№ 6509

F: 105 Lira

SATIŞ VE DAĞITIM YERİ: İstanbul'da Devlet Kitapları Müdürlüğü ve İllerde Millî Eğitim Bakanlığı Yayınevleri

MTÖ TEMEL DERS KİTAPLARI SERİSİ

UYGULAMALI HİDROLİK ve HİDROLOJİ

Yazan
Harun Yaşar KUTOĞLU
Yük. Müh. (İ.T.Ü.)

MİLLİ EĞİTİM BASIMEVİ — İSTANBUL 1980

Millî Eğitim Bakanlığı Talim ve Terbiye Kurulu'nun 19/4/1979 gün ve 84 sayılı kararı ile Temel Ders Kitabı olarak kabul edilmesi uygun görülmüş, Yayımlar ve Basılı Eğitim Malzemeleri Genel Müdürlüğü'nün 21/5/1979 gün ve 4401 sayılı emirleri ile birinci kez 25.000 adet bastırılmıştır.

HİDROLİK VE ENERJİ MAKİNALARI DİZİSİNİ OLUŞTURAN TEMEL DERS KİTAPLARI

1. *Kitap*

   UYGULAMALI HİDROLİK ve HİDROLOJİ

2. *Kitap*

   HİDROLİK KUMANDA SİSTEMLERİ

3. *Kitap*

   TERMODİNAMİK

4. *Kitap*

   SOĞUTMA TEKNİĞİ ve KLİMA

5. *Kitap*

   TERMİK MOTORLAR

6. *Kitap*

   NÜKLEER ENERJİ

ÖNSÖZ

Teknik liselerde okutulan, öğrencileri meslek yaşamına hazırlamak amacına yönelik derslerin başında, hemen belirtelim ki, "HİDROLİK VE ENERJİ MAKİNALARI" dersi gelir. Zaten bu dersin termodinamik ve nükleer enerjiden hidrolik kumanda sistemlerine dek birçok bilim ve bilim dallarına ilişkin özgün konuları içermiş olması yargımızın doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Konuların farklılığı ve çeşitliliği, "HİDROLİK VE ENERJİ MAKİNALARI" dersi için

UYGULAMALI HİDROLİK ve HİDROLOJİ,
HİDROLİK KUMANDA SİSTEMLERİ,
TERMODİNAMİK,
SOĞUTMA TEKNİĞİ VE KLİMA,
TERMİK MOTORLAR
NÜKLEER ENERJİ,

adlı temel ders kitaplarından oluşan bir dizinin hazırlanmasını gerektirmiş, bu amaçla da Mehmet Emin Zorkun'un başkanlığında Harun Yaşar Kutoğlu, Ali Rıza Ardıç, Demir Yücelen ve Vehbi Özyurt'un katıldıkları bir komisyon oluşturulmuştur. Komisyonun ilk toplantılarında çalışma yöntemleri saptanmış, Teknik Liselerin öğretim programları incelenmiş, temel ders kitaplarının yazımında uyulacak ve uygulanacak ortak kurallar, ortak ilkeler belirlenmiştir. Daha sonra, diziyi oluşturan ders kitaplarının içeriğine kesinlik kazandırmak düşüncesiyle barajlar, hidrolik ve termik santrallar, gözlem istasyonları, takım tezgâhı ve pompa imal eden fabrikalar, soğutma tesisleri, uçak bakım-onarım merkezleri gezilmiş, buralarda çalışan mühendis ve teknisyenlerin görüşleri alınmıştır. Ayrıca ileri düzeyde sanayileşmiş ülkelerde, orta dereceli teknik öğretim kurumlarında okutulan ders kitapları gözden geçirilerek bunların bir değerlendirilmesi yapılmış ve konuların işlenmesinde yararlanılacak kaynak kitaplarla makaleler derlenmiştir. Bir yılı aşkın bir süre devam eden bu tür hazırlık çalışmalarından sonra ancak temel ders kitaplarının yazımına geçilebilmiştir.

Temel ders kitaplarının yazımında, bilgilerin hazır ortaya konulmasından kaçınılmış, "NEDEN" ve "NİÇİN" sorularının cevaplandırılmasına öncelik verilmiştir. Ayrıca konuların birbirine bağlanmasına da özen gösterilmiştir.

Yeni bilgilerin öğrenciler tarafından özümlenmesinde, daha önce kazanılmış doğru bilgilerin önemli bir yeri vardır. Bu gerçek daima gözönünde bulundurulmuş, diziyi oluşturan temel ders kitaplarına kendi içinde ayrı birer bütünlük kazandırmak düşüncesiyle de bazı konuların yinelenmesinden, değişik bir yaklaşımla ele alınıp incelenmesinden ve yorumlanmasından kaçınılmamıştır, Her temel ders kitabının yazımında olduğu gibi, "HİDROLİK VE ENERJİ MAKİNALARI" dizisini oluşturan temel ders kitaplarının yazımında da kendine özgü bazı önemli güçlüklerle karşılaşılmıştır. Özellikle, konuların seçiminde, sıralanmasında, düzeyinin belirlenmesinde ve işlenmesinde karşılaşılan bu güçlüklerin üstesinden ancak, öğrenimlerini teknik öğretim kurumlarında sürdüren gençlere yararlı olmak düşüncesiyle gelinebilmiştir. Hele yabancı teknolojinin ürünü olan araç, gereç ve organlara ad bulmakta karşılaştığımız zorluklar, uygulama alanında kullanılan birçok terimlerin tutarsızlığı yanında anlam yetersizliği çoğu zaman elimizi kolumuzu bağlamış, diziyi oluşturan temel ders kitaplarının hizmete sunulmasını geciktirmiştir.

"UYGULAMALI HİDROLİK ve HİDROLOJİ" adlı temel ders kitabı, "HİDROLİK VE ENERJİ MAKİNALARI" dersi için hazırlanan dizinin birinci kitabıdır. Bu temel ders kitabının konuları (12) bölümde incelenmiştir. Konuların işlenmesinde "BASİTTEN KARMAŞIĞA DOĞRU" ilkesi benimsenmiş, ayrıca bilgilerin özümlenmesini sağlamak düşüncesiyle her bölümün sonuna o bölümün içerdiği konulara ilişkin çözümlü problemler eklenmiştir. "UYGULAMALI HİDROLİK ve HİDROLOJİ" adlı temel ders kitabında incelenen konuların uygulama alanındaki yerini ve önemini belirlemek için verilen örneklerin ülkemizden seçilmesine özen gösterilmiştir. Temel ders kitabının yazımında Teknik Liselerde okuyan öğrencileri meslek yaşamına hazırlamak yanında baraj, baraj santralı ve gözlem istasyonu gibi işyerlerinde çalışan teknisyenlerin karşılaştıkları sorunlara çözüm getirmek de amaçlanmıştır.

Son yıllarda, ülkemizin enerji gereksiniminin doğal kaynaklardan karşılanması ilkesi benimsenmiştir. Bunun için su kaynaklarımızın hidroelektrik potansiyelinin yararlanılabilir duruma getirilmesi, geliştirilmesi ve denetimi gerekir. Su kaynaklarımızın hidroelektrik potansiyelinin yararlanılabilir duruma getirilmesi, geliştirilmesi ve denetimi çalışmalarında HİDROLİK ve HİDROLOJİ'nin yadsınması olanaksız önemli bir yeri vardır. Bu nedenle ülkemizde, hidrolik enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde görev alan teknisyenlerle ileride görev alma olasılığı bulunan öğrencilere temel bilgileri vermeyi ve bazı mesleki sorunların çözümüne katkıda bulunmayı amaçlayan "UYGULAMALI HİDROLİK ve HİDROLOJİ" adlı temel ders kitabının önemli bir boşluğu dolduracağına inanmaktayız. Bu temel ders kitabının şüphesiz eksiklikleri vardır. Uygulayıcı meslekdaşlarımızın eleştiri ve uyarıları bu eksikliklerin giderilmesinde bize yardımcı olacak ve temel ders kitabının daha yeterli, daha yetkin bir eser durumuna getirilmesini sağlayacaktır.

Mart — 1979

Mehmet Emin ZORKUN
Harun Yaşar KUTOĞLU

İ Ç İ N D E K İ L E R

BİRİNCİ BÖLÜM

— AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ —

İKİNCİ BÖLÜM

— HİDROSTATİK —

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

— SIVILARIN KİNEMATİĞİ —

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

—HİDRODİNAMİK —

BEŞİNCİ BÖLÜM

— GERÇEK SIVILARIN DİNAMİĞİ —

ALTINCI BÖLÜM

— BORULARDA AKIM —

YEDİNCİ BÖLÜM

— BORULARIN PRATİK HESABI —

SEKİZİNCİ BÖLÜM

— AÇIK KANALLARDA AKIM —

DOKUZUNCU BÖLÜM

— SIVI AKIMININ ÖLÇÜLMESİ —

ONUNCU BÖLÜM

— HİDROLİK TÜRBİNLER —

ONBİRİNCİ BÖLÜM

— POMPALAR —

ONİKİNCİ BÖLÜM

— HİDROLOJİ —

KİTAPTA KULLANILAN BAZI SİMGELERİN OKUNUŞU

α — alfa
β — beta
ε — epsilon
η — eta
γ — gama
Δ — delta
θ — teta
$\varkappa$ — kapa
λ — lamda
μ — mü
ν — nü
π — pi
ρ — ro
Σ — sigma
τ — to
Φ — fi
Ω, ω — omega

I. BÖLÜM

AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ

1) AKIŞKANLAR MEKANİĞİ ve HİDROLİK

2) AKIŞKANIN TANIMI

3) BİRİM SİSTEMLERİ

4) SIVILARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ
   a) ÖZGÜL AĞIRLIK
   b) ÖZGÜL KÜTLE
   c) YOĞUNLUK
   d) SIVILARIN SIKIŞMASI
   e) GAZLARIN SIKIŞMASI
   f) VİSKOZİTE
   g) BUHAR BASINCI
   h) YÜZEYSEL GERİLME
   i) KILCALLIK

ÖRNEK PROBLEMLER

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

I. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

a — ivme, açıklık
C.G.S. — santimetre-gram-saniye birim sistemi
E — esneklik modülü
F — kuvvet
g — yerçekimi ivmesi
G — ağırlık
H.P. — güç
k — adyabatik üs
Kw — kilovat
ln — e tabanına göre logaritma
L — uzunluk
LTF — teknik birimler sistemi
LTM — fizik birimler sistemi
M — kütle
P — basınç
P.S — beygir gücü
R — gaz sabiti
S — alan
T — zaman, mutlak sıcaklık
t — sıcaklık
U — bir noktanın hızı
V — hız, hacim
v_s — özgül hacim
y — dik eksen, ordinat ekseni boyunca uzunluk
$\propto$ — orantı
γ — özgül ağırlık
Δ — küçük değişme veya artım
μ — mutlak viskozite
ν — kinematik viskozite
ρ — özgül kütle
τ — kayma gerilmesi

AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ

1) AKIŞKANLAR MEKANİĞİ ve HİDROLİK

Doğadaki cisimler fiziksel özelliklerine göre katı, sıvı ve gaz şeklinde üç bölüme ayrılır. Sıvı ve gazlara AKIŞKAN denir. Akışkanlar mekaniği ve hidrolik durgun ve hareket halindeki akışkanların (su, hava gibi) durumunu inceler. Akışkanlar mekaniği ile hidrolik kesin bir çizgi ile birbirinden ayrılamaz. Hidrolik akışkanlar mekaniğinin pratikteki problemlere uygulanması şeklinde tanımlanabilir. Hidrolik yeryüzü ve yeraltındaki suyun hareketini inceler.

Akışkanlar mekaniği üç bölüme ayrılır :

i) Hidrostatik : Durgun akışların durumunu inceler.

ii) Kinematik : Hareket halindeki akışkanın yalnız hız ve akım çizgileri ile ilgilenir, kuvvet ve enerji düşünülmez.

iii) Hidrodinamik : Hareket halindeki akışkanın hız ve ivmeleri ile akışkana etkiyen kuvvetler arasındaki bağıntıları inceler.

Akışkanların bazı özellikleri akışkanlar mekaniğinde önemli rol oynar. Hidrostatikte özgül ağırlık önemli bir özelliktir, hidrodinamikte ise özgül kütle ve viskozite önemli özelliklerdir. Akışkan sıkıştırılabilirse termodinamik kuralları gözönünde bulundurulmalıdır.

2) AKIŞKANIN TANIMI

Akışkanlar çok küçük bir kuvvetin etkisi ile şekil değiştiren ve içinde bulundukları kabın şeklini alan cisimlerdir. Akışkanlar kolaylıkla akabilir ve sıkıştırılabilir.

Akışkanlar sıvı ve gazlar şeklinde ikiye ayrılır. Sıvı ve gazlar kendi özelliklerini taşıyan çok düşük elemanlardan oluşmuşlardır ve bunlara elemanter partikül (parçacık) denir. Elemanter partiküller birbirinden bağımsız hareket eder ve bundan dolayı kolay şekil değiştirirler. Örneğin bir bardağa konulan su kolayca bardağın şeklini alır. Katı cisimleri oluşturan maddesel noktalar birbirinden bağımsız hareket edemez.

Sıvılar pratikte sıkıştırılamaz kabul edilir. Belirli hacimleri ve serbest yüzeyleri vardır. Gazlar sıkıştırılabilir ve içinde bulunduğu kabın hacmini tamamen doldurur, serbet yüzeyleri yoktur. Sıvıların durumu yalnız hacimle belirlenebildiği halde gazların durumu basınç, hacim, sıcaklık gibi parametrelerle belirlenir. Sıvılara SIKIŞTIRILAMIYAN AKIŞKAN, gazlara SIKIŞTIRILABİLEN AKIŞKAN denir.

Sıvıların şekil değiştirmeye karşı dayanım göstermesi özelliğine VİSKOZİTE denir. Buna göre sıvılar GERÇEK (viskoz-iç sürtünmesi var) ve YETKİN (ideal-iç sürtünmesi olmıyan) SIVILAR diye iki bölüme yarılır. Durgun sıvılarda viskozite sıfırdır. Uygulamada karşılaşılan sıvıların hepsinin iç sürtünmesi vardır.

HİDROMEKANİK doğada olmıyan yetkin sıvıları inceler, bundan dolayı pratik önemi sınırlıdır. Doğadaki gerçek sıvıların ve özellikle suyun hareketini HİDROLİK inceler. Konumuz Hidrolik ve Hidroloji olduğuna göre bundan sonraki bölümlerde sıvıların ve özellikle suyun durumu incelenecektir. Hemen belirtelimki doğadaki suyun oluşumunu, suyun zaman ve alansal dağılımını HİDROLOJİ inceler. Bundan dolayı Hidrolik ve Hidroloji arasında yakın ilişki vardır.

3) BİRİM SİSTEMLERİ

Hidrolikteki büyüklükleri ölçmeye yarayacak birimleri saptamak gerekir. Fizikte karşılaşılan tüm büyüklükler aralarından üçü aracılığı ile belirlenebildiğine göre esas birimleri saptamak önemli bir sorundur. Esas birimlerin bağlı oldukları temel büyüklükler olarak UZUNLUK (L), ZAMAN (T), KUVVET (F) ve KÜTLE (M) alınır. Diğer bütün büyüklüklerin birimleri bu esas birimlerden türetilebilir.

Fizikte uzunluk birimi METRE, zaman birimi SANİYE ve kütle birimi KİLOGRAM esas birimler olarak seçilmiştir. Bu esas birimlerin oluşturdukları ölçüm düzenine FİZİK BİRİMLER SİSTEMİ (LTM) denir. Diğer büyüklüklerin birimleri bu üç esas birimden türetilebilir, birim hacim (m^3), alan (m^2), ivme (m/sn^2) gibi. Kütle birimi kilogram (+ 4°C) sıcaklıkta (1 dm^3) saf suyun kütlesidir.

Teknikte uzunluk birimi METRE, zaman birimi SANİYE ve kuvvet birimi KİLOGRAM esas birim alınmıştır. Üç esas birimin oluşturdukları ölçüm düzenine TEKNİK BİRİMLER SİSTEMİ (LTF) denir. Kuvvet birimi kilogram (+ 4°C) sıcaklıkta (1 dm^3) saf suyun yerçekimi ivmesi altındaki ağırlığıdır. Bir cisme etkiyen yerçekimi kuvvetine ağırlık denir. Hidrolikte teknik birimler sistemi kullanılır. Sıvının hareketini belirlemek için üç esas birim yeterlidir, (LTM) veya (LTF) sistemi olabilir, hidrolikte (LTF) sistemi kabul edilmiştir.

(LTM) ve (LTF) sistemlerindeki esas birimler Newton'un ikinci hareket kanununa göre bağlantılıdır. Bu kanuna göre sürtünmesiz bir cisme etkiyen kuvvet (F) cisme sabit bir ivme (a) kazandırır ve aralarınla aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\text{Kuvvet } (F) = \text{Kütle } (M) \,.\, \text{İvme } (L/T^2)$$

Eğer kütle temel büyüklük olarak seçilmişse kuvvet (ML/T^2) biriminde olacaktır.

Bu eşitlikteki kütle cismin ağırlığı ile orantılı bir büyüklüktür, fakat ağırlığa özdeş değildir.

$$F = M \,.\, a$$

eşitliğinde kuvvet temel büyüklük seçilsin, teknik birimler sisteminde kuvvet birimi kg, ivme birimi (m/sn^2) olduğu için kütle birimi,

$$F\ (kg) = M \,.\, a\ (m/sn^2)$$

eşitliğinden ($kg.sn^2/m$) bulunur.

C.G.S. (Santimetre-Gram-Saniye) birim sisteminde uzunluk (cm.), kütle (gr.) ve zaman (sn.) birimindedir. Bu birim sisteminde kuvvet birimi din (dyne)'dir.

Bir cismin ağırlığı (G) ile kütlesi (M) arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$G = M \,.\, g$$

(g) yerçekimi ivmesidir. Yerçekimi kuvveti bütün cisimlere aynı ivmeyi kazandırdığı için yukarıdaki eşitlik yazılmıştır. ($g = 9{,}81\ m/sn^2$) olduğu için (9,81 kg) ağırlığındaki bir cismin kütlesi (1 kg. sn^2/m) olur. Teknik birimler sisteminde bir cisim (1 kg) kuvvetle etkilendiği zaman (1 m/sn^2) lik ivme kazanırsa cismin kütlesi kütle birimi (1 kg. sn^2/m) kabul edilir.

Teknik birimler sistemindeki kuvvet birimi (kg) ile fizik birimler sistemindeki kütle birimi (kg) birbirine karıştırılmamalıdır. Birim sistemleri (Tablo 1.1)'de ve birim sistemlerinin birbirine dönüştürülmesi (Tablo 1.2)'de gösterilmiştir.

4) SIVILARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

a) ÖZGÜL AĞIRLIK

Bir cismin birim hacminin ağırlığına özgül ağırlık denir ve (γ) ile gösterilir. Pratikte sıvıların özgül ağırlığı sabit alınabilir. Özgül ağırlık,

$$\gamma = \frac{\text{Ağırlık}}{\text{Hacim}} = \frac{G\ (kg)}{V\ (m^3)}$$

şeklinde tanımlanabilir.

Teknik birimler sisteminde (+ 4°C) sıcaklıkta (1 m^3) saf suya etkiyen yerçekimi kuvvetinin değeri (1000 kg) veya (1 cm^3) saf suya etkiyen yerçekimi kuvvetinin değeri (1) gramdır. Buna göre teknik birimler sisteminde saf suyun özgül ağırlığı ($\gamma = 1000$ kg/m^3) veya ($\gamma = 1$ gr/cm^3)'dür.

Gazların özgül ağırlığı aşağıda verilen durum denkleminden hesaplanır.

$$\frac{P \cdot v_s}{T} = R$$

Bu eşitlik Boyle ve Charles kanunu olarak bilinir ve eşitlikteki terimlerin anlamı şöyledir.

P : Mutlak basınç, (kg/m^2)

v_s : Özgül hacim, birim ağırlığın hacmi, (m^3/kg)

T : Mutlak sıcaklık, (°K)

R : Gaz sabiti (kg.m/kg. °K)

Hava için (R = 29,3 kg.m/kg. °K) alınabilir.

Özgül ağırlık (γ) ile özgül hacim (v_s) arasında aşağıdaki ilişki,

$$\gamma = \frac{1}{v_s}$$

yazılabilir.

TABLO 1.1 — Birim Sistemleri

Cinsi	C.G.S. Sistemindeki birim veya boyutu	Teknik Birimler Sistemindeki Birim veya boyutu
Uunluk	cm (santimetre)	m (metre)
Kütle	gr (gram)	Kg.sn^2/m
Zaman	sn (saniye)	sn. (Saniye)
Alan	cm^2	m^2
Hacim	cm^3	m^3
Özgül Hacim	cm^3/gr	m^3/Kg
Hız	cm/sn	m/sn
Radyan Açı	Radyan	Radyan
Açısal Hız	Radyan/sn	Radyan/sn
İvme	cm/sn^2	m/sn^2
Debi	cm^3/sn	m^3/sn
Kuvvet	Din = gr. cm/sn^2	Kg
Özgül Ağırlık	gr/cm^3	Kg/m^3
Yoğunluk	Boyutsuz	Boyutsuz
Özgül Kütle	gr.sn^2/cm^4	kg.sn^2/m^4
Basınç	Bar = 1 din/cm^2	Kg/m^2
İş veya Enerji	Erg	Kg.m
Güç	Erg/sn	Kg.m/sn
Esneklik Modülü	Din/cm^2 = gr/cm.sn^2	Kg/m^2
Dinamik Viskozite	gr.sn/cm^2	Kg.sn/m^2
Kinematik Viskozite	cm^2/sn	m^2/sn
Yüzeysel Gerilme	Din/cm	Kg/m
Kayma Gerilmesi	Din/cm^2	Kg/m^2
Moment veya Uyarım	Din.sn	Kg.sn
Reynolds Sayısı	Boyutsuz	Boyutsuz

TABLO 1.2 — Amerikan ve İngiliz Ölçü Sistemleri ile Metrik Sistemin Birbirlerine Dönüşüm Cetvelleri

UZUNLUK ÖLÇÜLERİ

Cinsi	Inch (İnç) = Parmak	Foot (Fut) = Ayak	Cm.	m.
1 Parmak	1	0.0833	2.54	0.0254
1 Ayak	12	1	30.48	0.3048
1 kara mili	63360	5280	—	1609
1 deniz mili	72960	6080	—	1853
1 cm.	0.3937	0.0328	1	0.01
1 m.	39.37	3.281	100	1

ALAN ÖLÇÜLERİ

Cinsi	Parmak kare	Ayak kare	cm²	m²
1 inç kare	1	—	6.452	—
1 ayak kare	144	1	929	0.0929
1 mil kare	—	—	—	2.59×10^6
1 cm²	0.155	—	—	0.0001
1 m²	1550	10.76	10000	1
1 ha (hektar)	—	—	—	10000

HACİM ÖLÇÜLERİ

Cinsi	Parmak küp	Ayak küp	cm³	m³
1 İnç küp	1	—	16.39	—
1 Ayak küp	1728	1	28320	0.0283
1 cm³	0.061	—	1	—
1 m³	61020	35	10^6	1

(Devamı Var)

(Tablo 1.2 Devamı)

AĞIRLIK ÖLÇÜLERİ

Cinsi	Ounce (Oz)	Libre (pound)	gr.	Kg.
1 Oz	1	0.0625	28.35	0.028
1 lb (Libre)	16	1	453.6	0.454
1 gr.	0.0353	—	1	0.001
1 Kg.	35.27	2.205	1000	1
1 ton	35274	2204.6	—	1000

GÜÇ ÖLÇÜLERİ

Cinsi	Kw	P.S	H.P	Kg.m/sn
1 Kw (kilovat) = 1000 w	1	1.36	1.34	102
1 P.S (Beygir Gücü - B.B)	0.735	1	0.986	75
1 H.P (Horse Power)	0.746	1.014	1	76.1
1 Kg.m/sn	9.81×10^{-3}	1.33×10^{-2}	1.31×10^{-2}	1

BASINÇ ÖLÇÜLERİ

Cinsi	(Fiziki atmosfer) atm	(Teknik atmosfer) at	Torr	(Bar) b
1 atm (760mm civa sütunu)	1	1.0332	760	1.0133
1 at	0.9678	1	735.56	0.9807
1 Torr (1mm civa sütunu)	1.316×10^{-3}	1.359×10^{-3}	1	—
1 Bar (10^6 din/cm²)	0.9869	1.0197	750.06	1

$$\frac{P \cdot v_s}{T} = R$$

eşitliğinde (v_s) yerine $\left(v_s = \frac{1}{\gamma}\right)$ konur ve (γ) yalnız bırakılırsa aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\gamma = \frac{P}{RT}$$

Gazların özgül ağırlığı yukarıdaki denklemden hesaplanır.

b) ÖZGÜL KÜTLE

Bir cismin birim hacminin kütlesine özgül kütle denir ve (ρ) ile gösterilir. Özgül kütle,

$$\rho = \frac{\text{Kütle}}{\text{Hacim}} = \frac{M\ (kg \cdot sn^2/m)}{V\ (m^3)}$$

eşitliğinden hesaplanabilir.

$(+\ 4°C)$ sıcaklıkta $(1\ m^3)$ saf suyun kütlesi suyun özgül kütlesi olur. Suyun özgül ağırlığı (γ) ile ve özgül kütlesi (ρ) ile gösterilirse (γ) ile (ρ) arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Bu formülde (g) yer çekimi ivmesidir.

Suyun özgül ağırlığı ve özgül kütlesi sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bu nedenle suyun özgül ağırlığı ve özgül kütlesi belirlenirken sıcaklığı gözönünde bulundurulur. (Tablo 1.3')de suyun sıcaklığı ile özgül ağırlığı ve özgül kütlesi arasındaki ilişki verilmiştir. Pratikteki hidrolik problemleri çözümlenirken suyun özgül ağırlığı $(\gamma = 1000\ kg/m^3)$ ve özgül kütlesi $\left(\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000}{9{,}81} = 102\ kg \cdot sn^2/m^4\right)$ alınır. Deniz suyunda tuz vardır ve bundan dolayı örneğin Karadeniz suyunun özgül ağırlığı $(\gamma = 1018{,}5\ kg/m^3)$ ve Akdenizinki $(\gamma = 1040\ kg/m^3)$ alınır.

c) YOĞUNLUK

Bir sıvının özgül ağırlığının $(+\ 4°C)$ sıcaklıktaki suyun özgül ağırlığına bölünmesinden bulunan orana suya göre yoğunluk veya cismin yoğunluğu denir. Bu tanıma göre yoğunluk boyutsuz bir sayıdır.

d) SIVILARIN SIKIŞMASI

Sıvılar pratikte sıkıştırılamıyan akışkan olarak kabul edilir. Örneğin su büyük kuvvetlerle sıkıştırıldığı zaman hacminde çok küçük bir değişiklik meydana gelir. Suyun hacmi $(200\text{x}10^4\ kg/m^2)$ lik basınç altında (% 1) oranında azalır. Buna rağmen hidrolik gereçler projelendirilirken bazı hallerde sıkıştırılan suyun hacmindeki değişme gözönünde bulundurulur.

Hacmi (V) olan su atmosfer basıncı altında ve sabit sıcaklıkta tutulurken sıkıştırılırsa hacmi küçülür, fakat özgül kütlesi artar. Sıkıştırma basıncı (ΔP) kadar artırıldığında suyun hacmi (ΔV) kadar azalır ve özgül kütlesi $(\Delta\rho)$ kadar artar. Su elastik bir cisim gibi düşünülürse ve ESNEKLİK MODÜLÜ (E) ile gösterilirse aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta P}{E}$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{E}$$

Hidrolikte esneklik modülü şöyle tanımlanır: Sıkıştırılan sıvının hacminin kendi hacmi kadar küçülmesini sağlıyan sıkıştırma basıncıdır. Eğer (P) basıncı (P_1, P_2) ve (ρ) özgül kütlesi (ρ_1, ρ_2) aralığında tanımlanmışsa $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{E}\right)$ denkleminin integrali alınarak şu bağıntı bulunur.

$$P_2 - P_1 = E \cdot \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$$

Teknik birimler sisteminde esneklik modülü (E)'nin birimi (kg/m^2)'dir.

Suyun sıcaklığı ile esneklik modülü arasındaki ilişki (Tablo 1.3)'de verilmiştir.

e) GAZLARIN SIKIŞMASI

Gazların sıkışması termodinamik kanunlarına göre olur. Aynı gaz kütlesi iki ayrı koşulda kalırsa $\left(\frac{P}{\gamma \cdot T} = R\right)$ eşitliği aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\frac{P_1}{\gamma_1 \cdot T_1} = \frac{P_2}{\gamma_2 \cdot T_2} = R$$

Bu eşitlikte (P) mutlak basınç, (γ) özgül ağırlık, (T) mutlak sıcaklık, (R) gaz sabitidir. (1) ve (2) endisleri (1.) ve (2.) koşulda bu terimlerin değerleridir.

İZOTERMAL koşullarda sıcaklık sabittir, ($T_1 = T_2$). Bu durumda yukardaki eşitlik,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \text{sabit}$$

şeklinde yazılabilir.

İzotermal koşullarda gazın esneklik modülü (E) aşağıdaki gibi olur.

$$-\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta P}{E} \quad \text{veya} \quad E = P$$

ADYABATİK koşullarda ısı alışverişi yoktur. Basınç ile özgül ağırlık arasında aşağıdaki ilişki vardır:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^k = \text{sabit}$$

Bu eşitlikte k adyabatik üstür, hava için ($k = 1.41$) alınır.

$\left(\frac{P_1}{\gamma_1 . T_1} = \frac{P_2}{\gamma_2 . T_2} = R\right)$ eşitliğinden $\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$ çözülür ve $\left(\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^k\right)$ konursa

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}$$

eşitliği elde edilir.

Adyabatik koşullarda gazın esneklik modülü (E) aşağıdaki gibi olur.

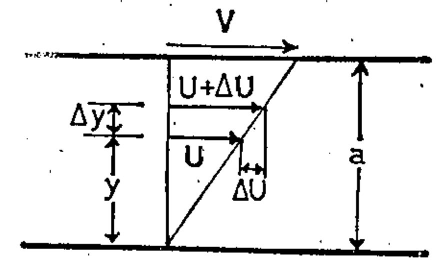
$$-\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P}{k . P} = \frac{\Delta P}{E} \quad \text{veya} \quad E = k . P$$

Bazı gazların (γ), (ρ) ve (k) değerleri (Tablo 1.4)'de verilmiştir.

f) VİSKOZİTE

Hareket halindeki sıvı yatakları arasında oluşan sürtünme kuvvetinin teğetsel bileşenine karşı sıvının gösterdiği dirence viskozite denir. Diğer bir tanıma göre hareket halindeki sıvı yatakları arasındaki sürtünme direncine viskozite denir.

Viskozite kavramına açıklık kazandırabilmek için (Şekil 1.1)'de gösterildiği şekilde birbirine paralel iki geniş plak alınır. Plaklardan biri sabit diğeri hareketlidir. Plaklar arasındaki açıklık (a) ile gösterilmiştir ve aralarındaki boşluk sıvı ile doludur.



Şekil 1.1

Üstteki plak'a sabit bir (F) kuvvetin etkidiğini ve (V) hızı ile hareket ettiğini varsayalım, alttaki plak hareketsizdir. Bu durumda sıvı yatakları birbiri üzerinden kayarlar ve sıvının hareketine laminer akım denir. Üstteki plak ile temasta olan sıvı plak'ın (V) hızı ile hareket eder. Alttaki sabit plak ile temasta olan sıvının hızı sıfırdır. Plaklar arasındaki (a) uzaklığı ve (V) hızı çok büyük değilse sıfır ile (V) arasında hız değişimi çizgiseldir ve hızın değeri alt plaktan olan mesafe ile orantılıdır. O halde bir noktadaki (U) hızını aşağıdaki şekilde belirleyebiliriz.

$$U = \frac{y}{a} \cdot V$$

Böyle bir hareketin olabilmesi için üst plak'a etkiyen teğetsel kuvvet ile sıvı içerisindeki sürtünme dengede olmalıdır. Yapılan deney sonuçlarına göre birim plak yüzeyine düşen kuvvet hız ile orantılı, ara uzaklık (a) ile ters orantılıdır. Birim yüzeye gelen KAYMA KUVVETİ (τ) ile gösterilir, $\left(\tau = \frac{F}{S}\right)$, ve ($\tau$)'ya KAYMA GERİLMESİ denir. (F) plak'a etkiyen teğetsel kuvvet ve (S) plak alanıdır. (τ) aşağıda gösterildiği şekilde $\left(\frac{V}{a}\right)$ ile orantılıdır.

$$\tau \propto \frac{V}{a}$$

(Şekil 1.1) deki benzer üçgenlerden:

$$\frac{V}{a} = \frac{\Delta U}{\Delta y}$$

yazılabilir. Yukardaki (τ) ifadesinde $\left(\frac{V}{a}\right)$ yerine $\left(\frac{\Delta U}{\Delta y}\right)$ konursa

$$\tau \propto \frac{\Delta U}{\Delta y}$$

olur. Bu eşitlikte oran katsayısı (μ) ile gösterilirse aşağıdaki denklem yazılır.

$$\tau = \mu \, \frac{\Delta U}{\Delta y} \quad \text{veya} \quad \mu = \frac{\tau}{\Delta U/\Delta y}$$

(μ)'ye MUTLAK VİSKOZİTE veya DİNAMİK VİSKOZİTE denir. (μ) sıvının cinsine bağlıdır. $\left(\tau = \mu \, . \, \frac{\Delta U}{\Delta y}\right)$ eşitliğine uyan sıvılara NEWTON SIVILAR denir, bazı ağır sıvılar bu bağıntıya uymaz. $\left(\tau = \mu \, . \, \frac{\Delta U}{\Delta y}\right)$ eşitliğinde $\left(\tau = \frac{F}{S}\right)$ konursa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$F = S . \mu . \frac{\Delta U}{\Delta y}$$

Bu bağıntıya Newton formülü denir.

Dinamik viskozite (μ)'nin teknik birimler sisteminde birimi (kg . sn/m²) dir, aşağıdaki eşitlikte kısaltmalar yapılarak bu sonuç bulunur.

$$\mu \; (kg \, . \, sn/m^2) = \frac{\tau \; (kg/m^2)}{\frac{\Delta U \; (m/sn)}{\Delta y \; (m)}}$$

C.G.S. sisteminde kuvvet birimi din (1 din = 1 gr/981 cm/sn²), alan birimi (cm²), hız birimi (cm/sn) ve uzunluk birimi (cm) olduğundan bu birim sisteminde dinamik viskozite (μ) nin birimi (din . sn/cm²) dir, (1 din . sn/cm² = 1 poise) denir.

C.G.S. sisteminde verilmiş (μ_{CGS}) değeri aşağıdaki bağıntı ile teknik birimler sistemine (μ_{teknik}) dönüştürülebilir.

$$\mu_{teknik} = \frac{\mu_{CGS}}{98{,}1}$$

Dinamik viskozitenin özgül kütleye oranına KİNEMATİK VİSKOZİTE denir ve (ν) ile gösterilir. Sıvının dinamik viskozitesi (μ) ve özgül kütlesi (ρ) ise kinematik viskozite aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Teknik birimler sisteminde kinematik viskozite birimi (m²/sn) dir, aşağıdaki eşitlikte gerekli kısaltmalar yapılırsa bu sonuç bulunur.

$$\nu \; (m^2/sn) = \frac{\mu \; (kg \, . \, sn/m^2)}{\rho \; (kg \, . \, sn^2/m^4)}$$

C.G.S. sisteminde kinematik viskozite birimi (cm²/sn) dir, (1 cm²/sn = 1 stok) denir. CGS sisteminde verilmiş (ν_{CGS}) değeri aşağıdaki bağıntı ile teknik birimler sistemine (ν_{teknik}) dönüştürülür.

$$\nu_{teknik} = 10^{-4} \, . \, \nu_{CGS}$$

Sıvıların viskozitesi sıcaklık arttıkça azalır, fakat basınç değişimine bağlı olarak viskozitede önemli bir değişme olmaz. Su için (μ) ve (ν) değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Tablo 1.3) de gösterilmiştir. Suyun viskozitesinin sıcaklıkla değişmesi aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$\mu_{su} = \frac{1{,}83 \, . \, 10^{-4}}{1 + 0{,}036t + 0{,}000185t^2} \; (kg \, . \, sn/m^2)$$

Gazların viskozitesi sıvıların tersine sıcaklıkla artar. Gazların viskozitesi de basınç değişiminden etkilenmez. Gazların özgül ağırlığı basınç değişimi (sıcaklık sabit) ile değiştiğinden kinematik viskoziteleri basınçla ters orantılı olarak değişir.

Havanın (μ) ve (ν) değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Tablo 1.5) de verilmiştir.

g) BUHAR BASINCI

Sıvılar sıcaklık etkisi ile buharlaşır ve buhar molekülleri sıvı çevresindeki boşluğa yayılır. Sıvı çevresindeki boşluk kapalı ise buraya yayılan buhar molekülleri kısmi basınç oluşturur. Buhar moleküllerinin kısmi basıncına buhar basıncı denir. Buhar basıncı sıcaklıkla artar. Buharlaşma ile sıvıdan ayrılan moleküller ile sıvıya dönen moleküller sayısı birbirine eşit ise doyma olur. Bu denge koşulundaki buhar basıncına doymuş buhar basıncı denir. Suyun çeşitli sıcaklıklardaki doymuş buhar basıncı değerleri (Tablo 1.3), de verilmiştir.

h) YÜZEYSEL GERİLME

Sıvı içindeki bir molekül her yönde çekme kuvvetlerinin etkisi altındadır ve bu kuvvetlerin toplamı sıfırdır. Sıvı moleküllerinin kendi aralarındaki çekme kuvvetine KOHEZYON ve sıvı molekülleri ile bir katı cisim molekülleri arasındaki çekme kuvvetine ADHEZYON denir.

Sıvı yüzeyindeki moleküller sıvı içindeki moleküller tarafından kohezyonla sıvı içine doğru çekilir. Bu çekme kuvveti sıvı yüzeyine diktir ve sıvı yüzeyini küçültmeye çalışır. Sıvı içindeki bir molekül sıvı yüzüne gelebilmesi için çekme kuvvetini karşılayacak enerjiye sahip olmalıdır. Sıvı yüzündeki molekül içteki molekülden daha fazla enerjiye sahiptir.

Birim yüzey alanı teşkil etmek için sıvı içinden sıvı yüzeyine getirilmesi gerekli moleküllerin kohezyona karşı yaptığı işe yüzeysel gerilme denir ve birimi (kg/m)'dir. Hidrolikte yüzeysel gerilme genellikle ihmal edilir. Örneğin su ile hava arasında yüzeysel gerilme değeri (76 din/cm) dir, sıcaklık artarsa gerilme değeri azalır. Yüzeysel gerilme, yüzey üzerinde birim uzunluğa etki eden teğetsel kuvvet şeklinde düşünülebilir.

i) KILCALLIK

Kılcal borularda sıvının yükselmesi veya düşmesi yüzey gerilmesinden dolayı olur. Yükselme veya düşme sıvının kohezyon ve adhezyonuna bağlıdır. Adhezyon kohezyondan büyükse, su gibi, böyle sıvılara ıslatan sıvılar denir ve sıvı kılcal boruda yükselir. Eğer sıvı kohezyonu adhezyonundan büyükse, civa gibi, bu sıvılara ıslatmayan sıvılar denir ve sıvı kıcal boruda düşer. Boru çapı (1 cm) den küçük olduğu zaman kılcallık önem kazanır.

Tablo 1.3 — Suyun Sıcaklığı İle Özgül Ağırlık, Özgül Kütle, Esneklik Modülü, Dinamik Viskozite, Kinematik Viskozitesi ve Buhar Basıncının Değişimi

Sıcaklık °C	Özgül Ağırlık γ Kg/m³	Özgül Kütle ρ Kg.sn²/m⁴	Esneklik Modülü E Kg/m²	Dinamik Viskozite $\mu \times 10^6$ Kg.sn/m²	Kinematik Viskozite $\nu \times 10^6$ m²/sn	Buhar basıncı kg/m²
0	999.9	101.92	1.99×10^8	182.6	1.79	62.3
4	1000	101.94	2.02×10^8	160.5	1.58	82.9
10	999.7	101.91	2.07×10^8	132.8	1.30	125.1
20	998.2	101.76	2.15×10^8	102.6	1.01	238.3
30	995.6	101.50	2.19×10^8	81.5	0.80	432.5
40	992.2	101.15	2.20×10^8	66.7	0.66	720.
50	988.1	100.72	2.22×10^8	56.1	0.56	1210.
60	983.2	100.23	2.23×10^8	48.1	0.48	1960.
70	977.8	99.68	2.24×10^8	41.6	0.42	3070.
80	971.8	99.07	2.25×10^8	36.5	0.37	4670.
90	965.3	98.40	—	32.1	0.33	6920.
100	958.4	97.69	—	28.1	0.29	10000.
150	917.2	93.50	—	—	—	42750.

Tablo 1.4 — Bazı Gazların Özgül Ağırlık, Özgül Kütle ve Adyabatik Üs Değerleri (Normal atmosfer basıncında ve 15.6 °C Sıcaklıkta)

Gaz	Özgül Ağırlık γ Kg/m³	Özgül Kütle ρ Kg.sn²/m⁴	Adyabatik Üs k
Hava	1.22	0.124	1.41
Hidrojen	0.085	0.0087	1.40
Oksijen	1.35	0.138	1.40
Asetilen	1.11	0.113	1.26
Amonyak	0.73	0.074	1.31
Metan	0.68	0.069	1.32

Tablo 1.5. — Havanın Sıcaklığı ile Özgül Ağırlık, Özgül Kütle, Dinamik Viskozite, Kinematik Viskozitesinin Değişimi

Sıcaklık °C	Özgül Ağırlık γ Kg/m³	Özgül Kütle ρ Kg.sn²/m⁴	Dinamik Viskozite $\mu \times 10^6$ Kg.sn/m²	Kinematik Viskozite $\nu \times 10^6$ m²/sn
—10	1.342	0.137	1.71	12.45
0	1.293	0.132	1.75	13.30
5	1.270	0.130	1.78	13.74
10	1.249	0.127	1.81	14.17
15	1.226	0.125	1.83	14.65
20	1.205	0.123	1.86	15.10
30	1.166	0.119	1.91	16.00
40	1.129	0.115	1.95	16.95
50	1.093	0.112	2.00	17.96
60	1.060	0.108	2.05	18.94
80	1.000	0.102	2.14	20.95
100	0.946	0.096	2.23	23.10
500	0.457	0.047	3.64	78.20

ÖRNEK PROBLEMLER

1) (100 °C) sıcaklıktaki havanın mutlak basıncı (6000 kg/m²) ve gaz sabiti (R = 29,3 kg . m/kg . °K) olduğuna göre özgül ağırlığını, özgül kütlesini ve özgül hacmini hesaplayınız.

ÇÖZÜM :

$$P . v_s = R . T \quad \text{veya} \quad \frac{P}{\gamma} = R . T$$

eşitliğinden (γ) özgül ağırlık çözülür.

$$\gamma = \frac{P}{R . T} = \frac{6 . 10^3}{29{,}3\ (100 + 273)} = 0{,}549\ \text{kg/m}^3$$

Özgül kütle (ρ),

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{0{,}549}{9{,}81} = 0{,}055\ \text{kg . sn}^2/\text{m}^4$$

bulunur. (v_s) Özgül hacim,

$$v_s = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{0{,}549} = 1{,}821\ \text{m}^3/\text{kg}$$

bulunur.

2) (400 dm³) hacmindeki bir yağın ağırlığı (360 kg) olduğuna göre özgül ağırlığı ve özgül kütlesini hesaplayınız.

ÇÖZÜM :

Özgür ağırlık (γ),

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{360}{400} = 0{,}90\ \text{kg/dm}^3 = 900\ \text{kg/m}^3$$

bulunur. (ρ) özgül kütle,

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{900}{9{,}81} = 91{,}74\ \text{kg . sn}^2/\text{m}^4$$

bulunur.

3) (0°C) sıcaklıkta (2 dm³) su (200 . 10⁴ kg/m²) lik basınç altında sıkıştırıldığı zaman hacmindeki değişmeyi hesaplayınız. Suyun esneklik modülü (E = 1,99 . 10⁸ kg/m²) verilmiştir.

ÇÖZÜM :

(ΔV) suyun hacmindeki değişme

$$\Delta V = -\frac{V . \Delta P}{E} = -\frac{2 . 10^{-3} . 200 . 10^4}{1{,}99 . 10^8} = -\frac{4000}{1{,}99 . 10^8} = -2 . 10^{-5}\ \text{m}^3$$

bulunur.

4) (20 °C) sıcaklıktaki suyun dinamik vizkozitesi (0,01008 poise) olduğuna göre dinamik viskoziteyi (kg . sn/m²) biriminde hesaplayınız. Suyun (20°C) sıcaklıkta özgül ağırlığı (998,2 kg/m³) olduğuna göre kinematik viskoziteyi (m²/sn) biriminde hesaplayınız.

ÇÖZÜM :

(μ) dinamik viskozite,

$$0{,}01008\ \text{poise} = 0{,}01008\ \text{din . sn/cm}^2$$

$$\mu_{teknik} = \frac{\mu_{CGS}}{98{,}1} = \frac{0{,}01008}{98{,}1} = 103 . 10^{-6}$$

$$\mu = 103 . 10^{-6}\ \text{kg . sn/m}^2$$

bulunur. (ν) kinematik viskozite,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\gamma/g} = \frac{\mu . g}{\gamma} = \frac{103 . 10^{-6} . 9{,}81}{998{,}2} = 1{,}012 . 10^{-6}$$

$$\nu = 1012 . 10^{-9}\ \text{m/sn}^2$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Akışkanın tanımını yapınız. Akışkanlar kaç bölüme ayrılır?
2) Akışkanlar mekaniği kaç bölüme ayrılır? Her bölümün tanımını yapınız.
3) Gerçek sıvılarla yetkin sıvılar arasındaki farkı belirtiniz.
4) Fizik ve teknik birimler sistemleri arasındaki farkı belirtiniz.
5) Newton'un ikinci hareket kanununu açıklayınız:
6) Özgül ağırlık ve özgül kütlenin tanımını yapınız.
7) Özgül ağırlık ile yoğunluk arasındaki farkı belirtiniz.
8) Viskozite nedir? Kaç türlü viskozite vardır?
9) Kayma gerilmesi nedir?
10) Doymuş buhar basıncı nedir?
11) Islatan ve ıslatmayan sıvıların tanımını yapınız.

II. BÖLÜM

HİDROSTATİK

II. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

D — çap
F — kuvvet, hidrostatik kuvvet, itme etkisi
G — ağırlık merkezi
h — sıvı derinliği, basınç yüksekliği, sıvı yüksekliği
h_g — ağırlık merkezinin derinliği
I_0 — yatay eksene göre eylemsizlik momenti
I_g — ağırlık merkezinden geçen ve yatay eksene paralel eksene göre eylemsizlik momenti
L — uzunluk
M — itme etkisi merkezi
P — basınç
P_{at} — atmosfer basıncı
P_{mut} — mutlak basınç
r — yarıçap
S — alan
V — hacım
X — yatay eksen, absis ekseni boyunca uzunluk
W — ağırlık
y_g — ağırlık merkezinin yatay eksenden uzaklığı
y_m — itme etkisi merkezinin yatay eksenden uzaklığı
z — düşey eksen, absis ve ordinat eksenlerine dik eksen boyunca uzunluk, kıyaslama düzleminden uzaklık
γ — özgül ağırlık
Δ — küçük değişme veya artım
θ — açı
π — daire çevresinin çapına oranı
Σ — toplam

HİDROSTATİK

1) GİRİŞ :

Hidrostatik hareketsiz sıvıların denge koşullarını inceler. Sıvılar YETKİN ve GERÇEK SIVILAR şeklinde ikiye ayrılır. Yetkin sıvıların hareketinde sıvı yatakları arasında sürtünme direnci yoktur. Hareket halindeki gerçek sıvıların sıvı yatakları arasında sürtünme direnci vardır. Hidrostatik hareketsiz sıvıları incelediği için yetkin sıvılarla gerçek sıvılar şeklinde sıvıların ayırımı yapılmaz.

2) BASINÇ

Hareketsiz sıvı temas ettiği yüzeye dik kuvvetle etkir. Birim alana gelen dik kuvvete SIVI BASINCI denir. Hareketsiz sıvı içinde küçük bir (ΔS) alanına sıvının yaptığı etki (ΔF) ise bu alanın ortalama basıncı (P) aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta S}$$

Toplam (S) alanına (F) kuvveti düzgün bir şekilde yayılmışsa basınç,

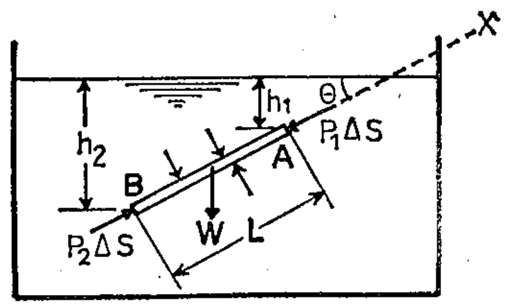
$$P = \frac{F}{S}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Hareketsiz sıvı içinde bir noktadaki basınç, bu noktanın bulunduğu yüzey elemanına diktir, bu noktaya komşu yüzey elemanlarına aynı şiddetle etkir, bütün doğrultu ve yönlerde aynı değere sahiptir.

3) BASINÇ FARKI

Hareketsiz sıvı içinde yükseklikleri farklı iki nokta arasındaki basınç farkı iki nokta arasındaki yüksekliğe bağlıdır. Basınç ile yükseklik arasındaki ilişkiyi belirlemek için (Şekil 2.1)'de gösterilen (AB) sıvı prizmasını inceleyelim. Sıvının özgül ağırlığı (γ), prizmanın ekseni (X) eksen doğrultusunda olsun. Sıvı sıkıştırılamıyan akışkandır, yani (γ = sabit)'tir. (AB) prizmasının ekseninin sıvı serbest yüzü ile yaptığı açı (θ) ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1

Prizmanın uzunluğu (L), kesit alanı (ΔS) ve hacmi (ΔV) olsun. Prizma kendi ağırlığı ve diğer sıvı partiküllerinin (AB) prizmasına etkileri altında dengededir. (A) ve (B) noktalarındaki basınçlar (P_1) ve (P_2) ise bu uçlarda etki eden kuvvetler ($P_1 . \Delta S$) ve ($P_2 . \Delta S$) olur. (AB) sıvı prizmasının (W) ağırlığı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$W = \gamma . \Delta V = \gamma . L . \Delta S$$

(AB) prizmasının yan yüzlerine etkiyen kuvvetler yüzlere diktir ve (X) ekseni doğrultusunda bileşkeleri sıfırdır. (AB) prizması dengede olduğundan prizmaya etki eden kuvvetlerin (X) doğrultusundaki bileşkeleri toplamı sıfırdır. (W) ağırlık kuvvetinin (X) doğrultusundaki bileşkesi,

$$W_x = \gamma . L . \Delta S . \sin\theta$$

şeklinde ifade edilir. (X) ekseni aşağıdan yukarı doğru yönlendirilirse (AB)'ye etkiyen toplam kuvvetlerin bu yöndeki bileşkeleri toplamı aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$P_2 . \Delta S - P_1 . \Delta S - \gamma . L . \Delta S . \sin\theta = 0$$

(A) ve (B) noktalarının sıvı yüzünden uzaklığı (h_1) ve (h_2) dir ve aşağı doğru yönlendirilmişlerdir. ($h_2 - h_1$) farkı

$$h_2 - h_1 = L . \sin\theta$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifade yukarıdaki denklemde yerine konur ve (ΔS) kısaltılırsa,

$$P_2 - P_1 = \gamma\ (h_2 - h_1)$$

elde edilir. Bu denkleme göre hareketsiz sıvı içinde iki nokta arasındaki basınç farkı bu iki nokta arasındaki düşey uzaklığa bağlıdır. (A) noktası sıvı serbest yüzeyinde ise yukarıdaki denklem,

$$P = \gamma . h$$

şeklinde yazılır. Bu denklemde (P) sıvı içinde bir noktadaki basınç ve (h) bu noktanın sıvı serbest yüzünden derinliğidir, (h) sıvı serbest yüzünden aşağı doğru yönlendirilmiştir. Bu denkleme HİDROSTATİĞİN TEMEL DENKLEMİ denir.

Yukarıdaki denklemden (h) çözülürse,

$$h = \frac{P}{\gamma}$$

elde edilir. Bu denklem basıncın sıvı yüksekliği cinsinden ifadesini gösterir. (h)'ya BASINÇ YÜKSEKLİĞİ denir. Hareketsiz sıvı içinde aynı basınçlı noktaların basınç yükseklikleri birbirine eşit olur ve uç noktaları aynı yatay düzlemde bulunur. Bu yatay düzleme YÜK DÜZLEMİ denir.

Sıvı sıkıştırılabilen akışkan ise,

$$P = \gamma . h$$

ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\Delta P = -\gamma . \Delta h$$

Bu denklem, yükseklik (Δh) kadar değiştiğinde basınçta (ΔP) kadar değişme olacağını ifade eder. Denklemdeki eksi işareti, (h) yukarı yönde pozitif alındığı için konmuştur. Eksi işareti yükseklik arttıkça basıncın azaldığını gösterir.

$$P = \gamma . h$$

denkleminde (h) yerine yukarı doğru yönlendirilmiş (z) konursa,

$$P = -\gamma . z = -\rho . g . z$$

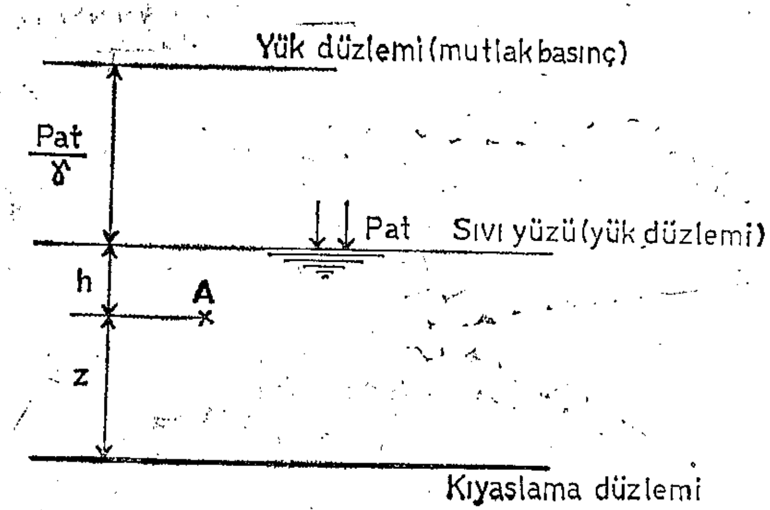
eşitliği elde edilir.

4) MUTLAK BASINÇ ve BAĞIL BASINÇ

Serbest yüzlü hareketsiz sıvının yüzüne (Şekil 2.2) de gösterildiği gibi (P_{at}) atmosfer basıncı etkir. Sıvı içindeki bir (A) noktasının (P_A) basıncı

$$P_A = \gamma . h$$

şeklindedir. (P_A) basıncına (A) noktasındaki BAĞIL BASINÇ denir.



Şekil 2.2

Bağıl basıncı karşılayan sıvı yüksekliğinin yük düzlemi sıvı serbest yüzünden geçer.

(A) noktasındaki bağıl basınca ATMOSFER BASINCI'da ilâve edilirse (A) noktasındaki (P_{Amut}) MUTLAK BASINÇ elde edilir.

$$P_{Amut} = P_A + P_{at} = \gamma . h + P_{at} = \rho . g . h + P_{at}$$

Mutlak basıncı karşılayan sıvı yüksekliği, (h_{mut}), şöyle yazılabilir,

$$h_{mut} = \frac{P_A + P_{at}}{\gamma} = h + \frac{P_{at}}{\gamma}$$

Bu durumda yük düzlemi (Şekil 2.2)'de gösterildiği gibi sıvı serbest yüzünün (P_{at}/γ) kadar yukarısından geçer. Deniz seviyesinde standart atmosfer basıncı (1,033 kg/cm² = 10330 kg/m²)'dir. Su için (γ = 1000 kg/m³) alınırsa atmosfer basıncını karşılayan su yüksekliği,

$$P_{at}/\gamma = \frac{10330 \ (kg/m^2)}{1000 \ (kg/m^3)} = 10,33 \ m$$

olur.

Hidrolikte genellikle bağıl basınç kullanılır.

5) BASINÇ BİRİMLERİ

C.G.S sisteminde kuvvet birimi (din), alan birimi (cm²) olduğundan bu sistemde basınç birimi (din/cm²) dir.

$$1 \ din/cm^2 = 1 \ Bari$$

denir.

Teknik birimler sisteminde kuvvet birimi (kg) ve alan birimi (m²) olduğundan bu sistemde basınç birimi (kg/m²)'dir.

METRE — TON — SANİYE (MTS) sisteminde kuvvet birimi STEN, alan birimi (m²) olduğundan bu sistemde basınç birimi (sten/m²) dir.

$$1 \ sten/m^2 = 1 \ piez$$

denir.

Basınç birimleri bir sistemde verilmişken diğer sisteme nasıl dönüştürüleceği aşağıda gösterilmiştir.

$$1 \ kg/m^2 = 981 \ . \ 10^3 \ din/10^4 \ cm^2 = 98,1 \ din/cm^2 = 98,1 \ Bari$$

$$1 \ Bari = 1 \ din/cm^2 = \frac{1}{98,1} \ kg/m^2$$

$$1 \ sten = \frac{1}{98,1} \ ton = \frac{10^3}{98,1} \ kg$$

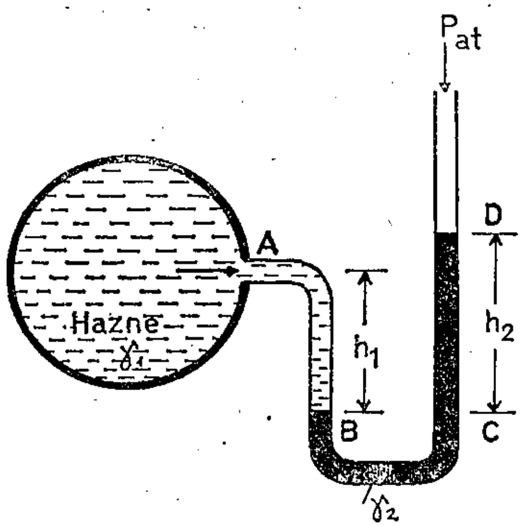
$$1 \ sten/m^2 = 1 \ piez = \frac{10^3}{98,1} \ kg/m^2$$

$$1 \ kg/m^2 = 9,81 . 10^{-3} \ sten/m^2 = 9,81 . 10^{-3} \ piez$$

$$1 \ sten/m^2 = \frac{10^3}{9,81} \ kg/m^2 = \frac{10^3}{98,1} . 98,1 \ din/cm^2 = 10^4 \ din/cm^2$$

6) BASINÇ ÖLÇÜMÜ

Sıvıların basıncı genellikle birleşik kaplar prensibine göre ölçülür. Basıncı ölçülecek sıvının bulunduğu hazneye (Şekil 2.3) de görüldüğü gibi bir boru bağlanır. Bu boruya MANOMETRE denir.



Şekil 2.3

Haznede bulunan sıvının özgül ağırlığı (γ_1), hazneye bağlı manometredeki sıvının özgül ağırlığı (γ_2) olsun. Haznede bulunan basınçlı sıvı manometrenin birinci kolunda (B) noktasına kadar gelir ve manometrede bulunan sıvı manometrenin atmosfere açık olan kolunda (D) noktasına kadar yükselir. Manometrenin hazneye bağlı olduğu (A) noktasında mutlak basınç (P_A), (B) noktasındaki mutlak basınç (P_B) ve (C) noktasındaki mutlak basınç (P_C) ile gösterilmiştir. Basınçlar arasında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$P_B = P_A + \gamma_1 . h_1$$
$$P_B = P_C = P_{at} + \gamma_2 . h_2$$

Yukarıdaki iki denklem eşitlenir ve (P_A) çözülürse,

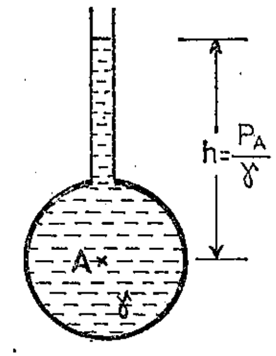
$$P_A = P_{at} + \gamma_2 . h_2 - \gamma_1 . h_1$$

ifadesi elde edilir,

Atmosfer basıncı (P_{at}) ile (γ_1), (γ_2) bildiğine göre manometreden (h_1) ve (h_2) okunursa yukarıdaki denklemden (A) noktasındaki (P_A) mutlak basıncı hesaplanabilir. Manometrede kullanılan sıvı genellikle civadır ve civanın özgül ağırlığı aşağıdaki gibidir.

$$\gamma_{civa} = 13{,}6 \text{ gr/cm}^3 = 13{,}6 \text{ kg/dm}^3 = 13{,}6 . 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Orta büyüklükteki basınçlar (Şekil 2.4)'de gösterildiği gibi PİYEZOMETRELER ile ölçülür.



Şekil 2.4

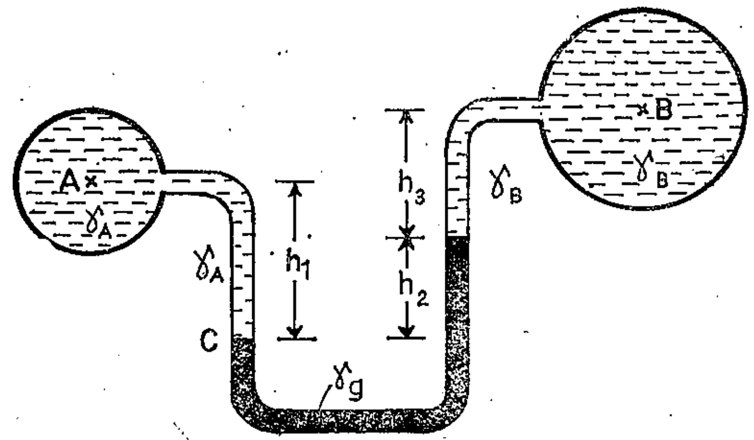
Piyezometre tübü içinde yükselen sıvının (h) yüksekliği basınç yüksekliğini verir.

$$h = \frac{P_A}{\gamma}$$

bağıntısından (A) noktasındaki mutlak veya bağıl basınç bulunabilir.

Manometrenin iki açık ucu (Şekil 2.5)'de gösterildiği gibi iki ayrı nokta ile birleştirilirse (iki nokta aynı sıvının içinde bulunduğu haznenin iki noktası olabileceği gibi iki ayrı sıvı içeren iki ayrı hazne de olabilir) sıvı basınç farkı ölçülmüş olur. Bu manometreye DİFERANSİYEL MANOMETRE denir.

(Şekil 2.5)'de (C) noktasından geçen yatay düzleme göre iki hazne kolu basınçları eşit olacaktır, eşitlik aşağıda yazılmıştır.



Şekil 2.5

$$P_A + \gamma_A . h_1 = P_B + \gamma_B . h_3 + \gamma_g . h_2$$

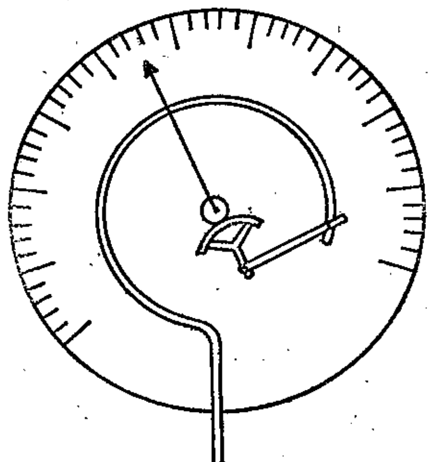
Bu denklemden $(P_A - P_B)$ basınç farkı hesaplanabilir,

$$P_A - P_B = \gamma_B . h_3 + \gamma_g . h_2 - \gamma_A . h_1$$

elde edilir.

Yukarıdaki denklem iki haznedeki sıvı basınçları farkını verir.

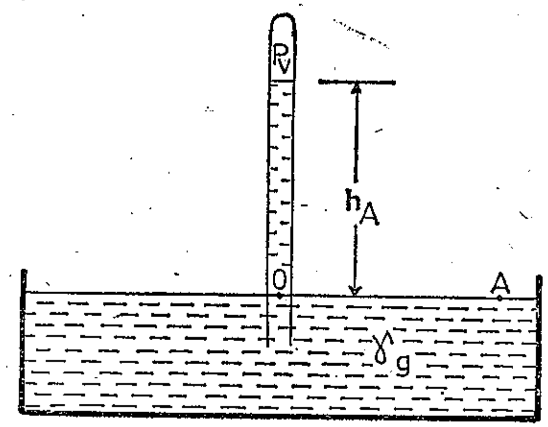
Sıvıların bağıl basıncı BOURDON basınç aleti ile ölçülür. Bourdon aletinin şematik yapısı (Şekil 2.6)'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6

Metal tübün açık ucu basıncı ölçülecek sıvının bulunduğu hazneye bağlanır, eğri ucu kapalı ve basınç gösterge mekanizması ile bağlantılıdır. Tübün eğri kısmının eğriliği tüb içindeki basınçla değişir ve böylece sıvının basıncı ölçülür.

Bir noktadaki atmosfer mutlak basıncı BAROMETRE ile ölçülür. En basit barometre (Şekil 2.7)'de gösterildiği gibi bir ucu kapalı cam tüb ve bir hazneden oluşur. Cam tüb özgül ağırlığı (γ_g) olan sıvı ile doldurulur ve açık ucu aynı sıvıyı içeren hazneye daldırılır.



Şekil 2.7

(O) ve (A) noktalarındaki basınçlar (P_0) ve (P_A) aynı yatay düzlemde olduğundan $(P_0 = P_A)$ yazılabilir. Tüb içindeki (P_V) sıvı buhar basıncı ihmal edilirse atmosfer basıncı (P_{at}) aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$P_{at} = P_A = P_0 = \gamma_g . h_A$$

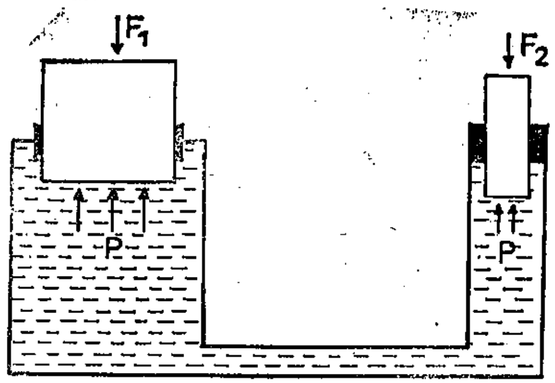
veya

$$h_A = \frac{P_{at}}{\gamma_g}$$

Tübde ve haznede kullanılan sıvı genellikle civadır. Normal sıcaklıklarda civanın buhar basıncı azdır, ayrıca civanın özgül ağırlığı fazla olduğundan atmosfer basıncını ölçmek için kısa boylu tüb kullanılır. Standart atmosfer basıncı (1,033 kg/cm² = 1013 mb) dir ve bu basıncı karşılayan civa sütunu yüksekliği (76 cm)'dir. Yeryüzünü çevreleyen havanın herhangibir yüzeye yaptığı etkinin birim alana düşen değerine ORTALAMA HAVA BASINCI veya ATMOSFER BASINCI denir. Atmosfer basıncı yükseklik ve sıcaklıkla değişir. Atmosfer basıncını ulusal meteoroloji örgütleri ölçer ve bu ölçümler hava tahmin çalışmalarında kullanılır.

7) HİDROLİK PRES

Hidrolik pres sıvı basıncının her yönde iletimi ilkesine —PASKAL KANUNU— dayanır. Paskal (Pascal) kanunu şu şekilde ifade edilebilir: Kapalı bir kap içinde bulunan hareketsiz sıvının bir noktasına uygulanan basınç sıvının her yanına olduğu gibi iletilir. (Şekil 2.8)'de şeması gösterilen hidrolik presin iki silindir içersinde hareket eden iki pistonu vardır. Pistonlardan biri büyük diğeri küçük ve yüzlerinin alanları (S_1) ve (S_2) ile gösterilmiştir. Silindirlerin içi sıvı ile doldurulmuş ve bir boru ile birbirine bağlanmıştır. Küçük pistona (F_2) kuvveti etkidiği zaman piston yüzündeki ortalama basınç,



Şekil 2.8

$$P = \frac{F_2}{S_2}$$

olur. Pascal kanununa göre (P) basıncı hiçbir kayba uğramadan büyük silindirin içindeki sıvıya ve piston yüzüne olduğu gibi iletilir. Böylece büyük piston üzerinde artan (F_1) kuvveti elde edilir. (F_1) kuvveti aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$F_1 = P \cdot S_1 = \frac{F_2}{S_2} \cdot S_1 = \frac{S_1}{S_2} \cdot F_2$$

Büyük piston ile küçük piston yüzleri alanlarının oranı

$$\frac{S_1}{S_2} = 10$$

ise büyük pistona etkiyen (F_1) kuvveti (F_2)'nin (10) katı olur.

8) HİDROSTATİK KALDIRMA

Hareketsiz sıvı içinde denge durumunda bulunan bir cisim düşünelim. Bu cisme etkiyen kuvvetlerin yatay bileşenlerinin toplamı sıfır, düşey kileşenlerinin toplamı

$$F = \gamma \cdot V$$

dır ve bu kuvvete KALDIRMA KUVETİ denir. (γ) sıvının özgül ağırlığı, (V) cisminin sıvı içindeki kısmının hacmidir. Bu sonuç ARŞİMED KANUNU olarak bilinir. Arşimed kanunu şöyle ifade edilebilir: Hareketsiz sıvı içinde dengede bulunan bir cisme sıvının yaptığı etki cismin hacmine eşit sıvının ağırlığına eşdeğerdir. Eğer etki cismin hacmine eşit sıvının ağırlığına eşdeğerse cisim sıvı içinde dengede kalır, cismin hacmine eşit sıvının ağırlığından büyükse cisim yüzer, cismin hacmine eşit sıvının ağırlığından küçükse cisim batar.

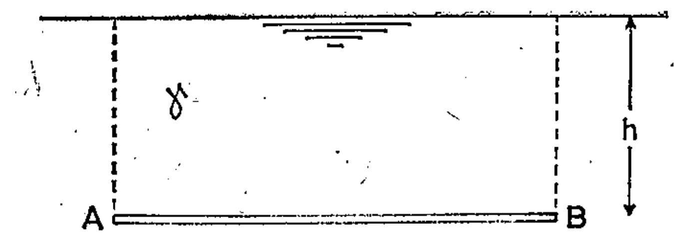
Bir bölümü hareketsiz sıvı içinde bulunan denge halindeki katı cisimlere hidrolikte YÜZEN CİSİMLER denir. Düzgün şekli olmayan bir katı cismin hacmi, Arşimed kanunundan yararlanılarak saptanabilir, sıvıların özgül ağırlıkları da aynı kanuna göre hesaplanabilir.

9) DÜZLEM YÜZEYLER ÜZERİNDEKİ HİDROSTATİK KUVVETLER

Hareketsiz sıvının düzlem yüzeye yaptığı itme kuvvetine hidrostatik kuvvet denir ve yüzeye diktir. Hidrostatik kuvvete İTME ETKİSİ ve itme etkisinin düzlem yüzey üzerindeki yerine İTME ETKİSİ MERKEZİ denir.

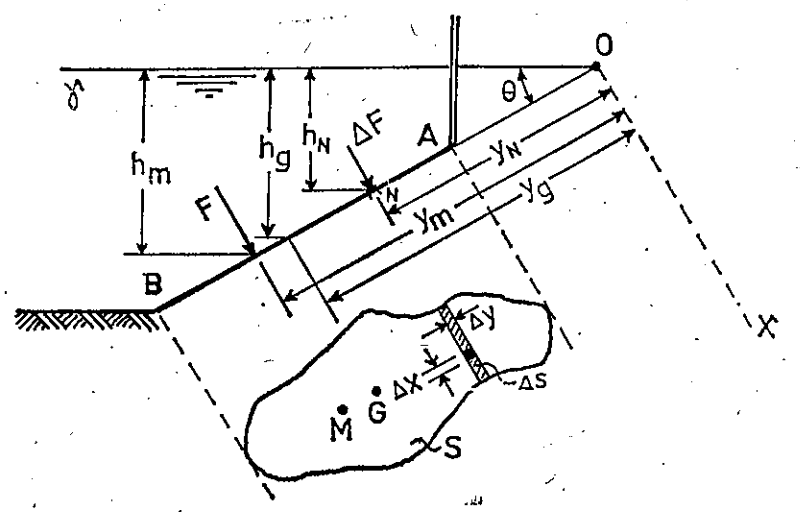
(Şekil 2.9)'daki gibi alanı (S) oran (AB) düzlem yüzeyi yatay konumda olsun ve üzerinde (h) derinliğinde sıvı bulunsun. Düzlem yüzeye etkiyen kuvvet (F) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$F = P \cdot S = \gamma \cdot h \cdot S$$



Şekil 2.9

Bu denklem yatay konumdaki düzlem yüzeye sıvının yaptığı itme etkisini verir. (AB) düzlem yüzey (Şekil 2.10)'da görüldüğü gibi sıvı içinde eğik konumda olsun ve sıvı serbest yüzeyi ile (θ) açısı yapsın. Düzlem yüzeyin alanı (S), ağırlık merkezi (G) ve itme etkisi merkezi (M) olsun.



Şekil 2.10

Düzlem yüzey üzerindeki statik basıncı (P_N) olan (N) noktasını çevreleyen küçük bir (ΔS) yüzey elemanına sıvının yaptığı itme etkisi (ΔF) şu şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta F = P_N \cdot \Delta S = \gamma \cdot h_N \cdot \Delta S$$

(ΔS) alanında (P_N) basıncının düzgün yayıldığı ve her noktasının derinliğinin (h_N) olduğu varsayılmıştır. Diğer yandan

$$h_N = y_N \cdot \mathrm{Sin}\,\theta$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlik yukarıdaki denklemde yerine konursa,

$$\Delta F = \gamma \cdot \mathrm{Sin}\,\theta \cdot y_N \cdot \Delta S$$

elde edilir.

Düzlem yüzeye sıvının yaptığı (F) itme etkisi, bu yüzeyin (ΔS) yüzey elemanlarına yaptığı (ΔF) itme etkilerinin toplamına eşittir.

$$F = \sum \Delta F = \gamma \cdot \mathrm{Sin}\,\theta \cdot \sum (y_N \cdot \Delta S)$$

(γ) ve ($\mathrm{Sin}\,\theta$) sabit olduğundan toplam işareti (Σ) 'nın dışına yazılmışlardır. Bu denklemdeki $[\Sigma\ (y_N \cdot \Delta S)]$ yerine aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\sum (y_N \cdot \Delta S) = y_g \cdot S$$

$[\Sigma\ (y_N \cdot \Delta S)]$ terimi (ΔS) yüzey elemanlarının düzlem yüzeyle sıvı yüzünün kesiştiği (OX) eksenine göre statik momentlerinin toplamını verir. Düzlem yüzeyin ağırlık merkezinin (OX) ekseninden uzaklığı (y_g) ile yüzeyin (S) alanının çarpımı, (OX) eksenine göre yüzeyin statik momentini verdiği bilinir. Yukarıdaki denklem buna göre yazılmıştır. Bu denklem (F) eşitliğinde yerine konursa,

$$F = \gamma \cdot \mathrm{Sin}\,\theta \cdot y_g \cdot S$$

elde edilir. Diğer yandan

$$y_g \cdot \mathrm{Sin}\,\theta = h_g$$

yazılabilir. Bu eşitlik yukarıdaki denklemde yerine konursa,

$$F = \gamma \cdot h_g \cdot S$$

olur. Hareketsiz sıvı içinde eğik konumda bulunan düzlem bir yüzeye sıvının yaptığı (F) itme etkisi yukarıdaki denklemden hesaplanır. Sıvının düzlem yüzeye yaptığı (F) itme etkisi, sıvının özgül ağırlığı, yüzeyin ağırlık merkezinin sıvı serbest yüzünden (h_g) derinliği ve yüzeyin toplam (S) alanı çarpımına eşittir.

Hareketsiz sıvının düzlem yüzeye yaptığı (F) itme etkisinin yüzey üzerindeki yeri (M) noktası ile gösterilmiştir ve bu noktanın (OX) ekseninden uzaklığı (y_m) dir. (M)'ye itme etkisi merkezi denir. İtme etkisi merkezinin yerini yani (y_m) 'yi hesaplıyabilmek için yüzeyin (F) itme etkisinin (OX) eksenine göre momenti ile yüzey elemanlarının (ΔF) itme etkilerinin (OX) eksenine göre momentleri toplamının birbirine eşit olmasından yararlanılır. Bu momentler eşitlenirse,

$$F \cdot y_m = \sum (\Delta F \cdot y_N)$$

elde edilir. Bu denklemin sol ve sağ tarafına daha önce bulduğumuz

$$F = \gamma \cdot \sin\theta \cdot y_g \cdot S \qquad \text{ve} \qquad \Delta F = \gamma \cdot \sin\theta \cdot y_N \cdot \Delta S$$

ifadelerini koyalım. Aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$F \cdot y_m = \gamma \cdot \sin\theta \cdot y_g \cdot S \cdot y_m$$

$$\sum (\Delta F \cdot y_N) = \sum (\gamma \cdot \sin\theta \cdot y_N \cdot \Delta S \cdot y_N) = \gamma \cdot \sin\theta \sum (y_N{}^2 \cdot \Delta S)$$

$[\Sigma\, (y_N{}^2 \cdot \Delta S)]$'ye düzlem yüzeyin (OX) eksenine göre eylemsizlik momenti denir ve (I_0) ile gösterilir.

$$I_0 = \sum (y_N{}^2 \cdot \Delta S)$$

ifadesi yukarıdaki denklemde yerine konursa,

$$\sum (\Delta F \cdot y_N) = \gamma \cdot \sin\theta \cdot I_0$$

olur.

$(F \cdot y_m)$ ifadesinin ve $[\Sigma\, (\Delta F \cdot y_N)]$ ifadesinin sağ tarafları eşitlenirse.

$$\gamma \cdot \sin\theta \cdot y_g \cdot S \cdot y_m = \gamma \cdot \sin\theta \cdot I_0\,,$$

denklemi elde edilir. Bu denklemden (y_m) çözülürse,

$$y_m = \frac{I_0}{y_g \cdot S}$$

elde edilir. Bu denklem daha kullanışlı şekle getirilebilir. Bunun için paralel eksenler teoreminden yararlanılır. Düzlem yüzeyin (OX) eksenine göre (I_0) eylemsizlik momenti, ağırlık merkezinden geçen ve (OX) eksenine paralel eksene göre (I_g) eylemsizlik momenti ve eksenler arasındaki, (y_g) uzaklığı karesinin yüzeyin (S) alanı ile çarpımının toplamına eşittir. Buna göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$I_0 = I_g + y_g{}^2 \cdot S$$

Bu ifade, daha önce

$$y_m = \frac{I_0}{y_g \cdot S}$$

şeklinde bulduğumuz denklemde yerine konursa,

$$y_m = \frac{I_g + y_g{}^2 \cdot S}{y_g \cdot S} = \frac{I_g}{y_g \cdot S} + y_g$$

elde edilir. Bu denklemden itme merkezinin (OX) ekseninden uzaklığı (y_m) hesaplanır. (y_m) herzaman (y_g) den büyüktür, çünkü yukarıdaki denklemde (I_g) herzaman pozitiftir.

