YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

85077

BİLGİSAYAR DESTEKLİ SU DARBESİ ANALİZİ VE ANTALYA DENİZ DEŞARJLARI ÖRNEĞİ

İnş.Müh. Yıldır RAİFOĞLU

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

F.B.E.İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Prof. Dr. Yalçın Yüksel

Prof. Dr. Sedat Kabdaşlı

Yrd. Doç. Dr. Esin Çevik

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

85077

İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER Sayfa

ÖNSÖZ v
ÖZET vi
ABSTRACT vii

1. SU DARBESİ 1

1.1 Temel Kavramlar 1
1.2 Rijit Su Sütunu Teorisi 8
1.2.1 Ani Kapanma Hali İçin Tünelde Sürtünme Ve Orifis Kayıplarının İhmal Edilmesi Durumunda Çözüm 11
1.2.2 Ani Kapanma Hali İçin Tünel Ve Denge Bacasındaki Kayıplar Hesaba Katıldığında Çözüm 14
1.2.3 Denge Bacası Denklemlerinin Sonlu Farklar Metodu İle Çözümü 16
1.3 Elastik Su Sütunu Teorisi 19
1.3.1 Su Darbesinin Temel Denklemleri 21
1.3.2 Su Darbesi Denklemlerinin Çözümleri 30
1.3.2.1 Allievi Denklemleri 31
1.3.2.2 Alternatif Formülasyon; Cebirsel Denklem Metodu 38
1.3.2.3 Schnyder-Bergeron Grafik Metodu 40
1.3.2.3.1 Boru Hatlarında Sürtünme Ve Diğer Kayıplar 43
1.3.2.3.2 İç Noktalarda Basınç Dalgaları 45
1.3.2.3.3 Pompa Durması Nedeniyle Basınç Dalgaları 46
1.3.2.4 Su Darbesi Denklemlerinin Nümerik Çözümü (Karakteristikler Metodu) ... 49
1.3.2.5 Kararsız Akımlarda Eşdeğer Boru Kavramı 83
1.3.2.5.1 Seri Halinde Bağlı Borularda Kararsız Akım 83
1.3.2.5.2 Paralel Bağlı Borularda Kararsız Akım 87
1.3.2.5.3 Önemli Değerdeki Yersel Kayıpların Dikkate Alınması 90
1.3.2.6 Su Darbesi Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması 91

1.4 Konu İle İlgili Uygulamalar 93

2. SU DARBESİ KONTROL SİSTEMLERİ 125

2.1 Giriş 125
2.1 Denge Bacaları 126
2.2.1 Denge Bacasının Boyutlarının Analizi 129
2.2.1.1 Orifisli Denge Bacası 130
2.2.1.2 Üstü Açık Basit Denge Bacası Hali 137
2.2.1.3 Tek Yönlü Denge Bacası Hali 140
2.2.2 Denge Bacalarının Boyutlandırılması 142
2.3 Hava Kazanları 145
2.3.1 Hava Kazanı Boyutunun Analizi 152
2.3.1.1 Hava Kazanının Pompanın Hemen Çıkışına Konması Hali 152
2.3.1.2 Hava Kazanının Pompadan Uzakta Olması Hali 162
2.3.2 Hava Kazanının Boyutlandırılması 166
2.3.3 Hava Kazanı Ekleri 168
2.4 Bilgisayarla Çözümde Girdi Değerleri 169

3. GÜNEY ANTALYA ATIKSU DEŞARJ HATLARININ SU DARBESİ ANALİZİ 171

3.1 Hatların Tanımı 171
3.2 Kızıltepe Çıkış Suyu Deşarj Hattı 174
3.3 Kemer Çıkış Suyu Deşarj Hattı 182
3.4 Kemer Terfi Deşarj Hattı 192

4. SONUÇLAR 215

KAYNAKLAR 217

EKLER 218

EK.1 Santrifüj Pompalar 219
EK.2 Su Darbesi Uygulama 1.1'e ait Program 239
EK.3 Su Darbesi Uygulama 1.2'e ait Program 243
EK.4 Su Darbesi Uygulama 1.3'e ait Program 247
EK.5 Pompanın Ani Olarak Durması Halinde Su Darbesi Programı 251
EK.6 Hava Kazanı Programı 259
EK.7 Rijit Sıvı Sütunu Teorisine Göre Hava Kazanı Boyutlandırılması 269
EK.8 Parmakyan Abakları Yardımıyla Hava Kazanı Hesabı 293
EK.9 Su Darbesi Uygulama 1.3'e ait Program Çıktıları 314

ÖZGEÇMİŞ

ÖNSÖZ

Bilgisayar Destekli Su Darbesi Analizi ve Antalya Deniz Deşarjları Örneği konulu bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı' nda 1996-1999 yılları arasında Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL danışmanlığında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Öncelikle beni tez öğrencisi olarak kabul eden, çalışmanın her safhasında görüşleri ile beni yönlendiren, eleştirilerinden yararlandığım, Tez Danışmanım Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL' e teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü öğrenimim süresince bana dostça yaklaşımlar sergileyen İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Programı tüm Öğretim Elemanlarına;

Öğrenim hayatım boyunca, bana büyük fedakarlık ve anlayış gösteren aileme teşekkür ederim.

23.05.1999
İstanbul

ÖZET

Basınçlı boru sistemlerinde su darbesi analizi adı ile anılan aşırı yüksek ve düşük basıçların etüdü, sistemin projelendirilmesinde oldukça önemlidir.

Boru hatlarında sıkışabilirlik etkilerinin önemsiz olduğu kararsız akıma rijit su sütunu salınımı (surge) denir. Boru hatlarında debideki değişim vana veya pompa operasyonuna bağlı olup; kapanma yada açılma sonucunda bu yapılardan doğru boru hattı boyunca yayılacak basınç değişimi oluşur. Değişimlerin tedrici olarak kalması sağlanırsa; basıncın zamanla değişimi ve debi, akışkanın sıkıştırılamaz olduğunu varsayarak ve boru hattının elastik özelliklerini ihmal ederek problemlerin çözülmesi rijit su sütunu teorisi kullanılarak yapılabilir.

Ani vana kapanması ya da pompanın durması durumunda, sonuç olarak sıvı kolonunda yavaşlama ve bunun sonucunda oluşan dalganın ön yüzeyi boyunca büyük basınç farklılıklarının meydana geldiği basınç salınımlarının oluştuğu görülür. Basınç dalgasının hızı sıvının sıkışabilmesine ve boru hattının elastikliğine bağlıdır ve bu nedenden dolayı bu parametreler çözüme dahil edilmelidir.

Su darbesi analizinde, geçmişte, yaklaşık sonuçlar veren çeşitli analitik ve grafik metotlar kullanılmıştır. En çok kullanılan nümerik metod ise büyük olasılıkla kısmi diferansiyel denklemleri bir çift adi diferansiyel denkleme dönüştüren "karakteristikler metodudur". Bunlar nümerik formda ifade edildiğinde (sonlu fark) bilgisayarlarla programlanabilir hale gelir.Bugün süratle hesap yapan bilgisayarlardan yararlanılarak kararsız akımın diferansiyel denklemleri, sonlu farklar metodu ile, analitik olarak çözülebilmekte ve daha kesin sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, su darbesi probleminin bigisayar yardımı ile, değişik sınır şartları altında analitik çözümünü ele alan matematik model ele alınmıştır.

Anahtar Sözcükler: Su darbesi, sınır şartları, karakteristikler, denge bacası, hava kazanı

ABSTRACT

The study of extremely high and low pressures, so called analysis of waterhammer, in pressure pipeline systems, is highly important in the design of system.

When compressibility effects are not significant the unsteady flow in pipelines is called "surge". Changes in the discharge in pipelines, caused by valve or pump operation, either closure or opening, result in pressure surges which are propagated along the pipeline from the source. If the changes in control are gradual the time variation of pressures and discharge may be achieved by assuming the liquid to be imcompressible and neglecting the elastic properties of the pipeline such as in the problems on surge analysis.

In the case of rapid valve closure or pump stoppage the resulting decelaration of the liquid column causes pressure surges having large pressure differences across the wave front. The speed (celerity) of the pressure wave is dependent on the compressibility of the liquid and the elasticity of the pipeline and these parameters are therefore incorporated in the analysis.

In the past, various analytical and graphical methods giving approaximate results in the analysis of water hammer have been used.The most commonly used numerical method is probably the method of "characteristics" which reduces the partial differantial equations to a pair of simultaneous ordinary differantial equations. These, when expressed in numerical (finite difference) from can be programmed for automatic evaluation on a digital computer.

The differential equations of unsteady flow can be solved analytically with the aid of finite difference methods, by using of computers which are making fast calculation today, and so more accurate results can be obtained. In this paper it has been considered a mathematical model which gives the analytical solutaion of water hammer problem, under various boundary conditions, with the aid of computer.

Key Words: Waterhammer, boundary conditions, characteristics, surge tank, air chamber

1. SU DARBESİ

1.1 Temel Kavramlar

Mühendislik uygulamalarında; sıvıların bir yerden başka bir yere naklinde boru ve açık kanal gibi akış yolları kullanılır.

Kanallar; enkesiti tamamen dodurmayan ve sıvı üst yüzeyine genel olarak atmosferik basınca eşit bir basıncın etki ettiği bir serbest yüzeye sahip sıvı akımının olduğu akış yollarıdır.

Borular ise bir basınç altında; en kesitinin sıvı ile tamamen dolu olduğu akış yollarıdır.

Boru hatları, yağ, petrol naklinde, konut ve endüstri bölgelerine su getirme ve dağıtımında, pompajlı basma boruları, Hidroelektrik santrallerdeki suyun taşınımını sağlayan cebri borular olmak üzere kullanılırlar.

Bu akış yolları içinde; sabit konumda akıma ve akışkana ait karakteristiklerin zamana bağlı olarak gösterecekleri değişime göre akım aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır.

1- Kararlı Akım: Akıma ve akışkana ait karakteristiklerinin zamanla değişmediği akım tipidir.

2- Kararsız Akım: Akıma ve akışkana ait karakteristiklerinin zamanla değiştiği akım tipidir.

3- Geçiş (transient) Akımı: Ani debi değişmesi sonucu akışın bir kararlı akım halinden, diğer bir kararlı akım haline geçerken, bu sırada çok kısa bir zaman aralığında oluşan kararsız akım rejimidir. Örneğin; hidrolik santrallerde cebri borularda, vanaların ani

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

açılıp, kapanması ve pompalı sistemlerde enerji kesilmesi nedeniyle pompanın durması sırasında geçiş akımı oluşur.

Geçiş akımında karşılaşılan tipik kavramlar ise kısaca şöyle özetlenebilir;

Su Darbesi :

Boru hatlarındaki vanaların aniden kapanması veya açılması, pompaların aniden durması veya çalışmaya başlaması, borulardan geçen sıvı debisinin geçici olarak değişmesine sebep olur. Debinin değişmesi sonucu; borudaki akımın, dolayısıyla, basıncın kararlılığı bozularak kararsız hale geçer.

Zamanla çabuk değişen bu kararsız durum; boru boyunca yükselen ve alçalan basınç salınımları şeklinde basınç dalgalarının yayılmasından ibarettir. Bu basınç değişimi; sıvı hızının değiştiği yerde doğar ve ses hızında yayılır.

Boru hatlarında, kararlı akıma ait hidrolik yüke ilaveten oluşan bu dinamik yüke "su darbesi" denir. Boru hatlarında her an geçiş akımının oluşabileceği varsayılarak yapılan analizede "normal su darbesi analizi" denir.

Sıvı Sütunu Ayrılması:

Su darbesi, basınç salınımlarının alçak basınç dalga hareketi halinde sıvı boyunca yayılırken eğer basınç değeri sıvının buharlaşma basıncı değerine düşerse önemli bir duruma sebep olur. Buhar basıncının hasıl olduğu kesitte sıvının buharlaşması sonucu, buhar boşluklu bir kısım oluşur. Boru boyunca, tamamen dolu olarak seyreden akışın devamlılığı, buhar boşluğunun olmasıyla bozulur ve boruda sıvı ayrılması oluşur. Buhar boşluklu kısımın dışında dolu akışın devam etmesi nedeniyle oluşan olaya "sıvı sütunu ayrılması" denir.

Kavitasyon:

Doygun su buharı basıncına "buharlaşma basıncı (Pv)" denir. Sıcaklığın sabit tutulup, basıncın düşürülmesiyle meydana gelen buharlaşmaya "kavitasyon" denir.

Kavitasyon olayını;

1- Başlangıç halindeki kavitasyon,

2- Gelişmiş kavitasyon hali

olmak üzere iki safhada ele almak mümkündür.

Başlangıç halindeki kavitasyon kısaca; henüz keşfedilebilir bir safhada olan kavitasyonu ifade eder. Bu safhada boşluklar çok küçüktür ve kavitasyonun oluştuğu bölge sınırlıdır. Şartların (basınç, hız ve sıcaklık) buharlaşma hızını artıracak yönde değişmesiyle büyür ve bu sırada izlenen safhalar; "gelişmiş kavitasyon" ifadesi ile başlangıç halindeki kavitasyon safhasından ayırt edilir.

Kavitasyonun başlangıç ve gelişme safhalarında meydana gelen hadiseler;

1- Sıvı içersindeki gaz ve katı partiküllerin mevcudiyetine,

2- Sıvı durumuna,

3- Kavitasyon bölgesindeki basınç alanına bağlıdır.

Kavitasyonun teşekkülü şu şekilde gruplanabilir:

1- Hareketli Kavitasyon: Bir sıvı akımı içinde teşekkül eden ve geliştikçe sıvı ile hareket eden geçici (transient), tekil kabarcıklardan ibaret olan kavitasyon tipidir (alçak basıç noktalarında görülürler).

2- Sabit Kavitasyon: Hareket halindeki bir sıvı içine batık katı bir cismin yüzeyinden sıvı akımının ayrılması şeklinde gelişen durum veya sıvı ipçiklerinin bir müddet cidardan ayrılıp, tekrar cidara yapışması suretiyle oluşan, yüzeye bağlı sabit bir boşluk durumunu ifade eden kavitasyondur.

3- Vorteks Kavitasyon: Sabit bir boşluk veya hareket eden boşluklar halinde beliren kavitasyondur. Vorteks kavitasyonunda boşluk; yüksek kayma gerilmesinin mevcut olduğu bölgelerde teşekkül eden vorteks çekirdekleri içinde yer alır.

4- Salınımlı Kavitasyon: Boşlukların oluşmasına ve çökmesine sebep olan kuvvetlerin; sıvı içinde yüksek genlikli ve yüksek frekanslı bir seri sıkışma ve genleşme dalgaları halinde yayılan basınç salınımlarının oluşturduğu kavitasyondur.

Sıvıda Çözünmüş Gazın ve Yüzey Geriliminin Rolü:

Sıvı içinde çözünmüş gaz, sıvının buhar basıncı değerinin artışı şeklinde bir etkiye sahip olabilir. Suda çözünebilen hava ve gaz miktarı, basıncın ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Su üzerindeki basınç azaldıkça, bu miktar düşer. Basıncın doygunluk basıncının altına düşmesiyle çözülmüş havanın bir kısmıda açığa çıkarak serbest hale geçecektir.

Belirli sıcaklıkta, basıncın düşmesiyle suyun ihtiva edebileceği hava ve gaz miktarı azalacağı için, suda evvelce mevcut olan gaz ve hava miktarının, basıncın yeni değerine tekabül eden miktarından fazlası kabarcıklar teşkil ederek serbest hale geçer.
Buna "hava kavitasyonu" denir. Boşluğa intikal edebilen hava miktarı, boşluğu doldurmak için buharlaşmakta olan boşluk etrafındaki su örtüsünün ihtiva ettiği

çözülmüş gaz miktarından çok daha azdır. Yüzey geriliminin kavitasyon üzerindeki etkisi, gaz nüvelerinden itibaren kabarcık teşekkülünün başlangıcı ve eseri miktarda gaz ihtiva eden gaz boşluklarının en son çökmesi sırasında vuku bulur. Yüzey geriliminde bir artma, boşlukların maksimum büyüklüğünü azaltmaya çalışır ve bu nedenle boşlukların normal akıma müdahalesini azaltır. Boşluğun teşekkülü esnasında yüzey gerilim kuvvetleri, boşluğun maksimum büyüklüğünü azaltmaya çalışır. Bu bakımdan, yüzey gerilim kuvvetinin etkisi tutucu olup, boşlukta depolanmış olan aynı miktarda enerjiyi, boşluğun çökmesi sırasında sıvıya iade eder.

Basınçlı Borularda Sıvı Sütunu Ayrılmasının Fiziksel Anlamı:

Etkili faktörler;

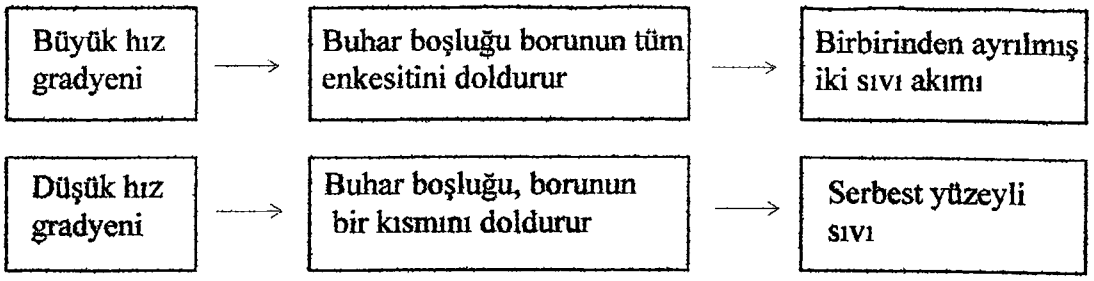
1- Basınç gradyeninin büyüklüğü,

2- Hız gradyeninin büyüklüğü,

a) Zaman, sıvı sütunu ayrılmasının başlamasından itibaren ölçülürse, bundan sonra herhangi bir andaki buhar boşluğu hacmi, boşluğun hemen önünde borudan boşalarak yığılmış sıvı hacmine eşdeğerdir.

b) Boşluğun kapanması anında, bu aynı sıvı hacmine tekabül eden kütlenin momentumunun değişimi sonucu, bir ek basınç artışına sebep olur ve basınç yükselmesinin borunun her iki doğrultusunda yayılacağı düşünülebilir.

Basınçlı borulardaki geçici su darbeleri etkileri, mekanik dalga hareketlerinden ibarettir. Sıvı-boru sürtünmeleri ve esnemelerine harcanan enerji dolayısıyla olay geçicidir ve belirli bir süre sonra dalgalar söner; yeni bir kararlı durum hasıl olur veya sıvı tamamen durur.



Sıkıştıran karakterde olan bir dalga geçtiği yerlerdeki akışkanı sıkıştırarak basıncını ve yoğunluğunu artırır. Bu dalgaya "sıkıştıran dalga (pozitiv basınç dalgası)" denir. Genişleten karakterde bir dalga ise, arkasında bıraktığı akışkanı genişleterek basıncını ve yoğunluğunu azalttığından bu dalgaya "genleştiren dalga (negativ basınç dalgası)" denir.

Bir vananın kapatılması ile bu vananın menba tarafında, ilk etapta menbaya doğru yayılan ve boruda basınç artışına sebep olan, sıkıştıran bir dalga oluşur. Mansap tarafında ise, ilk önce mansaba doğru yayılan ve basıncı azaltan, genleştiren bir dalga oluşur. Sıkıştıran (pozitiv) basınç dalgası menba ucuna vardığında, genleştiren (negativ) bir dalga halinde yansır ve bu genleştiren dalga vanaya vardığında bu noktada, yine menbaya doğru ilerleyen tekrar yeni bir genleştiren dalga oluşur. Mansap tarafında ise, bu durumun tersi oluşur. Bir pompanın ani olarak durdurulmasında ilk etapta, pompadan itibaren mansaba doğru yayılan, genleştiren bir dalga meydana gelecektir. Vananın açılması sırasında da aynı durum olur. Kapalı bir vananın aniden açılması halinde ise ilk etapta, vanadan menbaya doğru yayılan bir genleştiren dalga oluşur.

Basınç değerlerinin, buhar basıncı değerine kadar düşmeden salındığı andaki kararsız akış durumuna genel olarak; "su darbesi", bu olayın meydana geldiği boru kısmına da "su darbesi bölgesi" denir. Basınç değerlerinin, buhar basıncı değerine veya daha aşağıya düştüğü andaki boru kısmına "sıvı sütunu ayrılması bölgesi" veya "kavitasyon bölgesi" denir.

Boru İçinde Sıvı Sütunu Ayrılması:

Çözülmüş havanın açığa çıkması (gaz difüzyonu) dolayısıyla gelişme halinde olan hava kabarcıklarının, buhar basıncına erişildiği anda patlar bir şekilde büyümesi ile sağlanır. Sıvı içinde gazın kabarcıklara doğru difüzyonunun çok yavaş hızda bir olay olduğu bilinir.

Basınçlı borularda, basınç değişimlerinin süresi, dolayısıyla da boşluğun ömrü çok kısadır. Bundan dolayı; basıncın, doygunluk basıncının altına düşmesi ile sıvıdan açığa çıkacak gaz miktarını; yani çözünmüş gazın, sıvı sütunu ayrılmasına etkisi, ikinci derecede bir rol oynar.

Genleştirme dalgası sıvı boyunca yayılırken gaz difüzyonu dolayısıyla boru boyunun büyük bir kısmı boyunca sayısız boşluklar veya kabarcıklar oluşur (gaz kavitasyonu). Sıvı ortamı içinde %1 civarında hava muhteviyatının mevcudiyeti dahi dalga hızında önemli derecede azalmaya sebep olacağı çeşitli deneylerle de kanıtlanmıştır.

Kararsız akış şartları sırasında basınçlı bir boruda oluşan hidrolik olaylar zinciri içerisinde üç bölge ayırt edilebilir:

1- Buhar boşluklu sıvı sütun ayrılması bölgesi,

2- Sıvı sütunu ayrılması bölgesi dışında ve basıncın doygunluk basıncından yeteri kadar düşük basınçlarda, sıvı-gaz karışımlı iki fazlı akım şartlarının hüküm sürdüğü bölge,

3- Sıvıdaki serbest gaz muhteviyatının mevcut olmadığı veya ihmal edilebilir olduğu tek fazlı sıvı akım bölgesi,

Tek fazlı sıvı akım bölgesi içindeki kararsız akım şartlarının belirtilmesinde, klasik su darbesi denklemleri yeterli olduğundan üçüncü bölgeye aynı zamanda; "normal su darbesi bölgesi" de denir. Birinci ve ikinci bölgelerin her ikisi birden "su darbesi bölgesi" olarak isimlendirilebilir.

1.2 Rijit Su Sütunu Teorisi

Boru hatlarında sıkışabilirlik etkilerinin önemsiz olduğu kararsız akıma rijit su sütunu salınımı (surge) denir. Rijit su kütlesinin salınımlı hareketine tipik bir örnek olarak şekil 1.1 de görülen basınçlı hidro-elektrik tesis verilebilir.

Rijit su sütunu teorisinde yapılan varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

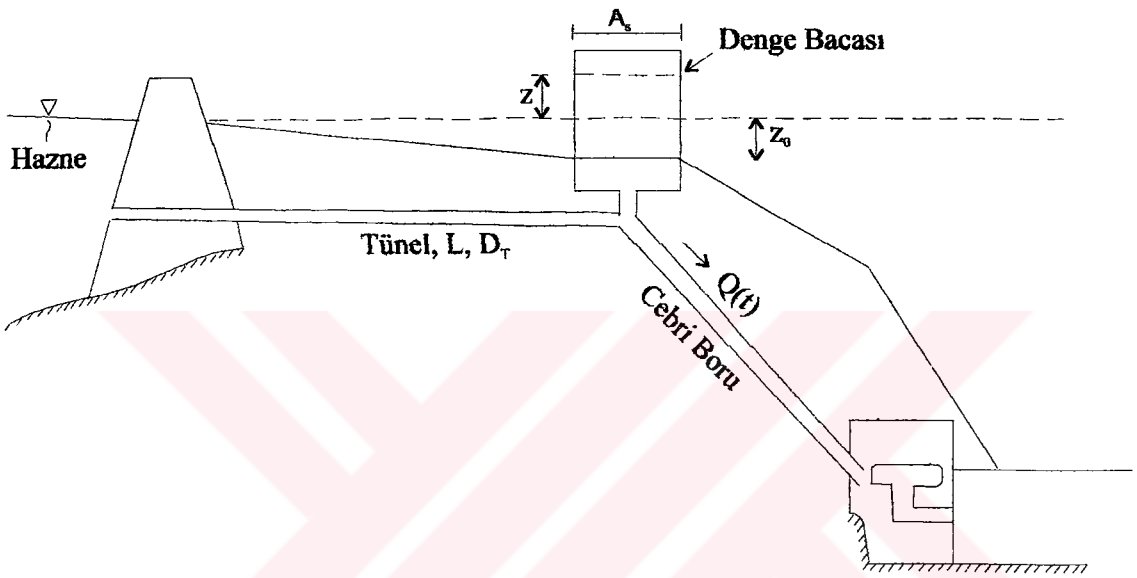
1- Borudaki su sıkıştırılamaz.
2- Borunun cidarı boru içindeki basınçtan etkilenemez.
3- Boru hattı sürekli tam olarak su ile doludur ve borunun içindeki minimum basınç suyun buharlaşma basıncından fazladır.
4- Hız yükü ve yersel kayıplar basınç değişimleri ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir.
5- Boru hattı boyunca borunun herhangi bir kesitinde hız üniformdur.
6- Borunun enine kesitinde de basınç üniformdur ve boru eksenindeki basınca eşittir.
7- Rezervuardaki su seviyesi vananın açılıp kapanmasından etkilenemez.
   Eğer vananın kapanması (açılması) söz konusu ise basınçtaki artma (azalma) L kadar mesafede A kesitli boruda Newton' un II. Kanunundan;

$$\gamma A \Delta h = \gamma \frac{AL}{g} \frac{dV}{dt}$$

ve

$$\Delta h = \frac{L}{g}\frac{dV}{dt}$$

dir.Bu basınç değişimi statik basınç miktarına eklenmelidir. Rijit su sütunu teorisi boru cidarlarının rijit, suyun sıkışamaz olduğunun kabul etmesinin yanında vana açılıp kapanma operasyonlarında oldukça yavaş olduğunu kabul etmektedir.

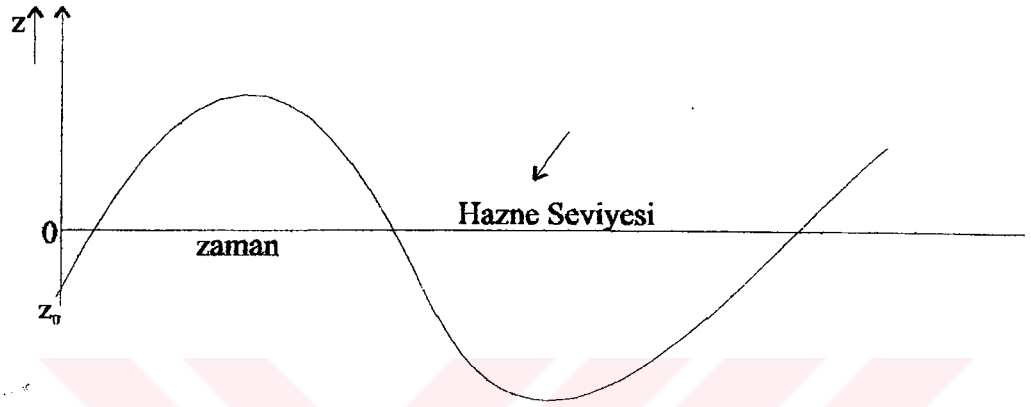


Şekil 1.1 - Hidroelektrik santral

Şekil 1.1' de görülen kararlı güç şartlarında çalışılması durumunda, türbinlerin kapanması istenirse bunun için türbin girişindeki vanalar yavaş yavaş kapatılacaktır.Bu esnada sistemde sıkışabilirlik etkilerine neden olabilecek basınç değişimleri meydana gelecektir. Bu olay türbine girişteki vanalarla denge bacası arasındaki boru hatlarında (cebri boru) oluşacaktır. Basınçtaki değişimler denge bacasının menbasında yayılmazlar ve bundan dolayı da tünel yüksek basınç etkilerinden korunulacağından inşaa masrafları azalır.

Denge bacasının mevcudiyeti nedeniyle, tüneldeki suyun momentumundan dolayı denge bacasına doğru su akmaya devam eder ve bacadaki yük ile yaratılacak basınçla

denge bacasının girişinde basınç dengelenecek ve akış duracaktır. Bu esnada bacadaki seviye haznedekinden yüksek olacaktır ve akış geriye dönecektir, iki sistem arasında uzun peryodlu salınım meydana gelecektir. Şekil 1.2 denge bacasında kabarma seviyesindeki zamanla değişim görülmektedir, salınımlar sonunda tüneldeki sürtünme, baca ve baca girişindeki kayıplarla sönümlenir.



Şekil 1.2 - Denge bacasındaki salınımlar

Hazne-boru-denge bacası sistemindeki rijit su sütunu salınımları şöyle tanımlanabilir:

(a) Dinamik Denklem $$: \frac{L}{g}.\frac{dv}{dt} + z + F_s.V_s.|V_s| + F_T.V.|V| = 0 \qquad (1.1)$$

(b) Süreklilik Denklemi $$: V.A_T = A_s.\frac{dz}{dt} + Q \qquad (1.2)$$

L: Tünel uzunluğu

z: Denge bacasında kabarma seviyesi ile haznedeki su seviyesi arasındaki düşey mesafe

F_s: Denge bacası girişindeki yük kaybı katsayısı (orifis)

V_s: Denge bacasındaki hız $\left(\frac{dz}{dt}\right)$

F_T: Tüneldeki sürtünme yük kaybı için yük kaybı katsayısı $\left(= \frac{\lambda L}{2gD_T} \right)$

D_T: Tünel çapı

V: Tüneldeki hız

A_T: Tünel kesit Alanı

A_s: Denge bacası kesit alanı

Q: Türbin debisi

(1.1) ve (1.2) denklemleri sadece ani kapanma hali için integre edilebilir ve buna tüneldeki sürtünme ile orifis kayıpları dahil edilebilir.

1.2.1 Ani Kapanma Hali İçin Tünelde Sürtünme ve Orifis Kayıplarının İhmal Edilmesi Durumunda Çözüm

F_s, F_T ve Q=0 için ve eşitlik (1.1) ve (1.2) şu şekli alır:

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + z = 0 \qquad (1.3)$$

$$V.A_T = A_s.\frac{dz}{dt} \qquad (1.4)$$

(1.4) ifadesinin diferansiyeli alınarak;

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A_s}{A_T}.\frac{d^2z}{dt^2} \qquad (1.5)$$

olur.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Buradan;

$$\frac{L}{g}.\frac{A_s}{A_T}.\frac{d^2z}{dt^2}+z=0 \qquad (1.6)$$

olur.

Bu lineer homojen ikinci dereceden bir denklemdir ve çözümü;

$$z=c_1.\mathrm{Cos}\frac{2\pi t}{T}+c_2.\mathrm{Sin}\frac{2\pi t}{T} \qquad (1.7)$$

olur.

Burada; c_1, c_2 sabitler ve

T: Salınım periyodudur.

Sınır şartları yardımıyla sabitler belirlenirse tünelin sürtünmesiz olduğu kabulü t=0 için z=0 dır. ($\mathrm{Cos}(0)=1, \mathrm{Sin}(0)=0$ ve $c_1=0$)

Buradan;

$$z=c_2\mathrm{Sin}\frac{2\pi t}{T} \qquad (1.8)$$

$$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}.\frac{A_s}{A_T}} \qquad (1.9)$$

olur.

Denklem (1.8)'den;

$$\frac{dz}{dt} = c_2 . \frac{2\pi}{T} . \mathrm{Cos} \frac{2\pi t}{T} \qquad (1.10)$$

bulunur.

Denklem (1.4)'den

$$\frac{dz}{dt} = V . \frac{A_T}{A_s} \qquad (1.11)$$

bulunur.

Buradan;

$$V = \frac{A_s}{A_T} . c_2 . \frac{2\pi}{T} . \mathrm{Cos} \frac{2\pi t}{T}$$

bulunur.

t=0 anında $V=V_0$ olduğundan

$$V_0 = \frac{A_s}{A_T} . c_2 . \frac{2\pi}{T} \qquad (1.12)$$

olur.

(1.9) denkleminden bulunan T bu ifadede yerine konursa;

$$c_2 = V_0\sqrt{\frac{L}{g}.\frac{A_T}{A_s}} \tag{1.13}$$

elde edilir.

Böylece bulunan bu katsayı (1.8) ifadesinde yerleştirilirse;

$$z = V_0\sqrt{\frac{L}{g}.\frac{A_T}{A_s}}.\,\mathrm{Sin}\frac{2\pi t}{T} \tag{1.14}$$

bulunur.

1.2.2 Ani Kapanma Hali İçin Tünel ve Denge Bacasındaki Kayıplar Hesaba Katıldığında Çözüm

Q=0, $V_s.A_s=V_T.A_T$ 'den hareketle eşitlik (1.1) şu şekli alır:

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + z + \left(F_s.\left(\frac{A_T}{A_s}\right)^2 + F_T\right).V.|V| = 0$$

yani

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + z + F_R.V.|V| = 0 \tag{1.15}$$

yazılabilir.

(1.4),(1.5) ve (1.15) denklemlerinden aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = \frac{L}{2g}.\frac{A_T}{A_s}.\frac{V_0^2}{(F_R.V_0^2)^2} - \frac{z}{F_R.V_0^2} + C\exp\left(-z.\frac{(2g.A_sF_R.V_0^2)}{L.A_TV_0^2}\right) \quad (1.16)$$

$t=0$, $V=V_0$ olduğunda ve $z_0 = -F_R.V_0^2$ olacağından (1.16) denklemi;

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = -\frac{z}{F_R.V_0^2} + \frac{L.A_TV_0^2}{2g.A_s.(F_R.V_0^2)^2}\left[.1 - \exp\left(-2g.\frac{(A_sF_R.V_0^2).(z+F_R.V_0^2)}{L.A_TV_0^2}\right)\right] \quad (1.17)$$

halini alır.

$V=0$ olduğunda z_{max} meydana gelecektir.

$\frac{dz}{dt} = V_s$ olduğu için $dt = \frac{dz}{V_s}$'dir ve z değerinin zamanla olan değişimi;

$$T_z = \int_0^t dt = \int_0^z \frac{dz}{V_s} = \int_0^z \frac{dz}{V.\frac{A_T}{A_s}} \quad (1.18)$$

ile ifade edilir.

(1.18) denklemi grafiksel integrasyon ya da nümerik integrasyon metodlarıyla çözümlenebilir.İkinci yöntemde z değerinin küçük aralıkları dikkate alınır.

1.2.3 Denge Bacası Denklemlerinin Sonlu Farklar Metodu İle Çözümü

Nümerik metodlar ile analizde bilgisayarlar kullanılarak denge bacası şekilleri, tipleri tüm işletme durumları dikkate alınarak çözülebilir.

Değişken alanlı denge bacasının genel durumu dikkate alındığında ve sonlu Δt aralığında, V değişimi için ΔV ve z değişimi için de Δz aralıklarında (1.15) ve (1.2) eşitlikleri şu şekli alır:

$$\frac{L}{g}.\frac{\Delta V}{\Delta t} + z_m + F_R.V_m.|V_m| = 0 \qquad (1.19)$$

$$V_m.A_T = A_{s,m}.\frac{\Delta z}{\Delta t} + Q_m \qquad (1.20)$$

Burada;m indisi bir aralıktaki ortalama değeri göstermektedir ve $A_{s,m}$ ise z ve $z+\Delta z$ arasındaki denge bacasının ortalama alanıdır.

a) Ardışık yaklaşım yöntemi: Her zaman adımı için ΔV tahmin edilir.

$$V_m = V_i + \frac{\Delta V}{2}$$

olur ve (1.19) denkleminden;

$$z_m = z_i + \frac{\Delta z}{2}$$

hesaplanarak z bulunur.

i indisi zaman aralığının başlangıcındaki değeri gösterdiğinden bilinmektedir. Q_m ise türbinde zamanla debi değişimini göstermekte olup, bilinmektedir ve (1.20) denkleminde Δz değeri yerine konularak V_m elde edilebilir. V_m'in iki değeri uyuşursa, tahmin edilen ΔV değeri doğrudur. Aksi taktirde ΔV düzeltilir ve bir sonraki zaman aralığında gerekli uyum elde edilene kadar işlemler tekrar edilerek çözüme ulaşılır.

Diğer taraftan eğer denge bacası alanı değişkense Δz tahmin edilir ve benzer işlemler yapılır. Her iki durumdada z'nin zamanla değişimi elde edilir.
Bilgisayar yardımıyla bu iterasyon gerektiren hesaplamalar kolaylıkla yapılabilir.

b) (1.19) ve (1.20) denklemlerinin Direkt Çözüm Yöntemi: Denklem (1.20)'den

$$\Delta z = \frac{\Delta t}{A_{s,m}}\left(V_i . A_T + \frac{A_T}{2}.\Delta V - Q_m \right) \qquad (1.21)$$

olur,burada

$$V_m = V_i + \frac{\Delta V}{2}$$

dır, aynı zamanda

$$z_m = z_i + \frac{\Delta z}{2}$$

dir ve (1.20) denklemi;

$$\frac{L}{g}.\frac{\Delta V}{\Delta t} + \frac{A_T}{2.A_{s,m}} V_i . \Delta t + \frac{A_T}{4.A_{s,m}}.\Delta V.\Delta t - \frac{Q_m}{2.A_{s,m}} \Delta t \pm F_R.\left(V_i + \frac{\Delta V}{2} \right)^2 + z_i = 0$$

olur.

Yeniden düzenleyerek;

$$\pm\frac{F_R}{4}\Delta V^2+\left(\frac{L}{g.\Delta t}+\frac{A_T}{4.A_{s,m}}\Delta t\pm F_R V_i\right)\Delta V+z_i+\frac{A_T}{2.A_{s,m}}V_i\Delta t-\frac{Q_m}{2.A_{s,m}}\Delta t\pm F_R.V_i^2=0 \qquad (1.22)$$

elde edilir.

Burada ifade;

$$a.\Delta V^2+b.\Delta V+c=0 \qquad (1.23)$$

formunda olduğundan çözüm;

$$\Delta V=\left(-b+\sqrt{b^2-4ac}\right)\Big/2a \qquad (1.24)$$

Her Δt zaman aralığı için ΔV bu açık şema yardımı ile hesaplanır ve (1.21) denklemi yardımıylada z'deki değişimler elde edilir. Eğer V negatif olursa F_R'nin negatif değeri kullanılmalıdır.

Sonlu farklar metodunda bu durumda Δt küçük değer alacaktır. Çünkü burada ortalama değerlerdeki değişimler zamanla lineer değişmektedir.10 sn'lik zaman aralığı yeterince doğru sonuç vermektedir.

1.3 Elastik Su Sütunu Teorisi

Boru hatlarında debideki değişim vana veya pompa operasyonuna bağlı olup; kapanma yada açılma sonucunda bu yapılardan doğru boru hattı boyunca yayılacak basınç değişimi oluşur. Değişimlerin tedrici olarak kalması sağlanırsa; basıncın zamanla değişimi ve debi, akışkanın sıkıştırılamaz olduğunu varsayarak ve boru hattının elastik özelliklerini ihmal ederek problemlerin çözülmesi bir önceki bölümde anlatıldığı gibi rijit su sütunu teorisi kullanılarak yapılabilir.

Ani vana kapanması ya da pompanın durması durumunda, sonuç olarak sıvı kolonunda yavaşlama ve bunun sonucunda oluşan dalganın ön yüzeyi boyunca büyük basınç farklılıklarının meydana geldiği basınç salınımlarının oluştuğu görülür. Basınç dalgasının hızı sıvının sıkışabilmesine ve boru hattının elastikliğine bağlıdır ve bu nedenden dolayı bu parametreler çözüme dahil edilmelidir. Su darbesine en sade örnek, ani vana kapanması nedeniyle anlatılan şekil 1.3 de görülen olay verilebilir.

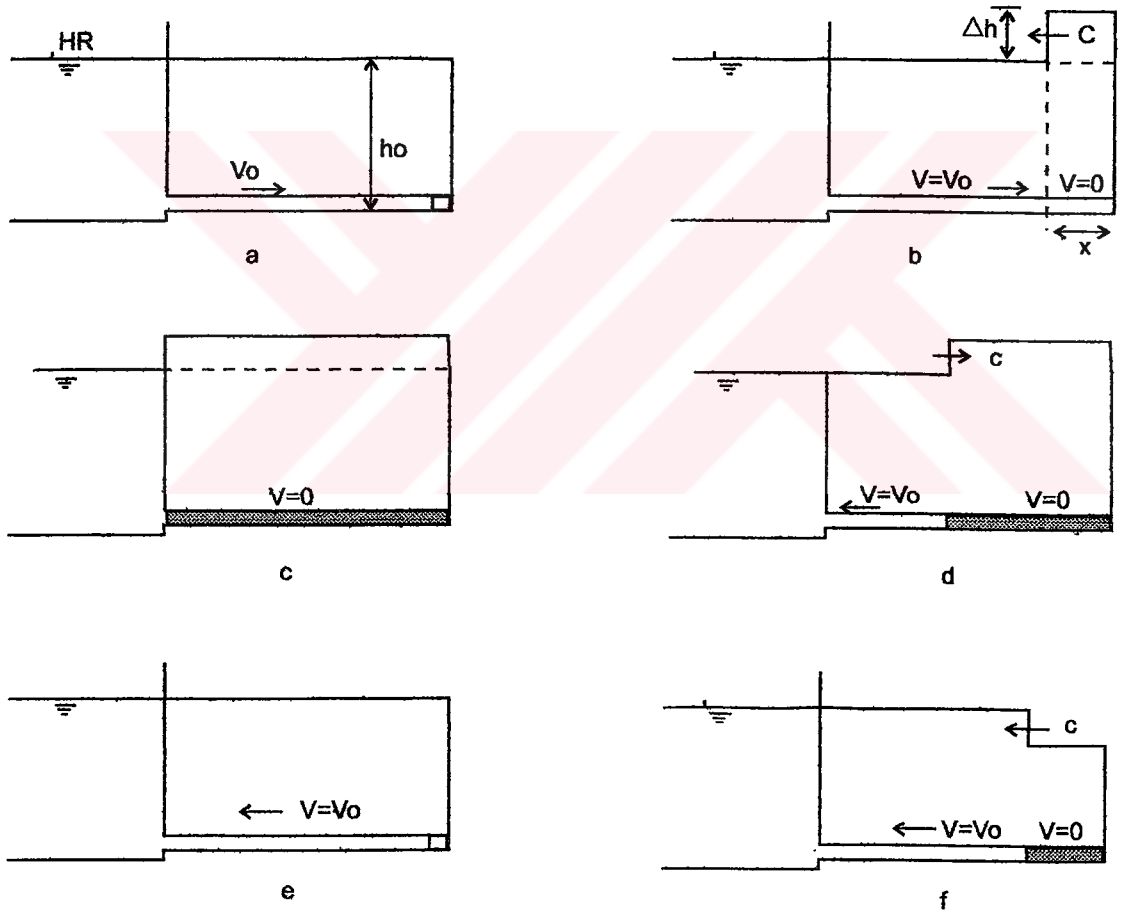
Kapanmadan Δt zaman sonra, basınç dalgası, c dalga hızı ile tanımlanan $x=c.\Delta t$ konumuna ulaşır. Dalganın önünde V_0 hızı ve ardında sakin su vardır. Basınç (0-x) sınırları içinde bölgede, dikkate değer bir şekilde artacak ve boru çapıda artan basınç nedeniyle zorlanacaktır. Sıkışabilirlik nedeniylede sıvının yoğunluğu artacaktır. $t = \frac{L}{c}$ anında bütün su kolonu sakin konuma gelecektir. Bu anda dalga, enerjinin sabit olduğu (HR) haznesine ulaşacaktır (Şekil 1.3 (c)). Böylece boru hattında artan gerilme enerjisi taşınamayacak ve su basınç gradyanı yönünde ters istikamette haznenin içine doğru akacaktır.Dalga c hızıyla geriye vanaya doğru hareket (Şekil 1.3 (d)) edecek ve bu konuma $t = \frac{2L}{c} (=T)$ anında ulaşacaktır. (Şekil 1.3 (e)).

Dalganın yayılması esnasında basınç gittikçe azalacak ve bu işlem sönümleninceye kadar tekrar edecektir.Uygulamada sürtünme nedeniyle bu işlem zaman içinde duracaktır.

Bu bize ani kapanma halinde oldukça, yüksek basınç $\Delta h = \frac{cV_0}{g}$ değerini verecektir. Burada V_0 başlangıçtaki kararlı akım hızıdır. c, çelik boru hatlarında 1300 m/sn mertebesindedir.

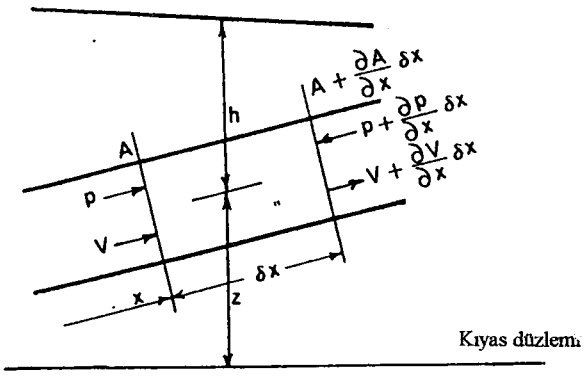
Örnek olarak; V_0=2 m/sn için

$\Delta h = \frac{1300.2}{9.81} = 265\,m$ bulunması, su darbesinin zararı hususunda fikir verebilir.



Şekil 1.3 - Üniform bir boru hattı boyunca ani vana kapanması sebebiyle basınç dalgaları

1.3.1 Su Darbesinin Temel Denklemleri



Şekil 1.4 -

Şekil 1.4 de görülen δx sonsuz küçük akım elemanlarına süreklilik ve dinamik denklemler uygulanırsa;

Momentumun korunumu presnsibinden;

Basınç kuvveti; $pA-(pA+\frac{\partial pA}{\partial x}.\delta x)$

Kontrol hacim içindeki akışkanın ağırlığı; $\rho g\delta x\left(\frac{A+A+\frac{\partial A}{\partial x}\delta x}{2}\right).\text{Sin}\alpha$

Sürtünme kuvveti; $-\tau.P.\delta x$

Akışkanın kütlesi; $\rho\delta x\left(\frac{A+A+\frac{\partial A}{\partial x}\delta x}{2}\right)$

Akışkanın ivmesi; $\frac{dV}{dt}$

Newton' un II. Hareket Kanunu uygulandığında;

$$pA-\left(pA+\frac{\partial pA}{\partial x}\delta x\right)-\rho g\delta x\left(\frac{A+A+\frac{\partial A}{\partial x}\delta x}{2}\right)Sin\alpha-\tau P\delta x=\rho\delta x\left(\frac{A+A+\frac{\partial A}{\partial x}\delta x}{2}\right)\frac{dV}{dt}$$

sadeleştirilir,ikinci mertebe diferansiyel terimler ihmal edilir ve tüm terimler $\rho A\delta x$ ile bölünürse;

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+g.Sin\alpha+\frac{\tau P}{\rho A}+\frac{dV}{dt}=0$$

elde edilir.

Burada; P borunun ıslak çevresi , α boru ekseninin yatayla yaptığı açıdır.

$$\frac{dV}{dt}=V\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial t}$$

ve kararlı akım halinde;

$$\tau_0=\frac{\lambda}{8}\rho V^2$$

$$\frac{1}{\rho g}\frac{\partial P}{\partial x}+Sin\alpha+\frac{\lambda}{\rho g}\frac{\rho V^2}{8R}+\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}=0$$

Burada ; $p = \rho g(h - z)$ tanımı kullanılarak;

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\rho g}\frac{\partial P}{\partial x} + \mathrm{Sin}\alpha$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\gamma}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x}$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\lambda}{8g} V|V| \frac{4}{D} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda}{2Dg} V|V| = 0$$

elde edilir.

Kütlenin korunumu prensibinden;

Kontrol hacime Δt zaman aralığında giren akışkan hacminin bir kısmı akışkanın ve boru çeperinin elastisitesinden dolayı depolanır.

Kontrol hacime Δt zamanında giren kütle; $\rho AV\delta t$

Kontrol hacimden Δt zamanında çıkan kütle; $\left(\rho AV + \frac{\partial A\rho V}{\partial x}\delta x\right)\delta t$

Kontrol hacimde Δt zamanında biriken akışkan kütlesi; $\frac{\partial \rho A\delta x}{\partial t}\delta t$

Kontrol hacimde akışkan kütlesindeki Δt zamanındaki değişim;

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

$$\rho AV\delta t - \left(\rho AV + \frac{\partial \rho AV}{\partial x}\delta x\right)\delta t = \frac{\partial(\rho A\delta x)}{\partial t}\delta t$$

Burada;

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial x}\delta x + \frac{\partial \rho}{\partial t}\delta t$$

$$dA = \frac{\partial A}{\partial x}\delta x + \frac{\partial A}{\partial t}\delta t$$

$$d\delta x = \frac{\partial \delta x}{\partial t}dt + \frac{\partial \delta x}{\partial x}\delta x = \frac{d\delta x}{dt}dt$$

$V = \frac{dx}{dt}$ olarak dikkate alınır ve denklemin her iki tarafı $\rho A\delta x\delta t$ 'ye bölünürse;

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A}\frac{dA}{dt} + \frac{1}{\delta x}\frac{d\delta x}{dt} = 0$$

Hacimsel elastiklik modülü kavramı kullanılırsa;

$$\frac{d\forall}{\forall} = \frac{1}{K}dp \qquad \text{ve} \qquad \frac{d\forall}{\forall} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

İfade yeniden yazılır;

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{K}\frac{dp}{dt} + \frac{1}{A}\frac{dA}{dt} + \frac{1}{\delta x}\frac{d\delta x}{dt} = 0$$

$\frac{1}{A}\frac{dA}{dt}$ ve $\frac{1}{\delta x}\frac{d\delta x}{dt}$ terimleri $\frac{dp}{dp}$ ile çarpıldıktan sonra tüm terimler ρ ile

çarpılırsa;

$$\rho\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{dp}{dt}\rho\left(\frac{1}{K}+\frac{1}{A}\frac{dA}{dp}+\frac{1}{\delta x}\frac{d\delta x}{dp}\right)=0$$

$$c=\frac{1}{\sqrt{\rho\left(\frac{1}{K}+\frac{1}{A}\frac{dA}{dp}+\frac{1}{\delta x}\frac{d\delta x}{dp}\right)}}$$

tanımı yapılırsa,

$$\rho\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{c^2}\frac{dp}{\partial t}=0$$

veya $\frac{dp}{dt}=\frac{\partial p}{\partial x}dx+\frac{\partial p}{\partial t}dt=\frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{dt}+\frac{\partial p}{\partial t}$ tanımından yararlanılarak,süreklilik denklemi;

$$c^2\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{\rho}V\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial t}=0$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\frac{1}{A}\frac{dA}{dp}=$ sb. ve $\frac{1}{\delta x}\frac{d\delta x}{dp}=$ sb. olması durumunda boru boyunca c=sb. olacaktır.

Süreklilik teriminde tüm terimler c^2 ile çarpılıp ρg ile bölünürse;

$$\frac{1}{\rho g}\frac{dp}{dt}+\frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0$$

Burada ; $p=\rho g(h-z)$ tanımı yapılırsa;

$$\frac{\partial p}{\partial t}=\rho g\left[\frac{\partial h}{\partial t}-\frac{\partial z}{\partial t}\right]=\rho g\frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\frac{dz}{dt}=\frac{\partial z}{\partial x}\frac{dx}{dt}+\frac{\partial z}{\partial t}=V\frac{\partial z}{\partial x}=V\frac{dz}{dx}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\rho g\left[\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{dz}{dx}\right]=\rho g\left[\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{\partial z}{\partial x}\right]$$

$$\frac{dp}{dt}=\frac{\partial p}{\partial x}V+\frac{\partial p}{\partial t}$$

ifadeleri süreklilik denkleminde kullanılırsa;

$$\frac{\partial h}{\partial t}-V\frac{\partial z}{\partial x}+V\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0$$

elde edilir. Yatay konumda bulunan boru için, $\frac{\partial z}{\partial x}=0$ olduğundan

$$\frac{\partial h}{\partial t}+V\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0$$

bulunur. Sonuç olarak temel denklemler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Süreklilik denklemi; $$\frac{\partial h}{\partial t} + V.\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g}.\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad (1.25)$$

Dinamik denklemi; $$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g}.\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g}.\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda}{2Dg}.V|V| = 0 \qquad (1.26)$$

olduğu elde edilir.

Basınç dalgasının c yayılma hızı;

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho\left(\frac{1}{K} + \frac{c_1 D}{T.E}\right)}} \qquad (1.27)$$

ile verilir. Borunun cinsine bağlı olarak bazı yayılma hızları şekil 1.5' de verilmiştir.

Burada;

K: Sıvının hacimsel elastiklik modülü

ρ: Sıvının özgül kütlesi

E: Boru malzemesinin elastiklik modülü

T: Boru et kalınlığı

D: Boru çapı

c_1 ise boru hattının mesnetlenmesine bağlı olarak verilen bir sabittir.

İnce cidarlı boru menba tarafından mesnetlenmiş ve genleşme derzleri yok ise, boru malzemesinin η poisson oranına bağlı olarak boru eksenel yönde serbestçe deforme olabiliyorsa ;

$$c_1 = \frac{5}{4} - \eta$$

ile hesaplanır.

Çelik için η=0.3'tür.

Boru hattı ekseni boyunca mesnetlenmiş ve genleşme derzi yok ise;

$c_1=1-\eta^2$

ile hesaplanır.

Boru uzunluğu boyunca genleşme derzleri varsa;

$$c_1 = 1-\frac{\eta}{2}$$

ile hesaplanır.

(1.27) Denklemi şu şekilde yazılabilir:

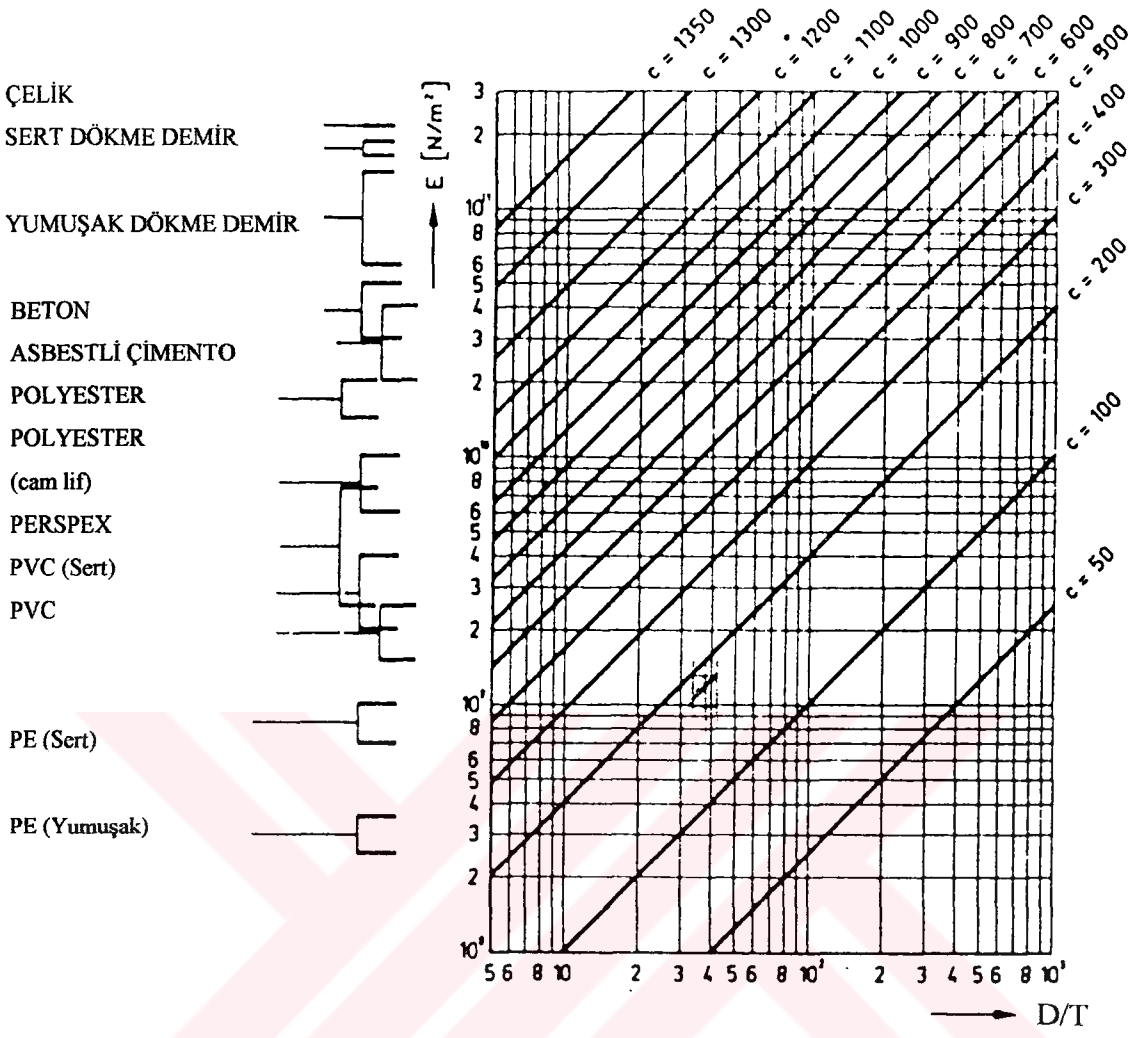
$$c = \sqrt{\frac{K'}{\rho}}$$

burada; K' fleksibil boru hatlarında sıvının mutlak hacimsel modülüdür.Çünkü;
Sonsuz akışkan veya rijit bir boru hattında (veya ses hızında) basınç dalgasının yayılma

hızı $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ olduğu için, $\frac{c_1.D}{T.E}$ terimi yayılma hızını azaltıcı etkiye sahiptir.

Su için $\rightarrow$ $K = 2,1.10^9$ N/m^2

Çelik için $\rightarrow$ $E = 2,1.10^{11}$ N/m^2 'dir.

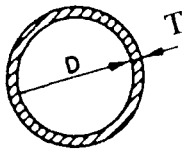


D = Boru çapı

T = Borunun et kalınlığı

E = Borunun elastiklik modülü

ρ = Özgül kütle



$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E.T}\right)}}$$

c = Yayılma hızı

K = Hacimsel elastiklik modülü

Şekil 1.5- Boru cinsine bağlı yayılma hızları

1.3.2 Su Darbesi Denklemlerinin Çözümleri

(1.25) ve (1.26) denklemleri analitik olarak, hazne ve vana gibi sınır şartları için basitleştirici kabuller yapılırsa çözümlenebilir. Ancak, bazı metodlarda sürtünme kayıplarının ihmali, basınç dalgalarının hesaplanmasında ciddi hatalara yol açabilmektedir.

Bilgisayar kullanımlarının devreye girmesiyle (1.25) ve (1.26) denklemleri ayrıklaştırılarak ifade edildiklerinde sınır şartları ve boru ağının bütünüyle birlikte değerlendirilerek bilgisayar yardımı ile hesaplanabilir. Hesaplamalar kısa zaman aralıklarında yapılır ve boru hattı eşit elemanlara ayrılır. Komşu elemanlar arasında her kesitte basınç dalgası ve hız her zaman aralığında hesaplanır. Bu şekilde su darbesinin zamanla değişimi analiz edilir.Temel denklemler için basitleştirici yaklaşımlara gerek yoktur. Özellikle eğimli boru hatlarında,düşük basınç nedeniyle kavitasyon meydana gelme ihtimali söz konusu ise, bu yolla analiz edilebilir.

En çok kullanılan nümerik metod ise büyük olasılıkla kısmi diferansiyel denklemleri bir çift adi diferansiyel denkleme dönüştüren "karakteristikler metodudur". Bunlar nümerik formda ifade edildiğinde (sonlu fark) bilgisayarlarla programlanabilir hale gelir.

Bu nedenle günümüzde basitleştirilmiş metodlar artık uygulanmamaktadır. Bununla beraber, ilerleyen bölümlerde bu basit metodlardan bazıları açıklanacaktır. Bunlar bilgisayarların gelişmesinden önce geliştirilmiş ve klasik analitik tekniklerdir.

Sürtünme yük kayıpları; hazneden çıkıştaki orifisler yardımıyla yerelleştirilerek basitleştirilebilir. Bu kayıplar boru boyunca dağıtılır, ancak bu analizi dahada zahmetli hale getirir.

Burada ele alınan analitik ve grafiksel metodlar su darbesi olayının bazı hallerini açıklayacaktır.

1.3.2.1 Allievi Denklemleri

(1.25) ve (1.26) Diferansiyel denklemleri beli kabüller olmadan analitik olarak çözülemez.

$V.\frac{\partial h}{\partial x}$ terimi $\frac{V}{(V+c)}\frac{\partial h}{\partial t}$ teriminin mertebesindedir ve bu yüzden etkisi küçüktür.

$\frac{\partial V}{\partial x}$ terimi ise; $\frac{\partial V}{\partial t}$ terimi ile karşılaştırıldığında etkisi küçüktür,çünkü;

$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{V\partial V}{\partial x} + \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dt}\left(1 - \frac{V\partial V}{\partial x}.\frac{dt}{dV}\right) = \frac{dV}{dt}\left(1 - \frac{V}{\partial x / dt}\right)$ ifadesinde son terim

küçüktür. Sürtünme kaybı dikkate alınmadığında;

Süreklilik denklemi; $\frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{g}{c^2}.\frac{\partial h}{\partial t}$ (1.28)

Dinamik denklem; $\frac{\partial V}{\partial t} = -g.\frac{\partial h}{\partial x}$ (1.29)

haline indirgenir. Rieman bu tür eşdeğer diferansiyel denklemler için bir çözüm bulmuştur ve şu şekilde formüle edilebilir:

$$h_{tx} = h_0 + F\left(t - \frac{x}{c}\right) + f\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (1.30)$$

$$V_{tx} = V_0 + \frac{g}{c}\left(F\left(t - \frac{x}{c}\right) - f\left(t + \frac{x}{c}\right)\right) \quad (1.31)$$

Burada; F ve f birer fonksiyondur.

F ve f fonksiyonları yük boyutundadır. +x yönünde boru hattı boyunca bir gözlemcinin seyahat etmesi durumunda konumu t zamanında $x_1=ct+x_0$ olacaktır ve $t=0$ anında ise x_0 konumundadır.

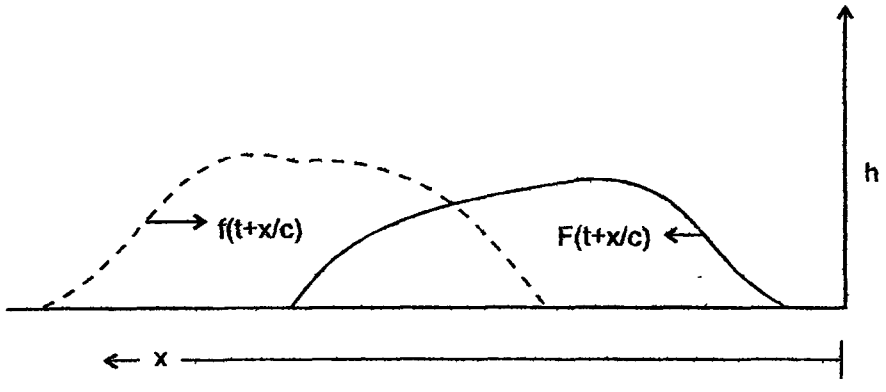
Gözlemci için fonksiyon;

$$F\left(t-\frac{x}{c}\right)=F\left(t-\frac{ct+x_0}{c}\right)=F\left(\frac{x_0}{c}\right)=\text{sabit}$$

olur.

Böylece; $F\left(t-\frac{x}{c}\right)$ fonksiyonu, menbaya doğru c yayılma hızıyla ilerleyen basıçtır.

Benzer bir ifadeyle $F\left(t+\frac{x}{c}\right)$ fonksiyonu; c dalga hızında -x yönünde yayılan basınç dalgasıdır. (Şekil 1.6)



Şekil 1.6 -

$F\left(t+\frac{x}{c}\right)$ basınç dalgası, mesela x=0 konumundaki vana operasyonu ile hazneye doğru yayılır, buraya ulaştıktan sonra f dalgası şeklinde negatif işaret ile geriye doğru; $\frac{T}{2}=\frac{L}{c}$ anında yansıyacaktır.Burada T su dalgası periyodu; $\left(\frac{2L}{c}\right)$ dir. "i"yi ayrıklaştırılmış zaman periyodunu gösterdiğini varsayarak; T zaman aralığında (1.30) ve (1.31) denklemleri, örneğin vana gibi bir mansap kontrolu için yazılabilir.

$$h_i=h_0+F_i+f_i \tag{1.32}$$

$$V_i = V_0 - \frac{g}{c}(F_i - f_i) \tag{1.33}$$

i=0 için t=0 olduğundan;

$h_0=h_0+F_0+f_0$

$$V_0 = V_0 - \frac{g}{c}(F_0 - f_0)$$

olur.

i=1 için t=T olduğundan;

$h_1=h_0+F_1+f_1$

$$V_1 = V_1 - \frac{g}{c}(F_1 - f_1)$$

olur ve böylece devam eder.

f , F dalgası ile yansıyacağı için;

$f_0=0$; $f_1=-F_0$: $f_2=-F_1$

olur.

Böylece;

$h_1=h_0+F_1-F_0$

$$V_1 = V_0 - \frac{g}{c}(F_1 + F_0)$$

olur.

Ayrıca;

$h_2=h_0+F_2-F_1$

$$V_2 = V_0 - \frac{g}{c}(F_2 + F_1)$$

olur.

Ard arda yük denklem çiftlerini toplayarak ve ard arda gelen hız denklemlerini çıkararak;

$h_1+h_0=2h_0+F_1$

$h_2+h_1=2h_0+F_2-F_0$

$$V_0 - V_1 = \frac{g}{c}F_1$$

$$V_1 - V_2 = -\frac{g}{c}(F_0 - F_2)$$

elde edilir.

Böylece; genel olarak;

$$F_i - F_{i-1} = \frac{c}{g}(V_{i-1} - V_i)$$

$$h_i - h_{i-1} + 2h_0 = \frac{c}{g}(V_{i-1} - V_i) \qquad (1.34)$$

elde edilir.

Sınır şartları;

Mansap ucuna yerleştirilmiş vana hali arkasında h_i basınç yükü bulunan i anında $A_{v,i}$ alanlı vanaya doğru olan akımın debisi;

$$Q = c_{d,i}\, A_{v,i} \sqrt{2g.h_i} \qquad (1.35)$$

ile verilebilir ve boru içinde menbaya doğru oluşan ani akım hızı için;

$$V_i = \frac{c_{d,i} \cdot A_{v,i}}{A_p} \sqrt{2g.h_i} \qquad (1.36)$$

yazılır.

Burada; A_p: boru alanı ve $c_{d,i}$ debi katsayısıdır.

Oranlarsak;

$$\frac{V_i}{V_0} = \frac{c_{d,i} \cdot A_{v,i} \sqrt{h_i}}{c_{d,0} \cdot A_{v,0} \sqrt{h_0}}$$

bulunur.

Burada;

$$\eta_i = \frac{c_{d,i} \cdot A_{v,i}}{c_{d,0} \cdot A_{v,0}}$$

ve

$$\xi_i^2 = \frac{h_i}{h_0}$$

tanımları yapılarak;

$$V_i = V_0 . \eta_i . \xi_i \qquad (1.37)$$

$$h_i=h_0, \xi_i^2 \tag{1.38}$$

bulunur.

(1.34) denkleminde yerlerine koyulursa;

$$h_0.\xi_i^2 + h_0.\xi_{i-1}^2 - 2h_0 = \frac{cV_0}{g}(\eta_{i-1}.\xi_{i-1} - \eta_i.\xi_i) \tag{1.39}$$

şeklinde yazılır.

Burada $\frac{cV_0}{2gh_0}$ 'ü ρ sembolüyle (sıvının özgül kütlesi değil) (1.39a)

gösterilirse;

$$\xi_i^2+\xi^2_{i-1}-2=2\rho(\eta_{i-1}.\ \xi_{i-1}-\eta_i.\ \xi_i) \tag{1.40}$$

yazılabilir.

(1.40) denklemi basınç yükünün, zaman aralıklarında; $(T)_i$=1,2,3...., kapanmaya ayarlı vana ($A_{v,i}$ vt)'de hesaplanması için bir denklem serisini verecektir.Bu denklemler; Allievi denklemleri olarak bilinmektedir.

Eğer vananın kapanması ani olarak meydana gelirse $\eta_{i=0}$, (1.40) denklemi;

$$\xi_i^2+\xi_0^2-2=2\rho(\eta_0.\ \xi_0-0)$$

olur.

Burada; $\eta_0=1$; $\xi_0=1$ alınarak;

$$\xi_i^2 - 1 = 2g = \frac{cV_0}{h_0}$$

bulunur.

Burada;

$$h_0\left(\frac{h_1}{h_0} - 1\right) = \frac{cV_0}{g}$$

veya;

$$\Delta h = h_1 - h_0 = \frac{cV_0}{g}$$

olur.

Eğer vana herhangi bir zamanda kapanacaksa $t < \frac{2L}{c}$ sonuç $\eta_1=0$ olduğundan aynı olacaktır.

1.3.2.2 Alternatif Formülasyon; Cebirsel Denklem Metodu

Mansaba yerleştirilmiş vana sınır şartı için; (1.36) denkleminin T zaman aralıkları ile ayrıklaştırılmış hali;

$$V_i = \frac{c_{d,i} \cdot A_{v,i}}{A_p}\sqrt{2g.h_i}$$

olur.

Bu taktirde;

$$V_i = B_i \cdot \sqrt{h_i} \; ; \quad h_i = \frac{V_i^2}{B_i^2}$$

olur.

Burada;

$$B_i = \frac{c_{d,i} \cdot A_{v,i} \sqrt{2g}}{A_p}$$

olduğundan;

(1.32) denklemini çıkartıp, (1.33) denklemine eklersek;

$$\frac{V_i^2}{B_i^2} + \frac{cV_i}{g} - h_0 - 2f - \frac{cV_0}{g} = 0$$

olur.

Böylece;

$$V_i = -\frac{B_i^2 . c}{2g} + B_i \sqrt{\left(\frac{B_i^2 . c}{2g}\right)^2 + \frac{c . V_0}{g} + h_0 + 2f} \qquad (1.41)$$

olduğundan, f_i=-F(i-1) (1.8 ifadesine bakın) hareketle;

$$F_i = \frac{c}{g}(V_i - V_0) + f_i \qquad (1.42)$$

ve

$$h_i - h_0 = F_i + f_i \qquad (1.43)$$

bulunur.

1.3.2.3 Schnyder - Bergeron Grafik Metodu

Bu grafik metod Riemann diferansiyel denklemler (1.30) ve (1.31)'nin çözümü kullanılarak geliştirilmiştir.

Boru hattı boyunca; dalga yayılma hızı c ile bir gözlemci hareket ettiğinde bu hat boyunca basınç yükünde ve debide değişime maruz kalacaktır, negatif V doğrultusunda hareket ettiğinde (Şekil 1.7)

$$h_{x,t} - h_{x,T} = \frac{c}{g.A_p}.(Q_{x,t} - Q_{x,T}) \qquad (1.44)$$

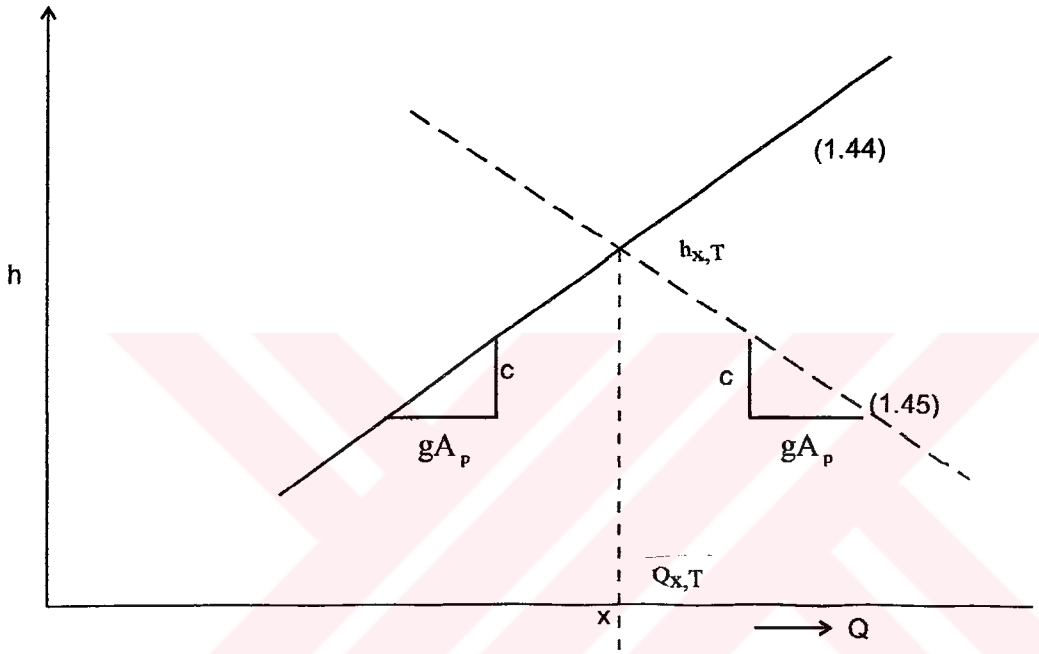
ifadesi elde edilir.

Böylece eğer; $Q_{x,T}$ ve $h_{x,T}$, x konumu için T zamanında biliniyorsa; $h_{x,t}$ ve $Q_{x,t}$ değerleri x,t konumlarında (1.44) ifadesiyle lineer olarak ilişkilidir.

Benzer olarak; c hızında +V yönünde hareket eden bir gözlemcinin maruz kalacağı yük ve debi değişimleri;

$$h_{x,t} - h_{x,T} = -\frac{c}{g.A_p}.(Q_{x,t} - Q_{x,T}) \qquad (1.45)$$

ile verilir.



Şekil 1.7 - Gözlemlenen Su darbesi hatları-Schnyder-Bergeron Metodu

Allievi denklemlerinden elde edilen (1.44)ve (1.45) ifadeleri "su darbesi hatları" olarak bilinir.

h,Q alanında hatları konumlandırabilmek için; boru hattının uçlarındaki sınır şartlarının bilinmesi gerekir. Bunlar h ve Q arasındaki bağıntı ile ifade edilmelidir. Örnek olarak; mansabta bulunan bir vana halinde; A_v kesitli vanaya doğru akan debi;

$$Q = c_d.A_v.\sqrt{2g.h} \qquad (1.46)$$

denklemi ile ifade edilebilir, burada; h vananın arkasındaki basınç yüküdür.

Hesaplamalar T zaman aralığında yapıldığı için; (1.46) denklemi bir seri parabolik eğriyi verecektir. $Q = c_d . A_{v,i} . \sqrt{2g.h}$ her biri ψ_i ile gösterilir. HR hazne seviyesi sabit olabilir veya zamanın fonksiyonu olarak bilinir. Bundan dolayı basınç yükü, debiden bağımsızdır ve sabit seviye hali ve sürtünmenin ihmal edildiği boru için h-Q diyagramında h_0=HR=sabit ve yatay doğru ile gösterilerek ifade edilir.

Başlangıçta; kısmen kapalı vananın yerleştirildiği sürtünmesiz boru boyunca akışın mevcut olduğu sabit seviyeli bir hazneyi dikkate alalım:

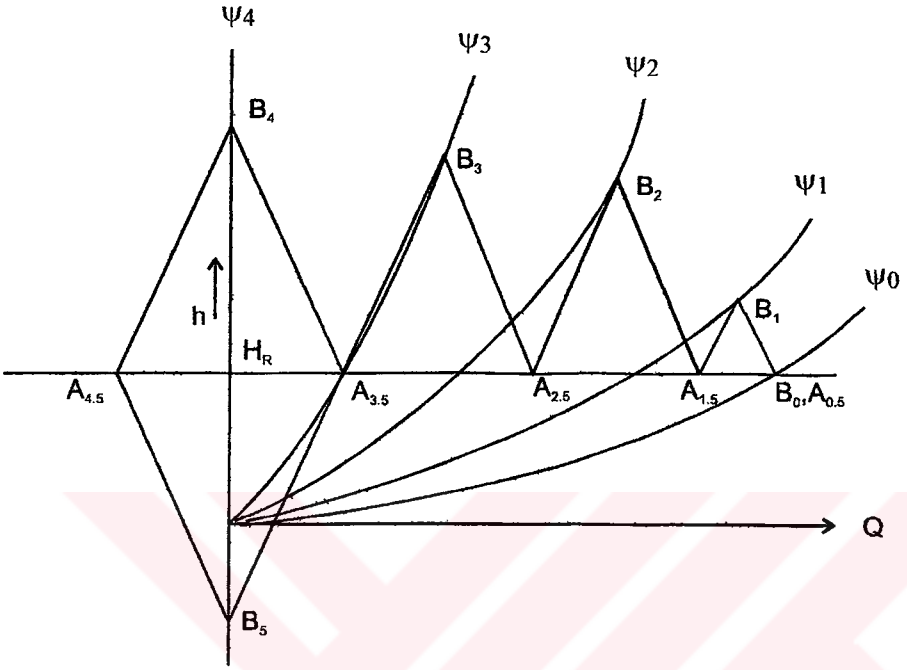
Şekil 1.8 -

Eğer vana açıklığı azaltılırsa şekil 1.9 da görüleceği gibi menba ve mansap sınır şartlarında ayrıklaştırılmış su darbesi periyotlarının bir değerinden sonra tamamen kapanacaktır.

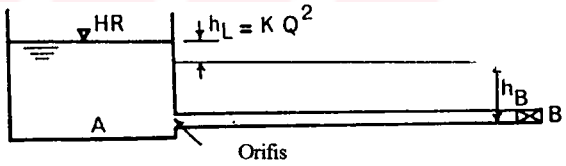
ψ_0 kesişme noktası ve HR=sabit, Q_0, h_0 başlangıç şartlarını verir. Bu şartlar; A noktasında $t = \frac{L}{c}$ zamanına kadar mevcut olacaktır.Eğer $\frac{L}{c}$ anında,ilk basınç dalgası A noktasına vardığında c hızında B noktasına doğru bir gözlemci harekete başlar ve $-\frac{c}{gA_p}$'de su darbesi hattı eğimiyle debi ve yük değişimlerine maruz kalacaktır. Bu hat, B_0, A_0-0,5 doğrultusundadır ve ψ_1 keser, vanada h_1, Q_1 verir.Gözlemci A'ya (B_1 hattı $A_{1.5}$ doğru) hazneye döner. Vanaya döndüğünde ($A_{1.5}$ hattı B_2'ye doğru) ψ_2 yeni vana şartı ile karşılaşır ve böylece devam eder. Vana kapatıldığında, vanadaki şart B_4 ile

erilir. Vana şimdi kapalıdır basınç şekil 1.3 de açıklandığı salınım gösterir. B_5'te basınç atmosfer basıncının altındadır ve bu -10 m' ye yaklaşırsa buharlaşma olur.

Böyle bir olayın su darbesi üzerindeki etkisi karmaşık olup; hala tam anlaşılmamıştır.



Şekil 1.9 -



Şekil 1.10 -

1.3.2.3.1 Boru Hatlarında Sürtünme ve Diğer Kayıplar

Boru hatlarında yük kayıpları ihmali su darbesi hesaplarında önemli hatalara yol açabilir.Bu tür kayıplar Schnyder-Bergeron metodunda yaklaşık olarak hazneden boruya girişte yoğunlaştıkları varsayılarak dikkate alınmaktadır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Orifis gibi yük-debi bağıntısını veren hidrolik yapılar boru hattı boyunca yük kaybı debi fonksiyonunu; $h_L=KQ^2$ temsil edebilmektedirler.

Buna göre haznedeki sınır şartı;

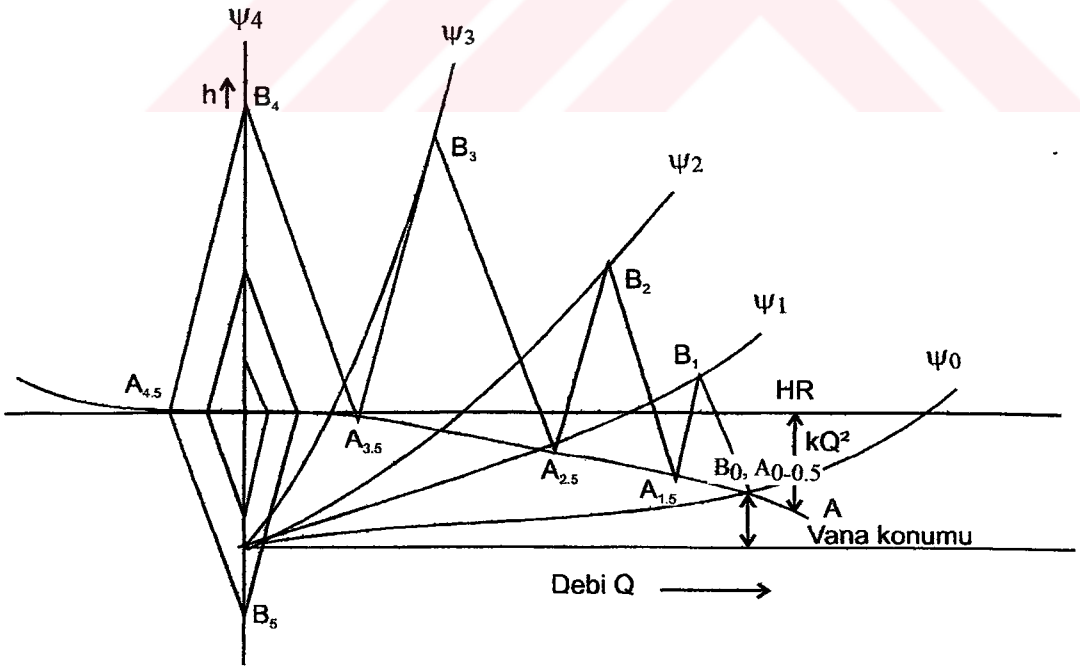
$h_A=HR-KQ^2$

olduğunda,burada;

$$K=\left(\frac{\lambda L}{D}+K_m\right).\frac{1}{A_p{}^2} \qquad (1.47)$$

dir.Burada;K_m boru hattı için yersel kaybın katsayısıdır.

