جمهوری اسلامی ایران

راهنمای طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب

نشریه شماره ۴۳۶

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور
معاونت نظارت راهبردی
دفتر نظام فنی اجرایی
http://tec.mporg.ir

وزارت نیرو
دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا
http://seso.moe.org.ir

جمهوری اسلامی ایران
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

راهنمای طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب

نشریه شماره ۴۳۶

معاونت نظارت راهبردی
دفتر نظام فنی اجرایی
http://tec.mporg.ir

وزارت نیرو
دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا
htt://seso.moe.org.ir

انتشارات معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور ۸۸/۰۰/۵۴

۱۳۸۸

فهرست‌برگه

ایران. ریاست جمهوری. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی. دفتر نظام فنی اجرایی

راهنمای طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب/ معاونت نظارت راهبردی، دفتر نظام فنی اجرایی؛ وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا.- تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، مرکز داده‌ورزی و اطلاع‌رسانی، ۱۳۸۸.

ح، [۱۹۷]ص.: جدول، نمودار، مصور.- (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. دفتر نظام فنی اجرایی؛ نشریه شماره ۴۳۶) (انتشارات معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور؛ ۸۸/۰۰/۵۴)

ISBN 978-964-179-131-7

مربوط به بخشنامه شماره ۱۰۰/۷۸۷۵۰ مورخ ۱۳۸۷/۸/۲۵

کتابنامه: ص. ۱۹۶-۱۹۷

۱. آب- تصفیه‌خانه‌ها- استانداردها. ۲. آب- نوسانها- استانداردها. ۳. آب- تصفیه- استانداردها. ۴. آب- مهندسی. الف. ایران. وزارت نیرو. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا. ب. ایران. ریاست جمهوری. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی. مرکز داده‌ورزی و اطلاع‌رسانی. ج. عنوان. د. فروست

۱۳۸۸ ش. ۴۳۶ ۸۸الف/ TA ۳۶۸

شابک ۷-۱۳۱-۱۷۹-۹۶۴-۹۷۸ ISBN 978-964-179-131-7

راهنمای طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب

ناشر: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، مرکز داده‌ورزی و اطلاع‌رسانی

چاپ اول: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۳۲۰۰۰ ریال

تاریخ انتشار: سال ۱۳۸۸

لیتوگرافی، چاپ و صحافی:

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.

بسمه تعالی

ریاست جمهوری
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	**شماره:**	۱۰۰/۷۸۷۵۰
	تاریخ:	۱۳۸۷/۸/۲۵

موضوع:
راهنمای طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی، موضوع ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ٤٢٣٣٩/ت ٣٣٤٩٧هـ، مورخ ١٣٨٥/٤/٢٠ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۴۳۶ دفتر نظام فنی اجرایی، با عنوان «راهنمای طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده کنند و در صورتی که روش‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنمای بهتری در اختیار داشته باشند، رعایت مفاد این بخشنامه الزامی نیست.

عوامل یاد شده باید نسخه‌ای از دستورالعمل‌ها، روش‌ها یا راهنماهای جایگزین را به دفتر نظام فنی اجرایی ارسال کنند.

امیرمنصور برقعی
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

484013

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- *شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.*

۲- *ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.*

۳- *در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.*

٤- *نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.*

کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی‌علی‌شاه، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱، دفتر نظام فنی اجرایی

Email: tsb.dta@mporg.ir **web: http://tec.mporg.ir/**

بسمه تعالی

پیشگفتار

طبق نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ ت ۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل پیدایش، مطالعات توجیهی، طراحی پایه و تفصیلی، اجرا، راه‌اندازی، تحویل و شروع بهره‌برداری طرح‌ها و پروژه‌های سرمایه‌گذاری به لحاظ رعایت جنبه‌های توجیه فنی و اقتصادی طرح‌ها، تامین کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و کاهش هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیت ویژه برخوردار می‌باشد.

باتوجه به مراتب یاد شده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب وزارت نیرو (طرح تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای صنعت آب کشور) با همکاری معاونت نظارت راهبردی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی (دفتر نظام فنی اجرایی) به استناد آیین‌نامه اجرایی طرح‌های عمرانی، موضوع ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصص‌ها و تجربه‌های کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی؛
- استفاده از منابع و ماخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی؛
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت؛
- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور؛
- توجه به اصول و موازین مورد عمل موسسه استانداردها و تحقیقات صنعتی ایران و سایر موسسات تهیه‌کننده استاندارد.

هدف از تهیه‌ی نشریه‌ی حاضر، بررسی هیدرولیک تصفیه‌خانه‌های آب می‌باشد تا با ارایه‌ی روند محاسبات مربوط به تغییرات سطح آب در مسیر جریان و ترسیم نیمرخ هیدرولیکی این واحدها به صورت ساده و کاربردی گامی در جهت اشاعه‌ی روش‌های کاراتر و ایجاد وحدت رویه در طراحی پروژه‌های ملی باشد.

ضمن تشکر از کارشناسان محترم برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با به کارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیت‌های کشور تلاش نموده و صاحبنظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند. با همه‌ی تلاش انجام‌شده قطعا هنوز کاستی‌هایی در متن موجود است که إن‌شاءا... کاربرد عملی و در سطح وسیع این نشریه توسط مهندسان موجبات شناسایی و برطرف نمودن آن‌ها را فراهم خواهد نمود.

در پایان، از تلاش و جدیت مدیرکل محترم دفتر نظام فنی اجرایی، سرکار خانم مهندس بهناز پورسید، نماینده‌ی مجری محترم طرح تهیه‌ی ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است شاهد توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران در خدمت به مردم شریف ایران اسلامی باشیم.

معاون نظارت راهبردی

۱۳۸۷

ترکیب اعضای تهیه کننده، کمیته و ناظران تخصصی

این پیش‌نویس استاندارد در معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف توسط افراد زیر تهیه شده است.

آقای سید محمود برقعی	دانشگاه صنعتی شریف	دکترای هیدرولیک
آقای سید مهدی برقعی	دانشگاه صنعتی شریف	دکترای مهندسی آب و فاضلاب
آقای امیر تائبی	سازمان حفاظت محیط زیست اصفهان	دکترای محیط زیست
آقای مسعود تجریشی	دانشگاه صنعتی شریف	دکترای محیط زیست
آقای محمدرضا فدایی تهرانی	دانشگاه صنعتی شریف	کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی

گروه نظارت که مسوولیت نظارت تخصصی بر تدوین این پیش‌نویس استاندارد را برعهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

آقای علیرضا تولایی	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس راه و ساختمان
خانم مینا زمانی	دفتر استانداردها و معیارهای فنی	لیسانس مهندسی شیمی
آقای باقر کریمی	شرکت عمرآب	لیسانس مهندسی شیمی

اعضای کمیته تخصصی آب و فاضلاب دفتر استانداردها و معیارهای فنی که بررسی و تایید پیش‌نویس حاضر را به عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

آقای فرخ افرا	شرکت مهندسین مشاور سختاب	فوق‌لیسانس راه و ساختمان
آقای نعمتا... الهی‌پناه	شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور	فوق‌لیسانس هیدرولوژی
آقای ابوالقاسم توتونچی	شرکت مهندسین مشاور ایراناب	فوق‌لیسانس راه و ساختمان
آقای علیرضا تولایی	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس راه و ساختمان
آقای عباس حاج‌حریری	شرکت آب و فاضلاب استان تهران	فوق‌لیسانس مدیریت صنایع
خانم مینا زمانی	دفتر استانداردها و معیارهای فنی	لیسانس مهندسی شیمی
آقای جلال‌الدین شایگان	دانشگاه صنعتی شریف	دکترای مهندسی بیوشیمی
آقای علی‌اکبر هوشمند	شرکت تهران میراب	لیسانس مهندسی مکانیک

کارشناسان معاونت نظارت راهبردی:

آقای علیرضا دولتشاهی	دفتر نظام فنی اجرایی	لیسانس مهندسی کشاورزی
خانم فرزانه آقارمضانعلی	دفتر نظام فنی اجرایی	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
خانم شهرزاد روشن‌خواه	دفتر نظام فنی اجرایی	کارشناس ارشد مهندسی عمران

ضمنا از آقای مهندس حسین شفیعی‌فر که با بازخوانی و ارایه نظرات مفید خود، در تهیه و تدوین این راهنما همکاری نموده‌اند، قدردانی می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
فصل اول- هدف ودامنه کاربرد	۳
۱-۱- هدف	۵
۱-۲ دامنه کاربرد	۵
فصل دوم- آشنایی با فرایندهای تصفیه آب شهری	۷
۲-۱- کلیات	۹
۲-۲- منابع تامین آب	۹
۲-۳- استانداردهای کیفی آب آشامیدنی	۹
۲-۴- روش‌های تصفیه آب شرب	۱۰
۲-۵- جمع آوری، بازیافت و دفع لجن	۱۰
فصل سوم- مبانی هیدرولیکی	۱۳
۳-۱- کلیات	۱۵
۳-۲- انواع جریان	۱۵
۳-۳- بررسی افت ارتفاع جریان در مجاری تحت فشار یا لوله	۱۵
۳-۴- نکات هیدرولیکی مهم در طراحی مجاری تحت فشار	۱۹
۳-۵- جریان در کانال‌های باز	۲۰
۳-۵- سیستم‌های توزیع جریان	۳۲
فصل چهارم- هیدرولیک لجن	۳۷
۴-۱- کلیات	۳۹
۴-۲- خطوط انتقال لجن	۳۹
۴-۳- افت ارتفاع اصطکاکی در رژیم جریان لایه‌ای	۳۹
۴-۴- افت‌های اصطکاکی در شرایط جریان آشفته	۴۰
۴-۵- روش‌های متداول محاسبه افت ارتفاع	۴۱
۴-۶- افت‌های موضعی در خطوط انتقال لجن	۴۳
فصل پنجم- هیدرولیک سازه‌ها	۴۵
۵-۱- کلیات	۴۷
۵-۲- سرریز	۴۷
۵-۳- دریچه	۵۰

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۵-۳- آبرو ۵۳
فصل ششم- هیدرولیک تلمبه‌ها ۵۷
۶-۱- کلیات ۵۹
۶-۲- مبانی هیدرولیکی ۵۹
۶-۳- انواع تلمبه‌ها و کاربرد آن‌ها ۶۲
۶-۴- طراحی ایستگاه تلمبه‌زنی ۶۳
۶-۵- تلمبه لجن ۶۵
فصل هفتم- اندازه گیری جریان ۶۷
۷-۱- کلیات ۶۹
۷-۲- اندازه‌گیری جریان در مجاری تحت فشار ۷۰
۷-۳- اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز ۷۲
۷-۴- ناودان پارشال ۷۳
۷-۵- انواع ناودان پارشال ۷۶
۷-۶- محاسبه بده جریان در حالت جریان آزاد ۷۶
۷-۷- محاسبه بده جریان در حالت جریان مستغرق ۷۷
۷-۸- محاسبه افت ارتفاع در ناودان پارشال ۷۷
۷-۹- اندازه‌گیری جریان به کمک سایر انواع ناودان ۷۷
۷-۱۰- اندازه‌گیری جریان به کمک سرریز لبه تیز ۷۷
فصل هشتم- عملیات پیش تصفیه ۸۱
۸-۱- کلیات ۸۳
۸-۲- تاسیسات برداشت آب خام ۸۳
۸-۳- آشغال‌گیری ۸۳
۸-۴- هوادهی ۸۹
۸-۵- پیش رسوب گیری (پیش ته‌نشینی) ۹۲
فصل نهم- انعقاد و لخته سازی ۹۵
۹-۱- کلیات ۹۷
۹-۲- اختلاط سریع ۹۷
۹-۳- گرادیان سرعت در واحد اختلاط سریع ۹۸

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۹-۴- زمان ماند در حوض‌های اختلاط سریع	۹۹
۹-۵- هندسه حوض اختلاط سریع	۹۹
۹-۶- لخته‌سازی	۱۰۱
۹-۷- انواع روش‌های لخته‌سازی	۱۰۲
۹-۸- گرادیان سرعت در واحد لخته‌سازی	۱۰۲
۹-۹- زمان ماند در حوض لخته‌سازی	۱۰۳
۹-۱۰- هندسه حوض لخته‌سازی	۱۰۳
فصل دهم- ته‌نشینی	۱۰۵
۱۰-۱- کلیات	۱۰۷
۱۰-۲- قوانین حاکم بر ته‌نشینی	۱۰۷
۱۰-۳- متغیرهای طراحی	۱۰۹
۱۰-۴- سازه ورودی و خروجی	۱۱۴
۱۰-۵- رژیم جریان	۱۱۵
فصل یازدهم- صاف سازی	۱۱۷
۱۱-۱- کلیات	۱۱۹
۱۱-۲- انواع صافی	۱۱۹
۱۱-۳- اجزای تشکیل دهنده صافی	۱۲۲
۱۱-۴- روش‌های کنترل جریان در صافی	۱۲۴
۱۱-۵- هیدرولیک صافی	۱۲۷
۱۱-۶- ابزارهای سنجش افت ارتفاع	۱۳۰
۱۱-۷- اندازه‌گیری جریان	۱۳۰
۱۱-۸- شستشوی صافی	۱۳۰
۱۱-۹- جمع‌آوری آب شستشو	۱۳۳
فصل دوازدهم- هیدرولیک سایر سازه‌ها	۱۳۵
۱۲-۱- کلیات	۱۳۷
۱۲-۲- کنترل رنگ، بو و مزه	۱۳۷
۱۲-۳- گندزدایی و فلوئور زنی	۱۳۷
۱۲-۴- جمع‌آوری و پردازش لجن	۱۴۱

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل سیزدهم- انتخاب محل و جانمایی واحدها	۱۳۹
۱۳-۱- کلیات	۱۴۷
۱۳-۲- انتخاب محل تصفیه‌خانه	۱۴۷
۱۳-۳- موقعیت تصفیه‌خانه به لحاظ منبع تامین آب خام	۱۴۷
۱۳-۴- عوامل هیدرولیکی	۱۴۹
۱۳-۵- جانمایی واحدهای تصفیه‌خانه	۱۵۰
۱۳-۶- مجاری ارتباطی بین واحدها	۱۵۱
فصل چهاردهم- نیمرخ هیدرولیکی	۱۵۳
۱۴-۱- کلیات	۱۵۵
۱۴-۲- تعیین نیمرخ هیدرولیکی	۱۵۵
۱۴-۳- اصول و نکات مهم	۱۵۵
۱۴-۴- اطلاعات اولیه	۱۵۷
پیوست الف – جداول و نمودارهای تعیین ضریب افت موضعی در مجاری باز و تحت فشار	۱۵۹
پیوست ب – مثال طراحی	۱۷۱
۱- واحد اختلاط و لخته سازی	۱۷۳
۲ – واحد ته نشینی	۱۸۷
۳- واحد صاف سازی	۲۰۱
۴- واحد گندزدایی	۲۱۶
۵- رسم نیمرخ جریان در طول تصفیه خانه	۲۲۱
منابع و مراجع	۲۲۵

مقدمه

در طراحی تصفیه‌خانه‌های آب همچون سایر سازه‌های آبی توجه به هیدرولیک جریان از اهمیت زیادی برخوردار است. منظور از طراحی هیدرولیکی مشخص نمودن سطح آب در هر واحد و تعیین افت ارتفاع در مسیر جریان و در نهایت رسم نیمرخ طولی سطح[1] آب می‌باشد. در طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه‌های آب افت ارتفاع از اهمیت زیادی برخوردار است و همواره سعی بر محاسبه صحیح و کمینه‌کردن این متغیر می‌باشد. افت ارتفاع در هر واحد، شامل بخش‌های افت ارتفاع در سازه ورودی، افت ارتفاع در سازه خروجی و افت ارتفاع در داخل واحد می‌باشد. هریک از این بخش‌ها خود می‌تواند مجموع چند افت دیگر باشد. در این راهنما ضمن بیان شکل‌های متداول برای سازه ورودی و خروجی در مورد هر واحد، نحوه محاسبه افت ارتفاع بررسی می‌شود.

ساختار کلی این راهنما مشتمل بر چهارده فصل است که مطالب اصلی از فصل‌دوم آغاز می‌گردد. در فصل دوم اشاره به مبانی فرایندی و معرفی واحدهای متداول در تصفیه‌خانه آب شهری آمده است. از فصل چهارم به بعد روابط کاربردی طراحی سازه‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه آب نظیر سرریز، دریچه و آبرو و در ادامه هیدرولیک جریان لجن آمده است. سپس تلمبه‌خانه‌های آب، در حد مورد نیاز تصفیه‌خانه آب و روش‌های مختلف اندازه‌گیری بده آب در مجاری باز و بسته بررسی شده است.

در فصل‌های هشتم تا دوازدهم هیدرولیک واحدهای اصلی تصفیه آب شامل پیش‌تصفیه، انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و صاف‌سازی و غیره مورد بررسی قرار گرفته و نحوه محاسبه افت ارتفاع و رسم نیمرخ طولی سطح آب در آن‌ها، ارایه می‌شود. همچنین فصل سیزدهم این راهنما به نکات هیدرولیکی موثر در تعیین جانمایی واحدها و فصل چهاردهم نیز به ترسیم نیمرخ هیدرولیکی اختصاص دارد. در پیوست این نشریه نیز یک مثال طراحی جهت تعیین عمق جریان در هر واحد و رسم نیمرخ هیدرولیکی در یک تصفیه‌خانه آب با اعداد واقعی آمده است.

در بیان روابط هیدرولیکی سعی بر این بوده تا از روابطی استفاده شود که علاوه بر دقت بالا و عمومیت کاربرد، تا حد امکان ساده و قابل استفاده باشد و اغلب با ارایه منحنی از بیان روابط پیچیده پرهیز شده است. روابط مورد استفاده در این راهنما بر اساس سیستم ابعاد SI[2] می‌باشد و لازم است در استفاده از این روابط کمیات را با ابعاد مناسب بکار برد.

در تهیه این راهنما سعی گردیده تا از تکرار مباحث مشابهی که در سایر نشریات مورد تایید دفتر استاندارد وزارت نیرو وجود دارد، پرهیز شود و در قسمت‌های مرتبط در صورت نیاز به این نشریات ارجاع شده است. به علاوه چون هدف از تهیه این راهنما، بررسی هیدرولیک تصفیه‌خانه‌های آب و در نهایت محاسبه افت ارتفاع و ترسیم نیمرخ هیدرولیکی است، لذا به موضوعاتی نظیر طراحی فرایندی واحدها و یا مسایل سازه‌ای پرداخته نشده است. بنابراین در این نوشتار تنها متغیرهای هیدرولیکی جریان و تعیین افت ارتفاع مورد توجه می‌باشد و سایر موارد به عنوان مفروضات مساله در نظر گرفته می‌شود و علاقه‌مندان می‌توانند در این زمینه‌ها به مراجع مرتبط رجوع نمایند.

1 - Hydraulic profile
2 - System of International

فصل ۱

هدف و دامنه کاربرد

۱-۱- هدف

هدف از تهیه این نشریه هیدرولیک جریان در تک‌تک واحدهای تصفیه‌خانه آب می‌باشد که شامل بررسی سرعت، ظرفیت و نهایتا افت در هر واحد و تعیین نیمرخ سطح آب است.

۱-۲- دامنه کاربرد

دامنه کار در این راهنما بررسی هیدرولیک جریان از ابتدای ورود آب به تصفیه‌خانه (واحد آشغال‌گیر) تا انتهای آن (واحد گندزدایی) می‌باشد.

فصل ۲

آشنایی با فرآیندهای تصفیه آب شهری

۲-۱- کلیات

مهم‌ترین هدف از تصفیه آب شرب، در کنار زدودن عوامل بیماری‌زا (به طوری‌که مصرف آن برای انسان بی‌خطر گردد)، بهبود آب از نظر رنگ، بو، مزه و کدورت در حدی که مورد قبول استانداردهای مربوط باشد، است. در جوامع بشری تصفیه آب وقتی مطرح می‌شود که کیفیت فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیکی آب خام برای آشامیدن مناسب نبوده و لازم باشد با انجام عملیاتی، کیفیت آب به حد مورد نظر برسد. کیفیت آب خام اولیه و میزان تصفیه مورد نیاز، تعیین‌کننده نوع واحدها و فرایندهایی هستند که باید برای تصفیه‌خانه آب تدارک دیده شوند. از طرفی کمیت یا بده جریان آب خام هم می‌تواند در فرایند تاثیر گذاشته و هم تعیین‌کننده اندازه واحدها و تراز سطح آب در قسمت‌های مختلف باشد. در این فصل فرایندها و واحدهای تصفیه آب شرب معرفی می‌شوند. برای آشنایی با شرح کامل این فرایندها به مراجع [۱]، [۱۰]، [۱۱] و [۱۷] رجوع شود.

۲-۲- منابع تامین آب

در اغلب کشورهای جهان از آب‌های سطحی و زیرزمینی به عنوان منبع تامین آب برای مصارف عمومی استفاده می‌کنند. متداول‌ترین منابع آب سطحی شامل رودخانه‌ها، دریاچه‌های طبیعی و مصنوعی می‌باشند. به‌طور کلی، کیفیت آب‌های زیرزمینی بهتر از آب‌های سطحی بوده و در طی سال تقریبا یکنواخت است و عمل تصفیه آن نیز آسان‌تر می‌باشد. در بعضی از آب‌های زیرزمینی، غلظت مواد جامد محلول از جمله کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز، سولفات و کلراید زیاد است. حذف این مواد غالبا دشوار و نیاز به عملیات خاص و پرهزینه دارد. اخیرا، با توجه به گسترش آلودگی‌ها و نشت آن‌ها به لایه‌های مختلف خاک استفاده از آب‌های زیرزمینی به تصفیه بیش‌تری نیاز پیدا کرده است.

کیفیت آب‌های سطحی در طول سال دارای تغییرات بیش‌تری نسبت به آب‌های زیرزمینی است و از این‌رو تصفیه‌خانه‌های مربوط به آب‌های سطحی نیازمند قابلیت بیش‌تری نسبت به آب‌های زیرزمینی می‌باشند. آب‌های سطحی معمولا فراوان‌تر از آب‌های زیرزمینی بوده و اغلب شهرهای بزرگ جهان، از آب‌های سطحی به عنوان منبع اصلی تامین آب شرب استفاده می‌کنند.

۲-۳- استانداردهای کیفی آب آشامیدنی

در مورد آب آشامیدنی استانداردهای ملی، منطقه‌ای (مانند استاندارد جامعه اروپا) و بین‌المللی وجود دارد. استاندارد بین‌المللی متداول در مورد کنترل کیفی آب، استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO)[1] است که نسبت به استاندارد جامعه اروپا و ایالات متحده آمریکا، آسان‌تر و برای بیش‌تر کشورها کاربردی‌تر است. در ایران نیز به منظور کنترل کیفی آب آشامیدنی از استاندارد نشریه شماره ۳-۱۱۶ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور استفاده می‌شود.

1 - World Health Organization

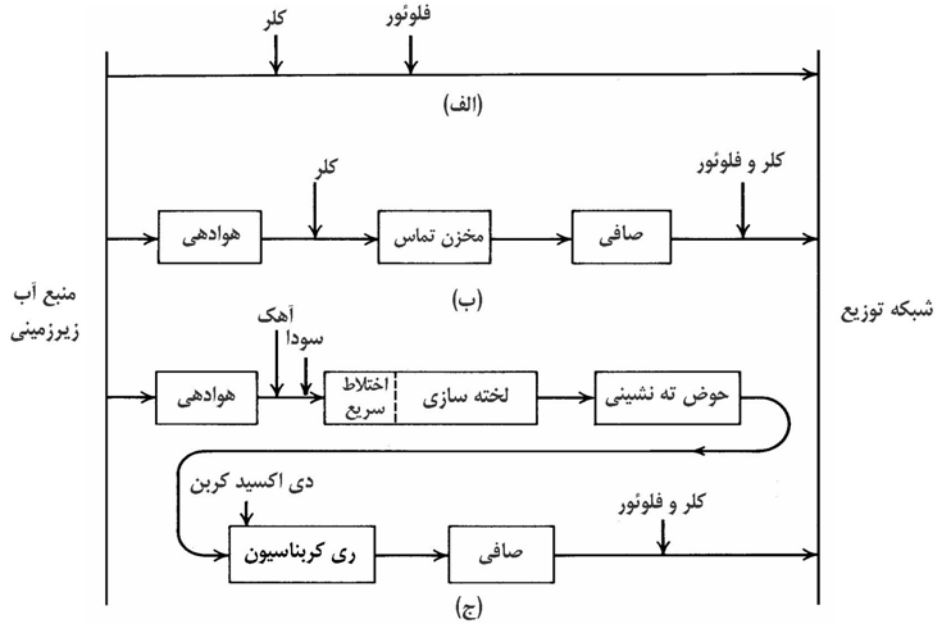
۲-٤- روش‌های تصفیه آب شرب

انتخاب فرایندهای تصفیه و طراحی واحدهای مورد نیاز بستگی کامل به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها و ارزیابی طبیعت و کیفیت آب خام و کیفیت مورد نظر برای آب تصفیه شده، دارد. به‌علاوه، لازم است شرایط محلی و امکانات اجرایی، بهره‌برداری و نگهداری موجود در منطقه در کنار سایر مسایل در نظر گرفته شود. ولی به‌طور کلی آب‌های سطحی نسبت به آب‌های زیرزمینی به عملیات تصفیه بیش‌تری نیاز دارند. آب‌های زیر زمینی حتی اگر عاری از هرگونه آلودگی میکروبی باشند، لازم است به منظور حفظ شبکه توزیع و رعایت سلامت جامعه، گندزدایی شوند. اگرچه برخی از آن‌ها به تصفیه بیش‌تری نیاز دارند تا سختی آن‌ها کاهش یافته و آهن و سایر ترکیبات که باعث ایجاد لکه، طعم، بو و رنگ می‌شوند، از آب خارج شوند. آب‌های سطحی معمولا علاوه بر ارگانیسم‌های بیماری‌زا حاوی کدورت، موجودات آبزی مانند جلبک‌ها و مقادیر جزیی از سایر آلاینده‌ها هستند که باید با روش صحیح و مناسب از آب خارج شوند.

فرایندهای اصلی تصفیه آب شامل مراحل انعقاد و لخته‌سازی، ته‌نشینی، صاف‌کردن و گندزدایی است و با توجه به عمومیت کاربرد این واحدها در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های آب، تحت عنوان واحدهای تصفیه متعارف مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین برای کاهش میزان ناخالصی‌ها و یا تعدیل مشخصات نامطلوب آب قبل از رسیدن به تصفیه‌خانه مجموعه عملیاتی تحت عنوان پیش تصفیه یا تصفیه مقدماتی بر روی آن انجام می‌گیرد. تصفیه مقدماتی شامل واحدهای آشغال‌گیری، پیش رسوب‌گیری و پیش کلرزنی است و می‌تواند در محل تامین آب و یا در ورودی آب به تصفیه‌خانه قرار گیرد. به‌علاوه چنانچه در تصفیه آب نیاز به دستیابی به درصدهای بالای تصفیه و یا حذف برخی ناخالصی‌های خاص از آب باشد از مجموعه عملیاتی تحت عنوان تصفیه پیشرفته آب استفاده می‌شود. در شکل (۲-۱) واحدهای متداول در تصفیه آب‌های زیرزمینی و در شکل (۲-۲) واحدهای متداول در تصفیه آب‌های سطحی به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.

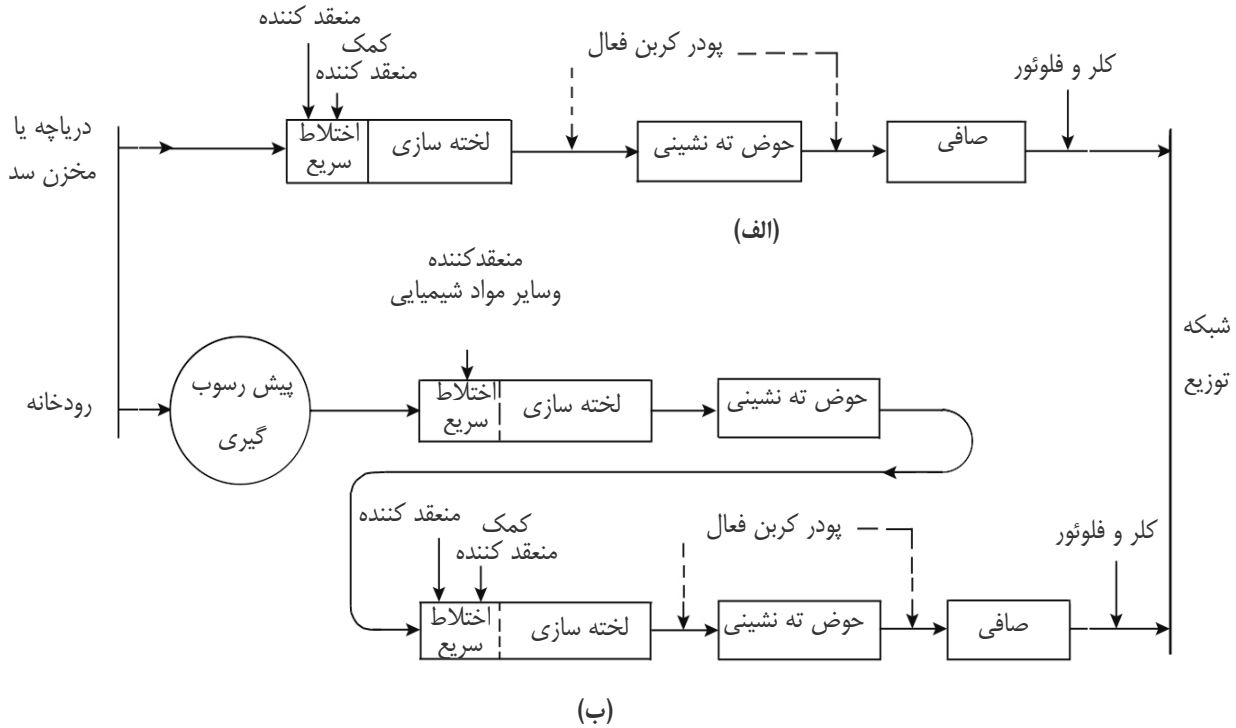
۲-۵- جمع آوری، بازیافت و دفع لجن

در تصفیه‌خانه‌های آب، لجن تولید شده ناشی از عمل ته‌نشینی، سختی‌گیری و شستشوی صافی‌ها می‌باشد. در گذشته لجن ته‌نشینی و آب شستشوی صافی به منابع آب نظیر رودخانه‌ها یا دریاچه‌ها تخلیه می‌شد. گرایش کنونی در جهت پردازش لجن ته‌نشینی به منظور دفع نهایی و نگه‌داشتن آب شستشوی صافی‌ها در داخل مخازن و برگشت تدریجی آن به ابتدای تصفیه‌خانه می‌باشد. مواد منعقدکننده نظیر نمک آلومینیم و آهن یک لجن ژلاتینی به‌وجود می‌آورند که آبگیری از این لجن بسیار دشوار است. این لجن ژلاتینی را می‌توان به شبکه جمع‌آوری فاضلاب بهداشتی تخلیه نمود. معمولا عمل تخلیه لجن به فاضلاب‌رو در طول شب که بده فاضلاب نسبتاً کم است، انجام می‌گیرد. لجن حاصل از سختی‌گیری با آهک را نباید به این روش دفع نمود، زیرا مقدار آن‌ها زیاد است و می‌تواند هاضم‌های هضم لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را به سرعت پر کند و همچنین باعث تولید رسوباتی درسرریزها، کانال‌ها، لوله‌ها و نظایر آن شود. واحدهای متداول برای پردازش لجن در تصفیه‌خانه‌های آب شامل لخته‌سازی و ته‌نشینی مجدد، تغلیظ و آبگیری مکانیکی می‌باشد. در شکل (۲-۳) مراحل مختلف پردازش لجن در تصفیه‌خانه آب شهری نشان داده شده است.

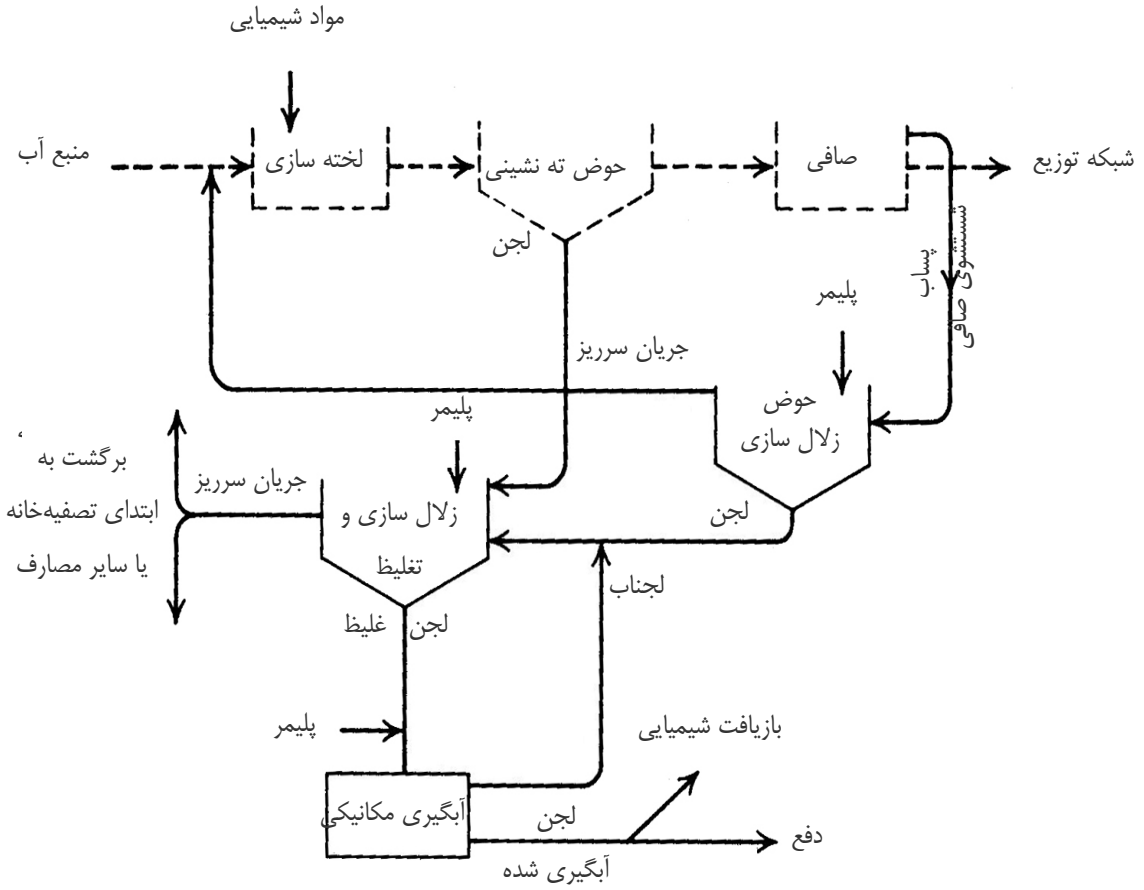


شکل ۲-۱- فرایندهای متداول در تصفیه آب‌های زیرزمینی، (الف) گندزدایی و فلوئورزنی، (ب) حذف آهن و منگنز، (ج) سختی‌گیری [۲۳]

در صورت نیاز به اطلاعات بیش‌تر در مورد ضوابط و معیارهای بکارگیری هر یک از واحدهای موجود در تصفیه‌خانه آب شهری به نشریات و استانداردهای موجود در این زمینه مراجعه شود.



شکل ۲-۲- فرایندهای متداول در تصفیه آب‌های سطح، (الف) آب‌های سطحی ساکن، (ب) آب‌های سطحی جاری [۲۳]



شکل۲-۳- مراحل مختلف جمع آوری، تغلیظ، پردازش و دفع لجن در تصفیه‌خانه آب شهری

فصل ۳

مبانی هیدرولیکی

۳-۱- کلیات

در این فصل معادلات جریان در مجاری تحت فشار و آزاد در حالت‌های مختلفی که در هیدرولیک تصفیه‌خانه آب وجود دارد ارایه می‌گردد. برای مطالعه بیش‌تر به "ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زهکشی: هیدرولیک کانال‌ها"، نشریه شماره ۱۰۴ و "هیدرولیک لوله‌ها و مجاری" نشریه شماره ۱۰۵، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و یا سایر کتب مرجع مراجعه شود.

۳-۲- انواع جریان

جریان دایم یا ماندگار (بده ثابت با زمان) و یکنواخت (مقطع ثابت جریان، در مجاری باز یا تحت فشار)، مبنای طراحی حرکت جریان در مجاری می‌باشند. همچنین جریان‌های غیریکنواخت و متغیر مکانی در مجاری باز در تصفیه‌خانه‌های آب زیاد اتفاق می‌افتد که در این بخش روابط آن‌ها ارایه شده است.

۳-۳- بررسی افت ارتفاع جریان در مجاری تحت فشار یا لوله

برای محاسبه افت ارتفاع در مجاری تحت فشار، روابط متنوعی ارایه شده است که در این استاندارد با توجه به عمومیت کاربرد و دقت قابل قبول، روابط دارسی- وایسباخ و هیزن- ویلیامز برای محاسبه افت ارتفاع معرفی می‌شوند.

۳-۳-۱- رابطه دارسی- وایسباخ

یکی از معمول‌ترین روابط برای تعیین افت ارتفاع در اثر وجود اصطکاک در لوله، رابطه معروف دارسی- وایسباخ می‌باشد. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h_f = f\frac{L}{d}\times\frac{V^2}{2g} \qquad (۱-۳)$$

در رابطه (۳-۱) h_f افت ارتفاع یا افت خط تراز هیدرولیکی (واحد طول) در لوله با طول L، قطر d و سرعت متوسط V است. ضریب اصطکاک f بدون بعد بوده و به سرعت، قطر لوله، جرم مخصوص (ρ)، لزجت (μ)، و مشخصه‌های زبری سطح جدار لوله، که با زبری معادل یا ε مشخص می‌شود، وابستگی دارد. کلبروک[1] آنرا به‌صورت زیر ارایه داده است [۱۵]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869\times\ln\left(\frac{\varepsilon/d}{3.7}+\frac{2.523}{N_{Re}\sqrt{f}}\right) \qquad (۲-۳)$$

که در آن N_{Re} عدد رینولدز جریان و $\frac{\varepsilon}{d}$ زبری نسبی لوله می‌باشد.

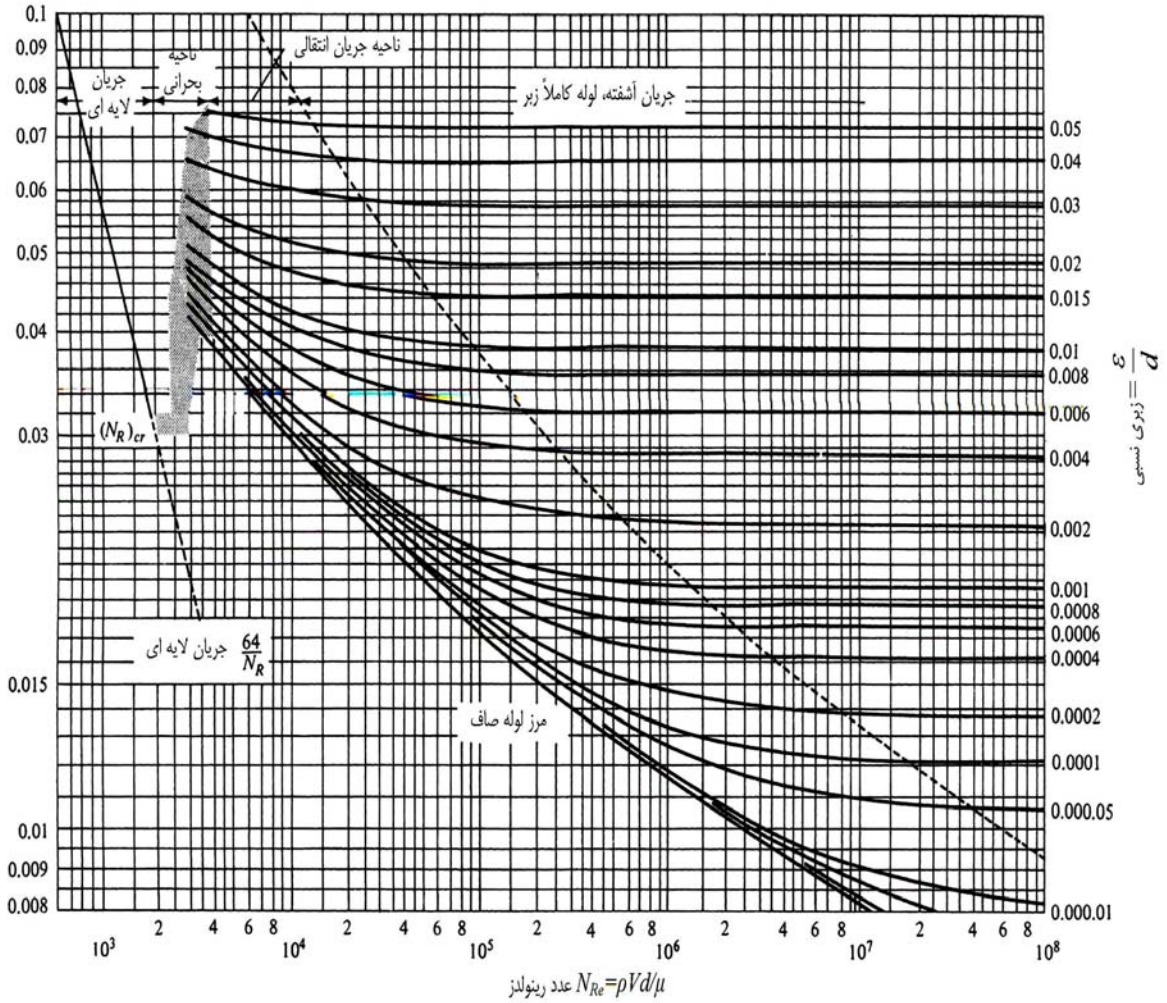
مودی[2] یکی از رایج‌ترین نمودارها جهت تعیین ضریب اصطکاک در لوله‌های صنعتی را تهیه کرده که کاربرد و عمومیت زیادی یافته است (شکل ۳-۱[3]). این نمودار ضریب اصطکاک f را به صورت تابعی از زبری نسبی و عدد رینولدز مشخص می‌سازد.

برای جریان لایه‌ای در لوله‌ها، f فقط تابعی از عدد رینولدز بوده و به صورت زیر ساده می‌شود:

---

1 - Colebrook
2 - Moody
3 - From Moody, L.F. (1944) Friction factors for pipe flow, Transactions American Society of Civil Engineers Vol.66, p.671

$$f = \frac{64}{N_{Re}} \qquad (۳-۳)$$



شکل ۳-۱- نمودار مودی برای محاسبه ضریب افت در رابطه دارسی- و ایسباخ

همچنین در محدوده $4000 < N_{Re} < 10^7$ و $\frac{\varepsilon}{d} < 0.01$ می‌توان از رابطه مودی برای به‌دست آوردن ضریب اصطکاک f به‌صورت زیر استفاده نمود.

$$f = 0.001375 \times [1 + (20000\frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{N_{Re}})^{\frac{1}{3}}] \qquad (۴-۳)$$

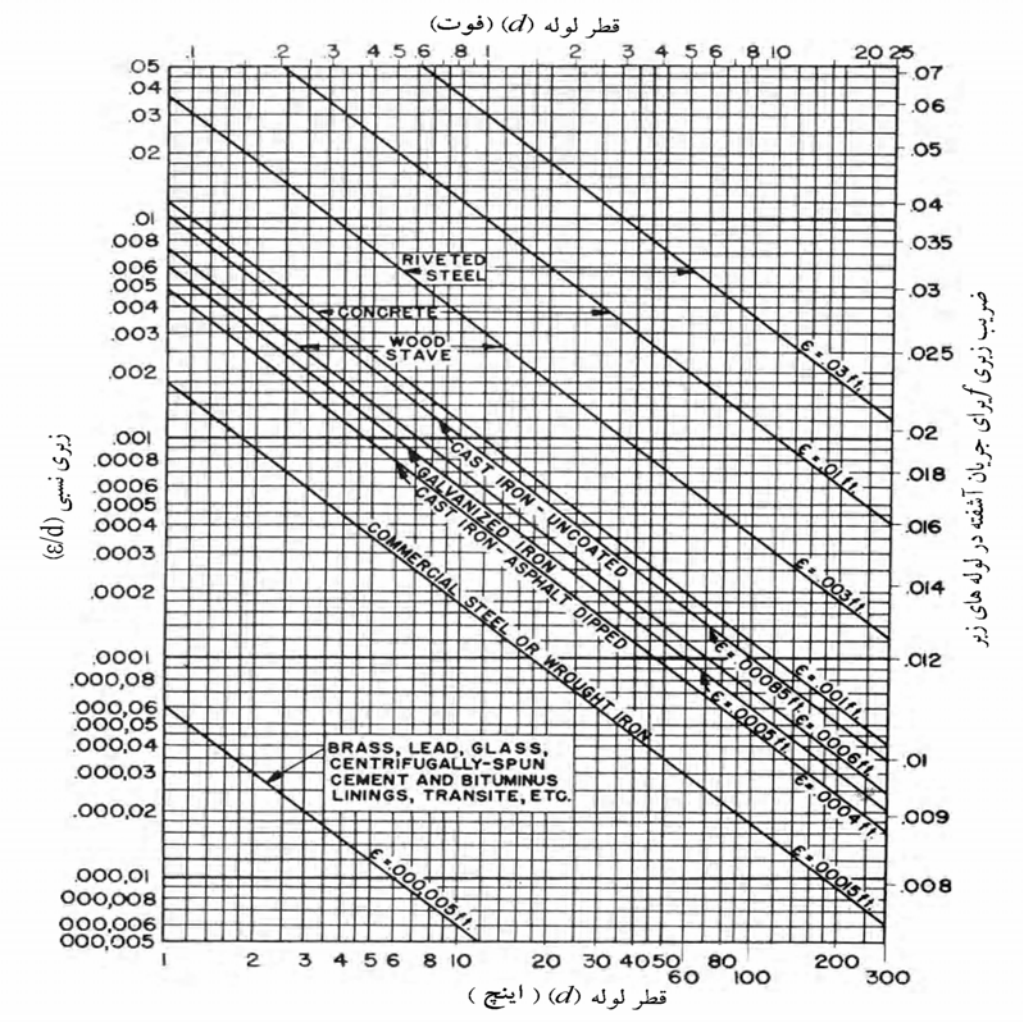
علاوه بر رابطه فوق، برای محاسبه ضریب f در تمام نواحی جریان می‌توان از رابطه چرچیل به شرح زیر نیز استفاده نمود:

$$f = 8 \times [(\frac{8}{N_{Re}})^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}}]^{\frac{1}{2}}$$

$$A = [2.457 \times Ln \frac{1}{(\frac{7}{N_{Re}})^{0.9} + \frac{0.27\varepsilon}{d}}]^{16} \qquad (۵-۳)$$

$$B = (\frac{37530}{N_{Re}})^{16}$$

به‌علاوه با توجه به اینکه ضریب اصطکاک f در طول مدت استفاده از لوله به خاطر تغییر زبری لوله تغییر می‌کند می‌توان با تقریب مناسب از نمودار شکل (۳-۲) استفاده نمود. در نمودار این ضریب برای انواع جنس لوله یا زبری نسبی که در تصفیه‌خانه‌های آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین شده است.



شکل ۳-۲- نمودار تعیین ضریب اصطکاک f با توجه به عمر لوله (یک اینچ = ۲۵/٤ میلی‌متر) [۸]

۳-۳-۲- رابطه هیزن- ویلیامز

رابطه هیزن- ویلیامز[1] برای آب در دمای معمولی برابر است با:

$$h_f = 10.67 L C_H^{-1.85} d^{-4.86} Q^{1.85} \quad (۳-۶)$$

رابطه برای سامانه متریک به‌دست آمده و در آن ضریب C_H متناسب با زبری یا جنس لوله است. در جدول (۳-۱) این ضریب برای بعضی از انواع لوله ارایه شده است. معمولا شرکت‌های سازنده لوله ضریب C_H را همراه با لوله ارایه می‌دهند. باید در نظر داشت که این ضریب به عمر لوله بستگی دارد و در طراحی باید عمر لوله کارکرده مد نظر قرار گیرد.

۳-۳-۳- محاسبه افت‌های موضعی

افت‌هایی را که در خطوط لوله به دلیل خمیدگی، زانوها، شیرها و اتصالات دیگر به وجود می‌آیند افت‌های موضعی می‌نامند. تقریبا در تمام حالات افت‌های موضعی را همانند رابطه (۳-۷) به‌صورت ضریبی از ارتفاع سرعت مشخص می‌کنند:

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad (۳-۷)$$

جدول ۳-۱- نمونه‌ای از ضریب هیزن- ویلیامز C_H برای انواع مختلف لوله

نوع مواد تشکیل‌دهنده لوله	مقدار ضریب هیزن- ویلیامز (C_H)		
	لوله نو	لوله کهنه	پیشنهاد طراحی
پلی‌اتیلن (PE) و پی‌وی‌سی (PVC)	۱۵۰	۱۳۰	۱۴۰
آزبست سیمان	۱۴۰	۱۲۰	۱۳۰
فایبر (Fiber)	۱۵۰	–	۱۴۰
سیمانی با پوشش آهن یا فولاد	۱۵۰	–	۱۴۰
لوله فولادی بدون درز	۱۳۰	۸۰	۱۰۰
لوله با پوشش پرچ شده فولادی	۱۳۰	–	۱۰۰
چدن	۱۳۰	۸۰	۱۰۰
چدن قیراندود	۱۳۰	۵۰	۱۰۰
بتن	۱۲۰	۸۵	۱۰۰
فولاد موجدار	۶۰	–	۶۰
لوله‌های چوبی	۱۲۰	۱۱۰	۱۱۵
لوله‌های کهنه در شرایط بد	–	–	۶۰-۸۰

در این رابطه K یک ضریب تجربی است و مقدار آن برای هر حالت توسط سازندگان به‌صورت تجربی تعیین و همراه با قطعه ارایه می‌گردد. روش دیگر ارایه افت موضعی در معادلات، استفاده از طول معادل است. به این ترتیب که طول معادل افت موضعی،

1 - Hazen-Williams

طولی از لوله است که با قطر d و ضریب f همان مقدار افت اصطکاک را که افت موضعی با ضریب K به‌وجود می‌آورد، ایجاد می‌کند. یعنی:

$$h_m = h_f \rightarrow f\frac{L_e}{d}\frac{V^2}{2g} = K\frac{V^2}{2g} \rightarrow L_e = \frac{Kd}{f} \qquad (۸-۳)$$

در تصفیه‌خانه‌های آب معمولا طول لوله‌ها کوتاه و تعداد اتصالات موضعی زیاد است، بنابراین افت‌های موضعی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در جدول (۳-۲) طول معادل L_e برای برخی اتصالات ارایه شده است. برای تخمین ضریب K برای انواع مختلف اتصالات به مرجع [۸] مراجعه شود.

جدول۳-۲- طول معادل برای برخی اتصالات (متر) [۸]

قطر لوله (اینچ)	قطر لوله (میلی‌متر)	شیر کنترل	شیر توپی باز	شیر کشویی باز	شاخه T	زانویی ۴۵ درجه	زانویی ۹۰° شعاع انحنای بزرگ	زانویی ۹۰° شعاع انحنای متوسط	زانویی ۹۰° شعاع انحنای استاندارد
۱	۲۵/۴	۲/۰۴	۸/۲۴	۰/۱۸	۱/۷۷	۰/۴	۰/۵۲	۰/۷	۰/۸۲
۲	۵۰/۸	۳/۹۶	۱۷/۳۷	۰/۳۷	۳/۳۵	۰/۷۶	۱/۰۷	۰/۴	۰/۶۸
۳	۷۶/۲	۶/۱	۲۵/۹۱	۰/۵۲	۵/۱۸	۱/۱۶	۱/۵۵	۲/۰۷	۲/۴۷
۴	۱۰۱/۶	۸/۲۳	۳۳/۵۳	۰/۷	۶/۷۱	۱/۵۲	۲/۱۳	۲/۷۷	۳/۳۵
۵	۱۲۷	۱۰/۰۶	۴۲/۶۷	۰/۸۸	۸/۲۳	۱/۸۶	۲/۷۱	۳/۶۶	۴/۲۷
۶	۱۵۲/۴	۱۲/۱۹	۴۸/۷۷	۱/۰۷	۱۰/۰۶	۲/۳۵	۳/۳۵	۴/۲۷	۴/۸۸
۸	۲۰۳/۲	۱۶/۱۵	۶۷/۰۵	۱/۳۷	۱۳/۱۱	۳/۰۵	۴/۲۷	۵/۴۹	۶/۴
۱۰	۲۵۴	۲۰/۴۲	۸۸/۳۹	۱/۷۴	۱۷/۰۷	۳/۹۶	۵/۱۸	۶/۷۱	۷/۹۲
۱۲	۳۰۴/۸	۲۴/۳۸	۱۰۳/۶۳	۲/۰۴	۲۰/۱۲	۴/۵۷	۶/۱	۷/۹۲	۹/۷۵
۱۴	۳۵۵/۶	۲۸/۳۵	۱۱۸/۸۷	۲/۴۴	۲۳/۱۶	۵/۱۸	۷/۰۱	۹/۴۵	۱۰/۹۷
۱۶	۴۰۶/۴	۳۲/۶۱	۱۳۱/۰۶	۲/۷۴	۲۶/۵۲	۵/۷۹	۸/۲۳	۱۰/۶۷	۱۲/۸
۱۸	۴۵۷/۲	۳۶/۵۷	۱۵۲/۳۹	۲/۱۱	۳۰/۴۸	۶/۴	۹/۱۴	۱۲/۱۹	۱۴/۰۲
۲۰	۵۰۸	۴۰/۸۴	۱۷۰/۶۸	۳/۶۶	۳۳/۵۳	۷/۰۱	۱۰/۳۶	۱۳/۱۱	۱۵/۸۵
۲۴	۶۰۹/۶	۴۸/۷۷	۲۰۷/۲۵	۴/۲۷	۴۲/۶۷	۸/۵۳	۱۲/۱۹	۱۶/۱۵	۱۹/۲
۳۶	۹۱۴/۴	۷۳/۱۵	۳۰۴/۷۹	۶/۱	۶۰/۹۶	۱۳/۱۱	۱۸/۲۹	۲۴/۰۸	۲۸/۶۵

۳-٤- نکات هیدرولیکی مهم در طراحی مجاری تحت فشار

در طراحی هیدرولیکی مجاری تحت فشار توجه به نکات زیر لازم می‌باشد:

الف- در محاسبات هیدرولیکی مجاری تحت فشار قطر داخلی لوله در نظر گرفته می‌شود.

ب- در انتخاب ضرایب مربوط به محاسبه افت ارتفاع نظیر ضریب اصطکاک دارسی- وایسباخ و ضریب هیزن- ویلیامز لازم است به این نکته توجه شود که این ضرایب در طول عمر لوله با گذشت زمان تغییر می‌کند و معمولا بر اثر کهنه‌شدن لوله در

جداره داخلی لوله مقدار زبری و در نتیجه ضریب افت ارتفاع اندکی افزایش می‌یابد. لذا لازم است طراحی مساله برای پایان دوره طرح نیز کنترل گردد.

ج- در انتخاب قطر لوله لازم است با توجه به جنس، از قطرهایی استفاده شود که امکان تهیه آن وجود داشته باشد.

۳-۵- جریان در کانال‌های باز

در طراحی هیدرولیکی کانال‌ها و مجاری باز انتقال آب نیاز است تا عمق آب در نقاط مختلف کانال و یا به‌عبارتی نیمرخ هیدرولیکی محاسبه و تعیین شود. سپس با منظور نمودن ارتفاع آزاد، ابعاد هندسی نهایی برای کانال انتخاب و بر مبنای مشخصات هیدرولیکی، افت ارتفاع جریان محاسبه شود.

۳-۵-۱- محاسبات در جریان یکنواخت و دایم

برای تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال‌های باز روابط متعددی ارایه شده است. از این روابط می‌توان به رابطه مانینگ، رابطه بازن و رابطه کاتر اشاره نمود. این روابط همگی بر مبنای رابطه شزی ($V = C\sqrt{R \cdot S}$) به‌دست آمده‌اند و تنها در نحوه تعیین ضریب C (ضریب شزی) با یکدیگر تفاوت دارند. در رابطه شزی V سرعت متوسط جریان آب، R شعاع هیدرولیکی و S شیب خط انرژی (یا شیب طولی کف کانال در جریان یکنواخت) می‌باشد. در این نشریه با توجه به عمومیت رابطه مانینگ، سهولت کاربرد و دقت قابل قبولی که از این رابطه به‌دست می‌آید، برای محاسبات هیدرولیکی جریان در کانال‌های باز از آن استفاده می‌شود. رابطه مانینگ در سامانه متریک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} \qquad (۹-۳)$$

$$Q = \frac{1}{n} A \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۰-۳)$$

و افت ارتفاع در طول L از کانال برابر است با:

$$h_f = S \times L = (\frac{nQ}{AR^{\frac{2}{3}}})^2 \times L \qquad (۱۱-۳)$$

زبری و جنس جداره و کف در تعیین ضریب زبری مانینگ (n) که در حقیقت مبین مقاومت کانال در مقابل عبور جریان است، بیش‌ترین اهمیت را دارند. جدول (۳-۳) این ضریب را برای چند جنس متداول‌تر کانال نشان می‌دهد. با توجه به اینکه کانال‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه آب معمولا با پوشش بتنی ساخته می‌شود و در آن‌ها $R < 1$ متر است[۱]، لذا می‌توان با توجه به نوع سیمان استفاده شده، نحوه قالب‌بندی و عمل‌آوری بتن، سطح نهایی و عمر کانال، مقدار n را بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۷ انتخاب نمود. البته از لوله با جنس آزبست، پلی اتیلن و یا فولادی نیز به‌عنوان کانال باز استفاده می‌شود که برای این جنس لوله‌ها نیز ضریب مانینگ ارایه شده است.

۱- تحقیقات انجام شده توسط موزه مقادیر ایالات متحده و دیگر مراکز تحقیقاتی نشان می‌دهد که ضریب زبری مانینگ برای شعاع هیدرولیکی بزرگ‌تر از ۳ متر باید ۱۰ تا ۱۵ درصد نسبت به مقادیر بدست آمده از جدول افزایش داده شود.

جدول ۳-۳- ضریب زبری مانینگ برای بعضی جنس‌های متداول کانال [۱۵]

جنس و نوع سطح	ضریب زبری n
لوله GRP و لوله پلی اتیلن	۰/۰۱۱-۰/۰۱۲
آزبست سیمان	۰/۰۱۳
سیمان پرداخت شده	۰/۰۱۲
سیمان پرداخت نشده	۰/۰۱۴
چدن	۰/۰۱۵
آجر	۰/۰۱۶
فولاد پرچی	۰/۰۱۸
صفحات فلزی موجدار	۰/۰۲۲
خاکی	۰/۰۲۵
سنگریزه و شن	۰/۰۲۹

ظرفیت طراحی برای کانال در تصفیه‌خانه‌های آب برابر با حداکثر جریان عبوری از آن طی مدت زمان بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه مانینگ، رابطه (۳-۱۰)، ابعاد کانال موردنظر تعیین می‌شود. برای مشخصات کانال‌های متداول مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب با مقاطع مستطیلی، ذوزنقه، مثلثی و دایره‌ای می‌توان از جدول (۳-۴) استفاده نمود.

۳-۵-۲- ارتفاع آزاد

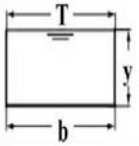
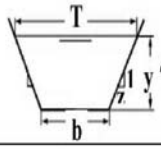
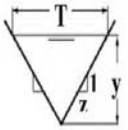
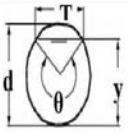
در طراحی کانال‌های باز ارتفاع دیوار کانال ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر بیش‌تر از عمق محاسبه شده برای جریان در نظر گرفته می‌شود تا به عنوان یک اندازه مطمئن از سرریز شدن جریان از کانال جلوگیری شود. پیش‌بینی ارتفاع آزاد به دلایلی نظیر بالا آمدن کف کانال بر اثر رسوب‌گذاری و رویش گیاه، وجود اختلال در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه، ورود جریان‌های اضافی ناشی از روان آب سطحی به داخل کانال و تلاطم ناشی از امواج در اثر وزش باد و موارد دیگر صورت می‌پذیرد.

۳-۵-۳- افت‌های موضعی در کانال‌های باز

در جریان کانال‌های باز افت‌های موضعی در اثر تغییرات ناگهانی در جهت یا مقطع کانال و یا وجود سازه‌های کنترلی به‌وجود می‌آید. بررسی انواع افت‌های موضعی در تصفیه‌خانه‌های آب از اهداف اصلی این استاندارد می‌باشد. در این حالت افت از رابطه (۳-۱۲) تعیین می‌شود.

$$h_m = K\frac{V^2}{2g} \qquad (۱۲-۳)$$

جدول۳-٤- مشخصات هیدرولیکی مقاطع مختلف در کانال‌های باز[۳]

نوع مقطع	مساحت (A)	پیرامون مرطوب (P)	عرض سطح آزاد (T)	شعاع هیدرولیکی (R)	عمق هیدرولیکی (D)
مستطیلی 	by	$b+۲y$	b	$\frac{by}{b+۲y}$	y
ذوزنقه 	$(b+zy)y$	$b+۲y\sqrt{۱+z^۲}$	$b+۲zy$	$\frac{(b+zy)y}{b+۲y\sqrt{۱+z^۲}}$	$\frac{(b+zy)y}{b+۲zy}$
مثلثی 	$zy^۲$	$۲y\sqrt{۱+z^۲}$	$۲zy$	$\frac{zy}{۲\sqrt{۱+z^۲}}$	$\frac{۱}{۲}y$
دایره ای 	$\frac{۱}{۸}(\theta-\sin\theta)d^۲$	$\frac{۱}{۲}\theta d$	$۲\sqrt{y(d-y)}$	$\frac{۱}{۴}\left(۱-\frac{\sin\theta}{\theta}\right)d$	$\frac{۱}{۸}\left(\frac{\theta-\sin\theta}{\sin۰/۵\theta}\right)d$

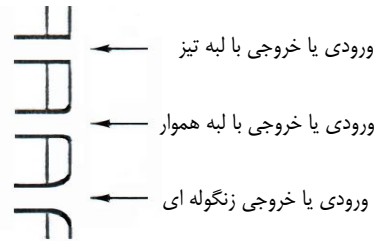
در این رابطه V سرعت متوسط و K ضریب افت موضعی است و مقدار K با توجه به شکل تغییر مقطع و نحوه اتصال تعیین می‌شود. ضریب افت موضعی در کانال‌ها از جداولی که برای جریان تحت فشار در لوله‌ها ارایه شده، به‌دست می‌آید. علاوه بر رابطه (۳-۱۲) در برخی اتصالات مقدار افت ارتفاع را بر اساس اختلاف ارتفاع سرعت در قبل و بعد از اتصال محاسبه می‌کنند. در این حالت از رابطه (۳-۱۳) استفاده می‌شود:

$$h_m = \overline{K}\ \frac{V_1^{\,2}}{2g}\quad\frac{V_2^{\,2}}{2g} \qquad (۱۳-۳)$$

ضریب $\overline{K}$ در این رابطه همانند رابطه (۳-۱۲) به‌صورت تجربی تعیین می‌گردد. در ادامه مقدار $\overline{K}$ برای برخی اتصالات مهم کانال‌های باز که در تصفیه‌خانه آب از آن استفاده می‌گردد، ارایه شده است.

الف) ضریب افت موضعی در انقباض ناگهانی یا ورودی

- ورودی لبه تیز: $\overline{K}=0.5$
- ورودی با لبه هموار: $\overline{K}=0.25$
- ورودی با دهانه زنگوله‌ای: $\overline{K}=0.05$



ب) ضریب افت موضعی در انبساط ناگهانی یا خروجی

- خروجی با گوشه‌های تیز: $\overline{K}=0.2\text{-}1.0$
- خروجی با دهانه زنگوله‌ای: $\overline{K}=0.1\text{-}0.2$

ج) ضریب افت موضعی $\overline{K}$ در اتصالات و جعبه‌های تقسیم جریان

این ضریب تابعی از اندازه و نحوه اتصال اجزا به همدیگر، میزان تغییر جهت در مسیر جریان و شکل پستی و بلندی‌های کف می‌باشد. برای تصفیه‌خانه آب حالات زیر را می‌توان در نظر گرفت:

جعبه‌های تقسیم بزرگ که سرعت در آن‌ها کوچک است

- ضریب افت خروجی: $\overline{K} = 1.0$
- ضریب افت ورودی: $\overline{K} = 0.5$

اگر در هر یک از موارد فوق تغییر جهت جریان وجود داشته باشد، مقادیر زیر به مقدار اولیه $\overline{K}$ اضافه می‌گردد:

- تغییر جهت ۴۵ درجه به‌صورت ناگهانی: $\overline{K} = 0.4$
- تغییر جهت ۴۵ درجه به‌صورت ملایم: $\overline{K} = 0.3$
- تغییر جهت ۹۰ درجه به‌صورت ناگهانی: $\overline{K} = 0.3$
- تغییر جهت ۹۰ درجه به‌صورت ملایم: $\overline{K} = 1.0$

۳-۵-٤- محاسبه عمق بحرانی

در هیدرولیک کانال‌های باز عمق بحرانی به عنوان یک عمق معیار، مخصوصا در حالت‌های ریزش آزاد، از اهمیت زیادی برخوردار است. با محاسبه عمق بحرانی و داشتن عمق آب در کانال، می‌توان نوع جریان (تحت بحرانی یا فوق بحرانی) را تعیین نمود.

روابط ۳-۱۴، ۳-۱۵، ۳-۱۶ و۳-۱۷ به‌ترتیب عمق بحرانی را برای‌کانال‌های مستطیلی، مثلثی،ذوزنقه و دایره‌ای ارایه می‌دهد[۶].

$$y_c = (\frac{Q^2}{b^2 g})^{\frac{1}{3}} = (\frac{q^2}{g})^{\frac{1}{3}} \qquad (۱۴-۳)$$

$$y_c = (\frac{2Q^2}{g z^2})^{0.2} \qquad (۱۵-۳)$$

$$y_c = 0.81 \times (\frac{Q^2}{g z^{0.75} b^{1.25}})^{0.27} - \frac{b}{30z} \qquad (۱۶-۳)$$

$$y_c = \frac{1.01}{d^{0.26}} \times (\frac{Q^2}{g})^{0.25} \qquad (۱۷-۳)$$

در این روابط Q بده کل و q بده در واحد عرض (برای کانال مستطیلی) می‌باشند و بقیه متغیرها در جدول ۳-۴ آمده است. همچنین، رابطه (۳-۱۶) در محدوده $0.06 < Q/b^{2.5} < 2.2$ قابل استفاده است و برای $Q/b^{2.5} < 0.06$، معادله مقطع مستطیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت رابطه (۳-۱۷) تنها در محدوده $0.02 \leqslant \frac{y_c}{d_0} \leqslant 0.85$ برای کارهای مهندسی قابل قبول است.

۳-۵-۵- جریان دایم و غیر یکنواخت

جریان غیر یکنواخت (جریان متغیر) در کانال‌های باز به صورت‌های متغیر تدریجی، متغیر سریع و متغیر مکانی وجود دارد. در این نشریه تنها جریان‌های متغیر دایمی مورد بررسی قرار می‌گیرد و بحث پیرامون شرایط غیردایمی جریان خارج از موضوع این نشریه است[۱]. لذا واژه غیر یکنواخت در این راهنما به معنای جریان دایمی غیر یکنواخت بکار رفته است.

۳-۵-٦- جریان متغیر تدریجی

هرگاه تغییرات عمق جریان در فاصله طولانی از مسیر صورت گیرد به‌طوریکه تغییرات بردار سرعت در مقطع ناچیز باشد، جریان متغیر تدریجی گفته می‌شود. در جریان متغیر تدریجی انحنای سطح جریان کم بوده و معمولا تغییرات عمق در فاصله طولانی از مسیر جریان صورت می‌گیرد. تغییرات عمق و سرعت در جریان‌های متغیر تدریجی در مواجهه جریان یکنواخت با عواملی چون سرریزها، دریچه‌ها و هر تغییری در مقطع به‌وجود می‌آید و در طراحی هیدرولیکی کانال‌های تصفیه‌خانه‌های آب باید به آن توجه شود.

برای طبقه‌بندی نیمرخ‌های طولی سطح آب، از دو علامت اختصاری که یکی معرف نوع شیب بوده و با یکی از حروف M، S، C، H و A (به ترتیب برای شیب‌های ملایم، تند، بحرانی، افقی و معکوس) مشخص می‌شوند و دیگری که معرف ناحیه جریان است، استفاده می‌گردد. در ناحیه ۱ عمق آب از عمق نرمال (y_o) و بحرانی (y_c) بیش‌تر و در ناحیه ۳ عمق آب از عمق نرمال و بحرانی کم‌تر است و ناحیه ۲ بین این دو ناحیه واقع شده است. همچنین از مشخصات این نواحی، به سمت پایین دست جریان در ناحیه‌های ۱ و ۳ افزایش عمق و در ناحیه ۲ کاهش عمق وجود دارد.

۳-۵-۷- جریان متغیر سریع

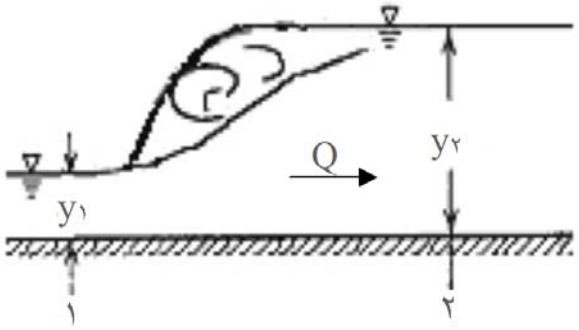
در این جریان، که در حالت‌هایی مثل خروج آب از زیر دریچه‌ها اتفاق می افتد، تغییرات شدید عمق جریان در فاصله کوتاهی از مسیر صورت می‌گیرد و سطح آب انحنای قابل توجهی دارد. پدیده پرش هیدرولیکی تنها نوع جریان متغیر سریع مورد بررسی در این نشریه می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، گذر از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی توام با یک آشفتگی شدید در جریان بوده و افت انرژی موضعی زیاد و نامعلومی را سبب می‌شود. محاسبات هیدرولیکی مربوط به این حالت شامل محاسبه عمق آب قبل و بعد از پرش و تعیین افت ارتفاع در طول پرش می‌باشد.

برای کانال مستطیلی رابطه (۳-۱۸) استفاده می‌شود. برای مقاطع دیگر که در تصفیه‌خانه‌های آب به ندرت نیاز می‌باشد به مراجع داده شده در این نشریه رجوع شود.

$$\frac{y_2}{y_1}=\frac{1}{2}\left[\sqrt{1+8Fr_1^2}\,-1\right] \quad \text{یا} \quad \frac{y_1}{y_2}=\frac{1}{2}\left[\sqrt{1+8Fr_2^2}\,-1\right] \qquad (۱۸-۳)$$

در این رابطه y عمق آب و Fr عدد فرود می‌باشد. زیرنویس‌های ۱ و ۲ مربوط به بالادست و پایین دست می‌باشند.

۱- برای مطالعه حالت متغیر غیر دایمی به مراجع [۴] و [۶] مراجعه شود.



شکل ۳-۳- پرش هیدرولیکی

۳-۵-۸- جریان متغیر مکانی

جریان متغیر مکانی عبارت است از جریان متغیر تدریجی که در طول کانال و در جهت جریان، مقدار بده آن تغییر می‌یابد. در مجاری تحت فشار نظیر مجرای توزیع[1] نیز امکان به‌وجود آمدن جریان متغیر مکانی وجود دارد که در این نشریه به آن نیز پرداخته شده است. بر حسب نوع تغییرات بده، جریان متغیر مکانی در کانال‌های باز به دو گروه تقسیم می‌شود:

الف- جریان‌های متغیر مکانی با افزایش شدت جریان (که به جریان با کانال جانبی معروف است).

ب- جریان‌های متغیر مکانی با کاهش شدت جریان (که به جریان با سرریز جانبی معروف است).

