

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SU JETİ İLE HAVALANDIRMA SİSTEMİNDE AĞIZLIK TİPİNİN
HAVALANDIRMA PERFORMANSINA ETKİSİ**

Tamer BAĞATUR

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMAN YÖNETİM MERKEZİ**

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

96365

**ELAZIĞ
2000**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU JETİ İLE HAVALANDIRMA SİSTEMİNDE AÇIZLIK TIPININ
HAVALANDIRMA PERFORMANSINA ETKİSİ

Tamer BAÇATUR

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 18.9.2000 tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği / Oyçokluğu ile Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

Prof.Dr. Nusret ŞEKERDAG
Danışman

Üye Üye
Prof.Dr.O.Erkin PERMECI
Prof.Dr.Ömer AKÇA

Bu tezin kabulü , Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun /..... /..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SU JETİ İLE HAVALANDIRMA SİSTEMİNDE AĞIZLIK TİPİNİN
HAVALANDIRMA PERFORMANSINA ETKİSİ

Tamer BAĞATUR

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
2000, Sayfa : 89

Bu çalışmada, su jeti ile havalandırma sisteminde ağızlık tipinin havalandırma performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Literatürde belirtilen dairesel kesitli ağızlıklardan farklı olarak elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlık tipleri üzerinde su jeti hızına bağlı olarak değişen hava kabarcığı nüfuz derinliği, iletilen hava miktarı, oksijen transfer katsayısı ve havalandırma verimi gibi akım karakteristیکleri araştırılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlara göre dairesel kesitli ağızlıklara nazaran elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlıklar daha yüksek ve verimli akım karakteristیکleri göstermiştir.

Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlıklarda, iletilen hava miktarı ve havalandırma verimi yönünden oldukça yüksek bir performans gözlenmiştir. Fakat, bunun yanında hava kabarcığı nüfuz derinliği daha az olmaktadır. Elips kesitli ağızlıklar ise hava kabarcığı nüfuz derinliği yönünden oldukça yüksek bir özelliک göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda yüksek hava kabarcığı konsantrasyonu ve küçük derinliklerin havalanması gibi ihtiyaç duyulan uygulamalarda kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlık, daha büyük derinliklerin havalanması durumunda ise elips kesitli ağızlık tercih edilmesinin uygun olacağı söylenebilir.

Anahtar Kelimeler : Su jeti, havalandırma, ağızlık tipi.

ABSTRACT

PhD Thesis

**THE EFFECT OF NOZZLE TYPE ON AERATION PERFORMANCE IN
PLUNGING WATER JET AERATION SYSTEM**

Tamer BAĞATUR

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
2000, Page : 89

In this study, for the plunging water jet aeration system using inclined different nozzle types, the flow characteristics such as the bubble penetration depth, air entrainment rate, oxygen transfer factor and aeration efficiency which changed depending on the jet velocity were evaluated in an air-water system. Numerous studies were conducted with circular nozzle. The present study describe new experiments performed with different nozzle types. Three types of nozzles i.e. circular, ellipse exit nozzle and rectangle duct with rounded ends exit nozzle were examined.

Experimental results showed that these two types (ellipse and rectangle duct with rounded ends exit nozzle) of jet have very different flow characterizes and entrainment patterns on free jet surface and also submerged jet region within the receiving pool (tank).

More aeration performance was observed by air entrainment rate and oxygen transfer efficiency in rectangle duct with rounded ends exit nozzle. But also bubble penetration depth is less and ellipse exit nozzle is indicated a rather high quality the way bubble penetration depth. From these results, it may be said that it is appropriate to be preferred ellipse exit nozzle on aeration of the deeper and rectangle duct with rounded ends exit nozzle in the practices which are needed like bubble concentration.

Key Words : Plunging water jet, aeration, nozzle type

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı yöneten ve çalışma boyunca teşvik, yardım ve ilgilerini gördüğüm sayın Hocam Prof.Dr. Nusret ŞEKERDAĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarım sırasında yardımlarını gördüğüm değerli hoca ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tamer BAĞATUR



İÇİNDEKİLER	<u>Sayfa</u>
ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER	XII
1. GİRİŞ	1
2. SU JETİ İLE HAVALANDIRMA SİSTEMİ ÜZERİNE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Su Jeti ile Havalandırma Sistemlerinin Pratik Uygulama Alanları	4
2.1.1. Atıksu Arıtma Tesislerinde Uygulanabilirliği	4
2.1.2. Jet Mikserler (Karıştırıcılar)	6
2.1.3. Su Jeti İle Flotasyon (Yüzdürme)	6
2.2. Su Jeti	8
2.3. Türbülanslı Bir Su Jetinin Difüzyonu	9
2.4. Su Jeti İle Havalandırma Sisteminin Mekanizması	12
2.5. Temel Hidrodinamik Özellikler	15
2.5.1. Jet Ağızlığı - Jet Çapı.	16
2.5.1.1. Ağızlık Uzunluğunun Ağızlık Çapına Oranı (L_N/d_0 oranı)	18
2.5.1.2. Ağızlık Sayısının Etkisi	20
2.5.2. Jet Hızı (V_j)	20
2.5.3. Jet Uzunluğu (L_j)	23
2.5.4. Jetin Çarpma Açısı (θ)	23
2.5.5. Su Jeti Yüzey Pürüzlülüğü (ϵ)	25
2.5.6. Su Jeti Nüfuz Derinliği (H_p)	27
2.5.7. Hava Kabarcığı Dağılımının Karakteristikleri	29
2.5.8. Karıştırma Karakteristikleri	30
2.5.9. Havalandırma Tankındaki Su Hızı (V_r)	30
2.6. Dalmalı Su Jetleri Tarafından Hava İletimi	31
2.6.1. İletilen Hava Miktarının Ölçüm Teknikleri	31

2.7. Kütle Transferi	34
2.7.1 Oksijen Transferi	34
2.7.2. Oksijen Transfer Katsayısının (k_{La}) Tayini	38
2.7.3. Oksijenlendirme Kapasitesi (OC)	39
2.7.4. Oksijen Transfer Verimi (OE).....	41
2.8. Literatür İncelemesinin Sonuçları	43
3. TEORİK YAKLAŞIMLAR	45
3.1. Jet Hızı	45
3.2. Serbest Jetin Genişlemesi	45
3.3. Hava İletimi Üzerinde Jet Çevre Uzunluğunun Etkisi	47
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
4.1. Amaç	49
4.2. Deney Düzenegi	51
4.3. Boyut Analizi	45
4.4. Ağzlık Tipleri	53
5. DENEYSEL ÖLÇÜMLER	56
5.1. İletilen Hava Miktarı Ölçümleri	56
5.1.1. Hava İletim Eğrisi	61
5.2. Su Jetinin Genişlemesi	62
5.3. Jet Çevre Uzunluğunun Etkisi	65
5.4. Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Ölçümleri	67
5.4.1. Dairesel Enkesitli Ağzlık Tipinde Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verileri	67
5.4.2. Elips Enkesitli Ağzlık Tipinde Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verileri	69
5.4.3. Kenar Uçları Yuvarlatılmış Dikdörtgen Enkesitli Ağzlık Tipinde Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verileri	71
5.4.4. Ağzlık Tipine Bağlı Olarak Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verilerinin Karşılaştırılması	73
5.5. Oksijen Transfer Katsayısının (k_{La}) Tayini	76
5.6. Oksijen Kapasitesi (OC) Değerlerinin Bulunması	78
5.7. Oksijen Transfer Veriminin (OE) Bulunması	78

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	81
KAYNAKLAR	84
EKLER	



ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Su jeti ile havalandırma sisteminin bir atık su arıtma tesisinin uygulanması.	5
2.2 Bir jet mikserde çift ağızlıklı yerleşimin genel görünümü	7
2.3 Su jeti ile flotasyon uygulaması	8
2.4 Su jeti tipleri	9
2.5 Durgun bir su tankına dalan serbest jetin teorik görünümü	10
2.6 Su-hava karışımli serbest jetin havalanma durumuna göre zamana bağlı olarak basınç değişimleri	11
2.7 Serbest dalan bir jetin havuzdaki akım modeline batık jet olarak dönüşümü ve hava kabarcığı transferi	12
2.8 Farklı türbülans siddetine sahip jetlerle hava transferine ait mekanizmalar . .	14
2.9 Su jeti ile havalandırma sisteminin temel hidrodinamik sistem parametreleri .	16
2.10 Farklı ağızlık tiplerinin hava iletim oranı üzerindeki etkisi	17
2.11 Ağızlık uzunluğunun jet yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi	19
2.12 Jet hızı ve hava iletim miktarı arasındaki ilişki	21
2.13 Jet hızı ve hava iletim oranı arasındaki ilişki	22
2.14 Bir jetin sinüs dalga formu ve fonksiyonları	26
2.15 Jet yüzey pürüzlülüğü(ϵ) ve hava iletim oranı (Q_A/Q_W) arasındaki ilişki . . .	27
2.16 Jet hızı ve hava kabarcığı nüfuz derinliği arasındaki ilişki	28
2.17 Hava başlığı tekniği	32
2.18 Hava kabarcığı kapanı tekniği	33
2.19 Kapalı ağızlık sistemi	33
2.20 İki film teorisine göre gaz transferi mekanizması	36
2.21 Bir sıvı film tabakasında oksijen transferinin şematik görünümü	37
2.22 Jet hızı – oksijen transfer verimi arasındaki ilişki	42
3.1 Serbest jetin genişlemesi ve hava iletiminin mekanizması	46
4.1 İletilen hava miktarı, hava kabarcığı nüfuz derinliği ve çözünmüş oksijen transferi ölçümleri için kullanılan deney düzeneğinin akım diyagramı	51
4.2 Elips çıkış kesitli ağızlık	53
4.3 Kenar uçları yuv. dikdörtgen çıkış kesitli ağızlık	54
4.4 Ağızlık tiplerinin plan ve kesitleri	55

5.1 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=5\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)	57
5.2 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=5\text{mm}$, $\theta=60^\circ$)	58
5.3 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=8\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)	59
5.4 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=8\text{mm}$, $\theta=60^\circ$)	60
5.5 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim oranları ($d_o=8\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)	62
5.6 Kenar uçları yuvarlatılmış ağızlık tipinde ağızlıktan çıkan jetin yörüngesi boyunca yayılışı	63
5.7 Jet hızına bağlı olarak jetin yayılma miktarları ($d_o=5\text{ mm}$, kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlık için)	64
5.8 Jet hızına bağlı olarak jetin yayılma miktarları ($d_o=8\text{ mm}$, kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlık için)	65
5.9 Jet hızına ve ağızlık tipine bağlı olarak jet çevre uzunluğu ile hava iletimi arasındaki ilişki	66
5.10 Dairesel enkesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı, jet uzunluğu, ağızlık çapı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi	68
5.11 Elips enkesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı, jet uzunluğu, ağızlık çapı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi	70
5.12 Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen enkesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı, jet uzunluğu, ağızlık çapı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi	72
5.13 Ağızlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o=5\text{ mm}$, $L_j=0.15$, $\theta=45^\circ$)	74
5.14 Ağızlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o=5\text{ mm}$, $L_j=0.15$, $\theta=60^\circ$)	74
5.15 Ağızlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o=8\text{ mm}$, $L_j=0.15$, $\theta=45^\circ$)	75
5.16 Ağızlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o=8\text{ mm}$, $L_j=0.15$, $\theta=60^\circ$)	75

5.17 Ağzılık tipine bağlı olarak oksijen transfer katsayısının karşılaştırılması ($d_o = 5 - 8 \text{ mm}$, $L_j = 0.15$, $\theta = 45^\circ$)	77
5.18 Ağzılık tipine bağlı olarak oksijen transfer veriminin karşılaştırılması ($d_o = 8 \text{ mm}$, $L_j = 0.15$, $\theta = 45^\circ - 60^\circ$)	79



konsantrasyonu	40
4.1 Dalmalı su jetleri ile havalandırma sisteminde farklı araştırmacılara ait deneysel şartlar	50
4.2 Ağızlık ve jet ile ilgili olarak seçilen sabit değişkenler	52



SEMBOLLER

a, b	ağızlık geometrisine bağlı boyutsal değerler , m
a / d ₀	kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlık kesit için büzülme oranı
a _j , b _j	jetin atmosferdeki yayılma genişliği, m
a _j / a	jetin yayılma oranı
A	ağızlık kesit alanı, m ²
C, C ₀	başlangıçtaki oksijen konsantrasyonu (t=0), mg L ⁻¹
C _s	deney şartları altında suyun oksijene doyma konsantrasyonu(sıcaklık, atmosfer basıncı), mg L ⁻¹
C _t	belirli bir zaman aralığında suyun oksijen konsantrasyonu, mg L ⁻¹
C*	standart şartlar altında suyun oksijene doyma konsantrasyonu(20 C° sıcaklık, 1 atmosfer basınç), mg L ⁻¹
Ç _j	jet çevre uzunluğu, m
d ₀	ağızlık çapı, m
d _j	jetin çarpma noktasındaki çapı, m
g	yerçekimi ivmesi, m s ⁻²
h _j	jetin çekirdek uzunluğu, m
H	su tankı derinliği, m
H _p	hava kabarcığı nüfuz derinliği, m
k _{La}	oksijen transfer katsayısı, s ⁻¹
L _j	su jeti uzunluğu, m
L _N	ağızlık uzunluğu, m
N _j	su jetinin gücü, Watt (N _j = ½ Q _w ρ V _j ²)
OC	oksijen transfer kapasitesi, kg O ₂ h ⁻¹ (OC= k _{La} C* V)
OE	oksijen transfer verimi, kg O ₂ (kW h) ⁻¹
Oh	Ohnesorge veya stabilite (denge) sayısı (= $\mu \sqrt{\rho d_0 \sigma}$), boyutsuz
P _A	atmosfer basıncı, mm-Hg
P _w	suyun buhar basıncı, mm-Hg
P	basınç, kg m ⁻²
P _{max}	dinamik basınç, kg m ⁻²
r	yarıçap, m

Re	reynolds sayısı
Q_A	iletlen havanın debisi, $m^3 s^{-1}$
Q_W	suyun debisi, $m^3 s^{-1}$
Q_A/Q_W	hava iletim oranı
T	zaman, s
t	türbülans şiddeti($\sqrt{\bar{V}'^2 / \bar{V}}$)
V	suyun toplam hacimi, m^3
V_n	ağızlıktaki hız, $m s^{-1}$
V_o	ağızlık çıkışındaki hız, $m s^{-1}$
V_j	su jetinin hızı, $m s^{-1}$
V_m	jet eksenindeki hız, $m s^{-1}$
V_x	jetin giriş noktasından herhangi bir y uzaklığında ve jet eksenine dikey x mesafesindeki hız, $m s^{-1}$
We	weber sayısı
θ	su jetinin çarpma açısı, derece
ϵ	su jetinin yüzey pürüzlülüğü, m
ρ	suyun yoğunluğu, $kg m^{-3}$
σ_1	standart sapma
σ	suyun yüzey gerilimi (su-hava ortamında 0.0073), $N m^{-1}$
δ	hava sınır tabakası kalınlığı, m
μ	viskozite, Pa s veya $N s m^{-2}$

1. GİRİŞ

Konu:

Havalandırma işlemleri genel olarak; temiz su veya atıksuya oksijen transfer etmek, karıştırma ve flotasyon gibi gayeler için yapılmaktadır.

Havalandırma ünitelerinde mekanik havalandırıcılar ve basınçlı hava difüzörleri olarak bilinen geleneksel havalandırıcılardan farklı olarak su jeti ile havalandırma sistemleri de kullanılmaktadır.

Bu havalandırma sistemlerine ait genel bilgiler tablo 1.1’de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi havalandırıcı tipleri başlıca şu özellikleri ile araştırılır.

- i) Oksijen verimi
- ii) Kullanım alanları
- iii) Yatırım ve işletme
- iv) Tamir ve bakım

Tablo 1.1 Havalandırıcı tipleri

Havalandırıcı Tipi	Oksijen Verimi (OE) (kgO ₂ / kW-saat)	Kullanım Alanları	Düşünceler
Mekanik havalandırıcılar	1.2 – 2.0	*Aktif çamur, havalandırılmalı lagünler, oksidasyon hendekleri	*Yatırım maliyeti çok yüksek, büyük açıklıklarda yerleşim problemi var.
Basınçlı hava difüzörleri	0.6 – 1.6	*Aktif çamur havuzları	*Yatırım maliyeti yüksek, tamir ve bakım güçlüğü, tıkanma problemi var.
Su jeti havalandırıcılar	>2.0	*Aktif çamur, havalandırılmalı lagünler, oksidasyon hendekleri, flotasyon, su ürünleri havuzları	*Yatırım maliyeti düşük, bakım ve işletilmesi kolay

Su jeti ile havalandırma sistemi şu özellikleri ile cazip olmaktadır (Jennekens, 1975; Ohkawa ve diğ., 1986).

- i) Hava kompresörüne ihtiyaç yoktur.
- ii) Yapımı ve işletilmesi kolaydır.
- iii) Sistem oldukça güvenlidir ve çok az bakım ister.
- iv) Havalandırma verimi 2 kgO₂ / kW-saat’in üzerindedir.
- v) Biyolojik arıtma tesislerinde kullanılan mikroorganizmaların aktivitesi jet havalandırıcı sisteminden etkilenmez.
- vi) Sistem iyi bir karışım temin eder.
- vii) Mekanik havalandırıcılardaki yerleşimin sınırlı olması ve basınçlı hava difüzörlerindeki tıkanma gibi olumsuzlukları yoktur.

Durgun bir su yüzeyine serbest su jetlerinin çarpması esnasında atmosferdeki havanın transfer olduğu gözlenebilir. Bu olayı; nehirler, dereler, çağlayanlar, şelaleler gibi tabii olaylar ile baraj, savak, açık kanal ve benzeri hidrolik yapılarda görmek mümkündür.

Su jetleri, tabii olaylarda; hava iletimi, iletilen havanın su kütlesi içinde hava kabarcıkları şeklinde dağılımı ve hava-su karışımının iyi bir temas sağlamasında önemli bir rol oynarlar. Pratik uygulamalarda ise jet havalandırıcılar, kimya mühendisliği alanında; karıştırma işlemleri, gaz-sıvı transferini arttırmak; çevre mühendisliği alanında ise içmesuyu-atıksu arıtma tesislerinde karıştırma ve oksijen transferi işlemleri için kullanılmaktadır. Ayrıca, madencilikte minerallerin geri kazanımı ile yağ endüstrisinde yağ ve gres arıtımında su jetleri ile hava kabarcığı flotasyonu (yüzdürme) olarak bilinen geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Su jeti ile havalandırma sistemi bir sirkülasyon pompası ve buna bağlı olarak su jetlerinin elde edildiği ağızlık ünitelerinden oluşmaktadır.

Ağızlıklar, akışkanları belirli bir geometrik şekilde düzenleyerek akışkanın hızını ve statik basıncını değiştirme özelliği gösteren elemanlardır. Bir ağızlığın temel amacı, potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürmektir.

Amaç:

Bu çalışmanın amacı, su jetleri ile havalandırma sisteminde havalandırma performansı üzerinde farklı ağızlık tiplerinin etkisini deneysel olarak araştırmaktır.

Literatürde genel olarak dairesel kesitli ağızlık tipleri üzerinde yapılan çalışmalar yer almaktadır. Bunun yanında farklı tipte ağızlıklara ait çalışmalarda mevcuttur. Fakat, ağızlık tipinin havalandırma sistemi üzerinde etkisini yorumlamaya yetecek kadar sonuç elde edilememiştir.

Bu nedenle, bu çalışmanın konusunu giriş ağızlık çapı dairesel kesitli olan ve sabit çapa sahip ağızlıkların çıkış noktasındaki kesitini değiştirerek gelişen farklı jet geometrisinin akım karakteristikleri ve havalandırma performansı üzerindeki etkisinin araştırılması oluşturmaktadır. Bu maksat için ağızlıkta oluşabilecek yersel kayıpları en az seviyede tutmak için ağızlık içinde keskin kenar oluşmayacak biçimde dairesel kesit dışında iki ağızlık tipi (elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen) tasarımılandı.

Su jetleri ile havalandırma konusunda yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların çoğunu deneysel araştırmalar oluşturmaktadır.

Bu konuda literatürden elde edilen çalışmalara ait deneysel şartlar baz alınarak bu çalışmayı oluşturacak deney düzeneği ve çalışma programı tasarımı yapılmıştır. Deney düzeneği ve çalışmalar literatüre uygun olarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işlemleri olarak, standart şartlarına göre dairesel tip ağızlıklar için elde edilen akım karakteristikleri çalışmamıza esas olan deney düzeneği üzerinde tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür ile uygunluk göstermiştir. Ölçüm cihazları deney şartlarına (atmosfer basıncı, nispi nem) göre ayarlanmıştır. Laboratuvar şartlarına göre elde edilen sonuçlar standart şartlara (sıcaklık, oksijen doygunluk konsantrasyonu, atmosfer basıncı) göre yeniden düzenlenmiştir.

Bu çalışmada, su jetleri ile havalandırma sisteminin temel ünitesi olan jet çıkış ağızlığının farklı tipleri (çıkış noktası kesitleri dairesel, elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen olan ağızlıklar) üzerinde çalışılarak havalandırma performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Kapsam:

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Araştırma Fonu İşletme Müdürlüğü (FÜNAF) tarafından 307 numaralı proje olarak desteklenmiştir.

Araştırma Fonu İşletme Müdürlüğü (FÜNAF) tarafından desteklenen bu çalışmanın deney düzeneği Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü Hidrolik Laboratuvarında tesis edildi.

Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, bir giriş yapılmakta; çalışmanın amacı ve kapsamı belirtilmektedir. İkinci bölümde, bir literatür araştırması verilerek; konu detaylarıyla ele alınmaktadır. Üçüncü bölümde, bazı teorik yaklaşımlar verilmekte; dördüncü bölümde, deney çalışmaları; beşinci bölümde ise deneysel ölçümler ve elde edilen sonuçlar verilmektedir. Altıncı bölümde, tezde ulaşılan başlıca sonuçlar ve bir tartışma verilmektedir.

2. SU JETİ İLE HAVALANDIRMA SİSTEMİ ÜZERİNE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Su Jeti ile Havalandırma Sistemlerinin Pratik Uygulama Alanları

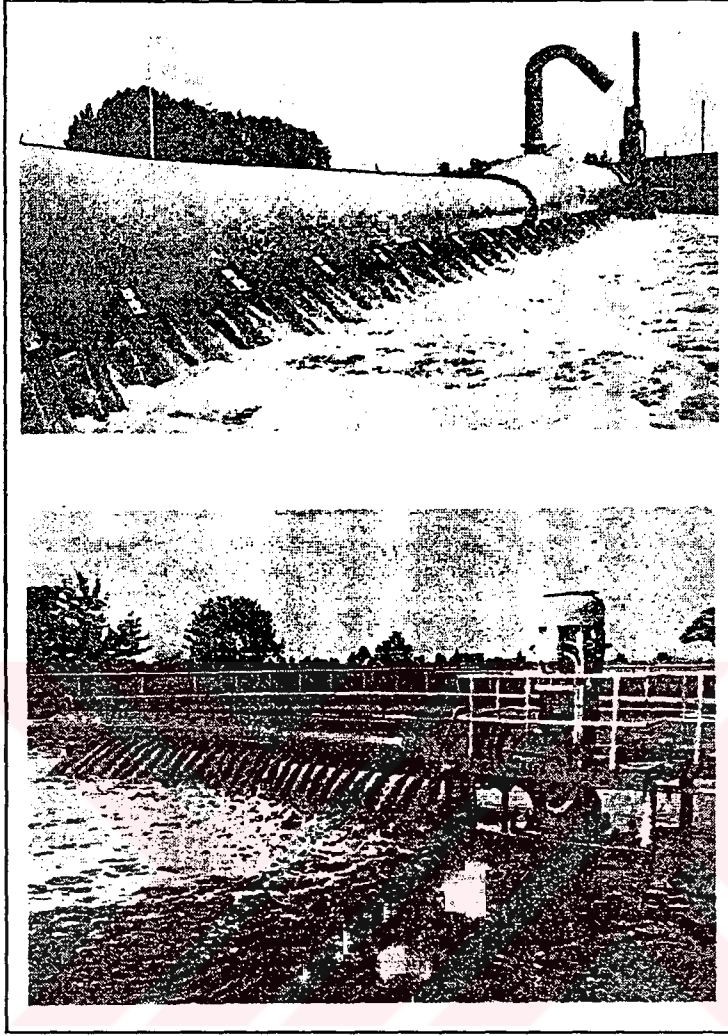
2.1.1. Atıksu Arıtma Tesislerinde Uygulanabilirliği

Su jeti ile havalandırma sistemleri su veya atıksu arıtma tesislerinde uygulama potansiyeline sahiptirler. Atık su arıtımı durumunda ilk olarak su jeti sistemi ile havalandırılan tesisler Hollanda'da inşa edildi. Su jeti ile havalandırma sistemi bir sirkülasyon pompası ve buna bağlı olarak su jetlerinin elde edildiği ağızlık ünitelerinden oluşmaktadır. 9000 kişilik nüfusa göre tasarımı yapılan bir arıtma tesisinde (Meijel atıksu arıtma tesisi) havalandırma ünitesinin hacmi 2250 m^3 , derinliği 4 m, bekleme zamanı 8.3 saat olarak seçilmiştir (Şekil 2.1). Tesisin havalandırma ünitesi iç çapı 1 m olan ve üzerinde 0.13 m çaplı orifislerin bulunduğu bir boruyla donatıldı. Jetlerin çarpma açısı 45° ve jet uzunluğu 0.60 metredir. Tesisin çalışma debisi (Q_w) 0.77 - 1.40 m^3/s olmak üzere oksijenlendirme kapasitesi (OC) 21-54 $\text{kg O}_2/\text{saat}$ ve oksijen transfer verimi (OE) 2 $\text{kg O}_2/\text{kW-saat}$ civarındadır.

Böhnke (1970) kanalizasyon atık sularının arıtılması için oksidasyon hendeği ile birleştirilen bir jet havalandırıcı (aeratör) uygulamasını tanımladı. Oksijen verimi jet açısına bağlı olarak bulundu. Oksijen verimi, 70° çarpma açısında maksimum 3.3 $\text{kg O}_2/\text{kW-saat}$ değerine ulaşmaktaydı. Oksidasyon hendeği su derinliği 0.70 m ve jet uzunluğu 0.65 m idi.

Sneath (1978) iç çapı 38-68 mm olan ağızlıklar kullanarak, jet gücü $N_j < 100 \text{ W}$ olmak üzere oksijen verimini 8 $\text{kg O}_2/\text{kW-saat}$ gibi yüksek bir değerde elde etti.

Kenyeres (1991), HTPJ (yüksek türbülanslı dalmalı jet) olarak isimlendirdiği bir jet havalandırıcı tanımladı. Bu havalandırıcının tipik özelliği, jet yüzeyinin su tankına dalmadan önce uygun bir pürüzlülüğe ulaştırılmasıdır. Jet yüzeyi üzerinde pürüzlülük elde etmek için jet çıkış ağızlığının altına yerleştirilen hava deliklerinden bir fan vasıtasıyla hava jetleri verilmektedir. Kullanılan jet ağızlıkları 50-100 mm çapında ve jet hızları da 10-15 m/s civarındadır. Ohkawa ve diğ.(1986) ve Yamagiwa ve diğ.(1991) küçük ölçekli bir aktif çamur arıtma ünitesinde dalmalı jet havalandırıcının (aeratör) bir uygulaması üzerinde çalıştılar.



Şekil 2.1 Su jeti ile havalandırma sisteminin bir atıksu arıtma tesisine uygulanması (Dijkstra ve diğ., 1979)

Dalmalı jet havalandırıcılar üzerinde yapılan oksijen transfer karakteristikleri ölçümleri neticesinde atık su arıtımında uygulanan geleneksel havalandırıcılardan (mekanik havalandırıcılar ve basınçlı hava difüzörleri...) üstün özellikler elde edildi. Oksijen transfer verimi (OE) 2.0 - 4.6 kg O₂ / kW-saat arasında bulundu.

Su jeti ile havalandırma sisteminin atık su arıtımına ait pratik uygulamalarında oldukça geç tanıtılmasının sebebi jet ağızlıklarına su temin eden sirkülasyon pompa çarkının dairesel hızı nedeniyle oluşan kesme kuvvetinin çamur floklarını parçalama ve çamur stabilitesi üzerinde negatif etki yapabilme endişeleriydi. Bu endişeye açıklık getirmek amacıyla yapılan çalışmalar göstermiştir ki; tank su yüzeyi ile yüzeye çarpan jet akımı arasında bir etkileşim olabilmesine rağmen arıtılan su muhtevasında

görülen yüksek süspanse katı madde konsantrasyonuna pompa çarkı ile çamur flokları arasındaki kesme kuvveti neden olmaktadır. Pompa çarkları ve çamur flokları arasındaki kesme kuvvetini önleme yollarından biri pompa hızını sınırlı tutmaktır. Bu durumda su jetinin havalandırma performansında azalma olacağından böyle bir sınırlama pratik değildir. Pratik bir bakış noktasından en az bir kesme kuvvetine sahip pompa geliştirmek en iyi tercih olmaktadır. Bu nedenle, arıtılan su içinde pompa çarklarının oluşturduğu kesme kuvvetinden dolayı artan ince süspanse katıların sınırlandırılması için su pompası seçiminin özenle yapılması gerekmektedir (Ohkawa ve diğ., 1986).

2.1.2. Jet Mikserler (Karıştırıcılar)

Kolay işletilmesi ve basit tasarımıyla jet mikserler su arıtma proseslerinde ve endüstrinin çok geniş alanlarında kullanıma sahiptir. Bir jet mikserin ağızlık yerleşimi ve genel görünümü Şekil 2.2’de verilmiştir. Jet mikserler optimum şartlar altında işletildikleri takdirde mükemmel bir karıştırma sağlamaktadırlar. Jet mikserlerin verimini arttıran en önemli faktör jetlerin kinetik enerjisidir. Bundan dolayı bir jet mikserin su tankındaki karışım ve işletme hızı için uygun kinetik enerjiyi temin edecek tasarımda olması gerekmektedir. Sistem için jet hızı 5-20 m/s, optimum jet çarpma açısı 60^0 ve ihtiyaç duyulan oksijen miktarı ile havalandırma kapasitesi için enerji sınırlaması 3-20 W/m³ olarak bir şart oluşturmaktadır (Tojo ve diğ., 1982).

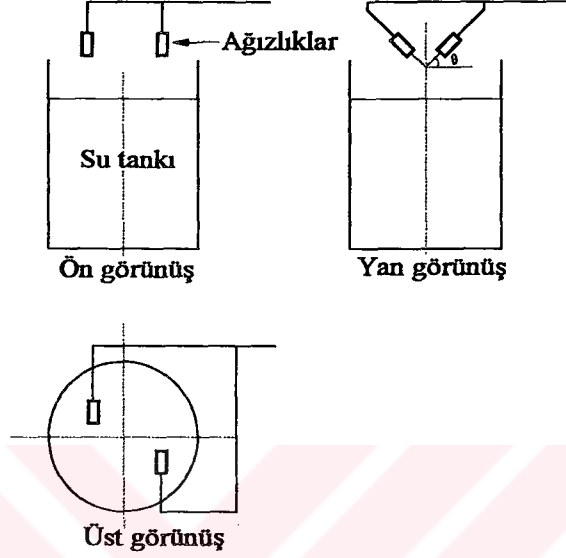
2.1.3. Su Jeti İle Flotasyon (Yüzdürme)

Flotasyon, katı ve sıvı fazların bir sıvı fazdan ayrılması için kullanılan fiziksel bir işlemdir. Flotasyon işlemi sıvı ortama verilen hava kabarcıklarının kolloidler, askıdaki katı maddeler ve yağları su yüzeyine doğru hareket ettirmeleri şeklinde olur.

Atık sularda çok ince disperse olan maddeleri ayırmak için gaz dispersiyon tekniğinin kullanıldığı bir flotasyon prosesi Avusturalya’da geliştirilmiştir (Chudacek, 1995).

Proses atık suda emilsüfiye olan yağ - gres hacmini 50 ppm (mg/L)’den 5 ppm gibi daha az bir seviyeye kadar indirebilmektedir. Sistem düşük enerji seviyelerine

ihtiyaç duyar. Yüksek hızlarda (50-60 m/s) proses akımı muhtevasına enjekte edilen ince su jetleri (4-5 mm) havalandırmayı temin etmektedir.



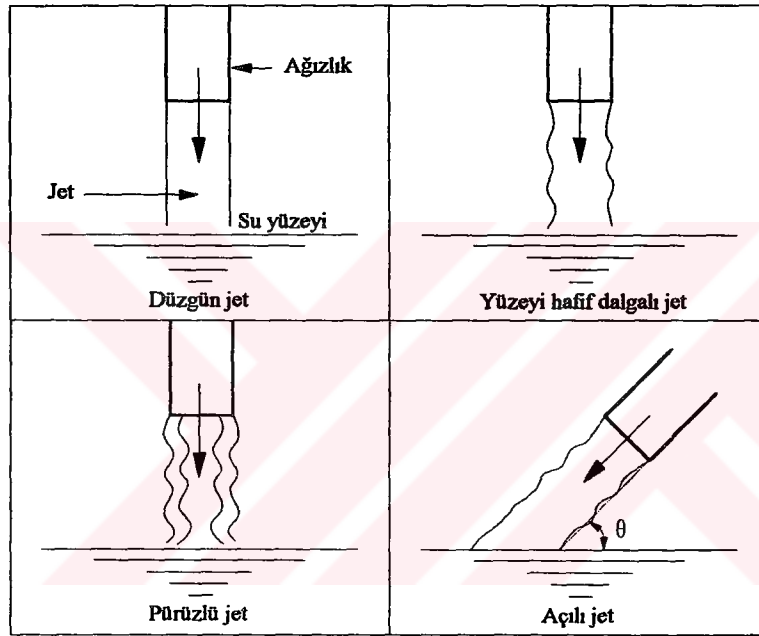
Şekil 2.2 Bir jet karıştırıcıda (mikser) çift ağızlıklılık sistemin genel görünümü (Tojo ve diğ., 1982)

Jetler, enerji ve hava taşıyıcısı olarak kullanılmaktadır. Yüksek hızlı jetler, temel olarak gaz dispersiyonu için şiddetli bir kesme bölgesi meydana getirmek ve partikül/hava kabarcığı çarpışma verimini artırarak yüksek hızlandırılmış bir alan oluşturmakta görev alırlar. İşletme sırasında jetler kuşatıldığı hava zarfını hızlandırır ve beraberinde taşır. Hız diferansiyelinden dolayı havuz su yüzeyine çarpma esnasında akımlar arasında oluşan kesme kuvveti hava zarfının çok küçük hava kabarcıklarına parçalanmasına sebep olur.

Bir pilot tesis çalışmasında geri devirsiz % 70, geri devirli olarak % 87 oranında yağ - gres flotasyon işlemi ile atıksu ortamından uzaklaştırılmıştır (Chudacek, 1995).

Su jeti ile havalandırma konusunda düşey ve belirli bir çarpma açısına (θ) sahip türbülanslı jetler üzerinde yapılan çalışmalar mevcuttur. Belirli çarpma açısına sahip türbülanslı jetler çarptığı su kütlesine yatay bir hız (V_r) sağlamaktadır. Özellikle dairesel kesitli tanklarda oluşan radyal hızlar su hacmini karıştırmaktadır. Böylece, havalandırma verimi artmakta ve su hacminin karışım süresi azalmaktadır.

Bu nedenle yapılan çalışmalar belirli çarpma açısına sahip türbülanslı su jetleri üzerinde yoğunlaşmıştır (Jennekens, 1975; Dijkstra ve diğ., 1979; Tojo ve diğ., 1982; Detsch ve diğ., 1990; Ohkawa ve diğ., 1986; Chudacek, 1995).



Şekil 2.4 Su jeti tipleri (Detsch ve diğ., 1990).

2.3. Türbülanslı Bir Su Jetinin Difüzyonu

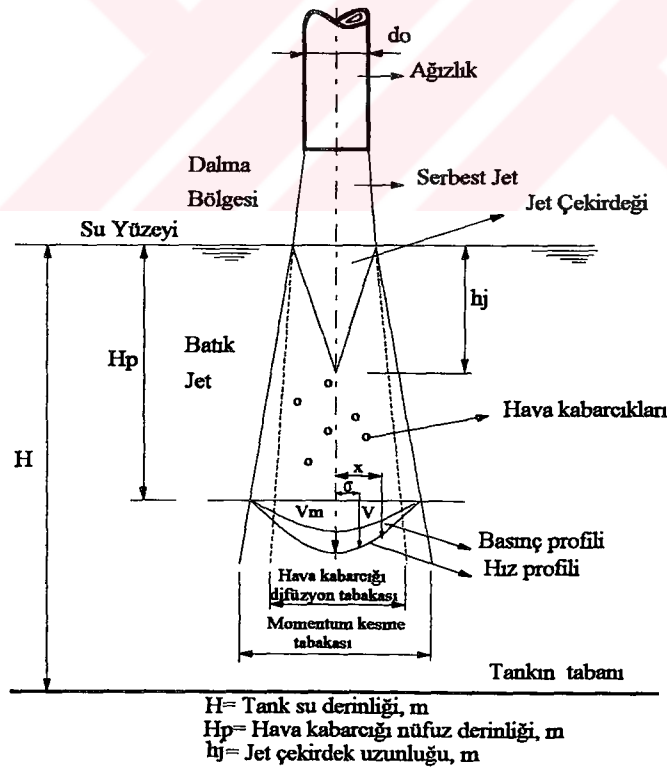
Dairesel veya farklı kesite sahip bir boşaltım ağzından çıkan türbülanslı serbest jet, çevresindeki havayı da beraberinde sürükleyerek yoluna devam eder. Jet, durgun bir su tankına daldığı zaman gerek jetin serbest hali ve gerekse durgun su yastığı içindeki hareketi esnasında; jetin çevresi ile sürtünmesi hacimsel akısını artırır. Buna mukabil, jet hızında salınımlar meydana gelir.