(1.47) denkleminin grafiği şekil 1.11 de (A eğrisi) gösterildiği gibi tipik vana sınır şartları ve su darbeleri hatları süperpoze edilmiştir.



Şekil 1.11 - Schnyder-Bergeron diyagramı boru hattı kayıplarıyla gösterilmiştir.

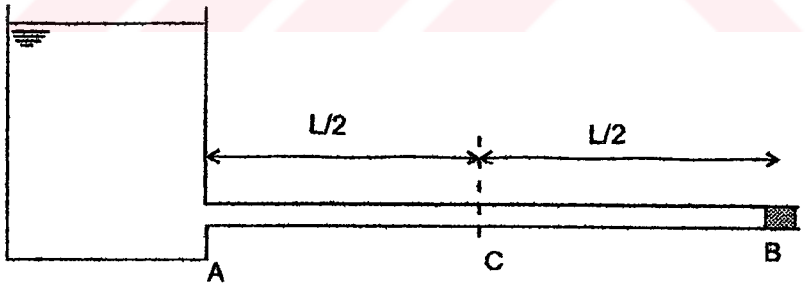
Bu gösterim, vanadaki basınç yükünün açıklanabileceği diferansiyel denklemlerin nümerik çözümleriyle benzer sonuçlar verir. Ayrıca boru hatlarındaki sürtünme kayıplarını, sanal olarak belirli aralıklarla yerleştiğini düşünebileceğimiz orifisler ile, boru hattı boyunca dağıtmak mümkündür. Schnyder-Bergeron bu yorumu, daha detaylı ve iyi anlaşılan denklemlerin nümerik çözümlere göre daha az kullanılır.

1.3.2.3.2 İç Noktalarda Basınç Dalgaları

Şekil 1.12 de gösterilen sistemi dikkate alalım:

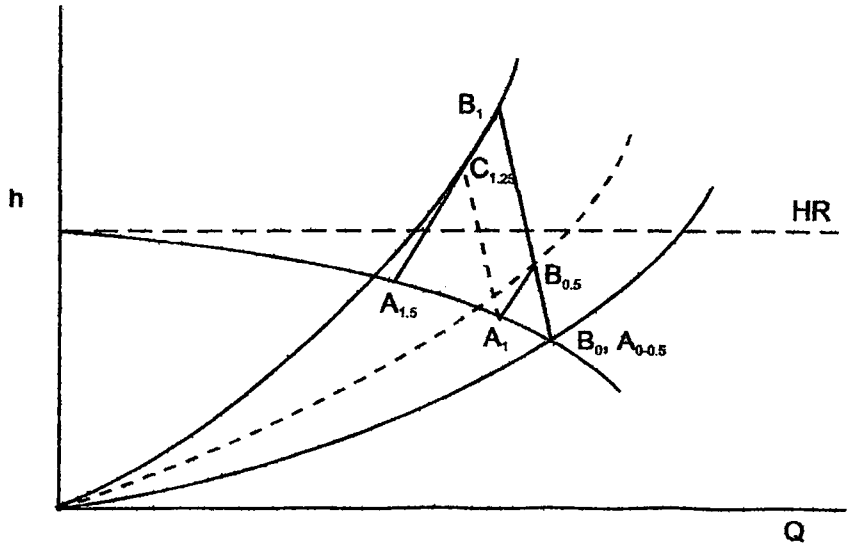
A'daki gözlemci T=1 zamanında; B yönüne doğru c hızı ile hareket ettiğinde, B'nin solunda T=1 anında benzer bir gözlemcide hareket ettiğinde $\left(T+\frac{L}{2c}\right)$ anında bu gözlemciler birbirleriyle karşılaşacaklardır. (yani 1.25. T)

Grafik metodu kullanarak $\psi_{0.5}$ vana sınır şartı yardımıyla A_i'nin konumunun elde edilmesini gerektirecektir.



Şekil 1.12 -

Şekil 1.13 ün çizilmesiyle, $c_{1.25}$ elde edilecek ve bu da $c_{2.25}$'in elde edilmesini sağlayacaktır.



Şekil 1.13 -

1.3.2.3.3 Pompa Durması Nedeniyle Basınç Dalgaları

Bir pompanın ani durması negatif bir basınç dalgasının yayılmasına neden olur ve bu bir hazneyle karşılaştığında pozitif dalga olarak yansır. Eğer pompadan gelen akış; basınç dalgası geri dönmeden kesilirse; geri tepme klapesi kapanacak ve bir ölü uç şartı yaratacaktır.

$\frac{2L}{c}$ zamanı içinde meydana gelen ani durma halinde; Schnyder-Bergeron diyagramı şekil 1.14 de görülmektedir.Başlangıç negatif basınç dalgasının buhar basıncına düşmediği varsayılmıştır.

Boru hattında sürtünmenin su darbesi olayının azalmasına neden olduğu bilindiğinden uzun boru hatları çoğunlukla su darbesini azaltma cihazları gibi düşünülür.

Bu tip pompajlı boru hatlarında içinde su içeren ve üzerinde basınçlı hava bulunduran hava kazanları su darbesini sönümlendirici cihazlar olarak kullanılmaktadır.

Eğer bir ratodinamik pompa, güç kesildikten sonra bir süre daha çalışmaya ataleti nedeniyle devam ederse bir müddet daha akım devam eder ve basınç dalgaları, yavaş ani olmayan vana kapanmasına benzer davranış gösterir.

Pompanın yavaşlaması şöyle ifade edilebilir.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{3600.\rho.g.Q.h_m}{4.\pi^2.I.N.\eta} \tag{1.48}$$

Burada; Q ve h_m, N hızında debi ve monometrik yüklerdir. I pompa ve motorun atalet momenti, η, N hızında Q debisinde pompanın verimidir.

Grafik metodlar kullanılırken ve sınırlı zaman $\Delta t = T = \frac{2L}{c}$ aralıklarında; Δt anında N_2 hızı;

$$N_2 = N_1 - \frac{3600.\rho.g.Q_1.h_{m1,\Delta t}}{4.\pi^2.I.N_1.\eta} \tag{1.49}$$

olarak verilir.

O zaman yeni pompa karakteristik eğri eğrisi;

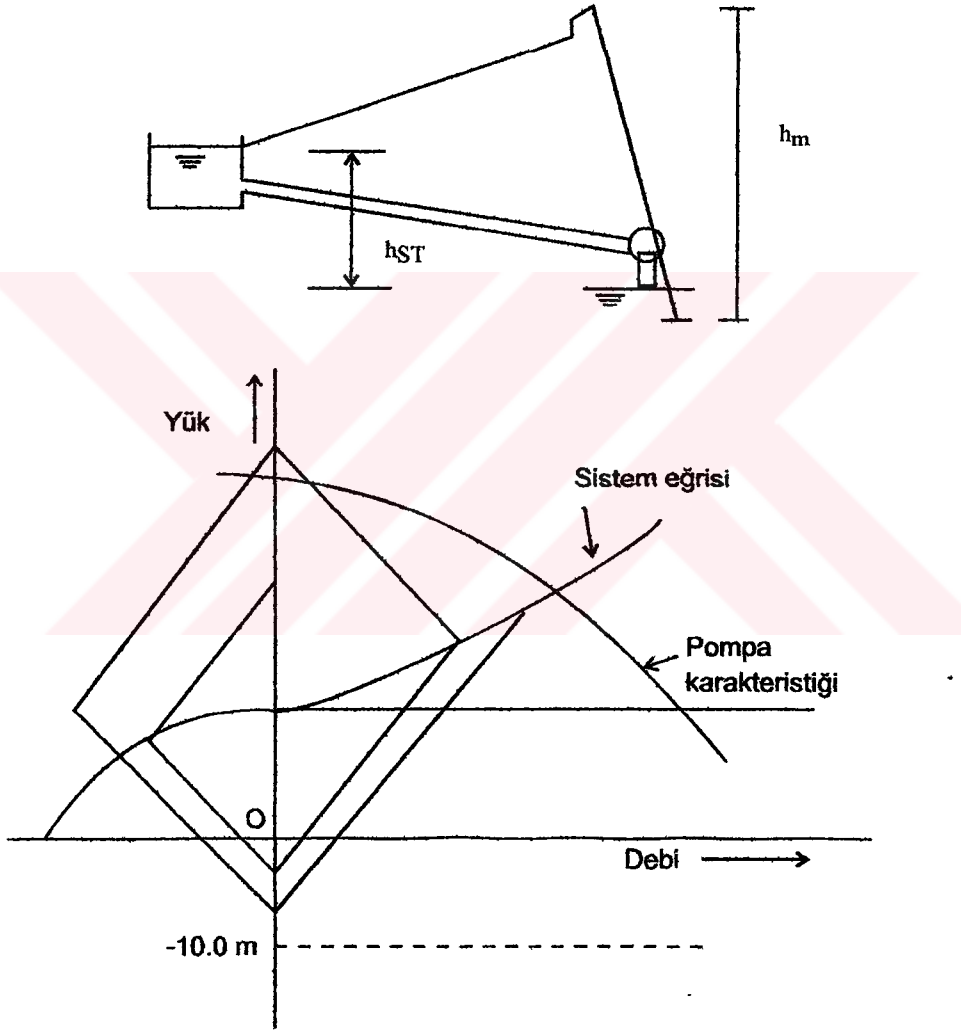
$$h_2 = h_1.\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2; \qquad Q_2 = Q_1.\left(\frac{N_2}{N_1}\right) \tag{1.50}$$

ile verilir.

Bu eğriler menba sınır şartlarını göstermektedir. Birinci ve ikinci zaman aralıklarında pompa sınır şartlarından kalan sadece zaman aralığının sonundaki h_m ve Q'ya bağlı su

darbesi hatlarını gösterecektir.Mansap sınır şartı (örneğin bir hazne) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$h = h_{ST} + \frac{Q^2}{2gA_p^2}\left(\frac{\lambda L}{D} + K_m\right) \qquad (1.51)$$



Şekil 1.14 - Pompanın ani olarak durmasıyla oluşan basınç dalgası-Schnyder-Bergeron diyagramı

1.3.2.4 Su Darbesi Denklemlerinin Nümerik Çözümü (Karakteristikler Metodu)

Su darbesi bölgesi içindeki basınç yükü, p(x,t) ve hız, V(x,t) bağımlı değişkenleri ile belirtilir. Su darbesi denklemleri değişken katsayıları ifade ettiklerinden non-lineerdir.

Su darbesi bölgesi içindeki kararsız akım şartlarının belirlenmesinde,non-lineer kısmi diferansiyel denklemlerin, verilen başlangıç ve sınır değerleri ile birlikte integrasyonu gerekir. Fakat; denklemlerin kapalı formda (analitik) çözümü mümkün olmadığından, bunların çözümü ancak nümerik integrasyonla yürütülür. Bu denklemler non-lineer olmalarına rağmen, karakteristik metodla nümerik olarak integre edilebilirler.

Su darbesi bölgesi içinde akımın matematiksel tarifini ifade eden denklemler, iki bağımlı değişken halinde, hiperbolik tipte diferansiyel denklemler olduklarından, karakteristik metodla nümerik çözüme elverişlidirler. Bu nedenle; kısmi diferansiyel denklemler, önce iki çift toplam (adi) diferansiyel denklem takımından ibaret karakteristik eşitliklere dönüştürülür. Sonra; bu denklemler bilgisayarla nümerik integrasyon için, sonlu farklar formunda yazılırlar.

Analitik olarak (kapalı formda) integrasyonları mümkün olmayan denklemler, sonlu farklar metodu kullanılarak bilgisayarla çözülürler. Böyle eşitliklerdeki türevler, sonlu farklar oranları kullanılarak ifade edilirlerse ve farklar küçük boyutlarda seçilirlerse, bu takdirde denklemler, birinci mertebeden bir yaklaşımla nümerik olarak integre edilebilirler. Bu çözüm tekniğinin amacı, x-t düzlemi üzerinde seçilen noktalardaki hız ve yük (basınç) değerlerini elde etmektir. Diferansiyel denklem çiftinin sonlu farklar metodu ile çözümünde, p ve V değişkenlerinin değerleri, ancak x-t düzlemi üzerinde alınmış olan münferit noktalarda belirlenebilir.

$$c^2 \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} . V \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \qquad (1.52)$$

$$V\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial x}+g.\frac{\partial z}{dx}+\frac{\lambda}{2D}.V|V|=0 \qquad (1.53)$$

veya

$$\frac{\partial h}{\partial t}-V\frac{\partial z}{\partial x}+V\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0 \qquad (1.54)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{g}.\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\lambda}{2Dg}.V|V|=0 \qquad (1.55)$$

Görüldüğü gibi su darbesinin non-lineer kısmi diferansiyel genel denklemleri doğrudan integre edilememektedir. Bununla beraber aşağıda açıklanacak olan karakteristikler metodu, denklemlerin nümerik olarak çözülebilmesine imkan vermektedir.

Karakteristikler metodu ile kısmi türevler toplam türevler halinde ifade edilebilir. Böylece çözüme daha çabuk ulaşılabilir. Elde edilen su darbesi denklemlerini karakteristikler metodu ile çözmeden önce kısaca bu metodu açıklayalım:

Genel olarak f(x,t), g(x,t) bağımlı değişkenlerinin aşağıdaki şekilde verilmiş iki diferansiyel denklemden çözülmesi istensin.

$$L_1: a_1.\frac{\partial f}{\partial x}+b_1.\frac{\partial f}{\partial t}+c_1\frac{\partial g}{\partial x}+d_1\frac{\partial g}{\partial t}+e_1=0 \qquad (1.56)$$

$$L_2: a_2.\frac{\partial f}{\partial x}+b_2.\frac{\partial f}{\partial t}+c_2\frac{\partial g}{\partial x}+d_2\frac{\partial g}{\partial t}+e_2=0 \qquad (1.57)$$

Bu iki diferansiyel denklem doğrudan doğruya integre edilememektedir. Bununla beraber bu iki diferansiyel denklemin çözümü olan fonksiyonlar, bunların her türlü lineer kombinezonun da çözümüdürler. Buna göre;

$$L_1 + \beta L_2 = 0 \tag{1.58}$$

denkleminin de çözümü olacaktır. Burada β, ileride belirlenecek olan bir parametreyi göstermektedir. (1.56) ve (1.57) bağıntılarının (1.58) şeklinde bir lineer kombinezonu alındığı takdirde, denklem düzenlendikten sonra

$$(a_1 + \beta a_2)\frac{\partial f}{\partial x} + (b_1 + \beta b_2)\frac{\partial f}{\partial t} + (c_1 + \beta c_2)\frac{\partial g}{\partial x} + (d_1 + \beta d_2)\frac{\partial g}{\partial t} + (e_1 + \beta e_2) = 0 \tag{1.59}$$

elde edilir. Bundan sonra, yukarıda keyfi olarak seçilmiş β parametresi (1.59) bağıntısında f ve g fonksiyonlarının adi türevleri gelecek şekilde belirlensin. Buna göre:

$$\frac{df}{dt} = (a_1 + \beta a_2)\frac{\partial f}{\partial x} + (b_1 + \beta b_2)\frac{\partial f}{\partial t} \tag{1.60}$$

$$\frac{dg}{dt} = (c_1 + \beta c_2)\frac{\partial g}{\partial x} + (d_1 + \beta d_2)\frac{\partial g}{\partial t} \tag{1.61}$$

olması istenmektedir. (1.60) bağıntısının gerçeklenebilmesi için;

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{a_1 + \beta a_2}{b_1 + \beta b_2}.\frac{\partial f}{\partial x}\right).(b_1 + \beta b_2)$$

bağıntısında $\frac{\partial f}{\partial x}$ in katsayısının $\frac{dx}{dt}$ olması gerekir. Benzer düşünceyle (1.61) bağıntısından;

$$\frac{dx}{dt} = \frac{c_1 + \beta c_2}{d_1 + \beta d_2}$$

elde edilir. Hem f, hem de g fonksiyonunun aynı β değeri için adi türeve dönüşebilmeleri ise her iki $\frac{dx}{dt}$ değerinin birbirine eşit olması ile mümkündür.

$$\frac{a_1 + \beta a_2}{b_1 + \beta b_2} = \frac{c_1 + \beta c_2}{d_1 + \beta d_2} \tag{1.62}$$

bu son bağıntı açılır ve β 'nın üslerine göre düzenlenirse;

$$\beta^2(a_2d_2-b_2c_2)+ \beta(a_2d_1+a_1d_2-b_2c_1-b_1c_2)+a_1d_1-b_1c_1=0 \tag{1.63}$$

bulunur.

$$A\beta^2 + B.\beta + C = 0$$

$$A = a_2d_2 - b_2c_2$$

$$B = a_2d_1 + a_1d_2 - b_2c_1 - b_1c_2$$

$$C = a_1d_1 - b_1c_1$$

şeklinde bir ikinci derece denklemidir. Denklemin reel çözümü olabilmesi için;

$$B^2 - 4AC \geq 0.A \neq 0$$

olmalıdır.

(1.52) ve (1.53) ifadeleri göz önüne alınırsa;

$$L_1;\ c^2\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{\rho}V\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial t}=0 \tag{1.64}$$

$$L_2;\ V\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+g\frac{\partial z}{\partial x}+\frac{\lambda}{2D}V|V|=0 \tag{1.65}$$

$$L_1+\beta L_2=0 \tag{1.66}$$

$$L_1+\beta L_2=c^2\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{\rho}V\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial t}+\beta V\frac{\partial V}{\partial x}+\beta\frac{\partial V}{\partial t}+\beta\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial x}+\beta g\frac{dz}{dx}+\beta\frac{\lambda}{2D}V|V|=0 \tag{1.67}$$

$$\beta V\frac{\partial V}{\partial x}+c^2\frac{\partial V}{\partial x}+\beta\frac{\partial V}{\partial t}+\beta\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial x}+V\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial t}+\beta g\frac{dz}{dx}+\beta\frac{\lambda}{2D}V|V|=0 \tag{1.68}$$

$$\frac{\beta}{\beta}\left\{(\beta V+c^2)\frac{\partial V}{\partial x}+\beta\frac{\partial V}{\partial t}\right\}+\frac{\rho}{\rho}\left\{\left(\frac{\beta}{\rho}+\frac{V}{\rho}\right)\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial t}\right\}+\beta g\frac{dz}{dx}+\beta\frac{\lambda}{2D}V|V|=0 \tag{1.69}$$

$$\beta\left\{\left(\frac{\beta V}{\beta}+\frac{c^2}{\beta}\right)\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial t}\right\}+\frac{1}{\rho}\left\{\left(\frac{\beta}{\rho}\rho+\frac{V}{\rho}\rho\right)\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\rho.\frac{\partial p}{\partial t}\right\}+\beta g\frac{dz}{dx}+\beta\frac{\lambda}{2D}V|V|=0 \tag{1.70}$$

$$\frac{dV}{dt}=\frac{\partial V}{\partial x}.\frac{dx}{dt}+\frac{\partial V}{\partial t}$$

olduğundan (1.70) denkleminde;

$$\frac{dx}{dt}=V+\frac{c^2}{\beta} \tag{1.71}$$

olur.

Aynı şekilde;

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} V + \frac{\partial p}{\partial x}$$

olduğundan (1.70) denkleminde

$$\frac{dx}{dt} = \beta + V \tag{1.72}$$

bulunur. Bu sonuçlar ile (1.70) denklemi

$$\beta \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + \beta g \frac{dz}{dx} + \beta \frac{\lambda}{2D} V|V| = 0 \tag{1.73}$$

denklemi haline dönüşür. (1.71) ve (1.72) denklemlerine göre de

$$V + \frac{c^2}{\beta} = \beta + V$$

dir.

Buradan;

$$c = \pm\beta \tag{1.74}$$

bulunur.

Yukarıdaki toplam türevlerin yazılabilmesi için bu şartın sağlanması lazımdır.

1. $\beta = c$ için

$$K^{+} \qquad c\frac{dV}{dt}+\frac{1}{\rho}.\frac{dp}{dt}+c.g.\frac{dz}{dx}+c\frac{\lambda}{2D}V|V|=0 \tag{1.75}$$

$$C^{+} \qquad \frac{dx}{dt}=V+c \tag{1.76}$$

2. $\beta = -c$ için

$$K^{-} \qquad -c\frac{dV}{dt}+\frac{1}{\rho}.\frac{dp}{dt}-c.g.\frac{dz}{dx}-c\frac{\lambda}{2D}V|V|=0 \tag{1.77}$$

$$C^{-} \qquad \frac{dx}{dt}=V-c \tag{1.78}$$

Böylece; iki kısmi diferansiyel denklem yerine iki adet adi diferansiyel ((1.75), (1.77)) denklem elde edilmiş olur. Ancak (x-t) düzleminin her yerinde geçerli olan kısmi diferansiyel su darbesi denklemleri yerine elde edilen bu adi diferansiyel denklemler sadece (1.76) ve (1.78) denklemleri sağlandığında geçerli olmaktadırlar.
(x-t) düzleminde; (1.76) ve (1.78) denklemleri iki doğruyu tanımlamaktadır. Bu iki doğru " KARAKTERİSTİKLER" olarak adlandırılmaktadır.

Burada;

(1.75) ve (1.77) : Karakteristik denklemler

(1.76) ve (1.78) : Karakteristik eğriler veya karakteristikler

olarak ifade edilebilir.

Bu durumda; (1.75) denklemi (1.76) denkleminin belirlediği eğriler boyunca integre edilebilir.

Aynı şekilde (1.77) denkleminde (1.78) denkleminin belirlediği eğriler boyunca integre edilebilir.

$A.C<0$, $A\neq0$ olduğu için daima iki reel karakteristik mevcuttur.

Böylece (1.76) ve (1.78) eğrilerinin çizileceği (x-t) düzlemi faz düzlemi; bu eğrilerin üzerinde yürürlükte bulunan (1.75) ve (1.77) bağıntılarının çizileceği (P-V) düzlemi hodograf düzlemi; hodograf düzlemindeki eğriler (K^+) ve (K^-) karakteristikleri ve faz düzlemindeki eğriler Cauchy Riemann veya (C^+) ve (C^-) karakteristikleri olarak adlandırılacaktır.

Bundan sonra A ve B gibi iki noktadaki akım durumunun bilindiği kabul edilsin.

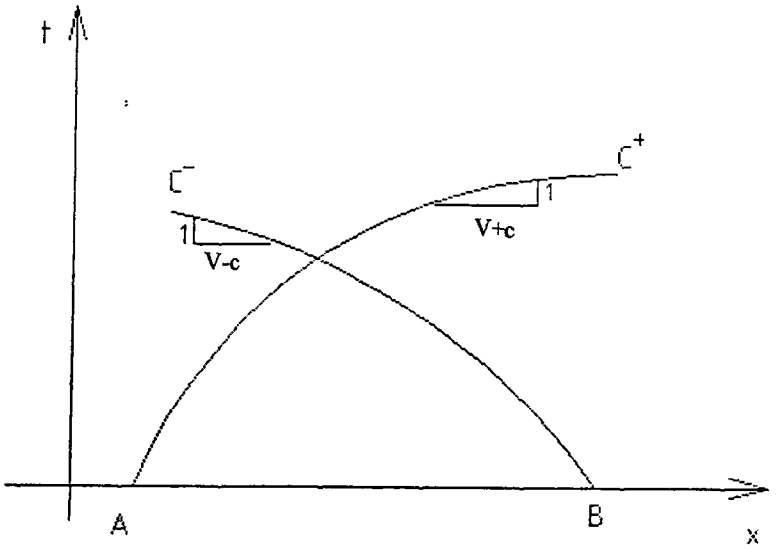
Buna göre;

X_A , t_A , V_A , P_A

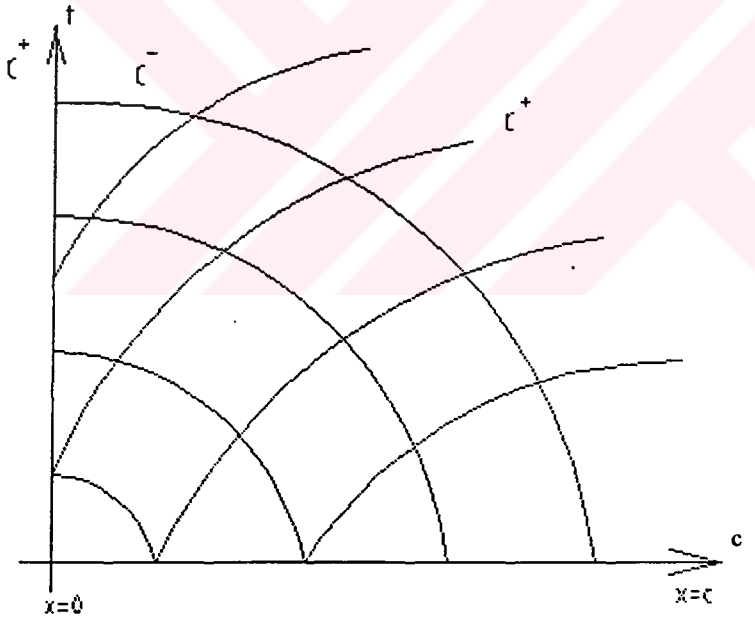
X_B , t_B , V_B , P_B

biliniyor demektir.

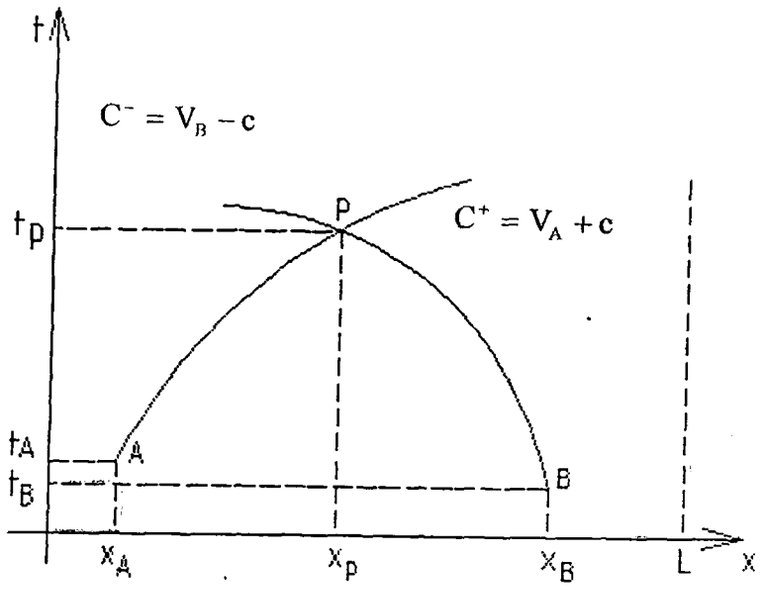
Dolayısıyla A ve B noktalarından geçen C^+ ve C^- karakteristiklerinin eğimleri bilinir. A noktasından geçen C^+ üzerinde (1.75) ve B noktasından geçen C^- üzerinde ise (1.77) bağıntısının yürürlükte olduğu yukarıda belirtilmişti. Buna göre bu iki karakteristiğin kesişme noktası olan P de her iki ifade geçerli olacaktır.(Şekil 1.17)



Şekil 1.15-



Şekil 1.16-



Şekil 1.17-

(1.54) ve (1.55) ifadelerinin kullanılması halinde;

$\beta = +\frac{1}{c}$ için

$$K^{+} \qquad \frac{dV}{dt} + \frac{g}{c}\frac{dh}{dt} - \frac{g}{c}V\frac{dz}{dx} + \frac{\lambda}{2D}|V|V = 0 \qquad (1.79)$$

$$C^{+} \qquad \frac{dx}{dt} = V + c \qquad (1.80)$$

$\beta = -\frac{1}{c}$ için

$$K^{-} \qquad \frac{dV}{dt} - \frac{g}{c}\frac{dh}{dt} + \frac{g}{c}V\frac{dz}{dx} - \frac{\lambda}{2D}|V|V = 0 \qquad (1.81)$$

$$C^- \qquad \frac{dx}{dt} = V - c \tag{1.82}$$

Genel halde C^+ ve C^- karakteristikleri eğriseldir. Zira "c" sadece boruya ve akışkana ait özelliklere bağlıysa da, dx/dt eğimi aynı zamanda V_i hızının fonksiyonudur. Dolayısıyla gözönüne alınan nokta, yani (x-t) değer çifti değiştikçe V_i ve neticede dx/dt de değişecektir. Bununla beraber A ve B noktalarının birbirinden çok uzak seçilmemesi halinde AP ve BP eğrileri yerine doğrular kabul edilebilir. Bu takdirde AP (C^- karakteristiği) için (1.80) denklemi A ile P arasında integre edilirse;

$$\frac{x_P - x_A}{t_P - t_A} = V_A + c \tag{1.83}$$

ve benzer şekilde;

$$\frac{x_P - x_B}{t_P - t_B} = V_B - c \tag{1.84}$$

elde edilir.

Bu iki denklem başlangıç değerleri kullanılarak, yani

$$V_A \cong \frac{V_A + V_P}{2} \tag{1.85}$$

$$V_B \cong \frac{V_B + V_P}{2} \tag{1.86}$$

kabul edilerek yazılmıştır. Buna göre (1.83) ve (1.84) denklemlerinden x_P ve t_P kolaylıkla belirlenebilir. Dolayısıyla V_P ve h_P de belirlenebildiği takdirde P noktası da

tamamen belirlenmiş olur. Bu amaçla da karakteristik denklemler (1.79-1.80-1.81-1.82) dt ile çarpılıp karakteristikler boyunca integre edilirlerse;

$$\int_A^P dV + \frac{g}{c}\int_A^P dh - \frac{g}{c}V\int_A^P \frac{dz}{dx}dt + \frac{\lambda}{2D}V|V|\int_A^P dt = 0$$

$$\int_B^P dV + \frac{g}{c}\int_B^P dh - \frac{g}{c}V\int_B^P \frac{dz}{dx}dt + \frac{\lambda}{2D}V|V|\int_B^P dt = 0$$

$$(V_P - V_A) + \frac{g}{c}(h_P - h_A) - \frac{g}{c}V_A\frac{\Delta z}{\Delta x}(t_P - t_A) + \frac{\lambda}{2D}V_A|V_A|(t_P - t_A) = 0 \qquad (1.87)$$

$$(V_P - V_B) - \frac{g}{c}(h_P - h_B) + \frac{g}{c}V_B\frac{\Delta z}{\Delta x}(t_P - t_B) + \frac{\lambda}{2D}V_B|V_B|(t_P - t_B) = 0 \qquad (1.88)$$

elde edilir. Bu denklemler yazılırken (1.85) ve (1.86) kabulünün yapılmış olduğuna, yani başlangıç değerlerinin kullanıldığına dikkat edilmelidir. (1.87) ve (1.88) bağıntılarındaki x_P ve t_P değerleri (1.83) ve (1.84) denklemleri yardımıyla belirlenmiş olduğuna göre bunlarda sadece h_P ve V_P bilinmemektedir, (1.87) ve (1.88) denklemleri bir defa taraf tarafa toplanır, bir defa taraf tarafa çıkartılırsa h_P ve V_P hemen bulunur.

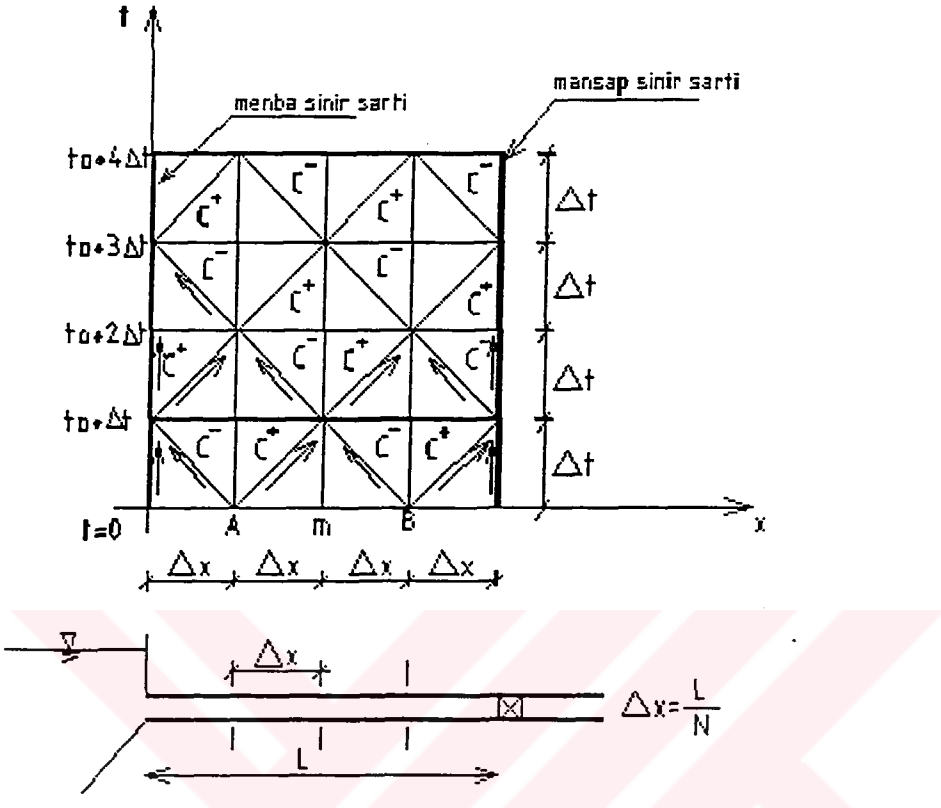
Madeni borularda;

$$V<<c$$

olduğundan ;

$$\frac{dx}{dt} = \pm c \qquad (1.89)$$

kabul edilebilir.



Şekil 1.18-

Görüldüğü üzere bu halde karakteristiklerin eğimi seçilen noktaya bağlı olmamakta, (x-t) düzleminin bütün noktalarında aynı değeri haiz olmaktadır. Ayrıca, daha önce de belirtildiği gibi, "c" sadece boru ve akışkana ait özelliklere bağlı olduğundan, bu özellikler değişmedikçe (bu tip borular tek karakteristikli borular olarak adlandırılır) C^+ ve C^- karakteristikleri birbirlerine paralel iki doğru ailesinden meydana gelir.
Bu son halde pratikte şöyle bir yol takip edilir:

Boru boyu L ile gösterildiği takdirde, boru n eşit parçaya bölünür. Başlangıçta kararlı rejim mevcut olduğundan t=0 için bütün x noktalarında, V_i, h_i büyüklükleri bilinir. Buna göre t=0 anı için; x noktalarından geçen pozitif ve negatif karakteristikler, başlangıç değerleri yardımıyla kolaylıkla çizilebilir. Madeni borular halinde bunların eğiminin

sabit edilebileceği yukarıda belirtilmiştir. Diğer taraftan boru eşit parçalara ayrıldığında, muhtelif noktalar arasındaki Δx uzunlukları da aynı olur ve bu halde Şekil 1.19'a göre;

$$\Delta t = c.\Delta x = \text{sabit} \tag{1.90}$$

elde edilir.

Bu arada karakteristik denklemler;

$$\Delta V + \frac{g}{c}\Delta h - \frac{g}{c} V \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{\lambda \Delta t}{2D} V|V| = 0 \tag{1.91}$$

$$\Delta x = c\Delta t \tag{1.92}$$

$$\Delta V - \frac{g}{c}\Delta h + \frac{g}{c} V \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{\lambda . \Delta t}{2D} V|V| = 0 \tag{1.93}$$

$$\Delta x = -c.\Delta t \tag{1.94}$$

Ayrıca;

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{c} \quad \text{ve} \quad \Delta x = \frac{L}{N} \tag{1.95}$$

dir.

$$(V_P - V_A) + \frac{g}{c}(h_P - h_A) - \frac{g}{c} V_A \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{\lambda . \Delta t}{2D} V_A|V_A| = 0$$

$$(V_P - V_B) + \frac{g}{c}(h_P - h_B) - \frac{g}{c} V_B \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{\lambda . \Delta t}{2D} V_B|V_B| = 0$$

ve

$$t_A = t_m = t_B = t_0$$

$$t_P - t_A = t_P - t_B = \Delta t$$

olduğu bilinmektedir. O halde bu denklemlerden faydalanarak Şekil 1.19'da herhangi bir t anında V_i ve h_i nasıl hesaplanabileceğini biraz daha açıklamaya çalışalım: Şekildeki 7,8,9, noktalarına ait (x_i , t_i) büyüklükleri kolayca bulunabilir. Bu halde $t_P - t_A = t_P - t_B = \Delta t$ olduğundan (1.91) ve (1.93) denklemlerinden örneğin 2 noktası için

$$h_2 = \frac{1}{2}\left[h_1 + h_3 + \frac{c}{g}(V_1 - V_3) - (V_1 + V_3)\mathrm{Sin}\theta.\Delta t + \frac{\lambda.c}{2gD}(V_3|V_3| - V_1|V_1|) \right] \qquad (1.96)$$

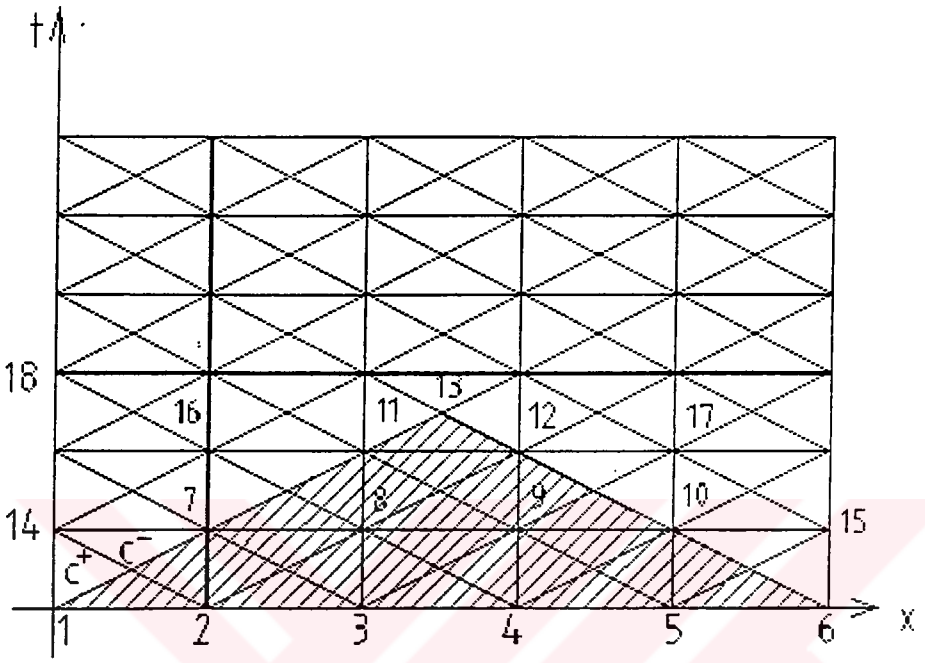
$$V_2 = \frac{g}{2c}\left[\frac{c}{g}(V_1 + V_3) + (H_1 - H_3) + (V_1 - V_3)\mathrm{Sin}\theta.\Delta t - \frac{\lambda.c}{2gD}(V_1|V_1| - V_3|V_3|) \right] \qquad (1.97)$$

elde edilir. Benzer şekilde 8,9,10 noktalarındaki durum 2.3,4,5,6 noktalarından faydalanılarak belirlenebilir. Bundan sonra 7 ve 9 noktaları yardımıyla 11, 8 ye 10 yardımıyla 12; son olarak da 11 ve 12 yardımıyla 13 belirlenir.

Görüldüğü üzere bu metod yardımıyla şekildeki taralı alan içinde düşen ve sınırlarına rastlayan noktalardaki akım durumu belirlenebilmektedir. Bu nedenle bu bölge 1-6 noktalarının etki bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgenin dışında kalan noktalardaki durumun belirlenebilmesi için başlangıç ve sınır şartlarından yararlanılması gerekir.

İlk olarak boru başlangıcında sabit seviyeli bir hazne bulunduğu düşünülsün. Bu enkesit içinde x_{14} ve t_{14} değerleri bilinmektedir. Ayrıca borunun sabit seviyeli bir hazne ile birleşmesi, girişteki yerel yük kayıpları ihmal edilmesi durumunda, bu en kesitteki

piyezometrik kotun zamana bağlı olmamasına ve dolayısıyla $h_1=h_{14}=...$ olmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla boru başlangıcına rastlayan enkesitte sadece V_{14} bilinmemektedir.



Şekil 1.19-

Diğer taraftan (14) noktası (2) noktasından çıkan C^- karakteristiği üzerinde bulunduğundan (1.88) bağıntısına göre;

$$(V_{14}-V_2)-\frac{g}{c}(h_{14}-h_2)+\frac{g}{c}V_2 Sin\theta\Delta t+\frac{\lambda}{2D}V_2|V_2|\Delta t$$

ve buradan V_{14} çözülürse

$$V_{14}=\frac{g}{c}\left[\frac{c}{g}V_2+(h_{14}-h_2)+V_2.Sin\theta.\Delta t-\frac{\lambda.c.V_2|V_2|}{2gD}\Delta t\right] \qquad (1.98)$$

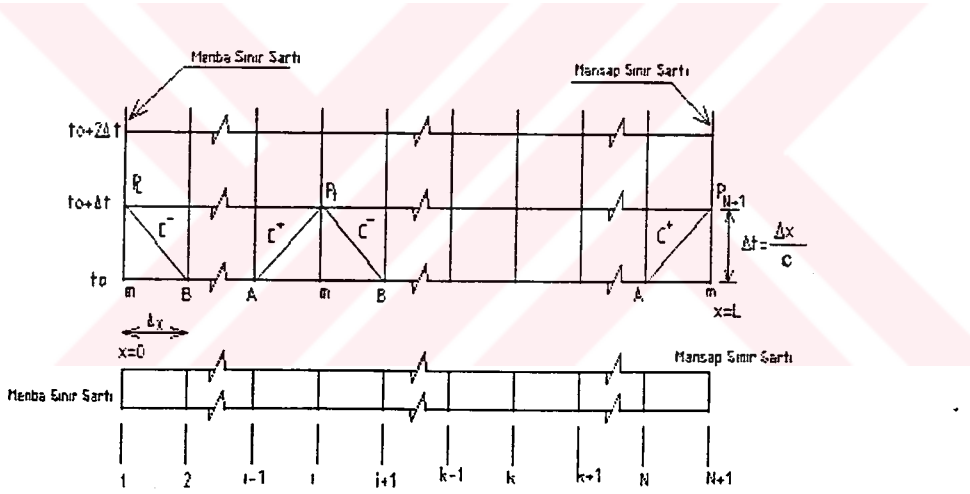
elde edilir.

Dolayısıyla böyle bir durumda başlangıç enkesitindeki kararsız akımda hemen belirlenebilmektedir. Bundan sonra (8) ve (14) noktaları yardımıyla (16) ve dolayısıyla (18) noktası belirlenir ve hesaplara bu şekilde devam edilir.

Sınır Şartları

$$K^{-}(V_P - V_B) - \frac{g}{c}(h_P - h_B) + \frac{g}{c} V_B \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{\lambda.\Delta t}{2D} V_B |V_B| = 0$$

$$K^{+}(V_P - V_A) - \frac{g}{c}(h_P - h_A) + \frac{g}{c} V_A \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{\lambda.\Delta t}{2D} V_A |V_A| = 0$$



Şekil 1.20-

Menbada uygulanacak denklem :

$$(K^{-})V_{P1} = V_B + \frac{g}{c}(h_{P1} - h_A) - \frac{g}{c} V_B \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda.\Delta t}{2D} V_B |V_B| \qquad (1.99)$$

Mansapta uygulanacak denklem :

$$(K^+)V_{P_{N-1}} = V_A - \frac{g}{c}(h_{P_{N-1}} - h_A) + \frac{g}{c}V_A\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_A|V_A| \qquad (1.100)$$

$$h_{P_{N-1}} = h_A - \frac{c}{g}(V_{P_{N+1}} - V_A) + V_A\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{c.\lambda.\Delta t}{g.2D}V_A|V_A| \qquad (1.101)$$

Boru hattı orta noktalarında :

$$(K^-)V_P = V_B + \frac{g}{c}(h_P - h_B) - \frac{g}{c}V_B\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_B|V_B|$$

$$(K^+)V_P = V_A - \frac{g}{c}(h_P - h_A) + \frac{g}{c}V_A\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_A|V_A|$$

$$h_P = \frac{1}{2}\left[\frac{c}{g}(V_A - V_B) + (h_B + h_A) + \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t(V_A + V_B) + \frac{c}{g}(C_{10} - C_{20})\right] \qquad (1.102)$$

$$C_{10} = \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_B|V_B| \qquad C_{20} = \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_A|V_A| \qquad (1.103)$$

$$(K^-)h_P = \frac{c}{g}(V_P - V_B) + h_B + V_B\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{c}{g}\frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_B|V_B|$$

$$(K^+)h_P = \frac{c}{g}(V_A - V_P) + h_A + V_A\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{c}{g}\frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_A|V_A|$$

$$V_P = \frac{1}{2}\left[(V_A + V_B) + \frac{g}{c}(h_A - h_B) + \frac{g}{c}(V_A - V_B)\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - (C_{10} + C_{20})\right] \qquad (1.104)$$

Rezervuar Hali

$h=h_0$ her zaman belli ise;

$$(K^-)V_P = V_B + \frac{g}{c}(h_P - h_B) - \frac{g}{c}V_B\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_B|V_B|$$

$$V_P = \frac{g}{c}h_P + V_B - \frac{g}{c}h_B - \frac{g}{c}V_B\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_B|V_B|$$

$$C_2 = \frac{g}{c} \qquad (1.105)$$

$$C_1 = V_B - \frac{g}{c}h_B - \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_B|V_B| - \frac{g}{c}V_B\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t \qquad (1.106(a))$$

veya

$$C_1 = V_B - C_2h_B - \frac{\lambda.\Delta t}{2D}V_B|V_B| - C_2V_B\frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t \qquad (1.106(b))$$

$$V_P = C_1 + C_2h_P \qquad (1.107)$$

Burada $h_P = h_0 = h_{rezzervuar}$ dir. Ve h_B ise enerji kaybı çıkartılarak bulunur.

$$Sin\alpha = -\frac{\Delta z}{\Delta x} \text{ ise} \qquad (1.108)$$

$$C_1 = V_B - C_2h_B + C_2.\Delta t.Sin\alpha - \frac{\lambda}{2D}\Delta tV_B|V_B| \qquad (1.109)$$

olur. Eğer V_P biliniyorsa;

$$(K^-)h_P = \frac{c}{g}(V_P - V_B) + h_B + V_B \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t + \frac{c}{g}\frac{\lambda.\Delta t}{2D} V_B|V_B|$$

$$E_1 = -\frac{c}{g}V_B + h_B - V_B.\Delta t.\mathrm{Sin}\alpha + \frac{c}{g}\frac{\lambda.\Delta t}{2D} V_B|V_B|$$

$$h_P = \frac{V_P}{C_2} + E_1 \qquad (1.110)$$

Mansapta ise

$$V_P = V_A - \frac{g}{c}(h_P - h_A) + \frac{g}{c}V_A \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda}{2D}\Delta t V_A|V_A|$$

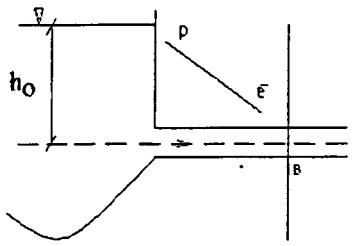
$$V_P = -\frac{g}{c}h_P + V_A + \frac{g}{c}h_A + \frac{g}{c}V_A \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda}{2D}\Delta t V_A|V_A|$$

$$C_4 = \frac{g}{c} \qquad (1.111)$$

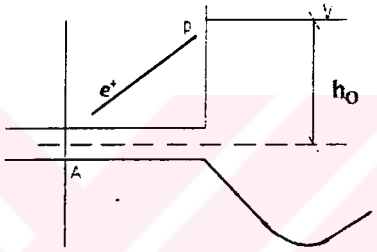
$$C_3 = V_A + C_4 h_A + C_4 V_A \frac{\Delta z}{\Delta x}\Delta t - \frac{\lambda}{2D}\Delta t V_A|V_A| \qquad (1.112)$$

$$V_P = C_3 - C_4 h_P \qquad (C_4=C_2) \qquad (1.113)$$

olur.



Şekil 1.21- Menbada Rezervuar



Şekil 1.22- Mansapta Rezervuar

Boru İçerisinde Vana veya Orifis Olması Hali

Bir boru hattının iç kısmında bir orifis veya vana bulunması halinde, bu orifis veya vanadan önce ve sonraki boru kesitleri bir sınır şartı olarak ele alınır. Bu durumda vanada meydana gelen yersel yük kaybı önemli bir yekün katacağından ihmali büyük bir hataya sebep olabilir.

Bundan dolayı vananın her iki tarafındaki yükler birbirine eşit değildir.

Burada dört bilinmeyen vardır, dört bilinmeyenin çözülebilmesi için dört denkleme ihtiyacımız olacaktır, o halde bunlar Şekil (1.23) olan da görüldüğü üzere

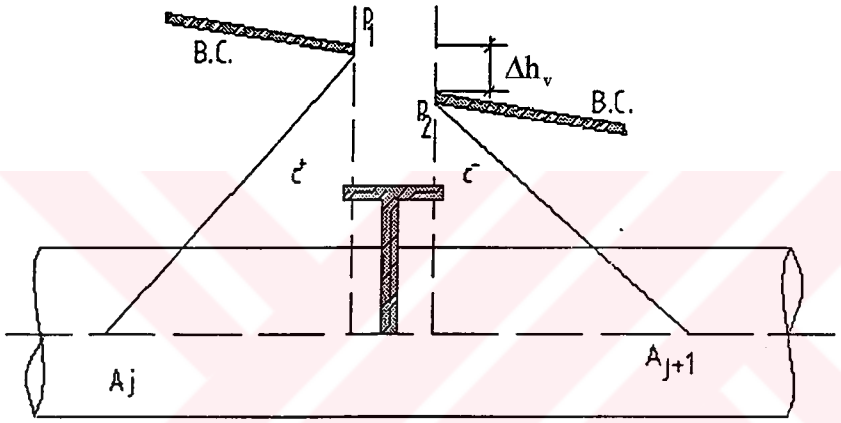
$$K^-, V_{P_2} = C_1 + C_2 h_{P_2} \quad \text{(Karakteristik denklemden)} \qquad (1.114)$$

$$K^+, V_{P_1} = C_3 - C_4 h_{P1} \quad \text{(Karakteristik denklemden)} \qquad (1.115)$$

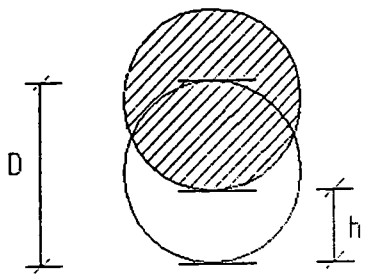
$$V_{P_a} . A_J = V_{P_2} . A_{J+1} \quad \text{(Süreklilik denkleminden)} \qquad (1.116)$$

$$h_{P_1} = h_{P_2} + \Delta h_V \quad \text{(Enerji denkleminden)} \qquad (1.117)$$

İşte bu dört denklem müşterek olarak çözülür ve $V_{P_1}, V_{P_2}, h_{P_1}, h_{P_2}$ bulunur.



Şekil 1.23-



Şekil 1.24-

Tablo 1.1

Açıklık yüzdesi	$1/K_L$	K_L
100	5,270	0,19
90	2.500	0,40
80	1.250	0,80
70	0.625	1,60
60	0.333	3,00
50	0.179	5,59
40	0.100	10,00
30	0.0556	17,99
20	0.0313	31,95
10	0.0167	59,88
0	0.0000	

Vana kaybı;

$$\Delta h_V = K_L \frac{V_{P_2}^2}{2g} \tag{1.118}$$

Vana kaybı katsayısı (K_L) değerleri açıklık yüzdesine göre tablo (1.1)'de verilmiştir. Burada ara değerler için (enterpolasyon için);

$$K_{Li} = K_{Li-1} - \frac{(A_{i-1} - A_i)(K_{Li-1} - K_{Li+1})}{A_{i-1} - A_{i+1}} \tag{1.119}$$

formülü verilebilir.

Aynı çaplı borular için ortak çözümden $V_{P_1}^{\ 2} + aV_{P_2} + b = 0$ gibi ikinci derece denklem ortaya çıkar. Ve bunun (+) çözümü göz önüne alınırsa;

$$V_{P_1} = V_{P_2} = \frac{B}{2K_L}\left(1 - \sqrt{1 + \frac{4c.K_L}{B^2}}\right) \tag{1.120}$$

$$B = 2g\left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_4}\right) \tag{1.121}$$

$$C = 2g\left(\frac{C_1}{C_2} + \frac{C_3}{C_4}\right) \tag{1.122}$$

Eğer adım yönü tersine dönmüş ise (-) göz önüne alırız.

$$V_{P_1} = V_{P_2} = \frac{B}{2K_L}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{4c.K_L}{B^2}}\right) \tag{1.123}$$

İkinci olarak borunun mansap ucunda bir vana bulunduğu ve bunun bir orifis gibi çalıştığı kabul edilecektir. Buna göre kararlı rejimde

$$A_0.V_0 = (C.A_V)_0.\sqrt{2gh_0}$$

ve kararsız rejimde, C debi katsayısını göstermek üzere

$$A.V_P = (C.A_V)_0.\sqrt{2gh_P}$$

yazılabilir. Bu iki ifade taraf tarafa oranlanırsa;

$$\frac{V_P}{V_0} = \frac{(C.A_V)}{(C.A_V)_0}\sqrt{\frac{h_P}{h_0}} = \tau\sqrt{\frac{h_P}{h_0}} \qquad (1.124)$$

bulunur. Burada τ, boyutsuz vana açıklığını göstermektedir. Ve genellikle zamanın fonksiyonu olarak verilmiştir. Kararlı rejimde τ=1; vananın tam kapalı olması halinde τ=0 olur. τ, vana kapanma kanunu t_c ile tam kapanma için gereken zaman gösterildiği takdirde;

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^m \qquad (1.125)$$

Debinin lineer olarak arttırılması veya azalması, kapanma veya açılma hızının sabit tutulmasıyla olur. Halbuki pratikte açısal hız sabit tutulur. Muhtelif tesislerde yapılan ölçümlere göre, kapanma sonrasında, lineer hale nazaran daha yavaş kapanma olmakta ve dolayısıyla pratikte elde edilen su darbesi, hesaplanan aşırı basınçlardan daha az olmaktadır.

Kapanmanın takriben %60' ı tamamlandıktan sonra, kapanma hızlanmakta ve dolayısıyla hesaplanan değerlerden daha büyük aşırı basınçlar meydana gelmektedir. Bu durum vananın takriben %10 açık kalmasına kadar devam etmektedir.

Benzer durum açılma hali için de söz konusudur ve başlangıçta lineer açılmaya nazaran daha büyük aşırı basınç doğar. Buna karşılık açılmanın son zamanlarında meydana gelen aşırı basınç hesaplara göre bulunan değerden daha az olur.

Bununla beraber hesaplar sırasında, açısal hızın lineer değişmesi halinde debinin de lineer değiştiği kabul edilir; buna göre kapanma halinde debinin

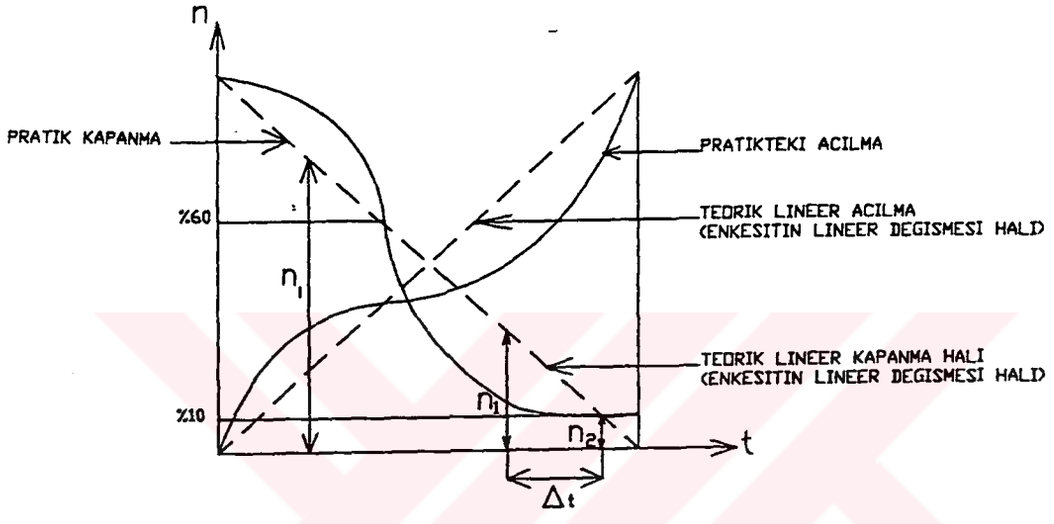
$$Q = Q_0 - n.\Delta t$$

ve açılma halinde

$$Q = A'\Delta t$$

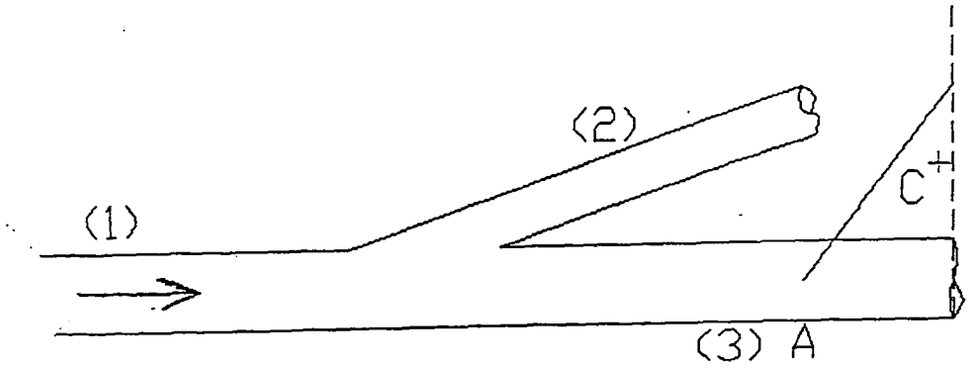
$$\Delta t = 2.\frac{L}{c} = \text{Allievi zamanı}$$

bağıntılarına göre değiştiği kabul edilebilir.



Şekil 1.25-

Tamamen Kapalı Uç Hali



Şekil 1.26-

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

(3) Borusunda V_0=0 dır. O halde

$$(K^+)V_P = C_4(h_A - h_P) \tag{1.126}$$

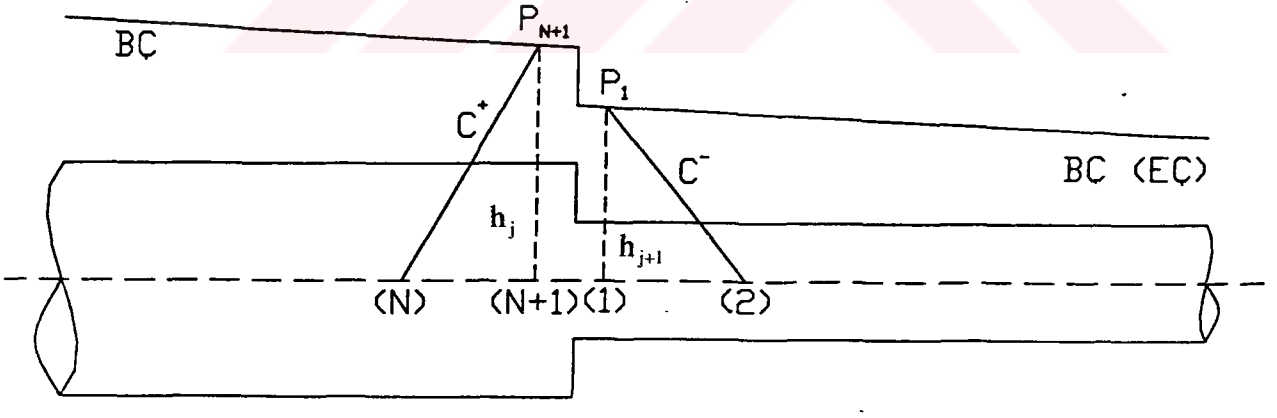
veya

$$C_4 h_P = C_4 h_A - V_P$$

$$(K^+)h_P = h_A - \frac{1}{C_4} V_P \tag{1.127}$$

dır. Süreklilik denklemine göre $V_P.A$=0, V_P=0 olduğuna göre h_P=h_A olur.

Boru Çapının Değişmesi Hali



Şekil 1.27- Değişik çaplı seri bağlı boru hali

$$h_j = h_{j+1} + \Delta h_d \quad \text{den veya} \quad h_{P_{N+1}} = h_{P_1} + \Delta h_d \qquad (1.128)(1)$$

$$\Delta h_d = K_d \frac{V_{j+1}^2}{2g} \text{ yersel yük kaybı } \Delta h_d = K_d \frac{V_{P_1}^2}{2g}$$

$$A_j\left(V_j\right)_{N+1} = A_{j+1}\left(V_{j+1}\right)_1 \quad \text{den veya} \quad A_j\left(V_{P_{N-1}}\right) = A_{j+1}\left(V_{P_1}\right) \qquad (1.129)(2)$$

$$(K^+)V_{P_{N+1}} = C_3 - C_4 h_{P_{N+1}} \qquad (1.130)(3)$$

$$(K^-)V_{P_1} = C_1 + C_2 h_{P_1} \qquad (1.131)(4)$$

Bu dört denklemden bilinmeyen $h_{P_{N+1}}$, h_{P_1}, $V_{P_{N+1}}$, V_{P_1} çözümlenir. Genellikle yersel yük kaybı ihmal edilir bu durumda denklemler;

$$h_{P_{N+1}} = h_{P_1} \qquad (1)$$

$$A_j\left(V_{P_{N+1}}\right) = A_{j+1}\left(V_{P_1}\right) \qquad (2)$$

$$V_{P_{N+1}} = C_3 - C_4 h_{P_{N+1}} \qquad (3)$$

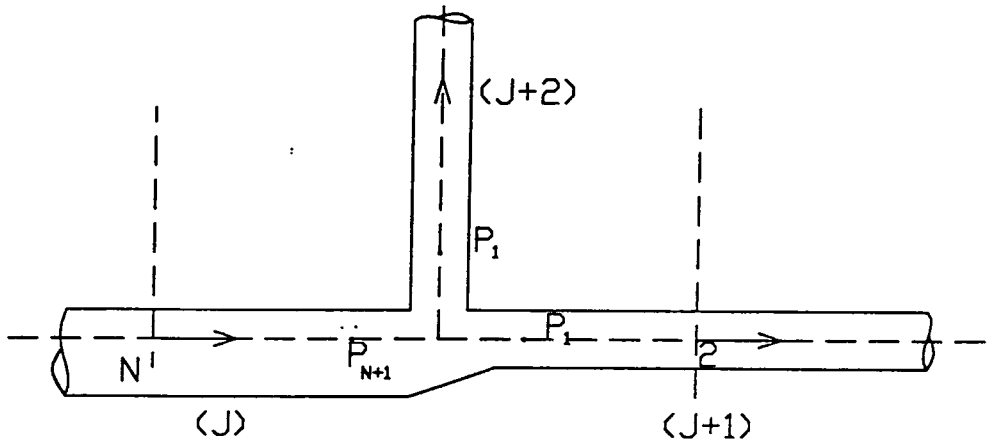
$$V_{P_1} = C_1 + C_2 h_{P_1} \qquad (4)$$

olur. Bu dört denklemin aynı anda çözümünden

$$h_{P_{N+1}} = h_{P_1} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j} \qquad (1.132)$$

elde edilir.

Borunun Ayrım Hali



Şekil 1.28-

K^+ (j) borusu için $V_{P_{N+1,j}} = C_{3,j} - C_{4,j} h_{P_{N+1,j}}$ (1.133) (1)

K^- (j+1) borusu için $V_{P_{1,j+1}} = C_{1,j+1} + C_{2,j+1} h_{P_{1,j+1}}$ (1.134) (2)

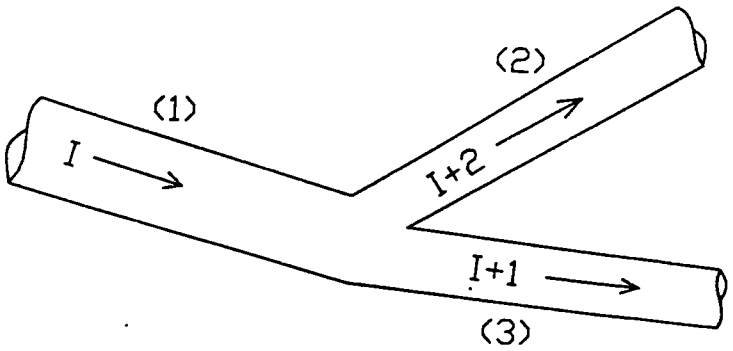
K^- (j+2) borusu için $V_{P_{1,j+2}} = C_{1,j+2} + C_{2,j+2} h_{P_{1,j+2}}$ (1.135) (3)

Süreklilik denklemi $V_{P_{N+1,j}} . A_j = V_{P_{1,j+1}} . A_{j+1} + V_{P_{1,j+1}} . A$ (1.136) (4)

Enerji denklemi $h_{P_{N+1,j}} = h_{P_{1,j+1}} = h_{P_{1,j+2}}$ (1.137) (5) (6)

$V_{P_{N+1,j}}$, $V_{P_{1,j+1}}$, $V_{P_{1,j+2}}$, $h_{P_{N+1,j}}$, $h_{P_{1,j+1}}$ ve $h_{P_{1,j+2}}$ bilinmeyenleri altı denklemden çözümlenir.

Örnek olarak boru bileşim noktasındaki sınır şartlarını bilgisayara verecek şekilde yazalım.



Şekil 1.29-

Pompa Hali (Santrifüj Pompalar)

Pompanın karakteristik denklemi

$$h_m = f(Q)$$

olduğuna göre

$$h_m = aQ^2 + bQ + C' \qquad (1.138)$$

$$h_m = a\left(A.V_{P_i}\right)^2 + b\left(A.V_{P_i}\right)^2 + C'$$

$$K_1 = aA,\ K_2 = b.A$$

$$h_m = K_1 V_{P_i}^2 + K_2 V_{P_i}^2 + C' \qquad (1.139)$$

K- karakteristik denklem

$$V_{P_1} = C_1 + C_2 h_{p_1} \qquad (1.140)$$

$$h_{P_1} = \frac{V_{P_1} - C_1}{C_2}$$

Pompanın manometrik basma yüksekliği, pompanın hemen solundaki ve sağındaki basınç yüksekliklerinin farkına eşittir,yani;

$$h_m = h_1 - h_N$$

dir,o halde;

$$h_L = \left(\frac{P}{\gamma}\right)_L \; ; \; h_N = \left(\frac{P}{\gamma}\right)_N = C; C = \frac{P_{at}}{\gamma}$$

$$h_1 = h_m + h_N$$

$$h_{P_1} = h_m + h_{P_N}$$

$$h_{P_1} = h_m + C \qquad (1.141)$$

$$\frac{V_{P_1} - C_1}{C_2} = K_1 V_{P_1}^2 + K_2 V_{P_1}^2 + C' + C$$

$$V_{P_1} - C_1 = C_2K_1V_{P_1}^2 + C_2K_2V_{P_1} + C_2(C'+C)$$

$$C_2K_1K_{P_1}^2 + (C_2K_2 - 1)V_{P_1} + C_2(C'+C) + C_1 = 0 \qquad (1.142)$$

$$B = \frac{C_2K_2 - 1}{C_2K_1}$$

$$C'' = \frac{C_2(C'+C) + C_1}{C_2K_1}$$

$$V_{P_1}^2 + BV_{P_1} + C'' = 0 \qquad (1.143)$$

$$V_{P_1 1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C''}}{2}$$

$$V_{P_1 1,2} = \frac{1}{2}B\left[-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4C''}{B^2}}\right] \qquad (1.144)$$

$$C_2 = [+],\ K_2 = [-],\ K_1 = [-],\ B = \frac{[-]-[+]}{[-]} = [+],\ C = [+],\ C' = [+]$$

C_1= [Belli değil], C"=[Belli değil], Δ=[+]

Akımın (+) ve (-) olabilme durumlarını sağlayan işaretlerden, sadece (+) olanı uygundur, çünkü bu bize (1.144) denklemi hem negatif, hem de pozitif sonuç verebilmektedir. Eğer pompanın çıkışında, çekvalf var ise (sadece basma istikametinde akıma imkan veren ve ters yöndeki akımı önleyen) ters yöne akış olamayacağından, çözümde (-) sonuç çıkarsa ki bu akımın ters olacağını gösterir. Bu takdirde çek valfden (kontrol vanası) dolayı V_{P1}=0 olur. O halde şimdi topluca sınır şartlarını yazarsak

$$(K^-)V_{P_1 j+1} = C_1 + C_2 h_{P_1} \qquad (1.145) \qquad (1)$$

$$(K^+)V_{P_N j} = C_3 - C_4 h_{P_N j} \qquad (1.146) \qquad (2)$$

Süreklilik $$V_{P_N j}.A_j = V_{P_1 j+1}.A_{j+1} \qquad (1.147) \qquad (3)$$

Enerji $$h_{P_N j+1} = H_m + h_{P_N j} \qquad (1.148) \qquad (4)$$

Karakteristik $$H_m = K_1 V_{p_1 j+1}{}^2 + K_2 V_{P_1 j} + C' \qquad (1.149) \qquad (5)$$

Hesaplama Sırası;

1. t_0=0 anında boru boyunca seçilen noktalardaki kararlı akıma ait basınç ve hız değerlerini bulunuz.

2. Verilen mesnetlenme durumuna göre dalga hızını ilgili denklemden hesaplayınız.

3. Kararlı akım hızı V_0 ve 2. şıkta hesap edilen dalga hızını kullanarak seçilen Δx aralığına göre

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{V + c} \tag{1.150}$$

eşitliğinden gerekli zaman aralığını hesaplayınız (Eğer borunun çap ve et kalınlığı değişmiyorsa buna tek karakteristikli boru denir ve dalga hızı sabittir).

NOT: Boru hattının seri halinde bağlı değişik çaplı borulardan meydana gelmesi halinde her bir borudaki dalga hızı birbirinden farklı olacaktır. Buna göre her bir borudaki (1.150) denklemine göre bulunan zaman aralığı süresi de birbirinden farklı olacaktır. Her bir borudaki zaman aralıklarının birbirine eşitleyebilmek için yani bunu elimine edebilmek için tüm boru hattı boyunca aynı değerde zaman aralığı tayin etmek gerekir. Bu da aşağıdaki şekilde yapılır. Burada,c_j ; ilgili borudaki dalga hızıdır.

$$\Delta t_j = \frac{\Delta x}{V_j + c_j} = \frac{L_i}{(V+c)_j N} \tag{1.151}$$

$$\Delta t \le (\Delta t_j)_{min} \tag{1.152}$$

4. t_0 zaman seviyesinde ızgara kesim noktalarında kararlı akım şartlarını kullanarak, iç ağ kesim noktalarında $t_0+\Delta t$ zaman seviyesindeki hız ve basınç yükü değerlerini (1.102), (1.104) denklemleriyle, sağ ve soldaki sınır değerlerini de (1.106(a)), (1.106(b)) ve (1.100) (1.101) denklemlerinden uygun olanıyla hesap ediniz.

5. $t_0 + \Delta t$ zaman seviyesine ait bütün değerler hesaplandıktan sonra, şimdi bu değerleri kullanarak 4. şıktaki işlemi aynı şekilde $t_0+2\Delta t$ zaman seviyesindeki değerlerin hesabı için tekrarlayınız ve bu işlemi arzu ettiğiniz bir zaman süresine kadar yürütünüz.

6. Maksimum ve minimum basınçları tayin ediniz.

7. Kavitasyon olayının meydana gelip gelmediğini tahkik ediniz.

1.3.2.5 Kararsız Akımlarda Eşdeğer Boru Kavramı

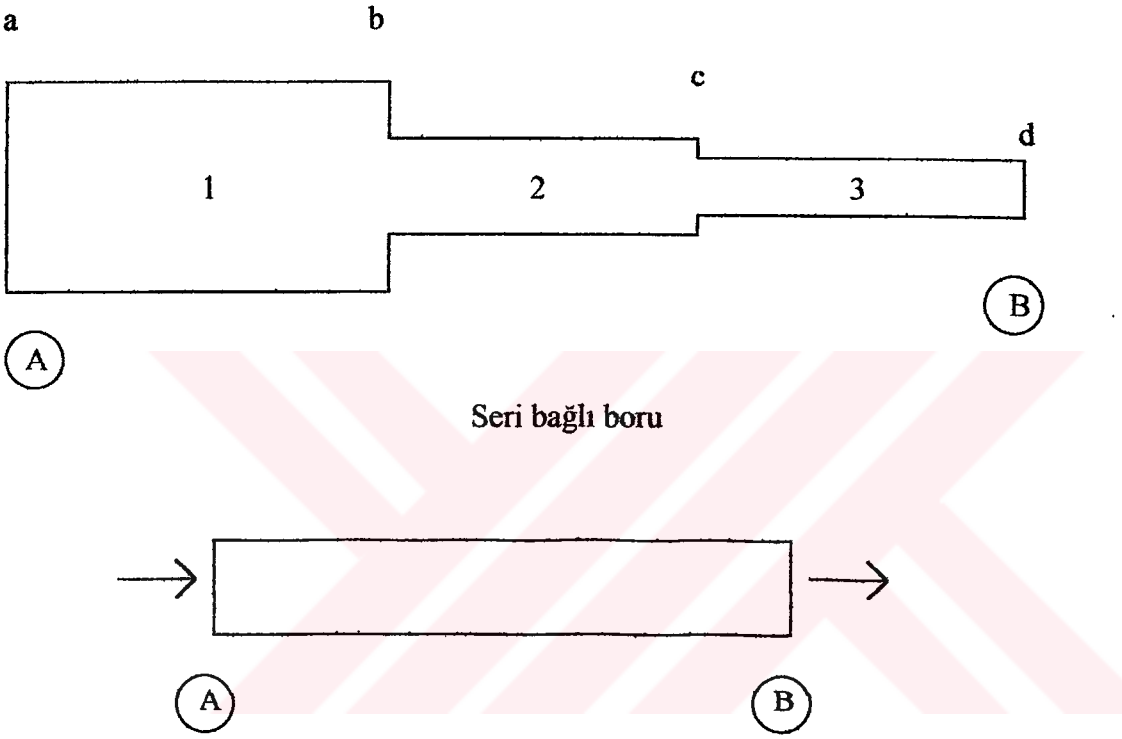
1.3.2.5.1 Seri Halinde Bağlı Borularda Kararsız Akım

Uygulamada, genellikle, değişik çaplı boruların birbiri ardı sıra seri halinde veya paralel olarak bağlanmasından meydana gelen karışık boru sistemleri ile karşılaşılır.
Bu tip karışık boru sistemlerindeki akım sorunlarının çözümü, genel olarak, seri ve paralel bağlı boru kısımlarının eşdeğer tek bir boruya çevrilmesi suretiyle kolayca yapılabilir. Burada seri bağlı bir boru hattının dinamik bakımdan eşdeğer tek bir boruya indirgenmesi ve böylece bir tek borulara ait analiz yöntemlerinin uygulanabileceği açıklanacaktır.

Eşdeğer boru kavramları mühendislerce çok sık kullanılan bir yöntemdir.Bu yöntemle, herhangi bir yersel kaybı veya verilen herhangi bir boruyu, uygun çaplı herhangi bir diğer boru ile yer değiştirmek mümkündür.
Bu durumda yapılacak yegane şey, hem gerçek sistemin hem de eşdeğer sistemin debi değerinde aynı sürtünme kayıplarına sahip olmasından ibarettir.

Eşdeğer boru yönteminin kararsız akım problemlerine uygulanmasında, eşdeğerlilik kavramı sürtünme etkileri ile birlikte dinamik etkiyi de ihtiva edilmelir. Yani ,gerçek ve eşdeğer sistemin atalet etkileri aynı olmalıdır.

Şekil 1.30' daki gibi değişik çaplı üç borudan ibaret bir seri bağlı boruyu ele alalım: Şimdi seri halinde bağlı değişik çaplı borulardan ibaret bir boru hattının, tek çaplı eşdeğer boruya dönüştürülebilmesi için gerekli bağıntılar aşağıdaki şekilde belirtilebilir. Bunun için, genel bir model olarak üç borudan ibaret seri bağlı bir boru sistemini ele alıp, buna eşdeğer tek çaplı bir boruyu seçelim.



Seri bağlı boru

Eşdeğer boru

Şekil 1.30-

Birinci şart, her iki sistemden de aynı debi geçerken A ve B arasındaki sürtünme yük kaybının aynı olmasıdır.Buna göre;

$$h_{f_1} + h_{f_2} + h_{f_3} = h_{f_{A-B}} = h_{f_{eş}}$$

$$K\frac{\lambda_1 L_1}{D_1^5}Q^2 + K\frac{\lambda_2 L_2}{D_2^5}Q^2 + K\frac{\lambda_3 L_3}{D_3^5}Q^2 = K\frac{\lambda_{eş} L_{eş}}{D_{eş}^5}Q^2$$

Burada; $K = 16/(\pi^2 2g)$ sabit sayı olup, Darcy-Weisbach denkleminin debi cinsinden yazılması halinde ve $g = 9.81$ alındığında $K = 0.0826$ dır. Seri halindeki borunun her bir kesitinden geçen debi, herhangi anda aynı olduğundan, eşdeğer sürtünme kaybı bağlantısı yukarıdaki eşitlikden;

$$\frac{\lambda_1 L_1}{D_1^5} + \frac{\lambda_2 L_2}{D_2^5} + \frac{\lambda_3 L_3}{D_3^5} = \frac{\lambda_{eş} L_{eş}}{D_{eş}^5}$$

Şeklinde yazılabilir. Seri halinde bağlı "n" boru için bu ifade daha genel bir şekilde;

$$\left(\frac{\lambda L}{D^5}\right)_{eş} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\lambda_i L_i}{D_i^5}\right) \qquad (1.153)$$

olarak yazılabilir.

Şimdi, iknci şart olarak seri bağlı boru sisteminden geçen debinin dinamik davranışını göz önüne alarak, kararsız akım denklemlerinin her bir boru kesimi için yazarsak;

$$\frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_b}{\gamma} - h_{f_1} = \frac{L_1}{g}\frac{dV_1}{dt} = \frac{L_1}{g}\frac{1}{A_1}\frac{dQ}{dt}$$

$$\frac{p_b}{\gamma} - \frac{p_c}{\gamma} - h_{f_2} = \frac{L_2}{g}\frac{dV_2}{dt} = \frac{L_2}{g}\frac{1}{A_2}\frac{dQ}{dt}$$

$$\frac{p_c}{\gamma} - \frac{p_d}{\gamma} - h_{f_3} = \frac{L_3}{g}\frac{dV_3}{dt} = \frac{L_3}{g}\frac{1}{A_3}\frac{dQ}{dt}$$

Bu üç eşitliği taraf tarafa toplarsak;

$$\frac{p_a}{\gamma}-\frac{p_d}{\gamma}-(h_{f_1}+h_{f_2}+h_{f_3})=\left[\frac{L_1}{gA_1}+\frac{L_2}{gA_2}+\frac{L_3}{gA_3}\right]\frac{dQ}{dt} \qquad (a)$$

Şimdi, aynı şekilde, kararsız akım denklemini eşdeğer boru için yazalım;

$$\frac{p_A}{\gamma}-\frac{p_B}{\gamma}-h_{f_{eş}}=\frac{L_{eş}}{g}\frac{dV_{eş}}{dt}=\frac{L_{eş}}{g}\frac{1}{A_{eş}}\frac{dQ}{dt} \qquad (b)$$

$p_a = p_A$ ve $p_d = p_B$ ve sürtünme kaybı eşdeğeri $h_{f_{eş}} = h_{f_1} + h_{f_2} + h_{f_3}$ olduğundan (a) ve (b) bir arada değerlendirilmesi ile;

$$\frac{L_{eş}}{A_{eş}}=\frac{L_1}{A_1}+\frac{L_2}{A_2}+\frac{L_3}{A_3}$$

olduğu sonucuna varılır ve daha genel şekilde;

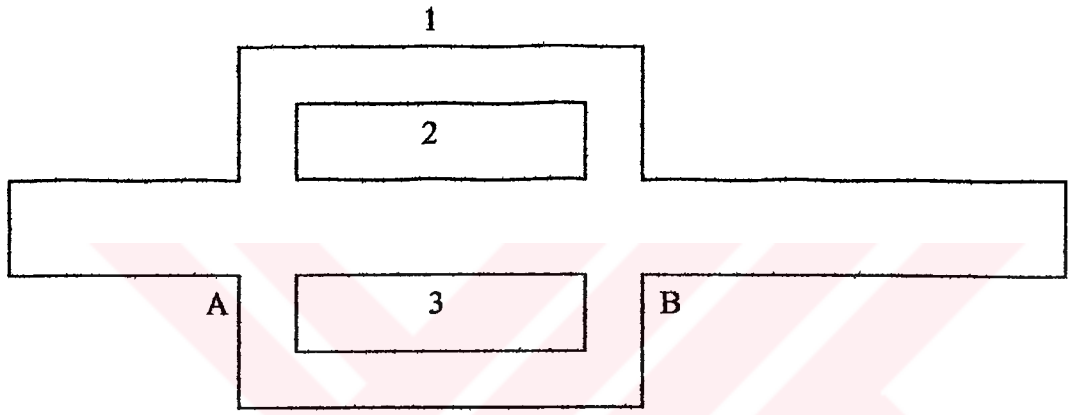
$$\left(\frac{L}{D^2}\right)_{eş}=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{L_i}{D_i^{\,2}}\right) \qquad (1.154)$$

yazılır. Burada yine n, seri sistemdeki bağlı boru sayısını ifade eder. Eşdeğer boru için keyfi olarak alınan bir λ değeri ile birlikte (1.153) ve (1.154) denklemlerinin, eşdeğer boru uzunluğu ve çapı için çözmek mümkündür. Eşdeğer boru bulunduktan sonra, boruların belirlenmesi için kararsız akım denklemi kullanılabilir.

