

T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HIZLI DÜŞEY MİLLİ MEKANİK  
YÜZEY HAVALANDIRICININ  
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ  
ANALİZİ

Canan AKBULUT  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE  
2010

T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HIZLI DÜŞEY MİLLİ MEKANİK  
YÜZEY HAVALANDIRICININ  
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ  
ANALİZİ

Canan AKBULUT  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Yrd. Doç Dr. Ahmet Zafer ŞENALP  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE  
2010



**GEBZE YÜKSEK  
TEKNOLOJİ  
ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JÜRİ ONAY FORMU**

## **JÜRİ**

ÜYE ( BAŞKAN) :

ÜYE :

ÜYE :

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen ...../...../..... tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi Canan AKBULUT'un çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu ...../...../..... tarih ve ..../...../..... sayılı kararıyla Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

**İMZA/MÜHÜR**

## ÖZET

### **TEZİN BAŞLIĞI: DÜŞÜK HIZLI DÜŞEY MİLLİ MEKANİK YÜZEY HAVALANDIRICININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ**

**YAZAR ADI : CANAN AKBULUT**

Evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılması için kurulan biyolojik arıtma tesislerinin en önemli ünitesi hiç şüphesiz arıtma işlemini gerçekleştiren canlı organizmalara, ihtiyaçları olan oksijenin transfer edildiği ve aktif çamurun üretildiği havalandırma havuzudur. Arıtma işleminin verimli olabilmesi için atıksuya, atmosferden gerekli oksijen verilirken, aynı anda mikroorganizmaların, yeterli oksijeni almış atıksu ile sürekli ve üniform bir karışım oluşturarak askıda kalmaları şarttır. Tesislerde kullanılan düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcıların görevi, işte bu her ikisi de çok önemli olan havalandırma ve karıştırma fonksiyonlarını yerine getirmektir. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılar, özel konstrüksiyona sahip türbin pervane ile suyun yarıldığı bölgede maksimum hava türbülansı oluşturarak yüksek oksijen transfer verimi sağlamak ve aynı zamanda havuz hacmini sürekli karışım halinde tutmaktadır.

Bu çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak akım kırıcsız ve akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının biyolojik arıtma prosesi için akışkanlar mekaniği çözümü karşılaştırılmıştır. Ekipmanların katı modeli Pro-Engineer programında oluşturulurken, analizde ağ (mesh) oluşturmak için ANSYS ICEM-CFD ve akışkanlar mekaniği sonuçları için de ANSYS CFX programı kullanılmıştır.

## **SUMMARY**

**THESIS TITLE : A LOW-SPEED MECHANICAL SURFACE AERATOR  
WITH VERTICAL SHAFT BY COMPUTATIONAL  
FLUID DYNAMICS (CFD) ANALYSIS**

**AUTHOR : CANAN AKBULUT**

The purification of industrial wastewater and domestic sewage is normally carried out by the biological aerobic activated sludge process. In aerobic processes the pollutants in the wastewater are removed by the living microorganisms. In order to accomplish this efficiently, the aeration equipment must not only be capable of transferring oxygen from atmosphere to the wastewater, but also maintain sufficient uniform mixing of the microorganisms with the oxygenated wastewater. Therefore, the aeration device is the most important part of an activated sludge process. Aerator impeller consist of an inverted shallow cone with blades attached vertically to the underside of the cone. As the aerator rotates, the air is drawn into the liquid behind the blades and mixes with the wastewater in the region of the greatest turbulence. The front of the blades disperse the oxygenated wastewater radially outwards over a large surface area in order to increase the oxygenation. This kind of action of the impeller creates an upward motion of the wastewater in the tank, resulting the concurrent activities of the aeration, mixing and circulation of the whole tank content.

In this thesis, fluid mechanics analysis for biological wastewater process of low-speed vertical shaft mechanical surface aerator without baffles and with baffles was compared using method Computational Fluid Dynamics (CFD). While Pro-Engineer software are shaped solid model of equipments, ANSYS ICEM CFD software is used for meshing and ANSYS CFX software also used for fluid mechanics results.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamdaki katkılarından dolayı, değerli zamanını ve bilgilerini benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. A. Zafer ŞENALP'e (GYTE Mühendislik Fakültesi), bu konuda bana çalışma olanağı veren Makine Yüksek Mühendisi Sayın Gıyasettin BİLGE'ye (ASTİM Endüstri Tesisleri A.Ş.), desteği ve fikirleri ile bu tezin yazılabilmesinde yardımcı olan Makine Mühendisi Sayın Alp KOŞ'a (ASTİM Endüstri Tesisleri A.Ş.) ve Teknik Ressam Sayın Mehmet BÜKE'ye (ASTİM Endüstri Tesisleri A.Ş.), HAD konusunda bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen Makine Mühendisi Sayın Mehmet TEKE (Figes A.Ş.), Makine Mühendisi Sayın Arda GÖKŞEN (Figes A.Ş.) ve Makine Mühendisi Sayın İsmail AYDIN'a, çalışma arkadaşlarıma, eşime ve yakınlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gebze, Haziran 2010

