Prozhefa.com

فهرست مطالب

پیشگفتار ۱۳

بخش ۱
قوانین اساسی حاکم بر جریانهای آزاد

فصل ۱ـ کلیات و مفاهیم اولیه ۱۷

مقدمه ۱۷

۱-۱ مقایسه جریان در کانالهای باز و مجاری تحت فشار ۱۷

۱-۲ کانالهای باز و مشخصات هندسی مقاطع آنها ۲۰

۱-۲-۱ تقسیم‌بندی کانالها ۲۰

۱-۲-۲ انواع مقاطع کانالهای باز ۲۱

۱-۲-۳ مشخصات هندسی مقاطع کانالهای باز ۲۳

۱-۲-۴ نامگذاری‌های مختلف کانالهای مصنوعی ۲۴

۱-۳ طبقه‌بندی و تشخیص انواع جریان در کانالهای باز ۲۵

۱-۴ وضعیت جریان در کانالهای باز ۳۱

۱-۴-۱ تأثیر نیروی لزجت ۳۱

۱-۴-۲ تأثیر نیروی ثقل ۳۳

۱-۴-۳ رژیم جریان ۳۴

۱-۵ توزیع سرعت در کانالها ۳۵

۱-۶ توزیع فشار در کانالها ۳۹

۱-۶-۱ توزیع فشار در جریانهای یکنواخت (موازی) ۳۹

۱-۶-۲ توزیع فشار در جریانهای متغیر تدریجی ۴۰

Prozhefa.com

۱-۶-۳ توزیع فشار در جریانهای با انحناء در صفحهٔ قائم ۴۰
۱-۷ بررسی معادلات اساسی حاکم بر حرکت سیالات ۴۴
۱-۷-۱ کاربرد روابط اساسی حاکم برحرکت سیالات درجریان آب درکانالهای باز ۴۸
۱-۷-۲ بررسی مقادیر α و β ۵۲
۱-۷-۳ کاربرد رابطهٔ اندازهٔ حرکت و رابطهٔ انرژی ۵۵
مسایل ۶۳

فصل ۲ ـ اصل انرژی در کانالهای باز ۶۷
مقدمه ۶۷
۲-۱ معادلهٔ انرژی ۶۷
۲-۲ کاربردهایی از معادلهٔ انرژی ۶۹
۲-۳ انرژی مخصوص ۷۱
۲-۳-۱ انرژی مخصوص در کانالهای مستطیلی با شیب کم، معرفی عمق بحرانی و اعماق متناوب ۷۲
۲-۴ تحلیل جریان ناشی از یک برآمدگی موضعی در کانال مستطیلی ۷۵
۲-۵ جریان ناشی از یک تنگنای موضعی در کانال مستطیلی ۸۳
۲-۶ منحنی E - y در حالت کلّی و برای هر مقطع دلخواه ۹۳
۲-۷ محاسبات عمق بحرانی ۹۶
مسایل ۱۱۸

فصل ۳ ـ اصل اندازهٔ حرکت در کانالهای باز و کاربرد آن ۱۲۴
مقدمه ۱۲۴
۳-۱ رابطهٔ اندازهٔ حرکت در کانالهای باز و معرفی نیروی مخصوص ۱۲۴
۳-۲ منحنی نیروی مخصوص در برابر عمق و اعماق مزدوج ۱۲۷
۳-۳ تحلیل پرش هیدرولیکی در کانالهای با شیب کم ۱۳۰
۳-۴ مقایسه بین منحنی‌های انرژی مخصوص و نیروی مخصوص ۱۳۹
مسایل ۱۴۷

Prozhefa.com

بخش ۲
جریانهای دائمی در کانالهای باز

فصل ۴ ـ جریان یکنواخت در کانالهای باز ۱۵۳
مقدمه ۱۵۳
۴-۱ شکل‌گیری جریان یکنواخت ۱۵۳
۴-۲ سرعت متوسط در جریانهای یکنواخت ۱۵۵
۴-۲-۱ فرمول شزی ۱۵۵
۴-۲-۲ تعیین ضریب شزی بر مبنای ضریب اصطکاک دارسی - وایسباخ ۱۵۷
۴-۲-۳ تعیین ضریب شزی با استفاده از رابطهٔ بیزن ۱۵۸
۴-۲-۴ تعیین ضریب شزی با استفاده از رابطهٔ گانگیلت - کاتر ۱۶۰
۴-۲-۵ تعیین سرعت متوسط در کانالها با استفاده از معادلهٔ مانینگ ۱۶۰
۴-۲-۶ تخمین ضریب زبری مانینگ ۱۶۱
۴-۲-۷ مقایسهٔ معادلات تعیین سرعت متوسط در جریان یکنواخت ۱۶۹
۴-۳ محاسبات جریان یکنواخت ۱۷۰
۴-۳-۱ محاسبهٔ عمق نرمال ۱۷۲
۴-۴ زبری معادل ۱۷۹
۴-۴-۱ زبری معادل در مقطع مرکب ۱۸۳
۴-۵ بهترین مقطع هیدرولیکی ۱۸۹
۴-۵-۱ بهترین مقطع هیدرولیکی مستطیلی ۱۸۹
۴-۵-۲ بهترین مقطع هیدرولیکی ذوزنقه‌ای ۱۹۰
۴-۵-۳ بهترین مقطع هیدرولیکی مثلثی ۱۹۱
۴-۶ مشخصات هیدرولیکی جریان در مقاطع دایروی ۱۹۳
مسایل ۱۹۷

فصل ۵ ـ تئوری جریان متغیر تدریجی (دائمی) در کانالهای باز ۲۰۴
مقدمه ۲۰۴
۵-۱ شکل‌گیری جریان متغیر تدریجی ۲۰۴
۵-۲ تئوری جریانهای متغیر تدریجی ۲۰۶

Prozhefa.com

۵-۲-۱ طبقه‌بندی نیمرخهای طولی سطح آب ۲۰۶
۵-۲-۲ معادلهٔ دینامیکی جریانهای متغیر تدریجی ۲۱۰
۵-۲-۳ بررسی کیفی انحنای سطح آب در نیمرخهای مختلف ۲۱۱
۵-۲-۴ ترکیب نیمرخهای سطح آب و ترسیم آنها ۲۱۶
مسایل ۲۲۶

فصل ۶ ـ محاسبات جریان متغیر تدریجی (دائمی) در کانالهای باز ۲۲۸
مقدمه ۲۲۸
۶-۱ تقسیم‌بندی کلی از روشهای معمول در محاسبات نیمرخهای سطح آب ۲۲۸
۶-۲ روشهای مناسب در کانالهای منشوری ۲۲۹
۶-۲-۱ روشهای عددی ساده ۲۲۹
۶-۲-۲ روش انتگرال‌گیری ترسیمی ۲۳۸
۶-۲-۳ روشهای انتگرال‌گیری مستقیم ۲۴۲
۶-۲-۴ روش انتگرال‌گیری مستقیم در مقاطع دایروی ۲۶۰
۶-۲-۵ محاسبهٔ نیمرخهای سطح آب در شیب‌های منفی (با روش انتگرال‌گیری مستقیم) ۲۶۴
۶-۲-۶ محاسبهٔ نیمرخهای سطح آب در کانالهای افقی (با روش انتگرال‌گیری مستقیم) ۲۶۵
۶-۳ محاسبهٔ نیمرخهای سطح آب در کانالهای طبیعی (رودخانه‌ها) ۲۷۳
۶-۳-۱ روش گام به گام استاندارد در کانالهای طبیعی با مقاطعی ساده ۲۷۳
۶-۳-۲ روش گام به گام استاندارد در کانالهای طبیعی با مقاطع مرکب ۲۸۰
۶-۳-۳ روش اذرا ۲۸۲
۶-۴ ارتباط دو دریاچه ۲۸۳
۶-۴-۱ کانال با شیب ملایم ۲۸۴
۶-۴-۲ کانال با شیب تند ۲۹۱
مسایل ۳۱۵

فصل ۷ ـ جریانهای متغیر مکانی ۳۲۱
مقدمه ۳۲۱
۷-۱ جریان متغیر مکانی با افزایش دبی ۳۲۱
۷-۱-۱ معادله دینامیکی جریانهای متغیر مکانی با افزایش دبی ۳۲۲

Prozhefa.com

۷-۱-۲ محاسبهٔ پروفیل سطح جریان ۳۲۷
۷-۲ جریان متغیرمکانی باکاهش دبی ۳۳۱
۷-۲-۱ معادله دینامیکی جریان متغیرمکانی باکاهش دبی ۳۳۲
مسایل ۳۴۸

بخش ۳
هیدرولیک سازه‌های مرتبط با جریانهای آزاد

فصل ۸ ـ سرریزها ۳۵۵
مقدمه ۳۵۵
۸-۱ انواع سرریزها ۳۵۵
۸-۲ سرریزهای لبه تیز ۳۵۵
۸-۲-۱ هیدرولیک سرریزهای لبه تیز ۳۵۶
۸-۲-۲ سرریز لبه تیز مستطیلی ۳۵۸
۸-۲-۳ سرریز لبه تیز مثلثی ۳۶۳
۸-۲-۴ سرریز لبه تیز در حالت جریان مستغرق ۳۶۶
۸-۲-۵ سرریزهای غیرمستطیلی ۳۶۷
۸-۳ سرریزهای لبه پهن ۳۷۱
۸-۳-۱ طبقه‌بندی انواع سرریزهای مستطیلی ۳۷۳
۸-۳-۲ ضریب شدت جریان Cd و Cd1 ..... ۳۷۳
۸-۳-۳ جریان مستغرق ۳۷۴
۸-۳-۴ سرریز سدها ۳۷۶
مسایل ۳۹۴

فصل ۹ ـ تبدیلها ۳۹۶
مقدمه ۳۹۶
۹-۱ جریان زیر بحرانی ۳۹۷
۹-۱-۱ تبدیلهای عریض کننده ۳۹۷
۹-۱-۲ تبدیلهای تنگ کننده ۳۹۹

Prozhefa.com

۹-۲ جریان فوق بحرانی ۴۰۲
۹-۲-۱ تبدیلهای تنگ کننده ۴۰۸
۹-۲-۲ تبدیل عریض کننده ۴۱۵
۹-۲-۳ تغییر جهت ۴۱۸
مسایل ۴۲۲

فصل ۱۰ ـ سازه‌های کنترل کنندهٔ جریان ۴۲۷
مقدمه ۴۲۷
۱۰-۱ آبشار آزاد ۴۲۷
۱۰-۲ سازه‌های ایجاد کننده عمق بحرانی ۴۳۰
۱۰-۲-۱ ناودان با موج ایستاده ۴۳۱
۱۰-۲-۲ ناودان پارشال ۴۳۴
۱۰-۳ جریان مابین پایه‌های پل ۴۳۶
۱۰-۳-۱ پایه‌های غیرموازی با جریان ۴۴۰
۱۰-۴ دریچه‌های زیرگذر ۴۴۱
۱۰-۴-۱ جریان خروجی آزاد ۴۴۲
۱۰-۴-۲ جریان خروجی مستغرق ۴۴۷
۱۰-۵ کالورت‌ها یا آبروهای زیرزمینی ۴۵۰
۱۰-۵-۱ کالورت دایروی با ورودی کلاه‌خودی ۴۶۶
مسایل ۴۶۹

فصل ۱۱ ـ پرش هیدرولیکی و کنترل آن ۴۷۰
مقدمه ۴۷۰
۱۱-۱ پرش هیدرولیکی ۴۷۱
۱۱-۲ انواع پرش آبی ۴۷۳
۱۱-۲-۱ طول پرش هیدرولیکی ۴۷۶
۱۱-۳ جهش آبی در مجاری شیبدار ۴۷۹
۱۱-۳-۱ طبقه‌بندی انواع پرش بر روی سطوح شیبدار ۴۸۰
۱۱-۳-۲ جهش آبی در کانالهای با شیب مثبت ۴۸۳

Prozhefa.com

۱۱-۳-۳ پرش هیدرولیکی در بسترهای با شیب معکوس ۴۹۰
۱۱-۴ کنترل پرش هیدرولیکی ۴۹۷
۱۱-۴-۱ سرریز لبه‌تیز ۴۹۸
۱۱-۴-۲ سرریز لبه پهن ۴۹۹
۱۱-۴-۳ بالاآمدگی ناگهانی - پله ۵۰۱
۱۱-۴-۴ پایین افتادگی ناگهانی ۵۰۲
۱۱-۵ حوضچه‌های آرامش ۵۰۴
۱۱-۵-۱ حوضچه آرامش ۵۰۵
۱۱-۵-۲ حوضچه‌های آرامش ۵۰۶
۱۱-۶ سرریزهای شیب شکن ۵۱۰

بخش ۴
جریانهای غیر دائمی در کانالهای باز

فصل ۱۲ - جریانهای غیردائمی ۵۱۷
مقدمه ۵۱۷
۱۲-۱ طبقه‌بندی جریانهای غیردائمی ۵۱۸
۱۲-۲ جریانهای غیردائمی متغیر تدریجی ۵۱۹
۱۲-۲-۱ معادلهٔ پیوستگی ۵۱۹
۱۲-۲-۲ معادلهٔ حرکت (دینامیکی) در جریانهای غیردائمی ۵۲۱
۱۲-۲-۳ روشهای حل معادلات جریانهای غیردائمی متغیر تدریجی ۵۲۳
۱۲-۲-۴ روش خصوصیات ۵۲۸
۱۲-۳ جریانهای غیردائمی متغیرسریع ۵۳۳
۱۲-۳-۱ موج مثبت ۵۳۴
۱۲-۳-۲ موج منفی ۵۳۹
مسایل ۵۵۰

