İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROLİK SIÇRAMANIN HAVALANDIRMA VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Serhat KÜÇÜKALİ

Anabilim Dalı : KIYI BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KIYI BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

NİSAN 2006

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında destek ve yardımlarını gördüğüm danışmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Şevket ÇOKGÖR'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmasına getirdikleri eleştiri ve önerilerle, çalışmanın gelişmesine katkılarda bulunan Sn. Prof. Dr. Sedat KAPDAŞLI, Doç.Dr. Hayrullah AĞAÇCIOĞLU, Prof. Dr. Emin KARAHAN, Doç. Dr. Esin ÇEVİK'e şükranlarımı sunarım.
Tezin son halini tekrar gözden geçirip, gerekli düzeltmeleri yapan Doç. Dr. Emine Ubay ÇOKGÖR'e teşekkür ederim. Deney sistemin kurulmasındaki katkılarından dolayı değerli dostum Levent Kamil EKİNCİ ve İTÜ Hidrolik Laboratuvarı teknisyenlerine ayrıca teşekkür ederim.

Ocak 2006 Serhat KÜÇÜKALİ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ v

ŞEKİL LİSTESİ vi

SEMBOL LİSTESİ x

1. GİRİŞ **1**

1.1 Çalışmanın Anlam ve Önemi 1

1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı 2

2. SU İÇERSİNDEKİ ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJENİN ÇEVRE SAĞLIĞI VE EKOLOJİK AÇIDAN ÖNEMİ **3**

Kıyı Suları Açısından Sudaki Çözünmüş Oksijenin Önemi 6

3. SUYUN DOĞAL OLARAK HAVALANDIRILMASI **10**

Hava-Su Gaz Transferi 11

3.1.1 Sıcaklığın hava-su gaz transferi üzerine etkisi 14

3.1.2 Su kalitesinin hava-su gaz transferi üzerine etkisi 15

Doğal Havalandırma Sürecinde Kullanılan Ölçüm Teknikleri 16

3.1.3 Su içindeki hava miktarının ölçülmesi 16

3.1.4 Su içindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun ölçülmesi 16

3.1.5 İz Tekniği 17

Suyun Doğal Havalandırılmasıyla İlgili Yapılan Çalışmalar 18

4. HİDROLİK SIÇRAMA **20**

Hidrolik Sıçrama Konusunda Yapılmış Olan Çalışmalar 21

Hidrolik Sıçramada Momentumun Korunum İlkesinin Uygulanması 24

Hidrolik Sıçrama Mekanizması 26

Hidrolik Sıçramanın Oluşmasını Sağlayan Kanal Geometrileri 27

Hidrolik Sıçramanın Türbülans Yapısı 28

Hidrolik Sıçramanın Havalandırma Verimliliği 30

5. DENEY SİSTEMİ VE KULLANILAN ÖLÇÜM TEKNİKLERİ 35
5.1 Deney Kanalı 35
Çözünmüş Oksijen Ölçümleri 38
Türbülans ve Basınç Çalkantıları Ölçümleri 42
Akım Görüntüleme 44
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 46
6.1 Boyut Analizi 46
6.2 Kuramsal Yaklaşım 48
6.3 Hidrolik Sıçramanın Doğal Havalandırma Verimliliğinin Araştırılması 49
6.4 Savaktaki Doğal Havalandırma Verimliliğinin Araştırılması 63
6.5 Hidrolik Sıçramanın Türbülans Yapısı 72
6.6 Basınç Çalkantıları Ölçümleri 86
6.7 Akım Görüntüleme Sonuçları 91
7. SONUÇLAR 101
ÖZGEÇMİŞ 111

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Bazı sucul canlılar için optimum T_{su} ve ÇO değerleri 4

Tablo 2.2 İnsan faaliyetlerinin akarsu sistemi üzerine etkileri 7

Tablo 2.3. Reaktif azotun doğadaki farklı sistemlerdeki özellikleri 9

Tablo 4.1. Hidrolik sıçramanın Fr_1 sayısına göre sınıflandırılması 27

Tablo 4.2. Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini hesaplamada kullanılan formüller..... 34

Tablo 5.1. Sudaki çözünmüş oksijen doygunluk miktarının sıcaklıkla değişimi 40

Tablo 5.2. Hidrolik sıçrama giriş ve çıkışında farlı zamanlarda yüzdesel olarak ölçülen ÇO değerleri 42

Tablo 6.1. Hidrolik sıçrama deneylerine ait akım koşulları ve elde edilen sonuçlar 52

Tablo 6.2. Farklı formüllerle tahmin edilen E_{20} değerlerinin bağıl hatalarının ortalamaları ve korelasyon katsayıları 63

Tablo 6.3. Savakta gerçekleştirilen deneylere ait akım koşulları.....67

Tablo 6.4. Savaklardaki havalandırma verimliliği için elde edilmiş olan formüller. 67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Su içindeki ÇO'nun doygunluk konsantrasyonun su sıcaklığına bağlı olarak değişimi 3

Şekil 2.2 Su içen atık suların karışması sonucunda ÇO'nun azalmasına yol açan biyokimyasal reaksiyonlar 5

Şekil 2.3 Dünyadaki yıllık azot gübresi tüketiminin yıllara göre değişimi 6

Şekil 2.4 Dünya'da oksijeni tükenmiş kıyı sularının harita üzerinde gösterimi 8

Şekil 2.5 Sudaki ÇO'yu tüketen reaktif azotun akarsular tarafından kıyı sularına taşınmasının şematize edilmesi 8

Şekil 3.1 Gameson (1957) tarafından basamaklı savaklardaki havalandırma verimliğinin araştırılması 10

Şekil 3.2 Hava-su gaz transferinin şematize edilmesi 13

Şekil 3.3 Su içine hava girişini sağlayan serbest yüzeydeki düzensizliklerin şematize edilmesi 19

Şekil 3.4 Su düşümünde hava girişini sağlayan kritik hızın düşey yöndeki türbülans şiddeti ile değişimi 19

Şekil 4.1 Hidrolik sıçramadaki temel fiziksel büyüklüklerin şematik olarak gösterilmesi 20

Şekil 4.2 Hidrolik sıçrama ve özgül enerji-akım derinliği eğrisinin gösterimi 21

Şekil 4.3 Rölatif havalandırma uzunluğunun Fr_1 sayısına bağlı olarak değişimi 23

Şekil 4.4 Hidrolik sıçramada momentumun korunumu 24

Şekil 4.5 Klasik bir hidrolik sıçramdaki hız dağılımı: Fr_1=6.8; d_1=2 cm 26

Şekil 4.6 Serbest yüzeyli bir hidrolik sıçramada akım ortamında meydana gelen fiziksel değişimlerin şematize edilmesi 26

Şekil 4.7 Hidrolik sıçramanın Fr_1 sayısına göre sınıflandırılması 27

Şekil 4.8 Hidrolik sıçrama oluşumunu sağlayan kanal geometrileri 28

Şekil 4.9 Hidrolik sıçramadaki türbülans karakteristikleri.....30

Şekil 4.10 Hidrolik sıçramada su içine hava girişinin şematize edilmesi 31

Şekil 4.11 Hidrolik sıçramada farklı Froude sayıları için su içindeki hava konsantrasyonun noktasal olarak dağılımı 31

Şekil 4.12 Klasik hidrolik sıçramadaki sınır tabakası gelişimini şematize edilmesi. 32

Şekil 4.13 Hidrolik sıçramadaki havalandırma bölgeleri 33

Şekil 5.1 (a) Deney kanalının ölçekli olarak üstten görünümü; (b) deney kanalında oluşturalan hidrolik sıçramanın şematik olarak yandan gösterilmesi 36

Şekil 5.2 Deney kanalında hidrolik sıçrama yaratmak için kullanılan kapaklar. (a) düşey kapak, (b) çıkış kapağı 37

Şekil 5.3 Deneylerde kullanılan oksijenmetrenin genel elemanları..... 41

Şekil 5.4 Hidrolik sıçrama çıkışında çözünmüş oksijen ölçümü yapılırken..... 41

Şekil 5.5 Deneylerde kullanılan akustik noktasal hızölçerin (ADV) çalışma prensibi 43

Şekil 5.6 Deneylerde Fr_1=3, q=0.0354 m^2/s olduğu akım koşullarında x/d_2=7.29, y/d1=1.03 noktasında ölçülen üç boyutlu hızların zaman serisi 43

Şekil 5.7 Hidrolik sıçramadaki basınç çalkantıları ölçümleri için tabana yerleştirilmiş olan basınç dönüştürücüler..... 45

Şekil 5.8 Kanalda oluşturulmuş bir hidrolik sıçramaya örnek (Fr_1=4.85; q = 5.3×10^{-2} m^2/s) 45

Şekil 6.1 Hidrolik sıçramadaki özgül enerji- akım derinliği grafiğinde enerji kaybının gösterilmesi: Deney No 42 ve 45 53

Şekil 6.2 Oluşturulan hidrolik sıçrama ve çevrinti bölgesi uzunluklarının Fr_1 sayısına göre değişimi 54

Şekil 6.3 Hidrolik sıçramadaki yük kaybının çevrinti bölgesi uzunluğuna göre değişimi 55

Şekil 6.4 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin Fr_1 sayısıyla değişimi 56

Şekil 6.5 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin yük kaybı ile değişimi 57

Şekil 6.6 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin yük kaybı ile değişimi 57

Şekil 6.7 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin farklı debilerde yük kaybına göre değişimi 59

Şekil 6.8 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin (6.18) denklemiyle tahmin edilmesi 61

Şekil 6.9 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin Apted ve Novak (1973), Wilhelms ve diğ. (1981) verileri için (6.18) denklemiyle tahmin edilmesi 62

Şekil 6.10 Geliştirilen denklemin diğer denklemlerle kıyaslanması 64

Şekil 6.11 Hidrolik sıçramadaki rölatif enerj kırılmasının α katsayısıyla değişimi... 65

Şekil 6.12 Savaktaki havalandırmada etkin olan parametreler 66

Şekil 6.13 Hidrolik sıçramadaki ve savaktaki havalandırma verimliliğinin yük kaybına göre değişimi 68

Şekil 6.14 Savaktaki havalandırma verimliliğinin farklı debilerdeki yük kaybına göre değişimi 70

Şekil 6.15 Savaktaki gözlenen havalandırma verimliliğinin formülüyle tahmin edilmesi 71

Şekil 6.16 Akım doğrultusundaki maksimum türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama boyunca değişimi 73

Şekil 6.17 Düşey doğrultudaki maksimum türbülans şiddettinin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi 75

Şekil 6.18 Akım doğrultusundaki türbülans şiddettinin hidrolik sıçrama alanındaki değişimi 76

Şekil 6.19 Düşey doğrultusundaki türbülans şiddettinin hidrolik sıçrama alanındaki değişimi 79

Şekil 6.20 Reynolds kayma gerilmesinin hidrolik sıçrama alanı içersindeki değişimi 80

Şekil 6.21 Boyutsuzlaştırılmış türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi 82

Şekil 6.22 Makro ölçekli çevrilerden mikro ölçekli çevrilere enerji iletiminin şematize edilmesi 83

Şekil 6.23 Türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi..... 84

Şekil 6.24 Akım doğrultusundaki türbülans çalkantı bileşininin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi 85

Şekil 6.25 Düşey doğrultudaki türbülans çalkantı bileşeninin hidrolik sıçrama boyunca değişimi 87

Şekil 6.26 Hidrolik sıçramadaki basınç çalkantılarının farklı noktalarda zamanla değişimi: Fr_1 = 4,30; q = 0,020 m^2/sn 88

Şekil 6.27 Hidrolik sıçrama alanındaki karakteristik basınç büyüklüklerinin değişimi: Fr_1= 4.9; q=0.02 m^2/s; d1=1.2 cm..... 90

Şekil 6.28 Hidrolik sıçrama boyunca boyutsuzlaştırılmış basınç çalkantılarının karesel ortamaların karakökünün x/d1 bağlı değişimi 91

Şekil 6.29 Hidrolik sıçrama boyuncaki basınç çalkantılarının karesel ortamaların maksimum değere olan oranının x/d1 göre değişimi 92

Şekil 6.30 Hidrolik sıçramdaki vortkes birleşiminin görüntülenmesi: Fr_1=2.45; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.5 cm, X = 20 cm; L_r=25 cm..... 93

Şekil 6.31 Hidrolik sıçramdaki tabakalar arasındaki hız farkından dolayı oluşan çevri hareketinin şematize edilmesi 94

Şekil 6.32 Hidrolik sıçramdaki hava girişinin görüntülenmesi: Fr_1=2.45; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.5 cm, X = 20 cm; L_r=25 cm..... 95

Şekil 6.33 Hidrolik sıçramadaki vorteks birleşiminin şematize edilmesi 96

Şekil 6.34 Hidrolik sıçramdaki hava kabarcık ve ceplerinin çıkışının görüntülenmesi: Fr_1=2.45; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.5 cm, X = 20 cm; L_r=25 cm 98

Şekil 6.35 Hidrolik sıçramdaki hava girişinin görüntülenmesi: Fr_1=2 99

Şekil 6.36 Hidrolik sıçramdaki hava kabarcık ve ceplerinin çıkışının görüntülenmesi: Fr_1=2; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.8 cm, X = 47 cm; L_r=15 cm 100

SEMBOL LİSTESİ

a	: Oksijen transferinin gerçekleştiği yüzey alanının hacme olan oranı
A	: Gaz-sıvı girişim alanı
C_a	: Gazın havadaki konsantrasyonu
C_D	: Bir hidrodinamik olayın çıkışındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu
C_S	: Gazın sıvı içersindeki doygunluk konsantrasyonu
C_U	: Bir hidrodinamik olayın girişindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu
C_w	: Gazın su içerisindeki konsantrasyonu
D	: Moleküler difüzyon katsayısı
d_1	: Hidrolik sıçramadan önceki akım derinliği
d_2	: Hidrolik sıçramadan sonrakiki akım derinliği
d_{ab}	: Hava kabarcık çapı
d_c	: Kritik akım derinliği
d_{cp}	: Kısmi gelişmişden tam gelişmiş akım koşullarına geçişteki akım derinliği
d_p	: Havuzcuk derinliği
E	: Havalandırma verimlilik katsayısı
f	: Sıcaklık düzeltme katsayısı
Fr_1	: Hidrolik sıçramadan önceki Froude sayısı
H	: Henry Katsayısı
h	: Düşüm yüksekliği
K_L	: Sıvı ortamındaki kütle transfer katsayısı
k	: Türbülans kinetik enerjisi
K_g	: Gaz ortamındaki kütle transfer katsayısı
L_a	: Hidrolik sıçramadaki havalandırma uzunluğu

$\mathbf{L_j}$: Serbest yüzeyli hidrolik sıçramanın uzunluğu

$\mathbf{L_r}$: Hidrolik sıçramadaki çevrinti bölgesi uzunluğu

p : Basınç

p' : :Tabanda oluşan türbülans basınç çalkantıları

P :Basınç kuvveti

q: :Birim genişlikten geçen debi

Q: :Debi

r :Oksijen eksiklik katsayısı

$\mathbf{r_{20}}$: 20 ^{o}C sıcaklıktaki oksijen eksiklik katsayısı

Re : Reynolds sayısı

$\mathbf{T_0}$: Referans sıcaklığı

$\mathbf{t_c}$: Hava kabarcıklarının suda kalış süresi

$\mathbf{T_w}$: Çalışmanın gerçekleştirildiği su sıcaklığı

U : Akım doğrultusundaki bir noktada ortalama hız

u: :Akım ortamında bir noktadaki anlık hız

$\mathbf{U_c}$: Su düşümünde hava girişini sağlıyan krıtik çarpma hızı

$\mathbf{U_j}$: Su jetinin havuzcuğa çarpma hızı

We : Weber sayısı

x :Hidrolik sıçrama başlangıcından akım doğrultusu boyuncaki krakteristik yatay mesafe

$\mathbf{x_{cp}}$: Kısmi gelişmiş koşullarından tam gelişmiş akım koşullarına geçiş noktasının kapağa olan yatay mesafesi

y : Kanal tabanından su yüzeyine doğru olan krakteristik düşey mesafe

α : Kinetik enerjinin potansiyel enerjiye oranı

γ : Özgül ağırlık

δ : Sınır tabakası kalınlığı

ΔH : Yük kaybı

μ : Dinamik viskozite

ρ	: Özgül kütle
σ	: Yüzey gerilmesi
υ	: Kinematik viskozite
$\sqrt{\overline{v'^2}}$	:Düşey yöndeki türbülans çalkantı bileşenlerinin karesel ortalamasının karekökü
$\sqrt{\overline{u'^2}}$	:Yatay yöndeki türbülans çalkantı bileşenlerinin karesel ortalamasının karekökü

HİDROLİK SIÇRAMANIN HAVALANDIRMA VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Doğal havalandırma, havadaki oksijenin suya olan transferi olarak tanımlanmaktadır. Doğal havalandırmayı sağlayan üç tane hidrodinamik süreç vardır, bunlar: (1) hidrolik sıçrama, (2) su düşümü, (3) basamaklı kanallardan ilerleyen akım. Bu yapıların bir diğer ortak özelliği hidrolik yapılarda enerji kırıcı olarak kullanılmalarıdır. Bu noktadan hareketle, doğal havalandırma verimliliğiyle enerji kırılması arasında pozitif bir ilişkinin bulunması beklenmektedir. Doğal havalandırmayı sağlayan bu hidrodinamik süreçlerde, termodinamiğin 1. prensibine dayanılarak, kaybolan enerjiden büyük ölçekli çevrilerin sorumlu olduğu ve bu çevrilerin yaptığı işin suya oksijen transferini sağlayan mekanizma olduğu yaklaşımında bulunulmuştur. Bu hipotezi desteklemek için laboratuvarda klasik hidrolik sıçramayla ilgili sistematik deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, genişliği 0.5 m olan bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir ve deneylerde $Fr_1 = 2.3 - 6.4$ arasında, ve $\mathrm{Re} = 1.4 - 5.4 \times 10^4$ arasında değerler almıştır. Havalandırma verimliliği 0.01-0.1 arasında değişim göstermiştir ve transfer olan oksijen miktarıyla, kırılan enerji miktarı arasında kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. Deneysel verilerin analizi sonucu, hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini yük kaybının ve birim genişlikten geçen debinin fonksiyonu olarak tahmin eden bir formül geliştirilmiştir. Havalandırma verimliliği yük kaybının ¾'cü, birim genişlikten geçen debinin ise ¼'cü kuvvetiyle ilişkilendirilmiştir. Olaydaki türbülans yapısının önemli rolü yapılan ölçümlerle ortaya konmuştur. Hidrolik sıçrama boyuncaki akım doğrultusundaki türbülans şiddeti eksponansiyel olarak azalan , türbülans kinetik enerjisi ise lineer olarak azalan bir fonksiyon sergilemiştir ve bu gidiş hidrolik sıçramadaki hava konsantarsyonu dağılımıyla uyuşmaktadır. Elde edilen deneysel bulgular, hidrolik sıçramdaki yük kaybının, ortamdaki türbülans kinetik enerjisini temsil ettiğini göstermektedir ve bu süreç yüzey yenilenme teoremini desteklemektedir. Sonuçta, hidrolik sıçramanın, arıtma tesislerinde etkin bir havalandırıcı ve karıştırıcı olarak kullanabilineceği ortaya konmuştur**.**

Anahtar Kelimeler: Doğal havalandırma, hidrolik sıçrama, su kalitesi, türbülans

INVESTIGATION OF HYDRAULIC JUMP SELF-AERATİON PROCESS

SUMMARY

Self-aeration is defined as the transfer of oxygen from air towards water. There are three hydrodynamic processes that ensure reaeration, these are: (1) hydraulic jump, (2) water fall, and (3) flow over stepped channels. Other common characteristic of these processes are, they are also used as energy dissipaters. From this point of view, it is expected to find a positive correlation between the aeration efficiency and energy dissipation. Thus, it is suggested that energy consuming large-scale eddies are responsible for the suction of air into water, based on the Thermodynamics First Law. Hence, aeration efficiency should be directly proportional with the work done by these eddies and to support this hypothesis, systematic experiments have been carried out for classical hydraulic jumps. Experiments were conducted in a 0.5 m wide flume with upstream Froude and Reynolds numbers ranging from 2.3 to 6.4 and 1.4 to $5.4x10^4$, respectively. Aeration efficiency got values between 0.01-0.1 and a strong correlation was found between the aeration efficiency and energy dissipation indicating the large-scale surface renewal eddies dominant role in the process. It was found that aeration efficiency is in proportion to the ¾ power of head loss and ¼ power of unit discharge. In addition, simultaneous measurement of turbulence quantities and dissolved oxygen were conducted. Turbulent characteristics exhibit decreasing exponential function through the hydraulic jump and this trend matches with the air concentration distribution. Moreover, the data reveals that head loss term represents the degree of turbulence kinetic energy related with the macro-scale vortices occurred in the roller length region and these findings are in agreement with the surface renewal theory. Consequently, experimental findings suggest that hydraulic jump can be used as a self-aerator and mixing device in water treatment plants.

Keywords: Self-aeration, hydraulic jump, water quality, turbulence

1 GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Anlam ve Önemi

Günümüzde, insan nüfusundaki hızlı artışa paralel olarak, kıyı sularına, akarsu ve sunni kanallardan boşalan oksijeni tükenmiş kirli suların miktarı giderek artmaktadır. Bu süreç, kıyı sularında oksijen ölü bölgelerin oluşmasına yol açarak, kıyı ekosistemlerini ve çevre sağlığını tehdit eden bir unsur oluşturmaktadır. İnsan kaynaklı bu kirli suların, kıyı suları gibi alıcı ortamlara deşarj olmadan önce, kirli sularda kaybedilmiş olan çözünmüş oksijenin tekrardan kazanılması, çevre sağlığı ve ekolojik açıdan son derece önemlidir. Günümüzde arıtma tesislerinin girişlerinde kaskatlar ve savaklar doğal havalandırıcı olarak sıkça kullanılmaktadırlar. Bu yapılara alternatif olarak, yapılması planlanan çalışmada, hidrolik sıçramanın oluştuğu düşey kapak ve mansap kontrol yapısı doğal havalandırıcı olarak önerilecektir. Literatürde, birden fazla düşey kapağın, arıtma tesislerinde doğal havalandırıcı olarak kullanılabileceği belirtilmiş ama bu konuda ayrıntılı bir bilgi sunulmamıştır.

Bu çalışmada, düşey bir kapağın altından geçen akımdan sonra oluşan hidrolik sıçramanın, havalandırma verimliliği laboratuvarda yapılacak sistematik ölçümlerle araştırılacaktır. Hidrolik sıçramanın etkin bir havalandırıcı ve mekanik karıştırıcı olduğunun gösterilmesi ve bu hidrodinamik yapının arıtma tesislerinde, denize deşarj olmadan önceki kanallarda kullanılmasının önerilmesi amaçlanmaktadır. Böylece alıcı ortama deşarj olmadan önceki suyun çözünmüş oksijen konsantrasyonun artması beklenmektedir.

1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

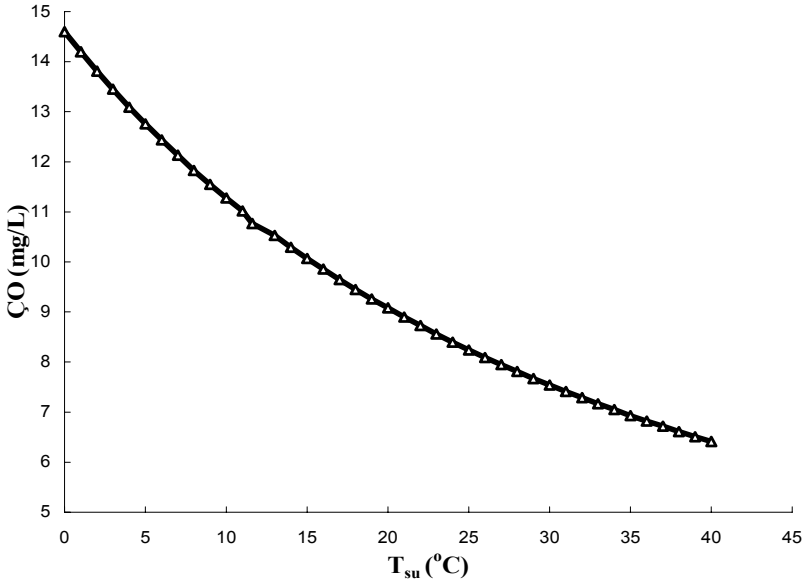
Gerçekleştirilecek bu deneysel çalışma ile hidrolik sıçramanın havalandırma performansı araştırılacak ve olaydaki türbülans yapısının önemi ortaya çıkarılacaktır. Ayrıca, hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini yük kaybı ve debi değişkenlerini hesaba katan bir ampirik ifadenin geliştirilmesi de amaçlanmaktadır. Çünkü, suya hava girişini sağlıyan hidrodinamik süreçlerin bir diğer ortak özelliği hidrolik yapılarda enerji kırıcı olarak kullanılmalarıdır. Hidrolik sıçramaların havalandırma verimliliği için elde edilmesi planlanan ampirik formülün doğruluğu diğer çalışmaların verileri kullanarak da araştırılacaktır. Ayrıca bu formülün uygulanabilinirliği savaklar ve basamaklı kanallar gibi diğer yapılar için de incelenecektir. Buna ek olarak, hidrolik sıçramada hava girişini sağlayan makro ölçekteki çevrilerin boyutları farklı akım koşulları için akım görüntüleme tekniğiyle analiz edilmeye çalışılacaktır.

Bu çalışma yukarıda belirtilen amaç ile aşağıda belirtilen adımları kapsıyacaktır. Çalışmanın ikinci bölümünde, konunun kıyı alanları açısından öneminin vurgulanması, üçüncü bölümde hava-su gaz transferiyle ilgili yapılan çalışmalara değinilmesi ve olaydaki etkin olan fiziksel süreçlerin vurgulanması;. dördüncü kısmında, hidrolik sıçramanın genel yapısı, özellikleri, hangi korunum denklemlerinin geçerli olduğu ve hidrolik sıçramayla ilgili yapılan önemli çalışmalardan bahsedilmesi; beşinci kısmında, laboratuvardaki deney sistemi, ölçüm aletleri ve kullanılan metot hakkında detaylı bilgi sunulması; altıncı bölümde, elde edilen deneysel verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması, son bölümde ise elde edilen sonuçlar iki alt gruba ayrılarak maddeler halinde özetlenmesini kapsamaktadır.

2 SU İÇERSİNDEKİ ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJENİN ÇEVRE SAĞLIĞI VE EKOLOJİK AÇIDAN ÖNEMİ

Günümüzde, nüfusun ve sanayileşmenin hızlı artışına bağlı olarak doğal kaynaklar hızla tükenmekte ve çevre kirliliği her geçen gün giderek artmaktadır. Bu olumsuz gelişmeler canlı hayatı için vazgeçilmez olan su kaynaklarının kirlenmesine yol açmaktadır. İnsan ve çevre sağlığı açısından suyun kalitesini belirlemeye yarayan önemli parametrelerden birisi su içindeki çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonudur. Burada bahsedilen oksijen suyun moleküler yapısında hidrojen iyonuyla kimyasal bağ yapmış H_2O içindeki oksijen değildir.

Bir sucul ekosistemde gerçekleşen birçok kimyasal, biyolojik ve fiziksel olaylarda sudaki oksijen kullanılmakta ve bu yüzden sudaki oksijen miktarı azalmaktadır (Gulliver ve diğ., 1998). Bu fiziksel etkenlerden en önemlisi su sıcaklığıdır. Su sıcaklığının artışıyla ÇO'nun su içindeki doygunluk miktarı azalır (Şekil 2.1). Şekil 2.1'de ÇO'nun su içindeki doygunluk konsantrasyonu, 760 mm Hg atmosfer basıncı, tuz konsantrasyonun sıfır olduğu durum için, su sıcaklığının bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Su içindeki ÇO'nun doygunluk konsantrasyonun su sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Colt, 1984).

Su içinde yaşayan canlılar solunumları ve diğer aktiviteleri için gerekli olan oksijeni sudan alırlar. Bu nedenle sudaki çözünmüş oksijenin miktarı yaşamlarını devam ettirmeleri açısından son derece önemlidir. Tatlı ve tuzlu sularda yaşayan balıklar, belirli su sıcaklığı ve çözünmüş oksijen değerleri arasında yaşarlar. Ayrıca sucul canlıların yumurtladığı ve yavru balıkların gelişim gösterdiği optimum su sıcaklığı T_{su} ve ÇO değerler vardır. Bazı sucul canlılar için bu değerler Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Bazı sucul canlılar için optimum T_{su} ve ÇO değerleri (Çelikkale ve diğ. [1999])

Sucul canlının ismi	Optimum T_{su} (^{o}C)	Optimum ÇO (mg/L)	Yumurtlaması için gerekli koşullar
Kalkan (Scophtalmus Maximus)	6-22	4.5-8	Kıyı suları,13-15 ^{o}C
Somon balığı (Salmo Salar)	2-18	5-10	Akarsu yatağı, 4-8 ^{o}C
Aynalı sazan (Cyprinus Carpia)	1-30	4-7	18-20 ^{o}C
Kara midye (Mytilus Galloprovincialis	6-24	2-8	10-20 ^{o}C
Kuruma karidesi (Penaeus Japonicus	15-35	4.5-8	22-24 ^{o}C
Çipura (Sparus Aurata)	6-32	4.5-8	Lagün, 14-16 ^{o}C
Gökkuşağı alabalığı (Oncorhynchus Mykiss)	1-20	5-10	4-8 ^{o}C

Eğer su içindeki çözünmüş oksijen miktarı canlıların ihtiyacı olandan daha az bir değere düşerse bu durum o canlılar üzerinde stres yaratarak çevre sağlığı açısından bir tehlike oluşturur. Su küredeki ÇO'nun insan kaynaklı nedenlerden dolayı düşmesinin başlıca sebebi: evsel, endüstriyel gibi noktasal ve tarım alanları gibi yayılı kaynaklardan gelen organik atık ve besi maddeleri (reaktif azot, fosfor) içeren atık suların, su kaynaklarına (akarsu, göl, deniz, haliç vb.) girişim yaparak karışmasıdır. Suya karışan bu organik atık ve besi maddeleri su içindeki çeşitli bakterilerin yaşamasına olanak sağlar ve bu bakteriler Şekil 2.2'de gösterilen biyo-kimyasal reaksiyonu gerçekleştirerek kendi metabolizmaları için gerekli olan enerjiyi sağlarlar.

Şekil 2.2'deki verilen reaksiyonlarda bakteriler tarafından kullanılan O_2, suda çözünmüş halde bulunan oksijenden sağlanır. Bu durum sudaki ÇO'nun miktarının azalmasına yol açar.

$$Organik\ madde + 0_2 \xrightarrow{Bakteri, Fungi} CO_2 + H_2O + NH_3$$

$$\left.\begin{array}{l} NH_4^+(Amonyak) + 1.5O_2 \xrightarrow{\substack{Nitrosomanas \\ Bakterisi}} 2H^+ + H_2O + NO_2^-(Nitrit) \\ NO_2 + 0.5O_2 \xrightarrow{\substack{Nitrobakter \\ Bakterisi}} NO_3^-(Nitrat) \end{array}\right\} Nitrifikasyon$$

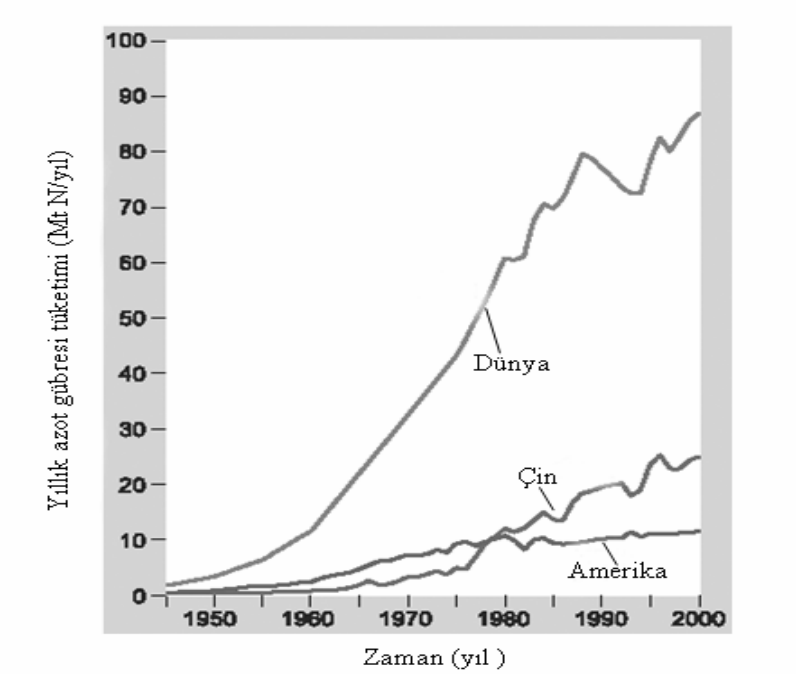
Şekil 2.2 Su içen atık suların karışması sonucunda ÇO'nun azalmasına yol açan biyokimyasal reaksiyonlar

Akarsulardaki ÇO miktarının bakteriler tarafından tüketildiği ilk kez Streeter ve Phelps (1925) tarafından ortaya konmuştur (Gönenç, 1979). Streeter ve Phelps (1925) bakteriler tarafından tüketilen olan ÇO miktarının suya karışmış olan organik maddelerin miktarıyla doğru orantılı olduğunu, Ohio Akarsuyu'nda yaptıkları çalışmayla ortaya koymuşlardır. Daha sonra Theriault (1927) evsel atık sularındaki ÇO miktarının azalmasının hem organik hem de azotlu maddelerin oksidasyonundan kaynaklandığı fikrini ortaya atmıştır. Günümüzde, 1 mg/L reaktif azotun (ör.NH_4) oksidasyonu (nitrifikasyon) için 4.6 mg/L ÇO harcandığını kabul edilmektedir (Novonty, 2003).

Su kaynaklarındaki ÇO'nun tükenmesi insan sağlığı açısından da bir tehdit oluşturur. Suda organik maddeleri ayrıştıran bakteri ve fungiler, kolera gibi hastalıkların insana geçmesine neden olabilir. Çevre sağlığı açısından diğer bir önemli husus ise, ÇO'su tükenen suda, organik maddelerin anaerobik ayrıştırılması sonucu ortama hidrojen sülfür (H_2S) salınmasıdır. Oksijensiz ortamda gerçekleşen bir diğer kimyasal olay ise denitrifikasyondur. Denitrifikasyonda, eğer oksijensiz durumda ortamda nitrit veya nitrat varsa, heteretrof mikroorganizmalar tarafından, nitrat gaz formunda azota çevrilip atmosfere verilir (Sözen, 1995). Kanalizasyon borularında hidrojen sülfür oluşumunu önlemek için, boru içine nitrat atılarak denitrifikasyon sürecinin oluşumunun sağlanması başvurulan bir yöntemdir (Baban, 1998). Bentzen ve diğ. (1995) kanalizasyon sisteminde nitrat atıldıktan sonra sülfatın 0-0.4 mg/L arasında, nitrat atılmadığı zaman ise sülfatın 4.2 mg/L civarındaki değerlerde olduğunu göstermişlerdir.

2.1 Kıyı Suları Açısından Sudaki Çözünmüş Oksijenin Önemi

Akarsular, bir vadi boyunca yüksek rakımdan düşük rakıma doğru yerçekiminin etkisiyle hareket ederler ve sonunda denize boşalırlar. 1950'li yıllardan sonraki hızlı nüfus artışına bağlı olarak, akarsular kıyı sularına organik atık ve besi maddelerini (reaktif azot ve fosforu) yüksek oranda taşımaktadırlar (Şekil 2.3). Kıyı alanlarındaki kirlenmenin %80'inin kıyı sistemine boşalan akarsular tarafından taşındığı Geo Year Book (2003)'te rapor edilmiştir.



Şekil 2.3 Dünyadaki yıllık azot gübresi tüketiminin yıllara göre değişimi (Smil, 2001)

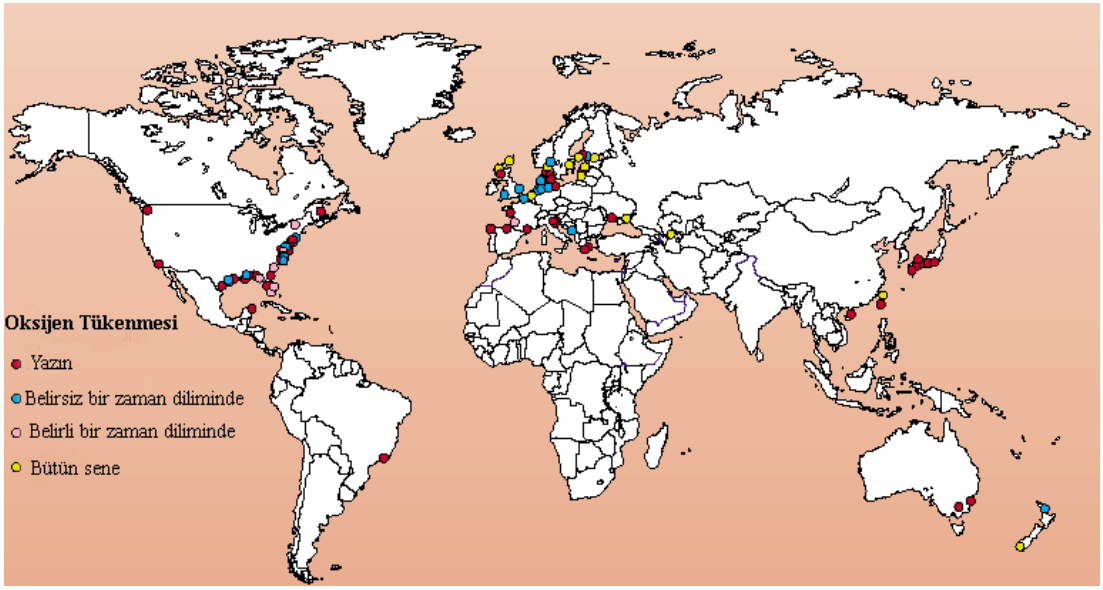
Ayrıca, günümüzde akarsuların dünya ölçeğinde insan faaliyetleri sonucunda en çok kirlenen ekosistemlerden biri olduğu kabul edilmektedir (Malmqvist ve Rundle, 2002). Tablo 2.2'de akarsuyun kirlenmesine yol açan insan faaliyetleri özetlenmiştir.

Atıksuların kıyı sularına deşarj olmasıyla, Şekil 2.2'de gösterilmiş olan kimyasal reaksiyonlar kıyı sularında gerçekleşmekte ve oksijensiz ölü bölgeleri kıyı alanlarında oluşmaktadır. Günümüzde, oksijen ölü bölgelerin oluştuğu bazı kıyı alanları şunlardır: Baltık Denizi, Meksika Körfezi, Kuzey Adriatik Denizi ve Tayland Körfezi'dir (UNEP, 2003). Bu durum sucul canlıların yaşamını tehdit etmektedir.

Tablo 2.2 İnsan faaliyetlerinin akarsu sistemi üzerine etkileri (Malmqvist ve Rundle [2002])

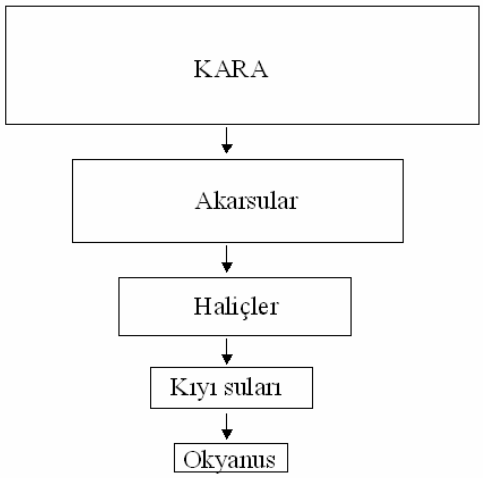
İnsan faaliyeti	Ekosistemde meydana gelen değişim	Biyolojik hayatta meydana gelen değişim
Yerleşim ve tarımsal alanların genişlemesi, suyun tamamen kullanılması	Ekosisteminin tamamen ortadan kalkması	Canlı türlerinin neslinin tükenmesi
Baraj inşa edilmesi, ormanların yok edilmesi, suyun başka bir yere taşınması	Akarsu rejiminin değişmesi, kuraklık riskinin artması, akarsuyun memba-mansap bağlantısının kesilmesi, baraj gölünün sedimentle dolması, akan suyun durdurulması sebebiyle sudaki ÇO'nun düşmesi	Canlıların yaşam alanın değişmesi, canlıların dağılımının azalması
Akarsu yatağının kenarında yer alan bitki örtüsünün değiştirilmesi, akarsu yatağının kanal haline dönüştürülmesi,	Akarsuya giriş yapan enerji birimlerinin (organik madde, ışık) değişmesi	Habitat koşulları ve tropik dinamiklerin değişmesi
Akarsuya, endüstrilerden salınan SO_2 ve NO_x gibi gazların ve egzozun (NO_x) difüze olması	pH'ın düşmesi (suyun asitliğinin artması)	Doğrudan fiziksel etkiler, besin zincirine dolaylı etki
Tarım alanları ve evsel , atık suların içerdiği besi maddelerinin akarsuya girişim yapması	N ve P'nin artması, reaktif azot girişiminden dolayı suyun ÇO'nun düşmesi	Alg miktarında artış, Canlıların yaşamlarını sürdürebileceği alanların azalması
Tarım alanları, evsel atık suların içerdiği organik maddelerinin suya karışması	Askıdaki katı maddelerin artması, suyun ÇO'sunun düşmesi	Canlıların yaşamlarını sürdürebileceği alanların azalması
Maden ve endüstri faaliyetleri sonucunda suya karışan ağır metaller	Cu, Hg, Zn v.b ağır metallerin suya girişim yapması	Doğrudan toksik etki
Balıkçılık faaliyetleri, akarsuya yeni balık türlerinin ilavesi	Akarsudaki türlerin saldırıya uğraması	Akarsuda canlıların arasındaki rekabetin artması/azalması

UNEP 2003'te akarsularla denize boşalan oksijeni tükenmiş su kütlesinin etki ettiği alanda, midye ve karides gibi yavaş hareket eden canlıların kitlesel ölümüne yol açtığı belirtilmiş ve dünya üzerinde oksijeni tükenmiş 146 kıyı alanı olduğunu raporlanmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Dünya'da oksijeni tükenmiş kıyı sularının harita üzerinde gösterimi (UNEP, 2003)

Galloway ve diğ. (2003) sudaki oksijenin tükenmesine yol açan reaktif azotun, kıyı alanlarının kirlenmesine yol açan en büyük etken olduğunu belirtmişlerdir . Dünyadaki reaktif azotun %32'sinin tarımda kullanılan gübre, % 27'sini insan atıkları ve % 41'nin atmosferden geldiği rapor edilmiştir (Novonty, 2003). Reaktif azot bir ekosistemden diğerine hareket eder ve her sistemde ayrı bir özellik taşır (Tablo 2.3). Bu süreç Galloway ve diğ. (2003) tarafından şematize edilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Sudaki ÇO'yu tüketen reaktif azotun akarsular tarafından kıyı sularına taşınmasının şematize edilmesi (Galloway ve diğ., 2003)

Tablo 2.3 Reaktif azotun doğadaki farklı sistemlerdeki özellikleri (Galloway ve diğ. 2003)

Sistem	Biriktirme kapasitesi	Transfer potansiyeli	Diğer sistemlerle bağlantısı	Etki potansiyeli
Atmosfer	Az	Çok yüksek	Yeraltı suyu hariç bütün sistemler	İnsan ve ekosistem sağlığı, iklim değişikliği
Tarımsal Alanlar	Az-orta	Çok yüksek	Hepsi	İnsan ve ekosistem sağlığı, iklim değişikliği
Orman	Yüksek	Orta-Yüksek	Hepsi	Biyolojik çeşitlilik, ilk üretim (alg), bitki ölümü, yeraltı suyu
Mera	Yüksek	Orta-Yüksek	Hepsi	Biyolojik çeşitlilik, ilk üretim (alg)
Yeraltı suyu	Orta	Orta	Yüsey suları ve atmosfer	İnsan ve ekosistem sağlığı, iklim değişikliği
Sulak alan, nehir, dere	Az-orta	Çok yüksek	Atmosfer, kıyı suları	Biyolojik çeşitlilik, ekolojik yapı, ötrifikasyon, alg patlaması
Kıyı suları	Az-orta	Orta	Atmosfer	Biyolojik çeşitlilik, ekolojik yapı, ötrifikasyon, alg patlaması

Sonuç olarak, günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık 1/3'ü kıyı alanlarında yaşamakta ve bu oranının ilerleyen yıllarda artması beklenmektedir (UNEP, 2003).

