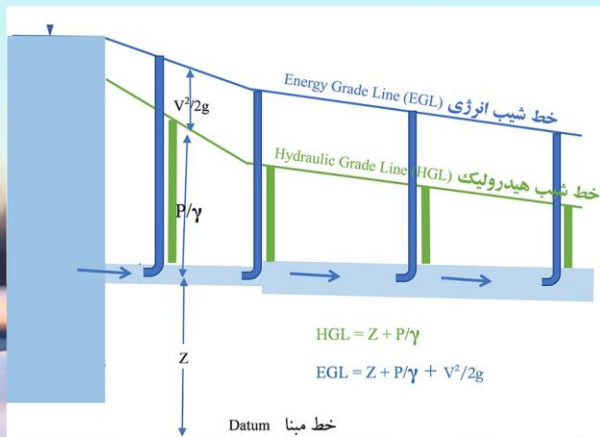


هیدرولیک جریان در لوله‌ها

دستنامه فنی:

دکتر ابراهیم پذیرا



بسم الله الرحمن الرحيم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

دستنامه فنی:

هیدرولیک جریان در لوله‌ها

تهیه و تدوین:

دکتر ابراهیم پذیرا

استاد مهندسی منابع آب و اراضی

سال انتشار:

۱۴۰۱



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



نوع نوشتار: دستنامه فنی
عنوان نوشتار: هیدرولیک جریان در لوله‌ها
نگارنده: دکتر ابراهیم پذیرا
ویراستار: دکتر حسین دهقانی‌سانیچ
بازخوانی: مهندس فؤاد تاجیک
صفحه‌آرا: سمیه وطن دوست
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۴۰۱



شماره ثبت ۶۲۰۹۹ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
به تاریخ ۱۴۰۱/۰۶/۰۸

مخاطبان نشریه:

کارشناسان و متخصصان مهندسی آب

اهداف آموزشی :

شما خوانندگان گرامی در این نشریه با :

- تعاریف جسم های جامد و سیال
 - کاربرد لوله ها در انتقال و توزیع آب
 - عوامل موثر بر جریان آب و قطر اقتصادی
 - افت بار در خط لوله و روابط مربوطه و افت بار موضعی
 - لوله معادل و لوله های مرکب
 - جریان در لوله های نیمه پر
 - معرفی صفحه های گسترده برای محاسبات
- آشنا خواهید شد.

سپاسگزاری :

همفکری و راهنمودهای آقای مهندس مجتبی اکرم کارشناس ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی که در تهیه و تدوین متن نهایی این دستنامه ره گشا بوده تشکر و قدردانی مینماید .

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
۱- پیش گفتار	۱
۱-۱- جسم‌های جامد و سیال	۱
۲-۱- کاربرد لوله‌ها در انتقال و توزیع آب	۲
۳-۱- عوامل موثر بر جریان آب در لوله	۲
۴-۱- قطر اقتصادی	۸
۲- افت بار در طول خط لوله	۹
۱-۲- معادله دارسی - ویسیاخ	۹
۲-۲- رابطه هیزن- ویلیامز	۱۴
۳-۲- افت بار موضعی در اثر کاربرد اتصالات در خط لوله	۱۹
۳- طول لوله معادل	۱۹
۴- لوله‌های مرکب	۲۴
۵- جریان در لوله‌های نیمه پر	۳۰
۱-۵- محاسبه جریان نیمه پر در لوله‌ها	۳۰
۲-۵- صفحه‌های گسترده برای محاسبات	۲۴

فهرست جداول

عنوان	شماره صفحه
جدول (۱) خواص فیزیکی آب در درجه حرارت‌های مختلف	۳
جدول (۲) دبی لوله‌ها در قطر و سرعت‌های مختلف	۵
جدول (۳) مقادیر شیب هیدرولیکی برای جریان با رژیم ناآرام ملایم در سرعت و قطرهای مختلف لوله	۱۳
جدول (۴) مقادیر زبری معادل (E) برای لوله‌های تجاری مختلف	۱۴
جدول (۵) مقادیر ضریب زبری هیزن- ویلیامز برای لوله‌های مختلف	۱۶
جدول (۶) نمونه ای از ضریب هیزن- ویلیامز برای انواع مختلف لوله های متداول در کشور	۱۶
جدول (۷-a) شیب هیدرولیکی برحسب متر بر کیلومتر با استفاده از معادله هیزن- ویلیامز برای ضریب زبری = CHW	۱۸
جدول (۷-b) شیب هیدرولیکی برحسب متر بر کیلومتر با استفاده از معادله هیزن- ویلیامز برای ضریب زبری = ۱۴۰ = CHW	۱۸
جدول (۸) مقادیر ضریب افت موضعی K برای چند اتصال معمول	۱۹
جدول (۹) - روابط مربوط به یافتن ضریب مودی در جریان‌های مختلف	۳۷
جدول (۱۰) - ضریب زبری جدار در لوله‌های با جنس مختلف	۳۷

فهرست شکل‌ها

عنوان	شماره صفحه
شکل (۱) دیاگرام انرژی کل (بار پتانسیل یا ارتفاع، بار فشار یا پیرومتریک و بار سرعت انرژی جنبشی یا کینماتیک) در طول خط لوله انتقال مایع	۶
شکل (۲) نمودار تغییرات مخارج احداث، تأمین انرژی و هزینه کل برای تعیین قطر اقتصادی لوله	۸
شکل (۳) دیاگرام مودی برای تعیین ضریب افت اصطکاکی و تشخیص نوع جریان در لوله‌ها	۱۲
شکل (۴) نمودار تهیه شده برای تعیین ضریب معادله هیزن- ویلیامز در لوله‌ها	۱۷
شکل (۵) راهنمای تعیین طول معادل لوله برای انواع اتصالات کاربردی در خطوط لوله	۲۱
شکل (۶) منحنی مشخصاتی رابطه افت بار و دبی در یک خط لوله	۲۴
شکل (۷) رابطه دبی و افت بار برای لوله مرکب در حالت اتصال سری	۲۷
شکل (۸) رابطه دبی و بار فشار در حالت اتصال موازی	۲۸
شکل (۹) نمودار مشخصاتی سامانه‌ای مشتمل بر سه شاخه لوله انتقال جریان آب	۲۹
شکل (۱۰) - رابطه بین عمق خیس شده و قطر لوله (y/D) با سرعت و دبی در لوله نیمه پر نسبت به سرعت و دبی در لوله پر (Q/Q_{full} و V/V_{full})	۳۱

هیدرولیک جریان در لوله‌ها

۱- پیش گفتار

اجسام به دو دسته جامدات و سیالات تقسیم می‌شوند. سیال^۱ به ماده‌ای گفته می‌شود که قابلیت روان شدن داشته باشد. ذرات سیال به سادگی جابجا می‌شوند، بی آن که از توده خود جدا شوند. سیالات مقاومت چندانی در برابر تغییر شکل نشان نمی‌دهند و به سادگی شکل ظرفی را که با آن تماس دارند یا در آن جایگزین می‌شوند بخود می‌گیرند.

سیالات را می‌توان به مایعات^۲ و گازها^۳ تقسیم بندی کرد. اختلاف این دو دسته به شرح زیر است:

الف- مایعات دارای سطح آزاد بوده و مقدار معینی از آن تنها قسمتی از حجم ظرف را اشغال می‌کند؛ در حالی که گازها دارای سطح آزاد نیستند و تمامی حجم ظرف را، بدون توجه به اندازه آن، پر می‌کنند.

ب - مایعات دارای خاصیت فشرده شدن نیستند و آنها را تراکم ناپذیر^۴ می‌دانند، در حالی که گازها دارای قابلیت فشرده شدن هستند و به آنها تراکم پذیر^۵ گفته می‌شود.

علمی که به حرکت جامدات و سیالات می‌پردازد، به ترتیب مکانیک جامدات^۶ و مکانیک سیالات^۷ نامیده می‌شود.

چنانچه سیال مورد نظر آب باشد، به مکانیک سیالات، "هیدرولیک"^۸ گفته می‌شود. هیدرولیک، خود به دو بخش تقسیم می‌شود: هیدرواستاتیک^۹ که در آن به آب در حال سکون و هیدرودینامیک^{۱۰} که به مکانیک آب در حال حرکت می‌پردازد.

۱-۱- جسم‌های جامد و سیال

جسم جامد (صلب) در اثر کشش، فشار و تنش برشی^{۱۱} تغییر شکل می‌دهد. جسم سیال نیز در اثر تلاش برشی در فاصله زمانی معین تغییر شکل خواهد داد. هرگاه تلاش برشی در جسم صلب از حد ارتجاع^۱ بیشتر نباشد، تغییر

-
- 1- Fluid
 - 2- Liquids
 - 3- Gases
 - 4- Incompressible
 - 5- Compressible
 - 6- Solid mechanics
 - 7- Fluid mechanics
 - 8- Hydraulics
 - 9- Hydrostatics
 - 10- Hydrodynamics

۱۱- تنش برشی (Shear Stress)، مؤلفه‌ای از تنش است که به صورت مماس بر سطح جسم اعمال می‌شود. بعد آن در سیستم SI پاسکال (نیوتن بر مترمربع) است.

شکلی برگشت پذیر در آن ایجاد می کند و با قطع تنش به حالت اول خود باز می گردد. اگر سیالی تحت اثر تلاش برشی قرار گیرد، متناسب با زمان، به طور یکنواخت تغییر شکل می دهد و با برداشته شدن نیرو، در اثر نیروهای داخلی ایجاد شده، به حالت اولیه بر می گردد.

افزودن حرارت نیز بیشتر جامدات را به مرحله روانی می رساند. سخت ترین فلزات نیز در اثر گرما چنان ذوب می شوند که می توانند به سادگی جریان یابند. یک بلوک قیر سرد، خاصیت جامدات را نشان می دهد، لیکن هنگامی که به آن حرارت داده شود، چنان روان می گردد که می توان آن را بین ترک های ریز بتون وارد کرد. تبدیل صخره های جامد به توده های مذاب یکی از مواردی است که در طبیعت روی می دهد. گرمای زیادی برای تبدیل جسم جامد به سیال لازم است. تبدیل یخ جامد به آب مایع (سیال) در دمای صفر درجه سانتی گراد روی می دهد. در باره ساز و کار شرایط حدی که در آن یک جسم جامد بصورت پلاستیک (قابل انعطاف) روان در می آید، هنوز مطالعه کافی انجام نشده است.

۱-۲- کاربرد لوله ها در انتقال و توزیع آب

به طور معمول، در شرایطی که توپوگرافی اجازه دهد، انتقال آب با استفاده از کانال های روباز انجام می شود. انتقال آب با لوله هنگامی صورت می پذیرد که امکان ساختن کانال های باز موجود نباشد. توزیع آب با لوله بین مصرف کنندگان رواج بیشتری دارد. هنگامی که استفاده از سیستم های تحت فشار آبیاری (بارانی و قطره ای) مورد نظر باشد، چاره ای جز استفاده از لوله به منظور تامین آب آبیاش ها^۲ و قطره چکان ها^۳ وجود ندارد.

۱-۳- عوامل موثر بر جریان آب در لوله

فاکتورهایی که بر جریان^۴ آب در خط لوله موثرند عبارتند از:

قطر لوله (D)، شیب هیدرولیکی ($I = \frac{h_L}{L}$) و سرانجام ضریب زبری جدار لوله.

مقدار ضریب زبری لوله که گاه ضریب اصطکاک نیز نامیده می شود، به ویژگی های لوله مانند جنس آن و به عبارت بهتر به ناصافی های دیواره لوله، قطر لوله، میانگین سرعت جریان (V یا Q و D) و نوع جریان (آرام^۵ یا ناآرام^۶) بستگی دارد.

بیشتر روابط موجود تجربی هستند و از آزمایش های پرشمار بر روی انواع لوله ها به دست آمده اند.

-
- 1- Elastic limit
 - 2- Sprinklers
 - 3- Drippers
 - 4- Flow rate
 - 5- Laminar flow
 - 6- Turbulent flow

یکی از این معادلات بنام **داریسی - ویسباخ**^۱ دانسته می‌شود که در آن ضریب اصطکاک، مربوط به زبری نسبی جدار لوله (ε/D) است. عامل دیگر موثر بر ضریب اصطکاک لوله، **عدد رینولدز**^۲ است که خود از تأثیر مشترک متغیرهای فیزیکی مانند قطر لوله (D)، میانگین سرعت جریان (V) و گرانشی کینماتیک^۳ سیال (μ) به دست می‌آید و به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$Re = \frac{VD}{\mu} \quad \text{معادله (۱)}$$

ارقام مقادیر گرانشی کینماتیک آب در دماهای مختلف در جدول شماره (۱) داده شده است:

جدول (۱) خواص فیزیکی آب در درجه حرارت‌های مختلف		
گرانشی کینماتیک	جرم ویژه	درجه حرارت سانتیگراد
(m^2 / sec)	(Kg / m^3)	($^{\circ}C$)
1.79×10^{-6}	1000/0	0
1.52×10^{-6}	1000/0	5
1.21×10^{-6}	1000/0	10
1.14×10^{-6}	999/0	15
1.01×10^{-6}	998/0	20
0.90×10^{-6}	997/0	25
0.80×10^{-6}	996/0	30
0.73×10^{-6}	994/0	35

در دماهای معمولی، کاربرد عددی معادل 10^{-6} مترمربع برثانیه (m^2/sec) برای گرانشی کینماتیک رقم مناسب و قابل اعتمادی خواهد بود.

در معادله (۱)، V متوسط سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه (m/sec) و D قطر داخلی لوله برحسب متر (m) است. از طرفی بجای سرعت یا V می‌توان مساوی آن یعنی مقدار دبی تقسیم بر سطح مقطع ($V = \frac{Q}{A}$) را به کار برد.

نظر به اینکه سطح مقطع لوله دایره است، پس می‌توان به جای A مساوی آن یعنی $A = \frac{\pi D^2}{4}$ را قرار داد.

-
- 1- Darcy-Weisbach
2- Reynolds number
3- Kinematic viscosity

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \text{معادله (۲)}$$

در این رابطه D = قطر داخلی لوله برحسب متر؛ و Q = دبی جریان برحسب مترمکعب در ثانیه (m^3/sec). به طور معمول، در کارهای عملی، قطر لوله‌ها برحسب میلی متر (mm) و دبی یا Q برحسب مترمکعب در ساعت یا لیتر در ثانیه بیان می‌شود. رابطه بین دو واحد به صورت زیر است:

$$1/0 \text{ lit / sec} = 3/6 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

مقادیر دبی با واحدهای بالا یعنی m^3 / hr و lit/sec برای لوله‌هایی با قطرهای متداول ۵۰ تا ۳۵۰ میلی متر در سرعت‌های ۰/۲ تا ۳ متر در ثانیه در جدول شماره (۲) نشان داده شده است.

