دانشکده: فنی و مهندسی

گروه: مکانیک

عنوان:
تهیه نرم افزار تحلیل شبکه های هیدرولیکی در حالت پایدار و گذرا

دانشجو: علیرضا مولوی

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات ارزنده جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان نهایت تشکر خود را ابراز و از خداوند متعال سلامتی و کامیابی برای ایشان خواستارم.

چکیده

این پایان نامه با هدف تهیه برنامه ای جهت تحلیل هیدرولیکی جریان سیال در شبکه های لوله در حالت پایدار و گذرا انجام شده است. برای این منظور ضمن مطالعه روش های تحلیل حالت پایدار، روش تئوری خطی به علت عدم نیاز به حدس اولیه و تقارب سریع جهت نوشتن برنامه انتخاب شد.

همچنین برای بررسی حالت گذرای جریان به تحلیل پدیده ضربه قوچ پرداخته شده است. تحلیل ضربه قوچ یا ضربه آبی با روش مشخصه ها و بصورت تقریبی حل می شود.

فهرست علائم و نشانه ها

ρ	چگالی سیال
V	سرعت متوسط
v	سرعت
A	سطح مقطع
ν	ویسکوزیته
γ	وزن مخصوص
P	فشار استاتیک
Q	دبی جریان
f	ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ
g	شتاب گرانش
L	طول لوله
Re	عدد رینولدز
H	هد پیزومتریک
a	سرعت موج
t	زمان

فهرست اشکال شماره صفحه

فهرست ***مطالب*** شماره ***صفحه***

فهرست مطالب | شماره صفحه

فهرست مطالب ***شماره صفحه***

فهرست مطالب ***شماره صفحه***

فصل اول

مقدمه

تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع آب اولین قدم در طراحی هرگونه سیستم آبرسانی شهری است. اصلاح شبکه های قدیم و یا توسعه آنها به دلیل گسترش مناطق مسکونی جدید مستلزم تحلیل هیدرولیکی آنهاست. هر شبکه باید قادر باشد آب مورد نیاز را با فشار کافی در هر موقع از شبانه روز و در هنگام پیک مصرف در اختیار مصرف کنندگان قرار دهد. چنانچه شبکه به لحاظ هیدرولیکی دارای نقایصی باشد، این منظور تامین نخواهد شد. تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع آب محاسبات ریاضی پیچیده و وقت گیری را بدنبال دارد و در مورد شبکه های واقعی، متشکل از تعداد زیاد لوله بصورت دستی امکان پذیر نیست. خوشبختانه وجود ریز کامپیوترها که امروزه در اختیار دانشجویان و مهندسین قرار دارد، کمک می کند که انجام حجم زیادی از محاسبات با دقت مناسب و در زمان کوتاهی انجام شود. به همین منظور در این پایان نامه هدف تهیه برنامه ای ساده است که اولا با شرح تئوری آن، آشنایی با اصول تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع سیال حاصل شود. ثانیا با شرح زیر روندهای آن امکان اشنایی با چگونگی تولید الگوریتم از تئوری و پیاده سازی آن فراهم شود و همچنین امکان اصلاح و توسعه برنامه وجود داشته باشد. و در نهایت اینکه برنامه به عنوان ابزاری قابل استفاده در اختیار دانشجویان و مهندسان قرار گیرد.

در ادامه مطابق مراحل فوق ابتدا به شرح تئوریک روابط حاکم بر جریان سیال در لوله ها و رفتار سایر اجزای شبکه می پردازیم. سپس روش های تحلیل شبکه ها را بررسی می کنیم و در انتها کدهای نوشته شده ارائه می شود.

فصل دوم

مبانی مکانیک سیالات

در این قسمت برای استنتاج مطالب بعدی و آشنایی با علائمی که برای خواص سیال در معادلات استفاده می شوند، بصورت مختصر خواص مایعات یا بطور دقیق تر سیالات غیر قابل تراکم و قوانین حاکم بر حرکت آنها بررسی می شود.

۲-۱- خواص سیالات

۲-۱-۱- چگالی

چگالی یک سیال عبارتست از جرم واحد حجم آن سیال که با حرف یونانی ρ نشان داده می شود. معادله ابعادی آن جرم بر مکعب طول است. درسیستم انگلیسی که با علامت اختصاری ES نشان داده می شود، برای واحد جرم اسلاگ و برای واحد طول از فوت استفاده می شود. و در سیستم بین المللی SI از واحد کیلوگرم برای جرم و متر برای طول استفاده می شود. و بنابراین واحد چگالی در سیستم انگلیسی اسلاگ بر فوت مکعب و در سیستم SI کیلوگرم بر متر مکعب است.

۲-۱-۲- وزن مخصوص

وزن مخصوص که گاهی وزن واحد نیز نامیده می شود، عبارتست از وزن سیال در واحد حجم آن که با حرف یونانی γ نشان داده می شود. بنابراین واحد آن در سیستم ES پوند بر فوت مکعب و در سیستم SI نیوتن برمتر مکعب است.

وزن مخصوص و چگالی سیال با توجه به شتاب ثقل زمین بصورت زیر با یکدیگر مرتبط هستند:

$$\gamma = \rho g \qquad (۱-۲)$$

که اندازه شتاب ثقل در سیستم های ES و SI عبارتست از:

$$\gamma = 32.2 \quad \frac{lb}{ft^3} \qquad \text{(ES)}$$

$$\gamma = 9.806 \quad \frac{N}{m^3} \qquad \text{(SI)}$$

۲-۱-۳- لزجت

خاصیت مهمی از سیال است که سیال بواسطه آن در مقابل حرکت، بصورت تنش برشی، در داخل سیال و همچنین مرز سیال با جدار ظرف، از خود مقاومت نشان می دهد. که به زبان ریاضی با رابطه زیر بیان می شود:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad (۲-۲)$$

رابطه فوق فقط در جریان ورقه ای صادق است و در جریان آشفته صادق نیست. در مورد روش تعیین رژیم جریان بعدا بحث خواهد شد.

چون حاصل بخش لزجت مطلق بر چگالی در معادله ها زیاد آشکار می شود، لذا تعریـف جداگانـه ای برای آن در نظر گرفته شده است که به اسم لزجت سینماتیک که با حرف یونانی ν نشان داده مـی شود، نامیده می شود.لزجت سینماتیک بفرم زیر تعریف می شود:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \qquad (۳-۲)$$

معادله ابعادی لزجت سینماتیک برابراست با مربع طول تقسیم بر زمـان، و واحـدهای مصـطلح آن در سیستم های ES و SI به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{ft^2}{Sec} \quad \text{و} \quad \frac{m^2}{Sec}$$

در ادامه بجای لزجت سینماتیک تنها از واژه لزجت استفاده می کنیم. در بسیاری از سیال هـا ماننـد آب لزجت، به درجه حرارت بستگی دارد و مستقل از تنش برشی است. به ایـن نـوع سـیالات، سـیال نیوتنی می گویند.

۲-۲- قوانین بقا

در مهندسی و علوم فیزیکی، بسیاری از محاسبات تحلیلی بر پایـه تعـداد محـدودی اصـول و مفـاهیم اساسی استوارند، که مهمترین آنها قوانین حرکت نیوتن و بقـای جـرم و انـرژی و مومنتـوم اسـت. بـه استثنای چند مورد محدود، جرم نه خلق و نه نابود می شود. انرژی فقط از شکلی به شکل دیگر تبدیل می شود و مومنتوم فقط در اثر اعمال نیرویی که در طی زمان وارد آید تغییر می کند.
در مکانیک سیالات شکل کمی بقای جرم را معادله پیوستگی می نامند که به صورتهای مختلف نشان داده می شود. یکی از شکلهای معادله بقای انرژی نیز که در هیدرولیک زیاد استفاده می شود، معادله برنولی است.

اصل مومنتوم نیز در تعیین نیروهای خارجی که بر سیال در حرکت وارد می شود وارد می شود بسیار مفید است. معادلاتی که از اصول سه گانه فوق حاصل می شوند اساسی ترین معادله هایی هستند که در حل مسائل مکانیک سیالات مورد استفاده قرار می گیرند. در این بخش اصول و معادلات مذکور با توجه خاص به حل مسائل مربوط به جریان سیال در لوله ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۲-۱- پیوستگی

بطور کلی معادله های ریاضی که اصل بقای جرم را در بر می گیرند به شکل معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی می باشند. این به آن علت است که معمولا کمیت های تشریح کننده جریان، مانند سرعتهای نقطه ای، توابعی از مکان و زمان ذره سیال هستند. در مورد جریان هایی که در آن متغیرها فقط در یک مختصات ساده مکانی تغییر می کنند و نسبت به زمان تغییر نمی کنند، برای تشریح این حقیقت که انرژی فنا شدنی نیست می توان از یک معادله جبری استفاده کرد. این گونه جریان ها را که در آنها خواص با زمان تغییر نمی کنند، جریان های پایدار یا ماندگار می نامند. در این بحث فقط جریان های یک بعدی مورد نظر هستند. یعنی جریانهایی که خصوصیات جریان فقط در یک بعد تغییر می کنند و در دو بعد دیگر قابل اغماض هستند.

در مکانیک جامدات، اصل بقای جرم بطور ساده به این صورت بکار برده می شود که جرم یک جسم ثابت باقی می ماند. ولی در برخورد با سیالات بجای اینکه مسیر هر یک از ذرات سیال را دنبال کنیم مناسب تر است که جرم سیالی را که از یک مقطع مشخص عبور می کند را در نظر بگیریم. بنابر این در معادله پیوستگی بجای اینکه تنها جرم در نظر گرفته شود، میزان جرمی که از مقطع جریان عبور می کند در نظر گرفته می شود. میزان جرم یا گذر جرمی بطور ساده عبارتست از جریان جرم یا مقدار جرمی که در واحد زمان از یک مقطع عبور می کند. واحد آن در سیستم انگلیسی $Slug/Sec$ و در

سیستم بین المللی Kg / Sec است. اگر گذر جرمی ماده را با G نشان دهیم، رابطه آن با سطح مقطع و سرعت جریان بصورت زیر است:

$$G = \rho VA \quad (۲-۴)$$

در رابطه فوق A وسعت سطح مقطع جریان که بر جهت جریان عمود است و V سرعت متوسط عبور جریان از این مقطع است. گذر حجمی جریان که با علامت Q نشان داده می شود، بصورت زیر تعریف می شود:

$$Q = AV \quad (۲-۵)$$

در مورد جریان های پایدار اصل بقای جرم ایجاب می کند که گذر جرمی در دو مقطع ۱ و ۲ که به فاصله مشخصی از هم قرار گرفته اند، برابر باشند، بنابر این:

$$G_1 = G_2 \quad (۲-۶)$$

و یا

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

معادله (۲-۶) شکلی از معادله پیوستگی است که برای جریان پایدار کاربرد دارد. برای جریان های غیر قابل تراکم، معادله پیوستگی بصورت زیر خلاصه می شود:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (۲-۷)$$

معادلات فوق بر این دلالت دارند که اگر چند لوله به هم متصل باشند، جرمی که به محل اتصال وارد می شود باید با جرمی که از محل اتصال خارج می شود برابر باشد. بزبان ریاضی:

$$\sum G_i = \sum \rho_i Q_i = 0 \quad (۲-۸)$$

که در رابطه فوق اندیس i شماره لوله هایی است که در نقطه اتصال بهم می پیوندند. بار دیگر در مورد سیال تراکم ناپذیر رابطه بفرم زیر خلاصه می شود:

$$\sum Q_i = 0 \qquad (۲-۹)$$

معادلات (۲-۸) و (۲-۹) در تحلیل شبکه های لوله کشی نقش بسیار مهمی ایفا می کنند. که در ادامه در مورد آن ها بیشتر بحث خواهد شد.

۲-۲-۲- *معادله برنولی (بقای انرژی)*

انرژی موجود در واحد جرم یک سیال در حال حرکت را که شامل ترم های انـرژی سـینتیک، انـرژی فشاری و انرژی پتانسیل ثقلی است را با صرفنظر از نحوه حصول آن با رابطه زیر بیان می کنیم:

$$e = gz + p/\rho + V^2/2 \qquad (۲-۱۰)$$

در هر جایی که سیال از بین مرزهایی (مثلا از یک مجـرا یـا در تمـاس بـا یـک جـدار) عبـور نمایـد، اصطکاک بوجود خواهد آمد. این اصطکاک موجب می شود که مقداری از انرژی مفیـد بـه حـرارت یـا شکل های دیگری که از نظر هیدرولیکی قابل احیا نیستند، تبـدیل شـود. همچنـین در طـول مسـیر ممکن است با یک پمپ انرژی مکانیکی e_M به واحد جرم سیال وارد شود و یا آنکه بوسـیله تـوربین، انرژی مکانیکی e_M از جریان جذب شود. اگر مقدار انرژی تلف شده در اثر اصطکاک سـیال را بـا e_L نشان دهیم، با وارد کردن این ترم ها در معادله بقای انرژی بین دو نقطه ۱ و ۲ از جریان یک سیال به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$g\,z_1 + p_1/\rho + V_1^2/2 + e_M = g\,z_2 + p_2/\rho + V_2^2/2 + e_L \qquad (۲-۱۱)$$

در معادله فوق هر یک از اجزا بر حسب انرژی بر واحد جرم بیان شده اند. اما در کارهای عملـی بهتـر است که هر یک از ترم ها بر حسب بعد طول L بیان شوند. این تبدیل ابعادی را می توان با تقسیم هر یک از اجزای معادله بر g (شتاب گرانش) انجام داد که نتیجه عبارتست از:

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}+h_M=z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}+h_L \qquad (۱۲-۲)$$

در محاسبات هیدرولیک، معادله (۲-۱۲) بیش از معادله(۲-۱۱) کاربرد دارد و به نـام معادلـه برنـولی نامیده می شود. به مجموع $z+\frac{p}{\gamma}$ بار هیدرولیکی یا بار پیزومتریک گفته می شود و بـه مجمـوع سـه جمله $z+\frac{p}{\gamma}+\frac{V^2}{2g}$ بار کل یا بار سکون می گویند. اگر خطوط مربوط به این دو معادله در طول مسیر جریان ترسیم شوند، بـه ترتیـب خـط شـیب هیـدرولیکی (Hydraulic Grade Line) و خـط انـرژی (Energy Line) حاصل می شود، که نشان دهنده بار پیزومتریـک و بـار کـل در هـر نقطـه از مسـیر می باشند.

۲-۲-۳- اصل بقای مومنتوم

اصل سوم بقا، یعنی بقای مومنتوم، که وسیله ای بسیار موثر در حل مسائل مربوط به جریان سـیالات است، بخصوص هنگامی که نیروهای وارد بر سیال، یا از طرف سیال به محیط مطرح می شوند.

با توجه به عدم استفاده از اصل بقای مومنتوم در ادامه مطالب، از توضیح بیشتر در مورد آن صرفنظر می شود.

فصل سوم

۳-۱- افت بار در اثر اصطکاک

برای تعیین افت بار در اثر اصطکاک، یعنی تبدیل انرژی جریان به نوع غیر قابل احیا ی هیدرولیکی، معادله های گوناگونی بکار گرفته می شوند که مهمترین آنها معادله دارسی ویسباخ و معادلات تجربی هایزن ویلیامز و مانینگ هستند.

اساسی ترین روش در محاسبه این نوع تلفات معادله دارسی ویسباخ است که به طریق آنالیز ابعادی استخراج شده است و به شکل زیر است[1]:

$$h_f = \frac{\Delta p}{\gamma} = f\,\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad (۱-۳)$$

که در آن f یک ضریب بی بعد بنام ضریب اصطکاک است. D قطر هیدرولیکی لوله، L طول لوله و V سرعت متوسط جریان در مقطع لوله و g شتاب ثقل زمین است. شعاع هیدرولیکی بر حسب تعریف عبارتست از چهار برابر سطح مقطع جریان تقسیم بر محیط خیس شده آن، که برای یک لوله با مقطع دایره، همان قطر لوله است.

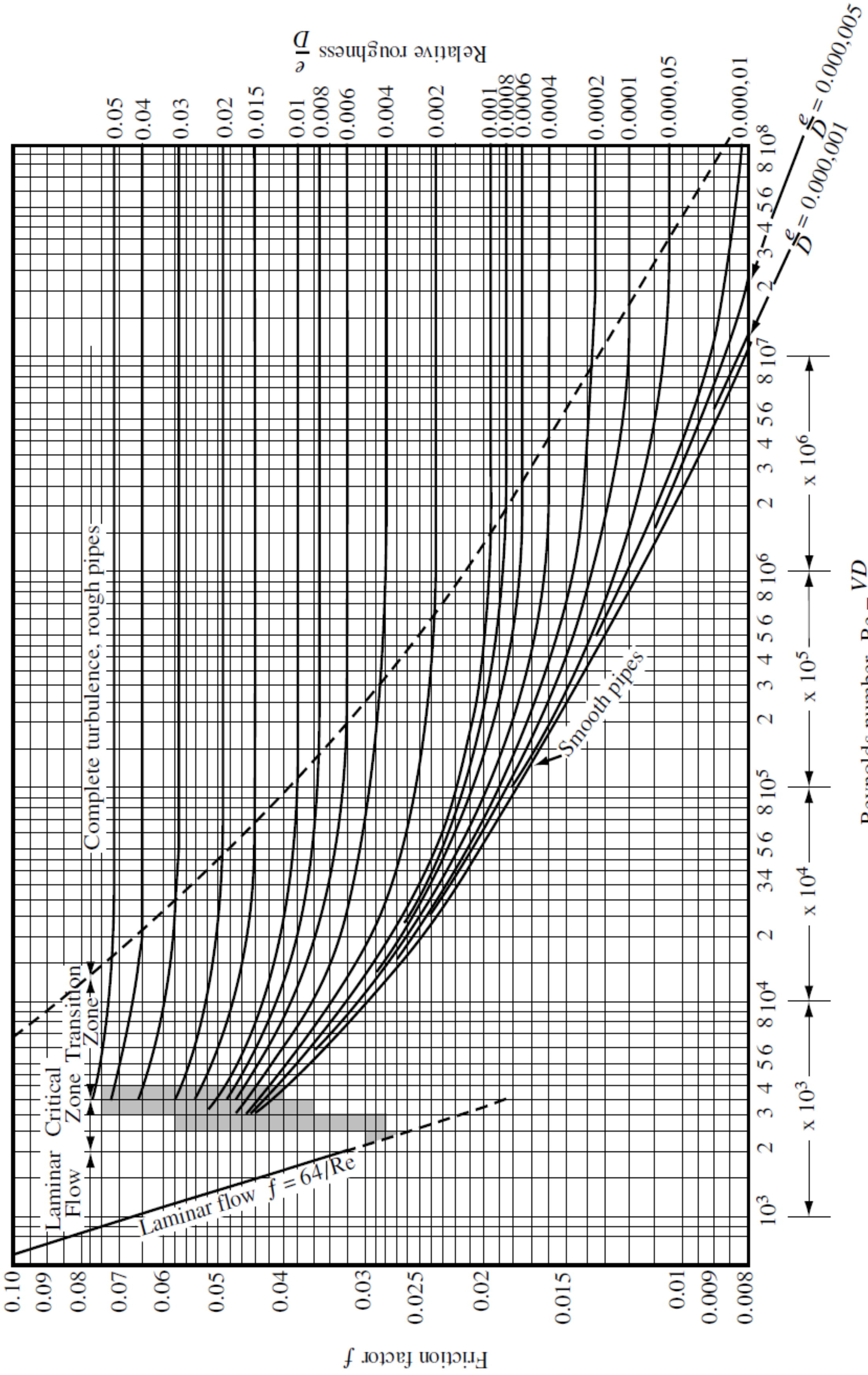
برای تعیین ضریب اصطکاک باید رژیم جریان مشخص باشد. که برای این منظور از عدد بی بعد رینولدز استفاده می شود.

$$\mathrm{Re} = \frac{VD}{\nu} \qquad (۲-۳)$$

نیکورادزه در سال ۱۹۳۳ با انجام آزمایشاتی نشان داد که ضریب اصطکاک تابع دو پارامتر است. یکی عدد رینولدز (Re) و دیگری زبری نسبی جدار لوله ($\frac{e}{D}$).

نیکورادزه توانست دانه های یکنواخت شن با اندازه های مختلف e را به جدار داخلی لوله هایی با قطرهای مختلف بچسباند و افت بار یا افت فشار حاصل از آن را اندازه گیری نماید. اگر نتایج حاصل از آزمایش را روی یک صفحه لگاریتمی ترسیم کنیم، بطوریکه محور افقی بیانگر عدد رینولدز و محور قائم نشان دهنده ضریب اصطکاک باشد، برای $\frac{e}{D}$ های مختلف شکلی مانند شکل (۳-۱) حاصل می شود.

به دیاگرام شکل (۳-۱) دیاگرام مودی می گویند که از آن برای تعیین ضریب اصکاک لوله ها بدون نیاز به محاسبه استفاده می شود.



شکل ۳-۱ دیاگرام مودی

از دیاگرام مودی نتایج زیر حاصل می شود:

۱- اگر عدد رینولدز کوچکتر از ۲۱۰۰ باشد، صرفنظر از مقدار زبری نسبی بازای هر مقدار رینولدز داده ها روی یک خط راست مشترک قرار می گیرند. چنین جریانی با عدد رینولدز کوچکتر از ۲۱۰۰ را جریان ورقه ای می نامند و معادله زیر در مورد آن صادق است:

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

۲- برای اعداد رینولدز بزرگتر از ۲۱۰۰ جریان آشفته (متلاطم) است. در این حالت در لوله هایی که جدار بسیار صاف دارند، دوباره داده ها روی یک خط قرار مـی گیرنـد. جریـان هـایی کـه وضعیت آن ها از این خط پیـروی مـی کننـد، صـاف هیـدرولیکی یـا صـاف مـتلاطم نامیـده می شوند. دراین نوع حرکت ها، قسمت اعظم جریان بصورت آشـفته اسـت و زبـری لولـه بـه اندازه ای کوچک است که در داخل لایه ورقه ای نزدیک جدار لوله قرار می گیرد.