Canan AKBULUT

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                  |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET                                                                                             | i     |
| SUMMARY                                                                                          | i     |
| TEŞEKKÜR                                                                                         | iii   |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ                                                                               | iv    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ                                                                   | viii  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                                                  | xiv   |
| TABLolar DİZİNİ                                                                                  | xxii  |
| <br>1. GİRİŞ                                                                                     | <br>1 |
| 1.1. Düşük Hızlı Düşey Milli Mekanik Yüzey Havalandırıcının Tarihsel Gelişimi                    | 2     |
| 1.2. Düşük Hızlı Düşey Milli Mekanik Yüzey Havalandırıcılarla İlgili Yapılan Bilimsel Çalışmalar | 3     |
| <br>2. ATIKSU ARITMA PROSESİ                                                                     | <br>7 |
| 2.1. Tanım                                                                                       | 7     |
| 2.1.1. Fiziksel Arıtma                                                                           | 8     |
| 2.1.2. Kimyasal Arıtma                                                                           | 9     |
| 2.1.3. Biyolojik Arıtma                                                                          | 9     |
| 2.1.4. Çamur Arıtma                                                                              | 10    |
| 2.1.5. İleri ve Son Arıtma                                                                       | 10    |
| 2.2. Biyolojik Arıtım Mekanizmasına Giriş                                                        | 10    |
| 2.2.1. Havalı (Aerobik) Biyolojik Arıtma                                                         | 12    |
| 2.2.1.1. Klasik Aktif Çamur Süreci                                                               | 13    |
| 2.2.1.2. Uzun Havalandırmalı Aktif Çamur Prosesi                                                 | 15    |
| 2.2.1.3. Mekanik Havalandırmalı Lagünler                                                         | 16    |
| 2.2.1.4. Saf Oksijenli Sistemler                                                                 | 19    |
| 2.2.1.5. Stabilizasyon Havuzları                                                                 | 20    |
| 2.2.1.6. Kontakt Stabilizasyon                                                                   | 22    |
| 2.2.1.7. Oksidasyon Hendeği                                                                      | 23    |
| 2.2.1.8. Kademeli Havalandırma                                                                   | 24    |
| 2.2.1.9. Tadil Edilmiş Havalandırma                                                              | 25    |
| 2.2.1.10. Yüksek Hızlı Havalandırma                                                              | 25    |
| 2.2.1.11. Damlatmalı Filtreler                                                                   | 26    |
| 2.2.1.12. Biyodiskler                                                                            | 27    |
| 2.2.2. Havasız (Anaerobik) Biyolojik Arıtma                                                      | 29    |
| 2.3. Havalandırma Ekipmanları                                                                    | 29    |
| 2.4. Mekanik Havalandırma                                                                        | 32    |
| 2.4.1. Düşük Hızlı Mekanik Yüzey Havalandırıcılar                                                | 32    |
| 2.4.1.1. Düşük Hızlı Mekanik Yüzey Havalandırıcılarda Performans Değer Aralığı                   | 37    |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.1.2. Düşük Hızlı Mekanik Yüzey Havalandırıcı Performansını Etkileyen Faktörler   | 38 |
| 3. TEORİK ESASLAR                                                                    | 42 |
| 3.1. Kütle Transfer Prensipleri                                                      | 42 |
| 3.1.1. Transferin Fiziksel Mekanizması                                               | 42 |
| 3.1.2. Moleküler Yayınım                                                             | 42 |
| 3.1.2.1. Fick Kanunu-Durağan Koşullar                                                | 43 |
| 3.1.3. Konvektör Taşınımı İçin Yayınımın Kıyaslanması                                | 49 |
| 3.1.4. Gaz –Sıvı Transferi                                                           | 51 |
| 3.1.4.1. Gaz ve Sıvı Filmleri                                                        | 53 |
| 3.1.4.2. Doygunluk Konsantrasyonu ve Absorbsiyon                                     | 54 |
| 3.1.4.2.1. Henry Kanunu                                                              | 54 |
| 3.1.4.3. Toplam İtme Kuvveti                                                         | 55 |
| 3.1.4.4. Sıvı Film Katsayısı                                                         | 56 |
| 3.2. Oksijen Transfer Uygulamaları                                                   | 57 |
| 3.2.1. Temel Denklem                                                                 | 57 |
| 3.2.2. Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler                                       | 58 |
| 3.2.2.1. Oksijen Doygunluğu                                                          | 58 |
| 3.2.2.1.1. Sıcaklık                                                                  | 59 |
| 3.2.2.1.2. Atıksu                                                                    | 60 |
| 3.2.2.1.3. Batma Derinliği                                                           | 61 |
| 3.2.2.2. Oksijen Transfer Katsayısı K <sub>La</sub>                                  | 61 |
| 3.2.2.2.1. Sıcaklık                                                                  | 62 |
| 3.2.2.2.2. Atıksu                                                                    | 62 |
| 3.2.2.3. Sıvı Yığındaki Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonu                              | 65 |
| 3.3. Dizayn Denklemleri                                                              | 67 |
| 3.3.1. Standart Oksijen Transfer Oranı, SOTR                                         | 67 |
| 3.3.2. Oksijenlenme Kapasitesi, OC                                                   | 68 |
| 3.3.3. Standart Havalandırma Verimi, SAE                                             | 69 |
| 3.3.4. Standart Oksijen Transfer Verimi, SOTE                                        | 69 |
| 4. MEKANİK YÜZEYSEL HAVALANDIRICI TASARIM İLKELERİ                                   | 71 |
| 4.1. Karışım İçin Enerji Gereksinimi                                                 | 73 |
| 4.2. Tasarım Parametreleri                                                           | 73 |
| 5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)                                             | 76 |
| 5.1. Giriş                                                                           | 76 |
| 5.1.1. Sonlu Hacimler Yöntemi                                                        | 77 |
| 5.1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi                                                       | 79 |
| 5.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) nin Atıksu Arıtma Sistemlerinde Kullanımı | 79 |
| 5.3. HAD Metodu İşlem Prosesleri                                                     | 82 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1. Ön İşlem                                                                                                           | 82  |
| 5.3.2. Çözüm                                                                                                              | 82  |
| 5.3.3. Son İşlem                                                                                                          | 83  |
| 5.4. Navier-Stokes Denklemleri                                                                                            | 84  |
| 5.4.1. Temel Kabuller                                                                                                     | 84  |
| 5.4.2. Sıkıştırılabilir Akışlarda Korunum Denklemleri                                                                     | 85  |
| 5.4.3. Sıkıştırılamaz Akışlarda Korunum Denklemleri                                                                       | 87  |
| 5.5. HAD ile Çoklu Faz Akış Yöntemleri                                                                                    | 88  |
| 5.5.1. Çoklu Faz Modelleme Yaklaşımları                                                                                   | 89  |
| 5.5.1.1. Euler-Lagrange Yaklaşımı                                                                                         | 89  |
| 5.5.1.2. Euler-Euler Yaklaşımı                                                                                            | 90  |
| 5.5.1.2.1. Akışkan Hacim (VOF) Modeli                                                                                     | 91  |
| 5.5.1.2.2. Karışım Modeli                                                                                                 | 91  |
| 5.5.1.2.3. Euler Modeli                                                                                                   | 92  |
| 5.6. Türbülans Modelleri                                                                                                  | 92  |
| 5.6.1. Tanım                                                                                                              | 92  |
| 5.6.2. Sıfır Denklem Modelleri                                                                                            | 93  |
| 5.6.2.1. Boussinessq Çevri Viskozitesi Yaklaşımı                                                                          | 94  |
| 5.6.2.2. Prandtl Karışma Uzunluğu Yaklaşımı                                                                               | 95  |
| 5.6.2.3. Von-Karman Yaklaşımı                                                                                             | 95  |
| 5.6.3. Tek Denklem Modeli                                                                                                 | 96  |
| 5.6.4. İki Denklem Modeli                                                                                                 | 98  |
| 5.6.4.1. Standart k- $\epsilon$ Modeli                                                                                    | 98  |
| 5.6.4.2. RNG k- $\epsilon$ Modeli                                                                                         | 99  |
| 5.6.4.1. k- $\omega$ Modeli                                                                                               | 101 |
| 5.6.5. Reynolds Gerilme Modeli                                                                                            | 102 |
| 5.6.5.1. Diferansiyel Model                                                                                               | 102 |
| 5.6.5.2. Cebirsel Model                                                                                                   | 104 |
| 5.6.6. Duvar Fonksiyonları                                                                                                | 104 |
| 5.6.6.1. Standart Duvar Fonksiyonu                                                                                        | 105 |
| 5.6.6.2. Dengeden Uzak Duvar Fonksiyonu                                                                                   | 105 |
| 5.6.7. Direkt Nümerik Benzeşimi (DNS) Modeli                                                                              | 106 |
| 5.6.8. Büyük Girdap Benzeşimi (LES) Modeli                                                                                | 107 |
| 5.6.9. Kayma Gerilme Taşınım (SST) Modeli                                                                                 | 108 |
| 6. MODELLEME VE SONUÇLAR                                                                                                  | 111 |
| 6.1. Teorik Model                                                                                                         | 111 |
| 6.2. Model Ağ Yapısı ve Sınır Koşulları                                                                                   | 117 |
| 6.2.1. Akım Kırıcısız ve Akım Kırıcılı Düşük Hızlı Düşey Milli Mekanik Yüzey Havalandırıcıların Sonlu Hacimlere Ayrılması | 119 |
| 6.2.2. Çözüm İçin Sınır Koşullarının Belirlemesi                                                                          | 124 |
| 6.2.2.1. Matematiksel Model                                                                                               | 128 |
| 6.3. Çözüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi                                                                                 | 130 |