Kıyı ekosistemi ve insan sağlığı açısından, oksijeni tükenmiş su kütlesinin, akarsu veya insan yapımı kanallardan denize boşalmadan önce, fiziksel bir arıtıma tabi tutulması son derece önemlidir. Bu konuyla ilgili olarak, Bölüm 3'de sudaki ÇO miktarının artışını sağlayan hidrodinamik süreçlere değinilenecektir.

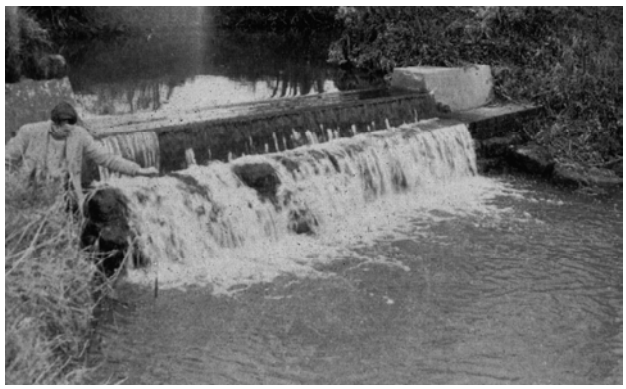
3 SUYUN DOĞAL OLARAK HAVALANDIRILMASI

Su havadan yaklaşık 1000 kat daha ağırdır (T_{su}=20 ^{o}C'de ρ_{su} =998.2, ρ_{hava}=1.204 kg/m^3;) ve hava ile su keskin bir yüzeyle birbirinden ayrılmışlardır. Akım ortamında meydana gelen bazı fiziksel süreçler, suyla hava fazları arasında bir temas yüzeyi yaratarak, havanın su içine girişim yapıp, karışmasını sağlar (Kobus, 1991). Bu süreç doğal havalandırma olarak adlandırılır.

Hava bir çok gazdan oluşan fiziksel bir karışımdır. Kirlenmemiş kuru bir hava, hacimsel olarak: %78 N_2, %21 O_2, %0.94 Ar, 360 ppm CO_2 (değişken), 18.18 ppm Ne vb. gazlarından oluşur (Brimblecombe, 1996). Bu çalışmada, suya giriş yapan atmosferik gazlardan oksijenle ilgili olan kısmı incelenecektir.

Havadan suya oksijen transferi: suya hava girişi; havanın havalandırma bölgesinden taşınması, hava kabarcıkları içindeki oksijenin su içinde çözünmesi ile üç aşamadan oluşur (Markofsky ve Kobus, 1978). Son aşama su kalitesinin bir fonksiyonudur ve suyun kirliliğinin artması oksijenin su içindeki çözünme yüzdesini azaltır.

Suyun doğal olarak havalandırma mekanizmasını literatürde ilk defa dile getirip, bu konudaki ilk formülleri öne süren Gameson (1957)'dir. Yazar İngiltere'deki birçok akarsudaki hidrolik yapılarda su içindeki ÇO konsantrasyonunun değişimini, yaptığı ölçümlerle araştırmıştır (Şekil 3.1). Yazar bu yapıları, serbest düşümlü savak, basamaklı savak, bent kapağı, eğimli kanal, ve değirmen olarak gruplandırmıştır.



Şekil 3.1 Gameson (1957) tarafından basamaklı savaklardaki havalandırma verimliğinin araştırılması

Gameson (1957), gruplandırdığı hidrolik yapıların, girişinde ve çıkışında ÇO konsantrasyonlarını ölçmüş ve bu yapıların suyun doğal olarak havalanmasını sağladığını saptayarak ve akımın havalandırma verimliliğini hesaplayan ifadeler öne sürmüştür (bkz. Denklem (3.8)-(3.9)). Araştırma sonucunda, en yüksek havalandırma verimliliği basamaklı savaklarda daha sonra serbest düşümlü savaklarda olduğu sonucuna ulaşmıştır. En düşük havalandırma verimliliği, eğimli kanal yapısında çıkmıştır. Gameson 1957'in ulaşmış olduğu bu sonuçları, Gulliver ve diğ. (1998)'in yapmış oldukları çalışma desteklemektedir. Literatürde yapılan çalışmalar yüksek eğimli kanallardaki etkin bir havalandırma sağlanmadığını göstermektedir (Watson ve diğ., 1998). Yüksek eğimli kanallarda daha çok hava girişiyle değişen akım karakteristikleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Wood, 1991).

Doğal havalandırmayı sağlayan hidrodinamik etkenler uzun ve kısa mesafede gerçekleşmesine göre sınıflandırılabilir (Kobus, 1991). Kısa mesafede doğal havalandırmayı sağlayan hidrodinamik süreçler: hidrolik sıçrama ve su düşümü; buna karşın uzun mesafede doğal havalandırmayı sağlayan hidrodinamik süreçler ise yüksek eğimli ve basamaklı kanallardan ilerleyen serbest yüzeyli akımlar olarak gruplandırılabilir (Kobus, 1991).

3.1 Hava-Su Gaz Transferi

Suyun doğal olarak havalandırılması, havadan suya doğru, bir ara yüzey boyunca gerçekleşen bir difüzyon oluşumudur. Bu olayda Fick kanunu geçerlidir. Fick kanunu bir ortamda konsantrasyon farklı olduğu zaman akı oluşacağını belirtir (Rutherford, 1994), bu ifade:

$$\frac{dm}{dt} = -D_{gaz} A \frac{dC}{dx} \tag{3.1}$$

burada dm/dt transfer olan kütlenin birim zamandaki değişimi, D_{gaz} gazın moleküler difüzyon katsayısı, A difüzyonun gerçekleştiği alanı, dC/dx transfer olan gazın konsantrasyonun x doğrultusu boyunca değişimini göstermektedir.

(3.1) eşitliğinin sağ tarafında eksi işareti olmasının sebebi, ilk durumdaki konsantrasyonun son durumdakine göre daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. (3.1) denklemi sıvı içinde çözünen bir kimyasal için yazılacak olursa (Gulliver ve diğ., 1990):

$$\frac{dm}{dt} = -KA(\frac{C_a}{H} - C_w) \tag{3.2}$$

halini alır. Burada K; transferi gerçekleşen gazın kütle transfer katsayısı, C_a; gazın havadaki derişimi, H; Henry katsayısı, C_w; gazın su içinde çözünmüş durumdaki derişimini göstermektedir. C_a değeri, atmosfer basıncıyla ve transferi gerçekleşen gazın hava içindeki miktarıyla doğru orantılıdır. Henry katsayısı ise; çözücü, çözünen, ve ortam sıcaklığının bir fonksiyonudur (Reid ve diğ., 1987). Tchobanoglous ve diğ. (2003), 20 ^oC ortam sıcaklığında H_{O2}= 41100 atm veya 30.75; H_{N2}= 80400 atm veya 60.16, $H_{CO}2$=1420 atm veya 1.06 olarak vermiştir. Genelde sıcaklığın artışıyla Henry katsayısı artış gösterir (Reid ve diğ., 1987) . Gazın sıvı içindeki doygunluk yüzdesini veren ifade ise:

$$C_S = \frac{C_a}{H} \tag{3.3}$$

şeklinde yazılabilir.

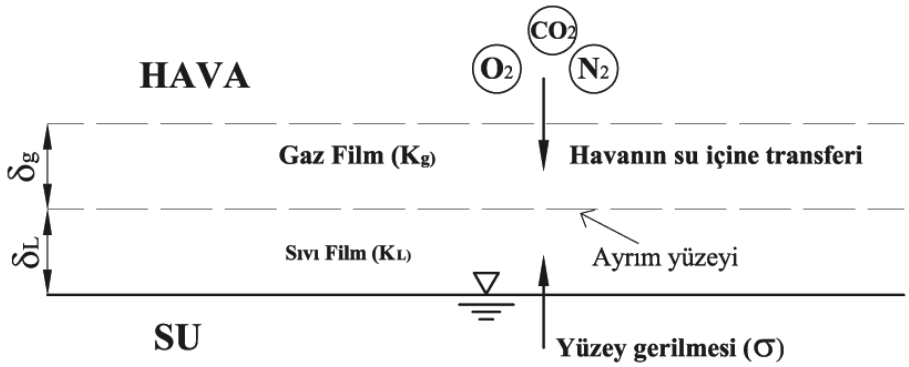
Kütle transfer katsayısı, K, transferi gerçekleşen gazın difüzyon katsayısıyla doğru orantılıdır (Muntz ve Roberts, 1988). Kawase ve Moo-Young (1992), K_L katsayısının maddenin difüzyon katsayısının yanında, türbülans karışım mekanizmasının bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüştür. Gazın transferi hem gaz hem de sıvı ortamda gerçekleştiğinden (Şekil 3.2), K ifadesi:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_L} + \frac{1}{HK_g} \tag{3.4}$$

şeklinde yazılabilir. Burada K_L sıvı ortamındaki (su), K_g ise gaz ortamındaki (hava) kütle transfer katsayısını gösterir. (3.4) ifadesindeki katsayıların tersi, gaz transferine karşı ortamların göstermiş olduğu direnci belirtir. Havanın oksijen transferine karşı gösterdiği direnç, sıvı faza kıyasla çok küçüktür (Gulliver ve diğ., 1990). Oksijenin 20 ^0C'de hava ortamındaki difüzyon katsayısı $D_g = 2.18 \times 10^{-5}$ m^2/s, buna karşın sıvı ortamındaki difüzyon katsayısı ise $D_L = 2.02 \times 10^{-9}$ m^2/s dir (Muntz ve Roberts, 1988).

Muntz ve Roberts (1988), kütle transfer katsayının hesaplanabilmesi için, moleküler difüzyon katsayısının 0.5-0.7 arasındaki değerleri için üstlerinin alınmasının uygun

olacağını belirtmiştirler. Buradan, $K_L << HK_G$ olur. Gaz transferi sıvı fazın kontrolünde olduğundan, $K \cong K_L$ alınır. N_2, CO_2 ve CH_4, propan ve toksik gazları içinde aynı kabul geçerlidir (Gulliver ve diğ., 1990).



Şekil 3.2 Hava-su gaz transferinin şematize edilmesi

Denklem (3.2)'in her iki tarafı transferin gerçekleştiği V hacmine bölünerek, (3.3) ifadesi, (3.2) ifadesinde yerine konolduğunda:

$$\frac{dC}{dt} = -K_L a(C_S - C) \tag{3.5}$$

ifadesi elde edilir. Burada a; oksijen transferinin gerçekleştiği yüzey alanının hacmine olan oranıdır. (3.5) denklemi, akım ortamında hava-su gaz transfer dinamiğini etkileyen bir hidrolik yapı boyunca (C_s değerinin değişmediği kabulü yapılıp) integrali alınırsa:

$$-\int_u^d \frac{dC}{(C_S - C)} = \int_0^t K_L a dt \tag{3.6}$$

elde edilir. (3.6) ifadesi çözüldüğünde

$$\frac{\ln C_S - C_U}{\ln C_S - C_D} = K_L a t \tag{3.7}$$

(3.7) denklemenin her iki tarafı e tabanında yazılacak olursa:

$$r = \frac{C_s - C_u}{C_s - C_d} = e^{K_L a t_c} \tag{3.8}$$

ifadesi elde edilir. Burada r oksijen eksiklik katsayısını, t_c ise hava kabarcıklarının suda kalış süresini ifade eder (Gameson, 1957). r, 0-∞ arasında değerler alır. Eğer ortamda, havadan suya oksijen transferi gerçekleşmemişse r = 1'dir. r ile havalandırma verimliliği arasında doğru bir orantı vardır. Genelde doğal havalandırmayla ilgili yapılan çalışmalarda r = 1-3 değerleri arasında değişim göstermektedir. Gameson (1957), akımın havalandırma performansının hesaplanmasını sağlayan bir denklem daha öne sürmüştür, bu ifade:

$$E = 1 - \frac{1}{r} = \frac{C_d - C_u}{C_s - C_u} \tag{3.9}$$

burada E havalandırma verimlilik katsayısı olarak hesaplanmıştır. E sayısının değişim aralığı 0-1 arasındadır. E'nin 0 değeri ortamda hiç havalandırma olmadığını, 1 değeri ise hidrolik yapı çıkışında suyun tamamen oksijene doygun hale geldiğini gösterir.

3.1.1 Sıcaklığın hava-su gaz transferi üzerine etkisi

Sıcaklığın değişmesiyle akışkanın özgül kütle, viskozite, yüzey gerilmesi değerleri ve kütle transfer katsayısı, gazın su içindeki doygunluk değeri değişir. Bu ise doğrudan hava-su gaz transfer dinamiğini etkilemektedir. Suyun doğal havalandırmayla ilgili yapılan çalışmaların karşılaştırabilmesini sağlayabilmek için; E ve r katsayıları standart bir su sıcaklığına dönüştürülmelidir. Genelde bu referans su sıcaklılığı 20 ^oC olarak alınmaktadır. Bu ifade katsayının bir alt indisiyle gösterilir (ör. r_{20}, E_{20}).

Gameson ve diğ. (1958) savaklarda farklı sıcaklıklarda gerçekleştirdikleri deneylerinde, suyun sıcaklığının artışıyla havalandırma verimliliğinin arttığını bulmuşlardır. Çünkü, kütle transfer katsayısı sıcaklık artışıyla artmaktadır. Gameson ve diğ., (1958) aşağıdaki ampirik formülü ortaya koymuşlardır:

$$r_{15} = 1 + \frac{r_T - 1}{1 + 0{,}027(T_w - 15)} \tag{3.10}$$

burada r_{15} 15 ^{0}C sıcaklığındaki referans oksijen eksiklik katsayısı, r_T çalışma ortamında T ^{0}C sıcaklığındaki oksijen eksiklik katsayısı, ve T_w çalışmanın gerçekleştirildiği su sıcaklığıdır. Gulliver ve diğ. (1990) tarafından öne sürülen bağıntı ise:

$$1 - E_{20} = (1 - E_T)^{1/f_T} \tag{3.11}$$

veya

$$r_{20} = r^{1/f} \tag{3.12}$$

burada f_T sıcaklık düzeltme katsayısıdır, bu ifade

$$f_T = \left(\frac{T + 273}{T_i + 273}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu_i}{\mu}\right)^{3/4} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma}\right)^{3/5} \left(\frac{\rho_i}{\rho}\right)^{17/20} \tag{3.13}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada i indisi referans sıcaklığında akışkanın özelliğini göstermektedir. 20 ^{o}C referans sıcaklığı için (3.13) eşitliği çözülecek olursa

$$f_T = 1 + 0.02103(T_w - 20) + 8.261x10^{-5}(T_w - 20)^2 \tag{3.14}$$

denklemi elde edilir.

3.1.2 Su kalitesinin hava-su gaz transferi üzerine etkisi

Suyun kirliliği arttıkça, oksijenin su içindeki çözünme yüzdesi azalır. Tchobanoglous ve diğ., (2003), kirli sudaki C_s değerinin bulunabilmesi için, temiz sudaki C_s değerinin 0.7-0.98 arasında değişen bir boyutsuz katsayıyla çarpılabileceğini önermişlerdir.Bu duruma ek olarak, suyun kirliğinin artması , oksijen transferine karşı gösterilen direnç kuvvetlerinin artmasına yol açar (Chanson, 1996). Gameson (1957) farklı su kalitelerinde yapılan çalışmaların, aynı koşullar altında karşılaştırılabilmelerini sağlayabilmek için şu formülü önermiştir:

$$(r-1)_{wq.b} = \frac{(r-1)_{wq}}{f_{wq}} \tag{3.15}$$

burada $(r-1)_{wq.b}$ referans su kalitesinde hesaplanan oksijen eksiklik katsayısını, $(r-1)_{wq}$ yapılan çalışmada hesaplanan oksijen eksiklik katsayısını, ve f_{wq} su kalitesini ifade eden boyutsuz bir katsayısını göstermektedir. f_{wq} değeri laboratuvar çalışmalarında, temiz su için 1; az kirlenmiş su için 0.89; orta derecede kirlenmiş su için 0.56; çok kirli su için 0.36 olarak verilmiştir (Markosfky ve Kobus, 1978).

3.2 Doğal Havalandırma Sürecinde Kullanılan Ölçüm Teknikleri

Hareketli suyun havalandırma verimliliğini ölçmeye yarayan farklı yöntemler vardır. Bu metotlar, şu alt başlıklara ayrılmıştır: su içindeki hava miktarının ölçülmesi; su içindeki ÇO konsantrasyonunun ölçülmesi ve su içine enjekte edilen kimyasalın konsantrasyonun ölçülmesi.

3.2.1 Su içindeki hava miktarının ölçülmesi

Su içindeki hava miktarı genelde fiber-optik ve elektrik ileten problarla ölçülmektedir. Hava gaz transferiyle suyun içine girdiğinde, akım, hava ve sudan oluşan fiziksel bir karışım (iki fazlı akım) olacaktır. Bu sürecin sonunda, akımın elektrik iletkenlik ve ses yansıtma değerleri gibi fiziksel özellikleri değişecektir. Örnek vermek gerekirse, havanın elektrik akımına karşı gösterdiği direnç suyunkinden yaklaşık 1000 kat fazladır (Chanson, 2002). Akım ses yansıtma ve elektrik iletim miktarları ölçülerek, su içindeki hava miktarları tespit edilebilir. Ayrıca bu teknikte kullanılan problarla (izleyicilerle), noktasal olarak akım ortamındaki hava kabarcıklarına ait fiziksel büyüklükler (hava kabarcık sayısı, hava kabarcık çaplarının boyutlarının dağılımı) tespit edilebilir.

3.2.2 Su içindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun ölçülmesi

Su içindeki ÇO'nun ölçülmesinde oksijen probları ve Winkler titrasyon metodu kullanılmaktadır. Günümüzde ÇO'nun ölçülmesinde oksijen probları yaygın olarak kullanılmaktadır. Oksijen probu şu prensibe göre çalışır: Oksijen sensörünün (algılayıcısının) organik membranından (zarından) geçen O_2'in kısmi basıncına göre su içindeki ÇO miktarı tespit edilir. O_2'nin kısmi basıncıyla ÇO arasında doğru bir orantı vardır. Eğer yapılan çalışmada su oksijene doygunsa, havalandırma sürecinde ÇO miktarında bir değişim olmayacaktır. Bu durumda, havalandırılacak suyun ÇO'sunun düşürülmesi gerekmektedir.

Genelde yapılan çalışmalarda memba tarafındaki akım ortamına sodyum sülfit (Na_2SO_3) ve katilazör olarak kobalt klorit ($COCI_2$) enjekte edilmektedir (Avery ve Novak, 1978; Emiroglu ve Baylar, 2003). Gulliver ve Rindels (1993), yapılan çalışmanın doğru sonuç verebilmesi için memba tarafındaki ÇO değeriyle, ÇO'nun doygunluk değeri arasında en az 2.5 mg/L fark olması gerektiğini belirtmişlerdir. Avery ve Novak (1978), debinin 5-25 L/s arasındaki değerlerde değiştiği deney koşullarında, 1 L suya yaklaşık 80 mg/s miktarında Na_2SO_3 enjekte etmiş ve su içindeki ÇO miktarının tamamen bitmesini sağlamışlardır. Kim ve diğ. (2001), debinin 80 L/s olduğu akım koşullarında ÇO değerini 3 mg/L değerine düşürebilmek için 1.92 g/s miktarında sodyum sülfit enjekte edilmesi gerektiğini önermişlerdir.

3.2.3 İz Tekniği

Hava-su gaz transferi boyunca, akım ortamına dışarıdan enjekte edilen uçucu gazlar (ör.SF_6 [Sülfür hegzaflorüd gazı]), atmosferde bulunmadıkları/veya çok az bulundukları için havaya girişim yapacaklardır. Bu kimyasalların akım ortamındaki değişimlerindeki azalma miktarlarının ölçülmesi, havalandırma verimliliğinin belirlenmesinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ilk defa Tvisoglu ve Neal (1976) tarafından geliştirilmiştir. Hava-su gaz transferi çalışmalarında kullanılan kimyasallarla ilgili detaylı bilgi, Hibbs ve diğ. (1998) tarafından rapor edilmiştir. Hibbs ve diğ. (1998), kendi çalışmalarında kimyasal olarak metan (H_{CH4} = 37,600 atm veya 28.13) kullanmışlar ve yaptıkları ölçümleri aynı akım şartlarında ÇO ölçümleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmada, iz tekniği ve ÇO ölçümlerinden hesaplanan E sayıları birbirine yakın değerler almıştır.

Cırpka ve diğ. (1993), bir dağ akarsuyundaki 1.76 m doğal su düşümündeki akım şartlarında, hava-su gaz transferini araştırmışlardır. Yazarlar, çalışmalarında farklı kimyasallar enjekte edip, havalandırma verimliliğini hesaplamışlardır. Aynı akım şartlarında, SF_6 kimyasalı için (H=82.4) için E = 0.33, $CHBr_3$ için (H = 0.007) E = 0.03 olarak bulmuşturlar. Bu çalışma Henry katsayısının olay üzerindeki etkisini ve iz tekniğinde kullanılacak olan kimyasalların Henry katsayısının, oksijeninkine yakın değerde alınması gerektiğini göstermektedir.

3.3 Suyun Doğal Havalandırılmasıyla İlgili Yapılan Çalışmalar

Suyun doğal havalandırma verimliliğini doğru olarak tahmin eden bağıntılarda, genelde Reynolds ve Froude sayısı bağımsız değişken olarak kullanılmıştır (Gulliver ve diğ 1998). Kobus (1991) yaklaşık $\mathrm{Re} \geq 10^5$ olduğu tam gelişmiş türbülanslı akım koşullarında ise, hava girişinin sadece Fr sayısının bir fonksiyonu olduğu yaklaşımında bulunmuştur. Reynolds sayısı atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlerine karşı oranını gösteren boyutsuz bir sayıdır, bu ifade:

$$\mathrm{Re} = \frac{Ud}{\nu} \tag{3.16}$$

burada U akım hızını, d akım derinliğini, ve ν kinematik viskoziteyi temsil etmektedir. Buna karşın Froude sayısı ise, atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine karşı oranını veren boyutsuz bir sayıdır, bu ifade:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gd}} \tag{3.17}$$

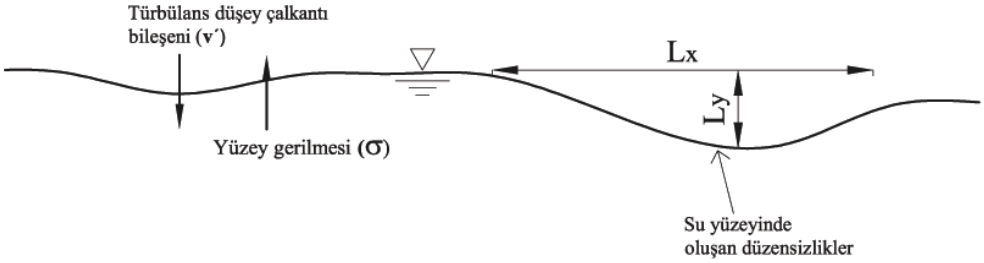
denklemde g yerçekimi ivmesini temsil etmektedir. Su düşümüyle ilgili yapılan çalışmalarda, d ifadesi düşüm yüksekliği olarak alınmaktadır (Markosfky ve Kobus 1978). Yapılan deneysel ve arazi çalışmaları, düşüm yüksekliğinin artışıyla havalandırma verimliliğinin arttığını göstermektedir (Gulliver ve diğ., 1993).

Hava-su gaz transferi ile ilgili olan diğer bir önemli boyutsuz katsayı ise Weber sayısıdır. Weber sayısı atalet kuvvetlerin, yüzey gerilme kuvvetlerine karşı oranını gösterir:

$$We = \frac{U^2 \rho d}{\sigma} \tag{3.18}$$

burada ρ akışkanın özgül kütlesi, σ ise akışkanın yüzey gerilmesidir. Boes ve Hager (2003) basamaklı dolu savakların hava-su iki fazlı akımının doğru bir şekilde benzeşiminin yapılabilmesi için, Weber sayısının modelde en az 110 olması gerektiğini önermişlerdir.

Ervine (1998) doğal havalandırma sürecinde akım ortamındaki türbülans karakteristiklerin önemli olduğunu vurgulamıştır. Yazar, suya hava girişini sağlayan hidrodinamik olaylarda; akımın serbest yüzeyi yakınında türbülansın düşey çalkantı bileşeni sayesinde yaratılan düzensizliklerin, hava girişine direnç gösteren yüzey gerilmesi kuvvetlerinin aşılmasını sağladığını belirtmiştir (Şekil 3.3). Çokgör ve Küçükali (2004) ise, akarsu yatağında bulunan kaya parçalarının, akım ortamında düzensizlikler yaratarak, hava-su gaz transferi dinamiğini etkilediğini yaptıkları deneysel çalışmayla ortaya koymuşlardır.



Şekil 3.3 Su içine hava girişini sağlayan serbest yüzeydeki düzensizliklerin şematize edilmesi (Ervine [1998]'ten uyarlanmıştır)

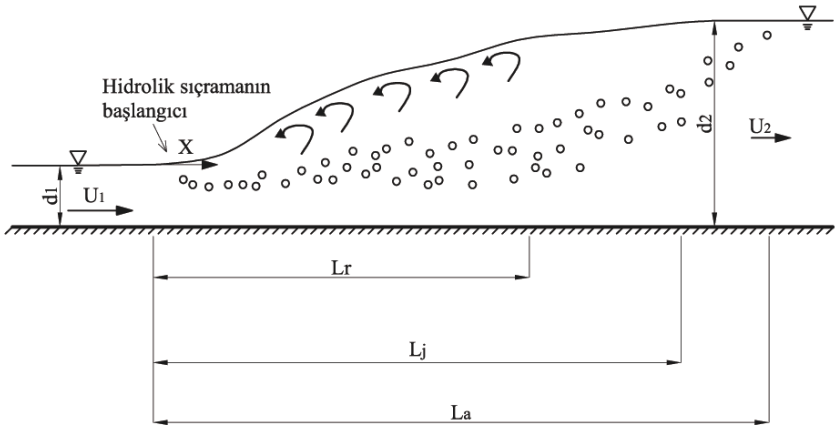
Ervine ve diğ. (1980) yaptığı deneysel ölçümlere dayanarak, su düşümünde hava girişinin gerçekleşebilmesini sağlayan, suyun havuzcuğa çarptığı kritik bir hız (U_c) tanımlamışlardır. U_c'yi düşey yöndeki türbülans şiddetiyle, değişimini Şekil 3.4'te grafik üzerinde göstererek, havalandırma mekanizmasıyla ilgili grafik üzerinde eğrisel bir ayrıştırma yapmıştır: Şekil 3.4'te grafik üzerine noktalanan değerler eğrinin üzerinde kalıyorsa suya hava girişinin gerçekleştiğini, eğer altında kalıyor ise suya hava girişinin gerçekleşmediğini belirtmektedir.



Şekil 3.4 Su düşümünde hava girişini sağlayan kritik hızın düşey yöndeki türbülans şiddeti ile değişimi (Ervine ve diğ., 1980)

4 HİDROLİK SIÇRAMA

Hidrolik sıçrama, serbest yüzeyli kanallarda akım derinliğinin ani bir şekilde yükselmesine yol açan hidrodinamik bir süreçtir (Şekil 4.1). Şekil 4.1'de dikdörtgen kesitli, tabanı yatay bir kanaldaki hidrolik sıçramadaki temel fiziksel büyüklükler gösterilmiştir. Burada sırasıyla d_1 ve U_1 hidrolik sıçramadan önceki akım derinliği ve hızını, d_2 ve U_2 hidrolik sıçramadan sonraki akım derinliği ve hızını, x hidrolik sıçrama başlangıcından itibaren olan karakteristik yatay uzunluğu, L_r makro ölçekli yatay eksenli çevri hareketlerinin oluştuğu uzunluğu (çevrinti bölgesi uzunluğu), L_j hidrolik sıçrama uzunluğunu, L_a ise havalandırma uzunluğunu temsil etmektedir.



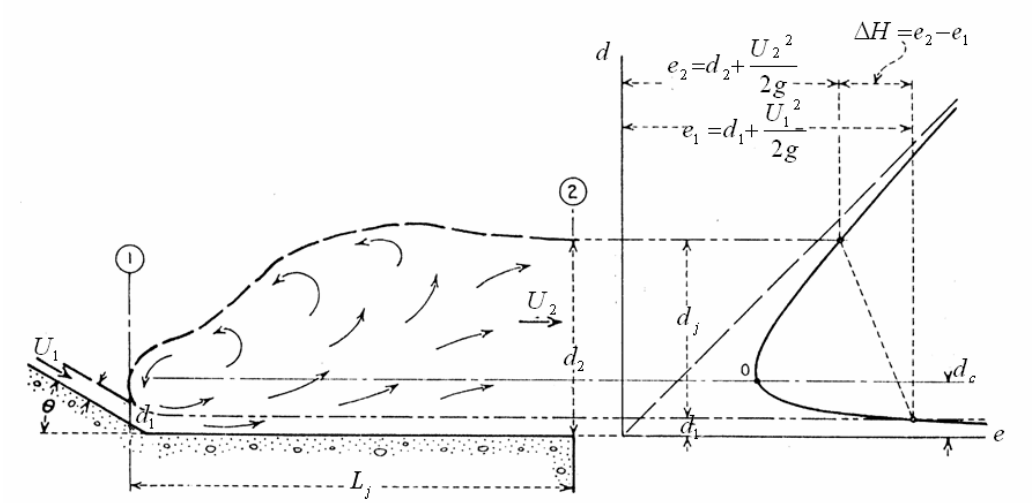
Şekil 4.1 Hidrolik sıçramadaki temel fiziksel büyüklüklerin şematik olarak gösterilmesi

Hidrolik sıçramanın meydana geldiği alanda, akım sel rejiminden ($d_1<d_c$), nehir rejimine ($d_2>d_c$) geçer. Burada d_c, Fr sayısının 1'e eşit olduğu kritik akım derinliğidir. Dikdörtgen kesitli kanallar için kritik akım derinliği:

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \tag{4.1}$$

şeklinde tanımlanır. Şekil 4.2'de hidrolik sıçrama oluşumu, özgül enerji-akım derinliği eğrisiyle birlikte gösterilmiştir.

Şekil 4.2'den de görüldüğü üzere hidrolik sıçramadan sonra akım ortamında ΔH kadar bir enerji kaybı meydana gelir. Bu enerji kaybına yol açan etken hidrolik sıçrama sırasında akım ortamında oluşan makro ölçekli çevri hareketleri ve türbülans büyüklüklerinde meydana gelen ani artıştır. Çevri hareketlerinde, akışkan parçacıklarının birbirlerine çarpmalarıyla sürtünme yaratılır ve oluşan bu sürtünme dolayısıyla akım ortamındaki enerjinin bir bölümü ısıya dönüşür (Sümer ve diğ., 1982).



Şekil 4.2 Hidrolik sıçrama ve özgül enerji-akım derinliği eğrisinin birlikte gösterimi (Bradley ve Peterka 1957).

4.1 Hidrolik Sıçrama Konusunda Yapılmış Olan Çalışmalar

Hidrolik sıçrama mekanizması tarihte ilk defa 16. yy. da Leonardo da Vinci tarafından tanımlanmıştır. Hidrolik sıçramayla ilgili ilk deneysel çalışma Bidone (1820) tarafından taban eğimi yatay olan bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Bidone deneylerinde d_1, d_2 ve L_j'yi ölçmüştür. Bidone, hidrolik sıçramada enerjinin korunduğu kabulünü yaparak, şu bağıntıyı öne sürmüştür:

$$d_2 - d_1 = \frac{U_1^2 - U_2^2}{2g} \tag{4.2}$$

Bidone (1820) tarafından öne sürülen bu bağıntı, elde ettiği deneysel verilerle bir uyuşma göstermemiştir. Yaklaşık 10 sene sonra Belanger (1828) hidrolik sıçramada enerjinin kaybolduğu fikrini ortaya atmış ve Bidone (1820) tarafından ortaya konan bağıntının yanlış olduğunu ileri sürmüştür.

Belanger (1828) hidrolik sıçramadaki momentum korunum ilkesini Bidone (1820)'in deneysel verilerine uygulamış ve d_2/d_1 oranını doğru olarak tahmin etmiştir (Mossa ve Petrillo, 2003). Bidone'nun yaptığı bu çalışmadan sonra, hidrolik sıçramada momentumun korunduğu, buna karşın enerjinin korunmadığı ilkesi kabul edilmiştir (Hager, 1992).

Safranez (1929) ilk defa hidrolik sıçramadaki çevrinti bölgesi uzunluğunu, akım alanına kimyasal enjekte ederek yaptığı deneysel çalışmasında ölçmüş ve L_r'yi hesaplamayı sağlayan şu denklemi öne sürmüştür:

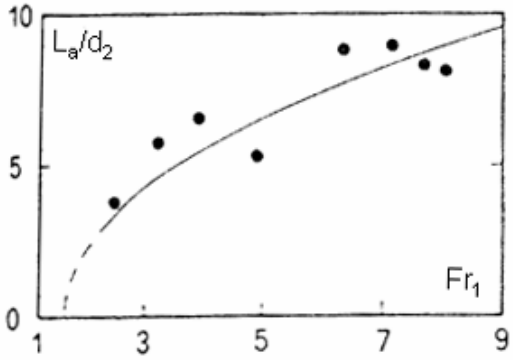
$$L_r = 6d_1 Fr_1 \tag{4.3}$$

Bakhmeteff ve Matzke (1936) ilk defa hidrolik sıçramayı Fr_1 sayısının bir fonksiyonu olarak deneysel olarak araştırmıştır. L/d_2'nin Fr_1 sayısına bağlı olarak olarak değişimini, elde ettikleri verileri grafik üzerinde işaretleyerek göstermişlerdir.

Bradley ve Petarka (1957) hidrolik sıçramayla ilgili yaptıkları deneysel çalışmalarını 6 tane farklı kanalda gerçekleştirmiştir. Yazarlar, Fr_1 sayısının artışıyla hidrolik sıçramanın uzunluğunun ve kırılan enerjinin miktarının arttığını çizdikleri grafiklerle göstermişlerdir. Yazarlar yaptıkları sistematik deneylerle baraj dolu savağının çıkışındaki enerji kırıcı havuzlar için Fr_1 sayısının aldığı değerlere göre birçok tasarım kriteri geliştirmiştir. Günümüzdü de yazarların geliştirdiği enerji kırıcı havuz tipleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yazarlar, hidrolik sıçrama uzunluğunun $4<Fr_1<12$ akım koşulları için yaklaşık olarak (4.4) ifadeyle hesaplanabileceğini belirtmişlerdir:

$$L_j \approx 6d_2 \tag{4.4}$$

Rajaratnam (1961) hidrolik sıçramadaki havalandırma uzunluğunu Fr_1 sayısının bir fonksiyonu olarak araştırmıştır. Hidrolik sıçrama, düşey kapak altından geçen akımda, B=0.30 m, Re= 30700-110600 sayıları arasında kısmi gelişmiş akım koşullarında deney sisteminde gerçekleştirilmiştir. Rajaratnam (1961) elde ettiği deneysel verileri, y ekseni L_a/d_2, x ekseni Fr_1 olacak şekilde kartezyen koordinat takımına işaretlemiş ve Şekil 4.3'de gösterilen eğriyi elde etmiştir.



Şekil 4.3 Rölatif havalandırma uzunluğunun Fr_1 sayısına bağlı olarak değişimi (Rajaratnam, 1961)

Hager (1992), Rajaratnam (1961)'nin verilerini tekrardan analiz ederek, $2<Fr_1<10$ arasındaki akım koşulları için, Şekil 4.3'deki eğriyi (4.5)'te matematiksel denklemle ifade etmiştir:

$$\frac{L_a}{d_2} = 3.5(Fr_1 - 1.5)^{1/2} \qquad (4.5)$$

Hidrolik sıçramadaki maksimum noktasal hızın, kayma gerilmesinin ve tabandaki basınç çalkantısının yeri birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Rajaratnam (1965) hidrolik sıçramada oluşan en büyük kayma gerilmesinin, hidrolik sıçramanın başlangıcında olduğunu göstermiştir. Abdul Khader ve Elango (1974) tabanda oluşan maksimum basınç çalkantısının yerini $Fr_1=6$ durumunda $x/d_1=16$'da bulmuştur.

Sarma ve Newhan (1973) $Fr_1<4.10$, B = 30.4 cm koşullarında L_j/L_r oranını 1.3 olarak bulmuştur. Hager ve diğ. (1990) üç farklı deney kanalında yaptıkları çalışmalarında L_r/d_1 oranını Froude sayısının bir fonksiyonu olarak araştırmış ve ($2.5<Fr_1<8$ (4.6)) denklemini ortaya koymuştur. Çünkü Fr_1 sayısının belirtilen sınır şartlarının dışındaki değerlerinde ($2.5<Fr_1<8$ (4.6)) denklemi yazarlar tarafından çizilmiş olan regresyon eğrisini temsil etmemektedir. Yazarlar ayrıca bütün Froude sayılarını kapsayan (4.7) ifadesini öne sürmüştürler.

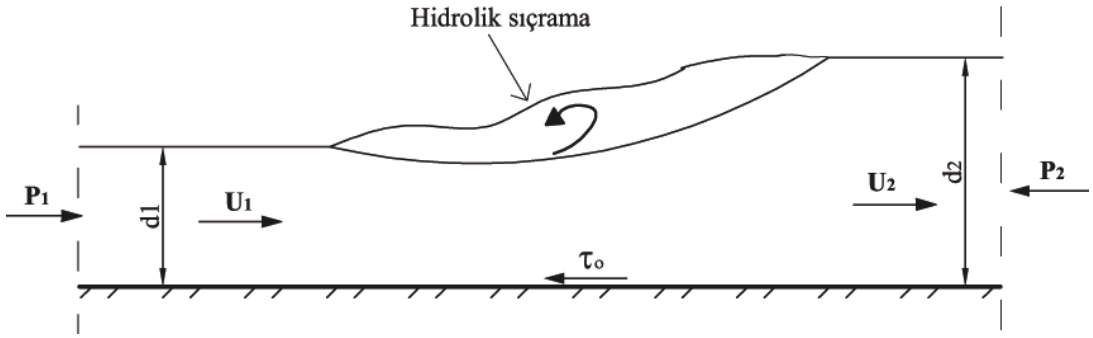
$$\frac{L_r}{d_1} = 8(Fr_1 - 1.5) \qquad 2.5<Fr_1<8 \qquad (4.6)$$

$$\frac{L_r}{d_1} = 160\tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) - 12 \qquad Fr_1<16 \qquad (4.7)$$

Long ve diğ. (1991) kullandıkları hızlı video çekimi tekniğiyle, hidrolik sıçramada oluşan makro ölçekli çevrilerin boyutları ve şekillerini, zamana ve konuma bağlı olarak değişimini farklı akım koşullarında belirlemiştir.

4.2 Hidrolik Sıçramada Momentumun Korunum İlkesinin Uygulanması

Hidrolik sıçramada kütlenin ve momentumun korunduğu kabulü yapılır (Belanger, 1838). Şekil 4.4'de dikdörtgen kesitli yatay tabanlı bir açık kanalda serbest yüzeyli hidrolik sıçramadaki fiziksel büyüklükler ve akım alanında oluşan hidrolik kuvvetler gösterilmiştir. Burada, P, bir kesitteki hidrostatik basınç kuvvetidir.



Şekil 4.4 Hidrolik sıçramada momentumun korunumu

Hidrolik sıçramadaki kanal genişliği değişmediği durum için süreklilik denklemi:

$$U_1 d_1 = U_2 d_2 = q \tag{4.8}$$

Hidrolik sıçramada momentumun korunumu yazılacak olursa:

$$\rho q(U_2 - U_1) = P_1 - P_2 - \tau_o \tag{4.9}$$

Tabanda oluşan kayma gerilmesi ihmal edilir(Chanson, 1999) ve basıncın hidrostatik kuvvetlerden oluştuğu kabul edilirse

$$\rho q(U_2 - U_1) = \frac{\rho g d_1^2}{2} - \frac{\rho g d_2^2}{2} \tag{4.10}$$

Denklem (4.10)'da U_2 yerine $\frac{q}{d_2}$, U_1 yerine de $\frac{q}{d_1}$ yazıldığında ve denklemin her iki tarafı ρg 'ye bölündüğünde

$$\frac{q^2}{g}(\frac{1}{d_2}-\frac{1}{d_1})=\frac{1}{2}(d_1^2-d_2^2) \tag{4.11}$$

Elde edilir. (4.11) denkleminin her iki tarafı (d_1-d_2)'ye bölünürse ve q, Fr_1^2 cinsinden yazılacak olursa

$$(\frac{d_2}{d_1})^2+\frac{d_2}{d_1}-2Fr_1^2=0 \tag{4.12}$$

ikinci dereceden denklemi elde edilir. Denklem (4.12) çözülür ve köklerinden pozitif olanı alınacak olursa:

$$\frac{d_2}{d_1}=\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1\right) \tag{4.13}$$

eşitliği bulunur. Bu eşitlik ayrıca Belanger Momentun Denklemi olarak da adlandırılır (Rajaratnam, 1965). Hidrolik sıçramadaki meydana gelen enerji kaybı hidrolik sıçramadan önce ve sonraki özgül enerjilerinin farkına eşitttir:

$$\Delta H=\left(d_1+\frac{U_1^2}{2g}\right)-\left(d_2+\frac{U_2^2}{2g}\right) \tag{4.14}$$

(4.14) denklemindeki U_1 yerine $\frac{q}{d_1}$, U_2 yerine $\frac{q}{d_2}$ yazılacak olur ve bağıntı (d_1-d_2) ortak parantezine alınacak olursa

$$\Delta H=(d_1-d_2)\left[1-\frac{q^2(d_1+d_2}{2gd_1^2d_2^2}\right] \tag{4.15}$$

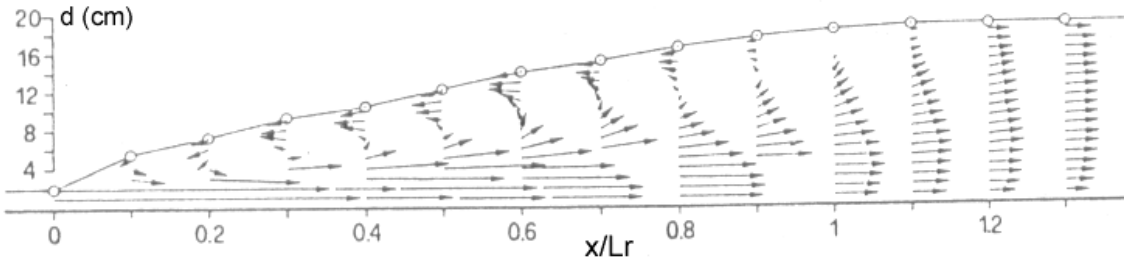
bağıntısı elde edilir. Kütlenin ve momentumun korunumundan $q^2=(gd_1d_2(d_1+d_2))/2$'ye eşittir (Sümer ve diğ., 1982) ve bu eşitlik (4.15) denkleminde yerine konulacak olursa:

$$\Delta H=\frac{(d_2-d_1)^3}{4d_1d_2} \tag{4.16}$$

hidrolik sıçramadaki kırılan enerji miktarını veren bağıntı elde edilmiş olur.

