



دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

هیدرولیک کاربردی

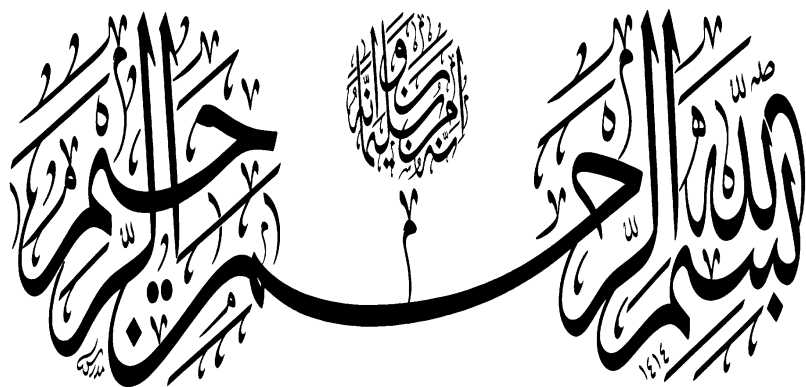
تصنیف:

دکتر میر علی محمدی

دانشیار مهندسی عمران (هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه)

دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه

زمستان ۱۳۹۸



تقديم به:

ارواح بلند و خستگى‌ناپذير مرحومين پدرم و مادرم،
همسر و فرزندانم

تشکر و سپاس‌گزاری:

با تشکر و سپاس فراوان خود را به

صفحه

فهرست مطالب مندرج

۱	۱ مقدمه‌ای بر هیدرولیک جریان در کانال‌های روباز
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ کانال‌ها
۲	۱-۲-۱ انواع کانال‌ها

۴	۲-۲-۱ عناصر هندسی و هیدرولیکی کانال‌ها
۵	۳-۱ هیدرولیک جریان در کانال‌ها
۵	۱-۳-۱ انواع جریان در کانال‌های روباز
۸	۲-۳-۱ رژیم جریان در کانال‌ها
۱۰	۴-۱ توزیع سرعت جریان در کانال‌ها
۱۱	۱-۴-۱ توزیع سرعت در امتداد مسیر جریان
۱۳	۲-۴-۱ منحنی‌های هم سرعت (<i>Isovels</i>)
۱۴	۵-۱ توزیع فشار
۱۵	۶-۱ جریان یکنواخت
۱۷	۷-۱ جریان در مسیرهای انحنادار

۱۹	۲ معادلات هیدرودینامیک جریان
۲۰	۲-۱ معادله پیوستگی
۲۲	۲-۲ معادله انرژی
۲۷	۲-۳ انرژی مخصوص
۲۸	۲-۳-۱ منحنی انرژی مخصوص
۳۰	۲-۳-۲ منحنی دبی
۳۲	۲-۳-۳ عمق بحرانی
۳۵	۲-۵ معادلات هیدرودینامیک جریان
۳۵	۲-۵-۱ جریان یکنواخت
۳۷	۲-۵-۳ جریان غیر یکنواخت
۴۰	۲-۶ معادلات توزیع سرعت جریان

۴۲	۳ جریان یکنواخت در کانال‌های روباز
۴۳	۳-۱ معادلات هیدرودینامیک جریان
۴۳	۳-۱-۱ دیدگاه یکنواختی جریان
۴۴	۳-۱-۲ معادله پیوستگی
۴۴	۳-۱-۳ معادله حرکت
۴۷	۳-۲ ضریب اصطکاک
۴۸	۳-۲-۱ ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ

۵۲	۳-۲-۲ ضریب زبری شزی
۵۵	۳-۲-۳ ضریب زبری مانینگ
۵۶	۳-۲-۴ زبری مختلط در مقاطع کانال ها
۵۷	۳-۳ محاسبه دبی، بستر ثابت
۵۸	۳-۳-۱ ظرفیت انتقال (گذردهی)
۵۹	۳-۳-۲ عمق نرمال
۶۰	۳-۳-۳ مقطع مختلط (کامپوزیت)
۶۱	۳-۳-۴ سطح مقطع دبی بیشینه
۶۳	۳-۴ محاسبه دبی، بستر متحرک
۶۵	۳-۴-۱ سرعت رسوب گذاری (ته نشینی)
۶۵	۳-۴-۲ سرعت بحرانی
۶۸	۳-۴-۳ توزیع تنش برشی
۷۰	۳-۴-۴ مقطع پایدار هیدرولیکی
۷۳	۳-۷ تمرینات و مسائل
۷۳	۳-۷-۱ تمرینات حل شده
۹۰	۳-۷-۲ مسائل حل نشده

۴ جریان غیریکنواخت در کانال های روباز

۹۵	۴-۱ جریان متغیر تدریجی
۹۵	۴-۱-۱ معادلات ساده شده سن - ونان (Saint-Venant eqs.)
۹۷	۴-۱-۲ معادلات سطح آب
۱۰۱	۴-۱-۳ شیب بحرانی
۱۰۲	۴-۲ شکل های پروفیل سطح آب
۱۰۴	۴-۲-۱ کانال های با شیب ملایم
۱۰۶	۴-۲-۲ کانال های با شیب تند
۱۰۹	۴-۲-۳ کانال های با شیب بحرانی
۱۰۹	۴-۲-۴ کانال های با شیب افقی
۱۱۰	۴-۲-۵ کانال های با شیب معکوس
۱۱۱	۴-۳ محاسبه پروفیل های سطح آب

۱۱۱	۴-۳-۱ روش تقریبات متوالی (روش گام استاندارد و روش گام مستقیم)
۱۱۶	۴-۳-۲ روش انتگرال گیری مستقیم
۱۲۴	۴-۴ جریان متغیر سریع
۱۲۴	۴-۴-۱ مقدمه
۱۲۵	۴-۴-۲ پرش هیدرولیکی و کاربردهای آن
۱۳۳	۴-۵ جریان ورودی جانبی
۱۳۶	۴-۶ تمرینات و مسائل:
۱۳۶	۴-۶-۱ تمرینات حل شده
۱۶۴	۴-۶-۲ تمرینات حل نشده
۱۷۲	۵ هیدرولیک کانال های رسوبی (حمل رسوبات و مواد جامد)
۱۷۳	۵-۱ کلیات
۱۷۳	۵-۱-۱ مقدمه
۱۷۴	۵-۱-۲ جریان مخلوط آب و رسوبات
۱۷۵	۵-۱-۳ خواص ذرات رسوبی
۱۷۸	۵-۲ تشریح حرکت ذرات رسوبی
۱۷۸	۵-۲-۱ ذرات در سرعت های جریان مغشوش
۱۸۰	۵-۲-۲ نظریه طول اختلاط پراتنل
۱۸۳	۵-۳ آستانه حرکت ذرات رسوبی
۱۸۵	۵-۳-۱ شیوه تحلیلی برای تعیین حد آستانه حرکت ذرات رسوبی
۱۸۹	۵-۴ اشکال (یا مدهای) مختلف انتقال رسوبات
۱۹۲	۵-۵ انواع مسائل مختلف انتقال رسوبات
۱۹۳	۵-۶ معادلات هیدرودینامیک جریان
۱۹۳	۵-۶-۱ معادلات سن-ونان-اگزرنر (Saint-Venant-Exner eqs.)
۱۹۶	۵-۶-۲ فرسایش و ته نشینی رسوبات
۲۰۱	۵-۷ بار معلق (Suspended Load)
۲۰۱	۵-۷-۱ مقدمه
۲۰۱	۵-۷-۲ ملاحظات نظری
۲۰۹	۵-۷-۳ رابطه بار معلق اینشتین

۲۱۴	۵-۸ بار بستر (Bed Load)
۲۱۴	۵-۸-۱ مقدمه
۲۱۴	۵-۸-۲ ملاحظات نظری
۲۲۰	۵-۸-۳ رابطه‌های بار بستر
۲۲۲	۵-۸-۴ تعیین احتمال وقوع فرسایش کف بستر
۲۲۵	۵-۸-۵ معادله بار بستر
۲۳۰	۵-۹ بار کل مواد رسوبی (Total Load)
۲۳۰	۵-۹-۱ مقدمه
۲۳۰	۵-۹-۲ رابطه‌های بار کل مواد رسوبی
۲۳۳	۵-۹-۳ رابطه اکرز و وایت (Ackers & White, 1973 & 1993)
۲۳۵	۵-۱۰ بار شستشو (Wash Load)
۲۳۶	۵-۱۱ کاربردها (Applications)
۲۴۷	۵-۱۲ مسائل

۲۴۹	۶ آب‌شستگی موضعی در کانال‌ها و رودخانه‌ها
۲۵۰	۶-۱ کلیات
۲۵۱	۶-۲ آبشستگی پایه میانی
۲۵۲	۶-۲-۱ فرآیند آبشستگی
۲۵۵	۶-۲-۲ مسیر و شکل جریان
۲۵۶	۶-۲-۳ رابطه‌های تابعی
۲۶۶	۶-۲-۴ فرمول‌های طراحی
۲۶۷	۶-۲-۵ پیش‌گیری از آبشستگی
۲۶۹	۶-۳ آبشستگی پایه کناری
۲۷۰	۶-۳-۱ مسیر جریان و آبشستگی
۲۷۱	۶-۳-۲ رابطه‌های تابعی
۲۷۴	۶-۳-۳ فرمول‌های طراحی
۲۷۶	۶-۴ آبشستگی در اثر تنگ‌شدگی مقطع
۲۷۶	۶-۴-۱ ملاحظات هیدرولیکی
۲۷۸	۶-۴-۲ رابطه‌های عمق-آبشستگی

۲۸۱	۶-۴-۳ فرمول طراحی
۲۸۲	۶-۵ آبشستگی در سازه‌های هیدرولیکی
۲۸۲	۶-۵-۱ دیدگاهها
۲۸۴	۶-۵-۲ گذر جریان از روی یک سازه
۲۸۸	۶-۵-۳ جریان در زیر یک سازه
۲۹۱	۶-۶ تمرینات
۲۹۱	۶-۶-۱ تمرینات حل شده
۳۱۱	۶-۶-۲ مسائل

صفحه	فهرست مطالب مندرج
۱	۱ مقدمه‌ای بر هیدرولیک جریان در کانال‌های روباز
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ کانال‌ها
۲	۱-۲-۱ انواع کانال‌ها
۴	۲-۲-۱ عناصر هندسی و هیدرولیکی کانال‌ها
۵	۳-۱ هیدرولیک جریان در کانال‌ها
۵	۱-۳-۱ انواع جریان در کانال‌های روباز
۸	۲-۳-۱ رژیم جریان در کانال‌ها
۱۰	۴-۱ توزیع سرعت جریان در کانال‌ها
۱۱	۱-۴-۱ توزیع سرعت در امتداد مسیر جریان
۱۳	۲-۴-۱ منحنی‌های هم سرعت (<i>Isovels</i>)
۱۴	۵-۱ توزیع فشار
۱۵	۶-۱ جریان یکنواخت
۱۷	۷-۱ جریان در مسیرهای انحنادار
۱۹	۲ معادلات هیدرودینامیک جریان
۲۰	۲-۱ معادله پیوستگی
۲۲	۲-۲ معادله انرژی

۲۷	۲-۳ انرژی مخصوص
۲۸	۲-۳-۱ منحنی انرژی مخصوص
۳۰	۲-۳-۲ منحنی دبی
۳۲	۲-۳-۳ عمق بحرانی
۳۵	۲-۵ معادلات هیدرودینامیک جریان
۳۵	۲-۵-۱ جریان یکنواخت
۳۷	۲-۵-۳ جریان غیر یکنواخت
۴۰	۲-۶ معادلات توزیع سرعت جریان

۴۲	۳ جریان یکنواخت در کانال های روباز
۴۳	۳-۱ معادلات هیدرودینامیک جریان
۴۳	۳-۱-۱ دیدگاه یکنواختی جریان
۴۴	۳-۱-۲ معادله پیوستگی
۴۴	۳-۱-۳ معادله حرکت
۴۷	۳-۲ ضریب اصطکاک
۴۸	۳-۲-۱ ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ
۵۲	۳-۲-۲ ضریب زبری شزی
۵۵	۳-۲-۳ ضریب زبری مانینگ
۵۶	۳-۲-۴ زبری مختلط در مقاطع کانال ها
۵۷	۳-۳ محاسبه دبی، بستر ثابت
۵۸	۳-۳-۱ ظرفیت انتقال (گذردهی)
۵۹	۳-۳-۲ عمق نرمال
۶۰	۳-۳-۳ مقطع مختلط (کامپوزیت)
۶۱	۳-۳-۴ سطح مقطع دبی بیشینه
۶۳	۳-۴ محاسبه دبی، بستر متحرک
۶۵	۳-۴-۱ سرعت رسوب گذاری (ته نشینی)
۶۵	۳-۴-۲ سرعت بحرانی
۶۸	۳-۴-۳ توزیع تنش برشی
۷۰	۳-۴-۴ مقطع پایدار هیدرولیکی

