



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی عمران  
گرایش آب

**عنوان:**

**شبیه سازی عددی میدان جریان و سطح آزاد در کانال های U شکل دارای سرریز جانبی**

اساتید راهنما:

دکتر میترا جوان

دکتر افشین اقبالزاده

نگارش:

حامد عظیمی

اسفند ۱۳۹۲



دانشکده فنی مهندسی  
گروه مهندسی عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی عمران گرایش آب

دانشجو

حامد عظیمی

تحت عنوان

**شبیه سازی عددی میدان جریان و سطح آزاد در کانال های U شکل دارای سرریز جانبی**

در تاریخ ۹۲/۱۲/۱ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

دکتر میترا جوان	با مرتبه علمی استادیار	۱- استاد راهنما
دکتر افشین اقبال زاده	با مرتبه علمی استادیار	۲- استاد راهنما
دکتر حسین بنگداری	با مرتبه علمی دانشیار	۳- داور ۱
دکتر علی اکبر اختری	با مرتبه علمی استادیار	۴- داور ۲

أَلْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي عَرَّفَنِي نَفْسَهُ وَ لَمْ يَتْرَكْنِي عُمِيَانَ الْقَلْبِ،

أَلْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي جَعَلَنِي مِنْ أُمَّةٍ مُحَمَّدٍ صَلَّى اللهُ عَلَيْهِ وَ آلِهِ،

أَلْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي جَعَلَ رِزْقِي فِي يَدِهِ وَ لَمْ يَجْعَلْهُ فِي أَيَدِي النَّاسِ،

أَلْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي سَتَرَ عُيُوبِي وَ عَوْرَتِي وَ لَمْ يَفْضَحْنِي بَيْنَ النَّاسِ.

تقدیم به او

که با آمدنش به آدمیت!!!

معنای دوباره انسان بودن را هدیه می کند،

تقدیم به تو

که در غیابت

هزاران فصل است، رنگ محبت از چهره ابل زمین کوچ کرده،

تقدیم به:

پیشگاه مقدس حضرت ولیعصر ارواحنا له فداء

## چکیده

به دلیل ساختار هیدرولیکی کانال‌های با سطح مقطع U شکل، این نوع مجاری به عنوان مقطع مبدل کانال‌های مستطیلی و دایروی درپچه‌های آدم‌رو<sup>1</sup> و نیز به همراه سرریزهای جانبی در شبکه دفع فاضلاب شهری، سیستم‌های آبیاری-زهکشی، پروژه‌های محافظت سیلاب و غیره برای تخلیه جریان‌های مازاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع کانال‌ها رژیم جریان می‌تواند در شرایط زیربحرانی و یا فوق‌بحرانی باشد. در مطالعه حاضر، میدان جریان آشفتنه و سطح آزاد جریان در کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی با استفاده از نرم افزار فلوتری‌دی، مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  RNG و طرح VOF شبیه‌سازی شده است. مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی، سطح آزاد و مشخصات میدان جریان را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌نماید. مقادیر درصد خطای متوسط ( $APE$ ) و خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) نسبی برای پروفیل‌های طولی سطح آزاد جریان در هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی به ترتیب  $2.79\%$ ،  $1.7\%$ ،  $2.86\%$  و  $2.21\%$  محاسبه شده است. در ادامه، الگوی جریان در کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. برای هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی، یک افت سطح آزاد در یک چهارم ابتدایی دهانه سرریز و یک پرش سطحی در یک چهارم انتهایی طول دهانه به وقوع پیوسته است. سرعت جانبی در شرایط جریان زیربحرانی از ابتدای سرریز تا وسط دهانه سرریز در حال افزایش بوده و سپس با پیشروی به سوی انتهای پائین‌دست سرریز جانبی مقدار آن کاهش می‌یابد. این در حالی است که در شرایط فوق‌بحرانی، سرعت جانبی از ابتدای سرریز به سمت انتهای آن در حال افزایش می‌باشد. در رژیم زیربحرانی، جریان ثانویه‌ای بعد از سرریز جانبی به وجود می‌آید، به گونه‌ای که سلول جریان ثانویه مذکور با پیشروی به سمت پائین‌دست کانال اصلی توسعه یافته و بزرگای مولفه عرضی جریان به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، حداقل زاویه ریزشی جت جریان برای رژیم‌های زیربحرانی و فوق‌بحرانی به ترتیب در یک پنجم انتهایی و وسط دهانه سرریز جانبی پیش بینی شده است. در شرایط جریان زیر-بحرانی، با پیشروی به سمت انتهای پائین‌دست کانال اصلی از مقدار تنش برشی کاسته می‌شود به گونه‌ای که حداکثر و حداقل مقدار تنش برشی بستر به ترتیب در ابتدای بالادست و انتهای پائین‌دست سرریز جانبی و در زیر ناحیه ایستایی اتفاق می‌افتد. سپس اثر عدد فرود بالادست سرریز جانبی بر روی جریان‌های زیربحرانی و فوق‌بحرانی بررسی شد. با افزایش عدد فرود طول پرش سطحی و ارتفاع نقطه ایستایی به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای عدد فرودهای مختلف، بر خلاف طول ناحیه ایستایی، عرض صفحه جدایش جریان از کف کانال اصلی به سمت سطح آزاد جریان توسعه یافته و عرض ناحیه ایستایی از تراز تاج سرریز به سوی کف کانال U شکل افزایش یافته است. حداکثر قدرت جریان جانبی در انتهای پائین‌دست سرریز جانبی ( $X=0/5$  متر) به وقوع می‌پیوندد و برای کلیه عدد فرودها با پیشروی به سمت پائین‌دست کانال اصلی قدرت جریان جانبی کاهش می‌یابد. در ادامه اثرات نسبت طول سرریز جانبی به قطر کانال U شکل بر مشخصات میدان جریان مورد بررسی قرار گرفت. سطح آزاد جریان در قبل از سرریز جانبی به علت افزایش طول سرریز تحت تاثیر آن قرار گرفته و یک اختلاف تراز در کلیه مقاطع طولی به وجود آمده است. اختلاف متوسط انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریز با طول بیشتر برابر  $2.94\%$  محاسبه شده که در مقایسه با سرریز جانبی کوتاه‌تر تقریباً  $2/5$  برابر شده است. در بخش مربوط به تغییر پارامتر، اثرات استغراق سرریز جانبی بر الگوی جریان در