4.3 Hidrolik Sıçrama Mekanizması

Hidrolik sıçramanın gerçekleştiği alanda su yüzü profilinde ani bir değişim, çalkantılar, düzensizlikler ve kararsız bir ortam meydana gelir (Şekil 4.5). Şekil 4.6'da serbest yüzeyli bir hidrolik sıçramada oluşan akım koşulları ve bu koşulların akım ortamında yarattığı etkiler şematize edilmiştir.



Şekil 4.5 Klasik bir hidrolik sıçramdaki hız dağılımı: Fr_1=6.8; d_1=2 cm (Hager, 1992)

Hidrolik Sıçramada Oluşan Akım Koşulları:
Türbülans krakteristiklerinde artış (Rouse ve diğ., 1959), kaotik akım çizgilerinin (ör.ters akım) oluşması (Hager, 1992), kanal tabanında hidrodinamik basınç çalkantılarının meydana gelmesi (Toso ve Bowers, 1988), kanal tabanındaki kayma gerilmesinin değerinin artması (Liu ve diğ., 2004), su yüzeyinde makro ölçekte yatay eksenli çevrilerin ve dalgalanmaların oluşması (Long ve diğ., 1991).

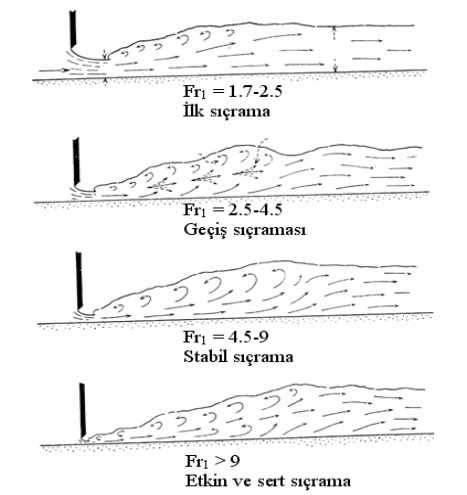
↓

Ortaya Çıkan Bu Akım Koşullarının Hidrolik Sıçrama Alanında Yarattığı Etkiler:
Akımın enerjisinin kırılması (Bradley ve Peterka, 1957), kanal tabanında oyulma ve kavitasyon riskinin oluşması (Narayan, 1980), havanın su içine emilmesi ve iki fazlı akımın oluşması (Chanson ve Brattberg, 2000), etkin bir fiziksel karışımın sağlanması (Breitenöder ve Dorer, 1967).

Şekil 4.6 Serbest yüzeyli bir hidrolik sıçramada akım ortamında meydana gelen fiziksel değişimlerin şematize edilmesi

Bradley ve Petarka (1957) yaptıkları deneysel gözlemlere dayanarak hidrolik sıçramayı Fr_1 sayısının aldığı değerlere göre sınıflandırmışlardır (Şekil 4.7): Fr_1=1.7-2.5 arasındaki değerleri için hidrolik sıçramayı ilk sıçrama olarak tanımlamışlardır; $4.5<Fr_1<9$ arasındaki değerlerinde taban oyulması, sökülmesi çok etkin olmadığından en ideal hidrolik sıçrama olarak tanımlamışlar ve stabil sıçrama olarak isimlendirmişlerdir; $1.7 <Fr_1<2.5$ arasındaki geçiş hidrolik sıçramada dalgalanmalar oluştuğundan kaçınılması gerektiğini belirtmişlerdir; $Fr_1>9$ değerlerinde gerçekleşen hidrolik sıçramayı etkin ve sert sıçrama olarak tanımlamışlar ve en büyük yüzey düzensizlikleri bu tip hidrolik sıçramada oluştuğunun vurgulamışlardır.

Chow (1973) Bradley ve Peterka (1957) tarafından yapılan sınıflandırmayı geliştirerek tekrardan sunulmuştur (Şekil 4.7, Tablo 2.1).



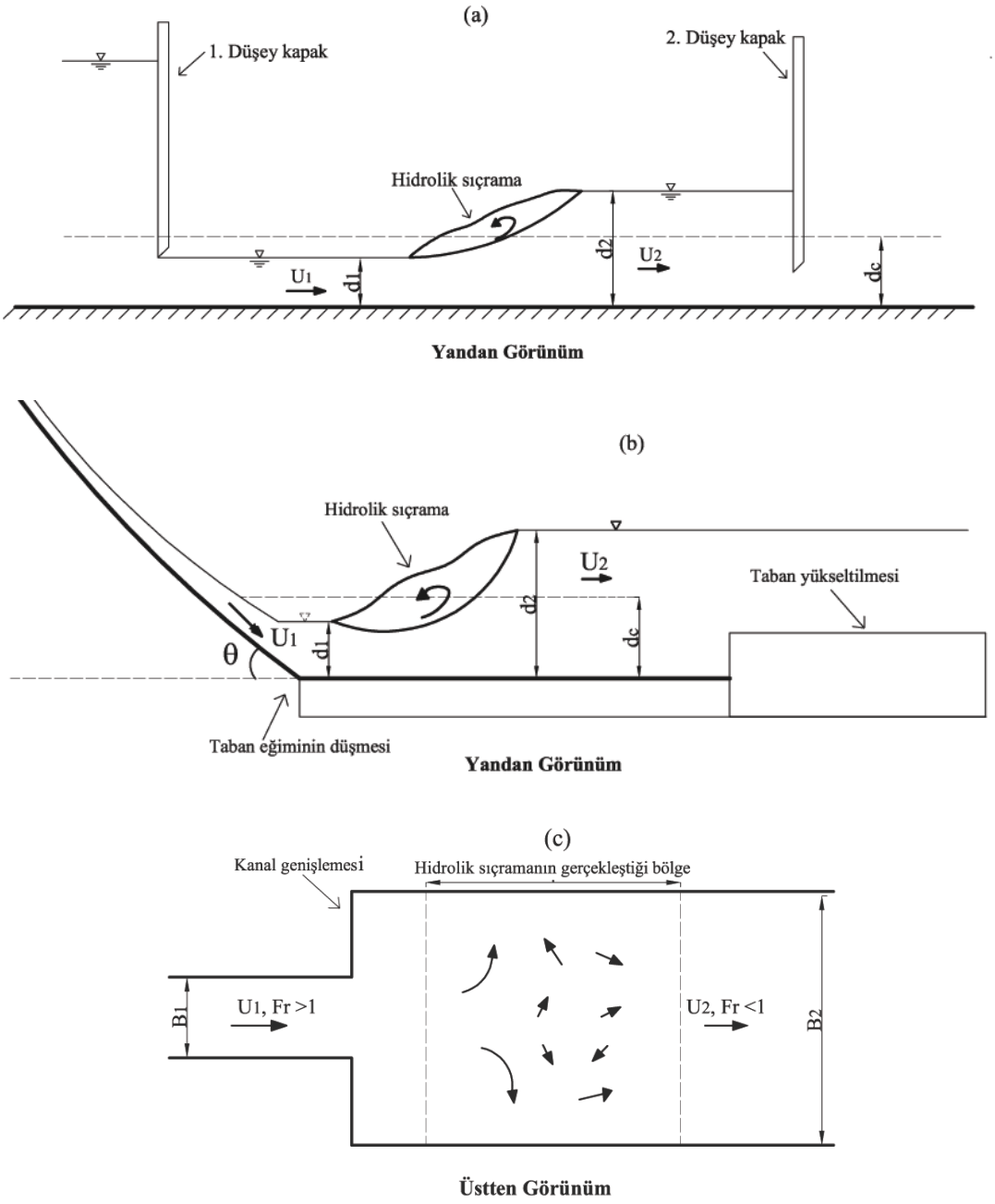
Şekil 4.7 Hidrolik sıçramanın Fr_1 sayısına göre sınıflandırılması(Bradley ve Peterka 1957)

Tablo 4.1 Hidrolik sıçramanın Fr_1 sayısına göre sınıflandırılması (Chow, 1973)

Fr_1 sayısı değer aralığı	Hidrolik Sıçrama İsmi	Özellikleri
1-1.7	Dalgalı Sıçrama	Mansap tarafında uzun mesafeler boyunca dalgalanmalar oluşur. Enerji kaybı ihmal edilebilecek kadar azdır.
1.7-2.5	Zayıf (ilk) sıçrama	Az miktarda enerji kaybı olur.
2.5-4.5	Titreşimli sıçrama	Düzensiz ve büyük dalgalar oluşur. Zamanla değişen titreşimli sıçrama oluşur. Mümkünse kaçınılmalıdır.
4.5-9	Stabil sıçrama	%45-70 oranında enerji kaybı olur. Mansap düzenlemelerinden bağımsızdır. En ekonomik tasarımdır.
>9	Etkin ve sert sıçrama	%85 oranında enerji kaybı vardır. Kanal yatağında oyulma riski vardır.

4.4 Hidrolik Sıçramanın Oluşmasını Sağlayan Kanal Geometrileri

Akımın sel rejimden nehir rejimine geçebilmesi için kanal geometrisinde ani bir değişimin ve/veya kuyruk suyunda bir kabartmanın yaratılması gerekir (Henderson 1966). Genelde hidrolik mühendisliği uygulamalarında serbest yüzlü akımlarda sel rejimine; kapak altından geçen akımlarda, büyük eğimli kanallarda ve daralan kesitlerdeki akım koşullarında sıkça rastlanır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Hidrolik sıçrama oluşumunu sağlayan kanal geometrileri: (a) düşey kapak altından geçen akım ve kuyruk suyunda kabartmanın oluşturulması; (b) kanal taban eğiminin düşmesi ve kuyruk suyunda tabanın yükseltilmesi ve (c) kanal genişlemesi

4.5 Hidrolik Sıçramanın Türbülans Yapısı

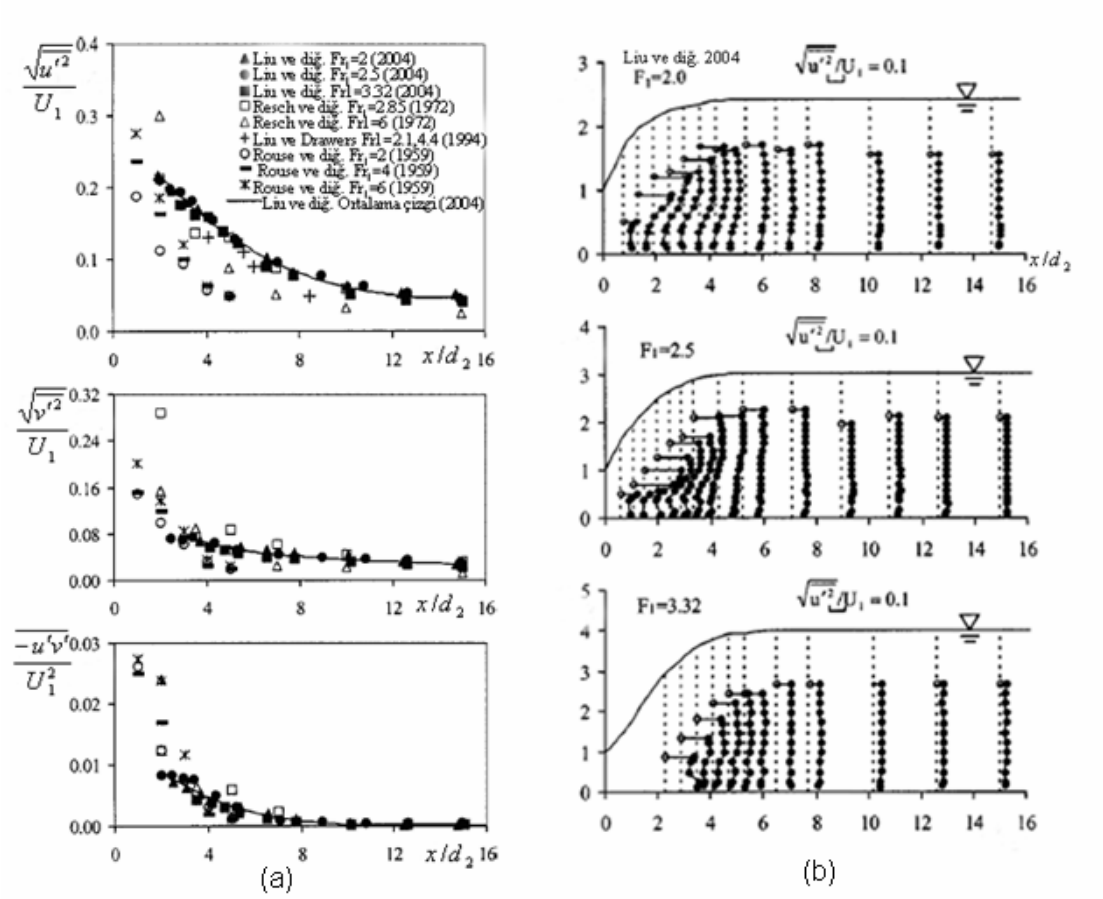
Serbest yüzeyli hidrolik sıçramadaki türbülans karakteristikleri ilk kez Rouse ve diğ. (1959) tarafından araştırılmıştır. Rouse ve diğ. (1959) hidrolik sıçramadaki türbülans yapısını belirleyebilmek için akışkan olarak hava kullanmıştır.

Rouse ve diğ (1959) yatay eksenli çevrintilerin oluştuğu hidrolik sıçramalarda (Fr_1>2); x ve y doğrultusu boyunca türbülans yapısı, tabakalar arasındaki momentum transferinin ve kırılan enerjinin Fr_1 sayısının bir fonksiyonu olduğunu dile getirmişlerdir.

Breitenöder ve Dorer (1967) hidrolik sıçramanın etkin bir fiziksel karıştırıcı olduğunu ve Fr_1 sayısının artmasıyla fiziksel karışımın çok daha kısa mesafe ve sürede gerçekleştiğini yaptıkları deneysel çalışmada ortaya koymuşlardır.

Resch ve diğ. (1974) Fr_1 sayısının artışıyla türbülans çalkantı hızlarının arttığını göstermiştir: Fr_1= 2.85 durumunda, x/d_2=2; y/d_1=1.75 koordinatlarındaki noktada akım doğrultusundaki türbülans karakteristiği $\sqrt{\overline{u'^2}}$ 'yi 0.25 m/s, ve Fr_1= 6 durumu için yaklaşık aynı noktada $\sqrt{\overline{u'^2}}$ 'yi 0.68 m/s olarak ölçmüşlerdir.

Liu ve diğ. (2004) hidrolik sıçramanın türbülans yapısını, Fr_1 = 2, 2.5, ve 3.32 durumları için araştırmışlardır. Yazarlar Fr_1 sayısının 3.5'ten büyük değerlerinde, türbülans büyüklüklerini ölçmeye yarayan Akustik Dopler (ADV)'in doğru sonuç vermediğini dile getirmişlerdir. Bunun nedeni olarak da, akım ortamında oluşan yoğun hava kabarcıklarını göstermişlerdir. Yapılan çalışmada, akım doğrultusundaki türbülans şiddeti %5-25 arasında (Şekil 4.9b), düşey doğrultudaki türbülans şiddeti ise %2-16 arasında, Reynolds gerilmesi ise %1-3 arasında ölçülmüştür. Hidrolik sıçramanın türbülans yapısıyla ilgili yapılan çalışmalar, türbülans karakteristiklerinin en büyük değerini hidrolik sıçramanın başlangıcında aldığını ve hidrolik sıçrama boyunca türbülans karakteristiklerinin x/d_2 doğrultusu boyunca giderek azaldığını ortaya koymaktadır (Şekil 4.9a).

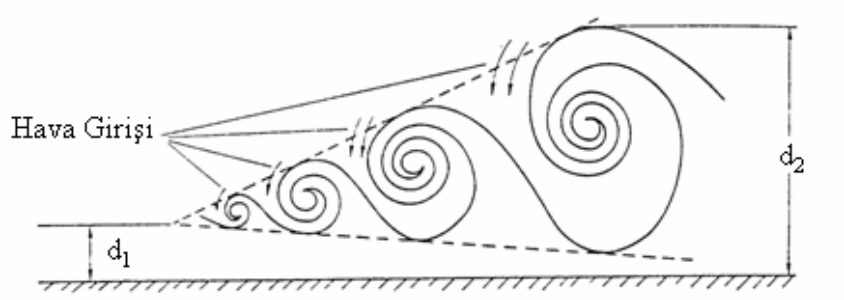


Şekil 4.9 Hidrolik sıçramadaki türbülans karakteristikleri: (a) türbülans karakteristiklerinin farklı Fr_1 sayılarında x/d_2 boyunca değişimi; (b) Akım doğrultundaki türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama alanında farklı Fr_1 sayıları için dağılımı (Liu ve diğ., 2004)

4.6 Hidrolik Sıçramanın Havalandırma Verimliliği

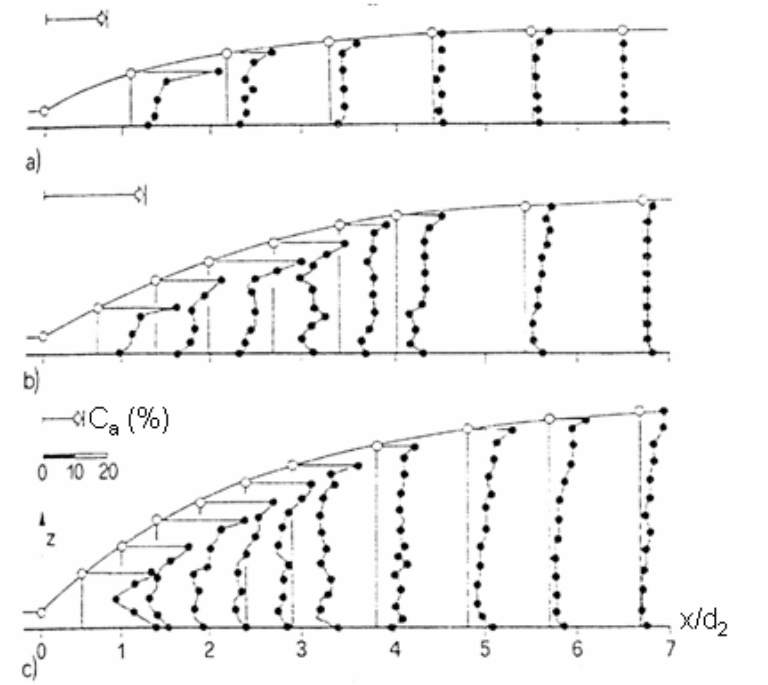
Hidrolik sıçramada oluşan akıma ters yöndeki büyük ölçekli çevriler, su yüzeyinde düzensizlikler yaratarak, havanın yukarıdan aşağıya doğru su içine emilmesini sağlar. Ayrıca, hidrolik sıçrama alanı içinde oluşan makro ölçekteki çevirilerin boyutlarının büyümesi; türbülans difüzyon katsayısının değerinin artmasını, ve su yüzeyinden tabana doğru daha etkin bir fiziksel karışımın gerçekleşmesini sağlar (Rouse ve diğ., 1959; Breitenöder ve Dorer, 1967).

Hoyt ve Sellin (1989), hidrolik sıçramadaki su içine hava girişini, gerçekleştirdikleri akım görüntüleme tekniğine dayanarak şematize etmişlerdir (Şekil 4.10). Şekil 4.10'da hidrolik sıçrama içersindeki bölgede, x doğrultusu boyunca giren havanın miktarının arttığı gösterilmiştir. Fakat bu konuda yapılan çalışmalar, hidrolik sıçramada en büyük hava girişinin hidrolik sıçramanın başlangıcında olduğunu göstermektedir (Şekil 4.11).



Şekil 4.10 Hidrolik sıçramada su içine hava girişinin şematize edilmesi (Hoyt ve Sellin,1989)

Rajaratnam (1961) yaptığı çalışmasında, hidrolik sıçrama alanı içersinde farklı Fr_1 sayıları için, su içindeki hava miktarının noktasal dağılımını göstermiştir. Şekil 4.11'deki hava konsantrasyonu miktarları hidrolik sıçrama başlangıcında en büyük daha sonra Şekil 4.9b'teki akım doğrultusundaki türbülans şiddetine benzer şekilde giderek azalmaktadır.



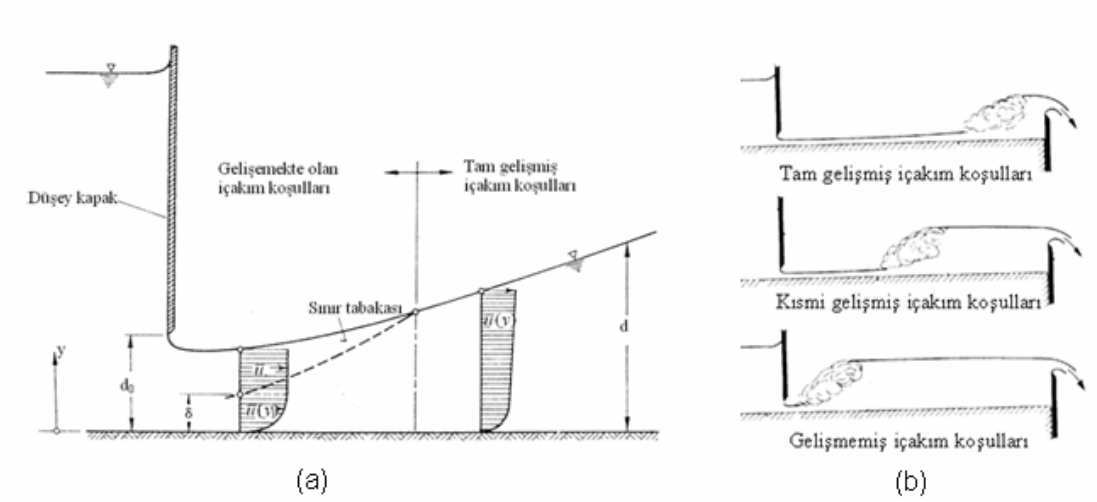
Şekil 4.11 Hidrolik sıçramada farklı Froude sayıları için su içindeki hava konsantrasyonun noktasal olarak dağılımı: a) Fr_1= 3.9, b) Fr_1= 6.35, c) Fr_1= 8.72 (Rajaratnam, 1961)

Leutheusser ve diğ. (1973), Babb ve Aus (1981) en büyük hava derişimi ve hava kabarcık sayısını hidrolik sıçramanın başlangıcında bulmuşlardır. Ayrıca Leutheusser ve diğ. (1973) hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğini belirlemede, akım koşullarının önemli bir etkisi olduğunu göstermiştirler. Burada akım koşullarından kastedilen; akım içersindeki sınır tabakası kalınlığının (δ) durumudur.

Eğer sınır tabakası su yüzeyine ulaşmışsa tam gelişmiş akım koşulları, ulaşmamış ise gelişmemiş akım koşulları olarak adlandırılır. Şekil 4.12a'da düşey kapak çıkışındaki hidrolik sıçramada sınır tabakası gelişimi şematize edilmiştir. Kapak çıkışından belirli bir yatay mesafe sonra tam gelişmiş akım koşulları oluşur (Şekil 4.12b). Bu yatay mesafe, Ohtsu ve Yasuda (1994) tarafından x_{cp} olarak sembolize edilmiş ve şu ampirik formülle ifade edilmiştir:

$$x_{cp} = 50 d_o \tag{4.17}$$

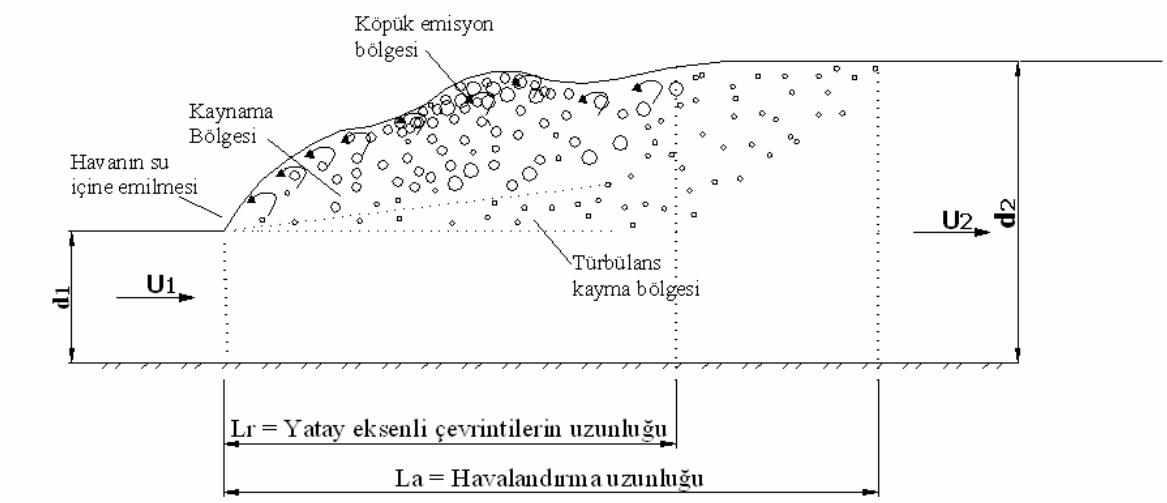
burada d_o düşey kapak altından geçen akımın derinliğini göstermektedir.



Şekil 4.12 Klasik hidrolik sıçramadaki sınır tabakası gelişiminin şematize edilmesi: (a) akım ortamında sınır tabakasının gelişiminin gösterimi; (b) düşey kapak çıkışındaki akım koşulların gösterilmesi (Leutheusser ve diğ., 1973).

Resch ve diğ. (1974) hidrolik sıçramada havalandırma verimliliğinin gelişmemiş akım ve gelişmiş akım durumlarında karşılaştırmasını yapmışlardır. Yazarlar gelişmiş akım şartlarında hidrolik sıçramanın daha etkin bir havalandırma sağladığını ortaya koymuşlardır. Yazarlar hidrolik sıçramada bir noktada zamanla ölçülen hava kabarcık çapları boyutlarının dağılımının normal dağılıma uyduğunu göstermişlerdir. Babb ve Aus (1981), Fr_1= 6 durumu için yaptıkları deneylerlerinde, en büyük hava kabarcık çaplarının boyutlarının ve hava kabarcık sayılarının hidrolik sıçramanın başlangıcında oluştuğunu ve türbülans yapısıyla bu kabarcıkların parçalara ayrıldıklarını göstermiştirler.

Chanson (1995) hidrolik sıçramadaki hava-su akımının üç bölgeden oluştuğunu (Şekil 4.13) belirterek, bu bölgeleri şu şekilde tanımlamıştır: Küçük boyutta hava kabarcıkları içeren türbülans kayma bölgesi; büyük miktarda kabarcık ve girdapların iç içe girdiği batmış akım alanı (kaynama bölgesi); serbest yüzeyde köpük içeren tabaka (köpük emisyon bölgesi)



Şekil 4.13 Hidrolik sıçramadaki havalandırma bölgeleri (Chanson 1995'ten uyarlanmıştır)

Tablo 4.2'de hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğiyle ilgili yapılmış olan deneysel çalışmalar özetlenmiştir. Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğini veren bağıntılarında, Fr_1 sayısıyla havalandırma verimliliği doğru orantılı olarak korele edilmiştir -Holler (1971), Apted ve Novak (1971) bağıntılarında sırasıyla verilen ΔU (hidrolik sıçramadan önce ve sonraki hız farkı) ve ΔH değerleri Fr_1 sayısıyla doğru orantılıdır. Henderson (1966) Fr_1 sayısının 1.7'den büyük değerlerinde hidrolik sıçramada hava girişinin gerçekleştiğini ifade etmiştir.

Hidrolik sıçramada Fr_1 sayısıyla havalandırma verimliliği arasındaki doğru orantı şu şekilde açıklanabilir; hidrolik sıçramadaki Fr_1 sayısının artmasıyla havalandırma uzunluğunun değeri artar (Rajaratnam, 1961; Hager, 1992) ve bu fiziksel gelişmeye bağlı olarak havadan suya daha fazla kütle transfer olur. Bu duruma ek olarak, Fr_1 sayısının değerinin artmasıyla türbülans çalkantı hızlarının değerleri büyür (Resch ve diğ., 1974; Liu ve diğ., 2004) ve bu durum yüzeyde oluşan düsensizliklerin büyümesine ve emilen havanın miktarının artmasını sağlar.

Tablo 4.2'de Avery ve Novak (1978) ve Wilhelms ve diğ. (1981) formüllerinde, Re sayısının artışıyla hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin arttığı görülmektedir. Bu duruma şu şekilde bir açıklama getirebilir: Bir akım ortamında Re sayısının belli bir değere kadar artışı ise ($\mathrm{Re} \approx 10^5$ [Kobus, 1991]) türbülans karakteristiklerinin büyümesine ve tabandan yüzeye doğru daha fazla yayılım göstermesine yol açar (Wei ve Willmarth, 1989). Bu durum ise hava-su girişim alanındaki hava-su arasındaki temas yüzeyini yaratan düzensizliklerin boyutlarını arttırır. Sonuçta havadan suya transfer olan kütlenin miktarı artmış olur.

Tablo 4.2 Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini hesaplamada kullanılan formüller

Referans	Formül	Akım koşulları
Holler (1971)	$r_{20} - 1 = 0.0463 \times \Delta U^2$	$0.61 < \Delta U < 2.44$ m/s
Avery ve Novak (1978)	$r_{15} - 1 = k' * Fr_1^{2.1} * \mathrm{Re}^{0.75}$ ($k' \sim 1 - 1.6 \times 10^{-6}$)	$1.45*10^4 < \mathrm{Re} < 7.1*10^4$ $q_w = 1.143 * 10^{-6} m^2/s$ B= 0.10 m
Wilhelms ve diğ. (1981)	$r_{15} - 1 = 4.924 \times 10^{-8} * Fr_1^{2.106} * \mathrm{Re}^{1.034}$	$1.89 < Fr_1 < 9.5$ $2.4*10^4 < \mathrm{Re} < 4.3*10^4$ B = 0.38 m
Chanson (1995)	$r_{15} \approx \exp(13.057 \times \frac{K_L}{g} \times U_1^{4.93} (U_1 - 0.21) \times (\frac{\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1)(Fr_1 - 1.5)}{Fr_1^2}))$	$5.2 < Fr_1 < 8.1$ $2.7*10^4 < \mathrm{Re} < 6.5*10^4$ ($\vartheta = 1.1 \times 10^{-6} m^2/s$ B= 0.25 m

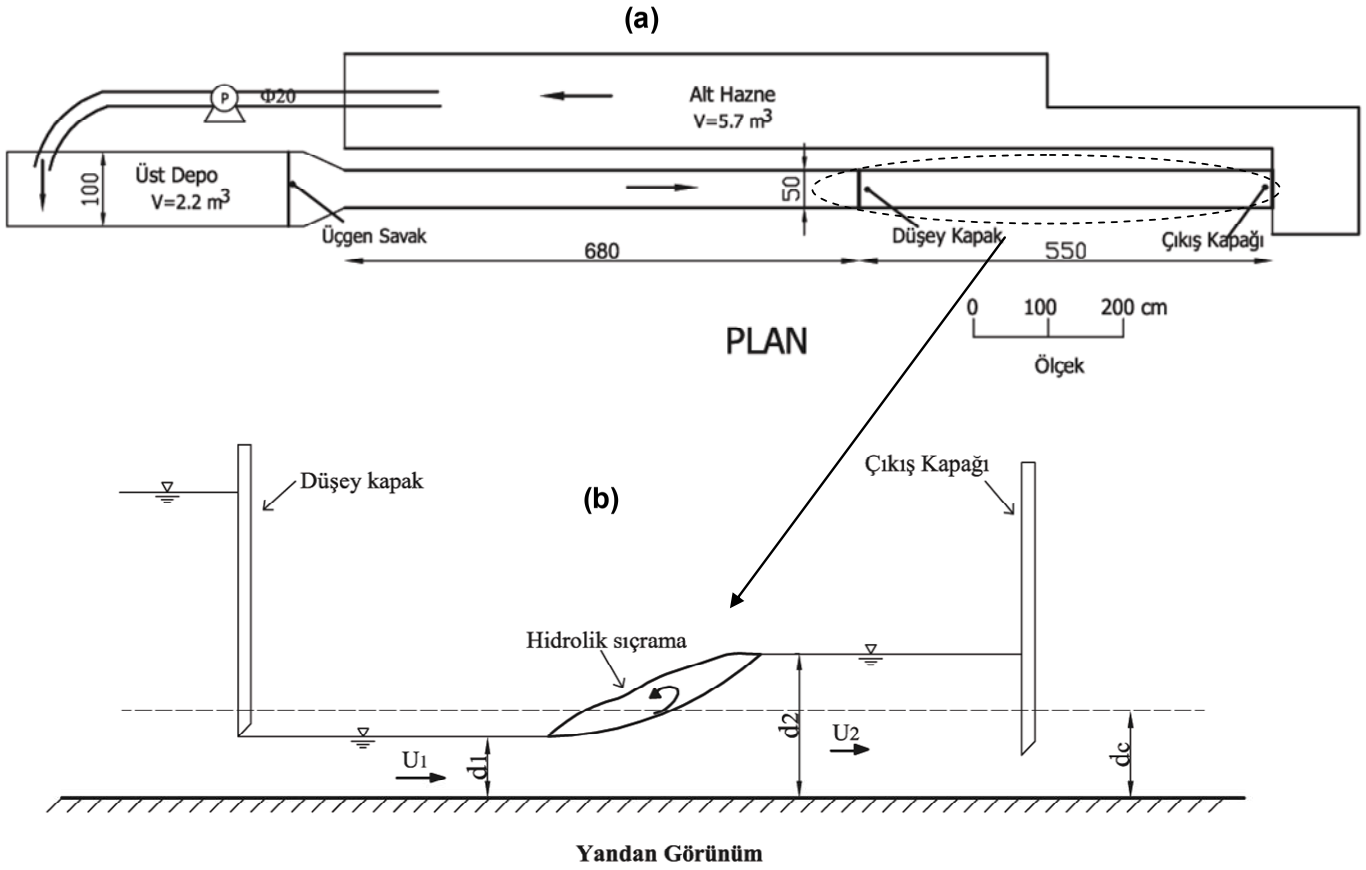
Tabloda k′ suya enjekte edilmiş olan $NaNO_2$'nin yüzdesini gösteren boyutsuz bir katsayı, B ise kanal genişliğidir. Chanson (1995) hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğini hesaplamaya yarayan analitik bir model oluşturmuş ve bu modelin geçerliliğinin sınanabilmesi için yeni deneysel ölçümlere ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır. Chanson (1995) yüksek Re sayılarında Avery ve Novak (1978), Wilhellms ve diğ. (1981) formüllerinde büyük sapmalar olduğunu göstermiştir.

5 DENEY SİSTEMİ VE KULLANILAN ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

5.1 Deney Kanalı

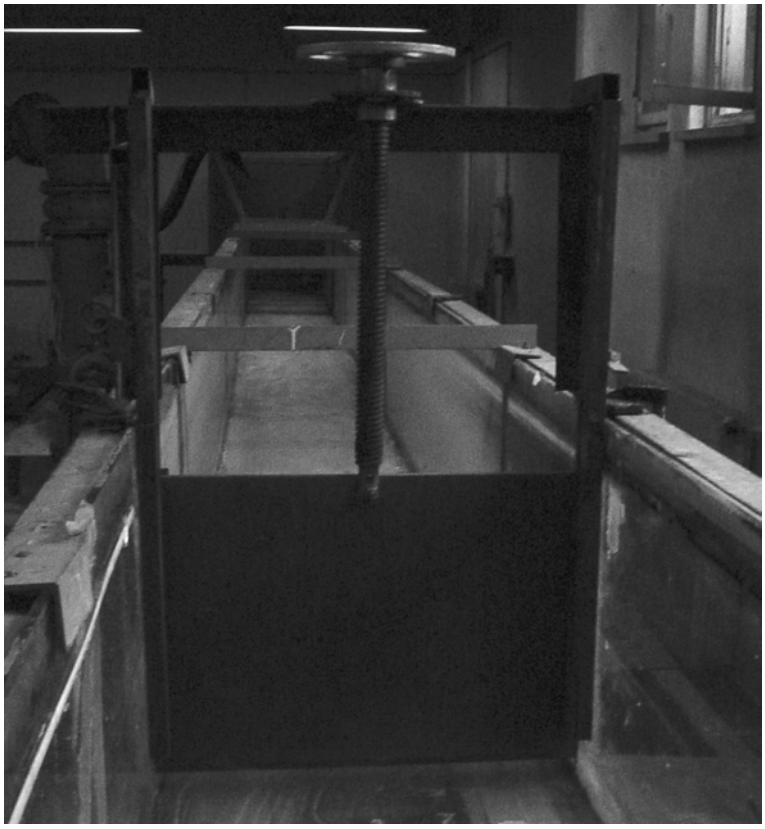
Bu doktora çalışmasının deneyleri, İTÜ Hidrolik Laboratuvarı, Deney Salonu I'de gerçekleştirilmiştir. Deneyler 12.3 m uzunluğunda, 0.5 m genişliğinde ve 0.45 m yüksekliğinde tabanı beton, yan cidarları camla kaplı, dikdörtgen enkesitli, ve yatay tabanlı bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1). Su kanalın alt kısmında bulunan yaklaşık 5.7 m^3 hacmindeki haznede depolanmakta, buradan 7.5 kW gücündeki pompanın yardımıyla kanalın üstünde yer alan 2.2 m^3 hacmindeki depoya basılmaktadır. Böylece suyun sistemdeki sirkülasyonu sağlanmaktadır. Kanaldan geçen akımın miktarı, pompa çıkışına monte edilmiş olan vanayla ayarlanmaktadır. Suyla birlikte kanala yabancı madde girmesini önlemek için kanal çıkışına 1 mm'lik elekten yapılmış bir ızgara konulmuştur. Kanaldaki akımın debisi, kanal girişine yerleştirilmiş olan üçgen savakta tespit edilmiş; akım derinlikleri ise liminimetrelerin yardımıyla ölçülmüştür.

Kanalda hidrolik sıçrama oluşturabilmek için, kanal başlangıcının 6.8 m mansap tarafına 50×40 cm^2 boyutlarında plexiglas malzemeden yapılmış bir düşey kapak ve kanal çıkışına da kontrol yapısı olarak ikinci bir düşey kapak yerleştirilmiştir (Şekil 5.2). Suyun kenarlarından geçişini önlemek için, düşey kapağın kenarlarına 2 mm kalınlığında lastik contalar monte edilmiştir. Kapakların düşey yöndeki hareketi, kapak üzerlerine yerleştirilmiş sonsuz vida mekanizmayla sağlanmıştır.



Şekil 5.1 (a) Deney kanalının ölçekli olarak üstten görünümü; (b) deney kanalında oluşturalan hidrolik sıçramanın şematik olarak yandan gösterilmesi

(a)



(b)



Şekil 5.2 Deney kanalında hidrolik sıçrama yaratmak için kullanılan kapaklar. (a) düşey kapak, (b) çıkış kapağı

Kanalda oluşturulan hidrolik sıçramanın şiddeti, 1. düşey kapağın açıklığına bağlı olarak değişmektedir; çünkü 1. düşey kapak açıklığı, hidrolik sıçramadan önceki Froude sayısını (Fr_1) belirlemektedir. Burada, dikdörtgen enkesitli bir kanaldaki Froude sayısının: $Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{d_1^3 g}}$ eşit olduğu hatırlanacak olursa, sabit bir debi için, hidrolik sıçramanın şiddetinin kapak açıklığının kontrolünde olduğu görülmekte ve Fr_1 sayısının artışıyla hidrolik sıçramanın şiddeti artmaktadır.

Kanalda oluşturan hidrolik sıçramalar 7 farklı birim genişlikten geçen debi için $1.42\times10^{-2} \le q \le 5.28\times10^{-2}\ m^2/s$ değer aralığında gruplandırılmış ve hidrolik sıçramalardaki Fr_1 sayısı 2.1-6.4 aralığında değişim göstermiştir. Deneyler kısmi gelişmiş hidrolik sıçrama koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde hidrolik sıçrama başlangıcının 1. kapağa olan yatay uzaklığı 10-94 cm aralığında değerler almıştır.

5.2 Çözünmüş Oksijen Ölçümleri

Akım ortamındaki çözünmüş oksijen ve su sıcaklığı ölçümleri, hidrolik sıçramanın giriş ve çıkışına yerleştirilmiş olan iki adet WTW Oxi330i eltipi oksijenmetreler ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3). Çözünmüş oksijen ölçümleri akım derinliklerinin orta noktalarında yapılmıştır. Oksijenmetreler kanal üzerine yerleştirilmiş olan konsola monte edilmiştir ve düşey hareketleri liminimetrelerle sağlanmıştır.

Her bir deneyden önce oksijenmetrenin kalibrasyonu üretici firma tarafından önerilen şartlara göre hava kalibrasyon aletinde yapılmış ve her iki oksijenmetrenin aynı değerleri gösterdiğinden emin olunduktan sonra deneylere başlanmıştır. Tablo 5.1'de suyun sıcaklığına bağlı olarak ÇO'nun su içindeki doygunluk konsantrasyonları verilmiştir.

Oksijenmetrenin ÇO için ölçüm aralığı ±0.5% hassasiyetle 0-19.99 mg/L arasında, sıcaklık içinse ± 0.1% hassasiyetle -5 ile +50 ºC arasında kalmaktadır. Oksijenmetrenin çalışma frekansı ise 1 Hz'dir ve oksijenmetre sensörünün çalışma prensibi ise membrandan difüze olan oksijenin katotda indirgenmesine dayanmaktadır (Şekil 5.3).

Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğinin belirlenebilmesi için, gelen suyun ÇO konsantrayonun, sudaki doygun değerin altında olması gerekmektedir. Bu koşulu sağlıyabilmek için, kanalın altındaki hazneye sodyum sülfit (Na_2SO_3) ve katilazör olarak kobalt klorit ($CoCI_2$) atılmıştır.

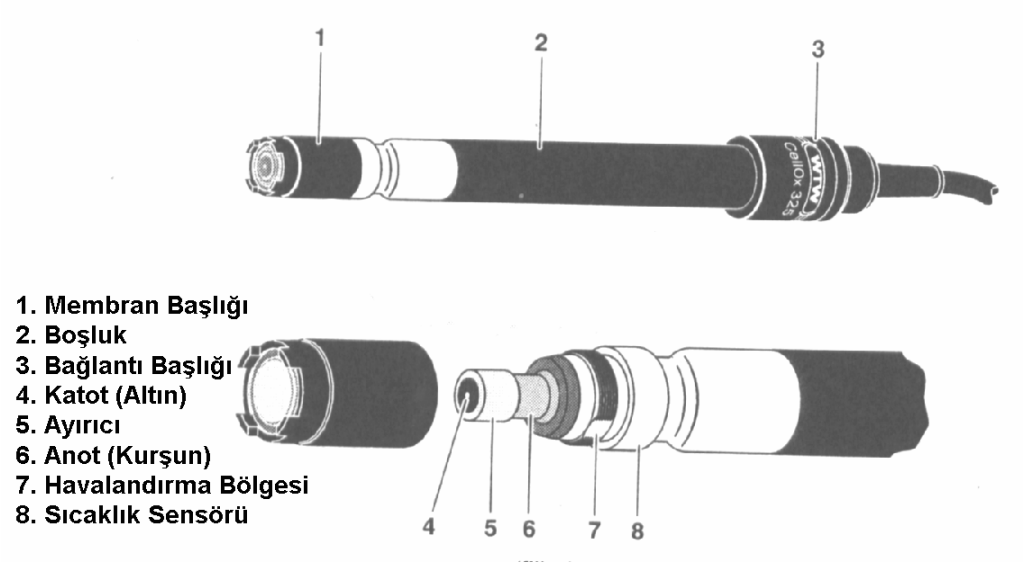
$$Na_2SO_3 + 1/2O_2 \xrightarrow{CoCI_2} Na_2SO_4 \qquad (5.1)$$

Bu kimyasal reaksiyon sonucunda su içersindeki çözünmüş oksijen sodyum sülfitle tepkimeye girerek yeni bir bileşik oluşturur ve su içersindeki ÇO'nun düşmesine yol açar. Denklem 5.1'deki kimyasal tepkimeden, 1 mol sodyum sülfitle 0.5 mol oksijenin tepkimeye girdiği görülmektedir. 1 mol oksijenin atomik kütlesi 32 gr, 1 mol sodyum sülfitin atomik kütlesi ise 126 gr'dır. Bu duruma bağlı olarak, suyun ÇO konsantrasyonunu 5 mg/L düşürmek için, su içersine 40 gr/m^3 Na_2SO_3 atmak gerekmektedir. Yapılan çalışmalar, su içersine 3 gr/m^3 $CoCI_2$ atılmasının kimyasal tepkimeyi istenilen oranda hızlandırdığını ortaya koymuştur. (Baylar ve Emiroglu, 2003).

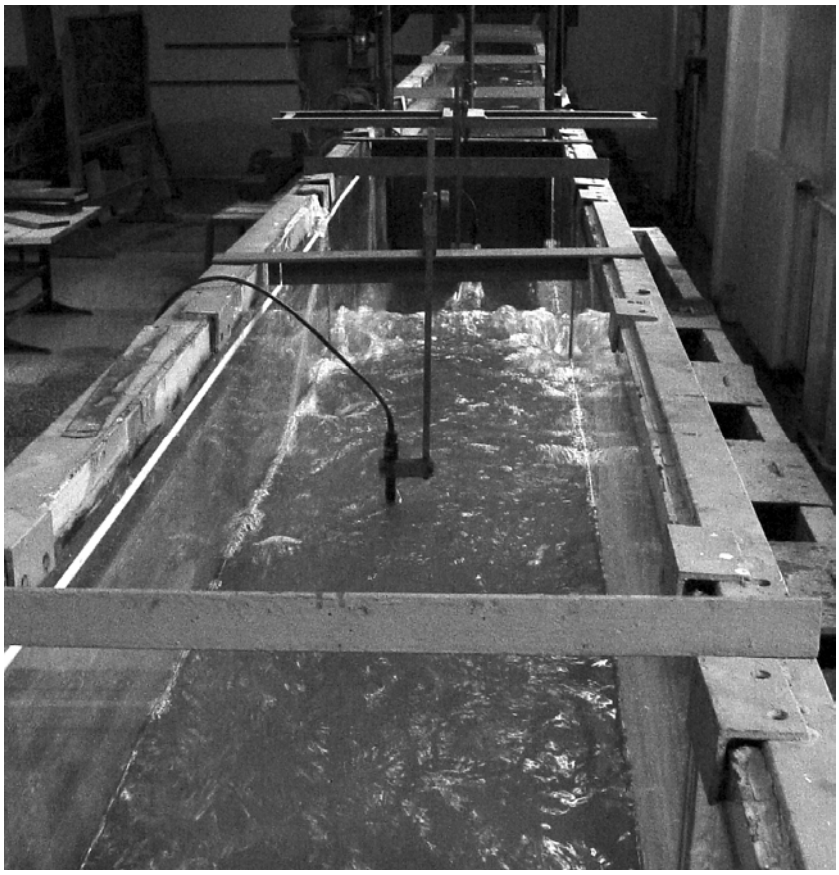
Hidrolik sıçrama giriş ve çıkışındaki ÇO konsantrayonları, su içersinde doygun değere ulaşıncaya kadar eşzamanlı olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.4). Tablo 5.2'de bir deney serisinde hidrolik sıçramanın giriş ve çıkışında kaydedilmiş olan ÇO değerleri gösterilmiştir. Tablo 5.2'den, ÇO değerlerinin yaklaşık sabit aralıklarla arttığı görülmektedir. Deneylerde ölçülen bu değerlerin aritmetik ortalaması alınıp, o seri için gerekli olan havalandırma verimliliği katsayısı hesaplanmıştır.

Tablo 5.1 Sudaki ÇO doygunluk miktarının sıcaklıkla değişimi (Colt, 1984)

Sıcaklık (^{o}C)	ÇO (mg/L)	Sıcaklık (^{o}C)	ÇO (mg/L)
0	14.60	21	8.90
1	14.20	22	8.73
2	13.81	23	8.56
3	13.45	24	8.40
4	13.09	25	8.24
5	12.76	26	8.09
6	12.44	27	7.95
7	12.13	28	7.81
8	11.83	29	7.67
9	11.55	30	7.54
10	11.28	31	7.41
11	11.02	32	7.29
12	10.77	33	7.17
13	10.53	34	7.05
14	10.29	35	6.93
15	10.07	36	6.82
16	9.86	37	6.72
17	9.65	38	6.61
18	9.45	39	6.51
19	9.26	40	6.41
20	9.08		



Şekil 5.3 Deneylerde kullanılan oksijenmetrenin genel elemanları



Şekil 5.4 Hidrolik sıçrama çıkışında çözünmüş oksijen ölçümü yapılırken

Tablo 5.2 Hidrolik sıçrama giriş ve çıkışında farlı zamanlarda yüzdesel olarak ölçülen ÇO değerleri

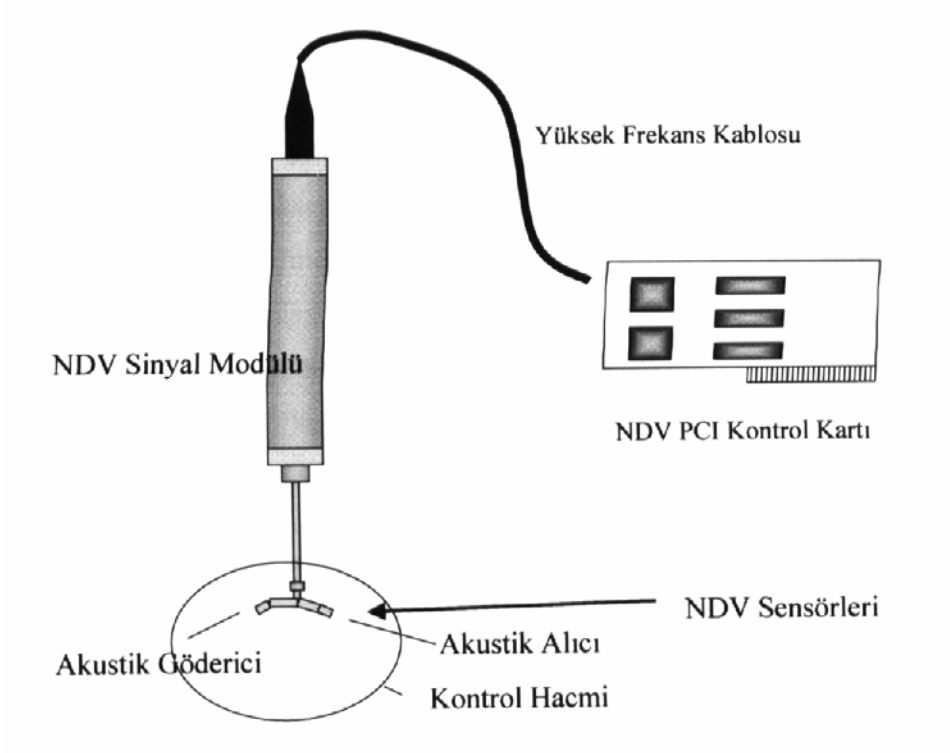
$q = 5.3x10^{-2}\ m^2/s$, $Fr_1=3.81$		$q = 5.3x10^{-2}\ m^2/s$, $Fr_1=4.26$	
Girişteki ÇO %	Çıkıştaki ÇO %	Girişteki ÇO %	Çıkıştaki ÇO %
9	17.7	14.3	24.4
17.1	25.8	22.4	32.6
34.8	43	30.2	40.1
44.5	53.2	40.3	50.4
51.9	60.3	56.5	66.4

5.3 Türbülans ve Basınç Çalkantıları Ölçümleri

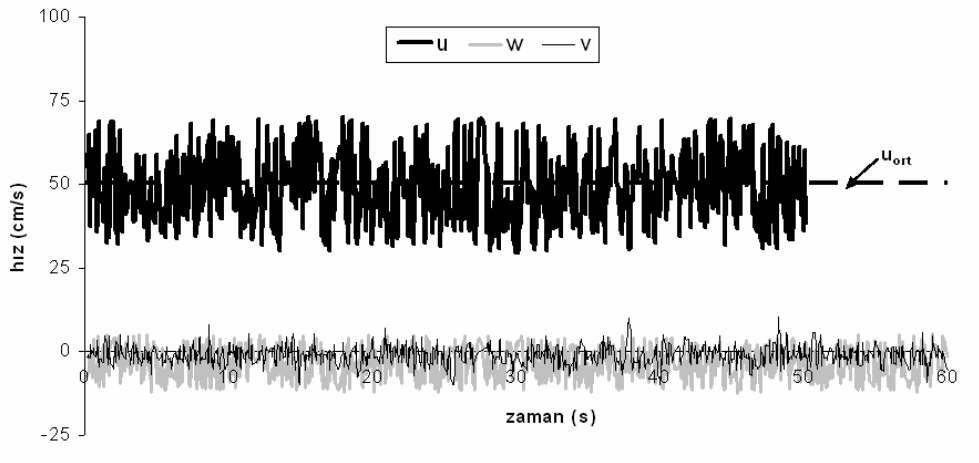
1970-1980'li yıllarda yapılan çalışmalarda türbülans çalkantı hızlarını ölçmede sıcak film anemometreleri sıkça kullanılmıştır (Bayazıt, 1971). Günümüzde ise türbülans karakteristiklerini belirlemede akustik dopler ve lazer dopler hızölçer gibi aletler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hidrolik sıçramanın düşük Froude sayılarındaki türbülans büyüklükleri, Nortek10 Mhz tipi Akustik Dopler Hızölçer (ADV) ile tespit edilmiştir. ADV hız ölçerin çalışma prensibi kısaca şöyledir. ADV vericisi düşey eksen boyunca belirli frekanslarda ses dalgaları yollar ve ses sinyalleri akım içersinde dağılmış olan küçük boyuttaki parçacıklara çarparak geri yansır. ADV aracılığıyla tespit edilen bu yansımış sinyaller ile gönderilen sinyaller arasındaki frekans farkından akım hızı tespit edilir. Elde edilen bu veri dizisi, ADV Signal Conditional Modulü'nden yüksek frekanslı kabloyla, bilgisayar üzerindeki işlemciye aktarılır (Şekil 5.5).

ADV 0.01-250 cm/s aralığında, ± %1 hassasiyetinde üç boyutlu hız ölçümleri yapılabilmekte ve saniyede 25 data alınmaktadır. ADV'nin ölçüm yaptığı akışkan kontrol hacmi 0.125 cm^3'tür ve bu kontrol hacmi cihazın 5.5 cm aşağısındadır. Yapılan deneylerde, hız ölçümleri her bir noktada 1 dakika süreyle kaydedilmiştir ve 1500 hız değerinden oluşan zaman serileri elde edilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.5 Deneylerde kullanılan akustik noktasal hızölçerin (ADV) çalışma prensibi



Şekil 5.6 Deneylerde Fr_1=3, q=0.0354 m^2/s olduğu akım koşullarında x/d_2=7.29, y/d1=1.03 noktasında ölçülen üç boyutlu hızların zaman serisi

Elde edilen veri dizisi, bilgisayarda kurulu olan WinADV32 programında çalıştırılarak, ortalama korelasyon katsayısının %70'den küçük olduğu aykırı değerler filtre edilmiş ve çalkantı hızlarının karesel ortamalarının karekökü, Reynolds kayma gerilmesi gibi türbülans büyüklükleri elde edilmiştir. Akustik

doplerın düşey yöndeki hareketi liminimetre yardımıyla, akım doğrultusundaki hareketi ise kanal üzerine yerleştirilmiş olan tekerlekli bir aparatla sağlanmıştır.

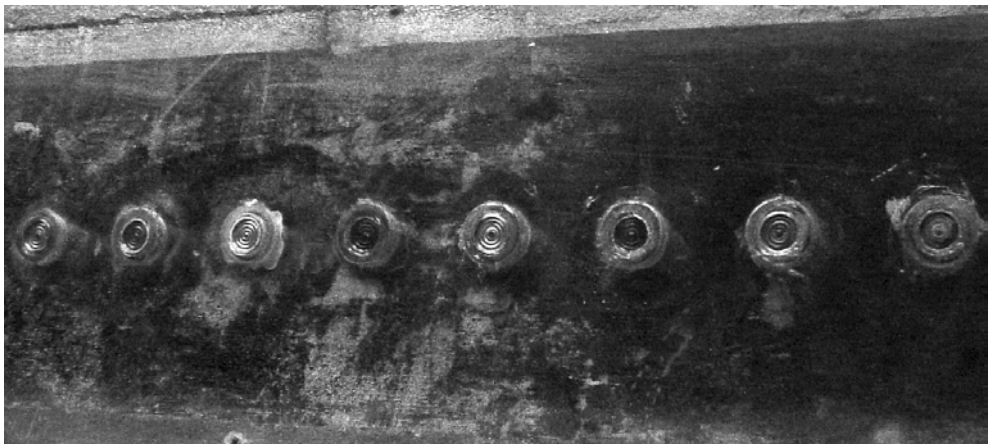
Basınç çalkantıları ölçümleri için 1. düşey kapağın 40 cm memba kesitinden başlayarak, kanal tabanının 180×50 cm^2'lik bölümüne pleksiglas bir levha monte edilmiştir. Levha üzerinde 7 santimetre aralıklarla kanal tabanın orta ekseninde 8 adet 1.1 cm çapında dairesel delikler açılmıştır. Bu dairesel deliklere, kanalın alt tarafından doğru HBM 11 B-5 tip modelinde 8 adet basınç dönüştürücü yerleştirilmiştir (Şekil 5.7). Basınç dönüştürücülerinden gelen analog sinyaller, herbiri ayrı birer kanal üzerinden önce bir sinyal kuvvetlendiriciye gelmekte ve buradan çıkan kuvvetlendirilmiş sinyaller ise, bir A/D dönüştürücü kartından geçerek bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayara gelen sinyaller, EASYEST LX yazılımı ile işlenerek, basınç ölçümlerini gösteren zaman serileri elde edilmektedir ve istenilen istatistik analizler programda yapılabilmektedir. Basınç dönüştürücülerin kalibrasyonu dört farklı akım derinliklerinde yapılmıştır. Basınç çalkantıları ölçümlerinde, hidrolik sıçramanın başlangıcının, 1. basınç dönüştürücüye yakın mesafede olmasına dikkat edilmiştir.

5.4 Akım Görüntüleme

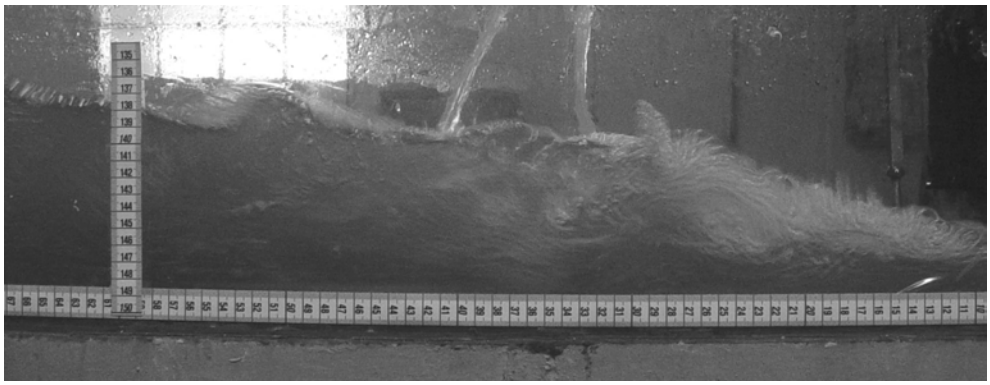
Hidrolik sıçramadaki akımın görüntülenmesi Sony DCR-HC19E dijital video kamera kullanarak iki farklı açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Video çekimleri farklı Fr_1 sayıları ve q değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerdeki ikinci kanal 7.5 cm genişliğinde, 17.5 cm yüksekliğinde, 440 cm uzunluğunda tabanı plastik ve yan cidarları pleksiglastan imal edilmiştir. Kanaldan en büyük 2 L/s'lik debi geçirebilmektedir ve hidrolik sıçrma 1. kanaldakine benzer şekilde düşey kapak çıkışında kuyruksuyunun kontrolünde oluşturulmuştur. Akım görüntülemede ikinci bir kanalda daha başvurulmasının sebebi, kameranın odaklandığı alanı küçülterek,

daha iyi çözünürlükte fotoğraflar elde etmektir. Böylece çevri hareketi ve hava girişinin daha net bir şekilde ortaya konması hedeflenmektedir.

Akımın görüntüleceği alana düşey ve yatay yönde yerleştirilen mezurelerle, görüntülerin ölçekli olması sağlanmıştır (Şekil 5.8). Bu video çekimleri daha sonra, bilgisayarda işlenerek, 0.02-0.04 saniye zaman aralıkları için birbirini takip eden fotoğraflar elde edilmiştir. Bu fotoğraflardan, hidrolik sıçramada oluşan makro ölçekli yatay eksenli çevri hareketlerinin yapısı ve hava kabarcıklarının hidrolik sıçrama alanı içersindeki dağılımı analiz edilmeye çalışılmışdır.



Şekil 5.7 Hidrolik sıçramadaki basınç çalkantıları ölçümleri için tabana yerleştirilmiş olan basınç dönüştürücüler



Şekil 5.8 Kanalda oluşturulmuş bir hidrolik sıçramaya örnek (Fr_1=4.85; q = 5.3 $\times 10^{-2}$ m^2/s)

6 DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1 Boyut Analizi

Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğine etki eden parametreler şu fiziksel büyüklüklerle ifade edilebilir:

$$E = f(d_1, d_2, U_1, B, k_s, \rho, g, \sigma, \nu, T_w) \tag{6.1}$$

Burada, E havalandırma verimlilik katsayısı, d_1 ve d_2 hidrolik sıçramadan önceki ve sonraki akım derinliklerini, U_1 hidrolik sıçrama öncesindeki kesitsel ortalama hızı, ρ akışkanın özgül kütlesini, σ akışkanın yüzey gerilmesini ve υ akışkanın kinematik viskozitesini göstermektedir. Yapılan araştırma pürüzsüz tabanda gerçekleştirildiği için k_s terimi ihmal edilmiş ve hidrolik sıçrama iki boyutlu olarak incelendiğinden B terimi (kanal genişliği) de dikkate alınmamıştır. Havalandırma verimliliği 20 ºC sıcaklık için yazıldığında:

$$E_{20} = f(d_1, d_2, U_1, \rho, g, \nu, \sigma) \tag{6.2}$$

olaya etki eden değişken sayısının yedi tane olduğu görülür. Temel boyut sayısı üç tane olduğundan, toplam dört tane boyutsuz π sayısı elde edilir. Boyut analizi için d_1, U_1, ve ρ esas değişken olarak seçilmiştir. Buradan, $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ boyutsuz büyüklükleri aşağıdaki gibi elde edilecekir:

$$\pi_1 = M^0 L^0 T^0 = (d_1)^{x_1} (U_1)^{y_1} (\rho)^{z_1} (\nu)^1 = (L)^{x_1} (LT^{-1})^{y_1} (ML^{-3})^{z_1} (L^2 T^{-1}) \tag{6.3}$$

$$\pi_2 = M^0 L^0 T^0 = (d_1)^{x_2} (U_1)^{y_2} (\rho)^{z_2} (g)^1 = (L)^{x_2} (LT^{-1})^{y_2} (ML^{-3})^{z_2} (LT^{-2}) \tag{6.4}$$

$$\pi_3 = M^0 L^0 T^0 = (d_1)^{x_3} (U_1)^{y_3} (\rho)^{z_3} (\sigma)^1 = (L)^{x_3} (LT^{-1})^{y_3} (ML^{-3})^{z_3} (MT^{-2}) \quad (6.5)$$

$$\pi_4 = M^0 L^0 T^0 = (d_1)^{x_4} (U_1)^{y_4} (\rho)^{z_4} (d_2)^1 = (L)^{x_4} (LT^{-1})^{y_4} (ML^{-3})^{z_4} (L) \quad (6.6)$$

Denklem 6.3'ten x_1, y_1, ve z_1 bilinmeyen üsleri sırasıyla, 1, 1 ve -1 olarak hesaplanır. Buradan: $\pi_1 = \frac{U_1 d_1}{\nu} = \mathrm{Re}$ olarak bulunur. Denklem 6.4'den x_2, y_2, ve z_2 bilinmeyen üsleri sırasıyla, -1/2, 1 ve -1/2 olarak hesaplanır. Buradan: $\pi_2 = \frac{U_1}{\sqrt{g d_1}} = Fr_1$ olarak elde edilir. Denklem 6.5'den x_3, y_3, ve z_3 bilinmeyen üsleri, -1, -2 ve -1 olarak hesaplanır. Buradan: $\pi_3 = \frac{\sigma}{U^2{}_1 \rho d_1} = 1/We^2$ (*Weber sayısı*) olarak bulunur. Denklem 6.6'dan x_4, y_4, ve z_4 bilinmeyen üsleri sırasıyla, -1, 0 ve 0 olarak hesaplanır. Buradan: $\pi_4 = \frac{d_2}{d_1}$ olarak elde edilir.

Hidrolik sıçramada, d_2/d_1 oranı momentumun korunumundan Fr_1 sayısının kontrolündedir; dolayısıyla bu boyutsuz parametre ihmal edilebilir. Weber sayısı, nap kalınlığının çok küçük olduğu akım koşullarında etkindir. Yapılan deneyler yüksek akım derinliklerinde gerçekleştirildiğinden, bu parametre de ihmal edilebilir. Buradan, hidrolik sıçramadaki E_{20} havalandırma verimliliğine etkiyen boyutsuz büyüklükler:

$$E_{20} = f(\mathrm{Re}, Fr_1) \quad (6.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

6.2 Kuramsal Yaklaşım

Termodinamiğin 1. prensibine dayanılarak ortamda kaybolan enerjinin büyük ölçekli çevrilerin yaptığı işe eşit olduğu yaklaşımında bulunulmuş ve havalandırma verimliliğinin yapılan bu işle doğru orantılı olduğu öne sürülmüştür.

$$E_{20} \propto \Delta H \times q \times \gamma \tag{6.8}$$

Ayrıca, suya transfer olan oksijenin miktarı akışkan özelliklerine de bağlıdır (Gameson, 1957; Kobus, 1991). Havadan suya oksijen transferinin gerçekleşebilmesi için yüzey gerilim kuvvetlerinin yenilmesi gerekir ve buradan, $E_{20} \ \alpha \ \frac{1}{\sigma}$ sonucuna ulaşılır (Ervine, 1998). Olaydaki etkin bir diğer akışkan özelliği ise viskozitedir. Viskozitenin artmasıyla, Reynolds sayısının değeri küçülür ve bu durum türbülans karakteristiklerinin küçülmesine yol açar (Wei ve Willmarth, 1989; Urban ve diğ., 2005). Buradan, $E_{20} \ \alpha \ \frac{1}{\upsilon}$ sonucuna ulaşılır (Kobus, 1991). Bu iki terimde (6.8) denklemimde yerine konulacak olursa:

$$E_{20} \ \alpha \ \frac{Q \times \Delta H \times \gamma}{\sigma \times \upsilon} = \frac{(m^2/s) \times m \times (N/m^3)}{(N/m) \times (m^2/s)} \tag{6.9}$$

boyutsuz değişkeni elde edilir. 20 ºC'de temiz bir suyun fiziksel özelliklerinin değerleri bellidir: $\gamma = 9789\ N/m^3; \sigma = 0.073\ N/m; \upsilon = 1.003 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}$ (Streeter ve Wylie, 1981). Bu değerler (6.9) denkleminde yerine konulacak olursa:

$$E_{20} \ \alpha \ 13.4 \times 10^{10} \times Q \times \Delta H \tag{6.10}$$

bağıntısı elde edilir. Bu değişkenler arasında nasıl bir fonksiyonel ilişki olduğunu belirlemek amacıyla laboratuvarda sistematik deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği, akımın kinetik enerjisini minimum yapma prensibine göre değerlendirilmiştir.

Burada, Froude sayısı enerji terimleri cinsinden yazılacak olursa, Fr_1 sayısının karesinin kinetik enerjinin potansiyel enerjiye oranı olduğu görülür ve bu oran α simgesiyle gösterilmiştir :

$$Fr_1^2 = 2\frac{1/2U^2}{gd} = 2\frac{Kinetik\ enerji}{Po\tan siyel\ enerji} = 2\alpha \qquad (6.11)$$

Örnek olarak, Fr_1 sayısının dört olduğu durumda, akımın kinetik enerjisi potansiyel enerjisinden sekiz kat daha büyüktür.

Hidrolik sıçramadan önceki yüksek kinetik enerji, sıçrama bölgesinde kırılmakta ve sıçramanın çıkışında potansiyel enerji kinetik enerjiden daha büyük olmaktadır. Bu süreç, termodinamiğin ikinci prensibiyle uyuşmaktadır. Bu prensibe göre doğadaki sistemler kinetik enerjilerini minimuma indirgeme eğilimindedirler. Termodinamiğin bu kanunu hidroliğin diğer kollarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek vermek gerekirse, Yalın ve Da Silva (2001) akarsularda oluşan kıvrım geometrilerini, termodinamiğin ikinci prensibine dayandırarak Froude sayılarını minimum yapma eğiliminden oluştuğunu ileri sürmüşler ve bu kıvrımlarda kaybolan enerjinin, akarsu yatağı ve kenarlarındaki sedimentin sökülmesi, taşınması gibi sistemin iç enerjisine dönüştüğünü belirtmişlerdir. Bu çalışmada da, hidrolik sıçrmanın havalandırma verimliliği, sıçramanın kinetik enerjisini minimuma indirgeme yaklaşımına göre incelenmiştir.

6.3 Hidrolik Sıçramanın Doğal Havalandırma Verimliliğinin Araştırılması

Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği, Fr_1 sayısının 2.1-6.5 aralığında değişim gösterdiği, yedi farklı debide gerçekleştirilen deney serileriyle araştırılmıştır (Tablo 6.1).

Tabloda, d_1 hidrolik sıçramadan önceki akım derinliğini, U_1 hidrolik sıçramadan önceki ortalama akım hızını, d_2 hidrolik sıçramadan sonraki akım derinliğini, ΔH hidrolik sıçramada meydana gelen yük kaybını, L_r çevrinti bölgesi uzunluğunu, E_{20} 20 ºC için hesaplanmış olan havalandırma verimliliğini göstermektedir. Her bir seri için havalandırma verimliliği:

$$E = \frac{C_u - C_d}{C_s - C_u} \tag{6.12}$$

formülüyle hesaplanmıştır. Hidrolik sıçramayla ilgili gerçekleştirilen deneylerde gözlenen en büyük E_{20} değeri 0.103 olmuştur. 20 ºC'de C_s'nin değeri 9.08 mg/L'dir ve bu durumda yaklaşık 0.91 mg/L'lik bir oksijen kazanımı olmuştur.

Batık sıçramanın gerçekleştiği deneylerde ise oksijen miktarında bir değişim gözlenmemiştir. Çünkü batık sıçramada oluşan çevriler yatay düzlemdedir (Long ve diğ. 1990) ve girişim alanında oksijen transferinin gerçekleşmesini sağlayacak bir düzensizlik yaratmamaktadır. Benzer şekilde, Urban ve diğ. (2001) çalışmasında da batık sıçrama olduğu durumda hava-su gaz transferi gözlenmemiştir.

Şekil 6.1'de hidrolik sıçramadaki yük kaybı ifadesi, özgül enerji-akım derinliği grafiği üzerinde gösterilmiştir. Grafikte gösterilen eğri bir hiperboldür ve eğrinin denklemi:

$$E = d + \frac{q^2}{2d^2 g} \tag{6.13}$$

şeklindedir. Grafik üzerine, q'nun 0.053 m^2/s olduğu akım koşulunda, farklı Froude sayılarında ölçülen değerler noktalanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, eğri akımın aynı enerjide iki farklı derinlikten geçebileceğini göstermektedir. Fakat, akımın sel rejiminden nehir rejimine geçişinde enerjinin bir kısmı kırılır ve bu durum, akımın nehir rejimine geçişinde gözlenen değerin eğrinin sol tarafında kalmasına yol açar (Şekil 6.1). Kırılan bu enerji miktarı:

$$\Delta H = \left(d_1 + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left(d_2 + \frac{U_2^2}{2g} \right) \tag{6.14}$$

formülünden hesaplanmıştır. Geçekleştirilen deneylerde enerji kırılmasını gösteren $\Delta H/E_1$ parametresi, %16 ile %63 aralığında değerler almıştır. Fr_1=5.17 olduğu durumda 15.9 cm, Fr_1=3.8 olduğu durumda ise 3.5 cm yüksekliğinde bir enerji kaybı meydana gelmiştir (Şekil 6.1). Çünkü Fr_1 sayısının artışı makro ölçekteki yatay eksenli çevrilerin oluştuğu bölgenin büyümesine yol açar (Şekil 6.2). Şekilde d_2'ye göre boyutsuzlaştırılmış olan, L_r ve L_j'nin Fr_1 sayısına göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.2'den görüleceği üzere grafik üzerine işaretlenmiş olan noktalar logaritmik bir fonksiyonu temsil etmektedir. Bu fonksiyonel ilişki:

$$\frac{L_r}{d_2} = 2.14 Ln(Fr_1) + 0.65 \tag{6.15}$$

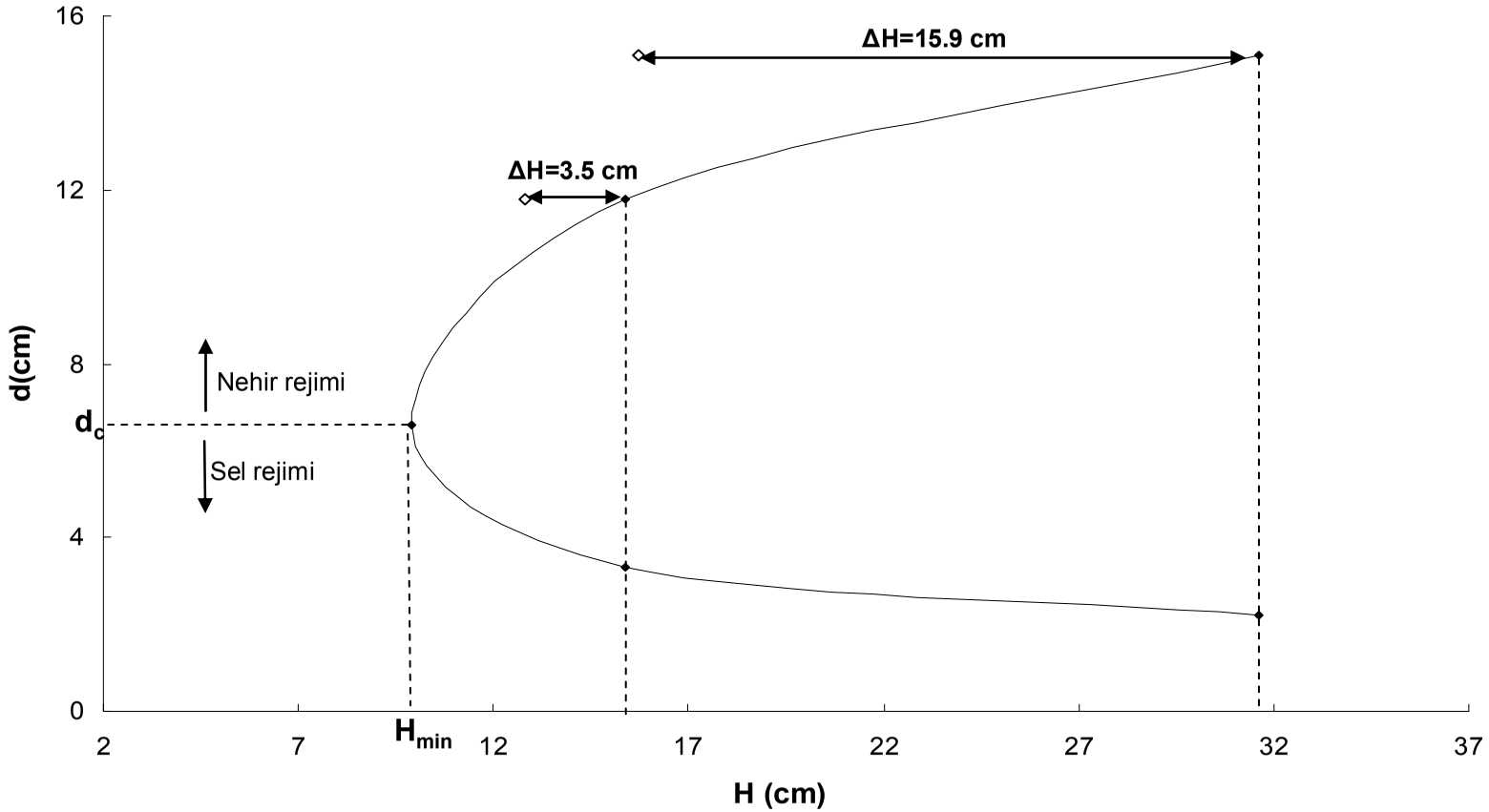
denklemiyle tanımlanmıştır. Rajaratnam (1967) ise, Fr_1>7 koşulunda, Fr_1'in L_r üzerindeki etkisinin azaldığını belirtmiş ve iki değişken arasında lineer bir ilişki bulmuştur:

$$\frac{L_r}{d_2} = 0.834 + 0.012 Fr_1 \qquad (2.5 \le Fr_1 \le 10) \tag{6.16}$$

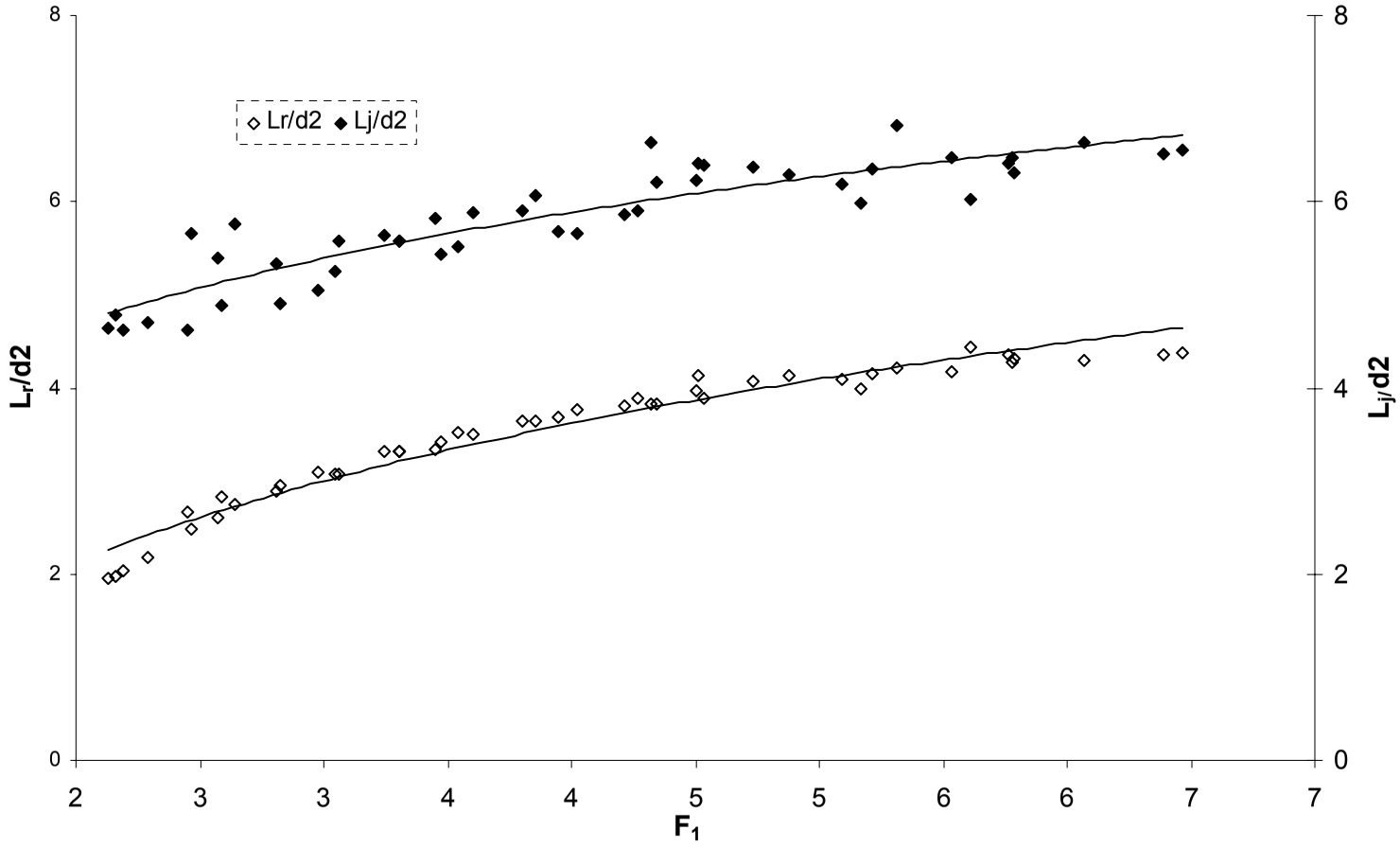
Bu çalışmada elde edilen sonuçlar bu eğilimi desteklemektedir. Ayrıca, Bradley ve Peterka (1957) tarafından hidrolik sıçramanın bitişini temsil $6d_2$ mesafesi bu çalışmada da gözlenmiştir (Şekil 6.2) ve Froude sayısının artışıyla L_r/L_j oranının artış eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde, Fr_1=2.1 durumunda Lr/Lj oranı %40 iken, Fr_1=6.5 durumunda bu oran %70'e çıkmıştır (Şekil 6.2). Rajaratnam (1967)'in çalışmasında, Fr_1'ın 3'den 9'a yükselmesiyle bu oran benzer şekilde %40'dan %70'e yükselmiştir.