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER                              |     |
| 7.1. CFX Grafikleri                                  | 138 |
| 7.2. Arayüzey ve YZ Düşey Düzlemindeki HAD Sonuçları | 142 |
| 7.3. Sonuçların Karşılaştırılması ve Öneriler        | 149 |
| KAYNAKLAR                                            | 152 |
| ÖZGEÇMİŞ                                             | 157 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler                      | Birimler       | Açıklamalar                                                             |
|-------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| A                             | m <sup>2</sup> | Arayüzey alanı                                                          |
| A                             | mg/g-h         | Spesifik oksijen alım oranı                                             |
| BOI                           |                | Biyolojik oksijen ihtiyacı                                              |
| C                             | mg/L           | Oksijen konsantrasyonu                                                  |
| C <sub>0</sub>                | mg/L           | 0 zamanındaki çözülmüş oksijen (DO) konsantrasyonu                      |
| C <sub>BOI5,GIRIS</sub>       | mg/L           | Ön çökeltme havuzuna giren BOI <sub>5</sub> konsantrasyonu              |
| C <sub>BOI5,CIKIS</sub>       | mg/L           | Ön çökeltme havuzunda gerçekleşen BOI <sub>5</sub> giderim oranı        |
| C <sub>G</sub>                | mg/L           | Yığın gaz faz oksijen konsantrasyonu                                    |
| C <sub>G,i</sub>              | mg/L           | Arayüzeydeki gaz fazı oksijen konsantrasyonu                            |
| C <sub>L</sub>                | mg/L           | Yığın sıvı faz oksijen konsantrasyonu                                   |
| C <sub>L,i</sub>              | mg/L           | Arayüzeydeki sıvı faz oksijen konsantrasyonu                            |
| C <sub>m</sub>                | mg/L           | Flok merkezindeki oksijen konsantrasyonu                                |
| c <sub>p</sub>                | kcal/kg°C      | Sabit basınçtaki spesifik ısı                                           |
| C <sub>s</sub>                | mg/L           | Çözülmüş oksijen (DO) doygunluk konsantrasyonu                          |
| C <sub>s</sub> <sup>*</sup>   | mg/L           | Yüzey doygunluk konsantrasyonu                                          |
| C <sub>s20</sub> <sup>*</sup> | mg/L           | 20 °C'de 9.09 mg/L yüzey doygunluk konsantrasyonu                       |
| C <sub>∞</sub> <sup>*</sup>   | mg/L           | Oksijen doygunluk konsantrasyonu                                        |
| C <sub>∞20</sub> <sup>*</sup> | mg/L           | 20 °C ve difüzör derinliğinde temiz su oksijen doygunluk konsantrasyonu |
| C <sub>∞f</sub> <sup>*</sup>  | mg/L           | Proses (saha) koşulları altında oksijen doygunluk konsantrasyonu        |
| ÇHI                           |                | Çamur hacim indeksi                                                     |