Hidrolik projelendirmelerde sıvının itme etkisinin büyüklüğü ve yönü ile itme merkezi yerinin hesaplanması gerekir.

ÖRNEK PROPLEMLER

1) Bir gölün serbest su yüzünden (6,50 m.) derinlikteki basıncını ve mutlak basıncını (kg/m^2) ve (kg/cm^2) biriminde hesaplayınız. Atmosfer basıncı (76 cm) cıva alınacaktır. Civanın özgül ağırlığı $(13{,}6 \cdot 10^3\ kg/m^3)$ dür.

ÇÖZÜM:

Bağıl basıncı

$$P = \gamma \cdot h = 1000 \cdot 6{,}50 = 6500\ kg/m^2$$

bulunur. Veya

$$P = 6500\ kg/10^4\ cm^2 = 6500 \cdot 10^{-4}\ kg/cm^2 = 0{,}65\ kg/cm^2$$

olur.

Mutlak basınç,

$$P_{mut} = P + P_{at} = 6500 + \gamma_{civa} \cdot h_{civa} = 6500 + 13{,}6 \cdot 10^3 \cdot 0{,}76$$

$$P_{mut} = 16{,}84 \cdot 10^3\ kg/m^2$$

bulunur. Veya

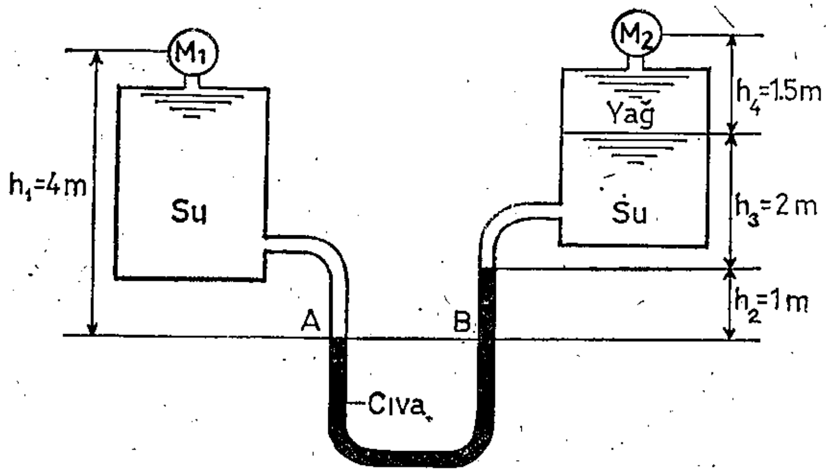
$$P_{mut} = 16{,}84 \cdot 10^3\ kg/10^4\ cm^2 = 1{,}68\ kg/cm^2$$

olur.

2) Bir diferansiyel manometre ile birbirine bağlı iki haznenin oluşturdukları düzen (Şekil 2.11)'de gösterilmiştir. Birinci haznede su, ikinci haznede su ve yağ vardır,

$$\gamma_{su} = 1000\ kg/m^3 \quad , \quad \gamma_{yağ} = 800\ kg/m^3,$$

dür. (M_1) manometresi ile ölçülen (P_{M_1}) basıncı $(4\ kg/cm^2)$ olduğuna göre (M_2) manometresi ile ölçülecek basıncı hesaplayınız,



Şekil 2.11

ÇÖZÜM:

(A-B) yatay düzlemde manometre kollarındaki basınçlar eşittir, yani

$$P_A = P_B$$

dir. Diğer yandan,

$$P_A = P_{M_1} + \gamma_{su} \cdot h_1$$

$$P_B = P_{M_2} + \gamma_{civa} \cdot h_2 + \gamma_{su} \cdot h_3 + \gamma_{yağ} \cdot h_4$$

yazılabilir.

$$P_A = P_B$$

olduğundan

$$P_{M_1} + \gamma_{su} \cdot h_1 = P_{M_2} + \gamma_{civa} \cdot h_2 + \gamma_{su} \cdot h_3 + \gamma_{yağ} \cdot h_4$$

yazılabilir. Bu eşitlikten (P_{M_2}) çözülürse

$$P_{M_2} = P_{M_1} + \gamma_{su} \cdot h_1 - \gamma_{civa} \cdot h_2 - \gamma_{su} \cdot h_3 - \gamma_{yağ} \cdot h_4$$

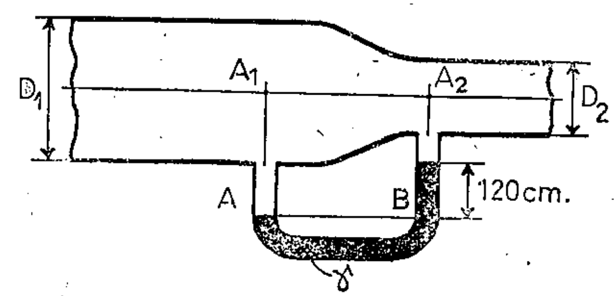
bulunur. Verilenler bu ifadede yerine konursa,

$$P_{M_2} = 4 \cdot 10^4 + 10^3 \cdot 4 - 13{,}6 \cdot 10^3 \cdot 1 - 10^3 \cdot 2 - 0{,}8 \cdot 10^3 \cdot 1{,}5$$

$$P_{M_2} = 10^3 (40 + 4 - 13{,}6 - 2 - 1{,}2) = 27{,}2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2$$

bulunur.

3) (Şekil 2.12)'de görülen borunun içinde yağ akmaktadır. Yağın özgül ağırlığı ($0{,}75 \cdot 10^3$ kg/m³)'dür. Boruya şekilde gösterildiği gibi bir diferansiyel manometre yerleştirilmiştir. (A_1) ve (A_2) noktaları arasındaki basınç farkını bulunuz.



Şekil 2.12

ÇÖZÜM:

(A-B) yatay düzleminde manometre kollarındaki basınçlar eşittir,

$$P_A = P_B$$

(A_1) ve (A_2) noktalarının kollardaki civa yüzeylerine uzaklığı (h_{x_1}) ve (h_{x_2}) olsun. [$(h_{x_1} - h_{x_2}) = 120$ cm] dir. (P_A) ve (P_B) basınçları

$$P_A = P_{A_1} + \gamma_{yağ} \cdot h_{x_1}$$

$$P_B = P_{A_2} + \gamma_{yağ} \cdot h_{x_2} + \gamma_{civa} (h_{x_1} - h_{x_2})$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadeler eşitlenir ve ($P_{A_1} - P_{A_2}$) basınç farkı çözülürse

$$P_{A_1} - P_{A_2} = \gamma_{yağ} \cdot h_{x_2} - \gamma_{yağ} \cdot h_{x_1} + \gamma_{civa} (h_{x_1} - h_{x_2}) = \gamma_{yağ} (h_{x_2} - h_{x_1}) + \gamma_{civa} (h_{x_1} - h_{x_2})$$

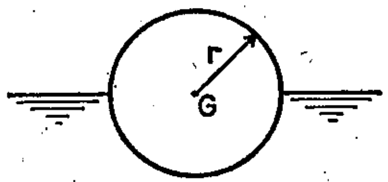
elde edilir. Verilenler yerlerine konursa,

$$P_{A_1} - P_{A_2} = -0,75 \,.\, 10^3 \,.\, 1,20 + 13,6 \,.\, 10^3 \,.\, 1,20$$

$$P_{A_1} - P_{A_2} = 10^3 \,(-0,75 \,.\, 1,20 + 13,6 \,.\, 1,20) = 15,42 \,.\, 10^3 \text{ kg/m}^2$$

bulunur.

4) Kurşun ve mantardan yapılmış homojen bir kürenin ağırlığı (24 kg)' dır. Küre (Şekil 2.13)'de gösterildiği gibi suya bırakıldığı zaman (G) ağırlık merkezi serbest su yüzünde kalmaktadır. Kurşunun özgül ağırlığı (11,3 . 10³ kg/m³) ve mantarın özgül ağırlığı (0,24 . 10³ kg/m³) olduğuna göre kürenin çapını hesaplayınız.



Şekil 2.13

ÇÖZÜM:

Küreyi kaldıran kuvvet (F) ve kürenin sıvı içinde kalan kısmının hacmi (V_1) olsun. Arşimed kanununa göre

$$F = \gamma_{su} \,.\, V_1$$

yazılabilir.

Kürenin toplam hacmi

$$V = \frac{4}{3} \,.\, \pi \,.\, r^3$$

şeklinde ifade edilir.

$$V_1 = \frac{1}{2} \,.\, V$$

olduğundan

$$V_1 = \frac{1}{2} \,.\, \frac{4}{3} \pi \,.\, r^3 = \frac{2}{3} \pi \,.\, r^3$$

şeklinde ifade edilebilir. Verilenler yerine konursa

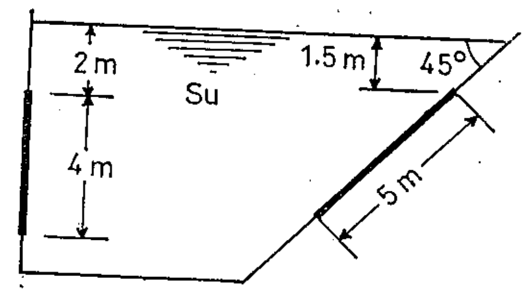
$$24 = 10^3 \,.\, \frac{2}{3} \,.\, \pi \,.\, r^3$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten (r) çözülürse

$$r = \sqrt[3]{\frac{24 \,.\, 3}{2 \,.\, 10^3 \,.\, 3,14}} = 0,225 \text{ m}; \quad D = 2r = 0,450 \text{ m}$$

bulunur.

5) (Şekil 2.14)'de gösterilen (2 . 4 m) boyutlu düşey konumdaki dikdörtgen bir kapağa ve (2 . 5 m) boyutlu eğik konumdaki dikdörtgen bir kapağa etkiyen hareketsiz suyun itme etkilerini ve itme etkisi merkezlerini bulunuz.



Şekil 2.14

ÇÖZÜM:

Düşey konumdaki kapağa sıvının yaptığı itme etkisi

$$F = \gamma \,.\, h_g \,.\, S$$

şeklinde ifade edilebilir. Ağırlık merkezinin su yüzünden uzaklığı

$$y_g = h_g = 2 + 2 = 4 \text{ m}$$

bulunur. Kapağın alanı,

$$S = 2 \,.\, 4 = 8 \text{ m}^2$$

hesaplanır,

Suyun özgül ağırlığı $(\gamma = 10^3 \text{ kg/m}^3)$'dür.

Bunlar (F) ifadesinde yerine konursa

$$F = 10^3 . 4 . 8 = 32 . 10^3 \text{ kg}$$

bulunur. İtme etkisi merkezi

$$y_m = \frac{I_g}{y_g . S} + y_g$$

şeklinde ifade edilir. Dikdörtgen kapağın ağırlık merkezinden geçen eksene göre eylemsizlik momenti

$$I_g = \frac{a. b^3}{12} = \frac{2 . 4^3}{12} = 10{,}7 \text{ m}^4$$

bulunur. İtme etkisi merkezinin su serbest yüzünden uzaklığı,

$$y_m = \frac{10{,}7}{4 . 8} + 4 = 4{,}33 \text{ m.}$$

bulunur.

Eğik konumdaki kapağa sıvının yaptığı itme etkisi,

$$F = \gamma . h_g . S$$

şeklinde ifade edilir. Ağırlık merkezinin su yüzünden derinliği

$$h_g = 1{,}5 + \frac{1}{2} . 5. \text{Sin } 45° = 1{,}5 + 2{,}5 . 0{,}707 = 1{,}5 + 1{,}77 = 3{,}27 \text{ m.}$$

bulunur. Kapağın alanı,

$$S = 2 . 5 = 10 \text{ m}^2$$

bulunur.

Bunlar (F) ifadesinde yerine konursa

$$F = 10^3 \cdot 3{,}27 . 10 = 32{,}7 . 10^3 \text{ kg/m}^2$$

bulunur. İtme etkisi merkezi

$$y_m = \frac{I_g}{y_g . S} + y_g$$

şeklinde ifade edilir. Diktörtgen kapağın ağırlık merkezinden geçen eksene göre eylemsizlik momenti,

$$I_g = \frac{2.5^3}{12} = \frac{250}{12} = 20{,}8 \text{ m}^4$$

bulunur. Ağırlık merkezinin su yüzünden uzaklığı

$$y_g = \frac{h_g}{\text{Sin}\,\theta} = \frac{3{,}27}{0{,}707} = 4{,}62 \text{ m.}$$

bulunur. İtme etkisi merkezinin serbest su yüzünden uzaklığı

$$y_m = \frac{20{,}8}{4{,}62 . 10} + 4{,}62 = 5{,}07 \text{ m}$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Basın nedir? Kaç türlü basınç vardır?
2) Hidrostatiğin temel denklemini açıklayınız.
3) Yük düzlemi nedir?
4) Basınç birimlerini sayınız.
5) Manometre ile diferansiyel manometre arasındaki farkı belirtiniz.
6) Piyezometre tübü ve Bourdon basınç aleti ne için kullanılır?
7) Pascal kanununun tanımını yapınız.
8) Arşimed kanununun tanımını yapınız.
9) İtme etkisi ve itme etkisi merkezi nedir?

III. BÖLÜM

SIVILARIN KİNEMATİĞİ

1) TANIMLAR
2) SÜREKLİLİK DENKLEMİ

ÖRNEK PROBLEMLER

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

III. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

d — çap

G — ağırlık debisi

m — kütle

Q — debi

R — gaz sabiti

S — alan

T — mutlak sıcaklık

V — hız

γ — özgül ağırlık

π — daire çevresinin çapına oranı

ρ — özgül kütle

SIVILARIN KİNEMATİĞİ

1) TANIMLAR

Akışkanın hareketine AKIM denir.

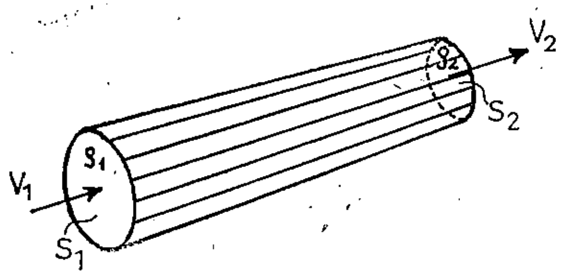
Hareketli akışkanın her elementer partikülünün bir hızı vardır. Elemanter partikülün hızı partikülün konumu ve zamanla değişir. Akışkanın hareketini tanımlayabilmek için partiküllerin çeşitli konum ve zamanlardaki hareketlerini incelemek gerekir. Akışkan partikülüne etki eden kuvvetler gözönünde bulundurulmadan partikülün hız ve konumu incelenirse buna AKIŞKANLARIN KİNEMATİĞİ denir. Akışkan sıvı ise sıvı partiküllerinin hız ve konumunun incelenmesine SIVILARIN KİNEMATİĞİ denir.

Sıvıyı oluşturan elemanter partiküllerin hareketini nitelendiren hız, bazı durumlarda yalnız konuma bağlı olarak değişir, zamana bağlı olarak değişmez. Partiküllerin hızı yalnız konuma bağlı olarak değişirse böyle harekete SÜREKLİ AKIM (Kararlı-Permenant) denir. Elemanter partikülün değişik zamanlarda bulunduğu noktaların geometrik yerine yörünge denir. Partikülün hızı konum ve zamana bağlı olarak değişirse akıma KARARSIZ AKIM denir.

Sıvıların kinematiğinde sıvı hareketi LAGRANGE METODU ve EULER METODU ile tanımlanır. Lagrange metodunda elemanter partikülün yörüngesi boyunca hareketi incelenir. Euler metodunda elemanter partikülün hareketi yerine belirli bir noktadaki hız incelenir.

Belirli bir zamanda sıvı içindeki her noktanın hızı çizilirse HIZLAR ALANI elde edilir, hızlara teğet olan çizgiye AKIM ÇİZGİSİ denir. Akım çizgileri hayali çizgilerdir ve akım yönünü göstermek için çizilirler. Sürekli akımda hızlar alanı sabittir, hızlar alanı değişirse sıvının hareketi kararsız akım olur. Sürekli akımda akım çizgileri değişmez ve yörüngelerle çakışırlar.

Sürekli akımda akım çizgilerinin oluşturduğu tübe AKIM BORUSU denir. (Şekil 3.1)'de gösterilen akım borusu gerçek boru gibidir, çünkü boru duvarını kesen akım olamaz.



Şekil 3.1

Akım borusunun kesit alanı (S) yeter derecede küçük ise kesit orta noktasındaki hız kesit ortalama hızı olarak alınabilir.

Hareketli sıvı içindeki her noktada hızın büyüklüğü ve yönü aynı ise böyle harekete ÜNİFORM AKIM denir, ters durumda ÜNİFORM OLMIYAN AKIM denir. Sabit çaplı uzun borulardaki sıvının hareketi üniform akımdır, üniform akım sürekli veya kararsız akım olabilir.

2) SÜREKLİLİK DENKLEMİ

Süreklilik denklemi kütlenin korunması kuralından çıkartılır. Sıvının hareketi kararlı ise (Şekil 3.1)'de gösterilen akım borusunun tüm kesitlerinden birim zamanda geçen sıvı kütlesi (m) aynıdır. Buna göre aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$m = \rho_1 . V_1 . S_1 = \rho_2 . V_2 . S_2 = \text{Sabit}$$

ρ : özgül kütle, V: ortalama hız, S : boru kesit alanı

Yukarıdaki denklemde (ρ) yerine (γ) konabilir ve aşağıdaki eşitlik yazılır:

$$G = \gamma_1 . V_1 . S_1 = \gamma_2 . V_2 . S_2 = \text{Sabit}$$

(G)'ye ağırlık debisi denir.

Akım borusu içinde hareket eden sıvı sıkıştırılamaz ise (ρ = Sabit) ve (γ = Sabit) olur, yani ($\rho_1 = \rho_2$) ve ($\gamma_1 = \gamma_2$) olur. Sıkıştırılamaz sıvı için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Q = V_1 . S_1 = V_2 . S_2 = \text{Sabit}$$

(Q) birim zamanda bir kesitten geçen sıvı hacmidir ve bu hacme DEBİ denir. Teknik birimler sisteminde debinin birimi (m^3/sn)'dir. (Q = V . S) eşitliğinden (V) hızı;

$$V = \frac{Q}{S}$$

bulunur. (V) kesitin ortalama hızıdır ve kesite diktir.

Akım doğrultusuna dik bir kesit üzerindeki tüm noktalarda gerçek debiye eşit debi verdiği tasarlanan hıza ORTALAMA HIZ denir

$$Q = V_1 . S_1 = V_2 . S_2 = \text{Sabit}$$

eşitliği sıkıştırılamıyan sıvının tek boyutlu akımındaki SÜREKLİLİK DENKLEMİ'dir. Sıkıştırılamıyan sıvının hareketi üniform ise akım tek boyutludur. Süreklilik denklemi sürekli ve kararsız akımlara da uygulanabilir.

Sıkıştırılabilen sıvıların süreklilik denklemi,

$$m = \rho_1 . V_1 . S_1 = \rho_2 . V_2 . S_2$$

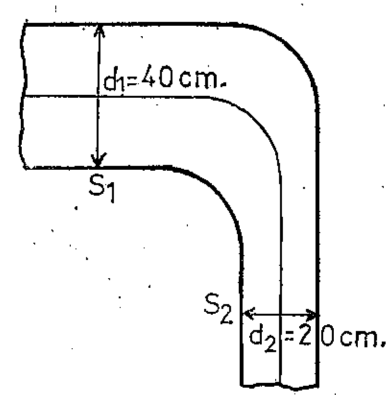
veya

$$G = \gamma_1 . V_1 . S_1 = \gamma_2 . V_2 . S_2$$

şeklindedir.

ÖRNEK PROBLEMLER

1) (Şekil 3.2)'de ana boyutları verilmiş bir dirsek gösterilmiştir. Dirseğin içinde akan suyun debisi (0,1256 m^3/sn)'dir ve akım süreklidir. (S_1) ve (S_2) kesitlerindeki ortalama akım hızını hesaplayınız.



Şekil 3.2

ÇÖZÜM:

Süreklilik denklemi,

$$Q = V_1 . S_1 = V_2 . S_2$$

yazılır. (1) nolu kesit alanı

$$S_1 = \frac{\pi . d_1^2}{4} = \frac{3{,}14 . (40)^2}{4} = 1256 \text{ cm}^2 = 0{,}1265 \text{ m}^2$$

bulunur.
(1) nolu kesitin ortalama hızı,

$$V_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{0{,}1256}{0{,}1256} = 1 \text{ m/sn}$$

bulunur.
(2) nolu kesitin ortalama hızı,

$$V_2 = V_1 . \frac{S_1}{S_2} = V_1 . \frac{\pi . d_1^2/4}{\pi . d_2^2/4} = V_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 1 . \left(\frac{0.40}{0{,}20}\right)^2 = 4 \text{ m/sn}$$

bulunur.

2) (15 cm) çapında bir borudan akan havanın sıcaklığı (35°C), bağıl basıncı (2,5 kg/cm²) ve hızı (3,5 m/sn)'dir. Atmosfer basıncı (10^4 kg/²) ve havanın gaz sabiti (R = 29,3 kgm/kg.°K) olduğuna göre borudan geçen havanın ağırlık debisini hesaplayınız.

ÇÖZÜM:

Havanın özgül ağırlığı,

$$\gamma_{hava} = \frac{P}{RT} = \frac{(2{,}5 . 10^4 + 10^4)}{29{,}3 . (35+273)} = \frac{3{,}5 . 10^4}{29{,}3 . 308} = 3{,}878 \text{ kg/m}^3$$

bulunur.
Ağırlık debisi,

$$G = \gamma_{hava} . Q = \gamma_{hava} . V . S = 3{,}878 . 3{,}5 . \frac{3{,}14 . (0{,}15)^2}{4} = 0{,}240 \text{ kg/sn}$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Akım nedir?
2) Sürekli akım ve kararsız akımın tanımını yapınız.
3) Sıvıların kinematiğinde sıvı hareketi hangi metodlarla incelenir.
4) Akım çizgisi nedir?
5) Uniform akımın tanımını yapınız.
6) Debi nedir?
7) Süreklilik denkleminin tanımını yapınız.

IV. BÖLÜM

HİDRODİNAMİK

IV. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

a — ivme
D — çap
E_a — ağırlık kuvvetinin yaptığı iş
E_b — basınç kuvvetinin yaptığı iş
E_k — hareket enerjisi
h — basınç yüksekliği
H_a — ilave edilen enerji
H_e — çekilen enerji
H_L — enerji kaybı, enerji yüksekliği, yük kaybı
k — adyabatik üs
l — uzunluk
ln — e tabanına göre logaritma
m — Kütle
M — Kütle
Q — debi
P — basınç
P_{at} — atmosfer basıncı
S — alan
t — zaman
U — hacım
v — hız
V — hız
V_{ort} — ortalama hız
z — konum enerjisi, kıyaslama düzleminden uzaklık, düey eksen
α — hız düzeltme katsayısı
γ — özgül ağırlık
π — daire çevresinin çapına oranı
Δ — küçük değişme veya artım
ρ — özgül kütle

HİDRODİNAMİK

1) GİRİŞ

Hidrodinamik hareketli sıvıların durumunu inceler. Hidrodinamikte sıvının hareketine neden olan kuvvet de gözönünde bulundurulur. Hareketli sıvının hız ve ivmeleri ile sıvıya etkiyen kuvvetler arasındaki bağıntılar bulunur. Hareketli sıvılar yetkin ve gerçek sıvılar şeklinde ikiye ayrıldığından hidrodinamik de iki bölümde incelenmiştir, Yetkin Sıvılar Dinamiği, Gerçek Sıvılar Dinamiği.

2) YETKİN SIVILAR DİNAMİĞİ

Yetkin sıvıların hareketi Bernoulli Denklemi ile incelenir. Bernoulli denklemi enerji denkleminden elde edilir. Hareketli sıvının birim kütlesinin basınç enerjisi $\left(\frac{P}{\gamma}\right)$, hız veya kinetik enerjisi $\left(\frac{V^2}{2g}\right)$, konum enerjisi (z) şeklinde ifade edilir.

Enerji denklemi enerjinin korunması prensibinin hareketli sıvıya uygulanmasından elde edilir. Hareketli sıvının enerjisi, iç enerji ile basınç, hız ve konuma bağlı enerjilerden oluşur. (Şekil 4.1)'de akım yönündeki (1) ve (2) nolu kesitlere enerji prensibinin uygulanması aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

1 NOLU KESİTTEKİ ENERJİ + İLAVE EDİLEN ENERJİ — ENERJİ KAYBI — ÇEKİLEN ENERJİ = 2 NOLU KESİTTEKİ ENERJİ

Sıkıştırılamıyan sıvıların iç enerji değişimi ihmal edilebildiğinden bu eşitlikte iç enerji değişimi gösterilmemiştir. Sıkıştırılamıyan sıvının sürekli akımında ilave edilen enerji (H_A), enerji kaybı (H_L) ve çekilen enerji (H_E) ile gösterilirse yukarıdaki ifade birim kütle için,

$$\left(\frac{P_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}+z_1\right)+H_A-H_L-H_E=\left(\frac{P_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}+z_2\right)$$

şeklinde yazılabilir. Parantez içindeki terimler (1) ve (2) nolu kesitlerdeki enerjileri ifade eder. Bu eşitlik BERNOULLI DENKLEMİ olarak bilinir. Pratikteki sıvı akımı ile ilgili problemlerin çözümünde Bernoulli denkleminden yararlanılır. Gazların akımı termodinamik kurallarına göre incelenir.

Dış enerji alışverişi olmazsa,

$$H_A = 0 \quad \text{ve} \quad H_E = 0$$

yazılabilir. Ayrıca yetkin sıvıların hareketinde sıvı partiküllerinin kendi arasında ve katı cidarla sürtünmeleri sonucu enerji kaybı olmıyacağı varsayılır, yani

$$H_L = 0$$

yazılabilir. Bu durumda Bernoulli denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Bu denkleme SIKIŞTIRILAMIYAN YETKİN SIVININ BERNOULLI DENKLEMİ denir. Bernoulli denkleminin birimi uzunluk boyutunda ve metredir.

Sıkıştırılabilen akışkanların hareketinde Bernoulli denklemi aşağıdaki gibi olur.

İZOTERMAL koşullarda:

$$\frac{P_1}{\gamma_1} . \ln P_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_L = \frac{P_2}{\gamma_2} . \ln P_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

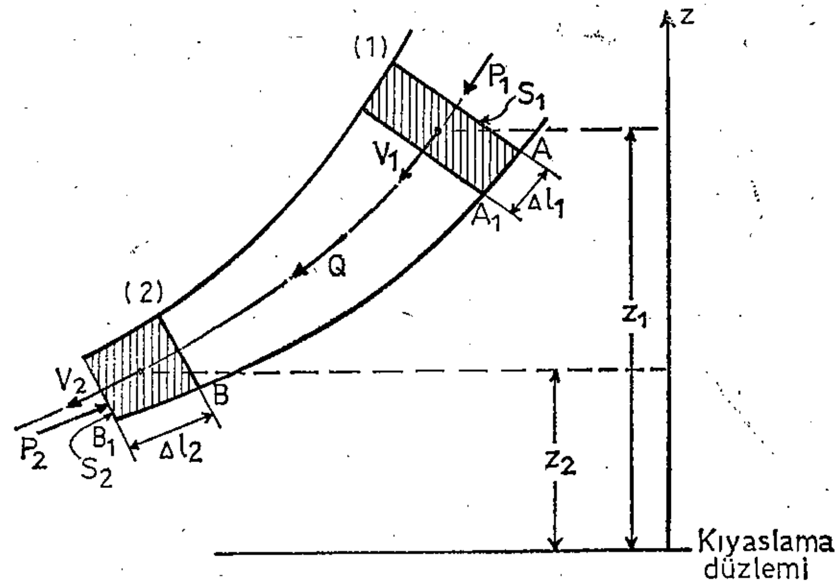
ADYABATİK koşullarda:

$$\left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot \frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_L = \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot \left(\frac{P_1}{\gamma_1}\right) \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Sıkıştırılabilen akışkan yetkin akışkan ise yukarıdaki iki denklemde $(H_L = 0)$ konur.

3) BERNOULLI DENKLEMİ

Sıkıştırılamıyan yetkin sıvıların sürekli akımında enerji prensibi uygulanarak Bernoulli denkleminin elde edilmesi aşağıda açıklanmıştır. Bunun için (Şekil 4.1)'de gösterilen akım borusunu alalım, boru içindeki sıvı yetkin akışkan olduğundan sürtünme direnci yoktur.



Şekil 4.1

Akım borusu başlangıçta (AB) konumunda iken (Δ t) kadar zaman sonra $(A_1 B_1)$ konumunu alır, (A) noktası (A_1) ve (B) noktası (B_1) e gelir. Sıvının sürtünme direnci olmadığından akım borusundaki hareketinde sürtünme direncine bağlı enerji kaybı olmıyacaktır. Bundan dolayı basınç kuvveti ve ağırlık kuvvetinin yaptığı (E_b) ve (E_a) işlerinin toplamı (E_k) hareket enerjisine eşit olacaktır,

$$E_b + E_a = E_k$$

Basınç kuvvetinin yaptığı (E_b) işi basınç enerjisini verir ve aşağıda ifade edilmiştir.

$$E_b = P_1 . S_1 . \Delta l_1 - P_2 . S_2 . \Delta l_2$$

(P_1) ve (P_2), (A) ve (B) kesitlerindeki basınç değerleridir.

Keşit alanı ile uzunluğun çapımı (U) hacmini verir.

$$S_1 . \Delta l_1 = U_1 \quad , \quad S_2 . \Delta l_2 = U_2$$

(Şekil 4.1)'deki (U_1) ve (U_2) hacimleri süreklilik kuralına göre birbirine eşittir,

$$U_1 = U_2 = U$$

Yukarıdaki (E_b) ifadesinde yerine konursa

$$E_b = U\,(P_1 - P_2)$$

elde edilir.

Boru içindeki sıvının (U) hacminin (m.g) ağırlık kuvveti (Δt) zaman aralığında ($z_1 - z_2$) yolunu almıştır. (m.g) ağırlık kuvvetinin yaptığı (E_a) işi aşağıda ifade edilmiştir.

$$E_a = m.g\,.\,(z_1 - z_2) = \rho\,.\,U.g\,.\,(z_1 - z_2) = \gamma.U\,.\,(z_1 - z_2)$$

(U) hacminin kütlesi (m) olduğuna göre kinetik enerji (E_k) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$E_k = \frac{1}{2}\,.\,m\,.\,(V_2^2 - V_1^2) = \frac{1}{2}\cdot\frac{\gamma}{g}\,.\,U\,.\,(V_2^2 - V_1^2)$$

Kinetik enerjiye hareket enerjisi de denir.

Yukarıdaki (E_b), (E_a) ve (E_k) ifadeleri,

$$E_k = E_a + E_b$$

eşitliğinde yerine konursa,

$$\gamma.U.\left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right) = \gamma.U.\,(z_1 - z_2) + U.\,(P_1 - P_2)$$

elde edilir. Bu denklemde kısaltmalar yapılırsa,

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = (z_1 - z_2) + \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma}\right)$$

olur. Bu denklem şu şekilde de yazılabilir,

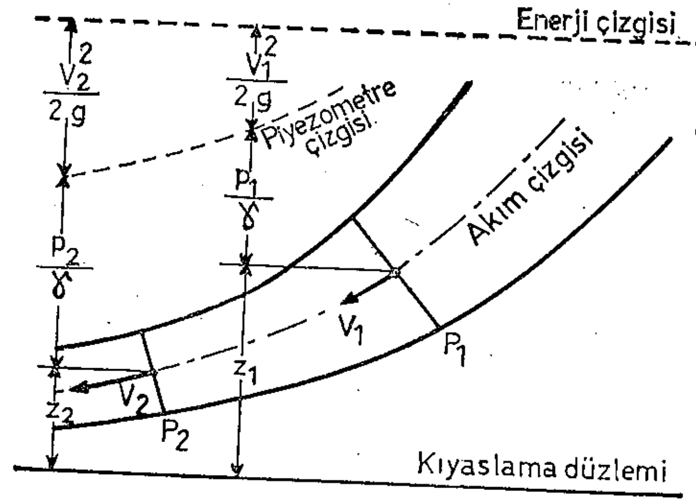
$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Yukarıdaki ifadeye Bernoulli Denklemi denir ve bu bölümün başlangıcında sıkıştırılamıyan yetkin sıvılar için verilmiş Bernoulli denkleminin aynıdır. Bernoulli denklemi (1738) yılında Daniel BERNOULLI tarafından çıkartılmıştır. Yukarıdaki Bernoulli denklemi yalnız ağırlık kuvvetinin etkisi altında hareket eden yetkin sıvının sürekli akımına uygulanabilir.

Bernoulli denklemi daha genel şekilde aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{Sabit}$$

Bernoulli denkleminde her terimin birimi uzunluktur. Birinci terime basınç yüksekliği, ikinci terime hız yüksekliği ve üçüncü terime geometrik yükseklik veya konum yüksekliği denir. Bernoulli denkleminden şu kural çıkartılır: Bir akım çizgisinin her noktasında basınç, hız ve konum yüksekliklerinin toplamı sabittir. (Şekil 4.2)'de Bernoulli denklemindeki terimlerin anlamı görülmektedir. Bernolli denklemi birim kütlenin enerjilerinin toplamını verir ve yörünge boyunca birim kütlenin sahip olduğu enerjinin değişmediğini gösterir.



Şekil 4.2

(Şekil 4.2)'de akım çizgisi üzerindeki bir noktanın kıyaslama düzleminden uzaklığı (z) ile gösterilmiştir. Her noktanın

$$\frac{P}{\gamma} + z$$

değerinin noktalanmasından piyezometre çizgisi ve

$$\frac{P}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}$$

değerinin noktalanmasından enerji çizgisi elde edilir. Akım çizgisi boyunca enerji çizgisi ile kıyaslama düzlemi arasındaki uzaklık sabit kalır, (H_L) enerji kaybı sıfır değilse enerji çizgisi akım yönünde aşağı iner.

$\left(\frac{P}{\gamma}\right)$ basınç yüksekliğidir ve $\left(\frac{P}{\gamma}=h\right)$ yazılabilir veya $(P=\gamma \cdot h)$ olur. Hidrostatikte $(P=\gamma \cdot h)$ olduğundan, Bernoulli denklemindeki basınca hidrostatik basınç denir.

Bernoulli denklemi Newton'un ikinci kanununa göre yazılan,

$$F=m \cdot a$$

eşitliğinden de çıkartılabilir.

4) HIZ YÜKSEKLİĞİ

Bernoulli denklemindeki hız yüksekliği terimi,

$$\frac{V^2}{2 \cdot g}$$

bir noktadaki birim kütleli sıvının kinetik enerjisini göterir. Eğer kesitin her noktasında aynı hız varsa bu hızla veya ortalama hızla hesaplanan hız yüksekliği sıvı birim kütlesinin gerçek kinetik enerjisini verir. Ancak hızın kesitteki dağılımı genellikle düzgün olmaz, kesitin her noktasında aynı hız yoktur.

Kütlesi (Δm), hızı (v), kesit alanı (ΔS) olan bir elementer partikülün gerçek kinetik enerjisi $\left(\frac{1}{2}\Delta m \cdot v^2\right)$'dir. Hareket halindeki sıvının toplam kinetik enerjisi partiküllerin kinetik enerjileri toplamından elde edilir. Toplam kinetik enerji,

$$\frac{1}{2}\sum(\Delta m \cdot v^2)=\frac{1}{2}\sum\left(\frac{\gamma}{g}\cdot\Delta Q \cdot v^2\right)=\frac{\gamma}{2g}\sum(v \cdot \Delta S)\cdot v^2=\frac{\gamma}{2g}\sum(v^3 \cdot \Delta S)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemde (Δm) yerine

$$\Delta m=\rho \cdot \Delta Q=\frac{\gamma}{g}\cdot \Delta Q$$

eşiti yazılmıştır.

Hareket halindeki sıvının kütlesi (M) ve bir kesitteki ortalama hızı (V_{ort}) ise kinetik enerji aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\frac{1}{2}M \cdot V^2_{ort}=\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\gamma}{g}\cdot Q\right)\cdot V^2_{ort}=\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\gamma}{g}\cdot V_{ort}\cdot S\right)\cdot V^2_{ort}=\frac{\gamma}{2g}\cdot S \cdot V^3_{ort}$$

Bu formülde (M) kütle, (Q) debi, (S) kesit alanı'dır.

$\left(\frac{1}{2}\cdot M \cdot V^2_{ort}\right)$ifadesi (α) düzeltme faktörü ile çarpıldıktan sonra $\left(\frac{1}{2}\sum(\Delta m \cdot v^2)\right)$ ile ifade edilen gerçek toplam kinetik enerjiye eşitlenebilir.

$$\alpha \cdot \frac{\gamma}{2g}\cdot S \cdot V^3_{ort}=\frac{\gamma}{2g}\cdot\sum(v^3 \cdot \Delta S)$$

Bu denklemde kısaltmalar yapılır ve (α) çözülürse,

$$\alpha=\frac{1}{S}\cdot\sum\left(\frac{v}{V_{ort}}\right)^3 \cdot \Delta S$$

elde edilir. (α)'ya hız düzeltme katsayısı denir.

Bir akımın bütününe Bernoulli denklemi aşağıdaki şekilde uygulanır,

$$\frac{P}{\gamma}+\alpha \cdot \frac{V^2_{ort}}{2g}+z=\text{sabit}$$

veya

$$\frac{P_1}{\gamma}+\alpha_1 \cdot \frac{V^2_{1ort}}{2g}+z_1=\frac{P_2}{\gamma}+\alpha_2 \cdot \frac{V^2_{2ort}}{2g}+z_2$$

Sıvı akımının bir kesitindeki tüm noktaların hızı eşit ise $(\alpha=1{,}0)$ dır, kaynaşık akımda $(\alpha=1{,}02 \sim 1{,}15)$ ve laminer akımda $(\alpha=2{,}0)$ dır. Hidrolikteki hesaplamalarda $(\alpha=1{,}0)$ alınır ve sonuçlarda önemli hata olmaz. Bunun nedeni kinetik enerjinin toplam enerjiye göre küçük olmasıdır.

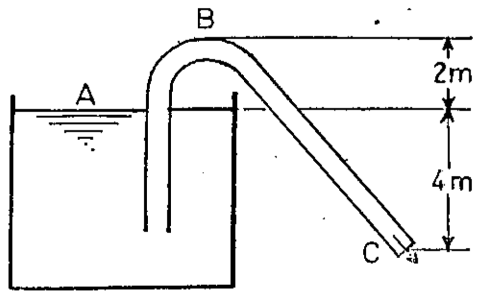
5) BERNOULLI DENKLEMİNİN UYGULANMASI

Bernoulli denklemi uygulanırken aşağıdaki sıranın izlenmesi kolaylık sağlar.

— Sıvı akımının taslak şeklinde diyagramı çizilir, incelenecek kesit alanları seçilir ve işaretlenir.
— Bernoulli denklemi akım yönünde uygulanır. Karşılaştırma düzlemi seçilir.
— (1) Nolu kesitteki enerji saptanır.
— Mekanik aletlerin, pompalar gibi, verdiği enerji varsa bu enerji (1) Nolu kesitteki enerjiye katılır.
— Akım boyunca enerji kaybı varsa bu kayıp çıkartılır.
— Mekanik aletlerin, türbinler gibi, çektiği enerji varsa bu enerji çıkartılır.
— Bu şekilde (1) Nolu kesit için bulunan toplam enerji (2) Nolu kesitin basınç, hız ve yükseklik enerjilerinin toplamına eşitlenir.
— İki kesitteki hız yükseklikleri bilinmiyorsa, süreklilik denklemi yardımı ile aralarında bağıntı kurulur.

ÖRNEK PROBLEMLER

1) (Şekil 4.3)'de gösterilen sifonun çapı (10 cm.)'dir. Sifonun içinden akan yetkin sıvının hızını, debisini ve (B) noktasındaki mutlak basıncı bulunuz. ($\gamma = 1000$ kg/m³)'dür.



Şekil 4.3

ÇÖZÜM:

(A) ile (C) arasında Bernoulli denklemini yazalım, sıvı yetkin olduğundan enerji kaybı yoktur, ($H_L = 0$).

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + z_C$$

Sıvının serbest yüzündeki (A) noktasında

$$V_A = 0 \quad , \quad P_A = P_{at}$$

dir.

(C) noktasında sıvı sifondan havaya açıldığından,

$$P_C = P_{at}$$

dır. Bunlar yukarıdaki Bernoulli denkleminde yerine konursa:

$$\frac{P_{at}}{\gamma} + 0 + z_A = \frac{P_{at}}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + z_C$$

veya

$$\frac{V_C^2}{2g} = z_A - z_C = 4\,\text{m}$$

olur. Hız (V_C),

$$V_C = \sqrt{2 \,.\, 9{,}81 \,.\, 4} = 8{,}86 \text{ m/sn}$$

ve debi (Q),

$$Q = V_C \,.\, \frac{\pi \,.\, D^2}{4} = 8{,}86 \,.\, \frac{3{,}14 \,.\, (0{,}1)^2}{4} = 6{,}96 \,.\, 10^{-2} \text{ m}^3\text{/sn} = 69{,}6 \text{ lt/sn}$$

bulunur.

(A) ile (B) arasında Bernoulli denklemi uygulanırsa:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

veya

$$\frac{P_{at}}{\gamma} + z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

yazılır. ($V_B = V_C$) olduğundan

$$\frac{P_B}{\gamma} = \frac{P_{at}}{\gamma} + z_A - z_B - \frac{V_C^2}{2g}$$

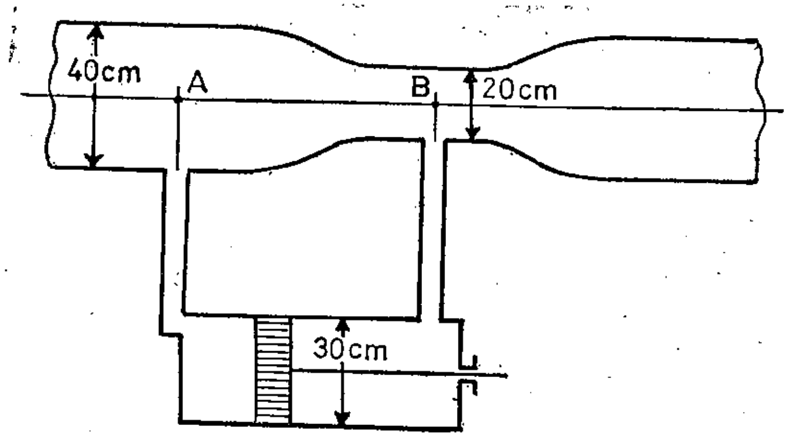
yazılır ve (P_B) çözülürse

$$\frac{P_B}{\gamma} = \frac{1{,}033 \,.\, 10^4}{1000} - 2 - 4 = 10{,}33 - 6 = 4{,}33 \text{ m}$$

$$P_B = 4{,}33 \,.\, \gamma = 4{,}33 \,.\, 10^3 \text{ kg/m}^2$$

bulunur.

2) (Şekil 4.4)'de dar kesitli bir cihazla pistonlu pompadan oluşan bir düzen gösterilmiştir. (A) noktasında su hızı (2,55 m/sn) olduğuna göre (A) ve (B) arasındaki basınç farkını ve pistona etkiyen toplam kuvveti bulunuz.



Şekil 4.4

ÇÖZÜM:

(A) ile (B) arasında Bernoulli denklemi (enerji kayıpları ihmal edilmiştir),

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

şeklindedir. Diğer yandan $(z_A = z_B)$ olduğundan

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = \frac{V_B^2 - V_A^2}{2g}$$

elde edilir.

(A) ve (B) arasında süreklilik denklemi

$$V_A . S_A = V_B . S_B = Q$$

şeklinde yazılır. Bu denklemden

$$V_A . \pi . \frac{D_A^2}{4} = V_B . \pi . \frac{D_B^2}{4}$$

veya

$$V_B = \left(\frac{D_A}{D_B}\right)^2 . V_A = \left(\frac{0,4}{0,2}\right)^2 . 2,55$$

$$V_B = 10,20 \text{ m/sn}$$

bulunur. (A) ve (B) arasındaki basınç farkı

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = \frac{(10,20)^2 - (2,55)^2}{2.9,81} = 4,97 \text{ m}$$

bulunur.

$$P_A - P_B = 4,97 \ . \ 10^3 \text{ kg/m}^2$$

bulunur.

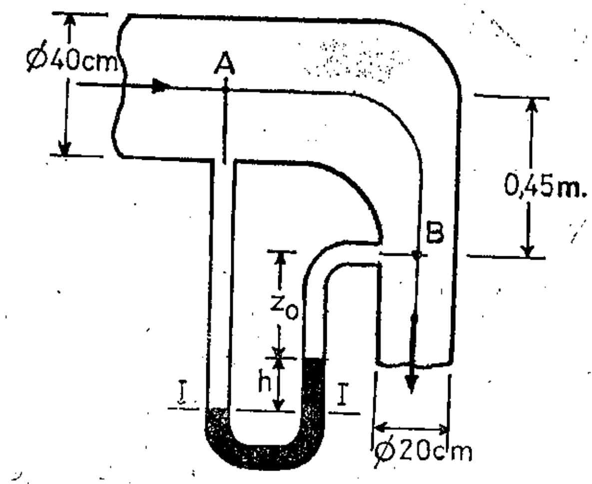
Piston üzerine gelen toplam kuvvet,

$$F = (P_A - P_B) . \pi . \frac{(D_P)^2}{4} = 4,97 \ . \ 10^3 . 3,14 . \frac{(0.3)^2}{4} = 351 \text{ kg}$$

bulunur.

3) (Şekil 4.5)'de ana boyutları verilmiş bir dirsekten (200 litre/sn) debisi olan su geçmektedir ve suyun akımı sürekli akımdır. Dirsekteki iç sürtünme direnci ve yersel yük kayıpları ihmal edildiğine göre (A) ve (B) kesitlerindeki basınç farkını bulunuz.

(A) ve (B) kesitlerindeki efektif basınçlar $(P_A = 0,5 \text{ kg/cm}^2)$ ve $(P_B = 0,35 \text{ kg/cm}^2)$ olduğuna göre bu kesitlere bağlanmış diferansiyel manometredeki seviye farkını hesaplayınız.



Şekil 4.5

ÇÖZÜM:

Süreklilik denklemi

$$Q = V_A . S_A = V_B . S_B$$

şeklindedir. Bu denklemden (V_A) ve (V_B) hızları bulunur.

$$V_A = \frac{Q}{S_A} = \frac{Q}{\pi . \frac{D_A^2}{4}} = \frac{0,200}{3,14 . \frac{(0,4)^2}{4}} = 1,59 \text{ m/sn}$$

$$V_B = \frac{Q}{S_B} = \frac{0,200}{3,14 . \frac{(0,2)^2}{4}} = 6,37 \text{ m/sn}$$

(A) ve (B) kesitleri arasında Bernoulli denklemi,

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

yazılır. Bu eşitlikten $(P_A - P_B)$ basınç farkı aşağıdaki şekilde bulunur.

$$P_A - P_B = \gamma . \left(\frac{V^2_B - V^2_A}{2g} + z_B - z_A \right) = 10^3 . \left[\frac{(6,37)^2 - (1,59)^2}{2 . 9,81} - 0,45 \right] = 1489 \text{ kg/m}^2$$

$$P_A - P_B = 1489 \text{ kg/m}^2$$

(I — I) yatay düzlemi üzerinde diferansiyel manometrenin kollarındaki basınçlar eşittir.

$$P_A + (0,45 + z_0 + h) . \gamma = P_B + z_0 . \gamma + h . \gamma_c$$

Bu eşitlikten

$$h . (\gamma_c - \gamma) = P_A - P_B + 0,45 . \gamma$$

veya

$$h = \frac{P_A - P_B + 0,45 . \gamma}{\gamma_c - \gamma}$$

bulunur. Manometredeki (h) seviye farkı,

$$h = \frac{0,50 . 10^4 - 0,35 . 10^4 + 0,45 . 1000}{13,6 . 10^3 - 1000} = 0,155 \text{ m}$$

dir.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Hareketli sıvının birim kütlesinin enerjisi hangi enerjilerin toplamından oluşur.
2) Bernoulli denkleminin tanımını yapınız?
3) Piyozometre ve enerji çizgisi nedir?
4) Hız düzeltme katsayısı nedir?
5) Bir sıvı akımına Bernoulli denkleminin nasıl uygulanacağını açıklayınız.

V. BÖLÜM

GERÇEK SIVILARIN DİNAMİĞİ

V. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

b — sabit, genişlik
D — çap
f (u) — hıza bağlı fonksiyon
g — yer çekimi ivmesi
h — basınç yüksekliği, derinlik
H — sürtünme kuvvetinin yaptığı iş
H_L — enerji kaybı yüksekliği, yük kaybı
l — uzunluk
L — uzunluk
Q — debi
J — birim kütleye düşen sürtünme kuvveti, birim uzunluk için enerji kaybı yüksekliği
P — basınç
R — hidrolik yarıçap
S — alan
V — hız
V_{ort} — ortalama hız
z — düşey eksen, kıyaslama düzleminden uzaklık
α — hız düzeltme katsayısı
γ — özgül ağırlık
Δ — küçük değişme veya artım
$\varkappa$ — ıslak çevre uzunluğu
π — daire çevresinin çapına oranı
ρ — özgül kütle
Σ — toplam

GERÇEK SIVILARIN DİNAMİĞİ

1) GİRİŞ

Gerçek sıvıların viskozitesi yani iç sürtünmesi vardır, yetkin sıvıların iç sürtünmesi yoktur. Gerçek sıvıların sürekli akımı LAMİNER AKIM ve KAYNAŞIK AKIM olmak üzere ikiye ayrılır. Laminer akım düzenli akımdır ve laminer akımda akışkan kütlesi tamamen birbirinden bağımsız yanyana sıralanmış liflerden oluşur. Sıvı lifleri birbiri üzerinde kayarak birbirine paralel hareket ederler. Laminer akımda sıvının serbest yüzü düzdür. Pratikte laminer akımla pek karşılaşılmaz.

Kaynaşık akımda akışkan kütlesini oluşturan sıvı lifleri birbirine girerler ve birbirinden bağımsız değildirler. Kaynaşık akımda sıvının serbet yüzü dalgalıdır. Pratikte genellikle kaynaşık akımla karşılaşılır.

Laminer akımda kayıplar viskozite ile belirlenir. Kaynaşık akımda düzensiz hareketlerin neden olduğu kayıplar viskoziteden daha önemlidir ve bundan dolayı kayıpları belirleyen ifadeler daha karmaşıktır.

2) BERNOULLİ DENKLEMİ

Sıkıştırılamıyan yetkin sıvıların sürekli akımı için Bernoulli denklemi

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{Sabit}$$

şeklindedir ve hareket halindeki sıvının birim kütlesinin sahip olduğu enerjinin yörünge boyunca değişmediğini ifade eder. Gerçek sıvılar için Bernoulli denklemine ayrıca darbe ve sürtünmelerin neden olduğu enerji kayıplarını da katmak gerekir. Darbe ve sürtünmeler nedeni ile tüketilen enerji yüksekliği (H_L) ile gösterilirse, sıkıştırılamıyan gerçek sıvıların sürekli akımı için Bernoulli denklemi

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

olur. (H_L)'ye YÜK KAYBI denir. Sıkıştırılamıyan sıvılarda akımın bütünü için Bernoulli denklemi aşağıdaki şekilde olur:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{V^2_{1ort}}{2g} + z_1 - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \cdot \frac{V^2_{2ort}}{2g} + z_2$$

(α_1) ve (α_2), (1) ve (2) kesitlerindeki hız düzeltme katsayılarıdır ve $(\alpha_1 = \alpha_2 = 1)$ alınabilir.

Akım yönüne ters yönde oluşan sürtünme kuvvetlerini (J) ile ve (Δz) kadar yükseklik değişimini karşılayan yörünge uzunluğunu (Δl) ile gösterirsek yapılan (ΔH) işi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta H = J \cdot \Delta l$$

Veya toplam iş

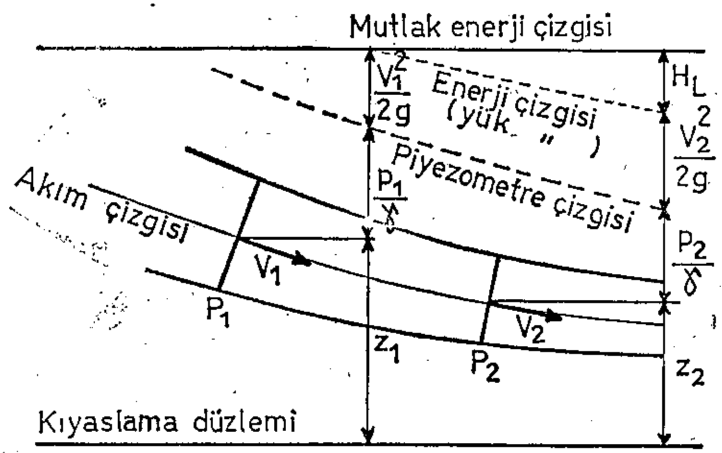
$$H = \sum J \cdot \Delta l$$

olur. (J) birim kütle için sürtünme kuvveti ise $(H = H_L)$ yazılabilir.

Sıkıştırılamıyan gerçek sıvılar için,

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

şeklinde verilen Bernoulli denklemindeki terimlerin anlamı (Şekil 5.1)'de gösterilmiştir.

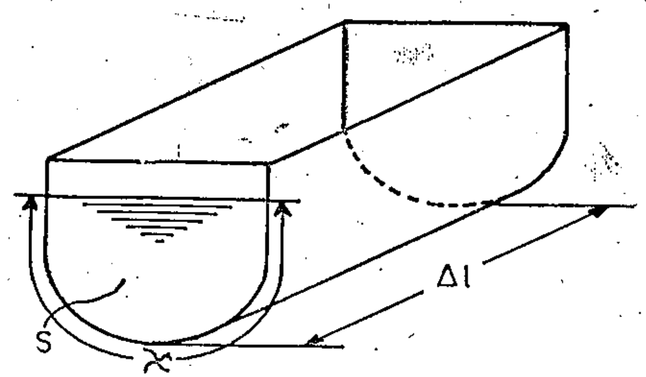


Şekil 5.1

3) AKIMA GÖSTERİLEN DİRENÇLER

Gerçek sıvıların hareketinde iki kesit arasındaki (H_L) yük kaybına neden olan dirençler SÜREKLİ DİRENÇLER ve YERSEL DİRENÇLER şeklinde ikiye ayrılır. Sürekli dirençler genellikle sabit kesitli kanallarda oluşur. Yersel dirençler kanalın kesit ve yön değiştirmesinden ileri gelir. Sürekli ve yersel dirençlerle ilgili formüller ilerideki bölümlerde açıklanacaktır. Sürekli yük kaybını veren eski formüllerin nasıl çıkartıldığı aşağıda açıklanmıştır .

Akım doğrultusuna dik kesit alanı (S), ıslak çevre uzunluğu $(\varkappa)$ (sıvının ıslattığı cidarın uzunluğu) ve uzunluğu (Δl) olan (Şekil 5.2)'deki gibi bir kanal alalım. Yapılan deney sonuçlarına göre (Δl) uzunluğundaki kanal kesiti için sürtünme kuvveti aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.2

$$\rho \cdot \varkappa \cdot f(u) \cdot \Delta l$$

Yukarıdaki ifadede (f (u)) hıza bağlı bir fonksiyondur. Diğer yandan sürtünme kuvvetinin yaptığı iş,

$$\Delta H = J \cdot \Delta l$$

şeklinde ifade edilebilir.

(Δl) uzunluğundaki kanalda bulunan sıvının kütlesi $(\rho \cdot S \cdot \Delta l)$'dir. Birim kütleye düşen sürtünme kuvveti (J) ile gösterilirse,

$$J = \frac{\rho \cdot \varkappa \cdot f(u) \cdot \Delta l}{\rho \cdot S \cdot \Delta l} = \frac{\varkappa}{S} \cdot f(u)$$

şeklinde ifade edilebilir. Genellikle (f (u)) fonksiyonu,

$$f(u) = b \cdot V^2$$

şeklindedir ve (b) sabittir. Yukarıdaki denklemde (J) yerine ve f (u) yerine eşitleri konursa,

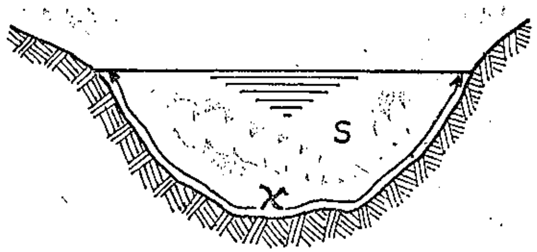
$$\Delta H = J \cdot \Delta l = \frac{\varkappa}{S} \cdot b \cdot V^2 \cdot \Delta l$$

elde edilir.

$$J = \frac{\varkappa}{S} \cdot f(u)$$

ifadesi ve bundan türetilmiş ifadeler eskiden sürekli yük kaybı formülü olarak kullanılırdı, zamanımızda bu formülün yerini almış modern formüller vardır.

(Şekil 5.3)'de gösterildiği gibi akım doğrultusuna dik (S) kesit alanının ($\varkappa$) ile gösterilen ıslak çevre uzunluğuna oranına (R) HİDROLİK YARIÇAP denir.



Şekil 5.3

Hidrolik yarıçap

$$R = \frac{S}{\varkappa}$$

şeklinde ifade edilir.

Dairesel kesit için hidrolik yarıçap şöyle hesaplanır.

$$R = \frac{S}{\varkappa} = \frac{\pi \cdot (D/2)^2}{\pi \cdot D} = \frac{D}{4}$$

Dairesel kesit için yukarıdaki (J) ifadesi

$$J = \frac{\varkappa}{S} \cdot f(u) = \frac{4}{D} \cdot b \cdot V^2$$

şeklini alır.

Genişliği (b) ve derinliği (h) olan dikdörtgen kesitli bir açık kanalın (R) hidrolik yarıçapı

$$R = \frac{b \cdot h}{b + 2h}$$

olur.

ÖRNEK PROBLEMLER

1) Çapı (40 cm) ve uzunluğu (1200 m) olan çelik bir boru ile özgül ağırlığı ($0{,}93 \cdot 10^3$ kg/m^3) olan ham petrol taşınmaktadır. Borunun debisi ($0{,}2512$ m^3/sn) ve ($A_1 - A_2$) boru uçları arasındaki kot farkı (10 m)'dir. (A_1) ve (A_2) noktalarında ölçülen mutlak basınçlar sıra ile ($6{,}8 \cdot 10^4$ kg/m^2) ve ($4 \cdot 10^4$ kg/m^2) olduğuna göre enerji kaybı yüksekliği ile birim uzunluk için enerji kaybı yüksekliği ile birim uzunluk için enerji kaybı yüksekliğini bulunuz. Akım yönü (A_1)'den (A_2)'ye doğrudur.

ÇÖZÜM:

(A_1) ve (A_2) arasında Bernoulli denklemi,

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V^2_{1\,ort}}{2g} + z_1 - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V^2_{2\,ort}}{2g} + z_2$$

şeklindedir. Boru çapı değişmediği için,

$$V_{1\,ort} = V_{2\,ort} = \frac{Q}{S} = \frac{0{,}2512}{3{,}14 \left(\frac{0{,}4}{2}\right)^2} = 2 \text{ m/sn}$$

bulunur. Enerji kaybı yüksekliği,

$$H_L = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{V_{1\,ort}^2 - V_{2\,ort}^2}{2g} + z_1 - z_2$$

şeklinde ifade edilir. Verilenler bu ifadede yerine konursa,

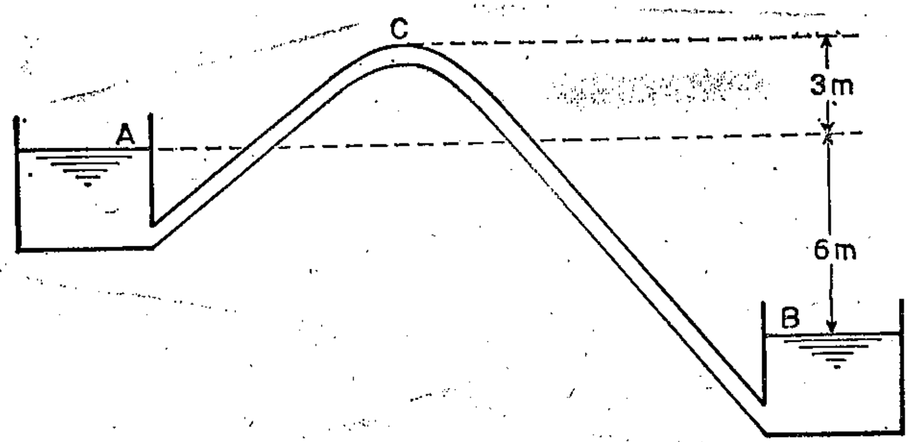
$$H_L = \frac{(6{,}8 - 4) \cdot 10^4}{0{,}93 \cdot 10^3} + 0 + 10 = 30{,}1 + 10 = 40{,}1 \text{ m}$$

bulunur. Birim uzunluk için enerji kaybı yüksekliği (J),

$$J = \frac{H_L}{L} = \frac{40{,}1}{1400} = 0{,}0286 \text{ m/m}$$

bulunur.

2) Aralarındaki kot farkı (6 m.) olan iki hazne (Şekil 5.4)'de gösterildiği gibi (600 m.) uzunluğunda bir boru ile birleştirilmiştir. (C) noktası ile aşağı hazne arasındaki kalan boru uzunluğu (400 m.)'dir. Boru çapı (1,20 m.) ve borudan geçen suyun hızı (2,21 m/sn) olduğuna göre borudan geçen debiyi ve (C) noktasındaki bağıl ve mutlak basıncı hesaplayınız. Yersel yük kayıpları ihmal edilecektir.



Şekil 5.4

ÇÖZÜM:

Borunun debisi,

$$Q = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot V = \frac{3{,}14 \cdot (1{,}2)^2}{4} \cdot 2{,}21 = 2{,}50 \ \mathrm{m^3/sn}$$

bulunur.

(A) ile (B) arasında Bernoulli denklemini uygulayalım.

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A - H_L = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

$$V_A = 0\,, \quad V_B = 0\,, \quad \frac{P_A}{\gamma} = 0\,, \quad \frac{P_B}{\gamma} = 0\,, \quad z_B = 0$$

olduğundan (H_L) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$H_L = z_A = 6{,}0 \ \mathrm{m.}$$

Yük kaybı,

$$H_L = J.L$$

şeklindedir. Bu ifadeden

$$6 = J \,.\, 600$$

veya

$$J = \frac{6}{600} = 0{,}01 \ \mathrm{m/m}$$

bulunur.

(A) ile (C) arasında Bernoulli denklemi

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A - H_L^{AC} = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + z_C$$

veya

$$0 + 0 + z_A - 0{,}01 \,.\, 200 = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{(2{,}21)^2}{19{,}62} + z_C$$

şeklinde yazılır. Buradan

$$\frac{P_C}{\gamma} = (z_A - z_c) - 2{,}0 - 0{,}27 = -3{,}0 - 2{,}0 - 0{,}27 = -5{,}27 \ \mathrm{m.}$$

bulunur.

(C) noktasındaki bağıl basınç,

$$P_C = -5{,}27 \,.\, \gamma = -5{,}27 \,.\, 10^3 \ \mathrm{kg/m^2}$$

bulunur.

(C) noktasındaki mutlak basınç

$$\left(\frac{P_C}{\gamma}\right)_{mutlak} = \frac{P_{at}}{\gamma} + \left(\frac{P_c}{\gamma}\right)_{bağıl} = 10{,}33 - 5{,}27 = 5{,}06 \ \mathrm{m.}$$

$$P_C = 5{,}06 \,.\, 10^3 \ \mathrm{kg/m^2}$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Laminer ve kaynaşık akımın tanımını yapınız.
2) Yük kaybı nedir?
3) Sıvı akımına karşı gösterilen dirençler nelerdir?
4) Islak çevre ve hidrolik yarıçapın tanımını yapınız.

VI. BÖLÜM

BORULARDA AKIM

1) GİRİŞ
2) REYNOLDS SAYISI
3) BORULARDA KAYMA GERİLMESİ
4) BORU KESİTİNDE HIZ DAĞILIMI
5) BORULARDA YÜK KAYBI
6) PÜRÜZLÜLÜK
7) LAMİNER AKIMDA YÜK KAYBI
8) KAYNAŞIK AKIMDA YÜK KAYBI
   a) ESKİ FORMÜLLER
   b) YENİ FORMÜLLER
9) YÜK KAYBININ DEBİ CİNSİNDEN İFADESİ
10) PÜRÜZLÜ BORULARDA YAPILAN DENEYSEL ARAŞTIRMALAR
11) BORULARDA YERSEL YÜK KAYIPLARI
   a) ANİ KESİT GENİŞLEMESİNDE YERSEL YÜK KAYBI
   b) ANİ KESİT DARALMASINDA YERSEL YÜK KAYBI
   c) HAZNEDEN BORUYA GEÇİŞTE YERSEL YÜK KAYBI
12) DİRSEKLERDE YERSEL YÜK KAYBI
   a) EĞRİSEL DİRSEKLERDE YÜK KAYBI
   b) KÖŞELİ DİRSEKLERDE YÜK KAYBI
13) ÇATALLARDA YERSEL YÜK KAYBI
   a) BİR AKIMI İKİYE AYIRAN ÇATALLARDA
   b) İKİ AKIMI BİRLEŞTİREN ÇATALLARDA

ÖRNEK PROBLEMLER

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

VI. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

b — sabit
D — çap
g — yerçekimi ivmesi
h — sıvı yüksekliği, yersel yük kaybı
H_L — yük kaybı
J — birim uzunluk için yük kaybı
K — boru bağıl pürüzlülüğü
L — uzunluk
log — 10 tabanına göre logaritma
ln — e tabanına göre logaritma
m — kesit alan oranı
n — üs
Q — debi
P — basınç
r — yarıçap
R — hidrolik yarıçap, dirsek eğrilik yarıçapı
R_e — Reynolds sayısı
R_{ekr} — kritik Reynolds sayısı
S — alan
V — hız
V_{ort} — ortalama hız
v — hız
v_* — kayma hızı veya sürtünme hızı
X — yatay eksen
y — boru cidarından uzaklık, dik eksen
α — açı
β — açı
γ — özgül ağırlık
Δ — küçük değişme veya artım
ε — mutlak pürüzlülük
θ — yersel yük kaybı katsayısı
λ — boru sürtünme katsayısı, direnç katsayısı, pürüzlülük katsayısı
μ — dinamik viskozite, kesit büzülme katsayısı
ν — kinematik viskozite
π — daire çevresinin çapına oranı
ρ — özgül kütle
Σ — toplam
τ — kayma gerilmesi

BORULARDA AKIM

1) GİRİŞ

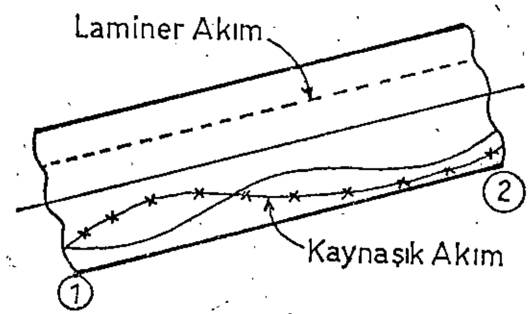
Borulardaki akım gerçek sıvılar için V. BÖLÜM'de

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

şeklinde çıkarılmış Bernoulli denkleminden yararlanılarak incelenebilir. Ancak bu formüldeki (H_L) yük kaybını belirlemek gerekir ve belirlenmesi oldukça güçtür. Gerçek sıvıların akımı yetkin sıvıların akımından daha karmaşıktır.

Gerçek sıvıların viskozitesinden dolayı sıvının akımına ters yönde sürtünme kuvvetleri oluşur ve yük kaybına neden olur. Sürtünme kuvvetleri sıvı partikülleri arasında ve sıvı ile sıvının temas ettiği cidar arasında oluşur. Yetkin sıvıların akımı için çıkarılabilen Euler hareket denklemleri gerçek sıvıların akım problemlerini çözümlemede kullanılamaz. Gerçek sıvıların akım problemlerinin çözümünde deney sonuçları ve yarı amprik metodlardan yararlanılır.

Gerçek sıvıların boru içindeki sürekli akımı laminer veya kaynaşık akım olabilir. (Şekil 6.1)'de boru içindeki laminer akım ve kaynaşık akım gösterilmiştir.



Şekil 6.1

Laminer akımda (1) kesitinden hareket eden partikül boru eksenine paralel yörüngeyi izleyerek (2) kesitinde aynı noktaya gelir. Türbülanslı akımda (1) kesitinden hareket eden partikül değişik yörüngeler izliyerek (2) kesitinde aynı noktaya veya değişik noktalara gelir. Laminer akımda hız akım kesidine dik olduğu halde türbülanslı akımda böyle olmıyabilir ve hızın yönü sürekli değişir. I. BÖLÜM'de gösterildiği gibi laminer akımda (τ) kayma gerilmesi ile (μ) dinamik viskozite arasında aşağıdaki bağıntı vardır.

$$\tau = \mu \cdot \frac{\Delta U}{\Delta y}$$

Laminer akımda sıvı viskozitesi hakim özelliktir ve kayıpların belirlenmesine olanak verir.

Kaynaşık akımda (τ) kayma gerilmesini belirliyen ifadeler karmaşıktır ve deney sonuçlarından çıkartılmıştır. Kaynaşık akımdaki yük kayıpları amprik formüllerden yararlanılarak hesaplanabilir.

2) REYNOLDS SAYISI

Reynolds sayısı (R_e) eylemsizlik kuvvetleri ile viskozite arasındaki ilişkiyi gösterir. Dairesel kesitli borular için (R_e) ifadesi aşağıda yazılmıştır.

$$R_e = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{V \cdot (2r)}{\nu}$$

Bu formülde :

- V = Ortalama hız, (m/sn)
- D = Boru çapı, (m.)
- r = Boru yarıçapı, (m.)
- μ = Sıvının dinamik viskozitesi, (kg . sn/m²)
- ρ = Sıvının özgül kütlesi, (kg . sn²/m⁴)
- ν = Sıvının kinematik viskozitesi, (m²/sn)

Boru kesiti tam dairesel değilse Reynolds sayısı aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$R_e = \frac{V \cdot (4R)}{\nu}$$

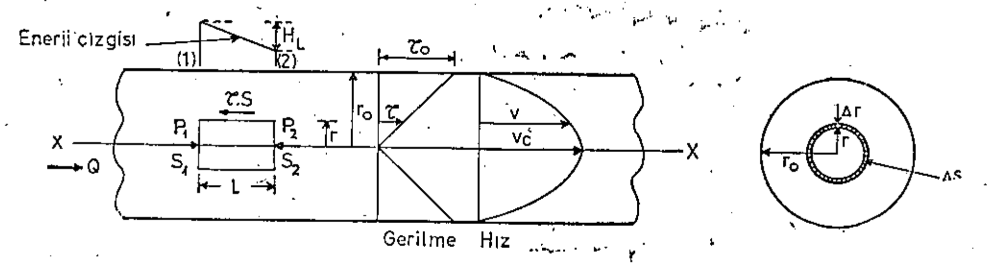
Bu formüldeki (R) hidrolik yarıçaptır.

(R_e) Reynolds sayısı boyutsuzdur.

Borulardaki akımın rejim değişikliğinde yani laminer akımdan kaynaşık akıma geçiş arasındaki hıza kritik hız ve bu andaki Reynolds sayısına kritik Reynolds sayısı, ($R_{e_{kr}}$), denir. Kritik Raynolds sayısı değeri ($R_{e_{kr}} = 2320$)'dir. (R_e), (2320)'den büyük ise akım kaynaşık olur, (R_e) (2320)'den küçük ise akım laminerdir. (R_e) (2320)'den büyük olduğu durumlarda da akım laminer olabilir, ancak küçük bir sarsıntı ile derhal kaynaşık akıma dönüşür.

3) BORULARDA KAYMA GERİLMESİ

Dairesel kesitli yatay konumdaki bir borunun herhangibir kesitinde (τ) kayma gerilmesinin dağılış şekli bulunabilir. Bunun için içinde sürekli akım bulunan (Şekil 6.2)'deki boruyu inceliyelim. Teğetsel kuvvetin birim alana düşen değerine KAYMA GERİLMESİ denir.



Şekil 6.2

Boru içinde yarıçapı (r) ve uzunluğu (L) olan silindir şeklinde bir kütle elemanına etkiyen kuvvetler dengededir ve bu kuvvetlerin toplamı sıfırdır, akım sürekli olduğundan ivmede sıfırdır. Kütle elemanına etkiyen kuvvetlerin (XX) eksen doğrultusundaki bileşenleri toplamı aşağıda verilmiştir, (P_1), (P_2) basınç ve (S_1), (S_2) kesit alanları (S) silindir çevre alanıdır.

$$P_1 \cdot S_1 - P_2 \cdot S_2 - \tau \cdot S = 0$$

veya

$$P_1 \cdot (\pi \cdot r^2) - P_2 \cdot (\pi \cdot r^2) - \tau \cdot (2\pi \cdot r \cdot L) = 0$$

Bu denklemden (τ) çözülürse,

$$\tau = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r}{2 \cdot L}$$

olur. Yarıçap ($r = 0$) olduğu zaman kayma gerilmesi (τ) sıfırdır, ($r = r_0$) ise boru cidarında kayma gerilmesi (τ_0) olur ve en büyük değerdir. (τ)'nun (r) ile değişimi çizgiseldir ve bu değişim (Şekil 6.2)'de gösterilmiştir. Yukarıdaki (τ) ifadesi laminer ve kaynaşık akım için kullanılabilir.

(L) uzunluğundaki kütle elemanının (1) ve (2) nolu kesitleri arasında Bernoulli denklemi uygulanırsa,

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

eşitliği elde edilir. Birinci ve ikinci kesitte ($V_1 = V_2$) ve ($z_1 = z_2$)'dir. Buna göre yukarıdaki denklem yeniden yazılırsa,

$$\frac{P_1}{\gamma} - H_L = \frac{P_2}{\gamma}$$

veya

$$H_L = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

ifadesi elde edilir.

(Şekil 6.2)'de gösterildiği gibi, $\left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma}\right)$ terimi akım yönünde enerji çizgisindeki düşmeyi ifade eder.

$$\tau = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r}{2 \cdot L}$$

ifadesinin sağ tarafı (γ/γ) ile çarpılırsa,

$$\tau = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} \cdot \frac{\gamma \cdot r}{2 \cdot L}$$

veya

$$\tau = \frac{\gamma \cdot r}{2 \cdot L} \cdot H_L$$

ifadesi elde edilir.

Boru cidarındaki (τ_0) kayma gerilmesini belirleyebilmek için (τ) ifadesinde ($r = r_0$) konur ve böylece aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\tau_0 = \frac{\gamma \cdot r_0}{2 \cdot L} \cdot H_L$$

veya

$$H_L = \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot L}{\gamma \cdot r_0}$$

Darcy formülüne göre borulardaki yük kaybı aşağıdaki şekildedir:

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Bu denklemde (λ) boru sürtünme katsayısıdır ve boyutsuzdur.

Yukarıda verilmiş (H_L) ifadelerinin,

$$H_L = \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot L}{\gamma \cdot r_0} = \frac{4 \cdot \tau_0 \cdot L}{\gamma \cdot D} \quad \text{ve} \quad H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

sağ tarafları eşitlenebilir. Böylece,

$$\frac{4 \cdot \tau_0 \cdot L}{\gamma \cdot D} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemden (τ_0) çözülürse,

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

elde edilir. Bu denklem boru cidarındaki (τ_0) kayma gerilmesini verir.

KAYMA HIZI veya SÜRTÜNME HIZI (v_*) ile gösterilmiştir ve aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$v_* = \sqrt{\tau_0/\rho} = V \cdot \sqrt{\lambda/8}$$

4) BORU KESİTİNDE HIZ DAĞILIMI

Boru kesitinde hız dağılımı akımın laminer ve kaynaşık akım olması durumuna göre ifade edilebilir.

Boru içindeki akım sürekli ve laminer olsun. (Şekil 6.2)'de gösterildiği gibi laminer akım için $\left(\tau = -\mu \cdot \frac{\Delta v}{\Delta r}\right)$ eşitliği yazılabilir, eksi işareti boru yarıçapının merkezden cidara doğru yönlendirilmesinden dolayıdır. Bu ifade

$$\tau = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r}{2 \cdot L}$$

ıfadesi ile eşitlenirse,

$$-\mu \cdot \frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r}{2 \cdot L}$$

elde edilir. Bu denklemden (Δv) çözülürse,

$$-\Delta v = \frac{P_1 - P_2}{2 \cdot \mu \cdot L} \cdot r \cdot \Delta r$$

elde edilir. Bu denklemin integrali alınırsa,

$$-(v - V_c) = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r^2}{4 \cdot \mu \cdot L}$$

eşitliği bulunur. Boru yarıçapı $(r = 0)$ olduğu zaman $(v = V_c)$'dir. Bu denklemden

$$v = V_c - \frac{(P_1 - P_2) \cdot r^2}{4 \cdot \mu \cdot L} \quad \text{veya} \quad v = V_c - \frac{\gamma \cdot H_L \cdot r^2}{4 \cdot \mu \cdot L}$$

ifadeleri elde edilir. Boru cidarında hız sıfır olduğundan yukarıdaki denklemde $(r = r_0)$ için $(v = 0)$ konursa boru merkezindeki (V_c) hızı,

$$V_c = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r_0^2}{4 \cdot \mu \cdot L}$$

şeklinde bulunur. (V_c) boru kesitindeki en büyük hızdır. Yukarıdaki (V_c) ifadesi daha önce bulunmuş (v) ifadesinde,

$$v = V_c - \frac{(P_1 - P_2) \cdot r^2}{4 \cdot \mu \cdot L}$$

(V_c) yerine konursa,

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot (r_0^2 - r^2)$$

elde edilir. Laminer akımda borunun bir kesitindeki (v) hız dağılımı yukarıdaki denklemle bulunur ve bu eşitlik bir parabolün denklemidir. Borudaki akım hız profili (Şekil 6.2)'de gösterilmiştir. Boru kesitindeki ortalama hız, (V_{ort}), şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_{ort} = \frac{Q}{S} = \frac{\sum (v \cdot \Delta s)}{\pi \cdot r_0^2} = \frac{\sum (v \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta r)}{\pi \cdot r_0^2}$$

$$V_{ort} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (P_1 - P_2)}{\pi \cdot r_0^2 \cdot (4 \cdot \mu \cdot L)} \cdot \sum [(r_0^2 - r^2) \cdot r \cdot \Delta r]$$

(Şekil 6.2)'de gösterilen silindir şeklindeki sıvı kütlesinin (Δs) alan artımı, silindir çevresi $(2 \cdot \pi \cdot r)$ ile (Δr) yarıçap artımının çarpımına eşittir, $(\Delta s = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r)$'dir. Yukarıdaki denklemde (v) yerine,

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot (r_0^2 - r^2)$$

ifadesi konmuştur. Bu denklemin sağ tarafındaki ifadenin integrali alınırsa,

$$V_{ort} = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r_0^2}{8 \cdot \mu \cdot L}$$

elde edilir. Bu denklemden anlaşıldığı gibi laminer akımlı borunun bir kesitindeki (V_{ort}) ortalama hızı, (V_c) en büyük hızın yarısı kadardır.