که هر دو حالت آن در تصفیه‌خانه آب اتفاق می‌افتد. در ادامه هر یک از این حالت‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف- جریان متغیر مکانی با افزایش بده

این حالت در برخی از قسمت‌های تصفیه‌خانه آب نظیر کانال‌های جمع‌آوری در انتهای واحدهای ته‌نشینی می‌تواند اتفاق بیفتد. در این حالات ریزش آزاد جریان به‌صورت جانبی از روی سرریز به داخل ناودان (فلوم یا کانال) باعث به‌وجود آمدن یک جریان متغیر مکانی با افزایش بده در طول ناودان و در مسیر جریان می‌شود که در نقطه انتهایی و خروجی، بده به مقدار حداکثر خود می‌رسد. رابطه دینامیکی این نوع جریان به‌صورت زیر می‌باشد [۵]:

$$\frac{dy}{dx}=\frac{S_{\circ}-S_f-(2\beta Q/gA^2)\times q^*}{1-Fr^2} \qquad (۱۹-۳)$$

در این رابطه q^* بده ورودی در واحد طول به کانال می‌باشد. سایر متغیرهای رابطه در شکل (۳-۴) مشخص شده‌اند. برای محاسبه نیمرخ سطح آب لازم است تا خصوصیات جریان در یک نقطه، نظیر یک مقطع با عمق معیار، معین باشد. حل رابطه (۳-۱۹) پیچیده است و در عمل از روش‌های عددی برای به‌دست آوردن نیمرخ سطح آب استفاده می‌گردد. یکی از این روش‌ها استفاده از رابطه (۳-۲۰) [۵] که برای توزیع یکنواخت سرعت در هر مقطع به‌دست آمده، می‌باشد.

$$\Delta y'=\frac{Q_1\overline{V}}{g\overline{Q}}(\Delta V+\frac{V_2}{Q_1}\Delta Q)+\overline{S}_f\times\Delta x \qquad (۲۰-۳)$$

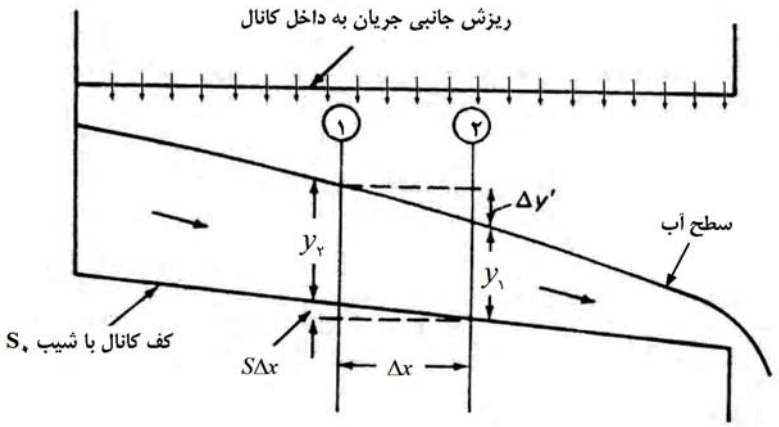
1 - Manifold

در این رابطه $\Delta y'$ پایین افتادگی سطح آب از مقطع ۱ به ۲، y_1 و y_2 به ترتیب اعماق جریان در مقاطع ۱ و ۲، Q_1 و Q_2 بده جریان در مقاطع ۱ و ۲ (مترمکعب بر ثانیه)، V_1 و V_2 سرعت جریان در مقاطع ۱ و ۲ (متر بر ثانیه)، ΔV اختلاف سرعت‌ها$(\Delta V = V_2 - V_1)$، $\overline{V}$ سرعت متوسط $(\frac{V_1 + V_2}{2})$، ΔQ بده اضافه شده $(\Delta Q = Q_2 - Q_1)$، $\overline{Q}$ بده متوسط جریان $(\frac{Q_1 + Q_2}{2})$، Δx فاصله افقی بین مقاطع ۱ و ۲ و $(\overline{S_f})$ شیب متوسط خط انرژی (متر/متر) که از رابطه (۳-۲۱) به‌دست می‌آید، می‌باشند.

$$\overline{S_f} = \frac{n^2(\overline{V})^2}{(\overline{R})^{\frac{4}{3}}} \qquad (۳-۲۱)$$

که شعاع هیدرولیکی متوسط ($\overline{R}$) از رابطه (۳-۲۲) محاسبه می‌گردد:

$$\overline{R} = \frac{R_1 + R_2}{2} \qquad (۳-۲۲)$$



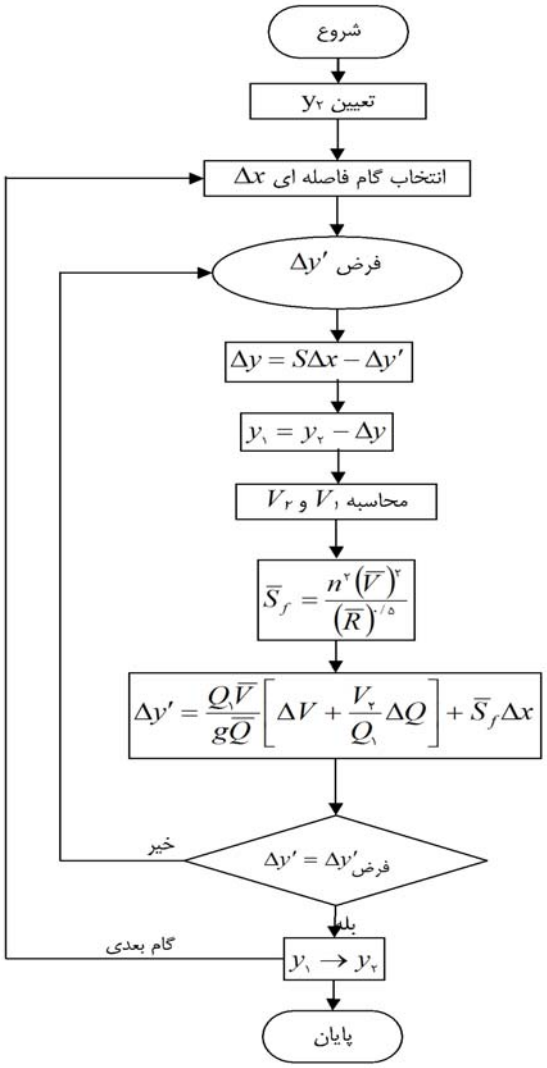
شکل ۳-٤- نیمرخ سطح آب در کانال جانبی خروجی

محاسبات مربوط به عمق آب در طول کانال و رسم نیمرخ جریان در طول کانال به‌صورت سعی و خطا مطابق نمودار شکل (۳-۵) حل می‌گردد.

در بسیاری از طراحی‌ها تنها محاسبه عمق جریان در بالادست یا ابتدای کانال مورد نظر است. بنابراین روش‌های دیگری که در آن‌ها می‌توان به سادگی عمق آب در ابتدای کانال را به‌دست آورد، ارایه شده است. در این صورت عمق طراحی در طول کانال تعیین می‌شود. از جمله این روش‌ها نمودار ارایه شده در شکل (۳-۶) می‌باشد که به کمک آن می‌توان عمق آب در ابتدای کانال مستطیلی را به‌دست آورد. لازم به یادآوری است که این نمودار فقط تا عدد فرود ۱ در انتها جواب می‌دهد یعنی جریان در همه مقاطع کانال باید زیر بحرانی باشد، که معمولا در مورد تصفیه‌خانه‌های آب چنین است. همچنین از آنجا که این منحنی بدون در نظر گرفتن اصطکاک کانال به‌دست آمده لذا جهت اطمینان بهتر است عمق به‌دست آمده را ۱۰ درصد افزایش دهیم. متغیر $F_\circ$ و G در نمودار توسط روابط ذیل محاسبه می‌شود:

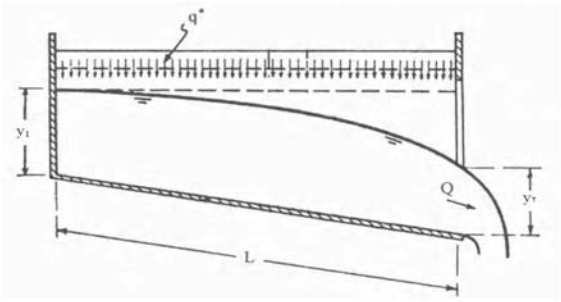
$$F_\circ = \frac{Q}{A_2\sqrt{g\,y_2}} \qquad (۳-۲۳)$$

$$G = \frac{SL}{y_2} \qquad (۲۴-۳)$$

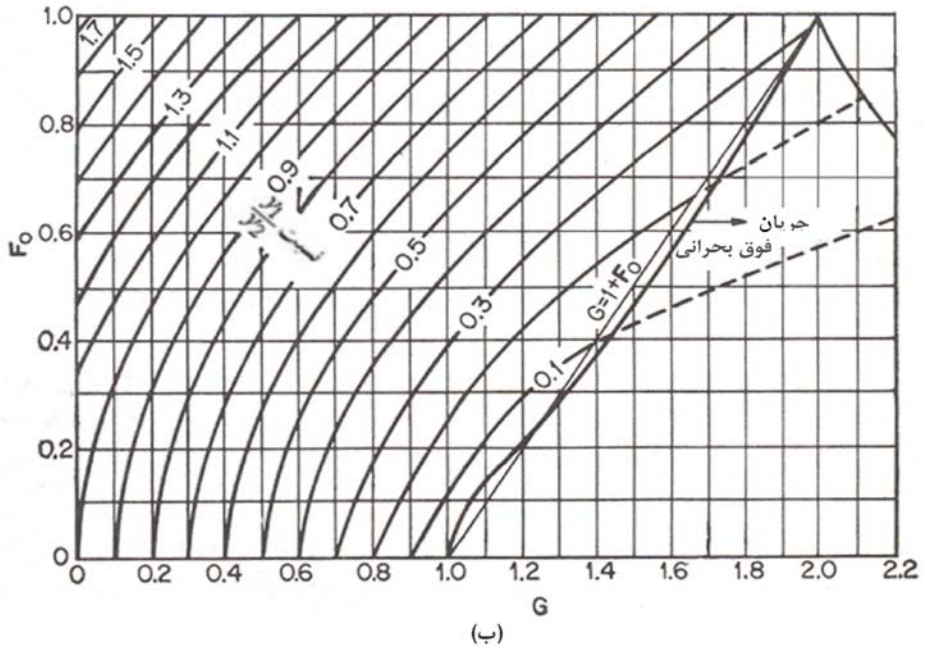


شکل ۳-۵- نمودار محاسبه عمق در طول کانال با جریان متغیر مکانی (رابطه ۳-۲۰) با افزایش بده

در این روابط Q بده کل در انتهای کانال، y_2 و A_2 عمق و مساحت سطح مقطع جریان در انتهای کانال، S شیب کف کانال و L طول کانال می‌باشد. لازم به ذکر است از این نمودار می‌توان برای کانال‌های بدون شیب نیز استفاده نمود که در این حالت $G=0$ می‌باشد و مقدار F_o از روی محور قائم خوانده می‌شود.



(الف)



(ب)

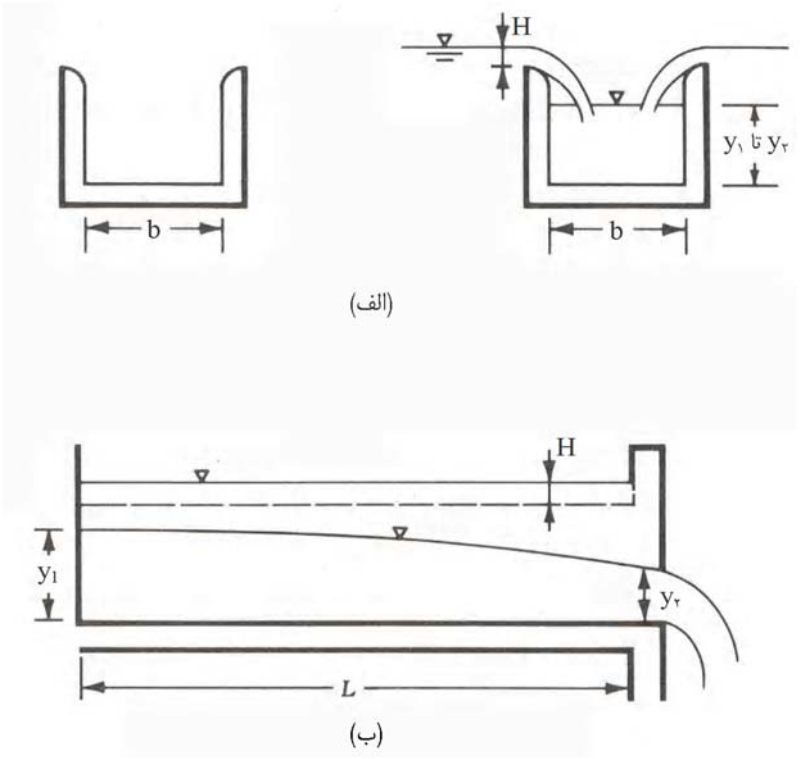
شکل ۳-٦- نمودار تعیین عمق جریان متغیر مکانی در ابتدای کانال، (الف) مقطع کانال، (ب) نمودار [۵]

لازم به ذکر است اگر آب از دو طرف کانال جمع‌آوری به درون آن ریزش کند نیز مساله به شکل مشابه با جمع بده ورودی از دو طرف به کانال قابل حل می‌باشد. در این نشریه با توجه به اهمیت و گستردگی کاربرد کانال‌های جانبی در قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه آب، روش سوم در مورد نحوه تعیین عمق آب در انتهای ناودان‌هایی که از یک یا دو طرف آب به درون آن سرریز می‌شود، با در نظر گرفتن اثر اصطکاک ناشی از زبری کانال ارایه شده است. این ناودان‌ها همان‌طور که در شکل (۳-۷) نشان داده شده است، عملا کانال‌های ریزش جانبی هستند که برای طراحی آن‌ها می‌توان از رابطه (۳-۲۵) استفاده نمود [۱۷].

$$y_1 = \sqrt{y_2^2 + \frac{2Q^2}{g \times b^2 \times y_2} + \frac{2}{3} \times \frac{n'^2 \times L \times Q^2}{b^2 \times \overline{R}^{\frac{4}{3}} \times \overline{d}}} \qquad (۳-۲۵)$$

متغیرهای این رابطه در شکل (۳-۷) آمده است. همچنین، n' ضریب تصحیح شده مانینگ، $\overline{R}$ شعاع هیدرولیکی متوسط، $\overline{d}$ عمق متوسط را نشان می‌دهد. در این رابطه باید مقادیر n بین ۰/۰۲۹ تا ۰/۰۳۹ برای ناودان از جنس بتن در نظر گرفته شود که بزرگ‌تر از مقادیر n مربوط به بتن در کانال‌های باز معمولی است و دلیل آن اغتشاش موجود در کانال در اثر ریزش جانبی به داخل آن، می‌باشد. برای یک کانال تراز، نیمرخ سطح آب یک سهمی است و عمق متوسط $\overline{d}$ با معادله زیر تقریب زده می‌شود:

$$\bar{d} = y_1 - \frac{1}{3}(y_1 - y_2) \qquad (۲۶-۳)$$



شکل ۳-۷- ناودان‌های جمع‌آوری جانبی، (الف) مقطع مجرای جمع‌آوری، (ب) نیمرخ سطح آب در طول مجرای جمع‌آوری [۱۷]

همچنین شعاع هیدرولیکی متوسط $\bar{R}$ برای مقطع مستطیلی، از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$\bar{R} = \frac{b\bar{d}}{b + 2\bar{d}} \qquad (۲۷-۳)$$

رابطه (۳-۲۵) با روش سعی و خطا حل می‌شود. ابتدا با چشم پوشی از اصطکاک مقدار y_1 محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از y_1 به‌دست آمده و روابط (۳-۲۶) و (۳-۲۷)، $\bar{d}$ و $\bar{R}$ محاسبه می‌شوند. آنگاه معادله (۳-۲۵) می‌تواند برای به‌دست آوردن y_1 برای اولین سعی به‌کار رود. حداقل مقدار y_2، عمق بحرانی (y_c) است و موقعی پدید می‌آید که سطح آب در قسمت خروجی بحرانی یا ریزش آزاد باشد. علاوه بر روش فوق بسیاری از طراحان، برای کانال‌های افقی از رابطه تقریبی (۳-۲۸) [۱۳] که با صرفنظر از قسمت اصطکاک رابطه (۳-۲۵) به‌دست آمده، استفاده می‌کنند و برای در نظر گرفتن اثر اصطکاک مقدار محاسبه شده از این رابطه را ۱۲ درصد افزایش می‌دهند.

$$y_1 = \sqrt{y_2^2 + \frac{2Q^2}{g \times b^2 \times y_2}} \qquad (۲۸-۳)$$

ب- جریان متغیر مکانی با کاهش بده

در نوع دوم جریان متغیر مکانی، در طول کانال بخشی از بده جریان به‌صورت جانبی خارج و از کل بده کاسته می‌شود. جریان متغیر مکانی با کاهش بده معمولا در سرریز کناری یا جانبی دیده می‌شود. سرریز کناری عبارت است از یک سرریز با جریان آزاد که

در کناره کانال و به موازات جریان تعبیه شده و اجازه می‌دهد تا در موقعی که ارتفاع آب بالاتر از تاج سرریز است، مقداری از آب از روی آن، به صورت جانبی، خارج شود. این نوع سرریز در انحراف و تخلیه آب اضافی در کانال ورودی به تصفیه‌خانه آب شهری و یا در مقاطعی از تصفیه خانه که بده از ظرفیت واحد پایین دست بیش‌تر است موارد استفاده فراوان دارد. منظور از سرریزهای کناری یا جانبی سازه‌های هیدرولیکی بوده که در آن‌ها نسبت طول سرریز به عرض کانال معمولا کم‌تر از $\frac{L}{B} \leqslant 3$ است. انواع نیمرخ‌های جریانی متداول که در مقطع سرریز در کانال به‌وجود می‌آید، به شرح زیر می‌باشد:

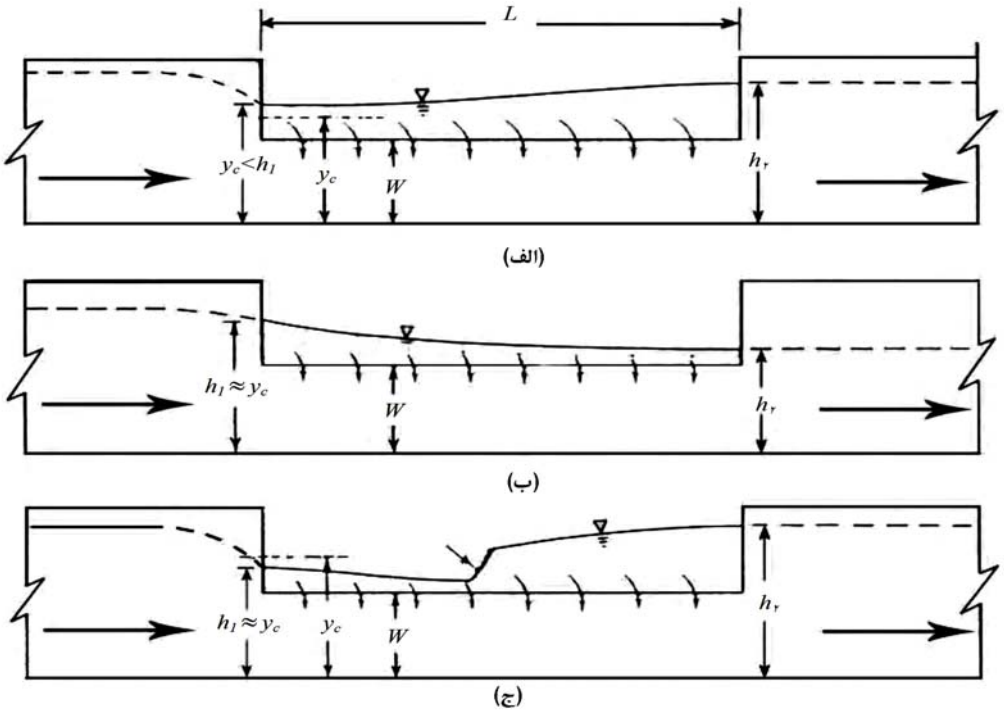
حالت اول: در این حالت کانال دارای شیب ملایم بوده و عمق قبل از سرریز بزرگ‌تر از عمق بحرانی در مقطع بالادست سرریز است (شکل۳-۸- الف). در انتهای سرریز، بده Q_2 با عمق نرمال حاکم بوده و لذا عمق آب در آن با عمق آب در کانال پایین‌دست سرریز یکسان است. عمق جریان در مقطع قبل از سرریز که از عمق بحرانی با بده Q_1 بیش‌تر و از عمق نرمال در کانال بالادست کم‌تر است. واضح است که در چنین شرایطی و با توجه به شیب ملایم کانال، عمق جریان به‌تدریج در طول سرریز افزایش یافته تا از h_1 به h_2 برسد. این حالت یکی از متداول‌ترین انواع جریان در سرریزهای جانبی در تصفیه‌خانه‌های آب می‌باشد.

حالت دوم: در این حالت همانند حالت قبل کانال شیب ملایم دارد ولی عمق قبل از سرریز به عمق بحرانی در مقطع بالادست سرریز بسیار نزدیک است. در این شرایط، همان‌طور که در شکل (۳-۸- ب) مشخص شده است، اگر سرریز طولانی باشد، امکان ایجاد جریانی با عمق کم‌تر از عمق بحرانی وجود دارد. در این حالت عمق جریان در مقطع بالادست سرریز را مساوی عمق بحرانی در کانال بالادست گرفته و در پایین‌دست سرریز نیز عمق y_2 از طریق یک پرش به عمق نرمال در کانال پایین دست متصل خواهد شد. لازم به ذکر است که بسته به عمق پایین‌دست، پرش می‌تواند به داخل منطقه سرریز نفوذ کرده و حالت سوم را به‌وجود آورد.

حالت سوم: در این حالت، همان‌طور که در شکل (۳-۸- ج) نشان داده شده است، عمق جریان در طول سرریز بتدریج کاهش پیدا کرده و قبل از رسیدن به مقطع ۲ در روی سرریز یک پرش هیدرولیکی به‌وجود می‌آید. این حالت به ندرت در تصفیه‌خانه اتفاق می‌افتد.

در طراحی سرریزهای جانبی معمولا تعیین بده خروجی از کانال به ازای طول (L) و ارتفاع سرریز (W)، مهم است و تغییرات عمق در مقطع سرریز اهمیت کم‌تری دارد. برای محاسبه طول لازم برای سرریز از رابطه (۳-۲۹) که با فرض برابری انرژی درطول سرریز برای کانال‌های مستطیلی و منشوری با سرریز جانبی لبه تیز به‌دست آمده، استفاده می‌شود [۵]:

$$L = \frac{3}{2} \times \frac{B}{C_M} (\varphi_2 - \varphi_1) \qquad (۲۹-۳)$$



شکل ۳-۸- انواع مختلف جریان روی سرریز کناری، (الف) حالت اول، (ب) حالت دوم، (ج) حالت سوم [۵]

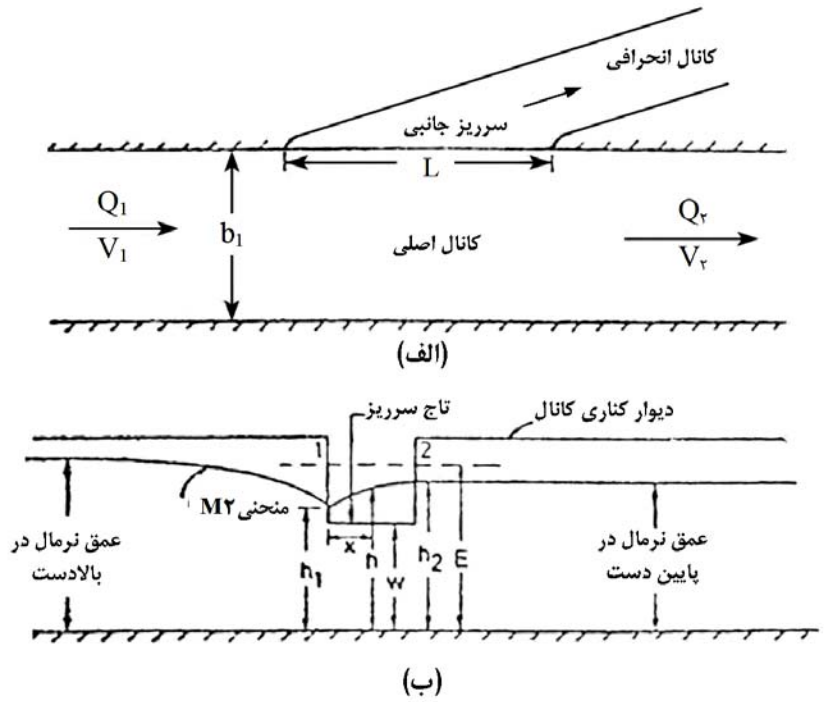
در رابطه (۳-۲۹) مقدار φ در هر مقطع با عمق h برابر است با:

$$\varphi = \frac{2E - 3W}{E - W} \times \sqrt{\frac{E - h}{h - W}} - 3\sin^{-1}\sqrt{\frac{E - h}{h - W}} \qquad (۳۰-۳)$$

همان‌طور که در شکل (۳-۹) دیده می‌شود در این روابط E مقدار انرژی مخصوص (که مقدار آن در طول سرریز ثابت است)، W ارتفاع سرریز، L طول سرریز، B عرض کانال و h عمق آب می‌باشند. برای تعیین C_M روابط تجربی مختلفی ارایه شده است که در این نشریه از رابطه (۳-۳۱) برای مقطع مستطیلی لبه تیز که متداول‌ترین هستند استفاده می‌شود.

$$C_M = 0.7 - 0.48 \times Fr_1 - 0.3 \times \frac{W}{h_1} + 0.06 \times \frac{L}{b} \qquad (۳۱-۳)$$

در این رابطه Fr_1 عدد فرود در مقطع ابتدای سرریز با عمق h_1 می باشد. این ضریب به‌صورت سعی و خطا همراه با رابطه (۳-۲۹) محاسبه می‌گردد.



شکل ۳-۹- سرریز جانبی(الف) تصویر افقی، (ب) مقطع

۳-٦- سیستم‌های توزیع جریان

با توجه به اینکه در بسیاری از قسمت‌های تصفیه‌خانه آب واحدها به‌صورت موازی در کنار هم قرار گرفته‌اند، لازم است جریان به‌طور مساوی و یا با یک نسبت مشخص بین آن‌ها تقسیم گردد. برای تقسیم جریان روش‌های مختلفی وجود دارد که بسته به شرایط موجود روش مناسب انتخاب می‌گردد. این روش‌ها به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌گردد.

الف- جعبه تقسیم؛

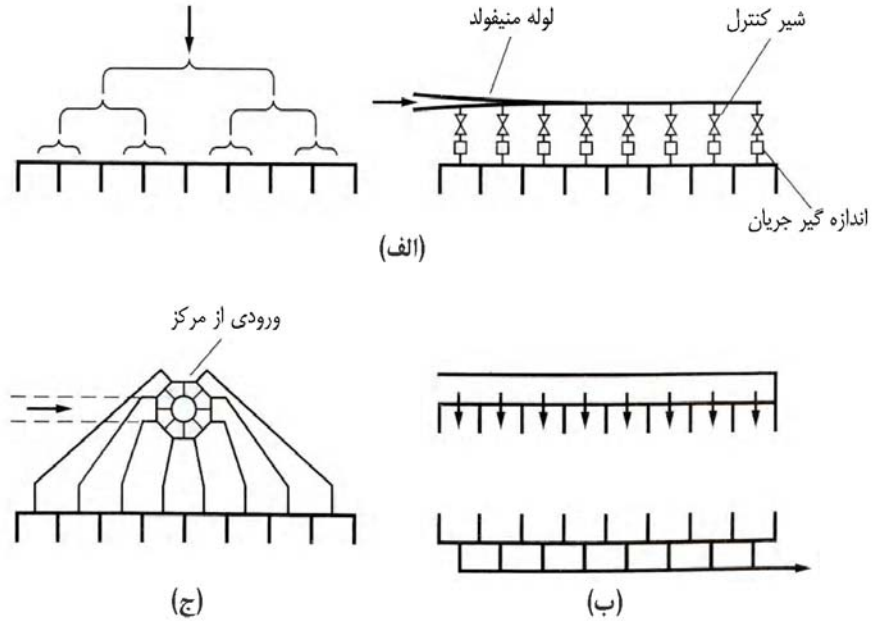
ب- آبراهه توزیع جریان کانال باز و بسته[1].

در شکل (۳-۱۰) چند نمونه از سیستم‌های متداول توزیع جریان در تصفیه‌خانه آب نشان داده شده است. در ادامه طراحی هیدرولیکی مربوط به هر یک ارایه می‌گردد.

الف- جعبه‌های تقسیم

در جعبه‌های تقسیم، با توجه به اینکه در اغلب موارد بده انشعابات با هم مساوی است، لذا بهتر است انشعابات جعبه با هم مشابه و به‌صورت متقارن قرار گیرند. ورودی جریان به جعبه تقسیم می‌تواند از کنار و یا به‌صورت ورودی از مرکز باشد. در صورت ورود جریان از کنار لازم است با در نظر گرفتن صفحه مانع، جریان در داخل جعبه را آرام کرد تا در توزیع مساوی جریان بین انشعابات اختلال ایجاد نگردد. معمولا برای کنترل و تنظیم جریان ورودی هر انشعاب از دریچه، سرریز و یا شیر کشویی استفاده می‌شود. محاسبه افت ارتفاع در جعبه تقسیم با استفاده از روابط (۳-۹)، (۳-۱۲)، (۳-۱۳) و یا روابط مربوط به سرریز انجام می‌گردد.

1 - Manifold



شکل ۳-۱۰- انواع سیستم‌های متداول توزیع جریان در تصفیه‌خانه آب، (الف) آبراهه توزیع بسته، (ب) کانال باز توزیع جریان، (ج) جعبه تقسیم

ب- آبراهه توزیع باز و بسته

جریان در آبراهه توزیع می‌تواند به‌صورت کانال باز یا لوله تحت فشار باشد. مجاری توزیعی که به صورت کانال باز عمل می‌کنند در طول دیوار جانبی خود شامل سرریزهایی هستند که جریان از آن خارج می‌گردد. علاوه بر سرریز در این کانال‌ها می‌توان از روزنه‌های مستغرق نیز برای تخلیه جریان استفاده نمود. بده عبوری از سرریز و یا روزنه‌های مستغرق را می‌توان از رابطه (۳-۳۲) به‌دست آورد:

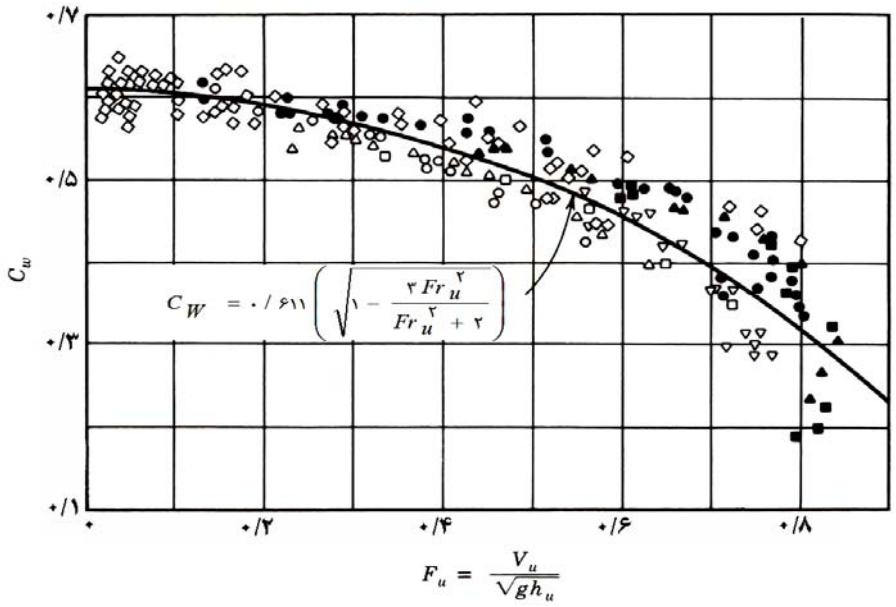
$$Q = CA\sqrt{2gH} \qquad (۳۲-۳)$$

در این رابطه Q بده، A سطح مقطع جریان در سرریز یا روزنه، H ارتفاع جریان روی سرریز یا روزنه (تا مرکز روزنه) و C ضریب بده در حالت کلی می‌باشد. ضریب بده برای حالتی که سرریز عمل تخلیه از کنار را انجام می‌دهد، با C_W مشخص شده و از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$C_W = 0.611 \times (1 - \frac{3Fr_u^2}{Fr_u^2 + 2})^{\frac{1}{2}} \qquad Fr_u < 1 \qquad (۳۳-۳)$$

در این رابطه Fr_u عدد فرود جریان در مقطع قبل از سرریز در کانال توزیع را نشان می‌دهد. علاوه بر رابطه (۳-۳۳) می‌توان از نمودار شکل (۳-۱۱) نیز برای تعیین ضریب C_W استفاده نمود. در اغلب موارد ضریب C_W را می‌توان ۰/۶۱۱ فرض کرد. ضریب بده برای حالتی که از روزنه‌های مستغرق استفاده گردد، با C_D نشان داده شده و از رابطه (۳-۳۴) به‌دست می‌آید [۱۴]:

$$C_D = 0.611 - 0.291 \times (\frac{V^2}{2g}) \qquad (۳۴-۳)$$



شکل ۳-۱۱- تعیین ضریب تخلیه سرریز جانبی [۱٤]

در این رابطه V سرعت جریان در مقطع بالادست روزنه در کانال توزیع را نشان می‌دهد. در ادامه نحوه تعیین افت ارتفاع برای قسمت‌های مختلف آبراهه توزیع جریان آمده است.

۳-٦-۱- محاسبه افت ارتفاع در طول آبراهه توزیع

برای محاسبه افت ارتفاع در طول آبراهه بسته از رابطه (۳-۳۵) استفاده می‌گردد [۷]:

$$\left(h_L\right)_x = h_t \times [\frac{x}{L} - (\frac{x}{L})^2 - \frac{1}{3} \times (\frac{x}{L})^3] \qquad (۳۵-۳)$$

در این رابطه $\left(h_L\right)_x$ افت ارتفاع از ابتدای آبراهه تا فاصله x از آن، L طول کانال و h_t افت ارتفاع اصطکاکی در لوله توزیع بسته در حالتی که هیچ انشعابی وجود ندارد و کل جریان از مجرا عبور می‌کند، را نشان می‌دهند. برای محاسبه h_t می‌توان از روابط ارایه شده برای محاسبه افت ارتفاع اصطکاکی در مجاری بسته، استفاده کرد. چون در اغلب موارد محاسبه افت ارتفاع بین اولین و آخرین انشعاب (ابتدای آبراهه تا انتهای آن) مورد نظر است، با جای‌گذاری $x = L$، داریم:

$$h_L = \frac{1}{3} \times h_t \qquad (۳۶-۳)$$

در این رابطه h_L افت ارتفاع بین اولین و آخرین انشعاب را نشان می‌دهد. از روابط (۳-۳۵) و (۳-۳۶) می‌توان برای محاسبه افت ارتفاع و تعیین تغییرات عمق آب در کانال‌های باز با استفاده از رابطه انرژی نیز استفاده نمود.

۳-٦-۲- محاسبه افت ارتفاع در مسیر انشعاب

برای محاسبه افت ارتفاع در مسیر انشعاب (Δh)، بین نقاط ۱ و ۲ در شکل (۳-۱۲)، از رابطه زیر استفاده می‌گردد [۷]:

$$\Delta h = \beta \times \frac{V_L^2}{2g} \qquad (۳۷-۳)$$

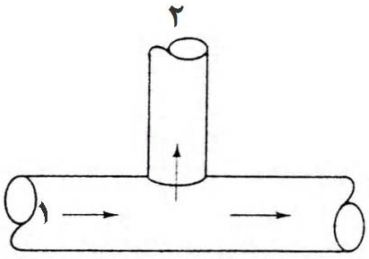
در این رابطه V_L سرعت متوسط جریان در انشعاب و β ضریب افت می‌باشد که مقدار آن از رابطه (۳-۳۸) تعیین می‌گردد [۷]:

$$\beta = \varphi \times (\frac{V_M}{V_L})^2 + \theta + 1 \qquad (۳۸-۳)$$

در این رابطه V_M سرعت متوسط در منیفولد در بالادست محل انشعاب را نشان می‌دهد. φ و θ ضرایب ثابتی هستند که با توجه به نوع انشعاب تعیین می‌گردد و مقدار آن را می‌توان از جدول (۳-۵) به‌دست آورد. انشعاب طویل حالتی را نشان می‌دهد که طول انشعاب از سه برابر قطر لوله آن بزرگ‌تر و انشعاب کوتاه حالتی است که طول انشعاب از سه برابر قطر آن کوتاه‌تر باشد. سرعت جریان در انشعاب (V_L) را می‌توان از رابطه (۳-۳۹) محاسبه نمود [۷]:

$$(V_L)_i = \frac{Q}{a\sqrt{\beta_i}} \times [\sum_{j=1}^{j=n} \sqrt{\frac{1}{\beta_j}}]^{-1} \qquad (۳۹-۳)$$

در این رابطه اندیس‌های i و j مربوط به انشعابات i –اُم و j –اُم ، Q بده کل، β از رابطه (۳-۳۸) تعیین شده، a سطح مقطع انشعاب و n تعداد انشعابات را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲- تعیین افت ارتفاع در انشعاب بین نقاط ۱ و ۲

جدول۳-۵- تعیین مقادیر φ و θ

طول انشعاب	φ	θ
طویل	۰/۹۰	۰/۴
کوتاه	۱/۶۷	۰/۷

فصل ۴

هیدرولیک لجن

٤-١- کلیات

لجن به علت دارا بودن مواد معلق بیش‌تر نسبت به آب، دارای لزجت و جرم مخصوص بیش‌تری نیز می‌باشد و در طراحی مجاری انتقال لجن باید این امر در نظر گرفته شود به نحوی که لجن بتواند به راحتی جریان یافته و در صورت نیاز قابل تلمبه‌زنی باشد. برای انتقال لجن معمولا از مجاری بسته نظیر لوله استفاده می‌شود و استفاده از کانال‌های باز برای انتقال لجن کم‌تر مرسوم است. برای تعیین متغیرهای هیدرولیکی در مورد لجن‌هایی که غلظت مواد معلق موجود در آن کم است (کم‌تر از ۱/۵ درصد)، می‌توان از روابط ارایه شده برای آب و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان بالاتر، استفاده کرد ولی در صورتی که غلظت لجن از این حد بیش‌تر باشد، مجاز به استفاده از این روابط نخواهیم بود. در این فصل روابط محاسبه متغیرهای هیدرولیکی و تعیین افت ارتفاع برای انواع لجن با درصد جامدات مختلف ارایه می‌گردد.

٤-٢- خطوط انتقال لجن

در خطوط انتقال لجن در نظر گرفتن رفتار لجن در لوله و کانال طراحی‌های خاصی را ایجاب می‌کند. در این راهنما حداقل قطر لوله‌های انتقال لجن برای جریان تحت فشار ۱۵۰ میلی‌متر و برای جریان ثقلی ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به ماهیت لجن لازم‌است سرعت جریان لجن در لوله در محدوده ۰/۳ متر بر ثانیه تا ۱/۵ متر بر ثانیه قرار گیرد. همچنین در طراحی سامانه‌های انتقال لجن توجه به نکات زیر ضروری است:

- لجن یک سیال غیر همگن است که غلظت مواد جامد در آن می‌تواند تغییرات زیادی داشته باشد.
- شاخص‌های مفید در مورد آب (نظیر عدد رینولدز) را نمی‌توان به‌طور مستقیم در مورد لجن استفاده نمود زیرا لجن می‌تواند رفتار یک سیال غیر نیوتنی را داشته باشد. همچنین لزجت در محاسبه افت فشار می‌تواند ثابت نباشد و روش خاصی باید در محاسبه افت‌های اصطکاکی مورد استفاده قرار گیرد.
- افت‌های اصطکاکی با کاهش درصد جامدات موجود در لجن و افزایش دما کاهش می‌یابد و غلظت جامدات محلول در لجن به عنوان یک متغیر اصلی در محاسبات هیدرولیکی مورد توجه قرار می‌گیرد. معمولا افت ارتفاع جریان لجن با غلظت‌های محدود در رژیم جریان آشفته بین ۱/۵ تا ۴ برابر حالت جریان آب است.

در هر صورت در طراحی سامانه‌های انتقال لجن مهم‌ترین عامل هیدرولیکی محاسبه افت ارتفاع در لوله می‌باشد. لذا با تعیین ضریب افت و یا روابط مربوط به آن که می‌تواند با جریان آب کاملا متفاوت باشد، افت ارتفاع تعیین می‌گردد. جریان لجن در لوله‌ها می‌تواند هم به صورت لایه‌ای (عدد رینولدز کم‌تر از ۲۰۰۰) و هم به صورت غیر لایه‌ای (عدد رینولدز بیش‌تر از ۳۰۰۰) وجود داشته باشد و لذا در هر مورد باید از روابط مخصوص به همان حالت استفاده نمود.

٤-٣- افت ارتفاع اصطکاکی در رژیم جریان لایه‌ای

به‌طور کلی لجن به‌صورت سیالات غیر نیوتنی (متغیر بودن لزجت با تنش برشی وارد بر سیال) رفتار می‌کند و افت‌های اصطکاکی در آن تابعی از رئولوژی[1] (خصوصیات جریان سیال از جمله لزجت و پلاستیسیته[2])، قطر لوله و سرعت جریان می‌باشد و مقدار افت ارتفاع در آن می‌تواند تا چندین برابر افت ارتفاع در مورد آب باشد. عواملی همچون افزایش اصطکاک با افزایش درصد جامدات، انباشتگی چربی روی دیوار لوله و فرار بودن مواد محلول در لجن باعث پیچیدگی محاسبه افت ارتفاع اصطکاکی در آن نسبت به جریان آب در لوله شده است. بر خلاف آب، جریان لجن در لوله، افت ارتفاع با سرعت جریان به تنهایی متناسب نیست. برای تخمین میزان افت ارتفاع اصطکاکی لجن در لوله می‌توان از رابطه بینگهام استفاده نمود:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{16S_y}{3\gamma d} + \frac{32\eta V}{\gamma d^2} \qquad (۱-۴)$$

در این رابطه h_f افت ارتفاع اصطکاکی در طول لوله (متر)، d قطر لوله (متر)، V سرعت جریان (متر بر ثانیه)، γ وزن مخصوص لجن (نیوتن بر مترمکعب)، S_y تنش تسلیم (نیوتن بر متر مربع) و η لزجت پلاستیکی یا ضریب صلبیت (نیوتن ثانیه بر متر مربع) را نشان می‌دهند. چگالی لجن را می‌توان با توجه به غلظت لجن و چگالی مواد معلق در آن به سادگی از نمودار شکل (۴-۱) به‌دست آورد. S_y و η نیز تابعی از درصد مواد جامد موجود در لجن هستند ولی تعیین مقدار آن پیچیده و تابع عوامل متعددی نظیر رئولوژی سیال است. نتایج کمی در خصوص تعیین مقدار S_y وجود دارد که فقط مربوط به شرایط خاصی می باشد. به‌طور کلی وقتی لجن رقیق است (معمولا غلظت کم‌تر از ۲ درصد) مقدار تنش تسلیم تقریبا به صفر رسیده و با حذف قسمت اول رابطه (۴-۱) این رابطه مشابه رابطه افت ارتفاع در جریان آب می‌گردد. برای غلظت‌های بالاتر مقدار S_y در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ تغییر می‌نماید. مقدار ضریب صلبیت (لزجت پلاستیکی) نیز بسته به غلظت، نوع لجن و دما تغییر می‌کند و مقدار آن در شرایط معمولی برای لجن‌های آلومی و آهن ۰/۰۰۳ نیوتن ثانیه بر متر مربع و برای لجن‌های فرایند نرم‌سازی ۰/۰۰۶ نیوتن ثانیه بر متر مربع پیشنهاد می‌گردد (حدود ۳ الی ۶ برابر آب).

٤-٤- افت‌های اصطکاکی در شرایط جریان آشفته

رژیم جریان آشفته بیش‌تر برای لجن با غلظت مواد جامد پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رژیم جریان افت‌های اصطکاکی به جریان آشفته در آب نزدیک بوده و به‌صورت تابعی از توان ۱/۷ الی ۲ سرعت تغییر می‌کنند و مقدار آن به‌طور چشمگیری از افت اصطکاکی در شرایط جریان لایه‌ای بیش‌تر است. همچنین در رژیم جریان آشفته بر خلاف جریان لایه‌ای، زبری دیوار لوله، یا جنس آن، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. افت‌های اصطکاکی در این شرایط تا حدود زیادی با جریان آب در لوله شباهت داشته و می‌توان میزان افت فشار در طول لوله را از رابطه (۴-۲) محاسبه نمود:

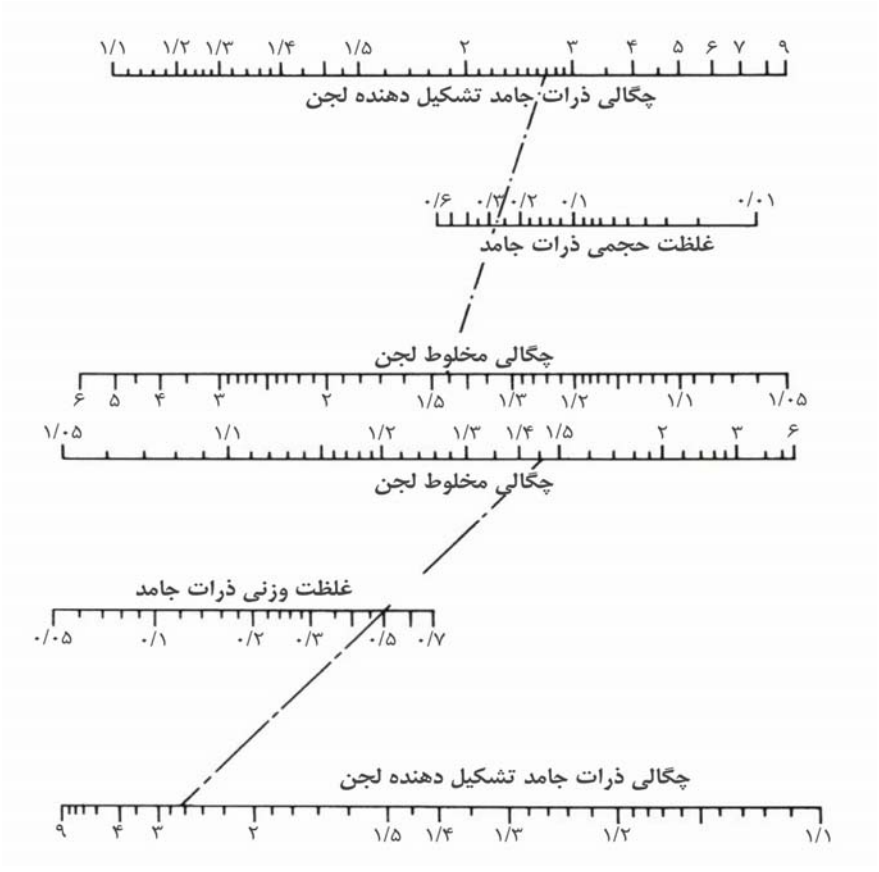
$$\Delta P = \frac{2\lambda\gamma L V^2}{gd} \qquad (۲-۴)$$

1 - Rheology
2 - Plasticity

در این رابطه g شتاب ثقل، ΔP تغییرات فشار و λ ضریب افت اصطکاکی را نشان می‌دهند. در این رابطه λ تابعی ازعدد هدستروم و عدد رینولدز می‌باشد و مقدار تقریبی آن را می‌توان از نمودار شکل (۴-۲) تعیین نمود ($\lambda = \frac{f}{4}$). عدد هدستروم (He) یک ضریب بدون بعد است که خصوصیات لجن را به‌طور کامل در بر می‌گیرد و مقدار آن را می‌توان از رابطه (۴-۳) محاسبه کرد:

$$He = \frac{d^2 S_y \gamma}{\eta^2 g} \qquad (۳-۴)$$

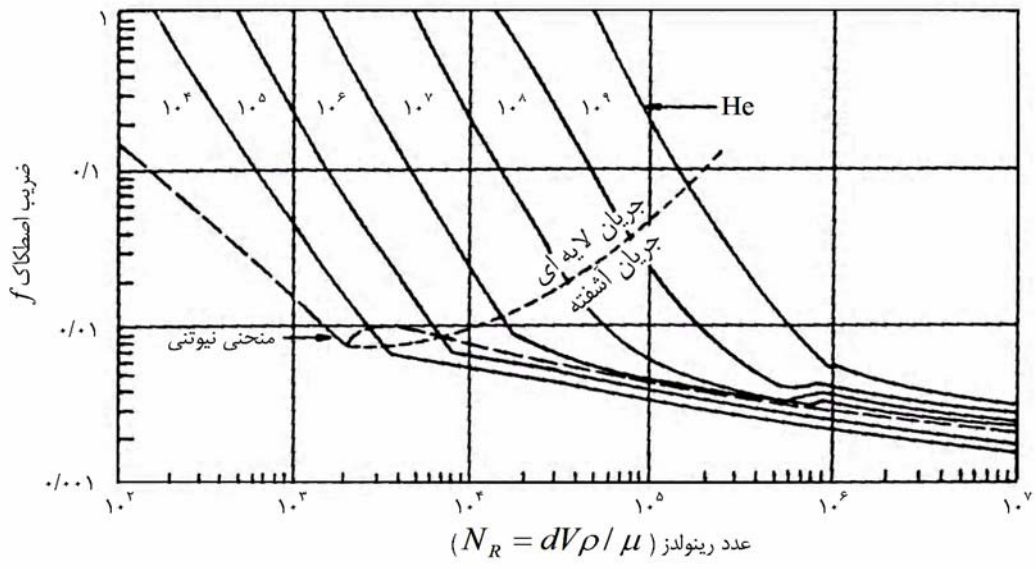
لازم به ذکر است در شرایط جریان بینابینی (انتقالی) استفاده از روابط ارایه شده برای رژیم جریان آرام و رژیم جریان آشفته به مقادیر تقریبا یکسانی منتج می‌شود.



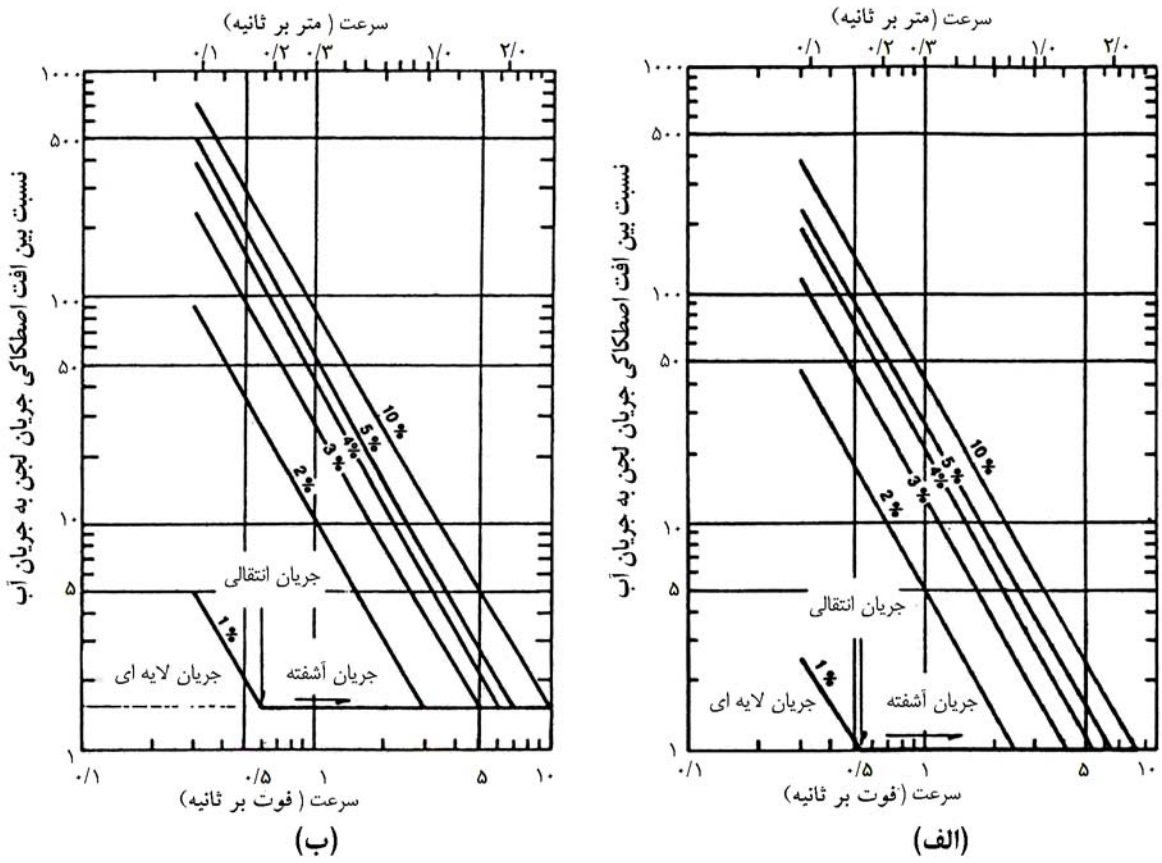
شکل ٤-١- تعیین چگالی مخلوط لجن، (الف) روش غلظت حجمی، (ب) روش علظت وزنی [۸]

٤-٥- روش‌های متداول محاسبه افت ارتفاع

محاسبه افت ارتفاع اصطکاکی برای جریان لجن با استفاده از روابط ارایه شده برای جریان‌های لایه‌ای و آشفته به علت زیاد بودن تعداد متغیرها و پیچیدگی محاسبه ضرایب ساده نیست. لذا برای محاسبه افت ارتفاع اصطکاکی در لوله‌های انتقال لجن روش‌های ساده‌تری نیز ارایه شده است. یکی از این روش‌ها ساده‌سازی مساله جریان لجن با فرض جریان آب در لوله و استفاده از ضریب تصحیح می‌باشد. این ضریب تصحیح تابعی از درصد جامدات موجود در لجن بوده و مقدار آن را برای طراحی در شرایط معمولی از نمودار شکل (۴-۳- الف) و برای طراحی در شرایط محافظه‌کارانه، از نمودار شکل (۴-۳- ب) تعیین می‌کنند.

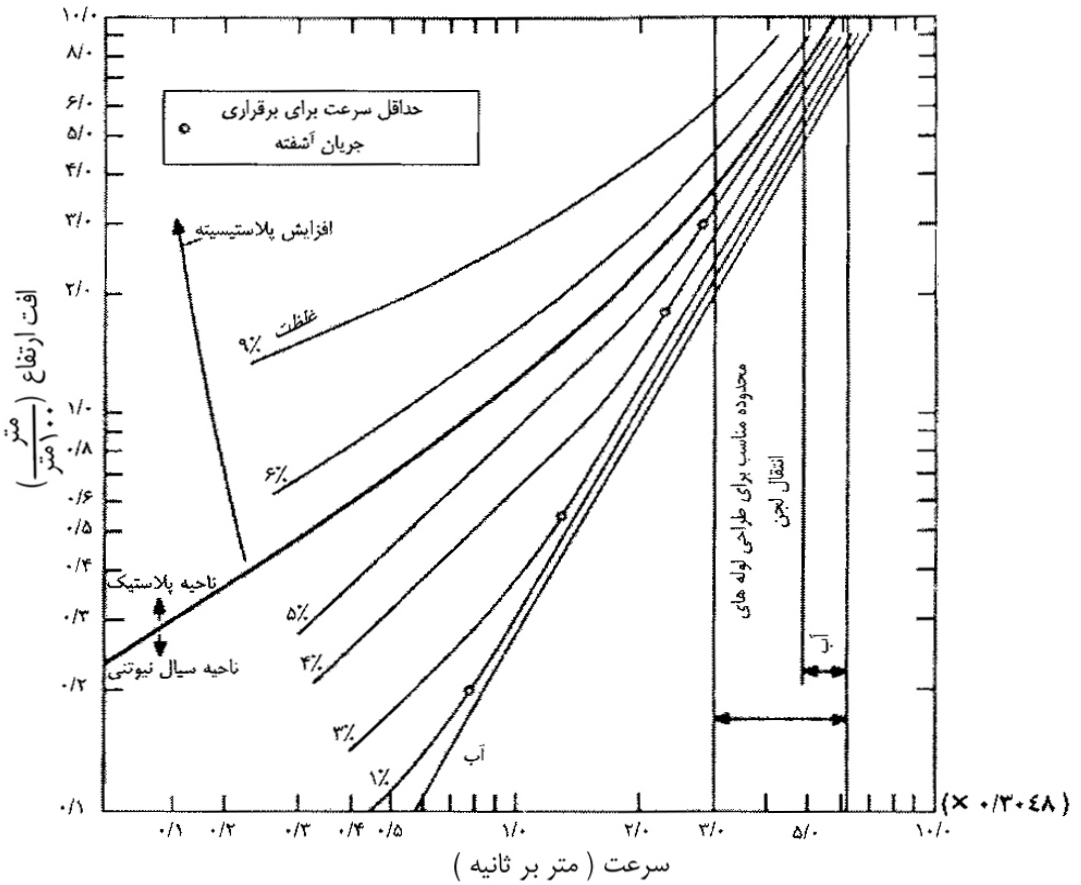


شکل ٤-٢- ضریب اصطکاک برای محاسبه افت ارتفاع لجن در تئوری پلاستیک بینگهام [۱۰]



شکل ٤-٣- تعیین ضریب تصحیح افت ارتفاع به‌دست آمده از رابطه دارسی، (الف) شرایط طراحی عادی، (ب) شرایط طراحی محافظه‌کارانه [۱۲]

یکی دیگر از روش‌های ساده محاسبه افت ارتفاع جریان لجن در مجاری بسته استفاده از رابطه هیزن- ویلیامز (رابطه۳-۱۱) است که اثر لزجت لجن در ضریب هیزن- ویلیامز (C_H) منعکس شده است. در این روش ضریب هیزن- ویلیامز بر مبنای مقدار ۱۰۰ برای آب، به‌صورت تابعی از درصد جامدات موجود در لجن از جدول (۴-۱) انتخاب می‌گردد. علاوه بر روش‌های بالا استفاده از نمودار شکل (۴-۴) که بر پایه مطالعات تجربی به‌دست آمده به نتایج رضایت بخشی منتج می‌شود.



شکل ٤-٤- نمودار تجربی تعیین افت ارتفاع برای جریان لجن با غلظت‌های مختلف در لوله [۲۷]

٤-٦- افت‌های موضعی در خطوط انتقال لجن

جهت محاسبه ارتفاع مربوط به افت‌های موضعی برای جریان لجن در مجاری بسته بهتر است طول معادل هر افت (رابطه۳-۸) تعیین و در نهایت طول معادل کل افت‌های موضعی به طول اصلی لوله اضافه شود و افت ارتفاع کل بر مبنای افت اصطکاکی با طول لوله کلی محاسبه گردد.

جدول ٤-١- ضریب هیزن- ویلیامز برای محاسبه افت ارتفاع برای انواع مختلف لجن [۱۲]

درصد جامدات لجن	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ضریب هیزن- ویلیامز	۱۰۰	۸۳	۷۱	۶۰	۵۳	۴۷	۴۲	۳۷	۳۳	۲۹	۲۵

فصل ۵

هیدرولیک سازه‌ها

۵-۱- کلیات

در تصفیه‌خانه آب سازه‌های هیدرولیکی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راهنما جزییات و مشخصات هیدرولیکی چند سازه مهم و متداول که تقریبا در اکثر تصفیه‌خانه‌ها وجود دارد، ارایه می‌شود. لازم به ذکر است در این نوشتار مجال بیان همه حالت‌های ممکن وجود ندارد، ولی هیدرولیک خیلی از این حالات شبیه مسایل مطرح شده در این فصل است.

۵-۲- سرریز

طبق تعریف، هر مانعی که بر سر راه جریان در کانال قرار گیرد و باعث شود تا آب در پشت آن بالا آمده و بر سرعت آب ضمن عبور از روی آن افزوده شود، سرریز نامیده می‌شود. سرریزها را می‌توان در دو حالت آزاد و مستغرق مورد مطالعه قرار داد. سرریزهای متداول در تصفیه‌خانه‌های آب به دو گروه سرریزهای لبه تیز و سرریزهای لبه پهن تقسیم می‌شوند.

۵-۲-۱- سرریزهای لبه تیز با جریان آزاد

این نوع سرریزها به‌صورت عمود بر بردار سرعت در مسیر جریان قرار می‌گیرند و رابطه بین بده (Q) و ارتفاع آب روی سرریز (H) به صورت $Q = KH^n$ خواهد بود که n تابعی از شکل سرریز و K تابعی از شکل و نحوه استقرار سرریز می‌باشد. از جمله مصارف عمده این سرریزها در تصفیه‌خانه‌های آب، کنترل سطح آب و احیانا اندازه‌گیری شدت جریان می‌باشد. سرریزها می‌توانند به شکل‌های مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه‌ای و غیره در تمام یا بخشی از سطح مقطع جریان عبوری ساخته شوند. در ادامه رابطه فوق برای حالت‌های متداول ارایه شده است.

الف- سرریزهای لبه تیز مستطیلی

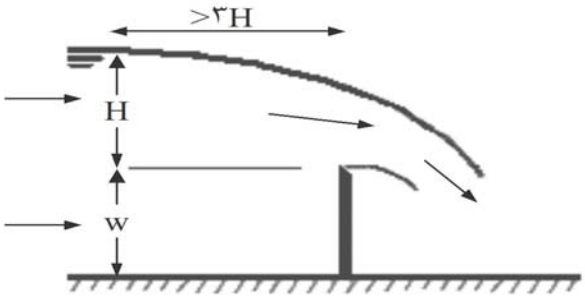
در این حالت، (شکل ۵-۱)، رابطه بین بده در واحد عرض و عمق روی سرریز به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۴]:

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \times H^{\frac{3}{2}} \qquad (۵-۱)$$

در رابطه بالا q بده در واحد عرض سرریز، H ارتفاع آب روی سرریز، g شتاب ثقل و C_d ضریب شدت جریان نامیده شده و برای مقادیر $\frac{H}{W} \leqslant 2$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H}{W} \qquad (۵-۲)$$

در این رابطه W ارتفاع سرریز نسبت به کف کانال در بالادست را نشان می‌دهد. البته استفاده از سرریز در شرایط $\frac{H}{W} < 0.5$ مطلوب‌تر می‌باشد و با توجه به تاثیر کم تغییر $\frac{H}{W}$ می‌توان C_d را ثابت و برابر ۰/۶۱۱ در نظر گرفت.



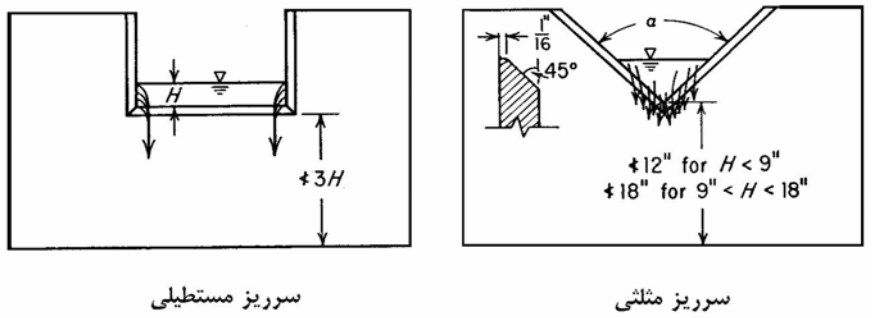
شکل ۵-۱- سرریز لبه تیز آزاد

ب- سرریزهای لبه تیز کوچک شده آزاد

در این حالت عرض سرریز کم‌تر از عرض کانال می‌باشد و جمع‌شدگی آب در موقع خروج از سرریز به‌وجود آمده و طول موثر سرریز (L_e) که امکان عبور آب را میسر می‌سازد از طول سرریز (L) کم‌تر شده و لازم است انقباض بر اثر کناره‌های سرریز را نیز در نظر گرفت. این سرریزها معمولا به شکل‌های مستطیلی و مثلثی ساخته شده و در تصفیه‌خانه‌های آب کاربرد بسیار زیادی جهت کنترل سطح آب و تنظیم بده عبوری دارند (شکل ۵-۲). روابط زیر برای محاسبه بده عبوری از آن‌ها پیشنهاده شده است:

- برای سرریز مستطیلی [۴]:

$$Q = \frac{2}{3} C_c (L - 0.1 \times nH) \sqrt{2g} \times H^{\frac{3}{2}} \qquad (۳-۵)$$



شکل ۵-۲- سرریز لبه تیز کوچک شده

C_c در رابطه (۵-۳) برابر با ۰/۶۱۱ در نظر گرفته می‌شود (n تعداد فشردگی جانبی است و مقدار آن ۰، ۱ یا ۲ می‌باشد).

- برای سرریز مثلثی با زاویه راس α [۴]:

$$Q = \frac{8}{15} C_c \times \tan(\frac{\alpha}{2}) \times \sqrt{2g} \times H^{\frac{5}{2}} \qquad (۴-۵)$$

اگر زاویه راس α برابر با ۹۰^o باشد و مقدار $C_c = 0.585$ در نظر گرفته شود، داریم:

$$Q = 1.382 H^{\frac{5}{2}} \qquad (۵-۵)$$

ج- سرریز تناسبی

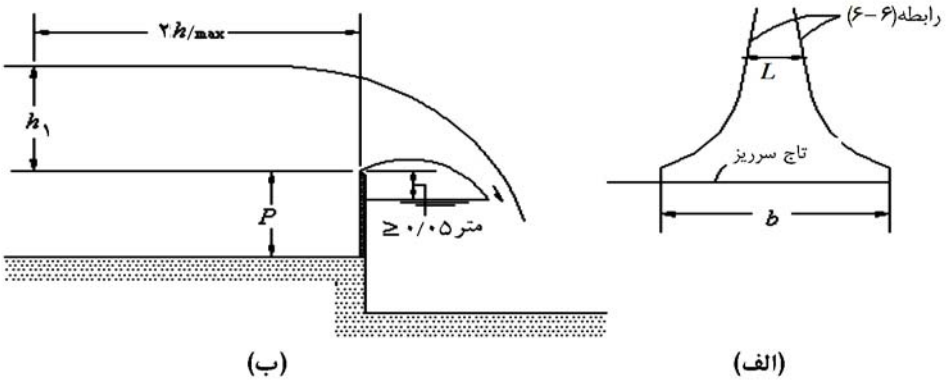
در صورتی که طراحی سرریز به گونه‌ای انجام پذیرد که بده به‌صورت خطی با تغییرات H تغییر کند، آن سرریز را سرریز تناسبی می‌نامند. این نوع سرریز از یک مقطع مستطیلی که به یک قسمت انحنادار متصل است، تشکیل شده است (شکل ۵-۳). در این قسمت ضمن ارایه رابطه بین بده و ارتفاع در سرریز تناسبی نحوه طراحی هیدرولیکی این سازه ارایه خواهد شد. در سرریز تناسبی رابطه (۵-۶) بین شدت جریان عبوری و عمق آب برقرار است [۴]:

$$Q = 1.57 C_d \sqrt{2g} \times L H^{\frac{3}{2}} \qquad (۵-۶)$$

در این رابطه Q بده جریان، H ارتفاع جریان روی سرریز و C_d ضریب بده می‌باشد که برای سرریز تناسبی بین ۰/۶ تا ۰/۹ تغییر می‌کند و در طراحی محافظه‌کارانه این مقدار برابر با ۰/۶ انتخاب می‌شود. همچنین در این رابطه همان‌طور که در شکل (۵-۳) نشان داده شده است، L طول بازشدگی روی سرریز، که متغیر است، را نشان می‌دهد. با جایگزینی مقادیر بالا در رابطه (۵-۶) خواهیم داشت:

$$Q = 4.173[LH^{1/2}] \times H \qquad (۵-۷)$$

از آنجایی که در سرریز تناسبی، بده با عمق جریان روی سرریز نسبت مستقیم دارد، بنابراین در رابطه بالا لازم است مقدار $(LH^{1/2})$ ثابت نگه داشته شود و به این ترتیب طول بازشدگی L در هر ارتفاعی مشخص می‌گردد.



شکل ۵-۳- سرریز تناسبی، (الف) مقطع عبور جریان، (ب) مقطع طولی

۵-۲-۲- سرریزهای لبه پهن

در این نوع، لبه سرریز در امتداد جریان به اندازه کافی نسبت به ارتفاع تیغه آب روی آن پهن بوده و در مقایسه با سایر ابعاد، دارای اندازه قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. تاج سرریزهای لبه پهن می‌تواند افقی یا انحنادار باشد. این نوع سرریز بیش‌تر در شرایط خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد و در تصفیه‌خانه‌های آب کم‌تر کاربرد دارند. روابط این نوع سرریزها نیز مانند روابط سرریز مستطیلی لبه تیز با ضریب بده خاص خود می‌باشد.

۵-۲-۳- سرریزهای لبه تیز در حالت مستغرق

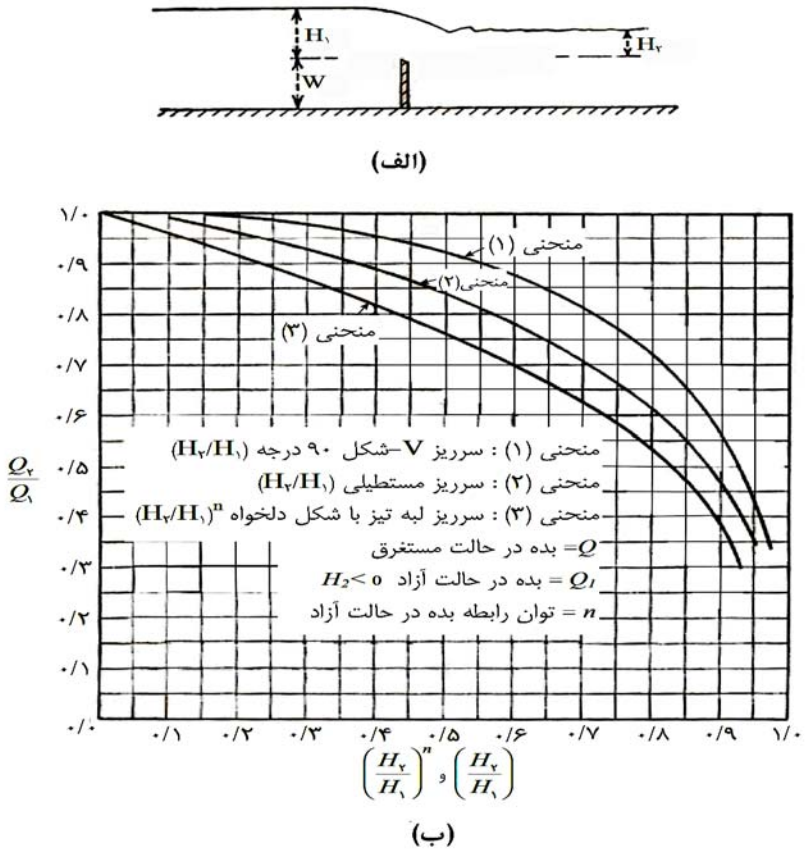
اگر تراز پایاب (جریان در پس از سرریز) به گونه‌ای نسبت به تاج سرریز در نظر گرفته شود که ریزش جریان از روی سرریز را تحت تاثیر قرار ندهد، جریان آزاد نامیده می‌شود. اما اگر تراز پایاب به حدی برسد که جریان عبوری از روی سرریز را تحت تاثیر قرار دهد در این صورت آب پس زده می‌شود و برای عبور همان بده عمق آب بالادست افزایش می‌یابد و یا بده نسبت به حالت آزاد با همان عمق در بالادست، کم‌تر می‌شود. در این صورت جریان مستغرق نامیده می‌شود. در شکل (۵-۵) نسبت $\frac{H_2}{H_1}$، نسبت استغراق نامیده شده که شدت جریان سرریز در این حالت (Q)، به آن بستگی دارد. مقدار Q با تقریب بسیار خوبی از رابطه (۵-۸) به‌دست می‌آید [۴]:

$$Q = Q_1 \times [1 - (\frac{H_2}{H_1})^n]^{0.385} \qquad (۵-۸)$$

علاوه بر رابطه فوق می‌توان از نمودار شکل (۵-۵) که دقیق‌تر است نیز برای به‌دست آوردن بده عبوری از روی سرریز در حالت مستغرق استفاده نمود. در رابطه (۵-۸)، Q_1 بده در حالت جریان آزاد با ارتفاع H_1 و n نمای H_1 در رابطه $Q = KH_1^n$ را نشان می‌دهند (در سرریز مستطیلی $n = 1.5$). برای حصول اطمینان از جریان آزاد، لازم است تراز آب پایین دست به اندازه کافی از تراز آب در بالادست سرریز، پایین تر در نظر گرفته شود. معمولا ارتفاعی که باعث مستغرق شدن سرریز می‌شود، ۰/۳ عمق بالادست است ($\frac{H_2}{H_1} < 0.3$) ولی جهت اطمینان بهتر است که تراز آب در پایین دست سرریز حداکثر در سطح تاج سرریز قرار گیرد. لازم به ذکر است که در حالت مستغرق شدن سرریز مقدار افت کم‌تر از حالت جریان آزاد است ولی ارتفاع دیوارهای کانال بیش‌تر خواهد شد.

۵-۳- دریچه

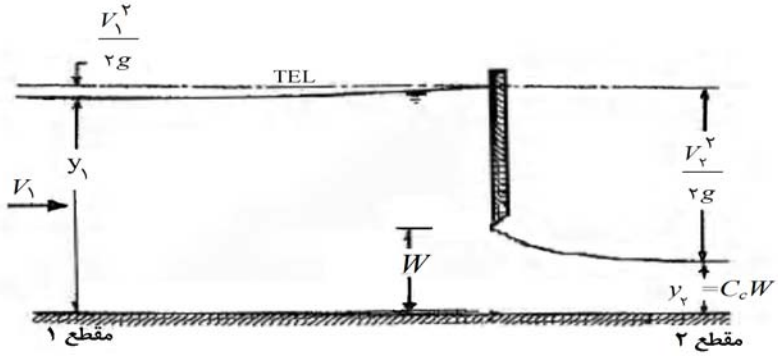
دریچه‌ها از جمله سازه‌های کنترل‌کننده جریان هستند که در شکل‌ها و عملکردهای متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دریچه‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب بیش‌تر از نوع دریچه‌های زیرگذر کشویی بوده و تنظیم و کنترل جریان بر اساس میزان بازشدگی از پایین‌دست انجام می‌گیرد. هیدرولیک جریان در عبور از دریچه‌ها را می‌توان در دو حالت جریان خروجی آزاد و جریان خروجی مستغرق مورد بررسی قرار داد.



شکل ۵-۵- جریان در سرریز مستغرق، (الف) سرریز مستغرق، (ب) منحنی بده در حالت مستغرق [٤]

۵-۳-۱- دریچه کشویی با جریان خروجی آزاد

در این حالت جریان خروجی از زیر دریچه تابع عمق آب در پایین دست نمی‌باشد و جریان در بالادست دریچه به صورت زیر بحرانی و بلافاصله پس از آن به‌صورت فوق بحرانی وجود خواهد داشت. مطابق شکل (۵-۶) عمق آب در کانال پس از دریچه ،y_2 تابع میزان باز شدگی دریچه (W) و ضریب انقباض آن (C_c) می‌باشد.



شکل۵-٦- دریچه کشویی با جریان خروجی آزاد

$$y_2 = C_c \times W \qquad (۹-۶)$$

با برقراری رابطه انرژی بین دو مقطع ۱ و ۲ برای بده در واحد عرض عبوری از زیر دریچه، خواهیم داشت:

$$q = C_d W\sqrt{2gy_1} \qquad (۱۰-۵)$$

ضریب بده C_d اغلب به‌صورت تجربی در نظر گرفته می‌شود. همچنین می‌توان مقدار C_d را از رابطه (۵-۱۱) به‌دست آورد:

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1+\frac{C_c W}{y_1}}} \qquad (۱۱-۵)$$

مقادیر C_c تابعی از $\frac{W}{E_1}$ بوده و از جدول (۵-۱) انتخاب می‌شود (E_1 انرژی کل در مقطع ۱ و برابر با $y_1+\frac{V_1^2}{2g}$ می‌باشد).