1.3.2.5.2 Paralel Bağlı Borularda Kararsız Akım

Paralel bir boru sistemi için eşdeğer boru, seri borulardakine benzer işlemler kullanılarak elde edilir.

Yine üç borudan ibaret bir sistemi göz önünde alalım ve sonra bu sonuçları herhangi bir sayıdaki boru sistemine genelleştirelim.(Şekil 1.31)



Paralel sistem

Eşdeğer boru

Şekil 1.31-

Eşdeğer sürtünme kaybı sisteminden;

$$h_{f_1} = h_{f_2} = h_{f_3} = h_{f_{eş}}$$

yazılabilir

Bu bağlantıdan;

$$K\frac{\lambda_1 L_1}{D_1^{\,5}}Q_1^{\,2} = K\frac{\lambda_2 L_2}{D_2^{\,5}}Q_2^{\,2} = K\frac{\lambda_3 L_3}{D_3^{\,5}}Q_3^{\,2} = K\frac{\lambda_{eş} L_{eş}}{D_{eş}^{\,5}}Q_{eş}^{\,2} \qquad (1.155)$$

yazılabilir.

Burada; $Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{eş}$ dir.

(1.155) denklemini yukarıdaki süreklilik denkleminde yerine koyarak;

$$\left[\frac{\lambda_{eş} L_{eş}}{D_{eş}^{\,5}}\right]^{1/2}\left[\frac{D_1^{\,5}}{\lambda_1 L_1}\right]^{1/2} Q_{eş} + \left[\frac{\lambda_{eş} L_{eş}}{D_{eş}^{\,5}}\right]^{1/2}\left[\frac{D_2^{\,5}}{\lambda_2 L_2}\right]^{1/2} Q_{eş} + \left[\frac{\lambda_{eş} L_{eş}}{D_{eş}^{\,5}}\right]^{1/2}\left[\frac{D_3^{\,5}}{\lambda_3 L_3}\right]^{1/2} Q_{eş} = Q_{eş} \qquad (1.156)$$

Her iki tarafı $Q_{eş}$ ile böler ve neticeyi düzenlersek;

$$\left[\frac{D_{eş}^{\,5}}{\lambda_{eş} L_{eş}}\right]^{1/2} = \left[\frac{D_1^{\,5}}{\lambda_1 L_1}\right]^{1/2} + \left[\frac{D_2^{\,5}}{\lambda_2 L_2}\right]^{1/2} + \left[\frac{D_3^{\,5}}{\lambda_3 L_3}\right]^{1/2}$$

elde edilir. Veya paralel bağlı n sayıdaki boru için genelleştirirsek;

$$\left(\frac{D_{eş}^{\,5}}{\lambda_{eş} L_{eş}}\right)^{1/2} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{D_i^{\,5}}{\lambda_i L_i}\right)^{1/2} \qquad (1.157)$$

Şimdi paralel sistemin dinamik davranışını göz önune alarak, herhangi bir boru için bir dinamik denklemleri yazalım:

$$\frac{p_A}{\gamma} - \frac{p_B}{\gamma} - h_{f_1} = \frac{L_1}{g}\frac{dV_1}{dt} = \frac{L_1}{g}\frac{1}{A_1}\frac{dQ_1}{dt}$$

$$\frac{p_A}{\gamma} - \frac{p_B}{\gamma} - h_{f_2} = \frac{L_2}{g}\frac{dV_2}{dt} = \frac{L_2}{g}\frac{1}{A_2}\frac{dQ_2}{dt}$$

$$\frac{p_A}{\gamma} - \frac{p_B}{\gamma} - h_{f_3} = \frac{L_3}{g}\frac{dV_3}{dt} = \frac{L_3}{g}\frac{1}{A_3}\frac{dQ_3}{dt}$$

$$\frac{p_A}{\gamma} - \frac{p_B}{\gamma} - h_{f_{eş}} = \frac{L_{eş}}{g}\frac{dV_{eş}}{dt} = \frac{L_{eş}}{g}\frac{1}{A_{eş}}\frac{dQ_{eş}}{dt}$$

Eşdeğer sürtünme kaybından ötürü, yukarıdaki denklemlerin sol tarafı birbirine eşittir. Böylece herbir denklemin sağ tarafı da birbirine eşit olacağından;

$$\frac{L_1}{A_1}\frac{dQ_1}{dt} = \frac{L_2}{A_2}\frac{dQ_2}{dt} = \frac{L_3}{A_3}\frac{dQ_3}{dt} = \frac{L_{eş}}{A_{eş}}\frac{dQ_{eş}}{dt}$$

olur.

Süreklilik denklemini diferansiyel formda;

$$dQ_1 + dQ_2 + dQ_3 = dQ_{eş}$$

şeklinde yazıp, dinamik denkleme ait ifadeleri bu diferansiyel bağıntıda yerine koyarsak;

$$\frac{L_{eş}}{A_{eş}}\frac{A_1}{L_1}dQ_{eş}+\frac{L_{eş}}{A_{eş}}\frac{A_2}{L_2}dQ_{eş}+\frac{L_{eş}}{A_{eş}}\frac{A_3}{L_3}dQ_{eş}=dQ_{eş}$$

olur.

Bu bağıntıyı dQ ile bölersek;

$$\frac{A_{eş}}{L_{eş}}=\frac{A_1}{L_1}+\frac{A_2}{L_2}+\frac{A_3}{L_3}$$

olur.

Alanları çap cinsinden yazar ve neticeyi genelleştirerek;

$$\frac{D_{eş}^{\,2}}{L_{eş}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{D_i^{\,2}}{L_i} \qquad (1.158)$$

olur.

1.3.2.5.3 Önemli Değerdeki Yersel Kayıpların Dikkate Alınması

Boru sisteminde, sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olacak miktarda yersel kayıplar meydana gelirse, o zaman bu kayıpların da analizde ele alınması gerekir. Boru sisteminin tek bir borudan ibaret olması halinde bu iki şekilde yapılabilir. Birinci metotta boru iki parçaya bölünür ve her bir kısım, tek genel kaybın meydana geldiği yerle bağlanmış iki çözüm halinde bir enerji denklemi yardımı ile ayrı ayrı ele alınır.

İkinci metot, boru sürtünme terimi ile birlikte diferansiyel denklemlerinde yersel kaybı da kapsar. Bu, sürtünme faktörü katsayısı değerini artırmak suretiyle boru sürtünme

terimi içine sokarak ya da ayrı bir terim halinde boru sürtünme terimine eklenmek suretiyle yapılabilir.

Yersel kaybın $h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$ şeklindeki ifade edilebileceğini kabul edersek, bu ikinci yöntem aşağıdaki değişimlere yol açar.

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} - \frac{\lambda' L}{2gD} V^2 = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \tag{1.159}$$

Burada

$$\lambda' = \lambda + K_L \frac{D}{L} \tag{1.160}$$

ve

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} - (\lambda \frac{L}{D} + K_L) \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \tag{1.161}$$

1.3.2.6 Su Darbesi Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması

a) Aritmetik Yöntem , Allievi Metodu

Genellikle sürtünme ihmal edilir,bilgisayar desteği ile işlemler kolaylaştırılabilir.

b) Grafik Yöntem , Schnyder - Bergeron Metodu

Sürtünme etkisini bir düzeltme yöntemi ile dikkate alır. Doğru sonuç için dikkat gerektirir, yöntem basittir.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

c) Cebirsel Yöntem

İki lineer olmayan cebirsel denklem çözüm için kullanılır, sürtünme etkileri dahil edilir. Ancak yeterince sağlıklı değildir. Bilgisayar zamanı oldukça az kullanılır.

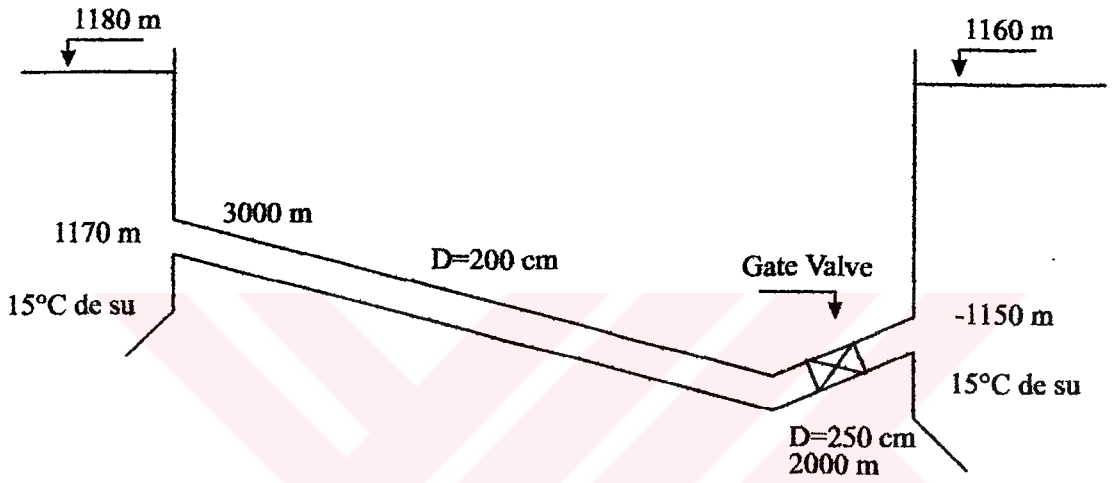
d) Karakteristikler Yöntemi

İki kısmi diferansiyel denklem yerine dört toplam diferansiyel denklem çözüm için kullanılır. Sürtünme etkileri dikkate alınır. Denklemler bilgisayar destekli sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak çözümlenir. Bu yöntemle en sağlıklı su darbesi analizi yapılır.

1.4 Konu İle İlgili Uygulamalar

Uygulama 1.1

Membada Bir Hazne ve Mansap Tarafında Bir Vana Bulunan Seri Halinde Bağlı Boru İçin Su Darbesi



Şekil 1.32

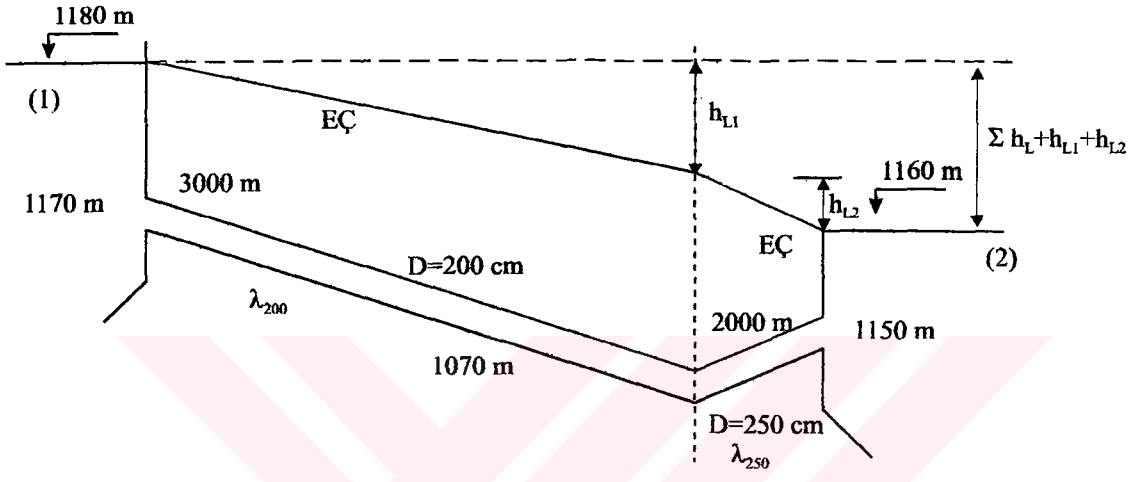
Yukarıda önerilen boru sisteminin projelendirilmesinde yükümlü olan proje mühendisi aşağıdaki soruların cevaplandırılması isteniyor.

a) Boru hattında meydana gelecek maksimum basınç değeri nedir?
b) Bu basınç nerede ve ne zaman meydana gelecektir?
c) Boru hattında kavitasyon (sütun ayrılması) meydana gelecek midir?
d) Bu kavitasyon nerede ve ne zaman meydana gelecektir?

Yukarıdaki sorular; vananın kapanması, hız zamanla lineer olarak 10 sn içinde 0'a düşecek tarzda yürütüldüğü kabul edilmek suretiyle cevaplandırılacaktır.
Seri boru hattı, kaynaklı çelik borudan yapılmıştır, bu borunun; pürüzlülük yüksekliği T=0.046 mm dir.

Çözüm:

Önce, vana tam açık iken bu sistemde meydana gelecek kararlı akıma ait değerler aşağıdaki şekilde hesaplanır. Bu hesaplamada hidrolik veya enerji çizgisinin şematik olarak çizilmesi faydalıdır.



Şekil 1.33-

$$A_{75} = \frac{\pi x 2^2}{4} = 3.14 \text{ m}^2$$

$$A_{95} = \frac{\pi x 2.5^2}{4} = 4.91 \text{ m}^2$$

(1) ve (2) noktaları arasında enerji denkleminden

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_L$$

$V_1 = V_2 = 0$

$1180 + 0 = 1160 + 0\ \Sigma h_L$

$\Sigma h_L = h_{L1} + h_{L2} = 20\ m$

$$\Sigma h_L = \lambda_{200} \frac{L_{200}}{D_{200}} \frac{V_{200}^2}{2.g} + \lambda_{250} \frac{L_{250}}{D_{250}} \frac{V_{250}^2}{2.g} = 20\ m$$

Süreklilik denkleminden

$A_{200}.V_{200} = V_{250}$

$$V_{250} = A_{200}\left(\frac{D_{200}}{D_{250}}\right)^2 = V_{200}\left(\frac{2}{2.5}\right)^2$$

$V_{250} = 0.64\ V_{200}$

$$\Sigma h_L = \lambda_{200} \frac{3000}{2.0} \frac{V_{200}^2}{19.62} + \lambda_{250} \frac{2000}{2.5} \frac{(0.64 V_{200})^2}{19.62} = 20m$$

$\lambda_{200}.V_{200}^2 + 0.22\lambda_{250}.V_{200}^2 = 0.26$

$V_{200}^2(\lambda_{200}+0.22\lambda_{250}) = 0.26$

Bu denklem aşağıdaki şekilde yanılma ve deneme yoluyla çözülür.

V_{200} $V_{250} = 0.64\ V_{200}$

Kaynaklı çelik boru için $\frac{T}{D}$ rölatif pürüzlülük

	D(mm)	T(mm)	$\frac{T}{D}$
Boru	3000	0.046	0.000023
Boru	2000	0.046	0.0000184

15°C de su için $\nu = 1.14 \times 10^{-6}$ m²/sn

$$Re_{200} = \frac{V_{200} D_{200}}{\nu} = \frac{V_{200} x2}{1.14x10^{-6}} = 1.75x10^{6}\ V_{200}$$

$$Re_{250} = \frac{V_{250} D_{250}}{\nu} = \frac{0.64 V_{200} 2.5}{1.4x10^{-6}} = 1.4x10^{6}\ V_{200}$$

1. Deneme

$\lambda_{200} = \lambda_{250} = 0.02$ kabul edelim.

$V_{200}\ (0.02 + 0.22 \times 0.02) = 0.26$

$V_{200} = 3.26$ m/sn

$Re_{200} = 1.75 \times 10^{6} \times 3.26 = 5.71 \times 10^{6}$

Moody diyagramından

$\frac{T}{D} = 0.000023$ ve $Re_{200} = 5.71 \times 10^6$ için $\lambda_{200} = 0.0102$

2. Deneme

$\lambda_{200} = \lambda_{250} = 0.0102$ kullanalım

$V_{200}^2 = (0.0102 + 0.22 \times 0.102) = 0.26$

$V_{200} = 4.57$ m/sn

$Re_{200} = 1.75 \times 10^6 \times 4.57 = 7.997 \times 10^6$

$\frac{T}{D} = 0.000023$ ve $Re_{200} = 7.997 \times 10^6$ için 0.0102

$V_{250} = 0.64 \times 4.57 = 2.9$ m/sn

$Re_{250} = 1.40 \times 10^6 \times 2.90 = 4.06 \times 10^6$

$\frac{T}{D} = 0.0000184$ ve $Re_{250} = 1.06 \times 10^6$ için $\lambda_{250} = 0.0102$

Böylece

$V_{200} = 4.57$ m/sn $\quad\quad$ $\lambda_{200} = 0.0102$

$V_{250} = 2.9$ m/sn $\quad\quad$ $\lambda_{250} = 0.010^2$

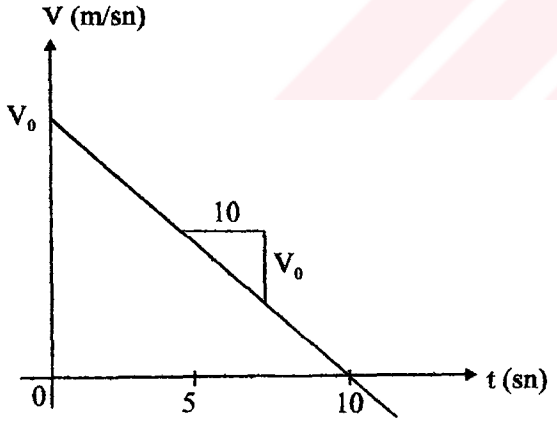
Eğim;

D	$\sin\alpha = \frac{\Delta z}{\Delta x}$
Boru D_{200}	$\frac{1070-1170}{3000} = -0.0333$
Boru D_{250}	$\frac{1150-1070}{2000} = 0.040$

Hız - zaman bağıntısı

Vana hız zamanla lineer olarak 10 sn içerisinde sıfıra düşecek biçimde kapanmaktadır.

Buna göre;



$V - V_1 = m(t-t_1)$

$V_1 = V_2$ olarak alırsak $t_1 = 0$ olur.

$V = 0$ iken $t = 10$ sn olduğundan

$0 - V_0 = m(10-0)$ dn

$$m = -\frac{V_0}{10}$$

Şekil 1.34-

Böylece yukarıdaki denklemden

$$V - V_0 = -\frac{V_0}{10}(t-0)$$

$$V = V_0 - \frac{V_0}{10}t = V_0(1-\frac{t}{10}) \quad t \le T_0 \text{ için geçerlidir.}$$

Kapanma zamanı; T_c = 10 sn olduğundan 0 ile T_c arasında vana önündeki hız yukarıdaki denklemle verilir. Kapanmadan sonra ise her zaman sıfırdır.

- Dalga hızının hesabı

Su için $K = 2.07 \times 10^6$ N/cm^2; $\rho = 1000$ kg/m^3

Çelik için $E = 2.07 \times 10^7$ N/cm^2; $\mu = 0.3$

Su darbesinin yayılma hızı

$$c = \frac{(K/\rho)^{1/2}}{\left[1+\left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{T}\right)(1-\mu^2)\right]^{1/2}} = \frac{1439}{\left[1+0.0091\left(\frac{D}{T}\right)\right]^{1/2}}$$

Böylece dalga hızları $\frac{D}{T}$>25 ince borular için

	D (mm)	T (mm)	$\frac{D}{T}$	c
Boru	2000	7.8	256.4	788.2
Boru	2500	7.8	320.5	727.1

Memba tarafındaki haznede yük

$$HR = z + \frac{p}{\gamma} = 1180$$

Membadaki D_{200} lik borunun başlangıç kotu = 1170 m

D_{250} borunun başlangıç kotu = 1070 m

Böylece bilgisayara verilecek girdi parametreleri

Bölüm sayısı; N = 3 (minimum)
Kapanma süresi; TC = 10 sn
Hesapların yürütüldüğü maksimum süre TMAX = 20 sn
Memba tarafındaki hazne yükü HR = 1180 m
Atmosferin akan sıvı cinsinden yüksekliği HATM = 10 m

1. BORU
Dalga hızı; A = 788.2 m/sn
Boru uzunluğu; FL = 3000 m
Boru çapı; D = 2000 m
Darcy sürtünme farkı, $\lambda = 0.0102$
Kararlı akıma ait hız; $V_0 = 4.57$ m/sn
Boru eğim açısının sürünüşü; SINA = 0.033
Boru başlangıç kotu; PBEL = 1170 m

2. BORU
A = 727.1 m/sn
FL = 2000 m
D = 2500 mm

$\lambda = 0.0102$

$V_0 = 2.90$ m/sn

SINA = 0.040

PBEL = 1070 m

Not: Bu probleme ait program Ek.2'de verilmiştir.

Uygulama 1.2

Membadaki Bir Rezervuardan Birbirine Seri ve Paralel Olarak Bağlanmış Cebri Borularla Santrala Su Götürülmesi Haline Ait Su Darbesi Hesabı

Bir hidroelektrik santralde meydana gelen bir arıza halinde cebri borulardaki hızlar 25 sn içinde lineer olarak 2 m/sn den 0'a düşecek şekilde türbin giriş kapakları kapatılıyor. Bu kapanma sırasında kapaklarda meydana gelecek maksimum basınç yükünü hesab ediniz?

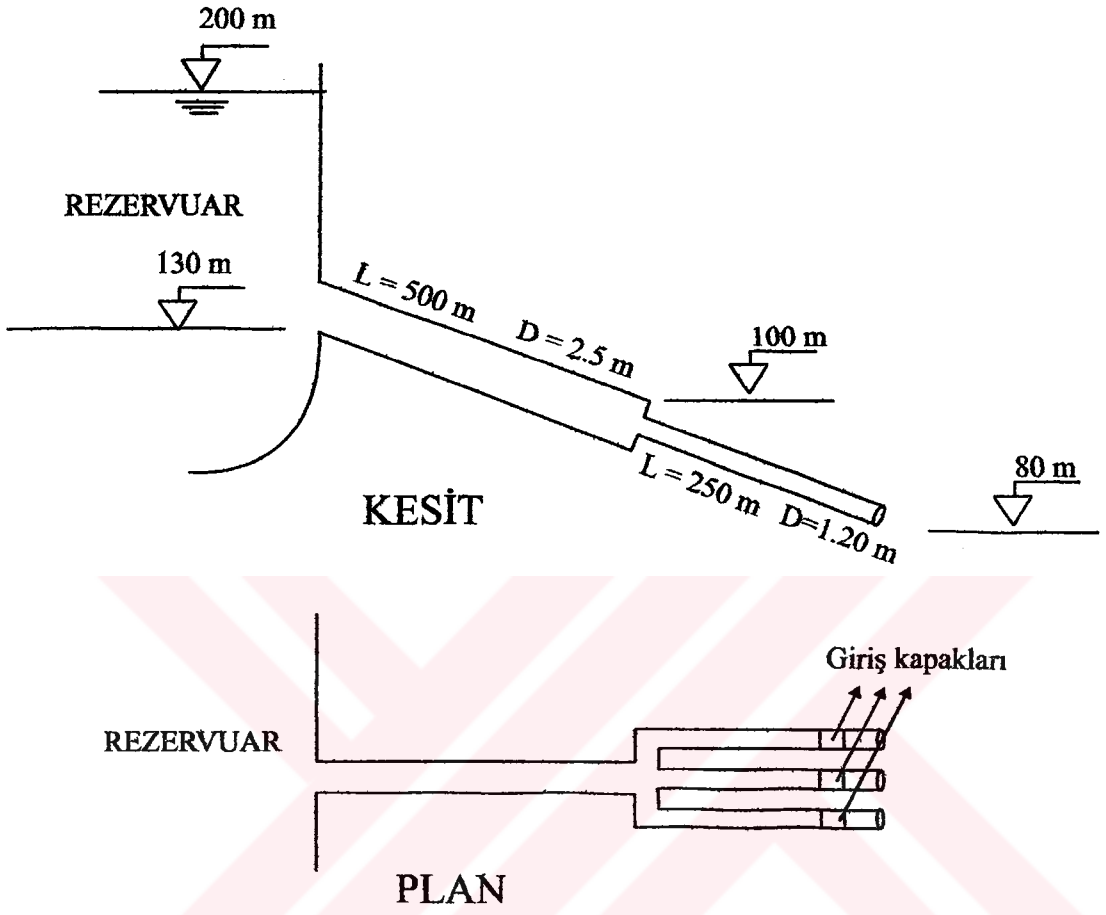
Not:Bütün borulardaki Darcy sürtünme faktörleri Karman'ın

$$\lambda = \left[\frac{1}{2\log\frac{D}{T} + 1.14} \right]^2$$

veya

$$\lambda = \left[\frac{1}{2\log\frac{D}{2T} + 1.74} \right]^2$$

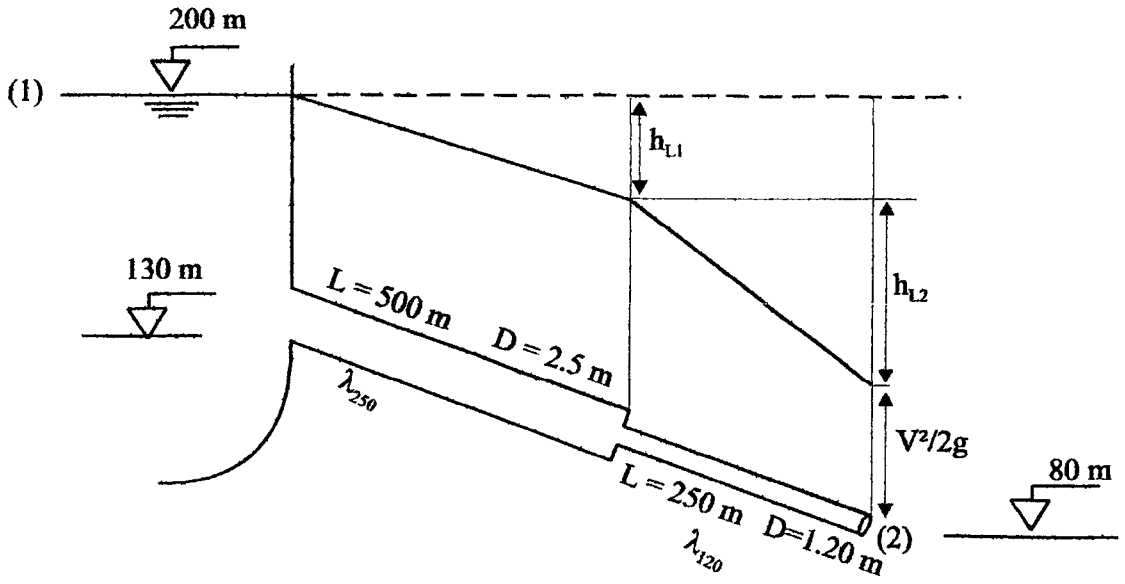
denklemiyle hesap edilecektir. Boru cinsi kaynaklı çeliktir.



Şekil 1.35-

Çözüm:

Önce türbinin giriş kapaklarının tamamen açık iken meydana gelecek kararlı akıma ait değerler hesaplanırsa;



Şekil 1.36-

$$A_{250} = \frac{\pi x 2.5^2}{4} = 1.9625 m^2$$

$$A_{120} = \frac{\pi x 1.2^2}{4} = 0.942 m^2$$

(1) ve (2) noktaları arasında enerji denkleminden

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_L$$

$$V_1 \approx 0$$

$$200 + 0 = 80 + \frac{2^2}{1962} + \Sigma h_L$$

$$\Sigma h_L = h_{L_1} + h_{L_2} = 119.796 \text{ m}$$

$$\lambda_{250} = \left[\frac{1}{2 \log \frac{2500}{0.046} + 1.14} \right]^2 = 0.00888 \approx 0.01$$

$$\lambda_{120} = \left[\frac{1}{2 \log \frac{1200}{0.046} + 1.14} \right]^2 = 0.01$$

Süreklilik denklemi

$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$

$V_2 = V_3 = V_4 = 2$ m/sn olması isteniyor. Ayrıca

$D_2 = D_3 = D_4$ olduğundan $A_2 = A_3 = A_4$ dir. O halde süreklilik denklemi

$Q_1 = 3Q_2 = 3.V_2.A_2$ olur ve ($Q_1 = 6.78$ m/sn)

$$V_1 x \frac{\pi x 2.5^2}{4} = 3x2x \frac{\pi x 1.2^2}{4}$$

$V_1 = 1.38$ m/sn bulunur.

$$Q_2 = Q_3 = Q_4 = 2x \frac{\pi x 2^2}{4} = 6.28 \text{ m}^3/\text{sn}$$

$Q_1 = 3x6.28 = 18.84$ m^3/sn

Borulardaki sürekli yük kayıplar Darcy denkleminden

$$\Delta h_{L1} = 0.01 \frac{500}{2.5} \frac{138^2}{19.62} = 0.19\text{m}$$

$$\Delta h_{L2} = 0.01 \frac{500}{1.2} \frac{2^2}{19.62} = 0.42\text{m}$$

Böylece,

$V_{250} = 1.38$ m/sn $\qquad \lambda_{250} = 0.01$

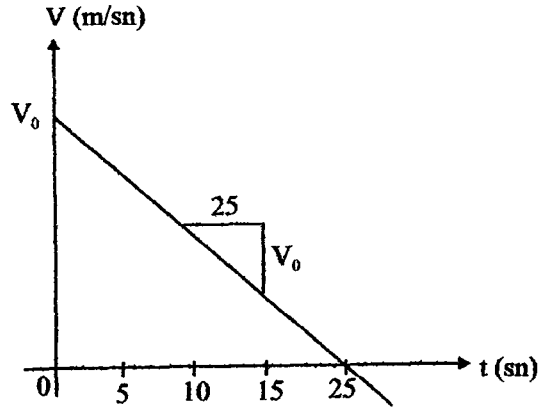
$V_{120} = 2$ m/sn $\qquad \lambda_{120} = 0.01$

Eğim

	D	$\sin\alpha = \frac{\Delta z}{\Delta x}$
Boru	D_{25}	$\frac{100-130}{500} = -0.06$
Boru	D_{12}	$\frac{80-100}{250} = -0.08$

Hız-zaman bağıntısı

Türbin kapakları zamanla lineer olarak 25 sn içerisinde sıfıra düşecek biçimde kapanmaktadır. Buna göre



$V - V_1 = m(t-t_1)$

$V_1 = V_0$ olarak alırsak $t_1 = 0$ olur.

$V = 0$ iken $t=25$ sn olduğundan

$0-V_0 = m(25-0)$ dan

$$m = -\frac{V_0}{10}$$

Şekil 1.37-

Böylece yukarıdaki denklem;

$$V - V_0 = -\frac{V_0}{10}(t-0)$$

$$V = V_0 - \frac{V_0}{10}t = V_0(1-\frac{t}{10}) \qquad t \le T_c \text{ ise geçerli}$$

Kapanma zamanı T_c = 25 sn olduğundan 0 ile T_c arasında türbin önündeki hız yukarıdaki denklem ile verilir. Kapanmadan sonra ise hız her zaman sıfırdır.

Dalga hızının hesabı

Su için $K = 2.07 \times 10^5$ N/cm^2, $\rho = 1000$ kg/m^3

Çelik için $E = 2.07 \times 10^7$ N/cm^2, $\mu = 0.3$

$$c = \frac{(K/\rho)^{1/2}}{\left[1+\left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{T}\right)(1-\mu^2)\right]^{1/2}} = \frac{1439}{\left[1+0.0091\left(\frac{D}{T}\right)\right]^{1/2}}$$

Böylece dalga hızları $\frac{D}{T}\rangle 25$ ince borular için

	D(mm)	T(mm)	$\frac{D}{T}$	q(m^3 / sn)
Boru	2500	7.8	320.5	727.1
Boru	1200	7.8	153.8	928.9

Memba tarafındaki haznede yük HR

$$HR = z + \frac{p}{\gamma} = 200 \text{ m}$$

Membadaki D_{250} lik borunun başlangıç kotu = 130 m

D_{120} borunun başlangıç kotu = 100 m

Bilgisayara verilecek girdi parametreleri

Bölüm sayısı: N = 3 (minimum)

Kapanma süresi; TC = 25 sn

Hesapların yürütüleceği maksimum süre, TMAX = 20 sn

Memba tarafındaki hazne yükü HR = 200 m

Atmosferin akan sıvı cinsinden yüksekliği HATM = 10 m

BORU -1

Dalga hızı	A = 727.1 m/sn
boru uzunluğu	FL = 500 m
Boru çapı	D = 2500 mm
Darcy sürtünme faktörü	$\lambda = 0.01$
Kararlı akıma ait hız	$V_0 = 1.38$ m/sn
Boru eğim açısı sinüsü	SINA = -0.06
Boru başlangıç kotu	PBEL = 130 m

BORU 2-3-4

Dalga hızı	A = 928.9 m/sn
Boru uzunluğu	FL = 250 m
Boru çapı	D = 1200 mm
Darcy sürtünme faktörü	$\lambda = 0.01$
Kararlı akıma ait hız	$V_0 = 2$ m/sn
Boru eğim açısı sinüsü	SINA = -0.08
Boru baş kotu	PBEL = 100 m

Not: Bu probleme ait program Ek.3'de verilmiştir.

Uygulama 1.3

Eşdeğer Boru Kavramı ile Su Darbesi Analizi

Bir hidroelektrik santralda meydana gelen bir arıza halinde cebri borulardaki hızlar 25 sn içinde lineer olarak 2 m/sn den 0'a düşecek şekilde türbin giriş kapakları kapatılıyor. Bu kapanma sırasında kapaklarda meydana gelecek maksimum basınç yükünü hesap ediniz?

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

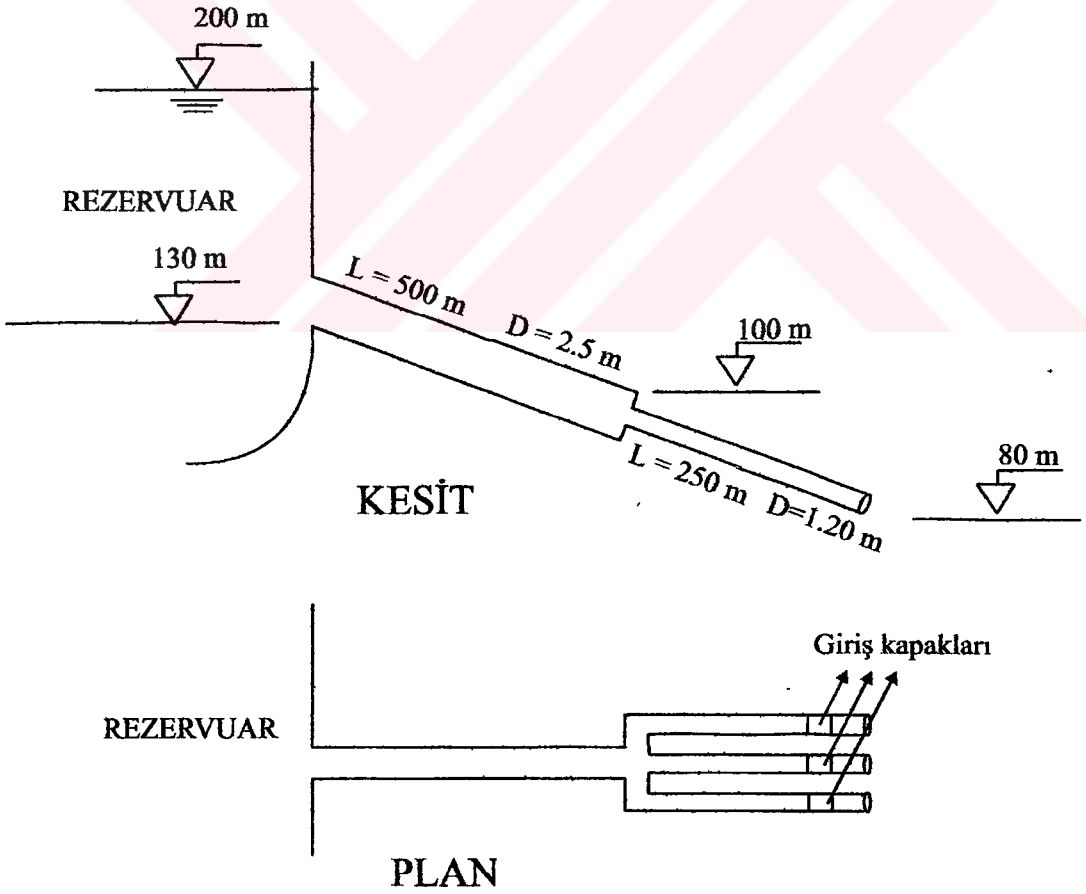
Not: Bütün borulardaki Darcy sürtünme faktörü Karman'ın

$$\lambda = \left[\frac{1}{2\log\frac{D}{T} + 1.14} \right]^2$$

veya

$$\lambda = \left[\frac{1}{2\log\frac{D}{2T} + 1.74} \right]^2$$

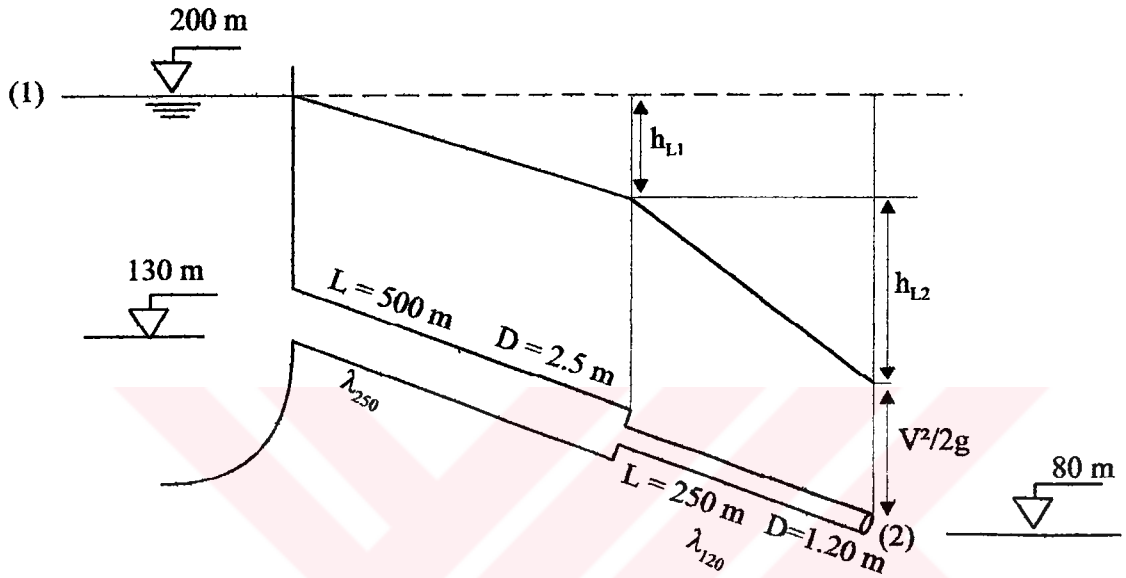
denklemiyle hesap edilecektir. Boru cinsi kaynaklı çeliktir.



Şekil 1.38-

Çözüm:

Önce türbinin giriş kapaklarının tamamen açık iken meydana gelecek kararlı akıma ait değerler hesaplanırsa;



Şekil 1.39-

$$A_{250} = \frac{\pi x 2.5^2}{4} = 1.9625 m^2$$

$$A_{120} = \frac{\pi x 1.2^2}{4} = 0.942 m^2$$

(1) ve (2) noktaları arasında enerji denkleminden

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_L$$

$V_1 \approx 0$

$$200 + 0 = 80 + \frac{2^2}{1962} + \Sigma h_L$$

$\Sigma h_L = h_{L1} + h_{L2} = 119.796$ m

$$\lambda_{250} = \left[\frac{1}{2 \log \frac{2500}{0.046} + 1.14} \right]^2 = 0.00888 \approx 0.01$$

$$\lambda_{120} = \left[\frac{1}{2 \log \frac{1200}{0.046} + 1.14} \right]^2 = 0.01$$

Süreklilik denklemi

$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$

$V_2 = V_3 = V_4 = 2$ m/sn olması isteniyor. Ayrıca

$D_2 = D_3 = D_4$ olduğundan $A_2 = A_3 = A_4$ dir. O halde süreklilik denklemi

$Q_1 = 3Q_2 = 3.V_2.A_2$ olur ve ($Q_1 = 6.78$ m/sn)

$$V_1 x \frac{\pi x 2.5^2}{4} = 3x2x \frac{\pi x 1.2^2}{4}$$

$V_1 = 1.38$ m/sn bulunur.

$$Q_2 = Q_3 = Q_4 = 2x\frac{\pi x 2^2}{4} = 6.28\ m^3/sn$$

$$Q_1 = 3x6.28 = 18.84\ m^3/sn$$

Borulardaki sürekli yük kayıplar Darcy denkleminden

$$\Delta h_{L_1} = 0.01\frac{500}{2.5}\frac{138^2}{19.62} = 0.19m$$

$$\Delta h_{L_2} = 0.01\frac{500}{1.2}\frac{2^2}{19.62} = 0.42m$$

Böylece,

$V_{250} = 1.38$ m/sn $\qquad \lambda_{250} = 0.01$

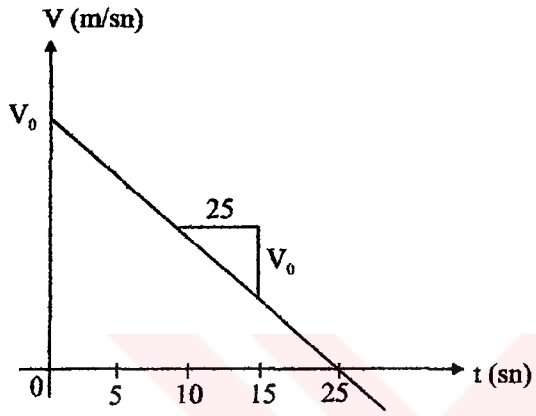
$V_{120} = 2$ m/sn $\qquad \lambda_{120} = 0.01$

Eğim

	D	$\sin\alpha = \frac{\Delta z}{\Delta x}$
Boru	D_{25}	$\frac{100-130}{500} = -0.06$
Boru	D_{12}	$\frac{80-100}{250} = -0.08$

Hız-zaman bağıntısı

Türbin kapakları zamanla lineer olarak 25 sn içerisinde sıfıra düşecek biçimde kapanmaktadır. Buna göre



$V - V_1 = m(t-t_1)$

$V_1 = V_0$ olarak alırsak $t_1 = 0$ olur.

$V = 0$ iken $t=25$ sn olduğundan

$0-V_0 = m(25-0)$ dan

$$m = -\frac{V_0}{10}$$

Şekil 1.40-

Böylece yukarıdaki denklem;

$$V - V_0 = -\frac{V_0}{10}(t-0)$$

$$V = V_0 - \frac{V_0}{10}t = V_0(1-\frac{t}{10}) \qquad t \le T_c \text{ ise geçerli}$$

Kapanma zamanı T_c = 25 sn olduğundan 0 ile T_c arasında türbin önündeki hız yukarıdaki denklem ile verilir. Kapanmadan sonra ise hız her zaman sıfırdır.

Dalga hızının hesabı

Su için $K = 2.07 \times 10^5\ N/cm^2, \rho = 1000\ kg/m^3$

Çelik için $E = 2.07 \times 10^7\ N/cm^2, \quad \mu = 0.3$

$$c = \frac{(K/\rho)^{1/2}}{\left[1+\left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{T}\right)(1-\mu^2)\right]^{1/2}} = \frac{1439}{\left[1+0.0091\left(\frac{D}{T}\right)\right]^{1/2}}$$

Böylece dalga hızları $\frac{D}{T} \rangle 25$ ince borular için

	D(mm)	T(mm)	$\frac{D}{T}$	q (m/sn)
Boru	2500	7.8	320.5	727.1
Boru	1200	7.8	153.8	928.9

Memba tarafındaki haznede yük HR

$$HR = z + \frac{p}{\gamma} = 200\ m$$

Membadaki D_{250} lik borunun başlangıç kotu = 130 m

D_{120} borunun başlangıç kotu = 100 m

Bilgisayara verilecek girdi parametreleri

Bölüm sayısı: N = 3 (minimum)

Kapanma süresi; TC = 25 sn

Hesapların yürütüleceği maksimum süre, TMAX = 20 sn

Memba tarafındaki hazne yükü HR = 200 m

Atmosferin akan sıvı cinsinden yüksekliği HATM = 10 m

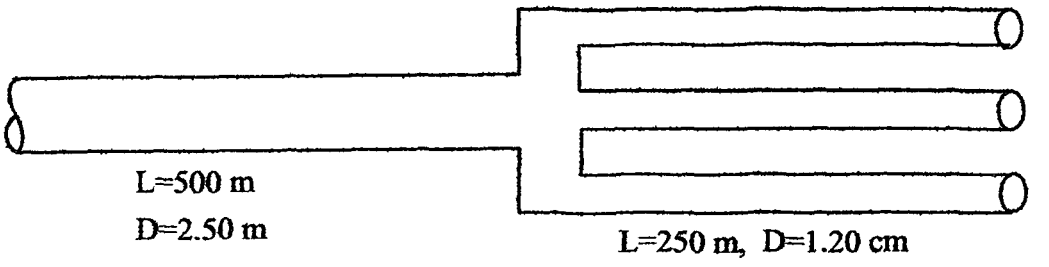
BORU -1

Dalga hızı	A = 727.1 m/sn
boru uzunluğu	FL = 500 m
Boru çapı	D = 2500 mm
Darcy sürtünme faktörü	$\lambda = 0.01$
Kararlı akıma ait hız	$V_0 =$ 1.38 m/sn
Boru eğim açısı sinüsü	SINA = -0.06
Boru başlangıç kotu	PBEL = 130 m

BORU 2-3-4

Dalga hızı	A = 928.9 m/sn
Boru uzunluğu	FL = 250 m
Boru çapı	D = 1200 mm
Darcy sürtünme faktörü	$\lambda = 0.01$
Kararlı akıma ait hız	$V_0 =$ 2 m/sn
Boru eğim açısı sinüsü	SINA = -0.08
Boru baş kotu	PBEL = 100 m

Sistemin Eşdeğer Çözümü



Şekil 1.41-

Paralel boruların eşdeğer hale getirilmesi:

(1). Denklem (Kararlı akım haline ait)

$$\left[\frac{D_{eş}^5}{\lambda_{eş} L_{eş}}\right]^{1/2} = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{D_i^5}{\lambda_i L_i}\right]^{1/2}$$

(2). Denklem (Kararsız akım haline ait)

$$\frac{D_{eş}^2}{L_{eş}} = \sum_{i=1}^{n}\frac{D_i^2}{L_i}$$

Bu iki denklemin çözümlenmesi halinde

$$\left[\frac{D_{eş}^5}{\lambda_{eş} L_{eş}}\right]^{1/2} = 3\left(\frac{1.2^5}{0.01x250}\right)^{1/2} = 2.99$$

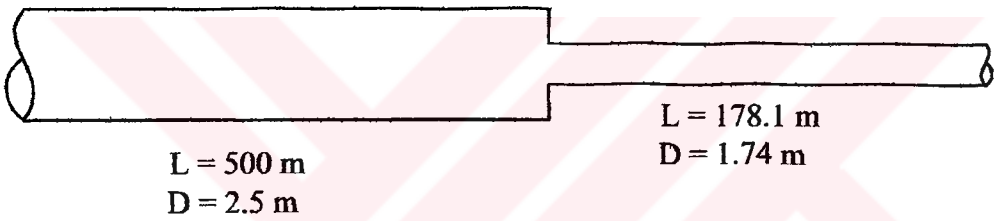
$$\frac{D_{eş}^2}{L_{eş}} = 0.089 \quad (1)$$

$$\frac{D_{eş}^2}{L_{eş}} = 3\frac{1.2^2}{250} = 0.017 \qquad (2)$$

$$L_{eş} = \frac{D_{eş}^2}{0.017}, \qquad \frac{\frac{D_{eş}^5}{D_{eş}^2}}{0.017} = 0.089$$

$$0.017\, D_{eş}^3 = 0.089$$

$$D_{eş} = 1.74 \text{ m} \qquad L_{eş} = 178.1 \text{ m}$$



Şekil 1.42-

Seri bağlı boruların eşdeğer hale getirilmesi

(1). Denklem (Kararlı akım haline ait)

$$\left[\frac{\lambda_{eş}.L_{eş}}{D_{eş}^5}\right] = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\lambda_i L_i}{D_i^5}\right]$$

(2). Denklem (Kararsız akım haline ait)

$$\frac{L_{eş}}{D_{eş}^2} = \sum_{i=1}^{n}\frac{L_i}{D_i^2}$$

Bu iki denklemin çözümlenmesi halinde

$$\left[\frac{\lambda_{eş}.L_{eş}}{D_{eş}^5}\right]=\left(\frac{0.01x500}{2.5^5}+\frac{0.01x178.1}{1.74^5}\right)=0.163$$

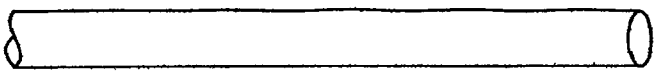
$$\frac{L_{eş}}{D_{eş}^5}=16.3 \qquad (1)$$

$$\frac{L_{eş}}{D_{eş}^2}=\frac{500}{2.5^2}+\frac{178.1}{1.74^2}=138.8 \quad (2)$$

$$L_{eş}=138.8\ D_{eş}^2 \qquad \frac{138.8\ D_{eş}^2}{D_{eş}^2}=16.3$$

$$138.8=16.3\ D_{eş}^3$$

$$D_{eş}=2.04\ m \qquad L_{eş}=577.63\ m$$



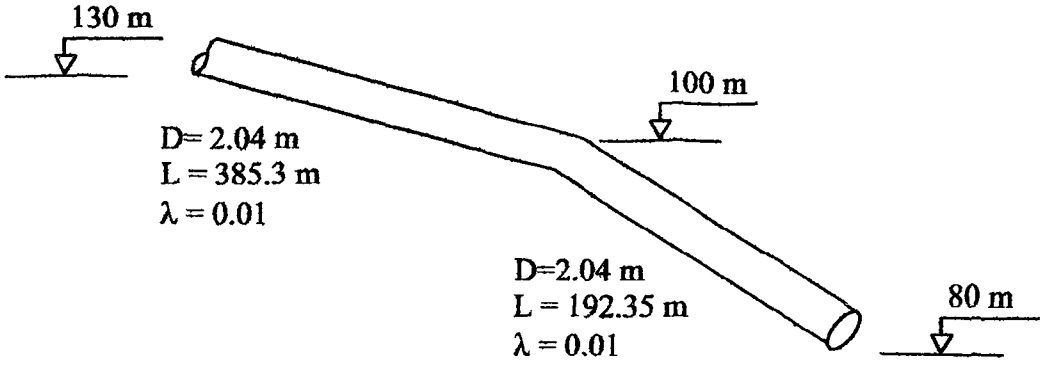
D = 2.04 m L = 577.63 m

Şekil 1.43-

Bu eşdeğer boru farklı eğime sahip olduğundan eğimin değiştiği noktaya kadar olan boru boyları,

$$L_1=\alpha_2\Sigma L_{eş}=\left(\frac{500}{750}\right)577.63=385.3\ m$$

$$L_2 = \alpha_2 \Sigma L_{eş} = \left(\frac{250}{750}\right) 577.63 = 192.35 \text{ m}$$



Şekil 1.44-

Sistemden iletilecek debi: $Q = 6.78 \text{ m}^3 / \text{sn}$

olduğuna göre eşdeğer borudaki akımın hızını hesaplayalım.

$$Q = V.A$$

$$6.78 = V \frac{\pi x 2.04^2}{4}$$

$$V = 2.08 \text{ m/sn}$$

Dalga hızının hesabı

$$c = \frac{(K/\rho)^{1/2}}{\left[1 + \left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{T}\right)(1-\mu^2)\right]^{1/2}} = \frac{1439}{\left[1 + 0.0091\left(\frac{D}{T}\right)\right]^{1/2}}$$

$$c = \frac{1439}{\left[1 + 0.0091\left(\frac{2040}{7.8}\right)\right]^{1/2}}$$

$c = 782.7$ m/sn

$$\lambda = \left[\frac{1}{2\log\frac{2040}{0.046} + 1.14}\right]^2 = 0.01$$

BORU-1

$$SINA = \frac{100 - 130}{385.3} = -0.078$$

BORU-2

$$SINA = \frac{80 - 100}{192.35} = -0.104$$

Girdi parametreleri

N = 3

TC = 25 sn

TMAX = 20 sn

HR = 200 m

HATM = 10 m

BORU-1

A = 782.7 m/sn

FL = 385.3 m

D = 2040 mm

$\lambda = 0.01$

$V_0 =$ 2.08 m/sn

SINA = -0,078

PBEL = 130 m

BORU-2

A = 782.2 m/sn

FL = 192.35 m

D = 2040 mm

$\lambda = 0.01$

$V_0 =$ 2.08 m/sn

SINA = -0.104

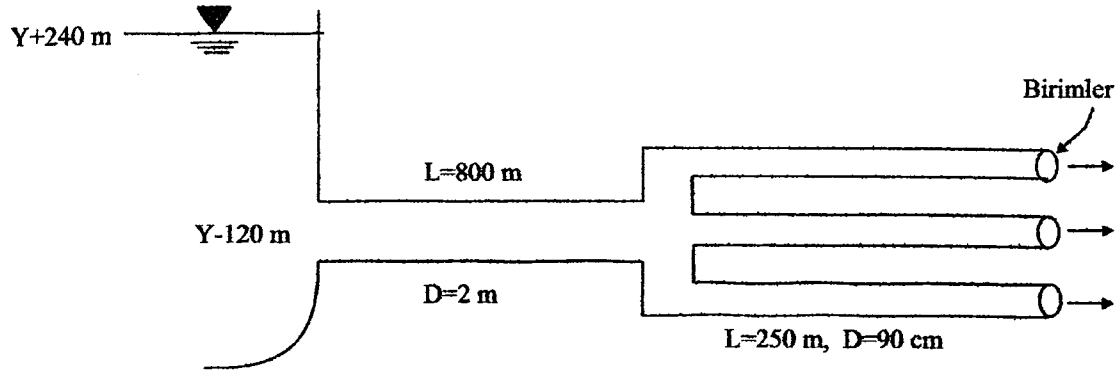
PBEL = 100 m

Not: Bu probleme ait program Ek.4'de, program çıktıları Ek.9'da verilmiştir.

Uygulama 1.4

(Q=19 m^3/sn) Üç birimli bir pompaj depolama tesisatı üretici tarzda çalışıyor. Tehlike anındaki kapama sırasında türbinler üzerindeki kapaklar, türbinlerdeki cebri borularda hızları lineer olarak 30 sn içinde 10 m/sn den 0'a azalacak şekilde kapatılıyor.
Kapama sırasında kapalılardaki maksimum basınç yükünü hesaplayınız?

Not:Bütün borular için λ değerlerinin aynı olduğunu kabul ediniz.



Şekil 1.45-

Çözüm:

Önce, üç paralel boruyu eşdeğer tek bir boru ile yer değiştirelim.

(1.158) denkleminden

$$\frac{D_{eş}^2}{L_{eş}} = 3\left(\frac{0.9^2}{250}\right) = 0.00972 \qquad (a)$$

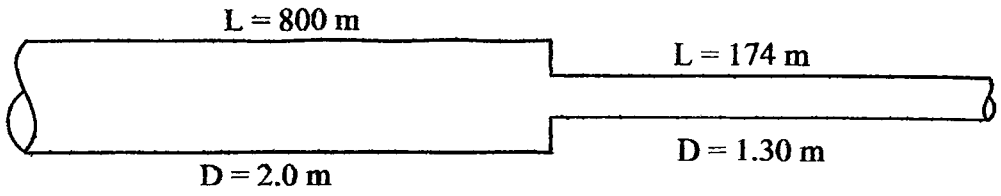
(1.157) denkleminden

$$\left[\frac{D_{eş}^5}{L_{eş}}\right]^{1/2} = 3\left[\frac{(0.9)^5}{250}\right]^{1/2} = 0.1458 \qquad (b)$$

(a) ve (b) yi beraberce çözersek

$D_{eş} = 1.30$ m $\qquad$ $L_{eş} = 174$ m

Şimdi boru sistemi aşağıda gösterilmiş olan seri borulara indirgenmiştir.



Şekil 1.46-

Sonra seri boruya ait eşdeğer bağıntıları kullanarak, seri bağlı boruyu, sabit çaplı tek bir boruya indirgeriz.

(1.153) eşitliğinden

$$\frac{L_{eş}}{D_{eş}^5} = \frac{600}{2^5} + \frac{174}{1.3^5} = 71.86$$

(1.154) eşitliğinden

$$\frac{L_{eş}}{D_{eş}^2} = \frac{800}{2^2} + \frac{174}{1.3^2} = 302.96$$

Bu iki denklemin beraberce çözümü ile

$$D_{eş} = 1.62 \text{ m} \qquad L_{eş} = 791$$

bulunur. Eşdeğer borudaki hızı hesap edersek

$$V_{eş} = \frac{Q}{A_{eş}} = \frac{4x19}{\pi x 1.62^2} = 9.26 \text{ m/sn}$$

bulunur.

Şimdi sabit çaplı bir tek boruya sahip olduğumuzdan, maksimum basıncı çözmek için kararsız akım denklemini kullanabiliriz.

Rezervuar ile boru ucu arasında

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} - \frac{\lambda L V^2}{2gD} = \frac{L}{g}\frac{dV}{dt}$$

$$120 - \frac{p_2}{\gamma} - \frac{\lambda L V^2}{2gD} = \left(\frac{791}{9.81}\right)\frac{0-9.26}{30}$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = 120 + 24.9 - \frac{\lambda L V^2}{2gD}$$

$\frac{p_2}{\gamma}$ için yukarıdaki eşitlik azalma işlemi sırasında iyidir. Bu denklemden en yüksek basıncın V=0 olduğunda meydana geleceği açıktır. Bu nedenle

$$\left(\frac{p_2}{\gamma}\right)_{max} = 120 + 24.9 - 0 = 145 \text{ m } (145 \text{ N/cm}^2)$$

bulunur.(vananın tamamen kapandığı anda)

2. SU DARBESİ KONTROL SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

Bilindiği üzere su darbelerinin nedeni, boru hattında, geçici olarak, boru boyunca herbiri ardı sıra sıvının sıkışması ve genleşmesi olayıdır.

Boruda sıvının sıkışması daha fazla sıvının depolanması, dolayısıyla basıncın artmasına neden olur. Sıvının genleşmesi ise boruda sıvının çekilmesi (yani azalması) olup, bu da basınç düşüşüne neden olmaktadır.

Örneğin, mansapta boru ucundaki bir vananın ani kapanması sonucunda bu olay, boruda önce sıvının sıkışması, sonra genleşmesi, tekrar sıkışması vs. şeklinde cereyan eder. Sürtünmeler ve esnemelere harcanan enerjiden ötürü bu sıkışma ve genleşmeler, gittikçe şiddetini kaybederek, sonuçta kısa bir süre sonra son bulmaktadır. Şüphesiz bu durumda ilk meydana gelen olay yani basınç artışı, ilk meydana geldiği yerde en şiddetli olacaktır.

Öte yandan vananın ani açılması veya pompanın ani durması olayında ise yukarıdakinin tam tersi bir olay meydana gelmektedir. Burada önce sıvı çekilmesi meydana gelmekte ve sonra da bunu sıvı sıkışması izlemektedir.

Yük kaybının az olduğu yerlerde sıkışma ve genleşme olayları uzun zaman devam eder, salınım geç sönümlenir.

Yukarıdaki açıklamalardan kolayca anlaşılacağı gibi, su darbesi olayı esnasında basınç artışını önlemenin en iyi yolu, boruda sıvının sıkışmasını önlemektir. Bunun için de sıkışma sırasında yeteri kadar sıvıyı borudan almak ve bu sırada enerjisini de mümkün mertebe kırmak gerekir. Buna karşılık, basınç düşüşünü önlemenin en iyi yolu da,

boruda azalan sıvıyı hızla takviye etmektir. Bu amaçla kullanılan cihazlar da "denge bacaları" (surge tanks) ve "hava kazanları" (air chambers) dır.

Basınçlı boru hatlarında bu cihazlar, görevleri aşırı basınçları önlemek olduğuna göre, kritik basınçların doğduğu noktalarda veya mümkün mertebe bu noktalara yakın yerlerde inşa edilmelidirler. Örneğin, aşırı basınçların doğuş nedeni bir vana ise vanaya yakın olarak ve pompa ise pompadan hemen sonra yerleştirilirler. Uygulamada, genel olarak denge bacaları hidroelektrik tesislerindeki cebri borular üzerinde ve hava kazanları ise pompajlı tesislerdeki terfi hatları (deşarj boruları) üzerinde kullanılırlar.

Cebri borular ucundaki türbin kapaklarını ani açılıp kapanması ve terfi hatlarında pompaların ani durması olağandır. Bu esnada oluşan aşırı basınçlar emniyet sınırını aşıyorsa tertibat almak lazımdır. Su darbelerinin analizi ve su darbesine karşı kullanılan denge bacaları ve hava kazanlarının boyutları, sıhhatli olarak, artık kararsız akım denklemlerinin, karakteristik metod yardımıyla, sayısal çözümü ile hesaplanmaktadır.

2.2 Denge Bacaları

Denge bacası (surge tank), basınçlı borularda oluşan aşırı basınçları önlemek amacıyla, basınçlı boru üzerinde inşaa edilen üstü açık bir su kulesidir. Kule genellikle silindirik bir baca biçiminde inşa edilir.

Basınçlı borularda denge bacaları hem yüksek ve hem de düşük aşırı basınçları sınırlamak üzere kullanılabilirler. Basınç artışı esnasında boruda sıkışan fazla sıvı, geçici olarak, baca içinde depolanır ve böylece boruda basınç fazla yükselmez. Bu esnada suyun denge bacası üzerinde taşmaması için, bacanın yeteri kadar yükseklikte inşa edilmiş olması gerekir. Aksi halde, basınç artışı esnasında, kısa bir süre, su bacadan taşar. Bu da büyük bir mahzur teşkil edebilir.

Boruda basınç düşüşü esnasında ise, baca sıvıyı boruya verir ve böylece boruda çekilen

sıvıyı takviye ederek basınç düşüşünü önler. Bu sırada da bacadaki sıvının tamamen boşalmaması gerekir. Çünkü sıvının tamamen boşalması halinde bacadan boru içine hava girer ve boruya hava girmesi de mahzurludur.

Denge bacaları, genel olarak, basıncın düşmesi ile tamamen boşalmayacak ve artması ile de taşmayacak şekilde boyutlandırılır. Bazı hallerde, baca bir dolu savakla teçhiz edilerek, sıvının taşmasına da imkan verilebilir.

Suyun denge bacasına girişinde büyük yersel yük kaybı meydana getirmek amacıyla, denge bacasının taban kısmı genellikle daraltılarak boruya bağlanır (Şekil 2.1 ve 2.3). Bu daraltılan kısma, suyun denge bacasına girişte büyük, çıkışta küçük yük kaybı meydana getireceği ve suyun boruya geçişini kolaylaştıracak şekilde bir biçim verilir. Bunun için bordo orifisi kullanılır. Bordo orifisinde, borudan bacaya geçişteki yük kaybı, bacadan boruya geçiştekine nazaran, yaklaşık olarak 2.5 misli fazladır.

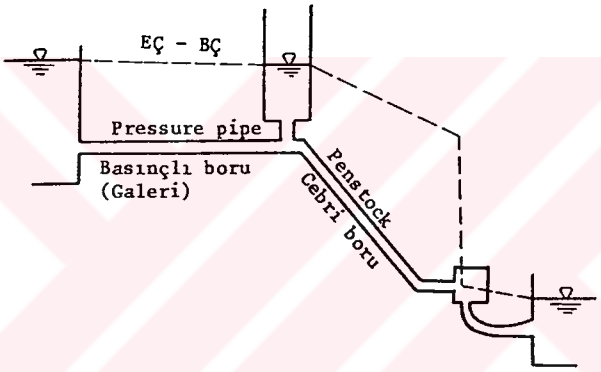
Orifis yerine, su borudan bacaya doğru girerken kapanan, ortası delikli bir geri tepme klapesi de kullanılır.

Denge bacaları, daha ziyade, hidroelektrik tesislerinde türbinlere su taşıyan basınçlı boruların aşırı basınçlara karşı korunmasında kullanılırlar. Genel olarak hidroelektrik tesislerinde denge bacasını, cebri boru üzerinde türbin kapaklarına yakın olarak inşa etmek pek ekonomik ve pratik olmaz. Çünkü bu kısım, çok yüksek bir bacanın yapılmasını gerektirir. Onun için bu tesislerde denge bacası, genel olarak,basınçlı boru (galeri) ile cebri boru arasına yerleştirilir.

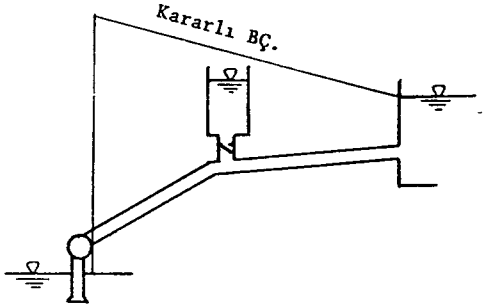
Şekil 2.1' de bir hidroelektrik tesisinde, üstü açık bir denge bacası uygulaması ile ilgili bir örnek gösterilmiştir. Bu denge bacasının görevi, elektrik yükü talebinin değişimine göre, türbin kapaklarının kapanması veya açılması sırasında suyu hem depolama hem de süratle boruya vermektir. Böylece baca, cebri boruda oluşan aşırı basınç salınımlarını süratle sönümleyerek, basınçlı boruya intikalini önler.

Pompajlı sistemlerde, pompa yakınında kararlı basınç çizgisi, genellikle, boru ekseninden çok yukarıdadır. Yani manometrik basma yüksekliği çok fazladır. Pompa yakınında çok yüksek bir baca yapmak ise ekonomik ve pratik açıdan pek mümkün olmaz. Bu bakımdan terfi hatları üzerinde, pompa yanında üstü açık bir denge bacası pek kullanılmaz, onun yerine hava kazanı inşa edilir.

Ancak terfi hattının yüksek yerlerinde kavitasyona mani olmak için, pompa yanındaki hava kazanına ilaveten, yüksek yerlere denge bacası da konabilir. Bu şekilde çok uygulama vardır. Bu denge bacaları, görevleri sadece basınç düşüşünü dolayısıyla kavitasyonu önlemek olduğundan,genellikle tek yönlü olarak dizayn edilirler.(Şekil 2.2)



Şekil 2.1- Bir hidroelektrik tesisinde üstü açık bir denge bacası



Şekil 2.2- Pompajlı sistemde tek yönlü denge bacası (one-way surge tank)

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tek yönlü denge bacasının basınç artışını önleme yeteneği yoktur. Çünkü tek yönlü denge bacası, basınç düşüşü sırasında, sıvının sadece bacadan boruya doğru akışına imkan verecek şekilde dizayn edilir. Tek yönlü denge bacası, boruda sadece kavitasyonun neden olduğu boşluğu doldurmaya yeterli bir sıvı hacmine ihtiyaç gösterir. Bu nedenle bacanın maksimum basınç çizgisine kadar uzatılması gerekmez.

Tek yönlü denge bacası içerisinde maksimum su seviyesi, genellikle kararlı akış sırasındaki basınç çizgisinden düşük bir seviyede tutulur. Baca bir geri tepme klapesi ile borudan ayrılır. Boruda basınç çizgisi, borudaki su seviyesinin altına düşünce bu klape açılır, su bacadan boruya akar. Fakat basınç artışı sırasında ise kapanarak suyun borudan denge bacasına girişini önler.

2.2.1 Denge Bacasının Boyutlarının Analizi

Denge bacalarını su darbesi analizi içine sokmak için, bunların boruya bağlandığı noktaları özel sınır şartları olarak ele almak gerekir. Denge bacasının boru hattı üzerinde yerleştirildiği yere ve seçilen geometrisine (yani kabul edilen bir baca kesitine ve orifis tipine) göre, baca için geçerli olabilecek sınır şartı denklemleri geliştirilir. Denge bacasının uygun boyutlarının tesbiti için, su darbesi denklemlerinin bu denklemlerle birlikte çözülmesi gerekir.

Bu sınır şartı denklemleri, bacanın boru hattı üzerinde, vana veya pompa yakınına ya da borunun iç tarafında kalan bir yere yerleştirilmesine göre değişir.

Şekil 2.1' de gösterildiği gibi hidroelektrik santrallerdeki basınçlı borularda veya şekil 2.2' deki gibi pompajlı sistemlerde kavitasyona maruz kalabilecek yüksek noktalara sahip terfi hatlarında, denge bacaları genellikle hattın iç tarafında kalan bir noktaya bağlanırlar. Bu durumda, denge bacasının boruya bağlandığı böyle bir noktayı, daima, seri bağlı iki ayrı borunun birleşme noktasıymış gibi kabul edebiliriz. Bu kabul, problemin çözümünde herhangi bir engel teşkil etmez. Zira verilen bir boruyu

istediğimiz sayıda kısımlara ayırabiliriz ve böylece denge bacasını da istediğimiz herhangi bir noktaya yerleştirebiliriz.

2.2.1.1 Orifisli Denge Bacası

Şekil 2.1 veya 2.2'deki gibi bir boru hattının menba ile mansap ucu arasında ve türbin kapaklarından ya da pompadan uzakta bir yere yerleştirilmiş bulunan bir denge bacasını ele alalım. Hidroelektrik tesis durumunda, cebri boru ucunda bulunan ve jeneratör üzerindeki elektrik yükünün değişimine bağlı olarak açılıp kapanabilen türbin kapaklarının açılma halini göz önüne alalım. Veya pompajlı durumda, pompaların durduğu durumu ele alalım. Her iki hale ait denge bacasının durumu, şematik olarak şekil 2.3' de gösterilmiştir.

Şekil 2.3' e bakarak ve bacayı, iki borunun birleşme noktasında inşa edilmiş gibi varsayarak, denge bacasının bulunduğu noktadaki sınır şartları için aşağıdaki denklemleri yazabiliriz:

Karakteristik denklemler;

Bacaya giden j borusunda:

$$C^+: \quad V_{p_{N+1_j}} = C_{d_{N_j}} - \frac{g}{c_j} h_{p_{N+1_j}} \tag{2.1}$$

$$C_{d_N} = V_N + \frac{g}{c} h_N - \frac{g}{c} V_N \Delta t \mathrm{Sin}\alpha - \frac{\lambda}{2D} V_N |V_N| \Delta t$$

Borudan çıkan j+1 borusunda:

$$C^{-}: \quad V_{P1_{j+1}} = Cu_{2_{j+1}} - \frac{g}{c_{j+1}} . h_{P1_{j+1}} \tag{2.2}$$

$$Cu_N = V_N - \frac{g}{c} h_N + \frac{g}{c} V_N \Delta t \mathrm{Sin}\alpha - \frac{\lambda}{2D} V_N |V_N| \Delta t$$

Enerji:

$$h_{P_{N+1_j}} = h_{P1_{j+1}} = h_{B(t+\Delta t)} \tag{2.3}$$

Süreklilik şartı:

$$V_{P_{N+1_j}} . A_j + Q_{d(t+\Delta t)} = V_{P1_{j+1}} . A_{j+1} \tag{2.4}$$

Baca süreklilik koşulu:

$$\frac{Q_{d_t} + Q_{d(t+\Delta t)}}{2} = \frac{\left[h_{d_t} - h_{d(t+\Delta t)} \right] . A_d}{\Delta t} \tag{2.5}$$

Orifis enerji bağıntısı:

$$h_{B(t+\Delta t)} \langle h_{d(t+\Delta t)} + z_B$$

için

$$Q_{d(t+\Delta t)} = C_0 . A_0 . (2g)^{1/2} . \left[h_{d(t+\Delta t)} + z_B - h_{B(t+\Delta t)} \right]^{1/2} \tag{2.6}$$

veya

$$h_{B(t+\Delta t)} \rangle h_{d(t+\Delta t)} + z_B$$

için

$$Q_{d(t+\Delta t)} = C_i.A_0.(2g)^{1/2}.\left[h_{B(t+\Delta t)} - h_{d(t+\Delta t)} - z_B\right]^{1/2} \qquad (2.7)$$

olur.

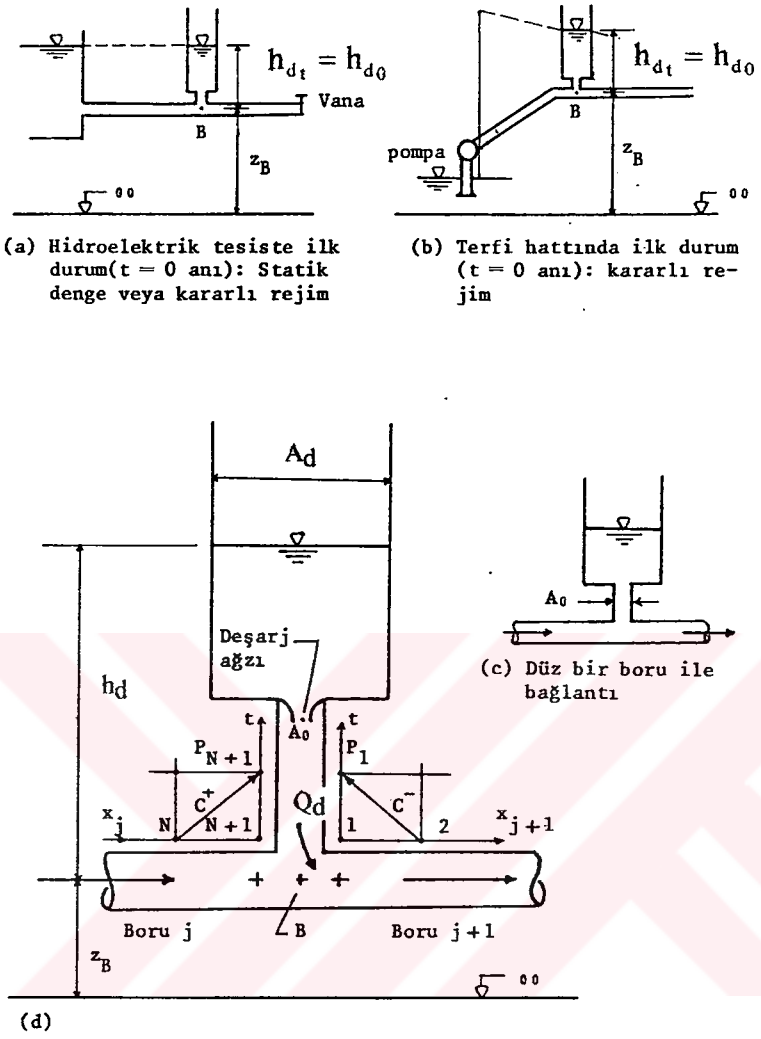
Burada A_d, bacanın en kesit alanını, h_d bacadaki su seviyesinin B noktasında boru ekseninden olan herhangi bir andaki yüksekliğini, z_B boru ekseninin B noktasında kıyas düzleminden olan yüksekliğini, Q_d, orifisden geçen akımın herhangi bir andaki debisini, A_0, baca deşarj ağızlığının kesit alanını; C_0, sıvının bacadan boruya akışında orifisin debi katsayısını ve C, sıvının borudan bacaya girişindeki debi katsayısını ifade eder. Genellikle C_0=2,5 C_i dir.

Şekil 2.3 (c)' de görüldüğü gibi baca ana boruya kısa bir boru ile de bağlanmış olabilir Bu takdirde A_0, bu bağlantı borusunun en kesit alanını ifade eder.

Vananın açılması veya pompanın durması hali göz önüne alınarak yazılan bu denklem takımı, vananın kapanması veya pompanın çalıştırılmaya başlaması hali için de geçerlidir.

Bu denklemlerde, t+Δt anındaki değerleri gösteren $V_{p_{N+1\,j}}$, $V_{p_{1\,j+1}}$, $h_{p_{N+1\,j+1}}$, $h_{p_{1\,j+1}}$, $h_{B(t+\Delta t)}$, $h_{d(t+\Delta t)}$, $Q_{d(t+\Delta t)}$ olmak üzere 7 bilinmeyen mevcuttur.

Böylece bu yedi bilinmeyen, denklemlerin ortak çözümünden elde edilebilir.



Şekil 2.3- Boru hattının iç tarafına yerleştirilmiş orifisli denge bacası

Bacadan olan Q_d deşarj debisi için; (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 ,2.6 ,2.7) denklemlerinin ortak çözümünden,

$$Q_{d(t+\Delta t)} = 0{,}5(-C_5 \pm \sqrt{C_5^2 + 4.C_6})$$

elde edilir. Hem (+) , hem de (-) sonuç elde edilebilmesi için de,

$$Q_{d(t+\Delta t)} = 0{,}5(-C_5 \pm \sqrt{C_5^2 + 4.C_6}) \tag{2.8}$$

denklemi kullanılmalıdır. Burada;

$$C_5 = 2g.C_0^2.A_0^2\left[\frac{1}{\frac{g}{c_{j+1}}.A_{j+1} + \frac{g}{c_j}.A_j} + \frac{\Delta t}{2.A_d}\right] \tag{2.9}$$

$$C_6 = 2g.C_0^2.A_0^2\left[\frac{Cu_{2_{j+1}}.A_{j+1} - C_{d_{N_j}}.A_j}{\frac{g}{c_{j+1}}.A_{j+1} + \frac{g}{c_j}.A_j} + h_{d_t} + z_B - \frac{\Delta t}{2.A_d}.Q_{d_t}\right] \tag{2.10}$$

(2.8) denklemi, ancak, bacadan boruya doğru olan sıvı akımı için geçerlidir ve borudan bacaya doğru olan ters bir akım meydana geldiğinde kullanılamaz. Bu nedenle de (2.8) denkleminin çözümünden elde edilecek negatif işaretli bir Q_d değeri de geçerli değildir.

(2.9) denklemindeki C_5'in değeri daima pozitiftir. Buna karşılık (2.10) denklemindeki C_6 'nın işareti ise negatif veya pozitif olabilir. Buna göre, (2.8) denkleminden açıkça görüleceği gibi, $C_6<0$ ise Q_d'nin değeri de daima negatif olur. Böylece (2.8) denklemi, aynı zamanda, (2.10) denkleminden elde edilen değer ancak $C_6 \geq 0$ ise geçerlidir. Onun için, Q_d'nin işaretinin negatif olup olmayacağını belirlemek üzere, devamlı olarak C_6'nın işareti kontrol edilebilir.

Eğer $C_6<0$ ise bu takdirde, $Q_d \langle 0$ ve $h_{B(t+\Delta t)} \rangle h_{d(t+\Delta t)} + z_B$ olacağından, denklem;

(2.1 ,2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7)' de orifis denklemi, (2.7) eşitliği şeklinde ele alınmalıdır.

Böylece denge bacasına doğru olan Q_d debisi için, (2.1 ,2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7) denklemlerinin ortak çözümünden de;

$$Q_{d(t+\Delta t)} = 0{,}5(C_6 - \sqrt{C_5^2 - 4.C_6}) \tag{2.11}$$

denklemi elde edilir.

Burada,

$$C_5 = 2g.C_i^2.A_0^2\left[\frac{1}{\frac{g}{c_{j+1}}.A_{j+1} + \frac{g}{c_j}.A_j} + \frac{\Delta t}{2.A_d}\right] \tag{2.12}$$

$$C_6 = 2g.C_i^2.A_0^2\left[\frac{Cu_{2_{j+1}}.A_{j+1} - C_{d_{N_j}}.A_j}{\frac{g}{c_{j+1}}.A_{j+1} + \frac{g}{c_j}.A_j} + h_{d_t} + z_B - \frac{\Delta t}{2.A_d}.Q_{d_t}\right] \tag{2.13}$$

olup, (2.9) ve (2.10) eşitlikleri gibi aynıdır ve aradaki fark, sadece debi katsayılarındadır. (2.11) denklemi ise, (2.13) denkleminden elde edilen $C_6<0$ değeri için geçerlidir. Çünkü ancak bu durumda debi negatif olup bacaya doğrudur.

Böylece bu denklemler vanaların hem açılması hem de kapanması veya pompaların hem durması hem de devreye girmesi hali için uygulanabilir. Bunun için işlem sırası şöyledir:

Önce (2.10) eşitliğinden C_6 katsayısı hesaplanıp işareti kontrol edilir. Eğer $C_6 \geq 0$ ise, o zaman C_5' in değeri (2.9) eşitliğinden bulunduktan sonra Q_d'nin değeri de (2.8) denkleminden hesaplanır.

