



هیدرولیک کانال‌های روباز

(رشته مهندسی عمران)

دکتر حمیدرضا شبانی

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربرار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار ۵۵

فصل اول. تعریف‌ها و مفاهیم اولیه

هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
مقدمه	۱
۱-۱ جریان با سطح آزاد و جریان تحت فشار	۲
۲-۱ طبقه‌بندی کانال‌ها	۳
۳-۱ طبقه‌بندی کانال‌های مصنوعی	۴
۱-۳-۱ طبقه‌بندی کانال‌های مصنوعی براساس شکل مقطع	۴
۲-۳-۱ طبقه‌بندی کانال‌های مصنوعی براساس کاربرد	۵
۴-۱ مشخصات هندسی و هیدرولیکی مقطع کانال روباز	۵
۵-۱ اعداد بدون بعد، فرود و رینولدز	۸
۱-۵-۱ عدد فرود	۸
۲-۵-۱ عدد رینولدز	۸
۶-۱ طبقه‌بندی جریان در کانال‌های روباز	۹
۱-۶-۱ تغییر پارامترهای هیدرولیکی برحسب زمان	۹
۲-۶-۱ تغییر پارامترهای هیدرولیکی برحسب مکان	۹
۳-۶-۱ نیروهای غالب بر جریان	۱۱
۷-۱ معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال	۱۳
۱-۷-۱ اصل بقای جرم و معادله پیوستگی	۱۳
۲-۷-۱ اصل بقای انرژی و معادله انرژی	۱۴

۱۶.....	۳-۷-۱ اصل بقای اندازه حرکت و معادله اندازه حرکت
۱۹.....	۸-۱ دبی و توزیع سرعت در کانال های روباز
۲۱.....	۹-۱ ضرایب تصحیح سرعت در رابطه انرژی و رابطه اندازه حرکت
۲۴.....	۱۰-۱ توزیع فشار سیال در کانال های روباز
۲۴.....	۱-۱۰-۱ توزیع فشار برای جریان یکنواخت در کانال
۲۵.....	۲-۱۰-۱ توزیع فشار در قوس کانال
۲۹.....	خودآزمایی فصل اول

فصل دوم. انرژی در کانال های روباز

۳۱.....	هدف کلی
۳۱.....	هدف های یادگیری
۳۱.....	مقدمه
۳۲.....	۱-۲ معادله انرژی در کانال های روباز
۳۳.....	۱-۱-۲ خط شیب انرژی و خط شیب هیدرولیکی در کانال های روباز
۳۵.....	۲-۲ جریان بحرانی
۳۶.....	۱-۲-۲ محاسبه عمق بحرانی
۴۱.....	۳-۲ انرژی مخصوص
۴۲.....	۱-۳-۲ منحنی انرژی مخصوص
۴۳.....	۲-۳-۲ حداقل انرژی مخصوص نسبت به عمق
۴۸.....	۴-۲ منحنی دبی جریان بر حسب عمق، به ازای انرژی مخصوص ثابت
۵۱.....	۵-۲ کاربرد انرژی مخصوص در کانال های روباز
۵۱.....	۱-۵-۲ انرژی مخصوص و تغییر تراز کف کانال
۶۰.....	۲-۵-۲ انرژی مخصوص و تغییر موضعی در عرض کانال
۶۶.....	۶-۲ انسداد جریان در کانال های روباز
۶۶.....	۱- ۶-۲ برآمدگی موضعی در کف و پدیده انسداد
۶۸.....	۲-۶-۲ کاهش موضعی عرض کانال و پدیده انسداد
۷۱.....	۳- ۶-۲ حل مسایل بالا آمدگی موضعی در کف کانال
۷۳.....	۴- ۶-۲ حل مسایل تنگ شدگی موضعی در عرض کانال
۷۵.....	۵-۶-۲ طول محدوده انسداد
۸۶.....	خودآزمایی فصل دوم

فصل سوم. اندازه حرکت در کانال های روباز

هدف کلی	۸۹
هدف های یادگیری	۸۹
مقدمه	۸۹
۱-۳ اندازه حرکت در کانال روباز	۹۰
۲-۳ نیروی مخصوص	۹۲
۳-۳ منحنی دبی - عمق، به ازای نیروی مخصوص ثابت	۹۸
۴-۳ پرش هیدرولیکی در آبراهه روباز	۱۰۱
۱-۴-۳ عمق های اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی	۱۰۱
۲-۴-۳ طول پرش هیدرولیکی	۱۱۱
۳-۴-۳ افت انرژی در پرش هیدرولیکی	۱۱۳
۵-۳ پرش های هیدرولیکی آزاد و مستغرق	۱۱۸
۶-۳ وقوع پرش هیدرولیکی به سبب انسداد جریان	۱۲۵
خودآزمایی فصل سوم	۱۲۹

فصل چهارم. جریان یکنواخت

هدف کلی	۱۳۳
هدف های یادگیری	۱۳۳
مقدمه	۱۳۳
۱-۴ شکل گیری جریان یکنواخت	۱۳۴
۲-۴ تنش برشی متوسط در کف و جداره کانال	۱۳۵
۳-۴ روابط جریان یکنواخت	۱۳۶
۱-۳-۴ رابطه شزی	۱۳۶
۲-۳-۴ ضریب شزی	۱۳۷
۳-۳-۴ رابطه مانینگ	۱۴۰
۴-۴ حل مسایل جریان های یکنواخت	۱۴۰
۱-۴-۴ جریان یکنواخت با عمق معلوم	۱۴۱
۲-۴-۴ جریان یکنواخت با عمق مجهول	۱۴۳
۵-۴ تعیین ضریب زبری مانینگ	۱۵۱
۱-۵-۴ ضریب زبری در کانال با بستر دانه ای	۱۵۳
۲-۵-۴ ضریب زبری در کانال با بستری از پوشش گیاهی	۱۵۵

۱۵۷	۳-۵-۴ ضریب زبری در کانال‌های مرکب
۱۶۵	۶-۴ طراحی کانال‌های فرسایش ناپذیر
۱۶۵	۱-۶-۴ جنس پوشش کانال
۱۶۵	۲-۶-۴ سرعت جریان در کانال
۱۶۶	۳-۶-۴ شیب طولی و شیب جداره کانال
۱۶۶	۴-۶-۴ ارتفاع آزاد کانال
۱۶۷	۵-۶-۴ ابعاد کانال
۱۷۱	خودآزمایی فصل چهارم