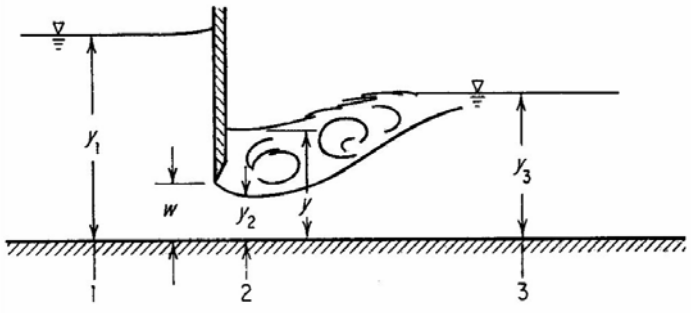
جدول ۵-۱- ضریب انقباض جریان C_c [٤]

W/E_1	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
C_c	۰/۶۱۱	۰/۶۰۶	۰/۶۰۲	۰/۶۰۰	۰/۵۹۸	۰/۵۹۸

۵-۳-۲- دریچه‌های کشویی با خروجی مستغرق

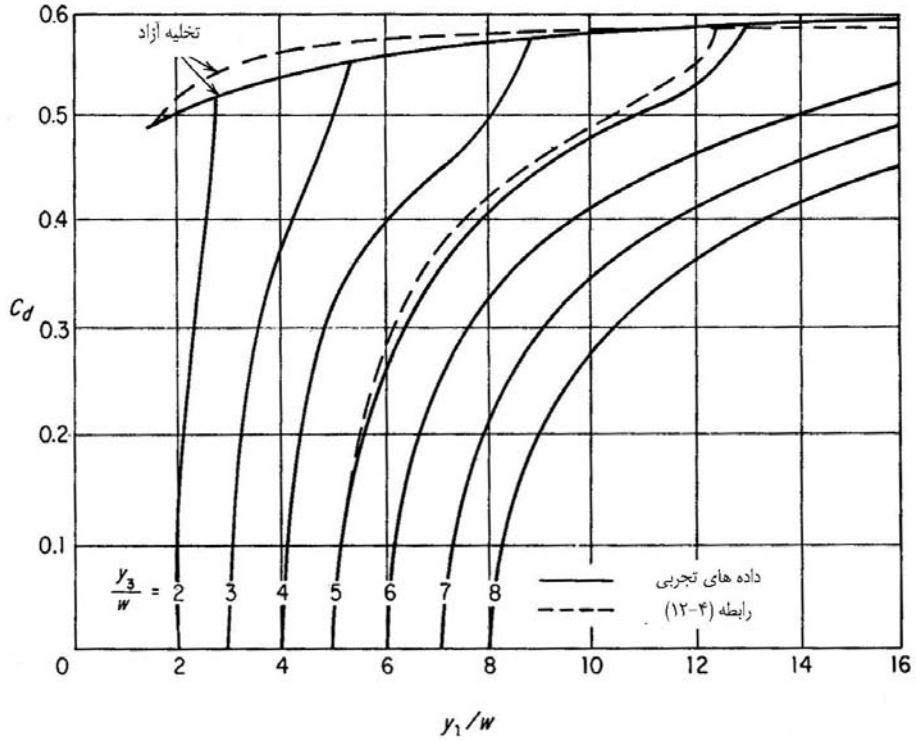
در جریان خروجی آزاد گفته شد که عمق پایاب به گونه‌ای است که تاثیری روی بده خروجی ندارد. اگر با ثابت ماندن بده، عمق پایاب (y_3 در شکل (۵-۷)) افزایش یابد، پرش هیدرولیکی به‌وجود آمده، بتدریج به سمت بالادست حرکت کرده تا زمانی که شروع پرش به محل کوچک‌ترین عمق جریان (y_2) برسد. در این حالت هر مقدار افزایش اضافی در y_3 باعث غرق شدن پرش گشته و لذا عمق جریان در مقطع ۲ بیش از C_cW خواهد شد و چنانچه بخواهیم شدت جریان ثابت بماند می‌باید مقدار عمق در بالادست، y_1، را افزایش دهیم (شکل ۵-۷). این حالت را جریان مستغرق می‌نامند و برای محاسبه مقدار y_1 در این حالت ابتدا به کمک رابطه (۵-۱۲) عمق جریان پس از دریچه (y) را محاسبه و با برقراری رابطه مومنتم بین مقطع قبل و بعد از دریچه، برای مقاطع مستطیلی با بده در واحد عرض (q)، مقدار y_1 محاسبه می‌شود [۴].

$$F_2 = F_3 \xrightarrow{\text{کانال مستطیلی}} \frac{g^2}{gy_2}+\frac{y^2}{2}=\frac{g^2}{gy_3}+\frac{y^{\frac{2}{3}}}{2} \qquad (۱۲-۵)$$



شکل ۵-۷- دریچه کشویی با جریان خروجی مستغرق

علاوه بر رابطه (۵-۱۱)، برای تعیین بده در حالت استغراق می‌توان از رابطه (۵-۱۰) استفاده نمود و باید مقادیر ضریب C_d را که تابعی از $\frac{y_1}{W}$ و $\frac{y_3}{W}$ است از نمودار شکل (۵-۸) به‌دست آورد.



شکل ۵-۸- مقادیر C_d برای دریچه کشویی با جریان خروجی مستغرق [٤]

۵-۳-۳- دریچه‌های با جریان آزاد در ابتدای لوله

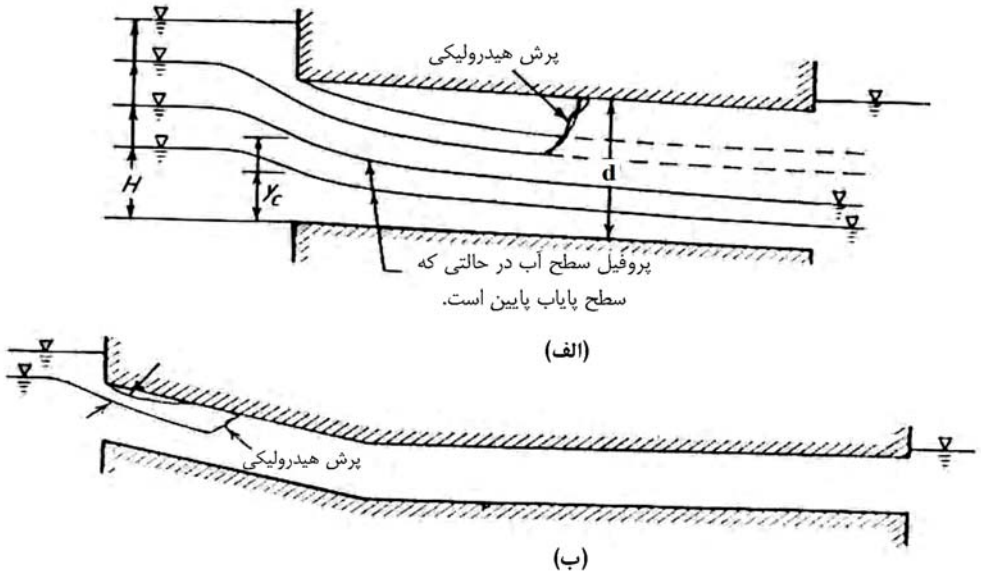
در قسمت‌های مختلفی از تصفیه‌خانه‌های آب از دریچه برای کنترل بده جریان ورودی به لوله استفاده می‌شود. این نوع دریچه‌ها وقتی که کاملا باز باشند، بیش‌ترین بده را از خود عبور داده و معمولا بیش‌ترین افت در حالت بده حداکثر و در نتیجه سرعت حداکثر در نظر گرفته می‌شود. البته در طراحی هیدرولیکی با باز بودن کامل دریچه، هیدرولیک جریان همانند آبروها می‌باشد و بسته به نسبت عمق بالادست به قطر (یا ارتفاع مجرا) و شیب مجرا یکی از حالت‌های جریان آزاد، تحت فشار و یا بینابینی اتفاق می‌افتد. لذا اگر برای شرایط افت حداکثر طراحی انجام شود، در حالت‌های نیمه باز که بده کم‌تر و لذا افت ارتفاع کوچک‌تر است، مسلما مناسب خواهد بود.

۵-۳- آبرو[1]

یکی دیگر از سازه‌هایی که ممکن است در تصفیه‌خانه‌های آب مورد استفاده قرار گیرد، آبروها هستند. این نوع سازه‌ها اگرچه از نظر اجرایی ساده هستند، اما طرح هیدرولیکی آن‌ها تا حدودی پیچیده و تابعی از عوامل مختلف است که به سادگی قابل تقسیم به جریان‌های تحت فشار یا آزاد نمی‌باشد، بلکه در برخی موارد ترکیبی از این دو حالت را دارا خواهد بود. از نظر هیدرولیکی پر یا نیمه پر بودن جریان عبوری از آبرو حایز اهمیت بوده و بسته به ارتفاع آب در بالادست و میزان افت انرژی، ممکن است هر دو حالت پر یا نیمه پر اتفاق افتد. به عبارت دیگر عوامل مختلف نظیر قطر (یا ابعاد مقطع برای مجاری غیر دایره‌ای)، طول و زبری آبرو، ارتفاع آب

1 - Culvert

در بالادست و پایین دست و نیز شیب آبرو در چگونگی جریان در داخل آبرو موثر می‌باشند. در تصفیه‌خانه‌های آب مبنای طراحی، سرعت جریان در آبروها است که باید به حدی باشد که از ته‌نشین شدن ذرات معلق آب در آن جلوگیری شود.



شکل ۵-۹- آبرو، (الف) انواع جریان در آبرو با شیب ثابت، (ب) آبرو با شیب متغیر

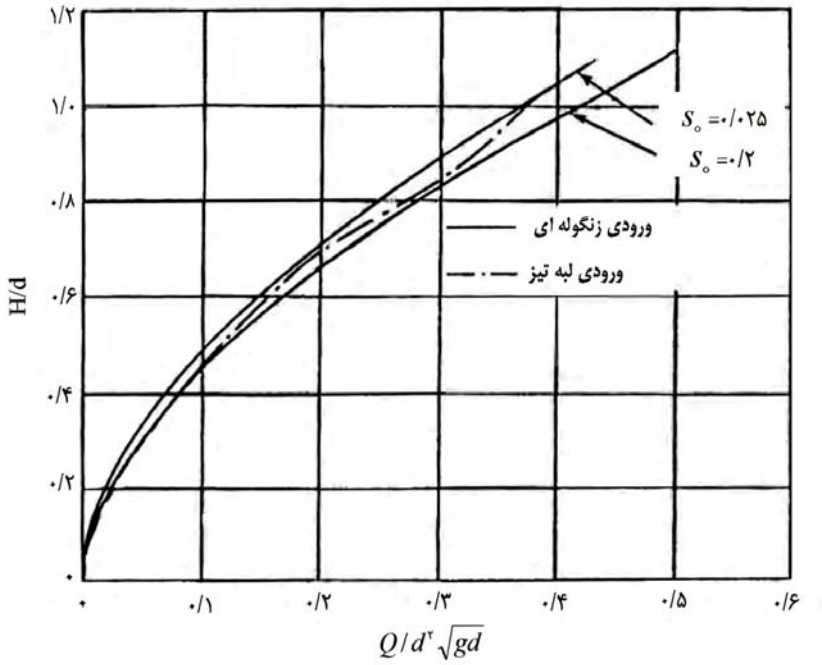
در آبروها مقدار بده با اعمال معادلات پیوستگی و انرژی بین دو مقطع ابتدایی و انتهایی به‌دست می‌آید و بر حسب آن که شیب کف آبرو تند یا ملایم باشد، انواع مختلف جریان در داخل آن تشکیل می‌شود، که در شکل (۵-۹) حالت‌های مختلف نشان داده شده است. در ادامه حالت‌های متداول جریان برای حالت‌های غیرمستغرق که شیب آبرو تند بوده و جریان از بالادست کنترل می‌شود، بررسی می‌گردد. برای سایر حالت‌های مستغرق، جریان بر مبنای جریان در مجاری تحت فشار در نظر گرفته می‌شود.

۵-۳-۱- آبرو با مقطع دایره‌ای و ورودی غیر مستغرق

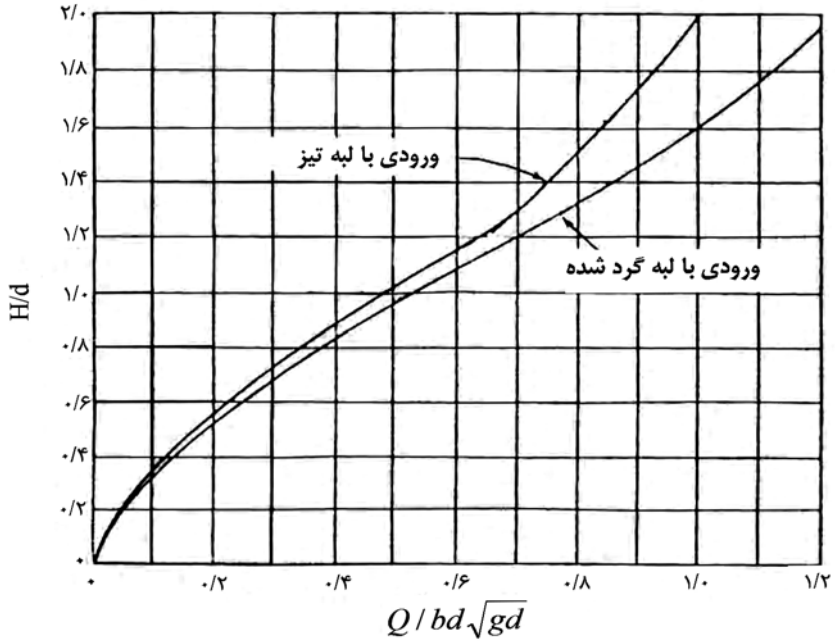
در نمودار شکل (۵-۱۰) رابطه بین بده (Q)، ارتفاع (H) و قطر (d) آبرو با مقطع دایره‌ای برای حالت‌های مختلف شیب کف آبرو و شکل ورودی نشان داده شده است. لازم به ذکر است در سازه‌های انتقال‌دهنده آب مقطع دایره‌ای نسبت به مقاطع مستطیلی به علت نوسانات جریان آب و امکان ته‌نشینی کم‌تر مواد معلق در آب، کاربرد بیش‌تری دارد.

۵-۳-۲- آبرو با مقطع مستطیلی

در این حالت نیز رابطه بین بده (Q)، ارتفاع (H) و ارتفاع مقطع مستطیلی (d) و عرض (b) آبرو برای حالت‌های مختلف در نمودار شکل (۵-۱۱) ترسیم شده است.



شکل۵-۱۰- مشخصات بده جریان در آبرو دایره‌ای با ورودی غیرمستغرق [٤]



شکل ۵-۱۱- مشخصات بده جریان در آبرو کوتاه با مقطع مستطیلی [٤]

فصل ۶

هیدرولیک تلمبه‌ها

٦-١- کلیات

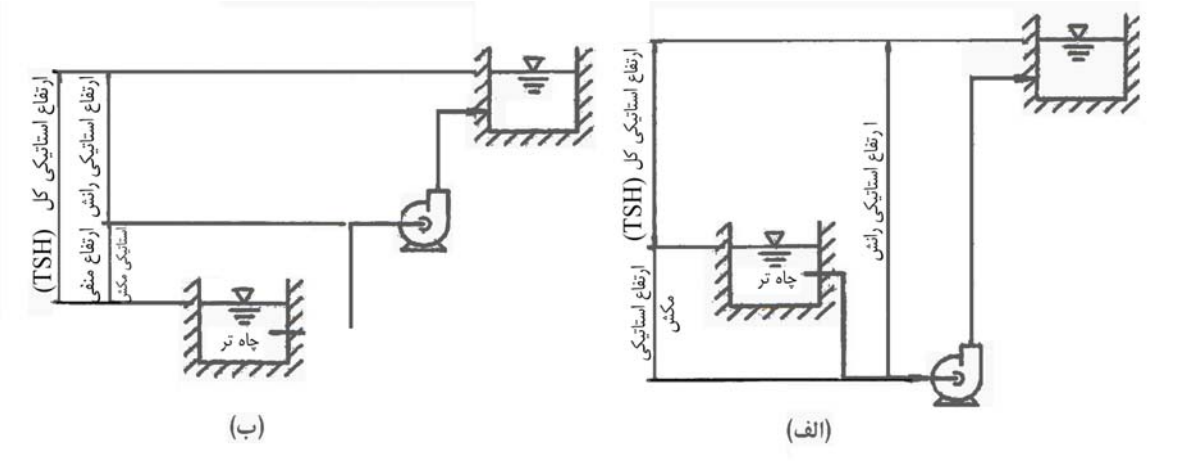
در تصفیه‌خانه‌های آب برای انتقال آب، مواد شیمیایی و پساب یا لجن بین واحدهای مختلف از تلمبه استفاده می‌شود. تلمبه انرژی لازم را با افزایش ارتفاع و سرعت به آب می‌دهد تا جریان از نقاط با ارتفاع کم‌تر به سمت نقاط با ارتفاع بیش‌تر جریان یافته یا افت ارتفاع آن را جبران کند. لازم به ذکر است در این فصل نیز همانند سایر فصل‌ها تنها به جنبه‌های هیدرولیکی مساله پرداخته شده و از بیان نکات مطرح در سایر زمینه‌ها خودداری شده است. لذا برای مطالعه بیش‌تر در مورد نحوه انتخاب و بهره‌برداری از تلمبه‌ها به نشریه "راهنمای طراحی تلمبه‌خانه‌های آب" شماره۳۰۰ – الف طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی و سایر کتب مرجع در این زمینه مراجعه شود.

٦-٢- مبانی هیدرولیکی

در بررسی هیدرولیکی تلمبه‌خانه که در تصفیه‌خانه‌های آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، لازم است ابتدا برخی تعاریف و روابط کلی بیان شود.

٦-٢-١- ارتفاع

در مطالعه هیدرولیک تلمبه‌خانه با انواع مختلف ارتفاع مواجه هستیم که عبارتند از: ارتفاع مکش استاتیکی، ارتفاع استاتیکی رانش، ارتفاع استاتیکی کل (TSH)[1]، ارتفاع کل مورد نیاز یا ارتفاع دینامیکی کل (TDH)[2] که برابر مجموع ارتفاع استاتیکی کل، ارتفاع اصطکاکی و افت‌های موضعی می‌باشد. این ارتفاع‌ها در شکل (۶-۱) نشان داده شده‌اند. ارتفاع اصطکاکی شامل افت ارتفاع در لوله‌های مکش و رانش است که توسط رابطه دارسی- وایسباخ و یا رابطه هیزن-ویلیامز محاسبه می‌گردد. افت‌های موضعی نیز شامل افت ایجاد شده توسط اتصالات، شیرآلات و خم‌ها می‌باشند و به صورت تابعی از ارتفاع سرعت بیان می‌شوند.



شکل ٦-١- انواع ارتفاع، (الف) ارتفاع مثبت در ورودی تلمبه، (ب) ارتفاع منفی در ورودی تلمبه

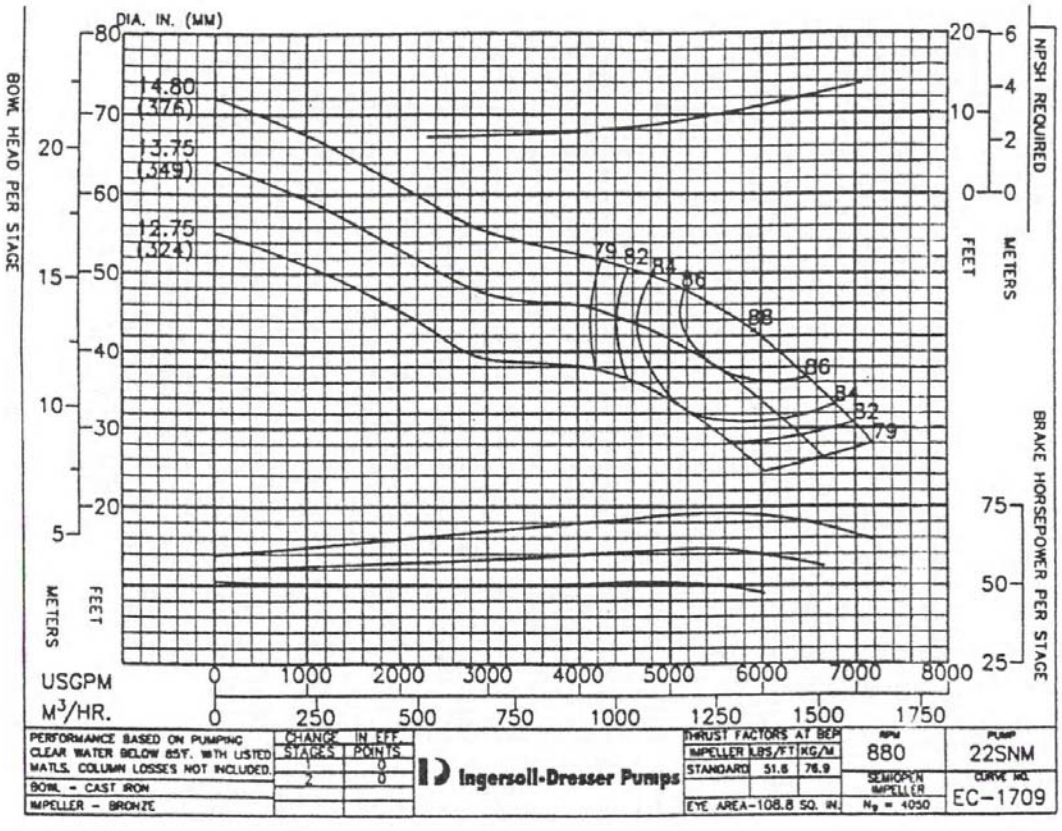
1 –Total Static Head
2 – Total Dynamic Head

۶-۲-۲- خلاء زایی[1]

خلاءزایی یا حفره‌زایی پدیده‌ای است که در شرایطی که فشار سیال تا حد مشخصی کاهش می‌یابد، رخ می‌دهد. در این وضعیت حباب‌های ریزی در سیال به‌وجود می‌آیند که پس از انتقال به ناحیه‌های پر فشار ترکیده و خوردگی را سبب می‌شوند. خلاءزایی بیش‌تر در تلمبه‌ها، شیرهای کنترل و سایر مکآن‌هایی که سیال با سرعت زیاد جریان دارد، به‌وجود می‌آید. روش‌های هیدرولیکی کاهش خطر خلاءزایی شامل افزایش قطر لوله مکش ورودی به تلمبه، کاهش سرعت تلمبه، کاهش ارتفاع منفی استاتیکی در سمت مکش تلمبه و کاهش بده جریان و یا استفاده از چند تلمبه کوچک‌تر به جای یک تلمبه بزرگ می‌باشد. بررسی پدیده خلاءزایی خارج از موضوع این راهنما است.

۶-۲-۳- منحنی‌های مشخصه

مشخصات تلمبه نظیر ارتفاع، بازده، توان مصرفی و دور موتور برای هر بده خاص در منحنی‌های مشخصه نشان داده می‌شوند. منحنی‌های مشخصه تلمبه، که نمونه‌ای از آن در شکل (۶-۲) نشان داده شده است، میزان تغییرات توان ورودی، بازده و ارتفاع را در بده‌های مختلف نشان می‌دهند. سازندگان تلمبه، این منحنی‌ها را همراه با تلمبه عرضه می‌کنند.



شکل ۶-۲- نمونه‌ای از منحنی‌های مشخصه برای تلمبه سانتریفوژ برای اندازه‌های مختلف پره

1 – Cavitation

۶-۲-۴- منحنی ارتفاع- بده

در صورتی که منحنی ارتفاع- بده سامانه و منحنی مشخصه تلمبه همانند شکل (۶-۳-د) در یک دستگاه مختصات رسم شوند، نقطه تقاطع دو منحنی، نقطه کار سامانه را نشان می‌دهد و با مشخص‌شدن این نقطه بده، ارتفاع و سایر مشخصات تلمبه و سامانه به‌دست خواهد آمد. در ایستگاه تلمبه‌زنی که از چاه تر با نوسانات زیاد سطح آب استفاده می‌شود (یا به‌طور کلی نوسانات ارتفاع کل استاتیکی وجود داشته باشد)، بهتر است از دو منحنی افت یکی در تراز حداکثر سطح آب در چاه تر و دیگری در تراز حداقل سطح آب در چاه تر استفاده شود.

۶-۲-۵- توان تلمبه

توان مفید یا هیدرولیکی (P_H)، مقدار توانی است که توسط تلمبه به سیال داده می‌شود و مقدار آن تابعی از ارتفاع و بده می‌باشد:

$$P_H = \gamma Q H \qquad (۱-۶)$$

۶-۲-۶- بازده

بازده تلمبه از تقسیم توان هیدرولیکی بر توان مصرفی توسط تلمبه به‌دست می‌آید:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{pump}} = \frac{\gamma Q H}{P_{pump}} \qquad (۲-۶)$$

معمولا بازده تلمبه به ازای بده‌ها و ارتفاع‌های مختلف محاسبه و همراه با منحنی مشخصه ارایه می‌شود (شکل (۶-۲)).

۶-۲-۷- ارتفاع مکش مثبت خالص (NPSH)[1]

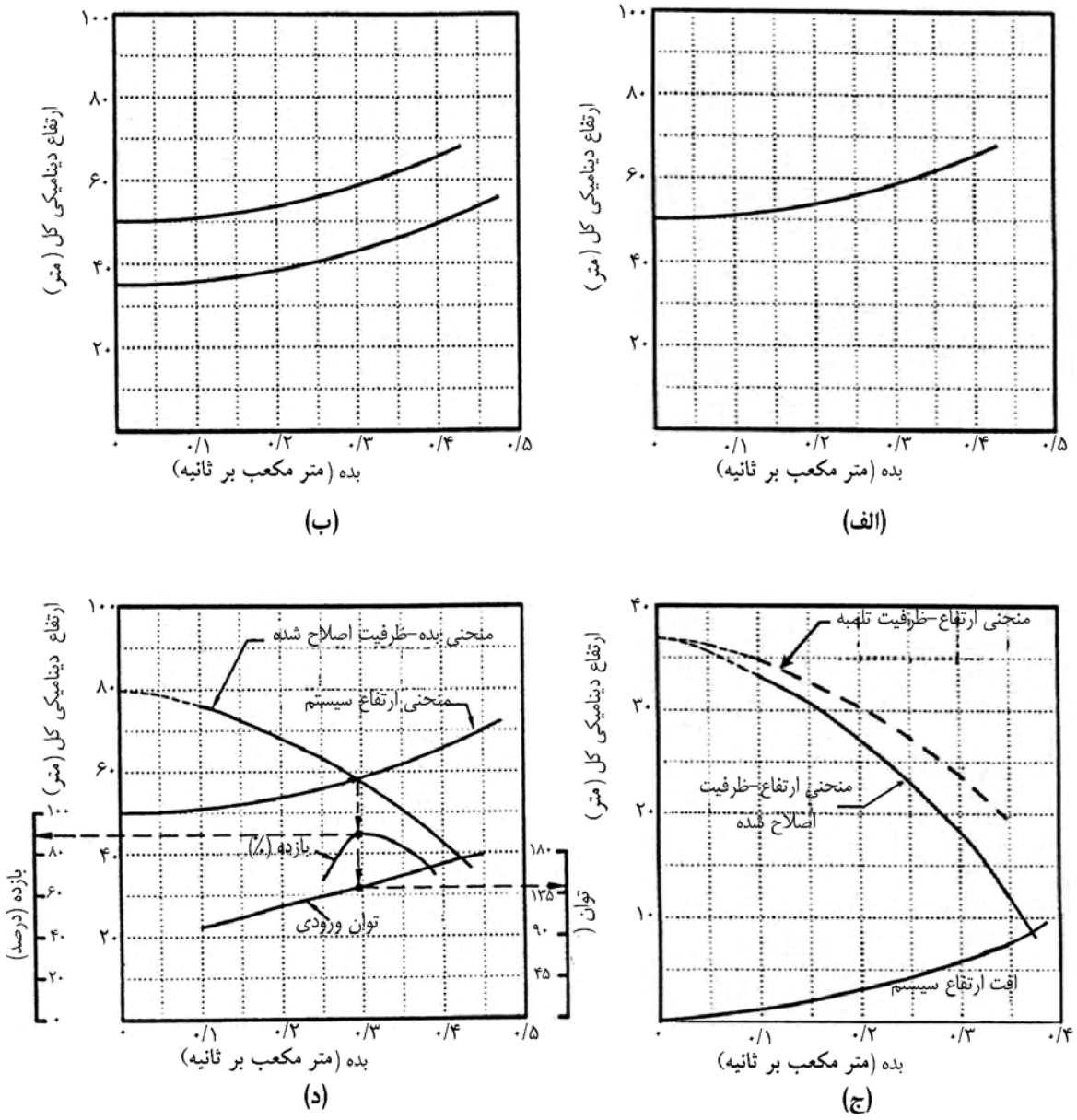
در قسمت ورودی تلمبه فشار نسبت به سطح آب در چاه کم‌تر می‌شود. فشار به‌وجود آمده در این مقطع فشار مکش یا ارتفاع مکش مثبت خالص (NPSH) نامیده می‌شود. NPSH به دو گروه ارتفاع مکش مثبت خالص موجود در سامانه و ارتفاع مثبت خالص مورد نیاز تلمبه دسته‌بندی می‌شود. ارتفاع مکش مثبت خالص موجود به موقعیت و نحوه ورود آب به تلمبه بستگی دارد و مقدار آن از رابطه (۶-۳) محاسبه می‌شود. ارتفاع مثبت خالص مورد نیاز تلمبه که توسط سازنده تلمبه ارایه می‌گردد، حداقل ارتفاع مثبتی است که در دهانه مکش تلمبه باید وجود داشته باشد. در این صورت مقدار محاسبه شده برای ارتفاع مثبت خالص موجود در سامانه (رابطه (۶-۳)) باید برابر یا بزرگ‌تر از ارتفاع مکش مثبت خالص مورد نیاز تلمبه باشد.

$$NPSH = H_{abs} + H_s - h_l - H_{vp} \qquad (۳-۶)$$

در این رابطه H_{abs} ارتفاع فشار مطلق محیط بر روی سطح آب در چاه مکش، H_s ارتفاع استاتیکی مایع بالا تلمبه (اگر سطح مایع در چاه تر پایین‌تر از محور پروانه باشد، H_s را منفی در نظر می‌گیریم)، h_L افت ارتفاع کل در لوله‌های مکش (مجموع افت اصطکاکی و موضعی)، H_{vp} فشار مطلق بخار سیال در دمای مورد نظر را نشان می‌دهند. ارتفاع مثبت خالص مورد نیاز تلمبه در بده‌های مختلف همراه با منحنی مشخصه تلمبه توسط سازنده ارایه می‌گردد. بعضی اوقات با داشتن ارتفاع مکش تلمبه، ارتفاع نصب تلمبه تعیین می‌شود. در هر صورت مساله ارتفاع مکش در تلمبه‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه آب می‌تواند اهمیت داشته باشد.

---

1 - Net Positive Suction Head

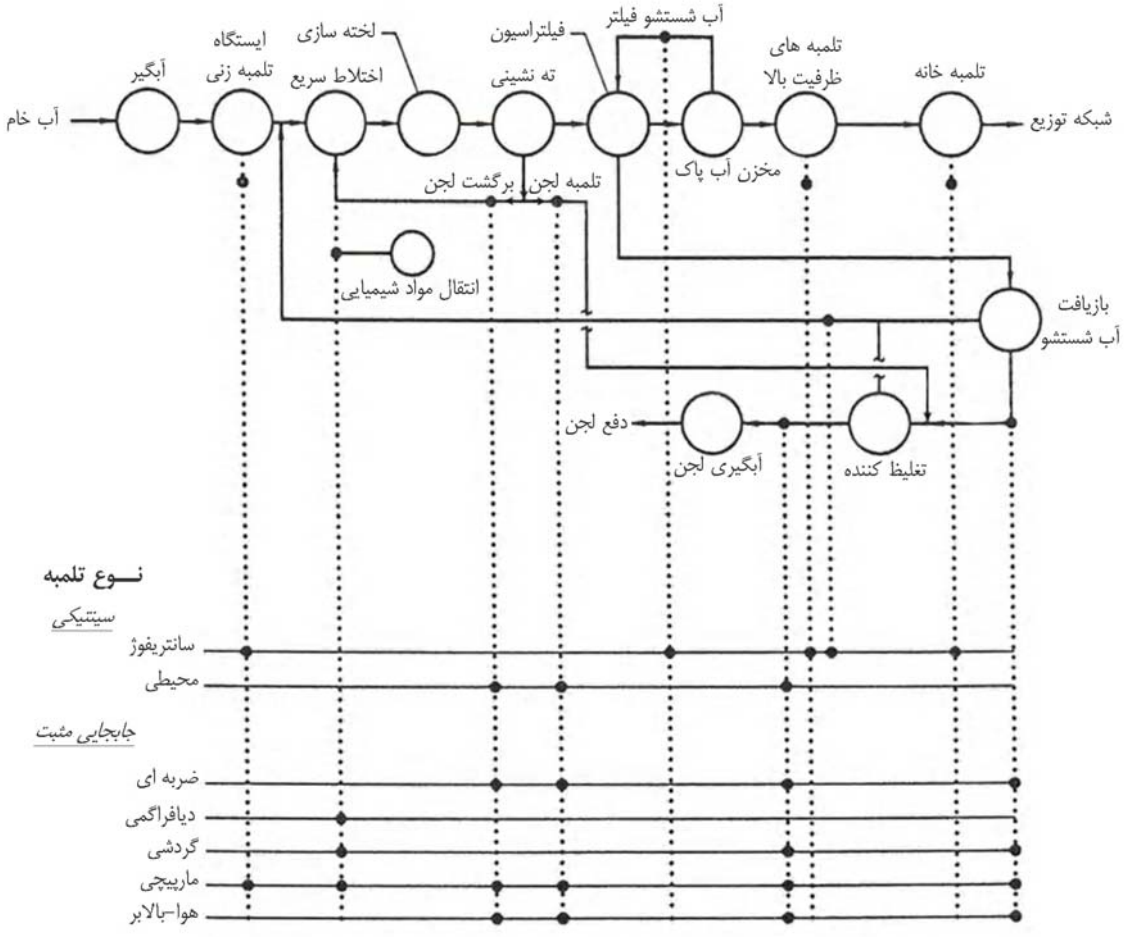


شکل ٦-٣- تقاطع منحنی مشخصه تلمبه و منحنی ارتفاع– بده سیستم برای تعیین نقطه کارکرد تلمبه

٦-٣- انواع تلمبه‌ها و کاربرد آن‌ها

تلمبه‌ها به دو گروه تلمبه‌های با انرژی جنبشی[1] و تلمبه‌های جابجایی مثبت[2] تقسیم می‌شوند. در هر یک از این دو گروه انواع مختلفی از تلمبه وجود دارد که هر یک از آن‌ها در شرایط خاص خود مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل (۶-۴) موارد استفاده انواع تلمبه‌ها در مقاطع مختلف تصفیه خانه آب ارایه شده است.

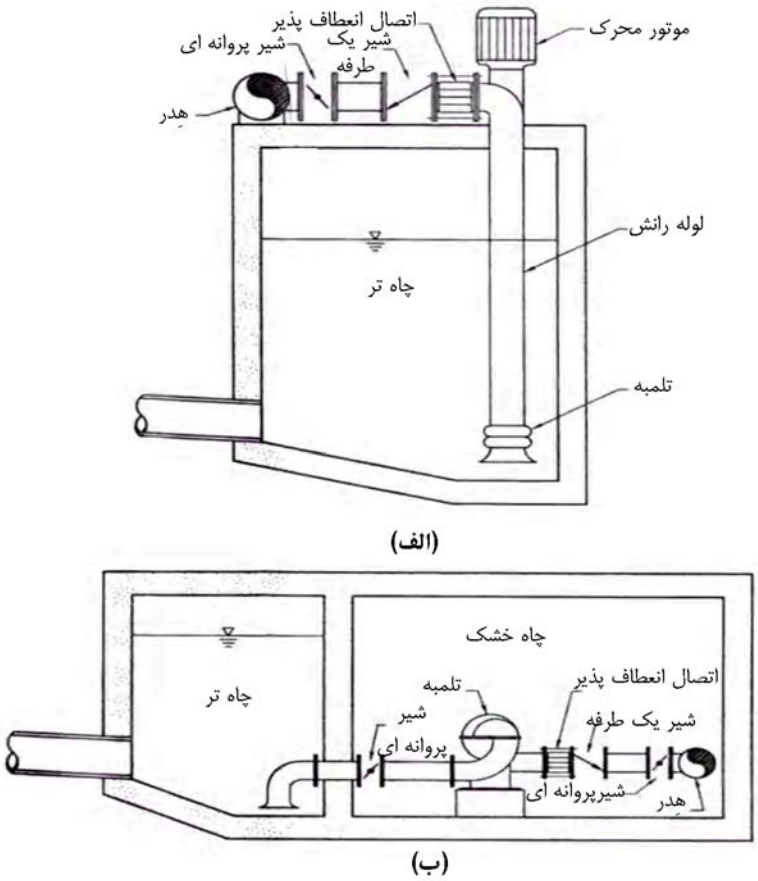
1 - Kinetic
2 - Positive Displacement



شکل ٦-٤- کاربردهای رایج تلمبه در قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه آب [۱۳]

٦-٤- طراحی ایستگاه تلمبه‌زنی

ایستگاه‌های تلمبه‌زنی به دو نوع ایستگاه با چاه خشک و ایستگاه با چاه تر تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل (۶-۵) وضعیت ایستگاه تلمبه‌زنی با چاه خشک و تر نشان داده شده است. معمولا انتخاب نوع ایستگاه تلمبه‌زنی به تجهیزات انتخاب شده در مراحل قبل بستگی دارد. برای مثال تلمبه‌های مستغرق و تلمبه‌های عمودی نیازمند چاه تر هستند. در صورتی که تلمبه‌های افقی نیازمند چاه خشک می‌باشند.



شکل ٦-٥- قسمت‌های تلمبه‌خانه آب، (الف) چاه تر، (ب) چاه خشک

از جمله نکات هیدرولیکی مهم در انتخاب نوع تلمبه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- ظرفیت تلمبه‌زنی ایستگاه مورد نظر باید طوری باشد که هرگاه بزرگ‌ترین تلمبه از مدار خارج شد، سامانه توانایی تلمبه‌زنی بده حداکثر طراحی را داشته باشد.

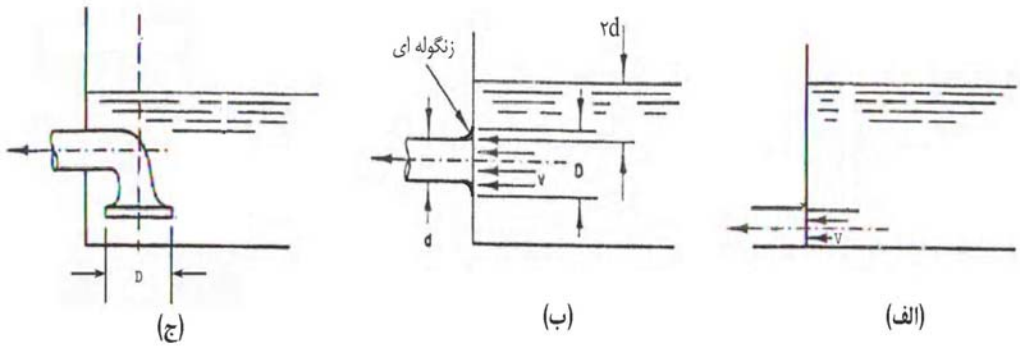
ب- طراحی هیدرولیکی لوله مکش باید به گونه‌ای باشد که افت ارتفاع در آن حداقل شود. همچنین لازم است از ورود هوا و ایجاد اغتشاش در جریان ورودی جلوگیری شود. برای جلوگیری از آشفتگی جریان باید لوله مکش تا حد امکان مستقیم و کوتاه باشد و در شرایطی که مجبور به استفاده از زانویی هستیم از زانویی‌های با شعاع انحنای بزرگ استفاده شود. استفاده از ورودی با دهانه زنگوله‌ای[1] معمولا از ورودیهای مستقیم دارای عملکرد بهتری می‌باشد. علت این امر جلوگیری از ایجاد جریان گردابی می‌باشد.

ج- برای برقراری شرایط ایده‌آل از لحاظ هیدرولیکی سرعت در مدخل ورودی تلمبه باید مناسب باشد به‌طوری که در بده حداقل هم سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه وجود داشته باشد. به منظور جلوگیری از آشفته شدن جریان، لوله مکش را با یک شیب مناسب به تلمبه متصل می‌کنند. همچنین در این حالت قطر لوله مکش نباید کم‌تر از قطر نازل[2] مکش باشد.

1 - Bell Mouth
2 – nozzle

د- در ایستگاه‌های تلمبه‌زنی بزرگ، در چاه مکش برای جلوگیری از ایجاد گرداب از صفحات مانع استفاده می‌شود و یا اینکه عمق آب در چاه مکش حداقل دو برابر قطر لوله مکش انتخاب می‌شود. در شکل (۶-۶) ابعاد و نحوه قرارگرفتن لوله مکش در چاه تر برای حالت‌های مختلف استفاده از چاه تر و چاه خشک، نشان داده شده است.

هـ- برای طراحی روزنه‌ها در دیوار پخش پیشنهاد می‌شود افت ارتفاع در آن را حداقل ۴ برابر ارتفاع سرعت در بالادست آن در نظر گرفته شود تا از توزیع آرام و مناسب جریان اطمینان حاصل گردد.



شکل ٦-٦- حالت‌های قرارگرفتن لوله مکش در چاه تر، (الف) چاه خشک با ورودی افقی غیردایره‌ای، (ب) چاه خشک با ورودی افقی دایره‌ای، (ج) چاه تر

٦-٥- تلمبه لجن

لجن از جمله سیالاتی است که تلمبه آن دشوار است. در این موارد انتخاب تلمبه تا حد زیادی به لزجت لجن بستگی دارد. به این جهت لجن را می‌توان به انواع سوسپانسیون لزجت پایین و سوسپانسیون لزجت بالا تقسیم‌بندی کرد. در جدول (۶-۱) محدوده متعارف برای انواع مختلف لجن در تصفیه‌خانه آب آورده شده است. لجن‌های با لزجت پایین همانند آب عمل می‌کنند و انتقال آن به سادگی با تلمبه‌های از نوع سانتریفوژ لجن‌کش امکان‌پذیر است. تلمبه‌زنی لجن‌های لزجت بالا نیازمند استفاده از تلمبه‌های با ارتفاع مکش بالا است. نمونه‌ای از این تلمبه‌ها، تلمبه‌های لجن‌کش جابجایی مثبت است.

لجن در تصفیه‌خانه آب معمولا حاوی ذرات ماسه و لای (سیلت) است. بنابراین تلمبه‌های لجن کش باید به نحوی انتخاب شود که در مقابل این ذرات آسیب‌پذیر نباشد. افت ارتفاع در لوله‌های انتقال لجن معمولا بیش‌تر از حالت‌های مشابه برای انتقال آب است. نحوه محاسبه افت ارتفاع برای لجن در فصل چهارم آمده است.

چنانچه لازم باشد لجن را در فاصله‌های زیاد انتقال دهیم لازم است محاسبات مربوط به افت ارتفاع را با دقت بیش‌تری انجام داد و طراحی را با ضریب ایمنی بالاتری صورت گیرد. در طراحی خطوط انتقال لجن به‌صورت تحت فشار باید قطر لوله‌های انتخابی مساوی یا بزرگ‌تر از ۱۵ سانتی‌متر باشد. همچنین با در نظر گرفتن مجاری رزرو باید امکان تمیزکردن و شستشوی لوله را فراهم نمود.

جدول ٦-١- کاربردهای متداول انواع تلمبه برای تلمبه‌زنی لجن و روآب در تصفیه‌خانه آب [١٣]

نوع تلمبه	نام فنی	روآب	لجن اولیه	لجن ترسیب شیمیایی	لجن تغلیظ شده
پلانجری	Plunger	+	+	+	+
پیچشی	Torque Flow	-	+	+	-
سانتریفوژ	Centrifugal	-	+	+	-
دیافراگمی	Diaphragm	-	+	+	+
پیستونی فشار بالا	High-pressure Piston	-	-	-	+
گردشی	Rotary-lobe	-	+	+	+

علامت + نشانگر استفاده و علامت- نشانگر عدم استفاده می‌باشد.

فصل ۷

اندازه‌گیری جریان

۷-۱- کلیات

اندازه‌گیری دایمی مقدار آب ورودی به تصفیه‌خانه و خروجی از آن جهت راهبری و بهره‌برداری صحیح از واحدهای مختلف آن لازم است. در تصفیه‌خانه‌های آب اندازه‌گیری بده جریان و تعیین مدت زمان توقف آب در واحدهای مختلف ضروری است. برای اندازه‌گیری مقدار جریان آب می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد که انتخاب روش اندازه‌گیری تابع عوامل هیدرولیکی، فنی و اقتصادی است. در جدول (۷-۱) مقایسه کلی بین روش‌های اندازه‌گیری جریان مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب، آمده است. بعضی از روش‌های ارایه شده در این جدول نظیر روش‌های صوتی یا الکترومغناطیسی اندازه‌گیری جریان عمدتا به ابزار دقیق مربوط شده و به هیدرولیک جریان ربط ندارد. در این فصل جزییات هیدرولیکی مربوط به اندازه‌گیری جریان در مجاری تحت فشار و کانال‌های باز ارایه می‌شود.

جدول ۷-۱- روش‌های متداول اندازه‌گیری بده جریان در تصفیه‌خانه‌های آب [۱۳]

وسیله اندازه‌گیری	مورد استفاده		دامنه و دقت	تاثیر مواد معلق آب	افت ارتفاع	توان مورد نیاز	سادگی و قابلیت اطمینان	نیازمندی به‌تعمیرات	سهولت واسنجی	هزینه	قابلیت حمل
	تحت فشار	کانال باز									
ونتوری متر	Y	N	±۰/۵	H	L	L	G	M	G	H	N
نازل	Y	N	±۰/۳	H	M	L	G	L	G	M	N
روزنه‌گیری	Y	N	±۱	H	H	L	G	H	G	L	Y
اندازه‌گیر مغناطیسی	Y	N	±۱-۲	S	L	M	F	M	G	H	N
اندازه‌گیری توربینی	Y	N	±۰/۲۵	H	M	L	F	H	G	H	N
سرعت سنج آلتراسونیک	Y	N	±۱-۲	M	L	M	F	M	G	H	N
آلتراسونیک	Y	N	±۱-۲	M	L	M	F	M	G	H	N
ناودان پارشال	N	Y	±۵	S	L	L	G	L	G	M	Y
ناودان	N	Y	±۱۰	S	L	L	G	L	G	L	Y
سرریز	N	Y	±۰/۵	H	H	L	G	M	G	L	Y
عمق سنج	N	Y	±۵۰	M	L	L	G	L	P	L	Y
نازل جریان آزاد	N	Y	±۱	S	M	L	G	M	F	L	Y

* F: نسبتا خوب، G: خوب، H: بالا، L: پایین، M: متوسط، N: نه، P: ناچیز، S: کمی، Y: بله.

۷-۲- اندازه‌گیری جریان در مجاری تحت فشار

در مجاری بسته از تغییرات ارتفاع فشار در یک مقطع برای اندازه‌گیری بده استفاده می‌شود. از جمله وسایل اندازه‌گیری بده در این مجاری روزنه[۱]، ونتوری[۲] و نازل[۳] می‌باشد.

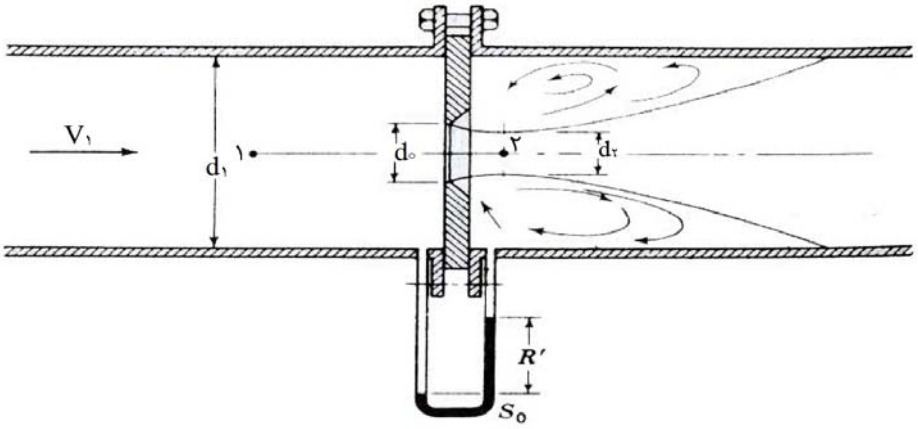
۷-۲-۱- روزنه

روزنه در داخل لوله قرار گرفته و باعث کاهش ناگهانی سطح مقطع لوله می‌شود (شکل(۷-۱)). این کاهش ناگهانی سطح مقطع لوله باعث تغییراتی در فشار می‌شود که با اندازه‌گیری آن می‌توان بده جریان را تعیین نمود. برای محاسبه بده عبوری (Q) از روزنه از روابط (۷-۱) و (۷-۲) استفاده می‌شود:

$$Q = C_o A_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad \text{OR} \quad Q = C_o A_o \sqrt{2g\Delta H} \qquad (۷-۱)$$

$$Q = C_o A_o \sqrt{2gR'(S_o - 1)} \qquad (۷-۲)$$

در این روابط A_o مساحت روزنه (مترمربع)، ΔP اختلاف فشار قبل و بعد از روزنه (پاسکال)، ΔH اختلاف ارتفاع قبل و بعد از روزنه (متر)، R اختلاف سطح مایع در مانومتر[۴] (متر) و S_o جرم مخصوص نسبی مایع مانومتر می‌باشند. ضریب روزنه C_o را می‌توان از نمودار شکل (۷-۲) تعیین نمود. C_o تابعی از هندسه روزنه است و برای انواع روزنه توسط سازندگان ارایه می‌شود.



شکل ۷-۱- اندازه‌گیری جریان در لوله تحت فشار به کمک روزنه

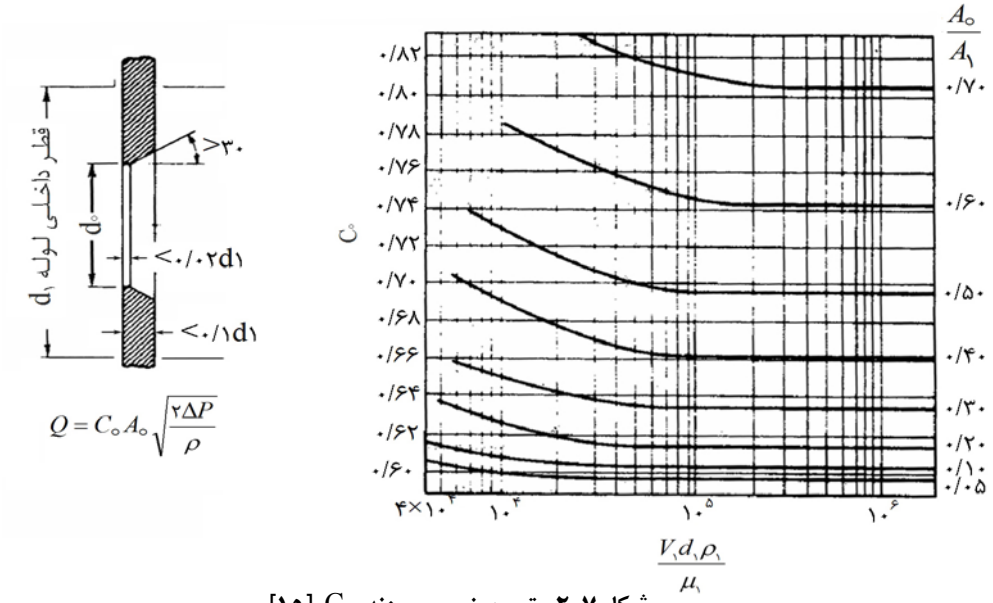
۷-۲-۲- ونتوری

ونتوری جهت اندازه‌گیری بده در لوله‌ها به‌کار برده می‌شود. این وسیله همان‌طور که در شکل (۷-۳) نشان داده شده است، دارای ساختمانی متشکل از یک گلوگاه استوانه‌ای مجهز به حلقه‌های پیزومتری و قسمت‌های همگرا و واگرا است. بده عبوری از ونتوری را می‌توان از رابطه (۷-۳) محاسبه نمود:

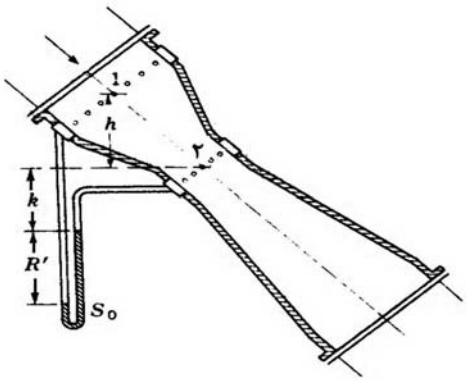
1 - Orifice
2 - Ventory Meter
3 - Nozzle
4 - Manometer

$$Q = C_v A_v \sqrt{2gR'(S_\circ - 1)} \qquad (۳-۷)$$

در این رابطه ضریب ونتوری C_v بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ تغییر می‌کند و مقدار دقیق آن را از واسنجی ونتوری در آزمایشگاه و یا جداول ارایه شده توسط سازنده به‌دست می‌آورند. افت ارتفاع در ونتوری نسبت به روزنه بسیار کم‌تر است و لذا در شرایطی که افت ارتفاع مهم باشد از ونتوری استفاده می‌گردد.



شکل ۷-۲- تعیین ضریب روزنه $C_\circ$ [۱۵]



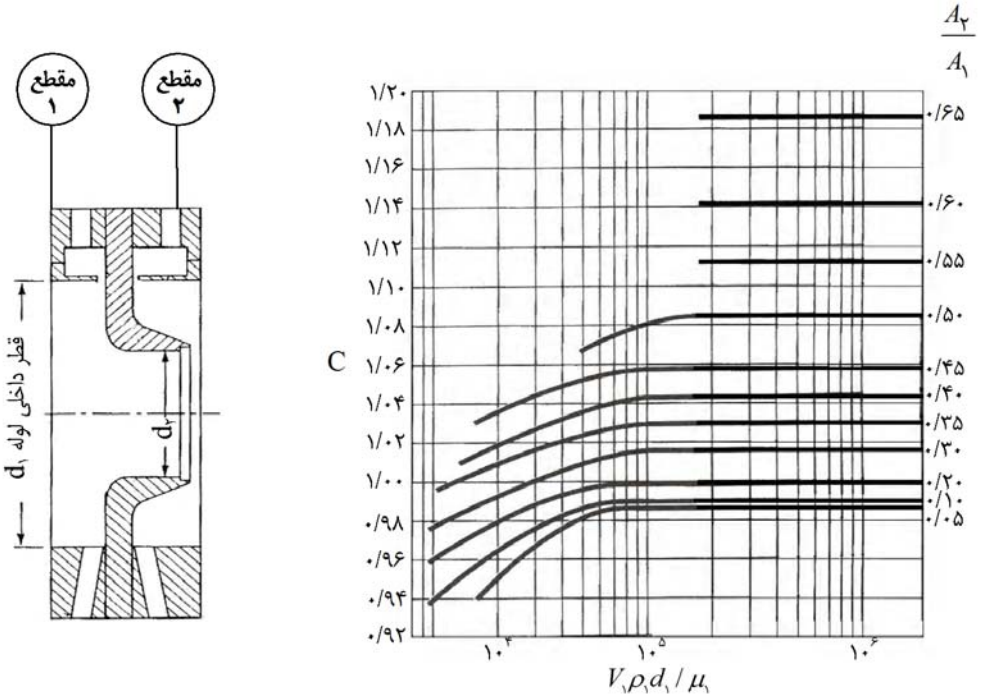
شکل ۷-۳- اندازه‌گیری جریان در لوله به کمک ونتوری

۷-۲-۳- نازل

نازل نیز برای اندازه‌گیری بده در مجاری تحت فشار به‌کار می‌رود. قسمت‌های مختلف نازل در شکل (۷-۴) نشان داده شده است. برای تعیین بده عبوری از نازل، از رابطه (۷-۴) استفاده می‌گردد:

$$Q = CA_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (۴-۷)$$

در این رابطه ΔP اختلاف فشار بین مقاطع ۱ و ۲ (شکل ۷-۴)، A_2 مساحت سطح مقطع جریان در مقطع ۲ و C ضریب نازل را نشان می‌دهند. مقدار این ضریب تابعی از عدد رینولدز در مقطع (۱) و نسبت مساحت مقطع ۲ و ۱ می‌باشد و مقدار آن را می‌توان از نمودار شکل (۷-۴) تعیین نمود.



شکل ۷-٤- تعیین ضریب نازل C [۱۵]

۷-۲-٤- محاسبه افت ارتفاع

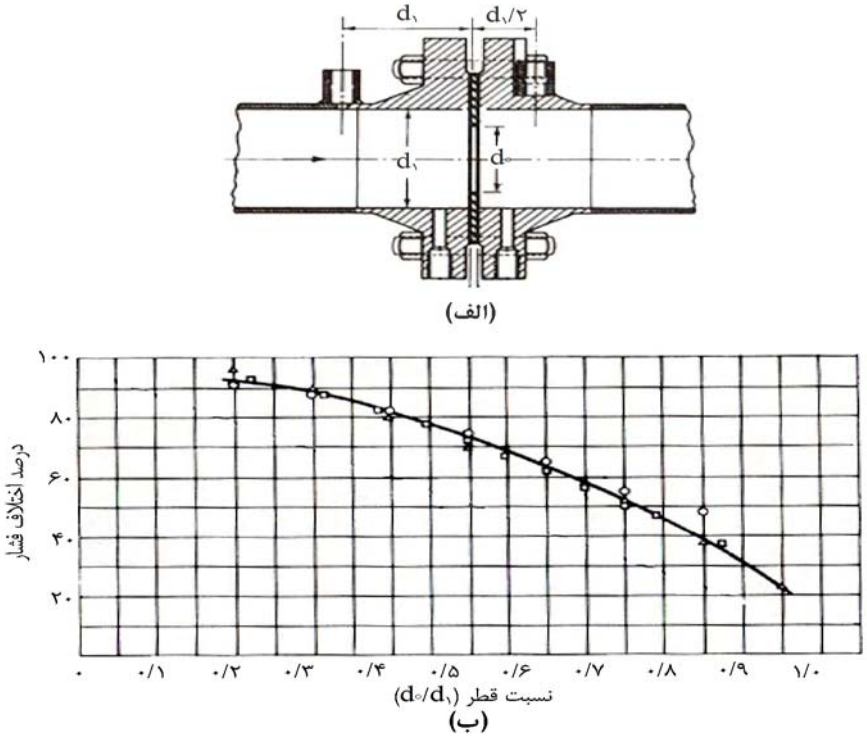
در تجهیزات اندازه‌گیری جریان درون لوله معمولا افت ارتفاع کل با افت فشار برابر است زیرا قطر ابتدا و انتهای آن‌ها یکسان و در نتیجه سرعت در ورودی و خروجی برابر می‌باشد. بر این اساس افت ارتفاع در این وسایل به‌صورت درصدی از اختلاف فشار بیان می‌شود. در شکل‌های (۷-۵)، (۷-۶) و (۷-۷) نمونه‌ای از نمودار تعیین افت ارتفاع برای هر یک از این وسایل نشان داده شده است. معمولا دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان توسط شرکت‌های سازنده این تجهیزات در آزمایشگاه برای بده‌های مختلف آزمایش شده و ضرایب بده به همراه سایر مشخصات نظیر ضرایب افت، در کاتالوگ این تجهیزات ارایه می‌شود. افت ارتفاع در نازل بیش‌تر از ونتوری است. به همین علت در شرایطی که در زمینه تامین فشار جریان محدودیت وجود دارد، از نازل استفاده نمی‌شود.

۷-۳- اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز

برای اندازه‌گیری بده در کانال‌های باز می‌توان از وسایل مختلفی نظیر سرریز و ناودان (فلوم) استفاده نمود. یکی از مهم‌ترین ناودان‌ها که در تصفیه‌خانه‌های آب به منظور اندازه‌گیری جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد، ناودان پارشال است که توضیح خلاصه آن در ادامه آورده شده است. علاوه بر ناودان پارشال از سایر انواع ناودان و نیز سرریز لبه تیز نیز برای اندازه‌گیری بده جریان استفاده می‌شود که در انتهای همین فصل هیدرولیک مربوط به آن ارایه شده است.

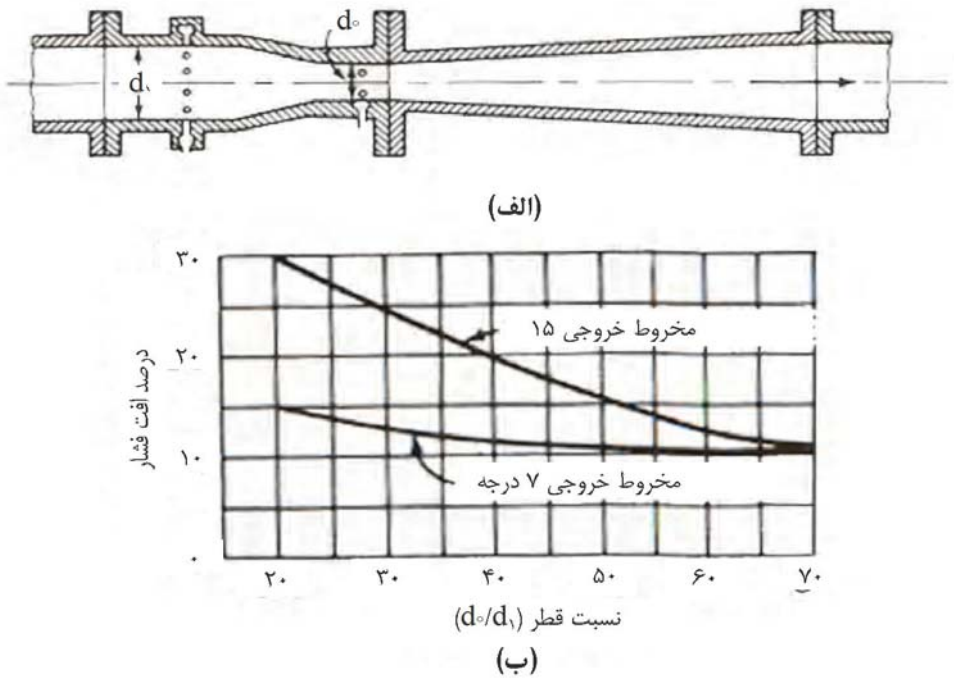
۷-٤- ناودان پارشال[1]

ناودان پارشال به منظور اندازه‌گیری مقدار جریان در یک کانال باز مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۷-۸). در این سازه شکل هندسی فلوم باعث می‌شود تا آب از روی تاج ناودان با عمق بحرانی عبور نماید و به این ترتیب روشی برای تعیین میزان بده، به کمک اندازه‌گیری عمق جریان (تنها در یک مقطع برای حالت آزاد و یا در دو مقطع برای حالت مستغرق) حاصل می‌گردد. حالت جریان آزاد وقتی اتفاق می‌افتد که سطح آب کانال در پایین دست (پایاب) به اندازه کافی پایین باشد و اثری بر عمق آب روی تاج نداشته باشد. این حالت در محدوده گسترده‌ای از تغییرات عمق پایاب به وجود می‌آید حتی اگر رقوم پایاب به اندازه قابل توجهی بالاتر از تاج ناودان باشد بدون اینکه اثری روی عبور جریان به‌صورت آزاد از ناودان داشته باشد و برای تعیین بده عمق جریان تنها در یک مقطع اندازه‌گیری می‌شود. ولی چنانچه سطح آب پایین دست از حدود معینی که برای ناودان پارشال با ابعاد مختلف متفاوت است، تجاوز نماید، حالت جریان مستغرق اتفاق می‌افتد و برای تعیین مقدار جریان احتیاج به اندازه‌گیری عمق جریان در دو مقطع می‌باشد ولی افت ارتفاع در آن کم‌تر از حالت آزاد است. در صورتی‌که جریان همواره به‌صورت آزاد عمل نماید بخش پایین دست گلوگاه پارشال فلوم تاثیر خاصی روی جریان نداشته و می‌تواند به‌طور معمول در نظر گرفته شود. در نشریه "ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زهکشی: اندازه‌گیری جریان" شماره ۱۰۶ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و یا کتاب‌های مرجع، جداول و نمودارهای مربوط به پارشال، آمده است. لذا، در این بخش به‌طور خلاصه به این موضوع پرداخته می‌شود.

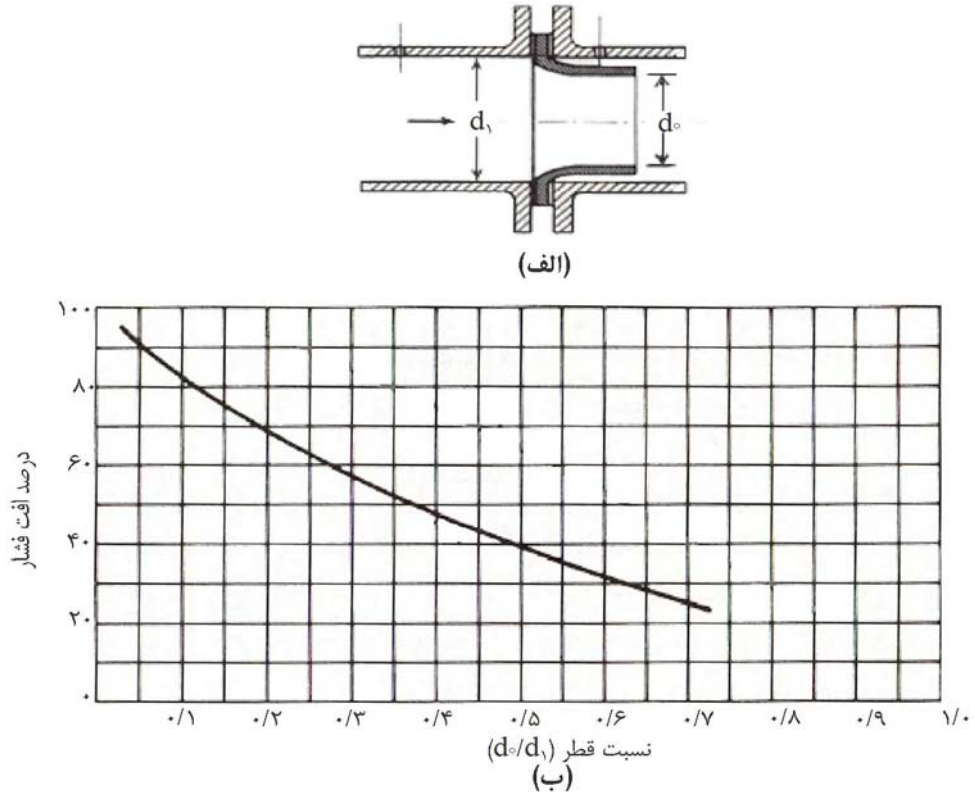


شکل ۷-۵- نمونه‌ای از منحنی‌های تعیین ضریب افت فشار در روزنه [۱۵]

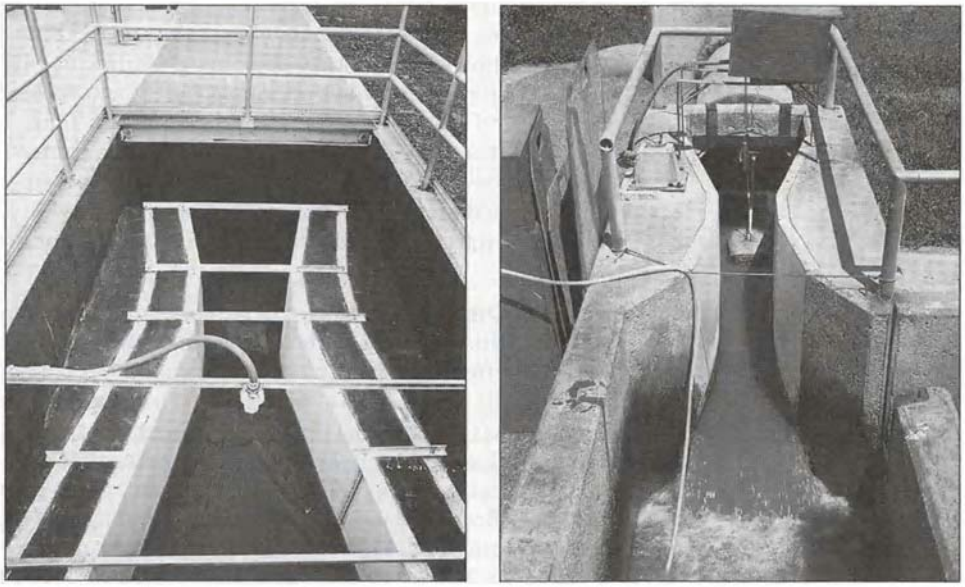
1 - Parshall Flume



شکل ۷-٦- نمونه‌ای از منحنی‌های تعیین ضریب افت فشار در ونتوری [۱۵]



شکل ۷-۷- نمونه‌ای از منحنی‌های تعیین ضریب افت فشار در شیپوره [۱۵]



شکل ۷-۸- اندازه‌گیری شدت جریان به کمک ناودان پارشال، (الف) ناودان پارشال با شاخص شناور اندازه‌گیر عمق آب، (ب) ناودان پارشال با اندازه‌گیر آلتراسونیک عمق آب [۱۰]

در این سازه تراز بودن کف قسمتی که به‌تدریج تنگ می‌شود، از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌طوری که جریان آب به‌صورت یکنواخت از روی هر بخش از عرض کانال عبور نماید. دیوارهای جانبی گلوگاه نیز باید موازی و قائم باشد. ناودان پارشال باید فقط در قسمت مستقیم کانال که جریان در آنجا نسبتا آرام و یکنواخت است، قرار گیرد و آن را هرگز نباید در قسمت‌های انحنادار کانال و در محل‌هایی که جریان غیر یکنوخت است، به‌کار برد. ناودان پارشال باید به اندازه کافی از سازه‌های کنترل مثل دریچه دور باشد به‌طوری که جریان ورودی به آن یکنواخت و بدون گرداب و تلاطم باشد. ناودان‌های پارشال به‌عنوان یک سازه دقیق و قابل اطمینان برای اندازه‌گیری جریان در تصفیه‌خانه‌های آب شناخته شده و دارای مزایای زیر می‌باشند:

۱- قادر به اندازه‌گیری جریان با افت ارتفاع نسبتا کوچک و در دامنه وسیعی از تغییرات عمق پایاب می‌باشند.

۲- وقتی که درجه استغراق زیاد بوده و مانع از عبور جریان به‌صورت آزاد شود، با اندازه‌گیری عمق در دو مقطع، تعیین بده جریان عبوری با افت کم‌تر ولی هزینه بیش‌تر، به‌خاطر اندازه‌گیری دقیق دو عمق به جای یک عمق، امکان‌پذیر خواهد بود.

۳- به علت شکل هندسی ناودان و سرعت جریان در گلوگاه، سازه همانند یک شستشو دهنده خودکار عمل نموده و نیازی به در نظر گرفتن تجهیزات شستشو و لایروبی ندارد.

۴- وقتی که ناودان پارشال با ابعاد استاندارد، ساخته شود و جریان ورودی به آن نیز یکنواخت و بدون تلاطم باشد، سرعت برخورد آب روی عملکرد آن تاثیری ندارد. به‌علاوه توصیه می‌شود بالادست آن تا ده برابر عرض گلوگاه مستقیم باشد.

از معایب پارشال می‌توان به گران‌تر بودن هزینه ساخت آن نسبت به بعضی سازه‌های دیگر مثل سرریز، عدم امکان به‌کارگیری آن در قسمت‌های انحنادار کانال‌ها و لزوم وجود جریان آرام و یکنواخت برای استفاده از آن اشاره کرد.

۷-۵- انواع ناودان پارشال

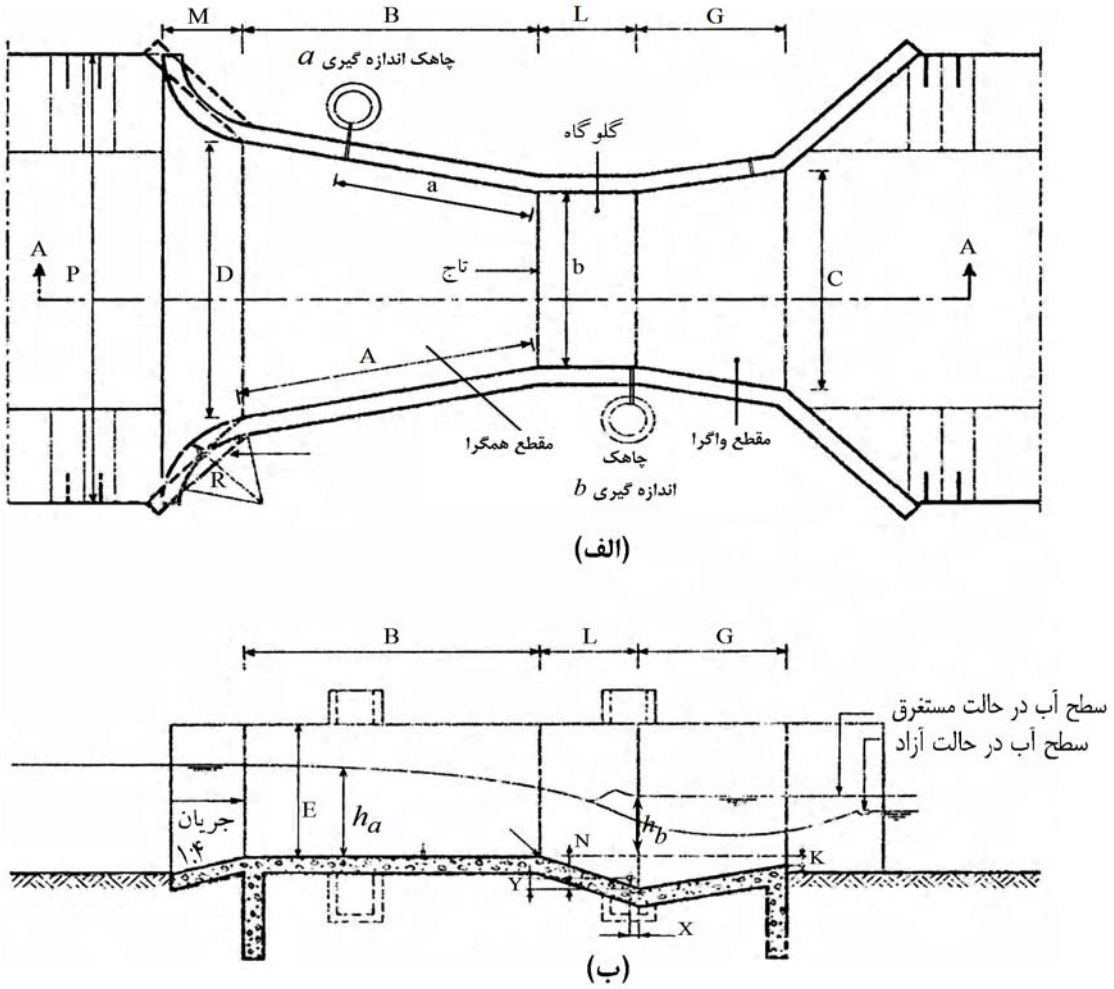
از ناودان‌های پارشال می‌توان برای اندازه‌گیری بده‌های کوچک، از ۰/۱ لیتر بر ثانیه تا بده‌های بسیار بزرگ تا ۹۰ مترمکعب بر ثانیه استفاده کرد. بر این اساس آن را با توجه به ظرفیت اندازه‌گیری به انواع بسیار کوچک، کوچک و بزرگ تقسیم‌بندی می‌کنند. مبنای این تقسیم‌بندی عرض گلوگاه ناودان می‌باشد. لازم به ذکر است عرض گلوگاه پارشال به همراه سایر ابعاد آن به‌صورت استاندارد وجود دارد و طراح مجاز به تغییر دادن آن نیست. ناودان‌های بزرگ در تصفیه‌خانه‌های آب استفاده نمی‌شود.