Jet ile çevresindeki akışkanın sınırı stabil değildir. Sınır boyunca yüksek kayma gerilmeleri yer alır ve jetten çevresindeki su ortamına momentum, ısı ve kütle transferi olur.

Jet içinde çekirdek olarak isimlendirilen bir bölge bulunur (Şekil 2.5). Çekirdeğin sınırı tamamıyla doğrusaldır. Çekirdek içindeki hız, jetin durgun suya dalma esnasındaki jet hızına (V_j) eşittir ve bütün jet bölgesinde hidrostatik basınç dağılımı uniformdur. Çekirdek bölgesinin dışında jet eksenine dik yöndeki hız ve basınç dağılımı profilinin Gauss ihtimal fonksiyonuna uyduğu saptanmıştır. Hız ve basınç dağılımı profili aşağıdaki denklem ile verilmektedir (McKeogh ve Ervine, 1981).

$$\left(\frac{V_x}{V_m}\right) = e^{\left(-x^2/2\sigma_i^2\right)} \quad (1)$$

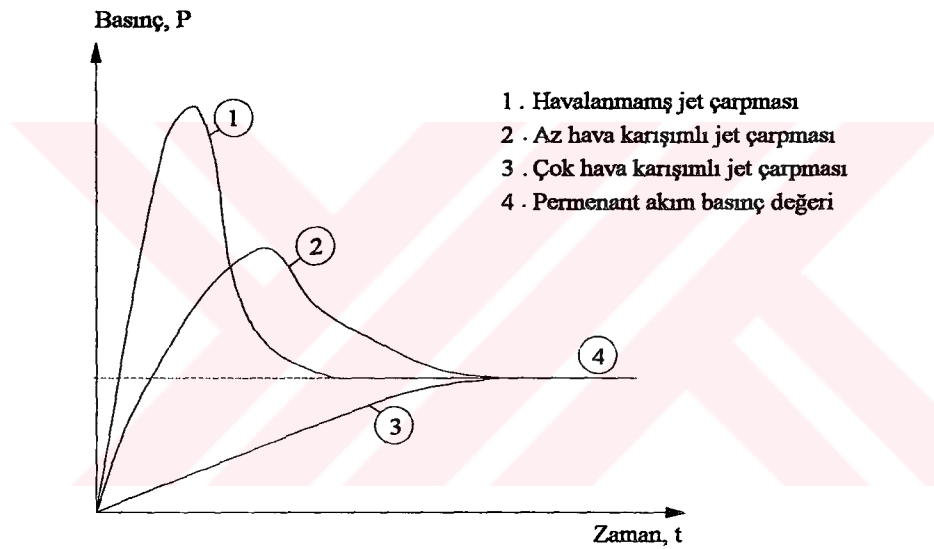
Burada, (V_x) ile jetin giriş noktasından herhangi bir y uzaklığında ve jet eksenine dikey (x) mesafesindeki hız ; (V_m) ile aynı y uzaklığında jet eksenindeki hız ve (σ_i) ile standart sapma gösterilmiştir. Standart sapma deneysel olarak bulunmaktadır.



Şekil 2.5 Durgun bir su tankına dalan serbest jetin teorik görünümü (Albertson ve diğ., 1948; McKeogh ve Ervine, 1981; Cumming ve Chanson, 1997b; Chanson ve Brattberg, 1998).

Su jetleri hava ortamından geçerken beraberinde sürüklediği hava ile karışır. Su-hava karışımı serbest jet, tank su yüzeyine çarptığı zaman bünyesindeki havanın sıkışabilme özelliğinden dolayı jet çarpma basıncında çok önemli ölçüde azalmalar olur. Çünkü, hava karışımı, serbest jetin havalanma oranına göre çarpma basıncı darbesini söndürmektedir.

Su jeti, tanktaki su yastığını deldikten sonra tank (veya havuz) tabanına kadar ulaşmaktadır. Su derinliği arttıkça basınç maksimumları küçülmekte ve basınç etkisi zaman içinde yayılmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Su-hava karışımı serbest jetin havalanma durumuna göre zamana bağlı olarak basınç değişimleri

Jet, su tankı derinliği (H) boyunca ilerlerken difüzyon olayı yer almaktadır ve tank tabanına etki eden maksimum dinamik basınç ;

$$P_{\max} < (g \cdot V_j^2) / 2 \quad (2)$$

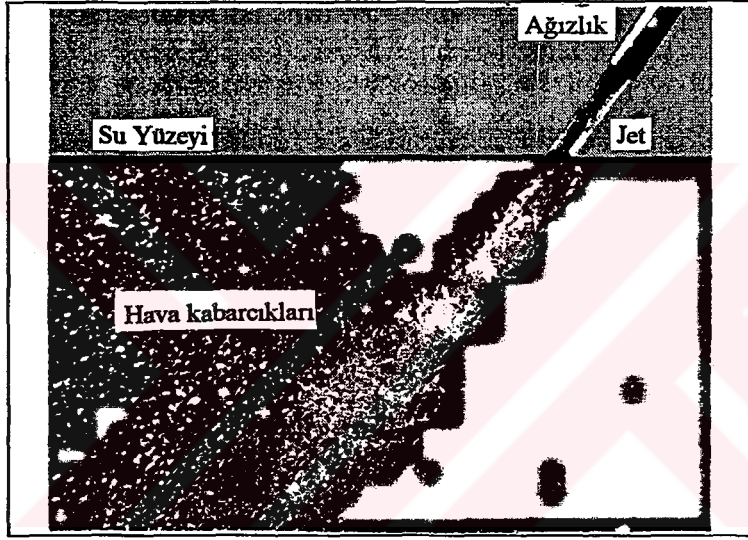
denklemleri ifade edilmektedir.

H derinliğinin küçük olması halinde, eğer jetin çekirdek boyu tabana ulaşacak uzunlukta ise dinamik basınç, $(g \cdot V_j^2) / 2$ olmaktadır (McKeogh ve Ervine, 1981),

2.4. Su Jeti İle Havalandırma Sisteminin Mekanizması

McKeogh ve Ervine (1981) su jetlerinin türbülans seviyesine bağlı olarak hava iletimi için üç tip mekanizma ileri sürdüler.

Hava tabakası içinden geçerek su tankına dalan serbest su jeti, havanın önemli bir miktarını tanktaki su kütesine iletir. İletilen hava, hava kabarcığı şeklinde dağılım gösterir ve bir ara yüzey alanında batık iki fazlı (su-hava kabarcığı karışımı) bir bölge oluşturur. Hava kabarcıkları, havalanmış batık bölge içinde bir miktar tutulduktan sonra yüzeye doğru yükselmeye başlar (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Bir su jetinin su tankına serbest olarak dalması, su ortamındaki akım modeline batık jet olarak dönüşümü ve hava kabarcığı transferi

Jet ile iletilen havanın, sürekli olarak su fazına transfer olması ve havalanmış bölgeden hava kabarcığı şeklinde yüzeye doğru yükselerek su kütesinden ayrılması esnasında havalandırma hacim sabit kalmaktadır (McKeogh ve Ervine, 1981).

Yüksek bir hızla durgun haldeki havuz yüzeyinden derinlere doğru dalan jet, çarpma basıncının bir sonucu olarak; havuz içinde bir akım oluşturur. Jetin sahip olduğu momentumla tanktaki su kütesine çarpması sonucu su yüzeyinde makaslama ve normal gerilmeler meydana gelmektedir. Böylece, jetin süreklilik gösteren hareketi sonucu

yarılan havuz su yüzeyinden hava transfer olmakta ve makaslama gerilmeleriyle su içerisindeki hava çok küçük kabarcıklara ayrılmaktadır (Chudacek, 1995).

Hava iletim mekanizmaları, tanktaki su kütlesi içerisinde havalanan bölgenin karakteristiklerini tayin etmek için önemlidir.

Hava iletim mekanizmaları aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (McKeogh ve Elsawy, 1980).

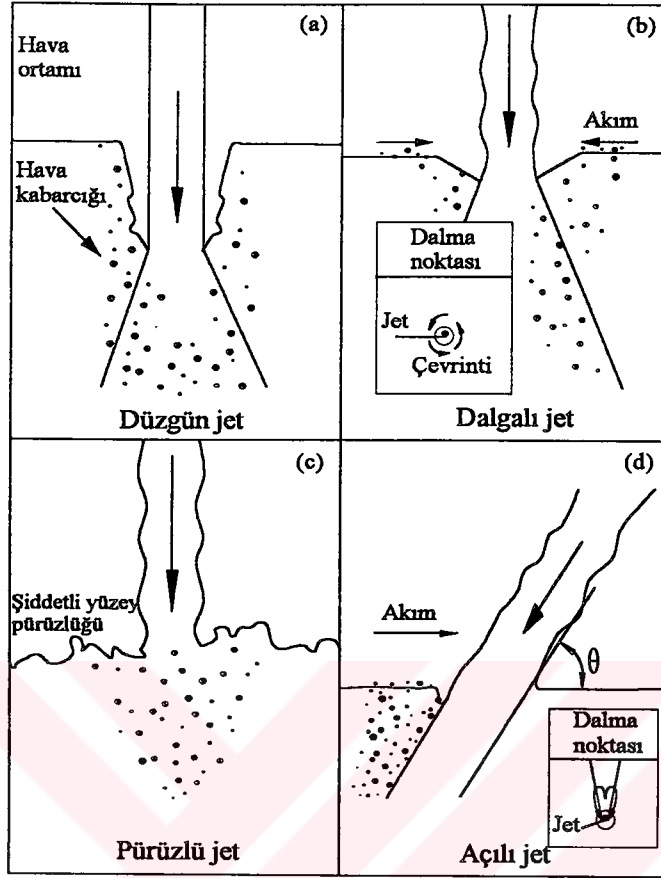
- i) Halkalı titreşim mekanizması
- ii) Çevrintili (vortex) akım mekanizması
- iii) Türbülanslı borulanma mekanizması
- iv) Dalmalı iletim mekanizması

Bu mekanizmaların bir tanımlaması şekil 2.8 a-d'de görülmektedir. Halkalı titreşim mekanizmasında jeti çevreleyen sınır tabakasında hareket eden hava bir su tankı yüzeyine çarpmakta ve su yüzeyi ile jetin dış çevresi arasında iç-dış bükey depresyona (titreşim) sebep olmaktadır (Şekil 2.8a). Bu tip iletim mekanizması jetin sadece laminar olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Bununla beraber jetin laminar özellikleri sadece su jetinin ağırlık çapına değil aynı zamanda hava ve su Reynolds sayılarına da bağlı olduğundan bu tip iletim mekanizmasının meydana geldiği Reynolds sayılarının tam olarak tanımlanması güçtür.

Jet karakteristikleri laminar ve türbülanslı şartlar arasındaki geçiş bölgesinde olduğu zaman, aralıklarla oluşan çevrinti mekanizması meydana gelmektedir. Bu durumda tank su yüzeyinin baskılanması jetin dış çevresi etrafında oluşmaktadır (Şekil 2.8b). Bu olay, aşağı doğru olan jet akımı ve jetin çevrelediği sınır tabakası ile iletilen hava akımının bir basınç oluşturması sonucu meydana gelmektedir.

Bu nedenle, oluşan çevrinti radyal bir akıma sebep olmaktadır. Bu iletim mekanizmasında, türbülans seviyesinin $1 < t < 1.5$ olduğu gözlemlenmiştir (McKeogh ve Ervine, 1981).

Türbülanslı bir jet, tanktaki su yüzeyine çarptığı zaman yüzey üzerinde büyük düzensizliklere sebep olur (Şekil 2.8c). İletilen hava, su tankı içinde hava kabarcıkları halinde yayılır. Bu şartlarda, türbülans şiddeti 2 'den daha büyük olmaktadır.



Şekil 2.8 Farklı türbülans şiddetine sahip jetlerle hava transferine ait mekanizmalar (McKeogh ve Elsawy, 1980)

Şekil 2.5d’de ise belirli bir çarpma açısı (θ) ile serbest su yüzeyine çarpan türbülanslı bir jetin hava iletim mekanizması gösterilmiştir.

Su jeti ile havalandırma sisteminde meydana gelen transfer olayının en önemli etkenlerinden biri batık havalanma bölgesinin kompozisyonu ve büyüklüğüdür. Jet havuz yüzeyine çarptığı zaman iletilen hava (Q_A) jet akımı ile taşınır ve havuz içinde bir alan boyunca yayılır. Havalanan iki fazlı bölgenin fiziksel kompozisyonu şu değişkenlere bağlı olmaktadır.

i) Jetin türbülans şiddeti (jet yüzey pürüzlülüğü) : Şekil 2.8’de hava iletimi için verilen mekanizmaların her biri farklı bir iletim modeli oluşturur. Bu mekanizma tipleri jetin türbülans şiddetine yani jet yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır.

ii) Jet uzunluğu : Ağızlık çıkış noktası ile jet çarpma noktası arasında kalan mesafedir. Bu parametre, iletilen havanın miktarını ve su kütlesi içindeki dağılımını etkilemektedir.

iii) Jet çapı ve hız : Jetin hız ve çapına bağlı olarak değişen momentum, hava iletim miktarı ve iki fazlı akım bölgesinde havanın nüfuz derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bütün bu parametreler ile havalanan bölgenin şekil ve kompozisyonu etkilenmesine rağmen, türbülans seviyesi veya jet pürüzlülüğü en kritik rolü oynar. Jet tarafından bir su kütlesine iletilen havanın oranı, mekanizması ve dağılma uzunluğu gibi yüzey stabilitesini etkileyen temel faktör türbülans şiddetidir. Düşük türbülans şiddetine sahip jetlerin ($t < \%1$) havuz yüzeyine çarpma noktasında elde edilen iletim modelinde, iletilen hava kabarcıklarının oluşturduğu hacim bir koni şeklinde tanımlanmaktadır (McKeogh ve Ervine, 1981).

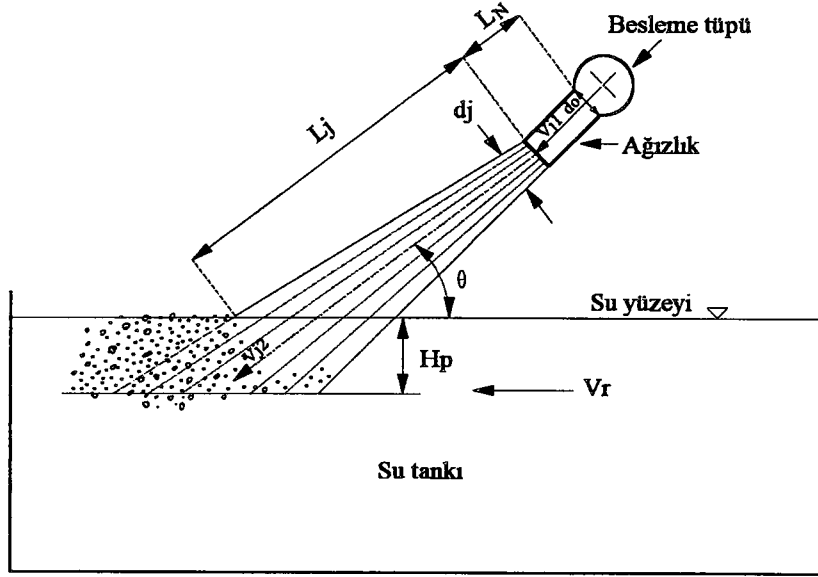
Jetin türbülans seviyesi kritik bir değeri aştığında, hava iletim modeli değişmektedir. Difüzyon bölgesi içindeki ortalama hava konsantrasyonu büyük oranda artar. Bu durumda hava kabarcıklarının nüfuz derinliği büyük oranda azalma gösterir.

2.5. Temel Hidrodinamik Özellikler

Su jeti ile havalandırma sisteminin temel hidrodinamik özellikleri şunlardır.

- i) Jet ağızlığı, jet çapı (d_o)
- ii) Jet hızı (V_j)
- iii) Jet uzunluğu (L_j)
- iv) Jet çarpma açısı (θ)
- v) Jet yüzey pürüzlülüğü (ϵ)
- iv) Hava kabarcığı nüfuz (penetrasyon) derinliği (H_p) - kabarcık şekli
- vii) Karıştırma karakteristikleri

Bu temel hidrodinamik özellikler Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



d_o = Ağızlık çapı, m

d_j = Jetin herhangi bir noktadaki çapı, m

H_p = Hava kabarcığı nüfuz derinliği, m

L_j = Su jeti uzunluğu, m

L_N = Ağızlık uzunluğu, m

V_n = Ağızlık taki su hızı, m/s

V_j = Su jeti hızı, m/s

V_r = Su tankındaki hız, m/s

θ = Jet çarpma açısı, der.

Şekil 2.9 Su jeti ile havalandırma sisteminin temel hidrodinamik sistem parametreleri (Dijkstra ve diğ., 1979)

2.5.1. Jet Ağızlığı – Jet Çapı

Su jeti ile havalandırma sistemi bir sirkülasyon pompası ve buna bağlı olarak su jetlerinin elde edildiği ağızlık ünitelerinden oluşmaktadır.

Ağızlıklar, akışkanları belirli bir geometrik şekilde düzenleyerek akışkanın hızını ve statik basıncını değiştirme özelliği gösteren elemanlardır.

Bir ağızlığın temel amacı, potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürmektir. Bu enerji dönüşümünün en verimli düzeyde olması için akışkan akımının sağlandığı kesit ve doğrultudan ağızlık ünitesine geçiş durumunda kesit alanı değişiminin ani ve düzgün olarak yapılması gerekir. Yani, ağızlık ünitesindeki enerji kayıplarının minimum tutulması sağlanmalıdır.

Ağızlık çıkışında toplam hız dağılımını etkileyen temel faktörler (hız ve akışkan özellikleri sabit olmak üzere);

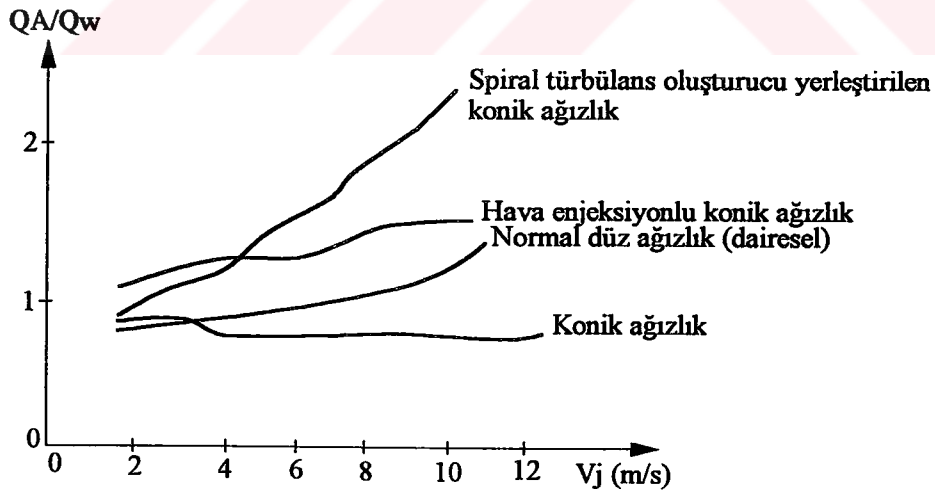
- Ağızlık uzunluğunun, ağızlık çapına oranı (L_N/d_o)

- ii) Ağızlık içindeki akımın doğrultusu
- iii) Ağızlık cidar yüzeyinin düzgünlüğüdür.

Bu faktörlerin genel bir ağızlık performansı üzerinde etkisi olduğu düşünülür (McCarty ve Molloy, 1974) .

Su jetlerinin havalandırma mekanizması üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda araştırmacılar genel olarak dairesel kesitli ağızlıklar üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Bunun yanında farklı ağızlık tasarımlarına ait çalışmalar da mevcuttur.

Van de Donk (1981) ağızlık tasarımının iletilen hava miktarı(Q_A) ile jet debisine (Q_w) bağlı olarak ifade eden hava iletim oranı (Q_A/Q_w) üzerindeki etkisini araştırdı. Ağızlık uzunluğu nispeten kısa olan ($L_N/d_o=2.2-22$) konik ağızlıklar üzerinde çalıştı. Fakat, hava iletimi üzerinde ağızlık tipinin etkisini yorumlamaya yetecek kadar sonuç elde edemedi. Bununla birlikte, artan jet hızlarında tipik dairesel ağızlıkların hava iletim miktarları, konik ağızlıklara göre yükselme gösterirken; konik ağızlıklarda sabit kalmaktaydı. Çalışma şartlarında, jet hızı (V_j)=2.0-10.0 m/s, ağızlık çapı (d_o)=0.01- 0.1 m ve jet uzunluğunun ağızlık çapına oranı (L_j/d_o)=2.5-100 arasında idi. Şekil 2.10'de 0.03 m çapındaki konik ağızlıklardan elde edilen deney sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Farklı ağızlık tiplerinin hava iletim oranı üzerindeki etkisi (Van de Donk, 1981)

Jet hızı (V_j) ile hava iletim oranı (Q_A/Q_w) arasında çizilen grafiğe göre basit bir konik ağızlık için 2.0-10.0 m/s'lik hız aralığında hava iletim oranı sabit kalmakta iken

normal düz ağızlık ile su akımına az bir oranda (% 1-3) havanın enjekte edildiği konik ağızlıkta artış gösteren hava iletim oranlarına ulaşıldı. Ayrıca, konik ağızlık içerisine spiral türbülans oluşturunucuların yerleştirilmesiyle yine hava iletim oranı artış gösterdi (Van de Donk,1981).

2.5.1.1. Ağızlık Uzunluğunun Ağızlık Çapına Oranı (L_N/d_o)

Jet ağızlığı içinde türbülansın gelişimi ve ağızlık sonrası meydana gelen jetin davranışı ağızlık geometrisine bağlıdır. Ağızlık tasarımında, ağızlık uzunluğunun ağızlık çapına oranı (L_N/d_o) bir su jetinin karakteristiğini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Ağızlığın (L_N/d_o) oranı jet profili, kesme gerilmesi, statik basınç gradyanının gelişmesi ve jet yüzey şekli üzerinde büyük bir etkiye sahiptirler. Gerçekte, ağızlık uzunluğunun ağızlık çapına oranının (L_N/d_o) değişebilirliği jet yüzey pürüzlülüğünün kontrolünde kendini göstermektedir. Ağızlık uzunluğunun jet yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi Şekil 2.11’de gösterilmiştir (McCarty ve Molloy, 1974).

(L_N/d_o) oranının büyük olduğu ağızlıklarda hava iletiminde yükselmeye doğru bir meyil oluşur. Ağızlığın iç yüzeyine daha yakın olan akışkan partikülleri ağızlık cidarları üzerinde sürtünmeden dolayı daha düşük hıza sahip olur. Böylece, akım profili üniform olmayan bir profile dönüşür. Sınır tabakası akım şartları akışkan özelliklerine bağlı olarak laminer veya türbülanslı olur.

Eğer, (L_N/d_o) oranı optimum ise sınır tabakası kalınlığı ($d_o/2$) değerine ulaşmaktadır. Yani, sınır tabakası boru akımının tamamen meydana gelmesi sonucunda tüm tüpü doldurur. Tüp Reynolds (Re) sayısı akımın laminer kalması için yeterince düşük ise akım profilin tamamen meydana gelmesi için ihtiyaç duyulan (L_N/d_o) oranı;

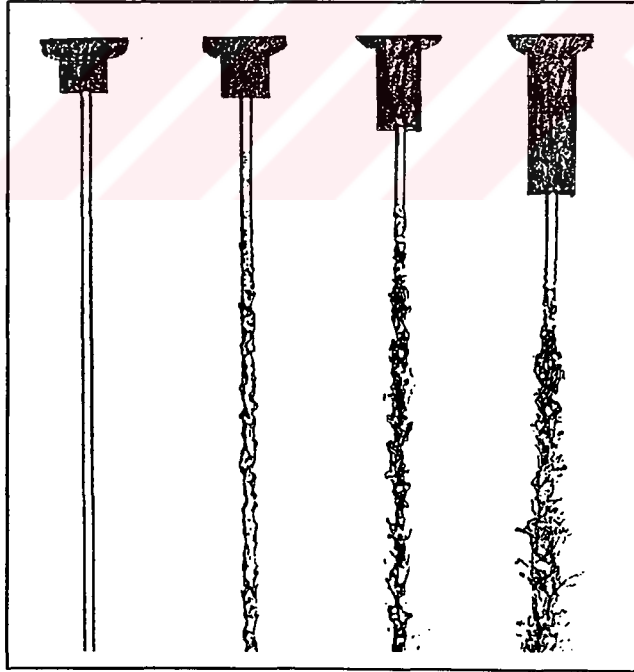
$$(L_N/d_o) = (0.057) Re \quad (3)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir.

Bu denklem ile bulunan (L_N/d_o) değerlerinden daha büyük değerler için ağızlık çıkışındaki hız profili üniform kalmaktadır. Bu kriter, jet başlangıcında akım şartlarını standart hale getirmek için jet stabilitesi üzerinde yapılan çalışmalarda oldukça sık kullanılmaktadır.

Bununla birlikte, kesme gerilmesi ve statik basınç gradyanı; ağızlık uzunluğunun ağızlık çapına oranının $(L_N/d_O)=15$ olması halinde tamamen gelişim göstermektedir. Bu suretle, ağızlık çapı $(d_O)=2$ mm ve ağızlık uzunluğunun ağızlık çapına oranı $(L_N/d_O)=50$ olan ağızlıklardan elde edilen jetlerde yüksek türbülans seviyeleri kaydedilmiştir. Buna rağmen, (L_N/d_O) oranı 15'den daha büyük ağızlıklarda iletilen hava akımının hızında önemli ölçüde farklılık olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle, hava iletimini bu noktadan itibaren etkileyecek parametre jet uzunluğu olarak karşımıza çıkmaktadır (Kumagai ve Endoh, 1983).

Su jeti ile havalandırma sisteminin pratik uygulamaları göz önünde tutulursa, sıvı besleme kaynağı ve borulardaki kayıplar veya biyoreaktörlerin yapısal sınırlamaları büyük (L_N/d_O) oranına sahip uzun ağızlıkların kullanımına imkan vermez. Örneğin, 2 mm çapındaki bir ağızlık dikkate alındığında; (L_N/d_O) oranının 50'den daha büyük değerlerini sağlayan ağızlık uzunluğunun 1 m'den daha fazla olması gerekir. Görüldüğü gibi uzun ağızlıkların büyük (L_N/d_O) oranları pratikte kullanışsızdır (Ohkawa, 1986).



Şekil 2.11 Ağızlık uzunluğunun jet yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi (McCarty ve Molloy, 1974).

2.5.1.2. Ağızlık Sayısının Etkisi

Tek ağızlıklı jetler, çift ağızlıklı jetlerden daha fazla kütle transferi ve nüfuz derinliği temin etmektedir. Buna mukabil en uygun jet yerleşimi ile çift ağızlıklı jetler düşey jetlerden daha fazla oksijen transferi ve daha kısa sıvı karışım zamanı temin etmektedir. Bölüm 2.1.2 - Şekil 2.2’de verilen çift ağızlıklı bir jet karıştırıcının (mikser) ağızlık yerleşimi buna örnek olarak verilebilir (Tojo ve diğ., 1982).

Van de Donk (1981) ve Tojo ve diğ.(1982) çeşitli kütle transfer sistemleri üzerinde çalıştılar. Van de Donk (1981) açılı çift jetlerin kullanıldığı bir sistem üzerinde deneysel çalışmalar yaptı. Sistemde ağızlık çapı (d_o)=6mm, jet hızı (V_j)=5 m/s (sabit), jet uzunluğu (L_j)=0.20 m ve çift ağızlıklı jetlerin ara mesafeleri 2-6 cm olarak değişmekteydi. Her bir jet için oksijen transfer katsayısı (k_{La}) değerleri jetlerin ara mesafelerinin artmasına oranla önemsiz bir azalma gösterdi.

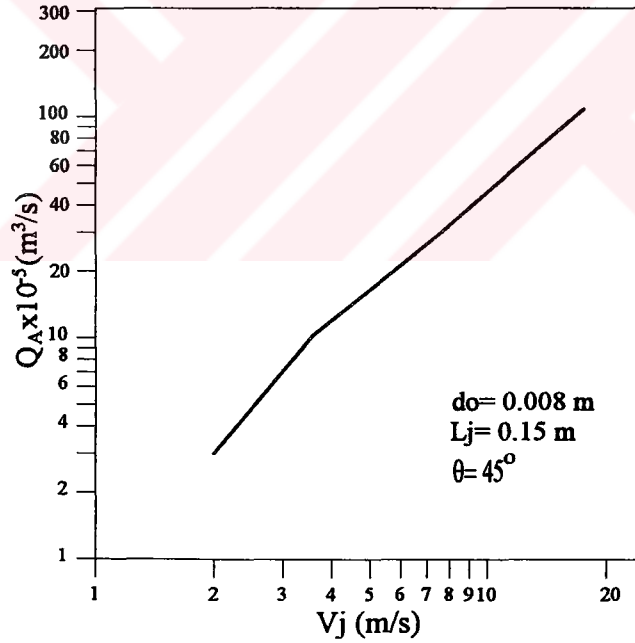
2.5.2. Jet Hızı (V_j)

Dalmalı jet akımları üzerinde yapılan gözlemler sonucu kritik bir hız değeri üstünde tank su yüzeyine çarpan jetlerin hava ilettiği gözlemlenmiştir. Türbülanslı su jeti için bu değer yaygın olarak 1 m/s olarak tanımlanmaktadır. Bu kritik değer jet yüzeyi üzerindeki dalgalanma derecesinden etkilenmektedir (Ervine ve diğ., 1980; Sene, 1988). Türbülans şiddetine bağlı olarak hava iletimi için minimum jet hızları Tablo 2.1’de verilmiştir.

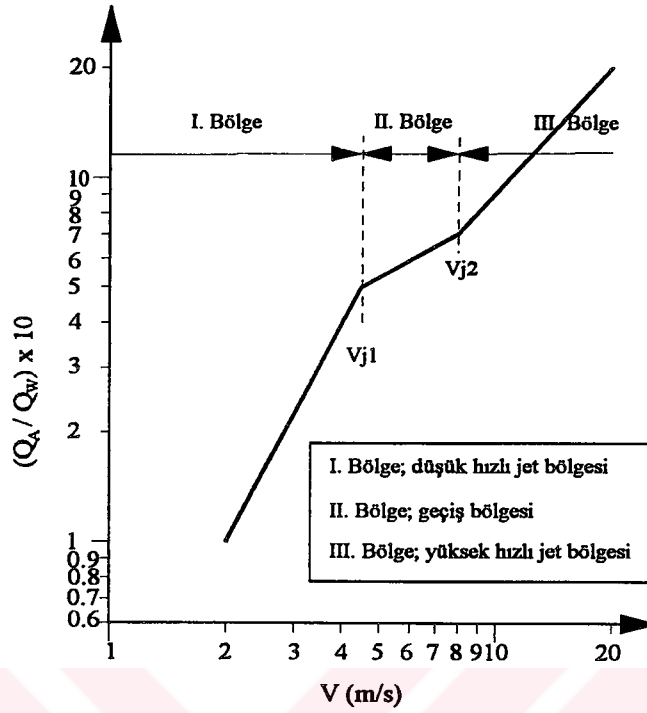
Tablo 2.1 Hava iletimi için jet türbülans şiddetine bağlı olarak değişen minimum jet hızları (McKeogh ve diğ., 1981)

Türbülans Şiddeti (t), %	$V_{j(min)}$, m/s
0.3	3.6
1.5	2.5
3.0	1.0
8.0	0.8

Hava iletim miktarları, jet hızının artan değerlerinde artış göstermektedir (Şekil 2.12). Bunun nedeni jet akımındaki momentum artışları, tank su yüzeyi ile çarpan jet akımı arasındaki kontak çevre yüzeyinin artması ve jet yüzey pürüzlülüğündeki artışlarla açıklanabilir (Ohkawa, 1986). Hava iletim miktarı (Q_A) ile jet hızı (V_j) arasında çizilen eğrinin geçiş noktalarını belirlemek için hava iletim oranı (Q_A/Q_w) ile jet hızı (V_j) arasında bir grafik çizilir. Jet hızı, hava iletim oranını artırmakta ve farklı üç hız bölgesine ayırmaktadır (Şekil 2.13). Burada, hava iletim oranı (Q_A/Q_w); iletilen havanın su debisine oranıdır. Bu oran, dalmalı su jetleri ile havalandırma sistemlerinde havalandırıcı performansının bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu oran, bütün hava kontrollü akımlarda oldukça sık kullanılmaktadır. Fotoğraf çekimleriyle yapılan gözlemler sonucunda jet hızının (V_j)=4.5 m/s'nin altındaki değerlerinde hava iletimi çok düzensiz olmaktadır (Van de Sande ve Smith, 1973).



Şekil 2.12 Jet hızı ve hava iletim miktarı arasındaki ilişki
(Van de Sande ve Smith, 1973; Ohkawa, 1986)



Şekil 2.13 Jet hızı ve hava iletim oranı arasındaki ilişki

Ohkawa (1986) jet hızı (V_j) ve hava iletim oranı (Q_A/Q_W) arasında çizilen grafiğin kırılma noktalarındaki hızları, dairesel kesitli ağızlıklar için ağızlık çapı (d_o)=0.008-0.020 m, ağızlık uzunluğunun ağızlık çapına oranı (L_N/d_o)=4.9-6.5, jet uzunluğu (L_j)=0.03-0.15 m ve jet çarpma açısı (θ)=30-60° arasında olmak üzere aşağıdaki denklemler ile ifade etmektedir.

$$V_{j1} = 8.40 \cdot 10^{-1} d_o^{-0.29} L_j^{-0.22} (\sin \theta)^{0.21} \quad (4)$$

$$V_{j2} = 1.85 d_o^{-0.24} L_j^{-0.20} (\sin \theta)^{0.21} \quad (5)$$

Yüksek hızlı jetlerle hava iletimi daha düzenli olmakta ve daha ince hava kabarcıkları elde edilmektedir (Van de Sande ve Smith, 1972,1974; Evans, 1990; Chudacek, 1995).

Yüksek hızlarda hava iletim mekanizması ile ilgili olarak Sene (1988) tank su yüzeyi üzerinde hava kabarcıklarının oluşturduğu köpük yapısındaki tabakayla nüfuz eden temel akımın temas etmesi sonucu hava iletiminin büyük oranda gerçekleştiğini ileri sürdü. Bu mekanizmaya göre jet çarpma sonucu sıçrama göstererek su kütlesine

dalmakta ve bir dalga hareketi sonucu olarak köpük yapısındaki yarıklardan hava nüfuz ederek köpüklenmenin oluşturduğu akım boyunca temel su kütlesi içine hava iletilmektedir.

Burada, baskın olan mekanizmanın tayinindeki temel faktör; jetin çarpma açısı olarak gözükmektedir. Düşük dalma açılarında yüksek köpüklenmeler olduğundan iletilen hava miktarlarında artış olmaktadır. Dik dalma açılarında; dağılan akımlar nispeten sakin olduğundan köpük tarafından hava iletimi muhtemelen daha az önem taşımaktadır.

Yüksek hızlı jetler sıklıkla hava sürtünme kuvvetlerine maruz kalarak kısmen yarılr. Jetin uzunluğu fazla ise hava sürtünme kuvvetleri nedeniyle belirli bir mesafeden sonra dağılmalar başlar.

Jette oluşan yüzey türbülansları ve dalgalanmalar ağızlık tasarımına bağlı olarak (L_N/d_0) oranının 20'den yüksek olan artışlarında fazlalaşmaktadır.

Yüksek hızlara sahip jetler, nispi olarak sıkı tanklarda hava kabarcıklarını tank tabanına kadar ulaştırarak tüm havuz hacminde karışımın homojenliğini sağlamaktadırlar.

2.5.3. Jet Uzunluğu (L_j)

Jet uzunluğu, ağızlık çıkış noktası ile tank su yüzeyi arasında kalan mesafe olarak tanımlanmaktadır.

Jet uzunluğunun artışına bağlı olarak jetin potansiyel enerjisi de arttığından kütle transferinde artış olmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda jet uzunluğunun ağızlık çapına oranı (L_j/d_0)=10 değerinde optimum bulunmuştur. Oksijen transfer katsayısı (k_{La}) bu oranda maksimuma ulaşmakta ve sabit kalmaktadır (Tojo ve diğ., 1982).

