



# مدلسازی امواج تیز ایستا در جریان آشفته آبهای کم عمق با روشهای حجم محدود

**مؤلف**

ابراهیم علامتیان

**استاد راهنما**

دکتر محمدرضا جعفرزاده

**استاد مشاور**

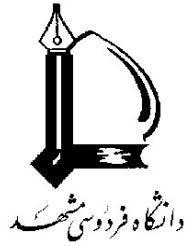
دکتر حمید نیازمند

پایان‌نامه‌ی ارائه شده به دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد برای

احراز درجه‌ی دکتری (Ph.D.) عمران-آب و هیدرولیک

زمستان ۱۳۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



این پایان نامه که به وسیله‌ی آقای **ابراهیم علامتیان** تدوین و به هیأت داوران ارائه گردیده است، به عنوان بخش پژوهشی دوره‌ی دکتری آب و هیدرولیک، مورد تأیید شورای تحصیلات تکمیلی گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

درجه ارزشیابی: عالی

نمره: ۱۹/۰

تاریخ دفاع: ۸۹/۱۱/۱۷

▪ استاد راهنما: آقای دکتر محمد رضا جعفرزاده

▪ استاد مشاور: آقای دکتر حمید نیازمند

▪ استاد مدعو خارجی: آقای دکتر محمدعلی بنی‌هاشمی

▪ استاد مدعو داخلی: آقای دکتر سید محمود حسینی

▪ استاد مدعو داخلی: آقای دکتر محمود فغفور مغربی

▪ استاد مدعو داخلی: آقای دکتر جلیل ابریشمی

▪ نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی: آقای دکتر فرزاد شهبابیان

## تأییدیه

گواهی می‌شود، این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه‌ی علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب‌های آن، به جز موردهایی که نام منبع آورده شده است، نتیجه‌ی کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

▪ امضای دانشجو: ابراهیم علامتیان

▪ امضای استاد راهنما: دکتر محمدرضا جعفرزاده



بسمه تعالی .  
مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان .  
دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه: مدلسازی امواج تیز ایستا در جریان آشفته آبهای کم عمق با روشهای حجم محدود

نام نویسنده: ابراهیم علامتیان

نام استاد(ان) راهنما: دکتر محمدرضا جعفرزاده

نام استاد(ان) مشاور: دکتر حمید نیازمند

دانشکده : مهندسی	گروه: عمران	رشته تحصیلی: عمران - آب و هیدرولیک
تاریخ تصویب:	تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۱۱/۱۷	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد <input type="radio"/>	دکتری <input checked="" type="radio"/>	تعداد صفحات:

چکیده رساله/پایان نامه:

در این رساله، رفتار امواج تیز ایستا در جریان‌های آشفته آبهای کم عمق بررسی می‌شود. در آغاز، معادلات متوسط گرفته شده در عمق با استفاده از سه مدل آشفته‌گی طول اختلاط،  $k - \varepsilon$  و  $ASM$  تکمیل می‌شود؛ و سپس به کمک روش‌های حجم محدود رو و ون - لیر، که مناسب برای تسخیر امواج تیز می‌باشند، حل می‌شود؛ این روش - ها مبتنی بر بازسازی خطی متغیرهای وابسته درون سلول هستند. کارایی این روش‌ها، میزان تاثیر اثرات آشفته‌گی و اندرکنش امواج تیز و آشفته‌گی با استفاده از دو آزمون عددی بررسی می‌شود. در آزمون اول، جریان فوق بحرانی در کانال به همراه مانع عرضی بصورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه می‌شود. در آزمون دوم، جریان فوق بحرانی در تقاطع دو کانال بصورت عددی شبیه سازی می‌شود و با داده‌های موجود سایر محققین مقایسه می‌گردد. در ادامه، اصول روشهای گودونفی و روش PPM مرور می‌شود. در این روش، از توابع چند جمله‌ای درجه دوم برای بازسازی متغیرهای وابسته استفاده می‌شود. سپس روش جدیدی برای بازسازی متغیرهای وابسته درون سلول با استفاده از توابع چند جمله‌ای درجه سوم پیشنهاد می‌گردد. روش پیشنهادی برای حل معادلات انتقال خطی و غیر خطی بکار برده می‌شود و برای معادلات یک بعدی و دو بعدی آبهای کم عمق توسعه داده می‌شود. نتایج راهکار پیشنهادی و همچنین سایر روش‌های بازسازی متغیرها، با استفاده از چند نمونه عددی در حالت‌های یک و دو بعدی معادلات آبهای کم عمق با یکدیگر مقایسه می‌شوند و برتری روش پیشنهادی در این قسمت تایید می‌گردد.

کلید واژه:	امضای استاد راهنما:
۱. معادلات آبهای کم عمق ۲. امواج تیز ایستا ۳. روش حجم محدود ۴. مدلسازی آشفته‌گی ۵. بازسازی غیر خطی	تاریخ:

# سپاسگزاری

سپاس و ستایش پروردگار را که توفیق به پایان رساندن رساله دکتری را به اینجانب عطا نمود. بی تردید پدر و مادر و کلیه اعضای خانواده‌ام، که در طول مدت تحصیل مشوق من بوده‌اند، نقش اساسی در اتمام موفقیت آمیز این رساله داشته‌اند. علاوه بر این، بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات و حمایت‌های بی‌شائبه دیگر عزیزانی که در این مسیر یاریگر اینجانب بوده‌اند سپاسگزاری نمایم:

جناب آقای **دکتر محمدرضا جعفرزاده**، استاد محترم راهنمای اینجانب، به خاطر تمامی محبت‌هایشان و توجه به روند حرکت پژوهشی بنده در طول چهار سال گذشته. ایشان با دقت و ریزبینی مثال زدنی و منحصر به فردشان افکار پراکنده و مغشوش بنده را نظام بخشیدند. من از لحاظ علمی همیشه خود را مدیون ایشان می‌دانم.