شیب هیدرولیکی^۱ (I) در یک خط لوله عبارتست از افت بار (افت فشار)^۲ در واحد طول لوله. در یک خط لوله مستقیم که قطر آن ثابت باشد و هیچ گونه اتصالی^۳ در آن بکار نرفته باشد، شیب هیدرولیکی تنها نشان دهنده افت بار یا افت انرژی است که در اثر اصطکاک ناشی از جریان مایع از لوله در آن مسافت روی می‌دهد. در نقاطی از خط لوله که در آن تغییر مسیر یا تغییر قطر روی دهد، و یا اتصالاتی به منظور کنترل جریان بکار رفته باشد، افزون بر افت بار طولی، مقداری افت انرژی اضافی نیز پیش می‌آید که افت بار موضعی^۴ نامیده می‌شوند و مربوط به استفاده از اتصالات در خط لوله است.

در بیشتر موارد، مقدار چنین افت بارهایی متناسب با مجذور سرعت متوسط جریان در لوله (در محلی که اتصالات بکار رفته‌اند) است.

بطور کلی، افت بار کلی^۵ یا افت کل فشار در یک خط لوله، مربوط به مشخصات لوله مانند جنس لوله، ویژگی‌های جریان مانند آرام یا ناآرام بودن آن، قطر لوله و مقدار جریان، طول خط انتقال، و تعداد و نوع اتصالاتی است که در خط لوله بکار رفته است. برای برآورد مقدماتی افت بارهای موضعی یا افت فشاری که به اتصالات مربوط می‌شود، به طور معمول ۵ تا ۱۰ درصد افت بار اصطکاک در نظر گرفته می‌شود. در سیستم‌های توزیع، که به طور معمول از اتصالات بیشتری استفاده می‌شود، افت بارهای موضعی، درصد بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند.

برای نشان دادن مقدار انرژی در هر نقطه از خط لوله، از ترسیم دیاگرام انرژی در طول خط لوله استفاده می‌کنند. دیاگرام شماره (۱) مقدار بار کل در هر نقطه از طول خط لوله انتقال آب را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

1- Hydraulic gradient

2- Head loss or friction loss

3- Fittings

4- Local losses or minor losses

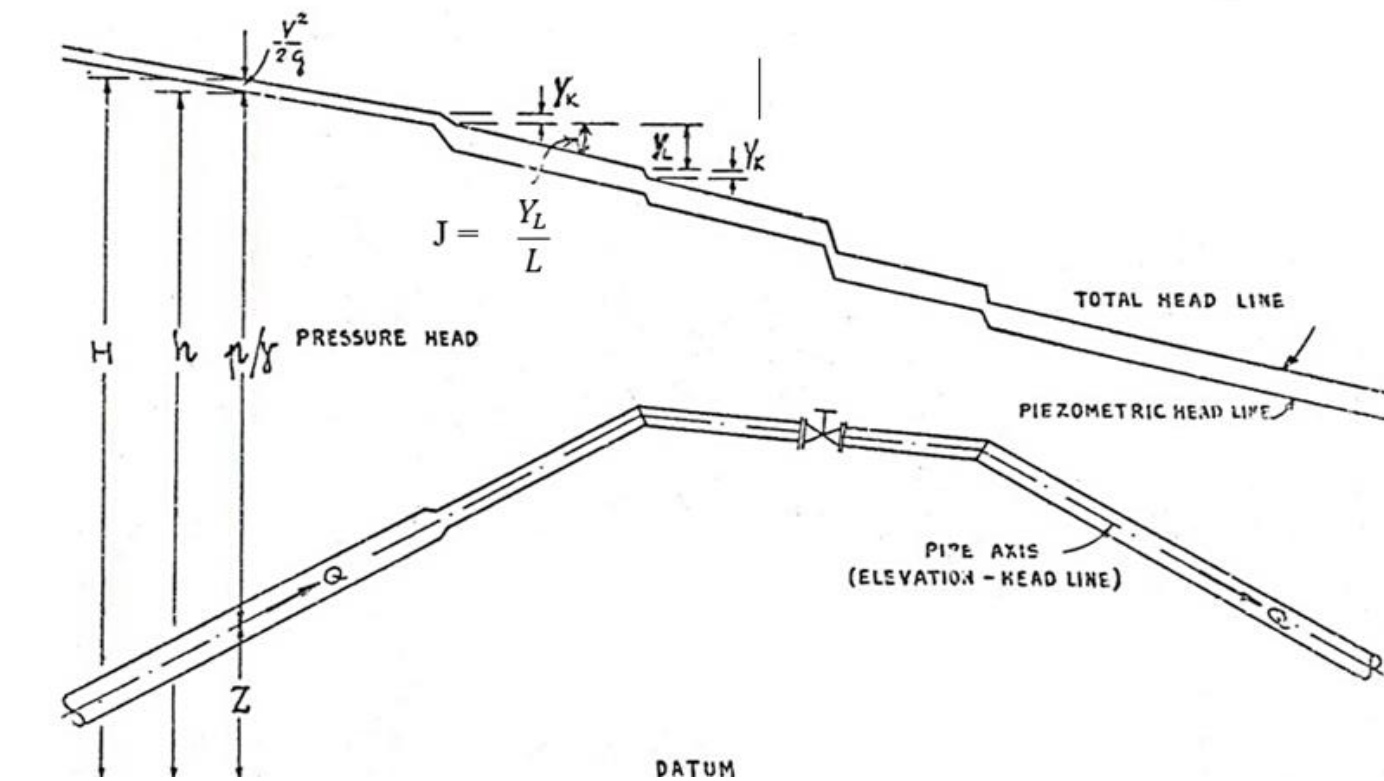
5- Total head loss

جدول (۲) - دبی لوله‌ها در قطر و سرعت‌های مختلف

سرعت (متر بر ثانیه)	میلی متر ۵۰ D =		میلی متر ۷۵ D =		میلی متر ۱۰۰ D =		میلی متر ۱۵۰ D =		میلی متر ۲۰۰ D =		میلی متر ۲۵۰ D =		میلی متر ۳۰۰ D =		میلی متر ۳۵۰ D =	
	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت	لیتر مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ساعت
۰/۲	۰/۳۹	۱/۴۱	۰/۸۸	۳/۱۸	۱/۵۱	۵/۶۵	۳/۵۳	۱۲/۷۰	۶/۲۸	۲۲/۶	۹/۸۲	۳۵/۳	۱۴/۱	۵۰/۹	۱۹/۲	۶۹/۳
۰/۴	۰/۷۹	۲/۸۳	۱/۷۷	۶/۳۶	۳/۱۴	۱۱/۳۱	۷/۰۷۰	۲۵/۴۰	۱۲/۶	۴۵/۲	۱۹/۶	۷۰/۷	۲۸/۳	۱۰۱/۸	۳۸/۵	۱۳۹
۰/۶	۱/۱۸	۴/۲۴	۲/۶۵	۹/۵۴	۴/۷۱	۱۷/۰۰	۱۰/۶۰	۳۸/۲۰	۱۸/۸	۶۷/۹	۲۹/۵	۱۰۶	۴۲/۴	۱۵۳	۵۷/۷	۲۰۸
۰/۸	۱/۵۷	۰/۶۵	۳/۵۲	۱۲/۷۲	۶/۲۸	۲۲/۶۰	۱۴/۱۰	۵۰/۹۰	۲۵/۱	۹۰/۵	۳۹/۳	۱۴۱	۵۶/۵	۲۰۴	۷۷/۰	۲۷۷
۱/۰	۱/۹۶	۷/۰۷	۴/۴۲	۱۵/۹۰	۷/۸۵	۲۸/۳۰	۱۷/۷۰	۶۳/۶۰	۳۱/۴	۱۱۳/۱	۴۹/۱	۱۷۷	۷۰/۷	۲۵۴	۹۶/۲	۳۴۶
۱/۲	۲/۳۶	۸/۴۸	۵/۳۰	۱۹/۱۰	۹/۴۲	۳۳/۹۰	۲۱/۲۰	۷۶/۳۰	۳۷/۶	۱۳۵	۵۸/۹	۲۱۲	۸۴/۸	۳۰۵	۱۱۵	۴۱۶
۱/۴	۲/۷۵	۹۹/۰۰	۶/۱۸	۲۲/۳۰	۱۱/۰۰	۳۹/۶۰	۲۴/۷۰	۸۹/۱۰	۴۴/۰	۱۵۸	۶۸/۷	۲۴۷	۹۹/۰	۳۵۶	۱۳۵	۴۸۵
۱/۶	۳/۱۴	۱۱/۳۱	۷/۰۷	۲۵/۴۰	۱۲/۶۰	۴۵/۲۰	۳۸/۳۰	۱۰۱/۸۰	۵۰/۲	۱۸۱	۷۸/۵	۲۸۳	۱۱۳	۴۰۷	۱۵۴	۵۵۴
۱/۸	۳/۳۵	۱۱/۷۲	۷/۹۵	۲۸/۶۰	۱۴/۱۰	۵۰/۹۰	۳۱/۸۰	۱۱۴/۵۰	۵۶/۵	۲۰۴	۸۸/۴	۳۱۸	۱۲۷	۴۵۸	۱۷۳	۶۲۳
۲/۰	۳/۹۳	۱۴/۱۴	۸/۸۴	۳۱/۸۰	۱۵/۷۰	۵۶/۵۰	۳۵/۳۰	۱۲۷/۰۰	۶۲/۸	۲۲۶	۹۸/۲	۳۵۳	۱۴۱	۵۰۹	۱۹۲	۶۹۲
۲/۲	۴/۳۲	۱۵/۶۰	۹/۷۲۰	۳۵/۰۰	۱۷/۳۰	۶۲/۲۰	۳۸/۹۰	۱۴۰	۶۹/۱	۲۴۹	۱۰۸	۳۸۹	۱۵۶	۵۶۰	۲۱۲	۷۶۲
۲/۴	۴/۷۱	۱۷/۰۰	۱۰/۶۰	۳۸/۲۰	۱۸/۸۰	۶۷/۹۰	۴۲/۴۰	۱۵۳	۷۵/۴	۲۷۱	۱۱۸	۴۲۴	۱۷۰	۶۱۰	۲۳۱	۸۳۱
۲/۶	۵/۱۱	۱۸/۴۰	۱۱/۵۰	۴۱/۴۰	۲۰/۴۰	۷۳/۵۰	۴۵/۹۰	۱۶۵	۸۱/۷	۲۹۴	۱۲۸	۴۵۹	۱۸۴	۶۶۲	۲۵۰	۹۰۰
۲/۸	۵/۵۰	۱۹/۸۰	۱۲/۴۰	۴۴/۵۰	۲۲/۰۰	۷۹/۳۰	۴۹/۴۰	۱۷۸	۸۸/۰	۳۱۷	۱۳۷	۴۹۵	۱۹۸	۷۱۳	۲۶۹	۹۷۰
۳/۰	۵/۸۹	۲۱/۲۰	۱۳/۳۰	۴۷/۷۰	23/60	۸۴/۸۰	۵۳/۰۰	۱۹۱	۹۴/۲	۳۳۹	۱۴۷	۵۳۰	۲۱۲	۷۶۳	۲۸۹	۱۰۳۹

۱- قطرهای ذکر شده، قطر داخلی لوله‌ها هستند.

۲- جنس لوله‌های مورد نظر، پلی‌اتیلن (PE) و پی وی سی (PVC) است.



شکل (۱) - دیاگرام انرژی کل (بار پتانسیل یا ارتفاع، بار فشار یا پیزومتریک و بار سرعت انرژی جنبشی یا کینماتیک) در طول خط لوله انتقال مایع

$$Z=Y \quad J=I \quad Y_L=\text{بار افت موضعی} \quad \gamma=W$$

بطوریکه از شکل (۱) بر می‌آید، بار کل یا انرژی، از سه قسمت زیر تشکیل می‌شود:

- بار پتانسیل، یا بار ارتفاع (Y) نشان دهنده ارتفاع نسبت به خط مقایسه،

- بار فشار یا بار پیزومتریک $(\frac{P}{W})$ ،

- بار سرعت یا انرژی کینماتیک مایع، $(\frac{V^2}{2g})$.

در این حالت، بار کل یا انرژی کل عبارت خواهد بود از:

$$H = Y + \frac{P}{W} + \frac{V^2}{2g} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن:

Y = ارتفاع محور لوله تا سطح یا خط مبنا بر حسب m

P = فشار برحسب kg/m^2

W = جرم ویژه آب برحسب kg/m^3

V = سرعت متوسط جریان در لوله برحسب m/sec و

g = شتاب جاذبه یا شتاب ثقل زمین ($g = 9.81 \text{ m/sec}^2$).

جرم ویژه آب (W) در دمای مختلف در جدول شماره (۱) ارائه شده است. در بیشتر موارد می‌توان از رقم kg/m^3

$W=1000$ که دارای دقت مناسبی است استفاده کرد.

خط انرژی کل یا بار کل نمایانگر مقدار انرژی‌ای است که وزن واحد آب (kg) دارا ست. انرژی دارای بُعد متر (m)

است.

شیب خط هیدرولیکی I است که نشان دهنده افت بار بر واحد طول خط لوله انتقال جریان است و به طور

معمول برحسب متر بر کیلومتر (m/km) و یا در هزار (۰/۰۰) بیان می‌گردد. افت سریع خط انرژی در شکل بالا در

محل نصب شیر (Valve) نشان دهنده افت موضعی فشاری است که مربوط به بکار بردن شیر کنترل جریان

می‌گردد.

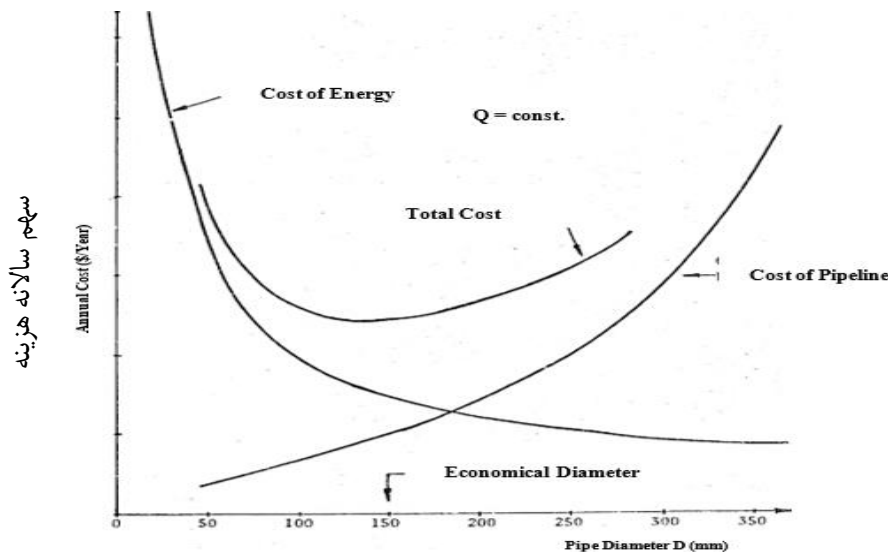
۱-۴- قطر اقتصادی

در احداث خط لوله، دو اصل اقتصادی بودن و سرعت جریان در لوله در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی برآورد مخارج اولیه انتقال جریان بوسیله لوله شامل دو بخش زیر است:

- مخارج احداث خط لوله انتقال و
- هزینه‌های تامین انرژی لازم به منظور رویارویی با افت بار یا افت انرژی خط لوله انتقال مایع.