۷-۶- محاسبه بده جریان در حالت جریان آزاد

به‌طور کلی رابطه بین شدت جریان و عمق آب در چاهک اندازه‌گیری، h_a در شکل (۷-۹)، به‌صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$Q = Kh_a^u \qquad (۵-۷)$$

در این رابطه ضریب K تابعی از عرض گلوگاه b می‌باشد و u در این رابطه بین ۱/۵۲۲ و ۱/۶۰۲ تغییر می‌کند. مقادیر K و u به ازای مقادیر مختلف b در جدول مربوط ارایه شده است.



شکل ۷-۹- هندسه ناودان پارشال، (الف) تصویر افقی، (ب) مقطع [٤]

۷-۷- محاسبه بده جریان در حالت جریان مستغرق

حداکثر نسبت $\frac{h_b}{h_a}$، برای اینکه جریان آزاد عمل کند در پارشال‌ها، بسته به عرض گلوگاه، از ۶۰ درصد تا ۷۰ درصد است (محل اندازه‌گیری h_a و h_b در شکل (۷-۹) مشخص شده است). برای کسب نتایج دقیق که معمولا خطایی تا حدود ۲ درصد برای جریان آزاد و تا حدود ۵ درصد برای جریان مستغرق را شامل می‌شود، واسنجی و قرائت صحیح وسیله اندازه‌گیری عمق ضروری است.

چنانچه حالت استغراق به‌وجود بیاید، سطح آب پایین‌دست روی عمق جریان بالادست یعنی h_a تاثیر گذاشته و به ازای h_a ثابت مقدار بده را نسبت به حالت آزاد کاهش می‌دهد. در این حالت شدت جریان از رابطه (۷-۶) محاسبه می‌شود:

$$Q_s = Q - Q_E \qquad (۶-۷)$$

در این رابطه Q_s بده در حالت استغراق، Q بده جریان با فرض جریان آزاد برای همان h_a و Q_E بده کاهش‌یافته در نتیجه استغراق را نشان می‌دهد. برای تعیین بده تصحیح، Q_E، از نمودارهای مربوط استفاده می‌شود.

۷-۸- محاسبه افت ارتفاع در ناودان پارشال

مقدار افت ارتفاع برای ناودان‌های پارشال در نمودار شکل (۷-۱۰) برای حالت‌هایی که در مرز استغراق و یا در حالت استغراق می‌باشند ارایه شده است و در حالتی که جریان حالت آزاد داشته باشد تقریبا با Δh در شکل (۷-۱۰- الف) یعنی $\Delta h = h_a + h_2 - y_2$ برابر است. برای اطلاعات بیش‌تر در رابطه با شکل (۷-۱۰) به مرجع شماره ۴ مراجعه شود.

۷-۹- اندازه‌گیری جریان به کمک سایر انواع ناودان

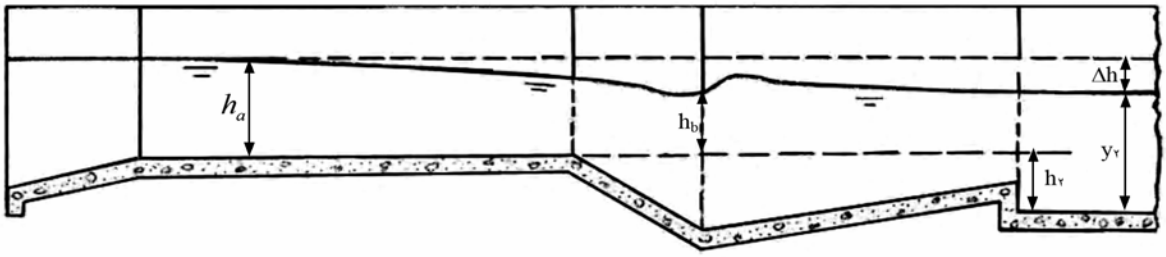
علاوه بر ناودان پارشال می‌توان از انواع دیگری از ناودان نیز برای اندازه‌گیری بده جریان در کانال‌های باز استفاده نمود. در همه این انواع با بالا آوردن یا کم کردن عرض کانال، شرایط ایجاد عمق بحرانی در مقطعی از کانال فراهم می‌گردد. با توجه به اینکه در کانال مستطیلی بده جریان از عمق بحرانی به‌دست می‌آید، می‌توان با ایجاد و اندازه‌گیری عمق بحرانی، بده جریان را تعیین نمود. اصول کلی استفاده از این نوع ناودان‌ها همانند پارشال فلوم است. در تصفیه‌خانه‌های آب با توجه به تجربیات موفقی که در استفاده از پارشال فلوم وجود دارد، به‌جز در شرایط خاص، استفاده از سایر ناودان‌ها به منظور اندازه‌گیری جریان توصیه نمی‌گردد.

۷-۱۰- اندازه‌گیری جریان به کمک سرریز لبه تیز

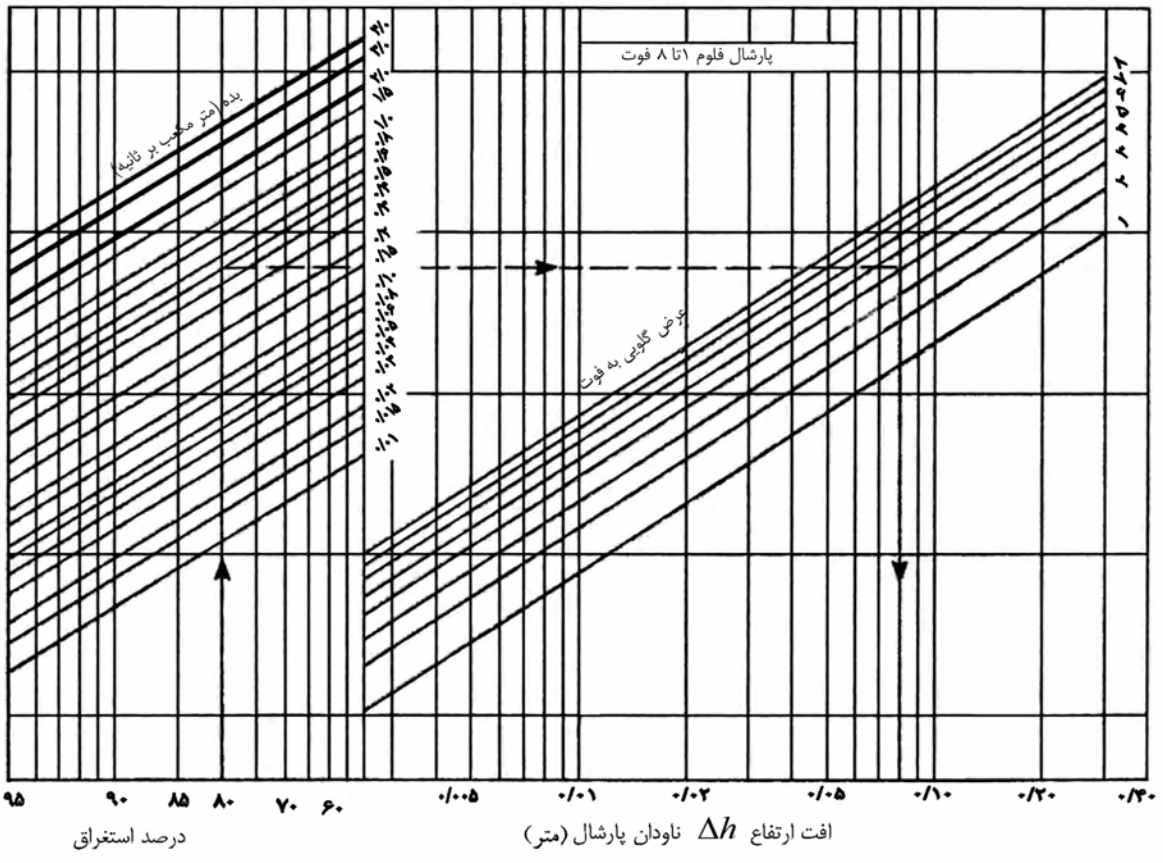
در تصفیه‌خانه‌های آب برای اندازه‌گیری بده جریان در کانال‌ها و یا خروجی مخازن و حوضچه‌ها می‌توان از سرریز نیز استفاده کرد. جریان آب در عبور از سرریز حالت ریزشی پیدا کرده و با اندازه‌گیری عمق جریان عبوری از روی آن و استفاده از روابطی که بین عمق و بده در سرریز وجود دارد، روش مناسبی برای اندازه‌گیری بده فراهم می‌شود (بخش۵-۲). برای اندازه‌گیری بده بیش‌تر از

سرریزهای لبه تیز مستطیلی، مثلثی و گاهی با شکل‌های دیگر استفاده می‌شود. در شکل (۷-۱۱) مقطع و تصویر افقی[1] سرریز لبه تیز نشان داده شده است.

استفاده از سرریز برای اندازه‌گیری شدت جریان به لحاظ فنی و اقتصادی مزایای فراوانی از جمله انعطاف در طراحی و پایین بودن هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری دارد. ولی در استفاده از آن باید توجه شود که وجود حجم آب ساکن قبل از آن باعث ته‌نشینی مواد معلق همراه با آب و به‌وجود آمدن مشکلات بعدی می‌شود. لذا تا حدودی استفاده از آن محدود می‌گردد.



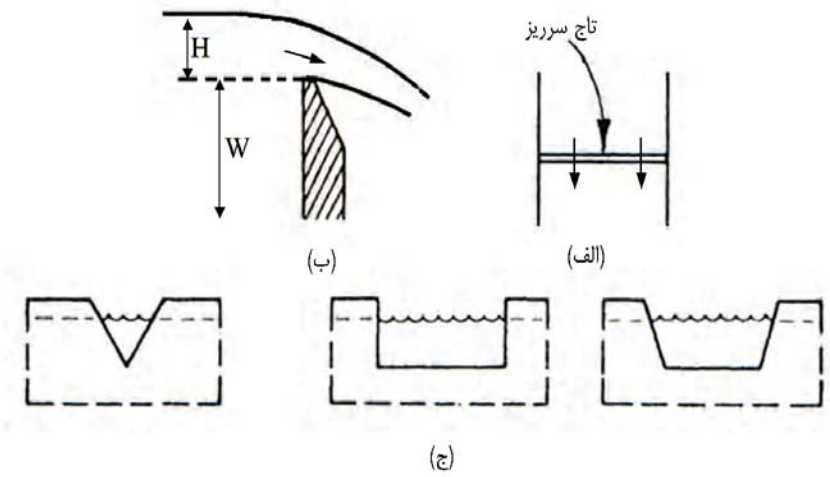
(الف)



(ب)

شکل ۷-۱۰- افت ارتفاع در ناودان پارشال با عرض گلوگاه ۰/۳ تا ۲/٤ متر، (الف) تغییرات سطح جریان در طول ناودان پارشال، (ب) نمودار تعیین افت ارتفاع [٤]

1 - Plan



شکل ۷-۱۱- سرریز اندازه‌گیری جریان، (الف) تصویر افقی، (ب) مقطع طولی، (ج) مقطع عرضی

فصل ۸

عملیات پیش‌تصفیه

۸-۱- کلیات

در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها قبل از ورود آب خام با انجام برخی اعمال، کیفیت آب را تا حدودی بهبود می‌بخشند تا عملیات تصفیه با بازدهی بهتری انجام گیرد. این مجموعه عملیات تحت عنوان پیش تصفیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. این اعمال شامل برداشت آب خام، آشغال‌گیری، هوادهی، پیش رسوب‌گیری و پیش کلرزنی می‌باشد. سازه آبگیر، آب با بهترین کیفیت را از رودخانه، دریاچه و دیگر منابع تامین آب شرب استحصال می‌کند. به منظور حفاظت از تجهیزات مکانیکی، توری‌ها و یا آشغال‌گیرهایی در محل آبگیر قرار می‌گیرند تا اشیای بزرگ و آشغال‌ها را قبل از ورود به تلمبه‌خانه حذف کنند. هوادهی فرایندی است که طی آن گازها و ترکیبات آلی فراری را که می‌تواند مشکلات مربوط به طعم و بو را در آب ایجاد کند، حذف می‌شود. از حوض‌های پیش ته‌نشینی نیز برای حذف ماسه و لای استفاده می‌گردد. این واحدها ممکن است در محل برداشت و یا در ورودی تصفیه‌خانه قرار گیرند. در این فصل هیدرولیک مربوط به واحدهای آبگیر، آشغال‌گیری، هوادهی، پیش رسوب‌گیری و محاسبه افت ارتفاع در آن‌ها آمده است.

۸-۲- تاسیسات برداشت آب خام

تاسیسات برداشت آب خام به منظور کنترل استحصال آب از منابع سطحی کاربرد دارند. ابتدایی‌ترین وظیفه این تاسیسات، برداشت آب مطلوب از لحاظ کیفی است به نحوی که فاقد آبزیان، ذرات شناور، رسوبات و دیگر ذرات باشد. این تاسیسات ممکن است یک لوله ساده مستغرق و یا تاسیساتی شبیه یک برج، متشکل از دریچه‌های ورودی، آشغال‌گیر، شیرهای کنترلی، تلمبه، شیپوره‌های تزریق مواد شیمیایی، دستگاه‌های بده سنجی و غیره باشند. این تاسیسات می‌توانند جزیی از یک سیستم تامین آب یا به تنهایی یک سازه مستقل در مکانی مجزا باشند. تاسیسات برداشت آب خام شامل انواع شناور، مستغرق، برج مانند، ساحلی و ستونی می‌باشد. انتخاب نوع تاسیسات بستگی به ویژگی‌های طبیعی منابع آب و نیز مشخصات کمی و کیفی آب برداشتی دارد. مزایا و معایب هر یک از این انواع در جدول (۸-۱) آمده است.

برای تعیین محل مناسب برای برداشت آب باید جنبه‌های مختلف از قبیل کیفیت، عمق، سرعت جریان سیال و غیره مورد توجه قرار گیرد. به‌علاوه تاسیسات برداشت آب باید در ترازی قرار گیرد که در صورت تغییر در ارتفاع سطح آب، بتوان آب برداشت نمود. در تاسیسات برداشت آب هم جهت و هم بزرگی سرعت با اهمیت است و اگر جریان آب قبل از رسیدن به تاسیسات و دریچه‌ها دارای سرعتی بیش از ۰/۶ متر بر ثانیه باشد، می‌تواند باعث ایجاد جریان گردابی و معکوس گردد که وضعیت هیدرولیکی سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از جمله نکات مهم در طراحی تاسیسات برداشت آب خام، می‌توان به سرعت جریان ورودی و محل دریچه‌ها اشاره کرد. بررسی سازه‌های برداشت آب خارج از موضوع این راهنما است و برای آشنایی با نحوه طراحی آن به کتب مربوط مراجعه گردد.

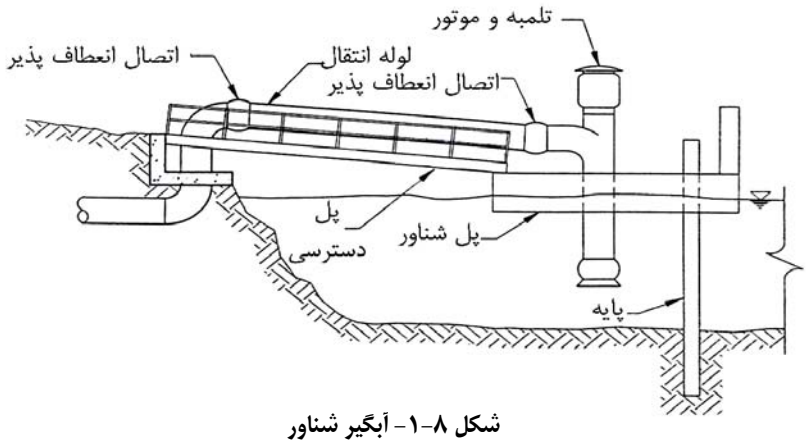
۸-۳- آشغال‌گیری

آشغال‌گیر یک واحد فیزیکی است که مواد معلق درشت را از آب جدا می‌کند و می‌تواند در ساختمان آبگیری، تلمبه‌خانه و یا در ورودی تصفیه‌خانه آب نصب گردد. آشغال‌گیرها را در سه دسته آشغال‌گیر دانه درشت، آشغال‌گیر دانه‌ریز و ریزصافی[1] دسته‌بندی می‌کنند.

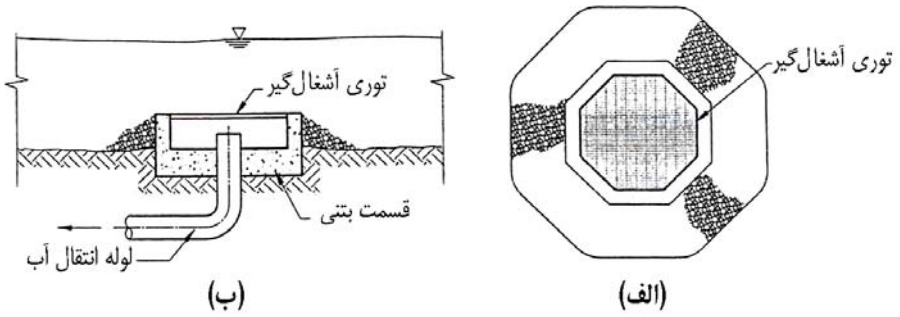
1 - Micro Strainer

جدول ۸-۱- مقایسه انواع تاسیسات برداشت آب خام [۱۳]

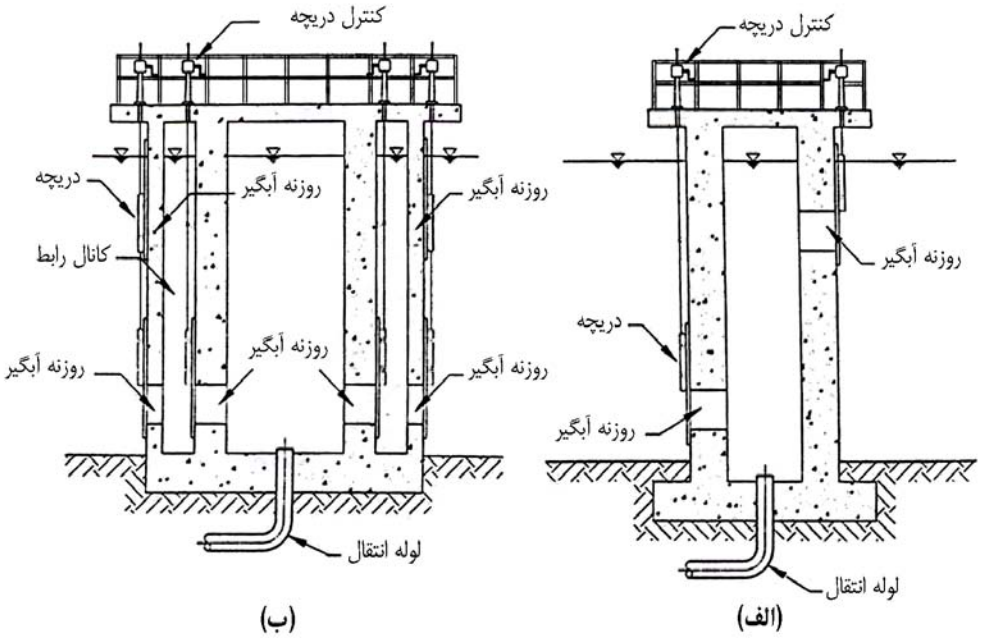
نوع آبگیر	مزایا	معایب
آبگیر شناور (شکل(۸-۱))	قیمت نسبتا کم، ساخت در کارخانه و نصب در محل، امکان بهره‌برداری با عمق آب کم	باید محکم مهار شود تا بر اثر باد صدمه نبیند. تنها از عمق خاصی آب برداشت می‌کند.
آبگیر مستغرق (شکل(۸-۲))	ساده، آسان و هزینه ساخت نسبتا کم است.	تنها از ارتفاع خاصی آب برداشت می‌کند که نزدیک کف است و کیفیت خوبی ندارد. تمیز کردن رسوبات و آشغال‌ها و تعمیرات مشکل است.
آبگیر برجی (شکل(۸-۳))	امکان برداشت آب با کیفیت بهینه از ترازهای مختلف، امکان نصب در آب‌های عمیق، امکان تخلیه مجاری از آب و انجام تعمیرات	خیلی پر هزینه است. ستون ندارد و ممکن است به نسبت نوع ساحلی دسترسی مشکل‌تر باشد.
آبگیر ساحلی (شکل(۸-۴-الف))	قابل دسترسی برای تعمیرات، در صورت تعبیه دریچه‌های گوناگون کیفیت بهینه قابل برداشت است. ساخت نسبتا ساده	خیلی پر هزینه تر از نوع مستغرق است و ممکن است نیاز به لایروبی در اعماق بالا داشته باشد.
آبگیر ستونی (شکل(۸-۴-ب))	مرحله ساخت نسبتا ساده در در زمان وجود آب. قابل دسترسی برای تعمیرات	تنها از ارتفاع خاصی برداشت می‌کند. امکان برداشت بهترین کیفیت آب وجود ندارد.



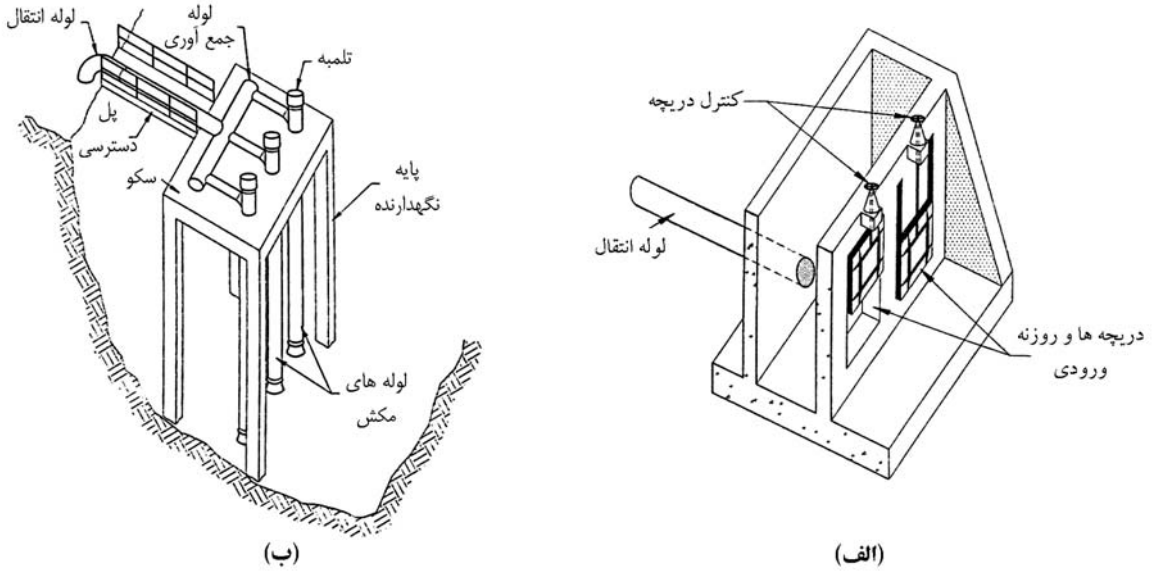
شکل ۸-۱- آبگیر شناور



شکل ۸-۲- آبگیر مستغرق، (الف) تصویر افقی، (ب) مقطع عرضی



شکل ۸-۳- آبگیر برجی، (الف) نوع خشک، (ب) نوع تر

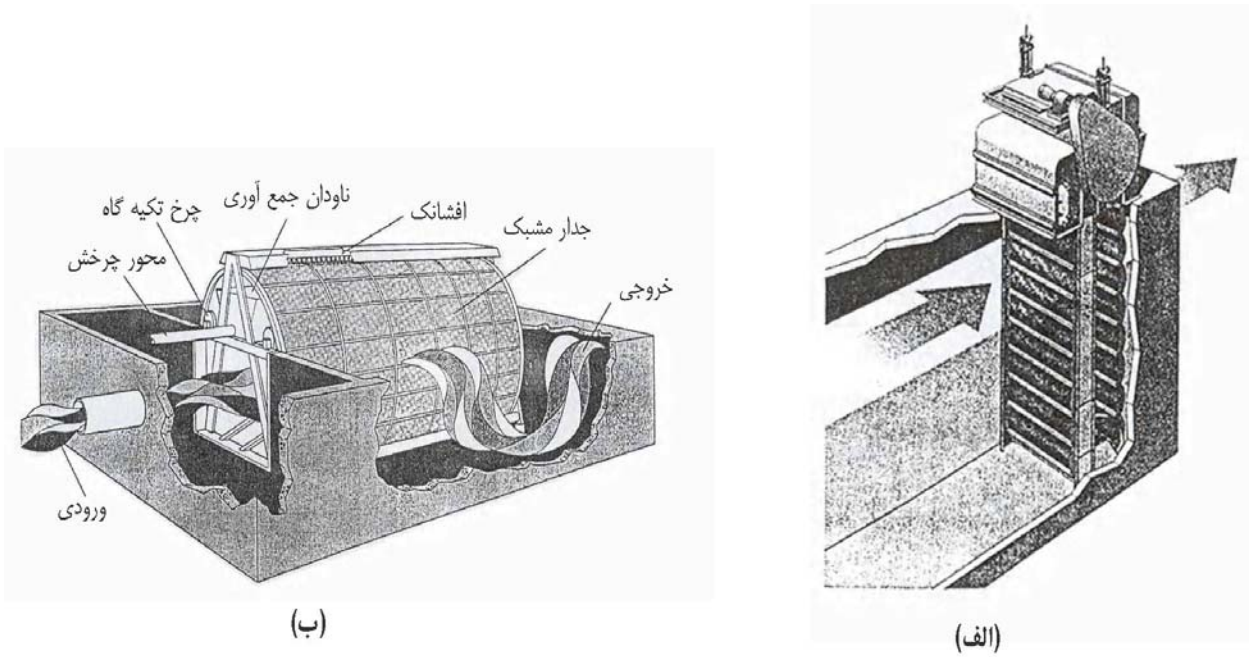


شکل۸-٤- (الف) آبگیر ساحلی، (ب) آبگیر ستونی

آشغال‌گیرهای دانه درشت برای جلوگیری از ورود اشیای درشت به داخل سیستم انتقال آب به‌کار می‌روند. این آشغال‌گیرها از میله‌های عمودی پهن و در چند ردیف با فاصله ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر تشکیل می‌شوند. طراحی آشغال‌گیر باید به گونه‌ای باشد که امکان دسترسی به تجهیزات برای انجام تعمیرات و حذف آشغال‌ها فراهم گردد. آشغال‌گیر دانه‌ریز جهت حذف دانه‌های ریز که ممکن است به تلمبه‌ها و دیگر تجهیزات مکانیکی آسیب برساند، به کار می‌رود و ممکن است در سازه آبگیری، تلمبه‌خانه، ابتدای خطوط انتقال و یا در ورودی تصفیه‌خانه قرار گیرد. آشغال‌گیر دانه ریز از میله‌های موازی و یا شبکه‌ای از سیم‌های فلزی تشکیل شده است و سرعت

طراحی جریان در عبور از بین روزنه‌های این نوع آشغال‌گیر ۰/۴ تا ۰/۸ متر بر ثانیه است که در شرایط خاص می‌تواند از این هم کم‌تر باشد.درشکل (۸-۵- الف) نمونه‌ای از این نوع آشغال‌گیر نشان داده شده است.

معمولا از ریز صافی‌ها به منظور حذف جلبک‌ها و ذرات بسیار ریز از آب ورودی به تصفیه‌خانه استفاده می‌شود. وجود این مواد در آب خام باعث به‌وجود آمدن مشکلاتی در فرایندهای انعقاد و لخته‌سازی می‌گردد. اگر ریزصافی قبل از واحد انعقاد قرار گیرد عملکرد زلال‌سازی را بهبود می‌بخشد.



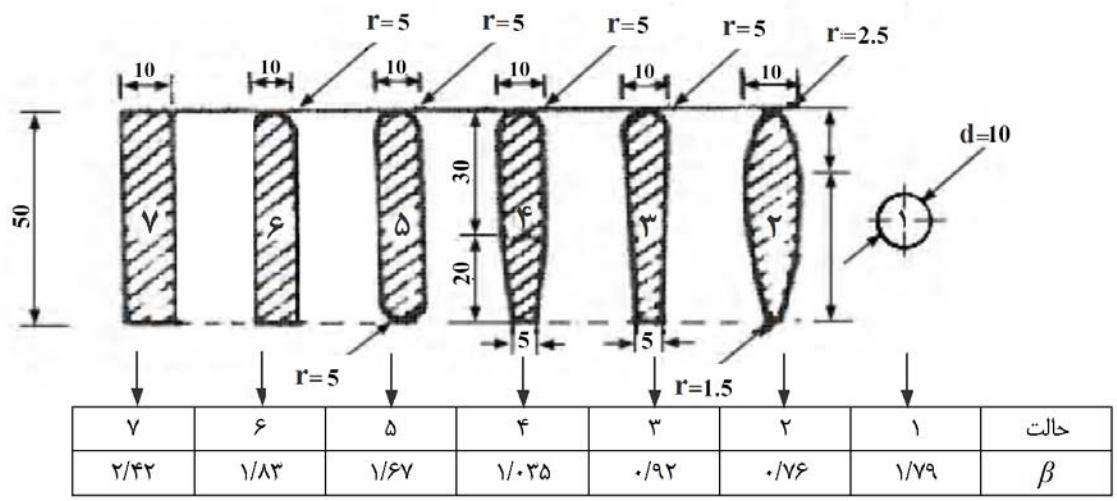
شکل ۸-۵- (الف) آشغال‌گیر دانه ریز از نوع متحرک، (ب) آشغال‌گیر از نوع ریز صافی

افت ارتفاع در آشغال‌گیر شامل افت ارتفاع در ورودی، افت ارتفاع در کانال آشغال‌گیر و افت ارتفاع در بین میله‌های آشغال‌گیر می‌باشد. محاسبه افت ارتفاع در بین میله‌های آشغال‌گیر در حالت‌های تمیز و گرفته انجام می‌گیرد. افت ارتفاع جریان در عبور از بین میله‌های آشغال‌گیر را می‌توان از هر یک از روابط زیر محاسبه نمود:

$$h_l = (\frac{1}{0.7}) \times \frac{V^2 - \overline{V}^2}{2g} \qquad (۱-۸)$$

$$h_l = \beta \times (\frac{W}{\overline{b}})^{\frac{4}{3}} \times \frac{V^2}{2g} \times \sin\theta \qquad (۲-۸)$$

در این روابط h_L افت ارتفاع در میله‌های آشغال‌گیر (متر)، $\overline{V}$ سرعت متوسط در کانال بالادست آشغال‌گیر (متر بر ثانیه)، V سرعت عبور جریان از بین میله‌های آشغال‌گیر (متر بر ثانیه)، g شتاب ثقل، W عرض مقطع میله‌ها که به‌طور مستقیم در مقابل جریان قرار دارد (متر)، $\overline{b}$ فضای باز بین میله‌ها (متر) و θ زاویه میله‌ها با افق را نشان می‌دهد. β فاکتور شکل است و مقدار آن با توجه به شکل هندسی میله‌ها از شکل (۸-۶) تعیین می‌شود. رابطه (۸-۱) را می‌توان برای محاسبه افت ارتفاع هم در آشغال‌گیر تمیز و هم برای آشغال‌گیر تا حدودی مسدود (کثیف) مورد استفاده قرار داد، در صورتی که رابطه (۸-۲) فقط برای آشغال‌گیر تمیز قابل استفاده است.



حالت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
β	۱/۷۹	۰/۷۶	۰/۹۲	۱/۰۳۵	۱/۶۷	۱/۸۳	۲/۴۲

شکل ۸-٦- فاکتور شکل β برای انواع مختلف میله‌های آشغال‌گیر (اندازه‌ها نسبی می‌باشند) [۹]

برای تعیین افت ارتفاع در آشغال‌گیرهای دانه‌ریز می‌توان از رابطه افت موضعی (رابطه ۳-۷) و یا رابطه زیر که بر مبنای رابطه روزنه به‌دست آمده، استفاده نمود [۸].

$$h_l = \frac{1}{2g} \times [1 - (\frac{A_r}{100})^2] \times (\frac{Q}{CA_\circ})^2 \qquad (۸-۳)$$

در این رابطه A_2 درصد سطح بازشدگی، A_0 مساحت کل بازشدگی‌ها، Q بده جریان و C ضریب روزنه را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب افت موضعی، K، در رابطه (۳-۷) و ضریب C در رابطه (۸-۳) روابط زیر پیشنهاد می‌گردد [۸].

$$K = \frac{1 - (\frac{A_r}{100})^2}{C^2 (\frac{A_r}{100})^2} \qquad (۸-۴- \text{الف})$$

$$C = \sqrt{\frac{1 - (\frac{A_r}{100})^2}{K - (\frac{A_r}{100})^2}} \qquad (۸-۴- \text{ب})$$

در جدول (۸-۲) ضریب افت موضعی، K، برای صفحات مشبک و میله‌های آشغال‌گیر ارایه شده است. برای محاسبه درصد سطح بازشدگی، A_2 ، در حالات مختلف می‌توان از رابطه کلی (۸-۵) استفاده نمود.

$$A_r = 100 \frac{A_0}{A_1} \qquad (۸-۵)$$

در این رابطه A_0 مساحت سطح کل بازشدگی‌ها و A_1 مساحت سطح کل را نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است برای تعیین افت ارتفاع در آشغال‌گیر از رابطه (۳-۷) لازم است سرعت متوسط قبل از آشغال‌گیر مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه برای برخی حالات تعیین A_2، روابط ساده‌تری ارایه می گردد.

جدول (۸-۲)- ضریب افت موضعی K در رابطه (۸-٤) برای صفحات و میله‌های آشغال‌گیر [۸]

$\frac{L}{d_h}$	$\frac{A_r}{100}$															
	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۹۰	۱/۰
۰	۷۰۰۰	۱۶۷۰	۷۳۰	۴۰۰	۲۴۵	۹۶/۰	۵۱/۵	۳۰/۰	۱۸/۲	۸/۲۵	۴/۰۰	۲/۰۰	۰/۹۷	۰/۴۲	۰/۱۳	۰/۰۰
۰/۲	۶۶۰۰	۱۶۰۰	۶۸۷	۳۷۴	۲۳۰	۹۴/۰	۴۸/۰	۲۸/۰	۱۷/۴	۷/۷۰	۳/۷۵	۱/۸۷	۰/۹۱	۰/۴۰	۰/۱۳	۰/۰۱
۰/۴	۶۳۱۰	۱۵۳۰	۶۶۰	۳۵۶	۲۲۱	۸۹/۰	۴۶/۰	۲۶/۵	۱۶/۶	۷/۴۰	۳/۶۰	۱/۸۰	۰/۸۸	۰/۳۹	۰/۱۳	۰/۰۱
۰/۶	۵۷۰۰	۱۳۸۰	۵۹۰	۳۲۲	۱۹۹	۸۱/۰	۴۲/۰	۲۴/۰	۱۵/۰	۶/۶۰	۳/۲۰	۱/۶۰	۰/۸۰	۰/۳۶	۰/۱۳	۰/۰۱
۰/۸	۴۶۸۰	۱۱۳۰	۴۸۶	۲۶۴	۱۶۴	۶۶/۰	۳۴/۰	۱۹/۶	۱۲/۲	۵/۵۰	۲/۷۰	۱/۳۴	۰/۶۶	۰/۳۱	۰/۱۲	۰/۰۲
۱/۰	۴۲۶۰	۱۰۳۰	۴۴۳	۲۴۰	۱۴۹	۶۰/۰	۳۱/۰	۱۷/۸	۱۱/۱	۵/۰۰	۲/۴۰	۱/۲۰	۰/۶۱	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۰۲
۱/۴	۳۹۳۰	۹۵۰	۴۰۸	۲۲۱	۱۳۷	۵۵/۶	۲۸/۴	۱۶/۴	۱۰/۳	۴/۶۰	۲/۲۵	۱/۱۵	۰/۵۸	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۰۳
۲/۰	۳۷۷۰	۹۱۰	۳۹۱	۲۱۲	۱۳۴	۵۳/۰	۲۷/۴	۱۵/۸	۹/۹	۴/۴۰	۲/۲۰	۱/۱۳	۰/۵۸	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۰۴
۳/۰	۳۷۶۵	۹۱۳	۳۹۲	۲۱۴	۱۳۲	۵۳/۵	۲۷/۵	۱۵/۹	۱۰/۰	۴/۵۰	۲/۲۴	۱/۱۷	۰/۶۱	۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۰۶
۴/۰	۳۷۷۵	۹۳۰	۴۰۰	۲۱۵	۱۳۲	۵۳/۸	۲۷/۷	۱۶/۲	۱۰/۰	۴/۶۰	۲/۲۵	۱/۲۰	۰/۶۴	۰/۳۵	۰/۱۶	۰/۰۸
۵/۰	۳۸۵۰	۹۳۶	۴۰۰	۲۲۰	۱۳۳	۵۵/۵	۲۸/۵	۱۶/۵	۱۰/۵	۴/۷۵	۲/۴۰	۱/۲۸	۰/۶۹	۰/۳۷	۰/۱۹	۰/۱۰
۶/۰	۳۸۷۰	۹۴۰	۴۰۰	۲۲۲	۱۳۳	۵۵/۸	۲۸/۵	۱۶/۶	۱۰/۵	۴/۸۰	۲/۴۲	۱/۳۲	۰/۷۰	۰/۴۰	۰/۲۱	۰/۱۲
۷/۰	۴۰۰۰	۹۵۰	۴۰۵	۲۳۰	۱۳۵	۵۵/۹	۲۹/۰	۱۷/۰	۱۰/۹	۵/۰۰	۲/۵۰	۱/۳۸	۰/۷۴	۰/۴۳	۰/۲۳	۰/۱۴
۸/۰	۴۰۰۰	۹۶۵	۴۱۰	۲۳۶	۱۳۷	۵۶/۰	۳۰/۰	۱۷/۲	۱۱/۱	۵/۱۰	۲/۵۸	۱/۴۵	۰/۸۰	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۱۶
۹/۰	۴۰۸۰	۹۸۵	۴۲۰	۲۴۰	۱۴۰	۵۷/۰	۳۰/۰	۱۷/۴	۱۱/۴	۵/۳۰	۲/۶۲	۱/۵۰	۰/۸۲	۰/۵۰	۰/۲۸	۰/۱۸
۱۰	۴۱۱۰	۱۰۰۰	۴۳۰	۲۴۵	۱۴۶	۵۹/۷	۳۱/۰	۱۸/۲	۱۱/۵	۵/۴۰	۲/۸۰	۱/۵۷	۰/۸۹	۰/۵۳	۰/۳۲	۰/۲۰

L ضخامت صفحه یا طول میله‌ها، d_h قطر هیدرولیکی (= قطر اگر چشمه‌ها دایره‌ای باشند) و A_2 درصد سطح بازشدگی

الف- صفحه با چشمه‌های دایره‌ای (شکل ۸-۷- ب و د و هـ)

$$A_r = 100 \times (\frac{0.785 d_0^2}{S_1 S_2}) \qquad (۶-۸)$$

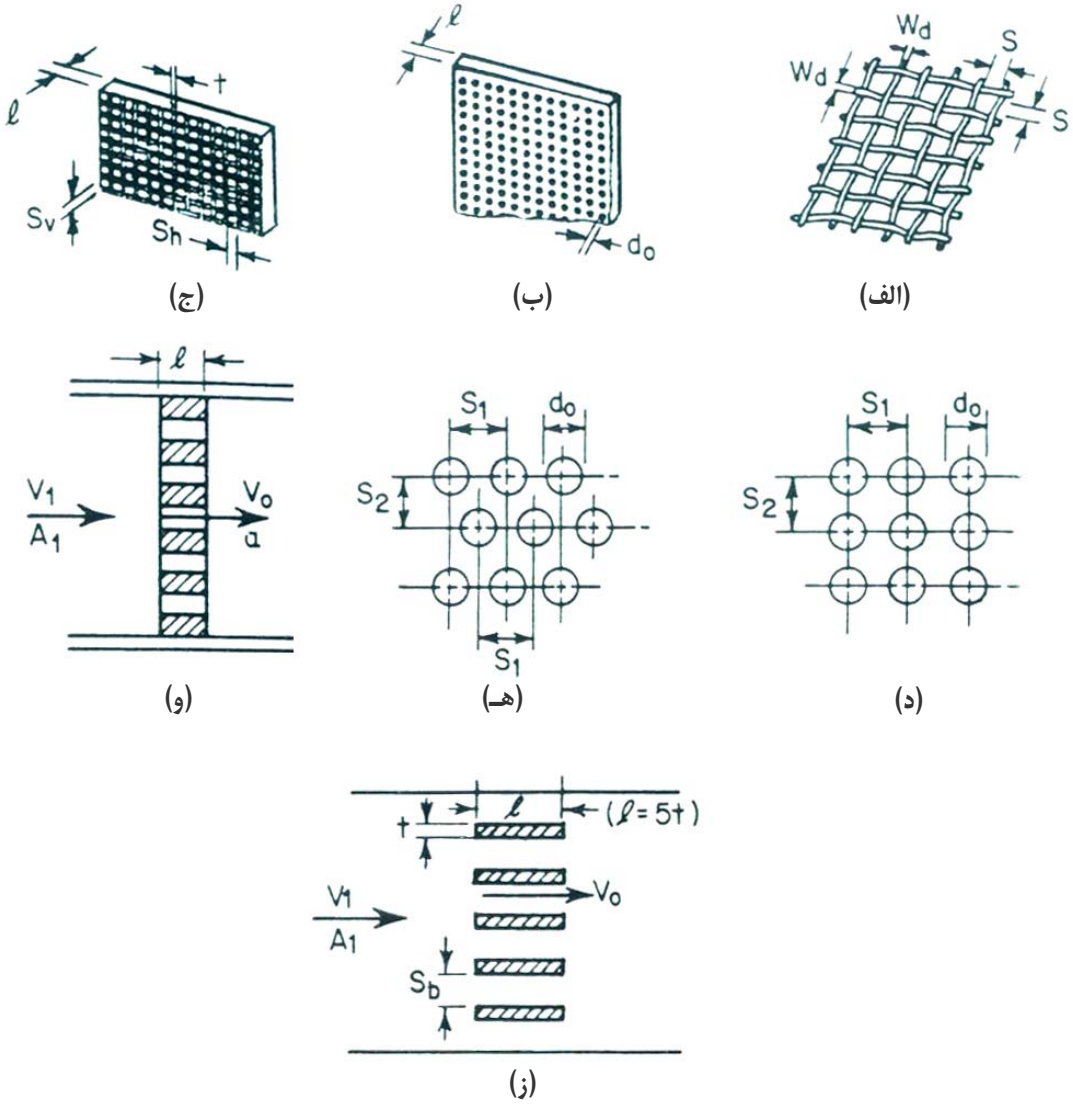
ب- صفحه با چشمه‌های مربع شکل (شکل ۸-۷- ج و $S = S_h = S_v$)

$$A_r = 100 \times (\frac{S}{S+t})^2 \qquad (۷-۸)$$

ج- صفحه با چشمه‌های مستطیل شکل (شکل ۸-۷- ج)

$$A_r = 100 \times \frac{S_h S_V}{(S_h + t)(S_V + t)} \qquad (۸-۸)$$

متغیرهای مورد استفاده در روابط (۸-۶) الی (۸-۸) در شکل (۸-۷) مشخص شده است. در سایر حالات و همچنین در ریز صافی‌ها، افت ارتفاع به قطر چشمه‌های آن و نحوه قرارگرفتن لایه‌های مختلف روی هم بستگی دارد و توسط سازنده تعیین می‌گردد.



شکل ۸-۷- برخی انواع آشغال‌گیر، (الف) توری با سیم گرد و چشمه‌های مربع شکل، (ب) صفحه با چشمه‌های دایره ای، (ج) صفحه با چشمه‌های مستطیلی، (د) صفحه با چشمه‌های مرتب در ستون های عمودی، (هـ) صفحه با چشمه‌های نامرتب متناوب، (و) مقطع عرضی از صفحه، (ز) مقطع عرضی از آشغال‌گیر با میله‌های مستطیلی [۸]

۸-٤- هوادهی

هوادهی عبارت است از قراردادن آب در معرض هوا تا اینکه برخی ترکیبات فرار از آب خارج شوند و برخی گازهای مفید در آب حل گردند. هدف از هوادهی در تصفیه آب حذف طعم و بو، حل کردن برخی گازها، اکسیدکردن آهن و منگنز و غیر محلول کردن آن‌ها و حذف موادی است که در صورت وجود در مراحل بعد ایجاد مشکل می‌کنند. اصلی‌ترین متغیر طراحی هواده فراهم‌نمودن بیش‌ترین سطح تماس میان هوا و آب با کم‌ترین هزینه است. در تصفیه‌خانه‌های آب برای هوادهی از روش‌های مختلفی نظیر

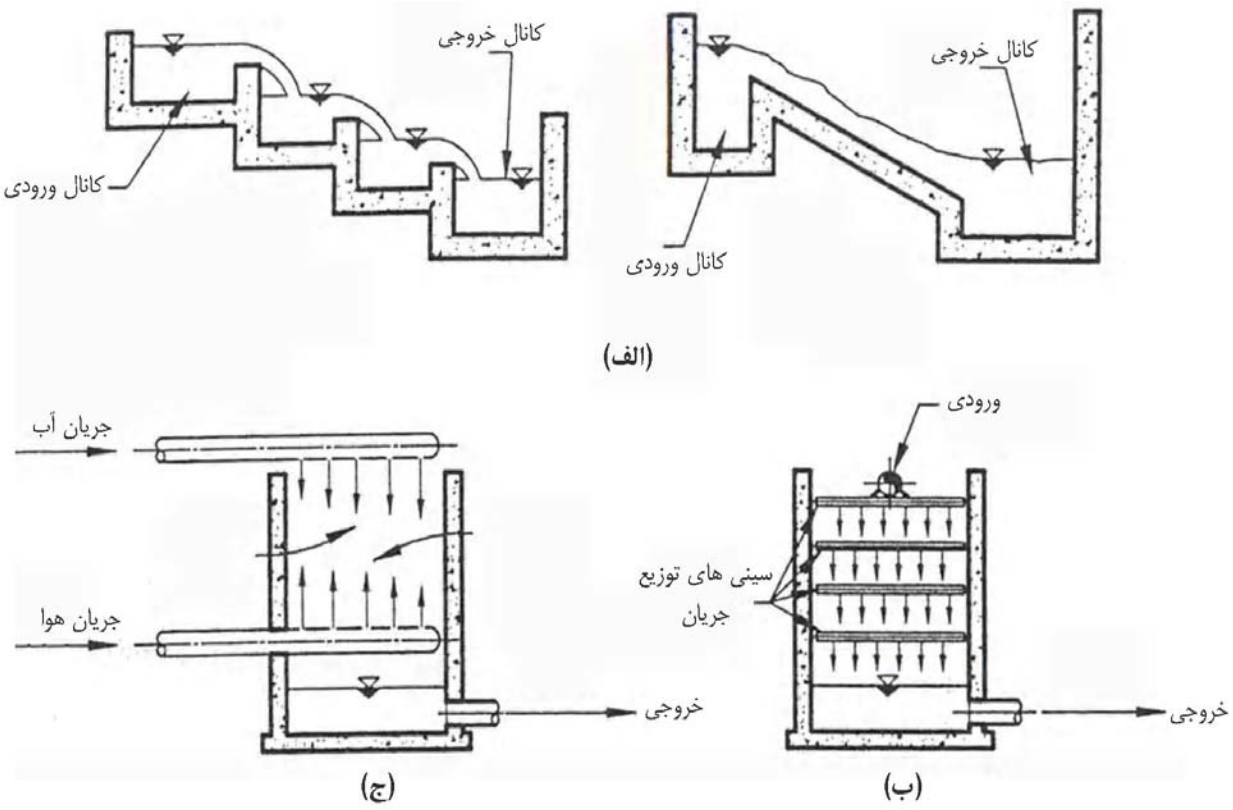
هوادهی ثقلی، هوادهی افشانه‌ای[1]، هوادهی پخشی[2] و هوادهی مکانیکی استفاده می‌شود. مقایسه عملکرد انواع مختلف هواده در جدول (۸-۳) آمده است.

جدول ۸-۳- مقایسه انواع مختلف هواده مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب [۱۳]

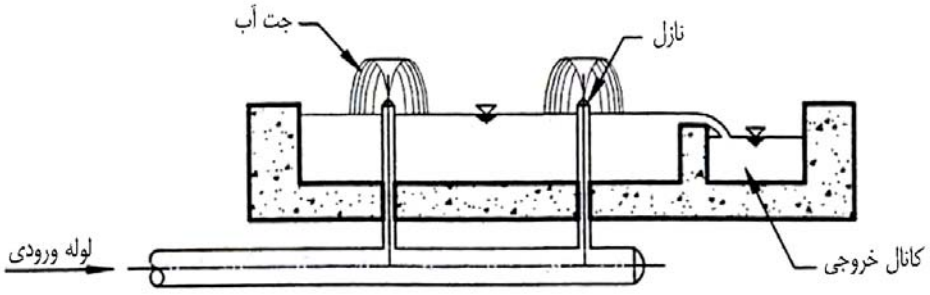
نوع هواده		متغیرهای هیدرولیکی
هواده ثقلی	آبشاری[3] (شکل(۸-۸- الف))	۱- افت ارتفاع: ۱/۰-۳/۰ m ۲- سرعت تقریبی جریان: ۰/۳ m/s
	برج سینی[4] (شکل(۸-۸- ب))	۱- شدت جریان: ۰/۸-۱/۵ $m^3/m^2/min$ ۲- فاصله سینی‌ها: ۳۰-۷۵ cm
	برج تماس[5] (شکل (۸-۸- ج))	۱- قطر حداکثر ستون: ۳ m ۲- بار هیدرولیکی: ۲۰۰۰ $m^3/m^2.d$
هواده افشانه‌ای (شکل (۸-۹))		۱- افت ارتفاع: ۱/۲-۹ m ۲- قطر و فاصله شیپوره‌ها: به ترتیب ۲/۵-۴/۰cm و ۰/۶-۳/۶m ۳- بده هر شیپوره: ۵-۱۰ L/s
هواده پخشی (شکل (۸-۱۰- الف))		۱- زمان ماند: ۱۰-۳۰ min ۲- هندسه: عمق ۲/۷-۴/۵m، پهنا ۳-۹ m و نسبت پهنا به عمق کم‌تراز۲ ۳- قطر روزنه‌ها: ۲-۵ mm
هواده مکانیکی (شکل (۸-۱۰- ب))		۱- زمان ماند: ۱۰-۳۰ min ۲- عمق: ۲-۴ m

افت ارتفاع در هواده، که اختلاف ارتفاع آب بین ورودی و خروجی را نشان می‌دهد، از سه قسمت ۱- افت ارتفاع در سازه ورودی، ۲- افت ارتفاع در سازه خروجی و ۳- افت ارتفاع در داخل حوض تشکیل شده است. محاسبه افت ارتفاع در سازه ورودی و خروجی از حوض هوادهی مشابه با سایر حوض‌ها می‌باشد و افت ارتفاع در داخل حوض نیز ناچیز است. در مورد طراحی هیدرولیکی و ترسیم نیمرخ سطح آب در حوض هوادهی توجه به این نکته مهم است که بر اثر هوادهی سطح آب مقداری بالا می‌آید. این افزایش ارتفاع بسته به میزان هوادهی می‌تواند تا ۲۰٪ عمق نیز باشد. بنابراین ارتفاع آزاد[6] در این حوض‌ها معمولا اندکی بیش‌تر از سایر انواع حوض در نظر گرفته می‌شود.

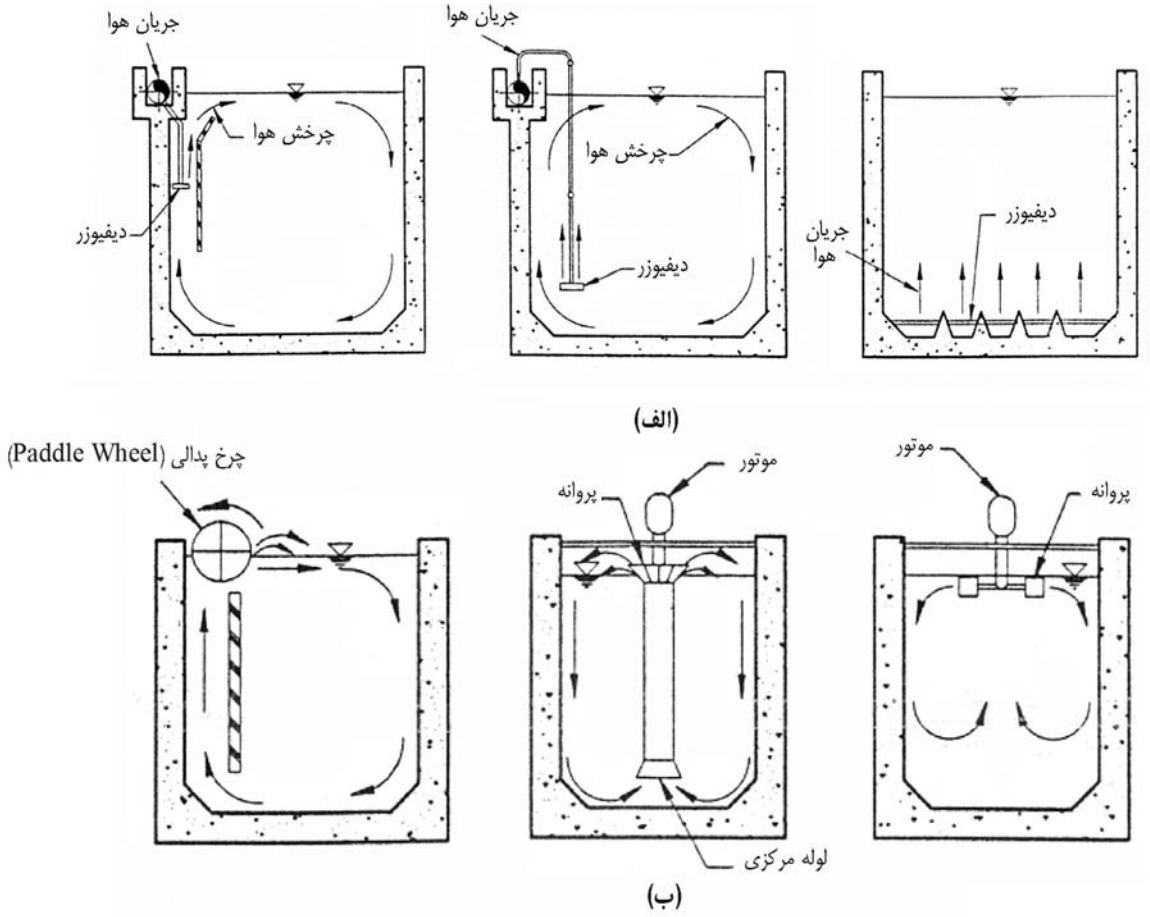
1 - Spray
2 - Diffuser
3 - Cascade
4 - Stack of Perforated Panel
5 - Tower With Outer-Current Flow
6 - Free-board



شکل ۸-۸- انواع هواده‌های ثقلی، (الف) هواده آبشاری، (ب) هواده برج سینی، (ج) هواده برج تماسی



شکل ۸-۹- قسمت‌های مختلف هواده افشانه‌ای



شکل ۸-۱۰- انواع متداول هواده‌های در تصفیه‌خانه آب، (الف) هواده‌های پخشی، (ب) هواده‌های مکانیکی

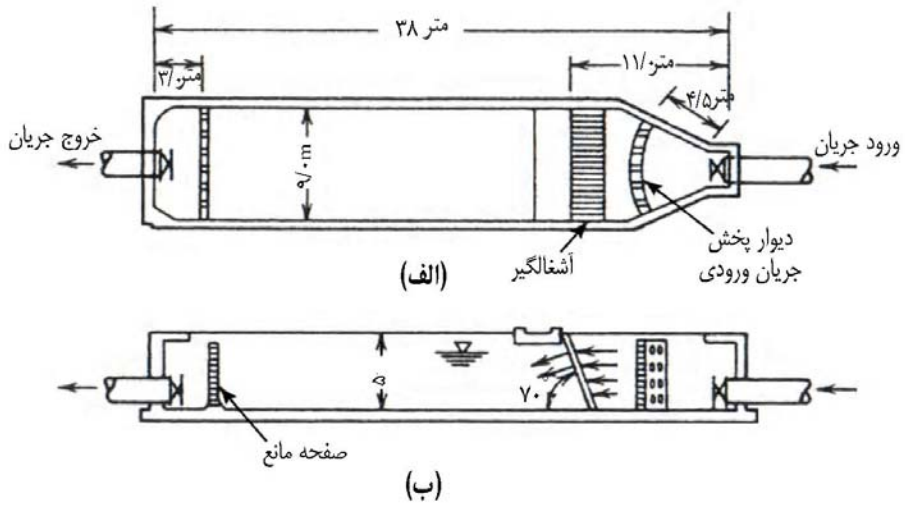
۸-۵- پیش رسوب‌گیری (پیش ته‌نشینی)

در تصفیه آب از اصطلاح دانه[1] برای لای (سیلت)، ماسه، شن و سایر ذرات معدنی قابل ته‌نشینی استفاده می‌شود. حوض پیش ته‌نشینی یا اصطلاحا دانه‌گیر یک مخزن ته‌نشینی ساده است که در آن دانه‌های همراه با آب از طریق ته‌نشینی ثقلی جدا می‌شوند. هدف از ایجاد این واحد حذف دانه‌هایی است که به تلمبه‌ها و سایر تجهیزات مکانیکی آسیب وارد نموده و با حرکت در خطوط و مجاری انتقال، سبب خوردگی و رسوب‌گذاری آن‌ها می‌شوند. همانند سایر واحدهای پیش تصفیه این واحد را می‌توان در محل آبگیری و یا ابتدای تصفیه‌خانه به‌کار برد که معمولا استفاده از آن در محل آبگیر متداول تر است. همانند حوض‌های ته‌نشینی این حوض‌ها را می‌توان به دو صورت دایره‌ای و مستطیلی به‌کار برد که نوع مستطیلی آن متداول تر است. هیدرولیک جریان در حوض‌های پیش ته‌نشینی مشابه هیدرولیک سایر انواع حوض‌های ته‌نشینی است که در فصل نهم به‌طور کامل ارایه شده است. برخی معیارهای متداول در طراحی حوض‌های دانه‌گیر در جدول (۸-۴) آمده است. همچنین در شکل (۸-۱۱) نمونه‌ای از حوض دانه‌گیر نشان داده شده است.

1 - Grit

جدول ۸-٤- معیارهای طراحی حوض دانه‌گیر در تصفیه‌خانه آب [١٦]

متغیر	مقدار متداول
تعداد حوض	۲ عدد همراه با کانال کنار گذر
عمق	۳ تا ۵ متر
نسبت طول به عرض	حداقل ۴ به ۱
نسبت طول به عمق	حداقل ۶ به ۱
محدوده سرعت متوسط	۳ تا ۴/۵ متر بر دقیقه
زمان ماند	۶ تا ۱۵ دقیقه
بارگذاری سطحی	۱۰ تا ۲۵ متر بر ساعت



شکل ۸-۱۱- نمونه‌ای از حوض دانه‌گیر، (الف) تصویر افقی، (ب) مقطع طولی [١٦]

فصل ۹

انعقاد و لخته‌سازی

۹-۱- کلیات

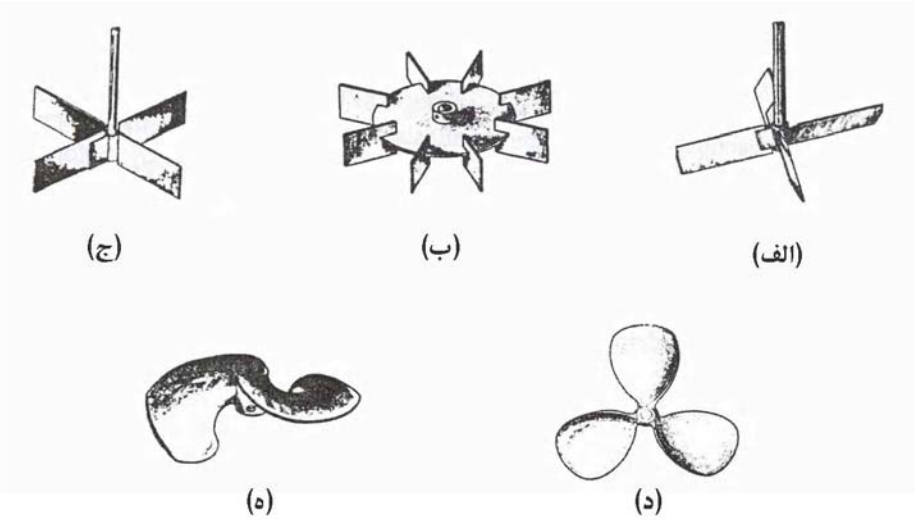
در آب، ذرات کلوئیدی وجود دارند که تنها می‌توان آن‌ها را پس از اینکه به لحاظ فیزیکی و شیمیایی تحت شرایط خاصی قرار گرفتند، ترسیب یا صاف نمود. آماده‌سازی شیمیایی ذرات کلوئیدی را اصطلاحا انعقاد[1] می‌نامند و طی آن با افزودن مواد شیمیایی خاص، خصوصیات فیزیکی ذرات کلوئیدی را به شکلی که قابلیت ته‌نشینی بهتری داشته باشند، اصلاح می‌کنند. آماده‌سازی فیزیکی ذرات کلوئیدی برای ته‌نشینی بهتر را لخته‌سازی[2] می‌نامند. این فرایند شامل به هم زدن ملایم آب است که طی آن ذرات کلوئیدی معلق برای تماس و چسبیدن به سمت همدیگر رانده می‌شوند. بنابراین لخته‌های بزرگ‌تری به‌وجود می‌آید که بهتر ته‌نشین می‌شوند. در این فصل جزییات هیدرولیکی طراحی قسمت‌های انعقاد و لخته‌سازی آمده است. لازم به ذکر است که در این فصل نیز همانند سایر فصول از بیان فرایند واحدها صرفنظر شده و مسایل با فرض در اختیار بودن این اطلاعات حل شده‌اند. لذا برای آشنایی با اطلاعات فرایند به مراجع [۱۱]، [۱۶] و [۱۷] و یا به نشریه شماره ۳-۱۲۱ با عنوان "ضوابط فنی بررسی و تصویب طرح‌های تصفیه آب شهری" از سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی مراجعه شود.

۹-۲- اختلاط سریع

فرایندهای انعقاد و غیر محلول‌سازی هر دو نیازمند افزودن مواد شیمیایی به آب هستند. موفقیت این عمل تا حد زیادی به توزیع یکنواخت و سریع افزودنی‌های شیمیایی بستگی دارد. عمل پراکنده کردن و پخش سریع مواد شیمیایی در داخل آب را اختلاط سریع می‌نامند. واحد اختلاط سریع را می‌توان بر مبنای روش اختلاط (مکانیکی یا استاتیکی) و انواع الگوهای جریان (جریان پلاگ[3] یا اختلاط کامل) دسته‌بندی نمود. در واحدهای اختلاط مکانیکی از یک پروانه استفاده می‌شود که با چرخش سریع آن اغتشاش شدیدی به‌وجود می‌آید. برخی از انواع این تجهیزات در شکل (۹-۱) نشان داده شده است. نوع پروانه‌های مورد استفاده برای اختلاط سریع تابعی از هندسه حوض و الگوی جریان در داخل آن می‌باشد.

همزن‌های استاتیکی با استفاده از عواملی نظیر پرش هیدرولیکی، صفحه مانع[4]، جریان آشفته در داخل لوله یا کانال و یا انقباض و انبساط ناگهانی در خطوط لوله، تماس مناسب بین مواد شیمیایی و آب خام فراهم می‌کنند. در جدول (۹-۱) مزایا و معایب انواع همزن‌ها مکانیکی و استاتیکی در مقایسه با هم ارایه شده است.

1 - Coagulation
2 - Flocculation
3 - Plug Flow
4 - Baffle



شکل۹-۱- همزن‌های پروانه‌ای، (الف) پروانه‌های تیغه‌ای با جریان محوری، (ب) پروانه‌های دیسکی با صفحات تخت، (ج) پروانه‌های توربینی تخت، (د) و (هـ) ملخ‌های سرعت بالا با جریان محوری

جدول ۹-۱- مقایسه مزایا و معایب همزن‌های مکانیکی و استاتیکی

نوع همزن	مزایا	معایب
مکانیکی	۱- مستقل از شدت جریان ۲- قابل تنظیم ۳- بهره‌برداری انعطاف پذیر	۱- نیاز به تجهیزات مکانیکی ۲- امکان خرابی تجهیزات
استاتیکی	۱- بهره‌برداری و نگهداری آسان ۲- کم هزینه و مطمئن	۱- وابستگی به شدت جریان ۲- افت ارتفاع بالا ۳- انعطاف‌پذیری کم در بهره‌برداری

۹-۳- گرادیان سرعت در واحد اختلاط سریع

در واحد اختلاط سریع، همزن‌ها آشفتگی مورد نیاز برای پخش مواد شیمیایی در کل حجم آب را فراهم می‌نمایند. واکنش مواد شیمیایی منعقدکننده معمولا سریع است، بنابراین پخش سریع این مواد قبل از کامل‌شدن واکنش مطلوب است. به منظور پخش همگن و سریع افزودنی‌های شیمیایی، همزن‌ها باید به نحوی طراحی شوند که در یک زمان کوتاه گرادیان شدیدی ایجاد نمایند و مواد شیمیایی نیز در نقطه‌ای که حداکثر گرادیان آشفتگی[1] را دارد، افزوده شوند. در تصفیه‌خانه آب میزان آشفتگی در واحد اختلاط را با گرادیان سرعت می‌سنجند. برای همزن‌ها، مقدار گرادیان سرعت از رابطه (۹-۱) محاسبه می‌شود:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V\mu}} \qquad (۹-۱)$$

در این رابطه P توان هیدرولیکی داده شده به آب (برحسب وات یا نیوتن- متر بر ثانیه)، V حجم حوض (مترمکعب)، μ لزجت آب (بر حسب نیوتن برثانیه بر مترمربع) و G گرادیان سرعت (بر حسب s^{-1}) را نشان می‌دهند. مقدار انتخابی برای گرادیان سرعت،

1 - Agitation Gradient

G، به عواملی همچون زمان ماند هیدرولیکی، مقدار تزریق مواد افزودنی و شکل هندسی حوض اختلاط بستگی دارد، ولی مقدار آن به‌طور معمول از $۱۰۰S^{-۱}$ تا $۱۰۰۰S^{-۱}$ تغییر می‌کند. در عمل گرادیان هیدرولیکی مناسب را با استفاده از مدل فیزیکی یا آزمایش راهنما[1] تعیین می‌کنند. یک جایگزین مناسب برای موارد فوق استفاده از تجربیات تصفیه‌خانه‌های موجود است.

۹-٤- زمان ماند در حوض‌های اختلاط سریع

زمان ماند در حوض‌های اختلاط سریع باید به اندازه‌ای باشد که زمان کافی برای پخش همگن مواد شیمیایی در آب و زمان کافی برای اینکه لخته‌ها به یک تعادل در اندازه برسند، را فراهم نماید. به این ترتیب زمان اختلاط سریع را تنها با انجام مطالعات آزمایشگاهی و یا استفاده از تجربیات موجود در تصفیه‌خانه‌های آبی که به لحاظ شیمیایی و بهره‌برداری متشابه هستند، تعیین می‌کنند. زمان ماند برای اختلاط سریع بین ۱۰ ثانیه تا ۵ دقیقه تغییر می‌کند (دامنه ۱۰ تا ۳۰ ثانیه متداول‌تر است) [۱۳]. همچنین زمان ماند متوسط در واحد اختلاط سریع را می‌توان به کمک رابطه (۹-۲) محاسبه نمود:

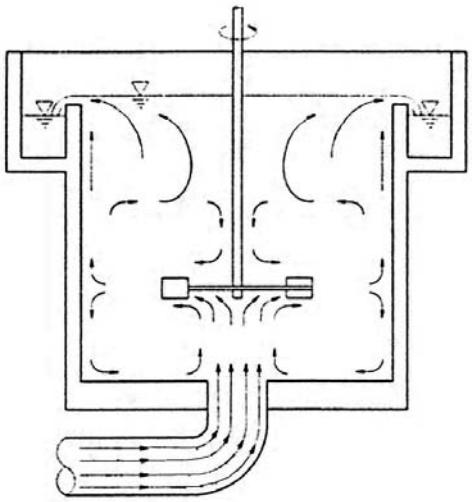
$$t = \frac{V}{Q} \qquad (۹-۲)$$

در این رابطه t زمان ماند متوسط، Q بده و V حجم حوض می‌باشد. برای رسیدن به اختلاط کافی در زمان ماند کوتاه‌تر، نیازمند گرادیان سرعت بالاتر خواهد بود و برعکس برای زمان ماند طولانی، گرادیان سرعت کم‌تری مورد نیاز است. بنابراین می‌توان از حاصل‌ضرب Gt که در بر دارنده هر دو متغیر زمان ماند و گرادیان سرعت است، به عنوان یک معیار مناسب استفاده کرد. مقدار معمول Gt در مسایل مربوط به اختلاط سریع در تصفیه آب شهری بین ۳۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ (Gt بدون دیمانسیون است) تغییر می‌کند. حاصل‌ضرب Gt حسب نوع مواد شیمیایی و دز تزریقی تا حد زیادی تغییر می‌کند که مقادیر بهینه برای آن به‌صورت تجربی تعیین می‌شود [۱۳].

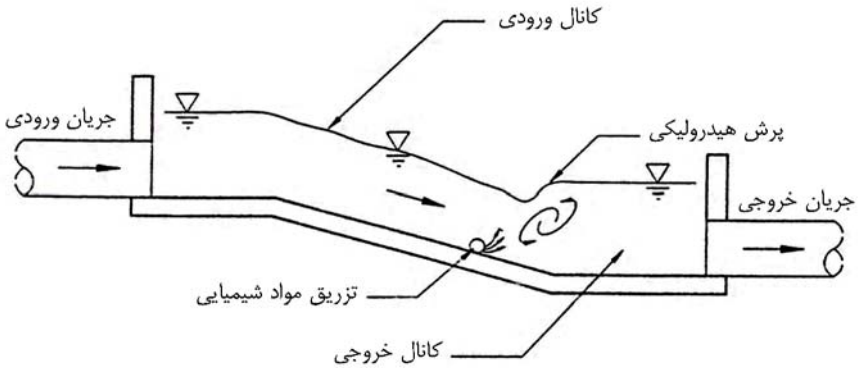
۹-۵- هندسه حوض اختلاط سریع

هندسه حوض اختلاط سریع یکی از مهم‌ترین جنبه‌های طراحی این واحد می‌باشد. اولین مساله مهم در طراحی هندسه این واحد فراهم نمودن شرایطی است که در آن آب به‌صورت یکنواخت در کل فضای حوض اختلاط جریان یافته و فضاهای مرده و جریان‌های کوتاه چرخشی حداقل شود. در صورتی که از همزن‌های مکانیکی برای اختلاط سریع استفاده شود، معمولا هندسه مربع که نسبت عمق به عرض آن حدودا ۲ است، طراحی می‌گردد. اندازه و شکل پروانه همزن باید متناسب با جهت جریان ورودی باشد. برای به حداقل رساندن تاثیرات جریان‌های کوتاه چرخشی می‌توان از واحدهای اختلاط سریع با الگوی جریان عمودی نیز استفاده نمود. در شکل (۹-۲) جزییات الگوی جریان در این سامانه نشان داده شده است. همزن‌های مکانیکی را نباید در مخازن استوانه‌ای به‌کار برد. زیرا حوض‌های با مقطع دایره‌ای مقاومت اندکی در مقابل جریان‌های گردابی ایجاد می‌کنند که این امر میزان اختلاط را کاهش می‌دهد. برای کاهش جریان‌های گردابی و افزایش راندمان اختلاط در این مخازن از صفحه مانع استفاده می‌شود. بخاطر افت ناچیز به‌وجود آمده، محاسبه افت ارتفاع در داخل این حوض‌ها از اهمیت چندانی برخوردار نیست.