| <b>Simgeler</b> | <b>Birimler</b>              | <b>Açıklamalar</b>                                                       |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| D               | $m^2/s$                      | Atıksudaki oksijenin moleküler yayınma katsayısı                         |
| D               | -                            | Difüzyon terimi                                                          |
| D               | m                            | Havalandırıcı çapı                                                       |
| d               | m                            | Tank derinliği                                                           |
| $D_{AB}$        | $m^2/s$                      | B çözücü maddesi içerisindeki A çözeltisinin moleküler yayınma katsayısı |
| $d_B$           | m                            | Kabarcık çapı                                                            |
| $D_f$           | $m^2/s$                      | Floktaki yayılım                                                         |
| $d_f$           | m                            | Flok çapı                                                                |
| DO              | kg                           | Çözünmüş oksijen                                                         |
| erfc            | -                            | Tamamlayıcı hata fonksiyonu                                              |
| $G_s$           | $m_N^3/h$ , scfm             | Standart koşullardaki hava akış oranı                                    |
| H               | $(mg/L)_{gaz}/(mg/L)_{sıvı}$ | Henry sabiti                                                             |
| H               | m                            | Akış derinliği                                                           |
| h               | m                            | Pervanenin suya batma derinliği                                          |
| HAD             |                              | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği                                          |
| J               | $g/m^2-s$                    | Oksijen kütle akısı                                                      |
| k               | N.m                          | Türbülans kinetik enerjisi                                               |
| k               |                              | Dalga sayısı                                                             |
| $k_D$           | -                            | Düzeltilme faktörü                                                       |
| $k_G$           | m/s                          | Gaz film katsayısı                                                       |
| $k_L$           | m/s                          | Sıvı film katsayısı                                                      |
| $K_L$           | m/s                          | Toplam sıvı film katsayısı                                               |
| $K_{La}$        | $h^{-1}$                     | Oksijen transfer katsayısı                                               |
| $K_{La20}$      | $h^{-1}$                     | 20 °C'deki temiz su oksijen transfer katsayısı                           |
| $K_{Lat}$       | $h^{-1}$                     | T sıcaklığındaki temiz su oksijen transfer katsayısı                     |
| $k_\delta$      | m/s                          | Vizkoz laminar alt tabakasındaki sıvı film katsayısı                     |
| $k_\tau$        | m/s                          | Türbülans alt tabakasındaki sıvı film katsayısı                          |