فصل پنجم. تئوری جریان متغیر تدریجی

۱۷۳	هدف کلی
۱۷۳	هدف‌های یادگیری
۱۷۳	مقدمه
۱۷۴	۱-۵ معادله دینامیکی جریان متغیر تدریجی
۱۷۵	۲-۵ طبقه‌بندی شیب کانال‌ها
۱۷۶	۳-۵ طبقه‌بندی پروفیل‌های سطح آب در جریان متغیر تدریجی
۱۷۷	۱-۳-۵ پروفیل‌های شیب ملایم، M
۱۸۲	۲-۳-۵ پروفیل‌های شیب تند، S
۱۸۶	۳-۳-۵ پروفیل‌های شیب بحرانی، C
۱۸۷	۴-۳-۵ پروفیل‌های شیب افقی، H
۱۸۸	۵-۳-۵ پروفیل‌های شیب معکوس، A
۱۸۸	۴-۵ پروفیل جریان متغیر تدریجی در محل تغییر شیب کانال
۱۸۹	۱-۴-۵ تأثیر شرایط جریان بر جانمایی پروفیل جریان متغیر تدریجی
۱۹۰	۲-۴-۵ راهنما برای ترسیم پروفیل در محل تغییر شیب کانال
۱۹۱	۳-۴-۵ پروفیل در اتصال کانال ملایم‌تر به ملایم
۱۹۲	۴-۴-۵ پروفیل در اتصال کانال ملایم به ملایم‌تر
۱۹۲	۵-۴-۵ پروفیل در اتصال کانال تندتر به تند
۱۹۳	۶-۴-۵ پروفیل در اتصال کانال تند به تندتر
۱۹۳	۷-۴-۵ پروفیل در اتصال کانال ملایم به تند
۱۹۴	۸-۴-۵ پروفیل در اتصال کانال تند به ملایم
۱۹۷	۹-۴-۵ نمونه‌های دیگری از پروفیل در اتصال کانال‌ها با شیب‌های مختلف
۲۰۸	خودآزمایی فصل پنجم

فصل ششم. جانمایی نیم‌رخ جریان متغیر تدریجی

هدف کلی	۲۱۱
هدف‌های یادگیری	۲۱۱
مقدمه	۲۱۱
۱-۶ جانمایی پروفیل جریان متغیر تدریجی	۲۱۲
۱-۱-۶ روش گام‌به‌گام مستقیم	۲۱۴
۲-۱-۶ روش اولر و اولر اصلاح‌شده	۲۲۰
۳-۱-۶ روش گام‌به‌گام استاندارد	۲۲۴
۲-۶ مثال‌های کاربردی از تعیین پروفیل جریان متغیر تدریجی	۲۳۱
۱-۲-۶ تعیین محل وقوع پرش هیدرولیکی	۲۳۱
۲-۲-۶ انسداد یا پس‌زدگی جریان	۲۳۴
۳-۲-۶ اتصال کانال و مخزن	۲۴۱
خودآزمایی فصل ششم	۲۵۹

فصل هفتم. توزیع سرعت در کانال روباز

هدف کلی	۲۶۱
هدف‌های یادگیری	۲۶۱
مقدمه	۲۶۱
۱-۷ توزیع سرعت بر روی بستر کانال نفوذناپذیر	۲۶۲
۱-۱-۷ توزیع سرعت در ناحیه زیرلایه ورقه‌ای در کانال	۲۶۳
۲-۱-۷ توزیع سرعت در ناحیه بالای زیرلایه ورقه‌ای	۲۶۳
۲-۷ توزیع سرعت بر روی سطوح نفوذپذیر در کانال	۲۶۴
۱-۲-۷ تنش برشی بر روی بستر نفوذپذیر	۲۶۷
۳-۷ بررسی ضریب زبری مانینگ	۲۶۹
خودآزمایی فصل هفتم	۲۷۳
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی	۲۷۵
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی	۲۷۸
مراجع	۲۸۱

تقدیم به مادرم، به امیدم

پیشگفتار

کتاب حاضر حاوی مطالب مورد نیاز برای مهندسين در گرايش‌های مختلف دپارتمان عمران و نیز بعضی از گرايش‌های دپارتمان کشاورزی می‌باشد. در تهیه این جلد سعی شده است تا نگارش متن به صورت ساده و روان باشد نیز توضیح مناسب و کامل برای درک بهتر خواننده آورده شود. مثال‌های کتاب با هدف روشن ساختن بیشتر مفاهیم و نیز آشنایی با حل مسایل هیدرولیکی قید گردیده‌اند. ترسیم منحنی‌های کتاب، همگی با استفاده از حل معادله‌های حاکم انجام شده‌اند و از درج نسخه اسکن شده آن‌ها از مراجع مرتبط، خودداری گردیده است تا ضمن حصول منحنی‌های واضح، کارایی استفاده از آن‌ها متناسب با حل مسایل فزونی یابد. همچنین دقت کافی در ترسیم شکل‌های کتاب به کار برده شده است تا آن‌ها ارائه مناسب را دارا باشند.

در تهیه این جلد، از همکاری خانم‌ها مهندسین الناز پورمحمودنژاد، مونا آریا، ندا اسکندری منجیلی، خدیجه میرزایی، شهرزاد دنکوب و نیز پسران اشکان بهره‌مند بوده‌ام و کمال تشکر از این عزیزان را دارم.

فصل اول کتاب به معرفی پارامترهای هیدرولیکی و انواع مختلف جریان، حصول معادله‌های حاکم بر جریان، نحوه توزیع سرعت و نیز توزیع فشار در کانال‌های روباز پرداخته است. در فصل دوم ضمن آشنایی با رابطه انرژی و موارد استفاده آن، به مفهوم انرژی مخصوص و بهره‌گیری از آن در تفسیر تغییرات پروفیل سطح آب در محل عارضه‌هایی چون تغییر عرض و یا تغییر رقوم کف کانال، اشاره گردیده است در این فصل در خصوص انسداد جریان نیز مطالب مورد نیاز آمده‌اند. فصل سوم کتاب، رابطه نیروی مخصوص را معرفی می‌کند نیز در این فصل با پرش هیدرولیکی و مشخصه‌های آن آشنایی حاصل می‌شود. در فصل چهارم، جریان یکنواخت و رابطه‌های مربوط به آن معرفی شده‌اند و روش طراحی کانال فرسایش‌ناپذیر مورد اشاره می‌باشد. جریان متغیر تدریجی و معادله دینامیکی جریان در فصل پنجم آمده است در این فصل انواع مختلف پروفیل‌های سطح آب گنجانده شده‌اند. فصل ششم به معرفی روش‌های مختلف برای تعیین جانمایی پروفیل سطح آب برای جریان متغیر تدریجی پرداخته است و در فصل هفتم، روابط توزیع سرعت در کانال و برای جریان بر روی بسترهای نفوذناپذیر و نفوذپذیر از کانال ذکر شده‌اند. از شما خواننده محترم که در بهبود مطالب کتاب برای ویرایش‌های بعدی، مرا از نقطه‌نظرهای ارزشمند خود بهره‌مند می‌سازید سپاسگزار هستم.