Şayet $C_6 < 0$ çıkarsa bu takdirde debi de $Q_d \langle 0$ olup, (2.11) eşitliği geçerlidir. Onun için C_6 ve C_5' in değerleri (2.12) ve (2.13) eşitliklerinden yeniden hesaplanır, Q_d 'de (2.11)' den bulunur.

Q_d' nin değeri bulunduktan sonra diğer bilinmeyenlerin değerleri de denklem (2.1 ,2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7)' deki ilgili denklemlerin çözümünden bulunur.

(2.1, 2.2, 2.3, 2.4)' ün ortak çözümünden,

$$h_{p_{N+1_j}} = h_{p_{1_{j+1}}} = h_{B(t+\Delta t)} = \frac{Q_{d(t+\Delta t)} + C_{d_{N_j}} . A_j - Cu_{2_{j+1}} . A_{j+1}}{\frac{g}{c_{j+1}} . A_{j+1} + \frac{g}{c_j} . A_j} \qquad (2.14)$$

ve (2.5) denkleminden;

$$h_{d(t+\Delta t)} = h_{d_t} - \frac{\Delta t}{2.A_d} \{Q_{d_t} + Q_{d(t+\Delta t)}\} \qquad (2.15)$$

$V_{p_{N+1_j}}$ ve $V_{p_{1_{j+1}}}$ 'in değerleri de, sırasıyla,(2.1) ve (2.2) denklemlerinden elde edilir.

2.2.1.2 Üstü Açık Basit Denge Bacası Hali

Boru hattının iç tarafında bulunan bir noktaya, Şekil 2.4' deki gibi, üstü açık ve dairesel kesitli silindirik bir hazneden ibaret basit bir denge bacasının bağlanmış olduğunu kabul edelim. Bu durumda, vananın açılması veya pompanın durması sırasındaki ilk durumu göz önüne alarak Şekil 2.4(c)' den, bacanın bulunduğu noktadaki sınır şartları için de şu denklemleri yazabiliriz:

$$C^{+}: V_{p_{N+1\,j}} = C_{d_{N\,j}} - \frac{g}{c_j}.h_{p_{N+1\,j}} \tag{2.16}$$

$$C^{-}: V_{p_{1\,j+1}} = Cu_{2_{j+1}} + \frac{g}{c_{j+1}}.h_{p_{1\,j+1}} \tag{2.17}$$

Enerji:

$$h_{p_{N+1\,j}} = h_{p_{1\,j+1}} = h_{d_{(t+\Delta t)}} + z_B \tag{2.18}$$

Süreklilik denklemi :

$$\frac{\{V_{p_{N+1\,j}} + V_{N+1\,j}\}.Aj}{2} + Q_d = \frac{\{V_{p_{1\,j+1}} + V_{1\,j+1}\}.A_{j+1}}{2} \tag{2.19}$$

$$Q_d = \frac{\{h_{d_t} - h_{d_{(t+\Delta t)}}\}.A_d}{\Delta t} \tag{2.20}$$

Bu denklem takımında $V_{p_{N+1\,j}}, V_{p_{1\,j+1}}, h_{p_{N+1\,j}}, h_{p_{1\,j+1}}$ ve $h_{d_{(t+\Delta t)}}$ olmak üzere beş bilinmeyen mevcut olup, bunlar denklemlerin ortak çözümünden bulunabilir. Denklemlerin ortak çözümünden;

$$h_{p_{N+1\,j}} = h_{p_{1\,j+1}} = \frac{h_{d_t} + z_B + \frac{\Delta t}{2.A_d}(C_5 - C_6)}{1 + \frac{g.\Delta t}{2.A_d}.\left[\frac{A_j}{c_j} + \frac{A_{j+1}}{c_{j+1}}\right]} \tag{2.21}$$

elde edilir. Burada,

$$C_5 = A_j.\left\{C_{d_{N\,j}} + V_{N+1\,j}\right\} \tag{2.22}$$

$$C_6 = A_{j+1}.\left\{Cu_{2\,j+1} + V_{1\,j+1}\right\} \tag{2.23}$$

dir, ve

$$h_{d(t+\Delta t)} = h_{p_{N+1\,j}} - z_B \tag{2.24}$$

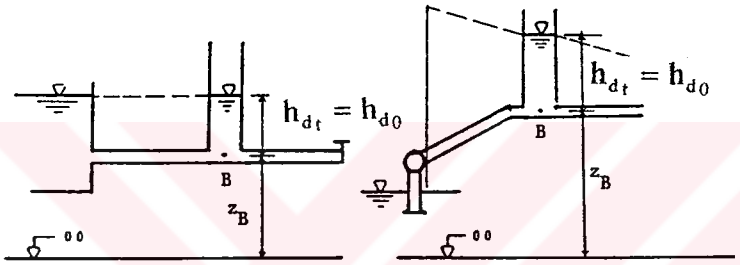
Diğer bilinmeyenler $V_{p_{N+1\,j}}$ ve $V_{p_{1\,j+1}}$ değerleri ise, sırasıyla (2.16) ve (2.17) denklemlerinden elde edilir.

Denklem (2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20)' nin yazılmasında, vananın açılması yerine kapanması sırasındaki ilk durumu da göz önüne alabiliriz. Ancak bu durumda (yani daha doğrusu akım bacaya doğru iken) denklem takımındaki süreklilik denklemi (2.19) ve (2.20);

$$\frac{\{V_{p_{N+1\,j}} + V_{N+1\,j}\}.A_j}{2} = \frac{\{V_{p_{1\,j+1}} + V_{1\,j+1}\}.A_{j+1}}{2} + Q_d$$

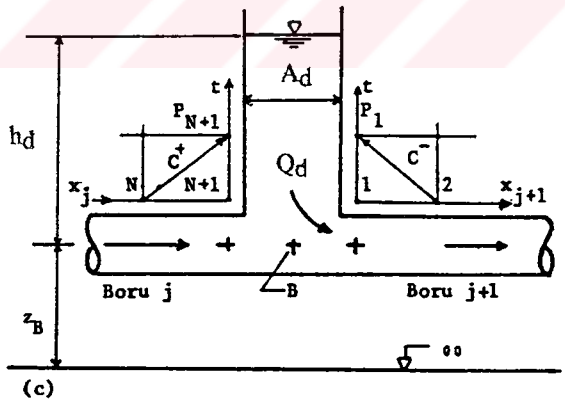
$$Q_d = \frac{\{ h_{d(t+\Delta t)} - h_{d_t} \}.A_d}{\Delta t}$$

şeklinde yazılır. Bu denklemin ise (2.16, 2.17, 2.18) denklemleri ile ortak çözümü, yine (2.21) denklemindeki gibi, aynı sonucu verir. O halde denklem takımı (2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20), vananın kapanması hali için de geçerli olur. Böylece, bu denklemler, vananın hem açılması hem de kapanması veya pompanın hem durması hem de çalışmaya başlaması sırasında uygulanabilir.



(a) Vana halinde ilk durum: Statik denge veya kararlı rejim.

(b) Terfi hattında ilk durum (t = 0 anı): Kararlı rejim.



(c)

Şekil 2.4- Boru hattı üzerinde açık uçlu ve dairesel kesitli basit bir denge bacası

2.2.1.3 Tek Yönlü Denge Bacası Hali

Denge bacasının bir terfi hattı üzerinde, sadece pompanın durması sırasında meydana gelen basınç düşüşünü önemek amacıyla, tek yönlü bir denge bacası olarak inşa edileceğini düşünelim. Bu durumda da Şekil 2.5' i göz önüne alarak, denge bacasının bulunduğu noktadaki sınır şartları için yine (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6) denklemlerindeki gibi aynı denklemleri yazabiliriz.

Tek yönlü denge bacası halinde, ancak, piyzometrik basınç çizgisi, bacadaki su seviyesinin altına düştüğünde klape açılır ve bacadan boruya doğru su akımı sadece bu durumda mevcut olur. Yani,

$$h_B(=h_p) \geq (h_d + z_B)$$

olduğu sürece klape kapalı olacağından denge bacası da devre dışıdır ve daima $Q_d = 0$ dır. Bu taktirde, bacanın bağlandığı noktada geçerli olacak denklem takımı,

$$V_{p_{N+1_j}} . A_j = V_{p_{1_{j+1}}} . A_{j+1} \tag{2.25}$$

şeklindeki süreklilik denklemi ile (2.1, 2.2, 2.3) denklemlerinden ibarettir. Böylece, bu esnadaki V_p ve h_p değerleri de bu dört denklemin ortak çözümünden elde edilir.
Yani;

$$h_{p_{N+1_j}} = h_{p_{1_{j+1}}} = h_{B(t+\Delta t)} = \frac{C_{d_{N_j}} . A_j - Cu_{2_{j+1}} . A_{j+1}}{\frac{g}{c_j} . A_j + \frac{g}{c_{j+1}} . A_{j+1}} \tag{2.26}$$

dir. ve $V_{p_{N+1_j}}$'nin değeri (2.1) denkleminden, $V_{p_{1_{j+1}}}$'in değeri de (2.2) denkleminden bulunur.

Eğer $h_p < h_d + z_B$ ise, bu takdirde klape açılacak ve denge bacası devreye girmiş olacağından, (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6) denklemleri geçerli olacaktır. Böylece C_5 ve C_6 'nın değerleri (2.9) ve (2.10) denklemlerinden hesaplanarak, (2.8) denkleminden Q_d 'nin değeri bulunur. Fakat bacaya doğru ters bir akım meydana geldiğinde klape kapanacaktır. Bu nedenle Q_d 'nin işaretinin negatif olup olmayacağını belirlemek üzere C_6'nın değeri devamlı kontrol edilir:

Eğer $C_6 > 0$ ise bu takdirde (2.8) eşitliğinden elde edilen Q_d değeri kullanılarak (2.5) eşitliğinden;

$$h_{d(t+\Delta t)} = h_{d_t} - \frac{\Delta t}{2.A_d}\left\{ Q_{d_t} + Q_{d(t+\Delta t)} \right\} \tag{2.27}$$

ve (2.6) eşitliğinden,

$$h_{p_{N+1_j}} = h_{p_{1_{j+1}}} = h_{B(t+\Delta t)} = h_{d(t+\Delta t)} + z_B - \frac{Q_{d(t+\Delta t)}^{\ 2}}{2g.C_0^2.A_0^2} \tag{2.28}$$

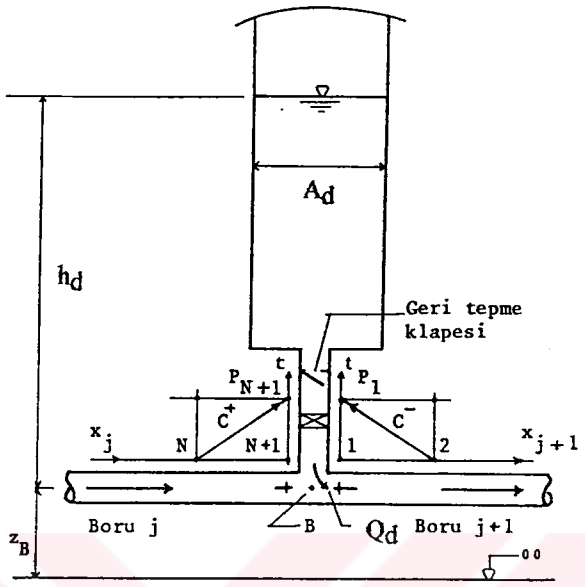
olarak hesaplanır. Ve $V_{p_{N+1_j}}, V_{p_{1_{j+1}}}$ hız değerleri de, sırasıyla, (2.1) ve (2.2) den elde edilir.

Eğer $C_6 \leq 0$ ise bu takdirde klape kapatılacak ve Q_d sıfıra eşitlenecektir. Bu durumda da h_p ve V_p 'lerin değeri (2.26), (2.1) ve (2.2)' den bulunur.

Tek yönlü denge bacalarında ana boruya bağlantı bir boru ile yapılır. C_0 debi çıkış katsayısı, bu bağlantı tipine bağlı olarak 0,60 ile 0,98 arasında değişir. Bağlantı borusu boyunca büyük yük kayıplarını önlemek için bağlantı, yeteri kadar geniş ve hidrolik bakımdan yeteri kadar randımanlı olacak şekilde yapılmalıdır. Çünkü bacanın asıl amacı, boru hattındaki basıncın belli bir seviyenin altına düşmesini önlemektir.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Minimum basınç çizgisi boru hattını kesmemeli ve hatta emniyet bakımından 5-6 m yüksekte kalmalıdır.



Şekil 2.5- Tek yönlü denge bacası (one-way surge tank)

2.2.2 Denge Bacalarının Boyutlandırılması

Basınçlı borularda denge bacalarının dizaynı, bacaların boruya bağlandığı noktalarda özel sınır şartı olarak yazılan denklemleri kullanmak suretiyle, kararsız akım (su darbesi) denklemlerinin çözümüyle yapılır. Bunun için verilen sistemde, önce bir su darbesi analizi yapılarak hat boyunca maksimum ve minimum basınçlar belirlenir. Bu noktalar birer parabol üzerindedir. Minimum basınç parabolü boruyu kesmemeli ve maksimum basınç parabolü de borunun dayanabileceği basınç sınırını aşmamalıdır. Böylece bacanın yerleştirileceği kritik noktalar belirlenmiş olur.

Hat üzerinde kritik olan nokta belirlendikten sonra, önce bir baca kesiti ve orifis (bordo boğumu veya delikli klape) seçilerek, bu noktaya bir baca yerleştirildiği kabul edilir.

Bu defa baca varken, bacanın bulunduğu noktada bu baca ile ilgili olarak geliştirilmiş olan sınır şartı denklemleri kullanılarak, boru hattı boyunca maksimum ve minimum basınçların değerleri yeniden çözülür. Bu basınçlar istenilen değerlerde değilse, orifis ve baca kesiti, duruma göre arttırılmak veya küçültülmek suretiyle, değiştirilerek çözüm tekrarlanır. Böylece, her seferinde yeni bir baca kesiti ve orifis kabul edilerek, istenen sonuç elde edilinceye kadar çözüme devam edilir.

Bu tatonman çözümde silindirik bir baca için başlangıçta seçilecek baca kesiti, sırf bir aşama olarak, şu formülle hesaplanabilir:

$$A_d = \frac{L.A}{g}.(\frac{V_0}{h_0})^2$$

Burada A_d , baca enkesit alanı m^2; L, terfi hatlarında bacanın mansabında kalan ve hidroelektrik santrallerde bacanın menba tarafında bulunan boru boyu m.; A, boru enkesiti m^2; V_0, boruda kararlı akım sırasındaki maksimum hız değeri m/sn ve h_0, bacanın bağlandığı noktada statik su seviyesinin boru ekseninden olan yüksekliği mss.

Pompaların durması veya vanaların kapanması hallerinde olduğu gibi, boruda başlangıçtaki akış kararlıdır ve çözüme kararlı akım şartlarından başlanır. Bu nedenle, bacada gerek Q_d ' nin ve gerekse h_d ' nin başlangıçtaki (yani t=0 anındaki) değerleri kararlı akım şartlarından bellidir. Boruda kararlı akış sırasında, denge bacasındaki su yüzeyi ile kararlı akım piyzometrik basınç çizgisi aynı seviyede dengede olduğundan Q_d =0 ve h_d ' nin değeri de basınç çizgisinin bacadaki yüksekliği olarak alınır.

Vanaların tamamen kapalı iken açılması veya pompaların çalışmaya başlaması hallerinde de başlangıçta sıvı, tüm sistem boyunca sukunette olup, statik denge halindedir ve çözüme statik denge şartlarından başlanır.

Vanaların açılıp kapanması sırasında denge bacasındaki en düşük su seviyesi, vananın tamamen kapalı iken ani olarak tam açılması halinde meydana gelir. Buna karşılık en yüksek su seviyesi de, vananın tamamen açık iken ani olarak tam kapanması halinde oluşur. Bu bakımdan vananın, ani olarak, hem açılması hem de kapanması haline karşı kullanılacak bir baca yüksekliğinin tayininde bu değerler önemlidir. Böyle durumlarda, suyun baca içinde yükselebileceği en büyük değeri ve düşebileceği en küçük değeri belirleyebilmek için, ani kapanma ve ani açılma hali ayrı olarak ele alınmalıdır.

Hidroelektrik tesislerinde denge bacaları, cebri boru ucunda bulunan ve elektrik yükü talebine göre süratle açılıp kapanmakta olan türbin kapaklarının oluşturacağı aşırı basınçlara karşı kullanılırlar. Bu nedenle bacayla ilgili denklemlerin uygulanmasında, kapakların tamamen açık iken (yani türbinler maksimum işletme debisiyle çalışırken) ani olarak tam kapanması ve kapakların tamamen kapalı iken (yani işletme debisi sıfır iken) ani olarak tam açılması halleri ayrı ayrı ele alınır. Bu hesaplar, ani tam kapanma sırasında biriktirme gölündeki maksimum su seviyesine göre ve ani tam açılma sırasında da biriktirme gölündeki minimum su seviyesine göre yapılır.

Vananın kapalı iken ani olarak tam açılması halinde, vanadaki hız değerinin de ani olarak maksimum değere ulaştığı kabul edilir. Bu durumda, vanada başlangıçtaki hız $V=0$, fakat Δt zaman sonra ve müteakip zaman seviyelerinde hep $V=V_{max}(=V_0)$ olarak alınabilir. Ani olarak tam kapanma halinde ise, vanadaki hız değeri de başlangıçta $V=V_0$ ve müteakip zaman seviyelerinde de $V=0$ alınır.

Diğer hallerde ise, vananın açılma ve kapanmasının bir programa göre yapıldığı ve vanadaki hızın, kapanma veya açılma süresinin bir fonksiyonu olarak verildiği kabul edilir.

2.3 Hava Kazanları

Hava kazanı, içinde sıvı ve yüzeyi üzerinde sıkıştırılmış gaz ihtiva eden kapalı bir tanktır. Hava kazanları, terfi hatlarında aşırı basınçların önlenmesinde en çok kullanılan cihazlardır. Hava kazanları kısa bir boru ile pompalardan hemen sonra terfi hattına bağlanırlar (Şekil 2.6 veya 2.7).

Su darbesi olayı sırasında oluşan aşırı basınçların kontrol altına alınmasında, şüphesiz, en iyi cihaz üstü açık denge bacasıdır. Fakat pompajlı sistemlerde, özellikle pompa yanında ekonomik ve estetik nedenlerden ötürü bu tip denge bacası bu amaçla nadiren kullanılır.

Pompa yanında tehlikeli basınçlara neden olabilecek dinamik basma yükseklikleri çok büyüktür. Örneğin, pompa yanında dinamik basma yüksekliği 60 m ise, bundan daha yüksek bir baca yapılması gerekir. Bu yükseklikte baca yapmak her zaman mümkün olmaz. Bu nedenle pompa yakınından denge bacaları fazla tatbikat görmemiştir. Onun için terfi hatlarında, denge bacası gibi yaklaşık olarak aynı görevi görebilen, fakat daha küçük bir hacmi gerektiren, hava kazanı kullanılır.

Terfi hattında hava kazanının başlıca görevi, pompanın durması sırasında kazanın mansap tarafındaki boru hattında oluşan basınç düşüşünü, dolayısıyla, kavitasyonu önlemek ve aynı zamanda basınç artışını sınırlamaktır.

Boru hattında basınç düşüşü sırasında, sıvı kazandan boruya geçer ve basıncın düşmesine mani olur. Veya basınç düşüşünü azaltır. Bu sırada kazan içinde sıvının üzerindeki gazın hacmi genişleyerek basıncı düşer. Kazan içinde basıncın düşme hızı, kazandaki gazın başlangıçtaki (yani ilk) hacmine, gazın maruz kaldığı termodinamik değişime ve suyun kazandan boruya akış hızına bağlıdır.

Basınç artışı zamanında ise sıvı borudan kazana girer, basınç artışı neticesi gaz hacmi küçülür ve basınç artışı azalır. Kazan içindeki gaz bir nevi esnek yay (yani amortisör) vazifesi görür.

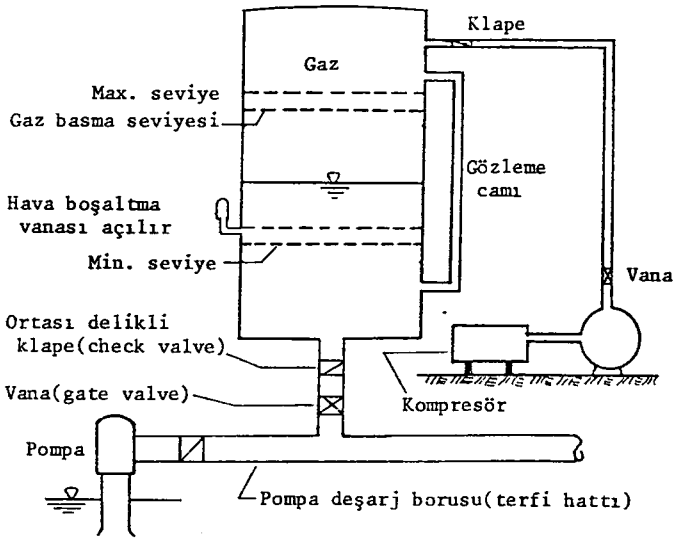
Hava kazanı, basınç düşüşü sırasında kazandaki sıvı tamamen boşalıp gaz boruya kaçmayacak ve boru hattındaki sıvı ihtiyacını karşılayacak şekilde yeteri büyüklükte olmalıdır. Genel olarak, kazanın mansabında kalan terfi borusu hacminin %1 veya %2 si normal kazan hacmi için bir aşama olarak alınabilir.

Aynı zamanda kazandaki ilk gaz hacmi de, basınç düşüşü çok hızlı olmayacak şekilde, yeteri büyüklükte olmalıdır. Başlangıçtaki gaz hacminin gereğinden çok küçük olması halinde, kazanın basınç düşüşünü azaltmadaki etkisi de çok az olacaktır. Ayrıca, basınç artışının azaltılması ve aynı zamanda salınımın sönümleme süresinin küçültülmesi için de kazanın boruya bağlantı kısmı, sıvının kazana girişinde büyük yük kaybı oluşturacak biçimde yapılmalıdır. Ancak böylece kuvvetli sönümleme elde edilir. Bu bağlantı sıvının boruya geçiş yönünde mümkün mertebe az yük kaybına sebep olmalıdır. Nihayet hava kazanının bu fonksiyonları mümkün olduğu kadar en küçük hacim ve en az masrafla başarılmalıdır.

Yük kaybının büyük olduğu yerlerde su darbesi büyük olmaz. Yük kaybının az olduğu yerlerde salınım uzun zaman devam eder, dalga geç sönümlenir.

Kazana girişte büyük ve çıkışta küçük yük kaybı temini için, kazanın önüne ortası delik bir klape (check valve) konur (Şekil 2.6). Klape suyun kazana dönüşünde kapanır ve delik büyük yük kaybı yaşar. Eğer deliğin boyutu iyi seçilmiş ise basınç artışı makul seviyeye iner. Su, kazandan boruya geçerken klape açılır ve çok az bir yük kaybı oluşur. Yük kaybı temini önemlidir.

Çünkü borudaki yük kaybı ihmal edilecek kadar azdır.



Şekil 2.6- Bir hava kazanı ve donanımının şematik görünümü

Delikli klape yerine, klapeye ilave edilen ufak çaplı bir by-pass da aynı işi görebilir (Şekil 2.8(a)). By-pass üzerindeki vana duruma göre ayarlanır. Basınç artışı esnasında klape kapanır, su by-pass dan geçer ve büyük bir yük kaybı oluşturur.

Yük kaybı temini için borda orifisi de kullanılır. Borda orifisinde sıvının borudan hava kazanına girişi sırasındaki yük kaybı, aksi yöndekine nazaran takriben 2,5 misli fazladır (Şekil 2.8(b)).Borda orifisi klape deliği kadar istenilen şekilde ayarlanamaz. İki yöndeki yük kayıpları oranı belirli bir değerden küçük yapılamaz. Böylece sıvının boruya geçişi yönünde de fazla yük kaybına sebep olur. Bu bakımdan klape genellikle tercih edilir.

Kazanda gereğinden fazla miktarda gaz bulunursa boruya kaçar, az bulunursa kazan aşırı basınçları azaltmada fazla etkili olmaz. Basınç düşüşü ve basınç artışı sınırları aşılmış olur.

Kazan içinde sıvıda eriyen gazı da tamamlamak gerekir. Eriyen gazı telafi etmek için otomatik olarak çalışan kompresörler kullanılır. Bu bakımdan haza kazanları fazla bakım ister.

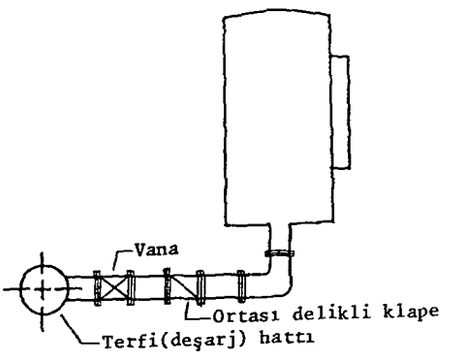
Kazan içindeki sıvı yüzeyi ne kadar büyük olursa gazın erimesi de o nisbette büyük olur. Onun için kazanlar düşey olarak yerleştirilir. Fakat basınç ne kadar büyük olursa eriyen gaz o kadar fazla olur. Bu bakımdan kazandaki maksimum gaz basıncının belirli bir değeri aşması da arzu edilmez. 150 N/cm^{2}' lik ve daha büyük basınçlarda hava kolay eriyeceği için ekseriya bu değer aşılmaz. Çok büyük kazanlar mecburi olarak yatık konur.

Kazan içinde gaz olarak genellikle hava kullanılır. Fakat hava yerine yarı yarıya daha az eriyen azot gazı da kullanılabilir.

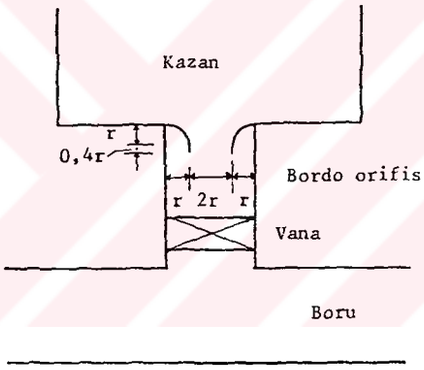
Kazan hacmi hesabında gazın genleşmesi, izoterm yerine, adyabatik olduğu kabul edilirse hacim 1,4 misli daha büyük elde edilir. Gerçekte kazan içindeki gazın genleşmesi ne izoterm ne de adyabatik olmayıp, ikisinin arasında bir özellikte olur. Onun için gaz hacmi genellikle 1,2 misli fazla alınır.

Ekonomik bakımdan, bazı özel haller hariç, hava kazanları büyük tutulmaz. Kuyularda olduğu gibi bir çok pompa bir boruya basarsa, tek bir kazan kafi gelmeyebilir, bir kaç kazan koymak gerekir.

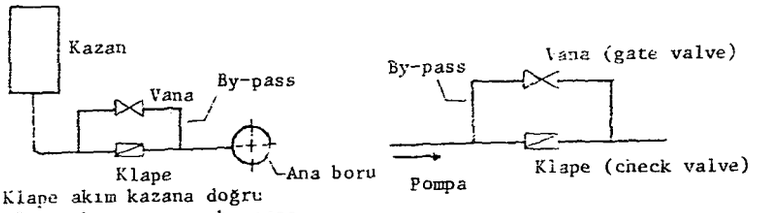
Hava kazanları, devamlı bakım gerektirdiklerinden, pompa yakınına yerleştirilirler. Bu bakımdan hava kazanlarının pompa istasyonlarından uzak olmaları mahzurlu sayılır.
Eğer yükseklikler müsait ise pompadan uzak olan noktalara denge bacası yerleştirilebilir.



Şekil 2.7- Terfi hattına yandan bağlı hava kazanı



(b) Bordo orifisli hava kazanı çıkış ağzı

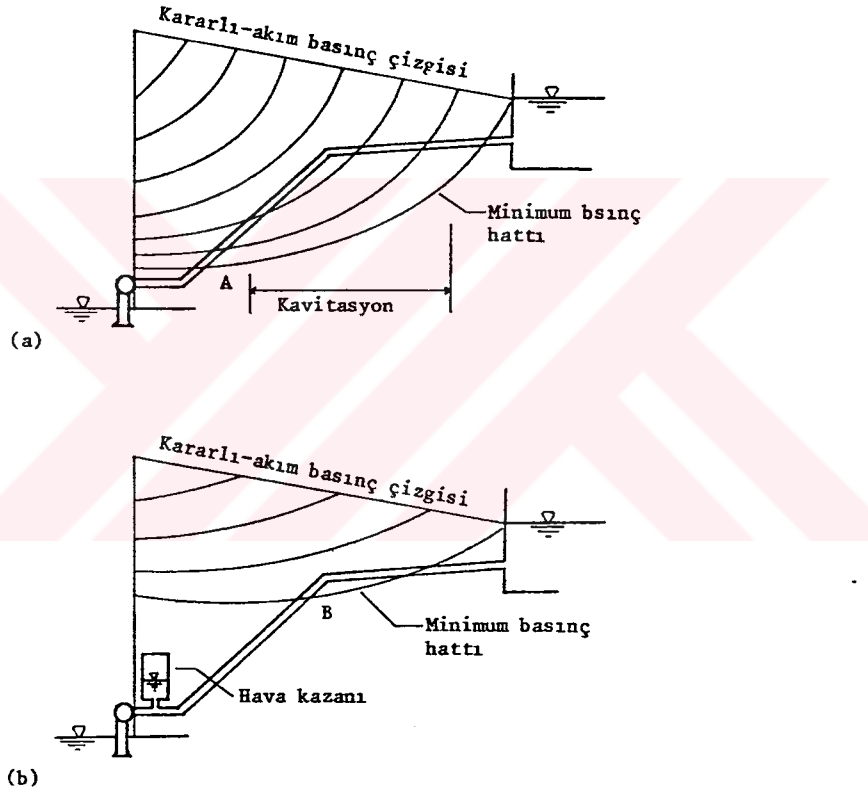


Klape akım kazana doğru olunca kapanır, su by-pass dan geçer.

(a) By-pass

Şekil 2.8-

Şekil 2.9' da hava kazanının, pompanın durması sırasında, terfi hattındaki basınç düşüşünü nasıl azalttığı mukayeseli olarak şematik bir şekilde gösterilmiştir. Aynı şekil, pompa çıkışına konan bir hava kazanının her zaman terfi hattındaki kavitasyonu tamamen önlemeye yeterli olamayacağını da göstermektedir. Pompa yakınındaki hava kazanına rağmen minimum basınç hattı B noktasında yine boruyu kesmekte ve kavitasyon oluşmaktadır. Bu durum ekseriya büyük debi ve yüksek noktalar ihtiva eden uzun boru hatlarında meydana gelir.



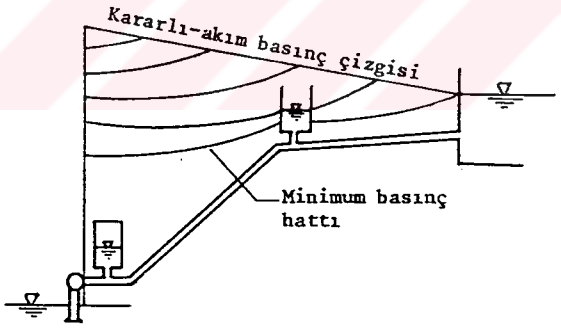
Şekil 2.9- Bir pompajlı sistemde pompanın durması sırasında negatif basınç dalgasının terfi hattı boyunca mansaba doğru yayılışı:

(a) Hava kazanı mevcut değilken,

(b) Hava kazanı mevcut iken.

Profilde yüksek noktalar ihtiva eden uzun terfi hatlarında pompanın durması esnasında oluşan minimum basınç hattı, Şekil 2.9(a)' daki gibi, A dan itibaren boruyu kesecektir. Bu durumda, kavitasyonu önleyebilmek için, hava kazanı çok büyük olacaktır veya Şekil 2.9(b)' deki gibi belki de tek kazan sorunu çözemeyecektir. Bu takdirde, pompa yanındaki kazana ilaveten bir kazan da B noktasına koymak gerekir. Ancak B noktası pompadan uzakta ise bu kazanın bakımı zor olur.

B' deki basınç artışı fazla değil ise B' ye üstü açık bir denge bacası koymak ve basınç artışı fazla fakat bir tehlike yaratmıyorsa tek yönlü bir denge bacası koymak en iyi bir çözümdür. Pompa durmaya başlayınca su bacadan boruya girer ve böylece baca, minimum basınç hattının boru eksenine kadar düşmesini önler (Şekil 2.10). Tek yönlü denge bacasının altında, sadece basınç düşüşü zamanında açılacak bir klape (çoğu kez küresel tipte) mevcuttur. Bu klape derhal açılıp yavaş kapanmalıdır.

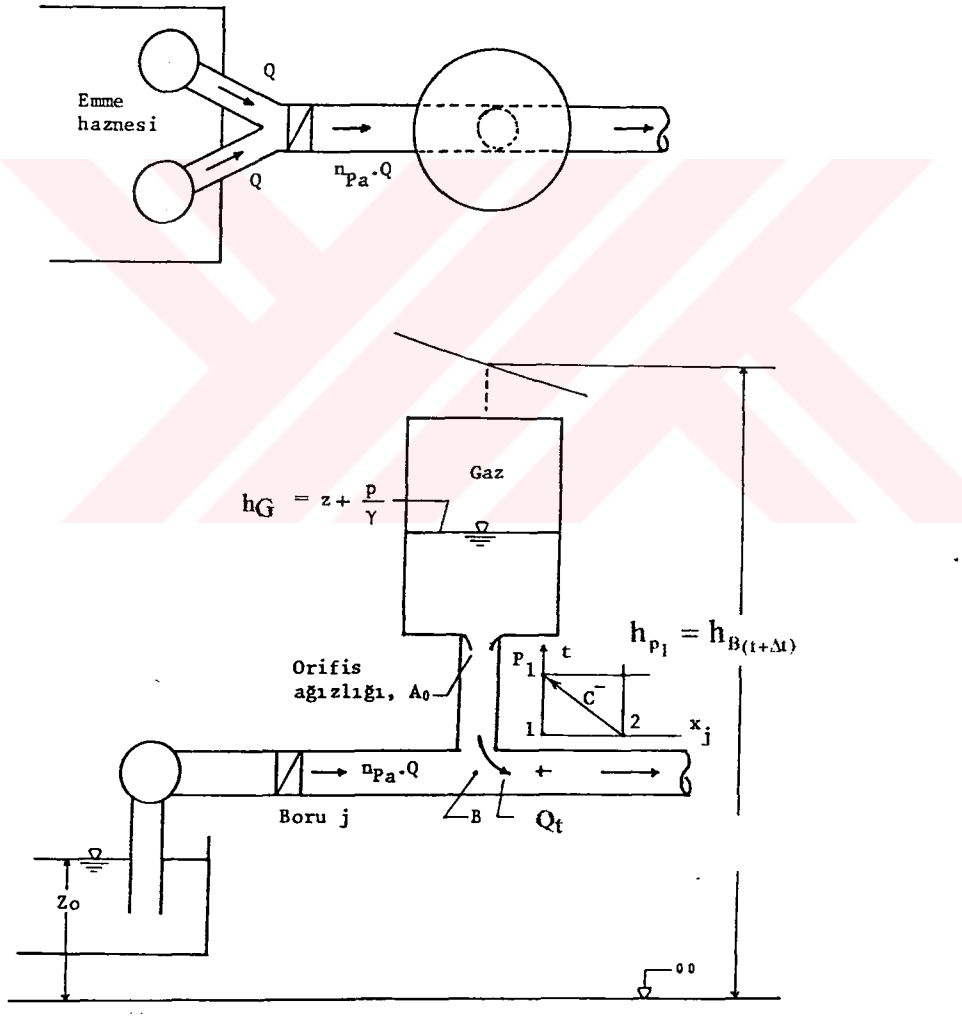


Şekil 2.10- Terfi hattında bir hava kazanı ve tek yönlü bir denge bacası mevcut iken pompanın durması sırasında negatif dalganın yayılışı.

2.3.1 Hava Kazanı Boyutunun Analizi

2.3.1.1 Hava Kazanının Pompanın Hemen Çıkışına Konması Hali

Pompa çıkışına konan hava kazanının sınır şartına katkısı pompa sınır şartı ile birleştirilebilir. Şekil 2.11' deki gibi k kademeli ve paralel bağlı n_{Pa} adet pompanı mevcut olduğu bir pompajlı sistemi ele alalım ve en tehlikeli hal olarak da, bütün pompalara gelen gücün aniden kesildiği kabul edilecektir.



Şekil 2.11- Pompanın hemen çıkışında bir hava kazanı bulunması hali.

Şekil 2.11' e bakarak bu durum için geçerli denklemleri şöyle yazabiliriz:

Kazanın Mansabında:

$$C^{-} = V_{p_{1j}} = Cu_{2j} + \frac{g}{c_j}.h_{p_{1j}} \tag{2.29}$$

Enerji:

$$h_{p_{1j}} = h_{B(t+\Delta t)} \tag{2.30}$$

Süreklilik:

$$n_{pa}.Q_{(t+\Delta t)} + Q_{t(t+\Delta t)} = V_{p_{1j}}.A_j \tag{2.31}$$

Enerji (pompada):

$$z_o + h_{m(t+\Delta t)} = h_{p_{1j}} \tag{2.32}$$

Pompada:

$$h_{m(t+\Delta t)} = k.N_{(t+\Delta t)}{}^2.\{a.\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{N_{(t+\Delta t)}} + b\} \tag{2.33}$$

Burada a ve b pompa karakteristik eğrisine ait katsayılardır.

ve kazan girişinde enerji denklemi (orifis bulunduğuna göre),

$h_{G(t+\Delta t)} \rangle h_{B(t+\Delta t)}$ için, yani sıvının kazana girişinde;

$$Q_{t(t+\Delta t)} = C_0.A_0(2g)^{1/2}\left[h_{G(t+\Delta t)} - h_{B(t+\Delta t)}\right]^{1/2} \qquad (2.34)$$

veya $h_{G(t+\Delta t)} \langle h_{B(t+\Delta t)}$ için, yani sıvının kazandan çıkışında:

$$Q_{t(t+\Delta t)} = C_i.A_i.(2g)^{1/2}.\left[h_{B(t+\Delta t)} - h_{G(t+\Delta t)}\right]^{1/2} \qquad (2.35)$$

Bu denklemlerde Q, pompalardan birinin bastığı debinin herhangi bir andaki değeri; h_m, pompa dinamik basma yüksekliğinin herhangi bir andaki değeri; Q_t, kazana giren ve çıkan debinin herhangi bir andaki değeri ve h_G, metre sıvı sütunu olarak kazan içindeki gaz basıncı yükü ile kazandaki su seviyesinin kıyas düzleminden olan toplamının herhangi bir andaki değeridir. C_0, akım kazandan boruya doğru iken orifis debi katsayısı ve A_0, orifis ağızlığının enkesit alanıdır. C_i ise, akım borudan kazana doğru iken olan debi katsayısı ve bu durumda $A_i=A_0$ olup yine orifis ağızlığının alanını ifade eder.

Şimdi (2.29, 2.30, 2.31, 2.32, 2.33 ve 2.34 veya 2.35) olmak üzere elimizde 6 denklem mevcuttur. Bu 6 denklemde ise $V_{P_{1j}}, h_{P_{1j}}, h_{B(t+\Delta t)}, Q_{(t+\Delta t)}, Q_{t(t+\Delta t)}, h_{m(t+\Delta t)}, h_{G(t+\Delta t)}$ olmak üzere 7 tane de bilinmeyen mevcuttur. O halde bir denkleme daha ihtiyaç vardır.

Bu 7. denklem, hava kazanı içindeki gazın politropik kanuna uyduğu varsayılarak, gazın hal denkleminden elde edilir. Termodinamikte bir gazın basıncı ile hacmi arasındaki ilişkiyi veren hal denklemi,

$$p.(VG)^n = p_0.(VG_0)^n = \text{sabit}$$

şeklinde yazılır. Burada p_0 ve VG_0, sırasıyla, gazın başlangıçtaki mutlak basıncı ve hacmi, p ve VG, bunların daha sonraki bir zamanda olan değerleridir. n, politropik

katsayı olup, izotermik değişim halinde n=1 ve adiabatik değişim halinde, azot gazı ve hava için, n=1,4 dür. Kazanda gaz olarak azot veya havanın kullanılması halinde bu değerlerin ortalaması, yani n=1,2 alınabilir.

Atmosferik basınç yükü olarak $p_{at} / \gamma = h_{at}$ kullanılırsa ve kazandaki su yüksekliğinin etkisi ihmal edilirse, hal denklemi basınç yükü cinsinden,

$$\gamma_{su}\cdot\left[h_{at} + h_{G(t+\Delta t)} - z_B\right]\cdot\left[VG_{(t+\Delta t)}\right]^{1/2} = \gamma_{su}\cdot\left[h_{at} + h_{G0} - z_B\right].(VG_0)^{1/2}$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikten de

$$h_{G(t+\Delta t)} = \frac{\{h_{at} + h_{G0} - z_B\}.(VG_0)^{1,2}}{\{VG_{(t+\Delta t)}\}^{1,2}} + z_B - h_{at} \qquad (2.36)$$

elde edilir. Burada z_B, kazanın bağlandığı noktada boru ekseninin kıyas düzleminden olan yüksekliğidir.

Terfi hattında başlangıçta kararlı akım mevcut iken kazan içindeki sıvı dengededir. Böylece başlangıçtaki (yani t=0 anındaki) h_{G0} değeri, t=0 anında B noktasındaki h_B değerine eşittir ve başlangıçtaki gaz hacmi VG_0 da bellidir.(Çünkü biz seçiyoruz.)

Başlangıçtaki gaz hacmi belli olduğuna göre Δt zaman aralığı sonundaki gaz hacmi, kazan içindeki süreklilik koşulu;

$$VG_{(t+\Delta t)} = VG_t + \Delta t.Q_{t_t} \qquad (2.37)$$

denkleminden hesaplanabilir. $VG_{(t+\Delta t)}$ bilinince $h_{G(t+\Delta t)}$ değeri de (2.36) eşitliğinden hesaplanabilir. Böylece (2.29, 2.30, 2.31, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35) denklemlerindeki bilinmeyen sayısı da 6' ya inmiş olur.

Kazandan boruya doğru olan Q_t debisi için, (2.29, 2.30, 2.31, 2.32, 2.34) denklemlerinin ortak çözümünden;

$$Q_{t(t+\Delta t)} = 0{,}5\{-C_5 \pm \sqrt{C_5^2 - 4.C_6}\}$$

elde edilir. Q_t 'nin hem (+) hem de (-) çıkabilmesi için de

$$Q_{t(t+\Delta t)} = 0{,}5\{-C_5 + \sqrt{C_5^2 - 4.C_6}\} \qquad (2.38)$$

eşitliği kullanılmalıdır. Burada;

$$C_5 = \frac{2g.C_0^2.A_0^2.a.k.N_{(t+\Delta t)}}{a.k.A_j.N_{(t+\Delta t)}.\dfrac{g}{c_j} - n_{Pa}} \qquad (2.39)$$

$$C_6 = 2g.C_0^2.A_0^2\left[-h_{G(t+\Delta t)} - \frac{z_0 + \dfrac{a.k.A_j.N_{(t+\Delta t)}.Cu_{2_j}}{n_{Pa}} + b.k.N_{(t+\Delta t)}^2}{\dfrac{a.k.A_j.N_{(t+\Delta t)}.g}{n_{Pa}.c_j} - 1}\right] . \qquad (2.40)$$

Burada k , pompa kademe sayısıdır.

Bu denklemlerle Q_t hesaplandıktan sonra Q, (2.29, 2.31, 2.34) denklemlerinin ortak çözümünden elde edilen aşağıdaki denklemler hesaplanır.

$$Q_{t(t+\Delta t)} = \frac{A_j}{n_{Pa}}\left[Cu_{2j} + \frac{g}{c_j}\left(h_{G(t+\Delta t)} - \frac{Q_{t(t+\Delta t)}^{\ 2}}{2g.C_0^2.A_0^2}\right) - \frac{Q_{t(t+\Delta t)}}{A_j}\right] \qquad (2.41)$$

Eğer (2.41) eşitliğinden elde edilen sonuç Q>0 ise çözüm geçerlidir. O zaman geriye kalan diğer bilinmeyenler (2.29, 2.30, 2.31, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35) denklemlerindeki ilgili denklemlerden hesaplanabilir:

(2.31)' den $V_{p_{1j}}$, (2.29)' dan $h_{p_{1j}}$, (2.32)' den $h_{m(t+\Delta t)}$ hesaplanır.

Sonra da (2.37)' den $C_{t(t+\Delta t)}$ ve (2.36)' dan da $h_{G(t+\Delta t)}$' nin değeri bulunur.

Eğer Q≤0 ise bu takdirde pompaların önündeki klapeler kapanmış olacağından Q=0 yapılır. Bu durumda Q_t ' nin değeri aşağıdaki denklemlerden yeniden hesaplanmalıdır.

Q<0 olmasına rağmen su akışı hala kazandan boruya doğru olabilir.

Onun için (2.38) denkleminden elde edilen Q_t' nin işareti de kontrol edilir:

Eğer Q_t ≥0 ise bu takdirde süreklilik denklemi (2.31), Q=0 alınacağından,

$$Q_{t(t+\Delta t)} = V_{p_{1j}}.A_j \qquad (2.42)$$

şeklinde olur. O zaman $Q_{t)}$' nin değeri de, bu süreklilik denklemi ile birlikte (2.29, 2.30, 2.34) denklemlerinin ortak çözümünden elde edilen aşağıdaki eşitlik kullanılarak yeniden hesaplanmalıdır.

$$Q_{t(t+\Delta t)} = 0{,}5\ \{-C_5 + \sqrt{C_5^2 - 4.C_6}\} \qquad (2.43)$$

$$C_5 = \frac{2g.C_0^2.A_0^2}{A_j.\frac{g}{c_j}} \qquad (2.44)$$

$$C_6 = 2g.C_0^2.A_0^2\left[h_{G(t+\Delta t)} + \frac{Cu_{2j}}{g/c_j}\right] \qquad (2.45)$$

(2.43) denklemi ise, (2.45) eşitliğinden elde edilen C_6 nın değeri $C_6 \geq 0$ için geçerlidir. Bu durumda, (2.43)' den de açıkça görüleceği gibi, $Q_t \geq 0$ dır. Böylece bu durum için Q_t'nin değeri (2.43)' den belirlendikten sonra $V_{p_{1j}}, h_{p_{1j}}$ nin değerleri de, sırasıyla, (2.42) ve (2.29) denklemlerinden,

$$V_{p_{1j}} = Q_{t(t+\Delta t)} / A_j \qquad (2.46)$$

$$h_{p_{1j}} = \frac{V_{p_{1j}} - Cu_{2j}}{g/c_j} \qquad (2.47)$$

olarak hesaplanır. Sonra da C_t, h_G'nin değeri yine (2.37) ve (2.36)' dan bulunur.

Sıvı akımı borudan kazana doğru olduğu sırada da pompaların sistemle ilişkisi kesilmiş olur. Bu durumda, ne (2.38) ne de (2.43) denklemi geçerli değildir. Q_t nin değeri için yeni bir denklem takımının çözümü gerekir.

Hava kazanına doğru olan akım için de, yine Q=0 olup, (2.42) denklemi ile birlikte (2.29, 2.30, 2.35) denklemleri geçerlidir. Böylece kazana doğru olan Q_t debisi için, bu denklemlerin ortak çözümünden,

$$Q_{t(t+\Delta t)} = 0{,}5\ \{C_5 - \sqrt{C_5^2 - 4.C_6}\} \qquad (2.48)$$

elde edilir.

Burada;

$$C_5 = \frac{2g.C_i^2.A_i^2}{A_j.g/c_j} \tag{2.49}$$

$$C_6 = 2g.C_i^2.A_i^2\left[h_{G(t+\Delta t)} + \frac{Cu_{2_j}}{g/c_j}\right] \tag{2.50}$$

dır ve $C_6<0$ için de (2.48)' nin sonucu daima negatifdir. Bu nedenle (2.48) denklemi de sadece $C_6\leq 0$ için geçerlidir.

Böylece eğer (2.38) denkleminden $Q_t<0$ elde edilmiş olunuyorsa ya da $Q_t\geq 0$ elde edilmiş olup (2.45)' nin sonucu $C_6<0$ çıkarsa, bu takdirde Q_t 'nin değeri (2.48)' den yeniden hesaplanır. Diğer bilinmeyenler de sırasıyla (2.46, 2.47, 2.37, 2.36) denklemlerinden elde edilir.

C_i nin değeri, bir dereceye kadar, ağızlığın şekline bağlıdır. Fakat genellikle re-entrant tipi kasa tüplere ait debi katsayıları kullanılır. Bu nedenle tavsiye edilen C_i değerleri 0,80-0,50 arasında değişir.

Kazan girişinde orifis yerine kısa düz bir boru da kullanılabilir. Bu durumda, kazan giriş borusunun iki ucu arasında rijid sıvı teorisine göre kararsız akım enerji denklemi uygulanarak orifis denklemi (2.34, 2.35) yerine aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

Akım kazandan boruya doğru iken:

$$h_{G(t+\Delta t)} - h_{B(t+\Delta t)} - K.u_{(t+\Delta t)}.\left|u_{(t+\Delta t)}\right| = \frac{L_0}{g}.\frac{u_{(t+\Delta t)} - u_t}{\Delta t}$$

veya bunu debi cinsinden aşağıdaki şekilde de yazabiliriz:

$$h_{G(t+\Delta t)} - h_{B(t+\Delta t)} - p.Q_{t(t+\Delta t)}{}^2 = \frac{L_0}{g.A_0}.\frac{Q_{t(t+\Delta t)} - Q_t}{\Delta t} \qquad (2.51)$$

Bu denklemde L_0, kazan giriş borusu boyu; A_0, giriş borusu enkesit alanı ve u , giriş borusundaki akımın hızıdır. Yük kaybı için Darcy-Wiesbach formülü kullanıldığında;

$$p = \frac{0{,}443\,\lambda\ .L_0}{g.A_0^{3/2}}$$

Strickler formülü kullanıldığında da:

$$p = \frac{5{,}4\ L_0}{m^2.A_0^{7/3}}$$

alınır. Burada λ, kazan giriş borusundaki Darcy-Weisbach ve m, Strickler sürtünme katsayısını ifade eder.

Akım borudan kazana doğru iken de (2.51) denklemi,

$$h_{B(t+\Delta t)} - h_{G(t+\Delta t)} - p.Q_{t(t+\Delta t)}{}^2 = \frac{L_0}{g.A_0}.\frac{Q_{t(t+\Delta t)} - Q_t}{\Delta t} \qquad (2.52)$$

şeklinde yazılmalıdır.

Böylece kazandan boruya doğru olan Q_t debisinin çözümü için, (2.29, 2.30, 2.31, 2.32) denklemleri ile birlikte (2.51) denklemi kullanılırsa (2.38) denklemindeki katsayılar aşağıdaki gibi olur:

$$C_5 = \frac{k.a.N + \frac{L_0}{g.A_0.\Delta t}\left[k.a.N.A_j.\frac{g}{c_j} - n_{Pa}\right]}{p.k.a.N.A_j\frac{g}{c_j} - P.n_{Pa}} \tag{2.53}$$

$$C_6 = \frac{1}{p}.\left[-h_{G(t+\Delta t)} - \frac{L_0 Q_{tt}}{g.A_0.\Delta t} - \frac{z_0.n_{Pa} + k.b.N^2.n_{Pa} + k.a.N.A_j.Cu_{2j}}{k.a.N.A_j.\frac{g}{c_j} - n_{Pa}}\right] \tag{2.54}$$

Burada N, pompanın devir sayısı (dev/dak)' dır.

Burada $N = N_{(t+\Delta t)}$' dir.

Q debisinin hesabı için de, (2.41) denklemi yerine, (2.29, 2.31) ve (2.51)' nin ortak çözümünden elde edilen aşağıdaki denklem kullanılır.

$$Q_{(t+\Delta t)} = \frac{A_j}{n_{Pa}}.\left[Cu_{2j} + \frac{g}{c_j}.\left(h_{G(t+\Delta t)} - p.Q_{t(t+\Delta t)}{}^2\right)\right.$$
$$\left. - \frac{L_0}{g.A_0.\Delta t}.\frac{g}{c_j}\left(Q_{t(t+\Delta t)} - Q_{tt}\right) - \frac{Q_{t(t+\Delta t)}}{A_j}\right] \tag{2.55}$$

Bu durumda (2.43) denklemindeki C_5 ve C_6 nın değerleri de ,

$$C_5 = \frac{1}{p}.\left[\frac{L_0}{g.A_0.\Delta t} + \frac{1}{A_j.g/c_j}\right] \tag{2.56}$$

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

$$C_6 = \frac{1}{p}.\left[h_{G(t+\Delta t)} + \frac{Cu_{2j}}{g/c_j} + \frac{L_0}{g.A_0.\Delta t}.Q_{t_t}\right] \tag{2.57}$$

denklemleri ile hesaplanmalıdır.

Akım hava kazanına doğru iken de (2.35) yerine (2.52) eşitliği kullanılır. Buna göre (2.48) denkleminde de, (2.49) ve (2.50) eşitlikleri yerine aşağıdaki eşitlikler kullanılmalıdır.

$$C_5 = \frac{1}{p}.\left[\frac{L_0}{g.A_0.\Delta t} + \frac{1}{A_j.g/c_j}\right] \tag{2.58}$$

$$C_6 = \frac{1}{p}.\left[h_{G(t+\Delta t)} + \frac{Cu_{2j}}{g/c_j} + \frac{L_0}{g.A_0.\Delta t}.Q_{t_t}\right] \tag{2.59}$$

2.3.1.2 Hava Kazanının Pompadan Uzakta Olması Hali

Terfi hattı üzerinde, kazanın pompadan uzakta ve pompayla deşarj ucu arasında bulunan bir noktaya bağlanmış olması halinde, bu nokta iki borunun birleşme noktasıymış gibi göz önüne alınır. Bu durumda, Şekil 2.12' ye bakarak, kazanın bağlandığı noktadaki sınır şartı denklemlerini aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$C^+ : V_{p_{N+1j}} = C_{dN_j} - \frac{g}{c_j}.h_{p_{N+1j}} \tag{2.60}$$

$$C^- : V_{p_{1j+1}} = Cu_{2j+1} + \frac{g}{c_{j+1}}h_{p_{1j+1}} \tag{2.61}$$

Enerji:

$$h_{p_{N+1j}} = h_{p_{1j+1}} = h_{B(t+\Delta t)} \tag{2.62}$$

Süreklilik:

$$V_{p_{N+1j}}.A_j + Q_{t(t+\Delta t)} = V_{p_{1j+1}}.A_{j+1} \tag{2.63}$$

Kazan girişinde orifis bulunduğuna göre,

Akım kazandan boruya doğru iken:

$$Q_{t(t+\Delta t)} = C_0.A_0(2g)^{1/2}.\left[h_{G(t+\Delta t)} - h_{B(t+\Delta t)}\right]^{1/2} \tag{2.64}$$

veya akım borudan kazana doğru iken:

$$Q_{t(t+\Delta t)} = C_i.A_0.(2g)^{1/2}.\left[h_{B(t+\Delta t)} - h_{G(t+\Delta t)}\right]^{1/2} \tag{2.65}$$

bu denklemlerle $V_{p_{N+1j}}, V_{p_{1j+1}}, h_{p_{N+1j}}, h_{p_{1j}}, h_{B(t+\Delta t)}, h_{G(t+\Delta t)}, Q_{t(t+\Delta t)}$ olmak üzere 7 bilinmeyen mevcuttur. $h_{G(t+\Delta t)}$' nin değeri, daha önceki bahiste açıklandığı gibi, (2.36) ve (2.37) denklemleri yardımıyla belirtilir. Böylece boruya doğru olan Q_t debisi için, (2.60, 2.61, 2.62, 2.63, 2.64) denklemlerinin ortak çözümünden,

$$Q_{t(t+\Delta t)} = 0{,}5\left[-C_5 + \sqrt{C_5^2 - 4.C_6}\right] \tag{2.66}$$

elde edilir.Burada;

$$C_5 = \frac{2g.C_0^2.A_0^2}{A_j.g/c_j + A_{j+1}.g/c_{j+1}} \tag{2.67}$$

$$C_6 = 2g.C_0^2.A_0^2.\left[\frac{C_{dN_j}.A_j - Cu_{2j+1}.A_{j+1}}{A_j.g/c_j + A_{j+1}.g/c_{j+1}} - h_{G(t+\Delta t)}\right] \tag{2.68}$$

(2.66) denklemi $C_6 \leq 0$ için geçerlidir.

Eğer (2.66) denkleminden elde edilen sonuç $Q_t < 0$ ise (yani $C_6 > 0$ demektir) akım borudan kazana doğrudur. Bu takdirde denklem takımında orifis denklemi olarak (2.65) denklemi kullanılmalıdır.

O halde kazana doğru olan Q_t debisi için de, (2.60, 2.61, 2.62, 2.63, 2.65) denklemlerinin ortak çözümünden,

$$Q_{t(t+\Delta t)} = 0{,}5\left[C_5 - \sqrt{C_5^2 - 4.C_6}\right] \tag{2.69}$$

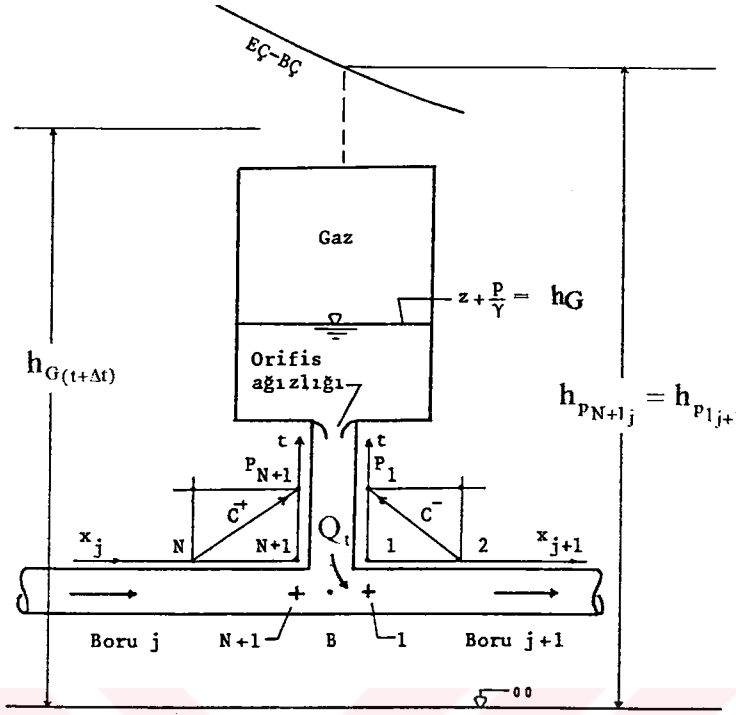
elde edilir. Burada;

$$C_5 = \frac{2g.C_i^2.A_0^2}{A_j.g/c_j + A_{j+1}.g/c_{j+1}} \tag{2.70}$$

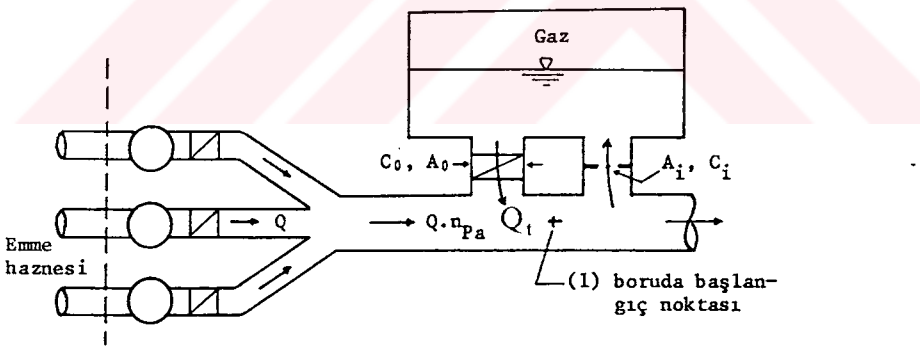
ve

$$C_6 = 2g.C_i^2.A_0^2.\left[\frac{Cu_{2j+1}.A_{j+1} - C_{dN_j}.A_j}{A_j.g/c_j + A_{j+1}.g/c_{j+1}} - h_{G(t+\Delta t)}\right] \tag{2.71}$$

olur.



Şekil 2.12 - Kazanın pompadan uzakta bulunması hali



Şekil 2.13-

Böylece (2.66) denkleminde $Q_t<0$ çıktığında veya (2.68) denkleminden $C_6>0$ elde edilince, (2.69) eşitliğinden Q_t yeniden çözülmelidir. Geri kalan bilinmeyenler ise (2.60, 2.61, 2.62, 2.63) denklemlerinden çözülür.

Şekil 2.13' de şematik olarak gösterildiği gibi, kazanın boruya bağlantısı, sıvının kazana giriş ve çıkışı ayrı olacak şekilde de düzenlenebilir. Bu durumda A_i, sıvının kazana girişinde borunun (veya şekildeki gibi orifis varsa ağızlığının) kesit alanını ve A_0, kazandan çıkışındaki borunun kesit alanını ifade eder.

2.3.2 Hava Kazanının Boyutlandırılması

Pompanın durması sırasında, hava kazanının boru hattına bağlandığı noktadaki basıncın zamanla değişimi, özellikle, kazan içinde başlangıçtaki ilk gaz hacmine bağlıdır. Kazanda başlangıçtaki ilk gaz hacmi ne kadar küçük olursa, basınç düşüşleri de o nisbette süratli olur. Hava kazanı hacmi lüzumundan az olarak yapılmış ise basınç düşüşü ve artışı fazlalaşır.

Hava kazanının boyutlandırılmasına bir başlangıç gaz hacmi (VG_0) seçilerek başlanır. Seçilen bu ilk gaz hacmine göre, pompanın durması sırasında boru hattı boyunca meydana gelen maksimum ve minimum basınç yükleri tayin edilir. Boru boyunca bu maksimum ve minimum basınç yükü değerleri birer parabolik eğri oluşturur. Minimum basınç yükü hattı, hiç bir noktada boruyu kesmemelidir. Eğer bu basınçlar istenen düzeyde değilse, ilk gaz hacmi olarak başka bir değer denenir.

Böylece, boru boyunca oluşan minimum basınç hattı kabul edilebilir sınırlar içinde kalıncaya kadar, bilgisayarda ilk gaz hacmi için ard arda muhtelif değerler denenerek, çözüm tekrarlanır. Bu ilk gaz hacmi, kazanda başlangıçta (pompa çalışırken) bulunması gereken en küçük gaz hacmi değerini belirtir. Eğer kazandaki gaz hacmi bu değerden daha küçük olduğunda pompaya gelen güç kesilecek olursa, sistemde istenenden daha düşük basınçlar meydana gelecektir. Bu nedenle pompanın normal operasyonu sırasında kazandaki gaz hacmi, hiç bir zaman, bu değerden daha küçük olmamalıdır. Böylece bu ilk gaz hacmi, pompa çalışırken kazandaki su yüzeyinin üst kritik seviyesini yani maksimum seviyesini belirler.

Pompanın normal çalışması sırasında basınçlarda salınımlar meydana geleceğinden, hava kazanı içinde bu salınımlar için de bir miktar yer ayrılmalıdır. Bunun için Evans ve Crawford (1953) üst kritik su seviyesindeki ilk gaz hacminin %25 kadar arttırılmasını önermektedir. Bu %25 arttırılmış gaz hacmi başlangıçtaki ilk gaz hacminin maksimum değeri olarak alınır. Bu da, başlangıçta, kazan içindeki su yüzeyinin bulunabileceği minimum yani alt kritik seviyeyi belirler.

Pompaya gelen gücün kesilmesi yani pompanın durması olayı, kazan içinde başlangıçtaki ilk gaz hacmi bu maksimum değerde iken de meydana gelebilir. Bu durumda kazanın, basınç düşüşü altında, tamamen boşalması tehlikesi mevcuttur. Kazanın boşalmasını önleyebilmek için, kazan hacminin yeteri büyüklükte seçilmiş olması gerekir. Bunu sağlayabilmek için, üst kritik seviyedeki ilk gaz hacminden %25 daha büyük olan yani alt kritik seviyedeki ilk gaz hacmi kullanılarak bir analiz daha yapılır. Bu analiz sonucunda elde edilen maksimum gaz hacmi ise, hava kazanının minimum toplam hacmini verir.

Basınç düşüşü sırasında boruya gaz kaçması ihtimalini önlemek amacıyla minimum kazan hacmi (yani maksimum gaz hacmi), bir emniyet faktörü olarak, %10 arttırılır ve bu değer de kazanın proje hacmi olarak alınır.

Hava kazanı analizinde seçilen ilk gaz hacmi VG_0 'ın her defasında, mümkün mertebe %25 değiştirilerek (artırılarak veya azaltılarak) denenmesi, kazanın nihai boyutunun belirlenmesinde kolaylık sağlar. Örneğin; analize VG_0=25 m³ ile başlanıldığını ve bu durumda boru hattı boyunca minimum basınç değerlerinin hepsinin sıfırdan oldukça büyük çıktığını kabul edelin. Böylece 2. denemede ilk gaz hacmi olarak VG_0=25/1,25=20 m³ denenir. (Not: bu denemede eğer minimum basınç hattı boruyu kesmiş olsaydı, bu defa ilk gaz hacmi değeri %25 artırılarak alınacaktı).

VG_0=20 m³ için de boru hattının her yerinde minimum basınçlar pozitif çıkmış olsun.

3. denemede de VG_0=20/1,25 =16 m³' lük ilk gaz hacmi ile yapılır. Bu defa boru hattının bir noktasında minimum basınç değerinin sıfıra yakın çıkmış olduğunu kabul edelim. Buna göre, yukarıda bahsedildiği gibi, kazan içinde başlangıçtaki minimum ilk gaz hacmi olarak 16 m³ alınır, üst kritik su seviyesi belirlenmiş olur.

Kazan içinde su seviyesinin salınımına müsaade etmek için, bu hacim %25 arttırılır. Böylece 16x1,25=20 m³' lük hacim maksimum ilk gaz hacmi olarak alınır ve alt kritik su seviyesi belirlenir. Sonra bu 20 m³' e göre daha önce yapılmış olan analiz sonucundaki maksimum gaz hacmi de, kazanın minimum hacmi olarak alınır.

Minimum kazan hacmi bulunduktan sonra artık, elde mevcut malzemeye göre ya da inşaat tahditlerine göre en uygun ve ekonomik çap ve uzunluklar seçilerek, hava kazanını dizayn edebiliriz.

Şekil 2.6' da gösterilmiş olan kazan yerleştirme şekli, küçük kazanlar için en yaygın olarak kullanılan kazan proje tipidir. Fakat şartlar büyük kazanları, örneğin 2m çapında ve 12 m yüksekliğinde bir kazanı gerektirdiğinde, kazan genellikle yatay olarak yerleştirilir.

2.3.3 Hava Kazanı Ekleri

Hava kazanlarının randımanlı çalıştırılabilmeleri için devamlı kontrolleri gerekir. Pompalar çalıştığı sırada kazan içindeki su seviyesi, kısa süreli salınımlar hariç, üst ve alt kritik su seviyesi sınırlarının içinde tutulmalıdır. Bunun için bazı tedbirlerin alınması gerekir. Eğer kazanda su seviyesi çok fazla yükselir ve uzun süre bu seviyede kalırsa, su seviyesini indirmek için kazan içine sıkıştırılmış hava enjekte edilir (tabii ki kazanda gaz olarak hala mevcut ise). Bu hava, küçük bir kompresör vasıtasıyla yüksek basınçlı bir hava tankından temin edilir. Tersine eğer su seviyesi çok fazla düşerse, bir hava boşaltma vanası ile fazla hava kazandan dışarı alınır.

Eğer su seviyesi üst kritik seviyeye ulaşır ve çok uzun süre bu seviyede kalırsa sistem kapatılmalı ve nedeni araştırılmalıdır. Bu tip bir sorundan personeli anında haberdar edebilmek için hava kazanı bir alarm sistemi ile teçhiz edilmelidir.

Kazanın boruya bağlantı kısmındaki daralma deliği büyük tutulursa, basınç artışını sınırlamada kazanın etkisi azalır, fakat basınç düşüşünün azalmasına etkili olur. buna karşılık, delik küçültülürse basınç artışı azalır, basınç düşüşü fazlalaşır. Bu nedenle kazan tabanında orifis yerine delikli klape tercih edilmelidir.
Kazanda su seviyesi konumunun gözlenebilmesi için kazan bir gözleme camı ile teçhiz edilir.

Üst ve alt kritik su seviyelerinin ihlal edildiği durumu haber vermek ve kazana verilecek hava akımının açılıp kapanacağı zamanı belirlemek için kazan dışına seviye algılayıcıları yerleştirilebilir. Böyle bir düzen, kazanın bakım ve tamir işini çok kolaylaştırır.

Büyük kazanlarda, kazan içine girmek için genellikle bir giriş kapısı yapılır. Soğuk iklimlerde kazan ve ekleri dona karşı korunmalıdır.

2.4 Bilgisayarla Çözümde Girdi Değerleri

Basınçlı borularda su darbelerinin karakteristik yöntemle çözümünde ve hava kazanı ile denge bacası boyutlarının tayininde kullanılacak bilgisayar programındaki gerekli girdi değerleri aşağıda verilmiştir.

Genel Girdi Değerleri

Serideki boru sayısı; boruların bölündüğü minimum bölüm sayısı; yük ve hız değerlerinin hesaplanacağı maksimum zaman süresi, sn ; atmosfer basınç yükü (pozitif), mss; mansap rezervuarındaki su seviyesinin yüksekliği, m ; mansap rezervuarına giren

boru ucunun yüksekliği, m ; serideki her bir borunun menba ucunun yüksekliği, m ; serideki her bir borunun m olarak çapı ve uzunluğu .

Pompa ile İlgili Girdi Değerleri

Paralel bağlı pompa sayısı; pompanın normal operasyonu (yani kararlı akım) sırasındaki devir sayısı, dev/dak ; bir pompa ve motorun atalet momenti, $Kg.m^2$; pompa kademe sayısı; emme haznesindeki su yüzeyinin yüksekliği, m ; bir pompanın karakteristik eğrisinden eldeedilen m^3/sn olarak basma debisi, beher kademe için m olarak basma yükü ve beher kademe için N.m/sn olarak mil gücü değerleri.

Hava Kazanı ile İlgili Girdi Değerleri

Hava kazanı içinde başlangıçtaki ilk gaz hacmi, m^3 ; kazandan boruya doğru olan akım için debi katsayısı; kazana doğru olan akım için debi katsayısı; hava kazanı giriş ağızlığının çapı, m ve politropik değişim katsayısı.

Tek Yönlü Denge Bacası İçin Girdi Değerleri

Hat üzerindeki baca sayısı; bacadan çıkan boru numarası; bacanın çapı veya enkesit alanı; baca bağlantısının çapı veya enkesit alanı; debi katsayısı ve bacadaki su yüzeyinin başlangıçtaki yüksekliği.

3. GÜNEY ANTALYA ATIKSU DEŞARJ HATLARININ SU DARBESİ ANALİZİ

3.1 Hatların Tanımı

Güney Antalya Projesi Atıksu Arıtma Tesislerinde, mevcut pompajlı sistemlerin her biri paralel bağlı iki pompanın atıksu bastığı bir boru hattından ibarettir.

Kızıltepe çıkış suyu arıtma tesisinden 5.75 kotunda çıkmakta ve Akdeniz'e 600 m'lik bir deşarj hattı ile -10 kotuna basılmaktadır.(Şekil 3.1 ve 3.2)

Kemer atıksu deşarj hatlarından, terfi hattı atıksu toplama odasından pompa ile arıtma tesisi kum tutucusuna 5 kotuna suyu basmaktadır.

Arıtma tesisinden çıkan su, çıkış suyu hattı ise 5.20 kotundan çıkarak 386 m uzunluğunda deşarj hattı ile -10 m kotuna denize basılmaktadır.(Şekil 3.3 ve 3.4)

Herbir pompajlı sistem, sistemde bulunan her iki pompanın kasıtlı veya kasıtsız olarak aniden durduğu anda oluşacak geçici kararsız akım şartları göz önünde tutularak su darbesi analizine tabi tutulmuştur. Çünkü bu durum, sistemde oluşabilecek aşırı basınçların en kritik durumunu yansıtmış olacaktır.

Bu analizde, kararsız ve üniform olmayan akıma ait tam diferansiyel denklemler kullanılmış olup, boru eğimi de dikkate alınmıştır.

Önce herbir sistem, sistemdeki her iki pompanın kararlı şartlarda devreye su basarken aniden durdurulduğu esnada boru boyunca meydana gelecek basınç değişimlerinin değerleri karakteristik metod yardımıyla sonlu farklar formunda yazılan momentum ve süreklilik denklem çiftinin bilgisayarda nümerik olarak integrasyonuyla belirtilmiştir.

Bu nümerik çözümde, ilk durum olarak kararlı akım şartlarındaki bilinen hız ve basınç değerlerinden başlayarak ve sınır şartı olarak menbada pompa, mansapta ise atmosfere açılan boru durumunu ele alarak yürütülmüştür.

Herbir sistemde, boru boyunca geçici kararsız akım şartları esnasında meydana gelebilecek minimum ve maksimum basınçların bilgisayar yardımıyla nümerik çözümünden elde edilen değerleri Şekil 3.5, 3.7, 3.10 da gösterilmiştir. Denklemlerin nümerik çözümünde herbir sistem için bilgisayar programında girdi değerleri, bilgisayar çıktı listesinde basıldığı şekilde alınmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre hiçbir sistemde böyle en kritik bir durumda dahi meydana gelebilecek maksimum basınç değerleri borunun işletme basıncı değeri olan 7.5 Atü = 75 mss' nu aşmamaktadır. Dolayısıyla su darbesi olayı esnasında meydana gelebilecek aşırı basınç değerlerinin borular için bir sorun yaratmayacağı görülmüştür. Buna karşılık pompaların durması sırasında ilk etapta deşarj hattında meydana gelen basınç düşüşü, Kızıltepe' de boru ekseni altında - 4 mss değerine ulaşırken, Kemer çıkış suyu hattında - 8 mss ve terfi hattında -10 mss değerine ulaşmıştır.

Antalya'da sıcaklığın yüksek olması dolayısıyla basılan suyun sıcaklığı 20 °C kabul edilirse, bu sıcaklıktaki suyun buharlaşma basıncı 0.23 m mutlak ss veya - 9.77 m rölatif ss değerinde olduğundan Kemer' deki minimum basınç değeri bu değere ulaşmıştır.

Kemer' de her iki pompanın aniden durması sonucunda boruda buharlaşmanın meydana gelmesi (yani kavitasyon) ve dolayısıyla basıncın yükselmesiyle bu buharlaşmanın ortadan kalkması sonucunda daha büyük bir basınca yol açması söz konusudur. Bu sebepten, basınç çizgisinin boru ekseninin altına düşmemesi ve dolayısıyla kavitasyonun önlenmesi için boru hattına bir hava kazanının yerleştirilmesi düşünülmüştür. Böylece sisteme, değişik kapasiteli hava kazanı yerleştirerek tekrar analize tabi tutulmuş ve basınç çizgisi boru ekseninin altına düşmeyecek şekilde en

ekonomik minimum kazan hacmi 0.35 m^3 olarak bulunmuştur. Basınç değişimi sırasında kazandaki havanın minimum hacmi ise 0.13 m^3 olarak elde edilmiştir. Bu değerler aynı zamanda, su darbesi olayı esnasında kazandaki su seviyesi değişiminin alt ve üst sınırlarını vermektedir. 0.13 m^3 minimum hava hacminde kazandaki basınç 33 mss, 0.35 m^3 maksimum hava hacminde ise kazandaki basınç 2.7 mss olmaktadır.

Basıncın, normal çalışma şartlarında salınımı söz konusu olabilir. Bu nedenle bu salınım için de hava kazanında bir miktar hacmin rezerv olarak ayrılması bakımından, bu değerler % 25 kadar arttırılarak su seviyesi için üst ve alt tehlike sınırları belirlenebilir. Bulunan 0.35 m^3 lük maksimum hava hacmi, her ne kadar dizayn edilecek kazanın minimum hacmini belirtirse de, kazandaki havanın boru hattına kaçmasını önlemek için bu değere % 50 civarında ilave yapılarak gerekli toplam kazan hacmi 0.55 m^3 olarak önerilmiştir.

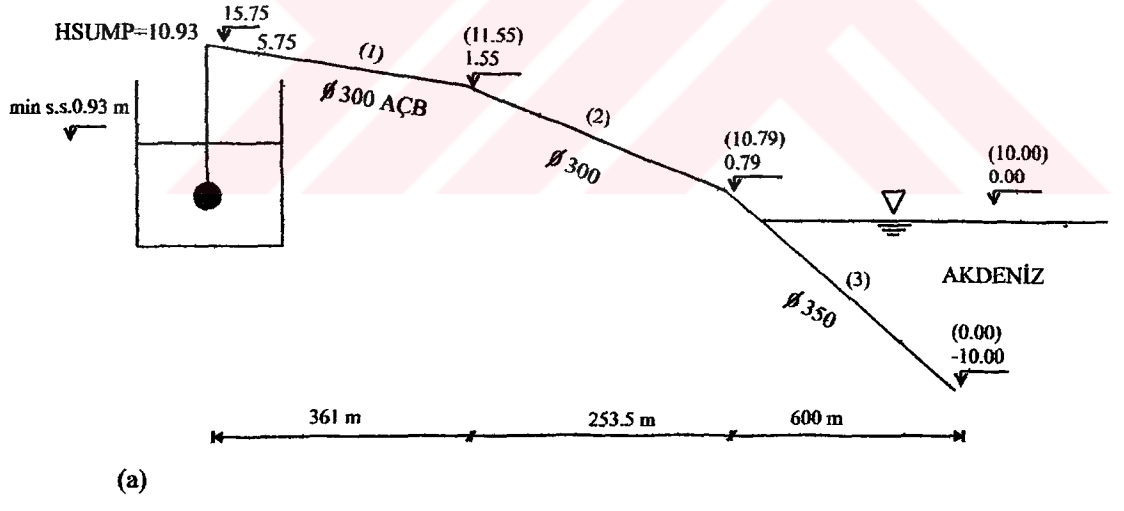
Toplam kazan hacmi bilindiğine göre artık, kazan kesiti seçilmek suretiyle hava kazanının boyutları belirlenebilir. Dizayn edilecek kazanla ilgili gerekli veriler Şekil 3.14' de gösterilmiştir.

Hava kazanlarının uygun operasyonu için bazı yardımcı donanımlara gerek duyulur. Hava kazanındaki su seviyesinin, kısa süreli salınımlar hariç, belirlenen üst ve alt tehlike sınırları içerisinde tutulması gerekir. Bunun yapılabilmesi için bazı tedbirlerin alınması icap eder. Eğer kazanda su seviyesi çok yükselecek ve uzun müddet yüksek seviyede kalacak olursa bu taktirde bu su seviyesinin aşağıya itilebilmesi için hava kazanına sıkıştırılmış hava enjekte edilir. Bu hava yüksek basınçlı bir hava tankından ufak bir kompresör yardımıyla temin edilebilir. Bunun tersi olarak eğer su seviyesi çok aşağıya düşerse bu taktirde de bir hava tahliye vanası yardımıyla kazandan hava alınır. Ekstrem hallerde su seviyesi üst tehlike sınırına eriştiğinde ve bu seviyede uzun müddet kaldığında sistemde bir arıza mevcut demektir. Bu arıza nedeninin belirtilmesi için sistemin devreden çıkarılması icap eder. Bu amaçla kazanın giriş kısmına bir vana yerleştirilmiştir. Bütün bu hususlar şekil 3.14 'de gösterilmiştir.

Kızıltepe pompajlı sistemlerinde her iki pompanın aniden durması sırasındaki basınç düşüşü kritik seviyenin çok üzerinde kalacağından pek fazla tehlike yaratmadığı görülmektedir. Bu bakımdan bu sistemin tekrar hava kazanı dikkate alınarak etüdüne lüzum görülmemiştir. Şayet basılan atıksu yüksek değerde erimiş ve tutulmuş hava ve gaz ihtiva ederse bu taktirde bu düşük basınç değerlerinde açığa çıkacak gazın sistemin kapasitesinde bir sorun yaratması ihtimali söz konusu olabilir. Bu bakımdan, bu tesislere de, arzu edilirse, aynı boyutlarda birer hava kazanı yerleştirilebilir.

