مقدار N قانون توانی را برای شیب 30 درجـه 5/6 و بـرای شـیب 50 درجـه 5/8 و میباشد. بوز¹[55] مقدار N قانون توانی را برای شیبهسازی با قرار دادن مقدار 5 برای N توزیـع سـرعت ماتوز²[56] مقدار 1/5 را بدست آورد. در این شبیه سازی با قرار دادن مقدار 5 برای N توزیـع سـرعت بدست آمده از قانون توانی با اطلاعات عددی بدست آمده از شبیه سازی نزدیک به هـم میباشـند. در شکل 5-19 نمودار بی بعد توزیع سرعت در 7 پله با مقدار تئوری بدست آمده از قانون توانی در دبی شکل 5-19 مقایسه شده است.



شده است. نتایج آزمایشگاهی چانسون نیز نشان میدهد که توزیع سرعت را میتوان از طریق قانون توانی بدست آورد.

1-Boes

2-Matos



شکل 5-20 مقایسه توزیع سرعت بی بعد میان اطلاعات آزمایشگاهی و قانون توانی به ازای N=6 [42]

4-5 كانتورهاى فشار

در شکلهای 5-21 کانتورهای رنگی فشار در پلههای 14 و 15 در دبی m²/s 4/6 نشان داده شده است. همچنین در شکلهای 5-22 و 5-23 مقادیر فشار بر روی کانتورها برای بررسی بهتر در پلههای 14 و 15 بر حسب *kPa* نشان داده شده است.



شکل 5-21 کانتورهای رنگی فشار بر روی پله 14 و 15 بر حسب Pa



با بررسی این شکلهای به این نکته پی میبریم که بیشترین مقدار فشار (فشار مثبت) در سطح افقی پلهها و کمترین مقدار فشار (فشار منفی) در سطح عمودی پلهها، در نزدیکی لبه آنها اتفاق میافتد. بنابراین در طراحی پلهها باید به این نکته دقت نمود و لبه پلهها باید مقاوم تر از دیگر نقاط طراحی و ساخته شود. برای بررسی بهتر این مسئله پروفیل فشار بر روی سطوح افقی و عمودی پله 14 در شکلهای 5-24 و 5-25 رسم شده است.



شکل 5-25 پروفیل فشار بر روی سطح عمودی پله 14

5-5 غلظت هوا

در سرریزهای پلکانی، مقدار زیادی هوا در طول کانال وارد جریان می شود. ورود هوا باعث افزایش اندازه عمق جریان شده و این عمق به عنوان پارامتر طراحی برای ارتفاع دیوار کناری سرریز استفاده می شود[32]. همچنین وجود هوادهی در لایهی مرزی تنش های برشی میان لایه های جریان را کاهش و ازاینرو نیروی برشی را کاهش میدهد. در اثر تقلیل نیروی در گ اتلاف انرژی کاهش و ازاینرو بازده سرریز کاهش مییابد. بعلاوه وجود هوا درون جریانهایی با سرعت بالا میتواند باعث جلوگیری و یا کاهش خسارت ناشی از کاویتاسیون شود[33]. بنابراین هوادهی یکی از موضوعات مهم در این سرریزها میباشد و باید بررسی شود.

برای بررسی میزان هوادهی جریان، غلظت هوا در لبه پلههای 9، 13، 20، 28 و 36 بررسی شده است. شکل 5-26 نمودار غلظت هوا به عمق بی بعد جریان را نشان میدهد که شبیه به *S* معکوس خوابیده میباشد. در این شکل هوادهی جریان در مدل عددی با راه حل تحلیلی معادله انتشار جابجایی حباب هوا (معادله 2-33) مقایسه شده است.



 m^2/s 4/6 شکل 5-25 نمودار بی بعد توزیع غلظت هوا برای دبی در واحد عرض m^2/s 4/6 شکل

همان طور که در شکل 5-26 مشخص میباشد، نتایج عددی به معادله تحلیلی نزدیک میباشند. مطالعات آزمایشگاهی گذشته [42] نیز نشان میدهد که معادله تحلیلی سازگاری مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد (شکل 2-10).