حمیدرضا شیبانی

عضو هیئت علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه پیام‌نور

sheibani@pnu.ac.ir

فصل اول

تعریف‌ها و مفاهیم اولیه

هدف کلی

فراگیری مفاهیم اولیه در هیدرولیک

هدف‌های یادگیری

بعد از مطالعه این فصل با موارد ذیل آشنایی حاصل می‌گردد.

۱- پارامترهای هندسی و هیدرولیکی در کانال‌های روباز

۲- معادلات حاکم بر جریان

۳- چگونگی توزیع سرعت جریان و مقدار فشار در مجاری روباز

مقدمه

انتقال آب از یک نقطه به نقطه دیگر، برای اهدافی چون تأمین آب شرب، کشاورزی و یا برای مصارف صنعتی انجام می‌شود. برای تحقق این اهداف، از مجراهای انتقال آب، مانند کانال‌ها و لوله‌ها استفاده می‌گردد. این گونه مجراها برای انتقال پساب‌ها و فاضلاب‌های خانگی و کارخانه‌ای نیز به کار گرفته می‌شوند.

انتقال سیال در یک مجرا، به دو شکل آزاد^۱ و یا تحت فشار^۲ انجام می‌شود. رفتار هیدرولیکی جریان‌های آزاد با جریان‌های تحت فشار تفاوت‌هایی دارند از این رو تشخیص نوع جریان در بررسی آن‌ها ضروری خواهد بود. محور اصلی بحث در این کتاب، هیدرولیک جریان‌های آزاد در کانال‌های روباز است.

در این فصل، پارامترهای هیدرولیکی، انواع مختلف دسته‌بندی‌های جریان و معادلات حاکم بر جریان شناخته می‌شوند و آشنایی با توزیع سرعت و توزیع فشار در مجراهای روباز محقق می‌گردد.

۱-۱ جریان با سطح آزاد و جريان تحت فشار

انتقال سیال در مجاری روباز به صورت جریان آزاد صورت می‌گیرد. در این نوع جریان، سطح سیال با هوای آزاد در تماس است و دارای فشار اتمسفر می‌باشد (فشار مطلق برابر فشار اتمسفر و فشار نسبی برابر صفر است). برای ارائه نمونه مثال از جریان آزاد، می‌توان به انتقال آب در کانال‌های آبیاری روباز و یا کانال‌های انتقال فاضلاب اشاره نمود.

انتقال جریان به شکل تحت فشار، در مجراهای بسته انجام می‌شود و جریان تمامی مقطع خود را پر می‌نماید. در این نوع جریان، فشار در سطح بالایی سیال غیر از فشار اتمسفر است و سیال بر تمامی محیط جداره فشار وارد می‌کند. جریان در لوله، کالورت^۱ و تونل‌های انتقال آب، که کل مقطع به صورت پر دیده می‌شود، به شکل جریان تحت فشار می‌باشد. برای درک بیشتر موضوع، لازم است به این نکته اشاره شود که اگر مقطع به صورت کامل بسته باشد و جریان تمامی مقطع را پر نموده باشد، لزوماً جریان تحت فشار نخواهد بود. به عنوان مثال تونلی با مقطع دایره، که در آن جریانی برقرار است و قسمتی از مقطع آن پر از آب می‌باشد، در نظر گرفته شود تحت این شرایط جریان در مجرا به صورت آزاد می‌باشد. حال اگر دبی به تدریج افزایش پیدا کند، عمق جریان در داخل تونل بیشتر می‌گردد و سطح جریان به سقف نزدیک می‌شود تا جایی که به سقف می‌چسبد در این زمان، یعنی لحظه‌ای که سطح سیال سقف را تر می‌نماید، فشار در سطح سیال همان فشار اتمسفر است و با وجود اینکه مقطع پر می‌باشد، اما جریان از نوع آزاد است. اگر به سببی، دبی جریان باز هم افزایش یابد فشار در سطح سیال بیش از فشار اتمسفر می‌گردد و جریان از حالت آزاد به تحت فشار تغییر می‌یابد. در جریان‌های تحت فشار، چنانچه فشارسنج یا همان مانومتر^۲ در قسمت فوقانی مقطع قرار داده شود، سطح آب در داخل مانومتر بالا می‌آید که خود نشان‌دهنده وجود فشاری بیش از فشار اتمسفر در سطح سیال است.

حال به نحوه ترسیم خطوط شیب انرژی و هیدرولیکی برای جریان‌های تحت فشار و آزاد اشاره می‌شود. در هر مقطع از جریان، انرژی کل، یعنی E ، برابر با مجموع ارتفاع^۳ معادل سرعت، یعنی $\frac{V^2}{2g}$ ، ارتفاع معادل فشار، یعنی $\frac{P}{\gamma}$ ، و ارتفاع معادل پتانسیل، یعنی Z ، می‌باشد. برای جریان تحت فشار، انرژی به صورت رابطه (۱-۱) است. P فشار در مرکز مقطع، V سرعت متوسط جریان، Z فاصله محور لوله تا سطح مبنا، γ وزن مخصوص سیال و g شتاب ثقل است.