<sup>1</sup> Manholes



کانال‌های U شکل برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی بررسی شده است. استغراق سرریزجانبی تنها بر روی الگوی تغییرات سطح آزاد در هر دو رژیم جریان، مولفه عرضی سرعت در شرایط جریان فوق‌بحرانی و زاویه ریزشی جت جریان در رژیم زیربحرانی اثر گذار بوده است.

**کلمات کلیدی:** کانال U شکل؛ سرریزجانبی مستغرق و غیرمستغرق؛ جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی؛ الگوی جریان؛ فلوتری‌دی.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول : کلیات

۲-۱-۱-۱	مقدمه.....	۲
۲-۱-۲	سرریز جانبی، انواع آن، شکل‌های مختلف کانال اصلی، مزایا و معایب.....	۲
۳-۱	جریان‌های متغیر مکانی.....	۴
۱-۳-۱	معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی.....	۵
۱-۳-۱-۱	با استفاده از معادله انرژی.....	۵
۱-۳-۱-۲	با استفاده از معادله اندازه حرکت.....	۶
۲-۳-۱	تئوری کلاسیک حاکم بر جریان روی سرریزهای جانبی.....	۶
۴-۱	هدف از تحقیق حاضر.....	۸

### فصل دوم : بررسی مطالعات و تحقیقات انجام شده

۱-۲-۱	مقدمه.....	۱۱
۲-۲	کانال‌های با سطح مقطع دایروی دارای سرریز جانبی.....	۱۲
۳-۲	کانال‌های با سطح مقطع مثلثی دارای سرریز جانبی.....	۱۶
۴-۲	کانال‌های با سطح مقطع U شکل دارای سرریز جانبی.....	۲۰
۵-۲	کانال‌های با سطح مقطع عرضی سهموی دارای سرریز جانبی.....	۲۵
۶-۲	مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی در شرایط جریان فوق-بحرانی.....	۲۶
۷-۲	مطالعات عددی در کانال دارای سرریز جانبی.....	۲۸
۸-۲	لزوم انجام مطالعه‌ی عددی حاضر.....	۲۹

### فصل سوم : معرفی نرم افزار و معادلات حاکم

۱-۳-۱	مقدمه.....	۳۱
۲-۳	نرم‌افزار فلوتری دی.....	۳۱
۱-۲-۳	قابلیت‌های نسخه ۱۰ نرم افزار فلوتری دی.....	۳۲
۲-۲-۳	مکانیزم‌های انتقال.....	۳۳
۳-۲-۳	معادلات حاکم.....	۳۴
۴-۲-۳	تنش برشی دیواره.....	۳۷
۵-۲-۳	بررسی گرانیروی.....	۳۷

