İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞKAN ÖZGÜL AĞIRLIĞININ SU DARBESİNE ETKİSİNİN MATEMATİK MODELLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Muhammed Alp TEKİN

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : HİDROLİK VE SU KAYNAKLARI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞKAN ÖZGÜL AĞIRLIĞININ SU DARBESİNE ETKİSİNİN MATEMATİK MODELLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Muhammed Alp TEKİN

501031516

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03.05.2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 10.06.2008

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Necati AĞIRALİOĞLU**
Diğer Jüri Üyeleri **Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK (Eş Danışman) (İ.T.Ü.)**
Doç. Dr. Şevket ÇOKGÖR (İ.T.Ü.)
Doç. Dr. Ali Fuat AYDIN (İ.T.Ü.)
Y. Doç. Dr. N.Erdem ÜNAL (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Hidrolik Anabilim dalında gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, araştırmam esnasında bana devamlı cesaret veren, deneyim ve engin bilgilerini paylaşan Danışman Hocalarım Prof. Dr. Necati Ağıralioğlu ve Prof. Dr. İzzet Öztürk'e teşekkür etmek istiyorum.

Aynı zamanda bu çalışma sürecinde sorularıma sabırla cevap veren Prof. Dr. İlhan Avcı'ya da teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmayı, anneannem Sevim Uluğ'a, Annem Nurdan ve Babam Ahmet Tekin'e, ağabeylerim Dr. Ali Çağrı ve değerli eşi Esra Tekin'e, Kimya Mühendisi Emir Tuğrul ve değerli eşi Melike Tekin'e, kız kardeşlerim Dr. Nilüfer ve küçüğüm Gülgün Tekin'e ve değerli iş arkadaşım Çevre Mühendisi Mehmet Peksayılır'a ithaf ediyorum.

Tüm eğitimim boyunca sabırları, destekleri ve fedakârlıkları için değerli aileme ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Haziran 2008 Muhammed Alp TEKİN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
SEMBOL LİSTESİ **ix**
ÖZET **xi**
SUMMARY **xiii**

1 . GİRİŞ **1**
1.1. İncelenecek Konu 1
1.2. Konunun Önemi 2
1.3. İnceleme Metodu 5

2. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **6**

3. SU DARBESİNİN TEORİSİ **9**
3.1. Konunun Kısa Açıklaması 9
3.2. Elastik Dalgaların Yayılışı 12
3.3. Düzlemsel Dalgaların Sonsuz Ortamda Yayılması 14
3.4. Düzlemsel Dalgaların Daire Kesitli Borularda Yayılması 16
3.5. Temel Denklemler 18
3.5.1. Yayılma Hızının Formülü 18
3.5.2. Hareket Denklemi 21
3.5.3. Süreklilik Denklemi 22
3.6. Su Darbesi Durumları 25
3.6.1. Mutlak Sıkıştırılamayan Akışkanın Hali 26
3.6.2. Sıkışabilen Akışkanların Hali (Gerçek Akışkan) 27
3.6.3. Kısmi kapama 28
3.6.4 .Olayın Gelişmesi 29
3.7.Allievi Formülleri 30
3.7.1. Hızlı Kapama 36
3.7.2. Basıncın değişimi 38
3.7.3. Yavaş Kapama 39
3.8. Su Darbelerinin Genel Durumlarının Özeti 40

4.ÇÖZÜM METODLARI **41**
4.1. Bergeron – Schnyder Metodu 41
4.1.1. Uç karakteristikleri 41
4.1.1.1 Zamanla değişmeyen rejim hali 41
4.1.1.2. Zamanla değişen rejim hali 46
4.1.2. Bergeron-Schnyder Metodunun Genel Hali 49
4.1.3. Değişken karakteristikli borular 55

4.2. Karakteristikler Metodu 58
4.2.1. Karakteristikler Metodunun Genel Hali 58
4.2.2. Karakteristikler met.aşırı basınçların belirlenmesinde kullanılması 59
4.3. Parmakian Metodu (Grafik yolla Su Darbesinin çözümlenmesi) 68
4.3.1.Eşlenik Su Darbesi Denklemleri 68
4.3.2. Kapak Deşarj Denklemleri 71
4.3.3. Kapak Kapanması için Grafik Çözüm 72
4.3.4. Üniform Kapak Hareketi için Su Darbesi 74
4.3.4.1. Sıfır kapağa üniform kapak kapanması 74
4.3.4.2. Sıfır kapaktan Üniform kapak açılması 76
4.3.5. Elektrik Kesintisi nedeniyle Basma Deşarj hatlarında Su Darbesi 78
4.3.5.1. Pompa ve Deşarj hattında Geçici Koşullar 78
4.3.5.2. Atalet Denklemi 79
4.3.5.3. Pompa Karakteristikleri 82
4.3.5.4. Su Darbesi Denklemleri 85
4.3.5.5. Su Sütunu Ayrılması 87
4.3.5.6. Su Darbesi Grafikleri 88

5. UYGULAMALARDA SONLU FARK METODUNUN KULLANILMASI 92
5.1. Sonlu Farklar Metodunun Su Darbesi ile ilişkisi 92
5.2. Sonlu Farklar Metodunun Genel Hali 92
5.3. İleri, Orta ve Geri Sonlu Fark Analoglarının (x ve y yönündeki) Özeti 94
5.4. Temel Sonlu Farklar Formlarının Geometrik Anlatımı 95
5.5. Hareket ve Süreklilik Denkl. Sonlu Farklar Metodunun Uygulanması 96
5.6. Karakteristikler Yöntemine Sonlu Farklar Metodunun Uygulanması 97

6. SEÇİLEN (KULLANILAN) VERİLER 98
6.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi 98
6.1.1. Kaba Izgara 99
6.1.2. Giriş Pompa Binası 99
6.2.Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi 101
6.2.1. Giriş Pompa 103
6.2.2. Deniz Deşarjı 103
6.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi 104
6.3.1.Giriş Pompa 104
6.3.2.Çıkış Pompa 105
6.3.3. Deniz Deşarjı 105

7. UYGULAMALAR 106
7.1. Elle Hesaplama Yöntemi 106
7.1.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması 106
7.1.2. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması 106
7.1.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması 106
7.2. Program Kullanarak (Sürtünmesiz) Hesaplama Yöntemi 107
7.2.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmesiz) 107
7.2.2. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmesiz) 110
7.2.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmesiz) 111

7.3. Program Kullanarak (Sürtünmeli) Hesaplama Yöntemi 112
7.3.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmeli) 112
7.3.2. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmeli) 114
7.3.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmeli) 115

8. DEĞERLENDİRMELER VE KARŞILAŞTIRMALAR 117
8.1. Değerlendirmeler 117
8.2. Karşılaştırmalar 120

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 123
9.1. Sonuçlar 123
9.2. Öneriler 124

KAYNAKLAR 125

ÖZGEÇMİŞ 128

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 3.1	Borularda K değerleri.....	10
Tablo 6.1	Dalgıç Pompa Karakteristikleri (Büyükçekmece).....	101
Tablo 6.2	Burgulu Pompa Karakteristikleri (Büyükçekmece).....	101
Tablo 6.3	Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Verileri.....	101
Tablo 6.4	Giriş Pompa Karakteristikleri (1) (Küçükçekmece).....	104
Tablo 6.5	Giriş Pompa Karakteristikleri (2) (Küçükçekmece).....	104
Tablo 6.6	Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Verileri.....	104
Tablo 6.7	Giriş Pompa Karakteristikleri (Kadıköy).....	105
Tablo 6.8	Çıkış Pompa Karakteristikleri (Kadıköy).....	106
Tablo 6.9	Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Verileri.....	106
Tablo 7.1	Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi içindeki basınçlı hattı üzerindeki 1,2,3,4,5 noktalarındaki Hız ve Basınç Yüksekliği Değerleri (Sürtünmesiz).....	108-109-110
Tablo 7.2	Küçükçekmece Ana Değişkenler (Sürtünmesiz).....	111
Tablo 7.3	Kadıköy Ana Değişkenler (Sürtünmesiz).....	112
Tablo 7.4	Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi içindeki basınçlı hattı üzerindeki1,2,3,4,5 noktalarındaki Hız ve Basınç Yüksekliği Değerleri (Sürtünmeli).....	113-114-115
Tablo 7.5	Küçükçekmece Ana Değişkenler (Sürtünmeli).....	116
Tablo 7.6	Kadıköy Ana Değişkenler (Sürtünmeli).....	117
Tablo 8.1	Akışkan Özgül Ağırlıkları.....	118
Tablo 8.2	Farklı Akışkan Özgül Ağırlıkları Darbe Değişim Değerleri	119
Tablo 8.3	Farklı Akışkan Özgül Ağılıkları göre Darbe Değişim Tablosu (Kadıköy).....	120
Tablo 8.4	Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarında Yüzde olarak Darbe Değişimi (Kadıköy).....	121
Tablo 8.5	Allievi Denklemleri ile Karaktersitikler Metodunda Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarına göre Sürpresyon Darbe Değişimlerinin Karşılaştırılması (Kadıköy).....	122
Tablo 8.6	Allievi Denklemleri ile Karakteristikler Metodunun Örnek veriye göre Yüzde olarak karşılaştırılması.....	123

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 3.1	Bir pompa ile bir depoya su basılması durumunda boru boyunca ortaya çıkan basınç dalgalanmaları şeması.....	10
Şekil 3.2	H (Yükseklik), Q(Debi), V(Hız) ile t (zamanın) Değişimi graf.	11
Şekil 3.3	Comolet Prensibi	13
Şekil 3.4	Düzlemsel bir dalganın enkesiti	14
Şekil 3.5 :	Düzlemsel bir dalganın daire kesitli borudaki enkesiti.....	16
Şekil 3.6	Dalga Enkesiti.....	17
Şekil 3.7	Terfi Hattında su darbesi etkisi.....	19
Şekil 3.8	Sisteme etkiyen kuvvetlerin şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.9	Sisteme etkiyen kuvvetlerin şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.10	Uzun bir boru hattının ucundaki vananın beslediği R Haznesi..	25
Şekil 3.11	Gerçek akışkan halinde darbenin gelişimi.....	27
Şekil 3.12	*B* noktasında basıncın zamana göre değişimi.....	29
Şekil 3.13	Hazne – Hat ilişkisi Şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.14	Darbe öncesi ve sonrası hazne – hat ilişkisi.....	35
Şekil 3.15	Darbe öncesi ve sonrası hattaki basınç değişimi.....	36
Şekil 3.16	Hızlı Kapama Şematik Çizim (1).....	37
Şekil 3.17	Hızlı Kapama Şematik Çizim (2).....	37
Şekil 3.18	Boru hattı basınç değişim diyagramları.....	38
Şekil 3.19	Yavaş Kapama (Lineer).....	39
Şekil 4.1	Bernoulli Denklemi Şematik Gösterim	41
Şekil 4.2	*Q* ile *h* arasındaki ilişki.....	42
Şekil 4.3	Sabit seviyeli bir haznedeki Q – h ilişkisi	44
Şekil 4.4	Suyun *B* ucundan *A* haznesine basılması halinde akışa ait karakteristik eğriler.....	44
Şekil 4.5	Bazı su makinelerine ait karakteristik eğriler.....	45
Şekil 4.6	Zamanla değişmeyen rejimdeki Q – h ilişkisi.....	46
Şekil 4.7	Zamanla değişmeyen rejimdeki Q – h ilişkisi.....	48

Şekil 4.8	Bergeron-Schnyder Metodu uç karak. plan ve grafik göst...	50
Şekil 4.9	Hazne – hat ile Grafik gösterim	52
Şekil 4.10	Teorik olarak Salınımlar	53
Şekil 4.11	B noktasındaki piyezometrik kot değişimleri ile *A* ve *B* enkesitlerinde debi değişimleri.....	53
Şekil 4.12	İdeal ile Tabii akışkan arasındaki uç karakteristikleri.....	54
Şekil 4.13	Örnekten elde edilmiş olan diyagramın grafiği.....	55
Şekil 4.14	Örnekten elde edilmiş olan diyagramın detaylı grafiği.....	55
Şekil 4.15	Değişken karakteristikli boru - hazne şematik gösterim.....	56
Şekil 4.16	Karakteristiklerin görünümü.....	57
Şekil 4.17	C^+ ve C^- karakteristikleri eğrileri.....	62
Şekil 4.18	Boru üzerindeki karakteristik çizgileri.....	62
Şekil 4.19	Eşit parçalara ayrılmış borudaki hesaplanacak basınç noktaları	64
Şekil 4.20	Orifis.....	66
Şekil 4.21	Lineer açılma ve kapanma yüzdesinin zamanla değişim grafiği	67
Şekil 4.22	Hazne - Deşarj Hattı.....	69
Şekil 4.23	h - v Diyagramı.....	71
Şekil 4.24	Şematik Çizim.....	73
Şekil 4.25	Kapak Kapanma İlişkisi.....	74
Şekil 4.26	h ve v eksen takımı üzerinde, m, n,o ve p parabolleri τ = 1.0, 0.7, 0.3 ve 0 değeri.....	74
Şekil 4.27	Üniform Kapak Eylemi için Ray S. Quick'in Su Darbesi Graf.	76
Şekil 4.28	Çeşitli başlangıç kapak açılmalarında üniform kapanmaya bağlı olarak kapakta basınç yüksekliği artışı.....	77
Şekil 4.29	Kapalı konumdan üniform kapak açılmasına bağlı olarak kapakta Minimum Yükseklik.....	78
Şekil 4.30	Elektrik Kesintisini takip eden Geçici Şartlar.....	80
Şekil 4.31	Tipik Pompa Performans Eğrisi.....	82
Şekil 4.32	Normal Pompa Eylem bölgesi için Karakteristik Diyagram Eğrisi.....	82
Şekil 4.33	h-v diyagramı.....	83
Şekil 4.34	Normal Pompa Eylem Bölgesi Pompa Karakteristikler Diyag.	84
Şekil 4.35	Enerji Dağıtım Bölgesi Pompa Karakteristikler Diyagramı	85
Şekil 4.36	Türbin Eylem Bölgesi Pompa Karakteristikler Diyagramı.....	86
Şekil 4.37	Pompa – Hazne İlişkisi.....	87
Şekil 4.38	h- v diyagramı.....	87

Şekil 4.39	Su Sütunu Ayrılması.....	88
Şekil 4.40	Pompadaki Aşağı Gerilim Darbesi.....	89
Şekil 4.41	Orta uzunluktaki Aşağı Gerilim Darbesi.....	90
Şekil 4.42	Pompadaki Yukarı Gerilim Darbesi.....	90
Şekil 4.43	Orta uzunluktaki Yukarı Gerilim Darbesi.....	91
Şekil 4.44	Maksimum Geri Dönüş Hızı.....	91
Şekil 4.45	Pompada akış geri çevirme zamanı.....	91
Şekil 4.46	Pompa Hızının Sıfır Zamanı.....	92
Şekil 4.47	Pompa Hızını Geri Çevirme Maksimum Zamanı.....	92
Şekil 5.1	Dikdörtgen Ağ Geometrisi.....	93
Şekil 5.2	İleri, Geri ve Orta Sonlu Fark Grafiği.....	96
Şekil 6.1	Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Yerleşiminden Gör.	99
Şekil 6.2	Terfi Hattı Su Alma Ağzı Haznesi ve 3 Adet Pompa Basma H.	100
Şekil 6.3	Terfi Hattı Su Alma Ağzı Haznesi Yerleşim Planı Şem. Çizimi	100
Şekil 6.4	Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Yerleşim Planı.....	102
Şekil 6.5	Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Yerleşiminden Gör.	103
Şekil 6.6	Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Görünüşü.....	105
Şekil 7.1	Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmesiz- B.Çekmece).....	111
Şekil 7.2	Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmesiz- K.Çekmece).....	112
Şekil 7.3	Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmesiz- Kadıköy).....	113
Şekil 7.4	Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmeli- B.Çekmece).....	115
Şekil 7.5	Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmeli- K.Çekmece).....	116
Şekil 7.6	Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmeli- Kadıköy).....	117
Şekil 8.1	Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarının Darbe üzerindeki Etkisi....	119
Şekil 8.2	Farklı akışkan özgül ağırlıklarında Darbe Değişim Grafiği.....	120
Şekil 8.3	Allievi Denklemleri ile Karakteristikler Metodu arasındaki Darbe Hesap Farklılıkları.....	122
Şekil 8.4	Büyükçekmece Deniz Deşarj Hattı Basınç Değişim Grafiği.....	122

SEMBOL LİSTESİ

Q : Debi
τ : Kapanma Süresi
L : Basma Hattı uzunluğu
Δ**H** : Basınç Değişimi
g : Yerçekim İvmesi
λ : Sürekli yük kaybı katsayısı
ξ : Yersel yük kaybı katsayısı
D : Boru dış çapı
$\mathbf{D_0}$: Boru iç çapı
e : Boru et kalınlığı
$\mathbf{d\rho/\rho}$: Özgül kütledeki rölatif değişim
dp : Basınç değişimi
ε : Elastiklik modülü
σ : Posisson katsayısı
E : Young modülü
γ : Akışkan Özgül Ağırlığı
a_0 : Dalga yayılma hızı
q : Kütlesel debi
A : Boru enkesit alanı
u : rölatif hızlar
Δ**v** : Su Hızı Değişimi
Δ**t** : Zaman Değişimi
a : Depresyon ve Sürpresyon dalgalarının yayılma hızı
v : Borudaki normal çalışma esnasındaki su hızı
$\mathbf{v_1}$: vana kısılması sonucu meydana gelen hız
ρ : Akışkan yoğunluğu
$\mathbf{H_{max}}$: Maksimum basınç yüksekliği
$\mathbf{H_{min}}$: Minimum basınç yüksekliği
K : Sıvının Elastisite Modülü
E : Boru Malzemesinin Elastisite Modülü
θ : Boru ekseninin yatayla yaptığı açı
$\mathbf{C_f}$: Boru sürtünme katsayısı
P : Basınç
h : Basınç Yüksekliği
Δp : Fazla basınç
$\mathbf{i_{max}}$: Boru hattının eşit sayıda bölüm sayısı
d : Boru çapı
l : Boru uzunluğu
S : Boru kesit alanı
x : Yatay eksen
y : Düşey eksen
F : Depresyon Dalga fonksiyonu

f	**:** Sürpresyon Dalga fonksiyonu
T	**:** Tam kapama zamanı
C	**:** Cauchy-Riemann (C) Karakteristiği
K	**:** K Karakteristiği
$\mathbf{B_e}$	**:** Kapak açılma faktörü
$\mathbf{H_0}$	**:** Kapakta başlangıç kararlı yükseklik
$\mathbf{V_e}$	**:** Kapak açıldıktan sonra her bir saniye için boru içinde Kararlı Hız
M	**:** Tork
W	**:** Açısal ivme
η	**:** Pompa Etkinliği
I	**:** Atalet Momenti
α, β	**:** Sabit oranlar
$\mathbf{K_i}$	**:** α ve β değerlerine bağlı katsayı
$\mathbf{f_{i+1}}$	**:** (i+1).noktadaki dalganın basınç yüksekliği
$\mathbf{f_i}$	**:** (i).noktadaki dalganın basınç yüksekliği
$\mathbf{f_{i-1}}$	**:** (i-1).noktadaki dalganın basınç yüksekliği

AKIŞKAN ÖZGÜL AĞIRLIĞININ SU DARBESİNE ETKİSİNİN MATEMATİK MODELLE İNCELENMESİ

ÖZET

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak; pompa kullanmak suretiyle basınçlı hatları çalıştırmak, işletmek, çalışan sistem elemanlarının güvenliğini sağlamak ve korumak, olağan dışı durumlarda sistem elemanlarında oluşabilecek basınçları belirli sınırlar içinde tutmak veya basınç değerlerini azaltmak veya darbe başlamadan önce önlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, hidrolikteki hareket ve süreklilik denklemlerini esas alarak su darbesi teorisini ve en çok kullanılan su darbesi hesaplama metotlarından (sonlu farklar metodu yardımıyla) Bergeron-Schnyder, Karakteristikler ve Parmakian Metotları tanımlanmıştır.

Bu konu hakkında otomatik denetimli, uzaktan ölçüm ve iletişim düzenleriyle donatılan boru hatlarında, tasarım aşamasında kullanılan matematik model geliştirilerek, ya da yeniden kurularak otomatik denetim yazılımının bir parçası haline getirilir. Bu tür boru hattı düzenleri, pompa istasyonlarında, terminallerde ve boru hattı boyunca ölçülerek elde edilen debi – basınç değerleri, ana yönetim merkezine iletilip, sürekli çalışmakta olan programın hesapladığı değerlerle karşılaştırılarak denetlenir. Bu yöntemle boru hattında sızıntı denetimi de yapılır ve karmaşık sistemler otomatik olarak yönetilir.

Boru hatları, su darbesi olayının sonuçları açısından iki kümeye ayrılabilir. Temel ilkeler açısından bakıldığında, uzun petrol veya su boru hatlarıyla, bir rafineride bulunan kısa boru hatları arasında bir ayrım yoktur. Ancak, uzun petrol boru hatları çoğu kez aralarında yüzlerce kilometre bulunan bir çok pompa istasyonunu birbirine bağlayan, ve toplam sürtünme kayıplarının yüksek olduğu düzenlerdir. Bu nedenle, pompa istasyonları çıkış basınçları ve giriş – çıkış basınçları arasındaki farklar da yüksektir. Böyle boru hatlarında örneğin hat sonu vanası herhangi bir nedenle kapanırsa, oluşan ilk basınç darbesinin yüksekliği hattın izin verilen en yüksek işletme basıncından fazla olmayabilir. Ancak, özellikle uzaktan iletişim ve denetim olmayan düzenlerde, bu tür beklenmeyen durumlarda, hattın kendi kendini kapatması pompa istasyonlarına basınç dalgasının ulaşması yoluyla olduğundan, istasyonlar "haber alıp" yerel otomatik denetim ile pompalarını durdurana kadar, kapanmış hatta basılmaya devam eden akışkan, hattı sıkıştırarak, izin verilen en yüksek işletme basıncının aşılmasına neden olabilir. Bu olaya " hat sıkışması" (line packing) adı verilir. Böyle uzun ve sürtünme kayıplarının önemli olduğu boru hatlarında, et kalınlıklarının hesaplanması, basınç giderme düzenlerinin belirlenmesi ve ayar noktalarının saptanması gibi işler, su darbesi olayının bu ikinci etkisine göre yapılır.

Dirsekler, boru büküm noktaları, istasyon giriş – çıkışları, hattın uçlarındaki kazıyıcı kovanları gibi iç basınçtan doğan kuvvetlerin dengelenmediği yerlerde oluşan darbeli

tepki kuvvetlerine karşı boru mesnetleri ve mesnet temelleri boyutlandırılır, büküm noktalarındaki gömme derinlikleri hesaplanır.

Örnek olarak bu çalışmada, İstanbul ilinin Avrupa Yakasında Büyükçekmece ile Küçükçekmece İlçeleri ve Asya yakasında ise Kadıköy İlçesi ve çevre havzasının atıksularını arıtarak bu havzalara hizmet eden mevcut Büyükçekmece, Küçükçekmece ve Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesis verileri seçilmiştir.

Bu tesislerin içindeki terfili basma hatlarında akışkan özgül ağırlığının değişimi sonucu oluşan darbe tesirlerinin sonlu farklar metodu ile önceden denenmiş bir Matematik Model kullanmak suretiyle hesaplanarak ve çıkan sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Ayrıca, bu tesislerdeki sistem elemanlarına, darbe tesirlerinin azaltılması, belirli sınırlar içinde tutulması, hattın darbeden etkilenmemesiyle ilgili tedbirlerden bahsedilmiştir.

Yukarıdakilere ilave olarak, su darbesi olayı sonucunda oluşan basınç düşümü (alçalma) dalgalarının da önem kazandığı durumlar olabilir. Özellikle pompa istasyonlarının emme taraflarındaki basınç düşmesi kısa süreli bile olsa pompalarda kavitasyona yol açabileceğinden, ayrıca, boru hattının yüksek kotlarında boru iç basıncının, akışkanın o sıcaklıktaki buharlaşma basıncının altına düşmesi sonucu buhar cepleri oluşacağından, su darbesi çözümlemesi yapılırken, boru hattı boyunca oluşabilecek en düşük basınçlar da hesaplanarak incelenir. Özellikle büyük çaplı beton borularda iç basıncın düşmesi, borunun dış basınç altında kırılmasına neden olabilir.

Su darbesi olayına karşı boru hatlarının korunması için en sık uygulanan çözüm basınç giderme vanalarıdır. Değişik ilkelerle çalışan tipleri olan bu vanalar, önceden ayarlanan basınca eriştiklerinde bir kısım akışkanın hatta alınarak başka bir tanka gitmelerini sağlarlar. Bundan başka, basınç yükselmesini algılayınca kapanarak hattı yalıtılmış bölümlere ayıran iç hat vanaları, buharları tehlikeli olmayan akışkanlarda hava çanları kullanılır.

Pompa millerine volan monte edilerek aniden durmalarını önlemek de uygulanan çözümlerdendir. Ayrıca, deşarj hattı içinde bulunan “Kelebek” olarak da adlandırılan vanalar kullanılarak pompayı ve hazneyi, oluşacak darbenin etkisinden korumak günümüzde sık kullanılan metodlardandır.

EXAMINATION WITH MATHEMATICAL MODEL OF EFFECT TO WATER HAMMER OF THE SPECIFIC GRAVITY ON FLUID

SUMMARY

There are many methods used to operate pressurized lines using pump; to render safe and protect functioning system components; to keep pressures likely to arise on system components under extraordinary conditions within certain limits or to reduce pressure values or to prevent impact before it occurs, all depending on technological developments. In this study, we define Theory of Water Impact with reference to equations of motion and continuity in hydraulics, as well as Bergeron-Schyder, Characteristics and Parmakian Methods which are among most widespread Water Impact computation methods (with aid of Finite Differences Method).

On auto-controlled pipelines equipped with remote measurement and communication systems, Mathematical Model used at phase of design is developed or re-shaped into an element of automatic control software. This kind of pipeline systems are measured at pumping stations and terminals and across the pipeline and flow – pressure values so found are transmitted to main management center and are thus controlled in comparison with values computed by continuously working program. This method also allows for leak control as well as for automatic management of complex systems.

Pipelines can be divided into two groups on the score of consequences of water impact incident. On looking from perspective of basic principles, there is no distinction between long petroleum or water pipelines and short pipelines available at a refinery. However, long petroleum pipelines are systems which interconnect many pumping stations located mostly hundreds of kilometers away from each other and which suffer from high total friction losses. Therefore, differences between the pumping stations' outlet (delivery) pressures and the inlet (supply) – outlet (delivery) pressures are high, as well. If, for example, end-of-line valve closes for any reason, resultant initial pressure impact may not be higher than highest allowable operating pressure. However, in the case of systems lacking in remote communication and control, in particular, as self-closing of the line is caused by transmission of pressure wave up to pumping stations, in this kind of unexpected situations, fluid still delivered on the closed line may pack the line, leading to going beyond highest allowable operating pressure, until stations "get the news" and stop their pumps by means of local automatic control. This incident is called "line packing". In the case of this kind of long pipelines with significant friction losses, such actions as computation of flesh thicknesses, determination of pressure reduction systems and determination of set-points are conducted according to this second effect of water impact incident.

And mechanical external effects of initial pressure impact gain importance. Pipe supports and support foundations are dimensioned against impacted response forces which occur in spots where forces arising from internal pressure failing to get a balance, like elbows, pipe twisting points, station inlets – outlets and scraper shells available at tips of the line, and their inlay depths are computed.

As examples, we used data obtained from Büyükçekmece, Küçükçekmece and Kadıköy Wastewater Pre-treatment Plants which serve for and treat wastewaters of Counties of Büyükçekmece and Küçükçekmece in European side of Istanbul and County of Kadıköy in Asian side of Istanbul, respectively.

We computed effects of impact arising from variation in specific gravity of fluid in compressed delivery lines available inside such plants, using a Mathematical Model with pre-tested Finite Differences Methods, and we assessed the situation comparing results achieved with each other.

We proposed some actions for reducing effects of impact on system components available at such plants and for keeping such effects within certain limits as well as for keeping the line exempt from effects of impact.

There might be situations where pressure drop (depression) waves arising from water impact incident gain importance, as well. In particular, as pressure drop at intake sides of pumping stations may give rise to cavitations on pumps even if they are short-time drops and, besides, as vapour pockets would occur because of pipe inner pressure at high altitudes of the pipeline falling below evaporation pressure of the fluid at that temperature, even the smallest pressures likely to occur all along the pipeline are computed and assessed for making a water impact analysis. Inner pressure drop in concrete pipes with big diameter, in particular, may give birth to break-up of the pipe under external pressure.

Most widespread solution applied for protection of pipelines against water impact incident is pressure relief valves. Having different types which function under various principles, these valves ensure that an amount of fluid is taken into the line for transmission into another tank when they reach pre-adjusted pressure. Among other appliances are internal line valves which close out on sensing the pressure rise, thereby dividing the line up into insulated sections, as well as air bells used for fluids which emit non-dangerous vapours. Another solution applied is to prevent sudden stoppage by fixing a flywheel on pump axles. Furthermore, today, there is another widespread method which uses valves, called “Butterfly”, available inside discharge line, to protect the pump and chamber (reservoir) against effects of the resultant impact.

1 . GİRİŞ

1.1.İNCELENECEK KONU

Günümüzdeki teknolojik gelişmelere bağlı olarak; pompa kullanmak suretiyle basınçlı hatları çalıştırmak, işletmek, pompa, basınçlı hat ve sistem elemanlarının güvenliğini sağlamak ve korumak için olağan dışı bir durumda sözkonusu sistem elemanlarında oluşabilecek basınçları belirli sınırlar içinde tutmak veya basınç değerlerini azaltmak veya darbe başlamadan önce önlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Hidrolikteki Hareket ve Süreklilik (temel) denklemlerini esas alarak Su Darbesi Teorisini ve su darbesi hesaplama metotlarından Bergeron-Schnyder, Karakteristikler ve Parmakian Metotları tanımlanacaktır.

Tanımlanan metotlardan günümüzde en çok kullanılan çözüm metodları (Temel Denklemler ile Karakteristikler Metodu) denenmiş bir matematik model kullanmak suretiyle örnek verilere uygulanacaktır. Ayrıca, uygulamaların çözümünde basitlik ve kolaylık sağlamak amacıyla hesap metotlarından biri olan Sonlu Farklar Metoduna bu çalışmada kısaca değinilecektir. Örnek olarak, İstanbul ilinin Avrupa Yakasında Büyükçekmece ile Küçükçekmece İlçeleri ve Asya yakasında ise Kadıköy İlçesi ve çevre havzasının atıksularını arıtarak bu havzalara hizmet eden mevcut Büyükçekmece, Küçükçekmece ve Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesis verileri seçilmiştir. Bu tesislerin içindeki terfili basma hatlarında akışkan özgül ağırlığının değişimi (artması veya azalması) sonucu oluşan darbe tesirlerinin Sonlu Farklar Metodu ile önceden denenmiş bir Matematik Model kullanmak suretiyle hesaplanacak ve çıkan sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak değerlendirilecektir.

Buna ek olarak, sözkonusu darbe tesirlerinin sistem elemanlarına etkilerinin azaltılmasına veya belirli sınırlar içinde tutulmasına veya hattın darbeden etkilenmemesine yönelik kısaca darbe önleyici tedbirlerden bahsedilecektir.

1.2. KONUNUN ÖNEMİ

Boru hatlarında su darbesi olayı, bir dış etki nedeniyle akış hızındaki ani bir değişme sonucu ortaya çıkan, ani basınç değişmesi şeklinde tanımlanabilir. Akış hızındaki değişikliğe neden olacak etki, boru hattının işletimi sırasında sürekli bir rejim konumundan başka bir sürekli rejim konumuna geçmek, hattı işletmeye almak, hattı durdurmak gibi amaçlarla önceden planlanmış olabilir ya da, bir pompa istasyonunu besleyen gücün kesilmesi, boru içinin temizlenmesi sırasında kullanılan kazıyıcının sıkışıp durması, yangın, boru patlaması gibi beklenmeyen veya zorunlu durumlarda hat vanalarının kapanması yoluyla da ortaya çıkabilir.

Boru içindeki akışkan kütlesinin eylemsizliği nedeniyle, akış hızındaki değişiklik, tüm boru hattı boyunca aynı anda olmaz. Önce, akış hızını değiştiren nedenin olduğu yerdeki akışkan kütlesinin hızlanma veya yavaşlamasından doğan ivmeleme sonucu eksi veya artı eylemsizlik kuvvetleri oluşur. Eylemsizlik kuvvetleri, yerel olarak bir basınç yükselmesi veya alçalması "darbesi" yaratırlar. Bu basınç darbesi, bir dalga halinde boru içinde ses hızıyla yol alarak başlangıç noktasından uzaklaşır. Akış hızındaki yeni durum, boru hattının diğer kesitlerine basınç dalgasının ilerlemesiyle iletilir. Başka bir deyişle, bu basınç dalgasının geçtiği kesitlerdeki akış hızı yeni değerler alırken, dalganın henüz ulaşmadığı kesitlerdeki akış, olaydan önceki hızında, su darbesi "haberi" gelene kadar devam eder.

Basınç dalgaları, boru hattı boyunca ses hızında yollarına devam ederek açık vanalardan, pompa istasyonlarından geçerler ve kapalı bir vana, hazne gibi boru hattının hidrolik sürekliliğini bozacak bir engelle karşılaştıkları zaman yansıyarak geri dönerler. Basınç dalgaları, boru hattı içindeki yolculukları süresince sürtünmeler nedeniyle giderek sönümlenirler ve pratikte sonlu bir zaman sonra hareketleri sona erer, akış durur veya yeni sürekli rejim koşullarında devam eder (Gürtay ,1985).

Bir boru hattının tasarımı sırasında, su darbesi çözümlemesi yapılarak, su darbesi nedeniyle ortaya çıkan basınç yükselmesi / alçalması durumları dikkatle incelenir. Bu incelemeden bulunan sonuçlara dayanarak boru et kalınlıkları seçilir, pompa istasyonları ve terminallerdeki cihazların, vanaların pompaların özellikleri belirlenir. Boru hattının işletim ve denetim düzenlerinin tasarımı ve programlaması yapılır. Hattı devreye alma, durdurma ve debi değiştirme işlemlerinin nasıl yapılacağı saptanır.

Bu işlemler sırasında oluşacak geçici rejim koşullarından sistemin zarar görmemesi için alınması gereken önlemler bulunur. Boru hatlarında su darbesi probleminin çözüm yollarından birisi sonlu farklar metodu ile matematik model kurarak çözümü bilgisayar yardımıyla yapmaktır. Tasarım aşamasında yukarıda anılan ve benzeri sorunlara bu model yardımıyla çözüm aranır ve bulunan sonuçlardan yararlanılarak boru hattının yapımı tamamlanır (Mousselli**,** 1981).

Otomatik denetimli, uzaktan ölçüm ve iletişim düzenleriyle donatılan boru hatlarında ,tasarım aşamasında kullanılan matematik modeli geliştirilerek ya da yeniden kurularak otomatik denetim yazılımının bir parçası haline getirilir. Bu tür boru hattı düzenleri, pompa istasyonlarında, terminallerde ve boru hattı boyunca ölçülerek elde edilen debi – basınç değerleri, ana yönetim merkezine iletilip, sürekli çalışmakta olan programın hesapladığı değerlerle karşılaştırılarak denetlenir. Bu yöntemle boru hattında sızıntı denetimi de yapılır ve karmaşık sistemler otomatik olarak yönetilir.

Boru hatları, su darbesi olayının sonuçları açısından iki kümeye ayrılabilir. Temel ilkeler açısından bakıldığında, uzun petrol veya su boru hatlarıyla, bir rafineride bulunan kısa boru hatları arasında bir ayrım yoktur. Ancak, uzun petrol boru hatları çoğu kez aralarında yüzlerce kilometre bulunan bir çok pompa istasyonunu birbirine bağlayan, ve toplam sürtünme kayıplarının yüksek olduğu düzenlerdir. Bu nedenle, pompa istasyonları çıkış basınçları ve giriş – çıkış basınçları arasındaki farklar da yüksektir. Böyle boru hatlarında örneğin hat sonu vanası herhangi bir nedenle kapanırsa, oluşan ilk basınç darbesinin yüksekliği hattın izin verilen en yüksek işletme basıncından fazla olmayabilir. Ancak, özellikle uzaktan iletişim ve denetim olmayan düzenlerde, bu tür beklenmeyen durumlarda, hattın kendi kendini kapatması pompa istasyonlarına basınç dalgasının ulaşması yoluyla olduğundan, istasyonlar " haber alıp" yerel otomatik denetim ile pompalarını durdurana kadar, kapanmış hatta basılmaya devam eden akışkan, hattı sıkıştırarak, izin verilen en yüksek işletme basıncının aşılmasına neden olabilir. Bu olaya " hat sıkışması" (line packing) adı verilir. Böyle uzun ve sürtünme kayıplarının önemli olduğu boru hatlarında , et kalınlıklarının hesaplanması, basınç giderme düzenlerinin belirlenmesi ve ayar noktalarının saptanması gibi işler, su darbesi olayının bu ikinci etkisine göre yapılır (Grace**,** 1978).

İlk basınç darbesinin ise, mekanik dış etkileri önem kazanır. Dirsekler, boru büküm noktaları, istasyon giriş – çıkışları, hattın uçlarındaki kazıyıcı kovanları gibi iç basınçtan doğan kuvvetlerin dengelenmediği yerlerde oluşan darbeli tepki kuvvetlerine karşı boru mesnetleri ve mesnet temelleri boyutlandırılır, büküm noktalarındaki gömme derinlikleri hesaplanır.

Rafineri borulama düzenleri gibi kısa boru hatlarında ise, sürtünme kayıpları ve statik basınçlar öncekiler gibi yüksek değildir. Bu durumda su darbesi basıncı, izin verilen en yüksek işletme basıncının çok üzerine çıkabilir. Dalga periyodu çok kısa olacağından, hat sıkışması olayının gelişmesine zaman olmaz. Öte yandan, darbeli tepkilere karşı, boru mesnetlerinin, boru esneklik ve rezonans hesaplarına göre önlemler alınarak tasarımlanması gerekir (Gülhan, 1984).

Su darbesi olayı sonucunda oluşan basınç düşümü (alçalma) dalgalarının da önem kazandığı durumlar olabilir. Özellikle pompa istasyonlarının emme taraflarındaki basınç düşmesi kısa süreli bile olsa pompalarda kavitasyona yol açabileceğinden, ayrıca, boru hattının yüksek kotlarında boru iç basıncının, akışkanın o sıcaklıktaki buharlaşma basıncının altına düşmesi sonucu buhar cepleri oluşacağından, su darbesi çözümlemesi yapılırken, boru hattı boyunca oluşabilecek en düşük basınçlar da hesaplanarak incelenir. Özellikle büyük çaplı beton borularda iç basıncın düşmesi, borunun dış basınç altında kırılmasına neden olabilir.

Su darbesi olayına karşı boru hatlarının korunması için en sık uygulanan çözüm basınç giderme vanalarıdır. Değişik ilkelerle çalışan tipleri olan bu vanalar, önceden ayarlanan basınca eriştiklerinde bir kısım akışkanın hatta alınarak başka bir tanka gitmelerini sağlarlar. Bundan başka, basınç yükselmesini algılayınca kapanarak hattı yalıtılmış bölümlere ayıran iç hat vanaları, buharları tehlikeli olmayan akışkanlarda hava çanları kullanılır.

Pompa millerine volan monte edilerek aniden durmalarını önlemek de uygulanan çözümlerdendir. Ayrıca, deşarj hattı içinde bulunan “Kelebek” olarak da adlandırılan vanalar kullanılarak pompayı ve hazneyi(yükleme odasını) oluşacak darbenin etkisinden korumak günümüzde sık kullanılan metodlardandır (Gunnerson ve diğerleri, 1996).

1.3. İNCELEME METODU

Boru hatlarında su darbesi sorununu çözmek için kullanılan yöntemlerin bazıları, analitik, grafik ve sayısal yöntemlerdir.

Bu tez çalışması, ülkemizde hayata geçirilen ve büyük önem arz eden santraller ve benzeri tesislerde kullanılan basınçlı hatlarda oluşabilecek akışkan özgül ağırlığının değişmesi (artması veya azalması) neticesinde darbe tesirinin incelenerek bu etkinin azaltılması veya darbe başlamadan önlenmesine yönelik hazırlanmış bir yüksek lisans çalışmasıdır.

Bu çalışmada, sonlu farklar metoduyla boru hatlarında sayısal su darbesi çözümü, İstanbul İli Büyükçekmece, Küçükçekmece ve Kadıköy İlçeleri sahil kesimlerinde mevcut bulunan Atıksu Ön Arıtma Tesislerinin Proje ve İşletme Raporlarının tasnifi sonucunda, elde edilen verilerin (Borunun yatay açı yapıp yapmadığı, türbülanslı akımın olduğu ve sürtünmelerin ihmal edildiği ve edilmediği en extrem durumlara göre hazırlanan) denenmiş bir matematik model kullanılarak yapılacaktır.

Devamında akışkan özgül ağırlığının yarattığı su darbesinin (boru ve benzeri) sistem elemanlarına etkileri ile beraber irdelenmesi bu yüksek lisans tezinde amaçlanmış ve çıkan sonuçların günümüz koşullarında karşılığı yorumlanarak darbe önleyici tedbirler hakkında kısa öneriler sunulmuştur.

2. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dünyada son yıllarda yapılan su darbesi ve etkileri ile ilgili araştırmalarda bu tez çalışmasının bu bölümünde anlatılmıştır. Bu nedenle, aşağıda su darbesi hakkında yapılan araştırmalarla ilgili dünya literatüründe kabul görerek yayınlanmış makalelere ait özet bilgiler verilmiştir.

"Türkiyedeki Çatalan Elektrik Santrali için Test Sonuçları ile hesaplanmış Su Darbesi Basınçlarının Karşılaştırılması" adlı çalışmada, Çatalan Elektrik Santrali içindeki bir cebri boru sonundaki akışkan kontrol mekanizmasının kapanması, önemli (geçici) basınçlara neden olabildiği görülmüştür. Kütlenin ve momentumun Korunumunu yöneten (zamanla değişen akım) denklemler, çeşitli hesaplama teknikleri kullanılarak Karakteristikler Metodu vasıtasıyla çözümlenebileceği incelenmiştir. Bu çalışma, Türkiye'deki Çatalan Elektrik Santrali için ölçülmüş prototip verilerle nümerik metotlarla hesaplanmış geçici basınçların karşılaştırılmasını anlatmaktadır. "Çabuk Durma", "Acil Kapama" ve " Yükleme Kabul Etmeme" gibi test yöntemlerinde bir Francis Türbininin küçük kapağının kapanması boyunca prototip veriler toplanmış ve geçici basınçlar için nümerik sonuçlar, ölçülmüş verilerle karşılaştırılmıştır. Teorik ve Deneysel sonuçlar arasındaki genel kabulün, çok makul (mantıklı, kabul edilebilir) olduğu bulunmuştur (Selek ve diğerleri, 2004).

"Bir boru hattı içinde yoğunlaşmaya neden olan buhar kabacıklarının çökmesi" adlı çalışmasında, boru hatları içinde buhar kabarması, boru hattı yapısı ve işlevsel hatalara bağlı olarak sık sık olabilir. Bu çalışma deneysel ve nümerik olarak çökme ve buhar kabarcığı formasyonu için koşulları incelemiştir. Laboratuardan alınan video görüntü serileri, birçok salınım üzerinde çökme ve su kabarcığı formasyonunu göstermiştir. Buhar kabarcıklarının basınç süreci resimlerle birleşme içinde ölçülür. Deneyde, akışkan sütunu düşük basınçlarda ayrıştıktan sonra yüksek basınç darbelerine neden olan yoğunlaşmaya bağlı olarak kabarcık çökmeleri boru kesit alanını daraldığı görülmüştür. Bu yöntem nümerik benzeşim modeli kullanılarak yapılmıştır.

Sonuçlar, su buhar kabarcığı formasyonundan kaçınmak için yöntemleri kapsayan operasyonlar ve akışkan soğutan boru hatlarının tasarlanması önerilmiştir (He ve diğerleri, 2000).

"Etkiyle uyarılmış su darbesine bağlı olan akışkan ile doldurulmuş borular içindeki akışkan yapısı için analitik çözüm" adlı çalışmasında, etkiyle uyarılmış su darbesine bağlı olan akışkan ile doldurulmuş borular içindeki akışkan yapısını tanımlayan 4 denklem modeli için analitik çözüm sunulmuştur.

Analitik çözüm, eklem eşleme ve poisson bağlama metotlarının her ikisinin kullanılmasıyla türetilmiştir. Sonuçlar, karakteristik metodlar vasıtasıyla saptanarak nümerik sonuçlarla ve deneysel ölçümlerle uygun (kabul edilebilir) bir analitik çözüm elde edilmiştir. Analitik çözümün avantajını alan birleştirilmiş dalga yayılımının bazı özellikleri sunulmuş ve tartışılmıştır (Yang ve diğerleri, 2003).

"Zamanla değişen sürtünme faktörüyle birlikte su darbesi akımının benzeşimi" adlı çalışmasında ise, türbin vanasının ani kapanmasına bağlı olarak gerilim tankı koşulsuz uzun bir kapalı kanala sahip hidrolik elektrik santrali içinde rastlanmış ve su darbesi durumunda hız, birkaç zaman aralığından sonra dalganın yönündeki değişimle birlikte önemli yüksek bir değerden aşırı küçük bir değer ile düzensiz bir şekilde değişir. Sonuçta burada, basınç yüksekliği ve deşarj ile birlikte duvar sürtünmesi içinde kocaman bir dalgalanma oluşmuştur.

Boru akımının geçici analizi, hızlı vana kapanmaları ile su darbesi durumları incelenerek bu ilave yüklemelere göre mühendislerin kullandığı zamanla değişmeyen durum operasyon koşulları analizinden çoğu kez daha önemli olduğu görülmüştür.

MOC ve Bar'ın Açık Sürtünme faktörünü kullanarak "UNSTD_FRIC_WH" bir nümerik model, belirli bir boru bölümündeki debiler ve basınçlar ile birlikte geçici sürtünmelerin bir koşulu olan su darbesinin geçici akım durumlarındaki çözümü burada sunulmuştur.

Bu zamanla değişen geçici akım koşulu içinde herhangi bir bölümünde sürtünme faktörlerinin değerlendirmesi, uygulanabilir nümerik modellerde olduğu gibi zamanla değişmeyen durum sürtünmesinin aksine çeşitli sürtünme faktörleri kullanarak verimliliği göstermiştir.

Borunun sürtünmesine bağlı olarak vana kapanmasından sonra zamanla debi ve basınç sönümlenmesi, "UNSTD_FRIC_WH" Modeli kullanarak açıkça tanımlanmıştır. Laminerden türbülansa değişerek tüm akım koşulları için uygulanabilir bir nümerik model 'dir (Saikia ve Sarma, 2006).

“ Hava kazanlarıyla boru hatları içinde su darbesi için grafikler” adlı çalışmada ise, yüksek ve düşük gerilim bir hava kazanına bağlı sağlanmış basit bir pompa deşarj hattı için hesaplamalar yapılmış ve grafikleri çizilmiştir.

Boru hattı sabiti, hava kazanı sabiti, boru duvar sürtünmesi ve orifis direnci gibi temel parametreler kullanılmıştır. Hesaplanan sonuçlar, gerekli hava kazanı hacminin belirlenmesi için tespit edilmiştir.

Bilgisayar çalışmaları, pompa sonunda makul düzeyde iyi sonuçlar elde edilmesi sonucu; kabul edilen boru hattının sonundaki pompada boru sürtünme yoğunluğu ve katı su sütunun varsayımını göstermektedir.

Fakat, varsayımlara bağlı olarak, her iki yüksek ve düşük gerilim etkisinin yorum içindeki büyük hatalar boru hattının orta noktasında ve özellikle de boru hattının çeyrek bölümünde olduğunu anlatmıştır. Boru sürtünmesi ve orifis direncinin gerilimler üzerinde büyük bir ölçüde farklı etkisi vardır. Bu iki etkinin bu yüzden ayrı olduğu tahmin edilmiştir. Ayrı bir orifis tavsiye edilmiş ve göz önünde bulundurulması istenmiştir. Bu orifis, kazandan dışarı akmak için düşük bir dirence sahip olması gerektiği söylemiştir (Ruus,1977).