فصل ۱۳ - روندیابی سیل ۵۵۳
مقدمه ۵۵۳

Prozhefa.com

۱۳-۱ روندیابی ذخیره ۵۵۵
۱۳-۱-۱ روش پالس ۵۵۵
۱۳-۲ روندیابی رودخانه ۵۶۰
۱۳-۲-۱ روش ماسکینگام ۵۶۰
۱۳-۳ روش مقادیر اجرائی ۵۶۵
۱۳-۴ روش خصوصیات ۵۶۶
۱۳-۵ روش همانندی پخش ۵۶۹
۱۳-۶ تعیین حداکثر دبی خروجی از سازه‌های هیدرولیکی در حین روندیابی سیل ۵۷۰
۱۳-۶-۱ شرح روش ۵۷۲
مسایل ۵۷۹

مراجع ۵۸۷
واژه نامه ۵۹۳
فهرست راهنما ۶۰۵

Prozhefa.com

پیشگفتار ویرایش دوّم

بسم‌الله الرحمن الرحیم

بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی و انتقال آب از یک مکان به مکان دیگر به منظورهای آبیاری و آبرسانی، به عنوان یک ضرورت حیاتی، از آغاز زندگی مورد نظر بشر بوده است. انسان نیز آگاهانه و یا ناآگاهانه از قوانین علمی حاکم بر این بهره‌وریها تبعیت می‌نموده و از آنها در جهت تجزیه و تحلیل مسائل پیش آمده سود می‌جسته است. در این راستا، علم هیدرولیک به عنوان علمی که رفتار مکانیکی آب، یعنی علمی که سکون، حرکت و تغییرشکلهای آن را تحت تأثیر تنشهای وارده همراه با دخالت شرایط مرزی بررسی می‌کند، تکامل یافته است. در دوران حاضر، بنابر ضرورت شناسایی رفتار مکانیکی سایر سیالات، هیدرولیک به عنوان یکی از شاخه‌های علم مکانیک سیالات شناخته می‌شود که در این شاخه، برخلاف شاخهٔ هیدرودینامیک، از جنبه‌های تجربی و آزمایشگاهی بهره فراوان برده می‌شود. ضرورت استفاده از نتایج تجربی و آزمایشگاهی خود معلولی از پیچیدگی تأثیر عوامل مختلف طبیعی و غیرطبیعی بر رفتار مکانیکی آب می‌باشد.

در میان روشهای مختلف انتقال آب، استفاده از نیروی ثقل و به حرکت در آوردن آب به صورت جریان با سطح آزاد، به همراه ایجاد کانال‌ها و سازه‌های هیدرولیکی مربوط نظیر سرریزها، دریچه‌ها و...، از متداولترین روش‌ها در آبیاری و آبرسانی می‌باشد، که شناخت مهندسین و متخصصین را از قوانین حاکم بر اینگونه جریانها تحت عنوان «هیدرولیک کانالهای باز» ضروری می‌نماید. در هیدرولیک کانالهای باز ضمن تبیین اصول و قوانین حاکم بر جریانهای آزاد و کاربردهای آنها و نیز بررسی جریانهای متغیر تدریجی و مکانی در آبراهه‌ها، به اصول هیدرولیکی حاکم بر تأسیساتی نظیر دریچه‌ها و سرریزها، به عنوان سازه‌های کنترل‌کننده جریان، طراحی هیدرولیکی سازه‌هایی همچون تبدیلها، پل‌ها و آبروها و نیز کنترل سیلاب و انتشار امواج در کانالها و رودخانه‌ها پرداخته می‌شود.

مجموعهٔ حاضر که تا حدّامکان پوشش دهندهٔ موارد ذکر شده می‌باشد، با تکیه بر مراجع اصلی و شناخته شدهٔ این رشته، یعنی کارهای محققین و مدرسین برجسته‌ای چون Chow، Henderson، Raju و Subramanya تدوین یافته است و در بر گیرندهٔ تجربیات چندین سالهٔ مؤلفین، در تدریس دروس هیدرولیک و هیدرولیک پیشرفته در گروه عمران دانشکدهٔ مهندسی دانشگاه فردوسی (مشهد) و نیز درس هیدرولیک مجاری روباز در گروه آبیاری این دانشگاه می‌باشد. این مجموعه، ضمن هماهنگی با سر فصل دروس یاد شده در مقاطع

Prozhefa.com

کارشناسی و کارشناسی ارشد، می‌تواند مورد استفادهٔ متخصصین رشته‌های آب و سازه‌های هیدرولیکی، که عملاً دست‌اندر کار جریانهای آزاد و طرح سازه‌های مرتبط با این جریانها می‌باشند، قرار گیرد. با این اعتقاد، که پس از تشریح یک موضوع علمی و فنی، درک بیشتر مفاهیم آن با مطالعه مثالهای مختلف و حلّ مسائل متنوع ممکن می‌باشد، سعی گردیده است، که ضمن ارائه یک نوشتهٔ ساده و روان، مثالهای عددی متعددی در هر فصل تجزیه و تحلیل گردند و امکان دسترسی به مسائل حلّ نشدهٔ اضافی نیز فراهم آید.

ویرایش اوّل کتاب در سال ۱۳۷۲ انجام پذیرفت و خوشبختانه با استقبال خوب دانشگاهیان و متخصّصین روبرو گردید. پس از شش چاپ، در اثر تجربیات بیشتر و دریافت نظرات مطالعه کنندگان محترم تصمیم گرفته شد تا ضعفها و کمبودهایی که در ویرایش اوّل وجود داشت برطرف گردد. در ویرایش دوم، که در پیش‌روست، ضمن سعی در برطرف نمودن اغلاط تایپی و چاپی، تغییراتی در طبقه‌بندی و فصل‌بندی مطالب و مسائل داده شده و مباحث جدید و قابل ملاحظه‌ای نیز به بعضی از فصول اضافه گردیده است. از جمله این اضافات تعدادی برنامهٔ رایانه‌ای مرتبط با بعضی از مباحث مطرح شده در کتاب می‌باشد که در انتهای فصول مربوط آورده شده‌اند.

ویرایش دوّم کتاب مشتمل بر چهار بخش است که سیزده فصل کتاب را تشکیل می‌دهند. این بخشها به ترتیب قوانین اساسی حاکم بر جریانهای آزاد، جریانهای دائمی در کانالهای باز، هیدرولیک سازه‌های مرتبط با جریانهای آزاد و جریانهای غیردائمی در کانالهای باز را شامل می‌شوند. بخش اوّل در برگیرنده فصول کلیّات و مفاهیم اوّلیه، اصل انرژی در کانالهای باز و اصل اندازهٔ حرکت در کانالهای باز می‌باشد. بخش دوّم از فصول جریانهای یکنواخت، تئوری جریانهای متغیر تدریجی، محاسبات جریانهای متغیر تدریجی و جریانهای متغیرمکانی تشکیل شده است. بخش سوّم شامل چهار فصل سرریزها، تبدیلها، سازه‌های کنترل‌کنندهٔ جریان و پرش هیدرولیکی و کنترل آن می‌باشد. بخش چهارم، متشکل از فصول دوازدهم و سیزدهم، در مورد جریانهای غیردائمی در کانالهای باز و روندیابی سیل به بحث می‌پردازد.

در پایان لازم می‌دانیم تا مراتب تشکّر و قدردانی خود را از مسؤولین محترم دانشگاه امام رضا(ع)، که با توجّه و علاقه خاص در نشر و توزیع ویرایش اوّل کتاب تلاش کردند و ما را در انجام ویرایش دوّم تشویق نمودند، اعلام نماییم. همچنین از تمام سرورانی که ما را در تهیه این مجموعه یاری داده‌اند بخصوص سرکار خانم نوری‌فر، که زحمت تایپ و غلط گیری را بعهده داشته‌اند، و آقای پاکرو، که امور مربوط به ویرایش و صفحه‌آرائی را انجام داده‌اند، سپاسگزاری می‌نماییم.

امید است که این زحمت ناچیز ضمن قبولی در پیشگاه الٰهی بازهم مورد توجّه صاحبنظران و علاقه‌مندان این رشته قرار گیرد و اساتید محترم ضمن بررسی و مطالعه، هرگونه لغزش و اشتباه احتمالی را به مؤلفین یادآوری فرمایند.

شهریور ۱۳۷۸

مؤلفین

Prozhefa.com

بخش ۱

قوانین اساسی حاکم بر جریانهای آزاد

Prozhefa.com

Prozhefa.com

فصل ۱

کلیات و مفاهیم اولیه

سید محمود حسینی - جلیل ابریشمی

مقدمه

در این فصل ابتدا جریان در کانالهای باز در مقایسه با جریان در کانالهای تحت فشار تشریح می‌گردد. سپس معرفی مختصری از انواع کانالهای باز و مشخصات هندسی مقاطع آنها صورت خواهد گرفت. طبقه‌بندی انواع جریان در کانالهای باز همراه با مثالهایی ساده و روشن از این جریانها، بررسی وضعیت جریان در کانالهای باز تحت تأثیر نیروی لزجت و نیروی ثقل، نحوهٔ توزیع سرعت و فشار در امتداد طولی و عرضی در کانالهای باز و نهایتاً مروری ساده بر معادلات اساسی حاکم بر جریان آب در کانالهای باز در حالت یک بعدی و دائمی موضوعات بعدی این فصل خواهند بود.

۱-۱ مقایسه جریان در کانالهای باز و مجاری تحت فشار

جریان مایع در یک مجرا ممکن است به دو صورت تحت فشار و یا جریان آزاد صورت پذیرد و از این نظر می‌توان هیدرولیک مجاری را به هیدرولیک مجاری تحت فشار و هیدرولیک کانالهای باز تقسیم‌بندی نمود.

در جریان تحت فشار که می‌توان آن‌را جریان در مجرای بسته نیز نامید، تمام مایع، درون یک مرز جامد محصور شده است، مرزهای حرکت مایع در تماس با جدار جامد می‌باشد ولی در کانال باز مایع در حرکت، در تمام مرزها در تماس با جدار جامد نمی‌باشد بلکه یک مرز جریان در تمام مسیر در معرض فشار اتمسفر قرار دارد و لایهٔ جدایی محیط مایع با فضای اطراف در تعادل با این فشار ثابت عمل می‌کند.

البته این نکته نباید از نظر دور بماند که یک مجرای بسته نیز می‌تواند به‌صورت کانال باز عمل کند و این امر مستلزم این است که جریان تعریف عمومی کانال باز را ارضاء نموده و سطح آزاد آن در معرض یک فشار ثابت قرار داشته باشد.

در مهندسی عمران جریان تحت فشار عمدتاً شامل جریان آب در لوله‌های آبرسانی شهری،

Prozhefa.com

شبکه‌های توزیع آب شهری و لوله کشی ساختمانها می‌باشد ولی جریان در کانالهای باز، حرکت آب در آبراهه‌های طبیعی (نظیر رودخانه‌ها و نهرها)، آبراهه‌های مصنوعی (نظیر کانالهای آبرسانی و کانالهای آبیاری و زهکشی)، شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب، جریان در آبروهای جاده‌ها و یا حاشیهٔ خیابانها را شامل می‌گردد. چنانکه دیده می‌شود در کانالهای باز جریان در سطح بالایی خود آزاد بوده و در این مرز جریان همواره با فشار ثابت اتمسفر روبرو می‌باشد. رفتار عمومی جریان در کانالهای باز را می‌توان در مقایسه با جریان در مجاری تحت فشار در شکل ۱-۱ که این مقایسه را در قالب دو تعریف هیدرولیک تحت عنوان خط تراز انرژی و خط تراز هیدرولیکی نشان می‌دهد، دریافت. شکل ۱-۱ الف جریان آب در یک لوله را نشان می‌دهد. جریان در این لوله تحت فشار بوده و چنانچه یک پیزومتر در بدنهٔ این لوله نصب گردد، آب در درون این پیزومتر بالا خواهد رفت.

با توجه به علائم نشان داده شده انرژی مکانیکی (یا در دسترس) در هر مقطع از جریان عبارت از جمع ارتفاع معادل سرعت ($\frac{V^2}{2g}$)، ارتفاع معادل فشار ($\frac{P}{\gamma}$) و ارتفاع از مبناء (Z) خواهد بود. انرژی کل در هر مقطع از جریان که در واحد وزن بیان می‌شود ($\frac{\text{N.m}}{\text{N}}$) دارای بُعد طول می‌باشد و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + Z \qquad (۱-۱)$$

عبارات رابطهٔ ۱-۱ به ترتیب بیانگر انرژی جنبشی، کار نیروی فشاری و انرژی پتانسیل ذرات آب می‌باشند. در مسیر حرکت آب در لوله قدری از انرژی صرف گرم کردن آب می‌شود و یا به صورت گرما از محیط خارج می‌گردد که افت انرژی در مسیر حرکت نامیده می‌شود. خط پیوسته‌ای که مقدار انرژی را در مقاطع مختلف جریان نشان می‌دهد خط تراز انرژی (Energy Grade Line) نامیده می‌شود و قاعدتاً به دلیل کاهش انرژی در دسترس، در مسیر حرکت دارای شیب منفی (کاهش یابنده) می‌باشد. خط تراز هیدرولیکی (Hydraulic Grade Line) یا خط پیزومتری به مقدار ارتفاع معادل سرعت ($\frac{V^2}{2g}$) از خط انرژی فاصله دارد و فقط جمع دو عبارت $\frac{P}{\gamma}$ و Z را شامل می‌شود.