6-5 بررسی پارامترهای آشفتگی

5-6-1 انرژی جنبشی آشفتگی

تمامی مدلهای آشفتگی دو معادلهای بکار رفته در شبیهسازی دارای معادلهای بر اساس متغیر انرژی جنبشی نوسانات آشفتگی در واحد جرم، k، میباشند. در شکلهای 5-27 تا 5-30 کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در چند پله رسم شده است. نتایج نشان میدهند که مقدار k در طول سرریز افزایش مییابد. همچنین شکلها نشان میدهند که بیشترین مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در درون گردابه چرخشی قرار دارد، که این نتایج شبیه به نتایج ارائهشده توسط چنگ و همکاران [16] میباشند.











شکل 5-29 کانتورهای انرژی جنبشی در پله 34



شکل 5-30 کانتورهای انرژی جنبشی در پله 44

2-6-5 نرخ اتلاف مخصوص انرژی جنبشی آشفتگی (*w*)

نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی یکی از پارامترهای موجود در مدل SST k- ω میباشد. در شکل مقدار ω بر 31-5 کانتورهای رنگی مقادیر ω در پلههای 14 و 15 نشان داده شده است. در این شکل مقدار ω بر اساس فرمول $w = k/v_t$ بدست آمده است. بیشترین مقدار ω در سطح آزاد و در لبه پلهها میباشد. کمترین مقدار ω در سطح آزاد و در ابه پلهها میباشد. بسیاس فرمول ω در وسط گردابه چرخشی زیر جریان اصلی میباشد، هر چند مقادیر ω در این شکل



شکل 5-31 کانتورهای رنگی نرخ اتلاف انرژی جنبشی، w، در پلههای 14 و 15

3-6-5 شدت آشفتگی

شدت آشفتگی، I، به صورت نسبت سرعت آشفتگی، u'، به سرعت متوسط جریان، U، تعریف شدت آشفتگی، $I = u'/U = \sqrt{\frac{2}{3}k}/U$ میشود. در نرمافزار انسیس فلوئنت این مقدار از رابطه $1 = \sqrt{\frac{2}{3}k}/U = \sqrt{\frac{2}{3}k}$ بدست میآید که k انرژی جنبشی آشفتگی میباشد. در شدت آشفتگی کمتر از 1 درصد آشفتگی جریان کم و در شدت بیشتر از 10 درصد آشفتگی جریان زیاد میباشد[52].



شکل 5-33 توزیع شدت آشفتگی برای جریان رویهای برای دبیهای مختلف



شکل 5-34 توزیع شدت آشفتگی در جریان رویهای [57]

7-5 بررسی میزان اتلاف انرژی

$$\frac{\Delta H_e}{H_{max}} = 1 - \left(\frac{\left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{1/3} \times \cos\alpha + \frac{E}{2} \times \left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}}\right)$$
(1-5)

که E ضریب تصحیح انرژی جنبشی، H_{dam} ارتفاع سد، ماکزیمم هد در دسترس و ارتفاع سد با رابطه E که H_{max} = H_{dam} + 1/5 d_c

از رابطه
$$d_c = \left(q_w^2/g
ight)^{1/3}$$
 بدست میآید. f_e ضریب اصطکاک برای جریان هوادهی شده یکنواخت
است که به صورت زیر محاسبه میشود:

$$f_e = \frac{8 g \sin \alpha \ d_e^2}{q_w^2} \left(\frac{D_H}{4}\right) \tag{2-5}$$

در این رابطه $d_{e} = \int_{0}^{Y_{90}} (1-C) dy$ میباشد که Y_{90} عمقی است که غلظت هوا در آنجا 90 درصد $D_{H} = 4A/P_{w}$ برابر q_{w} قطر هیدرولیکی برابر d_{w} $P_{H} = 4A/P_{w}$ است. C غلظت هوا، q_{w} دبی تخلیه در واحد عرض و d_{e} است. C غلظت هوا، p_{w} دبی تخلیه در واحد عرض و d_{H} قطر میدرولیکی از d_{e} است. C محاسبه قطر هیدرولیکی از d_{e} استفاده می شود.