هزینه احداث خط لوله انتقال جریان با افزایش قطر لوله افزایش می‌یابد؛ در حالی که با اضافه شدن قطر لوله، افت بار کاهش می‌یابد و در نتیجه از مخارج تامین انرژی کاسته می‌شود. قطر بهینه اقتصادی قطری از لوله است که در آن مجموع سهم سالانه مخارج اولیه احداث سامانه و هزینه سالانه تامین انرژی کمترین شود. این موارد در شکل شماره (۲) نشان داده شده است. همان گونه که گفته شد، قطری که برای انتقال جریان با دبی معلومی، کمترین مجموع هزینه‌های احداث و بهره‌برداری را داشته باشد، به نام **قطر اقتصادی لوله**^۱ نامیده می‌شود.

در این حال، سرعت متوسطی که این مقدار دبی را از آن لوله (با قطر معلوم) می‌تواند عبور دهد، به نام **سرعت اقتصادی جریان در لوله**^۲ نامیده می‌شود. تجربیات نشان داده است که سرعت اقتصادی جریان آب در لوله به طور معمول بین یک تا دو متر در ثانیه است و این سرعت با افزایش مقدار دبی زیاد می‌شود.



شکل (۲) - نمودار تغییرات مخارج احداث، تامین انرژی و هزینه کل برای تعیین قطر اقتصادی لوله

- 1- Pipe economical diameter
- 2- Pipe economical velocity

۲- افت بار در طول خط لوله^۱

۲-۱- معادله داریسی - ویسباخ

این رابطه یکی از معادلاتی است که برای تعیین افت بار اصطکاکی در خطوط لوله با قطرهای ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$h_l \text{ یا } h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن:

h_l یا h_f = افت بار بر حسب متر (m) ،

L = طول خط لوله بر حسب متر (m) ،

D = قطر داخلی لوله بر حسب متر (m) ،

V = سرعت متوسط جریان در لوله بر حسب متر در ثانیه (m/sec) ،

g = شتاب جاذبه زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه ($g = 9.81 \text{ m/sec}^2$) ، و

f = ضریب افت بار اصطکاکی (عددی بی بعد^۲) .

چنانچه در معادله بالا (معادله ۵) بجای سرعت، معادل آنرا از معادله (۲) یعنی $V = \frac{4Q}{\pi D^2}$ قرار دهیم، رابطه

داریسی - ویسباخ به صورت زیر در می‌آید:

$$h_l \text{ یا } h_f = \frac{\lambda \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5}$$

از سویی دیگر شیب هیدرولیکی (I) نیز عبارت خواهد بود از نسبت افت بار بر طول لوله ($I = \frac{h_l}{L}$) . بنابراین شیب

هیدرولیکی با تلفیق دو معادله بالا بصورت زیر در می‌آید:

$$I = \frac{h_l}{L} = \frac{\lambda \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot \frac{1}{L} \quad \text{معادله (۶)}$$

$$I = \frac{\lambda \cdot f \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5}$$

در این رابطه Q بر حسب مترمکعب در ثانیه (m^3 / sec) و شیب هیدرولیکی بر حسب متر بر متر (m/m) است.

1- Longitudinal head losses

2- Dimensionless

در رابطه بالا، افت بار اصطکاک (f) عدد بی بعدی است که بین 0.01 تا 0.05 تغییر می‌کند و میانگین آن 0.025 است. این رقم را می‌توان به عنوان فرض اول در بیشتر محاسبات بکار برد. مقدار واقعی افت اصطکاک (f) به زبری نسبی لوله یعنی $\frac{\varepsilon}{D}$ و عدد رینولدز^۱ که در معادلات شماره (۱) و (۲) نیز به آن اشاره شد بستگی دارد.

رابطه بین این عوامل، یعنی f و عدد رینولدز (Re) و زبری نسبی ($\frac{\varepsilon}{D}$) در دیاگرامی که بنام **دیاگرام مودی**^۲ مشهور است، در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. مقدار f را با استفاده از این دیاگرام به عنوان تابعی از عدد رینولدز (Re) برای مقادیر مختلف زبری‌های نسبی لوله ($\frac{\varepsilon}{D}$) می‌توان بدست آورد.

با توجه به دیاگرام گفته شده، در بیشتر مواقع جریان در لوله‌های آبیاری با آبرسانی ناآرام یا متلاطم است. در این حالت عدد رینولدز از 4000 بیشتر است.

در صورتی که مقدار جریان کم باشد و حرکت در لوله‌های کم قطر انجام شود (سرعت کمتر از 0.2 متر در ثانیه و قطر کمتر از 20 میلی متر)، عدد رینولدز کمتر از 2000 می‌شود که نشان دهنده آرام بودن جریان در لوله است. در جریان آرام، زبری جدار لوله بر مقدار جریان اثر نمی‌گذارد. بنابراین رابطه بین افت بار اصطکاک (f) و عدد رینولدز (Re) به صورت زیر در می‌آید:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{معادله (۷)}$$

در ناحیه جریان ناآرام یا متلاطم که در دیاگرام مشخص شده است، سه نوع جریان ناآرام یا متلاطم قابل تشخیص است:

- جریان ناآرام ملایم^۳،
- جریان ناآرام شدید^۴، و
- جریان ناآرام بینابینی^۵.

1- Reynolds number
 2- Moody
 3- Smooth turbulent flow
 4- Rough turbulent flow
 5- Turbulent transitional flow

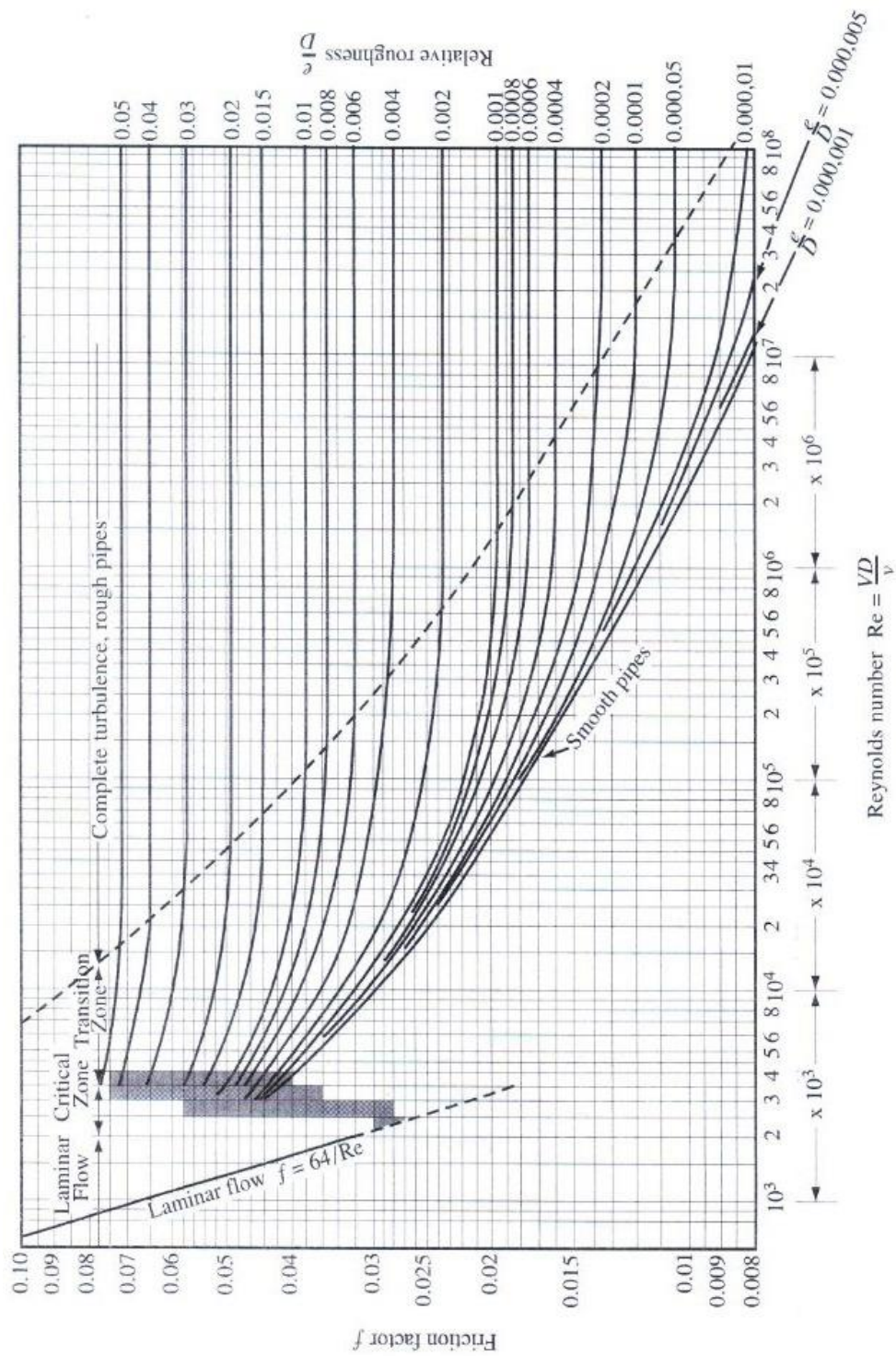
به طوری که در شکل (۳) نیز دیده می‌شود، جریان ناآرام ملایم موقعی ایجاد می‌شود که زبری نسبی ($\frac{\varepsilon}{D}$) کمتر $0/00001$ باشد. در این حالت، رابطه بین ضریب افت بار اصطکاک (f) و عدد رینولدز (Re) به شکل رابطه (۸) در می‌آید.

$$f = \frac{0/316}{Re^{0/25}} \quad \text{معادله (۸)}$$

مقادیر شیب هیدرولیکی (I) که از فرمول (۶) با استفاده از مقدار (f) معادله (۸) برای جریان ناآرام یا ناآرام ملایم محاسبه گردیده، در جدول (۳) نشان داده شده است.

در این جدول، مقادیر (f) برحسب متر بر کیلومتر (m/km) بیان شده است. این مقادیر کمترین ارقام ممکن و حاصل اثر متقابل قطر لوله و سرعت متوسط جریان (یا دبی) است. در حالی که جریان ناآرام یا ناآرام ملایم نباشد، ضریب اصطکاک و نیز شیب هیدرولیکی بیشتر می‌شود. مقادیر زبری معادل (ε) برای لوله‌های تجارتي مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است.

۱- ضریب زبری معادل (ε) برابر زبری داخلی لوله ایست که جدار داخلی آن بوسیله ذرات ماسه با فطر یکسان اندود شده باشد



شکل (۳) دیاگرام مودی برای تعیین ضریب افت اصطکاکی و تشخیص نوع جریان در لوله‌ها

جدول (۳) مقادیر شیب هیدرولیکی برای جریان با رژیم ناآرام ملایم در سرعت و قطرهای مختلف لوله

سرعت (متر بر ثانیه)	D=۵۰ (mm)	D=۱۰۰ (mm)	D=۱۵۰ (mm)	D=۲۰۰ (mm)	D=۲۵۰ (mm)	D=۳۰۰ (mm)	D=۳۵۰ (mm)
۰/۲	۱/۲۴	۰/۵۳	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۱۳۵	۰/۱۱۲
۰/۴	۴/۲	۱/۷۷	۱/۰۸	۰/۷۶	۰/۵۸	۰/۴۶	۰/۳۹
۰/۶	۸/۵	۳/۶۵	۲/۲۴	۱/۵۸	۱/۲۰	۰/۹۷	۰/۸۱
۰/۸	۱۴/۸	۶/۱	۳/۷۵	۲/۶۳	۲/۰۲	۱/۶۳	۱/۳۵
۱/۰	۲۱/۲	۹/۱	۵/۶	۳/۹۶	۳/۰۴	۲/۴۲	۲/۰۳
۱/۲	۲۹/۱	۱۲/۶	۷/۷	۵/۶	۴/۲	۳/۳۸	۲/۸۲
۱/۴	۳۸/۶	۱۶/۷	۱۰/۳	۷/۲	۵/۶	۴/۵	۳/۷۲
۱/۶	۴۹/۰	۲۱/۰	۱۳/۳	۹/۲	۷/۱	۵/۷	۴/۷
۱/۸	۶۰/۰	۲۶/۲	۱۶/۲	۱۱/۴	۸/۸	۶/۸	۵/۹
۲/۰	۷۳/۰	۳۱/۷	۱۹/۵	۱۳/۷	۱۰/۶	۸/۵	۷/۲
۲/۲	۸۶/۰	۳۸/۲	۲۳/۱	۱۶/۴	۱۲/۶	۱۰/۲	۸/۵
۲/۴	۱۰۲/۰	۴۵/۰	۲۷/۰	۱۹/۲	۱۴/۷	۱۲/۰	۱۰/۰
۲/۶	۱۱۷/۰	۵۱/۰	۳۱/۴	۲۲/۲	۱۷/۱	۱۳/۹	۱۲/۶
۲/۸	۱۳۴/۰	۵۸/۰	۳۵/۸	۲۵/۴	۱۹/۷	۱۵/۹	۱۳/۷
۳/۰	۱۵۱/۰	۶۶/۰	۴۰/۵	۲۸/۸	۲۲/۳	۱۸/۱	۱۵/۱

- شیب هیدرولیکی بر حسب متر بر کیلومتر (m/km) یا (در هزار ۰/۰۰)

جدول (۴) مقادیر زبری معادل (ε) برای لوله های تجارتي مختلف

نوع لوله	میزان زبری معادل (mm)
لوله های فلزی بدون پوشش	
۱- لوله فلزی نو (زنگ زده)	۰/۱ - ۰/۰۱
۲- لوله فلزی کمی زنگ زده	۰/۱ - ۰/۴
۳- لوله فلزی زنگ زده	۰/۵ - ۱/۰
۴- لوله فلزی خیلی زنگ زده	۱/۰ - ۳/۰
لوله های فلزی گالوانیزه	
لوله های فلزی پوشش دار	
۱- پوشش یا اندود قیر گرم	۰/۰۵ - ۰/۱۵
۲- پوشش یا اندود قیر معمولی	۰/۱ - ۰/۲۰
۳- پوشش یا اندود سیمانی (در حالت سانتریفیوژ)	۰/۰۶ - ۰/۱۵
۴- پوشش یا اندود با سیمان معمولی	۰/۲ - ۱/۵
لوله های سیمان نسوز (فارسیت- ایرانیت و غیره)	
لوله های آلومینیومی نو	
لوله های بتونی	
۱- لوله های بتونی که با قالب صاف تهیه شده باشد	۰/۰۲ - ۰/۱۰
۲- لوله های بتونی که با حالت سانتریفیوژ تهیه شده باشد	۰/۱۰ - ۰/۴۰
۳- لوله های بتونی با دیواره ناصاف	۰/۴ - ۱/۰
۴- لوله های بتونی با دیواره بسیار ناصاف	۱/۰ - ۵/۰