$$E = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \quad (1-1)$$

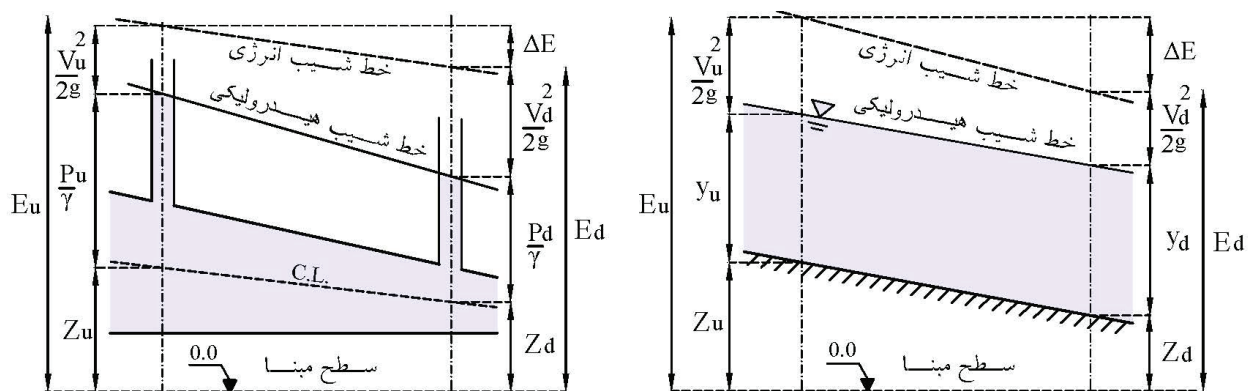
انرژی برای جریان آزاد به رابطه (۲-۱) تغییر پیدا می‌کند. y عمق آب در کانال و Z فاصله کف کانال تا سطح مبنا است.

$$E = y + \frac{V^2}{2g} + Z \quad (2-1)$$

دیمانسینون ابعادی انرژی در روابط فوق از جنس طول است. چنانچه سیال عبوری از مجرا، آب باشد مقدار وزن مخصوص آب در رابطه (۱-۱) قرار داده می‌شود و انرژی به دست آمده برحسب متر آب حاصل می‌گردد.

برای ترسیم خطوط شیب انرژی و شیب هیدرولیکی برای جریان‌های تحت فشار و با سطح آزاد به ترتیبی که می‌آید، عمل می‌شود.

1. Culvert
2. Manometer
3. Head



شکل ۱-۱. خطوط شیب انرژی و شیب هیدرولیکی در جریان آزاد (سمت راست) و جریان تحت فشار (سمت چپ). ΔE افت انرژی است.

برای سیال گذری از یک کانال، انرژی برای خط جریان منطبق بر کف کانال و برای سیال در یک لوله، انرژی برای خط جریان گذری از مرکز لوله سنجیده می‌شود. شکل (۱-۱) توضیح این مطلب را نشان می‌دهد.

در جریان تحت فشار فاصله مرکز لوله تا سطح مبنا به عنوان ارتفاع معادل پتانسیل، یعنی Z ، فاصله خط شیب هیدرولیکی تا مرکز لوله برابر با ارتفاع نظیر فشار، یعنی $\frac{P}{\gamma}$ ، و فاصله خط شیب انرژی تا شیب هیدرولیکی برابر با ارتفاع معادل سرعت، یعنی $\frac{V^2}{2g}$ ، قرار داده می‌شود. $\frac{P}{\gamma}$ فاصله محور لوله تا سطح آب در مانومتر نصب شده بر روی لوله است.

در جریان آزاد، فاصله کف تا سطح مبنا برابر ارتفاع معادل پتانسیل یعنی Z است، فاصله خط شیب هیدرولیکی تا کف برابر با ارتفاع جریان یعنی y می‌باشد و فاصله خط شیب هیدرولیکی^۱ تا خط شیب انرژی^۲ برابر با ارتفاع معادل سرعت یعنی $\frac{V^2}{2g}$ مقرر می‌شود. این توضیح نشان می‌دهد که در جریان با سطح آزاد خط شیب هیدرولیکی منطبق بر سطح آب خواهد بود. البته این نکته لازم به یادآوری است، نحوه ترسیم خطوط شیب انرژی و هیدرولیکی که در اینجا ذکر شده است خاص جریان‌های یکنواخت و متغیر تدریجی می‌باشد. در زیربخش‌های بعدی انواع جریان معرفی می‌گردند.

۲-۱ طبقه‌بندی کانال‌ها

کانال‌ها مهم‌ترین سازه‌های انتقال آب در جریان‌های روباز هستند. کانال‌ها را می‌توان بر مبنای پارامترهای مانند جنس، شکل و فرسایش‌پذیری بدنه آن‌ها طبقه‌بندی نمود. طبقه‌بندی بر مبنای جنس بدنه به دو دسته طبیعی و مصنوعی است.

• کانال‌های طبیعی^۳

آبراهه‌ها و رودخانه‌های طبیعی دارای بستر خاکی و سنگی هستند. این کانال‌ها به طور طبیعی ایجاد شده‌اند و از ویژگی‌های آن‌ها، نامنظم بودن در مسیر و نیز در مقطع عرضی می‌باشد.

• کانال‌های مصنوعی^۴

این کانال‌ها از جنس بتن، سنگ، آجر و ملات است و برای اهدافی نظیر انتقال آب و یا فاضلاب ساخته می‌شوند.

1. Hydraulic Grade Line
2. Energy Grade Line
3. Natural Channels
4. Artificial Channels

در طبقه‌بندی کانال‌ها بر مبنای شکل بدنه، کانال‌ها به دو دسته منشوری و غیرمنشوری تقسیم می‌شوند.

- **کانال‌های منشوری^۱**

کانال‌هایی هستند که سطح مقطع و شیب طولی آن‌ها در طول مسیر ثابت است.

- **کانال‌های غیرمنشوری^۲**

کانال‌هایی هستند که سطح مقطع یا شیب طولی آن‌ها در طول مسیر تغییر می‌کند.

طبقه‌بندی دیگری برای کانال‌ها، بر مبنای پایداری جداره آن‌ها در مقابل فرسایش، صورت می‌گیرد. بر این اساس

کانال‌ها به دو دسته کانال‌های با جداره ثابت و کانال‌های با جداره متحرک تقسیم می‌گردند.

- **کانال‌ها با جداره ثابت**

کانال‌های مصنوعی با بدنه‌ای از جنس مصالحی مانند بتن، چوب و یا فلز در این دسته جای می‌گیرند. رودخانه‌ها و آبراهه‌های با طول عمر زیاد، که با گذر جریان دچار رسوب‌گذاری و فرسایش یا آبستگي نمی‌شوند، نیز در این گروه قرار دارند. این کانال‌ها عموماً زبری جداره ثابتی دارند و غیرقابل فرسایش بودن مصالح جداره و نیز ثبات شکل مقطع، از ویژگی اصلی این نوع کانال‌ها است.