با سادهسازی فرمول 1-1 با توجه به این نکته که در کانالهای عریض $D_Hpprox 4d_e$ داریم:

$$\frac{\Delta H_e}{H_{max}} = 1 - \left(\frac{d_e \times \cos \alpha + \frac{Eq_w^2}{2gd_e^2}}{H_{max}}\right)$$
(3 - 5)

حال با محاسبه d_e می توان میزان افت انرژی را در سرریز محاسبه کرد.

در جدول 5-2 میزان افت انرژی برای دبیهای (در واحد عرض، q_w) 4/6، 7/5، 9 و 10/15 m²/s

نشان داده شده است. در این نقاط جریان هوادهی شده یکنواخت وجود دارد.

دبی چهارم	دبی سوم	دبی دوم	دبی اول	
10/15	9	7/5	4/6	$q_w (m^2/s)$
2/19	2/021	1/79	1/292	<i>d</i> _c (<i>m</i>)
54/29	54/04	53/69	52/95	<i>H_{max}</i> (<i>m</i>)
0/607	0/575	0/549	0/389	<i>d</i> _e (<i>m</i>)
2/19	2/021	1/79	1/292	d_c/h
0/7270	0/7593	0/8131	0/8586	$\Delta H_e/H_{max}$

جدول 5-2 بررسی میزان افت انرژی در دبیهای مختلف

نتایج نشان میدهد با افزایش دبی عبوری از سرریز، از میزان افت انرژی کاسته می شود. به عنوان مثال برای دبی در واحد عرض 4/6 اتلاف انرژی 85/86 بوده و برای دبی در واحد عرض 10/15 این مقدار به 72/70 درصد کاهش می یابد.

اگر دبی عبوری را بر اساس عدد بی بعد نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله (d_c/h) در نظر بگیریم، فلدر و همکاران [26] در مطالعات آزمایشگاهی خود برای شیب 21/8 به این نتیجه رسیدند که فلدر و همکاران [26] در مطالعات آزمایشگاهی خود برای شیب $d_c/h = 1/2$ به این نتیجه رسیدند که $\Delta H_e/H_{max}$ بین 80 درصد برای 21/4 مین 60 درصد برای 20 = d_c/h تا 72/7 درصد برای تحقیق نیز برای شیب 21/44 مقادیر 85/86 درصد برای 1/29 = d_c/h تا 72/7 درصد برای مراه ایران (1/29 – $d_c/h = 1/29$ درصد برای 21/9 ماری درصد برای 20 = $d_c/h = 1/2$ درصد برای مستهلک می کند.

فصل ششم نتیجهگیری و پیشنهادات

1-6 نتيجه گيرى

هدف این تحقیق تعیین مدل آشفتگی مناسب برای سرریزهای پلکانی میباشد. مدلهای خیلی قوی مثل DNS و LES قابل کاربرد روی چنین حجمی از شبیه سازی و چنین اعداد رینولدزی نمی باشند. بنابراین گزینه های قابل استفاده مدل های دو معادله ای می باشند که از میان آنها، 5 نوع از معروف ترین و پر کاربرد ترین این مدل ها انتخاب گردید. این مدل ها عبار تند از: *k-٤* استاندارد، *k-٤* معروف ترین و پر کاربرد ترین این مدل ها انتخاب گردید. این مدل ها عبار تند از: *k-٤* استاندارد، *k-٤* شبیه سازی گردید و نتایج آنها با نتایج آزمایشگاهی سد سیاه بیشه بالا مقایسه گردید. همچنین برای شبیه سازی گردید و نتایج آنها با نتایج آزمایشگاهی سد سیاه بیشه بالا مقایسه گردید. همچنین برای شبیه سازی سطح جریان از یکی از بهترین و شناخته ترین روش ها یعنی روش VOF استفاده شده