- ۳۹-۲-۳-۶- سطح مشترک و سطح آزاد سیال.....
- ۴۰-۲-۳-۷- روابط ورودی هوا.....
- ۴۱-۳-۳- مدل‌های آشفته‌گی.....
- ۴۲-۳-۳-۱- فرضیه بوزینسک.....
- ۴۳-۳-۳-۱-۱- مدل‌های صفر معادله‌ای.....
- ۴۴-۳-۳-۱-۲- مدل‌های یک معادله‌ای.....
- ۴۴-۳-۳-۱-۳- مدل‌های دو معادله‌ای.....
- ۴۵-۳-۳-۱-۴- مدل‌های دارای معادله تنش.....
- ۴۶-۳-۳-۱-۵- مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (*LES*).....
- ۴۷-۳-۴- شرایط مرزی آشفته.....

#### فصل چهارم: صحت‌سنجی و بررسی میدان جریان

- ۴۹-۴-۱- مقدمه.....
- ۴۹-۴-۲- مشخصات مدل آزمایشگاهی آیماز (۱۹۹۷).....
- ۵۰-۴-۳- ایجاد هندسه کانال U شکل و سرریز جانبی.....
- ۵۲-۴-۴- شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی.....
- ۵۳-۴-۵- آرایش و شبکه‌بندی میدان محاسباتی.....
- ۵۶-۴-۶- کالیبراسون ابعاد مخزن متصل به سرریز جانبی.....
- ۵۷-۴-۷- صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی.....
- ۵۷-۴-۷-۱- سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی.....
- ۵۸-۴-۷-۲- ضریب دبی سرریز جانبی در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....
- ۵۹-۴-۷-۳- شبیه‌سازی مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....
- ۶۱-۴-۷-۴- شبیه‌سازی مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....
- ۶۱-۴-۷-۵- انرژی مخصوص در کانال U شکل دارای سرریز جانبی در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....
- ۶۱-۴-۷-۸- بررسی میدان جریان در کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....
- ۶۲-۴-۸-۱- تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی برای  $L/D=2$ .....
- ۶۲-۴-۸-۲- تغییرات سرعت عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....
- ۶۴-۴-۸-۳- بردارهای سرعت عرضی و جریان ثانویه شبیه‌سازی شده در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....
- ۶۵-۴-۸-۳-۱- بردارهای سرعت عرضی و جریان ثانویه شبیه‌سازی شده در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....

۴-۸-۴- تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی برای $L/D=2$ .....	۶۶
۴-۸-۵- الگوی خطوط جریان در داخل کانال اصلی برای رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی برای $L/D=2$ .....	۶۸
۴-۸-۶- الگوی تنش برشی بستر در مجاورت کف کانال اصلی در رژیم‌های جریان زیربحرانی و فوق-بحرانی برای $L/D=2$ .....	۶۸
۴-۹-۹- اثرات عدد فرود بالادست کانال اصلی بر روی مشخصات میدان جریان برای $L/D=2$ .....	۶۹
۴-۹-۱- اثرات عدد فرود بر تغییرات سطح آزاد جریان‌های زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....	۷۰
۴-۹-۲- اثرات عدد فرود بر تغییرات صفحه جدایش جریان و ابعاد ناحیه ایستایی برای $L/D=2$ .....	۷۲
۴-۹-۳- اثرات عدد فرود بر روی مولفه عرضی سرعت برای $L/D=2$ .....	۷۴
۴-۹-۴- اثرات عدد فرود بر روی تغییرات قدرت جریان ثانویه برای $L/D=2$ .....	۷۵
۴-۹-۵- اثرات عدد فرود بر روی زاویه ریزشی جت جریان برای $L/D=2$ .....	۷۷
۴-۹-۶- اثرات عدد فرود بر الگوی تنش برشی بستر کانال اصلی برای $L/D=2$ .....	۷۸
۴-۱۰-۱- اثرات نسبت طول سرریزجانبی به قطر کانال U شکل بر مشخصات میدان جریان.....	۸۰
۴-۱۰-۱-۱- تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریزجانبی برای $L/D=3$ .....	۸۱
۴-۱۰-۲- تغییرات سرعت عرضی جریان برای $L/D=3$ .....	۸۱
۴-۱۰-۳- الگوی جریان ثانویه برای $L/D=3$ .....	۸۲
۴-۱۰-۴- تغییرات زاویه ریزشی جت جریان برای $L/D=3$ .....	۸۳
۴-۱۰-۵- الگوی تنش برشی بستر برای $L/D=3$ .....	۸۴
۴-۱۱-۱- انرژی مخصوص.....	۸۴
۴-۱۱-۱-۱- تغییرات انرژی مخصوص برای $L/D=2$ .....	۸۵
۴-۱۱-۲- تغییرات انرژی مخصوص برای $L/D=3$ .....	۸۶