۷۳	۳-۷ تمرینات و مسائل
۷۳	۳-۷-۱ تمرینات حل شده
۹۰	۳-۷-۲ مسائل حل نشده

۴ جریان غیریکنواخت در کانال‌های روباز

۹۵	۴-۱ جریان متغیر تدریجی
۹۵	۴-۱-۱ معادلات ساده شده سن - ونان (<i>Saint-Venant eqs.</i>)
۹۷	۴-۱-۲ معادلات سطح آب
۱۰۱	۴-۱-۳ شیب بحرانی
۱۰۲	۴-۲ شکل‌های پروفیل سطح آب
۱۰۴	۴-۲-۱ کانال‌های با شیب ملایم
۱۰۶	۴-۲-۲ کانال‌های با شیب تند
۱۰۹	۴-۲-۳ کانال‌های با شیب بحرانی
۱۰۹	۴-۲-۴ کانال‌های با شیب افقی
۱۱۰	۴-۲-۵ کانال‌های با شیب معکوس
۱۱۱	۴-۳ محاسبه پروفیل‌های سطح آب
۱۱۱	۴-۳-۱ روش تقریبات متوالی (روش گام استاندارد و روش گام مستقیم)
۱۱۶	۴-۳-۲ روش انتگرال‌گیری مستقیم
۱۲۴	۴-۴ جریان متغیر سریع
۱۲۴	۴-۴-۱ مقدمه
۱۲۵	۴-۴-۲ پرش هیدرولیکی و کاربردهای آن
۱۳۳	۴-۵ جریان ورودی جانبی
۱۳۶	۴-۶ تمرینات و مسائل:
۱۳۶	۴-۶-۱ تمرینات حل شده
۱۶۴	۴-۶-۲ تمرینات حل نشده

۱۷۲	۵ هیدرولیک کانال‌های رسوبی (حمل رسوبات و مواد جامد)
۱۷۳	۵-۱ کلیات
۱۷۳	۵-۱-۱ مقدمه

۱۷۴	۵-۱-۲ جریان مخلوط آب و رسوبات
۱۷۵	۵-۱-۳ خواص ذرات رسوبی
۱۷۸	۵-۲ تشریح حرکت ذرات رسوبی
۱۷۸	۵-۲-۱ ذرات در سرعت‌های جریان مغشوش
۱۸۰	۵-۲-۲ نظریه طول اختلاط پراتنل
۱۸۳	۵-۳ آستانه حرکت ذرات رسوبی
۱۸۵	۵-۳-۱ شیوه تحلیلی برای تعیین حد آستانه حرکت ذرات رسوبی
۱۸۹	۵-۴ اشکال (یا مُدهای) مختلف انتقال رسوبات
۱۹۲	۵-۵ انواع مسائل مختلف انتقال رسوبات
۱۹۳	۵-۶ معادلات هیدرودینامیک جریان
۱۹۳	۵-۶-۱ معادلات سن-ونان-اگزرنر (<i>Saint-Venant-Exner eqs.</i>)
۱۹۶	۵-۶-۲ فرسایش و ته‌نشینی رسوبات
۲۰۱	۵-۷ بار معلق (<i>Suspended Load</i>)
۲۰۱	۵-۷-۱ مقدمه
۲۰۱	۵-۷-۲ ملاحظات نظری
۲۰۹	۵-۷-۳ رابطه بار معلق اینشتین
۲۱۴	۵-۸ بار بستر (<i>Bed Load</i>)
۲۱۴	۵-۸-۱ مقدمه
۲۱۴	۵-۸-۲ ملاحظات نظری
۲۲۰	۵-۸-۳ رابطه‌های بار بستر
۲۲۲	۵-۸-۴ تعیین احتمال وقوع فرسایش کف بستر
۲۲۵	۵-۸-۵ معادله بار بستر
۲۳۰	۵-۹ بار کل مواد رسوبی (<i>Total Load</i>)
۲۳۰	۵-۹-۱ مقدمه
۲۳۰	۵-۹-۲ رابطه‌های بار کل مواد رسوبی
۲۳۳	۵-۹-۳ رابطه اکرز و وایت (<i>Ackers & White, 1973 & 1993</i>)
۲۳۵	۵-۱۰ بار شستشو (<i>Wash Load</i>)
۲۳۶	۵-۱۱ کاربردها (<i>Applications</i>)
۲۴۷	۵-۱۲ مسائل

۶	آب شستگی موضعی در کانال‌ها و رودخانه‌ها	۲۴۹
۶-۱	کلیات	۲۵۰
۶-۲	آبشستگی پایه میانی	۲۵۱
۶-۲-۱	فرآیند آبشستگی	۲۵۲
۶-۲-۲	مسیر و شکل جریان	۲۵۵
۶-۲-۳	رابطه های تابعی	۲۵۶
۶-۲-۴	فرمول های طراحی	۲۶۶
۶-۲-۵	پیش گیری از آبشستگی	۲۶۷
۶-۳	آبشستگی پایه کناری	۲۶۹
۶-۳-۱	مسیر جریان و آبشستگی	۲۷۰
۶-۳-۲	رابطه های تابعی	۲۷۱
۶-۳-۳	فرمول های طراحی	۲۷۴
۶-۴	آبشستگی در اثر تنگ شدگی مقطع	۲۷۶
۶-۴-۱	ملاحظات هیدرولیکی	۲۷۶
۶-۴-۲	رابطه های عمق-آبشستگی	۲۷۸
۶-۴-۳	فرمول طراحی	۲۸۱
۶-۵	آبشستگی در سازه های هیدرولیکی	۲۸۲
۶-۵-۱	دیدگاهها	۲۸۲
۶-۵-۲	گذر جریان از روی یک سازه	۲۸۴
۶-۵-۳	جریان در زیر یک سازه	۲۸۸
۶-۶	تمرینات	۲۹۱
۶-۶-۱	تمرینات حل شده	۲۹۱
۶-۶-۲	مسائل	۳۱۱

شماره

عنوان شکل های فصل ۱

صفحه

- شکل ۳-۱: فرم عمومی جریان های دائمی و غیردائمی در کانال های روباز ۶
- شکل ۴-۱: انواع جریان های دائمی، یکنواخت و غیر یکنواخت. ۸
- شکل ۵-۱: نواحی مختلف لایه های مرزی، توزیع قائم سرعت لگاریتمی برای یک جداره کانال زبر به همراه معرفی طول اختلاط متلاطم (Mohammadi, 1998) ۱۱
- شکل ۱a-۶: توزیع های عمقی سرعت متوسط. ۱۲
- شکل ۱b-۶: توزیع عمقی سرعت در رژیم های آرام، L ، و مغشوش، T ، (الف) در کانال روباز، (ب). در لوله ۱۳
- شکل ۷ الف-۱: منحنی های هم سرعت، توزیع تنش برشی جداره و الگوی جریان ثانویه در کانال دوزنقه ای شکل (نایت و همکاران، Knight et al, 1994) ۱۳
- شکل ۷ ب-۱: منحنی های هم سرعت در یک کانال مستطیلی با کف V - ۱۴
- شکل (محمدی، Mohammadi, 1999) ۱۵
- شکل ۸-۱: جریان روی یک بستر مقعر. ۱۵
- شکل ۹-۱: جریان در مسیر یکنواخت. ۱۶
- شکل ۱۰-۱: جریان بر روی یک جداره مقعر و محدب. ۱۸

شماره

عنوان شکل های فصل ۲

صفحه

- شکل (۲-۱) نمودار شماتیک برای به کارگیری معادله پیوستگی جریان. ۲۰
- شکل (۲-۲) نمودار شماتیک کاربرد معادله انرژی در یک مقطع کانال. ۲۳
- شکل (۲-۳) نمودار کاربرد معادله انرژی بین دو مقطع. ۲۵
- شکل (۲-۴) نمایش تعریف ارتفاع کل، H ، و انرژی مخصوص، H_s ۲۸
- شکل (۲-۵) منحنی انرژی مخصوص، $H_s=f(h)$ ، به ازای مقادیرهای ثابت دبی $Q=Cte$. ۳۰
- شکل (۲-۶) منحنی دبی جریان، $Q=f(h)$ ، برای $H_s=Cte$ ۳۱
- شکل (۲-۷) نمودار توزیع تنش برشی، $\tau_{zx}(z')$ ، و توزیع سرعت، $\bar{u}(z')$ ، در شرایط جریان غیریکنواخت. ۴۰

شماره

عنوان شکل های فصل ۳

صفحه

- شکل (۳-۱) جریان یکنواخت میان شرایط مرزی. ۴۳
- شکل (۳-۲) نمودار جریان یکنواخت در کانال ها. ۴۵
- شکل (۳-۳) مقطع کانال با زبری مختلط. ۵۷

۵۹	شکل (۳-۴) منحنی ظرفیت گذردهی یا عمق نرمال.
۶۰	شکل (۳-۵) مقطع یک کانال عریض.
۶۱	شکل (۳-۶) کانال با مقطع مختلط مرکب.
۶۲	شکل (۳-۷) مقطع های دبی بیشینه.
۶۴	شکل (۳-۸) سرعت رسوبگذاری و فرسایش $U_{de}+U_{cr}$ برای رسوبات با دانه بندی یکنواخت به شیوه ژولسترم (<i>Hjulstrom</i>)
۶۸	شکل (۳-۹) تنش برشی بدون بعد، τ^* ، به عنوان تابعی از قطر بدون بعد، d^* ، به شیوه شیلدرز-یالین (<i>Shields-Yalin</i>)
۶۹	شکل (۳-۱۰) توزیع تنش برشی در یک کانال ذوزنقه ای.
۷۰	شکل (۳-۱۱) مقطع پایدار ایده آل.
۷۲	شکل (۳-۱۲) مقطع پایدار ایده آل برای عرض های متفاوت کانال.

عنوان شکل های فصل ۴

شماره صفحه	
۹۵	شکل (۴-۱) نمودار جریان دایمی غیریکنواخت در کانالی با شیب ثابت، $Z(x)$.
۱۰۷	شکل (۴-۲) پروفیل های سطح آب برای جریان متغیر تدریجی.
۱۰۸	شکل (۴-۲a) مثال هایی از پروفیل های جریان.
۱۱۳	شکل (۴-۳) نمودار جریان غیریکنواخت مابین دو مقطع عرضی یک کانال.
۱۱۸	شکل (۴-۴) نمودار محاسباتی پروفیل سطح آب: (a) با روش انتگرال گیری مستقیم؛ (b) با روش تقریبات متوالی
۱۲۸	شکل (۴-۵) نمودار یک پرش هیدرولیکی جریان.
۱۳۱	شکل (۴-۶) انواع جهش هیدرولیکی.
۱۳۲	شکل (۴-۷) جانمایی محل وقوع پرش هیدرولیکی.
۱۳۴	شکل (۴-۸) نمودار جریان متغیر تدریجی با دبی جریان ورودی جانبی، q_l .