| Simgeler   | Birimler   | Açıklamalar                                                              |
|------------|------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $l$        | m          | Karakteristik karıştırma uzunluğu                                        |
| $L$        | m          | Türbülans ölçek uzunluğu                                                 |
| $M$        | g          | Oksijen transfer kütlesi                                                 |
| $M$        | g/mol      | Moleküler ağırlık                                                        |
| $M$        | mg/L       | Havalandırma havuzundaki MLSS konsantrasyonu                             |
| $M_B$      | g/mol      | B çözücünün moleküler ağırlığı                                           |
| MLSS       | mg/L       | Karışık sıvı askıda katı madde                                           |
| MLVSS      | mg/L       | Karışık sıvı askıda uçucu katı madde                                     |
| $n$        | mol        | İdeal gaz kanunundaki mol sayısı                                         |
| $N$        | -, %       | Standart koşullardaki oksijen transfer verimi                            |
| $N$        | m/s        | Hız                                                                      |
| $N_0$      | -, %       | Proses (saha) koşullarındaki oksijen transfer verimi                     |
| $N_{time}$ |            | Zaman adım sayısı                                                        |
| $N_{uni}$  |            | Grid noktaları okunan uniform dağılım sayısı                             |
| $oc$       | mg/L-h     | Temiz sudaki spesifik oksijenlenme katsayısı= $SOTR_v$                   |
| $oc_t$     | mg/L-h     | T sıcaklığındaki temiz sudaki spesifik oksijenleşme kapasitesi = $OTR_v$ |
| $OTE_f$    | -, %       | Proses koşulları altında oksijen transfer katsayısı                      |
| $OTR_f$    | kg/h, lb/h | Proses koşulları altındaki oksijen transfer oranı                        |
| $P$        | kPa, psia  | Basınç                                                                   |
| $P$        | -          | Üretim terimi                                                            |
| $p$        | -          | Kısmi oksijen basıncı                                                    |
| $P_b$      | kPa, psia  | Barometrik basınç                                                        |
| $P_{de}$   | kPa, psia  | Efektif basınç                                                           |
| $P_s$      | kPa, psia  | Standart barometrik basınç, 101.325 kPa, 14.696 psia                     |
| $p_t$      | kPa, psia  | Toplam basınç                                                            |
| $P_x$      | kg         | Uçucu çamur miktarı                                                      |

| <b>Simgeler</b> | <b>Birimler</b> | <b>Açıklamalar</b>                                        |
|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------------------|
| $p_v$           | kPa, psia       | Buhar basıncı                                             |
| $Q_R$           | m/s             | Oksijen debisi                                            |
| $Q_w$           | kg              | Çamur miktarı                                             |
| $Q_{TASARIM}$   | m/s             | Tasarım debisi                                            |
| $r$             | $s^{-1}$        | Yüzey yenileme oranı                                      |
| $R$             | J/(kg.K)        | Üniversal gaz sabiti (286.88 J/kg.K)                      |
| $R$             | -               | Geri çevrim oranı                                         |
| $Re$            | -               | Reynolds sayısı                                           |
| $R_G$           | s/m             | Gaz fazındaki oksijen transfer direnci                    |
| $R_L$           | s/m             | Sıvı fazındaki oksijen transfer direnci                   |
| $R_T$           | s/m             | Oksijen transferi toplam direnci                          |
| SAE             | kg/kWh, lb/hp-h | Standart havalandırma verimi                              |
| SEY             |                 | Sonlu Elemanlar Yöntemi                                   |
| SHY             |                 | Sonlu Hacimler Yöntemi                                    |
| SOTE            | -, %            | Standart oksijen transfer verimi                          |
| SOTR            | kg/h, lb/h      | Standart oksijen transfer oranı                           |
| $T$             | $^0K$           | Mutlak sıcaklık                                           |
| $t$             | s               | Zaman                                                     |
| TDS             | mg/L            | Toplam çözünmüş katı konsantrasyonu                       |
| $\tilde{u}$     | m/s             | Ortalama hız                                              |
| $u_t$           | m/s             | Sürtünme hızı                                             |
| $V$             | $m^3$           | Tank hacmi                                                |
| $V_A$           | $m^3$           | A çözeltisinin toplam hacmi                               |
| $V_{AT}$        | $m^3$           | Havalandırma havuzu hacmi                                 |
| $\bar{v}$       | m/s             | Düşey hız dalgalanması                                    |
| $w$             | kg/h, lb/h      | Havanın kütle akış oranı                                  |
| $w_o$           | kg/h, lb/h      | Oksijenin kütle akış oranı                                |
| WP              | kW, hp          | Kablo gücü                                                |
| $X_R$           | mg/L            | Havalandırma havuzuna geri gönderilen MLSS konsantrasyonu |
| $y$             | m               | Penetrasyon derinliği                                     |