### فصل پنجم : مطالعه اثرات استغراق سرریزجانبی

۵-۱-۱- مقدمه.....	۸۸
۵-۱-۱-۱- شرایط مرزی اعمال شده برای مدل سرریزجانبی مستغرق.....	۸۸
۵-۱-۲- آرایش میدان جریان و شبکه‌بندی آن برای سرریزجانبی مستغرق.....	۸۹
۵-۲-۱- اثرات استغراق سرریزجانبی بر روی مشخصات میدان جریان کانال اصلی.....	۹۰
۵-۲-۲-۱- اثر استغراق سرریزجانبی بر روی تغییرات سطح آزاد جریان.....	۹۰
۵-۲-۲-۲- اثر استغراق سرریزجانبی بر روی مولفه عرضی سرعت جریان.....	۹۱
۵-۲-۳- اثر استغراق سرریزجانبی بر روی زاویه ریزشی جت جریان.....	۹۲

### فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱-۱- مقدمه.....	۹۵
۶-۲-۱- نتیجه‌گیری.....	۹۵

- ۶-۲-۱- کانال U شکل دارای سرریز جانبی در شرایط جریان زیربحرانی و فوق بحرانی..... ۹۵
- ۶-۲-۲- دبی‌های عبوری مختلف از روی سرریز جانبی و اثرات عدد فرود بالادست کانال اصلی بر  
مشخصات میدان جریان زیربحرانی و فوق بحرانی..... ۹۷
- ۶-۲-۳- اثرات نسبت طول سرریز جانبی به قطر کانال U شکل بر مشخصات میدان جریان..... ۹۹
- ۶-۲-۴- انرژی مخصوص..... ۱۰۰
- ۶-۲-۵- اثرات استغراق سرریز جانبی بر میدان جریان زیربحرانی و فوق بحرانی..... ۱۰۰
- ۶-۳- پیشنهادات..... ۱۰۱
- مراجع..... ۱۰۳