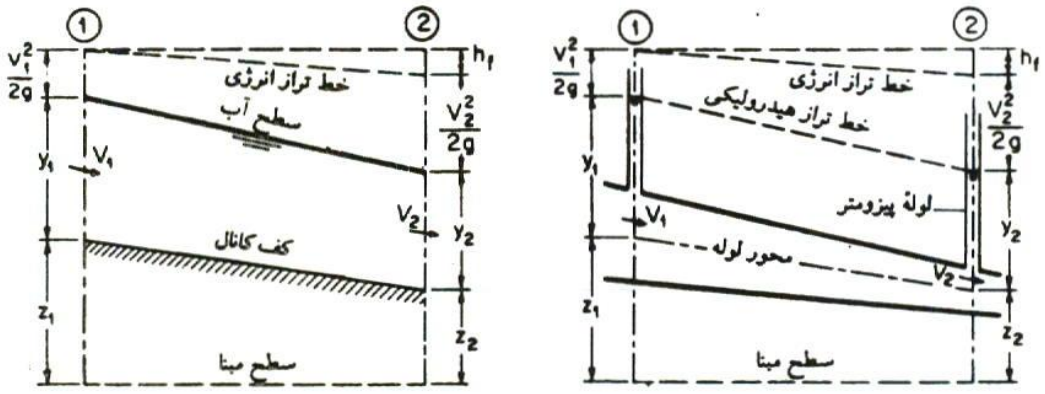
در شکل ۱-۱ الف، خطوط تراز انرژی و هیدرولیکی در مورد جریان در لوله ترسیم گردیده‌اند و مقدار افت انرژی (h_f) نیز نمایش داده شده است.

شکل ۱-۱ ب، خط تراز انرژی و خط تراز هیدرولیکی مربوط به جریان آب در یک کانال باز را نشان می‌دهد. در این حالت سطح پیزومتری در کانال منطبق بر سطح آزاد آب بوده و اگر مقدار ارتفاع معادل سرعت به فاصلهٔ سطح آزاد آب تا سطح مبناء دلخواه افزوده شود خط تراز انرژی به‌دست خواهد آمد.

در ترسیم این خطوط انحناء جریان و شیب کانال ناچیز فرض شده‌اند و ارتفاع معادل سرعت بر مبنای سرعت متوسط تعریف شده است که این فرضیات بعداً مورد بررسی بیشتری قرار خواهند گرفت.

علیرغم این‌که جریان در مجاری تحت فشار و جریان در کانالهای باز از اصول اساسی حاکم برحرکت سیالات تبعیت می‌کنند ولی نکاتی چند سبب می‌شود تا جریان در کانالهای باز از پیچیدگیهای بیشتری

Prozhefa.com



ب - جریان در کانال　　الف - جریان تحت فشار

شکل ۱-۱ مقایسه جریان در لوله‌های تحت فشار و کانالهای باز

برخوردار باشد و مطالعهٔ این‌گونه جریانها تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی بیشتری را طلب کند. در زیر به پاره‌ای از این نکات اشاره می‌گردد:

- کانالهای باز محدوده وسیعتری از جریان آب را شامل می‌شوند زیرا جریان در رودی به بزرگی رود نیل تا جریان در یک نهرکوچک و حتی جریان ورقه‌ای ناشی از رواناب بارندگی از قوانین عمومی کانالهای باز پیروی می‌کنند. لذا در کانالهای باز دامنهٔ تغییرات مشخصات هندسی (نظیر سطح مقطع) و مشخصات دیگر (نظیر زبری) بیشتر می‌باشد.
- جریان در کانالهای باز درجهٔ آزاد بیشتری نسبت به جریان در مجاری تحت فشار دارد و این درجهٔ آزادی قابلیت تغییر عمق می‌باشد، لذا با تغییر در شیب کانالها و یا ایجاد موانع و تغییرات در مسیر جریان نیروی ثقل تغییر نموده و در نتیجه موقعیت سطح آزاد آب و به‌دنبال آن سایر مشخصات جریان تغییر خواهد نمود.
- در کانالهای باز وابستگی بیشتری بین پارامترهای هیدرولیکی مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال در یک جریان تحت فشار، سرعت هنگامی تغییر می‌کند که مقطع جریان تغییر کند ولی سرعت در کانال باز، بستگی به شیب طولی کانال، زبری جدار مقطع، مساحت مقطع، شکل مقطع و سایر پارامترهای هیدرولیکی جریان دارد.
- اطلاعات تجربی و آزمایشگاهی در دسترس محققین از جریان در مجاری تحت فشار بیش از جریان در کانالهای باز می‌باشد.

Prozhefa.com

۱-۲ کانالهای باز و مشخصات هندسی مقاطع آنها

۱-۲-۱ تقسیم‌بندی کانالها

کانالها را می‌توان از دیدگاههای گوناگون تقسیم‌بندی نمود و در این طبقه‌بندی معیارهای متفاوتی را مبنا قرار داد.

- ساده‌ترین تقسیم‌بندی بر مبنای مصنوعی یا طبیعی بودن کانال می‌باشد:

۱- کانالهای طبیعی، این کانالها به صورت طبیعی در سطح زمین ایجاد گردیده، نقش بشر در شکل‌گیری آنها ناچیز می‌باشد. رودخانه‌هایی که در خط‌القعر یک حوضه آبریز جریان داشته و وظیفهٔ هدایت و انتقال آب را به سمت نقطهٔ تمرکز دارا می‌باشند مثال مشخصی از این کانالها هستند. مشخصات این کانالها با زمان و مکان تغییر می‌کند.

۲- کانالهای مصنوعی، این کانالها توسط بشر و به منظور و مقاصد مختلف آبرسانی، آبیاری، جمع‌آوری و انتقال فاضلابها یا آبهای سطحی ساخته می‌شوند.

- تقسیم‌بندی دیگر کانالها می‌تواند بر مبنای تغییرات در سطح مقطع کانالها صورت پذیرد:

۱- کانالهای منشوری، کانالهایی هستند که در مسیرشان دارای سطح مقطع و شیب ثابت می‌باشند. کانالهای مصنوعی عمدتاً منشوری بوده که براساس طراحی، مقاطع آنها اشکال هندسی متفاوتی به‌خود می‌گیرند.

۲- کانالهای غیر منشوری، کانالهایی هستند که در مسیر آنها سطح مقطع و یا شیب کانال تغییر می‌کند. کانالهای طبیعی حالت غیرمنشوری داشته و در مسیر جریان سطح مقطع و شیب کانال دستخوش تغییرات می‌شوند.

- همچنین می‌توان کانالها را براساس پایداری مصالح جدارهٔ آنها در مقابل فرسایش نیز طبقه‌بندی نمود:

۱- کانالهای با جدارهٔ ثابت، کانالهایی هستند که مصالح جدارهٔ آنها ثابت و غیر متحرک می‌باشد. این کانالها از مصالح سخت نظیر بتن، چوب، فلز و یا مصالح بنائی ساخته می‌شوند. در این کانالها پلان عمومی مسیر و نیز زبری جدار مقطع تابعی از مشخصات جریان نبوده و نسبتاً ثابت می‌باشند. این کانالها فقط دارای یک درجهٔ آزادی می‌باشند چراکه برای یک مسیر جریان ثابت، فقط عمق است که می‌تواند بر حسب نوع جریان با زمان و مکان تغییر کند.

۲- کانالهای با جدارهٔ متحرک، در مقایسه با کانالهای با جداره ثابت می‌توان کانالهای مصنوعی و یا طبیعی را در نظر گرفت که در تشکیلات آبرفتی جریان دارند و در نتیجه جدارهٔ این کانالها از ذرات رسوبی تشکیل یافته است و ذرات این قابلیت را دارند تا تحت تأثیر جریان آب به حرکت در آیند. باتوجه به این‌که جدارهٔ این کانالها در معرض فرسایش و رسوبگذاری مستمر جریان آب قرار دارد،

Prozhefa.com

لذا چنین کانالهائی می‌توانند علاوه بر آب، رسوباتی نیز به صورت معلق و یا در کف منتقل نمایند.

در یک نگاه کلی می‌توان گفت که این کانالها دارای چهار درجهٔ آزادی هستند، زیرا نه تنها عمق جریان بلکه عرض مقطع جریان، شیب طولی و پلان عمومی مسیر جریان نیز با زمان و مکان تغییر می‌کنند.

بررسی آستانهٔ حرکت ذرات رسوبی به صورت چسبنده و یا دانه‌ای و تعیین بار رسوب به‌صورت معلق و در کف از مسایل مورد بررسی در حرکت آب در این مجاری می‌باشد. لذا مطالعهٔ جریان در این کانالها دارای پیچیدگی بیشتری بوده و در مباحث هیدرولیک رسوبات و مهندسی رودخانه به صورت کامل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۲-۲ انواع مقاطع کانالهای باز

در طراحی کانالهای باز مصنوعی برای مقاصد مختلف سعی می‌شود تا این کانالها دارای اشکال هندسی منظمی بوده و نکات مورد لزوم طرح را ارضاء نمایند. جدول ۱-۱ انواع مقاطع معمول در طراحی کانالهای باز را نشان می‌دهد. در انتخاب این مقاطع علاوه بر نکات هیدرولیکی، عواملی دیگر چون مصالح در دسترس، امکانات اجرائی، شرایط محلی و نکات سازه‌ای (از نقطه‌نظر باربری عناصر سازه‌ای کانال) دخالت دارند. در این جدول مشخصات هندسی مقطع در صفحه‌ای عمود بر جهت عمومی جریان نیز آمده است. در زیر اشاره‌ای مختصر به خصوصیات انواع مقاطع کانالها صورت می‌گیرد:

۱- مقطع ذوزنقه‌ای: این مقطع معمولترین شکل برای کانالهای آبیاری بوده و در کانالهائی که در مصالح خاکی حفر گردیده و دارای پوششی از جنس مصالح سخت نمی‌باشند کاربرد دارند. شیب کناره‌ها پایداری عمومی آنها را در مقابل لغزش تأمین می‌کند.

مقاطع مستطیلی و مثلثی حالت خاصی از مقطع ذوزنقه‌ای می‌باشند. مقطع مستطیلی می‌تواند در مصالح سنگی حفر گردد و یا دارای پوششی از جنس مصالح سخت باشد در حالی که کانالهای مثلثی در دبی‌های کم، در آبروی حاشیه خیابانها و جاده‌ها و یا در کارهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲- مقطع دایره‌ای: این مقطع از مقاطع معمول در سیستمهای جمع‌آوری و انتقال فاضلاب می‌باشد. کانالهای دایروی می‌توانند به شکل پیش ساخته (لوله) تولید شده و به‌صورت مدفون در خاک قرار گیرند. در آبروهای زیر جاده با دبی کم نیز از این مقطع استفاده می‌شود.

۳- مقطع سهمی شکل: مقاطع سهمی شکل می‌توانند به عنوان یک تقریب برای کانالهای طبیعی با اندازهٔ کوچک و متوسط به کار روند.

مقاطع دیگری که می‌توان از آنها نام‌برد مقاطع نعل اسبی و تخم‌مرغی هستند که معمولاً در تأسیسات جمع‌آوری و انتقال فاضلاب کاربرد دارند. این مقاطع علاوه بر خواص سازه‌ای (باربری مقطع در حالت مدفون با استفاده از رفتار قوسی) نکات هیدرولیکی طرح را نیز ارضاء می‌نمایند. جهت آشنائی بیشتر با خواص این مقاطع می‌توان به کتب معتبر آب و فاضلاب مراجعه نمود.

Prozhefa.com

جدول ۱-۱ مشخصات هندسی مقاطع کانالها

$R = \frac{A}{P}$ $D = \frac{A}{T}$ $Z = A\sqrt{D}$

مقطع	مساحت A	پرامون مرطوب P	شعاع هیدرولیکی R	عرض سطح T	عمق هیدرولیکی D	فاکتور مقطع Z
مستطیل	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y	$by^{0.5}$
ذوزنقه	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$	$\frac{[(b + zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$
مثلث	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^{2.5}$
دایره	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)d_0^2$	$\frac{1}{2}\theta d_0$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)d_0$	$\frac{(\sin\frac{1}{2}\theta)d_0}{\text{or}}$ $2\sqrt{y(d_0 - y)}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \sin\theta}{\sin\frac{1}{2}\theta}\right)d_0$	$\frac{\sqrt{2}}{32}\frac{(\theta - \sin\theta)^{1.5}}{(\sin\frac{1}{2}\theta)^{0.5}}d_0^{2.5}$
سهمی	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8}{3}\frac{y^2}{T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3}{2}\frac{A}{y}$	$\frac{2}{3}y$	$\frac{2}{3}\sqrt{6}\,Ty^{2.5}$
مستطیل گرد گوشه ($y > r$)	$\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y$	$(\pi - 2)r + b + 2y$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$	$b + 2r$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2}{b + 2r} + y$	$\frac{[(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2r}}$
مثلث با کف گرد گوشه	$\frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1 - z\cot^{-1}z)$	$\frac{T}{z}\sqrt{1 + z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z\cot^{-1}z)$	$\frac{A}{P}$	$2z(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{\frac{A}{T}}$

* این مقدار برای $1 \leq z > 0$ تقریب رضایت بخشی است ($z = 4y/T$). و نیز اگر z باشد از فرمول دقیق $P = (T/2)[\sqrt{1 + z^2} + 1/z \ln(z + \sqrt{1 + z^2})]$ استفاده شود.