Kaynaşık akımlı borunun bir kesitindeki hız dağılımı, laminer akımın uyduğu parabol şeklindeki hız dağılımından farklıdır. Akımın merkeze yakın bölümünde hızdaki değişmeler az, boru cidarına yakın bölgede hız değişmeleri fazladır. Nikuradse adlı bir araştırıcının ve diğerlerinin yaptığı deney sonuçlarına göre kaynaşık akımdaki (v) hız profili amprik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$v = V_c \cdot (y/r_0)^n$$

Bu formülde (V_c) boru merkezindeki hız, (y), hızı (v) olan noktanın boru cidarından uzaklığı'dır. (n) değerleri aşağıdaki gibidir.

$$n = \frac{1}{7} \quad \text{pürüzsüz tüblerde ve } R_e \leq 100000$$

$$n = \frac{1}{8} \quad \text{"} \quad \text{"} \quad \text{ve } 100000 \leq R_e \leq 400000$$

PÜRÜZSÜZ (CİLALI) BORULAR'da hız,

$$v = v_* \cdot (5{,}5 + 5{,}75 \cdot \log y \cdot v_* / \nu)$$

şeklindedir. (v_*) kayma hızıdır.

Pürüzsüz borularda ve $5000 \leq R_e \leq 3000000$ için,

$$(V_c - v) = -2{,}5 \cdot v_* \cdot \ln \frac{y}{r_0}$$

şeklinde bir bağıntı vardır.

PÜRÜZLÜ BORULAR'da hız,

$$v = v_* \cdot \left(8{,}5 + 5{,}75 \cdot \log \frac{y}{\varepsilon}\right)$$

şeklinde ifade edilir. (ε) boru cidarının MUTLAK PÜRÜZLÜLÜĞÜ'dür.

Kaynaşık akımlı bir boruda, hız profilini ifade eden bütün formüller boru kesitindeki (V_{ort}) ortalama hızın aşağıdaki gibi ifade edilebileceğine olanak verir.

$$V_{ort} = (0.80 \sim 0.84) \cdot V_{max}$$

(V_{max}) boru kesitindeki en büyük hızdır. Boru cidarından $\left[0{,}8 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)\right]$ uzaklıktaki noktanın hızının ortalama hıza eşit olduğu kanıtlanmıştır.

5) BORULARDA YÜK KAYBI

Gerçek sıvıların boru içindeki hareketinde oluşan (H_L) yük kaybı, akıma ters yöndeki sürtünme kuvvetlerinin neden olduğu enerji kaybının birim kütleye düşen değeridir. Borulardaki akıma Bernoulli denklemini uygulayabilmek için (H_L)'nin belirlenmesi gerekir.

Yatay bir borunun iki kesiti arasındaki basınç düşmesini karşılayan sıvı yüksekliğini (h) ile gösterirsek,

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

ifadesi yazılabilir. Aynı borunun yük kaybı ise daha önce ifade edildiği gibi

$$H_L = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

eşitliğinden bulunabilir.

Yukarıdaki iki denklemin sağ tarafları aynı olduğundan ($h = H_L$) yazılabilir. Demek oluyor ki borunun iki kesiti arasındaki basınç düşmesi yük kaybını verir. Yük kaybı boru içindeki akıma gösterilen direncin ölçüsüdür. Direnç ise (D) boru çapı, (μ) viskozite, (ρ) özgül kütle, (L) boru uzunluğu, (V) sıvı hızı, (K) boru bağıl pürüzlülüğünün bir fonksiyonudur. Buna göre borudaki yük kaybı (H_L), aşağıdaki fonksiyonla eşitlenebilir.

$$H_L = h = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} = f\,(D,\ \mu,\ \rho,\ L,\ V,\ K) \cdot \frac{1}{\rho \cdot g}$$

Boru mutlak pürüzlülüğü (ε)'nın borunun (D) çapına oranı (K) ile gösterilir, $\left(K = \frac{\varepsilon}{D}\right)$'dir. Hidrolikte bilinen boyut analizi bu denkleme uygulanarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Bu ifadeye Darcy formülü veya sürekli yük kaybı formülü denir. (λ)'ya direnç katsayısı veya sürtünme katsayısı denir. (λ), bağıl pürüzlülük $\left(K = \frac{\varepsilon}{D}\right)$ ve Reynolds sayısı (R_e)'nin fonksiyonudur.

$$\lambda = f\left(R_e,\ \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

(L) uzunluğundaki boru içinde birim kütle için akıma ters yönde oluşan sürtünme kuvvetinin birim boru uzunluğuna düşen değeri (J) ile gösterilirse (H_L) ile (J) arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$H_L = J \cdot L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Bu ifadeden (J) çözülürse

$$J = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

ifadesi bulunur. Daha önce (V. BÖLÜM'de) daire kesitli bir boru için aşağıdaki ifade bulunmuştu.

$$J = \frac{4}{D} \cdot b \cdot V^2$$

Yukarıdaki (J) için verilmiş iki denklem eşitlenirse

$$\frac{4}{D} \cdot b \cdot V^2 = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{veya} \quad 4 \cdot b = \frac{\lambda}{2g}$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade borulardaki yük kaybını veren eski ve yeni formüller arasındaki bağıntıyı gösterir.

6) PÜRÜZLÜLÜK

Sürtünme katsayısı (λ) daha önce ifade edildiği gibi (R_e) ve $\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$'nin fonksiyonudur, yani

$$\lambda = f\left(R_e\,,\ \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

şeklindedir. Bu fonksiyondan anlaşıldığı gibi (λ), kesitin biçim etkenlerine bağlıdır. (λ)'ya pürüzlülük katsayısı da denir. Boru iç yüzü pürüzlülüğünün bağlı olduğu etkenleri tam olarak açıklamak olanaksızdır. Bununla beraber pürüzlülük boru iç yüzünün ortalama pürüz yüksekliğini ve boru kesitinin çarpıklığını yansıtan bir uzunluk şeklinde ifade edilir. Pürüzlülük (ε) ile gösterilir ve hidrolikte (ε)'na mutlak pürüzlülük denir. Boru iç yüzünün pürüzleri boru çapına göre çok küçüktür ve genellikle milimetrenin onda biri civarındadır.

Mutlak pürüzlülük (ε)'nın boru iç çapı (D)'ye oranına bağıl pürüzlülük denir. Bağıl pürüzlülük, (K), aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$K = \frac{\varepsilon}{D}$$

(λ) sürtünme katsayısı fonksiyonu yeniden yazılırsa,

$$\lambda = f\left(R_e\,,\ \frac{\varepsilon}{D}\right) = f\ (R_e,\ K)$$

şeklinde olur. Durumları ve nitelikleri farklı iki borunun (R_e) ve (K) değerleri eşit olursa iki borunun (λ) sürtünme katsayıları birbirine eşit olur. Boru iç yüzünün PARLAK ve PÜRÜZSÜZ kabul edilebilmesi için (ε)'nın (λ) üzerindeki etkisinin sıfır veya ihmal edilebilecek kadar küçük olması gerekir. (ε)'nın (λ) üzerindeki etkinliği yukarıdaki ifadede $\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$ oranı ile ancak gerçekleşir. Bir borunun iç yüzünün parlak ve pürüzsüz olabilmesi için (λ) üzerinde (R_e)'den başka bir etkenin etkinliğinin bulunmaması gerekir.

Yukarıdaki

$$\lambda = f\ (R_e,\ K)$$

denkleminden anlaşıldığı gibi boru iç yüzünün pürüzlülüğü veya parlaklığı (ε) ile değil (K) bağıl pürüzlülükle belirlenir. (ε) mutlak pürüzlülü-

ğü verilmiş bir borunun eğer (D) çapı yeter büyüklükte ise boru PARLAK ve PÜRÜZSÜZ BORU, çapı küçükse PÜRÜZLÜ BORU kabul edilir. Boru iç yüzünün pürüzlülüğü borunun yapımında kullanılan gereçlere bağlıdır. Örneğin, çelik boru için,

$$\varepsilon = 0{,}045 \text{ mm.}$$

fond boru için,

$$\varepsilon = 0{,}3 \sim 1 \text{ mm.}$$

beton boru için,

$$\varepsilon = 0{,}3 \sim 3 \text{ mm.'dir.}$$

7) LAMİNER AKIMDA YÜK KAYBI

Sıkıştırılamıyan bir sıvının boru içindeki sürekli laminer akımında bir kesitin ortalama hızı aşağıdaki denklemle ifade edilmişti.

$$V_{ort} = \frac{(P_1 - P_2)\,.\,r_0^2}{8\,.\,\mu\,.\,L}$$

Bu denklemden ($P_1 - P_2$) çözülürse,

$$P_1 - P_2 = \frac{8\,.\,\mu\,.\,L\,.\,V_{ort}}{r_0^2}$$

eşitliği bulunur.

$$H_L = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

olduğundan, yukarıdaki denklemin iki yanı (γ)ile bölünürse (H_L) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$H_L = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{8\,.\,\mu\,.\,L\,.\,V_{ort}}{\gamma\,.\,r_0^2}$$

veya

$$H_L = \frac{32\,.\,\mu\,.\,L\,.\,V_{ort}}{\gamma\,.\,D^2}$$

Boru çapı ($D = 2r_0$)'dır.

Bu denklem tüm sıvıların laminer akımı için uygulanabilir ve denklem POISEUILLE FORMÜLÜ adını alır.

(H_L) sürekli yük kaybı genel ifadesi,

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

şeklindedir. Bu denklem yukarıdaki (H_L) ifadesi ile birleştirilirse,

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2_{ort}}{2g} = \frac{32 \cdot \mu \cdot L \cdot V_{ort}}{\gamma \cdot D^2}$$

eşitliği bulunur. Yukarıdaki denklemden (λ) sürtünme katsayısı çözülürse,

$$\lambda = 64 \cdot \frac{\mu \cdot g}{V_{ort} \cdot D} = 64 \cdot \frac{\nu}{V_{ort} \cdot D} = \frac{64}{R_e}$$

ifadesi bulunur. Laminer akım için (R_e) pratikte en çok (2320) değerini alabilir.

$$\lambda = \frac{64}{R_e}$$

ifadesinden anlaşıldığı gibi pürüzlülüğün laminer akıma etkisi yoktur.

8) KAYNAŞIK AKIMDA YÜK KAYBI

Kaynaşık akımın oluşumu oldukça karmaşıktır ve bu nedenle kaynaşık akımı yalnız kuramsal yolla incelemek olanaksızdır. Pratikte borulardaki akım kaynaşık olduğu için yarı kuramsal ve deneysel yöntemlerle bile olsa kaynaşık akımı incelemek zorunluluğu vardır. Sürtünme katsayısı (λ) laminer akım için $\left(\lambda = \frac{64}{R_e}\right)$ şeklinde matematiksel olarak ifade edilebilirsede kaynaşık akım için böyle bir bağıntı çıkartılamaz. Nikuradse ve diğer araştırmacılar boru bağıl pürüzlülüğünün (λ)'ya etkidiğini saptamışlar ve yaptıkları deney sonuçlarına dayanarak (λ)'yı formüllerle ifade etmişlerdir. Kaynaşık akımda yük kaybı formülleri eski ve yeni formüller şeklinde iki bölüme ayrılır ve bu formüller aşağıda açıklanmıştır.

a) ESKİ FORMÜLLER

Eski yük kaybı formülleri bir formüle indirgenerek şu şekilde ifade edilebilir.

$$J = \frac{H_L}{L} = \frac{4}{D} \cdot b \cdot V^2$$

Bu denklemdeki (b) için, Dupuit ($b = 4 \cdot 10^{-4}$) değerini önermiştir. Dupuit'in (b) değeri yukarıdaki denklemde yerine konursa,

$$J = \frac{16 \cdot 10^{-4}}{D} \cdot V^2$$

olur. Bu denkleme DUPUIT FORMÜLÜ denir.

Darcy (b) için

$$b = \left(507 + \frac{12{,}9}{D}\right) \cdot 10^{-6}$$

ifadesini önermiştir.

Yukarıdaki (J) ifadesinde (b) yerine Darcy'nin önerdiği ifade konursa,

$$J = \frac{4}{D} \cdot \left(507 + \frac{12{,}9}{D}\right) \cdot 10^{-6} \cdot V^2$$

denklemi elde edilir. Bu denkleme DARCY FORMÜLÜ denir. Yeni borular için bu değerin yarısı, içi ziftlenmiş borular için üçte biri alınır.

b) YENİ FORMÜLLER

Yük kaybı (H_L)'yi belirleyen yeni formüller bir formüle indirgenerek aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Bu formüldeki (λ) sürtünme katsayısı (R_e) ve (ε/D)'nin fonksiyonudur. Yukarıdaki denklemde sürtünme katsayısı (λ)'yı veren formüller deney sonuçlarına dayanılarak çıkartılmıştır.

Blasius Formülü: İç yüzü parlatılmış borular için ve ($3000 \leq R_e \leq 100000$) arasında ise kullanılır. İç yüzü parlatılmış borularda (λ) yalnız (R_e)'nin fonksiyonudur ve bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = \frac{0{,}316}{R_e^{0{,}25}}$$

Prandtl Formülü: İç yüzü parlatılmış borular için ve ($100000 \leq R_e \leq 3000000$) ise kullanılır.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log\left(R_e \cdot \sqrt{\lambda}\right) - 0{,}8$$

Nikuradse Formülü: Pürüzlü borular için kullanılır.

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \cdot \log \frac{D}{\varepsilon} + 1{,}14\right)^2} \quad \text{veya} \quad \lambda = \frac{1}{\left(2 \cdot \log \frac{r}{\varepsilon} + 1{,}74\right)^2}$$

Colebrook-White Formülü: Pürüzlü bölgeden hidrolik cilalı bölgeye geçiş bölgesi için geçerlidir, fakat mühendisler tüm borular için bu formülü kullanarak (λ)'yi hesaplarlar.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 \cdot D} + \frac{2{,}51}{R_e \cdot \sqrt{\lambda}}\right)$$

Colebrook-White formülünün çözümü uzun işlemleri gerektirir, bunun yerine (λ) ile (R_e) ve $\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$ arasındaki ilişkiyi gösteren diyağramdan yararlanılır. Bu diyağrama Moody diyağramı denir ve (Şekil 6.3) de gösterilmiştir.

Borularda laminer ve kaynaşık akımdaki yük kaybı formülleri sıkıştırılmayan akışkanlar için geçerlidir. Formül ve diyagramlar kullanılmadan önce boru pürüzlülüğü tahmin edilmelidir.

9) YÜK KAYBININ DEBİ CİNSİNDEN İFADESİ

Bilindiği gibi debi, akım hızı ile kesit alanının çarpımına eşittir.

$$Q = S \cdot V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V$$

Bu denklemden akım hızı aşağıdaki şekilde bulunabilir.

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

Diğer yandan,

$$\frac{H_L}{L} = J = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

olduğunu biliyoruz. Bu denklemde (V) yerine yukarıdaki eşitliği konursa,

$$J = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}\right)^2 = \frac{\lambda}{2g} \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5}$$

olur. Bu ifadede,

$$\frac{\lambda}{2g} \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot D^5} = K$$

şeklinde tanımlanırsa, birim uzunluk için yük kaybı,

$$J = K \cdot Q^2$$

şeklinde debi cinsinden ifade edilebilir.

10) PÜRÜZLÜ BORULARDA YAPILAN DENEYSEL ARAŞTIRMALAR

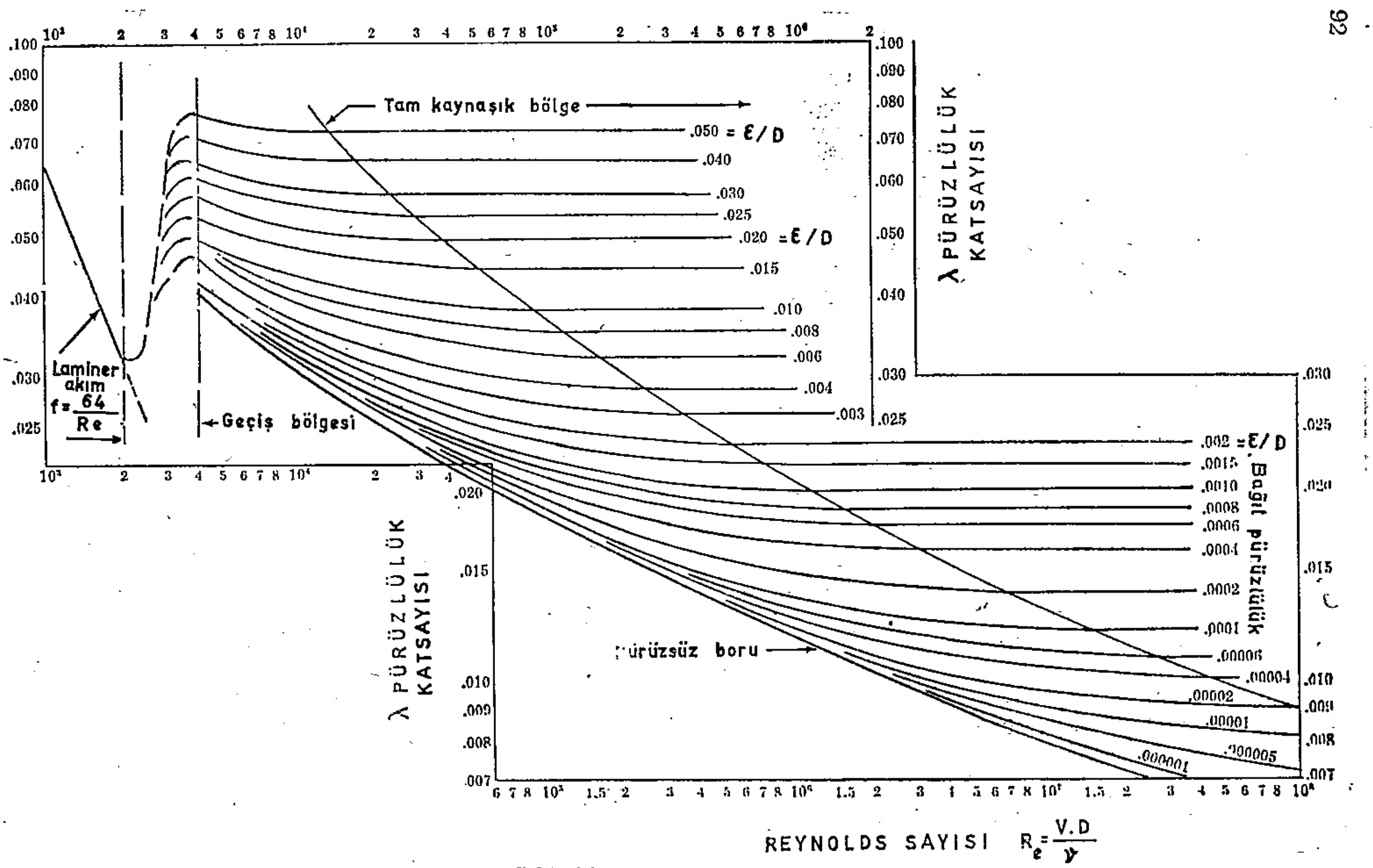
Pürüzlü borulardaki akım üzerinde yapılan deneysel araştırmalar arasında Nikuradse adlı araştırmacının yaptığı deneysel araştırmaların önemli yeri vardır. Nikuradse deneylerini kum tanecikleri ile yapay olarak pürüzlendirilmiş borularda sürdürmüştür. Bu deneylerde (R_e) arttıkça boru içinden farklı akım rejimlerinin birbiri ardından oluştuklarını kanıtlamıştır. Bu rejimlere kaynaşık akımın laminer akım aşaması, geçiş aşaması ve tam kaynaşık akım denir. Nikuradse yaptığı deneylerde

$$\lambda = \lambda\left(R_e, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

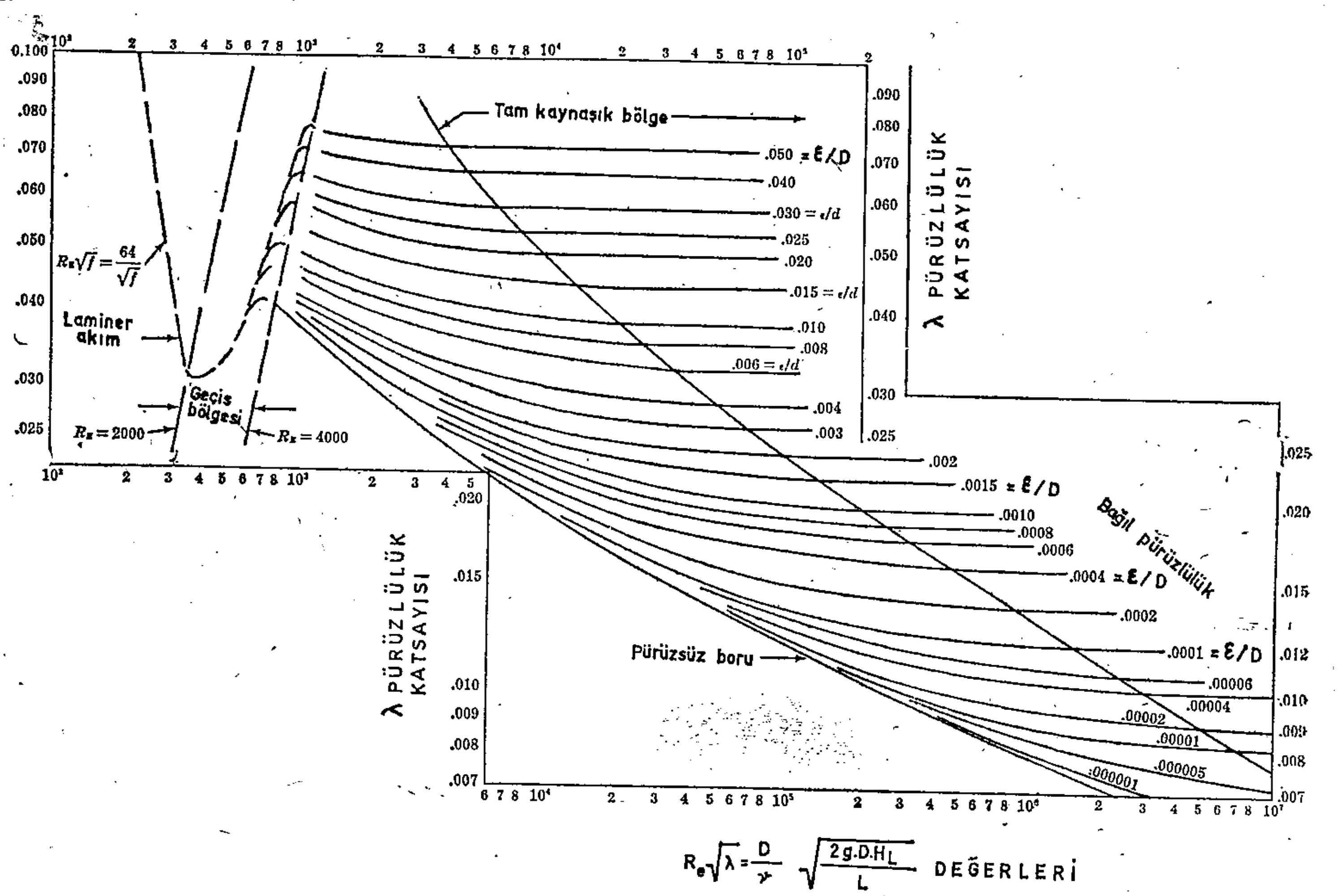
şeklinde (λ)'nın (R_e) ve (ε/D)'nin fonksiyonu olduğunu saptamıştır. Nikuradse deney sonuçlarına göre çizilen eğriler (Şekil 6.3)'deki Moody diyagramında çizilmiş eğrilerin aynıdır, yalnız geçiş bölgesinde farklılık gösterirler.

Kaynaşık akımın laminer akım aşamasında (λ) yalnız (R_e)'ye, geçiş aşamasında (λ), (R_e) ve (ε/D)'ye, tam kaynaşık akım aşamasında (λ) yalnız (ε/D)'ye bağlıdır.

Colebrook ve White adlı araştırmacıların sinai borularda yaptıkları deney sonuçlarına göre, sinai boruların laminer akım aşaması ile tam kaynaşık akım aşamasında Nikuradse borularınkilerle uyum vardır, geçiş bölgesinde farklılık gösterir. Sinai boruların akımında geçiş bölgesi için Colebrook-White formülü kullanılır ve bu formül gerçeğe en yakın sonuçlar verir. Borunun (Q) debisi biliniyorsa (Şekil 6.3)'de gösterilen Moody diyagramı kullanılır. Colebrook-White formülü S.P. Johnson ve H. Rouse tarafından daha değişik bir şekilde diyagram haline getirilmiştir. Bu diyagram (Şekil 6.4)'de gösterilmiştir. Debi hesaplanacağı zaman (Şekil 6.4)'deki diyagram kullanılır.



Şekil 6.3 — Moody Diyragramı



Şekil 6.4 — Johnson ve Rouse Diyragramı

Mutlak pürüzlülük (ε)'nın çeşitli türde sinai borular için değerleri mm olarak (Tablo 6.1)'de verilmiştir.

(λ) değerinin belirlenmesinde genellikle tüm borular için

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 \cdot D} + \frac{2{,}51}{R_e \cdot \sqrt{\lambda}}\right)$$

şeklinde verilmiş COLEBROOK-WHİTE formülü kullanılır ve bu formül (λ) için oldukça iyi sonuçlar verir.

Tablo 6.1 — Sinai Boruların Mutlak Pürüzlülük (ε) Değerleri

Boru Cinsi	ε (mm)
Pirinç, Bakır, Cam Çekme Borular	0.00015
Sinai Pirinç Borular	0.025
Akma Çelik Borular:	
Yeni	0.04 — 0.15
Kullanılmış	0.04 — 0.25
İçerisi ziftlenmiş	0.015
Dökme Çelik Borular:	
Yeni	0.03 — 0.10
Az kullanılmış	0.4
Çok kullanılmış	3
Galvenizli Demir Borular	0.12 — 0.15
Font Borular:	
Yeni	0.02 — 0.15
Kullanılmış	1 — 1.5
İçerisi ziftlenmiş	0.1 — 0.125
Beton Borular	0.15 — 3
Ağaç Borular	0.2 — 1

11) BORULARDA YERSEL YÜK KAYIPLARI

Borularda sürtünmeden ileri gelen sürekli yük kayıpları yanında akım yönünün ve kesit değşmesinin neden olduğu yersel yük kayıplarıda vardır. Yersel yük kayıpları boru boyuna bağlı değildir ve çok kısa aralıkta enerji çizgisinin düşmesine neden olurlar.

Yersel yük kayıpları borunun ani veya yavaşça genişlemesi veya daralması, bir dirsek olması, çatalların bulunması gibi durumlarda oluşur.

Boru içindeki sıvının akımında oluşan yersel yük kayıplarını (h) ile gösterirsek genel olarak aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$h = \theta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Bu formülde (θ)'nın değeri ($\theta \leq 1$)'dir ve yersel yük kaybı katsayısı denir.

Yersel yük kayıpları (h), borunun geometrisindeki değişikliklere göre aşağıdaki formüllerle belirlenebilir.

a) ANİ KESİT GENİŞLEMESİNDE YERSEL YÜK KAYBI

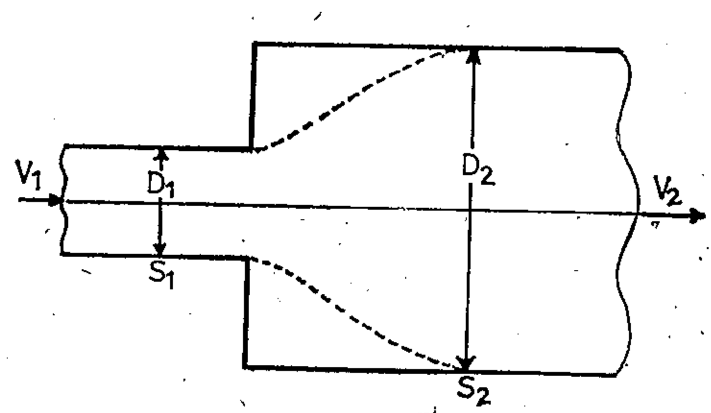
Boru kesitinin değiştiği yerden başlıyarak (Şekil 6.5)'de gösterildiği gibi sıvı lifleri önce dağılır ve birbirine girer, kesit değişmesinden uzakta akım yeniden düzenli duruma girer. Yersel yük kaybı formülü

$$h = \theta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 \cdot g} = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikten

$$\theta = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2$$

bulunur.



Şekil 6.5

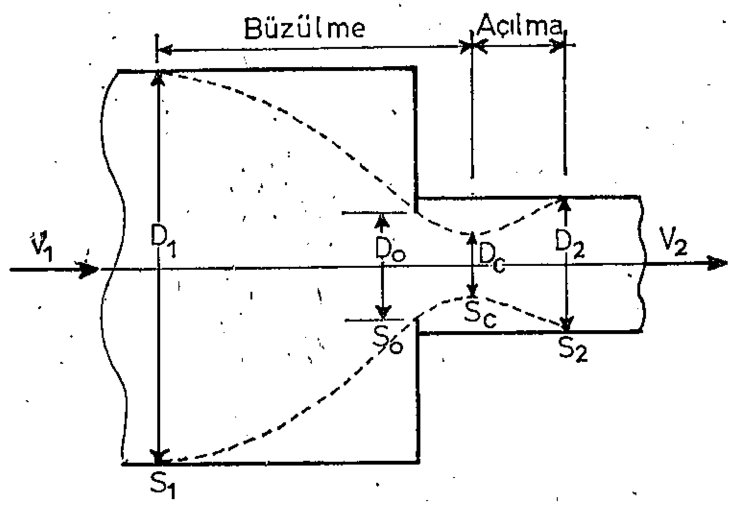
Eğer boru, boyutları çok büyük olan bir hazneye açılırsa hazne hızı ($V_2 = 0$) alınabilir ve bu durumda aşağıdaki ifade bulunur.

$$h = \theta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

Borudan hazneye geçişte ($\theta = 1$) olur.

b) ANİ KESİT DARALMASINDA YERSEL YÜK KAYBI

(Şekil 6.6)'da görüldüğü gibi, sıvı liflerinde önce büzülme ve büzülmeden sonra açılma olur. Açılmanın sonunda lifler yeniden birbirine paralel duruma gelir. Kesit alanlarının birbirine oranını aşağıdaki şekilde tanımlayalım.



Şekil 6.6

$$\frac{S_o}{S_2} = m$$

$$\frac{S_c}{S_o} = \mu$$

(μ)'ye büzülme katkısı denir. (m) ve (μ) eşitliklerinden aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\mu = \frac{S_c}{m \cdot S_2}, \quad \frac{S_2}{S_c} = \frac{1}{m \cdot \mu}$$

Araştırmalar kesit alanının (S_o)'dan (S_c)'ye düşmesinin yani büzülmenin yük kaybına neden olmadığını göstermişlerdir. Yük kaybı büzülmeden sonraki açılmada meydana gelir. Bu nedenle yük kaybı aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$h = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 \cdot g} = \frac{V_2^2}{2g} \cdot \left(\frac{S_2}{S_c} - 1\right)^2$$

Bu denklemde $\left(\frac{S_2}{S_c}\right)$ yerine $\left(\frac{S_2}{S_c} = \frac{1}{m \cdot \mu}\right)$ eşitliği konursa,

$$h = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$$

elde edilir. Bu ifadeden yersel yük kaybı katsayısı

$$\theta = \left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$$

bulunur. $\left(\frac{S_1}{S_o} \geq 10\right)$ ise ($\mu = 0{,}62$) alınır.

$\left(\frac{S_1}{S_o} \leq 10\right)$, ($S_1 = S_2$) ve ($m = 1$) olması durumuna göre ($\mu$) ve $\left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$ için (Tablo 6.2)'deki değerler alınır.

Tablo 6.2 — μ ve $\left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$ Değerleri, $\frac{S_1}{S_o} \leq 10$ ise

m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
μ	0.618	0.615	0.612	0.610	0.608	0.607	0.605	0.603	0.600	0.596
$\left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$	232	51	19.8	9.6	5.25	3.08	1.88	1.77	0.73	0.46

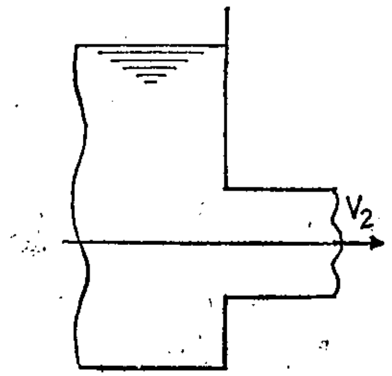
$S_1 = S_2$ ise

m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
μ	0.625	0.630	0.645	0.660	0.680	0.714	0.750	0.810	0.895	1
$\left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$	226	48	17.5	7.8	3.8	1.3	0.8	0.3	0.06	0

$m = 1$ ise

$\frac{S_1}{S_2}$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
μ	0.60	0.61	0.62	0.63	0.66	0.68	0.70	0.73	0.78	0.86	1
$\left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$	0.45	0.41	0.38	0.32	0.26	0.22	0.18	0.14	0.08	0.025	0

c) **HAZNEDEN BORUYA GEÇİŞTE YERSEL YÜK KAYBI** (Şekil 6.7):



Şekil 6.7

Yersel yük kaybı ve yersel yük kaybı katsayısı

$$h = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{ve} \quad \theta = \frac{1}{2}$$

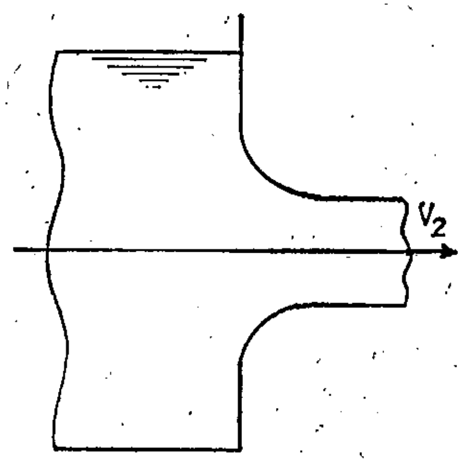
şekinde olur.

(Şekil 6.8) de görüldüğü gibi hazneden boruya geçişte boru yuvarlatılmışsa,

$$h = (0{,}005 \sim 0{,}25)\ \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\theta = 0{,}005 \sim 0{,}25$$

olur.



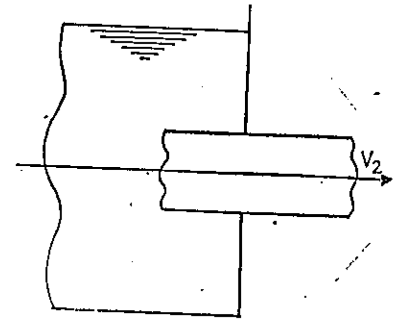
Şekil 6.8

Boru hazne ile birleşme yerinde hazne içine girmişse (Şekil 6.9),

$$h = (0{,}55 \sim 3) \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

$$\theta = 0{,}55 \sim 3$$

olur.



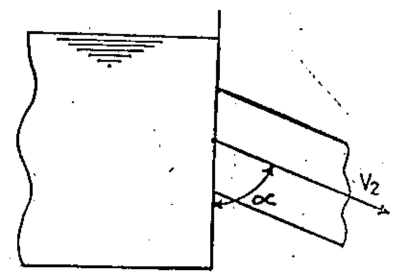
Şekil 6.9

Boru hazne ile eğik açı yaparak birleşmişse (Şekil 6.10),

$$h = (0{,}5 + 0{,}3 \cdot \cos\alpha + 0{,}25 \cdot \cos^2\alpha) \cdot \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\theta = 0{,}5 + 0{,}3 \cdot \cos\alpha + 0{,}25 \cdot \cos^2\alpha$$

olur.



Şekil 6.10

12) DİRSEKLERDE YERSEL YÜK KAYBI

a) EĞRİSEL DİRSEKLERDE YÜK KAYBI (Şekil 6.11):

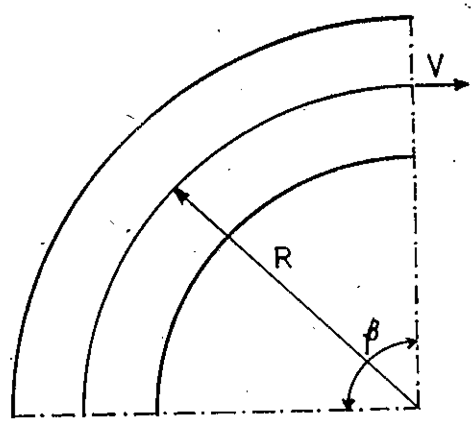
Genel denklem,

$$h = \theta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

şeklindedir ve

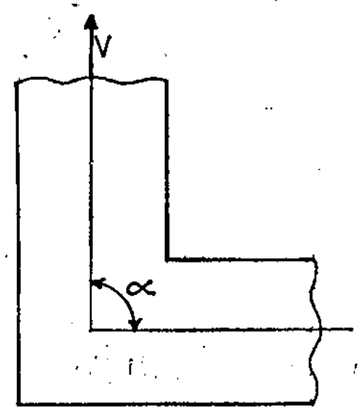
$$\theta = \frac{\beta}{90°} \cdot \left[0{,}131 + 0{,}163 \left(\frac{D}{R}\right)^{3,5}\right]$$

olur. Formüldeki (R) dirseğin eğrilik yarıçapıdır.



Şekil 6.11

b) KÖŞELİ DİRSEKLERDE YÜK KAYBI (Şekil 6.12):



Şekil 6.12

Genel denklem,

$$h = \theta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

şeklindedir ve

$$\theta = 0{,}9457 \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2{,}047 \cdot \sin^4 \frac{\alpha}{2}$$

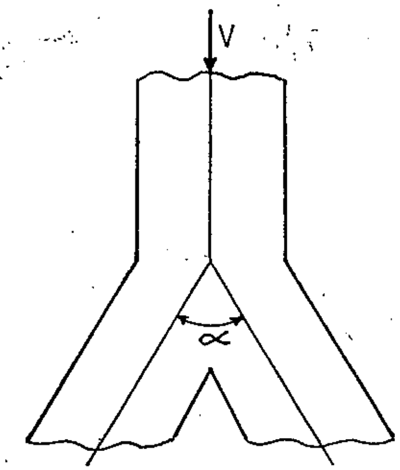
olur.

13) ÇATALLARDA YERSEL YÜK KAYBI (Şekil 6.13):

Genel denklem,

$$h = \theta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

şeklindedir.



Şekil 6.13

a) BİR AKIMI İKİYE AYIRAN ÇATALLARDA:

$\alpha = 90°$ için $\theta = 0{,}5$
$\alpha = 45°$ için $\theta = 0{,}25$

olur.

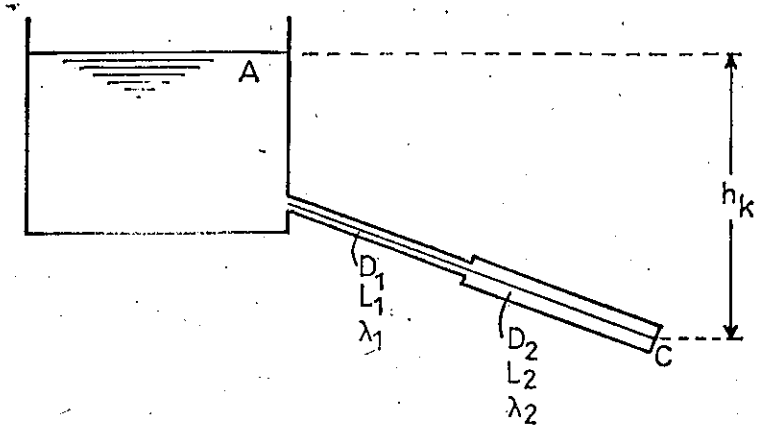
b) İKİ AKIMI BİRLEŞTİREN ÇATALLARDA:

$\alpha = 90°$ için $\theta = 1$
$\alpha = 45°$ için $\theta = 0{,}25$

olur.

ÖRNEK PROBLEMLER

1) (Şekil 6.14)'deki boru sistemi (15 m.) uzunluğunda ve (5 cm.) çapında ince bir boru ile (25 m.) uzunluğunda ve (8 cm.) çapında iki borudan oluşmuştur. İnce borunun sürtünme katsayısı (0,02), kalın borunun sürtünme katsayısı (0,03) ve hazneden çıkan debi (3 lt/sn) olduğuna göre haznedeki su seviyesi ile borunun bitim noktası arasındaki kot farkını bulunuz.



Şekil 6.14

ÇÖZÜM:

İnce boruda hız,

$$V_1 = \frac{4 \, . \, Q}{\pi \, . \, D_1^2} = \frac{4 \, . \, 0{,}003}{3{,}14 \, . \, (0{,}05)^2} = 1{,}53 \text{ m/sn}$$

bulunur.

Kalın boruda hız,

$$V_2 = \frac{4 \, . \, Q}{\pi \, . \, D_2^2} = \frac{4 \, . \, 0{,}003}{3{,}14 \, . \, (0{,}08)^2} = 0{,}598 \text{ m/sn}$$

bulunur.

(A) ile (C) arasında Bernoulli denklemini uygulayalım.

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A - H_L = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + z_C$$

$$P_A = P_C = V_A = 0 \, , \quad V_C = V_2$$

olduğundan

$$z_A - z_C = H_L + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{veya} \quad h_k = H_L + \frac{V_2^2}{2g}$$

elde edilir.

(H_L)toplam yük kaybı aşağıdaki kayıpların toplamıdır.

Yersel yük kayıpları

a) Hazneden çıkış kaybı:

$$h_ç = \frac{1}{2} \, . \, \frac{V_1^2}{2 \, . \, g} = \frac{1}{2} \, . \, \frac{(1{,}53)^2}{2 \, . \, 9{,}81} = 0{,}06 \text{ m.}$$

b) Ani genişleme kaybı:

$$h_G = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 \, . \, g} = \frac{(1{,}53 - 0{,}598)^2}{2 \, . \, 9{,}81} = 0{,}045 \text{ m.}$$

Sürekli yük kayıpları

a) İnce boruda:

$$H_{L_1} = \lambda_1 \, . \, \frac{L_1}{D_1} \, . \, \frac{V_1^2}{2 \, . \, g} = 0{,}02 \, . \, \frac{15}{0{,}05} \, . \, \frac{(1{,}53)^2}{2 \, . \, 9{,}81} = 0{,}716 \text{ m.}$$

b) Kalın boruda:

$$H_{L_2} = \lambda_2 \, . \, \frac{L_2}{D_2} \, . \, \frac{V_2^2}{2 \, . \, g} = 0{,}03 \, . \, \frac{25}{0{,}08} \, . \, \frac{(0{,}598)^2}{2 \, . \, 9{,}81} = 0{,}273 \text{ m.}$$

Toplam yük kaybı

$$H_L = h_ç + H_{L_1} + h_G + H_{L_2} = 0{,}060 + 0{,}716 + 0{,}045 + 0{,}273 = 1{,}094 \text{ m.}$$

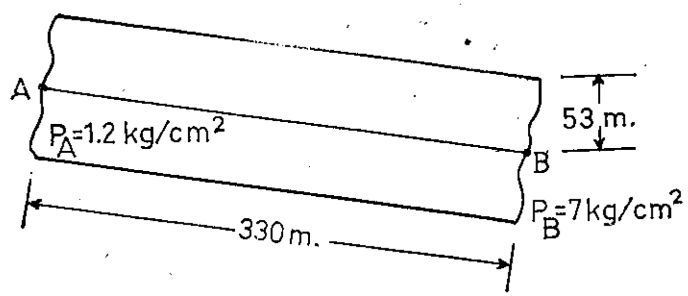
bulunur.

Kot farkı,

$$h_k = H_L + \frac{V_2^2}{2 \, . \, g} = 1{,}094 + \frac{(0{,}598)^2}{2 \, . \, 9{,}81} = 1{,}112 \text{ m.}$$

bulunur.

2) Uzunluğu (330 m.) ve çapı (30 cm.) olan bir borunun içinden su akmaktadır. Suyun sıcaklığı (10 °C) ve kinematik viskozitesi (0,0131 cm^2/sn)'dir. Borunun bağıl pürüzlülüğü (0.005), iki ucu arasındaki kot farkı (53 m.), uçlarındaki basınçlar (7 kg/cm^2) ve (1,2 kg/cm^2) dir. Borunun konumu (Şekil 6.15)'de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.15

Boru içinden akan suyun debisini hesaplayınız. İlk yaklaşım olarak pürüzlülük katsayısı (0,03) alınacaktır.

ÇÖZÜM:

(A) ile (B) arasında Bernoulli denklemi uygulanırsa,

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A - H_L = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

olur. ($V_A = V_B$) olduğundan denklem şu şekli alır.

$$H_L = \frac{P_A - P_B}{\gamma} + z_A - z_B$$

$$H_L = \frac{(1,2 - 7) \cdot 10^4}{10^3} + 53 = -5 \text{ m.}$$

Bu sonuca göre su boru içinde (B)'den (A)'ya doğru akmaktadır.

Toplam yük kaybı formülü aşağıda yazılmıştır,

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad \text{veya} \quad 5 = 0,03 \cdot \frac{330}{0,3} \cdot \frac{V^2}{19,62}$$

Bu eşitlikten (V) çözülürse

$$V = \sqrt{5 \cdot 0,3 \cdot 19,62 / 0,03 \cdot 330} = 1,72 \text{ m/sn}$$

bulunur ve ilk yaklaşım olarak (V) değeridir.

Boru için Reynolds sayısını hesaplıyalım.

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{1,72 \cdot 30}{0,0131} = 3,93 \cdot 10^5$$

(R_e) değeri (10^5)' den büyük olduğundan tam pürüzlü bölge için verilmiş (λ) formülünden gerçek (λ) değeri bulunur.

$$\lambda = \frac{1}{(2 \cdot \log D/\varepsilon + 1,14)^2} = \frac{1}{(2 \cdot \log 200 + 1,14)^2} = 0,0303$$

Gerçek hız,

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

veya

$$5 = 0,0303 \cdot \frac{330}{0,30} \cdot \frac{V^2}{19,62}$$

ifadesinden hesaplanır.

Buradan (V) çözülürse

$$V = 1,715 \text{ m/sn}$$

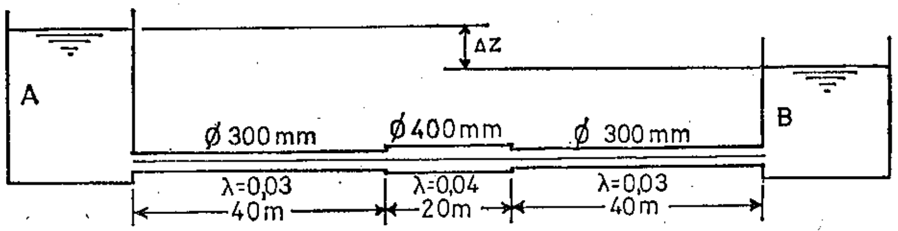
bulunur.

Debi,

$$Q = V \cdot S = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1,715 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,30)^2}{4} = 0,121 \text{ m}^3/\text{sn}$$

bulunur,

3) (Şekil 6.16)'da gösterilen hazne boru sisteminde yersel yük kayıplarını da hesaba katarak ($0{,}2\ m^3/sn$) debi elde edebilmek için (A) ve (B) haznelerinin su seviyeleri arasındaki kot farkı değerini bulunuz. Hazneleri birleştiren boruların çap, uzunluk ve pürüzlülük katsayı değerleri şekil üzerinde verilmiştir.



Şekil 6.16

ÇÖZÜM:

(A) ve (B) haznelerinin serbest su yüzlerindeki iki nokta arasında Bernoulli denklemi,

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A - H_L = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

şeklinde olur.

$$P_A = P_B = P_{at}, \quad V_A = V_B = 0 \quad \text{ve} \quad z_A - z_B = \Delta z$$

olduğundan Bernoulli denklemi yeniden yazılırsa

$$H_L = \Delta z$$

bulunur.

(H_L) toplam yük kaybı,

$$H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + 0{,}5 \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} + h_g + h_d$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemin sağ tarafındaki (1.) terim üç borunun sürekli yük kayıplarını, (2.) terim hazne çıkışında yersel kayıp, (3.) terim hazneye geçişte yersel kayıp, (4.) terim boru ani genişlemesinde yersel kayıp, (5.) terim boru ani daralmasında yersel yük kayıplarını ifade eder. Borudaki hızlar,

$$V_1 = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D_1^2}{4}} = \frac{0{,}2}{3{,}14 \cdot \frac{(0{,}3)^2}{4}} = 2{,}83\ m/sn$$

$$V_2 = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D_2^2}{4}} = \frac{0{,}2}{3{,}14 \cdot \frac{(0{,}4)^2}{4}} = 1{,}60\ m/sn$$

olur.

(h_g) genişleme kaybı,

$$h_g = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 = \frac{(1{,}60)^2}{2 \cdot 9{,}81} \cdot \left[\left(\frac{0{,}4}{0{,}3}\right)^2 - 1\right]^2 = 0{,}079\ m.$$

olur.

(h_d) daralma kaybı,

$$h_d = \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$$

olur.

$\left(m = \frac{S_1}{S_0}\right)$ ve ($S_1 = S_0$)'dır, bundan dolayı ($m = 1$) olur.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\pi \cdot D_1^2 / 4}{\pi \cdot D_2^2 / 4} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \left(\frac{0{,}3}{0{,}4}\right)^2 = 0{,}56$$

olur.

(Tablo 6.2)'den ($m = 1$) ve $\left(\frac{S_1}{S_2} = 0{,}56\right)$ için $\left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2 = 0{,}20$ bulunur. Daralma kaybı

$$h_d = \frac{(2{,}83)^2}{2 \cdot 9{,}81} \cdot 0{,}20 = 0{,}0816\ m.$$

olur.

Toplam yük kaybı,

$$H_L = 0{,}03 \cdot \frac{(40 + 40)}{0{,}3} \cdot \frac{(2{,}83)^2}{2 \cdot 9{,}81} + 0{,}04 \cdot \frac{20 \cdot (1{,}6)^2}{0{,}4 \cdot 2 \cdot 9{,}81} + 0{,}079 + 0{,}0816 = 3{,}68\ m.$$

bulunur.

($H_L = \Delta z$) olduğundan

$$\Delta z = 3{,}68\ m.$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Borulardaki akımın laminer veya kaynaşık akım olduğu nasıl belirlenir?
2) Borulardaki yük kaybını ifade eden Darcy formülünü ve formüldeki simgelerin anlamını açıklayınız.
3) Kayma hızı nedir?
4) Mutlak pürüzlülük ve bağıl pürüzlülük nedir?
5) Borulardaki yük kaybını veren eski ve yeni formüller arasındaki bağıntıyı belirtiniz.
6) Bir borunun iç yüzü hangi koşullarda pürüzsüz kabul edilir.
7) Boru içerisinde laminer akım olduğu zaman sürtünme katsayısı nasıl ifade edilir?
8) Boru içerisinde kaynaşık akım olduğu zaman yük kaybı nasıl hesaplanır?
9) Moody diyagramının kullanılışını açıklayınız.
10) Borulardaki sıvı akımında yersel yük kayıpları hangi nedenlerle oluşur?

VII. BÖLÜM

BORULARIN PRATİK HESABI

VII. BÖLÜMDE KULLANILAN SİNGELERİM ANLAMI

- b — sabit
- D — çap
- g — yerçekimi ivmesi
- h — yersel yük kaybı
- H — toplam enerji yüksekliği
- H_L — sürekli yük kaybı
- J — birim uzunluk için yük kaybı
- L — uzunluk
- P — basınç
- R_e — Reynolds sayısı
- V — hız
- z — kıyaslama düzleminden uzaklık, düşey eksen
- Q — debi
- γ — özgül ağırlık
- Δ — küçük değişme veya artım
- θ — yersel yük kaybı katsayısı
- λ — boru sürtünme katsayısı
- μ — kesit büzülme katsayısı
- ν — kinematik viskozite
- π — daire çevresinin çapına oranı
- Σ — toplam

BORULARIN PRATİK HESABI

1) BORULARDA TOPLAM YÜK KAYBI

Sıvının boru içindeki akımında toplam yük kaybı sürekli ve yersel yük kayıplarının toplamına eşittir. Boru uzun ise sürekli yük kayıpları yersel kayıplardan büyük olur ve yersel yük kayıpları ihmal edilebilir.

Sürekli yük kayıplarının debi cinsinden ifadesi daha önce aşağıdaki şekilde verilmişti.

$$J = K \cdot Q^2$$

veya

$$H_L = J \cdot L = K \cdot Q^2 \cdot L$$

Bu ifadede,

$$K = \frac{\lambda}{2 \cdot g} \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot D^5}$$

şeklindedir.

Borulardaki sürekli yük kaybı eski formüllerden,

$$H_L = J \cdot L = \frac{4}{D} \cdot b \cdot V^2 \cdot L = K \cdot Q^2 \cdot L$$

şeklinde ifade edilir. Daha önce $\left(4 \cdot b = \frac{\lambda}{2 \cdot g}\right)$ bağıntısı bulunmuştur. (K)'yı yeniden yazarsak

$$K = 4 \cdot b \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot D^5} = \frac{64 \cdot b}{\pi^2 \cdot D^5}$$

olur.

Borularda yersel yük kayıpları,

$$h = \theta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{\theta}{2 \cdot g} \cdot \left[\frac{Q}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}\right]^2 = \frac{\theta}{2 \cdot g} \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} = \theta \cdot K' \cdot Q^2$$

şeklinde yazılabilir. Bu formüldeki (K') nin ifadesi

$$K' = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot D^4}$$

şeklindedir.

İçersinde sürekli akım bulunan bir borunun (1) ve (2) nolu kesitleri arasında Bernouilli denklemi uygulanırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + \sum Q^2 \cdot (K \cdot L + K' \cdot \theta)$$

$\left(\sum Q^2 \cdot K \cdot L\right)$ sürekli yük kayıplarını ve $\left(\sum Q^2 \cdot K' \cdot \theta\right)$ yersel yük kayıplarını ifade eder. İki kesit arasındaki yük farkı (enerji yüksekliği azalması) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$H_1 - H_2 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 - \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2\right) = Q^2 \cdot \sum (K \cdot L + K' \cdot \theta)$$

Toplam yük kaybı

$$H_1 - H_2 = \Delta H$$

şeklinde ifade edilebilir, (H_1, H_2) kesitlerin toplam enerji yüksekliğidir. Toplam yük kaybı,

$$\Delta H = \sum Q^2 \cdot (K \cdot L + K' \cdot \theta)$$

olur.

Darcy (b) için şu ifadeyi vermiştir:

$$b = \left(a' + \frac{b'}{D}\right) = \left(507 + \frac{12.9}{D}\right) 10^{-6}$$

Bu formülden (b) hesaplanabilir ve böylece

$$K = \frac{64 \cdot b}{\pi^2 \cdot D^5}$$

ifadesinden (K) bulunabilir. Bu denkleme göre (K) yalnız (D)'nin fonksiyonudur.

Boru çapı (D) bilinirken (K) ve (K') hesaplanabilir, boru çapı (D) bilinirken (K) ve (K') değerleri (Tablo 7.1)'de verilmiştir.

Kollara ayrılmayan borularda (ΔH) toplam yük kayıpları

$$\Delta H = \sum Q^2 \cdot (K \cdot L + K' \cdot \theta)$$

ifadesinden bulunur.

Tablo 7.1 — Boru Çapına göre (K) ve (K') Değerleri

Boru Çapı m.	$K = \frac{64 \cdot b}{\pi \cdot D^5}$	$K' = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot D^4}$
0.01	116785000	8263800
0.02	2338500	516490
0.03	250310	102022
0.04	52560	32231
0.05	15874	13222
0.06	6021	6376.4
0.07	2666	3441.8
0.08	1321.9	2017.5
0.09	713.8	1259.5
0.10	412.4	826.4
0.11	251.2	564.4
0.12	160.01	398.53
0.13	105.8	289.3
0.14	72.2	251.1
0.15	50.6	163.2
0.16	36.301	126.09
0.17	26.6	98.4
0.18	19.835	78.781
0.19	15.1	63.4
0.20	11.6	51.6
0.25	3.7	21.2
0.30	1.5	10.2
0.35	0.67	5.5
0.40	0.37	3.2
0.45	0.19	2.0
0.50	0.11	1.3
0.60	0.04	0.67
0.70	0.02	0.34
0.80	0.01	0.20
0.90	0.006	0.126
1.00	0.003	0.083

$$K = \frac{\lambda}{2 \cdot g} \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot D^5}$$

ifadesinde (K) yalnız (λ) ve (D)'nin fonksiyonudur, (λ) ise (R_e) ve (ε/D)'nin fonksiyonudur.

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

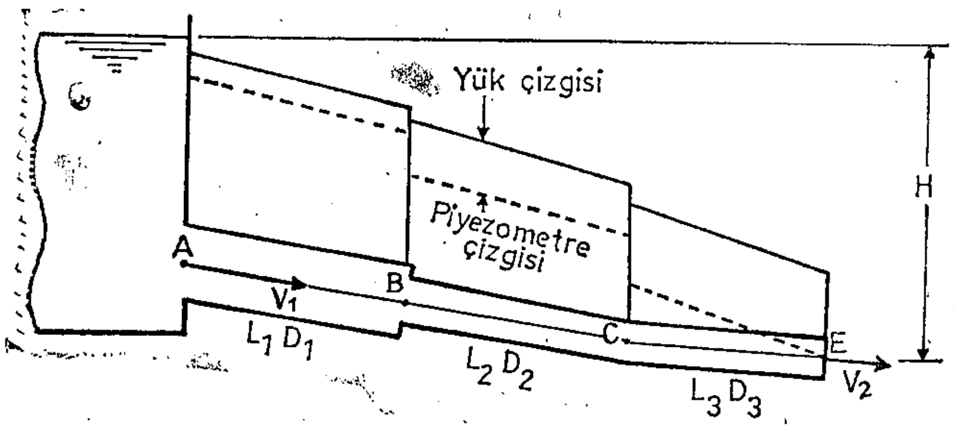
şeklinde olduğuna göre bir sıvının (ν) kinematik viskozitesi ve sıvının içinde aktığı borunun mutlak pürüzlülüğü bilinirse (K) yalnız (V) ile (D)'nin veya (Q) ile (D)'nin fonksiyonu olur. (K′) ise aşağıdaki denkleme göre yalnız (D)'nin fonksiyonudur.

$$K' = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \frac{16}{\pi^2 \cdot D^4}$$

2) BASİT BORULAR

Bir kente veya fabrikaya su dağıtan boru sistemi oldukça karmaşıktır. Biz burada birkaç basit durumu inceleyeceğiz ve boru içinde akan sıvının su olduğunu varsayacağız.

(Şekil 7.1)'de gösterildiği gibi sabit seviyeli bir haznenin beslediği borulardan oluşan bir sistemi inceleyelim. İki borunun çapları farklı ve uç kısmı atmosfere açılmaktadır. (Şekil 7.1)'deki sistemin yük çizgisi ve piyezometre çizgisi aşağıda açıklandığı şekilde çizilir.



Şekil 7.1

(Şekil 7.1)'de görüldüğü gibi hazneden çıkan boru (B) noktasında ani olarak daralmakta, (C) noktasında bir dirsek bulunmakta ve (E) noktasında boru havaya açılmaktadır. Kıyaslama düzlemi (E) noktasından geçerse (H) hazne yükü şekilde gösterildiği gibi olur. (E) noktasındaki yük $\left(\frac{V_2^2}{2 \cdot g}\right)$ dir.

A noktasının bulunduğu yerdeki boru girişinde yersel yük kaybı ($Q^2 \cdot K_1' \cdot \theta$)'dır, ($\theta = 0{,}5$) alınır. (A, B) arasında (L_1) uzunluğundaki borunun sürekli yük kaybı ($Q^2 \cdot K_1 \cdot L_1$)'dir. (B) noktasının bulunduğu yerde ani kesit daralmasından dolayı yersel yük kaybı ($Q^2 \cdot K_2' \cdot \theta$)'dır. Bu ifadedeki (θ),

$$\theta = \left(\frac{1}{m \cdot \mu} - 1\right)^2$$

eşitliğinden hesaplanır. (C) noktasının bulunduğu yerde köşeli dirsek vardır ve yersel yük kaybı ($Q^2 \cdot K_2' \cdot \theta$)'dır.

$$\theta = 0{,}945 \cdot \mathrm{Sin}^2 \frac{\alpha}{2} + 2{,}047 \cdot \mathrm{Sin}^4 \frac{\alpha}{2}$$

formülünden (θ) hesaplanır. Boru çapları değişmediğinden (C) noktasında da (K_2') aynıdır. (B, C) noktaları arasında (L_2) uzunluğundaki borunun sürekli yük kaybı ($Q^2 \cdot K_2 \cdot L_2$) ve (C, E) arasında (L_3) uzunluğundaki borunun sürekli yük kaybı ($Q^2 \cdot K_2 \cdot L_3$)'dir. Buna göre yük çizgisi (Şekil 7.1)'de çizildiği gibi olur. Yük çizgisi,

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2 \cdot g} + z = \text{Sabit}$$

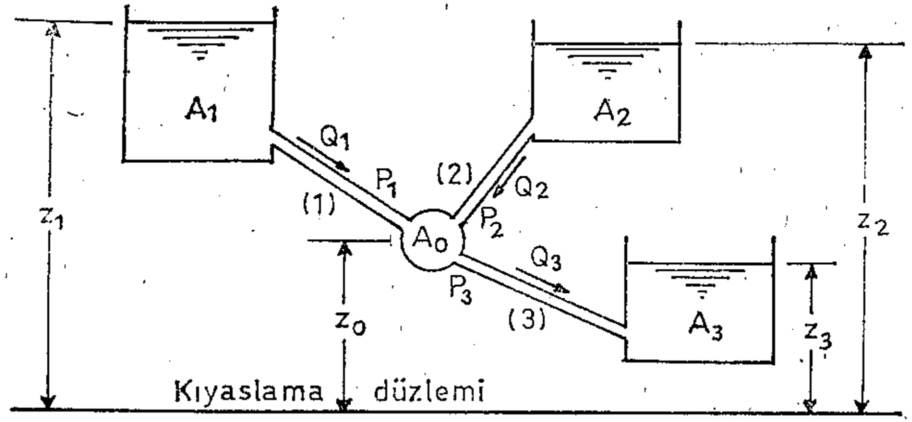
ifadesindeki basınç, hız ve mutlak yükseklik toplamının geometrik yeridir. Yük çizgisi akım yönünde (Δ H) kadar düşer ve aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$\Delta H = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 - \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2\right) = Q^2 \cdot \sum (K \cdot L + K' \cdot \theta)$$

Piyezometre çizgisini elde etmek için yük çizgisinin ordinatından $\left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right)$ çıkartılır, yani piyezometre çizgisi basınç yüksekliği ile mutlak yükseklik toplamının, $\left(\frac{P}{\gamma} + z\right)$, geometrik yeridir. Yük çizgisinden (A, B) noktaları arasında $\left(\frac{V_1^2}{2 \cdot g}\right)$ kadar ve (B, E) arasında $\left(\frac{V_2^2}{2 \cdot g}\right)$ kadar çıkartılırsa piyezometre çizgisi elde edilir.

3) BORU AĞI

Bir noktada birleştirilen üç hazneden oluşan boru ağını incelemekle yetineceğiz. (Şekil 7.2)'de görüldüğü gibi üç hazne çatal biçiminde bir boru ağı ile birbirine bağlanmıştır.



Şekil. 7.2

(P_1, P_2, P_3) basınçları (A_0) noktasına çok yakın ve akımın düzenli olduğu yerlerdeki basınçlardır. Toplam yük kaybını hesaplıyabilmek için Bernoulli denklemini üç kola uygulayalım.

Haznelerde hız sıfır alınmıştır ve Bernoulli denkleminde bağıl basınç kullanılmıştır. (1, 2, 3) endisleri (1), (2), (3) nolu borulara ait değerleri gösterir.

1. kol: $z_1 - \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 . g} + z_0\right) = Q_1^2 . K_1 . L_1 + Q_1^2 . K_1' . \theta_1$

2. kol: $z_2 - \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 . g} + z_0\right) = Q_2^2 . K_2 . L_2 + Q_2^2 . K_2' . \theta_2$

3. kol: $\left(\frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2 . g} + z_0\right) - z_3 = Q_3^2 . K_3 . L_3 + Q_3^2 . K_3' . \theta_3$

Yukarıdaki birinci ve üçüncü denklemler taraf tarafa toplanırsa,

$$(z_1 - z_3) - \left[\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 . g} + z_0\right) - \left(\frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2 . g} + z_0\right)\right]$$
$$= Q_1^2 . (K_1 . L_1 + K_1' . \theta_1) + Q_3^2 (K_3 . L_3 + K_3' . \theta_3)$$

elde edilir. Benzer şekilde ikinci ve üçüncü denklemler taraf tarafa toplanırsa,

$$(z_2 - z_3) - \left[\left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 . g} + z_0\right) - \left(\frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2 . g} + z_0\right)\right]$$
$$= Q_2^2 . (K_2 . L_2 + K_2' . \theta_2) + Q_3^2 . (K_3 . L_3 + K_3' . \theta_3)$$

elde edilir.

Bu iki denklemin sol tarafında büyük parantez içindeki terimler (1.) koldan (3.) kola ve (2.) koldan (3.4 kola geçişteki yersel yük kayıplarını ifade eder. (1.) koldan (3.) kola geçişte yersel yük kayıpları (D_1, Q_1) ve (D_3, Q_3)'e, (2.) koldan (3.) kola geçişte (D_2, Q_2) ve (D_3, Q_3)'e bağlı olduğundan bu kayıplar denklemlerin sağ tarafında verilmiş yersel yük kayıplarına eklenebilir. Bu durumda son iki denklem,

$$z_1 - z_3 = Q_1^2 (K_1 . L_1 + K_1' . \Sigma \theta_1) + Q_3^2 . (K_3 . L_3 + K_3' . \Sigma \theta_3)$$
$$z_2 - z_3 = Q_2^2 (K_2 . L_2 + K_2' . \Sigma \theta_2) + Q_3^2 . (K_3 . L_3 + K_3' . \Sigma \theta_3)$$

şeklini alır.

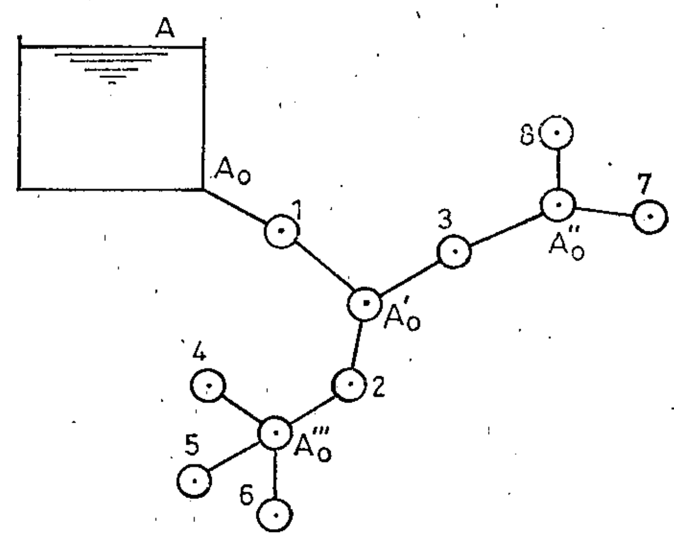
Diğer yandan kolların debileri arasında şu eşitlik yazılabilir.

$$Q_3 = Q_1 + Q_2$$

Bir noktada birleştirilen üç hazne ile ilgili problemler yukarıdaki üç eşitlikten yararlanılarak çözümlenebilir.

Örneğin hazneler arası seviye farkları verilmiş ve kolların debileri istenen bir problemde üç bilinmeyen vardır, buna karşılık üç eşitlik vardır. Üç bilinmiyenli bu üç eşitlikten debiler hesaplanabilir.

Besleme haznesinden itibaren çok sayıda kollara ayrılarak giden ve birbiri ile birleşmiyen boru ağı (Şekil 7.3) problemleri de üç hazne problemininin çözümüne benzer şekilde çözümlenebilir. (A) ile uç noktaları arasında Bernoulli denklemi uygulanır ve kolların debileri arasında eşitlikler yazılır.

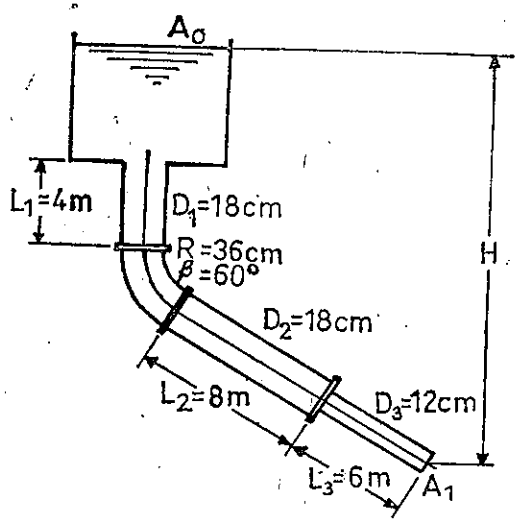


Şekil 7.3

(Şekil 7.3)'deki boru uçları kendi aralarında birleşirse bu şekildeki boru ağına kapalı boru ağı denir. Kapalı boru ağı problemleri kollara ayrılan boru ağı problemlerinin çözümünde izlenen yolla çözümlenir.

ÖRNEK PROBLEMLER

1) (Şekil 7.4)'de bir su haznesinin beslediği boru hattı gösterilmiştir. Boru hattı çap ve uzunlukları farklı üç boru ile bir dirsekten oluşmuştur. Boru çap ve uzunlukları ile dirseğin ölçüleri şekil üzerinde verilmiştir. Boru hattının debisi (0,3053 m^3/sn) olduğuna göre (A_1) ve (A_0) noktaları arasındaki fot farkını bulunuz.



Şekil 7.4

ÇÖZÜM:

(A_0) ile (A_1) arasında Bernoulli denklemini uygulayalım:

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2.g} + z_0 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2.g} + z_1 + Q^2.\sum(K.L + K'.\theta)$$

$$P_0 = P_1 = P_{at}\ ,\ V_0 = 0$$

olduğundan yukarıdaki denklem

$$(z_0 - z_1) = \frac{V_1^2}{2.g} + Q^2.\sum(K.L + K'.\theta)$$

şeklinde yazılır.

Eğrisel dirsek için yersel yük kaybı katsayısı (θ_1).

$$\theta_1 = \frac{\beta}{90°}\left[0{,}131 + 0{,}163.\left(\frac{D}{R}\right)^{3,5}\right] = \frac{60°}{90°}\left[0{,}131 + 0{,}163.\left(\frac{0{,}18}{0{,}36}\right)^{3,5}\right] = 0{,}097$$

hesaplanır.

Hazneden çıkışta yersel yük kaybı katsayısı ($\theta_2 = 0{,}5$) alınır. Ani kesit daralmasında yersel yük kaybı katsayısı (θ_3),

$$\theta_3 = \left(\frac{1}{m.\mu} - 1\right)^2$$

şeklinde ifade edilir.

($S_3 = S_0$) olduğundan,

$$m = \frac{S_0}{S_3} = 1 \text{ olur.}$$

$$\frac{S_3}{S_2} = \left(\frac{D_3}{D_2}\right)^2 = \left(\frac{12}{18}\right)^2 = 0{,}44$$

(Tablo 6.2)'den ($S_3 / S_2 = 0{,}44$) için $\left[\left(\frac{1}{m.\mu} - 1\right)^2 = 0{,}26\right]$ bulunmuştur.
($\theta_3 = 0{,}26$) olur.

(Tablo 7.1)'den ($D = 18$ cm) boru çapı için ($K_1 = 19{,}835$) ve ($K_1' = 78{,}781$); ($D = 12$ cm) boru çapı için ($K_2 = 160{,}01$) ve ($K_2' = 398{,}53$) bulunmuştur.

A_1 noktasındaki hız($V_3 = V_1$),

$$V_3 = \frac{Q}{S_3} = \frac{Q}{\pi.\left(\frac{D_3}{2}\right)^2} = \frac{0{,}3053}{3{,}14.(0{,}06)^2} = 27 \text{ m/sn}$$

dir.

Bernoulli denkleminin sağ tarafındaki terimler;

$$Q^2.\sum K.L = Q^2.K.(L_1 + L_2) + Q^2.K_2.L_3$$

$$Q^2.\sum K'.\theta = Q^2.K_1'.(\theta_1 + \theta_2) + Q^2.K_2'.\theta_3$$

şeklinde yazılır.

$$Q^2 . \sum (K . L + K' . \theta) = Q^2 \; [K_1 . (L_1 + L_2) + K_2 . L_3 + K_1' . (\theta_1 + \theta_2) + K_2' . \theta_3]$$

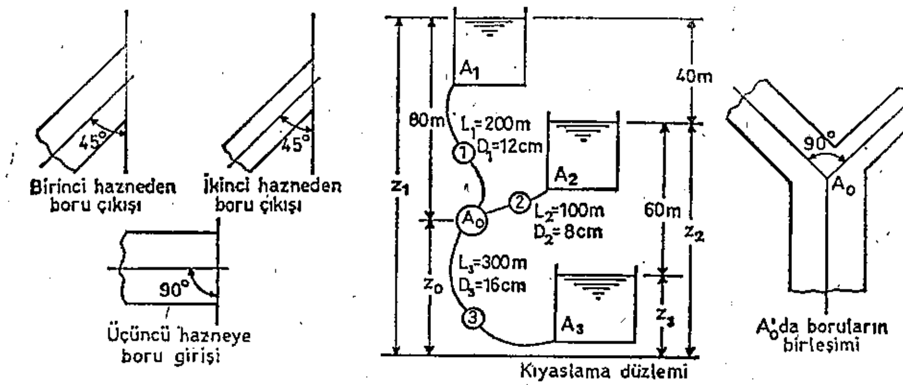
$$Q^2 . \sum (K . L + K' . \theta) = (0{,}3053)^2 . [19{,}835 . (4+8) + 160{,}01 . 6 + 78{,}781 . 0{,}597 + 398{,}53 . 0{,}26] = 125{,}70 \text{ m.}$$

$$z_0 - z_1 = \frac{V_1^2}{2 . g} + Q^2 . \sum (K . L + K' . \theta) = \frac{(27)^2}{19{,}62} + 125{,}70 = 157{,}85 \text{ m.}$$

(A_1) ile (A_0) arasındaki kot farkı, ($(z_0 - z_1) = 157{,}85$ m.) olur.

2) (Şekil 7.5)'de bir noktada birleşen üç hazne gösterilmiştir. Hazneleri (A_0) noktasına bağlıyan boruların uzunluk ve çapları ile hazne su seviyeleri ve (A_0) noktasının kotları şekil üzerinde verilmiştir. Haznelerden boru çıkışları ve (A_0) noktasında boruların birleşimleri (Şekil 7.5)'de gösterilmiştir.

Boruların debi ve akım hızlarını bulunuz.



Şekil 7.5

ÇÖZÜM:

Problemin çözümü için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır.

$$z_1 - z_3 = Q_1^2 . (K_1 . L_1 + K_1' . \Sigma\theta_1) + Q_3^2 . (K_3 . L_3 + K_3' . \Sigma\theta_3)$$

$$z_2 - z_3 = Q_2^2 . (K_2 . L_2 + K_2' . \Sigma\theta_2) + Q_3^2 . (K_3 . L_3 + K_3' . \Sigma\theta_3)$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_2$$

Bu eşitlerdeki terimler şu şekilde hesaplanır.

Birinci hazneden çıkışta yersel yük kaybı katsayısı (θ_1'):

$$\theta_1' = 0{,}5 + 0{,}3 . \text{Cos}\alpha + 0{,}2 . \text{Cos}^2\alpha = 0{,}5 + 0{,}3 . \text{Cos } 45° + 0{,}2 . \text{Cos}^2 45° = 0{,}821$$

$$\Sigma\theta_1 = \theta_1' = 0{,}821$$

İkinci hazneden çıkışta yersel yük kaybı katsayısı (θ_2'):

$$\theta_2' = 0{,}5 + 0{,}3 . \text{Cos}\alpha + 0{,}2 . \text{Cos}^2\alpha = 0{,}5 + 0{,}3 . \text{Cos } 45° + 0{,}2 . \text{Cos}^2 45° = 0{,}821$$

$$\Sigma\theta_2 = \theta_2' = 0{,}821$$

Birinci ve ikinci haznenin akımlarını birleştiren çatalda yersel yük kaybı katsayısı (θ_3'):

$$\theta_3' = 1 \quad (\alpha = 90° \text{ olduğu için})$$

Üçüncü hazneye girişte yersel yük kaybı katsayısı (θ_3''):

$$\theta_3'' = 1$$

$$\Sigma\theta_3 = \theta_3' + \theta_3'' = 1 + 1 = 2$$

Diğer yandan,

$$z_1 - z_3 = 100 \text{ m.} \quad \text{ve} \quad z_2 - z_3 = 60 \text{ m.}$$

verilmiştir.