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- طرح کلی کانال دایروی دارای سرریز جانبی مورد مطالعه ایماز و مسلو (۱۹۸۵).....	۱۳
شکل ۲-۲- پروفیل سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی در رژیم فوق بحرانی (آلیوتو و همکاران؛ ۲۰۰۱).....	۱۵
شکل ۳-۲- پروفیل سطح آزاد جریان الف- رژیم زیر بحرانی ب- رژیم فوق بحرانی (وطنخواه؛ ۲۰۱۲).....	۱۶
شکل ۴-۲- $\psi(r)$ های مختلف کانال مثلثی برای $\frac{P}{E}, \frac{Z}{E}$ متفاوت (ایماز؛ ۱۹۹۲).....	۱۷
شکل ۵-۲- مقایسه دبی عبوری از روی سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی در رژیم زیر بحرانی واقع در کانال مثلثی (ایماز؛ ۱۹۹۲).....	۱۸
شکل ۶-۲- مقایسه دبی عبوری از روی سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی در رژیم فوق بحرانی واقع در کانال مثلثی (ایماز؛ ۱۹۹۲).....	۱۸
شکل ۷-۲- پروفیل سطح آزاد جریان روش نیمه تحلیلی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در رژیم زیر بحرانی واقع در کانال مثلثی (ایماز؛ ۱۹۹۲).....	۱۸
شکل ۸-۲- پروفیل سطح آزاد جریان روش نیمه تحلیلی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در رژیم فوق بحرانی واقع در کانال مثلثی (ایماز؛ ۱۹۹۲).....	۱۹
شکل ۹-۲- کانال مثلثی دارای سرریز جانبی مورد مطالعه وطنخواه (وطنخواه؛ ۲۰۱۲).....	۱۹
شکل ۱۰-۲- مقایسه پروفیل سطح آزاد جریان در رژیم الف- زیر بحرانی ب- فوق بحرانی (وطنخواه؛ ۲۰۱۲).....	۲۰
شکل ۱۱-۲- طرح کلی کانال U شکل مورد آزمایش ایماز (۱۹۹۷).....	۲۱
شکل ۱۲-۲- مقایسه دبی عبوری از روی سرریز جانبی برای مقادیر آزمایشگاهی و روش نیمه تحلیلی در رژیم زیر بحرانی (ایماز؛ ۱۹۹۷).....	۲۲
شکل ۱۳-۲- مقایسه دبی عبوری از روی سرریز جانبی برای مقادیر آزمایشگاهی و روش نیمه تحلیلی در رژیم فوق بحرانی (ایماز؛ ۱۹۹۷).....	۲۲
شکل ۱۴-۲- مقایسه پروفیل سطح آزاد جریان برای مقادیر آزمایشگاهی و روش نیمه تحلیلی در رژیم زیر بحرانی (ایماز؛ ۱۹۹۷).....	۲۲
شکل ۱۵-۲- مقایسه پروفیل سطح آزاد جریان برای مقادیر آزمایشگاهی و روش نیمه تحلیلی در رژیم فوق بحرانی (ایماز؛ ۱۹۹۷).....	۲۳
شکل ۱۶-۲- طرح شماتیک کانال U مورد مطالعه وطنخواه (وطنخواه؛ ۲۰۱۳).....	۲۳
شکل ۱۷-۲- مقطع عرضی کانال U شکل در دو حالت مختلف تراز جریان (وطنخواه؛ ۲۰۱۳).....	۲۴
شکل ۱۸-۲- مقایسه پروفیل سطح آزاد جریان روش تحلیلی با مقادیر آزمایشگاهی در رژیم الف- زیر بحرانی ب- فوق بحرانی (وطنخواه؛ ۲۰۱۳).....	۲۴

شکل ۲-۱۹- طرح کلی کانال سهموی مورد مطالعه وطنخواه الف- مقطع طولی ب- مقطع عرضی (وطنخواه؛ ۲۰۱۳).....	۲۵
شکل ۲-۲۰- مقایسه روش تحلیلی وطنخواه و رانگ-کوتا مرتبه چهارم در پیش‌بینی پروفیل سطح آزاد جریان واقع در کانال سهموی (وطنخواه؛ ۲۰۱۳).....	۲۶
شکل ۲-۲۱- تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی و در رژیم فوق‌بحرانی به همراه پرش هیدرولیکی.....	۲۷
شکل ۲-۲۲- تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی برای کانال با شیب تند و رژیم فوق‌بحرانی.....	۲۷
شکل ۳-۱- شبکه بندی غیر قابل قبول توسط پیش پردازنده گمبیت.....	۳۱
شکل ۳-۲- طرح کلی مکانیزم‌های انتقال سیال.....	۳۳
شکل ۳-۳- طرح شماتیک شار ورودی و خروجی به یک المان مشخص از سیال.....	۳۳
شکل ۳-۴- طرح کلی مکانیزم روش حجم سیال.....	۴۰
شکل ۳-۵- توزیع نمودار سرعت در جریان‌های آرام و آشفته.....	۴۲
شکل ۳-۶- نحوه محاسبه موقعیت d.....	۴۷
شکل ۴-۱- طرح کلی کانال U شکل مورد مطالعه آیماز (۱۹۹۷) الف- شرایط زیربحرانی ب- شرایط فوق-بحرانی.....	۴۹
شکل ۴-۲- هندسه تولید شده توسط نرم‌افزار اتوکد.....	۵۰
شکل ۴-۳- تفسیر محل تقاطع چندگانه در نرم‌افزار فلوتریدی.....	۵۱
شکل ۴-۴- نحوه برخورد روش FAVOR با مرزهای جامد الف- شبکه‌بندی ریز (استفاده شده در شبیه‌سازی) ب- شبکه‌بندی درشت.....	۵۲
شکل ۴-۵- شرایط مرزی اعمال شده در مدل عددی.....	۵۳
شکل ۴-۶- ابعاد کانال U شکل و مخزن متصل به سرریز جانبی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی.....	۵۴
شکل ۴-۷- شبکه‌بندی میدان جریان در رژیم زیربحرانی الف- صفحه (yz) ب- صفحه (xy) ج- دید سه-بعدی.....	۵۵
شکل ۴-۸- شبکه‌بندی میدان جریان در رژیم فوق‌بحرانی الف- صفحه (yz) ب- صفحه (xy) ج- دید سه-بعدی.....	۵۶
شکل ۴-۹- مقایسه سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی الف- در شرایط جریان زیربحرانی ب- در شرایط جریان فوق‌بحرانی.....	۵۷
شکل ۴-۱۰- مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دبی عبوری از روی سرریز جانبی واقع در کانال U شکل برای $L/D=2$ الف- جریان زیربحرانی ب- جریان فوق‌بحرانی.....	۶۰
شکل ۴-۱۱- مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دبی عبوری از روی سرریز جانبی واقع در کانال U شکل برای $L/D=3$ .....	۶۱
شکل ۴-۱۲- تغییرات سطح آزاد شبیه‌سازی شده جریان در امتداد سرریز جانبی الف- جریان زیربحرانی ب- جریان فوق‌بحرانی.....	۶۳