Prozhefa.com

لازم به توضیح است که کانالهای طبیعی خصوصاً در ابعاد کوچک را می توان با یکی از مقاطع ذکر شده تقریب زد و در این حالت مقطع را مقطع مجرد (واحد) نامگذاری نمود، ولی در حالت سیلابی که آب از کانال اصلی لبریز شده و در بسترهای سیلابی اطراف جاری می‌گردد شکل مقطع کانال با مقاطع استاندارد معرفی شده قابل تطبیق نبوده این‌گونه مقاطع، مقاطع مرکب نامیده می‌شوند. توضیح رفتار هیدرولیکی مقاطع مرکب در مبحث جریان یکنواخت ارائه خواهد شد.

۱-۲-۳ مشخصات هندسی مقاطع کانالهای باز

با توجه به محاسبات هیدرولیکی در طراحی کانالهای باز، برخی از مشخصات مقاطع که بیشتر مورد لزوم بوده و در جدول ۱-۱ ارائه گردیده است، عبارتند از:

- عمق جریان (y): در یک محل، فاصلهٔ قائم پایین‌ترین نقطهٔ کف کانال تا سطح آزاد آب عمق جریان گفته می‌شود (شکل ۱-۲ الف). این فاصله در جهت عمود بر کف و یا در صفحه‌ای عمود بر جهت عمومی جریان با d نمایش داده می‌شود که در مورد کانالهای با شیب کم ($\theta < 6°$) این دو مشخّصه یکسان در نظر گرفته می‌شوند ولی در کانالهای با شیب تندتر باید بین y و d تفاوت قائل شد. ارتباط ریاضی سادهٔ $d = y \cos\theta$ بین d و y وجود دارد.
- تراز: در یک مقطع از کانال فاصلهٔ قائم سطح آزاد آب نسبت به یک سطح مبنای دلخواه تراز گفته می‌شود. این واژه در محاسبات دبی رودخانه‌ها کاربرد دارد (شکل ۱-۲ ب).
- سطح مقطع جریان (A): در یک محل، مساحت مقطع جریان در صفحه عمود بر جهت عمومی جریان سطح مقطع جریان گفته می‌شود. در ستون اول جدول ۱-۱، این مشخصه برحسب سایر مشخصات هندسی مقطع داده شده است.

در هنگام به کار بردن معادلهٔ پیوستگی، سطح مقطع در صفحه‌ای عمود بر جهت عمومی جریان به کار برده می‌شود زیراکه بردارهای سرعت عمود بر سطح مقطع هستند. در کانالهای با شیب کم تفاوتی بین سطح مقطع جریان (A) با سطح مقطع جریان در صفحهٔ قائم وجود ندارد.

- عرض سطح آزاد (T): به طولی از مقطع جریان گفته می‌شود که با هوای آزاد در تماس باشد. (ستون چهارم جدول ۱-۱).
- پیرامون مرطوب (P): در صورتی که از محیط کلی مقطع جریان عرض سطح آزاد آب را کم نماییم پیرامون مرطوب به‌دست می‌آید که محدودهٔ تماس جریان با بستر کانال را نشان می‌دهد. این مشخّصهٔ هندسی برای مقاطع استاندارد در ستون دوم جدول ۱-۱ آمده است.
- شعاع هیدرولیکی (R): بنابر تعریف نسبت سطح مقطع جریان به پیرامون مرطوب شعاع هیدرولیکی نامیده می‌شود، یعنی:

$$R = \frac{A}{P}$$

Prozhefa.com

این تعریف در مجاری تحت فشار نیز به کار برده می‌شود. به‌عنوان مثال در یک لوله مدور به قطر D' شعاع هیدرولیکی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$R = \frac{\pi(D'^{۲}/۴)}{\pi D'} = \frac{D'}{۴} \rightarrow D' = ۴R$$

شعاع هیدرولیکی مقاطع در ستون سوم جدول ۱-۱ دیده می‌شود.

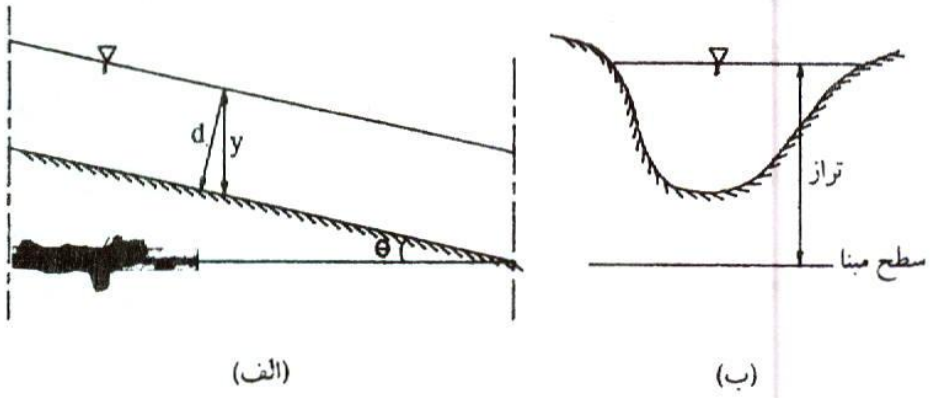
- عمق هیدرولیکی (D): بنابر تعریف نسبت سطح مقطع جریان به عرض سطح آزاد آب (T) عمق هیدرولیکی نامیده می‌شود.

$$D = \frac{A}{T}$$

- فاکتور سطح در محاسبه عمق بحرانی (Z): این فاکتور به صورت زیر تعریف شده و در محاسبات عمق بحرانی در فصل دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}} = \frac{A^{۳/۲}}{\sqrt{T}}$$

پارامتر هندسی Z نیز در ستون آخر جدول (۱-۱) برای انواع مقاطع معمول ذکر شده است.



شکل ۱-۲ مشخصات هندسی مقاطع در کانالهای باز

۱-۲-۴ نامگذاری‌های مختلف کانالهای مصنوعی

از کانالهای مصنوعی براساس کاربردی که از آنها انتظار می‌رود نامگذاریهای مختلفی صورت گرفته است که به پاره‌ای از آنها در زیر اشاره می‌شود:

- کانال: به آبراههٔ طولانی با شیب ملایم و کم که در زمین حفر می‌شود کانال گفته می‌شود. کانال ممکن است بدون پوشش و یا دارای پوششی از جنس بتن، سنگ چین، سیمان و یا آسفالت باشد.

- کانال پایه‌دار (فلوم): از چوب، فلز، بتن و ... ساخته می‌شود و آب را از یک طرف دره به‌طرف دیگر منتقل می‌کند. واژهٔ فلوم به کانالهای کوچک آزمایشگاهی نیز اطلاق می‌شود.

Prozhefa.com

- تندآبراه (شوت) : به کانالی اطلاق می‌شود که دارای شیب کف تند بوده و آب را از ارتفاع نسبتاً زیادی به ارتفاع پایین‌تر برساند (اختلاف ارتفاع معمولاً بیش از ۴٫۵ متر می‌باشد).
- شیب‌شکن : شبیه تند آبراه بوده ولی برای اختلاف ارتفاع کم به کار می‌رود (اختلاف ارتفاع ۰٫۹ الی ۴٫۵ متر)، حتی می‌تواند یک شیب‌شکن قائم نیز در مسیر جریان وجود داشته باشد.
- آبرو (کالورت) : جهت عبور دادن آب از زیر جاده و یا راه آهن به کار می‌رود.
- تونل با جریان آزاد : یک کانال طولانی است که به منظور عبور دادن آب از داخل کوهها به کار می‌رود.
- تبدیل : به هرگونه تغییر در جهت و یا سطح مقطع جریان که در فاصلهٔ کوتاهی از مسیر کانال صورت گیرد تبدیل گفته می‌شود.

شکل ۱-۳ اشکالی ساده از کانالهای مصنوعی مختلف را نشان می‌دهد.

۱-۳ طبقه‌بندی و تشخیص انواع جریان در کانالهای باز

ساده‌ترین طبقه‌بندی از جریان آب در کانالهای باز به صورتهای زیر انجام می‌شود :

۱- جریان دائمی - غیر دائمی : در این طبقه‌بندی تغییر در مشخصات جریان برحسب زمان معیار طبقه‌بندی قرار می‌گیرد. هرگاه در یک مقطع ثابت از جریان آب، عمق جریان با زمان تغییر نکند جریان دائمی گفته می‌شود و در صورتی که عمق جریان با زمان تغییرات داشته باشد، جریان غیردائمی می‌باشد یعنی :

جریان دائمی $\rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = 0$ در هر مقطع از جریان (ثابت $x =$)

جریان غیردائمی $\rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} \neq 0$ در هر مقطع مشخص از جریان (ثابت $x =$)

می‌توان این نکته را نیز اضافه نمود که در یک جریان دائمی، دبی و در نتیجه سرعت متوسط (V) نیز در یک موقعیت خاص با زمان ثابت می‌باشند پس :

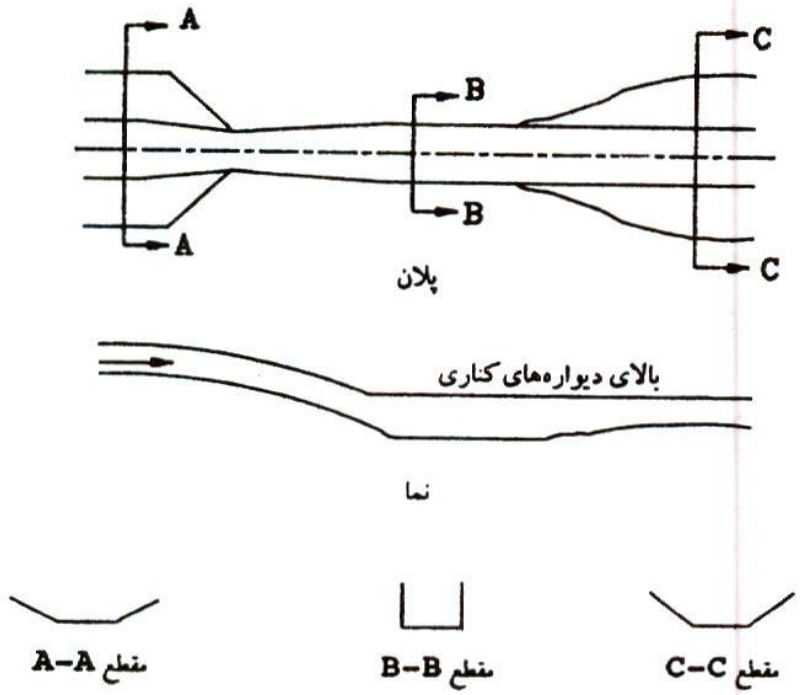
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad , \quad \frac{\partial V}{\partial t} = 0$$

۲- جریان یکنواخت - غیریکنواخت (متغیر) : در این طبقه‌بندی تغییر در مشخصات جریان برحسب مکان معیار طبقه‌بندی قرار می‌گیرد. در جریان یکنواخت در هر لحظهٔ زمانی ثابت، عمق جریان در مقاطع مختلف (در راستای طولی جریان) تغییر نمی‌کند، اما چنانچه عمق جریان در مقاطع مختلف تغییر نماید و یا به عبارت دیگر سطح آب دارای انحناء باشد جریان غیریکنواخت گفته می‌شود:

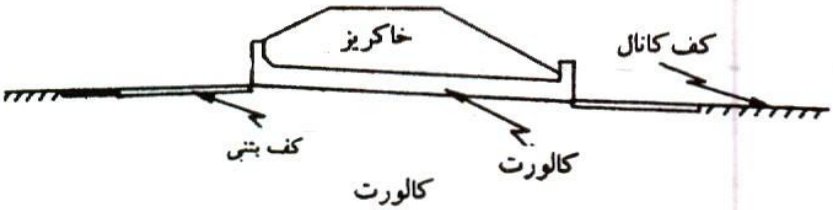
جریان یکنواخت $\rightarrow \frac{\partial y}{\partial x} = 0$ در هر لحظه زمانی ثابت (ثابت $t =$)

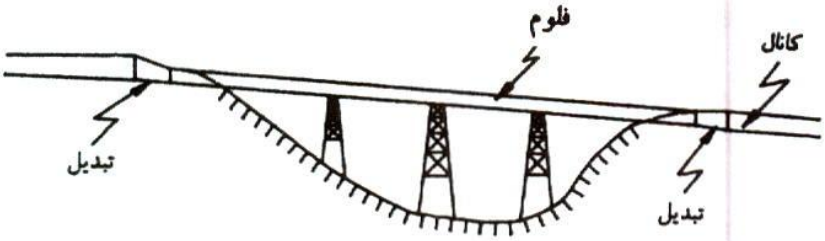
جریان غیریکنواخت $\rightarrow \frac{\partial y}{\partial x} \neq 0$ در هر لحظه زمانی ثابت (ثابت $t =$)