۲-۲- رابطه هیزن- ویلیامز^۱

همان گونه که گفته شد تعداد زیادی رابطه تجربی در مهندسی هیدرولیک وجود دارد که رابطه مشهور هیزن- ویلیامز یکی از شناخته شده ترین آنهاست. این رابطه در طراحی سیستم های انتقال آب کاربرد دارد. رابطه هیزن ویلیامز نسبت به روابط دیگری که افت بارها را محاسبه می کنند، از این جهت امتیاز دارد که ضریب اصطکاک در آن تابعی از عدد رینولدز نیست. این معادله تنها برای آب معتبر است و تاثیر دما و لزوجت را در نظر نمی گیرد. این رابطه پرکاربرد بصورت زیر نوشته می شود:

$$V = 1/0.96 \times 10^{-4} \times C_{HW} \times I^{0.54} \times D^{0.63} \quad \text{معادله (۹)}$$

و شیب هیدرولیکی با استفاده از معادله (۹) عبارت خواهد بود از:

$$I^{0.54} = \frac{V}{1/0.96 \times 10^{-4} \times C_{HW} \times D^{0.63}}$$

برای محاسبه I بایستی طرفین معادله را بتوان ۱/۸۵۲ (۱/۵۴) برسانیم در نتیجه:

$$I^{0.54 \times 1/852} = \frac{V^{1/852}}{(1/0.96 \times 10^{-4})^{1/852} \times C_{HW}^{1/852} \times D^{0.63 \times 1/852}}$$

معادله بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت یعنی:

$$I = \frac{1}{(1/0.96 \times 10^{-4})^{1/852}} \times \frac{V^{1/852}}{C_{HW}^{1/852} \times D^{1/167}}$$

ترم $\frac{1}{(1/0.96 \times 10^{-4})^{1/852}}$ را بایستی به این صورت درآورد تا محاسبات آن ساده‌تر شود.

$$\frac{1}{(1/0.96 \times 10^{-4})^{1/852}} = \frac{1}{\left(\frac{1/0.96}{10000}\right)^{1/852}} = \left(\frac{10000}{1/0.96}\right)^{1/852} = (9124)^{1/852}$$

حال بایستی از نتیجه اخیر لگاریتم بگیریم:

$$1/852 \log (9124) = 1/852 \times 3/9602 = 7/3342$$

از مقدار اخیر انتی لگاریتم می‌گیریم:

$$\text{anti log } 7/3342 = 21600000$$

و یا:

$$21600000 = 2/16 \times 10^7$$

با جایگزین کردن این مقدار در رابطه، معادله نهائی زیر حاصل می‌گردد:

$$I = \frac{2/16 \times 10^7 \times V^{1/852}}{C_{HW}^{1/852} \times D^{1/167}}$$

در این معادله سرعت برحسب متر بر ثانیه و قطر برحسب میلی متر بیان می‌گردد. لیکن شیب هیدرولیکی برحسب متر بر کیلومتر یا در هزار است.

ضریب C_{HW} در معادله بالا که گاه برای منظور سادگی با حرف C نیز نمایش داده می‌شود، عبارت از ضریب زبری است که به نام ضریب زبری هیزن- ویلیامز شناخته می‌شود. این ضریب از ۷۰ تا ۱۵۰ تغییر می‌کند. ارقام بزرگتر مربوط به لوله‌های با جدار داخلی صیقلی است. ارقام ضریب زبری هیزن- ویلیامز برای لوله‌های مختلف در جداول (۵) و (۶) نشان داده شده است.

جدول (۵) مقادیر ضریب زبری هیزن- ویلیامز برای لوله‌های مختلف

لوله	مقدار ضریب زبری
لوله فلزی نو	۱۳۰-۱۴۰
لوله فلزی کمی زنگ زده	۱۱۵-۱۲۵
لوله فلزی زنگ زده	۱۰۰-۱۱۰
لوله فلزی کاملاً زنگ زده	۷۰-۹۰
لوله سیمان نسوز (ایرانیت)	۱۳۰-۱۴۰
لوله آلومینیومی	۱۴۰-۱۶۰
لوله بتونی صیقلی	۱۲۰-۱۴۰
لوله بتونی غیر صیقلی	۱۰۰-۱۲۰
لوله پلاستیکی، پی وی سی (PVC)، پلی اتیلن (PE)	۱۳۰-۱۵۰

جدول (۶) - نمونه‌ای از ضریب هیزن- ویلیامز برای انواع مختلف لوله‌های متداول در کشور

مقدار ضریب هیزن- ویلیامز (CHW)			نوع مواد تشکیل دهنده لوله
پیشنهادهای طراحی	لوله کهنه	لوله نو	
۱۳۰	۱۳۰	۱۵۰	پلی اتیلین (PE) و پی وی سی (PVC)
۱۳۰	۱۲۰	۱۴۰	آزبست سیمان
۱۴۰	-	۱۵۰	فایبر گلاس (Fiber glass)
۱۴۰	-	۱۵۰	سیمانی با پوشش آهن و یا فولاد
۱۰۰	۸۰	۱۳۰	لوله فولادی بدون درز
۱۰۰	-	۱۳۰	لوله با پوشش پرچ شده فولادی
۱۰۰	۸۰	۱۳۰	چدن
۱۰۰	۵۰	۱۳۰	چدن قیراندود
۱۰۰	۸۵	۱۲۰	بتن
۶۰	-	۶۰	فولاد موجدار
۱۱۵	۱۱۰	۱۲۰	لوله‌های چوبی
۸۰-۶۰	-	-	لوله‌های کهنه در شرایط بد

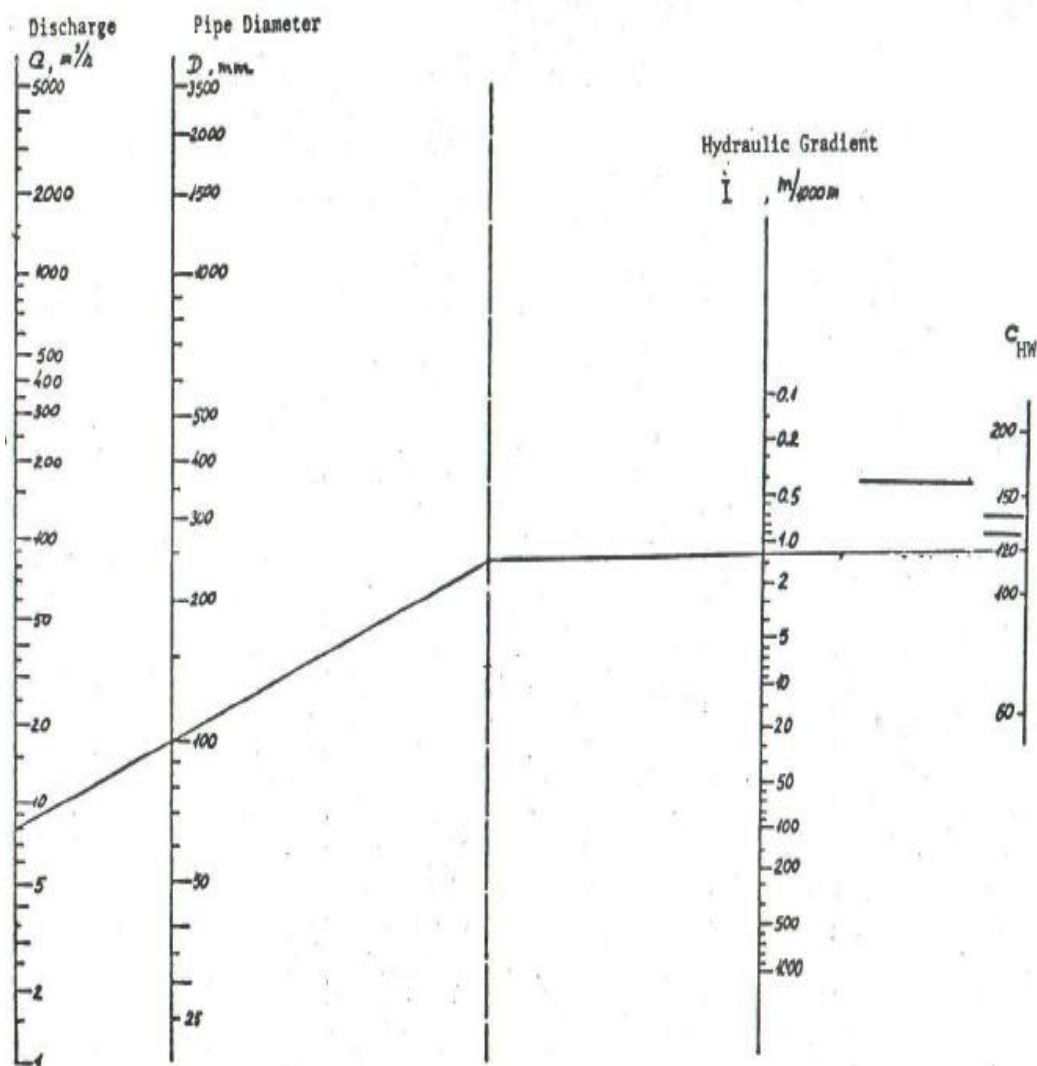
کاربرد گسترده رابطه هیزن- ویلیامز تا اندازه زیادی مربوط به امکان استفاده از ابزارهای محاسباتی است. نونموگرام و ماشین حساب‌های مهندسی می‌توانند با داشتن دو جزء معلوم، یکی از متغیرهای مجهول را برآورد کنند. نونموگرامی که با استفاده از رابطه هیزن- ویلیامز تهیه شده در شکل (۴) نشان داده شده است. هم چنین جداولی که با استفاده از آن‌ها می‌توان دبی را با معلوم بودن ضریب هیزن- ویلیامز ($C_{HW} = 120$ و 140) به دست آورد در جداول (۶-a) و (۶-b) نشان داده شده است.

با استفاده از این جداول، با معلوم بودن C_{HW} (120 و 140) در سرعت‌های مختلف می‌توان شیب هیدرولیکی را که از طریق معادله هیزن- ویلیامز محاسبه گردیده، به دست آورد. با کاربرد این جداول هم‌چنین می‌توان با

معلوم بودن قطر لوله، ضریب C ، شیب هیدرولیکی و سرعت متوسط جریان را استخراج و با استفاده از معادله

$$Q = \frac{\pi D^2 \cdot V}{4} \quad \text{یا} \quad V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

دبی را محاسبه کرد.



شکل (۴) نمودگرام تهیه شده برای تعیین ضریب معادله هیزن- ویلیامز در لوله‌ها

جدول (۷-a) شیب هیدرولیکی بر حسب متر بر کیلومتر با استفاده از معادله هیزن - ویلیامز برای ضریب زبری $CHW = 120$

سرعت	D=50	D=75	D=100	D=150	D=200	D=250	D=300	D=350
(متر بر ثانیه)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)
0.2	1/61	1/0	0.72	0.45	0.32	0.25	0.2	0.17
0.4	5/8	3/6	2/6	1/62	1/16	0.90	0.72	0.60
0.6	12/3	7/7	5/5	3/4	3/4	1/90	1/53	1/28
0.8	21/0	13/0	9/4	5/8	4/2	3/2	2/6	2/1
1.0	32/0	19/9	14/0	8/9	6/4	4/9	4/0	3/3
1.2	45/0	27	20/0	12/5	8/9	6/9	5/6	4/6
1.4	59/0	32	26	16/4	11/8	9/1	7/4	6/1
1.6	76/0	47	34	21/0	15/0	11/5	9/4	7/9
1.8	95/0	59	42	26	18/9	14/5	11/8	9/9
2.0	115/0	71	51	32	23	17/1	14/2	11/9
2.2	-	85	61	38	27	21/0	17/0	14/1
2.4	-	100	72	45	32	24	19/9	16/6
2.6	-	116	84	52	37	29	23	19/5
2.8	-	-	96	60	43/0	33/0	27/0	22/0
3.0	-	-	108	69	48/0	37/0	30/0	25/0

 جدول (۷-b) شیب هیدرولیکی بر حسب متر بر کیلومتر با استفاده از معادله هیزن - ویلیامز برای ضریب زبری $CHW = 140$

سرعت	D=50	D=75	D=100	D=150	D=200	D=250	D=300	D=350
(متر بر ثانیه)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)	(میلی متر)
0.2	1/20	0.75	0.54	0.34	0.24	0.19	0.15	0.12
0.4	4/4	2/7	1/95	1/22	0.85	0.67	0.54	0.45
0.6	9/3	5/8	4/2	2/6	1/85	1/42	1/15	0.96
0.8	15/9	9/9	7/0	4/4	3/2	1/4	1/95	1/65
1.0	24/0	14/9	10/7	6/6	4/8	3/7	3/0	2/5
1.2	34/0	21/0	15/0	9/3	6/8	5/2	4/2	3/5
1.4	45/0	27/0	20/0	12/5	8/9	6/9	5/6	4/6
1.6	57/0	36/0	26/0	15/9	11/3	8/8	7/1	5/9
1.8	71/0	44/0	32/0	19/5	14/1	11/0	8/9	7/4
2.0	86/0	54/0	38/0	24/0	17/1	13/1	10/7	9/0
2.2	102/0	65/0	45/0	27/0	20/0	15/9	12/8	10/7
2.4	120/0	75/0	54/0	34/0	24/0	18/5	15/0	12/5
2.6	-	88/0	63/0	38/0	28/0	22	17/5	14/5
2.8	-	100/0	72/0	45	32	25	20	16/5
3.0	-	112/0	81/0	50	36	28	23	19

۲-۳- افت بار موضعی در اثر کاربرد اتصالات در خط لوله

افت بار موضعی که در اثر کاربرد اتصالات در خط لوله روی می‌دهد، به طور معمول ۵ تا ۱۰ درصد کل افت بار را در خط لوله شامل می‌شود. این افت‌ها به طور معمول به دلیل وجود مانع در جهت جریان عبور سیال و برخورد یا تماس آن با اتصالات روی می‌دهد.