2.5.4. Jetin Çarpma Açısı (θ)

Su jetinin tank su yüzeyine çarpma açısı temel olarak üç durumda etkili olmaktadır.

i) Hava iletim miktarı (Q_A) çarpma açısının (θ) azalan değerlerinde artış göstermektedir.

Bunun nedeni, çarpan jet akımının tank su yüzeyi ile yaptığı kontak yüzeyin artması olarak düşünülür (Van de Sande ve Smith, 1973; Ohkawa, 1986).

ii) Jetin çarpma açısı (θ) oksijen transfer katsayısını ($k_L a$) bir derece etkiler (Tablo 2.2). En yüksek oksijen transfer faktörleri düşey jetler ile elde edildi (Van de Sande, 1974; Van de Donk, 1981). Bununla birlikte, çarpma açısı değişiminin etkisi zayıftır. 90° , 60° ve 30° 'ye kadar olan açı değişimlerinde oksijen transfer faktörü % 10-20 nispetinde azalma göstermektedir. Ohkawa ve diğ. (1986) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda 45° ve 60° açılar için oksijen transfer katsayısı üzerinde jet çarpma açısının pratik olarak önemli bir etkisinin olmadığını tespit ettiler. Bunun aksine olarak, Tojo ve diğ. (1982) çift ağızlıklı jetlerle yaptıkları deneysel çalışmalara göre maksimum oksijen transferi katsayısının 60° 'lik çarpma açısında elde edildiğini ileri sürdüler. Su jeti ile havalandırma sisteminde jet çarpma açısı ile ilgili tasarım ve uygulamalarda Ohkawa (1986) 45° 'lik açı değerini seçti. Ayrıca, DSM (Hollanda Araştırma Merkezi) tarafından yapılan arıtma tesislerinde 45° 'lik açı proje açısı olarak esas alındı (Jennekens, 1975).

Tablo 2.2 Su jeti çarpma açısının (θ) oksijen transfer katsayısı ($k_L a$) üzerindeki etkisi
(Van de Sande ve Smith, 1975).

$L_j=0.20 \text{ m}, (L_N/d_o)=50$		Oksijen transfer katsayısı ($k_L a$)				
		Jet çarpma açısı (θ)				
$d_o(\text{mm})$	$V_j(\text{m/s})$	30°	45°	60°	75°	90°
10.00	2.1	0.7	-	0.8	1.0	1.0
10.00	3.0	1.2	-	-	1.6	1.8
10.00	3.6	1.9	-	-	2.8	2.7
10.00	4.0	-	-	2.5	-	3.0
10.00	4.4	3.0	3.2	-	3.9	3.8
10.00	4.9	-	-	4.1	-	4.6
10.00	5.3	4.5	-	-	5.0	5.2
10.00	5.6	-	-	5.2	-	5.8
10.00	5.9	-	-	5.7	-	6.3
10.00	6.0	5.8	-	-	6.4	6.8
10.00	6.8	7.2	7.7	7.2	-	7.5
10.00	7.5	9.3	9.4	-	-	10.5

Genel olarak çarpma açısının azalmasıyla hava iletimi artmaktadır. İletilen hava miktarının artması ile tank su hacmindeki hava kabarcıklarının bekleme zamanına göre kütle transferinin artması beklenmesine rağmen tablo 2.2'deki sonuçlara göre azalma olmaktadır.

iii) Sıvı karışımı üzerinde de çarpma açısının etkisi vardır. Karışım zamanının azaltılması jet gücünün arttırarak elde edilmesi mümkün olmasına rağmen, jet açısının değişimiyle daha küçük jet güçlerinde daha düşük karışım zamanı elde edilebilmektedir (Tojo ve diğ., 1982).

2.5.5. Su Jeti Yüzey Pürüzlülüğü (ϵ)

Bir su jetinin yüzey pürüzlülüğü, jetin türbülans şiddeti ile ilgilidir (McKeogh ve Elsaywy, 1980). Belirli oranda yüzey pürüzlülüğüne sahip türbülanslı jetler, düzgün türbülanslı jetler tarafından elde edilen hava iletimi miktarlarından daha fazla hava iletmektedirler. Bu başlıca, jet yüzey pürüzlülüğünün artmasından kaynaklanmaktadır.

Havanın bir bölümü jetin yüzey dalgalanması ve jeti kuşatan sınır tabakasından iletilmektedir. Araştırmacılar, yüksek hızlı fotoğraf çekimleriyle her bir jetin yüzey pürüzlülüğünü farklı jet hızı, ağızlık çapı ve türbülans seviyelerinde ölçmeye çalıştılar. Jet hızı ve jet çarpma yüksekliğinin artmasıyla jet yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Eğer, iletilen havanın büyük bir oranı jet yüzeyinin sinüs dalgalanması boyunca taşınıyorsa, hava iletimi miktarı (Q_A) dalgalanma alanının bir fonksiyonu olmaktadır (Şekil 2.14).

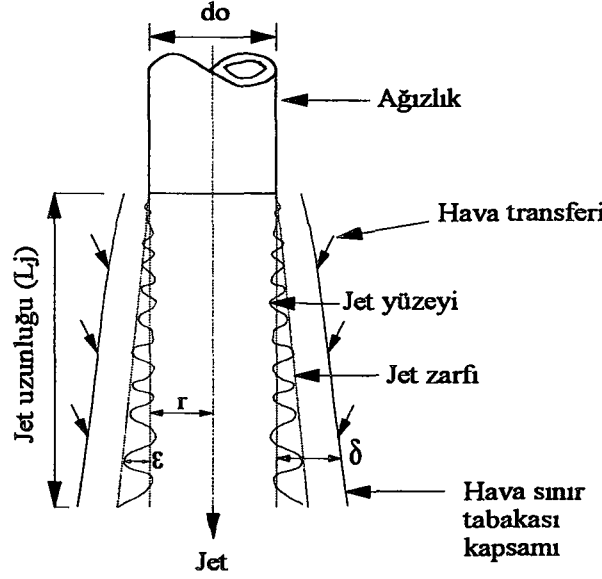
McKeogh ve Ervine (1981) jet yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olarak aşağıdaki ifadeleri verdiler.

Dalgalanan alan (A_d),

$$(A_d) = f [\pi (\epsilon + r)^2 - \pi r^2] \quad (6)$$

İletilen havanın debisi (Q_A),

$$(Q_A) = f [(\epsilon^2 + 2 \epsilon r) \pi V_j] \quad (7)$$



Şekil 2.14 Bir jetin sinüs dalga formu ve fonksiyonları (McKeogh ve Ervine, 1981)

Su debisi (Q_w),

$$(Q_w) = \pi r^2 V_j \quad (8)$$

Hava iletim oranı (Q_A / Q_w),

$$(Q_A / Q_w) = f [(\epsilon / r)^2 + 2(\epsilon / r)] \quad (9)$$

Burada, ϵ = Su jetinin yüzey pürüzlülüğü, m

r = Su jetinin yarıçapı, m

V_j = Su jetinin hızı, m/s

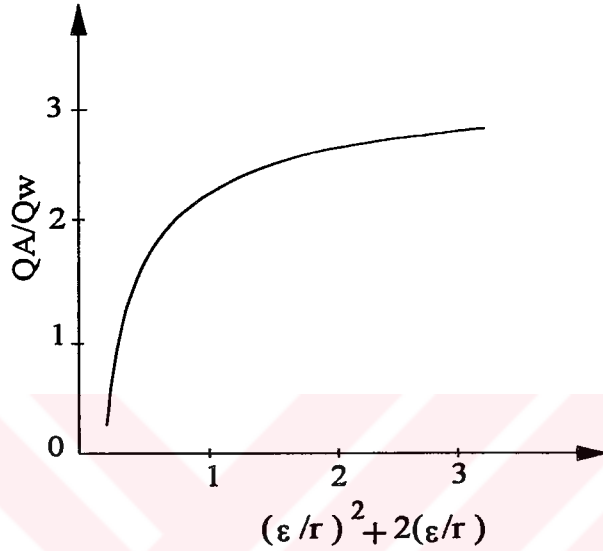
$[(\epsilon / r)^2 + 2(\epsilon / r)]$ bağıntısı ise jet yüzey pürüzlülük faktörünü temsil etmektedir.

Bütün türbülans seviyeleri için Hava iletim oranı (Q_A / Q_w) ile jet yüzey pürüzlülüğü faktörü $[(\epsilon / r)^2 + 2(\epsilon / r)]$ arasında çizilen grafikten (10) nolu denklemde belirtilen korelasyon elde edilmiştir (Şekil 2.15).

$$(Q_A / Q_w) = 1.4[(\epsilon / r)^2 + 2(\epsilon / r) - 0.1]^{0.6} \quad (10)$$

Jet hava sınır tabakası kalınlığı (δ), sadece jet uzunluğunun son % 10-20'lik kısmında önemli olmaktadır (McKeogh ve Ervine, 1981).

Yüzey pürüzlülüğü oranı, jet sistemlerindeki absorpsiyon (yüzeyde tutulma) için önemlidir. Jet yüzeyinin pürüzlülüğü, daha uzun jetler ve daha düşük yüzey geriliminde daha büyük olmaktadır. Yani, jet uzunluğu (L_j) ve jet yüzey gerilimi ile ilgili olarak Weber (We) sayısı arttığında jet yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (Bhunja ve Linenhard, 1994).



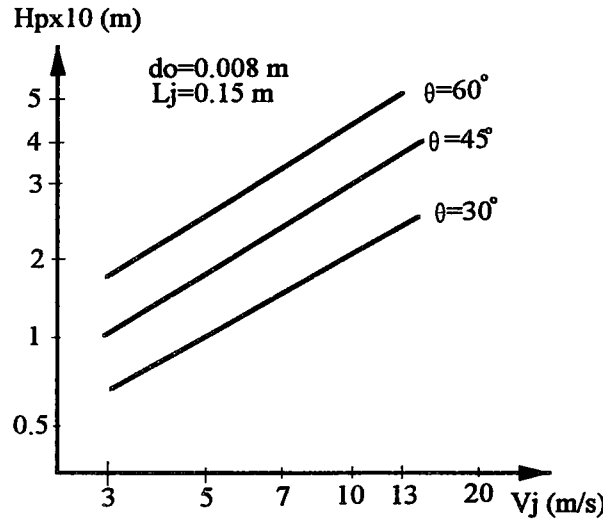
Şekil 2.15 Bütün türbülans seviyelerinde jet yüzey pürüzlülüğü (ϵ) ve hava iletim oranı (Q_A/Q_W) arasındaki ilişki (McKeogh ve Ervine, 1981).

2.5.6. İletilen Hava Kabarcıklarının Nüfuz (penetrasyon) Derinliği (H_p)

Hava kabarcıklarının nüfuz derinliği (H_p), tank su kütlesi içinde havalanan bölgenin en son noktası ile su yüzeyi arasındaki düşey mesafedir. Bu derinlik, yükselen hava kabarcıkları ve bu kabarcıkları çevreleyen su ortamı arasında oksijen transferinin artmasını sağlamaktadır.

Ağızlık çapı (d_o), çarpma açısı (θ) ve jet hızının (V_j) artan değerlerinde nüfuz derinliğinde (H_p) de artma yönünde bir meyil olmaktadır (Şekil 2.16).

Buna mukabil jet uzunluğunun (L_j) artan değerlerinde azalmaya doğru bir meyil göstermektedir. Jet çapı ve jet hızı ile nüfuz derinliğindeki artışlar jet momentumundaki artışlardan kaynaklanmaktadır. Jet uzunluğunun artması ile hava kabarcığı nüfuz derinliğinde meydana gelen azalmalar ise jet yüzey pürüzlülüğünün artması sonucu olarak artan yoğun hava sürtünmeleri nedeniyle jet hızı ve çarpma basıncındaki düşüşler ile açıklanmaktadır.



Şekil 2.16 Jet hızı ve hava kabarcığı nüfuz derinliği arasındaki ilişki (Ohkawa ve diğ., 1986)

Ayrıca, iletilen hava kabarcıklarının tank su yüzeyine doğru çıkma kuvvetlerindeki (kaldırma kuvvetleri) artışlarda buna bir neden olmaktadır (Ohkawa ve diğ., 1986).

Jetin tank su kütlesi içinde daha derinlere doğru nüfuz etmesi için tank su derinliği azaltılırsa, su kütlesi içinde tutulan hava kabarcıklarının hacmi artmaktadır. Optimum hava kabarcığı nüfuz derinliği tutulan hava hacminin maksimum olduğu bölgede oluşmaktadır (McKeogh ve Elsawy, 1980).

Hava kabarcığı nüfuz derinliğinin teorik olarak hesaplanmasında birkaç araştırmacı tarafından genel olarak (11) nolu denklem verilmektedir.

$$H_p = A(V_j d_o)^B (L_j / d_o)^C (\sin \theta)^D \quad (11)$$

Burada, $(V_j d_o)$ değişkeni, jet akımının momentumunu temsil eden tipik bir terimdir. Bu değişken ilk olarak Suci ve Smigelschi (1977) tarafından verilmiştir. Bu terim, nüfuz derinliğini teorik olarak hesaplamak için başarılı olarak kullanılmaktadır.

Denklemden verilen A, B, C ve D katsayıları deneysel olarak tayin edilmektedir. Jet uzunluğunun ağızlık çapına oranını ifade eden (L_j / d_o) değişkeni ise (ϵ / r) yani jet yüzey pürüzlülüğünün jet ağızlık yarıçapına oranı ile ilgili bir terimdir.

Ohkawa ve diğ. (1986) jet hızı $(V_j) = 2.0 - 13.0$ m/s, jet uzunluğu $(L_j) = 0.03 - 0.15$ m, jet ağızlık çapı $(d_o) = 0.008 - 0.020$ m ve jet çarpma açısı $(\theta) = 30 - 60^\circ$ olmak üzere

yaptıkları deney çalışmaları sonucu hava kabarcığı nüfuz derinliğini veren (12) nolu denklemi elde ettiler.

$$H_p = 5.50(V_j.d_o)^{0.73}(L_j/d_o)^{-0.26}(\sin \theta)^{1.11} \quad (12)$$

2.5.7. Hava Kabarcığı Dağılımının Karakteristikleri

Dalmalı su jetleri tarafından iletilen hava, hava kabarcıkları şeklinde tank su yüzeyi altına doğru yayılmaktadır. Dispersiyon ile yayılan hava kabarcıklarının iki ayrı bölgede şekillendiği görülür.

i) 1 mm'den daha küçük çaplarda ince kabarcıkların (primer) ihtiva edildiği konik profilli bölge

ii) İnce kabarcıkları (primer) kuşatan daha büyük çaplı kabarcıkların (sekonder) yükseldiği bölge

Hava kabarcıkları batık jetin momentumundan dolayı havuzun derinliğine doğru nüfuz eder. Maksimum nüfuz derinliğinde suyun kaldırma kuvvetleri jetin sahip olduğu momentum ile karşılaşır. Hava kabarcıkları su yüzeyine doğru yükselmek için serbest oluncaya kadar yanlardan kuşatılan hava kabarcıkları ile birleştiğinden kabarcık çapı büyümektedir.

Hava kabarcığı boyutları (çap) fotoğraf çekimleri ve kamera ile yapılan gözlemlerle tespit edilmektedir (Bin, 1971; Evans, 1992). Açıktır ki, bu yolla sadece büyük çaplı (sekonder) hava kabarcıkları ölçülebilmektedir. Van de Sande ve Smith (1975) hava kabarcıklarının boyutlarını fotoelektrik kapilarite metodunu kullanarak ölçtüler. Bu metot birkaç dakika içinde binlerce hava kabarcığını analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.

Genel olarak jet hızı ve ağızlık çapından bağımsız olarak büyük çaplı hava kabarcıkları için düşey ve açılı (meyilli) jetlerde yükselen serbest hava kabarcığı çapları 3-4 mm olmaktadır. Küçük çaptaki hava kabarcıkları ise 0.12-0.42 mm civarında olmaktadır (Bin, 1971; Ohkawa ve diğ., 1987; Evans ve diğ., 1992). Suci ve

Smigelschi (1976) küçük çaptaki hava kabarcıklarını 0.02-0.10 mm, Hara ve diğ. (1977) 0.13-0.33 mm olarak ölçtüler.

2.5.8. Karıştırma Karakteristikleri

Su jeti ile havalandırma sisteminde tank su kütlesinin karışma performansı sadece su içindeki hava kabarcıklarının dispersiyonunun bir sonucu olarak beklenmesine rağmen serbest jetin havuzdaki akım modeline batık jet olarak dönüşmesi de sebep olmaktadır. Jet hızının artmasıyla kazandığı momentum, hava kabarcıkları tarafından elde edilen kaldırma kuvvetlerini aşmıyorsa kadar hava kabarcığı nüfuz derinliği artmaktadır.

Nispeten sığ tanklarda yüksek hızlara sahip jetler, iletilen hava kabarcıklarını tank tabanına kadar ulaştırmakta ve tüm tank hacmine dağılarak karışımı temin etmektedir. Tank su kütlesinin karışım zamanı jet hızı, jet çarpma açısı ve su tankı büyüklüğüne bağlı olarak 150 saniyeden daha az olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalara göre bu karışım zamanında, hava kabarcığı nüfuz derinliğine bağlı olarak su hacmi $30 \times (H_p)^3$ 'ün altında olmalıdır (Ohkawa ve diğ., 1986).

Tojo ve diğ. (1982) yaptıkları deneysel çalışmalara göre açılı (meyilli) jetlerin düşey jetlere nazaran tank hacminin karışımında daha fazla verim sağladıklarını gözlemlediler.

2.5.9. Havalandırma Tankındaki Su Hızı (V_r)

Havalandırma havuzundaki su hızlarının artmasıyla havalandırma veriminde artış olmaktadır. Buna sebep olarak, tanktaki su hızının artmasıyla hava kabarcıklarının su içinde lokal hareketler yaparak uzun süre kalması gösterilmektedir

Havuzdaki su hareketi jetin çarpma açısıyla değiştirilebilmektedir. Havuz su hızları (V_r) 0.05-0.60 m/s arasında değişmektedir. Su hızı 0.05 m/s olduğunda havalandırma verimi % 100, 0.60 m/s'lik hızda ise % 120'lik bir lineer artış göstermektedir (Dijkstra ve diğ., 1979).

2.6. Dalmalı Su Jetleri Tarafından Hava İletimi

Bir gaz fazın diğer bir sıvı faz içerisine karşılıklı etkileşim sonucu olarak bir ara yüzey arasından nüfuz etmesine pratikte çevresel olduğu kadar endüstriyel seviyede de sıklıkla karşılaşılır. Bu olay; açık kanallar, şelaleler, dolu savaklar, orifis, sifonlar, boru kıvrımları ve benzeri hidrolik yapılarda gözlemlenebilir. Bu olayda, iletilen havanın bir su kütlesi ile karşılıklı etkileşimi söz konusudur (Avery ve Novak, 1978; Nakasone, 1987).

Dalmalı su jetleri tarafından elde edilen hava iletimi olayında temel rolü su jetleri oynar. Su jetleri tarafından elde edilen hava iletimi, birçok kimyasal, fermentasyon ve su-atık su arıtma metotlarında (örneğin; biyolojik arıtma, flotasyon işlemi ...) uygulama potansiyeline sahiptir.

Nehir, dere, çağılayan ve bentlerin tabii temizlenme işleminde jetler; hava iletimi, karıştırma ve su kütlesi içindeki hava kabarcıklarının dispersiyonunda önemli rol oynarlar.

Birçok araştırmacının gözlem ve çalışmalarından çıkan sonuç, dalmalı su jetleri tarafından hava iletiminin birçok değişkene bağlı olduğu ve jet hızıyla kontrol edildiğidir (Bin, 1993).

2.6.1. İletilen Hava Akımının Ölçüm Teknikleri

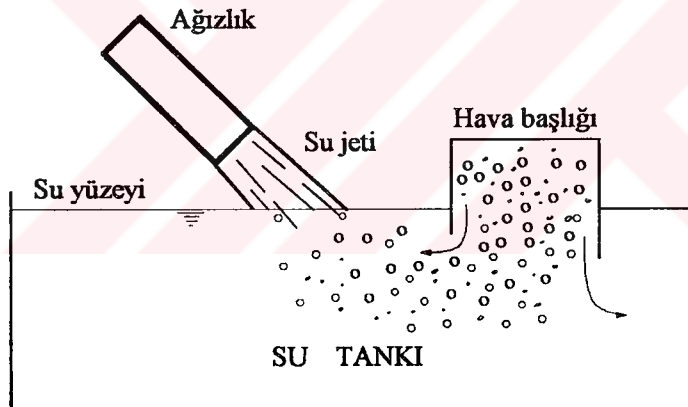
İletilen hava akımının ölçülmesinde temel olarak iki alternatif geliştirilmiştir. Birincisi, hava su tankı içerisine iletdikten sonra iletilen havanın yakalanması; ikincisi, iletilen havanın su jetinin dalma noktası etrafında tank yüzeyi üstünden uzaklaştırılmasıdır.

Belirli bir açı ile çarpan jetler için yapılan deneysel çalışmalarda, birinci alternatif olarak hava kabarcığı kapanları kullanıldı (Van de Sande ve Smith, 1972; McKeogh ve Ervine, 1981).

İkinci alternatif grupta ise dalma noktası etrafında tank yüzeyi üstündeki gazlı alan bir akım ölçüm aygıtı (orifis, rotametre, anemometre veya hacim-zaman okuyucuları) yardımıyla ölçülmektedir (Bin, 1993).

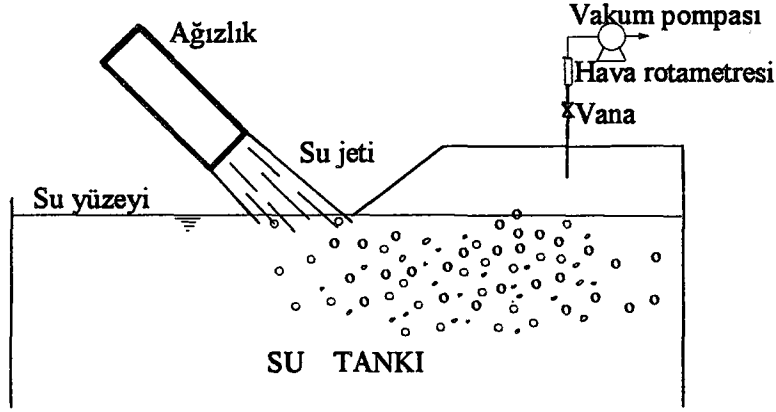
Bu iki alternatif doğrultusunda deneysel çalışmalarda üç tip ölçüm tekniği kullanılmaktadır.

i) Hava başlığı tekniği : Bu teknik ilk olarak Thomas (1982) tarafından kullanılmıştır. Araştırmacının kullandığı başlık 25 cm yüksekliğinde, 16 cm uzunluğunda ve 4.3 cm genişliğindedir. Başlangıçta başlık su ile doldurulur. Sonra ters çevrilerek ölçüm noktasına yerleştirilir. Başlığın alt kenarı su yüzeyinden yaklaşık olarak 0.5 cm altta olacak şekilde suya daldırılır (Şekil 2.17). Başlık ile jetin çarpma noktası arasında 1.0 cm'lik bir mesafe bırakılır. Jet tarafından tank su kütlesine iletilen hava kabarcığı serbest hale geçtikten sonra başlığa doğru yönelir ve başlık içerisinde birikmeye başlayarak başlıktaki su kütlesi ile yer değiştirir. Başlıktaki su tamamen boşalincaya kadar geçen zamana bağlı olarak başlık hacmini dolduran hava miktarı, sistemin ilettiği hava akımının debisini vermektedir (Sene, 1988).



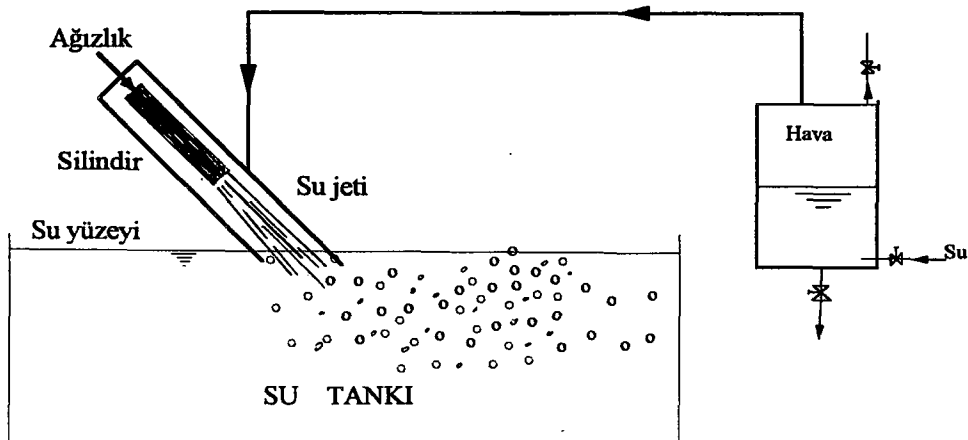
Şekil 2.17 Hava başlığı tekniği (Thomas,1982; Sene,1988)

ii) Hava kabarcığı tuzağı : Bu teknik Van de Sande ve Smith (1972) tarafından kullanıldı. Belirli bir açı ile çarpan jetler için yapılan deneysel çalışmalarda iletilen hava kapalı bir sistem içinde tutulduktan sonra bir hava toplama hücresinden hava vakum pompasıyla alınmaktadır. Vakumlanan hava miktarı pompa öncesi sisteme bağlı bir hava rotamettesinden okunmaktadır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Hava kabarcığı kapama tekniği (Van de Sande ve Smith, 1972)

iii) Kapalı ağızlık sistemi : Bu teknik Ohkawa ve diğ.(1986) tarafından kullanıldı. Sistem, başlangıçta içi hava dolu olan bir tank ve jet ağızlığının monte edildiği bir silindirden ibarettir (Şekil 2.19). Silindir tank yüzeyine tam olarak kapanacak bir şekilde yerleştirilmiştir. Silindire bağlı ağızlıktan çıkan su jeti silindir içinden geçtiği zaman tank içerisindeki havayı da beraberinde vakumlar. Hava tankı içerisinde hava vakumlandığı süre zarfında devrede olan su şebekesinden tanka su geçişi olur. Silindir içerisinde geçen jetin vakumladığı hava hacmi kadar su tank içerisine dolar. Tanka dolan su miktarı ölçülerek iletilen hava akımının debisi bulunur.



Şekil 2.19 Kapalı ağızlık sistemi (Ohkawa ve diğ., 1986)

2.7 Kütle Transferi

Su jeti ile havalandırma sisteminde kütle transferi farklı üç bölgeye ayrılmaktadır.

i) Atmosfer ortamından geçen türbülanslı serbest jetin hava ile viskoz sürtünmesi sonucu meydana gelen kütle transferi

ii) Serbest jetin havuz su yüzeyine çarpması sonucu serbest su yüzeyinde meydana gelen kütle transferi (jet çarpma noktası etrafında)

iii) Jet tarafından iletilen hava kabarcıkları ve havuz su kütlesi arasında meydana gelen kütle transferi

Bin (1977) tarafından yapılan çalışmalara göre toplam kütle transferi için tipik hidrodinamik şartlar altında birinci bölgenin kütle transfer dağılımındaki etkisi % 1'den azdır. İkinci bölgenin dağılımı havuz geometrisi (örneğin, dairesel) ve jet türbülansına bağlıdır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar ikinci bölgenin toplam kütle transferi dağılımındaki etkisi en çok % 1-2 olmaktadır.

Bu nedenle, ilk iki bölgenin kütle transfer dağılımı genellikle kütle transfer faktörünün deneysel olarak tayin edilmesi esnasında meydana gelen deneysel hatalar içinde mütalaa edilmektedir (Bin, 1993).

Ayrıca, Van de Donk (1981) üçüncü bölgede meydana gelen kütle transfer olayını çok ince disperse olan hava kabarcıkları ile kümeler halinde su yüzeyine doğru yükselen hava kabarcıkları arasında iki kısma ayırdı.

2.7.1 Oksijen Transferi

Su jeti ile havalandırma sisteminde meydana gelen kütle transferi olayında, iletilen hava kabarcıkları ile havuz su kütlesine oksijenin transferi sözkonusudur.

Oksijen su ortamında çok zor çözünebilen bir gazdır. Havalandırma işlemleri ile oksijenin suya geçişi ve su ortamında çözünmesi olayını anlamak önemlidir. Havalandırma ile oksijenin suya geçişi bir gaz transferi olayıdır. Gaz transferi, sıvı ve gaz fazlar arasında ve sıvı - gaz kütleleri ortak yüzeyinde meydana gelmektedir. Burada tahrik edici kuvvet, gaz fazında gazın kısmi basıncı; sıvı fazda ise ortamdaki oksijen konsantrasyonunun (c), doyumluk konsantrasyonundan (c_s) farkı yani ($c_s - c$) konsantrasyon gradyanıdır.

Oksijenin sudaki çözünürlülüğü difüzyon olayı ile açıklanmaktadır. Suda çözünebilen maddelerin su ile temas halinde olmaları yani ortak bir yüzeye sahip bulunmaları halinde, çözülmüş madde konsantrasyonu zamanla üniform hale gelmektedir. Bu denge olayı “difüzyon” olarak adlandırılır. Hiçbir etken (örneğin, karıştırma gibi) olmadan meydana gelen moleküler düzeydeki bu difüzyon olayının hızı çok düşüktür.

Derinliği sınırsız ve sabit bir su kütlesi ile temas halindeki bir gazın sıvı fazdaki gaz moleküllerinin difüzyonu neticesi ortaya çıkan kütle transfer hızı, Alman Adolf FİCK (1885) tarafından FİCK kanunu olarak bilinen;

$$\left(\frac{dm}{dt}\right) = -D.A.\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right) \quad (13)$$

denklemini ifade edilmektedir.

Burada, (dm / dt) = Kütle transfer hızı, g/s

m = Çözünen maddenin kütlesi, g

t = Zaman, s

D = Moleküler difüzyon katsayısı, m^2/s

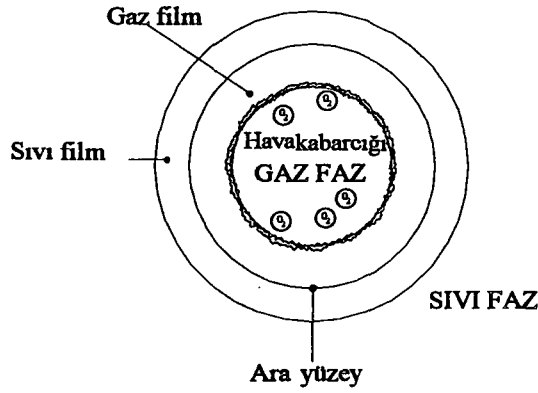
A = Temas yüzey alanı, m^2

x = Temas yüzeyinden itibaren mesafe, m

$(\partial c / \partial x)$ = Konsantrasyon gradyanı olarak ifade edilmektedir.

Gaz transferinin mekanizmasına teorik bir yaklaşım getirilmesi konusunda çeşitli teoriler ileri sürülmüştür. Bunlar arasında iki film, penetrasyon ve yüzey yenileme teorisi gibi yaklaşımlar belli başlılardır.

Bu yaklaşımlar arasında en çok kullanılan Lewis-Whitman'ın “iki film” teorisidir. Bu teori, gaz ve sıvı fazların temas yüzeylerinde iki film (gaz ve sıvı film) teşekkül ettiği varsayımına dayanmaktadır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 İki film teorisine göre gaz transferinin mekanizması

Gaz ve sıvı filmler, gaz fazın sıvı faz ortamına transfer olmasında dirençli tabakaları oluşturmaktadır. Gaz moleküllerinin gaz fazından sıvı fazına geçmesinde, sıvıda kolaylıkla çözünen gazlar (örneğin, su ortamında SO_2) esas direnci gaz filminden görürler. Sıvı içinde orta derecede çözünen gazlar her iki filmde önemli ölçüde geçiş mukavemeti ile karşılaşılır. Sıvı fazda az çözünen gazlar ise esas direnci sıvı filmde görmektedir.

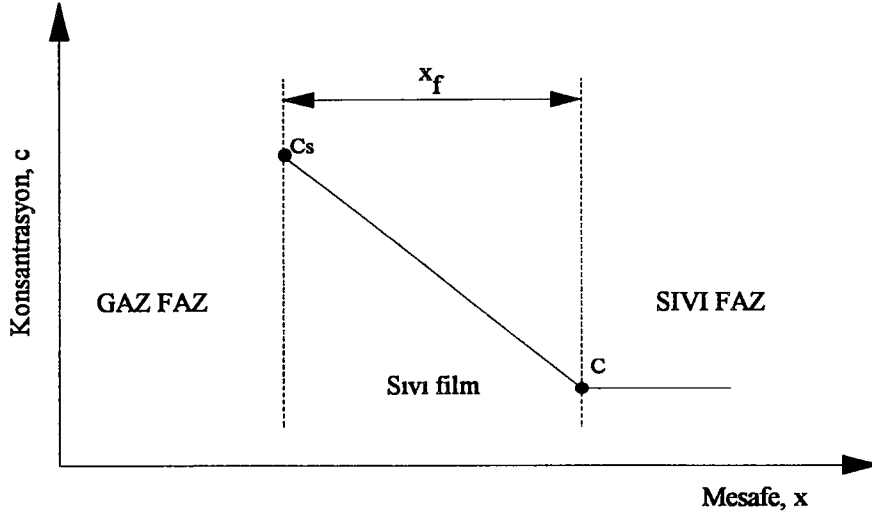
Oksijen moleküllerinin sıvı ortama geçmesi için iki kademede bu dirençli gaz ve sıvı filmlerini aşması gerekir. Oksijenin su ortamındaki çözünürlüğü çok azdır. Bu nedenle gaz filminin direnci sıvı film ile karşılaştırıldığında çok az olduğundan ihmal edilmektedir. Hızlı karıştırma ve havalandırma işlemleri ile hava kabarcıklarının çevresindeki dirençli sıvı film yırtılarak oksijenin su ortamına iletimi sağlanabilir.

Havalandırma işlemlerinde gaz transferi, esas direnci sıvı filmde görür. Bir sıvı film tabakasında oluşan oksijen transferinin sistematik görünümü Şekil 2.21’de verilmiştir.

Burada sıvı film kalınlığı, x_f , sıvı faz hacmindeki oksijen konsantrasyonu, c ve sıvı film arakesitindeki çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu değeri, c_s sembolleri ile ifade edilmiştir.

Sıvı film tabakasına Fick’in difüzyon denklemi uygulanırsa, $x=x_f$ için;

$$(dm / dt) = -D.A.(\partial c / \partial x_f) \quad (14)$$



Şekil 2.21 Bir sıvı film tabakasında oksijen transferinin şematik görünümü

olmaktadır. Denklemin her iki tarafı toplam su kütlesi hacmine bölünürse,

$$(1/V)(dm / dt) = -D.(A/V).(c_s - c) / x_f \quad (15)$$

olur. Denklem düzenlenirse,

$$(dc / dt) = (D/ x_f)(A/V)(c_s - c) \quad (16)$$

elde edilir. Burada, $(c_s - c)$ farkı oksijen eksikliğini ifade etmektedir.

Havalandırma ünitelerinde oksijenin su içindeki çözünürlüğünü kontrol eden faktör moleküler difüzyon katsayısından ziyade gaz transfer katsayısıdır. (D/ x_f) ifadesi yerine k_L gaz transfer katsayısı yazılırsa, ayrıca gaz ve sıvı fazlar arasındaki arakesit alanının (A) tespiti mümkün olmadığından (A/V) ifadesi a ile gösterilirse, denklem en genel halde;

$$(dc / dt) = k_L a (c_s - c) \quad (17)$$

ifade edilir. Gaz transfer olayında k_L ve a ifadeleri birlikte dikkate alınır.

$$\begin{aligned}
 \text{Burada,} \quad (dc / dt) &= \text{Konsantrasyon değişme hızı, mg / L / s} \\
 k_L a &= \text{Kütle transfer katsayısı, 1 / saat} \\
 c_s &= \text{Çözünmüş oksijenin su içindeki doygunluk kons.,} \\
 &\quad \text{mg / L (deney veya ortam koşullarında)} \\
 c &= t \text{ anında sudaki çözünmüş oksijen kons., mg / L} \\
 c_o &= t_o \text{ anında sudaki çözünmüş oksijen kons., mg / L} \\
 &\quad \text{(başlangıçta } c_o=0)
 \end{aligned}$$

ifade edilmektedir.

(17) nolu denklemin integrali alınırsa; oksijen transferi için en genel halde

$$\ln[(c_s - c_o) / (c_s - c)] = - k_L a \cdot (t_o - t) \quad (18)$$

denklemini elde edilir.

2.7.2. Oksijen Transfer Katsayısının ($k_L a$) Tayini

Bütün havalandırma sistemlerinde, havalandırma performansının tayini için tank su kütlesine birim zamanda verilen oksijen miktarının yani oksijenlendirme kapasitesinin (OC) bilinmesi gerekmektedir. Bu maksatla havalandırma tankları temiz su ile doldurulur. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu sıfırlandıktan sonra havalandırıcı çalıştırılarak tanktaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu artışlarının zamanla değişimi deneysel olarak belirlenir. Oksijen transfer katsayısının ($k_L a$) tayini için suların deokside edilmesinde (çözünmüş oksijen konsantrasyonunun sıfırlanması) en çok kullanılan metot sodyum sülfid yöntemidir. 1944 yılında Cooper ve arkadaşları tarafından bulunan bu yöntem oksijenin sodyum sülfid ile yükseltgenme ilkesine dayanmaktadır.