Prozhefa.com



تندآبراه (شوت)







شکل ۱–۳ اشکالی ساده از کانالهای مصنوعی

Prozhefa.com

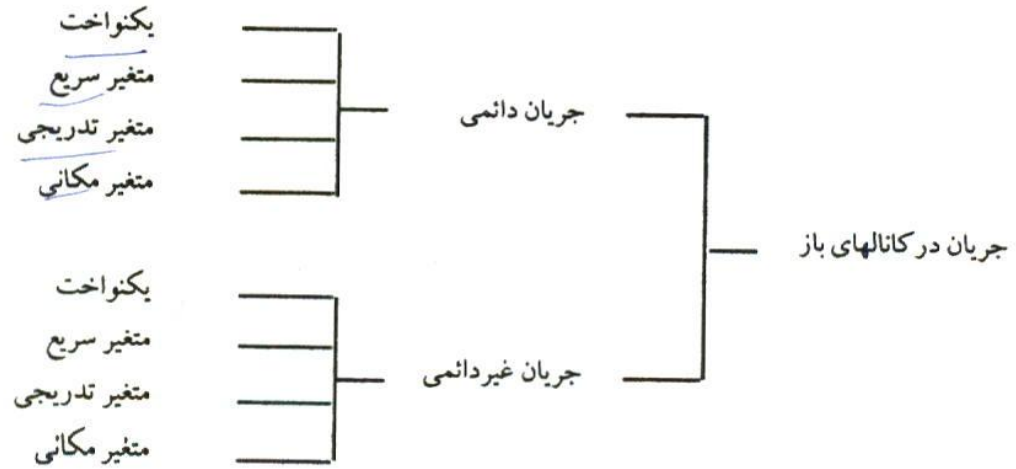
گفته‌های فوق این نتیجه گیری را نیز به‌دنبال دارد که در جریان یکنواخت دبی و سرعت نیز در طول مسیر ثابت می‌باشند ولی در جریان غیریکنواخت سرعت در مقاطع مختلف تغییر کرده، دبی جریان می‌تواند ثابت باقی ماند. جریان غیریکنواخت در هیدرولیک، جریان متغیر نیز نامیده شده است و براساس مشاهدات عملی از پدیده‌های جریان در کانالهای باز جریان متغیر به‌صورتهای زیر طبقه‌بندی شده است:

الف: جریان متغیر تدریجی (Gradually Varied Flow): هرگاه تغییرات عمق جریان در فاصلهٔ طولانی از مسیر صورت گیرد جریان متغیر تدریجی گفته می‌شود. به عبارت دیگر در این‌گونه جریانها انحناء سطح آب قابل ملاحظه نبوده و از نظر فیزیکی مؤلفه شتاب عمود بر خط جریان ($\frac{V^2}{r}$) ناچیز می‌باشد.

ب: جریان متغیر سریع (Rapidly Varied Flow): در این جریان، تغییرات شدید عمق جریان در فاصلهٔ کوتاهی از مسیر صورت گرفته، سطح آب انحناء قابل توجهی دارد. معمولاً جریان در رسیدن به یک مانع (نظیر تغییر در شیب، برخورد به یک دریچه و یا سرریز) به‌طور دفعی چنین تغییرات سریعی از خود نشان می‌دهد. اصولاً به‌این گونه پدیده‌ها به عنوان یک پدیده موضعی نگریسته می‌شود و مؤلفه شتاب در جهت عمود بر خطوط جریان ($\frac{V^2}{r}$) قابل صرفنظر کردن نمی‌باشد. پدیدهٔ پرش هیدرولیکی نیز تحت عنوان جریان متغیر سریع طبقه‌بندی می‌گردد. در این پدیده آب ضمن حرکت در کانال در مواجهه با یک مانع و جهت رسیدن به تعادل دینامیکی جدید به صورت دفعی خود را از یک حالت جریان موسوم به حالت فوق بحرانی به حالت متفاوت‌تری تحت عنوان زیر بحرانی می‌رساند. گذار از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی که توأم با یک آشفتگی شدید در جریان و افت انرژی موضعی زیاد می‌باشد پرش هیدرولیکی نامیده می‌شود. در مورد این پدیده در فصل سوم توضیحات لازم ارائه خواهد شد.

ج: جریان متغیر مکانی (Spatially Varied Flow): در طبقه‌بندی جریان به‌صورت G.V.F و R.V.F فرض می‌گردد که هیچ‌گونه دبی جریان در امتداد طولی کانال به کانال افزوده و یا از آن خارج نمی‌شود. حال اگر مقداری جریان از کانال اصلی گرفته شود و یا به آن اضافه گردد، جریان متغیر حاصل، جریان متغیر مکانی نامگذاری می‌شود.

نتایج و جمع‌بندی مباحث مطرح شده در این بخش را می‌توان به صورت دیاگرام زیرارائه داد:



Prozhefa.com

شکل ۱-۴ یک جریان دائمی در کانالهای باز راکه از حرکت دائمی آب از یک دریاچه با تراز ثابت به داخل یک کانال ایجاد شده است نشان می‌دهد. حالتهای مختلفی که می‌تواند در چنین جریانی مشاهده شود به صورت زیر بیان می‌گردد:

ناحیه ۱: جریان در بدو ورود به کانال مجبور به پذیرش یک انحنای شدید از نوع جریان متغیر سریع (R.V.F) می‌باشد. این انحناء در یک طول کوتاه از مسیر جریان صورت می‌گیرد.

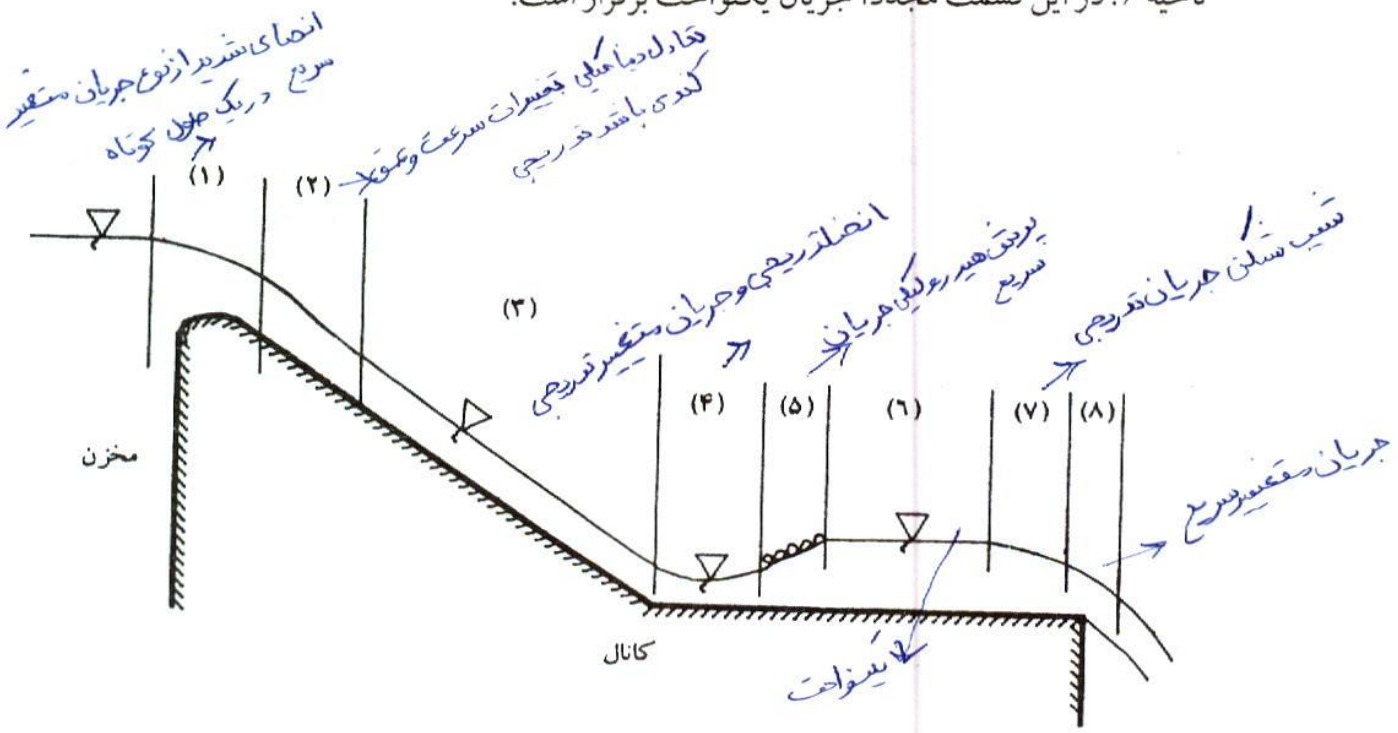
ناحیه ۲: در این ناحیه جریان در جهت رسیدن به تعادل دینامیکی (سرعت حد) حرکت کرده و ذرات سیال شتاب جابجائی (ناشی از تغییر سرعت روی مکان) را تجربه می‌کنند و چون تغییرات سرعت و عمق کند می‌باشد جریان متغیر تدریجی (G.V.F) می‌باشد.

ناحیه ۳: در این ناحیه جریان یکنواخت برقرار است و سطح آزاد آب و کف کانال موازی می‌باشند. از نظر فیزیکی هر جریان غیریکنواخت به سمت تعادل دینامیکی یعنی جریان یکنواخت میل می‌کند. در این حالت نیروی رانش (مؤلفه وزن در جهت شیب) و نیروی مقاوم (اصطکاک کف کانال) با یکدیگر متعادل شده و جریان به سرعت حد خود می‌رسد.

ناحیه ۴: سپس جریان در جهت رسیدن به تعادل دینامیکی جدید (ناحیهٔ ۶) مجبور به پذیرش انحناء تدریجی (متناسب با شیب کانال دوم) می‌گردد و جریان متغیر تدریجی به‌وجود می‌آورد.

ناحیه ۵: در این ناحیه پدیدهٔ پرش هیدرولیکی صورت گرفته است و جریان از نوع متغیر سریع می‌باشد

ناحیه ۶: در این قسمت مجدداً جریان یکنواخت برقرار است.



شکل ۱-۴ جریان دائمی در کانالهای باز

Prozhefa.com

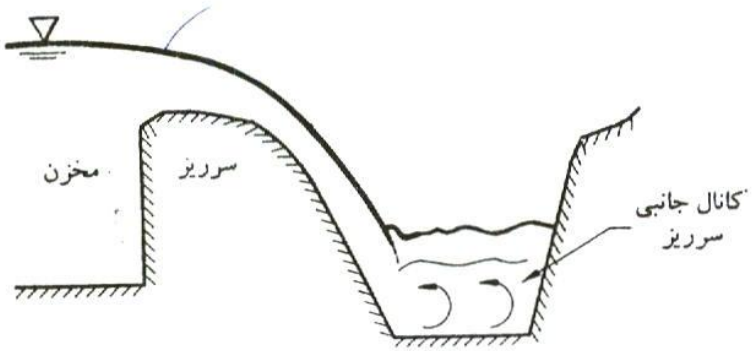
ناحیه ۷: در این ناحیه جریان وجود شیب‌شکن را احساس نموده و خود را از دور، با ایجاد جریان متغیر تدریجی (G.V.F.) با آن هماهنگ می‌کند.

ناحیه ۸: جریان موضعی در محل شیب‌شکن را نیز می‌توان جریان متغیر سریع نامگذاری نمود.

اگر با دقت بیشتری به جریان نگریسته شود می‌توان یک جریان متغیر سریع نیز در فاصله‌ای کوتاه در محل اتصال دو کانال مشخص نمود.

لازم به توضیح است که جریان رسم شده در شکل ۱-۴ یک حالت خاص از جریان اتصالی بین دریاچه و دو کانال می‌باشد و اصولاً جریان در این حالت به مشخصات هندسی و زبری کانال، شیب دو کانال، دبی جریان یافته و طول کانالها بستگی دارد که موضوع مورد بحث این فصل نمی‌باشد.

جریان متغیر مکانی را نیز می‌توان در حالتی داشت که در امتداد طولی جریان دبی به کانال افزوده و یا از دبی جریان در امتداد طولی کانال کاسته گردد. در صورتی که این افزایش یا کاهش دبی به‌میزان ثابتی نسبت به زمان صورت گیرد، جریان از نوع متغیر مکانی دائمی خواهد بود. به عنوان مثال در سرریزهای با کانال جانبی در سدها، آب به صورت دائمی و با دبی ثابتی از لبه سرریز به کانال جانبی اصلی اضافه می‌گردد و جریان متغیر مکانی دائمی (S.V.F) مشابه شکل ۱-۵ به‌وجود می‌آورد.