- **کانال‌ها با جداره متحرک**

کانال‌هایی هستند که جداره آن‌ها از مصالح دانه‌ای تشکیل شده است و با گذر جریان دچار فرسایش عمومی یا موضعی می‌شوند. رودخانه‌ها و آبراهه‌های جوان از این دسته هستند. مطالعه جریان در کانال‌های با جداره متحرک از پیچیدگی بیشتری نسبت به کانال‌های با جداره ثابت برخوردار است.

۳-۱ طبقه‌بندی کانال‌های مصنوعی

طبقه‌بندی کانال‌های مصنوعی بر اساس شکل مقطع عرضی و نیز کاربرد آن‌ها است و به صورتی که می‌آید می‌باشد.

۱-۳-۱ طبقه‌بندی کانال‌های مصنوعی بر اساس شکل مقطع

در طراحی مقطع عرضی کانال‌های مصنوعی، ایجاد شرایط مناسب هیدرولیکی همراه با صرف هزینه بهینه موردنظر می‌باشد. عوامل گوناگونی مانند هدف بهره‌برداری از کانال، مصالح در دسترس برای ساخت آن و شرایط و امکانات محلی نیز می‌تواند در طراحی کانال مؤثر باشند. یکی از مشخصه‌هایی که در ابتدای طراحی کانال تعیین می‌گردد، شکل هندسی مقطع کانال است. اشکال کانال‌های مصنوعی به قرار زیر هستند.

- **مقطع مستطیلی:** در زمین‌های سنگی و نیز شبکه‌های آبیاری کوچک به کار می‌رود و به دلیل شیب قائم جداره، معمولاً از مصالح پایدار مانند چوب، فلز، سنگ یا سایر مصالح بنایی ساخته می‌شود.
- **مقطع دوزنقه‌ای:** معمول‌ترین مقطع عرضی برای کانال‌های مصنوعی است و به صورت گسترده برای شبکه‌های انتقال آب استفاده می‌شود. مقطع دوزنقه‌ای شرایط هیدرولیکی مناسب را برای جریان فراهم می‌کند و به دلیل دارا

1. Prismatic Channels

2. Non-Prismatic Channels

- بودن جداره شیب دار، پایداری مناسبی نسبت به مقاطعی چون مستطیل دارد.
- **مقطع مثلثی:** در شبکه‌های آبیاری و زهکشی کوچک، مانند جوی حاشیه جاده‌ها و در کار آزمایشگاهی کاربرد دارد.
- **مقطع دایره‌ای:** برای انتقال فاضلاب و نیز به‌عنوان آبراهه‌های کوچک با دبی کم و متوسط به‌کار می‌رود.
- **مقطع سهموی:** در کانال‌های کوچک با مقاطع پیش ساخته کاربرد دارد.
- **مقطع نعل اسبی و تخم‌مرغی:** در آبروهای فاضلاب مدفون و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۳-۲ طبقه‌بندی کانال‌های مصنوعی براساس کاربرد

- بر مبنای این طبقه‌بندی، انواع مختلف کانال مصنوعی، به ترتیب زیر، قابل تعریف هستند.
- **کانال^۱:** آبراهه‌ای طولانی و با شیب ملایم است، که در سطح زمین ایجاد می‌شود و جریان در آن می‌تواند به عمق ثابت برسد. کانال ممکن است بدون پوشش و یا دارای پوشش باشد.
 - **فلوم^۲:** کانالی است که از مصالحی چون فلز و بتن و ساخته می‌شود و بر روی پایه‌هایی بالاتر از سطح زمین قرار می‌گیرد از موارد استفاده آن، انتقال آب از یک سمت دره به سمت دیگر است. کانال‌های آزمایشگاهی نیز فلوم هستند.
 - **تنداب^۳:** تنداب یا تندآبراهه، کانال با شیب تند و با دیواره‌های معمولاً قائم است و آب را از تراز بالا به تراز پایین‌تر می‌رساند. تنداب‌ها برای انتقال آب‌گذاری از سرریز سدها به پایین‌دست استفاده می‌شوند.
 - **شیب شکن مایل:** مشابه تنداب است، با این تفاوت که اختلاف تراز کمتر از ۴/۵ متر را تجربه می‌نماید.
 - **کالورت:** کانالی بسته و معمولاً کوتاه است و برای انتقال آب از یک طرف مسیر جاده به طرف دیگر آن به‌کار می‌رود. این مجرا می‌تواند به صورت تحت فشار نیز عمل کند.
 - **تونل:** مجرای بسته‌ای است و به منظور انتقال آب در عبور از یک مانع طبیعی مانند کوه ساخته می‌شود و می‌تواند جریان را به صورت آزاد یا تحت فشار منتقل نماید.
 - **تبدیل:** سازه‌ای است که در محل تغییر مسیر، تغییر ابعاد و تغییر شکل مقطع کانال قرار داده می‌شود. مهم‌ترین مزیت استفاده از تبدیل، به حداقل رساندن افت انرژی در طول جریان است.

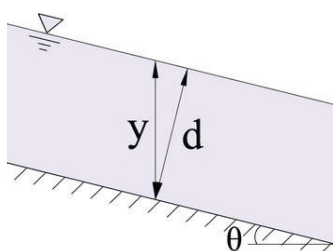
۱-۴ مشخصات هندسی و هیدرولیکی مقطع کانال روباز

این مشخصات در محاسبه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعریف آن‌ها در جدول (۱-۱) آمده است. یکی از این مشخصه‌ها، عمق جریان می‌باشد. این مشخصه در یکی از دو راستای مختلف ممکن است اعلام شود یک راستا، عمق جریان در امتداد عمود بر کف کانال و دیگری عمق در امتداد ثقل (شاقولی) می‌باشد.

جدول ۱-۱. معرفی مشخصات هندسی و هیدرولیکی جریان در کانال‌های روباز.