“Kavitasyon zararı üzerinde katılan havanın etkisi” adlı çalışmada ise, bir yüzey üzerinde yüksek hızda su aktığında, hızlı ve küçük sınır düzensizliklerini dönüşte büyük zarara neden olabilecek kavitasyonu tetikleyeceği incelenmiştir. Beton yüzeyler yüksek hızda dışa açık kapaklardaki akımlar nedeniyle kavitasyon zararından kolayca zedelendiği gözlemlenmiştir. Deneyimler ve yapılan deneyler sonucunda, su içine hava katılarak kavitasyon zararı azaltılmış veya bazı durumlarda tamamen bertaraf edilebileceği görülmüştür.

Deneyler, hava ilavesi etkisi üzerinde ilave veri elde etmek için Vancouver ‘da özel bir yüksek basınçlı test olanaklarıyla gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Bu testler hava ilavesinin etkinliğini doğrulamış ve verilen öneriler yüksek hız akımı gerektiren hidrolik yapıları tasarımını etkilediği sonucunu ortaya çıkarmıştır (Russel ve sheehan,1974).

3. SU DARBESİNİN TEORİSİ

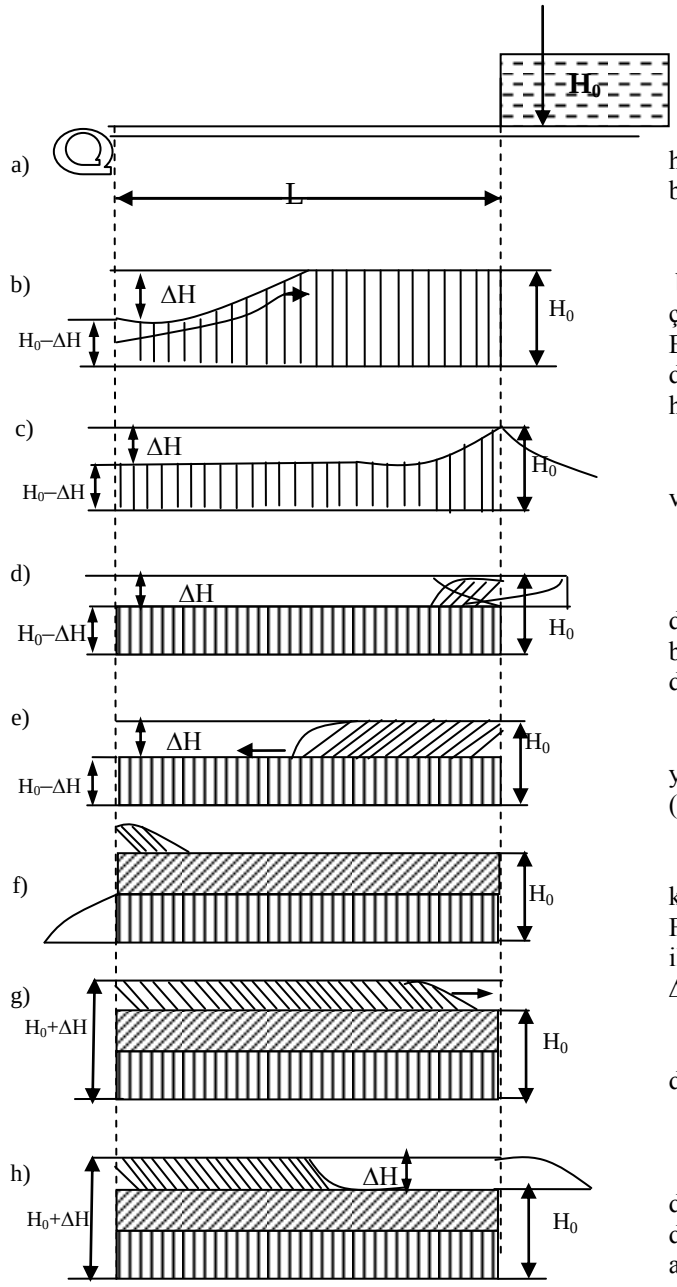
3.1. KONUNUN KISA AÇIKLAMASI

Bir terfi hattındaki vananın veya klapenin ani açılıp kapanması, boru hattına su veren motopompun aniden durması veya devreye girmesi gibi hareketler, hattaki suda değişik hareketlenmelere sebep olur. Bunun sonucu borularda basınç ve debi dalgalanmaları ortaya çıkar. Su darbesi diye adlandırılan bu olayın doğurduğu debi ve basınç dalgaları, boru hattını sesin su içindeki hızına eşit hızla katederek, hattın yüksek değerde artı ve eksi basınçlarla yüklenmesine sebep olurlar. Hattın güvenle hizmet görmesi için seçilen boruların bu basınçları karşılayıp karşılayamadığının bilinmesi gerekir (Sharp, 1996). Terfili içmesuyu iletim hatlarında motopompun elektrik akımı kesilmesi veya çıkış vanasının hızla kapatılması nedeni ile su hızının ani değişmesi olağan olduğundan, bütün terfili projelerin terfi hattındaki darbe hesabının yapılması ve boruların darbe tesirinin ortaya çıkardığı aşırı basınçlara göre kontrol edilmesi gerekir.

Darbe olayı, herhangi bir sebeple borudaki su hızının aniden değişmesi ile kendini gösterir. Örneğin pompa aniden durduğu takdirde pompadan çıkan son su kütlesi depoya doğru ilerken, ardından pompanın durması nedeniyle yeni bir su kütlesi gelememekte böylece pompa önündeki boruda bir boşluk eksi basınç doğurmaktadır ki, buna depresyon basıncı (alçalma basıncı veya alçalan basınç) denilir.

Alçalma dalgası depoya doğru ilerler ve hat sonunda sıfır değerine ulaşır. Pompadan son olarak çıkan ve önce alçalma dalgasının oluşumuna sebep olan su kütlesi, basınç düşümü nedeniyle depo önünden geri döner ve bu sefer yukarıdan aşağıya doğru ters bir su akımına sebep olur.

Bu akım da yine pompa önünde yüksek basınç meydana gelmesine sebep olur ki, bu yüksek basınca sürpresyon basıncı (yüksek basınç veya yükselen basınç) ve bunun doğurduğu dalgaya da sürpresyon dalga (yükselen basınç dalgası) denilir. Bir pompa ile bir depoya su basılması durumunda ortaya çıkacak basınç dalgalanmasının şeması Şekil 3.1 ‘de gösterilmiştir.



a) Pompa L uzunluğundaki terfi hattına sabit bir Q debisini basmaktadır. (Şekil 3.1.a.)

b) Pompa aniden durmuş veya çıkıştaki vana aniden kapatılmıştır. Basınç miktarı ΔH kadar az olan dalga ok yönünde depoya doğru hareket eder (Şekil 3.1.b)

c) Alçaltılmış dalganın depoya varışı (Şekil 3.1.c.)

d) Alçalmış basınç dalgasını depo ters çevirerek yükselen bir basınç dalgası halinde pompaya doğru gönderir (Şekil 3.1.d)

e) Yükselen basınç dalgası ok yönünde pompaya doğru gider (Şekil 3.1.e)

f) Kapanmış vana veya klape ile karşılaşan dalga tekrar yansır. Fakat bu defa üzerine ΔH kadar ilave basınç gelmiş olur ve H_0 + ΔH değerine ulaşır. (Şekil 3.1.f)

g) Bu ΔH basınç artışı depoya doğru hareket eder (Şekil 3.1.g)

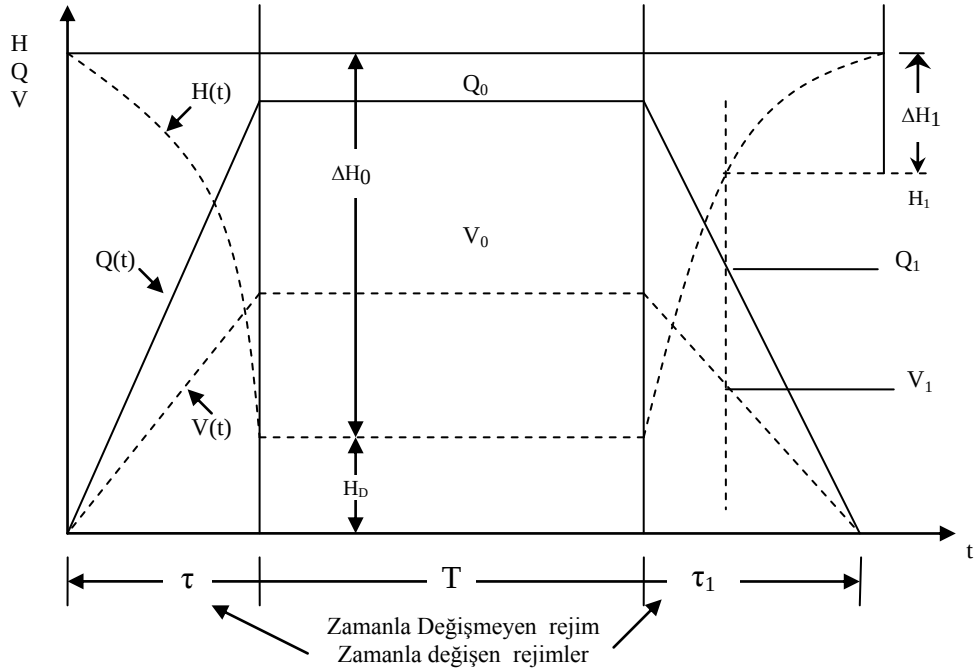
h) Açık depoya gelen bu basınç dalgası bir defa daha pompaya doğru yansıtılır; fakat bu defa alçalan bir dalga haline gelir (Şekil 3.1.h)

Şekil 3.1 : Bir pompa ile bir depoya su basılması durumunda boru boyunca ortaya çıkan basınç dalgalanmaları şeması

Pompaya kavuşan bu dalga tekrar alçalarak depoya doğru yola çıkar yani yeniden Şekil 3.1b'deki duruma dönülmüş olur. (Aksoğan ve Yücel, 1984) Bu konuda daha ayrıntılı bir örnek vermek uygun olacaktır. Başlangıçta kapalı bir durumda bulunan bir musluğun, yavaş yavaş açılmaya başlandığı ve belirli bir τ süresi sonunda bu işin tamamlandığı kabul edilsin. Bu durumda musluktan akmakta olan debi zamanın fonksiyonu olarak Q= 0 değerinden, belirli bir Q_0 değerine kadar yükselecek ve τ anından itibaren sabit kalacaktır.

Enkesitin sabit olması halinde hız ile debi benzer şekilde değişeceklerinden, bu süre zarfında hız da zamanla değişecektir (Şekil 3.2) Diğer taraftan zamanla değişmeyen rejimde, bir borunun herhangi bir enkesitindeki enerji seviyesi, borunun başlangıç enkesitindeki enerji seviyesiyle, söz konusu iki enkesit arasındaki yük kayıplarının fonksiyonu olduğundan, vananın kapalı olması halinde borunun herhangi bir enkesitindeki enerji seviyesi, borunun başlangıç enkesitindeki enerji seviyesine eşit olacaktır. Çünkü yük kayıpları ister sürekli ($h_s = \lambda . V^2.L/(2g. D)$), ister yerel ($h_y = \xi .V^2/2g$) olsun, daima hızın fonksiyonu olduklarından, $Q = 0$ için her ikisi de sıfır olacaktır. Bununla beraber vana açıldıkça artan debiyle, artan hızlar, gittikçe daha büyük yük kayıplarının doğmasına sebep olacaklardır. Bu nedenle $Q = Q_0$ debisi elde edildiği anda, göz önüne alınmış enkesitteki enerji seviyesi, boru başındaki enerji seviyesinden $\Delta H_0 = h_s + h_y$ kadar düşük olacaktır.

Vananın kapanması sırasında da benzer düşüncelerin yürürlükte olacağı; tabiatıyla bu defa Q ve V azalırken, enerji seviyesinin yükseleceği aşikârdır (kapanmanın kısmî olması, yani debinin Q_0 dan sıfıra düşeceğine, Q_1 debisinin düşmesi halinde de benzer şekilde düşünülebilir.



Şekil 3.2 : H (Yükseklik) , Q(Debi) , V(Hız) ile t (zamanın) Değişimi Grafikleri

Şekil 3.2'ye göre (0/π) ve ($T + \pi/T + \tau + \tau$) anları arasında borudaki akımın değişimi incelenmesi halinde; bu süreler, pratik nedenlerle, genellikle zamanla değişmeyen rejimin hüküm sürdüğü süreye göre çok küçüktür. Bununla beraber, bu sıralarda meydana gelen fiziksel olaylar, boruların boyutlandırılmasında ve arızaların sebepleri arasında çok önem taşıdıklarından, incelenmeleri pratik bakımdan büyük önem arz eder.

3.2. Elastik dalgaların yayılışı (Boyuna istikamette yayılan düzlemsel dalgalar)

Katı veya akışkan herhangi bir ortamın sıkışabilmesi, ortamın elastiklik modülü vasıtasıyla tanımlanabilir:

$$\frac{dp}{\varepsilon} = \frac{d\rho}{\rho} \qquad \textbf{(3.1)}$$

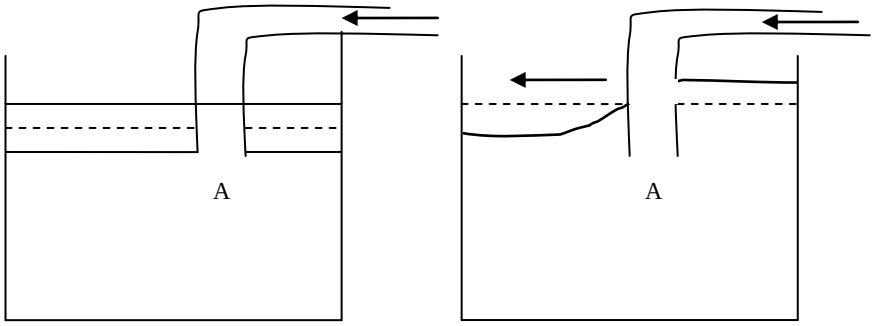
Burada $d\rho/\rho$ özgül kütledeki rölatif değişimi ve dp, bu değişimi meydana getiren basınç değişmesini göstermektedir. ε, elastiklik modülü; σ, POISSON katsayısı ve E, YOUNG modülü arasında

$$\varepsilon = \frac{E}{3(1-2\sigma)} \qquad \textbf{(3.2)}$$

bağıntısı mevcuttur. ε'nun boyutu, basınç boyutunda olup, genellikle kg/mm^2 ile ölçülür. İdeal gazlarda, ε esas olarak basınçla orantılıdır. İzoterm değişimlerin söz konusu olduğu hallerde $\varepsilon = \gamma.p$ alınabilir. Fiziksel olarak E, YOUNG modülünün boyutuna elastiklik katsayısını; ε'nun ise hacımsal elastiklik katsayısını gösterdiği söylenebilir.

ε, akışkanlarda ve katılarda, gazlara göre daha büyük değerler alır. Buna karşılık akışkanlarda ve katılarda ε ' da meydana gelen değişimler çok daha azdır. Örneğin, 0 ^oC sıcaklıkta, 760 mm Hg basınç altında, adiyabatik değişim halinde (ses dalgalarının yayılışı sırasındaki durum) hava için $\varepsilon = \gamma.p = 1{,}402.1{,}013.10^6$ *c.g.s* (centimeter, gram, second- santimetre, gram, saniye) $= 1{,}4 .10^{-2}$ kg/mm^2; su için $\varepsilon = 2.10^{10}$ *c.g.s* $= 2.10^2$ kg/mm^2, çelik için $\varepsilon = E/1{,}2$ c.g.s. $= 2.10^4/1{,}2 = 1{,}67.10^4$ kg/mm^2 'dir.

Bir madde ortamının herhangi bir yerinde, herhangi bir sebeple basınç değişimleri meydana getirildiği takdirde, ortaya çıkan değişiklik bütün yönlerde yayılır ve yayılma hızı sonlu bir değeri haizdir. Bununla beraber basınç değişimlerinin yavaş olması halinde, bu değişimlerin aynı anda bütün ortama yayıldıkları kabul edilir. Buna karşılık değişimlerin hızlı olması halinde, her an ortamda basınç üniform olarak yayılamaz. Değişimlerin yavaş ve hızlı olmaları, ancak elastik dalgaların etkisi altındaki ortamın boyutlarıyla, bu dalgaların hızları kıyaslandığında bir anlam taşır.



Şekil 3.3 : Comolet Prensibi

Elastik dalgaların yayılışı genellikle su yüzeyinde yayılan ağırlık dalgalarıyla karşılaştırılır. Durgun su ihtiva eden bir hazne ele alınsın ve bir alternatif pompa yardımıyla, haznenin herhangi bir A noktasından periyodik olarak su emilsin ve hazneye verilsin. Pompanın emme ve basma hızlarının küçük olması halinde su yüzeyinin zamanla alçalıp yükseldiği, fakat pratik olarak yatay kabul edilebileceği görülür. Buna karşılık pompanın emme ve basma hızının yüksek olması halinde yüzeyin yatay kabul edilemeyeceği ve A noktasında meydana gelecek bir dalganın yayılmaya başlayacağı görülür (Şekil 3.3).

Elastik dalgalar, izotrop ve sonsuz büyük ortamlarda herhangi bir değişikliğe uğramaksızın yayılabilirler; bununla beraber farklı iki ortamı birbirinden ayıran bir yüzeye rastladıklarında kırılmaya ve yansımaya uğrayabilirler. Gözönünde tutulması gereken iki önemli kaide mevcuttur.

Akışkan ortamda yayılan düzlemsel bir dalga, hareketsiz katı bir cidara rastladığında (dik olarak), işaret değiştirmeksizin yansır; buna göre bir sıkışma dalgası yansımadan sonra gene sıkışma dalgası olarak yayılır.

Akışkan ortamda yayılan düzlemsel bir dalga, basıncın sabit kaldığı bir yüzeye dik olarak çarparsa (örneğin bir akışkan yüzeyiyle karşılaşırsa), yansıma sırasında işaret değişimi olur. Buna göre bir sıkışma dalgası yansımadan sonra genleşme dalgası olarak yayılır.

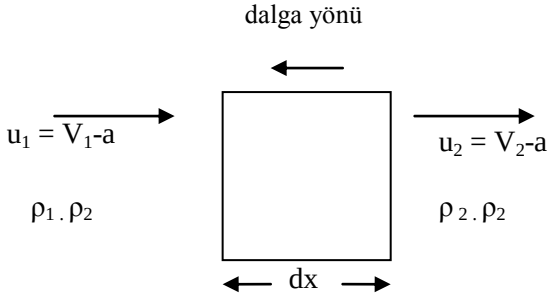
Elastik dalgalar, küçük hareketlerin süperpozisyonu prensibine uyarlar; buna göre basınçlar cebrik olarak, hızlar ve yer değiştirmeler geometrik (yani vektöriyel) olarak toplanır. Dolayısıyla şiddetleri aynı ve aksi istikamette yayılan iki dalganın mevcudiyeti halinde, toplam yer değiştirmenin sıfır olduğu, buna karşılık toplam basınç değişiminin iki katına çıktığı bir nokta mevcuttur; bu olay rijit bir cidarda yansımaya karşı gelir. Aksi istikamette yayılan bu dalgaların işaretlerinin ters olması halinde (birinin sıkışma, diğerinin genleşme) toplam yer değiştirmenin iki katına çıktığı, buna karşılık basınç değişiminin sıfır olduğu bir nokta mevcuttur. Sabit basıncı haiz bir cidarda meydana gelen yansıma bu gruba girer (haznede yansıma).

3.3. Düzlemsel dalgaların sonsuz ortamda yayılması

Parçacıkların yer değiştirmelerinin dalga yüzeylerine dik olduğu dalga hareketlerine boyuna dalgalar adı verilir (Roberson ve diğerleri, 1997). İdeal akışkanlarda sadece boyuna dalgalar yayılabilir. Titreşimlerin sonsuz küçük olması halinde a_0 dalga yayılma hızı

$$a_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \qquad \textbf{(3.3)}$$

bağıntısıyla belirlenebilir. Çünkü "a" hızıyla yayılan bir düzlemsel dalga düşünülsün ve bu dalganın geçtiği yerdeki parçacıkların hızları V_i ile gösterilsin. Birim enkesiti haiz bir akışkan dilimi alınıp, buna mekaniğin prensipleri uygulansın. Sisteme "$-a$ " hızı süperpoze edildiği takdirde, Parçacıkların rölatif hızları (Şekil 3.4)



Şekil 3.4 : Düzlemsel bir dalganın enkesiti

$$u_i = V_i - a \qquad \textbf{(3.4)}$$

olur. Bu sisteme göre basınçlar ve özgül kütle başlangıçtaki değerlerini korur. Buna göre kütlenin korunumu prensibinden;

$$\rho_1 . (V_1 - a) = \rho_2 . (V_2 - a) = q \qquad \textbf{(3.5)}$$

ve hareket miktarı denkleminden

$$q\,[(V_1 - a) - (V_2 - a)] = \rho_1 - \rho_2 \qquad \textbf{(3.6)}$$

elde edilir. Bu bağıntılarda q, kütlesel debileri göstermektedir. Bu denklemlerden $u_1 = V_1 - a$; $u_2 = V_2 - a$ çözülürse;

$$u_1 = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho_1 - \rho_2}} = V_1 - a \qquad \textbf{(3.7)}$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho_1 - \rho_2}} = V_2 - a \qquad \textbf{(3.8)}$$

bulunur. göz önüne alınan titreşimin durgun bir akışkanda yayılması ve sonlu bir değeri haiz olması halinde $V_1 = 0$ olacağından, dalga alanının hızı

$$a = u_1 = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta \rho}} \qquad \textbf{(3.9)}$$

olur. Bu ifadeden görüldüğü üzere, dalgaların yayılma hızı, dalganın geçişi sırasında meydana gelen basınç ve özgül kütle değişimlerinin fonksiyonudur.

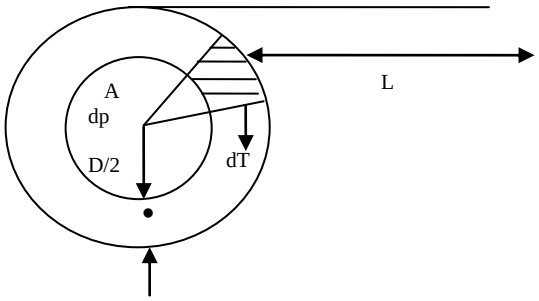
Buna karşılık, sonsuz küçük pertürbasyonların söz konusu olduğu elastik dalgaların yayılması halinde, V_1 ve V_2, a 'nın yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olurlar ve her iki ifade aynı sonucu verir:

$$a = a_0 = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Diğer taraftan, (3.1) bağıntısına göre $dp/d\rho = \varepsilon/\rho$ olduğundan, neticede (3.3) elde edilir. Gazların ve akışkanların elastiklik modülleri çok farklı olmasına rağmen, bu akışkanların a_0 dalga yayılış hızları arasındaki fark daha azdır. Normal şartlarda, hava için a_0 = 331 m/s , sakin su için a_0 =1410 m/s ' dir.

3.4. Düzlemsel dalgaların daire kesitli borularda yayılması

Boyuna elastik dalgalar, bir boru içerisindeki akışkanda da yayılabilirler. Cidarlarda meydana gelen bozulmalar ihmal edildiği takdirde, yayılmanın gene boru eksenine dik düzlemler boyunca olacağı kabul edilebilir. Fakat dalgaların "*a*" hızı, yukarıda hesaplanan a_0 hızından farklı olur; Çünkü bu halde hareketin süreklilik denklemi farklıdır. Bunun sebebi, dalganın oluşturduğu basınç değişimlerinin boru cidarlarının deforme olmasına sebep olmasıdır. Genellikle bu deformasyonlar küçüktür. Bununla beraber özgül kütle değişimleri de aynı mertebede olduklarından, hesaplarda göz önünde tutulmaları gerekir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Düzlemsel bir dalganın daire kesitli borudaki enkesiti

Sonsuz bir ortamdakine benzer şekilde hareket edilsin ve ilk olarak sonsuz küçük bir pertürbasyonun yayılışı incelensin. *A* enkesitli ve dalganın hızıyla ilerleyen bir enkesit için (yani sisteme $-a$ hızı süperpoze edildiği düşünüldüğü takdirde) süreklilik denklemi, rölatif hızlar *u* ile gösterildiği takdirde

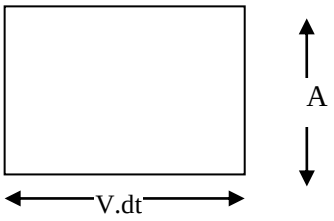
$$d(\rho \,.\, A \,.\, u) = 0 \qquad \textbf{(3.11)}$$

$$A \,.\, u \,.\, d\rho + \rho \,.\, u \,.\, dA + \rho \,.\, A \,.\, du = 0 \qquad \textbf{(3.11a)}$$

veya ($\rho . A . u$) ile bölerek

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{du}{u} = 0 \qquad \textbf{(3.11b)}$$

elde edilir. Hareket miktarı teoreminden ise



Şekil 3.6 : Dalga Enkesiti

$$\Sigma \vec{F} = m.\frac{\vec{du}}{dt} \qquad \textbf{(3.12)}$$

yazarak (Şekil 3.6) ve

$$\Sigma \vec{F} = -dp.A \qquad \textbf{(3.12a)}$$

$$m = u \,.\, dt \,.\, A.\, \rho \qquad \textbf{(3.12b)}$$

olduğu düşünülerek

$$-d\,\rho.\, A = \rho \,.\, u \,.\, dt \,.\, A.\, \frac{du}{dt} \qquad \textbf{(3.12c)}$$

ve neticede

$$dp = -\rho \,.\, u \,.\, du \qquad \textbf{(3.12d)}$$

elde edilir. Diğer taraftan dairesel borunun çapı *D*, et kalınlığı *e*, boru malzemesinin YOUNG modülü *E* ile gösterildiği takdirde, enkesit değişimleriyle basınç değişimleri arasında

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{E}.\frac{D}{e} \qquad \textbf{(3.13)}$$

bağıntısının varolduğu gösterilebilir. $d\rho = \rho.dp/\varepsilon$ olduğundan (3.1), (3.12d), (3.13) ifadeleri (3.11b) 'de yerleştirilirse

$$\frac{\rho.\frac{dp}{\varepsilon}}{\rho}+\frac{dp}{E}.\frac{D}{e}-\frac{dp}{\rho..u^2}=0 \qquad \textbf{(3.14)}$$

ve buradan *u* çözülerek

$$u=\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}.\frac{1}{\sqrt{1+\frac{\varepsilon.D}{E.e}}} \qquad \textbf{(3.15)}$$

elde edilir. Boru içindeki akışkanın durgun bulunması halinde $u = a$ olacağından, neticede

$$u=a=\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}.\frac{1}{\sqrt{1+\frac{\varepsilon.D}{E.e}}}=a_0\times\sqrt{\frac{1}{1+\frac{\varepsilon.D}{E.e}}} \qquad \textbf{(3.15a)}$$

bulunur. Görüldüğü üzere borulardaki yayılma hızları, sonsuz ortamlardaki yayılma hızlarından küçüktür $a_0=\sqrt{\varepsilon/\rho}$.

$\varepsilon.D/E.e$ oranı sıfıra yaklaştıkça a/a_0 oranı 1'e yaklaşır (sonsuz rijit boru, sonsuz et kalınlıkla boru veya çok fazla sıkıştırılabilen akışkan hali) (Roberson ve diğerleri, 1993).

3.5. TEMEL DENKLEMLER

3.5.1. Yayılma Hızının formülü

Pompanın aniden durması sonucu ortaya çıkan bu alçalma ve yükselme basınçlarının değeri eksi ve artı olarak birbirlerine eşit ve değerlerinin;

$$\Delta h = \pm \frac{a.\Delta v}{g} \qquad \textbf{(3.16)}$$

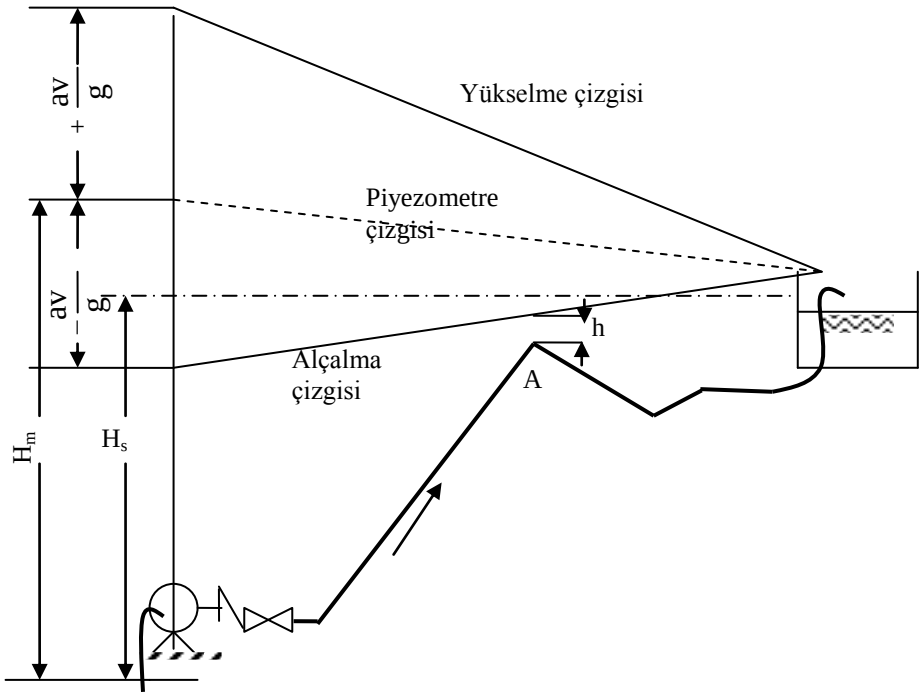
'nin olduğu belirtilmişti. Formülde (Δv) borudaki su hızı değişimini, (a) alçalma ve yükselme dalgalarının yayılma hızını , (g) ise yerçekimi ivmesini gösterir **(**Zaruba, 1993).

Borudaki normal çalışma esnasındaki su hızı v, vana kısılması sonucu meydana gelen hız v_1 ise $\Delta v = v - v_1$ olur . Şayet $v_1 = 0$ olursa $\Delta v = v$ olur.

Bir terfi hattında alçalma ve yükselme sonucu ortaya çıkan basınç değerlerinin maksimum ve minimum değerleri, ani kapamada $v_1 = 0$ olacağından pompanın çıkışındaki boruda işletme basıncı (H_m) ile gösterilirse aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 3.7).

$$H_{\max} = H_m + \frac{a.v}{g} \quad \text{(Yükselme Hali)} \qquad \textbf{(3.17)}$$

$$H_{\min} = H_m - \frac{a.v}{g} \quad \text{(Alçalma Hali)} \qquad \textbf{(3.17a)}$$



Şekil 3.7: Terfi Hattında su darbesi etkisi

Terfi Hattı borularının (H_{max}) basıncını karşılayacak şekilde seçilmesi zorunludur. (H_m - (a . v / g)) değerinin yani (H_{min})'nin her noktada sıfırdan büyük olması da istenir. Bu sağlanamıyorsa boruda "kavitasyon" denilen hadise ortaya çıkar. Terfi hattında kavitasyon olması istenmez, giderilmesi istenir. A noktasında H_{min} çok düşük olduğundan kavitasyon meydana gelebilir. (Şekil 3.7)

Yukarıda su darbesi ile ilgili olarak verilen formüldeki değerlerden (a) değerinin dışında kalanlar projeyi hazırlayan tarafından bilinen değerlerdir (Özgür, 1971).

a değeri ise Allievi teorisine göre şu formülle hesaplanır (Öztürk**,** 1996).

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma}\ \frac{1}{\frac{1}{K}+\frac{D}{E.e}}} \qquad \textbf{(3.18)}$$

Burada g = yerçekimi ivmesi , γ = akışkanın özgül ağırlığı , K = akışkanın elastisite modülü , D = boru çapı , E = boru malzemesinin elastisite Modülü, e = boru et kalınlığı. 10^{o}C'deki su için K ve E değerleri alınarak ;

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48 + K.\frac{D}{e}}} \quad (m/s) \qquad \textbf{(3.19)}$$

bulunur **(**DSİ Genel Müd., 2007). (K) değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Borularda K değerleri

Font borular için	K = 1
Çelik borular için	K = 0,5
Asbestli çimento borular için	K = 4,4
PVC ve PE borular için	K = 33,3
Beton borular için	K = 5
Betonarme borular için	K = 0,5
Kurşun borular için	K = 5

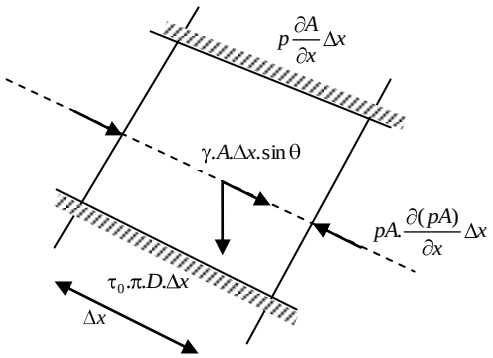
Betonarme borularda, malzeme heterojen olduğundan, *E* 'nin, dolayısıyla *H* 'nın belirlenmesi biraz hatalı olur. Bununla beraber a dalga yayılma hızı oldukça geniş sınırlar arasında değişmektedir.

Dalga yayılma hızı, çelik borularda 100 m/s mertebesinde olduğu halde plastik borularda birkaç yüz m/s 'ye, kauçuk borularda 15 m/s 'ye düşer (bu son değer hemen hemen kan damarlarında rastlanan değerlerdir). Su darbelerinin kritik değerlerine karşı gelen $\frac{a.v}{g}$ ifadesinden aynı v hızı için kritik basıncın a yayılma hızı ile orantılı olduğu ve bu açıdan PVC (Poli Vinil Klorür) ve PE (Poli Etilen) boruların çok avantajlı olduğu görülür.

3.5.2. Hareket denklemi

Hareket denklemini elde etmek için Δx boyundaki bir akışkan dilimine Newton 'un ikinci kanunu uygulanacaktır. Hareketin bağımlı değişkenleri olarak *h* piyezometre kotları ve *V* eksenel hızları alınacaktır. Serbest değişkenler ise boru başından itibaren ölçülen x eksenel mesafeleri ve *t* zamanıdır. Problem çeşitli (x , *t*) değerleri için (*h*, *V*) çiftinin belirlenmesidir.

İncelemeler sırasında boru ekseninin yatayla θ açısını yaptığı, türbülanslı akımların söz konusu olduğu ve dolayısıyla yük kayıplarının hızların karesiyle orantılı olduğu kabul edilecektir.



Şekil 3.8 : Sisteme etkiyen kuvvetlerin şematik gösterimi

Şekil 3.8.'deki sisteme etkiyen kuvvetler yazıldığı takdirde;

$$\rho.A-\left[p.A+\frac{\partial}{\partial x}(p.A).\Delta x\right]+p.\frac{\partial A}{\partial x}.\Delta x+\gamma.A.\Delta x.\sin\theta-\tau_0.\pi.D.\Delta x=\rho.A.\Delta x.\frac{dV}{dt} \quad \textbf{(3.20)}$$

ve sadeleştirip, ($\rho.A.\Delta x$) kütlesine de bölerek;

$$-\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial x}+g.\sin\theta-\frac{4.\tau_0}{\rho.D}=\frac{dV}{dt} \quad \textbf{(3.20a)}$$

elde edilir. Zamanla değişmeyen rejim ve türbülanslı akımlarda

$$\tau_0=\frac{\rho C_f}{8}V^2 \quad \textbf{(3.21)}$$

dir. Bu ifadenin zamanla değişen hareketler için de geçerli olduğu kabul edildiği takdirde

$$-\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial x}+g.\sin\theta-\frac{C_f.V^2}{2D}=\frac{dV}{dt} \qquad \textbf{(3.20b)}$$

elde edilir. Diğer taraftan

$$h=z+\frac{P}{\gamma}; \qquad p=\rho.g.(h-z); \qquad \sin\theta=-\partial z/\partial x \qquad \textbf{(3.22)}$$

olduğu da düşünülerek, (3.20b) denklemi

$$-\frac{1}{\rho}\cdot\rho g\left(\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{\partial z}{\partial x}\right)+g.\sin\theta-\frac{C_f\cdot V^2}{2\cdot D}=\frac{dV}{dt} \qquad \textbf{(3.20c)}$$

$$-g\cdot\frac{\partial h}{\partial x}-g\cdot\sin\theta+g\cdot\sin\theta-\frac{C_f\cdot V^2}{2\cdot D}=\frac{dV}{dt} \qquad \textbf{(3.20d)}$$

$$\frac{dV}{dt}+g\cdot\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{C_f\cdot V^2}{2\cdot D}=0 \qquad \textbf{(3.20e)}$$

şeklini alır. Yük kayıplarının akım istikametine ters yönde olduklarını hesaba katabilmek için bundan sonra, (3.20e) denkleminde $V^2 = V\cdot|V|$ konulur ve dV/dt maddesel türevi açılarak yazılırsa;

$$\frac{\partial V}{\partial t}+V\cdot\frac{\partial V}{\partial x}+g\cdot\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{C_f V|V|}{2\,D}=0 \qquad \textbf{(3.20f)}$$

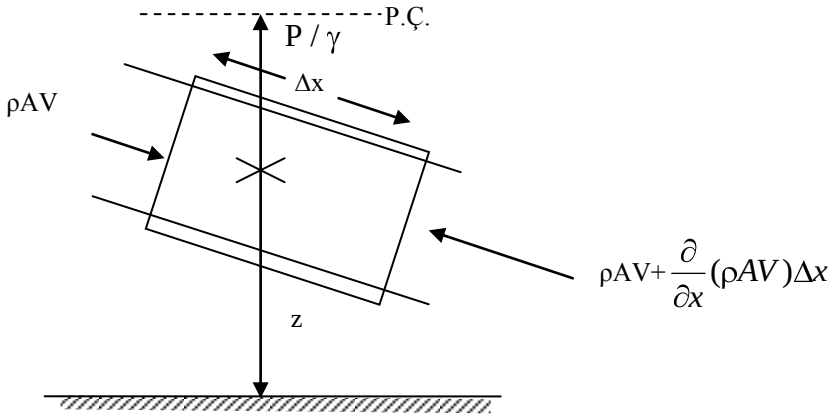
elde edilir.

3.5.3. Süreklilik denklemi

Birim zaman zarfında Δx boyundaki dilime giren ve çıkan kütlelerin farklarının, bu süre zarfında, göz önüne alınmış hacmin kütlesindeki değişime eşit olacağı yazıldığı takdirde (Şekil 3.9)

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho\cdot A\cdot V)\right]\cdot\Delta x=\frac{\partial}{\partial t}(\rho\cdot A\cdot\Delta x) \qquad \textbf{(3.23)}$$

elde edilir.



Şekil 3.9 : Sisteme etkiyen kuvvetlerin şematik gösterimi

Bu ifade açılır ve Δx, zamandan bağımsız olduğundan türevin dışına çıkartılırsa, Δx ile bölündükten sonra

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho A) + V\frac{\partial(\rho A)}{\partial x} + \rho A\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(3.23a)}$$

veya ilk iki terimin ($\rho.A$) nın maddesel türevine eşit olduğuna dikkat edilirse

$$\frac{d}{dt}(\rho \cdot A) + \rho \cdot A.\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(3.23b)}$$

elde edilir. Bundan sonra ilk terim dönüştürülecektir; bu terim cidarların elastikiyetinin ve akışkanın sıkışabilmesinin etkisini belirtmektedir.

$$\rho \cdot A = (\rho_0 + d\rho)\cdot(A_0 + dA) = \rho_0 A_0\left(1+\frac{d\rho}{\rho_0}\right)\left(1+\frac{dA}{A_0}\right) \cong \rho_0 A_0\left(1+\frac{d\rho}{\rho_0}+\frac{dA}{A_0}\right) \textbf{(3.24)}$$

yazılabilir. Burada ρ_0, A_0 zamanla değişmeyen rejimdeki değerleri, $d\rho$ ve dA bu değerlerden olan sapmaları göstermektedir. Son eşitlik yazılırken ikinci mertebeden küçük olan $(d\rho/\rho_0)$ (dA/A_0) terimi, birinci mertebeden küçük olan terimlerin yanında ihmal edilmiştir. Diğer taraftan (3.1) bağıntısına göre

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = \frac{dp}{\varepsilon} \qquad \textbf{(3.1)}$$

ve (3.13) bağıntısına göre

$$\frac{dA}{A_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{D}{e} \cdot dp \qquad \textbf{(3.13)}$$

olduğu düşünülür ve bu değerler yukarıda yerleştirilirse

$$\rho \cdot A = \rho_0 \cdot A_0 \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right) dp \right] = \rho_0 \cdot A_0 \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right) (p - p_0) \right] \qquad \textbf{(3.24a)}$$

elde edilir. Buna göre

$$\frac{d}{dt} \cdot (\rho \cdot A) \cong \rho_0 . A_0 \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right) . \frac{dp}{dt} \qquad \textbf{(3.24b)}$$

bulunur. Bu ifade yazılırken, çap ve et kalınlığı değişimlerinin, basınç değişikliği yanında ihmal edilebileceği kabul edilmiştir. Bundan sonra

$$\frac{1}{a^2} = \rho_0 . \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right) \qquad \textbf{(3.25)}$$

tanımlaması yapıldığı takdirde (3.24b) denklemi

$$\frac{d(\rho \cdot A)}{dt} = \frac{A_0}{a} \cdot \frac{dp}{dt} \qquad \textbf{(3.25b)}$$

ve dolayısıyla süreklilik denklemi, A_0'la da bölerek

$$\frac{1}{a^2} \cdot \frac{dp}{dt} + \rho_0 \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(3.25c)}$$

şeklini alır. $p = \rho_0 \cdot g \cdot (h - z)$ konulduğu takdirde ise

$$\frac{g}{a^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt} - \frac{dz}{dt} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(3.25d)}$$

ve

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial z}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial z}{\partial x} \qquad \textbf{(3.25e)}$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\sin\theta \quad , \quad \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \qquad \textbf{(3.26)}$$

olduğu da düşünülerek

$$\frac{g}{a^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt} + V \cdot \sin\theta \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(3.25f)}$$

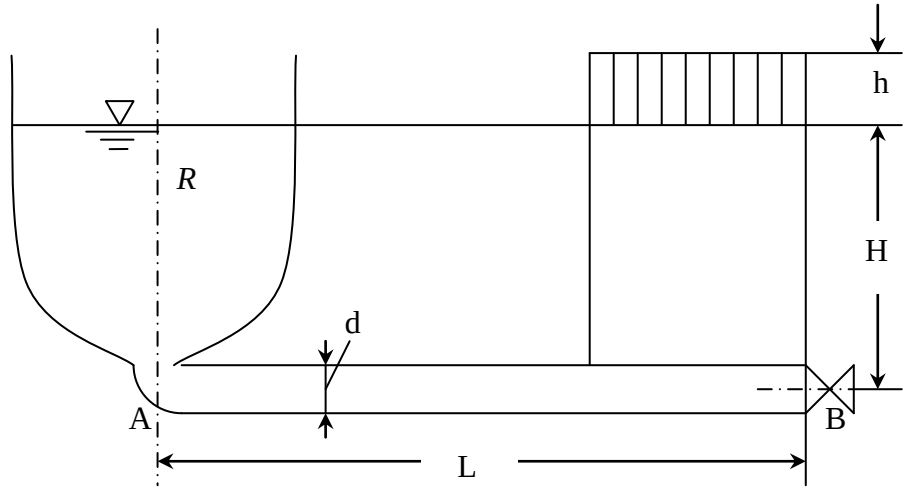
veya a^2/g ile çarpıp, maddesel türev açıldıktan sonra

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \sin\theta = 0 \qquad \textbf{(3.25g)}$$

elde edilir. Bu bağıntı boru ekseninin eğiminin, sürtünmelerin, akışkanın sıkışabilmesinin, boru cidarlarının deforme olabilmesinin hesaba katılması hali için süreklilik denklemidir.

3.6. Su Darbesi Durumları

Şekil 3.10 'daki gibi bir *R* haznesinin beslediği uzun bir boru hattının ucundaki vananın kapanması ile meydana gelen olayları inceleyelim. Başlangıçta rejim halinin oluştuğunu ve sabit kesitli olan boru içinde bir V_0 hızının mevcut olduğunu düşünelim ve muhtelif halleri ele alarak basitlik sağlamak için sürtünmeleri ihmâl edelim.



Şekil 3.10 : Uzun bir boru hattının ucundaki vananın beslediği R Haznesi.

3.6.1. Mutlak sıkıştırılamayan akışkan hali

Bu halde akışkanı mutlak sıkıştırılamayan akışkan olarak ele alarak boru cidar malzemesinin de elastisitesini ihmal edelim. Bu takdirde süreklilik şartı yüzünden boru içindeki hızlar bütün kesitlerde her an birbirine eşit olmak mecburiyetindedir. Başka bir deyişle *B* noktasındaki vananın yarattığı hız değişmeleri bütün boruya aynı anda intikal eder. Şimdi böyle bir tertipte vananın kapanmasının etkisini vana Δt zamanı içinde borudaki hızı ΔV kadar azaltsa boru içindeki akışkan kütlesinin hareket miktarında bir değişme yaratıldığından bu değişmeyi yaratacak şekilde bir kuvvet doğmalıdır. Bu kuvvet *B* noktasındaki basıncın artması suretiyle doğar. İşte bir bakıma akışkanın ataleti yüzünden doğan bu fazla basınca S*u Darbesi Basıncı* ismi verilir. Şimdi basınç artmasının değerini hesaplayalım. Hareket miktarı teoreminin basit şekline göre *m* akışkan kütlesine ΔV hız değişimini Δt zamanında verebilen *F* kuvveti

$$F \,.\, \Delta t = m \,.\, \Delta V \qquad \textbf{(3.27)}$$

şeklinde hesaplanacaktır. Fazla basınç Δp, boru çapı *d*, boru uzunluğu *l* ile gösterilirse

$$F = \Delta p \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad , \quad m = \rho \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \qquad \textbf{(3.28)}$$

değerleri yerine konarak

$$\Delta p \frac{\pi d^2}{4} \cdot \Delta t = \frac{\gamma}{g} \frac{\pi d^2}{4} \cdot \Delta V \qquad \textbf{(3.27a)}$$

$$h = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{l}{g} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad \textbf{(3.27b)}$$

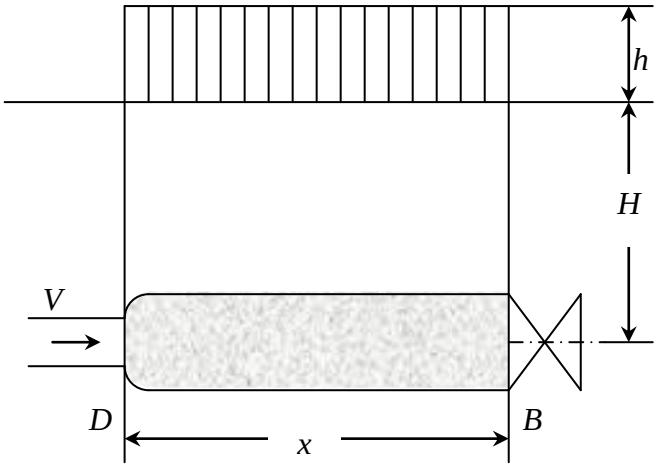
neticesi bulunur. Görülüyor ki kapama ne kadar hızlı olursa basınç artması da o nispette fazla olmaktadır. Eğer kapama kanunu lineer ise ve τ zamanı içinde tam kapama oluyorsa su darbesi, yani *B* noktasındaki basınç artmasının akışkan sütunu cinsinden değeri

$$h = \frac{l}{g} \frac{V_0}{\tau} \qquad \textbf{(3.27c)}$$

şeklini alır. Burada ani kapama için ($\tau = 0$) basıncın sonsuza gittiği görülmektedir. Gerçekte akışkanın ve borunun ihmal edilemeyen elastikliğinden dolayı su darbesi sonlu değer almaktadır.