شکل ۱-۵ سرریز جانبی و جریان متغیر مکانی

شکل ۱-۶، مثالهایی ساده از جریانهای غیر دائمی را نشان می‌دهد. شکل ۱-۶ الف نشان‌دهندهٔ جریان غیر دائمی-یکنواخت می‌باشد. چنانکه دیده می‌شود در لحظه t جریان یکنواخت با عمق y_1 در کانال برقرار است و مجدداً در لحظهٔ $t + \Delta t$ (که Δt یک تغییر لحظه‌ای کوچک است) نیز جریان یکنواخت با عمق y_2 برقرار می‌گردد. جریان غیر دائمی-یکنواخت در عمل مشاهده نشده و اصولاً هرگاه از جریان یکنواخت صحبت به‌عمل می‌آید منظور جریان یکنواخت-دائمی است.

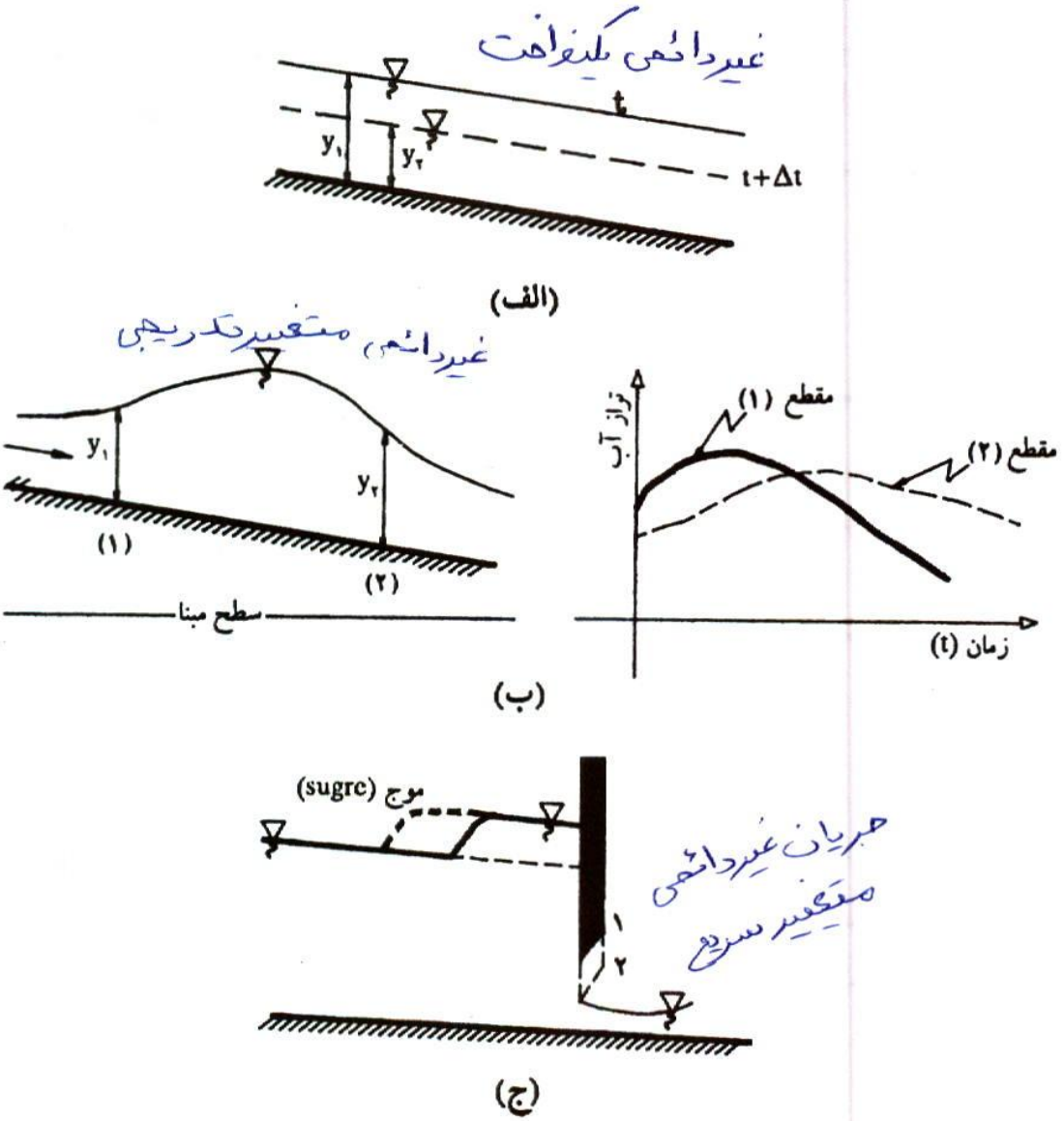
شکل ۱-۶ ب جریان غیر دائمی متغیر تدریجی را نشان می‌دهد. حرکت موج سیلاب در یک کانال

Prozhefa.com

چنین جریانی را ایجاد می‌کند. در این حالت ضمن این که در یک مقطع از جریان، عمق با زمان تغییر می‌کند، تغییرات عمق در طول مسیر نیز وجود دارد.

شکل ۱-۶ ج جریان غیر دائمی متغیر سریع را نشان می‌دهد. بستن سریع یک دریچه در مسیر جریان باعث ایجاد یک ناپیوستگی در عمق جریان می‌شود که این ناپیوستگی در عمق در جهت بالادست پیش‌روی می‌کند چنین جریانی، جریان غیردائمی- متغیر سریع نامیده می‌شود.

در صورتی که موج سیلاب در هنگام عبور از رودخانه از کناره‌های آن لبریز شود، جریان در مسیر کانال اصلی به صورت غیر دائمی-متغیر مکانی خواهد بود.



شکل ۱-۶ انواع جریان غیر دائمی

Prozhefa.com

۱-۴ وضعیت جریان در کانالهای باز

در جریان آب در کانالهای باز، نیروهای مختلفی نظیر نیروهای ثقل، لزجت، شتاب‌دهنده و کشش سطحی بر روی عناصر سیال اثر می‌کنند که در این میان از تأثیر نیروی کشش سطحی در مسایل عملی مهندسی به علت ناچیز بودن آن صرفنظر می‌گردد.

با توجه به اثرات نسبی نیروهای لزجت و نیروی ثقل نسبت به نیروهای اینرسی وضعیتهای متفاوتی از جریان در کانالهای باز مشاهده می‌شوند.

۱-۴-۱ تأثیر نیروی لزجت

تحت تأثیر نیروی لزجت نسبت به نیروی شتاب‌دهنده سه حالت متفاوت جریان در کانالهای باز مشاهده می‌شوند.

الف - جریان آرام (لایه‌ای) : در این حالت نیروی لزجت قوت بیشتری نسبت به نیروی شتاب‌دهنده داشته و ذرات آب در راستای اصلی حرکت به آرامی بر روی یکدیگر می‌لغزند. در جریان آرام، حرکات پراکنده ملکولها و نیز نیروهای بین ملکولی سبب بروز خاصیت لزجت در آب و مقاومت آن در مقابل تغییر شکل برشی می‌شود. در این جریان گرادیان سرعت و تنش برشی توسط قانون لزجت نیوتن به یکدیگر مرتبط می‌گردند.

ب - جریان آشفته (متلاطم) : در این حالت نیروی شتاب‌دهنده قوت بیشتری نسبت به نیروی لزجت دارد. ذرات آب از مسیر اصلی خود خارج شده و دارای حرکات پراکنده، غیر مشخص و نامنظم در عرض نیز می‌باشند. در جریان آشفته علاوه بر خاصیت لزجت مطلق باید انتظار داشت که حرکات پراکنده ذرات نیز (نظیر حرکات پراکنده ملکولها) در مقاومت جریان در مقابل تغییر شکل برشی تأثیر داشته باشند که در این رابطه از خاصیتی از جریان تحت عنوان لزجت گردابه‌ای نام‌برده می‌شود.

قابل ذکر است که از آن جاکه در جریان آشفته در یک نقطه از حوزهٔ جریان، نوسانات سرعت (نسبت به زمان) حول یک مقدار متوسط وجود دارد، لذا جریان از نوع غیردائمی می‌باشد ولی معمولاً از نقطه‌نظر تحلیلی به جریان آشفته از دید ماکروسکوپیک نگریسته شده، در صورتی که سرعت متوسط جریان در یک نقطه (صرفنظر از نوسانات) بر حسب زمان ثابت باشد، جریان دائمی و در غیراین صورت جریان غیردائمی در نظر گرفته می‌شود.

ج - جریان انتقالی : در جریان آب در کانالها یک حالت حد واسط نیز مشاهده می‌شود که به‌جریان نه آشفته و نه آرام طبقه‌بندی، و در آن، جریان به راحتی از آشفته به آرام و بالعکس تبدیل می‌گردد. این حالت به حالت تبدیلی یا انتقالی موسوم است.

معیار طبقه‌بندی و تشخیص این سه وضعیت، پارامتر بدون بعدی به نام عدد رینولدز می‌باشد که متناسب با نسبت نیروی شتاب‌دهنده به نیروی لزجت به شکل زیر می‌باشد:

Prozhefa.com

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \propto \frac{\text{نیروی شتاب دهنده}}{\text{نیروی لزجت}} \qquad (۱-۲)$$

در رابطهٔ ۱-۲، ρ جرم مخصوص آب، μ لزجت دینامیکی آب، V سرعت مشخصه در کانال (که معمولاً معادل سرعت متوسط در کانال گرفته می‌شود) و L طول مشخصهٔ جریان می‌باشد. در کانالها طول مشخصهٔ جریان شعاع هیدرولیکی (R) در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه عدد رینولدز برابر خواهد بود با:

$$Re = \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{VR}{\nu} \qquad (۱-۳)$$

که ν لزجت سینماتیک آب می‌باشد.

اثبات رابطهٔ ۱-۲، با استفاده از اصول مکانیک سیالات حاصل می‌گردد که به عنوان تمرین برعهده مطالعه کنندگان گذاشته شده است.

براساس مشاهدات آزمایشگاهی و برای کانالهای باز می‌توان گفت که:

جریان آرام (لایه‌ای)	$Re < ۵۰۰$
جریان انتقالی	$۵۰۰ \le Re \le ۲۰۰۰$
جریان آشفته	$۲۰۰۰ < Re$

اضافه می‌نماید که اصولاً وضعیت جریان در کانالها به صورت آشفته می‌باشد و عمدهٔ تئوریها و نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده به این وضعیت از جریان تعلق دارند.

مثال ۱-۱

چنانچه در یک کانال مستطیلی عریض آب ۲۰°C جاری باشد، امکان پیدایش جریان آرام را بررسی نمایید.

حل:

با توجه به نماد نشان داده شده در جدول ۱-۱، شعاع هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$R = \frac{by}{b + ۲y}$$

از آن‌جا که کانال مستطیلی عریض می‌باشد می‌توان فرض نمود که $b >> y$ می‌باشد که در نتیجه شعاع هیدرولیکی برابر خواهد شد با:

$$R \approx \frac{by}{b} \approx y$$

لذا در کانالهای مستطیلی عریض (عریض بودن کانال امری نسبی است و معمولاً در صورتی‌که b حدود ۵۰ برابر بیش از y باشد، کانال مستطیلی عریض در نظر گرفته می‌شود) شعاع هیدرولیکی برابر عمق جریان در نظر گرفته می‌شود.

Prozhefa.com

با توجه به این‌که در کانال آب ۲۰ درجه سانتیگراد جاری می‌باشد از جداول متداول خواص آب، ν برابر است با:

$$\nu_{۲۰^\circ C} = \frac{\mu}{\rho} = ۱ \times ۱۰^{-۶}\ m^۲/s$$

و در نتیجه عدد رینولدز برای چنین جریانی برابر است با:

$$Re = \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{VR}{\nu} \approx \frac{Vy}{۱۰^{-۶}} \approx ۱۰^{۶}\, Vy$$

برای این که وضعیت جریان در کانال آرام باشد باید شرط زیر برقرار گردد.

$$Vy \times ۱۰^{۶} < ۵۰۰ \Rightarrow Vy < ۵ \times ۱۰^{-۴}$$

در صورتی‌که عمق جریان برابر ۰٫۱m در نظر گرفته شود سرعت لازم در ایجاد وضعیت آرام سرعتی کمتر از ۰٫۰۰۵m/s می‌باشد و در صورتی که عمق فرضی جریان برابر ۱٫۰m در نظر گرفته شود این سرعت سرعتی کمتر از ۰٫۰۰۰۵m/s خواهد بود. محدوده‌های سرعت ذکر شده سرعتهای بسیار کمی می‌باشند که در عمل کمتر مشاهده می‌شوند. در هر حال ممکن است جریان آرام در جریان ناشی از رواناب بارندگی در شیبها و در ضخامت‌های کم مشاهده گردد.