- k- ε با مقایسه پروفیل فشار بر روی پلههای 10، 12، 19، 27، 34 و 43 نتایج سه مدل k- ε . k- ω ،RNG ، RNG استاندارد و m^2/s 4/6 برای دبی در واحد عرض k- ω تطابق خوبی با k- ω ،RNG دادههای آزمایشگاهی دارند.
- 2. در دبی در واحد عرض m^2/s 4/6 دو مدل w-w استاندارد و w-s SST k- ω در پلههای انتهایی مدل k-k تقریباً بر روی هم منطبق میباشد، که نشان میدهد در این دبی در پلههای انتهایی مدل -k-w تقریباً بر روی هم منطبق میباشد، که استاندارد عمل می کند. با افزایش دبی در واحد عرض به w-s SST w SST w-w استاندارد عمل می کند. با افزایش دبی در واحد عرض به m^2/s 7/5 دو مدل w-k-w استاندارد و SST k-w می کند. با افزایش دبی در واحد عرض به m^2/s 7/5 مهم نمی باشد. این موضوع نشان میدهد که با افزایش دبی و در نتیجه افزایش ارتفاع آب مدل w-w مدل w-w استاندارد عمل نمی کند و در نواحی که به اندازه k-w استاندارد و k-w استاندارد عمل نمی کند و در نواحی که به اندازه مدل w-w-w استاندارد عمل نمی کند و در نواحی که به اندازه المال المال

- ارتفاع آب بر روی سرریز یکی از مشخصههای طراحی دیواره جانبی سرریز میباشند. در سرریزهای پلکانی ارتفاع آب در مکانی که غلظت هوا 90 درصد میباشد برای طراحی دیواره مورد استفاده قرار می گیرد. ارتفاع آب بر روی سرریز برای سه مدل RNG k-ε استاندارد و SST k-ω ، RNG k-ε با دادههای آزمایشگاهی مقایسه شده است که نشان میدهد نتایج این سه مدل تقریباً منطبق بر روی همدیگر میباشند و سازگاری خوبی با دادههای آزمایشگاهی دارند.
- SST k- ω استاندارد و k- ω ،RNG k- ε استاندارد و k- ω استاندارد و k- ω استاندارد و k- ω استاندارد و k- ω همگی جوابهای قابل قبولی برای شبیه سازی سرریز پلکانی ایجاد می کنند ولی می توان گفت بین این سه مدل نیز مدل k- ω SST k- ω بهترین جوابها را ارائه می نماید و بنابراین توصیه می گردد برای شبیه سازی سرریزهای پلکانی از این روش استفاده شود.
- 6. نتایج آزمایشگاهی گذشته [4]، [10]، [26]، [26]، [57]، [58] و [59] نشان میدهند که نمودار توزیع سرعت بی بعد در لبه پلهها نسبت به ارتفاع بی بعد، سازگاری خوبی با قانون k-ω

¹⁻ Non-Equilibrium Wall Functions

SST مشخص شد که در این مدل عددی نیز توزیع سرعت با قانون توانی سازگاری مناسبی دارد.