- شکل ۴-۱۳- خطوط هم‌سرعت شبیه‌سازی شده مولفه طولی جریان در مجاورت سطح آزاد الف- رژیم جریان زیر- بحرانی ب- رژیم جریان فوق‌بحرانی..... ۶۴
- شکل ۴-۱۴- خطوط هم‌سرعت مولفه عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی الف و د- ابتدای دهانه سرریز ب و ه - وسط دهانه سرریز ج، و- انتهای دهانه سرریز..... ۶۵
- شکل ۴-۱۵- جریان ثانویه شبیه‌سازی شده در رژیم زیربحرانی در مقاطع عرضی واقع شده در الف- متر  $X=1$  ب- متر  $X=2$  ج- متر  $X=3$  د- متر  $X=4$ ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۶- بردارهای سرعت عرضی شبیه‌سازی شده در رژیم فوق‌بحرانی در مقاطع عرضی واقع شده در الف- متر  $X=1$  ب- متر  $X=2$  ج- متر  $X=3$  د- متر  $X=4$ ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۷- تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در امتداد تاج سرریز جانبی الف- جریان زیربحرانی ب- جریان فوق- بحرانی..... ۶۷
- شکل ۴-۱۸- الگوی خطوط جریان در داخل کانال اصلی برای هر دو رژیم جریان الف- نزدیک دیواره جامد ب- زیر تراز تاج سرریز ج- هم‌تراز تاج سرریز د- بالای تاج سرریز..... ۶۸
- شکل ۴-۱۹- الگوی تنش برشی بستر در کانال اصلی الف- جریان زیربحرانی ب- جریان فوق‌بحرانی..... ۶۹
- شکل ۴-۲۰- تغییرات سه‌بعدی سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده کانال اصلی در امتداد سرریز جانبی الف- جریان زیربحرانی ب- جریان فوق‌بحرانی..... ۷۰
- شکل ۴-۲۱- تغییرات سطح آزاد شبیه‌سازی شده برای عدد فرودهای مختلف جریان زیربحرانی الف- مقطع ۱-۱ ب- مقطع ۲-۲ ج- مقطع ۳-۳ د- مقطع ۴-۴..... ۷۱
- شکل ۴-۲۲- تغییرات سطح آزاد شبیه‌سازی شده برای عدد فرودهای مختلف جریان فوق‌بحرانی الف- مقطع ۱-۱ ب- مقطع ۲-۲ ج- مقطع ۳-۳ د- مقطع ۴-۴..... ۷۲
- شکل ۴-۲۳- نمای خطوط جریان دو بعدی ترسیم شده در کانال اصلی..... ۷۳
- شکل ۴-۲۴- تغییرات  $W_s$  و  $L_s$  و  $W_d$  در ترازهای متفاوت برای عدد فرودهای مختلف..... ۷۴
- شکل ۴-۲۵- خطوط هم‌سرعت مولفه عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی برای عدد فرودهای مختلف رژیم جریان زیربحرانی..... ۷۵
- شکل ۴-۲۶- خطوط هم‌سرعت مولفه عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی برای عدد فرودهای مختلف رژیم جریان فوق‌بحرانی..... ۷۵
- شکل ۴-۲۷- تغییرات  $\delta$  در طول کانال اصلی و بعد از سرریز جانبی برای عدد فرودهای مختلف الف- جریان زیربحرانی ب- جریان فوق‌بحرانی..... ۷۷
- شکل ۴-۲۸- تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در امتداد تاج سرریز جانبی برای عدد فرودهای مختلف الف، ب، ج- جریان زیربحرانی د، ه، و- جریان فوق‌بحرانی..... ۷۸
- شکل ۴-۲۹- الگوی تنش برشی بستر در کانال اصلی برای رژیم جریان زیربحرانی الف-  $F_1=0/390$  ب-  $F_1=0/574$  ج-  $F_1=0/868$ ..... ۷۹
- شکل ۴-۳۰- الگوی تنش برشی بستر در کانال اصلی برای رژیم جریان فوق‌بحرانی الف-  $F_1=1/01$  ب-  $F_1=1/07$  ج-  $F_1=1/1$ ..... ۸۰