Tablo 6.1 Hidrolik sıçrama deneylerine ait akım koşulları ve elde edilen sonuçlar

Deney No	q (m2/s)	d_1 (cm)	U_1 (m/s)	Fr_1	d_2 (cm)	ΔH (cm)	L_r(cm)	E_{20}
1	2.00E-02	1.40	1.43	3.85	7.1	4.66	30	0.033
2	2.00E-02	1.50	1.33	3.48	6.8	3.65	28	0.028
3	2.00E-02	1.10	1.82	5.53	8.2	9.92	39	0.056
4	2.00E-02	1.80	1.11	2.64	5.9	1.62	19	0.000
5	2.00E-02	1.00	2.00	6.39	8.6	12.76	42	0.075
6	2.00E-02	8.00	-	Batık	13.5	-	-	0.000
7	1.42E-02	1.00	1.42	4.53	6.1	5.44	28	0.037
8	1.42E-02	1.20	1.18	3.45	5.5	3.01	22	0.023
9	1.42E-02	1.3	1.09	3.06	5.2	2.19	20	0.019
10	1.42E-02	1.5	0.95	2.47	4.6	1.08	16	0.000
11	1.42E-02	0.9	1.58	5.31	6.3	6.94	32	0.037
12	1.42E-02	0.85	1.67	5.79	6.5	8.16	29	0.042
13	2.50E-02	1.35	1.85	5.09	9.2	9.74	43	0.056
14	2.50E-02	1.2	2.08	6.07	9.8	13.52	48	0.066
15	2.50E-02	1.5	1.67	4.34	8.7	7.15	38	0.047
16	2.50E-02	1.7	1.47	3.60	8.0	4.60	32	0.037
17	2.50E-02	1.8	1.39	3.31	7.7	3.70	29	0.033
18	2.50E-02	2.3	1.09	2.29	6.6	1.31	16	0.000
19	2.50E-02	1.8	1.39	3.31	7.7	3.70	27	0.033
20	3.00E-02	1.4	2.14	5.78	10.8	13.73	50	0.075
21	3.00E-02	1.3	2.31	6.46	11.3	17.02	54	0.103
22	3.00E-02	1.6	1.88	4.73	9.9	9.02	45	0.051
23	3.00E-02	1.5	2.00	5.21	10.4	11.30	49	0.061
24	3.00E-02	1.7	1.76	4.32	9.8	7.97	50	0.056
25	3.00E-02	2.7	1.11	2.16	7.1	1.11	18	0.000
26	3.00E-02	2.4	1.25	2.58	7.8	2.10	22	0.019
27	3.00E-02	10.8	-	Batık	17.0	-	60	0.000
28	4.00E-02	2.6	1.54	3.05	10.3	4.26	39	0.033
29	4.00E-02	2.35	1.70	3.55	10.7	5.79	45	0.042
30	4.00E-02	2	2.00	4.52	11.4	9.11	55	0.061
31	4.00E-02	3.3	1.21	2.13	8.4	1.20	17	0.000
32	4.00E-02	1.9	2.11	4.88	12.1	11.54	51	0.075
33	4.00E-02	1.7	2.35	5.76	12.8	15.71	61	0.094
34	4.00E-02	2.9	1.38	2.59	8.8	2.01	20	0.019
35	4.60E-02	2.9	1.59	2.97	10.9	4.05	30	0.033
36	4.60E-02	2.4	1.92	3.95	12.5	8.59	49	0.066
37	4.60E-02	2.2	2.09	4.50	13.0	11.01	55	0.075
38	4.60E-02	3.3	1.39	2.45	9.3	1.76	21	0.019
39	4.60E-02	3	1.53	2.83	10.6	3.45	28	0.030
40	4.60E-02	2.3	2.00	4.21	12.8	9.83	45	0.070
41	4.60E-02	1.9	2.42	5.61	14.0	16.70	57	0.094
42	5.28E-02	2.2	2.40	5.17	15.1	16.20	62	0.103
43	5.28E-02	2.5	2.11	4.26	13.9	10.66	57	0.075
44	5.28E-02	3	1.76	3.24	12.4	5.58	43	0.047
45	5.28E-02	2.7	1.96	3.80	13.4	8.46	50	0.066
46	5.28E-02	3.3	1.60	2.81	11.8	3.94	37	0.039
47	5.28E-02	3.9	1.35	2.19	10.4	1.69	23	0.000
48	5.28E-02	2.6	2.03	4.02	13.6	9.41	54	0.070



Şekil 6.1 Hidrolik sıçramadaki özgül enerji- akım derinliği grafiğinde enerji kaybının gösterilmesi: Deney No 42 ve 45

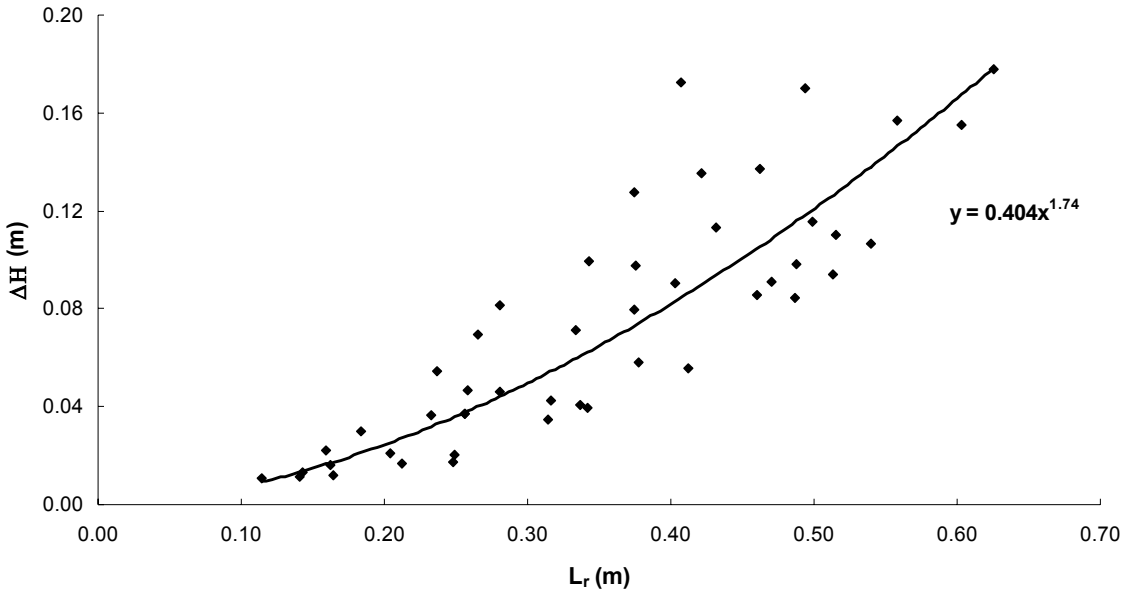


Şekil 6.2 Oluşturulan hidrolik sıçrama ve çevrinti bölgesi uzunluklarının Fr_1 sayısına göre değişimi

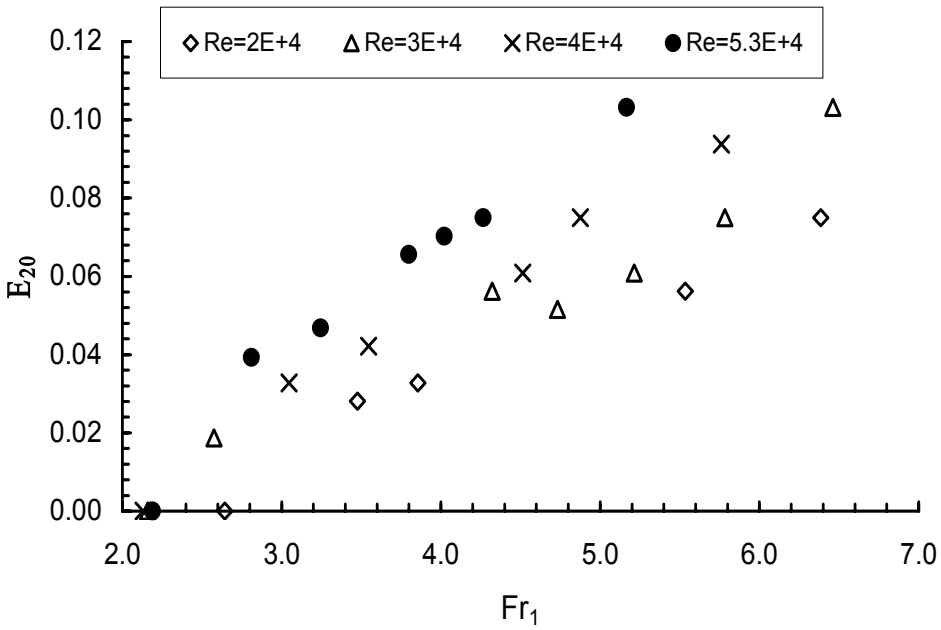
Şekil 6.3'te hidrolik sıçramadaki yük kaybıyla çevriniti bölgesi uzunluğu arasındaki fonksiyonel ilişki incelenmiştir. Şekilden görüleceği üzere L_r'nin az bir artışıyla, ΔH fazla bir şekilde artmaktadır. Bu noktaları en iyi biçimde temsil eden eğrinin fonksiyonu:

$$\Delta H = 0.404 L_r^{1.74} \tag{6.17}$$

denklemiyle tanımlanmıştır. Bu eşitlik, hidrolik sıçramadaki enerji kırılmasının önemli derecede L_r'ye bağımlı olduğunu işaret etmektedir. Bunun sebebi, büyük ölçekli çevri ve girdapların L_r uzunluğu içerisinde oluşup sonlanmasıdır. Bu çevri hareketi, ortamda ikincil akım oluşmasına sebeb olur ve böylece yaratılan türbülansla akım enerjisinin bir kısmı ısıya dönüşür. Şekil 6.4'te havalandırma verimlilik sayısının, Froude sayısıyla değişimi gösterilmiştir. Fr_1 ve Re sayılarının olay üzerindeki önemli etkisi şekilden görülebilmektedir

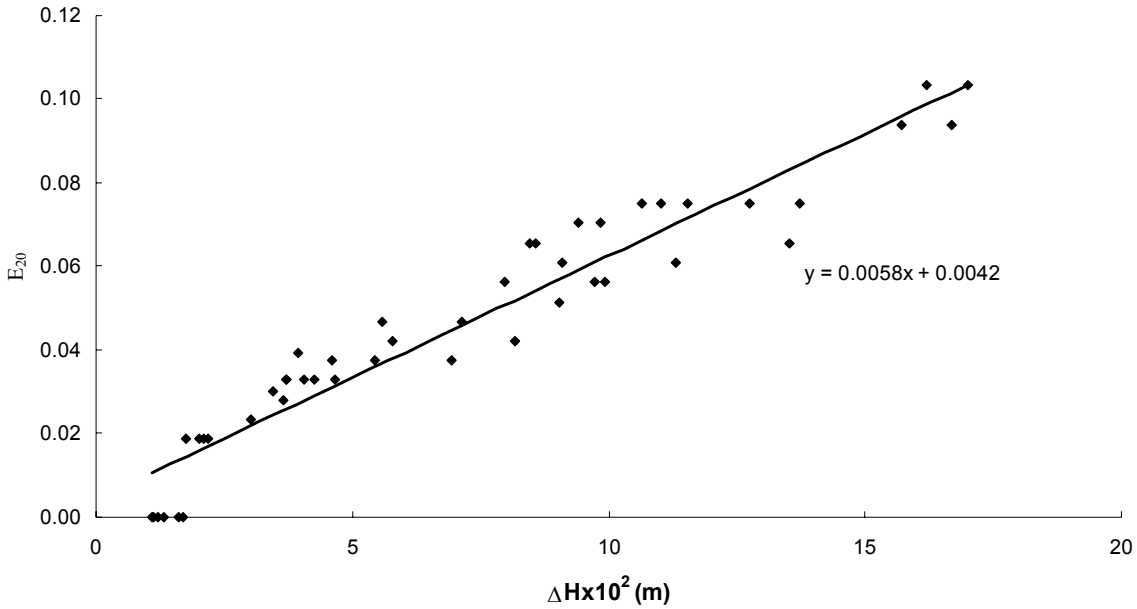


Şekil 6.3 Hidrolik sıçramadaki yük kaybının çevrinti bölgesi uzunluğuna göre değişimi

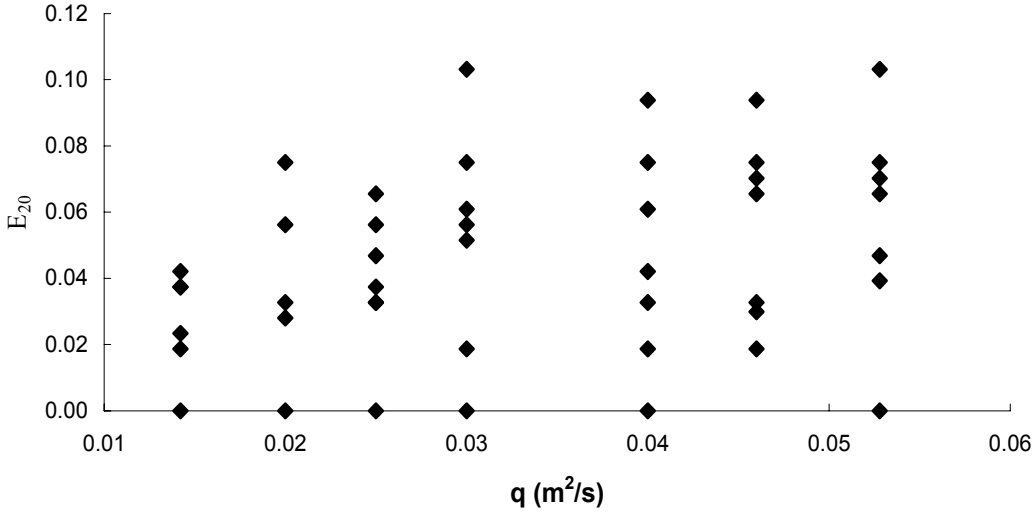


Şekil 6.4 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin Fr_1 sayısıyla farklı Re sayılarında değişimi

Bu çalışmadan beklenen, doğal havalandırma verimliliğiyle yük kaybı arasında fonksiyonel bir ilişkinin ortaya konmasıdır. Hatırlanacak olursa, doğal havalandırmayı sağlıyan üç tane önemli hidrodinamik süreç vardır. Bunlar: hidrolik sıçrama, su düşümü ve kaskatlı akımlardır. Keza, bu süreçlerin bir diğer ortak özelliği hidrolik yapılarda enerji kırıcı olarak kullanılmalarıdır. Bu noktadan hareketle, havalandırma verimliliğiyle yük kaybı arasında pozitif bir korelasyonun olması beklenmektedir. Bu pozitif korelasyon, elde edilen deneysel verilerin kartezyen koordinat takımına işaretlenmesiyle ortaya konmuştur (Şekil 6.5). Örnek vermek gerekirse, ΔH'ın 9.02 cm'den 17.2 cm'ye çıkmasıyla havalandırma verimliliği %100 artmıştır (Tablo 6.1). Havalandırma verimliliğinin yük kaybıyla doğru orantlı olarak değiştiği Şekil 6.5'ten görülebilmektedir. Fakat deneysel noktaların lineer bir doğru etrafında saçıldığı görülmektedir (Şekil 6.5). Bu eğilim, olayda ikinci bir parametrenin de etkin olduğunu işaret etmektedir. Bu parametre olarak birim genişlikten geçen debi seçilmiş ve havalandırma verimliliğiyle yük kaybı arasındaki ilişki Şekil 6.6'da sunulmuştur.



Şekil 6.5 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin yük kaybı ile değişimi



Şekil 6.6 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin yük kaybı ile değişimi

Şekil 6.7'de havalandırma verimliliği yük kaybı ve birim genişlikten geçen debinin fonkiyonu olarak verilmiştir. Şekle bakıldığında, E_{20}'nin birinci derecede ΔH'ın, ikinci derecede ise q'nun fonksiyonu olduğu gözlenmektedir. Deneysel verilere çoklu regresyon analizi yöntemi uygulanarak ampirik bir formül geliştirilmeye çalışılmıştır.

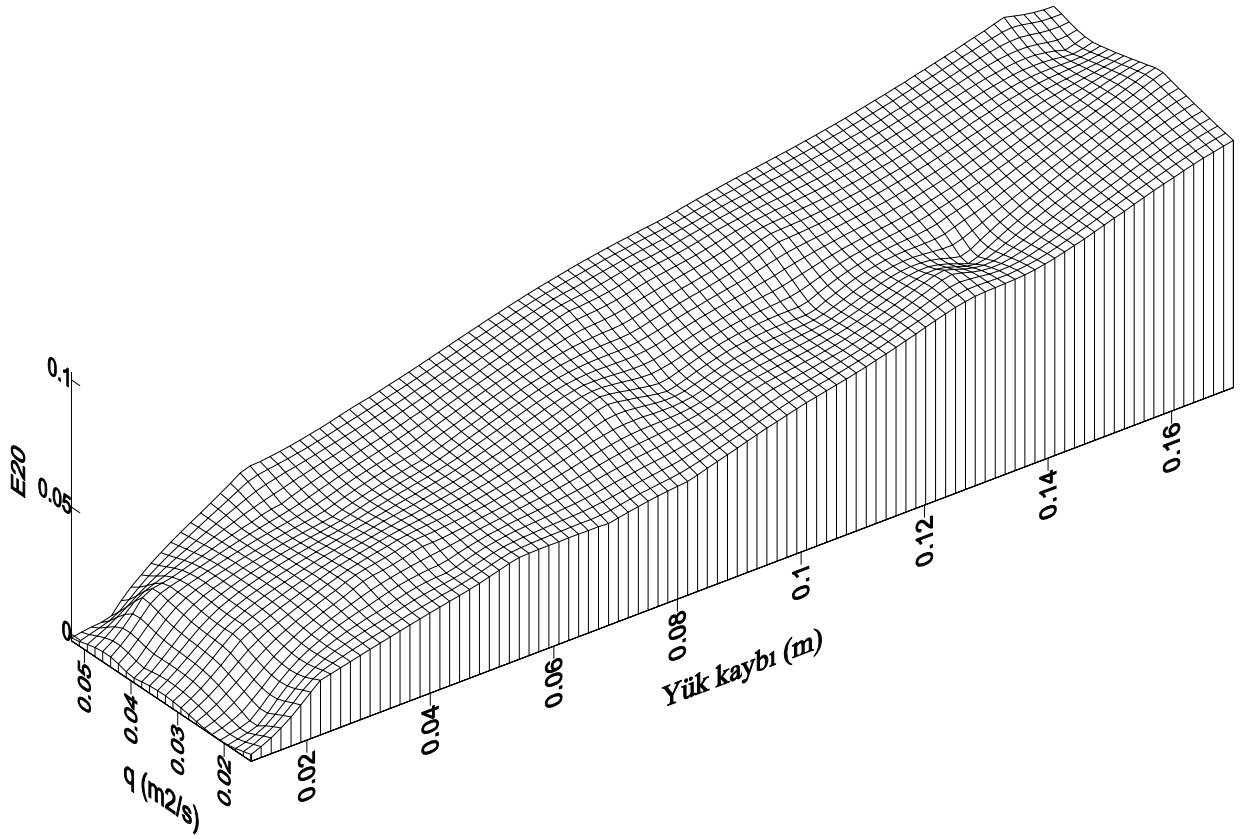
Bu yöntem birden fazla bağımsız değişken olduğunda kullanılır (Bayazıt ve Oğuz 1998) ve en küçük kareler yöntemi ilkesine dayanır. En küçük kareler yönteminde kartezyen düzlemine işaretlenen noktaları en iyi temsil eden eğrinin denklemi şu ilkeye göre belirlenir: $\min \sum_{i=1}^{n} (y_{ölç} - y_{tah})^2$. Bu çalışmada, ΔH ve q girdileri bağımsız değişkenler olarak ve E_{20} ise bağımlı değişken olarak alınmıştır. Deneysel verileri en iyi temsil eden eğrinin denklemi çoklu regresyon analiziyle kuvvet fonksiyonu olarak bulunmuş ve (6.18) denklemiyle ifade edilmiştir:

$$E_{20} = 0.17 q^{0.23} \Delta H^{0.74} \tag{6.18}$$

Bu denklem, havalandırma verimliliğinin birinci dereceden yük kaybının, ikinci dereceden ise birim genişlikten geçen debinin fonksiyonu olduğunu işaret etmektedir. Sonuçta, E_{20}'nin ΔH'ın ¾'cü, q'nun ise ¼'cü üssüyle doğru orantılı olduğu bulunmuştur. Bu denklem deneysel verilerin işaret ettiği üzere $\Delta H \geq 1.7\ cm$ koşullarında geçerlidir.

Bu ampirik denklem, şu bilgilerin ışığı altında açıklanacaktır: Termodinamiğin birinci prensibine göre bir ortamdaki enerji kaybolmaz, ancak başka bir enerjiye dönüşür. Hidrolik sıçramada kırılan akım enerjisi, makro ölçekli çevrilerin ortamda türbülans yaratması ve oluşturulan bu türbülans kinetik enerjisinin küçük ölçekteki çevrilere iletilmesiyle ısıya dönüşür (Nezu, 2005). Dolayısıyla, kırılan enerji miktarı çevri hareketiyle ilgilidir (Hager, 1992; Chanson, 1996). Nitekim, suya hava girişini sağlıyan fiziksel süreç yine bu çevri hareketidir.

Akıma ters yöndeki bu vorteksler, havayı yakalayıp su içine emilmesini sağlarlar. Böylece, havadaki oksijenin suyun içine transferi gerçekleşmiş olur.

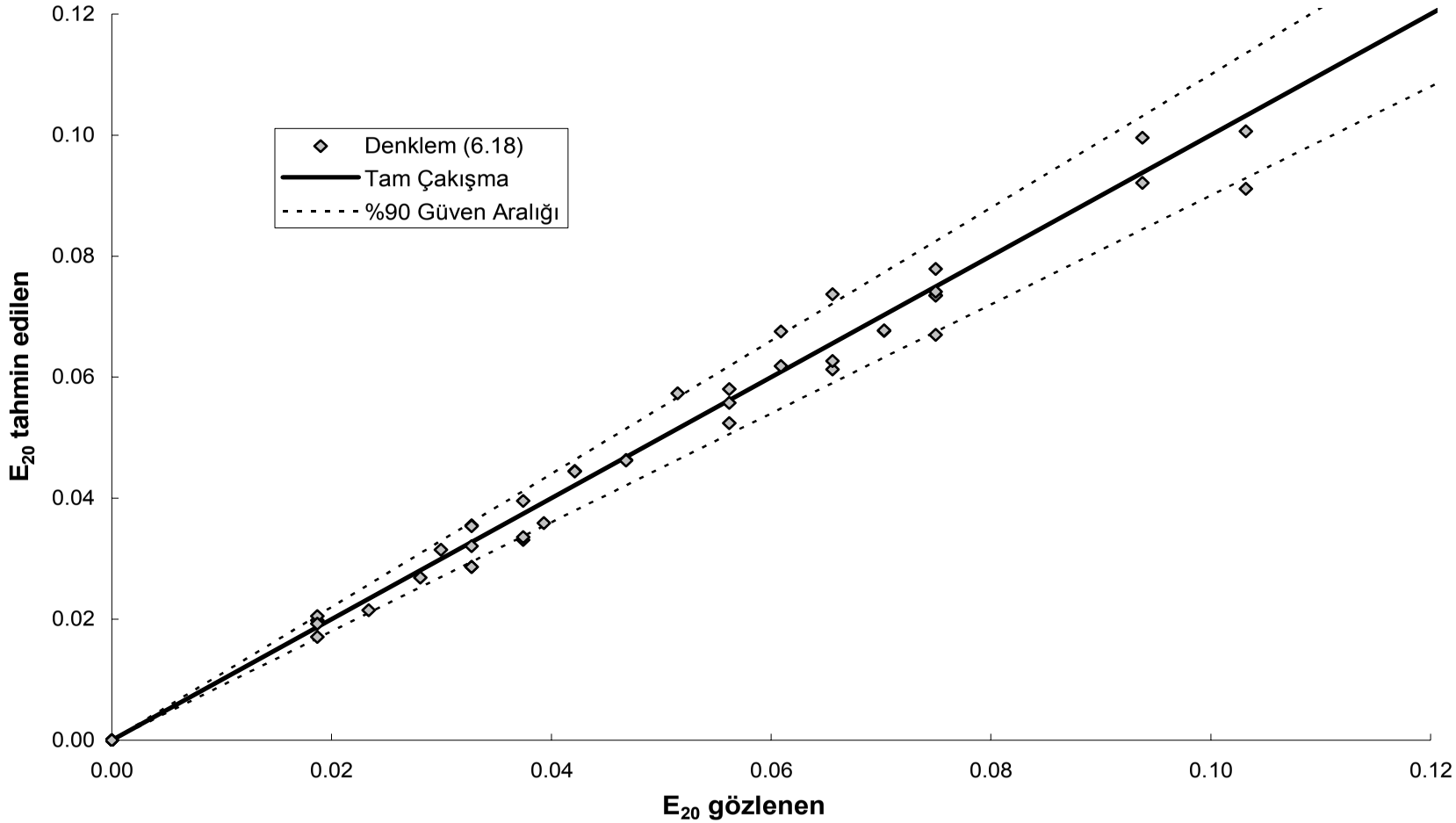


Şekil 6.7 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin farklı debilerde yük kaybına göre değişimi

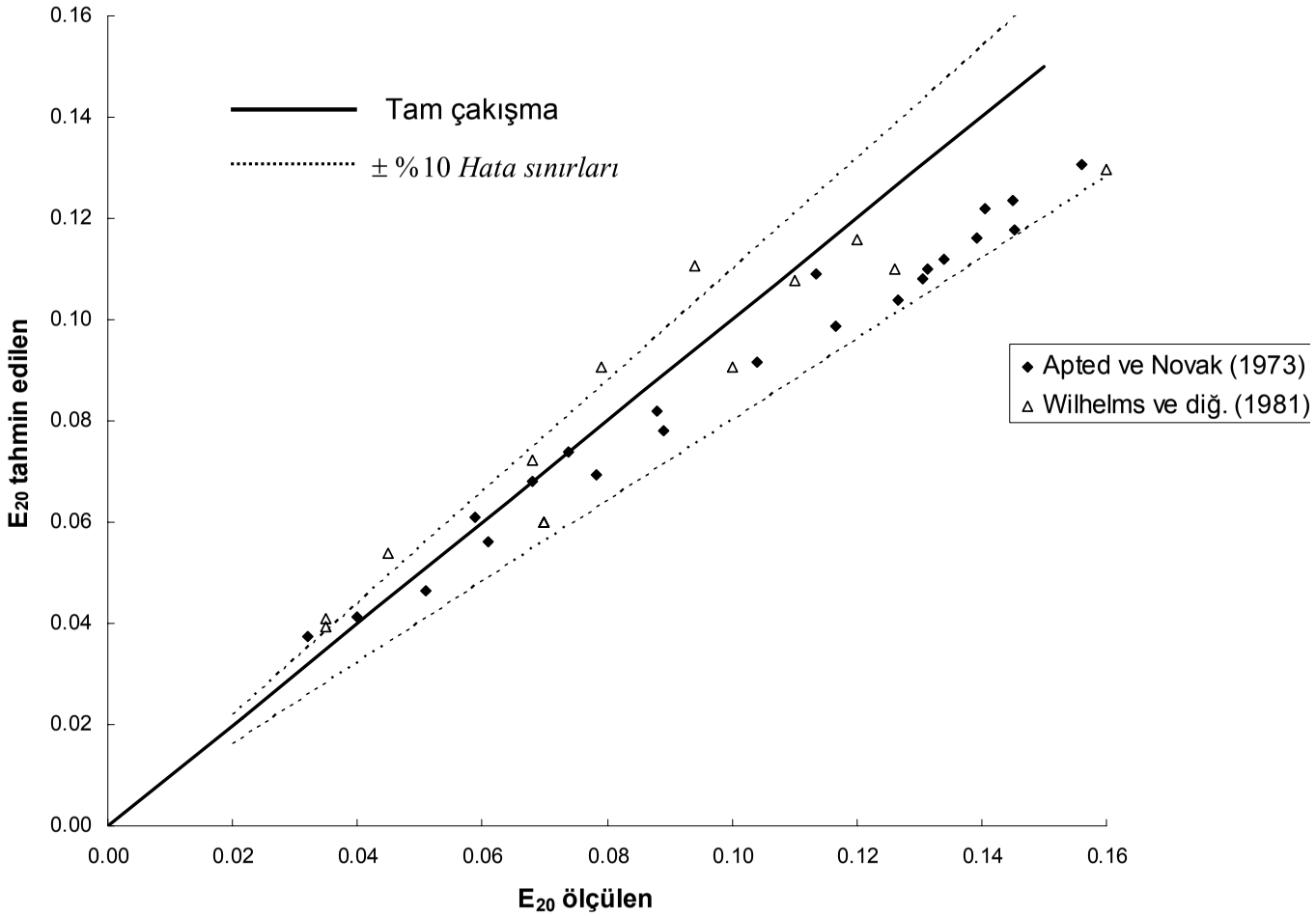
Şekil 6.8'de (6.18) denklemiyle tahmin edilen E_{20} değerleriyle, gözlenen E_{20} değerlerinin kıyaslanması ±%10 hata sınırları içinde gösterilmiştir. Baştaki bir iki veri dışında, tahmin edilen değerlerin ±%10 hata sınırlarının içinde kaldığı görülmektedir (Şekil 6.8). Bu konuda yapılan diğer çalışmalarla kıyaslandığında (bkz. Nakasone, 1987; Chanson, 1995; Gulliver ve diğ. 1998), elde edilen sonuçların oldukça yüksek bir güven aralığında kaldığı görülmektedir.

Önerilen denklemin geçerliliğini kontrol etmek için, Apted ve Novak (1973) ve Willhelms ve diğ. (1981) çalışmalarındaki veriler (6.18) denkleminde girdi olarak kullanılmış ve tahmin edilen değerlerle, gözlenen değerler bir saçılma diyagramında noktalanmıştır (Şekil 6.9). Dört değer dışında, tahmin edilen değerlerin %90 güven aralığında kaldığı görülmektedir. Bağıl hataların ortalaması ise %5'in altında kalmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalardaki ölçüm tekniklerindeki farklılık dikkate alındığında, (6.18) denkleminin oldukça iyi tahminler yaptığı ileri sürülebilir.

Elde edilen ampirik formül, literatürde sıkça kullanılan diğer formüllerle korelasyon katsayıları ve bağıl hatalarının ortalaması kriterleri dikkate alınarak kıyaslanmıştır. Sonuçlar Tablo 6.2 ve Şekil 6.10'da sunulmuştur. Denklemlerde girdi olarak sunulan çalışmadaki veriler kullanılmıştır. En iyi tahmini yapan bağıntılar sırasıyla: Sunulan çalışma, Willhelms ve diğ. (1981), Avery ve Novak (1978), ve Holler (1971) şeklinde olmuştur. Holler (1971) Denklemi'nin havalandırma verimliliğini doğru bir şekilde tahmin etmekten çok uzak olduğu görülmektedir (Şekil 6.10). Bunun nedeni, Holler (1971) denkleminde bağımsız değişken olarak sadece hidrolik sıçrama öncesi ve sonrasındaki hız farkı kullanılmıştır. Bu parametre, akım ortamındaki ΔH'ı temsil edebilmesine rağmen, tek başına yeterli olmadığı görülmektedir (Şekil 6.10).



Şekil 6.8 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin (6.18) denklemiyle tahmin edilmesi



Şekil 6.9 Hidrolik sıçramadaki havalandırma verimliliğinin Apted ve Novak (1973), Wilhelms ve diğ. (1981) verileri için (6.18) denklemiyle tahmin edilmesi

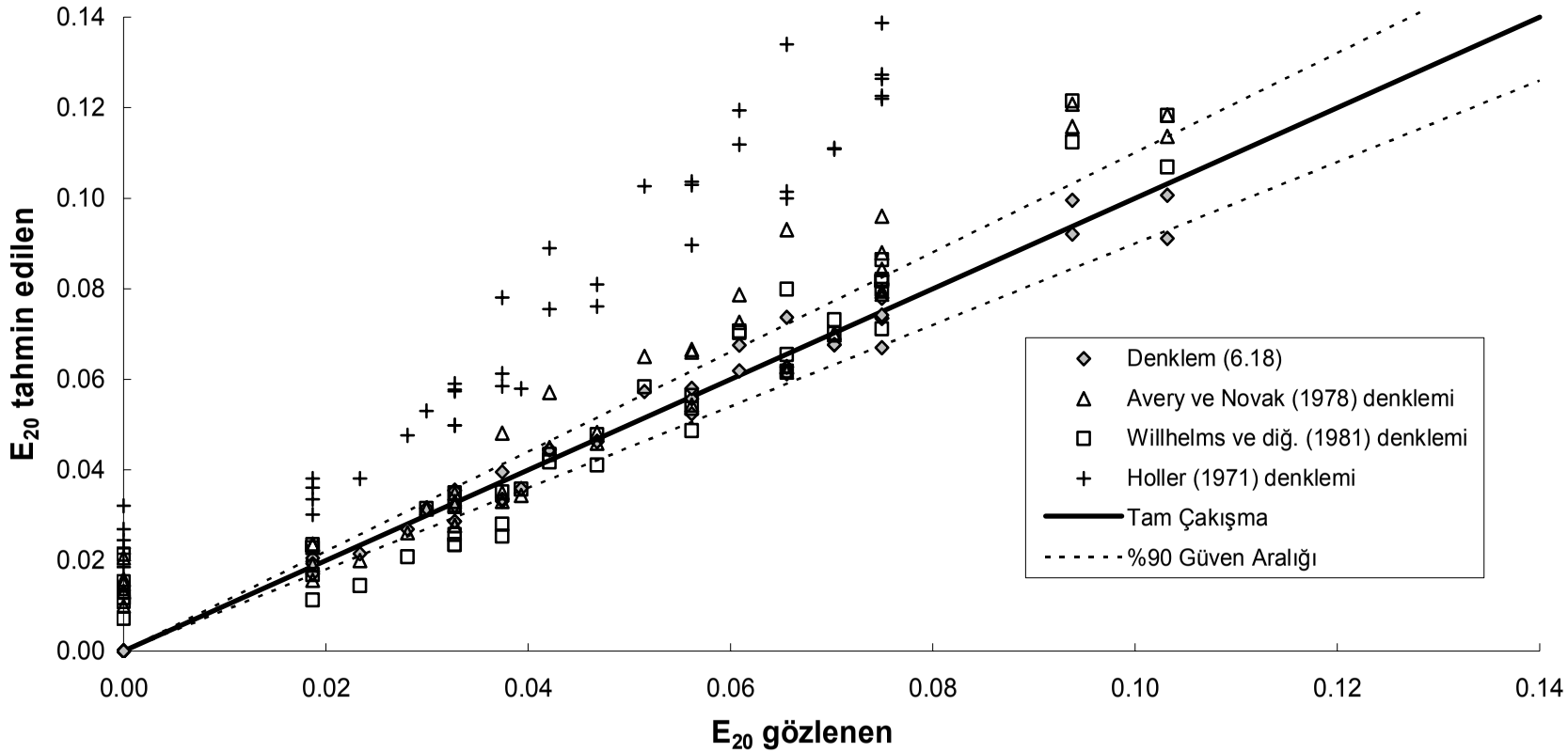
Şekil 6.11'de rölatif enerji kırılmasının α katsayısıyla (kinetik enerjinin potansiyel enerjiye oranı) değişimi gösterilmiştir. Şekilden, görüleceği üzere, α sayısı arttıkça yüzdesel olarak kırılan enerji miktarı logaritmik olarak artmaktadır. Bu gidişte, hidrolik sıçramanın kinetik enerjisini minimuma indirgeme ilkesini desteklemektedir.

Tablo 6.2. Farklı formüllerle tahmin edilen E_{20} değerlerinin bağıl hatalarının ortalamaları ve korelasyon katsayıları

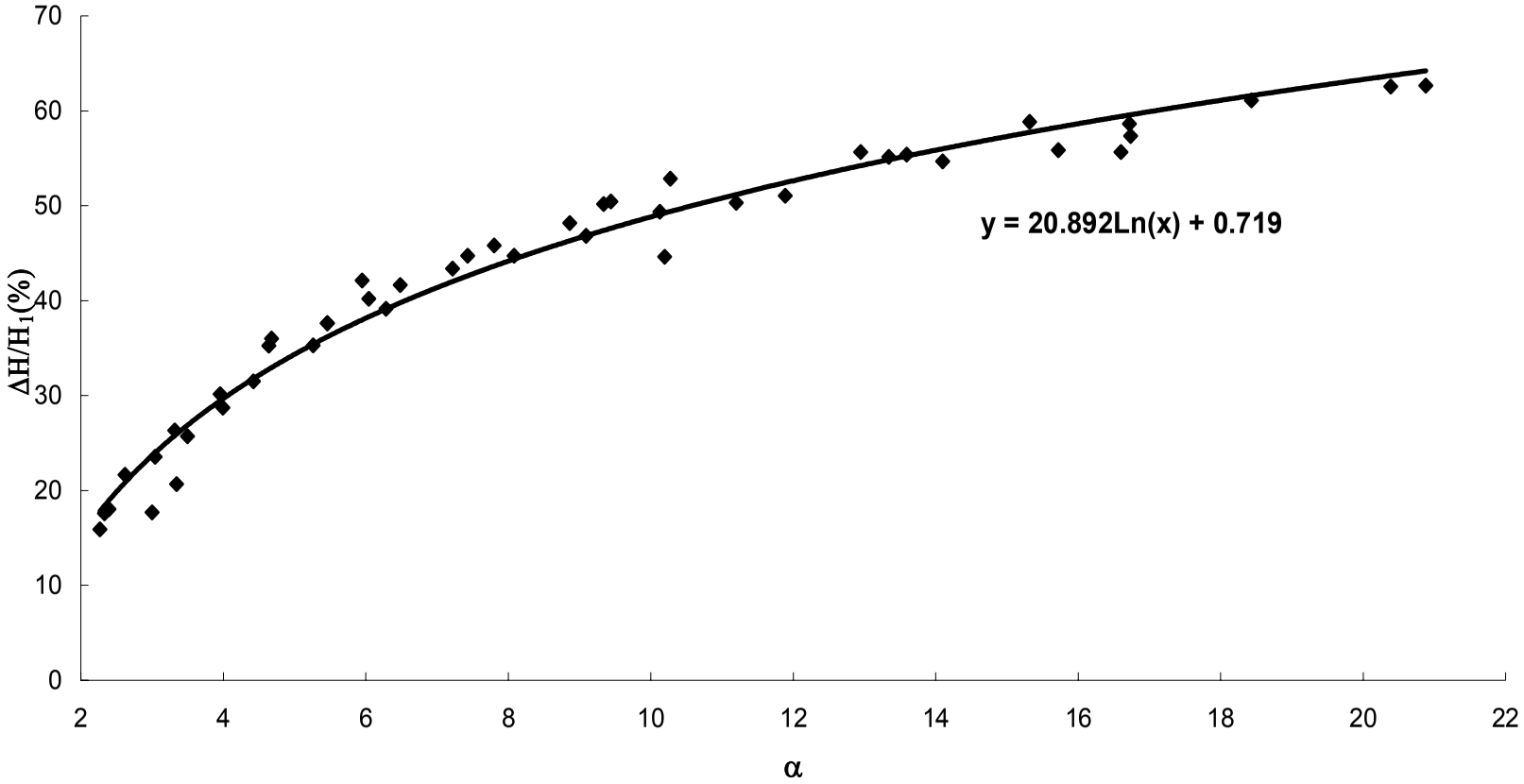
Formül	Bağıl hataların ortalaması	Karesel Hataların ortalamasının karekökü
Sunulan Çalışma	-0.007	0.004
Wilhelms ve diğ. (1981)	-0.014	0.009
Avery ve Novak (1978)	0.07	0.011
Holler (1971)	0.638	0.04

6.4 Savaktaki Doğal Havalandırma Verimliliğinin Araştırılması

Bu bölümde gerçekleştirilen deneylerde, savaktaki havalandırma verimliliği incelenmiştir. Bunun amacı, hidrolik sıçramada elde edilen ampirik formülün uygulanabilirliğini araştırmaktır. Dolayısıyla, kanalın membasında yer alan üçgen savakta dört farklı debi için 19 seri deney gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.3). Şekil 6.12'de, d_p havuzcuk derinliğini, h düşüm yüksekliğini göstermektedir. Sabit bir debide, düşüm yüksekliği ve havuzcuk derinliği, kanal içindeki düşey kapakla kontrol edilmiştir. Deneylerde havuzcuk derinliğinin, hava kabarcık dalış derinliğinden büyük olmasına dikkat edilmiştir. Böylece optimum havuzcuk derinliği kriteri sağlanmış ve d_p'nin olay üzerindeki etkisi ortadan kaldırılmıştır (Avery ve Novak, 1978; Nakasone, 1987).

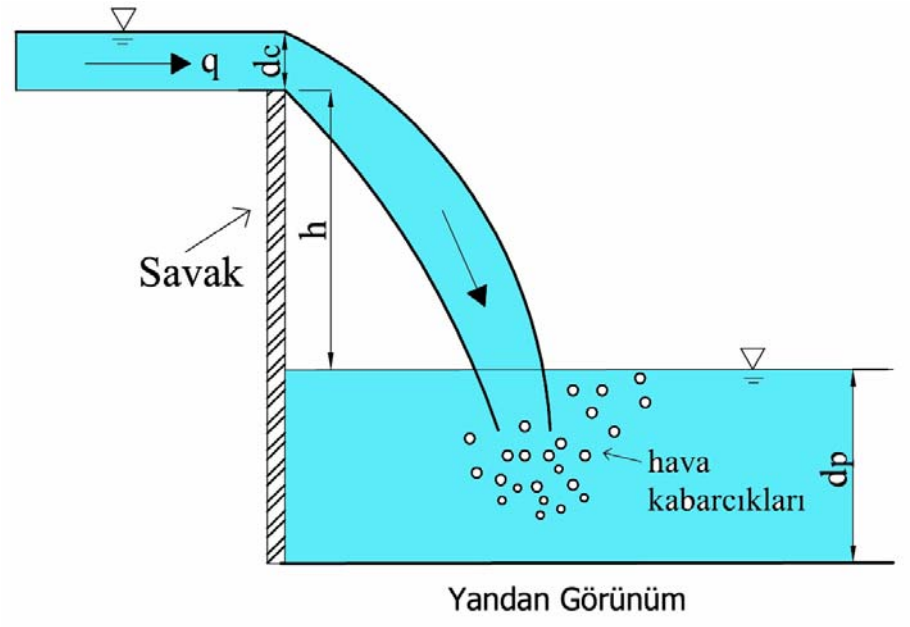


Şekil 6.10 Geliştirilen denklemin diğer denklemlerle kıyaslanması



Şekil 6.11 Hidrolik sıçramadaki rölatif enerj kırılmasının α katsayısıyla değişimi

Savaklandırmadaki havalandırmayla ilgili sunulan bütün formüller düşüm yüksekliğiyle artmasına karşın (bkz. Gulliver ve diğ. 1998), debinin olay üzerindeki etkisiyle ilgili tam bir netlik yoktur (Tablo 6.4). Bazı formüllerde debiyle havalandırma verimliliği doğru orantılı olmasına karşın (Nakasone, 1987; Emiroglu ve Baylar, 2003); bazılarında ise ters orantılı olarak değişmektedir (Avery ve Novak, 1978; Markosfky ve Kobus, 1978). Savakta gerçekleştirilen deneylerde havalandırma verimliliği %13 ile %23 arasında değişim göstermiştir (Tablo 6.3). Savaktaki % 23'lük bir havalandırma verimliliği su içine çok kısa bir zaman diliminde 1.92 mg/L oranında oksijenin transfer olması anlamına gelmektedir. Hidrolik sıçramaya göre savaktaki yaklaşık % 100'lük artışın nedeni hava-su girişim alanının büyümesi olarak yorumlanmıştır.