مقدار افت باری که هر یک از اتصالات در خط لوله ایجاد می‌کنند، به شکل و ابعاد آن و درجه مقاومتی که در برابر جریان (در مقایسه با حرکت مستقیم جریان) پیش می‌آورد بستگی دارد. چنین معمول است که اثر عدد رینولدز (Re) را در افت بار موضعی نادیده می‌گیرند. افت بارهای موضعی که در اثر کاربرد اتصالات در سیستم پیش می‌آید، تنها در صد کمی از افت بار کل را تشکیل می‌دهد. در این حالت افت بار موضعی تنها تابعی از سرعت جریان و نوع اتصال است و رابطه آن به شرح زیر است:

$$h_{LK} = K \frac{V^2}{2g} \quad \text{معادله (۱۰)}$$

که در آن h_{LK} مقدار افت بار موضعی و K ضریب ثابت افت بار نامیده می‌شود. مقدار K وسیله آزمون‌های هیدرولیکی محاسبه می‌گردد. مقادیر K برای چند اتصال متداول در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول (۸) مقادیر ضریب افت موضعی K برای چند اتصال معمول

ردیف	نوع اتصال	مقدار ضریب K
۱	اتصال لوله به فلاش تانک (منبع)	۰/۵
۲	اتصال لوله به تانک یا منبع	۰/۰۵
۳	لوله خروجی آب از منبع	۱/۰
۴	زانویی ۹۰ درجه	۰/۵ تا ۰/۹
۵	زانویی ۴۵ درجه	۰/۳ تا ۰/۵
۶	شیرفلکه (با مجرای عبور جریان مستقیم)	۰/۱ تا ۰/۳
۷	شیر یکطرفه	۱
۸	شیر ایزولاسیون باز	۰/۴
۹	شیرفلکه (با مجرای عبور جریان منحنی یا قوسی)	۳-۵
۱۰	شیر کنترل جریان	۳-۵
۱۱	شیر صفحه‌ای شیب دار	۲-۴

۳- طول لوله معادل

به منظور ساده‌تر کردن محاسبات هیدرولیکی، گاهی به جای استفاده از چند قطر لوله، یک قطر انتخاب می‌شود و طولی از آن که افت باری یکسان ایجاد می‌کند را به عنوان طول لوله معادل^۱ نام گذاری می‌کنند. به عنوان نمونه ۱۰۰۰ متر از لوله پلاستیکی با قطر ۲۵۰ میلی متر هنگامی که دبی ۳۰ لیتر در ثانیه را از خود بگذرانند، همان مقدار افت بار در واحد

۱- طول معادل از جمله افت‌های جزئی و آن برابر با طولی از لوله است که در دبی مساوی افت باری برابر با آن ایجاد می‌نماید.

طول ایجاد می‌کند که ۳۷۰ متر لوله‌ای از همان جنس با قطر ۲۰۰ میلی‌متر، همان دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه را از خود عبور می‌دهد. این دو لوله را معادل یکدیگر می‌گویند زیرا هر دو آنها افت باری برابر (۱/۴۹ متر در هزار متر) ایجاد می‌کنند.

از معادل سازی، بیشتر برای در نظر گرفتن افت بار اتصالات استفاده می‌شود. به عنوان نمونه، طول معینی از لوله ممکن است همان میزان افت بار را ایجاد کند که در اثر کاربرد یکی از اتصالات (شیر، زانو، تبدیل، سه راهی و غیره...) با همان مقدار دبی حاصل گردد.

مفهوم لوله معادل به طور معمول در تجزیه و تحلیل شبکه‌های لوله‌کشی به منظور ساده سازی محاسبات به کار می‌رود. افت بار اتصالاتی مانند شیر، زانو، کاهنده و افزایشنده سطح مقطع و غیره در خط لوله می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$h_l = K \frac{V^2}{2g} \quad \text{معادله (۱۱)}$$

که در آن K ضریب افت بار موضعی و h_l افت باری است که بوسیله اتصالات به کار برده شده به وجود می‌آید و V سرعت متوسط جریان در خط لوله است. برای پیدا کردن رابطه‌ای که افت بار لوله معادل را نشان دهد، ابتدا باید افت بار را در طول خط لوله انتقال از معادله دارسی-وایسباخ و یا هیزن-ویلیامز محاسبه کرد.

$$h_l = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{معادله (۱۲)}$$

که در آن f ضریب افت بار اصطکاک، L طول خط لوله و D قطر لوله است. مقایسه مقدار افت بار در معادلات (۱۱) و (۱۲) با دبی معلوم (یا سرعت معلوم) معادله (۱۳) را نتیجه می‌دهد.

$$h_l = \frac{K.V^2}{2g} = \frac{f.L.V^2}{D.2g}$$

$$2g.f.L.V^2 = K.V^2.D.2g$$

$$L = \frac{K.V^2.D.2g}{2g.f.L.V^2}$$

با ساده کردن این رابطه، فرمول زیر حاصل می‌شود.

$$L = \frac{K.D}{f} \quad \text{معادله (۱۳)}$$

از این رابطه (معادله ۱۳) طول معادل را برای داشتن افت باری معادل افت در اتصالات مورد نظر می‌توان محاسبه کرد. کاربرد مقدار $f = 0.025$ در معادله (۱۳) آنرا بصورت معادله (۱۴) که برآوردی تقریبی است در می‌آورد. یعنی:

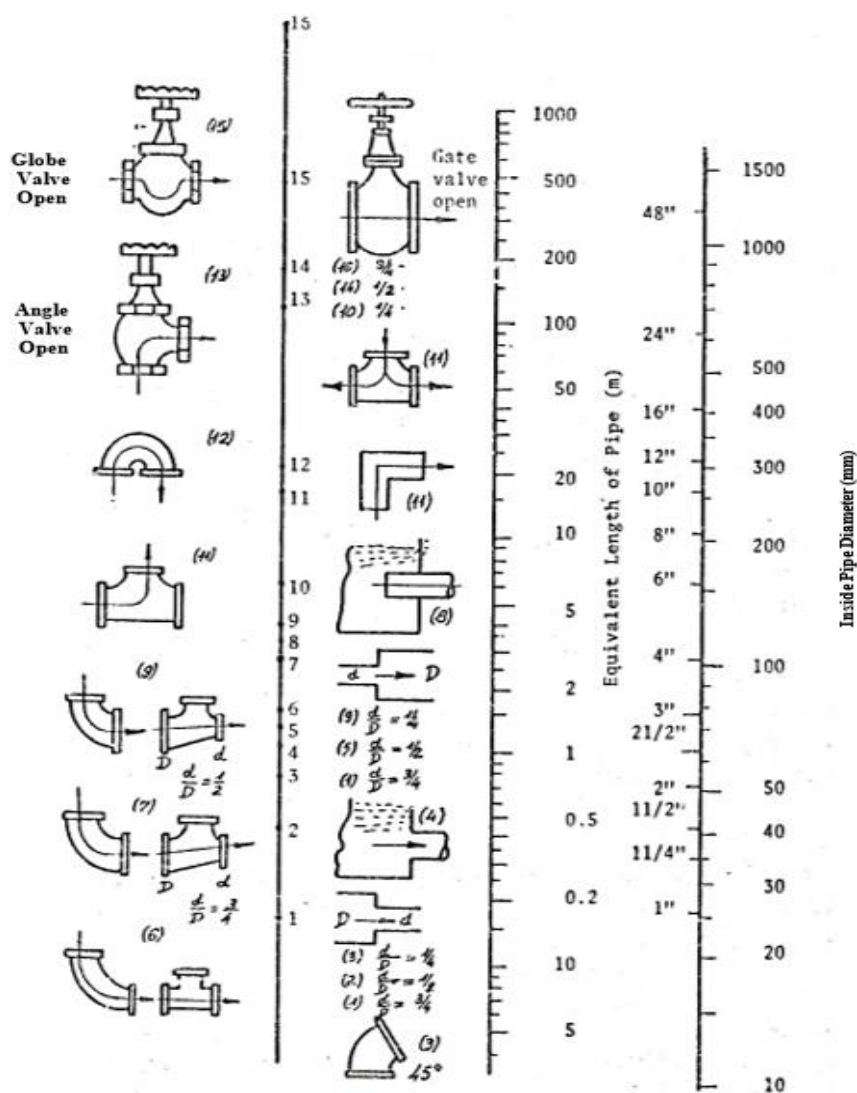
$$L = \frac{1}{f} \cdot K.D$$

$$L = \frac{1}{0.025} \cdot K.D$$

$$L = 40 \times K \times D \quad \text{معادله (۱۴)}$$

این رابطه نشان می‌دهد که طول معادل لوله که افت باری معادل افت بار در اتصالات مورد نظر را موجب می‌شود نزدیک ۴۰ برابر حاصل ضرب قطر لوله در ضریب افت موضعی K است.

نوموگرام شکل (۵) طول لوله معادل (برای محاسبه افت بار) را برای انواع اتصالات نشان می‌دهد.



شکل (۵) راهنمای تعیین طول معادل لوله برای انواع اتصالات کاربردی در خطوط لوله

در حالی که دو لوله دبی مشابهی را منتقل کنند، مطابق معادل داری - ویسباخ می توان نوشت:

$$h_l = \frac{\lambda \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad \text{معادله (۱۵)}$$

هنگامی که معادله بالا برای دو لوله، یکی با ضرایب (D_1, L_1, f_1) و دیگری با ضرایب (D_2, L_2, f_2) در نظر گرفته شود، و در آن دبی انتقال از هر دو لوله یکسان (و معادل Q) فرض شود، رابطه (۱۶) حاصل می گردد که با کمک آن می توان طول یک لوله را به ازاء لوله دیگر بدست آورد. یعنی:

$$\begin{aligned} h_{l1} &= h_{l2} \\ \frac{\lambda \cdot f_1 \cdot L_1 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_1^5} &= \frac{\lambda \cdot f_2 \cdot L_2 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_2^5} = \\ \pi^2 \cdot g \cdot D_1^5 \cdot \lambda \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot Q^2 &= \pi^2 \cdot g \cdot D_2^5 \cdot \lambda \cdot f_2 \cdot L_1 \cdot Q^2 \\ L_2 &= \frac{\pi^2 \cdot g \cdot D_2^5 \cdot \lambda \cdot f_1 \cdot L_1 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_1^5 \cdot \lambda \cdot f_2 \cdot Q^2} \\ L_2 &= \frac{f_1 \cdot D_2^5}{f_2 \cdot D_1^5} L_1 \end{aligned} \quad \text{در نتیجه :}$$

$$L_2 = \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \cdot \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \cdot L_1 \quad \text{معادله (۱۶) :}$$

در این رابطه لوله ای به طول L_2 که قطر آن D_2 و ضریب افت اصطکاک آن f_2 باشد، همان مقدار افت بار ایجاد می کند که لوله ای به طول L_1 با قطر D_1 و ضریب افت اصطکاک f_1 ایجاد می کند. در حالتی که ضریب افت اصطکاک هر دو لوله مساوی باشد ($f_2 = f_1$)، معادله (۱۶) به صورت ساده تر زیر در می آید:

$$L_2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \cdot L_1 \quad \text{معادله (۱۷)}$$

با انجام عملیات مشابهی با کاربرد معادله هیزن - ویلیامز می توان نشان داد که طول معادل یک لوله که نماینده میزان افت بار مشابه لوله دیگر است از معادله زیر قابل برآورد است:

$$\begin{aligned} I &= \frac{2/16 \times 10^7 \times V^{1/852}}{C_{HW}^{1/852} \times D^{1/167}} = \frac{h_l}{L} \\ h_l &= \frac{2/16 \times 10^7 \times V^{1/852} \times L}{C_{HW}^{1/852} \times D^{1/167}} \end{aligned}$$

در حالی که طول لوله اول L_1 و قطر آن D_1 و ضریب افت اصطکاک آن C_1 و به همین ترتیب، طول، قطر، و ضریب افت اصطکاک لوله دوم L_2 ، D_2 و C_2 نامیده شود، می توان نوشت: $h_{l1} = h_{l2}$

$$\frac{2/16 \times 10.7 \times V^{1/852} \times L_1}{C_1^{1/852} \times D_1^{1/167}} = \frac{2/16 \times 10.7 \times V^{1/852} \times L_2}{C_2^{1/852} \times D_2^{1/167}}$$

$$L_2 = \frac{2/16 \times 10.7 \times V^{1/852} \times L_1 \times C_2^{1/852} \times D_2^{1/167}}{2/16 \times 10.7 \times V^{1/852} \times C_1^{1/852} \times D_1^{1/167}} \quad \text{در نتیجه:}$$

چنانچه دبی در هر دو لوله ثابت باشد و مقدار آن معادل Q فرض شود، می‌توان به جای سرعت V معادل آن یعنی

$$\frac{Q}{A} \text{ را قرار داد.}$$

$$V^{1/852} = \left(\frac{Q}{A} \right)^{1/852} = \left(\frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \right)^{1/852} = \frac{Q^{1/852}}{\left(\frac{\pi}{4} \right)^{1/852} \times D^{2 \times 1/852}}$$

چنانچه این مقدار را بجای V در معادله قرار دهیم و با انجام عملیات جبری صورت و مخرج کسر را ساده نماییم،

معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$L_2 = \frac{D_2^{2 \times 1/852} \times L_1 \times C_2^{1/852} \times D_2^{1/167}}{D_1^{2 \times 1/852} \times C_1^{1/852} \times D_1^{1/167 \times 2}}$$

که آنرا به شکل زیر هم می‌توان نوشت:

$$L_2 = \frac{C_2^{1/852}}{C_1^{1/852}} \times \frac{D_2^{3/704} \times D_2^{1/167}}{D_1^{3/704} \times D_1^{1/167}} \times L_1$$

و فرم نهائی این معادله بصورت زیر در می‌آید:

$$L_2 = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{1/852} \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{4/87} \times L_1 \quad \text{معادله (۱۸)}$$

در حالیکه ضرایب C_1 و C_2 برای هر دو لوله مساوی باشند معادله (۱۸) بصورت معادله زیر در می‌آید:

$$L_2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{4/87} \times L_1 \quad \text{معادله (۱۹)}$$

از مفهوم طول معادل، به جز در مواقعی که لوله‌های هم قطر به یک لوله قطورتر اصلی متصل شده باشند، استفاده زیادی

نمی‌شود. این مفهوم، بیشتر در محاسبه افت اتصالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور معمول در طراحی مقدماتی یک شبکه

خط لوله انتقال آب به جای محاسبه افت یکایک اتصالات، از آن استفاده می‌شود. برای این منظور در محاسبات اولیه می‌توان

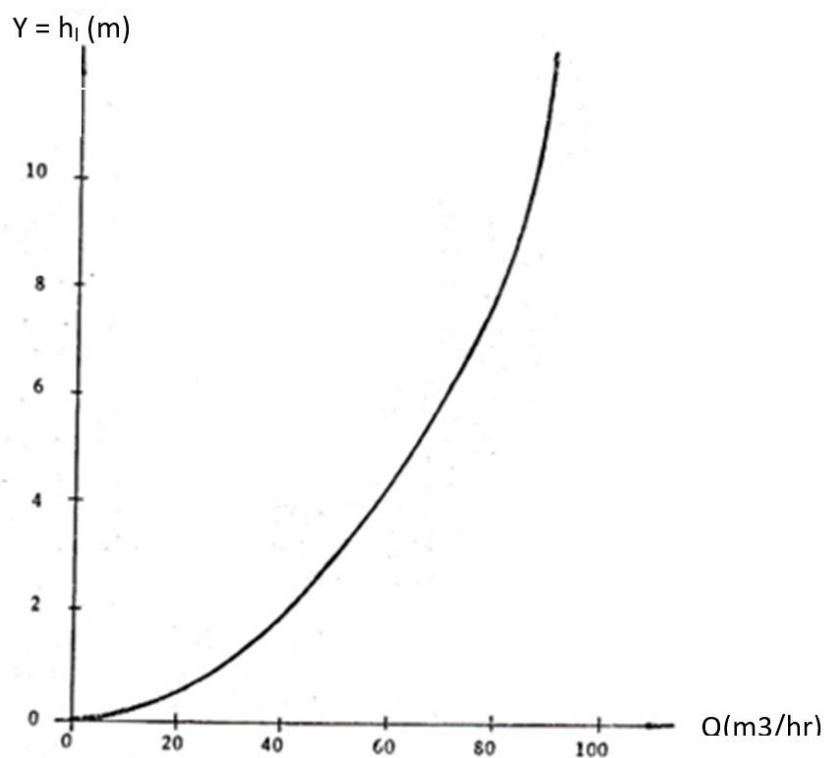
نزدیک ۵ تا ۲۰ درصد به طول لوله افزود.