(Tablo 7.1)'den boru çapı (D = 12 cm) için ($K = 160{,}01$), ($K_1' = 398{,}53$), boru çapı (D = 8 cm.) için ($K_2 = 1321{,}9$), $K_2' = 2017{,}5$) ve boru çapı (D = 16 cm) için ($K_3 = 36{,}301$), ($K_3' = 126{,}09$) bulunur. Yukarıda bulunan değerler ilk üç denklemde yerine konursa,

$$100 = Q_1^2 . (160{,}01 . 200 + 398{,}53 . 0{,}821) + Q_3^2 . (36{,}301 . 300 + 126{,}09 . 2)$$

$$60 = Q_2^2 . (1321{,}9 . 100 + 2017{,}5 . 0{,}821) + Q_3^2 . (36{,}301 . 300 + 126{,}09 . 2)$$

Bu eşitliklerdeki hesaplar yapılırsa

$$100 = 32347{,}19 . Q_1^2 + 11142{,}48 . Q_3^2$$

$$60 = 133846{,}36 . Q_2^2 + 11142{,}48 . Q_3^2$$

Bu iki eşitlik taraf tarafa çıkartılırsa,

$$40 = 32347{,}19 . Q_1^2 - 133846{,}36 . Q_2^2$$

olur. Diğer yandan

$$Q_3 = Q_1 + Q_2$$

veya

$$Q_3^2 = Q_1^2 + 2 . Q_1 . Q_2 + Q_2^2$$

yazılabilir.

$$100 = 32347{,}19 . Q_1^2 + 11142{,}48 . Q_3^2$$

ifadesinde (Q_3^2) yerine yukarıdaki eşitliği konursa,

$$100 = 32\,347{,}19 \,.\, Q_1^2 + 11142{,}48 \,.\, (Q_1^2 + 2 \,.\, Q_1 \,.\, Q_2 + Q_2^2)$$

olur. Bu denklem ile

$$40 = 32347{,}19 \,.\, Q_1^2 - 133846{,}36 \,.\, Q_2^2$$

ifadesinin birleşiminden,

$$19{,}98 \,.\, 10^3 \,.\, Q_1^4 - 874{,}6 \,.\, 10^4 \,.\, Q_1^2 + 9345 = 0$$

elde edilir ve dördüncü dereceden bir bilinmiyenli denklemdir. Bu denklemden,

$$Q_1' = 0{,}05024 \text{ m}^3/\text{sn} \quad \text{ve} \quad Q_1'' = 0{,}043\,07 \text{ m}^3/\text{sn}$$

şeklinde iki ayrı debi bulunur. Buradan sonraki hesaplarda yalnız ($Q_1 = Q_1' = 0{,}05024$ m³/sn) değeri kullanılacaktır. ($40 = 32\,347{,}19 \,.\, Q_1^2 - 133846{,}36 \,.\, Q_2^2$) ifadesinde ($Q_1$) değeri yerine konarak ($Q_2 = 0{,}0176$ m³/sn) bulunmuştur. Üçüncü borunun debisi,

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = 0{,}05024 + 0{,}0176 = 0{,}06784 \text{ m}^3/\text{sn}$$

bulunur.

Akım hızları,

$$V_1 = \frac{Q_1}{S_1} = \frac{Q_1}{\pi \,.\, \left(\frac{D_1}{2}\right)^2} = \frac{0{,}05024}{3{,}14 \,.\, (0{,}06)^2} = 4{,}44 \text{ m/sn}$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{S_2} = \frac{Q_2}{\pi \,.\, \left(\frac{D_2}{2}\right)^2} = \frac{0{,}0176}{3{,}14 \,.\, (0{,}04)^2} = 3{,}50 \text{ m/sn}$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{\pi \,.\, \left(\frac{D_3}{2}\right)^2} = \frac{0{,}06784}{3{,}14 \,.\, (0{,}08)^2} = 3{,}37 \text{ m/sn}$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Çapı (D) ve uzunluğu (L) olan bir borunun debisi ve yersel yük kaybı katsayısı verildiğine göre borunun iki ucu arasındaki yük farkı nasıl bulunur?
2) Çapı (D) ve uzunluğu (L) olan bir borunun iki ucu arasındaki yük farkı ve yersel yük kaybı katsayısı verildiğine göre borunun debisi nasıl bulunur?
3) Çapları ve uzunlukları farklı iki boru aynı yatay düzlemde bulunan ve içersindeki su seviyeleri farklı olan iki hazneyi birleştirmektedir. Bu sistemin yük çizgisinin nasıl çizileceğini açıklayınız.

VIII. BÖLÜM

AÇIK KANALLARDA AKIM

VIII. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

C — katsayı
g — yerçekimi ivmesi
H_L — yük kaybı
I — kanal eğimi veya enerji çizgisi eğimi
L — uzunluk
log — 10 tabanına göre logaritma
m — kanal pürüzlülüğüne bağlı katsayı
n — kanal pürüzlülüğüne bağlı katsayı
P — basınç
Q — debi
R — hidrolik yarıçap
R_e — Reynolds sayısı
S — alan
v — hız
V — hız
y — su derinliği, dik eksen
z — kıyaslama düzleminden uzaklık, düşey eksen
X — yatay eksen
W — ağırlık
γ — özgül ağırlık
θ — açı
$\varkappa$ — ıslak çevre uzunluğu
λ — sürtünme katsayısı
μ — dinamik viskozite
ν — kinematik viskozite
ρ — özgül kütle
τ_o — kayma gerilmesi

AÇIK KANALLARDA AKIM

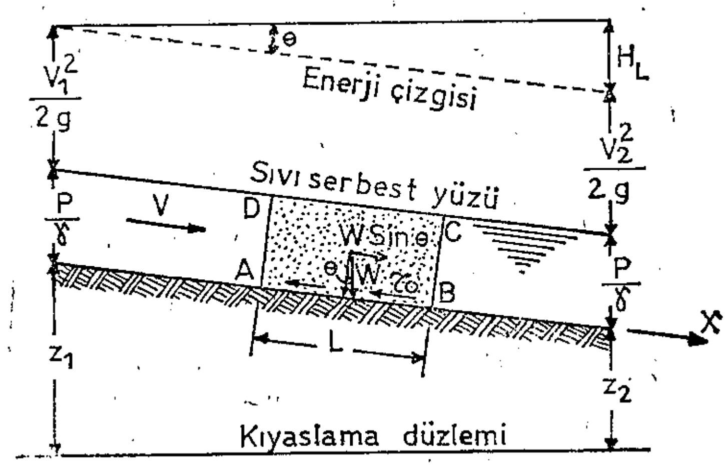
1) GİRİŞ

Açık kanal, içinde akan sıvının serbest yüzeyi atmosfer basıncı etkisinde olan bir borudur. Kanalın eğimi ve sıvı yüzünün eğimi kanaldaki sıvı hareketinin nedenidir. Açık kanallardaki akım problemlerinin doğru bir şekilde çözümü zordur ve deney sonuçlarından yararlanılır. Deney sonuçları değişik koşullara bağlı olarak elde edilmiştir. Bu bölümde yalnız sürekli üniform ve üniform olmıyan (değişken) akımlar incelenmiştir.

Kanallardaki akım sürekli veya kararsız akım şeklinde ve üniform veya üniform olmıyan akım şeklinde sınıflandırılabilir. ($R_e \leq 2000$) ise açık kanaldaki akım laminer, ($R_e > 2000$) ise kaynaşık akım olur.

2) SÜREKLİ ÜNİFORM AKIM

Açık kanalda hareket eden sıvının bir noktasındaki hız veya derinlik gibi akım karakteristikleri zamanla değişmezse sürekli akım denir. Kanal boyunca eğim, derinlik, hız ve kesit alanı değişmezse kanaldaki akım üniform akım olur. Şekil 8.1'de görüldüğü gibi enerji çizgisi su yüzüne paraleldir ve su yüzünün $\left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right)$ kadar yukarısından geçer.



Şekil 8.1

Sıvı serbest yüzü kanalın tabanına paralel olduğundan kanalın enine kesitleri eşdeğerdir ve ortalama akım hızı enine kesitlerde aynıdır. Sıvı liflerine dik olan her kesitte basınç hidrostatik olarak değişir.

Kesiti dikdörtgen şeklinde olan bir açık kanalda ortalama akım hızı ile yük kaybı arasındaki ilişkiyi bulabilmek için (Şekil 8.1)'deki gibi (ABCD) ile gösterilen sıvı hacmini inceleyelim. Sıvı hacminin uzunluğu (L) ve kesit alanı (S), cidar kayma gerilmesi (τ_0), sıvı hacminin ağırlığı (W), ıslak çevre (χ) olsun. Akım sürekli olduğu için ivme sıfırdır ve (ABCD) sıvı hacmi dengededir. Bundan dolayı (X) ekseni yönündeki kuvvetlerin toplamı sıfır olacaktır ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

AD yüzüne etkiyen kuvvet — BC yüzüne etkiyen kuvvet + W . Sin θ — Sürtünme kuvvetleri = 0

(AD) ve (BC) yüzüne etkiyen kuvvetler birbirine eşit olduğundan bu ifade şu şekilde yazılabilir, ($W = \gamma . S . L$) şeklinde ifade edilmiştir.

$$\gamma . S . L . \operatorname{Sin} \theta - \tau_0 . \chi . L = 0$$

Bu ifadeden,

$$\tau_0 = \frac{\chi}{\gamma . S . \operatorname{Sin} \theta} = \gamma . R . I$$

elde edilir.

Bu formülde $\left(R = \frac{S}{\chi}\right)$ hidrolik yarıçap ve ($I = \operatorname{Sin} \theta = \tan \theta$) kanal veya enerji çizgisi eğimidir, (θ) açısı değeri küçük olduğundan ($\operatorname{Sin} \theta = \tan \theta$) yazılabilir.

VI. BÖLÜM'de $\left(\tau_0 = \lambda . \frac{\gamma}{g} . \frac{V^2}{8}\right)$ ifadesi yazılmıştı, yukarıdaki (τ_0) ifadesinde yerine konursa,

$$\lambda . \frac{\gamma}{g} . \frac{V^2}{8} = \gamma . R . I$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten (V) hızı çözülürse,

$$V = \sqrt{\left(\frac{8 . g}{\lambda}\right) . R . I}$$

elde edilir.

Yukarıdaki denklemde $\left(C = \sqrt{\left(\frac{8 . g}{\lambda}\right)}\right)$ yazılırsa hız formülü

$$V = C . \sqrt{R . I}$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade CHEZY FORMÜLÜ olarak bilinir.

Kanaldaki sıvı akımı laminer ise $\left(\lambda = \frac{64}{R_e}\right)$ olur. Buna göre

$$C = \sqrt{\left(\frac{8 . g}{\lambda}\right)} = \sqrt{\left(\frac{8 . g}{64}\right) . R_e} = 1{,}1 . \sqrt{R_e}$$

olur.

Chezy formülündeki $\left(C = \sqrt{\frac{8 . g}{\lambda}}\right)$ katsayısı için araştırmacılar aşağıdaki ifadeleri vermişlerdir.

Kutter formülü: $$C = \frac{\frac{1}{n} + 23 + \frac{0{,}00155}{I}}{1 + \left(23 + \frac{0{,}00155}{I}\right) . \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

Bu ifadedeki (n) kanalın pürüzlülüğüne bağlı bir katsayıdır ve deneylerden elde edilir. İçinde su bulunan bir kanalın cidarı düzgün çimento kaplı ise $\left(\frac{1}{n} = 100\right)$, toprak cidar için $\left(\frac{1}{n} = 40\right)$ alınır.

Bazin formülü: $$C = \frac{87 . \sqrt{R}}{m + \sqrt{R}}$$

(m) kanalın pürüzlülüğüne bağlı bir katsayıdır. Düzgün çimento kaplı bir kanal cidarı için ($m = 0{,}06$), toprak cidar için ($m = 1{,}30$) alınır.

Manning formülü: $$C = \frac{1}{n} . R^{1/6}$$

Manning formülündeki (n) değerleri (Tablo 8.1)'de verilmiştir. Kutter formülündeki (n) değerleri Manning formülündeki (n) değerlerinden farklıdır.

Sürekli üniform akımın (Q) debisi Manning formülüne göre aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Q = S.V = S.C . \sqrt{R . I} = S . \frac{1}{n} . R^{1/6} . \sqrt{R . I}$$

veya

Tablo 8.1 — Manning Formülündeki (n) Değerleri

KANAL CIDARLARI	Kanal Cidarlarının Durumu			
	Mükemmel	İyi	Orta	Fena
Perdah yapılmış çimento	0.010	0.011	0.012	0.013
Çimento harcı	0.011	0.012	0.013	0.015
Rendelenmiş tahta cidarlar	0.010	0.012	0.013	0.014
Rendelenmemiş tahta cidarlar	0.011	0.013	0.014	0.015
Beton kaplanmış kanallar	0.012	0.014	0.016	0.018
Çimento ile birleştirilmiş adi moelonlar	0.017	0.020	0.025	0.030
Kuru kagir	0.025	0.030	0.033	0.035
Yonulmuş moelon	0.013	0.014	0.015	0.017
Yarı dairesel kesitli, mücella, madeni cidarlar	0.011	0.012	0.013	0.015
Oluklu saçtan yapılmış dairesel kesitli madeni cidarlar	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Toprakta açılmış düz ve üniform kanal ve hendekler	0.017	0.020	0.0225	0.025
Taşla kaplı, mücella ve üniform kanal ve hendekler	0.025	0.030	0.033	0.035
Taşla kaplı, cidar buruşukluğu büyük, gayri muntazam kanal ve hendekler	0.035	0.040	0.045	0.050
Eğrileri büyük yarı çaplı olan toprak kanallar	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Ekskavatörlerle açılmış toprak kanallar	0.025	0.0275	0.030	0.033
Tabanı pürüzlü taşlardan teşekkül eden ve yan tarafındaki toprak cidarları otla örtülü olan kanallar	0.025	0.030	0.035	0.040
Toprak tabanlı ve yan cidarları taşla kaplı kanallar	0.028	0.030	0.033	0.035

(Devamı var)

Tablo 8.1 — Devamı

KANAL CIDARLARI	Kanal Cidarlarının Durumu			
	Mükemmel	İyi	Orta	Fena
TABİİ KANALLAR				
Kıyıları doğrusal ve gayet temiz olan ve tabanında yığıntılar veya çukurluklar bulunmıyan kanallarda suyun en yüksek seviyede bulunması halinde	0.025	0.0275	0.030	0.033
Evvelki şartların gerçeklenmesi ve biraz ot ve taş bulunması halinde	0.030	0.033	0.035	0.040
Kıyılarının şekli eğrisel olan ve tabanında yığıntı veya çukur bulunan temiz kanallar	0.035	0.040	0.045	0.050
Evvelki şartların gerçeklenmesi, suyun en alçak su seviyesinde, eğimin ve kesitin daha ufak olması halinde	0.040	0.045	0.050	0.055
Üçüncü sıradaki şartların gerçeklenmesi ve biraz ot ve taş bulunması halinde	0.033	0.035	0.040	0.045
Dördüncü sıradaki şartların gerçeklenmesi ve taşların bulunması halinde	0.045	0.050	0.055	0.060
Suların gayet yavaş aktığı, otla örtülü veya tabanda derin çukurlukların bulunduğu bölgede	0.050	0.060	0.070	0.080
Çok miktarda otla örtülü bölgeler	0.075	0.100	0.125	0.150

$$Q = \frac{1}{n} . S . R^{2/3} . I^{1/2}$$

Bu denkleme MANNİNG FORMÜLÜ denir.

Enerji çizgisi eğimi (I) aşağıdaki şekilde ifade edilir, (L_T) toplam kanal uzunluğudur.

$$I = \frac{H_L}{L_T}$$

(I) ifadesi Manning formülünde yerine konursa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Q = S . V = \frac{1}{n} . S . R^{2/3} . I^{1/2} = \frac{1}{n} . S . R^{2/3} . \left(\frac{H_L}{L_T}\right)^{1/2}$$

Bu denklemden (H_L) çözülürse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$H_L = \left(\frac{V . n}{R^{2/3}}\right)^2 . L_T$$

Bu denklem Manning formülüne göre enerji kaybı ifadesidir.

3) ÜNİFORM OLMIYAN veya DEĞİŞKEN AKIM

Açık kanaldaki sıvının derinliği kanal uzunluğu boyunca değişirse bu akıma üniform olmıyan veya değişken akım denir, sürekli veya kararsız akım olabilir. Üniform olmıyan sürekli akım incelenirken açık kanal (L) uzunluğunda kanal parçalarına bölünür. Uzunluk, enerji - eğim arasındaki bağıntıyı çıkartabilmek için (Şekil 8.2)'deki kanal parçasını gözönüne alalım. (1) ve (2) nolu kesitlere Bernoulli denklemi uygulanırsa,

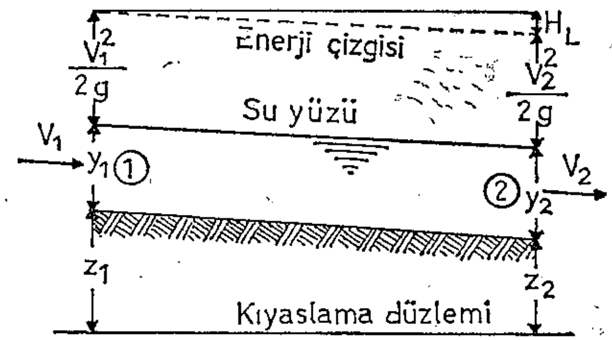
$$\left(z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2 . g}\right) - H_L = \left(z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2 . g}\right)$$

eşitliği elde edilir.

(y_1) ve (y_2) (1) ve (2) nolu kesitlerdeki su derinliğidir.

Enerji çizgisi eğimi $\left(I = \frac{H_L}{L}\right)$, kanal taban eğimi $\left(I_0 = \frac{z_1 - z_2}{L}\right)$ olduğundan yukarıdaki eşitlik şöyle yazılabilir.

$$I_0 . L + (y_1 - y_2) + \left(\frac{V_1^2}{2 . g} - \frac{V_2^2}{2 . g}\right) = H_L = I . L$$



Şekil 8.2

Bu ifadeden (L) çözülürse,

$$L = \frac{\left(y_1 + \frac{V_1^2}{2 . g}\right) - \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2 . g}\right)}{I - I_0}$$

elde edilir. (L) kanal parçasının uzunluğudur. Bir kanal parçasının bir ucundaki derinlik ile hız verilmişse ve kanalın (I_0), (n) değerleri biliniyorsa belirli bir derinliğin (L) uzunluğu yukarıdaki denklemden hesaplanabilir.

Ard arda kanal parçaları için enerji çizgisi eğimi aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$I = \left(\frac{n . V_{ort}}{R_{ort}^{2/3}}\right)^2$$

(V_{ort}) ve (R_{ort}) kanal uçlarındaki hızların ve hidrolik yarıçapların ortalamalarıdır.

Üniform olmıyan kararsız akım bu bölümde incelenmemiştir.

4) LAMİNER AKIM

Reynolds sayısı ($R_e \leq 2000$) ise kanaldaki akım laminer olur. Bununla beraber ($R_e = 10000$) değerine kadar laminer akım olabilir. Açık kanal akımı için (R_e) şöyle ifade edilebilir.

$$R_e = \frac{4 . R . V}{\nu}$$

5) HIZIN DÜŞEY DAĞILIŞI

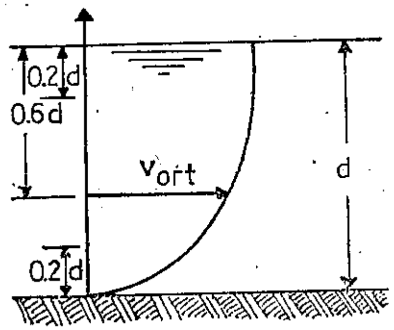
Açık kanalda hızın düşey dağılışı laminer akım için parabolik, kaynaşık akım için logaritmiktir.

Üniform laminer akımda (y_m) ortalama derinlik ise, (v) hızının düşey dağılışı ve (V_{ort}) ortalama hız ifadeleri şöyle olur.

$$v = \frac{\gamma \, . \, I}{\mu} \, . \left(y \, . \, y_m - \frac{1}{2} \, y^2 \right)$$

$$V_{ort} = \frac{\gamma \, . \, I \, . \, y_m^2}{3 \, . \, \mu}$$

(Şekil 8.3)'de üniform akım hızının düşey dağılışı gösterilmiştir. En büyük hız serbest sıvı yüzünden biraz aşağıdadır. Ortalama hız sıvı yüzünden (0,6 . d) aşağıdadır. (0,2 . d) ve (0,8 . d) derinlikteki hızların ortalaması ortalama hızı verir. Uygulamada akarsuların bir kesitteki or-



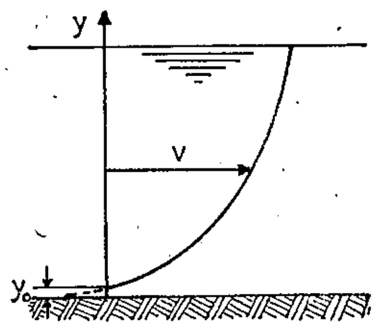
Şekil 8.3

talama hızı bu şekilde bulunur, muline ile düşeydeki (0,8) ve (0,2) derinliklerde hızlar ölçülür ve bu hızların ortalaması o düşeydeki ortalama hızı verir. Kesit alanı ile ortalama hız çarpılarak debi elde edilir.

Üniform kaynaşık akımda hızın düşey dağılışı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$v = 5{,}75 \, . \, \sqrt{\tau_0 / g} \, . \, \log \; (y/y_0)$$

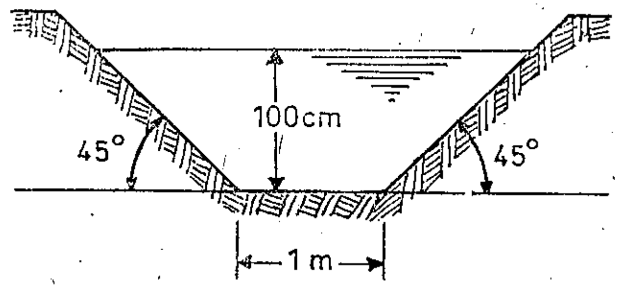
(y_0) hızın sıfır olduğu noktadaki derinliktir. Kaynaşık akımda hızın düşey dağılım eğrisi (Şekil 8.4)'de gösterilmiştir.



Şekil 8.4

ÖRNEK PROBLEM

1) (Şekil 8.5)'de açık bir kanalın enine kesiti gösterilmiştir. Kanalın kenarları sıkıştırılmış topraktandır ve kanalın eğim açısı (2°)'dir. Açık kanalda su derinliği (100 cm.) olduğuna göre kanalın debisini hesaplayınız.



Şekil 8.5

ÇÖZÜM :

Manning formülünden yararlanılır.

$$Q = \frac{1}{n} \, . \, S \, . \, R^{2/3} \, . \, I^{1/2}$$

veya

$$V = \frac{1}{n} \, . \, R^{2/3} \, . \, I^{1/2}$$

(Tablo 8.1)'den (n = 0,0275) bulunur. Kesit alanı, ıslak çevre, hidrolik yarıçap ve kanalın eğimi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$S = \frac{a + b}{2} \, . \, h = \frac{1 + (1 + 1 + 1)}{2} \, . \, 1 = 2 \text{ m}^2$$

$$\varkappa = a + 2 \, . \, a_1 \; , \; a_1 = \frac{h}{\text{Sin } 45} = \frac{1}{0{,}707} = 1{,}41 \text{ m.}$$

$$\varkappa = 1 + 2 \, . \, 1{,}41 = 3{,}82 \text{ m.}$$

$$R = \frac{S}{\varkappa} = \frac{2}{3{,}82} = 0{,}5235 \text{ m.}$$

$$I = \text{Sin } \theta = \text{Sin } 2° = \tan \theta = 0{,}0349$$

Kanaldaki suyun hızı,

$$V = \frac{1}{n} . R^{2/3} . I^{1/2} = \frac{1}{0,0275} (0,5235)^{2/3} . (0,0349)^{1/2} = 4,40 \text{ m/sn}$$

bulunur. Kanalın debisi,

$$Q = V . S = 4,40 . 2 = 8,80 \text{ m}^3/\text{sn}$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Açık kanallardaki suyun hareketi kaç şekilde olur?
2) Sürekli üniform akımın tanımını yapınız.
3) Sürekli üniform olmıyan akımın tanımını yapınız.
4) Sürekli üniform akımın debi formülünü açıklayınız.
5) Açık kanalda hızın düşey dağılışı hangi şekillerde olur?

IX. BÖLÜM

SIVI AKIMININ ÖLÇÜLMESİ

IX. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

a — katsayı, savak genişliği
b — katsayı
C — katsayı
C_d — debi düzeltme katsayısı
C_v — pitot tüb katsayısı, hız düzeltme katsayısı
d — çap
D — çap
g — yerçekimi ivmesi
h — su seviye farkı, savak yükü
H — toplam enerji yüksekliği, savak eşik yüksekliği
L — kanal genişliği, savak kret uzunluğu
m — debi katsayısı
Q — debi
P — basınç
S — alan
V — hız
z — kıyaslama düzleminden uzaklık, savak yükü
α — açı, toplam debi katsayısı
θ — yersel yük kaybı katsayısı
π — daire çevresinin çapına oranı
Σ — toplam
Δ — küçük değişme veya artım

SIVI AKIMININ ÖLÇÜLMESİ

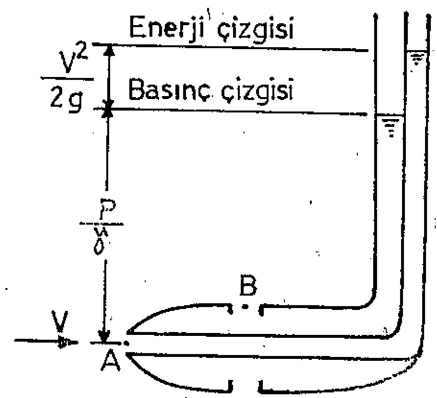
1) GİRİŞ

Sıvı akımını ölçmek için uygulamada çeşitli aletler kullanılır. Pitot tübleri ve mulinelerle sıvının hızı ölçülür. Sıvı miktarı menfez, lüle, venturimetre, savaklar veya dar kesitli cihazlarla ölçülür. Bu aletler kullanılırken Bernoulli denkleminden yararlanılır. Her aletin karakteristikleri ve katsayıları önceden saptanır. Aletlerin katsayıları bilinmediği zaman bu aletler çalıştırılacak koşullara göre ayarlanmalıdır.

Sıkıştırılamıyan akışkanların ölçümü için çıkartılan formüller sıkıştırılabilen akışkanların ölçümünde de kullanılabilir, ancak basınç farkı toplam basınca göre küçük olmalıdır. Aşağıda açıklanan ölçü teknikleri sıkıştırılabilen sıvıların ölçümünde de uygulanabilir.

2) PITOT TÜBÜ

Pitot tübü ile bir noktadaki akım hızı ölçülür. Pitot tübü (Şekil 9.1)' de gösterildiği gibi iç içe yerleştirilmiş iki borudan oluşur ve ucu (90°) kıvrılmıştır. Borunun ucu akım yönüne doğru yöneltilir.



Şekil 9.1

Bernoulli denklemini (Şekil 9.1)'de (A) ve (B) noktaları arasına uygulayalım. Bu iki nokta arasındaki enerji kaybı ihmal edilebilir, ($H_L = 0$). (A) noktasındaki hız sıfır ($V_A = 0$) ve (B) noktasındaki hız ($V_B = V$) olacaktır. (A) ve (B) noktalarının mutlak yükseklikleri birbirine eşit alınır, ($z_A = z_B$).

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A - H_L = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B$$

veya

$$\frac{P_A}{\gamma} = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

Bu ifadeden $\left(\frac{V^2}{2g}\right)$ çözülürse şu eşitlik elde edilir.

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{P_A - P_B}{\gamma}$$

Tübdeki iki çizgi arası seviye farkı (h) diye okunursa yukarıdaki eşitlik şöyle yazılabilir.

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{P_A - P_B}{\gamma} = h$$

veya

$$V = \sqrt{2 . g . h}$$

Bu denkleme Pitot tübünün imaline bağlı olarak (C_v) hız düzeltme katsayısı ilave edilmelidir,

$$C_v = \frac{\text{Gerçek ortalama hız}}{\text{İdeal ortalama hız}} = \frac{V}{\sqrt{2 . g . h}}$$

Ortalama hız,

$$V = C_v . \sqrt{2 . g . h}$$

şeklinde ifade edilebilir.

(C_v)'ye pitot tüb katsayısı denir ve birçok mühendislik probleminde ($C_v = 1$) alınır.

Pitot tübleri bugün artık açık kanallarda hız ölçümü için kullanılmamaktadır.

3) MULİNE

Muline açık kanallardaki akımı ölçmek için kullanılan dönel cihazdır. Hareket halindeki sıvı hidrolik türbinlerde olduğu gibi, dönel cihazın pervanesine bir güç iletir ve pervane döner. Pervanenin birim zaman aralığındaki (N) dönme sayısı, sıvının (V) hızı ile bağlantılıdır ve bu bağıntı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$V = a . N + b$$

Bu formülde (N) bir saniyedeki dönme sayısıdır. (a) ve (b) katsayılardır ve laboratuvarlardaki muline ayar kanallarında tesbit edilir. Yukarıdaki bağıntı tablo haline getirilmiştir ve muline devir sayısına karşı gelen hız doğrudan tablodan alınır. Muline ile kanaldaki akım hızı ölçülürken kanal enkesiti genellikle (20) dilime ayrılır. Her dilimin ortasındaki düşey sıvı derinliğinin (0,2 ve 0,8) noktalarında muline ile ölçülen ($V_{0.2}$) ve ($V_{0.8}$) hızların ortalaması alınır ve böylece dilimin ortasındaki ortalama hız elde edilir. Dilim ortalama hızı ile dilim (ΔS) alanı çarpımı o dilimin debisini verir. Tüm dilimlerde aynı işlemler yapılarak her dilimin debisi saptanır ve dilim debileri toplamı kanalın o kesitindeki (Q) debisini verir, debi formülü aşağıda verilmiştir.

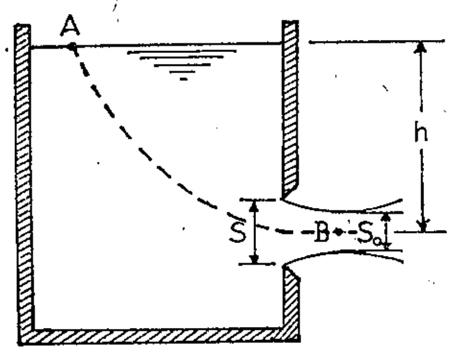
$$Q = \sum \left(\frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} . \Delta S \right)$$

Ülkemiz akarsularının debileri yukarıda açıklanan yöntem uygulanarak saptanır.

Borularda akan sıvının debiside dönel cihazlarla ölçülebilir. Özellikle içme suyu taşıyan borulardan çekilen debiyi ve su miktarını ölçmek için kullanılan dönel cihaza su sayacı denir.

4) MENFEZ

Bir haznede bulunan sıvının dışarıya akmasını sağlıyan hazne cidarındaki deliğe menfez denir. Bu delik kesiti daire şeklinde veya dikdörtgen, üçgen gibi kesit şekillerinde de olabilir. Menfezden geçen sıvı lifleri bir noktada menfezin kenarlarına değiyorsa bu menfeze ince kenarlı menfez denir. (Şekil 9.2)'de ince kenarlı bir menfez görülmektedir. Bu menfezin kesit alanı (S) ve sıvı liflerinin menfezden çıktıktan sonra birbirine paralel duruma geldikleri yerdeki büzülmüş kesit alanı (S_0) olsun. Haznedeki su seviyesi değişmediğini varsayalım ve (A) ile (B) noktaları arasındaki aralıkta bir sıvı partikülünün hareket yörüngesi boyunca Bernoulli denklemini uygulıyalım. Su seviyesi değişmediğine göre akım sürekli akımdır ve (A) ile (B) arasındaki kayıplar ihmal edilebilir.



Şekil 9.2 — İnce Kenarlı Menfez

$$\frac{P_A}{\gamma}+\frac{V^2_A}{2g}+z_A=\frac{P_B}{\gamma}+\frac{V^2_{BT}}{2g}+z_B$$

(A) noktasında ($V_A = 0$) ve ($P_A = P_{at}$), (B) noktasında ($P_B = P_{at}$)' dır, ($z_A - z_B = h$) yazılabilir. Bunlar yukarıdaki denklemde yerine konursa,

$$\frac{V^2_{BT}}{2g}=h$$

veya

$$V_{BT}=\sqrt{2.g.h}$$

olur. (V_{BT}), (B) noktasındaki teorik hızdır. Bu ifadeye hidrolikte TORİÇELLİ FORMÜLÜ denir. (B) noktasındaki (P_B) atmosfer basıncına eşit ve (B) noktasının bulunduğu kesit boyunca aynı kabul edilmiştir, ayrıca bu kesitteki hız dağılı da düzgün kabul edilmiştir.

(B) noktasındaki (V_B) gerçek hız Toriçelli formülü ile hesaplanan hızdan daha küçük olacaktır, bunun nedeni sıvının sürtünmesinin ihmal edilmesindendir. Toriçelli formülü hız düzeltme katsayısı (C_v) ile çarpılırsa gerçek hız elde edilir.

$$V_B = C_v\sqrt{2.g.h}$$

Su için ($C_v = 0{,}9 \sim 1$) arasında değerler alır.

Menfezden akan sıvının debisi (Q) şu şekilde ifade edilebilir.

$$Q = V_B . S_o$$

Büzülme katsayısı $\left(\mu=\frac{S_o}{S}\right)$ olduğuna göre (Q) ifadesi,

$$Q = \mu . S . V_B$$

veya

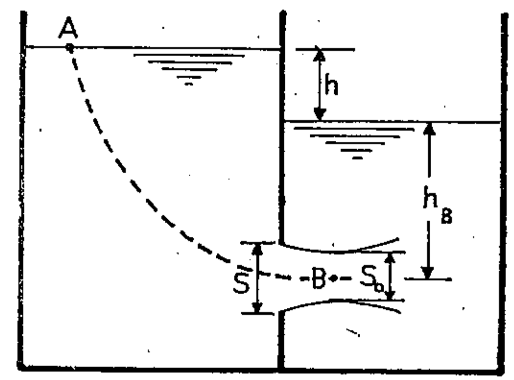
$$Q = \mu . S . C_v . \sqrt{2.g.h}$$

şeklinde yazılabilir. ($\mu . C_v$)'ye debi katsayısı denir ve (m) ile gösterilir, ($m = \mu . C_v$) ifadesi yukarıdaki denklemde yerine konursa,

$$Q = m . S . \sqrt{2.g.h}$$

olur. Dairesel kesitli menfezler için ($m = 0{,}62$) alınır. Diğer kesit biçimleri içinde aynı değer kullanılabilir.

Sıvı içinde bulunan ince kenarlı menfez (Şekil 9.3)'de gösterilmiştir. Böyle bir menfezin debisi aşağıda açıklandığı şekilde hesaplanabilir.



Şekil 9.3 — Batmış İnce Kenarlı Lüle

İki hazne arasındaki menfezin kesit alanı (S) ve büzülmüş kesit alanı (S_o), haznelerdeki su seviye farkı (h) olsun. (A) ile (B) noktaları arasındaki sıvı ipciğine Bernoulli denklemi uygulanırsa,

$$\frac{P_A}{\gamma}+\frac{V^2_A}{2g}+z_A=\frac{P_B}{\gamma}+\frac{V^2_{BT}}{2g}+z_B+\Delta H_{AB}$$

eşitliği elde edilir. (ΔH_{AB}), (A) ile (B) arasındaki yük kaybıdır ve özellikle menfezden geçen sıvının büzülmeden sonraki açılmalarında oluşur.

$$P_A = P_{at},\quad V_A = 0,\quad P_B = P_{at} + \gamma . h_B,\quad z_A - z_B = h_B + h$$

olduğundan bunlar yukarıdaki Bernoulli denkleminde yerlerine konursa,

$$h_B + h = h_B + \frac{V^2_{BT}}{2g} + \Delta H_{AB}$$

elde edilir. (ΔH_{AB}) yük kaybı ihmal edilirse bu denklem aşağıdaki gibi olur.

$$h = \frac{V^2_{BT}}{2g}$$

veya

$$V_{BT} = \sqrt{2 . g . h}$$

(B) noktasındaki (V_B) gerçek hız

$$V_B = C_v . \sqrt{2 . g . h}$$

şeklinde ifade edilir, (C_v) hız düzeltme katsayısıdır.

Menfezin (Q) debisi,

$$Q = S_0 . C_v . \sqrt{2 . g . h}$$

veya

$$Q = \mu . S . C_v . \sqrt{2 . g . h}$$

olur. ($\mu . C_v = m$) yazılırsa debi ifadesi,

$$Q = m . S . \sqrt{2 . g . h}$$

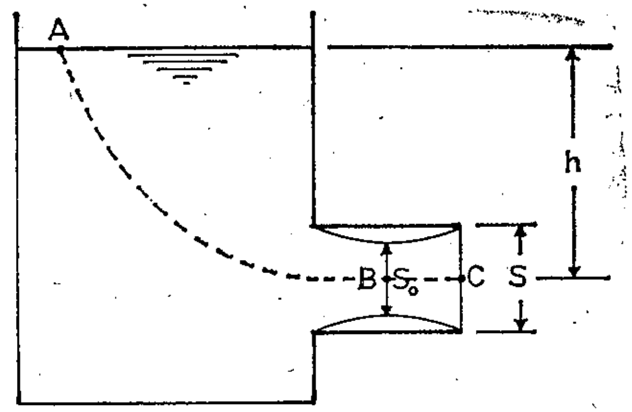
olur. Genellikle ($m = 0{,}62$) alınır. Bu denklemlerdeki (h), iki hazne su seviyeleri arasındaki farkı gösterir.

5) LÜLELER

İnce kenarlı menfeze takılan ve fazla uzun olmıyan borulara lüle denir. Lüleler içe dönük veya dışa çıkık olabilir.

Dışa çıkık bir lüle (Şekil 9.4)'de gösterilmiştir ve debisi aşağıda açıklandığı şekilde hesaplanabilir. Eğer lüle uzunluğu lüle çapının (1,5) katına eşitse lüle içinde büzülme ve açılma olur. Lüle kesit alanı (S) ve büzülmüş kesit alanı (S_0) ile gösterilirse (μ) kesit büzülme katsayısı $\left(\mu = \frac{S_0}{S}\right)$ olur.

(A) ile (C) noktalarının sınırlandıkları aralıkta Bernoulli denklemini uygulayalım.



Şekil 9.4 — Dışa Çıkık Lüle

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V^2_A}{2g} + z_A = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V^2_C}{2g} + z_C + \Delta H_{AC}$$

(ΔH_{AC}) büzülmeden sonraki açılmada meydana gelen yük kaybıdır ve daha önce aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$\Delta H_{AC} = \frac{V^2_C}{2 . g} . \left(\frac{1}{m . \mu} - 1\right)^2$$

Diğer yandan,

$$P_A = P_{at} \quad , \quad V_A = 0 \quad , \quad P_C = P_{at} \quad , \quad z_A - z_C = h$$

olduğundan Bernoulli denklemi,

$$h = \frac{V^2_C}{2g} + \frac{V_C^2}{2g}\left(\frac{1}{m . \mu} - 1\right)^2$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikten (V_C) çözülürse,

$$V_C = \frac{\sqrt{2 . g . h}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{m . \mu} - 1\right)^2}}$$

olur. Hazneden boruya geçişte yersel yük kaybı katsayısı

$$\theta = \left(\frac{1}{m . \mu} - 1\right)^2 = 0{,}5$$

olarak verilmiştir, (V_C) ifadesinde yerine konursa,

$$V_C = 0{,}82 . \sqrt{2 . g . h}$$

olur. Lülenin (Q) debisi şu şekilde ifade edilir.

$$Q = S_C \,.\, V_C$$

veya

$$Q = 0{,}82 \,.\, S \,.\, \sqrt{2 \,.\, g \,.\, h}$$

İçe dönük silindirik lülenin debisi

$$Q = \frac{1}{2} \,.\, S \,.\, \sqrt{2 \,.\, g \,.\, h}$$

formülünden bulunabilir.

6) VENTURİMETRE

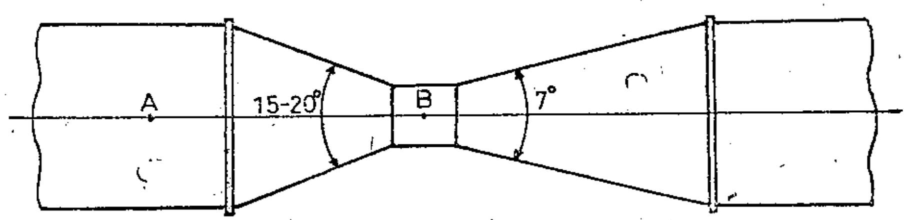
İki konik borunun birleştirilmesinden meydana gelen alete Venturimetre denir. Uygulamada boru içinden geçen sıvının debisi genellikle Venturimetre ile ölçülür. (Şekil 9.5)'de gösterildiği gibi konik boruların kesit alanı belirli bir uzunluktan sonra boru kesitinin yaklaşık olarak yarısı kadar olur ve düz bir boru ile birleştirilirler. Boruda bu şekilde oluşturulan kesit değişimi enerji değişimine neden olur. Enerji değişimi ölçülerek hız ve dolayısı ile debi hesaplanabilir. (A) ve (B) noktalarının sınırlandıkları aralıktaBernoulli denklemi uygulanırsa,

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B + \Delta H_{AB}$$

elde edilir. $(z_A = Z_B)$' dir ve (A) ile (B) arasındaki (ΔH_{AB}) enerji kaybı çok küçük olduğundan $(\Delta H_{AB} = 0)$ alınabilir. Bernoulli denklemi yeniden yazılırsa,

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = \frac{V_B^2 - V_A^2}{2g}$$

olur.



Şekil 9.5 — Venturimetre

(A) ile (B) noktaları arasındaki $\left(\frac{(P_A - P_B)}{\gamma}\right)$ basınç yükseklik farkı diferansiyel manometre ile ölçülür. Borunun debisi (Q) ise süreklilik denklemi şu şekilde yazılır.

$$Q = S_A \cdot V_A = S_B \cdot V_B$$

Bu ifadeden (V_B) çözülürse,

$$V_B = \frac{S_A}{S_B} \cdot V_A$$

olur. (V_B) eşitliği Bernoulli denkleminde yerine konursa,

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = \frac{\left(\frac{S_A}{S_B}\right)^2 \cdot V_A^2 - V_A^2}{2g} = \frac{V_A^2}{2g} \cdot \left[\left(\frac{S_A}{S_B}\right)^2 - 1\right]$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten (V_A) çözülürse,

$$V_A = \sqrt{\left(\frac{P_A - P_B}{\gamma}\right) \cdot \frac{2g}{\left[\left(\frac{S_A}{S_B}\right)^2 - 1\right]}}$$

olur. Borudan geçen (Q) debisi,

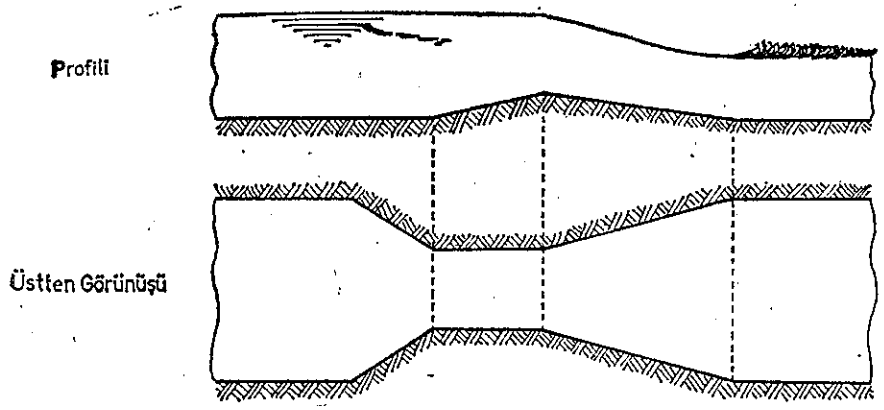
$$Q = S_A \cdot V_A = S_A \cdot \sqrt{\frac{2g}{\left[\left(\frac{S_A}{S_B}\right)^2 - 1\right]} \cdot \left(\frac{P_A - P_B}{\gamma}\right)}$$

şeklinde ifade edilir.

Debi ifadesi çıkartılırken (A) ve (B) noktalarının bulunduğu kesitlerdeki hız dağılımının düzgün olduğu varsayılmıştır. Yukarıdaki debi formülü (Q_G) gerçek debiye çok yakın değer verir, bazen (C_D) debi düzeltme katsayısı da kullanılır, $(Q_G = C_D \,.\, Q)$ olur. Venturimetrenin geometrik özellikleri bilindiğine göre manometre ile basınç farkı ölçülerek yukarıdaki debi ifadesinden borunun (Q) debisi hesaplanabilir.

Açık kanalların debisi Venturi kanalı ile ölçülür. Venturi kanalının tabanı yataydır, genişliği sabit olan bir boğazla bunu açık kanala bağlıyan yakınsak ve ıraksak boğazlardan oluşur. Açık kanalın kesiti değiştirilerek Venturi kanalı elde edilir.

Venturi kanalının özel bir şekli Parshal (Parşal) savağıdır. (Şekil 9.6)'da Parshal savağının profili ve üstten görünüşü gösterilmiştir.



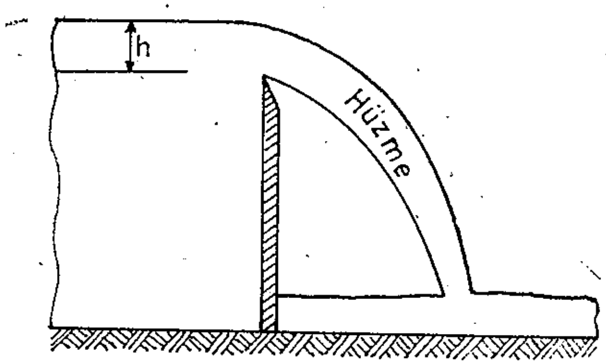
Şekil 9.6 — Parshal Savağı

Açık kanalın eğimi ve enine kesiti değiştirilerek Parshal savağı elde edilir. Kanalda yapılan bu değişiklikler enerji değişimine neden olur. Enerji değişimi kanaldaki su seviyeleri ölçülerek tesbit edilir ve bundan kanalın debisi hesaplanır.

Ülkemizde sulama amacı ile inşa edilmiş sulama kanallarının debisi genellikle Parshal savağı ile saptanır.

7) SAVAKLAR

Savak, bir tarafı açık ve kaynak kesimindeki sıvı seviyesi tarafından tamamen örtülmeyen yani kaynak kesimindeki sıvı seviyesinin altında kalmıyan bir menfezdir. Savak açık kanallardaki suyun debisinin ölçülmesinde kullanılır. Savaktan geçen sıvı liflerinin oluşturdukları şekle

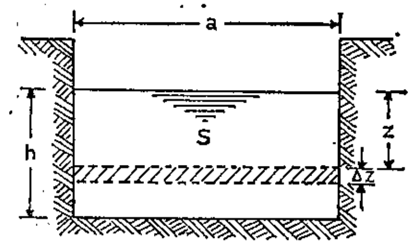


Şekil 9.7 — İnce Kenarlı Savak

hüzme veya örtü denir. Eğer sıvı lifleri savağın kenarlarına bir noktada temas ediyorlarsa bu savağa ince kenarlı savak denir.

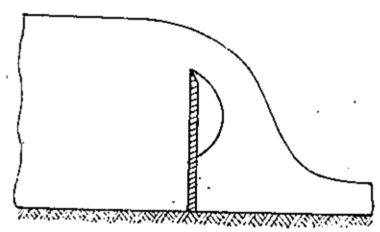
(Şekil 9.7)'de ince kenarlı bir savak gösterilmiştir. Savağın kaynak tarafında su seviyesi azalır ve buna büzülme denir. Büzülmenin başlamadığı yerde suyun serbest yüzü ile savağın su ile ıslanan en düşük noktası arasındaki (h) seviye farkına savak yükü denir.

Savaklar kesit biçimine göre dikdörtgen, üçgen, yamuk, daire kesitli savaklar diye sınıflandırılır. Savaklar genellikle dikdörtgen biçiminde imal edilir, yatay kenarına eşik, düşey kenarlarına yanak denir, (Şekil 9.8)'de dikdörtgen kesitli bir savak gösterilmiştir. Savaklar ayrıca eşik genişliğine göre ince kenarlı ve kalın kenarlı savaklar diye de sınıflandırılır.

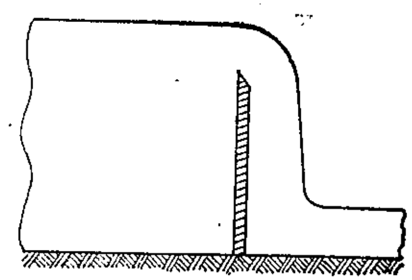


Şekil 9.8 — Dikdörtgen Savak

Savaklar örtü biçimine göre serbest örtülü, çökük örtülü ve yapışık örtülü diye sınıflandırılır. (Şekil 9.7)'deki savak serbest örtülüdür, örtünün heryanı açık hava ile çevrilidir ve savağın akıntı tarafındaki cidarından ayrılmıştır. (Şekil 9.9) ve (9.10)'da çökük örtülü ve yapışık örtülü savaklar gösterilmiştir.

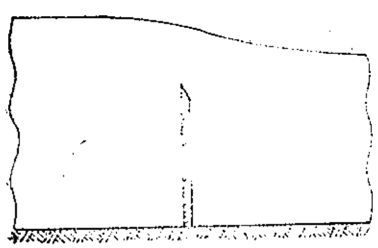


Şekil 9.9 — Çökük Örtülü Savak

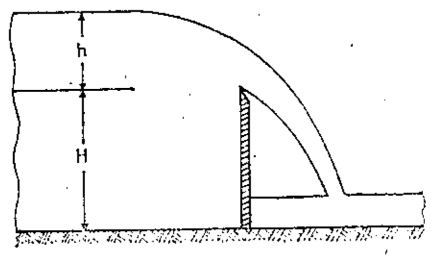


Şekil 9.10 — Yapışık Örtülü Savak

Savağın eşiği akıntı tarafındaki sıvı seviyesinin altına düşünce (Şekil 9.11)'de gösterildiği gibi savak suyun içinde kalır ve batmış savak denir.



Şekil 9.11 — Batmış Savak



Şekil 9.12 — Dikdörtgen Savak Kesiti

3) İNCE KENARLI DİKDÖRTGEN SAVAĞIN DEBİSİ

Uygulamada en çok kullanılan ince kenarlı dikdörtgen savaktır, (Şekil 9.12)'de kesiti gösterilen dikdörtgen savağın (Q) debisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir. Debi denklemi çıkartılırken şu varsayımlar yapılmıştır.

— Örtüde büzülme yoktur.
— Sıvı yatakları arasındaki sürtünme direnci ihmal edilmiştir.
— Kaynak tarafındaki akım hızı ihmal edilmiştir.
— Düşme yüksekliği (H) debiyi etkilemez.

(Şekil 9.8)'de görüldüğü gibi dikdörtgen savak yükü (z) olan küçük bir (ΔS) yüzey elemanından belirli bir zaman aralığında geçen sıvı miktarı (ΔQ) olsun. Yüzey elemanının alanı ($\Delta S = a\,.\,\Delta Z$) dir ve akım hızı $\left(V = \sqrt{2\,.\,g\,.\,z}\right)$ şeklinde ifade edilebilir (Toriçelli formülü). (ΔS) yüzey elemanından birim zaman aralığında geçen sıvı miktarı (ΔQ) aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$\Delta Q = V\,.\,\Delta S = \sqrt{2\,.\,g\,.\,z}\,.\,a\,.\,\Delta z = a\,.\sqrt{2\,.\,g}\;.\;z^{1/2}\,.\,\Delta z$$

(z)'nin (0) ila (h) aralığındaki değerleri için bu denklemin integrali alınırsa, savaktan geçen (Q_T) teorik debisi,

$$Q_T = \frac{2}{3}\,.\,a\,.\,\sqrt{2\,.\,g}\;.\;h^{3/2}$$

elde edilir.

Gerçek debi (Q)'yi bulabilmek için (Q_T) ifadesi (C_D) debi düzeltme katsayısı ile çarpılır.

$$Q = C_D\,.\,Q_T = \frac{2}{3}\,.\,C_D\,.\,a\,.\sqrt{2\,.\,g}\,.\,h^{3/2}$$

(C_D) debi düzeltme katsayısı deney sonuçlarına göre tesbit edilmiştir ve ($C_D = 0{,}62$) verilmiştir. Savak eşiği ile su seviyesi arasındaki alan ($S = a\,.\,h$) şeklinde ifade edilebilir. Bunlar yukarıdaki (Q) ifadesinde yerine konursa,

$$Q = 0{,}41\,.\,S\,.\,\sqrt{2\,.\,g\,.\,h}$$

elde edilir.

Gerçekte kanal genişliği (L) ve savak eşik yüksekliği (H) yukarıdaki debi bağıntısını etkiler.

İnce kenarlı dikdörtgen savağın (Q) debisi deney sonuçlarından elde edilmiş aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

— Bazin Formülü: $Q = \mu\,.\,S\,.\sqrt{2\,.\,g\,.\,h}$

$$\mu = \left(0{,}405 + \frac{3}{1000\,.\,h}\right)\cdot\left[1 + 0{,}55\left(\frac{h}{h+H}\right)^2\right]$$

Uygulama sınırları: $0{,}5<a<2$ m. , $0{,}1<h<0{,}6$ m. , $0{,}2<H<2$ m.

— Rehbock Formülü: $Q = \frac{2}{3}C\,.\sqrt{2\,.\,g}\,.\,a\,.\,h_e^{3/2}$

$$C = 0{,}602 + 0{,}083\,.\,\frac{h}{H}$$

$$h_e = h + 0{,}0012 \text{ m.}$$

Uygulama sınırları: $\frac{h}{H}\leq 1$, $0{,}03<h<0{,}75$ m, $a\geq 0{,}3$ m, $H\geq 0{,}1$ m, $\frac{a}{L}=1$

— İsviçre Mühendisler Birliği Formülü: $Q = \frac{2}{3}\,.\,C\,.\,S\;.\sqrt{2\,.\,g\,.\,h}$

$$C = \left[0{,}578 + 0{,}037\,.\left(\frac{a}{L}\right)^2 + \frac{0{,}003615 - 0{,}003\cdot(a/L)^2}{h + 0{,}0016}\right]\cdot\left[1 + 0{,}5\,.\left(\frac{a}{L}\right)^4\cdot\left(\frac{h}{h+H}\right)^2\right]$$

Uygulama sınırları: $\frac{h}{H} \leq 1$, $0{,}025 . \frac{L}{a} < h < 0{,}8$ m, $\frac{a}{L} \geq 0{,}3$, $H \geq 0{,}3$ m.

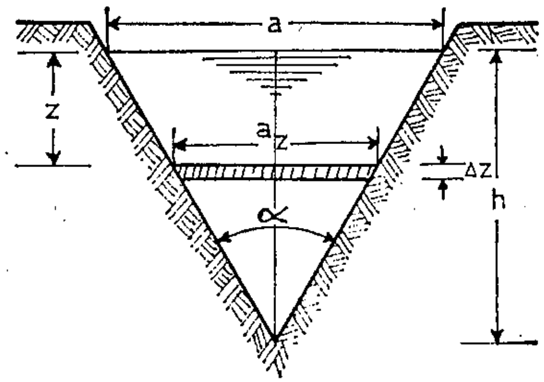
— Türk Standartları Enstitüsü Formülü: $Q = \mu . S . \sqrt{2 . g . h}$

$$\mu = 0{,}6138 . \left(1 + \frac{1}{1000 . h + 1{,}6}\right) \cdot \left[1 + 0{,}5\left(\frac{h}{h+H}\right)^2\right]$$

Uygulama sınırları: $a \geq 0{,}5$ m. , $0{,}1 < h < 0{,}8$ m. , $h \leq H \geq 0{,}3$ m.

9) İNCE KENARLI ÜÇGEN SAVAĞIN DEBİSİ

Küçük debilerin ölçümünde ince kenarlı üçgen savak ince kenarlı dikdörtgen savaktan daha iyi sonuçlar verir. (Şekil 9.13)'de kesiti gösterilen ince kenarlı üçgen savağın (Q) debisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.



Şekil 9.13 — Üçgen Savak Kesiti

(Şekil 9.13)'de gösterilen $\Delta S = (a_z . \Delta z)$ yüzey alanından geçen (ΔQ) sıvı miktarı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta Q = a_z . \sqrt{2 . g} . z^{1/2} . \Delta z$$

Benzer üçgenler bağıntısından yararlanılarak (a_z) şu şekilde ifade edilebilir.

$$a_z = \frac{a}{h} . (h - z)$$

(h) yüksekliği ise

$$h = \frac{a/2}{\tan \alpha/2}$$

şeklinde ifade edilebilir.

(a_z) ve (h) ifadeleri (ΔQ) denkleminde yerine konursa, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\Delta Q = \sqrt{2 . g} . 2 \tan \frac{\alpha}{2} . (h - z) . z^{1/2} . \Delta z$$

(z)'nin (0) ila (h) arasındaki değerleri için bu denklemin integrali alınır ve (C_D) debi düzeltme katsayısı ile çarpılırsa,

$$Q = \frac{8}{15} \cdot C_D \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{2 . g} . h^{5/2}$$

üçgen savağın debi formülü elde edilir. Araştırma sonuçlarına göre $(C_D = 0{,}56 \sim 0{,}60)$ arasında değişir.

Belirli bir üçgen savak için debi formülü şu şekilde ifade edilebilir.

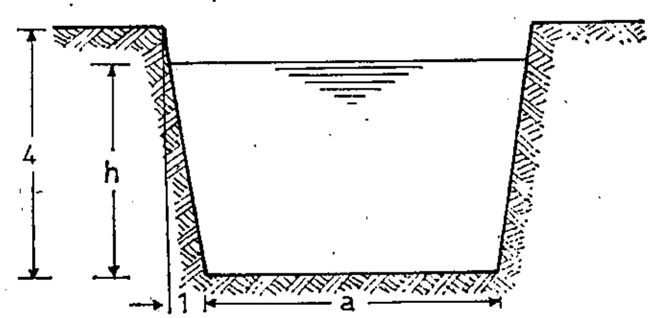
$$Q = m . h^{5/2}$$

Bu formülde $\left(m = \frac{8}{15} . C_D . \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{2 . g}\right)$'dir.

10) İNCE KENARLI YAMUK SAVAĞIN DEBİSİ

Cipoletti dikdörtgen savak yerine kenar eğrimi az olan yamuk kesitli savağı önermiştir, savağın kenar eğimi (Şekil 9.14)'deki gibi alınmalıdır. Yamuk savağa Cipoletti savak da denir. Debi formülü aşağıdaki gibidir.

$$Q = \frac{2}{3} . C_D . a . \sqrt{2 . g} . h^{3/2}$$



Şekil 9.14 — Yamuk Savak Kesiti

Açık kanalların debi ölçümünde savaklar en güvenilir sonucu verir. Uygulamada dikdörtgen savak ençok kullanılır. Savak ile debi ölçümünde karşılaşılan en önemli sorun (h) yükünün tesbitidir. Bunun için büzülmenin başladığı yerin doğru bir şekilde saptanması gerekir. Deney sonuçlarına göre büzülme savak eşiğinden $(3 . h \sim 4 . h)$ kadar uzakta başlar. Bundan dolayı savak yükü eşikten kaynak tarafında en az $(3 . h \sim 4 . h)$ kadar uzaktaki bir kesitte limnimetre gibi duyarlı aletlerle ölçülür.

11) KALIN KENARLI SAVAĞIN DEBİSİ

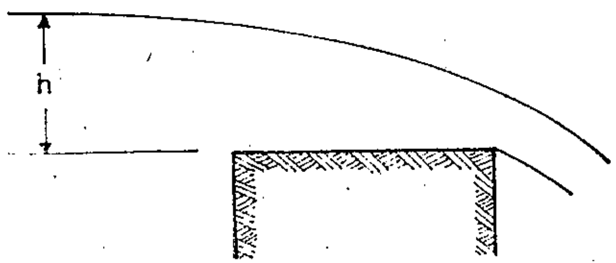
İnce kenarlı savaklarla genellikle kanallardaki küçük debiler ölçülebilir. Kalın kenarlı savak açık kanallardaki büyük debileri ölçmek için kullanılır. Barajların fazla suyunu boşaltmak için inşa edilen dolusavaklar da kalın kenarlı savaktır. Ülkemizdeki Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) hidrometri istasyonlarından bir kısmında yapışık örtülü kalın kenarlı savak (Şekil 12.24) inşa edilmiştir. (Şekil 9.15)'de keşiti gösterilen kalın kenarlı savağın (Q) debisi şöyle ifade edilebilir.

$$Q = \frac{2}{3} . \mu . \sqrt{2 . g} . L . \left[\left(h + \frac{V^2}{2 . g}\right)^{3/2} - \left(\frac{V^2}{2 . g}\right)^{3/2}\right]$$

Bu ifadede $\left(\frac{2}{3} . \mu . \sqrt{2 g} = C\right)$ konur ve savak yaklaşım hızı (V) ihmal edilirse

$$Q = C . L . h^{3/2}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikteki (C) bir katsayıdır ve savak inşa edildiği yerde ölçümlerle tesbit edilir, (L) savak kret uzunluğudur. Baraj dolusavaklarının (C) katsayısı hidrolik laboratuvarlarında sürdürülen dolusavak model çalışmalarından saptanır. (DSİ) hidrolik laboratuvarlarında bu tür model çalışmaları yapılır. (DSİ) hidrometri istasyonlarındaki ka-

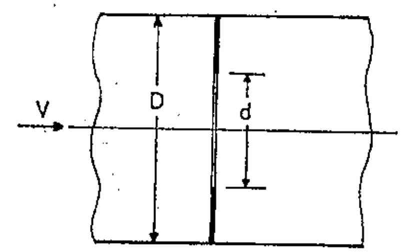


Şekil 9.15 — Kalın Kenarlı Savak Kesiti

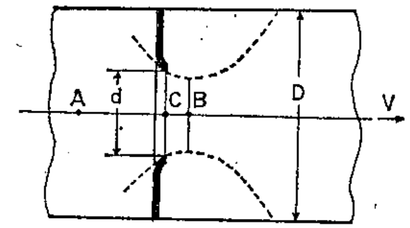
lın kenarlı savakların (Şekil 12.24) debisi ile su yükü arasındaki ilişki mulinelerle yapılan debi ölçümlerinden saptanır ve bu ilişki grafik eğri şeklinde gösterilir. Su seviyesi ile debi arasındaki ilişkiye savak anahtar eğrisi denir.

12) DAR KESİTLİ CİHAZLARLA DEBİ ÖLÇÜMÜ

Dar kesitli cihazlarla yalnız daire kesitli borulardaki debi ölçülür. Boru içine kesit daralmasını gerçekleştiren bir cihaz yerleştirilir. Dar kesitli cihazlar (Şekil 9.16) ve (Şekil 9.17)'de gösterildiği gibi diyaframlı veya memeli olurlar. Daha önce incelediğimiz Venturimetre'de dar kesitli bir cihazdır.



Şekil 9.16



Şekil 9.17

Diyafram, merkezinde dairesel menfez bulunan ince bir plakadır ve boru içinde akan sıvının ince kenarlı bir menfezden geçmesini sağlar.

Meme, ince kenarlı menfezin akım yönünde dışa kıvrılmasından elde edilir ve böylece enerji kayıpları azaltılmış olur.

Dar kesitli cihaz Bernoulli denkleminin de gösterdiği gibi basınç enerjisini kinetik enerjiye dönüştürür. Bu şekilde oluşturulan basınç düşmesi ölçülür ve bundan ortalama akım hızı ve debi hesaplanır.

(Şekil 9.17)'deki (A) ve (B) noktalarının sınırladıkları aralığa, yük kayıplarını ihmal ederek Bernoulli denklemini uygulayalım. Venturimetre bölümünde açıklanan yol izlenerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$Q = S_A \cdot \sqrt{\frac{2 g}{\left[\left(\frac{S_A}{S_B}\right)^2 - 1\right]} \cdot \left(\frac{P_A - P_B}{\gamma}\right)}$$

(A), (B) ve (C) noktalarındaki kesit alanları sıra ile (S_A), (S_B) ve (S_C) ile gösterilmiştir. Kesit alanları arasındaki oranlar

$$\frac{S_B}{S_C} = \mu \quad \text{ve} \quad \frac{S_C}{S_A} = m$$

şeklinde ifade edilirse bu bağıntılardan

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{1}{m \cdot \mu}$$

eşitliği elde edilir. Bu ifadeler yukarıdaki (Q) debi formülünde yerine konur ve formül (C_D) debi düzeltme katsayısı ile çarpılırsa gerçek debi formülü,

$$Q = C_D \cdot S_A \cdot \sqrt{\frac{2g}{\left(\frac{1}{m^2 \cdot \mu^2} - 1\right)} \left(\frac{P_A - P_B}{\gamma}\right)}$$

elde edilir. Bu formülde $\left(S_A = \frac{S_c}{m}\right)$ yazılır ve kısaltmalar yapılırsa

$$Q = C_D \cdot \mu \cdot S_C \cdot \sqrt{\frac{2g}{1 - m^2 \cdot \mu^2} \cdot \left(\frac{P_A - P_B}{\gamma}\right)}$$

debi formülü elde edilir. (α) aşağıdaki şekilde tanımlansın.

$$\alpha = \frac{C_D \cdot \mu}{\sqrt{1 - m^2 \cdot \mu^2}}$$

(α)'ya toplam debi katsayısı denir. (α) ifadesi debi formülünde yerine konursa aşağıdaki debi ifadesi elde edilir.

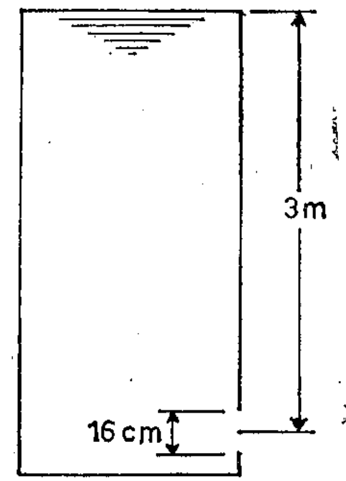
$$Q = \alpha \cdot S_c \cdot \sqrt{2g \cdot \left(\frac{P_A - P_B}{\gamma}\right)}$$

Borudaki basınç düşmesi ölçülür ve yukarıdaki debi formülünde yerine konursa borunun (Q) debisi hesaplanabilir.

ÖRNEK PROBLEMLER

1) (Şekil 9.18)'de gösterilen kapalı haznenin içinde basınçlı su vardır, suyun efektif basıncı ($2{,}5 \cdot 10^4$ kg/m²)'dir.

Haznedeki gerçek su seviyesinin değişmediğini varsayarak (16 cm.) çaplı ince kenarlı menfezin debisini bulunuz.



Şekil 9.18

ÇÖZÜM:

İnce kenarlı (Q) debisi,

$$Q = m \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

şeklindedir. ($m = 0{,}62$) alınabilir.

Basınçlı suyun (h) serbest su seviyesi;

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{10^3} = 25 \text{ m.}$$

bulunur. Menfez çapı küçük olduğu için ($h = 25$ m.) yükseklik, menfez merkezi ile serbest su yüzü arasındaki yükseklik farkı alınabilir. Menfez kesit alanı,

$$S = \frac{\pi . D^2}{4} = \frac{3{,}14 . (16)^2}{4} = 201 . cm^2 = 201 . 10^{-4}\ m^2$$

bulunur.

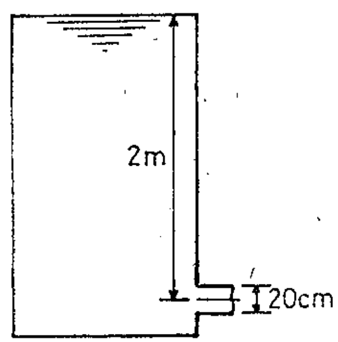
Menfezin debisi,

$$Q = 0{,}62 . 201 . 10^{-4} . \sqrt{2 . 9{,}81 . 25} = 0{,}276\ m^3/sn$$

$$Q = 0{,}276\ m^3/sn$$

bulunur.

2) (Şekil 9.19)'da gösterilen kapalı haznenin içinde bulunan su dışa çıkık silindirik lüle aracılığı ile dışarıya akıtılmaktadır. Haznedeki suyun efektif basıncı ($4 . 10^4$ kg/m²) dir ve gerçek su seviyesi sabittir. Lülenin debisini hesaplayınız.



Şekil 9.19

ÇÖZÜM:

Dışa çıkık silindirik lülenin (Q) debi formülü,

$$Q = 0{,}82 . S . \sqrt{2 . g . h}$$

şeklindedir.

Gerçek su seviyesi,

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{4 . 10^4}{10^3} = 40\ m.$$

bulunur.

Lüle kesit alanı,

$$S = \frac{\pi . D^2}{4} = \frac{3{,}14 . (20)^2}{4} = 314\ cm^2 = 314 . 10^{-4}\ m^2$$

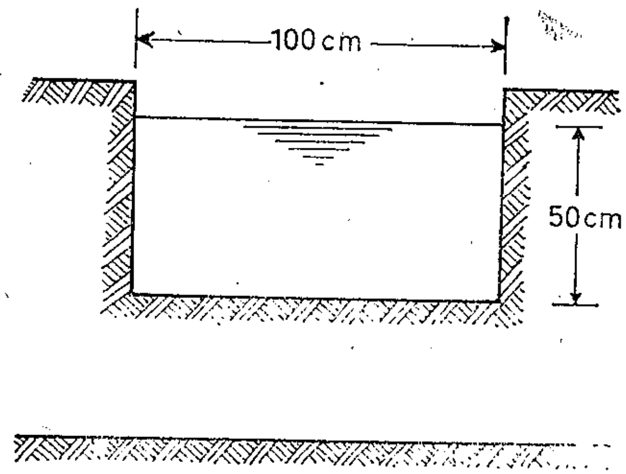
bulunur.

Lülenin debisi

$$Q = 0{,}82 . 314 . 10^{-4} . \sqrt{2 . 9{,}81 . 40} = 0{,}721\ m^3/sn$$

bulunur.

3) (Şekil 9.20)'de ölçüleri verilen ince kenarlı dikdörtgen savak (150 cm.) genişliğinde bir açık kanala yerleştirilmiştir. Savağın debisini hesaplayınız.



Şekil 9.20

ÇÖZÜM:

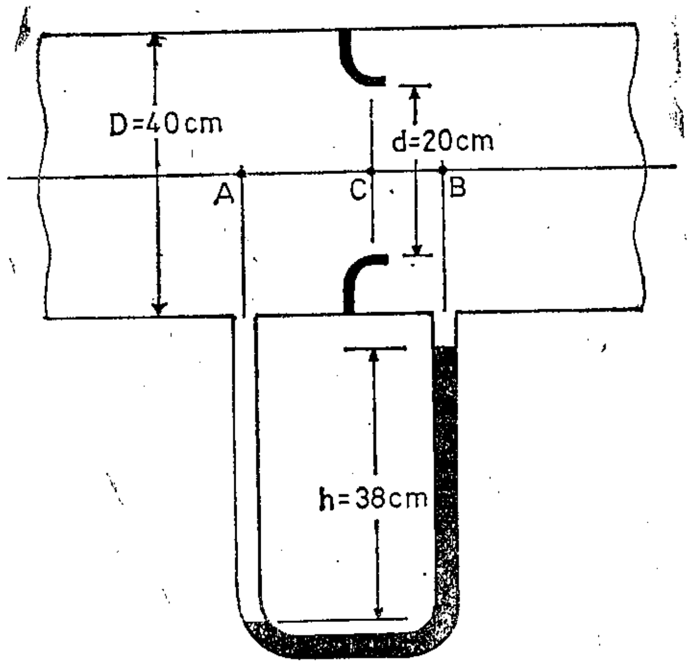
İnce kenarlı dikdörtgen savağın (Q) debi formülünden,

$$Q = 0{,}41 . S . \sqrt{2 . g . h} = 0{,}41 . 1 . 0{,}5\sqrt{2 . 9{,}81 . 0{,}50} = 0{,}642\ m^3/sn$$

bulunur.

4) İçerisinde sürekli akım bulunan boruya yerleştirilmiş standart ölçme memesi (Şekil 9.21)'de gösterilmiştir. (A) ve (B) noktaları arasına yerleştirilmiş civalı diferansiyel manometrede seviye farkı (38 cm.)'dir.

Debi düzeltme katsayısı (1), büzülme katsayısı (0,80) olduğuna göre borunun debisini ve ortalama hızını hesaplayınız.



Şekil 9.21

ÇÖZÜM:

Memenin (Q) debi formülü,

$$Q = \alpha \cdot S_c \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(\frac{P_A - P_B}{\gamma}\right)}$$

şeklindedir.

Kesit büzülme katsayısı

$$\alpha = \frac{C \, . \, \mu}{\sqrt{1 - m^2 \, . \, \mu^2}} \, , \quad m = \frac{S_c}{S_A}$$

şeklindedir.

Büzülmüş kesit alanı,

$$S_c = \frac{\pi \, . \, d^2}{4} = \frac{3{,}14 \, . \, (20)^2}{4} = 314 \ cm^2 = 314 \, . \, 10^{-4} \ m^2$$

bulunur.

$$m = \frac{S_c}{S_A} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 = \left(\frac{20}{40}\right)^2 = 0{,}25$$

$$\alpha = \frac{1 \, . \, 0{,}80}{\sqrt{1 - (0{,}25 \, . \, 0{,}80)^2}} = 0{,}818$$

bulunur.

Basınç yüksekliği

$$\frac{P_A - P_B}{\gamma} = \frac{\gamma_{civa}}{\gamma} \, . \, h = \frac{13{,}6 \, . \, 10^3 \, . \, 0{,}38}{10^3} = 5{,}168 \ m.$$

bulunur

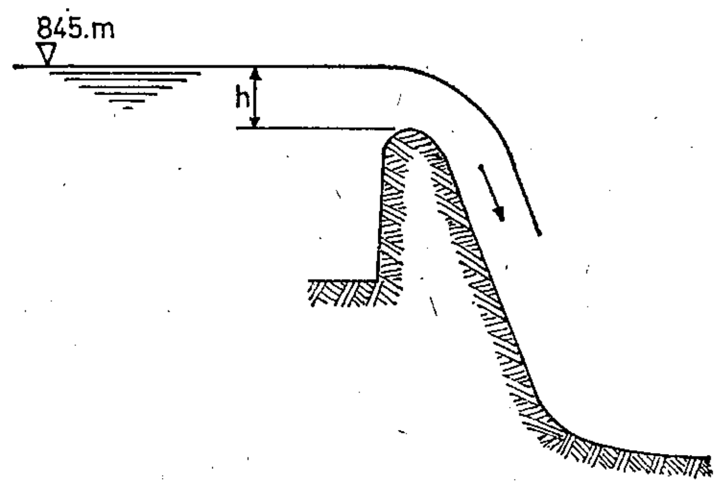
Borunun debisi,

$$Q = 0{,}818 \, . \, 314 \, . \, 10^{-4} \cdot \sqrt{2 \, . \, 9{,}81 \, . \, 5{,}168} = 0{,}2586 \ m^3/s$$

$$Q = 0{,}2586 \ m^3/sn$$

bulunur.

5) (Şekil 9.22)'de bir barajın dolusavağının kesiti gösterilmiştir. Savak kret uzunluğu (75 m.)'dir. Savaktan (3000 m³/sn) debi geçerken baraj göl su kotu (845 m.)'dir. Savak katsayısı (2,23) olduğuna göre savak kret kotunu hesaplayınız.



Şekil 9.22

ÇÖZÜM:

Dolusavağın (Q) debisi aşağıdaki kalın kenarlı savak formülü ile ifade edilebilir.

$$Q = C . L . h^{3/2}$$

Bu ifadeden,

$$h^{3/2} = \frac{Q}{C . L} = \frac{3000}{2,23 . 75} = 18$$

$$h = 6,85 \text{ m.}$$

bulunur. Savak kret kotu,

$$845 - 6,85 = 838,15 \text{ m. bulunur.}$$

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Sıvı akımın hızı ve miktarı hangi aletlerle ölçülür?
2) Pitot tübü ile akım hız ölçümü nasıl yapılır?
3) Muline ile bir kanaldaki su akımının hızı nasıl ölçülür?
4) Menfez ve lüle nedir?
5) Toriçelli formülünü açıklayınız.
6) Venturimetre nedir?
7) Parshal (Parşal) savağı nedir?
8) Savakların sınıflandırılmasını yapınız, savaklar nerelerde kullanılır.
9) Borulardaki sıvı akımının debisi nasıl ölçülür?

X. BÖLÜM

HİDROLİK TÜRBİNLER

1) GİRİŞ

2) HAREKET MİKTARI TEOREMİ ve TÜRBİN ÇARKLARINA UYGULANMASI

3) TÜRBİNLERLE İLGİLİ HİDROLİK TANIMLAR
   a) DÜŞÜ
   b) GÜÇ ve VERİM
   c) ÖZGÜL DÖNME SAYISI
   d) ANAMİLİN DÖNME SAYISI
   e) ÇEVRESEL HIZ KATSAYISI

4) HİDROLİK TÜRBİN TİPLERİ
   a) ETKİLİ TÜRBİNLER - PELTON TÜRBİNLERİ
      ÖRNEK PROBLEM
   b) TEPKİLİ TÜRBİNLER
      i) FRANCİS TÜRBİNLERİ
      ii) USKURLU TÜRBİNLER
      iii) KAPLAN TÜRBİNLERİ

5) TÜRKİYEDEKİ BAZI HİDROELEKTRİK SANTRALLARIN KARAKTERİSTİK DEĞERLERİ

ÖRNEK PROBLEM

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

X. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

a — ivme
B.B — buhar beygiri veya beygir gücü
D — çap
D_m — demet çapı
D_p — Pelton türbin çarkının çapı
F — kuvvet, frekans
g — yerçekimi ivmesi
G — ağırlık debisi
H — toplam enerji yüksekliği
H_g — geometrik düşü
H_k — toplam yük kaybı
H_n — net düşü
$k_ç$ — çift kutup sayısı
l — uzunluk
m — kütle
M — moment
n — dönme sayısı
n_s — özgül dönme sayısı
N_e — efektif güç
N_h — hidrolik güç
N_T — teorik güç
P — basınç
r — yarıçap
S — alan
t — zaman
T — teğetsel etki kuvveti
u — sürüklenme hızı veya çevresel hız
v — bağıl hız
V — hız

V_m — mutlak hız
V_r — bağıl hız
V_s — sürüklenme hızı
X — yatay eksen
z — kıyaslama düzleminden uzaklık
Q — debi
η_h — hidrolik verim
η_H — hacimsel verim
η_m — mekanik verim
η_T — toplam verim
α — açı
β — kanat açısı
Δ — küçük değişme veya artım
π — daire çevresinin çapına oranı
ρ — özgül kütle
φ — çevresel hız katsayısı
ω — açısal hız

HİDROLİK TÜRBİNLER

1) GİRİŞ

Hidrolik türbinler suyun enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinalardır. Hareketli su türbinin içinden geçerken suyun enerjisi türbin milinde mekanik enerjiye dönüştürülür. Mekanik enerji jeneratör yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbin ve jeneratörden oluşan sisteme bir ünite denir.

Suyun enerjisinden en iyi biçimde yararlanabilmek için suyun miktarı ve enerjisi ile birlikte bu enerjiyi kullanma yöntemleride bilinmelidir. Akarsuların doğal durumu farklılık gösterdiğinden bunların hidrolik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürecek türbinler belirli standartlara uygun olarak seri şekilde imal edilemez.

Türbinler suyun akış doğrultusu değiştirilerek kazanılan enerji ilkesinden hareketle projelendirilir. Su türbin içinden geçerken türbine etkidiği kuvvetin bilinmesi türbin projelendirmesinde çok önemlidir. Türbin içinden geçen suya yalnız enerji bağıntısı veya Bernoulli denklemi uygulanarak suyun türbine etkidiği kuvvet bulunamaz. Bunun için mekanikte bilinen HAREKET MİKTARI TEOREMİ'nden de yararlanmak gerekir. Hareket Miktarı Teoremi veya diğer bir deyimle Uyarım (Impuls) ve Momentum ilişkisinden yararlanılarak türbinlerin projelendirilmesinde karşılaşılan problemler çözümlenir.