Şekil 6.12 Savaktaki havalandırmada etkin olan parametreler

Tablo 6.3 Savakta gerçekleştirilen deneylere ait akım koşulları ve deney sonuçları

Q (m^3/s)	B (m)	q (m^2/s)	d_c (cm)	d_p (cm)	ΔH (cm)	E_{20}
0.0195	0.36	5.42E-02	18.0	17.5	49.0	0.212
0.0195	0.36	5.42E-02	18.0	31.0	35.5	0.150
0.0195	0.36	5.42E-02	18.0	23.5	43.0	0.179
0.0195	0.36	5.42E-02	18.0	27.3	39.2	0.169
0.0195	0.36	5.42E-02	18.0	29.0	37.5	0.165
0.0253	0.40	6.33E-02	20.0	15.0	53.5	0.236
0.0253	0.40	6.33E-02	20.0	19.5	49.0	0.217
0.0253	0.40	6.33E-02	20.0	22.4	46.1	0.212
0.0253	0.40	6.33E-02	20.0	26.3	42.2	0.188
0.0253	0.40	6.33E-02	20.0	31.5	37.0	0.160
0.0253	0.40	6.33E-02	20.0	17.5	51.0	0.221
0.0129	0.31	4.22E-02	15.3	18.0	45.8	0.171
0.0129	0.31	4.22E-02	15.3	14.8	49.0	0.179
0.0129	0.31	4.22E-02	15.3	28.0	35.8	0.141
0.0129	0.31	4.22E-02	15.3	23.8	40.0	0.160
0.0072	0.24	3.00E-02	12.1	12.0	48.6	0.160
0.0072	0.24	3.00E-02	12.1	20.6	40.0	0.146
0.0072	0.24	3.00E-02	12.1	25.6	35.0	0.131
0.0072	0.24	3.00E-02	12.1	17.5	43.1	0.150

Tablo 6.4 Savaklardaki havalandırma verimliliği için elde edilmiş olan formüller

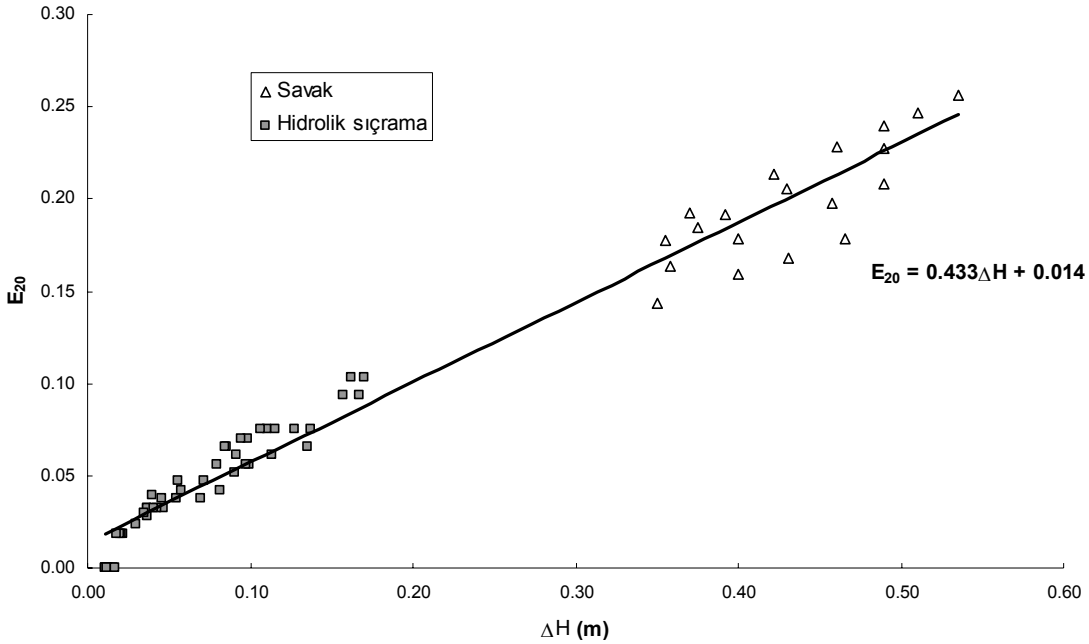
Kaynak	Formül	Açıklamalar
Gameson (1957)	$r = 1 + 0.62h$	İngiltere'deki birçok kirli akarsuda yapılan ölçümlere dayanılarak elde edilmiştir.
Avery ve Novak (1978)	$r_{20} = \left[1 + (0.24 \times 10^{-4} \times Fr_j^{\,1.78} \times \mathrm{Re}^{0.53})\right]^{1.115}$	Küçük ölçekli bir deney düzeneğinde elde edilmiştir: 0.6 L/s < Q < 5.8 L/s
Markosfky ve Kobus (1978)	$r_{20} = \left[1 + (1 + 0.1Fr_j^{\,1.2})\right]^{1.115}$	Tam türbülanslı akım koşullarında (Re > 10^5) geçerlidir
Nakasone (1987)	q ≤ 0.065 m^3/sm: $r_{20} = \exp\left[2.86 \times (h + 1.5d_c)^{0.816} \times q^{0.428} \times d_p^{\,0.310}\right]$ q > 0.065 m^3/sm: $r_{20} = \exp\left[(0.3 \times (h + 1.5d_c)^{0.816} \times q^{-0.363} \times d_p^{\,0.310}\right]$	Geçerli olduğu akım koşulları: $(h+1.5d_c)$ > 1.2 m
Kim ve Walters (2001)	$r_{20} = 1 + 0.453Fr_j^{\,0.453} \times h^{1.117} \times (\frac{d_p}{h})^{0.475}$	Deneylerdeki akım koşulları: $0.046 \le q \le 0.139\ \ m^3 / sm$
Emiroglu ve Baylar (2003)	$Q_a = 2.16^{\cos(\alpha/2)} Q^{1.03} h^{0.782}$	Geçerli olduğu akım koşulları: Q = 1-5 L/s; h = 0.2-1 m

Havalandırma verimliliği kütle transfer katsayısı cinsinden yazılacak olursa:

$$E = \exp(K_L a t_c) \tag{6.19}$$

havalandırma verimliliğinin, hava-su girişim alanıyla eksponansiyel bir şekilde arttığı görülür. Havayla su arasındaki bu girişim alanını arttıran, ortamdaki türbülans kinetik enerjisini temsil eden yük kaybıdır.

Savaktaki, yük kaybıyla havalandırma verimliliği arasındaki ilişki Şekil 6.13'te hidrolik sıçrama ölçümleriyle birlikte gösterilmiştir. Savaktaki havalandırma verimliliğinin, hidrolik sıçramadakine benzer bir davranış sergilediği görülmektedir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13 Hidrolik sıçramadaki ve savaktaki havalandırma verimliliğinin yük kaybına göre değişimi

Debinin olay üzerindeki etkisini araştırmak için savaktaki havalandırma verimliliği dört farklı debi değeri için ΔH'ın fonksiyonu olarak grafik üzerine noktalanmıştır (Şekil 6.14). Hidrolik sıçramdakine benzer gidiş savakta da gözlenmiştir. Örnek vermek gerekirse, düşüm yüksekliğinin 49 cm sabit olduğu değerde q'nun 0.042'den 0.054'e çıkışıyla, havalandırma verimliliğinde %3'lük bir artış gözlenmiştir (Tablo

6.3). Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini hesaplamada önerilen formül, savaktaki ölçümler içinde kullanılmış ve denklemin savaktaki ölçülen değerleri iyi bir şekilde tahmin ettiği gözlenmiştir (Şekil 6.15). Bütün tahmin edilen değerler %90 güven aralığında kalmıştır.

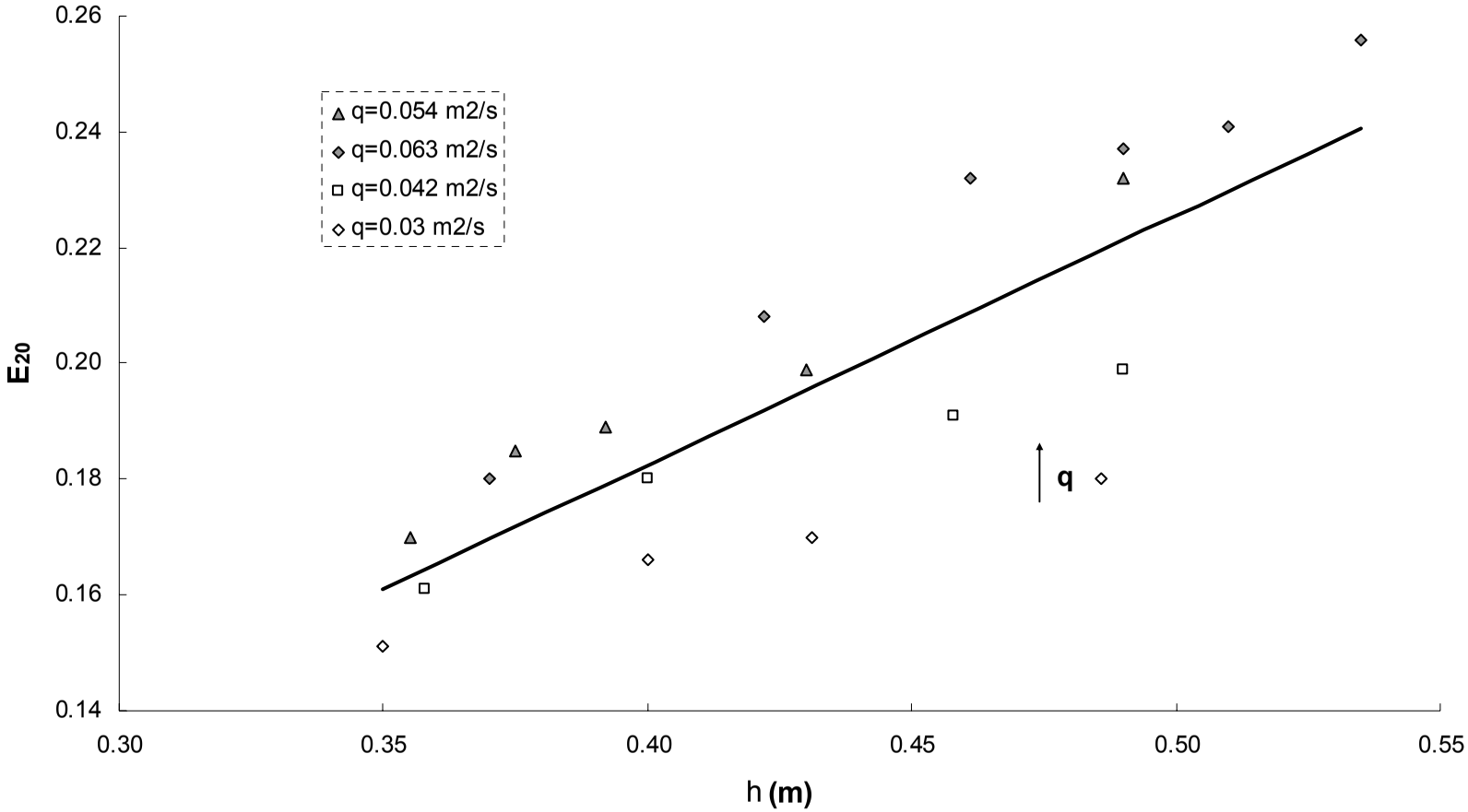
Yakın bir zamanda savaktaki oksijen transferi için elde edilmiş olan Emiroglu ve Baylar (2003) formülü 90º'lik üçgen savak için yazılacak olursa :

$$Q_a = 1.72 \times \Delta H^{0.782} \times Q^{1.03} \tag{6.20}$$

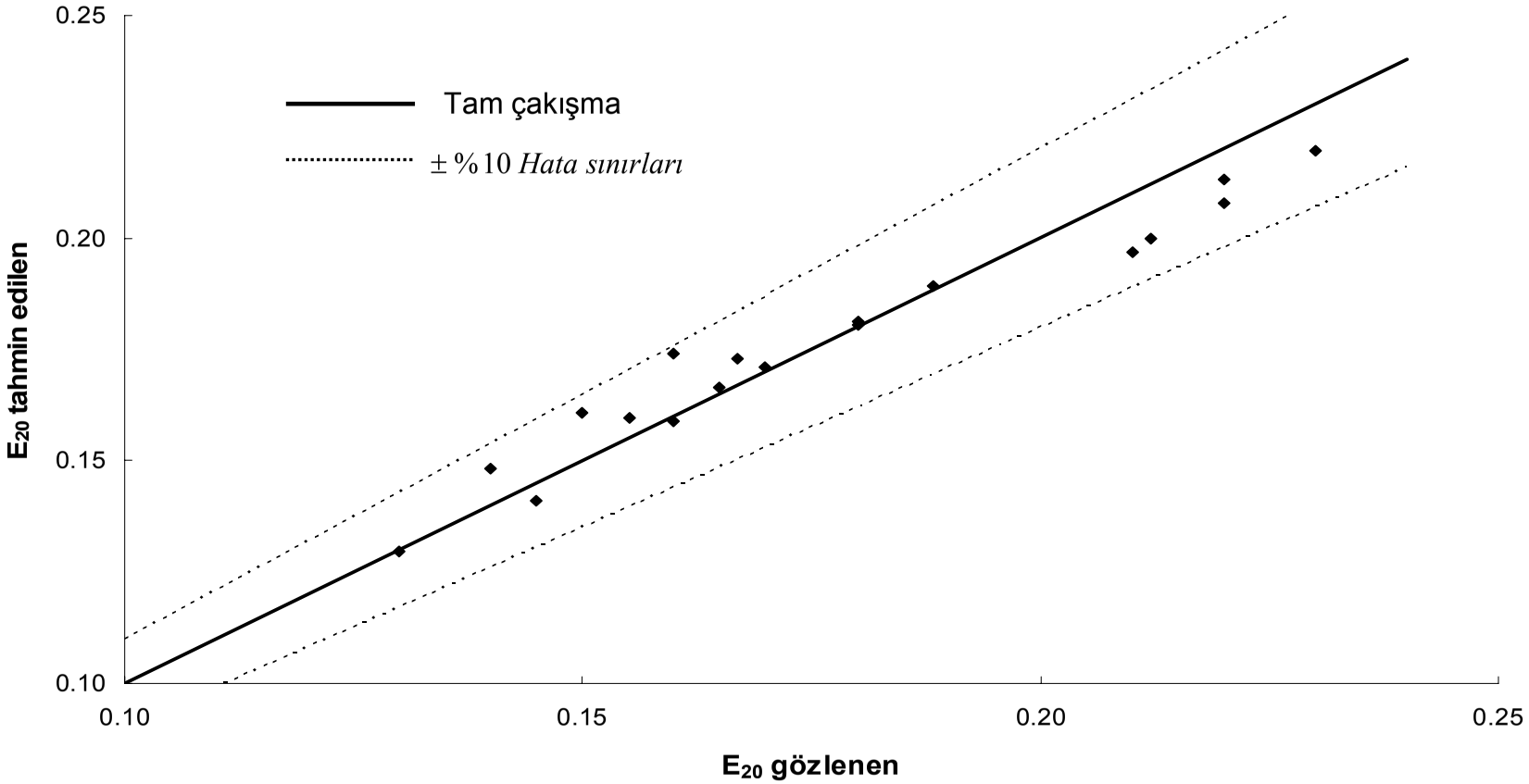
eşitliği elde edilir. Burada Q_a su içine transfer olan birim zamandaki havanın hacmidir. Sunulan çalışmada elde edilen ifadenin, (6.18) denklemiyle benzer özellikler taşıdığı görülmektedir. İki denklemde, iki parametreden oluşan eğimi giderek artan kuvvet fonksiyonlarıdır. Benzer şekilde, Nakasone (1987) savakta havalandırma uzunluğunun hesaplanmasında şu formülü öne sürmüştür:

$$L_a = 2.69 \times 10^{-4} \times \Delta H^{0.134} \times q^{0.666} \tag{6.21}$$

burada L_a havalandırma uzunluğunu temsil etmektedir ve bu uzunluğun artışı transfer olan oksijenin miktarının artması anlamına gelmektedir. Yine bu denklemde elde edilen ampirik formüle benzer şekilde giren havanın miktarı yük kaybı ve debiye bağlı olarak üstel olarak arttığını göstermektedir.



Şekil 6.14 Savaktaki havalandırma verimliliğinin farklı debilerdeki yük kaybına göre değişimi



Şekil 6.15 Savaktaki gözlenen havalandırma verimliliğinin formülüyle tahmin edilmesi

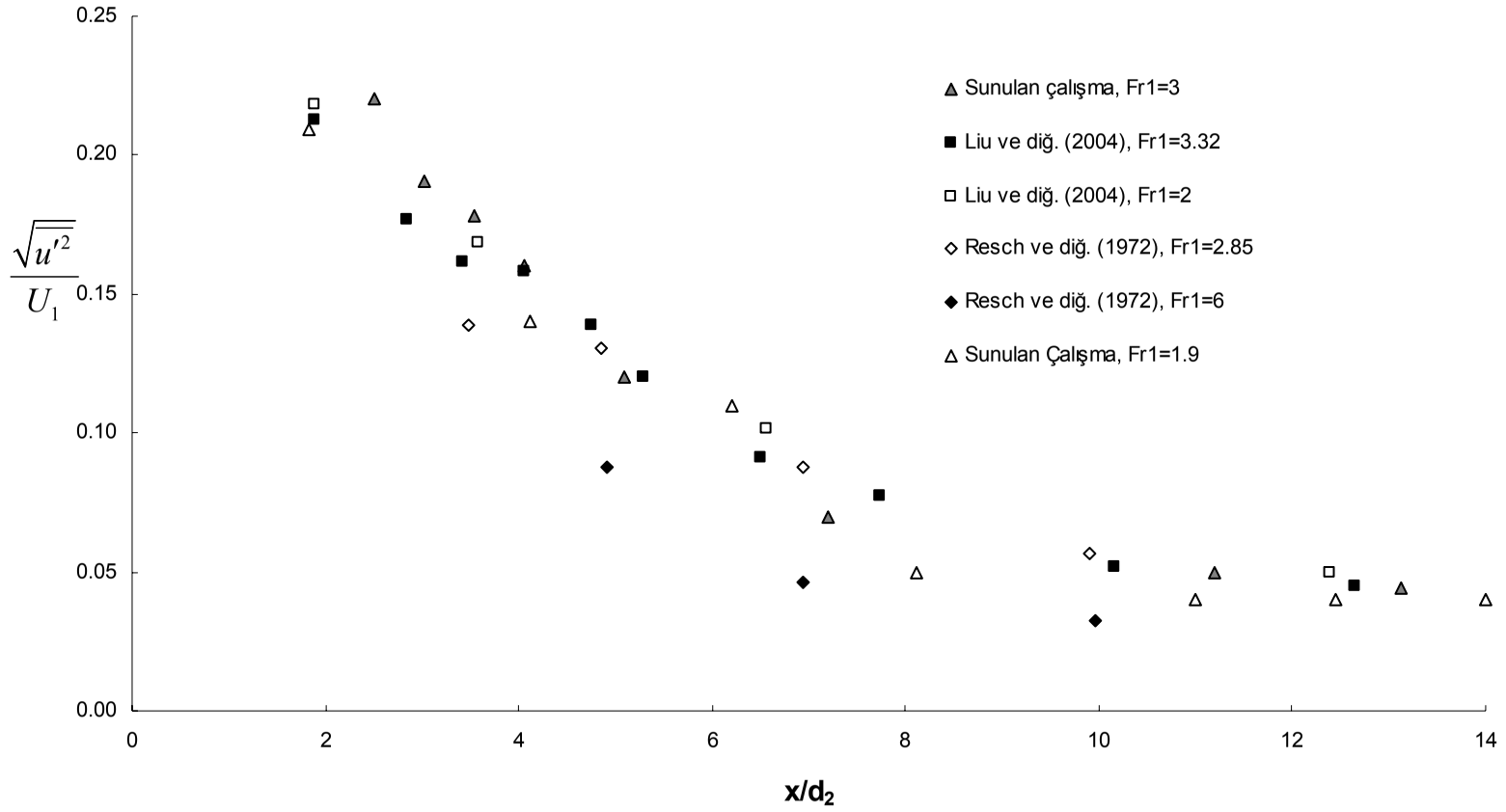
6.5 Hidrolik Sıçramanın Türbülans Yapısı

Doğal havalandırma süreciyle ilgili yapılan çalışmalarda, türbülans yapısının olay üzerindeki önemli bir etkisinin olduğu belirtilmesine karşın; Leutheusser ve diğ. (1973), Ervine ve diğ. (1980) ve Sene ve diğ. (1994) dışında yapılan çalışmalarda türbülans karakteristikleri ve havalandırma verimliliği eşzamanlı olarak ölçülmemiştir. Bu çalışmadan beklenen literatürdeki bu boşluğu doldurmak ve türbülansın olay üzerindeki etkisini açığa çıkarmaktadır. Hidrolik sıçramanın türbülans yapısı, Fr_1=3 ve 1.9 sayılarında incelenmiştir. Yüksek Froude sayılarında, ortamdaki hava kabarcık miktarı arttığından ADV doğru sonuç vermemektedir. Bu nedenle düşük Froude sayılarında çalışılmıştır. Şekil 6.16'da akım doğrultusunda türbülans şiddetinin x/d_2 boyunca değişimi, bu konuda yapılmış olan diğer çalışmalarla birlikte sunulmuştur. Şekil 6.16'ya bakıldığında, türbülans şiddetinin en büyük değerini hidrolik sıçrama başlangıcında aldığı ve hidrolik sıçrama bitişini temsil eden x/d_2=6 koordinatına kadar kademeli olarak azaldığı ve bu noktadan sonra sabitlendiği ve uniform bir dağılım sergilemektedir.

Grafik üzerine işaretlenen noktaların negatif eğimli bir eksponansiyel fonksiyonu temsil ettiği görülmektedir. Bu fonksiyonun denklemi:

$$\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_1} = 0.25\exp(-0.144x/d_2) \tag{6.22}$$

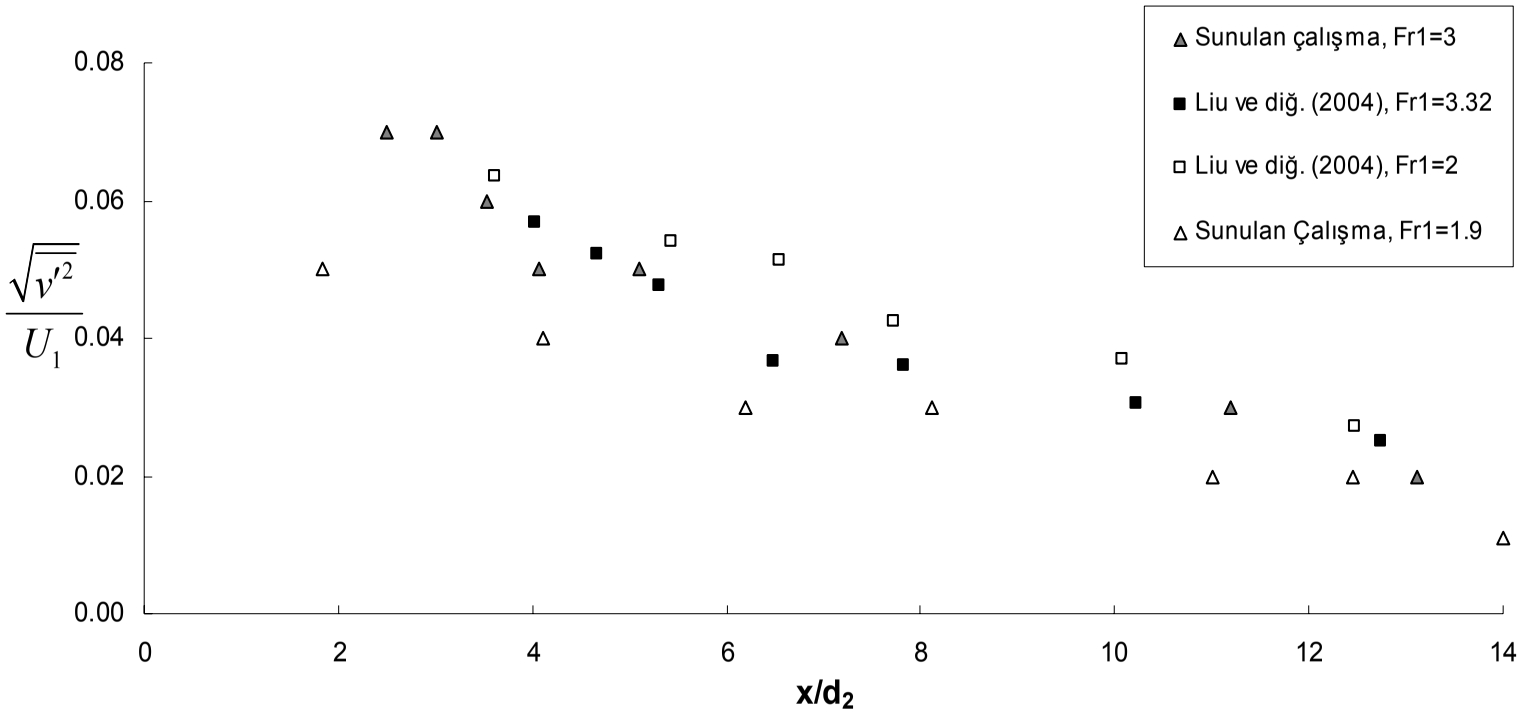
şeklinde bulunmuştur.



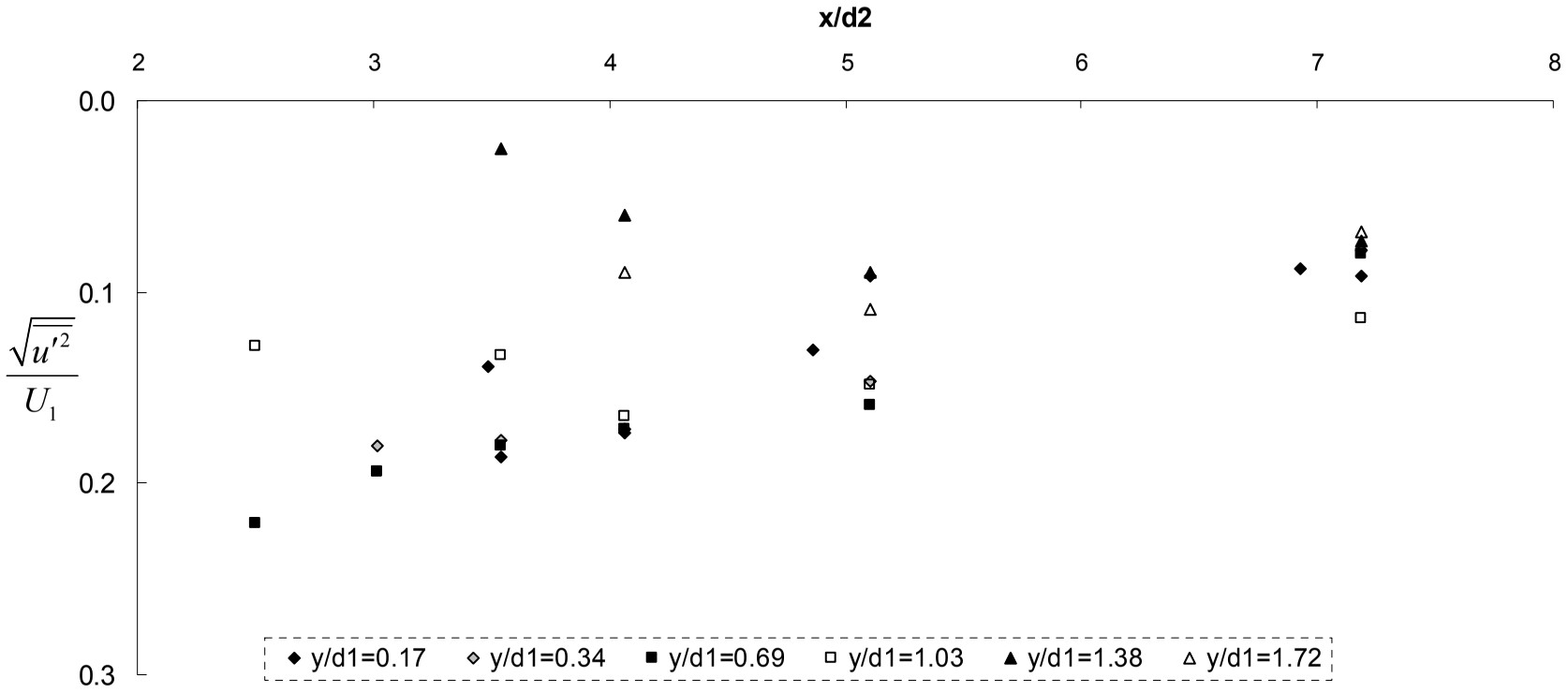
Şekil 6.16 Akım doğrultusundaki maksimum türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama boyunca değişimi

Düşey doğrultudaki türbülans şiddeti de, akım doğrultusundaki türbülans şiddetine benzer davranış sergilemiştir (Şekil 6.14). Faklı olan sadece türbülans şiddetinin aldığı değerlerdir ve bu beklenen bir durumdur. Çünkü normalde akım tek yönlüdür ve düşey doğrultuda bir akış yoktur. Düşey doğrultudaki çalkantı hızlarına akım ortamındaki sınır tabakasından ayrılma sonucu oluşan ikincil akımlar sebep olmaktadır. Şekiller 6.13 ve 6.14'teki türbülans şiddetleri, o kesitteki derinlik boyunca ölçülen en büyük değerlerden alınmıştır.

Şekiller 6.17-20'den görüleceği üzere kanal tabanından yüzeye ve hidrolik sıçrama başlangıcından sonuna doğru türbülans çalkantı bileşenlerinin değeri azalmaktadır. Bunun nedeni hidrolik sıçrama başlangıcında oluşan makro ölçekteki çevirilerdir. Bu çevirilerin dönüş yönü akım doğrultusuna ters yöndedir ve ortamda şiddetli bir türbülans hareketinin oluşmasına yol açarlar. Yapılan deneysel ölçümlerde bu durumu desteklemektedir: Sunulan çalışmada, akım doğrultusundaki türbülans şiddetinin en büyük değeri x/d_2=2.5 ve y/d_1=0.69 koordinatlarında %22 olarak ; buna karşın düşey doğrultudaki türbülans şiddetinin en büyük değeri ise x/d_2=2.5 ve y/d_1=0.17 koordinatlarında % 7 olarak belirlenmiştir. Resch ve diğ. (1974), Liu ve diğ. (2004) çalışmalarında da en büyük türbülans karakteristikleri hidrolik sıçramanın başlangıcında gözlenmiştir. Makro ölçekteki çevrilerin ortaya çıkardığı bu türbülans kinetik enerjisi, küçük ölçekteki çevrilere iletilerek, akımın enerjisinin ısıya dönüşmesine yol açar. Bu fiziksel süreç ise hidrolik sıçramanın hidrolik yapılarda etkin bir enerji kırıcı olarak kullanılmasını sağlamaktadır.



Şekil 6.17 Düşey doğrultudaki maksimum türbülans şiddettinin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi



Şekil 6.18 Akım doğrultusundaki türbülans şiddettinin hidrolik sıçrama alanındaki değişimi

Ayrıca, hidrolik sıçrama başlangıcında gerçekleşen en büyük türbülans şiddeti, suya hava girişini tetikleyen mekanizmadır ve yapılan çalışmalarda en büyük hava miktarı bu noktada gözlenmiştir (Rajaratnam, 1961; Chanson, 1996). Sunulan çalışma ve literatürdeki hidrolik sıçramanın türbülans yapısıyla ilgili sunulan diğer çalışmalar (Rouse ve diğ., 1959; Resch ve diğ., 1972; Liu ve diğ. 2004), türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama başlangıcından sonuna ve kanal tabanından yüzeye doğru azaldığını ortaya koymaktadır. Benzer eğilim hidrolik sıçrama içersindeki hava miktarı dağılımı içinde geçerlidir. Hidrolik sıçrama boyunca ve tabandan yüzeye doğru akım içersindeki hava miktarı azalmaktadır (Rajaratnam, 1961; Leutheusser ve diğ., 1973; Bab ve Aus, 1981). Chanson (1996) hidrolik sıçrama alanı içerisindeki hava miktarı dağılımını:

$$C_{mak} \approx k_1 \times (\frac{x}{d_1})^{-0.54} \tag{6.23}$$

bağıntısıyla tanımlamıştır. Burada C_{mak} ilgili kesitte derinlik boyunca ölçülen en büyük hava miktarını, k_1 bir sabiti göstermektedir. (6.22) denkleminde temsil edildiği gibi türbülans karakteristikleri gibi su içindeki hava miktarı hidrolik sıçrama boyunca benzer eğilimi göstererek üstel olarak azalmaktadır. Bu iki denklem türbülans karakteristikleriyle havalandırma verimliliği arasındaki pozitif korelasyonu yansıtmaktadır. Bu doğrusal ilişki, türbülans şiddeti arttıkça, serbest su yüzeyindeki düzensilikler büyüyerek hava-su temas alanı arttırması ve bunun sonucunda suya giriş yapan havanın miktarı artmasından kaynaklanmaktadır. Mckeough ve diğ. (1981) bu duruma bağlı olarak su düşümündeki hava giriş miktarını türbülans şiddetiyle doğru orantılı olarak korele etmişlerdir. Benzer şekilde bu süreç, Sene ve diğ. (1994) tarafından düşey yöndeki türbülans şiddeti dikkate alınarak şu şekilde formüle edilmiştir:

$$q_a = k_1 (\frac{U_1}{g}) \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{U_1} \tag{6.24}$$

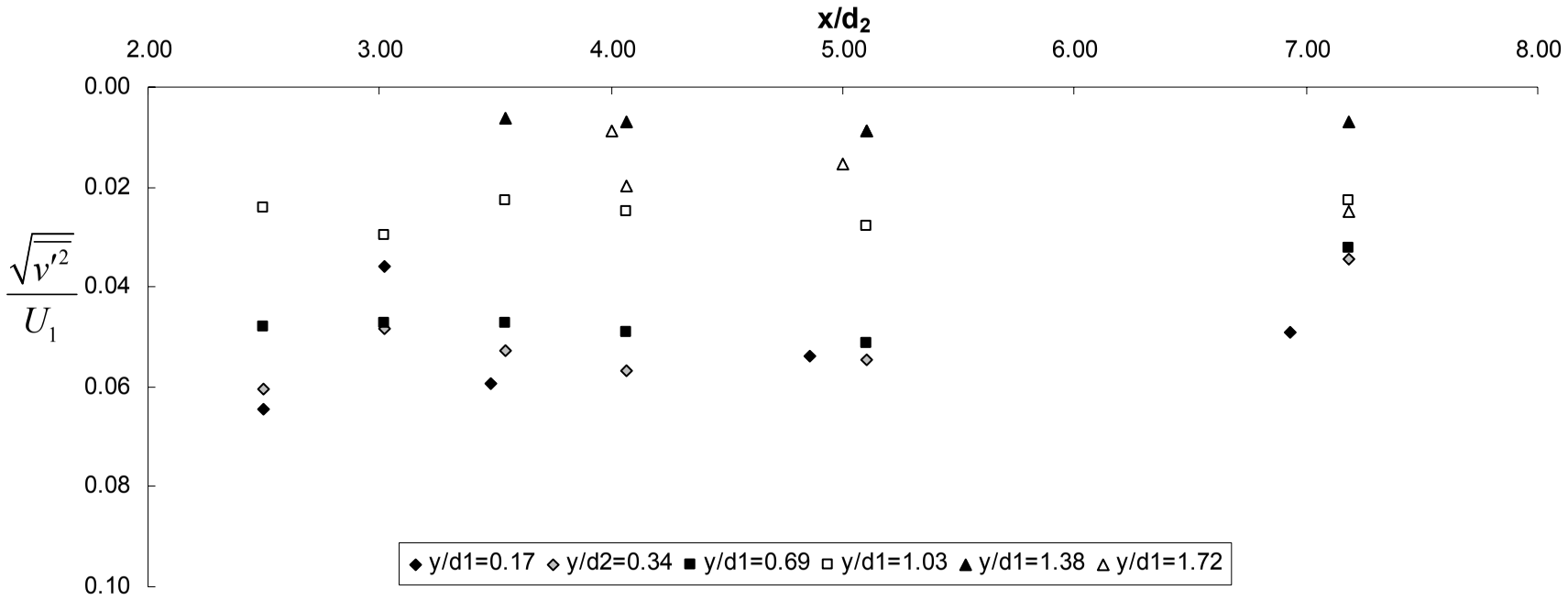
Bu denklem havanın su içine girişim yapıp karışmasını sağlıyan mekanizmanın düşey yöndeki türbülans şiddeti olduğunu işaret etmektedir (Ervine, 1997). Etkin bir hava girişinin gerçekleştiği basamaklı kanallarda El-Kamash ve diğ. (2005) nap akım rejiminde türbülans şiddetini %26-62 arasında, Chanson ve Toombes (2002) ise köpüklü akım rejiminde tübülans şiddeti %20-200 arasında gözlemlemişlerdir. Ölçülen bu yüksek türbülans şiddetleri, basamaklı kanalların neden hidrolik yapılarda enerji kırıcı olarak kullanıldıklarını ve yüksek oranda hava içeren iki fazlı bir akıma dönüştüğünü açıklamaktadır.

Bu duruma ek olarak, düşey doğrultu boyunca çözünen bir kimyasalın yayılım denklemi yazılacak olursa:

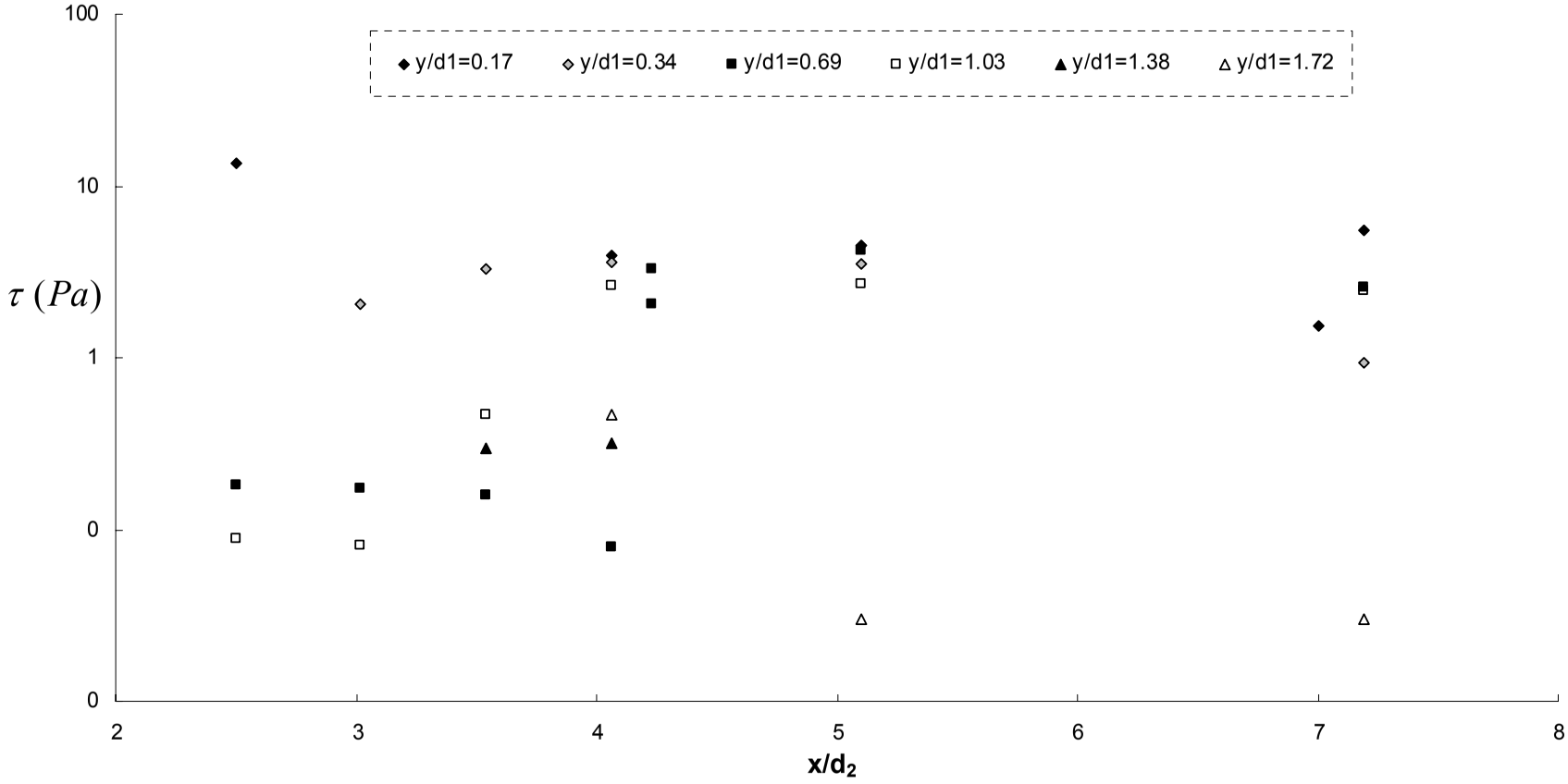
$$\frac{\partial C}{\partial t} + v' \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \tag{6.25}$$

transfer olan kütle miktarının düşey yöndeki türbülans çalkantı bileşinin kontrolünde olduğu görülür.

Şekil 6.17'de Reynolds kayma gerilmesinin türbülans yapısı içindeki dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kayma gerilmesinin hidrolik sıçrama alanındaki dağılımının, çalkantı hızlarına benzer bir özellik sergilediği görülmektedir. Tabandan su yüzeyine ve akım doğrultusu boyunca kayma gerilmesi değerleri azalmaktadır. En büyük kayma gerilmesi 13 Pa değerinde hidrolik sıçramanın başlangıcında gözlenmiştir. Hidrolik sıçrama çıkışında, kayma gerilmesi yaklaşık 1 Pa büyüklüğünde uniform bir dağılım göstermektedir (Şekil 6.20). Hidrolik sıçramanın tabanında oluşan bu yüksek kayma gerilmesi; özellikle taban oyulması, sediment taşınımı gibi hidrodinamik olayları tetiklemesi açısından çok önemlidir.