Suyun deokside edilmesinde kimyasal madde olarak sodyum sülfid (Na_2SO_3) ve katalizör olarak kobalt klorür (CoCl_2) kullanılmaktadır. Çözünmüş oksijen transfer katsayısının ($k_L a$) tayini için yapılacak deneysel çalışmalarda şu işlemler takip edilmektedir.

i) Lüzumlu teçhizatlar

- Oksijenmetre cihazı
- Termometre
- Kronometre
- Terazî
- Manyetik karıştırıcı

ii) Tayin edilecek parametreler

- Sıcaklık
- Zaman
- Çözünmüş oksijen konsantrasyonu

iii) Deneyin yapılışı

- Su tankı temiz su ile doldurulur
- Havalandırıcı çalıştırılır ve çözünmüş oksijen konsantrasyon değeri oksijenmetre cihazı ile ölçülür. Su sıcaklığı termometre ile kaydedilir.
- Su hacmi ve oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak su tankına miktarı belirlenen (hesap sonucu) sodyum sülfî ve kobalt klorür ilave edilir. Böylece, sudaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu sıfırlanmış olur.
- Havalandırıcı tekrar devreye alınarak, oksijenmetre cihazı yardımıyla sudaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu zamana bağlı olarak kayıt edilir.
- Oksijen transfer katsayısı ($k_L a$), analitik veya grafiksel olarak bulunur. Oksijen transfer katsayısı ($k_L a$), (18) nolu denklemden hesaplanmaktadır. Denklemden verilen $\ln[(c_s - c_o) / (c_s - c)]$ ifadesinin zamana bağlı olarak değişimini gösteren bir grafik çizilir. Grafikten elde edilen eğrinin eğimi, oksijen transfer katsayısını ($k_L a$) vermektedir. Bulunan sonuçlar, standart şartlara göre düzenlenir.

2.7.3. Oksijenlendirme Kapasitesi (OC)

Bir havalandırma sisteminin kapasitesi, birim zamanda ve birim hacimdeki su ortamına iletilen oksijen miktarı olarak tarif edilmektedir. Oksijenlendirme kapasitesi aşağıda belirtilen standart şartlara göre deneysel olarak tespit edilir.

- Deneyler temiz suda yapılmalı.
- Başlangıçta çözülmüş oksijen konsantrasyonu sıfır alınır ($c_o = 0$).
- Sıcaklık, 20 C° alınır (Amerika’da, 20 C°; Avrupa’da, 10 C°).
- Basınç değeri; 1 atmosfer (760 mm-Hg veya 101.3 kPa) alınır.

Havalandırıcı tiplerini karakterize edebilmek için standart şartlarda oksijen transfer katsayısının (k_{La}) saptanması gereklidir. Bu maksat için en çok kullanılan metot havalandırıcı çalıştırılarak çözülmüş oksijen konsantrasyon miktarlarını zamana bağlı olarak takip etmektir. Çoğu kez laboratuarda ölçülen veya literatürde verilen oksijen transfer katsayısı (k_{La}) değerleri sıcaklık ve basınç yönünden işletmedeki şartlara uymayabilir. Bu nedenle, sıcaklık ve basınç düzeltmelerinin literatürlerde verilen denklemlere göre yapılması zorunludur. Bu konu ile ilgili kaynaklarda sıcaklığa bağlı olarak oksijenin sudaki doygunluk konsantrasyon değerleri tablolar halinde verilmektedir. Tablo 2.3’de 1 atmosfer basınç ve değişik sıcaklıklar altında oksijenin sudaki doygunluk konsantrasyonları verilmiştir (Muslu, 1985).

Tablo 2.3 1 atmosfer basınç ve değişik sıcaklıklar altında oksijenin sudaki doygunluk konsantrasyonları

Sıcaklık(T), C°	Oksijenin doygunluk kons.(Cs*), mg/L
0	14.62
5	12.80
10	11.33
15	10.15
20	9.17
25	8.38
30	7.63

Oksijen transfer katsayısının (k_{La}) standart sıcaklığa göre düzeltilme işlemi (19) nolu denklem ile yapılmaktadır.

$$(k_{La})_{20^\circ} = (k_{La}) [1.024^{(T-20)}] \quad (19)$$

Oksijenlendirme kapasitesi, deney şartlarında ;

$$OC = (k_L a) \cdot V \cdot (c_s - c) \quad (20)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Ancak, standart şartlar ($c=0$) dikkate alındığında ;

$$OC = (k_L a)_{20^\circ} \cdot V \cdot (c_s^*) \quad (21)$$

denklemini ile hesaplanmaktadır.

Burada,

OC = Oksijenlendirme kapasitesi, $kg\ O_2 / saat$

$k_L a$ = Oksijen transfer katsayısı, $1/saat$

V = Su hacmi, m^3

c_s = Suyun oksijen doygunluk konsantrasyonu (deney veya ortam şartlarında), mg / L

c = Suyun oksijen konsantrasyonu (standart şartlarda), mg / L

c_s^* = Oksijen doygunluk konsantrasyonu (standart şartlarda), mg / L

Oksijenlendirme kapasitesini arttırmak için ya oksijen eksikliğini ($c_s - c$) veya oksijen transfer katsayısını arttırmak gerekir. ($c_s - c$) ifadesinde (c) belli bir değerde olduğundan, arttırılabilecek değer (c_s)'dir. (c_s)'i arttırmanın yolu yüksek hidrostatik basınç oluşturabilmektir. Böylece, (c_s^*) değeri arttırılabilmektedir. Hidrostatik basınç arttırılarak oksijen transfer verimi % 80'lere kadar arttırılabilir. Transfer katsayısını arttırmak için hava kabarcıklarının çapını küçültmek, bu küçük kabarcıkların birbiri ile etkileşimini azaltmak ve temas süresini arttırmakla gerçekleştirilir. Bunun yanında enerji ihtiyacını arttırmadan kullanılan teçhizatların daha karmaşık ve bakım masraflarının fazla olmaması havalandırma teknolojisinde sistem arayışları için dikkate alınmalıdır.

2.7.4. Oksijen Transfer Verimi (OE)

Herhangi bir havalandırma aygıtının performansı, geleneksel olarak her bir kilowatt – saat'e karşılık gelen hacimdeki maksimum oksijen transfer hızı (sıfır çözünmüş oksijen konsantrasyonunda) oksijen transfer verimi olarak tanımlanmakta ve (OE) ile ifade edilmektedir. Oksijen transfer verimi ne kadar büyükse havalandırmanın

verimliliği de o kadar yüksektir. Oksijen transfer verimi (22) nolu denklem ile hesaplanmaktadır. Jetin net gücü (N_j) ise, kinetik enerji olarak (23) nolu denklem ile ifade edilmektedir (Bin, 1993).

$$OE = OC / N_j \quad (22)$$

$$N_j = (1/2) \cdot Q_w \cdot \rho_w \cdot V_j^2 \quad (23)$$

Burada, OE = Oksijen transfer verimi, kg O₂ / kW- saat

OC = Oksijen kapasitesi, kg O₂ / saat

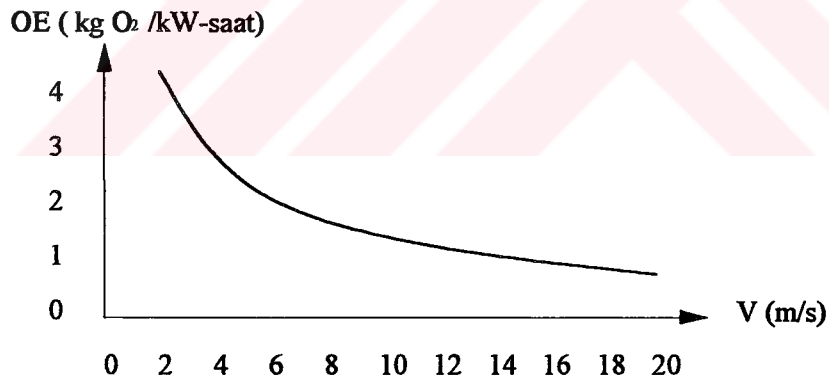
N_j = Jetin net gücü, kW

Q_w = Jet deşarj debisi, m³/s

ρ_w = Suyun yoğunluğu, kg/m³

V_j = Jetin hızı, m/s ifade edilmektedir.

Düşük jet hızlarında oksijen transfer verimi daha yüksek çıkmaktadır(Şekil 2.22).



Şekil 2.22 Jet hızı – oksijen transfer verimi arasındaki ilişki (Van de Sande ve Smith, 1975; Ohkawa ve diğ., 1986).

Fakat, pratik uygulamalarda bu jetlerle iletilen hava kabarcıklarının nüfuz (penetrasyon) derinliği küçük bir değerle sınırlı kalmaktadır. Daha derin suların havalandırılması durumunda bu bir avantaj olarak görülmemektedir (Ohkawa ve diğ., 1986).

2.8 Literatür İncelemesinin Sonuçları

Su jeti ile havalandırma sisteminin temel parametrelerini jet çapı (d_o), jet hızı (V_j), jet uzunluğu (L_j) ve ağızlık geometrisi meydana getirir. Sistemin temel elemanı ise su jetlerinin elde edildiği ağızlık üniteleridir.

Ağızlık içinde meydana gelen türbülanslı akımın seviyesi ve buna bağlı olarak ağızlıktan çıkan jetin davranışı ağızlık geometrisine bağlıdır. Ağızlık geometrisi hava iletimini etkileyen temel faktörlerden biridir. Ağızlık geometrisi ağızlık uzunluğunun, ağızlık çapına oranı (L_N/d_o) olarak tarif edilmektedir.

Araştırmacılar, farklı ağızlık geometrileri (L_N/d_o) ve temel sistem parametreleri (V_j , d_o , L_j) altında hava iletiminin davranışı üzerinde çalışmalar yaptılar.

Uzun ağızlıklardan ($L_N/d_o=50$) elde edilen su jetleri ile hava iletimi üzerine en kapsamlı çalışmalar Van de Sande ve Smith (1972, 1973, 1974, 1975, 1976), Kumagai ve Endoh (1982) tarafından yapıldı. Son yıllarda, hava iletimi üzerinde sıvı fazın fiziksel özellikleri ve ağızlık geometrisinin ($L_N/d_o < 10$) etkilerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur (Ohkawa ve diğ., 1986, 1987; Kusbiraki ve diğ.,1990).

Bin (1993) su jeti ile havalandırma sisteminin daha detaylı anlaşılması ve elde edilen sonuçların bir araya getirilerek jet havalandırıcıların tasarımına yönelik projelendirme esaslarının hazırlanması doğrultusunda şu teklifleri yapmaktadır.

- i) Su jeti ile hava iletimi üzerine daha fazla deneysel çalışmalar yapılması
- ii) Konu ile ilgili deneysel verilerin bir araya getirilerek hava iletimini teorik yaklaşımlar ile pratiğe sunmak
- iii) Pratik uygulama alanları ve jet sistemleri için modeller geliştirmek
- iv) Jet havalandırıcılar için daha kullanışlı ve güvenilir tasarım esasları elde etmek.

Sene (1988) düşük ve yüksek hızlı jetler ile hava iletimini tarif etmek amacıyla bazı teorik modeller üzerinde çalıştı. Dairesel kesitli jetler için iletilen hava miktarının jet hızı ve jet çevre uzunluğunun bir fonksiyonu olduğunu ileri sürdü.

$$Q_A = \text{fonksiyon} (\pi \cdot d_j \cdot V_j) \quad (24)$$

Burada, ($\pi \cdot d_j$) jetin çevre uzunluğu olmak üzere;

d_j = Jetin çarpma noktasındaki çapı, m

V_j = Jet hızı, m/s ifade edilmektedir.

Araştırmacı, jet çapının artan değerlerinde ($d_o = 3, 3.8, 4.9, 6.8, 10$ mm için) jet hızına bağlı olarak (zellikle yüksek hızlarda, $V_j > 10$ m/s) hava iletimi miktarındaki artışı jet evre uzunluğunun ($\pi \cdot d_j$) artması ile açıklamaktadır.

Literatür incelemesinin bu sonuçları doğrultusunda, ağızlık tipi ve ağızlık tipine bağlı olarak gelişen jet şeklinin hava iletimi üzerindeki etkisi ile ilgili çalışmalar yer almadığı görülmektedir.

Bu çalışmada, ağızlık tipi ve ağızlık tipine bağlı olarak gelişen jet şeklinin hava iletimi üzerindeki etkisini araştırmak için Sene'ye (1988) ait teorik model doğrultusunda jet evre uzunluğunu arttırmaya yönelik olarak deneysel çalışmalar hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, jetin evre uzunluğunu arttırmak için elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık tipleri tasarımılanmıştır.



3. TEORİK YAKLAŞIMLAR

3.1 Jet Hızı

Ağızlıktan belirli bir hızda deşarj olan serbest jet, hava sürtünmelerine maruz kalmakta ve bunun bir sonucu olarak hızında azalmalar meydana gelmektedir. Diğer taraftan, serbest jet yerçekimi etkisi altında olduğundan hızında artışlar olmakta ve jet hızlanmaktadır.

Van de Sande ve Smith (1973, 1974, 1975, 1976) yaptığı çalışmalarda hava sürtünme kuvvetleri ve yerçekimi etkisiyle oluşan hız farklarının birbirini nötr ettiğini kabul etmekte ve jet hızını sabit almaktadır.

Ohkawa ve diğ. (1986, 1987) yaptıkları çalışmalarda serbest jet hızını, ağızlık çıkışındaki hıza eşit aldılar.

Evans ve diğ. (1996), jeti kuşatan havanın aerodinamik direnci sonucu jet hızının azalacağını; bunun yanında, yerçekimi etkisiyle jet hızında bir artış olacağını belirtmektedir. Sürtünme ve yer çekimi etkisi ile tanımlanan bu hız terimlerinin jet hızı ile karşılaştırıldığında küçük değerlerde olduğunu ve böylece jet hızının jet uzunluğundan bağımsız ve sabit düşünülebileceğini ifade etmektedirler.

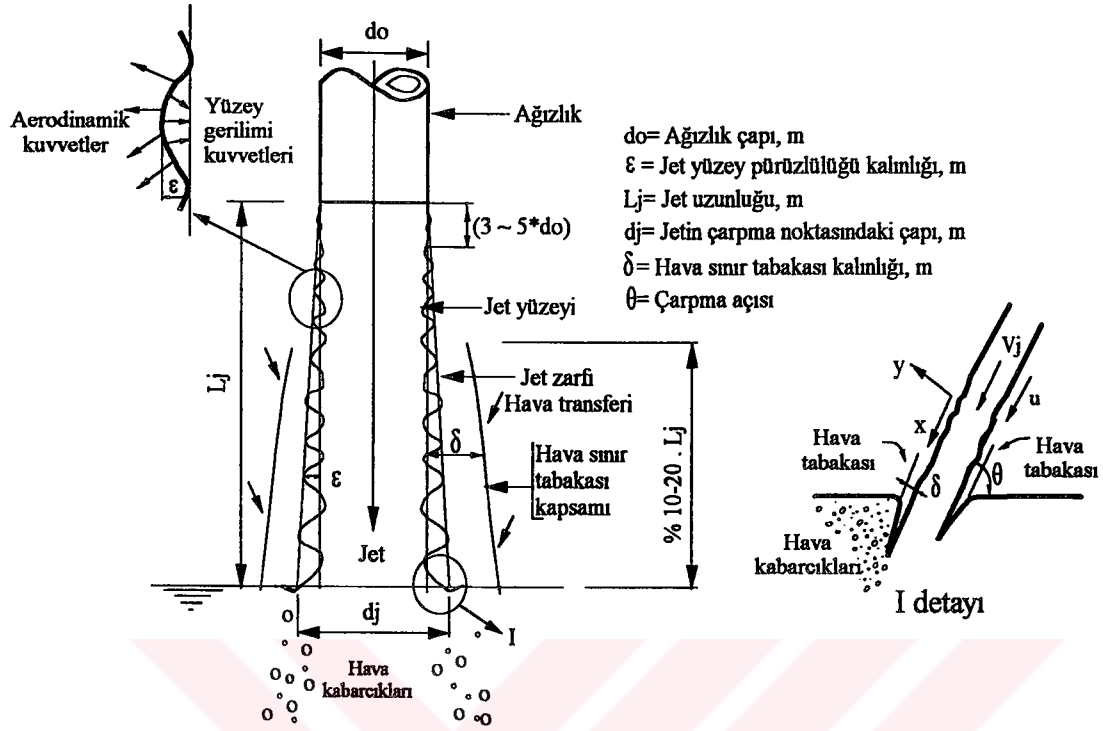
$$V_j \cong V_o$$

3.2 Serbest Jetin Genişlemesi

Başlangıçta, jet yüzeyi üzerindeki pürüzlülük ağızlık içinde gelişen türbülansın bir sonucu olarak gerçekleşir. Serbest jetin hareketi sırasında bu pürüzlülük yüzey gerilimi, eylemsizlik (atalet) ve aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle artar. Bu etkenler altında meydana gelen şeklin matematiksel olarak tanımlanması güçtür.

Ayrıca, serbest jetin şeklini etkileyen diğer faktörler ise akışkanın özellikleri (özellikle viskozite), jet hızı, jet uzunluğu ve ağızlık çapıdır. Bu değişkenler altında serbest jet, uzunluğu boyunca genişlemektedir (Şekil 3.1).

Evans ve diğ. (1996) dairesel kesitli jetler için çarpma noktasında jet genişliğinin teorik olarak hesaplanmasında (25) nolu denklemi verdiler.



Şekil 3.1 Serbest jetin genişlemesi ve hava iletiminin mekanizması

$$\frac{d_j}{d_o} - 1 = 0.0085 \text{ Oh}^{0.83} \text{ Re}_{L_j}^{0.63} \quad (25)$$

Burada, d_j = Jetin çarpma noktasındaki çapı, m

d_o = Ağzılık çapı, m

Oh = Ohnesorge veya stabilite (denge) sayısı ($= \mu \sqrt{\rho d_o \sigma}$), boyutsuz

(McCarthy ve diğ. (1972) tarafından tarif edilmektedir)

Re_{L_j} = Serbest jet uzunluğuna (L_j) bağlı Reynolds sayısı ($= \rho V_j L_j / \mu$), boyutsuz

Denklemden, (Oh) sayısı jetin stabilitesini ve (Re_{L_j}) ise hava sınır tabakasının gelişimini tanımlamaktadır.

3.3 Hava İletimi Üzerinde Jet Çevre Uzunluğunun Etkisi

Sene (1988) Şekil 3.1’de tanımlanan I- detayına göre; çarpma noktasında iletilen havanın miktarını tanımlamak için geliştirdiği modelde,

Hava tabakasındaki statik basınç, P

$$P \sim \rho g x \sin \theta \quad \text{olmak üzere} \quad (26)$$

Burada, ρ = Suyun yoğunluğu, kg m^{-3}

g = Yerçekim ivmesi, m s^{-2}

x = Etkin jet uzunluğu, m

θ = Jet çarpma açısı, der.

Hava tabakasındaki (δ) hava akımının hareketini,

$$(dP / dx) = \mu_a (d^2u / dy^2) \quad (27)$$

denklemleriyle açıklanmaktadır.

Burada, μ_a = Havanın viskozitesi, N s m^{-2} (veya Pa s)

(dP / dx) = Statik basınç farkı

(du / dy) ile hava akımının hız gradyanı tanımlanmaktadır.

Hava akımının basıncı artış gösterdikçe, lokal hız(u) azalmaktadır. Bu doğrultuda,

$$(du/dy) \big|_{y=\delta} = 0 \text{ olmak üzere, } u(0) = V_j \text{ için}$$

hava tabakasının kalınlığı,

$$\delta^2 = (2 \mu_a V_j) / (\rho g \sin \theta) \quad (28)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir.

İletilen hava akımının sınır tabakası kalınlığı (δ), iletim hızı ve hidrostatik değişimlerinden dolayı jet çevresi etrafında değişiklik gösterir. Bu değişimler ihmal edilirse hava iletim miktarı (Q_A),

$$Q_A \sim \int_0^\delta u \, dy = \pi d_j V_j \delta$$

veya

$$Q_A \sim \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2\mu_a}{\rho g \sin \theta}} \pi d_j V_j^{3/2} \quad (29)$$

denklemleri ile tanımlanmaktadır.

Teorik olarak tanımlanan bu açıklamalar doğrultusunda hava iletiminin jetin çarpma noktasındaki genişliği esas olmak üzere çevre uzunluğunun (C_j) bir fonksiyonu olduğu ileri sürülmektedir.

Dairesel jetler için çevre uzunluğu için, $C_j = \pi d_j$; dikdörtgen jet durumunda ise jet genişliği dikkate alınmaktadır.

Bin (1993), Sene (1988) tarafından sunulan bu model ile ilgili olarak; yapılan kabul ve açıklamaları savunmaktadır.

Bu çalışmada, (d_o, L_N, L_j, θ) = sabit olmak üzere V_j, d_j ve ağızlık çıkış kesiti (A) değişmek üzere ağızlık geometrisine bağlı olarak hava iletim miktarları deneysel olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçların belirtilen teorik modelle ne derece yorumlanacağı araştırılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, su jetleri ile havalandırma sisteminde havalandırma performansı üzerinde farklı ağızlık tiplerinin etkisini deneysel olarak araştırmaktır.

Literatürde genel olarak dairesel kesitli ağızlık tipleri üzerinde yapılan çalışmalar yer almaktadır. Bunun yanında farklı tipte ağızlıklara ait çalışmalarda mevcuttur. Fakat, bu çalışmalar ağızlık tipinin havalandırma sistemi üzerinde etkisini yorumlayacak kadar kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

Bu nedenle, bu çalışmanın konusunu giriş ağızlık çapı dairesel kesitli olan ve sabit çapa sahip ağızlıkların çıkış noktasındaki kesitini değiştirerek gelişen farklı jet geometrisinin akım karakteristikleri ve havalandırma performansı üzerindeki etkisinin araştırılması oluşturmaktadır. Bu maksat için ağızlıkta oluşabilecek yersel kayıpları minimum seviyede tutmak için ağızlık içinde keskin kenar oluşmayacak biçimde dairesel kesit dışında iki ağızlık tipi (elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen) tasarımılandı. Seçilen ağızlık tipleri ve özellikleri bölüm 4.4’de belirtilmiştir.

Su jetleri ile havalandırma konusunda yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların çoğunu deneysel araştırmalar oluşturmaktadır. Su jetleri ile havalandırma sisteminde farklı araştırmacılara ait deneysel şartlar Tablo 4.1’de özetlenmiştir.

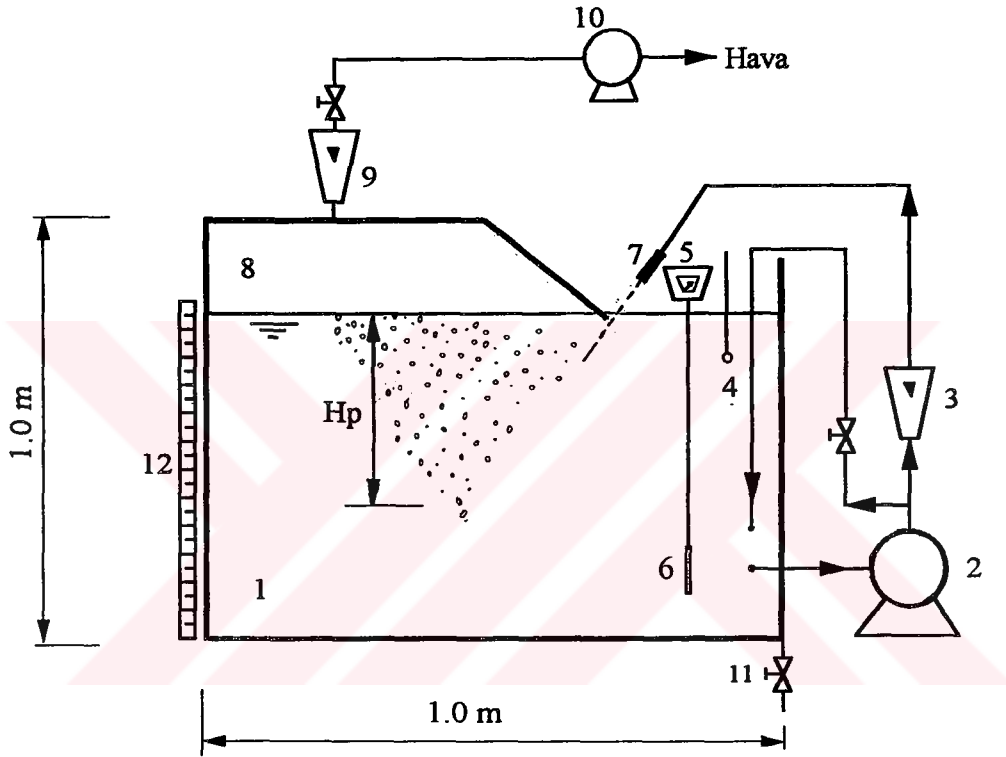
Bu konuda literatürden elde edilen çalışmalara ait deneysel şartlar baz alınarak bu çalışmayı oluşturacak deney düzeneği ve çalışma programı tasarımılandı. Deney düzeneği ve çalışmalar literatüre uygun olarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işlemleri olarak, standart şartlarına göre dairesel tip ağızlıklar için elde edilen akım karakteristikleri çalışmamıza esas olan deney düzeneği üzerinde tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür ile uygunluk göstermiştir. Ölçüm cihazları deney şartlarına (atmosfer basıncı, nispi nem) göre ayarlanmıştır. Laboratuvar şartlarına göre elde edilen sonuçlar standart şartlara (sıcaklık, oksijen doygunluk konsantrasyonu, atmosfer basıncı) göre yeniden düzenlenmiştir.

Tablo 4.1 Su jetleri ile havalandırma sisteminde farklı araştırmacılara ait deney şartları

Araştırmacı	Ağızlık çapı, d_o (mm)	Jet uzunluğu, L_j (mm)	Jet hızı, V_j (m/s)	Ağızlık geometrisi, (L_N/d_o)
Ohyama (1953)	8.00-16.00	250	-	0.3-0.6
Henderson ve ark. (1970)	2.54-12.70	10-270	10-30	0-1-10
Ciborowski ve Bin.(1972)	1.64-10.20	10-250	1-20	2-8
Van de Sande ve Smith(1972)	1.95-10.00	100-400	3-10	50
Van de Sande ve Smith(1974)	2.85-12.00	100-450	9-25	50
Ahmed(1974)	13.00-38.00	660-1050	2-30	3.5-8.3
Cumming(1975)	4.5-9.0	100-800	1.3-8.7	0-5-1-80
Hara ve ark.(1977)	1.0-4.0	20	3.5-6.0	5.0-20.0
Yagasaki ve Kuzuoka(1979)	2.80-7.30	20-250	3.0-11.0	-
Ervine ve ark.(1980)	6.0-25.0	0-4700	2.0-6.0	1.0-4.0
Van de Donk(1981)	10.0-100.0	260-1070	1.5-11.0	2.2-22.0
McKeogh ve Ervine(1981)	6.0-25.0	0.0-5000	0-10	-
Kumagai(1982)	2.0-8.0	20.0-800.0	1.2-3.7	50
Ohkawa ve ark.(1985)	13.0-25.0	30-90	1.2-2.6	-
Ohkawa ve ark.(1986)	7.0-13.0	25-750	2.0-14.3	5
Ohkawa ve ark.(1986)	8.0-20.0	30-150	2.0-13.0	4.9-6.5
Ohkawa ve ark.(1987)	7.0-17.8	25-150	2.0-13.5	5-70
Funatsu ve ark.(1988)	4.0-8.0	2-135	7.2-26.5	1
Kusabiraki ve ark.(1990)	7.0-17.8	50-750	2.0-13.5	5-70
Ohkawa(1990)	7.0-11.8	10-590	2.3-13.5	0.7-50
Evans(1990)	2.4-7.1	5-200	11.5-15.0	15-17

4.2. Deney Düzeneği

Fırat Üniversitesi Araştırma Fonu (FÜNAF) Müdürlüğü tarafından desteklenen bu çalışmanın deney düzeneği Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü Hidrolik Laboratuvarında tesis edildi. Deney düzeneğinin şematik bir görünümü Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 İletilen hava miktarı, hava kabarcığı nüfuz derinliği ve çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri için kullanılan deney düzeneğinin akım diyagramı : 1, su tankı; 2, sirkülasyon pompası; 3, su rotametre; 4, termometre; 5, oksijenmetre cihazı; 6, oksijenmetre probu; 7, ağızlık; 8, hava biriktirme tuzağı (kapan); 9, hava rotametre; 10, hava vakum pompası; 11, kontrol vanası; 12, ölçüm çubuğu

Su jeti ile havalandırma sisteminde ağızlık tiplerinin havalandırma performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmak için 1.00 m uzunluğunda, 1.00 m yüksekliğinde ve 0.70 m genişliğinde dış çerçevesi demir profillerden imal edilen bir su tankı tertip edildi. Tankın dış çerçevelerine deneysel gözlem ve ölçümlerin takibi için 6 mm kalınlığında şeffaf cam tabakalar yerleştirildi. Su sızdırmazlığını sağlamak için cam kenarları silikon malzemesi ile kaplandı.

Deney düzeneğinde suyu geri devir ettirmek için bir sirkülasyon pompası (0.850 kW, Pedrollo Model, İtalya) yerleştirildi. Su pompası ile sirküle edilen su

akımının debisini ölçmek için bir su rotametre (5-75 L/dak., Cole Parmer Instrument Model, Amerika) kullanıldı. Su tankının üst yüzeyi % 50 oranında atmosfere kapalı olacak biçimde galvanizli sac levha ile izole edildi. Su jetlerinin çıkış noktası olan ağızlık ünitesinde ağızlık tiplerine göre transfer olunan hava bu kapalı hacim içinde toplandı. Toplanan hava akımının debisini ölçmek için bir hava rotametre (10-100 L/dak., Cole Parmer Instrument Model, Amerika) ve havanın vakumlandığı bir hava vakum pompası (600 W, Simtel Model, Türkiye) sisteme yerleştirildi. Çözünmüş oksijen konsantrasyonlarını ölçmek için oksijenmetre cihazı (Hanna- HI 9142 Model, Almanya) kullanıldı.

Ağızlık yapımında, 5 ve 8 mm çapında bakırdan imal edilmiş borular kullanıldı. Seçilen ağızlık tipleri ve boyutlara göre bakır borular özel olarak şekillendirildi.

4.3. Boyut Analizi

Su jetleri ile hava iletimi mekanizması aşağıdaki temel parametrelerinin (değişkenlerin) bir fonksiyonu olmaktadır.

$$Q_A = \text{fonksiyon} (V_j, d_o, L_N, d_j, L_j, \theta)$$

Bu çalışmada, (d_o, L_N, L_j, θ) değişkenleri sabit olmak üzere (V_j, d_j) değişkenlerine bağlı olarak farklı ağızlık tipleri için akım karakteristikleri deneysel olarak araştırılmaktadır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 Ağızlık ve jet ile ilgili olarak seçilen sabit değişkenler

Ağızlık giriş çapı $d_o \times 10^{-3}, \text{ m}$	Ağızlık uzunluğu $L_N \times 10^{-2}, \text{ m}$	Jet uzunluğu $L_j \times 10^{-1}, \text{ m}$	Çarpma açısı $\theta, \text{ der.}$
5 - 8	50	15-20	45 - 60

Bu çalışmada, ağızlık çıkışında jet hızları (V_o), ağızlık tipine ve dolayısıyla ağızlık geometrisine bağlı olarak sabit debiler altında süreklilik denkleminde hesaplandı.

Serbest jetin çarpma hızı (V_j), araştırmacıların yaptıkları kabuller doğrultusunda ağızlık çıkış hızına eşit ($V_j \cong V_o$) olarak alındı.

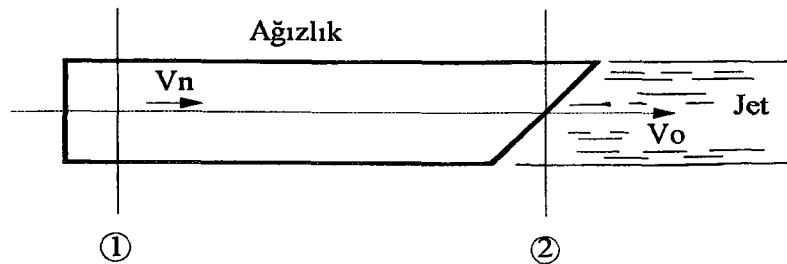
4.4. Ağzılık Tipleri

Literatürlerde ağzılık tipleri konusunda genel olarak dairesel kesitli ağzılık tipi üzerinde yapılan çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmada, dairesel kesitli ağzılıkların çıkış noktasındaki kesiti değiştirilerek elde edilen farklı ağzılık tiplerine bağlı olarak gelişen jet geometrilerinin akım karakteristikleri ve havalandırma performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Su jetleri ile havalandırma sisteminde havalandırma performansı üzerinde ağzılık tiplerinin etkisini deneysel olarak araştırmak için dairesel kesitli ağzılık esas olmak üzere iki tip ağzılık tasarımı yapıldı. Ağzılık tipleri için uygun hidrolik şartların sağlanması bakımından (örneğin, yersel kayıpların minimum olması) su akımının alındığı ağzılığın giriş çapı (d_o) ve geometrisi (daireesel) sabit tutularak, ağzılığın çıkış noktası üzerinde geometrik değişiklikler yapıldı.

Su jetleri ile hava transferi; jet yüzeyi üzerinde gelişen yüzey pürüzlülüğü ve serbest jet çevresi boyunca gelişen hava sınır tabakası olmak üzere iki yönlü olarak meydana gelmektedir. Bu yaklaşım, ağzılık çıkış noktasının geometrik şekli ve buna bağlı olarak gelişen jet tipleriyle jetin çevre uzunluğunun yörüngesi boyunca artırılması halinde; hava transferi ve akım karakteristiklerinin olumlu yönde sonuçlar göstereceği izlenimini vermektedir. Ayrıca, su jetinin çarpma basıncında oluşturulabilecek bir artış da oksijen transferini arttıracaktır. Bu doğrultuda, ağzılık ünitesinden çıkan serbest jetlerin hava ortamında izleyeceği yörünge boyunca çevre uzunluğu iki şekilde artırılabilir:

I) Ağzılık çıkış noktasını genişletmek : Bu çalışmada, dairesel kesitli ağzılık çıkış noktasından itibaren 45° bir açı ile kesilerek elips şeklinde geometrik bir kesit elde edildi. Elde edilen elips kesitin hidrolik özellikleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

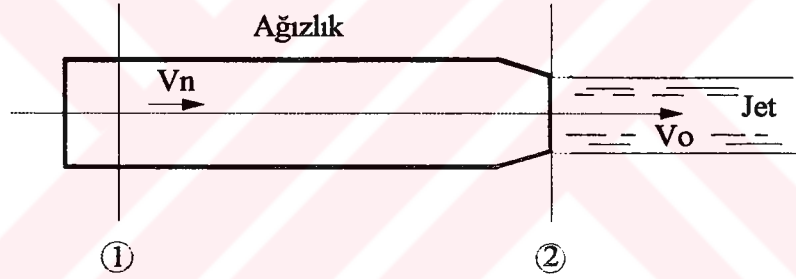


Şekil 4.2 Elips çıkış kesitli ağzılık

Çıkış geometrisi elips olan ağızlık üzerinde bir kontrol kesiti alırsak, 1 ve 2 nolu kesitlerde; kesit alanları A_1 , A_2 ve hızlar V_n , V_o olmak üzere,

$$A_1 < A_2, V_o < V_n \text{ olmaktadır.}$$

II) Ağızlık çıkış noktasını daraltmak : Bu daraltma öyle yapılmalı dır ki; ağızlıkta oluşacak hidrolik kayıplar minimum olmalıdır. Bu nedenle ağızlıkta keskin kenarlar (örneğin kare, üçgen kesitli ağızlıkların keskin kenarları gibi) olmamalıdır. Ayrıca, ağızlıktan çıkan akışkan serbest halde çevre uzunluğunu arttırarak yörüngesine devam etmelidir. Bu çalışmada, ağızlık çıkış noktasında kesit alanı % 20 mertebesinde daraltılarak jetin izleyeceği yörünge boyunca çevre genişliğini arttıracak şartları sağlayan kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesit elde edildi. Elde edilen kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitin hidrolik özellikleri aşağıdaki gibi olmaktadır.