Türbinler, üzerinde kanatlar bulunan bir çark ile çarkın bağlı bulunduğu bir mil ve kanatlara su gönderen hareketsiz dağıtıcı veya püskürtücüden oluşur. Çark bağlı olduğu milin ekseni etrafında döner. Türbinler çarkın dönme ekseninin konumuna göre yatay ve düşey eksenli türbinler diye ikiye ayrılır. Eksen konumunun seçiminde dönen kısımların ağırlığı ile yataklar arasındaki eğilme gözönünde bulundurulur. Türbinler suyun akış doğrultusuna göre teğetsel akışlı, radyal ve eksenel akışlı türbin şeklinde sınıflandırılır.

Türbinler, içinden geçen suyun etki durumuna göre etkili ve tepkili türbinler şeklinde ikiye ayrılır. Etkili türbinlerde su bir memeden püskürtülerek kanatlar üzerine gönderilir, suyun basıncı kanatlara girişte

ve çıkışta aynı kalır. Suyun basıncı değişmediği için suyun yalnız kinetik enerjisi kanatlara etkir. Pelton türbinleri etkili türbinlerdir ve suyun akışı teğetseldir. Tepkili türbinlerde suyun kanatlara giriş ve çıkışında basınç farklıdır ve kanatlara etkiyen kuvvet basınç kuvvetidir. Francis, uskurlu ve Kaplan tipi türbinler tepkili türbinlerdir. Francis türbinlerinde suyun akışı radyal, uskurlu ve Kaplan türbinlerinde suyun akışı ekseneldir.

2) HAREKET MİKTARI TEOREMİ ve TÜRBİN ÇARKLARINA UYGULANMASI

Hareket halindeki bir cismin kütlesi (m) ve hızı (V) ise kütle ile hızın çarpımına HAREKET MİKTARI veya MOMENTUM denir.

$$\text{Hareket miktarı} = m \cdot V$$

Diğer yandan hareket miktarındaki değişme UYARIM'a (Impuls) eşittir. Uyarım cismin kütlesine etkiyen kuvvetle zamanın çarpımına eşittir. (Δt) zaman aralığında cisme etkiyen kuvvet (F) ve hız değişimi ($\Delta V = V_2 - V_1$) ise

$$\text{Uyarım} = F \cdot \Delta t \quad \text{ve hareket miktarındaki değişme} = m \cdot \Delta V$$

olur. Öte yandan (Uyarım = Hareket Miktarındaki değişme) bağıntısına göre hareket miktarı teoremi,

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta V$$

şeklinde ifade edilir. Aslında hareket miktarı teoremi Newton formülünün özel biçiminden başka birşey değildir.

Newton'un ikinci kanununa göre kütlesi m olan bir cisme etkiyen toplam (F) kuvveti ile cismin (a) ivmesi arasında aşağıdaki bağıntı vardır.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Kuvvet, ivme ve hız gibi büyüklüklerin doğrultu, yön ve şiddeti olduğundan vektörel büyüklerdir. Bundan dolayı yukarıdaki bağıntıda bu büyüklükler vektörel belirtilerle gösterilmiştir.

Yukarıdaki denklemde ivme yerine $\left(\vec{a} = \dfrac{\Delta\vec{V}}{\Delta t}\right)$ eşiti konursa,

$$\vec{F} = m \cdot \frac{\Delta\vec{V}}{\Delta t}$$

olur. Bu denklem aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{V}$$

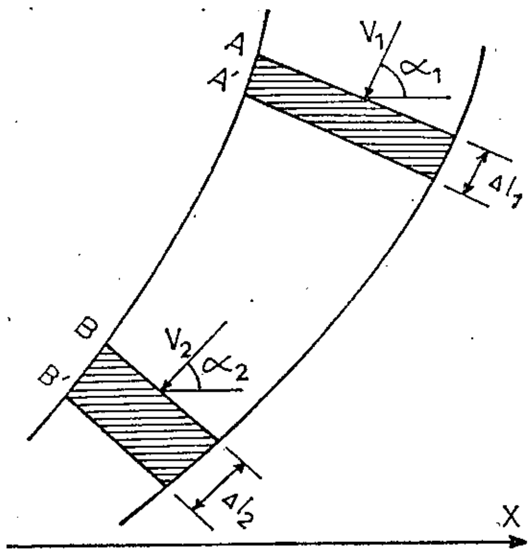
Yukarıdaki denklemin sol tarafı uyarım (impuls)'dır, sağ tarafı ise momentumdaki değişmeyi gösterir.

Hareket miktarı teoremini (Şekil 10.1)'de gösterilen ve içersinde sıvı bulunan boruya uygulayalım. Şekildeki (A) ve (B) kesitlerinin alanları (S_1) ve (S_2), ortalama hızları (V_1) ve (V_2) olsun. (Δt) gibi kısa bir zaman sonra (A) kesiti (A') ve (B) kesiti (B')'ye gelir. (A') ve (B')'deki kesit alanları (S_1') ve (S_2') olsun. (A) ve (B) kesitleri arasındaki akışkan kütlesi (Δt) zaman sonra (A') ve (B') kesitleri arasında bulunacaktır. Sürekli akımda (A') ve (B) arasındaki sıvı kütlesi ve hızında bir değişme olmıyacağından momentumu sabittir. Yalnız (A) ile (A') arasında giren ve (B) ile (B') arasında çıkan sıvıların momentum değişimi olacaktır. Süreklilik kuralına göre (Δt) zaman aralığında (S_1) kesitinden giren ve (S_2) kesitinden çıkan sıvı kütleleri birbirine eşittir. Giren ve çıkan sıvı kütlelerini (Δm) ile gösterirsek,

$$\Delta m = \rho_1 \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot \Delta t = \rho_2 \cdot S_2 \cdot V_2 \cdot \Delta t$$

ifadesi yazılabilir.

(ρ_1) ve (ρ_2) sıvının (A) ve (B) kesitlerindeki özgül kütlesidir.



Şekil 10.1

(Şekil 10.1)'deki borudan geçen sıvının ağırlık debisi (G) ile gösterilirse,

$$G = \gamma_1 \cdot V_1 \cdot S_1 = \gamma_2 \cdot V_2 \cdot S_2$$

veya

$$G = \rho_1 \cdot g \cdot V_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot g \cdot V_2 \cdot S_2$$

yazılır. Bu ifade yukarıdaki (Δm) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta m = \frac{G}{g} \cdot \Delta t$$

veya

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{G}{g} = \frac{\gamma \cdot Q}{g}$$

elde edilir. $\left(\frac{\Delta m}{\Delta t}\right)$ oranına kütle akış debisi denir. (A) ve (B) kesitlerinden (Δt) zaman aralığında giren ve çıkan momentum,

$$\Delta m \cdot V_1 = \frac{G}{g} \cdot \Delta t \cdot V_1$$

ve

$$\Delta m \cdot V_2 = \frac{G}{g} \cdot \Delta t \cdot V_2$$

olur.

Bu ifadelerden yararlanılarak momentumdaki değişme,

$$\Delta m \cdot V_2 - \Delta m \cdot V_1 = \Delta m \cdot (V_2 - V_1) = \frac{G}{g} \cdot \Delta t \cdot (V_2 - V_1)$$

şeklinde bulunur. (Δm) sıvı kütlesi (Δt) zaman aralığında borudan giren ve çıkan sıvının kütlesidir.

(Şekil 10.1)'deki boruya etkiyen toplam kuvvetlerin bileşkesi ($\vec{F}$) ile gösterilirse, ($\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{V}$) bağıntısı uyarınca,

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \frac{G}{g} \cdot \Delta t \cdot (\vec{V}_2 - \vec{V}_1)$$

veya

$$\vec{F} = \frac{G}{g} \cdot (\vec{V}_2 - \vec{V}_1)$$

boruya etkiyen toplam kuvvetlerin ifadesi elde edilir, (Δt) zaman aralığında borudan geçen sıvı kütlesi ($\Delta m = G/g \cdot \Delta t$) şeklinde ifade edilmiştir ve yukarıdaki formülde (m) kütlesi yerine bu ifade yazılmıştır.

Yukarıdaki eşitliğe hidrolikte EULER FORMÜLÜ denir. Euler formülünün (Şekil 10.1)'de gösterilen (X) ekseni yönündeki (F_x) bileşeni şöyle yazılabilir.

$$F_x = \frac{G}{g} \cdot (V_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2 - V_1 \cdot \text{Cos}\ \alpha_1)$$

Benzer şekilde (Y) ekseni yönündeki (F_y) bileşeni de aşağıdaki gibidir.

$$F_y = \frac{G}{g} \cdot (V_2 \cdot \text{Sin}\ \alpha_2 - V_1 \cdot \text{Sin}\ \alpha_1)$$

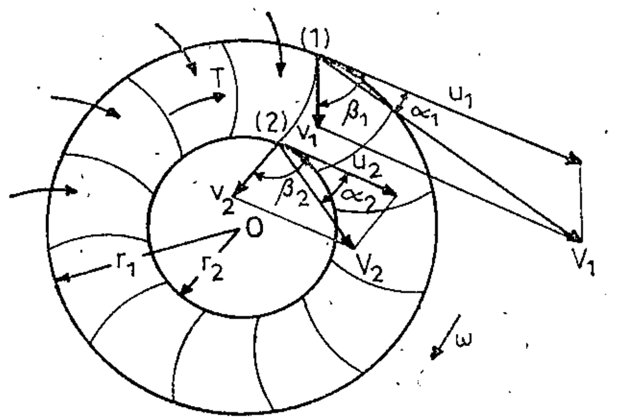
(G) ağırlık debisi yerine ($G = \gamma \cdot Q$) konursa Euler formülü

$$\vec{F} = \rho \cdot \vec{Q} \cdot (\vec{V}_2 - \vec{V}_1)$$

şeklinde de ifade edilir.

Euler formülünü (Şekil 10.2)'de şematik olarak gösterilen tepkili bir türbin çarkına uygulayalım. Türbin çarkına giren suyunkanatlar üzerine teğet doğrultusunda yaptığı etkiyi (T) ile gösterelim ve (T) kuvvetini hesaplayalım. Su çarka (r_1) yarıçaplı kısımdan girer ve (r_2) yarıçaplı kısımda çarkı terkeder.Çarkın (D) çapı, ($D = 2\ r_1$)'dir.

Çarkın bir kanadı üzerinde alınan (1) ve (2) noktalarında suyun giriş ve çıkış hızları (V_1) ve (V_2) ile gösterilmiştir. Burada suyun hareketinin mutlak hareket, bağıl hareket ve sürüklenme hareketi şeklinde üç çeşit hareketten oluştuğu gözönünde bulundurulmalıdır.



Şekil 10.2

Mekanikten bilindiği gibi, hareketli bir kıyaslama sisteminin sabit bir kıyaslama sistemine göre hareketine SÜRÜKLENME HAREKETİ denir. Uzaydaki bir noktanın sabit kıyaslama sistemine göre hareketine MUTLAK HAREKET ve hareketli kıyaslama sistemine göre hareketine BAĞIL HAREKET denir. Uzaydaki bir noktanın mutlak hareketteki ($\vec{V}_m$) hızına MUTLAK HIZ, sürüklenme hareketindeki ($\vec{V}_s$) hızına SÜRÜKLENME HIZI ve bağıl hareketteki ($\vec{V}_r$) hızına BAĞIL HIZ denir. Hızlar arasında aşağıdaki bağıntı vardır.

$$\vec{V}_m = \vec{V}_s + \vec{V}_r$$

(Şekil 10.2)'deki çarkın bir kanadına girişte suyun mutlak hızı (V_1), çark kanadına göre bağıl hız (v_1), sürüklenme hızı (u_1) ve kanattan çıkışta aynı hızlar (V_2) (v_2), (u_2) ile gösterilmiştir. Bu hızlar arasında aşağıdaki vektörel bağıntılar yazılabilir.

$$\vec{V}_1 = \vec{v}_1 + \vec{u}_1$$

$$\vec{V}_2 = \vec{v}_2 + \vec{u}_2$$

Yukarıdaki hızların oluşturdukları üçgenlere giriş ve çıkış hız üçgenleri denir.

Türbin çarkının kanatlarına giriş ve çıkışta suyun (u_1) ve (u_2) sürüklenme hızları kanatların dönme hızına eşittir. (u_1) ve (u_2) hızlarına çevresel hız da denir. (u_1) çevresel hız,

$$u_1 = \frac{2\pi \cdot r_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$$

şeklinde ifade edilebilir, (n) çarkın dakikadaki dönme sayısıdır.

(Δt) zaman aralığında (1) ve (2) noktalarından giren ve çıkan suyun kütlesi (Δm) olsun. Teğet doğrultusunda hareket miktarı teoremini uygulayalım. Teğet doğrultusunda suyun kanatlara yaptığı etki (T) ve (V_1), (V_2) hızlarının teğetle yaptığı açılar (α_1), (α_2) olduğuna göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$T \cdot \Delta t = \Delta m \cdot (V_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2 - V_1 \cdot \text{Cos}\ \alpha_1)$$

Bu eşitliğin sağ tarafında parantez içindeki terimler (V_2) ve (V_1) hızlarının teğet doğrultusundaki bileşenlerdir. İki kanat arasındaki debi (ΔQ) ise,

$$\Delta m = \frac{\gamma \, . \, \Delta Q}{g} \, . \, \Delta t$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlik

$$T \, . \, \Delta t = \Delta m \, . \, (V_2 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_2 - V_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1)$$

denkleminde yerine konur ve (T) çözülürse,

$$T = \frac{\gamma \, . \, \Delta Q}{g} \, . \, (V_2 \, . \, \text{Cos} \, \alpha_2 - V_1 \, . \, \text{Cos} \, \alpha)$$

ifadesi elde edilir.

(T) teğetsel kuvveti çarkın (ω) açısal hızı ile dönmesini sağlıyan (ΔM) momentini doğurur. Hareket miktarı momenti teoremi uygulanırsa,

$$\Delta M = \frac{\gamma \, . \, \Delta Q}{g} \, . \, (V_2 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_2 \, . \, r_2 - V_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1 \, . \, r_1)$$

eşitliği yazılır.

Suyun çarka uyguladığı (M) toplam momentini bulmak için (ΔQ) debisi yerine çarkın (Q) toplam debisini almak gerekir. Buna göre (M) toplam moment,

$$M = \sum \Delta M = \frac{\gamma \, . \, Q}{g} \, . \, (V_2 \, . \, r_2 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_2 - V_1 \, . \, r_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1)$$

şeklinde ifade edilir.

(M) momenti çarkın (ω) açısal hızı ile dönmesini sağlar. Çarkın içinden geçen suyun birim zamanda çarka kazandırdığı (N_h) HİDROLİK GÜÇ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$N_h = M \cdot \omega = \frac{\gamma \, . \, Q}{g} \, . \, (V_2 \, . \, r_2 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_2 - V_1 \, . \, r_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1) \, . \, \omega$$

Bu denklemde, ($r_1 \cdot \omega = u_1$) ve ($r_2 \; \omega = u_2$) ifadeleri yerlerine konursa,

$$N_h = \frac{\gamma \, . \, Q}{g} \, . \, (V_2 \, . \, u_2 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_2 - V_1 \, . \, u_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1)$$

hidrolik güç denklemi bu şekli alır.

(Şekil 10.2)'de (1) ve (2) suyun çarka giriş ve çıkışını gösterdiğine göre (N_h) negatif ise su çarka enerji vermiş ve pozitif ise su çarktan enerji almış olur.

Su türbinlerinde su türbin çarkına enerji verir. Yukarıdaki denklemde (N_h) değeri çarka verilen enerji şeklinde ve pozitif değerde ifade edilirse türbinlerin hidrolik güç denklemi şu şekle girer.

$$N_h = \frac{\gamma \, . \, Q}{g} \, . \, (V_1 \, . \, u_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1 - V_2 \, . \, u_2 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_2)$$

Francis tipi türbinde ($\alpha_2 = 90°$) ise ($\text{Cos} \; \alpha_2 = 0$) olur ve ($N_h$) en büyük değerini alır. ($\alpha_2 = 90°$) olduğu zaman (V_2) mutlak hızı (u_2) çevresel hızına diktir. Hidrolik güç,

$$N_h = \frac{\gamma \, . \, Q}{g} \, . \, V_1 \, . \, u_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1$$

olur.

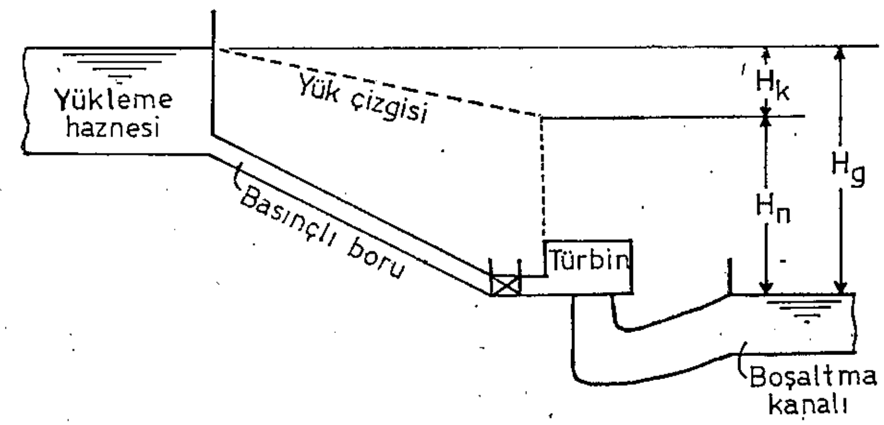
Pompalar suya enerji verir. (N_h) değeri suyun çarktan aldığı enerji şeklinde ve pozitif değerde ifade edilirse pompaların hidrolik gücü aşağıdaki denklemle bulunur.

$$N_h = \frac{\gamma \, . \, Q}{g} \, . \, (V_2 \, . \, u_2 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_2 - V_1 \, . \, u_1 \, . \, \text{Cos} \; \alpha_1)$$

3) TÜRBİNLERLE İLGİLİ HİDROLİK TANIMLAR

a) DÜŞÜ

(Şekil 10.3)'de bir hidroelektrik tesisin şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 10.3 — Bir Hidroelektrik Tesisin Şematik Resmi

Hidroelektrik tesisdeki türbin tepkili türbin tipindedir ve (H_n) düşüşü altında çalışmaktadır.

Yükleme haznesi veya baraj gölü serbest su yüzü ile boşaltma kanalındaki sebrest su yüzü seviyeleri farkına geometrik düşü denir ve (H_g) ile gösterilmiştir. Boşaltma kanalındaki serbest su yüzü seviyesine kuyruk suyu seviyesi de denir. Geometrik düşü türbin çalışmadığı zaman tanımlanan düşüdür.

Türbin çalışırken hazne su seviyesi ile türbin giriş yeri arasında oluşan toplam yük kaybı (H_k) ile gösterilmiştir. (H_k) basınçlı boru, tünel, vana gibi kısımlarda oluşan yük kayıplarının toplamıdır. Net düşü (H_n) şu şekilde tanımlanır.

$$H_n = H_g - H_k$$

(H_n) net düşü değeri, (1 kg.) su türbinden geçerken bırakabileceği enerjidir. Suyun türbine girişteki değerlerini (1) ve çıkıştaki değerlerini (2) endisi ile gösterirsek (1 kg) suyun türbin giriş ve çıkışındaki toplam enerjileri (H_1) ve (H_2) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 \quad \text{ve} \quad H_2 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2$$

($H_1 - H_2$) farkı (1 kg) suyun türbine bıraktığı enerjiyi ifade eder.

Türbin imal eden bazı firmalar net düşüyü hesaplarken türbini terkeden suyun kinetik enerjisini de geometrik düşüden çıkarır. Bu şekilde hesaplanan net düşü türbinin verimini gerçek değerinden daha yüksek gösterir ve bunun bilimsel geçerliliği yoktur.

Geometrik düşü ($H_g \leq 20$ m.) ise alçak düşü, ($20 \leq H_g \leq 100$ m.) ise orta düşü ve ($H_g \geq 100$ m.) ise yüksek düşü denir. Alçak düşülerde uskurlu ve Kaplan türbinleri, orta düşülerde Francis türbinleri, yüksek düşülerde Pelton türbinleri kullanılır.

b) GÜÇ ve VERİM

Debisi (Q m^3/sn) olan suyun (H_n) metrelik net düşü ile düşürülmesinden elde edilecek (N_T) teorik güç, (H_n) ile ağırlık debisinin çarpımından bulunur, birimi (kgm/sn) olduğundan (75) ile bölünürse güç Buhar Beygiri (B.B) biriminde ifade edilmiş olur. Teorik güç (N_T) ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$N_T = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_n}{75}$$

Bu enerjinin tümü çeşitli kayıplar nedeni ile mekanik enerjiye dönüştürülemez. Türbin milinden alınan güce efektif güç denir ve (N_e) ile gösterilir. Çeşitli kayıplar nedeni ile türbinin toplam verimi (η_T) ile gösterilirse efektif güç şu şekilde ifade edilebilir.

$$N_e = \eta_T \cdot N_T = \eta_T \cdot \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_n}{75}$$

Öte yandan efektif güç (N_e) türbin çarkının (M_e) çevirme momenti, (ω) açısal hızı ve (n) dönme sayısı cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$N_e = \omega \cdot M_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_e}{60 \cdot 75} = \frac{\pi \cdot n \cdot M_e}{30 \cdot 75}$$

Bu formülde n: devir/dakika, M_e : kgm/sn ve N_e : Buhar Beygiri birimindedir.

Türbinlerde toplam verim ($\eta_T = 0{,}85 \sim 0{,}92$) arasında değişir. Son yıllarda imal edilen modern türbinlerde ($\eta_T = 0{,}94$) değerine kadar ulaşılmıştır.

Türbinlerin (η_T) toplam verimi (η_H) hacimsel, (η_m) mekanik ve (η_h) hidrolik verimlerin birleşiminden oluşur. Toplam verim,

$$\eta_T = \eta_H \cdot \eta_m \cdot \eta_h$$

şeklinde ifade edilebilir.

Türbin debisi (Q) olduğu halde kaçaklar nedeni ile türbin çarkından (Q) debisinden daha küçük (Q') debisi geçer. Hacimsel verim $\left(\eta_H = \frac{Q'}{Q}\right)$ şeklinde ifade edilir. Türbin çarkının türbin miline devrettiği (N_h) gücü, milin yatak kayıpları nedeni ile türbin milinden alınan (N_e) efektif güç değerinden daha büyüktür. Mekanik verim $\left(\eta_m = \frac{N_e}{N_h}\right)$ şeklinde ifade edilir. Çarkın içinden geçen suyun çarka kazandırdığı güç (N_h) ile gösterilmiştir ve hidrolik güç denir. Çarkın içinden geçen (Q') debisinin gücünü (N'_T) ile gösterirsek

$$N'_T = \frac{\gamma \cdot Q' \cdot H_n}{75}$$

şeklinde ifade edilir. Hidrolik verim $\left(\eta_h = \frac{N_h}{N'_T}\right)$ şeklinde ifade edilir. Hacimsel verim $\left(\eta_H = \frac{N'_T}{N_T}\right)$ şeklinde de ifade edilebilir. Toplam verim,

$$\eta_T = \frac{N_e}{N_T} = \frac{N'_T}{N_T} \cdot \frac{N_e}{N_h} \cdot \frac{N_h}{N'_T} = \eta_H \cdot \eta_m \cdot \eta_h$$

olur. Türbin milinden alınan (N_e) efektif gücün, türbin içinden geçen suyun türbine bırakabileceği (N_T) en büyük güce oranına toplam verim denir.

Mekanik verim ($\eta_m = 0{,}92 \sim 0{,}97$) ve hidrolik verim ($\eta_h = 0{,}85 \sim 0{,}96$) arasında değişir.

c) **ÖZGÜL DÖNME SAYISI**

(1 m)'lik net düşü altında en büyük verim hızı ile çalışarak (1 B.B) efektif güç veren türbin dönme sayısına (n_s) özgül dönme sayısı denir. Türbin tipinin belirlenmesinde özgül dönme sayısının önemli yeri vardır. Özgül dönme sayısı (n_s) aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$n_s = n \cdot \frac{N_e^{1/2}}{H_n^{5/4}}$$

Bu eşitlikte (n) türbin milinin dönme sayısıdır ve birimi devir/dak. dır, N_e: B.B ve H_n: m. birimindedir, (n_s) devir/dak. biriminde elde edilir. Örneğin ($N_e = 2500$ B.B, $n = 500$ devir/dak.), ve ($H_n = 240$ m.) olan türbinin özgül dönme sayısı

$$n_s = 500 \cdot \frac{(2500)^{1/2}}{(240)^{5/4}} = 28{,}5 \text{ dev/dak.}$$

bulunur.

Türbin tipi, özgül dönme sayısı ve net düşü arasındaki ilişki (Tablo 10.1)'de verilmiştir.

Tablo 10.1 — Türbin tipi ile Özgül Dönme Sayısı ve Net Düşü İlişkileri

Türbin Tipi	Özgül Dönme Sayısı, dev/dak	Net düşü m
Tek püskürtücülü Pelton	$10 \leq n_s \leq 30$	$300 \leq H_n \leq 1800$
Çift püskürtücülü Pelton	$30 \leq n_s \leq 60$	$300 \leq H_n \leq 1800$
Düşük hızlı Francis	$60 \leq n_s \leq 125$	$150 \leq H_n \leq 350$
Orta hızlı Francis	$125 \leq n_s \leq 225$	$80 \leq H_n \leq 150$
Yüksek hızlı Francis	$225 \leq n_s \leq 450$	$20 \leq H_n \leq 80$
Uskurlu ve Kaplan	$350 \leq n_s \leq 1000$	$5 \leq H_n \leq 35$

d) **ANAMİLİN DÖNME SAYISI**

Türbin anamili doğrudan elektrik üreticinin (jeneratör) miline bağlanır. Türbin anamilinin (n) dönme sayısı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$n = \frac{60 \cdot F}{k_ç}$$

Bu eşitlikte (F) elektrik akımı frekansını, ($k_ç$) jeneratörün çift kutup sayısını ifade eder. (n) devir/dak. birimindedir. Örneğin (50) frekans ve (3) çift kutup sayısı için ($n = 1000$ devir/dak.) bulunur.

e) **ÇEVRESEL HIZ KATSAYISI**

Türbin çarkının çevresel hızı (u) ile giriş hızı (V) arasındaki orana (ϕ)) çevresel hız katsayısı denir. Net düşü (H_n) olduğuna göre (V) giriş hızı Toriçelli formülünden

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

şeklinde ifade edilebilir. Çevresel hız

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$$

şeklinde ifade edilebilir. Çevresel hız katsayısı,

$$\phi = \frac{u}{V} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60\sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}}$$

olur. Çevresel hız katsayısından türbin boyutlarının saptanmasında yararlanılır.

Türbinlerin (n), (H_n), (Q), (α), (N_e), (η_T) gibi karakteristik büyüklükleri arasındaki bağıntıları gösteren eğrilere türbin karakteristik eğrileri denir. Türbinlerin çalışma durumları bu eğriler yardımı ile saptanır.

4) **HİDROLİK TÜRBİN TİPLERİ**

a) **ETKİLİ TÜRBİNLER - PELTON TÜRBİNLERİ**

Pelton türbinleri etkili türbinlerdir. Suyun potansiyel enerjisi püskürtücünün ağzında kinetik enerjiye dönüştürülür. Püskürtücüden çıkan su çark üzerindeki (ω) kesitli kanatlara etkir. Bu kanatlara kepçe denir. Püskürtücüden kanatlar üzerine püskürtülen suya demet denir, demet kanatların çeperlerini izleyerek çarkı terkeder. Böylece suyun kinetik enerjisinin büyük bir bölümü çarkın anamiline iletilir.

(Şekil 10.4)'de tek püskürtücülü ve yatay eksenli Pelton türbininin kesiti gösterilmiştir. Tek püskürtücülü pelton türbininin ana parçaları püskürtücü ve iğne, çark ve kepçeler, saptırıcı, gövde şeklinde sıralanabilir. Bu parçalar şekil üzerinde sayılarla gösterilmiştir.

Püskürtücü suyu çarka gönderen bir lüledir. İğne lüleden fışkıran su demetinin çapını ve dolayısı ile debiyi ayarlar.

Çark hidrolik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Çarkın üzerindeki kepçelere su çarpar ve itme kuvveti doğar, bu kuvvet çarkı döndürür.

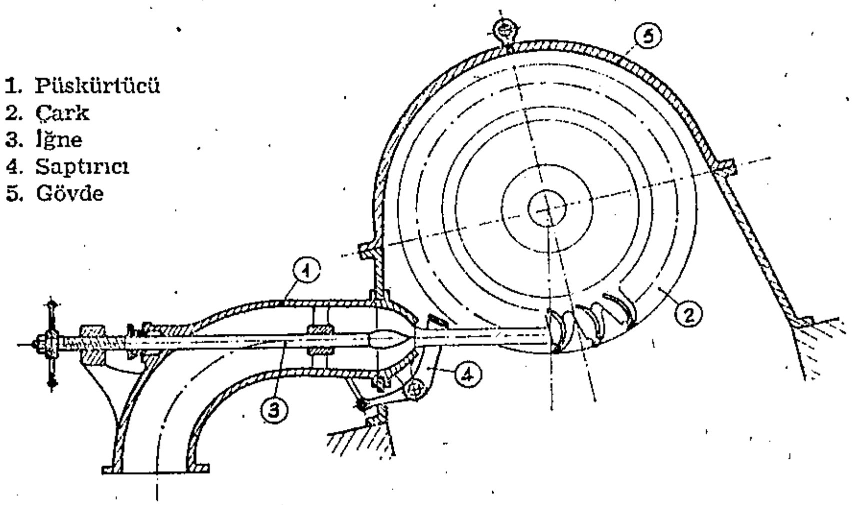
Saptırıcı su demetini çok kısa sürede saptırır ve demet çarka çarpamaz.

Gövde türbin çarkını sarar, yataklar ve püskürtücü gövdeye tesbit edilir.

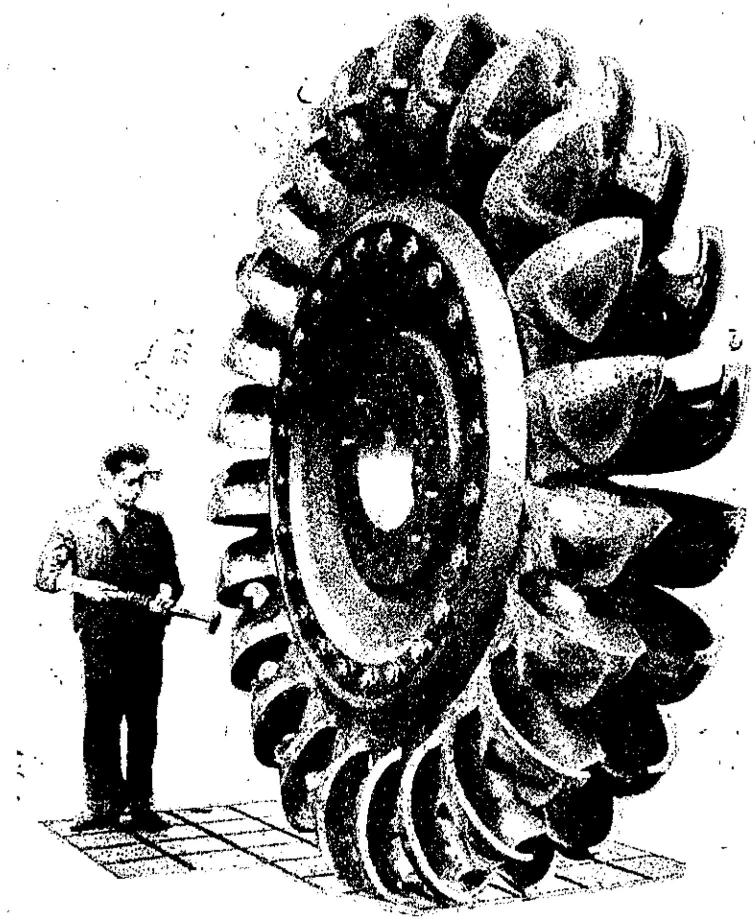
(Şekil 10.5)'de Pelton türbin çarkı ve (Şekil 10.6)'de Pelton türbininin dış görünüşü gösterilmiştir.

Pelton türbini kepçeleri darbe ve sürtünme nedeni ile çabuk aşınırlar. Kepçelerdeki aşınma verimi azalttığından zamanında değiştirilmeleri gerekir. Çark üzerindeki kepçe sayısı en az (16) olmalıdır.

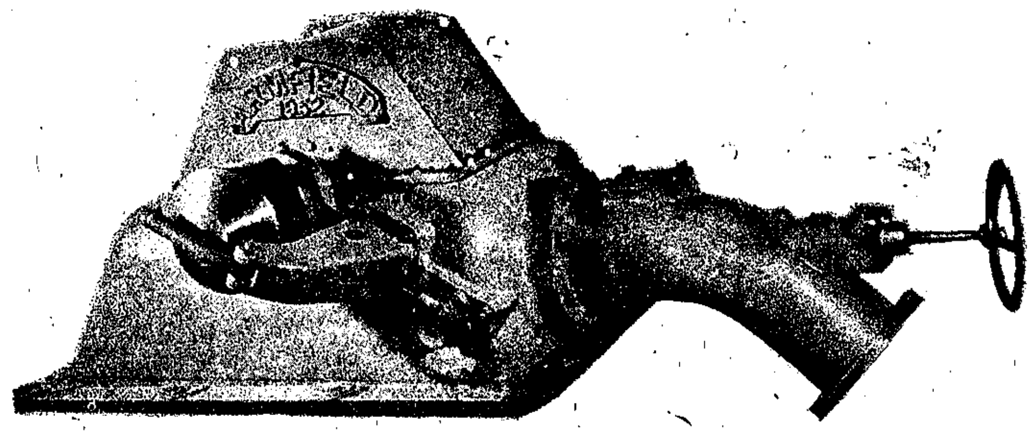
1. Püskürtücü
2. Çark
3. İğne
4. Saptırıcı
5. Gövde



Şekil 10.4 — Tek püskürtücülü yatay eksenli Pelton Türbini kesiti



Şekil 10.5 — Pelton Türbini Çarkı



Şekil 10.6 — Pelton Türbininin Dış Görünüşü

Pelton türbinleri genellikle (300 ∼ 1800 m.) arasındaki yüksek düşülerde küçük ve orta büyüklükteki debiler için imal edilirler. Bazen küçük güçler elde etmek için (300 m.)'den düşük düşülerde de kullanılırlar. Pelton türbinlerinin toplam verimi (0,78 ∼ 0,91) arasında değişir. Pelton türbinlerinde püskürtücü sayısı (6)'ya kadar çıkabilir.

Pelton türbini çarkının bir kepçesine püskürtülen suyun kepçe üzerindeki hareketi (Şekil 10.7)'de gösterilmiştir. Kanatlara girişte suyun mutlak hızı (V_1), çıkışta (V_2), çevresel hızlar (u_1, u_2) ve bağıl hızlar (v_1, v_2) olsun. Bu hızlar arasında

$$\vec{V}_1 = \vec{u}_1 + \vec{v}_1$$

$$\vec{V}_2 = \vec{u}_2 + \vec{v}_2$$

bağıntıları vardır. Suyun kanatlara giriş ve çıkış açıları ($\alpha_1 = 0°$) ve ($\alpha_2 = 180°$) kabul edilir. Çevresel hızlar eşittir ve (u) ile gösterelim, ($u = u_1 = u_2$) olur. Benzer şekilde bağıl hızlar da eşittir, ($v_1 = v_2$). Buna göre aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

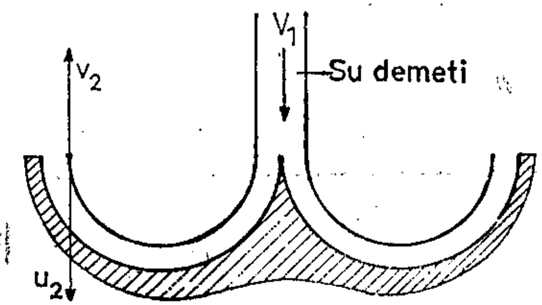
$$V_1 = u_1 + v_1 = u + v_1$$

$$V_2 = v_2 - u_2 = v_1 - u = V_1 - 2u$$

Daha önce türbinler için bulduğumuz (N_h) hidrolik güç ifadesi,

$$N_h = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (V_1 \cdot u_1 \cdot \text{Cos}\ \alpha_1 - V_2 \cdot u_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2)$$

şeklindedir. bu denklemde (Cos α_1 = Cos 0° = 1) ve (Cos α_2 = Cos 180° = −1) yerlerine konursa pelton türbininin (N_h) hidrolik güç ifadesi,



Şekil 10.7

$$N_h = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (V_1 \cdot u_1 + V_2 \cdot u_2) = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot u \cdot (V_1 + V_2)$$

elde edilir.

Bu denklemde (V_2) yerine ($V_2 = V_1 - 2u$) konursa,

$$N_h = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot u \cdot (V_1 + V_1 - 2u) = \frac{2 \cdot \gamma \cdot Q}{g} \cdot u \cdot (V_1 - u)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeye göre (N_h)'nin en büyük değeri $\left(u = \frac{V_1}{2}\right)$ olduğu zaman elde edilir. Demek oluyor ki Pelton türbinlerinde en iyi verimi elde etmek için türbin çarkı demet hızının yarısı ile döndürülmelidir. En büyük güç ($N_{h\,mak}$) ile gösterilirse,

$$N_{h\,mak} = \frac{2\ \gamma \cdot Q}{g} \cdot \frac{V_1}{2} \cdot \left(V_1 - \frac{V_1}{2}\right) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot V_1^2}{g \cdot 2} = G \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

elde edilir.

Çevresel hız katsayısı (ϕ) 'nin en büyük değeri,

$$\phi = \frac{u}{V_1} = \frac{V_1/2}{V_1} = 0{,}5$$

olur. Pelton türbini boyutları saptanırken (ϕ) değeri genellikle (0,5)'e yakın alınır.

Pelton türbinin demet çapı (D_m) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$Q = S \cdot V_1 = \frac{\pi \cdot D_m^2}{4} \cdot V_1$$

Toriçelli formülüne göre $(V_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n})$ olduğundan demet çapı,

$$D_m = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}}}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Pelton türbin çarkının (D_p) çapı aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir.

$$u = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n}{60} = \phi \cdot V_1 = \phi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$D_p = \frac{60}{\pi \cdot n} \cdot \phi \cdot \sqrt{2\ g \cdot H_n}$$

Pelton türbinlerin verim ve özgül dönme sayısı daha önce verilmiş formüllerden hesaplanabilir.

Pelton türbini karakteristik eğrileri, hız veya iğne açıklığı sabit tutularak çizilebilir.

ÖRNEK PROBLEM

1) Tek püskürtücülü bir Pelton türbinini besleyen akarsuyun net düşüşü (600 m.) ve debisi (2 m^3/sn)'dir. Türbinin hidrolik verimi (0,85) olduğuna göre, hidrolik gücünü, en büyük gücü sağlayan dönme sayısını, Pelton çarkının çapını ve demet çapını hesaplayınız. Hacimsel verim ve mekanik verim bire eşit alınacaktır.

ÇÖZÜM:

Pelton türbininin (N_h) hidrolik gücü,

$$N_h = N_{h\,mak} \cdot \eta_h = G \cdot \frac{V_1^2}{2g} \cdot \eta_h$$

veya

$$N_h = G \cdot H_n \cdot \eta_h = \gamma \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_h$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu bağıntıda verilenler yerine konursa, hidrolik güç

$$N_h = 1000 \,.\, 2 \,.\, 600 \,.\, 0{,}85 = 1020000 \text{ kgm/sn}$$

veya

$$N_h = \frac{1020000}{75} = 13600 \text{ B.B}$$

bulunur.

Net düşü ($1800 \geq H_n \geq 300$) arasında olduğu için özgül dönme sayısı ($10 \leq n_s \leq 30$) aralığındadır. Bu bağıntılardan yararlanılarak ($n_s = 14$ dev/dak.) bulunur. Aşağıdaki (n_s) eşitliğinden,

$$n_s = \frac{\sqrt{N_e}}{H_n^{5/4}} \cdot n$$

(n) çözülürse,

$$n = \frac{n_s \cdot H_n^{5/4}}{\sqrt{N_e}} = \frac{14 \,.\, 600^{5/4}}{\sqrt{13600}} = 356 \text{ dev/dak.}$$

bulunur. (N_e) efektif güç (N_h) hidrolik güce eşit alınmıştır

Pelton çarkının (D_p) çapı,

$$D_p = \phi \cdot \frac{60}{\pi \cdot n} \cdot \sqrt{2 \,.\, g \,.\, H_n}$$

ifadesinden hesaplanır.

Pelton türbininde maksimum güç $\left(u = \frac{V_1}{2}\right)$ olduğu zaman elde edilir.

Bu durumda ($\phi = 0{,}5$) olur. Pelton çarkının çapı,

$$D_p = 0{,}5 \cdot \frac{60}{3{,}14 \,.\, 356} \sqrt{2 \,.\, 9{,}81 \,.\, 600} = 2{,}9 \text{ m.}$$

bulunur.

Demet çapı,

$$D_m = \sqrt{\frac{4 \,.\, Q}{\pi \sqrt{2 \,.\, g \,.\, H_n}}} = \sqrt{\frac{4.2}{3{,}14 \sqrt{2 \,.\, 9{,}81 \,.\, 600}}} = 0{,}15 \text{ m.}$$

bulunur.

b) TEPKİLİ TÜRBİNLER

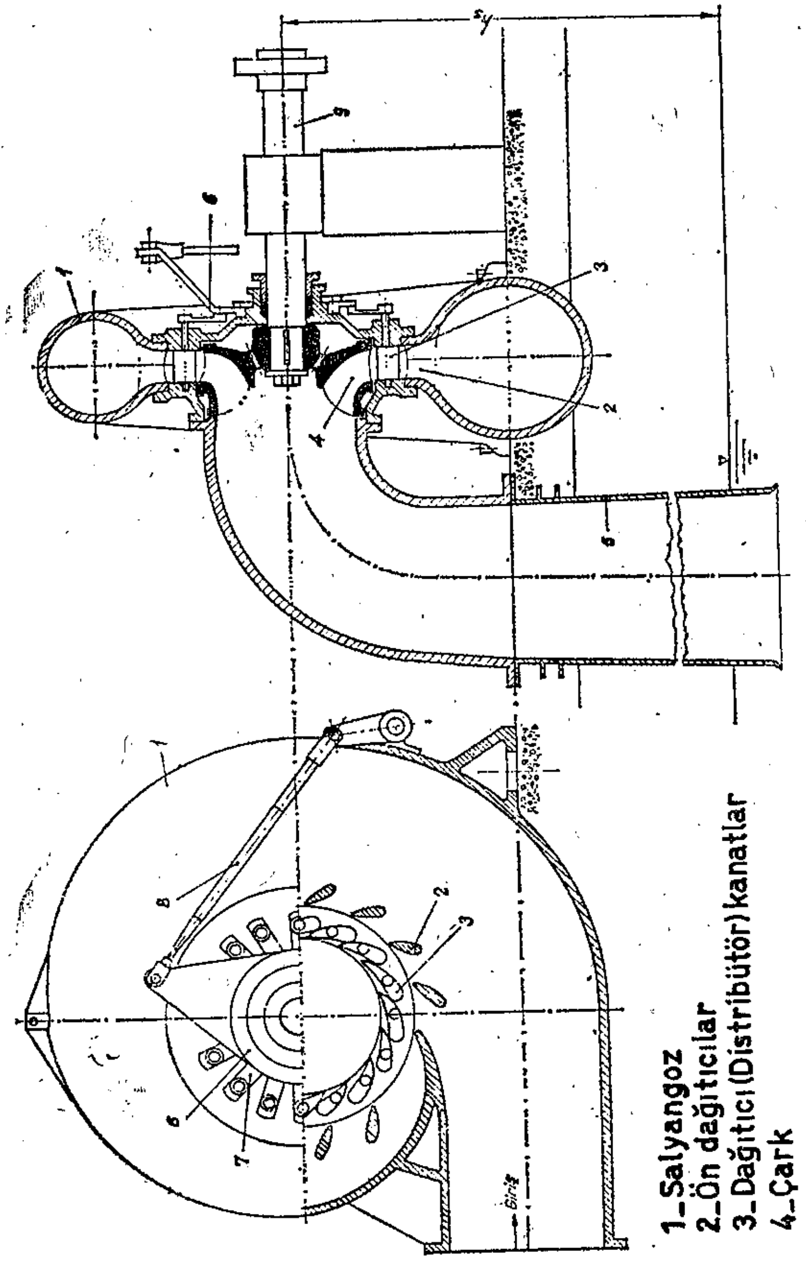
i) FRANCIS TÜRBİNLERİ

Francis türbinleri tepkili türbinlerdir, yatay ve düşey eksenli olabilirler. Francis türbinin uzunluk ekseni çevresinde dönen bir çark ve bu çarkı çevreleyen dağıtıcı kısımları vardır. Suyun potansiyel enerjisi çarkın kanatlarına girşi ve çıkış noktaları arasında kinetik enerjiye dönüşür ve kanatlara suyun yalnız basınç kuvveti etkir.

Francis türbinlerinde suyun dağıtıcıya eşit hızla girmesini sağlıyan salyangoz biçiminde bir dağıtma odası vardır. (Şekil 10.8)'de yatay eksenli bir Francis türbini kesiti gösterilmiştir. Türbin ana parçaları şekil üzerinde belirtilmiştir. Dağıtıcının görevi belirli miktarda suyu belirli bir açı altında çarkın kanatlarına göndermektir ve bundan dolayı dağıtıcı kanatları hareketlidir. Yayıcı türbin çarkından çıkan suyu boşaltma kanalına gönderen konik bir borudur, çıkış hız enerjisini azaltarak türbin genel verimini artırır. Türbinde kullanılan ve yayıcıdan çıkan suyu boşaltma kanalına taşıyan boruya emme borusu denir. Su çarkın yanlarından girer ve yön değiştirerek çark eksenine paralel doğrultuda çarkı terkeder. Atmosfer basıncı etkisi ile emme borusunun içi daima su ile doludur.

Salyangoz genel olarak dairesel kesitlidir ve dökme demir, dökme çelik veya kaynaklı saçtan imal edilir, düşük düşülü tesislerde betondan yapılır. Yayıcı dairesel kesitlidir ve saçtan imal edilir. Büyük tesislerde dirsekli betonarme yayıcı yapılır ve bazı durumlarda iç kısmı saç ile kaplanır.

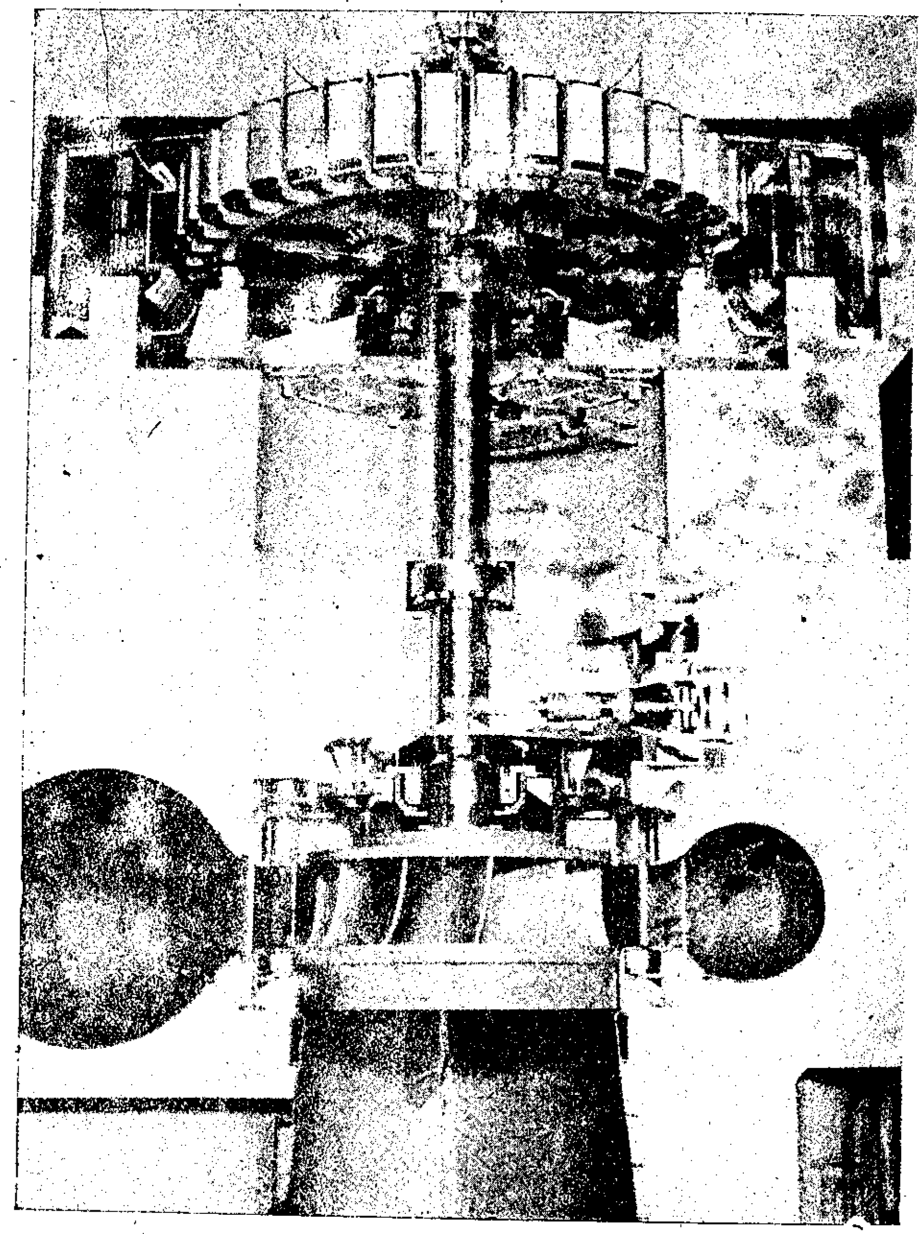
Francis türbinleri genellikle ($20 \sim 350$ m.) arasındaki düşüler için imal edilirler. Bu türbinler tek veya çok çarklı olabilirler. Etkili türbinlerde suyun kanatlara giriş ve çıkışta basıncı aynı olmasına rağmen tepkili türbinlerde kanatlara girişteki basınç çıkıştaki basınçtan daha büyüktür. Yükleme haznesinden cebri boru ile türbine gelen su emme borusu ile boşaltma kanalına boşaltılır. Türbine giren suyun sahip olduğu potansiyel enerjinin bir bölümü dağıtıcıda, diğer bölümü de hareketli çarkta kinetik enerjiye dönüştürülür.



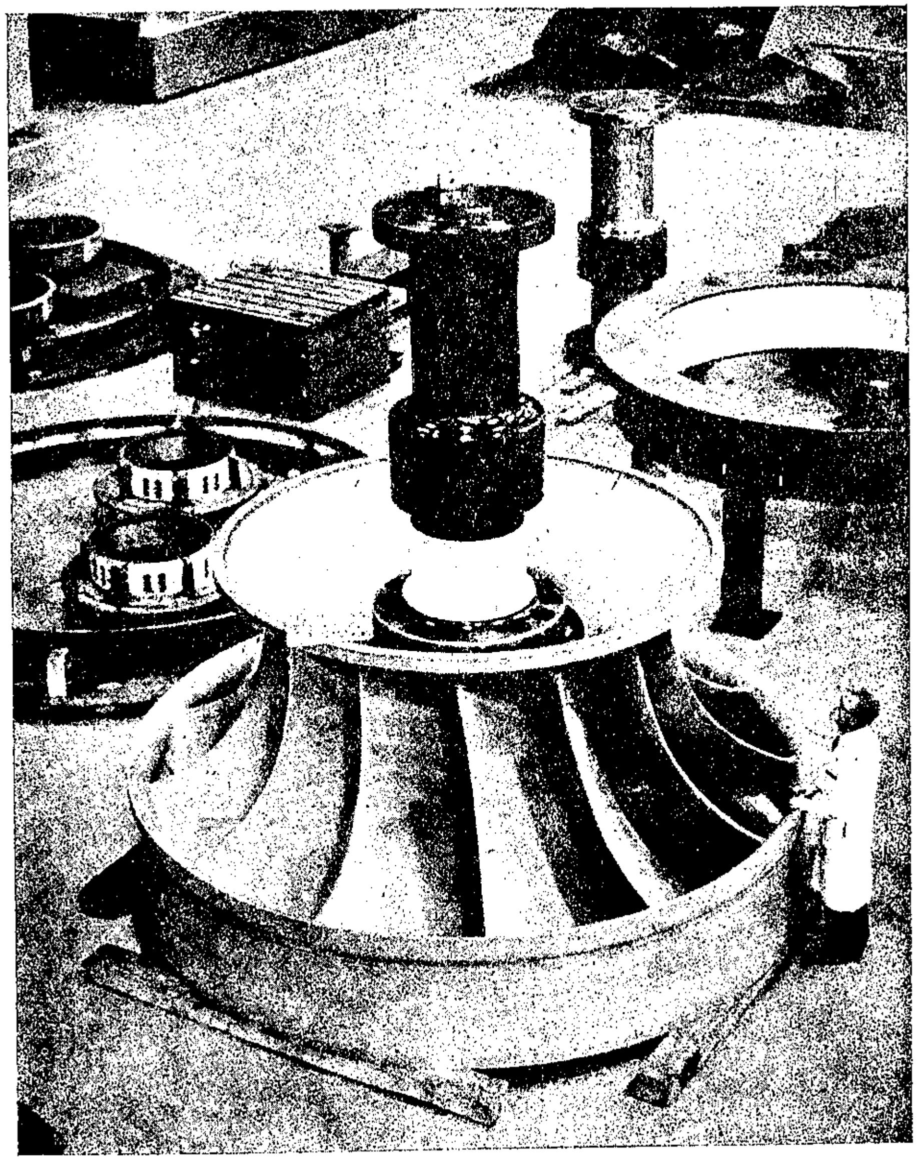
1-Salyangoz
2-Ön dağıtıcılar
3-Dağıtıcı (Distribütör) kanatlar
4-Çark
5-Yayıcı
6-Kumanda çemberi
7-Biyelcikler
8-Kumanda çubuğu
9-Mil

Şekil 10.8 — Salyangozlu ve yatay eksenli Francis Türbini Kesiti

(Şekil 10.9)'da düşey eksenli bir Francis türbin ve jeneratörü gösterilmiştir. (Şekil 10.10)'da bir Francis türbinin çarkı ve anamili görülmektedir.



Şekil 10.9 — Düşey Eksenli Bir Francis Türbini ve Jeneratörü (N_c = 77 000B.B)



Şekil 10.10 — Francis Türbini Çarkı ve Anamili (30 000 B.B)

Francis türbinin hidrolik gücü, efektif gücü, verimi ve özgül dönme sayısı daha önce verilmiş formüllerden hesaplanabilir. Hız veya dağıtıcı açıklığı sabit tutularak sabit hız ve sabit açıklık karakteristik eğrileri çizilebilir. Francis türbinleri ülkemizde ve dünyada ençok kullanılan türbin tipidir.

ii) USKURLU TÜRBİNLER

Tepkili türbinlerde özgül dönme sayısı büyürse suyun akışı, eksenel doğrultu kazanır. Bu durumda türbin debisinde büyük oduğundan çark kanatlarını dıştan saran çember kaldırılır ve gemi uskuruna benzer bir çark elde edilir. Çarkın şeklinden ismini alan uskurlu türbinler tepkili türbinlerdir. Genellikle büyük debi ve alçak düşülerden enerji elde etmek için kullanılırlar. Francis türbinlerinden farklı yanı çarkıdır. Küçük düşü ve büyük debiler için imal edilecek Francis türbinlerinin geometrik boyutları çok büyük olur. Bu gibi durumlarda Francis türbini yerine uskurlu türbinlerden yararlanılır. Uskurlu türbinlerin uskuru silindirik bir tamburla bu tambur üzerinde bulunan helisel kanatlardan oluşur. Helisel kanatların sayısı $(3 \sim 8)$ arasında değişir. Suyun türbine giriş ve çıkış doğrultusu çark ekseni doğrultusundadır. Uskurlu türbin gücü (H_h) daha önce verilmiş tepkili türbin genel güç formülünden hesaplanır.

$$N_h = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (V_1 \cdot u_1 \cdot \mathrm{Cos}\ \alpha_1 - V_2 \cdot u_2 \cdot \mathrm{Cos}\ \alpha_2)$$

iii) KAPLAN TÜRBİNLERİ

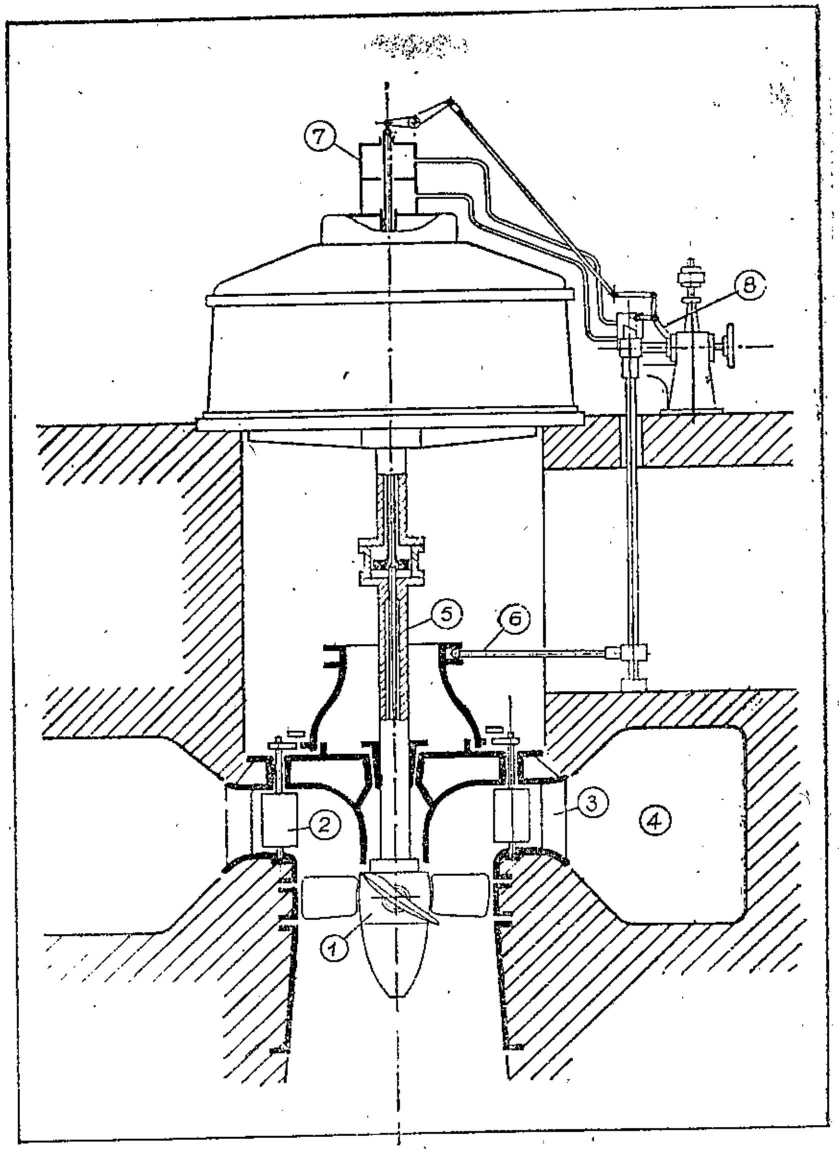
Kaplan türbinler tepkili türbinlerdir. Bu türbinlerin uskurlu türbinlerden farkı uskur kanatlarının hareketli olmasıdır. (Şekil 10.11)'de Kaplan türbini kesiti görülmektedir. Kaplan türbinleri genellikle alçak düşüler için imal edilirler. Kanatlar ayarlanabildiğinden debi ve düşünün değişik olduğu yerlerde kullanılırlar.

Suyun türbine giriş ve çıkışı çark ekseni doğrultusundadır. (Şekil 10.12)'de bir Kaplan türbini çarkı ve (Şekil 10.13)'de türbin ve jeneratör modeli gösterilmiştir.

Kaplan türbininin güç ve verimi, özgül dönme sayısı daha önce verilmiş formüllerden hesaplanabilir.

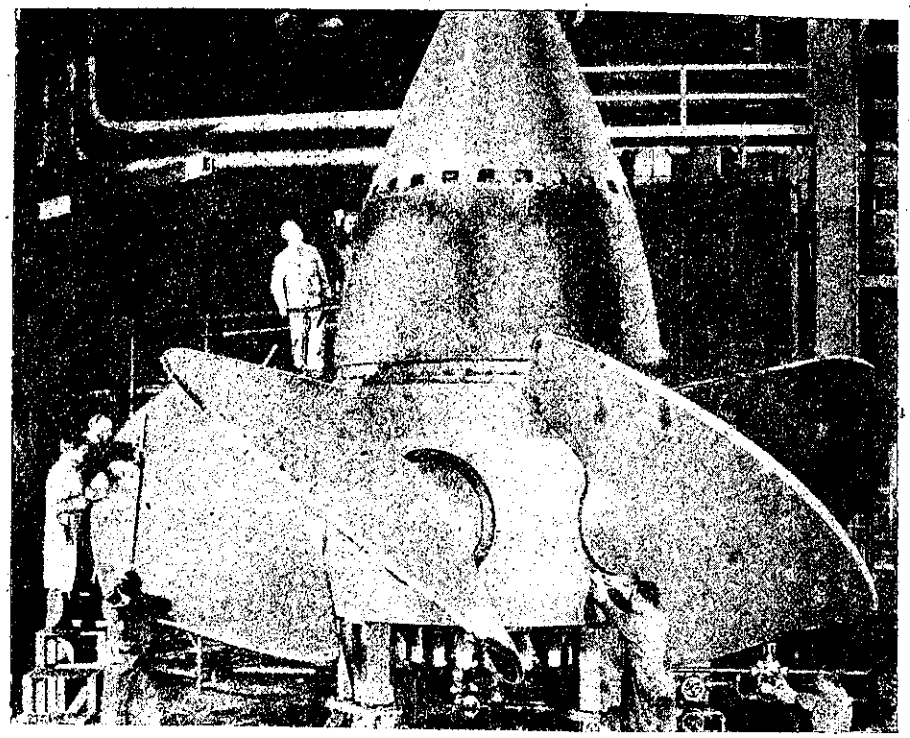
5) TÜRKİYEDEKİ BAZI HİDROELEKTRİK SANTRALLARININ KARAKTERİSTİK DEĞERLERİ

Türkiye'de inşa edilmiş ve işletmeye girmiş bir kısım hidroelektrik santralların karakteristik değerleri ve bazı teknik özellikleri (Tablo 10.2)'de belirtilmiştir. Bunlardan Keban Barajı ve hidroelektrik santralının genel görünüşü (Şekil 10.14)'deki resimde verilmiştir. Keban Barajı Elazığ ili yakınında, Fırat Nehri üzerinde inşa edilmiş beton ağırlık ve kaya dolgu tipi bir barajdır. Baraj inşaatı (1966 - 1974) yılları arasında tamamlanmıştır ve (9 milyar TL.) harcanmıştır. Keban Baraj göl hacmi $(30\,600 \cdot 10^6\ m^3)$, göl alanı $(675\ km^2)$ ve yağış alanı $(64000\ km^2)$'dir. Enerji, sulama ve taşkın kontrol amaçlı Keban Barajının (8) ünitesinin toplam gücü (1240 MW.) ve yıllık enerji üretimi $(5800 \cdot 10^6$ Kwh)'tir. Ünitelerin halen 4 adedi işletmeye girmiştir. Barajın temelden yüksekliği (207 m.)'dir. Keban Barajı Türkiyede inşa edilmiş barajların en büyüğüdür ve dünyadaki sayılı büyük barajlar arasına girer.

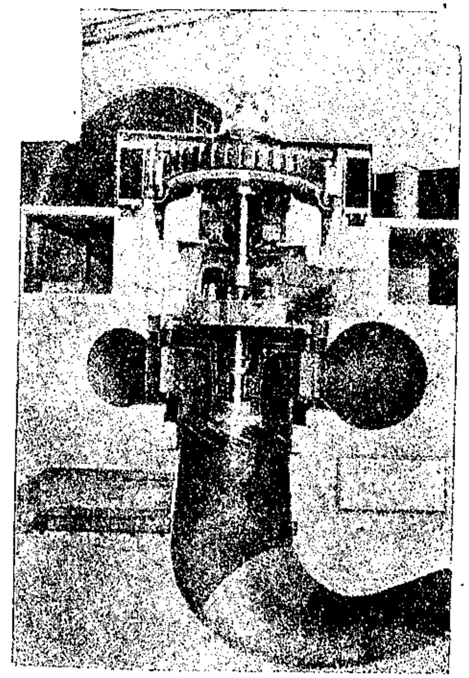


1 — Çark
2 — Dağıtıcı kanatlar
3 — Ön dağıtıcı
4 — Salyangoz
5 — Türbin mili
6 — Dağıtıcı kumanda çemberi ve ayar mekanizması
7 — Yağ dağıtma kafası
8 — Ortak ayar mekanizması

Şekil 10.11 — Kaplan türbini kesiti



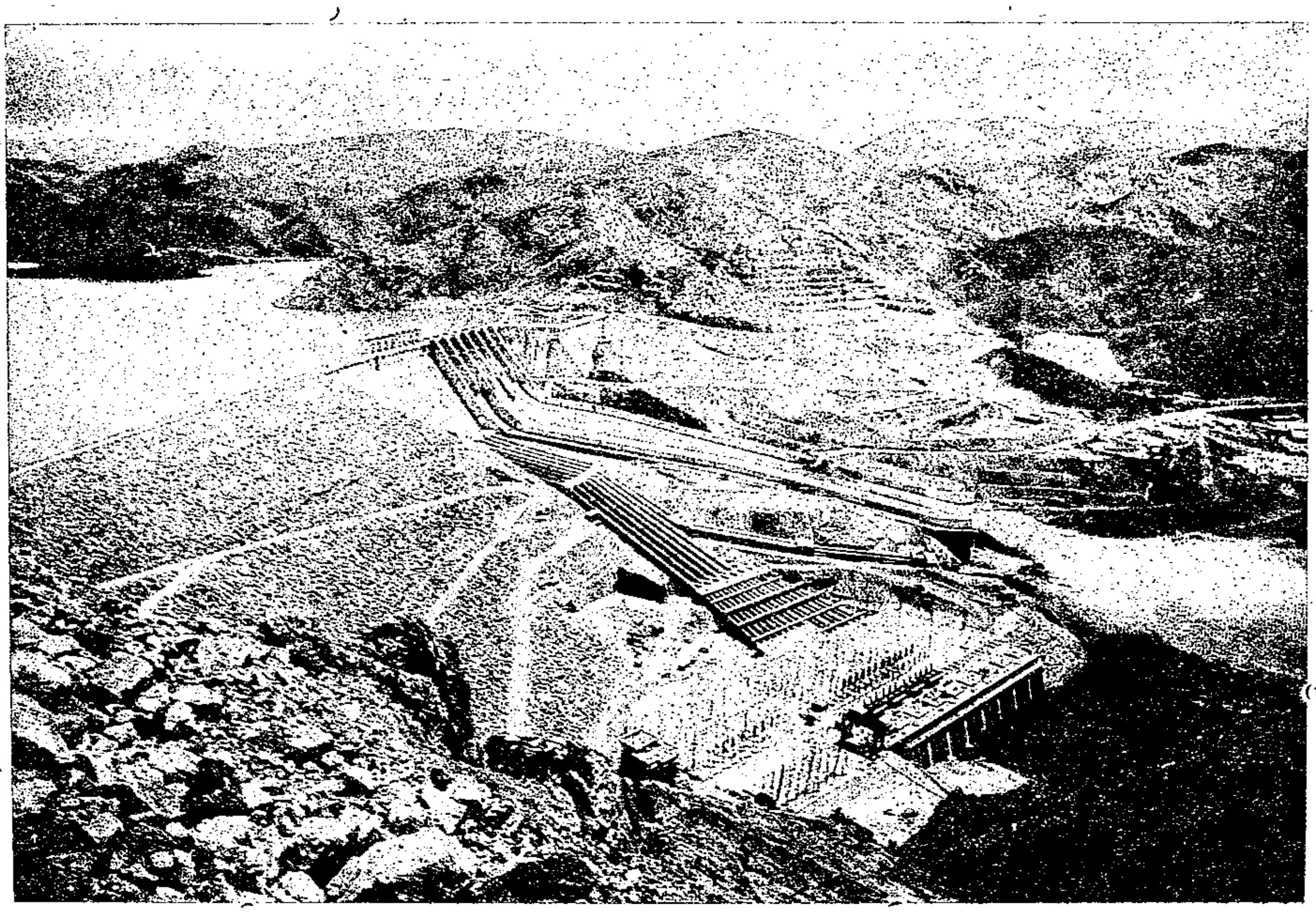
Şekil 10.12 — Bir Kaplan Türbin Çarkı (131 000 B.B)



Şekil 10.13 — Düşey Eksenli Kaplan Türbin ve Jeneratörünün Modeli (35 000 B.B)

Tablo 10.2 — Türkiye'deki Bazı Hidroelektrik Santrallarının Karakteristik Değerleri

	Santral Adı	Ünite Sayısı	Net Düşü (m)	Debi (m³/sn)	Türbin Gücü (B.B)	Dönme Sayısı (Dev/dak.)	Türbin Tipi	İşletmeye Girdiği Yıl
BARAJ SANTRALLARI	Sarıyar	2	76.5	51.0	2×6500	187.5	Düşey eksenli Francis	1956
	Seyhan	3	32.0	77.0	3×28900	125.0	Düşey eksenli Francis	1956
	Kemer	3	81.5	24.8	3×25600	300.0	Düşey eksenli Francis	1958
	Hirfanlı	3	60.0	63.5	3×44000	187.5	Düşey eksenli Francis	1959
	Demirköprü	3	100.6	26.8	3×37250	300.0	Düşey eksenli Francis	1960
	Almus	3	62.2	14.0	3×12750	300.0	Düşey eksenli Francis	1966
	Keban	4(+4)	145.0	150.0	4×249000	166.7	Düşey eksenli Francis	1974
NEHİR SANTRALLARI	Girvelik	2	151.3	0.87	2×1470	1000	Yatay Eksenli Pelton	1954
	Durucasu	2	132.4	0.38	2×566	500	Yatay Eksenli Francis	1955
	Hazar	4	230.0	1.5	4×5276	500	Yatay Eksenli Pelton	1957
	Kovada I	3	67.4	5.0	3×3890	600	Yatay Eksenli Francis	1960
	Tortum	2	194.6	3.49	2×7880	1000	Yatay Eksenli Francis	1960



Şekil 10.14 — Keban Barajı ve Hidrolik Santralının Genel Görünüşü

ÖRNEK PROBLEM

1) Bir akarsu üzerine kurulacak barajın santralına (4) adet düşük hızlı Francis türbini yerleştirilecektir. Baraj gölünden (24) (m^3/sn) debi ve (300 m.) net düşü elde edileceğine göre türbinlerden her birinin gücünü ve türbin milinin dönme sayısını hesaplayınız.

Toplam verim (0,85) ve özgül dönme sayısı (107 dev/dak) alınacaktır.

ÇÖZÜM:

Türbin gücü,

$$N_e = N_T \cdot \eta_T = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_n}{75} \eta_T = \frac{1000 \,.\, 24/4 \,.\, 300}{75} \,.\, 0{,}85 = 20400 \text{ B.B}$$

bulunur.

Türbin özgül dönme sayısı formülünden,

$$n_s = \frac{\sqrt{N_e}}{H_n^{5/4}} \cdot n$$

türbin milinin dönme sayısı,

$$n = \frac{n_s \cdot H_n^{5/4}}{\sqrt{N_e}} = \frac{107 \,.\, (300)^{5/4}}{\sqrt{20400}} = 935 \text{ dev/dak}$$

bulunur.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Hidrolik türbin nedir, nasıl sınıflandırılır?
2) Hareket miktarı teoremini açıklayınız.
3) Euler formülünü açıklayınız.
4) Çevresel hız nedir?
5) Hidrolik gücün tanımını yapınız.
6) Geometrik düşü ve net düşü nedir?
7) Türbin efektif gücü nedir?
8) Türbin toplam verimi hangi verimlerden oluşur?
9) Türbin özgül dönme sayısı nedir, nerede kullanılır?
10) Türbin çevresel hız katsayısı nedir?
11) Pelton türbininin ana parçalarını ve her parçanın işlevini açıklayınız.
12) Francis türbinlerinin çalışma prensibini açıklayınız.
13) Uskurlu türbinlerle Kaplan türbinleri arasındaki farkı belirtiniz.

XI. BÖLÜM

POMPALAR

1) GİRİŞ

2) POMPALARLA İLGİLİ HİDROLİK TANIMLAR
   a) MANOMETRİK YÜKSEKLİK
   b) GÜÇ ve VERİM
   c) ÖZGÜL DÖNME SAYISI

3) HACİMSEL POMPALAR
   a) PİSTONLU POMPALAR
   b) ROTATİF PİSTONLU POMPALAR
   c) DİŞLİ POMPALAR

4) SANTRİFÜJ POMPALAR

5) SANTRİFÜJ POMPA ÇALIŞMA NOKTASININ SAPTANMASI
   a) BİR SANTRİFÜJ POMPANIN TEK BORU AĞINA SU BASMASI
   b) SANTRİFÜJ POMPALARIN PARALEL BAĞLANMASI
   c) SANTRİFÜJ POMPALARIN SERİ BAĞLANMASI

6) KADEMELİ SANTRİFÜJ POMPALAR

7) ÖZEL KADEMELİ POMPA TİPLERİ
   a) TRANSMİSYONLU DERİN KUYU POMPALARI
   b) DALGIÇ POMPALARI
   c) BİRİKTİRME POMPALARI

8) EKSENEL SANTRİFÜJ POMPALAR

ÖRNEK PROBLEM

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

XI. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

A — sabit

B — katsayı

b — çark genişliği, diş genişliği

D — çap

e — eksantriklik

g — yerçekimi ivmesi

H — toplam enerji yüksekliği

H_b — basma borusundaki kayıp

H_g — geometrik yükseklik

H_k — toplam kayıp

H_L — yük kaybı

H_m — manometrik yükseklik

L — uzunluk

M_e — moment

n — dönme sayısı

n_s — özgül dönme sayısı

N_e — efektif güç

N_h — hidrolik güç

N_T — teorik güç

Q — debi

q — debi

P — basınç

r — yarıçap

S — alan

u — çevresel hız veya sürüklenme hızı

v — bağıl hız

V — hız

Z — diş sayısı

z — kıyaslama düzleminden uzaklık

ω — açısal hız

α — açı

β — kanat açısı

γ — özgül ağırlık

θ — yersel yük kaybı katsayısı

λ — sürtünme katsayısı

π — daire çevresinin çapına oranı

Ω — diş boşluğu

η_h — hidrolik verim

η_H — hacimsel verim

η_k — kaçak verim

η_m — mekanik verim

η_T — toplam verim

POMPALAR

1) GİRİŞ

Suya enerji veren makinalara pompa veya tulumba denir. Pompalar mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştürür. Suyun enerji seviyesini aşağıdaki denklemle ifade edebiliriz.

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2 \cdot g} + z$$

Suya enerji vermek için bu denklemin sağ tarafındaki üç terimden birinin veya birkaçının artırılması gerekir. Bu terimler basınç, hız ve konum enerjisini belirtir. Pompalar suyun basınç, hız veya konumundan birini veya birkaçını birden değiştirir.

Pompalar sıvının bir konumdan diğer bir konuma geçebilmesi için gerekli enerjiyi sağlar. Sıvının bir konumdan diğer bir konuma iletilmesi endüstrinin, tarım ve sosyal kesimin en büyük gereksinmelerinden biridir. Örneğin otomobilde radyatör suyunun dolaşımı, akarsulardan tarlaların sulanması, evlerdeki kalorifer tesisatında suyun dolaşımı, şehirlerdeki içme suyu pompalarla sağlanır.

Pompalar çalışma ilkelerine göre iki bölüme ayrılır.

— Pistonlu veya hacimsel pompalar
— Santrifüj veya hidrodinamik pompalar

Pistonlu Pompalar:

Silindir içinde hareket eden piston sıvının basıncını artırır. Pistonun geri hareketinde emme subabı açılır ve sıvı silindir içini doldurur. Pistonun ileri hareketinde emme subabı kapanır, sıvı sıkışır ve basma subabı açılır. Pistonlu pompalar sıvıyı kesikli şekilde basar. Pistonlu pompalarla yüksek basınç ve dolayısı ile büyük basma yüksekliklerine erişilebilir. Pistonlu pompaların devir sayısı sınırlıdır ve (10 ~ 100 devir/dak.) arasındadır. Pistonlu pompalar, dişli pompalar ve rotatif pistonlu pompalar hacimsel pompalar grubuna girer. Hacimsel pompalara hidrostatik pompalar da denir.

Santrifüj Pompalar:

Santrifüj pompalar dönen bir çark ve pompa gövdesi şeklinde iki ana parçadan oluşur. Gövdenin emme ve basma tarafları vardır.

Santrifüj pompalarda sıvıya verilen enerji, üzerinde kanatlar bulunan ve bir eksen etrafında dönen çark tarafından temin edilir. Çarkın sıvıya devrettiği kinetik enerji, sıvı çarktan ayrıldıktan sonra yayıcı ve salyangoz içersinde basınç enerjisine dönüştürülür. Santrifüj pompalar sıvıyı bir seviyeden diğer bir seviyeye sürekli bir şekilde basar. Bir mile bağlı olan çarkın devir sayısına göre sıvının basıncı sınırlı bir şekilde artırılır. Çarkın devir sayısı çok geniş aralıklarda olabilir. Santrifüj pompanın bir çarkı sıvıyı belirli bir yükseltiye kadar basar. Sıvıyı daha büyük yüksekliklere basmak için çarklar aynı gövde içinde seri bağlanır. Bu pompalara kademeli santrifüj pompa denir. Bir santrifüj pompanın bastığı sıvı yeterli değilse pompalar paralel bağlanır.

Hacimsel ve santrifüj pompaların suya aktardığı enerji elektrik motoru, benzin veya dizel motorundan alınır.