۳- برای اعداد بزرگ رینولدز و یا مقادیر بزرگ زبری نسبی، f مستقل از عدد رینولدز بوده و فقط تابعی از $\frac{e}{D}$ است. برای این نوع جریان ها منحنیهای مربوط به هر یک از مقادیر $\frac{e}{D}$ در شکل ۳-۱ بصورت خطوط افقی در می آیند. در این شرایط جریان را زبر کامل و یا به اختصـار زبـر می نامند.

با توجه به مشاهدات بالا رژیم های جریان را به انواع ورقه ای، صاف متلاطم، انتقالی متلاطم و یـا زبر متلاطم طبقه بندی می کنیم. در سه مورد آخر برای اختصار از ذکر کلمه مـتلاطم خـودداری می شود.

۳-۱-۱- ضریب اصطکاک در جریان های ورقه ای

در جریان های ورقه ای که قانون لزجت نیوتن (معادله ۲-۲) برقرار است این امکان وجود دارد که رابطه ضریب اصطکاک را بصورت تئوری استخراج نمود (رابطه ۳-۳). در اینجا از شرح نحوه بدست آمدن معادله صرفنظر می کنیم.

۳-۱-۲- ضریب اصطکاک در جریان های آشفته

در مورد جریان های آشفته، معادلات زیر برای محاسبه ضریب اصطکاک استفاده می شود:
برای جریان صاف هیدرولیکی یا صاف آشفته از دو رابطه زیر استفاده می شود. معادله اول توسط بلازیوس پیشنهاد شده است و معادله دوم از نتایج آزمایشاتی که بخصوص توسط کلبروک صورت گرفته است، حاصل شده است.[۱]

$$f = \frac{0.316}{\mathrm{Re}^{0.25}} \qquad 4000 < \mathrm{Re} < 10^5 \qquad (۴\text{-}۳)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2\,Log_{10}(e/D) \qquad 4000 < \mathrm{Re} \qquad (۵\text{-}۳)$$

برای ناحیه انتقالی، بین ناحیه صاف هیدرولیکی و زبر کامل کلبروک و وایت رابطه زیر را پیشنهاد کردند:[۱]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\,Log_{10}\left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{2.52}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right) = 1.14 - 2\,Log_{10}\left(\frac{e}{D} + \frac{9.35}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right) \qquad 4000 < \mathrm{Re} \qquad (۶\text{-}۳)$$

و در نهایت برای ناحیه زبر هیدرولیکی یا زبر آشفته رابطه زیر را داریم:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2\,Log_{10}(e/D) = 1.14 + 22\,Log_{10}(e/D) \qquad 4000 < \mathrm{Re} \qquad (۷\text{-}۳)$$

معادلات فوق بجز معادله بلازیوس بطور صریح بر اساس f بیان نشده اند. و بنابراین برای بدست آوردن f از آنها نیاز به روش سعی و خطا و چند مرحله تکرار در محاسبات داریم. هرچند حل معادلات فوق برای بدست آوردن f توسط کامپیوتر و بروش نیوتن رافسون چندان مشکل نیست اما وود روش تقریبی صریحی برای بدست آوردن ضریب اصطکاک در شرایطی که جریان آشفته است ارائه کرده است. که دارای دقت مناسبی است و برنامه نویسی را آسان تر می کند. این معادله به شکل زیر است:

$$f = a + \frac{b}{\mathrm{Re}^{C}} \qquad (۸-۳)$$

$$a = 0.094(e/D)^{0.225} + 0.53(e/D)$$

$$b = 88(e/D)^{0.44}$$

$$C = 1.62(e/D)^{0.134}$$

۳-۱-۳- معادله هایزن ویلیامز:

با وجود اینکه معادله دارسی ویسباخ اساسی ترین معادله در محاسبه افت بار است، ولی غالبا از معادله های تجربی نیز استفاده می شود. که از بین آنها معادله هایزن ویلیامز پر کاربردتر است.

این معادله به شکل زیر بیان می شود:[۱]

$$ES \qquad Q = 1.318 C_{HW} A\ R^{0.63} S^{0.54} \qquad (۹-۳)$$

$$SI \qquad Q = 0.849 C_{HW} A\ R^{0.63} S^{0.54}$$

که در آن C_{HW} ضریب زبری هایزن ویلیامز و S شیب خط انرژی است. و R شعاع هیدرولیکی است.

اگر دبی مشخص باشد و بخواهیم افت بار را محاسبه کنیم، معادله هایزن ویلیامز در مورد لوله ها بصورت زیر خواهد بود:

$$h_f = \frac{4.73L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852} \qquad (۱۰-۳)$$

معادله فوق مربوط به آحاد انگلیسی است و در آن طول و قطر لوله هر دو برحسب فـوت هسـتند. اگر قطر لوله بر حسب اینچ در نظر بگیریم، رابطه بصورت زیر خواهد بود:

$$h_f = \frac{8.52 \times 10^{-5} L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852}$$

در سیستم بین المللی داریم:

$$h_f = \frac{10.675L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852} \qquad (۱۱-۳)$$

یکی دیگر از فرمولهای تجربی که برای محاسبه افت اصطکاک استفاده می شود، معادلـه مانینـگ است. این معادله برای جریان در آبراهه های روباز و به شکل زیر پیشنهاد شده است:

$$ES \qquad Q = \frac{1.49}{n} A\ R^{2/3} S^{1/2} \qquad (۱۲-۳)$$

$$SI \qquad Q = \frac{1}{n} A\ R^{2/3} S^{1/2}$$

بر اساس معادله فوق رابطه افت اصطکاک بصورت زیر حاصل می شود:

$$ES \qquad h_f = \frac{4.637 n^2 L}{D^{5.333}} Q^2 \qquad (۱۳-۳)$$

در معادله فوق قطر و طول هر دو بر حسب فوت هستند. اگر قطر بر حسب ایـنچ در نظـر گرفتـه شود، آنگاه:

$$h_f = \frac{2.64 \times 10^6 n^2 L}{D^{5.333}} Q^2$$

و

$$h_f = \frac{10.29 n^2 L}{D^{5.333}} Q^2 \qquad SI$$

در معادلات فوق n ضریب مانینگ است. با توجه به آنکه جدول های موجود برای ضریب مانینـگ برای کانال های روباز تهیه شده اند، که در آنها موج های سطحی مقداری افت انـرژی (افـت بـار) ایجاد می کنند. در نتیجه جوابهای حاصل از معادله مانینگ برای یک لوله پر از سیال نسـبت بـه جوابهای حاصل از معادلات دارسی ویسباخ و هایزن ویلیامز دارای خطاست.

در جدول زیر مقادیر ضریب هایزن ویلیامز و مانینگ برای لوله هایی که از مواد معمـولی سـاخته می شوند، ارائه شده است:[2]

جدول ۳-۱ مقادیر ضریب هایزن ویلیامز و مانینگ برای لوله های معمولی

جنس لوله	$n \times 10^3$	C_{HW}
لوله های PVC	۸	۱۵۰
لوله های خیلی صاف	۱۱	۱۴۰
چدن نو یا فولاد جوشی	۱۴	۱۳۰
چوب، بتن	۱۶	۱۲۰
فولاد پرچی نو	۱۷	۱۱۰
چدن کهنه، آجر	۲۰	۱۰۰
لوله آهنی یا فولادی که به شدت پوسیده باشد.	۳۵	۸۰

۳-۲- *کهنگی لوله ها*

دیاگرام مودی و مقادیر زبری مطلق که در حاشیه آن آمده است (شکل ۲-۱) مربوط به لوله های تمیز و نو است. لوله ها به مرور زمان در اثر خوردگی، پوسته پوسته شدن و نشستن رسـوب مـواد روی دیواره لوله، زبرتر می شوند و در نتیجه ضریب اصطکاک آنها در طی زمان تغییـر مـی کنـد.

نحوه تغییر ضریب اصطکاک با زمان عمدتاً به سیالی که با لوله منتقل می شود بستگی دارد. کلبروک و وایت دریافتند که زبری مطلق، e ، با زمان بطور خطی افزایش می یابد. اگر زبری لوله نو را به e_0 نشان بدهیم، داریم:[2]

$$e = e_0 + \alpha t \qquad (۱۴-۳)$$

برای تعیین α لازم است لوله مورد آزمایش قرار گیرد.

با انجام اندازه گیری بر روی شبکه های توزیع آب در هفت شهر بزرگ آمریکا، تغییرات ضریب هیزن ویلیامز در طی زمان را تعیین کرده اند. هرچند این تغییرات خطی نیست، نرخ متوسط کاهش C بین ۰,۵ تا ۲ درصد در سال است. مقادیر بزرگتر برای سال های اولیه پس از نصب لوله نو بکار می روند. تنها راه مطمئن برای حصول ضرایب دقیق برای شاه لوله های قدیمی، اجرای آزمایشهای عملی است.

۳-۳- فرمول های توانی

در تحلیل توزیع جریان در شبکه های لوله کشی بزرگ، بهتر است افت بار در هر کدام از لوله ها بر حسب یک فرمول توانی به شکل زیر توصیف گردد:[۱]

$$h_f = KQ^n \qquad (۱۵-۳)$$

مقادیر K و n را می توان مستقیماً از معادلات هایزن ویلیامز و مانینگ بدست آورد. اما در مورد معادله دارسی ویسباخ باید به شیوه دیگری عمل کنیم. در این حالت f را در دامنه محدودی از تغییرات دبی با رابطه زیر تخمین می زنیم:

$$f = \frac{a}{Q^b} \qquad (۱۶-۳)$$

با جایگزین کردن معادله (۳-۱۶) در فرمول دارسی ویسباخ و گروه بندی پارامترها نتایج زیر بدست می آیند:

$$n = 2 - b \qquad (۳-۱۷)$$

و

$$K = \frac{aL}{2gD\,A^2} \qquad (۳-۱۸)$$

در رابطه فوق L طول لوله، g شتاب ثقل زمین، D قطر لوله و A مساحت مقطع لوله است.

پیدا کردن K و n با فرمول توانی فوق مستلزم پیدا کردن مقادیر a و b در معادله (۳-۱۶) است که در واقع باید معادله f را در دامنه ای به اندازه کافی کوچک از دبی حول دبی خاص مورد نظر حل نمود. اگر این دامنه بسیار بزرگ باشد، باید K و n را نیز متغیر در نظر بگیریم. چون یک معادله (معادله ۳-۱۶) و دو مجهول داریم، می بایست مقداری برای دامنه تغییرات دبی در نظر بگیریم و این مقدار را یک بار به دبی مورد نظر اضافه و یک بار کم کنیم و مقدار f را در این دو مقدار دبی بدست آوریم و این مقادیر را در معادله (۳-۱۶) قرار دهیم تا دو معادله برای بدست آوردن a و b داشته باشیم. وپس از بدست آوردن مقادیر a و b از روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۸) برای بدست آوردن K و n استفاده کنیم. الگوریتم زیر توضیحات بالا را روشن تر می کند. اگر لوله ای با قطر و زبری نسبی مشخص که سیالی با دبی Q در آن جاری است در نظر بگیریم برای تعیین K و n مطابق مراحل زیر عمل می کنیم.

۱-ابتدا دامنه ای کوچک برای تغییرات دبی در نظر می گیریم. (معمولا ۵ تا ۱۰ در صد) این دامنه با ΔQ نشان داده می شود.

۲- با اضافه و کم کردن ΔQ به Q دو مقدار دبی بدست می آید که در یک محدوده با دامنه تعیین شده قرار دارند.

$$Q_1 = Q + \Delta Q \qquad (۱۹-۳)$$

$$Q_2 = Q - \Delta Q \qquad (۲۰-۳)$$

۳- از هر کدام از دبی های فوق یک عدد رینولدز حاصل می شود که با هریک به همراه زبری نسبی می توان یک ضریب اصطکاک f از دیاگرام مودی و یا رابطه مناسب استخراج کرد.

۴- از طرفین (۳-۱۶) لگاریتم طبیعی می گیریم و مقادیر f و Q را در آن جایگزین می کنیم:

$$Ln(f_1) = Ln(a) - bLn(Q_1) \qquad (۲۱-۳)$$

$$Ln(f_2) = Ln(a) - bLn(Q_2) \qquad (۲۲-۳)$$

بنابر این داریم:

$$b = \frac{Ln\left(f_1 / f_2 \right)}{Ln\left(Q_2 / Q_1 \right)} \qquad (۲۳-۳)$$

و بعد از محاسبه b برای a می توان نوشت:

$$a = f_1 Q_1^{\,b} = f_2 Q_2^{\,b} \qquad (۲۴-۳)$$

۵- با استفاده از روا بط (۳-۱۷) و(۳-۱۸) به ترتیب n و K محاسبه می شوند.

در حل کامپیوتری مسائل شبکه قدم اول محاسبه ضرایب فرمول توانی افت اصکاک است. که با روش فوق انجام می شود. استفاده از فرمول توانی نوشتن معادلات انرژی را که در ادامه در مورد آنها بحث می شود، آسان تر می کند.

۳-۴- *تلفات جزئی*

معمولا خطوط لوله مشتمل بر متعلقاتی از قبیل دهانه ها، زانوها؛ زانو خمها، تبدیلهای افزاینده و کاهنده، شیرفلکه ها، کنتورها، اتصالات انعطاف پذیر و برخی از اتصالات دیگر هستند. که اینگونه

وسایل روند جریان را برهم می زنند و تلاطم بیشتری را در جریان ایجـاد مـی کننـد، کـه در نتیجـه، علاوه بر تلفات اصلی ناشی از اصطکاک افت های جدیدی نیز به وجود می آید. چنین تلفاتی را تلفات موضعی یا جزئی می گویند. اگر طول لوله زیاد باشد این تلفات واقعاً هم جزئی است و می توان از آنها صرفنظر کرد. ولی در لوله های کوتاه، این نوع تلفات ممکن است اعظم افت بار را شامل شود و اگر این وسایل تلفات زیادی را ایجاد کنند (مانند یک شیر فلکه نیمه بسته) وجودشان تـاثیر زیـادی بـر دبـی خواهد داشت.

اگر تلفات موضعی ۵ درصد افت ارتفاع ناشی از اصطکاک لوله یا کمتـر از آن باشـد مـی تـوان از آنهـا چشمپوشی کرد. ضریب اصطکاک در بهترین حالت حدود ۵ درصد خطا دارد و انتخاب مقـادیری کـه بیش از سه رقم با معنی دارند، برای آن بی معنی است. بطور کلی اگر بطور متوسط طول لوله موجـود بین هر دو افت موضعی ۱۰۰۰ برابر قطر لوله باشد، می توان از تلفات موضعی صرفنظر کرد.[2]

۳-۴-۱ زانوها و خم ها

در یک لوله افت بار (یا تبدیل انرژی به حرارت) در یک زانو خم تـدریجی، عمـدتاً بـه دلیـل جریـان مارپیچی مضاعف ثانویه ای است که بر جریان اصلی تحمیل می گردد. وقتی جریان از یـک زانـو خـم می گذرد، نیروی گریز از مرکز بزرگی بر ذرات سیال که در وسط لوله با سرعت در حرکت هستند اثـر نموده و آنها را به طرف خارج پرتاب می کند. برعکس مولکول های سیال که در جدار لوله بـا سـرعت کم در حرکت هستند به طرف مرکز لوله رانده می شوند. این وضعیت موجب می شـود کـه در پـایین دست محل زانو خم در نقطه ای به فاصله ۵۰ تا ۱۰۰ برابر قطر لوله از محل زانوخم، جریان مـارپیچی مضاعف و یا حرکت ثانویه ای ایجاد شود. بنابراین افت باری که در اثر زانو خم ایجاد می شود، در محل خود زانو خم نیست بلکه به فاصله ای دورتر از آن در پایین دست است.

در مورد زانوهای تیز، شیر فلکه ها و اتصالات دیگر، افت بار ممکن است بیشتر بـه دلیـل جـدا شـدن خطوط جریان از جدار لوله در اثر تغییر شکل ناگهانی جدار باشد تا در اثر جریانهای ثانویه.

تقریباً تمام تلفات موضعی بطور تجربی و با انجام آزمایش تعیین می شوند. یک استثناء مهم تلفات ناشی از انبساط ناگهانی است که رابطه آن بصورت تحلیلی به شکل زیر حاصل شده است:

$$h_e = K\frac{V1^2}{2g} \tag{۳-۲۵}$$

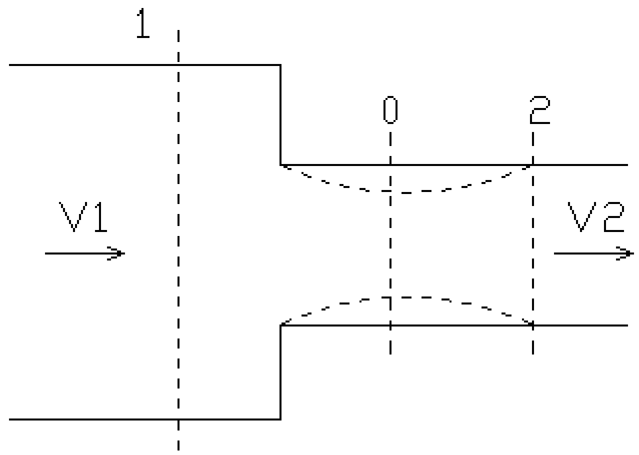
که در آن

$$K = \left[1-\left(\frac{D1}{D2}\right)^2\right]^2 \tag{۳-۲۶}$$

از معادله (۳-۲۵) معلوم می شود که افت ارتفاع در انبساط ناگهانی با مجذور سرعت متناسب است. این امر اساساً برای تمام تلفات موضعی در جریان در هم صادق است. یک روش مناسب برای بیان تلفات موضعی استفاده از ضریب k است. این ضریب معمولا با انجام آزمایش تعیین می شود.

اگر انبساط ناگهانی از لوله به مخزن باشد، $D_1/D_2 = 0$ خواهد بود. در این حالت کل انرژی جنبشی جریان تلف می شود.

در شکل ۳-۲ انقباض ناگهانی در مقطع لوله نشان داده شده است. افت ارتفاع ناشی از انقباض ناگهانی، با همان روشی که انبساط ناگهانی تحلیل گردید بررسی می شود، بشرطی که مقدار انقباض جت معلوم باشد. از مقطع ۱ تا مقطع ۰ که در آن انقباض جت به حداکثر مقدار خود رسیده است و به نام مقطع منقبض موسوم است، ارتفاع فشاری به ارتفاع سرعتی تبدیل می شود و از مقطع ۰ تا مقطع ۲، دو مرتبه ارتفاع سرعتی به ارتفاع فشاری تبدیل می شود. فرآیند تبدیل ارتفاع فشاری به ارتفاع سرعتی راندمان بالایی دارد. بنابراین تلفات از مقطع ۱ تا مقطع ۰ در مقایسه با تلفات از مقطع ۰ تا مقطع ۲ کوچک است.



شکل ۳-۲ انقباض ناگهانی در مقطع لوله

رابطه افت ارتفاع برای انقباض ناگهانی بصورت تحلیلی و به شکل زیر بدست می آید:

$$h_C = \frac{(V_0 - V_2)^2}{2g} \qquad (۳-۲۷)$$

از طرفی معادله پیوستگی به صورت $V_0 C_C A_2 = V_2 A_2$ بیان می شود. C_C نسبت سطح جت در مقطع ۰ به سطح جت در مقطع ۲ است و ضریب انقباض نامیده می شود. با استفاده از معادله پیوستگی، افت ارتفاع به صورت زیر بیان می شود:

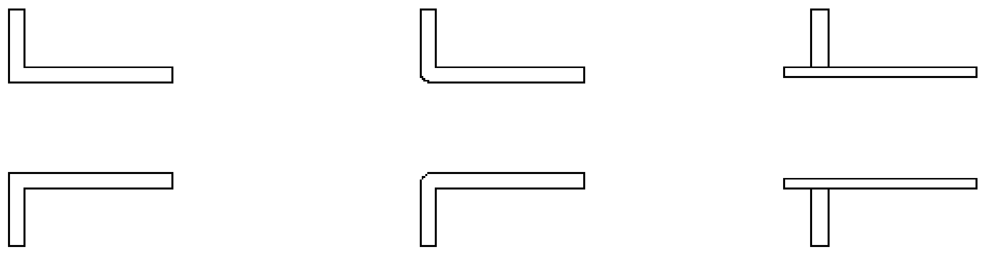
$$h_C = \left(\frac{1}{C_C} - 1\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \qquad (۳-۲۸)$$

ویسباخ مقادیر ضریب انقباض را برای آب تعیین کرده است. که در جدول ۲-۲ ارائه شده اند.

جدول ۳-۲ مقادیر ضریب انقباض برای آب

A_2/A_1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
C_C	0.624	0.632	0.643	0.659	0.681	0.712	0.755	0.813	0.892	1

میزان افت ارتفاع در هنگام ورود سیال از مخزن به لوله با توجه به شکل دهانه ورودی متفاوت است.در شکل زیر ضریب تلفات برای هر حالت نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ ضریب افت موضعی برای ورود از مخزن به لوله

برای هر یک از اتصالات ضرایب تجربی بسیار متفاوتی ارائه شده است. برای مثال بـرای شـیر بشـقابی کاملا باز، ضریب افت بسته به اندازه شیر و کارخانه سازنده آن بین ۴ تا ۲۵ تغییر می کند. در جـدول زیر مقادیر نمونه ضریب افت موضعی داده شده است.