Aşağıda göz önüne alınan örnekler için su darbesi analizi Ek.5'de, hava kazanı boyutlandırması Ek.6'da verilen bilgisayar programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

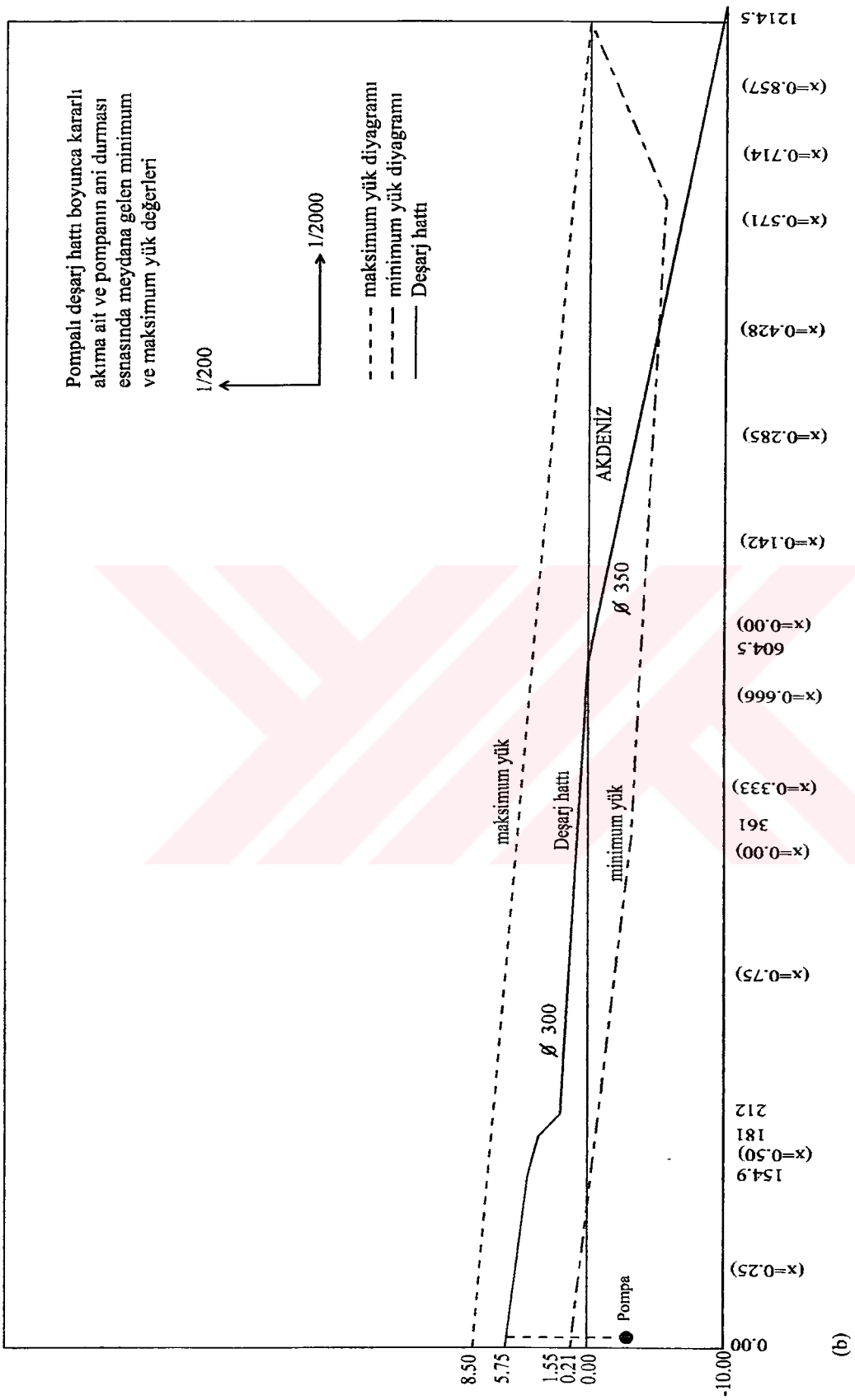
3.2 Kızıltepe Çıkış Suyu Deşarj Hattı



(a)

Şekil 3.5- (a) Kızıltepe çıkış suyu deşarj hattı şematik gösterimi

(b) basınç çizgileri


Pompalı deşarj hattı boyunca kararlı akıma ait ve pompanın ani durması esnasında meydana gelen minimum ve maksimum yük değerleri
1/200
1/2000
maksimum yük diyagramı
minimum yük diyagramı
Deşarj hattı
AKDENİZ
Ø 350
Ø 300
maksimum yük
Deşarj hattı
minimum yük
Pompa
8.50
5.75
1.55
0.21
0.00
-10.00
0.00
(x=0.25)
154.9
(x=0.50)
181
212
(x=0.75)
(x=0.00)
361
(x=0.333)
(x=0.666)
604.5
(x=0.00)
(x=0.142)
(x=0.285)
(x=0.428)
(x=0.571)
(x=0.714)
(x=0.857)
1214.5
(b)

HSUMP = 10.93 m

HRES = 10 m

QLİNE = 0,140 m^3/s

N = 1000 RPM

NPAR = 2 (paralel iki pompa)

Pompa tipi CP 3152 LT

I = 0.1176 (kg/m^2)

N = 1000 RPM

ZEND = 0.00 m

XI = 0,1176 kg/m^2

NPART = 3

λ = 0,014

ϕ300 için T = 19 mm

ϕ350 için T = 20 mm

μ = 0,3

δ = 0.025 mm

ρ = 1000 kg/m^3

$$c = \frac{(K/\rho)^{1/2}}{\left[1+\frac{K}{E}.\frac{D}{T}.(1-\mu^2)\right]^{1/2}}$$

D = 300 mm için;

$K = 2.07 \times 10^5 \ \ N/cm^2$

$E = 2.34 \times 10^6 \ \ N/cm^2$

$$c = \frac{(2.07x10^5 / 1000)^{1/2}}{\left[1 + \frac{2.07x10^5}{2.34x10^6} x \frac{300}{19} x(1 - 0.3^2)\right]^{1/2}} = 1279 \text{ m/s}$$

D = 350 mm için;

$$c = \frac{(2.07x10^5 / 1000)^{1/2}}{\left[1 + \frac{2.07x10^5}{2.34x10^6} x \frac{350}{20} x(1 - 0.3^2)\right]^{1/2}} = 1264 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{\pi(0.30)^2}{4} = 0.071 \text{ m}^2 \ ; \ V_o = \frac{0.14}{0.071} = 1.97 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{\pi(0.35)^2}{4} = 0.096 \text{ m}^2 \ ; \ V_o = \frac{0.14}{0.096} = 1.46 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{\delta}{D} + \frac{21.15}{Re^{0.9}}\right)} \right]^2$$

$\delta = 0.025$ mm (AÇB boru için, pürüzlülük)

$\vartheta = 1x10^{-6}$ m²/sn

$V_0 = 1.97$ m/sn $\qquad Re = \frac{V.D}{\vartheta} = \frac{1.97x0.3}{1x10^{-6}} = 5.9x10^5$

$V_0 = 1.46$ m/sn $\qquad Re = \frac{V.D}{\vartheta} = \frac{1.46x0.35}{1x10^{6}} = 5.1x10^5$

$$\lambda_1 = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{0.025}{300} + \frac{21.25}{(5.9x10^5)^{0,9}}\right)^2} \right]^2 = 0.01398 \approx 0.014$$

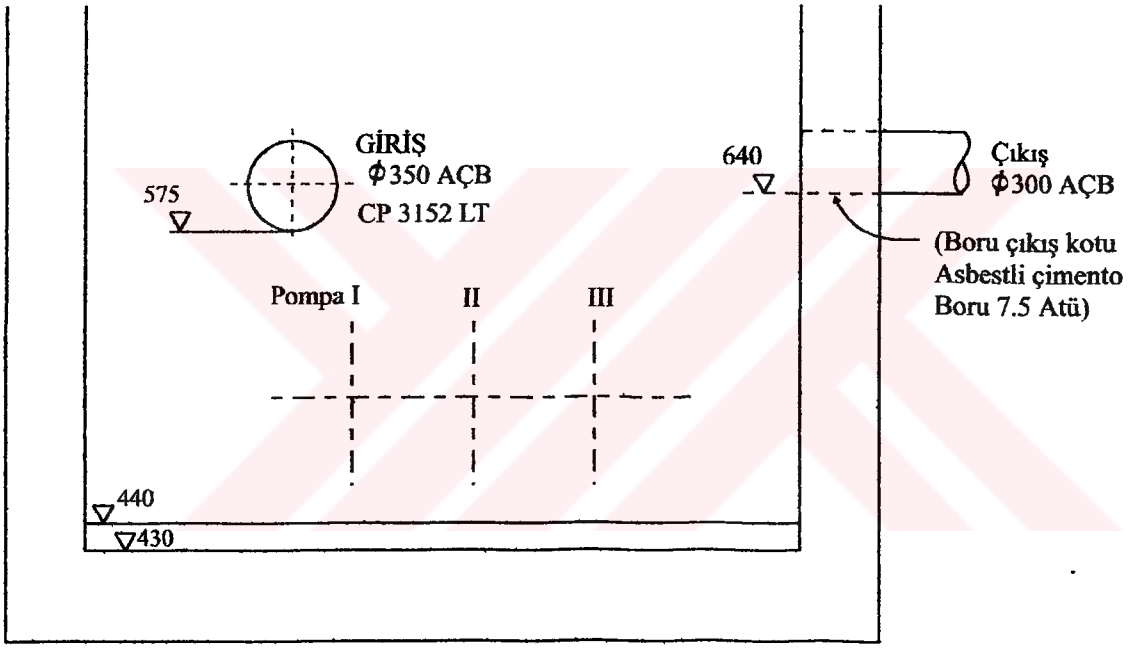
$$\lambda_2 = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{0.025}{350} + \frac{21.25}{(5.1x10^5)^{0,9}}\right)} \right]^2 = 0.014$$

Tablo 3.1- Kızıltepe Çıkış Suyu Pompa Karakteristikleri

QN Q	HNSQ H_p	BRWP KW	$Q/Nx10^{-3}$	$H_p / N^2 x10^{-6}$
0	9.4	7.7	0	9.4
10	8.8	7.6	0.01	8.8
20	8.5	7.7	0.02	8.5
30	8.3	8	0.03	8.3
40	8	8.4	0.04	8.0
50	7.8	8.8	0.05	7.8
60	7.4	9.2	0.06	7.4
70	7	9.5	0.07	7.0
80	6.8	9.8	0.08	6.8
90	6.4	10	0.09	6.4
100	6	10.2	0.10	6.0
110	5.7	10.3	0.11	5.7
120	5.3	10.3	0.12	5.3
130	4.9	10.4	0.13	4.9
140	4.5	10.5	0.14	4.5
150	4	10.5	0.15	4.0
160	3.6	10.4	0.16	3.6
170	3.1	10.3	0.17	3.1
180	2.8	10	0.18	2.8
190	2	9.7	0.19	2.0
200	1	9.3	0.20	1.0
210	0	8.8	0.21	0.0

Tablo 3.2- Kızıltepe Çıkış Suyu Boru Karakteristikleri

	Çap (mm)	Boy (m)	Baş Kot (m)	Son Kot (m)
Boru I	300	361	15.75	11.55
Boru II	300	253.5	11.55	10.79
Boru III	350	600	10.79	0.00



Şekil 3.6- Kızıltepe çıkış suyu pompa istasyonu

Yük Kayıpları;

$\Delta H = K.L.Q^2$

Burada;

$$K = \frac{\lambda x 10^{12}}{12.0984 x D^5}$$

Kızıltepe Çıkış Suyu Pompa İstasyonu Boyutları;

Emme haznesi hacmi : $V = \frac{Qx0.9}{i}$

i: pompanın saatteki çalışma sayısı

Çift pompa için:

Q = 140 lt/sn

$$V = \frac{140x0.9}{10} = 12.6\ m^3$$

Tek pompa için:

Q = 123 lt/sn

$$V = \frac{123x0.9}{12} = 9.225\ m^3$$

Pompa seviyeleri

1. seviye

Pompa haznesi 2.0 m x 5.0 m

$2.0 \times 5.0 \times h_1 = 12.6$

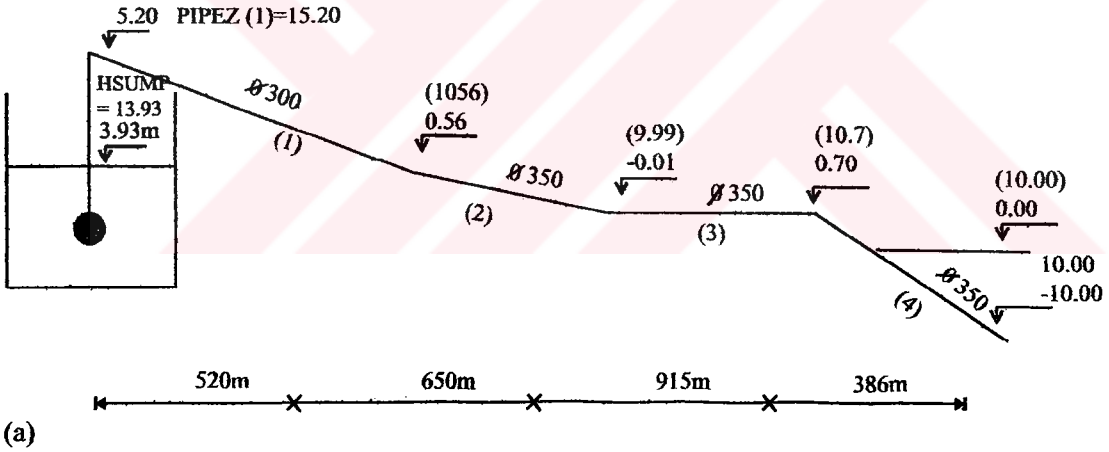
$h_1 = 1.26$ m

2. seviye

$2.0 \times 5.0 \times h_2 = 9.225$

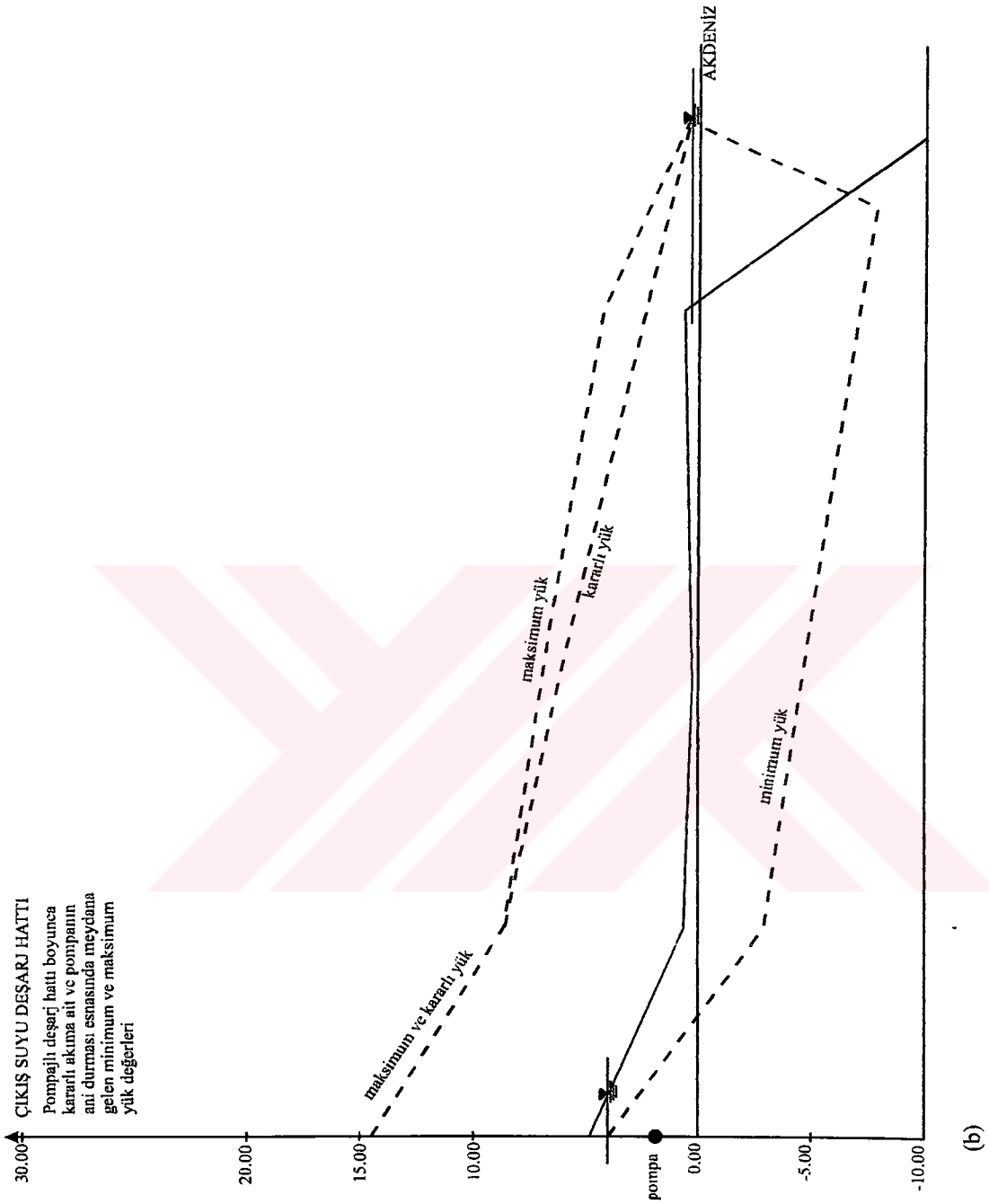
$h_2 = 0.93$ m

3.3 Kemer Çıkış Suyu Deşarj Hattı



Şekil 3.7- (a) Kemer çıkış suyu hattı şematik gösterimi

(b) Basınç çizgileri


ÇIKIŞ SUYU DEŞARJ HATTI
Pompajlı deşarj hattı boyunca kararlı akıma ait ve pompanın ani durması esnasında meydana gelen minimum ve maksimum yük değerleri
30.00
20.00
15.00
10.00
pompa
0.00
-5.00
-10.00
maksimum ve kararlı yük
maksimum yük
kararlı yük
minimum yük
AKDENİZ
(b)

NPAR = 2 (İki pompa paralel)

NST = 1

NP = 4

N_0 = 1000 RPM

Q_{lin} = 145 lt/sn

λ = 0.014

C_7 = -0.037

C_8 = 0.0000094

c_{300} = 1279 m/sn

c_{350} = 1264 m/sn

XI = 0.1179 kg/m²

ZEND = 0.00

HSUMP = 13.93

HRES = 10 m

Tablo 3.3- Kemer Çıkış Suyu Boru Karakteristikleri

Boru No	Çap (mm)	Boy (m)	Baş Kot (m)	Son Kot (m)
I	300	520	15.20	10.56
II	350	650	10.56	10
III	350	915	10	10.7
IV	350	386	10.7	0.00

$$\lambda = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{\delta}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}}\right)} \right]^2$$

$\delta = 0.025$ mm

$$R = \frac{V_0 . D}{\vartheta}$$

$\vartheta = 1x10^{-6}$ m²/sn

$$A_{30} = \frac{\pi x 0.3^2}{4} = 0.071\ m^2 \qquad V_0 = \frac{0.145}{0.071} = 2.04\ m/sn$$

$$A_{35} = \frac{\pi x 0.35^2}{4} = 0.096\ m^2 \qquad V_0 = \frac{0.145}{0.096} = 1.51\ m/sn$$

$$Re_{30} = \frac{2.04x0.3}{1x10^{-6}} = 6.12x10^{5}$$

$$Re_{35} = \frac{1.51x0.35}{1x10^{-6}} = 5.3x10^{5}$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{0.025}{300} + \frac{21.25}{(6.19x10^{5})^{0,9}} \right)} \right]^2 = 0.014$$

$$\lambda_2 = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{0.025}{350} + \frac{21.25}{(5.3x10^{5})^{0,9}} \right)} \right]^2 = 0.014$$

$$\Delta t = \frac{FL}{NPART(V_0 + Q)}$$

$$\Delta t_1 = \frac{520}{3(2.04 + 1279)} = 0.14$$

$$\Delta t_2 = \frac{650}{3(1.51 + 1264)} = 0.17$$

$$\Delta t_3 = \frac{915}{3(1.51 + 1264)} = 0.24$$

$$\Delta t_4 = \frac{386}{3(1.51+1264)} = 0.102$$

$$NPART_4 = \frac{FL}{\Delta t_{min}(V_0 + Q)} = 3$$

$$NPART_2 = \frac{650}{0.102(1.51+1264)} = 5.03$$

$$NPART_3 = \frac{915}{0.102(1.51+1264)} = 7.09$$

$$NPART_4 = \frac{520}{0.102(2.04+1279)} = 4$$

Seçilen NPART = 10

DIMENSION (4 . 10)

Burada;

4: Boru sayısı

10: Bölüm sayısı

göstermektedir.

Tablo 3.4- Kemer Çıkış Suyu Pompa Karakteristikleri

QN Q	HNSQ H_p	BRWP KW	$Q/Nx10^{-3}$	$H_p/N^2 \times 10^{-6}$
0	9.4	7.7	0	9.4
10	8.8	7.6	0.01	8.8
20	8.5	7.7	0.02	8.5
30	8.3	8	0.03	8.3
40	8	8.4	0.04	8
50	7.8	8.8	0.05	7.8
60	7.4	9.2	0.06	7.4
70	7	9.5	0.07	7.0
80	6.8	9.8	0.08	6.8
90	6.4	10	0.09	6.4
100	6	10.2	0.10	6.0
110	5.7	10.3	0.11	5.7
120	5.3	10.3	0.12	5.3
130	4.9	10.4	0.13	4.9
140	4.5	10.5	0.14	4.5
150	4	10.5	0.15	4.0
160	3.6	10.4	0.16	3.6
170	3.1	10.3	0.17	3.1
180	2.8	10	0.18	2.8
190	2	9.7	0.19	2.0
200	1	9.3	0.20	1.0
210	0	8.8	0.21	0.0

$N_0 = 1000$ RPM

$I = 0.1176$ kg/m²

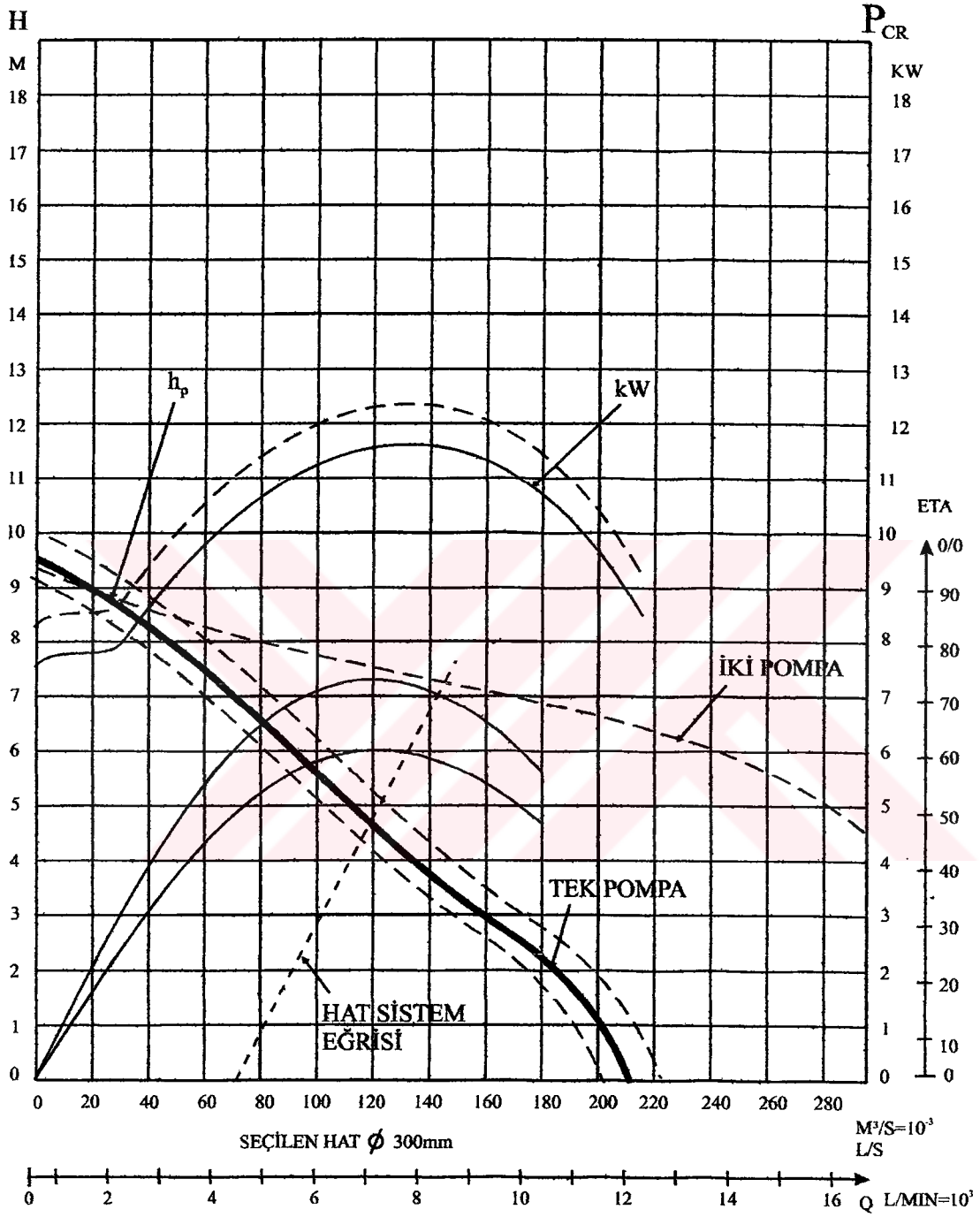
$$\frac{H_{pm}}{N^2} = f\left(\frac{Q}{N}\right)$$

$$Q_p = \frac{Q}{N_{pa}} = \frac{A_1 V_{pl}}{N_{po}}$$

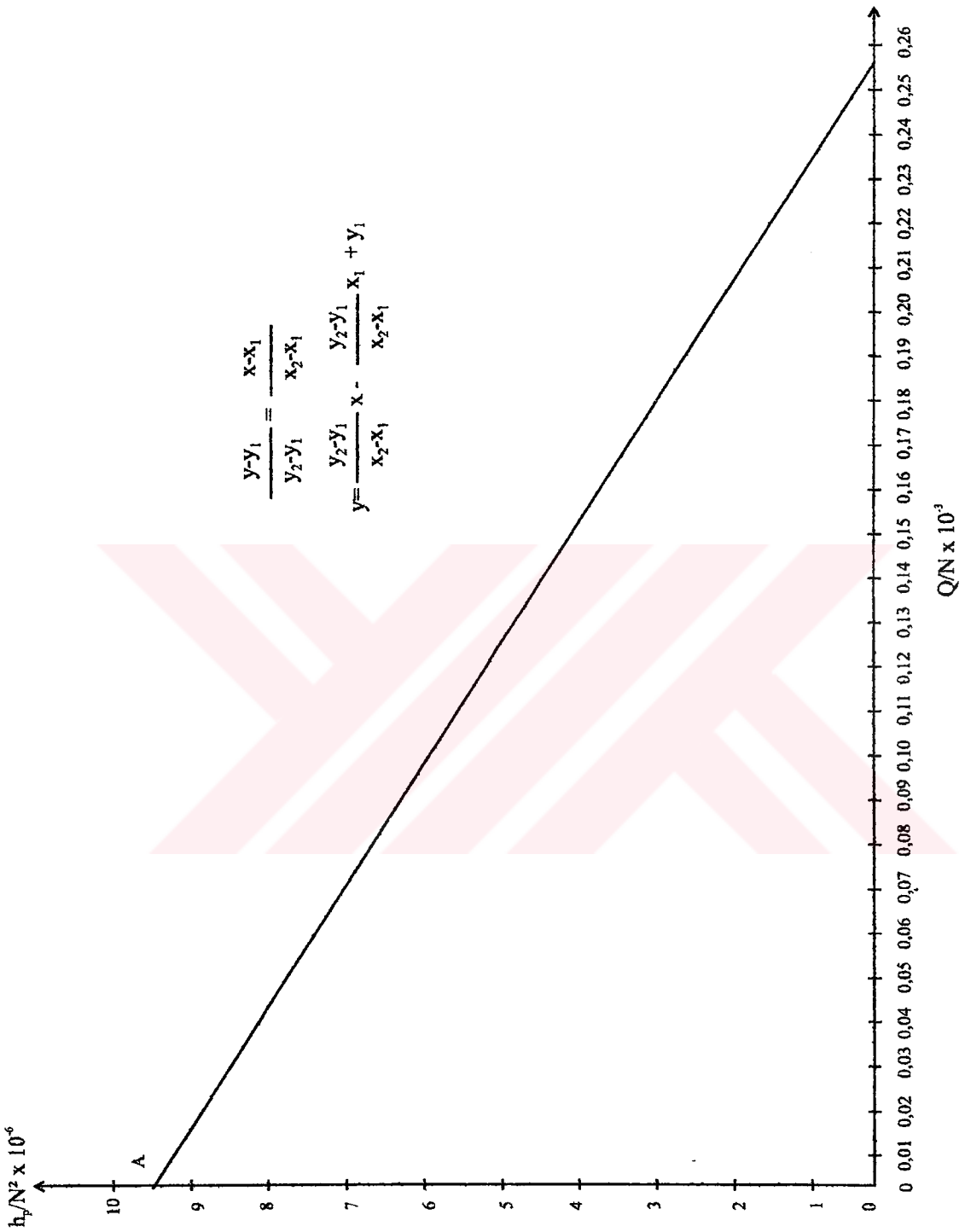
$$C^- \quad V_{pl} = C_1 - C_2 H_{pl}$$

$$H_{pm} = H_{pl} - Z_0$$

Şekil 3.8 'de Kemer çıkış suyu pompa ve boru karakteristikleri , şekil 3.9 'da ise pompa karakteristiği gösterilmiştir.

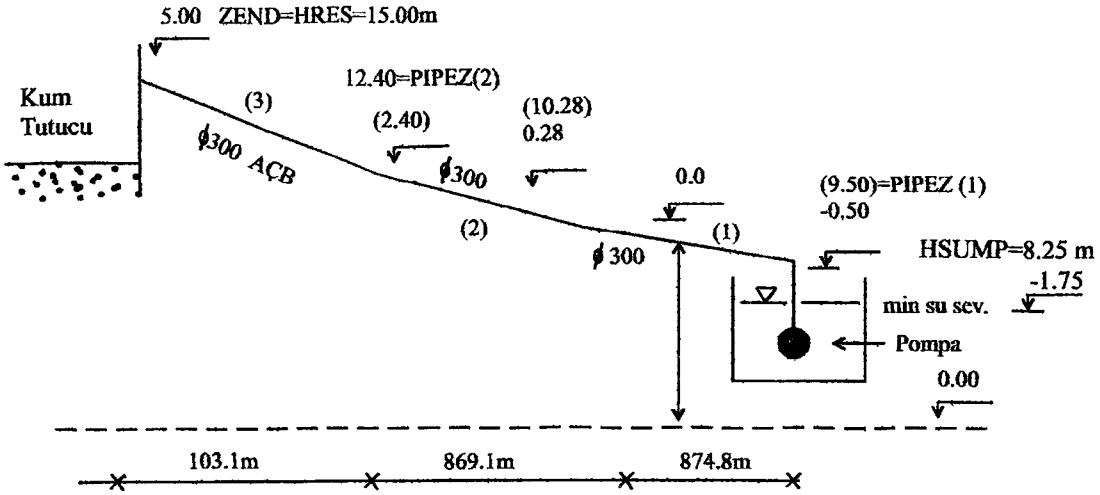


Şekil 3.8- Kemer Çıkış Suyu Pompa ve Boru Karakteristikleri



Şekil 3.9- Pompa Karakteristiği

3.4 Kemer Terfi Deşarj Hattı



Şekil 3.10- (a) Kemer terfi deşarj hattı şematik gösterimi

(b) Basınç çizgileri

NST = 1

NPAR = 2 (iki pompa paralel)

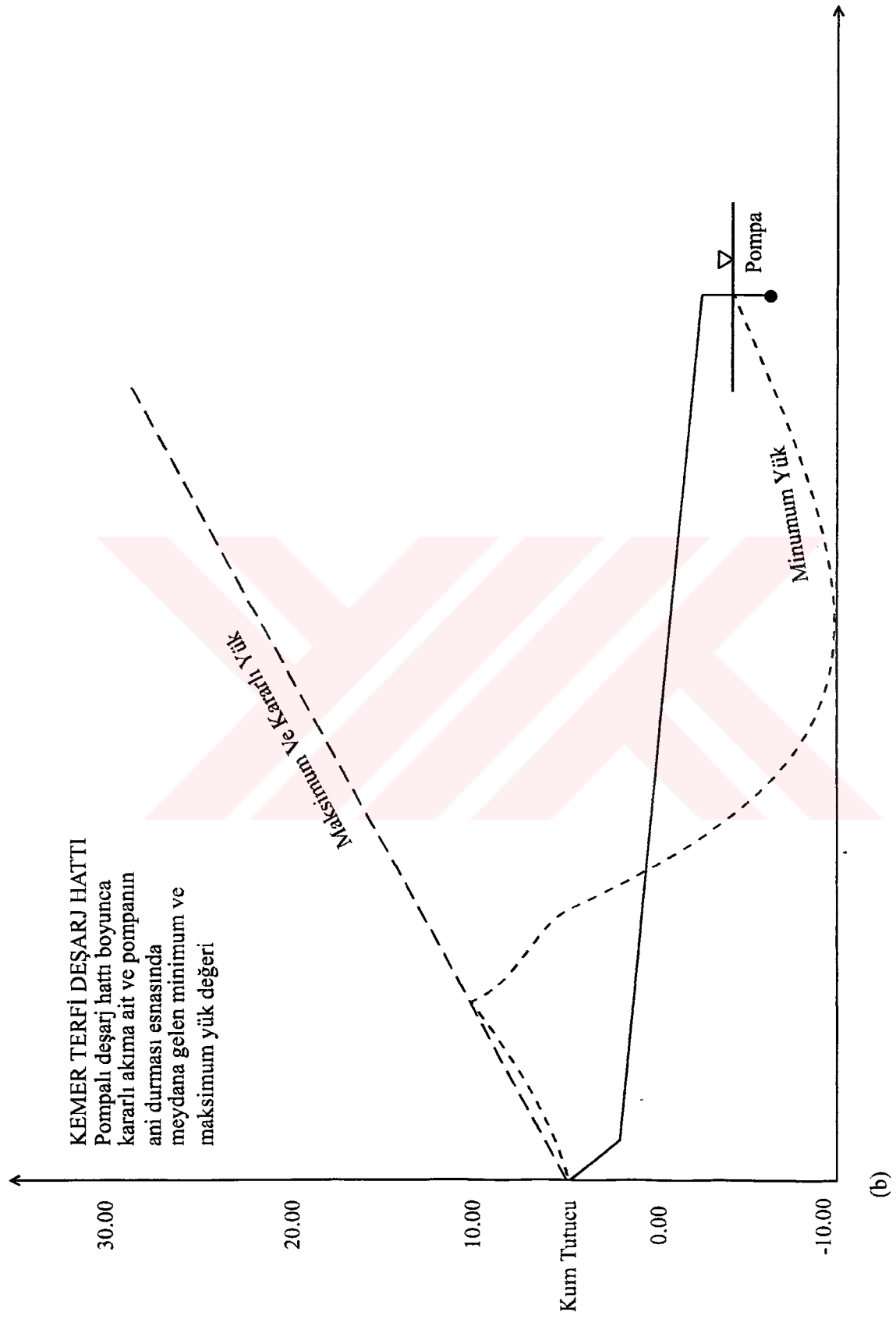
ZEND = 15.00 m

NP = 3 (Boru sayısı)

Q_{line} = 145 lt/sn

c = 1279 m/sn

HRES = 15.00 m


KEMER TERFİ DEŞARJ HATTI
Pompalı deşarj hattı boyunca
kararlı akıma ait ve pompanın
ani durması esnasında
meydana gelen minimum ve
maksimum yük değeri
Maksimum Ve Kararlı Yük
Minumum Yük
Pompa
30.00
20.00
10.00
Kum Tutucu
0.00
-10.00
(b)

$XI = 0.550\ kg/m^2$

$N_0 = 1450\ RPM$

$C_7 = -0.186$

$C_8 = 0.00002045$

$\lambda = 0.014$

$$A = \frac{\pi x 0.3^2}{4} = 0.071\ m^2 \qquad V_0 = \frac{0.145}{0.071} = 2.04\ m/sn$$

$$\lambda = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{\delta}{D} + \frac{21.25}{Re^{0,9}}\right)} \right]^2$$

$\delta = 0.025\ mm$

$\vartheta = 1x10^{-6}\ m^2/sn$

$$Re = \frac{V.D}{\vartheta} = \frac{2.04x0.3}{1x10^{-6}} = 6.12x10^5$$

$$\lambda = \left[\frac{1}{1.14 - 2\log\left(\frac{0.025}{300} + \frac{21.25}{(6.12x10^5)^{0,9}} \right)} \right]^2 = 0.014$$

$$\Delta t_1 = \frac{FL}{NPART(V_0 + c)} = \frac{103.1}{3(2.04 + 1279)} = 0.027 \rightarrow \text{minimum}$$

$$\Delta t_2 = \frac{869.1}{3(2.04 + 1279)} = 0.23$$

$$\Delta t_3 = \frac{874.8}{3(2.04 + 1279)} = 0.23$$

$$NPART_1 = \frac{FL}{\Delta t_{min}(V_0 + c)} = 3$$

$$NPART_2 = \frac{869.1}{0.027(2.04 + 1279)} = 25.12$$

$$NPART_3 = \frac{874.8}{0.027(2.04 + 1279)} = 25.3 \approx 26$$

1 DIMENSION (3, 26)

4 DIMENSION QN (14)

Kemer Terfi Pompa İstasyonu Boyutları;

Boru giriş kotu : -1.42

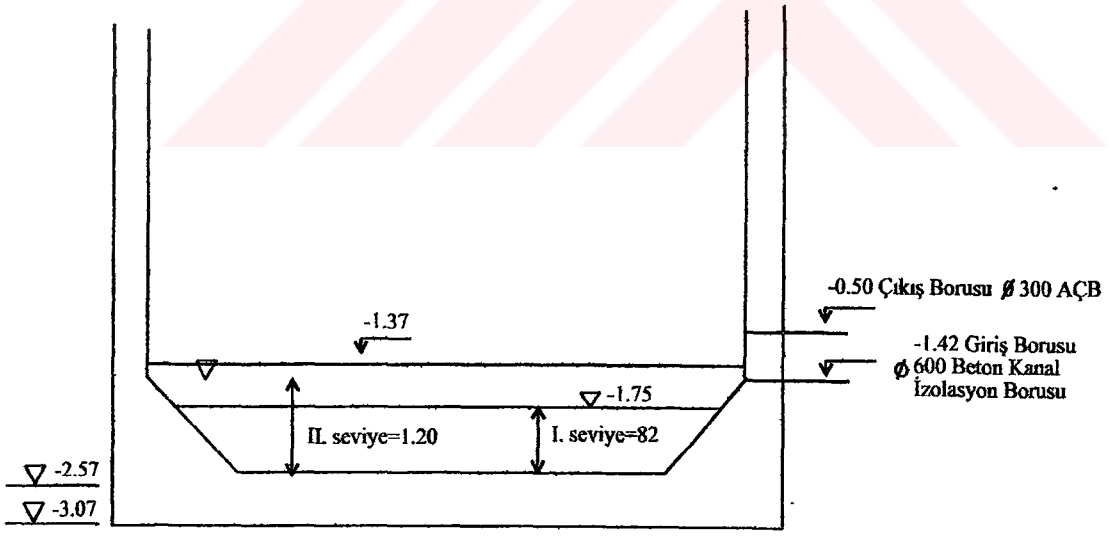
Boru çıkış kotu: -0.50

Pompa Cinsi : CP 3201 HT İmpeller No: 458
(I=0.550 kgm²)

Pompa Seviyeleri;

I. Seviye : 0.82 m

II. seviye : 1.20 m



Şekil 3.11- Kemer terfi hattı pompa istasyonu

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

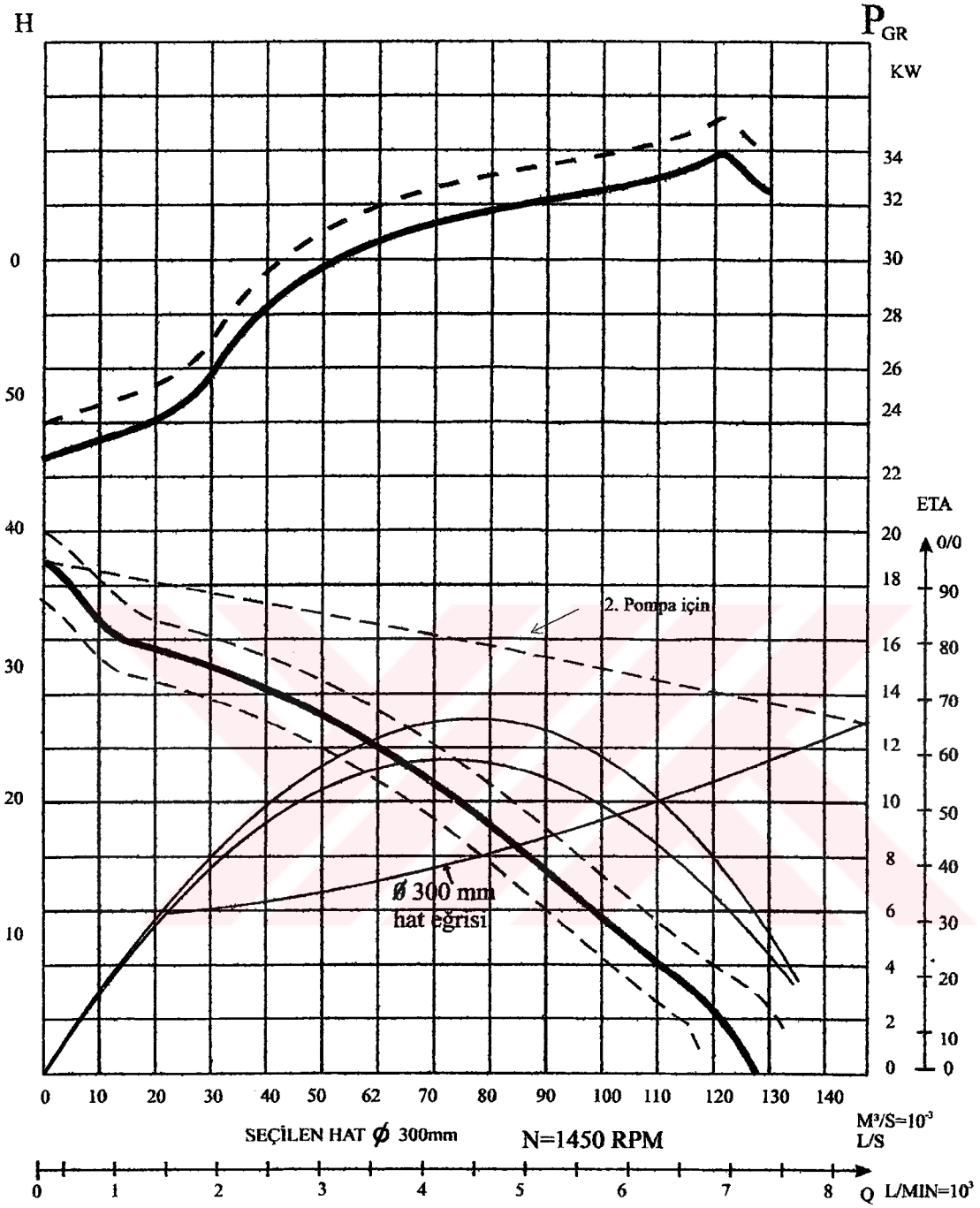
Tablo 3.5- Kemer Terfi Hattı Pompa Karakteristikleri

(QN) Q	(HNSQ) H_p	(BRWP) KW	$Q/Nx10^{-3}$	$h_p/N^2 \times 10^{-5}$
0	43	22	0	2.045
10	39	23	0.007	1.85
20	36.7	23.1	0.014	1.75
30	34.5	23.9	0.021	1.64
40	32.3	25.5	0.028	1.54
50	30.8	27.6	0.034	1.46
60	28.8	29.5	0.041	1.37
70	26.2	30.8	0.048	1.25
80	23.4	31.8	0.055	1.11
90	20.1	32.4	0.062	0.96
100	16.5	32.9	0.069	0.78
110	13.3	33.6	0.076	0.63
120	8.8	33.9	0.083	0.42
130	0.0	32.4	0.090	0.00

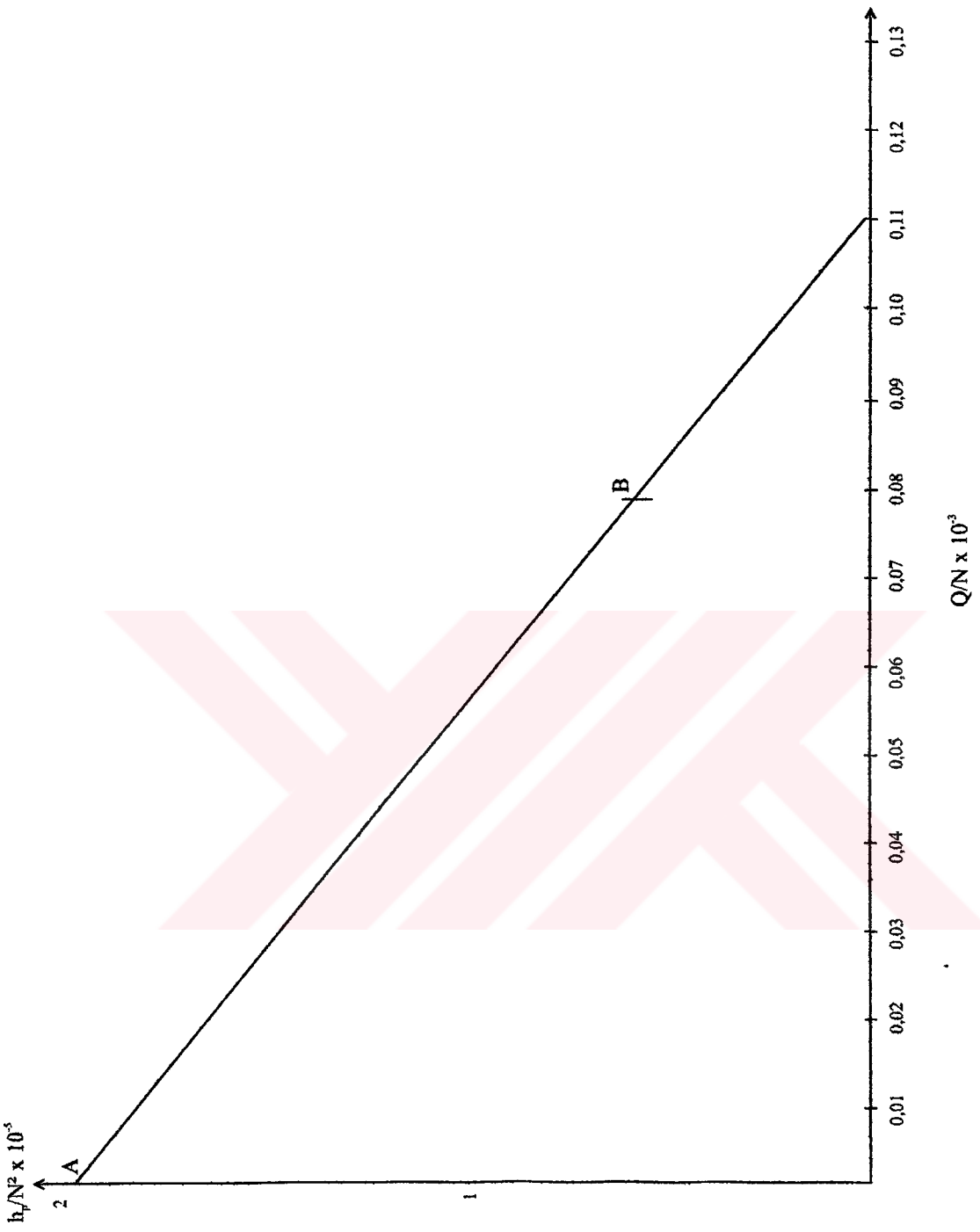
Tablo 3.6- Kemer Terfi Hattı Boru Karakteristikleri

Boru No	Çap (mm)	Boy (m)	Baş Kot (m)	Son Kot (m)
III	300	103.1	12.40	15.00
II	300	869.1	10.28	12.40
I	30	874.8	9.50	10.28

Toplam= 1847m



Şekil 3.12- Kemer terfi hattı pompa ve boru karakteristikleri



Şekil 3.13-Kemer terfi hattı pompa karakteristiği

Pompa karakteristiği program için;

$$\frac{h_p}{N^2} = \left[C_7 \frac{Q}{N} + C_8 \right] NST$$

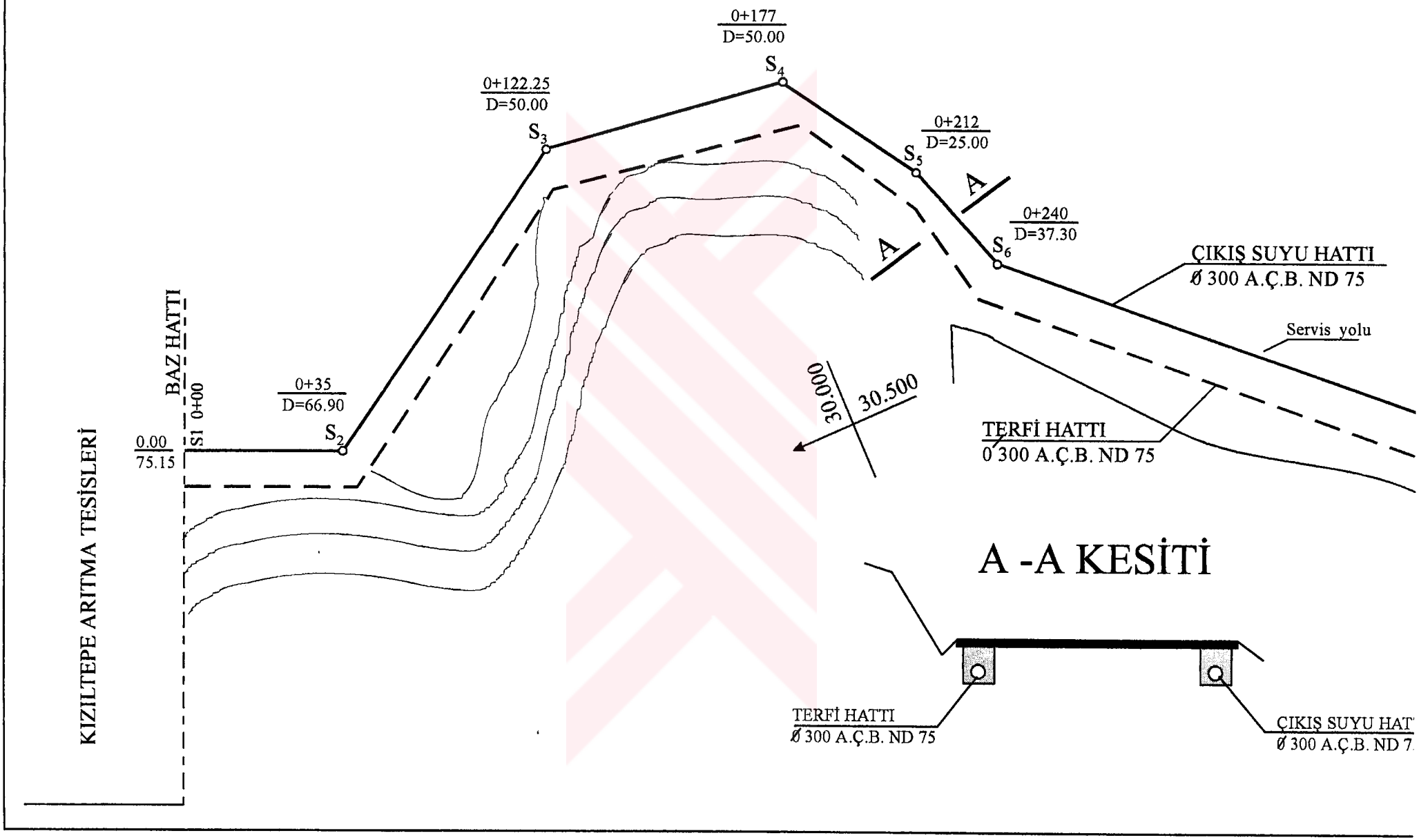
$$\frac{h_P}{N^2} = \frac{\left(\frac{h_P}{N^2}\right)_B - \left(\frac{h_P}{N^2}\right)_A}{\left(\frac{Q}{N}\right)_B - \left(\frac{Q}{N}\right)_A} \frac{Q}{N} - \frac{\left(\frac{h_P}{N^2}\right)_B - \left(\frac{h_P}{N^2}\right)_A}{\left(\frac{Q}{N}\right)_B - \left(\frac{Q}{N}\right)_A} \left(\frac{Q}{N}\right)_A + \left(\frac{h_P}{N^2}\right)_A$$

$$C_7 = \frac{\left(\frac{h_P}{N^2}\right)_B - \left(\frac{h_P}{N^2}\right)_A}{\left(\frac{Q}{N}\right)_B - \left(\frac{Q}{N}\right)_A} = \frac{0.63x10^{-5} - 2.045x10^{-5}}{0.076x10^{-3} - 0.00x10^{-3}} = -0.186$$

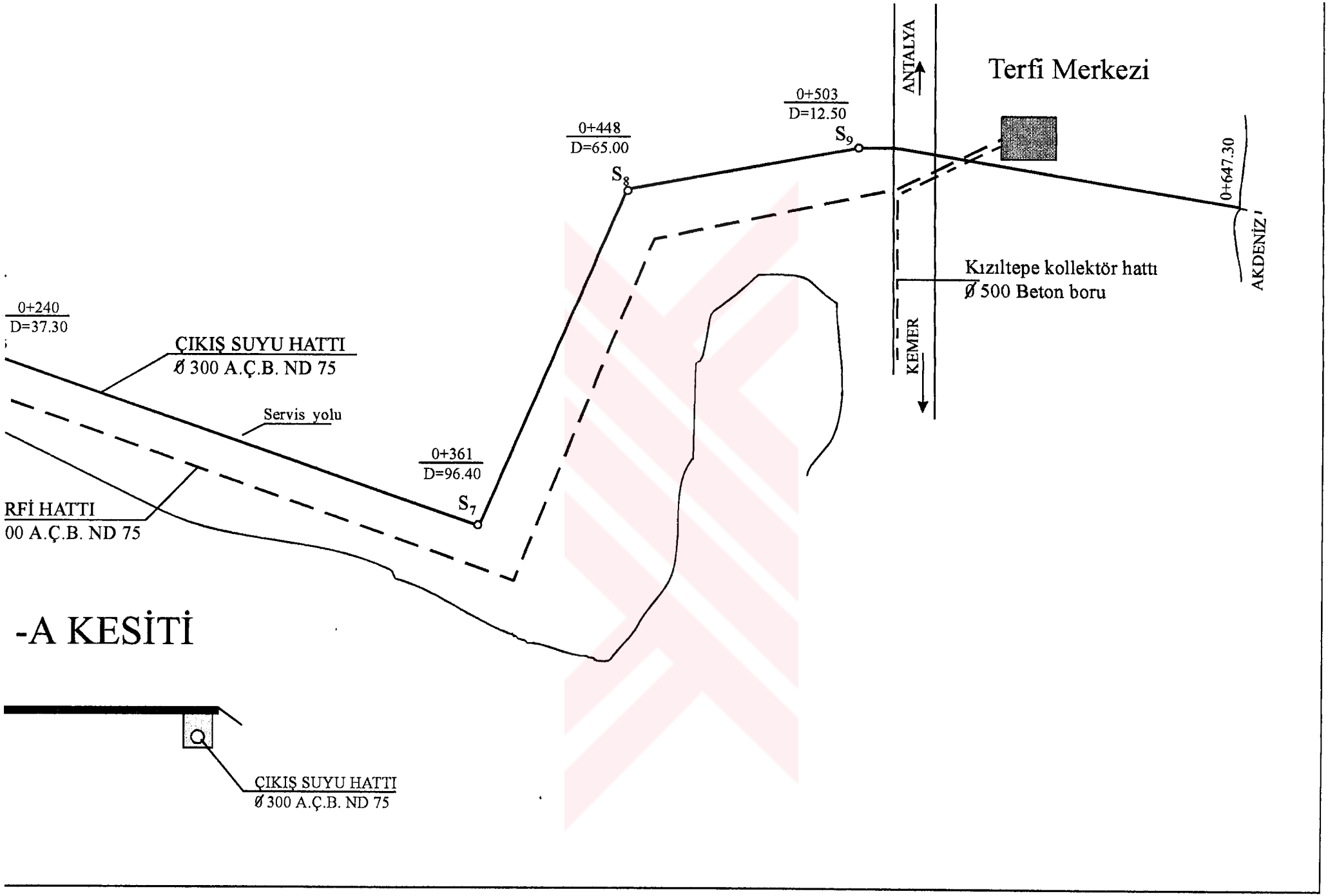
$$C_8 = \frac{\left(\frac{h_P}{N^2}\right)_B - \left(\frac{h_P}{N^2}\right)_A}{\left(\frac{Q}{N}\right)_B - \left(\frac{Q}{N}\right)_A} \left(\frac{Q}{N}\right)_A + \left(\frac{h_P}{N^2}\right)_A$$

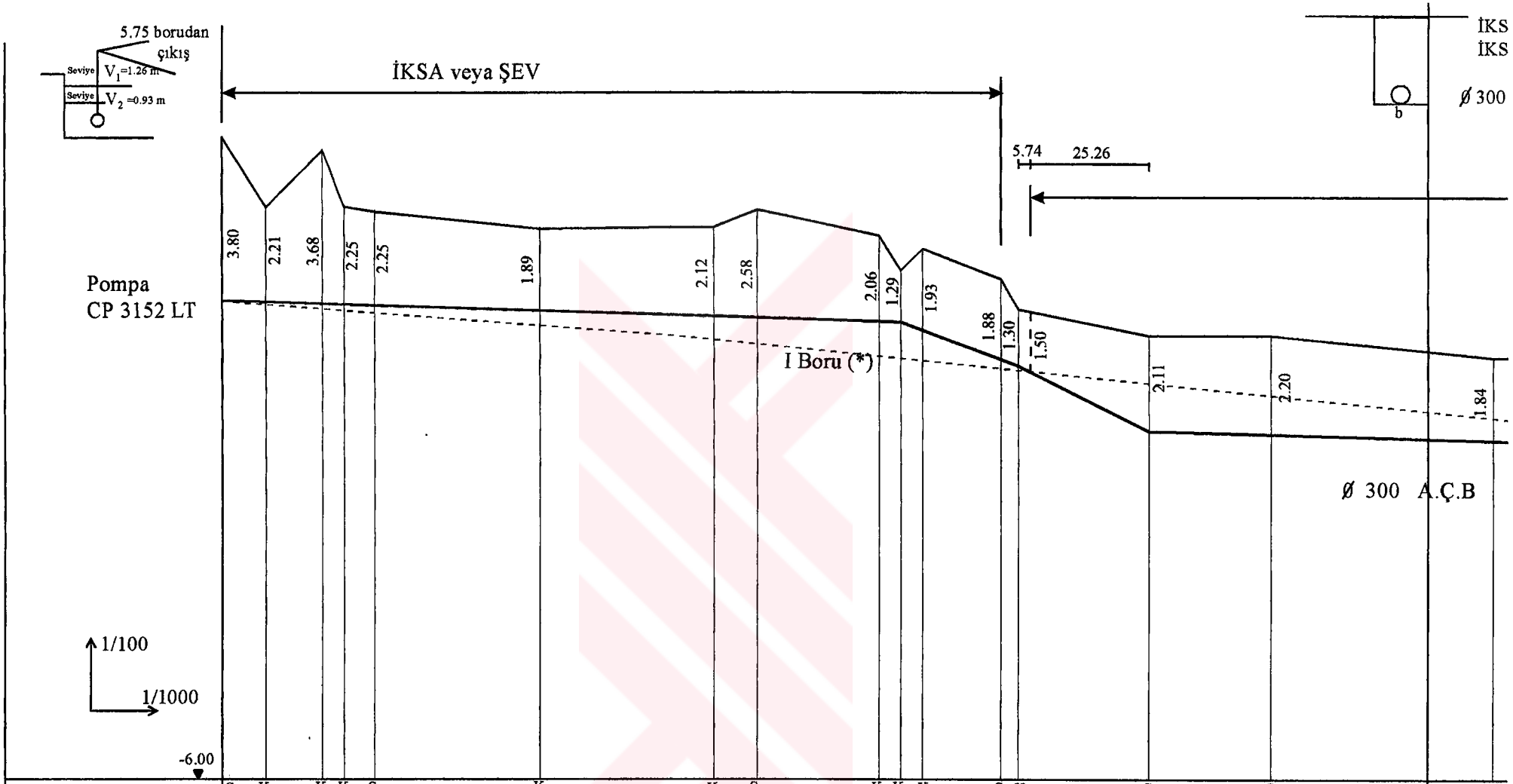
$$C_8 = -(-0.186)x(0.00) + 2.045x10^{-5} = 0.00002045$$

$$\frac{h_P}{N^2} = \left[-0.186 \frac{Q}{N} + 0.00002045 \right] NST$$



Şekil 3.1- Kızıltepe Çıkış Suyu ve terfi hattı planı

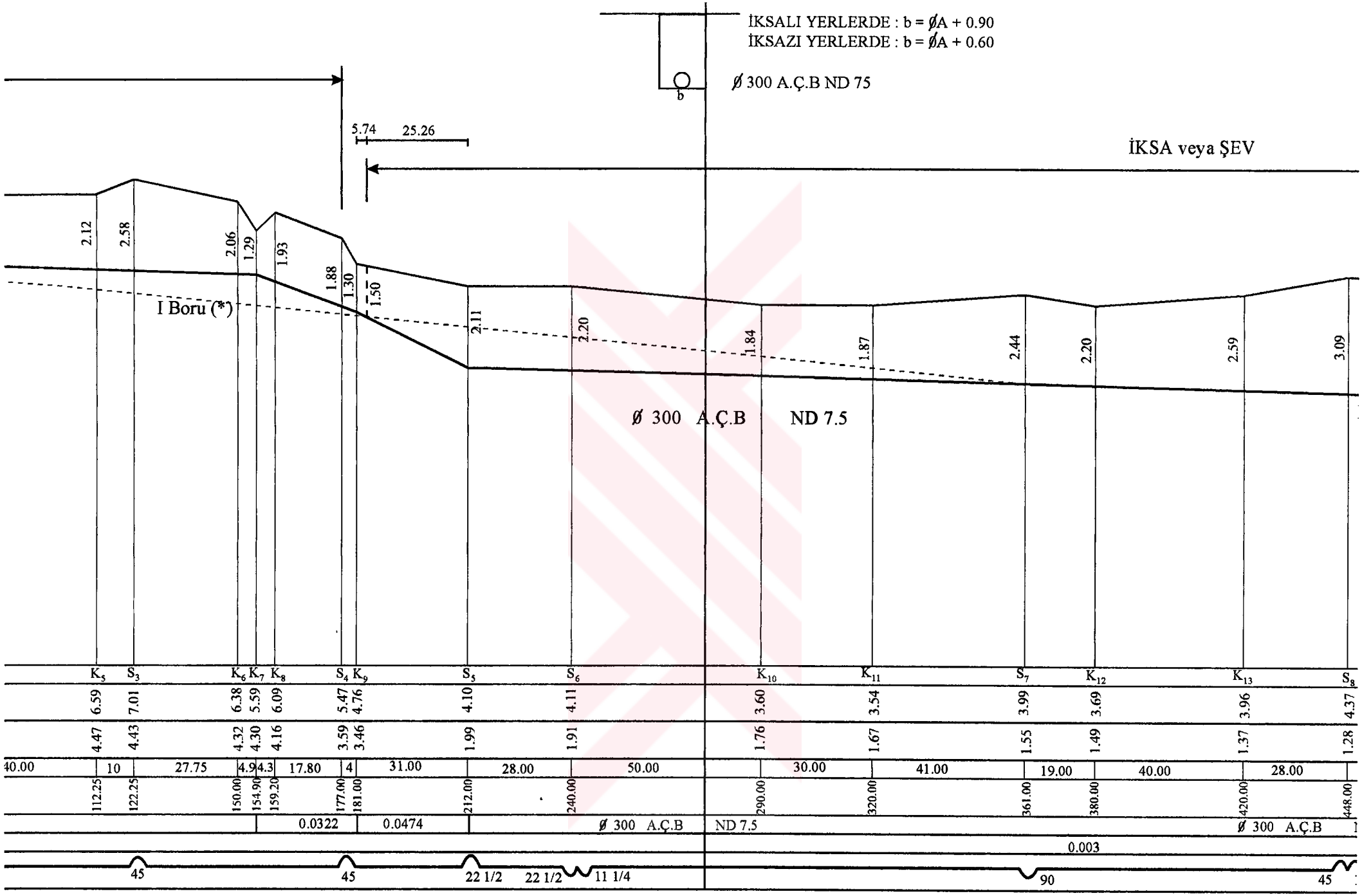

Terfi Merkezi
ANTALYA
0+503
D=12.50
S9
0+448
D=65.00
S8
0+647.30
AKDENİZ
Kızıltepe kollektör hattı
Ø 500 Beton boru
KEMER
0+240
D=37.30
ÇIKIŞ SUYU HATTI
Ø 300 A.Ç.B. ND 75
Servis yolu
0+361
D=96.40
S7
RFİ HATTI
00 A.Ç.B. ND 75
-A KESİTİ
ÇIKIŞ SUYU HATTI
Ø 300 A.Ç.B. ND 75



NOKTA NO	S_1	K_1	K_2	K_3	S_2	K_4	K_5	S_3	K_6	K_7	K_8	S_4	K_9	S_5	S_6	K_{10}
ZEMİN KOTU	8.70	7.07	8.49	7.04	7.01	6.51	6.59	7.01	6.38	5.59	6.09	5.47	4.76	4.10	4.11	3.60
BORU TABAN KOTU	4.90	4.86	4.81	4.79	4.76	4.62	4.47	4.43	4.32	4.30	4.16	3.59	3.46	1.99	1.91	1.76
ARA MESAFELER	10.15	12.85	5	7	37.25	40.00		10	27.75	4.9	4.3	17.80	4	31.00	28.00	50.00
BAŞLANGICAMESAFE	0.00	10.15	23.00	28.00	35.00	72.50	112.25	122.25	150.00	154.90	159.20	177.00	181.00	212.00	240.00	290.00
BORU ÇAPI, CİNSİ, TİPİ	0.003873											0.0322	0.0474	Ø 300 A.Ç.B		ND 7.5
EĞİMLER																
DİRSEKLER	45	11 1/4				45				45				22 1/2	22 1/2	11 1/4

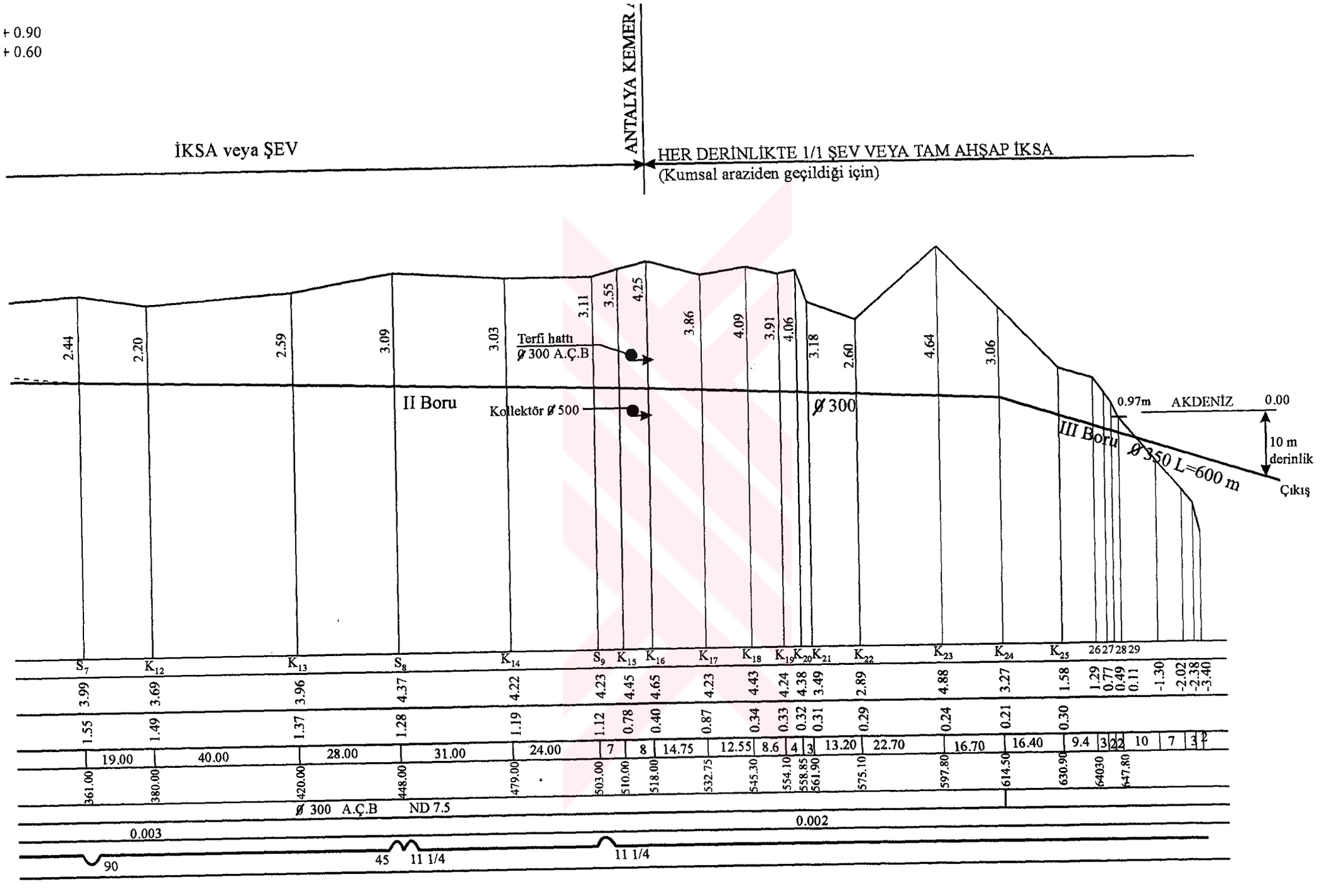
Şekil 3.2- Kızıltepe çıkış suyu Boykesit

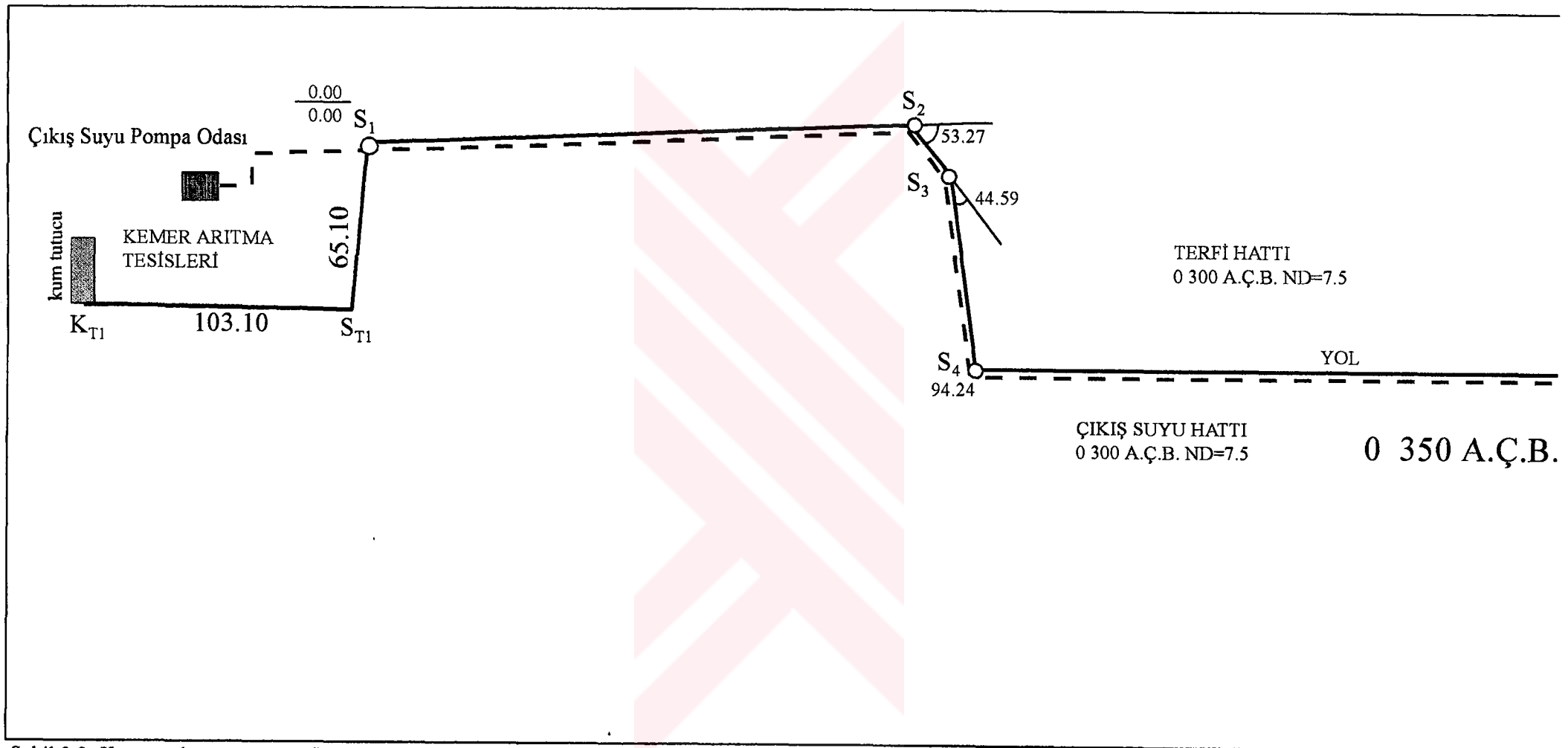
(*)- Bilgisayar hafızasında daha az yer işgal etmesi nedeniyle boru hattı üç hatta ayrılmıştır



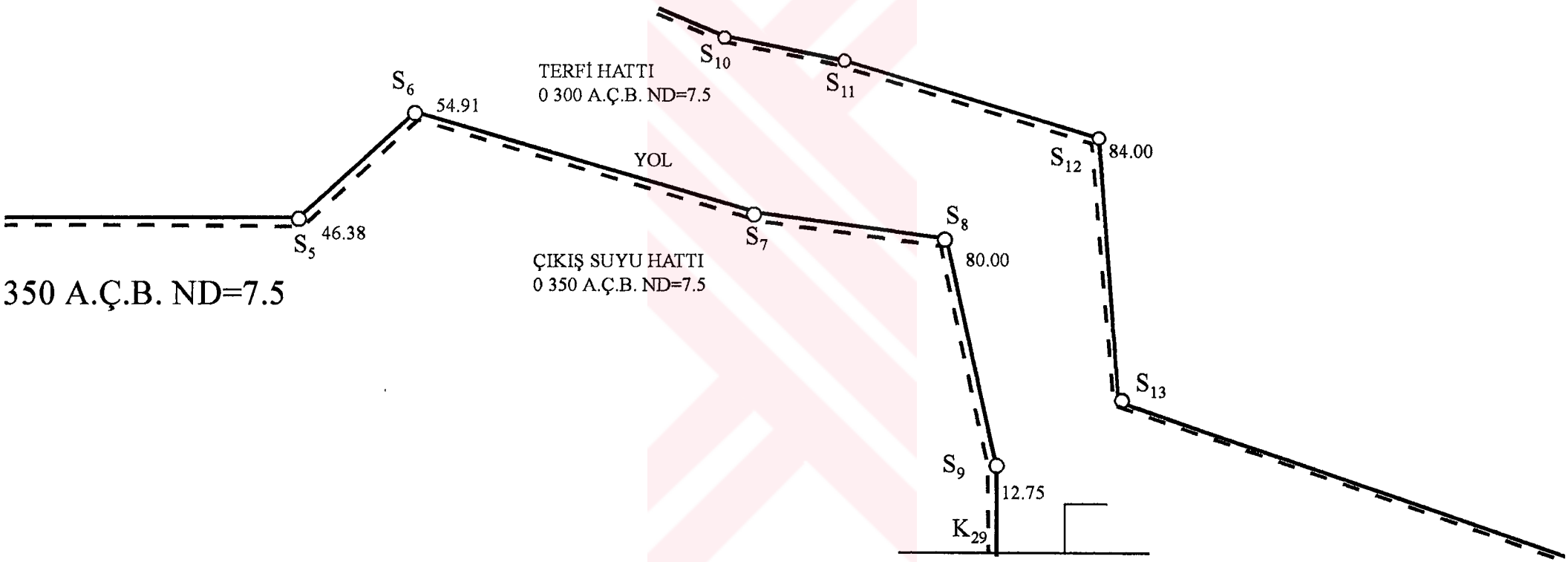
hattı üç hatta ayrılmıştır

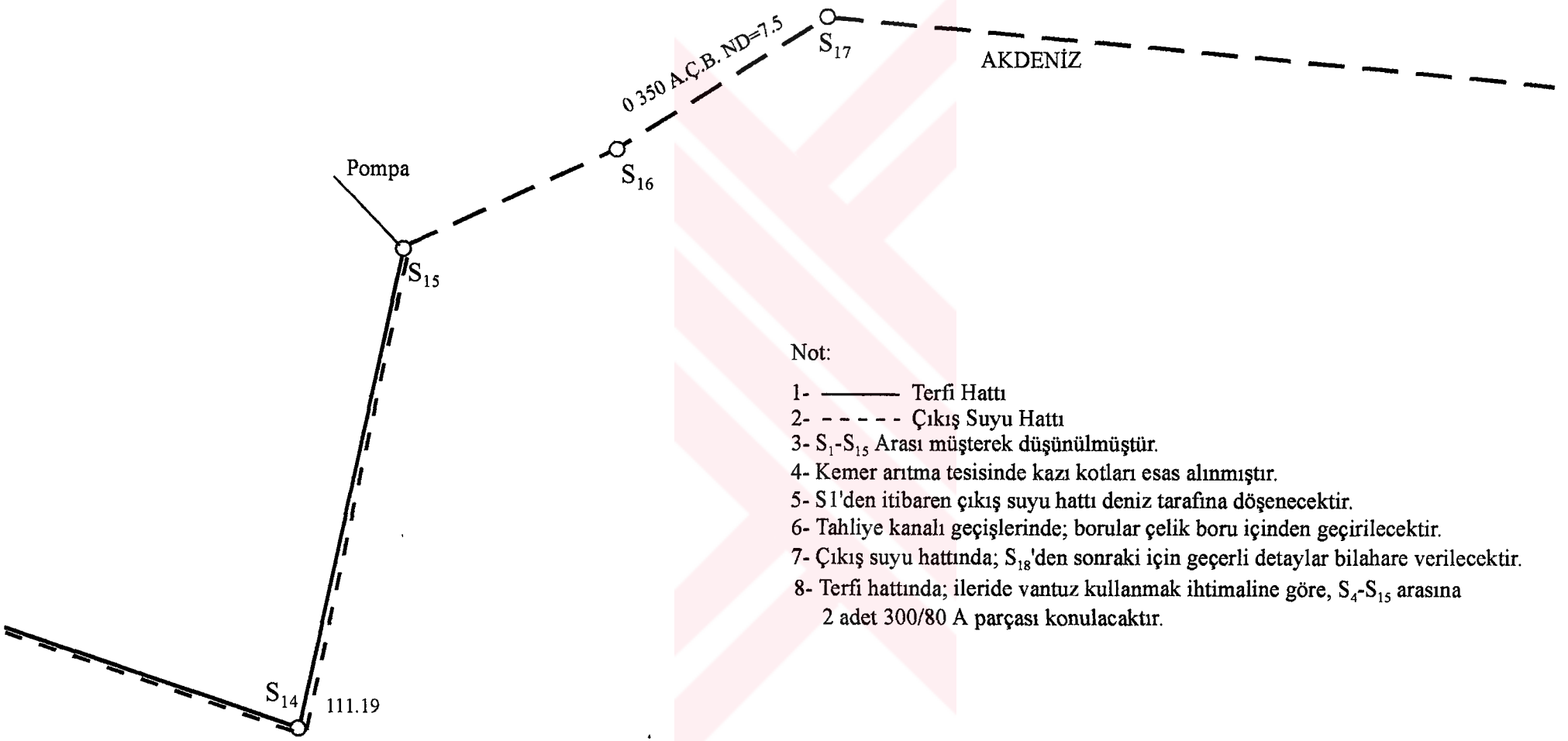
+ 0.90
+ 0.60


İKSA veya ŞEV
ANTALYA KEMER
HER DERİNLİKTE 1/1 ŞEV VEYA TAM AHŞAP İKSA
(Kumsal araziden geçildiği için)
Terfi hattı
Ø 300 A.Ç.B
Kollektör Ø 500
II Boru
Ø 300
III Boru Ø 350 L=600 m
0.97m
AKDENİZ
0.00
10 m derinlik
Çıkış
2.44
2.20
2.59
3.09
3.03
3.11
3.55
4.25
3.86
4.09
3.91
4.06
3.18
2.60
4.64
3.06
S7 K12 K13 S8 K14 S9 K15 K16 K17 K18 K19 K20 K21 K22 K23 K24 K25 26 27 28 29
3.99 3.69 3.96 4.37 4.22 4.23 4.45 4.65 4.23 4.43 4.24 4.38 3.49 2.89 4.88 3.27 1.58 1.29 0.77 0.49 0.11 -1.30 -2.02 -2.38 -3.40
1.55 1.49 1.37 1.28 1.19 1.12 0.78 0.40 0.87 0.34 0.33 0.32 0.31 0.29 0.24 0.21 0.30
19.00 40.00 28.00 31.00 24.00 7 8 14.75 12.55 8.6 4 3 13.20 22.70 16.70 16.40 9.4 3 22 10 7 3 2
361.00 380.00 420.00 448.00 479.00 503.00 510.00 518.00 532.75 545.30 554.10 558.85 561.90 575.10 597.80 614.50 630.90 640.30 647.80
Ø 300 A.Ç.B ND 7.5
0.003
0.002
90
45
11 1/4
11 1/4



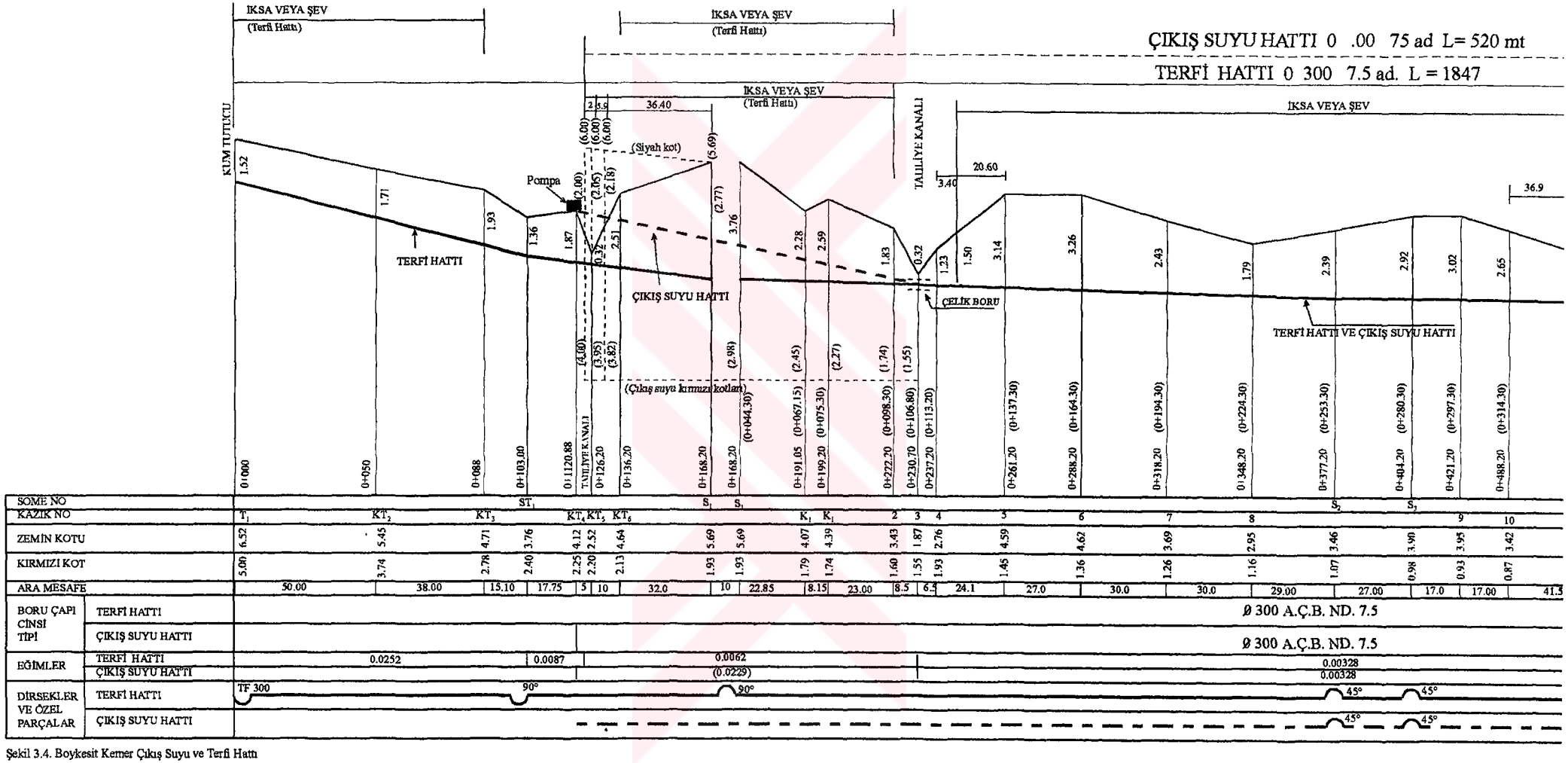
Şekil 3.3- Kemer çıkış suyu ve terfi hattı planı


TERFİ HATTI
0 300 A.Ç.B. ND=7.5
S10
S11
S12
84.00
S6
54.91
YOL
S5
46.38
S7
S8
80.00
ÇIKIŞ SUYU HATTI
0 350 A.Ç.B. ND=7.5
350 A.Ç.B. ND=7.5
S13
S9
12.75
K29



Not:

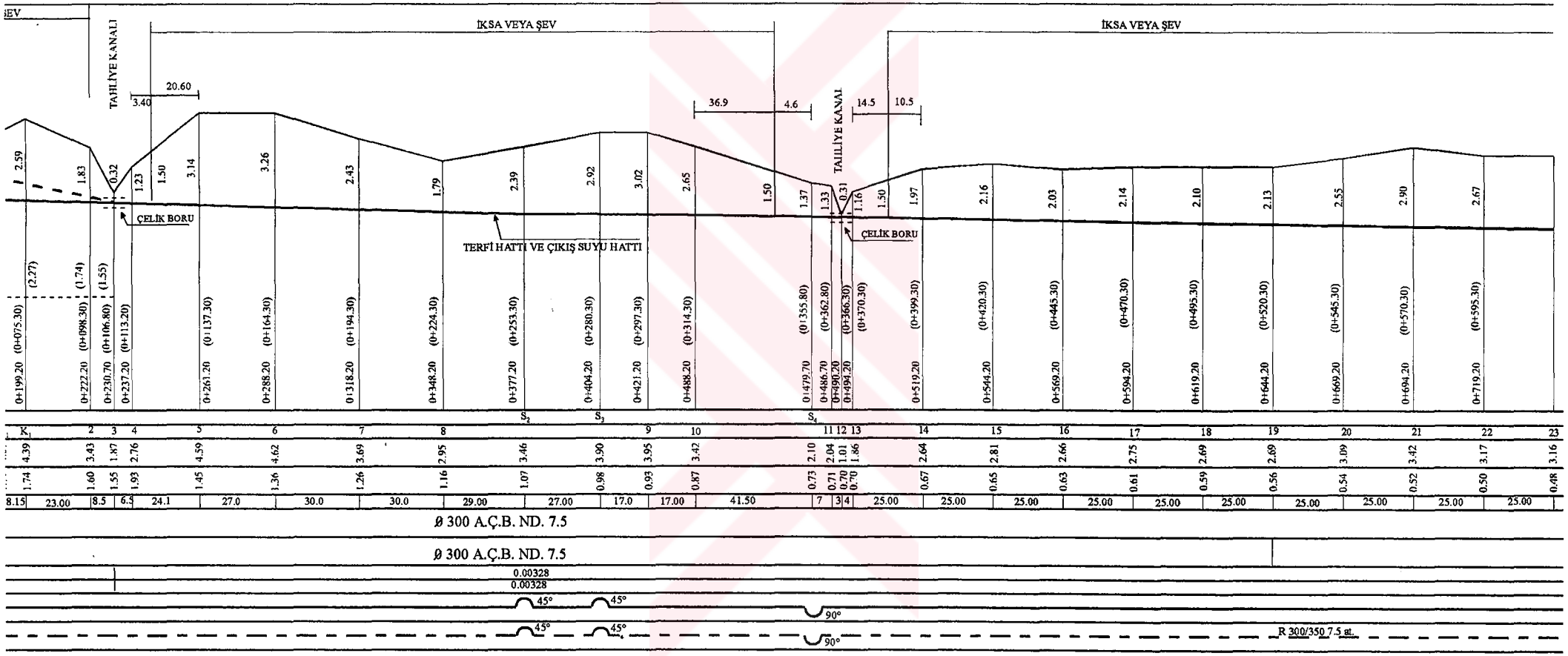
1- ——— Terfi Hattı
2- - - - - - Çıkış Suyu Hattı
3- S_1-S_{15} Arası müşterek düşünülmüştür.
4- Kemer arıtma tesisinde kazı kotları esas alınmıştır.
5- S1'den itibaren çıkış suyu hattı deniz tarafına döşenecektir.
6- Tahliye kanalı geçişlerinde; borular çelik boru içinden geçirilecektir.
7- Çıkış suyu hattında; S_{18}'den sonraki için geçerli detaylar bilahare verilecektir.
8- Terfi hattında; ileride vantuz kullanmak ihtimaline göre, S_4-S_{15} arasına 2 adet 300/80 A parçası konulacaktır.