3.6.2. Sıkışabilen Akışkanlar hali (Gerçek akışkan)

Deneyler göstermiştir ki, su ve buna benzer hakiki akışkanların sıkıştırılabilme özelliği bu olayda ihmal edilemez. Şimdi gerçek akışkan halinde darbenin gelişimini izleyelim. Öncelikle vananın ani kapanması halini inceleyelim: *B* kesitindeki parçacıklar derhal duracaklar, fakat diğer kesitlerdeki parçacıklar kapanıştan henüz haberdar olmadıkları için V_0 hızı ile akışa devam edeceklerdir. Bunun neticesinde su sağ tarafa doğru bir sıkışmaya maruz kalır. Kapanma anından *t* gibi bir zaman sonra kapanma haberi Şekil 3.11 'de *x* uzaklığındaki *D* kesitine kadar gelebilmiştir. Bu anda *D* ile *B* arasında kalan boru parçasında su sıkışmış durumdadır. Bunun neticesinde bu kısımda bir basınç artması meydana gelmiştir. Basıncın artması ile boru da genişlemiştir. *D* noktasının boru içinde ilerleme hızını "*a"* ile gösterelim.



Şekil 3.11 : Gerçek akışkan halinde darbenin gelişimi

Buradan

$$x = a \cdot t \qquad \textbf{(3.29)}$$

bağıntısı yazılır. Eğer borunun genişlemesi ihmal edilirse "a" sesin su içindeki hızına eşit olur. Şimdi hareket miktarı teoremini uygulayalım. Boru kesit alanı *S* ise *t* zamanı süresinde durağanlığa geçen kütle miktarı $\rho\, S\, x$ dir; Δp basınç artmasını göstermek üzere teorem,

$$\Delta p \,.\, S = \rho\, Sx \cdot \frac{V_0}{t} \qquad \textbf{(3.30)}$$

şeklinde yazılır. Buradan

$$\Delta p = \rho \cdot V_0 \cdot \frac{x}{t} \qquad \textbf{(3.30a)}$$

olarak hesaplanır. Su darbesi için, akışkan sütunu cinsinden,

$$h = \frac{a \,.\, V_0}{g} \qquad \textbf{(3.30b)}$$

basit formülü elde edilir. Görülüyor ki vana ani olarak kapatıldığı halde basınç artması sınırlıdır ve bu basınç fazlalığı depoya doğru "a" hızı ile yürür.

NOT:

Şekil 3.11 'de kapama anından *t* zaman sonra boru içindeki basınç yayılışı gösterilmiştir. Deponun su seviyesi *H* ile temsil edildiğine göre basınç darbesinin ulaştığı *D* kesitine kadar basıncın depo seviyesine oranla *h* kadar daha yüksek olduğunu görülmektedir. Bu durumu kabul edebilmek için boru içinde sürtmelerin tamamiyle ihmal edilmesi gereklidir. Ayrıca dinamik basıncın *H* yüksekliği yanında ihmal edilmesi icap eder. Çünkü *H* = sbt. eğrisi aslında piyezometrik basıncı değil yük hattını gösterir. Basınç darbesi ise piyezometrik hat üzerine ilave edilmelidir. Basitliği sağlamak için bu ihmaller yapılmaktadır.

3.6.3. Kısmi kapama

Şekil 3.10 'da *B* 'deki vana (tam kapama yerine) kısmi olarak kapansaydı V_0 hızı V_1 hızına indirilecekti. Biraz önceki bölümde tatbik edilen metod aynen buraya uygulanırsa, burada hızdaki değişiklik ($V_0 - V_1$) kadar olduğundan buna eşdeğer su darbesinin şiddeti

$$h = \frac{(V_0 - V_1)\,a}{g} \qquad \textbf{(3.30c)}$$

formülü ile hesaplanır. (3.30b) ifadesi bu formülün özel bir hali olmaktadır.

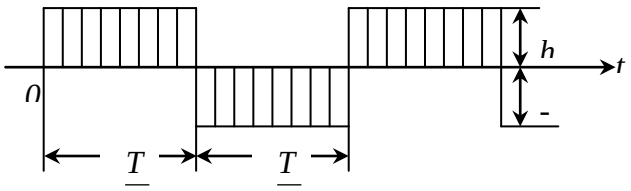
3.6.4.Olayın Gelişmesi

Yukarıda söz konusu olduğu gibi, ilk kapama hareketinden sonra *a* hızı ile bir basınç dalgası depoya doğru yol alacaktır. Bu dalga *A* noktasına Şekil 3.10' a varınca bütün akışkan sütunu *"h"* basıncı tesiri altında durgun hale geçmiş durumda olur. Depoyu büyük kabul edersek sıkışan suyun derhal *A* noktasından itibaren rahatlamak için genişleyeceği görülür. Başka bir deyişle boru içinden depoya doğru bir akış olur. Su ve cidar tam anlamıyla elastik ise meydana gelen hızın mutlak değeri yine V_0 olur ve hadisenin yayılış hızı da «*a*» dır. Demek oluyor ki basınç dalgası depoya varınca derhal bir rahatlama dalgası teşekkül ederek vanaya doğru hareket eder. Bu dalga *B* ye varınca artık bütün akışkan kütlesi (yük kayıpları ihmal edilmek şartı ile) statik basınç tesiri altında kalır yani su darbesinin doğurduğu ilave basınç ortadan kalkmıştır. Fakat şimdi de bütün su kütlesi depoya doğru V_0 hızını kazanmıştır.

Başlangıçtan bu ana kadar geçen zaman $\frac{T}{2}$, boru boyu *L* ile gösterilirse $\frac{2L}{a}=\frac{T}{2}$ olur.

Bu anda *B* noktasında bir alçalma doğar bunun mutlak değeri "*h"* kadardır. Çünkü *B* noktasındaki akışkanın depoya akma isteği akışkanı eksi bir basınç altında bırakır. Tabiatıyla meydana gelen yeni dalga *A* 'ya doğru yol alırken vardığı kesitte taneciklerin hızını sıfıra indirmiş olur. Depoya varınca bütün tanecikler durgun hale geçer fakat bu sefer bütün sütunda eksi bir basınç bulunduğundan bu dalga *A* noktasında rahatlama dalgası haline dönüşerek vanaya doğru harekete geçer. Bu yeni rahatlama dalgası *B* noktasına varınca bütün su vanaya doğru V_0 hızını kazanmış olur. Bu ise ilk vaziyete dönüş demektir. O halde başlangıçtan *T* zaman sonra her şey yeniden başlar.

Bu anlatılanlara göre *B* noktasında basıncın zamana göre değişimi Şekil 3.12 'de gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 3.12 : *B* noktasında basıncın zamana göre değişimi

3.7.Allievi Formülleri

3.5.2 ‘de açıklanan Hareketin denklemleri;

$$g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{C_f \cdot V \cdot |V|}{2D} = 0 \qquad \textbf{(3.20f)}$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot sin\theta = 0 \qquad \textbf{(3.25g)}$$

idi. Borunun yatay olduğu kabul edilir ve ideal akışkanlar düşünülürse

$$V \cdot sin\theta = 0; \quad \frac{C_f \cdot V \cdot |V|}{2D} = 0 \qquad \textbf{(3.31)}$$

olur. Diğer taraftan gözlemler *h* ve *V* fonksiyonlarında yere bağlı değişimlerin, zamanla değişen değişimlerin yanında çok küçük olduğunu göstermektedir:

$$\frac{\partial h}{\partial x} << \frac{\partial h}{\partial t}; \quad \frac{\partial V}{\partial x} << \frac{\partial V}{\partial t} \qquad \textbf{(3.32)}$$

Buna göre aynı bir ifadede *h*’nın veya *V* ‘nin hem *x*, hem de *t* ’ye göre değişimi mevcut olduğu takdirde, yere bağlı değişim, zamanla değişen değişimin yanında ihmal edilebilecektir. Bu koşullar altında, hareket ve süreklilik denklemleri

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \qquad \textbf{(3.33)}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(3.34)}$$

şekillerini alırlar. İlk denklem *x*’e; ikinci denklem *t*’ye göre türetilirse

$$g \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x . \partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 V}{\partial t \cdot \partial x} = -g \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \qquad \textbf{(3.33a)}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial x \cdot \partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 V}{\partial x \cdot \partial t} = -\frac{g}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \qquad \textbf{(3.34a)}$$

ve bu iki ifadeden

$$a^2 \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \qquad \textbf{(3.35)}$$

elde edilir. Bu bağıntının genel çözümü

$$h = h_0 + F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \qquad \textbf{(3.35a)}$$

tür. Bu değer (3.34) bağıntısında yerleştirildiği takdirde

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a^2}\left[F'\left(t - \frac{x}{a}\right) + f'\left(t + \frac{x}{a}\right)\right] \qquad \textbf{(3.34b)}$$

$$F' = \partial F / \partial t; \quad f' = \partial f / \partial t \qquad \textbf{(3.34c)}$$

elde edilir. Bu denklem x'e göre entegre edilirse

$$V = V_0 + \frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right)\right] \qquad \textbf{(3.34d)}$$

bulunur. (3.34d) ve (3.35a) bağıntılarına ALLIEVI formülleri adı verilir. Bu ifadelerdeki h_0 ve V_0 büyüklükleri sabit değerler olup, titreşim meydana getirilmeden mevcut olan üniform akımın piyezometre kotunu ve hızını göstermektedir. Dolayısıyla bu büyüklükler, başlangıçta var olduğu düşünülen zamanla değişmeyen rejime ait değerlerdir. Her ikisi de sıfır olabileceği gibi, içlerinde sadece bir tanesi de sıfır olabilir.

Elde edilmiş bulunan bağıntılar, pertürbasyon (düzensizlik, huzursuzluk) hareketinin, başlangıçta var olan zamanla değişmeyen rejim hareketine süperpoze olduğunu göstermektedir. (3.35a) bağıntısından elde edilecek olan $h - h_0$ farkı, basınçtaki artışı, yani herhangi bir x– enkesitinde t anında meydana gelen aşırı basıncı göstermektedir.

(3.35a) bağıntısından görüldüğü üzere toplam aşırı basınç F ve f aşırı basınçlarının toplamından meydana gelmektedir. Bunlardan F aşırı basıncı, deformasyona uğramaksızın "a" dalga hızıyla $+x$'ler yönünde; ve f aşırı basıncı aynı hızla $-x$'ler yönünde yayılmaktadır.

Bağıntıya göre, herhangi bir anda *x* absisli bir noktada mevcut aşırı basınç, bu anda bu noktada karşılaşan *F* ve *f* dalgalarının toplamına eşittir.

Boruda sadece bir tek tip dalganın mevcut olduğu haller olabilir. Örneğin sadece *F* dalgasının var olduğu kabul edilsin. Bu takdirde

$$h - h_0 = F\left(t - \frac{x}{a}\right) \qquad \textbf{(3.35b)}$$

$$V - V_0 = \frac{g}{a} \cdot F\left(t - \frac{x}{a}\right) \qquad \textbf{(3.34e)}$$

veya *F* fonksiyonu yok edilerek

$$\Delta h = \frac{a}{g} \cdot \Delta V \qquad \textbf{(3.36)}$$

bulunur. Benzer şekilde sadece f dalgasının mevcut olması halinde

$$\Delta h = -\frac{a}{g} \cdot \Delta V \qquad \textbf{(3.37)}$$

elde edilir. Bu iki özel hal için piyezometre kotunda meydana gelen değişimle, hızda meydana gelen değişim arasındaki ilişki, yukarıdaki basit bağıntılarla ifade olunabilir. *F* dalgalarının söz konusu olması halinde Δh ve ΔV aynı işareti haiz oldukları halde (3.36) bağıntısına göre), *f* dalgalarında bu iki büyüklük ters işareti haizdir ((3.37) bağıntısına göre). Genel olarak *F* ve *f* dalgalarının her ikisinin de mevcut olduğu hallerde, Δh ve ΔV arasındaki ilişki yukarıdakiler kadar basit olmaz.

ALLIEVI denklemlerinde *F* ve *f* fonksiyonları başlangıç ve sınır şartları yardımıyla belirlenecektir. (Ünsal, 1978)

L uzunluğunda daire kesitli bir boru düşünülsün ve borunun, su darbesi sonunda seviye değişimleri ihmal edilebilecek kadar geniş bir hazneyle irtibatlı olduğu kabul edilsin. Borudan geçen debi, mansap ucundaki bir vana vasıtasıyla ayarlansın. $t = 0$ anında boruda zamanla değişmeyen rejim mevcuttur ve bütün enkesitlerde ortalama hız V_0 değerindedir (Borudan çıkış hızının V_0 değerinde olması için vananın tamamen açık olması gerekir. Aksi halde çıkış hızı $V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (z_C - z_B)}$ olur.

İdeal akışkanlar ele alınmış olduğundan borunun bütün noktalarında $h = h_0$ dır. Bunlara göre; $t = 0$ için $V_i = V_0$ ve $h_i = h_0$ dır.

F ve f fonksiyonlarının her ikisi de sıfıra eşittir. Piyezometre çizgisi, su yüzeyinin $(V_0^2 / 2g)$ kadar altında bulunan yatay bir doğrudur. Bu anda vana açıklığında bir değişim meydana getirildiği takdirde, meydana gelen dalga *B*'den *A*'ya doğru yayılır. Dolayısıyla oluşan dalga, bir *F* dalgasıdır. *A* noktasına ulaştıktan sonra, dalga, daha ileri gitmez ve bir yansımaya uğradıktan sonra geri döner; dolayısıyla da yansımadan sonra eksi *x*– ler istikametinde ilerler. Buna göre yansımadan sonraki dalga bir *f* dalgasıdır. Aşağıda *F* ve *f* dalgaları arasındaki ilişki araştırılacaktır.

A noktasında zamanla değişen olmaksızın $h_A = h_0$ ve P_A = sabit 'tir. Dolayısıyla bu noktada bütün zamanlar için aşırı basınç sıfır olduğundan (3.35a) denklemine göre

$$F\left(t - \frac{L}{a}\right) + f\left(t + \frac{L}{a}\right) = 0 \qquad \textbf{(3.38)}$$

veya

$$f\left(t + \frac{L}{a}\right) = -F\left(t - \frac{L}{a}\right) \qquad \textbf{(3.39)}$$

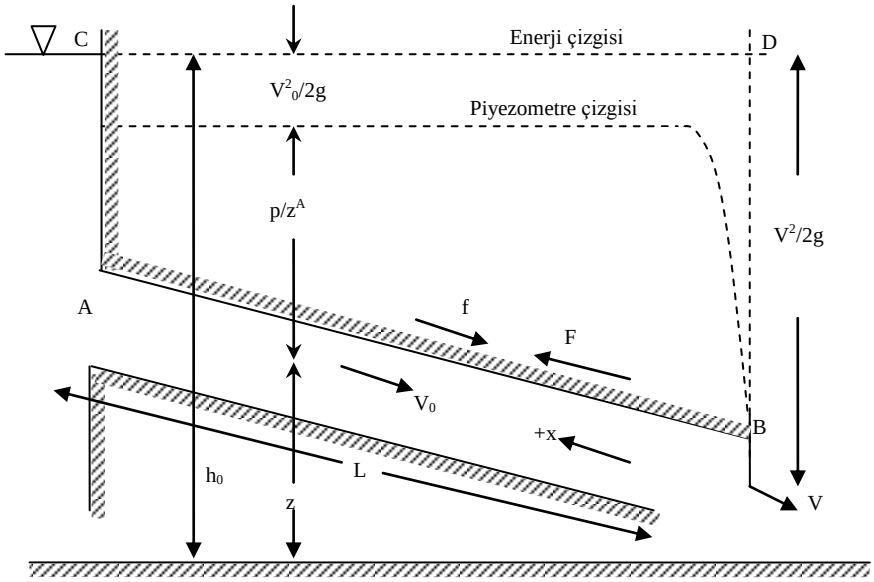
elde edilir.

$$t + \frac{L}{a} = t' \qquad \textbf{(3.40)}$$

değişken dönüşümü yapıldığı takdirde ise, (3.39) denkleminden

$$f(t') = -F\left(t' - \frac{2L}{a}\right) \qquad \textbf{(3.41)}$$

bulunur. Buna göre f fonksiyonunun t' anındaki değeri F fonksiyonunun $(t' - 2L/a)$ anındaki değerinin ters işaretlisine eşittir. Bu ifade yardımıyla gelen *F* dalgasının şekli bilindiği takdirde, yansımış f dalgasının matematik şekli belirlenebilir. F fonksiyonunun matematik ifadesi ise $t = 0$ anından itibaren *B* noktasına meydana gelen debi değişimi tarafından belirlenir.(Şekil 3.13)



Şekil 3.13: Hazne – Hat ilişkisi Şematik gösterimi

Bu açıklamalara göre ALLIEVI denklemlerinin bu halde

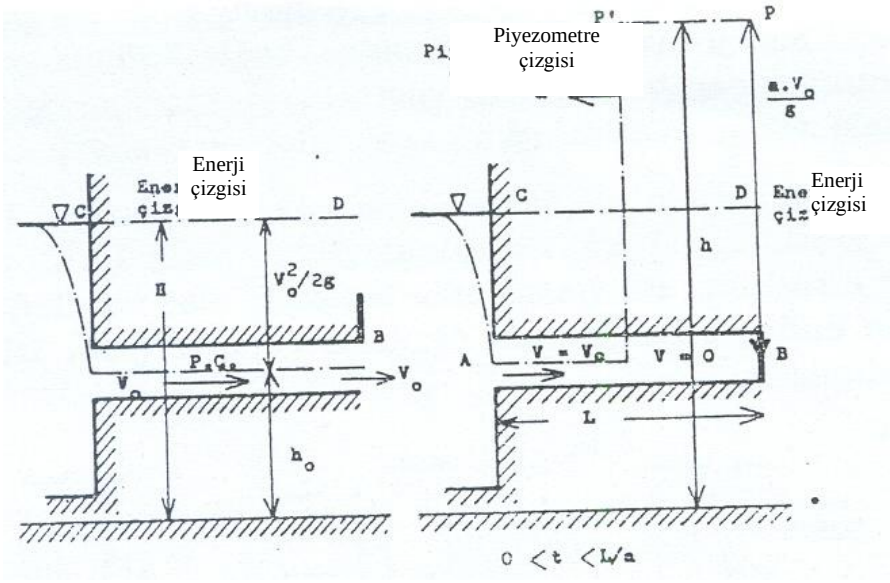
$$h = h_0 + \left[F\left(t - \frac{x}{a} \right) - F\left(t - \frac{2L}{a} + \frac{x}{a} \right) \right] \qquad \textbf{(3.42)}$$

ve

$$V = V_0 + \frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a} \right) - F\left(t - \frac{2L}{a} + \frac{x}{a} \right) \right] \qquad \textbf{(3.43)}$$

şekillerini alacağı görülmektedir. Dalganın L mesafesini katetmesi için gereken zaman $t = L/a$ ile gösterildiği takdirde, bu denklemin *A* noktasında ancak $t = T$ anından itibaren tatbik edilebileceği anlaşılır (*F* dalgasının *A* noktasına ulaştığı an). Benzer şekilde, *B* noktasında, ancak *f* dönüş dalgasının bu noktaya ulaştığı $t = 2.T$ anından itibaren uygulanabilirler.

Bu açıklamalar gözönünde tutulduğu takdirde *f* dalgası, *B* noktasında meydana gelmekte olan *F* dalgasına süperpoze olmaktadır.



Şekil 3.14 : Darbe öncesi ve sonrası hazne – hat ilişkisi

Bu olayın gelişimini bir örnekle anlatmak istersek; Yatay bir boru ele alınsın; menba tarafta bir hazne bulunsun ve zamanla değişmeyen rejimdeki hız V_0 ile gösterilsin. Borunun mansap ucundaki bir vananın ani olarak kapatılması halinde oluşacak aşırı basınç değişimi belirlensin.

Bu manevra sonunda borunun mansap ucunda bir aşırı basınç doğar ve artı *x*'ler istikametinde yayılmaya başlar; dolayısıyla meydana gelen dalga bir *F* dalgasıdır ve başka bir dalga söz konusu değildir. Bu basıncın değeri (3.36) bağıntısına göre

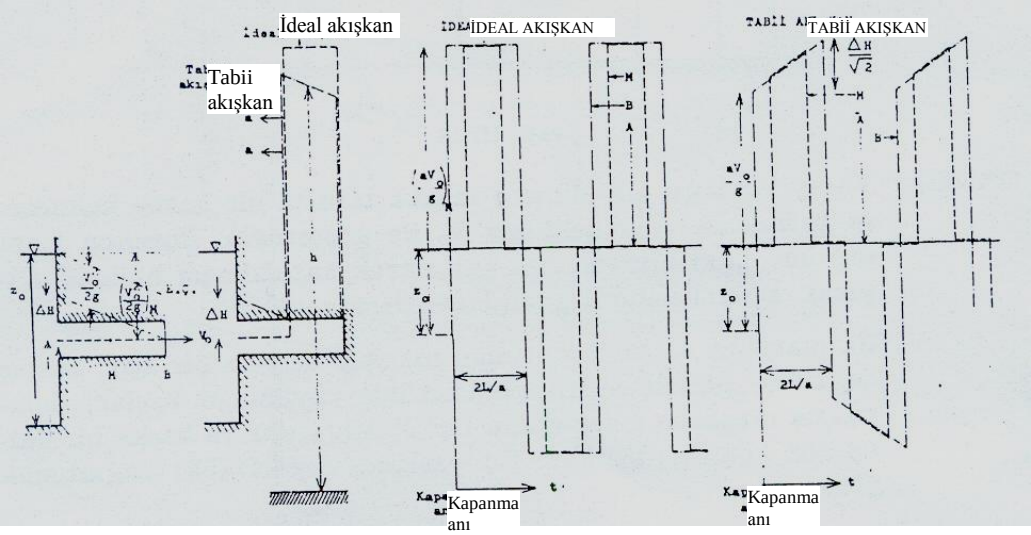
$$\Delta h = \frac{a}{g} \cdot \Delta V = \frac{a}{g} \cdot V_0 \qquad \textbf{(3.44)}$$

olacaktır. Görüldüğü üzere meydana gelen aşırı basıncın değeri boru boyuna bağlı olmayıp, bütün boru boyunca aynı değeri korur.

Şekil 3.14 'de zamanla değişmeyen rejime ve bozulmuş rejime ait piyezometre çizgileri görülmektedir. Vana kapatılır kapatılmaz ($t \geq 0$) , piyezometre çizgisi, enerji çizgisi kotundan daha yukarıda bulunan bir PP' seviyesine çıkar.

BP seviye farkı enerji çizgisinin durumuna bağlı değildir ve değeri akışkanın sıkışarak kazandığı potansiyel enerjiye eşittir; bu nedenle sıkışmayan akışkanlarda böyle bir enerji oluşmaz.

Basınçlı boruda meydana gelen yük kayıplarının boru boyunca yayılmış oldukları düşünülerek de Şekil 3.14 'deki grafikler çizilebilir. Bu halde elde edilecek olan eğriler, ideal akışkan haline karşılık gelen eğrilerle beraber Şekil 3.15 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Darbe öncesi ve sonrası hattaki basınç değişimi

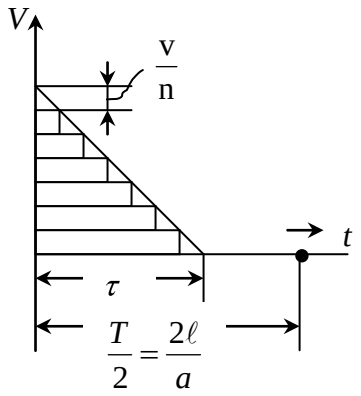
3.7.1. Hızlı Kapama

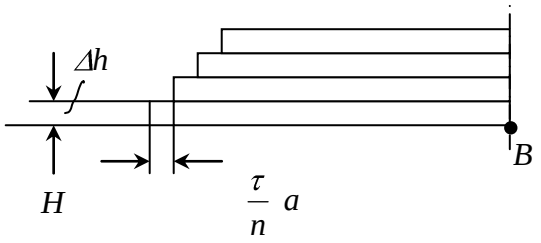
Boru ucundaki vananın ani olmayan fakat hızlı bir kapama hali ele alınacaktır. *Hızlı kapama* için bir tarif verilmesi gerekir. Vananın tamamıyla kapanması için geçen τ müddeti T / 2 den, yani olayın yarım periyodundan küçük ise "*kapama hızlıdır"* denilir.

Bu demektir ki, basınç dalgası depoya kadar gidip genişleme dalgası halinde tekrar *B* noktasına erişmeden kapama işlemi sona ermektedir.

Şimdi bu şekilde hızlı bir kapamayı Şekil 3.16 'daki gibi *n* sayıda ani ve kısmi kapamadan teşekkül etmiş gibi düşünelim. *n* sayısı sonsuza götürülünce kapama kanununu temsil eden eğri elde edilmektedir.

Bu şekilde, kapama kanunu lineer alınmıştır. Ancak hızlı kapama işleminde bu eğrinin karakteri, elde edilecek maksimum basınç artışı üzerinde rol oynamaktadır.





Şekil 3.16 : Hızlı Kapama Şematik Çizim (1) **Şekil 3.17 :** Hızlı Kapama Çizimi (2)

τ zamanı zarfında hız V_0 değerinden sıfır değerine inmektedir. Her küçük ve âni kısmî kapama sonucunda meydana getirilen hız azalması $\frac{V_0}{n}$ olduğuna göre bunların her birine

$$\Delta h = \frac{a \,.\, \Delta V}{g} = \frac{a \,.\, V_0}{g \,.\, n} \qquad \textbf{(3.45)}$$

şiddetinden bir su darbesi karşılık gelecektir. İlk kısmî kapamada meydana gelen basınç dalgası yola çıktıktan sonra ikinci kısmî kapama meydana gelecek ve bunun basıncı birinciye ilave olacaktır. Bu şekilde Şekil 3.17.' de görüldüğü gibi arka arkaya yola çıkan «*n*» sayıda basınç dalgası bir biri üzerine eklenerek kapamanın sonunda, *B* noktasında

$$h = \sum \Delta h = n \,.\, \Delta h = n \,.\, \frac{a \,.\, V_0}{g \,.\, n} = \frac{a \,.\, V_0}{g} \qquad \textbf{(3.46)}$$

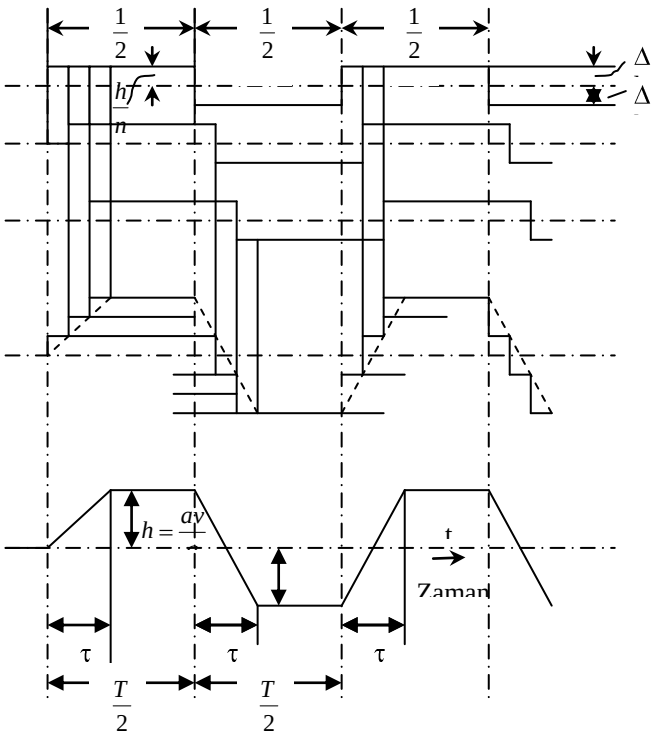
ΔV için geçen zaman $\tau \le \frac{2l}{a} = \frac{T}{2}$ ise (Hızlı ve kısmi kapama için)

$$h = \frac{a\, V_0}{g} \qquad \textbf{(3.46a)}$$

şiddetinde maksimum basınç artması meydana getirecektir. Görülüyor ki kapama hızlı olmak şartı ile kapama zamanının su darbesi şiddeti üzerinde bir tesiri yoktur.

3.7.2. Basıncın değişimi

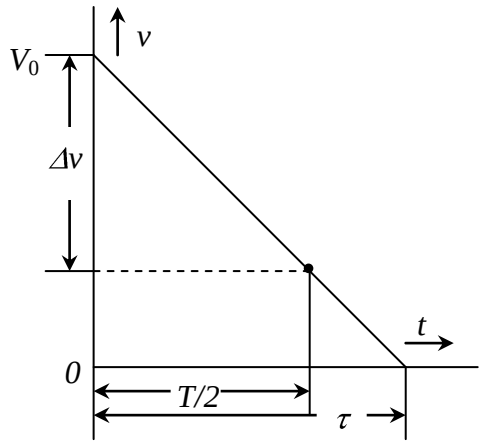
Şekil 3.10 ‘da görülen B noktasında basıncın zamana göre değişimi de yukarıdaki prensibe göre kolayca incelenebilir. Ancak daha önce belirtildiği gibi kapama kanununun lineer olup olmamasının, başka bir sözle $V_B = f(t)$ bağıntısının, hızlı kapamada meydana gelen maksimum basınç artması üzerinde bir tesiri olmadığı halde «*B*» noktasındaki basıncın değişim şekli üzerinde rolü olacağı muhakkaktır. Biz burada lineer değişim kanununu örnek olarak ele alacağız. τ / n zaman aralıkları ile meydana gelen bütün basınç dalgaları süperpoze edilecektir. Bunun için ilk dalganın başlangıcı Şekil 3.18 ’de görüldüğü gibi *O* noktasında alınır, ikinci dalga bu dalganın τ / n kadar sağa kaymışıdır. Çünkü bu dalga τ / n zamanına kadar mevcut olmayıp bu zamanda harekete geçmiştir. Diğerleri de aynı şekilde çizilir ve süperpozisyon yapılırsa T / 2 anından sonra (*T*) periyoduna malik tamamen simetrik bir değişim elde edilir. 0 ile T / 2 anı arasındaki durumun diğer durumlardan farklı olduğuna dikkat etmek gerekir. Bu aralığın (0–τ) kısmında basınç değişim hızı diğer aralıklardakilerin yarısı kadardır.



Şekil 3.18 : Boru hattı basınç değişim diyagramları

3.7.3. Yavaş Kapama

Kapama zamanı, yarım periyod olan T / 2 ‘den küçükse “*kapama yavaştır”* denir. Böyle bir hadisede Şekil 3.10’daki *A* noktasındaki maksimum basınç ani kapamadaki değerinden küçüktür. Şimdi bu değeri hesap etmek için yukarıda yaptığımız *n* adetteki kısmi kapamanın süperpozisyonu kaidesini $\tau \geq T / 2$ hali için uygulayalım. Basınç artması T / 2 zaman kadar devam edecektir. Çünkü ilk dalga *B* ye eriştikten sonra basınç artması devam edemez. Çünkü *B* ye erişen dalgalar alçalma dalgası haline çevrildiğinden kapama devam ettiği halde bu andan sonra basınç artmayacak bilakis eksilecektir. O halde *T*/2 anına kadar basıncın artma miktarını hesaplamak maksimum basınç artışını bulmak demektir.



Şekil 3.19 : Yavaş Kapama (Lineer)

Şekil 3.19 ‘daki gibi lineer fakat yavaş bir kapama ele alalım. T / 2 anına kadar hızdaki azalmayı hesaplayalım. Kapama kanunu lineer olduğuna göre şekilden

$$\Delta V = \frac{T}{2} \cdot \frac{V_0}{\tau} \qquad \textbf{(3.47)}$$

yazılır. Bunu kısmi kapama formülüne götürerek su darbesini bulalım.

$$h = \frac{a \,.\, \Delta V}{g} = \frac{a}{g} \frac{V_0 \,.\, T}{2\tau} \qquad \textbf{(3.48)}$$

veya $\frac{T}{2} = \frac{2l}{a}$ koyarak

$$h = \frac{2 . V_0 . l}{g . \tau} \qquad \textbf{(3.49)}$$

neticesi elde edilir. Yavaş kapama halinde maksimum basınç artışı (su darbesi) üzerinde τ kapama zamanının tesiri burada açıkça görülmektedir. Ayrıca kapama kanununun şekli de önemli rol oynamaktadır.

3.8. Su Darbelerinin Genel Durumlarının Özeti

Yukarıda muhtelif hallerdeki maksimum basınç artmaları için bulunan bağıntılar özetlenirse;

1) Ani tam kapama:

$\tau = 0$ } $\boxed{h = \frac{a . V_0}{g}}$ **(3.30b)**

2) Ani kısmî kapama:

V_0 hızından V_1 hızına } $\boxed{h = \frac{a (V_0 - V_1)}{g}}$ **(3.30c)**

3) Hızlı kapama:

$\tau \neq 0$

$\tau \leq \frac{2l}{a} = \frac{T}{2}$ } $\boxed{h = \frac{a . V_0}{g}}$ **(3.46)**

4) Hızlı ve kısmî kapama:

ΔV için geçen zaman τ

$\tau \leq \frac{2l}{a} = \frac{T}{2}$ } $\boxed{h = \frac{a . \Delta V}{g}}$ **(3.46a)**

5) Yavaş kapama:

$\tau \geq \frac{2l}{a} = \frac{T}{2}$

Lineer kapama kanunu } $\boxed{h = \frac{2 . V_0 . l}{g . \tau}}$ **(3.49)**

4. ÇÖZÜM METODLARI

4.1. Bergeron – Schnyder Metodu

Bu bölümde ALLIEVI denklemlerinden hareket edilerek BERGERON-SCHNYDER metodu yardımıyla basınçlı borularda aşırı basınç dağılışlarının nasıl belirlenebileceği ele alınacak ve o halde de sonucun sınır şartlarına bağlı olduğu görülecektir.

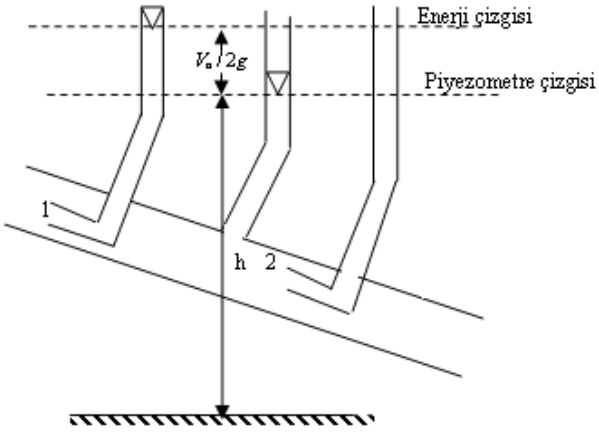
4.1.1. Uç karakteristikleri

4.1.1.1 Zamanla değişmeyen rejim hali

Bir borudan geçen Q debisinin sabit tutulabilmesi için, borunun baş ve uç noktaları arasındaki ΔH toplam yük farkının sabit tutulması gerekli ve yeterlidir. Bu yük farkının değeri Q debisinin ve borunun bağlantı şekillerinin fonksiyonudur. Daire kesitli borular halinde bu fark, piyezometre kotları farkına ve yatay borularda $\Delta(p/\gamma)$ basınç farkına eşittir.

Mükemmel akışkanlar halinde, akım sırasında sürekli veya yerel bir yük kaybı meydana gelmez ve toplam yük bütün boru boyunca sabit bir değeri korur:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \qquad \textbf{(4.1)}$$



Şekil 4.1 : Bernoulli Denklemi Şematik Gösterim

Bu durum borunun yatay olmamasına bağlı değildir. Ayrıca daire kesitli borularda

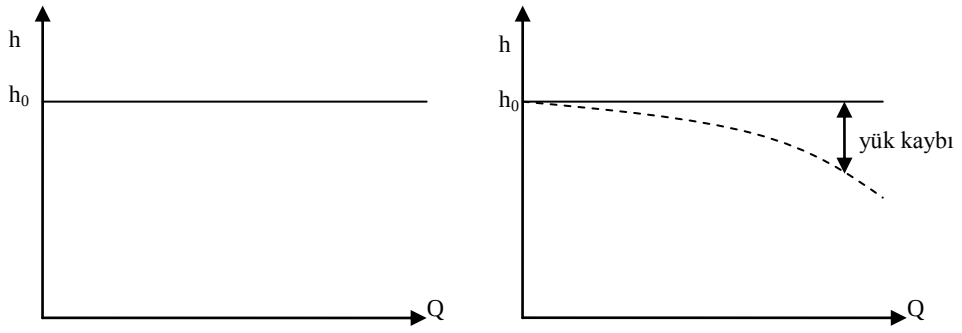
$$V_1 = V_2 = V_0 = \text{sabit} \qquad \textbf{(4.2)}$$

olduğundan, neticede

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = \text{ sabit} \qquad \textbf{(4.3)}$$

elde edilir. Buna göre boru boyunca piyezometre kotu sabittir: $h = h_0$. Bu bağıntı yük kaybının sıfır olduğu, daire kesitli boruların bütün noktaları için geçerlidir. Ayrıca elde edilmiş olan son eşitlik V_0 hızından bağımsız olduğundan, Q debisinden de bağımsızdır. Buna karşılık hız yüksekliği, V_0'a bağlı olduğundan, daire kesitli borularda ise, hız sabit bir değeri haiz bulunduğundan, piyezometre çizgisi enerji çizgisine paralel olur.

Bunlara göre aynı bir piyezometre kotu ile borunun herhangi bir kesitinden istenilen her debi geçirilebilir. Dolayısıyla herhangi bir boru enkesitinde Q ile h arasındaki ilişki, Q eksenine paralel bir doğru ile ifade edilebilir (Şekil 4.2)



Şekil 4.2 : *Q* ile *h* arasındaki ilişki

Bu doğru, akımın sürtünmesiz olması halinde, borunun herhangi bir enkesitinin karakteristik eğrisidir. Tabiatıyla piyezometre kotları aynı tutulduğu halde, farklı debiler için farklı hız yükseklikleri, dolayısıyla farklı toplam yük seviyeleri düşünülmektedir.

Tabii akışkan halinde ise, yük kayıpları yaklaşık olarak hızın karesiyle orantılı olduklarından, Q^2 ile de orantılıdırlar. Borunun menbaında sabit seviyeli bir hazne bulunduğu ve dolayısıyla giriş enkesitindeki piyezometre kotunun sabit bir değeri haiz olduğu düşünülsün: h_0 borudan geçen debinin sıfır olması halinde yük kaybı meydana gelmediğinden, bütün enkesitlerde piyezometrik kot aynı h_0 değerine eşittir.

Bununla beraber, akım olması halinde, Q debisi arttıkça, hızlar ve dolayısıyla yük kayıpları artacağından, enkesitlerdeki piyezometrik kotlar da azalır ve yük kayıplarının debinin karesiyle orantılı olduğunun kabul edilmesi halinde herhangi bir boru enkesitindeki ($Q - h$) değişimi parabolüyle

$$h = h_0 - \left[\xi \frac{V^2}{2g} + \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot L \right] \qquad \textbf{(4.4)}$$

$$h = h_0 - \frac{Q^2}{2g \cdot A^2} \left[\xi + \frac{\lambda L}{D} \right] \qquad \textbf{(4.5)}$$

ifade edilebilir. Bu eğriye söz konusu enkesitin karakteristiği adı verilir; Çünkü, görüldüğü üzere, bu defa piyezometrik kot, enkesitin D çapına bağlı olduğu gibi, enkesitin boru başlangıcına olan L mesafesinin de fonksiyonudur.

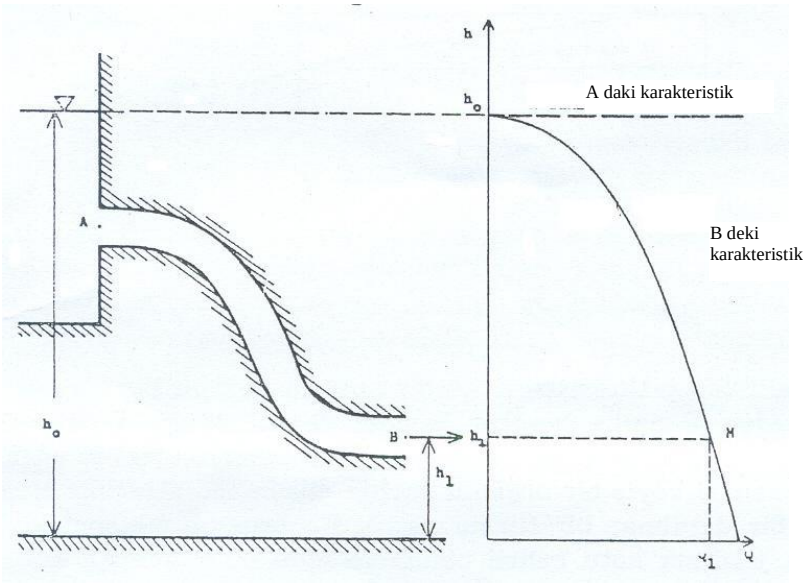
ξ katsayısı, boru girişinde meydana gelecek yerel yük kayıplarını hesaba katabilmek amacıyla, yukarıdaki bağıntıya dahil edilmiştir.

(4.5) bağıntısından görüldüğü üzere, herhangi bir enkesitte, *h* piyezometrik kotu ve Q debisinden biri değiştiği takdirde, diğeri de değişir. Bir enkesitte mümkün olabilecek zamanla değişmeyen akımlar, ancak, bu enkesite ait karakteristik eğri üzerindeki noktalar ((4.5) bağıntısını gerçekleyen noktalar) olabilir.

Aşağıdaki paragraflarda seçilen enkesitin özel bir durumunun olması halinde enkesit karakteristiğinin ne gibi bir görünüm arz edeceği belirtilecektir. Bu amaçla sabit seviyeli bir hazne ve buna bağlı yük kayıplarının Q^2 ile orantılı olduğu bir boru düşünülecek ve yerel yük kayıpları anlaşılma kolaylığı için ihmal edilecektir. Boru girişindeki kinetik enerji ihmal edildiği takdirde, *A* enkesitindeki karakteristik, piyezometre kotu sabit olduğundan yatay bir doğrudur.

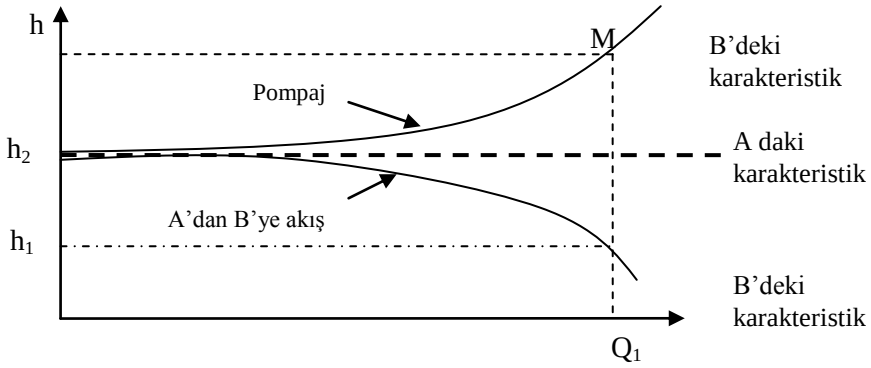
Buna karşılık *B* enkesitindeki piyezometre kotunun, h_1 değerinde olması şart koşulursa, *B* enkesitinin işletme noktasının, *B* enkesitine ait karakteristiğin üzerinde bulunması gerekir.

Bu koşullar altında B ucundan akacak olan Q_1 debisine karşılık gelen *M* noktası, *B* ’den yatay bir doğru çizilerek elde edilir (Şekil 4.3)



Şekil 4.3 : Sabit seviyeli bir haznedeki Q – h ilişkisi

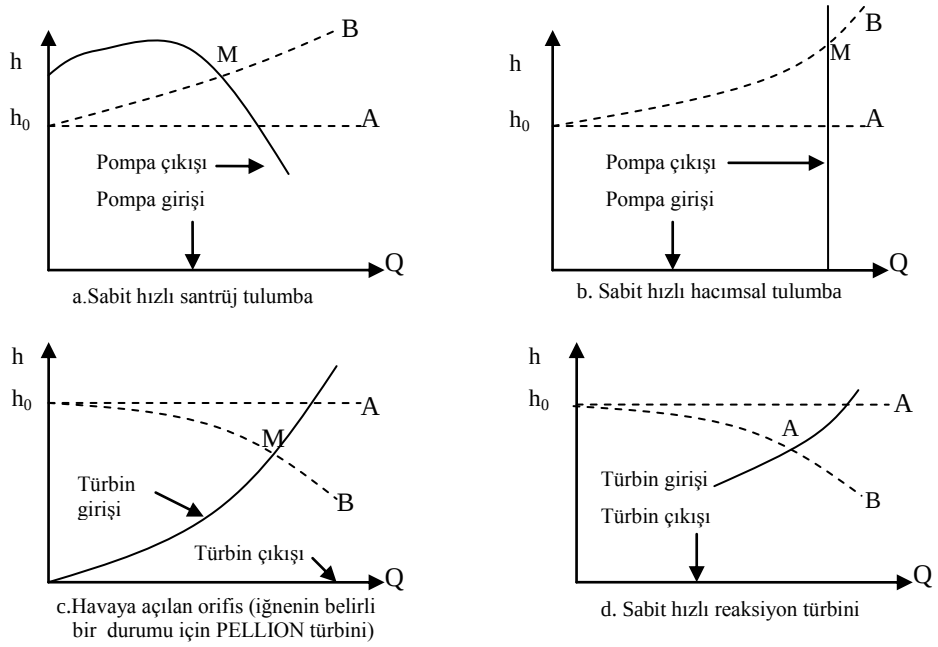
Suyun *B* ucundan *A* haznesine basılması halinde, *B* ucunda mevcut olması gereken h_2 piyezometrik kotu ve debiye bağlı olarak bunun değişimini veren karakteristik eğriyle, yerçekimi haline karşı gelen akışa ait karakteristik eğriler Şekil 4.4 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Suyun *B* ucundan *A* haznesine basılması halinde akışa ait karakteristik eğriler

Genellikle karakteristiğin her bir noktası değişik bir akım durumuna karşılık gelir. Bununla beraber basıncı ve debiyi ayarlayan organların durumuna bağlı olarak bu rejimlerden bir tanesi teşekkül eder. İncelemeler sırasında böyle bir organın varlığı düşünülecektir (bir musluk; bir pompa; bir daralma; bir türbin vs.).

Bu organın çıkışındaki basıncın (organın referans düzlem kotu belirli olduğuna göre piyezometrik kotun) sabit tutulması halinde, organ girişindeki basınçla, organdan geçen debi arasında bir bağıntı mevcuttur (çıkış basıncının sabit tutulması yerine giriş basıncının sabit tutulması halinde de aynı durum söz konusudur). Bu bağıntı, organın karakteristiği olarak adlandırılan bir eğriyle gösterilebilir. Bu eğri teorik veya deneysel olarak hazırlanır. Böyle bir organ için, işletme rejimlerine karşılayan noktalar; karakteristiklerin üzerindeki noktalardır. Şekil 4.5 'de bazı su makinelerine ait karakteristik eğriler gösterilmiştir.



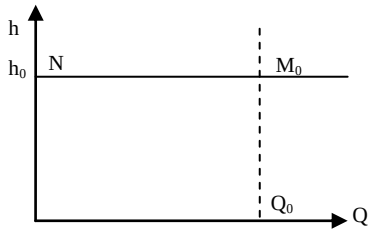
Şekil 4.5 : Bazı su makinelerine ait karakteristik eğriler

Yukarıdaki açıklamalara göre, bu su makinelerinden biriyle bir boru irtibatlandırıldığı takdirde, sistemin işletme durumunun, organa ve boruya ortak olan enkesite ait karakteristik eğrilerin kesişme nokta veya noktalarından elde edilebileceği kolaylıkla anlaşılır. İlk iki şekil *B* noktasına yerleştirilmiş bir pompa vasıtasıyla *A* haznesine su basılması haline karşılık gelmektedir. Son iki şekil ise *B* noktasında bir türbin bulunması halinde elde edilecek olan işletme noktasını göstermektedir.

Bir boru hattının üzerine birçok makinenin veya organın monte edilmiş olması halinde de, işletme noktasının, karakteristik eğrilerin kesişme noktası yardımıyla elde edilebileceği, yukarıdaki açıklamalardan kolaylıkla çıkartılabilir.