جدول ۳-۳ مقادیر نمونه ضریب افت موضعی برای اتصالات گوناگون

نوع اتصال	k
شیر بشقابی (کاملاً باز)	۱۰
شیر زاویه ای (کاملاً باز)	۵
شیر یکطرفه (کاملاً باز)	۲,۵
شیر کشویی (کاملاً باز)	۰,۱۹
خم ۱۸۰ درجه	۲,۲
سه راهی استاندارد	۱,۸
زانویی استاندارد	۰,۹
زانویی با شعاع انحنای متوسط	۰,۷۵
زانویی با شعاع انحنای بزرگ	۰,۶۰

تلفات موضعی را می توان بر حسب طول معادل L_e نیز بیان کرد. طول معادل، طول لوله ای است که به ازای دبی یکسان همان افت ارتفاع را ایجاد می کند. بنابراین می توان نوشت:

$$f\frac{L_e}{D}\frac{V^2}{2g}=k\frac{V^2}{2g}$$

K می تواند مربوط به یک افت موضعی یا مجموع چند افت موضعی باشد. از رابطه فوق L_e بـه صـورت زیر بدست می آید:

$$L_e=\frac{kf}{D} \qquad (۲۹-۳)$$

برای مثال اگر در لوله ای به قطر ۳۰۰ میلیمتر مجموع ضرایب افت موضعی ۲۰ باشـد و اگـر ضـریب اصطکاک لوله ۰,۰۲۰ باشد، آنگاه با توجه به رابطه فوق می توان به اندازه ۳۰۰ متر به طول واقعی لوله افزود. این طول همان مقاومتی را ایجاد می کند که تلفات موضعی.

۳-۵- لوله های معادل

معمولا هر شبکه لوله کشی شامل تعدادی لوله است که بصورت سری یا موازی یا شاخه ای (شبیه بـه شاخه های درخت) به هم متصل می شوند. علاوه بر آن تعدادی زانو، شیر فلکه، کنتور و وسائل دیگـر نیز در لوله ها تعبیه می شوند که خود باعث ایجاد آشـفتگی موضـعی در جریـان و یـا تلفـات جزئـی می شوند. در تحلیل شبکه های لوله کشی تاثیر تمام وسایل فوق الذکر را به صورت مجمـوع در نظـر می گیرند و یا آنکه به جای آنها لوله معادل در نظر گرفته می شود. مفهوم لوله معادل در ساده کردن شبکه های لوله کشی بسیار مفید است. روش مرسوم بـرای محاسـبه طـول معـادل افـت موضـعی در قسمت قبل بررسی شد. روش ساده کردن انواع انشعابات نیز در ادامه بررسی می شوند.

۳-۵-۱- لوله های سری

وقتی دو لوله با قطر یا زبری متفاوت طوری به هم متصل شوند که سیال ابتدا از یک لوله و سپس از لوله دیگر عبور کند، گوییم دو لوله بطور سری به هم متصل شده اند. در لوله های سری دبی عبوری از تمام لوله ها یکسان است و تلفات با هم جمع می شوند. به عبارت دیگر:

$$h_e = \sum h_i \qquad (۳۰-۳)$$

که در رابطه فوق h_e افت ارتفاع مجموعه لوله های سری است. اگر افت بار را در هریک از لوله ها بصورت رابطه توانی نشان دهیم خواهیم داشت:

$$K_e Q^{n_e} = K_1 Q^{n_1} + K_2 Q^{n_2} + ... = \sum K_i Q^{n_i} \qquad (۳۱-۳)$$

در تحلیل شبکه برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی لوله معادل باید K_eو n_e را داشته باشیم. چنانچه از معادله هایزن ویلیامز استفاده شود، تمام توان ها ۱٫۸۵۲ است (n=1.852) و لذا:

$$K_e = K_1 + K_2 + ... = \sum K_i \qquad (۳۲-۳)$$

به عبارت دیگر ضریب K که برای لوله معادل استفاده می شود، مساوی با مجموع K در لوله هایی است که بطور سری متصل شده اند. اگر از معادله دارسی ویسباخ در محاسبات استفاده شود، توانهای n در معادله (۳-۳۱) الزاماً با هم برابر نخواهند بود. ولی این نماها تقریباً طوری نزدیک به هم هستند که n برای لوله معادل، میانگین این نماها در نظر گرفته می شود و برای محاسبه K معادل نیز از معادله (۳-۳۲) استفاده می شود.

۳-۵-۲- لوله های موازی

چنانچه دو یا چند لوله بصورت موازی بهم متصل شوند، یعنی اینکه از یک سر به هم متصل باشند و سیال وارد آنها شود و در سر دیگر نیز به هم متصل و سیال از آنها خارج شود، در این صورت افت بار بین سر ورودی مجموعه و خروجی آن با افت یک یک لوله ها برابر است. از طرفی دبی که توسط مجموعه منتقل می شود برابر جمع دبی های منتقل شده توسط هر یک از لوله هاست یعنی:

$$h_f = h_{f1} = h_{f2} = \ldots \qquad (۳۳-۳)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots = \sum Q_i \qquad (۳۴-۳)$$

با حل معادله توانی $h_f = KQ^n$ بر حسب Q و قرار دادن مقادیر آن در معادله (۳-۳۴) خواهیم داشت:

$$\left(\frac{hf}{Ke}\right)^{\frac{1}{n_e}} = \left(\frac{hf}{K1}\right)^{\frac{1}{n_1}} + \left(\frac{hf}{K2}\right)^{\frac{1}{n_2}} + \ldots = \sum \left(\frac{hf}{Ki}\right)^{\frac{1}{n_i}} \qquad (۳۵-۳)$$

اگر از معادله هایزن ویلیامز در تحلیل استفاده شود توانها با هم برابر هستند و می توانیم آنها را ازطرفین ساده کنیم:

$$\left(\frac{1}{Ke}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{1}{K1}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(\frac{1}{K2}\right)^{\frac{1}{n}} + \ldots = \sum \left(\frac{1}{Ki}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (۳۶-۳)$$

چنانچه در تحلیل شبکه از معادله دارسی ویسباخ استفاده شود معمولا فرض می شود که مقادیر n برای تمام لوله ها برابر است و برای محاسبه K برای لوله معادل از رابطه (۳-۳۶) استفاده می شود.

در هر دو مورد لوله های سری و موازی بعد از محاسبه K با استفاده از رابطه (۳-۳۰) طول معادل محاسبه می شود و با طول لوله جمع می شود.

۳-۵-۳- سیستم شاخه ای

در سیستم شاخه ای تعدادی لوله متصل شده و هر یک از دیگری منشعب می شوند و شمایلی مشابه یک درخت را بوجود می آورند. با فرض اینکه جریان از لوله اصلی به طرف لوله های فرعی باشد و داشتن مصرف یا آب مورد نیاز در پایاب، می توان مقدار دبی در هر یک از لوله ها را محاسبه نمود. اگر لوله های فرعی لوله های اصلی را تغذیه کنند، مانند یک مانیفلد، در این شرایط نیز می توان به همین روش مقادیر دبی را محاسبه کرد. در هر یک از دو حالت فوق برای محاسبه دبی از دورترین شاخه نسبت به لوله اصلی یا "ریشه درخت" شروع نموده و مقادیر دبی محاسبه می شود. با داشتن دبی در هر لوله و استفاده از معادله دارسی ویسباخ یا هایزن ویلیامز مقادیر افت بار نیز در هر لوله محاسبه می شود. در تحلیل شبکه هایی که سیستم شاخه ای دارند فقط لوله اصلی با فرض اینکه دبی آن معادل دبی شاخه هاست در نظر گرفته می شود. پس از انجام تحلیل شبکه، بار فشار در لوله اصلی مشخص می شود و با کم کردن افت بار مربوط به هریک از لوله ها از این مقدار فشار در هر نقطه از این شبکه شاخه ای قابل محاسبه است.

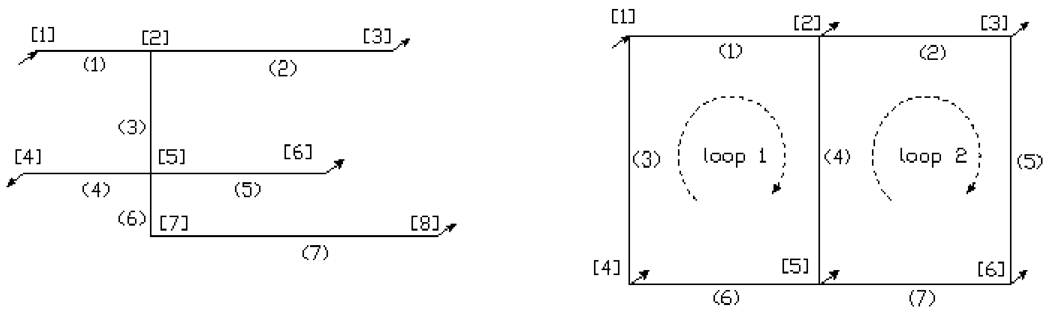
فصل چهارم

تحلیل شبکه ها در حالت جریان پایدار

۴-۱- معرفی شبکه و اصطلاحات مربوط به آن

شبکه از تعدادی لوله تشکیل می شود که بهم مرتبط هستند. نقاطی را که دو یا چند لولـه در آن به یکدیگر متصل می شوند را گره می نامند. در محل گره ها ممکن اسـت دبـی خروجـی داشـته باشیم (در محل مصرف کننده ها) و یا برعکس مقداری جریان از خارج به گره تزریـق شـود. ایـن حالت در عمل هنگامی اتفاق می افتد که قسمتی از یک شبکه را بخواهیم بطور مجزا بصورت یک شبکه مستقل تحلیل کنیم. همچنین ممکن است گره بسته باشد و فقط اتصال دهنده دو یا چنـد لوله باشد. گره می تواند در انتهای یک لوله باشد. این حالت یک استثناء است که در گره تنها یک لوله موجود است. در تحلیل شبکه ها محل اتصال لوله به مخزن گره محسوب نمی شود.

شبکه ها بردو نوع هستند شبکه های شاخه ای و شبکه های حلقوی کـه در شـکل (۴-۱) قابـل ملاحظه هستند. روش تحلیل شبکه شاخه ای مشابه آنچه که در مورد سیستم شاخه ای در فصل قبل بیان شد می باشد. اما در مورد شبکه های حلقه ای پیچیده تر است.



شکل ۴-۱ سیستم حلقه ای (با ۷ لوله و ۶ گره)، سیستم شاخه ای (با ۷ لوله و ۸ گره)

همانطور که در شکل (۴-۱) مشخص است حلقه به مسیر بسته ای گفته می شود که از چند لوله متصل بهم تشکیل شده است و از یک گره آغاز و در نهایت به همان گره ختم مـی شـود. شـبکه های شاخه ای فاقد حلقه هستند.

۴-۱-۱- جریان پایدار

جریان های پایدار آن دسته از جریان هایی هستند که مشخصات آنها در یک بازه نسبتاً طولانی از زمان ثابت است. تمام مسائل شبکه های آبی در یکی از دسته های زیر قرار می گیرند. که بستگی به معلومات و مجهولات مسئله دارد.

۱- مسائلی که در آنها مشخصات لوله ها و دبی ها معلوم و افت هد ها مجهول هستند.

۲- مسائلی که در آنها مشخصات لوله ها و افت هد ها معلوم و دبی ها مجهول هستند.

۳- مسائلی که در آنها افت هد ها و دبی ها مشخص و کمترین قطر لوله مجهول است.

مسائل دسته ۱ و ۲ مسائل تحلیلی نام دارند. مسائل گروه اول بصورت مستقیم و بدون نیـاز بـه روش های تکراری حل می شوند در صورتیکه مسائل نوع دوم نیازمند روش های تکراری هستند. دسته سوم که در آنها بهینه سازی انجام می شود، مسائل طراحی نام دارند، که نیازمند محاسـبات و فـرض هـای بیشتر هستند.

تحلیل و طراحی شبکه های پیچیده لوله کشی مسائل نسبتاً پیچیده ای را در بر دارد. بخصـوص اگـر شبکه مانند اکثر شبکه های توزیع آب شهری و یا شبکه های گاز کشی دارای تعداد زیادی لوله باشد. در یک تحلیل ساده با توجه به ممارست طراح می توان تصمیم گیری کرد که کدام لوله ها در شـبکه گنجانده شود ولی مسلماً در یک شهر بزرگ تجزیه و تحلیل تمام لولـه هـایی کـه بـه مشـترکین آب می رسانند امکان پذیر نیست. هرچند این لوله ها به شبکه کلی توزیع آب متصل هسـتند ولـی غالبـاً فقط لوله های اصلی را که آب را به مناطق مختلف انتقال می دهند در نظر مـی گیرنـد و در صـورت لزوم در داخل هر منطقه نیز تحلیل شبکه بطور مجزا انجام می شود. در شبکه های توزیع آب، تحلیل

وضعیت ماندگار در مشخص کردن این که آیا شبکه کارایی لازم را دارا می باشد یا خیر بسیار مهم است. هر زمانی که الگوی مصرف یا انتقال آب به نحو قابل ملاحظه ای تغییر کند و یا اینکه سیستم گسترش یابد و بخشهای دیگری به آن اضافه شود و یا پمپهای بوستر و مخازن ذخیره تغییراتی را در شبکه ایجاد نمایند لازم خواهد بود این تحلیل مجدداً صورت گیرد. علاوه بر تحلیل وضعیت ماندگار لازم است جریان های غیر ماندگار یا انتقالی و همچنین بهینه سازی و عملکرد شبکه در مقابل هزینه ها و مسائل اجتماعی نیز در نظر گرفته شود که برای همه این بررسی ها ابتدا تحلیل حالت پایدار شبکه لازم است.

مسائل مربوط به حالت ماندگار در شرایطی حل می شود که در آن میزان دبی در هر یک از لوله ها بر اساس الگوهای تامین و مصرف تعیین شده باشد. تامین آب ممکن است توسط مخازن تانکهای ذخیره و یا پمپها صورت گیرد و یا آنکه بصورت ورودی و خروجی در برخی نقاط شبکه مشخص شده باشد. با داشتن دبی می توان فشار و افت بار را در تمام شبکه محاسبه نمود. به طریق دیگر ممکن است مساله را به این صورت حل کرد که بدواً در محل هر یک از اتصالات شبکه ارتفاع (بار) را در نظر گرفته و سپس میزان دبی در هر کدام از لوله های شبکه محاسبه شود.

قدیمی ترین روش برای حل سیستماتیک مسائل جریان ماندگار در شبکه های لوله کشی روش هاردی کراس است. این روش نه تنها با دست قابل حل است بلکه برنامه های کامپیوتری زیادی هم برای آن نوشته شده است. هرچند کامپیوتر بطور اخص این امکان را فراهم می سازد که شبکه های بمراتب بزرگتری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد ولی ظاهرا چنین بنظر می رسد که در روش هاردی کراس تقارب بسیار کند بوده و حتی ممکن است در برخی موارد اصلاً به جواب نرسد. در سالهای اخیر برای شبکه های بزرگ از روش نیوتن رافسون استفاده شده است. با اصلاحاتی که در الگوریتم های روش نیوتن رافسون به عمل آمده است، حافظه مورد نیاز در روش مذکور بیشتر از روش هاردی کراس نیست. روش دیگری به نام روش تئوری خطی نیز پیشنهاد شده است. در روش تئوری خطی بر خلاف

دو روش دیگر به تخمین اولیه نیاز نیست ولی در عوض به حافظه بیشتری احتیاج است. در ادامـه بـه شرح روش های فوق می پردازیم.

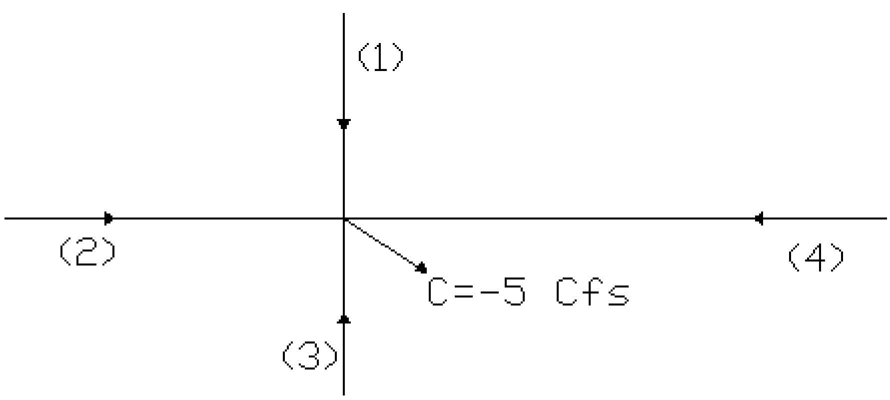
۴-۲- سیستم های معادلات تشریح کننده جریان ماندگار در شبکه های هیدرولیکی

حالت ۱- اگر دبی مجهول در نظر گرفته شود

تحلیل جریان در شبکه هیدرولیکی بر اساس قوانین انرژی و پیوستگی است که در فصل اول ذکر شد. برای آنکه اصل پیوستگی برقرار باشد لازم است گذر جرمی، وزنی و حجمی وارد شده به محل هر گره برابر گذر جرمی، وزنی و حجمی باشد که از محل گره خارج می شود. اگر ئر این اصل از گذر حجمـی استفاده شود، همانطور که در فصل اول اشاره شد، بصورت ریاضی می توان نوشت:

$$\left(\sum Q_i\right)_{out} - \left(\sum Q_i\right)_{in} = C$$

در رابطه فوق C عبارتست از دبی خارجی در محل گره که معمولاً ب اسم مصـرف یـا نیـاز یـا تقاضـا نامیده می شود. اگر جریان به سمت گره باشد (مصرف) C مثبت و اگر جریان به طرف خـارج از گـره باشد (تامین) C منفی است. مثلاً در شکل زیر چنانچه چهار لولـه در نقطـه ای بـه هـم متصـل شـده باشند، در این نقطه معادله پیوستگی عبارت خواهد بود از:



شکل ۴-۲ یک گره با جریان خارجی (مصرف)

$$Q_6 - Q_1 - Q_2 - Q_5 = -5$$

اگر یک شبکه لوله کشی مشتمل بر j اتصال (گره) باشد و تمام جریانهای خارجی نیز مشخص باشد در این صورت تعداد j-1 معادله پیوستگی مستقل مانند معادله بالا را می توان نوشت. آخرین معادله پیوستگی یعنی معادله J ام معادله مستقلی نخواهد بود. یعنی این معادله را می توان از ترکیبهای j-1 معادله اول بدست آورد. توجه شود که هر یک از معادله های پیوستگی مذکور خطی است. یعنی Q در هر یک از آنها با توان درجه اول ظاهر می شود.

علاوه بر این که معادلات پیوستگی باید برقرار باشند معادله های مربوط به اصل انرژی نیز باید برقرار باشند. معادلات مذکور به این ترتیب بدست می آیند که مجموع افت بار در هر حلقه باید صفر باشد، یعنی اگر در پیرامون یک حلقه بسته دور بزنیم و افت بار را در هر لوله در نظر بگیریم پس از آن که به همان نقطه شروع رسیدیم، مجموع افت بارها با توجه به علامت آنها باید مساوی صفر باشد. در هنگام دور زدن حلقه اگر جهت جریان سیال در لوله در جهت دور زدن ما باشد افت بار مثبت و در غیر اینصورت افت بار در آن لوله منفی در نظر گرفته می شود. به زبان ریاضی بر اساس اصل بقای انرژی، برای شبکه ای که دارای L حلقه است می توانیم به همین تعداد معادله انرژی به شکل زیر بنویسیم:

$$\sum_{L}^{I} h f_l = 0 \qquad I=1\ldots L \qquad (۱-۴)$$

که در آن L نشان دهنده تعداد حلقه های مستقل (که به حلقه طبیعی نیز معروف است) در شبکه و I نشان دهنده تعدادلوله در هر یک از حلقه های ۱ تا L می باشد. با استفاده از فرمول توانی افت اصطکاک (معادله ۳-۲-۲) معادله انرژی برای هر حلقه بصورت زیر در می آید:

$$\sum K_i Q_i^n = 0 \qquad (۲-۴)$$

که i شماره لوه های تشکیل دهنده حلقه است.

هر شبکه هیدرولیکی که دارای j گره و L حلقه مستقل و N لوله باشد معادله زیر در مورد آن صادق است:

$$N = (j-1) + L \qquad (۳-۴)$$

آنچه گفته شد برای حالتی است که تمام دبی های خارجی مشخص باشند ولی اگر جریانهای خارجی معلوم نباشند، در این صورت تمامی j معادله گره ها مستقل بوده و مطابق آنچه در ادامه گفته خواهد شد مورد استفاده قرار می گیرند. از جایی که دبی در هر یک از لوله ها را می توان به صورت مجهول در نظر گرفت در این صورت تعداد N مجهول وجود خواهد داشت. تعداد معادلات مستقلی که برای یک شبکه می توان بدست آورد، همانطور که در بالا آمد، $(j-1)+L$ می باشد. لذا تعداد معادله های مستقل مساوی تعداد دبی های مجهول در N لوله است. تمام (j-1) معادله پیوستگی خطی هستند ولی L معادله انرژی یا افت بار غیر خطی هستند و چون در یک شبکه بزرگ که ممکن است حاوی صدها لوله باشد، لذا باید از روشهای سیستماتیک که در آنها از کامپیوتر بهره گرفته می شود، استفاده نمود تا بتوان این سیستم معادلات را همزمان حل کرد. در مورد این روش ها در ادامه بحث می شود. نکته ای که باید به آن اشاره شود آن است که جهت گردش در حلقه ها اختیاری است. همچنین در نوشتن معادله پیوستگی می توان طرفین معادله را در یک منفی ضرب کرد. بنابراین علامتی که برای جریان ورودی و خروجی به گره در نظر گرفته می شود قراردادی است.