مشخصه و نماد	تعریف	نماد	رابطه
عمق جریان	فاصله قائم (شاقولی) سطح آب تا کف	(y)	-
عمق مقطع جریان	عمق در جهت عمود بر کف کانال	(d)	-
عرض در سطح	عرض کانال در سطح آزاد آب	(T)	-
محیط‌ترشده	محیط مقطع در تماس با آب	(P)	-
سطح مقطع جریان	مساحت سطح مقطع جریان	(A)	-
عمق هیدرولیکی	نسبت سطح مقطع به عرض در سطح	(D)	$D = \frac{A}{T}$
شعاع هیدرولیکی	نسبت سطح مقطع به محیط‌ترشده	(R)	$R = \frac{A}{P}$
شیب کف	شیب طولی کف کانال	(S _c)	-
فاکتور سطح		(Z)	$Z = A\sqrt{D}$

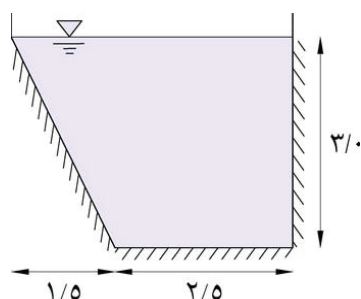
مطابق شکل (۲-۱)، این دو عمق به ترتیب، عموماً با پارامتر d و y قید می‌گردند. در جدول (۲-۱) نیز روابط مربوط به تعیین آن‌ها قید شده است.



شکل ۲-۱. عمق جریان در کانال‌های روباز.

مثال ۱-۱

مشخصات هندسی و هیدرولیکی مقطع کانال در شکل (۳-۱) محاسبه شود.



$$A = 3 \times \frac{2}{5} + \frac{3 \times \frac{1}{5}}{2} = \frac{9}{10} \text{ m}^2$$

$$P = 3 + \frac{2}{5} + \sqrt{\left(\frac{1}{5}\right)^2 + 3^2} = \frac{8}{5} \text{ m}$$

$$T = \frac{2}{5} + \frac{1}{5} = \frac{3}{5} \text{ m}$$

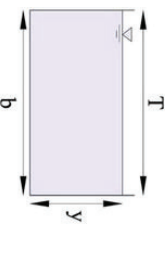
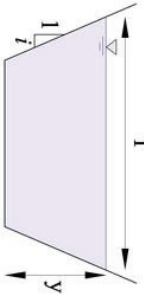
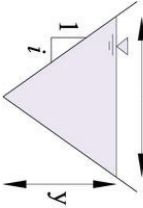
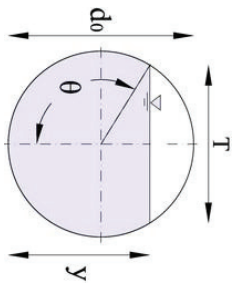
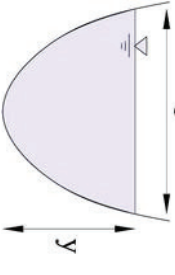
$$R = \frac{A}{P} = \frac{9/10}{8/5} = \frac{9}{16} \text{ m}$$

$$D = \frac{A}{T} = \frac{9/10}{3/5} = \frac{3}{2} \text{ m}$$

شکل ۳-۱. مقطع عرضی کانال، مثال (۱-۱).

$$Z = A \cdot \sqrt{D} = \frac{9}{10} \times \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{15}{23} \text{ m}^{3/2}$$

جدول ۱-۳. مشخصات هندسی مقطع کانال‌های روباز.

نام مقطع	شکل مقطع	سطح مقطع A	پیرامون مرطوب P	شعاع هیدرولیکی R	عرض سطح آزاد T	عمق هیدرولیکی D	فاکتور سطح Z
مستطیل		$b \cdot y$	$b + \gamma y$	$\frac{b \cdot y}{b + \gamma y}$	b	y	$b \cdot y^{1/5}$
ذوزنقه		$(b + i \cdot y) \cdot y$	$b + \gamma y \sqrt{1 + i^2}$	$\frac{(b + i \cdot y) \cdot y}{b + \gamma y \sqrt{1 + i^2}}$	$b + \gamma i \cdot y$	$\frac{(b + i \cdot y) \cdot y}{b + \gamma i \cdot y}$	$\frac{((b + i \cdot y) \cdot y)^{1/5}}{\sqrt{b + \gamma i \cdot y}}$
مثلث		$i \cdot y^2$	$\gamma y \sqrt{1 + i^2}$	$\frac{i \cdot y}{\gamma \sqrt{1 + i^2}}$	$\gamma i \cdot y$	$\frac{\gamma}{\gamma}$	$\frac{\sqrt{\gamma}}{\gamma} i \cdot y^{1/5}$
دایره		$\frac{1}{\lambda} (\gamma \theta - \sin \gamma \theta) \cdot d_0^2$ $\theta = \pi - \arccos \frac{(\gamma y - d_0)}{d_0}$	$\theta \cdot d_0$	$\frac{1}{\xi} \left(1 - \frac{\sin \gamma \theta}{\gamma \theta} \right) \cdot d_0$	$\frac{\sin \theta \cdot d_0}{\gamma}$ $\gamma \sqrt{y \cdot (d_0 - y)}$	$\frac{1}{\lambda} \left(\frac{\gamma \theta - \sin \gamma \theta}{\sin \theta} \right) \cdot d_0$	$\frac{\sqrt{\gamma} (\gamma \theta - \sin \gamma \theta)^{1/5}}{\gamma (\sin \theta)^{1/5}} \cdot d_0^{1/5}$
سه‌می		$\frac{\gamma}{\pi} T \cdot y$	$T + \frac{\lambda \gamma^2}{\pi T}^*$	$\frac{\gamma T^2 \cdot y}{\pi T^2 + \lambda \gamma^2}^*$	$\frac{1}{5} \frac{A}{y}$	$\frac{\gamma}{\pi \gamma}$	$\frac{\gamma}{q} \sqrt{\pi} T \cdot y^{1/5}$

* این مقدار برای $1 \leq \lambda < \infty$ تقریب رضایت بخشی است $(\lambda = \xi \gamma / T)$. وقتی که $\lambda > \infty$ باشد، باید از فرمول دقیق $P = \frac{T}{\gamma} \cdot \left[\sqrt{1 + \lambda^2} + \frac{1}{\lambda} \ln \left(\lambda + \sqrt{1 + \lambda^2} \right) \right]$ استفاده شود.

۵-۱ اعداد بدون بعد، فرود^۱ و رینولدز^۲

اعداد بدون بعد فرود، رینولدز، ماخ، وبر و اولر، هریک بیانگر نسبت نیروها به نیروی اینرسی در واحد حجم هستند و برای تحلیل جریان سیال اهمیت ویژه‌ای دارند. در هر شرایط و حالتی از جریان سیال، معمولاً یک یا چند نیرو به‌عنوان نیروی غالب بر جریان شناخته می‌شوند. برای سیال در شرایط گذر به صورت جریان با سطح آزاد، نیروی ثقل به‌عنوان نیروی غالب است و در مواردی نیز نیروی لزجت^۳ هم به‌عنوان نیروی مؤثر بر الگوی جریان به‌شمار می‌آید. بنابراین با توجه به غالب بودن نیروهای ثقل و نیز ویژگی ناشی از لزجت، به ترتیب اعداد فرود و رینولدز برای جریان‌های با سطح آزاد دارای اهمیت می‌باشند. از این دو عدد بدون بعد برای تشخیص حالت جریان در کانال‌های روباز استفاده می‌شود.