1 -Pilot



شکل ۹-۲- حوض اختلاط سریع با جریان رو به بالا و همزن مکانیکی

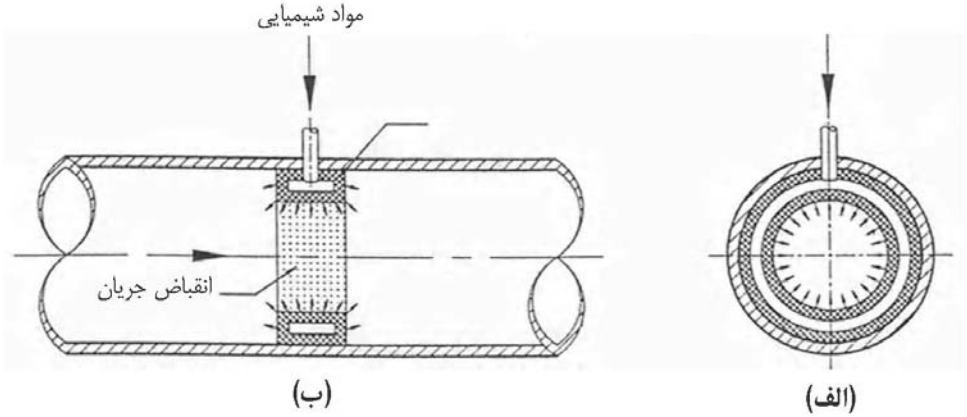


شکل ۹-۳- اختلاط سریع با استفاده از پرش هیدرولیکی در کانال باز

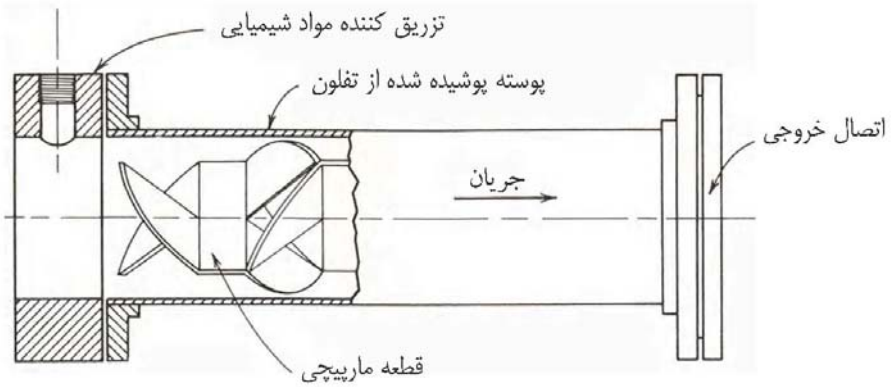
علاوه بر روش‌های مکانیکی از یک کانال با جریان آشفته، که در آن پرش هیدرولیکی ایجاد شده و طول کافی برای تامین زمان ماند را دارد، نیز می‌توان به‌طور مطلوبی برای اختلاط مناسب مواد شیمیایی با آب استفاده کرد. در شکل (۹-۳) نمونه‌ای از این سامانه اختلاط نشان داده شده است. روش تعیین افت ارتفاع در این حالت در قسمت (۳-۵-۷) آمده است.

به‌جز کانال باز از مجاری بسته با جریان تحت فشار نیز به شرط وجود جریان آشفته با طول کافی در آن‌ها می‌توان برای اختلاط مواد شیمیایی با آب استفاده نمود. به علاوه انبساط و انقباض در لوله باعث ایجاد آشفتگی در جریان می‌شود که اگر در طول کافی ادامه پیدا کند، می‌تواند شرایط مناسبی برای اختلاط فراهم نماید. در شکل (۹-۴) یک نمونه از این نوع سامانه اختلاط سریع نشان داده شده است. همچنین برخی همزن‌های استاتیکی به‌صورت یک لوله و قطعه مارپیچی در داخل آن و یا صفحاتی که تغییر جهت ناگهانی در مسیر جریان به‌وجود می‌آورند، می‌تواند برای اختلاط سریع مواد شیمیایی در طول کوتاه مورد استفاده قرار گیرد. در شکل (۹-۵) نمونه‌ای از این همزن‌ها که بیش‌تر تحت عنوان همزن‌های استاتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد، نشان داده شده است. محاسبه افت ارتفاع در این وسایل به کمک رابطه تعیین افت موضعی (رابطه (۳-۱۲)) انجام می‌گیرد. مشخصات این سامانه‌ها از قبیل ضریب افت ارتفاع موضعی یا حداقل فشار مورد نیاز توسط سازندگان ارایه می‌شود. در مورد همه روش‌های اختلاط لازم است تا

مواد شیمیایی افزودنی بلافاصله قبل از نقطه‌ای که حداکثر اغتشاش جریان درآن رخ می‌دهد، به آب اضافه شود. این نحوه طراحی رسیدن به پخش یکنواخت و سریع مواد شیمیایی داخل آب را تضمین می‌کند.



شکل ۹-٤- همزن استاتیکی مورد استفاده در لوله، (الف) مقطع عرضی، (ب) برش طولی



شکل ۹-۵- همزن‌های استاتیکی مورد استفاده در لوله

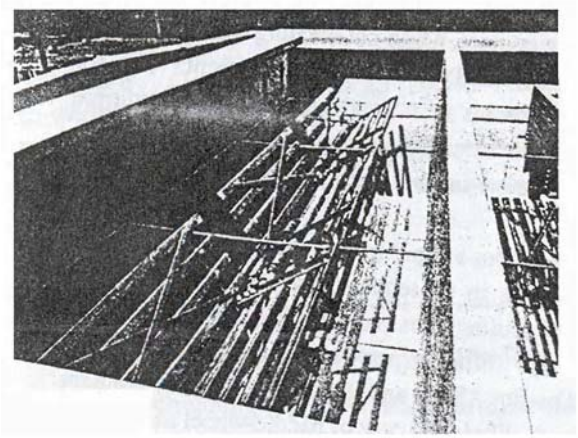
۹-٦- لخته‌سازی

فرایند انعقاد با اصلاح شیمیایی ذرات کلوئیدی موجود در آب، در نهایت باعث کاهش نیروهای دافعه بین ذرات می‌شود. برای اینکه امکان نزدیک‌شدن ذرات و چسبیدن و اجتماع آن‌ها با هم و تشکیل لخته فراهم شود لازم است پس از این مرحله امکان تماس بین ذرات به نحو مناسبی فراهم گردد. برای این منظور آب خروجی از واحد انعقاد به ملایمت به هم زده می‌شود تا باعث تسریع در رشد لخته‌ها گردد. این عمل که طی آن اندازه لخته‌ها بزرگ می‌شود، لخته‌سازی نامیده می‌شود. چنانچه اندازه لخته‌ها ریز باشد ته‌نشینی و صاف‌سازی آن دشوار، زمان بر و با بازدهی پایین خواهد بود. در واحد لخته‌سازی، همزن‌ها به آرامی جریان را به‌هم می‌زنند تا اندازه لخته‌ها به حدی برسد که ته‌نشینی و صاف‌سازی آن ممکن گردد. اندازه معمول برای لخته‌های تشکیل شده در این واحد بین ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر است. تشکیل لخته‌ها و رشد اندازه آن به دو صورت انجام می‌گیرد. در نوع اول رشد اندازه لخته‌ها در

نتیجه تماس بین ذره‌ای طی حرکت براونی[1] (حرکت تصادفی مولکولی) و در نوع دوم رشد اندازه لخته‌ها در نتیجه تماس بین ذره‌ای تحت اثر حرکت و آشفتگی موجود در سیال صورت می‌گیرد. در واحد لخته‌سازی نوع دوم به عنوان مکانیزم غالب در رشد اندازه لخته‌ها نقش دارد.

۹-۷- انواع روش‌های لخته‌سازی

در تصفیه‌خانه‌های آب لخته‌سازی به دو صورت هیدرولیکی و مکانیکی انجام می‌گیرد. در روش لخته‌سازی هیدرولیکی، از صفحات مانع عرضی[2] و یا تغییر جهت‌های ۱۸۰ درجه در مسیر جریان برای ایجاد آشفتگی مورد نیاز استفاده می‌شود. در لخته‌سازهای هیدرولیکی به علت حساسیت این سامانه‌ها به تغییرات جریان ورودی، این امر تنها در شرایطی که بده جریان نسبتا ثابت باشد، قابل دسترسی است و به همین علت در تصفیه‌خانه‌های با اندازه متوسط یا بزرگ به علت حساسیت این سامانه‌ها به تغییرات بده، کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اغلب موارد از لخته‌سازهای مکانیکی استفاده می‌شود و به‌طور معمول در آن از همزن‌های پدالی با محور افقی استفاده می‌شود. در شکل (۹-۶) نمونه‌ای از این نوع همزن نشان داده شده است.



شکل ۹-٦- همزن‌های پدالی با محور افقی در واحد لخته‌سازی

۹-۸- گرادیان سرعت در واحد لخته‌سازی

میزان آشفتگی مورد نیاز برای لخته‌سازی تا حد زیادی نسبت به اختلاط سریع کم‌تر است. هدف از لخته‌سازی برقراری تماس مناسب بین ذرات معلق است و نباید اغتشاش تا حدی زیاد شود که باعث شکسته شدن لخته‌های تشکیل شده در مراحل قبل گردد. گرادیان سرعت معمول مورد استفاده برای لخته‌سازی در دامنه $۱۵\ s^{-1}$ تا $۶۰\ s^{-1}$ قرار دارد. معمولا حوض‌های لخته‌سازی را به‌صورت چند قسمتی که به‌صورت سری قرار دارند، طراحی می‌کنند. سرعت همزن‌ها در طول این قسمت‌ها به تدریج کم می‌شود. این روش طراحی، روش لخته‌سازی چند مرحله‌ای نامیده می‌شود و از آن برای تشکیل لخته‌های یکنواخت، درشت و سفت که قابلیت نشست پذیری مناسبی دارند، استفاده می‌شود. در قسمت اول سامانه‌های لخته‌سازی چند مرحله‌ای، مقدارگرادیان سرعت زیاد است

1 - Brownian Motion
2 - Cross-Flow Baffle

که باعث می‌شود تعداد تماس زیادی بین ذرات موجود در آب به‌وجود آید و پس از آن در سایر قسمت‌ها با کاهش گرادیان سرعت امکان رشد و بزرگ‌تر شدن لخته‌های ریز فراهم می‌گردد.

۹-۹- زمان ماند در حوض لخته‌سازی

اهمیت زمان ماند در حوض‌های لخته‌ساز از حوض‌های اختلاط سریع بیش‌تر است و مقدار معمول آن بین ۲۰ تا ۶۰ دقیقه تغییر می‌کند. متغیر اصلی طراحی در حوض‌های لخته‌سازی حاصل‌ضرب Gt (زمان ماند × گرادیان سرعت) است، زیرا تعداد لخته‌های تشکیل شده با آن تناسب مستقیم دارد. مقدار متعارف برای Gt در تصفیه آب شهری بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰۰ می‌باشد و همانند آنچه برای اختلاط سریع گفته شد، در مورد حوض‌های لخته‌سازی نیز برای تعیین مناسب‌ترین مقدار برای Gt باید از نتایج آزمایشگاهی و یا تجربیات تصفیه‌خانه‌های موجود استفاده کرد [۱۳].

۹-۱۰- هندسه حوض لخته‌سازی

هندسه حوض لخته‌سازی باید به‌گونه‌ای باشد که جریان‌های چرخشی کوتاه در آن حداقل شود. به این علت واحد لخته‌سازی را به‌صورت چند حوض به‌صورت سری می‌سازند که معمولا استفاده از حوض با ۳ تا ۴ قسمت کافی است و هر قسمت را با صفحه مانع از سایر قسمت‌ها جدا می‌کنند. معمولا برای این منظور قسمت‌های با هندسه مربع به طول حداقل ۶ متر و عمق ۳ تا ۵ متر مناسب است. در شرایطی که از همزن‌های پدالی با محور افقی استفاده می‌شود، طول حوض ۶ تا ۳۰ متر و عرض آن ۳ تا ۵ متر خواهد بود. بازشدگی در صفحات مانع میانی باید به اندازه‌ای بزرگ باشند که گرادیان سرعت به‌وجود آمده در آن‌ها کم‌تر از مقداری که در لخته‌ساز ایجاد می‌شود، باشد. افت ارتفاع در این بازشدگی‌ها نیز با رابطه روزنه (رابطه (۸-۱)) محاسبه می‌شود. معیارهای سرعت که به‌طور معمول در طراحی هیدرولیکی واحد لخته‌سازی رعایت می‌شود، عبارتند از:

- سرعت متوسط در مجرا یا ناودان ورودی از واحد اختلاط سریع به حوض لخته ساز معمولا بین ۰/۴۵ تا ۰/۹ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. برای این منظور می‌توان از مجاری با مقطع متغیر که در عرض یا عمق باز می‌شوند، استفاده نمود.
- حوض‌های لخته‌سازی باید به نحوی طراحی شوند که سرعت متوسط در طول آن‌ها بین ۰/۱۵ تا ۰/۴۵ متر بر دقیقه قرار گیرد. چنانچه سرعت از ۰/۵ متر بر دقیقه تجاوز کند، ممکن است شکسته‌شدن لخته‌های تشکیل شده را در پی داشته باشد. همچنین جریان در مقطع حوض باید به صورت یکنواخت باشد تا فضای مرده را تا حد امکان کاهش دهد.
- صفحات مانع به گونه‌ای طراحی شوند که سرعت جریان در عبور از آن‌ها در حدود ۰/۳ تا ۰/۴۵ متر بر ثانیه باشد. همچنین نسبت سطح بازشدگی صفحات مانع ۳ تا ۶ درصد سطح کل است. به علاوه از شکاف‌هایی با ابعاد مناسب در کف (۰/۱-۰/۵ متر ارتفاع و ۰/۴-۰/۶ متر طول) به منظور تمیزکردن و لایروبی حوض استفاده می‌شود.
- چنانچه برای انتقال آب از واحد لخته‌سازی به واحدهای بعدی از لوله یا ناودان استفاده گردد، سرعت حرکت جریان در این مجراها باید در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۴۵ متر بر ثانیه باشد. در شرایطی که از دیوار پخش[1] (یا صفحه مانع انتهایی) بین واحد لخته‌سازی و حوض‌های ته‌نشینی استفاده گردد، برای محاسبه مساحت روزنه‌های مورد نیاز عبور جریان معمولا از

1 - Diffusion Wall

سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه استفاده می‌شود. به‌طور معمول در طراحی دیوار جداساز یک شکاف کوچک در پایین و یک شکاف کوچک نیز در بالای دیوار به منظور انتقال لجن و روآب در نظر گرفته می‌شود.

فصل ۱۰

ته‌نشینی

۱۰-۱-کلیات

واحد ته‌نشینی یکی از واحدهای اصلی تصفیه فیزیکی آب، جهت حذف ذرات معلق موجود در آب است. از لحاظ جانمایی این واحد بعد از واحدهای اختلاط سریع و لخته‌سازی قرار دارد. علاوه بر این، هنگام بازیابی آب شستشوی صافی‌ها و تغلیظ لجن از این واحد استفاده می‌شود. همچنین اگر منبع تامین آب خام رودخانه باشد، به منظور حذف لای (سیلت) و ماسه، از پیش ته‌نشینی استفاده می‌گردد. در این فصل نیز همانند سایر فصل‌ها تنها هیدرولیک حوض ته‌نشینی مورد بررسی قرار می‌گیرد و از شرح فرایند خودداری می‌شود.

۱۰-۲- قوانین حاکم بر ته‌نشینی

هیدرولیک حوض ته‌نشینی به متغیرهایی نظیر غلظت، اندازه و رفتار ذرات معلق موجود در آب بستگی دارد. به طور کلی شناسایی ذرات معلق و سرعت ته‌نشینی آن‌ها از موارد مهم در طراحی حوض‌های ته‌نشینی است. اگر به هر دلیلی امکان انجام آزمایش جهت برآورد موارد مذکور وجود نداشته باشد، می‌توان با استفاده از جدول (۱۰-۱) مقادیر تقریبی متغیرهای مورد نیاز جهت شناسایی ذرات ورودی را استخراج کرد. به طور کلی فرایند ته‌نشینی به چهار نوع تقسیم‌بندی می‌شود:

- نوع اول

این نوع ته‌نشینی متناسب با شرایطی است که غلظت جامدات معلق ورودی کم باشد و ذرات به طور تقریبا جداگانه ته‌نشین می‌شوند. از نمونه‌های این نوع ته‌نشینی در تصفیه‌خانه آب می‌توان به حذف لای (سیلت) از آب ورودی به تصفیه‌خانه از رودخانه در فرایند پیش ته‌نشینی قبل از مرحله اختلاط سریع و یا نشست ماسه‌ها در صافی‌ها پس از عملیات شستشو اشاره کرد.

- نوع دوم

این نوع ته‌نشینی متناظر با شرایطی است که غلظت ذرات معلق ورودی زیاد باشد. از نمونه‌های این نوع ته‌نشینی در تصفیه‌خانه آب می‌توان به ته‌نشینی لخته‌ها در حوض‌های لخته‌سازی اشاره کرد.

- نوع سوم

این نوع ته‌نشینی هنگامی رخ می‌دهد که غلظت ذرات معلق به اندازه کافی بالا است تا همانند یک جرم تجمع یافته[1] ته‌نشین شوند. نمونه‌ای از این نوع ته‌نشینی را می‌توان در قسمت فوقانی پتوی لجن در واحد تغلیظ ثقلی مشاهده کرد.

- نوع چهارم

این نوع ته‌نشینی در شرایطی اتفاق می‌افتد که غلظت ذرات معلق بسیار بالا باشد. در این شرایط ته‌نشینی یک ذره با متراکم کردن ذرات مجاورش رخ می‌دهد. نمونه‌ای از این نوع ته‌نشینی در قسمت تحتانی پتوی لجن در واحد تغلیظ ثقلی رخ می‌دهد.

1 - Mass

جدول ۱۰-۱- سرعت ته‌نشینی ذرات و بار سطحی حوض ته‌نشینی (دمای آب $10\ ^{\circ}C$) [۱۳]

نوع ذرات	چگالی	اندازه (میلی‌متر)	سرعت ته‌نشینی (میلی‌متر بر ثانیه)	بارگذاری سطحی (متر بر ساعت)
ماسه	۲/۶۵	۱/۰	۱۰۰	۳۶۰
ماسه	۲/۶۵	۰/۸۵	۷۳	۲۶۳
ماسه	۲/۶۵	۰/۶	۶۲	۲۲۳
ماسه	۲/۶۵	۰/۴	۴۲	۱۵۱
سیلت	۲/۶۵	۰/۲	۲۱	۷۶
سیلت	۲/۶۵	۰/۱۵	۱۵	۵۴
سیلت	۲/۶۵	۰/۱۰	۸	۲۹
سیلت و رس	۲/۶۵	۰/۰۸	۶	۲۲
سیلت و رس	۲/۶۵	۰/۰۶	۳/۸	۱۴
سیلت و رس	۲/۶۵	۰/۰۴	۲/۱	۷/۵
رس	۲/۶۵	۰/۰۲	۰/۶۲	۲/۳
رس	۲/۶۵	۰/۰۱	۰/۱۵۴	۰/۵۴
لخته آلومی	۱/۰۰۱	۱-۴	۰/۲-۰/۹	۰/۷۱-۳/۳
لخته آهکی	۱/۰۰۲	۱-۳	۰/۴-۱/۲	۱/۵-۴/۳

طراحی حوض ته‌نشینی معمولا بر مبنای ته‌نشینی نوع اول انجام می‌گیرد مگر در شرایطی که غلظت ذرات معلق زیاد باشد. قوانین حاکم بر ته‌نشینی نوع اول مبتنی بر تئوری ته‌نشینی ذرات با سرعت ثابت می‌باشد. براساس این تئوری ذرات در حین ته‌نشینی در ابتدا با یک حرکت شتاب‌دار شروع به حرکت می‌کنند و در ادامه با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهند. در این حالت نیروی دراگ برابر نیروی ثقل می‌باشد و عملا یکدیگر را خنثی می‌کنند. سرعت ته‌نشینی ثابت در این حالت با استفاده از رابطه (۱۰-۱) محاسبه می‌شود.

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{d_s g}{C_D} \times \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}} \quad \text{OR} \quad V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{d_s g}{C_D} \times (S_g - 1)} \qquad (۱-۱۰)$$

در این رابطه V_s سرعت ته‌نشینی (متر بر ثانیه)، d_s قطر ذرات (متر)، g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، C_D ضریب دراگ، S_g جرم مخصوص ذرات، ρ_s جرم مخصوص ذرات (کیلوگرم بر مترمکعب)، ρ جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب) را نشان می‌دهند.

رابطه (۱۰-۱) برای ذرات کروی به‌دست آمده و اگر ذرات غیرکروی باشند، ضریب C_D افزایش و سرعت ته‌نشینی کاهش می‌یابد. یکی از روش‌های تصحیح این رابطه برای حالتی که ذرات غیرکروی هستند، استفاده از متغیر شکل (Φ) به صورتی که در رابطه (۱۰-۲) نشان داده شده است، می‌باشد.

$$C_D = \frac{24\Phi}{N_{Re}} \qquad (۲-۱۰)$$

در این رابطه N_{Re} عدد رینولدز است و مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$N_{Re} = \frac{V_s d_s}{\nu} = \frac{V_s \rho d_s}{\mu} \qquad (۳-۱۰)$$

در این رابطه V_S سرعت سقوط ذرات (از رابطه (۱۰-۱))، ν ویسکوزیته سینماتیکی (مترمربع بر ثانیه) و μ ویسکوزیته دینامیکی (نیوتن بر ثانیه بر مترمربع) را نشان می‌دهند.

مقادیر متداول Φ برای ماسه ۲ و برای ذغال ۲/۲۵ می‌باشد. طبق رابطه (۱۰-۲) ضریب دراگ به عدد رینولدز وابسته است. در شرایطی که رژیم جریان لایه‌ای باشد (عدد رینولدز کم‌تر از ۱)، مقدار C_D برای ذرات کروی از رابطه (۱۰-۴) و در شرایطی که رژیم جریان در وضعیت بینابینی (عدد رینولدز بین ۱ تا 10^4) باشد، مقدار C_D از رابطه (۱۰-۵) محاسبه می‌شود. مقدار C_D برای ذرات کروی در شرایطی که رژیم جریان آشفته (عدد رینولدز بیش‌تر از 10^4) باشد، برابر عدد ثابت ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود.

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} \qquad (۱۰-۴)$$

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} + \frac{3}{\sqrt{N_{Re}}} + 0.34 \qquad (۱۰-۵)$$

در جریان لایه‌ای، با جایگزینی (۱۰-۱) در (۱۰-۴) سرعت ته‌نشینی را می‌توان با استفاده از قانون استوکس، رابطه (۱۰-۶)، محاسبه کرد.

$$V_s = \frac{g d_s^2 (\rho_s - \rho)}{18\mu} = \frac{g d_s^2 (S_g - 1)}{18\upsilon} \qquad (۱۰-۶)$$

۱۰-۳- متغیرهای طراحی

از متغیرهای مهم در طراحی حوض‌های ته‌نشینی می‌توان به هندسه حوض، نرخ بار سطحی، زمان ماند، ناحیه ورودی و خروجی، نرخ بار سرریز و سامانه جمع‌آوری لجن اشاره کرد. محدوده تقریبی مقادیر مناسب برای این متغیرها در جدول (۱۰-۲) آمده است. از آنجایی که در اکثر موارد زمان ماند واقعی حوض‌های ته‌نشینی به مراتب کم‌تر از زمان ماند طراحی است، این عامل باعث رخ دادن پدیده‌هایی همچون جریانات مدار کوتاه[1] می‌شود، که در نهایت منجر به کاهش بازده ته‌نشینی می‌گردد.

جدول ۱۰-۲- مقادیر معمول متغیرهای طراحی حوض ته‌نشینی در تصفیه‌خانه آب شهری [۱۳] و [۱۶]

نوع		زمان ماند (ساعت)	نرخ بار سطحی (مترمکعب بر مترمربع بر روز)	نرخ بار سرریز (مترمکعب بر متر مربع بر روز)
حوض مستطیلی	انعقاد	۴-۸	۲۰-۴۰	۲۵۰
	نرم سازی	۲-۶	۴۰-۶۰	۲۵۰
واحد تماس ذرات[2]	انعقاد	۲	۴۰-۶۰	۱۷۰
	نرم سازی	۱	۶۰-۱۰۰	۳۵۰
حوض با جریان[3] رو به بالا	انعقاد	۲	۴۰-۶۰	۱۷۰
	نرم سازی	۱	۶۰-۱۰۰	۳۵۰

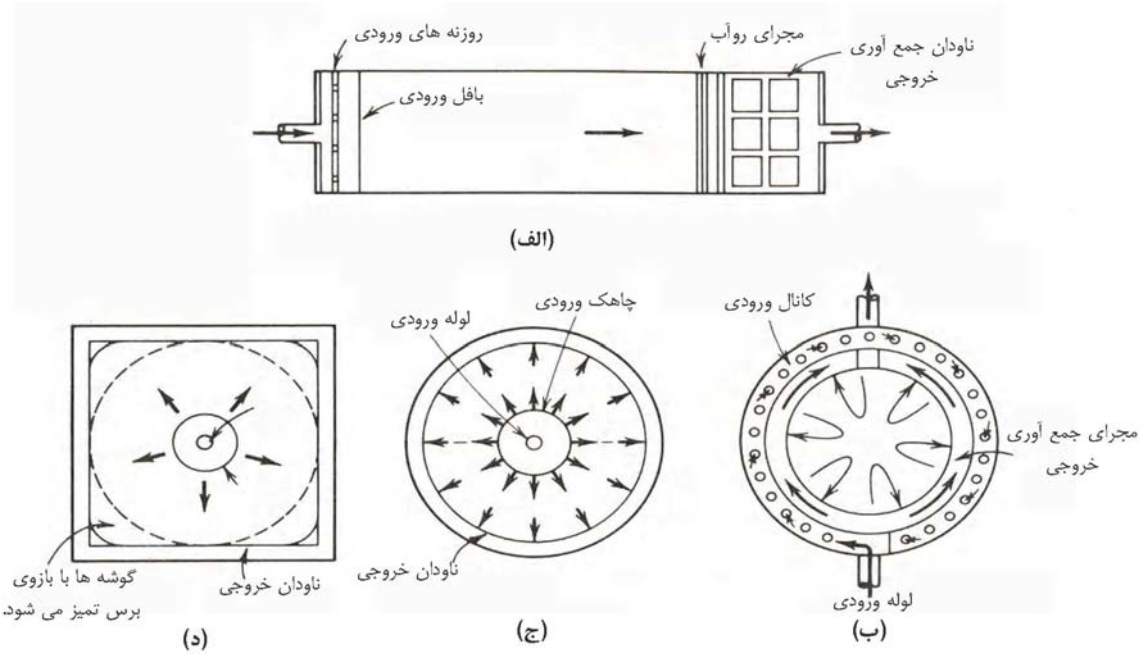
1 - Short-Circuiting
2 - Solids Contact Unit
3 - Up flow Basin

۱۰-۳-۱- هندسه حوض ته‌نشینی

در طراحی حوض‌های ته‌نشینی معمولا استفاده از هندسه مستطیل، مربع و دایره متداول‌تر می‌باشد (شکل (۱۰-۱)).

الف- حوض‌های مستطیلی

در حوض‌های مستطیلی معمولا از نسبت طول به عرض ۲ به ۱ تا ۳ به ۱ استفاده می‌شود. براساس تحقیقات مونک[1] استفاده از حوض مستطیلی با نسبت طول به عرض ۶ به ۱ تا ۷ به ۱ به دلیل ایجاد جریان ایده‌آل در ورودی و خروجی حوض برای کنترل جریانات مدار کوتاه، موثرتر می‌باشد. از دیگر ملاک‌های موردنظر در طراحی حوض مستطیلی این است که نسبت عرض به عمق حوض باید در محدوده ۳ به ۱ و حداکثر ۶ به ۱ باشد و ارتفاع آزاد برای کاهش اثرات باد در حدود ۰/۶ متر در نظر گرفته شود. معمولا حوض‌های مستطیلی با جریان افقی به علت این که دارای توانایی و پایداری بیش‌تری نسبت به شوک‌های ناشی از بارگذاری‌های مختلف هستند، نسبت به سایر هندسه‌ها بیش‌تر موردنظر طراحان است. از دیگر فواید حوض‌های مستطیلی استفاده از دیوار مشترک بین حوض‌ها است، که باعث اقتصادی شدن طرح می‌گردد.



شکل ۱۰-۱- انواع مختلف هندسه حوض ته‌نشینی، (الف) مستطیلی، (ب) دایره‌ای با ورودی محیطی، (ج) دایره‌ای با ورودی از مرکز، (د) مربعی

ب- حوض‌های مربعی

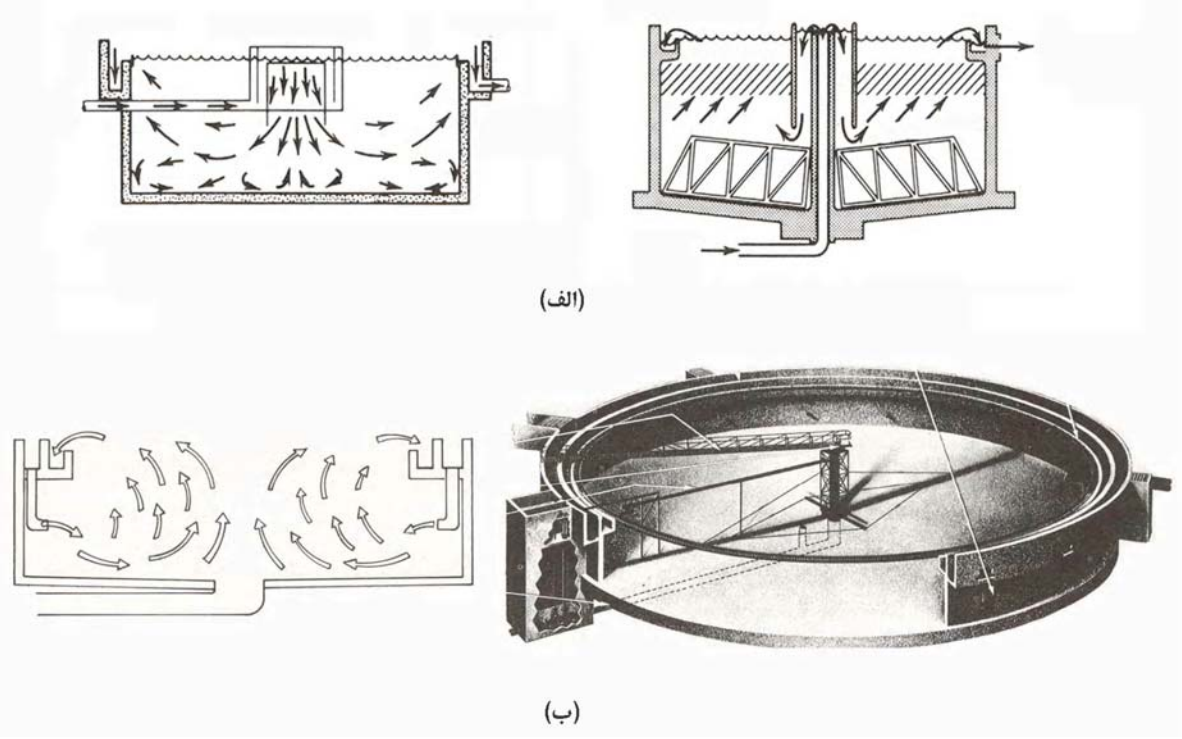
حوض‌های با هندسه مربع معمولا به صورت ورودی از مرکز طراحی می‌شوند. حوض‌های مربعی دارای برخی مزایای حوض‌های مستطیلی نظیر استفاده از دیوار مشترک برای دو حوض و همچنین دارای برخی مزایای حوض دایره‌ای نظیر سهولت جمع‌آوری لجن

1 - Monc

می‌باشند. از مشکلات حوض‌های مربعی می‌توان به عدم توزیع یکنواخت جریان در سطح حوض به دلیل هندسه سازه خروجی که در محیط حوض تعبیه می‌شود و همچنین ته‌نشین شدن لجن در گوشه‌ها اشاره کرد.

ج- حوض‌های دایره ای

در حوض‌های ته‌نشینی دایره‌ای نحوه ورود آب به دو صورت ورود از مرکز و ورود از محیط می‌باشد. در شکل (۱۰-۲) الگوی جریان در این دو حالت نشان داده شده است. براساس تحقیقات به‌عمل آمده این مطلب اثبات شده است که در حوض‌های با ورودی محیطی، وقوع مساله جریانات مدار کوتاه کم‌تر از حالت ورود از مرکز می‌باشد. از مزایای حوض‌های دایره‌ای می‌توان به سهولت در جمع‌آوری لجن اشاره کرد. به همین علت از آن بیش‌تر در مواردی که حجم لجن تولیدی نسبت به جریان ورودی بالاست، نظیر حوض‌های تغلیظ لجن، استفاده می‌شود.



شکل ۱۰-۲- الگوهای مختلف جریان در حوض ته‌نشینی دایره‌ای، (الف) ورود جریان از مرکز، (ب) ورود جریان از کناره‌ها

۱۰-۳-۲- ناحیه‌بندی حوض ته‌نشینی

همان‌طور که در شکل (۱۰-۳) نشان داده شده، هر حوض ته‌نشینی از چهار ناحیه تشکیل شده است:

الف- ناحیه ورودی

در این ناحیه جریان به صورت یکنواخت در سطح مقطع عرضی حوض توزیع می‌شود و جریان آب، ناحیه ورودی را به صورت افقی ترک می‌کند و در جهت خروجی حوض حرکت می‌کند.

ب - ناحیه ته‌نشینی

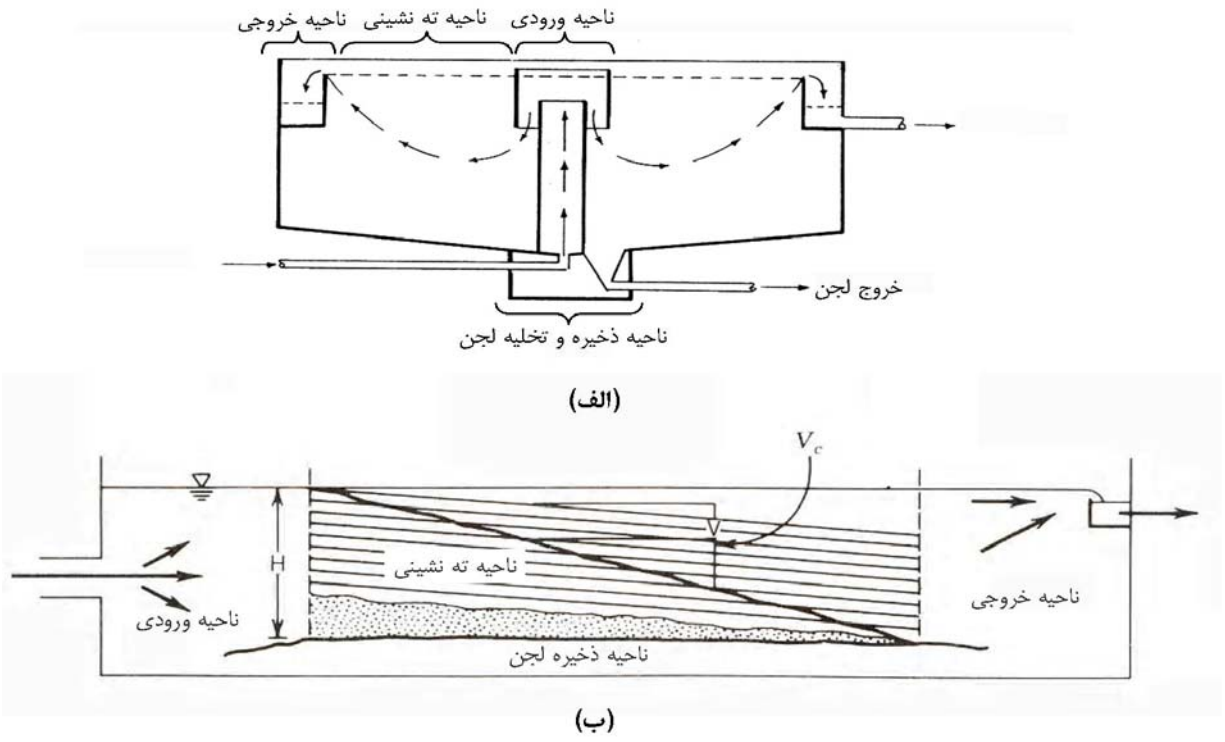
در این ناحیه آب به آرامی به صورت افقی به سمت خروجی حرکت و ته‌نشینی ذرات معلق در این ناحیه رخ می‌دهد.

ج - ناحیه لجن

در این ناحیه لجن ته‌نشین شده، انباشته شده و لجن وارد شده به این ناحیه از خروجی لجن خارج می‌شود.

د- ناحیه خروجی

در این ناحیه آب زلال شده به طور یکنواخت از حوض جمع‌آوری و خارج می‌گردد.



شکل ۱۰-۳- ناحیه‌بندی حوض ته‌نشینی، (الف) هندسه دایره‌ای، (ب) هندسه مستطیلی

۱۰-۳-۳- بار سطحی

یکی از متغیرهای مهم در طراحی حوض‌های ته‌نشینی بار سطحی می‌باشد که با نام‌های دیگری نظیر بارگذاری هیدرولیکی نیز نامیده می‌شود. برای محاسبه بار سطحی، V_t، از رابطه (۱۰-۷) استفاده می‌شود:

$$V_t = \frac{Q}{A} \qquad (۷-۱۰)$$

که A در این رابطه مساحت سطح حوض را نشان می‌دهد. در طراحی حوض‌های ته‌نشینی بار سطحی یکی از متغیرهای مهم و موثر بر میزان بازده حذف ذرات می‌باشد. در هنگام طراحی حوض‌های ته‌نشینی پس از تعیین بار سطحی وسطح حوض، برای

محاسبه عمق از متغیر مهم دیگری به نام زمان ماند استفاده می‌گردد. در طراحی حوض‌های ته‌نشینی ایده‌آل طراحی به‌گونه‌ای است که بر اساس یک زمان ماند مشخص و حداکثر بازده ته‌نشینی، کم‌ترین عمق محاسبه گردد.

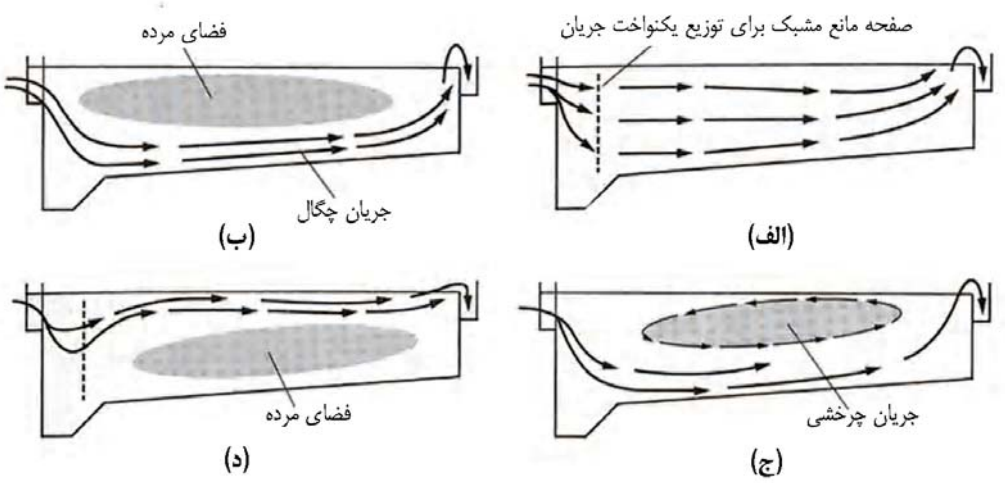
مفهوم مطالب عنوان شده براین اساس می‌باشد که هر چه عمق حوض کم‌تر باشد ذرات معلق با فاصله کم‌تری برای رسیدن به ناحیه لجن می‌رسند. در طراحی حوض‌های ته‌نشینی در صورتی که داده‌های لازم و امکان آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین بار سطحی موجود نباشد، معمولا بار سطحی را در محدوده ۲۰ تا ۴۰ (مترمکعب بر مترمربع در روز) و عمق آب را در حدود ۳ تا ۵ متر در نظر می‌گیرند.

۱۰-۳-٤- شوک هیدرولیکی

از مسایل مهم در طراحی حوض‌های ته‌نشینی مساله شوک بارگذاری هیدرولیکی در اثر تغییرات بده می‌باشد. در شرایطی که امکان وجود شوک‌های هیدرولیکی زیاد باشد، استفاده از سامانه‌های ته‌نشینی با جریان به سمت بالا و سامانه پتوی لجن توصیه نمی شود و گزینه برتر در این حالت حوض مستطیلی با جریان افقی می‌باشد.

۱۰-۳-۵- جریانات مدار کوتاه

جریانات مدار کوتاه که به دلایل مختلفی نظیر وجود گرادیان حرارتی، گرادیان چگالی و عدم توزیع یکنواخت جریان در ورودی ایجاد می شود و باعث کاهش بازده حوض‌های ته‌نشینی می‌گردد (شکل (۱۰-۴)). از این‌رو به منظور کاهش جریانات مدار کوتاه از دیواره‌های پخش‌کننده میانی قائم بر جهت جریان در قسمت میانی و یا در یک سوم ابتدای حوض استفاده می‌شود. روند تاثیر اختلاف درجه حرارت در حوض بدین صورت است که اگر دمای آب ورودی سردتر از آب درون حوض باشد، آب با دمای کم‌تر در ته حوض تا انتهای حوض حرکت می‌کند. اگر دمای آب ورودی بیش‌تر از دمای آب حوض باشد جریان مدار کوتاه در سطح حوض رخ می‌دهد، این حالت معمولا هنگامی رخ می‌دهد که منابع آب برای تامین آب تصفیه‌خانه از چندین منبع تشکیل شده باشد.



شکل ۱۰-٤- الگوهای جریان در حوض ته‌نشینی مستطیلی، (الف) حالت ایده‌آل، (ب) تاثیر جریان چگال یا طبقه‌بندی حرارتی، (ج) تشکیل جریان چرخشی تحت تاثیر باد، (د) طبقه‌بندی حرارتی [۱۰]

۱۰-۳-٦- نرخ بار سطحی و زمان ماند

نرخ بار سطحی نیز یکی از موارد مهم در طراحی هیدرولیکی حوض ته‌نشینی به شمار می‌رود. مقادیر دقیق این متغیر را باید با استفاده از آزمایش راهنما محاسبه کرد. در صورت عدم موجود بودن امکانات مذکور می‌توان از مقادیر مندرج در جدول (۱۰-۲) استفاده کرد. برای محاسبه حجم و عمق حوض ته‌نشینی نیازمند زمان ماند هستیم که مقدار این متغیر نیز از آزمایش ته‌نشینی ساکن محاسبه می‌گردد.

۱۰-٤- سازه ورودی و خروجی

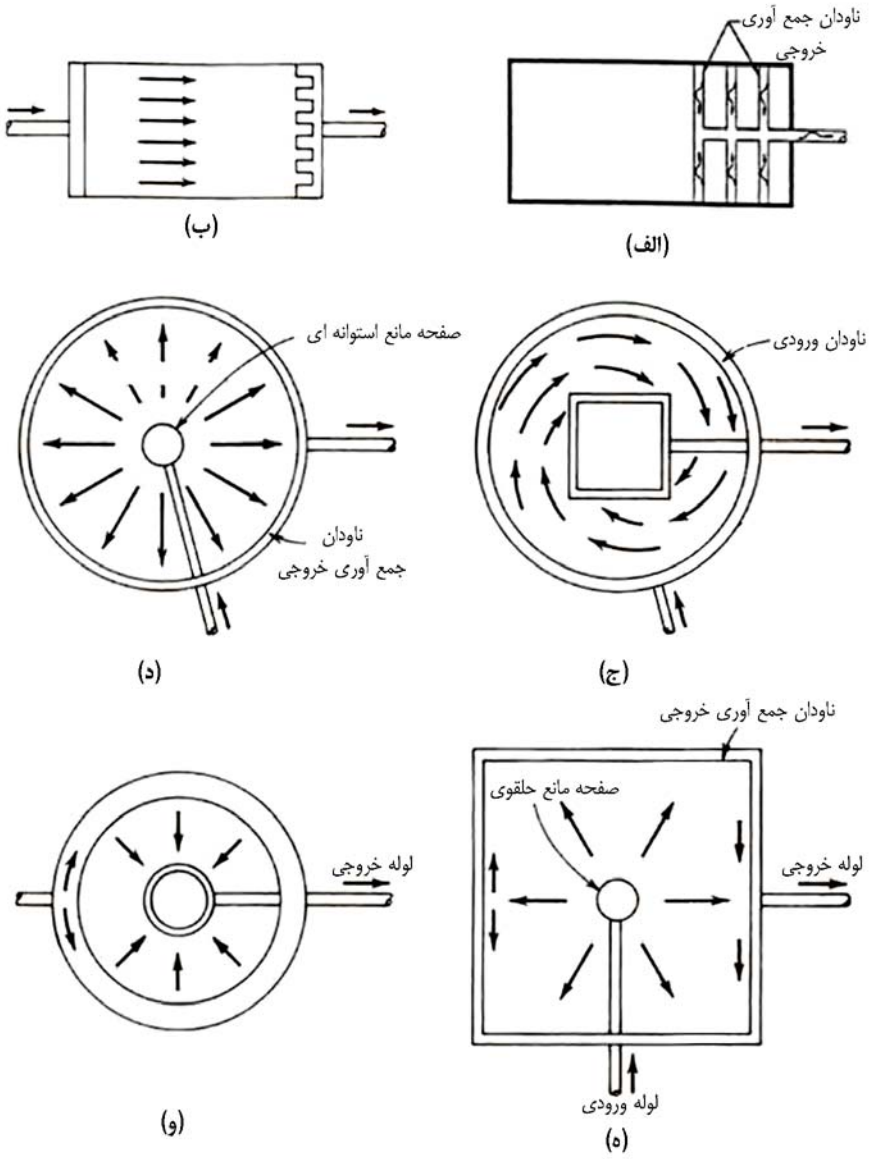
الف- سازه ورودی

سازه ورودی وظیفه توزیع یکنواخت جریان در حوض و کاهش سرعت جریان ورودی را دارد. طراحی سازه ورودی برای حوض مستطیلی و دایره‌ای متفاوت از یکدیگر است. در حوض‌های مستطیلی معمولا حوض ته‌نشینی به صورت یک مجموعه با حوض لخته‌سازی که به‌وسیله یک دیوار حائل پخش‌کننده از یکدیگر جدا می‌شوند، طراحی می‌شوند. در حوض‌های دایره‌ای که ورودی از مرکز انجام می‌گیرد، سازه ورودی به صورت یک صفحه مانع استوآن‌های می‌باشد که لوله ورودی را احاطه کرده است.

ب- سازه خروجی

سازه‌های خروجی متداول معمولا از یک‌سری سرریز و مجاری جمع‌آوری تشکیل شده‌اند. استفاده از سرریزهای V- شکل یا روزنه‌های مستغرق در سازه خروجی متداول‌تر است. روزنه‌های مستغرق به علت کاهش شکست لخته‌های خروجی از واحد ته‌نشینی به سمت واحد صاف‌سازی و همچنین به علت وجود مشکلات ناشی از یخ‌زدگی سرریزهای V-شکل در مناطق سردسیر، متداول‌تر می‌باشد. برای محاسبه طول سرریز از متغیری به نام نرخ بار سرریز استفاده می‌شود. مقادیر متداول نرخ بار سرریز در جدول (۱۰-۲) ارایه شده است. نمونه‌هایی از مجرای انتقال‌دهنده در حوض‌های ته‌نشینی مستطیلی، مربعی و دایره‌ای در شکل (۱۰-۵) نشان داده شده است. روابط حاکم بر جریان در مجاری جمع‌آوری از قوانین جریان‌های متغیر مکانی با افزایش بده تبعیت می‌کند که در قسمت (۳-۵) به‌طور کامل آمده است. بر اساس تحقیقات و تجربیات موجود در طراحی سازه ورودی و خروجی حوض‌های ته‌نشینی، رعایت موارد زیر ضروری است:

- روزنه‌های تعبیه شده در دیوار صفحه مانع ورودی باید به‌طور یکنواختی در تمام سطح دیوار توزیع شده باشند.
- هرچه تعداد روزنه‌ها زیادتر باشد، طول جت پرتابی کم‌تر می‌شود و فضای مرده بین منافذ کاهش می‌یابد.
- افت ارتفاع ناشی از عبور جریان از درون روزنه‌های دیوار جداساز، باید در حدود ۰/۳ تا ۰/۴ میلی‌متر باشد. دلیل این موضوع جلوگیری از شکسته‌شدن لخته‌های تولید شده در مرحله لخته‌سازی می‌باشد.
- ابعاد منفذها به دلیل جلوگیری از گرفتگی باید در محدوده ۰/۰۷۵ تا ۰/۲ متر باشد.
- فاصله مرکز به مرکز روزنه‌ها باید در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر باشد.



شکل ۱۰-۵- انواع سازه ورودی و خروجی حوض ته‌نشینی، (الف) و (ب) حوض مستطیلی، (ج)، (د) و (و) حوض دایره‌ای، (هـ) حوض مربعی

۱۰-۵- رژیم جریان

وضعیت رژیم جریان در حوض ته‌نشینی را می‌توان به‌وسیله عدد رینولدز (N_{Re})، رابطه (۱۰-۸)، و عدد فرود (N_{Fr})، رابطه (۱۰-۹)، تعیین کرد.

$$N_{Re} = \frac{VR}{\nu} < 2000 \qquad (۱۰-۸)$$

$$N_{Fr}^2 = \frac{V^2}{gR} \qquad (۱۰-۹)$$

در این روابط V سرعت جریان (متر بر ثانیه)، R شعاع هیدرولیکی (متر) و ν ویسکوزیته سینماتیکی آب (مترمربع بر ثانیه)، را نشان می‌دهند. وضعیت رژیم جریان یک حوض ته‌نشینی معمولی را می‌توان با قرار دادن صفحات مانع طولی که موازی دیوار کناری

حوض می‌باشد، بهبود داد. با این عمل حوض ته‌نشینی به کانال‌های کم عرض تبدیل می‌شود که در نتیجه سطح جریان کاهش می‌یابد و به تبع آن عدد رینولدز حتی تا ۵۰ درصد نسبت به حوض‌های معمولی کاهش می‌یابد و عدد فرود تا حدود مقدار مورد نظر افزایش می‌یابد. در آرایش صفحات مانع طولی باید به این نکته توجه داشت که به منظور نصب تجهیزات جمع‌آوری لجن حداقل فاصله بین صفحات مانع باید برابر ۳ متر باشد.

فصل ۱۱

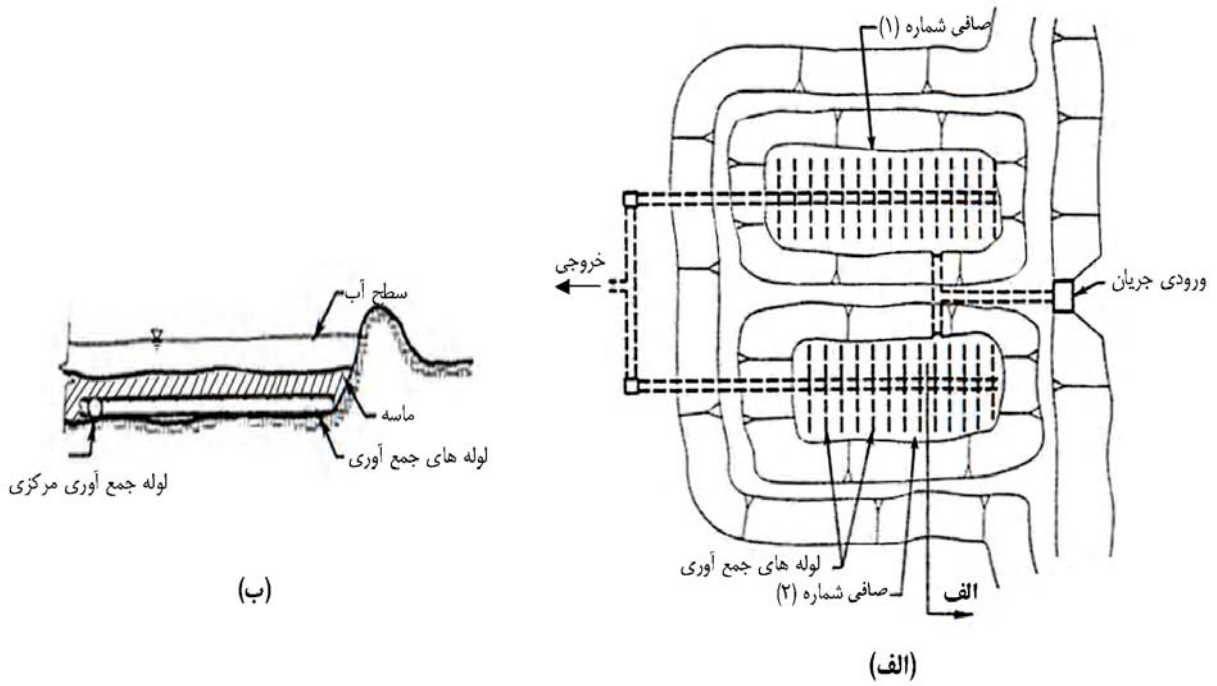
صاف‌سازی

۱۱-۱-کلیات

فرایندهای انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی موجب حذف بسیاری از مواد معلق ایجادکننده کدورت می‌شود ولی جهت رسیدن به استانداردهای سلامت عمومی برای آب آشامیدنی معمولا نیاز به حذف بیش‌تر ذرات معلق در فرایند صاف‌سازی می‌باشد. صاف‌سازی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تصفیه آب است و در آن آب با عبور از ساختارهای سنگی و ماسه‌ای متخلخل، به آرامی تمیز و خالص می‌گردد. در این فصل ضمن معرفی انواع صافی‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب، هیدرولیک این سامانه‌ها به همراه روابط محاسبه افت ارتفاع ارایه می‌شود.

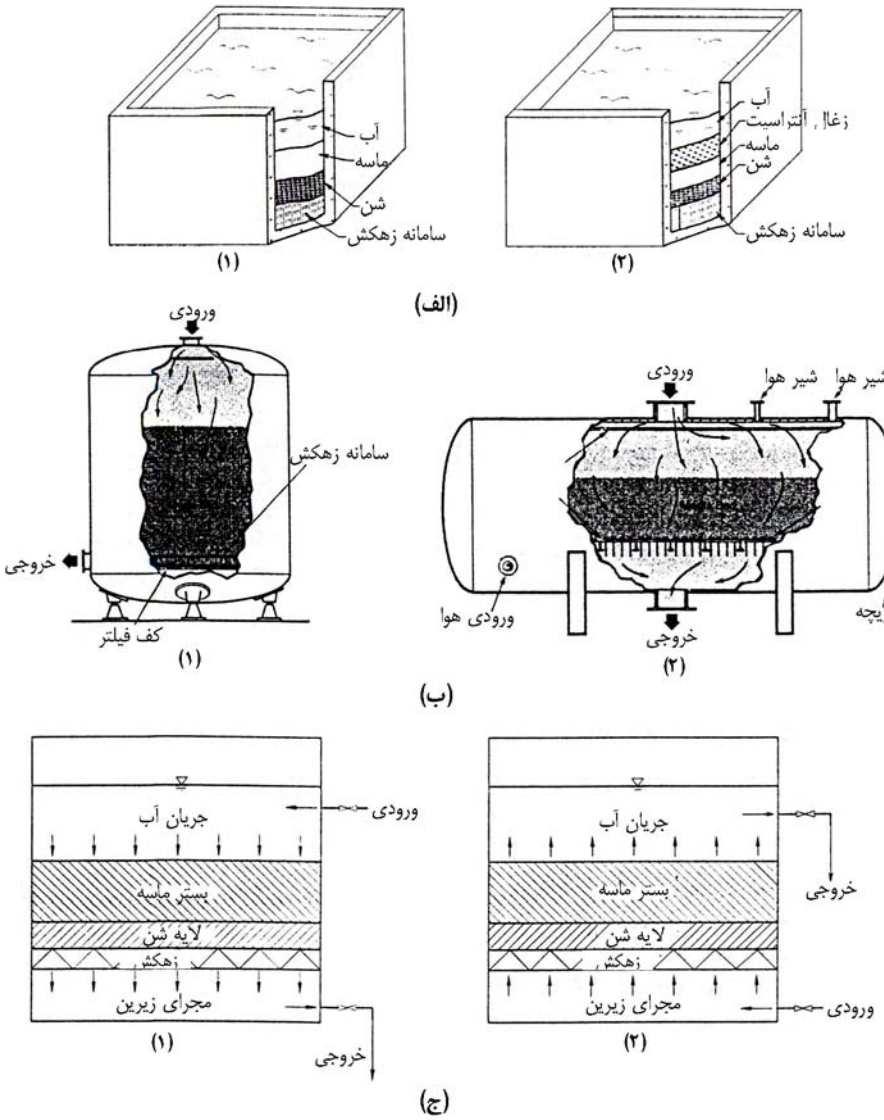
۱۱-۲- انواع صافی

صافی‌ها را معمولا بر اساس نرخ صاف‌سازی، نیروی محرک و جهت جریان به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌کنند. بر مبنای نرخ صاف‌سازی، صافی‌ها را می‌توان به انواع صافی‌های ماسه‌ای کند و صافی‌های تند و صافی‌های با بار زیاد تقسیم‌بندی نمود. صافی‌های ماسه‌ای کند دارای بار هیدرولیکی کم‌تر از ۱۰ مترمکعب بر مترمربع بر روز هستند. یک سامانه زهکشی تحتانی نیز در زیر بستر ماسه‌ای جهت جمع‌آوری آب صاف شده تعبیه می‌گردد. جزییات یک صافی ماسه‌ای کند در شکل (۱۱-۱) نشان داده شده است. صافی‌های ماسه‌ای تند دارای بار هیدرولیکی تقریبا ۱۲۰ مترمکعب بر مترمربع بر روز و صافی‌های با بار زیاد دارای بار هیدرولیکی بزرگ‌تر از ۲۴۰ مترمکعب بر مترمربع بر روز می‌باشند. هر دو نوع صافی تند و با بار زیاد به طور وسیعی به کار برده می‌شوند. ساخت این سامانه‌ها کاملا با هم شباهت دارند. همان‌طور که در شکل (۱۱-۲- الف) نشان داده شده است. در صافی‌های تند و با بار زیاد از مخازن بتنی یا فولادی پر شده با بستر صافی مناسب، استفاده می‌شود. بستر صافی توسط یک بستر شنی و یک سامانه زهکشی تحتانی پشتیبانی می‌گردد که وظیفه آن‌ها جمع‌آوری آب صاف شده و وارد کردن آب شستشو جهت تمیز کردن صافی می‌باشد. انواع



شکل ۱۱-۱- صافی ماسه‌ای کند، (الف) تصویر افقی، (ب) برش الف

مختلفی از زهکش‌های خاص صافی در شکل (۱۱-۳) نشان داده شده است. بر اساس نیروی محرک، صافی‌های مورد استفاده در تصفیه آب به صافی‌های ثقلی و تحت فشار طبقه بندی می‌شوند. تفاوت اساسی میان صافی‌های ثقلی و تحت فشار، ارتفاع مورد نیاز جهت هدایت آب درون بستر صافی و نوع مخازن در بر گیرنده صافی می‌باشد. انتخاب صحیح بستر صافی در طراحی از جهات: ۱ توانایی در گرفتن ذرات جامد، ۲ نرخ بار هیدرولیکی آن‌ها و ۳ کیفیت نهایی آب مهم می‌باشد. صافی‌ها بسته به تعداد بسترهای مورد استفاده آن‌ها به سه دسته بسترهای تک لایه (تک محیطی)، بسترهای دو لایه (دو محیطی) و بسترهای مختلط (چند محیطی) طبقه‌بندی می‌شوند.



شکل ۱۱-۲- انواع صافی(الف) برش صافی‌های تند و با بار زیاد: (۱) نمونه ای از صافی ماسه‌ای تند و (۲) صافی با بار زیاد و بستر دو لایه‌ای، (ب) صافی‌های تحت فشار: (۱) صافی عمودی و (۲) صافی افقی، (ج) جهت جریان: (۱) جریان رو به پایین (۲) جریان رو به بالا

الف- صافی‌های تک لایه (تک محیطی)

بستر این نوع صافی‌ها دارای یک محیط بوده که غالبا ماسه خوب دانه‌بندی شده است. در این صافی‌ها تحت تاثیر ورود جریان از زیر در زمان شستشو، لایه ماسه‌ای منبسط می‌شود. پس از پایان عمل شستشو ابتدا ذرات بزرگ‌تر ته‌نشین شده و پس از آن به ترتیب

ذرات دارای اندازه کوچک‌تر ته‌نشین می‌شوند که به پدیده لایه‌بندی موسوم است. لایه‌بندی عیب عمده این صافی‌ها به شمار می‌رود زیرا علاوه بر انسداد سریع‌تر صافی، باعث می‌شود اکثر ذرات معلق آب در ۴ تا ۵ سانتی‌متر بالای صافی به دام افتند و ذرات عبور کرده از این ۴ تا ۵ سانتی‌متر به ندرت در قسمت‌های پایین بستر حذف می‌شوند.

ب- بسترهای دو لایه (دو محیطی)

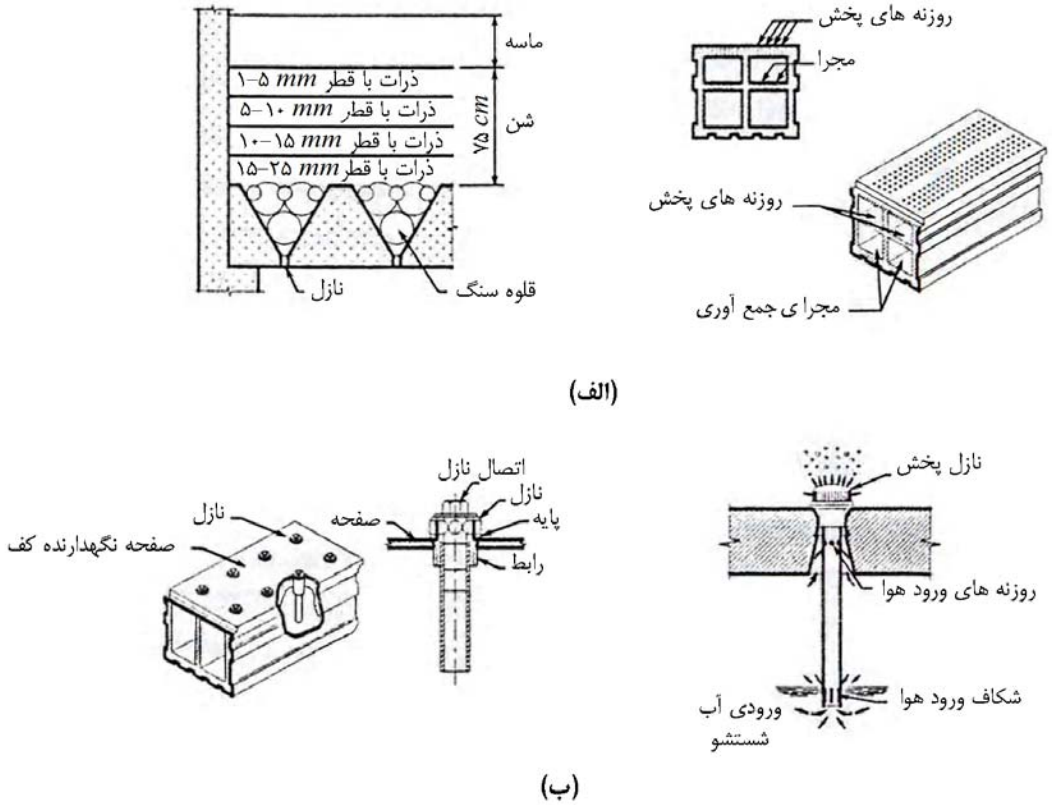
برای فایق آمدن بر مساله لایه بندی از صافی‌های دو لایه (دو محیطی) استفاده می‌شود که دو محیط آن اغلب زغال آنتراسیت و ماسه کوارتز می‌باشد. آنتراسیت دارای چگالی ۱/۵۵ می‌باشد که سبک تر از ماسه با چگالی ۲/۵۶ است. بنابراین در عمل شستشو لایه ماسه زودتر از آنتراسیت ته نشین می‌شود. در جدول (۱۱-۱) مقادیر معمول برای ضخامت این صافی‌ها آمده است.

ج- صافی‌های با بستر مختلط (چند محیطی)

صافی‌های مختلط شبیه صافی‌های دو لایه هستند با این تفاوت که در طراحی آن‌ها از چند لایه مصالح استفاده شده است و معمولا دارای سه نوع لایه‌اند که مصالح آن‌ها از جنس آنتراسیت، ماسه و گارنت با چگالی ۴/۰۵ می‌باشد که پس از شستشو به ترتیب چگالی و دانه‌بندی ته‌نشین می‌شوند. مقادیر معمول برای طراحی آن‌ها نیز در جدول (۱۱-۱) آمده است. زمان بهره‌برداری از این صافی‌ها و کیفیت آب خروجی از آن‌ها به مراتب بالاتر از صافی‌های دو لایه می‌باشد. معمولا جهت تعیین نوع، عمق و اندازه ذرات بستر صافی از آزمایش‌ها، راهنما یا تجربیات قبلی استفاده می‌گردد.

جدول ۱۱-۱- مقادیر معمول طراحی برای انواع صافی‌های ثقلی [۱۳]

جنس	متغیر	بستر تک لایه	بستر دو لایه	بستر مختلط
آنتراسیت	اندازه غالب ذرات (میلی‌متر)	۰/۵۰-۱/۵	۰/۷۰-۲/۰	۱/۰-۲/۰
	ضخامت لایه (سانتی‌متر)	۵۰-۱۵۰	۳۰-۶۰	۵۰-۱۳۰
ماسه	اندازه غالب ذرات (میلی‌متر)	۰/۴۵-۱/۰	۰/۴۵-۰/۶۰	۰-۴۰-۰/۸۰
	ضخامت لایه (سانتی‌متر)	۵۰-۱۵۰	۲۰-۴۰	۲۰-۴۰
گارنت	اندازه غالب ذرات (میلی‌متر)	-	-	۰/۲۰-۰/۸۰
	ضخامت لایه (سانتی‌متر)	-	-	۵-۱۵



شکل ۱۱-۳- انواع مختلف سامانه‌های زهکش صافی، (الف) زهکشی به کمک شن، (ب) زهکشی بدون استفاده از شن

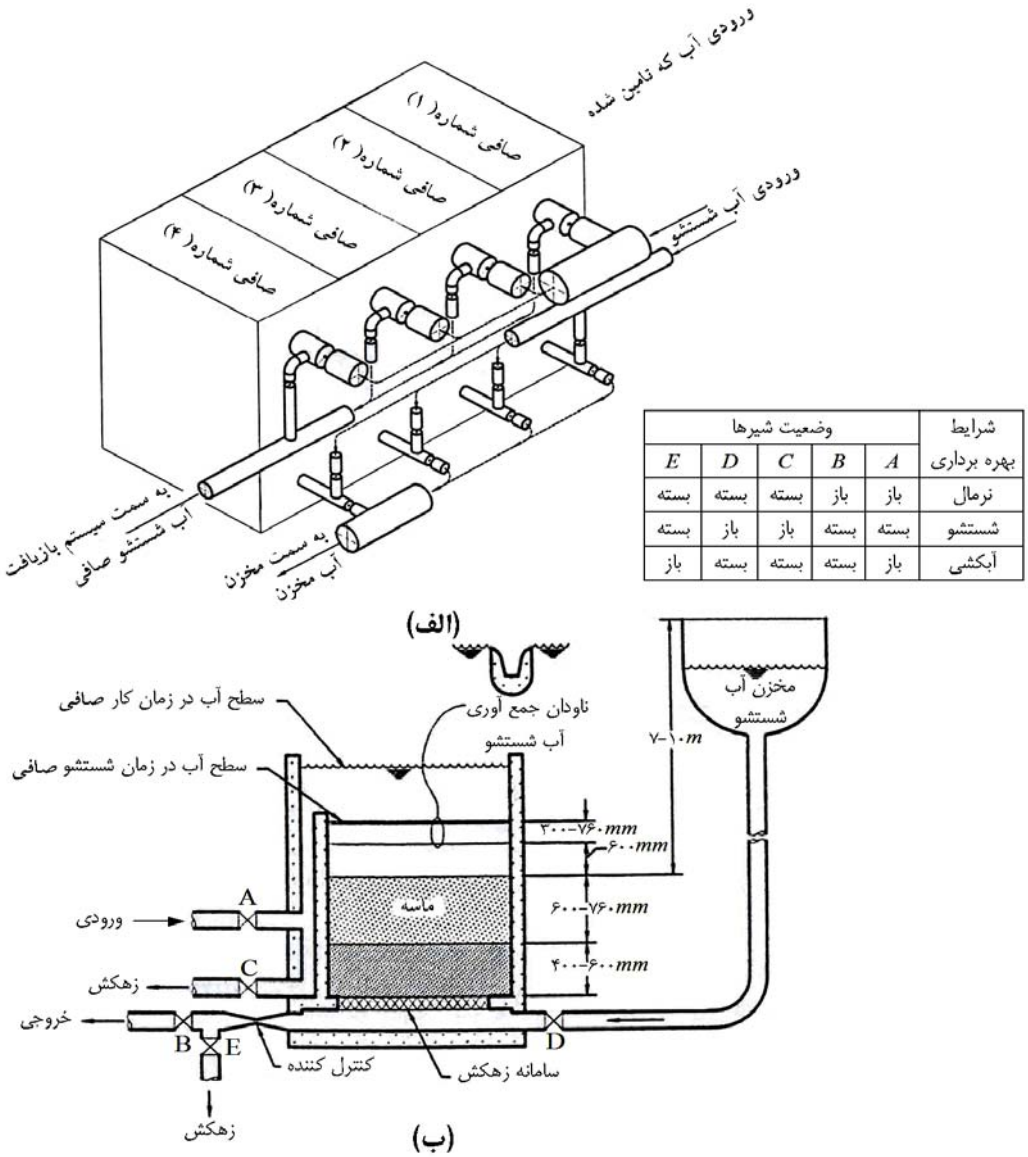
۱۱-۳- اجزای تشکیل‌دهنده صافی

در تصفیه‌خانه‌های آب معمولا از چند صافی به‌صورت موازی استفاده می‌شود. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده صافی شامل بدنه اصلی، سامانه‌های لوله‌کشی، شیرها، مجاری آب شستشو و تلمبه‌ها همراه با دیگر تجهیزات لازم برای کنترل جریان آب به درون سامانه و یا خارج از آن می‌باشد. در شکل (۱۱-۴) یک نمونه صافی که از ۴ سلول تشکیل شده، نشان داده شده است. آب از قسمت بالا وارد صافی شده و در بستر صافی، لایه نگهدارنده شن و زهکش زیرین جریان می‌یابد. زهکش زیرین جریان را به یک مجرای مرکزی هدایت کرده و در نهایت آب پس از خارج شدن از این مجرا وارد لوله خروجی می‌شود. پس از مدتی استفاده از صافی، منافذ آن با تجمع و انباشته شدن ذرات جامد جدا شده از آب گرفته شده و باید شستشو شود. در این مرحله شیرهای ورودی و خروجی صافی بسته شده و شیرهای آب شستشو باز می‌شوند. جریان آب پس از عبور از لایه نگهدارنده شنی وارد بستر صافی شده و آن را شناور می‌سازد. با شناور شدن مصالح صافی ذرات جامد انباشته شده بین ذرات بالا آمده و به داخل ناودان‌های جمع‌آوری پساب صافی وارد می‌شوند.

آب از خروجی واحد ته‌نشینی از طریق سامانه لوله‌کشی ورودی به صافی هدایت می‌شود. هر صافی دارای یک شیر جهت قطع کردن آب ورودی می‌باشد. معمولا لوله ورودی در قسمت بالای صافی و زیر سطح آب قرار دارد. سامانه لوله‌کشی خروجی، آب عبوری از صافی را به واحد بعدی هدایت می‌کند. هر صافی دارای یک شیر جهت قطع کردن آب خروجی می‌باشد.

سامانه لوله کشی شستشو معمولا آب را از زیر صافی به داخل بستر هدایت می‌کند. آب پس از عبور از لایه نگهدارنده شنی باعث شناور شدن بستر و خروج ذرات گیر کرده بین آن‌ها می‌شود. پساب شستشو در قسمت بالای صافی جمع‌آوری شده و وارد لوله خروجی می‌شود.

در طراحی سامانه صاف‌سازی بده آب معمولا ثابت است. هر چند ممکن است این بده در صافی‌های مختلف یکسان نباشد، اما در مجموع بده ورودی به سامانه صاف‌سازی معمولا ثابت است. برخی صافی‌ها به گونه‌ای طراحی شده اند که با انباشته شدن ذرات ریز داخل آب در میان فضاهای خالی بستر صافی نرخ جریان کاهش می‌یابد. از این صافی‌ها تحت عنوان صافی‌های با نرخ کاهنده یاد می‌شود. در برخی صافی‌ها علی رغم انباشته شدن ذرات جامد در فضاهای خالی میان بستر، فشار طوری تنظیم می‌شود که بده جریان ثابت باقی بماند که به صافی‌های با نرخ ثابت موسومند.



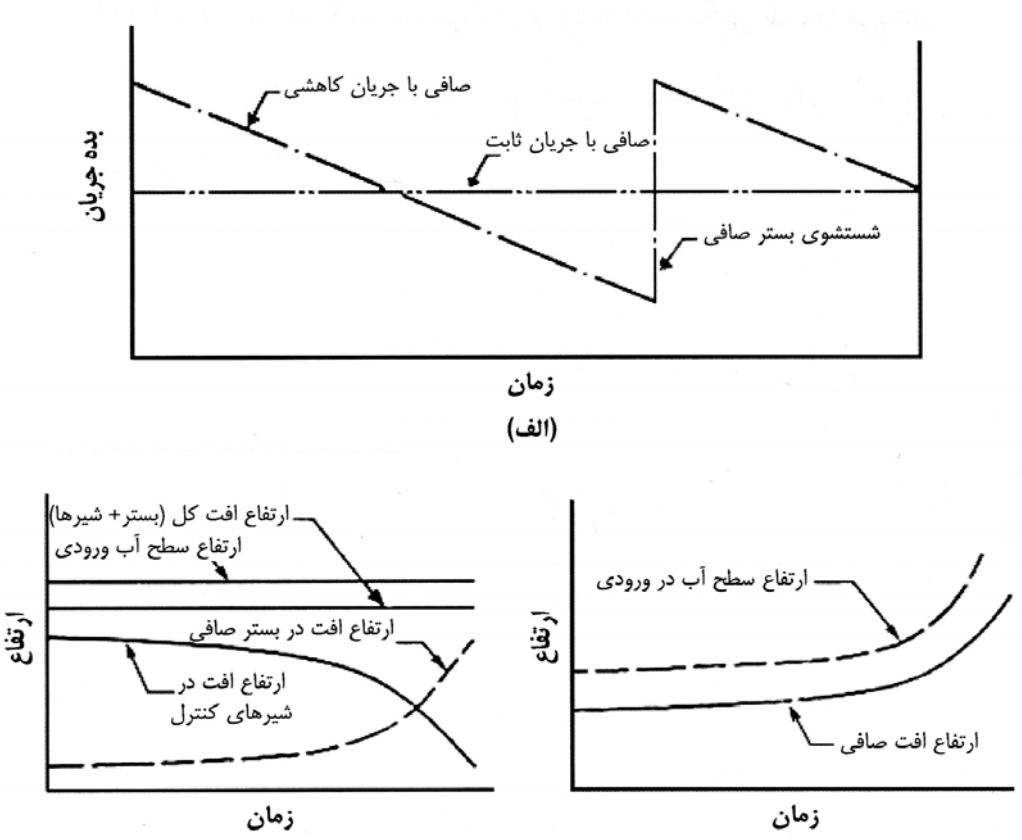
شرایط بهره برداری	وضعیت شیرها				
	A	B	C	D	E
نرمال	باز	باز	بسته	بسته	بسته
شستشو	بسته	بسته	باز	باز	بسته
آبکشی	باز	بسته	بسته	بسته	باز

شکل۱۱-٤- اجزای مختلف صافی به همراه سامانه لوله‌کشی، (الف) چهار صافی به‌صورت موازی، (ب) سامانه لوله‌کشی صافی

۱۱-٤- روش‌های کنترل جریان در صافی

صافی‌ها را بر حسب اینکه بده جریان در آن‌ها در طول زمان بهره‌برداری کاهش یافته و یا ثابت باقی بماند به ترتیب به انواع صافی‌های جریان کاهشی[1] و صافی‌های جریان ثابت[2] تقسیم‌بندی می‌نمایند. در صافی‌های جریان کاهشی در طول زمان بهره‌برداری با انباشته‌شدن لخته‌های همراه آب در بین دانه‌های بستر، افت ارتفاع افزایش و در نتیجه بده عبوری کاهش می‌یابد ولی در صافی‌های با جریان ثابت، با کنترل افت ارتفاع در خروجی صافی، میزان بده عبوری از صافی در طول زمان بهره‌برداری تقریبا ثابت باقی می‌ماند (شکل۱۱-۵-الف). لازم به ذکر است کنترل افت می‌تواند توسط شیر، سرریز، سیفون و یا انواع کنترل‌کننده‌های دیگر به صورت خودکار یا دستی انجام گیرد.