جناب آقای **دکتر حمید نیازمند**، استاد مشاور بزرگوار این رساله، به خاطر مطالعه رساله و ارائه نکات ارزشمند که به حق به غنای رساله افزود. اخلاق نیکو، فروتنی و مهربانی ایشان در معدود افرادی در چنین سطح علمی دیده می‌شود.

جناب آقای **دکتر محمدعلی بنی‌هاشمی**، استاد محترم داور خارجی، به پاس مطالعه دقیق و سریع رساله اینجانب و ارائه نظرات انتقادی.

**دکتر سید محمود حسینی - دکتر محمود فغفور مغربی و دکتر جلیل ابریشمی**، داوران محترم داخلی، به خاطر مطالعه رساله و ارائه نکات ارزشمند.

در نهایت لازم می‌دانم از همه عزیزانی که در مراحل مختلف انجام این رساله یاریگر اینجانب بوده‌اند سپاسگزاری نمایم.

ابراهیم علامتیان

اسفندماه ۱۳۸۹

# فهرست

الف	چکیده.....
ب	سپاسگزاری.....
ت	فهرست.....
د	نمایه‌ی نشانه‌ها.....
س	فهرست شکلها.....
ط	فهرست جدولها.....

---

۱	مقدمه:.....
---	-------------

---

۵	فصل یکم: مدل‌سازی آشفته‌گی در جریان آشفته.....
---	--

---

۵	۱-۱- بدست آوردن معادلات حاکم.....
۵	۱-۱-۱- معادلات ناویر استوکس.....
۶	۱-۱-۲- معادلات متوسط رینولدز ناویر استوکس.....
۷	۱-۱-۳- شکل بدون بعد معادلات ناویر استوکس.....
۸	۱-۲- شبیه‌سازی آشفته‌گی در جریان‌های مهندسی.....
۹	۱-۲-۱- حل عددی مستقیم.....
۱۰	۱-۲-۲- شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ.....
۱۰	۱-۲-۳- مدل‌های آشفته‌گی معادلات متوسط رینولدز.....
۱۱	۱-۲-۴- راهکار معادلات متوسط رینولدز غیر دائمی.....
۱۱	۱-۳- مدل‌سازی آشفته‌گی و معادلات متوسط رینولدز ناویر استوکس.....
۱۲	۱-۳-۱- مدل‌های لزجت گردابه‌ای خطی.....
۱۲	۱-۳-۱-۱- مدل‌های جبری آشفته‌گی.....
۱۳	۱-۳-۱-۲- مدل‌های یک معادله‌ای.....
۱۳	۱-۳-۱-۳- مدل‌های دو معادله‌ای.....
۱۵	۱-۳-۱-۴- محدودیت‌های مدل‌های لزجت گردابه‌ای.....
۱۵	۱-۳-۲- مدل‌های آشفته‌گی تنش رینولدز.....
۱۶	۱-۳-۳- مدل‌های تنش جبری.....
۱۷	۱-۴- شرایط مرزی دیواره.....

۱۸	..... ۱-۴-۱- شرط مرزی غیر لغزشی
۱۸	..... ۲-۴-۱- شرط مرزی تابع دیواره
۱۹	..... ۳-۴-۱- شرط مرزی لغزشی
<b>۲۱</b>	<b>..... فصل دوم: جریان آشفته آبهای کم عمق</b>
۲۱	..... ۱-۲- جریان شبه دو بعدی آشفته
۲۴	..... ۲-۲- مدل‌های عددی در مهندسی هیدرولیک
۲۶	..... ۳-۲- معادلات آبهای کم عمق
۲۶	..... ۱-۳-۲- علائم اختصاری
۲۷	..... ۲-۳-۲- محاسبه سطح آزاد
۲۸	..... ۳-۳-۲- معادلات سه بعدی آبهای کم عمق
۳۰	..... ۴-۳-۲- معادلات متوسط عمقی آبهای کم عمق
۳۴	..... ۵-۳-۲- نتیجه‌گیری بدست آوردن معادلات و فرضیات
۳۴	..... ۶-۳-۲- شکل بدون بعد معادلات متوسط عمقی آبهای کم عمق
۳۵	..... ۷-۳-۲- اصطکاک بستر
۳۷	..... ۸-۲-۲- شرایط مرزی
۳۸	..... ۴-۲- مدل‌سازی آشفتگی در آبهای کم عمق
۳۸	..... ۱-۴-۲- مقیاس طولی آشفتگی در آبهای کم عمق
۳۸	..... ۲-۴-۲- فرضیه بوسینسک در جریان آبهای کم عمق
۳۹	..... ۳-۴-۲- مدل متوسط عمقی لزجت گردابه‌ای سهمی
۴۱	..... ۴-۴-۲- مدل طول اختلاط متوسط عمقی
۴۲	..... ۵-۴-۲- مدل متوسط عمقی $k - \epsilon$
۴۲	..... ۱-۵-۴-۲- مدل $k - \epsilon$ ارائه شده توسط راستوجی و رودی
۴۳	..... ۲-۵-۴-۲- اصلاحی بوآجی در مدل $k - \epsilon$
۴۴	..... ۳-۵-۴-۲- بررسی اختلاف دو مدل $k - \epsilon$
۴۴	..... ۴-۵-۴-۲- شرایط مرزی
۴۵	..... ۵-۵-۴-۲- محدودیت در تولید انرژی جنبشی آشفتگی
۴۶	..... ۶-۵-۴-۲- واقعگرانه کردن مدل‌های لزجت گردابه‌ای
۴۷	..... ۵-۲- مدل متوسط عمقی تنش‌های جبری
۴۷	..... ۱-۵-۲- معادلات تنش‌های جبری در معادلات دو بعدی آبهای کم عمق
۴۹	..... ۲-۵-۲- تخمین جمله تولید آشفتگی تنش‌های عمودی ناشی از اصطکاک بستر
۵۱	..... ۳-۵-۲- واقعگرایانه کردن مدل ASM
۵۲	..... ۴-۵-۲- جریان لایه مرزی