۱-۵-۱ عدد فرود

عدد فرود، Fr ، نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل است و چون نیروی ثقل در جریان‌های با سطح آزاد به‌عنوان نیروی غالب شناخته شده است لذا این عدد بدون بعد در حل مسایل مربوط به جریان در کانال‌های روباز دارای کاربرد فراوانی است. در هر مقطع از کانال، با هر شکل هندسی خاص، عدد فرود به صورت رابطه (۳-۱) تعریف می‌شود.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{g}{\alpha} \cdot D \cdot \cos\theta}} \quad (3-1)$$

V سرعت متوسط جریان، g شتاب ثقل، α ضریب تصحیح سرعت در رابطه انرژی، D عمق هیدرولیکی و θ زاویه کف کانال با افق است. برای θ کمتر از ۶ درجه، کسینوس زاویه تقریباً برابر یک است و برای شرایطی که بتوان ضریب تصحیح سرعت در رابطه انرژی را نیز برابر با یک در نظر گرفت، رابطه تعیین فرود به صورت رابطه (۴-۱) خواهد بود.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (4-1)$$

رابطه (۴-۱) برای هر کانال با شکل مقطع دلخواه برقرار است. تعریف ریاضی عدد فرود برای کانال مستطیلی، با دانستن $D = y$ ، به صورت رابطه (۵-۱) به دست می‌آید.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (5-1)$$

۲-۵-۱ عدد رینولدز

عدد رینولدز، Re ، نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت است و در کانال روباز به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot R}{\mu} = \frac{V \cdot R}{\nu} \quad (6-1)$$

V سرعت متوسط جریان، ρ جرم مخصوص سیال، R شعاع هیدرولیکی، μ لزجت دینامیکی و ν لزجت سینماتیکی سیال است. نیروی لزجت بیشتر در جریان گذری از لوله‌ها و مقاطع تحت فشار، به‌عنوان نیروی غالب مطرح است، بنابراین

1. Froude

2. Reynolds

3. Viscosity

کاربرد این عدد بی‌بعد در حل مسایل جریان‌های تحت فشار پر رنگ‌تر از جریان با سطح آزاد است.

۱-۶ طبقه‌بندی جریان در کانال‌های روباز

سه گونه طبقه‌بندی برای جریان گذری از کانال‌های روباز موردنظر قرار گرفته است. این طبقه‌بندی‌ها براساس تغییر پارامترهای هیدرولیکی برحسب زمان، تغییر پارامترهای هیدرولیکی برحسب مکان و نیز نوع نیروهای غالب بر جریان می‌باشند.

۱-۶-۱ تغییر پارامترهای هیدرولیکی برحسب زمان

چنانچه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی برحسب زمان معیار طبقه‌بندی قرار گیرد، جریان به دو دسته دائمی^۱ و غیردائمی^۲ تقسیم می‌شود.

• جریان دائمی

اگر در مقطع مورد بررسی، مشخصات جریان، یعنی عمق، سرعت، دبی و ... با گذر زمان ثابت باشند، جریان دائمی است. در جریان دائمی روابط $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ و $\frac{\partial y}{\partial t} = 0$ برقرار هستند. جریان گذری در یک کانال، که در هر مقطع عرضی از آن، دبی در طول زمان ثابت باشد نمونه‌ای از این نوع جریان است.

• جریان غیردائمی

اگر مشخصات جریان با گذر زمان تغییر نمایند، جریان غیردائمی است. به عبارت دیگر $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ و $\frac{\partial y}{\partial t} \neq 0$ می‌باشد. مثال این نوع جریان، بروز سیلاب در رودخانه یا آبراهه است. به هنگام وقوع و نیز فروکش سیلاب، جریان غیردائمی در مجرا برقرار می‌گردد.

۱-۶-۲ تغییر پارامترهای هیدرولیکی برحسب مکان

در صورتی که تغییر پارامترهای هیدرولیکی برحسب مکان معیار طبقه‌بندی قرار گیرد، جریان به دو دسته یکنواخت و غیریکنواخت تقسیم می‌گردد.

• جریان یکنواخت^۳

جریانی است که در طول مسیر، مشخصات جریان مانند عمق، سرعت و دبی ثابت هستند. در جریان یکنواخت روابط $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$ و $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$ برقرارند.

• جریان غیریکنواخت^۴

جریانی است که در طول مسیر، مشخصات جریان تغییر می‌نماید. یعنی $\frac{\partial v}{\partial x} \neq 0$ و $\frac{\partial y}{\partial x} \neq 0$ می‌باشد. جریان‌های غیریکنواخت با دبی ثابت، به دو گروه جریان متغیر تدریجی و جریان متغیر سریع تقسیم می‌شوند. جریان متغیر مکانی نیز

1. Steady Flow
2. Unsteady Flow
3. Uniform Flow (Normal Flow)
4. Nonuniform Flow

نوعی جریان غیریکنواخت، اما با دبی متغیر در مسیر، می‌باشد.

• جریان متغیر تدریجی^۱

در صورتی که تغییر عمق در طول جریان غیریکنواخت به صورت تدریجی باشد و یا به عبارتی پایین و یا بالا آمدن سطح آب به آرامی صورت گیرد، جریان از نوع متغیر تدریجی است.

• جریان متغیر سریع^۲

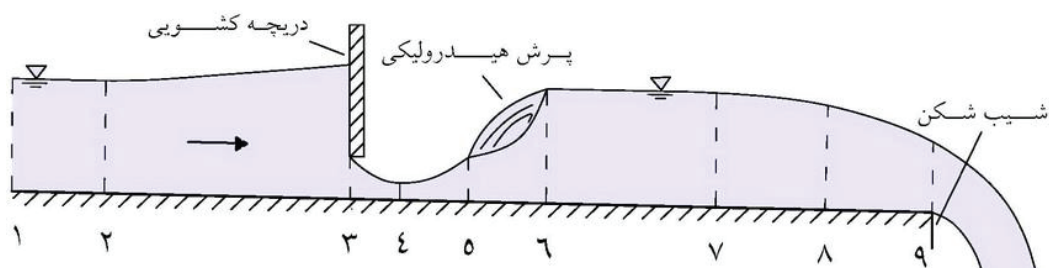
هنگامی که تغییر عمق جریان به طور سریع انجام شود به طوری که پایین افتادگی یا بالا آمدگی سطح آب شدید باشد و لذا در سطح آب انحنای قابل توجهی ایجاد شود، جریان متغیر سریع است.