در برخی از صافی‌ها طراحی به نحوی انجام می‌شود که تراز سطح آب در کانال یا جعبه ورودی با گرفته شدن منافذ بستر صافی و افزایش افت ارتفاع، افزایش می‌یابد. در این نوع صافی کنترل جریان در ورودی انجام می‌شود. در نوع دیگر از صافی با تعبیه تجهیزات کنترل جریان (نظیر شیرهای کنترل) در مجرای خروجی مقدار افت ارتفاع در صافی تنظیم می‌گردد. در شکل (۱۱-۵) تغییرات بده عبوری از صافی و افت ارتفاع در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. بنابر مطالب ارایه شده در این قسمت، می‌توان صافی‌ها را بر اساس نحوه کنترل جریان در آن‌ها به انواع ذیل تقسیم‌بندی نمود:



شکل۱۱-۵- حالت‌های مختلف جریان در صافی، (الف) مقایسه صافی با جریان ثابت و صافی با جریان کاهشی، (ب) صافی با کنترل در ورودی، (ج) صافی با کنترل در خروجی

1 - Declining Rate Filter
2 - Constant Rate Filter

الف- صافی‌های جریان ثابت با کنترل در خروجی

در این سامانه‌ها که به دلیل پیچیده بودن فقط در تصفیه‌خانه‌های بزرگ مورد توجه هستند، جریان ورودی به‌طور مساوی بین واحدهای صافی تقسیم می شود و افت ارتفاع در صافی توسط تجهیزات کنترلی در مجرای خروجی تنظیم می شود. ارتفاع آب در ورودی این نوع صافی یکسان و ثابت است. سامانه کنترل در این نوع صافی با اندازه‌گیری تغییرات گرادیان هیدرولیکی در ورودی و باز و بسته کردن شیرهای خروجی، بده جریان را تنظیم می کند. اگر افت ارتفاع تحت تاثیر انباشته شدن لخته‌ها بین منافذ بستر صافی افزایش یابد، شیرهای خروجی به آرامی باز می شود و چنانچه تحت تاثیر شستشو افت ارتفاع در بستر صافی کاهش یابد، با بسته شدن شیرهای خروجی، این کاهش افت جبران می شود. به این ترتیب با وجود افت ارتفاع ثابت شکل (۱۱-۵- ج)، بده عبوری از صافی نیز ثابت باقی خواهد ماند. در شکل (۱۱-۶- الف) قسمت‌های مختلف این نوع صافی نشان داده شده است.

ب- صافی‌های جریان ثابت با کنترل در ورودی

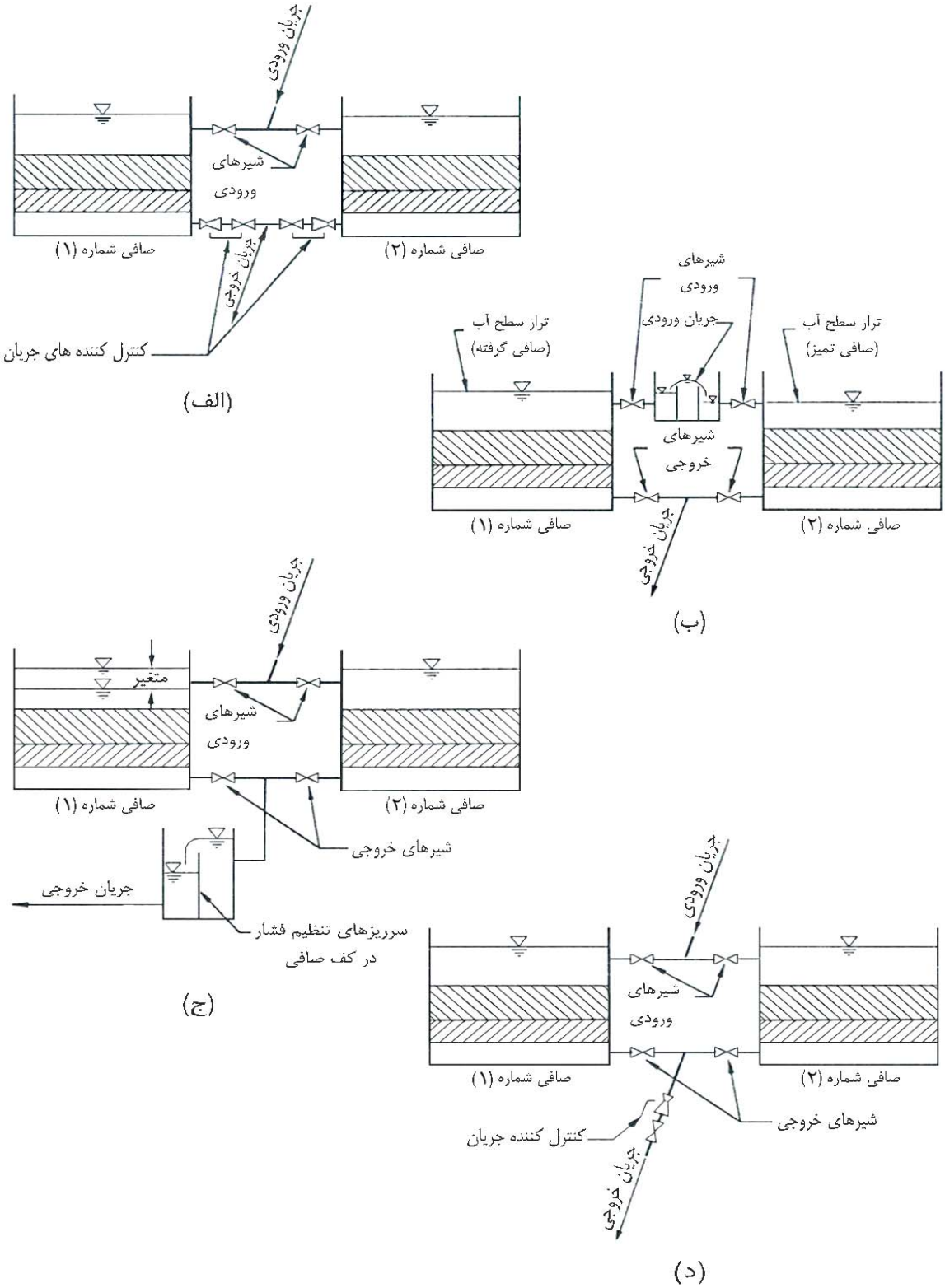
در این نوع صافی جریان ورودی به‌صورت یکسان بین واحدهای مختلف صافی تقسیم می گردد. بسته به افت ارتفاع، سطح آب در این واحدها متغیر خواهد بود. زمانی که بر اثر انباشته شدن لخته ها در بین منافذ صافی افت ارتفاع افزایش یابد، با بالا آمدن سطح آب این افزایش افت جبران می گردد (شکل ۱۱-۵- ب). سامانه کنترل در این نوع صافی چندان پیچیده نیست و به دلیل سادگی عمل در تصفیه‌خانه‌های کوچک نیز قابل استفاده است. یکی از معایب این نوع سامانه امکان عبور ذرات همراه آب و کاهش کیفیت آب خروجی از صافی است. در شکل (۱۱-۶- ب) قسمت‌های مختلف این نوع صافی نشان داده شده است.

ج- صافی‌های جریان کاهشی با کنترل در ورودی

این نوع سامانه ساده‌ترین نوع صافی است و بر خلاف حالات قبل در آن هیچ کنترل‌کننده یا تقسیم‌کننده جریانی وجود ندارد. در این نوع صافی،که در شکل (۱۱-۶- ج) قسمت‌های مختلف آن نشان داده شده، با در نظرگیری یک سرریز در سازه خروجی، فشار در کف بستر صافی در طول زمان بهره برداری مثبت نگه داشته می شود و تحت تاثیر بسته شدن منافذ صافی بر اثر ته‌نشین شدن لخته های همراه آب، بده جریان عبوری از صافی کاهش می‌یابد. سادگی ساختمان و سهولت بهره‌برداری استفاده از این صافی‌ها را در تصفیه‌خانه‌های کوچک مناسب ساخته است.

د- صافی‌های جریان کاهشی با کنترل در خروجی

این صافی‌ها مشابه صافی‌های جریان ثابت با کنترل در خروجی هستند و در آن با کنترل افت ارتفاع توسط شیرهای خروجی، گرادیان هیدرولیکی ثابتی به تمام واحدها اعمال می شود. در این حالت نیاز به نصب تجهیزات کنترل‌کننده جریان برای تک تک صافی‌ها نیست و با نصب یک شیر کنترل‌کننده در لوله خروجی نهایی می‌توان کل صافی‌ها را کنترل نمود. بنابراین واحدهای تمیز دارای جریان بیش‌تر و واحدهای کثیف جریان کم‌تری را عبور می‌دهند. در شکل (۱۱-۶-د) قسمت‌های مختلف این نوع صافی نشان داده شده است. تجربه‌های موجود نشان داده کیفیت آب خروجی از این نوع صافی نسبت به سایر انواع مناسب‌تر است.



شکل۱۱-٦- انواع صافی، (الف) صافی جریان ثابت با کنترل در خروجی، (ب) صافی جریان ثابت با کنترل در ورودی، (ج) صافی جریان کاهشی با کنترل در ورودی، (د) صافی جریان کاهشی با کنترل در خروجی

۱۱-۵- هیدرولیک صافی

طراحی هیدرولیکی صافی پیچیده است و معادلات تجربی متعددی برای پیش‌بینی افت ارتفاع در بستر تمیز صافی پیشنهاد شده است. همچنین روش‌های متعددی برای تخمین افت ارتفاع صافی‌های گرفته موجود می‌باشد. در ادامه برخی از این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱۱-۵-۱- افت ارتفاع در بستر صافی

افت ارتفاع h_f در بستر صافی که در واقع یک محیط متخلخل است، را می‌توان با تابع زیر مورد بررسی قرار داد:

$$h_f = \psi(e, L_f, d_s, V, \mu, \rho, g) \qquad (۱-۱۱)$$

در این رابطه L_f عمق بستر، e تخلخل بستر، d_S قطر متوسط دانه‌های بستر، V سرعت جریان در بستر، μ لزجت، ρ جرم مخصوص آب و g شتاب ثقل می‌باشند. در طول سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی هیدرولیک صافی‌ها صورت گرفته و روابط تجربی و نیمه تجربی متعددی برای تعیین افت ارتفاع صافی‌های تمیز ارایه شده است. یکی از روابط معروف در زمینه محاسبه افت ارتفاع در بستر صافی‌ها رابطه کارمن-کوزونی[1] است:

$$h_f = f \times (\frac{L_f}{\varphi d_s}) \times (\frac{1-e}{e^3}) \times (\frac{V^2}{g}) \qquad (۲-۱۱)$$

در این رابطه V سرعت متوسط (برابر با حاصل تقسیم بده عبوری بر مساحت سطح صافی است) و ϕ ضریب شکل دانه‌ها (جدول (۱۱-۲)) را نشان می‌دهند. f ضریب اصطکاک (ضریب بدون بعد) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f = 150(\frac{1-e}{N_{Re}}) + 1.75 \qquad (۳-۱۱)$$

در رابطه بالا عدد رینولدز N_{Re} برابر است با:

$$N_{Re} = \frac{\rho d V}{\mu} \qquad (۴-۱۱)$$

جدول ۱۱-۲- تعیین شکل دانه‌های بستر صافی

نوع ذره	ضریب شکل دانه‌ها (ϕ)
دانه‌های کروی	۱
ماسه مدور	۰/۸۲
ماسه متوسط	۰/۷۵
زغال خورد شده و ماسه زاویه‌دار	۰/۷۳

رابطه دیگر محاسبه افت ارتفاع در یک بستر تمیز متخلخل با دانه‌بندی نسبتا یکنواخت، رابطه رز[2] (رابطه (۱۱-۵)) می‌باشد که بیش‌تر مبتنی بر تجربه تدوین شده است:

$$h_f = \frac{1.067}{\varphi} \times \frac{C_D}{g} \times L_f \times \frac{V^2}{e^4} \times \frac{1}{d_s} \qquad (۵-۱۱)$$

1 - Carman-Kozeni
2 - Rose

C_D در رابطه بالا ضریب درگ را نشان می‌دهد و از روابط (۱۱-۴) و (۱۱-۵) محاسبه می‌شود. برای بسترهای با اندازه دانه‌های متفاوت رابطه (۱۱-۵) عبارتست از:

$$h_l = \frac{1.067}{\varphi} C_D \frac{L_f}{g} \times \frac{V^2}{e^4} \sum \frac{x}{d_s} \qquad (۱۱-۶)$$

در رابطه بالا x درصد وزنی برای اندازه‌های ذرات d_s می‌باشد. برای بسترهای لایه لایه که تخلخل یکنواختی دارند، رابطه (۱۱-۵) عبارتست از:

$$h_l = \frac{1.067}{\varphi} \times \frac{L_f}{g} \times \frac{V^2}{e^4} \sum \frac{C_D x}{d_s} \qquad (۱۱-۷)$$

در دو رابطه (۱۱-۶) و (۱۱-۷) قسمت مجموع از محاسباتی که بر روی نتایج آنالیز الک انجام می‌گیرد، به دست می‌آید و خارج از موضوع این راهنما است. علاوه بر روابط بالا، روابط فایر- هچ[1] (رابطه (۱۱-۸)) و هیزن[2] (رابطه (۱۱-۸)) نیز برای تعیین افت ارتفاع در بستر صافی ارایه شده است.

$$h_L = k^2 \nu S^2 \frac{(1-e)^2}{e^3} \times \frac{L_f}{d_s^2} \times \frac{V}{g} \qquad (۱۱-۸)$$

$$h_L = \frac{1}{C} \times \frac{5.2 \times 10^6}{T+10} \times \frac{L_f}{d_{10}^2} V \qquad (۱۱-۹)$$

در این روابط C ضریب تراکم، d_{10} اندازه موثر ذرات بستر (میلی‌متر)، k ثابت صافی، S ضریب (تابع شکل دانه‌ها معمولا بین ۶/۰ تا ۸/۵)، T دما (درجه فارنهایت) و v ویسکوزیته سینماتیکی (مترمربع بر ثانیه) را نشان می‌دهند.

اگرچه روابط ارایه شده در این بخش محدود به بستر صافی‌های تمیز می‌باشد، ولی می‌توان از آن برای محاسبه افت ارتفاع فشار در حالت صافی با درصدی گرفتگی نیز استفاده کرد. با گرفته شدن تدریجی منافذ بستر صافی، تخلخل موثر e کاهش می‌یابد که به افزایش افت فشار h_l، منتج می‌شود. نحوه کاربرد این معادلات برای محاسبات مربوط به تعیین افت ارتفاع در مثال نشان داده شده است.

۱۱-۵-۲- افت ارتفاع در صافی‌های گرفته

در طول زمان بهره‌برداری از صافی، ذرات جامد داخل آب فضاهای خالی بستر را پر کرده و باعث کاهش تخلخل و افزایش افت ارتفاع در صافی می‌شوند. افت ارتفاع نهایی در بستر صافی را در صورت معین بودن تخلخل در پایان زمان بهره‌برداری می‌توان از روابط ارایه شده در قسمت قبل محاسبه نمود. میانگین تخلخل را می‌توان با فرض اینکه حجم ذرات حذف شده برابر با کاهش حجم منافذ است، تخمین زد. هر چند این روش ممکن است نتایج غیر واقعی به همراه داشته باشد. معمولا کدورت خروجی صافی‌ها طی زمان بهره‌برداری تا زمانیکه افت ارتفاع آن‌ها به حدود ۲ تا ۳ متر نرسیده، رضایت بخش است و برای جلوگیری از بالا رفتن کدورت آب خروجی و دسترسی به کیفیت بهتر، باید صافی دایما شستشو شود. با مطالعات راهنما می‌توان تخمین دقیق‌تری از حداکثر افت فشار در صافی‌ها به‌دست آورد و متغیرهای رابطه کوزنی‌کارمن (معادله (۱۱-۲)) را برای گرفتن نتایج بهتر، واسنجی نمود. در این

1 - Fair-Hatch
2 - Hazen

روش بستر صافی به‌صورت لایه‌هایی فرض می‌شود که هر کدام از آن‌ها مثل یک صافی تنها (با ضخامت کم) که به‌طور سری باهم قرار گرفته‌اند، عمل می‌کند. افزایش افت ارتفاع فشار لایه، مرتبط با مقدار جامدات انباشته شده در آن لایه از صافی است. با این فرض مدل هیدرولیکی واقعی‌تری به‌دست می‌آید که باید متغیرهای آن جهت حصول نتایج واقعی با اطلاعات آزمایش راهنما واسنجی شوند.

۱۱-۵-۳- افت‌های متفرقه

در طراحی هیدرولیکی صافی علاوه بر در نظر گرفتن افت ارتفاع در طول بستر، افت‌های ناشی از متعلقات صافی نیز باید ملاحظه گردد. مهم‌ترین این موارد عبارتند از: ۱- شبکه‌های لوله‌کشی، ۲- بسترهای شنی، ۳- سامانه زهکش زیرین ۴- کانال جمع‌آوری آب شستشو. در ادامه هر یک از این موارد بررسی می‌شود.

- شبکه لوله کشی

این شبکه شامل سامانه لوله کشی جریان ورودی، جریان خروجی، کنترل‌کننده‌های جریان و شیرها می‌باشند. جهت محاسبه افت ارتفاع در این سامانه‌ها از رابطه افت دارسی- وایسباخ (معادله (۳-۶))، رابطه هیزن- ویلیامز (معادله (۳-۱۱)) و رابطه تعیین افت ارتفاع موضعی (۳-۱۱) استفاده می‌شود.

- بسترهای شنی

برای محاسبه افت ارتفاع در بسترهای شنی از روابط ارایه شده در قسمت (۱۱-۴-۱) استفاده می‌شود و طرز استفاده از آن‌ها مشابه محاسبه افت ارتفاع در بستر تمیز می‌باشد. بستر شنی معمولا از چندین لایه که به ترتیب روی هم قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌شود.

- سامانه زهکش زیرین

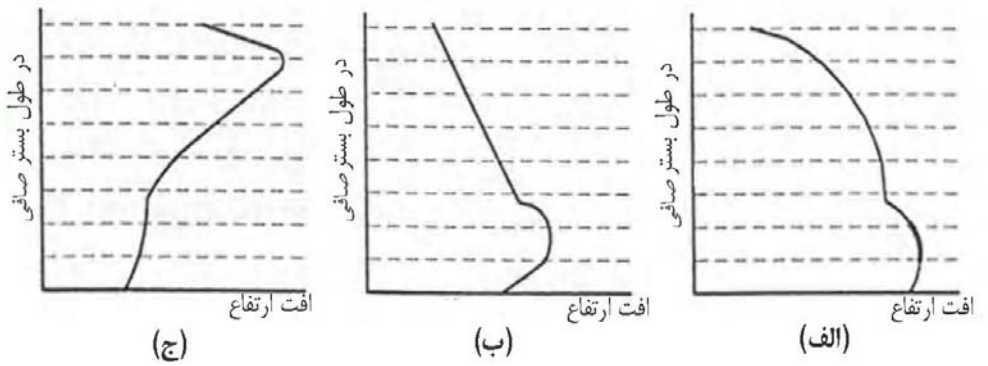
سامانه زهکش زیرین معمولا روزنه می‌باشد. برای محاسبه افت ارتفاع در این قسمت می‌توان از روابط تعیین افت ارتفاع موضعی (رابطه ۳-۱۲) یا رابطه روزنه (رابطه ۷-۱) استفاده نمود. ویژگی‌های هیدرولیکی (ضریب افت موضعی یا ضریب روزنه) این سامانه‌ها به میزان زیادی متغیر است و معمولا توسط سازندگان ارایه می‌شود.

- کانال‌های جمع‌آوری آب شستشو

این کانال‌ها پساب شستشو را به سمت زهکش هدایت می‌کنند. نقش این کانال‌ها شبیه کانال‌های باز با جریان متغیر مکانی است و طراحی آن‌ها شبیه طراحی کانال‌های خروجی در حوض‌های ته‌نشین می‌باشد. مراحل طراحی آن‌ها در بخش (۳-۶-۷) ذکر شده است.

۱۱-٦- ابزارهای سنجش افت ارتفاع

معمولا روی صافی تجهیزات نمایشگر افت ارتفاع نصب می‌شود که از دو حسگر در ورودی و خروجی به صافی تشکیل شده است. شکل (۱۱-۷) نمونه‌ای از خروجی این نمایشگرها را نشان می‌دهد که نیمرخ فشار در آن رسم شده است. اگر همانند شکل (۱۱-۷- الف) افت ارتفاع به تدریج در طول بستر زیاد شود، لخته‌ها به‌طرز مناسبی در طول بستر گیر می‌کنند. اما اگر همانند شکل (۱۱-۷- ب) افت ارتفاع در اعماق پایین‌تر رخ دهد نشان دهنده این است که لخته‌ها در طول لایه ماسه پیش رفته و ممکن است کدورت در خروجی مشاهده شود. شکل (۱۱-۷- ج) حالتی را نشان می‌دهد که در آن افت فشار در قسمت‌های بالایی صافی رخ می‌دهد. این حالت می‌تواند نشان‌دهنده لخته‌های سفت و بزرگ یا مصالح صافی ریز و یا نرخ صاف‌سازی بسیار پایین باشد.



شکل ۱۱-۷- اندازه‌گیری فشار در صافی، (الف) لخته‌های مناسب، (ب) لخته‌های بسیار ضعیف، (ج) لخته‌های بزرگ یا سفت

۱۱-۷- اندازه‌گیری جریان

معمولا بر روی هر صافی بده‌سنج نصب می‌شود. برخی از سامانه‌های صاف‌سازی نظیر صافی‌های نرخ ثابت با کنترل جریان خروجی به دستگاه اندازه‌گیری جریان نیاز دارند اما وجود این دستگاه بر روی بسیاری از صافی‌ها الزامی نیست هر چند بهتر است همه صافی‌ها به دستگاه بده‌سنج مجهز باشند. این دستگاه بهره‌بردار را قادر می‌سازد که جریان توزیع شده در صافی‌ها را اندازه‌گیری کرده و از عدم اعمال بار اضافی به هر صافی اطمینان حاصل کند.

۱۱-۸- شستشوی صافی

صافی زمانی شستشو می‌شود که: ۱- افت ارتفاع صافی به بیش از افت ارتفاع محاسبه شده در طراحی برسد، ۲-کدورت آب خروجی به بالاترین مقدار مجاز برسد، ۳- زمان کارکرد صافی از آخرین دفعه‌ای که شستشو داده شده است، بیش از زمان انتخاب شده برای طراحی باشد. در عمل شستشو، آب با سرعت کافی در جهت رو به بالا از بستر صافی عبور داده می‌شود تا بستر صافی منبسط شده و جامدات انباشته شده در بستر به طرف بیرون شسته شوند. در طی عمل شستشو، بستر صافی شناور و ذرات چسبیده به آن‌ها جدا می‌شوند. در این حالت فضای بین مصالح بستر زیادتر شده و تخلخل افزایش می‌یابد و سرعت عمودی آب تقریبا برابر با سرعت ته‌نشینی ذرات بستر است. این امر باعث می‌شود که ذرات دارای سرعت ته‌نشینی کم‌تر حذف شده و به طرف جریان خروجی

رانده شوند. برای اطمینان از بهره‌برداری صحیح لازم است در طراحی هیدرولیکی صافی به متغیرهایی نظیر: ۱- سرعت ته‌نشینی ذرات بستر، ۲- بده شستشو، ۳- افت ارتفاع در حین عمل شستشو و ۴- مدت زمان شستشو توجه شود.

۱۱-۸-۱- سرعت ته‌نشینی ذرات بستر صافی

سرعت ته‌نشینی بستر صافی با استفاده از رابطه (۱۰-۱) یا استفاده از نمودار شکل (۱۱-۸) به‌دست می‌آید. در این روابط برای محاسبه سرعت ته‌نشینی، ذرات بستر به‌صورت کروی و جدا از هم (بدون چسبیدن به هم) فرض می‌شوند. بستر ماسه و بستر گارنت دارای ذرات کروی هستند ولی بسترهای آنتراسیت اشکال هندسی نامنظمی دارند و سرعت ته‌نشینی ذرات آن‌ها کمی کم‌تر از سرعت محاسبه شده با این دو رابطه است که مقدار آن جزیی و قابل صرفنظر کردن است.

۱۱-۸-۲- محاسبه افت در زمان شستشو

در زمان شستشوی صافی، جهت جریان از پایین به بالا بوده و باعث شناور شدن ذرات صافی می‌شود. در این راهنما روابط محاسبه افت ارتفاع در بسترهای منبسط شده هم برای بسترهای یکنواخت و هم برای بسترهای لایه لایه آمده است. عمل شستشوی بستر یکنواخت به عمق L_f، را تا عمق L_{fe} منبسط خواهد کرد. در حین شستشو، افت ارتفاع بر اثر اصطکاک ذرات h_L برابر است با:

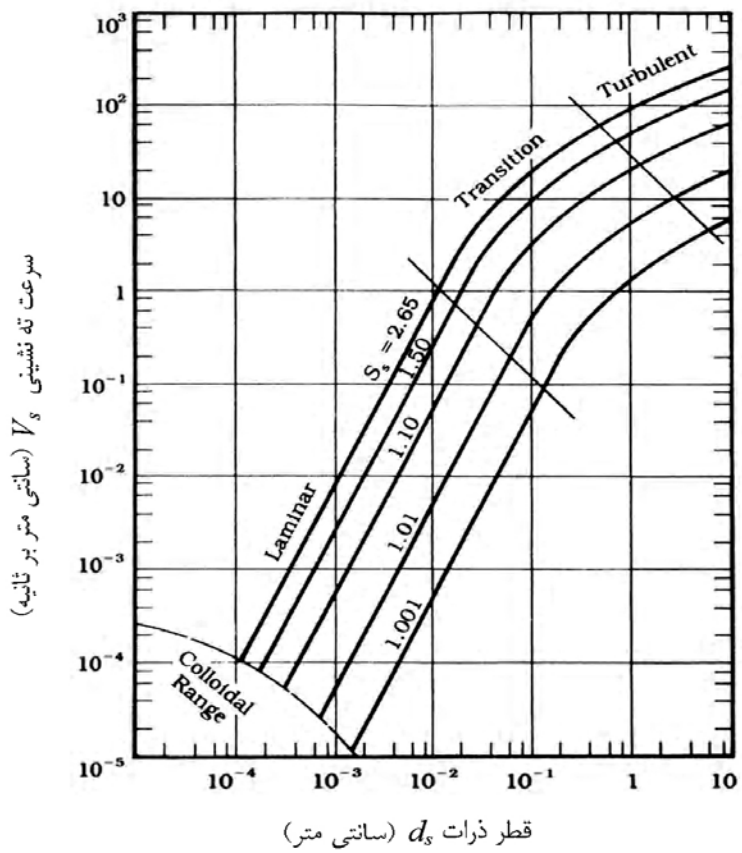
$$h_L = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \times (1 - e_e) \times L_{fe} \qquad (۱۰-۱۱)$$

در این رابطه بالا ρ_s جرم مخصوص ذرات تشکیل‌دهنده بستر و e_e تخلخل بستر منبسط شده را نشان می‌دهد. مقدار e_e را می‌توان از رابطه (۱۱-۱۱) محاسبه نمود:

$$e_e = \left(\frac{V_b}{V_s}\right)^{0.22} \qquad (۱۱-۱۱)$$

در این رابطه V_b سرعت رو به بالای آب شستشو و V_s سرعت ته‌نشینی ذرات بستر را نشان می‌دهد. مقدار V_s را می‌توان با توجه به قطر دانه‌های بستر با استفاده از رابطه (۱۰-۱) محاسبه و یا از نمودار شکل (۱۱-۸) به‌دست آورد. این نمودار برای دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده و برای سایر دماها عدد حاصل از این نمودار را باید در ضریب $\left(\frac{\nu}{0.013}\right)$ ضرب نمود (ν لزجت سینماتیکی آب در دمای مورد نظر) بستر تشکیل شده از ذرات یکنواخت در صورتی انبساط خواهد یافت که:

$$V_b = V_s \times e_e^{4.5} \qquad (۱۲-۱۱)$$



شکل ۱۱-۸- نمودار تعیین سرعت ته‌نشینی ذرات بر اساس قطر دانه (S_s چگالی ذرات) [۱۰]

عمق انبساط را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$L_{fe} = \frac{1-e}{1-e_e} \times L_f \qquad (۱۳-۱۱)$$

و یا با جایگزینی e_e از رابطه (۱۱-۱۱) داریم:

$$L_{fe} = \left(\frac{1-e}{1-\left(\frac{V_b}{V_s}\right)^{0.22}}\right) \times L_f \qquad (۱۴-۱۱)$$

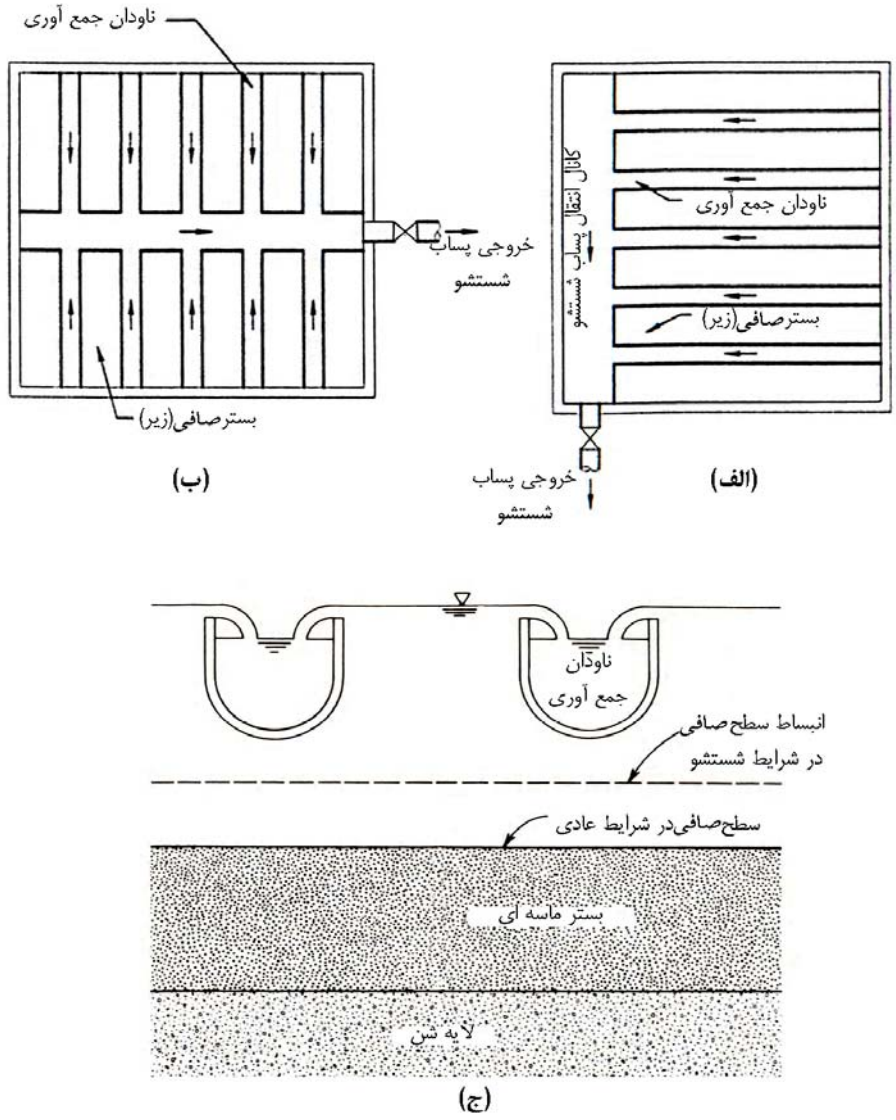
در بسترهای لایه لایه، ابتدا ذرات کوچک‌تر واقع در لایه‌های فوقانی منبسط می‌شوند. به محض اینکه V_b برای شناور شدن ذرات بزرگ‌تر کافی شد، تمام بستر منبسط خواهد شد. عمق انبساط بستر غیر یکنواخت با اصلاح رابطه (۱۱-۱۴) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$L_{fe} = (1-e) \times L_f \times \sum \frac{x}{1-e_e} \qquad (۱۵-۱۱)$$

که در رابطه بالا x نسبت وزنی ذرات دارای تخلخل انبساط یافته e_e می‌باشد.

۱۱-۹- جمع‌آوری آب شستشو

برای اطمینان از تمیز شدن موثر بستر صافی، جهت جریان آب شستشو باید تا حد امکان قائم باشد. در بیش‌تر صافی‌ها از کانال‌های جمع‌آوری کننده آب شستشو برای اطمینان از قائم بودن جریان استفاده می‌شود. در شکل (۱۱-۹) نحوه آرایش این کانال‌ها نشان داده شده است. طراحی هیدرولیکی این کانال‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که جریان به راحتی از لبه آن سرریز کند. جریان در این کانال‌ها به‌صورت متغیر مکانی می‌باشد که محاسبات هیدرولیکی برای طراحی چنین کانال‌هایی در بخش (۴-۶-۷) آمده است. محاسبه فواصل و ارتفاع این کانال‌ها بسیار مهم است. اگر فاصلهٔ کانال‌ها از هم زیاد باشد، لخته‌های معلق به طور موثر در عمل شستشو حذف نمی‌شوند. همچنین اگر این فاصله خیلی کم باشد، مصالح بستر به بیرون می‌روند. در حالت کلی بهتر است که کانال‌ها نزدیک به هم بوده و ارتفاع آن‌ها در بالای بستر منبسط شده قرار گیرد.



شکل ۱۱-۹- سامانه شستشوی صافی، (الف) سامانه جمع‌آوری پساب شستشو از کنار، (ب) سامانه جمع‌آوری پساب شستشو از مرکز، (ج) وضعیت بستر صافی در شرایط شستشو

فصل ۱۲

هیدرولیک سایر واحدها

۱۲-۱- کلیات

در تصفیه آب شرب علاوه بر واحدهای اصلی که در فصول قبل هیدرولیک آن بیان شد، به منظور بهبود متغیرهای کیفی آب، حسب شرایط و موقعیت‌های خاص از فرایندهایی نظیر حذف طعم و بو، فلوئور زنی، استفاده از کربن فعال و غیره استفاده می‌شود. به علاوه آب تصفیه شده قبل از ورودی به شبکه توزیع باید گندزدایی شود. طراحی این واحدها به لحاظ هیدرولیکی نکته خاصی ندارد و مشابه با سایر واحدهاست. در این راهنما با توجه به اهمیت و عمومیت واحد گندزدایی، طراحی هیدرولیکی این واحد آورده شده است. در ادامه این فصل هیدرولیک واحدهای فراوری پسماندها و لجن تولیدی بررسی می‌شود.

۱۲-۲- کنترل رنگ، بو و مزه

هر چند هدف اصلی و اولیه در تصفیه‌خانه آب تولید آب سالم و بهداشتی است که متغیرهای آن در حد استانداردهای سلامت باشد، اما مسایل گوارا بودن آب نظیر رنگ، بو و مزهٔ آب نیز برای اطمینان از قابل آشامیدن بودن آن از اهمیت برخوردار است. استانداردهای موجود سعی در پایین نگه داشتن این متغیرها و سایر عوامل موثر در مسایل گوارا بودن در آب تصفیه شده دارند. منشاء رنگ آب ترکیبات آلی و غیرآلی طبیعی و یا مصنوعی است که به منابع آب بالا دست تصفیه‌خانه وارد می‌شود و به‌صورت معلق و یا محلول وجود دارند. در تصفیه‌خانه آب حذف رنگ به‌وسیله فرایندهایی همانند اکسیداسیون، انعقاد، صاف‌سازی، جذب سطحی و ستون‌های مبدل یونی انجام می‌شود. معمولا حذف طعم و بو در کنار فرایندهای اصلی تصفیه انجام می‌شود و به لحاظ هیدرولیکی تاثیر چندانی ندارد.

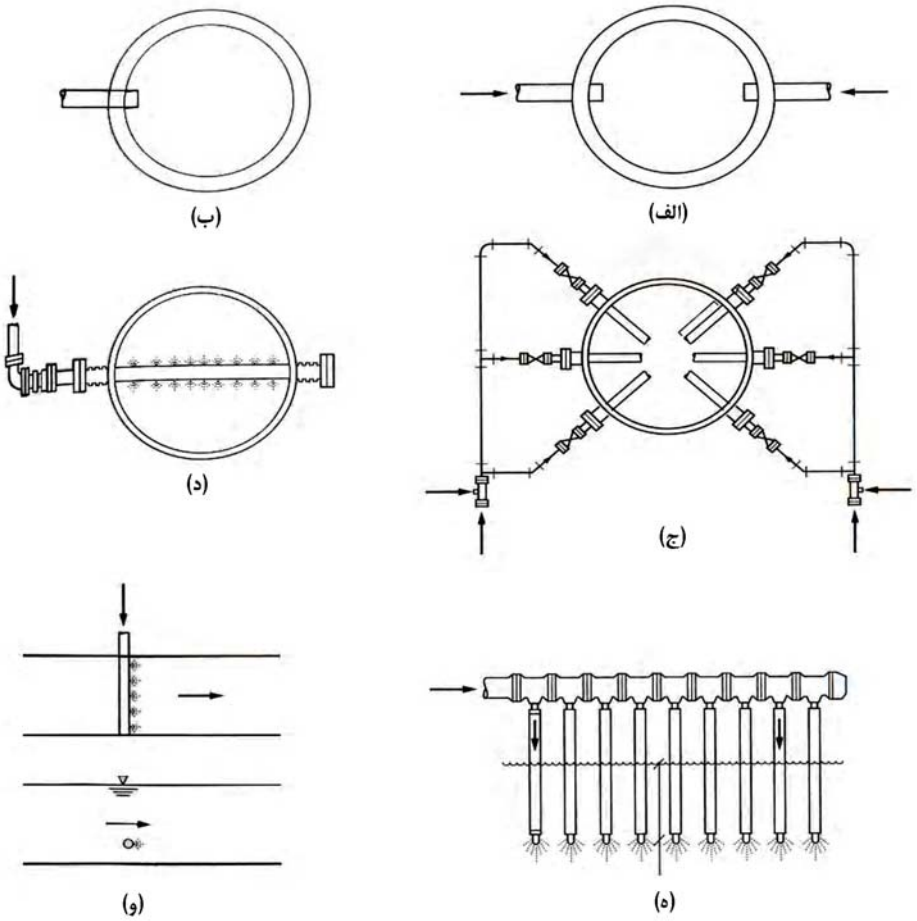
۱۲-۳- گندزدایی و فلوئورزنی

فرایند گندزدایی آب آشامیدنی به منظور حذف عوامل بیماری‌زا استفاده می‌شوند. در تصفیه‌خانه‌های آب این عمل می‌تواند در ابتدا یا انتهای تصفیه‌خانه انجام گیرد. در گندزدایی در اول تصفیه‌خانه معمولا هدف حذف عوامل بیولوژیکی مزاحم مثل جلبکها می‌باشد که می‌توانند بازده تصفیه در واحدهای بعدی را کاهش دهند در حالی‌که گندزدایی نهایی بیش‌تر برای مصون نگه‌داشتن آب تصفیه شده از عوامل بیماری‌زا در طول شبکه توزیع تا رسیدن به دست مصرف‌کننده صورت می‌پذیرد. این کار با روش‌های مختلف نظیر استفاده از مواد اکسید کننده قوی مثل ازن، کلر، پرمنگنات پتاسیم، تابش اشعه و یا روش‌های دیگر انجام می‌شود که متداول‌ترین این روش‌ها در کشور ما استفاده از کلر و ترکیبات آن است. به هنگام استفاده از اکسیداسیون باید دقت شود که ماده اکسیدکننده پس از اختلاط مناسب و پخش یکنواخت در تمام حجم آب، به اندازه کافی در تماس با عوامل بیماری‌زا قرارگیرد.

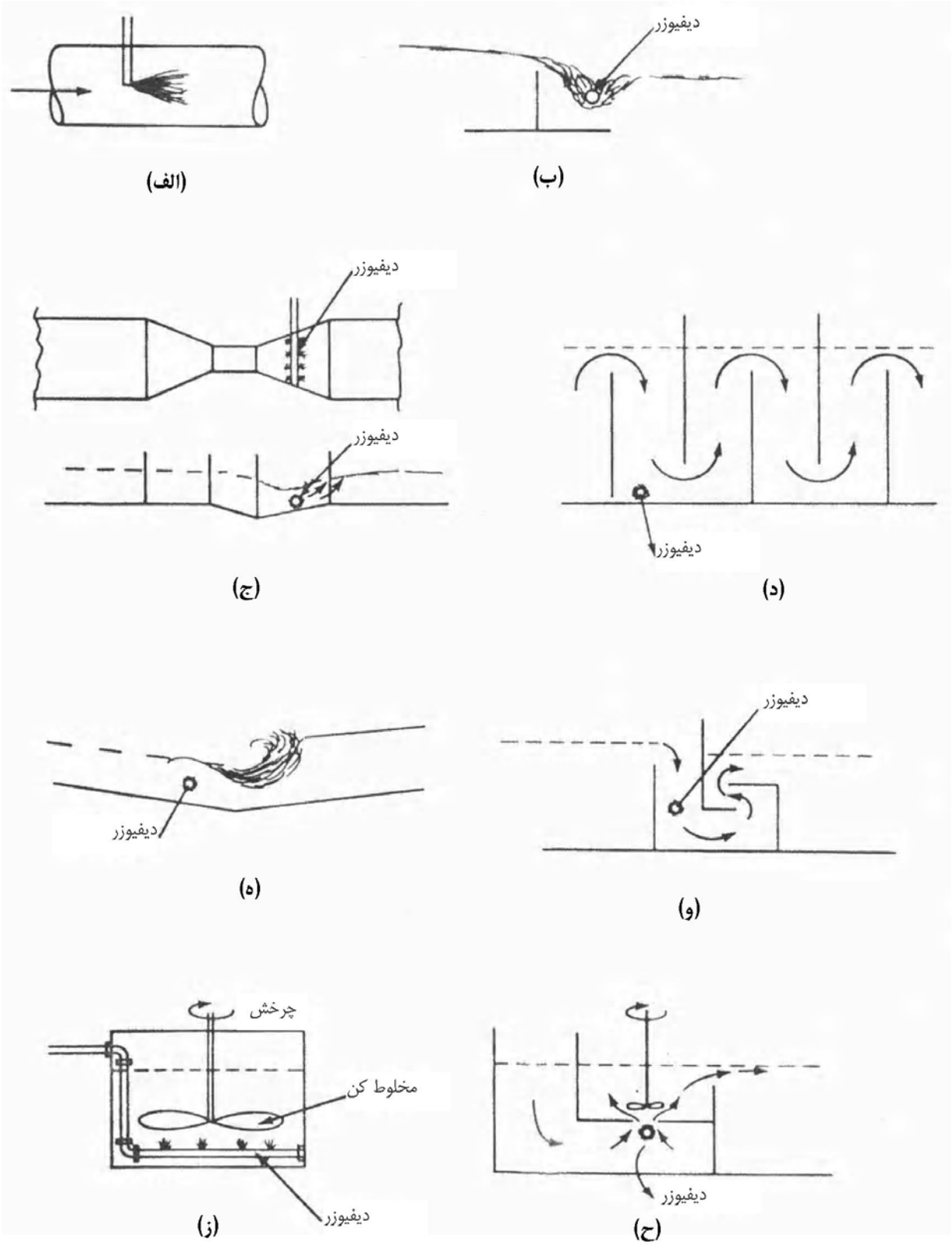
محلول کلر به کمک پخش‌کننده‌هایی (دیفیوزر) که ترتیب قرارگرفتن آن‌ها در شکل‌های (۱۲-۱) و (۱۲-۲) آمده است، به آب تصفیه شده در نقاط معین مثل قبل و یا بعد از واحد صاف‌سازی تزریق می‌شود. پس از آن به سرعت توسط مکانیسم‌هایی نظیر استفاده از ابزار مکانیکی، قرارگرفتن صفحات مانع و پرش هیدرولیکی ایجاد شده در پایین دست سرریز، ونتوری، دریچه یا ناودان پارشال با آب مخلوط می‌شود. برای این عمل گرادیان سرعت در حدود s^{-1} ۴۰۰ لازم است.

هچنین در سال‌های اخیر استفاده از ازن به عنوان ماده گندزدایی‌کننده مورد توجه قرار گرفته است. در شکل (۱۲-۳) به‌صورت شماتیک روش تزریق ازن به آب نشان داده شده است.

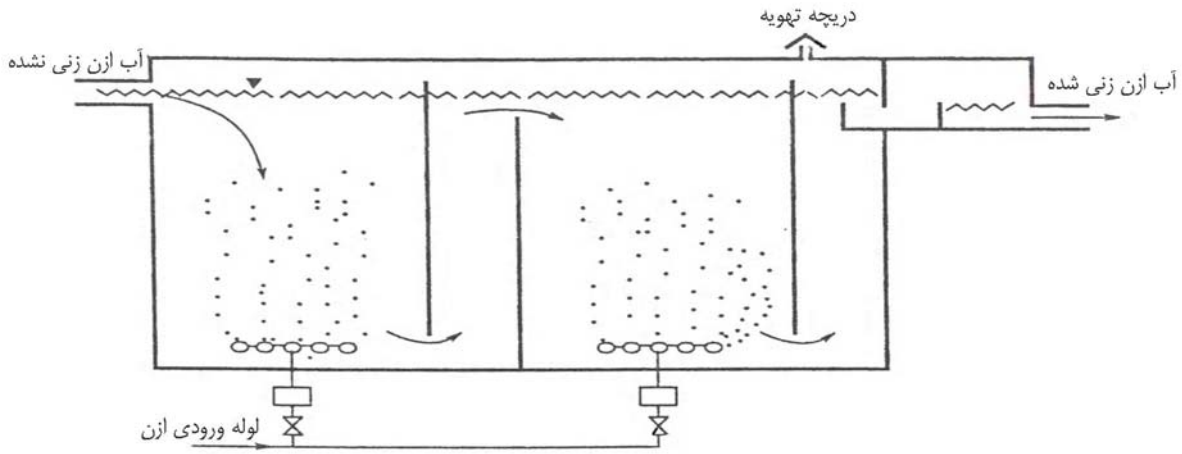
در تصفیه‌خانه غالبا جهت اختلاط موثر آب با ماده گندزدایی‌کننده از صفحه مانع (دیوارهای قائم) در مخزن آب پاک استفاده می‌شود. این صفحات مانع با کاستن از فضاهای مرده، تاثیر باد، لایه بندی حرارتی، آشفتگی جریان در ورودی و خروجی و احتمال پدیده اتصال کوتاه را کاهش می‌دهد. در شکل (۱۲-۴) نمونه‌های ضعیف، متوسط و خوب از قرارگرفتن صفحات مانع در مخزن آب تمیز مستطیل شکل و در شکل (۱۲-۵) حالت‌های مختلف قرارگرفتن صفحات مانع در مخزن آب پاک دایره‌ای شکل آمده است. واحد کلرزنی، ازن زنی و واحد فلوئور زنی به لحاظ هیدرولیکی کاملا مشابه با سایر واحدهاست. در ادامه با یک مثال نحوه محاسبه افت ارتفاع و ترسیم نیمرخ هیدرولیکی در واحد کلرزنی ارایه می‌شود.



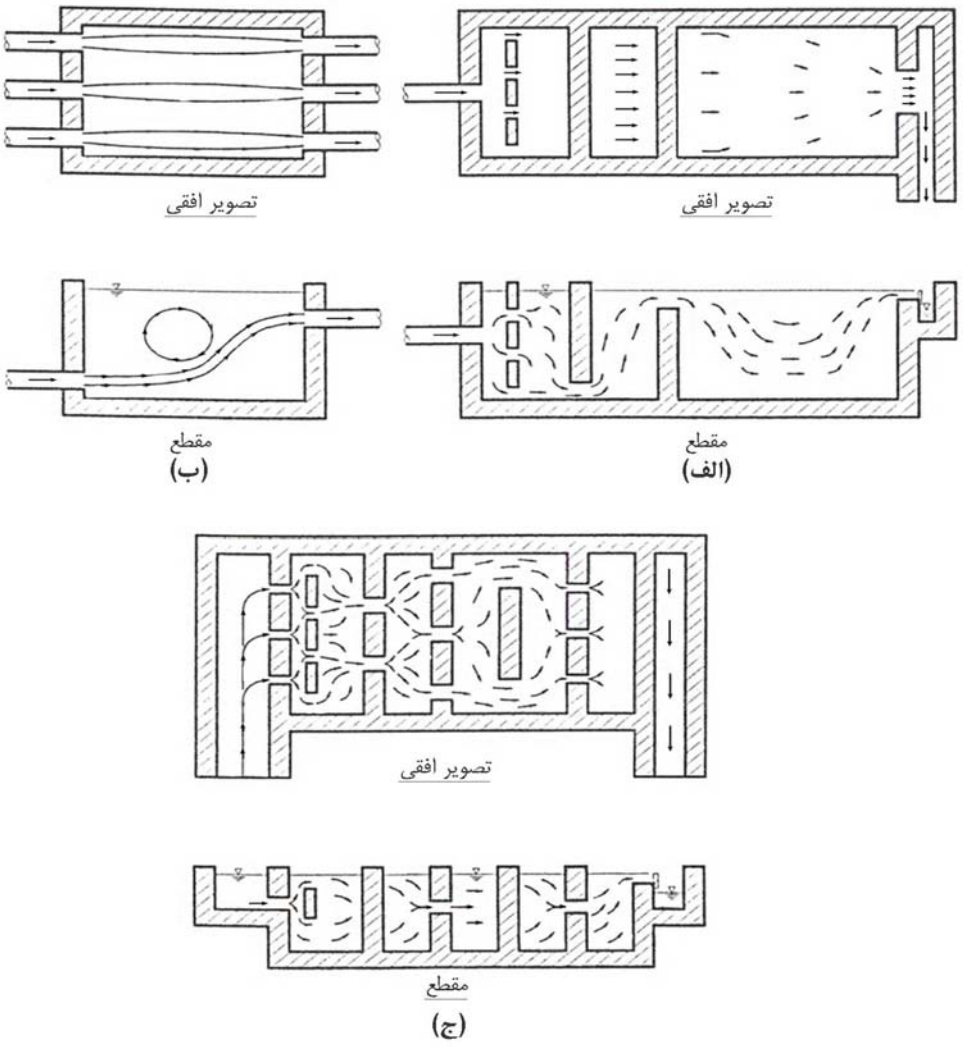
شکل ۱۲-۱- روش‌های تزریق کلر به آب، (الف) انژکتور دوگانه، (ب) انژکتور منفرد، (ج) انژکتور چندگانه، (د) سامانه انژکتور، (هـ) دیفیوزر چندگانه با نازل‌های آویزان، (و) دیفیوزر منفرد قائم



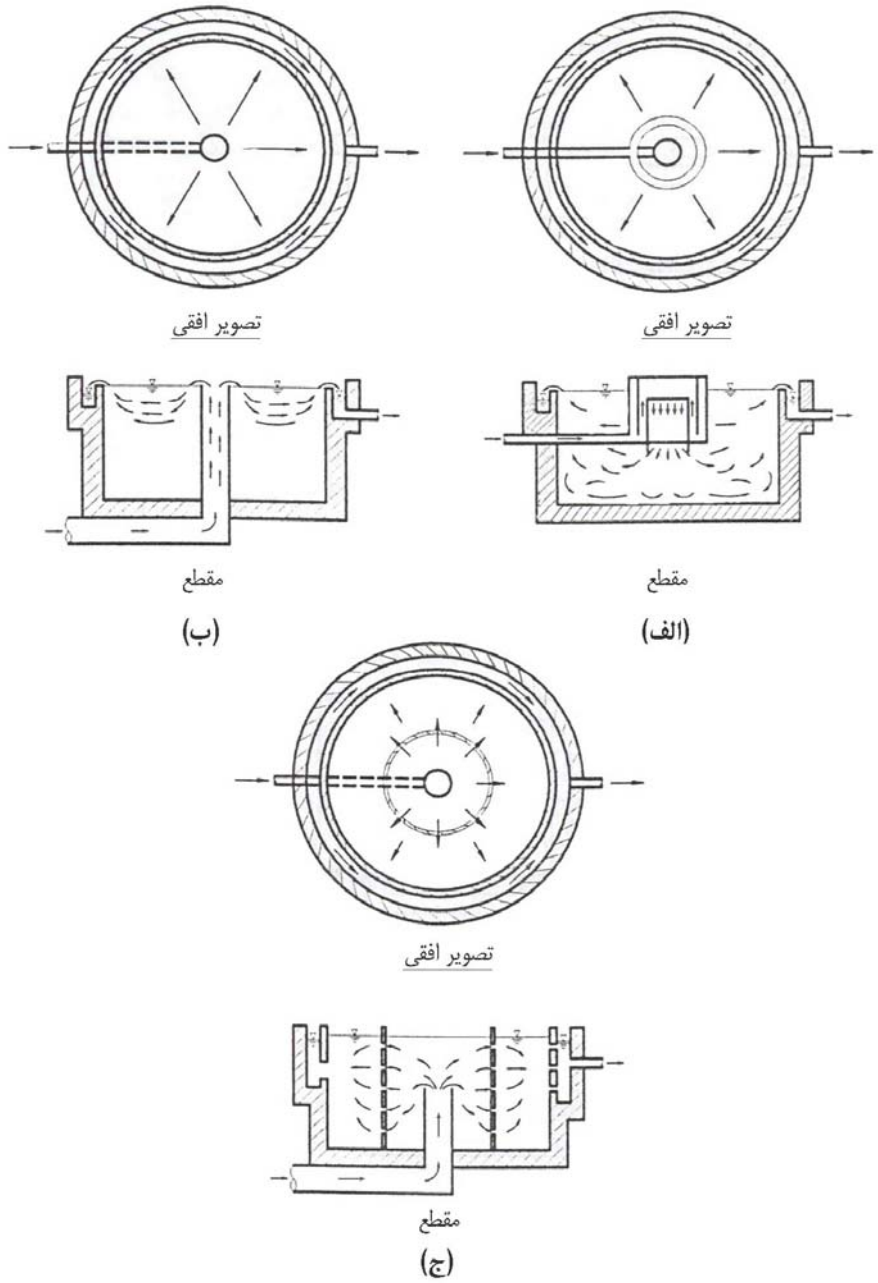
شکل۱۲-۲- روش‌های اختلاط کلر با آب، (الف) نازل در یک مجرای بسته، (ب) پایین دست سرریز، (ج) ناودان پارشال، (د) اختلاط در مخزن با استفاده از صفحه مانع، (هـ) پرش هیدرولیکی، (و) اختلاط به‌وسیله شکل خاص دیوارها، (ز) اختلاط مکانیکی، (ح) اختلاط مکانیکی به کمک دیوار راهنما



شکل۱۲-۳- کانال‌های تماس با پخش‌کن ازن در کف به منظور گندزدایی آب



شکل ۱۲-٤- صفحات مانع در مخزن آب پاک مستطیلی، (الف) متوسط، (ب) نامناسب، (ج) مناسب



شکل۱۲-۵- صفحات مانع مورد استفاده در مخزن آب پاک دایره‌ای، (الف) حالت متوسط، (ب) حالت نامناسب، (ج) حالت مناسب

۱۲-٤- جمع‌آوری و پردازش لجن

در تصفیه‌خانه آب، پسماندهای حاوی جامدات آلی و غیرآلی از قبیل لجن‌های بیولوژیکی، رس، سیلت و رسوب دهنده‌های شیمیایی در فرایندهای مختلف در طول تصفیه تولید می‌شوند. در گذشته این پسماندها به منابع آب طبیعی تخلیه می‌شدند ولی قوانین و مقرارت جدید مربوط به کنترل آلودگی آب‌ها این عمل را ممنوع کرده است. لذا پس از اعمال محدودیت در تخلیه پسماندهای تصفیه‌خانه آب به آب‌های سطحی، گزینه‌های دیگر نظیر دفع در زمین و تخلیه به فاضلاب‌روهای بهداشتی مورد توجه

قرار می‌گیرد. در این قسمت با معرفی انواع لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌های آب و منابع تولید آن، واحدهای مختلف جمع‌آوری و پردازش لجن به لحاظ هیدرولیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱۲-٤-۱- منابع تولید لجن

لجن تولیدی در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه آب، به لحاظ کمیت و کیفیت یکسان نبوده و خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها نظیر چگالی، میزان مواد معلق، قابلیت آبگیری و لزجت متفاوت می‌باشد. به‌طور کلی این پسماندها را می‌توان به گروه‌های لجن حاصل از فرایند انعقاد، لجن فرایند سختی‌گیری، پساب شستشوی صافی‌ها، لجن حاصل از رسوبات آهن و منگنز، پساب ناشی از کمک منعقدکننده‌ها، پودر کربن فعال اضافه شده و پسماندهای حاصل از اضافه‌کردن سایر مواد شیمیایی تفکیک کرد.

۱۲-٤-۲- پردازش (فراوری) پسماندها

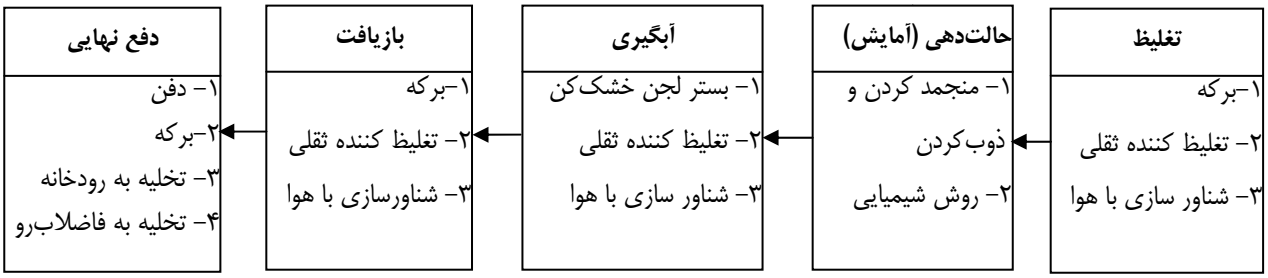
فراوری پسماند شامل مجموعه عملیات‌هایی است که طی آن لجن برای دفع آماده می‌شود. به‌طور کلی فرایندهای فراوری شامل مراحل تغلیظ، حالت‌دهی (آمایش)، آبگیری، خشک‌کردن، بازیافت شیمیایی و دفع می‌باشد. از آنجا که قسمت زیادی از هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری در تصفیه‌خانه‌های آب مربوط به واحدهای مدیریت پسماندها و لجن می‌باشد، انتخاب این فرایندها از اهمیت زیادی برخوردار است. در شکل (۱۳-۶) یک شمای کلی از انواع این سامانه‌های تصفیه آورده شده است که با توجه به عواملی نظیر زمین موجود، اندازه تصفیه‌خانه، حمل و نقل و دفع لجن، بازیافت و استفاده مجدد از مواد شیمیایی یکی از این گزینه‌ها انتخاب می‌گردد. بخش عمده انتخاب و طراحی این واحدها مربوط به فرایند مساله می‌باشد و خارج از موضوع این راهنما است. در ادامه ضمن تعریف هر یک از این روش‌ها، نکاتی که به جهت هیدرولیکی مهم هستند، بیان می‌شود.

الف- تغلیظ

هدف از سامانه تغلیظ کاهش حجم آب لجن و نیز کاهش اندازه واحدهای آبگیری از لجن می‌باشد. این کار معمولا توسط برکه‌ها، تغلیظ‌کننده‌های ثقلی و شناورسازی با هوای محلول انجام می‌شود. برکه‌ها معمولا زمانی که زمین به میزان زیاد در دسترس باشد استفاده می‌شوند و در صورت طراحی صحیح از بازده بالایی برخوردار هستند. عمق استخر معمولا ۲ تا ۳ متر در نظر گرفته می‌شود.

تغلیظ‌کننده‌های ثقلی نیز با افزایش غلظت جامدات و حذف آب اضافی (که در برخی موارد به ابتدای تصفیه‌خانه برگشت داده می‌شود) موجب کاهش حجم لجن می‌شوند. این تغلیظ‌کننده‌ها معمولا به‌صورت حوضچه‌های ته‌نشینی دایره‌ای شکل مجهز به لجن روب طراحی می‌شوند و بهره‌برداری از آن‌ها به‌صورت پیوسته و یا منقطع می‌باشد. لجن تغلیظ‌شده به‌وسیله یک چاهک مرکزی جمع‌آوری و به خارج تلمبه می‌شود. طراحی این سامانه‌ها معمولا بر اساس آزمایش‌های راهنما و با توجه به تجربیات موجود انجام می‌شود. ولی به‌طور کلی در طراحی آن باید به نکاتی از قبیل در نظر گیری تغییرات کمی و کیفی سالیانه و فصلی توجه نمود. بارگذاری هیدرولیکی لجن حالت‌دهی شده معمولا ۴ تا ۱۰ مترمکعب بر مترمربع بر روز، بارگذاری جامدات لجن حالت‌دهی شده معمولا ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر مترمربع بر روز و عمق و زمان ماند تغلیظ‌کننده معمولا به ترتیب ۴/۵ تا ۶/۵ متر و ۸ تا ۲۴ ساعت در نظر گرفته می‌شود.

در شناور سازی با هوای محلول نیز حباب‌های ریز هوا باعث بالا آمدن ذرات جامد و شناورشدن آن‌ها و در نهایت جداسازی آن‌ها می‌شود. امروزه از این روش کم‌تر استفاده می‌شود. در شکل (۱۳-۷) نمونه‌ای از تغلیظ‌کننده‌های ثقلی نشان داده شده است.



شکل ۱۲-٦- روش‌ها و فرایندهای مختلف فرآوری و دفع لجن

ب- حالت‌دهی

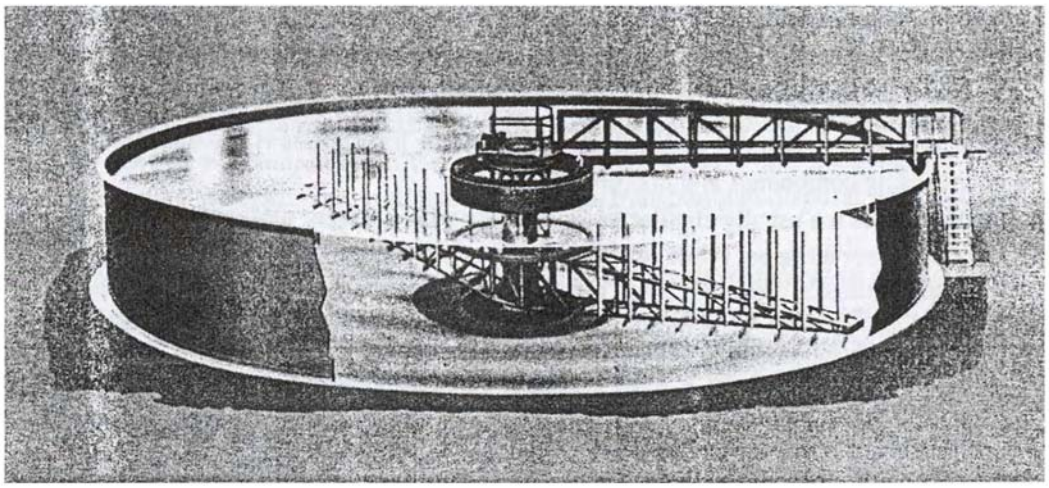
حالت‌دهی لجن معمولا جهت سهولت در کار تغلیظ‌کننده‌های ثقلی و نیز افزایش کارآیی فرایند آبگیری استفاده می‌شود. برای این منظور بیش‌تر از دو روش منجمدکردن و ذوب‌کردن متناوب و یا افزودن مواد شیمیایی استفاده می‌شود. سامانه‌های حالت‌دهی به لحاظ هیدرولیکی مهم نیستند.

ج- آبگیری

برای انتقال لجن به محل دفع لازم است به کمک فرایندهای آبگیری، رطوبت آن را از بین برده و لجن را به صورت جامد تبدیل کرد. برای این منظور از فرایندهای ساده‌ای مثل تبخیر و رسوب در برکه ها و بسترهای لجن خشک کن و یا فرایندهای پیچیده نظیر صافی‌های خلا، صافی‌پرس‌ها، صافی‌های تسمه‌ای و سانتریفوژها استفاده می‌شود. انتخاب هر کدام از این انواع به کمیت و ماهیت لجن و روش‌های دفع بستگی دارد و در طراحی آن‌ها نیز معمولا متغیرهای هیدرولیکی نقش ندارند.

د- بازیافت مواد شیمیایی و دفع

در لجن تصفیه‌خانه آب موادی وجود دارند که دارای ارزش اقتصادی بوده و دارای قابلیت بازیافت می‌باشند و می‌توان از آن‌ها پس از بازیافت مجددا در پروسه تصفیه استفاده کرد. عمل بازیافت نیز به لحاظ هیدرولیکی نکته خاصی ندارد. دفع لجن نیز آخرین مرحله از این فرایند است و به روش‌های مختلفی نظیر دفن در زمین، پخش روی سطح زمین و تخلیه به فاضلاب‌روهای بهداشتی انجام می‌شود.



شکل۱۲-۷- جزییات حوض تغلیظ‌کننده ثقلی

فصل ۱۳

انتخاب محل و جانمایی واحدها

۱۳-۱- کلیات

انتخاب محل مناسب برای احداث تصفیه‌خانه آب نخستین گام از مراحل طراحی و ساخت می‌باشد که با توجه به محدودیت‌های مختلف زیست‌محیطی، نوع منابع آب خام، متغیرهای طراحی و غیره تعیین می‌شود. پس از انتخاب محل تصفیه‌خانه و تعیین فرایندهای تصفیه، تهیه نقشه جانمایی واحدها آغاز می‌شود که این قسمت نحوه قرار گیری واحدهای مختلف تصفیه‌خانه در محل انتخاب شده را دربر می‌گیرد و در مرحلهٔ بعد ارتباط بین این واحدها از طریق مجاری باز، لوله‌ها و اتصالات مربوط صورت می‌پذیرد.

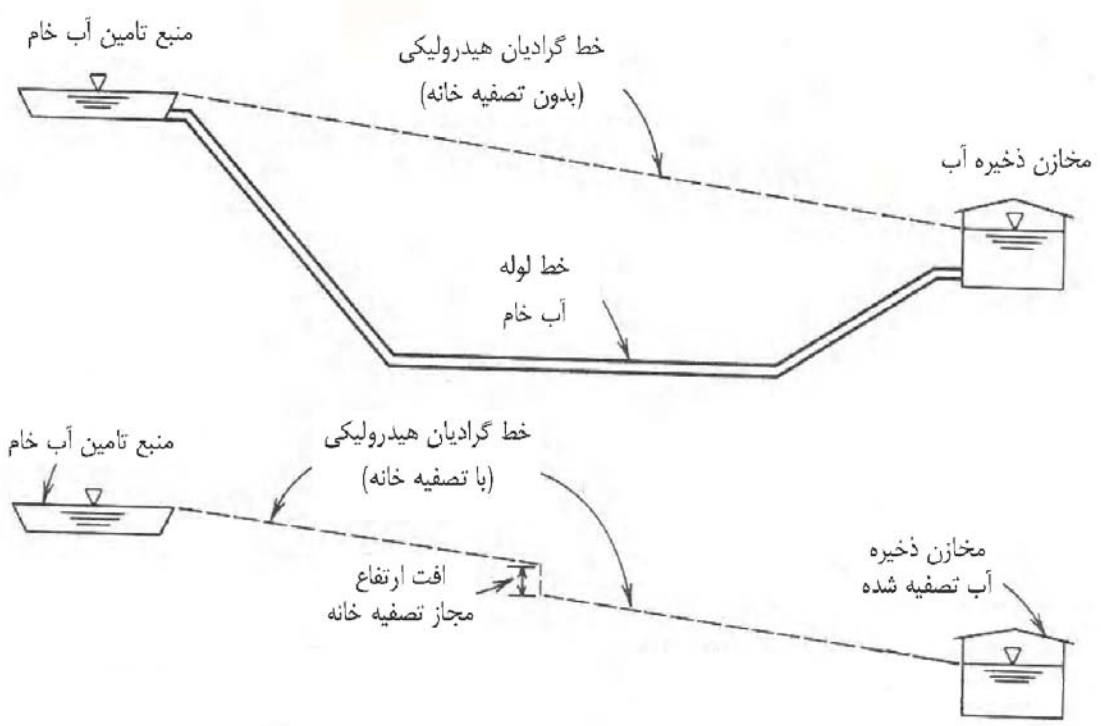
بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها در طول مدت استفاده با مسایل و مشکلات جدی بهره‌برداری مواجه می‌شوند که ناشی از انتخاب غیر صحیح و غیر اصولی محل احداث تصفیه‌خانه و اشتباه در جانمایی واحدها و لوله‌کشی بین آن‌ها و نیز نامناسب بودن گرادیان هیدرولیکی در طول تصفیه‌خانه می‌باشد. بنابراین بسیار مهم است که طراح در انتخاب محل تصفیه‌خانه، جانمایی واحدها و طراحی هیدرولیکی تصفیه‌خانه دقت و توجه لازم را داشته باشد. در این فصل به ارایه کلیات مربوط به انتخاب محل، جانمایی واحدها و مجاری ارتباطی بین واحدها پرداخته شده است.

۱۳-۲- انتخاب محل تصفیه‌خانه

انتخاب محل تصفیه‌خانه نیازمند در نظر گرفتن دقیق محدودیت‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، زیست‌محیطی، هیدرولیک ورود و خروج و غیره می‌باشد. هرچند که یافتن یک محل ایده‌آل که تامین‌کننده تمام شرایط یادشده باشد تقریبا دشوار است، اما می‌توان با انجام مقایسه فنی و اقتصادی و در نظرگرفتن مسایل مختلف طراحی و عوامل زیست‌محیطی، بهترین محل را برای احداث تصفیه‌خانه از بین گزینه‌های ممکن انتخاب نمود. برخی از عواملی که در انتخاب محل تصفیه‌خانه باید به آن‌ها توجه شود عبارتند از: ۱- موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه، ۲- اطلاعات حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، ۳- در دسترس بودن انرژی الکتریکی، ۴- دسترسی به جاده، ۵- پیشینه زلزله‌خیزی و جاری‌شدن سیل در منطقه، ۶- هزینه‌های ساخت و ساز، ۷- هزینه‌های نگهداری محل، ۸- سرعت گسترش شهر و جهت آن، ۹- سلامتی بهره‌برداران و ایمنی خانه‌های مجاور، ۱۰- امکان توسعه در آینده، ۱۱- فاصله از منبع اصلی آب و نحوه انتقال آب به تصفیه‌خانه، ۱۲- نحوه انتقال و توزیع آب تصفیه‌شده به مخازن و شبکه مصرف.

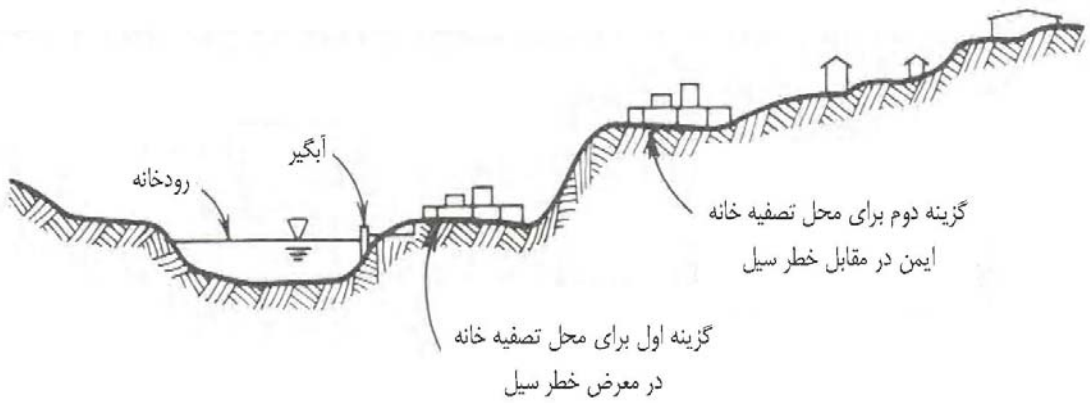
۱۳-۳- موقعیت تصفیه‌خانه به لحاظ منبع تامین آب خام

منابع آب خام نظیر سد، رودخانه و چاه با انتخاب محل تصفیه‌خانه رابطه مستقیم داشته و در برخی موارد نوع و موقعیت آن‌ها نقش اساسی در انتخاب محل ایفا می‌کند. علاوه بر این منبع آب خام و محل آبگیری با توجه به کیفیت آب تاثیر بلند مدت و طولانی در بهره‌برداری تصفیه‌خانه دارد. در مورد سدها، محل تصفیه‌خانه باید به گونه‌ای باشد که حتی‌الامکان آب به‌صورت ثقلی بین واحدهای تصفیه‌خانه جریان یابد. برای این منظور باید در ارزیابی اولیه محل موردنظر، ۱۰ تا ۳۰ متر اختلاف ارتفاع وجود داشته باشد. بنابراین گرادیان هیدرولیکی در طول مسیر باید به گونه‌ای باشد که این شرایط را تامین کند (شکل (۱۳-۱)).