## فصل سوم: جداسازی معادلات..... ۵۳

۵۳	..... ۱-۳- روش‌های عددی برای معادلات دو بعدی آبهای کم عمق.....
۵۵	..... ۲-۳- روش حجم محدود.....
۵۷	..... ۳-۳- روش حجم محدود برای حل معادلات دو بعدی آبهای کم عمق.....
۵۸	..... ۴-۳- جداسازی معادلات در روش حجم محدود.....
۵۸	..... ۱-۴-۳- جداسازی معادله پخش-انتقال.....
۵۹	..... ۲-۴-۳- جداسازی متکی به بالادست در مقابل جداسازی مرکزی.....
۶۰	..... ۱-۲-۴-۳- جداسازی متکی به بالادست شار انتقالی.....
۶۱	..... ۲-۲-۴-۳- جداسازی جملات چشمه به روش متکی به بالادست.....
۶۲	..... ۳-۴-۳- آنالیز خطی پایداری برای معادله یک بعدی پخش-انتقال.....
۶۲	..... ۱-۳-۴-۳- جداسازی مرکزی.....
۶۲	..... ۲-۳-۴-۳- جداسازی متکی به بالادست شار انتقالی.....
۶۳	..... ۳-۳-۴-۳- جداسازی متکی به بالادست جمله شار پخشی.....
۶۳	..... ۴-۳-۴-۳- جداسازی نیمه ضمنی شار پخشیدگی.....
۶۴	..... ۵-۳- جداسازی معادلات دو بعدی آبهای کم عمق.....
۶۴	..... ۱-۵-۳- جداسازی بر روی فضای فیزیکی.....
۶۶	..... ۲-۵-۳- معادلات دو بعدی آبهای کم عمق در شکل بقایی و برداری.....
۶۷	..... ۳-۵-۳- مشخصه هذلولی معادلات دو بعدی آبهای کم عمق.....
۶۸	..... ۴-۵-۳- جداسازی معادلات.....
۶۸	..... ۱-۴-۵-۳- جداسازی در زمان.....
۶۹	..... ۲-۴-۵-۳- جداسازی در فضای فیزیکی.....
۶۹	..... ۵-۵-۳- جداسازی شار جابجایی.....
۷۱	..... ۱-۵-۵-۳- روش مرتبه اول ون- لیر.....
۷۱	..... ۲-۵-۵-۳- روش مرتبه اول متکی به بالادست رو.....
۷۱	..... ۳-۵-۵-۳- ویرایش مرتبه دوم روش‌های رو و ون- لیر.....
۷۳	..... ۴-۵-۵-۳- تنظیم مقادیر ویژه.....
۷۴	..... ۶-۵-۳- تخمین گرادیان در سلول‌های مثلثی.....
۷۵	..... ۷-۵-۳- جداسازی جمله شیب بستر.....
۷۵	..... ۱-۷-۵-۳- جداسازی مرکزی جمله شیب بستر.....
۷۶	..... ۲-۷-۵-۳- جداسازی با روش متکی به بالادست برای جمله شیب بستر.....
۷۷	..... ۳-۷-۵-۳- جداسازی متکی به بالادست جمله شیب بستر در حالت استاتیک جریان.....
۷۸	..... ۴-۷-۵-۳- جداسازی متکی به بالادست مرتبه دوم جمله شیب بستر.....
۷۹	..... ۸-۵-۳- جداسازی جمله شار پخش.....

۷۹	.....۳-۵-۸-۱- جداسازی مرکزی جمله شار پخش لزجتی.....
۸۰	.....۳-۵-۸-۲- روش جداسازی متکی به بالادست در شار پخش لزجتی.....
۸۰	.....۳-۵-۸-۳- روش نیمه ضمنی پخش لزجتی.....
۸۲	.....۳-۵-۹- جداسازی تنش‌های رینولدز.....
۸۳	.....۳-۶-۶- جداسازی معادله مدل متوسط عمقی $k - \varepsilon$ .....
۸۳	.....۳-۶-۱- معادله متوسط عمقی مدل $k - \varepsilon$ در شکل بقایی.....
۸۴	.....۳-۶-۲- جداسازی شار پخش جابجایی روش متکی به بالادست مرتبه اول.....
۸۵	.....۳-۶-۲-۱- روش هیبرید.....
۸۶	.....۳-۶-۲-۲- توسعه به دقت مرتبه دوم.....
۸۶	.....۳-۶-۳- جداسازی جملات چشمه.....
۸۷	.....۳-۷- کاربرد روش متوسط عمقی تنش جبری.....
۸۷	.....۳-۸- اعمال شرط مرزی دیوار.....
۸۸	.....۳-۸-۱- شرط مرزی غیر لغزشی.....
۸۸	.....۳-۸-۲- تابع دیواره.....
۸۸	.....۳-۸-۳- شرط مرزی لغزشی.....
۸۹	.....۳-۹- محاسبه مقادیر راس سلول‌های محاسباتی.....

## ۹۰ فصل چهارم: مدل عددی و صحت سنجی آن.....

۹۰	.....۴-۱- فلوچارت برنامه حل عددی.....
۹۳	.....۴-۲- پرش هیدرولیکی مایل.....
۹۸	.....۴-۳- جریان آشفته در کانال.....
۱۰۱	.....۴-۴- نتیجه گیری.....