Şekil 6.19 Düşey doğrultusundaki türbülans şiddettinin hidrolik sıçrama alanındaki değişimi



Şekil 6.20 Reynolds kayma gerilmesinin hidrolik sıçrama alanı içersindeki değişimi

Şekil 6.21'de boyutsuzlaştırılmış türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyunca değişimi Liu ve diğ. (2004) çalışmasıyla birlikte sunulmuştur. Türbülans kinetik enerjisi:

$$K = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2 \tag{6.26}$$

denklemiyle hesaplanmıştır. Hidrolik sıçrama boyunca türbülans kinetik enerjisinin lineer olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 6.21). Bu foksiyonel ilişki Liu ve diğ. (2004) tarafındanda saptanmıştır. Bu fonksiyonel ilişki şu matematiksel denklemle ifade edilmiştir:

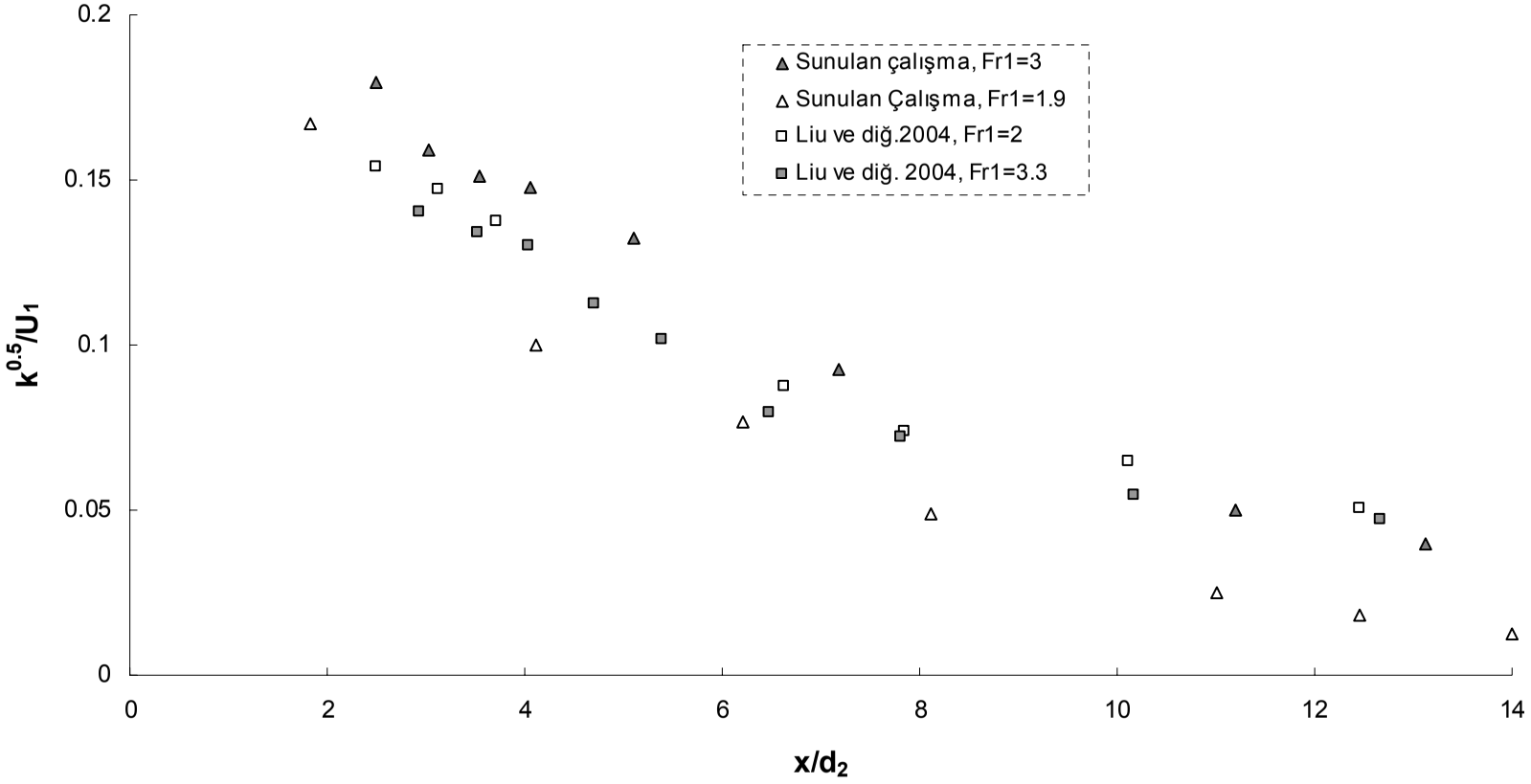
$$\frac{K^{1/2}}{U_1} = -0.012x/d_2 + 0.2 \tag{6.27}$$

Hidrolik sıçrama boyunca türbülans kinetik enerjisinin lineer olarak azalmasının sebebi, ortamda yaratılan türbülanslı akımın bir kısmının küçük ölçekteki çevrilere iletilerek (0.1 mm mertebesinde [Liu ve diğ. 2004]) sönümlenmesidir. Nezu (2005) bu süreci çok iyi bir şekilde şematize etmiştir (Şekil 6.22). Sönümlenen türbülans kinetik enerji miktarı:

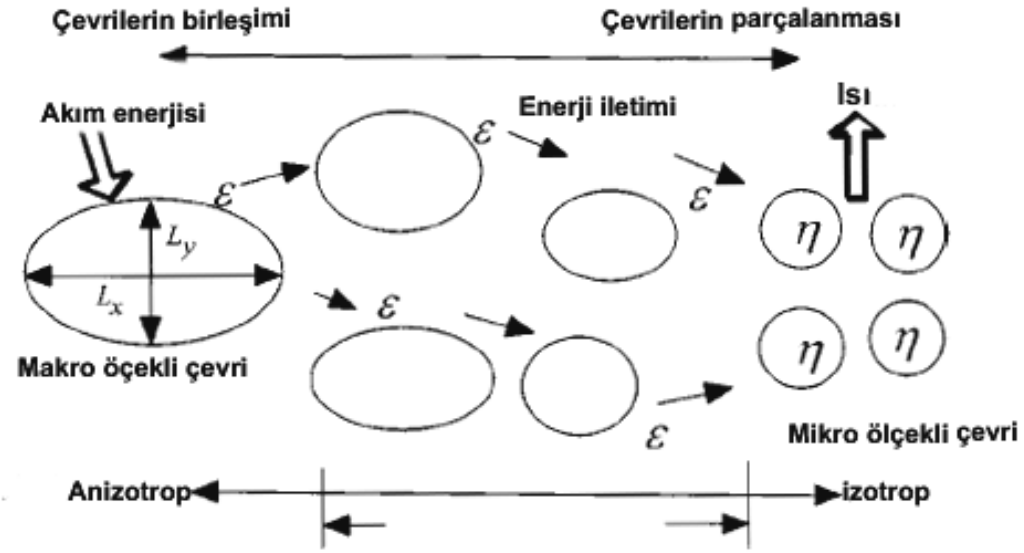
$$\varepsilon = 0.16\frac{K^{1.5}}{L} \tag{6.28}$$

denklemiyle verilmektedir (Pope, 2000). Burada L makro ölçekli çevrilerin boyutlarını göstermektedir. Bu denklem akım ortamında sönümlenen enerjinin türbülans kinetik enerjisiyle doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

Şekiller 6.23-6.25 arasında, hesaplanmış olan türbülans karakteristikleri boyutlu olarak sunulmuştur.

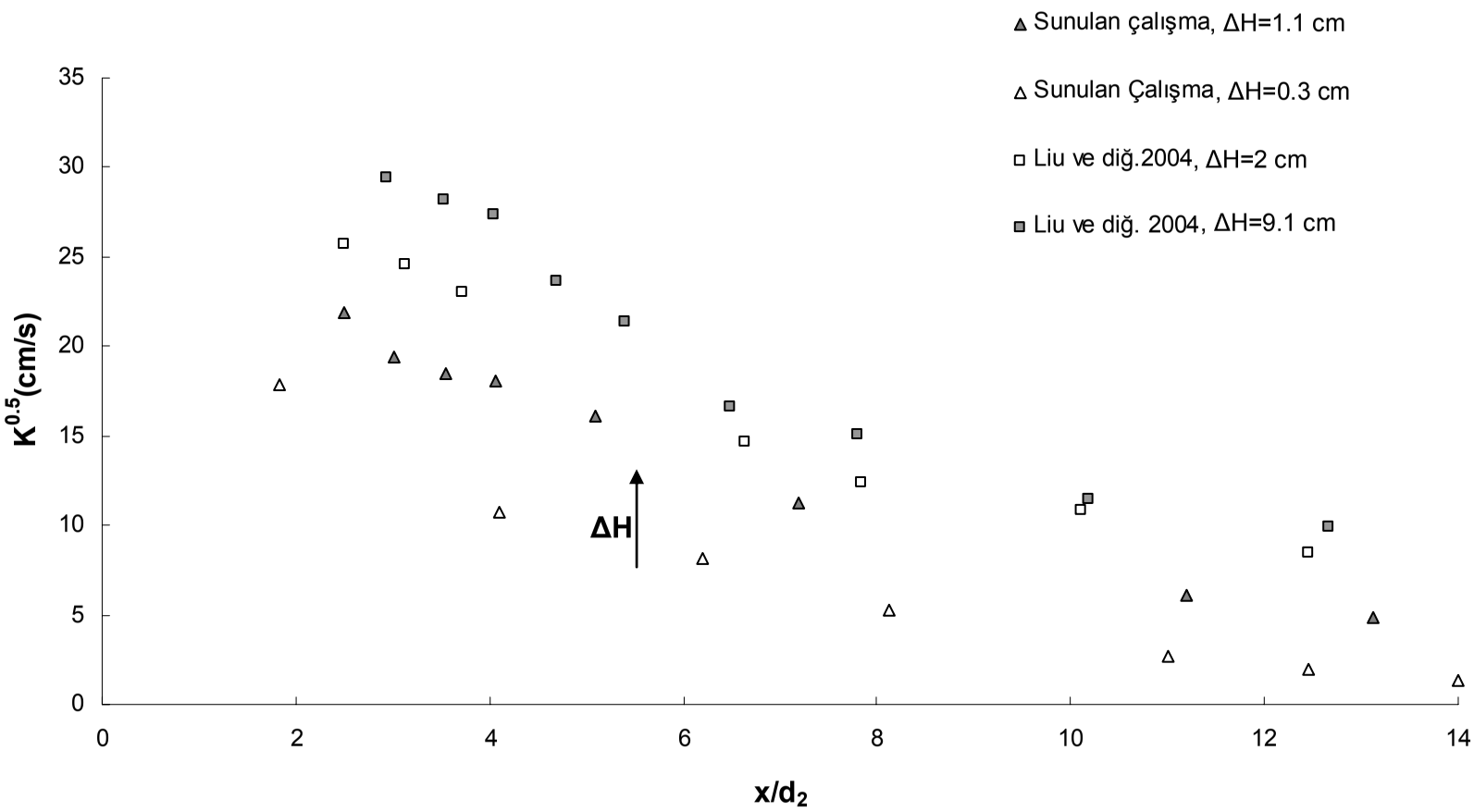


Şekil 6.21 Boyutsuzlaştırılmış türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi

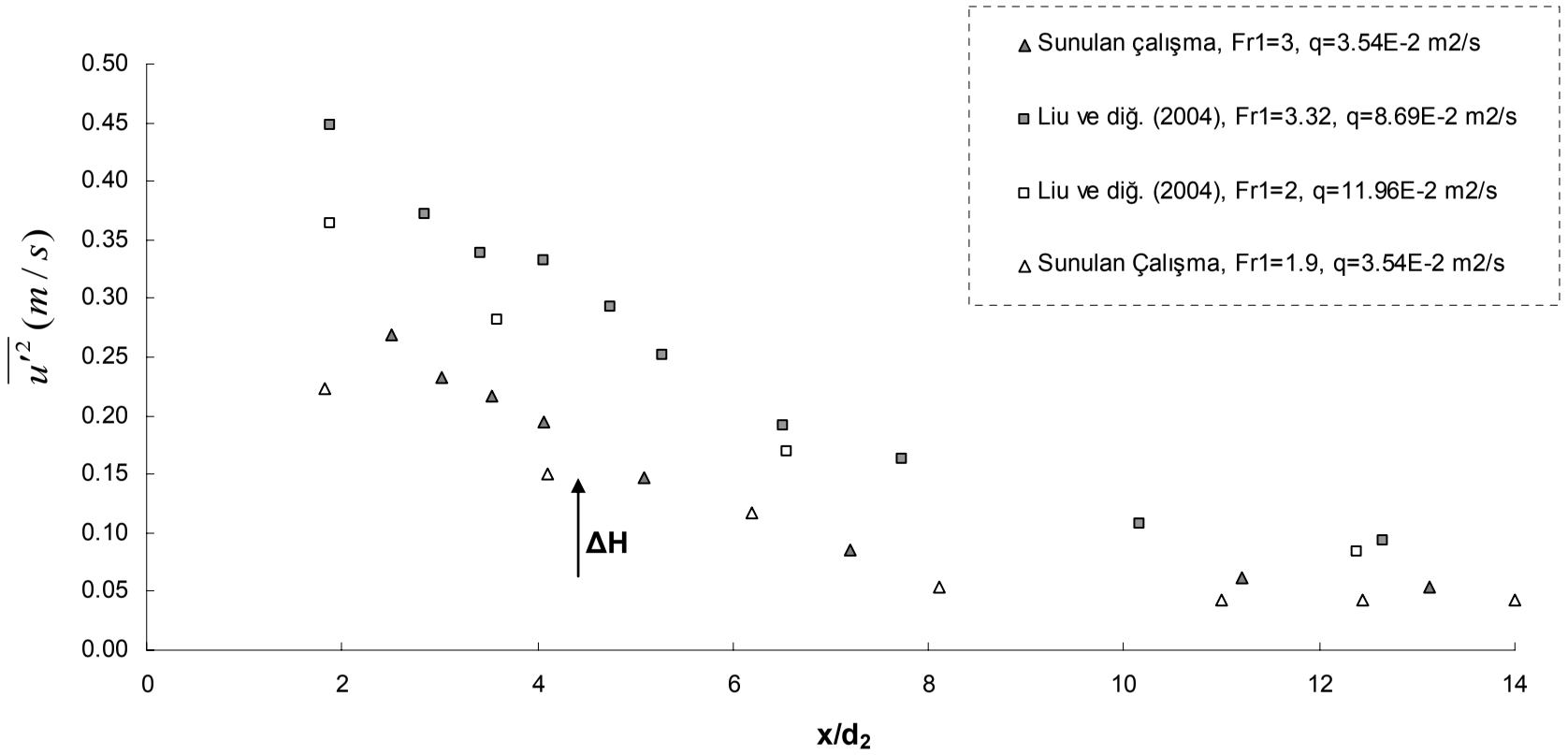


Şekil 6.22 Makro ölçekli çevrilerden mikro ölçekli çevrilere enerji iletiminin şematize edilmesi (Nezu, 2005)

Şekil 6.23'den görüleceği üzere türbülans kinetik enerjisinin değeri arttıkça yük kaybı artmaktadır. Dolayısıyla, havalandırma verimliliğiyle ilişkilendirilen yük kaybının türbülans kinetik enerjisini, bir başka deyişle makro ölçekli çevrilerin yaptığı işi temsil ettiği Şekil 6.23'de net bir şekilde ortaya konulmuş olmaktadır. Hidrolik sıçrama başlangıcındaki türbülans kinetik enerjisinin 17 cm/s'den 29.5 cm/s'ye çıkışıyla, yük kaybı 1.1 cm'den 9.1 cm'e yükselmiştir. Aynı eğilim boyuna ve düşey doğrultudaki türbülans şiddeti içinde geçerlidir (Şekiller 6.24-6.25). Benzer şekilde Resch ve diğ. (1974) çalışmasında Fr_1'in 2.85'ten 6'ya çıkmasıyla x/d_2=2 koordinatıdaki akım doğrultusundaki türbülans hızı %172 artarak 0.25 m/s'den 0.68 m/s'ye çıkmıştır. Bu çalışmada havalandırma verimliliğiyle ilişkilendirilen yük kaybı aslında ortamdaki türbülans büyüklüklerinin bir göstergesidir. Akım alanındaki türbülans kinetik enerjisinin artması, su yüzeyinde oluşturduğu düzensizliklerle hava-su girişim alanının büyümesine, dolayısıyla kütle transferinin artışına yol açar. (6.28) bağıntısı ve Şekiller 6.23-6.25'den görüleceği üzere türbülans kinetik enerjisinin artışıyla, kırılan enerjinin miktarı artar.



Şekil 6.23 Türbülans kinetik enerjisinin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi

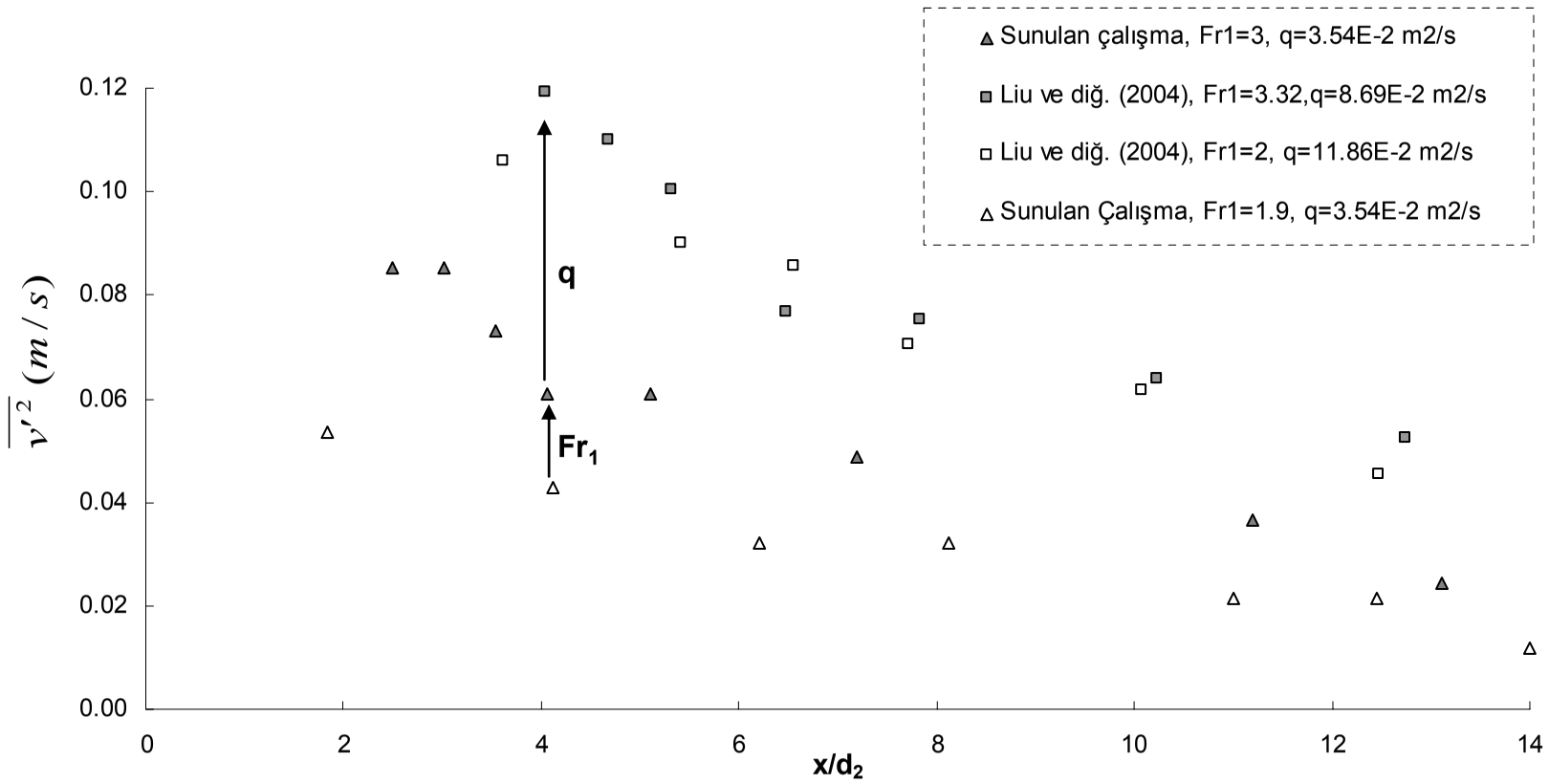


Şekil 6.24 Akım doğrultusundaki türbülans çalkantı bileşininin hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi

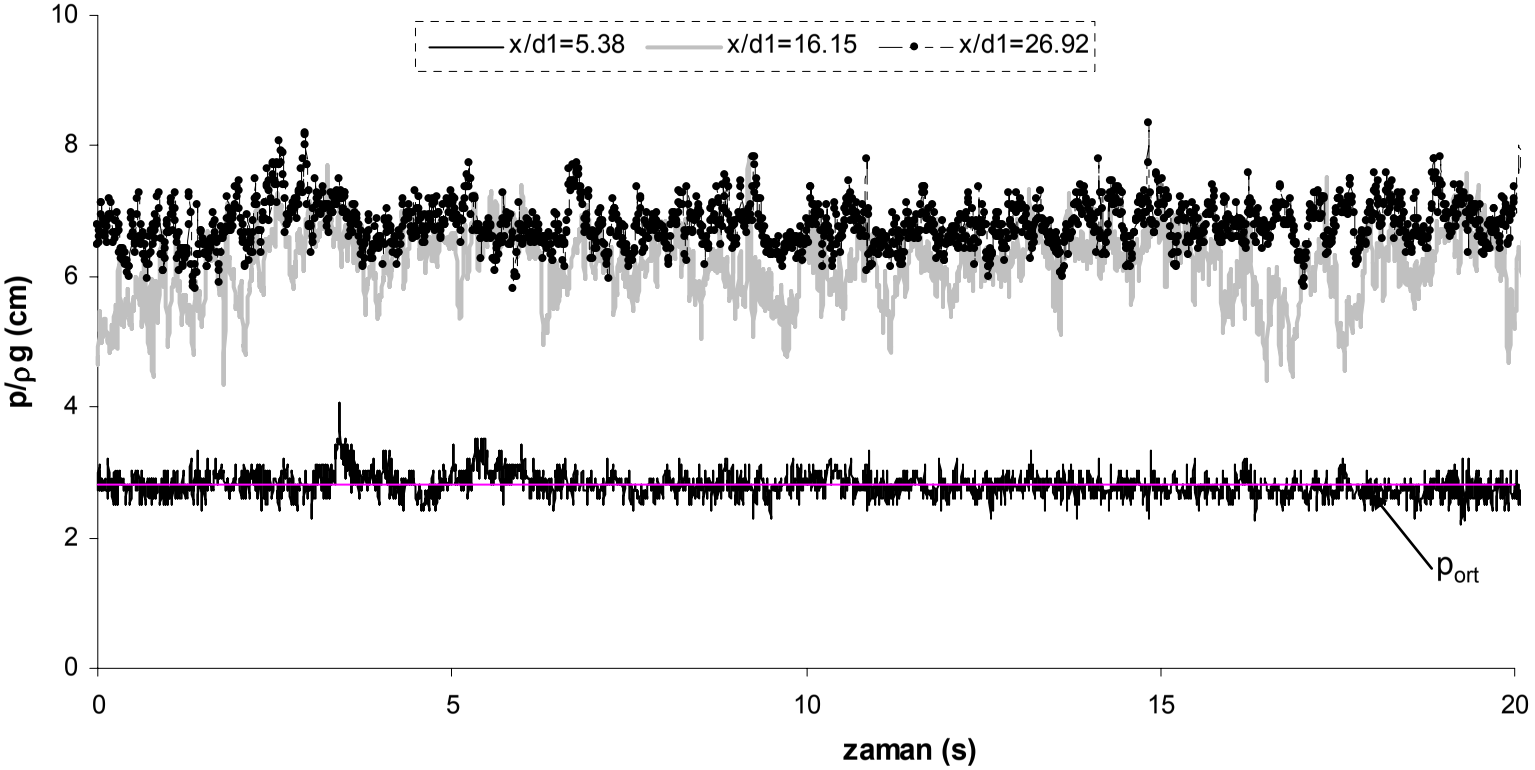
Böylece, ΔH ile havalandırma verimliliği arasındaki doğrusal ilişkinin nedeni ortaya konmuştur. Ayrıca, oksijen transferiyle yük kaybı arasındaki pozitif ilişki, Dankwerts (1951) tarafından ortaya atılan yüzey yenilenme teoremiyle de uyuşmaktadır. Teoriye göre, serbest su yüzeyi türbülans girdaplarıyla sürekli olarak belirli periyotlarda yenilenmekte ve su içine transfer olan kütlenin miktarı bu yenilenme frekansıyla doğru orantılıdır.

6.6 Basınç Çalkantıları Ölçümleri

Yapılan basınç çalkantı ölçümlerinde, basınç çalkantılarının hidrolik sıçrama içindeki dağılımları ve karakteristik büyüklükleri farklı Fr_1=4.9 ve 6.4 değerlerinde incelenmiştir. Şekil 6.26'da Fr_1'in 4.9 olduğu akım koşulları için basınç çalkantılarının 20 saniyelik bir zaman diliminde farklı noktalarda değişimleri gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere basıncın belli bir ortalamada çalkantı gösterdiği ve bu çalkantıların şiddetlerinin hidrolik sıçramanın membasından mansabına doğru belli bir değere kadar artış göstermektedir. İşte bu basınç çalkantıları p′ sembolüyle gösterilmiş ve basınç çalkantılarının karesel ortamalarının karekökü ise $\sqrt{\overline{p'^2}}$ sembolüyle temsil edilmiştir. Şekil 6.27'de Fr_1 sayısının 4.9, q'nun 0.02 m^2/sn olduğu akım koşullarında, basınç çalkantı karakteristiklerinin (maksimum, minimum, ortalama) hidrolik sıçrama boyuncaki değişimi sunulmuştur. Grafikte yatay eksen x/d_1, düşey eksen ise $p/(\rho g d_1)$ olarak sunulmuştur. Böylece her iki eksen boyutsuz olarak verilmiş ve diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Şekil 6.27'deki grafik analiz edildiğinde basınç çalkantı büyüklüklerinin başlangıçta sıçrama boyunca artış eğilimi sergilediği ve belli bir pik değerinden sonra düşüş eğiliminde olduğu gözlenmektedir.



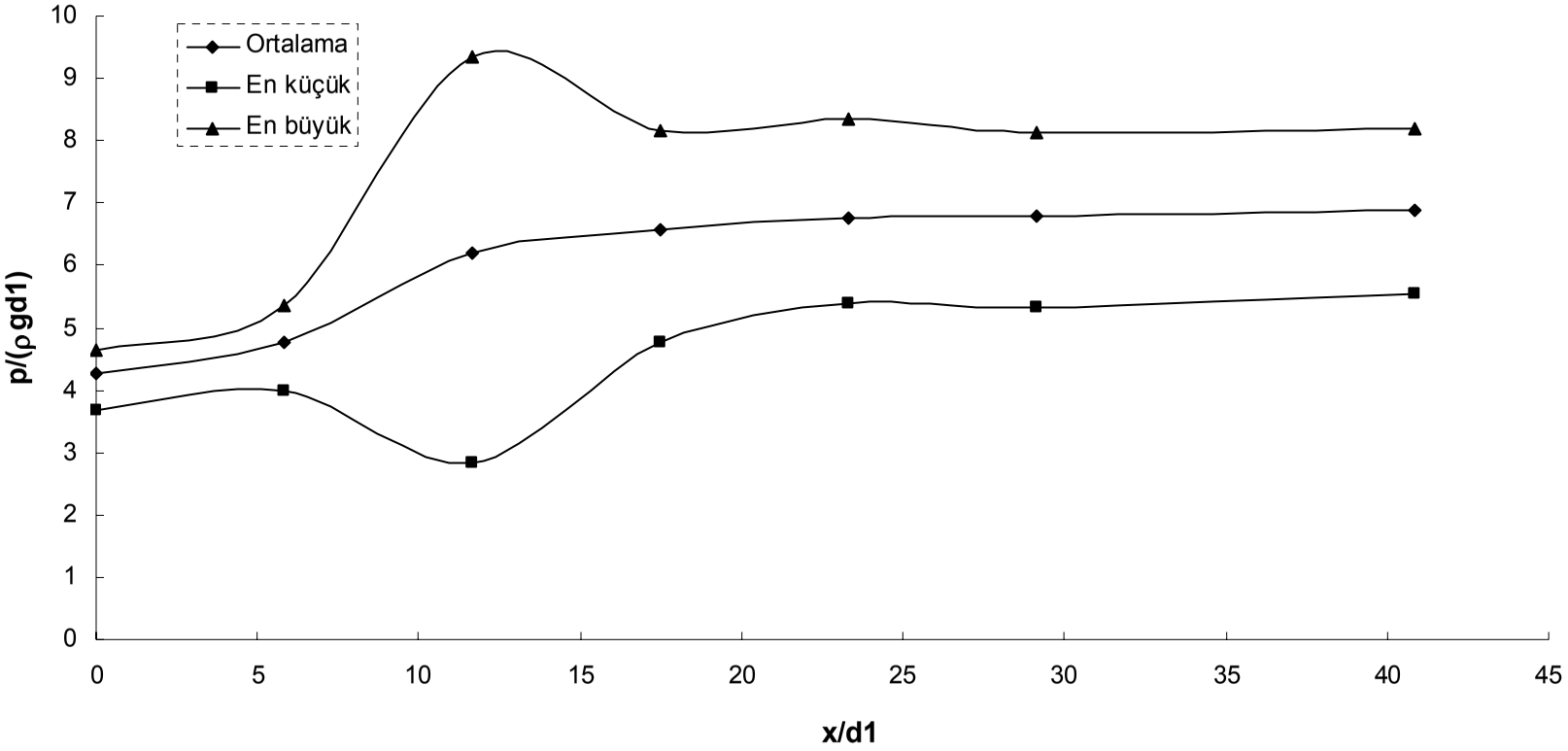
Şekil 6.25 Düşey doğrultudaki türbülans çalkantı bileşeninin hidrolik sıçrama boyunca değişimi



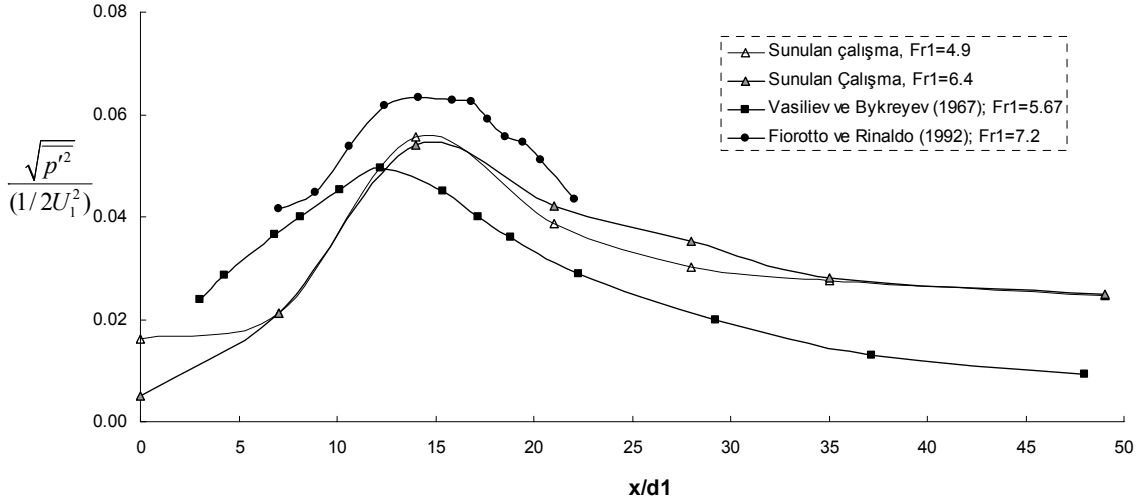
Şekil 6.26 Hidrolik sıçramadaki basınç çalkantılarının farklı noktalarda zamanla değişimi: $Fr_1 = 4{,}30$; $q = 0{,}020$ m^2/sn

Özellikle maksimum ve minimum değerler için bu pik değerden sonra eğrinin yönü değişmektedir (Tose ve Bowers, 1988).

Şekil 6.28'de basınç çalkantılarının KOK değeri $U_1^2\rho/2$ değerine bölünerek standart hale getirilmiştir ve x/d_1 boyunca değişimi diğer yapılan çalışmalarla birlikte gösterilmiştir. Şekil 6.28'de gösterilen düşey eksendeki büyüklük C_d kaldırma kuvveti sabitinide temsil etmektedir (Toso ve Bowers, 1988). Basınç çalkantı şiddetinin, hidrolik sıçrama başlangıcından itibaren tırmanışa geçerek bir noktada pik değere ulaştığı, bu noktadan sonra ani bir şekilde düşerek x/d_1=35 değerinden sonra sabitlendiği görülmektedir. Sunulan diğer çalışmalarla birlikte, basınç çalkantı şiddetinin en büyük değerini %49-63 arasında x/d_1=11-16 bölgesinde almıştır (Şekil 6.25). Safranez (1929) tarafından çevrinti bölgesinin uzunluğu $L_r = 6d_1Fr_1$ olarak alındığı hatırlanacak olursa, Şekil 6.25'teki grafikte x/d_1=35 noktasının çevrinti bölgesinin dışında kaldığı görülmektedir. Akımın türbülans yapısının bir göstergesi olan tabandaki basınç çalkantıları (Toso ve Bowers, 1988; Hager, 1992), bir kez daha büyük ölçekteki çevrilerin etkin olduğunu göstermiştir. Buradan, şu soru ortaya çıkmaktadır: Basınç çalkantılarının bu pik değeri L_r'nin hangi bölgesinde oluşmaktadır? Türbülans çalkantı hızlarında bu değer L_r'nin başlangıcında oluşmuştur. Bu durumu incelemek için, basınç çalkantı şiddetinin maksimum değere bölünmüş şekli, x/L_r boyunca grafik üzerine Akbari ve diğ. (1982) çalışmasıyla birlikte noktalanmıştır (Şekil 6.29). Sunulan çalışmada, Fr_1=4.9 değerinde maksimum değer x/L_r=0.45 noktasında, Fr_1=6.4 değerinde maksimum değer x/L_r=0.38 noktasında gözlenmiştir; Akbari ve diğ. (1982) çalışmasında ise Fr_1=8.4 değerinde maksimum değer x/L_r=0.35 noktasında, Fr_1=6.4 değerinde maksimum değer x/L_r=0.30 noktasında gözlenmiştir.



Şekil 6.27 Hidrolik sıçrama alanındaki karakteristik basınç büyüklüklerinin değişimi: Fr_1= 4.9; q=0.02 m^2/s; d1=1.2 cm

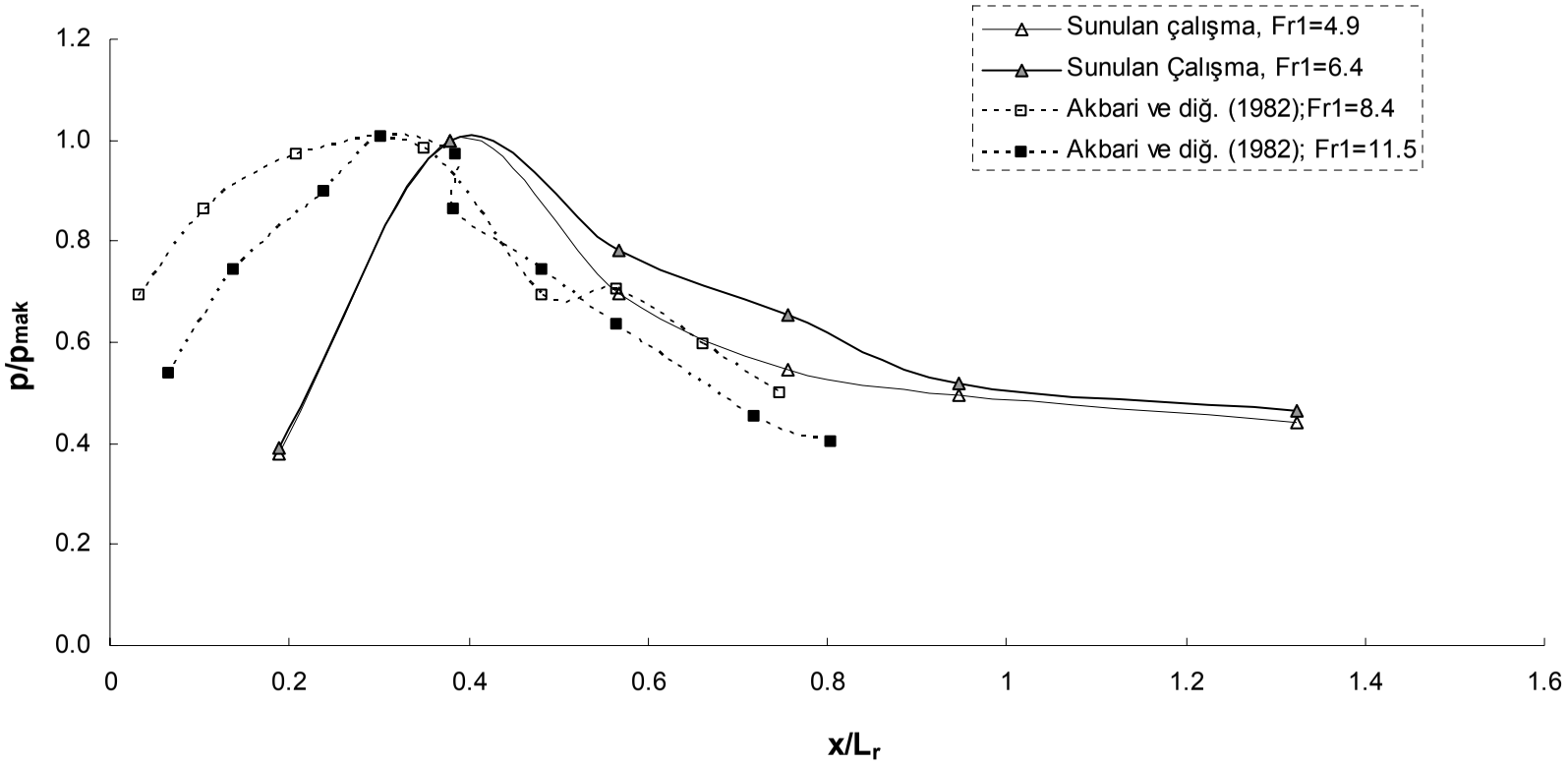


Şekil 6.28 Hidrolik sıçrama boyunca boyutsuzlaştırılmış basınç çalkantılarının karesel ortamaların karakökünün x/d1 bağlı değişimi

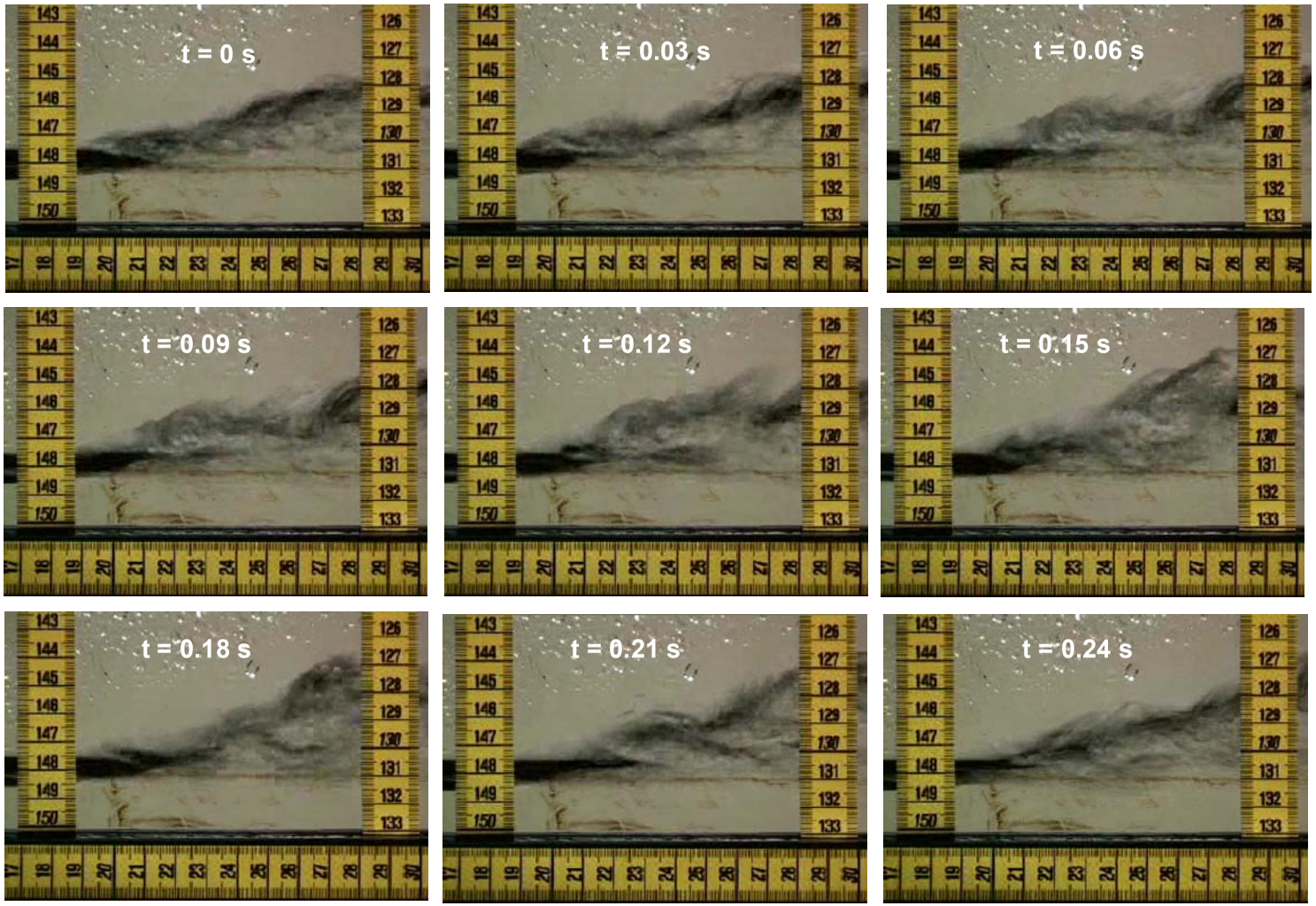
Bu sonuçlar en büyük basınç çalkantısının yaklaşık 0.3-0.4 x/L_r bölgesinde oluştuğunu ortaya koymaktadır. Hager (1992), hidrolik sıçrama içersinde oluşan en büyük hava miktarının 0.2-0.3 x/L_a bölgesinde oluştuğunu rapor etmiştir. Bu bulgular, hidrolik sıçramadaki basınç çalkantıların KOK değeriyle, maksimum hava miktarı dağılımının birbiriyle çakıştığını işaret etmektedir.

6.7 Akım Görüntüleme Sonuçları

Hidrolik sıçramadaki çevri hareketi, su yüzeyinde oluşan düzensizlikler ve hava girişinin incelenebilmesi için akım görüntüleme tekniği kullanılmıştır. Hidrolik sıçramanın oluştuğu bölge iki alana bölünerek video çekimleri gerçekleştirilmiştir. Kaydedilen bu video görüntülerinden, 0.03 saniye aralıklarla fotoğraflar elde edilerek akım alanın görselleştirilmesi sağlanmıştır (Şekil 6.30). Hidrolik sıçrama esnasında serbest su yüzeyinde oluşan koherent yapıdaki akımlar, tabakalar arasındaki hız farkından dolayı oluşmaktadır (Sene, 1994; Yalçın ve diğ., 2004) ve hidrolik sıçrama başlangıcında tabandaki akım hızı yüzeydekinden daha büyüktür (Liu ve diğ., 2004).