4.1.1.2. Zamanla Değişen rejim hali

Tesisteki organlardan bir tanesinde zamanla değişen bir hareketin meydana geldiği düşünülsün (bir vananın açılıp kapanması; bir pompanın hızının değişmesi; vs… gibi) Bunun sonucu olarak *h* piyezometre yüksekliği ve Q debisi de değişir; bununla beraber bu iki değişim aynı anda olmaz. Herhangi bir enkesitte işletme durumuna karşılık gelen (*h, Q*) noktası, zamanla oldukça karışık olan bir eğri üzerinde hareket eder. Bu değişimin belirlenmesi için ALLIEVI denklemlerinden faydalanılır.



Şekil 4.6 : Zamanla değişmeyen rejimdeki Q – h ilişkisi

İlk olarak daire kesitli bir borudan ideal bir akışkanın akması hali ele alınsın. Zamanla değişmeyen rejimde $h = h_0$ olduğundan, bütün enkesitlerin karakteristik eğrileri aynı NM_0 yatay doğrusuyla çakışır. M_0 noktası borudan akmakta olan Q_0 debisine karşılık gelmektedir. Rejimin değişmesi halinde, bu karakteristik doğrunun alacağı yeni şekil ALLIEVI denklemleriyle belirlenebilir. Bunlara göre belirli bir M_1 enkesitinde ve *i* anında, şu iki bağıntı geçerli olacaktır:

$$h_1 - h_0 = F_i + f_i \qquad \textbf{(4.6)}$$

$$V_i - V_0 = \frac{g}{a}(F_i - f_i) \qquad \textbf{(4.7)}$$

Son bağıntı debiler cinsinden yazıldığı takdirde ise

$$\frac{Q_i - Q_0}{A} = \frac{g}{a}(F_i - f_i) \qquad \textbf{(4.8)}$$

elde edilir. Bunlara göre (h_i, Q_i) durumunun belirlenebilmesi için *i* anında F_i ve f_i fonksiyonlarının bilinmesi gerekir.

Bu fonksiyonlar ise zamanla keyfi olarak değişebilen fonksiyonlardır. (4.6) ve (4.8) denklemlerinde 4 bilinmeyen olduğundan, bu iki bağıntıdan, sadece h_i ve Q_i arasındaki değişimi veren bağıntının çıkartılması mümkün değildir.

Sabit bir eksen takımı yerine, elastik dalgaların (-a) hızıyla artı x'ler yönünde hareket eden bir eksen takımı alınsın. M_i noktasında i anında hareket eden bu eksen takımının orijinde bulunan bir gözlemci, t anında bir M enkesitine ulaşır. Bu son enkesitteki piyezometre kotları ile, V hızları arasında

$$h_1 - h_0 = F_i + f_i \qquad \textbf{(4.6a)}$$

$$V_i - V_0 = \frac{g}{a}(F_i - f_i) \qquad \textbf{(4.7a)}$$

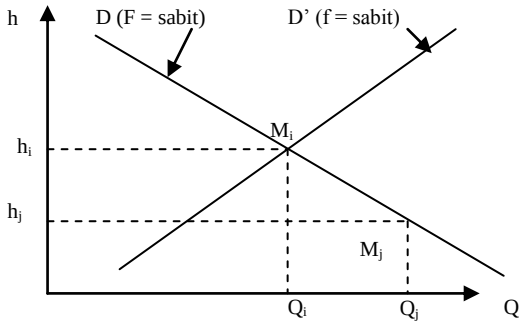
bağıntıları yürürlüktedir. Bu bağıntılarda F_i fonksiyonu sabit bir değeri haizdir; Çünkü eksen takımı ve F_i dalgası aynı hızla, aynı yönde hareket etmektedirler. Buna göre gözlemci zamanla değişmeyen bir F_i dalgası ve kendisine göre (–2a) hızıyla hareket eden bir f dalgası görür. Dolayısıyla bu denklemler arasında F_i, f, f_i yok edilirse

$$h - h_i = -\frac{a}{g}(V - V_i) \qquad \textbf{(4.9)}$$

veya debiler cinsinden

$$h - h_i = -\frac{a}{g}.\frac{Q - Q_i}{A} \qquad \textbf{(4.9a)}$$

elde edilir. Bu bağıntı aranmakta olan (h, Q) bağıntısıdır. Şekil 4.7 'de görüldüğü üzere bu ifade D gibi bir doğruyu göstermektedir ve başlangıç noktası olarak seçilmiş bulunan M_i noktasından geçmekte olup, eğimi $-a/(g.A)$ 'dır.



Şekil 4.7 : Zamanla değişmeyen rejimdeki Q – h ilişkisi

D doğrusu aranan karakteristik eğridir. Bu doğrunun sadece F dalgasıyla hareket eden bir gözlemci için geçerli olduğuna dikkat edilmesi gerekir.

Benzer şekilde *a* hızıyla eksi x'ler yönünde hareket eden ikinci bir gözlemci düşünülebilir. Bu şahıs için ise f dalgası sabit bir değeri haiz olur. Bu takdirde F, F_j ve f_j yok edildiği takdirde

$$h - h_i = +\frac{a}{g}(V - V_i) \qquad \textbf{(4.10)}$$

veya debiler cinsinden

$$h - h_i = +\frac{a}{g} \cdot \frac{Q - Q_j}{A} \qquad \textbf{(4.10a)}$$

elde edilir. Bu bağıntı da h piyezometrik kotlarıyla, Q debileri arasında bir ifade olduğundan bir karakteristik ve (h_j, Q_j) bilinen değerleriyle tanımlanmış olan M_j noktasından geçmektedir. Eğimi $+a/(g.A)$ olan bu doğru D' ile gösterilecektir. D', f dalgasıyla beraber ilerleyen gözlemciye ait karakteristik doğrudur. Görüldüğü üzere D ve D' doğruları M_i noktasından geçen düşeye göre simetriklerdir.

Özet olarak f dalgasının mevcut olmadığı kabul edilsin (vana enkesitinde oluşan ilk dalga hazneye ulaşıncaya kadar geçen süre zarfında böyle bir durum mevcuttur; bu süreye f yansımış dalgası henüz teşekkül etmemiştir ve sadece F direkt dalgası vardır). Bu durumda F direkt dalgasıyla ilerleyen bir gözlemci için h ve Q'nun sabit kalacakları ve daima (h_i, Q_i) değerini haiz olacakları aşikârdır; dolayısıyla bu süre zarfında şekildeki M_i noktası değişmeyecektir. Buna göre

$$h - h_0 = h_i - h_0 = F_i = \text{sabit} = \Delta h \qquad \textbf{(4.11)}$$

ve

$$\frac{Q - Q_0}{A} = \frac{Q_i - Q_0}{A} = \frac{g}{a} \cdot F_i = \text{sabit} = \frac{\Delta Q}{A} \qquad \textbf{(4.11a)}$$

ve dolayısıyla

$$\Delta h = \frac{a}{g} \cdot \frac{\Delta Q}{A} = \frac{a}{g} \cdot \Delta V \qquad \textbf{(4.12)}$$

elde edilir. Benzer şekilde F dalgasının mevcut olmaması halinde (ani kapama halinde haznede yansıyan F dalgası, vanada yansıyıp, tekrar hazneye ulaşıncaya kadar geçen zaman süresindeki durum), h_j ve Q_j, ikinci bir gözlemci için sabit kalır ve M_j noktası değişmez. Yukarıdaki düşünce tarzına göre bu defa

$$\Delta h = -\frac{a}{g} \cdot \frac{\Delta Q}{A} \quad \text{veya} \quad \Delta h = -\frac{a}{g} \cdot \Delta V \qquad \textbf{(4.13)}$$

elde edilir.

4.1.2. BERGERON-SCHNYDER Metodunun Genel Hali

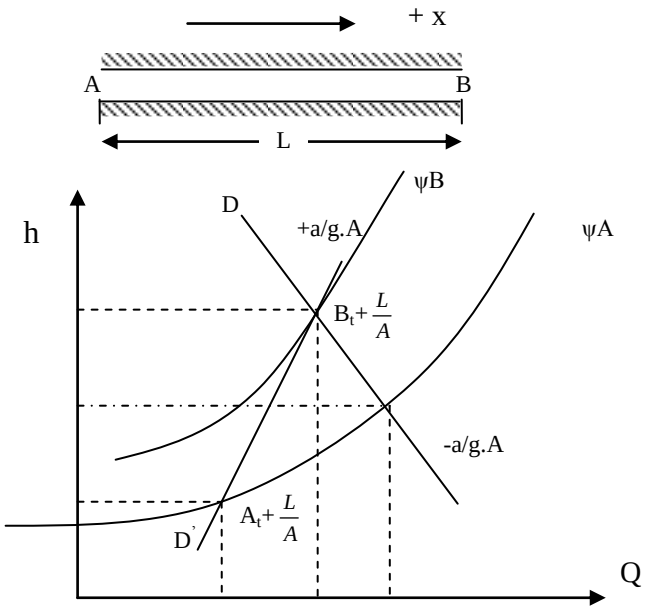
Dalgaların a hızıyla hareket eden gözlemciler için h piyezometrik kotlarıyla, Q debileri arasındaki değişimin bir doğru ile (D veya D') gösterilebileceği yukarıda görülmüştü. Doğrunun eğimi sadece gözlemcinin hareket yönüne bağlı olduğundan (artı veya eksi x'ler yönünde), gözlemcinin hareket yönü tespit edildiği anda, herhangi bir noktadan geçen D ve D' doğruları çizilebilir.

İlk olarak gözlemcinin i anında, M_i noktasından hareket ettiği ve a hızıyla ilerlediği düşünülsün. Bu noktada i anında mevcut olan durum h_i ve Q_i parametreleriyle tanımlanmıştır. Yukarıdaki açıklamalara göre ise, gözlemcinin ilerleyişi sırasında, borunun bütün noktalarında h ve Q arasında aynı lineer bağıntı yürürlükte olacaktır. Bu lineer bağıntı boruya ait a ve A sabitleriyle, başlangıç rejiminin h_i ve Q_i parametrelerine ve hareket yönüne bağlıdır. Diğer taraftan (4.9a) ve (4.10) bağıntıları F ve f fonksiyonlarının belirlenmesine lüzum olmadığını göstermektedir. Bununla beraber, istenildiği takdirde (4.6) ve (4.8) bağıntıları F_i ve f_i'ye göre çözülerek bu büyüklükler hesaplanabilir.

$$2.F_i = h_i - h_0 + \frac{a}{g \cdot A}(Q_i - Q_0) \qquad \textbf{(4.14)}$$

$$2.f_i = h_i - h_0 - \frac{a}{g \cdot A}(Q_i - Q_0) \qquad \textbf{(4.15)}$$

D ve D' doğruları, M_i noktasından geçen "+a" ve "–a" hızlarıyla hareket eden iki gözlemciye ait karakteristik doğrulardır. Aşağıda bunlar yardımıyla su darbesi problemlerinin nasıl çözülebileceği görülecektir.



Şekil 4.8 : Bergeron-Schnyder Metodunda uç karakteristikleri plan ve grafik gösterimi

L boyundaki daire kesitli AB borusu ele alınsın. Borunun uçlarındaki h piyezometrik yüksekliklerinin, debiye bağlı olarak verilmiş olduğu kabul edilsin: ψ_A ve ψ_B fonksiyonları (uç karakteristikleri). Ayrıca, *t* anında *A* noktasındaki *h* ve *Q* büyüklüklerinin bilindiği düşünülsün (Şekil 4.8 'deki A_t noktası). *x*- ekseninin artı yönü A 'dan B 'ye doğru seçilsin.

A noktasından *t* anında *a* hızıyla hareket eden bir gözlemci B noktasına $t + (L/a)$ anında ulaşır; bu süre zarfında borunun bütün enkesitlerinden geçer ve her bir enkesitte rastladığı rejim *D* doğrusunun üzerinde bulunur. Dolayısıyla *B* noktasına karşılık gelen rejim de bu doğrunun üzerinde bulunmalıdır.

Diğer taraftan B noktasındaki akım durumu bu noktaya ait uç karakteristiğinin denklemini de gerçeklemeli ve dolayısıyla ψ_B eğrisiyle, A_t noktasından geçen D doğrusunun kesişme noktası $t+(L/a)$ anında B noktasındaki durumu belirtir: $B_{t+(L/a)}$.

B noktasından $t+(L/a)$ anında $(-a)$ hızıyla hareket eden bir gözlemci $t+(2L/a)$ anında A enkesitine ulaşacaktır. Yukarıdakine benzer düşünceyle, $A_{t+(2L/a)}$ noktasının, D' karakteristiğiyle, ψ_A uç karakteristiğinin kesişme noktası olacağı anlaşılır. Bu işlemlere devam edilerek borunun iki ucundaki değişimler, belirli zaman aralıkları için adım adım belirlenebilir.

Gözlemci t anında durumu bilinen (debisi ve piyezometrik kotu) herhangi bir noktadan hareket ettirilebileceğinden, borunun herhangi bir noktasındaki durumun, istenilen herhangi bir an için belirlenmesi mümkün olur.

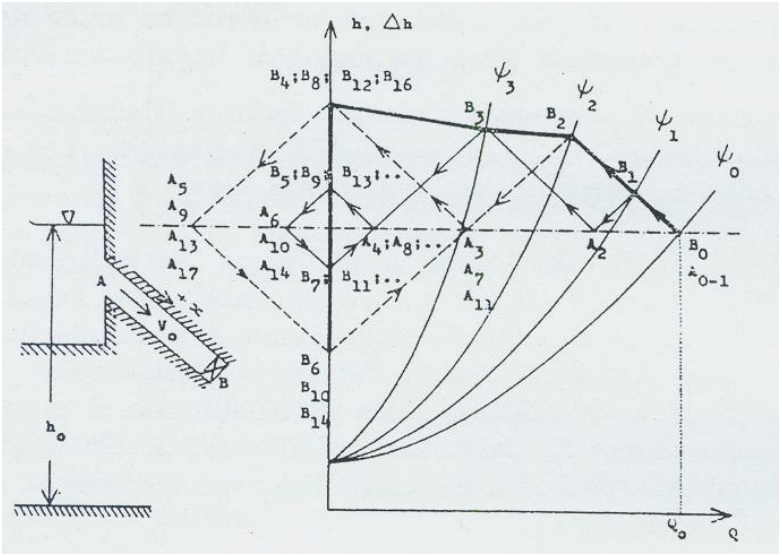
Yukarıdaki incelemeler sırasında ψ_A ve ψ_B karakteristik eğrilerinin sabit oldukları kabul edilmişti. Pratikte biraz farklı bir durum mevcuttur ve genellikle bu eğriler borunun uçlarına yerleştirilmiş olan organların karakteristiklerine karşılık gelirler. Sık sık karşılaşılan uç karakteristikleri şunlardır:

- Büyük bir hazneyle irtibatlı olan boru ucu: bu halde h = sabittir.
- Ucunda; zamanın fonksiyonu olarak açılan veya kapanan bir vana bulunan boru: bu halde $Q = Q(t)$ değişimi bilinmektedir.
- Ucunda santrfüj bir pompa bulunan bir boru: bu halde debi, basma yüksekliği ve pompanın gücü arasında bir bağıntı verilmiştir.

ψ eğrilerinden birinin sabit olmaması halinde, (burada ψ_B nin sabit olmadığı düşünülmüştür), $B_{t+L/a}$ noktası D doğrusuyla, $t+(L/a)$ anına karşılık gelen ψ_B eğrisini kesiştiği nokta olur.

Bu olayın gelişmesini bir örnekle anlatmak istersek; Şekil 4.9 'daki tesisin B noktasına yerleştirilmiş bulunan vananın yavaş olarak $4.L/a$ süresinde tam kapatılması halinde, A ve B enkesitlerinde zamanla değişen olarak meydana gelecek piyezometre kotu ve debi değişimlerinin belirlenmesi istenmektedir. Yük kayıpları ihmal edilecek, A enkesitinde basıncın daima h_0 değerinde kabul edilebileceği düşünülecektir (yani A enkesitinin birleştiği haznenin çok büyük olduğu kabul edilebilecektir). x ekseni A'dan B'ye doğru yönlendirilsin ve zamanla değişmeyen rejime ait debi Q ile gösterilsin.

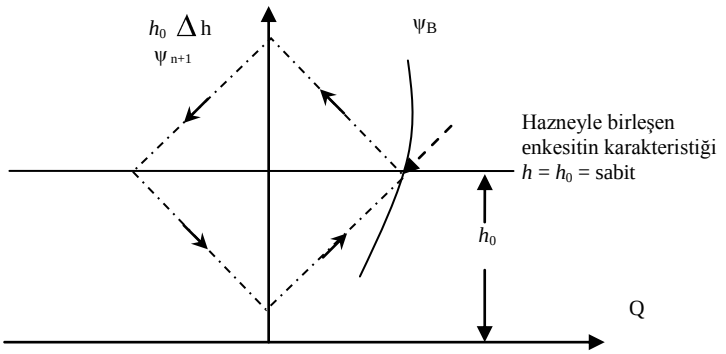
Bir orifisin karakteristik eğrisi parabolik olduğundan, *B* noktasında 0; 1; 2; 3; 4 zamanlarında mümkün olan $\psi_0, \psi_1, \psi_2, \psi_3, \cdots$parabolleri önceden çizilebilir (zaman birimi olarak *L*/*a* alınmıştır; 2*L*/*a* süresi ise ALLIEVI zaman birimi olarak adlandırılır). 4 anında vana kapanmış olacağından ψ_4 parabolü ordinat ekseni ile çakışır.1 anına kadar *A* noktasında herhangi bir değişiklik meydana gelmeyecektir. *A* noktasından 0 anında hareket eden ve *B*'ye doğru ilerleyen bir gözlemci düşünülsün (Şekil A_0 noktasından). Bunun karakteristiği A_0 noktasından geçen, eksi eğimli bir *D* doğrusudur. Gözlemci B noktasına 1 anında ulaşacaktır. Buna göre işletme noktası B_1 dir ve $\psi_1$parabolü üzerinde bulunacaktır. Gözlemcinin geri dönmesi halinde, karakteristiği, B_1 noktasından geçen artı eğimli D' doğrusudur. Bu gözlemci A noktasına 2 anında (2 anı=2.*L*/*a*) ulaşır ve bu karakteristiğin $h = h_0$ yatayıyla kesiştiği nokta A_2 işletme noktasını verir (Çünkü *A* noktası piyezometrik basıncın zamanla değişmediği ve zamanla değişmeyen rejimdeki değere eşit olduğu noktadır. Bu şekilde hareket edilerek B_3; A_4 vs.. noktaları elde edilebilir. Sürtünmelerin ihmal edilmiş olduğu bu halde sönümleme olmaz ve teorik olarak salınımlar Şekil 4.10'da görüldüğü üzere devam eder.



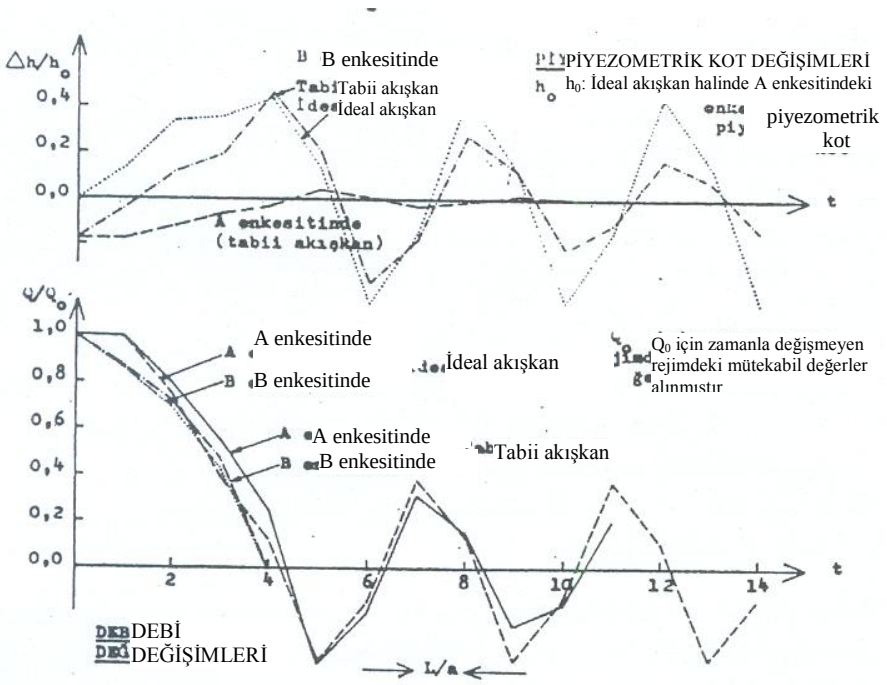
Şekil 4.9 : Hazne – hat ile Grafik gösterim

Bununla beraber 4 anından (4 anı = 4.*L*/*a*) itibaren *B* enkesitindeki yansımalar kapalı bir vana üzerinde olacaktır. Bunun karakteristiği ise $Q = 0$ doğrusudur; dolayısıyla B_5, A_6, B_7, A_8 hemen elde edilebilir. Bundan sonraki noktalar sırasıyla bu noktalarla çakışırlar. Böylece *A* noktasındaki basınçlar çift zamanlar için, *B* noktasındaki basınçlar tek zamanlar için elde edilmiş olmaktadır.

A noktasındaki tek zamanlarda, *B* noktasındaki çift zamanlarda meydana gelecek basınçların belirlenmesi için hesaplara yeniden başlanır; fakat bu defa gözlemci *A* noktasından, *B* noktasından gelen gözlemci *A*'ya ulaşmadan hemen önceki 1 anında hareket ettirilir.



Şekil 4.10 : Teorik olarak Salınımlar



Şekil 4.11 : B noktasındaki piyezometrik kot değişimleri ile

A ve *B* enkesitlerinde debi değişimleri

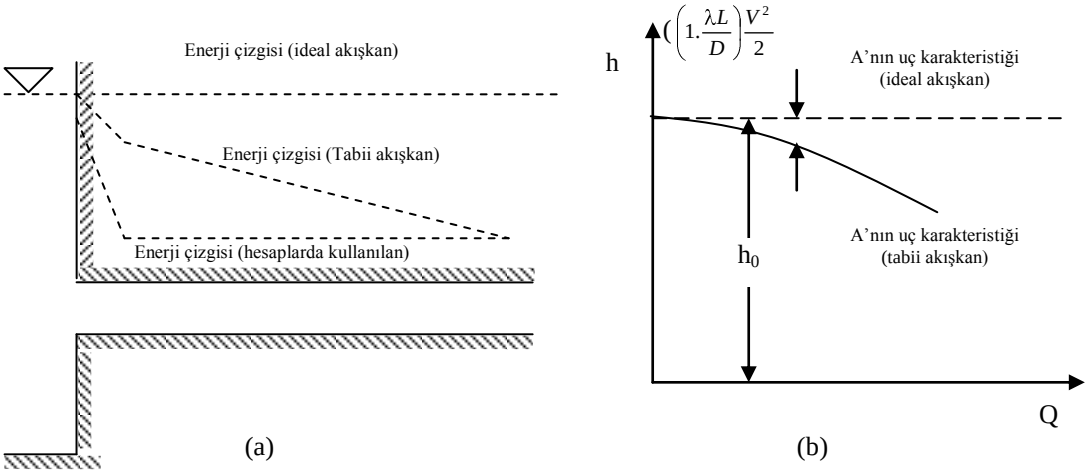
Buna karşılık gelen nokta A_1'dir ve A_0'la çakışır; Çünkü 1 anına kadar *A* enkesiti vananın kapanmasını hissetmemiş olduğundan, zamanla değişmeyen rejimdeki durumunu korur.

Bu gözlemci tarafından karşılaşılan işletme noktaları B_2, A_3, …dür. Şekil 4.11 'deki grafiğe göre, zamanla değişen olarak B noktasındaki piyezometrik kot değişimleri ve *A* ve *B* enkesitlerinde debi değişimleri gösterilmiştir.

Bu çizim tarzı ara zamanlar için veya *A* ile *B* enkesitleri arasında kalan noktalardaki durumların belirlenmesi için de kullanılabilir. Metod genel olup, bazı kabuller yapıldığı takdirde, yük kayıplarının da kolaylıkla hesaba katılması mümkündür.

Boru boyunca üniform olarak yayılmış bulunan yük kayıplarının, borunun birkaç enkesitine yerleştirilmesi suretiyle, hesaplara katılması mümkündür. SCHNYDER, bu kaybın borunun menba ucunda (haznede) toplandığı ve boru boyunca yük kayıplarının

$$h_k = \frac{V^2}{2g} + \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot L = \frac{V^2}{2g}\left(1 + \frac{\lambda L}{D}\right) \qquad \textbf{(4.16)}$$

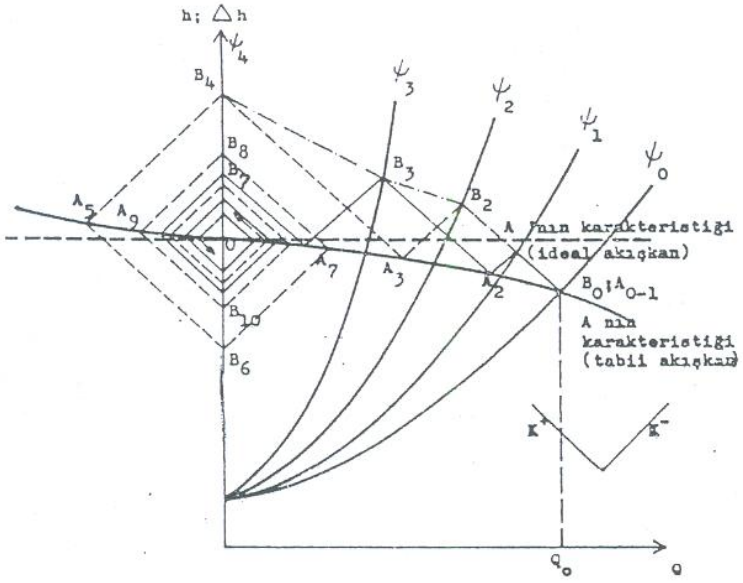


Şekil 4.12 : İdeal ile Tabii akışkan arasındaki uç karakteristikleri

parabolüne göre yayıldığını kabul etmektedir. Burada ilk terim girişteki yerel yük kayıplarına, ikinci terim ise boru boyunca meydana gelen sürekli yük kayıplarına karşılık gelmektedir. Bu kabule göre A noktaları ideal akışkan halindeki gibi h_0 yatayı üzerinde bulunmayıp

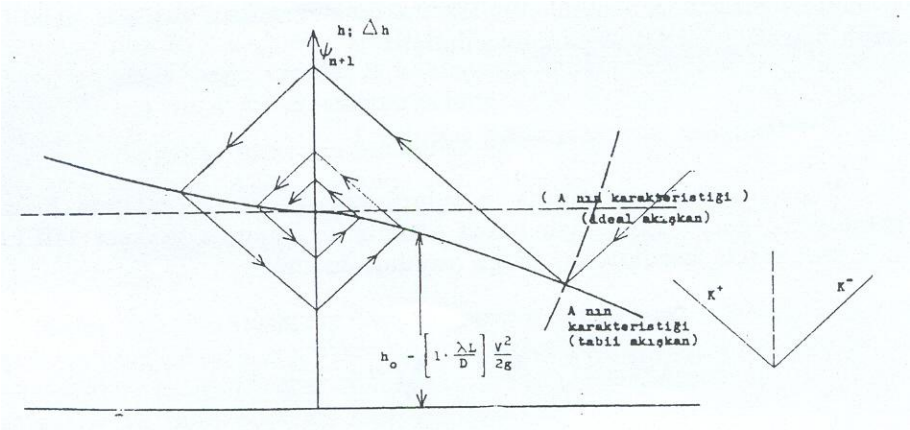
$$h_0 - \left(1 + \frac{\lambda L}{D}\right) \cdot \frac{V^2}{2g} = h_0 - \left(1 + \frac{\lambda L}{D}\right) \cdot \frac{Q^2}{A^2} \qquad \textbf{(4.17)}$$

parabolü üzerinde bulunurlar. Yukarıdaki örnekte elde edilmiş olan BERGERON diyagramının bu halde alacağı görünüm Şekil 4.13 'de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Örnekten elde edilmiş olan diyagramın grafiği

Şekil 4.13 'ün incelenmesinden de görüleceği üzere; bu defa salınımlar 0 noktası etrafında sönümlenir. Bu nokta civarındaki değişim daha detaylı olarak Şekil 4.14 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : Örnekten elde edilmiş olan diyagramın detaylı grafiği

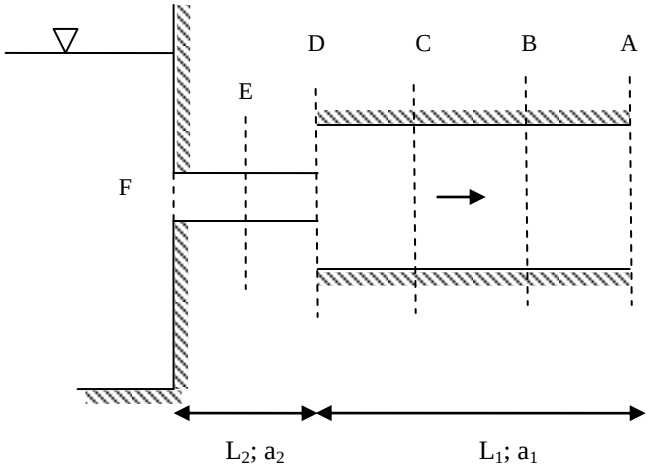
4.1.3. Değişken karakteristikli borular

Yukarıdaki paragraflarda borulardaki "a" dalga yayılma hızının

$$a = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1+\frac{\varepsilon D}{Ee}}} \qquad \textbf{(4.18)}$$

Bağıntısıyla belirlenebileceği gösterilmişti. Dolayısıyla $a = a(\varepsilon, D, E, e)$ dir.

Buna göre bu parametrelerden birinin değişmesi halinde, dalga yayılma hızı da değişecektir. Dalga yayılma hızının boru boyunca sabit bir değeri haiz olduğu borular tek karakteristikli; boru boyunca birden fazla dalga yayılma hızının mevcut olduğu borular çok karakteristikli veya değişken karakteristikli borular olarak adlandırılır.



Şekil 4.15 : Değişken karakteristikli boru - hazne şematik gösterim

Aşırı basınçların değişken karakteristikli borulardaki yayılışları da karakteristikler metodu veya BERGERON metodu yardımıyla incelenebilir. Bu amaçla şu hususa dikkat edilmelidir. Örneğin çift karakteristikli bir boru ele alınsın (Şekil 4.15) ve karakteristik değişimi *D* enkesitinde meydana gelsin. *F* ve A enkesitlerinden yola çıkarılan gözlemcilerin, aynı anda *D* enkesitine ulaşmaları temin edildiği takdirde, problem tek karakteristikli borulardaki gibi çözülebilir. Örneğin

$$\frac{CD}{a_1} = \frac{ED}{a_2} \quad \text{ve } CD = BC = AB = L_1/3 \quad \text{ve} \quad FE = ED = L_2/2 \qquad \textbf{(4.19)}$$

seçildiği takdirde 0 anında *A* enkesitinden ve 1 anında *F* enkesitinden yola çıkacak olan gözlemciler aynı anda *D* enkesitine ulaşırlar. Bu amaçla

$$\frac{L_1}{a_1} = m_1 \quad \text{ve} \quad \frac{L_2}{a_2} = m_2 \qquad \textbf{(4.20)}$$

belirlenir ve

$$\frac{m_1}{m} = a = \text{tam sayı} \qquad \textbf{(4.21)}$$

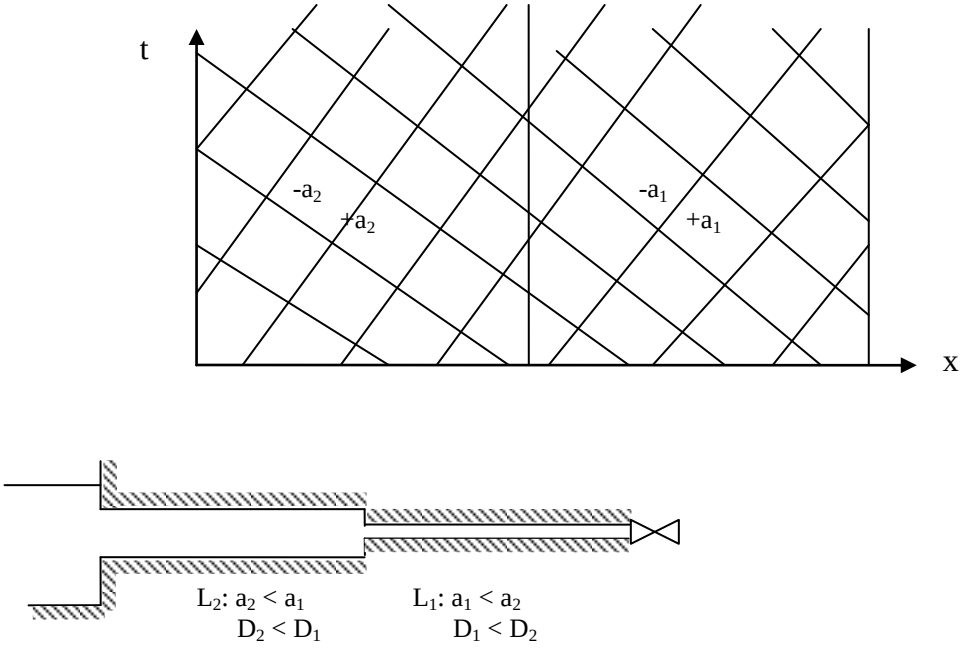
$$\frac{m_2}{m} = b = \text{ tam sayı} \qquad \textbf{(4.22)}$$

olacak şekilde m seçilir. Bundan sonra L_1 borusu a eşit parçaya; L_2 borusu b eşit parçaya bölünür; bu durumda A ucunda meydana gelecek dalganın bu dilimlerden herhangi birini katetmesi için gereken zamanın eşit olacağı kolaylıkla görülebilir:

$$\Delta t = \frac{AB}{a_1} = \frac{BC}{a_1} = \frac{CD}{a_1} = \frac{ED}{a_2} = \frac{EF}{a_2} \qquad \textbf{(4.23)}$$

Bundan sonra, daha önce yapıldığı şekilde BERGERON epürü çizilerek değerlendirmeler tek karakteristikli borulardakine benzer şekilde yapılır. BERGERON diyagramı çizilirken D ve D' doğrularının eğimlerinin boru karakteristiği ile değişeceği göz önünde tutulmalıdır.

Karakteristikler metodunun kullanılması da benzer şekilde yapılır. Bu halde de borunun farklı kısımlarında $dx/dt = V \pm a \cong \pm a$ karakteristiklerinin eğimleri farklı olacaktır. Karakteristiklerin görünümü Şekil 4.16 'da verilmiştir. Bunun haricinde hesapların yapılışı aynen tek karakteristikli borularda olduğu şekilde yürütülür.



Şekil 4.16 : Karakteristiklerin görünümü

4.2.KARAKTERİSTİKLER METODU

4.2.1. Karakteristikler Metodu Genel Hali

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

$$L_1 : a_1 \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + b_1 \cdot \frac{\partial f}{\partial t} + c_1 \cdot \frac{\partial g}{\partial x} + d_1 \cdot \frac{\partial g}{\partial t} + e_1 = 0 \qquad \textbf{(4.24)}$$

$$L_2 : a_2 \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + b_2 \cdot \frac{\partial f}{\partial t} + c_2 \cdot \frac{\partial g}{\partial x} + d_2 \cdot \frac{\partial g}{\partial t} + e_2 = 0 \qquad \textbf{(4.25)}$$

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

$$L = L_1 + \lambda \cdot L_2 \qquad \textbf{(4.26)}$$

denkleminin de çözümü olacaklardır. Burada λ, ileride belirlenecek olan bir parametreyi göstermektedir. (4.24) ve (4.25) bağıntılarının (4.26) şeklinde bir lineer kombinezonu alındığı takdirde, denklem düzenlendikten sonra

$$(a_1 + \lambda \cdot a_2)\frac{\partial f}{\partial x} + (b_1 + \lambda\, b_2)\frac{\partial f}{\partial t} + (c_1 + \lambda\, c_2) \cdot \frac{\partial g}{\partial x} + (d_1 + \lambda\, d_2) \cdot \frac{\partial g}{\partial t} + (e_1 + \lambda\, e_2) = 0 \qquad \textbf{(4.26a)}$$

elde edilir. Bundan sonra, yukarıdaki keyfi olarak seçilmiş λ parametresi, (4.26a) bağıntısında f ve g fonksiyonlarının adi türevleri gelecek şekilde belirlensin. Buna göre

$$\frac{df}{dt} = (a_1 + \lambda \cdot a_2) \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + (b_1 + \lambda\, b_2) \cdot \frac{\partial f}{\partial t} \qquad \textbf{(4.27)}$$

$$\frac{dg}{dt} = (c_1 + \lambda\, c_2) \cdot \frac{\partial g}{\partial x} + (d_1 + \lambda\, d_2) \cdot \frac{\partial g}{\partial t} \qquad \textbf{(4.28)}$$

olması istenmektedir. (4.27) bağıntısının gerçeklenebilmesi için

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{a_1 + \lambda a_2}{b_1 + \lambda\, b_2} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} \right) \cdot (b_1 + \lambda\, b_2) \qquad \textbf{(4.29)}$$

bağıntısından $\partial f / dx$ 'in katsayısının *dx*/*dt* olması gerekir. Benzer düşünceyle (4.28) bağıntısından

$$\frac{dx}{dt} = \frac{c_1 + \lambda c_2}{d_1 + \lambda d_2} \qquad \textbf{(4.30)}$$

elde edilir. Hem *f*, hem de *g* fonksiyonunun aynı λ değeri için adi türeve dönüşebilmeleri ise her iki *dx*/*dt* değerinin birbirine eşit olması ile mümkündür.

$$\frac{a_1 + \lambda a_2}{b_1 + \lambda b_2} = \frac{c_1 + \lambda c_2}{d_1 + \lambda d_2} \qquad \textbf{(4.31)}$$

Bu son bağıntı açılır ve λ'nın üslerine göre düzenlenirse;

$$\lambda^2 (a_2 d_2 - b_2 c_2) + \lambda (a_2 d_1 + b_1 d_2 - b_2 c_1 - b_1 c_2) + a_1 d_1 - b_1 c_1 = 0 \qquad \textbf{(4.31a)}$$

bulunur. Bu ifade

$$A.\lambda^2 + B \cdot \lambda + C = 0 \qquad \textbf{(4.32)}$$

$$A = a_2 \cdot d_2 - b_2 \cdot c_2 \qquad \textbf{(4.32a)}$$

$$B = a_2 \cdot d_1 + a_1 \cdot d_2 - b_2 .c_1 - b_1 \cdot c_2 \qquad \textbf{(4.32b)}$$

$$C = a_1 \cdot d_1 - b_1 \cdot c_1 \qquad \textbf{(4.32c)}$$

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

$$B^2 - 4 \cdot A \cdot C \geq 0; \qquad A \neq 0 \qquad \textbf{(4.33)}$$

olmalıdır.

4.2.2. Karakteristikler metodunun aşırı basınçların belirlenmesinde kullanılması

Aşırı basınçların belirlenmesi için elde edilmiş bulunan süreklilik ve hareket denklemleri, (4.24) ve (4.25) denklemlerine benzetilerek yazılırsa

$$\frac{a^2}{g}\cdot\frac{\partial V}{\partial x}+0+V\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial t}+V\cdot\sin\theta=0 \qquad \textbf{(4.34)}$$

$$V\cdot\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial t}+g\cdot\frac{\partial h}{\partial x}+0+\frac{C_f\cdot V\cdot|V|}{2\,D}=0 \qquad \textbf{(4.35)}$$

elde edilir. Bunlara göre $V(x, t) \equiv f(x, t)$; $h(x, t) \equiv g(x, t)$ kabul edildiği takdirde

$a_1 = a^2/g$ $\qquad$ $a_2 = V$ **(4.31b)**

$b_1 = 0$ $\qquad$ $b_2 = 1$ **(4.31c)**

$c_1 = V$ $\qquad$ $c_2 = g$ **(4.31d)**

$d_1 = 1$ $\qquad$ $d_2 = 0$ **(4.31e)**

$e_1 = V.\sin\theta$ $\qquad$ $e_2 = C_f\cdot V\cdot|V|/$ ❨· D ˜ **(4.31f)**

ve dolayısıyla

$$A=a_2\cdot d_2-b_2\cdot c_2-g \qquad \textbf{(4.32d)}$$

$$B=a_2\cdot d_1+a_1\cdot d_2-b_2.c_1-b_1\cdot c_2=0 \qquad \textbf{(4.32e)}$$

$$C=a_1\cdot d_1-b_1\cdot c_1=a^2/g \qquad \textbf{(4.32f)}$$

elde edilir. Dolayısıyla

$$\lambda_{1,2}=\frac{-B\pm\sqrt{B^2-4AC}}{2A}=\pm\frac{a}{g} \qquad \textbf{(4.36)}$$

seçildiği takdirde (4.34) ve (4.35) denklemlerinin lineer kombinezonu olan

$$\frac{\partial V}{\partial x}\left(\frac{a^2}{g}+\lambda V\right)+\lambda\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial h}{\partial x}(V+\lambda g)+\frac{\partial h}{\partial t}+V\cdot\sin\theta+\frac{C_f\lambda V|V|}{2D} \qquad \textbf{(4.37)}$$

ifadesinde ($\lambda = a/g$) konulduğu takdirde, (4.37) yerine

$$K^+\ \frac{a}{g}\cdot\frac{dV}{dt}+\frac{dh}{dt}+V\cdot\sin\theta+\frac{C_f\,a\,V\,|V|}{2gD}=0 \qquad \textbf{(4.37a)}$$

ve

$$C^{+}\ \frac{dx}{dt} = V + a \qquad \textbf{(4.37b)}$$

($\lambda = -a/g$) konulduğu takdirde, (4.37) yerine

$$K^{-} - \frac{a}{g}\cdot\frac{dV}{dt} + \frac{dh}{dt} + V\cdot\sin\theta - \frac{C_f\, a\, V\,|V|}{2gD} = 0 \qquad \textbf{(4.37c)}$$

ve

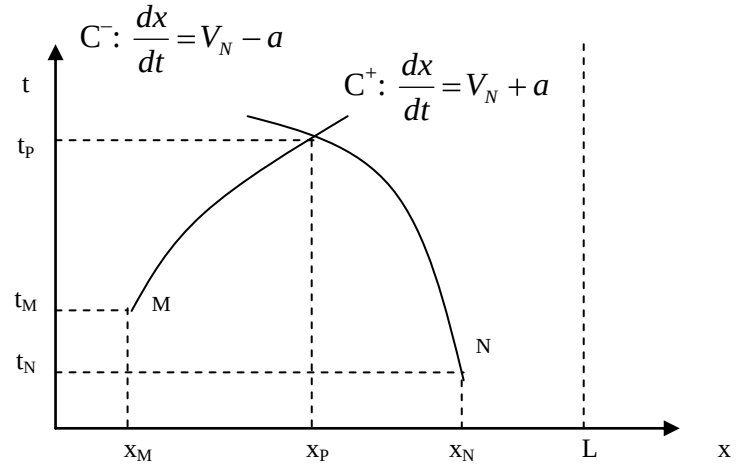
$$C^{-}\ \frac{dx}{dt} = V - a \qquad \textbf{(4.37d)}$$

elde edilir. Bu denklemler karakteristik denklemler; $dx/dt = V \pm a$ eğrileri karakteristik eğriler veya sadece karakteristikler olarak adlandırılır. $A\cdot C <,\ A \neq 0$ olduğu için daima iki reel karakteristik mevcuttur.

(4.37a – 4.37b) ve (4.37c-4.37d) bağıntıları fiziksel olarak şu şekilde açıklanabilir. (4.37b) bağıntısının gerçekleşmesi halinde (4.37a) bağıntısı; (4.37d) koşulunun gerçekleşmesi halinde ise (4.37c) bağıntısı yürürlükte olacaktır. Bundan böyle (4.37b) ve (4.37d) eğrilerinin çizilebileceği $(x-t)$ düzlemi faz düzlemi; bu eğrilerin üzerinde yürürlükte bulunan (4.37a) – (4.37c) bağıntılarının çizileceği $(h-V)$ düzlemi hodograf düzlemi; hodograf düzlemindeki eğriler K karakteristikleri ve faz düzlemindeki eğriler CAUCHY-RIEMANN karakteristikleri veya C karakteristikleri olarak adlandırılacaktır.

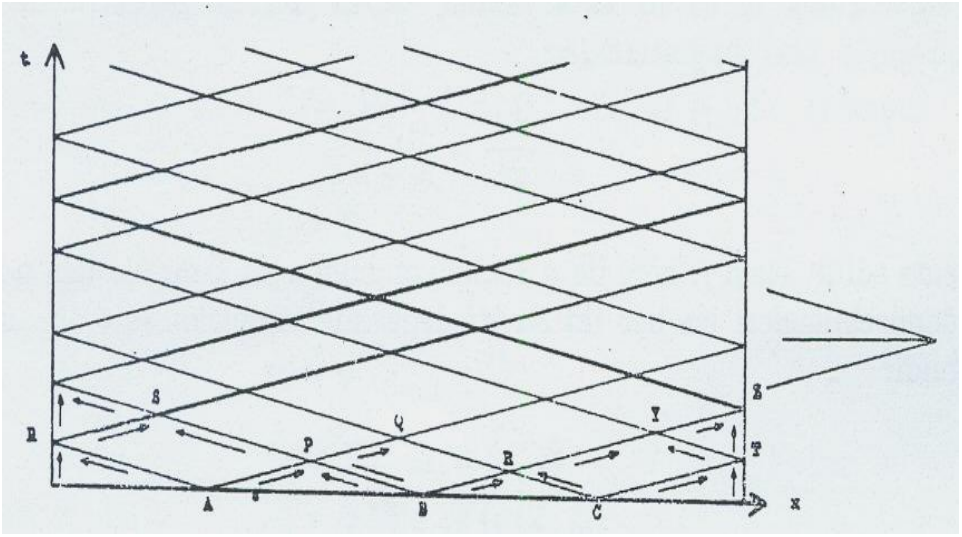
Bundan sonra M ve N gibi iki noktadaki akım durumunun bilindiği kabul edilsin. Buna göre x_M, t_M, V_M, h_M ve x_N, t_N, V_N, h_N biliniyor demektir. Dolayısıyla *M* ve *N* noktalarından geçen C^{+} ve C^{-} karakteristiklerinin eğimleri bilinir. *M* noktasından geçen C^{+} üzerinde (4.37a) ve *N* noktasından geçen C^{-} üzerinde ise (4.37c) bağıntısının yürürlükte olduğu yukarıda belirtilmişti.

Buna göre bu iki karakteristiğin kesişme noktası olan *P* de her iki ifade geçerli olacaktır (Şekil 4.17)



Şekil 4.17 : C^+ ve C^- karakteristikleri eğrileri

Genel halde C^+ ve C^- karakteristikleri eğriseldir; Çünkü "a" sadece boruya ve akışkana bağlıysa da , *dx*/*dt* eğimi aynı zamanda V_i hızının fonksiyonudur. Dolayısıyla göz önüne alınan nokta, yani (*x* – *t*) değer çifti değiştikçe V_i ve neticede *dx*/*dt* de değişecektir.