Şekil 4.3 Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlık

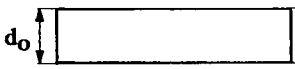
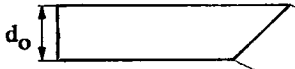
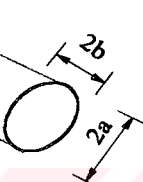
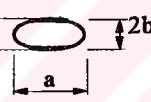
Çıkış geometrisi kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen olan ağızlık üzerinde bir kontrol kesiti alırsak, 1 ve 2 nolu kesitlerde; kesit alanları A_1 , A_2 ve hızlar V_n , V_o olmak üzere,

$$A_1 > A_2, V_n < V_o \text{ olmaktadır.}$$

Elde edilen bu ağızlık tiplerine bağlı olarak elde edilecek akım karakteristiklerinin hem literatür ile karşılaştırılması hem de deneysel şartların kalibrasyonu açısından kıyaslanması için dairesel kesit de ağızlık tipi olarak dikkate alındı. Bu durumda seçilen ağızlık tipleri şunlardır;

- 1) Dairesel kesitli ağızlık
- 2) Elips çıkış kesitli ağızlık
- 3) Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlık.

Seçilen ağızlık tiplerinin plan ve kesitleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

No	Plan	Kesit	*Alan, A	*Çevre Uzunluğu, Ç
1			$\frac{\pi d_o^2}{4}$	πd_o
2			$\pi a b$	$\pi (a+b)$
3			$2 a b - (4 - \pi) b^2$	$\pi 2b+2(a-2b)$

* Applied fluid dynamics handbook

Şekil 4.4 Ağızlık tiplerinin plan ve kesitleri

5. DENEYSEL ÖLÇÜMLER

Deneysel ölçümler sistematik akım diyagramı Şekil 4.1’de verilen deney düzeneği üzerinde yapıldı. Deneysel ölçümleri temel olarak; iletilen hava miktarı, hava kabarcığı nüfuz derinliği, su jetinin yayılması (kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlık durumunda), çözünmüş oksijen konsantrasyonu tayini oluşturmaktadır. Bu ölçümlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar grafiksel olarak ifade edilmiştir. Bunun yanında elde edilen ölçüm sonuçları ile hava iletim oranı, oksijenlendirme kapasitesi ve oksijen transfer verimi değerleri hesaplanmıştır.

Deneysel ölçümler için; ağızlık çapı, $d_o = 5-8$ mm; jet çıkış hızı, $V_j = 2-20$ m/s; jet uzunluğu, $L_j = 0.15-0.20$ m ve jet çarpma açısı, $\theta = 45^\circ-60^\circ$ seçilmiştir.

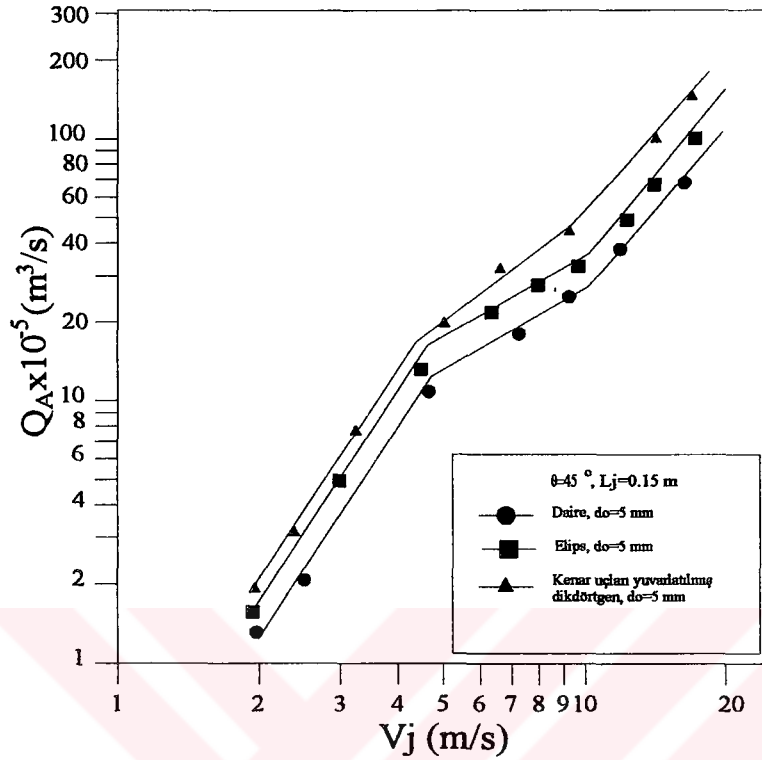
Yapılan deneysel ölçümlerde çeşme suyu kullanıldı. Her deneysel ölçümden (özellikle çözünmüş oksijen kons. tayininde) sonra kullanılan su uzaklaştırıldı. Çalışma sıcaklığı 20°C seçildi. Su sıcaklığı sürekli olarak takip edildi. Su sıcaklığını sabit tutmak için tanka (su hacmi sabit olmak üzere) su ilave edildi. Su sıcaklığının sabit tutulamadığı ölçümlerde (çözünmüş oksijen kons. için) sıcaklık düzeltmeleri yapıldı.

5.1. İletilen Hava Akımının Ölçülmesi

Su jetleri tarafından tank su yüzeyinden tabana doğru iletilen hava akımını ölçmek için Şekil 4.1’de verilen deney düzeneğinde gösterildiği gibi tank üst yüzeyi % 50 oranında atmosfer ortamına kapalı olacak şekilde izole edildi.

Sistem tarafından iletilen hava, tank su kütlesi ortamında hava kabarcığı formunda yayılış göstermektedir. İletilen hava kabarcıkları “hava kabarcığı tuzağı (kapan)” olarak isimlendirilen ve kapalı bir hacim oluşturan sistem içerisinde toplandı. Hacim içerisinde toplanan hava bir vakum pompası tarafından vakumlanarak (emilerek) dış ortama (atmosfer) verildi. Vakumlanan hava akımının miktarı sisteme bağlı olan bir hava rotamettesinden okundu. Her farklı ağızlık tipi ve hidrodinamik akım şartları için deneysel çalışmalar tekrarlandı.

İlk olarak ağızlık çapı (d_o)=5mm ve jet çarpma açısı (θ)= 45° olması durumunda jet çıkış hızına (V_j) bağlı olarak her ağızlık tipi için iletilen hava akımı miktarları elde edildi. Elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Jet çıkış hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_0=5\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)

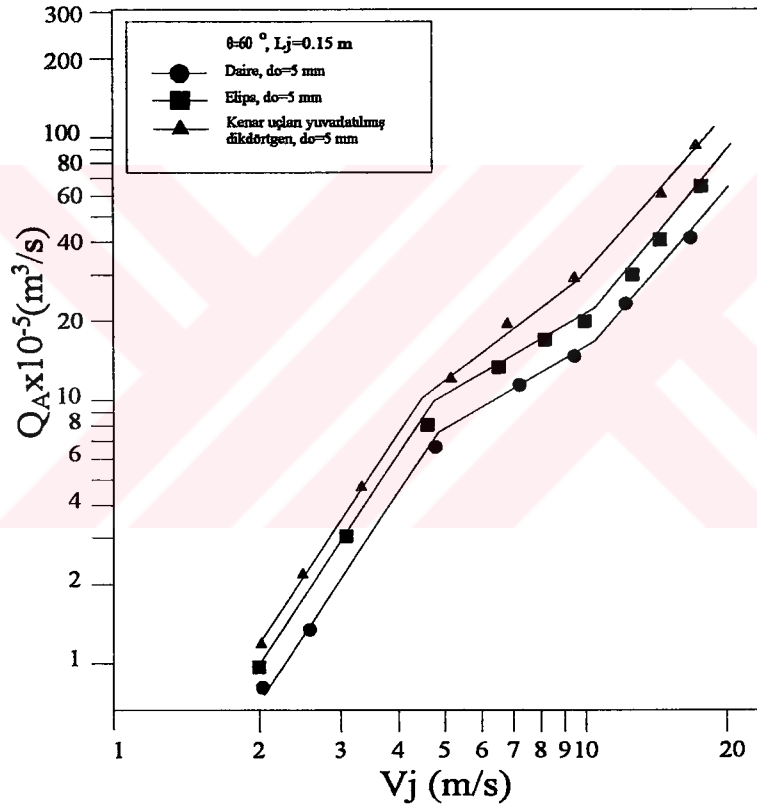
Jet hızı (V_j) ile iletilen hava akımı miktarı (Q_A) arasında çizilen eğriler incelendiğinde hava iletim miktarı jet hızına bağlı olarak değişmekte ve jet hızı arttıkça iletilen hava miktarı da artış göstermektedir.

Ayrıca, ağızlık tipine bağlı olarak hava iletim miktarında önemli bir oranda artış gözlemlenmektedir. Düşük hızlarda ($V_j < 5 \text{ m/s}$) her ağızlık tipi için iletilen hava miktarındaki artışlar paralellik göstermektedir. Yüksek jet hızlarında ($5 \text{ m/s} < V_j < 20 \text{ m/s}$) dairesel ve elips kesitli ağızlıklar aynı eğilimle hava iletirken, kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık daha yüksek değerlerde hava iletmektedir. Bunun nedeni, ilerideki bölümlerde detaylı olarak açıklanan serbest jetin (özellikle bu ağızlık tipi için) yörüngesi boyunca çevre uzunluğunu arttırarak bir yayılım (enine genişleme) göstermesinden kaynaklanmaktadır. Jet çevre uzunluğunda meydana gelen bu artışlarla atmosfer ortamındaki hava sürtünmeleri artmakta ve buna bağlı olarak iletilecek hava hacminde artışlar gözlenmektedir.

Şekilde görüldüğü gibi jet hızı (V_j) ve iletilen hava miktarı (Q_A) arasında çizilen grafik iki farklı eğimde lineer bir özellik göstermektedir.

Jet hızının (V_j)=4-5 m/s olduğu noktada ilk eğim ile ileten hava akımı bir kırılma göstererek ikinci bir eğime geçmektedir. Buradaki kırılma artan jet hızı (V_j) değerlerinde momentum arttığından iletilen hava kabarcıkları daha küçük çaplara bölünerek daha derinlere nüfuz etmesi ve dolayısıyla tank su kütlesi içinde daha uzun süre kalmasından kaynaklanmaktadır.

Benzer şekilde ağızlık çapı (d_o)=5mm sabit kalmak şartıyla jet çarpma açısının (θ)=60°'ye yükseltilmesi durumunda jet hızına (V_j) bağlı olarak her ağızlık tipi için hava iletim miktarları elde edildi. Elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.2'de verilmiştir.



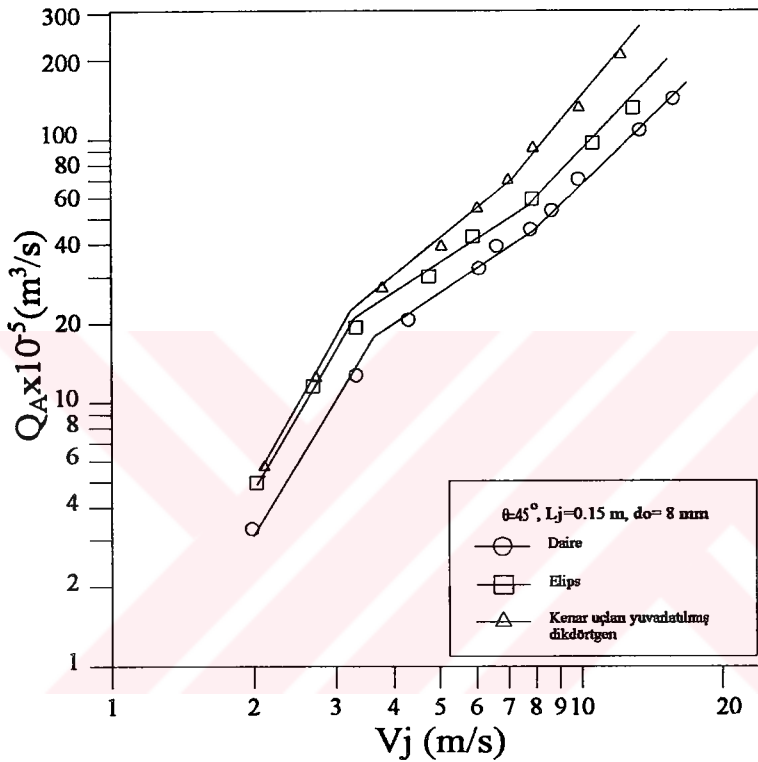
Şekil 5.2 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=5\text{mm}$, $\theta=60^\circ$)

Elde edilen eğriler Şekil 5.1 ile uyum göstermekte, ancak çarpma açısının artmasına bağlı olarak iletilen hava miktarlarında bir azalma olmaktadır. Buna neden olarak çarpma açısı (θ) arttıkça hava kabarcığı nüfuz derinliği de (H_f) arttığından iletilen hava kabarcıklarının su ortamında daha uzun süre kalmaları gösterilebilir.

Ağızlık çapı (d_o)=5mm'den 8 mm'ye büyütülerek ağızlık tiplerine bağlı olarak hava iletimi kapasitelerini ölçmek için yine farklı jet hızları ve çarpma açısı altında

deneyler tekrarlandı. Ağızlık çapının büyütülmesine bağlı olarak her ağızlık tipi için hava iletimi miktarları artış gösterdi.

Şekil 5.3 ağızlık giriş çapı (d_o)=8mm ve jet çarpma açısı (θ)=45° olması durumunda jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerine göre iletilen hava miktarlarını göstermektedir.

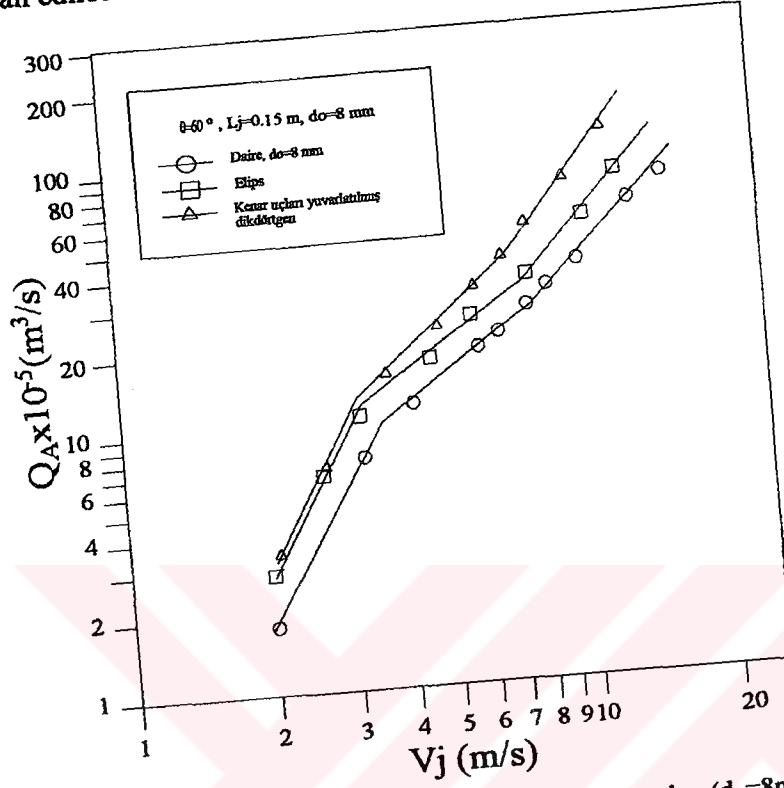


Şekil 5.3 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları (d_o =8mm, θ =45°)

Şekil 5.4 ağızlık giriş çapı (d_o)=8mm jet çarpma açısı (θ)=60° olması halinde hava iletim miktarlarını göstermektedir. Elde edilen eğriler Şekil 5.3 ile uyum göstermekte, ancak çarpma açısının artmasına bağlı olarak iletilen hava miktarında bir azalma olmaktadır.

Grafiklerde görüldüğü gibi hava iletim miktarı jet hızına bağlı olarak değişmekte ve jet hızı arttıkça iletilen hava miktarı da artış göstermektedir. Ayrıca, ağızlık tipine bağlı olarak hava iletim miktarında önemli bir oranda artış gözlemlenmektedir. Düşük hızlarda ($V_j < 5$ m/s) her ağızlık tipi için iletilen hava miktarı artışları paralellik göstermekte, yüksek hızlarda (5 m/s $< V_j < 20$ m/s) dairesel ve elips kesitli ağızlıklar aynı eğilimle hava iletirken, kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık daha

yüksek değerlerde hava iletmektedir. Bunun nedeni yine Şekil 5.1 ve 5.2 için belirtilen açıklamalarla izah edilebilir.



Şekil 5.4 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=8\text{mm}$, $\theta=60^\circ$)

Ağızlık çapı (d_o)=5mm ve (d_o)=8mm için elde edilen deneysel verilere ait grafikler karşılaştırıldığında şu sonuçlar çıkarılabilir.

Düşük jet hızlarında ($V_j < 5 \text{ m/s}$) ağızlık çapı (d_o)=5mm için elips kesitli ağızlık dairesel kesitli ağızlık ile aynı eğilimde fakat biraz daha yüksek iletim miktarları sağladı. Ağızlık çapı (d_o)=8mm'ye büyütüldüğünde elips kesitli ağızlık kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık ile aynı eğilimde ve oldukça yakın hava iletim miktarları temin etti. Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık ise (d_o)=5mm için deney şartlarında sağlanan en yüksek jet hızı değerinde ($V_j=20 \text{ m/s}$) ilettiği hava miktarlarını ağızlık çapı (d_o)=8mm'ye çıkarıldığında aynı miktarda hava iletimi sağlamak için $V_j=10 \text{ m/s}$ 'lik jet hızına ihtiyaç duyulmaktadır.

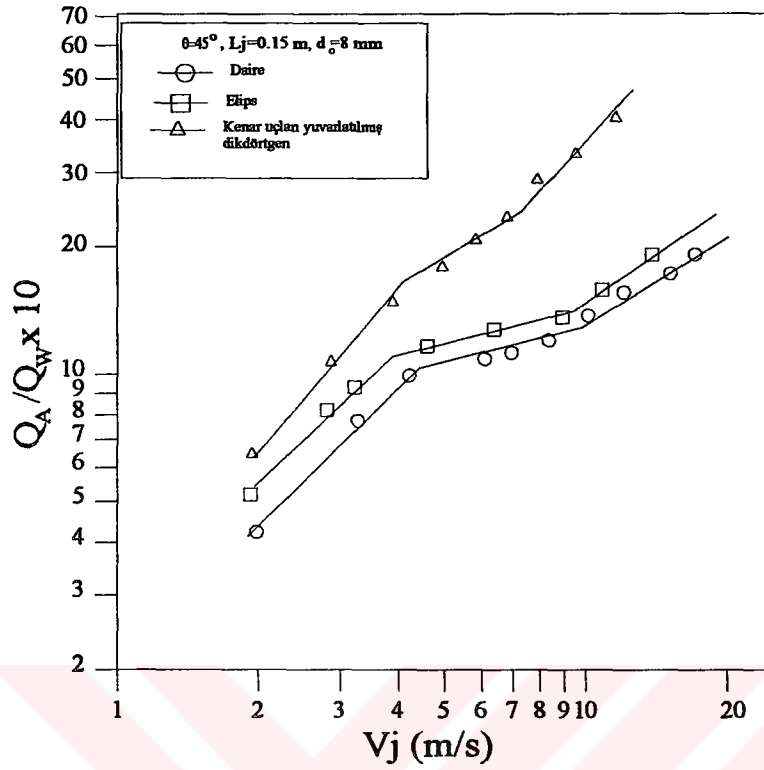
Her iki ağızlık çapında hava iletimi mekanizmasının düşük ve yüksek jet hızları için farklı iki eğilimde iletim mekanizmaları oluşmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlara ait grafiklerde görüldüğü gibi her iki eğilim bölgesi için kırılma noktaları jet

hızı $V_j=4-5$ m/s civarında olduğu zaman meydana gelmektedir. Bu farklı iki eğilimin olması düşük jet hızı ($V_j < 5$ m/s) bölgesinden yüksek hızlı jet bölgesine geçiş esnasında olmaktadır. Bunun nedeni hava kabarcıklarının artan jet hızına bağlı olarak daha küçük çaplara bölünmesi ve tank su kütlesi içinde daha uzun süre kalmalarından kaynaklanmaktadır. Hatta yüksek jet hızlarına doğru ($V_j > 7$ m/s) tank su kütlesi içinde dolaşan daha büyük çaplara sahip hava kabarcıklarına rastlandı.

Literatürde bu hava kabarcıklarından avare olarak gezip dolaşan (sauter) manasına gelen isim ile tanımlamalar yapılarak bahis edilmektedir (Bin, 1993).

5.1.1 Hava İletim Eğrisi

Bölüm 5.1’de hava iletim miktarları için elde edilen deneysel sonuçlara ait grafikler iki farklı eğilim göstermektedir. Hava iletim miktarı (Q_A) ile jet hızı (V_j) arasında çizilen bu grafiklerin oluşturduğu eğri üzerindeki geçiş noktalarını tam olarak belirlemek için hava iletim oranı yani iletilen hava akımının su jeti debisine oranı (Q_A / Q_w) ile jet hızı (V_j) arasında bir grafik çizilir. Hava iletim oranı su jetleri ile havalandırma sistemlerinin performansının bir ölçüsü olarak tanımlanır. Bir havalandırma sisteminin performansı hakkında en iyi bilgiyi çizilen böyle bir hava iletim grafiği vermektedir. Bu nedenle, bütün hava kontrollü akımlarda hava iletim eğrileri oldukça sık kullanılmaktadır. Şekil 5.5’de verilen grafikler üzerinde geçiş noktaları gösterilmiştir. Dairesel kesitli ağızlıklar için “S” şeklinde bir hava iletim eğrisi tanımlanmaktadır. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi dairesele ağızlık için tanımlanan böyle bir eğri elde edilmiştir. Elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklar ise yüksek havalanma performansı göstermektedirler. Hava iletim oranının en büyük değerleri kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlıklardan elde edildi. Bunun nedeni, bölüm 5.1’de belirtildiği gibi iletilen hava miktarının yüksek mertebede olmasından kaynaklanmaktadır.

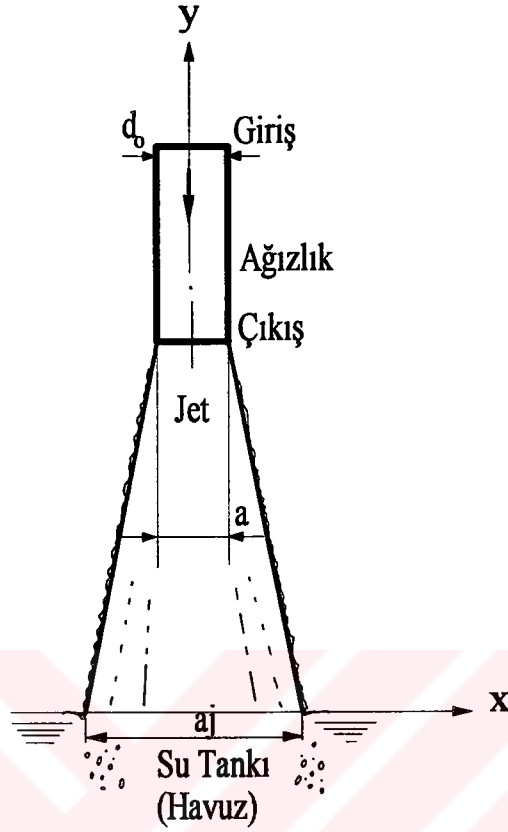


Şekil 5.5 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim oranları ($d_o=8\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)

5.2. Su Jetinin Genişlemesi

Bu çalışmada kullanılan ağızlık tipleri arasında kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık tipi farklı özellikler göstermektedir. Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklardan deşarj olan su jetleri artan hız değerlerinde yörüngesi boyunca ilerlerken jetin enine doğrultuda yani x-yönünde bir yayılma (genişleme) gösterdiği gözlemlendi (Şekil 5.6).

Şekilde görüldüğü gibi bu tip ağızlık için ağızlık girişinde dairesel olan kesit ağızlık çıkışında kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesite dönüşmektedir. Dairesel kesitin ağızlık çıkış noktasında x-yönüne doğru büzülmesi sonucu elde edilen geometrik şekil jetin yörüngesi boyunca hareketi esnasında x yönünde yayılımına (genişleme) neden olmaktadır.

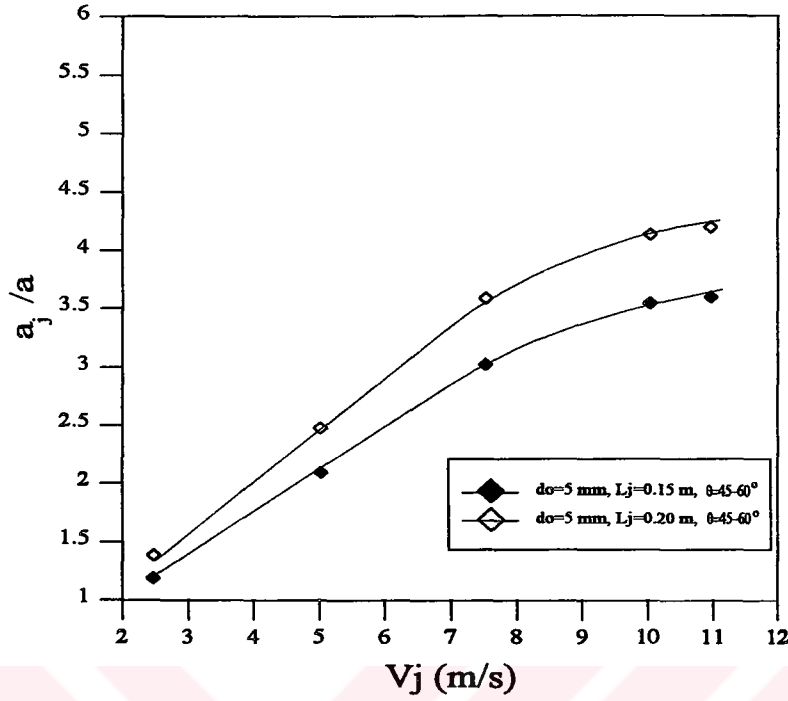


Şekil 5.6 Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde ağızlıktan çıkan jetin yörüngesi boyunca yayılışı

Jetin x-yönündeki bu yayılımının (genişleme) bir sonucu olarak jetin kalınlığı azalmakta, genişliği ise artmaktadır. Artan hız değerlerinde jet daha fazla yayılmakta ve dolayısıyla jetin çevre uzunluğu da artış göstermektedir.

Jetin x-doğrultusunda çevre uzunluğunu artırarak yörüngesi boyunca yoluna devam etmesi sonucu hava ortamı ile arasındaki sürtünme kuvvetleri artış gösterdiğinden jetin taşıdığı havanın hacimsel akısı da artmaktadır. Hava transferi jet yüzeyi üzerinde gerçekleştiğinden bu yüzeyin arttırılması iletilen hava miktarını da arttırmaktadır.

Su jetinin çıkış noktasındaki genişliği, a ve tank su yüzeyine çaptığı noktadaki genişliği, a_j olmak üzere jetin yayılma (genişleme) oranı (a_j / a) ile ifade edilirse hızla bağlı olarak jetin yayılma oranı arasında çizilen grafikler Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki gibi olmaktadır.

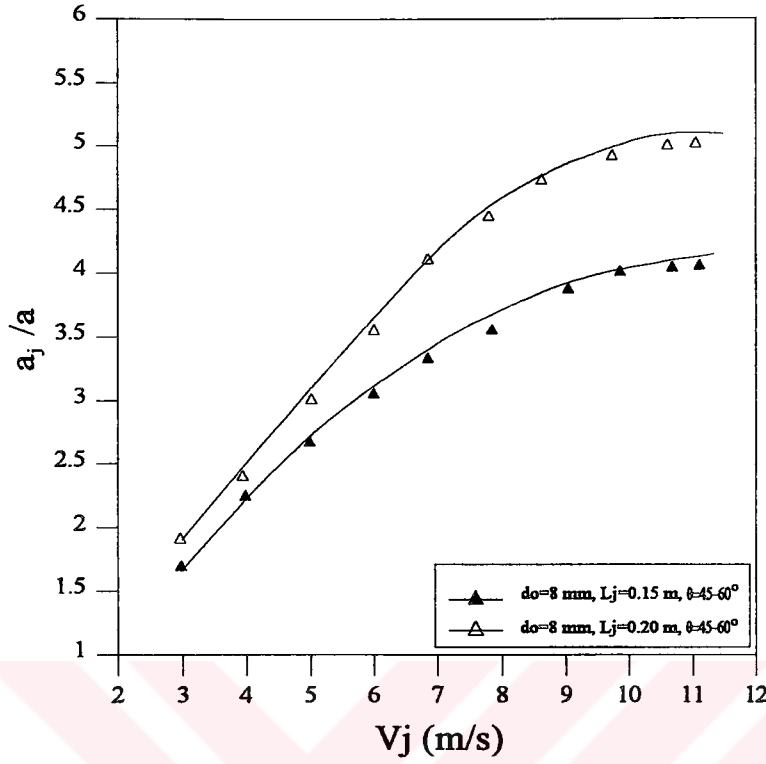


Şekil 5.7 Jet hızına bağlı olarak jetin yayılma miktarları ($d_o=5$ mm, kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlık için)

Şekil 5.7 ağızlık giriş çapı (d_o)=5 mm, Şekil 5.8 ise ağızlık giriş çapı (d_o)=8 mm olması halinde jet yayılımını ifade etmektedir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 incelendiğinde; jet hızının, $V_j < 7$ m/s olduğu bölgede jetin yayılma oranı lineer bir artış göstermektedir. Jet hızlarının $7 \text{ m/s} < V_j < 12 \text{ m/s}$ aralığında olması halinde jet yayılımı 2. dereceden bir fonksiyon göstererek azalmakta ve sabit kalmaya doğru bir meyil göstermektedir. Ağızlık çapının değişimine bağlı olarak elde edilen grafiklerden görüldüğü gibi ağızlık çapı arttıkça jet yayılma oranı da artmaktadır.

Ayrıca, grafiklerde görüldüğü gibi jet uzunluğu attıkça, jetin genişleme oranı da artmaktadır. y-yönünde jet uzunluğu arttıkça, jetin yörüngesi boyunca alacağı mesafe attığından buna paralel olarak x-yönündeki yayılımı da artmaktadır.

Jet çarpma açılarının değişimine bağlı olarak jetin genişleme oranlarında herhangi bir artış gözlenmemiştir. Jet çarpma açısının genişleme üzerinde etkisi olmamaktadır.



Şekil 5.8 Jet hızına bağlı olarak jetin yayılma miktarları ($d_o=8$ mm, kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlık tipi için)

5.3 Jet Çevre Uzunluğunun Etkisi

Dairesel ve elips kesitli jetlerin çarpma noktasındaki çapı (d_j) veya genişliği (a_j ve b_j) Evans ve diğ. (1996) tarafından tanımlanan (25) nolu denklemden hesaplandı. Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli jet çarpma noktasında ölçüm yapmaya imkan verdiği için jet genişleme oranları deneysel ölçüm olarak kayıt edildi. Elde edilen sonuçlar bölüm 5.2’de grafikler halinde verilmiştir.

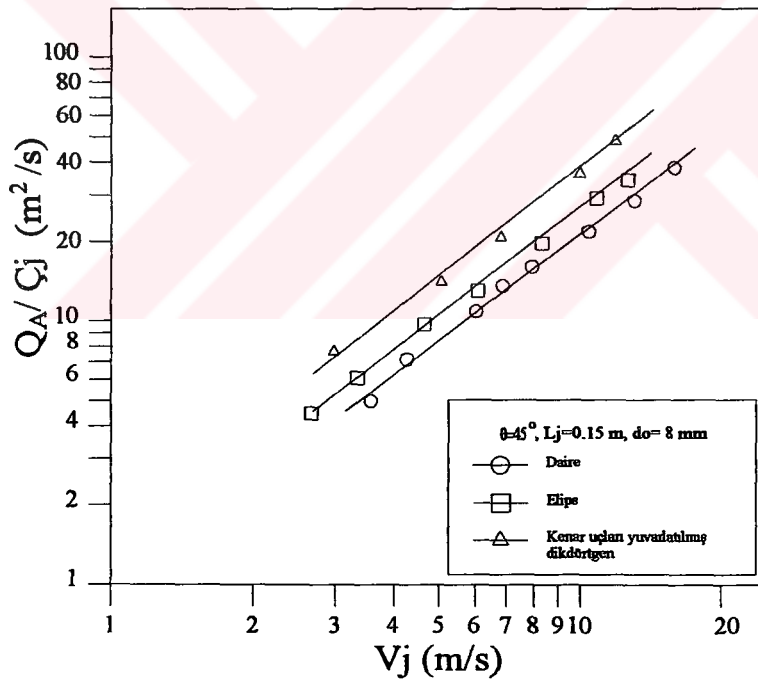
Bölüm 3.3’de açıklandığı üzere Sene (1988) tarafından verilen teorik bir modelde hava iletiminin jetin çarpma noktasındaki çevre uzunluğu ve hızının bir fonksiyonu olduğu vurgulanmaktadır. Burada, çarpma noktasında ağızlık tiplerine bağlı olarak gelişen jet geometrilerinin çevre uzunluğu ile hava iletimi arasındaki ilişkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.9’da verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi hava iletiminin çevre uzunluğuna oranı jet hızına bağlı olarak artmaktadır. Ağızlık tipi yönünden incelendiğinde kenar uçları yuvarlatılmış

dikdörtgen kesitli ağızlıktan çıkan jetin çevre uzunluğu, hıza bağlı olarak daha yüksek hava iletimi sağlamaktadır.

Ağızlık tiplerine bağlı olarak jet çevre uzunluklarının (ζ_j) hesaplanmasında Bölüm 4.3 verilen denklemler kullanıldı.

Dairesel kesitler jetler için çarpma noktasında, daire çevresi boyunca borulanma olmakta ve hava iletimi gözlenmektedir. Bu nedenle, jetin çarpma noktasındaki çapı(d_j) dikkate alınmaktadır. Aynı durum elips kesitli jetler içinde geçerli olmakta ve çarpma noktasındaki genişlikleri dikkate alınmaktadır. Dikdörtgen kesitli jetlerde ise çarpma noktasındaki hava iletimi için jet genişliği boyunca bir mekanizma oluşmaktadır. Böylece, dikdörtgen jet halinde çevre uzunluğunun hesaplanmasında jetin çarpma noktasındaki genişliği (a_j) dikkate alınmaktadır.



Şekil 5. 9 Jet hızına ve ağızlık tipine bağlı olarak jet çevre uzunluğu ile hava iletimi arasındaki ilişkisi

5.4. Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Ölçümleri

Serbest su jetleri tarafından taşınan hava, tank su yüzeyine çarptıktan sonra meydana gelen gerilmeler (kesme ve makaslama) sonucunda küçük çaplardaki hava kabarcıklarına dönüşmekte ve tank su kütlesi derinliği boyunca hareket etmektedir. Tank derinliğince dağılan hava kabarcıklarının serbest su yüzeyi ile düşey yönde dağıldığı son nokta arasındaki mesafe hava kabarcığı nüfuz derinliği olarak tanımlanmaktadır.

Hava kabarcığı nüfuz derinliği, düşey yönde havuz yan duvarına (8 mm kalınlığında şeffaf cam tabaka) yerleştirilen milimetrik skalalı bir ölçüm çubuğuyla gözlemsel olarak ölçüldü. Hava kabarcığı nüfuz derinliği, (H_p) sembolü ile ifade edildi. Seçilen her ağızlık tipi için hava kabarcığı nüfuz derinliği ölçümleri jet hızı, ağızlık çapı, jet uzunluğu ve jet çarpma açısı değişkenleri altında tamamlandı.

Elde edilen deneysel sonuçlar, jet hızı ve hava kabarcığı nüfuz derinliği arasında çizilen grafikler üzerinde sunulmuştur.