2) POMPALARLA İLGİLİ HİDROLİK TANIMLAR

a) MANOMETRİK YÜKSEKLİK

Manometrik yükseklik deyimi pompalar için kullanılır. Birim ağırlıktaki sıvının pompa girişi ile çıkışı arasında kazandığı enerjiye manometrik yükseklik denir ve (H_m) ile gösterilir. (H_m) birimi (kgm/kg) veya metre'dir. Pompa girişindeki kesiti (1) ve çıkışındaki kesiti (2) ile gösterelim. Bu kesitlerdeki toplam enerjiler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 \quad , \quad H_2 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2$$

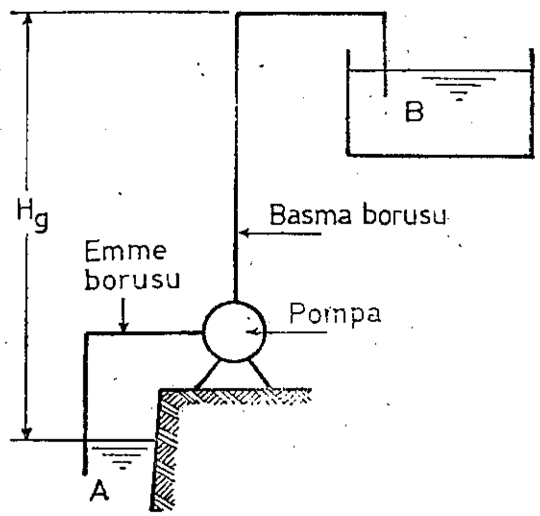
(H_1) pompa girişindeki toplam enerjiyi, (H_2) pompa çıkışındaki toplam enerjiyi gösterir. (H_2) ve (H_1) arasındaki fark manometrik yüksekliği verir. Manometrik yükseklik

$$H_m = H_2 - H_1 = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2\right) - \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1\right)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Pompa giriş ve çıkışına bağlanan bir diferansiyel manometre ile ($H_2 - H_1$) farkı ölçülebilir. Manometrik yükseklik deyimi, ($H_m = H_2 - H_1$) farkının manometre ile doğrudan ölçülmesinden gelir.

(Şekil 11.1)'de (A) haznesinden (B) haznesine su basan bir pompa



Şekil 11.1

gösterilmiştir. (H_g) geometrik yükselkliktir. Emme borusundaki kayıplar (H_e) ve basma borusundaki kayıplar (H_b) ile gösterilirse, toplam kayıp (H_k) şöyle ifade edilebilir.

$$H_k = H_e + H_b$$

Emme borusu ile ilgili değerleri (e) endisi ve basma borusu ile ilgili değerleri (b) endisi ile gösterirsek, (H_e) ve (H_b)

$$H_e = \theta \cdot \frac{V_e^2}{2g} + \lambda \cdot \frac{L_e}{D_e} \cdot \frac{V_e^2}{2g}, \qquad H_b = \theta \cdot \frac{V_b^2}{2g} + \lambda \cdot \frac{L_b}{D_b} \cdot \frac{V_b^2}{2g}$$

şeklinde ifade edilebilir. Manometrik yükseklik, (H_m),

$$H_m = H_g + H_k = H_g + H_e + H_b$$

şeklinde ifade edilir.

b) GÜÇ ve VERİM

Santrifüj pompanın çarkından geçen debi (Q) ve bastığı debi (Q_p) ise, pompanın birim zamanda suya verdiği enerji,

$$N'_T = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75} \quad \text{veya} \quad N_T = \frac{\gamma \cdot Q_p \cdot H_m}{75}$$

denklemleri ile ifade edilir ve birimleri (B.B)'dir. Kaçaklar nedeni ile (Q) debisinin bir kısmı geri döner ve pompanın bastığı (Q_p) debisi çarktan geçen (Q) debisinden küçük olur. Pompa motordan aldığı enerjiyi suya bir verimle iletir. Bu verime toplam verim denir ve (η_T) ile gösterelim, pompanın milindeki efektif gücü (N_e) ise,

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_e}$$

olur. Bu eşitlikten efektif güç (N_e) çözülürse,

$$N_e = \frac{N_T}{\eta_T} = \frac{\gamma \cdot Q_p \cdot H_m}{75 \cdot \eta_T}$$

ifadesi elde edilir. Milin açısal hızı (ω) ve taşıdığı moment (M_e) ise, efektif güç,

$$N_e = \frac{\omega \cdot M_e}{75} = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \frac{M_e}{75}$$

şeklinde ifade edilebilir, (n) milin dakikadaki dönme sayısıdır. Türbinlerde olduğu gibi pompaların (η_T) toplam verimi

$$\eta_T = \eta_h \cdot \eta_m \quad \eta_H$$

şeklinde ifade edilebilir. (η_H) hacimsel, (η_m) mekanik ve (η_h) hidrolik verimdir.

Suyun birim zamanda çarktan aldığı enerjiye pompanın (N_h) hidrolik gücü denir. Pompanın hidrolik gücü, daha önce

$$N_h = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (V_2 \cdot u_2 \cdot \cos \alpha_2 - V_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1)$$

şeklinde ifade edilmişti. Bu ifadedeki (Q) debisi pompanın çarkından geçen debidir.

Hidrolik verim η_h,

$$\eta_h = \frac{N_T'}{N_h} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (V_2 \cdot u_2 \cdot \cos \alpha_2 - V_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1)}$$

$$\eta_h = \frac{H_m \cdot g}{(V_2 \cdot u_2 \cdot \cos \alpha_2 - V_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1)}$$

şeklinde ifade edilir.

Mekanik verim,

$$\eta_m = \frac{N_h}{N_e}$$

şeklindedir.

Pompanın basmakta olduğu debi (Q_P) ve çarktan geçmekte olan debi (Q) ile gösterildiğine göre, (η_H) hacimsel verim,

$$\eta_H = \frac{Q_P}{Q} = \frac{N_T}{N'_T}$$

şeklinde ifade edilir. Pompa toplam verimi,

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_e} = \frac{N'_T}{N_h} \cdot \frac{N_h}{N_e} \cdot \frac{N_T}{N'_T} = \eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_H$$

olur.

Pompanın manometrik yüksekliği ile debi, güç, verim, dönme sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren eğrilere karakteristik eğri denir.

c) ÖZGÜL DÖNME SAYISI

(1 m.)'lik geometrik yüksekliğe (1 m^3/sn) debiyi en iyi verim değerinde çalışarak sağlıyan pompa dönme sayısına özgül dönme sayısı (n_s) denir. Pompa özgül dönme sayısı (n_s) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{N_T}}{H^{5/4}_m} = \frac{n \cdot \sqrt{\gamma \cdot Q \cdot H_m/75}}{H_m^{5/4}} = 3{,}65 \cdot \frac{n \cdot Q^{1/2}}{H_m^{3/4}}$$

Bu denklemde su için ($\gamma = 1000$ kg/m^3) alınmıştır.

Türbinlerde olduğu gibi santrifüj pompalarda da özgül dönme sayısı yükselirse akış radyal durumdan eksenel duruma geçer. Özgül dönme sayısına göre pompa tipleri aşağıda verilmiştir.

Özgül dönme sayısı devir/dak	Pompa tipi
$n_s = 60 \sim 150$	Tam santrifüj pompa
$n_s = 150 \sim 400$	Yarı santrifüj pompa
$n_s = 400 \sim 700$	Yarı eksenel pompa
$n_s = 700 \sim 1000$	Eksenel pompa

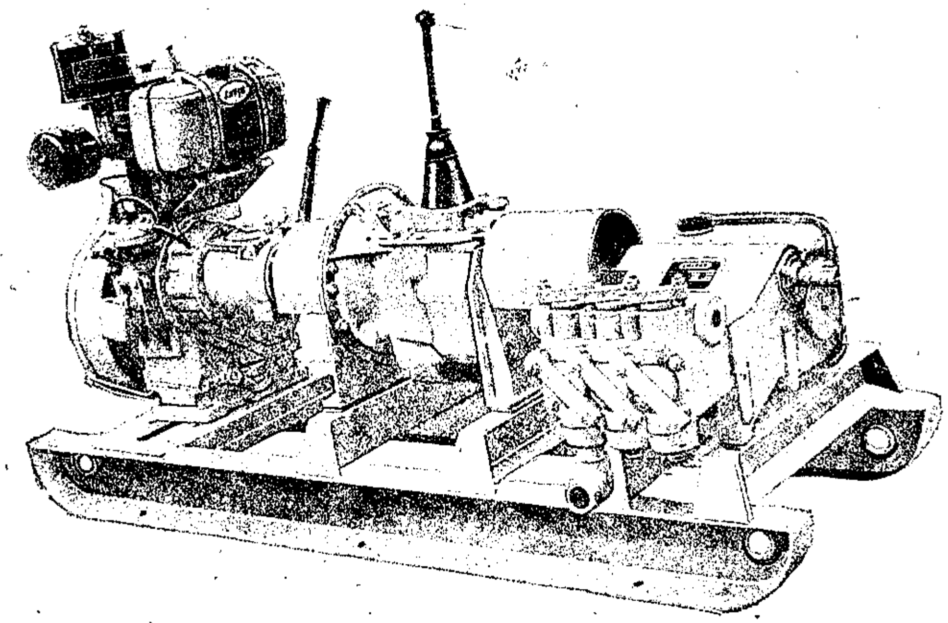
3) HACİMSEL POMPALAR

Hacimsel pompalarda su emme haznesine alınır ve buradan basma haznesine aktarılır. Silindir şeklindeki pompa hacim elemanı kesikli olarak emme ve basma kısmı ile bağlanır. Hacim elemanları çoğu kez birden fazladır. Böylece kesikli çalışma kısmen önlenir. Hacimsel pompalarda kuramsal olarak debi yalnız pompanın devir sayısına bağlıdır. Ancak pompanın hacimsel verimi veya geometrik büyüklükleri değiştirilerek debi değiştirilebilir.

Hacimsel pompaların en eski tipi bilinen pistonlu pompalardır. Bu pompaların emme ve basma kısımlarında subap vardır. Dişli pompalar gibi subabı olmıyan hacimsel pompalarda vardır.

Hacimsel pompalar santrifüj pompalara göre daha yüksek basınca erişir. Küçük debi ve büyük manometrik basınçlar için hacimsel pompalar kullanışlıdır ve verimleri daha yüksektir.

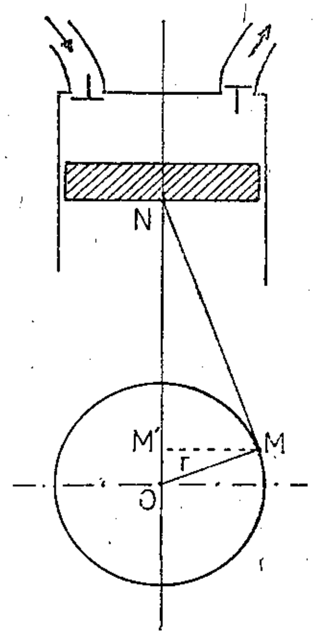
(Şekil 11.2)'de pistonlu bir pompa ve motorunun dış görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 11.2 — Üç Pistonlu ve Çift Etkili Pompa (Tripleks) ve Motorunun Dış Görünüşü

a) **PİSTONLU POMPALAR**

Pistonlu pompa (Şekil 11.3)'de gösterildiği gibi krank-biyel mekanizması ve silindir içinde gidip gelme hareketi yapan bir piston ile emme ve basma subabından oluşur. Pistonun aşağıya doğru hareketinde emme subabı açılır ve silindir su ile dolar. Silindir yukarı doğru hareket ederken emme subabı kapanır ve basma subabı açılır, su basma borusuna girer. Her devirde piston bir gidip gelme hareketi yaptığından basılan su miktarı pistonun taradığı hacim kadardır.



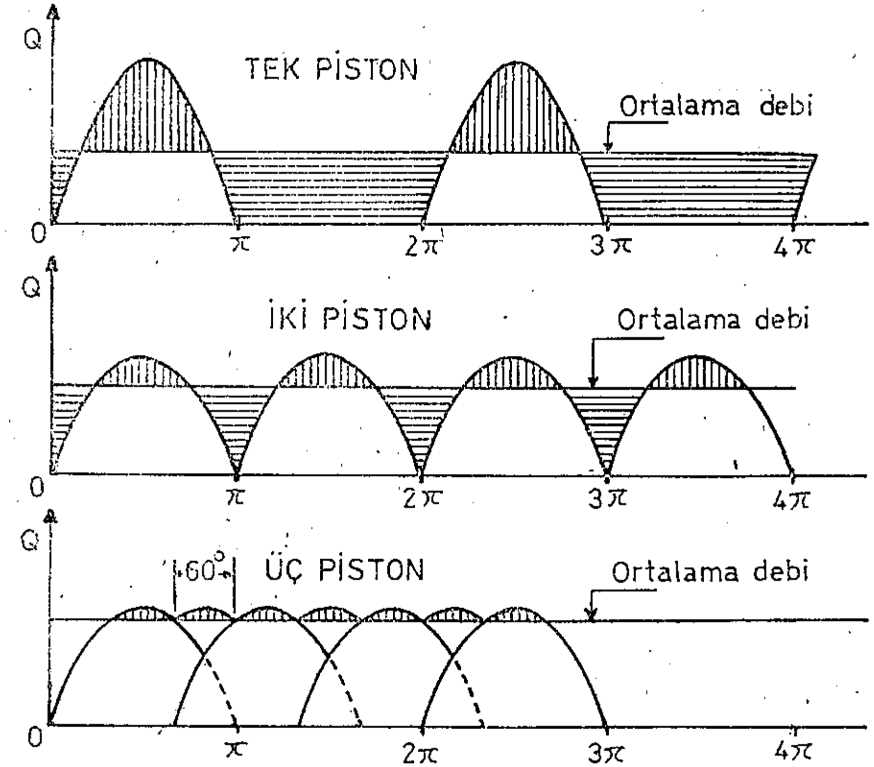
Şekil 11.3

Tek pistonlu pompanın ortalama debisi (Q_{ort}) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_{ort} = \frac{\pi}{60} \cdot 2 \cdot r \cdot S \cdot \eta_k$$

Bu formüldeki harflerin anlamı aşağıda belirtilmiştir.
n: dakikada dönme sayısı, 2 r: pistonun silindir içindeki gidip gelme uzunluğu, S: piston kesit alanı, η_k: subapların açılıp kapanmasından doğan kaçakların verimi.

Pistonlu pompaların verdiği su miktarı sürekli değil, kesiklidir. Bunun için hava çanı kullanılarak veya piston sayısı artırılarak debinin sürekli olması sağlanır. Pompa çıkış kısmına konan hava çanı yardımı ile su düzgün ve sabit hızla basılır. Eğer pistonun arka yüzüde çalıştırılırsa buna çift etkili pompa denir. Çift etkili pompaya simpleks denir ve aralarında (180°) faz farkı olan iki pistonlu pompaya eşdeğerdir. (2) pistonlu ve çift etkili pompaya dupleks, (3) pistonlu ve çift etkili pompaya tripleks (Şekil 11.2) denir. (Şekil 11.4)'de tek pistonlu, iki pistonlu ve üç pistonlu pompaların debi diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 11.4

(Şekil 11.4)'de görüldüğü gibi tek pistonlu pompa yerine (2) pistonlu pompa kullanılırsa debideki düzgünsüzlük yarıya iner. (3) pistonlu pompada ise debi dalgalanmasının periyodu (60°)'ye inmekte ve debideki düzgünsüzlük iyice küçülmektedir. Böyle bir pompa (4) pistonludan daha iyidir. (4) pistonlu pompada debinin dalgalanma periyodu (90°)'dir ve ortalama debi ile en büyük debi arasındaki fark (3) pistonlu pompanınkinden daha büyüktür.

b) **ROTATİF PİSTONLU POMPALAR**

Rotatif pistonlu pompalar genellikle iki gruba ayrılır:

— Yıldız pompalar.

— Paralel eksenli pompalar.

Yıldız pompalarda iki gruba ayrılır:

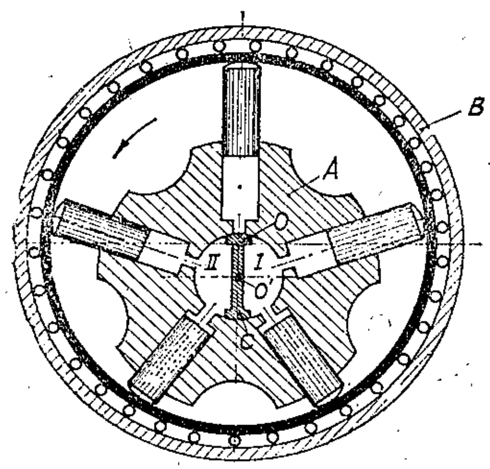
— Döner pistonlu yıldız pompalar.

— Sabit pistonlu yıldız pompalar.

Yıldız pompaların pistonları pompa eksenine dik hareket ederler. Döner pistonlu yıldız pompanın şematik resmi (Şekil 11.5)'de gösterilmiştir. (A) ile gösterilen ve pistonları taşıyan silindir bloku (O') ekseni etrafında döner. Pompanın silindirik olan (B) gövdesinin ekseni ise (O) merkezinden geçmektedir. (O) ile (O') eksenleri arasında (e) kadar eksantriklik vardır. (A) bloku dönünce pistonlar blok içindeki silindirik yuvalarında gidip gelme hareketi yaparlar. Bu blokun merkezindeki boşluk (I) ve (II) odalarına ayrılmıştır. Dönüş yönü şekildeki gibi ise (I) hücresinden emilen sıvı daima (II) hücresine basılacaktır. Dönme yönü değiştirilirse akışın yönü de değişir.

Sabit pistonlu yıldız pompalarda pistonları taşıyan blok sabittir. Pistonlar dış zarfın etkisi ile ileri-geri hareket ederek emme ve basma işlemi tamamlanır.

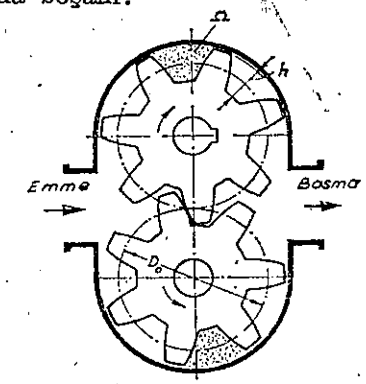
Paralel eksenli pompaların pistonları pompa eksenine paralel hareket ederler.



Şekil 11.5 — Yıldız Pompa

c) **DİŞLİ POMPALAR**

Basit bir dişli pompa (Şekil 11.6)'da gösterildiği gibi iki alın dişlisinden oluşur. Bu dişlilerden biri döndürülünce diğeri de ters yönde döner ve sıvıyı (A) emme kanalından alarak (B) basma kanalına basar. İki diş arasında kalan ve (Ω) ile gösterilen boşluklar emme tarafında dolar ve basma tarafında boşalır.



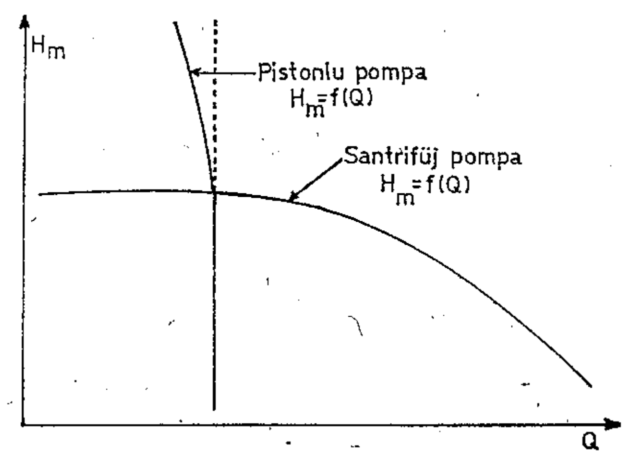
Şekil 11.6 — Dişli Pompa

Pompanın bastığı (Q) debisi

$$Q = \frac{2 . \Omega . b . Z . n}{60}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu formülde (Ω) iki diş arasındaki boşluk, (b) diş genişliği, (Z) diş sayısı, (n) dakikadaki dönme sayısıdır. Dişli pompalar yağ pompası olarak kullanılır.

(Şekil 11.7)'de sabit devir sayısında çalışan pistonlu pompanın ve



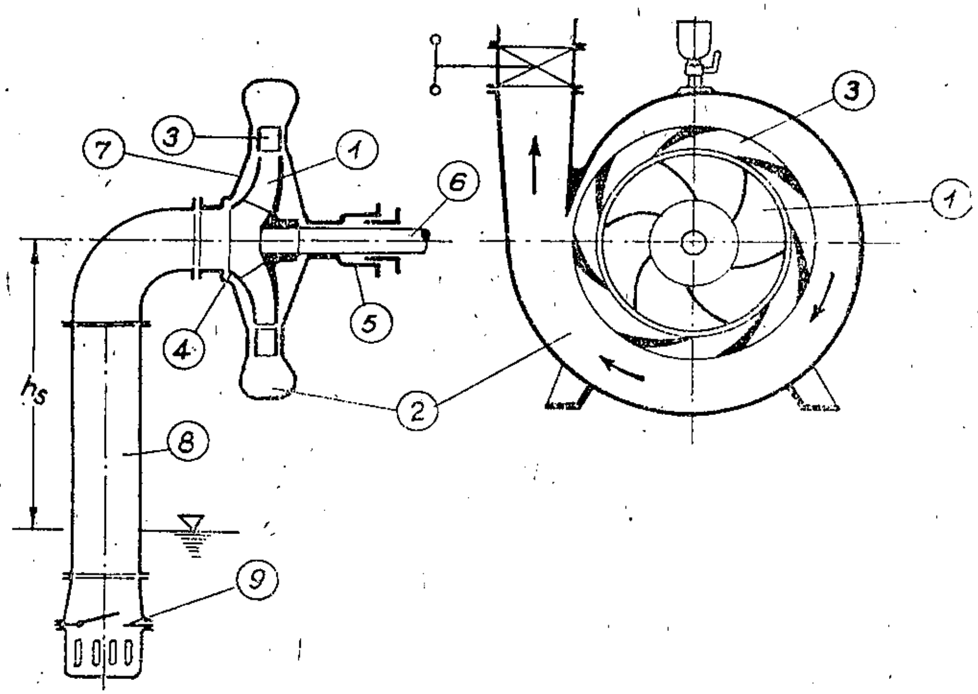
Şekil 11.7

santrifüj pompanın manometrik basma yüksekliği-debi karakteristik eğrileri gösterilmiştir.

Pistonlu pompanın [$H_m = f(Q)$] karakteristiği düşeye yakın bir eğridir. Santrifüj pompanın (H_m) manometrik yüksekliği ise debiye göre çok değişkenlik gösterir.

4) SANTRİFÜJ POMPALAR

Santrifüj veya hidrodinamik pompalar radyal akışlı, yarı eksenel akışlı ve eksenel akışlı pompalar şeklinde üç gruba ayrılır. Sıvının pompaya girişine göre de tek girişli ve çift girişli santrifüj pompalar şeklinde bir ayrım yapılabilir. (Şekil 11.8)'de tek girişli santrifüj pompanın şematik



Şekil 11.8 — Tek Girişli Santrifüj Pompanın Şematik Kesitleri

kesitleri gösterilmiştir. Pompanın dönen çarkı sıvıyı kendisi ile birlikte dönme hareketine zorlar. Pompanın gövdesi sıvıyı çarka gönderir ve çarktan ayrılan sıvının kinetik enerjisini yayıcı ile basınç enerjisine dönüştürür. Çarktan ayrılan sıvıyı toplıyarak çıkış ağzına gönderen kısma salyangoz denir.

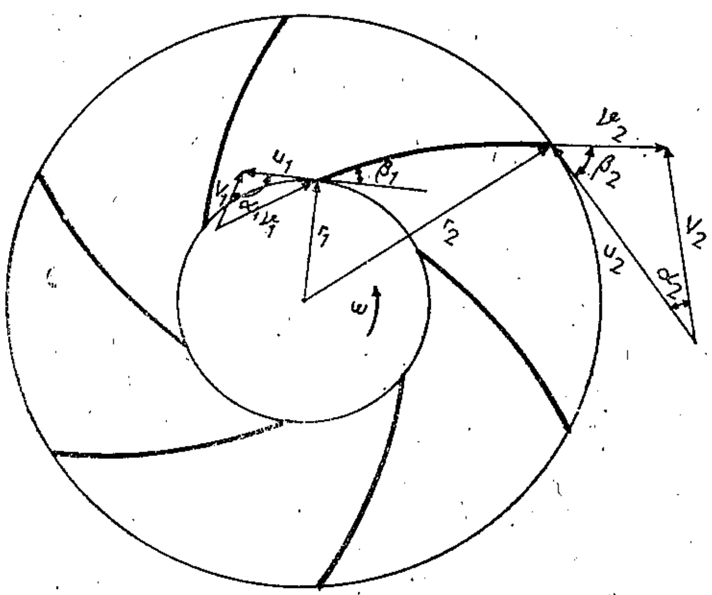
(Şekil 11.8)'deki pompa kesitlerinde numaralanmış kısımların tanımları aşağıda verilmiştir.

1. Çark: Mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştürür. Çark üzerinde kıvrık kanatlar vardır. Çark dönünce merkez ile çevre arasında bir basınç farkı doğar. Böylece içten dışa doğru bir akım oluşur. Hareket eden sıvının yerine merkezden sıvı emilir.
2. Salyangoz: Çarktan çıkan sıvıyı toplar ve basma borusuna verir.
3. Yayıcı: Sıvıya yön verir, çarktan çıkan sıvının hızını azaltarak kinetik enerjinin bir kısmını basınç enerjisine dönüştürür.
4. Yıpranma halkası ve hidrolik conta: Kaçakları önler.
5. Salmastra kutusu: Mil ile gövde arasındaki kaçakları önler.
6. Mil: Motor ile çarkı bağlar.
7. Gövde: Salyangoz ve diğer organları taşır.
8. Emme borusu: Emme haznesi ile pompa girişi arasındaki borudur.
9. Dip klapesi ve süzgeç: Emme borusu girişindeki tek yönlü akımı sağlar, pompa çalışmazken pompa içindeki ve emme borusundaki sıvının geri boşalmamasını sağlar. Süzgeç pompaya giren sıvıyı süzer.

Çift girişli santrifüj pompalarda iki çark sırt sırta bağlanmıştır. Çarkların iki ayrı girişi olmasına rağmen çıkışları tek bir salyangoza bağlıdır, her biri toplam debinin yarısını basar.

Türbinlerde olduğu gibi santrifüj pompalarda da mutlak hız sürüklenme hızı ile bağıl hızın toplamına eşittir ve bu hızların oluşturduğu üçgene pompa hız üçgeni denir.

Santrifüj pompanın çarkı ile giriş ve çıkış hız üçgenleri şematik olarak (Şekil 11.9)'da gösterilmiştir.



Şekil 11.9

Daha önce belirtildiği gibi pompa hidrolik verimi (η_h) aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$\eta_h = \frac{H_m \cdot g}{V_2 \cdot u_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2 - V_1 \cdot u_1 \cdot \text{Cos}\ \alpha_1}$$

İdeal koşullarda kanat sayısının sonsuz olduğu varsayılırsa çarka girişte ($\vec{V_1}$) mutlak hızı ($\vec{u_1}$) çevresel hızına dik olacaktır, yani ($\alpha_1 = 90°$) olur. Öte yandan pompa hidrolik verimi ($\eta_h = 1$) olsun. Yukarıdaki (η_h) ifadesinde bu değerler yerine konursa

$$\eta_h = 1 = \frac{H_m \cdot g}{V_2 \cdot u_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2 - V_1 \cdot u_1 \cdot \text{Cos}\ 90°} = \frac{H_m \cdot g}{V_2 \cdot u_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2}$$

olur. Bu denklemden manometrik yükseklik (H_m) çözülürse

$$H_m = \frac{V_2 \cdot u_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2}{g}$$

elde edilir.

Sonsuz kanat halinde su çıkışta kanada teğet olacaktır. Kanat açısı (β_2) ile (u_2) ve (v_2) hızları arasındaki açı eşit olacaktır. ($\vec{V_2}$) mutlak hızının teğet doğrultusundaki izdüşümü şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_2 \cdot \text{Cos}\ \alpha_2 = u_2 - v_2 \cdot \text{Cos}\ \beta_2$$

Bu ifade yukarıdaki (H_m) formülünde yerine konursa,

$$H_m = \frac{u_2 \cdot (u_2 - v_2 \cdot \text{Cos}\ \beta_2)}{g} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{1}{g} \cdot u_2 \cdot v_2 \cdot \text{Cos}\ \beta_2$$

elde edilir.

Çıkışta çark genişliği (b_2) ise çarkın debisi (Q) şu şekilde ifade edilebilir.

$$Q = V \cdot S = (v_2 \cdot \text{Sin}\ \beta_2) \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot b_2)$$

Bu ifadeden (v_2) çözülürse,

$$v_2 = \frac{Q}{\text{Sin}\ \beta_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot b_2}$$

elde edilir. (v_2) ifadesi (H_m) eşitliğinde yerine konursa,

$$H_m = \frac{u_2^2}{g} - \frac{1}{g} \cdot \frac{u_2 \cdot Q}{2\pi \cdot r_2 \cdot b_2} \cdot \frac{\text{Cos}\ \beta_2}{\text{Sin}\ \beta_2} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 \cdot Q}{2\pi \cdot r_2 \cdot b_2 \cdot g \cdot \tan\ \beta_2}$$

elde edilir. Bu denklem geometrik boyutları ve devir sayısı belirli bir çarkta manometrik yüksekliğin debiye göre değişimini verir.

Geometrik boyutları belirli bir çarkın dönme sayısı sabit ise

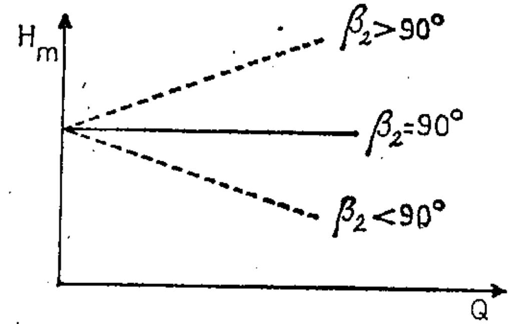
$$H_m = \frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_2 \cdot Q}{2\pi \cdot r_2 \cdot b_2 \cdot g \cdot \tan\ \beta_2}$$

eşitliğinde (H_m) ile (Q) arasındaki bağıntı çizgisel (lineer) olur. Bu bağıntı genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$H_m = A - B \cdot Q$$

(A) ve (B) denklem sabiti ve katsayısıdır.

Pompanın [$H_m = f(Q)$] şeklindeki karakteristiği ideal koşullarda ($H_m = A - B \cdot Q$) bağıntısına göre düz bir doğrudur. (β_2) kanat açısının değerine göre (H_m)'nin (Q) ile değişimi (Şekil 11.10)'da gösterilmiştir.

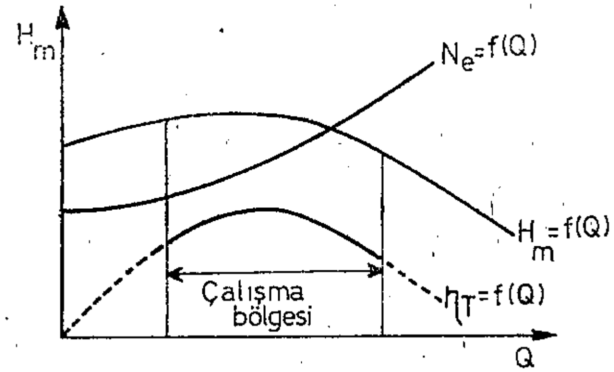


Şekil 11.10

Santrifüj pompanın debisi ile manometrik yükseklik, verim, dönme sayısı, çektiği güç arasındaki ilişkiyi gösteren eğrilere pompanın karakteristik eğrileri denir. Pompanın dönme sayısı sabit tutularak (H_m) manometrik yüksekliği ile (Q) debisi arasındaki ilişkiyi gösteren karakteristik eğriye pompanın ana karakteristiği denir.

Gerçek koşullarda pompa çarkının kanat sayısı belirlidir ve [$H = f(Q)$] karakteristiği (Şekil 11.11)'de gösterildiği gibidir. Tam santrifüj bir pompanın sabit dönme sayısı için (H_m) manometrik yükseklik,

(N_e) efektif güç ve (η_T) toplam verimi ile debisi arasındaki ilişkiler (Şekil 11.11)'de gösterilmiştir.



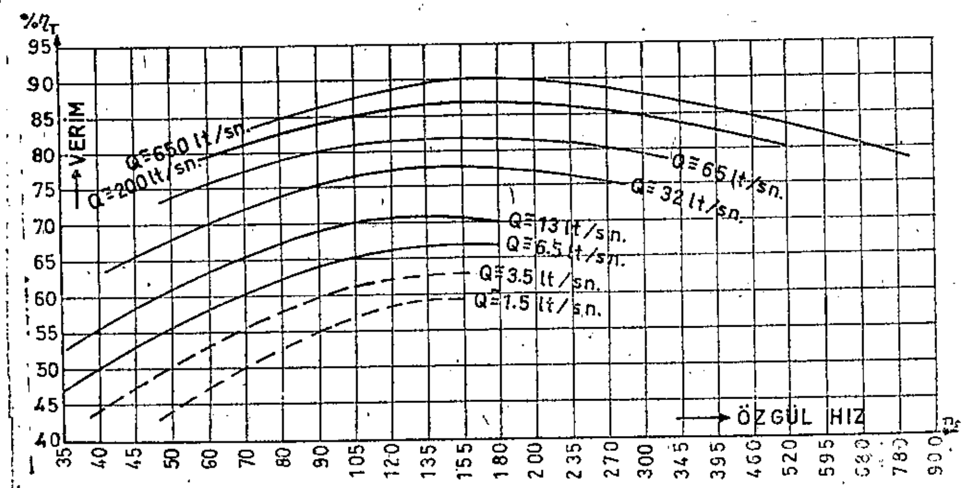
Şekil 11.11

Bir santrifüj pompanın bir tek manometrik yüksekliği ve debisi olmayıp [$H_m = f(Q)$] karakteristiğine uygun olarak sonsuz değer vardır. Bunlar arasında maksimum verim civarındaki verime karşı gelen değerler kuşkusuz en iyi değerlerdir. Pompa seçilirken pompa veriminin (Şekil 11.11)'de gösterilen ve "çalışma bölgesi" denilen aralığı gözönünde bulundurulmalı ve pompa çalışma noktası bu aralıkta kalmalıdır.

Santrifüj pompaların özgül dönme sayısı,

$$n_s = 3{,}65 \cdot \frac{n \cdot Q^{1/2}}{H_m^{3/4}}$$

şeklinde ifade edilir. Özgül dönme sayısı (özgül hız) ve debiye göre santrifüj pompa veriminin değişimi (Şekil 11.12)'de gösterilmiştir.



Şekil 11.12 — Pompa Genel Veriminin Özgül Dönme Sayısı ve Debiye Göre Değişim Eğrileri

5) SANTRİFÜJ POMPA ÇALIŞMA NOKTASININ SAPTANMASI

Boru ağına su basan santrifüj pompaların bir veya birden fazla olması durumlarına göre pompa çalışma noktasının nasıl bulunacağı aşağıda açıklanmıştır.

a) BİR SANTRİFÜJ POMPANIN TEK BORU AĞINA SU BASMASI

(Şekil 11.13)'de görüldüğü gibi (P) santrifüj pompası (L) uzunluğunda bir boru yardımı ile (A) deposundan (B) deposuna su basmaktadır.

Pompanın [$H_m = f(Q)$] karakteristiği, borunun yük kaybı katsayısı ve depolar arasındaki (H_g) seviye farkı verilmiş olsun. Borudan (Q) debisi geçtiği zaman oluşan yük kaybı,

$$H_L = J \cdot L = \frac{\lambda}{D} \cdot L \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = K \cdot Q^2$$

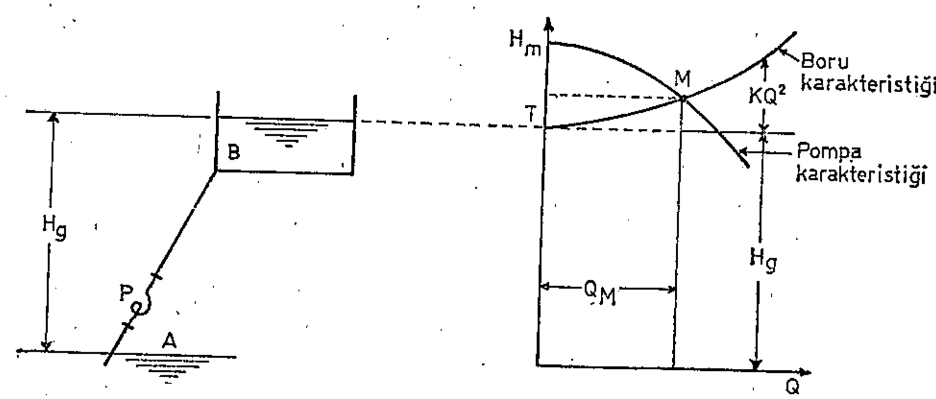
şeklinde ifade edilir.

($H_L = K \cdot Q^2$) şeklindeki bu bağıntıya boru karakteristiği denir.

Pompa (B) deposuna debisi (Q) olan suyu basarken pompanın manometrik yüksekliği [$H_m = f(Q)$] karakteristiği ile bellidir. Denge halinde manometrik yükseklik,

$$H_m = H_g + H_L = H_g + K \cdot Q_m^2$$

bağıntısını gerçekleştirmelidir. Buna göre pompanın (M) çalışma noktası, (T) noktasından çizilen boru karakteristiği ile pompa karakteristiği-

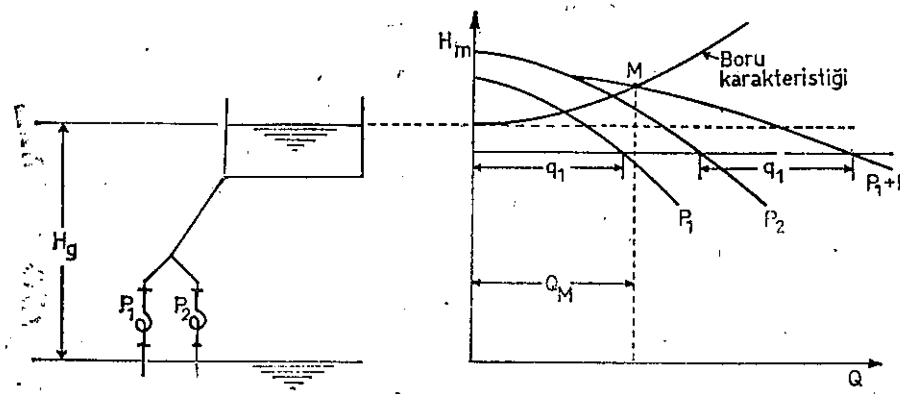


Şekil 11.13

nin kesim noktası olacaktır. Debi, (Q_M) debisinden büyük olursa pompanın manometrik yüksekliği boru direncinden küçük olacağından azalır ve (Q_M) debi değerini bulur. Debi, (Q_M) debisinden küçük ise manometrik yükseklik fazla geldiğinden artar ve yine (Q_M) debi değerini bulur.

b) SANTRİFÜJ POMPALARIN PARALEL BAĞLANMASI

Karakteristikleri (P_1) ve (P_2) olan pompalar paralel çalışarak (Şekil 11.14)'de gösterildiği gibi aynı boru ağına su basmaktadır. Boru ka-



Şekil 11.14

rakteristiği önceki örnekte olduğu gibi çizilir. (P_1) pompasının debisi (q_1) ve (P_2) pompasının debisi (q_2) ise boruya basılan (Q) debisi,

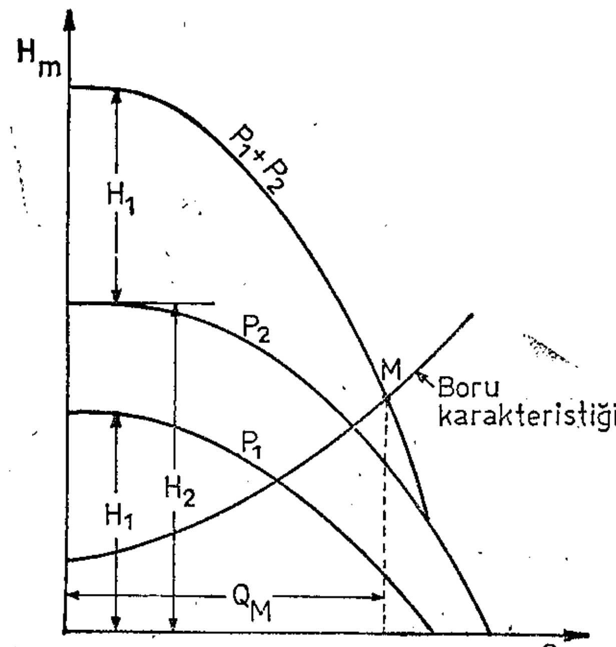
$$Q = q_1 + q_2$$

olur. Paralel çalışmanın özelliği olarak iki pompanın manometrik yükseklikleri her zaman eşittir. Her iki pompanın [$H_m = f(Q)$] karekteristiği çizilebilir, bu karakteristikler şekilde (11.4)'de (P_1) ve (P_2) ile gösterilmiştir. Her (H_m) değeri için (q_1) ve (q_2) debileri toplanarak iki pompanın ortak karakteristiği olan [$H_m = f(Q)$] eğrisi elde edilir, şekil üzerinde ($P_1 + P_2$) ile gösterilmiştir.

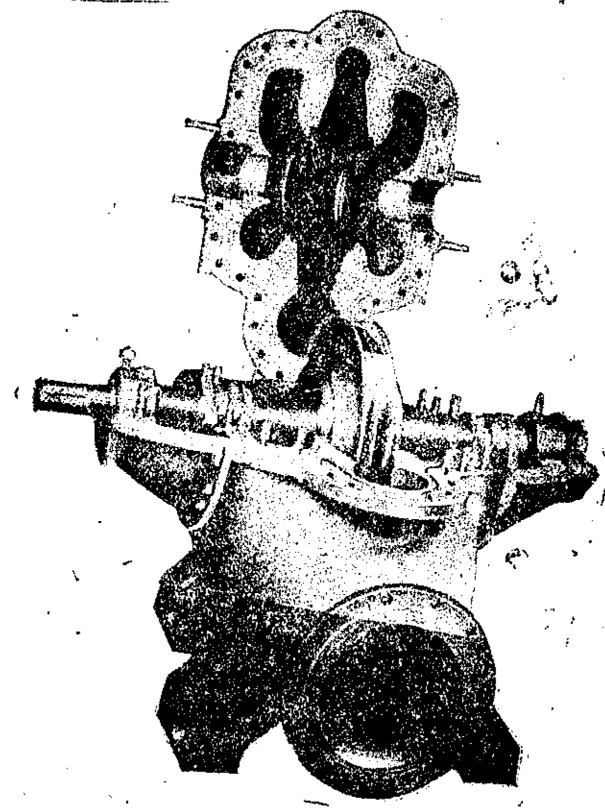
Ortak karakteristik ile boru karakteristiğinin kesiştiği (M) noktası pompaların çalışma noktasıdır.

c) SANTRİFÜJ POMPALARIN SERİ BAĞLANMASI

Seri bağlı iki santrifüj pompa aynı boru ağına su bassın. İki santrifüj pompa seri bağlanırsa bunların debileri her an eşit olacak, buna karşılık manometrik yükseklikleri toplanacaktır. (Şekil 11.15)'de görüldüğü gibi seri bağlı iki pompanın (P_1) ve (P_2) karakteristikleri düşey yönde toplanarak toplam pompa karakteristiği elde edilmiştir. Boru karakteristiği ile toplam pompa karakteristiğinin kesim noktası pompaların (M) çalışma noktasını verir.



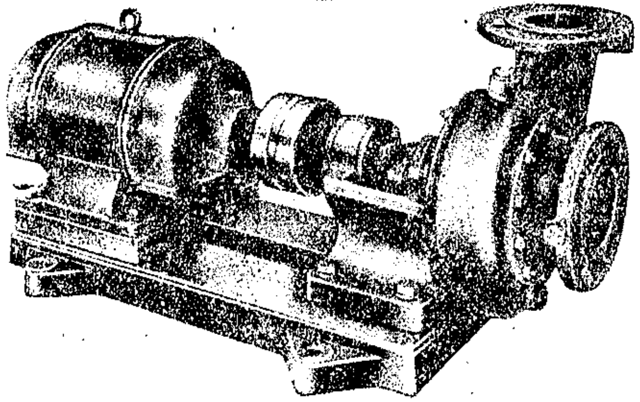
Şekil 11.15



Şekil 11.16 — Tek Kademeli Santrifüj Pompanın İç Görünüşü

İki hazneye su basan tek pompa, iki hazneye çatal bir boru ağı ile su basan pompa, iki ayrı hazneden bir hazneye su basan paralel iki pompa olması duurmlarında yukarıdaki işlemlere benzer işlemler izlenerek pompa çalışma noktası bulunabilir.

(Şekil 11.6)'da tek kademeli santrifüj bir pompanın iç görünüşü gösterilmiştir. Tek kademeli ve tek girişli santrifüj pompanın ve motorunun dış görünüşü (Şekil 11.17)'de gösterilmiştir.

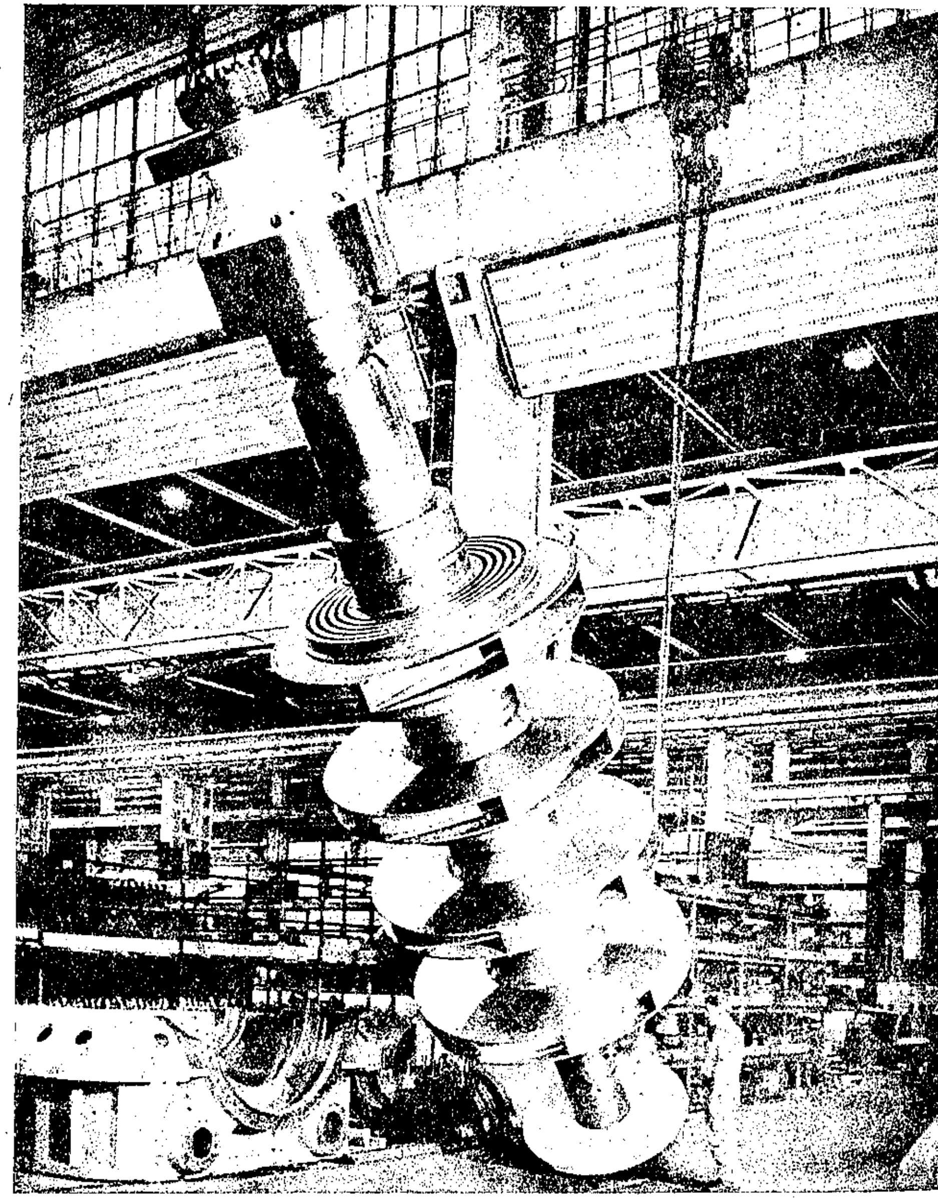


Şekil 11.17 — Tek Kademeli ve Tek Girişli Santrifüj Pompanın ve Motorunun Dış Görünüşü

6) KADEMELİ SANTRİFÜJ POMPALAR

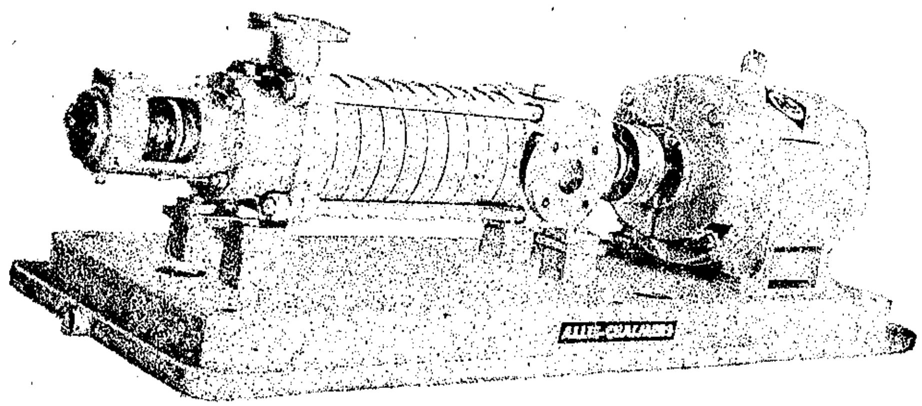
Manometrik yükseklik (40 ~ 50) metre üzerinde olursa tek kademeli santrifüj bir pompa ile su bu yüksekliklere basılamaz. Bunun için aynı mil üzerine tesbit edilmiş ve hidrolik açıdan seri bağlı çarklardan oluşan çok kademeli santrifüj pompalardan yararlanılır. (Şekil 11.18)'de dört kademeli santrifüj pompanın çarkları ve mili gösterilmiştir. (Şekil 11.18)'deki dört adet pompa çarkı aynı mil üzerine seri bağlı olduğundan dört kademeli pompa denmiştir.

Kademeli santrifüj pompalarda birinci kademenin bastığı su yayıcıdan geçtikten sonra dönüş kanalı ile ikinci kademenin girişine verilir. İkinci kademenin çarkını geçen su aynı yollardan geçerek üçüncü kademenin girişine verilir ve diğer kademeler için aynı işlemler sürer. Her kademenin girişindeki suyun enerjisi bir evvelki kademenin çıkış enerjisine eşit olduğundan pompanın manometrik yüksekliği kademelerin manometrik yüksekliklerinin toplamına eşittir.



Şekil 11.18 — Dört Kademeli Santrifüj Pompanın Çarkları ve Mili

Kademe sayısı (12) ile (14)'e kadar ulaşan pompalar imal edilmiştir. Genel olarak kademe sayısının (10)'u aşması istenmez. (Şekil 11.19)'da on kademeli santrifüj pompanın dış görünüşü gösterilmiştir. Çok büyük basma yükseklikleri için seri bağlı iki pompa kullanılır. Kademeli pompa verimi tek kademeli santrifüj pompanın veriminden düşüktür, çünkü kademeler arası geçişte kayıplar oluşur. Kademeli pompalar kazan besi pompası olarak ve maden kuyularından su basma işlerinde kullanılır.



Şekil 11.19 — On Kademeli Santrifüj Pompanın Dış Görünüşü

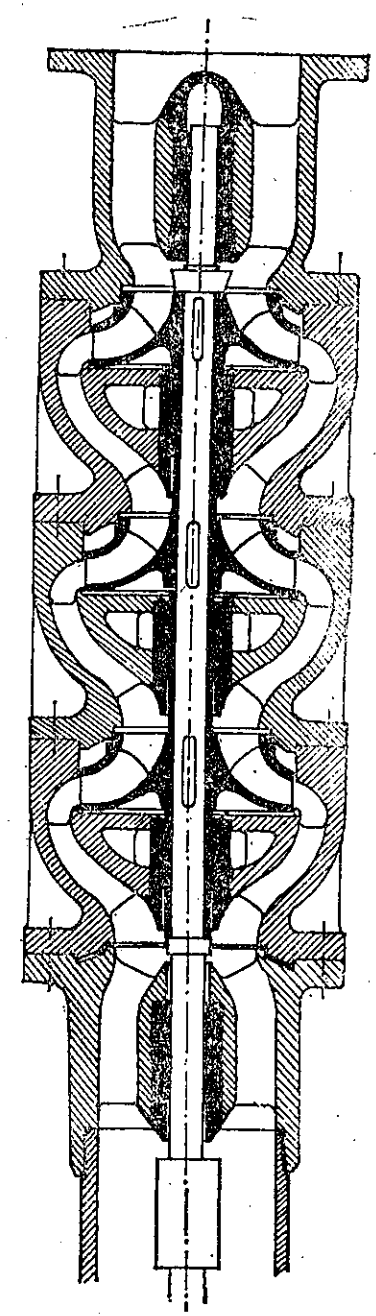
7) ÖZEL KADEMELİ SANTRİFÜJ POMPA TİPLERİ

Derin kuyulardan su çekmek için özel kademeli santrifüj pompalar kullanılır. Bu pompalar çakma boru içinde çalışır ve bu tip kuyuya forajlı kuyu denir. Özel kademeli pompalar transmisyonlu veya dalgıç tipinde olabilir. Ayrıca su biriktirmek amacı ile kullanılan biriktirme pompa tipi de vardır.

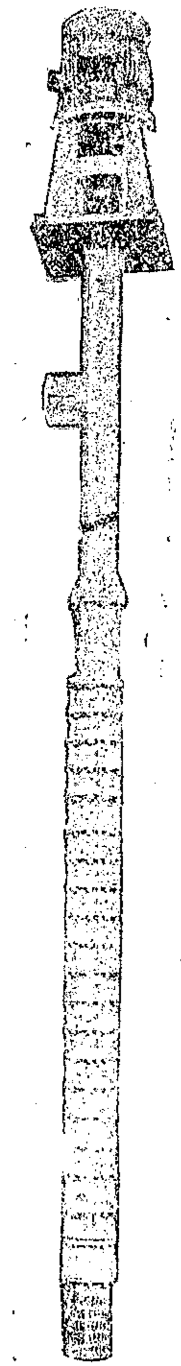
a) TRANSMİSYONLU DERİN KUYU POMPALARI

(Şekil 11.20)'de transmisyonlu derin kuyu pompası kesiti ve (Şekil 11.21)'de dış görünüşü gösterilmiştir. Pompaya hareket veren motor toprak seviyesine monte edilir, pompa ise kuyudaki su seviyesine indirilir. Düşey eksenli çarkların en az bir kademesi suya dalmış konumda bulunur. Bu şekilde pompanın emme problemi ortadan kalkar.

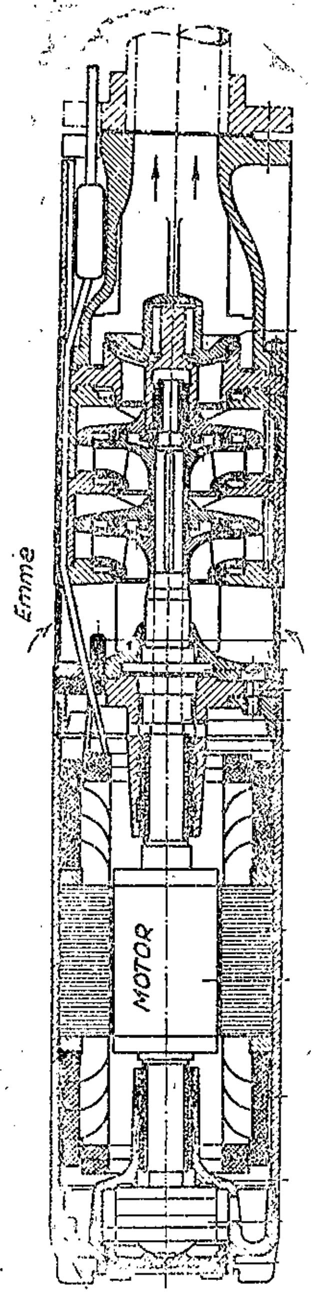
Kuyunun derinliğine göre (60—70 m.) uzunluğunda transmisyon mili kullanılabilir ve bu mil ile pompaya hareket iletilir. Transmisyon mili (1,5 - 2 m.) aralıklarla yataklanır. Pompa çapının küçük tutulması için kademe sayısı çoğaltılır ve pompa çarkının özgül hızı artırılır. Bu şekilde çarklar tam santrifüj durumdan yarı eksenel duruma kayar.



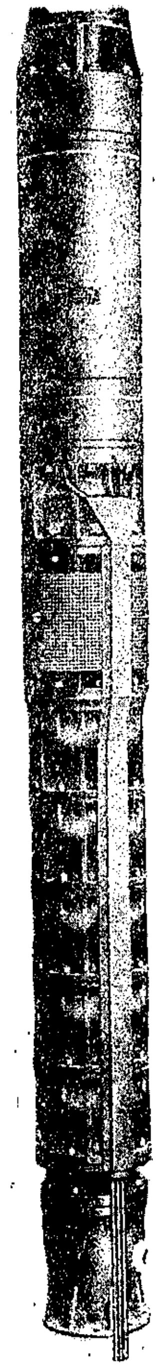
Şekil 11.20 — Transmisyonlu Derin Kuyu Pompasının Kademelerinin Kesiti



Şekil 11.21 — Transmisyonlu Derin Kuyu Pompasının ve Çevirme Motorunun Dış Görünüşü



Şekil 11.22 — Motoru Altta Olan "Yaş Tip" Bir Dalgıç Pompa



Şekil 11.23 — Motoru Altta Olan "Yaş Tip" Dalgıç Pompa Dış Görünüşü

b) **DALGIÇ POMPALAR**

Dalgıç pompalarda çevirme motoru ve pompa bir blok teşkil eder. Motor ve pompa suya gömülü şekilde çalışır ve transmisyon miline gerek kalmaz. Elektrik kablosu ve su basma borusu kuyu dışına çıkartılır. Su basma borusu pompayı da taşır.

Dalgıç pompaların kuru motorlu ve yaş motorlu şeklinde iki tipi vardır. Kuru tip dalgıç pompalarında motor üstte ve pompa alttadır. Yaş tip dalgıç pompalarında motor altta ve su içindedir.

(Şekil 11.22)'de yaş tip dalgıç pompa kesiti ve (Şekil 11.23)'de dış görünüşü gösterilmiştir.

c) **BİRİKTİRME POMPALARI**

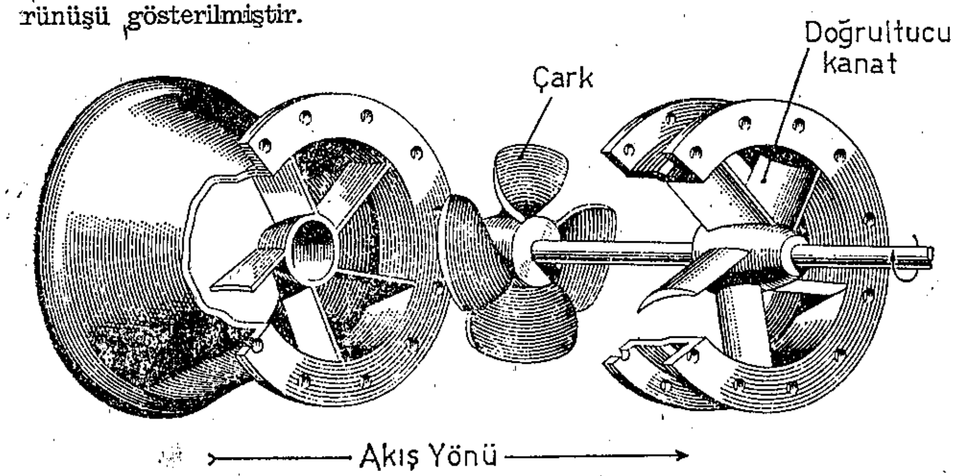
Elketrik enerjisinin fazla veya çok ucuz olduğu zamanlarda su yüksekteki bir hazneye biriktirilir ve puant zamanlarında türbinden geçirilerek enerjiye dönüştürülür. Suyu hazneye basmak için tek veya çok kademeli pompa kullanılabileceği gibi türbin-pompa da kullanılabilir. Türbin-pompa hem türbin ve hemde pompa olarak çalışır.

8) **EKSENEL SANTRİFÜJ POMPALAR**

Özgül hız büyürse santrifüj pompanın çark şekli değişir ve su akışı radyal durumdan eksenel duruma kayar. Çok büyük debiler için en uygun çözüm pompanın akış kesitini büyütmektir. Ayrıca manometrik yüksekliğin büyük olması istenmediğine göre bu durumda en uygun çözüm eksenel akışlı çarktır. Eksenel akışlı çarkı olan pompalara eksenel santrifüj pompalar denir. Suyun çarktan geçişindeki sürtünme kayıplarını azaltmak için uskurlu türbinlerde olduğu gibi pompa çarkı açık tipte yapılır, çark kanatlarını dıştan kavrayan çenber yoktur.

Eksenel bir akışla çarka giren suyun çarktan ayrıldıktan sonra yeniden tam eksenel akışla hareket etmesi için çarkın çıkış kısmına hareketsiz doğrultucu kanatlar konmuştur.

(Şekil 11.24)'de eksenel bir pompanın elemanlarının perspektif görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 11.24 — Eksenel Bir Pompa Elemanlarının Perspektif Görünüşü

ÖRNEK PROBLEM

1) (1470 dev/dak) dönme hızı olan bir elektrik motoruna doğrudan bağlı bir santrifüj pompanın bastığı suyun debisi (100 litre/sn), manometrik yüksekliği (40 m.) olduğuna göre pompanın özgül dönme sayısını, pompa mil gücü ve çevirici motor gücünü bulunuz. Pompa toplam verimi (0,76) alınacaktır.

ÇÖZÜM:

Pompanın özgül dönme sayısı,

$$n_s = 3{,}65\ n \,.\, \frac{Q^{1/2}}{H_m^{3/4}} = 3{,}65 \,.\, 1470 \,.\, \frac{(0{,}100)^{1/2}}{40^{3/4}} = 106{,}7 \text{ dev/dak}$$

bulunur.

($n_s = 106{,}7$ dev/dak) değerine göre pompa tam santrifüj tiptendir.

Mil gücü veya efektif güç,

$$N_e = \frac{\gamma \,.\, Q \,.\, H_m}{75 \,.\, \eta_T} = \frac{1000 \,.\, 0{,}1 \,.\, 40}{75 \,.\, 0{,}76} = 70{,}2 \text{ B.B}$$

bulunur.

Elektrik motoru gücü

$$N_m = 1{,}15 \,.\, N_e = 1{,}15 \,.\, 70{,}2 = 80{,}5 \text{ B.B}$$

bulunur. (1,15) emniyet katsayısı olarak seçilmiştir.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Pistonlu ve santrifüj pompalar arasındaki farkları belirtiniz.
2) Manometrik yükseklik nedir?
3) Santrifüj pompanın güç ve verimini açıklayınız.
4) Pompa özgül dönme sayısının tanımını yapınız.
5) Hacimsel pompa grubuna giren pompaların çalışma ilkelerini açıklayınız.
6) Santrifüj pompanın ana parçalarını ve her parçanın işlevini açıklayınız.
7) Tam santrifüj bir pompanın sabit devir sayısı için karakteristik eğrileri ne şekildedir?
8) Seri bağlı ve aynı boru ağına su basan iki santrifüj pompanın çalışma noktası nasıl bulunur?
9) Üç kademeli santrifüj pompanın suyu nasıl bastığını açıklayınız.
10) Özel kademeli santrifüj pompa tiplerini ve çalışma ilkelerini belirtiniz.

XII. BÖLÜM

HİDROLOJİ

XII. BÖLÜMDE KULLANILAN SİMGELERİN ANLAMI

a, b — katsayı, regresyon denkleminin sabitleri
A — yağış alanı, aşılma olasılığı
A, B — sabitler
B — buharlaşma
C_p — katsayı
C_t — katsayı
C_v — değişim katsayısı
DMİ — Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
DSİ — Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EİE — Elektrki İşleri Etüd İdaresi Genel Direktörlüğü
f — frekans
F — toplam frekans
F — süzülme
h — su derinliği
h_{ort} — ortalama seviye
H — eşel seviyesi
I — tutma
i — ortalama yağış
L — uzunluk
Log — Logaritma
m — olayın görülme sayısı, sıra numarası
μ — toplumun aritmetik ortalaması
n — olayın görülme sayısı
N — eleman sayısı
Q — debi
p — olasılık

P — toplam olasılık
Q_p — pik debi
q — olasılık
r — korelasyon katsayısı
R — radyasyon
S — standart sapma, standart hata
S^2 — değişim
t — zaman
t_p — gecikme zamanı
t_r — net yağış süresi
t_{pR} — gecikme zamanı
t_R — net yağış süresi
T — terleme, zaman
T_b — taban genişliği
T_p — tekerrür aralığı
V — hız
x — rastgele değişken, bağımsız değişken
$\bar{x}$, $\bar{y}$ — aritmetik ortalama
x_i — olay
y — rastgele değişken, bağımlı değişken
Y — yağış
z — standart normal değişken
Δ — küçük değişme veya artım
θ — sapma açısı
σ — toplumun standart sapması
π — daire çevresinin çapına oranı
μ — toplumun ortalaması

HİDROLOJİ

1) GİRİŞ

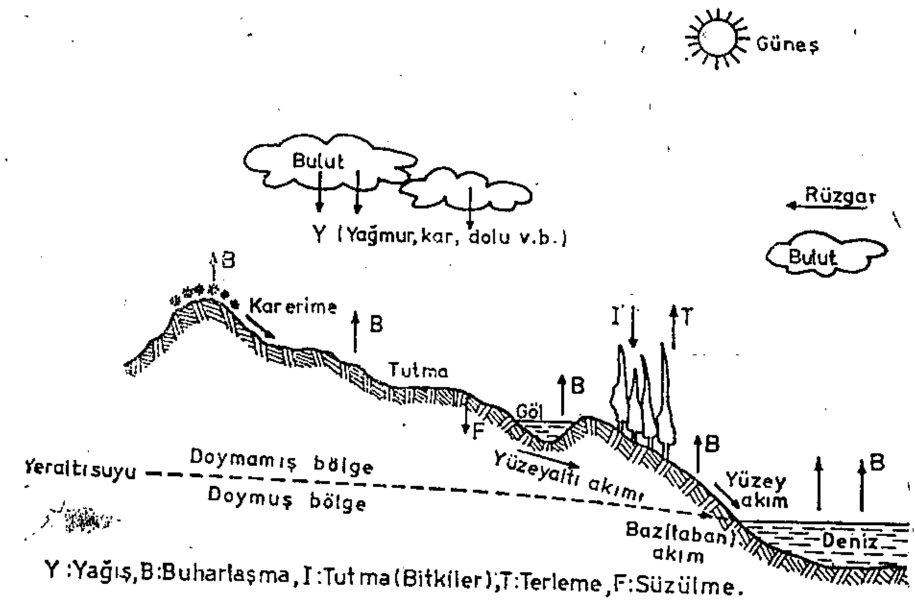
Bu bölümde hidroloji kısaca tanıtılmaya çalışılmıştır. Hidroloji konularında ayrıntılı bilgiler bölümün sonunda isimleri verilmiş kaynaklardan sağlanabilir.

Hidroloji genel anlamda su bilimidir. Hidroloji atmosfer, yeryüzü ve yeraltında çeşitli şekillerde görülen suyun oluşumu ve dağılımını inceler. Tüm canlıların yaşamını etkiliyen suyun kaynağı yağmur ve kardır.

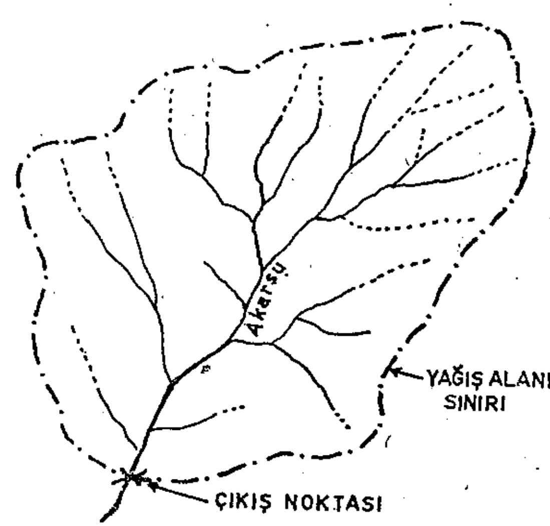
2) HİDROLOJİK ÇEVRİM

Su hidrolojik çevrim içinde dolaşır ve çevrimi güneş radrasyonu düzenler. Hidrolojik çevrim (Şekil 12.1)'deki gibi şematik olarak gösterilebilir. Güneşten yeryüzüne gelen enerji denizlerden ve karalardan suyun buharlaşmasını sağlar. Buharlaşan suya su buharı denir ve yoğunluğu havanın yoğunluğundan daha az olduğu için atmosferde yükselir. Yükselen su buharı soğur ve uygun koşullarda yoğunlaşır. Yoğunlaşma sonucu atmosferdeki bulutlar oluşur. Yer yüzünden atmosfere nem şeklinde taşınan su yağmur, kar, dolu v.b. yağış şekillerine dönüşerek bulutlardan yeniden yeryüzüne döner. Yeryüzüne dönen suyun % 60-70 gibi büyük bir bölümü toprak ve su yüzünden buharlaşma ve bitkilerden terleme yoluyla atmosfere döner. Yağışın bir bölümü bitkiler tarafından tutulur, diğer bir bölümü ise toprak içinde süzülerek yeraltına gider. Yeryüzüne dönen suyun buharlaşma, terleme, tutma ve süzülme dışında geri kalan bölümü yer çekimi etkisi ile hareket ederek toprak yüzünden akar ve bu akıma YÜZEY AKIMI denir. Toprak içine süzülen suyun bir bölümü toprak içindeki doymamış bölgede akar ve bu akıma YÜZEYALTI AKMI denir. Toprak içine süzülen suyun diğer bir bölümü daha derine gider ve yeraltı su seviyesine erişir. Yeraltı suyu BAZ AKIM'ın (taban akımı) kaynağıdır.

Yüzeysel akışını bir akarsuyun aynı çıkış noktasına gönderen bölgeye bu noktanın YAĞIŞ ALANI denir. (Şekil 12.2)'de bir akarsuyun belirli bir çıkış noktasına göre yağış alanı gösterilmiştir.



Şekil 12.1 — Hidrolojik Çevrim

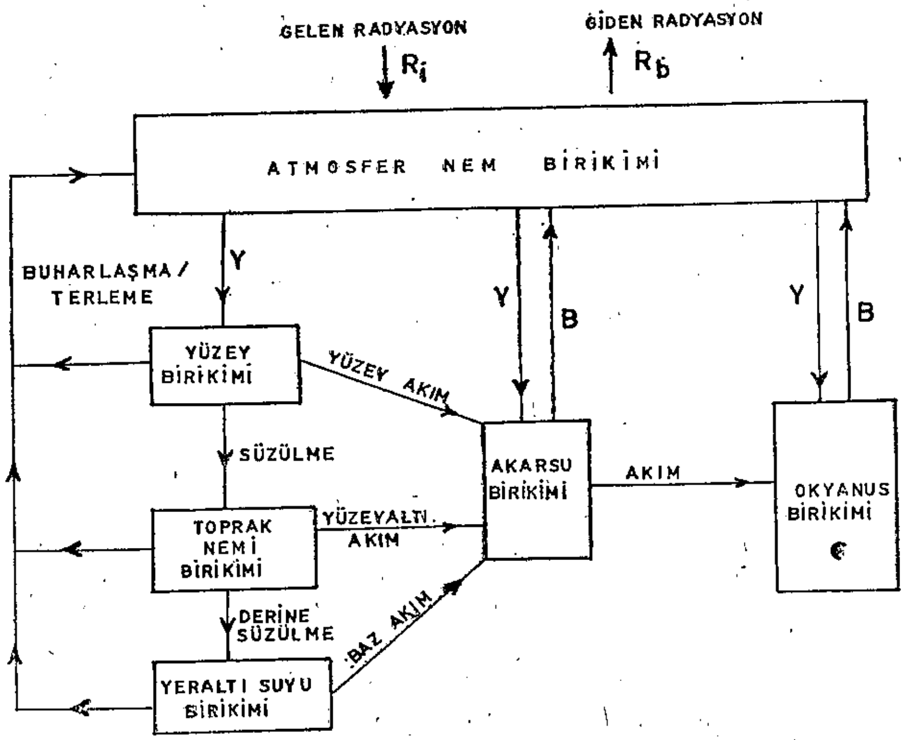


Şekil 12.2 — Akarsu Yağış Alanı

Çıkış noktasındaki akım yüzey, yüzeyaltı ve baz akımın toplamıdır. Yağış alanına uzun süre yağış düşmemişse çıkış noktasında görülen akım baz akımdır.

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşıldığı gibi hidrolojik çevrim buharlaşma, yağış, terleme, tutma, süzülme, yüzey akımı, yüzeyaltı akımı ve baz akım gibi olayların birleşimidir. Bu olaylara hidrolojik çevrim parametreleri denir.

Hidrolojik çevrim (Şekil 12.3)' de gösterildiği gibi akış diyagramı şeklinde de tasarlanabilir. Hidrolojik çevrimin akış diyagramı şeklinde gösterilmesi sonucu çevrime bir sistem gibi bakılabilir. Böylece hidrolojik çevrim bilgisayarda simüle edilebilir ve örneğin uzun süreli yağış verilerinden yararlanılarak kısa süreli akımlar uzun süreye uzatılabilir. Bir olayın matematiksel veya fiziksel modelinin teşkil edilmesine SİMÜLASYON denir.



Şekil 12.3 — Hidrolojik Çevrim

Hidrolojik çevrim kısaca suyun denizlerden atmosfere ve atmosferden yeniden denizlere taşınması şeklinde tanımlanabilir.

Hidrolojik çevrim içinde dolaşan suyun çeşitli oluşumları ayrı disiplinlere konu teşkil eder. Genellikle atmosferdeki suyu Meteoroloji, yeryüzündeki ve yeraltındaki suyu Hidroloji bilimleri inceler. Diğer yandan suyun hareketini hidromekanik inceler, hidromekaniğin teknikteki uygulamasına HİDROLİK denir.

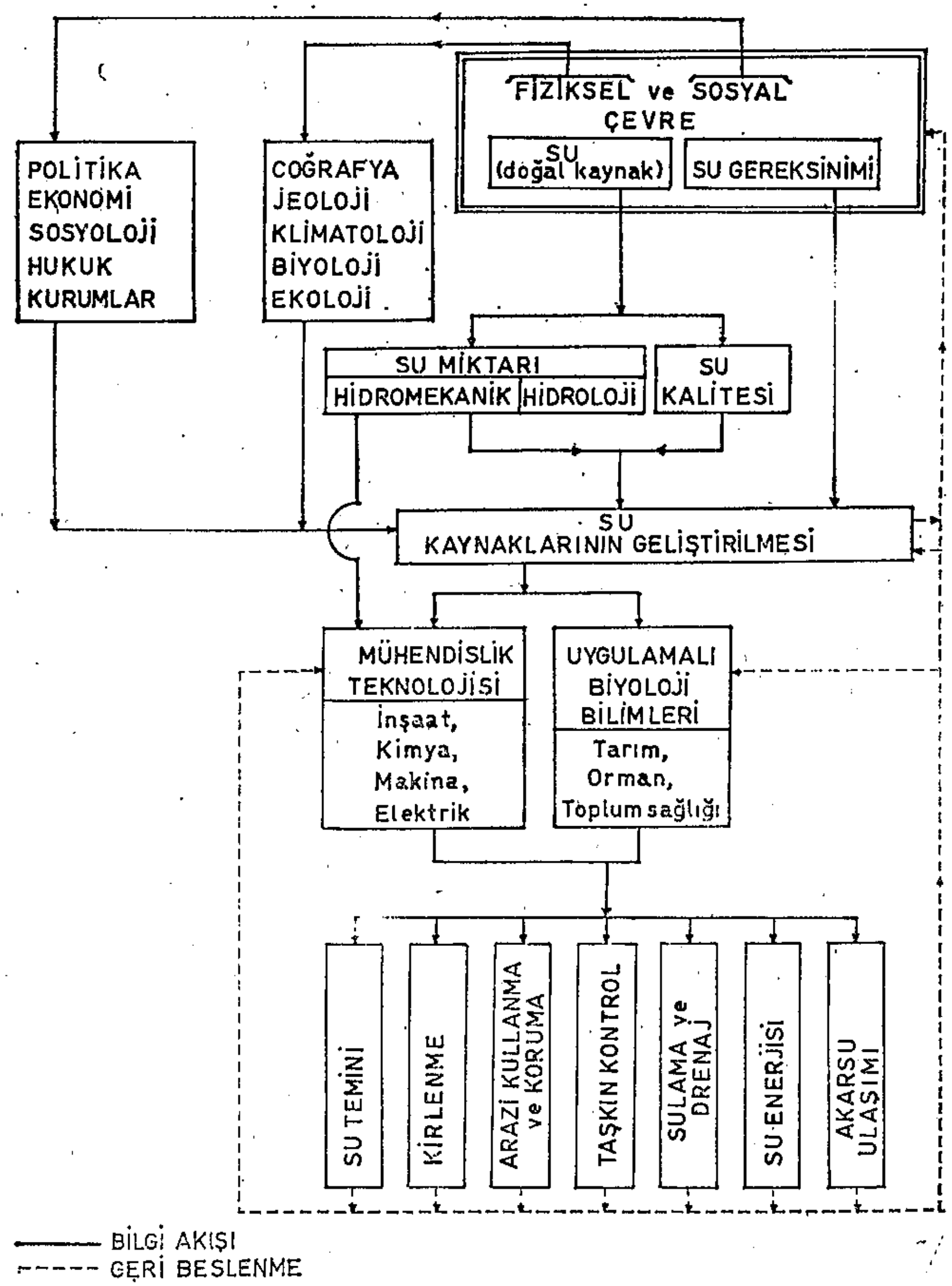
3) HİDROLOJİNİN ÖNEMİ

Su doğal ve sınırlı bir kaynaktır. Suyun toplum yararına kullanılması ve kontrolu amacı ile yapılan mühendislik çalışmaları SU KAYNAKLARININ GELİŞTİRİLMESİ adı altında toplanır. Doğal su kaynaklarının geliştirilmesi ile ilgili çalışmalarda suyun alan ve zaman dağılımı ile fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu bilgileri meteoroloji ve hidroloji (veya Hidrometeoroloji) verir. Ayrıca inşa edilmiş su projelerinin en verimli bir şekilde işletilebilmesi için meteoroloji ve hidroloji bilgilerinden yararlanılır.

Nüfus artışı ve sanayi gelişimine bağlı olarak toplumun suya gereksinmesinde büyük artışlar olmaktadır. Bunun sonucunda toplum su ihtiyacı su kaynağı verimini aşmış ve su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmaları ve araştırmaları önem kazanmıştır. Böylece su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarına sistem analizi, bilgisayar uygulaması, yapay uydular gibi modern teknikler girmiştir. Su gereksinimi ile su kaynağının verimi arasındaki denge aranırken fiziksel ve sosyal çevre de düşünülür. Su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarında çevre ve disiplinler arası ilişkiler (Şekil 12.4)' de gösterilmiştir.