## ۱۰۲ فصل پنجم: جریان فوق بحرانی آشفته در کانال با وجود مانع عرضی.....

۱۰۲	.....۵-۱- بیان مسئله.....
۱۰۴	.....۵-۲- امکانات آزمایشگاهی.....
۱۰۶	.....۵-۳- مدلسازی عددی.....
۱۰۶	.....۵-۳-۱- تعیین نوع و تراکم سلول‌های محاسباتی.....
۱۱۲	.....۵-۳-۲- انتخاب نوع محدود کننده.....
۱۱۲	.....۵-۳-۳- مقایسه روش حجم محدود و روش تفاضل محدود.....
۱۱۳	.....۵-۳-۴- جداسازی پیشرو و مرکزی جمله چشمه شیب بستر.....
۱۱۴	.....۵-۳-۵- نتایج عددی.....
۱۲۷	.....۵-۳-۶- بررسی اثرات جملات چشمه.....
۱۳۳	.....۵-۳-۷- بررسی کانال با دو مانع عرضی.....
۱۳۶	.....۵-۴- نتیجه گیری.....

۱۳۸	<b>فصل ششم: تحلیل عددی جریان در تقاطع دو کانال</b>
۱۳۸	۱-۶- سوابق تحقیقاتی
۱۴۰	۲-۶- داده‌های آزمایشگاهی
۱۴۳	۳-۶- مدلسازی عددی
۱۴۳	۱-۳-۶- تعیین نوع و تراکم سلول‌های محاسباتی
۱۴۶	۲-۳-۶- نتایج عددی
۱۵۷	۴-۶- نتیجه گیری
۱۵۹	<b>فصل هفتم: کاربرد شار غیر خطی در حل معادلات آبهای کم عمق</b>
۱۵۹	۱-۷- پیشگفتار
۱۶۱	۲-۷- ساختار کلی روش‌های گودونفی
۱۶۲	۳-۷- ساختار مسئله تعمیم یافته ریمان در مرز سلول‌ها
۱۶۴	۴-۷- روش سهمی-تکه‌ای
۱۶۷	۵-۷- روش سهمی-تکه‌ای با الگوی محلی
۱۶۸	۶-۷- روش پیشنهادی برای بازسازی متغیرهای وابسته درون سلول
۱۷۰	۷-۷- صحت سنجی روش‌ها
۱۷۰	۱-۷-۷- معادله انتقال محض
۱۷۳	۲-۷-۷- معادله برگرز
۱۷۸	۸-۷- کاربرد شار غیر خطی در حل معادلات آبهای کم عمق
۱۸۰	۱-۸-۷- تعیین مقادیر مرزی
۱۸۲	۲-۸-۷- محاسبه شار در مرز سلول‌ها
۱۸۴	۳-۸-۷- نتایج عددی یک بعدی
۱۹۶	۴-۸-۷- نتایج عددی دو بعدی
۱۹۸	۹-۷- نتیجه گیری
۱۹۹	<b>فصل هشتم: خلاصه و نتیجه گیری</b>
۱۹۹	۱-۸- خلاصه
۲۰۱	۲-۸- نتیجه گیری
۲۰۲	۳-۸- پژوهشهای آیندگان
۲۰۴	<b>منابع</b>

## نمایه‌ی نشانه‌ها

$u_i (i=1,2,3)$	مولفه بردار سرعت در جهات $x, y$ و $z$ .....
$\tau_{ij}$	تانسور تنش لزجتی.....
$p$	فشار.....
$F_i$	نیروی حجمی.....
$s_{ij}$	تانسور نرخ کرنش.....
$\mu$	لزجت دینامیکی.....
$\bar{u}$	سرعت متوسط زمانی.....
$u'$	نوسانات سرعت.....
$\overline{u'_i u'_j}$	تنش‌های رینولدز.....
$u_s$	مقیاس سرعت نوسانات.....
$\eta_k$	مقیاس کلموگروف.....
$l_s$	طول مشخصه.....
$\varepsilon$	نرخ اتلاف انرژی آشفتگی.....
$U_t$	لزجت گردابه‌ای.....
$\bar{s}_{ij}$	تانسور نرخ کرنش‌های اصلی.....
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی.....
$\bar{u}_t$	سرعت مماس با دیواره.....
$\sigma_\varepsilon, \sigma_k, c_{2\varepsilon}, c_{1\varepsilon}, c_\mu$	ثابت‌های مدل آشفتگی.....
$\Phi_{ij}$	جمله مربوط به مدل کردن ترم‌های فشار-کرنش.....
$C_{ij}$	جملات انتقالی.....
$D_{ij}$	جملات پخش.....
$P_{ij}$	جملات تولید.....
$u_*$	سرعت برشی دیواره.....
$\nu$	لزجت سینماتیک.....
$E$	ثابت زبری.....
$\kappa$	ضریب ثابت فون کارمن.....
$K_s$	ارتفاع زبری.....
$\tau_w$	تنش برشی دیواره.....
$\overline{u'v'}, \overline{v'^2}, \overline{u'^2}$	تنش‌های رینولدز.....
$\bar{u}_n$	مولفه سرعت عمود بر دیواره جامد.....
$n_c$	زبری مانینگ در سلول‌های مجاور دیواره.....