۴- لوله‌های مرکب^۱

به طور معمول، لوله مرکب از دو یا چند شاخه لوله جداگانه است که همگی از یک منبع یا یک خط لوله اصلی تغذیه می‌شوند و به صورت سری یا موازی برای انتقال آب بین دو نقطه بکار می‌روند. یک شبکه خط لوله انتقال آب به طور معمول ترکیبی از تعدادی خط لوله فرعی می‌باشد که آب را در نقاط مختلف برای مصرف در یک شبکه منتقل می‌کند. هر سیستم لوله مرکب را می‌توان همانند یک لوله معادل با قطر و ضریب اصطکاک معین محسوب نمود. کاربرد چنین فرضیه‌ای منجر به تهیه منحنی مشخصه‌ای می‌گردد که در محاسبه افت بار در لوله‌های مرکب بکار می‌رود. چنین منحنی‌ای رابطه بین افت بار y یا h_l در طول خط لوله و دبی Q است که از آن می‌گذرد. فرم کلی منحنی مشخصاتی یک خط لوله را می‌توان بصورت زیر نشان داد:

$$y = h_l = K.Q^n \quad \text{معادله (۲۰)}$$

به عنوان نمونه منحنی مشخصاتی یک خط لوله در دیاگرام شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶) منحنی مشخصاتی رابطه افت بار و دبی در یک خط لوله

که در آن K ضریب مقاومت لوله است و خود به قطر، طول و نوع لوله بستگی دارد. n توانی است که مقدار آن با تعیین ضریب مقاومت لوله معلوم می‌شود. چنانچه در محاسبه افت بار از معادله دارسی-وایسباخ استفاده شود، مقدار $n = 2$ خواهد بود.

$$h_l = \frac{\lambda \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} = \frac{\lambda \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \times Q^2$$

مقایسه رابطه اخیر با معادله (۲۰) نشان می‌دهد که مقدار K در معادله (۲۰) برابر است با:

$$K = \frac{\lambda \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad \text{معادله (۲۱)}$$

$$K \cdot Q^n = K \cdot Q^2 \quad \text{پس می‌توان نوشت:}$$

$$h_l = K \cdot Q^2 \quad \text{معادله (۲۲)}$$

در رابطه بالا h_l برحسب متر و دبی برحسب مترمکعب در ثانیه بیان می‌گردد. در عمل ساده‌تر خواهد بود اگر دبی برحسب مترمکعب در ساعت بکار برده شود. در این حالت مقدار K برابر ۳۶۰۰ است که همان ضریب تبدیل از مترمکعب در ثانیه به مترمکعب در ساعت است.

چنانچه رابطه هیزن-ویلیامز برای تعیین افت بار بکار رود، در این حالت توان n مساوی با ۱/۸۵۲ است و معادله (۲۲) بصورت زیر در می‌آید:

$$h_l = K \times Q^{1/852} \quad \text{معادله (۲۳)}$$

در این رابطه، مقدار K به نوع لوله و واحدهای بکار رفته بستگی خواهد داشت. به طور معمول، دبی برحسب مترمکعب در ساعت و h_l برحسب متر بیان می‌شود.

منحنی مشخصاتی برای لوله مرکب ممکن است بطریق تهیه منحنی مربوط به هر رشته منفرد لوله با استفاده از روش زیر تهیه گردد. این نمونه برای لوله مرکب دو شاخه‌ای است. چنانچه تعداد لوله‌های فرعی آن بیش از دو لوله باشد نیز می‌توان از همین روش استفاده کرد.

حالت اول - در صورتی که مطابق شکل (۶) دو شاخه لوله بصورت اتصال سری باشند و دبی مشابهی از هر دو لوله بگذرد، مقدار افت بار در لوله مرکب با هر مقدار دبی مساوی خواهد بود با مجموع افت بار در هر قسمت مجزا (یعنی افت بار قسمت اول + افت بار قسمت دوم). یا:

$$h_{l_{total}} = h_{l(1)} + h_{l(2)} \quad \text{معادله (۲۴)}$$

که در آن :

$$h_{l_{total}} = \text{افت بار کل،}$$

$$h_{l(1)} = \text{افت بار در قسمت اول لوله، و}$$

$$h_{l(2)} = \text{افت بار در قسمت دوم لوله.}$$

چنانچه به ازاء مقادیر مختلف Q ، مقدار افت بار را در هر شاخه لوله، چه به تنهایی و چه برای مجموع دو شاخه لوله، محاسبه و بر محور مختصات منتقل و منحنی مربوطه را ترسیم گردد، منحنی مشخصاتی لوله مرکب مطابق شکل (۷) بدست خواهد آمد.

حالت دوم – فرض کنیم مطابق شکل (۸) یک سیستم لوله مرکب، شامل دو انشعاب موازی باشد. هر شاخه لوله، دبی معینی را منتقل می‌کند. در این حالت، افت بار دو شاخه لوله با یکدیگر برابر است و دبی کل، مجموع دبی عبوری از هر دو لوله خواهد بود یعنی:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad \text{معادله (۲۵)}$$

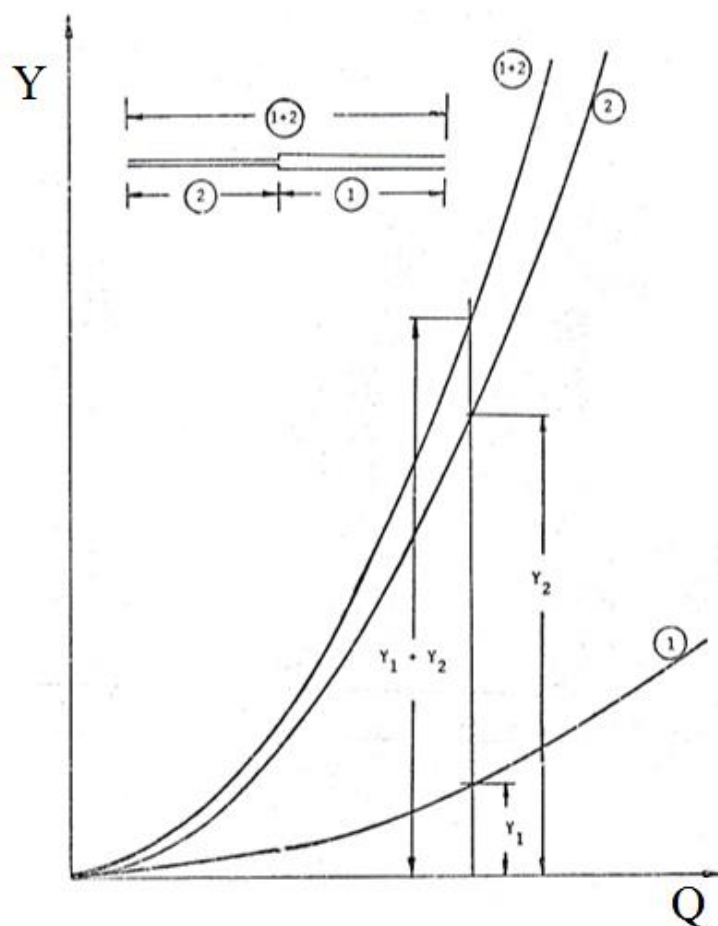
که در آن:

$$Q = \text{دبی کل سیستم مرکب،}$$

$$Q_1 = \text{دبی شاخه اول، و}$$

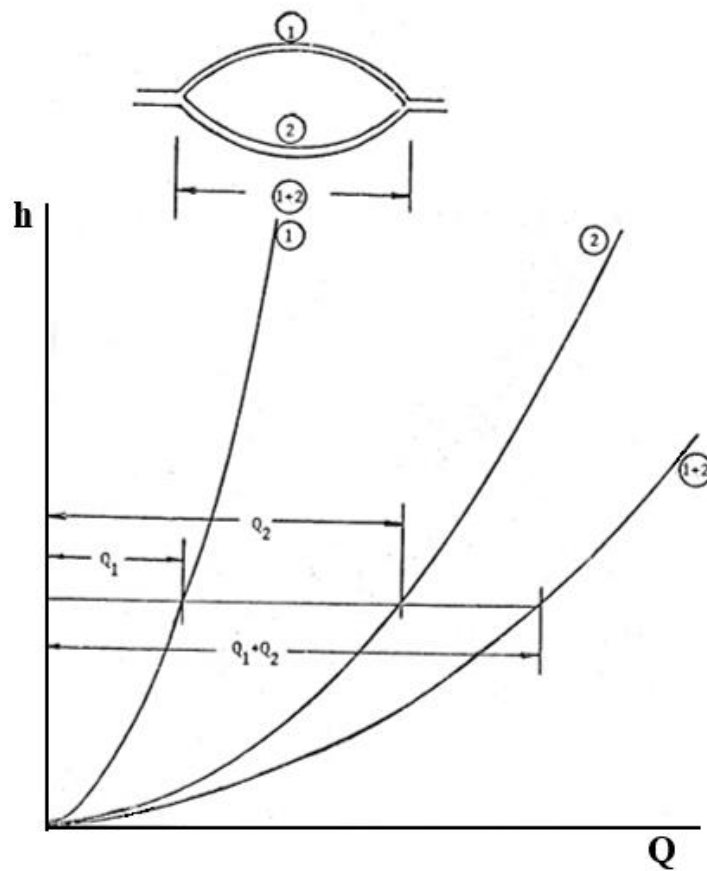
$$Q_2 = \text{دبی شاخه دوم است.}$$

منحنی مشخصاتی و نمودار لوله مرکب (رابطه بین H یا بار و Q یا دبی) در شکل (۹) نشان داده شده است. در هر مقدار فشار یا بار معین H می‌توان با امتداد افقی به موازات محور Q تا محلی که نمودار لوله مرکب یعنی منحنی (۱+۲) را قطع کند، دبی لوله مرکب ($Q_1 + Q_2$) را معلوم نمود.



شکل (۷) رابطه دبی و افت بار برای لوله مرکب در حالت اتصال سری

توسعه ایده تهیه منحنی مشخصاتی برای لوله‌های مرکب در حالی که شبکه آبرسانی از چندین رشته با شاخه فرعی خط انتقال تشکیل شده باشد، بیشتر نمودار می‌گردد. در شبکه‌هایی که منشعب بوده و آب را به نقاط مختلف برای مصرف توزیع می‌کنند، به طور معمول دبی‌ای که از خط اصلی انتقال آن می‌گذرد یا مقدار دبی‌ای که از منبع آب به شبکه فرستاده می‌شود، مقداری مساوی دارد. مقدار آن بستگی به فرم هندسی شبکه انتقال دارد. تشریح چنین حالتی در شکل (۸) نشان داده شده است.

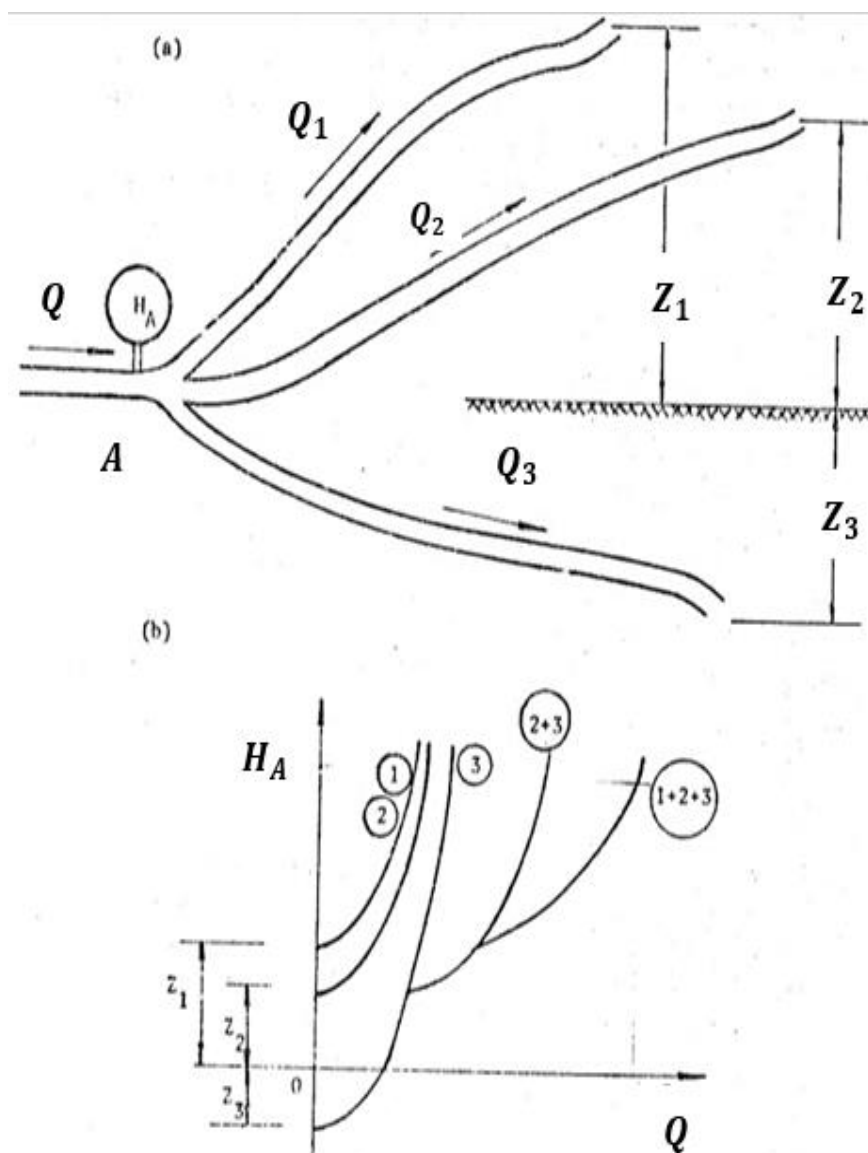


شکل (۸) رابطه دبی و بار فشار در حالت اتصال موازی

در شکل (۹) شبکه‌ای موازی با سه شاخه خط انتقال نشان داده شده است که همگی از خط لوله اصلی در نقطه A جدا می‌شوند و آب را به سه نقطه B، C و D که ارتفاع آنان به ترتیب Y_1 ، Y_2 و Y_3 است می‌رسانند. در حالی که سیستم قبل از نقطه A بصورت یک لوله مرکب فرض شود، می‌توان برای این لوله مرکب منحنی مشخصاتی تهیه نمود که اساس تهیه آن بر رسم منحنی مشخصاتی هر شاخه لوله منفرد (هر یک از سه شاخه) بستگی دارد. منحنی شکل (۹) رابطه بین میزان دبی کل در نقطه A در خط اصلی انتقال جریان و مقدار بار کل را که در همان نقطه یعنی H_A اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.