۱-۴-۲ تأثیر نیروی ثقل

تأثیر نیروی ثقل در قالب پارامتر دینامیکی بدون بعدی به نام عدد فرود مورد بررسی قرار می‌گیرد. این عدد در هر مقطع از جریان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \propto \sqrt{\frac{\text{نیروی شتاب دهنده}}{\text{نیروی ثقل}}} \qquad (۴-۱)$$

در رابطهٔ ۱-۴، V سرعت متوسط، g شتاب ثقل و L طول مشخصه از جریان می‌باشد. در کانالهای باز طول مشخصه ازجریان برابر عمق هیدرولیکی (D) می‌باشدکه در نتیجه عددفرود به‌شکل زیرمحاسبه می‌گردد:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

و در کانالهای با مقطع مستطیلی با توجه به این‌که $D = y$ می‌باشد عدد فرود برابر خواهد شد با:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

در مثال ۱-۹ خواهیم دید که مخرج کسر در عدد فرود برابر سرعت انتقال یک موج سطحی می‌باشد. لذا با توجه به این مطلب و براساس تأثیر نیروی ثقل نسبت به نیروی شتاب‌دهنده سه وضعیت رفتاری

Prozhefa.com

متفاوت از جریان در کانالهای باز مشاهده می‌گردد:

الف: اگر $Fr > ۱$ باشد جریان فوق بحرانی نامیده می‌شود. در این‌جا به ازاء یک دبی ثابت عمق جریان کم وسرعت زیاد وجود خواهد داشت. با توجه به این‌که سرعت در این‌گونه جریانها بیش از سرعت موج سطحی می‌باشد لذا در این وضعیت بین پایین‌دست و بالادست جریان ارتباط هیدرولیکی مشاهده نمی‌شود و موج حاصله از اغتشاش موضعی در جریان، قابلیت انتقال به‌بالادست جریان را ندارد.

ب: اگر $Fr < ۱$ باشد جریان زیر بحرانی است که در آن به ازاء یک دبی ثابت عمق جریان زیاد و سرعت کم می‌باشد. در این حالت موج حاصله در پایین‌دست به بالادست منتقل می‌شود، و رفتار بالادست از پایین دست جریان تأثیر می‌پذیرد.

ج: در صورتی که $Fr = ۱$ باشد جریان بحرانی در کانال وجود خواهد داشت.

چنانچه در بخش ۱-۴-۱ ذکر گردید اصولاً جریان آب در کانالها در محدودهٔ آشفته می‌باشد و تغییر ناچیز لزجت (مثلاً تحت تأثیر درجه‌حرارت آب) تأثیر چندانی در وضعیت جریان ندارد و حتی ضریب اصطکاک در رابطهٔ دارسی - وایسباخ در هیدرولیک لوله‌ها که در حالت کلی تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی مجرا می‌باشد، در جریان آب در کانالها مستقل از عدد رینولدز و تابعی از زبری نسبی به‌دست می‌آید. از طرفی به‌دلیل آن‌که جریان آب در کانالها دارای سطح آزاد می‌باشد به‌نیروی ثقل حساسیت زیادی داشته و با تغییر در شیب (تغییر در نیروی ثقل) وضعیت جریان سریعاً تغییر می‌کند. لذا، نیروی ثقل (عدد فرود) نقش مهمی در مطالعات و معادلات به‌دست آمده در جریان آب در کانالها دارد.

در مدل‌سازی فیزیکی از جریانهای با سطح آزاد عموماً تشابه دینامیکی بین مدل و نمونهٔ اصلی بر پایهٔ عدد فرود جریان قرار داده می‌شود و این به معنی اهمیت نیروی ثقل در رفتار جریان در کانالهاست. البته این موضوع نباید موجب نادیده فرض نمودن نیروی لزجت و اثرات اصطکاکی باشد، بلکه باید ابعاد مدل و نمونهٔ اصلی به گونه‌ای انتخاب شوند که هم مدل و هم نمونهٔ اصلی در محدودهٔ جریان آشفته عمل نموده و رفتار هیدرودینامیکی یکسانی را داشته باشند.

۱-۴-۳ رژیم جریان

تأثیر مشترک نیروی ثقل و نیروی لزجت، رژیم جریان را در کانالهای باز مشخص می‌کند، یعنی:

رژیم زیر بحرانی - آرام	$Fr < ۱$	و	$Re < ۵۰۰$
رژیم زیر بحرانی - آشفته	$Fr < ۱$	و	$Re > ۲۰۰۰$
رژیم فوق بحرانی - آرام	$Fr > ۱$	و	$Re < ۵۰۰$
رژیم فوق بحرانی - آشفته	$Fr > ۱$	و	$Re > ۲۰۰۰$

نظر به این‌که جریانهای بحرانی و انتقالی حالت پایداری ندارند، در طبقه‌بندی‌های ذکر شده گنجانده نشده‌اند.

Prozhefa.com

مثال ۱-۲

آبی به‌صورت یکنواخت و با دبی $۸٫۵ m^۳/s$ در یک کانال ذوزنقه‌ای با مشخصات $b = ۳٫۰۵ m$ و $z = ۱٫۵$ در جریان است. عمق جریان $۱٫۲۲ m$ می‌باشد. رژیم جریان را مشخص نمایید. $(\nu = ۱۰^{-۶} m^۲/s)$

حل:

با توجه به نمادهای جدول ۱-۱، برای مقطع ذوزنقه‌ای شکل با ابعاد هندسی داده شده داریم:

$$R = \frac{۳٫۰۵ \times ۱٫۲۲ + ۱٫۵(۱٫۲۲)^۲}{۳٫۰۵ + ۲ \times ۱٫۲۲\sqrt{۱ + ۱٫۵^۲}} = ۰٫۸ m$$

$$A = ۳٫۰۵ \times ۱٫۲۲ + ۱٫۵ (۱٫۲۲)^۲ = ۵٫۹۵۴ \ m^۲$$

$$D = \frac{(۳٫۰۵ + ۱٫۵ \times ۱٫۲۲) ۱٫۲۲}{۳٫۰۵ + ۲ \times ۱٫۵ \times ۱٫۲۲} = ۰٫۸۸۷ \ m$$

مشخصات هیدرولیکی مقطع جریان عبارتند از:

$$V = \frac{۸٫۵}{۵٫۹۵۴} = ۱٫۴۳ \ m/s$$

$$Re = \frac{VR}{\nu} = \frac{۱٫۴۳ \times ۰٫۸}{۱۰^{-۶}} = ۱٫۱۴۴ \times ۱۰^۶ >> ۲۰۰۰$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} = \frac{۱٫۴۳}{\sqrt{۹٫۸۱ \times ۰٫۸۸۷}} = ۰٫۴۸۵ < ۱$$

رژیم جریان زیر بحرانی - آشفته می‌باشد.

۱-۵ توزیع سرعت در کانالها

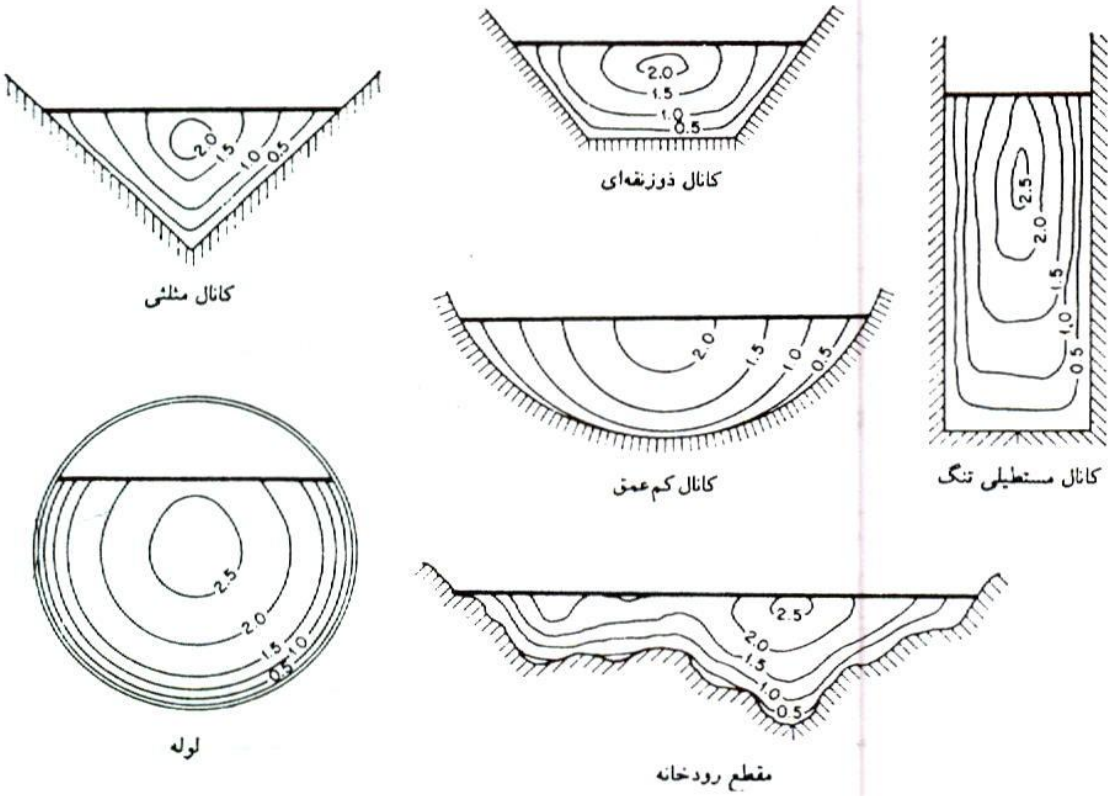
با توجه به تأثیر لزجت آب، وجود جداره‌ها و زبری آنها، وجود سطح آزاد آب و همچنین نامنظمی مقاطع، توزیع سرعت در کانالها پیچیده و سه بعدی بوده و به‌دست آوردن یک رابطهٔ کلی که بیانگر توزیع سرعت در کانالهایی با خصوصیات متفاوت باشد به سادگی میسر نمی‌باشد به عبارت دیگر، فرض ثابت بودن سرعت در مقطع جریان درست نبوده و با اندازه گیری سرعت طولی در چند نقطه از یک مقطع از جریان می‌توان منحنی‌های هم سرعت را در یک مقطع معین و رسم نمود. شکل ۱-۷ الف منحنی‌های هم سرعت در کانالهای با مقاطع مختلف را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها براساس مطالعات تجربی ترسیم شده‌اند و با توجه به آنها می‌توان قضاوتهای کلی زیر را از توزیع سرعت در کانالها به‌دست آورد.

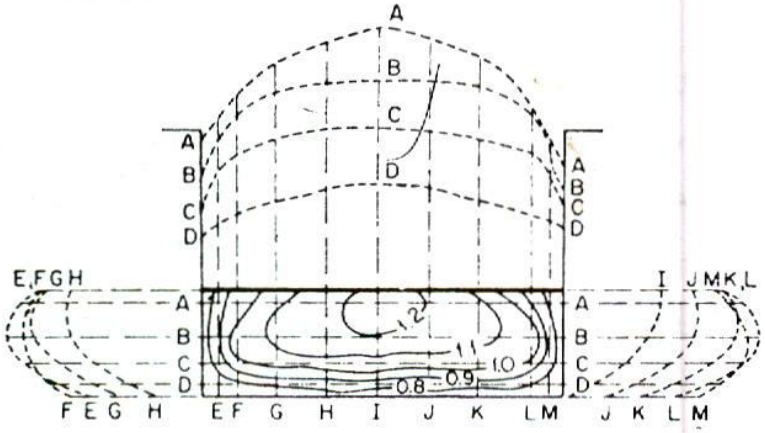
الف: مقدار سرعت در جداره‌ها صفر می‌باشد و با دور شدن از جداره‌ها افزایش می‌یابد.

Prozhefa.com

ب: گرادیان سرعت در مجاورت مرزها شدیدتر می‌باشد.

ج: سرعت ماکزیمم در هر مقطع قائم، در نزدیکی سطح آب و در فاصلهٔ ۰٫۰۵ تا ۰٫۲۵ عمق جریان از سطح آزاد اتفاق می‌افتد (شکل ۱-۷ ب). علت اصلی این‌که سرعت ماکزیمم در نزدیکی سطح آزاد پیش می‌آید بیش از آن‌که تحت تأثیر تنش برشی ناشی از مقاومت هوا باشد، تحت تأثیر جریانهای ثانویه ضعیف می‌باشد. جریانهای ثانویه جریانهایی هستند که در صفحهٔ مقطع جریان و یا حول محوری عمود بر صفحهٔ مقطع جریان به‌وجود می‌آیند. این‌گونه جریانها در انحناها به‌جریانهای ثانویهٔ قوی موسوم می‌باشند ولی در





شکل ۱-۷ منحنی‌های هم سرعت در مقاطع مختلف

Prozhefa.com

کانالهای بدون انحناء در پلان نیز، به جهت تأثیر زبری جدار و نامنظمی مقطع، جریانهای ثانویهٔ ضعیف ایجاد می‌گردند.

بررسی تأثیر جریانهای ثانویهٔ ضعیف در پیدایش سرعت ماکزیمم در نزدیکی سطح آزاد در کارهای Henderson و French آمده است که از پرداختن به آنها در این بخش خودداری می‌گردد.