- شکل ۴-۳۱- تغییرات سطح آزاد شبیه‌سازی شده جریان در امتداد سرریز جانبی برای  $L/D=3$ ..... ۸۱
- شکل ۴-۳۲- خطوط هم‌سرعت مولفه عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی برای  $L/D=3$  الف- مقطع ابتدایی ب- مقطع میانی ج- مقطع انتهایی..... ۸۲
- شکل ۴-۳۳- جریان ثانویه شبیه‌سازی شده برای  $L/D=3$  در مقاطع عرضی واقع شده در الف- متر  $x=1$  ب- متر  $x=2$  ج- متر  $x=3$  د- متر  $x=4$ ..... ۸۳
- شکل ۴-۳۴- تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در امتداد تاج سرریز جانبی برای  $L/D=3$ ..... ۸۴
- شکل ۴-۳۵- الگوی تنش برشی بستر در کانال اصلی برای  $L/D=3$ ..... ۸۴
- شکل ۴-۳۶- مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریز جانبی برای دبی‌های مختلف عبوری از داخل کانال U شکل الف- رژیم زیربحرانی ب- رژیم فوق‌بحرانی..... ۸۶
- شکل ۴-۳۷- مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریز جانبی برای  $L/D=3$  در رژیم جریان زیربحرانی..... ۸۶
- شکل ۵-۱- طرح شماتیک کانال U شکل به همراه کانال جانبی و نحوه استغراق سرریز جانبی..... ۸۸
- شکل ۵-۲- شرایط مرزی اعمال شده در مدل سرریز جانبی مستغرق..... ۸۹
- شکل ۵-۳- شبکه‌بندی میدان جریان در وضعیت سرریز جانبی مستغرق الف- دید سه‌بعدی ب- مقطع عرضی ج- پلان..... ۸۹
- شکل ۵-۴- تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی مستغرق الف- جریان زیربحرانی ب- جریان فوق‌بحرانی..... ۹۱
- شکل ۵-۵- خطوط هم‌سرعت مولفه عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی مستغرق الف- ابتدای دهانه سرریز ب- وسط دهانه سرریز ج- انتهای دهانه سرریز..... ۹۲
- شکل ۵-۶- تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در امتداد تاج سرریز جانبی مستغرق برای رژیم جریان زیربحرانی..... ۹۳

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳- مقادیر ورودی متغیرهای روابط ۱۴-۳ و ۱۵-۳.....	۳۸
جدول ۱-۴- مشخصات هندسی مدل‌های آزمایشگاهی آیماز (۱۹۹۷) در دو شرایط زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....	۵۰
جدول ۲-۴- مشخصات هیدرولیکی مدل‌های آزمایشگاهی آیماز (۱۹۹۷) در دو شرایط زیربحرانی و فوق‌بحرانی.....	۵۰
جدول ۳-۴- تعداد سلول‌های محاسباتی در راستاهای مختلف در رژیم جریان زیربحرانی.....	۵۵
جدول ۴-۴- تعداد سلول‌های محاسباتی در راستاهای مختلف در رژیم جریان فوق‌بحرانی.....	۵۶
جدول ۵-۴- نتایج شبیه‌سازی سطح آزاد جریان به منظور کالیبراسیون مخزن.....	۵۷
جدول ۶-۴- مقادیر درصد خطای متوسط ( $APE$ ) و خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) نسبی پروفیل طولی سطح آزاد در هر دو رژیم جریان.....	۵۸
جدول ۷-۴- مقایسه بین ضرایب دبی آزمایشگاهی و عددی در هر دو شرایط جریان.....	۵۹
جدول ۸-۴- مشخصات هندسی کانال‌های U شکل دارای سرریزجانبی برای مقادیر مختلف دبی عبوری.....	۶۰
جدول ۹-۴- مقادیر درصد خطای متوسط نسبی ( $APE$ ) و خطای ریشه میانگین مربعات نسبی ( $RMSE$ ) دبی عبوری از روی سرریزجانبی در هر دو رژیم جریان برای $L/D=2$ .....	۶۰
جدول ۱۰-۴- مقایسه انرژی مخصوص آزمایشگاهی و عددی برای $L/D=2$ .....	۶۲
جدول ۱-۵- تعداد سلول‌های محاسباتی برای وضعیت سرریزجانبی مستغرق در دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق-بحرانی.....	۹۰