- 7. با بررسی فشار بر روی پلهها مشخص گردید که بیشترین و کمترین مقدار فشار به ترتیب در لبه پلهها اتفاق میافتد. بنابراین در لبه پلهها در یک طرف آن بیشترین مقدار فشار (فشار مثبت) و در طرف دیگر آن کمترین مقدار فشار (فشار منفی) وجود دارد و باید در طراحی و ساخت پلهها به این نکته توجه نمود و لبه پلهها باید مقاومت بیشتری داشته باشند.
- 8. یکی از دلایل استفاده از سرریز پلکانی اتلاف انرژی آن میباشد. در این تحقیق اتلاف انرژی در در دبیهای در واحد عرض 4/6، 7/5، 9 و 10/15 بررسی شده است و نتایج نشان میدهند که اتلاف انرژی وابسته به دبی عبوری در واحد عرض سرریز میباشد. هر چه دبی عبوری افزایش مییابد از میزان افت انرژی کاسته میشود. برای دبیهای بالاتر به دلیل افزایش ارتفاع آب بر روی سرریز، لایهمرزی دیرتر به سطح آزاد جریان میرسد و در نتیجه طول جریان آشفته کاهش مییابد و از میزان اتلاف انرژی کاسته میشود.

2-6 پیشنهادات

- امروزه یکی از کاربردهای سرریز پلکانی اکسیژن دهی جریان آب میباشد. برای اینکه میزان اکسیژن دهی مشخص شود نیاز به غلظت هوا در نقاط مختلف بر روی سرریز میباشد. همچنین غلظت هوا بر روی این سرریزها یکی از مشخصههای مهم در طراحی آنها میباشد. روش مورد استفاده در شبیه سازی سطح آزاد میتواند تأثیر بسزایی در پیشبینی غلظت هوا در نقاط مختلف داشته باشد. بنابراین روش عددی مناسب برای پیشبینی سطح آزاد جریان در سرریزهای پلکانی میتواند مورد بررسی قرار گیرد.
- 2. مدل های ϵ در نزدیکی دیوار از تابع دیوار برای مدل سازی آشفتگی استفاده می کنند. در این تحقیق مدل تابع دیوار استاندار از جواب های مناسبی برخوردار نبوده و مجبور به تغییر

تابع دیوار شدهایم. بنابراین تابع دیوار مناسب در مدلهای آشفتگی k-۶ میتواند مورد بررسی قرار گیرد.

- یکی از دلایل اصلی ساخت این نوع سرریزها کاهش هزینههای ساخت حوضچه آرامش از طریق اتلاف انرژی در طول سرریز میباشد. همچنین یکی از مشکلات این نوع سرریزها دبی تخلیه پایین میباشد. با افزایش دبی عبوری در واحد عرض در این سرریزها از میزان افت انرژی کاسته میشود. بررسی تعیین بیشترین دبی عبوری از این نوع سرریزها برای بدست آوردن میزان افت انرژی بهینه میتواند صورت بگیرد.
- 4. در سرریزهای پلکانی شیب سرریز یکی از پارامترهای مهم در طراحی سرریز، رشد لایهمرزی، میزان هوادهی، اتلاف انرژی و غیره میباشد. محدودهی شیبهایی که این سرریز در آن شیبها کارایی بهتری دارد میتواند مورد بررسی قرار گیرد.

- 1. Tabbara M, Chatila J, (2009) "Computational simulation of flow over stepped spillways", **Computers and Structures Elsevior**, Vol. 83, pp. 2215-2224.
- Carlos A, Gonzalez, Hubert Chanson, (2007), "Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams", Dam Engineering, Vol. 17, No 4, pp 223-224
- 3. Chanson H, (2001) "Historical development of stepped cascades for the dissipation of hydraulic energy", **Trans. Newcomen Soc.**, 72, pp 295-318
- Chanson H, Toombes L, (2001) "Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. Application to embankment overflow stepped spillways.", Research report no CE158, Departmnt of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, pp 74.
- 5. Michael Pfister, Willi H. Hager, Hans-Erwin Minor, (2006) "Stepped chutes: Preaeration and spray reduction", **International Journal of Multiphase**, 32, pp 269-284
- Essery I T S, Horner M W, (1971), "The hydraulic design of stepped spillways", London, Construction Industry Research and Information Association, CIRIA report 33.
- Sorensen R M, (1985), "Stepped spillway hydraulic model investigation", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp 1461-1472.
- Rajaratnam N, (1990), "Skimming Flow in Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 4, pp. 587-591.
- Ruff J F, Frizell K H, (1994), "Air Concentration Measurements in Highly-Turbulent Flow on a Steeply-Sloping Chute", Hydraulic Engineering Conf, ASCE, Vol. 2,No. 72, pp. 999-1003.
- Chanson H, (1993), "Stepped Spillway Flows and Air Entrainment." Can. Jl of Civil Eng, Vol 20, No 3, pp 422-435.