| <b>Simgeler</b>      | <b>Birimler</b>                       | <b>Açıklamalar</b>                                                          |
|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $Y_0$                | %                                     | Büyüme verimi                                                               |
| $y_v$                | m                                     | Fiziksel viskoz alt tabaka kalınlığı                                        |
| $\alpha$             | -                                     | Oksijen transfer katsayısı için atıksu düzelme faktörü                      |
| $\alpha_s$           | -                                     | Girdap sabiti                                                               |
| $\beta$              | -                                     | Oksijen doygunluğu için atıksu düzelme faktörü                              |
| $\delta$             | -                                     | Oksijen doygunluğu için derinlik düzelme faktörü                            |
| $\delta_c$           | m                                     | Konsantrasyon sınır tabaka kalınlığı                                        |
| $\delta_d$           | m                                     | Yayınım alt tabaka kalınlığı                                                |
| $\delta_L$           | m                                     | Sıvı film kalınlığı                                                         |
| $\varepsilon$        | -                                     | Dissipasyon oranı                                                           |
| $\phi$               | -                                     | B çözücüsü için birleşik parametre                                          |
| $\phi$               | -                                     | Kümülatif Gauss hata fonksiyonu                                             |
| $\gamma_f$           | kg/m <sup>3</sup>                     | Kuru flokun spesifik ağırlığı                                               |
| $\gamma_w$           | N/m <sup>3</sup> , lb/ft <sup>3</sup> | Suyun spesifik ağırlığı                                                     |
| $\kappa$             | -                                     | Logaritmik formda oksijen transfer katsayısı için sıcaklık düzeltme faktörü |
| $\rho$               | g/cm <sup>3</sup>                     | Yoğunluk                                                                    |
| $\mu$                | g/m-s                                 | Mutlak viskozite                                                            |
| $\mu_B$              | g/m-s                                 | B çözücüsünün mutlak viskozitesi                                            |
| $\mu_e$              | g/m-s                                 | Efektif viskozitesi                                                         |
| $\theta$             |                                       | Oksijen transfer katsayısı için sıcaklık düzeltme faktörü                   |
| $\Gamma_\varepsilon$ | -                                     | Türbülans dissipasyon oranı diffüzivite terimi                              |
| $\Gamma_k$           | -                                     | Türbülans kinetik enerjisi diffüzivite terimi                               |
| $\sigma_\varepsilon$ | -                                     | Türbülans dissipasyon oranı Prandl sayısı                                   |
| $\sigma_k$           | -                                     | Türbülans kinetik enerjisi Prandl sayısı                                    |
| $\tau$               | -                                     | Oksijen doygunluğu için sıcaklık düzeltme faktörü                           |
| $\Delta t$           | m                                     | Zaman adımı                                                                 |

| <b>Simgeler</b>    | <b>Birimler</b> | <b>Açıklamalar</b>          |
|--------------------|-----------------|-----------------------------|
| $\Delta t_{TOTAL}$ | m               | Toplam zaman adımı          |
| $\pi$              | -               | Basınç terimi               |
| $\Omega$           | -               | Karakteristik girdap sayısı |
| $\nu$              | g/m-s           | Kinematik viskozitesi       |
| $\nu_i$            | g/m-s           | Çevri viskozitesi           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sekil

### Sayfa

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Atıksu arıtma tesisi şematik gösterimi                                                                                                        | 8  |
| 2.2. Biyolojik arıtma ünitelerinin basitleştirilmiş akım diyagramı                                                                                 | 12 |
| 2.3. Havalandırma prosesleri                                                                                                                       | 12 |
| 2.4. Klasik aktif çamur süreci proses akış şeması                                                                                                  | 14 |
| 2.5. Uzun havalandırılmalı aktif çamur süreci proses akış şeması                                                                                   | 16 |
| 2.6. Mekanik havalandırılmalı lagün                                                                                                                | 17 |
| 2.7. Havalandırılmalı lagün proses akım şeması                                                                                                     | 18 |
| 2.8. Fakültatif havalandırılmalı lagün                                                                                                             | 19 |
| 2.9. Saf oksijenli sistem proses akış şeması                                                                                                       | 20 |
| 2.10. Stabilizasyon havuzu proses akım şeması                                                                                                      | 21 |
| 2.11. Stabilizasyon havuzu kesiti                                                                                                                  | 22 |
| 2.12. Kontakt (temas) ve stabilizasyon süreci proses akış şeması                                                                                   | 23 |
| 2.13. Oksidasyon hendeği proses akış şeması                                                                                                        | 24 |
| 2.14. Kademeli havalandırma süreci proses akış şeması                                                                                              | 25 |
| 2.15. Yüksek hızlı havalandırma süreci proses akış şeması                                                                                          | 26 |
| 2.16. Damlatılmalı filtre proses akış şeması                                                                                                       | 27 |
| 2.17. Döner biyolojik disk proses akış şeması                                                                                                      | 28 |
| 2.18. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı akış davranışı                                                                           | 33 |
| 2.19. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı esnasındaki resmi                                                                        | 35 |
| 2.20. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesi                                                                                | 36 |
| 2.21. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı ekipmanları                                                                              | 37 |
| 2.22. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervane çalışma konumu                                                                   | 39 |
| 2.23. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı için rotor hızı ve batma derinliğinin standart oksijen transferi (SAE) üzerindeki etkisi | 40 |
| 2.24.(a) Akış borulu düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı                                                                           | 41 |
| 2.24.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı                                                                         | 41 |
| 3.1.(a) $t=0$ anında durağan çözelti için oksijen yayılımının şematik gösterimi                                                                    | 44 |
| 3.1.(b) $t=1/2$ anında durağan çözelti için oksijen yayılımının şematik gösterimi                                                                  | 45 |
| 3.1.(c) $t=t$ anında durağan çözelti için oksijen yayılımının şematik gösterimi                                                                    | 45 |