Şekil 3.4. Boykesit Kemer Çıkış Suyu ve Terfi Hattı

ÇIKIŞ SUYU HATTI 0 .00 75 ad L= 520 mt

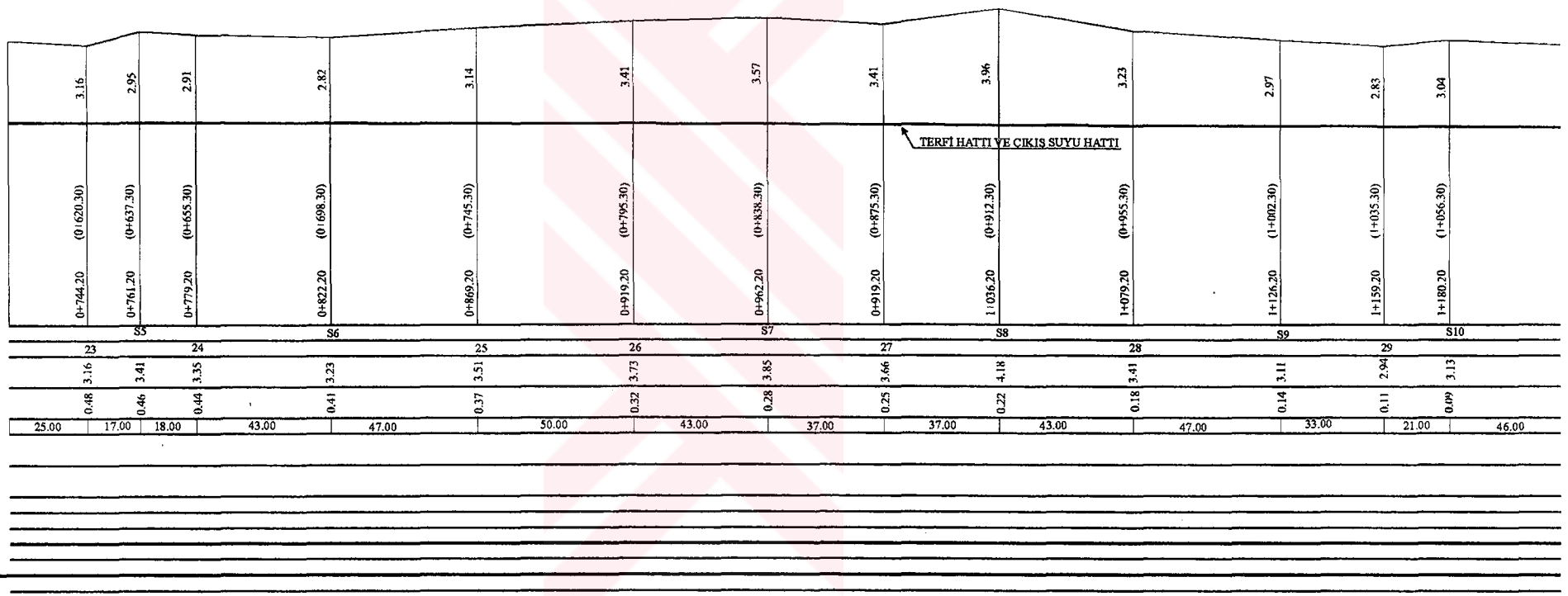
TERFİ HATTI 0 300 7.5 ad. L = 1847



ÇIKIŞ SUYU HATTI 0 350 ND 75 L=1651 mt

TERFİ HATTI L = 1847

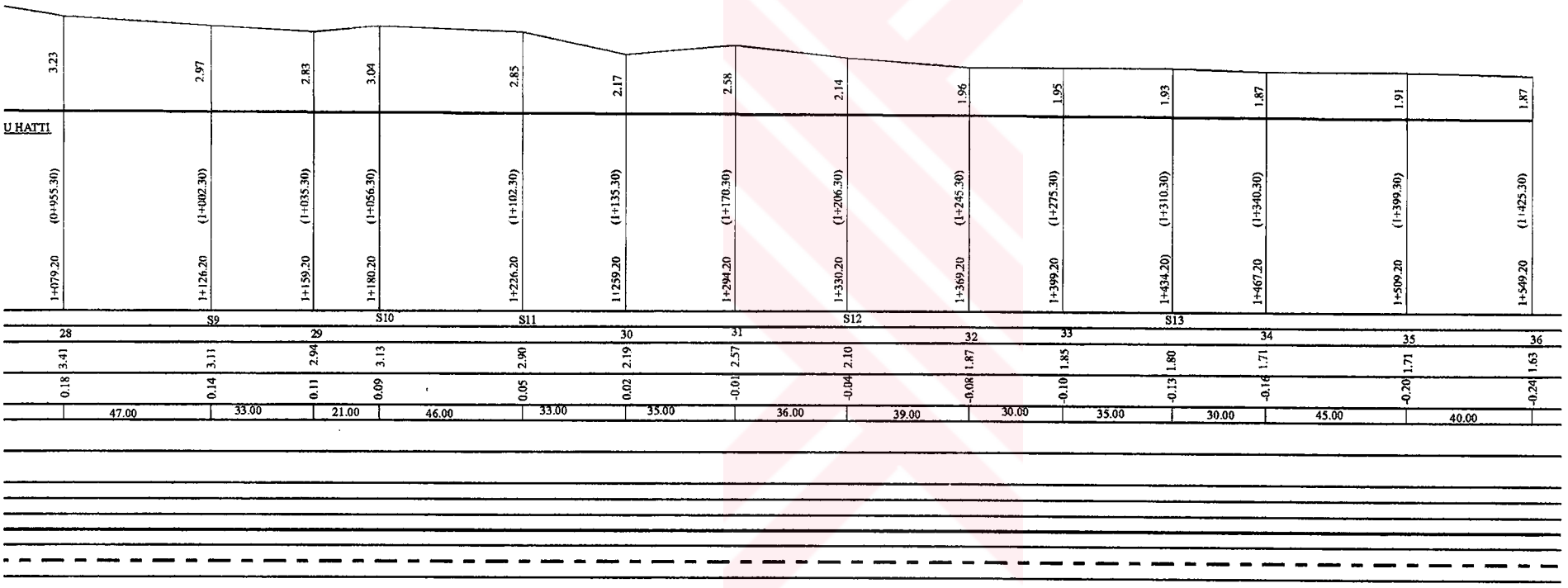
İKSA VEYA ŞEV

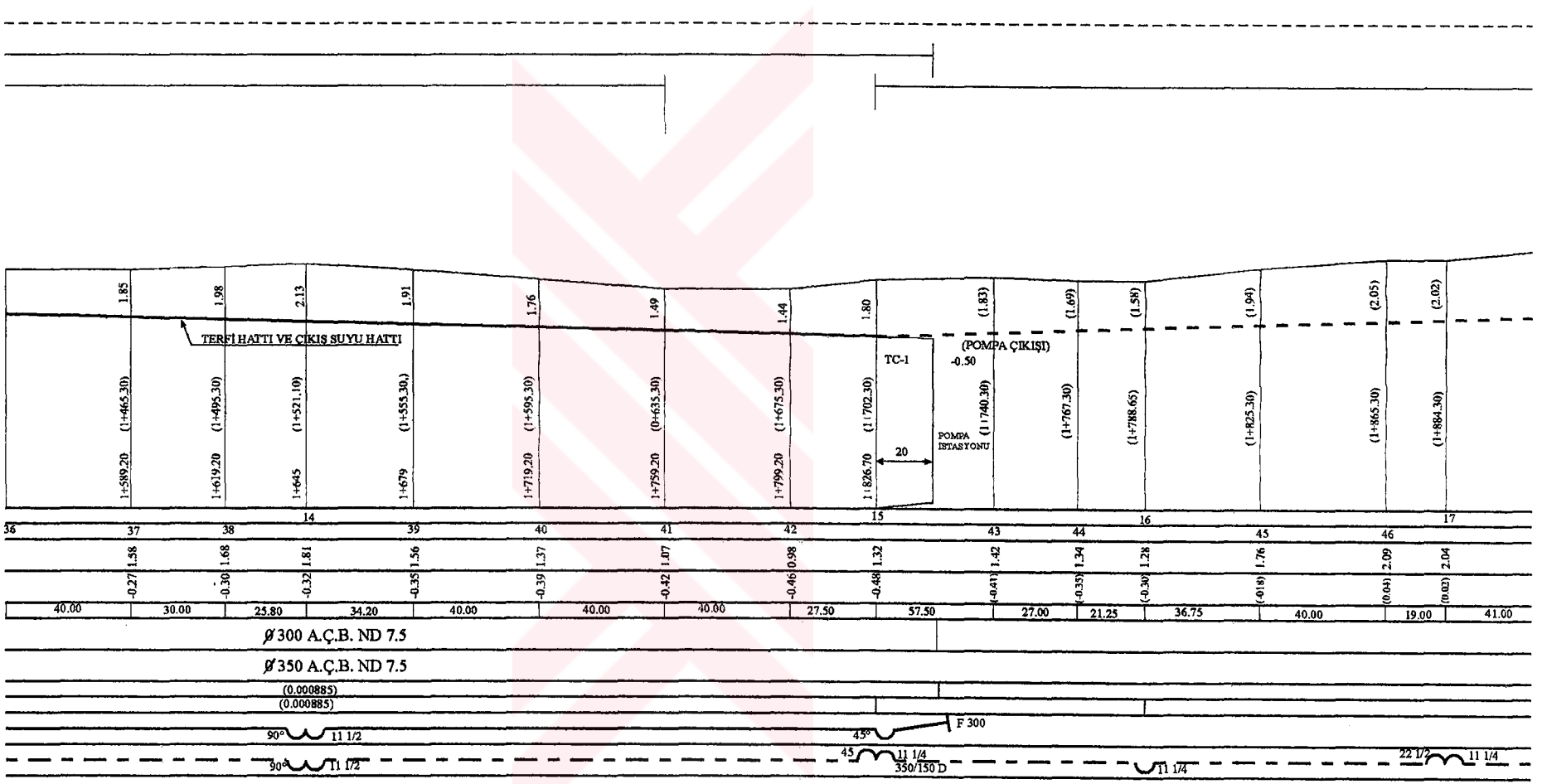


IATTI 0 350 ND 75 L=1651 mt

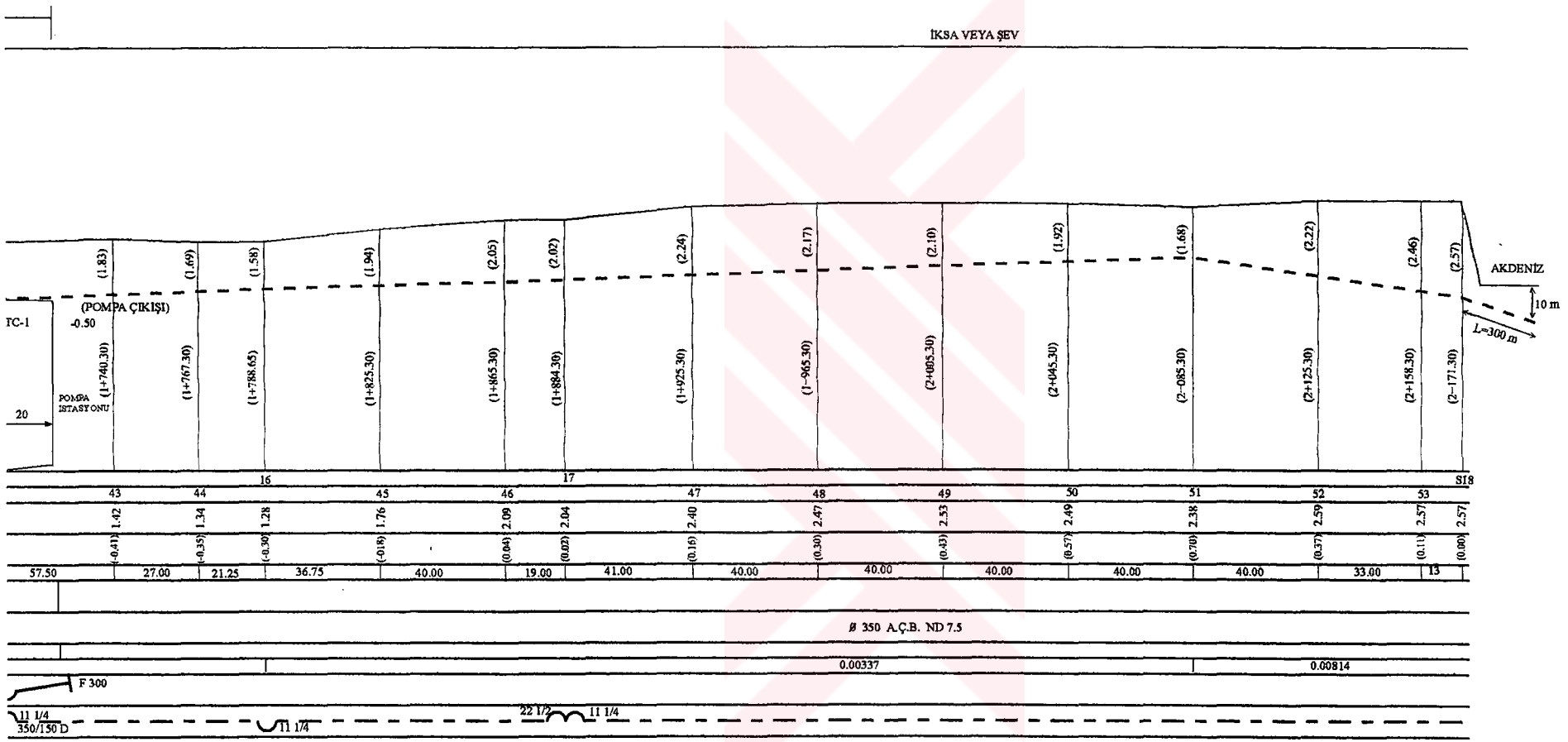
L = 1847

KSA VEYA ŞEV




TERFİ HATTI VE ÇIKIŞ SUYU HATTI
(POMPA ÇIKIŞI)
TC-1
-0.50
POMPA İSTASYONU
20
1.85
1.98
2.13
1.91
1.76
1.49
1.44
1.80
(1.83)
(1.69)
(1.58)
(1.94)
(2.05)
(2.02)
(1+465.30)
(1+495.30)
(1+521.10)
(1+555.30)
(1+595.30)
(0+635.30)
(1+675.30)
(1+702.30)
(1+740.30)
(1+767.30)
(1+788.65)
(1+825.30)
(1+865.30)
(1+884.30)
1+589.20
1+619.20
1+645
1+679
1+719.20
1+759.20
1+799.20
1+826.70
14
15
16
17
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
1.58
1.68
1.81
1.56
1.37
1.07
0.98
1.32
1.42
1.34
1.28
1.76
2.09
2.04
-0.27
-0.30
-0.32
-0.35
-0.39
-0.42
-0.46
-0.48
(-0.41)
(-0.35)
(-0.30)
(-0.18)
(0.04)
(0.02)
40.00
30.00
25.80
34.20
40.00
40.00
40.00
27.50
57.50
27.00
21.25
36.75
40.00
19.00
41.00
Ø300 A.Ç.B. ND 7.5
Ø350 A.Ç.B. ND 7.5
(0.000885)
(0.000885)
90°
11 1/2
90°
11 1/2
45°
F 300
45
11 1/4
350/150 D
11 1/4
22 1/2
11 1/4

ÇIKIŞ SUYU HATTI 0 350 ND 75 L=1651 mt.



4. SONUÇLAR

1- Borularda geçici kararsız akım şartlarında meydana gelen aşırı basınç salınımlarını karakterize eden hiperbolik tipte lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin kapalı çözümleri mümkün değildir.

2- Su darbesi olarak adlandırılan aşırı basınçların hesabı için nümerik yöntemler kullanılmaktadır.

3- Bu amaçla kullanılan en yaygın nümerik teknik karakteristikler metodudur. Bu metod yardımıyla su darbesi denklemleri bir çift adi diferansiyel denkleme dönüşür ve karakteristik doğrular boyunca bu denklemler sonlu farklar yöntemiyle ayrıklaştırılır.

4- Pompa, vana, hazne, boru ayrımı ve farklı çapta boruların birleşimi gibi sınır şartlarının ayrı ayrı tanımı yapılır. Böylece tanımlanan zaman aralıklarında boru hatlarının her kesitinde basınçların değişimi belirlenebilir.

5- Sınır şartlarının ayrı ayrı tanımlanmaları güç olduğundan boru iç noktalarındaki dallanmalara ait sınır şartları eşdeğer boru kavramı yardımıyla dinamik olarak benzeştirilerek nümerik analizi basitleştirmek mümkündür.

6- Su darbesini önleyen hava kazanı ve denge bacası gibi sistemlerin tasarımıda sonlu farklar yaklaşımı ile mümkündür.

7- Bu amaçla hazırlanan Fortran 77 dilindeki programlar yardımıyla, üç ayrı boru hattında su darbesi analizi yapılmıştır.Böylece elde edilen sonuçlar bu hatlar için en doğru tasarımın yapılmasını sağlamıştır.Yazılımlar uygun sınır şartlarının tanımı ile daha farklı boru hatlarının su darbesi analizinide mümkün kılmaktadır. Bu yöntemler

ile analizlerin bilgisayar destekli yapılmasıda, tasarımın çok hızlı gerçekleşmesini sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Avcı C.B., Yüksel Y., 1994, "The Finite Difference Method In Computational Fluid Dynamics", Yıldız Technical University, İstanbul

Dağlı F., 1979, "Basınçlı Borularda Sıvı Sütunu Ayrılması ve Çözülmüş Gaz Etkisinin İncelenmesi", Yıldız Technical University, İstanbul

Dağlı F., 1986, "Karmaşık Boru Sistemlerinde Su Darbesinin Sonlu Farklar Çözüm Yöntemi İle Analizi", Yıldız Technical University, İstanbul

Dağlı F., Yüksel Y., 1984, "Basınçlı Borularda Kararlı Olmayan Hareketler (Su Darbesi)", Yıldız Technical University, İstanbul

Featherstone, R.E. and Nalluri, C., 1982, "Civil Engineering Hydraulics", Granada, London

Fox J.A., 1989, "Transient Flow In Pipes,Open Channels and Sewers", Ellis Horwood Limited, Publishers, Chichester, Halsted Press: a division of John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto

Kaykayoğlu R, 1994, "Introduction to Compitational Fluid Dynamics", İstanbul University, İstanbul

Stephenson David, 1984, "Pipeflow Analysis", Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo

Wijdieks J., 1983, "Waterhammer", Delft Hydraulics Laboratory, Publication no.310

Yüksel Y., 1996, "Su Darbesi", Yıldız Technical University, İstanbul

EKLER

EK.1

SANTRİFÜJ POMPALAR

EK.1 SANTRIFÜJ POMPA

E1.1 Genel

Santrifüj pompaların

debi, Q
manometrik basma yüksekliği, (h_m)
verim (genel verim, η_g)
devir adedi (n) ve
çektiği güç (pompa miline verilen, N güç)

şeklindeki çeşitli karakteristik değerlerinin birbirleri arasındaki bağ münasebeti belirten eğrilere tulumbanın karakteristik eğrileri adını veriyoruz.

Bu karakteristik değerlerden devir adedi sabit tutularak manometrik basma yüksekliği ve debi arasındaki bağlantıyı veren karakteristik eğri pompanın ana karakteristik eğrisidir.

Aynı şekilde devir adedini sabit tutarak verim ve çekilen gücün debiye bağlı olarak değişimleri de belli olduğu takdirde, söz konusu çalışma devri için pompa karakteristik eğrileri bilinmiş olur.

Pompanın karakteristik eğrileri tecrübi olarak bulunur. Bunların teorik olarak ne şekilde değişecekleri de hesaplanabilir.

Bu hususu belirtmek üzere aşağıdaki kaideler verilebilir:
Pompa devir adedi (n) değiştiği zaman;

1. Pompa debisi devir adedi ile orantılı olarak değişir.

2. Manometrik basma yüksekliği devir adedinin karesi ile orantılı olarak değişir ve

3. Çekilen güç ise devir adedinin üçüncü kuvveti ile orantılı olarak değişir.

Yukarıdaki kaideleri tatbik edebilmek için verimin bu çalışma noktasında, devir adedinin değişiminden etkilenmediğini, kabul etmek gerekir. Bu takdirde şu denklemleri, yazabiliriz.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \qquad \frac{h_1}{h_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}; \qquad \frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}$$

Bir pompa debisinin sıfır olması halinde sağlayabileceği maksimum basma yüksekliğini aşağıdaki ampirik formül ile tahmin etmek mümkündür.

$$h = \left(\frac{Dn}{8500}\right)^2$$

Burada;

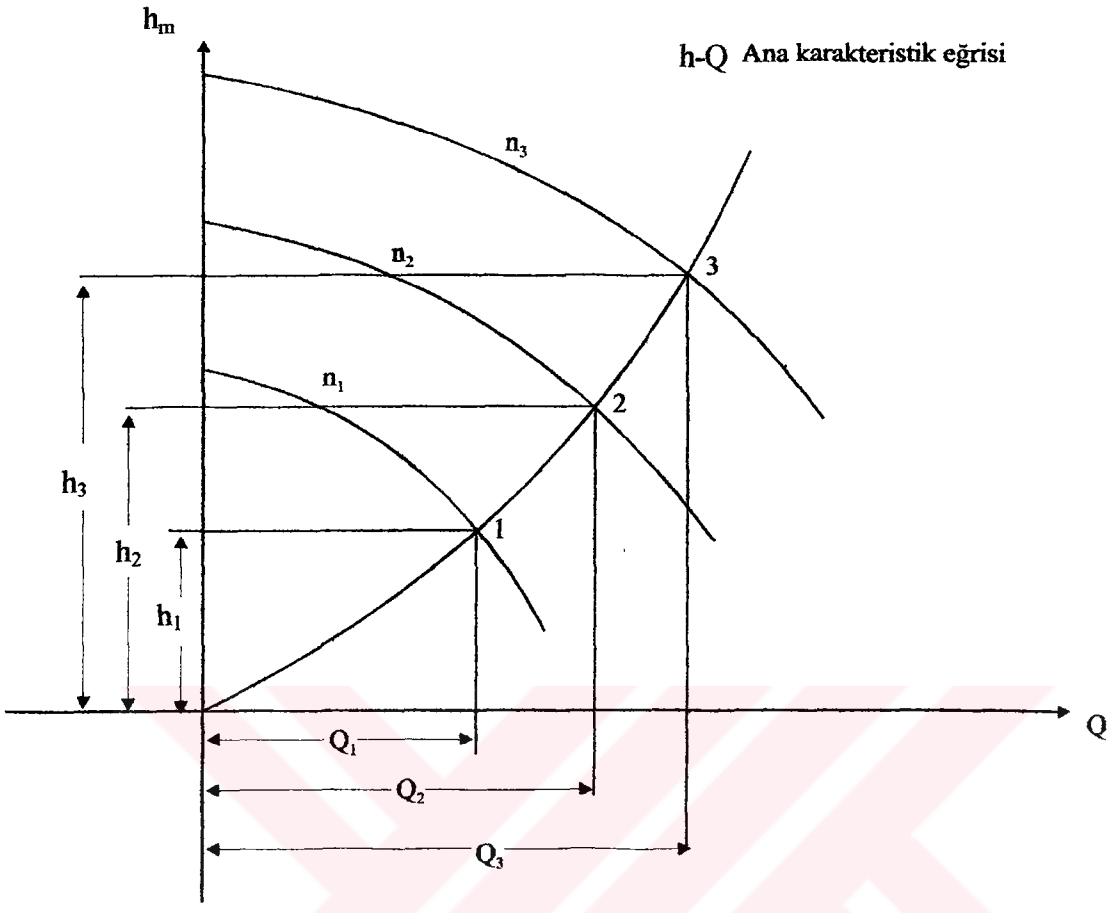
h : Metre su sütunu olarak manometrik basma yüksekliği

D : Pompa çarkının santimetre olarak dış çapı

n : Pompanın devir adedi (dakika devir adedi olarak)

Pompa debisi sıfırdan itibaren arttığı takdirde, manometrik basma yüksekliğinin tedricen azaldığı görülür. Basma yüksekliğindeki bu düşüş daha çok pompa çarkının konstrüksiyonuna bağlıdır. Kanat formları, giriş ve çıkış hız üçgenleri ve çark içindeki hidrolik kayıplar ana karakteristik eğrinin değişimi üzerinde etkili olurlar.

Şekil E1.1' de bir santrifüj tulumbanın n_1, n_2, n_3 gibi farklı üç devir adedi için ana karakteristik eğrileri görülmektedir.



Şekil E1.1- Pompa karakteristik eğrilerinin n devir adedinin fonksiyonu olarak değişimi

$$\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{n_1}{n_2}\;;\qquad \frac{Q_2}{Q_3}=\frac{n_2}{n_3}$$

$$\frac{h_1}{h_2}=\frac{n_1^{\,2}}{n_2^{\,2}};\qquad \frac{h_2}{h_3}=\frac{n_2^{\,3}}{n_3^{\,3}}$$

denklemleri ile belirli 1,2,3 noktaları ayrı bir parabol üzerindedirler.

(bu eşitliklerden $\frac{h_1}{h_2}=\frac{n_1^{\,2}}{n_2^{\,2}}=\frac{Q_1^{\,2}}{Q_2^{\,2}}$ böylece $\frac{h_1}{Q_1^{\,2}}=\frac{h_2}{Q_2^{\,2}}$ genel olarak $\frac{h}{Q^2}$=sabit kabul olduğu görülür)

Bütün bu noktalarda pompanın verimi ve özgül hızının aynı olduğu kabul edilmektedir.

Şöyle ki;

$$n_{sq} = \frac{n_1 Q_1^{1/2}}{h_1^{3/4}} = \frac{n_2 Q_2^{1/2}}{h_2^{3/4}}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{3/4}\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{n_1^2}{n_2^2}\right)^{3/4}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{1/2}$$

$$= \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{3/2}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{1/2} = \frac{n_1}{n_2}$$

E1.2 Dağ Eğrileri

Bir santrifüj pompanın sabit devir adedinde $h_m = f(Q)$ manometrik basma yüksekliği ile debi arasındaki bağlantıyı tecrübe yolu ile tayin edebilmek için belirli çalışma şartları altında ve devri sabit tutmak suretiyle h_m manometrik basma yüksekliği ve debi değerleri ölçülür. Bu suretle verilen devir adedindeki karakteristik eğriye ait bu noktayı tespit ettikten sonra (devri değiştirmeden) çalışma şartlarının (yani debiyi) değiştirmek suretiyle değişik manometrik basma yüksekliği ve değişik debide karakteristik eğriye ait yeni bir nokta bulunur ve bu şekilde $h_m = f(Q)$ karakteristik eğrisi nokta nokta belirlenir. Bu sırada herhangi bir çalışma şartında h_m ve Q değerleri bulunduğu esnada tulumba milindeki gücü (N) de ölçtüğümüz takdirde

$$n_g = \frac{\gamma Q h_m}{75N}$$

bağıntısından o debideki pompa veriminin de hesaplanması ve $h_m=f(Q)$ karakteristiği ile birlikte $n_g=f(Q)$ verim debi karakteristiğinin de elde edilmesi mümkün olur.

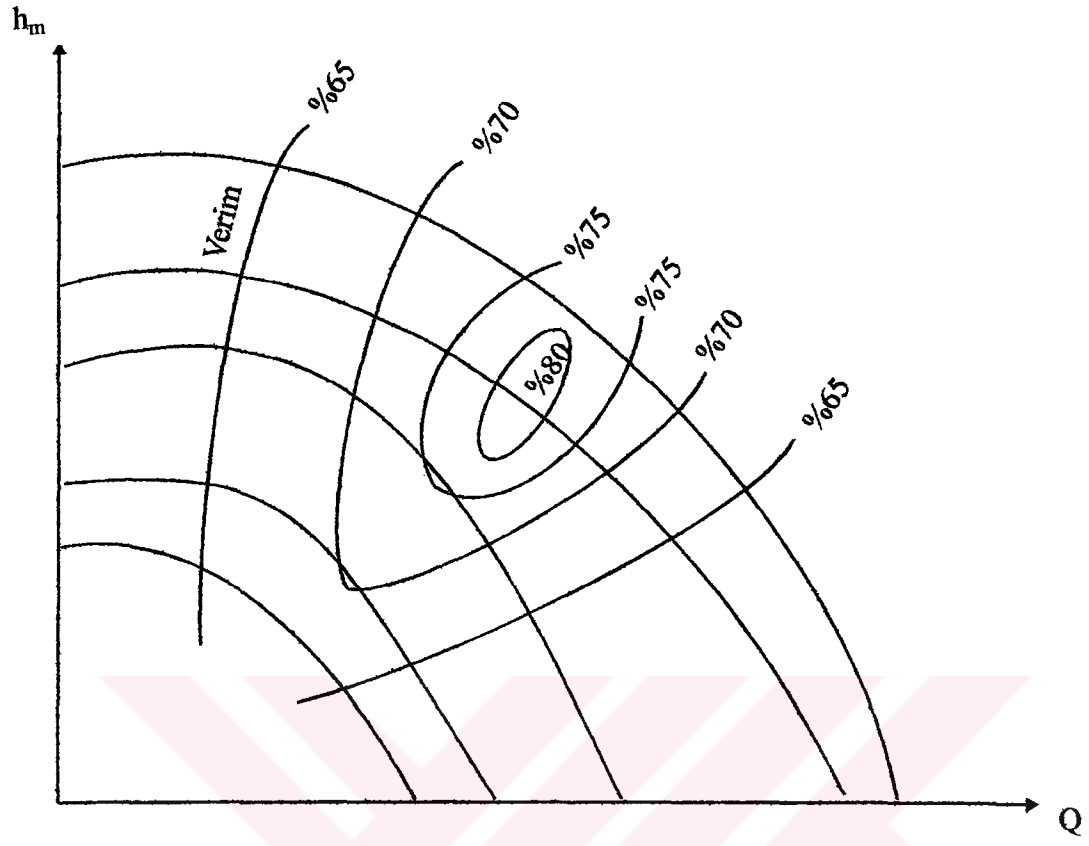
Burada $n_g=f(Q)$ eğrisinin tek tepe noktası pompanın tecrübe esnasında sabit tutulmuş bulunan devir adedinde sağlayabileceği maksimum verim değerini göstereceği gibi aynı zamanda pompanın bu devirde çalışması gereken h_m yüksekliği ile Q debisini de belirli kılar.

Bu suretle belirli n dev/dak değeri için maksimum verim sağlayan h_m ve Q değeri belirli olmasına karşılık değişik devir adetlerinde maksimum verimin nümerik değerinin ne şekilde değişeceği belli değildir.

Bir santrifüj pompanın en yüksek verim sağlayacağı devir adedi; manometrik basma yüksekliği ve debi değerlerinin tespiti amacı ile yapılan tecrübelerin sonucu pompanın dağ eğrileri ile belirtilir. (Şekil E1.2)

Dağ eğrilerinin çizimi için n_1 devir adedi sabit tutulmak suretiyle $h_m=f(Q)$ karakteristik eğrisi çizildiği sırada her noktaya tekabül eden verim değeri karakteristik eğri üzerine işaretlenir. Aynı işlem n_2, n_3, n_4, ... gibi değişik hız değerleri için tekrarlanmak suretiyle pompanın çalışabileceği bütün hız (devir) alanı taranır.

Bundan sonra her karakteristik $h_m=f(Q)$ eğrisi üzerinde eşit nümerik verim değerleri birleştirilmek suretiyle topografik eğrilere benzer bir eğri ailesi elde edilir. Bu eğrilerin ortasındaki tepe noktaların tekabül eden nokta pompanın en yüksek verimini ve bu verimin hangi devir adedinde elde edebileceğini ve bu durumda pompanın sağlayacağı h_m ve Q değerlerinin ne olacağını gösterir.



Şekil E1.2- Değişik devir adedi ile santrifüj pompanın dağ eğrilerinin şekli

Bundan sonra her karakteristik $H_m=f(Q)$ eğrisi üzerinde eşit nümerik verim değerleri birleştirilmek suretiyle topografik eğrilere benzer bir eğri ailesi elde edilir. Bu eğrilerin ortasındaki tepe noktaların tekabül eden nokta pompanın en yüksek verimini ve bu verimin hangi devir adedinde elde edebileceğini ve bu durumda pompanın sağlayacağı H_m ve Q değerlerinin ne olacağını gösterir.

E1.3 Özgül Hız

Özgül hız kavramı pompaların tasnif ve mukayesesinde rasyonel bir devir açmıştır. Özgül hız ile mukayese yolu kabul edilinceye kadar iki pompanın mukayesesi için genel

olarak hidrolik bakımdan önemli olan boyutlar ile mukayese yapılmaya çalışılırdı. Örneğin çark dış çapları D_1/D_2 veya çark çıkışında çark genişliğinin çark çapına oranı b_2/D_2 gibi. Sonraları tulumbaların tasnif ve tasnifi içinde (önceleri türbinlerde olduğu gibi) bir özgül hız (n_{sq}) tarifi kullanılmaya başlanmıştır.

Burada

$$n_{sq} = \frac{n\sqrt{Q}}{h_m^{3/4}}$$

n : Pompanın dakikada devir adedi

Q : saniyede basılmakta olan metre küp su miktarı

h_m : metre cinsinden manometrik basma yüksekliği

n_{sq} : Özgül pompanın dakikada devir adedi (Özgül hız)

Pompalar için kullanılmakta olan özgül hız değerinin fiziki manası şöyledir:

n_{sq} ; değeri verilen gerçek pompaya benzer ve 1 metre manometrik basma yüksekliğine saniyede 1 m^3 su basan tulumbanın maksimum verim sağlayabilmesi için dakikada dönmesi icap eden devir adedidir. Yani 1 m^3 suyu 1 m manometrik basma yüksekliğine maksimum verim sağlayacak şekilde basabilmesi için dakikada dönmesi icap eden devir adedidir.

$$n_s = 3.65 n_{sq}$$

E1.3.1 Özgül hız (n_{sq}) formülünün elde edilişi

Devir dedi n ve n' olan benzer iki pompa göz önüne alalım.

Birinci pompanın karakteristik değerleri n, h_m ve Q

İkinci pompanın karakteristik değerleri n', h'_m, ve Q'.
olsun ve her iki tulumba da aynı maksimum verimde çalışsın.

İki pompa arasındaki kinematik benzeşim katsayısı;

$$\mu = \frac{V_0'}{V_0} = \frac{\sqrt{h_m'}}{\sqrt{h_m}} \qquad (1)$$

ve geometrik benzeşim katsayısı

$$\lambda = \frac{D'}{D} \qquad (2)$$

olacaktır. Pompa çarkının çıkışındaki çevresel hızlar

$$U' = \frac{\pi D' n'}{60} \quad \text{ve} \quad U = \frac{\pi D n}{60}$$

olacaktır. Çevresel hızlar arasındaki oran ise;

$$\frac{U'}{U} = \frac{D' n'}{D n} \quad \text{veya} \quad \mu = \lambda \frac{n'}{n} \qquad (3)$$

şeklinde olacaktır.

İki pompanın debileri arasındaki oran ise;

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{A'}{A} \cdot \frac{C'}{C} = \frac{\pi D' b' C'}{\pi D b C} = \lambda^2 \mu \qquad (4)$$

b : çark genişliği

şeklindedir.

(3) ve (4) eşitliklerinden

$$\frac{Q'}{Q} = \lambda^2 \mu \qquad \text{(4) den}$$

$$\mu = \lambda \frac{n'}{n} \rightarrow \lambda = \mu \frac{n}{n'} \quad \text{(3) den}$$

(4) de yerine konursa

$$\frac{Q'}{Q} = \mu\lambda^2 = \mu\left(\mu \frac{n}{n'}\right)^2 = \mu^3 \frac{n^2}{n'^2}$$

ve (1) eşitliğindeki değer bunda yerine konursa;

$$\frac{Q'}{Q} = \mu^3 \frac{n^2}{n_1^{\,2}} = \left(\frac{\sqrt{h_m'}}{\sqrt{h_m}}\right)^3 \frac{n^2}{n'^2} =$$

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{h_m'}{h_m} \sqrt{\frac{h_m'}{h_m}} \frac{n^2}{n'^2}$$

veya

$$n' = n \sqrt{\frac{Q}{Q'}} \sqrt{\frac{h_m'}{h_m} \frac{\sqrt{h_m'}}{h_m}}$$

$$n' = n\left(\frac{Q}{Q'}\right)^{1/2}\left(\frac{h_m'}{h_m}\right)^{3/4} \qquad (5)$$

bağıntısı elde edilir.

Karakteristik değerleri n', h_m' ,Q' olan tulumbaya özgül pompa olarak seçersek;

$n' = n_{sq}$

$h_m' = 1$ m

$Q' = 1\ m^3/sn$

değerleri (5) eşitliğinde kullanmak suretiyle

$$n_{sq} = nQ^{1/2}\left(h_m\right)^{3/4} \qquad (6)$$

şeklini alır. n_{sq} değerinin boyutu dakikada devir adedidir.

Özgül hız denkleminin etüdünden şu neticeleri doğrudan doğruya çıkarabiliriz:

1. Eşit manometrik basma yüksekliği ve eşit debi ile çalışan iki santrifüj pompadan özgül hızı büyük olan pompa daha yüksek devir adedi ile çalışır ve boyutlar daha ufaktır.

2. Eşit debi ve devir adedi ile çalışan iki tulumbadan özgül hızı büyük olan tulumbanın manometrik basma yüksekliği daha ufaktır.

3. Eşit manometrik basma yüksekliği ve devir adedi ile çalışan iki pompadan özgül hızı büyük olan pompanın basacağı debi diğerinden daha fazladır.

Bazı imalatçılar türbinler için kullanılmakta olan özgül hız formülünü pompalar için de kullanırlar.

Türbinler için kullanılan özgül hız formülü

$$n_s = nN^{1/2}\left(h\right)^{-5/4}$$

şeklindedir. Burada

$$N = \frac{\gamma Q h_m}{75}$$

tulumba tarafından suya devredilen enerji değerini kullanmak suretiyle

$$n_s = n\sqrt{\frac{\gamma Q h_m}{75N}}h_m^{-5/4} = 3.65nQ^{1/2}h_m^{-3/4}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu suretle türbinler için kullanılmakta olan özgül hız formülü tulumbalar için de kullanılırsa n_{sq} özgül hızının 3,65 mislinin alınması gerekir.

$$n_s = 3{,}65\ n_{sq}$$

Bu takdirde N gücü için pompa tarafından suya devredilen gücün kullanılması gerekir.

E1.4 Santrifüj Pompalarda Hız Üçgenleri

Bir santrifüj pompa çarkının içindeki akışın etüdü için en elverişli yol çarkın muhtelif noktalarındaki sıvının hız değerlerinin tespitidir. Çarkın bir eksen etrafında döndüğünü de göz önüne alacak olursak, herhangi bir noktada üç ayrı hız mefhumunun varlığını görürüz. Bunlar;

1. Sıvının sabit bir eksen takımına göre hareketini belirten sıvının mutlak hızı. Bunu $\vec{v}$ harfi vektörü ile gösterelim.

2. Sıvının dönmekte olan çarka göre hareketini belirten sıvının çarka göre rölatif hızı. Bunu $\vec{w}$ harfi ve vektörü ile gösterelim.

3. Bir eksen etrafında dönmekte olan çarka ait noktanın hareketini belirten çarkın sabit eksen takımına göre (mutlak) hızı, sürüklenme hızı. Bunun $\vec{u}$ harfi ve vektörü ile gösterelim.

Yukarıda belirtilen aynı noktaya ait üç hız arasında

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$$

$$\left\{(V_{su})_{mut} = (U_{çark})_{mut} + W_{su/çark}\right\}$$

vektörel bağlantısı mevcuttur. Yani $\vec{V}$ suyun mutlak hız vektörü, aynı noktada suyun çarka göre rölatif hız vektörü W ile o noktadaki çarkın U mutlak hız vektörünün toplamına eşittir.

Böylece $\vec{V}, \vec{U}, \vec{W}$ vektörlerini bir arada çizersek bu üç vektör kapanacak uzayda bir üçgen meydana getirirler. Bu üçgene etüd etmekte olduğumuz noktanın hız üçgeni diyoruz.

Çark içinde herhangi bir nokta için, o noktaya ait bir hız üçgenin çizilmesi mümkündür. Çarkın içinde sıvının hareketi sırasında bu sıvının çarkın işgal ettiği hacme girişi ve bu hacimden çıkışı özellikle önemlidir. Bir sıvı zerresinin çarka girdiği ve çarktan çıktığı

noktalar için çizilen hız üçgenlerinden çarka giriş noktasındaki hız üçgenine "giriş hız üçgeni" ve çarktan çıkış noktasındaki hız üçgenine de "çıkış hız üçgeni" diyelim.

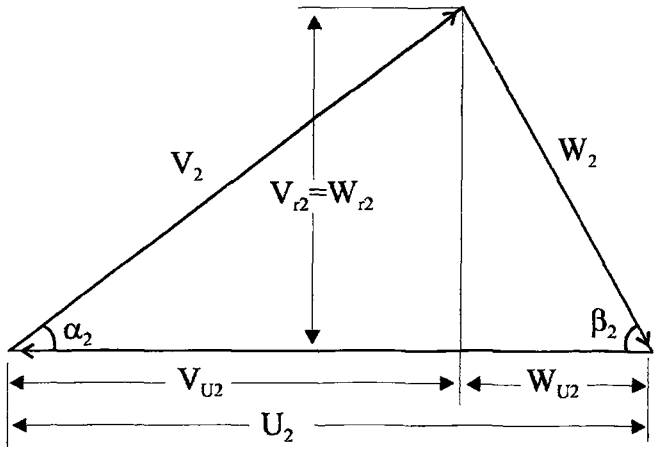
Türbinlerde suyun hareket halindeki çarka girişini (1) ve suyun hareket halindeki çarktan çıkışını da (2) indisi ile göstereli. Buna göre;

V_1 : Suyun çarka girişteki mutlak hızı
U_1 : Suyun çarka giriş noktasındaki çarkın çevresel hızı (sürüklenme hızı)
W_1 : Çarka girişte suyun hareket halindeki çarka göre rölatif hızı
V_2 : Suyun çarktan çıkışta mutlak hızı
U_2 : Çıkış noktasında çarkın çevresel hızı (sürüklenme hızı)
W_2 : Çıkış noktasındaki suyun çarka göre rölatif hızını
değerlerini gösterecektir.

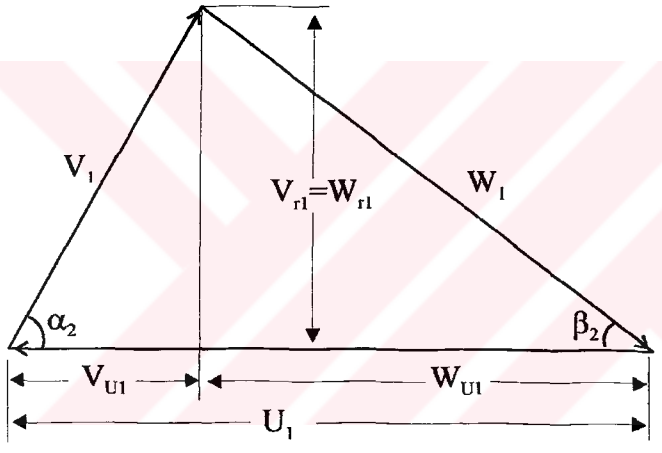
Bir santrifüj pompanın giriş ve çıkış hız üçgenleri şekil E1.3 'de gösterilmiştir. V_1 mutlak hızı ile U_1 sürüklenme hızı arasındaki açıyı α_1 ile gösterelim. Bu açı suyun çark çevresi ile yaptığı açıdır.

Suyun çarka yaklaşış şartları çarkın dışındaki organlar tarafından tanzim edildiğine göre çarka bağlı olmayan faktörler α_1 açısını tayin edecektir.

W_1 rölatif hızı ile U_1 sürüklenme hızının teşkil ettiği açıyı β_1 ile gösterelim. Su çarkın içine girdiğinde çarkın içindeki kanatların teşkil ettiği kanallar içinden akacaktır. Sonuç olarak W rölatif hızının çark kanatlarına paralel olduğunu söyleyebiliriz. Buna göre β_1 açısı çark kanatlarının girişte çark çevresi ile yaptığı açı olacaktır. Kanatlar çarka göre sabit olduğuna göre β_1 açısı çark boyutlandırılması esnasında tespit edilmiş sabit bir değerdir. β_1 açısı çarka bağlı faktörlerin tayin ettiği bir değerdir.



Çıkış hız üçgeni



Giriş hız üçgeni

Şekil E1.3- Santrifüj pompa giriş ve çıkış hız üçgeni

Suyun çarka girişte çevresel hıza dik istikametteki geçit alanı sabit bir değerdir. Su debisi de Q sabit olduğunda

$$V_{r1} = \frac{Q}{A_1}$$

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

V mutlak hızının çevresel hıza dik istikametteki mutlak bileşenini verecektir. Bu değer giriş hız üçgeninden (Şekil E1.3)

$$V_{r1} = V_1 \sin\alpha_1 = W_{r1} = W_1 \sin\beta_1$$

ile belirlidir.

Bir santrifüj pompada n devir adedi ve suyun çarka giriş noktasındaki çark çapı D_1 belli olduğuna göre giriş noktasındaki U_1 çevresel hızı

$$U_1 = \frac{\pi D_1 n}{60}$$

bağıntısı ile belirlidir. Çark kanatlarının çevre ile açısı β_1 sabit ve belli bir değerdedir.

Böylece giriş hız üçgeninin iki değeri bellidir. Suyun çarka sevkini α_1 gibi belirli bir değerle yaparsak hız üçgeninin çizilmesi için gerekli 3 şart temin edilmiş olur ve bu hız üçgeninden V_{r1} bileşeni ölçülerek elde edilir. Bu suretle bu pompanın basması gereken Q su miktarı da belli olur (Uygulamada α_1 giriş açısı 85° ile 90° arasında değişen bitr değer taşır).

U_1, β_1 ve α_1 değerleri belli iken pompanın Q debisinin V_{r1} belirli hız bileşenini sağlayacak şiddette olmalıdır. Bu Q debisi pompanın nominal veya çizim debisi değerine eşit olmalıdır. Pompa bu debiden daha küçük veya daha büyük fakat değişik bir debide çalıştığı takdirde farklı V_{r1} değeri bileşeni dolayısıyla giriş hız üçgeni kapanmayacaktır. Bu takdirde su pompa kanatları arasında girerken çark kanatları ile çarpışacak ve V_1 vektörü giriş hız üçgenine uyacak şekilde şiddeti ve yönü yani α_1 açısı değişecektir. Ancak bu çarpma olayı ile birlikte doğacak hidrolik yük kayıpları pompa veriminin düşmesine yol açacaktır. Pompanın nominal veya çizim debisinin dışındaki

debilerde çalışması halinde maksimum veriminin azalması sebeplerinden birisi de budur.

Nihayet giriş hız üçgeninden V_1 mutlak hızının çevresel hız üzerindeki izdüşümünü V_{u1} ve W_1 rölatif hızın çevresel hız üzerindeki iz düşümünü de W_{u1} değerleri ile gösterirsek

$$V_{u1} = V_1 \cos\alpha_1 \qquad \text{ve} \qquad W_{u1} = W_1 \cos\beta_1$$

ile belirlidirler (daha önce V_{u1}, V_{t1} harfi ile ifade edilmişti.

Çıkış hız üçgeninde V_1 suyun pompa çarkını terkettiği zamanki mutlak hızını göstermektedir. V_2 hızı ile U_2 çevresel hız arasındaki açı da α_2 ve çark kanatlarının U_2 çevresel hızı ile yaptığı açı da β_2 ile gösterilmiştir. β_2 aynı zamanda W_2 rölatif hızın çevresel hız ile yaptığı açıdır.

Su çark içinde ve çark kanatları arasında girişten çıkışa kadar aktığına göre çarkın çıkışında W_2 hızının çevresel hız ile açısı β_2 olmak mecburiyetindedir.

Giriş ve çıkış hız üçgenleri β_1 ve β_2 açıları bakımından mukayese edilirse, giriş hız üçgeninde β_1 açısının çarka girişi müteakip sağlanmasına karşılık çıkış hız üçgeninde β_2 açısının çark kanatlarının pozisyonuna bağlı olarak çark tarafından tayin edildiğini görürüz.

Aynı şekilde α_1 ve α_2 açılarının mukayesesinde α_1 açısının çarka bağlı olmayan faktörler tarafından tanzimine karşılık, α_2 açısı da çark kanatları tarafından tanzim edilmektedir.

Suyun çarktan çıkışta çevresel hıza dik istikametteki geçit alanı A_2 sabit bir değerdir. Su debisi değeri de sabit ise

$$V_{r2} = \frac{Q}{A_2}$$

V_2 mutlak hızının çevresel hıza dik istikametteki mutlak hız bileşenini verecektir.

$$V_{r2} = V_2 \sin\alpha_2 = W_2 \sin\beta_2 = W_{r2}$$

ile belirlidir. Bu değerler V_{r1} değeri ile birlikte pompanın debisini belirli kıldıklarından özel bir değer arzederler.

n devir adedi ve D_2 çark çapı belirli iken çıkış tarafındaki U_2 sürüklenme hızı

$$U_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}$$

ile belirlidir. β_2 açısı kanatların durumu ile belirlidir. Böylece çıkış hız üçgeni çark ile ilgili değerler yani U_2, β_2, D_2 ve V_{r2} değerleri ile belirli olmaktadır ve geçen Q debisine tekabül eden V_{r2} değerini sağlayacak bir α_2 açısı teşekkül etmektedir. Diğer taraftan V_2 mutlak hızının U_2 çevresel hızı üzerindeki izdüşümünü V_{u2} ve W_2 rölatif hızının U_2 hızı üzerindeki izdüşümünü de W_{u2} ile gösterelim.

Geçen Q debisine göre gerekli V_{r2} değerini sağlayacak α_2 açısı teşekkül ederken α_2 açısına bağlı olarak V_{u2} teğetsel hız izdüşümünü de değişecektir. Halbuki pompanın H_m manometrik basma yüksekliği

$$h_m = \eta_h \frac{V_{u2}U_2 - V_{u1}U_1}{g}$$

ile belirlidir. Q debi değerinin değişimi neticesi α_2 açısı ve dolayısıyla V_{u2} değerinin değişmesi, h_m manometrik basma yüksekliğinin değişmesine de yol açacaktır.

Tatbikatta çarkın girişinde kesit boyunca bu noktada aynı hız üçgeninin mevcudiyeti kabul edilir. Aynı şekilde çıkış üçgeninin de çıkış kesiti boyunca her noktada aynı olduğu düşünülebilir. Çarkın simetrik oluşu dolayısıyla mümkün görünen bu hal hakikatte çarkın iki kanadı arasındaki sıvı akışında her sıvı iplikçiği için farklıdır. İki kanat arasındaki akışın muayyen bir kesitindeki hızların her noktada birbirinden çok farklı olacağı tabiidir. Bu sebeple her kesitteki ortalama hızın bütün kesite teşmil edilecek hız üçgenlerinin bu hız esas alınarak çizilmesi gerekir.

E1.5 Net pozitif emme yüksekliği (NPSH)

$$\Delta h_d + \frac{V_e^2}{2g}$$

ye net pozitif emme yüksekliği (Net positive suction head) denir ve NPSH ile gösterilir.

Böylece (3) eşitliği

$$h_e \le \frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_b}{\gamma} - NPSH - \sum \Delta h$$

veya

$$NPSH = \frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_b}{\gamma} - \left(h_e + \sum \Delta h\right) \qquad (3)$$

olur. Bu, pompanın giriş ağzındaki mutlak dinamik basıncın miktarıdır. Pompayı çalıştıracaklar kullanılabilen NPSH'yi bilmelidirler. Kavitasyon olmaması için pompa girişinden itibaren azalan mutlak basıncın, pompa içinde buharlaşma basıncından büyük olması lazımdır. Bu tecrübe ile bulunur. Fabrika tarafından verilen bir (NPSH) eğrisine mevcut (available) NPSH eğrisi denir (mutlak basınçla ifade edilir).

Pompanın iyi çalışabilmesi için kullanılabilir NPSH eğrisini,n mevcut NPSH dan bir kaç desimetre, bütün çalışma sahalarında, büyük olması lazımdır.
Mühendis kullanılabilen NPSH'yi yani pompa girişindeki mutlak basıncı hesaplamalıdır.

$\frac{p_b}{\gamma}$ yı ihmal ederek

$$NPSH = \frac{p_a}{\gamma} - \left(h_e + \sum \Delta h\right)$$

olur. p_a/γ=10 m olarak, NPSH=10-(N_e+$\Sigma\Delta h$) eğrisini çizersek bir parabol elde ederiz. Bu eğri h_e kadar aşağıda emme borusu karakteristiğidir.

E1.5.1 Thoma Kavitasyon Katsayısı

Pompanın kavitasyon durumunu belirtmek için kavitasyon katsayısı (Thoma Kavitasyon katsayısı) kullanılır.

$$\frac{V_e^2}{2g} + \Delta h_d = \sigma h_p$$

bağıntısı kullanıldığı takdirde σ, kavitasyon katsayısı veya Thoma kavitasyon katsayısı adını alır. Bu bağıntı (2) deki h_e(max) bağıntısında h_e(max) yerine kurulu tesisin statik emme yüksekliği h_e kullanılmak suretiyle yerine konulduğunda

$$\sigma = \left(\frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_b}{\gamma} - \sum \Delta h - h_e\right) \Big/ h_p$$

EK.2

SU DARBESİ UYGULAMA 1.1'E AİT PROGRAM

EK.2

```
C     SU DARBESI UYGULAMA 1.1 Prof.Dr.Yalcın YUKSEL
C     MENBADA BIR HAZNE VE MANSAP TARAFINDA BIR VANA BULUNAN SERI HALINDE
C     BAGLI K=ADET BORU ICIN SU DARBESI PROGRAMI
C     PBEL( )=BORUNUN BASLANGIC KOTU
C     PRESH( )=BORUDA BASINC YUKU
      DIMENSION A(5),V(5,10),H(5,10),VP(5,10),HP(5,10),FL(5),D(5),
     1F(5),VO(5),NN(5),C2(5),SINA(5),XL(5,10),AA(5),DELT(5),
     2PBEL(5),PRESH(5,10),FF(5)
      OPEN (3,FILE='SUDAR1.DAT')
      OPEN (UNIT=7,FILE='SUDAR11.DAT')
      OPEN (UNIT=2,FILE='SUDAR1.OUT',STATUS='UNKNOWN')
      HEAD1=0.00
      READ(3,*) K,N,TC,TMAX,HR,HATM
      READ(7,*) (A(I),FL(I),D(I),F(I),VO(I),SINA(I),PBEL(I),I=1,K)
      WRITE(2,208) N,TC,TMAX,HR,HATM,(I,A(I),FL(I),D(I),F(I),VO(I),
     1SINA(I),PBEL(I),I=1,K)
C     MINUMUM ZAMAN ARALIGININ VE KARARLI AKIMA AIT SARTLARIN TAYINI
      AN=N
      DO 2 I=1,K
    2 DELT(I)=(FL(I)/AN)/A(I)
      DT=DELT(1)
      KK=1
      DO 6 I=2,K
      IF(DT-DELT(I)) 6,6,7
    7 DT=DELT(I)
      KK=I
    6 CONTINUE
      H(1,1)=HR
      V(1,1)=VO(1)
      DO 20 I=1,K
      IF(I-KK) 4,21,4
    4 NN(I)=FL(I)/(DT*A(I))
      GO TO 23
   21 NN(I)=N
   23 ANN=NN(I)
      C2(I)=9.81/A(I)
      D(I)=D(I)/1000.
      DHL=F(I)*FL(I)*VO(I)*VO(I)/(19.62*D(I)*ANN)
      AA(I)=3.1415927*D(I)*D(I)*0.25
      FF(I)=F(I)*DT/(2.*D(I))
      M=NN(I)+1
      XL(I,1)=0.0
      PRESH (I,1)=H(I,1)-PBEL(I)
      DO 22 L=2,M
      TEM=L-1
      XL(I,L)=TEM/ANN
      H(I,L)=H(I,1)-(DHL*TEM)
      PRESH (I,L)=H(I,L)-(PBEL(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINA(I))
   22 V(I,L)=VO(I)
      IF (I-K) 13,20,13
   13 H(I+1,1)=H(I,M)
      V(I+1,1)=VO(I+1)
   20 CONTINUE
```

```
      T=0.0
      IU=0
      HP(1,1)=HR
      WRITE(2,204)
    5 WRITE(2,205) T
      DO 9 I=1,K
      WRITE(2,206) I
      NK=NN(I)+1
      WRITE(2,207) (XL(I,M),PRESH(I,M),H(I,M),V(I,M),M=1,NK)
    9 CONTINUE
   17 WRITE(2,201) I,XL(I,M),PRESH(I,M),T
      GO TO 100
   12 CONTINUE
   11 CONTINUE
      IU=IU+1
      IF (T-TMAX) 10,10,100
C     IC NOKTALARINDAKI DEGERLERIN HESAPLANMASI
   10 DO 30 I=1,K
      LL=NN(I)
      DO 32 L=2,LL
      VP(I,L)=0.5*(V(I,L-1)+V(I,L+1)+C2(I)*(H(I,L-1)-H(I,L+1))-
     $FF(I)*(V(I,L-1)*ABS(V(I,L-1))+V(I,L+1)*ABS(V(I,L+1)))
     $+C2(I)*(V(I,L-1)-V(I,L+1))*SINA(I)*DT)
      HP(I,L)=0.5*((V(I,L-1)-V(I,L+1))/C2(I)+(H(I,L-1)+H(I,L+1))
     $+(V(I,L-1)+V(I,L+1))*SINA(I)*DT-(FF(I)/C2(I))*(V(I,L-1)
     $*ABS(V(I,L-1))-V(I,L+1)*ABS(V(I,L+1))))
   32 CONTINUE
   30 CONTINUE
C     BORU BIRLESIM NOKTALARINDAKI DEGERLER
      KKK=K-1
      DO 40 I=1,KKK
      C1=V(I+1,2)-C2(I+1)*H(I+1,2)+C2(I+1)*DT*V(I+1,2)*SINA(I+1)-
     1FF(I+1)*V(I+1,2)*ABS(V(I+1,2))
      CC2=C2(I+1)
      HP(I,NNN)=(-C1*A(I+1)+C3*A(I))/(CC2*AA(I+1)+C4*AA(I))
      HP(I+1,1)=HP(I,NNN)
      VP(I,NNN)=C3-C4*HP(I,NNN)
   40 VP(I+1,1)=C1+CC2*HP(I+1,1)
C     HAZNEDEKI HIZIN HESABI
      VP(1,1)=V(1,2)+C2(1)*(HP(1,1)-H(1,2))+C2(1)*DT*V(1,2)*SINA(1)-
     1FF(1)*V(1,2)*ABS(V(1,2))
C     VANADAKI SART ; HIZ LINEER OLARAK SIFIRA DOGRU AZALMAKTADIR
      NVALV=NN(K)+1
      C3=V(K,NVALV-1)+C2(K)*H(K,NVALV-1)+C2(K)*V(K,NVALV-1)*SINA(K)*DT-
     1FF(K)*V(K,NVALV-1)*ABS(V(K,NVALV-1))
      C4=C2(K)
      IF(T-TC) 19,19,14
   19 VP(K,NVALV)=VO(K)*(1.-T/TC)
      GO TO 15
   14 VP(K,NVALV)=0.0
   15 HP(K,NVALV)=(C3-VP(K,NVALV))/C4
      DO 59 I=1,K
      LL=NN(I)+1
      DO 58 L=1,LL
      V(I,L)=VP(I,L)
      H(I,L)=HP(I,L)
      PRESH (I,L)=H(I,L)-(PBEL(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINA(I))
      IF(PRESH (I,L)-HEAD1) 58,29,29
```

```
   29 HEAD1=PRESH (I,L)
      T1=T
      X1=XL(I,L)
      IX=I
   58 CONTINUE
   59 CONTINUE
      IF(IU/2*2-IU) 8,5,8
  100 CONTINUE
      WRITE(2,500)IX,HEAD1,X1,T1
C 200 FORMAT(2I10,4F12.2)
  201 FORMAT(1X,//////,'SUTUN AYRILMASI MEYDANA GELEN BORU NO',I3,
     12X,'NOKTA XL=',F6.3,2X,/,'YUK=',F4.0,1X,'ZAMAN=',F7.3)
C 202 FORMAT(3F9.4,4F13.4)
  204 FORMAT(2X,'BORU BOYUNCA YUKLER VE HIZLAR')
  205 FORMAT(2X,///,'ZAMAN=',F7.3,/)
  206 FORMAT(2X,'BORU NO.',I3)
  207 FORMAT(2X,'X=',F4.2,2X,'YUK=',F9.0,2X,'H=',F10.0,2X,'V=',F9.2,3X)
  208 FORMAT(2X,'GIRIS PARAMETRELERI',/,'N=',I10,/,'TC=',F10.2,/,
     1'TMAX=',F10.2,/,'HR=',F10.2,/,'HATM=',F10.2,/,('BORU NO.',I2,/,
     2'A=',F9.2,1X,'L=',F9.2,1X,'D=',F6.1,1X,'F=',F6.4,1X,/,'VO=',F6.2,
     31X,'SINA=',F10.7,1X,'PBEL=',F8.1,/))
  500 FORMAT (2X,///,'BORUDA MAKSIMUM BASINC',/,2X,'BORU NO=',I4,2X,
     1'MAXIMUM BASINC=',F10.3,5X,'NOKTA XL=',F6.3,1X,/,'ZAMAN=',F7.3)
      CALL EXIT
      END
```

EK.3

SU DARBESİ UYGULAMA 1.2'E AİT PROGRAM

EK.3

```
C     SU DARBESI UYGULAMA 1.2 Prof.Dr.Yalcın YUKSEL
C     MENBADAKİ BİR REZEVUARDAN BİRBİRİNE SERİ VE PARALEL OLARAK BAĞLANMIŞ
C     CEBRI BORULARLA BIR SANTRALA SU GOTURULMESI HALINE AIT
C     SU DARBESI PROGRAMI
C     PBEL( )=BORUNUN BAŞLANGIC KOTU
C     PRESH( )=BORUDAKI BASINÇ YUKU
      DIMENSION A(5),V(5,10),H(5,10),VP(5,10),HP(5,10),FL(5),D(5),
     1F(5),VO(5),NN(5),C2(5),SINA(5),XL(5,10),AA(5),DELT(5),
     2PBEL(5),PRESH(5,10),FF(5)
      OPEN (3,FILE='SUDAR2.DAT')
      OPEN (4,FILE='SUDAR22.DAT')
      OPEN (2,FILE='SUDAR2.OUT',STATUS='UNKNOWN')
      HEAD1=0.00
      READ(3,*) K,N,TC,TMAX,HR,HATM
      READ(4,*) (A(I),FL(I),D(I),F(I),VO(I),SINA(I),PBEL(I),I=1,K)
      WRITE(2,208) N,TC,TMAX,HR,HATM,(I,A(I),FL(I),D(I),F(I),VO(I),
     1SINA(I),PBEL(I),I=1,K)
C     MINUMUM ZAMAN ARALIĞININ VE KARARLI AKIMA AIT ŞARTLARIN TAYİNİ
      AN=N
      DO 2 I=1,K
    2 DELT(I)=(FL(I)/AN)/A(I)
      DT=DELT(1)
      KK=1
      DO 6 I=2,K
      IF(DT-DELT(I)) 6,6,7
    7 DT=DELT(I)
      KK=I
    6 CONTINUE
      H(1,1)=HR
      V(1,1)=VO(1)
      DO 20 I=1,K
      IF(I-KK) 4,21,4
    4 NN(I)=FL(I)/(DT*A(I))
      GO TO 23
   21 NN(I)=N
   23 ANN=NN(I)
      XL(I,1)=0.0
      PRESH (I,1)=H(I,1)-PBEL(I)
      DO 22 L=2,M
      TEM=L-1
      XL(I,L)=TEM/ANN
      H(I,L)=H(I,L)-DHL*TEM
      PRESH (I,L)=H(I,L)-(PBEL(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINA(I))
   22 V(I,L)=VO(I)
      IF (I-K) 13,20,13
   13 H(I+1,1)=H(I,M)
      V(I+1,1)=VO(I+1)
   20 CONTINUE
      T=0.0
      IU=0
      HP(1,1)=HR
      WRITE(2,204)
    5 WRITE(2,205) T
```

```
      DO 9 I=1,K
      WRITE(2,206) I
      NK=NN(I)+1
      WRITE(2,207) (XL(I,M),PRESH(I,M),H(I,M),V(I,M),M=1,NK)
    9 CONTINUE
    8 T=T+DT
      DO 11 I=1,K
      LM=NN(I)+1
      DO 11 M=1,LM
      IF(PRESH (I,M)-(-HATM)) 17,17,12
   17 WRITE(2,201) I,XL(I,M),PRESH(I,M),T
      GO TO 100
   12 CONTINUE
   11 CONTINUE
      IU=IU+1
      IF(T-TMAX) 10,10,100
C     IC NOKTALARINDAKI DEGERLERIN HESAPLANMASI
   10 DO 30 I=1,K
      LL=NN(I)
      DO 32 L=2,LL
      VP(I,L)=0.5*(V(I,L-1)+V(I,L+1)+C2(I)*(H(I,L-1)-H(I,L+1)-FF(I)*
     1(V(I,L-1)*ABS(V(I,L-1)+V(I,L+1)*ABS(V(I,L+1))))))+C2(I)*(V(I,L-1)-
     2V(I,L+1)*SINA(I)*DT)
   32 HP(I,L)=0.5*((V(I,L-1)-V(I,L+1))/C2(I))+(H(I,L-1)+H(I,L+1))
     1+(V(I,L-1)+V(I,L+1))*SINA(I)*DT-(FF(I)/C2(I))*(V(I,L-1)
     2*ABS(V(I,L-1))-V(I,L+1)*ABS(V(I,L+1)))
   30 CONTINUE
C     BORU AYRIM NOKTASINDAKI DEGERLER
      C7=V(I+3,2)-C2(I+3)*H(I+3,2)-C2(I+3)*DT*V(I+3,2)*SINA(I+3)-FF(I+3)
     1*V(I+3,2)*ABS(V(I+3,2))
      C4=C2(I)
      C6=C2(I+1)
      C8=C2(I+2)
      C10=C2(I+3)
      HP(I,NNN)=(C3*AA(I)-C1*AA(I+1)-C5*AA(I+2)-C7*AA(I+3))/
     1(C4*A(I)+C6*AA(I+1)+C8*AA(I+2)+C10*AA(I+3))
      VP(I,NNN)=C3-C4*HP(I,NNN)
      HP(I+1,1)=HP(I,NNN)
      VP(I+1,1)=C1+C6*HP(I+1,1)
      HP(I+2,1)=HP(I,NNN)
      VP(I+2,1)=C5+C8*HP(I+2,1)
      HP(I+3,1)=HP(I,NNN)
      VP(I+3,1)=C7+C10*HP(I+3,1)
   40 CONTINUE
C     HAZNEDEKI HIZIN HESABI
      VP(I,1)=V(1,2)+C2(1)*(HP(1,1)-H(1,2))+C2(1)*DT*V(1,2)*SINA(1)-
     1FF(1)*V(1,2)*ABS(V(1,2))
C     TURBUN KAPAKLARININ KAPATILMASIYLA HIZ LINEER OLARAK SIFIRA
C     AZALMAKTADIR
      NVALV=NN(K)+1
      C3=V(K,NVALV-1)+C2(K)*H(K,NVALV-1)+C2(K)*V(K,NVALV-1)*SINA(K)*DT-
     1FF(K)*V(K,NVALV-1)*ABS(V(K,NVALV-1))
      C4=C2(K)
      IF(T-TC) 19,19,14
   19 VP(K,NVALV)=VO(K)*(1.-T/TC)
      GO TO 15
   14 VP(K,NVALV)=0.0
```

```
   15 HP(K,NVALV)=(C3-VP(K,NVALV))/C4
      DO 59 I=1,K
      LL=NN(I)+1
      DO 58 L=1,LL
      V(I,L)=VP(I,L)
      H(I,L)=HP(I,L)
      PRESH (I,L)=H(I,L)-(PBEL(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINA(I))
      IF(PRESH(I,L)-HEAD1) 58,29,29
   29 HEAD1=PRESH (I,L)
      T1=T
      X1=XL(I,L)
      IX=I
   58 CONTINUE
   59 CONTINUE
      IF(IU/2*2-IU) 8,5,8
  100 CONTINUE
      WRITE(2,500)IX,HEAD1,X1,T1
C 200 FORMAT(2I10,4F12.2)
  201 FORMAT(1X,//////,'SUTUN AYRILMASI MEYDANA GELEN BORU NO',I3,
     12X,'NOKTA XL=',F6.3,2X,/,'YUK=',F6.0,1X,'ZAMAN=',F7.3)
C 202 FORMAT(3F9.1,4F13.4)
  204 FORMAT(2X,'BORU BOYUNCA YUKLER VE HIZLARI')
  205 FORMAT(2X,///,'ZAMAN=',F7.3,/)
  206 FORMAT(2X,'BORU NO.',I3)
  207 FORMAT(2X,'X=',F4.2,2X,'YUK=',F7.2,2X,'H=',F7.2,2X,'V=',F6.2,3X)
  208 FORMAT(2X,'GIRIS PARAMETRELERI',/,'N=',I10,/,'TC=',F10.2,/,
     1'TMAX=',F10.2,/,'HR=',F10.2,/,'HATM=',F10.2,/,('BORU NO.',I2,/,
     2'A=',F9.2,1X,'L=',F9.2,1X,'D=',F6.1,1X,'F=',F6.4,1X,/,'VO=',F6.2,
     31X,'SINA=',F10.7,1X,'PBEL=',F8.1,/))
  500 FORMAT(2X,///,'BORUDA MAXIMUM BASINC',/,2X,'BORU NO=',I4,2X,
     1'MAKSIMUM BASINC=',F10.3,5X,'NOKTA XL=',F6.3,1X,/,'ZAMAN=',F7.3)
      CALL EXIT
      END
```