- 11. Lee J H W, (1994), "Tai Lam Chung reservoir waterfall dam side channel spillway model study", Technical Report, Hong Kong, China: The University of Hong Kong.
- Au M Y D, Lee J H W, (1994), "Flow in stepped channels", Final Year Project, Hong Kong, China: The University of Hong Kong.
- Chen Qun, Dai Guang-qing et al, (2002), "Numerical simulation for the stepped spillway overflow with turbulence model", Journal of Hydrodynamics, Ser.B, Vol. 14, No. 2, pp 58-63.
- Chen Qun, Dai Guang-qing et al, (2004), "Three-dimensional turbulence numerical simulation of a stepped spillway overflow", Journal of Hydrodynamics, Ser.B, Vol. 16, No. 1, pp 74-79.
- Chen Qun, Dai Guang-qing et al, (2005), "Influencing factors for the energy dissipation ratio of stepped spillways", Journal of Hydrodynamics, Ser.B, Vol. 17, No. 1, pp 50-57.
- 16. Cheng Xiang-ju, Luo Lin, Zhao Wen-qian, (2004), "Numerical simulation of characteristics of free surface aeration on stepped spillway", Journal of Hydrodynamics, Ser. A, Vol. 19, No. 2, pp 152-157.
- 17. Fabián A. Bombardelli, Inês Meireles, Jorge Matos, (2011) "Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways", Environmental Fluid Mechanics, Volume 11, Issue 3, pp 263-288.
- Peyras L, Royet P, Degoutte G. (1991), "Ecoulement et Dissipation sur les Déversoirs en Gradins de Gabions (Flows and Dissipation of Energy on Gabion Weirs)", Journal La Houille Blanche, No. 1, pp 37-47.
- Peyras L, Royet P, Degoutte G, (1992), "Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 707-717.

- 20. Ellis J, (1989), "Guide to Analysisof Open-Channel Spillway Flow", CIRIA Technical Note No. 134, 2nd edition, London, UK.
- Moore W L, (1943), "Energy Loss at the Base of a Free Overfall", Transactions, ASCE, Vol. 108, pp 1343-1360.
- Rand W, (1955), "Flow Geometry at Straight Drop Spillways", Proceedings, ASCE, Vol 81, No 791, pp 1-13.
- White, M P, (1943). "Discussion of Energy Loss at the Base of a Free Overfall" by Moore W.L, Transactions, ASCE, Vol. 108, pp 1343-1360, Transactions, ASCE, Vol. 108, pp 1361-1364.
- 24. Stephenson D, (1979), "Gabion Energy Dissipators", 13the International CongressOn Large Dams, New Delhi, India, Q 50, R 3, pp 33-43.
- 25. Stephenson D, (1991), "Energy Dissipation down Stepped Spillways",International Water Power & Dam Construction, pp 27-30.
- 26. Felder S, Chanson H, (2005) "Energy dissipation, flow resistance and gas-liquid interfacial area in skimming flows on moderate-slope stepped spillways", Environ Fluid Mechanics, pp 427–441.
- Chanson H, (2001), "The hydraulics of stepped chutes and spillways", Balkema, Lisse, The Netherlands 418 pp.
- Morris H M, (1955), "A New Concept of Flow in Rough Conduits", Transactions, ASCE, Vol. 120, pp. 373-410.
- Knight D W , Macdonald J A, (1979), "Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 105, No. HY6, pp. 675-690.
- Hartung F, Scheuerlein H, (1970), "Design of Overflow Rockfill Dams", 10the International Congress On Large Dams, Montréal, Canada, Q. 36, R. 35, pp. 587-598.