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2. Wilke-Chang denklemi kullanılarak viskozitenin sıcaklık ve oksijen yayılımı üzerindeki değişiminin bağlı etkileri | 47  |
| 3.3. Sıcaklığın oksijen yayılımı üzerindeki etkileri                                                                   | 47  |
| 3.4. 20 °C’de Fick kanunu yayılımıyla suya transfer edilen oksijen kütlesi                                             | 49  |
| 3.5. Oksijen transfer oranının 0.5 m derinlik ve 20°C’deki arazi koşulları için moleküler yayılımı kıyaslanması        | 51  |
| 3.6. İki fazda oksijen transfer şeması                                                                                 | 53  |
| 3.7. Sıcaklığın oksijen doygunluğu üzerine etkisi                                                                      | 60  |
| 3.8. Toplam çözünmüş katı maddenin (TDS) oksijen doygunluğu üzerindeki etkisi                                          | 61  |
| 3.9. Bir su yüzeyinde floresans ölçümü kullanılarak hız dalgalanmalarında atıksuyun KLa üzerindeki etkisi              | 64  |
| 3.10. Türbülansın temiz sudaki O <sub>2</sub> transferi üzerine etkisi                                                 | 65  |
| 3.11. Türbülansın atıksudaki O <sub>2</sub> transferi üzerine etkisi                                                   | 65  |
| 3.12. Aktif çamur kütle transfer direncinin gerekli oksijen konsantrasyonu üzerine etkisi                              | 66  |
| 3.13. 0 °C’de çözünmüş oksijen konsantrasyonunun oksijen transfer sıcaklığı üzerindeki etkisi                          | 68  |
| 5.1. Reynolds sayısına bağlı akış modelleri                                                                            | 93  |
| 6.1.(a) Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı                                                            | 111 |
| 6.1.(b) Akım kırıcı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı                                                | 111 |
| 6.2.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı 3 boyutlu CAD modeli                        | 112 |
| 6.2.(b) Akım kırıcı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı 3 boyutlu CAD modeli                           | 113 |
| 6.2.(c) Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesi 3 boyutlu CAD modeli                             | 113 |
| 6.3. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının havuz yerleşim ölçüleri                                    | 116 |
| 6.4. Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun ağ (mesh) ölçüleri                   | 120 |
| 6.5. Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun 3 boyutlu tetrahedral ağ yapısı      | 121 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.6. Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun ağ (mesh) ölçüleri                   | 121 |
| 6.7. Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının 3 boyutlu tetrahedral ağ yapısı             | 122 |
| 6.8. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesinin ağ (mesh) ölçüleri                              | 123 |
| 6.9. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesinin boyutlu tetrahedral ağ yapısı                   | 123 |
| 6.10.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının CFX sınır şartları                     | 125 |
| 6.10.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının CFX sınır şartları                      | 125 |
| 6.11.(a) Havuz bölgesi için havanın özelliklerinin girilmesi                                                          | 126 |
| 6.11.(b) Havuz bölgesi için suyun özelliklerinin girilmesi                                                            | 126 |
| 6.11.(c) Havuz bölgesi için akış karakterinin girilmesi                                                               | 126 |
| 6.11.(d) Havuz bölgesi için serbest yüzey modelinin girilmesi                                                         | 126 |
| 6.12.(a) Pervane bölgesi için havanın özelliklerinin girilmesi                                                        | 127 |
| 6.12.(b) Pervane bölgesi için suyun özelliklerinin girilmesi                                                          | 127 |
| 6.12.(c) Pervane bölgesi için akış karakterinin girilmesi                                                             | 127 |
| 6.12.(d) Pervane bölgesi için serbest yüzey modelinin girilmesi                                                       | 127 |
| 6.13. Serbest yüzey arayüzeyi şematik gösterimi                                                                       | 128 |
| 6.14.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi                    | 131 |
| 6.14.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi                     | 131 |
| 6.14.(c) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi maksimum değerleri | 132 |
| 6.14.(d) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi maksimum değerleri  | 132 |
| 6.14.(e) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi | 132 |
| 6.14.(f) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi  | 132 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.14.(g) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi maksimum değerleri               | 133 |
| 6.14.(h) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi maksimum değerleri               | 133 |
| 6.15.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi                                       | 133 |
| 6.15.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi                                       | 133 |
| 6.15.(c) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri                    | 134 |
| 6.15.(d) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri                    | 134 |
| 6.15.(e) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi                    | 134 |
| 6.15.(f) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi                    | 134 |
| 6.15.(g) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri | 135 |
| 6.15.(h) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri | 135 |
| 6.16.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı                                                             | 135 |
| 6.16.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı                                                             | 135 |
| 6.16.(c) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı maksimum değerleri                                          | 136 |
| 6.16.(d) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı maksimum değerleri                                          | 136 |
| 6.16.(e) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı                                          | 136 |
| 6.16.(f) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı                                          | 136 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.16.(g) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı maksimum değerleri     | 137 |
| 6.16.(h) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı maksimum değerleri      | 137 |
| 6.17.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için girdap viskozitesi                          | 138 |
| 6.17.(b) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için girdap viskozitesi                           | 138 |
| 6.18.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için yüzeysel hız eğrisi                         | 138 |
| 6.18.(b) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için yüzeysel hız eğrisi                          | 138 |
| 6.19.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı eğrisi                               | 139 |
| 6.19.(b) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı eğrisi                                | 139 |
| 6.20.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki toplam basınç eğrisi | 139 |
| 6.20.(b) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki toplam basınç eğrisi  | 139 |
| 6.21.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için girdap (çevri) viskozitesi eğrisi             | 140 |
| 6.21.(b) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için girdap (çevri) viskozitesi eğrisi              | 140 |
| 6.22.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için yüzeysel hız eğrisi                           | 140 |
| 6.22.(b) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için yüzeysel hız eğrisi                            | 140 |
| 6.23.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için türbülans kinetik enerji eğrisi               | 141 |
| 6.23.(b) Akım kırıcsı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için türbülans kinetik enerji eğrisi                | 141 |