$H, h$	عمق آب
$B$	پهنای سلول
$\eta$	نرخ بازگشت انرژی
$V, U$	سرعت جریان در افق
$U_z$	لزجت گردابه‌ای قائم
$P$	پارامتر دنباله جزیره
$C_f$	ثابت اصطکاک بستر
$\tau_b$	تنش برشی بستر
$R_v$	عدد رینولدز قائم
$R_h$	عدد رینولدز افقی
$z_b$	تراز بستر کانال
$z_s$	تراز سطح آب
$p_h$	فشار هیدرواستاتیک
$p_a$	فشار اتمسفر
$p_d$	فشار هیدرودینامیک
$g$	ثابت شتاب جاذبه
$L_n$	مقیاس طول‌های افقی
$H_n$	مقیاس طول قائم
$f, \phi_i(x, y)$	تابع شکل
$\tau_{uv}, \tau_{uu}$	تنش‌های پراکندگی طولی و عرضی
$\bar{t}_{xx}$	تنش مؤثر
$\hat{u}'^2$	تنش رینولدز متوسط عمقی
$\tau_{b,x}$	تنش برشی در بستر
$\tau_{s,x}$	تنش برشی در سطح سیال
$n = (n_x, n_y), \alpha = (\alpha_x, \alpha_y)$	بردار عمود بر سطح
$\tilde{n} = (\tilde{n}_x, \tilde{n}_y), \tilde{\alpha} = (\tilde{\alpha}_x, \tilde{\alpha}_y)$	بردار بیکه واحد
$c$	سرعت موج
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	مقادیر ویژه
$F_p$	مجموع کل نیروی فشاری در هر طرف المان سیال
$U_i^h$	لزجت گردابه‌ای ناشی از فرایندهای افقی
$U_i^v$	لزجت گردابه‌ای ناشی از اصطکاک بستر
$d_{wall}$	فاصله تا نزدیکترین دیواره
$T_u$	شدت آشفتگی
$P_{uv,V}$ و $P_{vv,V}, P_{uu,V}$	تولید ناشی از تنش‌های عمودی
$P_{uv,V}, P_{vv,V}, P_{uu,V}$	تولید آشفتگی ناشی از اصطکاک بستر

$L_i$	.....	مرز سلول
$K_i$	.....	تعداد وجوه سلول
$F(u; x, y)$	.....	تابع شار
$G(x, w)$	.....	جملات چشمه
$c_k$	.....	سرعت انتقالی
$w^n$	.....	مقدار متغیر بقایی
$w_i^n$	.....	مقدار متوسط متغیر $w$ در سلول $C_i$
$\phi$	.....	شار عددی
$\Delta t$	.....	گام زمانی
$C_r$	.....	عدد کورانت
$N_{\log}$	.....	نقاط موجود در ناحیه لگاریتمی
$N_w$	.....	نقاط روی مرز دیوار
$N_b$	.....	نقاط بر روی مرز باز
$q_i$	.....	دبی واحد عرض
$F_y, F_x$	.....	شار فیزیکی در جهات $x$ و $y$
$G_1$	.....	جمله چشمه شیب بستر
$G_2$	.....	جمله چشمه اصطکاک بستر
$G_3$	.....	جمله چشمه آشفتگی
$ U $	.....	اندازه بردار سرعت
$Z$	.....	مجموع شار عمودی
$A$	.....	جاکوین ماتریس شار عمودی
$W_{ij}, W_{ji}$	.....	مقدار متغیر بقایی در مرز سلول
$\Delta^*$	.....	گرادیان محدود شده
$\Gamma_{D_1}$	.....	ثابت پخش متعامد
$\Phi$	.....	متغیر آشفتگی بقایی
$F_{\Phi,y}, F_{\Phi,x}$	.....	شار فیزیکی آشفتگی
$H_1$	.....	پخش لزجی و آشفتگی
$H_2$	.....	تولید ناشی از گرادیان سرعت افقی
$H_3$	.....	تولید ناشی از اصطکاک بستر
$H_4$	.....	نرخ اتلاف انرژی
$v_e$	.....	لزجت مؤثر
$A_i$	.....	مساحت سلول $C_i$
$Va_k$	.....	مقدار متغیر $Va$ در راس $k$
$Q$	.....	دبی
$n$	.....	ضریب زبری مانینگ

---

$\Delta x, \Delta y$	..... گام مکانی
$\nabla_x, \Delta_x$	..... عملگر پیشرو
$\nabla_y, \Delta_y$	..... عملگر پسرو
$E_2, E_1, E_{qt}, E_{qxy}$	..... شاخص آماری خطا
$y^+$	..... معیار فاصله تا دیوار