عنوان شکل های فصل ۵

شماره صفحه	
۱۷۶	شکل (۵-۱). نمودار منحنی دانه بندی ذرات رسوبی

- شکل (۵-۲). نمودار ضریب درگ و عدد رینولدز در شرایط رژیم های مختلف جریان ۱۷۸
- شکل (۵-۳). توزیع قائم سرعت در رژیم جریان مغشوش (با سرعت نوسانی نقطه‌ای) ۱۷۸
- شکل (۵-۴). توزیع سرعت و نیروهای عمل کننده روی ذرات رسوبی ۱۸۳
- شکل (۵-۵). نمودار شیلدز (Vanoni, 1975) ۱۸۷
- شکل (۵-۶). نمودارهای آستانه حرکت ذرات رسوبی (دبی-شیب طولی) برای مصالح رسوبی شن ($d_{35}=7/22 \text{ mm}$) و ماسه ($d_{35}=0/8 \text{ mm}$) در یک کانال مستطیلی با کف V-شکل (Mohammadi & Knight, 1999) ۱۸۸
- شکل (۵-۷). نمودارهای دبی-تنش برشی بحرانی، برای آستانه حرکت ذرات رسوبی برای مصالح رسوبی شن ($d_{35}=7/22 \text{ mm}$) و ماسه ($d_{35}=0/8 \text{ mm}$) در یک کانال مستطیلی با کف V-شکل (Mohammadi, 2005) ۱۸۹
- شکل (۵-۸). نمودار شکل‌های (مدهای) مختلف حمل رسوب. ۱۹۱
- شکل (۵-۹). نمودار جریان غیردائمی و غیریکنواخت روی یک تراز بستر متحرک $z(x,t)$. ۱۹۴
- شکل (۵-۱۰). نمودارهای فرسایش یا ته‌نشینی رسوبات. ۱۹۷
- شکل (۵-۱۱). فرسایش ناشی از پایین آمدن یک نقطه ثابت، Δh ، در بستر (Graf & Altinakar, 1998) ۱۹۹
- شکل (۵-۱۲). رسوب‌گذاری با افزایش بار تأمین Δq_s دبی مواد جامد، (Graf & Altinakar, 1998) ۲۰۰
- شکل (۵-۱۳). سرعت ته‌نشینی، v_{ss} ، تابعی از قطر ذره، d . ۲۰۷
- شکل (۵-۱۴). توزیع قائم غلظت نسبی، C_s/C_{sa} ، در حالت تعلیق (Graf, 1971). ۲۰۸
- شکل (۵-۱۵). انتگرال های به کار رفته در روش اینشتین (Einstein, 1950) ۲۱۱
- شکل (۵-۱۶). ضریب های تصحیح: (a) توزیع سرعت، (b) ضریب مخفی، (c) ضریب نیروی بالابرنده (Graf, 1971). ۲۲۵
- شکل (۵-۱۷). معادله بار بستر، $\Phi_* = f(\Psi_*)$ ، روش اینشتین (Einstein, 1950). ۲۲۹
- شکل (۵-۱۸). مقایسه روند موفقیت در برآورد حمل رسوب برای فرمول های موجود، با توجه به نسبت، C_{calc}/C_{obs} . ۲۳۹

شماره

صفحه

عنوان شکل های فصل ۶

- شکل (۶-۱): نمودار مسیر جریان و آبشستگی موضعی در اطراف یک پایه پل میانی استوانه‌ای. ۲۵۳

- شکل (۶-۲): نمودار پیشروی عمق آبشستگی، d_s ، با توجه به سرعت جریان، U ، و زمان، t . (Graf & Altinakar, 1991)
- شکل (۶-۳): تأثیر پارامترهای مختلف (معادله ۵-۶ را ببینید) بر روی عمق آبشستگی بی‌بعد، d_s/D_P ، در یک پایه میانی (Breusers et al., 1977)
- شکل (۶-۴): تأثیر دو پایه میانی روی عمق آبشستگی (Raudkivi, 1991)
- شکل (۶-۵): روش های جلوگیری از آبشستگی (Raudkivi, 1991) (a)
- پایه با آستانه انتهائی سنگ چین (b) کف پوش با پی سطحی (c) پایه میانی با حلقه دور پایه
- شکل (۶-۶): نمودار مسیر جریان و آبشستگی موضعی در اطراف یک پایه کناری.
- شکل (۶-۷): تأثیر پارامترهای مختلف (معادله ۱۲-۶) روی عمق آبشستگی بی‌بعد، d_s/L_A ، برای یک پایه کناری (Melville, 1992).
- شکل (۶-۸): نمودار معرف برای تنگ‌شدگی طولانی (Melville, 1992).
- شکل (۶-۹): عمق جریان نسبی، h_2/h_1 ، یا عمق آبشستگی، d_s/h_1 ، به عنوان تابعی از تنش برشی نسبی، τ_{01}/τ_{02} ، یا تنش برشی نسبی τ_{01}/τ_{cr} (اگر $\tau_{02} \equiv \tau_{cr}$ برای کاهش های عرض مختلف B_1/B_2)
- شکل (۶-۱۰): نمودار آبشستگی در سازه هیدرولیکی؛ یک دریچه ترکیبی کنترل، جریان از بالا و پایین را از خود عبور می‌دهد (Raudkivi, 1990).
- شکل (۶-۱۱): نمودار جریان در روی یک سازه (Raudkivi, 1990).
- شکل (۶-۱۲): شکل جریان در زیر یک سازه.

شماره

عنوان شکل های فصل ۷

صفحه

- شکل ۷-۱: نشت در حالت پایین بودن تراز آب زیرزمینی ۳۱۶
- شکل ۷-۲: نشت در حالت پایین تر بودن تراز آب زیرزمینی از تراز آب کانال ۳۱۷
- شکل ۷-۳a: نشت در حالت بالاتر بودن تراز آب زیرزمینی از تراز آب کانال ۳۱۷
- شکل ۷-۳b: نشت در حالت متفاوت بودن تراز آب زیرزمینی ۳۱۸
- شکل ۷-۴: دیاگرام توزیع سرعت نشت در جداره های کانال ۳۱۸
- شکل ۷-۵: روند محاسبه ی مرحله به مرحله ی تلفات در یک کانال ۳۱۹
- شکل ۷-۶: نمونه ای از مقطع کانال به صورت کامل در خاکبرداری ۳۲۲
- شکل ۷-۷: نمونه ای از مقطع کانال به صورت کامل در خاکریزی ۳۲۳
- شکل ۷-۸: مقطع کانال به صورت مشترک در خاکبرداری و خاکریزی ۳۲۳
- شکل ۷-۹: نحوه ی نمایش شیب جانبی کانال ۳۲۴
- شکل ۷-۱۰: انواع مقاطع ساده کانال ها ۳۳۰

- شکل ۷-۱۱: نمودار تجربی رابطه‌ی دبی با عرض کف کانال (USBR, 1987) ۳۳۲
- و (Chow, 1959)
- شکل ۷-۱۲: توزیع تنش برشی در جداره‌ی یک کانال دوزنقه‌ای (Akan, 2006) ۳۴۷
- شکل ۷-۱۳: مقدار ضریب K_s برای $1 < \frac{b}{y} < 6$ (Akan, 2006) ۳۴۸
- شکل ۷-۱۴: زاویه ایستایی خاک در خاک‌های غیر چسبنده (Simon & Albertson, 1960) ۳۵۰
- شکل ۷-۱۵: تنش برشی مجاز در خاک‌های چسبنده بر اساس نسبت تخلخل (Chow, 1959) ۳۵۱
- شکل ۷-۱۶: تنش برشی مجاز در خاک‌های چسبنده با شاخص خمیری (Chen & Cotton, 1988) ۳۵۲
- شکل ۷-۱۷: تنش برشی مجاز در خاک‌های غیرچسبنده با قطر متوسط مصالح (Chen & Cotton, 1988) ۳۵۳
- شکل ۷-۱۸: نمودار محاسبه‌ی ارتفاع آزاد برحسب دبی کانال (Chow, 1959) ۳۶۱
- شکل ۷-۱۹: طول حفاظت پایین‌دست خم (Akan, 2006) ۳۶۳
- شکل ۷-۲۰: ضریب محاسبه تنش افزوده در خم (Chen & Cotton, 1988) ۳۶۴
- شکل ۷-۲۱: مصالح ژئوممبراین ۳۷۲
- شکل ۷-۲۲: مصالح ژئوتکستایل ۳۷۲
- شکل ۷-۲۳: کانال پوشش شده توسط ژئوممبراین ۳۷۳
- شکل ۷-۲۴: کانال پوشش شده توسط ژئوممبراین ۳۷۳
- شکل ۷-۲۵: مقطع اولیه‌ی کانال و شابلون گذاری ۳۷۴
- شکل ۷-۲۶: اجرای مصالح فیلتر ۳۷۵
- شکل ۷-۲۷: اجرای پوشش بتنی ۳۷۵
- شکل ۷-۲۸: پانل‌های اصلی اجراشده‌ی بتنی ۳۷۶
- شکل ۷-۲۹: پانل‌های اصلی اجراشده‌ی بتنی ۳۷۶
- شکل ۷-۳۰: درزگیری پوشش کانال با مصالح قیری (ماستیک) ۳۷۷
- شکل ۷-۳۱: نمایی از یک پوشش بتنی آماده‌شده ۳۷۷

شماره	عنوان شکل های فصل ۸
صفحه	
۳۹۷	شکل ۸-۱: نمایی از تبدیل (ترانزیشن) در مسیر کانال
۳۹۸	شکل ۸-۲: ضرایب افت انرژی در تبدیل ها
۳۹۹	شکل ۸-۳: شکل سه بعدی از نیمه یک تبدیل سهموی
۴۰۰	شکل ۸-۴: شکل سه بعدی از نیمه یک تبدیل ربع دایره
۴۰۰	شکل ۸-۵: شکل سه بعدی از نیمه یک تبدیل خطی ساده
۴۰۱	شکل ۸-۶: پروفیل طولی سطح آب
۴۰۶	شکل ۸-۷: نمای شماتیک یک تبدیل منحنی و پارامترهای محاسباتی آن

شماره	عنوان شکل های فصل ۹
صفحه	
۴۲۰	شکل ۹-۱: انتخاب حوضچه آرامش بر اساس دبی در واحد عرض و ارتفاع دراپ (USBR, 1987)
۴۲۱	شکل ۹-۲: نمایی از یک دراپ مایل
۴۲۲	شکل ۹-۳: نمایی از یک دراپ پلکانی
۴۲۳	شکل ۹-۴: شکل شماتیک یک دراپ پلکانی
۴۲۴	شکل ۹-۵: جزییات جریان در یک دراپ آزاد
۴۲۶	شکل ۹-۶: دراپ قائم به همراه آبراهه ماهی
۴۲۷	شکل ۹-۷: دراپ قائم با پله
۴۲۸	شکل ۹-۸: دراپ قائم مستغرق
۴۲۹	شکل ۹-۹: دراپ قائم با کنترل از بالادست
۴۳۱	شکل ۹-۱۰: دراپ مایل
۴۳۴	شکل ۹-۱۱: دراپ شیبدار با بلوک های ضربه گیر
۴۳۴	شکل ۹-۱۲: برش طولی دراپ شیبدار با بلوک های ضربه گیر
۴۳۶	شکل ۹-۱۳: شکل استاندارد دراپ شیبدار با بلوک های ضربه گیر (USBR, 1987).
۴۳۹	شکل ۹-۱۴: سیستم کنترل و لوله ورودی در دراپ لوله ای (USBR, 1987).

شماره

عنوان شکل های فصل ۱۰

صفحه

۴۴۷	شکل ۱۰-۱: شکل شماتیک یک سیفون معکوس
۴۵۰	شکل ۱۰-۲: چگونگی کنترل شیب ورودی برای جریان آزاد در ورودی سیفون
۴۵۳	شکل ۱۰-۳: نمایی از ورودی یک سیفون
۴۵۶	شکل ۱۰-۴: پارامترهای لازم برای محاسبه ضریب افت انرژی در خمیدگی
۴۵۶	شکل ۱۰-۵: گراف محاسبه ی ضریب افت انرژی در خمیدگی با توجه به زاویه ی خمیدگی
۴۶۱	شکل ۱۰-۶: پلان و برش طولی یک سیفون وارونه

شماره

عنوان شکل های فصل ۱۱

صفحه

۴۷۲	شکل ۱۱-۱: نمونه ای از کالورت با مقطع دایره ای
۴۷۲	شکل ۱۱-۲: نمونه ای از کالورت با مقطع مستطیلی
۴۷۳	شکل ۱۱-۳: نمونه ای از کالورت با مقطع خاص (نعل اسبی)
۴۷۵	شکل ۱۱-۴: نمونه ای از تبدیل های ورودی ساده لوله ای
۴۷۵	شکل ۱۱-۵: نمونه ای از تبدیل های ورودی ساده لوله ای مورب
۴۷۶	شکل ۱۱-۶: نمونه ای از دهانه های ورودی دیواره دار
۴۷۷	شکل ۱۱-۷: نمونه ای از دهانه های ورودی دیواره دار با دیواره های برگشتی
۴۷۸	شکل ۱۱-۸: نمونه ای از دهانه های ورودی دیواره دار با دیواره های برگشتی
۴۷۹	شکل ۱۱-۹: نمونه ای از دهانه های ورودی دیواره دار ارتقا داده شده
۴۸۱	شکل ۱۱-۱۰: موقعیت یابی مسیر کالورت
۴۸۲	شکل ۱۱-۱۱: فلوچارت روند طراحی کالورت
۴۸۴	شکل ۱۱-۱۲: خط تراز انرژی و خط تراز هیدرولیکی
۴۸۷	شکل ۱۱-۱۳: انواع کنترل ورودی در کالورت ها
۴۸۸	شکل ۱۱-۱۴: اثر شرایط لبه ورودی بر فشردگی جریان
۴۸۹	شکل ۱۱-۱۵: تبدیل ورودی با پایین آمدگی و دیواره های برگشتی
۴۹۰	شکل ۱۱-۱۶: تبدیل ورودی با پایین آمدگی و بدون دیواره های برگشتی
۴۹۴	شکل ۱۱-۱۷: انواع کنترل خروجی در کالورت ها
۴۹۸	شکل ۱۱-۱۸: چارت ظرفیت برای لوله کاروگیت فلزی استاندارد با قطر ۱۸ الی ۳۶ اینچ با دیوار پیشانی (FHWA 1965; UDFCD 2001)