حالت ۲- اگر فشار در محل گره ها مجهول در نظر گرفته شود:

اگر به جای دبی از همان ابتدا فشار در محل گره ها مجهول در نظر گرفته شود در این صورت سیستم معادله هایی که باید حل شود از نظر تعداد تقلیل پیدا خواهد کرد. ولی این تقلیل به بهای خارج شدن تعدادی از معادله ها از حالت خطی تمام خواهد شد. منظور از فشار در محل گره ها همان بار کلی، یعنی بار پیزومتری است. زیرا معمولاً از بار سرعت به دلی کوچک بودن صرفنظر می شود.

برای بدست آوردن سیستم معادله هایی که در آنها مقدار فشار در هر یک از گره های شبکه مجهول باشد، می توان مانند قبل j-1 معادله پیوستگی مستقل را نوشت. پس از آن رابطه بین دبی و افت بار در معادلات پیوستگی جایگزین می گردد. در هنگام نوشتن این معادلات بهتر است از اندیسهای دوگانه استفاده شود. این اندیسها مربوط به گره هایی است که در دو انتهای لوله قرار گرفته اند. اندیس اول نشان دهنده شماره گرهی است که جریان از سمت آن می آید و اندیس دوم نشان دهنده

گرهی است که جریان به سمت آن می رود. مثلاً Q_{12} نماینگر جریان در لوله ای است که بین گـره ۱ و۲ قرار گرفته است، با این فرض که جریان از گره ۱ به طرف گره ۲ در حرکت است. اگر جریان واقعاً در همین جهت باشد، در این صورت Q_{12} مثبت است و Q_{21} مساوی با Q_{12} است با علامت منفی.

از حل فرمول توانی نسبت به Q (با استفاده از اندیسهای دوگانه) به رابطه زیر می رسیم:

$$Q_{ij} = \left({h_{Lij}}/{K_{jj}} \right)^{n_{jj}} = \left(\frac{H_i - H_j}{K_{ij}} \right)^{1/n_{ij}} \qquad (۴-۴)$$

اگر معادله فوق را در معادله پیوستگی جایگزین کنیم داریم:

$$\left[\sum \left(\frac{H_i - H_j}{K_{ij}} \right)^{\frac{1}{n_{ij}}} \right]_{out} - \left[\sum \left(\frac{H_i - H_j}{K_{ij}} \right)^{\frac{1}{n_{ij}}} \right]_{in} = C \qquad (۵-۴)$$

با نوشتن معادله ای به شکل فوق در محل هر یک از j-1 گره شبکه، سیستمی متشکل از j-1 معادله غیر خطی حاصل می شود. در این صورت اگر فشار در محل یکی از گره ها معلوم باشد. با حل دستگاه فوق، فشار در محل تمام گره ها حاصل می شود.

حالت۳- اگر دبی های اصلاحی در پیرامون حلقه ها مجهول در نظر گرفته شوند.

به لحظ عددی همیشه تعداد گره های شبکه منهای یک (j-1) کمتر از تعداد لوله های موجـود در آن شبکه است. تفاضل این دو برابر تعداد حلقه های L شبکه است. لذا معادلات H معمولاً از نظـر تعـداد کمتر از سیستم معادلات Q می باشد. البته کم شدن تعداد معـادلات الزامـاً یـک مزیـت نیسـت زیـرا تمامی این معادله ها از نوع غیر خطی خواهند بود. حال آنکه در سیستم معـادلات Q فقـط معـادلات انرژی حلقه ها، غیر خطی بودند. در سیستم دبی اصلاحی در حلقه ها تعداد کمتری معادله برای حـل شبکه نوشته می شونهد.در این معادلات مقداری به نام دبی اصلاحی برای هر یک از حلقه ها به عنوان مجهول در نظر گرفته می شوند. به این معادلات، معادله های ΔQ گفته می شود.

چون در یک شبکه تعداد L حلقه اصلی وجو دارد لذا سیستم معادلات ΔQ مرکب از L معادلـه اسـت که همگی آنها از نوع غیر خطی می باشند.

در نظر گرفتن دبی اولیه برای هر کدام از لوله ها، بطوریکه بتوانند در تعداد j معادله پیوستگی گره ها صادق باشند، کار مشکلی نیست. البته تخمین های اولیه ای که برای دبی در نظر گرفته می شود، معمولاً بطور همزمان در کل معادلات انرژی حلقه ها صدق نخواهد کرد. لذا این مقادیر قبل از آنکه بتوان آنها را به عنوان دبی لوله ها در نظر گرفت باید اصلاح شوند. برای این منظور به دبی فرض شده قبلی در هر یک از لوله های تشکیل دهنده حلقه های شبکه، یک دبی اصلاحی افزوده می شود. بدون آنکه معادلات پیوستگی در محل اتصالات را بهم بزند. به ای ترتیب می توان به تعداد حلقه ها، معادله انرژی (یا افت بار) را نوشت که در آنها مقدار دبی اولیه به اضافهء دبی اصلاحی حلقه ΔQ به عنوان دبی حقیقی در معادله های افت بار بکار برده می شود. پس از پیدا کردن مقدار مناسب دبی اصلاحی حلقه و صادق بودن معادلات افت بار باید تعداد j-1 معادله پیوستگی نیز مانند اول برقرار باشند. مقدار دبی های اصلاحی را می توان در حلقه ها در جهت عقربه های ساعت یا عکس عقربه های ساعت در نظر گرفت. ولی علامت قراردادی باید در مورد هر حلقه بخصوص نیز ثابت باقی بماند و بهتر است برای تمام حلقه های شبکه در همان جهت در نظر گرفته شود.

شکل ریاضی معادلات ΔQ از قرار زیر است:

$$\sum K_i (Q_{0_i} + \Delta Q_1)^{n_i} = 0 \qquad (۶-۴)$$

معادله فوق برای حلقه شماره ۱ یک شبکه نوشته می شود و مشابه آن برای تمام حلقه های شبکه نوشته می شود.

در فصل بعد در مورد روش های حل سیستمهایی که در این فصل بررسی شدند، بحث خواهد شد.

فصل پنجم

در فصل قبل سه نوع سیستم معادلاتی که می تواند در حل مسائل مربوط به توزیع فشار یا دبی در شبکه های لوله کشی مورد استفاده قرار گیرد تشریح شد. در این بخش روش های حل آنها بررسی می شود. روش های حل عبارتند از، روش هاردی کراس، روش نیوتن و روش تئوری خطی.

۵-۱- روش نیوتن رافسون

روش نیتن رافسون یکی از معمولترین روشها برای حل ضمنی معادله های غیر خطی است. اغلب کتابهایی که در زمینه روشهای عددی نوشته شده اند این روش را با تفصیل بیشتر مورد بحث قرار داده اند. این روش زیاد مورد استفاده قرار می گیرد زیرا در حل آن زودتر به تقارب می رسیم. در این روش معادله $F(x)=0$ بوسیله فرمول تکراری زیر حل می شود.

$$X^{(m+1)} = X^{m} - \frac{F(X^{(m)})}{F^{/}(X^{(m)})} \tag{۵-۱}$$

با روش نیوتن رافسون می توان هر سه سری از معادلاتی که در فصل قبل شرح داده شد حل کرد. در روش نیوتن رافسون ابتدا لازم است برای مجهول مورد نظر مقدار اولیه ای را حدس زد. چون دو سیستم معادلات فشار و دبی اصلاحی از نظر تعداد معادلات کوچکتر از معادله های دبی می باشند لذا احتمالاً روش نیوتن رافسون بهترین روش برای تحلیل شبکه های بزرگ می باشد. این روش به حافظه کامپیوتری کمتری نیاز دارد. البته به این جهت نیست که تعداد معادله های H و ΔQ که باید همزمان حل شوند کمتر است. بلکه اصولاً حافظه مورد نیاز برای تعداد معینی معادله کم است. قبل از آنکه ببینیم چگونه می توان از روش نیوتن رافسون برای حل معادلات اخیر استفاده کرد، لازم است این روش را از سیستم تک معادله ای به سیستمی که مرکب از چندین معادله همزمان

باشد، تعمیم داد. این تعمیم بسیار ساده است. فرمول تکراری نیوتن رافسون برای یک سیستم معادلات عبارتست از:

$$\overrightarrow{X^{m+1}} = \overrightarrow{X^m} - D^{-1}\overrightarrow{F(X^m)} \tag{۵-۲}$$

می بینیم که در معادله فوق بردارهای مجهول جایگزین مجهول های ساده شده اند و $1/dF/dX$ ماتریس معکوس ژاکوب جایگزین شده است. اگر در معادلات فشار، معادلات افت بار در حلقه ها را با F_i نشان دهیم آنگاه ماتریس ژاکوب برای آن بصورت زیر خواهد بود:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial H_1} & \frac{\partial F_1}{\partial H_2} & . & . & . & \frac{\partial F_1}{\partial H_j} \\ \frac{\partial F_2}{\partial H_1} & \frac{\partial F_2}{\partial H_2} & . & . & . & \frac{\partial F_2}{\partial H_j} \\ . & & & & & \\ . & & & & & \\ . & & & & & \\ \frac{\partial F_j}{\partial H_1} & \frac{\partial F_j}{\partial H_2} & . & . & . & \frac{\partial F_j}{\partial H_j} \end{bmatrix} \tag{۵-۳}$$

اگر برداری مانند z در نظر بگیریم که $Dz = F$ متوانیم در معادله (۵-۱-۲) عبارت $D^{-1}F$ را با z جایگزین کنیم. در این صورت با انتخاب معادلات H فرمول تکراری نیوتن رافسون به فرم زیر است:

$$\overrightarrow{H^{m+1}} = \overrightarrow{H^m} - \overrightarrow{z^m} \tag{۵-۴}$$

با تغییر فوق نیاز به محاسبه معکوس ماتریس ژاکوب رفع می شود. با توجه به متقارن بودن ماتریس ژاکوب، انتخاب الگوریتمی برای حل سیستم معادلات خطی با ماتریس متقارن از نظر محاسباتی کارایی بیشتری خواهد داشت. در روش نیوتن رافسون باید حدس اولیه تا اندازه ای دقیق باشد در غیر اینصورت ممکن است حل به جواب منتهی نشود.

۵-۲- روش هاردی کراس

قدیمی ترین و در عین حال معمولترین روشی که در تحلیل شبکه های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرد روش هاردی کراس است که شرح آن را می توان در اکثر کتاب های درسی هیدرولیک یا مکانیک سیالات پیدا کرد. قبل از اختراع کامپیوتر که تحلیل شبکه ها با دست انجام می شد، از روش هاردی کراس استفاده می شد. امروزه نیز بسیاری از برنامه های کامپیوتری بر اساس روش هاردی کراس می باشند. این روش برای حل معادلات فشار یا سیستم معادلات دبی اصلاحی و بدون تردید برای سیستم معادلات Q استفاده می شود. با اختراع کامپیوتر، در هنگامی که شبکه های بزرگ و پیچیده مورد بررسی قرار می گرفت مشاهده شد که روش هاردی کراس یا دیر به جواب می رسد و یا اصلاً به جواب منتهی نمی شود. البته اقدامات خاص و متعددی در جهت اصلاح خصوصیات تقارب پذیری آن برداشته شده است که در اینجا بحثی از آن به عمل نمی آید. اگر کامپیوتری با حافظه قوی در دسترس باشد بهتر است از روش های دیگر استفاده شود. ولی در هنگام استفاده از کامپیوترهای کوچک، با محاسبات دستی و با شبکه های کوچک، هنوز می توان از روش هاردی کراس استفاده کرد. آنچه در ادامه بحث می شود، استفاده از روش هاردی کراس برای سیستم معادلات ΔQ است. البته طرز استفاده آن در حل معادلات سیستم H، با شرحی که داده می شود کاملاً روشن است.

۵-۲-۱- جنبه های ریاضی روش هاردی کراس

روش هاردی کراس حالت خاصی از روش نیوتن رافسون است که در آن در هر تکرار بجای حل همزمان تمام معادلات، ابتدا یکی از معادلات حل می شود و سپس معادله بعدی. برای انجام این کار تمام ΔQ ها بجز ΔQ_l در حلقه l که برای آن معادله نوشته می شود موقتاً معلوم فرض می شوند. بر اساس این فرض می توان برای حل معادله $F_l = 0$ نسبت به ΔQ_l از روش نیوتن رافسون استفاده کرد. بصورت رابطه زیر:

$$\Delta Q_l^{m+1} = \Delta Q_l^{m} - \frac{F_l^{m}}{\frac{dF_l^{m}}{d\Delta Q_l^{m}}} \qquad (۵-۵)$$

معمولاً در روش هاردی کراس برای هر معادله، قبل از آنکه به معادله دیگری یعنی حلقه دیگر پرداخته شود، فقط یکبار تکرار برای اصلاح صورت می گیرد. حتی اگر چندین متغیر وجود داشته باشد. پس از آن که در یک تکرار برای تمام معادلات یک اصلاح صورت گرفت، عمل دو باره تکرار می شود تا سرانجام تقارب حاصل گردد. به عبارت دیگر معمولاً بلافاصله پس از محاسبه هر ΔQ دبی فرضی اولیه در مورد تمام لوله های حلقه ای که معادله برای آن نوشته شده است تصحیح می شود. در نتیجه هر معادله $F_l = 0$ به ازای تمام ΔQ های برابر صفر و همچنین $\Delta Q_1^{m} = 0$ قبلی تعیین می شود و لذا معادله (۵-۵) بصورت زیر ساده می شود:

$$\Delta Q = -\frac{F_l}{\frac{dF_l}{d\Delta Q_l}} \qquad (۶-۵)$$

اندیسهایی که در معادله (۵-۵) نشان دهنده شماره تکرار بودند در معادله فوق حذف شده اند زیرا فقط یک ΔQ در آن وجود دارد. معادله $F_l = 0$ برای این حلقه، معادله افت بار در پیرامون حلقه است یعنی:

$$F_l = \sum K_i Q_i^{n_i} \qquad (۷-۵)$$

با جایگزین کردن معادله (۵-۷) در معادله (۵-۲) داریم:

$$\Delta Q = -\frac{\sum K_i Q_i^{n_i}}{\sum \left| n_i K_i Q_i^{n_i - 1} \right|} \qquad (۸-۵)$$

روش هاردی کراس را می توان بصورت مراحل زیر خلاصه کرد:

۱- برای هر لوله دبی اولیه ای را حدس می زنیم به نحوی که معادلات پیوستگی در مورد تمام گره ها صادق باشند.

۲- مجموع افت بار را در هر یک از لوپهای شبکه حساب میکنیم به این ترتیب که یک جهت مثبت برای گردش لوپ در نظر می گیریم و در آن جهت دور می زنیم. اگر جهت لوله با جهت حرکت یکسان بود افت بار را مثبت ودر غیر اینصورت منفی در نظر می گیریم و همه مقادیر را با هم جمع می کنیم.

۳- مخرج معادله (۴-۸) را با دور زدن حول همان حلقه بدست می آوریم.

۴- با استفاده از معادله (۴-۸) مقدار ΔQ را بدست می آوریم.

۵- مراحل ۲ تا ۴ را برای هر حلقه از شبکه انجام می دهیم.

۶- ΔQ بدست آمده را با دبی تک تک لوله های حلقه جمع می کنیم.

۷- مراحل فوق را بطور مزتب تکرار می کنیم تا زمانی که تمام ΔQ های محاسبه شده در تکرارها به قدری کوچک شوند که بتوان از آنها صرفنظر کرد.

۵-۳- روش تئوری خطی

این روش در مورد حل معادله هایی بکار می رود که در آنها دبی به عنوان مجهول در نظر گرفته می شوند. (معادلات Q). کاربرد این معادلات بسیار ساده است به شرط آنکه تمام جریانهای خارجی شبکه مشخص باشند و یا به اصطلاح آرایش شبکه بر اساس دبی مشخص باشد.

روش تئوری خطی نسبت به دو روش نیوتن رافسون و هاردی کراس که در دو بخش قبل تشریح شد، دارای چندین مزیت بارز است. اول آینکه در این روش نیازی به فرض اولیه نیست. دوم اینکه بر طبق اظهار نظر وود و چارلز همیشه بعد از چند تکرار به جواب منتهی می شود. استفاده از این روش برای حل معادلات فشار و یا معادلات دبی های اصلاحی توصیه نمی شود.

۵-۳-۱- تبدیل معادلات غیر خطی انرژی به معادلات خطی

در روش تئوری خطی بار فشار در هر لوله توسط فرمول زیر تخمین زده می شود. لذا معادلات غیر خطی حلقه ها به معادله های خطی تیدیل می شوند. بدین ترتیب تعداد L معادله خطی به دست می آید.

$$h f_i = \left[K_i Q_i (0)^{n-1} \right] Q_i = K'_i Q_i \qquad (۹-۵)$$

یعنی برای هر لوله یک ضریب K' در نظر گرفته می شود که طبق رابطه فوق بدست می آید. از ترکیب L معادله خطی بدست آمده و j-1 معادله پیوستگی گره ها سیستمی بوجود می آید که در آن N معادله وجود دارد که از طریق جبر خطی قابل حل است. البته جواب ممکن است درست نباشد ولی با تکرار این عمل و اصلاح Q ها سر انجام به جواب می رسیم.

در استفاده از تئوری خطی نیازی به حدس اولیه به آن معنی که از آن مفهوم می شود وجود ندارد بلکه به جای آن در اولین تکرار هر یک از K'_iها را برابر K_i می گیریم و این مثل آن است که تمام دبی های $Q_i(0)$ را برابر یک در نظر گرفته ایم. وود در ابداع روش تئوری خطی مشاهده کرد که پس از چند تکرار نتایج حول جواب اصلی نوسان می کنند. بدین جهت وی پیشنهاد کرد که پس از دو تکرار جواب مساله بدست می آید و پس از آن هر دبی که برای محاسبه بکار برده می شود میانگین دبی در دو جواب قبلی است.

در استفاده از روش تئوری خطی قدم اول محاسبه ضرایب K و n است. قدم دوم بدست آوردن طول معادل برای لوله هایی که دارای شیر فلکه، کنتور و ... می باشند است. این طول ها به طول لوله افزوده می شوند. سپس معادلات پیوستگی و انرژی نوشته می شوند و مطابق روشی که شرح داده شد، معادلات انرژی خطی می شوند. در نهایت لا استفاده از روش هایی مانند روش حذفی گوس یا حذفی گوس جردن ویا اورتوگونال پلومنیال معادلات خطی بالا حل شده و جوابها حاصل می شوند. با تکرار مراحل فوق جوابها تصحیح می شوند تا سرانجام تقارب حاصل شود.

۵-۳-۲- وارد کردن مخازن و پمپ ها در روش تئوری خطی

کلیه مواردی که تا به حال در مورد روش تئوری خطی گفته شد برای شبکه هایی است که در آنها دبی های خارجی معلوم فرض شده است ولی در عمل چنین حالتی ممکن است پیش نیاید. بلکه مقدار دبی تامین شده از مخازن و یا پمپ ها به فشار و دبی در سرتاسر شبکه بستگی دارد. در نتیجه باید روش تئوری خطی را به طریقی تعمیم داد که بتواند وارد شدن آب از پمپها و مخازن و نیز وجود پمپهای بوستر را در مسیر لوله ها در برگیرد.

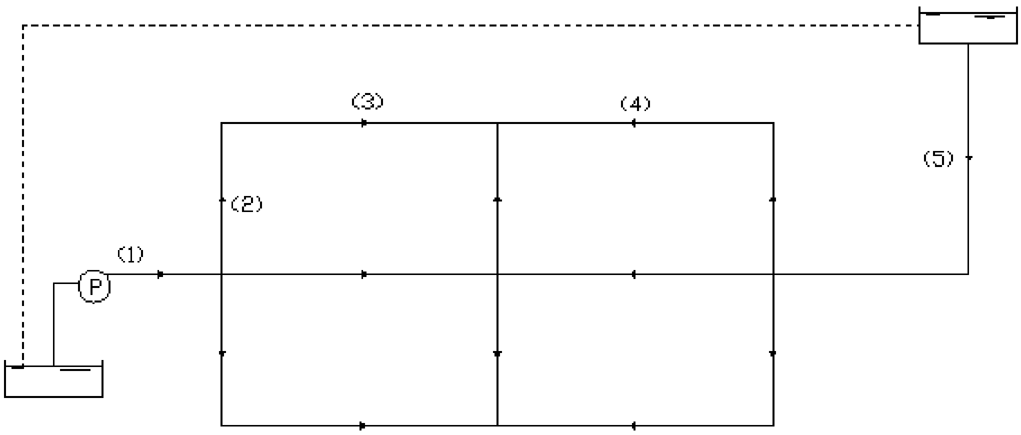
لازم به توضیح است که منظور از بوستر پمپ، پمپی است که برای تقویت فشار در مسیر یک خط لوله قرار می گیرد و منظور از پمپ، پمپی است که با پمپاژ سیال از منبعی، حجم مشخصی از سیال را با فشار مشخص برای شبکه تامین می کند.

هر پمپ (البته نه بوستر پمپ) و هر مخزنی که جریان را به سیستم وارد و یا از آن خارج می کند مجهول جدیدی را بوجود می آورد که باید در تحلیل شبکه آن را بدست آورد. چون مخزن ها و پمپها از طریق لوله به شبکه متصل می شوند طبیعی است که میزان دبی در این لوله های اتصالی مجهول جدیدی باشد. ولی رقوم مخازن و رقوم مخازنی که پمپها از آنها آب دریافت می دارند و خصوصیات پمپ (معادله مشخصه) از عواملی هستند که مقادیرشان مشخص است. بنابراین معادله هایی لازم است که این پارامترهای معلوم را با دبی لوله هایی که به آن متصل شده مشخص نماید. همچنین برای حالتی که شبکه دارای مخزن است و یا سیال از طریق پمپ از مخزنی به شبکه تزریق می شود، معادله پیوستگی برای تمام گره ها مستقل از هم هستند و بنابراین به تعداد گره ها می توان معادله پیوستگی نوشت. با توجه به مطالب فوق اگر شبکه ای به شکل زیر داشته باشیم. آنگاه با توجه به اینکه دبی در دو لوله ۱ و ۵ مجهول هستند بنابراین تعداد معادلات یکی کمتر از مجهولات است. چون یک معادله پیوستگی اضافه شده و دو لوله (دو مجهول) اضافه شده است.