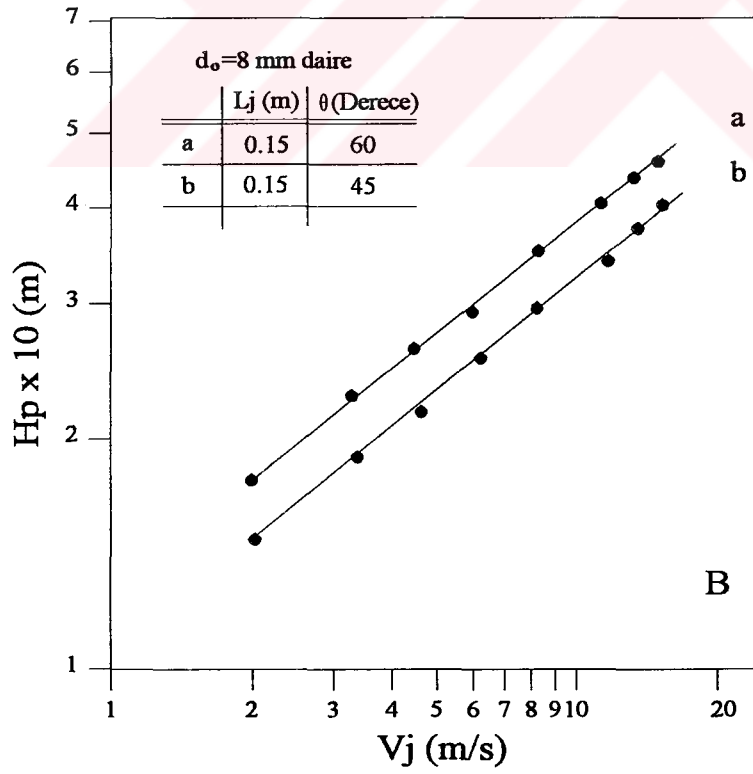
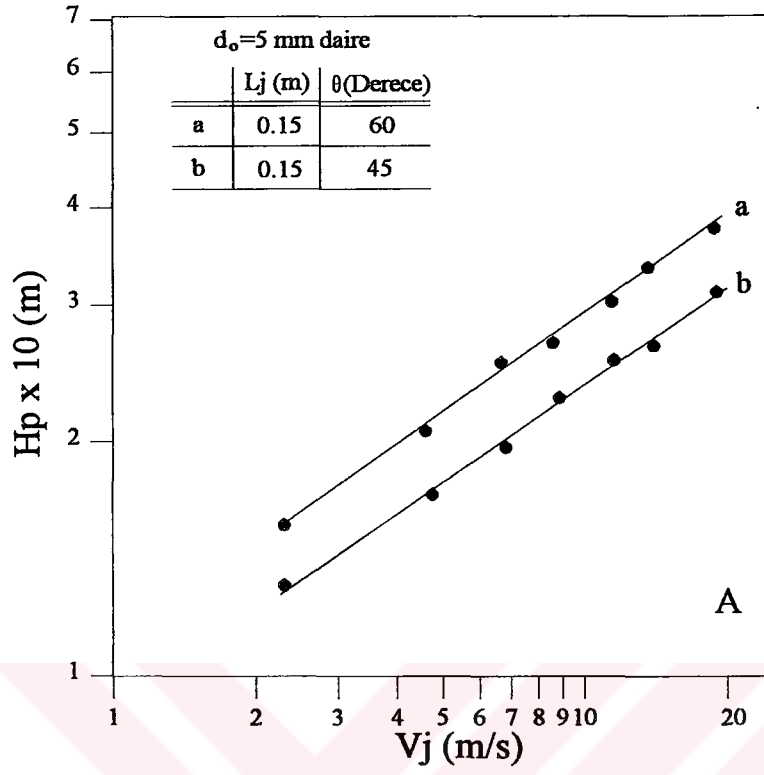
5.4.1 Dairesel Kesitli Ağızlık Tipinde Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verileri

Dairesel kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliği verileri Şekil 5.10 A – B’ de verilmiştir. Farklı jet hızı, ağızlık çapı, jet uzunluğu ve çarpma açısına bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin değişimi incelenmiştir.

Şekil 5.10 A’da ağızlık çapı (d_o)=5 mm sabit olmak üzere çarpma açısı (θ)= 45°-60° ve jet uzunluğu (L_j)=0.15 m için yapılan hava kabarcığı nüfuz derinliği ölçümlerini göstermektedir. Şekil 5.10 B’de ise ağızlık çapı (d_o)=8 mm sabit olmak üzere çarpma açısı (θ)= 45°-60° ve jet uzunluğu (L_j)= 0.15 m için yapılan hava kabarcığı nüfuz derinliği ölçüm değerlerini vermektedir.

Elde edilen verilere göre jet hızı, ağızlık çapı ve çarpma açısının artan değerlerinde hava kabarcığı nüfuz derinliği artmakta, jet uzunluğunun artan değerlerinde ise azalma göstermektedir. Bunun en önemli sebebi, jet uzunluğu ile iletilen hava miktarı artış göstererek jet çarpma basıncını önemli ölçüde sönmülmesinden kaynaklanmaktadır. Jet hızı ve ağızlık çapının artması ile jetin momentumu da attığından nüfuz derinliği artmaktadır.

Elde edilen deneysel sonuçlar dairesel kesitler için literatürde Ohkawa ve diğ.(1986) tarafından verilen sonuçlar ile uyum göstermektedir.



Şekil 5.10 Dairesel kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı, jet uzunluğu, ağızlık çapı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi A) $d_o=5$ mm, B) $d_o=8$ mm

5.4.2 Elips Kesitli Ağızlık Tipinde Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verileri

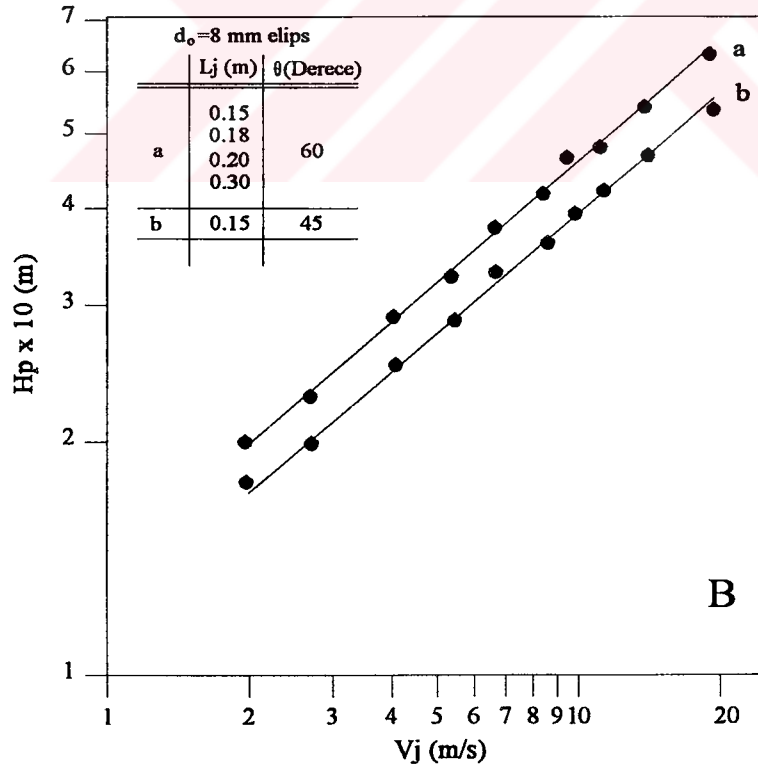
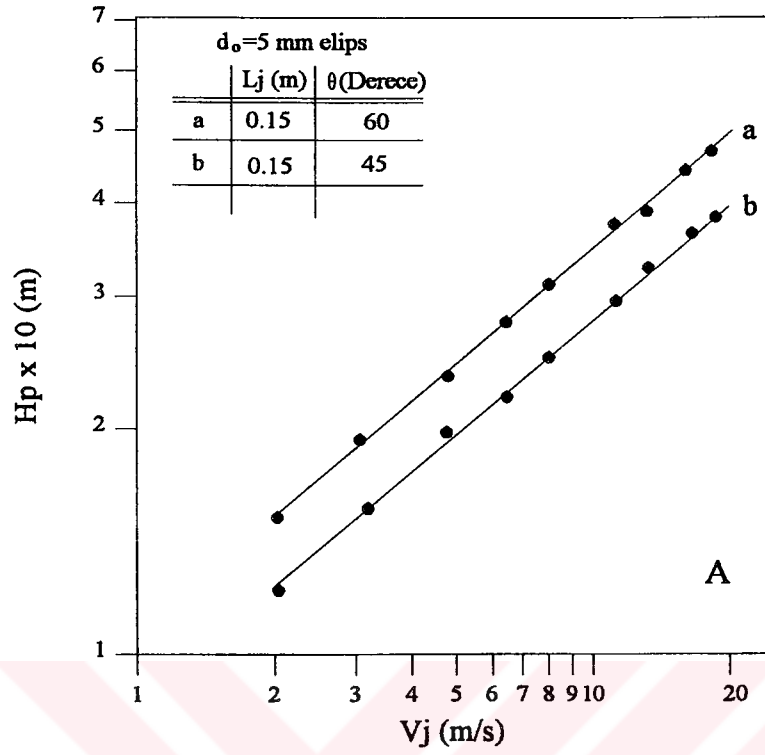
Dairesel kesitli ağızlık çıkış noktasından itibaren 45° 'lik bir açı ile kesilmesi sonucu ağızlık çıkışında geometrik olarak elips şeklinde bir kesit elde edildi. Elips kesitli ağızlık ile ilgili detay bilgiler Bölüm 4.4'de verilmiştir.

Elde edilen elips kesit 45° 'lik bir açı ile kesildiğinden daha geniş bir geometrik alan meydana geldi.

Elips kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliği verileri Şekil 5.11 A – B' de verilmiştir. Farklı jet hızı, ağızlık çapı, jet uzunluğu ve çarpma açısına bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin değişimi incelenmiştir. Şekil 5.11 A'da ağızlık çapı (d_o)= 5 mm sabit olmak üzere çarpma açısı (θ)= 45° - 60° ve jet uzunluğu (L_j)= 0.15 m için yapılan hava kabarcığı nüfuz derinliği ölçümlerini göstermektedir. Şekil 5.11 B'de ise ağızlık çapı (d_o)=8 mm sabit olmak üzere çarpma açısı (θ)= 45° - 60° ve jet uzunluğu (L_j)=0.15-0.30 m için yapılan hava kabarcığı nüfuz derinliği ölçüm değerlerini vermektedir.

Elde edilen verilere göre jet hızı, ağızlık çapı ve çarpma açısının artan değerlerinde hava kabarcığı nüfuz derinliği artmakta, jet uzunluğunun artan değerlerinde ise azalma göstermektedir. Bunun en önemli sebebi, Bölüm 5.4.1'de belirtildiği gibi jet uzunluğu ile iletilen hava miktarının artış göstermesi sonucu jet çarpma basıncının önemli ölçüde sönümlenmesinden kaynaklanmaktadır. Jet hızı ve ağızlık çapının artması ile jetin momentumu da attığından nüfuz derinliği artmaktadır. Jet çarpma açısının artması ile iletilen hava miktarı azalma göstermektedir. Bu nedenle, büyük çarpma açılarında jetin taşıdığı hava miktarının azalma göstermesi ile çarpma basıncı daha az sönümlenmektedir. Böylece, nüfuz derinliği artmaktadır.

Elips kesitli ağızlıklar, dairesel kesitli ağızlıklardan elde edilen deney sonuçlarına ait grafiklerde görüldüğü gibi lineer bir artış göstermektedir. İki ağızlık arasındaki fark ağızlık giriş çapı dairesel ve sabit çapta olmasına rağmen ağızlık çıkış kesiti geometrik olarak elips kesitli olması sonucu yüksek hava kabarcığı nüfuz derinliği sağlaması gözükmektedir.



Şekil 5.11 Elips kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı, jet uzunluğu, ağızlık çapı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi A) $d_o = 5 \text{ mm}$, B) $d_o = 8 \text{ mm}$

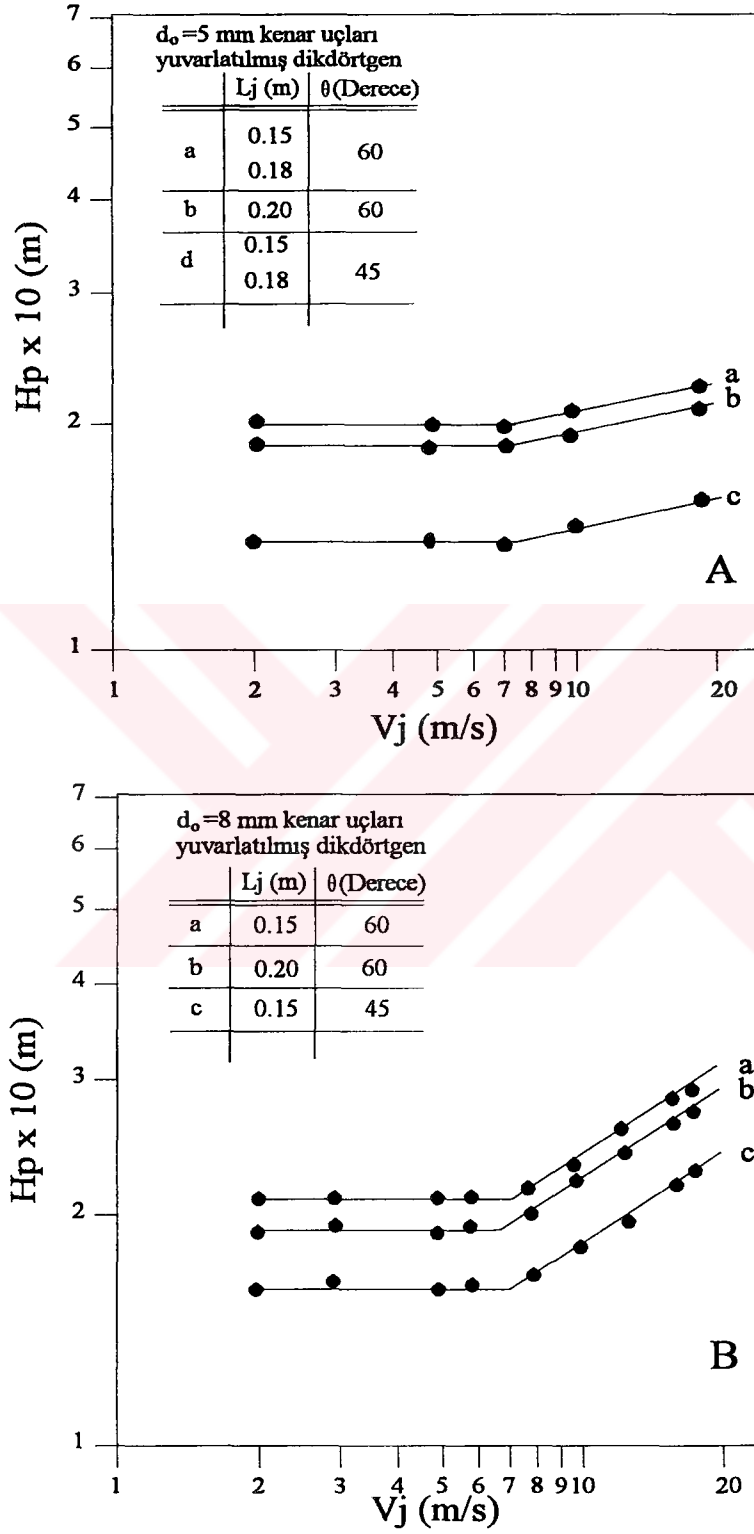
5.4.3 Kenar Uçları Yuvarlatılmış Dikdörtgen Kesitli Ağzılık Tipinde Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verileri

Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağzılık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliği verileri Şekil 5.12 A – B’ de verilmiştir. Farklı jet hızı, ağzılık çapı, jet uzunluğu ve çarpma açısına bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen verilere göre jet hızı, ağzılık çapı ve çarpma açısının artan değerlerinde hava kabarcığı nüfuz derinliği artmakta, jet uzunluğunun artan değerlerinde ise azalma göstermektedir. Bunun en önemli sebebi, jet uzunluğu ile iletilen hava miktarı artış göstererek jet çarpma basıncını önemli ölçüde sönmülmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.12-A ağzılık giriş çapı (d_o)=5 mm olması durumunda hava kabarcığı nüfuz derinliği değişimini göstermektedir. Hava kabarcığı nüfuz derinliği, jet hızının (V_j)= 7 m/s’ye kadar olan hızlarında sabit kalmakta bu noktadan itibaren jet hızlarının artmasına bağlı olarak artış göstermektedir. Bunun sebebi, iletilen hava kabarcıklarının yüksek konsantrasyonlarda ve daha küçük kabarcık çaplarına sahip olması ve tank su yüzeyine çıkma kuvvetlerinin (kaldırma kuvveti), jetin 7 m/s sonrası artan hızlarla kazandığı momentum ile karşılanmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.12-B ağzılık giriş çapı (d_o)=8 mm olması durumunda hava kabarcığı nüfuz derinliği değişimini göstermektedir. Hava kabarcığı nüfuz derinliği, jet hızının (V_j) 6-7 m/s’ye kadar olan hızlarında sabit kalmakta bu noktadan itibaren jet hızlarının artmasına bağlı olarak artış göstermektedir. Bunun sebebi, daha önce belirtildiği gibi iletilen hava kabarcıklarının tank su yüzeyine çıkma kuvvetlerini (kaldırma kuvveti) jetin 6-7 m/s sonrası artan hızlarla kazandığı momentum ile karşılaşmasından kaynaklanmaktadır.

Ağzılık çapına bağlı olarak çizilen grafikler incelendiğinde hava kabarcığı nüfuz derinliği ağzılık çapının artması ile artış göstermektedir. Düşük jet hızlarında ($V_j < 7$ m/s) hava kabarcığı nüfuz derinliği her ağzılık çapı ($d_o = 5 - 8$ mm) için aynı değerlerde olmasına rağmen yüksek jet hızlarında ağzılık çapının artması ($d_o = 8$ mm) ile hava kabarcığı nüfuz derinliği değerleri büyük oranlarda artış gösterdi.



Şekil 5.12 Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı, jet uzunluğu, ağızlık çapı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi A) $d_o = 5$ mm, B) $d_o = 8$ mm

5.4.4 Ağızlık Tipine Bağlı Olarak Hava Kabarcığı Nüfuz Derinliği Verilerinin Karşılaştırılması

Ağızlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliği verilerinin karşılaştırılması Şekil 5.13, şekil 5.14, şekil 5.15 ve şekil 5.16'da verilmiştir. En yüksek hava kabarcığı nüfuz derinliğine elips kesitli ağızlıklar ile ulaşılmaktadır. Buna neden olarak, ağızlık giriş çapından (d_o) elips kesitli çıkış noktasına geçiş durumunda kesit alanı arttığından ağızlıktan deşarj olan jetin çarpma basıncının artması ile gösterilebilir.

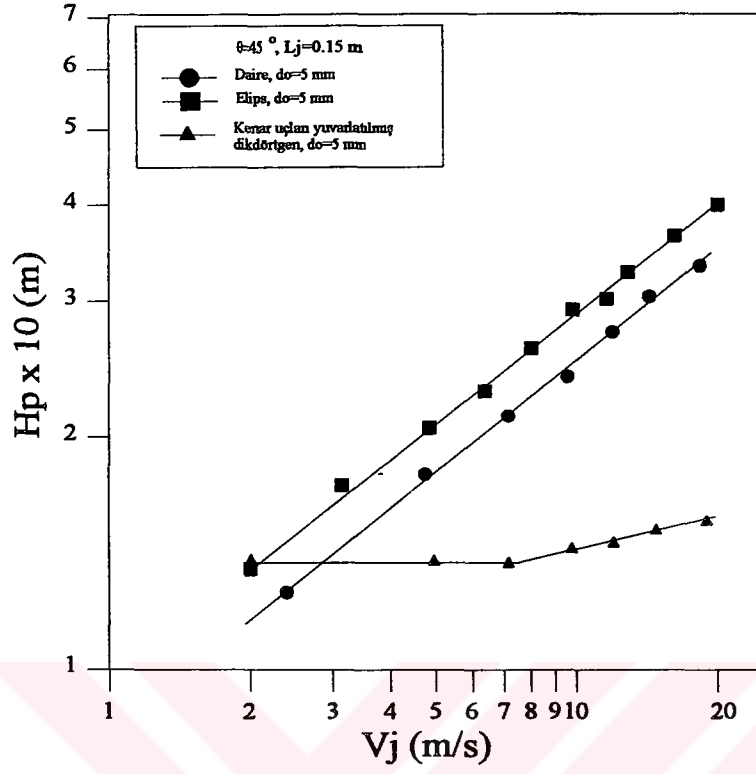
Bunun yanında jet momentumundaki artışlarla iletilen hava kabarcıklarının su yüzüne çıkma kuvvetleri karşılandığından süreklilik gösteren jet akımı karşısında su yüzüne çıkmak isteyen hava kabarcıkları artan momentum ile daha derinlere nüfuz etmekte ve su kütlesi içinde daha uzun süre kalmaktadır.

Farklı ağızlık çapı ve çarpma açılarında jet hızına bağlı olarak elde edilen grafiksel veriler hava kabarcığı nüfuz derinliği bakımından aynı eğilimleri göstermemektedir. Genel olarak elips ve dairesel kesitli ağızlık tipleri için elde edilen eğriler lineer bir fonksiyon göstermektedir.

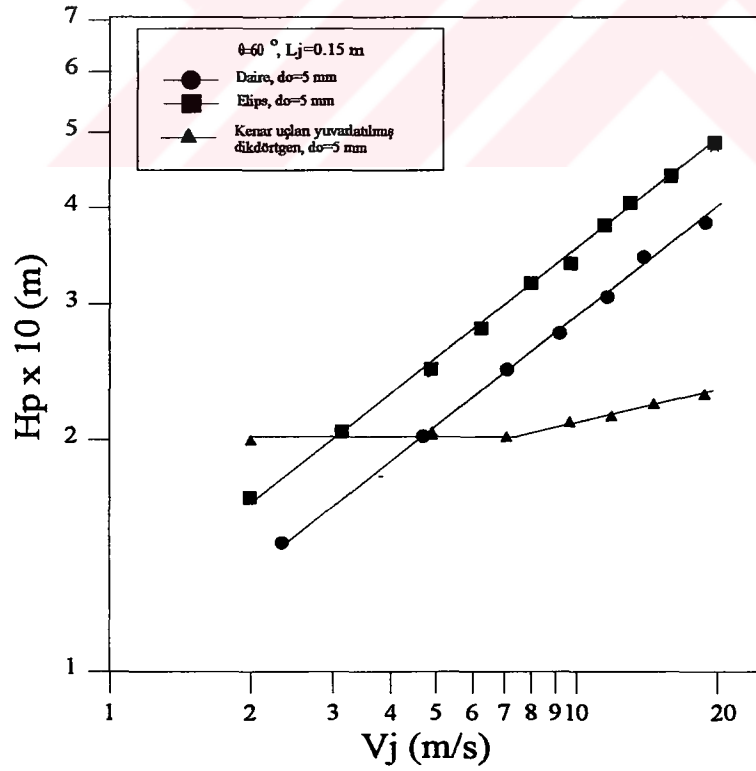
Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklar, düşük hızlarda ($V_j < 5$ m/s) sabit hava kabarcığı nüfuz derinliğine sahip olmasına rağmen dairesel kesitli ağızlıklara nazaran daha fazla hava kabarcığı nüfuz derinliği temin etmektedir.

Ayrıca, dairesel ve elips kesitli ağızlıklar, ağızlık çapının (d_o)=5 mm'den (d_o)=8 mm'ye çıkarılması karşısında daha fazla hava kabarcığı nüfuz derinliği temin etmesine rağmen, jet hızı ($V_j < 7$ m/s) için kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlık artan ağızlık çapı karşısında aynı değerlerde hava kabarcığı nüfuz derinliği temin etmektedir.

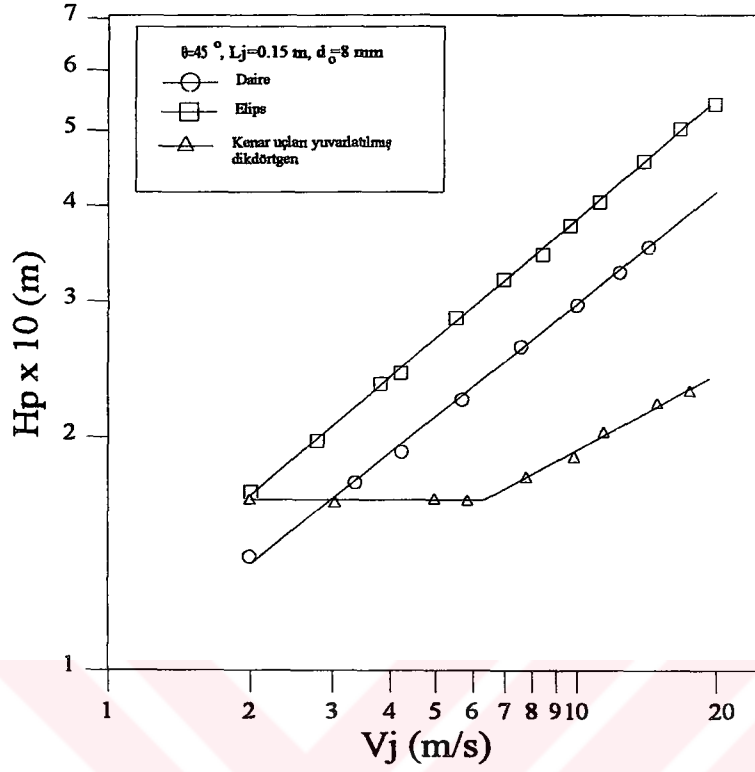
Bunun nedeni kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen ağızlığın iletilen hava miktarları yönünden daha fazla hava kabarcığı transfer etmesi ve dolayısı ile momentum ve çarpma basıncı yönünden fazla sönmelenmesinden kaynaklanmaktadır.



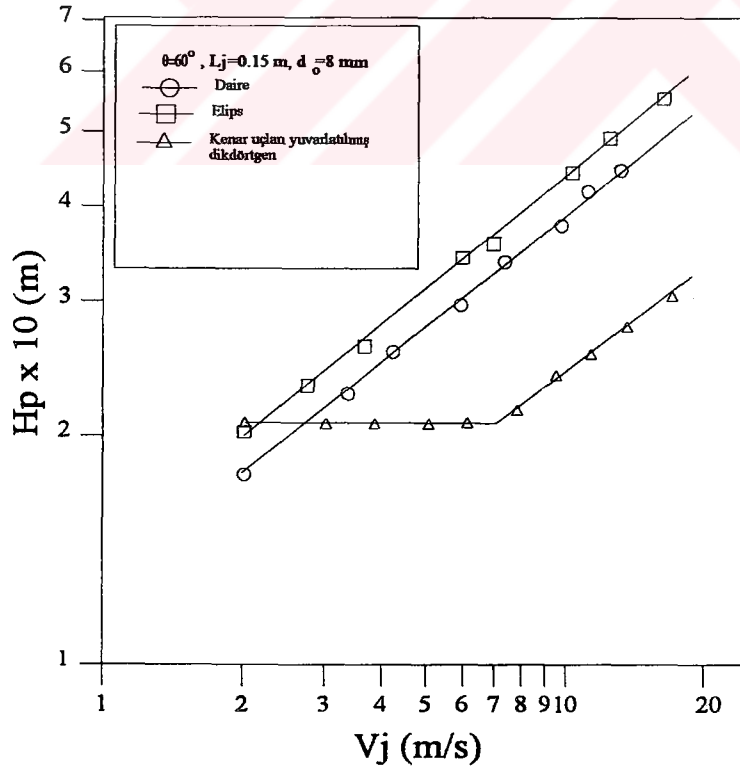
Şekil 5.13 Ağzlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o = 5$ mm, $L_j = 0.15$, $\theta = 45^\circ$)



Şekil 5.14 Ağzlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o = 5$ mm, $L_j = 0.15$, $\theta = 60^\circ$)



Şekil 5.15 Ağızlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o=8 \text{ mm}$, $L_j=0.15$, $\theta=45^\circ$)



Şekil 5.16 Ağızlık tipine bağlı olarak hava kabarcığı nüfuz derinliğinin karşılaştırılması ($d_o=8 \text{ mm}$, $L_j=0.15$, $\theta=60^\circ$)

5.5. Oksijen Transfer Katsayısının (k_La) Tayini

Oksijen transfer katsayısı (k_La), (30) nolu denklemden hesaplandı.

$$\ln[(c_s - c_o) / (c_s - c)] = - k_La \cdot (t_o - t) \quad (30)$$

Oksijen transfer katsayısı (k_La), ağızlık tipleri ve jet hızı değişkenlerine bağlı olarak elde edildi. Başlangıçta, tanktaki su kütlesinin çözünmüş oksijen konsantrasyonu sodyum sülfid metoduyla deoksidede (sıfır çözünmüş oksijen konsantrasyonu) edildi. Bu işlem için 70 g/m^3 sodyum sülfid ile katalizör olarak 4 g/m^3 kobalt klorür kullanıldı. Sonra jet havalandırıcı çalıştırıldı. Tanktaki suya sirkülasyon pompası yardımıyla sürekli olarak geridevir yaptırıldı. Geridevir yaptırılmasının temel sebebi, su jeti ile havalandırma sisteminin pratik uygulamalarında elde edilen su jetlerinin geridevir suyu ile sürekliliğinin sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, literatürdeki bütün çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da tanktaki su kütlesine geridevir yaptırıldı. Zamana bağlı olarak çözünmüş oksijen konsantrasyon değişimleri oksijenmetre cihazıyla kaydedildi. Oksijenmetre cihazı, deney çalışmalarının yapıldığı ortamdaki atmosfer şartlarına bağlı olarak;

Elazığ ili için:

Rakım : 1067 m, Atmosfer Basıncı : 677 mm - Hg, Nispi Nem : % 73

değerleri dikkate alınarak kalibrasyon işlemleri tamamlandı. Bütün deneysel ölçümler tank tabanına yakın mesafede yapıldı. (18) nolu denklemde verilen $\ln[(c_s - c_o) / (c_s - c)]$ ifadesinin zamana bağlı olarak değişimini gösteren bir grafik çizildi. Grafikten elde edilen eğrinin eğimi, oksijen transfer katsayısı (k_La) olarak bulundu. Deney şartlarına göre elde edilen sonuçlar, standart şartlara göre yeniden düzenlendi.

Ortam şartlarındaki sıcaklık ve basınç değerlerine bağlı olarak yapılan ölçüm değerleri standart şartlara göre (19) ve (21) nolu denklemler ile yeniden düzenlendi. Ortamın sıcaklığına (T) bağlı olarak elde edilen oksijen transfer katsayısını (k_La), standart sıcaklığa (20°C) göre ifade etmek için (31) nolu denklem kullanıldı.

$$(k_La)_{20^\circ\text{C}} = (k_La)_T [1.024^{(T-20)}] \quad (31)$$

Ortaman atmosfer basıncına bağılı olarak elde edilen çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu standart atmosfer şartlarına (1 atm. veya 760 mm-Hg) göre ifade etmek için (32) nolu denklem kullanıldı.

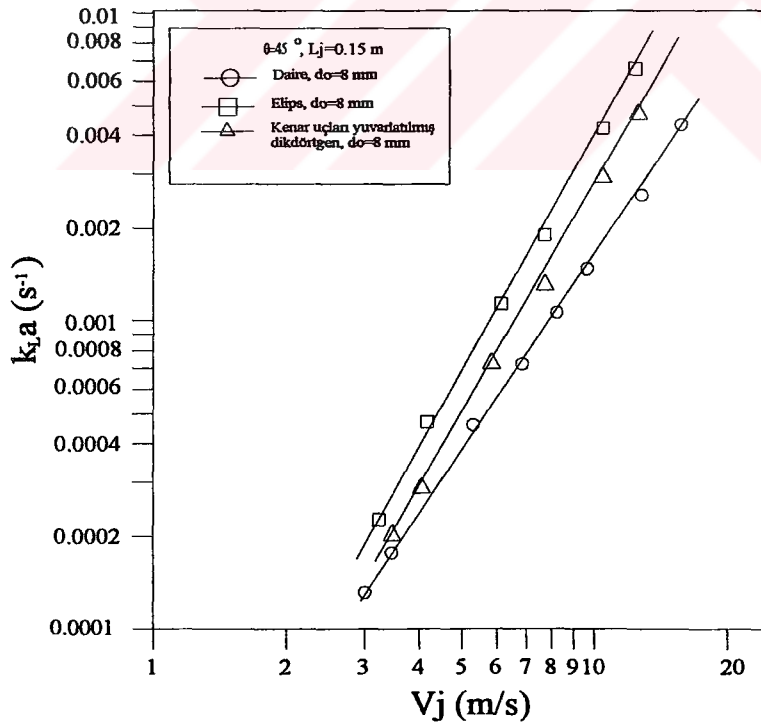
$$C_S = (C_S)_{760 \text{ mm-Hg}} \cdot (P_A - P_w) / (760 - P_w) \quad (32)$$

Burada, P_A = Atmosfer basıncı, mm-Hg

P_w = Suyun buhar basıncı, mm-Hg ifade edilmektedir.

Oksijen transfer katsayısı ($k_L a$) ile jet hızı (V_j) arasında çizilen grafik sonucu, jet hızındaki artış ve ağızlık tipi değişimiyle oksijen transfer katsayısında artmaya karşı bir eğilim gözlemlendi (Şekil 5.17). Buna neden olarak, iletilen hava miktarı ile hava kabarcığı nüfuz derinliğindeki artışlar gösterilebilir. Jet çarpma açısı yönünden literatürdeki veriler ile uygunluk göstererek, jet çarpma açısının oksijen transfer katsayısı ($k_L a$) üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğu gözlemlendi.

Ağızlık çapının değişen değerlerinde oksijen transfer katsayısı ($k_L a$) çok az bir azalma gösterdi.



Şekil 5.17 Ağızlık tipine bağılı olarak oksijen transfer katsayısının karşılaştırılması
($d_o = 8 \text{ mm}$, $L_j = 0.15$, $\theta = 45^\circ$)

5.6. Oksijenlendirme Kapasitesi (OC) Değerlerinin Bulunması

Bir havalandırma sisteminin oksijenlendirme kapasitesi, birim zamanda ve birim hacimdeki su ortamına iletilen oksijen miktarı olarak tarif edilmektedir. Bu çalışmada, sistemin oksijenlendirme kapasitesi tank su hacmi sabit 0.500 m³ olmak üzere standart şartlara göre tayin edilen oksijen transfer katsayısı ve çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu değerlerinin (33) nolu denklemde yerine yazılması ile elde edildi.

$$OC = (k_L a) \cdot C^* \cdot V \quad (33)$$

5.7. Oksijen Transfer Veriminin (OE) Bulunması

Oksijen transfer verimi (OE), jet gücüne bağlı olarak her bir kilowatt saate karşılık gelen hacimdeki maksimum oksijen transfer hızı (sıfır çözünmüş oksijen konsantrasyonunda) olarak tanımlanır ve (34) nolu denklem ile hesaplanmaktadır.

Oksijen transfer veriminin (OE) bulunması için başlangıçta bölüm 5.6'da belirtildiği şekilde oksijenlendirme kapasiteleri hesaplandı. Sabit debilerde, ağızlık tiplerine göre değişen jet hızlarına bağlı olarak jet gücü (35) nolu denklem ile hesaplandı.

$$OE = OC / N_j \quad (34)$$

$$N_j = (1/2) \cdot Q_w \cdot \rho_w \cdot V_j^2 \quad (35)$$

Burada, OE = Oksijen transfer verimi, kg O₂ / kW- saat

OC = Oksijen kapasitesi, kg O₂ / saat

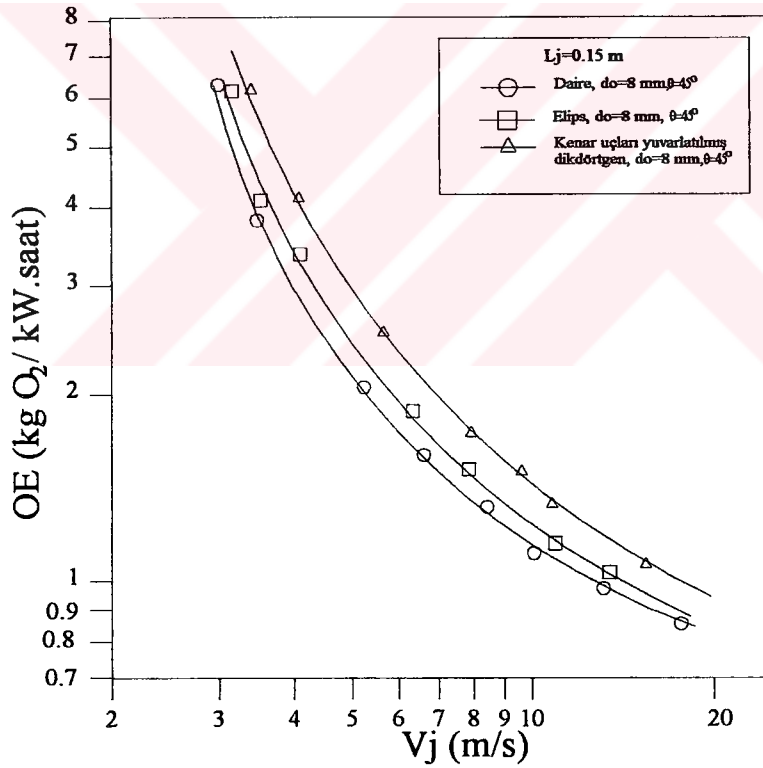
N_j = Jetin net gücü, kW

Q_w = Jet deşarj debisi, m³/s

ρ_w = Suyun yoğunluğu, kg/m³

V_j = Jet hızı, m/s ifade edilmektedir.

Ağızlık tiplerine bağlı olarak jet hızı ile oksijen transfer verimi (OE) arasında logaritmik bir grafik çizildi (Şekil 5.18). Elde edilen eğriler ters orantılı bir fonksiyon yani artan jet hızı değerlerinde oksijen transfer verimi azalan bir fonksiyon göstermektedir. Şekil 5.18’de görüldüğü gibi düşük jet hızlarında oksijen transfer performansındaki verim oldukça yüksektir. Ayrıca, ağızlık tip değişimi ile oksijen transfer verimi (OE) değişmektedir. Dairesel kesitli ağızlığa nazaran seçilen her iki tip (elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesit) daha yüksek oksijen transfer verimi temin etmektedir. Ağızlık tip değişimi ile oksijen transfer verimindeki artış; elips kesitli ağızlık durumunda, ağızlık çıkış noktasında ağızlık geometrisi ile kesit alanı değişiminin bir sonucu olarak düşünülebilir. Ayrıca, ağızlık giriş çapından (d_o) elips kesitli çıkış noktasına geçiş durumunda kesit alanı arttığından çarpma basıncının artması ile gösterilebilir.