- شکل ۱۹-۱۱: چارت ظرفیت برای لوله کاروگیت فلزی استاندارد با قطر ۳۶
الی ۶۶ اینچ با دیوار پیشانی (FHWA 1965; UDFCD 2001)
۴۹۹
- شکل ۲۰-۱۱: چارت ظرفیت برای لوله کاروگیت فلزی استاندارد با قطر ۱۸
الی ۳۶ اینچ با بیرون زدگی (FHWA 1965; UDFCD 2001)
۵۰۰
- شکل ۲۱-۱۱: چارت ظرفیت برای لوله کاروگیت فلزی استاندارد با قطر ۳۶
الی ۶۶ اینچ با بیرون زدگی (FHWA 1965; UDFCD 2001)
۵۰۱
- شکل ۲۲-۱۱: چارت ظرفیت برای لوله بتنی با قطر ۱۸ الی ۶۶ اینچ و لبه
قایم (FHWA 1965; UDFCD 2001)
۵۰۲
- شکل ۲۳-۱۱: چارت ظرفیت برای لوله بتنی با قطر ۶۰ الی ۱۸۰ اینچ و لبه
قایم (FHWA 1965; UDFCD 2001)
۵۰۳
- شکل ۲۴-۱۱: چارت ظرفیت برای لوله بتنی لبه دار با قطر ۱۸ الی ۶۶ اینچ
(FHWA 1965; UDFCD 2001)
۵۰۴
- شکل ۲۵-۱۱: چارت ظرفیت برای لوله بتنی لبه دار با قطر ۶۰ الی ۱۸۰ اینچ
(FHWA 1965; UDFCD 2001)
۵۰۵
- شکل ۲۶-۱۱: نمودار کنترل در ورودی جهت تعیین عمق سراب در کالورت
باکس
۵۰۸
- شکل ۲۷-۱۱: نمودار کنترل در ورودی جهت تعیین عمق سراب در کالورت
لوله ای بتنی
۵۰۹
- شکل ۲۸-۱۱: نمودار کنترل در ورودی جهت تعیین عمق سراب در کالورت
لوله ای کاروگیت فلزی
۵۱۰
- شکل ۲۹-۱۱: نمودار کنترل در خروجی جهت تعیین ارتفاع H در کالورت
لوله ای بتنی با مقطع پر و ضریب زبری $n=0.012$
۵۱۱
- شکل ۳۰-۱۱: نمودار کنترل در خروجی جهت تعیین ارتفاع H در کالورت
لوله ای کاروگیت استاندارد با مقطع پر و ضریب زبری $n=0.024$
۵۱۲
- شکل ۳۱-۱۱: نمودار کنترل در خروجی جهت تعیین ارتفاع H در کالورت
لوله ای کاروگیت با ورق سازه ای با مقطع پر و ضریب زبری $n=0.0302$ الی
 $n=0.0328$
۵۱۳
- شکل ۳۲-۱۱: نمودار کنترل در خروجی جهت تعیین ارتفاع H در کالورت
باکس بتنی با مقطع پر و ضریب زبری $n=0.012$
۵۱۴

شماره	عنوان شکل های فصل ۱۲
صفحه	
۵۲۶	شکل ۱۲-۱: روگذر نیممکتی
۵۲۷	شکل ۱۲-۲: روگذر پایه دار
۵۳۰	شکل ۱۲-۳: دو طرح متفاوت روگذر نیممکتی
۵۳۴	شکل ۱۲-۴: دو طرح روگذر پایه دار بتنی بدون سقف و دارای سقف
۵۳۵	شکل ۱۲-۵: روگذر پایه دار ناو شکل
۵۳۶	شکل ۱۲-۶: روگذرهای پایه دار لوله ای
۵۳۷	شکل ۱۲-۷: روگذرهای پایه دار ناو شکل
۵۳۹	شکل ۱۲-۸: سرریز جانبی در یک کانال در شبکه آبیاری و زهکشی دشت نازک - آذربایجان غربی
۵۳۹	شکل ۱۲-۹: سرریز جانبی در ورودی یک سیفون معکوس، شبکه پایین دست سد آغ چای - خوی
۵۴۱	شکل ۱۲-۱۰: تنظیم سطح آب توسط مخزن جانبی
۵۴۲	شکل ۱۲-۱۱: تنظیم سطح آب توسط مخزن جانبی
۵۴۲	شکل ۱۲-۱۲: تنظیم سطح آب توسط مخزن جانبی

شماره	عنوان شکل های فصل ۱۳
صفحه	
۵۴۸	شکل ۱۳-۱: سرریز آجی
۵۴۹	شکل ۱۳-۲: سرریز تند آب
۵۵۰	شکل ۱۳-۳: سرریز سیفونی
۵۵۱	شکل ۱۳-۴: سرریز نیلوفری
۵۵۲	شکل ۱۳-۵: سرریز جانبی
۵۵۳	شکل ۱۳-۶: سرریز پلکانی
۵۵۴	شکل ۱۳-۷: شمای یک دریچه ی فیوزگیت
۵۵۵	شکل ۱۳-۸: نحوه ی عبور جریان از روی سرریز آجی
۵۵۷	شکل ۱۳-۹: شکل عبور جریان از روی سرریز با آستانه ی لبه تیز
۵۶۰	شکل ۱۳-۱۰: پارامترهای محاسباتی منحنی سرریز
۵۶۳	شکل ۱۳-۱۱: نمودار محاسبه ضریب n و K برحسب شیب و ارتفاع آب بالادست سرریز (USBR, 1987)

۵۶۵	شکل ۱۲-۱۳: پارامترهای شعاع و مختصات شروع قوس تاج برحسب ارتفاع آب در بالادست و شیب بالادست (USBR, 1987)
۵۶۶	شکل ۱۳-۱۳: ضریب دبی برای سرریز آجی با دیواره‌ی بالادست قایم (USBR, 1987)
۵۶۶	شکل ۱۴-۱۳: ضریب دبی برای هد بیش از هد طراحی در سرریز آجی با دیواره‌ی قایم (USBR, 1987)
۵۶۷	شکل ۱۵-۱۳: ضریب دبی در سرریز آجی با دیواره‌ی بالادست شیب‌دار (USBR, 1987)
۵۶۹	شکل ۱۶-۱۳: نحوه‌ی کاهش یا افزایش عرض در تنداب
۵۷۰	شکل ۱۷-۱۳: شیوه‌ی نادرست تغییر عرض در تنداب
۵۷۲	شکل ۱۸-۱۳: پارامترهای منحنی سرریز WES
۵۷۴	شکل ۱۹-۱۳: چند نمونه از سرریز استاندارد WES
۵۷۵	شکل ۲۰-۱۳: ضریب دبی جریان در سرریز استاندارد
۵۷۶	شکل ۲۱-۱۳: ضریب دبی جریان در سرریز استاندارد با ضریب تصحیح ناشی از شیب
۵۷۸	شکل ۲۲-۱۳: اثر عمق آب و رقوم پایاب بر ضریب دبی
۵۸۰	شکل ۲۳-۱۳: ضرایب فشردگی برای پایه‌های پل و دماغه‌ی سواحل
۵۸۱	شکل ۲۴-۱۳: طراحی بدنه سرریز استاندارد
۵۸۳	شکل ۲۵-۱۳: نیمرخ طولی سرریز در تنداب

شماره	عنوان شکل های فصل ۱۴
صفحه	
۵۹۲	شکل ۱-۱۴: پارامترهای پرش هیدرولیکی
۵۹۵	شکل ۲-۱۴: عمق پایین‌دست در یک پرش هیدرولیکی از زیر دریچه
۵۹۶	شکل ۳-۱۴: طول یک پرش هیدرولیکی در پای یک شوت
۵۹۶	شکل ۴-۱۴: اثر وجود پله منفی در مسیر پرش
۵۹۷	شکل ۵-۱۴: اثر وجود پله مثبت در مسیر پرش
۵۹۷	شکل ۶-۱۴: اثر پایین‌افتادگی در مسیر پرش
۵۹۹	شکل ۷-۱۴: نمودار بدون بعد جهت محاسبه طول پرش برحسب عدد فرود و عمق اولیه‌ی پرش در حوضچه‌ی آرامش USBR تیپ I (USBR, 1983)
۶۰۰	شکل ۸-۱۴: نمودار بدون بعد عمق جریان پایین‌دست با توجه به عدد فرود در حوضچه‌ی آرامش USBR تیپ I (USBR, 1983)

- شکل ۹-۱۴: نمودار بدون بعد طول پرش برحسب عدد فرود و عمق ثانویه
 ۶۰۱ پرش در حوضچه‌ی آرامش USBR تیپ I (USBR, 1983)
- شکل ۱۰-۱۴: نمودار بدون بعد افت انرژی در طول پرش برحسب عدد فرود
 ۶۰۱ (USBR, 1983)
- شکل ۱۱-۱۴: حوضچه‌ی آرامش تیپ II و ابعاد بلوک‌ها با توجه به عمق اولیه
 ۶۰۴ و ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی (Wei & Lindell, 2004)
- شکل ۱۲-۱۴: نمودار حوضچه‌ی تیپ II جهت تقریب پروفیل سطح آب
 ۶۰۵ (USBR, 1983)
- شکل ۱۳-۱۴: نمودار طول حوضچه با استفاده از عدد فرود در حوضچه‌ی
 ۶۰۶ تیپ I، II و III (USBR, 1983)
- شکل ۱۴-۱۴: نمودار حوضچه‌ی تیپ II برای محاسبه‌ی عمق ثانویه برحسب
 ۶۰۷ عدد فرود یا عمق جریان پایین‌دست (USBR, 1983)
- شکل ۱۵-۱۴: حوضچه‌ی آرامش تیپ III و ابعاد ضربه‌گیرها برحسب عمق
 ۶۰۹ اولیه‌ی پرش (FHWA, 2006)
- شکل ۱۶-۱۴: نمودار تعیین اندازه‌ی h_3 و h_4 در حوضچه‌ی آرامش تیپ III
 ۶۰۹ (Wei & Lindell, 2004)
- شکل ۱۷-۱۴: نمودار تعیین پروفیل سطح آب به‌صورت تقریبی در حوضچه‌ی
 ۶۱۰ آرامش تیپ III (USBR, 1983)
- شکل ۱۸-۱۴: حوضچه‌ی آرامش تیپ IV و نحوه‌ی قرارگیری بلوک‌ها
 ۶۱۲ (USBR, 1983)
- شکل ۱۹-۱۴: سازه‌ی موج گیر (Wei & Lindell, 2004)
 ۶۱۳
- شکل ۲۰-۱۴: سازه‌ی موج گیر (Wei & Lindell, 2004)
 ۶۱۳
- شکل ۲۱-۱۴: سازه‌ی موج گیر (Wei & Lindell, 2004)
 ۶۱۴
- شکل ۲۲-۱۴: پرش‌های آزمایش‌شده جهت طراحی حوضچه‌ی آرامش تیپ
 ۶۱۵ V (Wei & Lindell, 2004)
- شکل ۲۳-۱۴: فاکتور شکل (K) در رابطه‌ی پرش هیدرولیکی حوضچه‌ی
 ۶۱۵ آرامش تیپ V (USBR, 1983)
- شکل ۲۴-۱۴: عمق آب پایین‌دست برحسب عمق اولیه‌ی پرش در حوضچه
 ۶۱۶ تیپ V (USBR, 1983)
- شکل ۲۵-۱۴: عمق آب پایین‌دست برحسب عمق ثانویه‌ی پرش در حوضچه
 ۶۱۷ تیپ V (USBR, 1983)