Şekil 4.18 : Boru üzerindeki karakteristik çizgileri

Bununla beraber *M* ve *N* noktalarının birbirinden çok uzak seçilmemesi halinde *MP* ve *NP* eğrileri yerine doğrular kabul edilebilir. Bu takdirde MP (C^+ karakteristiği) için, (4.37b) denklemi sonlu farklar cinsinden yazılırsa;

$$\frac{x_P - x_M}{t_P - t_M} = V_M + a \qquad \textbf{(4.38)}$$

ve benzer şekilde

$$\frac{x_P - x_N}{t_P - t_N} = V_N - a \qquad \textbf{(4.39)}$$

elde edilir. Bu iki denklem başlangıç değerleri kullanılarak, yani

$$V_M \cong \frac{V_M + V_P}{2} \qquad \textbf{(4.40)}$$

$$V_N \cong \frac{V_N + V_P}{2} \qquad \textbf{(4.41)}$$

kabul edilerek yazılmıştır. Buna göre (4.38) ve (4.39) 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 (4.37a) ve (4.37c) bağıntıları sonlu farklar cinsinden yazılırsa, genel halde

$$K^+ : \Delta h + \frac{a}{g} \cdot \Delta V + V \cdot \sin\theta \cdot \Delta t + \frac{C_f \, a V |V|}{2g \cdot D} \cdot \Delta t = 0 \qquad \textbf{(4.42)}$$

$$K^- : \Delta h - \frac{a}{g} \cdot \Delta V + V \cdot \sin\theta \cdot \Delta t - \frac{C_f \, a V |V|}{2g \cdot D} \cdot \Delta t = 0 \qquad \textbf{(4.43)}$$

ve mevcut halde

$$K^+ : h_P - h_M + \frac{a}{g}(V_P - V_M) + V_M \cdot \sin\theta \cdot (t_P - t_M) + \frac{C_f \cdot a \cdot V_M |V_M|}{2g \cdot D} \cdot (t_P - t_M) = 0 \qquad \textbf{(4.44)}$$

$$K^+ : h_P - h_N - \frac{a}{g}(V_P - V_N) + V_N \cdot \sin\theta \cdot (t_P - t_N) - \frac{C_f \cdot a \cdot V_N |V_N|}{2g \cdot D} \cdot (t_P - t_N) = 0 \qquad \textbf{(4.45)}$$

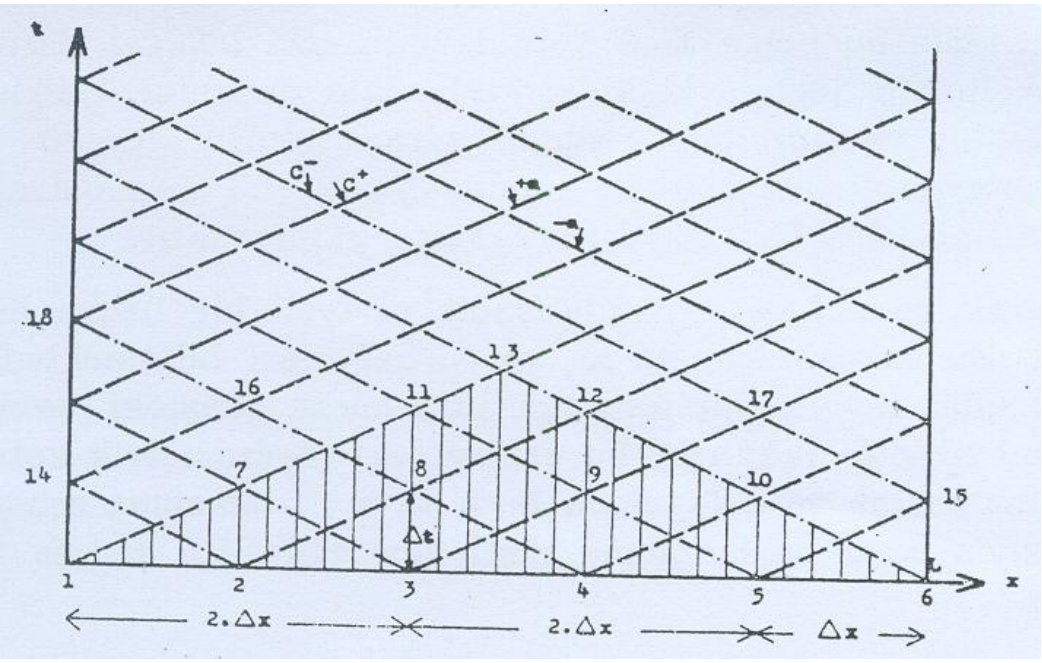
elde edilir. Bu denklemler yazılırken de (4.41) kabulünün yapılmış olduğuna, yani başlangıç değerlerinin kullanıldığına dikkat edilmelidir. (4.44) ve (4.45) bağıntılarındaki x_P ve t_P değerleri (4.38) ve (4.39) denklemleri yardımıyla belirlenmiş olduğuna göre, bunlarda sadece h_P ve V_P bilinmemektedir; (4.44) ve (4.45) denklemleri bir defa taraf tarafa toplanır; bir defa da taraf tarafa çıkartılırsa, h_P ve V_P hemen bulunur.

Madeni borularda; $V << a$ olduğundan

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \qquad \textbf{(4.46)}$$

kabul edilebilir. 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, "a" 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 zamanla değişmeyen rejim mevcut olduğundan $t = 0$ için bütün x noktalarında V_i, h_i büyüklükleri bilinir. Buna göre 1, 2, 3, … noktalarından geçen artı ve eksi karakteristikler, başlangıç değerleri yardımıyla kolaylıkla çizilebilir. Madeni borular halinde bunların eğiminin a = sabit kabul edilebileceği yukarıda belirtilmişti. Diğer taraftan boru eşit parçalara ayrıldığından, muhtelif noktalar arasında Δx uzaklıkları da aynı olur ve bu halde Şekil 4.19 'e göre;



Şekil 4.19 : Eşit parçalara ayrılmış borudaki hesaplanacak basınç noktaları

$$\Delta t = a \cdot \Delta x = \text{sabit} \qquad \textbf{(4.47)}$$

elde edilir. Dolayısıyla şekilde 7, 8, 9, … noktalarına ait (x_i, t_i) büyüklükleri de hemen bulunabilir. Bu halde (t_P – t_M) = (t_P – t_N) olduğundan (4.44) ve (4.45) denklemlerinden, örneğin (7) noktası için

$$h_1 = \frac{1}{2}\left[h_1 + h_3 + \frac{a}{g}(V_1 - V_3) - (V_1 + V_3)\cdot \sin\theta \cdot \Delta t + \frac{C\cdot a}{2gD}(V_3 \cdot |V_3| - V_1 \cdot |V_1|) \right] \quad \textbf{(4.48)}$$

$$V_1 = \frac{g}{2a}\left[\frac{a}{g}(V_1 + V_3) + (h_1 - h_3) + (V_1 - V_3)\cdot \sin\theta \cdot \Delta t - \frac{C\cdot a}{2gD}(V_1 \cdot |V_1| - V_3 \cdot |V_3|) \right] \quad \textbf{(4.49)}$$

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 ve 10 yardımıyla 12; son olarak da 11 ve 12 yardımıyla 13 belirlenebilir.

Görüldüğü üzere bu metod yardımıyla Şekil 4.19 ‘daki taralı alan içine 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. Metodun uygulamasının anlaşılabilmesi için;

İlk olarak boru başlangıcında sabit seviyeli bir hazne bulunduğu düşünülsün. Bu enkesit için de x_{14} ve t_{14} değerleri bilinmektedir. Ayrıca borunun sabit seviyeli bir hazneyle birleşmesi, girişteki yerel yük kayıpları ihmal edildiği takdirde, bu enkesitteki piyezometrik kotun zamanla değişen olmamasına ve dolayısıyla $h_1 = h_{14}$ = … olmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla boru başlangıcına rastlayan enkesitte sadece V_{14} bilinmemektedir.

Diğer taraftan (14) noktası, (2) noktasından çıkan C^- karakteristiği üzerinde bulunduğundan (4.45) bağıntısına göre

$$-\frac{g}{a}V_{14} + \frac{g}{a}V_2 + (h_{14} - h_2) + V_2 \cdot \sin\theta \cdot \Delta t - \frac{C\cdot a\cdot V_2 \cdot |V_2|}{2gD}\cdot \Delta t = 0 \quad \textbf{(4.50)}$$

ve buradan V_{14} çözülürse;

$$V_{14} = \frac{g}{a}\left[\frac{a}{g}V_2 + (h_{14} - h_2) + V_2 \cdot \sin\theta \cdot \Delta t - \frac{C\cdot a\cdot V_2 \cdot |V_2|}{2gD}\cdot \Delta t \right] = 0 \quad \textbf{(4.51)}$$

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

İkinci olarak borunun mansap ucunda bir vana bulunduğu ve bunun bir orifis gibi çalıştığı kabul edilecektir. (Şekil 4.20) Buna göre, zamanla değişmeyen rejimde

$$A_0 \cdot V_0 = (C \cdot A_V)_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0} \qquad \textbf{(4.52)}$$

ve zamanla değişen rejimde, C debi katsayısını göstermek üzere

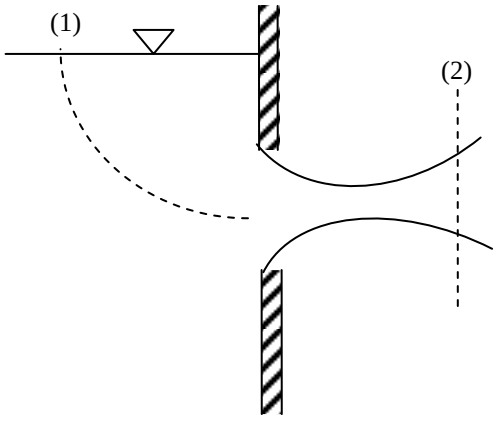
$$A \cdot V_P = (C \cdot A_V)_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_P} \qquad \textbf{(4.53)}$$

yazılabilir. Bu iki ifade taraf tarafa oranlanırsa

$$\frac{V_P}{V_0} = \frac{(C \cdot A_V)}{(C \cdot A_V)_0} \cdot \sqrt{\frac{h_P}{h_0}} = \tau \cdot \sqrt{\frac{h_P}{h_0}} \qquad \textbf{(4.54)}$$

bulunur. Burada τ, boyutsuz vana açıklığını göstermektedir ve genellikle zamanın fonksiyonu olarak verilmiştir.

Zamanla değişmeyen rejimde $\tau = 1$, vananın tam kapalı olması halinde $\tau = 0$ olur. τ, vana kapanma kanunu; t_c ile tam kapanma için gereken zaman gösterildiği takdirde



Şekil 4.20 : Orifis

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^m \qquad \textbf{(4.55)}$$

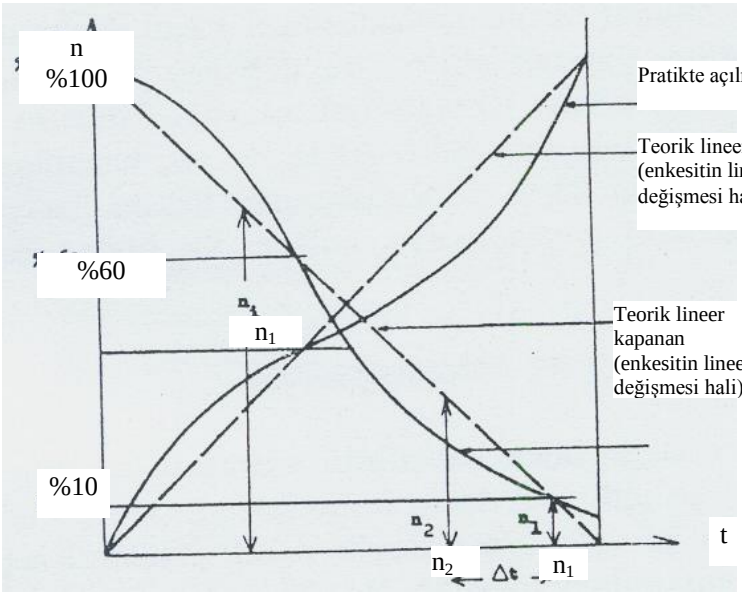
şeklinde kabul edilebilir.

Denge bacalarında, debinin lineer olarak arttırılmasının veya azaltılmasının hidrolik bakımdan uygun olduğu, bununla beraber, bunun temininin aslında çok zor olduğu bilinmektedir.

Çünkü vana enkesitindeki hız sabit kabul edilebileceğine göre, böyle bir durumun temin edilebilmesi için, enkesitin lineer olarak değiştirilmesi, dolayısıyla kapama veya açılma hızının sabit tutulması gerekir. Halbuki pratikte açısal hız sabit tutulur. Bu nedenle gerçekte değişim Şekil 4.21 ‘de görüldüğü gibi olur.

Muhtelif tesislerde yapılan ölçümlere göre, kapama sırasında, lineer hale göre daha yavaş kapama 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. **(**Kourtitas, 1983)

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



Şekil 4.21 : Lineer açılma ve kapanma yüzdesinin zamanla değişim grafiği

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

$$Q = Q_0 - n \,.\, \Delta t \qquad \textbf{(4.56)}$$

ve açılma halinde

$$Q = n' \,.\, \Delta t \qquad \textbf{(4.57)}$$

$$\Delta t = 2 \,.\, L / a \qquad \textbf{(4.58)}$$

ALLIEVI zamanı bağıntılarına göre değiştiği kabul edilir.

4.3. PARMAKİAN METODU (Grafik yolla Su Darbesinin çözümlenmesi)

4.3.1.Eşlenik Su Darbesi Denklemleri

Genellikle aşağıdaki (4.59) denkleminden doğru olarak V teriminin hesaplanması, birden fazla bilinmeyen bulunduğundan can sıkıcı bir hal alır.

$$V = -\frac{aB^2}{2g} + \frac{B}{2}\sqrt{\left[\frac{aB}{g}\right] + 4\left(H_0 + \frac{aV_0}{g} + 2f_1\right)} \qquad \textbf{(4.59)}$$

Boru hattında fiziksel bir süreksizlik olduğunda basınç ve benzeri büyüklüklerde önemli bir artış meydana gelir. Daha kolay su darbesi çözümünü elde etmek için; bu bölümde grafik metod kullanılacaktır. Aşağıdaki türetilmiş ifadeler;

$$V - V_0 = -\frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right)\right] \qquad \textbf{(3.34d)}$$

$$H - H_0 = F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \qquad \textbf{(3.35a)}$$

temel su darbesi eşitlikleridir.

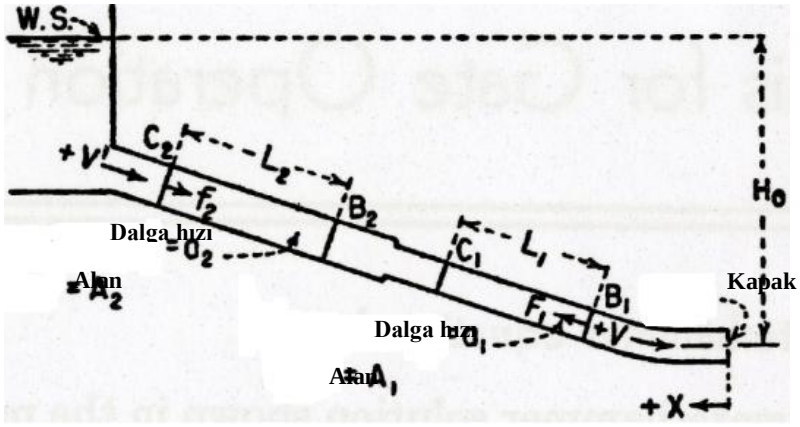
(3.35a)'den (3.34d) eşitliği çıkarılırsa ;

$$H - H_0 = \frac{a}{g}(V - V_0) + 2F\left(t - \frac{x}{a}\right) \qquad \textbf{(4.60)}$$

(3.34a)'den (3.34d) eşitlikleri eklenirse ;

$$H - H_0 = -\frac{a}{g}(V - V_0) + 2f\left(t + \frac{x}{a}\right) \qquad \textbf{(4.60)}$$

(4.60) denklemi sadece F dalga terimini içerdiğinden, bu eşitlik F dalgaları teriminin boru hattında hız ve basıç ilişkilerini tanımlar. Benzer olarak, (4.61) eşitliği f dalgaları açısından hız ve basıç ilişkilerini tanımlar. Şekil 4.22 'de gösterilen boru hattını düşünelim. Borunun üst kesiti a_2 (feet/s) dalga hızına sahipken, borunun alt kesiti üniform et kalınlığı ve çapı farklı olan a_1 (feet/s) dalga hızına sahiptir. t_1 zamanında B_1 'de F_1 olsun. Bu dalga, $t_2 = t_1 + L_1/a_1$ saniyesinde C_2'ye ulaşır ve a_1 hızıyla yukarı çıkar. Benzer olarak, t_3 zamanında C_2 'de f_2 olsun. Bu dalga, $t_4 = t_3 + L_2/a_2$ saniyesinde B_2'ye ulaşır ve a_2 hızıyla aşağıya gider. (4.61) denkleminde uygulanan B_2 ve C_2 (4.60) eşitliğine göre B_1 ve C_1 aşağıda belirlenir.



Şekil 4.22 : Hazne - Deşarj Hattı

$$H_{B1t1} - H_{B1t0} = \frac{a_1}{g}(V_{B1t1} - V_{B1t0}) + 2F_1 \qquad \textbf{(4.62)}$$

$$H_{C1t2} - H_{B1t2} = \frac{a_1}{g}(V_{C1t2} - V_{C1t2}) + 2F_1 \qquad \textbf{(4.63)}$$

$$H_{C2t2} - H_{C2t0} = -\frac{a_2}{g}(V'_{C2t2} - V'_{C2t0}) + 2f_2 \qquad \textbf{(4.64)}$$

$$H_{B2t4} - H_{B2t0} = -\frac{a_2}{g}(V'_{B2t4} - V'_{B2t0}) + 2f_2 \qquad \textbf{(4.65)}$$

Aşağıdaki ilişkileri kullanarak bu denklemlerden F_1 ve f_2 çıkarıldıktan sonra;

$H_{B1t0} = H_{C1t0}$ $\qquad$ $H_{C2t0} = H_{B2t0}$ $\qquad$ **(4.66)**

$V_{B1t0} = V_{C1t0}$ $\qquad$ $V'_{B2t0} = V'_{c2t0}$ **(4.67)**

Aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$H_{B1t1} - H_{C1t2} = \frac{a_1}{g}(V_{B1t1} - V_{C1t2}) \quad \textbf{(4.68)}$$

$$H_{C2t2} - H_{B2t4} = -\frac{a_2}{g}(V'_{C2t2} - V'_{B2t4}) \quad \textbf{(4.69)}$$

(4.68) ve (4.69) eşitlilikleri türetildiğinde, B_2 ve C_2 üniform borunun üst kesitinde isteğe bağlı noktalarken, B_1 ve C_1 üniform borunun alt kesitinde isteğe bağlı noktalardır.

Buradan, boru hattında üniform borunun herhangi bir bölümünün son noktalarını içeren iki nokta arasındaki (4.68) ve (4.69) denklemleri temin edilir. Bu denklemler aşağıdaki oranlarla ilgili olan başka bir formda tekrar yazılabilir.

$$H = \frac{H}{H_0} \quad \textbf{(4.70)}$$

$$v = \frac{V}{V_0} = \frac{V'}{V'_0} \quad \text{(kapak kapama hareketleri için)} \quad \textbf{(4.71)}$$

$$v = \frac{V}{V_e} = \frac{V'}{V'_e} \quad \text{(kapak açılma hareketleri için)} \quad \textbf{(4.72)}$$

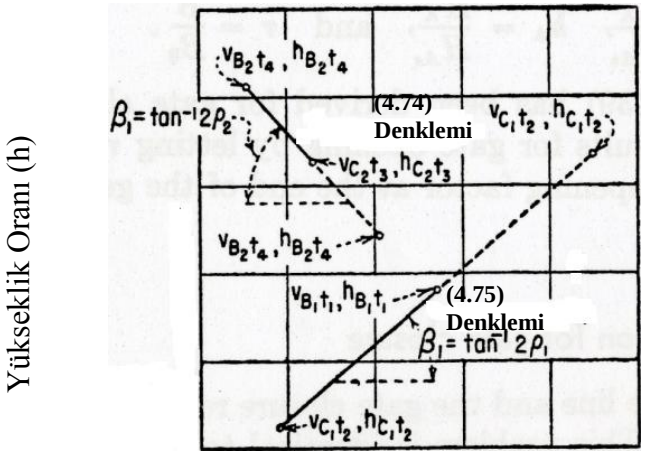
Kapak kapamasından önceki boru bölümünde başlangıçta kararlı suyun hızları V_0 ve V_0''dır. Kapak açılmasından sonra için boru bölümünde nihai kararlı suyun hızları V_e ve V_e' tanımlanır. O zaman, kapak kapanması için;

$$\rho_1 = \frac{a_1 V_0}{2gH_0} \qquad \text{ve} \qquad \rho_2 = \frac{a_2 V'_0}{2gH'_0} \quad \textbf{(4.73)}$$

ise

$$h_{B1t1} - h_{C1t2} = 2\rho_1(v_{B1t1} - v_{C1t2}) \quad \textbf{(4.74)}$$

$$h_{C2t2} - h_{B2t4} = -2\rho_2(v'_{C2t2} - v'_{B2t4}) \text{ 'dir.} \quad \textbf{(4.75)}$$



Şekil 4.23 : h - v Diyagramı

Ve kapak açılması için;

$$\rho_1 = \frac{a_1 V_e}{2gH_0} \qquad \text{ve} \qquad \rho_2 = \frac{a_2 V'_e}{2gH'_0} \qquad \textbf{(4.76)}$$

ρ_1 ve ρ_2 boru hattı sabitleri iken (4.74) ve (4.75) denklemleri eşlenik su darbesi eşitlikleridir. h ve v 'nin dikdörtgen koordinat sistemindeki eşlenik denklemleri, Şekil 4.23 'de gösterildiği gibi bilinen noktaların içinden geçen ve ± 2ρ eğimine sahip düz çizgiler tarafından temsil edilir.

4.3.2. Kapak Deşarj Denklemleri

Her bir eşlenik su darbesi denklemi, olağanüstü su darbesi dalgası hareketi altında borunun bir noktasındaki h ve v ile aynı üniform boru hattının başka bir noktasındaki h ve v arasındaki ilişkiyi tanımlar. Açık olarak h ve v 'yi belirlemek için, ikinci bir bağımsız ilişki gerekir. Kapak eylemleri için bu ilişki kapaktaki deşarjdan belirlenebilir. Kararlı koşullar altında kapak içinden başlangıç deşarjı ;

$$V_{A0} = B_0 \sqrt{H_{A0}} \qquad \textbf{(4.77)}$$

ve herhangi kapak açılmasında deşarj ve yükseklik (4.77) eşitliğinde tanımlandığında;

$$V_A = B_0\sqrt{H_A} \qquad \textbf{(4.78)}$$

$v_A = \frac{V_A}{V_{A0}}$; $h_A = \frac{H_A}{H_{A0}}$ ve $\tau = \frac{B}{B_0}$ kullanılarak;
O zaman

$$v_A = \tau\sqrt{h_A} \qquad \textbf{(4.79)}$$

'dır.

Kapak kapanması için (4.79) denklemi türetilmesine rağmen , kapak hareketinin sonunda kapak açılma faktörü B_e 'yken $\tau = B / B_e$ ile izin verildiği kapak açılması aynı (özdeş) denklem ile sonuçlanır.

4.3.3. Kapak Kapanması için Grafik Çözüm

Şekil 4.24 ve 4.25 'de görülen kapak kapanma ve boru hattı ilişkisini düşünelim. En basit halde çözümü tarif etmek için, Kapaktaki yükseklik artışı 2 s. zaman aralığı için belirlenir. A'dan E'ye 1 saniye Dalga seyahat zamanından dolayı, boru hattının son noktaları için gerekli eşlenik su darbesi denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$h_{A0} - h_{E1} = +2(v_{A0} - v_{E1}) \qquad \textbf{(4.80a)}$$

$$h_{E1} - h_{A2} = -2(v_{E1} - v_{A2}) \qquad \textbf{(4.80b)}$$

$$h_{A0} - h_{E3} = +2(v_{A2} - v_{E3}) \qquad \textbf{(4.80c)}$$

$$h_{E3} - h_{A4} = -2(v_{E3} - v_{A4}) \qquad \textbf{(4.80d)}$$

$$h_{A4} - h_{E5} = +2(v_{A4} - v_{E5}) \qquad \textbf{(4.80e)}$$

$$h_{E5} - h_{A6} = -2(v_{E5} - v_{A6}) \qquad \textbf{(4.80f)}$$

Kapakta h ve v (yükseklik ve hız) oranları bu denklemlerde T = 0, 2, 4 ve 6. saniyeler için gösterilir. Buradan sadece bu belirli zamanlarda kapaktaki deşarj ilişkisi, su darbesi çözümlerinde gerekecektir.

$$v_{A0} = 1.0\sqrt{h_{A0}} \qquad \textbf{(4.81a)}$$

$$v_{A2} = 0.7\sqrt{h_{A2}} \qquad \textbf{(4.81b)}$$

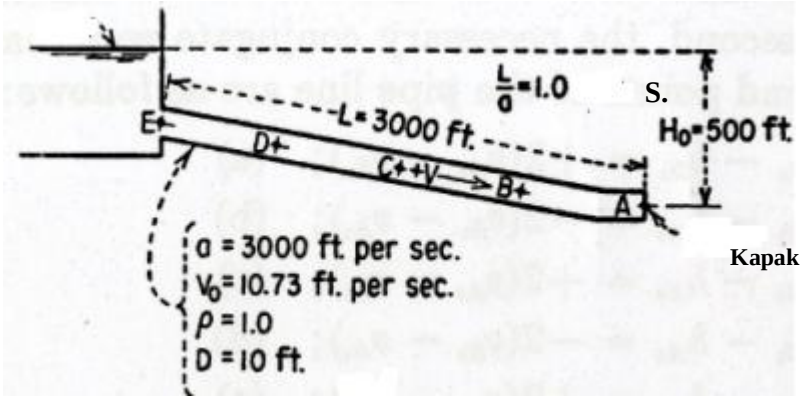
$$v_{A4} = 0.3\sqrt{h_{A4}} \qquad \textbf{(4.81c)}$$

$v_{A6} = 0$ **(4.81d)**

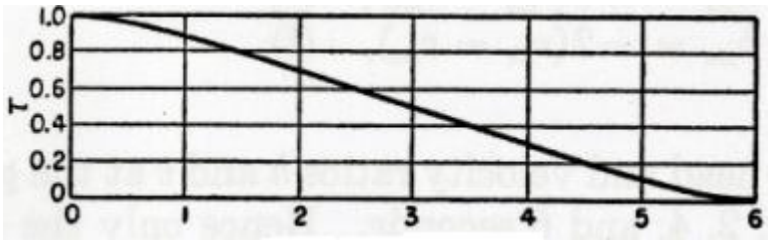
$v_{A6} = 0$ (t> 6 s olduğunda) **(4.81e)**

(4.80) ve (4.81) denklemleri eş zamanlı grafik yöntemi ile çözümlenirse; h ve v eksen takımı üzerinde, (4.81a), (4.81b), (4.81c) ve (4.81d) parabolleri τ = 1.0, 0.7, 0.3 ve 0 değerleri Şekil 4.26 'da gösterildiği gibi çizilir. τ = 0 parabolü v=0 'da düşey eksenle kesişir. Kapak hareketinden önce A_0 noktası h=1 ve v=1 koordinatlarında yeri belirlenir. Kapak hareketi etkisi 1 saniyelik dalga seyahat zaman aralığının sonrasına kadar borunun hazne sonuna ulaşmadan E_1 aynı noktada A_o olarak yeniden yeri belirlenir. Denklen (4.80a) h= 1 ve v=1 'de diyagram üzerinde bir nokta olarak temsil edilir. Denklem (4.80b) E_1 noktasının içinde geçen -2ρ eğimiyle düz bir çizgi eşitliğidir. Eğim hattı (4.80b) ve (4.81b) parabolü üzerinde aynı zamanda yeri bulunan A_2 'ye ilişkin nokta için, Şekilde görüldüğü gibi bu iki hattın kesişiminden yeri bulunmalıdır.

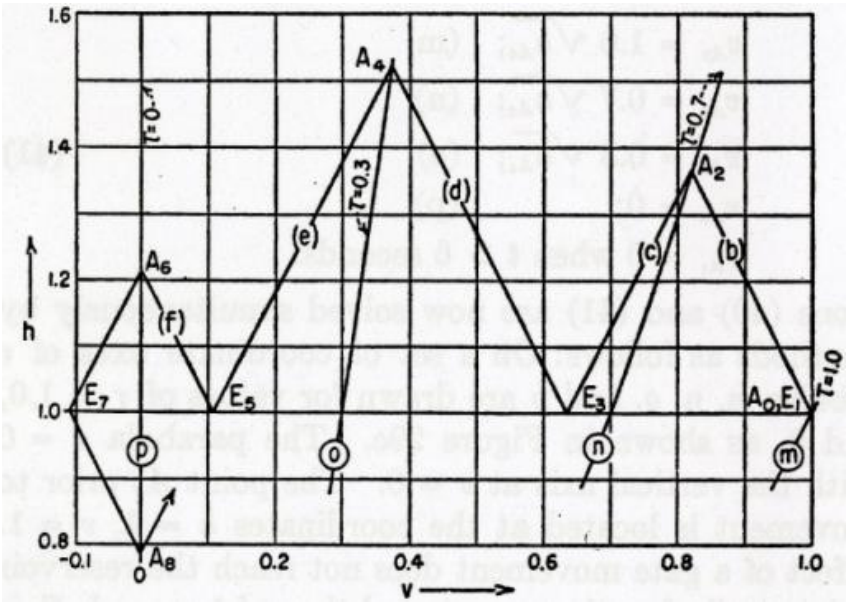
Denklem (4.80c) A_2 noktasının içinde geçen 2ρ eğimiyle düz bir çizgi eşitliğidir. Sabit Hazne bölümü E_3 için h=1 'de yatay eksen üzerinde yeri bulunur. A_4, E_5, A_6, E_7, A_8 ve benzeri ilişkin noktalar şekilde gösterildiği tarzda belirlenebilir.



Şekil 4.24: Şematik Çizim



Şekil 4.25 : Kapak Kapanma İlişkisi (s)



Şekil 4.26 : h ve v eksen takımı üzerinde, m, n,o ve p parabolleri

τ = 1.0, 0.7, 0.3 ve 0 değeri

Su darbesi analizi grafik metodu, aslında eş zamanlı denklemlerin grafik çözümünden ibaret olduğu görülmektedir.

Denklemlerin bir grubu belirlenmiş etkin kapak açılması τ değerine bağlıdır. Bu kapak ilişkisi h – v diyagramı üzerinde paraboller tarafından temsil edilir. İkinci bir denklem grubu eşlenik su darbesi denklemlerinden elde edilir. Bu denklemler $\pm 2\rho$ eğimini düz çizgiler tarafından h-v diyagramı üzerinde temsil edilir.

Paraboller ve Eğim çizgilerinin kesişmeleri kapakta hız ve yükseklik oranlarını belirler ve h=1 yatay hat ile eğim çizgilerinin kesişmeleri sonucunda borunun hazne sonundaki oranlar belirlenir.

4.3.4. Üniform Kapak Hareketi için Su Darbesi

4.3.4.1. Sıfır kapağa üniform kapak kapanması

Su Darbesi analizinin grafik metodu, herhangi bir kapak hareketi tipi için bir boru hattında çeşitli noktalarında basınç yüksekliği değişimini belirleyen bir yöntem sağladığı bir önceki bölümde verilmişti.

Zamana göre üniform olarak etkin kapak açılma değişimlerinde, kapak hareketi üniform kapak eylemi olarak ifade edilir. Kapak hareketinin tipinden dolayı, her bir boru hattı ve kapak kapanma için grafik bir su darbesi analizi yapmak gerekli değildir. Çünkü su darbesi çözümlerinin büyük sayısal sonuçları grafikler üzerinde

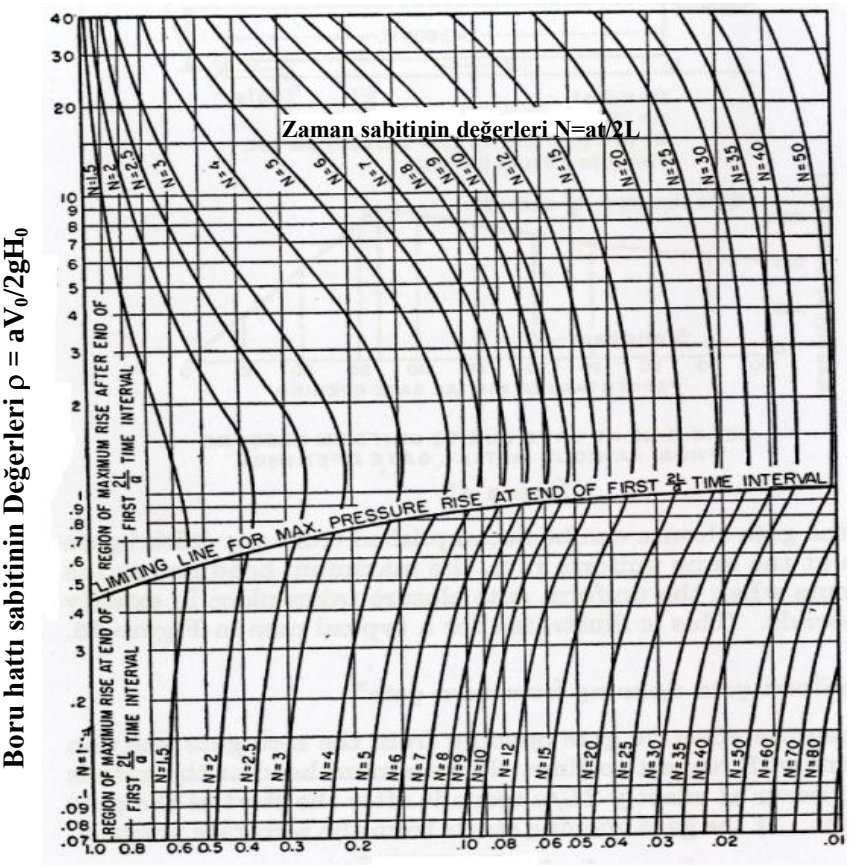
gösterilebilir. Şekil 4.27, kapak kapanmasından sıfır kapanmaya üniformluğu gösteren bu grafiklerden birisidir.

$$N = \frac{Ta}{2L} \qquad \textbf{(4.82)}$$

Kapakta maksimum basınç artışını belirlemek için birkaç 2L/a aralığı açısından kapak kapanma zamanı ve ρ boru hattı karakteristiğini hesaplamak gereklidir.

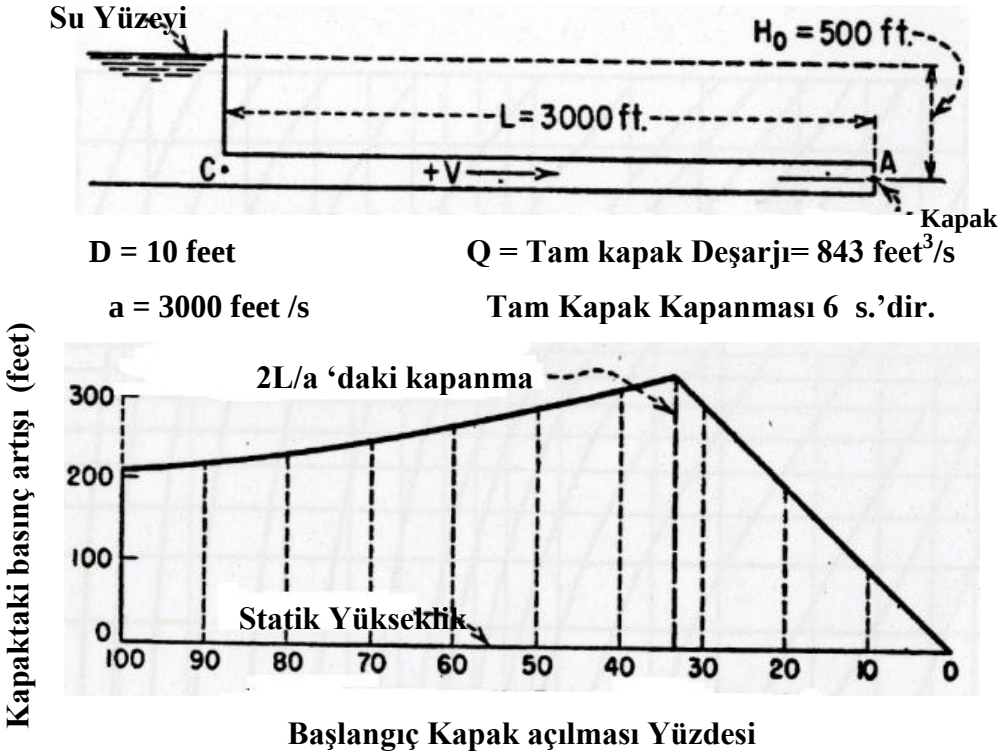
$$\Delta H = 2\rho K H_0 \qquad \textbf{(4.83)}$$

ilişkisinden belirlenerek basınç yükseklik artışı ve K 'nın değeri grafikten o zaman okunur. N≤ 1 'nda, K=1 ve $\Delta H = 2\rho K H_0$ için tam kapak kapanması 2L/a 'dan daha az veya eşit bir zaman boyunca gerçekleştirilir. Böyle hızlı kapak kapanmalar için basınç yüksekliği artışı, $\Delta H = -\frac{a}{g}\Delta V$ denklemidir.



Şekil 4.27 : Üniform Kapak Eylemi için Ray S. Quick'in Su Darbesi Grafiği

Kapak kapanması aynı üniform hızda başlangıç kapak konumundan yerine getirilirse kapaktaki maksimum basınç yüksekliği artışı, tam olarak 2L/a saniyesinde (üniform kapanma olduğunda) meydana gelir. Şekil 4.28 'deki tipik bir durum örneklenebilir.



Şekil 4.28 : Çeşitli başlangıç kapak açılmalarında üniform kapanmaya bağlı olarak kapakta basınç yüksekliği artışı

4.3.4.2. Sıfır kapaktan Üniform kapak açılması

Zamana göre üniform olan sıfır kapak konumundan etkin kapak açılması olduğunda, kapakta minimum yükseklik kapak hareketinin başlangıcından sonra tam olarak 2L/a saniyesinde meydana geldiği bulunur. Kapak açılması sıfır kapak konumundan başlarsa ($K = LV/gH_0T$ için),

$$h = \left(K + \sqrt{K^2 + 1}\right)^2 \qquad \textbf{(4.84)}$$

Bu denklemde V_e , kapak açılması tamamlandıktan sonra borudaki son sabit suyun hızıdır. Bu denklem, Şekil 4.29' un kullanılmasını kolaylaştırarak çözümleme ve $T \geq 2L/a$ olduğunda uygulanabilir.

$$h = \frac{H \min}{H_0} \qquad \textbf{(4.85)}$$

H_{min} = Kapaktaki minumum basınç yüksekliği (feet)

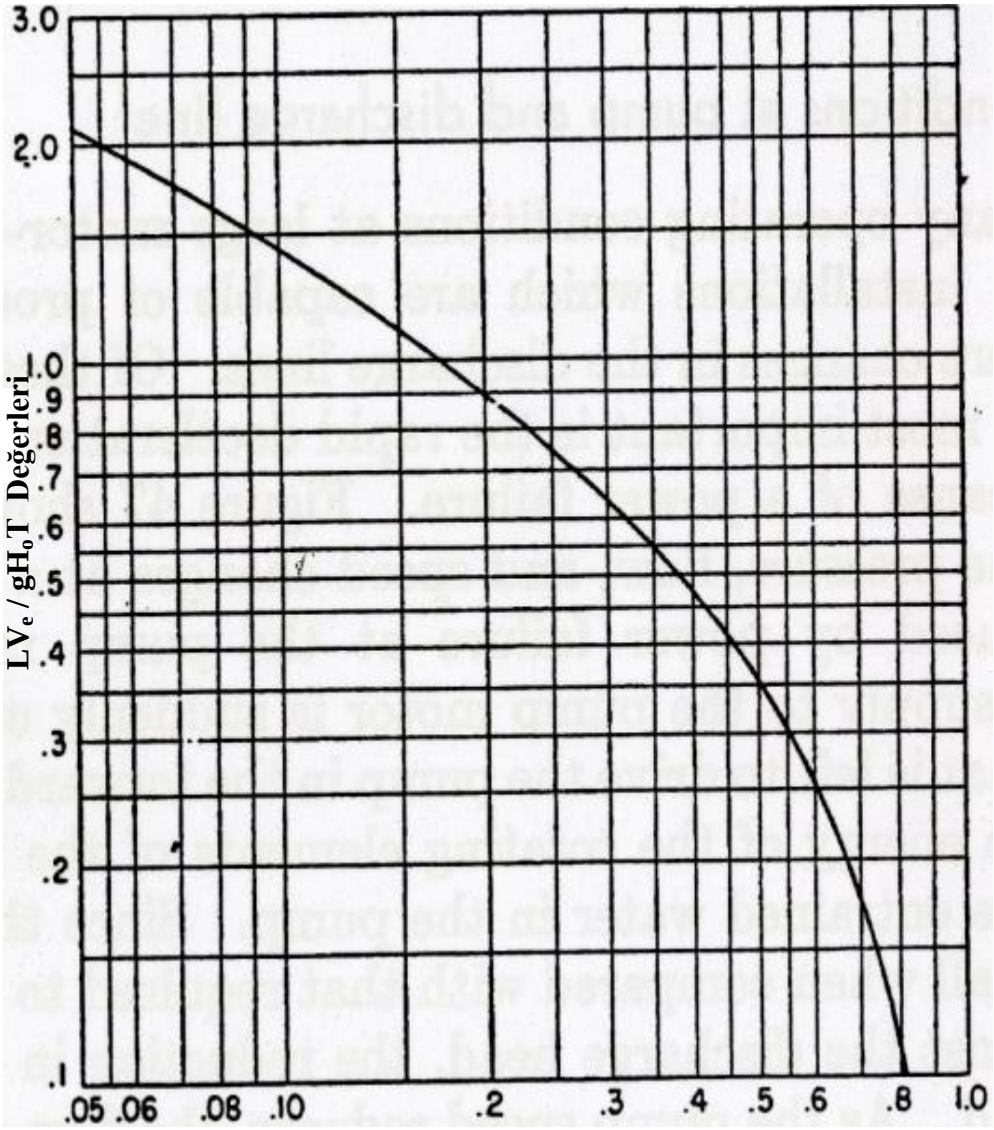
H_O= Kapakta başlangıç kararlı yükseklik (feet)

L = Borunun uzunluğu (feet)

T = İstenen konum için kapak açılma zamanı (s) ($T \geq 2L/a$)

V_e= Kapak açıldıktan sonra her bir saniye için boru içinde Son Kararlı Hız (feet/s)

g= Yerçekim İvmesi (feet /s^2)



Şekil 4.29: Kapalı konumdan üniform kapak açılmasına bağlı olarak kapakta Minimum Yükseklik

4.3.5. Elektrik Kesintisi nedeniyle Basma Deşarj hatlarında Su Darbesi

4.3.5.1. Pompa ve Deşarj hattında Geçici Koşullar

Deşarj hatlarında önemli basınç değişimleri üretilerek yapılabilen büyük motorla çalışan santrifüjlü pompa yüklemelerinin birçok işletim şartları vardır. Bu koşulların en önemlilerinden biri elektrik kesintisinden dolayı pompa motorlarının hızlı yavaşlamasıdır. Şekil 4.30 'da pompa motorlarının elektrik kesintisine bağlı olarak üretilmiş pompa yüklemelerinde hız, akış ve basıncın zaman süreçlerini gösterir.

Pompa motorlarına temin edilen güç aniden kesildiğinde; sadece ileri yönde pompayı kullanmak için bırakılmış enerji, pompa ve motorun dönen elementlerinin kinetik enerjisidir ve pompadaki su arkadan çekilir.

Gerekli deşarj yüksekliğine karşı akışı korumak için karşılaştırıldığında genellikle küçük olan bu enerjiden dolayı pompa hızı azalması çok hızlıdır.

Pompa hızı azaldığında, pompaya bitişik deşarj hattındaki suyun akışı da azalır. Bu hızlı akış değişimi sonucunda, normalin altındaki basıncın su darbesi dalgası pompaya bağlı deşarj hattında gelişir.

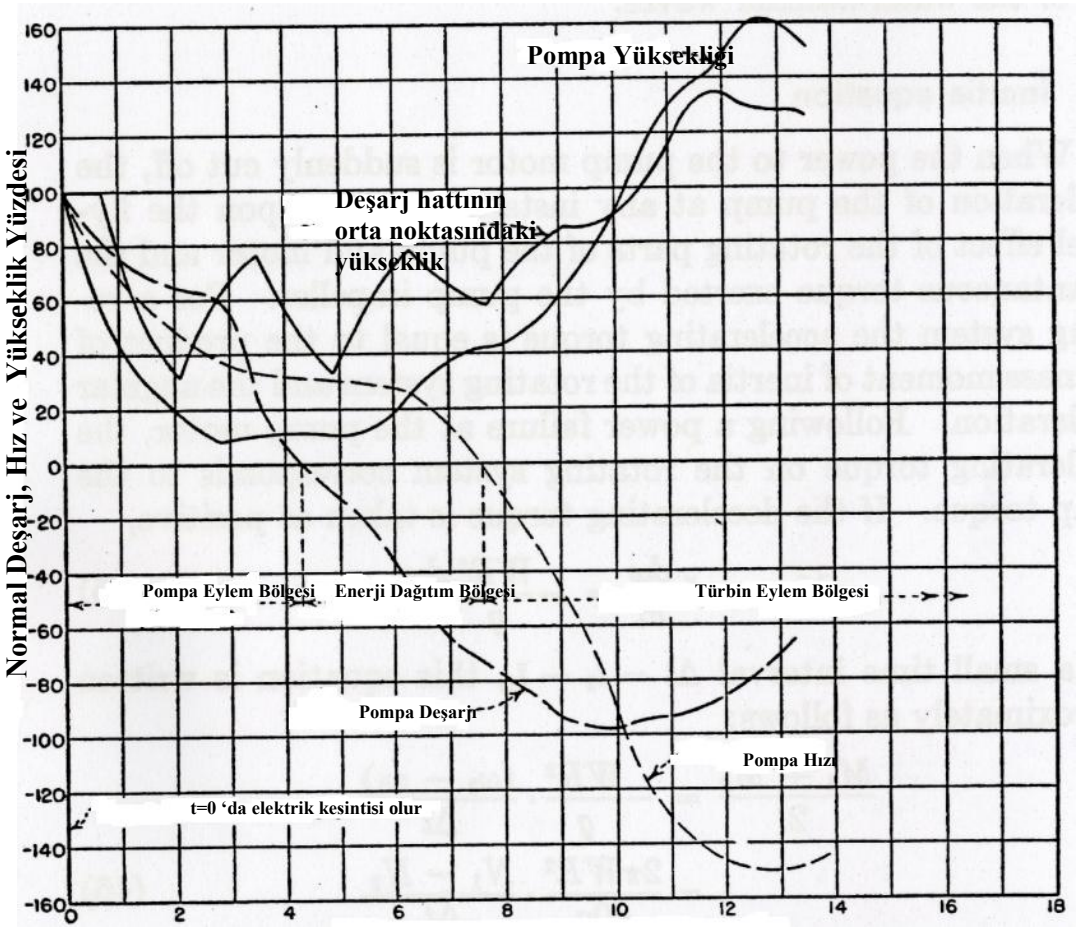
Bu normalin altındaki basınç dalgaları , dalganın bir yansıması olarak deşarj çıkış noktasına deşarj hattı içinde hızlı bir şekilde ilerler. Pompanın hızı varolan yüksekliğe karşı serbest bırakılmış susuz bir noktada azalır.

Pompada kontrol vanası mevcut değilse, ileri yönde hala dönen pompaya rağmen pompa içindeki akış ters yönde geriye döner.

Şimdi pompa hızı daha çabuk azalır ve sıfır' a iner. Kısa bir zaman sonra pompa, bir türbin gibi işleyen, geriye doğru kaçış hızına ulaşır.

Pompa kaçış hızı yaklaşımında, pompaya doğru ters akış hızlı bir şekilde azalır ve bu akıştaki azalma deşarj hattı uzunluğu boyunca ve pompada bir basınç artışı üretir.

Pompa motorunda elektrik kesintisinden sonraki deşarj hattı ve pompada geçici hidrolik şartları saptamak için, Pompa ve Motor Ataleti, Pompa Karakteristikleri ve Deşarj Hattındaki su Darbesi Dalgası olağanüstülüğü olarak üç etki düşünülür.



Elektrik kesintisinden sonra Zaman (saniye)

Şekil 4.30 : Elektrik Kesintisini takip eden Geçici Şartlar

Pompa ve Motor Ataletinin etkisi atalet denkleminden elde edilir. Bu denklem, pompa hızı ve dönen sistemin kinetik enerjisi açısından anlık verilmiş zamandaki tork'u (dönme hızı) arasındaki ilişkiyi tanımlar.