- Diez-Cascon J, Blanco J L, Revilla J, Garcia R, (1991), "Studies on the Hydraulic Behaviour of Stepped Spillways", International Water Power & Dam Construction, pp. 22-26.
- 32. Falvey H T, (1980), "Air-Water Flow in Hydraulic Structures", US Bureau of Reclamation Engineering Monograph, No. 41, Denver, Colorado, USA.
- 33. May R W P, (1987), "Cavitation in HydraulicStructures: Occurrence and Prevention", Hydraulics Research Report, No. SR 79, Wallingford, UK.
- 34. Wilhelms S C, Gulliver J S, (1989), "Self-Aerating Spillway Flow", National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, New Orleans, USA, M.A. PORTS editor, pp. 881-533.
- 35. Ervine D A, Falvey H T, (1987), "Behaviour ofTurbulent Water Jets in he Atmosphere and in Plunge Pools", **Proceedings of the Institution Civil Engineers**, Part 2, Mar., 83, pp. 295-314.
- Chanson H, (1992), "Air Entrainment in Chutes and Spillways", Research Report No. CE 133, Dept. of Civil Eng, Univ. of Queensland, Australia, Feb., 85 pages.
- 37. Keller R J, Rastogi A K, (1977). "Design Chart for Predicting Critical Point on Spillways", Journal of Hydraulic Division, ASCE, HY12, Proc. Paper 13426, Dec., pp. 1417-1429.
- Wood I R, (1983), "Uniform Region of Self-Aerated Flow", Jl Hyd. Eng, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 447-461.
- 39. Chanson H, (1995), "Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways", Pergamon,Oxford 292 pp.
- Carosi G, Chanson H, (2008), "Turbulence characteristics in skimming flows on Stepped spillways", Can J Civ Eng, Vol 35, No 9, pp 865–880.

- Knauss J, (1979), "Computation of Maximum Discharge at Overflow Rockfill Dams (a comparison of different model test results)", 13the International Congress On Large Dams, New Delhi, India, Q. 50, R. 9, pp. 143-159.
- 42. Chanson H, Toombes L, (2002), "Air-water flows down stepped chutes : turbulence and flow structure observations", Intl Jl of Multiphase Flow, Vol. 28, No. 11, pp. 1737-1761.
- Wood I R, (1985), "Air Water Flows", Proceedings of the 21st International Association of Hydraulic Research Congress, Melbourne, Australia, Keynote address, pp. 18-29.
- Wood I R, (1991), "Air Entrainment in Free-Surface Flows", IAHR Hydraulic Structures Design Manual, No. 4, Hydraulic Design Considerations, Balkema Publ., Rotterdam, The Netherlands, 149 pages.
- 45. Chanson H, (1997), "Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows", Academic Press, London, UK, 401 pages.
- 46. Jevdjevich V, Levin L, (1953), "Entrainment of Air in flowing Water and Technical Problems connected with it", Proceedings of the 5the International Association for Hydraulic Research Congress, Minneapolis, USA, pp. 439-454.
- 47. Straub L G, Anderson A G, (1958), "Experiments on Self-Aerated Flow in Open Channels", Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 84, No. HY7, paper 1890.
- Chanson H, (1994), "Drag Reduction in Open Channel Flow by Aeration and Suspended Load", Jl of Hyd. Res, IAHR, Vol. 32, No. 1, pp. 87-101.
- Chanson H, Toombes L, (2000), "Stream Reaeration in Nonuniform Flow: Macroroughness Enhancement", Jl of Hyd. Engrg, ASCE, Vol 126, No 3, pp 222-224.
- R. Munson, F. Young, H. Okiishi, W. Huebsch (2006), "Fundamentals of Fluid Mechanics", Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc, pp 535.
- 51. David C Wilcox, (2006), "Turbulence Modeling for CFD". DCW Industries, Inc.
- 52. ANSYS FLUENT 12.0, Theory Guide
- Trotter Cebeci, (2003), "Turbulence Models and Their Application",. Horizons Publishing Inc, pp 10-13.
- 54. John F. Wendt, (), **Computational fluid dynamics an introduction**, Third Edition, pp 6-8.
- 55. Boes R M, (2000), "Zweiphasenstroömung und Energieumsetzung an Grosskaskaden. (Two-Phase Flow and Energy Dissipation on Cascades)", Ph.D. thesis, VAW-ETH, Zürich, Switzerland (in German). (also Mitteilungen der Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zurich, Switzerland, No. 166).
- 56. Matos J, (2000), "Hydraulic Design of Stepped Spillways over RCC Dams", Intl Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Zürich, Switzerland, H.E. Minor & W.H. Hager Editors, Balkema Publ., pp. 187-194.
- 57. Stefan Felder, Hubert Chanson, (2011), "Air–water flow properties in step cavity down a stepped chute", **International Journal of Multiphase Flow**, 37, pp 732–745
- Chanson H, Toombes L, (2004) "Hydraulics of stepped chutes: The transition flow", Journal of Hydraulic Researc, Vol 42, No 1, pp 43–54.
- 59. C A Gonzalez, H Chanson, (2008) "Turbulence manipulation in air-water flows on a stepped chute: An experimental study", European Journal of Mechanics B/Fluids, 27, pp 388–408.