Şekil 5.18 Ağızlık tipine bağlı olarak oksijen transfer veriminin karşılaştırılması
($d_o = 8 \text{ mm}$, $L_j = 0.15$, $\theta = 45^\circ - 60^\circ$)

Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitin en yüksek oksijen transfer verimine sahip olması, jetin enine doğrultuda yayılımının (x-yönünde enine genişleme)

bir sonucu olarak jetin çevre uzunluğunun artarak daha fazla havanın beraberinde taşınması ile izah edilebilir.

Jet hızlarının artışı karşısında oksijen veriminin azalması literatür ile uygunluk göstermektedir. Dairesel kesit için elde edilen sonuçlar Ohkawa ve diğ.(1986) tarafından yapılan deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir. Van de Sande ve Smith (1975) yaptıkları bir çalışmada ağızlık çaplarını, $d_o = 3.9, 5.8, 8.0, 10.0, 12.0$ mm seçtiler. En yüksek havalandırma verimine en küçük ağızlık çapında ulaşılar. Bunun nedenini, jet çapı azaldıkça elde edilen ince jetler tarafından iletilen hava kabarcıklarının küçük çaplarda olması ve kabarcık temas yüzeyinin artmasıyla açıklamaktadırlar. Ayrıca, Chudacek (1995) ince jetlerle (4-5 mm) küçük çaplarda hava kabarcıkları elde edildiğini belirtmektedir.

Bu doğrultuda, kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıktan deşarj olan jetin kalınlığı, $b=2-4$ mm olduğundan küçük çaplarda hava kabarcıkları temin etmektedir.

Jet çarpma açısı $\theta=45$ ve 60° seçildi. Literatürde belirtildiği gibi çarpma açısı değişiminin havalandırma verimi üzerinde etkisi olmadığı görüldü.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre şu sonuçlar çıkarılabilir.

- i) Hava İletimi: Hava iletim miktarları (Q_A) jet hızı (V_j), ağızlık çapı (d_o) ve ağızlık tipine bağlı olarak değişmektedir. Dairesel kesitli ağızlık tipine nazaran seçilen elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlıklar daha yüksek hava iletimi sağladılar. Elips kesitli ağızlık durumunda, dairesele ağızlık giriş çapından (d_o) elips kesitli çıkış noktasına geçişte kesit alanı ve dolayısıyla çevre uzunluğu (C_j) arttığından ağızlıktan deşarj olan jet daha fazla hava sürtünmelerine maruz kalarak hacimsel hava akısını arttırmaktadır. En yüksek hava iletimi değerlerine kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklar tarafından ulaşıldı. Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklardan deşarj olan jetlerin yörüngesi boyunca enine bir genişleme göstererek jet çevre uzunluğunun (C_j) artması ile daha fazla hava taşıdığı gözlemlendi. Bölüm 5.3 – Şekil 5.9’da jet çevre uzunluğunun hava iletimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bölüm 5.2’de belirtildiği gibi jet hızları $3 < V_j < 12$ m/s arasında olmak üzere kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklardan çıkan jetlerde genişleme oranları $1.5 \leq (a_j / a) \leq 5$ arasında değişim gösterdi. Görüldüğü gibi bu tip ağızlıklardan elde edilen jetler çarpma noktasında ağızlık genişliğinin 5 katı bir genişleme göstermektedir. Bu doğrultuda, Sene (1988) tarafından önerilen modele göre, çarpma noktasındaki jet çevre uzunluğu hava iletiminin bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Bu yaklaşıma bağlı olarak elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde Şekil 5.9’da belirtildiği gibi jet hızı ve ağızlık tipine göre gelişen jet geometrisinin çarpma noktasındaki çevre uzunluğu hava iletimini etkilemektedir. Literatürde belirtildiği gibi jet çarpma açısı arttıkça hava iletiminin azaldığı gözlemlendi. Hava iletimi, farklı üç hız bölgesine ayrılmaktadır. Literatürde bu hız bölgeleri düşük hızlı jet bölgesi ($V_j < 5$ m/s), geçiş

bölgesi ve yüksek hızlı ($V_j > 10$ m/s) jet bölgesi olarak tanımlanmakta ve bölgelerde farklı hava iletim mekanizmaları meydana geldiği belirtilmektedir.

- ii) Hava kabarcığı nüfuz derinliği: Elde edilen sonuçlara göre jet hızı, ağızlık çapı ve çarpma açısının artan değerlerinde hava kabarcığı nüfuz derinliği (H_p) artmakta, jet uzunluğunun (L_j) artan değerlerinde ise azalma göstermektedir. Bunun en önemli sebebi, jet uzunluğu ile iletilen hava miktarı artış göstererek jet çarpma basıncını önemli ölçüde sönmülmesinden kaynaklanmaktadır. En yüksek hava kabarcığı nüfuz derinliğine elips kesitli ağızlıklar ile ulaşılmaktadır. Buna neden olarak, ağızlık giriş çapından (d_o) elips kesitli çıkış noktasına geçiş durumunda kesit alanı arttığından ağızlıktan deşarj olan jetin çarpma basıncının artması ile gösterilebilir. Genel olarak elips ve dairesel kesitli ağızlık tipleri için elde edilen eğriler lineer bir fonksiyon göstermektedir. En düşük hava kabarcığı nüfuz derinliği kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklardan elde edildi. Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklar, düşük hızlarda ($V_j < 7$ m/s) sabit hava kabarcığı nüfuz derinliğine sahip olmaktadır. Yüksek hızlarda, hava kabarcığı nüfuz derinliği artışa geçmektedir. Bu tip ağızlıkta, yüksek hava iletimine ulaşıldığından jet çarpma basıncı sönmülenmektedir.
- iii) Oksijen transfer verimi: Oksijen transfer verimi jet hızının artması ile azalmaya doğru bir eğilim göstermektedir. Ağızlık tip değişimi durumunda, elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklar dairesel ağızlığa oranla daha yüksek oksijen transfer verimi sağladılar. En yüksek oksijen transfer verimine kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ağızlıklar tarafından ulaşıldı.

Elde edilen deneysel sonuçlar özetlenecek olursa; dairesel kesitli ağızlıklara nazaran elips ve kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlıklar daha yüksek ve verimli akım karakteristikleri göstermiştir.

Kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlıklarda; iletilen hava miktarı (Q_A) ve havalandırma verimi (OE) yönünden oldukça yüksek bir performans gözlenmiştir. Fakat, bunun yanında hava kabarcığı nüfuz derinliği (H_p) daha az olmaktadır. Elips kesitli ağızlıklar ise hava kabarcığı nüfuz derinliği (H_p) yönünden oldukça yüksek bir özellik göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, yüksek hava kabarcığı konsantrasyonu ve küçük derinliklerin havalanması gibi ihtiyaç duyulan uygulamalarda kenar uçları yuvarlatılmış dikdörtgen çıkış kesitli ağızlık, daha büyük derinliklerin havalanması durumunda ise elips kesitli ağızlık tercih edilmesinin uygun olacağı söylenebilir.

Su jetleri ile havalandırma sisteminde hava iletimini etkileyen faktörler;

- i) ağızlık çapı
- ii) ağızlık uzunluğunun ağızlık çapına oranı(L_N / d_o)
- iii) jet hızı
- iv) jet uzunluğu
- v) jet çarpma açısı
- vi) jet yüzey pürüzlülüğü olmak üzere bir su jeti ile havalandırma

sisteminin karakteristik özellikleri bu altı faktör ile tartışılmaktadır.

Bu çalışmada, su jetinin belirtilen karakteristiklerine ilave olarak ağızlık tipinin ve dolayısıyla ağızlık tipine göre gelişen su jeti şeklinin hava iletimine etkisi deneysel olarak tartışıldı.

Elde edilen sonuçlara göre bir ağızlık ünitesinden deşarj olan jetin gelişen geometrik şeklinin akım karakteristiklerini etkileyecek derecede önemli sonuçlar gösterdiği gözlemlendi.

Bu doğrultuda, su jeti ile havalandırma sisteminde akım karakteristiklerinin ağızlık tipi ve gelişen jet şekilleri ile de tartışılması gerektiği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, A., 1974.** Aeration by plunging liquid jet. Ph.D. thesis, Loughborough University of Technology.
- Albertson, M.L., Jensen, R.A. and Rouse, H., 1948.** Diffusion of submerged jets. Proc.ASCE, 1571-1596.
- Avery, S. T. And Novak, P., 1978.** Oxygen transfer at hydraulic structures. Journal Hydr. Div. Proc. ASCE 104, 1521-1540.
- Bhunia, S.K., Lienhard V.J.H., 1994.** Surface disturbance evaluation and the splattering of turbulent liquid jets. Journal of fluids engineering, 116, 721-727.
- Bin.A.K., 1977.** Mass transfer in a plunging jet absorber. Int. Chem. Engng.,19, 227-235.
- Bin.A.K., 1993.** Gas entrainment by plunging liquid jets. Chem. Eng. Sci., 48, 3585-3630
- Böhnke, B., 1970.** Package treatment plant for expanding communities, in Advances Water Pollution Research, Proceedings of the 5th International Conference, San Francisco, paper II-9/2-9/7.
- Ciborowski, J. and Bin, A., 1972.** Investigation of the aeration effect of plunging liquid jets. Inz.Chem. (Polish) 2, 557-577.
- Chanson, H., Brattberg, T., 1998.** Entrainment, dispersion and diffusion of air bubbles by plunging water jet. Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98, France, June 8-12

Chudacek, M.W., 1995. Jet flotation removes particles from wastewater(jet flotation process). Water environment and technology, January / 19-20.

Cummings, I.W., 1975. The impact of falling liquids with liquid surfaces. Ph.D. thesis, Loughborough University of Technology.

Cummings, P.D., Chanson, H., 1997a. Air entrainment in the developing flow region of plunging Jets-Part 1:teoretical development. J. Fluids Engineering, 119, 579-602.

Cummings, P.D., Chanson, H., 1997b. Air entrainment in the developing flow region of plunging Jets-Part 1:experimental. J. Fluids Engineering, 119, 603-608.

Detsch ,R.M., Sharma, R.N, 1990. The critical angle for gas bubble entrainment by plunging liquid jets. Chem. Eng. J., 44, 157-166.

Dijkstra, F., Jennekens, H. And Nooren, P., 1979. The development and application of water jet aeration for wastewater treatment. Prog.Water Technol., 11, 181.

Eroğlu, V., 1991. Oksijen transferi ve atıksu tasfiyesinde havalandırma. Su Kirliliği ve Kontrolü Dergisi. Cilt 1, Sayı 2, 95 – 109 .

Ervine, D.A, McKeogh, E.J. and Elsayy, E. M., 1980. Effect of turbulance intensity on the rate of air entrainment by plunging water jets. Proc. Instn. Civil Engrs. Part 2, 69, 425-445.

Evans, G. M., 1990. A study of a plunging jet bubble column. Ph.D. thesis, University of Newcastle, Australia.

Evans, G. M., Jameson G. J. and Rielly C. D., 1996. Free jet expansion and gas entrainment characteristics of a plunging liquid jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 12, 142-149.

Funatsu, K., Hsu, Y.-Ch., Noda, M. and Sugawa, S., 1988. Oxygen transfer in the water-jet vessel. *Chem. Engng Commun.* 73, 121-139.

Hara, H., Shimada, K. and Kumagai, M., 1977. The behaviour of gas entrainment by a liquid jet. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 3, 424-425.

Henderson, J. B., McCarty M.J., Molloy, N.A., 1970. Entrainment by plunging jets, in *Proceedings of Chemeca'70, Melbourne- Australia, Section 2*, pp. 86-100.

Jennekens, H., 1979. Water jet technique combines aeration and mixing. *Water and Sewage Works*. March / 71-73.

Jennekens, H., 1975. Waterstrall beluchting voor biologische waterzuiverings installaties. *H₂O*, 8, 479-482.

Kenyeres, S., 1991. Plunging jet aeration technology and equipment. Brochure.

Kumagai, M. and Imai, H., 1982. Gas entrainment characteristics of an impinging water jet. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 8, 1-6.

Kusabiraki, D., Murota, M., Ohno, S., Yamagawa, K., Yasuda, M., and Ohkawa, A., 1990. Gas entrainment rate and flow pattern in a plunging liquid jet aeration system using inclined nozzles. *J. Chem. Engng. Japan*, 23, 704-710.

McCarty M.J., Molloy, N.A., 1974. Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design. *Chem. Eng. Sci.*, 7, 1-20.

McKeogh, E.J. and Elsayy, E.M., 1980. Air retained in pool by plunging water jet. *J. Hydr. Dr. Proc. ASCE* 106, 1577-1593.

McKeogh E.J. and Ervine, D.A., 1981. Air entrainment rate and diffusion pattern of plunging liquid jets. *Chem. Eng. Sci.* 36, 1161-1172.

Muslu, Y., 1985. Su temini ve çevre sağlığı, cilt II, İTÜ matbaası.

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

Ohkawa, A., Shiokawa, Y., Sakai, N. and Imai, H., 1985. Flow characteristics of downflow bubble columns with gas entrainment by a liquid jet. *J. Chem. Engng Japan* 18, 466-469.

Ohkawa, A., Kusabiraki, D., Shiokawa, Y., Sakai, N. and Fujii, M., 1986. Flow and oxygen transfer in a plunging water system using inclined short nozzles and performance characteristics of its system in aerobic treatment of wastewater. *Biotechnol. Bioeng.*, 28, 1845-1856.

Ohkawa, A., Kusabiraki, D., Sakai, N., 1987. Effect of nozzle length on gas entrainment characteristics of vertical liquid jet. *J. Chem. Engng Japan*, 20, 295-300.

Ohyama, Y., Takashima, Y. And Idemura, H., 1953. Induction of air by jet streams. Kagaku Hokoku, 29, 344-348.

Pekin, B., 1983. Biyokimya mühendisliği, Ege Üniv. Kimya Fak. Yayınları, no:3.

Ramalho, R. S., 1983. Introduction to wastewater treatment process, academic press, London

Richardson, E. G., 1954. Mechanics of disruption of liquid jets. Appl. Sci. Res. A4-374-380

Robert D.Blevins, 1992. Applied fluid dynamics handbook. Krieger publishing company, florida.

Sene, K. J., 1988. Air entrainment by plunging jets. Chem. Eng. Sci., 43, 2615-2623.

Sneath, R. W., 1978. The performance of a plunging jet aerator and aerobic treatment of pig slurry. Water Pollution Control 77, 408-420.

Suciu, G.D. and Smigelschi, O., 1977. Gas absorption by turbulent liquid plunging jets. Chem. Eng. Sci., 32, 889-896.

Tojo, K and Miyanami, K., 1982. Oxygen transfer in jet mixers. Chem. Eng. J., 24, 89-97.

Tojo , K., Naruko,M. And Miyanami, K., 1982. Oxygen transfer and liquid mixing characteristics of plunging jet reactors. Chem. Eng. J., 25, 107-109.

Van de Donk, J. A. C., 1981. Water aeration with plunging jets. Ph.D. thesis, Technische Hogeschool Delft, The Netherlands, 168 pages.

Van de Sande, E. and Smith, J.M., 1972. Strahlen mit geringer geschwindigkeit. Chemie. Ing. Techn., 44, 1177-1183.

Van de Sande, E. and Smith, J.M., 1973. Surface entrainment of air by high velocity water jets. Chem. Eng. Sci., 28, 1161-1168.

Van de Sande, E. and Smith, J.M., 1974. Mass transfer in a pool with plunging liquid jets, in Proceedings of the International Chem. Engng Symposium Multiphase Flow Systems, Glasgow.

Van de Sande, E. and Smith, J.M., 1975. Mass transfer from plunging water jets. Chem. Eng. J., 10, 225-233.

Yagasaki, T. and Kuzuoka, T., 1979. Surface entrainment of gas by plunging liquid jet. Research Reports of Kogakuin university, 47, 77-85.

Yamagiwa, K., Ohmae, Y., Dahlan, H. M. and Ohkawa, A., 1991. Activated sludge treatment of small-scale wastewater by a plunging liquid jet bioreactor with cross-flow filtration. Bioresource Technol. 37, 215-222.



EKLER

Tablo A.1 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=8\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)

Daire		Elips		Kenar uçları yuv. dikdörtgen	
V_j m/s	$Q_A \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$	V_j m/s	$Q_A \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$	V_j m/s	$Q_A \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$
2.00	3.50	2.00	5.50	2.00	5.60
3.49	13.30	2.78	13.50	3.00	13.30
4.36	20.80	3.47	48.30	4.00	26.67
6.11	33.30	4.86	30.00	5.00	40.00
6.98	40.00	6.25	40.00	6.00	53.00
7.86	45.50	7.64	48.30	7.00	70.00
8.73	53.30	8.00	60.00	8.00	100.00
10.13	70.00	11.11	100.00	10.00	136.67
13.97	105.00	13.89	135.00	12.10	195.00
17.47	150.00	19.44	175.40	-	-

Tablo A.2 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim miktarları ($d_o=5\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)

Daire		Elips		Kenar uçları yuv. dikdörtgen	
V_j m/s	$Q_A \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$	V_j m/s	$Q_A \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$	V_j m/s	$Q_A \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$
2.00	1.30	2.00	1.57	2.00	1.93
2.40	1.93	3.20	5.10	2.51	3.10
4.81	10.30	4.84	13.60	3.51	7.60
7.23	19.00	6.46	20.00	5.00	16.70
9.63	26.30	8.00	26.20	7.53	32.00
12.00	39.00	9.69	32.00	10.00	45.00
18.30	70.00	14.53	61.00	15.00	93.00
-	-	19.38	104.00	19.00	145.00

Tablo A.3 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin hava iletim oranları ($d_o=8\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)

Daire		Elips		Kenar uçları yuv. dikdörtgen	
V_j m/s	Q_A/Q_w	V_j m/s	Q_A/Q_w	V_j m/s	Q_A/Q_w
2.00	4.20	2.00	4.40	2.00	6.72
3.49	7.98	2.78	7.98	3.00	10.80
4.36	10.00	3.47	8.80	4.00	16.00
6.11	11.42	4.86	10.28	5.00	19.23
6.98	12.00	6.25	10.70	6.00	21.20
7.86	12.13	7.64	12.15	7.00	24.00
8.73	12.80	8.00	12.41	8.00	30.00
10.13	14.48	11.11	15.00	10.00	32.80
13.97	15.75	13.89	16.20	12.10	39.00
17.47	18.00	19.44	18.23	-	-

Tablo A.4 Dairesel kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi ($d_o=8$ mm, $L_f=0.15$ m)

V_j , m/s	H_p , cm	
	$\theta=60^\circ$	$\theta=45^\circ$
2.00	17.50	14.50
3.49	24.00	18.00
4.36	25.50	20.00
6.11	30.00	23.00
6.98	32.00	25.50
7.86	34.50	27.00
8.73	35.50	29.00
10.13	38.00	31.00
12.22	42.00	33.00
13.97	44.50	35.50

Tablo A.5 Dairesel kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi ($d_o=5$ mm, $L_f=0.15$ m)

V_j , m/s	H_p , cm	
	$\theta=60^\circ$	$\theta=45^\circ$
2.40	15.00	12.50
7.23	20.00	16.50
9.63	25.50	20.50
12.00	28.50	24.00
14.45	31.00	28.00
19.27	39.50	32.50

Tablo A.6 Elips kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi ($d_o=8$ mm, $L_f=0.15$ m)

V_j , m/s	H_p , cm	
	$\theta=60^\circ$	$\theta=45^\circ$
2.00	19.50	17.00
2.78	23.00	18.50
3.47	26.00	19.00
4.86	30.50	23.00
6.25	35.50	29.50
7.64	37.50	32.50
11.11	48.00	41.00
13.89	53.50	45.00
19.44	64.00	53.00

Tablo A.7 Elips kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi ($d_o=5$ mm, $L_i=0.15$ m)

V_j , m/s	Hp, cm	
	$\theta=60^\circ$	$\theta=45^\circ$
2.00	17.50	13.50
3.20	21.00	17.00
4.84	26.00	21.00
6.46	29.50	23.50
8.00	32.50	26.50
9.69	35.50	28.00
14.53	43.00	33.00
19.38	49.50	39.00

Tablo A.8 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi ($d_o=8$ mm)

V_j , m/s	Hp, cm		
	$\theta=60^\circ$, $L_i=0.15$ m	$\theta=60^\circ$, $L_i=0.20$ m	$\theta=45^\circ$, $L_i=0.15$ m
2.00	21.00	19.00	16.50
3.00	21.00	19.00	16.50
4.00	21.00	19.00	16.50
6.00	21.50	19.00	16.50
8.00	22.00	20.50	17.00
10.00	24.00	22.00	19.00
12.10	26.00	24.50	21.00
16.14	29.50	28.00	23.50
18.15	31.00	29.00	24.50

Tablo A.9 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde hava kabarcığı nüfuz derinliğinin jet hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişimi ($d_o=5$ mm)

V_j , m/s	Hp, cm		
	$\theta=60^\circ$, $L_i=0.15$ m	$\theta=60^\circ$, $L_i=0.20$ m	$\theta=45^\circ$, $L_i=0.15$ m
2.00	20.50	19.00	14.00
5.00	20.50	19.00	14.00
7.53	20.50	19.00	14.00
10.00	21.00	20.00	14.50
15.00	22.00	21.00	15.00
20.00	23.00	21.50	16.00

Tablo A.10 Dairesel kesitli ağızlık tipinde jet hızına bağlı olarak çarpma noktasında jetin genişleme miktarları ve çevre uzunluğu değerleri ($d_o=8$ mm, $\theta=45^\circ$)

V_j , m/s	$L_i=0.15$ m	$C_j \times 10^{-2}$, m	$Q_A/C_j \times 10^{-3}$
	d_j , mm		
3.49	8.88	2.78	4.78
4.36	9.03	2.83	7.35
6.11	9.34	2.93	11.36
6.98	9.48	2.97	13.46
7.86	9.61	3.02	15.06
8.73	9.63	3.05	17.47
10.13	9.92	3.11	22.50
13.97	10.40	3.26	31.21
17.47	10.79	3.39	44.24

Tablo A.11 Elips kesitli ağızlık tipinde jet hızına bağlı olarak çarpma noktasında jetin genişleme miktarları ve çevre uzunluğu değerleri ($d_o=8$ mm, $\theta=45^\circ$)

V_j , m/s	$L_j=0.15$ m		$C_j \times 10^{-2}$, m	$Q_A/C_j \times 10^{-3}$
	$2a_j$, mm	$2b_j$, mm		
2.78	8.41	11.30	3.09	4.30
3.47	8.55	11.40	3.13	5.84
4.86	8.80	11.70	3.21	9.34
6.25	9.03	12.00	3.30	12.12
8.00	9.28	12.30	3.39	17.70
11.11	9.70	12.80	3.53	28.33
13.89	10.00	13.20	3.64	37.09

Tablo A.12 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde jet hızına bağlı olarak çarpma noktasında jetin genişleme miktarları ve çevre uzunluğu değerleri ($d_o=5$ mm, $\theta=45^\circ$)

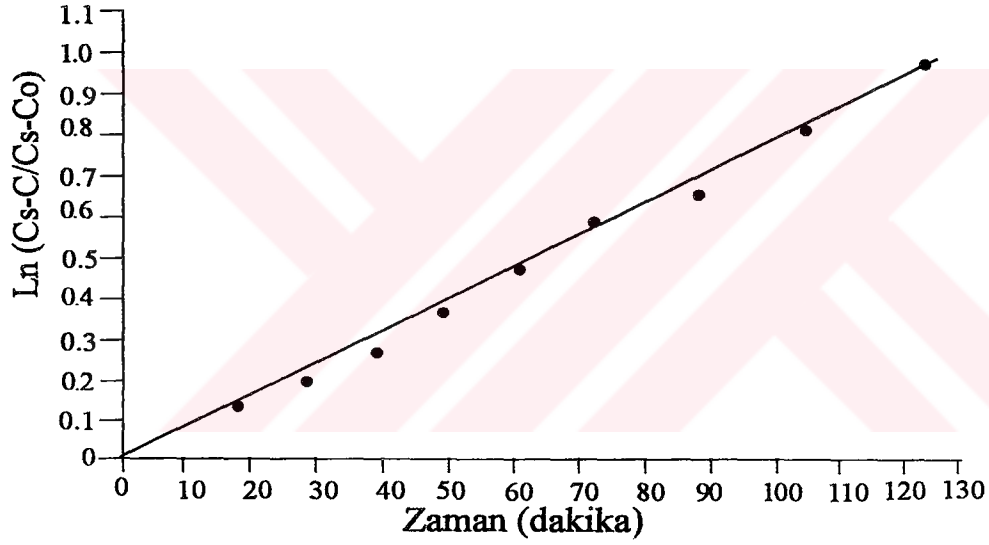
V_j , m/s	$L_j=0.15$ m	$L_j=0.20$ m
	a_j/a_i	a_j/a_i
2.51	1.15	1.38
5.00	2.10	2.50
7.53	3.00	3.60
10.00	3.60	4.20
11.00	3.60	4.20

Tablo A.13 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde jet hızına bağlı olarak çarpma noktasında jetin genişleme miktarları ve çevre uzunluğu değerleri ($d_o=8$ mm, $\theta=45^\circ$)

V_j , m/s	$L_j=0.15$ m	$L_j=0.20$ m	$L_j=0.15$ m	$C_j \times 10^{-2}$, m	$Q_A/C_j \times 10^{-3}$
	a_j/a_i	a_j/a_i	a_j , mm		
2.00	1.73	1.85	-	-	-
3.00	2.24	2.35	1.70	3.68	7.94
4.00	2.76	3.00	2.20	4.61	12.12
6.00	3.06	3.67	2.70	5.58	14.81
7.00	3.36	4.08	3.00	6.15	17.66
8.00	3.57	4.49	3.30	6.74	21.21
9.60	3.88	4.69	3.50	7.13	28.57
10.00	4.08	4.79	4.00	8.12	34.16
11.51	4.08	4.79	4.00	8.12	48.75

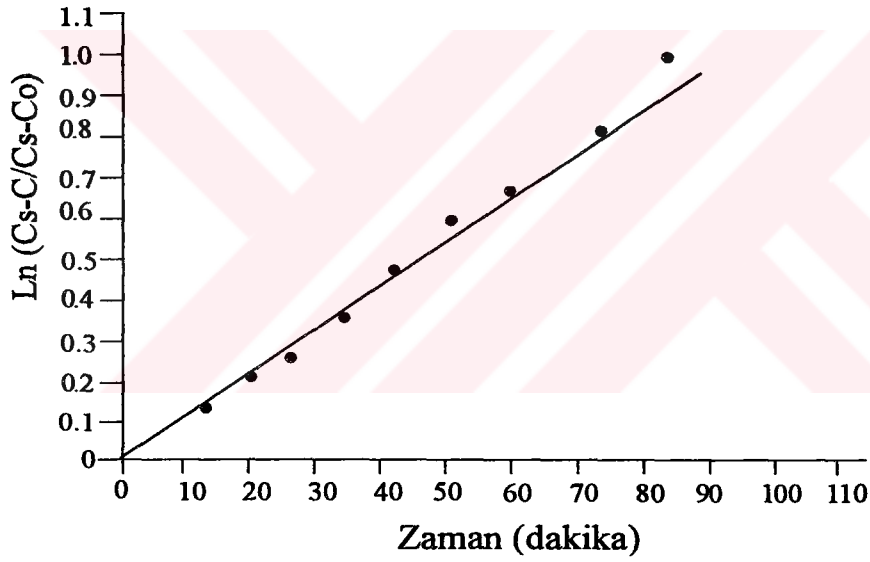
Tablo A.14 Dairesel kesitli ağırlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=3.00$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
17.05	1.0	0.875	0.133
27.23	1.5	0.813	0.207
38.78	2.0	0.750	0.287
49.34	2.5	0.687	0.375
60.25	3.0	0.625	0.470
73.58	3.5	0.563	0.574
88.84	4.0	0.500	0.693
105.76	4.5	0.438	0.825
124.05	5.0	0.375	0.980



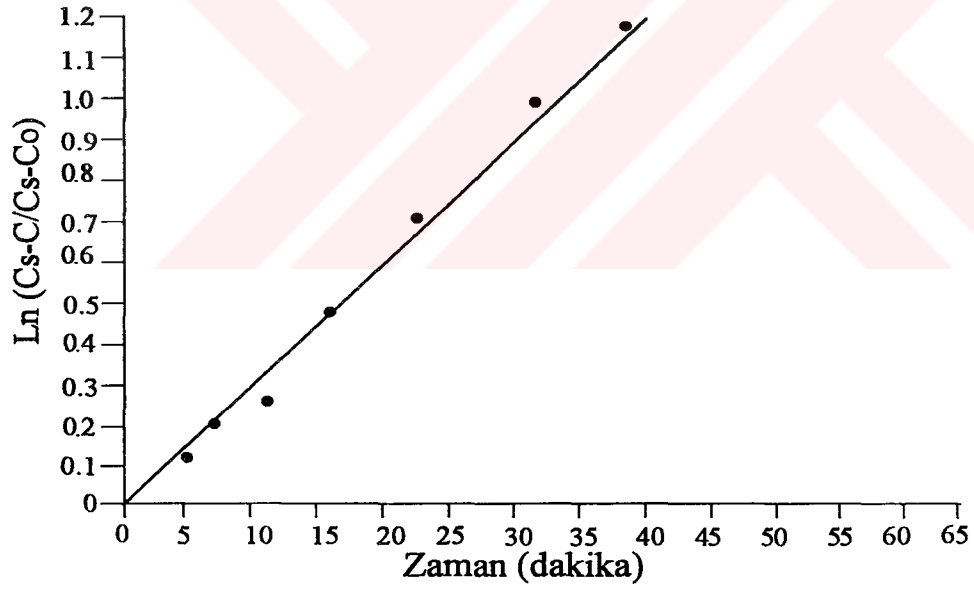
Tablo A 15 Dairesel kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_f=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=3.49$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
12.09	1.0	0.875	0.133
18.48	1.5	0.813	0.207
25.85	2.0	0.750	0.287
33.18	2.5	0.687	0.375
41.22	3.0	0.625	0.470
50.35	3.5	0.563	0.574
60.78	4.0	0.500	0.693
73.00	4.5	0.438	0.825
85.96	5.0	0.375	0.980
101.84	5.5	0.313	1.161
122.30	6.0	0.251	1.382



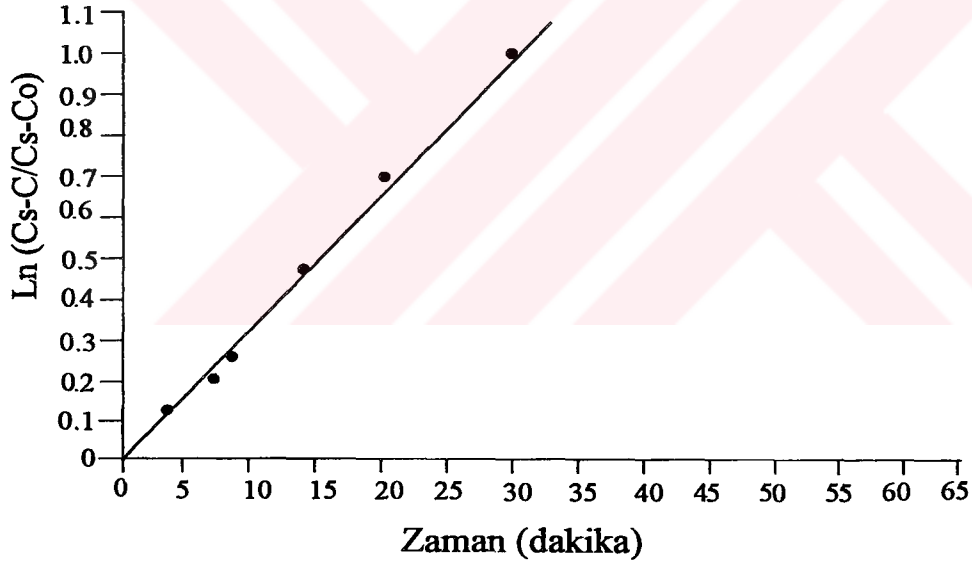
Tablo A.16 Dairesel kesitli ağırlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=5.24$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
3.20	0.50	0.937	0.065
5.15	1.00	0.875	0.133
7.40	1.50	0.813	0.207
10.20	2.00	0.750	0.287
12.50	2.50	0.687	0.375
15.40	3.00	0.625	0.470
19.15	3.50	0.563	0.574
23.00	4.00	0.500	0.693
27.00	4.50	0.438	0.825
31.50	5.00	0.375	0.980
38.30	5.50	0.313	1.161
46.30	6.00	0.251	1.382
58.30	6.50	0.188	1.670



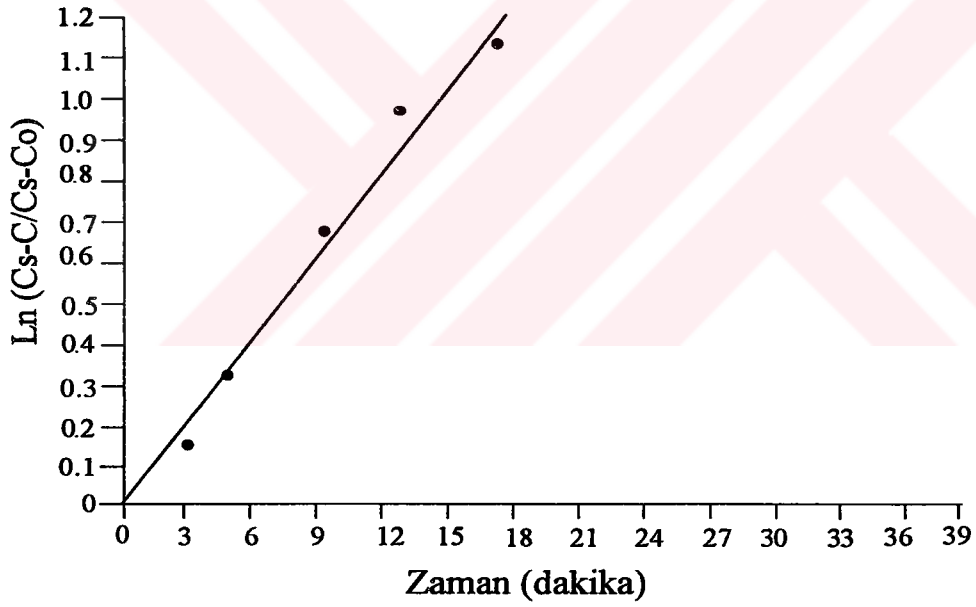
Tablo A.17 Dairesel kesitli ağırlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_j=6.98$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
-	0.50	0.937	0.065
4.43	1.00	0.875	0.133
6.90	1.50	0.813	0.207
9.56	2.00	0.750	0.287
11.71	2.50	0.687	0.375
14.24	3.00	0.625	0.470
16.40	3.50	0.563	0.574
21.00	4.00	0.500	0.693
22.91	4.50	0.438	0.825
29.69	5.00	0.375	0.980
34.14	5.50	0.313	1.161
41.87	6.00	0.251	1.382
55.66	6.50	0.188	1.670



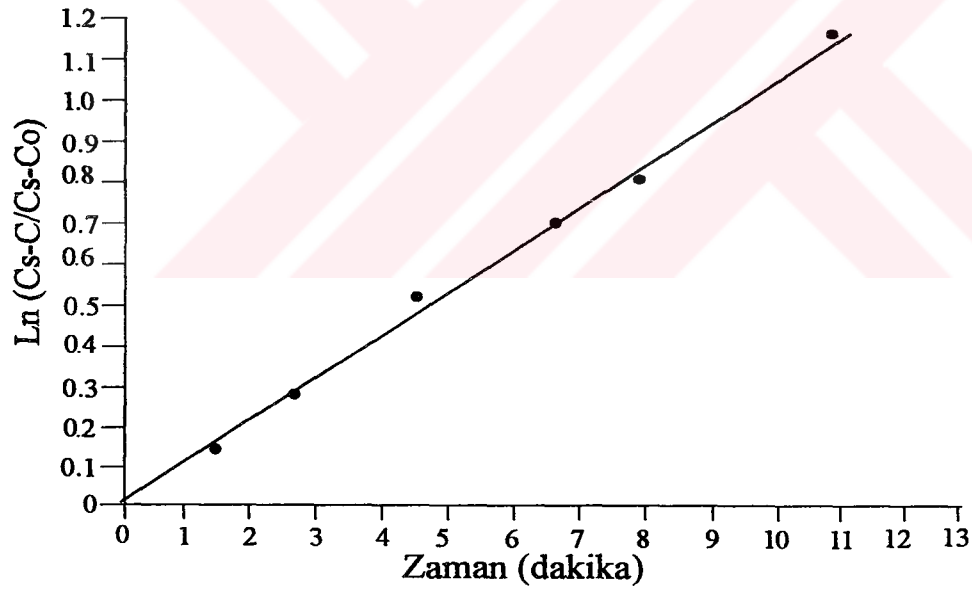
Tablo A.18 Dairesel kesitli ağızlık tipinde çözülmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_i=8.73$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
3.00	1.10	0.860	0.151
5.00	2.20	0.730	0.315
9.35	4.00	0.500	0.693
13.35	5.00	0.376	0.978
17.05	5.50	0.313	1.160
20.30	6.00	0.250	1.380
27.00	6.50	0.188	1.670
31.30	6.70	0.162	1.820
34.00	7.00	0.125	2.080