Su gereksinimi ile doğal su kaynağı verimi arasındaki dengeyi düzenliyeceği ümidedilen "Hava Modifikasyonu" araştırmaları son yıllarda önem kazanmıştır. Hava modifikasyonu ile yapay yoldan yağışın arttırılması çalışmalarından elde edilen pozitif sonuçlar henüz tartışma düzeyindedir.

Hidrolojik çevrim içinde dolaşan suyun yağış, akım gibi çevrim parametre değerleri meteorolojik ve hidrolojik ölçü teknikleri ile tesbit edilir. Ölçme işlemleri sürekli ve uzun yıllar devam eder. Ölçüler analiz edilerek doğal su kaynaklarının meteorolojik ve hidrolojik rejim karakterleri belirlendikten sonra bu kaynaklardan ekonomik bir şekilde yararlanılabilir. Su ölçümleri yüzyıllar önce yapılmaya başlanmış olmasına rağmen ölçü bilgilerinin mühendislik çalışmalarında kullanılması oldukça yenidir.



Şekil 12.4 — Su Kaynaklarının Geliştirilmesi Çalışmalarında Disiplinler Arası İlişkiler.

Doğal su kaynaklarından yararlanma gereksinmesine paralel olarak meteorolojik ve hidrolojik çalışmalar da önem kazanmaktadır. Meteoroloji ve hidroloji çalışmaları ayrı kamu kuruluşları tarafından yürütülebildiği gibi tek bir kamu kuruluşu tarafından da yürütülebilmektedir.

4) HİDROLOJİK ÇALIŞMALAR

Hidrolojik çalışmalar genellikle aşağıdaki sırayı izler.

— Hidrolojik çevrim elemanlarının ölçümü
— Ölçülerin analizi ve teorilerin geliştirilmesi
— Ölçü ve teorilerin pratikteki problemlere uygulanması

Hidroloji pür teorik bir bilim değildir, daha çok uygulamalı konuları içerir. Hidrolojinin su kaynakları problemlerine uygulanması aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

— Taşkın ve kuraklık: Bunlara ekstrem olaylar denir. Su kaynakları projelerinin dolusavakları ve kapasiteleri ekstrem olayların büyüklüklerine göre tesbit edilir.
— Hidroelektrik enerji, sulama, su temini: Bunların değerleri ortalama akımlara göre tesbit edilir.

Burada hemen belirtelimki hidrolojik çalışmaların en önemli ve zor bölümü yağış, akım gibi çevrim prametrelerinin ölçümüdür. Ölçümlerle elde edilen veriler analiz edilerek bir akarsuyun su potansiyeli, kuraklık ve taşkın zamanlarındaki su miktarları ile bunların frekansları hesaplanabilir.

Ülkemizde (1976) yılına kadar sürdürülen hidrometeorolojik ölçümlerin (30) yıllık ortalamalarına göre, Türkiyenin yıllık ortalama yağışı (679 mm.), akarsularımızın denizlere ulaşan ve ulusal sınırlarımızı terkeden kesimlerin yıllık ortalama su miktarı $(181 . 10^9\ m^3)$,dür. Türkiyenin (1976) yılına kadar saptanabilmiş yeraltısuyu potansiyeli $(9{,}4 . 10^9\ m^3)$'dür.

5) HİDROMETEOROLOJİK ÖLÇÜMLER

Hidrolojik çevrim içinde dolaşan suyun yeryüzünde bulunan kısmı yerüstü sularını teşkil eder. Yerüstü suları miktarı hidrometeorolojik ölçümlerle tesbit edilir.

Hidrolojik çevrim parametre değerlerinin ölçüldüğü yerlere meteoroloji ve hidrometri istasyonları denir, bu istasyonların oluşturduğu ağa hidrometeorolojik ölçü ağı denir. Hidrolojik çevrim olaylarını benzeşim modelleri aracılığı ile laboratuvarlarda gerçekleştirmek genellikle mümkün olamamaktadır. Bundan dolayı doğrudan doğada ölçülürler ve ölçüler çevrim parametrelerinin noktasal değerleridir. Çevrim parametreleri zamanla ve yerden yere çok değişkenlik gösterdiğinden, yeterli zaman aralıklarında ve yeter sıklıkta noktalarda ölçülürler. Hidrometeorolojik ölçü ağını oluşturan istasyonlar etüd kademesindeki su kaynakları projelerine veri sağlamak amacıyla ülke üzerine planlı bir şekilde serpiştirilir. İstasyon yoğunluğu ile istasyon amacı ve ülke ekonomisi arasında yakın ilişki vardır. İstasyonlar yeterli doğrulukta ölçüm yapacak aletlerle donatılır. Genellikle yazıcı aletler kullanılır. Yazıcı aletler, ölçülen büyüklüğün zaman içinde önemli değişimler gösterdiği ve ölçüm noktasına yaklaşımın zor olduğu durumlarda gereklidir. Yazıcı aletlerin kullanılmasını gerektiren diğer bir neden de bazı ölçüm istasyonlarından elde edilen bilgilerin kısa bir sürede kullanıma hazır hale getirilmesi zorunluluğudur. Yazıcı aletler ilk yatırım bedeli yönünden yazıcı olmayan tiplerden daha pahalı olmakla beraber, yıllık işletme giderleri yönünde daha ucuz bir çözüm getirirler. Gözlem hataları ve işletme zorlukları giderek ölçüm aletlerinin yazıcı aletlere dönüşümünü zorunlu kılmaktadır.

Meteoroloji ve hidrometri istasyonları amaçlarına göre birincil (baz), ikincil (tali) ve özel istasyonlar şeklinde sınıflandırılır. Birincil istasyonlar sürekli çalıştırılır, diğer istasyonlar amaçları tamamlanınca kapatılır. Su kaynaklarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar hidrolojik çevrim parametrelerinin ölçü değerleri ve analizlerinden yararlanılarak sürdürülür. Bundan dolayı hidrometeorolojik ölçülere çok önceden başlamak gerekir.

Hidrometeoroloji (Meteoroloji ve Hidroloji) istasyonlarında ölçülen önemli çevrim parametre değerleri Yağmur, Kar Örtüsü, Buharlaşma, Sıcaklık, Su Seviyesi, Akarsu Debisi, Sediment, Toprak Nemi, Su Kalitesi ve Yeraltı Suyu'dur. Ölçü sonuçları aylık ve yıllık bültenlerde yayınlanır.

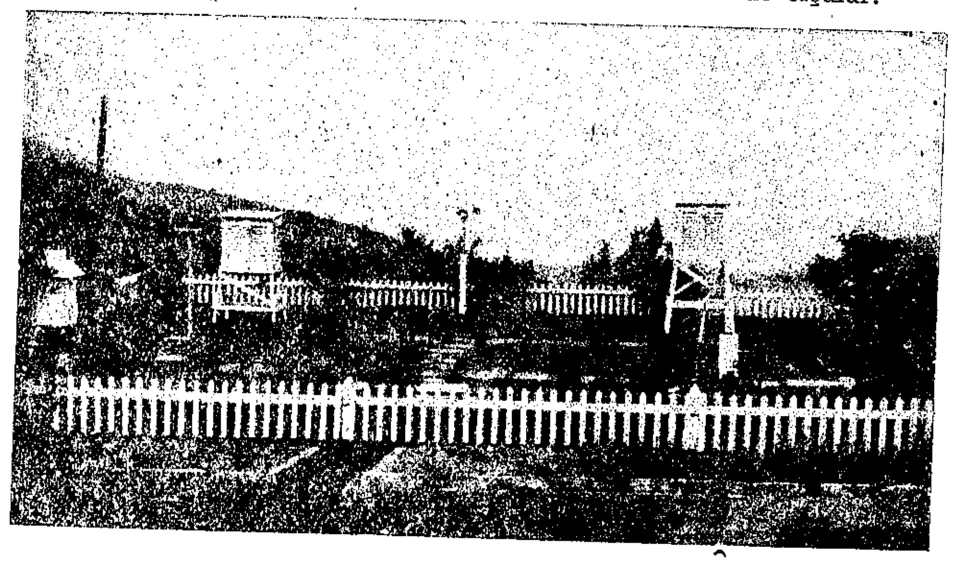
Ülkemizde meteoroloji istasyonları yağış, küçük klima ve büyük klima şeklinde sınıflandırılmıştır. Yağış istasyonlarında yalnız yağış; küçük klima istasyonlarında yağış ve sıcaklık; büyük klima istasyonlarında yağış, sıcaklık ve buharlaşma ile diğer meteorolojik parametreler ölçülür.

Ülkemiz hidrometeorolojik ölçü ağı 1 Ocak 1976 tarihine göre (1524) adet meteoroloji ve (876) adet hidrometri istasyonundan oluşur. Meteoroloji istasyonları genellikle optimum birincil istasyon ağını teşkil etmek amacıyla açılır. Hidrometri istasyonları başlangıçta proje ve işletme amacıyla açılır, sonradan bir kısmı birincil hidrometri istasyon ağına girer. Ülkemizde hidrometeoroloji istasyonlarını yalnız kamu kuruluşları işletir. Bu kuruluşlar DSİ, EİE, Topraksu ve DMİ'dir.

6) METEOROLOJİK ÖLÇÜMLER

Hidrolojik çevrimin meteorolojik parametre değerlerinden bir veya birkaçının ölçüldüğü istasyonlara meteoroloji istasyonu ve bu istasyonların oluşturduğu ağa meteorolojik ölçü ağı denir. Bazı durumlarda meteorolojik parametreleri ölçmek için otomatik meteoroloji istasyonları da kullanılır. (Şekil 12.5)'de bir meteoroloji istasyonu görülmektedir.

Su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarında önemli meteorolojik parametreler yağmur, kar örtüsü, buharlaşma ve sıcaklıktır. Bu parametrelerin bir veya birkaçı yeryüzünde ve yüksek atmosferde ölçülür.

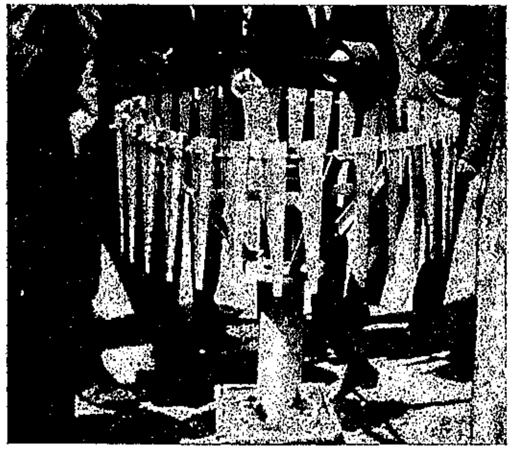


Şekil 12.5 — Bozkurt Meteoloji İstasyonu (DMİ)

7) YAĞIŞ ÖLÇÜMLERİ

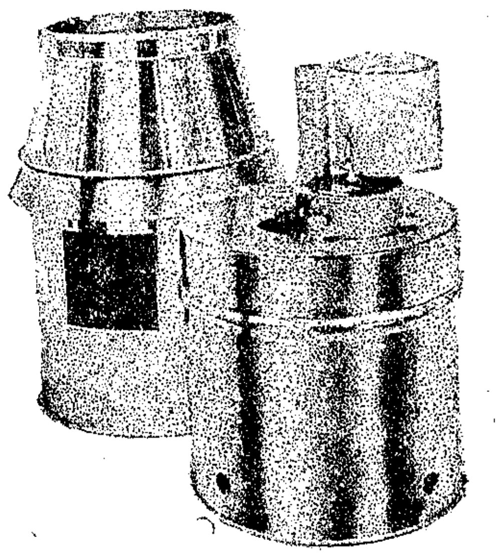
Atmosferden sıvı ve katı şeklinde yeryüzüne düşen yağmur ve karın ikisine birden yağış denir. Yağış plüviyometrelerle, yerdeki kar derinliği eşel veya kar bastonu ile ölçülür. (Şekil 12-6) ve (Şekil 12-7)'de görüldüğü gibi plüviyometre silindir şeklinde ve ağzı açık bir kaptır. Ulaşım güçlüğü olan bölgelerde mevsimlik yağış miktarı totalizatörlerle (dağ plüviyometresi) ölçülür. Yağış zamanla çok değişiklik gösterdiğinden yazıcı aletlerle de (plüviyograf) sürekli olarak ölçülür. İklim özelliklerine

Şekil 12.6 — Plüviyometre (Ağzı 200 cm², yüksekliği 100 cm, DMİ standart plüviyometresi)



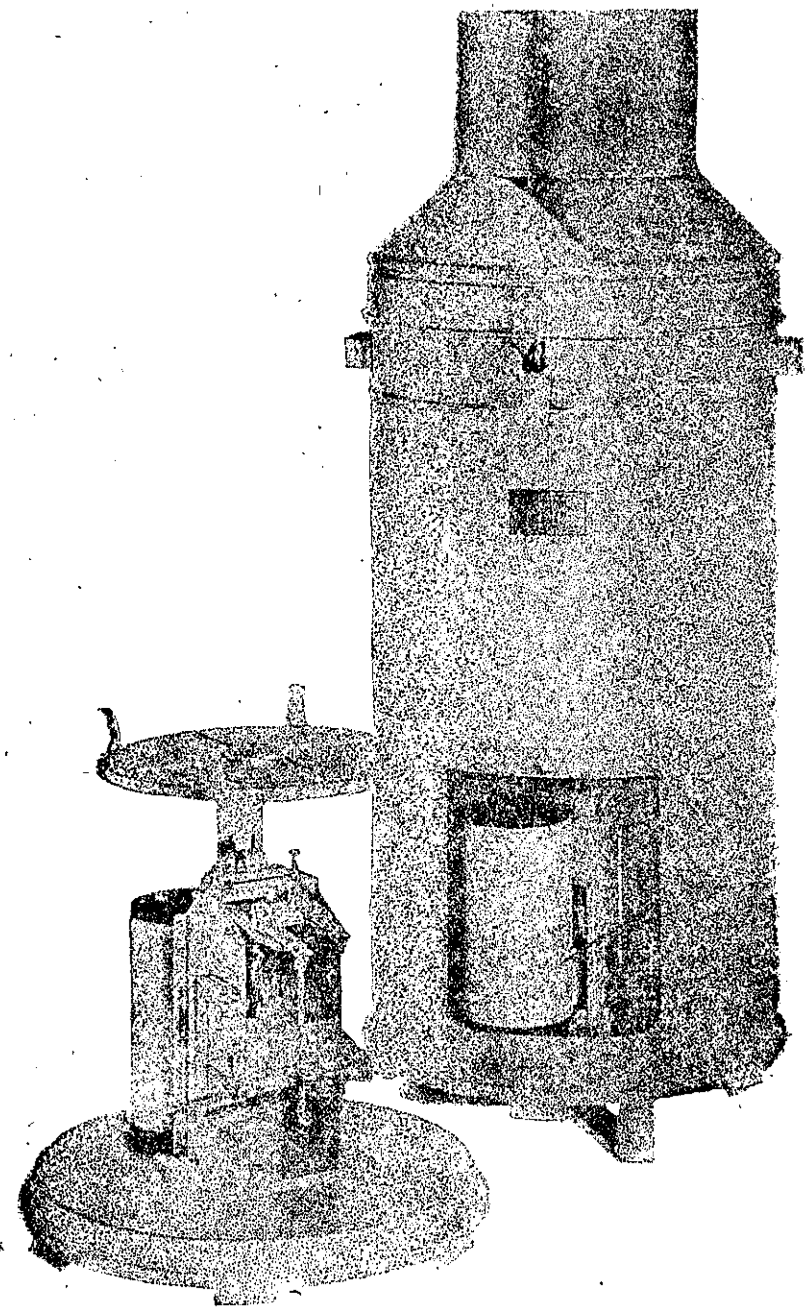
Şekil 12.7 — Dünya Meteoroloji Örgütünün Standart Plüviyometresi (Alter tipi siperli, yüksekliği 75 cm, DMİ)

göre geliştirilmiş şamandralı veya tartılı plüviyograf tipleri kullanılır. (Şekil 12-8)'de şamandralı ve (Şekil 12-9)'da tartılı plüviyograf göste-



Şekil 12.8 — Şamandralı Plüviyograf (Casella)

rilmiştir. Plüviyograf kağıt şeritlere kayıt yapar, kağıt şerit yerine bazan delgeli kağıt bant veya manyetik bant da kullanılır. Telemetre (telli veya telsiz) sistemi aracılığıyla plüviyograf ölçüleri otomatik olarak uzak mesafelere gönderilebilir.



Şekil 12.9 — Tartılı Plüviyograf (Belfort)

Delgili bant veya manyetik banda kaydedilen yağış bilgileri doğrudan bilgisayara verilerek analizleri yapılabilir. Yağışın zaman ve alan dağılımı meteorolojik radarla da tesbit edilebilir. Su projelerinin ekonomik şekilde işletilmesi ve taşkınların ihbarı için meteorolojik radarla ölçülen yağış bilgileri çok kullanışlıdır.

Yağış, belli bir zaman içinde yatay bir yüzey üzerine düşen ve düştüğü yerde biriktiği varsayılan su sütunu yüksekliği ile belirtilir ve birimi milimetre'dir.

Yağışın meydana gelebilmesi için atmosferin o bölgesinde yeter ölçüde su buharı bulunması, havanın soğuması, yoğunlaşma olması ve yeter irilikte damlalar oluşması gibi koşulların bir arada gerçekleşmesi gerekir.

Atmosferde hava yükseldikçe soğur. Havanın yükselmesi çeşitli nedenlerle olur ve yükselmenin nedenine göre yağış konvektif yağış, cephesel yağış ve orografik yağış şeklinde üçe ayrılır.

Bir bölgedeki ortalama yağış yüksekliği, noktasal yağış değerlerinden aritmetik, Thiessen (Tissen) veya izohiyet (eş yağış) yöntemi ile hesaplanır.

Ülkemizde yağış ölçümleri (1524) adet meteoroloji istasyonda yapılır. Bunların (1158) tanesi Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ), (340) tanesi diğer kamu kuruluşları tarafından çalıştırılır. Meteoroloji istasyonlarında DMİ (39) totalizatör, (251) plüviyograf, (6) meteorolojik radar ve DSİ (190) plüviyograf çalıştırır. Ülkemizde ortalama (512 km²)'lik alana (1) plüviyometre düşer. DMİ (742) yağış, (175) küçük klima ve (241) büyük klima istasyonu çalıştırır.

Ülkemizdeki meteoroloji istasyonlarının deniz seviyesinden itibaren kotlara ve alanlara göre dağılımı (Tablo 12-1)'de verilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere meteoroloji istasyonlarının kotlara göre dağılımı düzgün değildir.

Tablo 12.1 — Türkiyedeki Meteoroloji İstasyonlarının Kotlara Göre Dağılımı

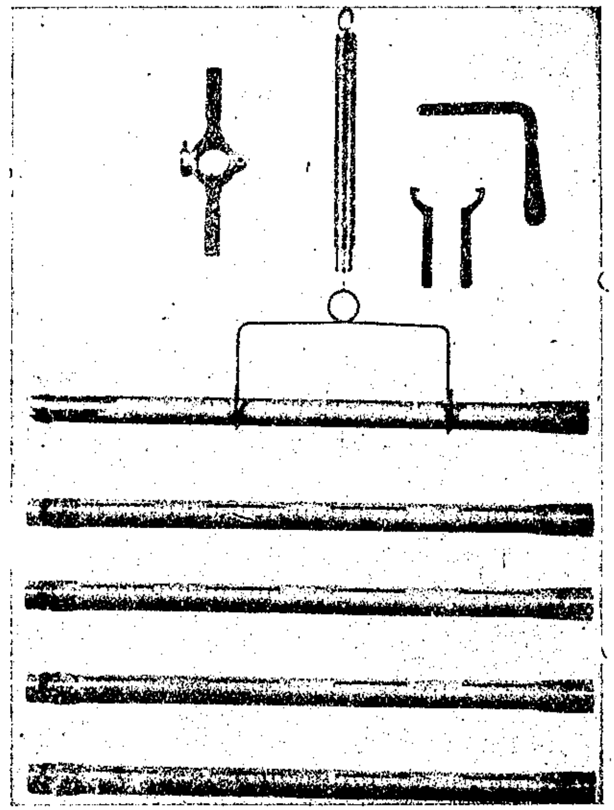
Kot (m)	Kotlar arası alan (km²)	Kotlar arasındaki istasyon sayısı	Bir istasyona düşen ortalama alan (km²)
0—500	136601	514	266
501—1000	208414	415	502
1001—1500	238075	445	535
1501—2000	120990	128	945
2001 den üstü	76496	22	3477
TOPLAM	780576	1524	Ort.: 512

8) KAR ÖLÇÜMLERİ

Soğuk bölgelerde yerüstü ve yeraltı suyunun önemli bir kısmı kar erimesinden oluşur. Bundan dolayı kar ölçümleri önem kazanmıştır. Kar derinlik, yoğunluk ve su eşdeğeri ölçümlerinin yapıldığı istasyona kar gözlem istasyonu denir. Kar eridiği zaman oluşacak su sütunun yüksekliğine karın su eşdeğeri denir.

Kar ölçümleri ölçü tüpleriyle ve periyodik olarak (15 gün, 1 ay, mevsim gibi) kış mevsimi süresince yapılır. (Şekil 12.10)'da kar ölçü tüpleri görülmektedir. Kar ölçümünde radyoizotop cihazları ve kar yastıkları da kullanılır, telemetre sistemi aracılığı ile ölçüler uzak mesafelere gönderilebilir.

Kar derinliği bilgileri eşel, kar direği, veya yer ve hava fotoğraflarından elde edilir. Kar örtü sınırı ise yer ve hava fotoğrafları ile yapay uydu fotoğraflarından saptanır.



Şekil 12.10 — Kar Ölçü Tüpü ve Kantarı

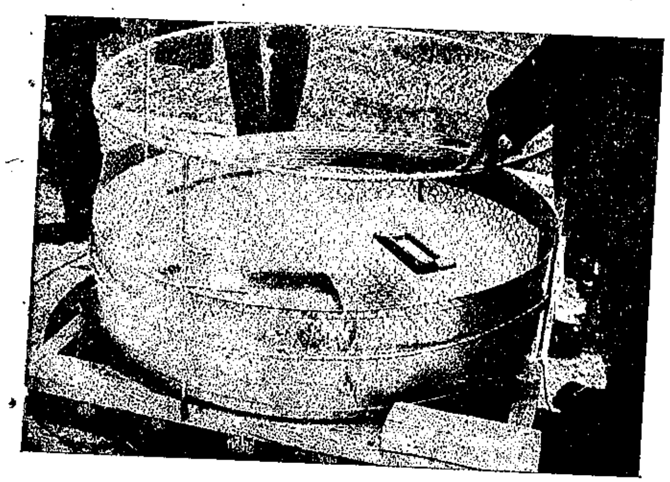
Ülkemizin yüksek kotlardaki alanlarına kış mevsiminde düşen yağış kar şeklindedir. Sahillerin yüksek kısımları, İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerine düşen kar uzun süre toprak üstünde kalır. Toprak üstünde birikmiş karın akarsularımızı besleyen önemli bir su potansiyeli vardır. Bundan dolayı EİE, DSİ, DMİ, Topraksu gibi kamu kuruluşları kar ölçümü yapar.

Ulaşım güçlükleri ve malzeme azlığı nedeniyle ülkemizdeki kar ölçümleri sınırlı bir düzeyde tutulmuştur. Hidrolojik anlamda kar ölçümleri ancak EİE ve DSİ tarafından yapılmaktadır. DSİ'de ölçümler Aralık-Mayıs ayları arasında (15) günde bir, EİE'de Şubat-Mayıs ayları arası ayda bir yapılır. DMİ meteoroloji istasyonlarından bir kısmında kış mevsimi başlangıcından itibaren haftada (3) gün yalnız kar yoğunluğu ölçülür. Ülkemizde ilk kar gözlem istasyonları 1963 yılında açılmıştır. EİE (21) ve DSİ (109) kar gözlem istasyonu çalıştırır.

9) BUHARLAŞMA ÖLÇÜMLERİ

Yeryüzündeki su, buharlaşma ve terleme yoluyla atmosfere gider. Su yüzü ile hava arasında sürekli su molekülü alış-verişi vardır. Eğer su yüzünden havaya giden su molekül sayısı havadan su yüzüne gelen su molekül sayısından büyük ise buharlaşma olur.

Su yüzünden buharlaşma (Şekil 12.11)'de görüldüğü gibi yuvarlak tavalarla ölçülür. Kare tava, evaporimetre ve atmometrelerle de buharlaşma ölçümleri yapılır. Bu aletler meteoroloji istasyon parkı içinde belirli bir yere konur. Toprak yüzünden buharlaşma (Evapotranspirasyon = Buharlaşma + Terleme) lizimetrelerle ölçülür. DMİ (109) ve (DSİ) (158) meteoroloji istasyonunda buharlaşma tavası çalıştırır. Topraksu'nun (6) tane lizimetre istasyonu vardır.



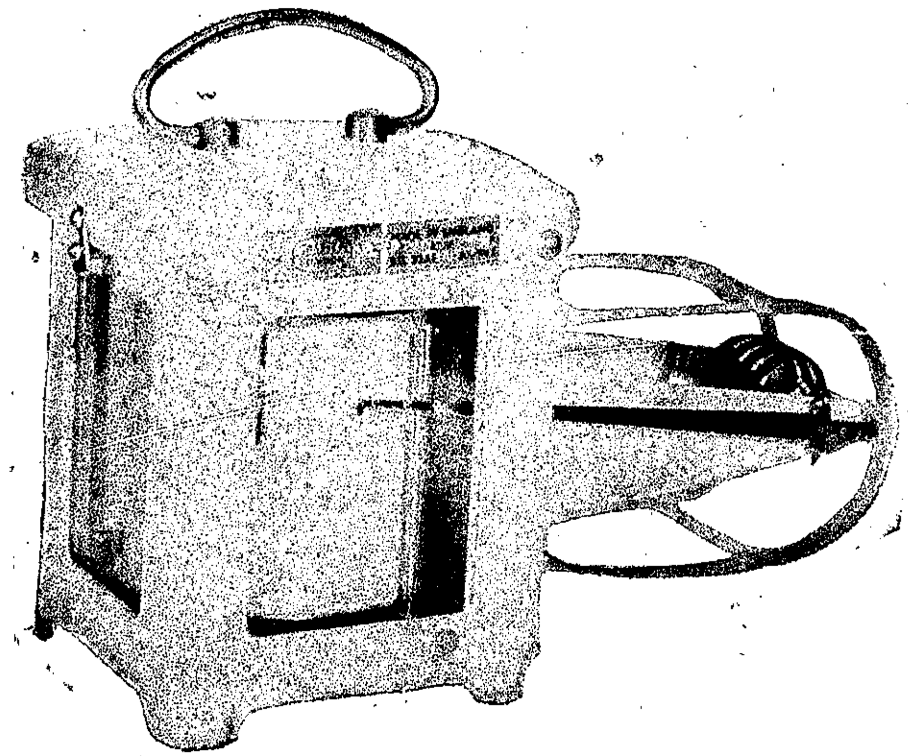
Şekil 12.11 — Yuvarlak Buharlaşma Tavası (DMİ)

Su yüzünden buharlaşma su dengesi, enerji dengesi, kütle transferi yöntemleri veya amprik formüllerle hesaplanabilir.

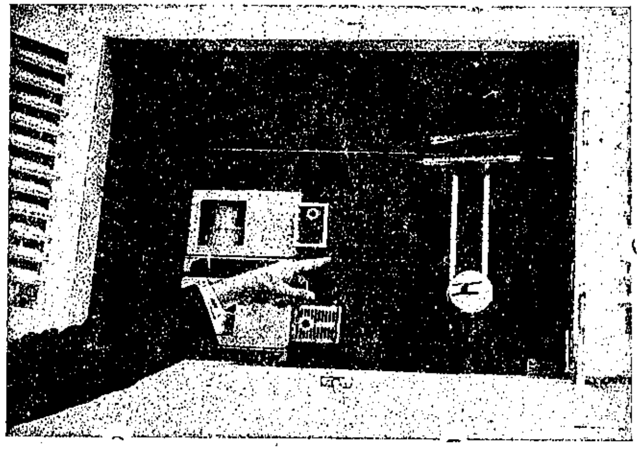
Evapotranspirasyon hesabı için geliştirilmiş çeşitli amprik formüller vardır. Yer yüzüne düşen yağışın yarıdan çoğu evapotranspirasyonla atmosfere döner.

10) SICAKLIK ve DİĞER METEOROLOJİK PARAMETRELERİN ÖLÇÜMÜ

Hava sıcaklığı yerden (120 cm.) yüksekte bir siper içine yerleştirilmiş termometre veya termografla ölçülür. (Şekil 12.12)'de termograf ve (Şekil 12.13)'de termometre siperi içinde termometreler, psikrometre, termograf ve higrograf görülmektedir. DMİ (258) ve DSİ (57) meteoroloji istasyonunda termograf çalıştırır.

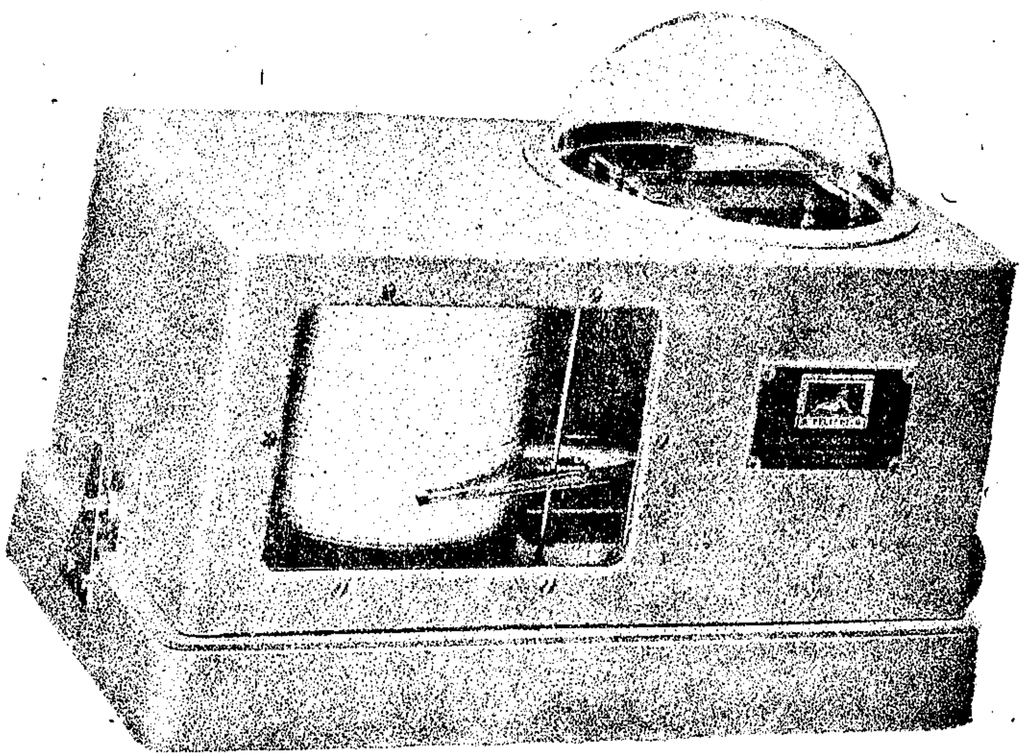


Şekil 12.12 — Termograf (Casella)



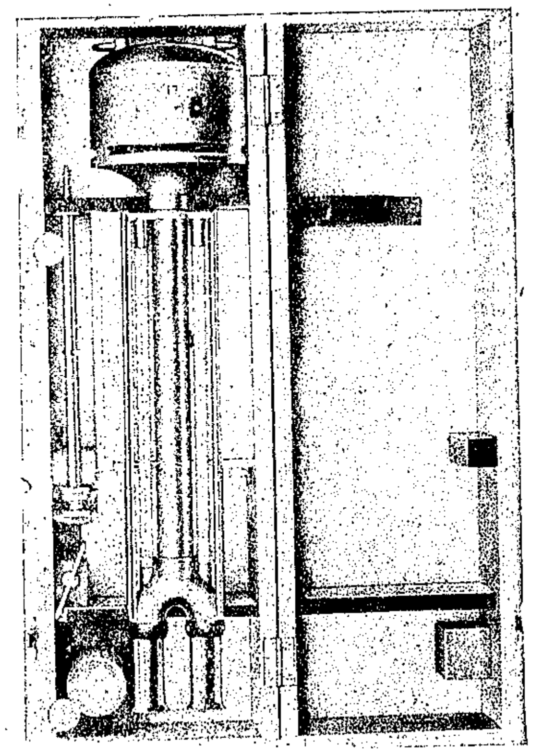
Şekil 12.13 — Termometre Siperi İçi (DMİ)

Güneşten gelen enerji aktinometre (solarimetre, pireliyometre) veya (Şekil 12.14)'de gösterilen aktinograf (pireliyograf) ile ölçülür. DMİ (66) ve DSİ (33) meteoroloji istasyonunda aktinograf çalıştırır.

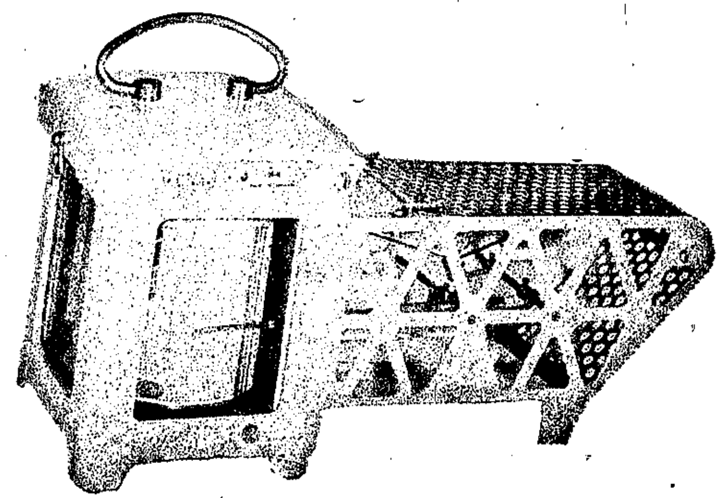


Şekil 12.14 — Aktinograf (Belfort)

Hava nemi higrometre, psikrometre veya higrofraf ile ölçülür. Havada belirli bir sıcaklıktaki buhar basıncının (mutlak nem) aynı sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına oranına bağıl nem denir. (Şekil 12.15)' de Assman psikrometresi, (Şekil 12.16)'da higrograf görülmektedir.

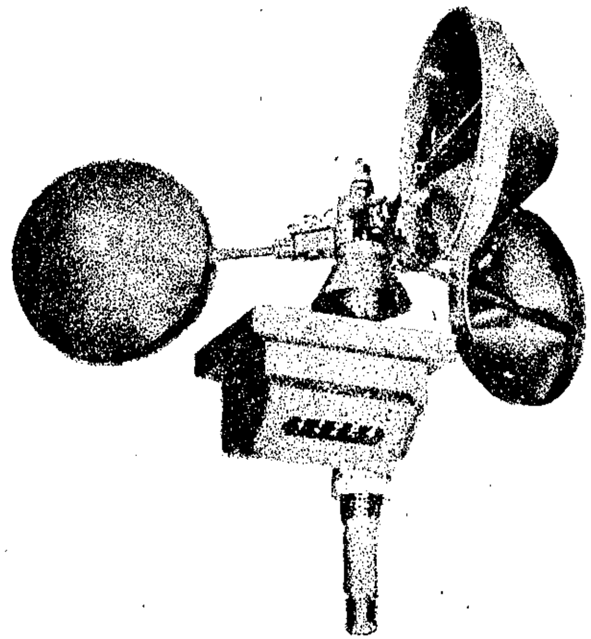


Şekil 12.15 — Assmann Psikrometresi (Siap)



Şekil 12.16 — Saç Higrograf (Casella)

Rüzgar hızı (Şekil 12.17)'de gösterildiği gibi anemometrelerle ölçülür. Yazıcı tipte olanlara anemograf denir.



Şekil 12.17 — Kepçeli Anemometre

Toprak nemi gravimetrik yöntemle veya nötron ve gama cihazları ile ölçülür.

Süzülme infiltrometre ile ölçülür veya süzülme formülünden hesaplanır.

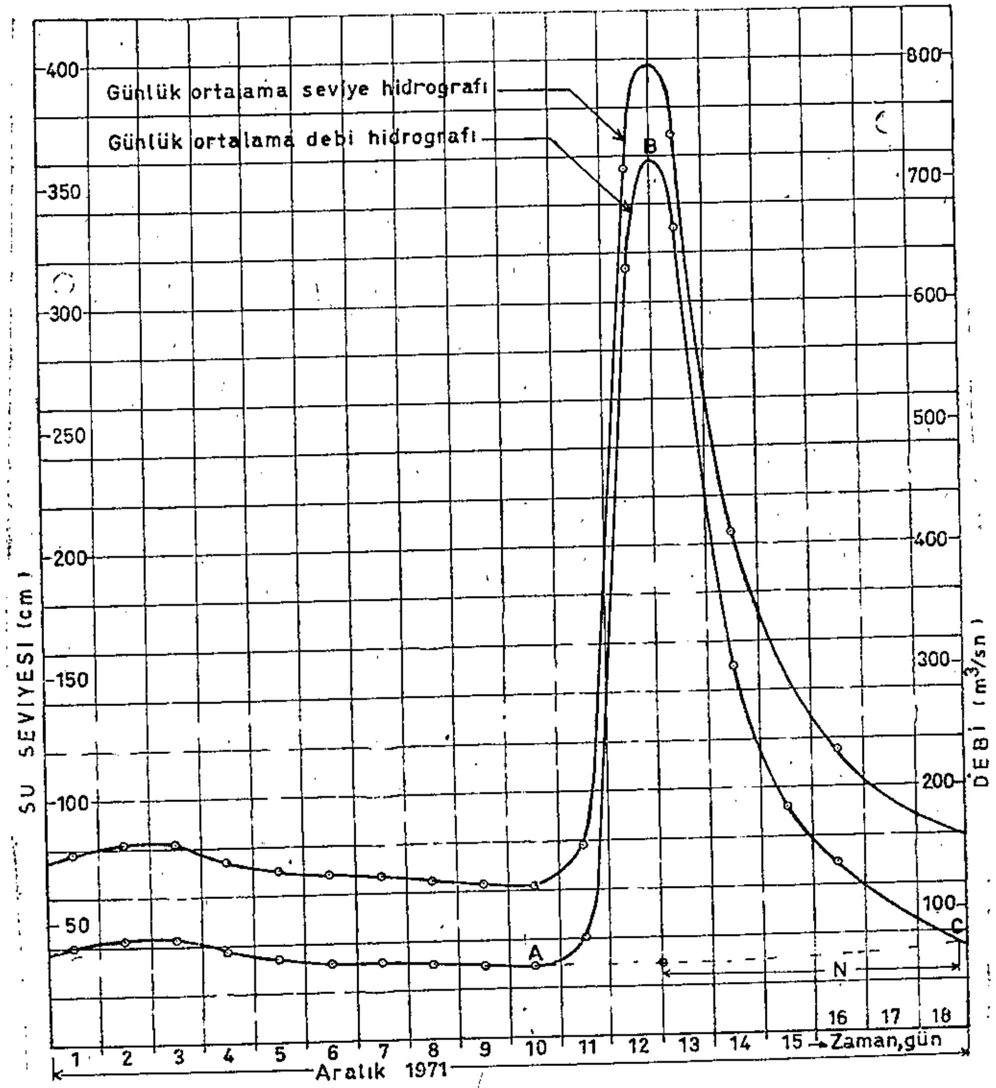
Yüksek atmosferdeki sıcaklık, nem, rüzgar, basınç gibi meteorolojik parametrelerin ölçümleri pilot balon ve radyozonda cihazları ile yapılır. Son yıllarda yapay uydulardan da bu parametrelerin ölçüm bilgileri alınabilmektedir.

DMİ meteoroloji istasyonlarından (3) tanesinde pilot balon, (6) tanesinde radyozonda ve (1) tanesinde yapay uydu fotograf alıcı (APT) cihazı çalıştırılır.

11) HİDROMETRİK ÖLÇÜMLER

Hidrolojinin akım ölçümleri ile ilgili bölümüne hidrometri denir. Akarsu, göl ve yapay göllerdeki su seviyesi, debi, sediment (rusubat), su kalitesi gibi parametre değerlerinin ölçüldüğü istasyonlara hidrometri istasyonu denir. Akım ölçüsü ile akarsuyun bir kesitinden geçen suyun seviyesi veya debisinin zamanla değişimi bulunur. Su seviyesi veya debi zamana karşı noktalandığında elde edilen eğriye seviye veya debi hidrografı denir. Su seviyesi bir karşılaştırma düzlemine göre su yüzünün kotudur. Birim zamanda akarsuyun belirli bir kesitinden geçen su hacmine debi denir ve ortalama hız ile kesit alanının çarpımına eşittir. O halde debiyi bulabilmek için hız ve kesit ölçümleri yapmak gerekir. Hız ve kesit ölçümlerini sürekli bir şekilde yapmak zordur. Halbuki akarsuların su seviyelerini ölçmek kolaydır. Bundan dolayı akarsuların akım verileri hidrometri istasyonlarındaki sürekli su seviye gözlemleri ve periyodik debi ölçümlerinden (genellikle ayda 1 veya 2 ölçü) elde edilir. Hidrometri istasyon yerindeki su seviyesi ile debi arasındaki bağıntı belirlenir ve bu bağıntı yardımı ile su seviyeleri debiye dönüştürülür. Su seviyesi ile debi arasındaki ilişkiye anahtar eğrisi denir. Anahtar eğrisi lineer ölçekli bir kağıta çizilirse genellikle parabol şeklini alır, logaritmik ölçekli bir kağıtta ise düz bir doğru şeklindedir.

Doğu Akdeniz bölgesindeki Göksu nehri üzerinde (1961) yılında açılmış ve (10065 km^2) yağış alanlı (1714) Karahacılı EİE hidrometri istasyonunun (Şekil 12.43) hidrometrik ölçümleri örnek olarak verilmiştir. İstasyonun (1 - 18 Aralık 1971) tarihleri arasındaki günlük ortalama su seviye ve günlük ortalama debi hidrografları (Şekil 12.18)'de gösterilmiştir. Aynı istasyonda (13 Nisan 1976) günü yapılmış debi ölçüsü notları (Tablo 12.2)'de ve teleferikten ölçülmüş su derinlik ve hız değerleri (Tablo 12.3)'de verilmiştir. (1714) Karahacılı hidrometri istasyonunun lineer ve logaritmik ölçekli kağıtta çizilmiş anahtar eğrileri (Şekil 12.19) ve (Şekil 12.20)'de gösterilmiştir. Şekiller üzerindeki noktalar yalnız (1976 - 1978) yıllarında yapılmış debi ölçülerini gösterir.



ŞEKİL 12.18 — 1714 Karahacılı Hidrometri İstasyonu Seviye ve Debi Hidrografları

Tablo 12.2 — Debi Ölçüsü Notları

ELEKTRİK İŞLERİ ETÜT İDARESİ
GENEL DİREKTÖRLÜĞÜ
HİDROGRAFİ SERVİSİ

İstasyon No 1714
Ölçü no 9
Hesaplayan F. Nardalı
Kontrol eden S. Orkun

AKIM ÖLÇÜSÜ NOTLARI

İstasyon Göksu N. – KARAHACILI
Tarih 13/Nisan/1976 Gurup Fuat Nardalı – Salih Orkun
Genişlik 82,80 K.Alanı 339.12 m² O.Hız 2.324 m/sec E.sev. 413 cm. Akım 788.256 m³/sec
Metod 02/08 Şakul ad. 21 Sev. değişimi –14 cm 1.50 saatte ağırlık 100 LB
Metod ems. 100 yatay sapma em. 100 ağr. em. — Muline no 1210 Gurley

Eşel okumaları, cm				
Zaman		limnigraf	iç eşel	Dış eşel
13⁰⁰		421	421	421
14⁵⁰		409	409	409
Hesaplanan sev.				
Seviye düzeltmesi				
Doğru art. seviye				

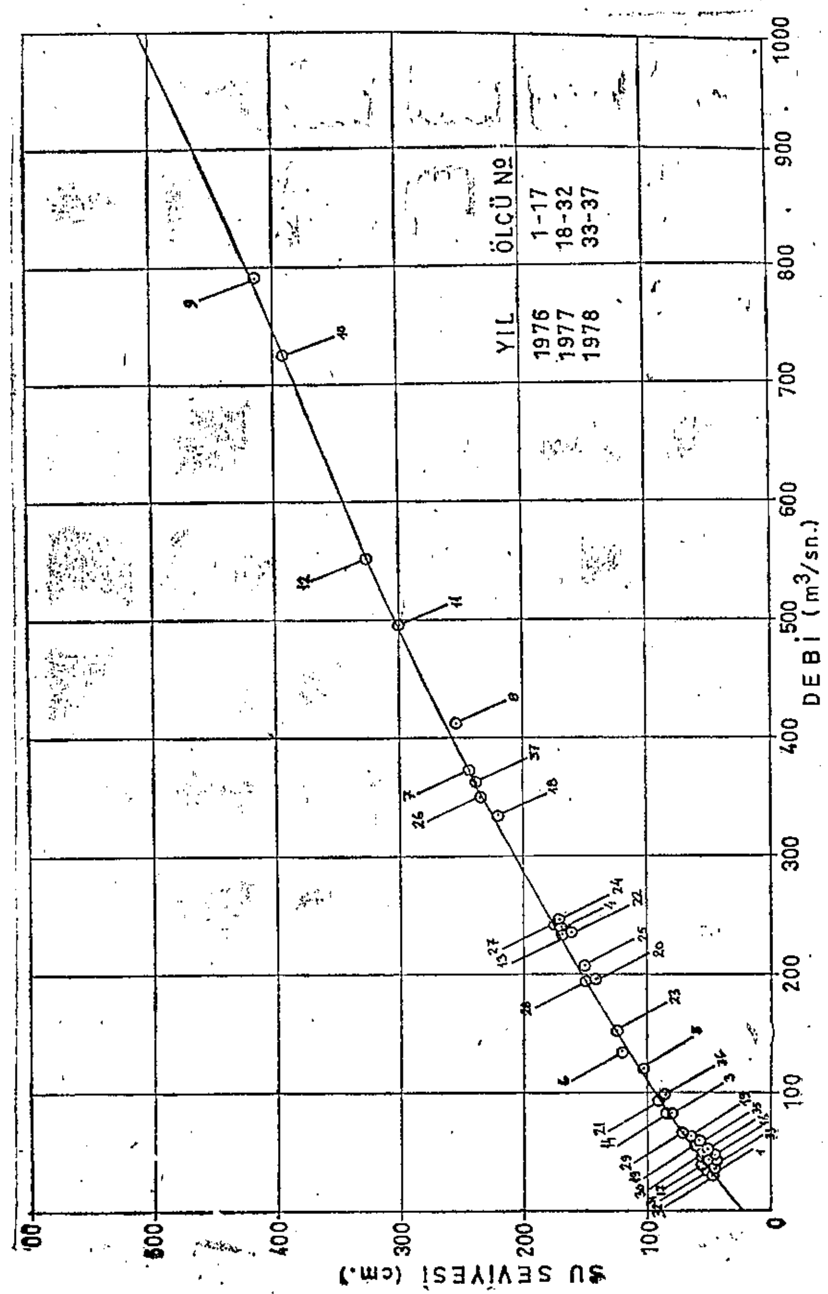
Ayar tarihi ______ Ayar sapa veya 100 LB ağırlığa göre yapılmıştır. Muline askı ağırlığı tabanından 30 cm yukarıdadır. Muline iyice çekik vaziyette askı noktası ile ağırlık tabanı arasındaki mesafe 44 cm. Askı telleri kontrol edildi, Dönüş testi ölçüden ev. iyi ölçüden sonra iyi, ölçü eğriye konunca ______ tarihli anahtardan % ______ saptı. Ölçü sapla, askıda, buzda kayıkla, köprünün membaında, mansabında kenarında, eşelin 000 m veya km altında, üstünde ve telefterikle yapıldı. Ağırlıklı eşel tabanı, zinciri kontrol edilip ______ bulundu ve ______ tarihinde ______ düzeltildi.
Düzeltme ______
Röper kontrol ______

Aşağıdaki şartlar dahilinde ölçü mukemmel (% 2), iyi (%5), orta (% 8), kifayetsiz (% 8 den fazla) olarak değerlendirildi. Kesit vaziyeti. Çakıl – mil
Akım vaziyeti Düzgün Hava durumu P. Bulutlu
Diğerleri Su bulanık Hava 19 °C
Eşel iyi Su 10 °C
/ /197 , Limnigraf kağıdı alındı / /197 girişler temizlendi Alt ______ Üst ______
Rasıt kontrolu ______
Kontrol ______
Mülahazat 12/Nisan/1976 günü saat 21³⁰ da seviye 483 cm. olarak tesbit edildi.
Sıfır akımda eşel seviyesi ______ cm

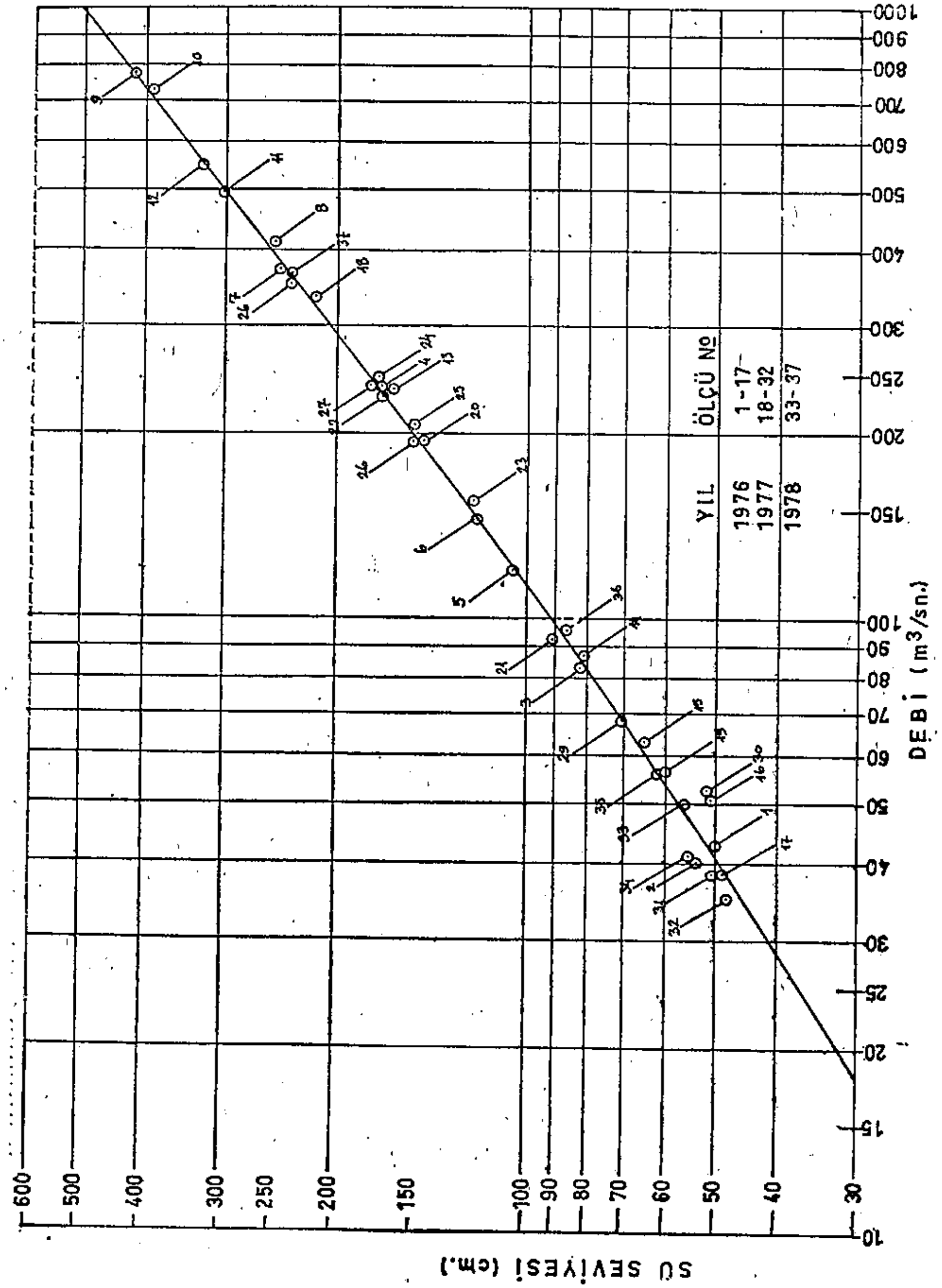
OM/21 05 003/122

Tablo 12.3 — Teleferikten Debi Ölçümü

Başlangıca mesafe	θ Dikey sapma açısı	H Su yüzüne olan dikey mesafe	Δ KURU Kuru düzeltme miktarı	L KURU Kuru uzunluk	L Toplam Toplam uzunluk	L ISLAK Islak uzunluk	Δ ISLAK Islak düzeltme miktarı	D Hakiki su derinliği	Hız alınma derinliği	Devir adedi	Zaman (saniye)	Hız: Ölçülen noktada	Hız: Şakulde ortalama	Şakuller arası genişlik	Yatay sapma düzeltme oranı	Kesit alanı	Akım
m	derece	m	m	m	m	m	m	m			sec	m/sec	m/sec	m		m²	m³/sec
			Sağ Sahil					Saat	13	00		H = 421 cm.					
7.								000									
9.	0	5.54			7.09			1.55		Akım yok				2.50		3.88	
12.	0	5.32			8.78			3.46		20	87	0.163	0.140	3.		10.38	1.453
										10	64	0.116					
15.	0	5.12			9.09			3.97		70	63	0.753	0.771	3.		11.91	9.183
										70	60	0.789					
18.	0	4.94			8.85			3.91		150	71	1.440	1.491	3.		11.73	17.489
21	4°	4.79	01	4.80	8.84	4.04	000	4.04		200	79	1.718	1.937	3.		12.12	23.476
										200	63	2.155					
24.	6°	4.68	02	4.70	8.72	4.02	01	4.01		200	71	1.912	2.204	3.		12.03	26.514
										250	68	2.495					
27.	8°	4.58	04	4.62	8.82	4.20	01	4.19		200	70	1.939	2.295	3.		12.57	28.848
										250	64	2.651					
30.	8°	4.48	04	4.52	8.68	4.16	01	4.15		200	70	1.939	2.360	4.50		18.68	44.085
										250	61	2.781					
36.	8°	4.31	04	4.35	8.88	4.53	01	4.52		250	67	2.532	2.935	6.		27.12	79.597
										300	61	3.337					
42.	10°	4.22	06	4.28	8.88	4.60	02	4.58		250	73	2.324	2.753	6.		27.48	75.652
										300	64	3.181					
48.	10°	4.18	06	4.24	8.98	4.74	02	4.72		250	73	2.324	2.616	6.		28.32	74.085
										300	70	2.908					
54.	10°	4.18	06	4.24	8.95	4.71	02	4.69		200	65	2.008	2.391	6.		28.14	67.283
										250	63	2.693					
60.	10°	4.26	06	4.32	9.06	4.74	02	4.72		250	73	2.324	2.682	6.		28.32	75.954
										300	67	3.039					
66.	10°	4.40	07	4.47	9.21	4.74	02	4.72		250	67	2.532	2.857	4.50		21.24	60.683
										300	64	3.181					
69.	10°	4.48	07	4.55	9.39	4.83	02	4.81		250	70	2.424	2.828	3.		14.43	40.808
										300	63	3.231					
72.	10°	4.58	07	4.65	9.68	5.03	02	5.01		250	70	2.424	2.778	3.		15.03	41.753
										300	65	3.132					
75.	8°	4.72	04	4.76	9.67	4.91	02	4.89		250	65	2.610	2.759	3.		14.67	40.475
										300	70	2.908					
78.	8°	4.87	05	4.92	9.82	4.90	02	4.88		250	68	2.495	2.514	3.		14.64	36.805
										250	67	2.532					
81.	6°	5.04	03	5.07	9.75	4.68	01	4.67		200	70	1.939	2.101	3.		14.01	29.435
										200	60	2.262					
84.	2°	5.28			8.84			3.56		90	61	1.003	1.273	3.		10.68	13.596
										150	66	1.542					
87.	0	5.48			6.08			0.60		60	66		0.622	2.90		1.74	1.082
89.80								000								339.12	788.256
			Sol sahil					Saat	14	50		H = 407 cm.					



Şekil 12.19 — Karahaçlı Hidrometri İstasyonu Anahtar Eğrisi



Şekil 12.20 — Karahacılı Hidrometri İstasyonu Anahtar Eğrisi

(1714) Karahacılı hidrometri istasyonunda (1972) su yılında gözlenmiş günlük ortalama su seviyeleri anahtar eğrisi yardımı ile (Tablo 12.4)'de görüldüğü gibi günlük ortalama debiye dönüştürülmüştür. (Tablo 12.4) "EİE 1972 Su Yılı Akım Neticeleri" kitabının bir sayfasıdır ve bilgisayarda hesaplanmıştır. (1972) su yılı (1 Ekim 1971) ile (30 Eylül 1972) tarihleri arasındaki bir yıllık aralığa denir.

12) SU SEVİYE ÖLÇÜMLERİ

Akarsu ve göllerin belirli bir kesimindeki su seviyesinin zamanla değişimi yazıcı olmıyan ölçekler veya yazıcı ölçeklerle saptanır.

Yazıcı olmıyan ölçeklere eşel veya limnimetre de denir. Hidrometri istasyonuna tesis edilen eşellerdeki su seviyesi genellikle günde 2 kez saat (0800) ve (1600)'da gözlemci tarafından okunur. Bir gün önce saat (1600)'daki seviye (a), o günkü seviyeler (b) ve (c), bir gün sonra (0800)'deki seviye (d) ise günlük ortalama seviye,

$$h_{ort} = \frac{a}{12} + \frac{5\,(b+c)}{12} + \frac{d}{12}$$

formülünden hesaplanır.

Yazıcı ölçeklere limnigraf da denir. Su seviye değişimi durgun suda yüzen bir yüzgeç (şamandra) yardımı ile limnigrafa iletilir. Su seviyesi saat ile döndürülen kağıt şerit üzerine sürekli bir şekilde kaydedilir.

(Şekil 12.21)'de eşel, kule limnigraf ve teleferik tesisleri olan bir hidrometri istasyonu gösterilmiştir.

Limnigrafların çeşitli tipleri vardır. (Şekil 12.22)'de A. Ott ve (Şekil 12.23)'de Stevens tipi limnigraf gösterilmiştir. A. Ott ve Stevens tipi limnigraflar EİE ve DSİ hidrometri istasyonlarında çalıştırılır. Limnigraf yüzgeçi çelik saç veya beton kule (boru) içindeki durgun suda yüzer ve yazıcı alet borunun üst kısmına bağlanır.

Tablo 12.4 — Debi Tablosu

17 - KÜTEFERRİK DOĞU AKDENİZ SULARI
1714 - GÖKSU - KARAHACILI

MEVKİİ : (33° 48' 57" D - 36° 24' 09" K) Silifke - Mut asfaltının, Silifke'den itibaren 15.Km.sindeki köprüdedir.

YAĞIŞ ALANI : 10065.2 Km² TAKRİBİ RAKIMI : 24 m.

RASAT SÜRESİ : 1.Haziran.1961 - 30.Eylül.1972

ORTALAMA AKIMLAR : Rasat süresinde 127.7?? m³/sn. (12 yıllık) 1972 Su yılında 104.?? m³/sn.

AZAMİ VE ASGARİ AKIMLAR 1972 Su yılında azami akım : 938. m³/sn. (13.12.1971)
1972 Su yılında asgari akım : 40.4 " (1.9.1972)
Rasat süresinde azami akım : 1650. " (19.12.1962)
Rasat süresinde asgari akım : 38.0 " (9.9.1964)

SEVİYE ÖLÇEĞİ : Eşel ve Limnigraf.

DÜŞÜNCELER : Akım durumu iyi. Yıl içinde 3 ayrı anahtar eğrisi kullanılmıştır. 8.10.1971 ile 24.10.1971, 4.11.1971 ile 21.11.1971, 22.12.1971 ile 27.12.1971, 17.2.1972 ile 25.2.1972, 1.4.1972 ile 19.4.1972, 19.5.1972 ile 30.5.1972, 1.9.1972 ile 30.9.1972 günleri arasında çift tatbik edilmiştir.

13. Anahtar eğrisi (Seviyeler Cm. - Akımlar m³/Sn. dir.)

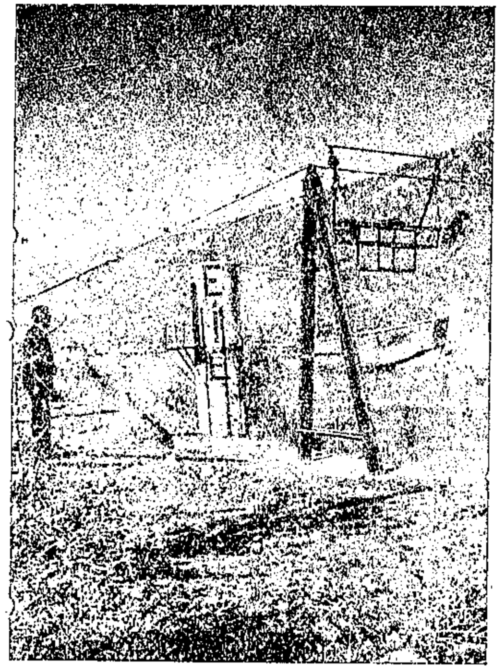
Seviye	Akım	Seviye	Akım
40	32.5	100	115.
50	42.5	200	290.
60	55.0	300	486.
70	69.0	400	718.
80	83.5	500	968.

AKIMLAR 1 EKIM 1971'DEN 30 EYLÜL 1972'YE KADAR VE SANİYEDE METRE-KÜP OLARAK

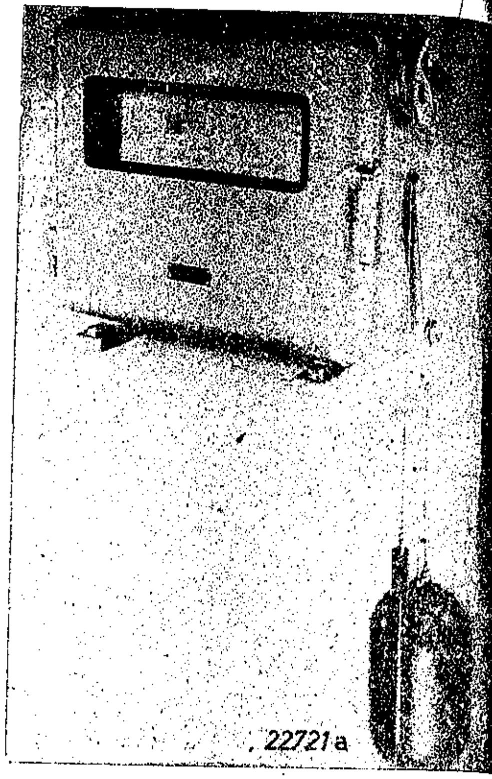
GUN	EKIM	KASIM	ARALIK	OCAK	SUBAT	MART	NISAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AGUSTOS	EYLUL
1	43.1	47.6	79.7	64.3	61.6	103.	315.	*305.	97.5	57.8	49.6	42.5
2	43.1	47.6	85.5	62.9	61.6	101.	330.	368.	94.4	57.8	47.1	42.5
3	43.1	47.6	85.5	62.9	64.3	108.	330.	313.	89.7	56.4	47.1	41.5
4	44.0	47.6	73.9	61.6	64.3	124.	294.	257.	91.3	56.4	45.9	41.5
5	44.0	47.6	66.9	64.3	61.6	144.	*257.	226.	91.3	55.0	44.8	40.4
6	44.0	47.6	64.1	62.9	60.2	153.	258.	*206.	89.7	55.0	44.8	40.4
7	53.5	47.6	62.8	61.6	60.2	175.	*279.	192.	85.1	55.0	*43.6	40.4
8	102.	47.6	60.0	60.2	57.4	226.	282.	181.	80.6	55.0	43.6	41.5
9	71.0	48.8	58.6	60.2	57.4	249.	303.	178.	79.2	55.0	43.6	41.5
10	58.6	47.6	*57.3	60.2	58.8	235.	416.	167.	82.1	*56.4	42.5	40.4
11	53.5	*47.6	79.7	60.2	58.8	230.	426.	159.	88.2	57.8	42.5	40.4
12	52.3	47.6	629.	58.8	60.2	239.	*398.	154.	92.8	59.2	42.5	40.4
13	51.1	47.6	661.	60.2	61.6	244.	382.	149.	97.5	56.4	42.5	40.4
14	50.0	47.6	300.	60.2	69.8	233.	*388.	141.	86.6	53.6	42.5	*40.4
15	48.8	48.8	184.	*60.2	133.	224.	400.	137.	80.6	52.3	45.9	40.4
16	48.8	48.8	138.	60.2	242.	206.	449.	134.	77.7	50.9	55.0	41.5
17	47.6	47.6	117.	61.6	220.	*212.	*364.	131.	73.4	49.6	57.8	40.4
18	47.6	48.8	104.	61.6	151.	228.	296.	126.	70.5	49.6	55.0	40.4
19	46.4	48.8	94.9	58.8	*126.	239.	267.	120.	69.0	48.2	48.2	40.4
20	46.4	48.8	87.2	60.2	114.	*230.	249.	117.	67.6	48.2	45.9	40.4
21	46.4	48.8	82.5	64.3	106.	221.	244.	112.	66.2	48.2	44.8	40.4
22	46.4	60.0	99.6	65.7	101.	219.	246.	107.	*64.8	48.2	43.6	40.4
23	*46.4	79.7	94.9	64.3	98.0	217.	226.	102.	64.8	48.2	42.5	40.4
24	46.4	76.8	82.5	61.6	96.5	*219.	203.	*97.5	64.8	47.1	42.5	41.5
25	46.4	62.8	76.9	61.6	96.5	226.	194.	94.4	64.8	45.9	41.5	42.5
26	46.4	68.2	74.0	64.3	96.5	226.	188.	94.4	63.4	45.9	41.5	41.5
27	46.4	75.4	71.2	65.7	96.5	221.	185.	94.4	62.0	45.9	41.5	41.5
28	47.6	69.6	68.4	64.3	98.0	215.	178.	91.3	59.2	45.9	41.5	41.5
29	47.6	79.7	67.0	64.3	98.0	235.	174.	89.7	59.2	45.9	41.5	40.4
30	47.6	75.4	67.0	62.9	----	262.	219.	94.4	57.8	53.6	41.5	40.4
31	47.6	----	65.7	61.6	----	*301.	----	102.	----	50.9	45.9	----
TOPLAM	1554.1	1655.6	3938.8	1923.7	2730.8	6465.	8729.	4832.1	2311.8	1611.3	1398.7	1228.2
ORTALAMA	50.13	55.19	127.1	62.05	94.17	208.5	291.0	155.9	77.06	51.98	45.12	40.94
LT/SN/KM²	4.98	5.48	12.6	6.16	9.36	20.7	28.9	15.5	7.66	5.16	4.48	4.07
AKIM,MM.	13.3	14.2	33.8	16.5	23.4	55.5	74.9	41.5	19.8	13.8	12.0	10.5
10^6 M³ AKIM	134.	143.	340.	166.	236.	559.	754.	417.	200.	139.	121.	106.

SU YILI (1972) YILLIK TOPLAM AKIM. 3316. MILYON M³, 329. MM, 10.4 LT/SN/KM².

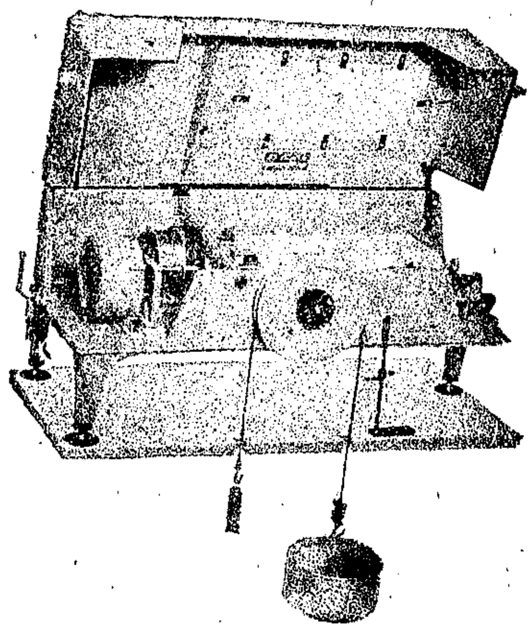
(*) AKIM ÖLÇÜSÜNÜN YAPILDIĞI GÜNLERİ GÖSTERİR.



Şekil 12.21 — Bir Hidrometri İstasyon Yeri Genel Görünüşü

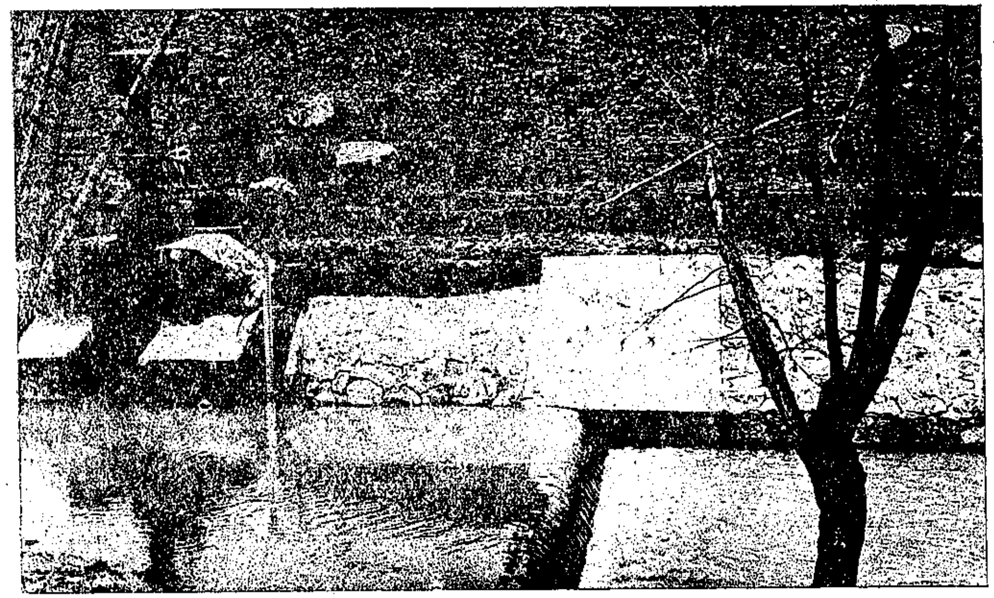


Şekil 12.22 — Limnigraf (AOtt)



Şekil 12.23 — Limnigraf (Stevens)

(Şekil 12.24)'de boru limnigrafı olan bir hidrometri istasyonu gösterilmiştir.



Şekil 12.24 — Boru Limnigraflı ve Eşikli Bir Hidrometri İstasyonu (DSİ)

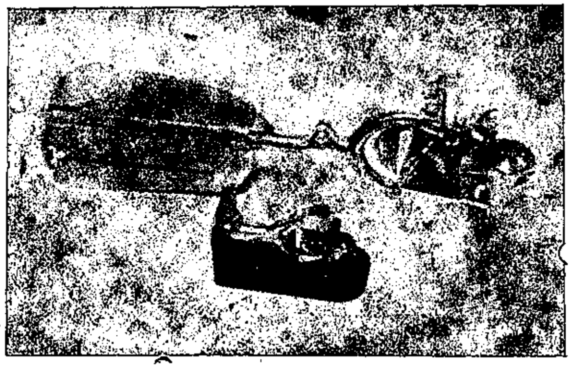
Limnigraflarda kağıt şerit yerine delgili kağıt şerit veya manyetik bant kullanılabilir. Böylece su seviye bilgileri doğrudan bilgisayara verilebilir.

Limnigrafın su seviye ölçüleri telemetre sistemleri aracılığı ile otomatik olarak uzak mesafelere gönderilebilir. Hidrolojik öngörü ve taşkınların önceden haber verilmesi ile ilgili çalışmalarda akarsu su seviyelerinin otomatik bir şekilde belirli merkezlere ulaştırılması çok önemlidir. Su seviyesinin otomatik olarak gönderilmesi için gazlı (basınçlı) limnigraflardan da yararlanılır. Gazlı limnigraflarda basınçlı azot gazı bir boru ucundaki delikten suya kabarcıklar şeklinde bırakılır. Deliğin üstündeki basıncın su seviyesi ile ilişkisinden yararlanılarak su seviyesi ölçülür ve kaydedilir.

13) HIZ ÖLÇÜMÜ

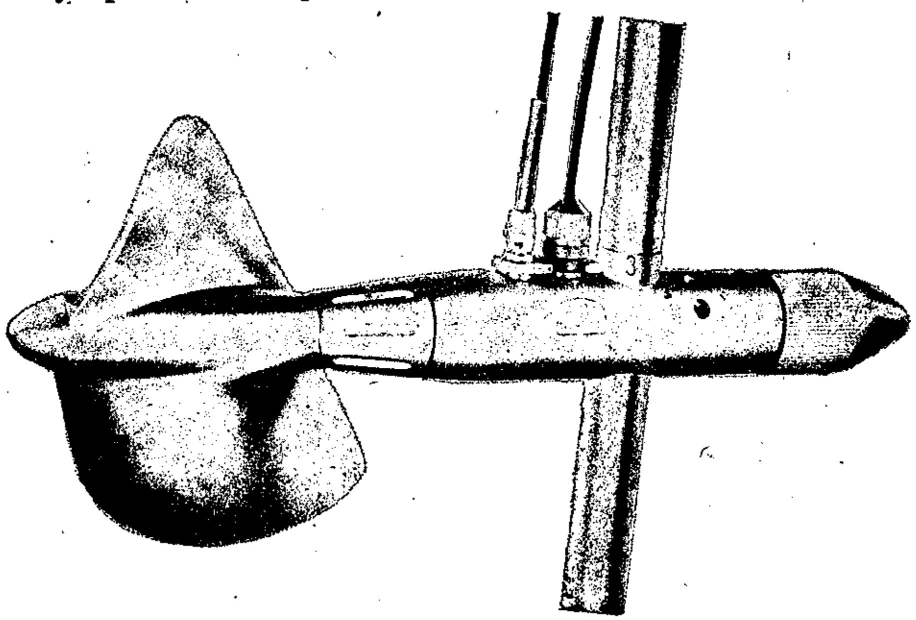
Hidrometri istasyonundaki su hızı ve akarsu enkesiti ölçülerek (Tablo 12.3)'de gösterildiği gibi debi hesaplanır. Su hızı muline ile ölçülür. Mulineler düşey eksenli ve yatay eksenli mulineler şeklinde ikiye ayrılır.

(Şekil 12.25)'de düşey eksenli ve (Şekil 12.26)'da yatay eksenli muline gösterilmiştir. Düşey eksenli mulinelere kepçeli ve yatay eksenli mulinelere pervaneli muline de denir.



Şekil 12.25 — Düşey Eksenli Muline (Gurley)

DSİ ve EİE'de kullanılan mulineler Gurley ve A. Ott firmalarının imal ettiği mulinelerdir. Bundan dolayı uygulamada kepçeli mulinelere Gurley, pervaneli mulinelere A. Ott muline denir. DSİ'de A. ott ve EİE'de Gurley tip mulineler ençok kullanılır.



Şekil 12.26 — Yatay Eksenli Muline (A.Ott)

Mulineleri su akım doğrultusuna yönelten bir kuyruk parçası ile mulinenin su akımı tarafından sürüklenmesini önlemek için ağırlık kullanılır.

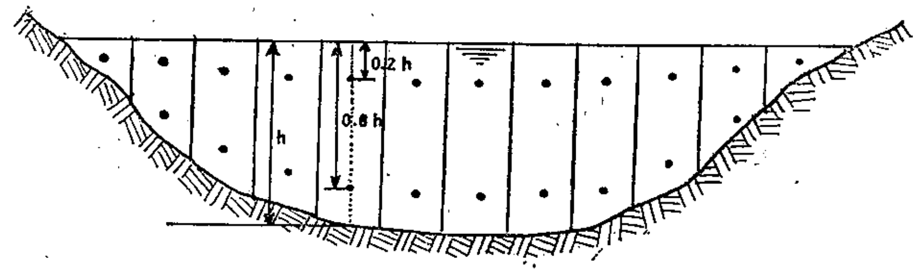
Muline pervane veya kepçesinin dönme hızı su akımının hızı ile orantılıdır. Saniyedeki dönme sayısı (N) ve akım hızı (V) arasındaki ilişki

$$V = a + b\ N$$

şeklindedir. (a) ve (b) katsayılardır ve mulineyi yapan firma tarafından verilir. Yukarıdaki formül genellikle abak şekline getirilir ve pratikte bu abaklar kullanılır.

Mulinelerin kalibrasyonu muline ayar kanallarında yapılır. DSİ Araştırma Dairesi laboratuvarlarında böyle bir kanal vardır.

Hidrometri istasyon kesitinin bir düşeyindeki ortalama hızı bulmak için düşeyin su yüzeyinden (0,2) ve (0,8) katı derinliklerde muline ile hız ölçülür ve bu hızların aritmetik ortalaması alınır. (Şekil 12.27)'de bir hidrometri istasyon kesitinin dilimlere ayrılması ve hız ölçü noktaları



Şekil 12.27 — Akarsu Kesitinin Dilimlere Ayrılması ve Hız Ölçümü

gösterilmiştir. Akarsuyun büyüklüğüne göre dilim sayısı (10 - 30) arasında değişir. Her dilimin ortasından geçen düşeydeki ortalama hız bulunur ve dilim alanı ile çarpılarak dilimin debisi elde edilir. Her dilim için aynı işlemler tekrarlanır ve tüm dilimlerin debileri toplanırsa hidrometri istasyonunun toplam debisi elde edilir.

Küçük ve sığ akarsuların hızı ölçülürken (Şekil 12.28)'de görüldüğü gibi muline bir sap üzerine takılır ve suya girerek ölçü yapılır.

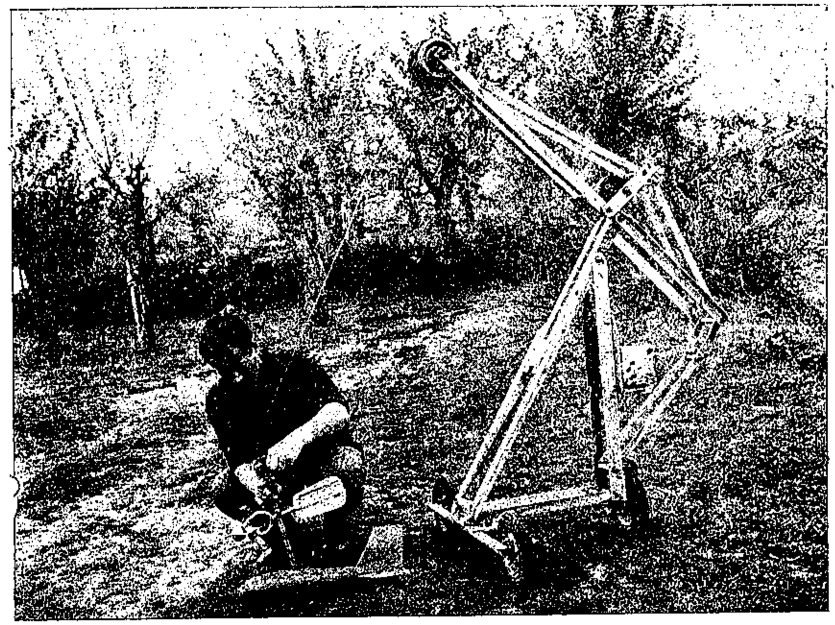
Büyük ve hızlı akarsuların debi ölçümünde lastik veya alüminyum bot, köprü ve kren-çıkrık, teleferik ve çıkrık gibi tesislerden yararlanılır.