۶۱۸	شکل ۲۶-۱۴: نمودار تعیین طول پرش برحسب عمق آب پایین‌دست در حوضچه تیپ V (USBR, 1983)
۶۱۸	شکل ۲۷-۱۴: نمودار تعیین طول پرش برحسب عمق ثانویه‌ی پرش در حوضچه تیپ V (Wei & Lindell, 2004)
۶۲۰	شکل ۲۸-۱۴: نمای کلی حوضچه‌ی آرامش تیپ VI (USBR, 1983)
۶۲۱	شکل ۲۹-۱۴: نحوه‌ی تعیین ابعاد حوضچه‌ی آرامش تیپ VI (USBR, 1983)
۶۲۳	شکل ۳۰-۱۴: حوضچه‌ی آرامش SAF (نشریه شماره ۳۰۳ الف)
۶۲۵	شکل ۳۱-۱۴: جریان از روی سازه‌ی جامی شکل
۶۲۶	شکل ۳۲-۱۴: شکل کلی یک باکت جامی دندان‌دار
۶۳۰	شکل ۳۳-۱۴: باکت‌های ساده و دندان‌دار و جریان عبوری از آنها
۶۳۲	شکل ۳۴-۱۴: نمودار کمترین شعاع مجاز باکت (USBR, 1983)
۶۳۳	شکل ۳۵-۱۴: نمودار تعیین بیشینه و کمینه عمق پایین‌دست (USBR, 1983)
۶۳۴	شکل ۳۶-۱۴: منحنی جریان ورودی در شیب‌های تند (USBR, 1983)
۶۳۵	شکل ۳۷-۱۴: جریان از روی باکت بلوک‌دار مستغرق (USBR, 1983)

شماره

عنوان شکل‌های فصل ۱۵

صفحه

۶۴۹	شکل ۱-۱۵: مقطع عرضی و پلان یک کانال مرکب طبیعی با دشت‌های سیلابی
۶۵۰	شکل ۲-۱۵: نمایش پارامترها و عوامل موثر در یک کانال مرکب
۶۵۱	شکل ۳-۱۵: آشفتگی جریان و تنش برشی شدید در ناحیه اتصال کانال اصلی به دشت سیلابی در یک کانال مرکب آزمایشگاهی (ون پرویجن و همکاران، ۲۰۰۵)
۶۵۳	شکل ۴-۱۵: تقسیم بندی نواحی در یک مقطع کانال مرکب به روش هنگ مهندسین ارتش امریکا (US Army Corps of Engineers) برای نرم افزار HEC-RAS
۶۵۴	شکل ۵-۱۵: برخی مقاطع مختلف کاربردی برای کانال‌های مرکب
۶۵۶	شکل ۶-۱۵: نمایش روش‌های خطوط تقسیم در مقطع کانال مرکب
۶۵۷	شکل ۷-۱۵: کانال مرکب غیر منشوری با سیلاب دشت همگرا
۶۵۸	شکل ۸-۱۵: ویژگی‌ها و مؤلفه‌های جریان در یک کانال طبیعی (یا رودخانه).

- شکل ۹-۱۵: نمودار دبی-اشل ویژه برای جریان فراتر از کانال اصلی. (a) ۶۶۳
آزمایشگاهی، (b) میدانی (Knight & Dimitriou (1983)
- شکل ۱۰-۱۵: منحنی های از نوع سرعت دبی-موج سینماتیک و دبی-میرایی ۶۶۷
جریان.
- شکل ۱۱-۱۵: نمونه منحنی دبی-سرعت برای رودخانه Wye در بازه ۶۶۷
Erwood تا Belmont (Nerc, 1975)
- شکل ۱۲-۱۵: رابطه عرض معادل برای کمینه انرژی جریان و نرخ انتقال ۶۶۹
رسوب بیشینه وایت و همکاران (White et al., 1982)
- شکل ۱۳-۱۵: انتقال رسوب در یک رودخانه فرضی دارای ماسه ۰/۲۵ میلی- ۶۷۰
متری (Ackers, 1992)
- شکل ۱۵a-۱۴: پارامترهای هیدرولیکی همراه جریان فراتر از کانال اصلی ۶۷۳
(Shiono & Knight, 1991)
- شکل ۱۵b-۱۴: ساختار گرداب در جریان فراتر از کانال اصلی در مقیاس ۶۷۳
بزرگ (Fukuoka & Fujita, 1989)
- شکل ۱۵-۱۵: توزیع عرضی تنش برشی جداره حاصل از آزمایش FCF ۶۷۵
(080501)
- شکل ۱۶-۱۵: توزیع های تنش برشی جداره بی بعد حاصل از آزمایش FCF ۶۷۶
(Serries 8)
- شکل ۱۷-۱۵: روش های تقسیم بندی سطح مقطع رودخانه برای محاسبه دبی ۶۷۹
جریان.
- شکل ۱۸-۱۵: تغییرات ضریب زبری n مانینگ برای جریان فراتر از کانال ۶۸۰
اصلی در رودخانه Montford انگلستان (Knight et al., 1989)
- شکل ۱۹-۱۵: ضرایب تنظیم دبی (DISADF) برای آزمایشات FCF ۶۸۳
(Ackers, 1993a)
- شکل ۲۰-۱۵: مثال واسنجی مدل دو بعدی از آزمایشات (FCF 020501) ۶۶۸
- شکل ۲۱-۱۵: مثال واسنجی مدل دو بعدی از آزمایشات (FCF 060501) ۶۶۹
- شکل ۲۲-۱۵: مثال واسنجی مدل دو بعدی از آزمایشات (FCF 020501) ۶۹۰
- شکل ۲۳-۱۵: مثال دیگر از واسنجی مدل دو بعدی از آزمایشات (FCF ۶۹۱
020501)
- شکل ۲۴-۱۵: تغییرات عرضی تنش برشی رینولدز در نزدیکی ناحیه اندرکنش ۶۹۳
کانال اصلی و بستر سیلابی (FCF, 020301 & 020501)
- شکل ۲۵-۱۵: ساختار جریان در مقطع کانال مرکب پیچان ۶۹۶
- شکل ۲۶-۱۵: مدل آزمایشگاهی کانال مرکب پیچان آزمایشگاه FCF- ۶۹۸
Wallingford
- شکل ۲۷-۱۵: بردارهای جریان ثانویه در ابتدای پیچ کانال با خم ۱۱۰ درجه ۷۰۰
با مقطع عرضی طبیعی (جریان در درون کانال اصلی و فراتر از آن در مطالعات
(FCF)

- شکل ۲۸-۱۵: بردارهای جریان ثانویه در ابتدای پیچ دو کانال با خم ۶۰ درجه
 ۷۰۱ با مقطع عرضی دوزنقه و نسبت‌های متفاوت جریان (درون کانال اصلی و فراتر از آن در مطالعات *Bradford* و *FCF*)
- شکل ۲۹-۱۵: متوسط سرعت‌های عمقی در دو لایه اطراف خم ۶۰ درجه
 ۷۰۲ برای جریان فراتر از کانال اصلی با $(H-h)/H=0.25$
- شکل ۳۰-۱۵: بردارهای جریان ثانویه اطراف خم ۶۰ درجه برای جریان فراتر از کانال اصلی با $(H-h)/H=0.25$
 ۷۰۳
- شکل ۳۱-۱۵: بردارهای سرعت برای جریان کانال اصلی پر در یک کانال پیچان دوزنقه ای.
 ۷۰۴
- شکل ۳۲-۱۵: بردارهای سرعت برای جریان فراتر از کانال اصلی در یک کانال خم دار دوزنقه‌ای و با بستر سیلابی مستقیم با $(H-h)/H=0.25$
 ۷۰۶
- شکل ۳۳-۱۵: بردارهای سرعت برای جریان فراتر از کانال اصلی در یک کانال خم دار مستطیلی و با بستر سیلابی غیرمستقیم با $(H-h)/H=0.25$
 ۷۰۷
- شکل ۳۴-۱۵: بردارهای سرعت برای جریان فراتر از کانال اصلی در یک کانال خم دار مستطیلی و با بستر سیلابی غیرمستقیم (خم دار)
 ۷۰۷ با $(H-h)/H=0.50$

شماره

عنوان شکل های فصل ۱۶

صفحه

- شکل ۱-۱۶: تقسیم‌بندی پمپ‌ها
 ۷۱۳
- شکل ۲-۱۶: انواع پمپ‌های با جابجایی مثبت
 ۷۱۴
- شکل ۳-۱۶: الف) توربوپمپ چندمرحله‌ای، ب) توربوپمپ تک‌مرحله‌ای
 ۷۱۶
- شکل a ۱۶-۴: شکل چرخ انواع پمپ‌ها
 ۷۱۶
- شکل b ۱۶-۴: اجزای مختلف پمپ گریز از مرکز
 ۷۱۷
- شکل ۵-۱۶: انتخاب تقریبی نوع پمپ بر اساس دبی و هد موردنیاز
 ۷۱۷ (*Karassik, 2001*)
- شکل ۶-۱۶: جریان در یک دستگاه پمپ
 ۷۱۸
- شکل ۷-۱۶: جریان در یک دستگاه پمپ
 ۷۲۰
- شکل ۸-۱۶: شکل کلی منحنی مشخصه پمپ در برابر منحنی *NPSH*
 ۷۲۱
- شکل ۹-۱۶: یک نمونه از منحنی مشخصه برای راندمان، هد و توان پمپ
 ۷۲۳
- شکل ۱۰-۱۶: منحنی مشخصه برای سرعت‌های دوران مختلف پمپ (نوربخش
 ۷۲۵ (۱۳۸۱)
- شکل ۱۱-۶۱: منحنی مشخصه برای قطر پره‌های متفاوت (نوربخش ۱۳۸۱)
 ۷۲۶
- شکل ۱۲-۱۶: شکل ساده ای از نحوه نصب یک دستگاه پمپ بین دو مخزن در ارتفاع های مختلف.
 ۷۲۷

۷۲۸	شکل ۱۳-۱۶: تلاقی منحنی سیستم و منحنی مشخصه‌ی پمپ در نقطه‌ی کار پمپ
۷۳۲	شکل مثال a ۱-۱۶: نمودار همپوشانی پمپ‌های فشارقوی، ۱۴۵۰ دور بر دقیقه، پمپ ۶۵/۵ WKL
۷۳۳	شکل مثال b ۱-۱۶: نمودار همپوشانی پمپ‌های فشارقوی، ۲۹۰۰ دور بر دقیقه، پمپ ۵۰/۲ WKL
۷۳۴	شکل مثال c ۱-۱۶: نمودار پمپ فشارقوی ۶۵ WKL، ۱۴۵۰ دور بر دقیقه
۷۳۶	شکل ۱۴-۱۶: (الف) نحوه اتصال پمپ‌ها به صورت موازی، (ب) منحنی مشخصه پمپ و سیستم در حالت پمپ‌های موازی
۷۳۸	شکل ۱۵-۱۶: (الف) نحوه اتصال پمپ‌ها به صورت سری، (ب) منحنی مشخصه پمپ و سیستم در حالت پمپ‌های سری
۷۴۱	شکل ۱۶-۱۶: توربین ضربه‌ای (پلتون)
۷۴۱	شکل ۱۷-۱۶: نحوه‌ی تلاقی دو نیم کره در چرخ پلتون
۷۴۱	شکل ۱۸-۱۶: نحوه‌ی ساخت توربین ضربه‌ای تورگو
۷۴۲	شکل ۱۹-۱۶: عملکرد توربین جریان متقاطع
۷۴۳	شکل ۲۰-۱۶: توربین واکنشی
۷۴۴	شکل ۲۱-۱۶: توربین فرانسیس (توربین واکنشی جریان مخلوط)
۷۴۴	شکل ۲۲-۱۶: توربین دریاز (توربین واکنشی جریان مخلوط)
۷۴۵	شکل ۲۳-۱۶: توربین کاپلان (توربین واکنشی جریان محوری)
۷۴۷	شکل ۲۴-۱۶: یک نمونه از دیاگرام انتخاب اولیه‌ی توربین‌های استاندارد
۷۴۸	شکل ۲۵-۱۶: منحنی یک نمونه از توربین
۷۵۱	شکل ۲۶-۱۶: ترکیب‌گی یک شیر یک‌طرفه در اثر ضربه‌ی قوچ
۷۵۲	شکل ۲۷-۱۶: خوردگی در پره‌ی یک پمپ در اثر کاویتاسیون
۷۵۴	شکل ۲۸-۱۶: نحوه‌ی کارکرد دستگاه پاک‌کننده‌ی اولتراسونیک قوی برای صنعت سیم و کابل با اثر کاویتاسیون
۷۵۶	شکل ۲۹-۱۶: مخزن ضربه‌گیر یک‌طرفه
۷۵۷	شکل ۳۰-۱۶: مخزن ضربه‌گیر تحت فشار
۷۵۸	شکل ۳۱-۱۶: لوله کنارگذر به همراه شیر یک‌طرفه
۷۵۹	شکل ۳۲-۱۶: لوله قایم در مسیر یک خط لوله