EK.4

SU DARBESİ UYGULAMA 1.3'E AİT PROGRAM

EK.4

```
C
C     SU DARBESI UYGULAMA 1.3 Prof.Dr.Yalcın YUKSEL
C     MEMBADAKI BIR REZERVUARDAN BIRBIRINE SERI VE PARALEL OLARAK BAGLANMIS
C     CEBRI BORULARLA SANTRALA SU GOTURULMESI HALINE AIT SU DARBESI
C     PROGRAMININ ESDEGER SISTEM HALINE GETIRILEREK COZUMU
C     PBEL( )=BORUNUN BASLANGIC KOTU
C     PRESH( )=BORUDA BASINC YUKU
      DIMENSION A(5),V(5,10),H(5,10),VP(5,10),HP(5,10),FL(5),D(5)
     1,F(5),V0(5),NN(5),C2(5),SINA(5),XL(5,10),AA(5),DELT(5),
     2PBEL(5),PRESH(5,10),FF(5)
      HEAD1=0.00
    1 READ(2,200) K,N,TC,TMAX,HR,HATM
      READ(2,202) (A(I),FL(I),D(I),F(I),V0(I),SINA(I),PBEL(I),I=1,K)
      WRITE(3,208) N,TC,TMAX,HR,HATM,(I,A(I),FL(I),D(I),F(I),V0(I),
     1SINA(I),PBEL(I),I=1,K)
C     MINIMUM ZAMAN ARALIGININ VE KARARLI AKIMA AIT SARTLARIN TAYINI
      AN=N
      DO 2 I=1,K
    2 DELT(I)=(FL(I)/AN)/A(I)
      DT=DELT(1)
      KK=1
      DO 6 I=2,K
      IF(DT-DELT(I)) 6,6,7
    7 DT=DELT(I)
      KK=I
    6 CONTINUE
      H(1,1)=HR
      V(1,1)=V0(1)
      DO 20 I=1,K
      IF(I-KK) 4,21,4
    4 NN(I)=FL(I)/(DT*A(I))
      GO TO 23
   21 NN(I)=N
   23 ANN=NN(I)
      C2(I)=9.81/A(I)
      D(I)=D(I)/1000.
      DHL=F(I)*FL(I)*V0(I)*V0(I)/(19.62*D(I)*ANN)
      AA(I)=3.1415927*D(I)*D(I)*0.25
      FF(I)=F(I)*DT/(2.*D(I))
      M=NN(I)+1
      XL(I,1)=0.0
      PRESH(I,1)=H(I,1)-PBEL(I)
      DO 22 L=2,M
      TEM=L-1
      XL(I,L)=TEM/ANN
      H(I,L)=H(I,1)-DHL*TEM
      PRESH(I,L)=H(I,L)-(PBEL(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINA(I))
   22 V(I,L)=V0(I)
      IF(I-K) 13,20,13
   13 H(I+1,1)=H(I,M)
      V(I+1,1)=V0(I+1)
   20 CONTINUE
```

```
      T=0.0
      IU=0
      HP(1,1)=HR
      WRITE(3,204)
    5 WRITE(3,205) T
      DO 9 I=1,K
      WRITE(3,206) I
      NK=NN(I)+1
      WRITE(3,207) (XL(I,M),PRESH(I,M),H(I,M),V(I,M),M=1,NK)
    9 CONTINUE
    8 T=T+DT
      DO 11 I=1,K
      LM=NN(I)+1
      DO 11 M=1,LM
      IF(PRESH(I,M)-(-HATM)) 17,17,12
   17 WRITE(3,201) I,XL(I,M),PRESH(I,M),T
      GO TO 100
   12 CONTINUE
   11 CONTINUE
      IU=IU+1
      IF(T-TMAX) 10,10,100
C     IC NOKTALARDAKI DEGERLERIN HESAPLANMASI
   10 DO 30 I=1,K
      LL=NN(I)
   32 HP(I,L)=0.5*((V(I,L-1)-V(I,L+1)/C2(I)+(H(I,L-1)+H(I,L+1))
     1+(V(I,L-1)+(V(I,L+1))*SINA(I)*DT-(FF(I)/C2(I))*(V(I,L-1)
     2*ABS(V(I,L-1))-V(I,L+1)*ABS(V(I,L+1))))
   30 CONTINUE
C     BORU BIRLESIM NOKTALARINDAKI DEGERLER
      KKK=K-1
      DO 40 I=1,KKK
      CC2=C2(I+1)
      HP(I,NNN)=(-C1*AA(I+1)+C3*AA(I))/(CC2*AA(I+1)+C4*AA(I))
      HP(I+1,1)=HP(I,NNN)
      VP(I,NNN)=C3-C4*HP(I,NNN)
   40 VP(I+1,1)=C1+CC2*HP(I+1,1)
C     HAZNEDEKI HIZIN HESABI
      VP(1,1)=V(1,2)+C2(1)*(HP(1,1)-H(1,2))+C2(1)*DT*V(1,2)*SINA(1)-
     1FF(1)*V(1,2)*ABS(V(1,2))
C     TURBUN KAPAKLARININ KAPATILMASIYLA HIZ LINEER OLARAK SIFIRA AZALMAKTA
      NVALV=NN(K)+1
      C3=V(K,NVALV-1)+C2(K)*H(K,NVALV-1)+C2(K)*V(K,NVALV-1)*SINA(K)*DT-
     1FF(K)*V(K,NVALV-1)*ABS(V(K,NVALV-1))
      C4=C2(K)
      IF(T-TC) 19,19,14
   19 VP(K,NVALV)=V0(K)*(1.-T/TC)
      GO TO 15
   14 VP(K,NVALV)=0.0
   15 HP(K,NVALV)=(C3-VP(K,NVALV))/C4
      DO 59 I=1,K
      LL=NN(I)+1
      DO 58 L=1,LL
      V(I,L)=VP(I,L)
      H(I,L)=HP(I,L)
      PRESH(I,L)=H(I,L)-(PBEL(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINA(I))
      IF(PRESH(I,L)-HEAD1) 58,29,29
```

```
   29 HEAD1=PRESH(I,L)
      T1=T
      X1=XL(I,L)
      IX=I
   58 CONTINUE
   59 CONTINUE
      IF(IU/2*2-IU) 8,5,8
  100 CONTINUE
      WRITE(3,500) IX,HEAD1,X1,T1
200   FORMAT(2I10,4F12.2)
201   FORMAT(1X,//////,'SUTUN AYRILMASI VUKUA GELEN BORU NO&',I3,2X,'NOK
     UTA XL=',F6.3,2X,'YUK=',F4.0,1X,'ZAMAN=',F7.3)
202   FORMAT(3F9.1,4F13.4)
204   FORMAT(1H1,30H BORU BOYUNCA YUKLER VE HIZLAR)
205   FORMAT(1H0,///7H ZAMAN=,F7.3/)
206   FORMAT(1H,8HBORU NO.,I3)
207   FORMAT(3H X=,F4.2,2X,4HYUK=,F5.0,2X,2HH=,F5.0,2X,2HV=,F6.2,3X)
208   FORMAT(22H1 GIRIS PARAMETRELERI /4H0 N=,I10/4H TC=,F10.2/6H TMAX=,
     1F10.2/4H HR=,F10.2/6H HATM=,F10.2/(9H BORU NO.,I2/3H A=,F9.2,1X,
     22HL=,F9.2,1X,2HD=,F6.1,1X,2HF=,F6.4,1X,3HV0=,F6.2,1X,5HSINA=,
     3F10.7,1X,5HPBEL=,F8.1/))
500   FORMAT(2X,///23HBORUDA MAKSIMIM BASINC /2X,8HBORU NO=,I4,2X,
     116HMAKSIMIM BASINC=,F10.3.5X,9HNOKTA XL=,F6.3,1X,6HZAMAN=F7.3)
      CALL EXIT
      END
```

EK.5

POMPANIN ANİ OLARAK DURMASI HALİNDE SU DARBESİ PROGRAMI

:K.5

```
*****Prof.Dr.Yalcın YUKSEL **
*****************************************************************
* WATER HAMMER PROGRAM FOR PUMP POWER FAILURE *
*****************************************************************

SYSTEM CONFIGURATION & RESERVOIR WITH PUMPS AT UPSTREAM END
*** GENERAL DEFINITIONS ***
PROGRAM HANDLES ANY NO.OF PARALLEL PUMPS-ALL FAIL SIMULTANEOUSLY
PROGRAM WILL HANDLE PIPES IN SERIES
NP= NO.OF PIPES IN SERIES-PIPE NO.1 IS JUST DOWNSTREAM FROM PUMP
IOUT=WRITES OUTPUT OF EVERY IOUT-TH COMPUTATION
NPART=MINIMUM NO OF SECTIONS INTO WHICH PIPES ARE DIVIDED
PATM=ATMOSPHERIC PRESURE IN N/CM SQ ABSOLUTE
TMAX=MAX TIME OF COMPUTATION IN SEC
PV=VAPOR PRESURE OF LIQUID IN N/CM SQ ABSOLUTE
HSUMP=ELEV.OF LIQUID SURFACE IN SUMP
HRES= ELEV.OF LIQUID SURFACE IN DOWNSTREAM RESERVOIR
ZEND= ELEV.OF LAST PIPE-END AT DOWNSTREAM RESERVOIR-M
RPM=STEADY STATE PUMP IMPELLER SPEED IN RPM
GAMMA =SPECIFIC WT.OF LIQUID WHICH IS PUMPED -N/M CU
A( ) =WAVE SPEED - M/SEC , FL( )=LENGTH-M , D( )=DIAM - CM
F( )=FRICTION FACTOR (DARCY)
PIPEZ( )=UPSTREAM ELEVETION OF PIPE -M
PRESH( )=PRESSURE HEAD IN PIPE - M
NPAR( )=NO.OF PUMPS IN PARALLEL
NST( )=NO.OF STAGES FOR PUMP
XI    = MOMENT OF INERTIA OF PUMP AND MOTOR IN KG-M SQ
QN( )=DISCHARGE FROM PUMP CHARACTERISTIC CURVE LT/SEC
HNSQ( )= HEAD PER STAGE DEVELOPED BY PUMP TAKEN FROM PUMP-
1CHARACTERISTIC -M
TNSQ( )= PUMP SHAFT POWER PER STAGE FROM PUMP CHARACTERISTIC
1CURVE -KW NM/SEC
HPUMP = HEAD DEVELOPED AT PUMP
QLINE = TOTAL RATE OF FLOW DELIVERED BY PUMPS M CU/SEC
QP  = RATE OF FLOW FOR EACH PUMP IN PARALLEL-MCU/SEC
KE = NO OF DATA TAKEN FROM PUMP CHARACTERISTIC CURVE

DIMENSION V(3,26),H(3,26),VP(3,26),HP(3,26),PRESH(3,26),XL(3,26),
1HLOW(3,26),HHIGH(3,26)
DIMENSION FL(3),A(3),D(3),F(3),AREA(3),PIPEZ(3),NN(3),V0(3)
DIMENSION C2(3),SINE(3),FF(3),TH(3),DTT(3)
DIMENSION QN(14),HNSQ(14),TNSQ(14),BKWP(14)
DATA PI,HLL,PHMAX,PHMIN/3.141592,0.0,-100.0,100000./
MM=0
CONTINUE
READ(2,200) KE,NP,IOUT,NPART,NPAR,NST,TMAX,PATM,PV,GAMMA,RPM,
1HRES,HSUMP,ZEND,QLINE,XI,C7,C8
READ(2,201) (A(I),FL(I),D(I),PIPEZ(I),F(I),I=1,NP)
READ(2,202) (QN(I),HNSQ(I),BKWP(I),I=1,KE)
MM=MM+1
HATM=PATM*10000./GAMMA
HVPR=-(PATM-PV)*10000./GAMMA
QP=QLINE/NPAR
WRITE(3,203)
WRITE(3,204) NP,NPART,TMAX,HATM,HRES,ZEND,IOUT
SRPM= RPM
```

```
C
C       *** COMPUTATION OF PUMP HEAD AND WRITE OUT DATA USED ***
C
        DO 301 J= 1,NP
        AREA(J)=PI*D(J)**2/(4.*10000.)
        V0(J)=QLINE/AREA(J)
        C2(J)=9.81/A(J)
301     HLL=HLL+100.*F(J)*(FL(J)/D(J))*(V0(J)**2/19.62)
        HPUMP=HRES-HSUMP+HLL+V0(1)**2/19.62
        WRITE(3,205)
        WRITE(3,206) (I,D(I),FL(I),F(I),A(I),V0(I),PIPEZ(I),I=1,NP)
        WRITE(3,207) NPAR,NST,RPM,XI,HSUMP
        WRITE(3,208)
        WRITE(3,209) (QN(I),HNSQ(I),BKWP(I),I=1,KE)
        DO 2 I=1,NP
        DTT(I)=FL(I)/(NPART*(V0(I)+A(I)))
        IF(I-NP) 4,3,2
3       SINE(I)=(ZEND-PIPEZ(I))/FL(I)
        GO TO 2
4       SINE(I)=(PIPEZ(I+1)-PIPEZ(I))/FL(I)
2       CONTINUE
C
C       *** SET UP DIVISION-NUMBER FOR EACH PIPE ***
C
        DO 7 I=1,NP
        IF(I-KMIN) 9,8,9
9       ANN= FL(I)/(DT*(V0(I)+A(I)))
        NN(I)=ANN
        TEST=NN(I)
        IF(ABS(TEST+1-ANN)-0.01) 11,7,7
11      NN(I)=NN(I)+1
        GO TO 7
8       NN(I)=NPART
7       CONTINUE
C
C       *** COMPUTATION OF Q/N,H/NSQ,T/NSQ ***
C
        W=(2.*PI/60.)*RPM
        DO 12 I=1,KE
        QN(I)=QN(I)/1000.
        QN(I)=QN(I)/RPM
        HNSQ(I)=HNSQ(I)/RPM**2
        TRQ=1000.*BKWP(I)/W
12      TNSQ(I)=TRQ/RPM**2
C
C       *** SET UP STEADY STATE CONDITION FOR TIME ZERO ***
C
        H(1,1)=HSUMP+HPUMP
        V(1,1)=V0(1)
        D(I)=D(I)/100.
        DX=FL(I)/NN(I)
        DHL=F(I)*DX*V0(I)*V0(I)/(19.62*D(I))
        FF(I)=F(I)*DT/(2.*D(I))
```

```
      K= NN(I)+1
      XL(I,1)=0.0
      PRESH(I,1)=H(I,1)-PIPEZ(I)
      TH(I)=DT/DX
      DO 17 L=2,K
      TEM=L-1
      XL(I,L)=TEM*DX/FL(I)
      H(I,L)=H(I,1)-DHL*TEM
      PRESH(I,L)=H(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINE(I))
      T=0.0
      DO 80 I=1,NP
      K=NN(I)+1
      DO 80 L=1,K
      HLOW(I,L)=H(I,L)
30    HHIGH(I,L)=H(I,L)
      DO 81 I=1,NP
      K=NN(I)+1
      DO 81 L=1,K
      IF(PRESH(I,L)-PHMAX) 83,82,82
32    IPMAX=I
      XMAX=XL(I,L)
      PHMAX=PRESH(I,L)
      TTMAX=T
      GO TO 84
33    IF(PRESH(I,L)-PHMIN) 85,85,84
35    IPMIN=I
      XMIN=XL(I,L)
      PHMIN=PRESH(I,L)
      TTMIN=T
34    CONTINUE
31    CONTINUE
C
C     *** WRITE OUT VALUES OF HEADS AND PRESSURES ***
C
      WRITE(3,210)
500   WRITE(3,211) T
      IU=0
      DO 21 I=1,NP
      K= NN(I)+1
      WRITE(3,2121) I
      WRITE(3,212) (XL(I,M),PRESH(I,M),H(I,M),V(I,M),M=1,K)
21    CONTINUE
      QP=1000.*QP
      WRITE(3,213) RPM,QP,HPUMP
      QP=QP/1000.
C
C     *** START WATER - HAMMER ANALYSIS ***
C
300   T=T+DT
      DO 22 I=1,NP
```

```
      K= NN(I)+1
      DO 22 M=1,K
      IF(PRESH(I,M)-HVPR) 23,23,22
23    WRITE(3,214) T,I,XL(I,M)
      GO TO 100
22    CONTINUE
      IU=IU+1
      DO 550 I=2,KE
      QRPM=QP/RPM
      IF(QRPM-QN(I)) 908,915,550
908   IF(QRPM) 910,910,911
910   TN2=TNSQ(1)
      GO TO 551
911   TN2=TNSQ(I-1)+(QRPM-QN(I-1))*(TNSQ(I)-TNSQ(I-1))/(QN(I)-QN(I-1))
      GO TO 551
915   TN2=TNSQ(I)
      GO TO 551
550   CONTINUE
551   J=I
      RPM=RPM-30.*TN2*DT*RPM*RPM/(PI*XI)
      IF(T-TMAX) 10,10,100
10    CONTINUE
C
C     *** COMPUTATION H AND V AT INTERIOR POINTS ***
C     DO 50 I=1,NP
      K=NN(I)
      DO 51 L=2,K
      VL=V(I,L)-TH(I)*A(I)*(V(I,L)-V(I,L-1))
      HR=H(I,L)-TH(I)*A(I)*(H(I,L)-H(I,L+1))
      VP(I,L)=0.5*(VL+VR+C2(I)*(HL-HR)+C2(I)*DT*SINE(I)*(VL-VR)-FF(I)*
     1(VL*ABS(VL)+VR+ABS(VR)))
51    HP(I,L)=0.5*(HL+HR+(VL-VR)/C2(I)+DT*SINE(I)*(VL+VR)-(FF(I)/C2(I))
     1*(VL*ABS(VL)-VR*ABS(VR)))
50    CONTINUE
C
C     *** COMPUTATION H AND V AT PIPE INTERIOR JUNCTIONS ***
C
      KK=NP-1
      DO 52 I=1,KK
      K=NN(I)+1
      VL=V(I,K)-TH(I)*A(I)*(V(I,K)-V(I,K-1))
      HL=H(I,K)-TH(I)*A(I)*(H(I,K)-H(I,K-1))
      C3=VL+C2(I)*HL+C2(I)*VL*DT*SINE(I)-FF(I)*VL*ABS(VL)
      VR=V(I+1,1)-TH(I+1)*A(I+1)*(V(I+1,1)-V(I+1,2))
      HR=H(I+1,1)-TH(I+1)*A(I+1)*(H(I+1,1)-H(I+1,2))
      CC1=VR-C2(I+1)*HR-C2(I+1)*DT*VR*SINE(I+1)-FF(I+1)*VR*ABS(VR)
      HP(I,K)=(-CC1*AREA(I+1)+C3*AREA(I))/(C2(I+1)*AREA(I+1)+C2(I)*
     1AREA(I))
      HP(I+1,1)=HP(I,K)
      VP(I,K)=C3-C2(I)*HP(I,K)
      VP(I+1,1)=CC1+C2(I+1)+HP(I+1,1)
52    CONTINUE
```

```
C
C      *** BOUNDARY CONDITIONS AT PUMP (UPSTREAM BOUNDARY CONDITION) ***
C
       VR=V(1,1)-TH(1)*A(1)*(V(1,1)-V(1,2))
       HR=H(1,1)-TH(1)*A(1)*(H(1,1)-H(1,2))
       C1=VR-C2(1)*HR-C2(1)*DT*VR*SINE(1)-FF(1)*VR*ABS(VR)
       C6=C1+C2(1)*HSUMP+C2(1)*C8*RPM*RPM*NST
       C9=(1.-C2(1)*C7*AREA(1)*RPM*NST/NPAR)
       VP(1,1)=C6/C9
       IF(VP(1,1)) 701,701,700
701    VP(1,1)=0.0
700    HP(1,1)=(VP(1,1)-C1)/C2(1)
       HPUMP=HP(1,1)-HSUMP
       IF(HPUMP) 702,702,703
702    HPUMP=0.0
       HP(1,1)=HSUMP
       VP(1,1)=C1+C2(1)*HP(1,1)
703    QP=VP(1,1)*AREA(1)/NPAR
C
C      ** COMPUTATION H AND V AT DOWNSTREAM END ( THIS BONDARY CONDITION
C     1IS FOR ACONSTANT HEAD RESERVOIR) **
C
       LM=NN(NP)+1
       VL=V(NP,LM)-TH(NP)*A(NP)*(V(NP,LM)-V(NP,LM-1))
       HP(NP,LM)=HRES
       VP(NP,LM)=C3-C2(NP)*HP(NP,LM)
C
C      *** PREPARATION OF VALUES FOR NEXT TIME STEP COMPUTATION ***
C
       DO 55 I=1,NP
       K=NN(I)+1
       DO 55 L=1,K
       V(I,L)=VP(I,L)
       H(I,L)=HP(I,L)
       PRESH(I,L)=H(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINE(I))
55     CONTINUE
C
C      *** LOCATE MAXIMUM AND MINIMUM PRESSURE HEADS AND H VALUES ***
C
       DO 56 I=1,NP
       K=NN(I)+1
       DO 56 L=1,K
       IF(H(I,L)-HLOW(I,L)) 62,63,63
52     HLOW(I,L)=H(I,L)
53     IF(H(I,L)-HHIGH(I,L)) 65,65,64
54     HHIGH(I,L)=H(I,L)
55     IF(PRESH(I,L)-PHMAX) 66,67,67
```

```
7     IPMAX=I
      XMAX=XL(I,L)
      PHMAX=PRESH(I,L)
      TTMAX=T
      GO TO 56
6     IF(PRESH(I,L)-PHMIN) 68,68,56
8     IPMIN=I
      XMIN=XL(I,L)
      PHMIN=PRESH(I,L)
      TTMIN=T
6     CONTINUE
      IF(IU-IOUT) 800,500,800

      *** WRITE OUT MAXIMUM AND MINIMUM PRESSURE HEADS AND H VALUES ***

00    CONTINUE
      WRITE(3,215)
      DO 401 I=1,NP
      WRITE(3,216) I
      K=NN(I)+1
      DO 401 L=1,K
      PHMX=HHIGH(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)+FL(I)*SINE(I))
      PHMN=HLOW(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)+FL(I)*SINE(I))
01    WRITE(3,217) XL(I,L),PHMX,PHMN,HHIGH(I,L),HLOW(I,L)
      WRITE(3,218) PHMAX,IPMAX,XMAX,TTMAX
      WRITE(3,219) PHMIN,IPMIN,XMIN,TTMIN
      IF(MM-1) 1,1000,1000
000   CONTINUE

      *** FORMAT STATEMENTS ***

00    FORMAT(6I5,5F10.2/3F10.2,2F10.4,F10.5,F10.7)
01    FORMAT(4F10.1,F10.5)
02    FORMAT(3F10.2)
03    FORMAT(1H1,20X,14('*')/21X,'INPUT DATA '/)
04    FORMAT(' ',4X,'NO. OF PIPES ',20('.'),'=',15/' ',4X,'MIN. DIVISION
     1NO THAT PIPE DIVIDED=' ,15/' ',4X,'MAX. TIME OF ANALYSIS ',11('.'
     2),'=',F7.1,'SEC.'/' ',4X,'ATMOSPHER-PRESSURE HEAD ',9('.'),'=',
     3F7.1,' M-LIQUID'/' ',4X,'RESERVOIR ELEV.AT DOWNSTREAM END =',F7.1,
     4' M.'/' ',4X,'DOWNSTREAM-END ELEV. OF LAST PIPE=',F7.1,' M.'/' ',
     54X,'OUTPUT IS PRINTED EVERY',I3,' TH TIME INTERVAL')
05    FORMAT(//43X,'PIPE DATA'/)
06    FORMAT(' ',4X,'PIPE',12/' ',4X,'D =',F6.2,' CM',3X,'L =',F7.0,' M'
     1,3X,'F =',F6.4,3X,'WAVE SPD =',F6.0,' M/SEC',3X,'V0 =',F4.1,
     2' M/SEC',3X,'UPSTR PIPE ELEV =',F7.1,' M'/)
07    FORMAT(///15X,' PUMP DATA '/' ',4X,'NUMBER OF PUMPS IN PARALLEL ='
     1,I3/' ',4X,'EACH PUMP HAS',I2,' STAGES'/' ',4X,'STEADY STATE PUMP
     2SPEED =',F7.1,' RPM'/' ',4X,'EACH PUMP AND MOTOR UNIT HAS A
     3MOMENT OF INERTIA OF ',F6.3,' KG-MSQ'//' ',4X,'ELEVATION OF PUMP
     4SUMP =',F7.1,' M')
08    FORMAT(/9X,'Q-CU.LT/SEC',2X,'H/STAGE-M',2X,'BKWP/STAGE'/8X,13
     1('-'),2X,9('-'),2X,10('-'))
09    FORMAT(9X,F8.3,7X,F6.0,4X,F6.0)
```

```
10    FORMAT(1H1/'PRESSURE HEADS, H - VALUES AND VELOCITIES AS
     1FUNCTIONS OF TIME ALONG PIPES '/2X,74('-'))
11    FORMAT('0',16X,3(4X,' X P. HEAD HEAD VELOCITY')/' ',15X,3(14X,
     1'M        M        M/SEC')/' ','TIME=',F7.3,' SEC',3(4X,'-----
     2------ --------'))
121   FORMAT(' ','PIPE NO',I3)
12    FORMAT(' ',20X,F5.3,2F7.1,F8.2,6X,F5.3,2F7.1,F8.2,6X,F5.3,2F7.1,
     1F8.2)
13    FORMAT(/4X,'PUMP IMPELLER SPEED N=',F7.1,' RPM',8X,'EACH PUMP
     1DISCHARGE =',F7.3,' LT/SEC',8X,'PUMP HEAD =',F6.1,' M')
14    FORMAT(////2X,'COLUMN SEPERATION HAS OCCURED AT',F6.2,' SEC.
     1IN PIPE NO.',I3,' AT LOCATION',F5.3)
15    FORMAT(1H1/18X,27('*')/18X,'* TABLE OF EXTREME VALUES *'/18X,
     127('*')//13X,'X  MAX  P. HEAD  MIN  P. HEAD  MAX  HEAD  MIN  HEAD'
     2/11X,5('-'),1X,11('-'),2X,11('-'),3X,8('-'),3X,8('-'))
16    FORMAT(2X,'PIPE',I3)
17    FORMAT(11X,F5.3,2X,F7.1,6X,F7.1,5X,F7.1,4X,F7.1)
18    FORMAT(2X,' MAX PRESSURE HEAD =',F6.1,' M. IN PIPE',I3,' AT X =',
     1F5.3,' AT TIME =',F7.2,' SEC')
19    FORMAT(2X,' MIN PRESSURE HEAD =',F6.1,' M. IN PIPE',I3,
     1' AT X =',F5.3,' AT TIME =',F7.2,' SEC')
      STOP' '
      END
```

EK.6

HAVA KAZANI PROGRAMI

EK.6

```
      **** Prof.Dr.Yalcın YUKSEL ****
      * WATER HAMMER PROGRAM FOR PUMP RUNDOWN AFTER POWER *
      *       FAILURE WITH AIR CHAMBER                     *
      ************************************************************
      SYSTEM CONFIGURATION RESERVOIR WITH PUMPS AT UPSTREAM END
      RESERVOIR AT DOWNSTREAM END
      AIR CHAMBER IS LOCATED AT THE PUMP DISCHARGE
      PROGRAM WILL HANDLE UP TO 3 SERIES PIPES-MEST BE AT-LEAST TWO
     1SERIES PIPES

      *** GENERAL DEFINITIONS ***

      NP= NO OF PIPES INSERIES-PIPE NO.1 IS JUST DOWNSTREAM FROM PUMP
      IOUT=WRITES OUT PUT OF EVERY IOUT-TH COMPUTATION
      NPART=MINIMUM NO OF SECTIONS INTO WHICH PIPES ARE DIVIDED
      PATM=ATMOSPHERIC PRESURE IN N/CM SQ ABSOLUTE
      TMAX=MAX TIME OF COMPUTATION IN SEC
      PV= VAPOR PRESURE OF LIQUID IN N/CM SQ ABSOLUTE
      HSUMP=ELEVATION OF LIQUID SURFACE IN JUMP
      HRES= ELEVATION OF LIQUID SURFACE IN DOWNSTREAM RESERVOIR
      ZEND= ELEVATION OF LAST PIPE - END AT DOWNSTREAM RESERVOIR-M
      RPM = STEADY STATE PUMP-IMPELLER SPEED IN RPM
      GAMMA=SPECIFIC WT.OF LIQUID WHICH IS PUMPED-N/M CU
      A ( )=WAVE SPEED-M/SEC.FL( )=LENGTH-M.O ( )=OIAM-CM.F ( )=
     1FRICTION FACTOR (DARCY)
      PIPEZ( )=UPSTREAM ELEVATION OF PIPE-M
      PRESH( )=PRESSURE HEAD IN PIPE-M
      NPAR( )=NO.OF PUMPS IN PARALLEL
      NST( )=NO.OF STAGES FOR PUMP
      XI( )=MOMENT OF INERTIA OF PUMP AND MOTOR IN KG-MSQ
      QN( )=DISCHARGE FROM PUMP CHARASTERISTIC CURVE LT/SEC
      HNSQ( )=HEAD PER STAGE DEVELOPED BY PUMP TAKEN FROM PUMP-
     1CHARACTERIST IC-M
      TNSQ( )=PUMP-SHAFT POWER PER STAGE FROM PUMP CHARACTERISTIC
     1CURVE-KW NM/SEC
      HPUMP=HEAD DEVELOPED AT PUMP
      QLINE=TOTAL RATE OF FLOW DELIVERED BY PUMPS M CU/SEC
      QP=RATE OF FLOW FOR EACH PUMP IN PARALLEL-M CU/SEC
      KE=NO OF DATA TAKEN FROM PUMP CHARACTERISTIC CURVE

      *** AIR CHAMBER DATA ***

      CTD=INITIAL AIR VOLUME IN AIR CHAMBER-CU M
      CT=AIR VOLUME IN CHAMBER AT TIME T
      COUT=DISCHARGE COEFFICIENT FOR FLOW OUT OF AIR CHAMBER
      CIN=DISCHARGE COEFFICIENT FOR FLOW INTO AIR CHAMBER
      DSD=DIAMETER OF INLET TO AIR CHAMBER-CM
      EX=POLYTROPIC PROCESS EXPONENT
      ACD=CROSS-SECTIONAL AREA OF OUTLET PIPE FROM CHAMBER
      ACI=CROSS-SECTIONAL AREA OF INLET PIPE TO CHAMBER

      DIMENSION V(3,25),H(3,25),VP(3,25),HP(3,25),PRESH(3,25),
     1XL(3,25),HLOW(3,25),HHIGH(3,25)
      DIMENSION FL(3),A(3),D(3),F(3),AREA(3),PIPEZ(3),NN(3),V0(3)
      DIMENSION C2(3),SINE(3),FF(3),TH(3),DTT(3)
      DIMENSION QN(16),HNSQ(16),TNSQ(16),BKWP(16)
```

```
      DATA PI,HLL,PHMAX,PHMIN/3.141592,0.0,-100.0,100000./
      DATA CTD,COUT,CIN,DSD,DSI,EX,VMAX,CHAME/0.25,
     10.50,0.95,20.0,20.0,1.2,0.0,1.0/

      READ(2,200) KE,NP,IOUT,NPART,NPAR,NST,TMAX,PATM,
     1PV,GAMMA,RPM,HRES,HSUMP,ZEND,QLINE,XI,C7,C8
      READ(2,201)(A(I),FL(I),D(I),PIPEZ(I),F(I),I=1,NP)
      READ(2,202)(QN(I),HNSQ(I),BKWP(I),I=1,KE)
      HATM=PATM*10000./GAMMA
      HVPR=-(PATM-PV)*10000./GAMMA
      QP=QLINE/NPAR
      WRITE(3,203)
      WRITE(6,204)NP,NPART,TMAX,HATM,HRES,ZEND,IOUT
      SRPM= RPM

      ***  COMPUTATION OF PUMP HEAD AND WRITE OUT DATA USED*

      DO 301 J=1,NP
      AREA(J)=PI*D(J)**2/(4.*10000.)
      V0(J)=QLINE/AREA(J)
      C2(J)=9.81/A(J)
01    HLL=HLL+100.*F(J)*(FL(J)/D(J))*(V0(J)**2/19.62)
      HPUMP=HRES-HSUMP+HLL+V0(1)**2/19.62
      WRITE(6,205)
      WRITE(6,206)(I,D(I),FL(I),F(I),A(I),V0(I),PIPEZ(I),I=1,NP)
      WRITE(6,207) NPAR,NST,RPM,XI,HSUMP
      WRITE(6,208)
      WRITE(6,209)(QN(I),HNSQ(I),BKWP(I),I=1,KE)
      DO 2 I=1,NP
      DTT(I)=FL(I)/(NPART*(V0(I)+A(I)))
      IF(I-NP) 4,3,2
      SINE(I)=(ZEND-PIPEZ(I))/FL(I)
      GO TO 2
      SINE(I)=(PIPEZ(I+1)-PIPEZ(I))/FL(I)
      CONTINUE

      ***  COMPUTATION MINIMUM DELTA T ***

      DT=DTT(1)
      KMIN=1
      DO 5 I=2,NP
      IF(DTT(I)-DT) 6,6,5
      DT=DTT(I)
      KMIN=I
      CONTINUE

      ***  SET UP DIVISION-NUMBER FOR EACH PIPE **

      DO 7 I=1,NP
      IF(I-PMIN) 9,8,9
      ANN=FL(I)/(DT*(V0(I)+A(I)))
      NN(I)=ANN
      TEST=NN(I)
      IF(ABS(TEST+1-ANN)-0.01) 11,7,7
```

```
11      NN(I)=NN(I)+1
        GO TO 7
8       NN(I)=NPART
7       CONTINUE
C
C       ***  COMPUTATION OF Q/N,H/NSQ,T/NSQ ***
C
        W=(2.*PI/10.)*RPM
        DO 12 I=1,KE
        QN(I)=QN(I)/1000.
        QN(I)=QN(I)/RPM
        HNSQ(I)=HNSQ(I)/RPM**2
        TRQ=1000.*BKWP(I)/W
12      TNSQ(I)=TRQ/RPM**2
        ACD=0.7854*DSD*DSD/10000.
        ACI=0.7854*DSI*DSI/10000.
710     CONTINUE
C
C       ***  WRITE OUT AIR CHAMBER DATA ***
C
        IF(CHAMB) 470,470,471
471     WRITE(6,220)
        WRITE(6,221)CTD,COUT,CIN,DSD,DSI
470     CONTINUE
        CT=CTD
C
C       ***  SET UP STEADY CONDITION FOR TIME ZERO ***
C
        H(1,1)=HSUMP+HPUMP
        V(1,1)=V0(1)
        DO 13 I=1,NP
        D(I)=D(I)/100.
        DX=FL(I)/NN(I)
        DHL=F(I)*DX*V0(I)*V0(I)/(19.62*D(I))
        FF(I)=F(I)*DT/(2.*D(I))
        TEM=L-1
        XL(I,L)=TEM*DX/FL(I)
        H(I,L)=H(I,1)-DHL*TEM
        PRESH(I,L)=H(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINE(I))
17      V(I,L)=V0(I)
        IF(I-NP) 18,13,18
18      H(I+1,1)=H(I,K)
        V(I+1,1)=V0(I+1)
13      CONTINUE
        T=0.0
        DO 80 I=1,NP
        K=NN(I)+1
        DO 80 L=1,K
        HLOW(I,L)=H(I,L)
80      HHIGH(I,L)=H(I,L)
        DO 81 I=1,NP
        K=NN(I)+1
        DO 81 L=1,K
        IF(PRESH(I,L)-PHMAX) 83,82,82
```

```
32    IPMAX=I
      XMAX=XL(I,L)
      PHMAX=PRESH(I,L)
      TTMAX=T
      GO TO 84
33    IF(PRESH(I,L)-PHMIN) 85,85,84
35    IPMIN=I
      XMIN=XL(I,L)
      PHMIN=PRESH(I,L)
      TTMIN=I
34    CONTINUE
31    CONTINUE
      HT=H(1,1)
      HTD=HT
      VMIN=CTD
      QC=0.0
C
C     ***  WRITE OUT VALUES OF HEADS AND PRESSURES ***
C
      WRITE(6,210)
500   WRITE(6,211)T
      DO 21 I=1,NP
      K=NN(I)+1
      WRITE(6,2121)I
      WRITE(6,212) (XL(I,M),PRESH(I,M),H(I,M),V(I,M),M=1,K)
21    CONTINUE
      QP=1000.*QP
      WRITE(6,213) PPM,QP,HPUMP
      QP=QP/1000.
      IF(CHAMB) 996,996,995
995   WRITE(6,222)
      WRITE(6,223) QC,HT,CT
996   CONTINUE
C
C     ***  START WATER-HAMMER ANALYSIS ***
C
300   T=T+DT
      K=NN(I)+1
      DO 22 M=1,K
      IF(PRESH(I,M)-HVPR) 23,23,122
23    WRITE(3,214) T,I,XL(I,M)
      IF(CHAMB) 100,100,382
122   IF(CHAMB) 22,22,381
381   IF(PRESH(I,M)) 382,22,22
      CONTINUE
      GO TO 383
382   CTD=CTD*1.25
      HPUMP=HRES-HSUMP+HLL
      RPM=SRPM
      QP=QLINE/NPAR
      GO TO 710
383   CONTINUE
      IU=IU+1
      QRPM=QP/RPM
```

```
      DO 550 I=2,KE
      IF(QRPM-QN(I)) 908,915,550
908   IF(QRPM) 910,910,911
910   TN2=TNSQ(1)
      GO TO 551
911   TN2=TNSQ(I-1)+(QRPM-QN(I-1))*(TNSQ(I)-TNSQ(I-1))/(QN(I)-QN(I-1))
      GO TO 551
915   TN2=TNSQ(I)
      GO TO 551
550   CONTINUE
551   J=I
      RPM=RPM-30.*TN2*DT*RPM*RPM/(PI*XI)
      IF(T-TMAX) 10,10,100
10    CONTINUE

      ***  COMPUTATION H AND V AT INTERIOR POINTS ***

      DO 50 I=1,NP
      K=NN(I)
      DO 51 L=2,K
      VL=V(I,L)-TH(I)*A(I)*(V(I,L)-V(I,L-1))
      HR=H(I,L)-TH(I)*A(I)*(H(I,L)-H(I,L+1))
      VP=(I,L)=0.5*(VL+VR+C2(I)*(HL-HR)+C2(I)*DT*SINE(I)*
     1(VL-VR)-FF(I)*(VL*ABS(VL)*VR*ABS(VR)))
51    HP=(I,L)=0.5*(HL+HR+(VL-VR)/C2(I)+DT*SINE(I)*(VL+VR)-
     1(FF(I)/C2(I))*(VL*ABS(VL)-VR*ABS(VR)))
50    CONTINUE

      ***  COMPUTATION H AND V AT PIPE INTERIOR JUNCTIONS ***

      KK=NP-1
      DO 52 I=1,KK
      K=NN(I)+1
      VL=V(I,K)-TH(I)*A(I)*(V(I,K)-V(I,K-1))
      HR=H(I+1,1)-TH(I+1)*A(I+1)*(H(I+1,1)-H(I+1,2))
      CC1=VR-C2(I+1)*HR-C2(I+1)*DT*VR*SINE(I+1)-FF(I+1)*VR*ABS(VR)
      HP(I,K)=(-CC1*AREA(I+1)+C3*AREA(I))/(C2(I+1)*AREA(I+1)+C2(I)*
     1AREA(I))
      HP(I+1,1)=HP(D,K)
      VP(I,K)=C3-C2(I)*HP(I,K)
      VP(I+1,1)=CC1+C2(I+1)*HP(I+1,1)
52    CONTINUE

      ***  BOUNDARY CONDITIONS AT PUMP (UPSTREAM BOUNDARY CONTITION) **

      VR=V(1,1)-TH(1)*A(1)*(V(1,1)-V(1,2))
      HR=H(1,1)-TH(1)*A(1)*(H(1,1)-H(1,2))
      C1=VR-C2(1)+HR-C2(1)*DT*VR*SINE(1)-FF(1)*VR*ABS(VR)
      IF(CHAMB) 509,509,510
```

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

```
509   CONTINUE
      VP(1,1)=C6/C9
      IF(VP(1,1)) 701,701,700
701   VP(1,1)=0.0
700   HP(1,1)=(VP(1,1)-C1)/C2(1)
      HPUMP=HP(1,1)-HSUMP
      IF(HPUMP) 702,702,703
702   HPUMP=0.0
      HP(1,1)=HSUMP
      VP(1,1)=C1+C2(1)*HP(1,1)
703   QP=VP(1,1)*AREA(1)/NPAR
      GO TO 50
C
C     ***  AIR CHAMBER WITH PUMPS STILL OPERATING ***
C
510   C5=19.62*COUNT*COUNT*ACD*ACD*RPM*NST*C7/(NPAR-RPM*NST*AREA(1)*C7*
     1C2(1))
      C6=19.62*COUNT*COUNT*ACD*ACD*(-HT+(HSUMP+(RPM*NST/NPAR)*
     1(C1*C7*AREA(1)+RPM*NPAR*C8))/(1.-RPM*NST*AREA(1)*C2(1)*C7/NPAR))
      QC=0.5*C5*(1.-SQRT(1.-4.*C6/(C5*C5)))
      QP=(C1*AREA(1)*C2(1)*AREA(1)+(HT-QC*QC/(19.62*COUNT*COUNT*
     1ACD+ACD))-QC)/NPAR
      VP(1,1)=(QC*NPAR*QP)/AREA(1)
      HP(1,1)=(VP(1,1)-C1)/C2(I)
      HPUMP=HP(1,1)-HSUMP
      IF(QP) 150,150,158
150   QP=0.0
C
C     ***  AIR CHAMBER WITH PUMP CHECK VALVES CLOSED ***
C
      IF(QC) 153,151,151
151   C5=19.62*COUNT*COUNT*ACD*ACD/(C2(I)*AREA(1))
      C6=19.62*COUNT*COUNT*ACD*ACD*(HT+C1/C2(1))
      IF(C6) 153,154,154
154   QC=0.5*C5*(-1.+SQRT(1.+4.*C6/(C5*C5)))
156   VP(1,1)=QC/AREA(1)
      HP(1,1)=(VP(1,1)-C1)/C2(1)
      HPUMP=HP(1,1)-HSUMP
      GO TO 158
153   C5=19.62*CIN*CIN*ACI*ACI/(C2(1)*AREA(1))
      C6=19.62*CIN*CIN*ACI*ACI*(HT+C1/C2(1))
      IF(C6) 155,155,151
155   QC=0.5*C5*(1.-SQRT(1.-4.*C6/(C5*C5)))
      GO TO 156
158   CT=CT*QC*DT
      HT=PIPEZ(1)-HATM*(HTD-PIPEZ(1)+HATM)*(CTD/CT)**EX
      PHT=HT-PIPEZ(1)
      IF(CT-VMAX) 60,60,160
160   VMAX=CT
      HTMAX=HT
      PHTMX=PHT
      TVMAX=T
```

```
60     IF(CT-VMIN) 331,331,59
331    VMIN=CT
       HTMIN=HT
       PHTMN=PHT
       TVMIN=T
59     CONTINUE
C
C      ***  COMPUTATION H AND V AT DOWNSTREAM END (THIS BOUNDARY
      1CONDITION IS FOR A CONSTANT HEAD RESERVOIR) ***
C
       LM=NN(NP)+1
       VL=V(NP,LM)-TH(NP)*A(NP)*(V(NP,LM)-V(NP,LM-1))
       HL=H(NP,LM)-TH(NP)*A(NP)*(H(NP,LM)-H(NP,LM-1))
       C3=VL+C2(NP)*HL+C2(NP)*VL*DT*SINE(NP)-FF(NP)*VL*ABS(VL)
       HP(NP,LM)=HRES
       VP(NP,LM)=C3-C2(NP)*HP(NP,LM)
C
C      ***  PREPARATION OF VALUES FOR NEXT TIME STEP COMPUTATION ***
C
       DO 55 I=1,NP
       K=NN(I)+1
       DO 55 L=1,K
       V(I,L)=VP(I,L)
       H(I,L)=HP(I,L)
       PRESH(I,L)=H(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINE(I))
55     CONTINUE
C
C      ***  LOCATE MAXIMUM AND MINIMUM PRESSURE HEADS AND H VALUES ***
C
       DO 56 I=1,NP
       K=NN(I)+1
       DO 56 L=1,K
       IF(H(I,L)-HLOW(I,L)) 62,63,63
62     HLOW(I,L)=H(I,L)
63     IF(H(I,L)-HHIGH(I,L)) 65,65,64
64     HHIGH(I,L)=H(I,L)
65     IF(PRESH(I,L)-PHMAX) 66,67,67
67     IPMAX=I
       TTMAX=T
       GO TO 56
66     IF(PRESH(I,L)-PHMIN) 68,68,56
68     IPMIN=I
       XMIN=XL(I,L)
       PHMIN=PRESH(I,L)
       TTMIN=T
56     CONTINUE
       IF(TH-TOUT) 800,500,800
```

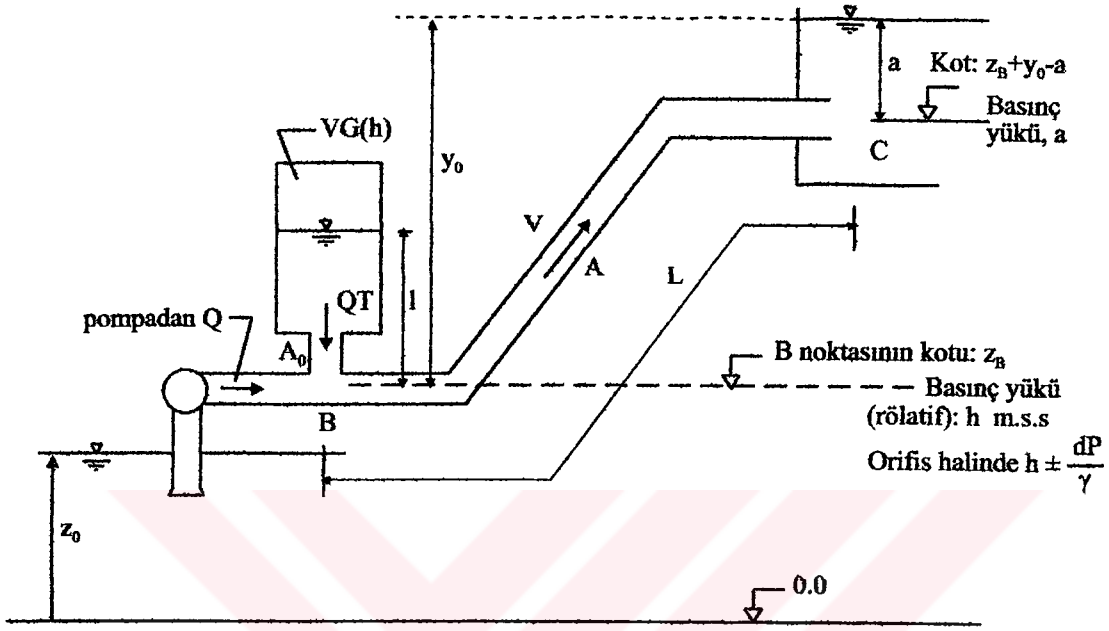
```
      ***  WRITEOUT MAXIMUM AND MINIMUM PRESSURE HEADS AND H VALUES ***

00    CONTINUE
      WRITE(6,215)
      DO 401 I=1,NP
      WRITE(6,216)I
      K=NN(I)+1
      DO 401 L=1,K
      PHMX=HHIGH(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINE(I))
      PHMN=HLOW(I,L)-(PIPEZ(I)+XL(I,L)*FL(I)*SINE(I))
01    WRITE(6,217) XL(I,L),PHMX,PHMN,HHIGH(I,L),HLOW(I,L)
      WRITE(6,218) PHMAX,IPMAX,XMAX,TTMAX
      WRITE(6,219) PHMIN,IPMIN,XMIN,TTMIN
      IF(CHAMB) 999,999,998
98    WRITE(6,224) VMAX,TVMAX,HTMAX,PHTMX
      WRITE(6,225) VMIN,TVMIN,HTMIN,PHTMN
99    CONTINUE

      ***  FORMAT STATEMENTS ***

00    FORMAT(6I5,5F10.2/3F10.2,2F10.4,F10.5,F10.7)
01    FORMAT(4F10.1,F10.5)
02    FORMAT(3F10.2)
03    FORMAT(1H1,20X,14('*')/21X,'INPUT DATA '/)
04    FORMAT(' ',4X,'NO. OF PIPES',20('.'), '=',I5/' ',4X,'MIN.
     1DIVISION NO THAT PIPE DIVIDED=',I5/' ',4X,'MAX.TIME OF ANALYSIS',
     2/1('.'),'=',F7.1,'SEC.'/' ',4X,'ATMOSPHER-PRESSURE HEAD',
     39('.'),'=',F7.1,' M-LIQUID '/' ',4X,'RESERVOIR ELEV. AT
     4DOWNSTREAM END =',F7.1,' M'/ ' ',4X,'DOWNSTREAM-END
     5ELEV. OF LAST PIPE= ',F7.1,' M'/' ',4X,'OUTPUT IS PRINTED
     6EVERY',I3,'TH TIME INTERVALU')
05    FORMAT(//43X,'PIPE DATA'/)
06    FORMAT(' ',4X,'PIPE',I2/' ',4X,'D=',F6.2,'CM',3X,'L=',
     1F7.0,'M',3X,'F=',F6.4,3X,'WAVE SPD=',F6.0,'M/SEC',
     23X,'V0=',F4.1,'M/SEC',3X,'UPSTR PIPE ELEV=',F7.1,'M'/)
07    FORMAT(///15X,'PUMP DATA'/' ',4X,'NUMBER OF PUMPS IN PARALLEL=',
     1I3/' ',4X,'EACH PUMP HAS',I2,'STAGES'/' ',4X,'STEADY STATE
     2PUMP SPEED=',F7.1,'RPM'/' ',4X,'EACH PUMP AND MOTOR UNIT HAS A
     3MOMENT OF INERTIA OF',F6.3,'KG-MSQ'/' ',4X,'ELEVATION OF
     4PUMP JUMP=',F7.1,'M')
08    FORMAT(/8X,'Q-CU.M/SEC',4X,'H/STAGE-M',2X,'BKWP/STAGE'/8X,13
     1('-'),2X,9('-'),2X,10('-'))
09    FORMAT(9X,F8.3,7X,F6.0,4X,F6.0)
10    FORMAT(1H1/'PRESSURE HEADS, H - VALUES AND VELOCITIES
     1AS FUNCTIONS OF TIME ALONG PIPES'/2X,74('-'))
11    FORMAT(///16X,3(4X,'X P.HEAD HEAD VELOCITY')
     1/' ',15X,3(14X,'M........M M/SEC')/' ',
     2'TIME=',F7.3,'SEC',3(4X,'.........................
     3.............................................'))
21    FORMAT(' ','PIPE NO',I3)
2     FORMAT(' ',20X,F5.3,2F7.1,F8.2,6X,F5.3,2F7.1,F8.2,6X,
     1F5.3,2F7.1,F8.2)
3     FORMAT(/4X,'PUMP IMPELLER SPEED N=',F7.1,'RPM',8X,
     1'EACH PUMP DISCHARGE=',F7.3,'LT/SEC',8X,'PUMP HEAD=',
     2F6.1,'M')
```

```
14    FORMAT(////2X,'COLUMN SEPERATION HAS OCCURED AT',F6.2,
     1'SEC.IN PIPE NO.',I3,'AT LOCATION',F5.3)
15    FORMAT(1H1/18X,27('*')/18X,'*TABLE OF EXTREME
     1VALUES*'/18X,27('*')//13X,'X MAX P.HEAD MIN
     2P.HEAD MAX HEAD MIN HEAD'///X,5('-'),1X,11('-'),
     32X,11('-'),3X,8('-'),3X,8('-'))
16    FORMAT(2X,'PIPE',I3)
17    FORMAT(11X,F5.3,2X,F7.1,6X,F7.1,5X,F7.1,4X,F7.1)
18    FORMAT(2X,'MAX PRESSURE HEAD=',F6.1,'M.IN PIPE',
     1I3,'AT X=',F5.3,'AT TIME=',F7.2,'SEC')
19    FORMAT(2X,'MIN PRESSURE HEAD=',F6.1,'M. IN PIPE',I3,
     1'AT X=',F5.3,'AT TIME=',F7.2,'SEC')
20    FORMAT(///10X,'AIR CHAMBER DATA:'/)
21    FORMAT(4X,'INITIAL AIR CHAMBER VOLUME.....=',F7.3,
     1'CU M'/4X,'DISCHARGE COEFFICIENT FOR OUTFLOW=',
     2F6.2/4X,'DISCHARGE COEFFICIENT FOR INFLOW=',
     3F6.2/4X,'CHAMBER-OUTLET DIAMETER',8('.'),'=',
     4F6.2,'CM'/4X,'CHAMBER-INLET DIAMETER',9('.'),
     5'=',F6.2,'CM'/4X,'POLYTROPIC PROCESS EXPONENT....
     6=',F6.2)
22    FORMAT(/4X,'AIR CHAMBER VALUES:')
23    FORMAT(/4X,'CHAMBER DISCHARGE',3('.'),'=',F7.2,'CU M'
     1/4X,'H-VALUE IN CHAMBER',2('.'),'=',F7.2,'M'/4X,
     2'AIR VOLUME IN CHAMBER=',F7.2,'CU M')
24    FORMAT(//4X,'MAXIMUM AIR VOLUME=',F7.3,'CU M AT
     1TIME=',F7.3,'SEC'/14X,'MAXIMUM HEAD IN CHAMBER=',
     2F7.2,'M','MAXIMUM PRESSURE HEAD IN CHAMBER=',
     3F7.2,'M')
25    FORMAT(//4X,'MINIMUM AIR VOLUME=',F7.3,'CU M AT
     1TIME=',F7.3,'SEC'/14X,'MINIMUM HEAD IN CHAMBER=',
     2F7.2,'M','MINIMUM PRESSURE HEAD IN CHAMBER=',
     3F7.2,'M')
      STOP' '
      END
```

EK.7

RİJİD SIVI SÜTUNU TEORİSİNE GÖRE HAVA KAZANI BOYUTLANDIRILMASI

EK.7 RİJİD SIVI SÜTUNU TEORİSİNE GÖRE HAVA KAZANI BOYUTLANDIRILMASI



Şekil E7.1-

Kazanda herhangi bir andaki l su yüksekliğini ihmal edersek, böylece herhangi bir anda kazandaki gaz basıncı yükü B noktasındaki h basınç yüküne eşit olur. Eğer kazan tabanı dP/γ kadar basınç düşüşüne neden olursa, bu takdirde B noktasındaki basınç yükü h-dP/γ olur.

Sudan ve borunun kendisinden çok daha fazla deforme olabilen bir eleman ihtiva eden sistemlerde, su darbesi dalgaları yerlerini süratle suyun bir kitle halindeki yavaşça salınımlarına bırakırlar. Bu şartlarda eğer boru çapı sabit ise, hız borunun tamamında aynıdır. Böylece hız konuma bağlı değildir, ancak zamana bağlıdır.

Basınçlı borularda aşırı basınçlara karşı inşa edilen hava kazanları ve denge bacaları deformasyon kabiliyeti yüksek olan tesisleri oluştururlar. Aşırı basınç dalgalarının boru

hattı doyunca yayılımı sırasında, bu tesisler içindeki su seviyesi de, tesisin boruya bağlandığı noktadaki basınç salınımına bağlı olarak, salınıma uğrar. Bu salınım hareketi, tesis içindeki suyun yer değiştirmesinden ileri gelen kitle halindeki bir salınım hareketidir.

Bu nedenle kitle halindeki salınım hareketine (yani sıkışamaz bir akışkanın kararsız uniform akışına) ait dinamik denklemi (*) ile süreklilik denkleminin beraberce çözümü suretiyle bu tesisleri boyutlandırabiliriz.

Dinamik denklemin uygulanmasında başlıca varsayımlar şöyledir:

1. Basma haznesi hacmi sonsuz büyüktür. Bu nedenle haznedeki su seviyesi salınım hareketi süresince sabittir.
2. Meydana gelen basınç değişimleri boruda deformayona sebep olmamaktadır. Yani borunun elastik modülü çok büyüktür (E→∞). Ayrıca su sıkışmamaktadır.
3. Boru kesiti sabittir.

Şimdi pompanın çalışırken aniden durması sırasındaki ilk durumu göz önüne alalım. Şekil E7.1 'e bakarak ve kazanın bağlandığı B noktası ile boru ucundaki C noktasını gözönüne alarak, sıkışamaz bir akışkanın herhangi bir andaki akışına ait dinamik denklemini uygularsak;

(*) Rijid sıvı sütunu teorisinde borunun ve sıvının deformasyonu ihmal edilir, yani boru içinde sıvının rijid bir kitle gibi hareket ettiği kabul edilir. Bu durumda, kesiti sabit bir boru içindeki kararsız sıvı akımına ait hareket denkleminin, akış yönünde ele alınan iki kesit arsında boru boyunca belli bir andaki integrayonundan elde edilen dinamik denklem;

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} - \frac{\lambda L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{L}{g} \cdot \frac{dV}{dt}$$

şeklinde yazılabilir.

$$z_B + \frac{P_B}{\gamma} = z_C + \frac{P_C}{\gamma} \pm F.V^2 + \frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} \qquad (1)$$

veya

$$(z_C - z_B) + \left(\frac{P_C}{\gamma} - \frac{P_B}{\gamma}\right) \pm F.V^2 + \frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} = 0 \qquad (1a)$$

Burada V, terfi hattında herhangi bir andaki su hızı; Q, pompadan basılan toplam debi; L, kazandan itibaren basma haznesine kadar olan terfi borusunun boyudur. Suyun basma haznesine doğru akması halinde yük kayıplarına tekabül eden $P.V^2$ teriminin önündeki (+) işareti, aksi halde (-) işareti alınacaktır.

Yük kaybının hesabında kararlı akış rejimindeki yük kaybı formüllerinin, kararsız akış rejiminde de geçerli olduğu kabul edilecektir. Buna göre sürekli yük kaybı için Darcy-Weisbach formülü kullanıldığında;

$$h_L = \frac{\lambda.L}{D}.\frac{V^2}{2g} = F.V^2$$

olacağından

$$F = \frac{\lambda.L}{2gD}$$

ve yük kaybının hesabı için Strickler formülü seçildiğinde

$$h_L = \frac{L}{m^2.R^{4/3}}.V^2 = F.V^2$$

olacağından

$$F = \frac{L}{m^2 . R^{4/3}}$$

olur.

Burada λ, Darcy-Weisbach; m, Strickler sürtünme katsayısı ve R, boruya ait hidrolik yarıçaptır.

Şekilden B noktasında;

$$z = z_B, \quad ve \quad \frac{P_B}{\gamma} = h \quad mss$$

Kazan tabanında yük kaybına neden olan orifis veya daraltılmış bir kısım bulunması halinde, suyun bu kısımdan geçişi sırasında meydana gelen yersel kaybı dP/γ ile gösterilirse;

$$\frac{P_B}{\gamma} = h \pm \frac{dP}{\gamma} = h \pm kQ_T^2$$

Kazandan boruya doğru olan akımda (-) ve ters akımda (+) alınır.

C noktasında;

$$z_C = z_B + y_0 - a \quad ; \qquad \frac{P_C}{\gamma} = a \quad mss$$

Bu değerler (1a) eşitliğinde yerine konulduğunda,

$$z_B + y_0 - a - z_B + \left[a - (h \pm \frac{dP}{\gamma}) \right] \pm F.V^2 + \frac{L}{g} . \frac{dV}{dt} = 0$$

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + y_0 - h \pm \frac{dP}{\gamma} \pm F.V^2 = 0 \qquad (2)$$

olur. Veya B ve C noktasında mutlak basınç cinsinden basınç yükü değerleri kullanılarak;

$$H = h + h_{atm} \quad Y_0 = y_0 + h_{atm}$$

yazarsak

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + Y_0 - H \pm \frac{dP}{\gamma} \pm F.V^2 = 0 \qquad (2a)$$

Not: Boru hattındaki hızın değerine bağlı olarak çıkıştaki $V^2/2g$ hız yükü teriminin ihmal edilemeyeceği veya ihmal edilmemesi istenilen hallerde bu dinamik denklem;

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + Y_0 - H + \frac{V^2}{2g} \pm \frac{dP}{\gamma} \pm F.V^2 = 0 \qquad (2b)$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıdaki denklemlerde son iki terimin önündeki işaret, suyun kazandan boruya doğru olması halinde (+), ters yönde olması halinde de (-) olarak alınacaktır.

Eğer su hazneye, Şekil E7.2 'deki gibi su yüzeyi üzerinden verilirse (en genel hal), bu takdirde borudaki su yüksekliği y_0, Şekil E7.1 'deki gibi sabit bir yükseklik yerine y değişken bir yükseklik olabilir. O zaman (2) denklemi;

$$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_C = 0, \qquad z_C = y + z_B$$

$$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_B = h \pm \frac{dP}{\gamma};\ z = z_B$$

olduğundan (1) eşitliğinden

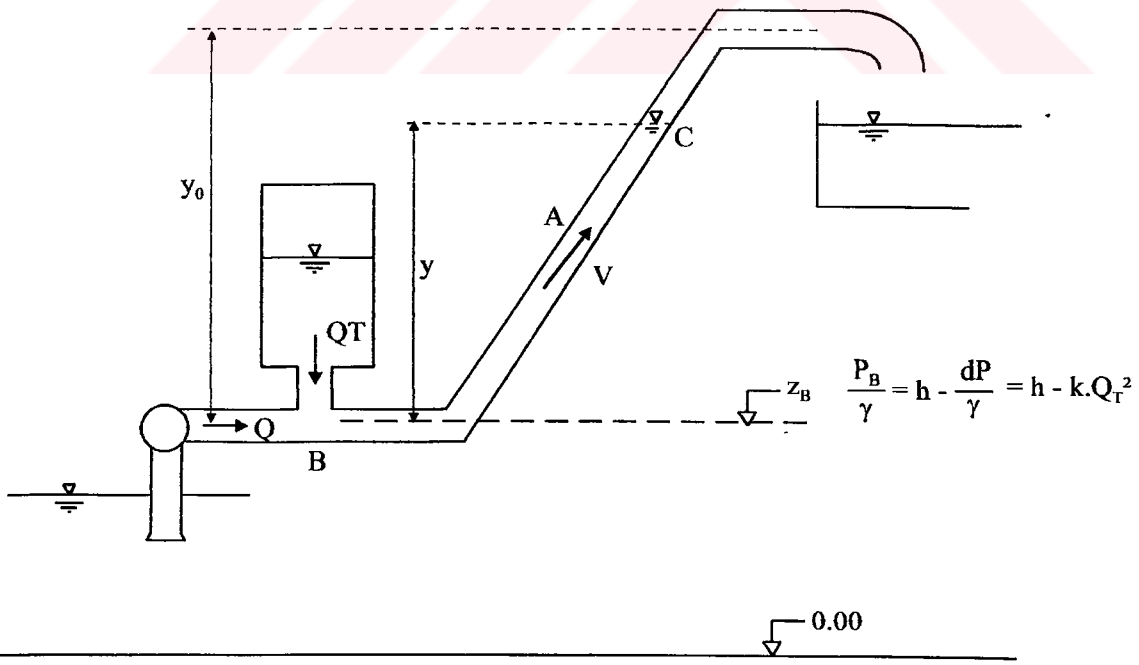
$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + y - h \pm \frac{dP}{\gamma} \pm F.V^2 = 0 \qquad (2b)$$

şeklini alır. Veya B ve C noktasındaki basınç yükleri mutlak basınç değerleri cinsinden ifade edilirse, yani

$$H = h + h_{at} \quad \text{ve} \quad Y = y + h_{at}$$

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} - H + Y \pm \frac{dP}{\gamma} \pm F.V^2 = 0 \qquad (2c)$$

olur.



Şekil E7.2-

Orifisten geçen Q_T debisi için

$$Q_T = \pm CA_0\sqrt{2g\frac{dF}{\gamma}}$$

yazılabilir. Burada C debi katsayısı ve A_0, orifis ağızlığının enkesit alanıdır. Orifis halinde su akımı kazandan boruya doğru iken $C=C_0$ ve denklemdeki işaret (+) alınır. Borudan kazana doğru iken de $C=C_i$ ve işareti de (-) alınır. Genellikle $C_0=2.C_i$. Tabandaki daraltılmış kısmın kısa bir borudan ibaret olması halinde $C=C_0=C_i$ dir.

Q_T bağıntısından

$$\frac{dP}{\gamma} = \frac{1}{2g.C^2.A_0^2}Q_T^2 = kQ_T^2$$

elde edilir. Bu bağıntı (2b) ve (2c) denkleminde yerine konursa ve $K=1/(2g.C^2.A_0^2)$ denirse;

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} - H + Y_0 \pm kQ_T^2 \pm F.V^2 = 0 \qquad (3)$$

ve

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} - H + Y \pm kQ_T^2 \pm F.V^2 = 0 \qquad (3a)$$

denklemleri elde edilir.

Süreklilik denklemi: Herhangi bir anda terfi hattındaki hız V ve pompadan gelen debi Q ve kazandan boruya doğru olan debi Q_T olduğu anda süreklilik denklemi;

$$Q + Q_T = A.V \qquad (4)$$

şeklinde yazılabilir.

Böylece borunun rezervuara su-yüzeyi altından girmesi halinde, rijid sıvı sütunu teorisine göre temel denklemler;

Dinamik denklem:

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} + Y_0 - H \pm k.Q_T^2 \pm F.V^2 = 0 \qquad (3)$$

$$Q + Q_T = A.V \qquad (4)$$

Bu denklemlerde Q, herhangi bir anda pompadan gelen toplam debidir. Uygulamada, pompaya doğru olacak ters akıma karşı hemen kapanan ve pompadan hemen sonra yerleştirilen bir klape bulunur. Pompanın durmaya başlamasından kısa bir süre sonra pompadan basılan debi de sıfır olur. Q_T, herhangi bir anda kazandan çıkan suyun debisidir. Ters akım halinde, (3) denklemindeki son iki terimin işaretinin (-) olarak alınması gerekir. Böylece bu denklemler genel olup, Q_T 'nin kazana doğru olması durumunda da geçerlidir.

Başlangıçta terfi hattında kararlı bir su akımı mevcut iken Q_T=0 olup $k.Q_T^2$ 'nin değeri de sıfırdır. t=0 anındaki kararlı akıma ait değerleri "0" indisi ile gösterelim. (3) denkleminden, başlangıçtaki kararlı akım halinde B noktasındaki, dolayısıyla kazan içindeki gazın basınç yükü rölatif basınç cinsinden;

$$h_0 = y_0 + F.V^2$$

veya mutlak basınç yükü cinsinden,

$$H_0 = y_0 + h_{at} + F.V^2 = Y_0 + F.V^2$$

olur.

Şimdi (3) ve (4) denklemlerini, Δt zaman aralığı esnasında t ve Δt anlarındaki değerlerin ortalaması kullanılarak ve bu ortalama değerleri "m" indisi ile göstererek, sonlu farklar formunda yazarsak;

$$\frac{L}{g}.\frac{\Delta V}{\Delta t} + Y_0 - H_m \pm k.Q_{Tm}^2 \pm F.V_m^2 = 0 \qquad (5)$$

$$Q_m + Q_{Tm} = A.V_m \qquad (6)$$

veya (6) denklemini (5) 'de yerine koyarsak;

$$\frac{L}{g}.\frac{\Delta V}{\Delta t} + Y_0 - H_m \pm k(A.V_m - Q_m)^2 \pm F.V_m^2 = 0 \qquad (7)$$

elde ederiz.

$$V_m = \frac{V(t)+V(t+\Delta t)}{2} = \frac{V(t)+V(t+\Delta t)-V(t)+V(t)}{2}$$

$$V_m = \frac{2V(t)+V(t+\Delta t)-V(t)}{2} = V(t)+\frac{\Delta V}{2}$$

veya t zamanındaki değer için "i" indisi ve t+Δt anındaki değer için de "i+1" indisi kullanılırsa;

$$V_m = V_i + \frac{\Delta V}{2}$$

yazılabilir. Böylece (7) eşitliği

$$\frac{L}{g}.\frac{\Delta V}{\Delta t}+Y_0-H_m \pm k\left[A\left(V_i+\frac{\Delta V}{2}\right)-Q_m\right]^2 \pm F\left(V_i+\frac{\Delta V}{2}\right)^2=0$$

olur ve ΔV 'ye göre düzenlenirse;

$$C_1.\overline{\Delta V}^2+C_2.\Delta V+C_3=0 \qquad (8)$$

şeklinde bir denklem elde edilir. Burada C_1, C_2 ve C_3 katsayıları şöyle tanımlanır:

$$C_1=\pm\frac{1}{4}\left(k.A^2+F\right)$$

$$C_2=\frac{L}{g.\Delta t} \pm k.A^2.V_i \pm F.V_i \pm k.A.Q_m \qquad (9)$$

$$C_3=Y_0-H_m \pm k.A^2.V_i^2 \pm F.V_i^2 \pm k.Q_m^2 \pm 2.k.A.Q_m.V_i$$

(8) denkleminin çözümü için

$$\Delta V=\frac{-C_2 \pm \sqrt{C_2^2-4.(C_1).(C_2)}}{2.(C_1)}$$

Fakat ΔV pozitif veya negatif değerli olabileceğinden (8) denkleminin çözümünde

$$\Delta V=\frac{-C_2+\sqrt{C_2{}^2-4C_1.C_3}}{2.C_1} \qquad (10)$$

kullanılır.

ΔV 'nin hesabında şöyle bir yaklaşım da yapılabilir. Genel olarak ΔV 'ler küçük olduğundan, ikinci mertebeden $\overline{\Delta V}^2$ 'nin değeri de daha küçük olur. İlk yaklaşım olarak $\overline{\Delta V}^2$ ihmal edilirse (8) denkleminden,

$$\Delta V = -\frac{C_3}{C_2} \tag{11}$$

bulunur. $\overline{\Delta V}^2$ 'nin ihmal edilmemesi halinde ise,

$$\Delta V = -\frac{C_3}{C_2} - \frac{C_1}{C_2}\overline{\Delta V}^2$$

yazılabilir.

Böylece ikinci yaklaşım olarak,

$$\overline{\Delta V}^2 = \left(-\frac{C_3}{C_2}\right)^2 = \frac{C_3^2}{C_2^2}$$

alınırsa ΔV için;

$$\Delta V = -\frac{C_3}{C_2} - \frac{C_1}{C_2}\left(\frac{C_3}{C_2}\right)^2 \tag{12}$$

elde edilir. Böylece ΔV 'nin çözümü için (11) veya (12) eşitliği kullanılarak çözüm çabuklaştırılabilir.

Eğer $V_i < 0$ ise C_1, C_2 ve C_3 katsayıların hesabında terimlerin önündeki işaretlerin altındakiler kullanılmalıdır.

E7.1 Hava Kazanının Yaklaşık Hesabı

(9) eşitlikleri ile C_1, C_2 katsayılarının hesaplanabilmesi için Q_m ve H_m değerlerinin bilinmesi gerekir.

Q_m 'nin değeri, aşağıdaki gibi pompada yazılan enerji denklemi ile $H_p=f(Q)$ bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir.

Pompada enerji: $z_0 + H_p + h_{at} = z_B + H$

veya rölatif basınç cinsinden,

$$z_0 + H_p = z_B + h$$

Pompanın karakteristik eğrisinden,

$$\frac{H_p}{N^2} = ka\left[a\frac{(Q/N_{pa})^2}{N^2} + b.\frac{Q/N_{pa}}{N} + c\right]$$

Burada ka, pompanın kademe sayısı ve N_{pa}, paralel bağlı pompa sayısıdır.

Ancak burada yaklaşık, fakat daha optimistik bir çözüm olarak pompanın ani olarak kapandığı (yani Q=0) kabul edilecektir.

C_3 katsayısındaki H_m 'nin değeri ise hava kazanı içindeki gazın politropik konuna uyduğu varsayılarak, gazın hal denkleminden elde edilir.

Kazan içindeki gazın hacminin değişimi için hal denklemi;

$$H_0.(VG_0)^n = H.(VG)^n = sabit$$

veya rölatif basınç değeri kullanılırsa,

$$(h_0 + h_{at})(VG_0)^n = (h + h_{at})(VG)^n$$

şeklinde yazılabilir. Burada H_0 ve VG_0, sırasıyla gazın başlangıçtaki mutlak basınç yükü ve hacmi; H ve VG, bunların daha sonraki bir zamanda olan değerleridir; n, politropik katsayıdır.

Yavaş değişimler (Yani izotermik genleşmeler) için n=1 dir. Buna karşılık azot gazı veya hava için çok hızlı değişim (yani adiabatik genleşme) sırasında n=1,4 dür. N değeri olarak, genellikle, bunların ortalaması, yani n=1,2 alınır.

Böylece;

$$H.(VG)^{1,2} = H_0.(VG_0)^{1,2} = \text{sabit}$$

Bu eşitlikten;

$$H_{i+1} = \frac{H_0.(VG_0)^{1,2}}{(VG_{i+1})^{1,2}} \qquad (13)$$

Burada $H_{i+1} = H(t+\Delta t)$; $VG_{i+1}=VG(t+\Delta t)$ dir.

Terfi hattında başlangıçta kararlı akım mevcut iken kazan içindeki sıvı dengededir. Böylece başlangıçtaki (yani t=0 anındaki) H_0 değeri, t=0 anında B noktasındaki H_B değerine eşittir. Ve başlangıçtaki gaz hacmi VG_0 da bellidir. Çünkü biz seçiyoruz.

Başlangıçtaki gaz hacmi belli olduğuna göre Δt zaman aralığı sonundaki gaz hacmi kazan içindeki süreklilik koşulu,

$$VG_{i+1} = VG_i + \Delta t.Q_{Ti} \qquad (14)$$

denkleminden hesaplanabilir. $VG_{i+1}=VG(t+\Delta t)$ bilinince H_{i+1} değeri de (13) eşitliğinden hesaplanabilir.

$$H_m = \frac{H_i + H_{i+1}}{2} = H_i \frac{\Delta V}{2}$$

Hesaplar şu şekilde yürütülebilir.

1. Δt seçilir. Δt 'nin başlangıçtaki $H_i(=H_0)$, $V_i(=V_0)$, $Q_i(=Q_0)$ ve $Q_{Ti}(=Q_{T0}=0)$ değerleri bellidir.

2. İlk zaman aralığı Δt 'nin sonundaki $Q_{i+1}=0$ alınıp,

$$Q_m = (Q_i+Q_{i+1})/2$$

hesaplanır.

Not: Bundan sonraki zaman aralıkları sonunda hep Q=0 dır.

3. İlk adımda $H_0=H_m$ değeri olarak alınıp, (9) eşitlikleri ile C_1, C_2 ve C_3 katsayıları hesaplanır.

Not: $V_i<0$ ise, (9) eşitliklerindeki terimlerin önünde bulunan (±) işaretinden (-) olanı ve (∓) işaretinden (+) olanı alınır. Eğer kazana giriş ve çıkış debi katsayıları farklı ise, bu takdirde k değeri, C_i debi giriş katsayısı ile yani $k=1/(2g.C_i^2.A_0^2)$ şeklinde hesaplanır. $V_i\geq 0$ ise çift işaretlerden üstteki kullanılır.

4. (10) veya (12) eşitliğinden ΔV hız değişimi bulunur. Ve

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V$$

den Δt nin sonundaki hız ve

$$V_m = V_i + \frac{\Delta V}{2}$$

den Δt aralığındaki ortalama hız değeri hesaplanır.

5. Süreklilik denklemi (4) den

$$Q_{Tm} = A.V_m - Q_m$$

ve

$$Q_{Ti+1} = 2Q_{Tm} - Q_{Ti}$$

hesaplanır.

6. Sonra (14) denkleminden Δt 'nin sonundaki VG_{i+1} değeri ve (13) denkleminden de H_{i+1} değeri hesaplanır.

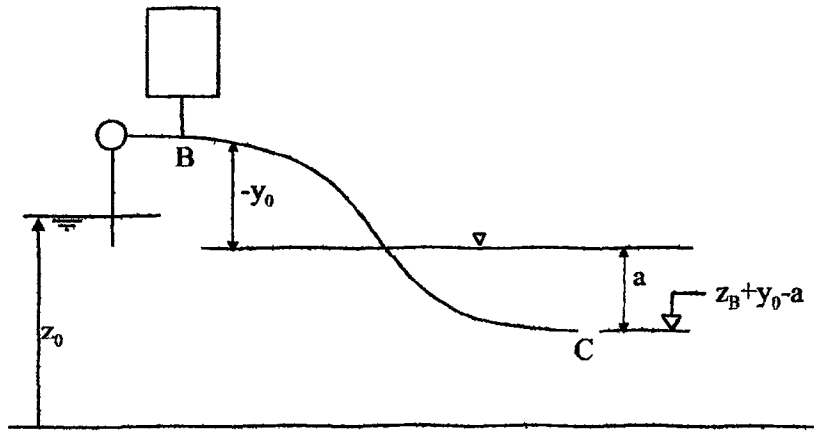
7. Yeni bir Δt değeri için i+1 indisli değerler i indisli olarak alınıp aynı işleme devam edilir.

Eğer kıyas düzlemi suyun deşarj edildiği rezervuar veya deniz seviyesinden geçirilirse,

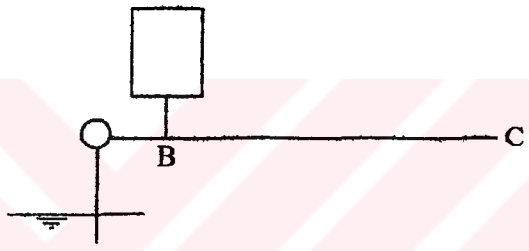
$$z_B = y_0 \quad ; \quad z_C = z_B + y_0 - a = -a$$

Böylece $y_0 = -y_0$ ve $Y_0 = -y_0 + h_{at}$ olur.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ



Şekil E7.3-



Şekil E7.4-

Şekil E7.4' e göre ise, $y_0 = 0$; $Y_0 = h_{at}$ olur.

Suyun rezervuar su yüzeyi üstünden verilmesi halinde,

$$\frac{L}{g}.\frac{dV}{dt} - H + Y \pm k.Q_T^2 \pm F.V^2 = 0$$

$Y<Y_0$ olduğunda, kazandaki ΔVG hava hacmi değişimi, boruda ihtiva edilen su hacmi değişimine eşittir. Böylece

$$\Delta VG = A.\Delta Y$$

$$Q_T = \frac{\Delta VG}{\Delta t} = \frac{A.\Delta Y}{\Delta t}$$

Süreklilik denklemi;

$$Q + Q_T = A.V$$

$$Q_m + \frac{A.\Delta Y}{\Delta t} = A.V_m$$

ifade edilir.

Dinamik denklem;

$$\frac{L}{g}.\frac{\Delta V}{\Delta t} - H_m + Y_m \pm k.\left(\frac{A.\Delta Y}{\Delta t}\right)^2 \pm F.V_m^2 = 0$$

$Y_m = Y_i + \frac{\Delta Y}{2}$ olduğu düşünülürse ve süreklilik denkleminden,

$$\Delta Y = \Delta t.V_m - \frac{\Delta t}{A}Q_m$$

dinamik denklemde yerine konup ΔY 'ler yok edilir ve ΔV 'ye göre düzenlenirse;

$$C_1.\Delta V^2 + C_2.\Delta V + C_3 = 0 \qquad (15)$$

elde edilir.

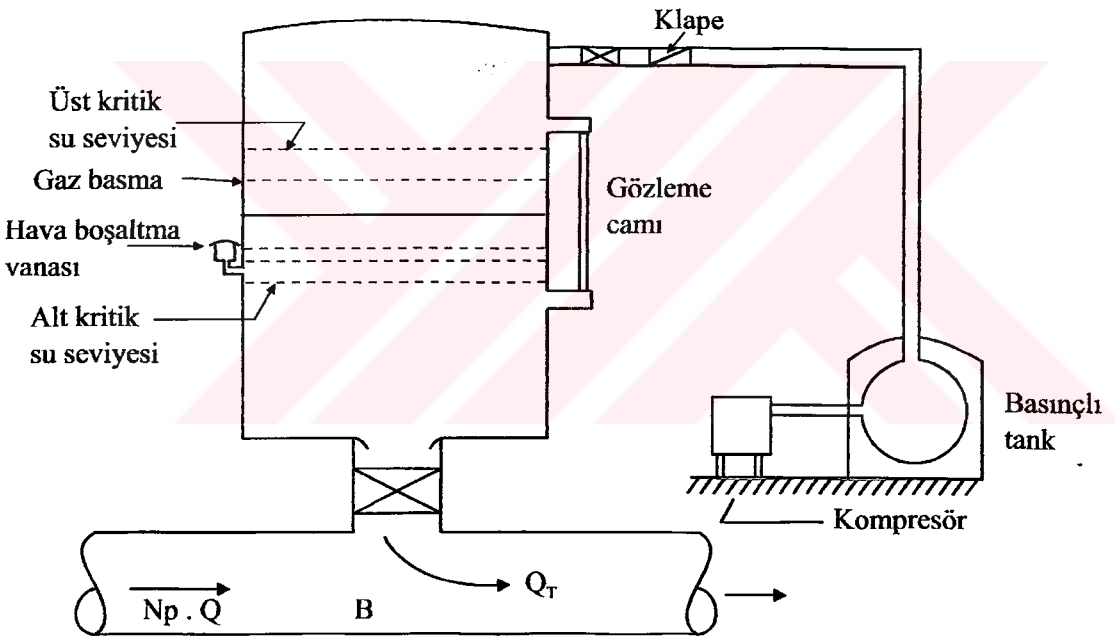
Burada

$$C_1 = \pm\frac{1}{4}\left(kA^2 + F\right)$$

$$C_2 = \frac{L}{g.\Delta t} + \frac{\Delta t}{4} \pm k.A^2.V_i \pm F.V_i \pm k.A.Q_m \qquad (16)$$

$$C_3 = Y_i - H_m + \frac{1}{2}\Delta t.V_i \pm k.A^2.V_i^2 \pm F.V_i^2 \pm k.Q_m{}^2 \mp 2.k.A.Q_m.V_i - \frac{\Delta t.Q_m}{2.A}$$

(15) denklemi de aynı şekilde çözülür.