برای حل این مشکل از حلقه مجازی استفاده می کنیم. به این ترتیب که مخزن ها را با یک لوله مجازی به هم متصل می کنیم و دبی این لوله مجازی را برابر با صفر در نظر می گیریم. در پیرامون

این حلقه مجازی مجموع افت بار صفر نیست بلکه برابر اختلاف ارتفـاع دو مخـزن و بـار تولیـد شـده بوسیله پمپ یا پمپ ها است.برای شکل ۵-۱ معادله انرژی برای حلقه مجازی عبارتست از:

$$H_2 - K_5 Q_5^{n_5} - K_4 Q_4^{n_4} + K_3 Q_3^{n_3} + K_2 Q_2^{n_2} + K_1 Q_1^{n_1} - h_P = H_1$$



شکل ۵-۱ ایجاد حلقه مجازی بین دو مخزن با استفاده از لوله مجازی بدون جریان

بطور کلی معادله زیر نشان دهنده معادله انرژی برای یک حلقه مجازی است که مشتمل بر دو مخـزن یا پمپ تامین آب است.

$$\sum K_i Q_i^{n_i} \pm \sum h_P = \Delta H \qquad (۵-۱۰)$$

برای محاسبه مقدار فشار تولید شده توسط پمپ، روشهای متعـددی وجـو دارد. روشـی کـه در اینجـا استفاده شده است مقدار تقریب h_P از معادله درجه دوم زیر به دست می آید.

$$h_P = AQ^2 + BQ + H_0 \qquad (۵-۱۱)$$

که در آن A، B و H_0 برای هر پمپ ضرایب ثابتی است و می توان آنها را از تطبیق معادله فوق با سه نقطه از منحنی خصوصیات پمپ بدست آورد.

۵-۳-۳- شیر های فشار شکن

نقش یک شیر فشار شکن که با علامت PRV نشان داده می شود آن است که فشار ثابتی را در پایاب تامین کند صرفنظر از اینکه فشار بالادست یا سرآب چقدر باشد. حالات استثنایی عبارتند از:

۱- فشار بالادست کمتر از مقدار تنظیم شده شیر باشد.

۲- فشار پایین دست بیش از مقدار تنظیم شده شیر باشد بطوریکه اگر شیر وجود نمی داشت، جریان در جهت عکس رخ می داد. اگر حالت اول اتفاق بیفتد شیر هیچ گونه نقشی در شرایط جریان ندارد. در حالت دوم شیر فشارشکن مانند شیر یکطرفه عمل کرده و از جریان در جهت عکس جلوگیری کند.با جلوگیری از جریان معکوس فشار بلافاصله از فشار تنظیم شده شیر بالاتر می رود.

برای حل شبکه شامل شیر فشار شکن به روش زیر عمل می کنیم:

لوله ای که روی آن شیر فشار شکن نصب شده است از بالادست شیر قطه می کنیم و بجای شیر فشار شکن یک مخزن مجازی با ارتفاعی معادل فشار تنظیم شده شیر قرار می دهیم.

معادلات پیوستگی را برای گره ها و معادلات انرژی را برای حلقه ها می نویسیم. در این مرحله طول لوله ای که شامل شیر فشار شکن بوده است را برابر طول پایین دست شیر فشار شکن در نظر می گیریم. سپس با حل دستگاه مقدار دبی ها را محاسبه می کنیم. و بعد از آن رقوم هیدرولیکی (فشار هیدرولیکی) گره ها را حساب می کنیم. اگر فشار مربوط به گره پایین دست لوله شامل شیر فشار شکن از فشار گره بالا دست آن کمتر بود، استفاده از فرض فوق درست بوده است وشیر فشار شکن، در حالت ۱ قرار دارد. در صورتیکه دبی لوله منفی شود یعنی فشار پایین دست از بالا دست بیشتر است و بنابراین فرض نادرست است زیرا در این صورت شیر فشار شکن مانند شیر یکطرفه عمل می کند و در اینصورت دبی لوله صفر خواهد بود.

فصل ششم

۶-۱- تحلیل جریان گذرا

تمامی جریان های گذرا، جریان از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر است که این تغییر ممکن است در یک زمان کوتاه یا بلند مدت انجام شود. هر جریان گذرایی پاسخ سیال به تغییراتی است که توسط وسایل کنترل و یا انتقال جریان انجام می شود و یا شرایطی که در اثر تغییرات محیطی ایجاد و جریان را تحت تاثیر قرار می دهد. اولین نوع جریان گذرا که به جریان نیمه پایدار معروف است، با حذف تاثیرات اینرسی و الاستیسیته در رفتار سیال مشخص می شود. در چنین جریانی تغییرات دبی و فشار نسبت به زمان به کندی انجام می شود و در یک بازه زمانی کوتاه جریان پایدار به نظر می رسد. به عنوان مثال برای این جریان می توان خارج شدن آب از یک مخزن بزرگ و یا تغییرات مصرف آب در یک شبکه آبرسانی در مدت ۲۴ ساعت در نظر گرفت.

دومین نوع جریان گذرا که آن را به عنوانم جریان گذرای واقعی می شناسیم، با در نظر گرفتن تاثیرات اینرسی سیال (بدون در نظر گرفتن تاثیرات الاستیک سیال و لوله) و یا با در نظر گرفتن تاثیرات اینرسی سیال و الاستیسیته سیال و لوله مشخص می شوند. اگر تاثیرات اینرسی دارای اهمیت باشند، اما ترلکم پذیری سیال و لوله قابل صرف نظر کردن باشند، با جریان گذرای واقعی روبرو هستیم که آنرا جریان ستون صلب می نامیم. اگر علاوه بر آن اثرات الاستیک لوله و سیال نیز براب تعیین دقیق شرایط گذرای جریان در نظر گرفته شود. با مسئله ضربه آبی مواجه هستیم. اختلاف این دو نوع جریان به راحتی قابل تشخیص نیست و بستگی به این دارد که تغییرات با چه سرعتی انجام شوند.به عنوان مثال بسته شدن ناگهانی یک شیر در یک خط لوله، ضربه آبی است و برای آنکه مدلسازی با دقت انجام شود در تحلیل مسئله تاثیرات الاستیک لوله و سیال نیز در نظر گرفته می شود.

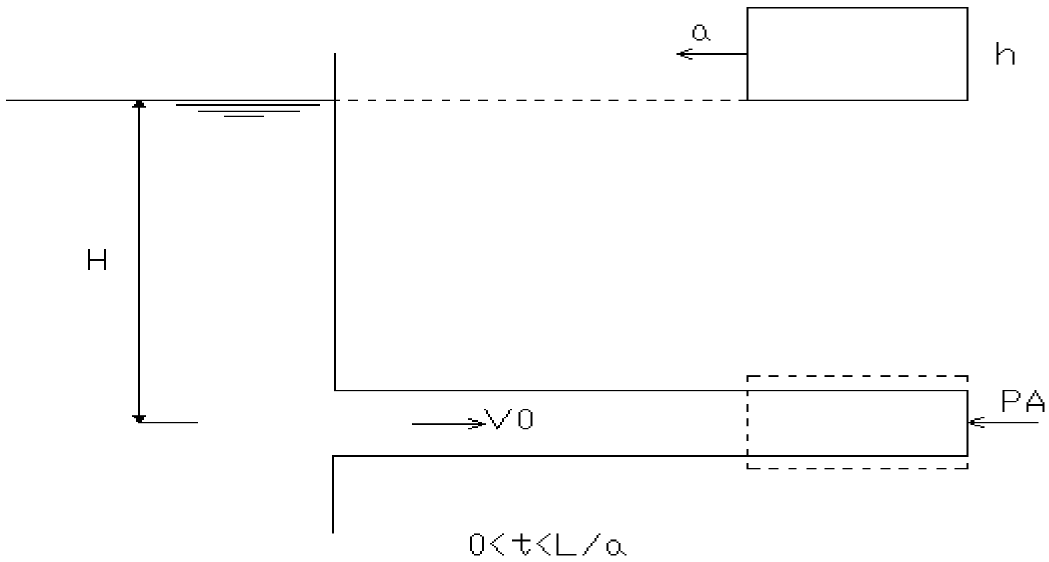
در ادامه بحث به پدیده ضربه آبی و روابط حاکم بر آن می پردازیم.

۶-۲- تشریح ضربه قوچ

هر گاه جریان در یک لوله مثلاً بواسطه باز شدگی یک شیر، تحت شتاب مثبت یا منفی قرار گیرد، ممکن است ضربه قوچ رخ دهد. هنگامی که در یک لوله شیری بطور ناگهانی بسته می شود، دبی عبوری از شیر کاهش می یابد. این امر باعث افزایش فشار در بالا دست شیر و کاهش فشار در پایین دست آن می شود. در بالادست شیر یک موج افزاینده فشار ایجاد می شود و با سرعت a در خلاف جهت جریان حرکت می کند. این موج سرعت جریان را کاهش می دهد. در پایین دست شیر یک موج کاهنده فشار ایجاد می شود و با سرعت a در جهت جریان حرکت می کند. این موج نیز سرعت جریان را کاهش می دهد. اگر بسته شدن شیر، سریع و فشار اولیه کم باشد ممکن است در پایین دست شیر مایع تبخیر شود. تقطیر ناگهانی بخارات منجر به ایجاد یک موج افزاینده فشار خواهد شد.

در اینجا برای یک سیستم ساده روند وقایعی را که بدنبال بسته شدن ناگهانی شیر رخ می دهد، شرح می دهیم. از اثرات اصطکاک صرفنظر می کنیم. لوله ای را در نظر بگیرید که ابتدای آن به یک مخزن بزرگ و انتهای آن به یک شیر متصل شده است. شیر باز است و جریان دائمی با سرعت V_0 در لوله برقرار است. در لحظه $t=0$ شیر آناً بسته می شود. لایه ای از سیال که در مجاورت شیر قرار دارد متوقف شده، متراکم می شود. جداره لوله در پیرامون این لایه منبسط می شود. پس از متراکم شدن این لایه و توقف آن، لایه بعدی متراکم خواهد شد. فرآیند تراکم سیال و انبساط لوله برای تمام قطعات تکرار می شود و به صورت یک موج فشاری به طرف بالادست حرکت می کند. در حالیکه سیال بالادست هنوز با سرعت V_0 در جریان است (مطابق شکل۴-۲). موج در $t=\frac{L}{a}$ به ابتدای لوله می رسد. در این لحظه تمام سیال داخل لوله تحت فشار اضافی h قرار دارد. مومنتوم سیال به صفر رسیده، تمام انرژی جنبشی آن به انرژی الاستیک تبدیل شده است.

در لحظه ای که موج به مخزن می رسد وضعیت نامتعادل است. سیال داخل لوله تحت فشاری بیش از مخزن قرار دارد، لذا به داخل مخزن بر می گردد. با برگشت سیال به مخزن ، فشار به فشار اولیه مـی رسد و لوله به حالت عادی خود بر می گردد. این فرآیند به صورت یک موج که با سرعت a بـه طـرف شیر حرکت می کند، برای تمام لوله اتفاق می افتد.

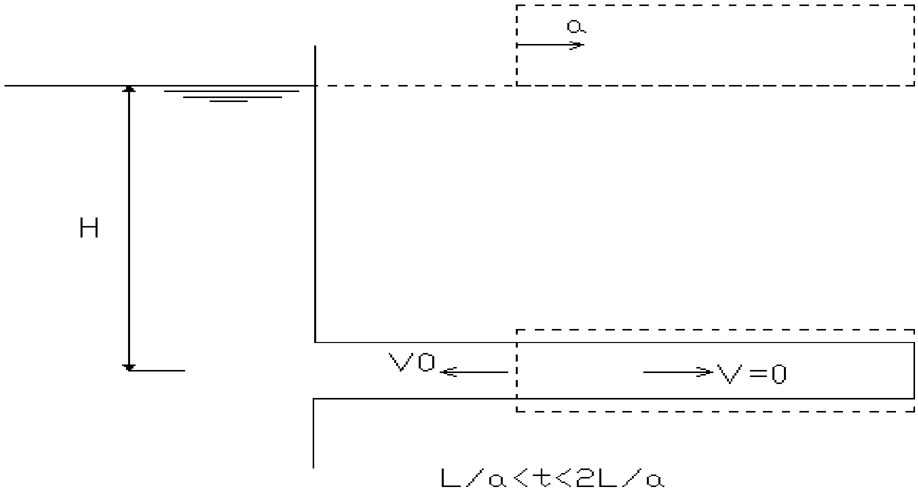


شکل ۶-۱ ربع سیکل اول پس از بسته شدن ناگهانی شیر در مسیر جریان

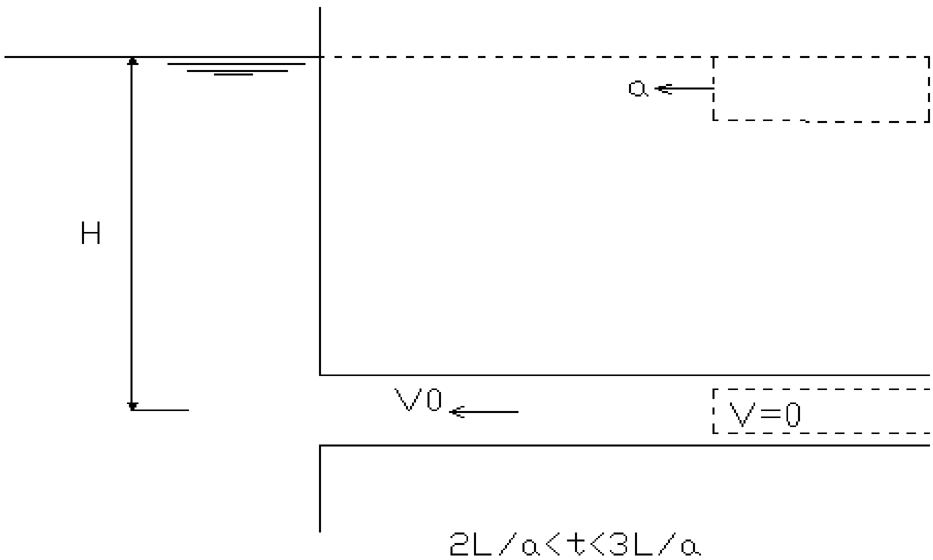
با عبور موج، سیال پشت آن با سرعت V_0 به سمت مخزن به جریان می افتد. (مطابق شـکل ۶-۲).در لحظه $t=\frac{2L}{a}$ موج به شیر می رسد. در این هنگام فشار در سراسر لوله به فشار اولیه رسـیده اسـت و سرعت در تمام نقاط آن $-V_0$ است.

چون شیر بسته است، سیالی وجود ندارد که در آن جریان یابد و لذا لایه ای از سیال که در مجـاورت شیر است متوقف شده، فشار آن به اندازه h کاهش می یابد. یک موج کاهنده فشار ایجاد می شود و با سرعت a به طرف بالادست حرکت می کند. این موج سیال را منبسط و لولـه را منقـبض مـی کنـد و سرعت جریان را به صفر می رساند (مطابق شکل ۶-۳). هرگاه فشار استاتیک اولیه کم باشـد، ممکـن

است فشار مایع به فشار بخار برسد. در این صورت قسمتی از مایع تبخیر شده، برای مدتی طولانی بـه طرف بالادست حرکت خواهد کرد.



شکل ۶-۲ ربع سیکل دوم پس از بسته شدن ناگهانی شیر در مسیر جریان

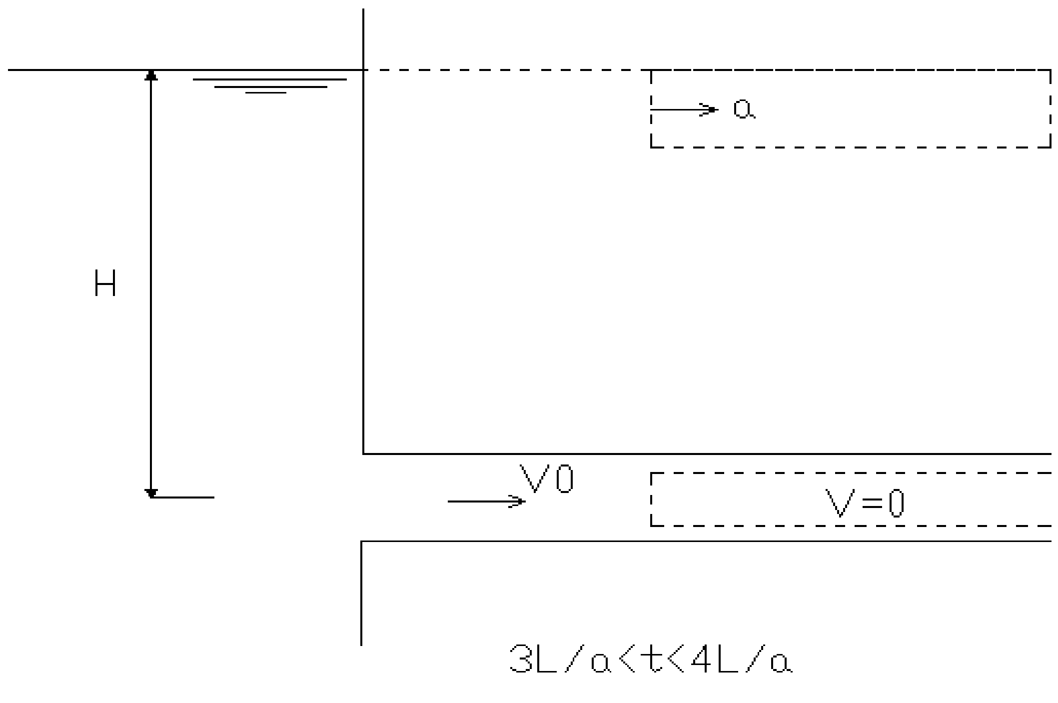


شکل ۶-۳ ربع سیکل سوم پس از بسته شدن ناگهانی شیر در مسیر جریان

در لحظه $t=\frac{3L}{a}$ موج کاهنده فشار به ابتدای لوله می رسد. در این لحظه سیال داخل لوله ساکن است و فشار در سرتاسر لوله نسبت به فشار مخزن h– است. در این وضعیت نـا متعـادل سـیال از

مخزن وارد لوله شده با سرعت V_0 به طرف شیر حرکت می کند. موج با سرعت a به طـرف شـیر حرکت کرده، لوله و سیال را به حالات عادی خود برمی گرداند (مطابق شکل ۶-۳). در لحظـه ای که این موج به شیر می رسد، شرایط دقیقاً همان است که در لحظه بسته شـدن شـیر یعنـی $\frac{4L}{a}$ ثانیه قبل بوده است.

مراحل فوق الذکر هر $\frac{4L}{a}$ ثانیه یکبار تکرار می شوند. در عمل، اصطکاک سیال و کـاملاً الاسـتیک نبودن لوله و سیال باعث استهلاک نوسانات شده، سیال را به سـکون دائمـی مـی رسـانند. بسـته شدن شیر در مدتی کمتر از $\frac{2L}{a}$ را بسته شـدن سـریع و در مـدتی بیشـتر از $\frac{2L}{a}$ را بسـته شـدن آهسته می گویند.



شکل ۶-۴ ربع سیکل چهارم پس از بسته شدن شیر در مسیر جریان

۶-۳- معادلات دیفرانسیلی حاکم بر ضربه قوچ

در این بخش از بدست آوردن روابط صرفنظر می کنیم و فقط به ارائه آن ها بسنده مـی شـود. دو معادله دیفرانسیل مستقل برای سرعت و شتاب در ضربه قوچ بصورت زیر هستند:

$$\frac{dV}{dt}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial s}+g\frac{dz}{ds}+\frac{f}{2D}V|V|=0 \qquad (۱۲-۶)$$

$$a^2\frac{\partial V}{\partial s}+\frac{1}{\rho}\frac{dP}{ds}=0 \qquad (۱۳-۶)$$

یکی از روش هایی که امروزه بطور گسترده برای حل معادلات اویلر و بقای جرم برای تحلیل ضربه آبی مورد استفاده قرار می گیرد روش مشخصه هاسـت. ایـن روش انطبـاق خـوبی بـا روش هـای عددی که در حل کامپیوتری استفاده می شوند دارد.