## فهرست شکلها

۲	..... شکل (م-۱) - نمونه‌هایی از جریان‌های آشفته
۳۹	..... شکل (۱-۲) - المان سیال در حالت جریان یکنواخت
۴۵	..... شکل (۲-۲) - برخورد جت سیال با دیواره جامد
۶۰	..... شکل (۱-۳) - خطوط مشخصه در معادله خطی انتقال محض یک بعدی
۶۴	..... شکل (۲-۳) - انواع سلول محاسباتی
۶۵	..... شکل (۳-۳) - مفاهیم اولیه سلول‌های لبه‌ای
۷۲	..... شکل (۴-۳) - بازسازی اطلاعات در روی مرز سلول‌ها
۷۴	..... شکل (۵-۳) - دستگاه مختصات حقیقی و مجازی
۷۵	..... شکل (۶-۳) - محاسبه گرادیان در سلول‌های غیر مثلثی
۸۱	..... شکل (۷-۳) - جداسازی نیمه ضمنی جمله شار پخششی
۹۲	..... شکل (۱-۴) - فلوجارت حل عددی در نرم افزار
۹۳	..... شکل (۲-۴) - شمایی از صفحات میانبر نوشته شده برای ورود اطلاعات
۹۳	..... شکل (۳-۴) - فضای محاسباتی
۹۵	..... شکل (۴-۴) - تغییرات شاخص خطای نرم $L_2$ در برابر تعداد سلول‌های محاسباتی
۹۶	..... شکل (۵-۴) - نمای سه بعدی پرش هیدرولیکی ایجاد شده در کانال
۹۷	..... شکل (۶-۴) - پروفیل طولی عمق جریان در $y = 5.0m$
۹۷	..... شکل (۷-۴) - پروفیل طولی عمق جریان در $x = 15.0m$
۹۸	..... شکل (۸-۴) - شبکه $m1$
۹۹	..... شکل (۹-۴) - تغییرات متغیر $Fu$ در برابر تراکم‌های مختلف سلول‌ها
۱۰۰	..... شکل (۱۰-۴) - تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در عرض کانال
۱۰۱	..... شکل (۱۱-۴) - پروفیل عرضی توزیع سرعت طولی در انتهای کانال ( $x = 1.8m$ )
۱۰۳	..... شکل (۱-۵) - آبشکن‌های متوالی در محل یک خم
۱۰۴	..... شکل (۲-۵) - فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده
۱۰۴	..... شکل (۳-۵) - نمای شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی
۱۰۶	..... شکل (۴-۵) - توسعه امواج ایستا در کانال
۱۰۶	..... شکل (۵-۵) - کروکی پلان کانال و موقعیت مقاطع طولی و عرضی
۱۰۸	..... شکل (۶-۵) - نمودار تغییرات Res در برابر زمان محاسبات برای شبکه MT3 در حالت ST1 - مانع $0.12m$
۱۰۸	..... شکل (۷-۵) - تاثیر تراکم و نوع سلول‌های محاسباتی بر طول گردابه برای مانع با عرض $0.12m$ - مدل آشفتگی ASM
۱۰۹	..... شکل (۸-۵) - تغییرات پارامتر $Fh$ در برابر تراکم سلولی
۱۱۰	..... شکل (۹-۵) - تغییرات زمان محاسبات در برابر تعداد سلول‌های محاسباتی برای مانع با عرض $0.12m$ - شبکه MT
۱۱۱	..... شکل (۱۰-۵) - نمای سه بعدی جریان در مدل ASM برای مانع با عرض $0.12m$ - شبکه مثلثی (MT)
۱۱۱	..... شکل (۱۱-۵) - نمای سه بعدی جریان در مدل ASM برای مانع با عرض $0.12m$ - شبکه چهار وجهی (MQ)



- شکل (۵-۱۲) - توزیع عدد فرود در مدل ASM برای مانع با عرض  $0.12m$  - شبکه MT ..... ۱۱۱
- شکل (۵-۱۳) - مقایسه محدود کننده های شیب مختلف در امتداد  $p1$  برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۱۲
- شکل (۵-۱۴) - پروفیل طولی عمق جریان در مقطع  $p1$  با استفاده از دو روش عددی حجم محدود و تفاضل محدود ..... ۱۱۳
- شکل (۵-۱۵) - پروفیل طولی عمق جریان در مقطع  $p1$  با استفاده از دو روش محاسبه جمله چشمه شیب بستر ..... ۱۱۴
- شکل (۵-۱۶) - نیمرخ طولی عمق جریان یک متر پس از مانع با عرض  $0.12m$  با استفاده از مدل های آشفتگی مختلف ..... ۱۱۶
- شکل (۵-۱۷) - نیمرخ طولی عمق جریان یک متر پس از مانع با عرض  $0.16m$  با استفاده از مدل های آشفتگی مختلف ..... ۱۱۷
- شکل (۵-۱۸) - نیمرخ طولی عمق جریان یک متر پس از مانع با عرض  $0.24m$  با استفاده از مدل های آشفتگی مختلف ..... ۱۱۸
- شکل (۵-۱۹) - نیمرخ طولی عمق جریان یک متر پس از مانع با عرض  $0.30m$  با استفاده از مدل های آشفتگی مختلف ..... ۱۱۹
- شکل (۵-۲۰) - خطوط جریان در مدل های مختلف برای مانع با عرض  $0.24m$  ..... ۱۲۰
- شکل (۵-۲۱) - توزیع انرژی جنبشی آشفتگی برای مانع با عرض  $0.12m$   $k(m^2/s^2)$  ..... ۱۲۰
- شکل (۵-۲۲) - تغییرات حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در برابر عرض مانع ..... ۱۲۱
- شکل (۵-۲۳) - تغییرات مختصه  $X$  محل وقوع حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در برابر عرض مانع ..... ۱۲۱
- شکل (۵-۲۴) - توزیع تنش های رینولدز در فضای محاسباتی برای مانع با عرض  $0.12m$   $(m^2/s^2)$  ..... ۱۲۲
- شکل (۵-۲۵) - تغییرات حداکثر تنش های رینولدز در برابر عرض مانع ..... ۱۲۲
- شکل (۵-۲۶) - تغییرات مختصه  $X$  محل وقوع حداکثر تنش های رینولدز در برابر عرض مانع ..... ۱۲۳
- شکل (۵-۲۷) - توزیع جمله چشمه معادله ممنتم در راستای  $X$  برای مانع با عرض  $0.12m$  (نتایج مدل ASM) ..... ۱۲۳
- شکل (۵-۲۸) - مقایسه نیمرخ عرضی عمق جریان از مدل های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۲۵
- شکل (۵-۲۹) - مقایسه شاخص خطا  $E1$  در امتداد های مختلف برای مانع با عرض های متفاوت ..... ۱۲۶
- شکل (۵-۳۰) - مقایسه شاخص خطا  $E2$  در امتداد های مختلف برای مانع با عرض های متفاوت ..... ۱۲۶
- شکل (۵-۳۱) - مقایسه آماری نتایج ..... ۱۲۷
- شکل (۵-۳۲) - نیمرخ طولی عمق جریان در حالت های مختلف در امتداد  $P1$  برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۳۳) - نیمرخ طولی عمق جریان در حالت های مختلف در امتداد  $P2$  برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۳۴) - نیمرخ طولی عمق جریان در حالت های مختلف در امتداد  $P3$  برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۳۵) - نیمرخ طولی عمق جریان در حالت های مختلف در امتداد  $P1$  برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۳۰
- شکل (۵-۳۶) - نیمرخ طولی عمق جریان در حالت های مختلف در امتداد  $P2$  برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۳۰
- شکل (۵-۳۷) - نیمرخ طولی عمق جریان در حالت های مختلف در امتداد  $P3$  برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۳۰
- شکل (۵-۳۸) - مقایسه شاخص خطا در امتداد های مختلف برای مانع با عرض های متفاوت در حالت TG ..... ۱۳۱
- شکل (۵-۳۹) - مقایسه شاخص خطا در امتداد های مختلف برای مانع با عرض های متفاوت در حالت TC ..... ۱۳۱
- شکل (۵-۴۰) - پروفیل عمق جریان در مجاورت دیواره ها برای مانع با عرض  $0.12m$  ..... ۱۳۲
- شکل (۵-۴۱) - تجربیات عددی در کانال به همراه دو مانع عرضی ..... ۱۳۳
- شکل (۵-۴۲) - کانال با دو مانع عرضی ..... ۱۳۳
- شکل (۵-۴۳) - نمای سه بعدی پروفیل جریان در کانال همراه دو مانع عرضی ..... ۱۳۴
- شکل (۵-۴۴) - توزیع عدد فرود در کانال با دو مانع عرضی ..... ۱۳۴
- شکل (۵-۴۵) - خطوط جریان به همراه منحنی های سایه عمق در کانال با دو مانع عرضی ..... ۱۳۵
- شکل (۵-۴۶) - پروفیل طولی عمق جریان در خط مرکزی کانال ..... ۱۳۵