منحنی‌های مربوط به هر یک از شاخه‌هایی که با شماره‌های (۱) و (۲) و (۳) نشان داده شده رابطه بین مقدار فشار و دبی هر شاخه لوله را در حالی که از دو شاخه دیگر مقدار آبی گذر نکند (دو شاخه دیگر بسته باشند) نشان می‌دهد. منحنی‌ای که با (۲+۳)، نشان داده شده رابطه بین فشار و دبی را برای لوله‌های (۲) و (۳) در حالی

که لوله شماره (۱) بسته باشد نمودار می‌کند و بالاخره منحنی که با شماره $(۳+۲+۱)$ ، علامت گذاری شده است، منحنی مشخصاتی سیستم را که مشتمل بر سه شاخه لوله (که جریان آب از هر سه آنها می‌گذرد) نشان می‌دهد.



شکل (۹) نمودار مشخصاتی سامانه‌ای مشتمل بر سه شاخه لوله انتقال جریان آب

۵- جریان در لوله‌های نیمه پر

۵-۱- محاسبه جریان نیمه پر^۱ در لوله‌ها

در منابع اینترنتی می‌توان برنامه‌های فراوانی را یافت که با کمک آنها مسایل مربوط به لوله‌های نیمه پر را حل کرد. روشن است که جریان‌هایی که با هوا در تماس هستند، از جمله جریان‌های آزاد و یا غیر تحت فشار به شمار می‌روند. از این رو، هر چند در لوله جریان می‌یابند، اما قوانین مربوط به جریان‌های روباز در باره آنها کاربرد دارد. برای حل این گونه جریان‌ها می‌توان از رابطه مانینگ استفاده کرد که در سیستم بین‌المللی به شکل زیر است:

$$Q = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

که در آن:

Q = دبی جریان، مترمکعب بر ثانیه؛

n = ضریب زبری جدار؛

A = سطح مقطع خیس شده، متر مربع؛

$R = A/P$ = شعاع هیدرولیکی، متر؛

P = محیط خیس شده، متر؛ و

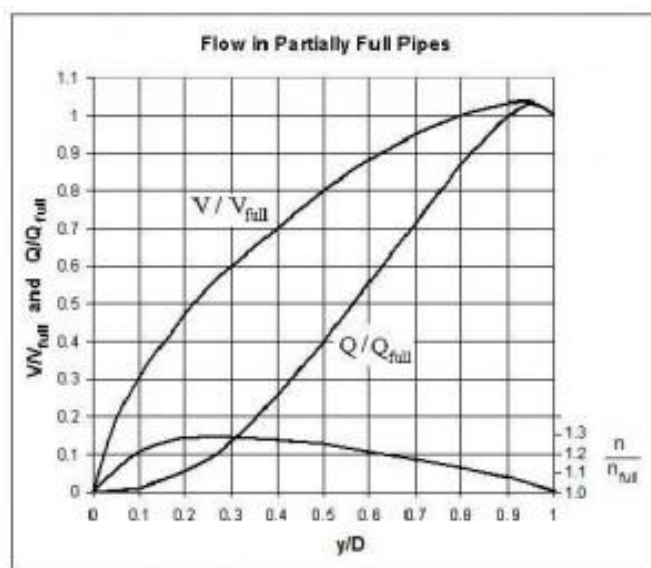
S = شیب خط انرژی، که در جریان یکنواخت^۲ برابر شیب کف است.

کاربرد رابطه مانینگ در لوله‌های نیمه پر چندان آسان نیست و برای یافتن مساحت و محیط خیس شده باید از روابط هندسی استفاده کرد. شکل (۱۰) می‌تواند راهنمایی برای یافتن عوامل سرعت، آبدهی و ضریب زبری جدار در لوله‌های نیمه پر نسبت به لوله‌های پر باشد.

1- Partially full pipe flow

2- Uniform flow

جریان یکنواخت جریانی است که در آن عمق آب نسبت به مکان تغییر نمی‌کند.



شکل (۱۰) - رابطه بین عمق خیس شده و قطر لوله (y/D) با سرعت و دبی در لوله نیمه پر نسبت به سرعت و دبی در لوله پر (V/V_{full} و Q/Q_{full})

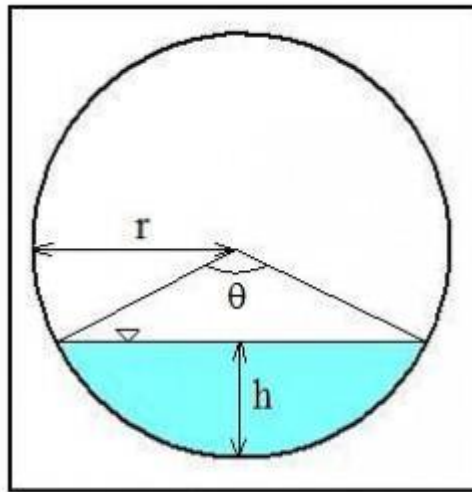
لازم به ذکر است که ضریب زبری جدار نیز با عمق آب در مقطع نیم لوله ثابت نیست. در حقیقت، همین موضوع است که به دشواری کار می‌افزاید. در غیر این صورت، محاسبات هندسی و مثلثاتی دیگر حاکم بر نیمه پر بودن لوله، همان گونه که در زیر ارائه شده، چندان دشوار نیست. ضریب زبری جدار، تنها پارامتری است که تغییرات آن با عمق را نمی‌توان با روابط هندسی تعریف کرد. یادآوری می‌شود که رابطه مانینگ، تجربی است و نباید از آن پاسخ‌های دقیق را انتظار داشت. این رابطه برای جریان‌های آزاد در کانال‌های مستطیلی شکل تدوین شده لیکن توانایی‌های آن برای مقاطع دیگر نیز به اثبات رسیده است. در باره جریان در لوله‌های نیمه پر نیز تا میانه قرن پیش، لزوم اصلاح ضریب زبری جدار آشکار نشده بود. در بسیاری از صفحه‌های گسترده چنین اصلاحی انجام نشده و باید در دقت پاسخ‌های آنها تردید کرد.

در هر حال، هنگامی که $y < D/2$ باشد، از روابط زیر می‌توان استفاده کرد:

$n/n_{full} = 1 + (y/D) (1/3)$	$0 < y/D < 0.03$
$n/n_{full} = 1.1 + (y/D - 0.03) (12/7)$	$0.03 < y/D < 0.1$
$n/n_{full} = 1.22 + (y/D - 0.1) (0.6)$	$0.1 < y/D < 0.2$
$n/n_{full} = 1.29$	$0.2 < y/D < 0.3$
$n/n_{full} = 1.29 - (y/D - 0.3) (0.2)$	$0.3 < y/D < 0.5$

محاسبات هنگامی که جریان در نیمه پایینی لوله وجود داشته باشد، یا بیش از نیمی از لوله پر باشد، اندکی متفاوت است. در زیر روابط مثلثاتی هر دو تشریح می‌شود:

حالت اول: هنگامی که عمق جریان کمتر از نصف قطر لوله باشد



شکل (۱۱) - عوامل موثر در حالتی که عمق جریان کمتر از نصف قطر لوله باشد

چنانچه r شعاع لوله، A مساحت قطعه دارای آب، P طول کمان و h بلندی همان قطعه و θ زاویه مرکزی آن باشد، می‌توان با استفاده از رابطه مانینگ و در نظر گرفتن معادله $Q = VA$ روابط زیر را به دست آورد:

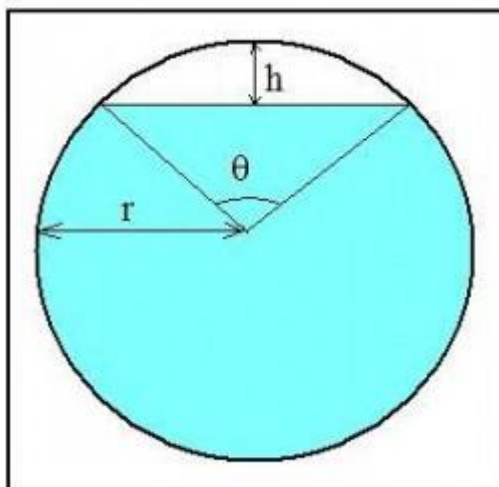
- $h = y$
- $\theta = 2 \arccos [(r - h)/r]$
- $A = r^2(\theta - \sin\theta)/2$
- $P = r\theta$

مثال نمونه:

فرض کنیم در ۱۰ سانتی متر از لوله‌ای به قطر ۳۰۰ میلی متر، آب جریان دارد. اگر شیب طولی لوله ۰/۰۰۴ و جنس لوله از آهن گالوانیزه باشد، سرعت ودبی جریان را پیدا کنید.

- $h = 0.1$
- $\theta = 2 \arccos [(r - h)/r] = 2 \arccos [(0.15 - 0.1)/0.15] = 140^\circ$
- $A = r^2(\theta - \sin\theta)/2 = 0.15^2(\pi \cdot 140/180 - \sin 140/180)/2 = 0.0273 \text{ m}^2$
- $P = r\theta = 0.15 \cdot \pi \cdot 140/360 = 0.1855 \text{ m}$
- $R = A/P = 0.0273/0.1855 = 0.147 \text{ m}$
- $y/D = 0.1/0.3 = 0.33$ $0.3 < y/D < 0.5$
- $n/n_{full} = 1.29 - (y/D - 0.3) (0.2) = n/0.015 = 1.29 - (0.33 - 0.3) (0.2) = 1.284$
- $n = 0.015 \cdot 1.284 = 0.0193$ (for galvanized iron)
- $S = 0.004$
- $Q = (1/n) A (R^{2/3}) (S^{1/2}) = (1/0.0193) \cdot 0.0273 (0.147^{2/3}) (0.004^{1/2}) = 0.00250 \text{ m}^3/\text{s} = 2.5 \text{ l/s}$
- $V = Q/A = 0.0025/0.0273 = 0.915 \text{ m/s}$

حالت دوم: هنگامی که عمق جریان بیشتر از نصف قطر لوله باشد



شکل (۱۲) - عوامل موثر در حالتی که عمق جریان بیشتر از نصف قطر لوله باشد

چنانچه r شعاع لوله، A مساحت قطعه دارای آب، P طول کمان و h بلندی قسمت بالای لوله، y عمق آب در لوله و θ زاویه مرکزی بخش بالایی نیم لوله باشد، می‌توان با استفاده از رابطه مانینگ و در نظر گرفتن $Q = VA$ روابط زیر را به دست آورد:

- $h = 2r - y$
- $\theta = 2 \arccos [(r - h)/r]$
- $A = \pi r^2 - A = \pi r^2 - r^2(\theta - \sin\theta)/2$
- $P = 2\pi r - P = 2\pi r - r\theta$

در این حالت، همواره y/D بین 0.5 و 1.0 است و رابطه زیر برای تعدیل n مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$n/n_{full} = 1.25 - [(y/D - 0.5)/2] \quad 0.5 < y/D < 1$$

مثال نمونه:

فرض کنیم تنها در **۱۰ سانتی متر** از لوله‌ای به قطر **۳۰۰ میلی متر**، آب جریان نداشته باشد. اگر شیب طولی لوله 0.004 و جنس لوله از آهن گالوانیزه باشد، سرعت و دبی جریان را پیدا کنید.

- $h = 0.3 - 0.1 = 0.2 \text{ m}$
- $\theta = 2 \arccos [(0.15 - 0.1)/0.15] = 141.4^\circ$
- $A = \pi r^2 - r^2(\theta - \sin\theta)/2 = 0.15^2(\pi * 141.4/180 - \sin 141.4/180)/2 = 0.0276 \text{ m}^2$
- $P = 2\pi r - r\theta = 2\pi * 0.15 - 0.15 * 141.4/180 = 0.8246 \text{ m}$
- $R = A/P = 0.0276/0.8246 = 0.0335 \text{ m}$
- $n/n_{full} = 1.25 - [(y/D - 0.5)/2] = 1.25 - (0.1/0.3)/2 = 1.08335$
- $n = 0.15(\text{for galvanized iron}) * 1.08335 = 0.1625$
- $S = 0.004$
- $Q = (1/n) A (R^{2/3}) (S^{1/2}) = (1/0.1625) * 0.0276 (0.0335^{2/3}) (0.004^{1/2}) = 0.1345 \text{ m}^3/\text{s} = 134.5 \text{ l/s}$

$$\blacksquare V = Q/A = 0.1345 / 0.0276 = 4.87 \text{ m/s}$$

۵-۲- صفحه‌های گسترده برای محاسبات

همان گونه که گفته شد، صفحات گسترده فراوانی در اینترنت وجود دارد که به آسانی پاسخگوی نیاز حل روابط هیدرولیکی لوله‌های پر (تحت فشار) و نیمه پر (جریان آزاد) هستند. در زیر نمونه‌ای از این صفحات دیده می‌شود. در لوله‌های نیمه پر، مهم‌ترین موضوع این است که برای دقت کافی لازم است ضریب زبری جدار لوله با توجه به نسبت پر بودن لوله تعدیل شود. در استفاده از این نرم افزارها باید اطمینان حاصل شود که این موضوع مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه، نمونه‌ای از این گونه صفحات گسترده ارائه شده است.