نکته ای که در روش مشخصه ها حائز اهمیت است جایگزینی یک دسـتگاه معـادلات دیفرانسـیل معمولی به جای یک دستگاه معادلات جزئی اسـت. در ایـن روش از معـادلات (۶-۱۲) و (۶-۱۳) یک ترکیب خطی ایجاد می کنیم. λ یک عدد ثابت است. ترکیب خطی مورد نظر به شـکل زیـر است:

$$\lambda[\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial s}+g\frac{dz}{ds}+\frac{f}{2D}V|V|]+[a^2\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial s}]=0 \qquad (۱۴-۶)$$

بعد از مرتب کردن جملات اگر جمله $\lambda\frac{\partial V}{\partial t}+a^2\frac{\partial V}{\partial s}$ را با $\lambda\frac{dV}{ds}$ جایگزین کنیم، آنگاه $\lambda\frac{ds}{dt}=a^2$ و همچنین اگر به جای جمله $\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{\lambda}{\rho}\frac{\partial P}{\partial s}$ عبارت $\frac{1}{\rho}\frac{dP}{dt}$ را قرار دهیم آنگاه $\frac{\lambda}{\rho}=\frac{1}{\rho}\frac{ds}{dt}$ خواهـد بود.برای ارضاء روابط فوق لازم است که:

$$\lambda=\pm a \qquad (۱۵-۶)$$

λ نیز مانند a و جایگزینی آنها در معادله (۶-۱۴) به یک دستگاه با دو معادله دیفرانسیل معمولی به شکل زیر می رسیم:

$$\frac{dV}{dt}+\frac{1}{a\rho}\frac{dP}{dt}+g\frac{dz}{ds}+\frac{f}{2D}V|V|=0 \qquad (۱۶-۶)$$

$$\frac{dV}{dt}-\frac{1}{a\rho}\frac{dP}{dt}+g\frac{dz}{dt}+\frac{f}{2D}V|V|=0 \qquad (۱۷-۶)$$

در معادلات بالا شرایط خاصی برای متغیرهای غیر وابسته در هر معادله وجو دارد. معادله (۶-۱۶) در صورتی اعتبار دارد که $\lambda\frac{ds}{dt}=a^2$ باشد که نتیجه آن $\frac{ds}{dt}=+a$ است و به طور مشابه معادله (۶-۱۷) در صورتی اعتبار دارد که $\frac{ds}{dt}=+a$ باشد. در نتیجه ما دو معادله دیفرانسیل جزئی را با دو معادله دیفرانسیل معمولی جایگزین کرده ایم. با استفاده از رابطه $P=\gamma(H-z)$ معادلات جدید به شکل زیر بدست می آیند:

$$\frac{dV}{dt}+\frac{g}{a}\frac{dH}{dt}+\frac{f}{2D}V|V|=0 \quad ، \quad \frac{ds}{dt}=+a \qquad (۱۸-۶)$$

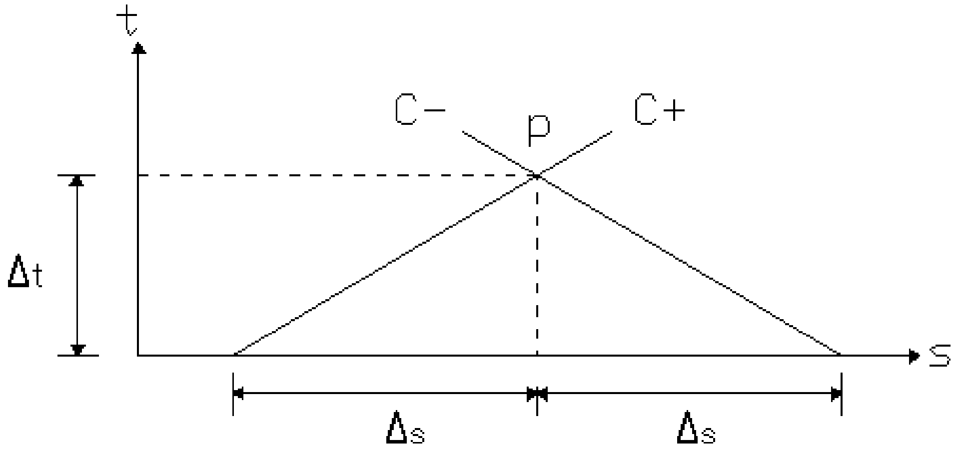
$$\frac{dV}{dt}-\frac{g}{a}\frac{dH}{dt}+\frac{f}{2D}V|V|=0 \quad ، \quad \frac{ds}{dt}=-a \qquad (۱۹-۶)$$

از آنجا که روابط خاصی بین s, t وجود دارد، معادلات $\frac{ds}{dt}=+a$ و $\frac{ds}{dt}=-a$ به عنوان مشخصه های معادلات (۶-۱۸) و (۶-۱۹) نامیده می شوند.

۶-۴- حل عددی معادلات تقریبی

شکل ۶-۵ صفحه s-t را برای یک مسئله فرضی نشان می دهد. برای هر نقطه ای در صفحه s-t متغیرهای پیوسته H و V مقادیری یکه هستند. در مرحله بعدی خطوط مشخصه C^+ و C^- که از نقطه p می گذرند را رسم می کنیم. نقاطی که حاصل برخورد خطوط مشخصه و محور s هستند را Ri و Le می نامیم. این نقاط دارای فاصله طولی Δs با نقطه P هستند. معادله (۶-۱۸) در راستای مشخصه C^+ و معادله (۶-۱۹) در راستای مشخصه C^- اعمال می شود. داده های نقاط Ri و Le بطور پیشرو روی این مشخصه ها اعمال می شوند و منجر به تعیین H و V می شوند.

برای یافتن یک روش عددی برای حل مساله، معادلات (۶-۱۸) و (۶-۱۹) را به شکل تفاضل محدود می نویسیم:



شکل ۶-۵ صفحه s-t به همراه خطوط مشخصه ها

$$\frac{V_P - V_{Le}}{t_P - 0} + \frac{g}{a}\frac{H_P - H_{Le}}{t_P - 0} + \frac{f}{2D}V_{Le}|V_{Le}| = 0 \qquad (۶-۲۰)$$

$$\frac{V_P - V_{Ri}}{t_P - 0} - \frac{g}{a}\frac{H_P - H_{Ri}}{t_P - 0} + \frac{f}{2D}V_{Ri}|V_{Ri}| = 0 \qquad (۶-۲۱)$$

در معادلات اخیر دو فرض مهم را در نظر گرفته ایم. اول اینکه سرعتی که در نظر گرفته ایم سرعت در ابتدای بازه زمانی است در حالیکه استفاده از سرعت متوسط در بازه زمانی معقول تر است. اگر ما از سرعت نامعلوم V_P در جملات اصطکاک استفاده کنیم، معادله دیفرانسیل غیر خطی خواهند بود و نیاز به حل تکراری داریم. با توجه به تعداد بازه های زمانی و مشکلات ذاتی که در حل معادلات غیر خطی وجود دارد استفاده از این روش مناسب نیست. به طور کلی با توجه به بازه های کوچک زمانی که در حل مسائل گذرا انتخاب می شوند، این ساده سازیها خطای چندانی در حل مسائل ایجاد نخواهد کرد.

فرض دوم این است که ضریب اصطکاک حالت پایدار به نتایج مناسبی برای حالت گذرا منجر شود. فرض ضریب اصطکاک پایدار در تحلیل جریان گذرا یک تقریب است.

در این مرحله در روابط (۶-۲۰) و (۶-۲۱) به جای $t_P - 0$ از Δtاستفاده می کنیم. و به عبارتی می توان معادلات را برای بازه ای زمانی بعدی نیز اعمال کرد.

$$C^{+}: (V_P - V_{Le}) + \frac{g}{a}(H_P - H_{Le}) + \frac{f\Delta t}{2D} V_{Le}|V_{Le}| = 0 \qquad (۶-۲۲)$$

$$C^{-}: (V_P - V_{Ri}) - \frac{g}{a}(H_P - H_{Ri}) + \frac{f\Delta t}{2D} V_{Ri}|V_{Ri}| = 0 \qquad (۶-۲۳)$$

معادلات مشخصه های بالا را می توان بصورت تفاضل محدود نیز نوشت. اگر لوله را به N قسمت تقسیم کنیم برای قسمت های ۲ تا N مقادیر زیر معتبر هستند:

$$V_P = \frac{1}{2}\left[(V_{Le} + V_{Ri}) + \frac{g}{a}(H_{Le} - H_{Ri}) - \frac{f\Delta t}{2D}(V_{Le}|V_{Le}| + V_{Ri}|V_{Ri}|)\right] \qquad (۶-۲۴)$$

$$H_P = \frac{1}{2}\left[\frac{a}{g}(V_{Le} - V_{Ri}) + (H_{Le} + H_{Ri}) - \frac{a}{g}\frac{f\Delta t}{2D}(V_{Le}|V_{Le}| + V_{Ri}|V_{Ri}|)\right] \qquad (۶-۲۵)$$

مقادیر نقاط ۱ وN+1 با توجه به شرایط مرزی که ناشی از شرایط خارجی هستند بدست می آیند. به عنوان مثال به چند شرط مرزی اشاره می شود:

۶-۵- شرط مرزی مخزن در بالا دست لوله

هد در ابتدای لوله ای که به یک مخزن متصل است مطابق با هد سطح آب مخزن در نظر گرفته می شود. اگر سطح آب مخزن نسبت به زمان ثابت باشد. هد H نیز ثابت خواهد بود:

$$H_{p_1} = H_0 \qquad (۶-۲۶)$$

با توجه به معادله (۶-۲۳) برای سرعت خواهیم داشت:

$$V_{p_1} = V_{p_2} + \frac{g}{a}(H_0 - H_2) - \frac{f\Delta t}{2D} V_2|V_2| \qquad (۶-۲۷)$$

اگر مخزن در پایین دست جریان باشد عبارتی معادل عبارت فوق برای Vp_{N+1} با مشخصه C^{+} خواهیم داشت.

۶-۶- شرط مرزی سرعت در پایین دست لوله

اگر شیری در پایین دست لوله داشته باشیم که رفتار خطی داشته باشد و بسته شدن آن موجب کاهش سرعت جریان بصورت خطی شود، آنگاه:

$$Vp_{N+1} = V_0\left(1-\frac{t}{T_C}\right) \qquad 0 \le t \le T_C \qquad (۲۸-۶)$$

و

$$Vp_{N+1} = 0 \qquad t \ge T_C$$

با جایگذار ی معادله فوق در معادله (۶-۲۷) خواهیم داشت:

$$Hp_{N+1} = H_N - \frac{a}{g}(Vp_{N-1} - V_N) - \frac{a}{g}\frac{f\Delta t}{2D}V_N|V_N| \qquad (۲۹-۶)$$

۶-۷- شرط مرزی پمپ دور ثابت در بالادست لوله:

این شرط مرزی باعث می شود که پیچیدگیهایی در معادلات ایجاد شود زیرا Hp_1 و Vp_1 هر دو در معادلات وجود دارند. در نتیجه شرط مرزی باید برای هر دو مجهول به طور همزمان حل شود. یکی از معمول ترین راه ها برای نشان دادن شرط مرزی استفاده از معادلات مشخصه پمپ ها است.

$$h_p = A'_p Q^2 + B'_p Q + C_p' \qquad (۳۰-۶)$$

که در آن Q دبی پمپ و h_p افزایش هد در پمپ است. این متغیرها در معادله مشخصه C^{-} قابل استفاده نمی باشد در نتیجه باید تغییراتی در تعریف متغیرها ایجاد کرد به شکلی که قابل استفاده در معادلات باشند.

$$Q = Vp_1 A \qquad (۳۱-۶)$$

$$h_p = h_p - H_{sump} \qquad (۳۲-۶)$$

با ترکیب معادلات بالا:

$$H_{p_1} = A_p V_{p_1}^2 + B_p V_{p_1} + C_p \quad (۶-۳۳)$$

هنگامی که معادله فوق به موازات معادله مشخصه C^- حل شود با حذف H_{p_1}به معادله زیر برای V_{p_1} به شکل زیر می رسیم:

$$V_{p_1} - V_2 - \frac{g}{a}(A_p V_{p_1}^2 + B_p V_{p_1} + C_p) + \frac{g}{a} H_2 + \frac{f\Delta t}{2D} V_2 |V_2| = 0 \quad (۶-۳۴)$$

با مرتب کردن معادله بالا داریم:

$$(\frac{g}{a} A_p) V_{p_1}^2 + (\frac{g}{a} B_p - 1) V_{p_1} + (V_2 + \frac{g}{a} C_p - \frac{g}{a} H_2 - \frac{f\Delta t}{2D} V_2 |V_2|) = 0 \quad (۶-۳۵)$$

و سپس حل آن مقدار V_{p_1} بدست می آید و با قرار دادن آن در معادله (۶-۱۳) مقدار H_{p_1} بدست می آید. در واقع در صورتیکه شیر یکطرفه بدون اصطکاک در پایین دست پمپ قرا داشته باشد می توان از معادله (۶-۱۴) برای بدست آوردن V_{p_1} و بررسی علامت آن استفاده کرد. در صورتی که علامت سرعت منفی باشد باید مقدار سرعت را صفر قرار داد و با استفاده از آن H_{p_1} را از معادله C^- بدست آورد. برای سادگی کار معادله C^- را برای انتهای بالایی لوله می نویسیم:

$$V_{p_1} = C_1 + C_2 H_{p_1} \quad (۶-۳۶)$$

$$C_1 = V_2 - \frac{g}{a} H_2 - \frac{f\Delta t}{2D} V_2 |V_2| \quad (۶-۳۷)$$

$$C_2 = \frac{g}{a} \quad (۶-۳۸)$$

با تر کیب سه معادله فوق برای حذف H_{p_1}داریم:

$$\frac{V_{p_1} - C_1}{C_2} = A_p V_{p_1}^2 + B_p V_{p_1} + C_p \quad (۶-۳۹)$$

معادله بالا را می توان به فرم درجه دوم در آورد:

$$V_{p_1}^2 + C_3 V_{p_1} + C_4 = 0 \quad (۶-۴۰)$$

$$C_3 = \frac{B_p - \frac{1}{C_2}}{A_p} \quad (۶-۴۱)$$

$$C_4 = \frac{C_p + C_1/C_2}{A_p} \qquad (۴۲-۶)$$

جواب معادله به شکل زیر بدست می آید:

$$Vp_1 = \frac{C_3}{2}\left[-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4C_4}{C_3^{2}}}\right] \qquad (۴۳-۶)$$

از معادله فوق به عنوان شرط مرزی در برنامه استفاده شده است.

۶-۸- شرط مرزی گره با فشار (هد) معلوم در بالادست لوله

فرض می کنیم یک گره با فشار معلوم در بالادست لوله داشته باشیم و در پایین دست لوله یک شیر با رفتار خطی، که با بسته شدن آن در مدت زمان t سرعت جریان بصورت خطی از مقدار اولیه v تا صفر کاهش می یابد. در حل تقریبی ضربه آبی دو فرض اساسی مطرح کردیم که یکی از آنها این بود که ضریب اصطکاک حالت پایدار به نتایج مناسبی برای حالت گذرا منجر می شود. بر پایه همین فرض می توانیم این شرط مرزی را شبیه سازی کنیم.

در ابتدا لوله مورد نظر را بطور مجزا از شبکه در نظر می گیریم. در لحظه t=0 با توجه به این که فشار گره معلوم و برابر p است، یک مخزن فرضی با ارتفاع $h = \frac{p}{\gamma}$ بر روی گره در نظر می گیریم. سپس مساله را مانند حالتی که یک مخزن ثابت در بالادست لوله قرار داشت برای اولین بازه زمانی حل می کنیم. در مرحله بعد که لازم استمساله برای بازه زمانی دوم حل شود ابتدا هد گره را آپدیت می کنیم به این ترتیب که در بازه زمانی دوم مقدار سرعت در لوله کاهش یافته که در مرحل اول محاسبه شده است. همچنین با توجه به فرض اساسی که ذکر شد f را ثابت در نظر گرفتیم. پس با رابطه زیر مقدار فشار گره در بازه زمانی دوم که به عنوان شرط مرزی در مرحله دوم زمانی استفاده می شود، بدست می آید:

$$h_{node1} = \left(\frac{p}{\gamma}\right)_{node2} + \frac{fL}{D}\frac{V1^{2}}{2g} \qquad (۴۴-۶)$$

و یا

$$h_{node1} = \left(\frac{p}{\gamma}\right)_{node2} + K\,Q^n \qquad (۴۵-۶)$$

بعد از محاسبه هد مخزن فرضی با رابطه بالا دو باره مراحل فوق را تکرار می کنیم. و به همین ترتیب برای کل بازه زمان شبیه سازی عمل می کنیم. این روش بـرای حـل تقریبـی و بـرای پرهیـز از حـل همزمان دستگاه معادلات دیفرانسیل که می تواند شامل صدها معادله دیفراسیل باشد، مـورد اسـتفاده قرار می گیرد.

ضمیمه

کدهای برنامه تحلیل شبکه

توضیح:

جهت پرهیز از حجیم شدن بیش از حد فقط توابع اصلی که در ماژول نوشته شده اند در اینجا ارائه می شوند.