شکل۱۳-۱- افت در سیستم با توجه به انتخاب محل تصفیه‌خانه (در این شکل شماتیک، جزییات از قبیل بالا یا پایین بودن تصفیه‌خانه و یا تلمبه‌ها مطرح نبوده و فقط افت در تصفیه‌خانه مدنظر می‌باشد.)

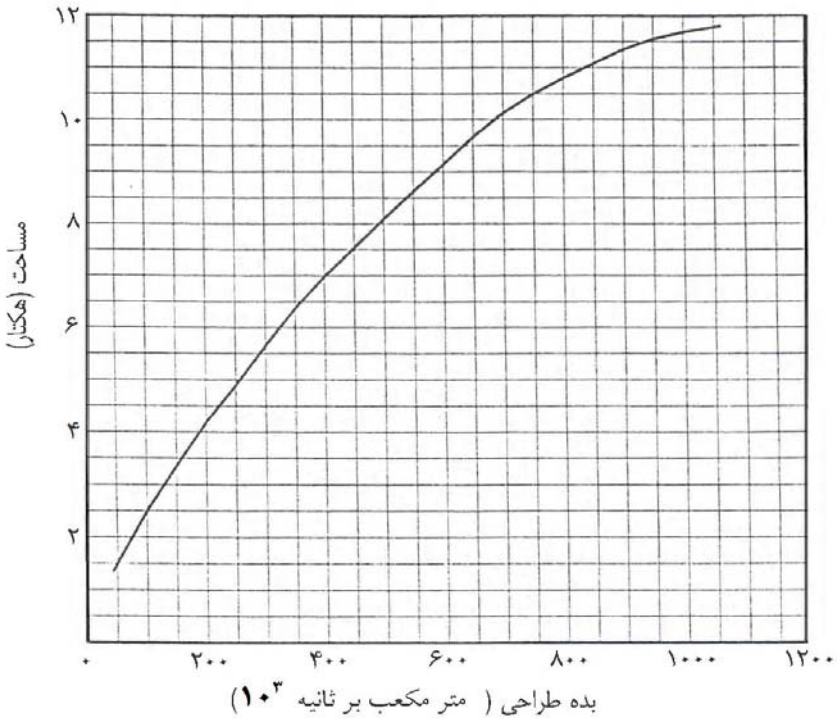
در صورتی که محل تصفیه‌خانه کنار رودخانه باشد، اغلب با مشکلاتی نظیر استغراق، بالا آمدن سطح آب زیر زمینی و ضعف سازه‌ها در شرایط موجود مواجه بوده و بهتر است که مکان‌های مرتفع تر برای این منظور در نظر گرفته شود (شکل (۱۳-۲)).



شکل۱۳-۲- تعیین محل مناسب برای تصفیه‌خانه در مجاور رودخانه

نکته دیگری که در انتخاب محل باید مدنظر قرار گیرد، اطمینان از موجود بودن زمین کافی برای گسترش آتی تصفیه‌خانه می‌باشد. قبل از انتخاب محل تصفیه‌خانه می‌باید سطح مورد نیاز برای تمامی فرایندهای تصفیه محاسبه شده و به سطح مورد نیاز جهت

گسترش آن در آینده اضافه گردد. از نمودار شکل (۱۳-۳) می‌توان برای برآورد اولیه سطح مورد نیاز، بدون در نظرگرفتن واحدهای پیش ته‌نشینی، مخزن آب تمیز و حوضچه‌های نگهداری لجن یا بسترهای لجن خشک‌کن، استفاده کرد.



شکل۱۳-۳- تعیین سطح زمین مورد نیاز برای تصفیه‌خانه نسبت به جمعیت

۱۳-٤- عوامل هیدرولیکی

متغیرهای هیدرولیکی مورد توجه در انتخاب محل مناسب برای تصفیه‌خانه شامل: ۱- خط گرادیان هیدرولیکی، ۲- اندازه لوله‌ها و ۳- افت ارتفاع در طول تصفیه‌خانه می‌باشد.

۱۳-٤-۱- خط گرادیان هیدرولیکی

انتخاب صحیح تراز تصفیه‌خانه و مناسب بودن محل (از نظر خاکبرداری و خاکریزی) روی این متغیر تاثیر می‌گذارد. در بیش‌تر تصفیه‌خانه‌های متعارف، میزان افت در داخل تصفیه‌خانه از حداقل ۴ متر تا حداکثر ۳۰ متر تغییر می‌کند. این بدین معنی است که باید اختلاف ارتفاع در این محدوده بین تراز آب در ورودی به تصفیه‌خانه تا تراز آب در مخزن آب تمیز، وجود داشته باشد. لازم به ذکر است این رقم در مورد تصفیه‌خانه‌های پیشرفته که شامل واحدهایی نظیر واحد جذب سطحی با کربن فعال است، می‌تواند بیش‌تر باشد. طبیعی است که هم زمین‌های مسطح و صاف و هم زمین‌های با شیب تند برای احداث تصفیه‌خانه مناسب نیستند. بلکه به‌طور کلی محل احداث تصفیه‌خانه باید شیبی حدود ۳ تا ۵ درصد داشته باشد.

۱۳-٤-۲- اندازه مجاری ارتباطی

قطر لوله‌های ورودی به تصفیه‌خانه و خروجی از آن تا رسیدن به مخزن معمولا بر اساس بده ماکزیمم روزانه طراحی می‌شود. علاوه بر تعیین قطر بهینه لوله‌ها و درنظرگرفتن مسایل فنی و اقتصادی باید سرعت مناسب جریان در لوله‌های انتقال با توجه به واحدهایی که به آن‌ها وارد و یا از آن‌ها خارج می‌شوند، را هم در نظر گرفت. مثلا سرعت در مجاری خروجی از واحد لخته‌سازی نباید به حدی باشد که لخته‌ها شکسته شوند. در جدول (۱۴-۱) محدوده سرعت‌های مجاز جریان در لوله‌های مختلف آمده است.

جدول ۱۳-۱- محدوده مجاز سرعت در مجاری ورودی و خروجی واحدها

واحد	محدوده سرعت مجاز (متر بر ثانیه)
لوله اصلی ورودی آب خام	۱/۸-۲/۱
لوله خروجی از واحد لخته‌سازی	در مورد صافی‌های تند با لخته‌های آلومی ۰/۵-۰/۳
لوله ورودی به صافی‌ها	در حالت کلی ۱/۱-۰/۷۵ و در حالتی که از پلیمر در ورودی صافی استفاده شده باشد ۱/۴-۱/۱
لوله خروجی از صافی‌ها	۱/۸-۱/۵
لوله آب شستشوی صافی‌ها	۲/۷۵-۲/۴
خط لوله مکش تلمبه	۱/۸-۱/۲
خط لوله رانش تلمبه	۲/۷۵-۲/۱

۱۳-٤-۳- افت ارتفاع

محل در نظر گرفته شده برای احداث تصفیه‌خانه باید ارتفاع لازم برای جبران افت در طول تصفیه‌خانه را داشته باشد. در غیر این صورت استفاده از تلمبه لازم می‌شود. در طراحی تصفیه‌خانه سعی می‌شود حتی الامکان انتخاب محل به‌گونه‌ای باشد که کم‌ترین نیاز به تلمبه جهت برقراری ثقلی جریان بین واحدها وجود داشته باشد.

۱۳-۵- جانمایی واحدهای تصفیه‌خانه

پس از تعیین محل تصفیه‌خانه و انتخاب فرایندهای تصفیه، جانمایی واحدها انجام می‌گیرد که نحوه قرارگیری واحدهای تصفیه‌خانه در زمین انتخاب شده را نشان می‌دهد. تجربه نشان می‌دهد که جانمایی صحیح واحدها می‌تواند: ۱- جذابیت محل تصفیه را افزایش دهد، ۲- نیازهای بهره‌برداری را مرتفع سازد، ۳- هزینه‌های ساخت و ساز و بهره‌برداری را حداقل کند، ۴- انعطاف‌پذیری در تصفیه‌خانه به منظور اصلاح فرایندها و یا گسترش آن در آینده را محقق کرده و ۵- منظره و ساختمان تصفیه‌خانه را با مسایل محیط زیست وفق دهد. با توجه به الگوی جانمایی، غیر از جاهایی که نیاز به تلمبه باشد، آب به‌صورت ثقلی بین واحدها جریان می‌یابد. به‌طور کلی در جانمایی واحدها باید به موارد زیر توجه نمود:

- به حداقل رساندن هزینه‌های مربوط به کارهای عمرانی که برای این منظور طراح باید مطالعات دقیق بر روی توپوگرافی زمین و وجود گسل، شرایط خاک، منابع آب طبیعی، نیازهای خاکبرداری و خاکریزی، زهکشی، حفاظت از تصفیه‌خانه در برابر سیلاب و غیره انجام دهد.

- بارگذاری هیدرولیکی یکسان (یا متناسب با ابعاد) به مخازن و واحدها، که این هدف تنها با جانمایی صحیح واحدها امکان پذیر است. بیش از ۷۰٪ تصفیه‌خانه‌های موجود دارای عدم توازن بار هیدرولیکی در واحدهای خود هستند، که نتیجه طراحی غیر اصولی جانمایی واحدهای آن‌ها می‌باشد.
- متمرکزکردن کنترل و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه؛
- در نظرگرفتن ملاحظات سازه‌ای؛
- توجه به گسترش تصفیه‌خانه در آینده و تهیه نقشه نهایی و لوله‌کشی بین واحدها؛
- در نظر گرفتن شرایط جوی و ملاحظات آب و هوایی در محل تصفیه‌خانه، به‌عنوان مثال استفاده از صافی‌های بدون پوشش در نواحی معتدل مناسب است. در صورتی که در نواحی سرد صافی‌ها حتما باید جهت جلوگیری از یخزدگی پوشیده باشند؛
- در طراحی و جانمایی واحدها نسبت به هم بهتر است از واحدهای مشابه که به‌صورت قرینه نسبت به هم قرار می‌گیرند، استفاده نمود. به عبارتی واحدهای تصفیه‌خانه به‌صورت مدولار طراحی شوند تا امکان ساخت مدول‌ها به‌صورت مجزا در دوره‌های مختلف طرح و با توجه به ظرفیت مورد نیاز در آن دوره میسر باشد؛
- در طراحی مجاری انتقال لجن باید حتی الامکان از زانو و خم کم‌تر استفاده شود. همچنین در صورت استفاده از زاتویی، از زانوهای با شعاع انحنای زیاد استفاده نمود و سامانه به گونه‌ای طراحی گردد که بتوان در مواقع لزوم، داخل لوله‌ها را شستشو داد؛
- از نقاط کور در طراحی سازه‌ها و ارتباط هیدرولیکی بین واحدها پرهیز شود؛
- با توجه به فشار آب ورودی و اندازه سازه‌ها می‌توان از جانمایی عمودی استفاده شود؛
- ساختمان مواد شیمیایی در نزدیک‌ترین محل مصرف منظور شوند؛
- در صورت امکان دو سامانه انتقال در تصفیه‌خانه طراحی شود تا در صورت نیاز به تعمیر و یا شستشو فقط یکی از خطوط از مدار خارج شود.

۱۳-٦- مجاری ارتباطی بین واحدها

لوله‌کشی بین واحدها شامل اتصال مجراها، جعبه‌های جمع‌آوری و تقسیم، شیرآلات و دریچه‌ها و متعلقات بین واحدهای مختلف تصفیه می‌باشد. افت ارتفاع در سیستم لوله کشی و واحدهای تصفیه پس از آنکه واحدها و لوله‌های رابط در نقشه جانمایی مشخص شدند، محاسبه می‌شود. در انتقال جریان از یک واحد تصفیه به واحد دیگر ترتیب کانال‌ها و خطوط لوله و متعلقات آن مهم می‌باشد. قبل از ترسیم نیمرخ هیدرولیکی لازم است افت ارتفاع در هر یک از این اتصالات محاسبه گردد. فاصله اندک بین واحدهای همجوار در جانمایی واحدها می‌تواند طول و در نتیجه ارتفاع مورد نیاز و هزینه سامانه ارتباطی بین واحدها را کاهش دهد. بنابراین قبل از طراحی باید جانمایی واحدهای به نحوی تعیین شود که در مراحل بعد، طراحی مناسب مجاری ارتباطی بین واحدها امکان‌پذیر باشد. کانال‌ها و لوله‌های ارتباط دهنده بهتر است در زیر سطح زمین قرار داشته باشند و در طرح‌های ارایه شده توسط طراح لازم است همه این موارد به طور واضح به همراه واحدهای متصل به آن مشخص شوند. در جانمایی واحدهای لازم است امکان توسعه در آینده و

افزایش ظرفیت تصفیه‌خانه در نظر گرفته شود. همچنین لازم است با در نظرگیری شیر و دریچه در ابتدا و انتهای این مجراها امکان خارج‌کردن آن‌ها از مدار و عبور جریان از خطوط کنارگذر فراهم گردد. در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها از تونل‌های زیرزمینی، که گالری‌های دسترسی نیز نامیده می‌شوند، برای دسترسی به شیرها و دریچه‌ها و کنترل بهینه آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در اغلب موارد جریان از چند واحد تصفیه که به موازات هم قرار دارند، جمع شده و یا بین چندین واحد تقسیم می‌شود که از لوله‌ها و کانال‌های مشابه جهت پخش جریان استفاده می‌شود. توازن هیدرولیکی جریان بین واحدهای مختلف تصفیه با جانمایی صحیح واحدها و آرایش مناسب مجراها ارتباط‌دهنده بین آن‌ها، امکان‌پذیر است. در جانمایی لوله‌ها سه فرض مهم و پایه‌ای وجود دارد که عبارتند از: ۱- سهولت احداث و بهره‌برداری، ۲- سهولت دسترسی به آن‌ها جهت تعمیر و نگهداری و ۳- سهولت در گرفتن اتصال از آن‌ها و یا اضافه نمودن خطوط جدید در آینده. کانال‌ها و مجراها ممکن است بالا و یا زیر سطح زمین باشند. در نقشه جانمایی همه لوله‌ها باید با توجه به واحدهای تصفیه مشخص شده و نیز اتصالاتی که در آینده اضافه می‌شوند، نشان داده شوند. در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها تونل‌های زیرزمینی (که گالری‌های بهره‌برداری نیز نامیده می‌شوند) برای قرارگرفتن لوله‌ها و ابزار کنترلی آن‌ها ساخته می‌شوند.

فصل ۱۴

نیمرخ هیدرولیکی

۱۴-۱-کلیات

نیمرخ هیدرولیکی نمایش تصویری تغییرات سطح آب در طول تصفیه‌خانه است. بررسی تغییرات سطح جریان در تصفیه‌خانه‌های آب عمدتا به‌خاطر اینست که بتوان مشخص نمود در هر نقطه از تصفیه‌خانه سطح آب نسبت به حالت‌های قبل خود چقدر پایین‌تر قرار گرفته و یا نسبت به واحدهای پایین دست چقدر بالاتر می‌باشد. در این فصل ضمن بیان تعاریف و نکات موجود در این زمینه، نحوه محاسبه و ترسیم نیمرخ هیدرولیکی ارایه می‌شود. در طراحی تصفیه‌خانه آب ارتفاع واحدها و مجاری ارتباط‌دهنده به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که گرادیان هیدرولیکی مناسبی که تحت آن جریان به‌صورت ثقلی برقرار می‌شود، ایجاد گردد. بسیاری از تصفیه‌خانه‌های موجود به‌خاطر مشکلاتی که به علت گرادیان هیدرولیکی نامناسب در واحدهای تصفیه‌خانه به‌وجود آمده، عملکرد مناسبی ندارند. بنابراین طراح باید نسبت به تهیه و ترسیم نیمرخ هیدرولیکی مناسب و دقیق اقدامات لازم را انجام دهد.

هدف از ارایه این فصل تکمیل محاسبات هیدرولیکی مربوط به فصول قبل و تعیین افت ارتفاع برای لوله‌ها و مجاری ارتباطی بین آن‌ها می‌باشد که در نهایت منجر به ترسیم نیمرخ هیدرولیکی برای کل تصفیه‌خانه می‌شود.

۱۴-۲- تعیین نیمرخ هیدرولیکی

نیمرخ هیدرولیکی نمایش تصویری تغییرات سطح آب در طول تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد. برای ترسیم نیمرخ هیدرولیکی به یک نقطه کنترل که تراز سطح آب در آن معلوم باشد، نیاز است. این نقطه می‌تواند در ابتدا، انتها و یا در برخی شرایط خاص در وسط تصفیه‌خانه یا یک نقطه با تراز اختیاری باشد. با مشخص شدن این نقطه می‌توان با حرکت به سمت پایین دست یا بالادست و محاسبه افت ارتفاع در هر قسمت به‌صورت عقب رو یا جلورو، تراز سطح آب در هر نقطه را محاسبه و نیمرخ سطح آب را رسم نمود.

افت ارتفاع کل در طول تصفیه‌خانه، برابر تفاوت بین سطح آب در ابتدای ورودی آب خام و تراز حداقل سطح آب در مخزن آب پاک است. اگر به دلیل شیب طبیعی زمین، ارتفاع کل بین ابتدا و انتهای تصفیه‌خانه، کم‌تر از افت ارتفاع کل محاسبه شده باشد، امکان برقراری جریان ثقلی وجود نخواهد داشت. در این شرایط برای جبران کمبود ارتفاع به تلمبه‌خانه نیاز است. پس از اینکه سطح آب توسط تلمبه بالا آمد، مجددا امکان برقراری جریان ثقلی فراهم می‌گردد. در هر حال قرارگرفتن تلمبه‌خانه در بین واحدها (وسط تصفیه‌خانه) توصیه نمی‌شود و همواره سعی در به‌کارگیری آن در ابتدای تصفیه‌خانه قبل از ورودی آب خام است. برقراری تعادل مناسب بین ارتفاع آب خام در ابتدا، افت ارتفاع در طول و ذخیره و تلمبه‌زنی آب پاک در انتهای تصفیه‌خانه نیازمند به کارگیری دقیق اصول و روابط هیدرولیک است.

۱۴-۳- اصول و نکات مهم

اصول اولیه و نکات مهم زیادی وجود دارد که در ترسیم نیمرخ هیدرولیکی باید به آن توجه نمود. برخی از این موارد عبارتند از:

الف- نیمرخ هیدرولیکی باید برای هر دو حالت بده ورودی حداکثر و بده ورودی حداقل محاسبه و ترسیم شود.

ب- نیمرخ هیدرولیکی جریان باید برای تمام مسیرهای اصلی موجود در تصفیه‌خانه ترسیم گردد.

پ- افت ارتفاع کل در طول تصفیه‌خانه برابر مجموع افت ارتفاع در واحدها و اتصالات، متعلقات و مجاری ارتباط‌دهنده است.

ت- افت ارتفاع در طول هر واحد شامل قسمت‌های زیر است:

- افت ارتفاع در سازه ورودی واحد؛
- افت ارتفاع در سازه خروجی واحد؛
- افت ارتفاع در طول واحد؛
- موارد متفرقه نظیر ارتفاع ریزش آزاد در سرریزها.

بیش‌ترین افت ارتفاع در طول واحدها در بده حداکثر لحظه‌ای طراحی وقتی که یک یا چند واحد خارج از مدار است، رخ می‌دهد. با زمان‌بندی مناسب تعمیرات در فصولی که آب مورد نیاز شهروندان کم است، می‌توان از این وضعیت جلوگیری به‌عمل آورد. محدوده مقادیر متداول افت ارتفاع در طول واحدهای مختلف تصفیه‌خانه در جدول (۱۴-۱) ارایه شده است.

ث - افت ارتفاع در طول لوله‌ها، کانال‌های ارتباطی و متعلقات متصل به آن‌ها برابر با مجموع مقادیر زیر است:

- افت ارتفاع در نتیجه ورود جریان؛
- افت ارتفاع در نتیجه خروج جریان؛
- افت ارتفاع در نتیجه جمع‌شدگی و بازشدگی در مقطع کانال؛
- افت ارتفاع در نتیجه وجود اصطکاک؛
- افت ارتفاع در نتیجه زانوها، دریچه‌ها، شیرها، اتصالات و ابزار بده‌سنجی؛
- افت ارتفاع مورد نیاز برای سرریز و سایر سازه‌های هیدرولیکی؛
- ارتفاع مورد نیاز برای ریزش آزاد؛
- ارتفاع مورد نیاز برای توسعه و گسترش واحدها در آینده.

جدول ۱۴-۱- محدوده متداول افت ارتفاع در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه آب [۱۳]

واحد		مقدار تقریبی افت ارتفاع (متر)
مجرای اندازه‌گیری جریان		۱-۰/۲
واحد اختلاط سریع		۱-۰/۵
حوض لخته‌ساز با دیوار پخش		۰/۵-۰/۰۱
واحد ته‌نشینی		۱/۵-۰/۵
واحد صاف‌سازی	با نرخ ثابت	۵-۳
	با نرخ کاهشی	۵-۲
واحد گندزدایی		۲/۵-۰/۲

ج - سرعت در مجاری ارتباطی بین واحدها باید به اندازه کافی زیاد باشد تا مانع از ته‌نشینی مواد معلق همراه با آب در آن‌ها شود. برای این منظور معمولا در طراحی حداقل سرعت برابر ۰/۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در شرایطی که بده ورودی حداقل باشد، سرعت حداقل طراحی ۰/۲ متر بر ثانیه فرض می‌گردد. به علاوه یکی از مواردی که باعث بهتر شدن طراحی می‌شود، در نظرگیری مجاری مجزا بین واحدها است تا امکان تمیز کردن و شستشوی مجراها در شرایط حداقل بده فراهم گردد.

چ – افت‌های اصطکاکی در مجاری تحت فشار با استفاده از رابطه هیزن– ویلیامز (رابطه۳–۱۱) یا رابطه دارسی (رابطه۳–۶) محاسبه می‌شود.

ح – افت ارتفاع موضعی در اتصالات کانال‌ها و مجاری باز و لوله‌های تحت فشار به‌صورت ضریبی از ارتفاع سرعت محاسبه می‌شود. نحوه تعیین ضرایب افت موضعی و محاسبه افت ارتفاع در بخش‌های (۳–۵–۳) و (۳–۶–۲) آمده است.

خ – در کانال‌های باز عمق با تغییر شرایط جریان، تغییر می‌کند. بنابراین با انتخاب ابعاد و شیب کف مناسب امکان برقراری جریان با عمق مورد نظر در آن فراهم می‌شود. همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، جریان در کانال‌های باز می‌تواند به‌صورت‌های یکنواخت و غیر یکنواخت وجود داشته باشد. در این راهنما مبنای محاسبات جریان یکنواخت در کانال‌های باز رابطه مانینگ (رابطه (۳–۱۴)) است و در طراحی کانال‌های ارتباطی بین واحدها جریان به‌صورت یکنواخت و مقطع جریان ثابت فرض می‌شود. هم‌چنین از تغییرات سرعت در سطح مقطع جریان صرفنظر شده و سرعت جریان برابر با سرعت متوسط (V=Q/A) در نظر گرفته می‌شود. جریان غیر یکنواخت در کانال‌هایی که مقطع آن‌ها متغیر است یا در شرایطی که جریان از کنار به درون آن ریزش می‌کند یا از آن خارج می‌شود، به‌وجود می‌آید. جریان متغیر به انواع متغیر تدریجی، متغیر سریع و متغیر مکانی تقسیم‌بندی می‌شود که محاسبات مربوط به هریک در فصل سوم آمده است. در طراحی کانال‌های با جریان غیر یکنواخت و نیز در طراحی تبدیل‌ها معمولا در نظر گیری پله[1] در کف مطلوب است. افت ارتفاع در مقاطع تبدیل با برقراری رابطه انرژی بین مقاطع قبل و بعد از آن محاسبه می‌شود. وجود ریزش آزاد با ارتفاع نسبتا زیاد علاوه بر بالابردن ضریب اطمینان، باعث هوادهی طبیعی می‌شود که حذف عوامل مولد طعم و بو و گواراتر شدن آب را در پی دارد.

د – اکثر وسایلی که برای اندازه‌گیری جریان در تصفیه‌خانه آب بکار می‌رود، باعث ایجاد افت ارتفاع می‌شود و لازم است افت ارتفاع در این تجهیزات (ونتوری، روزنه، پارشال فلوم، سرریز و غیره) محاسبه و در ترسیم نیمرخ هیدرولیکی اعمال شود. نحوه انجام این محاسبات در فصل هفتم آمده است.

ذ– در برخی مراجع توصیه شده است تا برای انعطاف پذیری بیش‌تر لوله‌ها و کانال‌های ارتباطی برای ظرفیت ۱/۵ برابر بده حداکثر طراحی شوند تا امکان افزایش ظرفیت در آینده وجود داشته باشد.

۱۴-۴- اطلاعات اولیه

قبل از اقدام به تهیه نیمرخ هیدرولیکی لازم است نسبت به تهیه و کنترل موارد ذیل اقدام گردد:

۱- مشخصات محل نظیر نقشه‌های توپوگرافی، سطح آب زیرزمینی و غیره

۲- اطلاعات هیدرولیکی و جانمایی واحدها نسبت به هم که شامل موارد زیر می باشد:

الف– بده حداقل، متوسط و حداکثر روزانه مورد نیاز و بده جریان در سال نخست بهره‌برداری

ب– نوع، تعداد و ابعاد واحدها به همراه فرایندهای انتخابی

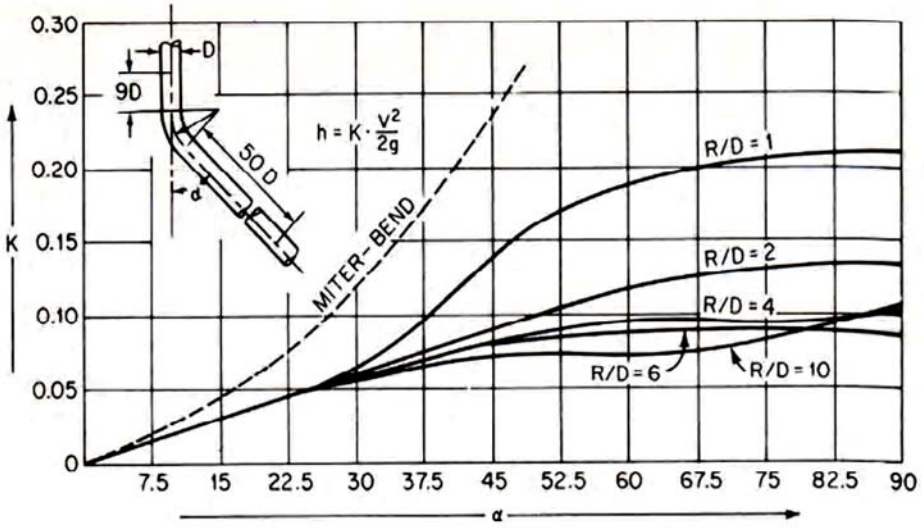
ج– ضرایب مربوط به محاسبه افت ارتفاع در تجهیزات مختلف

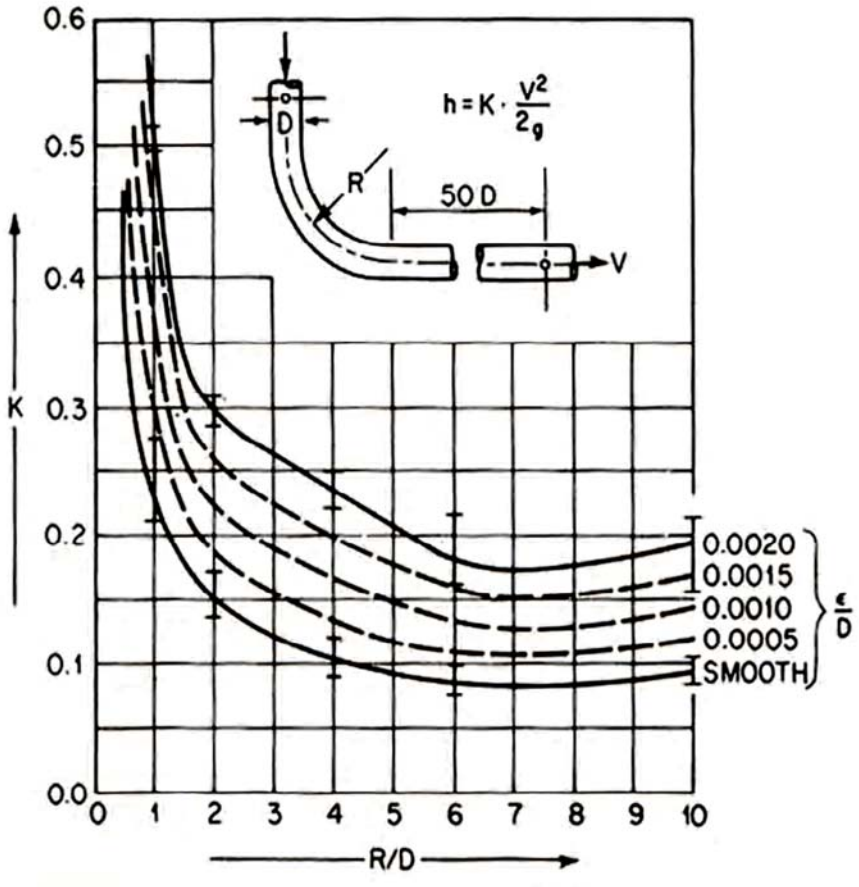
د– شرایط و مشخصات آب خام

1- Drop

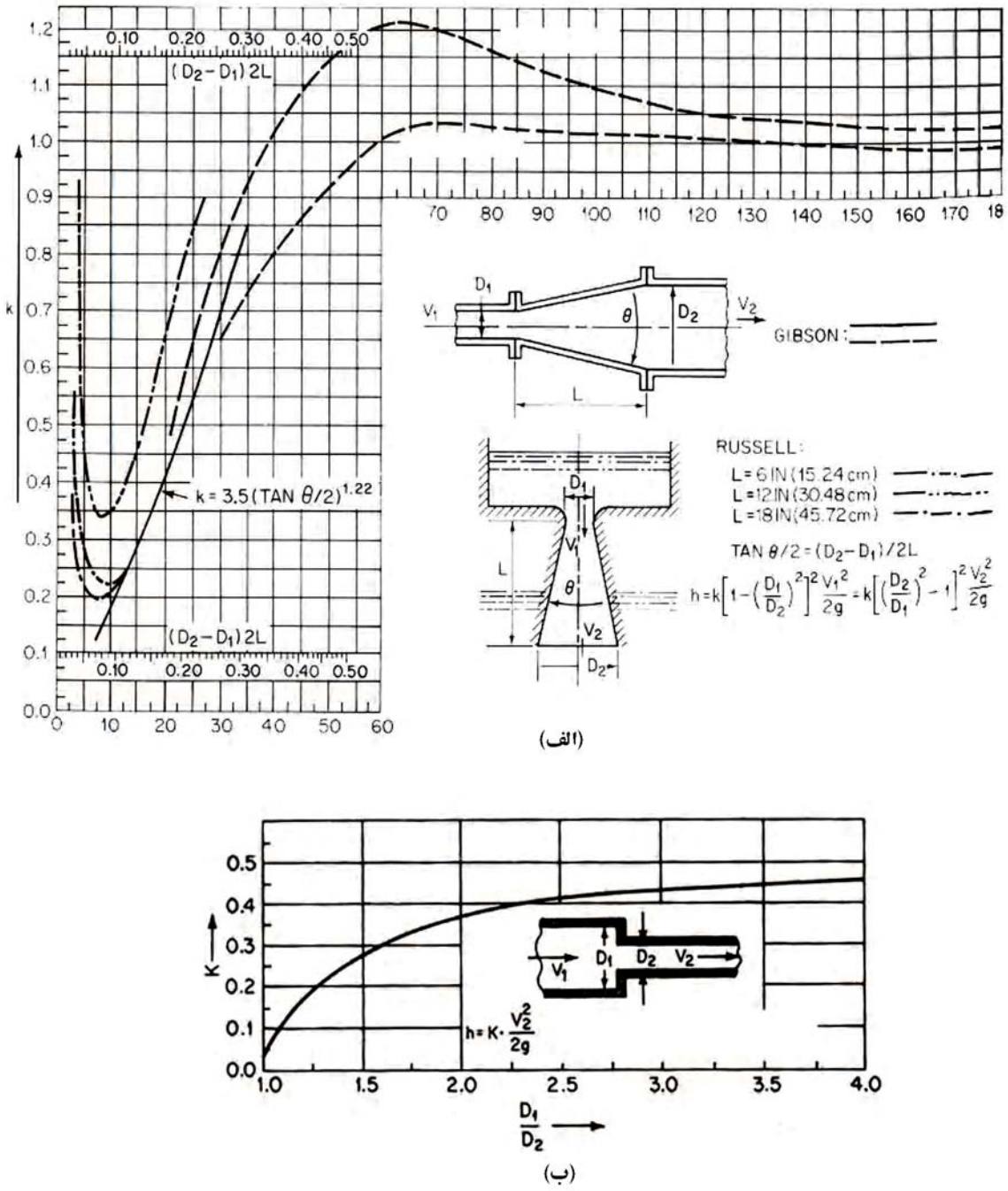
پیوست الف

جداول و نمودارهای تعیین ضریب افت موضعی در مجاری باز و تحت فشار

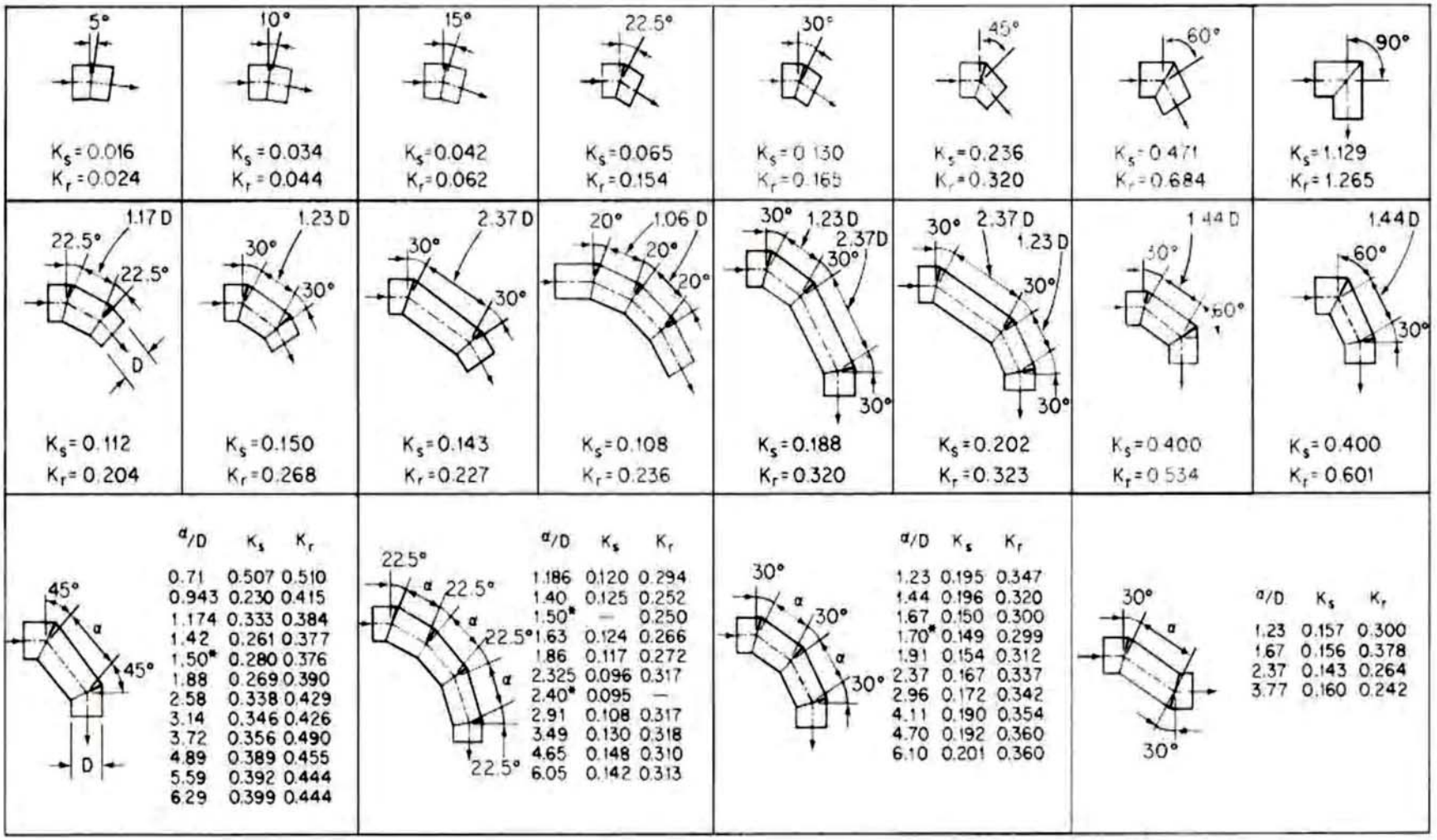




شکل الف-۱- ضریب افت موضعی K برای انحنا در لوله [۸]



شکل الف-۲- ضریب افت موضعی K، (الف) تغییر مقطع تدریجی، (ب) تغییر مقطع ناگهانی [۸]

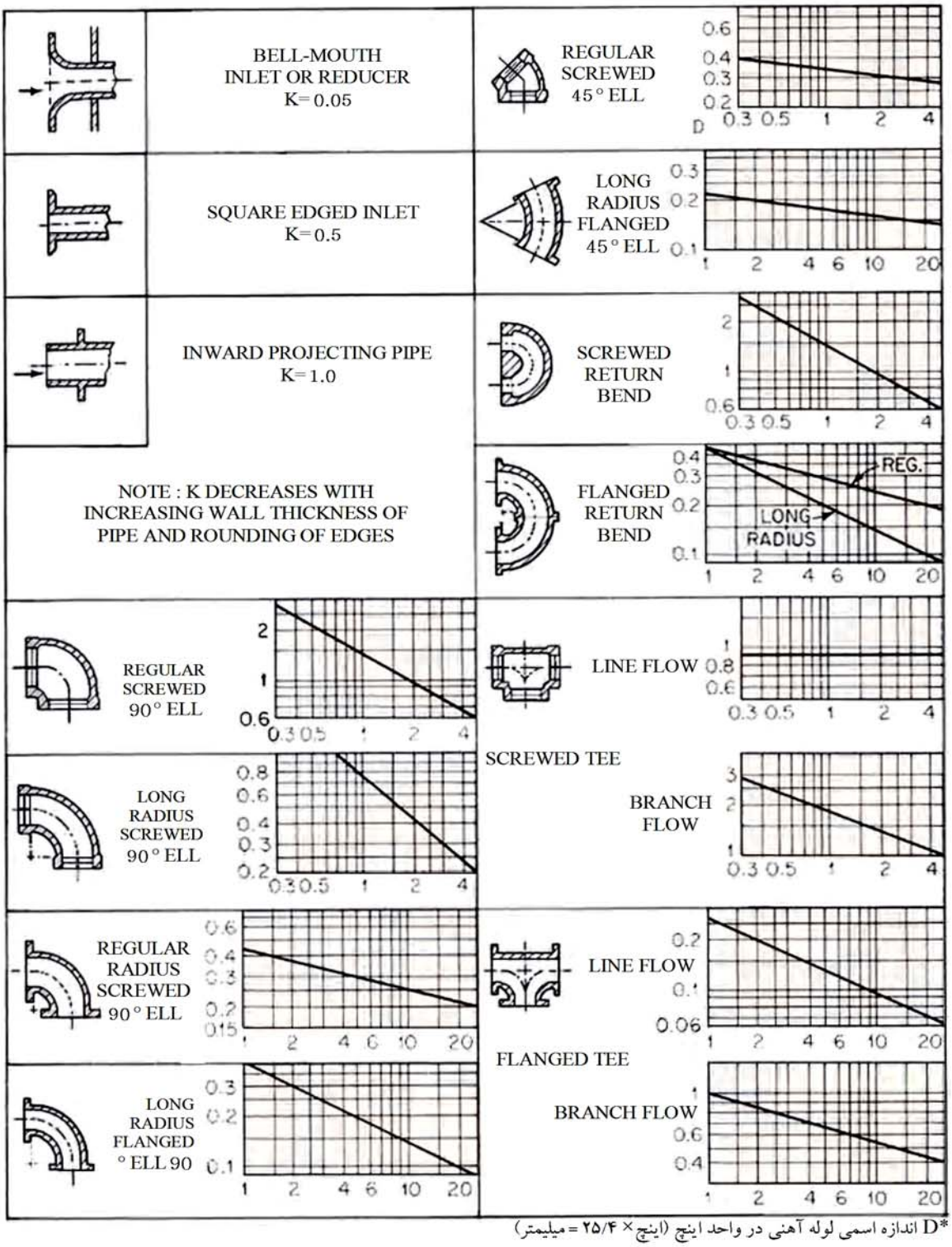


K_S=ضریب مقاومت برای سطح زبر، $(\frac{\varepsilon}{D} \cong 0.0022)$

K_F = ضریب مقاومت برای سطح صاف

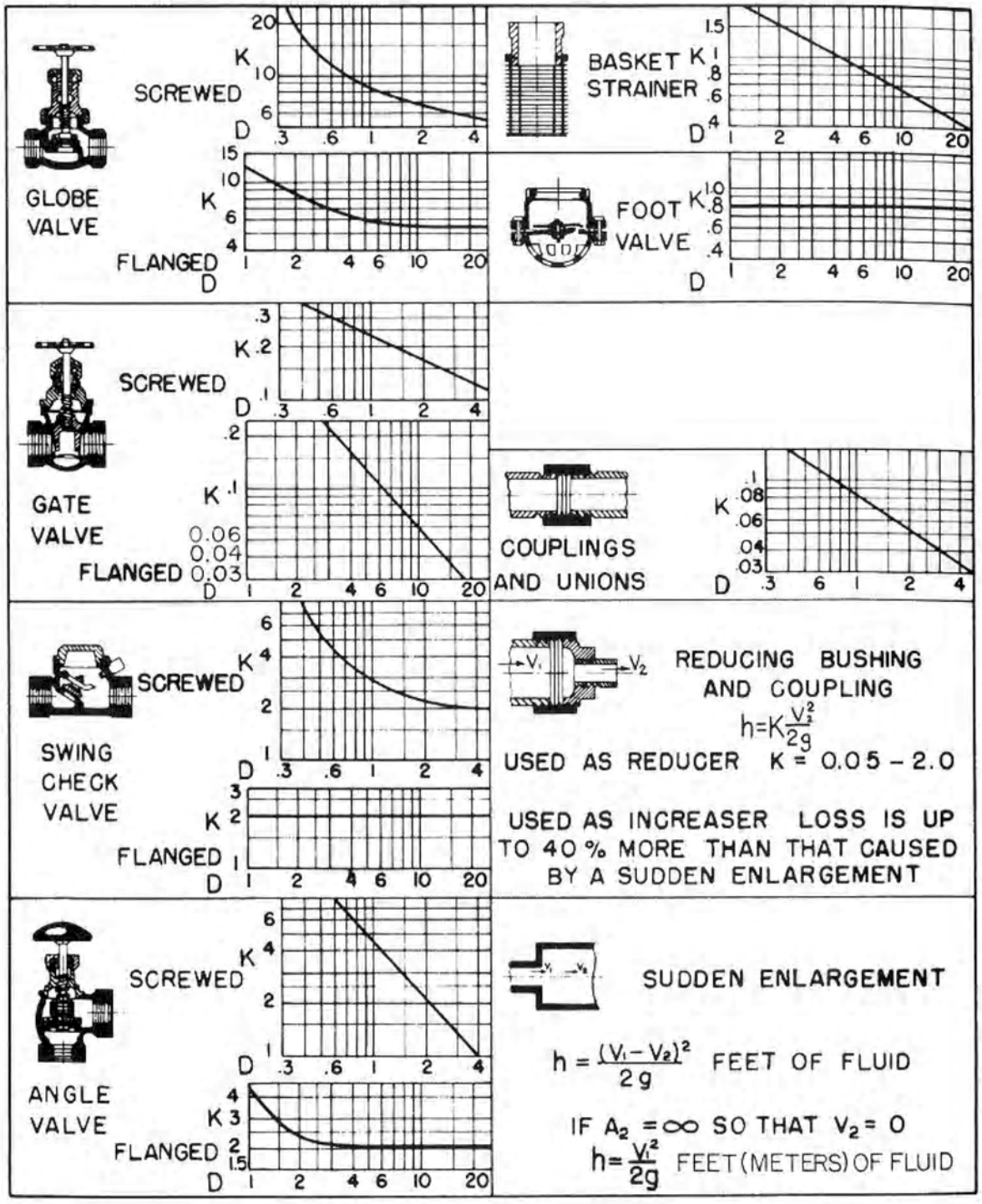
* مقدار بهینه درون یابی شده α

شکل الف- ۳- ضریب افت موضعی K برای حالت‌های مختلف انحنا در لوله [۹]

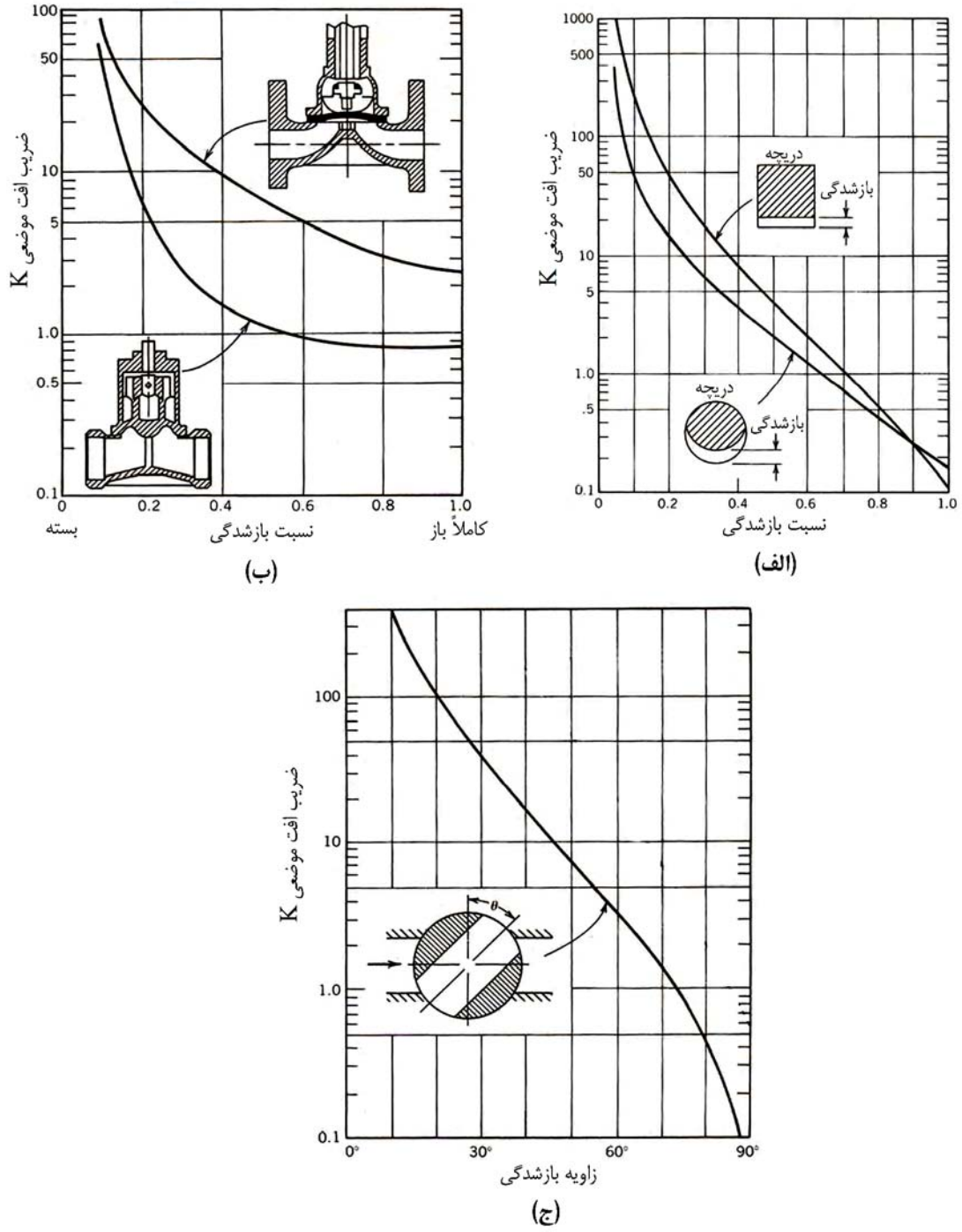


*D اندازه اسمی لوله آهنی در واحد اینچ (اینچ× ۲۵/۴ = میلیمتر)

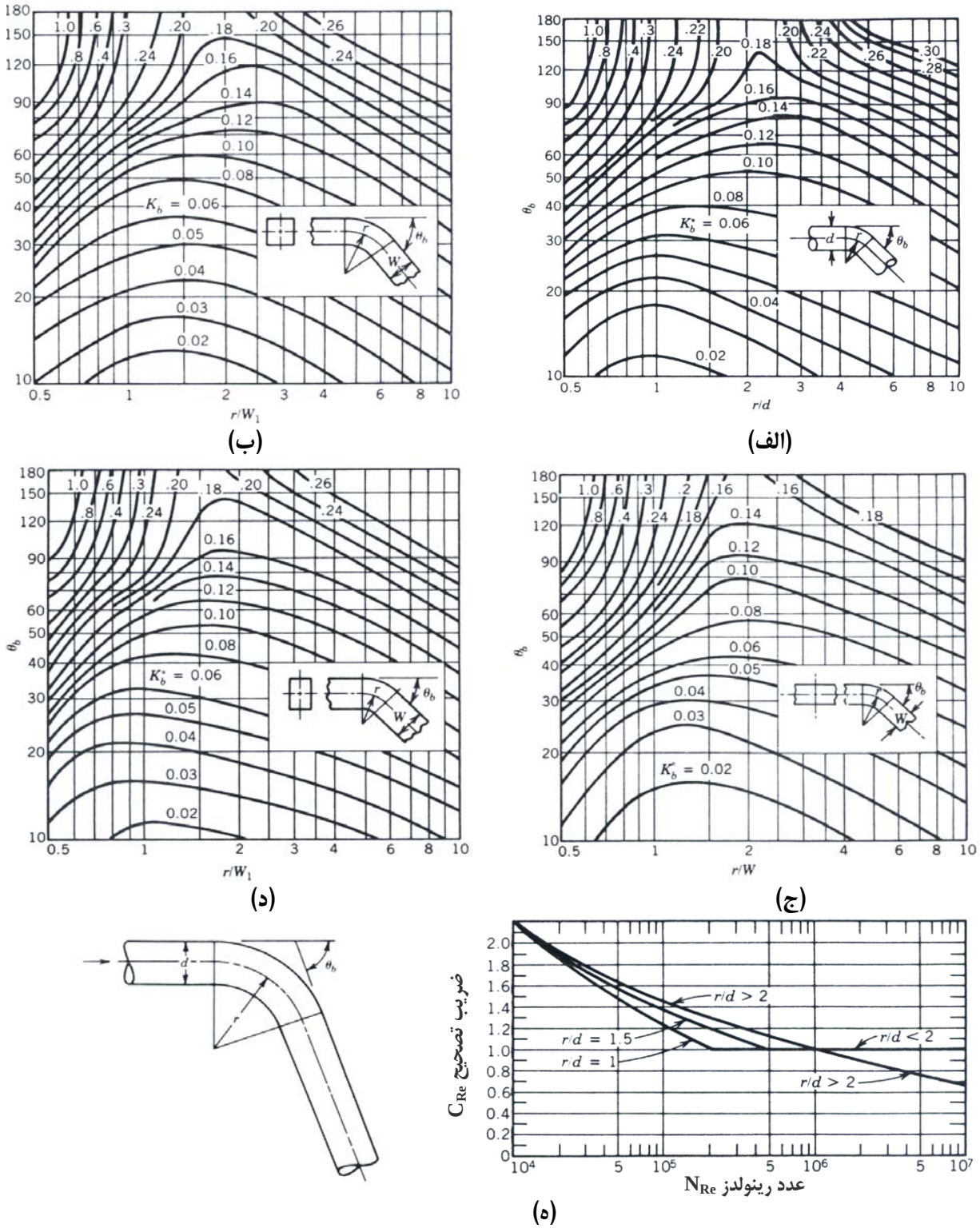
شکل الف-٤- ضریب افت موضعی K در اتصالات لوله (قطر لوله برحسب اینچ) [۸]



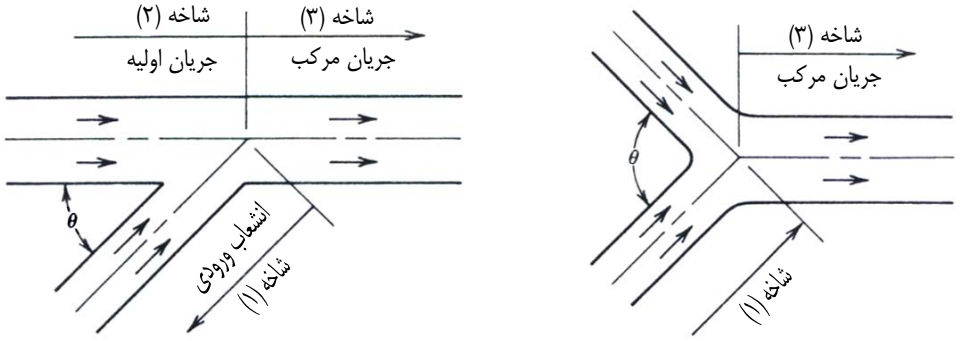
شکل الف-۵- ضریب افت موضعی K در اتصالات لوله و شیرآلات (قطر لوله برحسب اینچ) [۸]



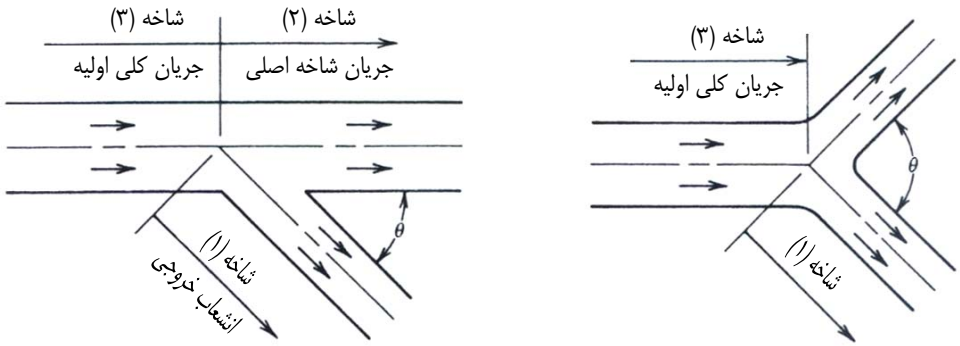
شکل الف-٦- تعیین ضریب افت موضعی انواع متداول شیر با توجه به میزان بازشدگی آن، (الف) شیر کشویی، (ب) شیر دیافراگمی، (ج) شیر توپی [۱۱]



شکل الف-۷- تعیین ضریب افت موضعی $K = C_{Re} \times K_b^*$ انواع زانویی (K)، (الف) زانویی با مقطع دایره ای (ب) زانویی با مقطع مربع، (ج) زانویی با مقطع مستطیل نسبت طول به عرض ۲، (د) زانویی با مقطع مستطیل نسبت طول به عرض ۰/۵، (هـ) تعیین ضریب تصحیح رینولدز [۱۱]



(الف)



(ب)

شکل الف-۸- متغیرهای مورد استفاده در تعیین هیدرولیک جریان انشعابی (روابط مورد نیاز جهت تعیین ضریب افت در پایین همین صفحه و در شکل (الف-۹) آمده است)، (الف) ترکیب جریان، (ب) تقسیم جریان [۱۱]

۱- ترکیب جریان

$$K_{13} = \frac{(V_1^2/2g) + h_1 - (V_3^2/2g) + h_3}{V_3^2/2g}$$

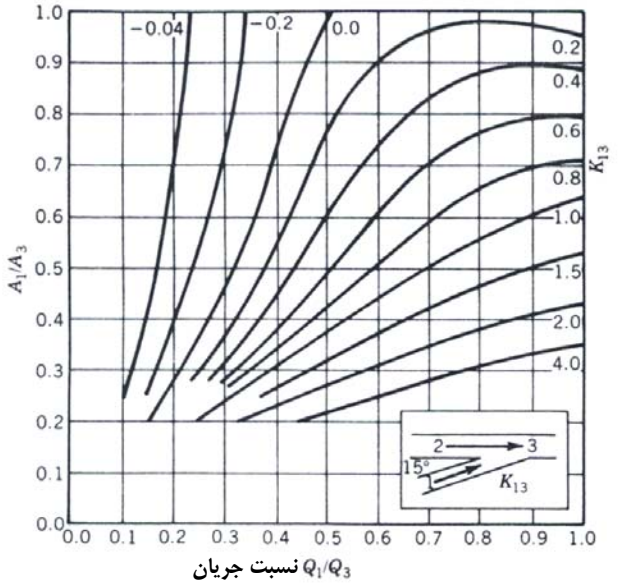
$$K_{23} = \frac{(V_2^2/2g) + h_2 - (V_3^2/2g) + h_3}{V_3^2/2g}$$

۲- تقسیم جریان

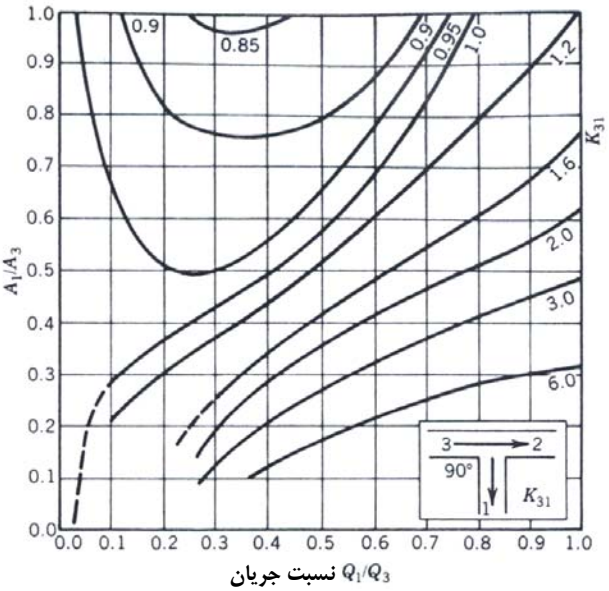
$$K_{31} = \frac{(V_3^2/2g) + h_3 - (V_1^2/2g) + h_1}{V_3^2/2g}$$

$$K_{32} = \frac{(V_3^2/2g) + h_3 - (V_2^2/2g) + h_2}{V_3^2/2g}$$

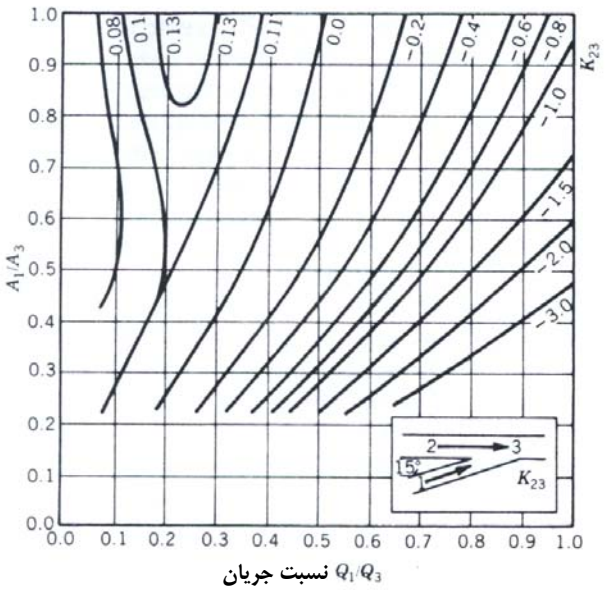
V سرعت جریان و h ارتفاع معادل فشار را نشان داده و کلیه لوله‌ها هم صفحه‌اند ($\Delta Z = 0$).



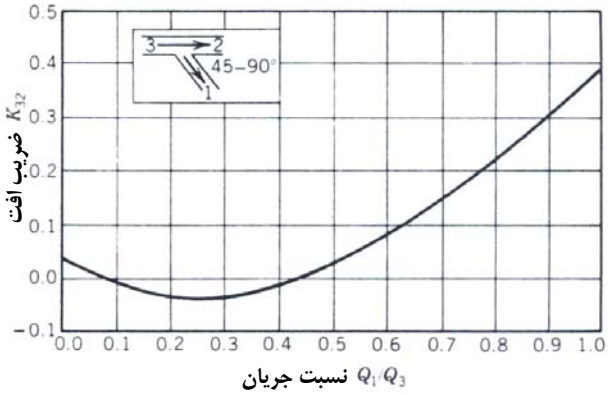
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل الف-۹- ضریب افت در جریان انشعابی، (الف) تقسیم جریان در انشعاب ۹۰° K_{31}، (ب) ترکیب جریان با انشعاب ۱۵° K_{13}، (ج) تقسیم جریان در انشعاب ۴۵° الی ۹۰° K_{32}، (د) ترکیب جریان با انشعاب ۱۵° K_{23} [۱۱]

پیوست ب

مثال طراحی

در این پیوست یک مثال کلی ارایه شده است که عمده واحدهای متداول تصفیه‌خانه آب را که در فصول مختلف این راهنما هیدرولیک جریان در آن‌ها تشریح شده، در بر می‌گیرد. هدف از ارایه این مثال تنها انجام محاسبات هیدرولیکی و تعیین افت ارتفاع بوده و سایر موارد به عنوان مفروضات مساله در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه افت در تک تک واحدها و رسم نیمرخ سطح آب در آن‌ها، افت ارتفاع در مجراهای ارتباطی بین واحدها تعیین و در انتها نیمرخ سطح آب در طول تصفیه‌خانه رسم می‌گردد. لازم به ذکر است ابعاد فرضی برای واحدها ممکن است از نظر فرایندی کاملا صحیح نبوده و یا با استانداردهای ایران مطابقت نداشته باشد.

مثال:

برای یک تصفیه‌خانه آب شرایط زیر مفروض است. مطلوب است تعیین افت ارتفاع در واحدهای مختلف و در نهایت ترسیم نیمرخ هیدرولیکی در کل تصفیه خانه موردنظر.

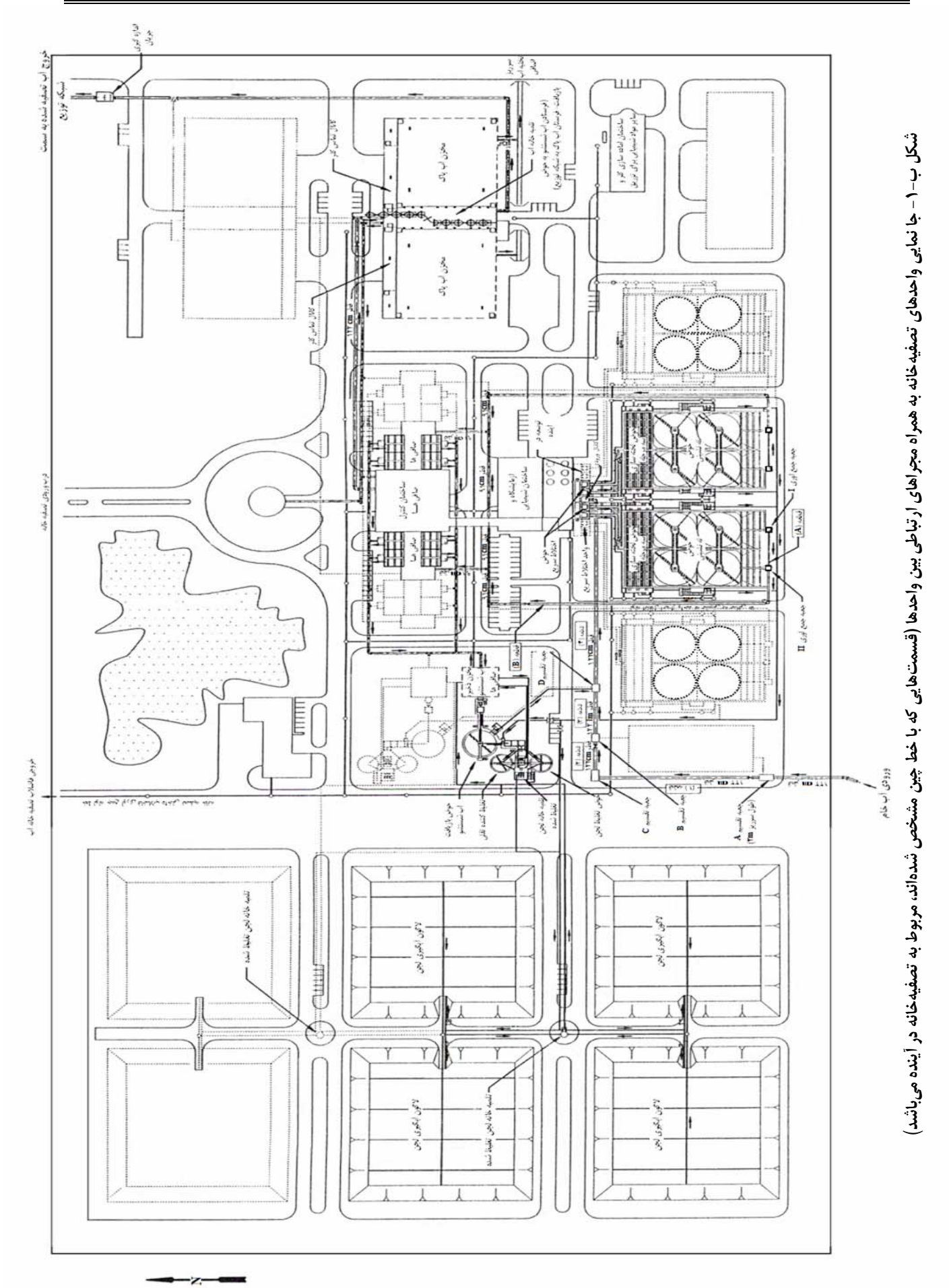
الف- حالت‌های مختلف بده ورودی به این تصفیه‌خانه عبارت است از:

- بده حداکثر ورودی: ۱۱۳۵۰۰ متر مکعب بر روز
- بده متوسط سالیانه: ۵۱۴۰۰ متر مکعب بر روز
- بده حداقل: ۴۵۲۰۰ متر مکعب بر روز

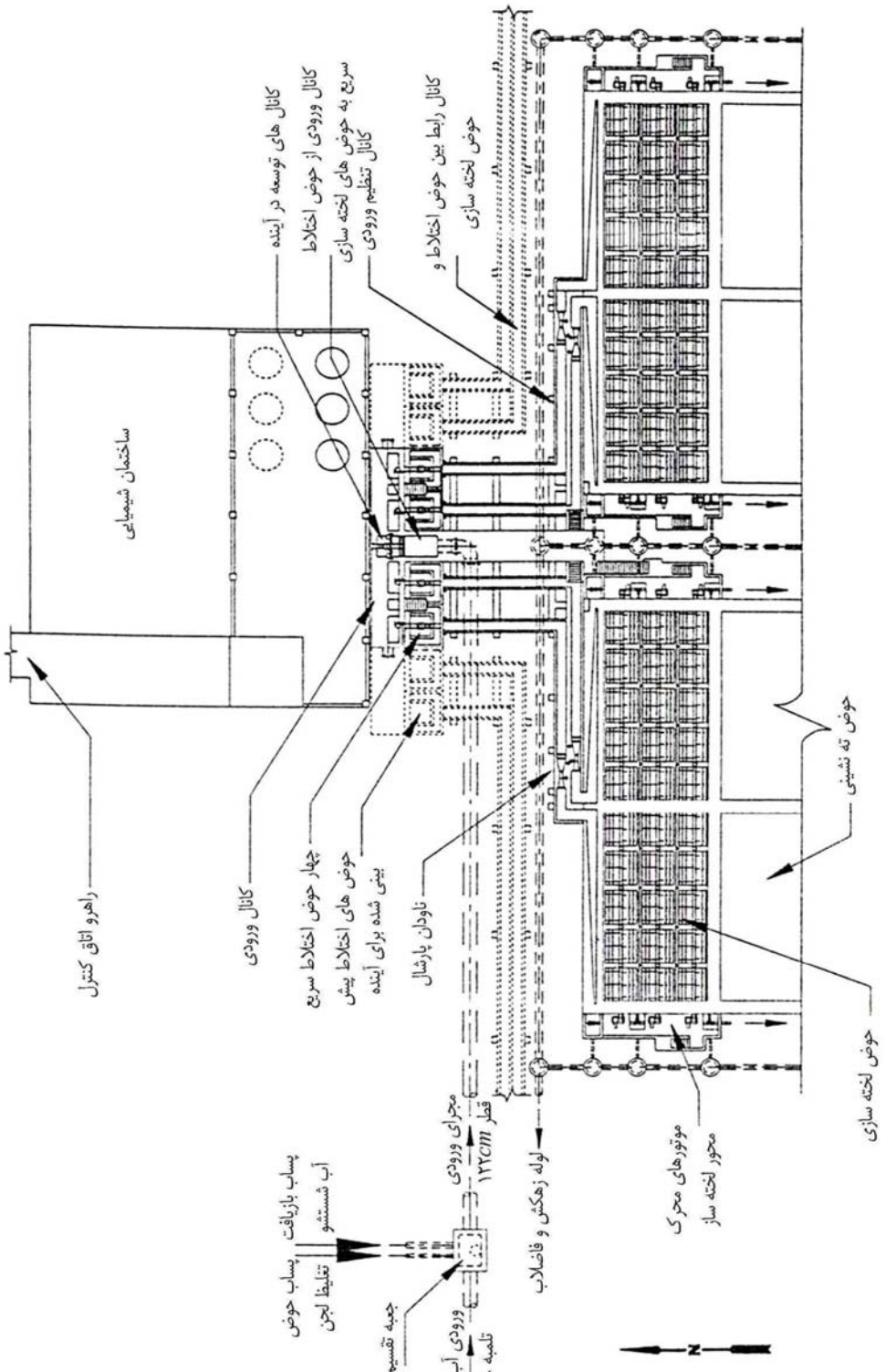
ب- همان‌طور که در شکل (ب-۱) نشان داده شده آب خام توسط یک لوله به قطر ۱/۲۲ متر از سمت جنوب به ابتدای تصفیه‌خانه (جعبه تقسیم A) وارد می شود. مراحل آشغال‌گیری و احتمالا دانه‌گیری در محل آبگیری انجام شده و جزء مراحل طراحی نمی‌باشد. این مثال شامل واحدهای اختلاط و لخته‌سازی، ته‌نشینی، صاف‌سازی و گندزدایی است و مشخصات مربوط به هر واحد در هر قسمت ارایه می شود. جانمایی واحدهای مختلف و نحوه ارتباط آن‌ها به همراه ابعاد مجراهای ارتباطی در شکل (ب-۱) نشان داده شده است. آب تصفیه شده در داخل دو مخزن آب پاک در انتهای شمالی تصفیه‌خانه ذخیره و از این نقطه، پس از تزریق کلر و فلوئور، توسط تلمبه به داخل شبکه توزیع فرستاده می‌شود.