## فهرست علامتها

سطح مقطع عرضی جریان	$A$
ضریب ثابت	$a$
مساحت کسری محیط به جریان در راستاهای $x, y, z$	$A_x, A_y, A_z$
درصد خطای متوسط نسبی	$APE$
عرض کانال مستطیلی	$B$
ضریب ثابت	$b$
افت جریان در محیطهای دارای خلل و فرج در راستای $x, y, z$	$b_x, b_y, b_z$
ضریب ثابت	$c$
ضریب دبی سرریز جانبی	$C_d$
ضریب دبی حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی	$C_{de}$
ضریب دبی حاصل از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی	$C_{dn}$
ضرایب ثابت معادله انرژی جنبشی آشفتگی	$CDIS3, CDIS2, CDIS1$
ضریب ثابت	$CNU$
ضریب ثابت	$C_p$
قطر کانال اصلی	$D$
فاصله مرکز سلول محاسباتی تا جداره جامد	$d$
انرژی مخصوص در کانال اصلی	$E$
انرژی مخصوص آزمایشگاهی	$E_{Exp}$
انرژی مخصوص عددی	$E_{Num}$
مقدار انرژی مخصوص در ابتدای بالادست	$E_1$
مقدار انرژی مخصوص در انتهای پائین‌دست	$E_2$
جزء حجمی سیال در یک سلول محاسباتی	$F$
عدد فرود کانال اصلی	$F_r$
تغییرات نرخ زمان جزء حجمی به همراه ترم چشمه	$F_{SOR}$
شتاب‌های ناشی از لزجت در راستای $x, y, z$	$f_x, f_y, f_z$
عدد فرود واقع در ابتدای بالادست سرریز جانبی	$F_1$
شتاب‌های جرمی در راستای $x, y, z$	$G_x, G_y, G_z$
شتاب گرانش	$g$
مولفه شتاب گرانش در جهت عمود بر سطح آزاد	$g_n$
شار یک کمیت معلوم	$J$
ضریب ثابت فن کارمن	$K$

انرژی جنبشی آشفتگی	$k_T$
طول سرریز جانبی	$L$
طول ناحیه ایستایی	$L_s$
شیب جداره‌های کانال مثلثی	$m, m'$
سطح معمولی خارجی	$n$
ارتفاع تاج سرریز جانبی	$P$
فشار	$p$
دبی جریان در کانال اصلی	$Q$
دبی عبوری از روی سرریز جانبی	$Q_w$
دبی ورودی کانال اصلی	$Q_I$
دبی بر واحد طول عبوری از روی سرریز جانبی	$q$
ضریب تبدیل سیستم مختصات	$R$
عدد رینولدز	$Re$
ترم نفوذپذیری آشفتگی	$R_{DIF}$
ترم چشمه	$R_{SOR}$
درصد خطای نسبی	$REP$
خطای ریشه میانگین مربعات	$RMSE$
نتایج آزمایشگاهی آیماز (۱۹۹۷)	$R_{(measured)}$
نتایج شبیه‌سازی عددی	$R_{(simulated)}$
شعاع از مبدا	$r_m$
شیب اصطکاک	$S_f$
شیب طولی کانال اصلی	$S_0$
دمای سیال	$T$
مقیاس طول آشفتگی	$TLEN$
ضریب ثابت	$T^*$
زمان	$t$
مولفه‌های سرعت در راستای $x, y, z$ یا $r, \theta, z$	$u, v, w$
مولفه‌های سرعت سیال در چشمه نسبی در خود چشمه	$u_s, v_s, w_s$
مولفه‌های سرعت ترم چشمه	$u_w, v_w, w_w$
سرعت برشی دیواره	$u_*$
نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان	$V_F$
تنش‌های روی دیواره	$wsx, wsy, wsz$
عرض صفحه جدایش جریان	$W_d$