کد های ماژول:

```
Attribute VB_Name = "Module1"
Option Explicit

Public fname, path As String

'constants
Public pi As Variant
Public ges As Variant
Public gsi As Variant
Public accuracy, itt As Double

'number of network elements
Public nopipe, nonode, nonodef3, noloop, nosloop, nopres, nores, noboost, tempnode,
temppipe, tempq, detaq, vis As Variant
Public eqn As Integer
Public eps As Double

' pipe characteristics
Public lpipe(400), chwpipe(400), dpipe(400), kpipe(400), npipe(400), ed(400) As
Variant
Public fpipe(400), leq(400), ltot(400), deq(400), apipe(400), rey(400), kl(400), deltaq
As Variant
Public kp(400), ib(400, 400) As Double

'matrixes
Public mat(400, 400), r(400), qpipe(400), loops(400, 400), resloop(400, 400),
boostpump(400, 400) As Variant
Public apump(400), bpump(400), cpump(400), gpump(400), pipesloop(400), pres(400,
400), hboost(400) As Variant
Public apres(400), bpres(400), cpres(400), gpres(400), headboost(400), headpres(400),
deltah(400) As Variant
Public h0pres(400), h0pump(400), mean(400), backup, jv(400), pj(400), hpres(400) As
Double


' nodes information first index is number of node and second is for pipe
```

```
Public qnode(400, 400) As Variant
Public demand(400) As Variant
Public nojoint(400) As Variant
Public hight(400) As Double
Public sj As Integer
Public js As Integer
Public statp(400) As Double
Public hydp(400) As Double

' counters
Public dahi, sies, err, c2, c3, cf3, er1, er2, er3, er4, er5, er6, er7 As Integer
Public Check1, check2, ittacc As Variant
Public mc, bcond, ip As Integer

'water hammer variables
Public nparts, nn, index As Integer
Public vzero, hzero, elevup, elevdn, tmax, tclose, ws, headmx(500), headmn(500) As
Double
Public aprime, bprime, cprime, hsump, x(500), v(500), h(500), head(500) As Double
Public hlow(500), hhigh(500), nodes, delt, hzn As Double


'functions

'error form2
Public Sub er()
   er7 = er1 * er2 * er3 * er4 * er5 * er6
End Sub
'////////////////////////////////////////////

'calculate number of equations
Public Sub equations()
   eqn = (nopipe * 1) + (1 * noboost) + (1 * nopres)
End Sub

' calulate reynolds number
Public Sub calcreynolds()
   If sies = 1 Then
      For mc = 1 To nopipe
         rey(mc) = (4 * Abs(qpipe(mc) / 1000)) / (vis * pi * ((dpipe(mc) / 1000)))
         If rey(mc) = 0 Then rey(mc) = eps
      Next mc
   Else
      For mc = 1 To nopipe
         rey(mc) = (4 * Abs(qpipe(mc))) / (vis * pi * (dpipe(mc) / 12))
         If rey(mc) = 0 Then rey(mc) = eps
      Next mc
   End If
```

```
End Sub
'/////////////////////////////////////////

'calculate f
Public Sub calcf()
   Dim a, b, c As Variant
   For mc = 1 To nopipe
      If rey(mc) < 2100 Then
         fpipe(mc) = 64 / rey(mc)
      Else
         a = (0.094 * (ed(mc) ^ 0.225)) + (0.053 * ed(mc))
         b = 88 * (ed(mc) ^ 0.44)
         c = 1.62 * (ed(mc) ^ 0.134)
         fpipe(mc) = a + (b / (Abs(rey(mc)) ^ c))
      End If
   Next mc
End Sub
'//////////////////////////////////

'calculate delta l
Public Sub deltal()
   Dim aa As Variant
   aa = (sies + 1) * (dahi + 10)
   Select Case aa
   Case 10:
         For mc = 1 To nopipe
            leq(mc) = kl(mc) * dpipe(mc) / (12 * fpipe(mc))
            ltot(mc) = lpipe(mc) + leq(mc)
         Next mc
   Case 20:
         For mc = 1 To nopipe
            leq(mc) = kl(mc) * dpipe(mc) / (1000 * fpipe(mc))
            ltot(mc) = lpipe(mc) + leq(mc)
         Next mc
   Case 11:
         For mc = 1 To nopipe
            leq(mc) = 0.00532 * kl(mc) * Abs(qpipe(mc)) ^ 0.148 * chwpipe(mc) ^ 1.852
* dpipe(mc) ^ 0.8703
            ltot(mc) = lpipe(mc) + leq(mc)
         Next mc
   Case 22:
         For mc = 1 To nopipe
            leq(mc) = 0.00773 * kl(mc) * Abs(qpipe(mc)) ^ 0.148 * chwpipe(mc) ^ 1.852
* dpipe(mc) ^ 0.8703
            ltot(mc) = lpipe(mc) + leq(mc)
         Next mc
   End Select
End Sub
'//////////////////////////////////////////////////////
```

```
'calculate k and n for each pipe
Public Sub kn()
    Dim q1, q2, v1, v2, re1, re2, f1, f2, b, a, area, aa, lna As Double
    Dim c, chkq As Integer

    aa = (sies + 1) * (dahi + 10)

    Select Case aa
    Case 22:
            For mc = 1 To nopipe
                kpipe(mc) = (10.675 * ltot(mc)) / (chwpipe(mc) ^ 1.852 * dpipe(mc) ^ 4.87)
                npipe(mc) = 1.852
            Next mc
    Case 11:
            For mc = 1 To nopipe
                kpipe(mc) = (4.73 * ltot(mc)) / (chwpipe(mc) ^ 1.852 * (dpipe(mc) / 12) ^
4.87)
                npipe(mc) = 1.852
            Next mc
    Case 10:
        chkq = 0
        For mc = 1 To nopipe
            dpipe(mc) = dpipe(mc) / 12
            area = (pi * dpipe(mc) ^ 2) / 4
            If qpipe(mc) < 0 Then
                qpipe(mc) = qpipe(mc) * -1
                chkq = 1
            End If
            q1 = qpipe(mc) - (deltaq * qpipe(mc))
            q2 = qpipe(mc) + (deltaq * qpipe(mc))
            v1 = q1 / area
            v2 = q2 / area
            re1 = v1 * dpipe(mc) / vis
            re2 = v2 * dpipe(mc) / vis
            If re1 = 0 Then re1 = eps: If re2 = 0 Then re2 = eps
            If re1 < 2100 Then
                f1 = 64 / re1
            Else
                a = 0.094 * (ed(mc) ^ 0.225) + 0.053 * (ed(mc))
                b = 88 * (ed(mc) ^ 0.44)
                c = 1.62 * (ed(mc) ^ 0.134)
                f1 = a + (b / (re1 ^ c))
            End If
            If re2 < 2100 Then
                f2 = 64 / re2
            Else
                a = 0.094 * (ed(mc) ^ 0.225) + 0.053 * (ed(mc))
                b = 88 * (ed(mc) ^ 0.44)
```

```
            c = 1.62 * (ed(mc) ^ 0.134)
            f2 = a + (b / (re2 ^ c))
        End If
        b = (Log(f1) - Log(f2)) / (Log(q2) - Log(q1))
        lna = Log(f1) + b * Log(q1)
        npipe(mc) = 2 - b
        kpipe(mc) = (Exp(lna) * ltot(mc)) / (2 * ges * dpipe(mc) * area ^ 2)
        dpipe(mc) = dpipe(mc) * 12
        If chkq = 1 Then
            qpipe(mc) = -1 * qpipe(mc)
        End If
        chkq = 0
    Next mc
Case 20:
    chkq = 0
    For mc = 1 To nopipe
        dpipe(mc) = dpipe(mc) / 1000
        area = (pi * dpipe(mc) ^ 2) / 4
        If qpipe(mc) < 0 Then
            qpipe(mc) = qpipe(mc) * -1
            chkq = 1
        End If
        q1 = qpipe(mc) - (deltaq * qpipe(mc))
        q2 = qpipe(mc) + (deltaq * qpipe(mc))
        v1 = q1 / area
        v2 = q2 / area
        re1 = v1 * dpipe(mc) / vis
        re2 = v2 * dpipe(mc) / vis
        If re1 = 0 Then re1 = eps: If re2 = 0 Then re2 = eps
        If re1 < 2100 Then
            f1 = 64 / re1
        Else
            a = 0.094 * (ed(mc) ^ 0.225) + 0.053 * (ed(mc))
            b = 88 * (ed(mc) ^ 0.44)
            c = 1.62 * (ed(mc) ^ 0.134)
            f1 = a + (b / (re1 ^ c))
        End If
        If re2 < 2100 Then
            f2 = 64 / re2
        Else
            a = 0.094 * (ed(mc) ^ 0.225) + 0.053 * (ed(mc))
            b = 88 * (ed(mc) ^ 0.44)
            c = 1.62 * (ed(mc) ^ 0.134)
            f2 = a + (b / (re2 ^ c))
        End If
        b = (Log(f1) - Log(f2)) / (Log(q2) - Log(q1))
        lna = Log(f1) + b * Log(q1)
        npipe(mc) = (2 - b)
        kpipe(mc) = (Exp(lna) * ltot(mc)) / (2 * gsi * dpipe(mc) * area ^ 2)
```

```
            dpipe(mc) = dpipe(mc) * 1000
            If chkq = 1 Then
                qpipe(mc) = -1 * qpipe(mc)
            End If
            chkq = 0
        Next mc
    End Select
End Sub
'/////////////////////////////////////////////////////////////////////

' forming matrix of coeficients in network without pesude loop
Public Sub simpelmat()
    Dim w, p, wl, pl, pb, wb, rp, wc, pc As Integer

    For w = 1 To nonodef3
        For p = 1 To nopipe
            If qnode(w, p) > 0 Then mat(w, Abs(qnode(w, p))) = -1 Else If qnode(w, p) = 0
Then Else If qnode(w, p) < 0 Then mat(w, Abs(qnode(w, p))) = 1
        Next p
        r(w) = demand(w)
    Next w

    For wl = 1 To noloop
        For pl = 1 To pipesloop(wl)
            If loops(wl, pl) > 0 Then mat(wl + (1 * nonodef3), Abs(loops(wl, pl))) =
kpipe(Abs(loops(wl, pl))) * (1 * Abs((qpipe(Abs(loops(wl, pl))))) ^
(npipe(Abs(loops(wl, pl))) - 1)) Else If loops(wl, pl) = 0 Then Else If loops(wl, pl) < 0
Then mat(wl + (1 * nonodef3), Abs(loops(wl, pl))) = -kpipe(Abs(loops(wl, pl))) *
(Abs((qpipe(Abs(loops(wl, pl))))) ^ (npipe(Abs(loops(wl, pl))) - 1))
        Next pl
    Next wl

    For wb = 1 To noloop
        For pb = 1 To nopipe
            If boostpump(wb, pb) > 0 Then mat(wb + (1 * nonodef3), Abs(1 *
boostpump(wb, pb)) + (1 * nopipe)) = -1 * apump(Abs(1 * boostpump(wb, pb))) *
gpump(Abs(1 * boostpump(wb, pb))): r(wb + (1 * nonodef3)) = 1 *
h0pump(Abs(boostpump(wb, pb))) Else If boostpump(wb, pb) < 0 Then mat(wb + 1 *
nonodef3, Abs(1 * boostpump(wb, pb)) + 1 * nopipe) = 1 * apump(Abs(1 *
boostpump(wb, pb))) * 1 * gpump(Abs(1 * boostpump(wb, pb))): r(wb + nonodef3) = -
1 * h0pump(Abs(1 * boostpump(wb, pb)))
        Next pb
    Next wb

    For wc = 1 To noloop
        For pc = 1 To nopipe
            If Abs(1 * boostpump(wc, pc)) > 0 Then
                mat((1 * noloop) + (1 * nonodef3) + Abs(1 * boostpump(wc, pc)), (1 *
nopipe) + Abs(1 * boostpump(wc, pc))) = 1
```

```
            mat((1 * noloop) + (1 * nonodef3) + Abs(1 * boostpump(wc, pc)), pc) = -1
         End If
      Next pc
   Next wc

End Sub
'/////////////////////////////////////////////////////////////////////////
'form RHS right hand side of eqs for real loop with boosters (1 time only)
Public Sub rhsloop()
   Dim wc, pc As Integer
   For wc = 1 To noloop
      For pc = 1 To nopipe
         If 1 * boostpump(wc, pc) > 0 Then
            r((1 * nonodef3) + (1 * noloop) + Abs(1 * boostpump(wc, pc))) = (1 *
bpump(Abs(1 * boostpump(wc, pc))) / (2 * apump(Abs(1 * boostpump(wc, pc)))))
         ElseIf 1 * boostpump(wc, pc) < 0 Then
            r((1 * nonodef3) + (1 * noloop) + Abs(1 * boostpump(wc, pc))) = (-1 *
bpump(Abs(1 * boostpump(wc, pc))) / (2 * apump(Abs(1 * boostpump(wc, pc)))))
         End If
      Next pc
   Next wc
End Sub
'/////////////////////////////////////////////////////////////////////////
'calculate RHS eqs for pesudo loop pumps (1 time only)
Public Sub rhsnosloop()
   Dim w, wl, pl As Integer
   For w = 1 To nosloop
      r(w + (1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost)) = deltah(w)
   Next w
   For wl = 1 To nosloop
      For pl = 1 To nopipe
         If pres(wl, pl) > 0 Then r(wl + (1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost)) =
r(wl + (1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost)) + h0pres(Abs(pres(wl, pl))) Else
If pres(wl, pl) < 0 Then r(wl + (1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost)) = r(wl +
(1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost)) - h0pres(Abs(pres(wl, pl)))
      Next pl
   Next wl
End Sub
'calc boostpump G
Public Sub calcgboost()
   Dim w, p As Integer
   For w = 1 To noloop
      For p = 1 To nopipe
         If Abs(1 * boostpump(w, p)) > 0 Then
            gpump(Abs(1 * boostpump(w, p))) = qpipe(p) + (bpump(Abs(1 *
boostpump(w, p))) / (2 * apump(Abs(1 * boostpump(w, p)))))
         End If
      Next p
   Next w
```

```
End Sub
'////////////////////////////////////////////////////////////////////
'calculate h0pump
Public Sub calch0pump()
   Dim w, p As Integer
   For w = 1 To noloop
      For p = 1 To nopipe
         If Abs(1 * boostpump(w, p)) > 0 Then
            h0pump(Abs(1 * boostpump(w, p))) = cpump(Abs(1 * boostpump(w, p))) -
((bpump(Abs(1 * boostpump(w, p))) ^ 2) / (4 * apump(Abs(1 * boostpump(w, p)))))
         End If
      Next p
   Next w
End Sub
'//////////////////////////////////////////////////////////////////
'calculate pumpres G
Public Sub calcgpres()
   Dim w, p As Integer
   For w = 1 To nosloop
      For p = 1 To nopipe
         If Abs(1 * pres(w, p)) > 0 Then
            gpres(Abs(1 * pres(w, p))) = qpipe(p) + (bpres(Abs(1 * pres(w, p))) / (2 *
apres(Abs(1 * pres(w, p)))))
         End If
      Next p
   Next w
End Sub
'//////////////////////////////////////////////////////////////////
'calc h0 for boosterpump
Public Sub calch0pres()
   Dim w, p As Integer
   For w = 1 To nosloop
      For p = 1 To nopipe
         If Abs(1 * pres(w, p)) > 0 Then
            h0pres(Abs(1 * pres(w, p))) = cpres(Abs(1 * pres(w, p))) - ((bpres(Abs(1 *
pres(w, p))) ^ 2) / (4 * apres(Abs(1 * pres(w, p)))))
         End If
      Next p
   Next w
End Sub

'////////////////////////////////////////////////////////////////////
'compelet matrix OF COEFICIENTS (for virtual loops)
Public Sub compmat()
   Dim w, p, wc, pc, wl, pl As Integer
   For w = 1 To nosloop
      For p = 1 To nopipe
         If resloop(w, p) > 0 Then mat(w + (1 * noloop) + (1 * nonodef3) + (1 *
noboost), Abs(1 * resloop(w, p))) = kpipe(resloop(w, p)) * Abs(qpipe(resloop(w, p))) ^
```

```
(npipe(Abs(resloop(w, p))) - 1) Else If resloop(w, p) = 0 Then Else If resloop(w, p) < 0
Then mat(w + (1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost), Abs(1 * resloop(w, p))) =
-kpipe(Abs(1 * resloop(w, p))) * (Abs(qpipe(Abs(resloop(w, p))))) ^ (npipe(Abs(1 *
resloop(w, p))) - 1)
        Next p
    Next w
    For wl = 1 To nosloop
        For pl = 1 To nopipe
            If pres(wl, pl) > 0 Then mat(wl + (1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost),
Abs(1 * pres(wl, pl)) + (1 * nopipe) + (1 * noboost)) = -1 * apres(Abs(1 * pres(wl, pl)))
* gpres(Abs(1 * pres(wl, pl))) Else If pres(wl, pl) < 0 Then mat(wl + (1 * nonodef3) +
(1 * noloop) + (1 * noboost), Abs(1 * pres(wl, pl)) + (1 * nopipe) + (1 * noboost)) = 1 *
apres(Abs(1 * pres(wl, pl))) * gpres(Abs(1 * pres(wl, pl)))
        Next pl
    Next wl
    For wc = 1 To nosloop
        For pc = 1 To nopipe
            If Abs(1 * pres(wc, pc)) > 0 Then
                mat((1 * noloop) + (1 * nonodef3) + (1 * noboost) + (1 * nosloop) + Abs(1 *
pres(wc, pc)), (1 * nopipe) + (1 * noboost) + Abs(1 * pres(wc, pc))) = 1
                mat((1 * noloop) + (1 * nonodef3) + (1 * noboost) + (1 * nosloop) + Abs(1 *
pres(wc, pc)), pc) = -1
                r((1 * nonodef3) + (1 * noloop) + (1 * noboost) + (1 * nosloop) + Abs(1 *
pres(wc, pc))) = (1 * bpres(Abs(1 * pres(wc, pc))) / (2 * apres(Abs(1 * pres(wc, pc)))))
            End If
        Next pc
    Next wc
End Sub

'//////////////////////////////////////////////////////////////////////////
'calculate static and dynamic head in each node
Public Sub nodehead()
    Dim istp, ist(100) As Double
    Dim o, jj, ii, aa, bb, cc, dd, ee, ff, kk, je, ipipe As Integer
    For ii = 1 To nopipe
        For jj = 1 To nopipe
            ib(ii, jj) = 0
        Next jj
    Next ii
    For aa = 1 To nonode
        For bb = 1 To nopipe
            If qnode(aa, bb) = 0 Then GoTo 420
            For cc = 1 To nonode
                For dd = 1 To nopipe
                    If (1 * qnode(aa, bb)) = (-1 * qnode(cc, dd)) Then
                        ib(aa, cc) = 1 * qnode(aa, bb)
                        ib(cc, aa) = -1 * qnode(aa, bb)
                    End If
                Next dd
```

```
            Next cc
        Next bb
420: Next aa
    'traversing the network
    For ee = 1 To 400
        jv(ee) = 0
        pj(ee) = 0
    Next ee
    jv(js) = 1
    istp = 0
490: For ff = 1 To nonode
    If ib(js, ff) = 0 Or jv(ff) = 1 Then GoTo 600
    istp = istp + 1
    ist(istp) = ff
    je = ff
    jv(je) = 1
    ipipe = Abs(ib(js, je))
    hydp(je) = hight(js) - hight(je) + hydp(js) - Sgn(ib(js, je)) * kp(ipipe) + Sgn(ib(js, je))
* headpres(ipipe) + Sgn(ib(js, je)) * headboost(ipipe)
600: Next ff
    If istp = 0 Then GoTo 670
    js = ist(istp)
    istp = istp - 1
    GoTo 490
    js = je
    GoTo 490
670: For kk = 1 To nonode
    statp(kk) = hight(sj) - hight(kk) + statp(sj)
     Next kk
End Sub
'////////////////////////////////////////////////

'water hamer simulation in pipes (for Reservoir in upper stream)
Public Sub whr()
    Dim pipez(500) As Double
    Dim vnew(500), hnew(500) As Double
    Dim time, dell, delel, c, wtt, nexp, ak, delhf, f, factor, ctrl As Double
    Dim np, n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, par As Integer
    If sies = 0 Then
        dpipe(ip) = dpipe(ip) / 12
        factor = 194.81
        c = 32.2 / ws
    Else
        dpipe(ip) = dpipe(ip) / 1000
        factor = 59.3263
        c = 9.806 / ws
    End If
    vzero = (4 * Abs(qpipe(ip))) / (pi * dpipe(ip) ^ 2)
    np = nparts + 1
```

```
wtt = lpipe(ip) / ws
dell = lpipe(ip) / nparts
time = 0
nexp = 1
If dahi = 1 Then nexp = 0.852
delt = dell / ws
index = Fix(tmax / delt) + 1
delel = (elevdn - elevup) / nparts
nodes = nparts + 1
If dahi = 1 Then f = chwpipe(ip) Else If dahi = 0 Then f = fpipe(ip)
If dahi = 0 Then
   ak = f * delt / (2 * dpipe(ip))
End If
If dahi = 1 Then
   ak = delt * factor / (2 * dpipe(ip) * (f ^ 1.852) * (dpipe(ip) ^ 0.166))
   f = factor / ((f ^ 1.852) * (vzero ^ 0.148) * (dpipe(ip) ^ 0.166))
End If
If sies = 0 Then
   delhf = f * dell * vzero ^ 2 / (64.4 * dpipe(ip))
Else
   delhf = f * dell * vzero ^ 2 / (2 * 9.806 * dpipe(ip))
End If
For n1 = 1 To nodes
   v(n1) = vzero
   h(n1) = hzero - (n1 - 1) * delhf
   hlow(n1) = h(n1)
   hhigh(n1) = h(n1)
   x(n1) = (n1 - 1) * dell
   pipez(n1) = elevup + (n1 - 1) * delel
   head(n1) = h(n1) - pipez(n1)
Next n1
ctrl = 1
par = 0
For n2 = 1 To index
   time = 1 * time + 1 * delt
   If time > 1 * tclose Then par = 1
   'compute H and V at inteior nodes
   For n3 = 2 To nparts
      vnew(n3) = 0.5 * (v(n3 - 1) + v(n3 + 1) + c * (h(n3 - 1) - h(n3 + 1)) - ak * (v(n3 - 1) * Abs(v(n3 - 1)) ^ nexp + v(n3 + 1) * Abs(v(n3 + 1)) ^ nexp))
      hnew(n3) = 0.5 * (h(n3 - 1) + h(n3 + 1) + (v(n3 - 1) - v(n3 + 1)) / c - ak * (v(n3 - 1) * Abs(v(n3 - 1)) ^ nexp - v(n3 + 1) * Abs(v(n3 + 1)) ^ nexp) / c)
   Next n3
   'compute H and V at upstream end
   'this boundary condition is for a constant head reservoir
   hnew(1) = hzero
   vnew(1) = v(2) + c * (hnew(1) - h(2)) - ak * v(2) * Abs(v(2)) ^ nexp
   'compute H and V at downstream end
   'this boundary condition is for linearly decresing velosity
```

```
        Select Case par
        Case 0:
           vnew(nodes) = vzero * (1 - time / tclose)
           hnew(nodes) = h(nparts) + (v(nparts) - vnew(nodes) - ak * v(nparts) *
Abs(v(nparts)) ^ nexp) / c
        Case 1:
           vnew(nodes) = 0
           hnew(nodes) = h(nparts) + (v(nparts) - vnew(nodes) - ak * v(nparts) *
Abs(v(nparts)) ^ nexp) / c
        End Select
        For n4 = 1 To nodes
           If hnew(n4) < hlow(n4) Then hlow(n4) = hnew(n4)
           If hnew(n4) > hhigh(n4) Then hhigh(n4) = hnew(n4)
           head(n4) = hnew(n4) - pipez(n4)
        Next n4
        If time < tmax Then
           For n5 = 1 To nodes
              v(n5) = vnew(n5)
              h(n5) = hnew(n5)
           Next n5
        End If
        Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes, 0) = time
        For n7 = 1 To nodes
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 1) = Round(x(n7),
1)
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 2) =
Round(head(n7), 1)
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 3) = Round(h(n7),
1)
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 4) = Round(v(n7),
2)
        Next n7
200: Next n2
     For n6 = 1 To nodes
        headmx(n6) = hhigh(n6) - pipez(n6)
        headmn(n6) = hlow(n6) - pipez(n6)
    Next n6
End Sub
'///////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
'water hammer simulation in pipe (with pump at upstream)
Public Sub whp()
    Dim pipez(500) As Double
    Dim vnew(500), hnew(500), vfinal, hpump As Double
    Dim time, area, dell, delel, c, wtt, nexp, ak, delhf, f, factor, ctrl As Double
    Dim c1, c3, c4, chek As Double
    Dim np, n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, par As Integer
    If sies = 0 Then
        dpipe(ip) = dpipe(ip) / 12
        factor = 194.81
```

```
    c = 32.2 / ws
Else
    dpipe(ip) = dpipe(ip) / 1000
    factor = 59.3263
    c = 9.806 / ws
End If
vzero = (4 * qpipe(ip)) / (pi * dpipe(ip) ^ 2)
area = pi * (dpipe(ip) ^ 2) / 4
aprime = aprime * (area * 449) ^ 2
bprime = bprime * area * 449
cprime = cprime + hsump
hpump = (aprime * vzero ^ 2) + bprime * vzero + cprime
np = nparts + 1
wtt = lpipe(ip) / ws
dell = lpipe(ip) / nparts
time = 0
nexp = 1
If dahi = 1 Then nexp = 0.85
delt = dell / ws
index = Fix(tmax / delt) + 1
delel = (elevdn - elevup) / nparts
nodes = nparts + 1
If dahi = 1 Then f = chwpipe(ip) Else If dahi = 0 Then f = fpipe(ip)
If dahi = 0 Then
    ak = f * delt / (2 * dpipe(ip))
End If
If dahi = 1 Then
    ak = delt * factor / (2 * dpipe(ip) * (f ^ 1.852) * (dpipe(ip) ^ 0.166))
    f = factor / ((f ^ 1.852) * (vzero ^ 0.148) * (dpipe(ip) ^ 0.166))
End If
If sies = 0 Then
    delhf = f * dell * vzero ^ 2 / (64.4 * dpipe(ip))
Else
    delhf = f * dell * vzero ^ 2 / (2 * 9.806 * dpipe(ip))
End If
For n1 = 1 To nodes
    v(n1) = vzero
    h(n1) = hzero - (n1 - 1) * delhf
    hlow(n1) = h(n1)
    hhigh(n1) = h(n1)
    x(n1) = (n1 - 1) * dell
    pipez(n1) = elevup + (n1 - 1) * delel
    head(n1) = h(n1) - pipez(n1)
Next n1
par = 0
For n2 = 1 To index
    time = 1 * time + 1 * delt
    If time > 1 * tclose Then par = 1
    'compute H and V at inteior nodes
```

```
        For n3 = 2 To nparts
           vnew(n3) = 0.5 * (v(n3 - 1) + v(n3 + 1) + c * (h(n3 - 1) - h(n3 + 1)) - ak * (v(n3
- 1) * Abs(v(n3 - 1)) ^ nexp + v(n3 + 1) * Abs(v(n3 + 1)) ^ nexp))
           hnew(n3) = 0.5 * (h(n3 - 1) + h(n3 + 1) + (v(n3 - 1) - v(n3 + 1)) / c - ak * (v(n3 -
1) * Abs(v(n3 - 1)) ^ nexp - v(n3 + 1) * Abs(v(n3 + 1)) ^ nexp) / c)
        Next n3
        'compute H and V at upstream end
        'this boundary condition is for a constant head pump
        c1 = v(2) - c * h(2) - ak * v(2) * Abs(v(2))
        c3 = (bprime - 1 / c) / aprime
        c4 = (cprime + c1 / c) / aprime
        chek = 4 * c4 / c3 ^ 2
        If chek <= 0 Then vnew(1) = 0.5 * c3 * (-1 + Sqr(1 - chek)) Else If chek > 0 Then
vnew(1) = 0
        hnew(1) = (vnew(1) - c1) / c
        'compute H and V at downstream end
        'this boundary condition is for linearly decresing velosity
        Select Case par
        Case 0:
           vnew(nodes) = vzero * (1 - time / tclose)
           hnew(nodes) = h(nparts) + (v(nparts) - vnew(nodes) - ak * v(nparts) *
Abs(v(nparts)) ^ nexp) / c
        Case 1:
           vnew(nodes) = 0
           hnew(nodes) = h(nparts) + (v(nparts) - vnew(nodes) - ak * v(nparts) *
Abs(v(nparts)) ^ nexp) / c
        End Select
        For n4 = 1 To nodes
           If hnew(n4) < hlow(n4) Then hlow(n4) = hnew(n4)
           If hnew(n4) > hhigh(n4) Then hhigh(n4) = hnew(n4)
           head(n4) = hnew(n4) - pipez(n4)
        Next n4
        If time < tmax Then
           For n5 = 1 To nodes
              v(n5) = vnew(n5)
              h(n5) = hnew(n5)
           Next n5
        End If
        Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes, 0) = time
        For n7 = 1 To nodes
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 1) = Round(x(n7),
2)
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 2) =
Round(head(n7), 2)
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 3) = Round(h(n7),
2)
           Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 4) = Round(v(n7),
2)
        Next n7
```

```
    Next n2
     For n6 = 1 To nodes
        headmx(n6) = hhigh(n6) - pipez(n6)
        headmn(n6) = hlow(n6) - pipez(n6)
    Next n6
End Sub
'/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
'approximate water hammer in pipe with a node at upstream
Public Sub whn()
    Dim pipez(500) As Double
    Dim vnew(500), hnew(500) As Double
    Dim time, dell, delel, c, wtt, nexp, ak, delhf, f, factor, ctrl As Double
    Dim np, n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, par As Integer
    If sies = 0 Then
        dpipe(ip) = dpipe(ip) / 12
        factor = 194.81
        c = 32.2 / ws
    Else
        dpipe(ip) = dpipe(ip) / 1000
        factor = 59.3263
        c = 9.806 / ws
    End If
    vzero = (4 * qpipe(ip)) / (pi * dpipe(ip) ^ 2)
    np = nparts + 1
    wtt = lpipe(ip) / ws
    dell = lpipe(ip) / nparts
    time = 0
    hzero = 1 * hzn
    nexp = 1
    If dahi = 1 Then nexp = 0.85
    delt = dell / ws
    index = Fix(tmax / delt) + 1
    delel = (elevdn - elevup) / nparts
    nodes = nparts + 1
    If dahi = 1 Then f = chwpipe(ip) Else If dahi = 0 Then f = fpipe(ip)
    If dahi = 0 Then
        ak = f * delt / (2 * dpipe(ip))
    End If
    If dahi = 1 Then
        ak = delt * factor / (2 * dpipe(ip) * (f ^ 1.852) * (dpipe(ip) ^ 0.166))
        f = factor / ((f ^ 1.852) * (vzero ^ 0.148) * (dpipe(ip) ^ 0.166))
    End If
    If sies = 0 Then
        delhf = f * dell * vzero ^ 2 / (64.4 * dpipe(ip))
    Else
        delhf = f * dell * vzero ^ 2 / (2 * 9.806 * dpipe(ip))
    End If
    For n1 = 1 To nodes
        v(n1) = vzero
```

```
        h(n1) = hzero - (n1 - 1) * delhf
        hlow(n1) = h(n1)
        hhigh(n1) = h(n1)
        x(n1) = (n1 - 1) * dell
        pipez(n1) = elevup + (n1 - 1) * delel
        head(n1) = h(n1) - pipez(n1)
    Next n1
    par = 0
    For n2 = 1 To index
        If n2 > 1 Then
            hzero = 1 * h(2) + (1 * delhf * (v(1) / vzero) ^ 2)
        End If
        time = 1 * time + 1 * delt
        If time > 1 * tclose Then par = 1
        'compute H and V at inteior nodes
        For n3 = 2 To nparts
            vnew(n3) = 0.5 * (v(n3 - 1) + v(n3 + 1) + c * (h(n3 - 1) - h(n3 + 1)) - ak * (v(n3
- 1) * Abs(v(n3 - 1)) ^ nexp + v(n3 + 1) * Abs(v(n3 + 1)) ^ nexp))
            hnew(n3) = 0.5 * (h(n3 - 1) + h(n3 + 1) + (v(n3 - 1) - v(n3 + 1)) / c - ak * (v(n3 -
1) * Abs(v(n3 - 1)) ^ nexp - v(n3 + 1) * Abs(v(n3 + 1)) ^ nexp) / c)
        Next n3
        'compute H and V at upstream end
        'this boundary condition is for a node at upstream
        hnew(1) = hzero
        vnew(1) = v(2) + c * (hnew(1) - h(2)) - ak * v(2) * Abs(v(2)) ^ nexp
        'compute H and V at downstream end
        'this boundary condition is for linearly decresing velosity
         Select Case par
        Case 0:
            vnew(nodes) = vzero * (1 - time / tclose)
            hnew(nodes) = h(nparts) + (v(nparts) - vnew(nodes) - ak * v(nparts) *
Abs(v(nparts)) ^ nexp) / c
        Case 1:
            vnew(nodes) = 0
            hnew(nodes) = h(nparts) + (v(nparts) - vnew(nodes) - ak * v(nparts) *
Abs(v(nparts)) ^ nexp) / c
        End Select
        For n4 = 1 To nodes
            If hnew(n4) < hlow(n4) Then hlow(n4) = hnew(n4)
            If hnew(n4) > hhigh(n4) Then hhigh(n4) = hnew(n4)
            head(n4) = hnew(n4) - pipez(n4)
        Next n4
        If time < tmax Then
            For n5 = 1 To nodes
                v(n5) = vnew(n5)
                h(n5) = hnew(n5)
            Next n5
        End If
        Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes, 0) = time
```

```
        For n7 = 1 To nodes
            Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 1) = Round(x(n7),
2)
            Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 2) =
Round(head(n7), 2)
            Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 3) = Round(h(n7),
2)
            Form11.MSFlexGrid1.TextMatrix(n2 + (n2 - 1) * nodes + n7, 4) = Round(v(n7),
2)
        Next n7
    Next n2
    For n6 = 1 To nodes
        headmx(n6) = hhigh(n6) - pipez(n6)
        headmn(n6) = hlow(n6) - pipez(n6)
    Next n6
End Sub
Public Sub solver()
    Dim correct(400), correctr, mat2(402, 402), rr(400) As Double
    Dim ii, jj, ss, bb, tt, r2 As Integer
    Dim tiny, factor As Double
    Dim ss2, tt2, ll2, o, ob, op, oc, od, c1 As Integer
    Dim rswp, swp(400), tmp, cb, cn As Double
    '-------------------------------------------- initial condition
    tiny = 0.000001
    For ss2 = 1 To eqn
        For tt2 = 1 To eqn
            mat2(ss2, tt2) = mat(ss2, tt2)
        Next tt2
    Next ss2
    For ll2 = 1 To eqn
        mat2(ll2, eqn + 1) = r(ll2)
    Next ll2
    For ss = 1 To nopipe
        mat2(ss, eqn + 2) = qpipe(ss)
    Next ss
    For bb = 1 To noboost
        mat2(bb, eqn + 2) = gpump(bb)
    Next bb
    For tt = 1 To nopres
        mat2(tt, eqn + 2) = gpres(tt)
    Next tt

    ' Start solving.
    For ii = 1 To eqn - 1
        ' Zero out all entries in column r after this row.
        ' See if this row has a non-zero entry in column r.
        If Abs(mat2(ii, ii)) < tiny Then
            ' Not a non-zero value. Try to swap with a later row.
            For r2 = ii + 1 To eqn
```

```
            If Abs(mat2(r2, ii)) > tiny Then
                ' This row will work. Swap them.
                For c1 = 1 To eqn + 1
                    tmp = mat2(ii, c1)
                    mat2(ii, c1) = mat2(r2, c1)
                    mat2(r2, c1) = tmp
                Next c1
                Exit For
            End If
        Next r2
    End If

    ' If this row has a non-zero entry in column r, skip this column.
    If Abs(mat2(ii, ii)) > tiny Then
        ' Zero out this column in later rows.
        For r2 = ii + 1 To eqn
            factor = -mat2(r2, ii) / mat2(ii, ii)
            For c1 = ii To eqn + 1
                mat2(r2, c1) = mat2(r2, c1) + factor * mat2(ii, c1)
            Next c1
        Next r2
    End If
Next ii

' See if we have a solution.
If mat2(eqn, eqn) = 0 Then
    ' We have no solution.
    MsgBox "ÏÓÊ□Çå ÞÇÈá Íá äíÓÊ"
Else
    ' Back solve.
    For jj = eqn To 1 Step -1
        tmp = mat2(jj, eqn + 1)
        For r2 = jj + 1 To eqn
            tmp = tmp - mat2(jj, r2) * mat2(r2, eqn + 2)
        Next r2
        mat2(jj, eqn + 2) = tmp / mat2(jj, jj)
    Next jj
End If

For o = 1 To nopipe
    qpipe(o) = mat2(o, eqn + 2)
    If qpipe(o) = 0 Then qpipe(o) = eps
Next o
For ob = 1 To noboost
    gpump(ob) = mat2(ob + nopipe, eqn + 2)
Next ob
For op = 1 To nopres
    gpres(op) = mat2(op + nopipe + noboost, eqn + 2)
Next op
```

```
   For oc = 1 To noboost
      hboost(oc) = 1 * apump(oc) * ((gpump(oc)) ^ 2) + 1 * cpump(oc)
   Next oc
   For od = 1 To nopres
      hpres(od) = 1 * apres(od) * ((gpres(od)) ^ 2) + 1 * cpres(od)
   Next od
'swap head of pumps in new array for calculat hydraulic pressure in next step
   Dim ax, ay, lx, ly As Integer
   For ax = 1 To 0
      For ay = 1 To nopipe
         If pres(ax, ay) > 0 Then headpres(ay) = hpres(pres(ax, ay)) Else headpres(ay) =
0
      Next ay
   Next ax
   For lx = 1 To noloop
      For ly = 1 To nopipe
         If boostpump(lx, ly) > 0 Then headboost(ly) = hboost(boostpump(lx, ly)) Else
headboost(ly) = 0
      Next ly
   Next lx
End Sub
'///////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

'save informations on file
Public Sub saveinfo()
   Dim w, p, wa, pa, wb, pb, wc, pc, wd, pd, we, pe, wf, pf, wg, pg As Integer
   Open fname For Output As 1#
   If sies = 1 Then
      Write #1, "system", "si", sies
   Else
      Write #1, "system", "es", sies
   End If
   If dahi = 1 Then
      Write #1, "methode ", "Hazen williams", dahi
   Else
      Write #1, "methode ", " Darcy weisbach", dahi
   End If
   Write #1, "-------------------------------------------------------------------"
   Write #1, "number of nodes ", nonode
   Write #1, "number of continuety equations ", nonodef3
   Write #1, "number of pipes ", nopipe
   Write #1, " number of booster pumpes", noboost
   Write #1, " number of reservoirs", nores
   Write #1, " number of pumps", nopres
   Write #1, " number of loops", noloop
   Write #1, "  number of virtual loops", nosloop
   Write #1, "-------------------------------------------------------------------"
   Write #1,
   Write #1, "node informations"
```

```
Write #1,
For w = 1 To nonode
   Write #1, "node no. ", w
   Write #1, "joints"
   For p = 1 To nopipe
      Write #1, qnode(w, p)
   Next p
   Write #1, "-----------------------------------------------------------------"
Next w
Write #1,
For wa = 1 To nonode
   Write #1, "demand of node", wa, demand(wa)
   Write #1, "hight of node", wa, hight(wa)
   Write #1,
Next wa
Write #1, "-----------------------------------------------------------------"
Write #1,
Write #1, "pipes informations"
Write #1,
For pa = 1 To nopipe
   Write #1, " pipe no.", pa
   Write #1, " pipe lenght", lpipe(pa)
   Write #1, " pipe diameter", dpipe(pa)
   Write #1, "minor loss coeficient ", kl(pa)
   If dahi = 1 Then
      Write #1, "CHW", chwpipe(pa)
   Else
      Write #1, "e/D", ed(pa)
   End If
   Write #1,
Next pa
Write #1, "-----------------------------------------------------------------"
Write #1,
Write #1, "loops informations"
Write #1,
For wb = 1 To noloop
   Write #1, "loop no. ", wb
   Write #1, "number of pipes in this loop", pipesloop(wb)
   Write #1, "loops"
   For pb = 1 To nopipe
      If loops(wb, pb) = "" Then
         Write #1, "0"
      Else
         Write #1, loops(wb, pb)
      End If
   Next pb
   Write #1,
Next wb
Write #1, "-----------------------------------------------------------------"
```

```
Write #1,
Write #1, "booster pumps informations"
Write #1,
For wc = 1 To noloop
   Write #1, "loop no. ", wc
   Write #1, "number of booster pumpes in this loop"
   For pc = 1 To nopipe
      If boostpump(wc, pc) = "" Then
         Write #1, "0"
      Else
         Write #1, boostpump(wc, pc)
      End If
   Next pc
   Write #1,
Next wc
Write #1, "------------------------------------------------------------------"
Write #1,
Write #1, "coeficients of booster pumps equation"
Write #1,
For wd = 1 To noboost
   Write #1, "booster pump no.", wd
   Write #1, "A", apump(wd)
   Write #1, "B", bpump(wd)
   Write #1, "C", cpump(wd)
   Write #1,
Next wd
Write #1, "-------------------------------------------------------------------"
If IsNumeric(nosloop) = True And 1 * nosloop > 0 Then
   Write #1,
   Write #1, "virtual loops informations"
   Write #1,
   For we = 1 To nosloop
      Write #1, "virtual loop no.", we
      Write #1, "number of pipes in this virtual loop"
      For pe = 1 To nopipe
         If resloop(we, pe) = "" Then
            Write #1, "0"
         Else
            Write #1, resloop(we, pe)
         End If
      Next pe
      Write #1,
   Next we
   Write #1, "----------------------------------------------------------------"
   Write #1,
   Write #1, "pumps informations"
   Write #1,
   For wf = 1 To nosloop
      Write #1, "virtual loop no.", wf
```

```
            Write #1, "number of pumps in this virtual loop"
            For pf = 1 To nopipe
                If pres(wf, pf) = "" Then
                    Write #1, "0"
                Else
                    Write #1, pres(wf, pf)
                End If
            Next pf
            Write #1,
        Next wf
        Write #1, "-----------------------------------------------------------------"
        Write #1,
        For pd = 1 To nosloop
            Write #1, "number of nosloop", pd
            Write #1, "hight difference between first and last node of virtual loop",
deltah(pd)
            Write #1,
        Next pd
        Write #1, "-----------------------------------------------------------------"
        Write #1,
        Write #1, "coeficients of pumps equation"
        For wg = 1 To nopres
            Write #1, "pump no.", wg
            Write #1, "A", apres(wg)
            Write #1, "B", bpres(wg)
            Write #1, "C", cpres(wg)
            Write #1,
        Next wg
    End If
    Close #1
End Sub
'////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

'Read information from file
Public Sub opninfo()
    Dim w, p, wa, pa, wb, pb, wc, pc, wd, pd, we, pe, wf, pf, wg, pg, cycle, cycle2 As
Integer
    Dim strg As String
    Open fname For Input As 1#
    Input #1, strg, strg, sies
    Input #1, strg, strg, dahi
    Input #1, strg
    Input #1, strg, nonode
    Input #1, strg, nonodef3
    Input #1, strg, nopipe
    Input #1, strg, noboost
    Input #1, strg, nores
    Input #1, strg, nopres
    Input #1, strg, noloop
```

```
Input #1, strg, nosloop
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
For w = 1 To nonode
    Input #1, strg, strg
    Input #1, strg
    For p = 1 To nopipe
        Input #1, qnode(w, p)
    Next p
    Input #1, strg
Next w
Input #1, strg
For wa = 1 To nonode
    Input #1, strg, strg, demand(wa)
    Input #1, strg, strg, hight(wa)
    Input #1, strg
Next wa
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
For pa = 1 To nopipe
    Input #1, strg, strg
    Input #1, strg, lpipe(pa)
    Input #1, strg, dpipe(pa)
    Input #1, strg, kl(pa)
    If dahi = 1 Then
        Input #1, strg, chwpipe(pa)
    Else
        Input #1, strg, ed(pa)
    End If
    Input #1, strg
Next pa
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
For wb = 1 To noloop
    Input #1, strg, strg
    Input #1, strg, pipesloop(wb)
    Input #1, strg
    For pb = 1 To nopipe
       Input #1, loops(wb, pb)
    Next pb
    Input #1, strg
Next wb
Input #1, strg
```

```
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
For wc = 1 To noloop
   Input #1, strg, strg
   Input #1, strg
   For pc = 1 To nopipe
      Input #1, boostpump(wc, pc)
   Next pc
   Input #1, strg
Next wc
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
Input #1, strg
For wd = 1 To noboost
   Input #1, strg, strg
   Input #1, strg, apump(wd)
   Input #1, strg, bpump(wd)
   Input #1, strg, cpump(wd)
   Input #1, strg
Next wd
Input #1, strg
If IsNumeric(nosloop) = True And 1 * nosloop > 0 Then
   Input #1, strg
   Input #1, strg
   Input #1, strg
   For we = 1 To nosloop
      Input #1, strg, strg
      Input #1, strg
      For pe = 1 To nopipe
         Input #1, resloop(we, pe)
      Next pe
      Input #1, strg
   Next we
   Input #1, strg
   Input #1, strg
   Input #1, strg
   Input #1, strg
   For wf = 1 To nosloop
      Input #1, strg, strg
      Input #1, strg
      For pf = 1 To nopipe
         Input #1, pres(wf, pf)
      Next pf
      Input #1, strg
   Next wf
   Input #1, strg
   Input #1, strg
```

```
        For pd = 1 To nosloop
            Input #1, strg, strg
            Input #1, strg, deltah(pd)
            Input #1, strg
        Next pd
        Input #1, strg
        Input #1, strg
        Input #1, strg
        For wg = 1 To nopres
            Input #1, strg, strg
            Input #1, strg, apres(wg)
            Input #1, strg, bpres(wg)
            Input #1, strg, cpres(wg)
            Input #1, strg
        Next wg
    End If
    Close #1
    For cycle = 1 To 400
        For cycle2 = 1 To 400
            mat(cycle, cycle2) = 0
        Next cycle2
        qpipe(cycle) = 1
        gpump(cycle) = 1
        gpres(cycle) = 1
    Next cycle
    js = 1
    sj = 1
    statp(1) = 0
    hydp(1) = 0
    eqn = (nopipe * 1) + (1 * noboost) + (1 * nopres)
    If nosloop = 0 Then Form6.Show Else Form10.Show
    If nores = 0 Then nonodef3 = nonode - 1 Else If nores > 0 Then nonodef3 = nonode
    deltaq = 0.1
End Sub
```