(Şekil 12.29)'da lastik botla debi ölçümü gösterilmiştir.

Şekil 12.28 — Suya Girerek ve Sapla Hız Ölçümü (EİE)

Şekil 12.29 — Lastik Bot İle Debi Ölçümü (EİE)

(Şekil 12.30)'da kren-çıkrık ve düşey eksenli mulinenin ağırlık ile birlikte çıkrığa bağlanması gösterilmiştir.



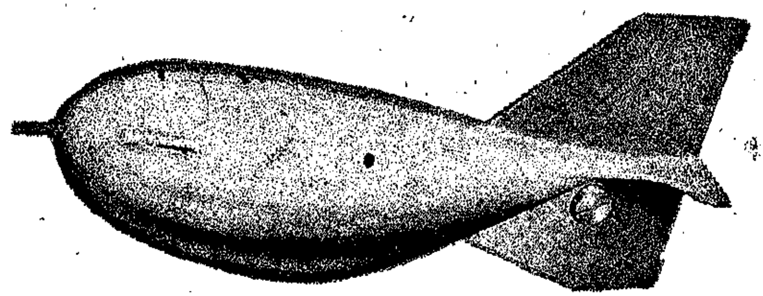
Şekil 12.30 — Kren-çıkrık ve Muline (EİE)

Debi ölçümü kimyasal yöntemlerle de yapılabilir, bu tür ölçümlerde tuzlar veya radyoaktif elementlerden yararlanılır. Yüzgeçlerle de debi ölçülebilir.

Akarsuların debisi ince ve kalın kenarlı savaklarla da ölçülebilir, kalın kenarlı savaklara pratikte eşik (Şekil 12.24) denir.

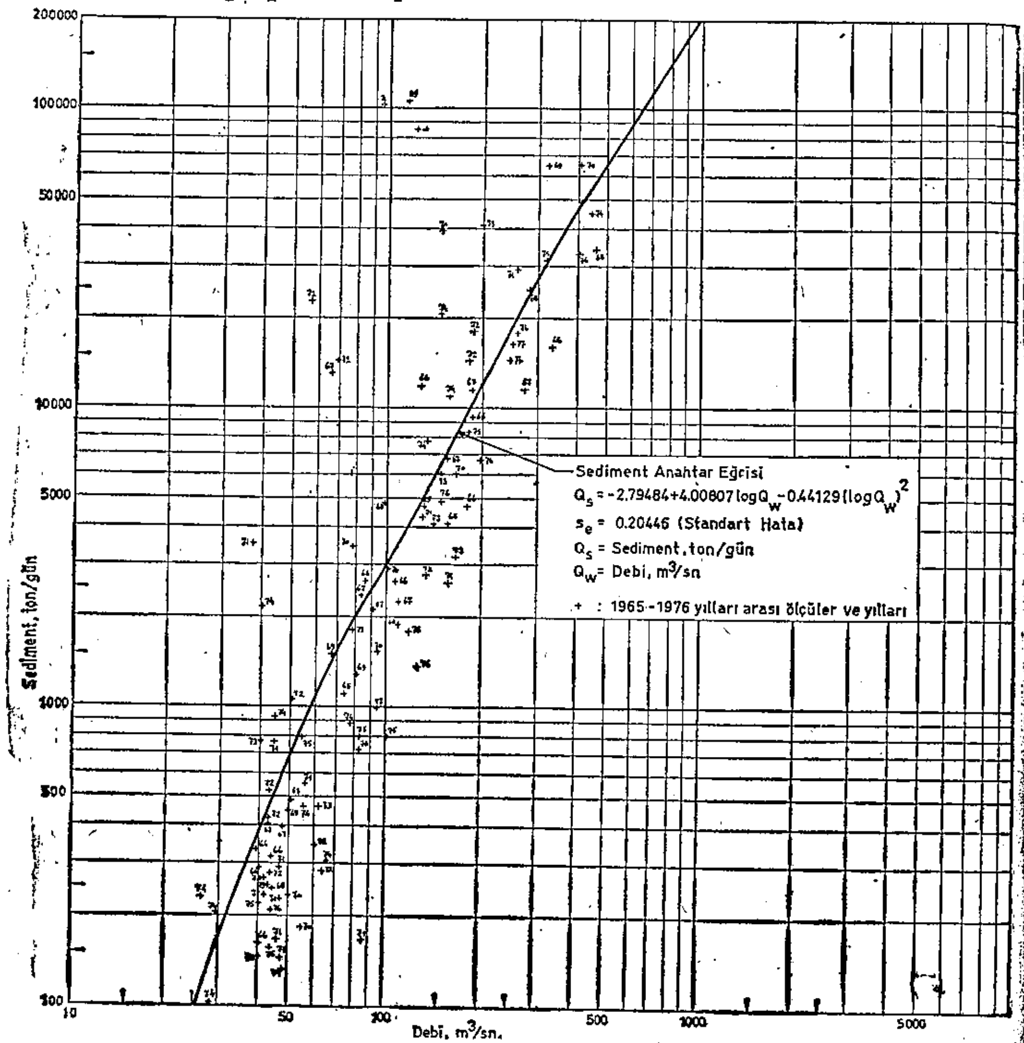
14) SEDİMENT ve SU KALİTESİ ÖLÇÜMLERİ

Hidrometri istasyon yerindeki akarsu kesitinden askı halinde geçen sediment, sediment örnekleme aletleri ile alınan su örneklerinin laboratuvar analizinden bulunur. (Şekil 12.31)'de entegrasyon yöntemi ile örnek alınan sediment örnekleme aleti gösterilmiştir.



Şekil 12.31 — Sediment Örnekleme Aleti (D. 49)

Su örnekleri analizinden bulunan günlük sediment değeri (ton/gün), günlük ortalama debiye karşı noktalanarak sediment anahtar eğrileri elde edilir. (Şekil 12.32)'de (1714) Karahacılı hidrometri istasyonunun sediment anahtar eğrisi gösterilmiştir. Bu istasyondan (1965 - 1976) yılları arasında (110) adet örnek alınmış ve analiz edilmiştir. (1714) istasyonunda askı halindeki yıllık ortalama sediment verimi (271 ton/yıl/km²) hesaplanmıştır. EİE (40) adet ve DSİ (115) adet hidrometri istasyonunda sediment çalışmalarını yürütmektedir.



Şekil 12.32 — Karahacılı Hidrometri İstasyonunun Sediment Anahtar Eğrisi

Hidrometri istasyon yerlerindeki suyun kalitesi, sudan alınan örneklerin laboratuvarlardaki kimyasal analizinden bulunur. DSİ'de (6), adet ve Topraksu'da (12) adet laboratuvarda su kalite analizleri yapılır.

Ülkemizde çalıştırılmakta olan hdirometri istasyonlarının (1976) yılı başındaki alet durumu (Tablo 12.5)'de verilmiştir.

Tablo 12.5 — Hidrometri İstasyonlarının Alet Durumu

ALET ADI	Kuruluş			TOPLAM
	DSİ	EİE	TOPRAKSU	
EŞEL	619	252	5	876
LİMNİGRAF	362	98	5	465
a) Şamandıralı	361	96	5	462
b) Basınçlı	1	2	—	3
MULİNE	107	46	—	153
ÇIKRIK	79	45	—	124
KREN	28	20	—	48
BOT	91	16	—	107
a) Lastik	91	11	—	102
b) Aluminyum	—	5	—	5
EŞİK	300	1	5	306
DONAV	175	—	—	175
TELEFERİK	55	111	—	166
ÖLÇÜ KÖPRÜSÜ	22	—	—	22
MULİNE AYAR KANALI	1	—	—	1
KİMYASAL YÖNTEM CİHAZI	3	—	—	3

Ülkemizde çalıştırılmakta olan hidrometri istasyonlarının kuruluşlar arası dağılımı ve amaçlarına göre sınıflandırılması (Tablo 12.6)'da verilmiştir. Proje amaçlı hidrometri istasyonlarının bir bölümü gelecek yıllarda birincil veya ikincil sınıfa dahil edilecektir.

Tablo 12.6 — Hidrometri İstasyonlarının Dağılımı

İSTASYON	Kuruluş			TOPLAM
	DSİ	EİE	TOPRAKSU	
Birincil (baz)	4	182	—	186
Özel (Proje-işletme- araştırma)	525	60	5	590
Doğal Göl	31	10	—	41
Yapay Göl	59	—	—	59
Toplam	619	252	5	876

TÜRKİYE'DEKİ BİR KISIM HİDROMETEOROLOJİK ÖLÇÜ SONUÇLARI

Ülkemiz hidrometeorolojik istasyon ağının işletilmesinde ve toplanan verilerin analizinde görevlendirilen elemanlar Yüksek Mühendis veya Mühendis (Meteoroloji, Hidroloji, İnşaat, Orman, Ziraat, Fizik), lisans (Meteorolojist, Hidrolojist, Fizik, Matematik, Coğrafya), teknisyen (Meteorolog, Hidrolog) ve rasatçılardır. Hidrometeorolojik ağda kullanılan aletlerin küçük bir bölümü ulusal olanaklarla üretilmekte, diğerleri ithal edilmektedir.

Türkiyede hidrometeorolojik ölçümler EİE'nin (1935) yılında ve DMİ'nin (1937) yılında kurulmasından sonra sistemli bir şekilde yürütülmeye başlamıştır. (19.) yüzyıl sonları ve (20.) yüzyıl başlarında yapılan sınırlı hidrometeorolojik ölçümler süreksiz ve yetersiz olmuştur.

Türkiye hidrolojik açıdan (26) akarsu havzasına bölünmüş ve (30) yıllık gözlem sonuçlarına göre elde edilen ortalama yağış ve akış değerleri (Tablo 12.7)'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, Türkiyenin yıllık ortalama yağışı (678,6 mm.) ve ortalama akımı (180,7 . 10^9 m^3)'dür. En büyük yıllık ortalama yağış Doğu Karadeniz havzasında (1272 mm.) ve en düşük Konya kapalı havzasında (412 mm.)'dir. En büyük yıllık ortalama akış Antalya havzasında (989 mm.) ve en düşük Akarçay havzasında (60 mm.)'dir.

Hidrometri istasyonlarından bir kısmının ölçü periyodu içinde gözlenmiş en büyük ve en küçük debileri (Tablo 12.8)'de verilmiştir. Bu tablodaki debilerin karşılaştırılmasından görüldüğü gibi ülkemiz akarsularının su rejimleri genellikle düzensizdir.

16) ANALİZ YÖNTEMLERİ

a) YAĞIŞ - AKIŞ İLİŞKİLERİ

Atmosferden yeryüzüne düşen yağışın büyük bir bölümü buharlaşma ve terleme şeklinde yeniden atmosfere döner. Diğer bir bölümü toprak yüzeyinde toplanır veya toprak içinde süzülerek yeraltı suyuna erişir. Yağışın atmosfere dönen ve toprak tarafından tutulan bölümleri çıkarıldıktan sonra geri kalan kısmına YÜZEY AKIMI denir.

Tablo 12.7 — Türkiye Akarsu Havzalarının Yağış ve Akış Değerleri

HAVZA ADI	Havza No	Yağış Alanı, km²	Yıllık ortalama yağış, mm.	Türkiyenin akarsuları su potansiyeli: Yıllık ortalama akım, 10^9 m^3	Yıllık ortalama Akış, mm.	Yıllık ortalama debi, m^3/sn	Akış ve yağış oranı
MERİÇ — ERGENE	1	14560.	637.	2.10*	144.2	66.5	0.23
MARMARA	2	24100.	751.	5.03	208.7	159.6	0.28
SUSURLUK	3	23765.	668.	5.43	228.5	172.2	0.34
KUZEY EGE	4	9032.	731.	1.94	214.8	81.4	0.29
GEDİZ	5	17110.	591.	1.61	94.1	51.0	0.16
K. MENDERES	6	7165.	745.	0.95	132.6	30.0	0.18
B. MENDERES	7	24903.	662.	3.14	126.1	99.5	0.19
BATI AKDENİZ	8	22615.	880.	9.12	403.3	289.2	0.46
ANTALYA	9	14518.	947.	14.36	989.1	455.4	1.04
BURDUR GÖLLER	10	8764.	536.	0.58	66.2	18.3	0.12
AKARÇAY	11	8377.	498.	0.50	59.7	15.9	0.12
SAKARYA	12	56504.	502.	4.96	87.8	157.4	0.17
BATI KARADENİZ	13	29682.	801.	7.48*	252.0	237.1	0.31
YEŞİLIRMAK	14	36129.	514.	5.18	143.4	164.1	0.28
KIZILIRMAK	15	78646.	430.	5.90	75.0	187.0	0.17
KONYA KAPALI HAV.	16	56554.	412.	5.11	90.4	162.1	0.22
DOĞU AKDENİZ	17	22484.	748.	9.04	402.1	286.8	0.54
SEYHAN	18	20731.	670.	6.27	302.4	198.7	0.45
ASİ	19	10885.	914.	1.27	116.7	40.4	0.13
CEYHAN	20	21222.	714.	6.88	324.2	218.1	0.45
FIRAT	21	120917.	568.	34.67	286.7	1099.3	0.50
DOĞU KARADENİZ	22	24022.	1272.	14.24	592.8	451.6	0.46
ÇORUH	23	19894.	681.	5.57	280.0	176.6	0.41
ARAS	24	27548.	432.	5.00	181.5	158.7	0.42
VAN	25	15254.	525.	1.84	120.6	58.5	0.23
DİCLE	26	51489.	814.	22.57	438.3	715.6	0.54
TOPLAM		766870.	—.	180.74	—	—	—
ORTALAMA		—	678.6	—	244.7	220.4	0.36

Not: 1) Göl alanları yağış alanlarına dahil edilmemiştir.
2) (*) 30 yıllık ölçü periyodundan daha kısa süreli ortalamadır.
3) Sulama amacı ile akarsulardan alınan su miktarları ortalamalara katılmamıştır.

Tablo 12.8 — Bazı Hidrometri İstasyonlarında Gözlenmiş Debiler

Hidrometri İstasyonu	İstasyon Yağış Alanı, km²	En büyük Debi, m³/sn	En Küçük Debi, m³/sn	Ölçü Periyodu, Yıl
302 M. Kemal Paşa Ç. — Döllük	9629.2	3374.	7.40	35
518 Gediz N. — Manisa Köp.	15616.4	812.	2.20	13
707 B. Menderes - Söke	23889.2	632.	0.00	26
902 Köprüçay - Beşkonak	1942.4	1622.	21.0	36
1243 Sakarya N. - Botbaşı	55321.6	977.	23.5	14
1335 Filyos Ç. - Derecikviran	13300.4	1385.	10.4	11
1408 Yeşilırmak - Çarşamba	35958.0	1914.	14.0	8
1501 Kızılırmak - Yamula	15581.6	901.	7.4	37
1533 Kızılırmak - İnözü	75120.8	1673.	18.4	15
1818 Seyhan N. — Üçtepe	13846.0	2218.	43.6	13
2012 Ceyhan N. — Ceyhan	19727.2	1750.	19.8	17
2114 Fırat N. — Birecik	100915.6	7156.	150.	13
2201 Harşit Ç. - Kürtün	2750.0	580.	2.6	23
2207 İyidere - İkizdere	781.2	81.5	6.35	5
2232 Fırtına D. - Topluca	940.0	342.	4.68	12
2247 Melet Ç. - Gocallı	1859.2	1508.	1.75	13
2315 Çoruh N. - Karşıköy	19654.4	2431.	41.0	7
2402 Aras N. - Kağızman	8872.8	841.	5.38	8

Bir akarsuyun herhangibir kesitindeki toplam akımı DOLAYSIZ AKIM (direkt akım) ve BAZ AKIM toplamıdır. Dolaysız akım yüzey akımı ile yüzeyaltı akımının gecikmesiz (süzülmeden kısa bir süre sonra akarsuya kavuşan) kısmından oluşur. Baz akım yeraltı suyu akımı ile yüzeyaltı akımının gecikmeli kısmından oluşur.

Dolaysız akım şiddetli yağışlardan sonra önem kazanır, taşkınların başlıca kaynağı dolaysız akımdır. Akarsuyu sürekli olarak ve yağışsız sürelerde baz akım besler.

Bir akarsu yağış alanının bütünü aynı anda çıkış noktasındaki akıma katkıda bulunabilir. Bu andan sonra yağış kesilinceye kadar akımla yağış dengededir ve çıkış noktasındaki akım sabit kalır. Bu durumun oluşabilmesi için yağış süresinin en az yağış alanının GEÇİŞ ZAMANI

(konsantrasyon zamanı) kadar sürmesi gerekir. Yüzeysel akımın yağış alanının en uzak noktasından çıkış noktasına ulaşması için geçen zamana geçiş zamanı denir.

(Şekil 12.18)'de gösterildiği gibi bir akarsu kesitindeki debinin zamanla değişimini gösteren grafiğe debi hidrografı denir. Bu hidrografın (AB) kısmına yükselme eğrisi, (B) noktasına pik, (BC) kısmına çekilme (alçalma) eğrisi denir. Hidrografı oluşturan yağış blokunun ağırlık merkezi ile pik debi arasındaki zaman aralığına GECİKME ZAMANI denir. Dolaysız akımın tepe noktasından (N) gün sonra sona erdiği varsayılırsa büyük yağış alanlarında,

$$N = 0{,}9 \,.\, A^{0{,}2}$$

bağınıtsından yararlanılır, (A) (km²) cinsinden yağış alanıdır.

Dolaysız akımla baz akımı ayırmak için çeşitli amprik yöntemler uygulanır. En kolay yöntem (A) ve (C) noktalarını bir doğru ile birleştirmektir.

Bir akarsu yağış alanı, üzerine düşen yağışı akıma dönüştüren bir sistem gibi düşünülebilir. Yağış ile debi arasındaki ilişki aşağıdaki fonksiyonla ifade edilebilir.

$$Q\,(t) = f\,[i\,(t)]$$

Q (t) : Çıkış noktasındaki debi

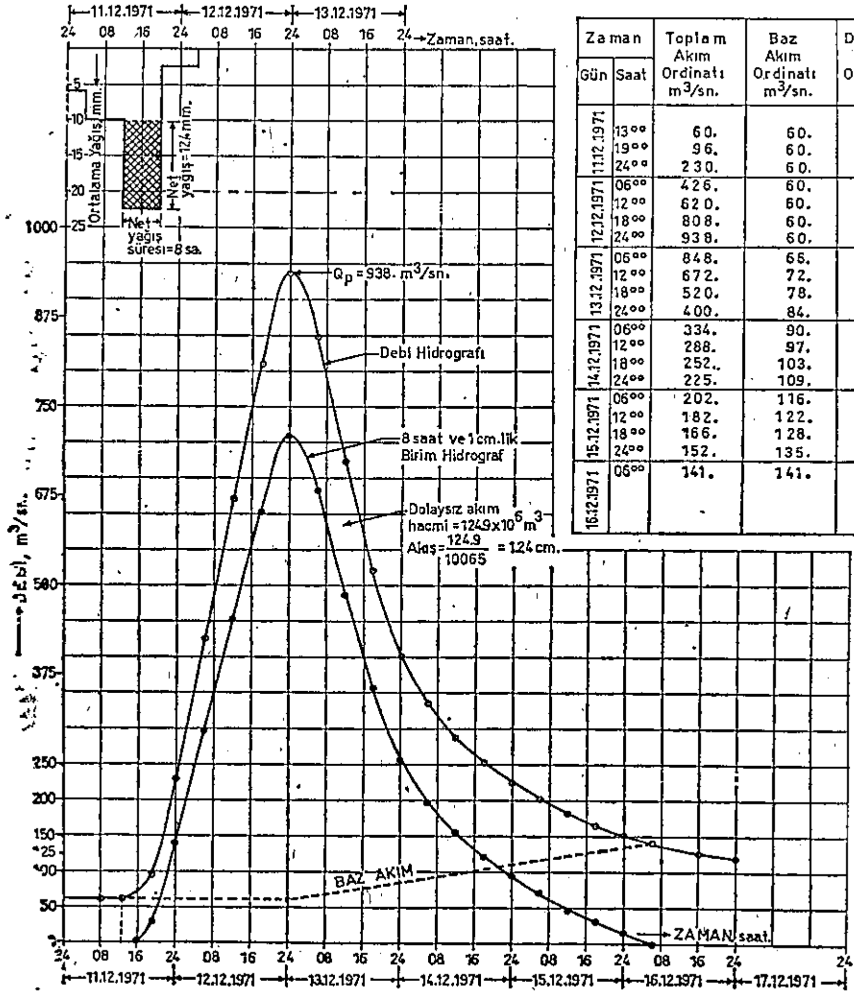
i (t) : Ortalama yağış

Akarsu yağış alanı çok karışık bir sistem olduğundan yağışın akıma dönüşümünü veren matematik ifadenin elde edilmesi zordur. Bunun için basitleştirici kabuller yapılır ve sistemin matematik modeli kurulur.

b) BİRİM HİDROGRAF

Bir akarsu yağış alanına düşen toplam yağıştan tutma, yüzey birikintileri ve süzülme ile ayrılan bölümleri çıkartılırsa NET YAĞIŞ (artık yağış) elde edilir. Net yağışı dolaysız akıma (direkt akım) dönüştüren bağıntı çizgisel (lineer) kabul edilebilir ve bu modele birim hidrograf modeli denir. Birim hidrograf ilk kez 1932 yılında Sherman (Şerman) tarafından tanımlanmıştır. Yağış alanının her tarafına (T) saat süre ile aynı şiddette düşen yağışın birim akış yüksekliğinin (birim net yağış) oluşturduğu hidrografa (T) saatlik birim hidrograf denir, örneğin (6) saat ve (1 cm.)'lik birim hidrograf gibi.

Bir akarsu yağış alanının birim hidrografı, taşkın debi hidrografları ile bu hidrografları oluşturan fırtına yağışlarının analizinden elde edilebilir. (1714) Karahacılı hidrometri istasyonunda gözlenmiş debi hidrografı (limnigraftan) ve bu hidrografı oluşturan fırtına yağış analizi (plüviyograflardan) sonuçları (Şekil 12.33)'de gösterilmiştir. Dolaysız akım hidrografı altındaki akış yüksekliği (dolaysız akım hacmi/yağış alanı) net yağış yüksekliğine eşittir. Toplam yağışın net yağış yüksekliği buna



Zaman		Toplam Akım Ordinatı $m^3/sn.$	Baz Akım Ordinatı $m^3/sn.$	Dolaysız Akım Ordinatı $m^3/sn.$	8 saat ve 1 cm.lik Birim Hidrograf Ordinatı $m^3/sn/cm$
Gün	Saat				
11.12.1971	13^{00}	60.	60.	0.	0.
	19^{00}	96.	60.	36.	29.0
	24^{00}	230.	60.	170.	137.1
12.12.1971	06^{00}	426.	60.	366.	295.2
	12^{00}	620.	60.	560.	451.6
	18^{00}	808.	60.	748.	603.2
	24^{00}	938.	60.	878.	708.1
13.12.1971	06^{00}	848.	66.	782.	630.2
	12^{00}	672.	72.	600.	483.9
	18^{00}	520.	78.	442.	356.5
	24^{00}	400.	84.	316.	254.8
14.12.1971	06^{00}	334.	90.	244.	196.8
	12^{00}	288.	97.	191.	154.0
	18^{00}	252.	103.	149.	120.2
	24^{00}	225.	109.	116.	93.5
15.12.1971	06^{00}	202.	116.	86.	69.4
	12^{00}	182.	122.	60.	48.4
	18^{00}	166.	128.	38.	30.6
	24^{00}	152.	135.	17.	13.7
16.12.1971	06^{00}	141.	141.	0.	0.

ŞEKİL 12.33 — 1714 Karahacılı Hidrometri İstasyonunda Gözlenmiş Taşkın Debi Hidrografı ve Birim Hidrograf Analizi

göre bölünmüş ve (Şekil 12.33)'de gösterilmiştir, net yağış süresi (8) saattir. Dolaysız akım hidrografının ordinatları (1,24 cm.)'lik net yağış yüksekliğine bölünmüş ve böylece (8) saat ve (1 cm.)'lik birim hidrograf ordinatları elde edilmiştir. (1714) Karahacılı hidrometri istasyon yerinin (8) ve (1 cm.)'lik birim hidrografının ordinatları ve eğrisi (Şekil 12.33)'de verilmiştir.

(T) saatlik birim hidrograftan (2T) süreli birim hidrograf elde edilebilir, bunun için (T) saatlik birim hidrograf (T) saat sağa kaydırılır ve kendisi ile toplanır, elde edilen ordinatlar ikiye bölünür. (S) hidrograf yöntemi ile (T) saatlik birim hidrograftan çeşitli süreli birim hidrograflar hesaplanabilir.

Bir akarsu yağış alanına düşecek (T) saat süreli ve (h cm.) yüksekliğindeki yağışın oluşturacağı taşkın hidrografı, bu yağış alanının (T) saat süreli ve (1 cm.)'lik birim hidrografından yararlanılarak hesaplanabilir. Önce yağışın net yağış kısmı bulunur. (T) saat süreli net yağış (T) saatlik birim hidrograf ordinatları ile çarpılır ve taşkın hidrografı ordinatları elde edilir.

c) SENTETİK BİRİM HİDROGRAF

Yağış ve akım gözlemleri olmıyan yağış alanlarının birim hidrografları alanın büyüklüğü, eğimi gibi fiziksel özelliklerinden yararlanılarak elde edilebilir. Bunun için geliştirilmiş çeşitli sentetik birim hidrograf yöntemlerinden en yaygın olanı Snyder (Snayder) yöntemidir. Snyder yöntemine göre birim hidrografın (t_p) gecikme zamanı,

$$t_p = C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0,3}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu formülde:

C_t = (1,35 — 1,85) arasında değişen bir katsayı, ortalama 1,5 alınır.

L = Akarsu çıkış noktası ile yağış alanının en uzak noktası arasındaki anakol uzunluğu, km.

L_c = Akarsu yağış alanının ağırlık merkezinden ana kola inilen dikmenin ana kolu kestiği nokta ile yağış alanı çıkış noktası arasındaki kol uzunluğu, km.

t_p = Gecikme zamanı, sa.

Net yağış (t_r) süresi,

$$t_r = \frac{t_p}{5,5}$$

formülünden hesaplanır ve birimi saattir.

Birim hidrografın (Q_p) pik debisi,

$$Q_p = 2{,}7 \cdot \frac{C_p}{t_p} \cdot A$$

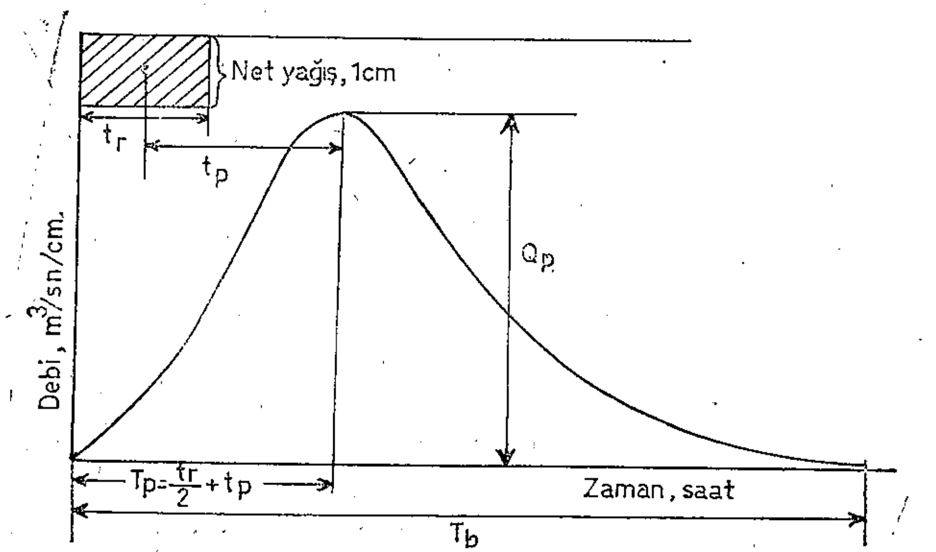
formülünden hesaplanır. Bu formülde:

C_p = (0,56 — 0,69) arasında değişen bir katsayı
A = Yağış alanı, km²
Q_p = pik debi, m³/sn/cm.

Birim hidrografın (T_b) taban genişliği

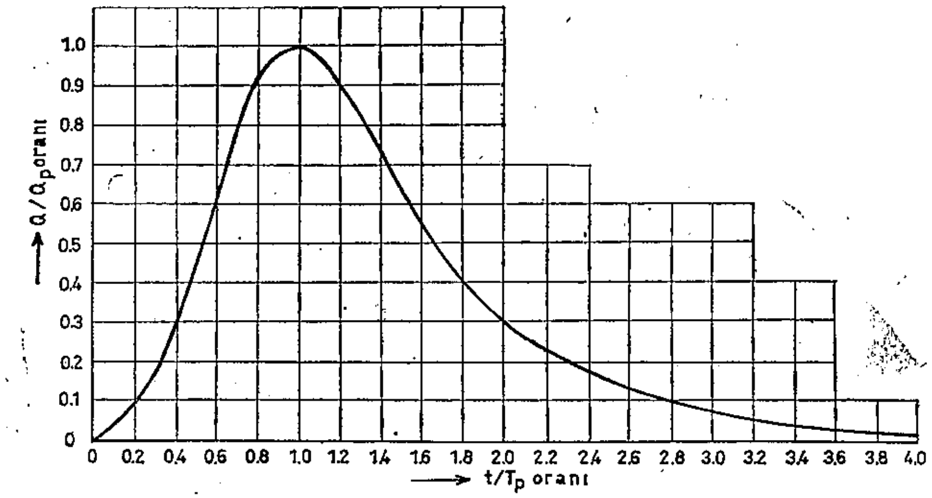
$$T_b = 3 + \frac{3 \cdot t_p}{24}$$

formülünden bulunur ve birimi saattir. Snyder yönteminde kullanılan sembollerin ifade ettiği büyüklükler (Şekil 12.34)'de gösterilmiştir.



Şekil 12.34 — Synder Yöntemi ile Çizilmiş (t_r) Saatlik ve (1 cm)'lik Birim Hidrograf

Birim hidrografın (Q_p) pik debisi ve (t_p) gecikme zamanı hesaplandıktan sonra boyutsuz birim hidrograf yardımı ile birim hidrograf eğrisi çizilebilir. Boyutsuz birim hidrograf (Q/Q_p) debi oranının (t/T_p) zaman oranı ile değişimini gösterir. Böyle bir boyutsuz birim hidrograf (Şekil 12.35)'te gösterilmiştir.



Şekil 12.35 — Boyutsuz Birim Hidrograf

(C_t) ve (C_p) katsayı değerleri bir akarsu yağış alanından diğerine çok değişir ve yukarıda verilen değer aralıkları kesin değildir. (t_r)'den farklı (T_R) süreli birim hidrograf aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$t_{PR} = t_p + 0{,}25 \cdot (t_R - t_r)$$

$$Q_{PR} = 2{,}7 \cdot \frac{C_p}{t_{PR}} \cdot A$$

17) İSTATİSTİK ANALİZLERİ

Hidrolojik çevrim parametreleri zamanla değiştiğinden sürekli bir şekilde ölçülürler. Toplanan hidrolojik veriler çok fazla olduğundan kullanılmaları zordur. Verilerden bir takım özet bilgiler çıkartılır ve bu bilgilerden yararlanılır, ortalama yağış veya ortalama akım gibi özet bilgiler İSATİSTİK yöntemler uygulanarak çıkartılabilir.

İstatistik, gözlem ve deney sonucunda toplanan verileri analiz ederek ve bu analiz sonuçlarına dayanarak kararlar veren bir bilim şeklinde tanımlanabilir. Toplanan verilere dayanarak olayların olma veya olmama olasılıklarını olasılık teorisi inceler. Bir olayın önceden belirlenmesi mümkün değilse bu olay PROBABİLİSTİK karakterdedir. Hidrolojideki olaylar, aylık yağış, yıllık debi gibi, probabilistiktir. Hidrolojik olay belirli fizik kanunlarına göre oluşursa DETERMİNİSTİK denir.

a) TANIMLAR

Değeri önceden bilinemiyen değişkene RASTGELE DEĞİŞKEN denir. Örneğin bir akarsuyun yıllık ortalama debisinin gelecek yıl hangi değerde olacağı önceden bilinemez ve rastgele değişkendir. Rastgele değişkenin ilerde alacağı değerleri tahmin edebilmek için geçmişte gözlenmiş değerleri bulunmalıdır. Rastgele değişkenin alabileceği değerler çok geniş bir TOPLUM teşkil eder. Toplumdaki olayların hepsi gözlenemez, ancak toplumdan sınırlı bir ÖRNEK alınabilir. Bir akarsuyun (1941 - 1975) yılları arasında (40) yıllık ortalama debileri ölçülmüşse elimizde (40) elemanlı bir örnek var demektir. Örnekte ne kadar çok eleman olursa rastgele değişkenin toplumu hakkında bize o kadar iyi bir fikir verir.

Rastgele değişkenin bir gözlem sırasında ölçülen belirli bir değeri almasına OLAY denir.

b) OLASILIK

Her rastgele olayın bir (p) olasılığı vardır, $(0 \leq p \leq 1)$ arasında bir sayıdır. $(p = 0)$ ise olay olmaz. $(p = 1)$ ise olay kesinlikle olur. Bir tavla zarı atıldığında belli bir yüzün gelmesi olasılığı (1/6)'dır. Yağışlı günler sayısını belirleyen bir örnek düşünelim, (N) günlük bir örnek olsun. Bu örnekte yağışlı günler sayısı (m) ise yağışlı günler (f) frekansı,

$$f = \frac{m}{N}$$

şeklinde ifade edilir. Örnekteki (N) eleman sayısı artarsa (f) frekansı (p) olasılığına yaklaşır,

$$p = \lim_{N \to \infty} \frac{m}{N}$$

eşitliği yazılır.

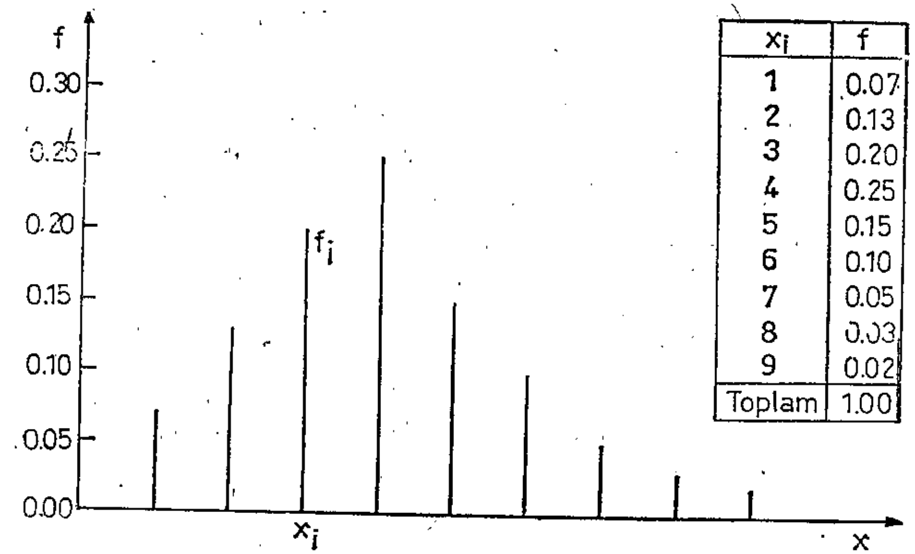
c) FREKANS DAĞILIMI

(N) elemanlı bir örnekte (x_i) olayı (n_i) kez görülürse (yani n_i kez $x = x_i$ oluyorsa) bu olayın frekansı,

$$f_i = \frac{n_i}{N}$$

şeklinde olur. Çeşitli (x_i)'ler için hesaplanan (f_i) değerleri (x_i) absisleri

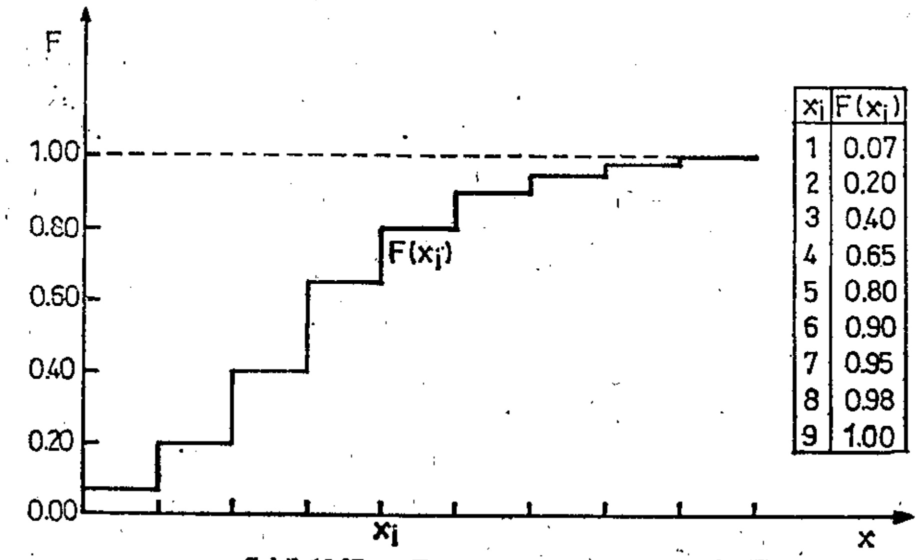
hizasında düşey çizgilerle gösterilirse (x) rastgele değişkeninin (Şekil 12.36)'daki frekans grafiği elde edilir. Bu grafikteki (f_i) frekanslar toplamı (1)'e eşittir.



x_i	f
1	0.07
2	0.13
3	0.20
4	0.25
5	0.15
6	0.10
7	0.05
8	0.03
9	0.02
Toplam	1.00

Şekil 12.36 — Frekans Grafiği

(x) değişkeninin belli bir (x_i) değerine eşit veya ondan küçük olması olayının F (x_i) frekansı,



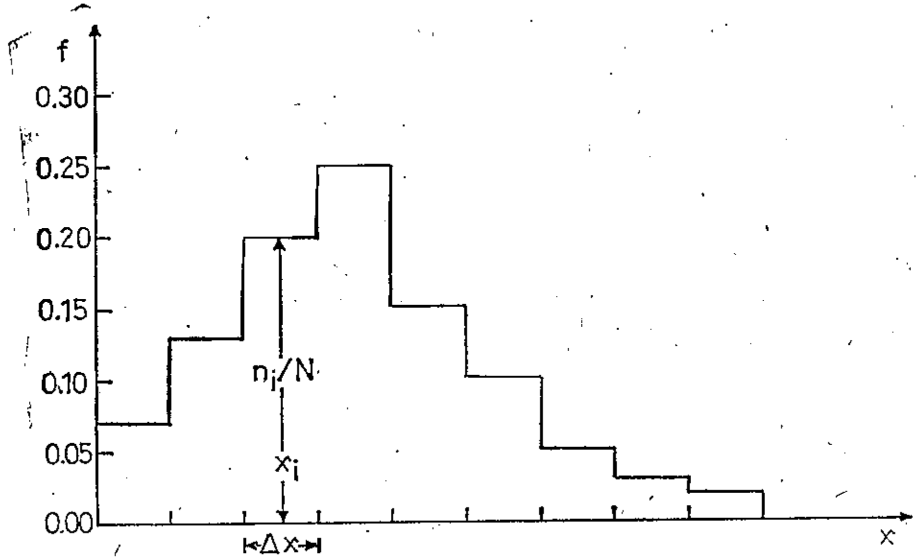
x_i	$F(x_i)$
1	0.07
2	0.20
3	0.40
4	0.65
5	0.80
6	0.90
7	0.95
8	0.98
9	1.00

Şekil 12.37 — Toplam Frekans Dağılımı

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^{i} \frac{n_j}{N}$$

şeklinde ifade edilebilir. (Şekil 12.37)'de F (x) grafiği gösterilmiştir ve bu grafiğe toplam frekans dağılımı denir.

Örnekteki eleman sayısına göre önce sınıf aralıkları belirlenir. Sınıf aralıkları sayısı (10 - 25) arasında tutulur. Sınıf aralıklarındaki olaylar aralığın (x_i) orta noktasında toplandığı kabul edilir. Frekans grafiği (Şekil 12.38)'deki gibi çizilebilir ve frekans histogramı denir.



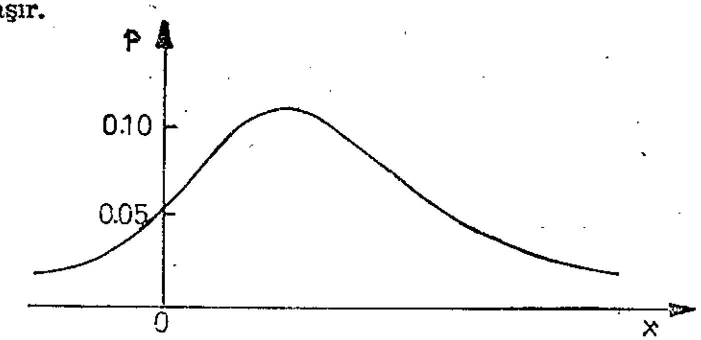
Şekil 12.38 — Frekans Histogramı

Örnekteki elemanlar büyüklük sırasına göre dizilirse düzenlenmiş örnek elde edilir. Artan sırada dizilmiş bir düzenlenmiş örnekte (m) inci elemanı (x_m) ile gösterirsek değişkenin (x_m)'ye eşit veya ondan küçük kalması olayının frekansı

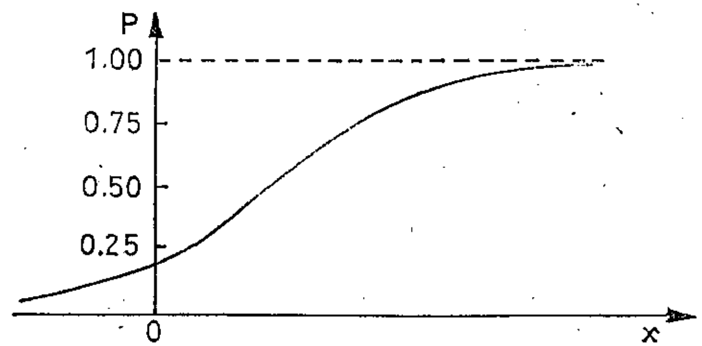
$$F(x_m) = \frac{m}{N+1}$$

formülü ile hesaplanır.

Örnekteki (N) eleman sayısı sonsuza yaklaştıkça (f) frekansları (p) olasılıklarına yaklaşır, frekans grafiği olasılık yoğunluk fonksiyonuna (Şekil 12.39), toplam frekans dağılımı da toplam olasılık dağılımına (Şekil 12.40) yaklaşır.



Şekil 12.39 — Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu



Şekil 12.40 — Toplam Olasılık Dağılımı

d) İSTATİSTİK PARAMETRELER

Bir (x) değişkenine ait örnekteki eleman sayısı (N) ise ($\bar{x}$) aritmetik ortalama,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum x_i$$

olur. Aritmetik ortalama rastgele değişkenin merkez değerini gösterir. (S) standart sapma,

$$S = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x)^2}{N - 1}}$$

şeklinde ifade edilir. Standart sapma değişkenin aldığı değerlerin ortalama etrafında yayılmasını ifade eder. (S^2)'ye değişim (varyans) denir. Değişim katsayısı (C_v),

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}}$$

şeklinde ifade edilir. (C_v), ortalama etrafında yayılmayı ifade eden boyutsuz bir parametredir.

Bir örnekten hesaplanan istatistik parametreler toplumun gerçek parametre değerlerini göstermezler, örnekteki eleman sayısı sonlu olduğu için ancak bir yaklaşım teşkil ederler.

18) OLASILIK DAĞILIM FONKSİYONLARI

Örneklerden elde edilen frekans dağılımları analitik olasılık dağılım fonksiyonlarına uydurulur. Bu fonksiyonlar deney ve fiziksel düşüncelere dayanarak seçilir. Hidrolojide kullanılan bazı analitik dağılım fonksiyonları aşağıda açıklanmıştır.

a) BİNOM DAĞILIM

Bir değişken için iki olay olsun, olaydan birinin olasılığı (p) ise diğerininki (q = 1 — p) olur. (n) elemanlı bir örnekte olasılığı (p) olan olayın (x) defa görülmesi olasılığı Binom dağılımına uyar. Binom dağılımının denklemi,

$$p(x) = \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot q^{n-x}$$

şeklindedir. Bu formülde,

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!\,(n-x)!}$$

şeklinde yazılır ve Binom katsayıları denir.

b) NORMAL DAĞILIM

Doğadaki birçok rastgele değişkenin olasılık dağılımı normal (Gaus) dağılımına uyar. Normal dağılım denklemi aşağıda verilmiştir.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma . \sqrt{2\pi}}\, e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

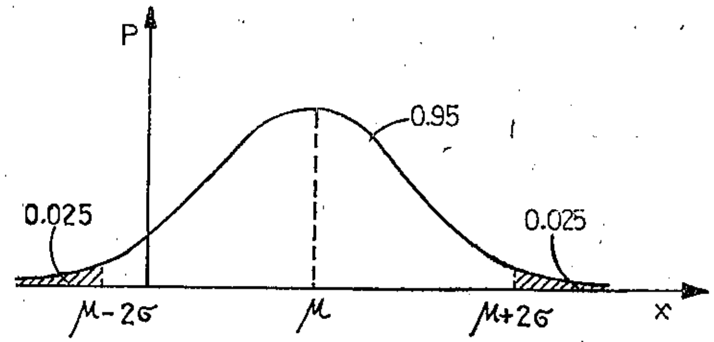
Bu formülde (μ) toplumun ortalaması ve (σ) toplumun standart sapmasıdır. (x) değişkeni yerine,

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma}$$

konursa standart normal dağılım denklemi elde edilir:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Normal dağılım (Şekil 12.41)'de gösterildiği gibi simetrik bir dağılımdır.



Şekil 12.41 — Normal Dağılım

Normal dağılıma uyan bir değişkenin ortalamasının, (μ)'nin iki yanına doğru (σ) genişliğindeki bir aralıkta kalması olasılığı (0,68), (2σ) genişliğindeki bir aralıkta kalması olasılığı (0,95)'dir.

Standart normal dağılım tablo haline getirilmiştir, bu dağılımın ortalaması sıfır, standart sapması (1)'dir.

c) LOGNORMAL DAĞILIM

(x) değişkeninin logaritması normal dağılmışsa (x)in dağılımı lognormaldir denir.

d) EKSTREM DEĞER DAĞILIMLARI

Hidrolojide taşkın debilerinin olasılık dağılımlarının belirlenmesi büyük önem taşır. Hidrometri istasyonunda ölçülmüş bir yıldaki debiler arasından en büyük debi alınır ve her yıl için bu işlem tekrarlanırsa yıllık en büyük taşkın debiler dizisi elde edilir. Bu değerlerin dağılımı Gumbel dağılımına uyar. Gumbel dağılımının toplam olasılık fonksiyonu,

$$p(x) = e^{-e^{-y}}$$

şeklindedir. Bu formülde

$$y = \alpha\,(x - \beta)$$

$$\alpha = \frac{1.28}{\sigma}\,, \quad \beta = \mu - 0{,}45 \cdot \sigma$$

şeklinde ifade edilir. Gumbel dağılımının olasılık kağıdı (Şekil 12.42)'de gösterildiği gibidir.

Verilen bir (x) debisinin aşılmaması olasılığı, p(x), Gumbel dağılım yardımı ile hesaplanabilir. Debinin herhangibir yılda aşılma olasılığı (A = 1 — p)'dir. Debinin tekerrür (yinelenme) aralığı,

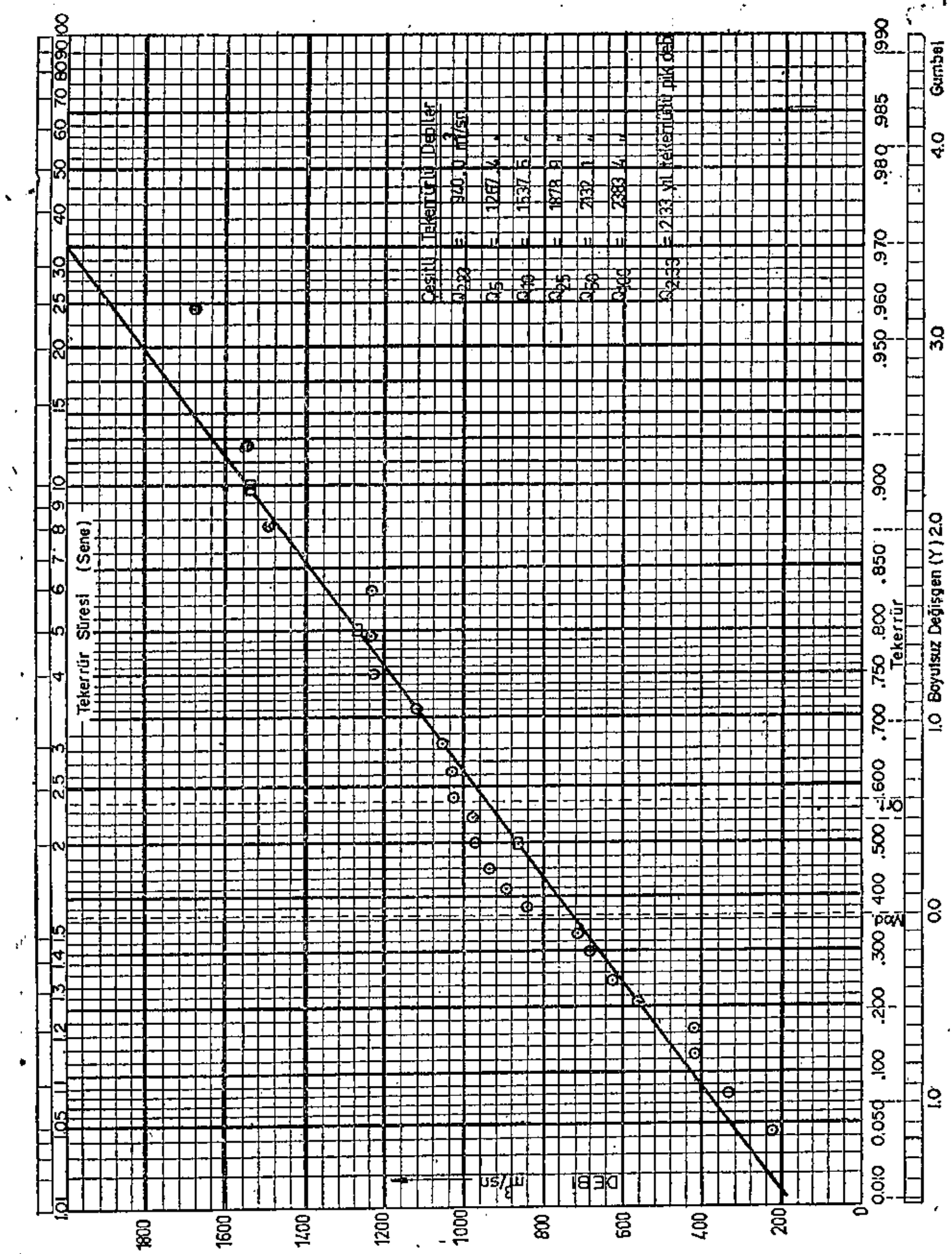
$$T_p = \frac{1}{1-p} = \frac{1}{A}$$

olur. Tekerrür aralığı, verilen taşkın debisinin iki defa aşılması arasında geçmesi beklenen ortalama zaman süresini ifade eder. (1714) Karahacılı hidrometri istasyonunun (Tablo 12.9)'da verilen yıllık pik debilerinin Gumbel kağıdına noktalanması (Şekil 12.42)'de gösterilmiştir. Noktalama pozisyonu,

Tablo 12.9 — 1714 Karahacılı Hidrometri İstasyonunun Yıllık Pik Debileri, m³/sn

Tarih (su yılı)	Pik debi, m³/sn	Sıra No m	Sıralanmış pik debiler, m³/sn	Noktalama pozisyonu $\frac{m}{N+1}$
10.2.1953	1479.	1	225.	0.042
2.4.1954	830.	2	338.	0.084
26.12.1955	1024.	3	410.	0.125
18.12.1956	1108.	4	418.	0.167
3.3.1957	410.	5	553.	0.209
10.1.1958	1679.	6	615.	0.250
29.1.1959	1230.	7	670.	0.292
18.4.1960	338.	8	694.	0.334
29.12.1961	1047.	9	830.	0.375
17.12.1962	553.	10	893.	0.417
19.12.1963	1550.	11	938.	0.459
26.3.1964	225.	12	960.	0.500
12.4.1965	670.	13	969.	0.542
25.1.1966	960.	14	1024.	0.584
16.4.1967	615.	15	1025.	0.625
13.3.1968	1223.	16	1047.	0.667
22.1.1969	1230.	17	1108.	0.709
18.12.1970	969.	18	1223.	0.750
11.1.1971	694.	19	1230.	0.792
13.12.1972	938.	20	1230.	0.834
24.10.1973	418.	21	1479.	0.875
15.3.1974	893.	22	1550.	0.917
31.1.1975	1025.	23	1679.	0.959

N = 23
Toplam = 21108
Ortalama = 917.7
Standart Sapma = 389.2



Şekil 12.42 — 1714 Karahacılı Hidrometri İstasyonu Yıllık Pik Debilerinin Frekans Analizi (1953-1975)

$$p(x) = \frac{m}{N+1} \text{ veya } T = \frac{1}{1-p}$$

formülünden hesaplanmıştır. Noktaları ortalayan doğru hesapla bulunmuştur, gözle de çizilebilir.

Tekerrür aralığı (n) yıl olan taşkın debisine hidrolojide (n) yıllık taşkın debisi denir.

19) KORELASYON ve REGRESYON ANALİZİ

(x) ve (y) gibi iki rastgele değişkenin aynı gözlem sırasında aldıkları değerler arasında bir bağıntı varsa bu iki değişken arasında korelasyon bulunduğu söylenir. Örneğin bir akarsu yağış alanına düşen yıllık yağışla yıllık akım arasındaki bağıntı gibi.

İki rastgele değişken arasında bir korelasyon bağıntısı varsa bu bağıntıyı ifade eden matematik denklemine REGRESYON DENKLEMİ denir. Regresyon denklemi doğrusal ise korelasyon ve regresyon analizi çizgisel (lineer)'dir. İki değişkenli basit çizgisel regresyon denklemi,

$$y = a + b \, . \, x$$

şeklindedir. Bu denklemde (y) bağımlı değişken, (x) bağımsız değişken, (a) ve (b) sabitlerdir. (a) ve (b) sabitleri en küçük kareler yöntemi ile bulunur. (b) regresyon denkleminin eğimidir ve aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$b = \frac{\Sigma\,(y-\bar{y})\,.\,(x-\bar{x})}{\Sigma\,(x-\bar{x})^2}$$

Bu denklemde $(\bar{y})$' (y)'nin ve $(\bar{x})$'in aritmetik ortalamasıdır ve aşağıdaki ifadelerden hesaplanır.

$$\bar{y} = \frac{\Sigma y}{N}, \quad \bar{x} = \frac{\Sigma x}{N}$$

Denklemin (a) sabiti,

$$a = \bar{y} - b\,\bar{x}$$

ifadesinden bulunur, $(x = 0)$ iken doğrunun (y) eksenini kestiği noktanın değeridir.

İki değişken arasındaki bağıntının derecesini (r) korelasyon katsayısı gösterir ve $(-1 \leq r \leq 1)$ arasındadır. Korelasyon katsayısı formülü

$$r = \frac{\Sigma\,(y-\bar{y}) \cdot (x-\bar{x})}{\sqrt{\Sigma\,(y-\bar{y})^2 \cdot (x-\bar{x})^2}}$$

şeklindedir.

Tahminin (S) standart hatası

$$(S = \sqrt{(y_i - y)^2/N - 1})$$

denkleminden bulunabilir. (y_i) denklemden hesaplanmış değerleri ve (y) gözlenmiş değerleri belirtir.

(Şekil 12.43)'de Göksu N. yağış alanı ve üzerindeki hidrometri istasyonları gösterilmiştir. (1714 ve 1705) hidrometri istasyonu aylık akımları ile (1719 + 1720) hidrometri istasyonlarının aylık akımları toplamı arasındaki bağıntı (Şekil 12.44)'de gösterilmiştir. Noktalama aritmetik ölçekli kağıtta yapılmıştır. Bu noktaları ortalayan doğrunun $(y = a + bx)$ şeklindeki regresyon denklemi bilgisayarda çözümlenmiş ve sonuçlar şekil üzerinde verilmiştir. Bu korelasyondan (1714) istasyonunun (1946 - 1952) yılları arası aylık akım değerleri hesaplanmıştır. (1714) Karahacılı hidrometri istasyonunun (1953 - 1975) yılları arası için ölçülmüş aylık akım değerleri, (1719) ve (1720) hidrometri istasyonlarının (1946 - 1975) yılları arası için ölçülmüş aylık akım değerleri vardır.

İki değişken arasındaki bağıntıyı ifade eden regresyon denklemi çizgisel olmıyabilir. Bu durumda regresyon denklemi

$$y = a \cdot x^b$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemdeki (a) ve (b) sabitlerdir. Denklemin iki yanının logaritması alınırsa,

$$\log y = \log a + b \, . \log x$$

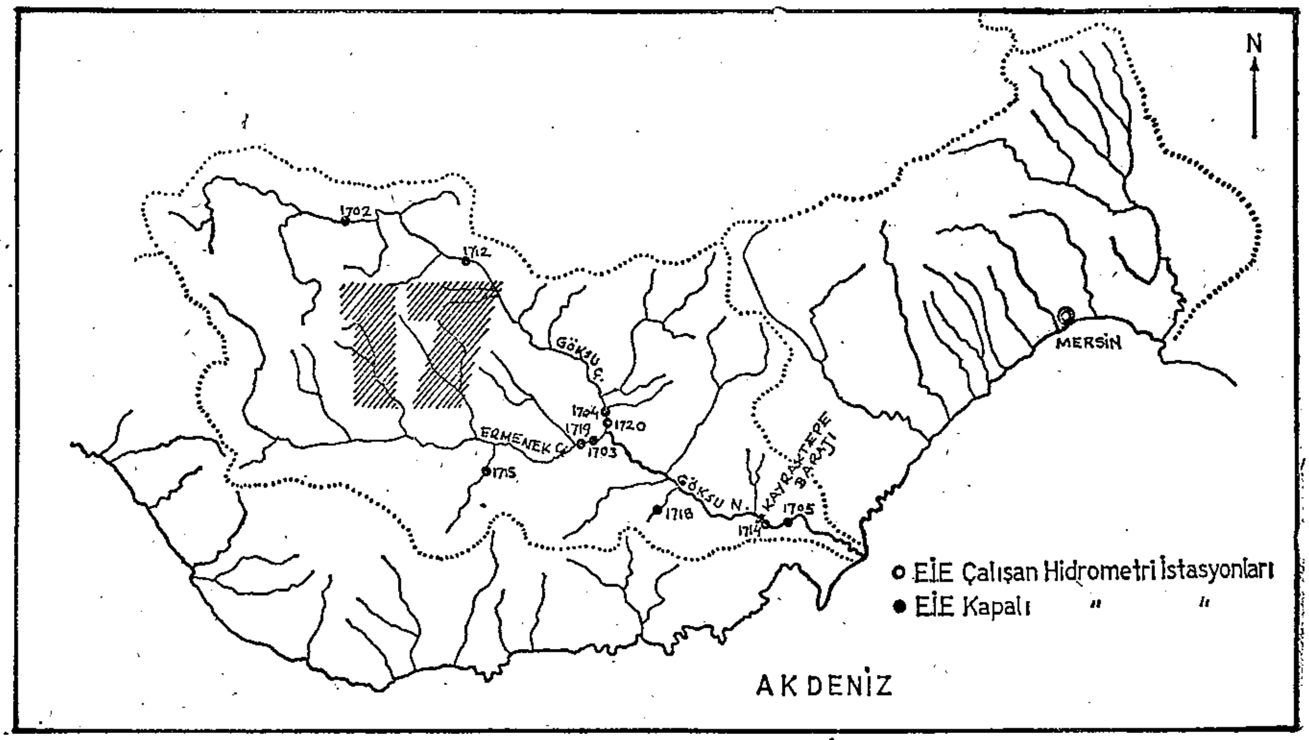
ifadesi elde edilir. Bu ifade logaritmik ölçekli kağıtta düz bir doğru gösterir.

$$\log y = Y, \quad \log a = A, \quad b = B \text{ ve } \log x = X$$

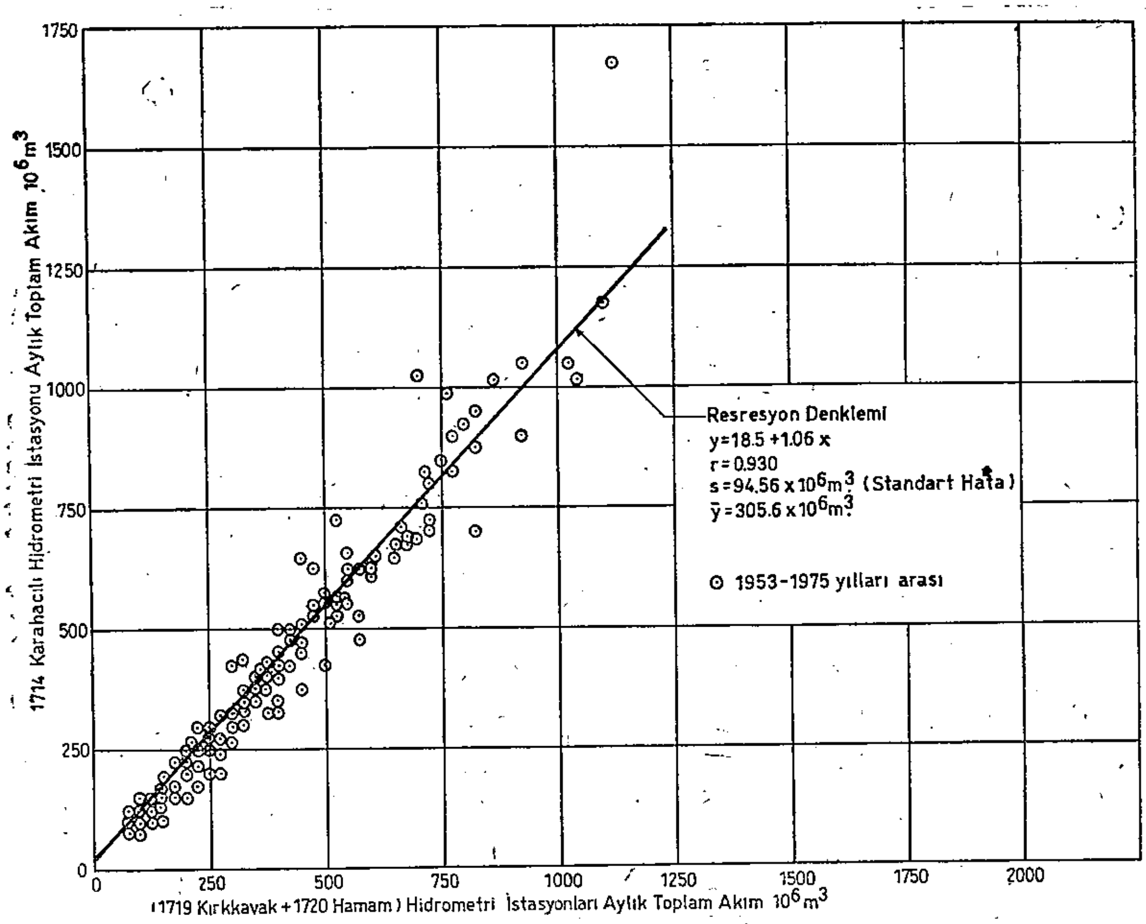
yazılırsa yukarıdaki denklem,

$$Y = A + B \, . \, X$$

şeklinde ifade edilir. (x) ve (y) değişken değerlerinin logaritmaları hesaplandıktan sonra (A) ve B) sabitlerinin değerleri iki değişkenli basit çizgisel regresyon denkleminde olduğu gibi en küçük kareler yöntemi ile bulunur.



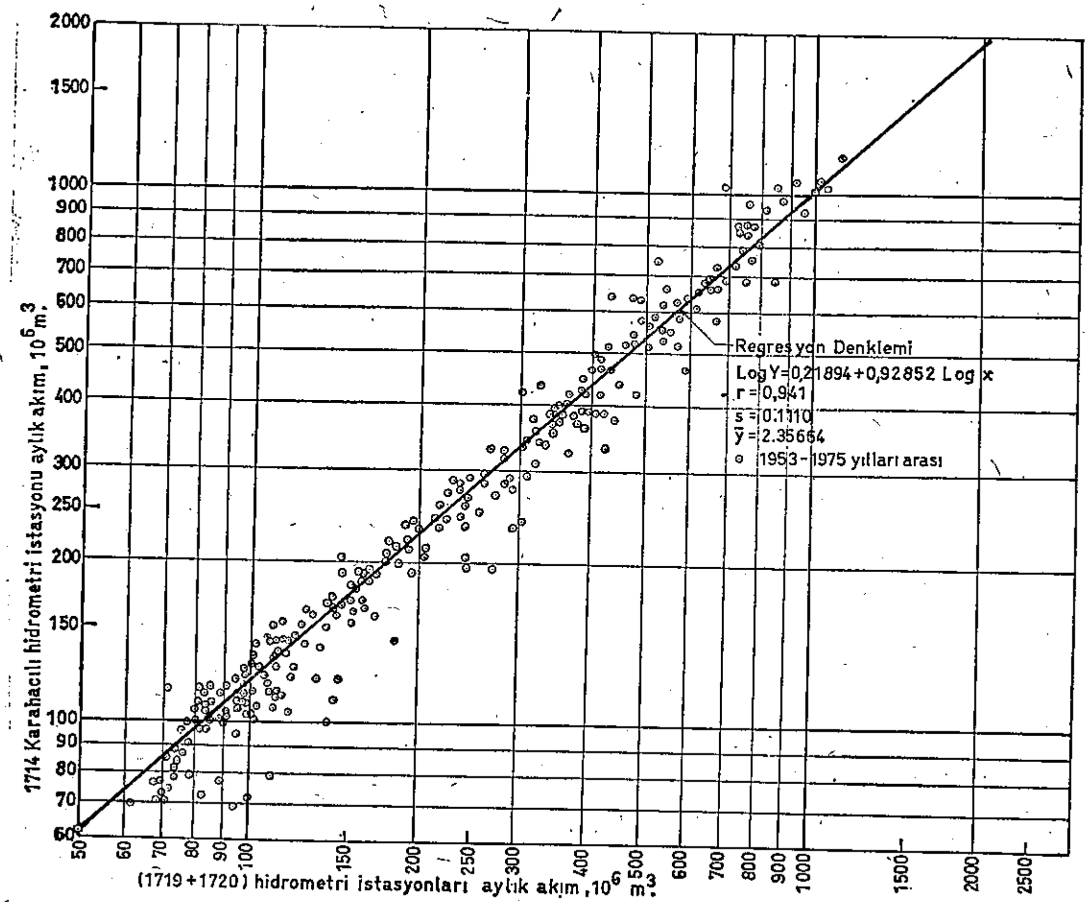
Şekil 12.43 — Göksu N. Yağış Alanı ve Hidrometri İstasyonları



ŞEKİL 12.44 — 1714 ve (1719 + 1720) Hidrometri İstasyonları Aylık Akımlarının Lineer Korelasyonu

(1714 ve 1705) hidrometri istasyonu aylık akımları ile (1719 + 1720) hidrometri istasyonlarının aylık toplam akımları (Şekil 12.45)'de gösterildiği gibi logaritmik ölçekli kağıda noktalanmıştır. Noktaları ortalayan doğrunun ($\log y = a + b \cdot \log x$) şeklindeki regresyon denklemi bilgisayarda çözümlenmiş ve sonuçlar (Şekil 12.45) üzerinde verilmiştir. Aşağıda verilen regresyon denkleminde (x) yerine (1719 + 1720) istasyonlarının (1946 - 1952) yılları arasındaki aylık akım değerleri konmuş ve (1946 - 1952) yılları arası (y) değerleri hesaplanmıştır.

$$\log y = 0{,}21894 + 0{,}92852 \cdot \log x$$



ŞEKİL 12.45 — 1714 ve (1719+1720) Hidrometri İstasyonları Aylık Akımlarının Korelasyonu

Logaritmik kağıda noktalanmış (x) ve (y) değerlerinin belirlediği bağıntı hafif eğrilik gösterirse, bu bağıntı

$$y = a \cdot x^b + c$$

şeklinde ifade edilir.

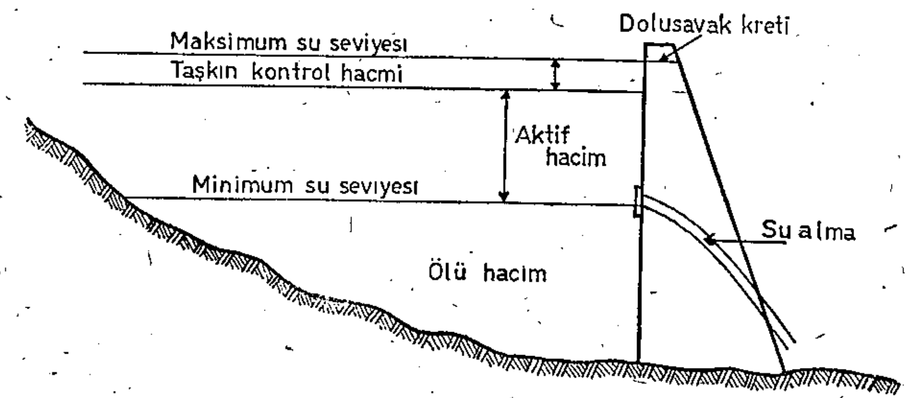
(y) ve (x) arasındaki bağıntı bazı durumlarda,

$$y = 10^{a+b.x}$$

şeklinde olabilir. Böyle bir bağıntı için yarı logaritmik ölçekli kağıtlar kullanılır. Bu kağıdın düşey ekseni logaritmik ve yatay ekseni normal (aritmetik) ölçeklidir.

20) HİDROLOJİNİN SU KAYNAKLARI PROJELERİNE UYGULANMASI

Su kaynaklarının geliştirilmesi düşünülen bir bölgedeki suyun miktarı ve kalitesi ile su gereksinimi bilinmelidir. Bu bilgilere göre akarsu üzerinde baraj inşa etmek veya etmemek kararı verilebilir, ayrıca baraj inşa edilecekse büyüklüğü ne olmalı, baraj çıkış kapasiteleri ne olmalı, taşkın esnasında veya kurak mevsimde baraj nasıl işletilmeli gibi sorular yanıtlanabilir. (Şekil 12.46)'da bir barajın şematik enkesiti gösterilmiştir.



Şekil 12.46 — Baraj Şematik Enkesiti

Suyun miktarı yıllık, aylık veya günlük ortalama akımla, veya daha kısa süreli ortalama akımla ifade edilir. Ortalama akım en iyi biçimde hidrometri istasyonu akım ölçülerinden hesaplanır. Akım ölçüsü olmıyan yerlerde su miktarını hesaplamak için korelasyon, türetme gibi teknikler geliştirilmiştir. Suyun alan dağılımı geometrik boyutlarla, rejim değişimi-zaman boyutu ile belirlenir. Meteorolojik ölçümler genellikle akım ölçümlerinden daha uzun sürelidir. Akım ölçümlerini yeterli süreye uzatmak için yağış gibi meteorolojik ölçümlerden yararlanılır.

Suyun kalitesi fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle belirlenir. Bu amaçla su kalite ölçümleri yapılır.

Akarsuyun bulunduğu bölgenin tarım, enerji, endüstri, taşkın koruma gibi amaçlarına göre su gereksinimi saptanır.

Su miktarı, kalitesi ve su gereksinimi saptandıktan sonra su kaynağı üzerindeki çeşitli kesitlerde düşünülen baraj projelerinden gereksinimi karşılayacak en uygunu seçilir ve baraj inşa edilir.

Akarsu üzerinde inşa edilen baraj, bağlama, gölet, kanal gibi mühendislik yapıları ile suyun alan ve zaman dağılımı yeniden düzenlenir.

Su kaynaklarının geliştirilmesi son yıllarda daha çok önem kazanmıştır. Toplum su gereksiniminin sınırlı doğal su kaynaklarından karşılanması problemi toplumun gelişme modeli içinde etkilidir. Bu problemin çözümlenmesindeki hata topluma büyük ölçüde yansır. Buna bağlı olarak su kaynaklarının geliştirilmesi teknikleri önem kazanmış ve sistem mühendisliği gibi yeni teknikler uygulamaya konmuştur. Matematik modeller, karar teorisi, bilgisayar gibi son yıllarda geliştirilen yeni tekniklerin su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarında uygulanması ile daha iyi ve hızlı sonuçlar elde edilmektedir.

KONTROL VE DEĞERLENDİRME SORULARI

1) Hidroloji'nin tanımını yapınız.
2) Hidrolojik çevrimi açıklayınız.
3) Hidrometeorolojik ağ nedir, bu ağı oluşturan istasyonlar nasıl sınıflandırılır?
4) Hidrometeoroloji istasyonlarında ölçülen hidrolojik çevrim parametreleri hangileridir?
5) Yağış nasıl ölçülür?
6) Kar gözlem istasyonunda yapılan ölçümleri açıklayınız.
7) Buharlaşma nasıl ölçülür?
8) Termograf, aktinograf, psikrometre, anemograf ile neler ölçülür?
9) Hidrometri istasyonu nedir?
10) Debi hidrografı nedir?
11) Anahtar eğrisi nedir?
12) Akarsu ve göllerin su seviyeleri nasıl ölçülür?
13) Akarsuların su hızını ölçmede kullanılan muline tiplerini ve bir düşeydeki ortalama hızın nasıl bulunduğunu açıklayınız.
14) Sediment anahtar eğrisi nasıl çizilir?
15) Yüzey akımı, gecikme zamanı nedir?
16) Birim hidrografın tanımını yapınız.
17) Frekans ve frekans histogramı nedir?
18) Standart sapma nedir?
19) Hidrolojide kullanılan olasılık dağılımlarını belirtiniz.
20) Debi tekerrür (yenileme) aralığı nedir?
21) Regresyon denklemi nedir?

KAYNAKÇA

— UYGULAMALI HİDROLİK —

1) Genel Hidrolik, M. Emin Zorkun, 1975
2) Hidrolik Cilt I, Prof. Dr. Kazım Çeçen, 1973
3) Deneysel Hidromekanik, Prof. Dr. Cahit Özgür, 1971
4) Hidrolik Cilt I, Prof. Nurettin Taner, 1966
5) Hidro-Aerodinamik, Prof. Saffet Müftüoğlu, 1969
6) Hidrolik Problemleri, Dr. Aydeniz Sığıner ve Dr. Mutlu Sümer, 1974
7) Pratik Hidrolik Problemleri, Prof. Dr. Cahit Özgür, 1972
8) Hidrolik Problemleri, Prof. Dr. Hamdi Topkaya, 1977
9) Su Makinaları Dersleri, Prof. Dr. Cahit Özgür, 1977
10) Su Makinaları Ders Notları, Prof. Aziz Ergin, 1972
11) Hidrolik Türbinlere Ait Esaslar, DSİ, 1965
12) Akım Makinaları (Çeviri), Prof. Seyfettin Saraçoğlu, 1972
13) Tam Santrifüj Pompalar, Doç. Dr. B. Kaya Baysal, 1975
14) Santrifüj Pompalar, Fahrettin Sönmez, 1961
15) Pompalar, A. Turhan Gökelim, 1976
16) Derinkuyu Su Motor-Pomp Gruplarının Tanıtılması, DSİ, 1969
17) Su Kuyuları, Kazım Karacadağ, 1966
18) Fluid Mechanoics and Hydraulics, Prof. Ranold V. Giles, 1962
19) Practical Hydraulics, A.L. Simon, 1976
20) İntroduction to Fluid Mechanics, R.W. Henke, 1967
21) Fluid Mechanics, R.L. Daugherty and A.C. Ingersol, 1954
22) Fluid Mechanics, Prof. Dr. Richard H.F. Pao, 1961
23) Mechanics of Fluids, Prof. Irving H. Shames, 1962
24) Hondbook of Applied Hydraulics, Calvin V. Davis, 1952
25) Elements of Hydraulic Engineering, Prof. R.K. Linsley and Prof. J.B. Franzini, 1955

— UYGULAMALI HİDROLOJİ —

1) Hidroloji, Doç. Dr. Mehmetçik Beyazıt, 1974
2) Hidroloji Ders Notları, Dr. Recai Bilgin, 1975
3) Su Kaynaklarının Geliştirilmesinde Meteorolojik Uygulamalar, H. Yaşar Kutoğlu) EİE Bülteni, Ağustos 1975
4) Uygulamalı Taşkın Hidrolojisi, Hüseyin Özdemir, 1978
5) Taşkınlar Hidrolojisi, DSİ, 1968
6) Küçük Toprak Barajların Planlama, Projelendirme, İnşaat ve İşletme Esasları, Ass. Prof. Korkut Özal, 1967
7) Toprak ve Su Kaynakları Özel İhtisas Komisyonu - Su Kaynakları Potansiyeli ve Bugünkü Durumu Çalışma Grubu Raporu, 1976
8) Göksu Nehri - Kayraktepe Barajı Mühendislik Hidroloji Raporu, EİE, 1977
9) Hidrolog Geliştirme Kursu Ders Notları. EİE, 1977
10) Hidroloji Uygulamaları, Prof. Dr. Mehmetçik Bayazıt, Dr. İlhan Avcı ve Dr. Zekâi Şen, 1978
11) Hydrometeorology, H. Yaşar Kutoğlu, 1973
12) Hyrology for Engineers, R.K. Linsley, M.A. Kohler, J.L. H. Paulhus, 1975
13) Introduction to Hydrometeorology, J.P. Bruce and R.H. Clark, 1966
14) Handbook on the principles of Hydrology, Donald M. Gray, 1973
15) Handbook of Applied Hydrology, V.T. Chow, 1964
16) Hydrometeorology, C.J. Wiesner, 1970
17) Engineering Hydrology, E.M. Wilson, 1974
18) Engineering Hydrology, J. Nemec, 1972
19) Guide to Hydrometeorological Practices, World Meteorological Organization, 1970
20) Geohydrology, R.J. M. De Wiest, 1965
21) Problems in Applied Hydrology, E.F. Schulz, 1973