د: با توجه به این‌که در تحلیل بسیاری از مسایل کانالهای باز و نیز اندازه گیری دبی جریان در آنها، توزیع سرعت در راستای اصلی جریان مدنظر می‌باشد و حتی در بیشتر موارد مهندسی هیدرولیک تحلیل جریان براساس سرعت متوسط در مقطع صورت می‌گیرد، لذا براساس مطالعات انجام شده توزیع سرعت در یک مقطع قائم به صورت شکل ۱-۸الف قابل ترسیم است. به تجربه ثابت شده است که در صورتی‌که سرعت در اعماق $0/2y_0$ و $0/8y_0$ اندازه گیری شود، میانگین این دو سرعت، سرعت متوسط در آن مقطع قائم را به‌دست خواهد داد، یعنی:

$$V = \frac{V_{0/2y_0} + V_{0/8y_0}}{2} \qquad (۵-۱)$$

این موضوع اساس اندازه گیری دبی در رودخانه‌ها است. به منظور اندازه گیری دبی در رودخانه‌ها مقطع را به قطعات کوچکتر تقسیم نموده و در هر مقطع i، سرعت در امتداد خط مرکزی قطعه را با استفاده از مولینه[1] ودراعماق $0/2y_0$ و $0/8y_0$ اندازه گیری می‌نمایند (شکل ۱-۸ب). سرعت در هر قطعه i با استفاده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$V_i = \frac{V_{0/2y_0} + V_{0/8y_0}}{2}$$

و در صورتی‌که A_i مساحت اندازه گیری و محاسبه شده قطعهٔ i باشد:

$$Q_i = V_i A_i$$

و لذا دبی کل به صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$Q = \Sigma Q_i = \Sigma V_i A_i$$

چنانچه عمق جریان کم باشد سرعت در $0/6y_0$ از سطح آزاد آب به عنوان سرعت متوسط در آن مقطع پذیرفته می‌شود.

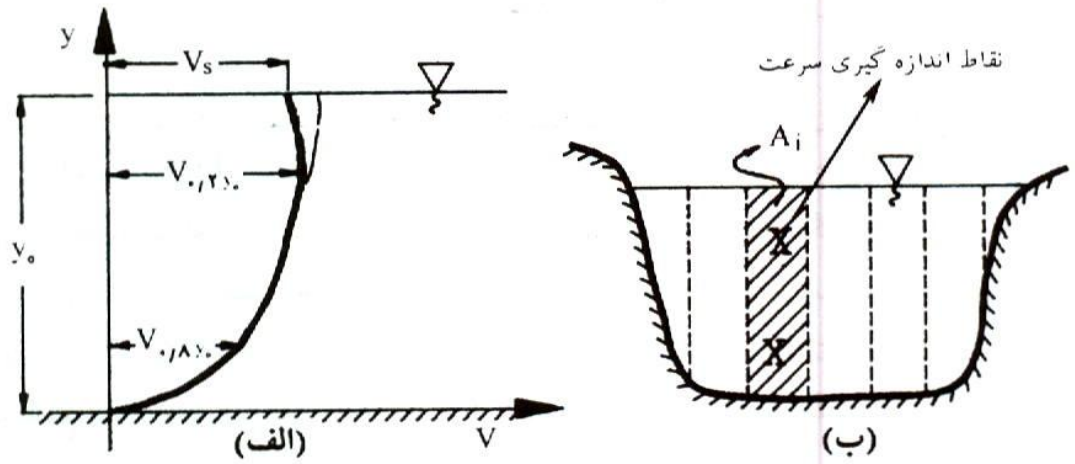
سرعت در سطح یک مقطع جریان توسط رابطهٔ زیر به سرعت متوسط در مقطع ارتباط می‌یابد:

$$V = KV_s$$

K ضریبی است که تابع شکل مقطع بوده و بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ تغییر می‌کند و در کارهای عملی مقدار دقیق‌تر آن قابل تعیین است، سرعت در سطح (V_s) را می‌توان با استفاده از یک جسم شناور اندازه گیری نمود.

۱- وسیله اندازه گیری سرعت در راستای اصلی در یک نقطه از جریان.

Prozhefa.com



شکل ۱-۸ توزیع سرعت در یک مقطع قائم

مثال ۱-۳

نشان دهید که قانون لگاریتمی توزیع سرعت در کانالهای مستطیلی عریض با این نکته تجربی که سرعت در عمق $۰/۶y_۰$ به عنوان سرعت متوسط در آن مقطع پذیرفته می‌شود، هماهنگی نشان می‌دهد.

$$U = V + \frac{V_*}{K}\left(۱ + \ln\frac{y}{y_۰}\right) \qquad (۶-۱)$$

حل:

Vanoni نشان داده است که رابطهٔ ۱-۶ در توزیع سرعت در جریان آشفتهٔ یکنواخت در کانالهای مستطیلی عریض صدق می‌کند. در این رابطه V سرعت متوسط، $y_۰$ عمق جریان، V_* سرعت برشی (ثابت جریان) و K ثابت فن -کارمن (حدوداً ۰/۴ برای آب صاف) می‌باشد. U نیز سرعت در مختصات y (اندازه گیری شده از کف) را نشان می‌دهد.

اگر سرعت U برابر با سرعت متوسط (V) قرار داده شود:

$$V = V + \frac{V_*}{K}\left(۱ + \ln\frac{y}{y_۰}\right) \rightarrow \ln\frac{y}{y_۰} = -۱ \rightarrow y = ۰/۳۶۸\, y_۰$$

در نتیجه عمقی که سرعت متوسط را به‌دست می‌دهد برابر است با:

$$y' = y_۰ - ۰/۳۶۸y_۰ = ۰/۶۳۲y_۰$$

لذا مطالعات تجربی هماهنگی لازم را با رابطهٔ نظری ۱-۶ نشان می‌دهد. بررسی هماهنگی رابطهٔ ۱-۵ با رابطهٔ ۱-۶، به عنوان تمرین به عهدهٔ مطالعه کنندگان گذاشته شده است.

قابل اشاره است که در استخراج رابطهٔ ۱-۶ به ماکزیمم بودن سرعت در نزدیکی سطح آزاد آب توجهی نشده است و نیز براساس این رابطه سرعت در کف معادل صفر به‌دست نمی‌آید. بررسی این موضوع خارج از مباحث این فصل می‌باشد و از نقطه‌نظر تحلیل دبی جریان ضروری به نظر نمی‌رسد.

Prozhefa.com

۱-۶ توزیع فشار در کانالها

هدف از تعیین توزیع فشار در کانالها، مشخص نمودن نحوهٔ تغییرات پارامتر فشار در عرض و در عمق در مقطع خاصی از کانال می‌باشد. با دانستن توزیع فشار در کانالها و با انتگرال‌گیری از نیروهای جزء فشاری می‌توان برآیند حاصل از این نیروهای فشاری را بر روی تأسیسات هیدرولیکی تعیین نمود. علاوه بر این اطلاع از چگونگی توزیع فشار در به کار بردن آگاهانهٔ معادلات انرژی و اندازهٔ حرکت در کانالها سودمند خواهد بود. در این قسمت روابط لازم در تعیین تغییرات فشار در سه حالت مختلف یعنی جریانهای یکنواخت (موازی)، جریانهای متغیرتدریجی و جریانهای با انحناء در صفحهٔ قائم ارائه خواهد شد.

۱-۶-۱ توزیع فشار در جریانهای یکنواخت (موازی)

کانالی مطابق شکل ۱-۶الف، با هر سطح مقطع دلخواه را در نظر گرفته و فرض می‌کنیم که در این کانال جریان یکنواخت برقرار است. جهت به‌دست آوردن توزیع فشار در مقطع خاصی از این کانال مطابق شکل ۱-۹الف، ستونی از آب به عمق h (در صفحهٔ عمود بر جهت عمومی جریان) و سطح مقطع dA را در نظر گرفته و تغییرات فشار در امتداد این ستون را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در صورتی که معادلهٔ حرکت برای جرم این ستون و در جهت عمود بر خطوط جریان نوشته شود، با توجه به این‌که خطوط جریان موازی هستند (جریان موازی) مؤلفه شتاب در جهت عمود برخطوط جریان نمایش داده شده وجود نداشته و لذا:

مؤلفه وزن در جهت عمود بر خطوط جریان = نیروی فشاری $\rightarrow \Sigma F_n = 0$

$$PdA = \gamma h\, dA \cos\theta \rightarrow \boxed{P = \gamma h \cos\theta} \qquad (۷-۱)$$

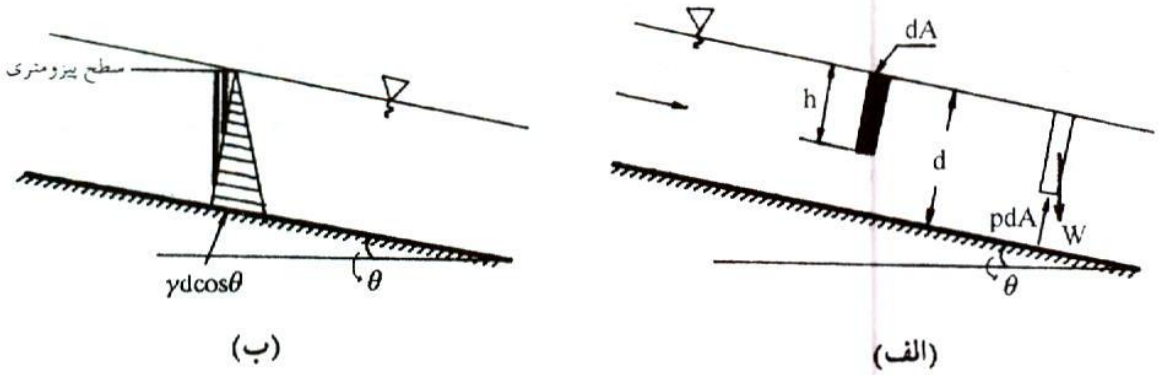
P در این رابطه، که به قانون تغییرات هیدرواستاتیکی فشار موسوم است، بر مبنای فشار نسبی بیان گردیده است و h تغییرات عمق را در موضع مورد نظر در صفحه‌ای عمود بر جهت عمومی جریان نمایش می‌دهد. γ و θ نیز به ترتیب وزن مخصوص آب و زاویهٔ شیب کانال می‌باشند.

در صورتی که تعیین مقدار فشار در کف کانال مورد نظر باشد با قرار دادن d به جای h می‌توان از رابطهٔ زیر برای به‌دست آوردن فشار استفاده نمود:

$$P = \gamma d \cos\theta = \gamma y \cos^2\theta \qquad (۸-۱)$$

در شکل ۱-۹ ب، نحوهٔ تغییرات فشار در جریان یکنواخت ترسیم گردیده است که براساس آن، فشار مربوطه به صورت خطی از صفر تا مقدار $\gamma d \cos\theta$ تغییر می‌نماید. با توجه به موارد ذکر شده، در صورتی‌که پیزومترهای فرضی در مقطع جریان در موضع مورد نظر از کانال قرار داده شود سطح این پیزومترها منطبق بر سطح آزاد نخواهد بود. نکته‌ای که در این رابطه قابل ذکر است این است که در صورتی که شیب کف کانال کم باشد (کم بودن شیب کانال امری نسبی است و در این مورد زاویهٔ $\theta < 6^\circ$ به عنوان شیب کم در نظر گرفته می‌شود. این زاویهٔ شیبی در حدود ده درصد را مطرح می‌کند که در مسایل عملی چنین شیب زیادی کمتر

Prozhefa.com



شکل ۱-۹ توزیع فشار در جریان یکنواخت

پیش می‌آید) می‌توان $\cos^2\theta$ را تقریباً معادل یک در نظر گرفت و در نتیجه در کانال با شیب کم روابط ۱-۷ و ۱-۸، به صورت زیر در خواهند آمد:

$$P = \gamma h \cos\theta \approx \gamma h$$

فشار در کف

$$P = \gamma d \cos\theta = \gamma y \cos^2\theta \approx \gamma y$$

لذا در کانال با شیب کم است که می‌توان خط تراز هیدرولیکی (سطح پیزومتری) را منطبق بر سطح آزاد در نظر گرفت.

۱-۶-۲ توزیع فشار در جریانهای متغیر تدریجی

با توجه به ویژگیهایی که از جریان متغیر تدریجی ذکر گردید، توزیع فشار در این حالت نیز از قانون تغییرات هیدرواستاتیکی فشار تبعیت خواهد کرد و روابط ۱-۷ و ۱-۸ در این حالت نیز صادق می‌باشند. فرض برقرار بودن قانون تغییرات هیدرواستاتیکی فشار در جریانهای متغیر تدریجی یکی از فرضیات اساسی در به‌دست آوردن معادلهٔ حاکم بر این گونه جریانها می‌باشد که در فصل پنجم توضیح داده خواهد شد.

۱-۶-۳ توزیع فشار در جریانهای با انحناء در صفحهٔ قائم

در مطالعات چگونگی تغییرات فشار در قسمت تاج سرریزها و یا در انحناء پای سرریزها، با توجه به انحناء شدیدی که جریان در این مواضع به‌خود می‌گیرد دیگر نمی‌توان از رابطهٔ ۱-۷ استفاده نمود بلکه باید تصحیحاتی که در برگیرندهٔ تأثیر انحنای جریان باشد اعمال گردد. بدین منظور نخست جریانی با تقعّر به سمت بالا را در نظر گرفته (شکل ۱-۱۰) و تغییرات فشار را در مقطعی که کاملاً در صفحهٔ قائم قرارداد مورد بررسی قرار می‌دهیم. از آن‌جایی که هندسهٔ دقیق جریان و نیز نحوهٔ تغییرات سرعت در این موضع روشن نمی‌باشد، بررسی چگونگی تغییرات فشار نیاز به فرضیاتی دارد.

مطابق شکل ۱-۱۰ الف، ستونی از آب به عمق h و سطح مقطع dA در مقطع مورد نظر انتخاب کرده،