- شکل (۵-۴۷) - توزیع تنش‌های رینولدز در فضای حل ( $m^2/s^2$ )..... ۱۳۶
- شکل (۶-۱) - پلان شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی..... ۱۴۱
- شکل (۶-۲) - تجهیزات آزمایشگاهی تقاطع دو کانال..... ۱۴۱
- شکل (۶-۳) - حالت‌های مختلف جریان در تقاطع..... ۱۴۲
- شکل (۶-۴) - منحنی تغییرات پارامتر Res در برابر تعداد سلول‌های محاسباتی برای حالت a.II..... ۱۴۴
- شکل (۶-۵) - تغییرات  $y^+$  برای حالت a.II در محدوده  $2.3 \leq x \leq 4.3$  ،  $y \approx 2.0$ ..... ۱۴۵
- شکل (۶-۶) - منحنی تغییرات پارامتر Fh در برابر تعداد سلول‌های محاسباتی برای حالت a.II..... ۱۴۵
- شکل (۶-۷) - منحنی تغییرات زمان محاسبات در برابر تعداد سلول‌های محاسباتی برای حالت a.II..... ۱۴۶
- شکل (۶-۸) - نمودار سه بعدی عمق جریان در حالت I..... ۱۴۷
- شکل (۶-۹) - منحنی سایه عمق به همراه خطوط هم عمق جریان برای حالت I..... ۱۴۸
- شکل (۶-۱۰) - منحنی سایه عمق به همراه خطوط هم عمق جریان برای حالت a. II..... ۱۴۸
- شکل (۶-۱۱) - منحنی سایه عمق به همراه خطوط هم عمق جریان برای حالت b. II..... ۱۴۹
- شکل (۶-۱۲) - منحنی سایه عمق به همراه خطوط هم عمق جریان برای حالت III..... ۱۴۹
- شکل (۶-۱۳) - منحنی سایه توزیع عدد فرود برای حالت‌های مختلف..... ۱۵۰
- شکل (۶-۱۴) - پروفیل عمق در محل تقاطع در حالت a. II..... ۱۵۱
- شکل (۶-۱۵) - پروفیل عمق در محل تقاطع در حالت b. II..... ۱۵۲
- شکل (۶-۱۶) - مقایسه شاخص‌های خطا برای دبی در حالت‌های مختلف..... ۱۵۳
- شکل (۶-۱۷) - مقایسه شاخص خطا نرم  $L2$  در مدل‌های آشفتگی مختلف..... ۱۵۴
- شکل (۶-۱۸) - توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در حالت b.II  $k(m^2/s^2)$ ..... ۱۵۵
- شکل (۶-۱۹) - توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در حالت III  $k(m^2/s^2)$ ..... ۱۵۵
- شکل (۶-۲۰) - خطوط جریان در حالت‌های a. II و III برای مدل ASM..... ۱۵۶
- شکل (۶-۲۱) - مقایسه دبی محاسبه شده برای مدل‌های مختلف در حالت‌های گوناگون..... ۱۵۷
- شکل (۷-۱) - مراحل الگوریتم گودونف..... ۱۶۲
- شکل (۷-۲) - تبدیل مسئله تعمیم یافته ریمان به مسئله ریمان معادل..... ۱۶۴
- شکل (۷-۳) - بازسازی اطلاعات درون سلول محاسباتی یک بعدی..... ۱۶۵
- شکل (۷-۴) - تعیین مقادیر مرز سلول‌ها در ناحیه تاثیر..... ۱۶۶
- شکل (۷-۵) - درون‌یابی مقادیر درون سلول با روش پیشنهادی..... ۱۶۹
- شکل (۷-۶) - نتایج روش‌های مختلف عددی با نتایج تحلیلی در زمان‌های متفاوت (T1)..... ۱۷۲
- شکل (۷-۷) - مقایسه نتایج روش‌های عددی مختلف با نتایج تحلیلی در زمان  $t \approx 250s$ ..... ۱۷۳
- شکل (۷-۸) - حل تحلیلی معادله برگرز برای شرط اولیه معادله (۷-۴۱)..... ۱۷۵
- شکل (۷-۹) - مقایسه نتایج روش‌های عددی مختلف با نتایج تحلیلی -  $t=0.6s$ ..... ۱۷۶
- شکل (۷-۱۰) - مقایسه نتایج روش‌های عددی مختلف با نتایج تحلیلی -  $t=2.0s$ ..... ۱۷۸
- شکل (۷-۱۱) - خطوط مشخصه در سلول‌های محاسباتی..... ۱۸۱
- شکل (۷-۱۲) - توزیع غیر خطی مقادیر درون سلول‌های محاسباتی..... ۱۸۱
- شکل (۷-۱۳) - توسعه محاسبه شار غیر خطی به فضای دو بعدی..... ۱۸۲