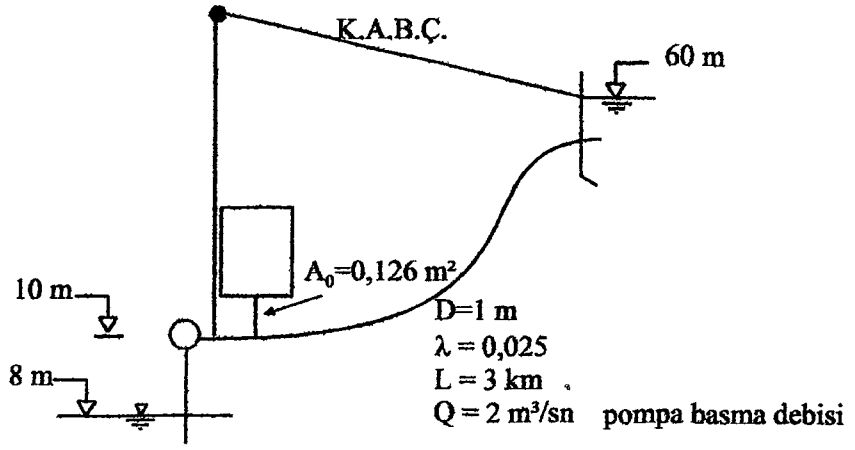
Şekil E7.5-

```
C     Q = POMPANIN TOPLAM BASMA DEBİSİ, M³/SN
C     D = TERFİ BORUSU ÇAPI, M
C     H0 = HAVA KAZANINDA T=0 ANINDAKİ RÖLATİF BASINÇ YÜKÜ
C     VG0 = BAŞLANGIÇTKİ GAZ HACMİ, M³
C     C0 = DEBİ ÇIKIŞ KATSAYISI
C     Cİ = DEBİ GİRİŞ KATSYISI
C     A0 = ORİFİS AĞIZLIĞI KESİTİ, M²
C     XL = TERFİ HATTI BOYU, M
C     DT = ΔT ZAMAN ARALIĞI, SN
C     TMAX = MAX. ZAMAN SÜRESİ, SN

      READ (5,1) Q, D, H0, VG0, C0, Cİ, A0, XL, DT, Y0, TMAX, F, HAT
      P = F * XL / (2*9,81*D)
      VGMAX = 0.0
      Vİ = Q/A
      QM = (Q+0.0)/2
      QT = 0.0
      VG = VG0
      T = 0.0
      HMAX = -8.0
      HMIN = 150.0
      Hİ = H0
      HM = Hİ
      WRİTE (6,9) T, Hİ, Vİ, VG0

5     T = T + DT
      IF (Vİ.LT.0.) GO TO 2
      R = 1./(19.62*C0**2*A0**2)
      C1 = (1./4.)*(R*A**2+P)
      C2 = XL/(9,81*DT)+R*A**2*VI+P*VI-R*A*QM
```

```
      C3 = Y0-HM+R*A**2*VI+P*VI**2+R*QM**2-2.*R*A*QM*V1

4     DV = -C3/C2 - (C1/C2)*(C3/C2)**2
      GO TO 3

2     R = 1./(19,62*C1**2**AO**2)
      C1 = -(1./4.)*(R*A**2+P)
      C2 = XL/(9,81*DT)-R*A**2*V1-P*V1+R*A*QM
      C3 = Y0-HM-R*A**2*V1**2-P*V1**2-R*QM**2+2.*R*A*QM*V1
      GO TO 4

3     V2 = V1 + DV
      VM =  V1 + DV/2
      QTM = A*VM-QM
      QT = 2.*QTM-QT
      VG = VG+QT*DT
      H = (H0+HAT)*((VG0)**1,2)/(VG**1,2)-HAT
      IF (VG.GT.VGMAX) TVMAX = T
      IF (VG.GT.VGMAX) VGMAX = VG
      H2 = H
      HM = (H1+H2)/2
      WRITE (6,10) T, H, V2, V6
      IF (H.LT.HMAX) GO TO 16
      HMAX = H
      TTMAX = T
      GO TO 17

16    IF (H.GT.HMIN) GO TO 17
      HMIN = H
      TTMIN = T
```

```
17      CONTINUE

        V1 = V2
        H1 = H2
        QM = 0.0
        IF (T.LE.TMAX) GO TO 5
        WRITE (6,13) TTMAX, HMAX
        WRITE (6,14) TTMIN, HMIN
        WRITE (6,15) TVMAX, VGMAX
        STOP
        END
```

Örnek E7.1



Şekil E7.6-

$C_i = 0,50$ Akım kazana doğru

$C_0 = 0,90$ Boruya doğru iken

Akım boruya doğru iken;

$$k = \frac{1}{2g.C_0^2.A_0^2} = \frac{1}{19,62.(0,90)^2.(0,126)^2} = 3,96$$

Akım kazana doğru iken;

$$k = \frac{1}{2g.C_i^2.A_0 2} = \frac{1}{19,62.(0,50)^2.(0,126)} = 12,84$$

$$A = \frac{(1)^2.\pi}{4} = 0,785 \quad ; \; F = \frac{\lambda L}{2gD} = \frac{0,025.3000}{19,62.1} = 3,82$$

$y_0 = 60 - 10 = 50$ m

$$V_0 = \frac{2.4}{(1)^2.\pi} = 2{,}546 \text{ m/sn}$$

$$h_0 = y_0 + \frac{\lambda L}{D} \cdot \frac{V_0^2}{2g} = 50 + \frac{0{,}025.3000}{1} \cdot \frac{(2{,}546)^2}{19{,}62} = 75\text{m}$$

$VG_0 = 30 \text{ m}^3$

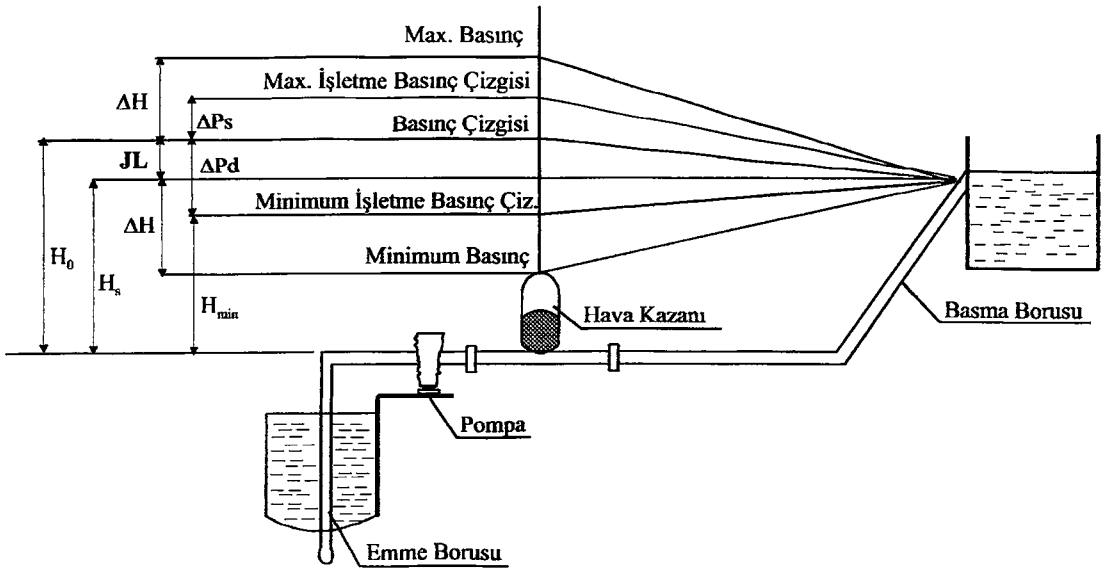
EK.8

PARMAKYAN ABAKLARI YARDIMIYLA HAVA KAZANI HESABI

EK.8 PARMAKYAN ABAKLARI YARDIMIYLA HAVA KAZANI HESABI

Burada hava kazanı hesabı için Parmakyan abaklarının kullanımı anlatılacaktır.

V_0 [m^3/sn]	Basma borusundaki Q_0 debisine karşılık gelen hız
Q_0 [m^3/sn]	Pompa basma debisi
L [m]	Basma borusunun uzunluğu
c [m/sn]	Dalga yayılma hızı
$H_0^*=H_S+JL+H_{atm}$ [mss]	Hattın basıncında, Q_0 debisinde normal işletme basıncı (mutlak basınç olarak)
$H_0 = H_S+JL$	Normal işletme basıncı (rölatif basınç olarak)
ΔP_s [mss]	H_0'dan itibaren müsaade edilen maksimum basınç artması (sürpresyon)
ΔP_d [mss]	H_0 kotundan itibaren müsaade edilebilen maksimum basınç azalması (depresyon)
$\Delta H=cV_0/g$ [mss]	Su darbesini önleyici teçhizat olmadığı takdirde ve pompanın ani olarak durması halinde basma borusunun başında meydana gelecek maksimum basınç artması
P_{max}^* [mss]	Basma borusunun başlangıcında müsaade edilebilir maksimum basınç; boru işletme basıncı (mutlak basınç olarak)
$2\rho=\Delta H/H_0^*$	Boyutsuz parametre
K	Boyutsuz parametre
C_0 [m^3]	H_0 basıncı altında, hava kazanında bulunması gereken havanın hacmi
$C^*=C_0/[1-(\Delta P_d/H_0^*)]$	Hava kazanı asgari hacmi
g [m/sn^2]	Yerçekimi ivmesi



Şekil E8.1-

Parmakyan abakları, bir basma borusunun başlangıç ve orta noktasına ait sürpresyon (ΔP) ve depresyon (ΔP) değerlerini 2Cc/QL büyüklüğünün fonksiyonu olarak verir. (K) parametresi basma borusunda ve hava kazanına girişte meydana gelen yük kayıplarının H'a oranını ifade eder. 2ρ ise ΔH/H oranının ifadesidir.

Parmakyan abakları şu kabullere göre hazırlanmıştır:

1. Hava kazanı basma borusunun başlangıç noktasındadır.
2. Geri tepme klapesi pompa devreden çıkar çıkmaz kapanır.
3. Hava kazanına giriş ve çıkışta meydana gelen yük kayıplarının oranı 1/2,5 tir. K=0, K=0,3; K=0,5; K=0,7; için dört ayrı abak verilmiş olup K>0,7'e pratikte pek rastlanmaz.

Abaklar ordinat ekseni üzerinde sıfırdan yukarıya doğru ΔP/H; aşağıya doğru ise ΔP/H oranları ve ortak apsis ekseni üzerinde de (2Cc/QL) değerleri gösterilmiştir.

Bu abaklar ile hava kazanı hesaplamak için aşağıdaki yol izlenir:

1. Boru cinsine ve hattın profiline göre müsaade edilebilir en büyük $\Delta P_s/H_0^*$ veya $\Delta P_d/H_0^*$ hesaplanır.

2. $2\rho=c\ V_0/gH_0^* = \Delta H/H_0^*$ bulunur.

3. Bulunan 2ρ parametresine ait eğrinin $\Delta P_s/H_0^*$ veya $\Delta P_d/H_0^*$ ordinat noktasının apsisi $(2C_0c/Q_0L)$ abaktan okunur. Hesaplanan 2ρ parametresi abakta mevcut değil ise mevcut en yakın eğri kullanılır veya en yakın iki eğrinin gidişlerine göre takriben belirlenir.

4. Görüleceği gibi $2C_0c/Q_0L$ değeri aynı (2ρ) için bir $\Delta P_s/H_0^*$ ve bir de $\Delta P_d/H_0^*$ değeri verir. Bu sebeple başlangıçtan sınır şartı olarak $\Delta P_s/H_0^*$ alınmışsa buna karşılık gelen $\Delta P_d/H_0^*$ nün değeri abaktan okunur. Sınır şartı olarak $\Delta P_d/H_0^*$ alınmışsa bu defa $\Delta P_s/H_0^*$ abaktan bulunur.

5. Böylece her abağa göre bulunan $2C_oc/Q_0L$, $\Delta P_s/H_0^*$, $\Delta P_d/H_0^*$ ve bunlara bağlı olarak hesaplanan C_0 ve C^* bir tabloda toplanır. Neticede emniyet ve ucuzluk bakımından uygun olan C^* değeri seçilir.

6. Kazan girişine konulacak diferansiyel orifisin R yarıçapı

$$R = [2{,}5Q_0^2/2g\pi^2(KH_0^*-JL)]^{1/4}$$

ifadesinden bulunur.

7. 2ρ eğrilerinin aranan bölgede sürekli olmadığı abaklar dikkate alınmaz.

Genel olarak yukarıda izah edilen hesap tarzı sistemin özelliklerine göre aşağıda daha açık olarak gösterilecektir.

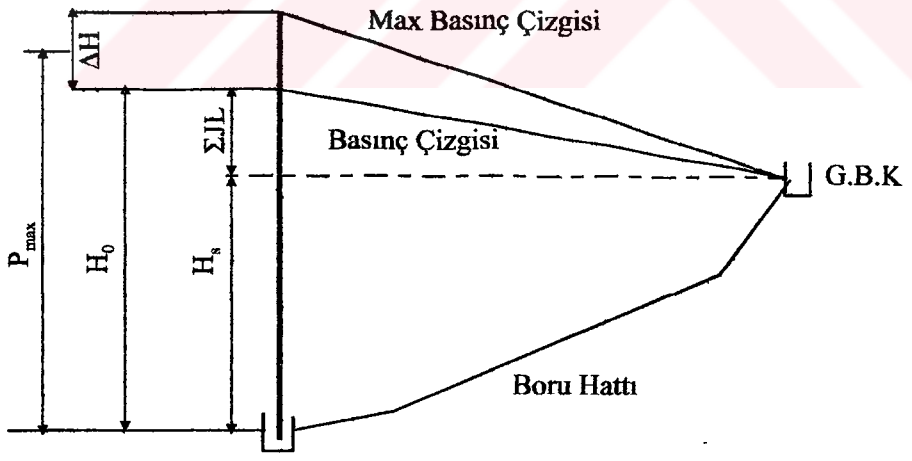
E8.1 Kritik Noktası Bulunmayan Hatlar

İniş ve çıkışları olan bir profilde minimum basınç çizgisinin basma borusunu kestiği noktalar veya minimum basınç çizgisine göre P_{max} 'dan büyük basınçlara maruz kalacak çukur noktalar, kritik nokta olarak adlandırılır.

E8.1.1 Tehlikeli Basınç Yükselmesi Hali (Sürpresyon Hali)

$H_0^* + \Delta H > P_{max}^*$ olması halinde hattın aşırı basınca karşı korunması, yani basınç artmasının sınırlandırılması gerekir.

Bu amaçla kullanılacak hava kazanı hacmi şöyle bulunur:



Şekil E8.2-

1. Kullanılan borunun işletme basıncına P_{max} dersek $P_{max}^* = P_{max}+10$ olur.
$\Delta P_s = P_{max} - H_0^*$ ve buradan $\Delta P_s/H_0^*$ hesaplanır.

2. $2\rho=cV_0/gH_0^* = \Delta H/H^*$ hesaplanır.

3. Hesaplanan 2ρ parametresine ait eğrinin $\Delta P_s/H_0^*$ ordinatlı noktasının apsisi olarak $2C_0c/QL=X$ değeri bulunur.

4. Abaktan $\Delta P_d/H_0^*$ değeri bulunur.

5. $C_0=XQ_b/2c$ hesaplanır ve $C^* = C_0/(1-\Delta P_d/H_0^*)$ bulunur.

Önemli Not: Her K için ayrı yrı C değerleri apsisten okunduğundan (L=0 ve L=L/2 için) en büyüğü alınır. Sonunda tüm K 'lardan C değerleri belli olduktan sonra bunlardan en küçüğü seçilir. Farklı K 'lar için bulunan değerler bir tabloda toplanır. Emniyet bakımından bir sakınca yoksa bulunan C 'lerden en küçüğü seçilir.

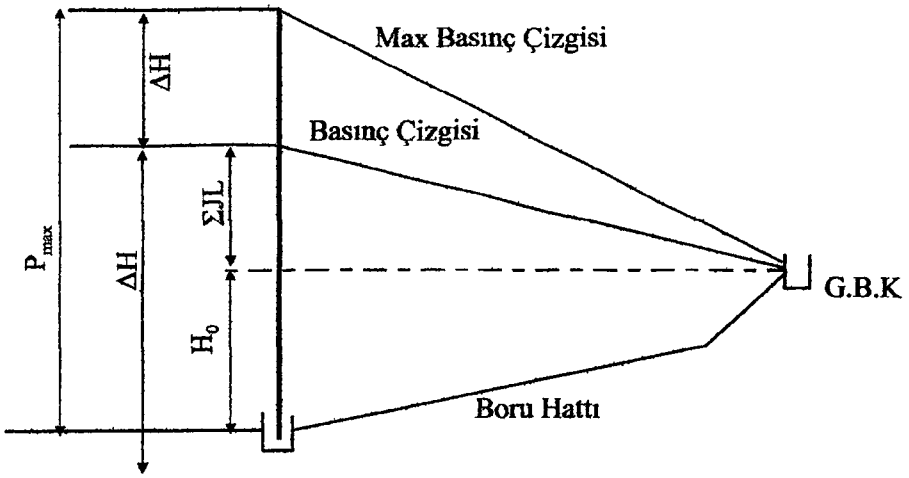
6. Seçilen C* 'ı veren K değerine uygun olan orifis yarıçapı

$$R = [2,5Q_0^2/2g\pi^2(KH_0^*-JL)]^{1/4}$$

ifadesiyle belirlenir.

E8.1.2 Tehlikeli Basınç Alçalması Hali (Depresyon Hali)

$\Delta H \geq H_0^*-6$ olması halinde hattın kavitasyona karşı korunması yani basınç alçalmalarının sınırlandırılması gerekir.



Şekil E8.3-

Bu maksatla kullanılacak hava kazanının hacmi şöyle bulunur:

1. $\Delta P_d = H_0^* - 6$ ve $\Delta P_d/H_0^*$

2. $2\rho = \Delta H/H_0^*$ bulunur.

Bunlardan hareketle abaklardan:

3. $2C_0$ c/QL

4. $\Delta P_d/H_0^*$ bulunur.

5. C_0 çözülür. $C^*=C_0/[1-(\Delta P_d/H_0^*)]$ hesaplanır. C* 'lerin en küçüğü seçilir.

6. Seçilen C* nü veren K değerine uygun olarak orifis yarıçapı

$$R = [2,5Q_0^2/2g\pi^2(KH_0^*-JL)]^{1/4}$$

ifadesinden belirlenir.

E8.1.3 Tehlikeli Basınç Yükselmesi İle Birlikte Tehlikeli Basınç Alçalması (Depresyon ve Sürpresyon Birlikte)

$\Delta H > H_0^*-6$

$H_0^* + \Delta H > P_{max}$ artması halinde hat, hem kavitasyon hem de aşırı basınç bakımından tehlikelidir. Bu maksatla hacmi şöyle bulunur.

1. $\Delta P_s = P_{max} - H_0^*$; $\Delta P_d=H_0^*-6$ ve $\Delta P_s/H_0^*$ ile $\Delta P_d/H_0^*$ bulunur.

2. $2\rho = \Delta H/H_0^*$ bulunur.

3. Her abaktan $\Delta P_s/H_0^*$ ile $\Delta P_d/H_0^*$ den her birine karşılık gelen ($X=2C_0c/QL$) değerlerinden büyüğü ve bunu veren sınır şartı ($\Delta P_s/H_0^*$ veya $\Delta P_d/H_0^*$) esas alınır.

4. $\Delta P_s/H_0^*$ ve $\Delta P_d/H_0^*$'den bir tanesi sınır şartı olarak esas alınmış oldu (E8.1.1) ve (E8.1.2) hallerinde olduğu gibi ($X=2C_0c/QL$) apsisinden geri gidilerek grafikten bulunur.

5. C_0 bulunur. $C^*=C_0/[1-(\Delta P_d/H_0^*)]$
böylece bulunan C* lerden en küçüğü seçilir.

6. Seçilen C* nü veren K değerine uygun olarak orifis yarıçapı:

$$R = [2,5Q_0^2/2g\pi^2(KH_0^*-JL)]^{1/4}$$

ifadesinden belirlenir.

E8.2 Kritik Noktaları Bulunan Hatlar

Bu gibi hallerde hattın başlangıç noktasında $\Delta P_s \leq P_{max} - H_0^*$ ve $\Delta P_d \leq H_0^*-6$ şartları sağlanmış olsa bile kritik noktalarda $\Delta P_s > P_{max}-H_0^*$ veya $\Delta P_d > H_0^*-6$ durumları ile karşılaşılabilir, o takdirde hattın tamamı korunmuş değildir.

Parmakyan abakları hattın başlangıç ve orta noktasındaki sürpresyon ve depresyon değerlerini verdiği için her kritik nokta doğrudan doğruya tahkik edilemez. Ancak kritik noktadaki sınır şartını tahmin edici bir yaklaşımla çıkarmak mümkündür.

Bilindiği gibi maksimum ve minimum basınç eğrileri parabolik eğrilerdir. Bu eğrilerin üçer noktası ancak tespit edilir. Birinci nokta depo girişidir (sabit basınç noktası); ikinci noktayı, hattın orta noktasındaki maksimum (veya minimum) basınç, üçüncü noktayı da hattın başlangıcındaki maksimum (veya minimum) basınç değeri verir. İkinci ve üçüncü noktalara ait değerler Parmakyan abaklarında verilmiştir.

Problemin çözümü için, kritik noktadaki maksimum (veya minimum) basınç değeri tespit edildikten sonra eğrinin parabolik gidişi ve sabit basınç noktası alınarak orta noktada veya başlangıç noktasındaki maksimum (veya minimum) basınç değeri tahmin edilir. Tahmin edilen bu değer esas sınır şartlarından biri olarak alınır ve $2C_0c/QL$ apsisi buna göre abaktan bulunur ve problem bundan önceki hallerdeki gibi çözülür. Sonuçta bulunan ΔP_s ve ΔP_d noktalarından da yararlanılarak eğriler daha sıhhatli olarak çizilip kritik noktadaki basınç durumu kontrol edilir.

Örnek E8.1

Q_0 = 13 lt/sn

V_0 = 0,74 m/sn

D = 150 mm

T = 15 mm et kalınlığı

L = 3700 m

J = 0,003944

JL = 14,60 m

$c = 9900 / \sqrt{[48,3 + 4,4(150/15)]} = 1015$ m/sn

Depo giriş borusu kotu = 578,00 m

Pompa giriş borusu kotu = 518,00 m

$H_0^* - 6 = 87-6 = 81 > \Delta H = 77$ Depresyon yok

$H_0^* + \Delta H = 87+77 = 164 > P_{max}^* = 110$ Sürpresyon var

H_0 = 578,00 - 518,00 + 14,60 + 2,40 = 77,0 m

Burada yersel yük kaybı 2,4 m alınmıştır.

$\Delta H = cV_0/g = (1015.0,74)*9,81 = 77,0$ m

$H_0^* = 77,00 + 10,00 = 87,00$ m ($H_0^* = H_0 + H_{atm}$)

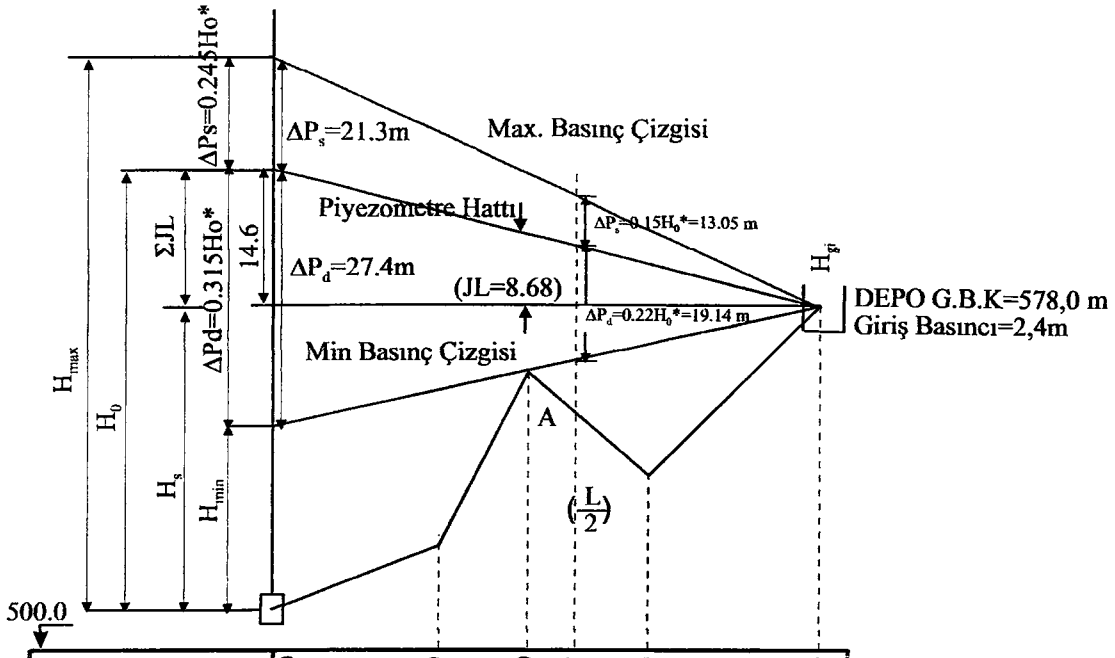
$2\rho = \Delta H/H_0^* = 77/87 = 0,89 \cong 1$

H_0 = 77 m

ΔH = 77 m

H_0^* = 87 m

2ρ = 1


ΔPs=0.245Ho*
ΔPs=21.3m
Max. Basınç Çizgisi
Piyezometre Hattı
ΔPs=0.15Ho*=13.05 m
ΔPd=27.4m
(JL=8.68)
ΔPd=0.315Ho*
14.6
ΣJL
Hgi
DEPO G.B.K=578,0 m
Giriş Basıncı=2,4m
ΔPd=0.22Ho*=19.14 m
Min Basınç Çizgisi
Hmax
H0
Hs
Hmin
A
(L/2)
500.0

| | | |

Sonuç olarak A noktasında müsaade edilebilir basınç alçalması bu noktadaki normal işletme basıncına eşit ve 21,08 m 'dir.

Bu duruma göre A noktası ile depo giriş noktası profilde parabolik bir eğri ile birleştirilip hattın ortasında bu eğri ile Piyezometre eğrisi arasındaki düşey mesafe şekil üzerinde ölçülerek ΔP_d=19 m bulunur. (Takribi olarak çizilen eğrinin gerçekliği elde edilen nihai değerlere göre tahkik edilecektir).

Sınır Şartları

1. $\Delta P_s = P_{max}^* - H_0^* = 110,00 - 87,00 = 23,00$ m

   $\Delta P_s/H_0^* = 23/87 = 0,26$ (Başlangıç noktasında)

2. $\Delta P_d/H_0^* = 19/87 = 0,22$ (Hattın orta noktasında)

Bu iki sınır şartından ikincisinin verdiği $2C_0c/Q_0L$ değeri daha büyük olduğundan esas alınır ve esas alınan $2C_0c/Q_0L$ değerine göre hattın başındaki ve ortasındaki ΔP_s ve ΔP_d değerleri abaklardan alınarak aşağıdaki tabloya işlenir.

Tablo E8.1-

K	L=0 noktasında		L/2 noktasında		$2C_0c/QL$	C_0 (m^3)	C^* (m^3)
	ΔP_d	ΔP_s	ΔP_d	ΔP_s			
0,00	-	-	-	-	-	-	-
0,3	$0,315H_0^*$	$0,245H_0^*$	$0,22H_0^*$	$0,15H_0^*$	11,5	0,272	0,397
0,5	-	-	-	-	-	-	-
0,7	-	-	-	-	-	-	-
0,9	-	$0,26H_0^*$	-	-	5,8	-	-

K = 0; K=0,5 ve K=0,7 abakları $0,22H_0^*$ değeri için çözüm vermez. Tablodan görüldüğü gibi basma hattının başlangıcına $C^*=0,397 \cong 0,4\ m^3$ lük bir hava kazanı monte edilecektir.

Abaklardan bulunarak yukarıdaki tabloya işlenen ΔP_s ve ΔP_d değerleri şematik profile işaretlenir ve böylece depo sabit basınç noktası ile birlikte üçer noktası belirlenen max ve min basınç eğrileri çizilir.

Diferansiyel Orifisin Hesabı

Basınçlı sistemde toplam yük kaybını (hava kazanı basma borusu) $KH_0^*=0,3H_0^*$ kabul etmiş bulunuyoruz bundan dolayı hava kazanının girişine koyacağımız orifisin bu yük kaybını meydana getirecek şekilde hesaplanması gerekir.

$$0,3H_0^* = 0,3.87,00 = 26,10\ m$$

Borudaki yük kaybı 26,10-14,60 = 1150 m olarak bulunur.

Orifisin yarıçapı

$$R = [2,5Q_0^2/2g\pi^2(KH_0^*-JL)]^{1/4}$$

$$R = [3,5.0,013^2/(2.9,81.3,14^2.11,50)]^{1/4} = 0,021\ m$$

Hava kazanının girişine konulacak olan diferansiyel orifiste R=21 mm olacaktır.

Örnek E8.2

Q_0 = 15 lt/sn

V_0 = 0,85 m/sn

D = 150 mm (font boru)

T = 9 mm et kalınlığı

L=1400 m

J = 0,010003

JL = 14,00 m

Depo giriş kotu = 1268,00 m

Motopomp çıkış borusu kotu = 1205,00 m

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + D/T}} = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + 15/9}} = 1238 m/sn$$

$\Delta H = (cV_0)/g = (1238.0{,}85)/9{,}81 = 110{,}7$ m

$H_0 = (1268\text{-}1205)+14{,}00+3 = 80$ m

$H_0^* = H_0 + 10 = 80+10 = 90$ m

$P_{max}^* = 100+10 = 110$ m

$H_0^* - 6 = 90\text{-}6 = 84$ m $< \Delta H = 110{,}7$ m Depresyon var.

$90+110{,}7 = H_0^* + \Delta H > P_{max}^* = 110{,}0$ m Sürpresyon var

1) $\Delta P_s = P_{max}^* - H_0^* = 110{,}00 - 90{,}00 = 20{,}00$ m

$\Delta P_s = 20$ m

$\Delta P_s/H_0^* = 20{,}00 / 90{,}00 = 0{,}22$

$\Delta P_d = H_0^* - 6 = 90\text{-}6 = 84$ m

$\Delta P_d = 84$ m

$\Delta P_d/H_0^* = 84{,}00/90{,}00 = 0{,}93$

2) $2\rho = \Delta H/H_0^* = 110{,}7/90 = 1{,}23$

Bütün grafiklerde ΔP_d=$0{,}93H_0^*$, ΔP_s=$0{,}22H_0^*$ 'ne göre daha küçük $2C_0c/Q_0L$ değerleri verdiği için ΔP_s=$0{,}22H_0^*$ esas alınarak bulunan ΔP_d ve $2C_0c/Q_0L$ değerleri aşağıdaki tabloya yazılmıştır.

$\Delta P_d = 0{,}93H_0^*$

$\Delta P_s = 0{,}22H_0^*$

$2\rho = 1{,}23$

Tablo E8.2-

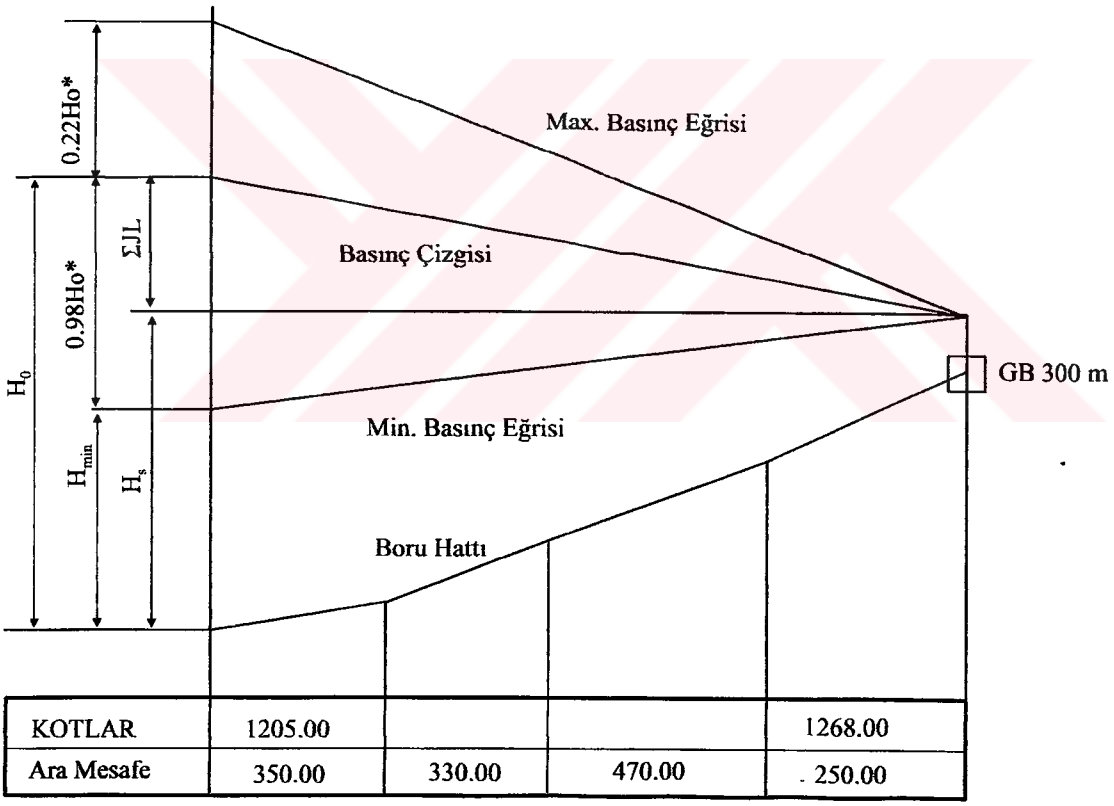
K	L=0 noktasında		$2C_0c/QL$	C_0 (m^3)	C* (m^3)
	ΔP_d	ΔP_s			
0,00	-	-	-	-	-
0,3	$0{,}30H_0^*$	$0{,}22H_0^*$	15	0,127	0,181
0,5	$0{,}35H_0^*$	$0{,}22H_0^*$	11	0,093	0,143
0,7	$0{,}39H_0^*$	$0{,}22H_0^*$	9	0,076	0,125

Tablodan görüldüğü üzere, basma hattı başlangıcına konulacak en uygun hava kazanının hacmi 0,7 abağının verdiği değer olduğundan;

$C^* = C_0/[1-(\Delta P_d/H_0^*)]$

$C^* = 0{,}076/(1-0{,}39) = 0{,}125\ m^3$

bulunur.



Şekil E8.5-

Diferansiyel Orifisin Hesabı

Toplam yük kaybı = $K.H_0^* = 0,7.90,00 = 63,00$ m

Borudaki yük kaybı = JL = 14,00 m

Orifisteki yük kaybı = 63,00 - 14,00 = 49,00 m

$R = [2,5Q_0^2/2g\pi^2(KH_0^*-JL)]^{1/4}$

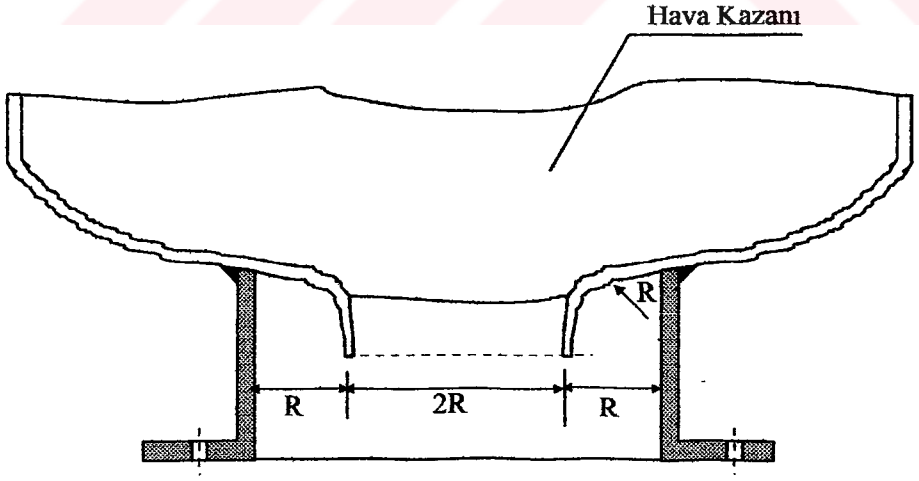
$R = (2,5.0,015^2/2.9,81.3,14^2.49)]^{1/4}$

R = 0,016 m

Hava kazanı girişine konulacak diferansiyel orifiste R = 16 mm olacaktır.

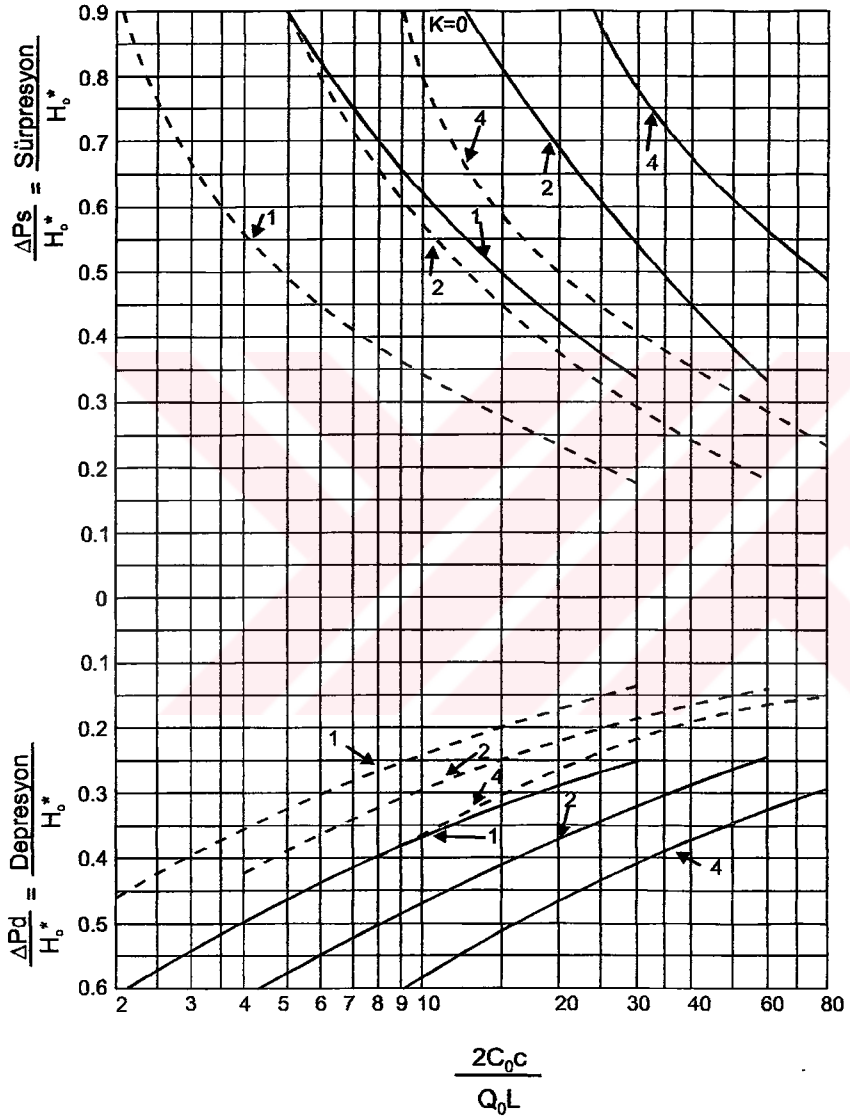
Dinamik basınç dalgalanmalarının amortisman süresini kısaltmak (sönümlülüğünü kuvvetlendirmek) için hava kazanı ile hat arasında konan diferansiyel orifisin, hava haznesinden çıkışta meydana getireceği girişte meydana getireceği kayba oranı 1/2,5 kabul edildiğini ve abakların buna göre tanzim edilmiş olduğunu başlangıçta söylemiştik.

1/ 2,5 'luk orifisn şekli aşağıda gösterilmiştir.

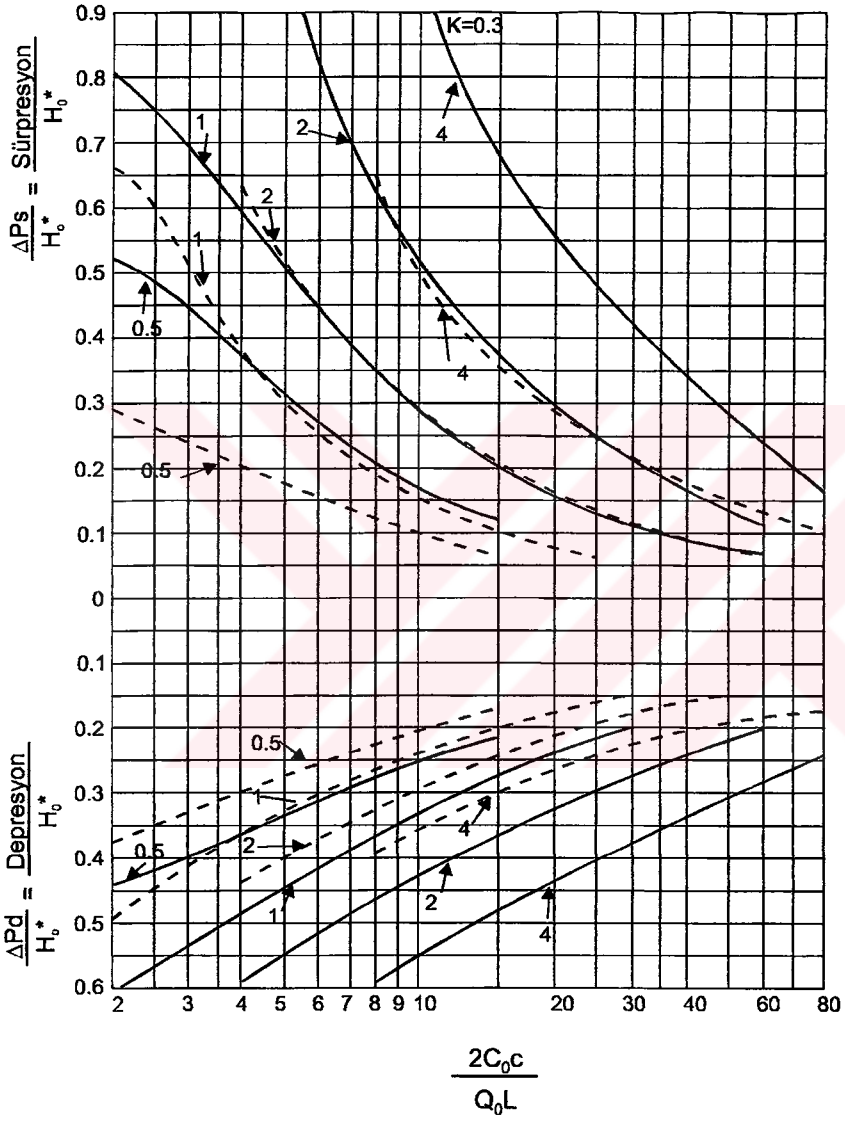


Şekil E8.6-

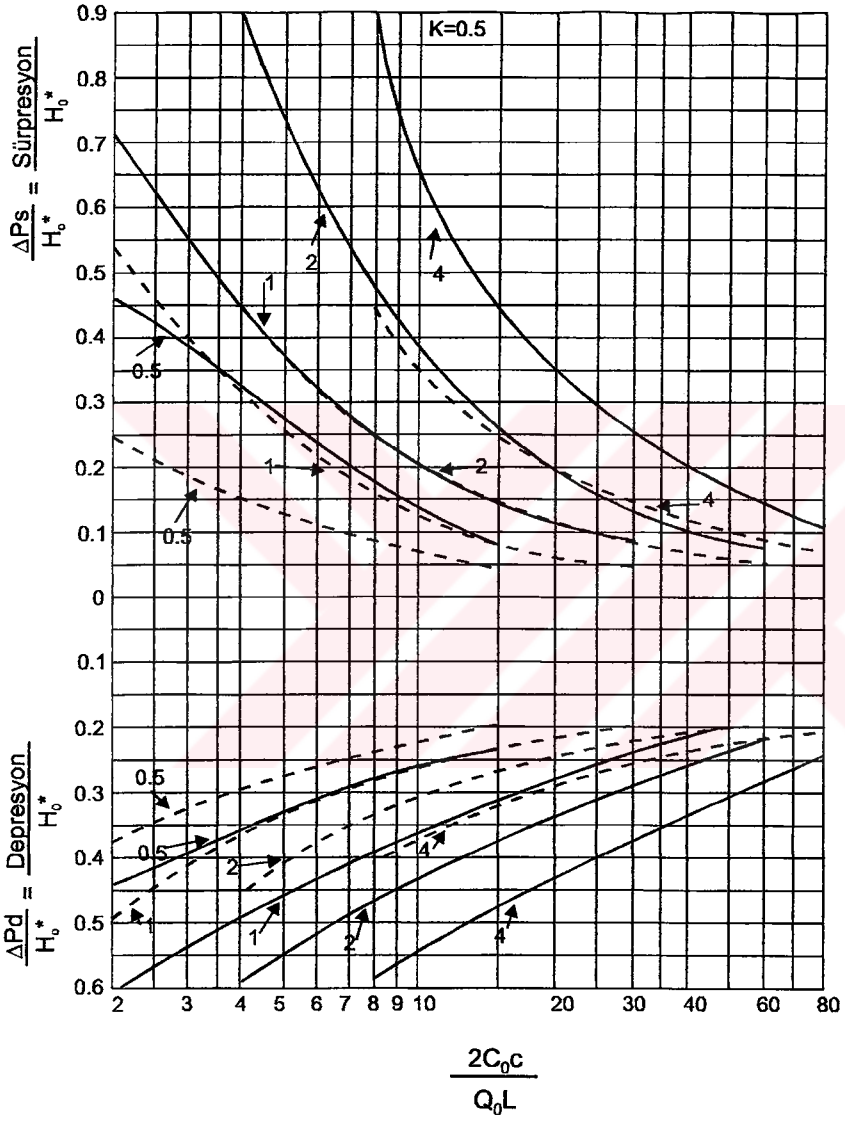
Parmakyan Abakları



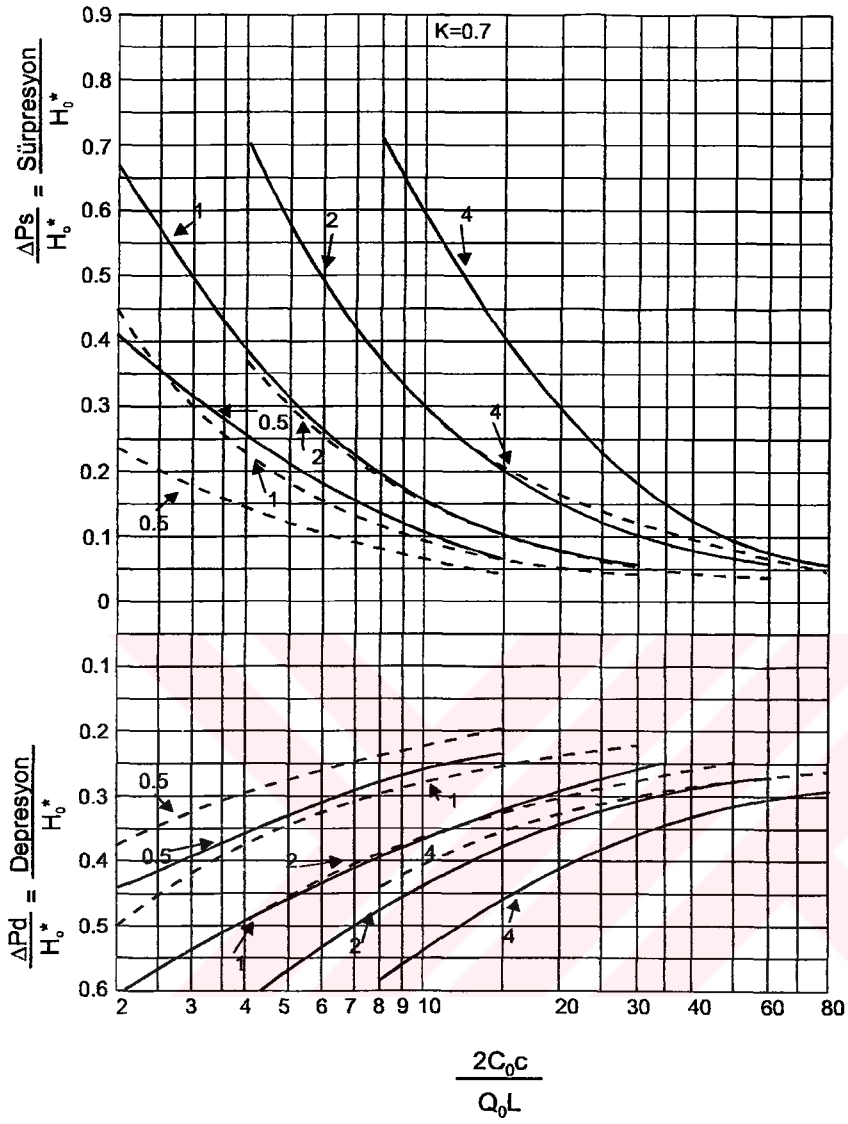
Parmakyan Abakları



Parmakyan Abakları



Parmakyan Abakları



EK.9

UYGULAMA 1.3'E AİT
PROGRAM ÇIKTILARI

```
 GİRİŞ PARAMETRELERI
 N=,         3
 TC=      5.00
 TMAX=     10.00
 HR=    200.00
 HATM=     10.00
 BORU NO. 1
 A=   782.70 L=   385.30 D=2040.0 F=0.0100 VO=  2.08 SINA=-0.0780000 PBEL=   130.0

 BORU NO. 2
 A=   782.70 L=   192.40 D=2040.0 F=0.0100 VO=  2.08 SINA= 0.1040000 PBEL=   100.0

 BORU BOYUNCA YUKLER VE HIZLAR



 ZAMAN=  0.000

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.67  YUK=  90.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.83  YUK=  95.  H= 200.  V=  2.08
 X=1.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  2.08
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.33  YUK=  93.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.67  YUK=  86.  H= 199.  V=  2.08
 X=1.00  YUK=  79.  H= 199.  V=  2.08



 ZAMAN=  0.164

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.67  YUK=  90.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.83  YUK=  95.  H= 200.  V=  2.08
 X=1.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  2.08
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.33  YUK=  93.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.67  YUK=  89.  H= 202.  V=  2.05
 X=1.00  YUK=  85.  H= 205.  V=  2.01
```

```
 ZAMAN=  0.328

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.67  YUK=  90.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.83  YUK=  95.  H= 200.  V=  2.08
 X=1.00  YUK= 102.  H= 202.  V=  2.05
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 102.  H= 202.  V=  2.05
 X=0.33  YUK=  98.  H= 205.  V=  2.01
 X=0.67  YUK=  94.  H= 208.  V=  1.98
 X=1.00  YUK=  90.  H= 210.  V=  1.94


 ZAMAN=  0.492

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.67  YUK=  92.  H= 202.  V=  2.05
 X=0.83  YUK= 100.  H= 205.  V=  2.01
 X=1.00  YUK= 108.  H= 208.  V=  1.98
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 108.  H= 208.  V=  1.98
 X=0.33  YUK= 104.  H= 210.  V=  1.94
 X=0.67  YUK= 100.  H= 213.  V=  1.91
 X=1.00  YUK=  96.  H= 216.  V=  1.88


 ZAMAN=  0.656

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  2.08
 X=0.33  YUK=  83.  H= 203.  V=  2.05
 X=0.50  YUK=  90.  H= 205.  V=  2.01
 X=0.67  YUK=  98.  H= 208.  V=  1.98
 X=0.83  YUK= 106.  H= 211.  V=  1.94
 X=1.00  YUK= 113.  H= 213.  V=  1.91
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 113.  H= 213.  V=  1.91
 X=0.33  YUK= 109.  H= 216.  V=  1.87
 X=0.67  YUK= 105.  H= 218.  V=  1.84
 X=1.00  YUK= 101.  H= 221.  V=  1.81
```

ZAMAN= 0.819

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 2.01
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 2.01
X=0.33 YUK= 88. H= 208. V= 1.98
X=0.50 YUK= 96. H= 211. V= 1.94
X=0.67 YUK= 103. H= 213. V= 1.91
X=0.83 YUK= 111. H= 216. V= 1.88
X=1.00 YUK= 119. H= 219. V= 1.84
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 119. H= 219. V= 1.84
X=0.33 YUK= 115. H= 221. V= 1.81
X=0.67 YUK= 111. H= 224. V= 1.77
X=1.00 YUK= 107. H= 227. V= 1.74

ZAMAN= 0.983

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 1.88
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 1.88
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 1.88
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 1.88
X=0.67 YUK= 109. H= 219. V= 1.84
X=0.83 YUK= 116. H= 221. V= 1.81
X=1.00 YUK= 124. H= 224. V= 1.77
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 124. H= 224. V= 1.77
X=0.33 YUK= 120. H= 227. V= 1.74
X=0.67 YUK= 116. H= 229. V= 1.71
X=1.00 YUK= 112. H= 232. V= 1.67

ZAMAN= 1.147

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 1.74
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 1.74
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 1.74
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 1.74
X=0.67 YUK= 111. H= 221. V= 1.74
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 1.74
X=1.00 YUK= 130. H= 230. V= 1.71
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 130. H= 230. V= 1.71
X=0.33 YUK= 126. H= 232. V= 1.67
X=0.67 YUK= 122. H= 235. V= 1.64
X=1.00 YUK= 118. H= 238. V= 1.60

ZAMAN= 1.311

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 1.60
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 1.60
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 1.60
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 1.60
X=0.67 YUK= 112. H= 221. V= 1.60
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 1.60
X=1.00 YUK= 132. H= 232. V= 1.60
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 132. H= 232. V= 1.60
X=0.33 YUK= 131. H= 238. V= 1.60
X=0.67 YUK= 127. H= 240. V= 1.57
X=1.00 YUK= 123. H= 243. V= 1.53

ZAMAN= 1.475

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 1.47
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 1.47
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 1.47
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 1.47
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= 1.47
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 1.47
X=1.00 YUK= 132. H= 232. V= 1.47
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 132. H= 232. V= 1.47
X=0.33 YUK= 131. H= 238. V= 1.47
X=0.67 YUK= 130. H= 243. V= 1.47
X=1.00 YUK= 128. H= 248. V= 1.47

ZAMAN= 1.639

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 1.33
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 1.33
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 1.33
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 1.33
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= 1.33
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 1.33
X=1.00 YUK= 132. H= 232. V= 1.33
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 132. H= 232. V= 1.33
X=0.33 YUK= 131. H= 238. V= 1.33
X=0.67 YUK= 127. H= 240. V= 1.36
X=1.00 YUK= 123. H= 243. V= 1.40

ZAMAN= 1.803

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 1.20
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 1.20
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 1.20
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 1.20
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= 1.20
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 1.20
X=1.00 YUK= 130. H= 230. V= 1.23
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 130. H= 230. V= 1.23
X=0.33 YUK= 126. H= 232. V= 1.26
X=0.67 YUK= 122. H= 235. V= 1.30
X=1.00 YUK= 118. H= 238. V= 1.33

ZAMAN= 1.967

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 1.06
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 1.06
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 1.06
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 1.06
X=0.67 YUK= 109. H= 219. V= 1.09
X=0.83 YUK= 117. H= 222. V= 1.13
X=1.00 YUK= 124. H= 224. V= 1.16
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 124. H= 224. V= 1.16
X=0.33 YUK= 120. H= 227. V= 1.19
X=0.67 YUK= 116. H= 230. V= 1.23
X=1.00 YUK= 112. H= 232. V= 1.26

ZAMAN= 2.130

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.92
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 0.92
X=0.33 YUK= 88. H= 208. V= 0.96
X=0.50 YUK= 96. H= 211. V= 0.99
X=0.67 YUK= 104. H= 214. V= 1.03
X=0.83 YUK= 111. H= 216. V= 1.06
X=1.00 YUK= 119. H= 219. V= 1.09
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 119. H= 219. V= 1.09
X=0.33 YUK= 115. H= 222. V= 1.13
X=0.67 YUK= 111. H= 224. V= 1.16
X=1.00 YUK= 107. H= 227. V= 1.19

ZAMAN= 2.294

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.86
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.86
X=0.33 YUK= 83. H= 203. V= 0.89
X=0.50 YUK= 90. H= 205. V= 0.92
X=0.67 YUK= 98. H= 208. V= 0.96
X=0.83 YUK= 106. H= 211. V= 0.99
X=1.00 YUK= 114. H= 214. V= 1.02
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 114. H= 214. V= 1.02
X=0.33 YUK= 110. H= 216. V= 1.06
X=0.67 YUK= 106. H= 219. V= 1.09
X=1.00 YUK= 102. H= 222. V= 1.13

ZAMAN= 2.458

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.86
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.86
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= 0.86
X=0.50 YUK= 85. H= 200. V= 0.85
X=0.67 YUK= 93. H= 203. V= 0.89
X=0.83 YUK= 101. H= 206. V= 0.92
X=1.00 YUK= 108. H= 208. V= 0.96
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 108. H= 208. V= 0.96
X=0.33 YUK= 104. H= 211. V= 0.99
X=0.67 YUK= 100. H= 214. V= 1.02
X=1.00 YUK= 96. H= 216. V= 1.06

ZAMAN= 2.622

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.85
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.85
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= 0.85
X=0.50 YUK= 85. H= 200. V= 0.85
X=0.67 YUK= 90. H= 200. V= 0.85
X=0.83 YUK= 95. H= 200. V= 0.85
X=1.00 YUK= 103. H= 203. V= 0.89
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 103. H= 203. V= 0.89
X=0.33 YUK= 99. H= 206. V= 0.92
X=0.67 YUK= 95. H= 208. V= 0.96
X=1.00 YUK= 91. H= 211. V= 0.99

```
 ZAMAN=  2.786

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.67  YUK=  90.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.83  YUK=  95.  H= 200.  V=  0.85
 X=1.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  0.85
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.33  YUK=  93.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.67  YUK=  90.  H= 203.  V=  0.89
 X=1.00  YUK=  86.  H= 206.  V=  0.92


 ZAMAN=  2.950

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.67  YUK=  90.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.83  YUK=  95.  H= 200.  V=  0.85
 X=1.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  0.85
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.33  YUK=  93.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.67  YUK=  87.  H= 200.  V=  0.85
 X=1.00  YUK=  80.  H= 200.  V=  0.85


 ZAMAN=  3.114

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.67  YUK=  90.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.83  YUK=  95.  H= 200.  V=  0.85
 X=1.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  0.85
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 100.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.33  YUK=  93.  H= 200.  V=  0.85
 X=0.67  YUK=  90.  H= 203.  V=  0.82
 X=1.00  YUK=  86.  H= 206.  V=  0.78
```

ZAMAN= 3.278

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.85
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.85
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= 0.85
X=0.50 YUK= 85. H= 200. V= 0.85
X=0.67 YUK= 90. H= 200. V= 0.85
X=0.83 YUK= 95. H= 200. V= 0.85
X=1.00 YUK= 103. H= 203. V= 0.82
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 103. H= 203. V= 0.82
X=0.33 YUK= 99. H= 205. V= 0.78
X=0.67 YUK= 95. H= 208. V= 0.75
X=1.00 YUK= 91. H= 211. V= 0.72

ZAMAN= 3.441

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.85
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.85
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= 0.85
X=0.50 YUK= 85. H= 200. V= 0.85
X=0.67 YUK= 93. H= 203. V= 0.82
X=0.83 YUK= 100. H= 205. V= 0.78
X=1.00 YUK= 108. H= 208. V= 0.75
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 108. H= 208. V= 0.75
X=0.33 YUK= 104. H= 211. V= 0.72
X=0.67 YUK= 100. H= 214. V= 0.68
X=1.00 YUK= 96. H= 216. V= 0.65

ZAMAN= 3.605

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.85
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.85
X=0.33 YUK= 83. H= 203. V= 0.82
X=0.50 YUK= 90. H= 205. V= 0.78
X=0.67 YUK= 98. H= 208. V= 0.75
X=0.83 YUK= 106. H= 211. V= 0.71
X=1.00 YUK= 114. H= 213. V= 0.68
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 113. H= 213. V= 0.68
X=0.33 YUK= 110. H= 216. V= 0.65
X=0.67 YUK= 106. H= 219. V= 0.61
X=1.00 YUK= 102. H= 222. V= 0.58

```
 ZAMAN=  3.769

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.78
 X=0.17  YUK=  80.  H= 205.  V=  0.78
 X=0.33  YUK=  88.  H= 208.  V=  0.75
 X=0.50  YUK=  96.  H= 211.  V=  0.71
 X=0.67  YUK= 104.  H= 213.  V=  0.68
 X=0.83  YUK= 111.  H= 216.  V=  0.65
 X=1.00  YUK= 119.  H= 219.  V=  0.61
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 119.  H= 219.  V=  0.61
 X=0.33  YUK= 115.  H= 222.  V=  0.58
 X=0.67  YUK= 111.  H= 224.  V=  0.55
 X=1.00  YUK= 107.  H= 227.  V=  0.51


 ZAMAN=  3.933

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.65
 X=0.17  YUK=  80.  H= 205.  V=  0.65
 X=0.33  YUK=  91.  H= 211.  V=  0.65
 X=0.50  YUK= 101.  H= 216.  V=  0.65
 X=0.67  YUK= 109.  H= 219.  V=  0.61
 X=0.83  YUK= 117.  H= 222.  V=  0.58
 X=1.00  YUK= 124.  H= 224.  V=  0.55
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 124.  H= 224.  V=  0.55
 X=0.33  YUK= 120.  H= 227.  V=  0.51
 X=0.67  YUK= 116.  H= 230.  V=  0.48
 X=1.00  YUK= 112.  H= 232.  V=  0.44


 ZAMAN=  4.097

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.51
 X=0.17  YUK=  80.  H= 205.  V=  0.51
 X=0.33  YUK=  91.  H= 211.  V=  0.51
 X=0.50  YUK= 101.  H= 216.  V=  0.51
 X=0.67  YUK= 112.  H= 222.  V=  0.51
 X=0.83  YUK= 122.  H= 227.  V=  0.51
 X=1.00  YUK= 130.  H= 230.  V=  0.48
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 130.  H= 230.  V=  0.48
 X=0.33  YUK= 126.  H= 232.  V=  0.44
 X=0.67  YUK= 122.  H= 235.  V=  0.41
 X=1.00  YUK= 118.  H= 238.  V=  0.38
```

ZAMAN= 4.261

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.38
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 0.38
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 0.38
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 0.38
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= 0.38
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 0.38
X=1.00 YUK= 132. H= 232. V= 0.38
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 132. H= 232. V= 0.38
X=0.33 YUK= 131. H= 238. V= 0.38
X=0.67 YUK= 127. H= 241. V= 0.34
X=1.00 YUK= 123. H= 243. V= 0.31

ZAMAN= 4.425

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.24
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 0.24
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 0.24
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 0.24
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= 0.24
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 0.24
X=1.00 YUK= 132. H= 232. V= 0.24
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 132. H= 232. V= 0.24
X=0.33 YUK= 131. H= 238. V= 0.24
X=0.67 YUK= 130. H= 243. V= 0.24
X=1.00 YUK= 129. H= 249. V= 0.24

ZAMAN= 4.589

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.11
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 0.11
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 0.11
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 0.11
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= 0.11
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= 0.10
X=1.00 YUK= 133. H= 232. V= 0.10
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 132. H= 232. V= 0.10
X=0.33 YUK= 131. H= 238. V= 0.10
X=0.67 YUK= 127. H= 241. V= 0.14
X=1.00 YUK= 123. H= 243. V= 0.17

```
 ZAMAN=  4.752

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V= -0.03
 X=0.17  YUK=  80.  H= 205.  V= -0.03
 X=0.33  YUK=  91.  H= 211.  V= -0.03
 X=0.50  YUK= 101.  H= 216.  V= -0.03
 X=0.67  YUK= 112.  H= 222.  V= -0.03
 X=0.83  YUK= 122.  H= 227.  V= -0.03
 X=1.00  YUK= 130.  H= 230.  V=  0.00
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 130.  H= 230.  V=  0.00
 X=0.33  YUK= 126.  H= 233.  V=  0.04
 X=0.67  YUK= 122.  H= 235.  V=  0.07
 X=1.00  YUK= 118.  H= 238.  V=  0.10


 ZAMAN=  4.916

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V= -0.17
 X=0.17  YUK=  80.  H= 205.  V= -0.17
 X=0.33  YUK=  91.  H= 211.  V= -0.17
 X=0.50  YUK= 101.  H= 216.  V= -0.17
 X=0.67  YUK= 109.  H= 219.  V= -0.13
 X=0.83  YUK= 117.  H= 222.  V= -0.10
 X=1.00  YUK= 125.  H= 224.  V= -0.07
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 124.  H= 224.  V= -0.07
 X=0.33  YUK= 121.  H= 227.  V= -0.03
 X=0.67  YUK= 117.  H= 230.  V=  0.00
 X=1.00  YUK= 113.  H= 233.  V=  0.03


 ZAMAN=  5.080

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V= -0.30
 X=0.17  YUK=  80.  H= 205.  V= -0.30
 X=0.33  YUK=  88.  H= 208.  V= -0.27
 X=0.50  YUK=  96.  H= 211.  V= -0.23
 X=0.67  YUK= 104.  H= 214.  V= -0.20
 X=0.83  YUK= 111.  H= 216.  V= -0.17
 X=1.00  YUK= 119.  H= 219.  V= -0.13
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 119.  H= 219.  V= -0.13
 X=0.33  YUK= 115.  H= 222.  V= -0.10
 X=0.67  YUK= 111.  H= 225.  V= -0.07
 X=1.00  YUK= 105.  H= 225.  V=  0.00
```

ZAMAN= 5.244

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= -0.37
X=0.33 YUK= 83. H= 203. V= -0.34
X=0.50 YUK= 91. H= 206. V= -0.30
X=0.67 YUK= 98. H= 208. V= -0.27
X=0.83 YUK= 106. H= 211. V= -0.24
X=1.00 YUK= 114. H= 214. V= -0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 114. H= 214. V= -0.20
X=0.33 YUK= 107. H= 214. V= -0.14
X=0.67 YUK= 101. H= 214. V= -0.07
X=1.00 YUK= 94. H= 214. V= 0.00

ZAMAN= 5.408

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= -0.37
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= -0.37
X=0.50 YUK= 85. H= 200. V= -0.37
X=0.67 YUK= 93. H= 203. V= -0.34
X=0.83 YUK= 98. H= 203. V= -0.27
X=1.00 YUK= 103. H= 203. V= -0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 103. H= 203. V= -0.20
X=0.33 YUK= 96. H= 203. V= -0.14
X=0.67 YUK= 90. H= 203. V= -0.07
X=1.00 YUK= 83. H= 203. V= 0.00

ZAMAN= 5.572

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= -0.37
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= -0.37
X=0.50 YUK= 83. H= 198. V= -0.34
X=0.67 YUK= 85. H= 195. V= -0.31
X=0.83 YUK= 87. H= 192. V= -0.27
X=1.00 YUK= 92. H= 192. V= -0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 92. H= 192. V= -0.20
X=0.33 YUK= 85. H= 192. V= -0.14
X=0.67 YUK= 79. H= 192. V= -0.07
X=1.00 YUK= 72. H= 192. V= 0.00

ZAMAN= 5.736

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 72. H= 197. V= -0.34
X=0.33 YUK= 75. H= 195. V= -0.31
X=0.50 YUK= 77. H= 192. V= -0.27
X=0.67 YUK= 79. H= 189. V= -0.24
X=0.83 YUK= 82. H= 187. V= -0.20
X=1.00 YUK= 84. H= 184. V= -0.17
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 84. H= 184. V= -0.17
X=0.33 YUK= 75. H= 181. V= -0.14
X=0.67 YUK= 68. H= 181. V= -0.07
X=1.00 YUK= 61. H= 181. V= 0.00

ZAMAN= 5.900

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.24
X=0.17 YUK= 70. H= 195. V= -0.24
X=0.33 YUK= 69. H= 189. V= -0.24
X=0.50 YUK= 72. H= 187. V= -0.21
X=0.67 YUK= 74. H= 184. V= -0.17
X=0.83 YUK= 76. H= 181. V= -0.14
X=1.00 YUK= 79. H= 179. V= -0.10
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 79. H= 179. V= -0.10
X=0.33 YUK= 69. H= 176. V= -0.07
X=0.67 YUK= 60. H= 173. V= -0.03
X=1.00 YUK= 50. H= 170. V= 0.00

ZAMAN= 6.063

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.11
X=0.17 YUK= 70. H= 195. V= -0.11
X=0.33 YUK= 69. H= 189. V= -0.11
X=0.50 YUK= 69. H= 184. V= -0.11
X=0.67 YUK= 68. H= 178. V= -0.10
X=0.83 YUK= 71. H= 176. V= -0.07
X=1.00 YUK= 73. H= 173. V= -0.04
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 73. H= 173. V= -0.04
X=0.33 YUK= 64. H= 170. V= 0.00
X=0.67 YUK= 57. H= 170. V= 0.00
X=1.00 YUK= 50. H= 170. V= 0.00

```
 ZAMAN=  6.227

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.03
 X=0.17  YUK=  70.  H= 195.  V=  0.03
 X=0.33  YUK=  69.  H= 189.  V=  0.03
 X=0.50  YUK=  69.  H= 184.  V=  0.03
 X=0.67  YUK=  68.  H= 178.  V=  0.03
 X=0.83  YUK=  68.  H= 173.  V=  0.03
 X=1.00  YUK=  70.  H= 170.  V=  0.00
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  70.  H= 170.  V=  0.00
 X=0.33  YUK=  64.  H= 170.  V=  0.00
 X=0.67  YUK=  57.  H= 170.  V=  0.00
 X=1.00  YUK=  50.  H= 170.  V=  0.00


 ZAMAN=  6.391

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.17
 X=0.17  YUK=  70.  H= 195.  V=  0.17
 X=0.33  YUK=  69.  H= 189.  V=  0.17
 X=0.50  YUK=  69.  H= 184.  V=  0.17
 X=0.67  YUK=  71.  H= 181.  V=  0.13
 X=0.83  YUK=  73.  H= 178.  V=  0.10
 X=1.00  YUK=  76.  H= 176.  V=  0.07
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  76.  H= 176.  V=  0.07
 X=0.33  YUK=  66.  H= 173.  V=  0.03
 X=0.67  YUK=  57.  H= 170.  V=  0.00
 X=1.00  YUK=  50.  H= 170.  V=  0.00


 ZAMAN=  6.555

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.30
 X=0.17  YUK=  70.  H= 195.  V=  0.30
 X=0.33  YUK=  72.  H= 192.  V=  0.27
 X=0.50  YUK=  74.  H= 189.  V=  0.23
 X=0.67  YUK=  76.  H= 186.  V=  0.20
 X=0.83  YUK=  79.  H= 184.  V=  0.17
 X=1.00  YUK=  81.  H= 181.  V=  0.13
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  81.  H= 181.  V=  0.13
 X=0.33  YUK=  71.  H= 178.  V=  0.10
 X=0.67  YUK=  62.  H= 175.  V=  0.07
 X=1.00  YUK=  55.  H= 175.  V=  0.00
```

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ZAMAN= 6.719

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.37
X=0.33 YUK= 77. H= 197. V= 0.34
X=0.50 YUK= 80. H= 194. V= 0.30
X=0.67 YUK= 82. H= 192. V= 0.27
X=0.83 YUK= 84. H= 189. V= 0.24
X=1.00 YUK= 86. H= 186. V= 0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 86. H= 186. V= 0.20
X=0.33 YUK= 79. H= 186. V= 0.14
X=0.67 YUK= 73. H= 186. V= 0.07
X=1.00 YUK= 66. H= 186. V= 0.00

ZAMAN= 6.883

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.37
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= 0.37
X=0.50 YUK= 85. H= 200. V= 0.37
X=0.67 YUK= 87. H= 197. V= 0.34
X=0.83 YUK= 92. H= 197. V= 0.27
X=1.00 YUK= 97. H= 197. V= 0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 97. H= 197. V= 0.20
X=0.33 YUK= 90. H= 197. V= 0.14
X=0.67 YUK= 84. H= 197. V= 0.07
X=1.00 YUK= 77. H= 197. V= 0.00

ZAMAN= 7.047

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= 0.37
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= 0.37
X=0.50 YUK= 87. H= 202. V= 0.34
X=0.67 YUK= 95. H= 205. V= 0.31
X=0.83 YUK= 103. H= 208. V= 0.27
X=1.00 YUK= 108. H= 208. V= 0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 108. H= 208. V= 0.20
X=0.33 YUK= 101. H= 208. V= 0.14
X=0.67 YUK= 94. H= 208. V= 0.07
X=1.00 YUK= 88. H= 208. V= 0.00

ZAMAN= 7.211

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.37
X=0.17 YUK= 78. H= 203. V= 0.34
X=0.33 YUK= 85. H= 205. V= 0.31
X=0.50 YUK= 93. H= 208. V= 0.27
X=0.67 YUK= 101. H= 211. V= 0.24
X=0.83 YUK= 108. H= 213. V= 0.20
X=1.00 YUK= 116. H= 216. V= 0.17
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 116. H= 216. V= 0.17
X=0.33 YUK= 112. H= 219. V= 0.14
X=0.67 YUK= 105. H= 219. V= 0.07
X=1.00 YUK= 99. H= 219. V= 0.00

ZAMAN= 7.374

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.24
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 0.24
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 0.24
X=0.50 YUK= 98. H= 213. V= 0.21
X=0.67 YUK= 106. H= 216. V= 0.17
X=0.83 YUK= 114. H= 219. V= 0.14
X=1.00 YUK= 121. H= 221. V= 0.10
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 121. H= 221. V= 0.10
X=0.33 YUK= 117. H= 224. V= 0.07
X=0.67 YUK= 113. H= 227. V= 0.03
X=1.00 YUK= 109. H= 229. V= 0.00

ZAMAN= 7.538

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= 0.11
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= 0.11
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= 0.11
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= 0.11
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= 0.10
X=0.83 YUK= 119. H= 224. V= 0.07
X=1.00 YUK= 127. H= 227. V= 0.04
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 127. H= 227. V= 0.04
X=0.33 YUK= 123. H= 230. V= 0.00
X=0.67 YUK= 116. H= 230. V= 0.00
X=1.00 YUK= 110. H= 230. V= 0.00

ZAMAN= 7.702

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.03
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= -0.03
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= -0.03
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= -0.03
X=0.67 YUK= 112. H= 222. V= -0.03
X=0.83 YUK= 122. H= 227. V= -0.03
X=1.00 YUK= 130. H= 230. V= 0.00
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 130. H= 230. V= 0.00
X=0.33 YUK= 123. H= 230. V= 0.00
X=0.67 YUK= 116. H= 230. V= 0.00
X=1.00 YUK= 110. H= 230. V= 0.00

ZAMAN= 7.866

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.17
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= -0.17
X=0.33 YUK= 91. H= 211. V= -0.17
X=0.50 YUK= 101. H= 216. V= -0.17
X=0.67 YUK= 109. H= 219. V= -0.13
X=0.83 YUK= 117. H= 222. V= -0.10
X=1.00 YUK= 124. H= 224. V= -0.06
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 124. H= 224. V= -0.06
X=0.33 YUK= 120. H= 227. V= -0.03
X=0.67 YUK= 116. H= 230. V= 0.00
X=1.00 YUK= 110. H= 230. V= 0.00

ZAMAN= 8.030

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.30
X=0.17 YUK= 80. H= 205. V= -0.30
X=0.33 YUK= 88. H= 208. V= -0.27
X=0.50 YUK= 96. H= 211. V= -0.23
X=0.67 YUK= 104. H= 214. V= -0.20
X=0.83 YUK= 111. H= 216. V= -0.17
X=1.00 YUK= 119. H= 219. V= -0.13
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 119. H= 219. V= -0.13
X=0.33 YUK= 115. H= 222. V= -0.10
X=0.67 YUK= 111. H= 225. V= -0.07
X=1.00 YUK= 105. H= 225. V= 0.00

ZAMAN= 8.194

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= -0.37
X=0.33 YUK= 83. H= 203. V= -0.34
X=0.50 YUK= 91. H= 206. V= -0.30
X=0.67 YUK= 98. H= 208. V= -0.27
X=0.83 YUK= 106. H= 211. V= -0.24
X=1.00 YUK= 114. H= 214. V= -0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 114. H= 214. V= -0.20
X=0.33 YUK= 107. H= 214. V= -0.14
X=0.67 YUK= 101. H= 214. V= -0.07
X=1.00 YUK= 94. H= 214. V= 0.00

ZAMAN= 8.358

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= -0.37
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= -0.37
X=0.50 YUK= 85. H= 200. V= -0.37
X=0.67 YUK= 93. H= 203. V= -0.34
X=0.83 YUK= 98. H= 203. V= -0.27
X=1.00 YUK= 103. H= 203. V= -0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 103. H= 203. V= -0.20
X=0.33 YUK= 96. H= 203. V= -0.14
X=0.67 YUK= 90. H= 203. V= -0.07
X=1.00 YUK= 83. H= 203. V= 0.00

ZAMAN= 8.522

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 75. H= 200. V= -0.37
X=0.33 YUK= 80. H= 200. V= -0.37
X=0.50 YUK= 83. H= 198. V= -0.34
X=0.67 YUK= 85. H= 195. V= -0.31
X=0.83 YUK= 87. H= 192. V= -0.27
X=1.00 YUK= 92. H= 192. V= -0.20
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 92. H= 192. V= -0.20
X=0.33 YUK= 86. H= 192. V= -0.14
X=0.67 YUK= 79. H= 192. V= -0.07
X=1.00 YUK= 72. H= 192. V= 0.00

ZAMAN= 8.685

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.37
X=0.17 YUK= 72. H= 197. V= -0.34
X=0.33 YUK= 75. H= 195. V= -0.31
X=0.50 YUK= 77. H= 192. V= -0.27
X=0.67 YUK= 79. H= 189. V= -0.24
X=0.83 YUK= 82. H= 187. V= -0.20
X=1.00 YUK= 84. H= 184. V= -0.17
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 84. H= 184. V= -0.17
X=0.33 YUK= 75. H= 181. V= -0.14
X=0.67 YUK= 68. H= 181. V= -0.07
X=1.00 YUK= 61. H= 181. V= 0.00

ZAMAN= 8.849

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.24
X=0.17 YUK= 70. H= 195. V= -0.24
X=0.33 YUK= 69. H= 189. V= -0.24
X=0.50 YUK= 72. H= 187. V= -0.21
X=0.67 YUK= 74. H= 184. V= -0.17
X=0.83 YUK= 76. H= 181. V= -0.14
X=1.00 YUK= 79. H= 179. V= -0.10
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 79. H= 179. V= -0.10
X=0.33 YUK= 69. H= 176. V= -0.07
X=0.67 YUK= 60. H= 173. V= -0.03
X=1.00 YUK= 51. H= 171. V= 0.00

ZAMAN= 9.013

BORU NO. 1
X=0.00 YUK= 70. H= 200. V= -0.11
X=0.17 YUK= 70. H= 195. V= -0.11
X=0.33 YUK= 69. H= 189. V= -0.11
X=0.50 YUK= 69. H= 184. V= -0.11
X=0.67 YUK= 68. H= 178. V= -0.10
X=0.83 YUK= 71. H= 176. V= -0.07
X=1.00 YUK= 73. H= 173. V= -0.04
BORU NO. 2
X=0.00 YUK= 73. H= 173. V= -0.04
X=0.33 YUK= 64. H= 170. V= 0.00
X=0.67 YUK= 57. H= 170. V= 0.00
X=1.00 YUK= 50. H= 170. V= 0.00

```
 ZAMAN=  9.177

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.03
 X=0.17  YUK=  70.  H= 195.  V=  0.03
 X=0.33  YUK=  69.  H= 189.  V=  0.03
 X=0.50  YUK=  69.  H= 184.  V=  0.03
 X=0.67  YUK=  68.  H= 178.  V=  0.03
 X=0.83  YUK=  68.  H= 173.  V=  0.03
 X=1.00  YUK=  70.  H= 170.  V=  0.00
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  70.  H= 170.  V=  0.00
 X=0.33  YUK=  64.  H= 170.  V=  0.00
 X=0.67  YUK=  57.  H= 170.  V=  0.00
 X=1.00  YUK=  50.  H= 170.  V=  0.00



 ZAMAN=  9.341

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.17
 X=0.17  YUK=  70.  H= 195.  V=  0.17
 X=0.33  YUK=  69.  H= 189.  V=  0.17
 X=0.50  YUK=  69.  H= 184.  V=  0.17
 X=0.67  YUK=  71.  H= 181.  V=  0.13
 X=0.83  YUK=  73.  H= 178.  V=  0.10
 X=1.00  YUK=  76.  H= 176.  V=  0.06
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  76.  H= 176.  V=  0.06
 X=0.33  YUK=  66.  H= 173.  V=  0.03
 X=0.67  YUK=  57.  H= 170.  V=  0.00
 X=1.00  YUK=  50.  H= 170.  V=  0.00



 ZAMAN=  9.505

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.30
 X=0.17  YUK=  70.  H= 195.  V=  0.30
 X=0.33  YUK=  72.  H= 192.  V=  0.27
 X=0.50  YUK=  74.  H= 189.  V=  0.23
 X=0.67  YUK=  76.  H= 186.  V=  0.20
 X=0.83  YUK=  79.  H= 184.  V=  0.17
 X=1.00  YUK=  81.  H= 181.  V=  0.13
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  81.  H= 181.  V=  0.13
 X=0.33  YUK=  71.  H= 178.  V=  0.10
 X=0.67  YUK=  62.  H= 175.  V=  0.07
 X=1.00  YUK=  55.  H= 175.  V=  0.00
```

```
 ZAMAN=  9.669

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.33  YUK=  77.  H= 197.  V=  0.34
 X=0.50  YUK=  80.  H= 194.  V=  0.30
 X=0.67  YUK=  82.  H= 192.  V=  0.27
 X=0.83  YUK=  84.  H= 189.  V=  0.24
 X=1.00  YUK=  86.  H= 186.  V=  0.20
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  86.  H= 186.  V=  0.20
 X=0.33  YUK=  79.  H= 186.  V=  0.14
 X=0.67  YUK=  73.  H= 186.  V=  0.07
 X=1.00  YUK=  66.  H= 186.  V=  0.00


 ZAMAN=  9.833

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.50  YUK=  85.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.67  YUK=  87.  H= 197.  V=  0.34
 X=0.83  YUK=  92.  H= 197.  V=  0.27
 X=1.00  YUK=  97.  H= 197.  V=  0.20
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK=  97.  H= 197.  V=  0.20
 X=0.33  YUK=  90.  H= 197.  V=  0.14
 X=0.67  YUK=  84.  H= 197.  V=  0.07
 X=1.00  YUK=  77.  H= 197.  V=  0.00


 ZAMAN=  9.997

BORU NO.  1
 X=0.00  YUK=  70.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.17  YUK=  75.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.33  YUK=  80.  H= 200.  V=  0.37
 X=0.50  YUK=  87.  H= 202.  V=  0.34
 X=0.67  YUK=  95.  H= 205.  V=  0.31
 X=0.83  YUK= 103.  H= 208.  V=  0.27
 X=1.00  YUK= 108.  H= 208.  V=  0.20
BORU NO.  2
 X=0.00  YUK= 108.  H= 208.  V=  0.20
 X=0.33  YUK= 101.  H= 208.  V=  0.14
 X=0.67  YUK=  94.  H= 208.  V=  0.07
 X=1.00  YUK=  88.  H= 208.  V=  0.00


BORUDA MAKSIMUM BASINC
Mk099÷  BORU NO=  1  MAKSIMUM BASINC=   132.531     NOKTA XL= 1.000 ZAMAN=  4.670
```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	23.05.1967	
Doğum Yeri	İstanbul	
Lise	1978-1984	FMV Özel Işık Lisesi
Lisans	1985-1989	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1995-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik Programı
Çalıştığı Kurumlar	1989-1991	Umut İnşaat Ltd.Şti.
	1991-1992	Askerlik dönemi
	1992-1993	Umut İnşaat Ltd.Şti.
	1993-Devam Ediyor	Yapı Üretim San.ve Tic.A.Ş.