• جریان متغیر مکانی^۳

جریانی است که در طول مسیر، دبی جریان تغییر می‌نماید. دبی می‌تواند کاهش و یا افزایش یابد.

برای درک بهتر از تعاریف فوق، شکل (۴-۱) در نظر گرفته شود. در این شکل، کانالی نمایش داده شده است که در مسیر آن یک دریچه کشویی^۴ و یک شیب شکن قائم^۵ قرار گرفته است. جریان بین مقاطع ۱ و ۲ یکنواخت، بین مقاطع ۲ و ۳ متغیر تدریجی، بین مقاطع ۳ و ۴ متغیر سریع، بین مقاطع ۴ و ۵ متغیر تدریجی، بین مقاطع ۵ و ۶ پرش هیدرولیکی^۶ رخ داده است و از نوع متغیر سریع، بین مقاطع ۶ و ۷ یکنواخت، بین مقاطع ۷ و ۸ متغیر تدریجی و بین مقاطع ۸ و ۹، یعنی قبل از رسیدن به شیب شکن قائم، متغیر سریع است.

برای جریان متغیر مکانی می‌توان مثال جریان در کانال زهکش حاشیه جاده را عنوان نمود. به هنگام بارندگی، آب در مسیر کانال زهکش دائماً افزوده می‌شود و دبی در آن ازدیاد می‌یابد یعنی جریان متغیر مکانی رخ داده است. یک خصوصیت مهم برای جریان‌های تعریف شده، نوع توزیع فشار در آن‌هاست. برای جریان‌های یکنواخت، این توزیع هیدروستاتیک است. در جریان‌های متغیر تدریجی نیز به سبب انحنای کم در سطح آب، می‌توان با دقت قابل قبولی توزیع فشار را هیدروستاتیک در نظر گرفت اما در جریان‌های متغیر سریع، مؤلفه عمودی سرعت جریان مقدار قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌نماید و همین مؤلفه سبب می‌شود تا توزیع فشار کاملاً غیرهیدروستاتیک باشد.



شکل ۴-۱. نمایش انواع مختلف جریان در کانال روباز.

1. Gratualy Varied Flow
2. Rapidly Varied Flow
3. Spatially Varied Flow
4. Slide Gate
5. Drop
6. Hydraulic Jump

۱-۶-۳ نیروهای غالب بر جریان

از دیدگاه نوع نیروهای غالب بر جریان نیز طبقه‌بندی جریان موردنظر است. برای جریان با سطح آزاد، نیروی ثقل در درجه اول و نیروی لزجت در رتبه دوم، به عنوان نیروهای غالب شناخته می‌شوند. طبقه‌بندی مختلف جریان، تحت تأثیر این دو نیرو، به صورت زیر تشریح می‌شوند.

• نیروی ثقل

در جریان با سطح آزاد نیروی ثقل به عنوان نیروی غالب شناخته می‌شود. عدد فرود، یعنی نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل، شاخصی برای تعیین شرایط مختلف جریان می‌باشد. مخرج کسر در عدد فرود، یعنی $\sqrt{g \cdot D}$ ، سرعت انتقال امواج ثقل (سطحی) در کانال روباز است و سرعت موج خوانده می‌شود. به تعبیری، این عدد برابر نسبت سرعت متوسط آب به سرعت انتقال موج در آب است. با این تعریف، عدد فرود طبقه‌بندی زیر را می‌دهد.

✓ **جریان زیر بحرانی^۱:** برای این جریان، $Fr < 1$ است. در این حالت سرعت سیال کمتر از سرعت امواج سطحی می‌باشد و امواجی که از طریق اغتشاش‌های سطحی در پایین دست جریان ایجاد می‌شوند، به بالادست انتقال می‌یابند. به عبارت دیگر رفتار در هر مقطع از جریان متأثر از رفتار در پایین دست آن است. در جریان زیر بحرانی اثر نیروی ثقل کاملاً بارز و جریان کم سرعت و عمیق می‌باشد.

✓ **جریان فوق بحرانی^۲:** در این جریان، $Fr > 1$ می‌باشد. در این شرایط سرعت سیال بیش از سرعت امواج سطحی است و اغتشاش‌های ناشی از امواج به پایین دست انتقال می‌یابند. به عبارت دیگر رفتار در بالادست کنترل کننده رفتار جریان در هر مقطع خواهد بود. در جریان فوق بحرانی اثر نیروی ثقل اندک، و جریان پرسرعت و کم عمق است.

✓ **جریان بحرانی^۳:** چنانچه $Fr = 1$ باشد جریان بحرانی نامیده می‌شود. جریان بحرانی، مرز بین جریان فوق بحرانی و جریان زیر بحرانی است. این نوع جریان خصوصیتی دارد که در فصول بعدی با آن آشنایی حاصل می‌گردد.

• نیروی لزجت

دومین نیروی غالب در جریان‌های با سطح آزاد، نیروی لزجت است. در جریان با سطح آزاد، تأثیرگذاری این نیرو نسبت به نیروی ثقل کمتر می‌باشد. عدد رینولدز معیاری برای تشخیص تأثیر لزجت و تعیین حالت‌های مختلف جریان قرار داده می‌شود. این حالت‌ها به ترتیبی هستند که می‌آیند.

✓ **جریان آرام^۴:** در این جریان، $Re < 500$ می‌باشد. در جریان آرام حرکت سیال به صورت لایه‌ای یا ورقه‌ای است و هر لایه به آرامی روی لایه مجاور خود می‌لغزد. در این نوع جریان، هر ذره سیال در مسیر مشخصی حرکت می‌کند و تداخلی بین مسیر طی شده توسط ذرات وجود ندارد. در جریان آرام نیروی لزجت نسبت به اینرسی اهمیت بیشتری دارد. وقوع جریان آرام در طبیعت اندک است و آن را می‌توان تحت شرایط خاص به وجود آورد.

1. Subcritical Flow
2. Supercritical Flow
3. Critical Flow
4. Laminar Flow