(ب). لیست جدول‌ها

شماره

صفحه

عنوان جدول

۵۰	جدول (۳-۱): زبری معادل برای لوله‌های صنعتی.
۵۴	جدول (۳-۲): نمودار ضرایب زبری مانینگ-استریکلر و کوتر (<i>Graf & Altinakar, 1991</i>)
۱۷۵	جدول (۵-۱): طبقه‌بندی جریان‌های یک مخلوط.
۲۳۴	جدول (۵-۲): مقادیر ضرایب کاربردی در رابطه بار کل رسوبی (آکرز و وایت، ۱۹۷۳)
۲۳۷	جدول (۵-۳): پارامترهای به کار رفته برای به دست آوردن فرمول‌های مختلف
۳۱۹	جدول ۷-۱: میزان اتلاف نشست بر اساس نوع خاک بستر (حیدری‌زاده، ۱۳۶۹)
۳۲۵	جدول ۷-۲: مشخصات و عناصر هندسی مقاطع مختلف کانال‌ها (محمدی و بشارت، ۱۳۹۵).
۳۲۶	جدول ۷-۳: مقادیر شیب جانبی (m) با توجه به جنس بستر
۳۲۸	جدول ۷-۴: حداقل سرعت جریان در کانال‌ها (متر بر ثانیه) (نشریه ۱۰۴، وزارت نیرو)
۳۳۳	جدول ۷-۵: ضریب زبری مانینگ (n) (نشریه ۱۰۴ ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زهکشی)
۳۳۸	جدول ۷-۶: مقادیر دبی برحسب عمق آب در کانال (USBR, 1974)
۳۴۱	جدول ۷-۷: مشخصات مقاطع بر اساس بهترین مقطع هیدرولیکی
۳۴۳	جدول ۷-۸: بیشترین سرعت مجاز در کانال‌های بدون پوشش (برگرفته از US Army Corps of Engineers, 1991)
۳۵۴	جدول ۷-۹: ضریب کاهش بر اساس شکل کانال‌ها در پلان
۳۹۹	جدول ۸-۱: ضرایب افت انرژی در تبدیل‌ها
۴۴۹	جدول ۱۰-۱: مقدار پوشش خاکریز روی بدنه‌ی اصلی سیفون
۴۵۷	جدول ۱۰-۲: تخمین سرعت در سیفون
۴۸۵	جدول ۱۱-۱: پارامترهای اثرگذار بر جریان در دو حالت کنترل در ورودی و خروجی
۴۹۱	جدول ۱۱-۲: ضریب افت ورودی کالورت‌ها (Normann, 1985)
۵۷۳	جدول ۱۳-۱: پارامترهای منحنی سرریز <i>WES</i> بر اساس پیشنهاد US Army, 1991
۵۸۳	جدول ۱۳-۲: منحنی‌های پیشنهادشده توسط <i>WES</i> برای پایین‌دست تاج سرریز در تنداب‌ها
۵۸۴	جدول ۱۳-۳: مختصات نقاط منحنی بالادست تاج سرریز کوتاه <i>WES</i>
۵۹۸	جدول ۱۴-۱: انواع حوضچه‌های آرامش <i>USBR</i>

۶۲۲	جدول ۲-۱۴: عمق آب در حوضچه‌ی SAF و عدد فرود (نشریه شماره ۳۰۳ (الف)
۷۴۶	جدول ۱-۱۶: دامنه‌ی کاربرد توربین‌های مختلف
۷۵۳	جدول ۲-۱۶: فشار بخار در دماهای مختلف

بخش اوّل:

مبانی هیدرولیک جریان در کانال‌ها

شامل:

- مقدمه‌ای بر هیدرولیک جریان در کانال‌ها
- معادلات هیدرودینامیک جریان در کانال‌ها
- جریان یکنواخت در کانال‌های روباز
- جریان غیریکنواخت در کانال‌های روباز
- هیدرولیک کانال‌های رسوبی

▪ آبشستگی موضعی در کانال‌ها و رودخانه‌ها

بخش دوم

اصول طراحی و اجرای کانال‌ها، سازه ها و
تأسیسات وابسته

شامل:

- مقدمه ای بر نکات اجرایی در طراحی و احداث کانال‌ها
- تبدیل‌ها یا ترانزیشن‌ها
- آبشارها یا دراپ‌ها
- سازه های تحت فشار و نیمه تحت فشار در مسیر کانال‌ها، شامل:
 - الف- سیفون معکوس
 - ب- زیرگذرها یا کالورت‌ها
 - ج- روگذرها یا فلوم‌ها
- سرریزها، آببندها و دریچه‌ها
- حوضچه‌های آرامش و سازه‌های انرژی‌گیر

بخش سوم

- هیدرولیک کانال‌های مرکب
-
- شامل:
- کانال‌های رودخانه‌ای با دشتهای سیلابی

بخش چهارم

- ماشین‌های آبی
-
- شامل:
- پمپ‌ها
- توربین‌ها
- ایستگاه‌های پمپاژ و توربین
- پدیده ضربه قوچ



مقدمه ای بر هیدرولیک جریان در کانال های
روباز

An Introduction to the Flow Hydraulics in Open
Channels

۱-۱ مقدمه

در جریان‌های با سطح آزاد، به دلیل در تماس بودن سطح جریان با هوا، فشار درون سیال فقط ناشی از فشار اتمسفر و وزن سیال است و هیچ‌گونه فشار دیگری وجود ندارد. با توجه به وجود سطح آزاد، این‌گونه جریان‌ها فقط در اثر نیروی ثقل از تراز بالاتر به تراز پایین‌تر به وجود می‌آیند و سرعت جریان تابعی از مشخصات هندسی مقطع، زبری جدار و شیب کف کانال است.

مطالعه‌ی جریان‌های با سطح آزاد، اغلب تحت عنوان هیدرولیک جریان در کانال‌ها صورت می‌گیرد. کانال‌ها برای منظورها و اهداف گوناگون از جمله انتقال آب، آبرسانی شهری، جمع‌آوری و دفع فاضلاب، آبیاری و زهکشی و موارد دیگر قابل‌استفاده می‌باشند. طرح کانال با توجه به اهداف ذکرشده ممکن است با روش‌های مختلفی انجام گیرد. در این فصل به‌طور کلی به برخی جزئیات طراحی و اجرای کانال‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲ کانال‌ها

کانال یک سیستم انتقال آب است که در آن جریان برقرار شده و سطح آزاد آن در معرض فشار اتمسفر قرار دارد. مطالعه هیدرولیک جریان در کانال‌ها اغلب این سؤال مهم را برای مهندسين پيش می‌آورد: چه شکل و ابعاد هندسی برای کانالی در یک شیب بستر طولی داده شده با میزان مشخص دبی جریان عبوری، باید تعیین شود؟

۱-۲-۱ انواع کانال‌ها

کانال‌ها در حالت عمومی به دو دسته قابل تقسیم هستند (شکل ۱-۱):

الف - کانال‌های طبیعی،

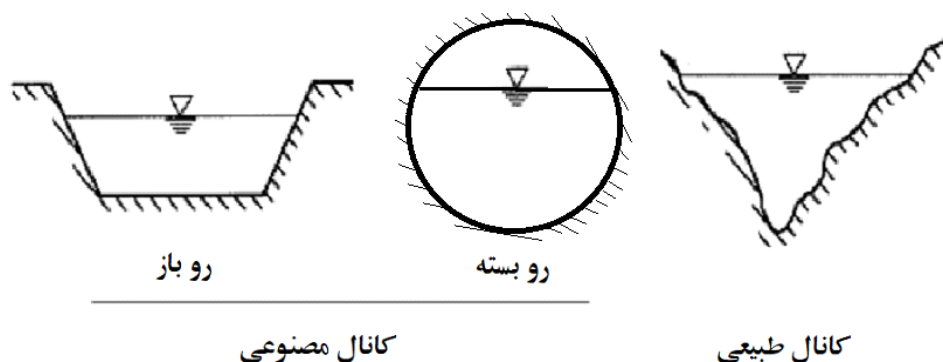
ب - کانال‌های مصنوعی (ساخته شده بدست انسان).

کانال‌های طبیعی:

آبراهه‌هایی طبیعی در سطح و یا زیر زمین هستند؛ برای مثال انواع آبگذرها، جوی‌ها، مسیل‌ها، رودخانه‌ها، نهرها و مدخل خلیج‌ها را می‌توان نام برد. ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی چنین جریان‌هایی به طور کلی نامنظم هستند. در آنها استفاده از نظریه‌های هیدرولیک، جواب تقریبی را بدست می‌دهد.

کانال‌های مصنوعی:

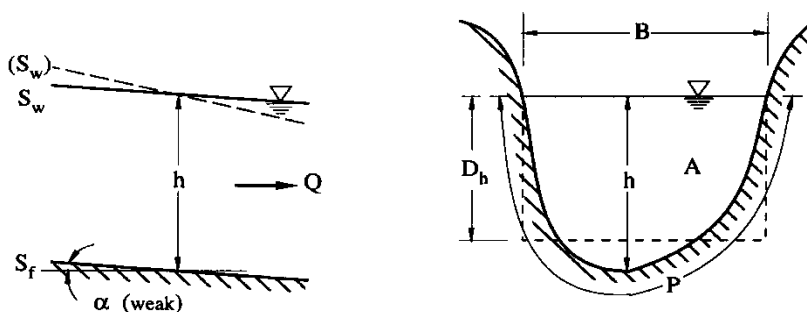
آبراهه‌هایی هستند که توسط بشر در سطح (یا زیر) زمین ساخته می‌شوند، مثل کانال‌های روباز (کانال‌های کشتیرانی، کانال‌های نیروگاه‌ها، کانال‌های آبیاری و زهکشی) یا کانال‌های بسته‌ای که جریان سطح مقطع آنها را بطور کامل پر نمی‌کند (مثل تونل‌های آبرسانی، آبراهه‌ها، زهکش‌ها و کانال‌های انتقال فاضلاب). ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی چنین کانال‌ها در کل منظم هستند. استفاده از نظریه‌های هیدرولیک، جواب واقعی قابل قبولی را بدست می‌دهد. انواع مختلف مقاطع کانال‌های طبیعی و مصنوعی در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: مقاطع کانال‌های طبیعی و مصنوعی.

۲-۲-۱ عناصر هندسی و هیدرولیکی کانال‌ها

مقطع (عرضی) یک کانال، سطح مقطع عمود بر امتداد جریان می‌باشد. این مقطع یا بهتر بگوییم سطح مقطع جریان، A قسمتی از مقطع می‌باشد که در تماس با جریان آب است (شکل ۲-۱). کانالی که مقطع آن تغییر نمی‌کند و شیب طولی و زبری آن ثابت است - هر چند که عمق جریان ممکن است تغییر کند - **کانال منشوری** خوانده می‌شود، در غیر این صورت کانال را **غیر منشوری** می‌نامند.



شکل ۲-۱: عناصر معمول هندسی برای یک مقطع کانال.

عناصر هندسی یک مقطع و یا سطح مقطع مرطوب، A ، به صورت زیر می‌باشد:

الف- عرض سطح آب، B ، پهنای سطح آزاد آب در کانال می‌باشد.

ب- عمق جریان، h ، یا ارتفاع آب- اگر به صورت دیگری تعریف نشده باشد - حداکثر عمق در کانال در نظر گرفته می‌شود.

د- مساحت مقطع جریان، A ، عبارت از سطح مقطع جریان می‌باشد.

ج- عمق هیدرولیکی، D_h ، کانال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_h = \frac{A}{B} \quad (1-1)$$

محیط مرطوب کانال، P ، عبارت از خط تماس سطح مقطع مرطوب و بستر و دیواره‌های کانال به وجود می‌آید، که شامل سطح آزاد آب نمی‌شود.

ii) شعاع هیدرولیکی، R_h ، نسبت سطح مرطوب، A ، به محیط مرطوب، P ، مقطع کانال است.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (2-1)$$

این شعاع اغلب به عنوان طول مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرمول‌های عناصر هندسی پنج نوع مقطع مختلف کانال در جدول (۲-۱) داده شده است.

آبراهه‌های طبیعی ممکن است دارای یک شکل هندسی نامنظم باشند، اما اغلب با مقاطع دوزنقه‌ای و یا سهموی تقریب زده می‌شوند. در کنار عناصر هندسی، شیب‌های طولی نیز مورد ملاحظه قرار می‌گیرند که شامل موارد زیر هستند:

i) شیب بستر کانال (کف)، S_f ؛

ii) شیب سطح آب (پیزومتریک)، S_w .

در اصل مقدار شیب کف کانال به توپوگرافی و عوارض زمین بستگی دارد و اغلب ملایم می‌باشد، بنابراین ممکن است به صورت $S_f = \tan \alpha \cong \sin \alpha$ بیان شود. محیط مرطوب، P ، می‌تواند ترکیبی از یک بستر ثابت و بدون حرکت (سیمان و سنگ) یا یک بستر متحرک (ذرات رسوبی) باشد. جدول (۲-۷ ص: ۳۲۵) عناصر هندسی برای کانال‌ها با مقاطع مختلف را نشان می‌دهد.