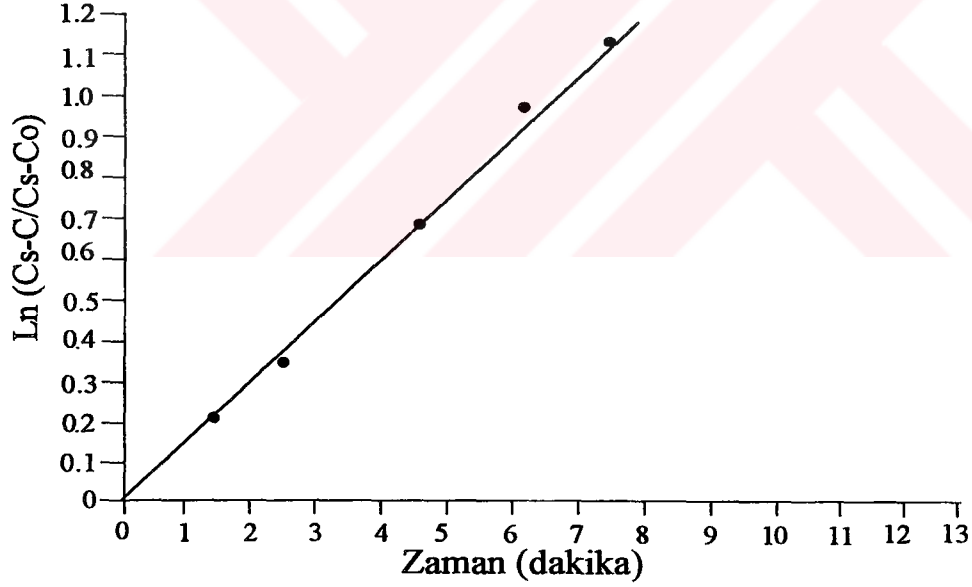
Tablo A.19 Dairesel kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_f=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=10.13$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
1.30	1.0	0.875	0.133
2.03	1.5	0.813	0.207
2.81	2.0	0.750	0.287
3.67	2.5	0.687	0.375
4.60	3.0	0.625	0.470
5.63	3.5	0.563	0.574
6.79	4.0	0.500	0.693
8.08	4.5	0.438	0.825
9.60	5.0	0.375	0.980
11.38	5.5	0.313	1.161
13.54	6.0	0.251	1.382
16.37	6.5	0.188	1.670
18.83	7.00	0.125	2.080



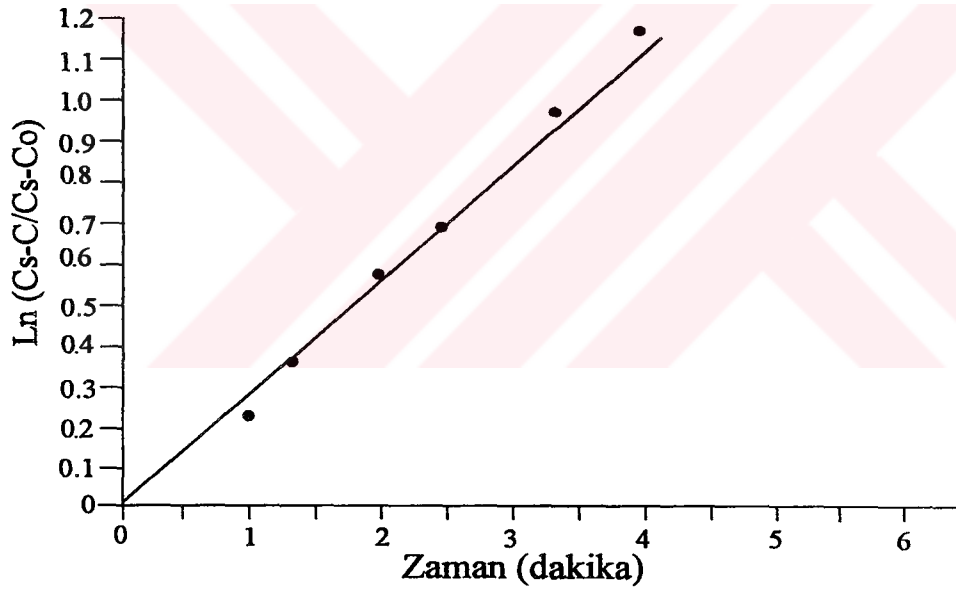
Tablo A.20 Dairesel kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=13.97$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
0.85	1.0	0.875	0.133
1.32	1.5	0.813	0.207
1.84	2.0	0.750	0.287
2.40	2.5	0.687	0.375
3.01	3.0	0.625	0.470
3.67	3.5	0.563	0.574
4.44	4.0	0.500	0.693
5.28	4.5	0.438	0.825
6.29	5.0	0.375	0.980
7.44	5.5	0.313	1.161
8.85	6.0	0.251	1.382
10.70	6.5	0.188	1.670
12.65	7.00	0.125	2.080



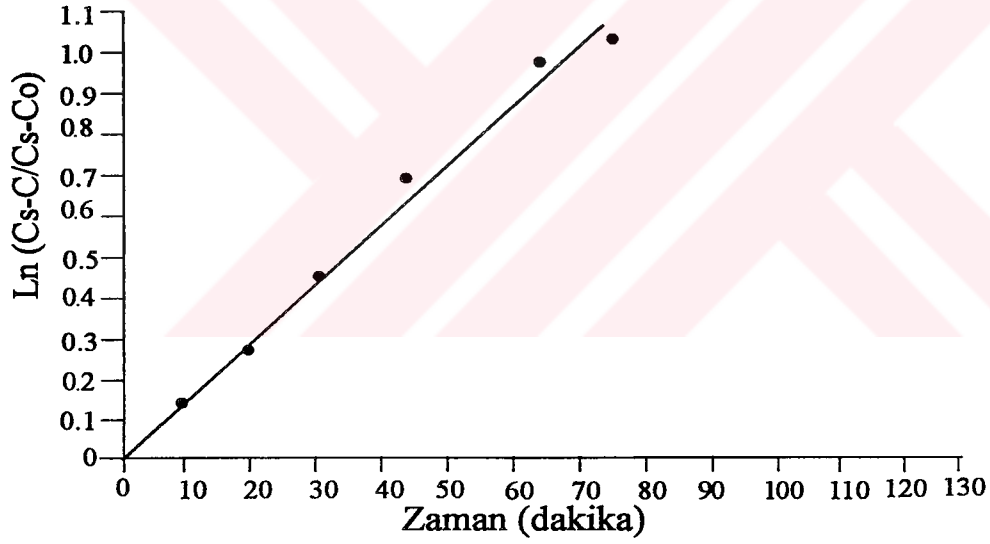
Tablo A.21 Dairesel kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_f=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=17.47$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
0.46	1.0	0.875	0.133
0.71	1.5	0.813	0.207
0.99	2.0	0.750	0.287
1.30	2.5	0.687	0.375
1.63	3.0	0.625	0.470
1.99	3.5	0.563	0.574
2.40	4.0	0.500	0.693
2.86	4.5	0.438	0.825
3.40	5.0	0.375	0.980
4.03	5.5	0.313	1.161
4.79	6.0	0.251	1.382
5.82	6.5	0.188	1.670
7.18	7.00	0.125	2.080



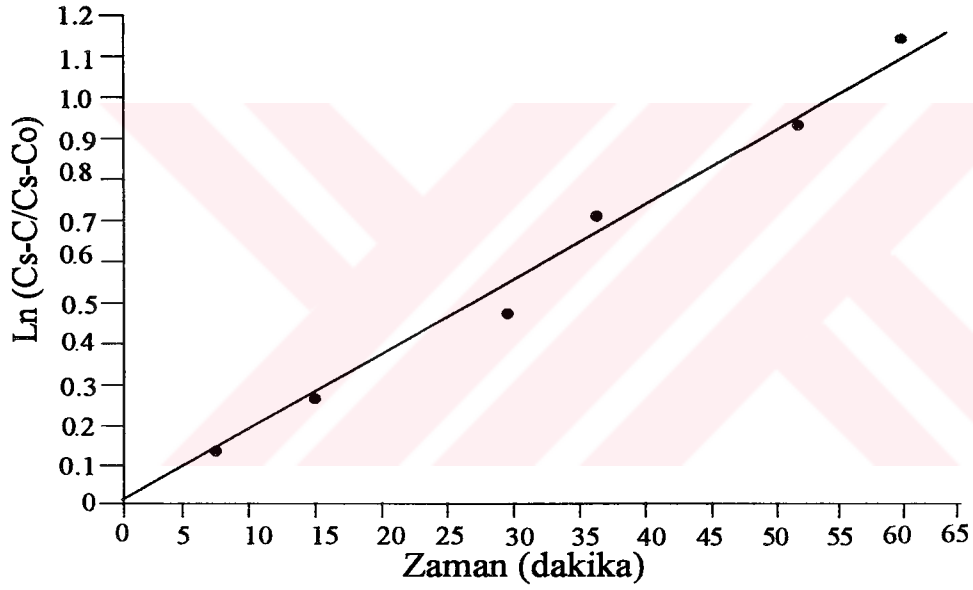
Tablo A.22 Elips kesitli ağızlık tipinde çözülmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=3.20$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
8.52	1.0	0.875	0.133
13.26	1.5	0.813	0.207
18.39	2.0	0.750	0.287
24.03	2.5	0.687	0.375
30.12	3.0	0.625	0.470
36.79	3.5	0.563	0.574
44.42	4.0	0.500	0.693
52.88	4.5	0.438	0.825
62.82	5.0	0.375	0.980
74.42	5.5	0.313	1.161
85.12	6.0	0.251	1.382
107.05	6.5	0.188	1.670



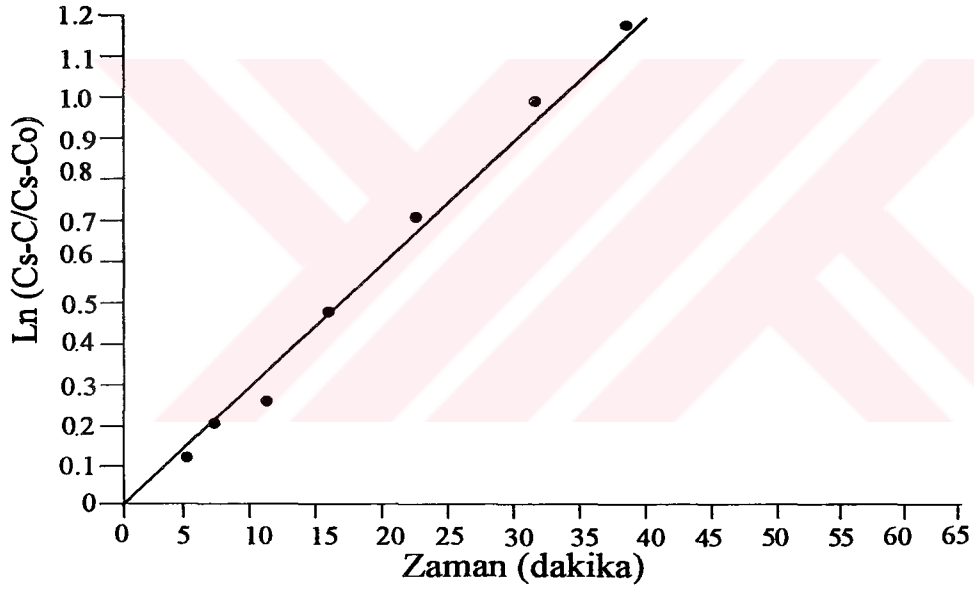
Tablo A.23 Elips kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_i=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_i=3.47$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
6.92	1.0	0.875	0.133
10.78	1.5	0.813	0.207
14.94	2.0	0.750	0.287
19.53	2.5	0.687	0.375
24.47	3.0	0.625	0.470
29.89	3.5	0.563	0.574
36.09	4.0	0.500	0.693
42.96	4.5	0.438	0.825
51.04	5.0	0.375	0.980
60.46	5.5	0.313	1.161
71.97	6.0	0.251	1.382



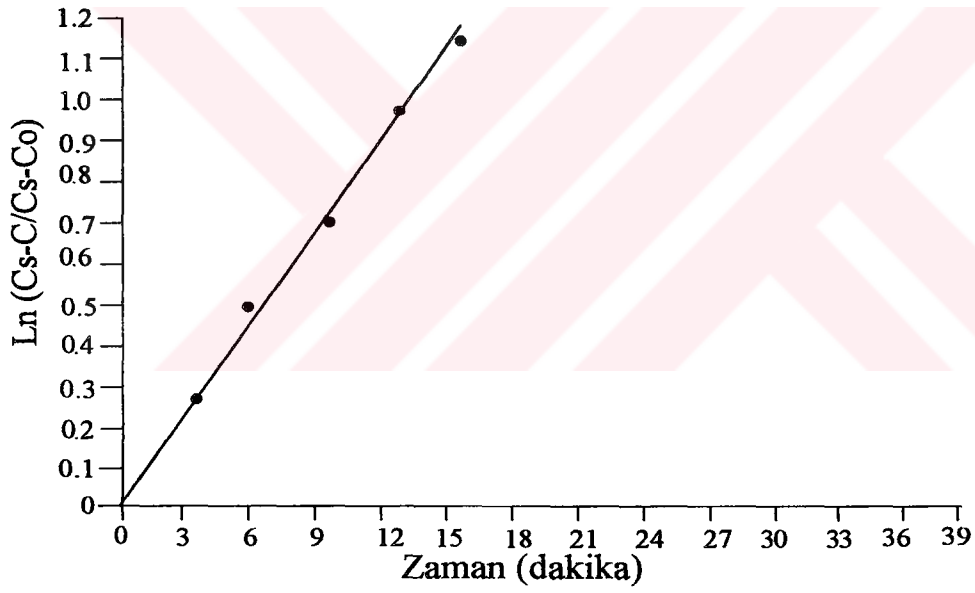
Tablo A.24 Elips kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_i=4.17$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
3.40	0.50	0.937	0.065
5.50	1.00	0.875	0.133
8.10	1.50	0.813	0.207
10.40	2.00	0.750	0.287
13.30	2.50	0.687	0.375
16.30	3.00	0.625	0.470
19.45	3.50	0.563	0.574
23.25	4.00	0.500	0.693
28.05	4.50	0.438	0.825
33.10	5.00	0.375	0.980
39.40	5.50	0.313	1.161
45.45	6.00	0.263	1.330



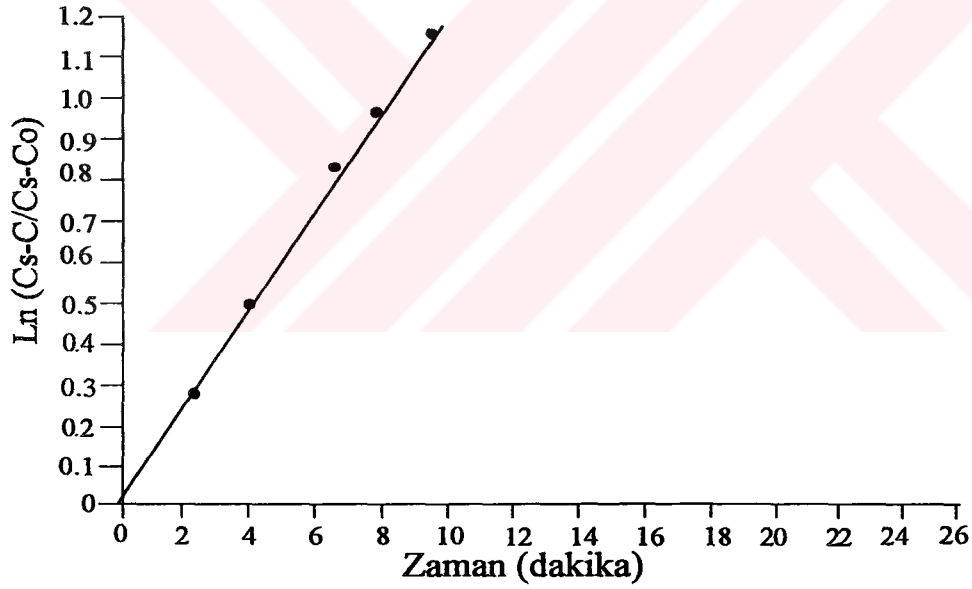
Tablo A.25 Elips kesitli ağızlık tipinde çözülmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=6.25$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.0	1.000	0.000
1.70	1.0	0.875	0.133
2.65	1.5	0.813	0.207
3.67	2.0	0.750	0.287
4.80	2.5	0.687	0.375
6.02	3.0	0.625	0.470
7.35	3.5	0.563	0.574
8.88	4.0	0.500	0.693
10.57	4.5	0.438	0.825
12.56	5.0	0.375	0.980
14.88	5.5	0.313	1.161
17.71	6.0	0.251	1.382
21.48	6.5	0.188	1.670



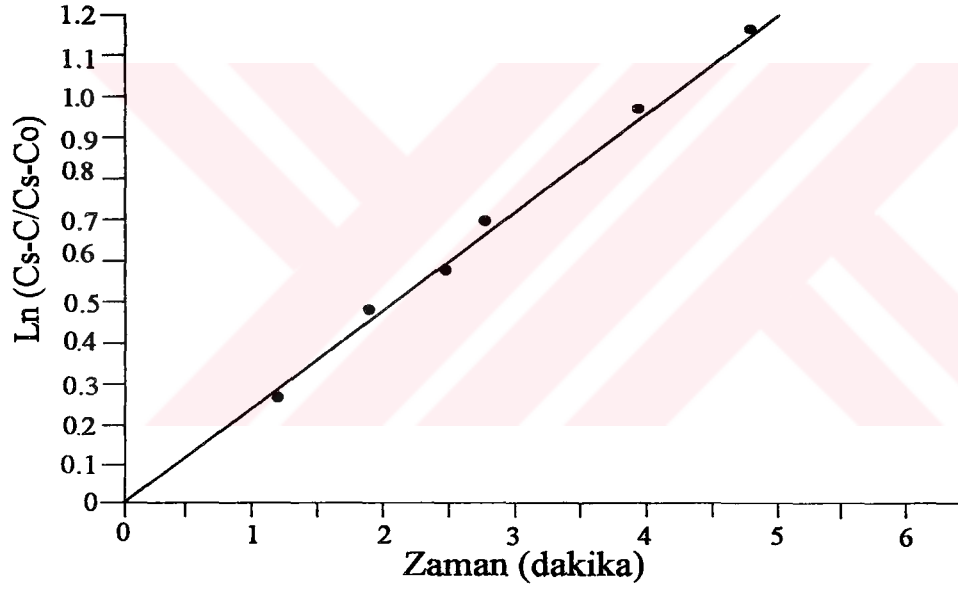
Tablo A.26 Elips kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=8.00$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
1.20	1.00	0.875	0.133
1.50	1.50	0.813	0.207
2.25	2.00	0.750	0.287
3.10	2.50	0.687	0.375
4.00	3.00	0.625	0.470
4.50	3.50	0.563	0.574
5.45	4.00	0.500	0.693
7.00	4.50	0.438	0.825
8.10	5.00	0.375	0.980
9.50	5.50	0.313	1.161
11.50	6.00	0.251	1.382
14.45	6.50	0.188	1.670
19.05	7.00	0.126	2.070
23.50	7.30	0.088	2.430



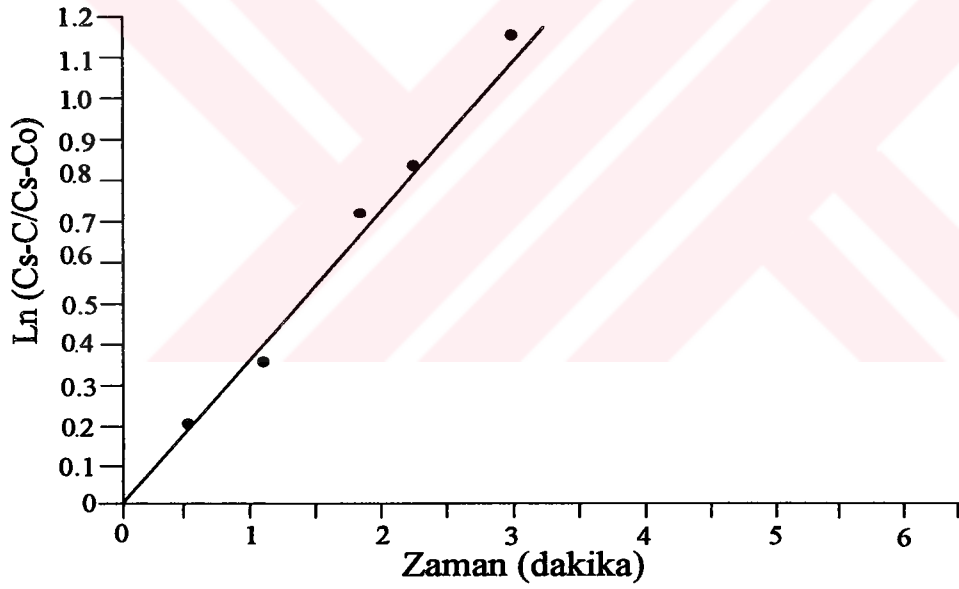
Tablo A.27 Elips kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_j=11.11$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
0.55	1.00	0.875	0.133
0.86	1.50	0.813	0.207
1.19	2.00	0.750	0.287
1.56	2.50	0.687	0.375
1.95	3.00	0.625	0.470
2.39	3.50	0.563	0.574
2.88	4.00	0.500	0.693
3.43	4.50	0.438	0.825
4.08	5.00	0.375	0.980
4.83	5.50	0.313	1.161
5.75	6.00	0.251	1.382
6.95	6.50	0.188	1.670



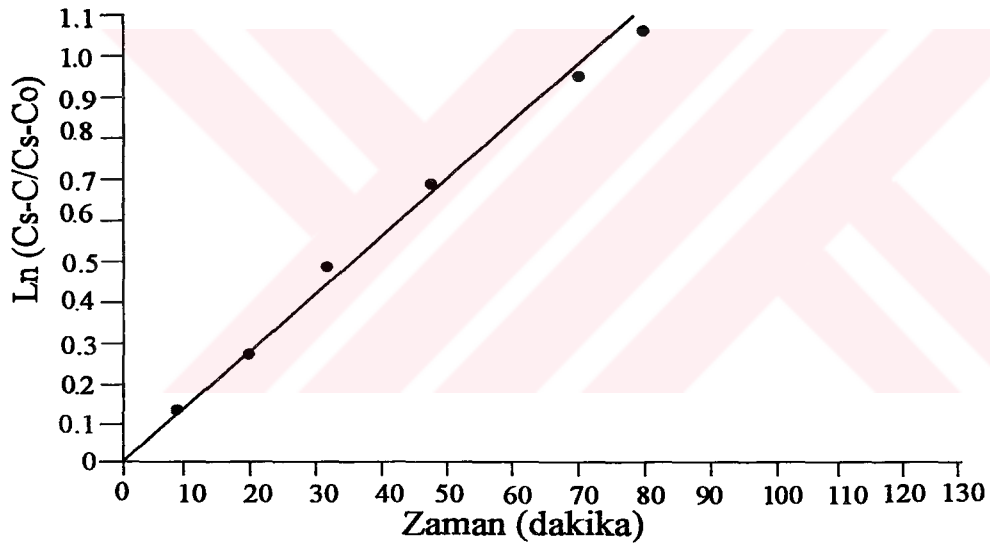
Tablo A.28 Elips kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri
($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_i=13.89$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
0.36	1.00	0.875	0.133
0.56	1.50	0.813	0.207
0.78	2.00	0.750	0.287
1.02	2.50	0.687	0.375
1.28	3.00	0.625	0.470
1.56	3.50	0.563	0.574
1.89	4.00	0.500	0.693
2.25	4.50	0.438	0.825
2.67	5.00	0.375	0.980
3.17	5.50	0.313	1.161
3.77	6.00	0.251	1.382
4.56	6.50	0.188	1.670



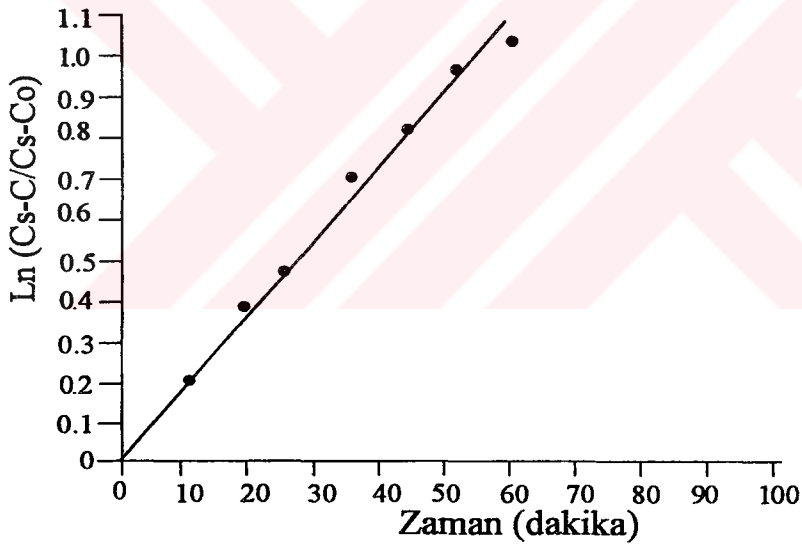
Tablo A.29 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri ($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=3.43$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
9.23	1.00	0.875	0.133
14.37	1.50	0.813	0.207
19.93	2.00	0.750	0.287
26.04	2.50	0.687	0.375
32.63	3.00	0.625	0.470
39.86	3.50	0.563	0.574
48.12	4.00	0.500	0.693
57.29	4.50	0.438	0.825
68.05	5.00	0.375	0.980
80.62	5.50	0.313	1.161
95.97	6.00	0.251	1.382
116.04	6.50	0.188	1.670



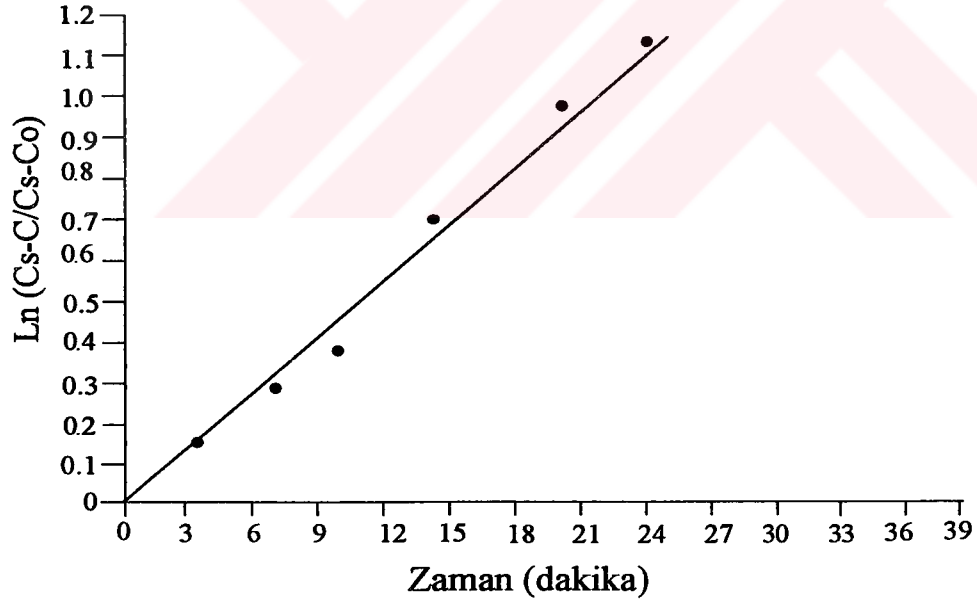
Tablo A.30 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri ($d_o=8$ mm, $L_f=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=4.00$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
7.15	1.00	0.875	0.133
11.12	1.50	0.813	0.207
15.43	2.00	0.750	0.287
20.16	2.50	0.687	0.375
25.26	3.00	0.625	0.470
30.86	3.50	0.563	0.574
37.25	4.00	0.500	0.693
44.35	4.50	0.438	0.825
52.68	5.00	0.375	0.980
62.41	5.50	0.313	1.161
74.30	6.00	0.251	1.382
89.78	6.50	0.188	1.670



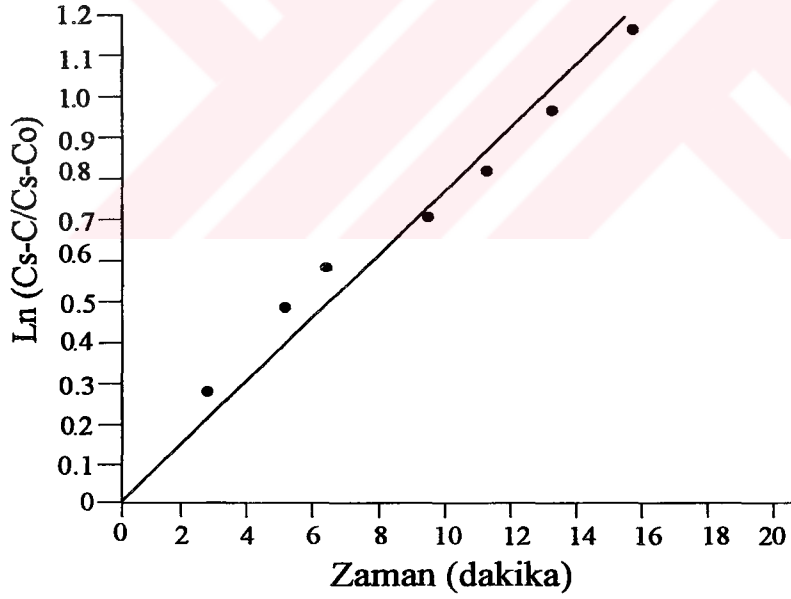
Tablo A.31 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri ($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_j=6.00$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
2.34	0.50	0.937	0.065
3.50	1.00	0.875	0.133
5.20	1.50	0.813	0.207
6.50	2.00	0.750	0.287
8.33	2.50	0.687	0.375
10.28	3.00	0.625	0.470
12.32	3.50	0.563	0.574
14.50	4.00	0.500	0.693
17.35	4.50	0.438	0.825
20.45	5.00	0.375	0.980
24.55	5.50	0.313	1.161
29.57	6.00	0.251	1.380
35.15	6.50	0.200	1.610
43.50	7.30	0.088	2.430



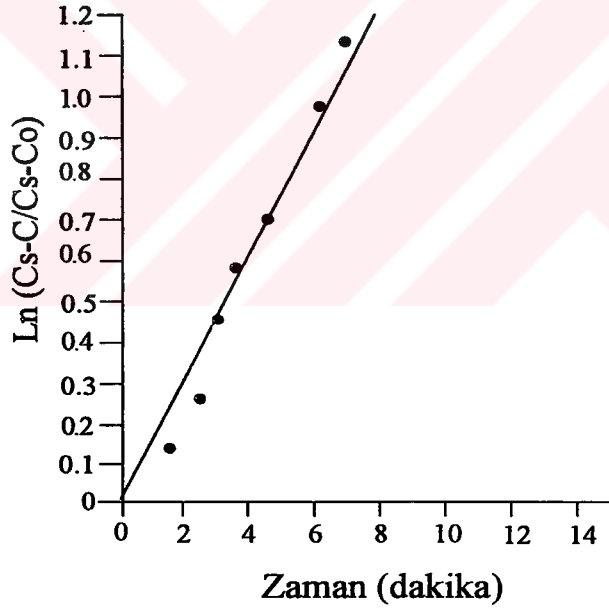
Tablo A.32 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri ($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=8.00$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
1.84	1.00	0.875	0.133
2.87	1.50	0.813	0.207
3.98	2.00	0.750	0.287
5.20	2.50	0.687	0.375
6.52	3.00	0.625	0.470
9.62	3.50	0.563	0.574
11.45	4.00	0.500	0.693
13.61	4.50	0.438	0.825
16.12	5.00	0.375	0.980
19.19	5.50	0.313	1.161
23.19	6.00	0.251	1.382



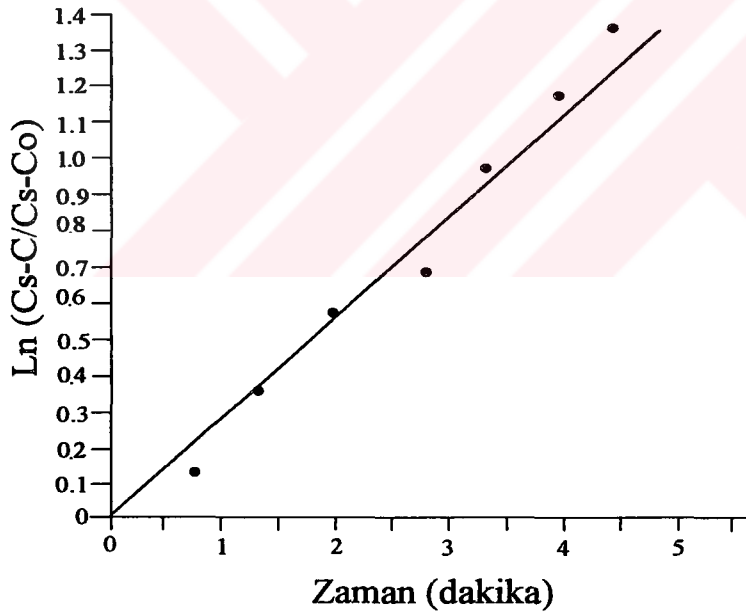
Tablo A.33 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri ($d_o=8$ mm, $L_f=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_f=11.09$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
1.20	0.50	0.937	0.065
1.45	1.00	0.875	0.133
2.05	1.50	0.813	0.207
2.30	2.00	0.750	0.287
2.56	2.50	0.687	0.375
3.22	3.00	0.625	0.470
3.47	3.50	0.563	0.574
4.30	4.00	0.500	0.693
5.10	4.50	0.438	0.825
6.07	5.00	0.375	0.980
7.07	5.50	0.313	1.161
8.35	6.00	0.251	1.380
10.35	6.50	0.188	1.610
14.00	7.00	0.126	2.070



Tablo A.34 Kenar uçları yuv. dikdörtgen kesitli ağızlık tipinde çözünmüş oksijen konsantrasyon ölçümleri ($d_o=8$ mm, $L_j=0.15$ m, $\theta=45^\circ$)

$V_j=16.14$ m/s, $T=20$ C°, $c_s=8.01$ mg/L			
Zaman, dakika	c	$(c_s-c)/(c_s-c_o)$	$\ln(c_s-c)/(c_s-c_o)$
0.00	0.00	1.000	0.000
0.44	1.00	0.875	0.133
0.69	1.50	0.813	0.207
0.95	2.00	0.750	0.287
1.25	2.50	0.687	0.375
1.56	3.00	0.625	0.470
1.91	3.50	0.563	0.574
2.31	4.00	0.500	0.693
2.75	4.50	0.438	0.825
3.26	5.00	0.375	0.980
3.87	5.50	0.313	1.161
4.60	6.00	0.251	1.382
5.56	6.50	0.188	1.670



Tablo A.35 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin oksijen transfer katsayıları ($k_L a$)
($d_o=8\text{mm}$, $L_j= 0.15\text{ m}$, $\theta=45^\circ$)

Daire		Elips		Kenar uçları yuv. dikdörtgen	
$V_j, \text{ m/s}$	$k_L a \text{ (1/s)}$	$V_j, \text{ m/s}$	$k_L a \text{ (1/s)}$	$V_j, \text{ m/s}$	$k_L a \text{ (1/s)}$
3.00	0.00013	3.20	0.00026	3.43	0.00024
3.49	0.00019	3.47	0.00032	4.00	0.00031
5.24	0.00051	4.17	0.00049	6.00	0.00078
6.98	0.00070	6.25	0.0013	8.00	0.00012
8.73	0.0010	8.00	0.00195	11.09	0.0027
10.13	0.0017	11.11	0.0040	16.14	0.0050
13.97	0.0026	13.89	0.0061	-	-
17.47	0.0048	-	-	-	-

Tablo A.36 Jet hızına bağlı olarak ağızlık tiplerinin oksijen transfer verimleri (OE)
($d_o=8\text{mm}$, $L_j= 0.15\text{ m}$, $\theta=45^\circ$)

Daire		Elips		Kenar uçları yuv. dikdörtgen	
$V_j, \text{ m/s}$	OE (kg O ₂ / kW.saat)	$V_j, \text{ m/s}$	OE (kg O ₂ / kW.saat)	$V_j, \text{ m/s}$	OE (kg O ₂ / kW.saat)
3.00	6.73	3.20	6.15	3.43	6.28
3.49	3.72	3.47	4.21	4.00	4.18
5.24	2.10	4.17	3.26	6.00	2.51
6.98	1.63	6.25	1.84	8.00	1.70
8.73	1.47	8.00	1.52	11.09	1.37
10.13	1.15	11.11	1.20	16.14	1.09
13.97	0.95	13.89	1.06	-	-
17.47	0.88	-	-	-	-