Pompa Karakteristikleri, pompa karakteristik diyagramından elde edilir. Bu diyagram, bir türbin, enerji dağıtıcı, pompa gibi eylem sırasının her yerinde deşarj ve yükseklik ile pompa torku ve hızının halini tanımlar.

Neticede, Su Darbesi etkileri su darbesi denklemlerinden elde edilir. Bu denklemler, su darbesi dalgalarının hareketi altında geçici akım koşulları boyunca deşarj hattında akım ve yükseklik arasındaki ilişkileri tanımlar.

4.3.5.2. Atalet Denklemi

Pompa motorunun gücü aniden kesildiğinde, herhangi bir anda pompanın yavaşlaması motor ve pompanın dönen kısımlarının volan (fly-wheel) etkisine ve pompa çarkı tarafından sarf edilme anında olan tork 'a (dönme hızına) bağlıdır.

Hızlandırılmış tork'un dönen sisteminden dolayı açısal ivme ve dönen sistemin atalet momentinin sonucuna eşittir. Pompa motorunda elektrik kesintisine müteakip dönen sistem üzerindeki yavaşlayan tork pompa tork 'una karşılık gelir. Yavaşlayan tork artı alınırsa ;

$$M = -I\frac{dw}{dt} = -\frac{WR^2}{g}\frac{dw}{dt} \qquad \textbf{(4.86)}$$

Bu denklem küçük bir zaman aralığı için ($\Delta t = t_2 - t_1$) yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{M_1 + M_2}{2} = -\frac{WR^2}{g}\frac{(w_2 - w_1)}{\Delta t}. = \frac{2\pi WR^2}{60g}\frac{(N_1 - N_2)}{\Delta t} \qquad \textbf{(4.87)}$$

Bu denklem $\alpha = N / N_e$ ve $\beta = M / M_R$ oranlarıyla aşağıdaki gibi yazılırsa ;

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{15gM_R}{\pi WR^2 N_R}(\beta_1 + \beta_2)\Delta t \qquad \textbf{(4.88)}$$

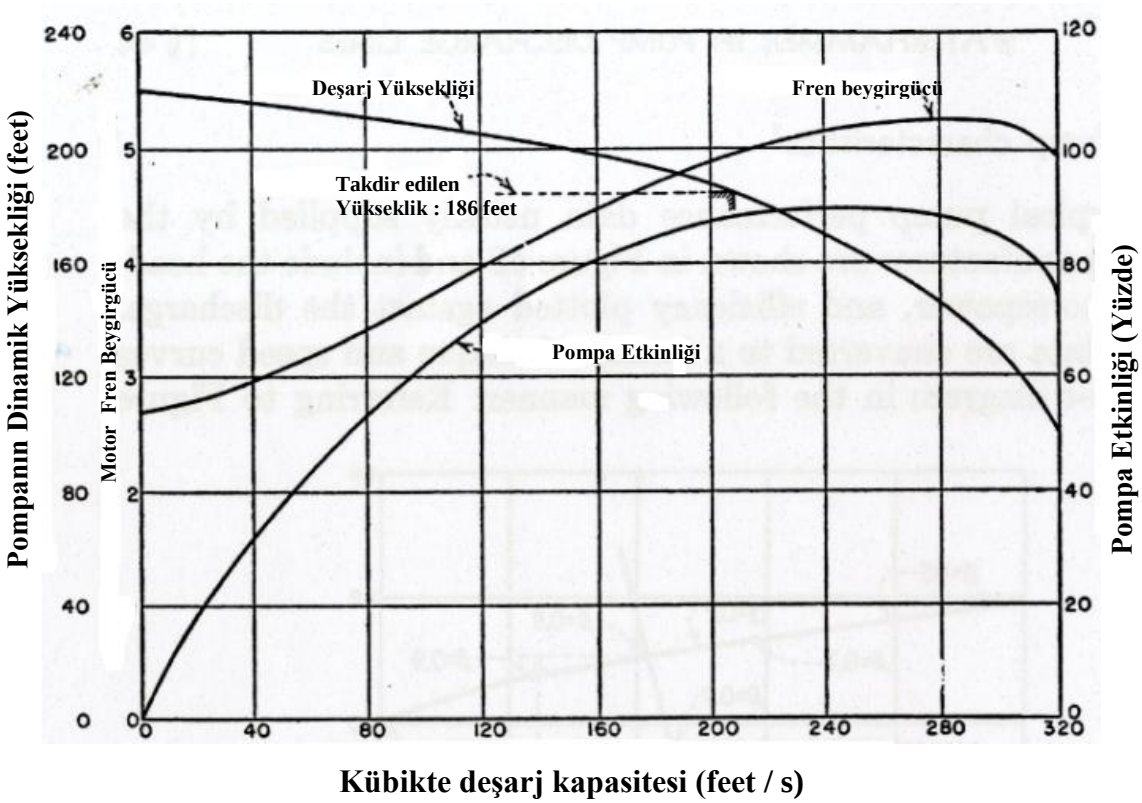
Pompa hızı ve takdir edilen yükseklikte yavaşlayan tork ;

$$M_R = \frac{60wH_R Q_R}{2\pi N_R \eta_R} \qquad \textbf{(4.89)}$$

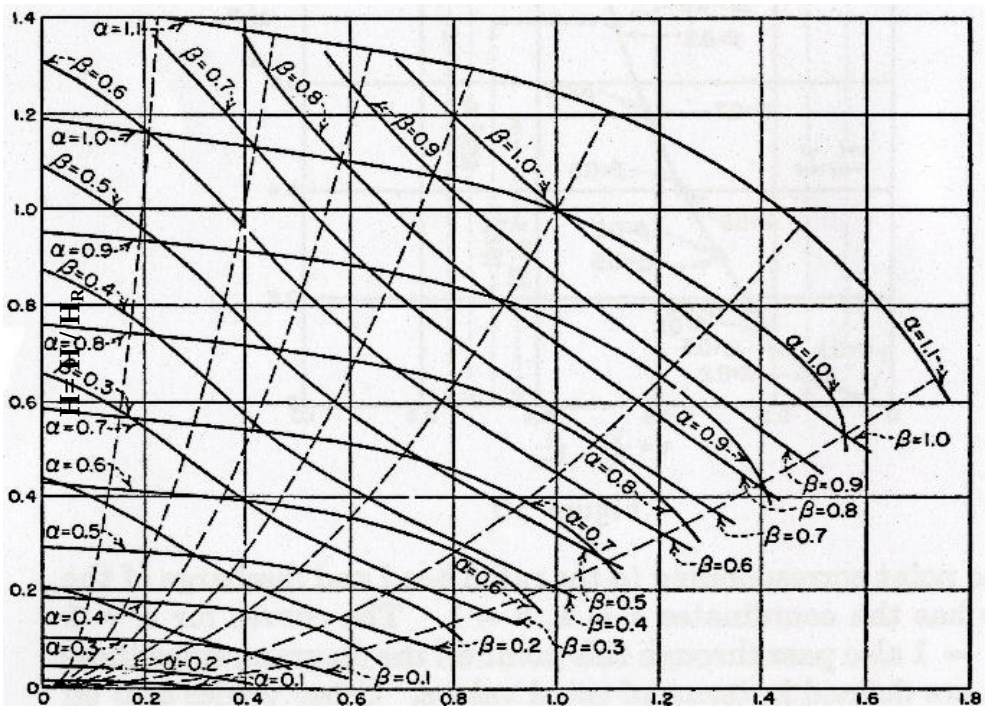
O zaman;

$$\alpha_1 - \alpha_2 = K_1(\beta_1 + \beta_2)\Delta t \qquad \textbf{(4.90)}$$

$$K_1 = \frac{450gwH_R Q_R}{\pi^2 WR^2 \eta_R N^2{}_R} = \frac{91{,}600H_R Q_R}{WR^2 \eta_R N^2{}_R} \quad \text{kullanılarak} \qquad \textbf{(4.91)}$$



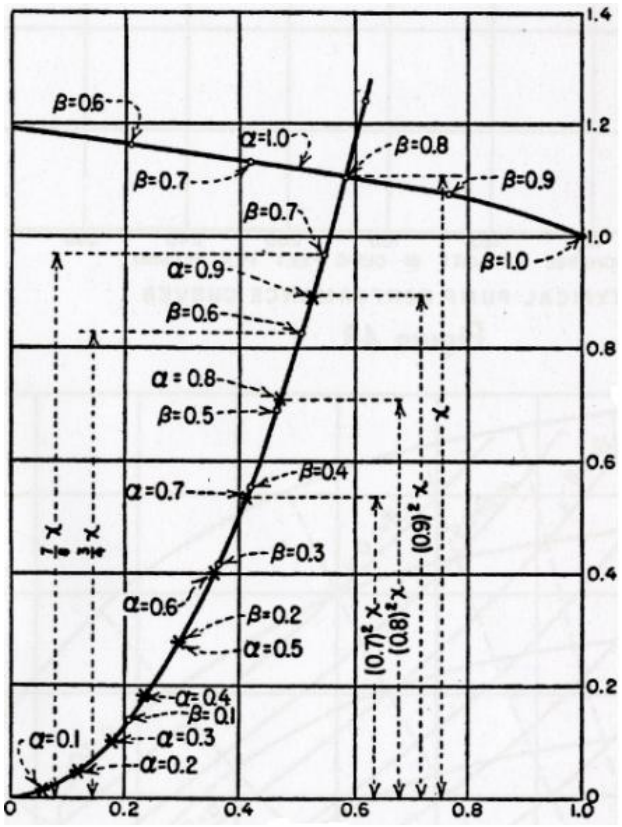
Şekil 4.31: Tipik Pompa Performans Eğrisi



Şekil 4.32: Normal Pompa Eylem bölgesi için Karakteristik Diyagram Eğrisi

4.3.5.3. Pompa Karakteristikleri

Pompa üreticisine bağlı genellikle temin edilen tipik pompa performans datası, deşarja karşı çizilmiş pompa etkinliği, fren beygirgücü, deşarj yüksekliğini kapsamaktadır. (Şekil 4.31) Bu datalar, aşağıdaki biçimde h-v diyagramı üzerinde hız ve tork eğriler ailesine dönüştürülür. Şekil 4.32 'ye başvurularak, pompanın deşarjı ve takdir edilen yüksekliğe ilişkin nokta h=1, v=1 koordinatlarına sahiptir. İstenilen değerler açısından bu oranların tanımlanmasından sonra α=1 ve β=1 için eğiriler diyagram üzerinde bu nokta içinden geçer. α=1 için eğri üzerinde β'nın diğer değerleri, Şekil 48' de verilmiş fren beygirgücü eğrisinden h ve v değerleri hesaplanarak belirlenir. α ve β'nın diğer değerleri için diyagram üzerindeki noktalar birbirine benzer pompa eylemi kanunlarından saptanır.



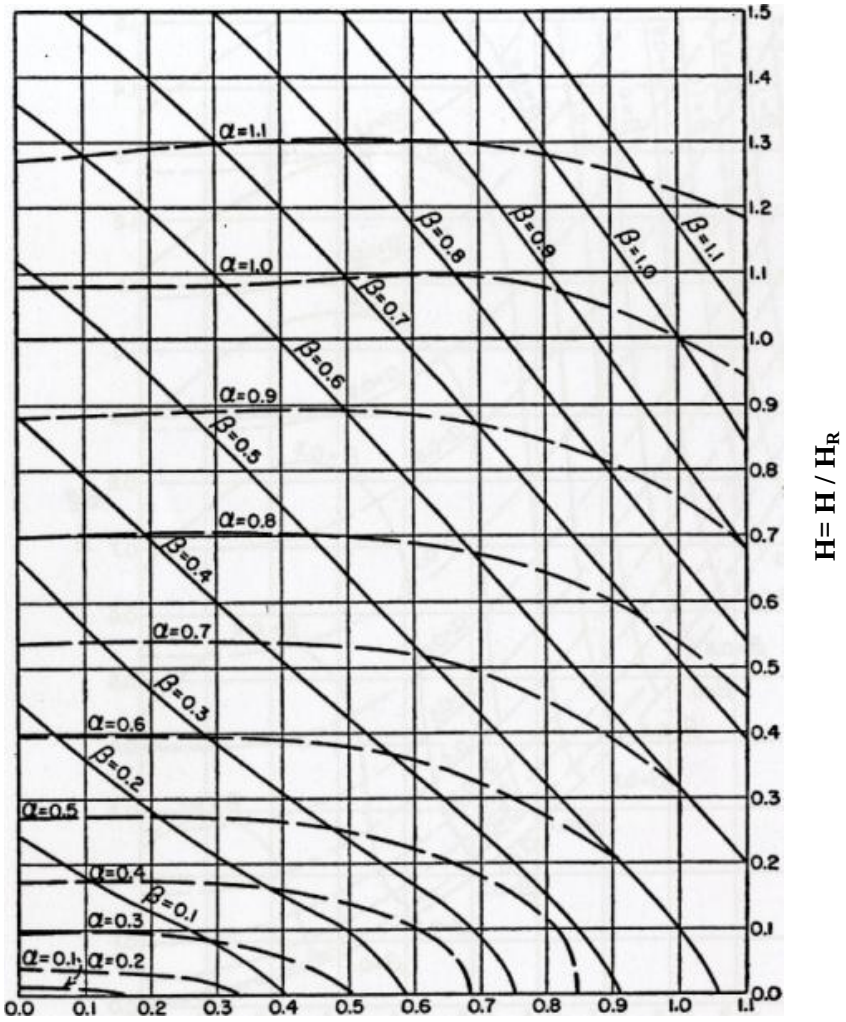
H= H / H_R

v = V/ V_0 = Q / Q_0

Şekil 4.33 : h-v diyagramı

Örnek olarak, Q 'yla değişik N ve $\sqrt{H}$, N^2 ile değişik H ve M, verilmiş bir pompa olsun. h = K_2v^2 tipi bir h – v diyagramı üzerinde bu ilişkileri kullanmak için α=1.0 ve β=0.8 'de Şekil 4.33 'de gösterildiği gibi diyagram üzerinde bilinen bir nokta içinden geçilir. Bu noktada düşey mesafe h=1.10 sekiz eşit kısma ayrılır ve β=0.7,

0.6 ve benzeri ilişkin noktalar h = $\frac{7}{8}(1.10)$, $\frac{6}{8}$ (1.10) ve benzeri değerleri ordinatta parabolün üzerinde yeri belirlenir.

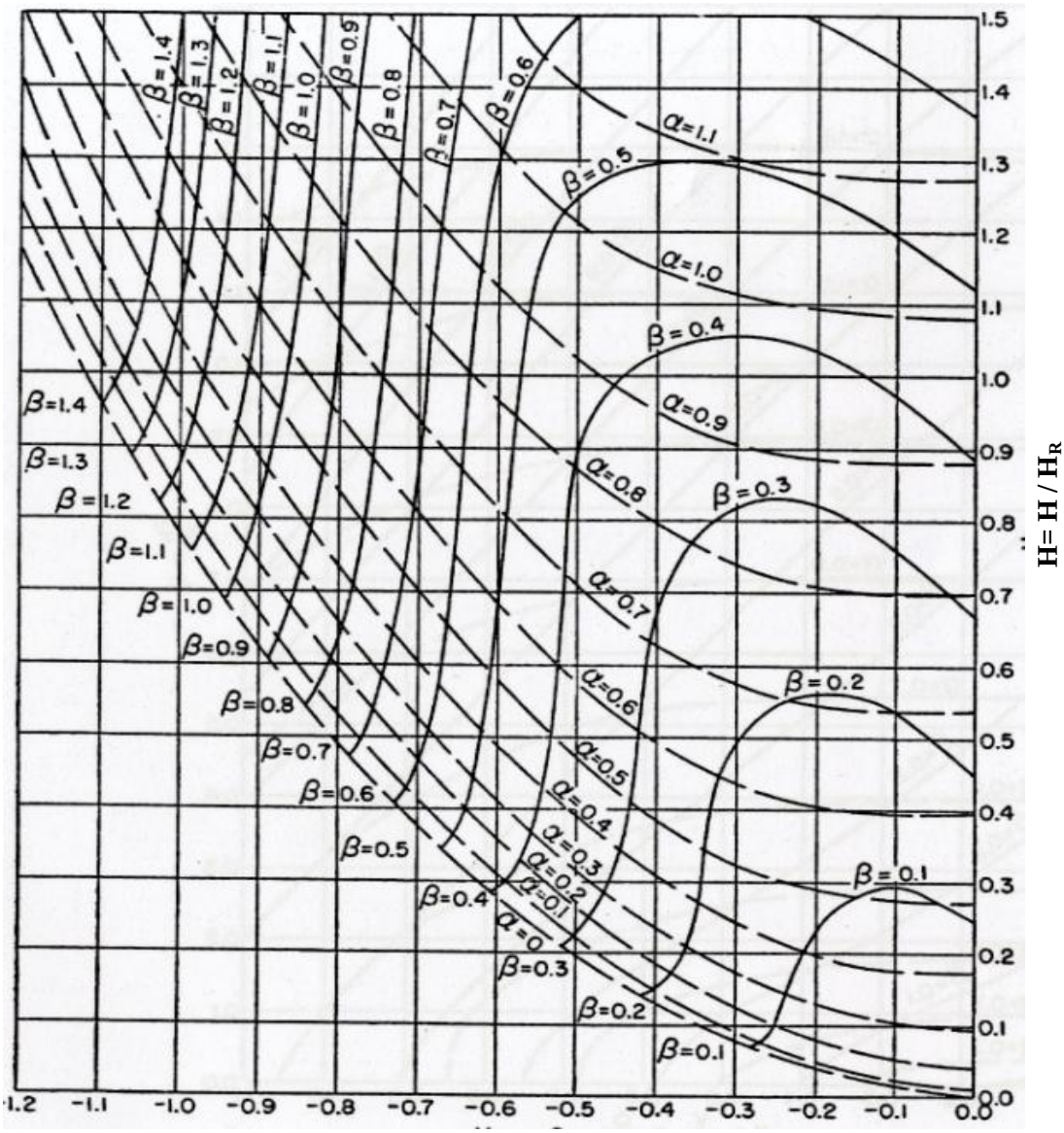


Şekil 4.34 : Normal Pompa Eylem Bölgesi Pompa Karakteristikler Diyagramı

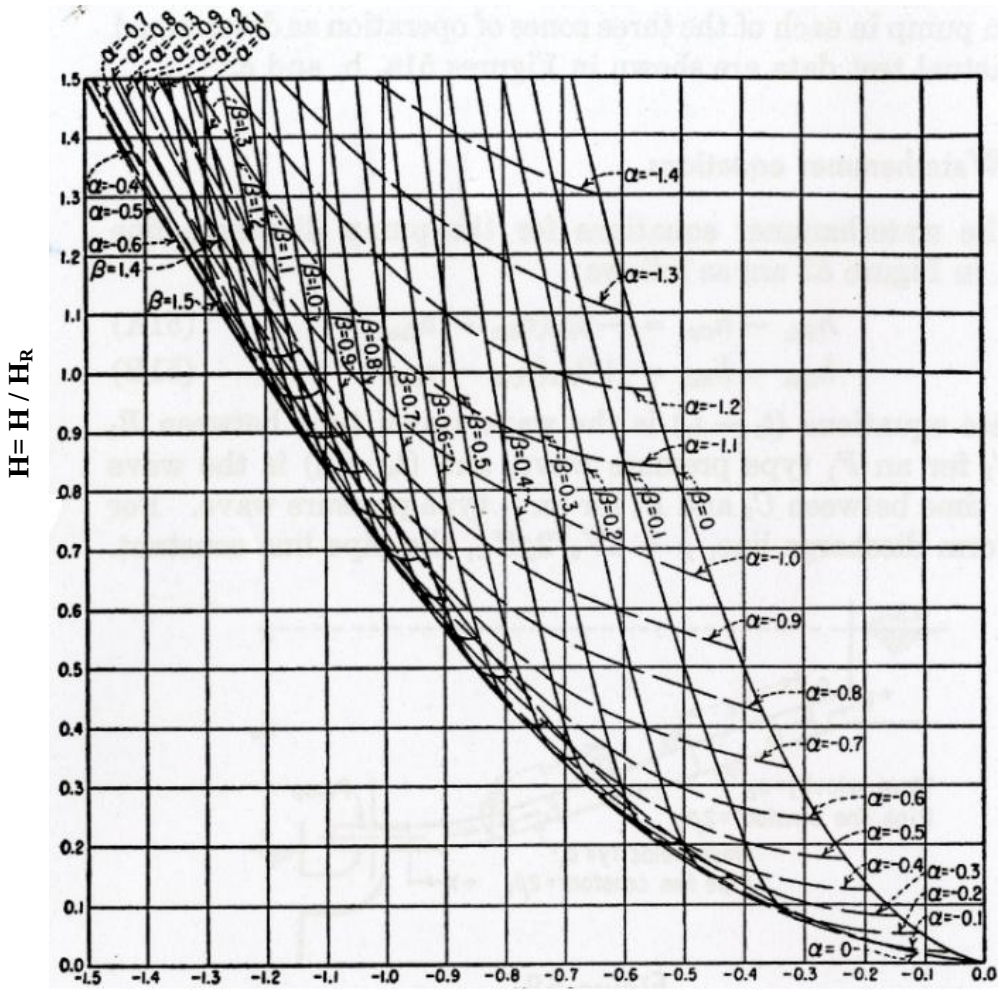
Benzer olarak, α=0.9 ve 0.8 'e ilişkin noktalar h = 1.10 $(0.9)^2$ ve h = 1.10 $(0.8)^2$ 'nin değerleri de aynı parabolün üzerinde yeri belirlenir. α ve β 'nın her bir değerine ilişkin çeşitli paraboller üzerindeki noktalar düz bir eğri içinden çizilir. Şekil 4.32, bu biçimde tertip edilmiş hız ve tork eğrileri ailelerini gösterir. Şekil 4.32 'da gösterilen pompa karakteristikleri normal pompa eylem bölgesi içindir.

Pompa motorunda elektrik kesintisi olduğunda, su sütununun ayrılma olabilirliğinin ve deşarj hattında tüm noktalarda minumum geçici basınçların belirlenmesi bu karakteristikler için yeterlidir.(Parmakian, 1963)

Fakat, akışkan pompa içinden geriye döndükten sonra ilave pompa karakteristikleri geriye dönüşte pompa içinden geçen akışla ileri yönde dönen pompanın enerji dağıtım bölgesi gerekir. Pompa Dönmesi ve Pompa içinden geçen akışkanın türbin eylem bölgesi için her ikisi de aksi yöndedir .



Şekil 4.35 : Enerji Dağıtım Bölgesi Pompa Karakteristikler Diyagramı



Şekil 4.36 : Türbin Eylem Bölgesi Pompa Karakteristikler Diyagramı

Gerçek test verisinden belirlenmiş üç eylem bölgesinin her birinde tek bir emme pompası için tam karakteristikler, Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36 'de gösterilmektedir.

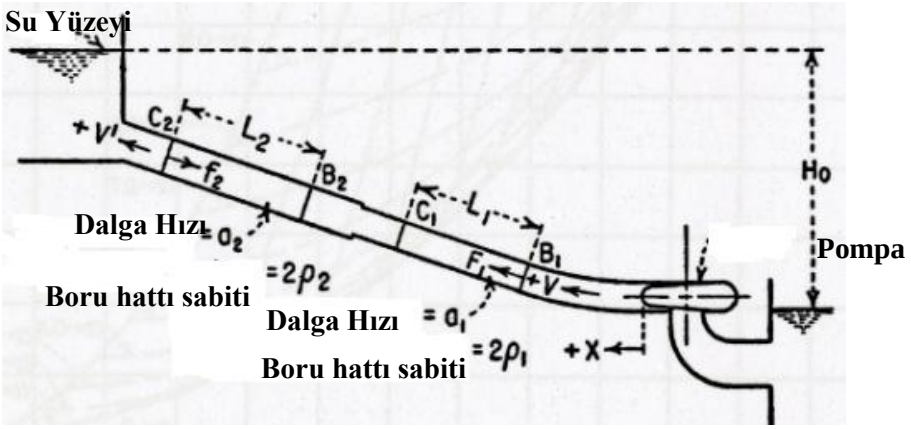
4.3.5.4. Su Darbesi Denklemleri

Şekil 4.37 'de gösterilen pompa deşarj hattı için su darbesi denklemleri aşağıdaki gibidir.

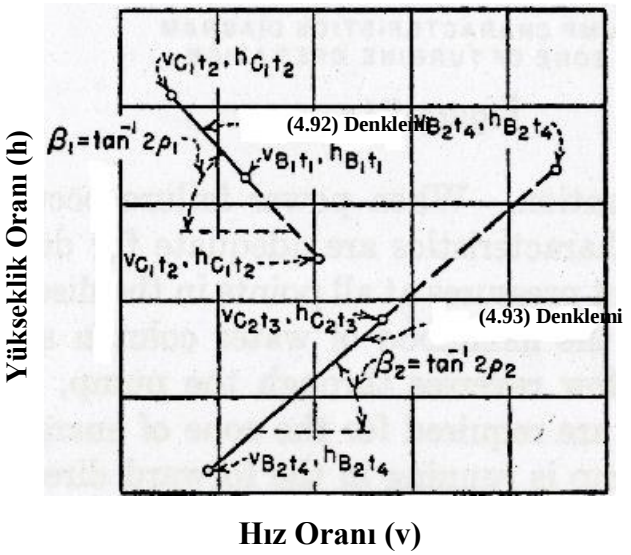
$$h_{B1t1} - h_{C1t2} = 2\rho_1(v_{B1t1} - v_{C1t2}) \qquad \textbf{(4.92)}$$

$$h_{C2t2} - h_{B2t4} = 2\rho_1(v_{C21t2} - v_{B2t4}) \qquad \textbf{(4.93)}$$

Bu denklemlerde (t_2- t_1), F_1 tipi bir basınç dalgası için C_1 ve B_1 arasında dalga seyahat zamanıdır ve (t_4- t_3), f_2 tipi bir basınç dalgası için C_2 ve B_2 arasında dalga seyahat zamanıdır . Üniform bir deşarj hattı için $\rho=aV_0/2gH_R$, boru hattı sabittir.



Şekil 4.37 : Pompa – Hazne İlişkisi



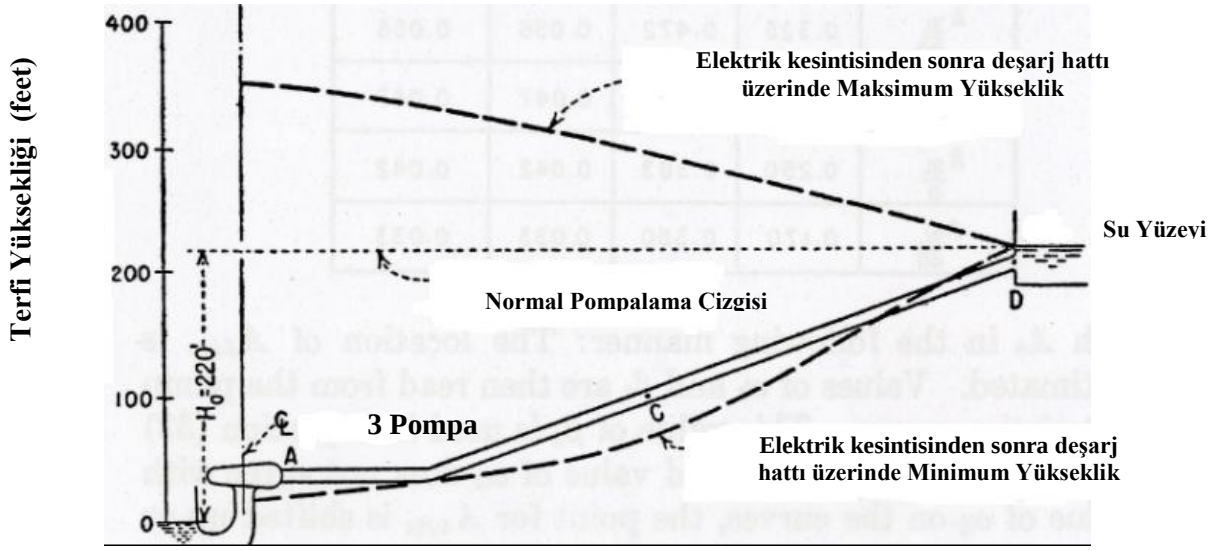
Şekil 4.38 : h- v diyagramı

Bu denklemler su darbesi dalgası olağanüstülüğü boyunca hız ve yükseklik oranları arasındaki ilişkiyi tanımlar. h ve v bir koordinat sistemi üzerinde, bu denklemler Şekil 4.38 'de gösterildiği gibi ±2ρ eğiminde sahip düzgün çizgiler tarafından temsil edilir.

Her bir su darbesi denklemi, hat içinde bir noktada bilinen h ve v açısından deşarj hattının üniform bölümünde başka bir noktadaki h ve v arasında bir ilişkiyi verir. Açık bir şekilde h ve v 'yi belirlemek için ikinci bir bağımsız ilişki gerekir. Bu ilişki pompa karakteristik diyagram kullanımıyla pompa atalet denkleminden elde edilir.

4.3.5.5. Su Sütunu Ayrılması

Su Darbesi çözümünden elde edilmiş Maksimum artı ve eksi basınç değişimleri, dizayn edilmiş deşarj hattından dolayı limit basınçları göstermek için Şekil 4.39 'daki deşarj hat profili üzerinde çizilmiştir. Pompa Deşarj hattı boyunca herhangi bir noktadaki minimum basınç, suyun buharlaşma basıncına ulaştığında, Su Darbesi Çözümü elverişsiz hale gelir. Boru içinde bu atmosfer basıncının altındaki basınç koşulu yeterli bir periyot için korunursa , akışkan su sütunu parçaları buharın bir bölümünden ayrılır. Su sütunu ayrılması bazen, hidrolik eğim yakınındaki yüksek noktalarda uzun pompa deşarj hatları üzerinde başlangıç eksi gerilim dalgaları boyunca meydana gelir. Her nerede mümkün olursa olsun, bu koşuldan ya bir gerilim tankı, hava kazanı ya da iki akışkan su sütunu yeniden birleştirildiğinde yaratılan yüksek basınca bağlı olarak geniş motor WR^2 kullanılarak kaçınılmalıdır.

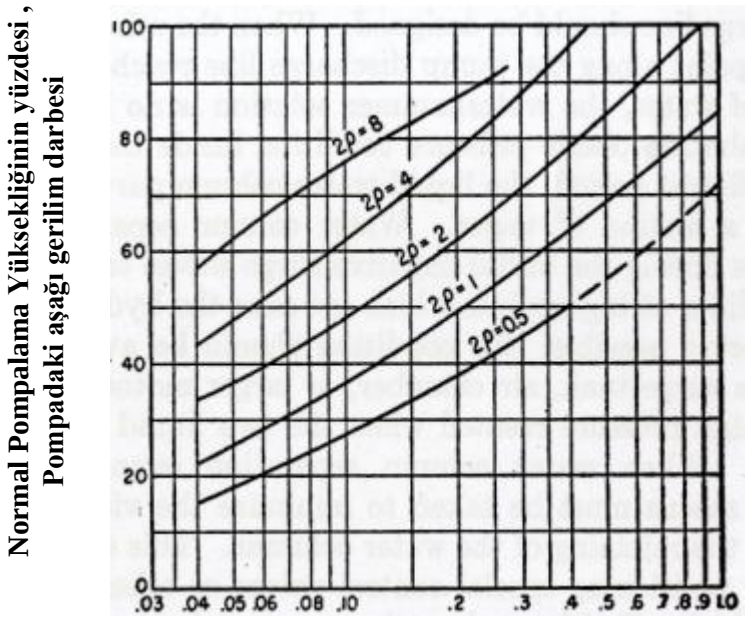


Şekil 4.39 : Su Sütunu Ayrılması

Su sütunu ayrılmasından kaçınılmadığında, su sütunun yeniden birleşmesine bağlı olarak şiddetin etkisini mümkün olduğu kadar küçültmek için mutlaka özel önlemler alınmalıdır. Darbe etkisi azaltmak için Özel Kontrol Vanaları konumlanmalı veya daha yüksek su sütunun geri dönüş hızını azaltacak ya da daha düşük su sütunun geri dönüş hızını arttıracak diğer koruma aygıtları yerleştirilmelidir.

4.3.5.6. Su Darbesi Grafikleri

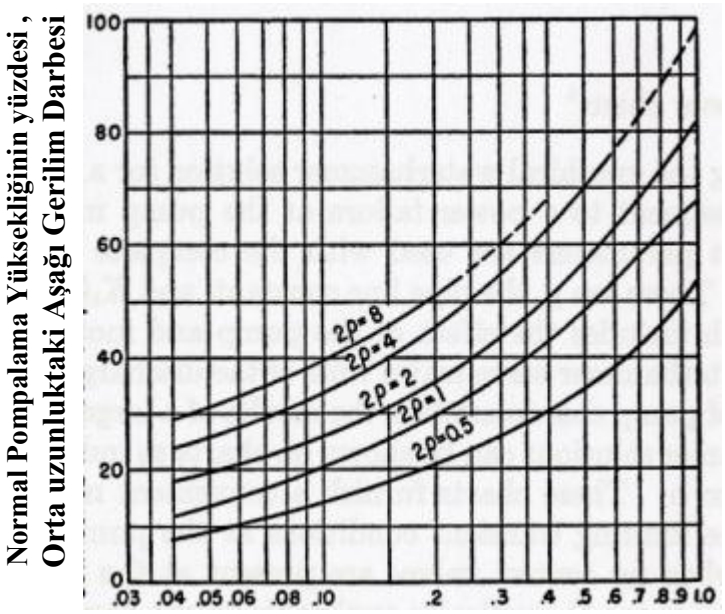
Pompa motorlarında elektrik kesintisinden sonra meydana gelen pompa yüklemeleri için grafik su darbesi çözümü elde edildiğinde, iki bağımsız parametre tam pompa karakteristikleriyle kullanılır.



Şekil 4.40 : Pompadaki Aşağı Gerilim Darbesi

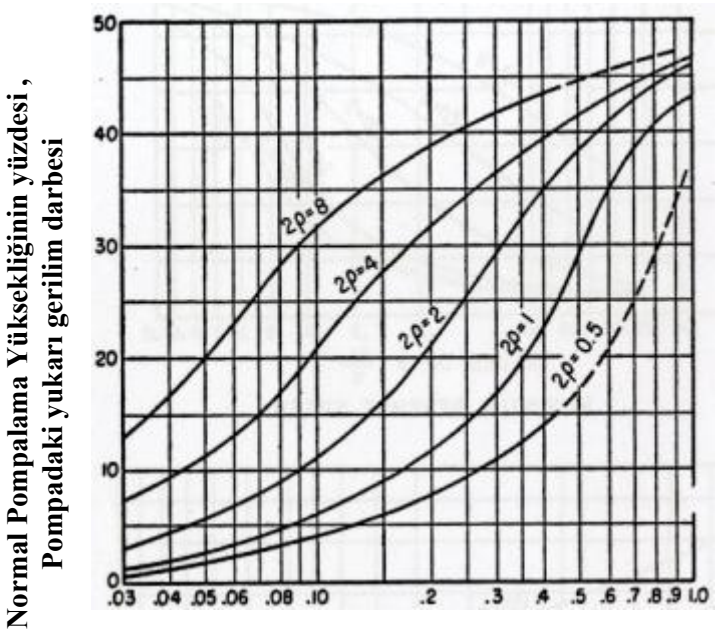
Bunlar ρ (boru hattı sabiti) , $K_1(2L/a)$ Deşarj hattının su darbesi dalgası seyahat zamanı ile motor ataleti ve pompanın etkisini içeren bir sabittir.

Verilmiş bir takım pompa karakteristikleri için, pek çok su darbesi çözümlerinin sonuçları Şekil 4.40 ile 4.47 arasında gösterildiği gibi grafiklerde tanımlanmıştır.



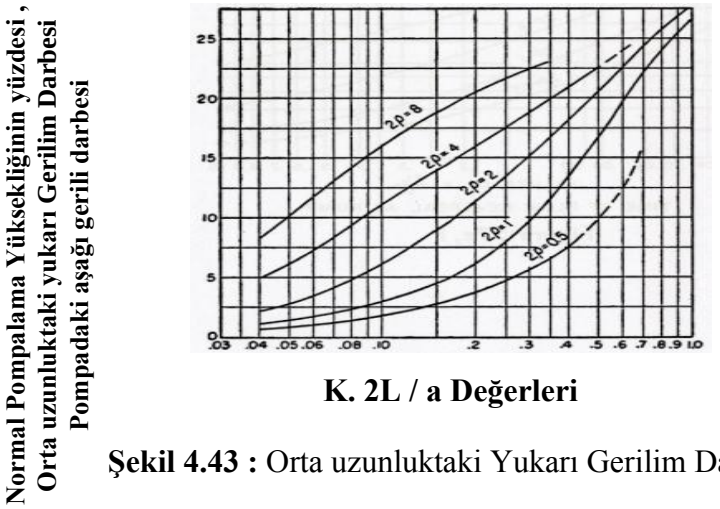
Şekil 4.41 : Orta uzunluktaki Aşağı Gerilim Darbesi

Bu grafikler, pompada kontrol vanası olmaması halindeki deşarj hattı ve pompada sınırlanan geçici koşullar elde edilerek elverişli bir yöntem sağlanır.Elektrik kesintisinden önceki takdir edilen yükseklikte pompa eyleminin özel bir tipi için teorik olarak uygulanabilir grafikler olmasına rağmen bu grafikler herhangi bir deşarj hattı içinde yaklaşık su darbesi etkilerini belirlemek için çok yararlıdır. (Parmakian, 1963)

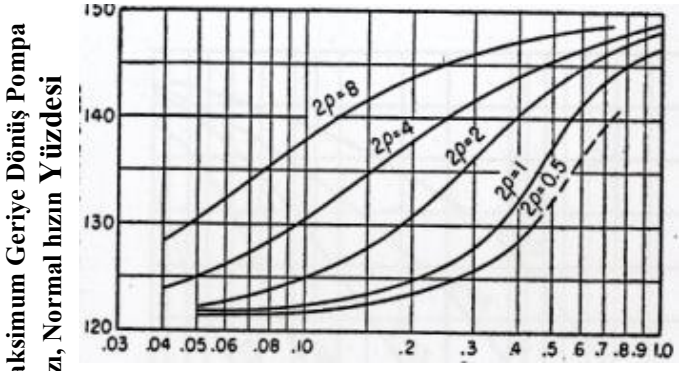


Şekil 4.42 : Pompadaki Yukarı Gerilim Darbesi

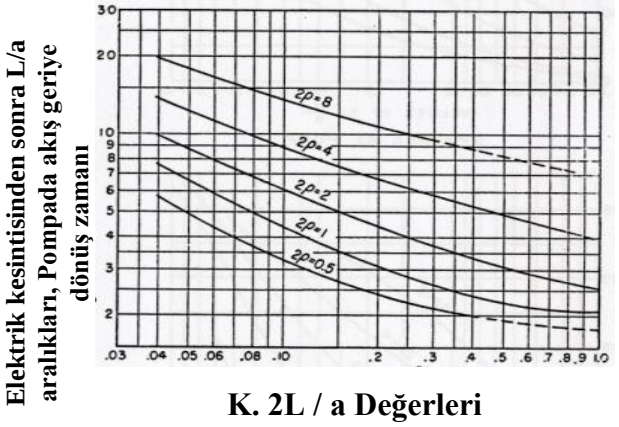
Pompanın tam karakteristikleri bilinirse, pompa motorlarında elektrik kesintisinden sonraki pompa deşarj hatlarındaki basınç gerilim darbeleri hassas olarak hesaplanabilmektedir. Çoğu durumda sadece Normal pompa eylem bölgesi için karakteristikler, pompa üreticileri yoluyla temin edilen pompa performans verilerinden elde edilebilir.



Şekil 4.43 : Orta uzunluktaki Yukarı Gerilim Darbesi

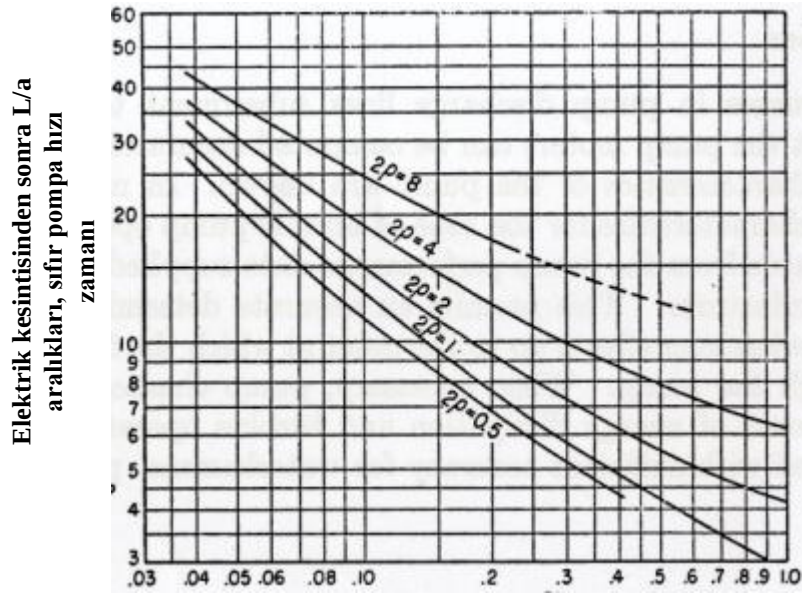


Şekil 4.44: Maksimum Geri Dönüş Hızı

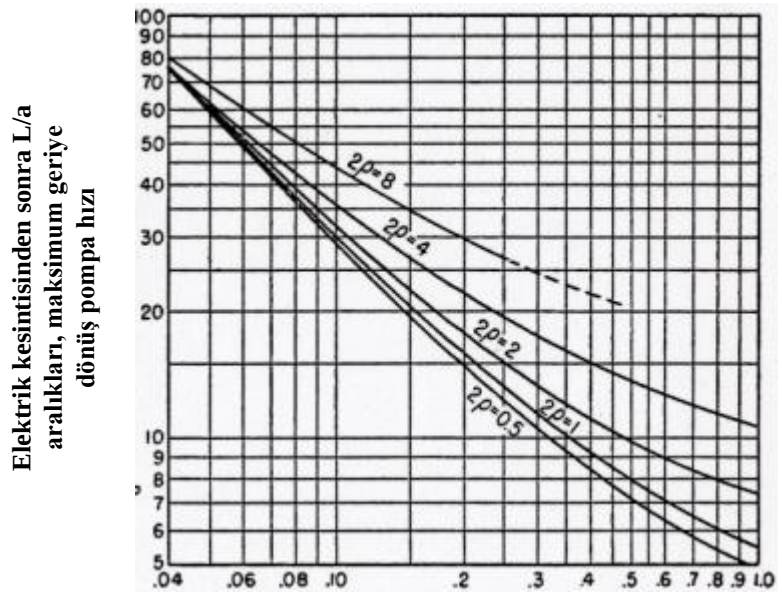


Şekil 4.45: Pompada akış geri çevirme zamanı

Pompadan geriye dönen akışında noktalara kadarki su darbesi etkilerinin tam (doğru, yanlışsız) belirlenmesine bu veriler izin verir. Gerektiğinde, türbin eylemi ve enerji dağıtım bölgeleri için pompa karakteristikleri, su darbesi amaçları için yeterli doğrulukla tahmin edilebilmektedir.



Şekil 4.46: Pompa Hızının Sıfır Zamanı



Şekil 4.47: Pompa Hızını Geri Çevirme Maksimum Zamanı

5. UYGULAMALARDA SONLU FARKLAR METODUNUN KULLANILMASI

5.1. Sonlu Farklar Metodunun Su Darbesi ile ilişkisi

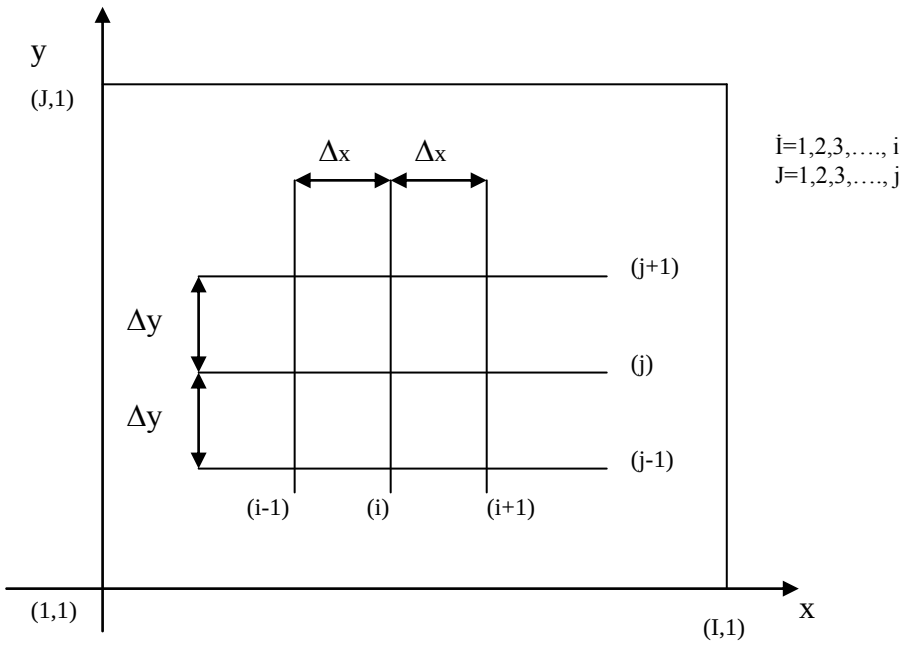
Hidrolik problemlerinin çözümlenmesinde teorik, deneysel ve hesaplamalı hidrolik yöntemler kullanılmaktadır.

Bu yöntemlerden, hesaplamalı hidrolik metodu diğerler yöntemlere göre problemin kesin sonuçlarına daha çok yaklaşır ve günümüzde en çok kullanılan yöntemler arasındadır.

Hesaplamalı hidrolikte kendi arasında da nümerik yaklaşım, sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sınır elemanları gibi çeşitli gruplara ayrılır.

Bu bölümde su darbesi tesirlerinin hesaplarında kolaylık ve basitlik sağlamak amacıyla (uygulamalarda kullanılacak ana formüller verilerek) Sonlu Farklar Metodu betimlenecektir.

5.2. Sonlu Farklar Metodunun Genel Hali



Şekil 5.1 : Dikdörtgen Ağ Geometrisi

Şekil 5.1 ‘de görülen Dikdörtgen Ağ Geometrisine göre aşağıdaki ifadeler yazılabilir. Bu türlü hesaplamalarda Δx aralığı ne kadar küçük bir değer seçilirse hesap içindeki hata payı o kadar azalır ve kesin sonuca daha çok yaklaşılır.

$$f_{i+1,j} = f_{i,j} + \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j}.\Delta x + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\Big|_{i,j}.\Delta x + \text{Daha Yük. Dereceli Terimler} \quad \textbf{(5.1)}$$

(5.1) denkleminden $\partial f/\partial x \Big|_{i,j}$ çekilirse;

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i,j}}{\Delta x} - \frac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\Big|_{i,j}.\Delta x + D.Y.D.T. \quad \textbf{(5.2)}$$

$\partial f/\partial x$ için İleri Fark Yaklaşımı ;

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i,j}}{\Delta x} + KesmeHatası \quad \textbf{(5.3)}$$

Birinci derece hassaslıkta bir kesme hatası bulunur ve net sonuca göre çok küçük bir hata (daha yüksek dereceli terimler) olduğundan hesaplamalarda ihmal edilebilir.

(5.1) denkleminin çıkarılışına göre Orta ve Geri Fark Analogları aşağıdaki gibi yazılır.