- شکل (۷-۱۴) - مجموعه‌ای از خطوط مشخصه مثبت درون سلول آم..... ۱۸۳
- شکل (۷-۱۵) - امواج تیز و انبساطی ..... ۱۸۴
- شکل (۷-۱۶) - مسئله استاندارد شکست سد..... ۱۸۴
- شکل (۷-۱۷) - مقایسه نتایج روش‌های عددی مختلف با حل تحلیلی ( $t=15s$ )..... ۱۸۶
- شکل (۷-۱۸) - مقایسه نتایج روش‌های مختلف عددی و روش تحلیلی در مقیاس بزرگتر ( $t=15s$ ) ..... ۱۸۶
- شکل (۷-۱۹) - مقایسه نتایج روش‌های مختلف عددی و روش تحلیلی در مقیاس بزرگتر ( $t=15s$ ) ..... ۱۸۷
- شکل (۷-۲۰) - شرایط اولیه در آزمون برخورد دو موج تیز..... ۱۸۷
- شکل (۷-۲۱) - حل تحلیلی آزمون برخورد دو موج تیز در زمان‌های مختلف..... ۱۸۸
- شکل (۷-۲۲) - مقایسه نتایج روش‌های مختلف عددی و روش تحلیلی در تراکم مختلف سلول‌های محاسباتی..... ۱۸۹
- شکل (۷-۲۳) - مقایسه نتایج روش‌های مختلف عددی و روش تحلیلی ( $t=25s$ ) ..... ۱۹۰
- شکل (۷-۲۴) - مقایسه نتایج روش‌های مختلف عددی و روش تحلیلی در مقیاس بزرگتر ( $t=25s$ ) ..... ۱۹۰
- شکل (۷-۲۵) - مقایسه نتایج روش‌های مختلف عددی و روش تحلیلی در مقیاس بزرگتر ( $t=25s$ ) ..... ۱۹۱
- شکل (۷-۲۶) - شرایط اولیه در آزمون برخورد دو موج انبساطی..... ۱۹۱
- شکل (۷-۲۷) - پروفیل عمق جریان در  $t = 5s$  پس از برداشتن دریچه‌ها..... ۱۹۲
- شکل (۷-۲۸) - مقایسه نتایج روش‌های عددی مختلف با نتایج تحلیلی  $t = 35s$  ..... ۱۹۲
- شکل (۷-۲۹) - شرایط اولیه در آزمون برخورد یک موج تیز و یک موج انبساطی..... ۱۹۳
- شکل (۷-۳۰) - حل تحلیلی مسئله برخورد یک موج تیز و یک موج انبساطی..... ۱۹۴
- شکل (۷-۳۱) - مقایسه نتایج روش‌های عددی با نتایج تحلیلی در  $t = 25s$  ..... ۱۹۵
- شکل (۷-۳۲) - مقایسه نتایج روش‌های عددی با نتایج تحلیلی در مقیاس بزرگتر  $t = 25s$  ..... ۱۹۵
- شکل (۷-۳۳) - شاخص خطا برای روش‌های عددی مختلف در مقابل تراکم‌های مختلف سلول‌های محاسباتی..... ۱۹۶
- شکل (۷-۳۴) - فضای محاسباتی آزمون دو بعدی..... ۱۹۶
- شکل (۷-۳۵) - پروفیل سه بعدی عمق جریان با استفاده از روش PCM..... ۱۹۷
- شکل (۷-۳۶) - پروفیل عمق جریان با روش‌های مختلف عددی در  $y = 3.0m$  ..... ۱۹۷

## فهرست جدول‌ها

۲۸	جدول (۱-۲) - متغیرها و مقیاس‌های مورد استفاده.....
۹۴	جدول (۱-۴) - مشخصات شبکه‌های بکار رفته.....
۹۶	جدول (۲-۴) - نتایج روش‌های عددی مختلف برای پرش هیدرولیکی مایل.....
۹۶	جدول (۳-۴) - نتایج روش‌های عددی مختلف برای پرش هیدرولیکی مایل.....
۹۹	جدول (۴-۴) - مشخصات شبکه‌های محاسباتی.....
۱۰۵	جدول (۱-۵) - برآورد ضریب زبری مانینگ.....
۱۰۵	جدول (۲-۵) - مشخصات جریان در کانال بدون مانع عرضی.....
۱۰۷	جدول (۳-۵) - مشخصات شبکه‌های بکار رفته.....
۱۲۰	جدول (۴-۵) - طول گردابه بدست آمده برای مدل‌های مختلف ( $m$ ).....
۱۴۱	جدول (۱-۶) - مشخصات کانال‌ها در حالت‌های مختلف.....
۱۴۳	جدول (۲-۶) - مشخصات تراکم‌های مختلف سلول‌های محاسباتی.....
۱۵۳	جدول (۳-۶) - شاخص خطای نرم $L2$ در روش‌های مختلف.....
۱۷۳	جدول (۱-۷) - شاخص‌های خطا در روش‌های مختلف ( $t=50s$ ).....
۱۹۱	جدول (۲-۷) - شاخص‌های خطا در روش‌های مختلف ( $t=35s$ ).....
۱۹۳	جدول (۳-۷) - شاخص‌های خطا در روش‌های مختلف ( $t=35s$ ).....
۱۹۸	جدول (۴-۷) - شاخص‌های خطا در روش‌های مختلف ( $t=35s$ ).....