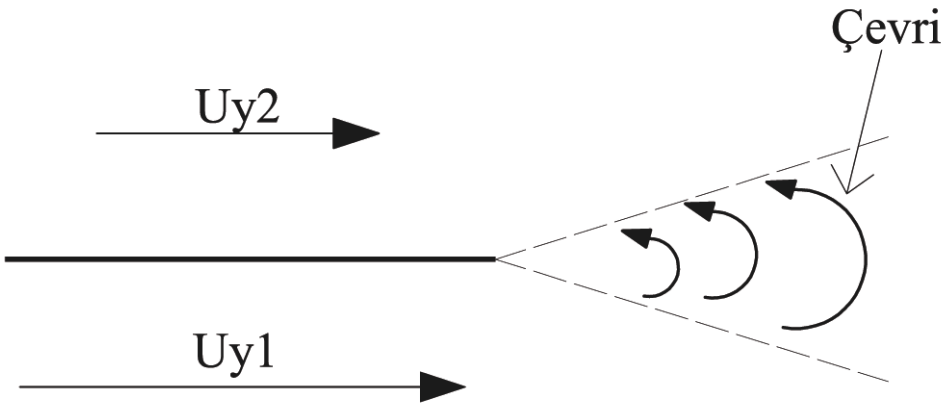
Şekil 6.29 Hidrolik sıçrama boyuncaki basınç çalkantılarının karesel ortamaların maksimum değere olan oranının x/d1 göre değişimi



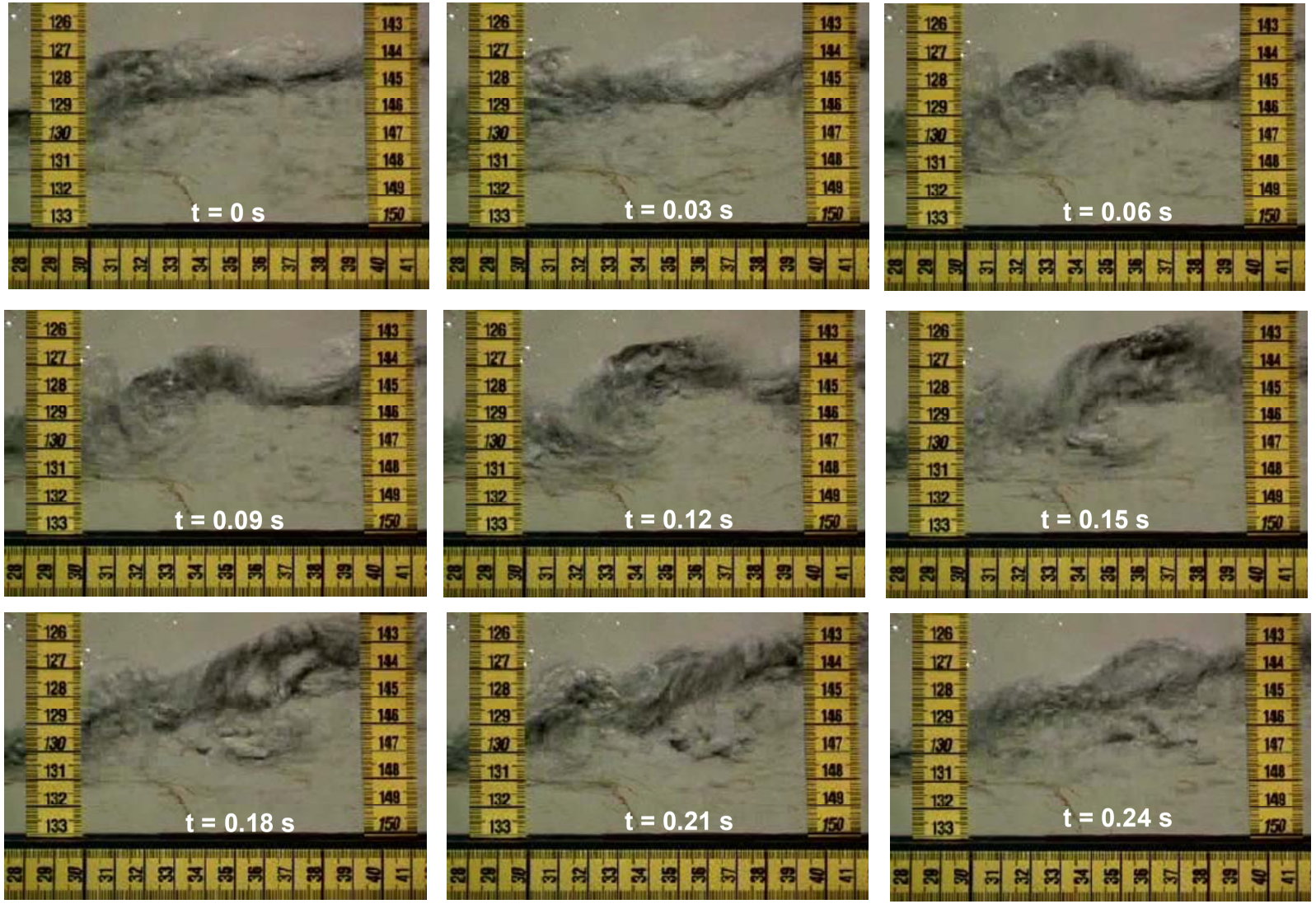
Şekil 6.30 Hidrolik sıçramdaki vortkes birleşiminin görüntülenmesi: Fr_1=2.45; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.5 cm, X = 20 cm; L_r=25 cm

Bu süreç Şekil 6.31'de video görüntülerine dayanılarak şematize edilmiştir. Ayrıca iki tabaka arasındaki momentum transferinin gerçekleştiği bu düşey mesafe Prandtl karışım uzunluğu olarak ifade edilmektedir.

Şekil 6.32'de Fr_1=2.45 koşulunda hidrolik sıçramadaki vortekslerin birleşimi gösterilmiştir. Hidrolik sıçramadaki birbirine komşu vorteksler birbirleriyle etkileşimin sonucunda birleşmekte ve daha sonra memba tarafına doğru hareket ederek parçalanmaktadır. Bu hareket sürekli olarak tekrar etmekte ve hareketin periyodu yaklaşık 0.18 saniye olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.32) ve hidrolik sıçramanın çok etkin bir fiziksel karıştırıcı olduğu Şekil 6.29'dan görülmektedir. Long ve diğ. (1991) hidrolik sıçramadaki bu vorteks birleşimini iyi bir şekilde şematize etmiştir (Şekil 6.33). Ayrıca bu komşu vortekslerin birbirleriyle etkileşimi, hidrolik sıçrama başlangıcının sürekli sağa-sola hareket etmesine yol açmaktadır.



Şekil 6.31 Hidrolik sıçramdaki tabakalar arasındaki hız farkından dolayı oluşan çevri hareketinin şematize edilmesi

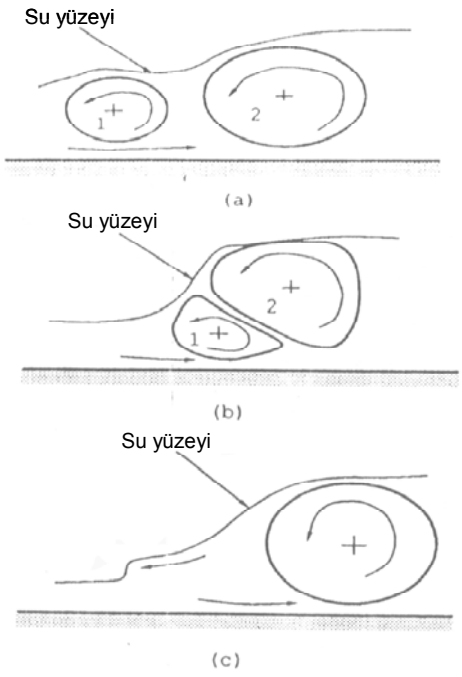


Şekil 6.32 Hidrolik sıçramdaki hava girişinin görüntülenmesi: Fr_1=2.45; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.5 cm, X = 20 cm; L_r=25 cm

Hidrolik sıçramadaki çevrilerin birleşip ayrılma mekanizması "yüzey yenilenme" teorimiyle uyuşmaktadır. Higbe (1931) ve Dankwerts (1951) tarfından ortaya atılan bu teoreme göre, hava-su gaz transferinin gerçekleşebilmesi için serbest su yüzeyinin belirli periyotlarda sürekli yenilenmesi gerekmektedir. Çünkü türbülanslı akımlarda Nernst (1904) tarafından ileri sürüldüğü gibi film tabakaları sabit kalmamakta, zaman ve mekanla sürekli değişmektedir Hava ile su arasındaki gaz transferinde önemli olanın film kalınlığından ziyade yüzey yenilenme frekansı olduğu belirtilmiş (Dankwerts, 1951) ve bu kavram:

$$K_L = \sqrt{Df} \tag{6.29}$$

formülüyle ifade edilmiştir. Burada K_L sıvı fazındaki kütle transfer katsayısı, D transfer olan gazın Difüzyon katsayısı ve f yüzey yenilenmesinin frekansını göstermektedir. Buradan yüzey ne kadar sık oranda yenilenirse o oranda kütle transferinin gerçekleştiği sonucu çıkmaktadır.

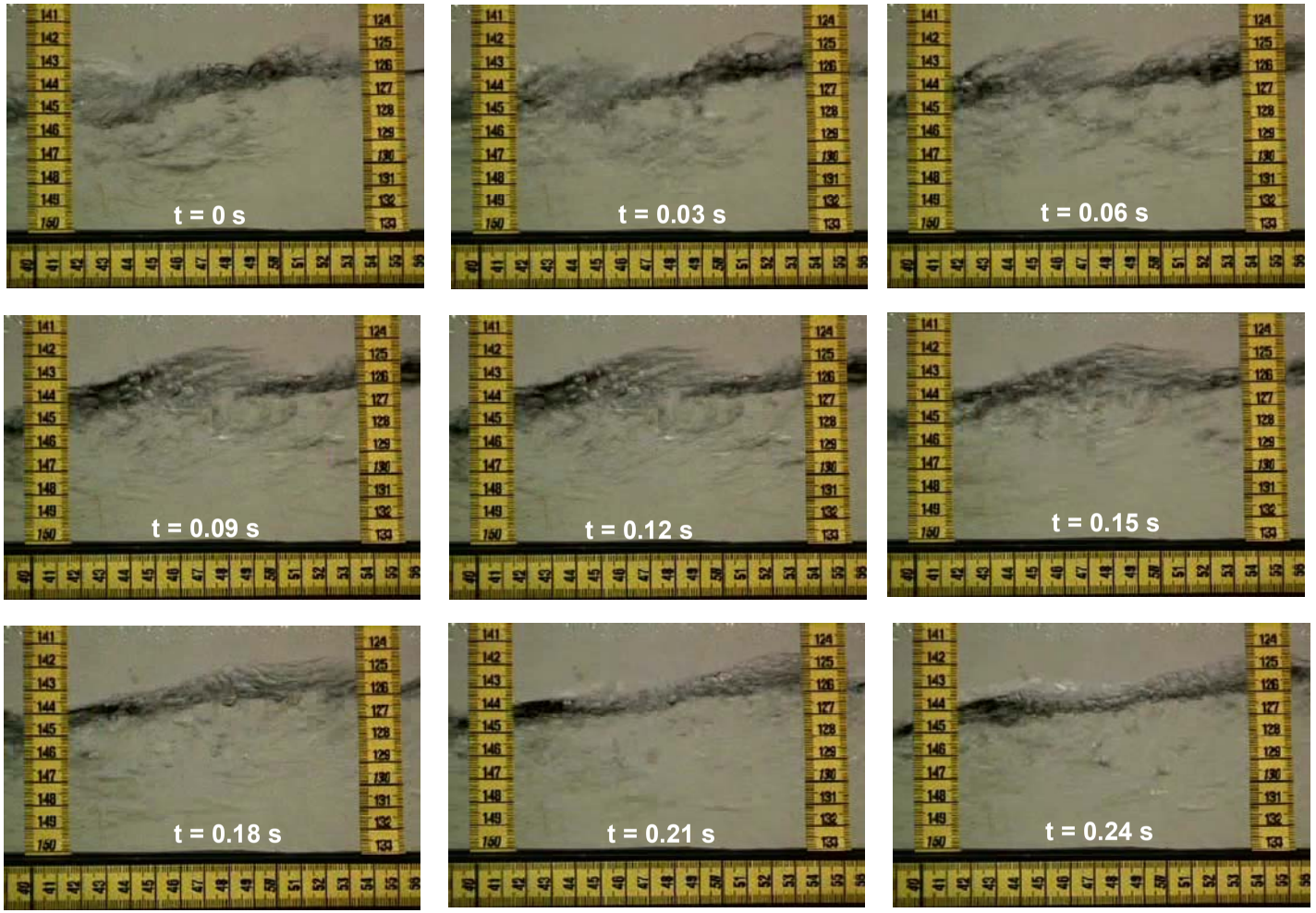


Şekil 6.33 Hidrolik sıçramadaki vorteks birleşiminin şematize edilmesi (Long ve diğ., 1991)

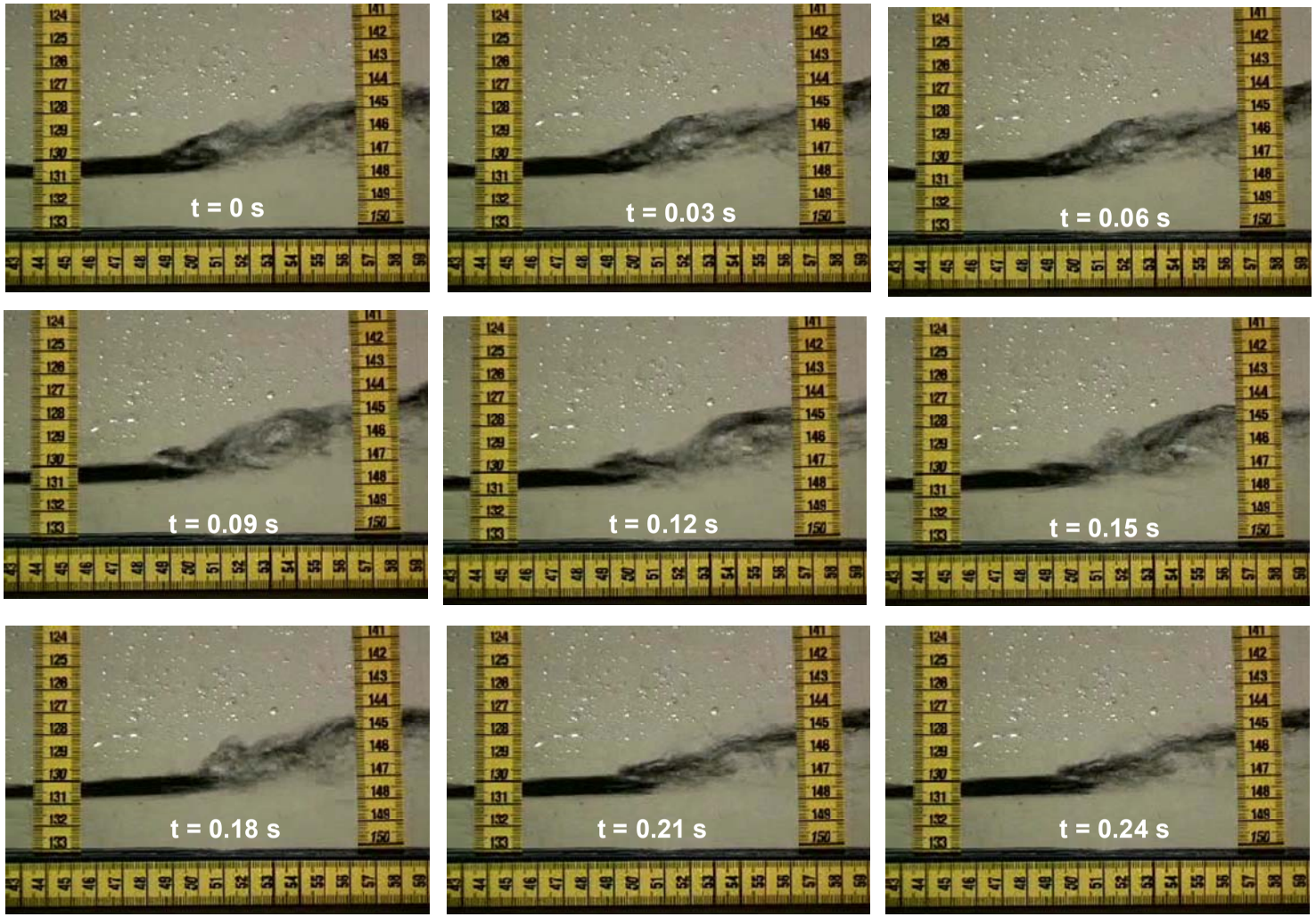
İşte hidrolik sıçramada çevrilerin sürekli olarak belirli periyotlarda birleşip, dağılması su yüzeyinin yenilenmesini sağlamaktadır (Şekil 6.32). Yüzey yenilenmesini sağlıyan bu çevrilerin boyutları Fr_1=2.45'te: L_x=1.4d_1, L_y= 1.7d_1; Fr_1=2'de ise: L_x=1.1d_1, L_y= 1.1d_1 olarak gözlenmiştir. Verilerin işaret ettiği üzere Froude sayısının düşmesiyle çevri boyutu kısalmaktadır. Kumori ve diğ. (1989) ise taban etkisiyle yaratılan türbülanslı akımda, yüzey yenilenmesini sağlayan çevri boyutlarını L_x=2d_1, L_y= 0.5d_1 olarak gözlemlemişlerdir.

Şekil 6.31'de su içine giriş yapan hava miktarı gösterilmiştir. Türbülans girdapları su yüzeyinde düzensizlikler oluşturarak, havayı yakalamakta ve hava su içine emilmektedir (Şekil 6.31). Vortekslerin bu emme hareketine ait bir başka örnek Sümer ve diğ. (2001) çalışmasından verilebilir. Çalışmada kaba taneli sedimentten ince taneli sedimentin emilmesine yol açan etkenin türbülanslı akım alanında oluşan çevriler olduğu ortaya konmuş ve bu hareketin periyodu 0.16 saniye olarak gözlenmiştir. Sunulan çalışmadaki yüzey yenilenmesi periyodu 0.18 olarak saptanmıştır, iki çalışma kıyaslandığında hareketlerin periyodu arasında %11'lik bir zaman farkı olduğu görülmektedir.

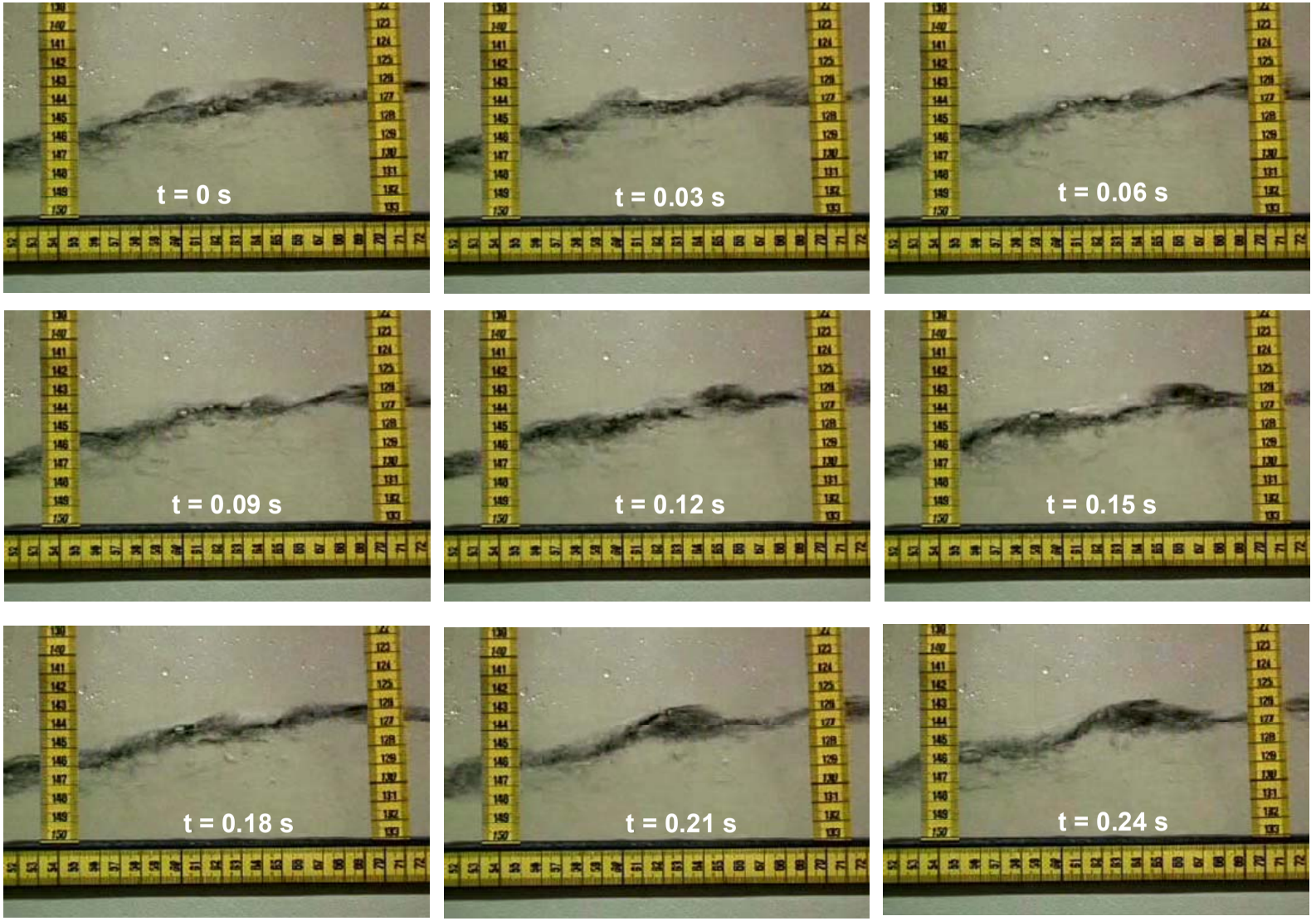
Hava su içine giriş yaptıktan sonra kabarcık, hava cepleri ve köpük haline dönüşmekte ve suyu terk etmektedir (Şekil 6.32). İşte kabarcıkların suda bu kalış süreleri esnasında, atmosferik gazlar (Ör. O_2, N_2) su içinde çözünür (Markofsky ve Kobus, 1978). Ayrıca, Fr_1 sayısının değerinin düşmesiyle çevri boyutlarının küçülmesi ve su içinde taşınan hava miktarının azalması Şekiller 6.35-6.36'da ortaya konmuştur.



Şekil 6.34 Hidrolik sıçramdaki hava kabarcık ve ceplerinin çıkışının görüntülenmesi: Fr_1=2.45; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.5 cm, X = 20 cm; L_r=25 cm



Şekil 6.35 Hidrolik sıçramdaki hava girişinin görüntülenmesi: Fr_1=2; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.8 cm, X = 47 cm; L_r=15 cm



Şekil 6.36 Hidrolik sıçramdaki hava kabarcık ve ceplerinin çıkışının görüntülenmesi: Fr_1=2; q = 0.03 m^2/s; d1= 2.8 cm, X = 47 cm; L_r=15 cm

7 SONUÇLAR

Bu çalışmada hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliği deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde sunularak özetlenmiştir.

1. Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğinin birinci dereceden yük kaybının ve ikinci dereceden debinin fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğini, yük kaybının ve birim genişlikten geçen debinin fonksiyonu olarak tahmin eden, yeni bir ampirik formül geliştirilmiştir. Elde edilen bu formül savakta yapılan ölçümlere de uygulandığında %90 güven aralığında kalarak tutarlı sonuçlar vermiştir.
2. Yapılan ölçümlerde en büyük türbülans şiddeti, hidrolik sıçrama başlangıcında oluşmuş ve hidrolik sıçrama boyunca giderek azalmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda, aynı gidiş su içindeki hava hacmi içinde gözlenmiştir. Buradan türbülans karakteristikleriyle hava hacmi arasındaki pozitif ilişki gösterilmeye çalışılmıştır.
3. Akım doğrultusundaki türbülans şiddetinin hidrolik sıçrama alanı içinde eksponansiyel olarak azaldığı; buna karşın türbülans kinetik enerjisinin ise lineer olarak azaldığı gösterilmiştir. Bu süreçleri ifade eden denklemler ortaya konmuştur.
4. İlk defa bu çalışmada çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleriyle, türbülans karakteristikleri ve basınç çalkantıları ölçümleri eşzamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde, hidrolik sıçramada yük kaybıyla

havalandırma verimliliği arasındaki doğru orantılı ilişki, yük kaybıyla türbülans çalkantı hızları arasında da gözlenmiştir.

5. Geliştirilen ampirik formüldeki yük kaybının, elde edilen verilere ve diğer çalışmalara dayanılarak, ortamdaki türbülans kinetik enerjisini temsil ettiği yaklaşımınında bulunulmuştur.
6. Türbülans basınç çalkantısının pik değere ulaştığı bölge 0.3-0.4L_r arasında gözlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda, maksimum hava hacmi benzer şekilde aynı bölgede tespit edilmiştir. Bu bulgular, maksimum basınç çalkantısı ve hava hacmi arasındaki bir çakışmayı işaret etmektedir.
7. Gerçekleştirilen akım görüntüleme tekniğiyle, hidrolik sıçramadaki birbirine komşu çevrilerin belirli periyotlarda sürekli birbirleriyle birleşerek ayrıldığı ortaya konmuştur ve bu hareketin frekansı 5.5 Hz mertebesinde tespit edilmiştir.
8. Hidrolik sıçramdaki çevrilerin birleşip ayrılma mekanizmasıyla, suya kütle transferini gerçekleştirilen "yüzey yenilenme" teoriminin uyuştuğu ve suya hava girişinin bu çevri hareketleriyle gerçekleştiği gösterilmiştir.
9. Çalışmadan elde edilen sonuçlara dayanılarak, hidrolik sıçramanın ÇO'nun yetersiz olduğu durumlarda, hidrodinamik bir havalandırıcı olarak kullanılabileciği belirlenmiştir.
10. Konuyla ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalarda, yüksek Froude sayılarında deneylerin gerçekleştirilmesi ve türübülans yapısının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi; konuyu daha anlaşılır bir hale getireceği düşüncesindeyim. Ortamdaki türbülans büyüklüklerini artışını sağlayacak, farklı kanal geometrilerinin incelenmesi, uygulamaya yönelik tasarımların gelişmesine katkı sağlıyacağına inanmaktayım.

KAYNAKLAR

Abdul Khader, M.H., and Elango, K., 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump, *J. Hydr. Res.,* IAHR, **12**, 469-489.

Akbari, M.E., Mittal, M.K. ve Pande, P.K., 1982. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps, *Int. Conf. Hydarulic Modelling of Civil Engineering Structures Conventry*, England, 13-19 October, 87-96.

Apted, R.W., and Novak, P., 1973. Oxygen uptake at weirs, *15th IAHR Congress*, İstanbul, Turkey, 2-7 September, 177-186.

ASCE, 1988. Aeration : A Wastewater Treatment Process. Water Pollution Control Federation Press, Alexandria.

Avery, S. T., and Novak, P. 1978. Oxygen transfer at hydraulic structures, *J. Hydr. Engrg., ASCE,* **104,** 1521-1540.

Babb, A.F., and Aus, H.C., 1981. Measurements of air in flowing water, *J. Hydr. Div., ASCE,* **107**, 1615-1630.

Baban, A., 1998. A study on oxygen transfer, organic matter removal and nitrification in sewer lines, *Ph.D. Thesis*, ITU Institute of Science and Technology, Istanbul.

Bakhmeteff, B.A., and Matzke, A.E., 1936. The hydraulic jump in terms of dynamic similarity, *ASCE Transactions*, **101**, 630-680.

Bayazıt, M., 1971. Çökeltme havuzlarındaki akımın türbülans karakteristikleri, Tübitak Ankara, Türkiye (Rapor).

Bayazıt, M., Oğuz, B., 1994**.** Mühendislik İçin İstatistik. Birsen Yayınevi, İstanbul.

Breitenöder, M., and, Dorrer, H., 1967. Turbulent diffusion in the hydraulic jump. *XII IAHR Congress,* Colorado, USA, September 1967, 137-145.

Bélanger, J.B. 1828. Essai sur la Solution Numérique de quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes (‘Essay on the Numerical Solution of Some Problems relative to Steady Flow of Water’), Carilian-Goeury, Paris, France.

Bentzen, G., Smith, A.T., Benett, D.,Webster, N. J., Reinholt, F., Sletholt, E., and Hobson, J., 1995. Controlled dosing of nitrate for prevention of H_2S in a sewer network and the effects on the subsequent treatment processes, *Wat. Sci. Tech.,* **31**, 293-302.

Bidone, G., 1820. Expériences sur la propagation des remous. *Memorie della Reale Accademia delle Scienze di Torino*, **30**, 195-292.

Bradley, J.N., Peterka, A.J., 1957. The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron, *Proc. ASCE, J. Hydraulics Division*, **83**, 1401-1424.

Brimblecombe, P., 1996. Air Composition and Chemistry. Cambridge University Press, Cambridge.

Brown, G., 1969. Predicting Temperatures of Small Streams, *Water Resources Research,* **5**, 68-75.

Çelikale, M.S., Düzgüneş, E., Okumuş, İ., 1999. Türkiye Su Ürünleri Sektörü: Potansiyeli,Mevcut Durumu, Sorunları ve Çözüm Önerileri. İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.

Chanson, H., 1995. Air-water gas transfer at hydraulic jump with partially developed inflow, *Water Res*., **29**, 2247-2254.

Chanson, H., 1996. Air Bubble Entrainment In Free-Surface Turbulent Shear Flows. Academic Press, San Diego.

Chanson H., 1999. The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

Chanson H., Brattberg, T., 2000. Experimental study of the air-water shear flow in hydraulic jump*, Int. J. Multiphase Flow*, **26**, 583-607.

Chanson, H. and Toombes, L., 2002. Air–water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations, *Int. J. Multiphase Flow,* **28**, 1737–1761.

Chanson, H., 2002. Air-water flow measurements with intrusive, phase-detection probes: can we improve their interpretation, *J. Hydr. Engrg., ASCE*., **128**, 252-255.

Chow, V.T., 1959. Open Channel Hydraulics, McGrawHill Book Co., New York.

Cirpka, O., Reichert, P., Wanner, O., Muller, S. R., and Schwarzenbach, R.P., 1993. Gas exchange at river cascades: Field experiments and model calculations, *Envir. Sci. and Technol*., **27**, 2086-2097.

Cokgor S., Kucukali, S., 2004. Oxygen transfer in flow around and over stones placed in a laboratory flume, *Ecological Engrg.,* **23**, 205-219.

Colt, J., 1984. Computation of dissolved gas concentration in water as functions of temperature salinity and pressure. *Fisheries Society Special Publication*, **14**, Bethesda, MD.

Dankwerts, P.V., 1951. Significance of liquid-film coefficients in gas adsorption. *Industrial and Engineering Chemistry,* **43**, 1460-1467.

El-Kamash, M.K., Loewen, M.R., Rajaratnam, N., 2005. An experimental investigation of jet flow on stepped chute. *J of Hydr. Res., IAHR*, **43**, 31-43.

Emiroglu, M. E., and Baylar, A., 2003. The effect of broad-crested weir shape on air entrainment, *J. Hydr. Res.,* IAHR, **41**, 649-655.

Ervine, D.A., Mckeogh, E., and Elsawy, E.M., 1980. Effect of Turbulent intensity on the rate of entrainment by plunging water jets, *Proc. Inst. Civ. Engrs*., **2**, 425-455.

Ervine, D. A., 1998. Air entrainment in hydraulic structures: a review, *Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy.,* **130**, 142-153.

Fick, A.E., 1855. On liquid diffusion, *Philosophical Magazine*, **10**, 30-39.

Fiorotto, V. ve Rinaldo, A. 1992. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.,* **30**, 499-520.

Galloway, J. N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.H., Cowling, E.B., and, Cosby, B.J., 2003. The nitrogen cascade, *Bioscience*, **53**, 341-356.

Gameson, A.L.H., 1957. Weirs and aeration of rivers, *J. Inst. Water Engrg.,* **11**, 477-490.

Gameson, A.L.H., Vandyke, K.G., and Ogden, C.G., 1958. The effect of temperature on aeration at weirs, *Water and Water Engrg. Sci.,* **62**, 489-492.

Giller, P. S., and Malmqvist, B., 1998. The Biology of Streams and Rivers, Oxford University Press, Great Britain.

Gönenç, İ.E., 1979. Akarsulardaki inorganik azot dağılımına dispersiyonun etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gulliver, J. S., and Rindels, A. J., 1990. Indexing gas transfer in self-aerated flows, *J. Envir. Engrg.,* ASCE, **116**, 503-523.

Gulliver, J.S., and Rindels, A. J., 1993. Measurement of air-water oxygen transfer at hydraulic structures. J. *Hydr. Engrg.,* ASCE, **119,** 327-349.

Gulliver, J.S., Wilhelms S. C., and Parkhill K.L., 1998. Predictive capabilities in oxygen transfer at hydraulic structures, J. *Hydr. Engrg.,* ASCE, **124**, pp. 664-671.

Gulliver, J.S., Wilhelms S. C., and Parkhill K.L., 1998. Predictive capabilities in oxygen transfer at hydraulic structures, J. *Hydr. Engrg.,* ASCE, **124**, 664-671.

Hager, W.H., Bremen, R., Kawagoshi, N., 1990. Classical hydraulic jump: Length of roller. *J. Hydraulic Research*, IAHR, **28**, 591-608.

Hager, W.H., 1992. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.

Henderson, F.M., 1966. Open Channel Flow. Macmillan Publishing CO., Inc., New York.

Hibbs, D.E., Parkhill, K.L., and Gulliver, J.S., 1998. Sulfur hexafluoride gas tracer studies in streams, *J. Envi. Engrg.,* ASCE, **124**, 752-760.

Higbe, R., 1935. On the adsorption of a pure gas into a still liquid during short period of exposure. Transactions, *American Institute of Chemical Engineers*, **31**, 365-390.

Holler, A.G. 1971. The mechanism describing oxygen transfer from the atmosphere to discharge through hydraulic structures, *Proc., 14th IAHR Congress and Conf.*, Paris, France, September 1971, 372-382.

Hoyt, J.W., and Sellin, R.H.J., 1989. Hydraulic jump as mixing layer, *J. Hydr. Engrg*., ASCE, **115**, 1607-1613.

Kawase, Y., Young, M.M., 1992. Correlations for liquid-phase mass transfer coefficients in bubble column reactors with newtonian and non-newtonian fluids, *The Can. J. Chem. Engrg.,* **70**, 48-54.

Kim J., Walters R.W., 2001. Oxygen transfer at low drop weirs, *J. Envir. Engrg, ASCE,* **127,** 604-610.

Kobus, H., 1991. Introduction to air-water flows, in *Air entrainment in free surface flows*, pp. 1-28, Ed. I. R. Wood, IAHR Hydraulic Structures Manual, No. 4, Roterdam.

Küçükali, S., 2003**.** Açık Kanallarda Oksijen Transferi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Küçükali, S., Bilir, T., 2004. Karst hydrogeology of Zonguldak and a roman water supply line, *IV. National Hydrology Congress of Turkey*, Istanbul, Turkey, 23-25 June, 499-506.

Küçükali, S., Bircan, K., Çokgor, S., 2004. Water pollution and turbot stocks in the zonguldak region*, 1st Black Sea Region: Past, Present, and Future Conference*, Istanbul, 14-16 October, Turkey,30.

Küçükali, S., 2005. Local Dissolved Oxygen Variations in the vicinity of Different Boulder Arrangements Placed in a Flume, *XXXI IAHR Congress, John Kennedy Student Paper Competition*, Seoul, South Korea, 11-16 September, E, 371-378.

Mossa, M., and Tolve, U., 1998. Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump, *J.Fluids Engrg*., ASME, **120**, 160-1

Komori, S., Murakimi, Y. ve Ueda, H., 1989. The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow, *J.Fluid Mech*., **203**, 103-123.

Leutheusser, H.J., Resch, F.J., and Alemu, S., 1973. Water quality enchancement through hydraulic aeration, *XV IAHR Congress*, Istanbul, Turkey, 2-7 September, 167-175.

Lewis, W. K. ve Whitman, W.G., 1924. Principle of gas adsorption, *Industrial and Engineering Chemistry*, **16**, 1215-1220.

Liu, M., Rajaratnam, N., Zhu, D.Z., 2004. Turbulence structure of hydraulic jumps of low froude numbers, *J. Hydr. Engrg*., ASCE, **130**, 511-520.

Long, D., Steffler, P. M., and Rajaratnam, N., 1990. LDA study of flow structure in submerged hydraulic jumps. *J. Hydraul. Res.*, **28**, 437–460.

Long, D., Rajaratnam, N., Steffler, P.M., and Smy, P.R., 1991. Structure of flow in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res., IAHR*, **29,** 207-218.

Malmqvist, B., Rundle, S., 2002. Threats to the running water ecosystems of the world, *Enviromental Conservation*, **29**, 134-153.

Markosfky, M., Kobus, H., 1978. Unified presentation of weir-aeration data, J. *Hydr. Engrg.,* ASCE, **104**, 562-568.

Mıthcell, S., 1999. A simple model for estimating mean monthly stream temperatures after riparian canopy removal, *Envir. Management*, **24**, 77-83.

Montgomery, D. R., and Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins, *Geol. Soc. Am. Bull*., **109**, 596-611.

Mossa, M., Petrillo, A., 2003. A brief history of the jump of the Bidone, *XXX IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece, 24-29 August, Theme 65.

Muntz, C., Roberts, P.V., 1989. Gas and liquid phase mass transfer resistances of organic compounds during mechanical surface aeration. *Wat. Res*., **23**, 589-601.

Nakasone, H., 1987. Study of aeration at weirs and cascades, *J. Envir.Engrg*., ASCE. **113**, 64-81.

Narayanan, R., 1980. Cavitation induced by turbulence in stilling basin. *Proc. ASCE, J. Hydraulics Division,* **106**, 616-619.

Nernst, W., 1904. Theorie der reaktionsgeschwindigkeit in heterogenen systemen*, Zeitschrift für Physikalische Chemie*, **47**, 52-55.

Nezu, I., 2005. Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century, *J. Hydr. Engrg*., ASCE, **131**, 229-246.

Novonty, V., 2003. Water Quality, Diffuse Pollution and Watershed Management. Willey & Sons, New York.

Ohtsu, I., and Yasuda, Y., 1994. Chracteristics of Supercritical-flow below sluice gate*, J. Hydr. Engrg*., ASCE, **120**, 332-346.

Pope, S. B., 2000. Turbulent Flows. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.

Rajaratnam, N., 1961. An experimental study of air entrainment characteristics of hdraulic jump. *J. Institution of Engineers (India),* **42**., 247-273.

Rajaratnam, N., 1965. The hydraulic jump as a wall jet, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, **91**, 107-132.

Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E., 1987. The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill, New York.

Resch, F. J., ve Leutheusser, H. J., 1972. Reynolds stress measurements in hydraulic jumps, *J. Hydraul. Res.,* **10**, 409-429.

Resch, F.J., and Leutheusser, H.J., and Alemu, S., 1974. Bubbly two-phase flow in hydraulic jump, *J. Hydr. Engrg.,* ASCE, **100**, pp. 137-149.

Rouse, H., Siao, T.T., and Nagaratnam, S., 1959. Turbulence characteristics of the hydraulic jump, *Trans. ASCE*, **124**, 926-966.

Rutherford, R. C., 1994. River Mixing. John Willey & Sons, England.

Safranez, K., 1929. Untersuchungen über den wechselsprung. Bauingenieur, **10**, 668-677.

Sarma, K.V.N., Newnham, D. A., 1973. Surface profiles of hydraulic jump for Froude Numbers less than four, *Water Power*, **25**, 139-142.

Sene, K.J., Hunt, J. C. R. ve Thomas, N.H., 1994. The role of coherent structures in bubble transport by turbulent shear flows, *J. Fluid Mechanics*, **259**, 219-240.

Sinokrot, B.A., and Stefan, H.G., 1993. Stream temperature dynamics: Measurements and modeling, *Water Resources Research*, **29**, 2299-2312.

Smil, V., 2001. Feeding the World a Challenge for the 21st Century. MIT Press, Cambridge.

Sözen, S., 1995. Nitrifikasyon-denitrifikasyon kinetiğinin deneysel karakterizasyonu. *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Speece, R.E., Givler, C., Aubert, R., Crate, J., Caire., R., and Siddiqi, R. H., 1982. Hypolimnion Oxygenation Studies in Clark Hill Lake, *J. Envir. Engrg., ASCE*. **108**, 225-244.

Streeter, J.W., and Phelps, E.B., 1925. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *Public Health Bull*., **146**, U.S Public Health Service.

Streeter, V.L., ve Wylie, E.B., 1981. Fluid Mechanics. McGraw-Hill. Singapore.

Sumer, B.M., Cokgor, S., and Fredsoe, J., 2001. Suction removal of sediment from between armor blocks. *J. Hydr. Engrg*., ASCE, **127**, 293-306.

Sümer, B.M., Ünsal, İ., Bayazıt, M., 1982. Hidrolik. Birsen Yayınevi, İstanbul.

Theriault, E.J., 1927. The oxygen demand of polluted waters, *Public Health Bull*., **173**, U.S Public Health Service.

Toso, J., and Bowers, E.C., 1988. Extreme pressures in hydraulic jump stilling basin*, J.Hydr. Engrg.,* ASCE, **114**, 829-843.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L., H. David Stense, H.D., 2003. Wastewater Engineering: Treatment And Reuse**.** McGraw-Hill, Boston.

Tebbut, T.H.Y., 1972. Some studies on reaeration in cascades, *Water Research*, **6**, 297-304.

Tsivoglou, E. C., and Neal, L. A., 1976. Tracer measurements of reareation: II. field studies, *Water Pollution Control Fed.,* **48**, 285-305.

UNEP, 2003. Global Environmental Outlook, United Nations.

Urban, A. L., Hettiarachchi, S. L., Miller, K. F., Kincaid, G. P., and Gulliver, J. S., 2001. Field experiments to determine gas transfer at gated sills, *J. Hydr. Engrg.,* ASCE, **127**, 848-859.

Urban, A.L., Wilhelms, S.C., Gulliver, J.S., 2005. Decay of turbulence downstream of a stilling basin. **131**, 825-829.

Valle, B.E., and Pasternack, G. B., 2002. TDR measurements of hydraulic jump aeration in the South fork of the American river, California, *Geomorphology*, **42**, 153-165.

Van der Kroon, G.T.M., and Scharm, A.H., 1969. Weir-aeration-Part II, H_2O, **22**, 538-545.

Vasilev, O.F. ve Bukreyev, V.I., 1967. Statisticsl chracteristcs of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump, *XII IAHR Congress*, September 1967, 1-8.

Watson, C.C., Walters, R.W., Hogan, S.A., 1998. Aeration performance of low drop weirs, J. *Hydr. Engrg.,* ASCE, **124**, 65-71.

Wei, T. and Willmarth, W.W., 1989. Reynolds-number effects on the structure of a turbulent channel flow, *J. Fluid Mech*., **204**, 57-95.

Welch, E.B., and J. M. Jacoby., 2004. Pollutant Effects In Freshwater: Applied Limnlogy. Spon Press, London and New York.

Wilhelms, S.C., Clark, L., Wallace, J.R., and Smith, D.R., 1981. Gas transfer in hydraulic jumps. Technical Report E-81-10, US Army Enginner Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg Miss., USA.

Wormleaton, P.R., and Tsang, C.C., 2000. Aeration performance of rectangular planform Labyreinth weirs, *J. Envir. Engrg. ASCE*. **126**, 456-465.

Wood, I.R., 1991. Air Entrainment in Free Surface Flows. IAHR Hydraulic Structures Manual, No. 4, Roterdam.

Yalçın, Y., Günal, M., Bostan, T., Çevik, E., Çelikoğlu, Y., 2004**.** The influence of impinging jets on hydraulic jumps, Water Management. **157**, 63-76.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Zonguldak'ta doğan Serhat Küçükali, ilk, orta ve lise öğrenimini Zonguldak TED Koleji'nde tamamladı. 1997 yılında YTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girerek, 2001 yılında mezun oldu. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Su Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitimine başlayarak, bu programdan 2003 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl İTÜ Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı'nda doktora eğitimine başladı ve Araştırma Görevliliği kadrosu Zonguldak Karaelmas Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 35. Madde kapsamında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne nakil olmuştur. Halen İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde doktora eğitimine devam etmektedir.