Abstract

The main reasons used of the stepped spillway is energy dissipation and flow aeration. Energy dissipation in stepped spillway is to reduce the cost of building the stepped spillway stilling basin and flow aerated is to prevent cavitation damage. In the spillway elementary steps next to the boundary, turbulence is generated and the boundary layer grows until the outer edge of the boundary layer reaches the free surface. When the outer edge of the boundary layer reaches the free surface, the turbulence may initiate natural free surface aeration. Therefore, the flows over this type of spillways is highly turbulent, and the turbulence modeling has a significant impact on results in simulation of its. Ansys Fluent software is used for to model the flow. This software uses the finite volume method to solve the governing equations. Volume of fluid (VOF) method used for Free surface simulation. Standard k-e, RNG k-e, Realizable k- ε , standard k- ω and SST k- ω turbulence models are compared. Siah Bishe Bala dam spillway experimental model results used for verification of the simulation. The horizontal pressure profile steps plotted and simulation results are compared with the experimental. The results show that three models RNG k- ε and the standard k- ω and SST k- ω are closer to the experimental data. RNG k- ε model in the near wall regions (the appropriate wall function should be selected for this model) and the standard k- ω model in the regions away from the wall and free shear flows are weak. SST k- ω model in the near wall regions as the standard k- ω model and in the regions away from the wall as standard k- ε model acts, therefore, this model compared to the standard k- ω and RNG k- ε models is less limitation and is more suitable. The energy dissipation in discharge per unit width, 4.6, 7.5, 9 and 10.15 in slope 21.8° has been investigated. The results show that the highest rate of energy dissipation 85.86 and the lowest 72.7 percent. Also rate of energy dissipation is reduced by increasing the the discharge. Therefore, significant energy is wasting in stepped spillway and this can reduce construction costs or even eliminate the stilling basin.

Keywords: Volume of fluid method (VOF), Stepped spillway, Numerical simulation, Turbulence modeling, Ansys Fluent software



Shahrood University of Technology Department of Civil engineering

Determination of the appropriate turbulence model for the energy loss in the stepped spillway

Saeed Barari

Supervisor: Dr. Ramin Amini

Associate Supervisor: Dr. Amir abbas Abedini

February 2013