$\partial f/\partial x$ için Geri Fark Yaklaşımı ;

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i,j} - f_{i-1,j}}{\Delta x} + KesmeHatası \quad \textbf{(5.4)}$$

$$f_{i+1,j} = f_{i,j} + \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j}.(x_{i+1,j} - x_{i,j}) + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\Big|_{i,j}.(x_{i+1,j} - x_{i,j})^2 + \frac{1}{6}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}\Big|_{i,j}.(\Delta x)^3 + \frac{1}{24}\frac{\partial^4 f}{\partial x^4}\Big|_{i,j}.(\Delta x)^4 + ... + O(\Delta x)^5 \quad \textbf{(5.5)}$$

$$f_{i-1,j} = f_{i,j} - \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j}.(x_{i+1,j} - x_{i,j}) + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\Big|_{i,j}.(x_{i+1,j} - x_{i,j})^2 - \frac{1}{6}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}\Big|_{i,j}.(\Delta x)^3 + \frac{1}{24}\frac{\partial^4 f}{\partial x^4}\Big|_{i,j}.(\Delta x)^4 + ... + O(\Delta x)^5 \quad \textbf{(5.6)}$$

(5.5) denkleminden (5.6) denklemi çıkarılırsa;

$$f_{i+1,j} - f_{i-1,j} = 2.\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j}.\Delta x + \frac{1}{3}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}\Big|_{i,j}.\Delta x^3 + KesmeHatası \qquad \textbf{(5.7)}$$

(5.7) denkleminde $\partial f / \partial x$ çekilirse; Orta Sonlu Fark Analogu

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2.\Delta x} - \frac{1}{6}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}\Big|_{i,j}.\Delta x^3 + KesmeHatası \qquad \textbf{(5.8)}$$

İkinci derece hassaslıkta bir kesme hatası bulunur ve $(-\frac{1}{6}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}\Big|_{i,j}.\Delta x^3 + KesmeHatası)$ değeri çok küçük bir değer aldığından ihmal edilebilir. (5.5) ile (5.6) denklemi taraf tarafa toplanırsa ;

$$f_{i+1,j} + f_{i-1,j} = 2.f_{i,j} + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\Big|_{i,j}.\Delta x + \frac{1}{12}\frac{\partial^4 f}{\partial x^4}\Big|_{i,j}.\Delta x^4 + KesmeHatası \qquad \textbf{(5.9)}$$

Buradan $\partial^2 f / \partial x^2$ çekilirse;

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - 2.f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \qquad \textbf{(5.10)}$$

5.3. İleri, Orta ve Geri Sonlu Fark Analoglarının (x ve y yönündeki) Özeti

Kesme Hataları ihmal edildiği takdirde özet olarak aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i,j}}{\Delta x}$$ x yönünde İleri Fark Analogu **(5.11)**

$$\frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i,j}}{\Delta y}$$ y yönünde İleri Fark Analogu **(5.12)**

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i,j} - f_{i-1,j}}{\Delta x}$$ x yönünde Geri Fark Analogu **(5.13)**

$$\frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i,j} - f_{i-1,j}}{\Delta y}$$ y yönünde Geri Fark Analogu **(5.14)**

$$\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2.\Delta x}$$ x yönünde Orta Fark Analogu **(5.15)**

$$\frac{\partial f}{\partial y}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2.\Delta y}$$ y yönünde Orta Fark Analogu **(5.16)**

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - 2.f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta x^2}$$ x yönünde ikinci der. Orta Fark Analogu **(5.17)**

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\Big|_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - 2.f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta y^2}$$ y yönünde ikinci der. Orta Fark Analogu **(5.18)**

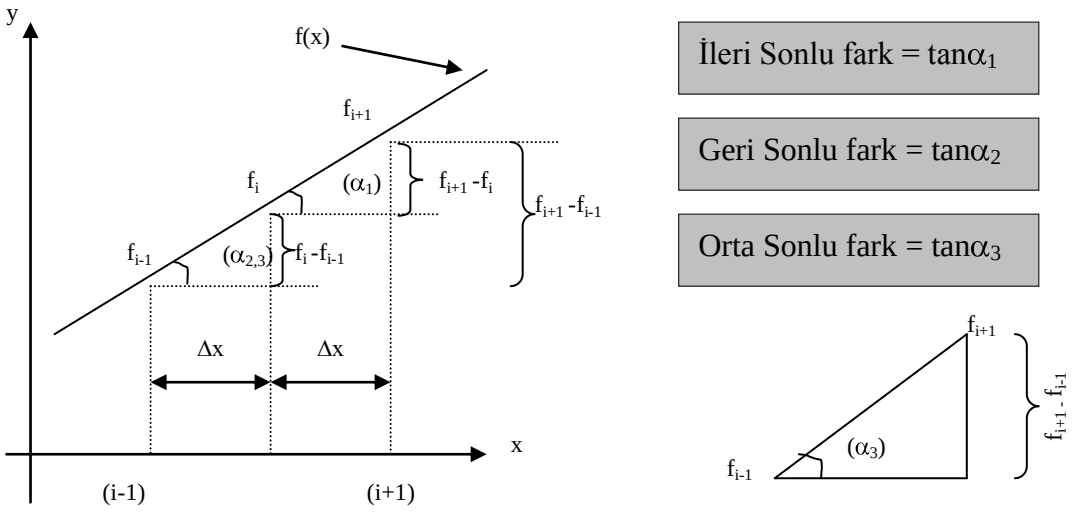
5.4. Temel Sonlu Farklar Formlarının Geometrik Anlatımı

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x}$$ x yönünde İleri Sonlu Fark **(5.19)**

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x}$$ x yönünde Geri Sonlu Fark **(5.20)**

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2.\Delta x}$$ x yönünde Orta Sonlu Fark **(5.21)**

$$\frac{\partial f}{\partial x} = m$$ Eğrinin Eğimi **(5.22)**



Şekil 5.2 : İleri, Geri ve Orta Sonlu Fark Grafiği

Δx ne kadar küçük bir değer seçilirse hatalar o kadar küçülür ve kesin sonuca çok yakın değerler bulunur . (Ağıralioğlu, 2004)

5.5. Hareket ve Süreklilik Denklemlerine Sonlu Farklar Metodunun Uygulanması

Hareket Denklemi :

$$g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{C_f V|V|}{2\,D} = 0 \qquad \textbf{(3.20f)}$$

Süreklilik Denklemi :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \sin\theta = 0 \qquad \textbf{(3.25g)}$$

3. Bölümde yukarıdaki hareket ve süreklilik denklemleri verilmişti. Bu bölümde ise örnek verilerde kullanılmak üzere Temel denklemlerin içinde sonlu farklar metodunun eşitlikleri yerleştirilerek uygulamalarda kullanılacak ana formüller aşağıda elde edilmiştir.

Hareket Denklemindeki (5.19) ve (5.20) denklemlerine benzer olarak h ve v değerleri yazılmak istenirse;

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta x} \qquad \text{x yönünde Geri Sonlu Fark} \qquad \textbf{(5.23)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta x} \qquad \text{x yönünde İleri Sonlu Fark} \qquad \textbf{(5.24)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} \qquad \text{x yönünde İleri Sonlu Fark} \qquad \textbf{(5.25)}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta t} \qquad \text{x yönünde Geri Sonlu Fark} \qquad \textbf{(5.26)}$$

(5.23), (5.24), (5.25) ve (5.26) denklemleri (3.20f) denkleminde yerine konursa;

$$H_{i+1} = H_i - \frac{V_i}{g}.(V_{i+1} - V_i) - (\frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t}).\frac{\Delta x}{g} - \frac{C_f.V_i.|V_i|}{2.D}.\frac{\Delta x}{g} \qquad \textbf{(5.27)}$$

(5.27) denklemi, sürtünmelerin ihmal edilmediği hal için kullanılır. Sürtünmenin ihmal edildiği durumlar için (5.27) denkleminde Sürtünme katsayısı sıfır (C_f= 0) alınacaktır.

(5.23), (5.24), (5.25) ve (5.26) denklemleri (3.25g) denkleminde yerine konursa;

$$V_{i+1} = V_i - \frac{g}{a^2}.V_i.(H_i - H_{i-1}) - \frac{g}{a^2}.V_i.\sin\theta.\Delta x - \frac{g}{a^2}.\left(\frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta t}\right).\frac{1}{\Delta x} \qquad \textbf{(5.28)}$$

Basma hattının yatayla açı yaptığı düşünülürse θ açısının değeri (5.27) denkleminde yerine yazılır.

(5.27) ve (5.28) denklemleri Microsoft Excel programında hazırlanan tabloya adapte edilerek seçilmiş örnek verilere göre H(m) ve V(m/s) değerleri ("Uygulamalar" bölümünde) hesaplanacaktır.

5.5. Karakteristikler Yöntemine Sonlu Farklar Metodunun Uygulanması

4. Bölümde anlatılan Karakteristikler Yöntemine göre yazılmış denklemi Sonlu Farklar Metoduna yazılırsa aşağıdaki (5.29) ve (5.30) denklemleri elde edilir.

$$h_{i+1} = \frac{1}{2}\left[h_i + h_{i+2} + \frac{a}{g}.(V_i - V_{i+2}) - (V_i - V_{i+2}).\sin\theta.\Delta t + \frac{C_f.a}{2.g.D}.(V_{i+2}.|V_{i+2}| - V_{i}.|V_i|)\right] \textbf{(5.29)}$$

$$V_{i+1} = \frac{g}{2.a}\left[\frac{a}{g}.(V_i + V_{i+2}) + (h_i - h_{i+2}) + (V_i - V_{i+2}).\sin\theta.\Delta t + \frac{C_f.a}{2.g.D}.(V_i.|V_i| - V_{i+2}.|V_{i+2}|)\right] \textbf{(5.30)}$$

(5.29) ve (5.30) denklemleri, yine Microsoft Excel programında hazırlanan tabloya adapte edilerek seçilmiş (sadece Kadıköy için) Örnek Verisine göre Yükselen Darbe H(m) hesapları yapılacak ve diğer yaygın çözüm metoduna göre "Karşılaştırmalar" bölümünde değerlendirilecektir.

6. SEÇİLEN (KULLANILAN) VERİLER

6.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi



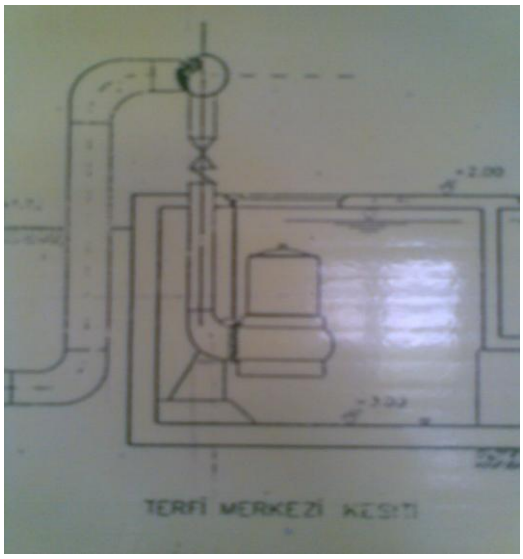
Şekil 6.1: Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Yerleşiminden Görünümler

İstanbul'a yılda 70 milyon m^3 su temin eden Büyükçekmece Gölü ile tabiat harikası Büyükçekmece Koyu'nu kurtaracak çevre koruma projesi kapsamında Büyükçekmece, Mimarsinan, Çatalca, Tepecik ve Ahmediye Köyü bölgelerine hizmet verilmektedir. (İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müd., 1995) Planlanan debisi 155.000m^3/gün olup 620.000 nüfusun ihtiyacını karşılamaktadır.

Arıtılmış atıksular daha sonra 4847m karada ve 1897 m denizde olmak üzere toplam 6744m uzunluğunda bir derin deniz deşarj hattı ile 40m derinlikten Marmara Deniz'ine 1600 mm çapında HDPE (High Density Polyetilen - Yüksek Yoğunluklu Polietilen) hat ile denize verilmektedir. Deşarj hattı üzerindeki difüzörlerle seyrelme sağlanmaktadır.



Şekil 6.2: Terfi Hattı Su Alma Ağzı Haznesi ve 3 Adet Pompa Basma Hattı



Şekil 6.3 : Terfi Hattı Su Alma Ağzı Haznesi Yerleşim Planı Şematik Çizimi

6.1.1. Kaba Izgara

Atıksular, tesise –4,60 m kotundan girerler. Bu kotta bulunan kaba ızgara bölgesinde atıksular 60 mm çubuk aralıklı kaba ızgaradan geçirilerek içindeki iri malzemeler mekanik olarak temizlenir ve sular bir hazne içinde toplanır. Toplanan sular 2 adet 3240 m^3/saat'lik ve 2 adet 790 m^3/saat'lik pompalarla yukarıya yükseltilir.

6.1.2. Giriş Pompa Binası

Tesise atıksular giriş yapısından alınmaktadır. Daha sonra kaba ızgaradan geçirilen sular terfi haznesindeki 2 adet burgulu (arşimed) ve 2 adet dalgıç pompa vasıtası ile ince ızgara ünitesine nakledilmektedir. Buradan geçen sular havalandırmalı kum tutucu ve yağ tutucudan geçirilerek arıtılmaktadır.

Tablo 6.1 : Dalgıç Pompa Karakteristikleri

DALGIÇ POMPA	
ADET	2
GÜÇ	22 kW
DEVİR	1480 RPM
Hm	6,47
Q	790 m^3/h

Tablo 6.2 : Burgulu Pompa Karakteristikleri

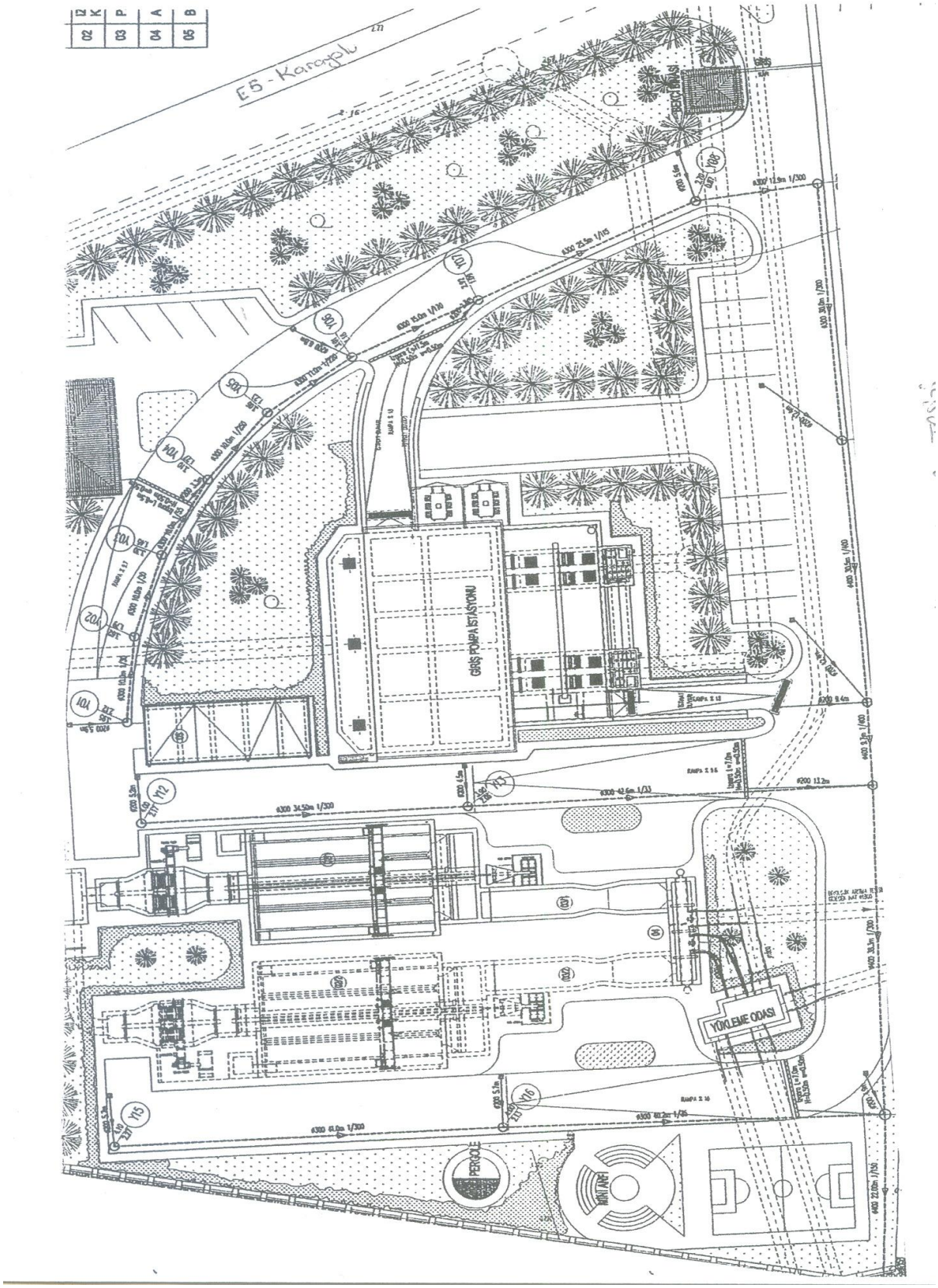
BURGULU POMPA	
ADET	2
GÜÇ	132 kW
DEVİR	380 RPM
Hm	7,60
Q	3,240 m^3/h

Deniz Deşarj Hattı: 1600 mm çapında HDPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) borulardan toplam 1897 m uzunluğunda dizayn edilmiştir.

Tablo 6.3 : Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Verileri

BÜYÜKÇEKMECE ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ VERİLERİ				
VERİNİN	**Adı**	**Sembolü**	**Birimi**	**Değeri**
	Basma Hattı Cinsi	**-**	**-**	**Çelik**
	Basma Hattı Anma Çapı	**D**	**mm**	**500**
	Basma Hattı Et kalınlığı	**e**	**mm**	**45.5**
	Basma Hattı Uzunluğu	**L**	**mt.**	**45**
	Debi	**Q**	**m^3 / s**	**0,073**
	Basma Hattının Yatayla yaptığı Açı	θ	**derece**	**0**
	Akışkanın Özgül Ağırlığı	γ	**kg/m^3**	**1,052**
	Sürtünme Katsayısı	**C**	**-**	**0,0457**

6.2. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi



Şekil 6.4: Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Yerleşim Planı






Şekil 6.5: Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Yerleşiminden görünümler

Küçükçekmece ilçesinin tamamı , Avcılar ilçesinin 1.135 hektarlık alanı ve Bakırköy ilçesinin 1.180 hektarlık alanı olmak üzere toplam 3.825 hektarlık yerleşim bölgesinden toplanan atık sular , Küçükçekmece atık su ön arıtma tesisinde arıtılacaktır.Yeşilköy'den Ambarlı deresine kadar uzanan 12,50 km ' lik sahil şeridi boyunca denize doğrudan akan atık suları kolektörler vasıtasıyla toplayacak olan tesis dünyanın önemli lagünlerinden Küçükçekmece gölünü de kirlilikten kurtaracaktır.Tesise atık sular giriş terfi merkezinden alınmaktadır. Burada 3 adet 275 KW 1100 lt/s 'lik , 4 adet 283 kW 1100 lt/s 'lik motorlar bulunmaktadır ve sular önce çubuk ızgaradan geçirilmektedir.(İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müdürlüğü, 1999)

Daha sonra ön arıtma binasında sular ince ızgaralar , havalandırmalı kum tutucu ve yağ tutucudan geçirilerek arıtılmaktadır. Planlanan debi 350.000 m^3/gün olup, 1.400.000 nüfusun ihtiyacını karşılamaktadır.

6.2.1. Giriş Pompa

Yükseltilmiş sular bir kanalla ön arıtma binasına gönderilir. Terfi merkezi içinde suların hareketini yönlendiren mekanik kapaklar (penstoklar) pompaları hareket ettiren motorlar , elektrik panoları bulunmaktadır.

Tablo 6.4: Giriş Pompa Karakteristikleri (1)

FLIGHT SANTRİFÜJ POMPA	
ADET	4
GÜÇ	283 kW
DEVİR	740 RPM
Hm	21,5
Q	3960 m^3/h

Tablo 6.5 : Giriş Pompa Karakteristikleri (2)

FLIGHT SANTRİFÜJ POMPA	
ADET	3
GÜÇ	275 kW
DEVİR	740 RPM
Hm	19,5
Q	3960 m^3/h

6.2.2. Deniz Deşarjı

Arıtılmış atık sular 1057 m uzunluğundaki 1600 mm çapındaki HDPE (Yüksek yoğunluklu polietilen) hat ile denizin -27 m derinliğine verilmektedir. Deşarj hattı üzerindeki 38 adet 150mm çapındaki difizörle seyrelme sağlanmaktadır.

Tablo 6.6 : Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Verileri

KÜÇÜKÇEKMECE ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ VERİLERİ				
VERİNİN	**Adı**	**Sembolü**	**Birimi**	**Değeri**
	Basma Hattı Cinsi	**-**	**-**	**Çelik**
	Basma Hattı Anma Çapı	**D**	**mm**	**500**
	Basma Hattı Et kalınlığı	**e**	**mm**	**45,5**
	Basma Hattı Uzunluğu	**L**	**mt.**	**45**
	Debi	**Q**	**m^3 / s**	**0,157**
	Basma Hattının Yatayla yaptığı Açı	**θ**	**derece**	**0**
	Akışkanın Özgül Ağırlığı	**γ**	**kg/m^3**	**1,090**
	Sürtünme Katsayısı	**C**	**-**	**0,0457**

6.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi



Şekil 6.6 : Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Görünüşü

Kadıköy atıksu ön arıtma ve deniz deşarj tesisi , Üsküdar, Ümraniye, Kadıköy ve maltepe ilçelerinin doğrudan denize akan ve bölgedeki çevre ile sosyal yaşamı olumsuz yönde etkileyen atıksularını arıtarak 2.308 m uzunlukta bir deşarj hattı ile İstanbul Boğazı' nın 51,5 m derinliğinden Karadeniz dip akıntısına verilmektedir. (İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müdürlüğü, 2000)

6.3.1.Giriş Pompa

Terfi merkezi içinde suların hareketini yönlendiren mekanik kapaklar (penstoklar), pompaları hareket ettiren motorlar, elektrik panoları ve ekipmanların kontrolünün yapıldığı kumanda odası bulunmaktadır. Ayrıca atıksuların boşaltılacağı acil tahliye savağı ve geçici savak da yer almaktadır.

Tablo 6.7: Giriş Pompa Karakteristikleri

ABS SANTRİFÜJ POMPA	
ADET	8
GÜÇ	300 kW
DEVİR	492 RPM
Hm	14
Q	6588 m^3/h

6.3.2.Çıkış Pompa

Ön arıtmadan çıkan sular buraya -6,40 m derinlikte gelir. Burada denize deşarj için daha yüksek bir kota terfi edilmesi gerekmektedir. Şekil ve fonksiyon itibari ile giriş terfi merkezi gibidir.

Tablo 6.8: Çıkış Pompa Karakteristikleri

ABS SANTRİFÜJ POMPA	
ADET	8
GÜÇ	300 kW
DEVİR	492 RPM
Hm	15,8
Q	6588 m3/h

Hazne içine biriken sular 8 adet (ilave edilecek pompalarla 12 adet) 1,83 m^3/s' lik pompalarla 12,80 m yukarıya yükseltilmektedir. Yükseltilen sular terfi merkezi içindeki bir çıkış haznesinde toplanmakta buradan da kendi cazibesi ile boğazın dip sularına boşaltılmaktadır.

6.3.3. Deniz Deşarjı

Deniz deşarj hattı beton kaplı 2200mm çaplı çelik borulardan 100 m si difüzör kısmı olmak üzere toplam 2308 m uzunluğunda dizayn edilmiştir. 13 adet 500 mm çapında difüzör ile seyrelme sağlanacaktır.

Tablo 6.9 : Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Verileri

KADIKÖY ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ VERİLERİ				
VERİNİN	**Adı**	**Sembolü**	**Birimi**	**Değeri**
	Basma Hattı Cinsi	**-**	**-**	**Çelik**
	Basma Hattı Anma Çapı	**D**	**mm**	**560**
	Basma Hattı Et kalınlığı	**e**	**mm**	**50,9**
	Basma Hattı Uzunluğu	**L**	**mt.**	**45**
	Debi	**Q**	**m^3 / s**	**0,229**
	Basma Hattının Yatayla yaptığı Açı	θ	**derece**	**0**
	Akışkanın Özgül Ağırlığı	γ	**kg/m^3**	**1,090**
	Sürtünme Katsayısı	**C**	**-**	**0,0457**

7. UYGULAMALAR

7.1. ELLE HESAPLAMA YÖNTEMİ

7.1.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması

Alçalma ve Yükselme basıncı değerlerini bulalım. (a) sellerite değeri; 3 Pompa için Q= 790 m^3 / saat , D = 500 mm ve PN 16 için e = 45,5 mm , E = 2.10^{10} kg / m^2 , K = 2.10^8 kg / m^2 ve γ = 1,052 kg / m^3 alınarak,

Q = 790 / (60*60*3) = 0,073 m^3 / s

D_0 = D – 2*e = 500 – 2 * 45,5 = 409 mm

Q = V * A $\Rightarrow$ 0,073 = V * π * (0,409)^2 /4 $\Rightarrow$ V = 0,56 m/s

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g}\left[\frac{1}{K}+\frac{D}{e.E}\right]}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1,052}{9,81}\left[\frac{1}{2.10^8}+\frac{409}{45,5.2.10^{10}}\right]}} = 41366 \text{ m/s bulunur.}$$

$$\Delta h = \pm\frac{a.\Delta v}{g} = \pm\frac{41366\times 0,54}{9,81} = \pm 2361,36 \text{ m.}$$

7.1.2. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması

Alçalma ve Yükselme basıncı değerlerini bulalım. (a) sellerite değeri ; 7 Pompa için Q= 3960 m^3 / saat , D = 500 mm ve PN 16 için e = 45,5 mm , E = 2.10^{10} kg / m^2 , K = 2.10^8 kg / m^2 ve γ = 1,090 kg / m^3 alınarak,

Q = 3960 / (60*60*7) = 0,157 m^3 / s

D_0 = D – 2*e = 500 – 2 * 45,5 = 409 mm

Q = V * A $\Rightarrow$ 0,157 = V * π * (0,409)^2 /4 $\Rightarrow$ V =1,19 m/s

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{1,090}{9,81}\left[\frac{1}{2.10^8}+\frac{409}{45,5.2.10^{10}}\right]}} = 40639 \text{ m/s bulunur.}$$

$$\Delta h = \pm\frac{a.\Delta v}{g} = \pm\frac{40639\times 1,19}{9,81} = \pm 4929,71 \text{ m.}$$

7.1.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması

Alçalma ve Yükselme basıncı değerlerini bulalım. (a) sellerite değeri; 8 Pompa için Q= 6588 m^3 / saat , D = 560 mm ve PN 16 için e =50,9 mm , E = 2.10^{10} kg / m^2 , K = 2.10^8 kg / m^2 ve γ = 1,090 kg / m^3 alınarak,

Q = 6588 / (60*60*8) = 0,229 m^3 / s

D_0 = D – 2*e = 560 – 2 * 50,9 = 458,2 mm

Q = V * A $\Rightarrow$ 0,229 = V * π * $(0,4582)^2$ / 4 $\Rightarrow$ V = 1,39 m/s

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{1,090}{9,81}\left[\frac{1}{2.10^8}+\frac{458,2}{50,9.2.10^{10}}\right]}} = 40636,80 \text{ m/s bulunur.}$$

$$\Delta h = \pm\frac{a.\Delta v}{g} = \pm\frac{40636,80\times 1,39}{9,81} = \pm 5757,92 m.$$

7.2. PROGRAM KULLANARAK (SÜRTÜNMESİZ) HESAPLAMA YÖNTEMİ

7.2.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmesiz)

Courant (Stabilite) Koşulu : $\frac{a.\Delta t}{\Delta x} = \frac{41366.0,0002}{15} = 0,552 < 1,00$

Δt= 0,0002 s ve Δx = 15 mt. olarak bulunur.

Kapanma Süresi = 2* L / a = 2* 45 / 41366 = 0,00218 s

Boru hattı için en extrem durum olan **"Hızlı Kapama"** olduğunu düşünürsek; Kapanma süresini t = 0,0020 s seçelim.

Imax = L / Δx +2 = 45 / 15 + 2 = 5

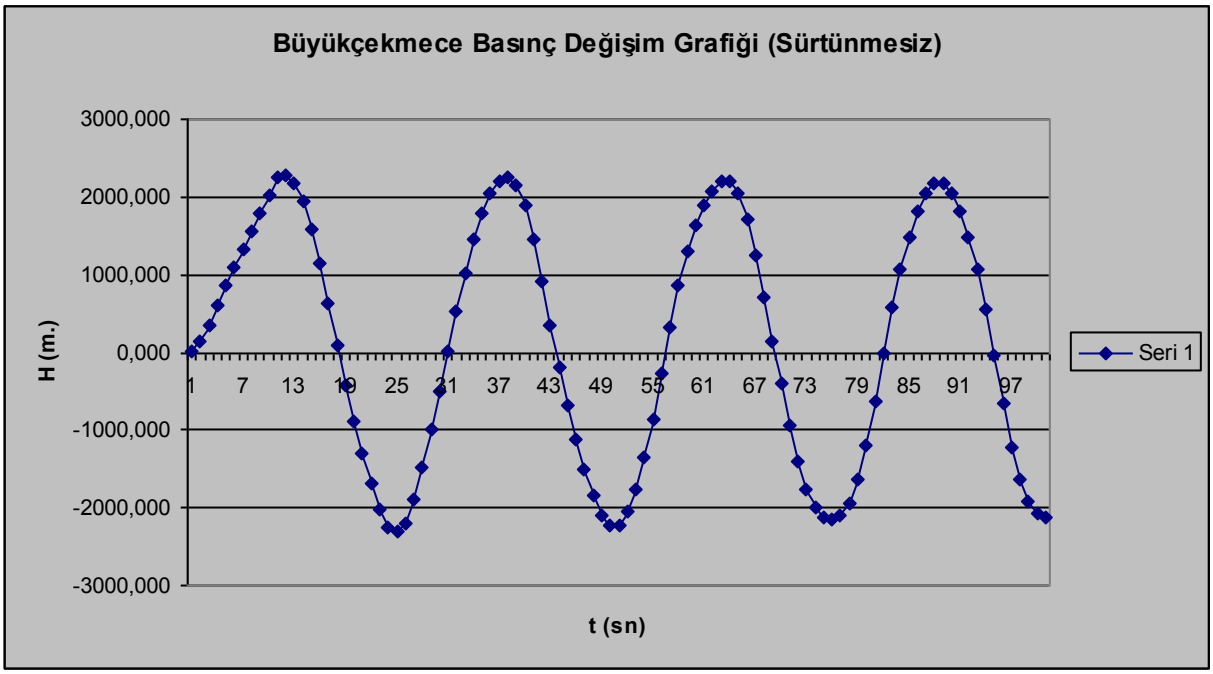
Imax1 = Imax – 1= 5 -1 = 4

Tablo 7.1 : Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi içindeki basınçlı hattı üzerindeki 1,2,3,4,5 noktalarındaki Hız ve Basınç Yüksekliği Değerleri

N	*v1*	*v2*	*v3*	*v4*	*v5*	*h1*	*h2*	*h3*	*h4*	*h5*
0	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
1	0,56	0,56	0,56	0,56	0,50	0,016	0,016	0,016	129,66	1135,56
2	0,56	0,56	0,56	0,54	0,45	0,016	0,016	39,45	350,17	2140,80
3	0,56	0,56	0,55	0,50	0,39	0,016	12,01	161,42	606,47	3015,74
4	0,56	0,56	0,54	0,44	0,34	0,016	65,81	373,31	857,68	3760,37
5	0,56	0,55	0,50	0,38	0,28	0,016	193,14	639,02	1091,86	4374,69
6	0,56	0,52	0,44	0,32	0,22	0,016	397,35	906,84	1318,59	4858,70
7	0,56	0,47	0,37	0,27	0,17	0,016	635,68	1144,93	1550,36	5212,41

8	0,56	0,39	0,30	0,21	0,11	0,016	835,56	1351,44	1789,11	5435,81
9	0,56	0,28	0,24	0,16	0,06	0,016	938,19	1534,16	2025,02	5528,91
10	0,56	0,16	0,16	0,09	0,00	0,016	936,72	1684,91	2241,92	5491,70
11	0,56	0,03	0,06	0,02	0,00	0,016	877,90	1777,50	2289,37	5454,49
12	0,56	-0,08	-0,06	-0,05	0,00	0,016	825,69	1752,14	2181,11	5417,27
13	0,56	-0,19	-0,18	-0,10	0,00	0,016	804,14	1575,45	1942,35	5380,06
14	0,56	-0,29	-0,28	-0,15	0,00	0,016	772,60	1275,73	1591,98	5342,85
15	0,56	-0,39	-0,35	-0,19	0,00	0,016	659,10	919,17	1145,41	5305,64
16	0,56	-0,48	-0,38	-0,22	0,00	0,016	424,21	552,31	630,02	5268,43
17	0,56	-0,54	-0,40	-0,23	0,00	0,016	99,25	170,12	90,98	5231,22
18	0,56	-0,55	-0,41	-0,22	0,00	0,016	-234,33	-257,70	-423,98	5194,00
19	0,56	-0,52	-0,40	-0,20	0,00	0,016	-503,74	-728,99	-888,36	5156,79
20	0,56	-0,45	-0,37	-0,18	0,00	0,016	-688,42	-1180,25	-1304,25	5119,58
21	0,56	-0,36	-0,31	-0,16	0,00	0,016	-813,30	-1519,61	-1682,43	5082,37
22	0,56	-0,26	-0,22	-0,14	0,00	0,016	-905,62	-1693,64	-2011,07	5045,16
23	0,56	-0,14	-0,11	-0,10	0,00	0,016	-962,16	-1724,51	-2243,15	5007,95
24	0,56	-0,01	-0,01	-0,03	0,00	0,016	-957,92	-1681,25	-2317,46	4970,74
25	0,56	0,11	0,08	0,05	0,00	0,016	-882,30	-1611,48	-2198,23	4933,52
26	0,56	0,23	0,18	0,13	0,00	0,016	-760,11	-1498,39	-1900,51	4896,31
27	0,56	0,33	0,27	0,18	0,00	0,016	-631,26	-1283,03	-1480,46	4859,10
28	0,56	0,41	0,36	0,21	0,00	0,016	-508,66	-929,47	-1000,36	4821,89
29	0,56	0,48	0,41	0,22	0,00	0,016	-359,32	-469,45	-498,69	4784,68
30	0,56	0,52	0,43	0,22	0,00	0,016	-134,17	15,17	11,88	4747,47
31	0,56	0,54	0,41	0,22	0,00	0,016	177,22	453,36	523,44	4710,26
32	0,56	0,52	0,37	0,21	0,00	0,016	518,72	828,87	1013,69	4673,04
33	0,56	0,45	0,33	0,19	0,00	0,016	796,77	1166,25	1447,72	4635,83
34	0,56	0,35	0,28	0,15	0,00	0,016	944,84	1476,86	1796,12	4598,62
35	0,56	0,22	0,21	0,11	0,00	0,016	967,34	1722,74	2047,40	4561,41
36	0,56	0,10	0,11	0,07	0,00	0,016	925,37	1837,59	2199,92	4524,20
37	0,56	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,016	879,40	1785,16	2242,21	4486,99
38	0,56	-0,14	-0,12	-0,04	0,00	0,016	841,46	1596,23	2145,48	4449,78
39	0,56	-0,25	-0,22	-0,11	0,00	0,016	777,15	1344,78	1881,65	4412,56
40	0,56	-0,35	-0,30	-0,18	0,00	0,016	649,11	1083,98	1454,52	4375,35
41	0,56	-0,44	-0,35	-0,23	0,00	0,016	455,90	803,60	914,66	4338,14
42	0,56	-0,50	-0,40	-0,25	0,00	0,016	229,78	451,24	341,01	4300,93
43	0,56	-0,53	-0,43	-0,23	0,00	0,016	1,13	-2,02	-199,10	4263,72
44	0,56	-0,53	-0,43	-0,21	0,00	0,016	-228,81	-514,28	-679,26	4226,51
45	0,56	-0,50	-0,39	-0,18	0,00	0,016	-475,99	-989,88	-1109,23	4189,30
46	0,56	-0,43	-0,32	-0,17	0,00	0,016	-734,69	-1345,46	-1502,90	4152,08
47	0,56	-0,34	-0,24	-0,15	0,00	0,016	-955,69	-1563,14	-1848,67	4114,87
48	0,56	-0,21	-0,16	-0,11	0,00	0,016	-1070,75	-1682,88	-2107,58	4077,66
49	0,56	-0,07	-0,08	-0,06	0,00	0,016	-1046,29	-1745,61	-2237,30	4040,45
50	0,56	0,06	0,01	0,01	0,00	0,016	-916,28	-1745,18	-2217,44	4003,24
51	0,56	0,18	0,12	0,07	0,00	0,016	-759,68	-1636,25	-2053,92	3966,03
52	0,56	0,28	0,23	0,12	0,00	0,016	-638,64	-1387,73	-1763,34	3928,81
53	0,56	0,37	0,33	0,17	0,00	0,016	-551,19	-1025,59	-1358,50	3891,60
54	0,56	0,44	0,39	0,22	0,00	0,016	-440,38	-620,41	-852,39	3854,39
55	0,56	0,50	0,42	0,25	0,00	0,016	-250,36	-231,03	-275,71	3817,18
56	0,56	0,53	0,41	0,25	0,00	0,016	21,70	138,88	314,56	3779,97
57	0,56	0,53	0,40	0,23	0,00	0,016	322,81	526,58	851,39	3742,76
58	0,56	0,48	0,37	0,19	0,00	0,016	587,71	951,11	1289,41	3705,55
59	0,56	0,41	0,32	0,14	0,00	0,016	784,39	1368,00	1624,52	3668,33

60	0,56	0,31	0,25	0,11	0,00	0,016	919,99	1685,39	1881,59	3631,12
61	0,56	0,18	0,15	0,08	0,00	0,016	1008,57	1829,62	2078,98	3593,91
62	0,56	0,05	0,04	0,05	0,00	0,016	1040,11	1799,95	2200,51	3556,70
63	0,56	-0,08	-0,06	0,00	0,00	0,016	986,40	1660,98	2200,19	3519,49
64	0,56	-0,21	-0,15	-0,07	0,00	0,016	837,83	1480,83	2035,84	3482,28
65	0,56	-0,32	-0,23	-0,14	0,00	0,016	630,00	1273,92	1702,65	3445,07
66	0,56	-0,40	-0,32	-0,20	0,00	0,016	426,41	1001,55	1239,04	3407,85
67	0,56	-0,46	-0,39	-0,23	0,00	0,016	268,07	626,46	703,19	3370,64
68	0,56	-0,49	-0,44	-0,24	0,00	0,016	137,21	165,70	143,99	3333,43
69	0,56	-0,51	-0,44	-0,24	0,00	0,016	-26,72	-310,34	-408,61	3296,22
70	0,56	-0,51	-0,41	-0,22	0,00	0,016	-268,80	-730,00	-931,31	3259,01
71	0,56	-0,47	-0,34	-0,20	0,00	0,016	-569,39	-1070,59	-1392,77	3221,80
72	0,56	-0,40	-0,28	-0,16	0,00	0,016	-849,24	-1356,72	-1756,22	3184,59
73	0,56	-0,29	-0,21	-0,10	0,00	0,016	-1025,12	-1610,01	-1998,15	3147,37
74	0,56	-0,15	-0,14	-0,05	0,00	0,016	-1067,07	-1803,44	-2122,00	3110,16
75	0,56	-0,01	-0,04	-0,01	0,00	0,016	-1008,42	-1869,78	-2148,95	3072,95
76	0,56	0,12	0,07	0,02	0,00	0,016	-905,03	-1759,01	-2090,97	3035,74
77	0,56	0,24	0,18	0,07	0,00	0,016	-786,10	-1489,44	-1932,01	2998,53
78	0,56	0,34	0,28	0,13	0,00	0,016	-641,99	-1140,54	-1638,41	2961,32
79	0,56	0,42	0,34	0,19	0,00	0,016	-454,24	-791,44	-1193,36	2924,11
80	0,56	0,48	0,39	0,24	0,00	0,016	-230,88	-462,02	-626,05	2886,89
81	0,56	0,51	0,42	0,27	0,00	0,016	-7,60	-112,19	-8,84	2849,68
82	0,56	0,51	0,43	0,25	0,00	0,016	186,18	300,90	576,94	2812,47
83	0,56	0,49	0,41	0,22	0,00	0,016	358,23	763,06	1078,73	2775,26
84	0,56	0,44	0,36	0,17	0,00	0,016	544,45	1198,11	1484,50	2738,05
85	0,56	0,37	0,28	0,14	0,00	0,016	763,90	1521,43	1803,15	2700,84
86	0,56	0,27	0,18	0,10	0,00	0,016	981,42	1700,01	2036,10	2663,63
87	0,56	0,14	0,08	0,06	0,00	0,016	1118,98	1762,23	2166,80	2626,41
88	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,016	1111,83	1751,85	2174,44	2589,20
89	0,56	-0,15	-0,08	-0,05	0,00	0,016	961,16	1675,32	2053,52	2551,99
90	0,56	-0,28	-0,18	-0,10	0,00	0,016	735,35	1496,60	1817,55	2514,78
91	0,56	-0,37	-0,28	-0,14	0,00	0,016	517,43	1183,93	1483,95	2477,57
92	0,56	-0,44	-0,37	-0,18	0,00	0,016	344,86	759,78	1059,08	2440,36
93	0,56	-0,48	-0,42	-0,22	0,00	0,016	193,60	300,46	543,16	2403,14
94	0,56	-0,51	-0,43	-0,25	0,00	0,016	15,97	-117,54	-46,59	2365,93
95	0,56	-0,51	-0,42	-0,26	0,00	0,016	-207,14	-473,34	-657,92	2328,72
96	0,56	-0,48	-0,38	-0,24	0,00	0,016	-448,20	-804,31	-1213,11	2291,51
97	0,56	-0,43	-0,33	-0,19	0,00	0,016	-661,25	-1151,31	-1643,93	2254,30
98	0,56	-0,34	-0,27	-0,12	0,00	0,016	-822,21	-1499,09	-1924,90	2217,09
99	0,56	-0,23	-0,18	-0,07	0,00	0,016	-938,96	-1770,49	-2076,34	2179,88
100	0,56	-0,11	-0,07	-0,03	0,00	0,016	-1023,02	-1881,98	-2134,73	2142,66



Şekil 7.1 : Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmesiz-B.Çekmece)

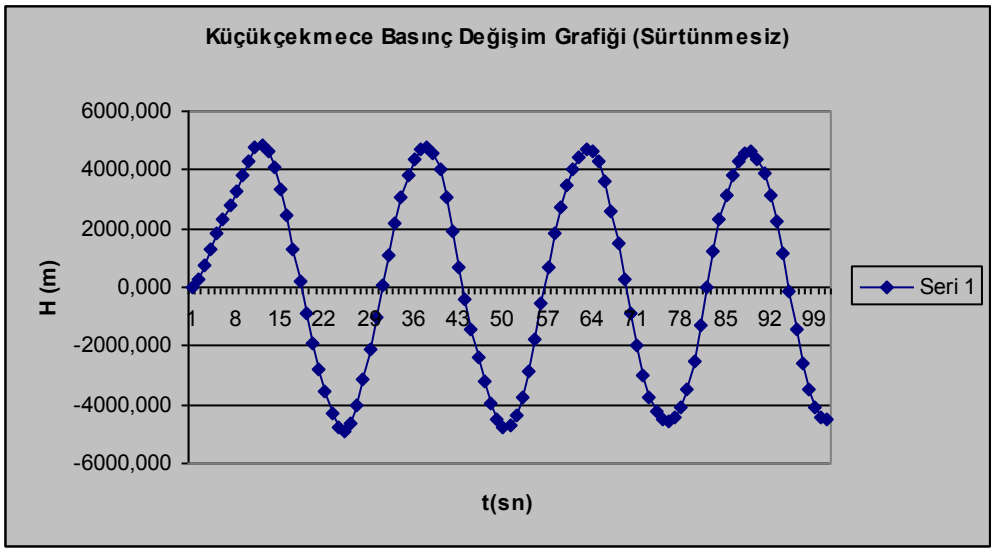
7.2.2. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmesiz)

Tablo 7.2. 'deki parametreleri kullanarak 7.2.1 'de yapılan hesaplamalar tekrarlanırsa;

Tablo 7.2 : Küçükçekmece Ana Değişkenler

ANA DEĞİŞKENLER	
DT	0,0002
DX	15
C	41366
HO	0,072
VO	1,19
TOL	0,002
IMAX	5

aşağıdaki Şekil 7.2 elde edilir.



Şekil 7.2 : Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği

(Sürtünmesiz - K.Çekmece)

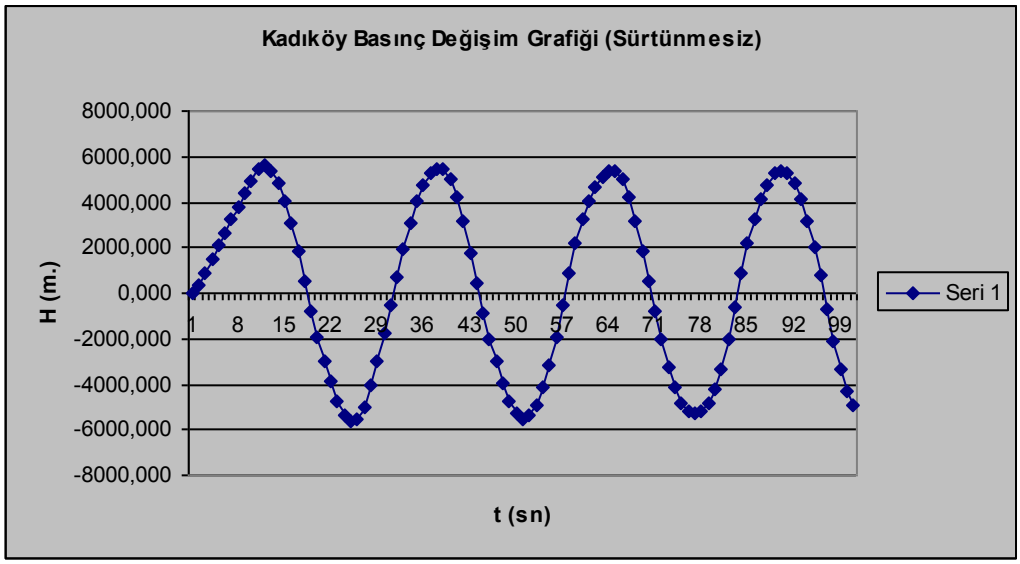
7.2.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmesiz)

Tablo 7.3. 'deki parametreleri kullanarak 7.2.1'de yapılan hesaplamalar tekrarlanırsa;

Tablo 7.3 : Kadıköy Ana Değişkenler

ANA DEĞİŞKENLER	
DT	**0,0002**
DX	**15**
C	**40636,8**
HO	**0,098**
VO	**1,39**
TOL	**0,002**
IMAX	**5**

aşağıdaki Şekil 7.3 elde edilir.