۱- واحد اختلاط و لخته‌سازی

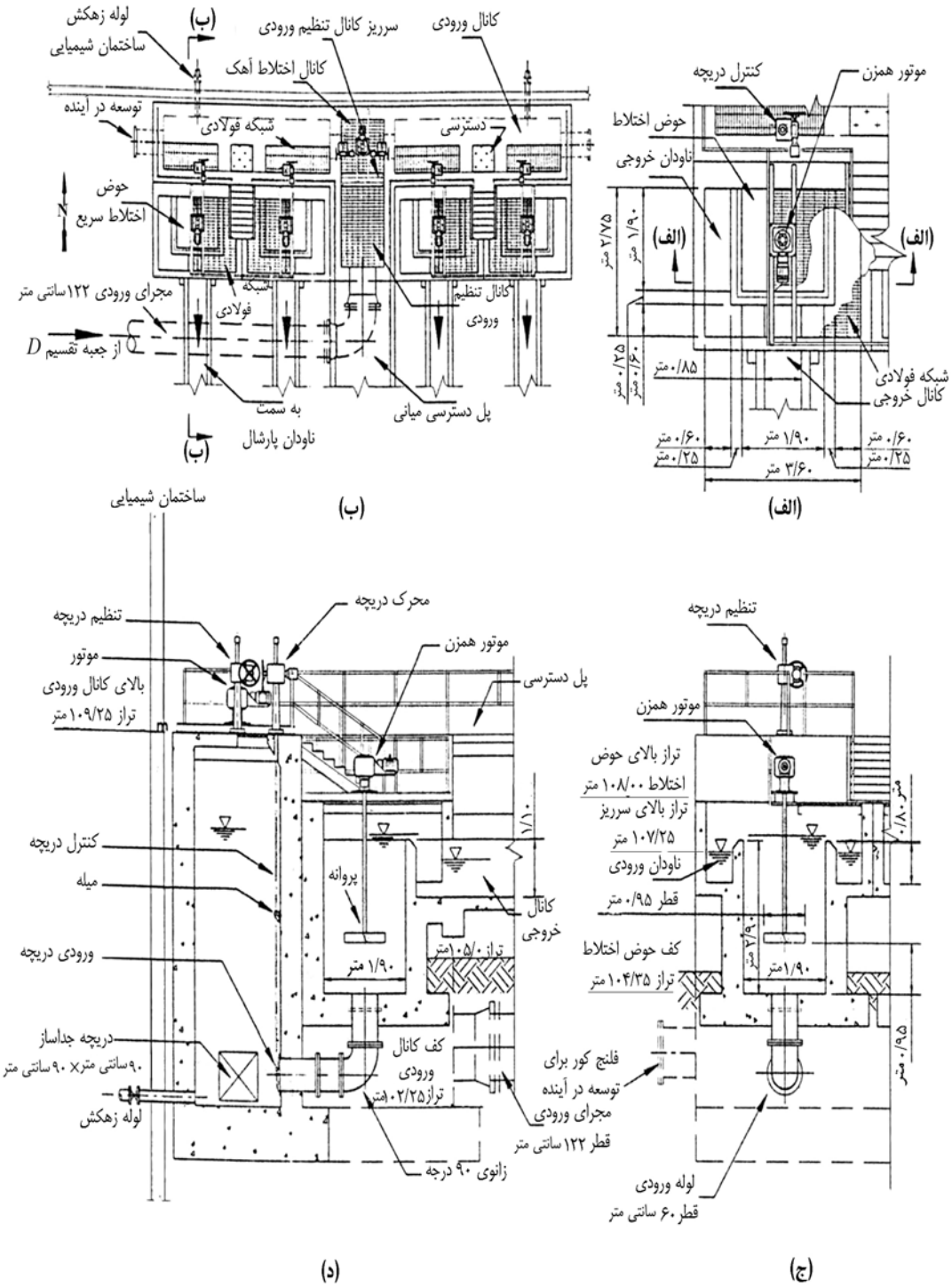
قسمت‌های مختلف واحد اختلاط و لخته‌سازی در شکل (ب-۲) نشان داده شده است. همچنین در جدول (ب-۱) اطلاعات کلی مورد نیاز آمده است. لوله ای به قطر ۱/۲۲ متر آب خام را از جعبه تقسیم D به داخل کانال تنظیم انتقال می‌دهد. پس از آن آب خام از روی سرریز به داخل کانال اختلاط آهک که در آن آب آهک برای تنظیم pH اضافه می‌شود، ریزش می‌کند. زمان ماند کوتاهی (در حدود دو دقیقه برای بده حداکثر لحظه‌ای) برای حل شدن آب آهک در داخل کانال اختلاط آهک و مجرای قبل از حوض‌های اختلاط سریع وجود خواهد داشت. آبی که pH آن تنظیم شده به دو کانال قبل از حوض اختلاط در دو طرف، ریزش می‌کند. از هر کانال ورودی، دو مدول مجزا برای انعقاد و لخته‌سازی و پس از آن ته‌نشینی در نظر گرفته شده است. هر قسمت شامل موارد ذیل می‌باشد:



شکل ب-۱- جا نمایی واحدهای تصفیه‌خانه به همراه مجراهای ارتباطی بین واحدها (قسمت‌هایی که با خط چین مشخص شده‌اند، مربوط به تصفیه‌خانه در آینده می‌باشد)



شکل ب-۲- جانمایی واحد اختلاط سریع و واحد لخته‌سازی



شکل ب-۳- جزییات مربوط به طراحی حوض اختلاط سریع، (الف) تصویر افقی، (ب) جانمایی کلی، (ج) برش الف- الف ، (د) برش ب- ب

الف- همزن‌های اختلاط سریع

چهار حوض اختلاط به‌صورت موازی باهم بهره‌برداری می‌شوند و ۲۵ درصد از بده حداکثر لحظه‌ای به هر یک از این واحدها وارد می‌گردد. در هر حوض از همزن‌های مکانیکی با جریان شعاعی استفاده می‌شود. مواد منعقدکننده در حوض‌های اختلاط سریع به آب

اضافه می‌شود و کمک منعقد کننده‌ها نیز در ناودان پارشال قبل از حوض‌های لخته‌سازی به آن افزوده می‌شود. بده طراحی هر حوض ۰/۳۲۸ مترمکعب بر ثانیه (یک چهارم بده حداکثر لحظه‌ای کل) می‌باشد. حوض اختلاط دارای هندسه مربعی با ابعاد ۱/۹ متر × ۱/۹ متر و عمق ۲/۹ متر می‌باشد. در شکل (ب-۳) جزییات واحد اختلاط سریع نشان داده شده است.

جدول ب-۱- اطلاعات و شرایط اولیه برای واحد اختلاط و لخته‌سازی

بده طراحی	حداکثر لحظه‌ای	۱۱۳۵۰۰ مترمکعب بر روز
	متوسط	۵۷۹۰۰ مترمکعب بر روز
حوض اختلاط سریع	تعداد واحدها	۴ عدد
	تعداد مرحله‌ها	۱ مرحله
	زمان ماند	۲۰-۳۰ ثانیه
	گرادیان سرعت	۹۵۰/s
حوض لخته‌سازی	تعداد حوض‌ها	۴
	تعداد مرحله‌ها	۳
	زمان ماند	۳۰ دقیقه (هر مرحله ۱۰ دقیقه)
	گرادیان سرعت	مرحله اول: ۶۰/s
		مرحله دوم: ۳۰/s
		مرحله سوم: ۱۵/s
		متوسط سه مرحله: ۳۵/s
دمای آب خام ورودی	دمای حداقل	۵ درجه سانتی‌گراد
	دمای حداکثر	۲۸ درجه سانتی‌گراد

ب- حوض‌های لخته‌سازی

همان‌طور که در شکل (ب-۲) مشخص شده، در این تصفیه‌خانه چهار حوض لخته ساز موازی تعبیه شده است و ۲۵ درصد جریان به هر یک وارد می‌شود. آب انعقاد یافته به‌طور یکنواخت در طول کانال توزیع و از روی سرریز به داخل حوض‌های لخته‌سازی وارد می‌گردد. هر حوض از سه قسمت تشکیل شده که با دو صفحه مانع میانی به ضخامت ۵ سانتی‌متر از هم جدا شده‌اند و دیوار پخش انتهایی که تعدادی روزنه در آن تعبیه شده، آن را به حوض ته‌نشینی وصل می‌کند. بده طراحی هر حوض ۰/۳۲۸ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. شکل هندسی حوض لخته‌سازی، مستطیلی با ابعاد ۱۸/۴ متر × ۱۰ متر و عمق ۳/۲۷ متر می‌باشد. ابعاد قسمت‌های مختلف حوض لخته‌سازی در شکل (ب-۵- الف) مشخص شده است. بر اساس این فرضیات نیمرخ هیدرولیکی سطح آب در طول واحد انعقاد و واحد لخته‌سازی به‌دست می‌آید.

حل)

ابتدا محاسبات مربوط به واحد انعقاد انجام می‌گیرد:

گام ۱- طراحی سازه ورودی

سازه ورودی واحد اختلاط سریع از حوضچه تنظیم، کانال آهک زنی و کانال ورودی تشکیل شده است. حوضچه تنظیم آب خام را از مجرایی به قطر ۱۲۲ سانتی‌متر از روزنه‌ای که نزدیک به کف آن است، دریافت می‌کند. آب در طول حوضچه تنظیم به سمت بالا جریان پیدا می‌کند و از روی سرریزی به طول ۲ متر به داخل کانال آهک زنی ریزش می‌کند. کانال آهک‌زنی مربع شکل و ابعاد آن ۲ متر × ۲ متر است. سپس آب از دو دریچه کشویی جداساز که نزدیک به کف کانال تعبیه شده به کانال ورودی در هر طرف جریان می یابد. ابعاد دریچه انتخابی برای این منظور ۰/۹ متر × ۰/۹ متر است. حوض‌های اختلاط سریع به وسیله کانال ورودی با مقطع مستطیلی به عرض ۲ متر که در دو طرف کانال آهک زنی قرار دارد و آب از طریق دریچه‌های کشویی به آن وارد می‌شود، تغذیه میگردد. هر حوض اختلاط سریع از طریق لوله‌ای به قطر ۶۰ سانتی‌متر به کانال ورودی متصل می‌شود (شکل ب-۳- ج). این لوله آب را از کف حوض اختلاط و در نقطه‌ای در راستای زیر محور همزن، به درون آن تخلیه می‌کند. در انتهای هر لوله یک دریچه کشویی قرار دارد تا در شرایطی که به هر دلیلی لازم است حوض اختلاط از مدار خارج شود، بتوان جریان ورودی به آن را قطع نمود.

گام ۲- طراحی سازه خروجی

سازه خروجی حوض‌های اختلاط سریع از سرریزهایی به عرض ۱/۹۰ متر، که در سه طرف هر حوض تعبیه شده، تشکیل می‌شود. آب از دو سرریز در کنار و یک سرریز در مقابل به داخل کانال جمع‌آوری آب منعقد شده ریزش می‌کند. این کانال در انتها به ناودان پارشال متصل می‌شود و عرض آن با توجه به عرض مورد نیاز برای ناودان پارشال، انتخاب می‌شود. جانمایی قسمت‌های مختلف واحد اختلاط سریع به همراه جزییات سازه ورودی و خروجی در شکل‌های (ب-۲) و (ب-۳) نشان داده شده است.

گام ۳- محاسبه افت ارتفاع

در این گام افت ارتفاع از حوضچه تنظیم ورودی تا قبل از ناودان پارشال محاسبه می‌گردد. افت ارتفاع در طول مجرا به قطر ۱۲۲ سانتی‌متر که قبل از کانال تنظیم قرار دارد، در قسمت‌های بعدی محاسبه می‌گردد.

الف- محاسبه افت ارتفاع در سازه ورودی

افت ارتفاع در سازه ورودی از قسمت‌های ریزش آزاد از کانال تنظیم به داخل کانال آهک زنی، افت در دریچه جداساز، افت در طول کانال ورودی و افت در لوله ورودی به حوض اختلاط سریع تشکیل شده است. تراز سطح آب در کانال تنظیم بوسیله ارتفاع سرریز کنترل می‌شود. در رسم نیمرخ سطح آب در سازه ورودی، در نظر گیری حداقل ۰/۶ متر برای ریزش آزاد سرریز، مناسب است. تراز سطح آب در داخل حوض اختلاط سریع به وسیله سازه خروجی کنترل می‌گردد. برای محاسبه افت ارتفاع در قسمت‌های مختلف سازه ورودی به صورت زیر عمل می‌شود:

۱- محاسبه ارتفاع آب روی سرریز کانال تنظیم (رابطه ۶-۱):

$$Q = \frac{2}{3} C_d L' \sqrt{2gH^3} \quad \text{و} \quad (C_d = 0.6 \quad \text{و} \quad L' = L\,m \text{ و } Q = 113500\ \frac{m^3}{day} = 1.314\ m^3/s$$

$$\Rightarrow H=(\frac{1.314\times\frac{3}{2}}{0.6\times2\times\sqrt{2\times9.81}})^{\frac{2}{3}}\Rightarrow H=0.52m$$

ارتفاع ریزش باید بیش‌تر از مقدار به‌دست آمده برای عمق تیغه آب روی سرریز در نظر گرفته شود. علت این امر وجود تلاطم و آشفتگی جریان روی سرریز و اطمینان از عدم به‌وجود آمدن پس زدگی جریان است. در این مثال با توجه به وجود ارتفاع کافی در محل احداث تصفیه‌خانه، ارتفاع ریزش آزاد به جای ۰/۵۲ متر، ۰/۹۵ متر در نظر گرفته می‌شود. معمولا در صورت محدودیت در وجود ارتفاع، این ارتفاع ریزش می‌تواند تا حداقل ۱/۲۵H نیز منظور شود.

۲- محاسبه افت ارتفاع دریچه با استفاده از رابطه روزنه (رابطه ۷-۱) برای حالتی که نصف بده حداکثر لحظه‌ای که از هر دریچه عبور می‌کند:

$$Q=\frac{1.314}{2}=0.657\ \ m^3/s\ \rightarrow\ \ h_l=\frac{Q^2}{2gC_o^2A^2}=\frac{1}{2\times9.81}\times\frac{0.657^2}{0.6^2\times0.9^4}=0.10$$

۳- محاسبه افت ارتفاع اصطکاکی در طول کانال ورودی

کانال ورودی ۲ متر عرض دارد و عمق متوسط آب در آن ۵ متر نگه داشته می‌شود. در کانال جریان متغیر مکانی برقرار است. حداکثر بده ورودی به هر کانال ۰/۶۵۷ متر مکعب بر ثانیه است که پس از رسیدن به ورودی اولین حوض اختلاط نصف آن (۰/۳۲۸ متر مکعب بر ثانیه) تخلیه می‌شود. سرعت حداکثر در هر کانال ۰/۰۷ متر بر ثانیه ($V=\frac{Q}{A}=\frac{0.657}{2\times5}=0.07$) است که در طول کانال به تدریج کاهش پیدا می‌کند. افت ارتفاع در طول کانال کوچک است و در محاسبات از آن صرفنظر می‌گردد.

۴- محاسبه افت ارتفاع در لوله ورودی به حوض اختلاط سریع

قطر لوله ورودی ۶۰ سانتی‌متر و بده عبوری از آن در شرایط حداکثر لحظه‌ای ۰/۳۲۸ مترمکعب بر ثانیه است. بنابراین:

$$\text{سرعت در لوله}=\frac{4\times0.328}{\pi\times0.60^2}=1.16\ \ m/s$$

به علت کوتاه بودن طول لوله افت‌های اصطکاکی در آن ناچیز است و می‌توان از آن صرفنظر کرد. افت ارتفاع موضعی در این لوله از سه جزء افت ارتفاع در ورودی (K=۰/۵)، افت ارتفاع در زانویی (K=۰/۳) و افت ارتفاع در خروجی لوله (K=۱/۰) تشکیل شده است. با استفاده از رابطه (۴-۱۲) داریم:

$$h_m=(0.5+0.3+1.0)\times\frac{1.16^2}{2\times9.81}=0.12m$$

۵- محاسبه افت ارتفاع کل در سازه ورودی

افت ارتفاع کل در سازه ورودی برابر مجموع ارتفاع‌های افت در هر یک از اجزای آن می‌باشد:

افت ارتفاع کل در سازه ورودی = ۰/۹۵+۰/۱۰+۰/۱۲ = ۱/۱۷ متر

ب- محاسبه افت ارتفاع در سازه خروجی

افت ارتفاع در سازه خروجی از قسمت‌های ریزش آزاد از سرریز به داخل ناودان، افت در خروجی ناودان و افت در کانال خروجی تشکیل شده است. تراز سطح آب در کانال خروجی بوسیله ناودان پارشالی که در ابتدای واحد لخته‌سازی در نظر گرفته شده، کنترل می‌گردد. برای محاسبه افت ارتفاع در قسمت‌های مختلف سازه خروجی به صورت زیر عمل می‌شود.

۱- محاسبه ارتفاع روی سرریز

همانند آنچه برای محاسبه ارتفاع روی سرریز در کانال تنظیم انجام شد، در این قسمت نیز ارتفاع روی سرریز را از رابطه (۵-۱) محاسبه می‌کنیم.

$$\left.\begin{array}{l} L = L' = 3 \times 1.9 = 5.7\,m \\ Q = 0.328\,m^3/s \end{array}\right\} \Rightarrow H = 0.10\,m$$

جهت اطمینان ارتفاع ریزش آزاد ۰/۳۳ متر در نظر گرفته می‌شود، اگرچه می تواند ۰/۱۳ متر نیز فرض شود (۱/۲۵H).

۲- طراحی کانال خروجی

برای محاسبه عمق در کانال خروجی از عمق موجود در ابتدای ناودان پارشال شروع می‌کنیم. عمق مورد نیاز در ورودی ناودان پارشال را ۰/۷۱ متر در نظر بگیرید. با فرض وجود جریان نرمال در این کانال، با استفاده از رابطه مانینگ (رابطه ۳-۱۰)، داریم:

$$\left.\begin{array}{l} n = 0.013 \\ d = 0.71\,m \\ B = 0.85\,m \end{array}\right. \Rightarrow V = \frac{0.328}{0.85 \times 0.71} = 0.54\,m/s \quad \Rightarrow \quad 0.54 = \frac{1}{0.013} \times 0.266^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} \Rightarrow S = 0.0003$$

$$R = \frac{0.85 \times 0.71}{2 \times 0.71 + 0.85} = 0.266\,m$$

۳- محاسبه عمق آب در ابتدای ناودان خروجی (انتهای بالادست ناودان خروجی)

تراز سطح آب در انتهای ناودان خروجی با تراز سطح آب در کانال خروجی یکسان است. با توجه به اینکه کف ناودان خروجی به اندازه ۰/۳ متر از کف کانال خروجی بالاتر است، عمق آب در انتهای ناودان خروجی، y_2، برابر است با:

$$y_2 = 0.71 - 0.30 = 0.41\ \ m$$

هم‌چنین با توجه به شکل‌های (ب-۲) و (ب-۳) داریم:

نصف عرض کانال خروجی - نصف طول سرریز خروجی = طول هر ناودان خروجی $= \left(\frac{۵/۷ - ۰/۸۵}{۲}\right) =$ ۲/۴۳ متر

بده کل در انتهای پایین دست هر ناودان خروجی برابر است با:

بده کل ورودی به حوض اختلاط = بده کل در انتهای هر ناودان $= ۰/۳۲۸ \times \frac{۲/۴۳}{۵/۷} =$ ۰/۱۴۰ متر مکعب بر ثانیه

عرض ناودان خروجی متر $b = 0.6$ است. با جای‌گذاری مقادیر به‌دست آمده برای y_2، Q و b در رابطه (۳-۲۸) عمق آب در ابتدای ناودان خروجی، y_1، محاسبه می‌گردد:

$$y_1 = \sqrt{y_2^2 + \frac{2Q^2}{gb^2 y_2}} \rightarrow y_1 = \sqrt{0.41^2 + \frac{2\times 0.140^2}{9.81\times 0.6^2 \times 0.41}} = 0.44\,\text{m}$$

به منظور در نظر گیری اثر افت‌های اصطکاکی، که در به‌دست آوردن رابطه (۳-۲۸) از آن صرفنظر شده است، اغتشاشات ناشی از ریزش آب از سرریز به داخل ناودان و چرخش ۹۰ درجه‌ای جریان در ناودان، ۳۰ درصد به عمق به‌دست آمده افزوده می‌شود:

عمق آب در انتهای بالادست ناودان خروجی = ۰/۴۴×۱/۳۰ = ۰/۵۷ متر

بنابراین افت ارتفاع در طول ناودان خروجی برابر است با:

۰/۵۷ − ۰/۴۱ = ۰/۱۶ متر

مسایلی از قبیل افت ارتفاع زانویی ۹۰ درجه انتهای کانال خروجی که به لخته‌ساز منتهی می‌شود، افت ارتفاع ناشی از اغتشاشات موجود در سطح آب و افت ارتفاع در اثر تغییر جهت جریان، باعث می‌شود سطح آب در کانال بالا بیاید. بنابراین در این مثال عمق آب در کانال ۰/۷۱ متر فرض می‌شود.

۴- محاسبه افت ارتفاع در کانال خروجی

طول کل کانال خروجی از انتهای ناودان خروجی تا ورودی ناودان پارشال به‌طور تقریبی ۲۵ متر است. با فرض وجود جریان یکنواخت در این کانال، افت ارتفاع در آن برابر است با:

افت ارتفاع کل در کانال خروجی $= L \times S_0 = 25 \times 0.0003 = 0.01$ m

۵- محاسبه افت ارتفاع کل در سازه خروجی که برابر مجموع افت ارتفاع‌های محاسبه شده در مراحل قبل است:

افت ارتفاع کل سازه خروجی = ۰/۳۳ + ۰/۱۶ + ۰/۰۱ = ۰/۵۰ متر

گام٤- ترسیم نیمرخ هیدرولیکی

برای رسم نیمرخ هیدرولیکی جریان در طول واحد انعقاد با فرض اینکه تراز سطح آب در انتهای این واحد برابر ۱۰۶/۸۵ متر است، تراز سطح آب در قسمت‌های مختلف واحد انعقاد به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

تراز سطح آب در انتهای کانال خروجی = ۱۰۶/۸۵ متر

تراز سطح آب در حوض اختلاط سریع = ۱۰۶/۸۵ متر + (افت ارتفاع کل در طول سازه خروجی) = ۱۰۶/۸۵+۰/۵۰=۱۰۷/۳۵ متر

ارتفاع بالای سرریز خروجی = ۱۰۷/۳۵ متر − (ارتفاع روی سرریز خروجی) = ۱۰۷/۳۵−۰/۱۰=۱۰۷/۲۵ متر

ارتفاع کف حوض اختلاط سریع = ۱۰۷/۲۵ متر − (عمق آب) = ۱۰۷/۲۵−۲/۹=۱۰۴/۳۵ متر

تراز سطح آب در کانال تنظیم = ۱۰۷/۳۵ متر + (افت ارتفاع کل در سازه ورودی) = ۱۰۷/۳۵+۱/۱۷=۱۰۸/۵۲ متر

ارتفاع بالای سرریز کانال تنظیم = ۱۰۸/۵۲ متر − (ارتفاع روی سرریز) = ۱۰۸/۵۲−۰/۵۲=۱۰۸/۰۰ متر

اگر به لحاظ شرایط خاص موجود در این مثال ارتفاع سرریز کانال تنظیم ۵/۷۵ متر فرض شود، خواهیم داشت:

ارتفاع کف کانال تنظیم = ۱۰۸/۰۰ متر − (ارتفاع در نظر گرفته شده برای سرریز) = ۱۰۸/۰۰−۵/۷۵=۱۰۲/۲۵ متر

نتایج محاسبه بالا در شکل (ب–۴) به‌صورت نیمرخ هیدرولیکی سطح آب ترسیم شده است.

واحد لخته‌سازی

گام ۱- طراحی سازه ورودی

در این مثال سازه ورودی حوض لخته‌سازی از ناودان پارشال (جهت اندازه‌گیری بده جریان)، کانال ورودی، کانال توزیع کننده ورودی و سرریز توزیع‌کننده ورودی تشکیل شده است. آب به‌وسیله کانال خروجی از واحد انعقاد به عرض ۰/۸۵ متر به ناودان پارشال می‌رسد. هیدرولیک ناودان پارشال در فصل هفتم ارایه شده و بر این اساس داده‌های فرضی اختلاف تراز سطح آب بالادست و پایین دست ناودان پارشال برابر با ۰/۲۵ متر در نظرگرفته می‌شود. آب پس از اندازه‌گیری در ناودان پارشال با ۹۰ درجه چرخش به داخل کانال توزیع ورودی ریزش می‌کند. همان‌طور که در شکل (ب–۵- الف) دیده می‌شود، طراحی کانال ورودی به نحوی است که در امتداد جریان عرض کانال کاهش پیدا می‌کند و کانال هم پیزمان با کاهش بده، باریک می‌شود. نحوه طراحی هیدرولیکی این نوع کانال‌ها در قسمت سیستم‌های توزیع جریان (قسمت ۶–۴) آمده است. در دیوار کانال پنج سرریز تعبیه شده که آب از روی آن به داخل قسمت اول حوض لخته‌سازی ریزش می‌کند.

گام ۲- طراحی سازه خروجی

سازه خروجی هر حوض لخته‌سازی به‌صورت یک صفحه مانع که در آن روزنه هایی برای توزیع آب به واحد بعدی (حوض ته‌نشینی) وجود دارد، ساخته می‌شود. آب با عبور از این روزنه‌ها به حوض ته‌نشینی وارد می‌شود. طراحی این دیوار باید به شکلی باشد که سرعت عبور جریان از روزنه‌های به اندازه کافی کم باشد تا لخته‌های تشکیل شده در واحد لخته‌سازی شکسته نشوند.

گام ۳- محاسبه افت ارتفاع

افت ارتفاع در واحد لخته ساز شامل افت ارتفاع در سازه ورودی، افت ارتفاع در حوض لخته‌سازی و افت ارتفاع در سازه خروجی است.

الف- افت در سازه ورودی

افت ارتفاع در سازه ورودی از دو قسمت افت در ناودان پارشال و افت در سازه پایین دست ناودان پارشال تشکیل شده است. افت ارتفاع در سازه پایین دست به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

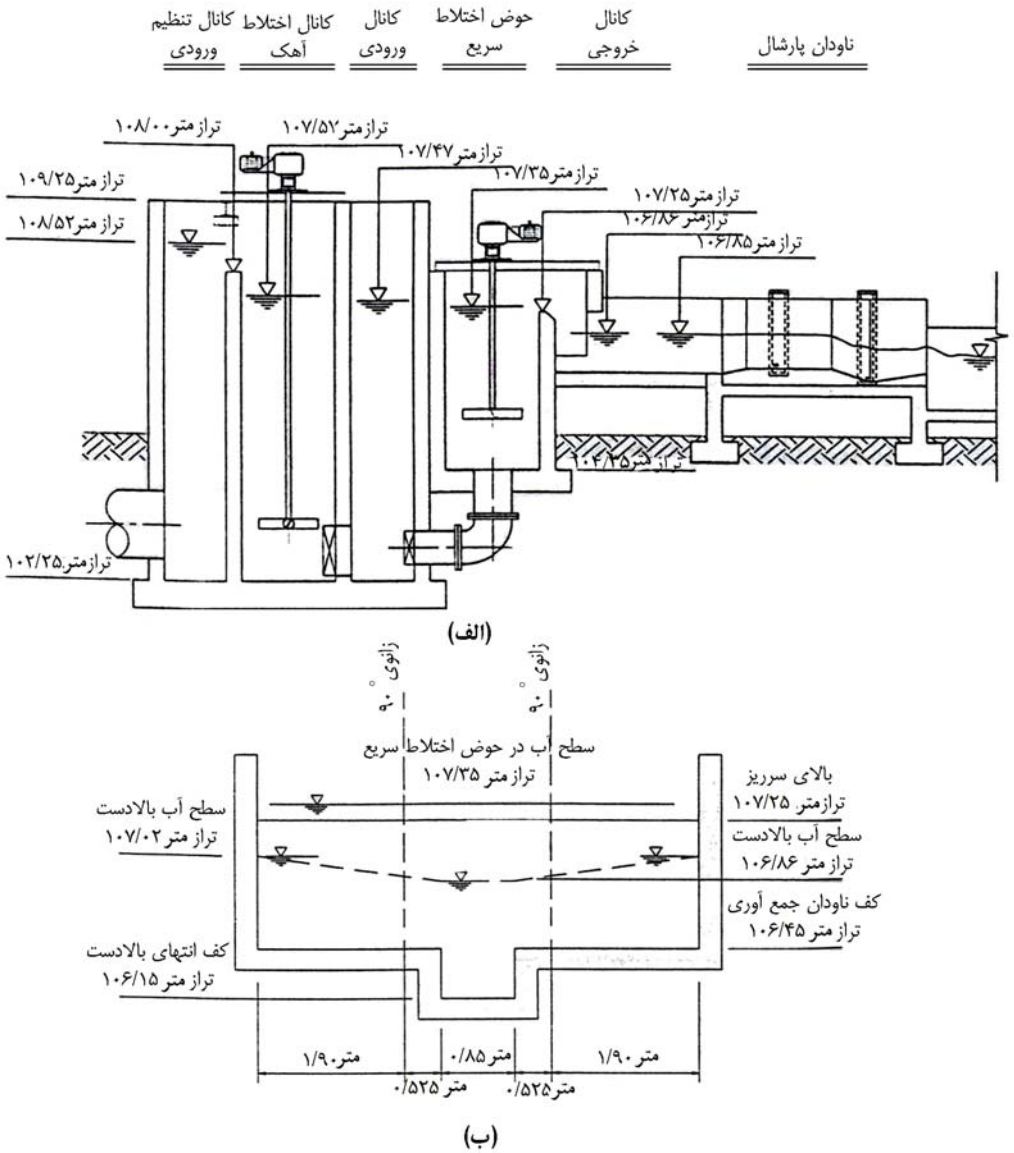
۱- محاسبه افت ارتفاع در کانال ورودی

عمق آب در کانال ورودی تقریبا برابر ۰/۹ متر (عمق خروجی ناودان پارشال فلوم) فرض می شود. عرض کانال در قسمت اول کانال ورودی (قبل از چرخش ۹۰ درجه جهت جریان) مشابه با انتهای ناودان پارشال و برابر ۰/۸۵ متر است. در قسمت دوم کانال ورودی، بعد از چرخش ۹۰ درجه جهت جریان، پهنای این کانال به ۱ متر افزایش پیدا می‌نماید. این عرض به عنوان عرض ورودی کانال توزیع نیز در نظر گرفته خواهد شد. با استفاده از عرض متوسط ۰/۹ متر و طول ۴ متر برای کانال ورودی و محاسبه شیب کف

کانال ورودی (از رابطه مانینگ) مقدار افت اصطکاکی در طول کانال ورودی $h_L = 0.00002$ متر به‌دست می‌آید که از آن صرفنظر می‌گردد. سرعت متوسط در بده حداکثر لحظه‌ای در این کانال برابر است با:

$$V_{avg} = \frac{0.328}{0.9 \times 0.9} = 0.40 \ \ m^3/s$$

این مقدار اندکی کم‌تر از دامنه مجاز سرعت (۰/۴۵ تا ۰/۹ متر بر ثانیه) برای انتقال آب انعقاد یافته از واحد اختلاط به واحد لخته‌سازی است. از افت ارتفاع موضعی در اثر وجود زانویی ۹۰ درجه در این کانال نیز به دلیل کوچک بودن صرفنظر می‌گردد.



شکل ب-٤- نیمرخ هیدرولیکی در واحد اختلاط سریع، (الف) نیمرخ هیدرولیکی از کانال تنظیم ورودی تا ابتدای پارشال ناودان، (ب) نیمرخ هیدرولیکی در مقطع طولی کانال خروجی

۲- محاسبه افت ارتفاع در کانال توزیع

عرض کانال توزیع در جهت جریان با کاهش بده، کم می‌شود (شکل ب-۵). در این مثال عرض ابتدایی کانال ۱ متر و عرض در انتهای آن ۰/۲ متر در نظر گرفته شده است. اگر مشابه با مرحله قبل افت ارتفاع در این کانال محاسبه شود مقدار $h_L = 0.0004$ متر به‌دست می‌آید که قابل صرفنظر کردن است.

۳- محاسبه افت ارتفاع روی سرریز ورودی

برای ورودی آب به حوض‌های لخته‌سازی ۵ سرریز که طول هر یک $L = 3.5$ متر است، در نظر گرفته شده است. فاصله بین هر دو سرریز ۰/۲۲۵ متر می‌باشد. ارتفاع روی سرریز را با استفاده از رابطه (۶-۱) و با فرض $C_d = 0.6$ و با در نظر گیری عبور یک پنجم جریان از هریک از آن‌ها محاسبه می‌کنیم:

$$Q = \frac{0.328}{5} = 0.656 \ m^3/s \quad \rightarrow 0.656 = \frac{2}{3} \times 0.6 \times 3.5 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times H^3} \quad \rightarrow H = 0.5 \ m$$

در این قسمت نیز برای اطمینان از ریزش آزاد، ارتفاع ریزش برای هر سرریز ۰/۲۳ متر در نظر گرفته می‌شود.

۴- محاسبه افت ارتفاع کل در سازه ورودی

افت ارتفاع کل در سازه ورودی از جمع افت ارتفاع در اجزای آن به‌دست می‌آید:

متر ۰/۰۰ = افت ارتفاع در طول کانال ورودی

متر ۰/۰۰ = افت ارتفاع در طول کانال توزیع

متر ۰/۲۳ = ارتفاع ریزش در سرریز ورودی

متر ۰/۲۳ = جمع کل

ب- افت ارتفاع در حوض لخته‌سازی

افت ارتفاع در حوض لخته‌سازی و در طول دیوارهای جداساز میانی آن با توجه به کوچک بودن سرعت جریان ناچیز است و از آن صرفنظر می‌گردد.

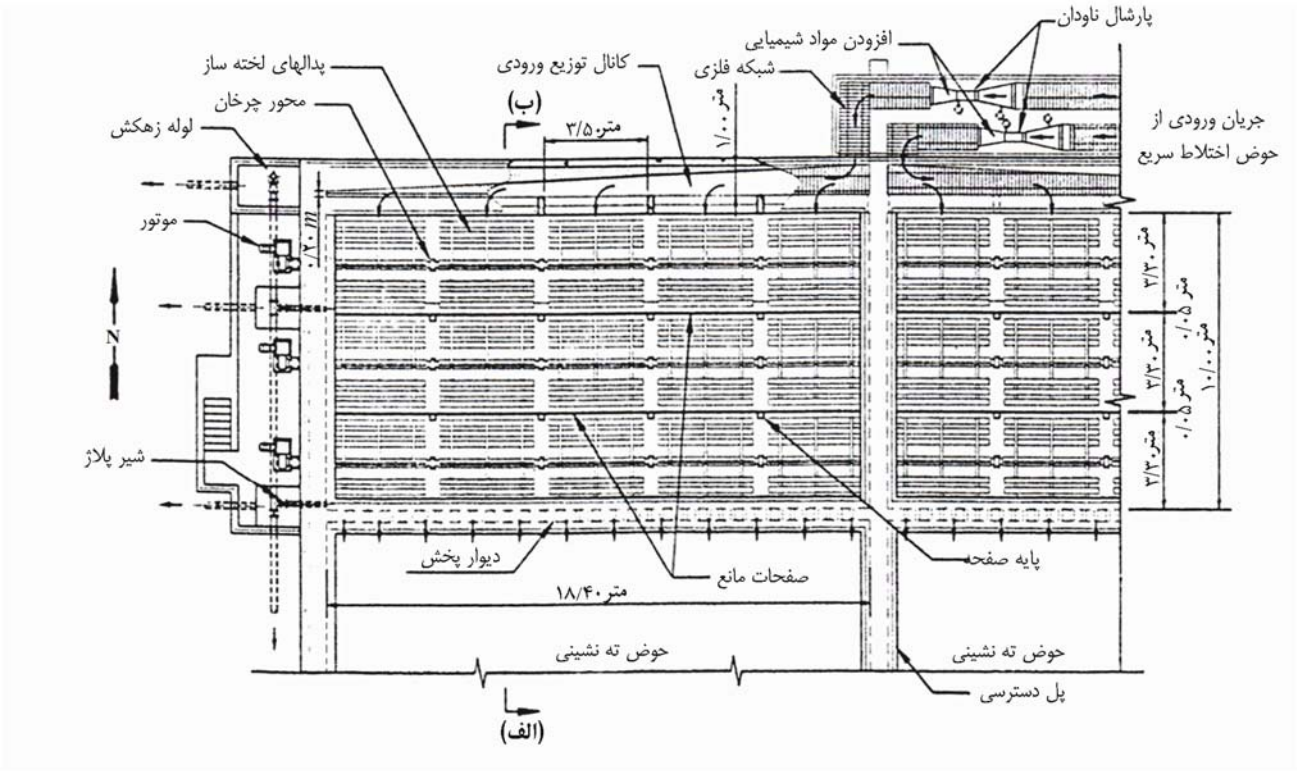
ج- افت ارتفاع در سازه خروجی

افت ارتفاع در سازه خروجی در اثر عبور جریان از روزنه‌های دیوار پخش واقع در بین حوض لخته‌سازی و حوض ته‌نشینی به‌وجود می‌آید. نکته مهم در طراحی این دیوار این است که جریان را به‌صورت یکنواخت در مقطع حوض ته‌نشینی به شکلی توزیع نماید که انرژی جنبشی آب به‌طور کامل مستهلک گردد. برای رسیدن به این منظور در نظرگیری موارد ذیل در طراحی این دیوار لازم می‌باشد:

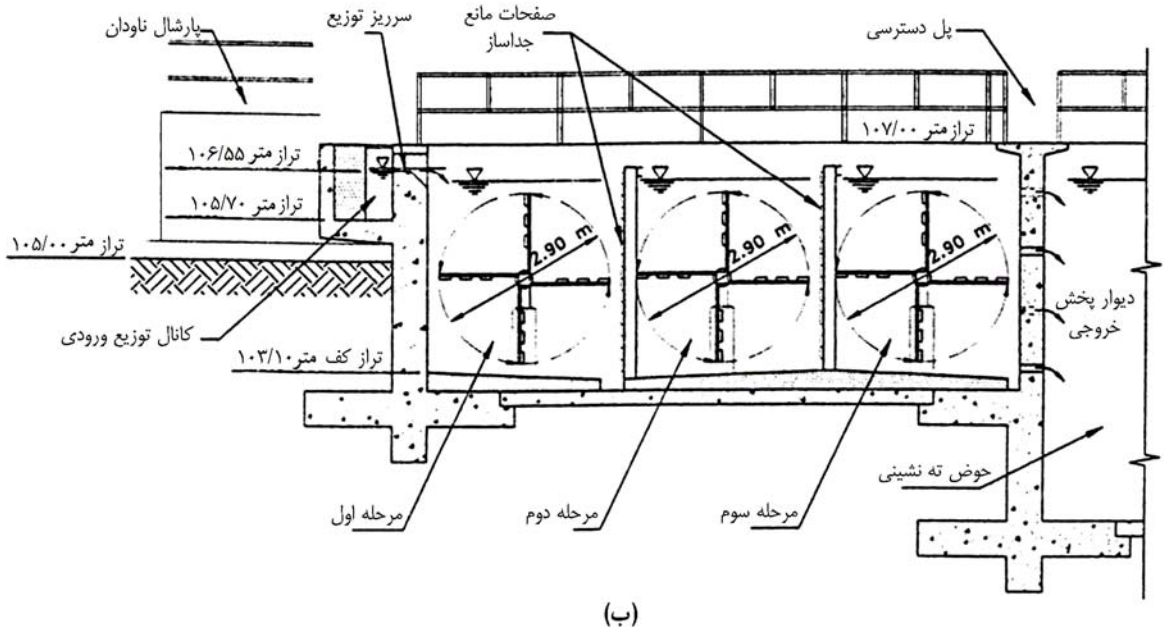
- روزنه‌ها باید در تمام سطح دیوار به‌صورت یکنواخت توزیع گردند.
- به منظور به حداقل رساندن فضاهای مرده لازم است حداکثر تعداد روزنه‌ها در نظر گرفته شود.
- افت ارتفاع مناسب برای طراحی این دیوار ۲ تا ۳ میلی‌متر است.

- سرعت حداکثر جریان در طول روزنه‌ها باید کم‌تر از ۰/۱۵ متر بر ثانیه باشد تا لخته‌های به‌وجود آمده در مرحله قبل شکسته نشوند.

معمولا قطر روزنه‌ها را کم‌تر از ضخامت دیوار در نظر می‌گیرند، ولی برای دیوار پخش (بین واحد لخته‌سازی و حوض ته‌نشینی) روزنه هایی به قطر ۱۲۵ میلی‌متر که ۶ تا ۸ درصد از سطح کل دیوار را پوشش می‌دهند، مناسب است.



(الف)



(ب)

شکل ب-۵- جزییات حوض لخته‌سازی، (الف) تصویر افقی، (ب) برش الف – الف

۱- تعیین تعداد روزنه‌ها

اگر سرعت عبور جریان از روزنه‌ها برای بده حداکثر لحظه‌ای را برابر ۰/۱۵ متر بر ثانیه فرض کنیم، آنگاه:

$$A = \frac{0.328}{0.15} = 2.187\ m^2$$

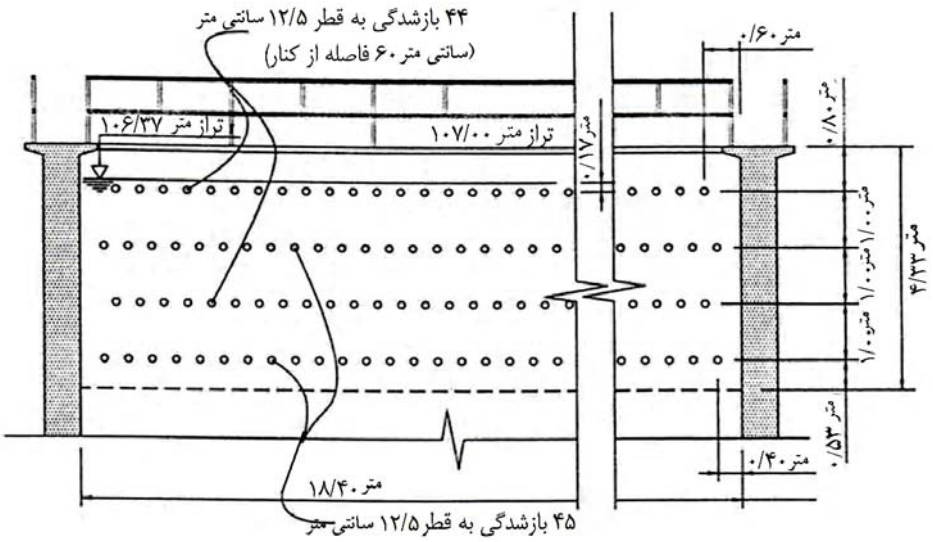
چنانچه قطر روزنه‌ها ۱۲۵ میلی‌متر (۵ اینچ) در نظر گرفته شود:

$$\text{مساحت سطح هر روزنه} = \frac{\pi}{4} \times (0.125)^2 = 0.0123 m^2 \rightarrow \quad \text{تعداد روزنه‌ها} = \frac{2.187}{0.0123} = 178$$

۱۷۸ روزنه در چهار ردیف قرار داده می‌شود. جزییات این طراحی در شکل (ب-۶) نشان داده شده است.

۲- محاسبه افت ارتفاع در دیوار پخش

افت ارتفاع در طول دیوار جداساز از رابطه روزنه (رابطه ۸-۱) و با در نظر گیری $C_d = 0.6$، برابر $h_L = 0.0032$ متر به‌دست می‌آید که ناچیز است و در محاسبات از آن صرفنظر می‌شود.



شکل ب-٦- جزییات قسمت‌های مختلف دیوار پخش (بین حوض لخته‌سازی و حوض ته‌نشینی)

گام ٤- ترسیم نیمرخ هیدرولیکی

برای ترسیم نیمرخ جریان تراز سطح آب در انتهای واحد لخته‌سازی (ابتدای حوض ته‌نشینی) برابر ۱۰۶/۳۷ متر فرض می‌شود:

متر ۱۰۶/۳۷ = تراز سطح آب در انتهای حوض لخته‌سازی

متر ۱۰۶/۳۷=۰/۰۰ + ۱۰۶/۳۷ = (افت ارتفاع در سازه خروجی) + ۱۰۶/۳۷ = تراز سطح آب در حوض لخته‌سازی

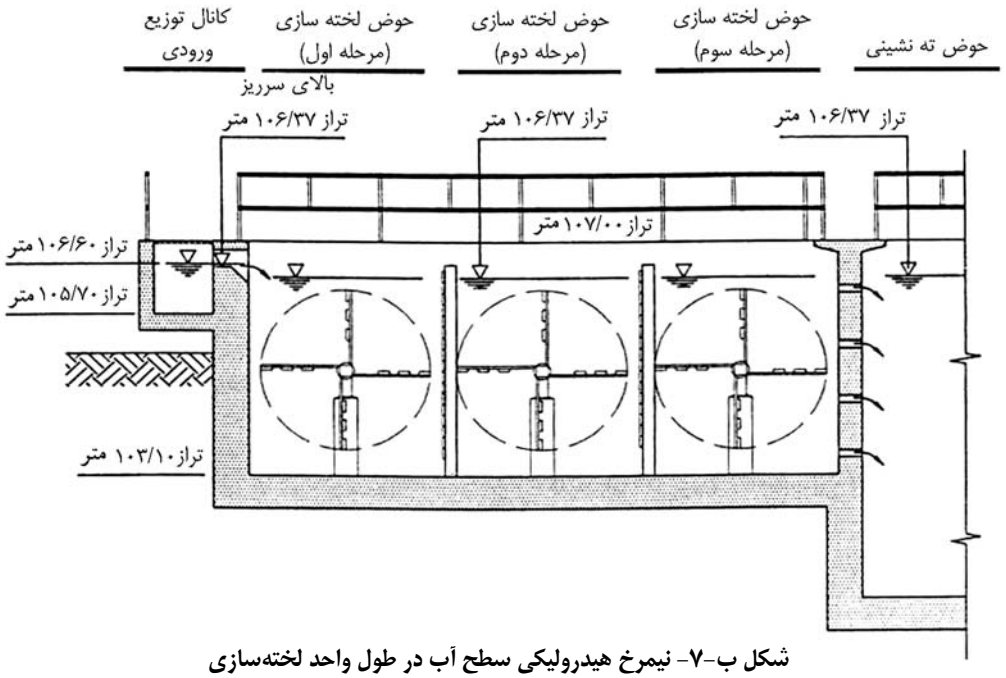
متر ۱۰۳/۱۰ = ۳/۲۷ – ۱۰۶/۳۷ = (عمق آب در حوض لخته ساز) + ۱۰۶/۳۷ = تراز کف حوض لخته‌سازی

متر ۱۰۶/۶۰ = ۰/۲۳ + ۱۰۶/۳۷ = (ارتفاع ریزش در روی سرریز) + ۱۰۶/۳۷ = تراز سطح آب در کانال توزیع ورودی

متر ۱۰۶/۵۵ = ۰/۰۵ – ۱۰۶/۶۰ = (ارتفاع آب روی سرریز) – ۱۰۶/۶۰ = تراز بالای سرریز ورودی

متر ۱۰۵/۷۰ = ۰/۹۰ – ۱۰۶/۶۰ = (عمق آب در کانال توزیع ورودی) – ۱۰۶/۶۰ = تراز کف کانال توزیع

با توجه به کم بودن افت ارتفاع در اتصال بین ناودان پارشال و کانال بعد از آن، از آن صرفنظر می‌شود و ارتفاع کف کانال در انتهای ناودان پارشال ۱۰۵/۷۰ متر و تراز سطح آب در این نقطه ۱۰۶/۶۰ متر خواهد بود. بر اساس اعداد به‌دست آمده برای تراز سطح آب در نقاط مختلف واحد لخته‌سازی نیمرخ سطح آب در این واحد به‌صورت شکل (ب-۷) ترسیم می‌شود.



شکل ب-۷- نیمرخ هیدرولیکی سطح آب در طول واحد لخته‌سازی

۲- واحد ته نشینی

در این مثال پس از واحد لخته‌سازی چهار حوض ته‌نشینی مورد استفاده قرار گرفته و لازم است هر حوض توانایی عبور ۲۵ درصد بده حداکثر را دارا باشد. جانمایی کلی حوض‌ها در شکل (ب-۸) نشان داده شده است. در این طراحی، حوض‌های ته‌نشینی به صورت بخشی از واحد لخته‌سازی ته‌نشینی می‌باشد، بدین معنی که واحد ته‌نشینی و لخته‌سازی در یک مجموعه قرار دارند و عرض هر حوض ته‌نشینی با عرض واحد لخته‌سازی برابر است. این دو واحد بوسیله دیوار پخش از یکدیگر جدا می‌شوند. از مزایای این جانمایی می‌توان به حداقل شکست لخته‌ها در انتقال از مرحله سوم حوض لخته‌سازی به ناحیه ورودی حوض ته‌نشینی و توزیع مناسب جریان در ناحیه ورودی حوض ته‌نشینی اشاره کرد. در این مثال آب زلال شده بوسیله یک سامانه جمع‌کننده شامل سرریز V- شکل و کانال جمع‌آوری به سمت نقطه خروج هدایت می‌شود. جانمایی قسمت‌های مختلف واحد ته‌نشینی در شکل (ب-۸) نشان داده شده است. با در نظرگیری شرایط زیر، افت ارتفاع در قسمت‌های مختلف را محاسبه و نیمرخ سطح جریان را به‌دست می آوریم.

- بده حداکثر = ۱۱۳۵۰۰ مترمکعب بر روز
- بده متوسط = ۵۷۹۰۰ مترمکعب بر روز
- نرخ بار سرریز = ۲۵۰ مترمکعب بر متر در روز
- زمان ماند = ۴ ساعت
- محدوده مجاز نسبت طول به عرض : ۲ تا ۳

- نرخ بار سطحی = ۳۵ مترمکعب بر مترمربع در روز

حل)

گام۱- تعیین هندسه حوض

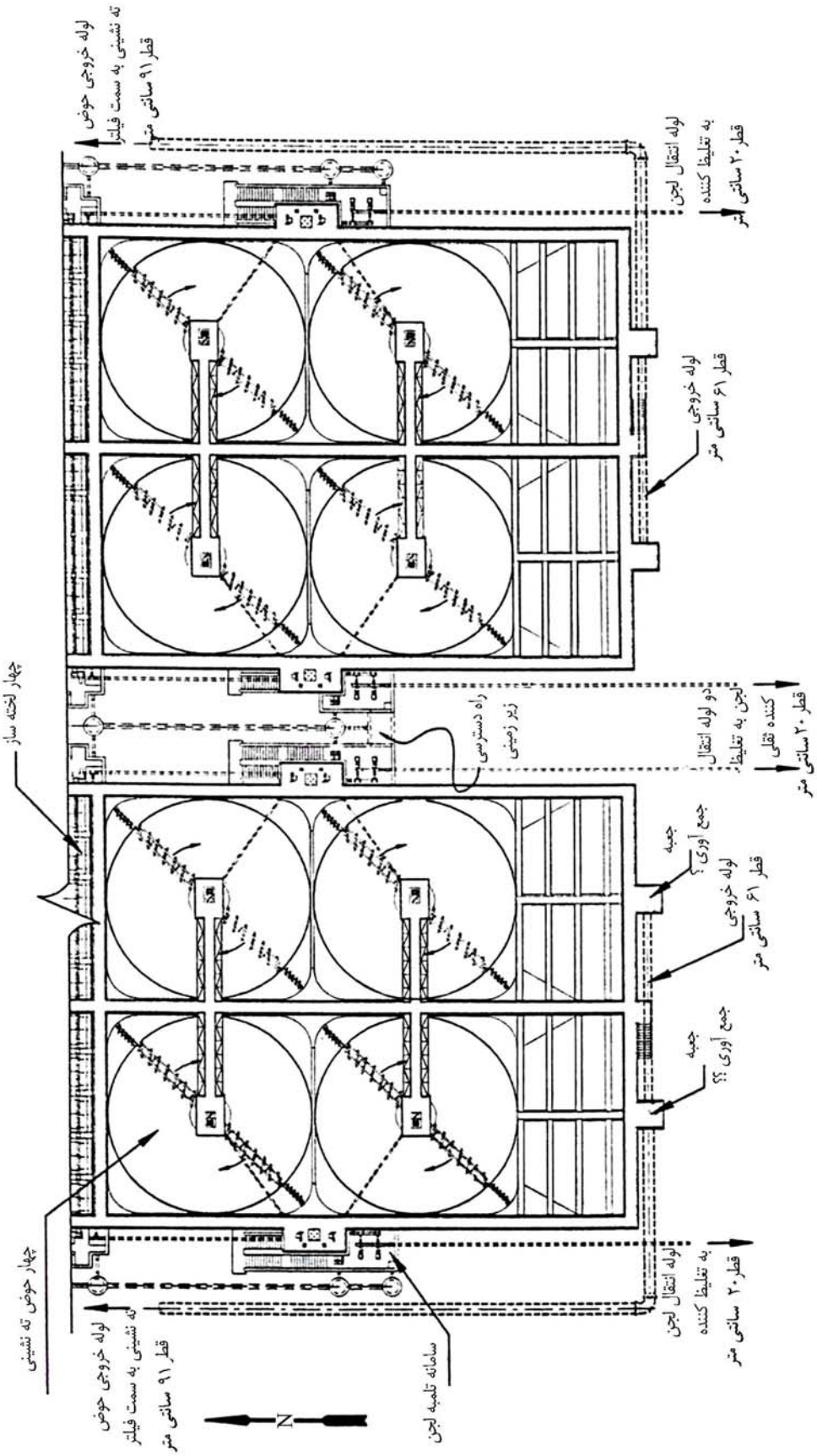
الف- سطح مورد نیاز

مترمکعب بر روز ۱۳۵۰۰ = حداکثر بده طراحی

بده طراحی هر حوض $= \frac{113500}{4} = 28375\,m^3/d = 0.328\ m^3/s$

با استفاده از بار سطحی معادل ۳۵ مترمکعب بر مترمربع در روز، مساحت سطحی مورد نیاز برای حوض‌ها را محاسبه می‌کنیم:

$$A_{req} = \frac{28375}{35} = 811\ m^2$$



شکل ب-۸- جانمایی کلی قسمتهای مختلف واحد ته‌نشینی

ب- طول حوض

حداقل طول مورد نیاز بر اساس عرض W= 8.14 متر برابر است با:

$$L_{req} = \frac{810.7}{18.4} = 44.1 \text{ m}$$

طول حوض را برابر ۴۵ متر در نظر می‌گیریم و نسبت طول به عرض را برای آن کنترل می‌کنیم:

$$\frac{L}{W} = \frac{45}{18.4} = 2.4$$

این نسبت در محدوده مقادیر مجاز برای $\frac{L}{W}$ قرار دارد.

ج- عمق حوض

با استفاده از بار سطحی ۳۵ مترمکعب بر مترمربع در روز و زمان ماند ۴ ساعت، عمق مورد نیاز حوض برابر است با:

$$H_{req} = \frac{35 m^3/m^2 d \times 4 hr}{24 h/d} = 5.8 \text{ m}$$

با توجه به محاسبات انجام گرفته در بالا، وضعیت حوض‌ها به صورت ۴ حوض به ابعاد ۵/۸× ۱۸/۴× ۴۵ می‌باشد. با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد معادل ۰/۶۵ متر، عمق واقعی حوض‌ها برابر ۶/۴۵ متر می‌باشد. ابعاد حوض‌های ته‌نشینی در شکل‌های (ب-۹) و (ب-۱۰) نشان داده شده است.

گام۲- سازه خروجی

سازه خروجی از سرریزهای V- شکل با راس قائم که از هر دو طرف آب از روی آن به داخل مجرای جمع‌آوری با عرض ۰/۵ متر ریزش می‌کند، و یک کانال جمع‌کننده مرکزی به عرض ۰/۶۵ متر که وظیفه انتقال آب زلال شده به سمت جعبه جمع‌کننده نهایی را دارد، تشکیل شده است. به منظور کاهش اثرات امواج و جریانات سطحی از یک صفحه مانع عرضی برای جدا کردن ناحیه خروجی و ناحیه ته‌نشینی استفاده می‌شود. این آرایش در شکل (ب-۱۱) نشان داده شده است.

مترمکعب بر متر در روز ۲۵۰ = بار سرریز

در نتیجه طول مورد نیاز برای سرریز برابر است با:

$$L = \frac{28376 m^3/d}{250 m^3/md} = 113.5 \text{ m}$$

گام۳- تعیین افت ارتفاع

افت ارتفاع در واحد ته‌نشینی از سه قسمت افت ارتفاع در سازه ورودی، افت ارتفاع در طول حوض و افت ارتفاع در سازه خروجی تشکیل شده است. افت ارتفاع در حوض ته‌نشینی به علت سرعت بسیار پایین جریان ناچیز است و در محاسبات از آن صرفنظر می‌گردد. در ادامه افت ارتفاع در سازه ورودی و سازه خروجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سازه ورودی از دیوار پخش کننده تشکیل شده است که همان‌طور که قبلا نشان داده شد، افت ارتفاع در آن ناچیز بوده و از آن صرفنظر می‌گردد. برای تعیین افت ارتفاع در سازه خروجی به ترتیب زیر عمل می‌کنیم.

الف- طول مورد نیاز برای سرریز

برای سامانه جمع‌کننده از ۸ مجرای انتقال‌دهنده که طول هر یک ۸/۵ متر و یک کانال جمع‌آوری مرکزی همانند شکل (ب-۱۱) استفاده شده است. اولین ردیف مجرای انتقال‌دهنده که به ورودی حوض نزدیک‌تر است تنها در یک طرف دارای سرریز می‌باشد ولی سه ردیف باقی مانده در هر دو طرف مجرا دارای سرریز می‌باشند.

متر ۱۱۳/۵ > متر ۱۱۹ = (۲ × متر ۸/۵ × ۶) + (۱ × متر ۸/۵ × ۲) = طول واقعی سرریز

ب- تعداد شکاف‌های V- شکل

با استفاده از سرریز V- شکل استاندارد ۹۰ درجه، در هر ۲ متر از طول سرریز، ۹ عدد شکاف سرریز قرار می‌گیرد، در کل طول ۸/۵ متر، ۴ عدد صفحه سرریز ۲ متری قرار می‌دهیم. ارتفاع کل هر سرریز ۷/۵ سانتی‌متر و فاصله مرکز به مرکز هر شکاف V- شکل، ۲۰ سانتی‌متر است. به این ترتیب تعداد کل شکاف‌های سرریز در هر حوض برابر است با:

تعداد کل شکاف‌ها = (۲×۱×۴×۹) + (۶×۲×۴×۹) = ۵۰۴

ج- ارتفاع بر روی سرریز V- شکل

با توجه به قسمت قبل بده حداکثر لحظه‌ای برای هر سرریز برابر است با:

$$q = \frac{0.328}{504} = 6.52\times10^{-4}\ \ m^3/s$$

ارتفاع بر روی هر شکاف سرریز را می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۴) با فرض زاویه راس ۹۰ درجه، محاسبه کرد:

$$q = \frac{18}{15}\times C_d\times(2g)^{1/2}\tan(\frac{\theta}{2})\times H^{5/2} \quad \rightarrow \quad 6.52\times10^{-4} = \frac{8}{15}\times0.6\times(2\times9.81)^{1/2}\times\tan(\frac{90}{2})\times(H)^{5/2}$$

مقدار ارتفاع روی سرریز در بده طراحی حداکثر لحظه‌ای H= ۰/۰۴۶ متر به‌دست می‌آید. به این ترتیب اگر ارتفاع کل سرریز ۷/۵ سانتی‌متر باشد، ارتفاع آزاد برابر است با:

ارتفاع آزاد سرریز = ۷/۵ – ۴/۶ = ۲/۹ سانتی‌متر

د- افت ارتفاع در طول مجرای انتقال‌دهنده

محاسبات افت ارتفاع بر این اساس که در هر دو طرف مجرای جمع‌آوری، شکاف سرریز موجود است، انجام می‌شود. ابتدا بده جریان در هر نقطه از هر مجرای جمع‌آوری با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$Q' =$ بده جریان در هر مجرا = Q' = (بده هر سرریز)× (تعداد سرریزهای هرمجرا) $\Rightarrow Q' = 6.52\times10^{-4}\times72 = 0.469\ m^3/s$

توجه به این مطلب که در نقطه خروجی مجرا ریزش آزاد داریم و این که در این نقطه عمق بحرانی تشکیل می‌شود، عمق انتهائی مجرا را با استفاده از رابطه (۴-۱۴) محاسبه می‌کنیم.

$$y_c = (\frac{Q'^2}{gb^2})^{1/3} \quad \rightarrow \quad y_c = (\frac{0.047^2}{9.81\times0.5^2})^{1/3} = 0.096m$$

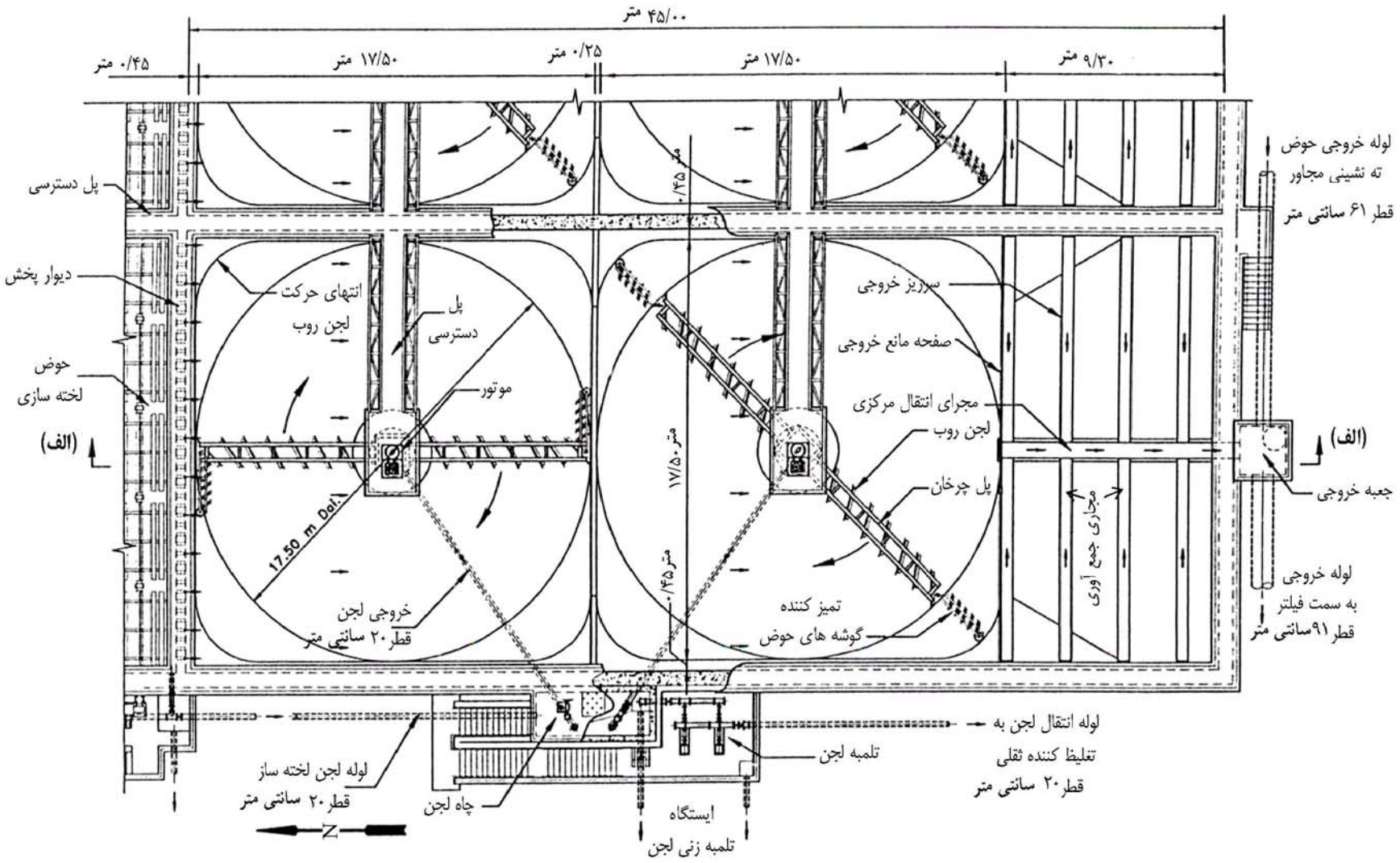
با فرض این که عمق متوسط در مجرای انتقالی خروجی برابر ۰/۱۴ متر باشد، شعاع هیدرولیکی متوسط، $\overline{R}$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{R} = \frac{0.4 \times 0.5}{2 \times 0.14 + 0.5} = 0.09 \ \text{m}$$

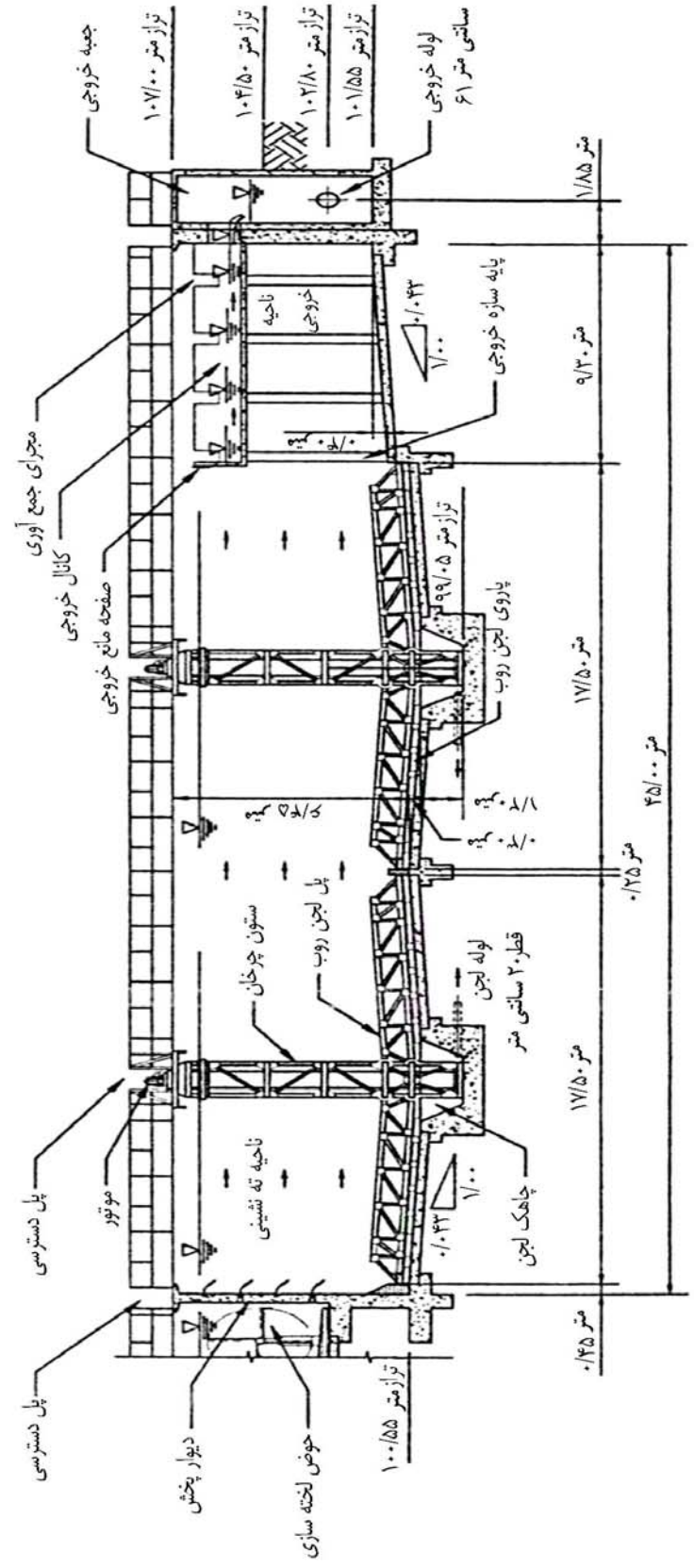
با فرض این که ضریب اصطکاک دارسی برابر ۰/۱ و $y_2 = y_c$=۰/۰۹۶ متر باشد و با استفاده از رابطه (۴-۲۵) داریم:

$$y_1 = [(0.096\text{m})^2 + \frac{2 \times (0.0469)^2}{9.81 \times (0.5)^2 \times 0.096} + \frac{0.1 \times 8.5 \times (0.0469)^2}{12 \times 9.18 \times (0.5)^2 \times 0.09 \times 0.14}]^{0.5}$$

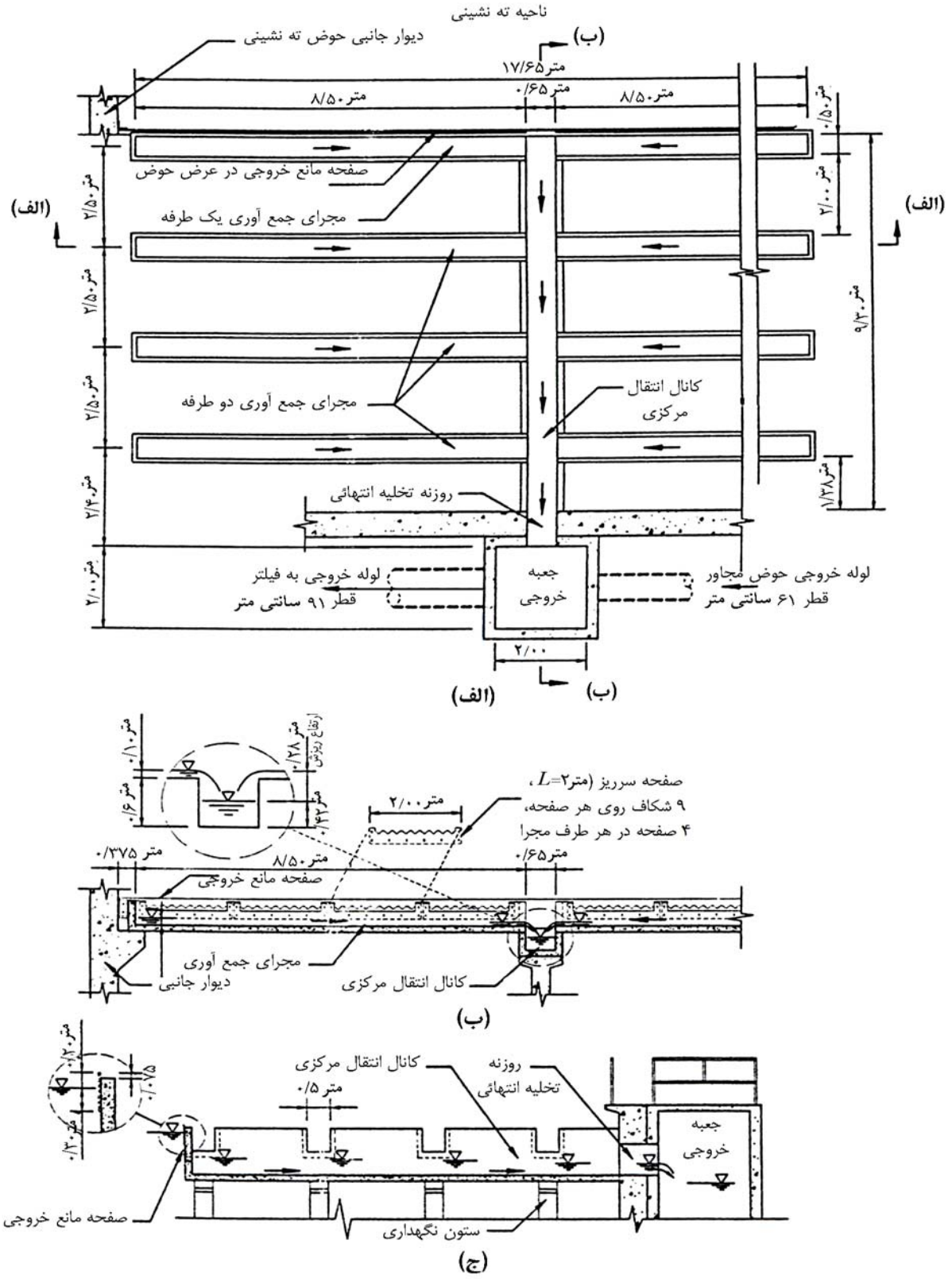
$$\Rightarrow y_1 = (0.0092 + 0.0187 + 0.005)^{0.5} = 0.18\,\text{m}$$



شکل ب-۹- تصویر افقی حوض ته نشینی (برش الف-الف در شکل (ب-۱۰) نشان داده شده است.)



شکل ب-۱۰- مقطع الف – الف حوض ته‌نشینی از شکل (ب-۹)



شکل ب-۱۱- سازه خروجی حوض ته‌نشینی، (الف) جانمایی سازه خروجی، (ب) مقطع الف– الف (ناودان خروجی در طول سرریز)، (ج) مقطع ب– ب (کانال انتقال‌دهنده مرکزی)

منابع و مراجع

۱- ضوابط فنی بررسی و تصویب طرح‌های تصفیه آب شهری، نشریه ۳-۱۲۱، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی.

۲- معیارهای هیدرولیکی طراحی کانال‌های آبیاری و زهکش‌های روباز، نشریه ۱۶۶، سازمان برنامه و بودجه.

۳- هیدرولیک کانال‌های باز، دکتر سید محمود حسینی- دکتر جلیل ابریشمی، (۱۳۷۹هـ‌ش)، انتشارات آستان قدس رضوی.

4- Bos, M.C.(Ed.), “Discharge Measurement Structures”, Publication No.161, Hydraulics, (1976).

5- Chow, Vente, “Open Channel Hydraulics” , McGraw-Hill , (1956).

6- Davis.C.V,Sorenson.K.E, “handbook of Applied Hydraulic” ,McGraw-Hill , (1984).

7- Hudson.H.E & Uhler.R.B,“Dividing-Flow Manifolds with Square-Edged Laterals”, Journal Environmental Engineering Division, ASCE, No.105,pp745 , (1979) .

8- Igor J.Karassik,William C.Krutzsch, Worren H.Fraser, “Pump Handbook”, Mc Graw-Hill Second Edition, (1976) .

9- Imre Horvath C.Sc, “Hydraulics in Water and Wastewater Treatment Technology” , JOHN WILEY & SONS, (1994).

10- Metcalf and Eddy,Inc, “Wastewater Engineering” ,McGraw-Hill , (2003).

11- M.Montgomery James , “Water Treatment Principles and Design” , John Wieley & Sons , (1976) .

12- Qasim,Syed R , “Wastewater Treatment Plants” Technomic Publishing Company, Inc , (1999).

13- Qasim,Syed R, “Water Works Engineering”, Prentice-Hall PTR,(2000).

14- Richard H. French , “Open-channel hydraulics” , McGraw-Hill , (1985).

15- Streeter&Wylie & Bedford , “Fluid Mechanics” , McGraw-Hill , (1909).

16- Tom D.Reynolds, Poul A.Richards , “Unit Operations and Processes in Environmental Engineering” , PWS Publishing Company , (1999).

17- U.S.Department of the Interior, “Design of Small Dams”, OXFORD & IBH PUBLISHING Co, (1974).

18- U.S.Department of the Interior, “Design of Small Canal Structures” , (1978).

19- W.Wesley.Eckenfelder, “Industrial Water Pollution Control” , McGraw-Hill , (1926).

20- Hammer M.J, “Water and Wastewater Technology”, McGraw-Hill , (1986).

21- Brater,E.F, King,H.W, “Handbook of Hydraulic” McGraw-Hill , (1976).

22- French, R.H, "Open – Channel Hydraulics" , Mc Graw-Hill, (1986).

23- Jeppson.R.W “Analysis of Flow in Pipe Networks” , An Arbor Science , (1977).

24- Henderson, F.M , “Open Channel Flow” , Macmillan , (1966).

25- Mohinder L.Nayyar, “Piping Handbook”, McGraw.Hill companies , (1967) .

26- Ranga Raju.K.G, “Flow Through Open Channels” , McGraw-Hill , (1981) .

27- P. Aarne Vesilind, “Treatment And Disposal Of Wastewater Sludges”, Revised Edition, Ann Arbor Science, (1979).

خواننده گرامی

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر چهارصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **http://tec.mporg.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

دفتر نظام فنی اجرایی

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision

Guideline for Hydraulics of Water Treatment Plant

No. 436

Office of Deputy for Strategic Supervision
Bureau of Technical Execution System
http://tec.mporg.ir

Ministry of Energy
Bureau for Water and Wastewater Engineering System and Standards
http://www.wrm.ir/standard

این نشریه

تصفیه‌خانه آب شامل فرایندهای فیزیکی و شیمیایی می‌باشد که برای عملکرد صحیح باید از هیدرولیک مناسب جریان برخوردار باشد. در صورتی‌که در مراحل مختلف فرایند، افت هیدرولیکی به‌طور صحیح محاسبه نشود باعث معضلات در فرایند تصفیه شده و می‌تواند عواقب بهداشتی متعددی داشته باشد. در این نشریه شرایط هیدرولیکی جریان در واحدهای مختلف و خطوط انتقال، تصفیه‌خانه اعم از تحت فشار و آزاد، بررسی شده و همراه با مثال‌های واقعی، تعیین دقیق خط نیمرخ هیدرولیکی ارایه می‌گردد. این نشریه راهنمایی برای طراحان و کاربران تصفیه‌خانه‌های آب می‌باشد.

مرکز داده‌ورزی و اطلاع رسانی

ISBN: 978-964-179-131-7

9789641791317