۳-۱ مقدمه ای بر هیدرولیک جریان در کانال‌ها

۱-۳-۱ انواع جریان در کانال‌های روباز

جریان در کانال‌های طبیعی و مصنوعی، با سطح آزاد بوده که دارای سطح جداکننده آب و هوا می‌باشد؛ و در این سطح فشار برابر با فشار اتمسفر است.

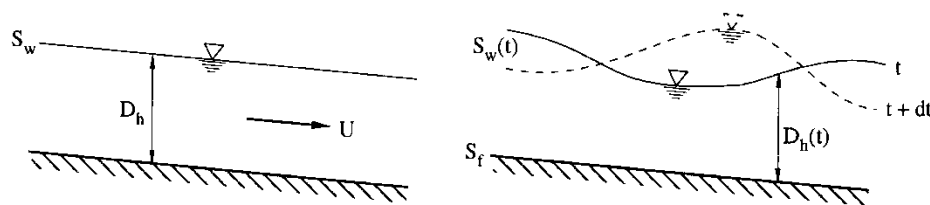
جریان در کانال‌های روباز بستگی به شیب بستر دارد، در حالی که جریان در مجاری بسته ناشی از اختلاف فشار مابین مقاطع می‌باشد. دسته‌بندی انواع جریان در کانال‌های روباز ممکن است وابسته به تغییر عمق جریان (h) یا (D_h) با توجه به زمان و مکان انجام پذیرد، یعنی: $D_h = f(t, x)$.

الف - جریان متغیر زمانی (شکل ۳-۱).

چنانچه سرعت متوسط جریان، U ، و سرعت لحظه‌ای، u ، همچنین عمق جریان، h یا D_h ، نسبت به زمان بزرگی و جهت آن ثابت باقی بماند، جریان **دائمی** (پایدار) خواهد بود، در نتیجه دبی جریان:

$$Q = AU \quad (۳-۱)$$

مابین مقاطع مختلف کانال، با فرض عدم وجود جریان‌های ورودی و خروجی جانبی، دبی ثابت باقی می‌ماند. اگر عمق هیدرولیکی، $D_h(t)$ ، و سایر پارامترها با زمان تغییر نماید، جریان **غیردائمی** است. در نتیجه، دبی جریان ثابت نخواهد بود. شکل (۳-۱) شکل عمومی جریان‌های دایمی و غیردایمی در کانال‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: فرم عمومی جریان‌های دایمی و غیردائمی در کانال‌های روباز

اگر دقیق‌تر بگوئیم، جریان در یک کانال روباز بندرت دایمی است. با وجود این، تغییرات نسبت به زمان اغلب به قدر کافی آرام است که جریان را بتوان دایمی فرض نمود و این فرض را حداقل برای فاصله‌های زمانی کوتاه‌تر می‌توان به کار برد.

ب - جریان متغیر مکانی

اگر عمق جریان، D_h ، هم‌چنین سایر پارامترها در هر مقطع کانال نسبت به طول کانال ثابت باشد، جریان **یکنواخت** است. آنگاه خط شیب کف بستر با سطح آب آزاد موازی با $S_f \equiv S_w$ می‌شود.

اگر عمق جریان، $D_h(x)$ ، و همچنین سایر پارامترهای جریان، در طول کانال تغییر نماید، جریان **غیر یکنواخت** است. آنگاه شیب کف بستر با شیب سطح آب مغایر خواهد بود، یعنی $S_f \neq S_w$. جریان **غیریکنواخت** می‌تواند **دائمی** یا **غیردائمی** باشد.

۱-۳-۲ رژیم جریان در کانال‌ها

در اصل فیزیک جریان در کانال‌های روباز تحت تأثیر عکس العمل نیروهای متقابل زیر قرار می‌گیرد:

- نیروهای اینرسی،

- نیروهای ثقلی،

- نیروهای اصطکاک (ناشی از لزوجت و زبری).

پس از تعیین نیروهای فوق، معادلات خلاصه شده حرکت جریان (Graf & Altinakar, 1991) با اعداد

بدون بعد زیر معرفی می‌شوند که این اعداد برای تعیین رژیم جریان نیز به کار می‌روند:

(i) عدد فرود، Fr ، عبارت از نسبت نیروهای ثقلی به نیروهای اینرسی است، یا:

$$\frac{\rho g}{\rho U_c^2 / L_c} = \frac{gL_c}{U_c^2} = Fr^{-2} \quad \text{و} \quad Fr = \frac{U_c}{\sqrt{gL_c}} \quad (4-1)$$

(ii) عدد رینولدز، Re ، عبارت از نسبت نیروهای اصطکاک به اینرسی است، یا:

$$\frac{\mu(U_c / L_c)}{\rho U_c^2 / L_c} = \frac{\nu}{U_c L_c} = Re^{-1} \quad \text{و} \quad Re = \frac{U_c L_c}{\nu} \quad (5-1)$$

باید عامل زبری نسبی را نیز به این دو اعداد بدون بعد اضافه کرد:

(iii) زبری نسبی، عبارت از نسبت ضخامت زبری، k_s ، به یک مشخصه طولی، یا:

$$\frac{k_s}{L_c} \quad (6-1)$$

U_c و L_c عبارت از مشخصه‌های سرعت و طول هستند، می‌توان $U_c = U$ در نظر گرفت و $L_c = R_h$ یا $L_c = D_h$.

در هیدرولیک جریان در کانال‌های روباز، اعداد بدون بعد زیر معرفی می‌شوند:

$$Re' = \frac{R_h U}{\nu} \quad \text{و} \quad \frac{k_s}{D_h} \quad (7-1)$$

$$Fr = \frac{U_c}{\sqrt{gD_h}} \quad \text{و} \quad Re = \frac{4R_h U}{\nu}$$

عدد رینولدز جریان به منظور طبقه‌بندی حالت جریان به شرح زیر به کار می‌رود (Graf & Altinakar, 1991):

$$Re' < 500$$

- جریان آرام یا ورقه‌ای

$$Re' > 2000$$

- جریان آشفته یا مغشوش

- جریان گذرا یا تراتریشن $500 < Re' < 2000$

از آزمایشات گوناگون روی کانال‌های مصنوعی (Chow, 1959)، نتیجه می‌شود که اگر عدد رینولدز، Re' به مقداری معادل 2000 برسد، جریان آشفته یا مغشوش می‌شود. جریان در کانال‌های روباز به صورت آشفته بوده و اغلب جریان از نوع غیرهموار هیدرولیکی است.

عدد فرود جهت طبقه‌بندی نوع جریان به شرح زیر بکار می‌رود:

- جریان زیر بحرانی (رودخانه‌ای) $Fr < 1$

- جریان فوق بحرانی (سیلابی) $Fr > 1$

- جریان بحرانی $Fr \equiv Fr_c = 1$

درکل، جریان در کانال‌های روباز از همین سه نوع خارج نیست.

در نتیجه، از ترکیب اثر عدد رینولدز Re' و عدد فرود Fr چهار نوع رژیم جریان زیر بدست می‌آید:

- جریان زیر بحرانی - آرام، $Fr < 1$; $Re' > 500$

- جریان زیر بحرانی - آشفته، $Fr < 1$; $Re' > 2000$

- جریان فوق بحرانی - آرام، $Fr > 1$; $Re' < 500$

- جریان فوق بحرانی - آشفته. $Fr > 1$; $Re' > 2000$

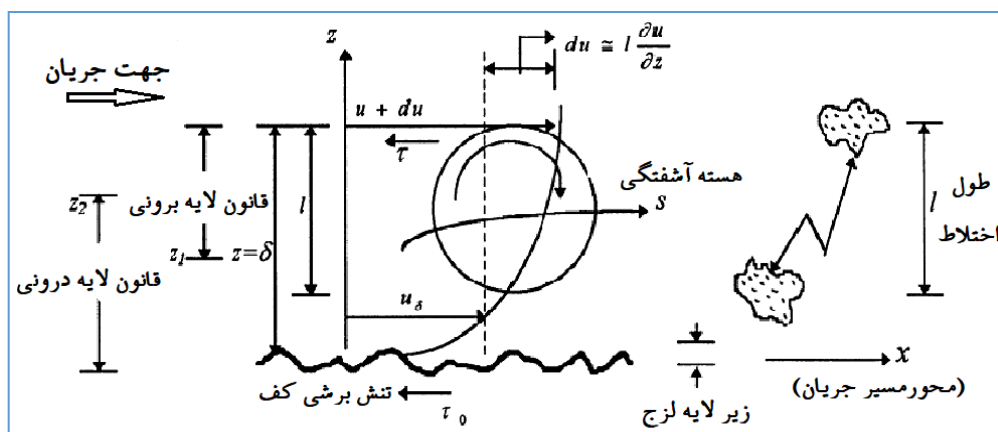
۴-۱ توزیع سرعت جریان در کانال‌ها

جریان موجود در امتدادهای مختلف دارای توزیع‌های گوناگونی است که به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۴-۱ توزیع سرعت در امتداد مسیر جریان

جریان موجود در طول دیواره (یا بستر کانال)، دارای توزیع سرعت است (Graf & Altinakar, 1991). سرعت نقطه‌ای، u ، در دیواره به طور تقریبی مساوی صفر بوده و به سرعت به سوی سطح آزاد جریان افزایش می‌یابد. حداکثر مقدار آن اغلب اندکی پایین‌تر از این سطح آزاد واقع می‌شود. پروفیل توزیع سرعت در امتداد عمق جریان تقریباً لگاریتمی است.

درکل، جریان دائمی به سه متغیر x ، y و z بستگی دارد؛ که این جریان سه بعدی می‌شود. نواحی مختلف لایه های مرزی و توزیع قائم لگاریتمی سرعت در جداره های زیر کانال ها در شکل (۱-۵) ملاحظه می گردد.



شکل ۵-۱: نواحی مختلف لایه های مرزی، توزیع قائم سرعت لگاریتمی برای یک جداره کانال زبر به همراه معرفی طول اختلاط متلاطم (Mohammadi, 1998)

در یک کانال با پهنای عریض B - عریض در مقایسه با عمق، $B > 5h$ - جریان دو بعدی است، جدای از جریان موجود در نزدیکی دیواره های قائم است. اگر فرض کنیم جریان یک بعدی باشد، محاسبات هیدرولیکی به طور قابل ملاحظه ای ساده می شود. سرعت متوسط $U(x)$ ، در طول قائم یا در مقطع به صورت زیر بیان می شود:

$$U = \frac{1}{h} \int_0^h u(z) dz \quad \text{یا} \quad U = \frac{1}{A} \int_0^B \int_h^h u(z) dz dy \quad (۸-۱)$$

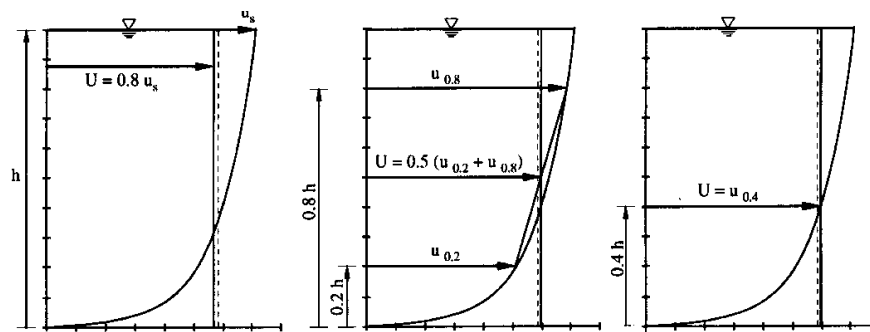
در کانال های روباز با شکل هندسی ساده، در کل جریان مغشوش محسوب می شود، به طوری که سرعت نقطه ای $u(x, z)$ با سرعت متوسط $U(x)$ متفاوت است.

در شرایط جریان دائمی، بررسی فرضیه جریان یک بعدی امکان پذیر است. برای تعیین سرعت متوسط U ، در یک مقطع داده شده، روابط تقریبی زیرمورد استفاده قرار می گیرد (شکل های ۱-۶ را ببینید):

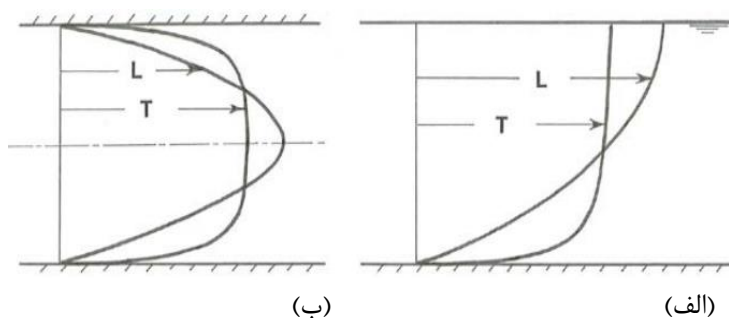
$$U \cong (0.8 - 0.9) u_s \quad (\text{فرمول Prony}) \quad (۹-۱ \text{ الف})$$

$$U \cong 0.5(u_{0.2} + u_{0.8}) \quad (\text{فرمول USGS}) \quad (۹-۱ \text{ ب})$$

که در آن $u_{0.2}$ ، $u_{0.8}$ و u_s عبارت از سرعت های نقطه ای در نقاط ارتفاعی فرض شده است.