Şekil 7.3 : Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmesiz - Kadıköy)

7.3. PROGRAM KULLANARAK (SÜRTÜNMELİ) HESAPLAMA YÖNTEMİ

7.3.1. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmeli)

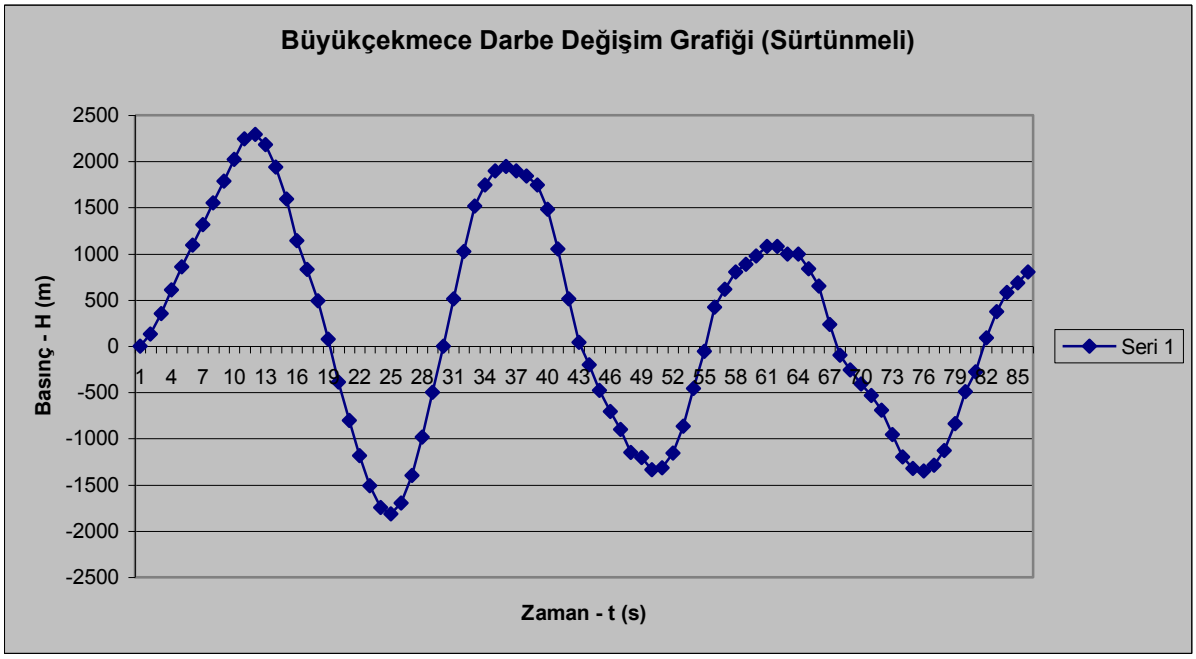
7.1.1 'de verilen ve hesaplanan değerlere ek olarak ; C(Friction Coefficent) = 0,0457 alınıp ve 7.2.1 'deki formüllere sürtünme katsayısı da etkirse;

Tablo 7.4 : Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi içindeki basınçlı hattı üzerindeki 1,2,3,4,5 noktalarındaki Hız ve Basınç Yüksekliği Değerleri (Sürtünmeli)

N	*v1*	*v2*	*v3*	*v4*	*v5*	*h1*	*h2*	*h3*	*h4*
0	0,560	0,560	0,560	0,560	0,560	0,016	0,016	0,016	0,016
1	0,560	0,560	0,560	0,560	0,504	0,016	0,016	0,016	129,6516
2	0,560	0,560	0,560	0,543	0,448	0,016	0,016	39,452	350,1514
3	0,560	0,560	0,555	0,502	0,392	0,016	12,012	161,406	606,4355
4	0,560	0,558	0,535	0,444	0,336	0,016	65,806	373,293	857,6413
5	0,560	0,550	0,495	0,381	0,280	0,016	193,124	638,980	1091,809
6	0,560	0,525	0,437	0,322	0,224	0,016	397,328	906,786	1318,528
7	0,560	0,473	0,370	0,268	0,168	0,016	635,645	1144,864	1550,298
8	0,560	0,389	0,304	0,215	0,112	0,016	835,506	1351,369	1789,038
9	0,560	0,280	0,236	0,157	0,056	0,016	938,134	1534,086	2024,943
10	0,560	0,157	0,158	0,093	0,000	0,016	936,674	1684,833	2241,834
11	0,560	0,035	0,060	0,020	0,000	0,016	877,871	1777,428	2289,283
12	0,560	-0,080	-0,057	-0,047	0,000	0,016	825,670	1752,082	2181,023
13	0,560	-0,188	-0,179	-0,103	0,000	0,016	804,120	1575,405	1942,278
14	0,560	-0,293	-0,280	-0,151	0,000	0,016	772,587	1275,704	1591,929

15	0,560	-0,394	-0,345	-0,192	0,000	0,016	659,085	919,151	1145,384
16	0,560	-0,480	-0,379	-0,222	0,000	0,016	424,205	552,308	830,0184
17	0,560	-0,536	-0,396	-0,232	0,000	0,016	99,257	170,137	491,0142
18	0,560	-0,549	-0,405	-0,221	0,000	0,016	-234,316	-257,663	76,08065
19	0,560	-0,518	-0,402	-0,200	0,000	0,016	-503,703	-728,934	-388,276
20	0,560	-0,452	-0,373	-0,179	0,000	0,016	-688,372	-1180,159	-804,16
21	0,560	-0,362	-0,309	-0,163	0,000	0,016	-813,232	-1519,500	-1182,32
22	0,560	-0,256	-0,216	-0,141	0,000	0,016	-905,548	-1693,520	-1510,95
23	0,560	-0,137	-0,113	-0,100	0,000	0,016	-962,091	-1724,400	-1743,02
24	0,560	-0,012	-0,013	-0,032	0,000	0,016	-957,855	-1681,147	-1817,32
25	0,560	0,114	0,081	0,051	0,000	0,016	-882,259	-1611,392	-1698,09
26	0,560	0,229	0,177	0,128	0,000	0,016	-760,077	-1498,309	-1400,39
27	0,560	0,329	0,273	0,181	0,000	0,016	-631,245	-1282,968	-980,375
28	0,560	0,411	0,358	0,206	0,000	0,016	-508,638	-929,423	-500,308
29	0,560	0,478	0,413	0,216	0,000	0,016	-359,302	-469,440	1,321968
30	0,560	0,525	0,428	0,220	0,000	0,016	-134,165	15,151	511,8454
31	0,560	0,542	0,408	0,220	0,000	0,016	177,210	453,311	1023,373
32	0,560	0,519	0,372	0,211	0,000	0,016	518,671	828,790	1513,587
33	0,560	0,451	0,332	0,187	0,000	0,016	796,691	1166,144	1747,584
34	0,560	0,347	0,283	0,150	0,000	0,016	944,747	1476,723	1895,965
35	0,560	0,223	0,214	0,108	0,000	0,016	967,241	1722,586	1947,231
36	0,560	0,097	0,115	0,066	0,000	0,016	925,279	1837,428	1899,738
37	0,560	-0,024	-0,004	0,018	0,000	0,016	879,328	1785,007	1842,029
38	0,560	-0,139	-0,123	-0,042	0,000	0,016	841,398	1596,103	1745,292
39	0,560	-0,249	-0,222	-0,113	0,000	0,016	777,100	1344,681	1481,49
40	0,560	-0,351	-0,296	-0,184	0,000	0,016	649,071	1083,899	1054,388
41	0,560	-0,436	-0,353	-0,232	0,000	0,016	455,874	803,546	514,5832
42	0,560	-0,495	-0,398	-0,247	0,000	0,016	229,767	451,209	41,00137
43	0,560	-0,525	-0,427	-0,232	0,000	0,016	1,135	-2,014	-199,053
44	0,560	-0,526	-0,427	-0,206	0,000	0,016	-228,794	-514,217	-479,167
45	0,560	-0,496	-0,389	-0,185	0,000	0,016	-475,943	-989,769	-709,101
46	0,560	-0,433	-0,322	-0,169	0,000	0,016	-734,609	-1345,311	-902,733
47	0,560	-0,337	-0,242	-0,149	0,000	0,016	-955,576	-1562,963	-1148,48
48	0,560	-0,212	-0,163	-0,111	0,000	0,016	-1070,616	-1682,699	-1207,36
49	0,560	-0,072	-0,083	-0,056	0,000	0,016	-1046,164	-1745,421	-1337,07
50	0,560	0,065	0,009	0,009	0,000	0,016	-916,176	-1744,988	-1317,21
51	0,560	0,184	0,117	0,070	0,000	0,016	-759,607	-1636,079	-1153,7
52	0,560	0,284	0,232	0,125	0,000	0,016	-638,584	-1387,586	-863,149
53	0,560	0,367	0,330	0,174	0,000	0,016	-551,146	-1025,493	-458,35
54	0,560	0,439	0,392	0,218	0,000	0,016	-440,341	-620,360	-52,2953
55	0,560	0,497	0,415	0,248	0,000	0,016	-250,341	-231,022	424,3141
56	0,560	0,530	0,413	0,254	0,000	0,016	21,694	138,849	614,5091
57	0,560	0,527	0,397	0,231	0,000	0,016	322,771	526,516	801,2662
58	0,560	0,485	0,371	0,188	0,000	0,016	587,642	950,991	889,2319
59	0,560	0,408	0,323	0,144	0,000	0,016	784,285	1367,826	974,3026
60	0,560	0,305	0,247	0,111	0,000	0,016	919,864	1685,165	1081,352
61	0,560	0,185	0,147	0,085	0,000	0,016	1008,429	1829,376	1078,72
62	0,560	0,053	0,039	0,052	0,000	0,016	1039,966	1799,703	1000,236
63	0,560	-0,083	-0,060	0,000	0,000	0,016	986,261	1660,759	999,9095
64	0,560	-0,212	-0,148	-0,071	0,000	0,016	837,722	1480,641	835,571
65	0,560	-0,322	-0,232	-0,143	0,000	0,016	629,928	1273,757	652,4209
66	0,560	-0,404	-0,316	-0,199	0,000	0,016	426,370	1001,420	238,8701

67	0,560	-0,460	-0,392	-0,230	0,000	0,016	268,046	626,385	-96,913
68	0,560	-0,495	-0,438	-0,240	0,000	0,016	137,196	165,677	-256,028
69	0,560	-0,513	-0,442	-0,238	0,000	0,016	-26,720	-310,295	-408,539
70	0,560	-0,509	-0,405	-0,225	0,000	0,016	-268,766	-729,885	-531,163
71	0,560	-0,474	-0,345	-0,198	0,000	0,016	-569,319	-1070,428	-692,556
72	0,560	-0,400	-0,279	-0,156	0,000	0,016	-849,116	-1356,523	-955,956
73	0,560	-0,289	-0,213	-0,104	0,000	0,016	-1024,957	-1609,771	-1197,85
74	0,560	-0,154	-0,136	-0,053	0,000	0,016	-1066,899	-1803,169	-1321,68
75	0,560	-0,015	-0,040	-0,012	0,000	0,016	-1008,257	-1869,484	-1348,63
76	0,560	0,117	0,073	0,025	0,000	0,016	-904,884	-1758,727	-1290,65
77	0,560	0,235	0,184	0,068	0,000	0,016	-785,978	-1489,200	-1131,71
78	0,560	0,338	0,276	0,126	0,000	0,016	-641,894	-1140,363	-838,149
79	0,560	0,422	0,341	0,191	0,000	0,016	-454,175	-791,320	-493,163
80	0,560	0,482	0,386	0,244	0,000	0,016	-230,852	-461,960	-275,936
81	0,560	0,512	0,416	0,265	0,000	0,016	-7,603	-112,179	91,17214
82	0,560	0,513	0,429	0,252	0,000	0,016	186,149	300,851	376,8387
83	0,560	0,488	0,414	0,216	0,000	0,016	358,170	762,942	578,5474
84	0,560	0,442	0,361	0,174	0,000	0,016	544,371	1197,906	684,247



Şekil 7.4 : Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği

(Sürtünmeli - B.Çekmece)

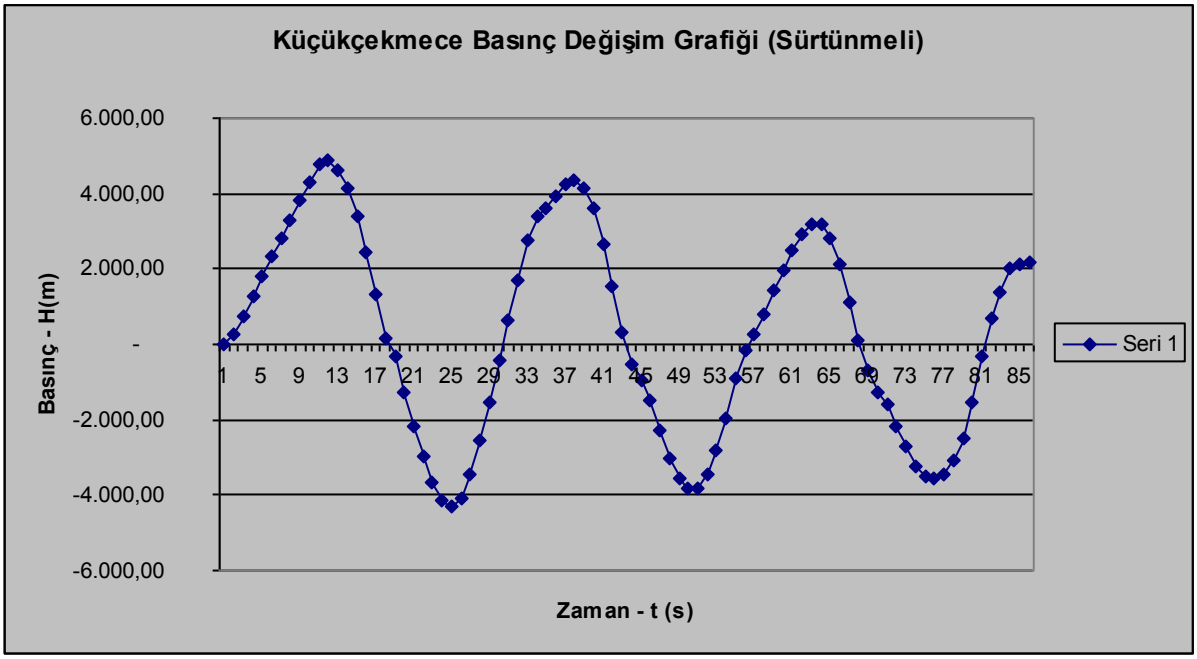
7.3.2. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmeli)

Tablo 7.5. ‘deki parametreleri kullanarak 7.3.1‘de yapılan hesaplamalar tekrarlanırsa;

Tablo 7.5 : Küçükçekmece Ana Değişkenler (Sürtünmeli)

ANA DEĞİŞKENLER	
DT	0,0002
DX	15
C	41366
HO	0,072
VO	1,19
TOL	0,002
IMAX	5
C	0,0457
$D_{iç}$	0,409

aşağıdaki Şekil 5.3.2 elde edilir.



Şekil 7.5 : Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği

(Sürtünmeli - K.Çekmece)

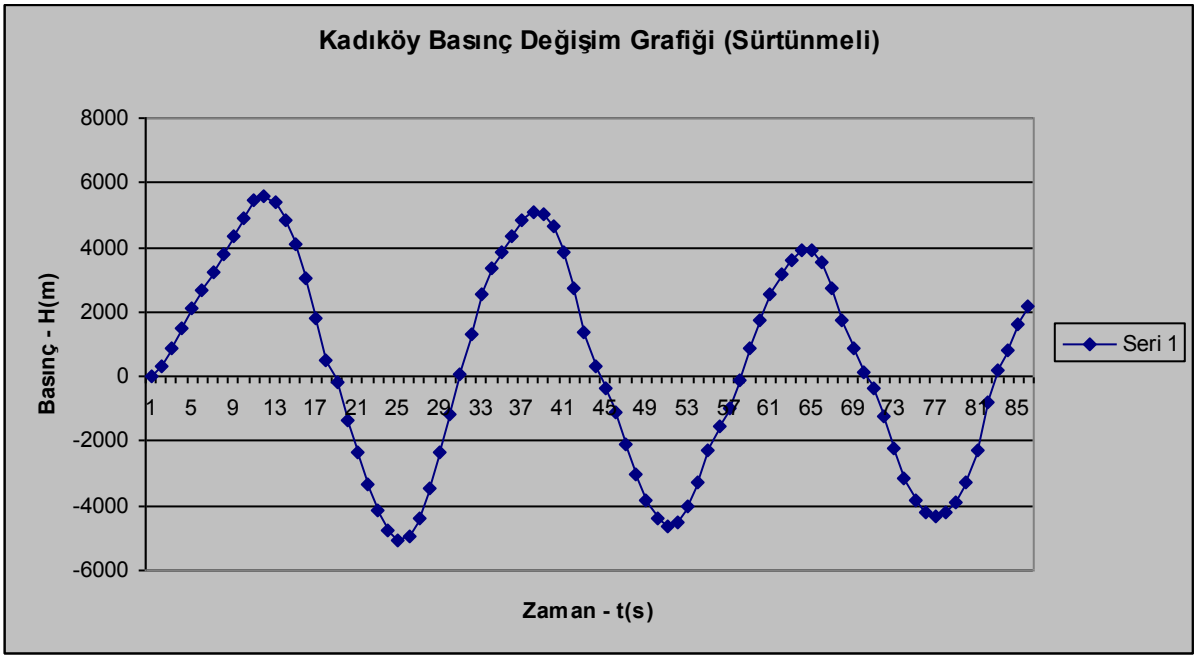
7.3.3. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi Uygulaması (Sürtünmeli)

Tablo 7.6 ‘daki parametreleri kullanarak 7.3.1. ‘de yapılan hesaplamalar tekrarlanırsa;

Tablo 7.6 : Kadıköy Ana Değişkenler (Sürtünmeli)

ANA DEĞİŞKENLER	
DT	**0,0002**
DX	**15**
C	**40636,8**
HO	**0,098**
VO	**1,39**
TOL	**0,002**
IMAX	**5**
C	**0,0457**
$D_{iç}$	**0,4582**

aşağıdaki Şekil 7.6 elde edilir.



Şekil 7.6 : Vana ucundaki Zamanla değişen Basınç Değişim Grafiği (Sürtünmeli - Kadıköy)

8. DEĞERLENDİRMELER VE KARŞILAŞTIRMALAR

8.1. Değerlendirmeler

Bu çalışmada, sonlu farklar metodu kullanılarak, İstanbul ilindeki mevcut Büyükçekmece, Küçükçekmece ve Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisleri içindeki terfili boru hattı düzenlerinde sürtünme faktörü dikkate alınarak (veya alınmadan) programın kısıtları (D,e, K, E) değiştirilmeden sadece akışkan özgül ağırlığı farklılıklarının Allievi Denklemleri ve Karakteristikleri vasıtasıyla su darbesi üzerindeki etkisi incelenmiş ve bir sonraki bölümde ise kısaca darbeyi önleyici tedbirlerden bahsedilmiştir.

Darbe, akışkan özgül ağırlığı, malzemenin elastisite ve akışkanın hacim (bulk) modülü, hat iç çapı ve et kalınlığının bir fonksiyonudur. (Topacık, 2000)

Bu beş adet bileşenden birisi olan elastisite modülü malzemenin cinsine, hacim (bulk) modülü ise akışkanın özgül ağırlığına bağlı olarak değişmekte olan yayılma hızına etkiyen önemli faktörlerdendir.

Aşağıda çeşitli tipte akışkanların (A, B, C, D, E ve F Tipi) özgül ağırlıkları Tablo 8.1 ‘de belirtilmektedir.

Tablo 8.1 : Akışkan Özgül Ağırlıkları

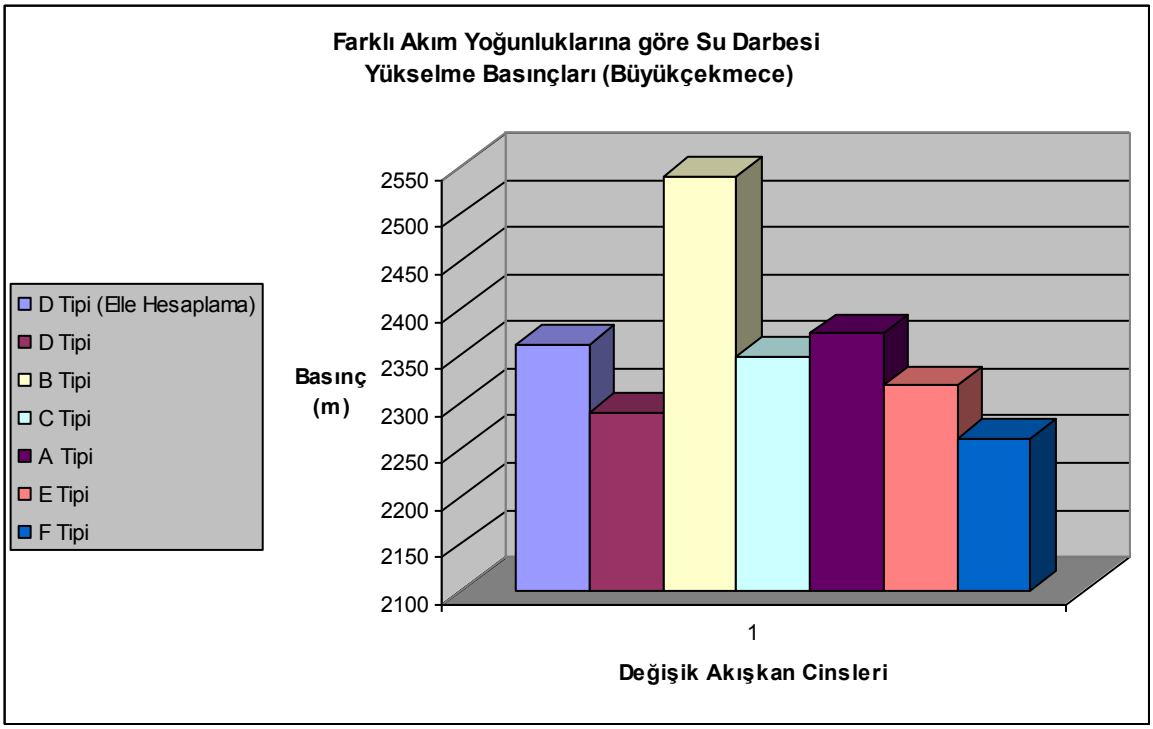
Muhtelif Özgül Ağırlıklar (T= 20 ^{0}C için)	
Akışkan Adı	**Değeri (kg/m^3)**
A Tipi	1,000
B Tipi	0,74-0,754
C Tipi	1,040
D Tipi	1,052
E Tipi	1,010
F Tipi	1,090

Tablo 8.2 ‘de aynı karakteristikli boru hatlarında sürtünme faktörü dikkate alınarak (D, e, E, K değiştirilmeksizin) akışkan özgül ağırlığının artması halinde darbenin azaldığı, akışkan özgül ağırlığının azalması halinde ise darbe etkisinin arttığı görülmüştür.

Tablo 8.2 : Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarına göre Darbe Değişim Değerleri

Tesis Adı		Büyükçekmece		Küçükçekmece		Kadıköy	
Akışkan Adı	γ (kg/m^3)	ΔH (Yükselme) (+)(m)	ΔH (Alçalma) (-)(m)	ΔH (Yükselme) (+)(m)	ΔH (Alçalma) (-)(m)	ΔH (Yükselme) (+)(m)	ΔH (Alçalma) (-)(m)
D Tipi (Elle Hesaplama)	1,052	+2361,36	-2361,36	+4929,71	-4929,71	+5757,92	-5757,92
D Tipi	1,052	+2289,28	-2317,32	+4862,71	-4921,83	+5678,16	-5746,99
B Tipi	0,750	+2539,85	-2521,67	+5393,20	-5353,13	+6296,49	-6248,60
C Tipi	1,040	+2348,38	-2384,53	+4987,25	-5064,52	+5823,04	-5913,76
A Tipi	1,000	+2373,22	-2402,83	+5041,81	-5102,04	+5888,21	-5956,48
E Tipi	1,010	+2318,53	-2324,98	+4924,39	-4497,02	+5750,09	-5763,64
F Tipi	1,090	+2261,51	-2284,95	+4862,66	-4921,79	+5609,81	5668,08

Aynı koşullar altında farklı akışkan özgül ağırlıklarında, özgül ağırlığı küçük olan akışkanların diğerlerine göre su darbesi etkisinin daha büyük olacağı Şekil 8.1 'deki grafikte de açıkça görülmektedir.

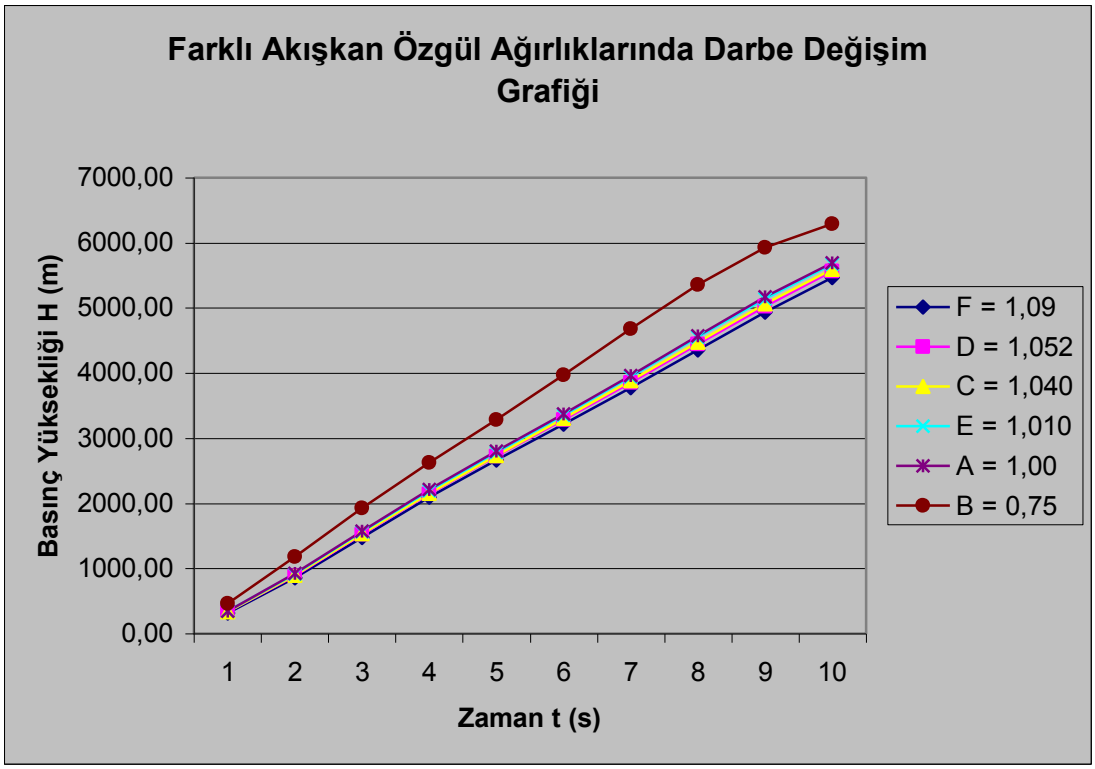


Şekil 8.1 : Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarının Darbe üzerindeki Etkisi

Darbenin farklı akışkan özgül ağırlıklarında etkisini incelemek için; Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi ana parametrelerine çeşitli özgül ağırlık değerleri uygulanmış olup, hem Tablo 8.3 hem de Şekil 8.2 'deki grafik bulunarak gösterilmiştir.

Tablo 8.3 : Farklı akışkan özgül ağılıklarına göre Darbe Değişim Tablosu (K.köy)

Farklı akışkan özgül ağılıklarına göre Darbe Değişim Tablosu (Kadıköy)							
H Değerleri	t(s)	γ = 1,09	γ = 1,052	γ = 1,040	γ = 1,010	γ = 1,00	γ = 0,75
	1	318.83	330.34	334.15	344.07	347.51	463.32
	2	855.18	882.56	891.57	914.89	922.94	1181.15
	3	1479.15	1519.33	1532.46	1566.24	1577.83	1931.65
	4	2092.61	2140.59	2156.20	2196.23	2209.92	2621.98
	5	2664.28	2718.83	2736.62	2782.34	2798.02	3285.98
	6	3215.11	3279.34	3300.41	3354.80	3373.54	3974.16
	7	3776.08	3853.25	3878.61	3944.14	3966.73	4680.27
	8	4355.13	4444.56	4473.81	4549.13	4574.98	5354.31
	9	4931.78	5028.14	5059.41	5139.31	5166.53	5927.60
	10	5469.03	5563.52	5593.78	5670.12	5695.79	6296.29



Şekil 8.2 : Farklı akışkan özgül ağırlıklarında Darbe Değişim Grafiği

Bulunan bu değerleri, bir tablo halinde (Tablo 8.3) yüzde olarak değişimi incelendiği takdirde;

Tablo 8.4 : Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarında Yüzde olarak Darbe Değişimi

Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarında Yüzde Olarak Darbe Değişimi (Kadıköy) (%)										
H Değerleri	**γ = 1,09**	Ort. (%)	**γ = 1,052**	Ort. (%)	**γ = 1,04**	Ort. (%)	**γ = 1,01**	Ort. (%)	**γ = 0,75**	Ort. (%)
	%		**%**		**%**		**%**		**%**	
	0.92		**0.95**		**0.96**		**0.99**		**1.33**	
	0.93		**0.96**		**0.97**		**0.99**		**1.28**	
	0.94		**0.96**		**0.97**		**0.99**		**1.22**	
	0.95		**0.97**		**0.98**		**0.99**		**1.19**	
	0.95		**0.97**		**0.98**		**0.99**		**1.17**	
	0.95	**0.95**	**0.97**	**0.97**	**0.98**	**0.98**	**0.99**	**0.99**	**1.18**	**1.18**
	0.95		**0.97**		**0.98**		**0.99**		**1.18**	
	0.95		**0.97**		**0.98**		**0.99**		**1.17**	
	0.95		**0.97**		**0.98**		**0.99**		**1.15**	
	0.96		**0.98**		**0.98**		**1.00**		**1.11**	
	0.97		**0.98**		**0.99**		**1.00**		**1.02**	

8.2. Karşılaştırmalar

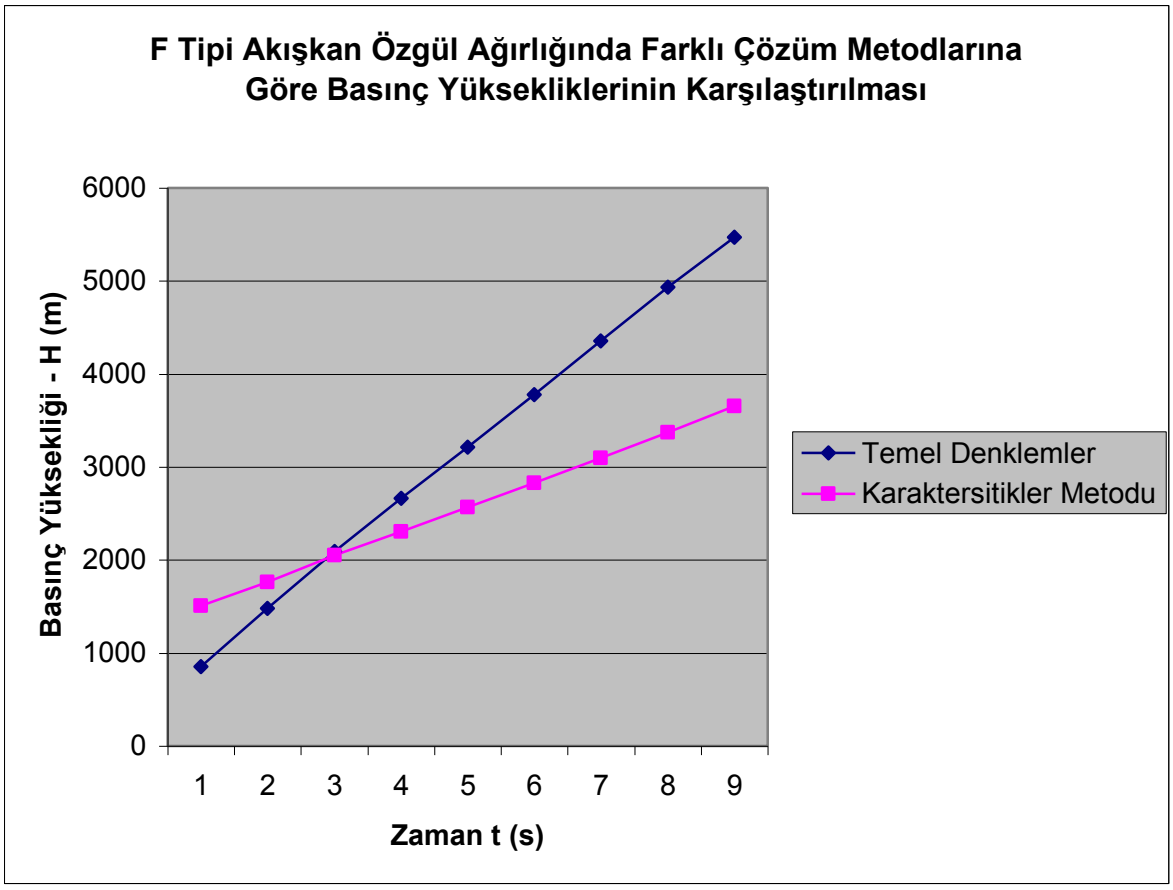
Örneklerden Kadıköy Atıksu Arıtma Tesisi Verilerini 4. Bölümdeki "Çözüm Metodları" nda anlatılan Karakteristikler Metoduna göre uygulama yapıldığında yükselme darbeleri Tablo 8.4 'deki gibidir.

Tablo 8.5 : Allievi Denklemleri ile Karakteristikler Metodunda Farklı Akışkan Özgül Ağırlıklarına göre Yükselen Darbe Değişimlerinin Karşılaştırılması (Kadıköy)

H Değerleri	**t(s)**	**γ = 1,09**		**γ = 1,052**		**γ = 1,040**	
		kg /m^3					
	1	**318.83**	***6,18***	**330.34**	***6,29***	**334.15**	***6,33***
	2	**855.18**	***1505,78***	**882.56**	***1532,80***	**891.57**	***1541,62***
	3	**1479.15**	***1761,82***	**1519.33**	***1793,44***	**1532.46**	***1803,76***
	4	**2092.61**	***2049,77***	**2140.59**	***2086,55***	**2156.20**	***2098,55***
	5	**2664.28**	***2303,99***	**2718.83**	***2345,33***	**2736.62**	***2358,82***
	6	**3215.11**	***2565,13***	**3279.34**	***2611,16***	**3300.41**	***2626,18***
	7	**3776.08**	***2828,73***	**3853.25**	***2879,49***	**3878.61**	***2896,05***
	8	**4355.13**	***3097,69***	**4444.56**	***3153,27***	**4473.81**	***3171,41***
	9	**4931.78**	***3371,60***	**5028.14**	***3432,10***	**5059.41**	***3451,85***
	10	**5469.03**	***3650,69***	**5563.52**	***3716,20***	**5593.78**	***3737,58***

H Değerleri	t(s)	γ = 1,010		γ = 1,00		γ = 0,75	
		kg /m^3					
	1	344.07	*6,42*	347.51	*6,45*	463.32	*7,43*
	2	914.89	*1564,26*	922.94	*1572,08*	1181.15	*1815,37*
	3	1566.24	*1830,24*	1577.83	*1839,39*	1931.65	*2124,06*
	4	2196.23	*2129,37*	2209.92	*2140,01*	2621.98	*2471,21*
	5	2782.34	*2393,46*	2798.02	*2405,43*	3285.98	*2777,70*
	6	3354.80	*2664,75*	3373.54	*2678,07*	3974.16	*3092,54*
	7	3944.14	*2938,58*	3966.73	*2953,27*	4680.27	*3410,34*
	8	4549.13	*3217,99*	4574.98	*3234,07*	5354.31	*3734,60*
	9	5139.31	*3502,54*	5166.53	*3520,04*	5927.60	*4064,83*
	10	5670.12	*3792,47*	5695.79	*3811,42*	6296.29	*4401,31*

Ayrıca, Kadıköy Atıksu Arıtma Tesisi örneği için; her iki metod arasındaki darbe değer farklılıkları arasındaki ilişki grafik olarak Şekil 8.3 'de gösterilmektedir.

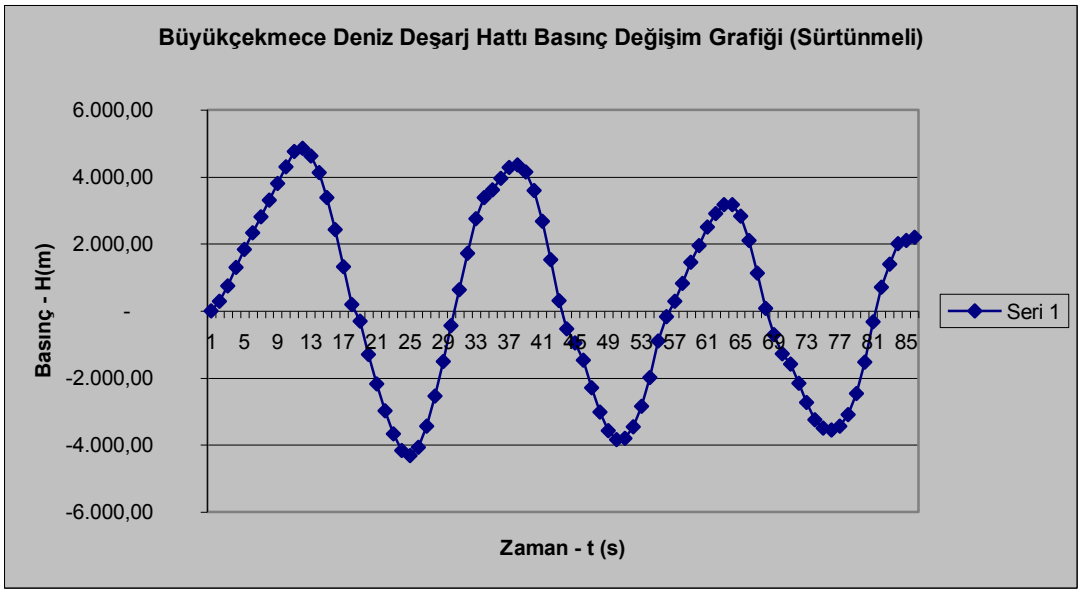


Şekil 8.3 : Allievi (Temel) Denklemleri ile Karakteristikler Metodu arasındaki Darbe Hesap Farklılıkları

Tablo 8.6 : Allievi (Temel) Denklemleri ile Karakteristikler Metodunun Örnek veriye göre Yüzde olarak karşılaştırılması

	Temel (Allievi) Denklemler	Karakteristikler Metodu	Yüzde Değişimi (%)	Ortalama Yüzde Değişimi (%)
Basınç Yükseklikleri H (m)	855,18	1505,78	-43	
	1479,15	1761,82	-16	
	2092,61	2049,77	2	
	2664,28	2303,99	16	
	3215,11	2565,13	25	17
	3776,08	2828,73	33	
	4355,13	3097,69	41	
	4931,78	3371,60	46	
	5469,03	3650,69	50	

Ayrıca, örnek verilerden Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisinin yaklaşık 6744 m. uzunluğundaki 1600 (HDPE) mm çaplı deniz deşarj hattına göre terfi hattının direkt olarak bağlandığı düşünülerek su darbesi hesabı yapıldığında Şekil 8.4. 'teki gibi bir grafik ortaya çıkmıştır Buna ilave olarak, Şekil 6.1 'deki tesis fotoğraflarından da görüleceği üzere; terfili basma hattının çıkış noktasına darbe önleyici yapılardan Hava Kazanı (Çanı) konulmuş ve deşarj hattının uzun olması nedeniyle de hava kazanına ek olarak deşarj hattının karadan denize geçmeden hemen önceki bir noktaya Denge Bacası yapılmak suretiyle sözkonusu hat üzerinde oluşan ve/veya oluşabilecek darbenin engellendiği gözlemlenmiştir.



Şekil 8.4 : Büyükçekmece Deniz Deşarj Hattı Basınç Değişim Grafiği

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, akışkanın özgül ağırlığının su darbesine etkisini sonlu farklar metodu kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Önce sürtünmesiz durum için hareketin denklemleri sonlu farklar metoduyla çözülmüş, daha sonra sürtünmeli durum için aynı metot ile su darbesinin en yüksek ve en alçak basınçları bulunmuş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Çalışan terfili sistem içinde süreksizlik olduğunda başlayan darbe etkisi (sürtünme ihmal edildiği takdirde) sönümlenmez ve hat boyunca sonsuza kadar devam eder. Ama sürtünmeli bir durum için bu söylenemez ve sürtünme katsayısına bağlı olarak belirli bir süre içinde darbe sönümlenir.

Örnek veriler çerçevesinde uygulama yapılan örnekte; suyun özgül ağırlığı referans alındığında, akışkan özgül ağırlığının artması halinde darbenin azalacağı, akışkan özgül ağırlığının azalması halinde ise darbenin etkisinin artacağı müşahede edilmiştir. Darbenin yüzde olarak ortalama etkisi su özgül ağırlığına (A tipine) göre F Tipinde % 5 azalma, D Tipinde % 3 azalma, C Tipinde % 2 azalma, E Tipinde % 1 azalma ve B Tipinde ise % 18 artış göstermiştir. Bu durum, akışkan özgül ağırlığının küçülmesi halinde yayılma hızının yani su darbesinin etkisinin (B Tipinde olduğu gibi % 18 'lik) büyük bir artış gösterdiği görülmektedir.

F Tipi akışkan özgül ağırlığı için Allievi Denklemleri ile Karakteristikler metodu arasındaki darbe hesapları karşılaştırıldığında, pompanın yavaşlamaya başladığı ilk zaman içersinde karakteristikler metoduyla hesaplanan darbe değeri, Allievi denklemleri ile hesaplanan darbe değerine göre yaklaşık % 60 daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 8.3 'den de görüleceği üzere bu durum fazla sürmemekte ve darbenin pik olduğu noktada yüzde değişimi % 50 (yarı yarıya) azaldığı müşahede edilmiştir. İki metod arasındaki bu durum, başlangıçtaki aynı zaman aralığında ortalama yüzde olarak % 17 'lik bir değişim gösterdiği söylenebilir.

Bu durumun nedeni, Allievi Denklemlerinde Lokal İvme ($\delta V/\delta t$ ve $\delta h/\delta t$) yanında Konvektif ($\delta V/\delta x$ ve $\delta h/\delta x$) ivmenin ihmal edilmesidir.

Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere; olabilecek olağan dışı durumlarda dikkate alınarak, projelendirme safhasında terfili hatların boyutlandırılmasında akışkan özgül

ağırlığının farklılıklar göstermesinden dolayı su darbesinin etkisinin azaltılabilmesi veya önlenmesi veya hattın darbeden etkilenmemesi için, proje ekonomikliği açısından en extrem durumlar da hesaba katılarak birincil derecede akışkan özgül ağırlığı dikkatli seçilmeli ve bu meyanda sistem elemanları boyutlandırılmalıdır.

9.2. Öneriler

Bu yüksek lisans çalışmasında, örnek verilerle yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre Darbe tesirlerini azaltmak için;

1) Borudaki su hızını küçültmek; bunun için de boru çapını büyütmek;
2) Dalga hızı (a) nın değerini küçültmek; bunun için de mümkünse PVC veya PE boru kullanmak;
3) Kısa terfi hatları (L > 1000 m.) için; motora volan takarak ani durmayı önlemek;
4) Terfi hattına hava kazanı (çanı) koymak (en çok kullanılan ve ekonomik yöntemler arasındadır.)
5) Terfi hattında uygun bir yükseklik varsa; denge bacası yapmak,
6) Terfi hattı başına yükselmede açılan emniyet ventili koymak,

Ayrıca, pompa ile beslenen tesislerde genellikle en büyük tehlike pompa motorunun bir elektrik kesintisi ve benzeri olağan dışı bir nedenle ani olarak durması olduğunu Parmakian Metodunda bahsedilmişti. Bu takdirde 3. Bölümde izah edildiği gibi yükselme (artı) ve alçalma (eksi) darbeleri doğmaktadır. Meydana gelen basınç düşüklüğü neticesinde borunun herhangi bir yerinde basınç, akışkanın buharlaşma basıncının altına düşerse burada bir buharlaşma olur ve akışkan kolonu kopar. Daha sonra basıncın tekrar yükselmesi sırasında kopan kolonların tekrar birleşmesi çok büyük su darbelerine sebep olur. Bu bakımdan her zaman boru içinde kavitasyon önlenmelidir. Kavitasyonun önlenmesi için ise ;

- Geri tepme ventili yerine kontrollü vana kullanılması,
- Pompaya volan ilave edilmesi,
- Hava çanı kullanılması,
- Hava subapları ilavesi,

tedbirleri sayılabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Ağıralioğlu N.,** 2004. Computational Hydraulics Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul.

[2] **Aksoğan S. ve Yücel, M.,** 1984**.** Su Getirme, Kanalizasyon ve Suların Arıtılması, Cilt I ve Cilt II, İstanbul.

[3] **D.S.İ. Genel Müd.,** 2007. Cyprus Water Supply Project, Sea Croossing Static and Hydraulic Calculation Report, Transient Anlaysis, Ankara

[4]**Grace A. Robert,** 1978. Marine Outfall Systems Planning, Design, and Construction, New Jersey, United States of America. (U.S.A.)

[5] **Gunnerson Charles G., French Jonathan A.,** 1996. Wastewater Management for Coastal Cities, Springer Company, Originally Published in 1988, Washington, DC, U.S.A.

[6] **Gülhan A**., 1984. Türbin ve regülasyon karakteristikleri gözönüne alınarak hidrolik tesislerde su darbesinin etüdü, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[7] **Gürtay H.,**1985. Boru hattı düzenlerinde sayısal yolla su darbesi çözümlemesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] **He F., Yang J., Wang X.,** 2000. Condensation-Induced Steam Bubble Collapse in a Pipeline, Tsınghua Science And Technology. **4**, 424-427

[9] **İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müd.,**1995. Büyükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi ve Deniz Deşarj Hattı Proje Raporu, İstanbul

[10] **İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müd.,** 2000. Kadıköy Atıksu Ön Arıtma Tesisi ve Deniz Deşarj Hattı Proje Raporu, İstanbul

[11] **İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müd.**,1999. Küçükçekmece Atıksu Ön Arıtma Tesisi ve Deniz Deşarj Hattı Proje Raporu, İstanbul

[12] **Kourtitas Christopher G.,** 1983. Elements of Computational Hydraulics, Pentech Pres, London, United Kingdom.

[13] **Mousselli A.H.,** 1981. Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods, PennWell Publishing Company Tulsa, Oklohoma, United States of America. (U.S.A.)

[14] **Özgür C.,** 1971. Deneysel Hidromekanik, İ.T.Ü. Makina Fakültesi Sayı : 848, Cağaloğlu, İstanbul.

[15] **Öztürk İ.,** 1996. Atıksu Ön Arıtma ve Deniz Deşarjı Sistemleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[16] **Parmakian John,** 1963. Water hammer Analysis, Dover Publications Inc., Originally Published in 1963, New York U.S.A.

[17] **Roberson John A., Calyton, T. Crowe,** 1993. Engineering Fluid Mechanics, Houghton Mifflin Company, Boston, United States of America. (U.S.A.)

[18] **Roberson John A., Cassidy, Joh J., Chaudry, M. Hanif,** 1997. Hydraulic Engineering , John Willey & Sons, Inc. Newyork, United States of America. (U.S.A.)

[19] **Russel S.O. and Sheehan G.J.,** 1974**.** Effect of entrained Air on Cavitation Damage. Canadian Journal Of Civil Engineering. **1**(1), 97-107.

[20] **Ruus E.,** 1977. Charts for water hammer in pipelines with air chambers. Canadian Journal Of Civil Engineering. **4**(3), 293-313.

[21] **Saikia M. D and Sarma A.K.,** 2006. Simulation Of Water Hammer Flows With Unsteady Friction Factor, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. **4,** 35-39.

[22] **Selek B., Kirkgoz M.**, **Selek Z.**, 2004. Comparison of computed water hammer pressures with test results for the Catalan power plant in Turkey, Canadian Journal Of Civil Engineering. **31**, 78-85.

[23] **Sharp B.B. and D.B.,** 1996. Water Hammer Practical Solutions, Burnell Research Laboratory, John Willey & Sons, Inc. Newyork, United States of America.

[24] **Topacık D.,** 2000. Atıksu Arıtma Tesisleri İşletme El Kitabı, Lale Ajans Ltd. Şti., İstanbul

[25] **Ünsal İ.,** 1978. Değişken Akımların Hidroliği, Su Darbeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Hidrolik ve Su Kuvvetleri Kürsüsü, İstanbul .

[26] **Yang K., Zhang L.,** 2003. Analytical Solution for Fluid-Structure Interaction in

Liquid-Filled Pipes Subjected to Impact-Induced Water Hammer, American Society of Civil Engineers. **12** , 1408-1417

[27] **Zaruba J.,** 1993. Water Hammer In Pipe- Line Systems, Elsevier, Vltava Basin, Prague, Czechoslavakia.

ÖZGEÇMİŞ

18 Eylül 1979 ‘da İstanbul’da doğdu. Antalya Lisesinden mezun olduktan sonra Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliğinde öğrenimine devam etti. 2003 ‘de İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Kasım 2002’den beri İstanbul Büyükşehir Belediye Başkanlığı İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü Plan Proje Dairesi Başkanlığında çalışmaya devam etmektedir.