محاسبه افت بار در لوله

$$h_L = \text{افت بار در لوله}$$

$$\Delta P_f = \text{افت در اثر اصطکاک}$$

$$Q = \text{دبی عبوری از نیم لوله}$$

$$D = \text{قطر لوله}$$

$$L = \text{طول لوله}$$

$$\varepsilon = \text{زبری جدار لوله}$$

$$\rho \text{ و } \mu = \text{ویژگی‌های مایع درون لوله}$$

داده‌ها در سلول‌های آبی رنگ داده می‌شوند و نتایج در سلول‌های زرد رنگ آشکار می‌شوند

۱- ابتدا با استفاده از این رابطه و با فرض جریان درهم کامل، ضریب اصطکاک (f) به دست می‌آید:

$$\{f = [1.14 + 2 \log_{10} (D/\varepsilon)]^{-2}\}$$

Inputs (enter values in the blue boxes)

Pipe Diameter, D_{in}	6	in
Pipe Roughness, ε	0.0005	ft
Pipe Length, L	100	ft
Pipe Flow Rate, Q	0.600	cfs
Fluid Density, $\rho =$	1.94	slugs/ft ³
Fluid Viscosity, $\mu =$	0.0000273	lb-sec/ft ²

Calculations (done by spreadsheet)

Pipe Diameter, D	0.5000	ft
Friction Factor, f	0.01962	
Cross-Sect. Area, A	0.1963	ft ²
Ave. Velocity, V	3.1	ft/sec
Reynolds number, Re	108,575	

۲. باید کنترل کرد که آیا جریان به صورت در هم کامل^۱ هست یا خیر؟ برای این کار f در ناحیه بینابینی^۲ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود و با f در جریان درهمکامل مقایسه می‌گردد.

$$f = \{-2 \cdot \log_{10}[(e/D)/3.7 + (2.51/(Re \cdot (fL/2)))]\}^{-2}$$

Transition Region Friction Factor, f : $f =$ 0.0221

Repeat calc of f using new value of f : $f =$ 0.0220

Repeat again if necessary: $f =$ 0.0220

۳. محاسبه h و ΔP_f با به کار بردن مقدار f از گام پیشین

$$hL = f(L/D) (V^2/2g) \text{ and } \Delta P_f = \rho ghL$$

Frictional Head Loss, $hL =$ 0.64 ft

Frictional Pressure Drop, $\Delta P_f =$ 40 psf

Frictional Pressure Drop, $\Delta P_f =$ 0.28 Psi

1- Completely turbulent flow

2- Transition region

جدول (۹) - روابط مربوط به یافتن ضریب مودی در جریان‌های مختلف

$f = \frac{64}{Re}$	Laminar Flow	جریان آرام
$f = \frac{0.316}{Re^{1.4}}$	Smooth Pipe Turbulent Flow	جریان درهم در لوله‌های صاف
$f = \left[1.14 + 2 \log_{10} \left(\frac{D}{\epsilon} \right) \right]^{-2}$	Completely Turbulent Flow	جریان درهم کامل
$f = \left\{ -2 \log_{10} \left[\frac{(\epsilon/D)}{3.7} + \frac{2.51}{Re(f^{1.2})} \right] \right\}^{-2}$	Transition Region	ناحیه بینابینی

جدول (۱۰) - ضریب زبری جدار در لوله‌های با جنس مختلف

جنس لوله	زبری لوله (ε) بر حسب فوت (feet)
آلیاژ برنج یا مس	۰/۰۰۰۰۵
پی وی سی (PVC)	۰/۰۰۰۰۵
فولاد تجاری	۰/۰۰۰۱۵۰
آهن فرفورزه	۰/۰۰۰۱۵۰
چدن قیراندود	۰/۰۰۰۴۰۰
آهن گالوانیزه	۰/۰۰۰۵۰۰
چدن	۰/۰۰۰۸۵۰
بتن	۰/۰۰۱ - ۰/۰۱

محاسبه دبی جریان - افت اصطکاک

۱- ابتدا با استفاده از این رابطه و با فرض جریان درهمکامل، ضریب اصطکاک (f) به دست می آید:

$$\{f = [1.14 + 2 \log_{10}(D/\epsilon)]^{-2}\}$$

h_L = افت بار در لوله

ΔP_f = افت در اثر اصطکاک

Q = دبی عبوری از نیم لوله

D = قطر لوله

L = طول لوله

ϵ = زبری جدار لوله

ρ و μ = ویژگی های مایع درون لوله

داده ها در سلول های آبی رنگ داده می شوند و نتایج در سلول های زرد رنگ آشکار می شوند

Inputs (enter values in the blue boxes)

Calculations

Pipe Diameter, D_{in}	4	in	Pipe Diameter, D	0.3333	ft
Pipe Roughness, ϵ	0.0005	ft	Friction Factor, f	0.02170	
Pipe Length, L	40	ft	Cross-Sect. Area, A	0.0873	ft ²
Allowable Head Loss, h_L	0.9	ft	Assumed Flow Rate, Q	0.83	cfs
Fluid Density, ρ	1.94	slugs/ft ³	Ave. Velocity, V	9.5	ft/sec
Fluid Viscosity, μ	0.0000273	lb-sec/ft ²	Reynolds number, Re	225,293	

۲. باید کنترل کرد که آیا جریان به صورت درهمکامل هست یا خیر؟ برای این کار (f) در ناحیه بینابینی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود و با (f) در جریان درهمکامل مقایسه می‌گردد.

$$f = \{-2 \cdot \log_{10}[(\epsilon/D)/3.7 + (2.51/(Re \cdot (f^{1/2})))]\}^{-2}$$

Transition Region Friction Factor, f: $f =$ 0.0227

Repeat calc off using new value off: $f =$ 0.0227

Repeat again if necessary: $f =$ 0.0227

۳. محاسبه V و Q با استفاده از مقادیر نهایی (f) در مرحله پیشین در رابطه دارسی- ویسباخ

$$[V = (2g \cdot D \cdot h_L / f \cdot L)^{1/2}] \text{ and } Q = V(\pi D^2/4)$$

Fluid Velocity, V = 4.6 ft/sec

Fluid Flow Rate, Q = 0.40 cfs

باید به یاد داشت که این محاسبات با فرض مقدار معینی برای بده جریان بر پایه آزمون و خطا انجام می‌شود. چنانچه مقدار به دست آمده Q با مقدار فرض شده متفاوت باشد، باید مقدار به دست آمده را به عنوان فرض بعدی در نظر گرفت. این کار آن قدر ادامه می‌یابد که مقدار به دست آمده با مقدار مفروض متفاوت نباشد. این صفحه گسترده تنها مقدار جواب را نشان می‌دهد. مقادیر به دست آمده بینابینی و فرضی در نمونه بالا همانند جدولی است که در زیر نشان داده شده است.

Assumed Q, cfs

Calculated Q, cfs

1.5	0.85
0.85	0.83
0.83	0.83

محاسبه دبی جریان - افت اصطکاک

۱- ابتدا با استفاده از این رابطه و با فرض جریان درهمگام، ضریب اصطکاک (f) به دست می‌آید:

$$\{f = [1.14 + 2 \log_{10}(D/\epsilon)]^{-2}\}$$

h_L = افت بار در لوله

ΔP_f = افت در اثر اصطکاک

Q = دبی عبوری از نیم لوله

D = قطر لوله

L = طول لوله

ϵ = زبری جدار لوله

ρ و μ = ویژگی‌های مایع درون لوله

باید به خاطر داشت که این محاسبات با فرض مقدار معینی برای قطر لوله بر پایه آزمون و خطاست.

داده‌ها در سلول‌های آبی رنگ داده می‌شوند و نتایج در سلول‌های زرد رنگ آشکار می‌شوند

Inputs

Calculations

Allowable Head Loss, h_L	7	ft	Assumed Pipe Diam, D_m^*	4	in
Pipe Roughness, ϵ	0.0005	ft	Pipe Diameter, D	0.3333	Ft
Pipe Length, L	600	ft	Friction Factor, f	0.02170	
Pipe Flow Rate, Q	4.250	cfs	Cross-Sect. Area, A	0.0873	ft ²
Fluid Density, ρ	1.94	slugs/ft ³	Ave. Velocity, V	48.7	ft/sec
Fluid Viscosity, μ	0.000027	lb-sec/ft ²	Reynolds number, Re	#####	

۲. باید کنترل کرد که آیا جریان به صورت درهمکامل هست یا خیر؟ برای این کار (f) در ناحیه بینابینی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود و با (f) در جریان درهمکامل مقایسه می‌گردد.

$$f = \{-2 \cdot \log_{10} [(\epsilon/D)/3.7 + (2.51/(Re \cdot (f^{1/2})))]\}^{-2}$$

Transition Region Friction Factor, f :

$$f = 0.0219$$

Repeat calc off using new value off:

$$f = 0.0219$$

Repeat again if necessary:

$$f = 0.0219$$

۳. قطر لوله را با مقدار نهایی به دست آمده در گام پیشین محاسبه کنید.

$$[D = f(L/h_L)(V^2/2g)]$$

Pipe Diameter, $D =$

$$69.2757$$

ft =

$$831.3$$

in

باید به یاد داشت که قطر لوله در این محاسبات به آسانی همگرا نمی‌شود. چنانچه مقدار به دست آمده D بزرگتر از مقدار فرض شده باشد، باید مقدار به دست آمده را با در نظر گرفتن قطرهای موجود در بازار به عنوان فرض بعدی در نظر گرفت. این کار آن قدر ادامه می‌یابد که کمینه مقدار قطر تجاری لوله به دست آید. در مثال بالا، با فرض قطر لوله برابر با ۳ اینچ، پاسخ ۳/۴ اینچ به دست می‌آید. چنانچه فرض بعدی ۳/۵ اینچ (قطر تجاری کمی بزرگتر از پاسخ) در نظر گرفته شود، پاسخ نامناسب ۱/۸ اینچ به دست می‌آید. از این رو پاسخ این مثال ۳/۵ اینچ است.

قطرهای استاندارد لوله در ایالات متحده بر حسب اینچ عبارتند از:

1.8, 1.4, 3.8, 1.2, 3.4, 1, 1 1.4, 1 1.2, 2, 2 1.2, 3, 3 1.2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 30, 42, 48, 54, 60

بعضی تبدیلات سودمند (طول، مساحت و حجم) برای اعمال در محاسبات مربوطه

الف- ضرایب تبدیل طول از سیستم انگلیسی به سیستم متریک (SI)

طول	اینچ	فوت	یارد	مایل	سانتیمتر	متر	کیلومتر
۱- اینچ	۱	۰/۰۸۳	۰/۰۲۷	-	۲/۵۴	-	-
۱- فوت	۱۲	۱	۰/۳۳۳	-	۳۰/۴۸	۰/۳۰۵	-
۱- یارد	۳۶	۳	۱	-	۹۱/۴۴	۰/۹۱۴	-
۱- مایل	-	۵۲۸۰	۱۷۶۰	۱	-	۱۶۰۹	۱/۶۱
۱- سانتیمتر	۰/۳۹۴	۰/۰۳۳	۰/۰۱۱	-	-	۰/۱	-
۱- متر	۳۹/۳۷	۳/۲۸۱	۱/۰۹۴	-	۱۰۰	۱	۰/۰۰۱
۱- کیلومتر	-	۳۲۸۱	۱۰۹۴	۰/۶۲۱	-	۱۰۰۰	۱

ب- ضرایب تبدیل مساحت از سیستم انگلیسی به سیستم متریک (SI)

مساحت	اینچ مربع	فوت مربع	یارد مربع	آکر	سانتیمتر مربع	مترمربع	هکتار
۱- اینچ مربع	۱	۰/۰۰۷	-	-	۶/۴۵	۰/۰۰۰۶۴	-
۱- فوت مربع	۱۴۴	۱	۰/۱۱۱۱	-	-	۰/۰۹۲۹	-
۱- یارد مربع	۱۲۹۶	۹	۱	-	-	۰/۸۳۶۱	-
۱- ایگر	-	۴۳۵۶۰	۴۸۴۰	۱	-	۴۰۴۷	۰/۴۰۵
۱- سانتیمتر مربع	۰/۱۵۵	-	-	-	۱	۰/۰۰۰۱	-
۱- مترمربع	۱۵۵۰	۱۰/۷۶	۱/۲۰	-	۱۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۱
۱- هکتار	-	۱۰۷۶۵۰	۱۱۹۶۱	۲/۴۷	-	۱۰۰۰۰	۱

پ- ضرایب تبدیل حجم از سیستم انگلیسی به سیستم متریک (SI)

حجم	اینچ مکعب	فوت مکعب	گالن آمریکایی	لیتر	مترمکعب	آگر-فوت	هکتار-متر
۱- اینچ مکعب	۱	-	۰/۰۰۴۳	۰/۰۱۶۴	-	-	-
۱- فوت مکعب	۱۷۲۸	۱	۷/۴۸۱	۲۸/۳۲	۰/۰۲۸۳	-	-
۱- گالن آمریکایی	۲۳۱	۰/۱۳۴	۱	۳/۷۸۵	۰/۰۰۳۸	-	-
۱- لیتر	۶۱/۰۲	۰/۰۳۵۳	۰/۲۶۴۲	۱	۰/۰۰۱	-	-
۱- مترمکعب	۶۱۰۲۲	۳۵/۳۱	۲۶۴/۲	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۰۰۱
۱- آگر-فوت	-	۴۳۵۶۰	۳۲۵۸۷۲	-	۱۲۳۳/۴	۱	۰/۱۲۳۳
۱- هکتار-متر	-	۳۵۳۱۹۸	-	۱۰×۱۰۶	۱۰۰۰۰	۸/۱۰۸	۱

توجه: هر یارد مکعب = ۰/۷۶۵ مترمکعب و هر مترمکعب = ۱/۳۰۸ یارد مکعب است.

برخی منابع برای مطالعه بیشتر

- ۱- مشعل، محمود، [۱۳۹۷]. هیدرولیک در مهندسی عمران و محیط زیست (ترجمه) ویراست پنجم، چاپ دوم، شماره ۲۸۴۳، انتشارات دانشگاه تهران.
- 2- Bruce, E.L. [2000]. Civil Engineering Hydraulics and Engineering, Hydrology Engineering Press U.S.A.
- 3- Cuenca, R. H. [1989] Irrigation System Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- 4- Engineering Field Manual for Conservation Practices, [1969]. Soil Conservation Service, U.S. Dept of Agriculture Washington. D.C.
- 5- Frederick, S., [1976]. Standard Handbook for Civil Engineers, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co.
- 6- James, L. G. [1988] Principles of Farm Irrigation System Design, Wiley, New York.
- 7- Keller, J. and Bliesner, R. D. [1990] Sprinkle and Trickle Irrigation, Chapman and Hall, New York.
- 8- King, H.W. and E.F. Barter, [1963]. Handbook of Hydraulics. McGraw-Hill Book Co.
- 9- Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (2000). Hydraulics of pipeline systems. Boca Raton, FL, CRC Press.
- 10- Massis, H.M., [1963]. Applied Hydraulics in Engineering, Ronald Peen Co.
- 11- National Engineering Handbook (NEH). [1971]. Soil Conservation Service, Section 15, Irrigation, US Dept of Agriculture, Washington. D.C.
- 12- Parmley, R.O, [1995]. Field Engineer's Manual, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc.
- 13- Ralnd V. Gles. [1977]. Fluid Mechanics and Hydraulics, 2nd ed. Schaum's outline Series.
- 14- Scaloppi, E. J. and Allen, R. G. [1993] Hydraulics of Irrigation Laterals: Comparative Analysis, J. Irrig. and Drainage Engr., ASCE, 119(1), 91.
- 15- Schwab, G.O., and Fangmeier, D.D., [1993]. Soil and Water Conservation Engineering, 4th Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- 16- Street, R. L., Watters, G. Z., and Vennard, J. K. [1996] Elementary Fluid Mechanics, 7th Ed., John Wiley, New York.
- 17- U. S. Soil Conservation Service [1984] National Engineering Handbook, Sec. 15.