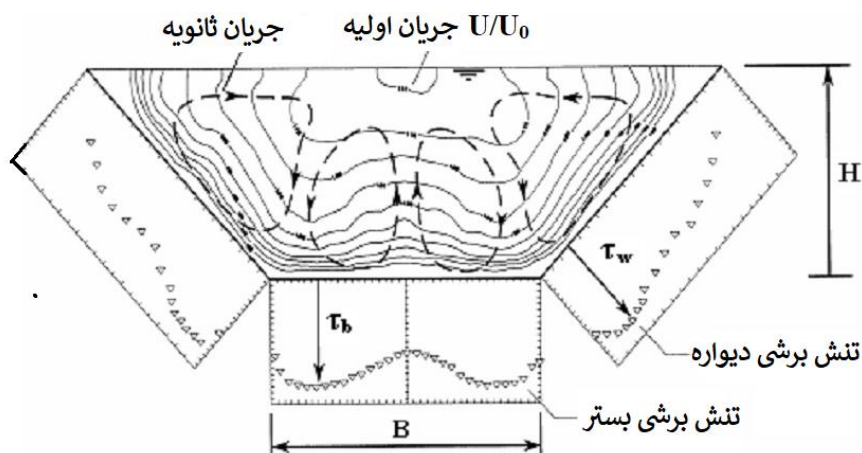
شکل ۱a-۶: توزیع های عمقی سرعت متوسط.



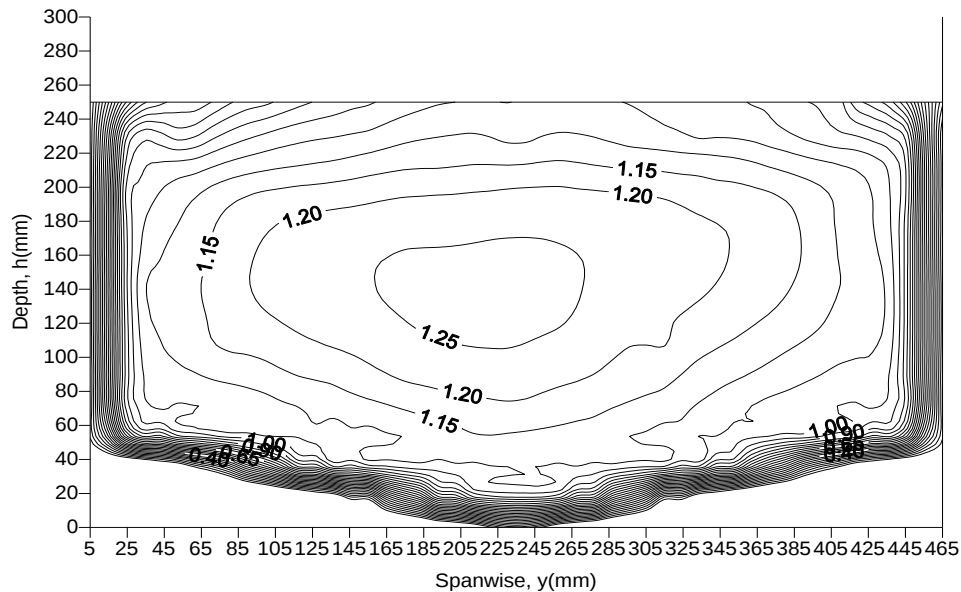
شکل ۱b-۶: توزیع عمقی سرعت در رژیم های آرام، L، و مغشوش، T،
(الف) در کانال روباز ، (ب) در لوله

۲-۴-۱ منحنی های هم سرعت (Isovels)

در مقاطع کانال های مختلف با اندازه گیری سرعت های نقطه ای می توان کنتور و یا منحنی های هم سرعت را ترسیم نمود. نمونه ای از این نوع توزیع ها را که برای یک مقطع کانال ذوزنقه ای توسط نایت و همکاران در شکل (۷-۱الف)، و برای یک مقطع مستطیل با کف V- شکل توسط محمدی تهیه شده است، ملاحظه کنید.



شکل ۷ الف-۱: منحنی های هم سرعت، توزیع تنش برشی جداره و الگوی جریان ثانویه در کانال دوزنقه ای شکل (نایت و همکاران، 1994, Knight et al)



شکل ۷ ب-۱: منحنی های هم سرعت در یک کانال مستطیلی با کف V-شکل (محمدی، 1999, Mohammadi)

۵-۱ توزیع فشار

معادله حاکم بر جریان دائمی یک سیال تراکم ناپذیر (Graf & Altinakar, 1991)، در امتداد مؤلفه قائم $n (\equiv z)$ عبارتست از:

$$U \frac{U}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial n} (p + \gamma z') \quad (10-1)$$

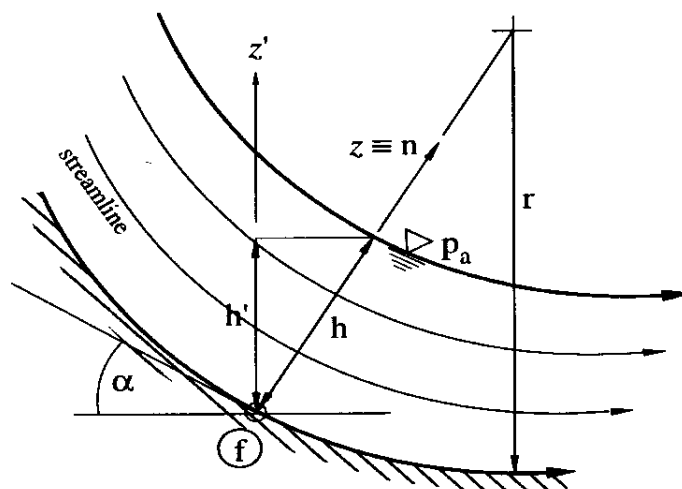
طوری که نسبت (U^2/r) شتاب گریز از مرکز جرمی سیال است که جایگزین خط انحنا دار خود (r) می شود (شکل ۹-۱ را ببینید). با فرض اینکه U و r به نسبت ثابت باقی می ماند، از انتگرال گیری معادله (۱۰-۱) داریم:

$$(p + \gamma z') = -\rho \int \frac{U^2}{r} dn + Cte = -\rho \frac{U^2}{r} z + Cte \quad (10-1a)$$

در فشار نسبی (نسبت به فشار اتمسفر) روی بستر کانال رابطه زیر توصیف می شود:

$$p_f = \gamma h' + \rho \frac{U^2}{r} h + p_a \quad (11-1)$$

در این صورت شامل فشار هیدرواستاتیک و متحرک خواهد بود.



شکل ۸-۱: جریان روی یک بستر مقعر.

۶-۱ جریان یکنواخت

وقتی که سرعت متوسط (U) ثابت باقی بماند و خطوط مسیر جریان به طور قابل قبول در امتداد یکدیگر قرار بگیرند (با $r \rightarrow \infty$)، توزیع فشار در یک مقطع عمود بر بستر، جریان یکنواخت هیدرواستاتیک است (شکل ۹-۱).

بنابراین با در نظر گرفتن $z \equiv n$ (معادله ۱۰-۱) می‌توان نوشت:

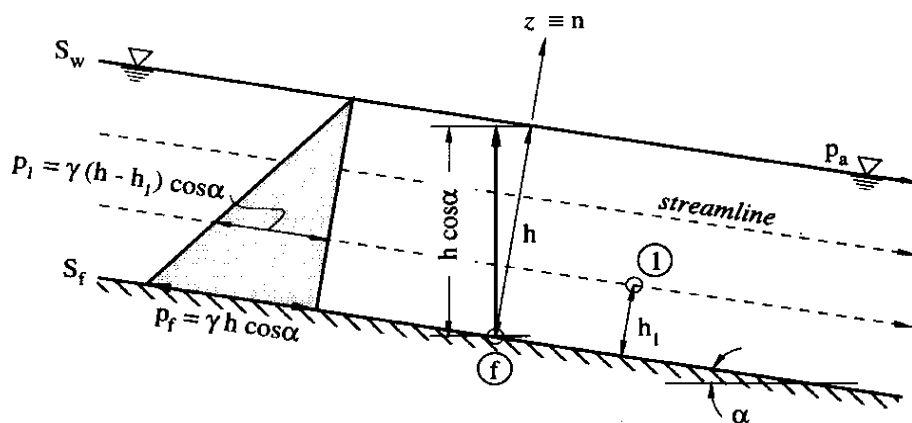
$$0 = \frac{\partial}{\partial z} (\gamma z' + p) \quad (12-1)$$

یک توصیف فشار، نسبت به بستر، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$p_f = +\gamma h' \quad (13-1)$$

که داریم:

$$\left(\frac{p}{\gamma} \right)_f = h \cos \alpha \quad (14-1)$$



شکل ۹-۱: جریان در مسیر یکنواخت.

برای کانال‌های روباز معمول، زاویهٔ شیب α ملایم و ضعیف، یعنی $\alpha < 6^\circ$ یا $J_f < 0.1$ و $\cos \alpha \approx 1$ است، در نتیجه معادلهٔ (۱۴-۱) به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$\left(\frac{p}{\gamma} \right)_f = h \quad (15-1)$$

در این معادله، h همان عمق جریان در کانال است.

۷-۱ جریان در مسیرهای انحنادار

برای جریان، (اندکی) غیر یکنواخت، مسیر جریان انحنادار از نوع همگرا یا واگراست. در این گونه جریان یک مؤلفهٔ شتاب توسط نیروهای اینرسی به وجود می‌آید. چنان که پیش‌تر داشتیم، می‌توان نوشت:

$$\frac{U^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial n} (p + \gamma z') \quad (16-1)$$

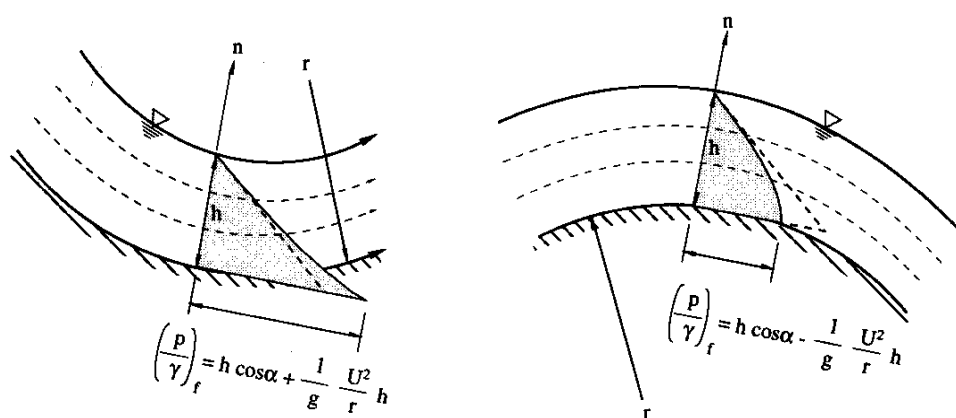
در این صورت، برای فشار نسبی روی بستر، با رابطهٔ زیر یک توصیف داده می‌شود:

$$p_f = \gamma h' + \rho \frac{U^2}{r} h + p_a \quad (17-1)$$

علامت (+) برای بستر مقعر و علامت (-) برای بستر محدب است. بدین ترتیب:

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_f = h \cos \alpha \pm \frac{1}{g} \frac{U^2}{r} h \quad (16-1)$$

توزیع فشار چندان هیدرواستاتیک نیست (شکل ۱۰-۱ را ببینید). برای یک جریان مقعر به سمت خارج، نیروی گریز از مرکز سبب افزایش فشار می شود؛ ولی برای یک جریان محدب، این نیرو سبب کاهش فشار می گردد. در حالت اخیر، فشار می تواند به زیر فشار اتمسفر رسیده، که سبب جدائی جریان از روی جداره کانال می شود. نمونه ای از کاربردهای این توزیع ها در سرریزهای روجریانی سدها نیز ملاحظه می شود.



شکل ۱۰-۱: جریان بر روی یک جداره مقعر و محدب.