نتیجه گیری

نتیجه ای که از مطالعه در مورد روش تئوری خطی بدست می آید آن است که با توجه به عدم نیاز به حدس اولیه و تقارب سریع در مقایسه با روش های هاردی کراس و نیـوتن برتـری دارد. امـا در مـورد سیستم دبی اصلاحی و سیستم H توصیه می شود که از این روش استفاده نشود. بنابراین به سیســتم دبی محدود می شود که در آن باید تمام دبی های خارجی معلوم باشند.

در صورتیکه تمام دبی های خارجی معلوم نباشند، یعنی مثلا یکی یا چند تـا از گـره هـا بـه مخـزن تامین آب متصل باشند، آنگاه باید از حلقه های مجازی بین دو مخزن اسـتفاده شـود و بنـابراین بایـد حتما بیش از یک مخزن داشته باشیم و در غیر اینصورت می بایست از روش دیگری استفاده کنیم.

در مورد روش مشخصه ها نیز شرط مرزی برای وجود گره در بالادست لوله با توجـه بـه فـرض ثابـت بودن f در طول زمان بدست آمد.

منابع:

[1]. Bruce E.Larock, Roland W.Jepson, Gray Z.Watters, 2000, Hydraulic of pipeline systems, CRC Press

[2].Victor L. Streeter E.Benjamin, Fluid Mechanics 5Th Edition

[3].John Parmakian. 1963. WaterHammer Analysis. Dover publication.

[4].Frank m. White. Fluid Mechanics. McGraw Hill company.

[5].George R. Rich. 1963. Hydraulic Transients. Dover publications inc.

۱- رولاند جپسون،۱۳۸۵، تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع آب با استفاده از ریز کامپیوترها، ترجمه دکتر امین علیزاده، دکتر محمود نقیب زاده، مهندس جلال جوشش، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).

۲- هتیهوا سانجایا، ۱۳۷۹، کتاب آموزش ویژوال بیسیک ۶، ترجمه علیرضا منتظرالقائم، انتشارات آذین رایانه.

۳- مایکل هالورسون، ۱۳۸۵، آموزش گام به گام ویژوال بیسیک ۲۰۰۵، ترجمه حسن محمدی، حسین محمدی، انتشارات نورپردازان تهران.

Abstract

Our purpose in this project, is writing a computer program for analysis of flow in pipe networks in steady and transient states.

For this purpose we use the linear theory method for analysis of steady state flow in pipes of network, because in this method we don’t need the first guess for solving then problem. And on the other hand, the result obtains sooner in this method.

Finally in Transient flow, we analysis WaterHammer in pipes of network approximately by characteristics method and calculate pressure and velocity in pipes.

Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanics Eng.

Title: Hydrualic Analysis of Pipe Networks In Transient And steady state conditions With Computer Programing.

Alireza Molavi

Supervisor:

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

Date: February 2010