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.24.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki su hız eğrisi                      | 141 |
| 6.24.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki su hız eğrisi                       | 141 |
| 6.25.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için hacim oranı eğrisi                                          | 142 |
| 6.25.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için hacim oranı eğrisi                                           | 142 |
| 6.26.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın girdap (çevri) viskozitesi              | 142 |
| 6.26.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın girdap (çevri) viskozitesi               | 142 |
| 6.27.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın yüzeysel hızı                           | 143 |
| 6.27.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın yüzeysel hızı                            | 143 |
| 6.28.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın hacim oranı                             | 143 |
| 6.28.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın hacim oranı                              | 143 |
| 6.29.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı | 143 |
| 6.29.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı  | 143 |
| 6.30.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun girdap viskozitesi                        | 144 |
| 6.30.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun girdap viskozitesi                         | 144 |
| 6.31.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun yüzeysel hızı                             | 144 |
| 6.31.(b) Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun yüzeysel hızı                              | 144 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.32.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun türbülans kinetik enerjisi            | 144 |
| 6.32.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun türbülans kinetik enerjisi             | 144 |
| 6.33.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenindeki suyun hızı | 145 |
| 6.33.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenindeki suyun hızı  | 145 |
| 6.34.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun hacim oranı                           | 145 |
| 6.34.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun hacim oranı                            | 145 |
| 6.35.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su viskozitesi                                                | 145 |
| 6.35.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su viskozitesi                                                 | 145 |
| 6.36.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava yüzeysel hızı                                              | 146 |
| 6.36.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava yüzeysel hızı                                               | 146 |
| 6.37.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı                                                | 146 |
| 6.37.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı                                                 | 146 |
| 6.38.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı                 | 146 |
| 6.38.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı                  | 146 |
| 6.39.(a) Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su girdap viskozitesi                                           | 147 |
| 6.39.(b) Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su girdap viskozitesi                                            | 147 |

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.40.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su yüzeysel hızı                             | 147 |
| 6.40.(b) Akım kırıcsılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su yüzeysel hızı                            | 147 |
| 6.41.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su türbölans kinetik enerjisi                | 147 |
| 6.41.(b) Akım kırıcsılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su türbölans kinetik enerjisi               | 147 |
| 6.42.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki suyun hızı  | 148 |
| 6.42.(b) Akım kırıcsılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki suyun hızı | 148 |
| 6.43.(a) Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su hacim oranı                               | 148 |
| 6.43.(b) Akım kırıcsılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su hacim oranı                              | 148 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

| <b><u>Tablo</u></b>                                                  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1. Bazı havalandırıcıların teknik özellikleri                      | 30                  |
| 2.2. Havalandırıcı karışım gereksinimleri                            | 32                  |
| 3.1. Havalandırma ekipmanları için spesifikasyonlar                  | 67                  |
| 4.1. Mekanik havalandırıcı oksijen transfer verimleri                | 71                  |
| 4.2. Düşük devirli yüzey havalandırıcılar için $\alpha$ faktörü      | 72                  |
| 4.3. Yüzeysel havalandırıcıların gücüne bağlı olarak havuz boyutları | 73                  |
| 5.1. HAD analiz prosesi                                              | 83                  |
| 6.1. Havalandırıcı pervane seçim tablosu                             | 114                 |

# 1.GİRİŞ

İnsanoğlu yaşamının her anında ihtiyaç duyduğu suyu her zaman yanında hazır olarak istemiştir. Bundan dolayı, yaşadığı ve çalıştığı mekanın içerisine suyu getirmiştir. Yani içme suyu şebekesini her yere döşemiştir. Burada unutulana bir nokta getirilen suyun, kullanıldıktan sonra nereye gideceğidir. Yerleşim bölgelerinde henüz yoğunluğun fazla olmadığı zamanlarda atıksular foseptik çukurlarda toplanırdı. Kent yoğunluğu arttıkça, foseptik çukurlar bir yandan ihtiyacı karşılayamaz duruma gelirken diğer yandan da bir takım problemleri meydana getirmiştir. Bu problemler detaylı incelendiğinde kanalizasyon fikri ortaya çıkmıştır. Kanalizasyonlar genelde bir akarsuda veya denizde sonlanmıştır. Daha az hallerde suyun az olduğu kurak bölgelerde sulama suyu olarak da kullanılmıştır. 19. yüzyıl sonları ve 20. yüzyıl başlarında nüfusun hızlı artışı, daha doğrusu teknolojisi ile birlikte hayat standardının yükselişi ile ölüm oranlarının azalması ve yaş ortalamasının artması, kentlerde yoğun bir ortam meydana getirmiştir. Böylece kanalizasyon atıksularındaki farklılaşma ve artış, yaşanan bölgeyi tehdit etmeye başlamıştır. Bundan dolayı dünyanın her yerinde bilhassa 20. yüzyılın ilk başlarında atıksu arıtma tesisleri çalışmaları başlamıştır. Sanayi atıksuları ile evsel kaynaklı atıksular çok farklı özellik gösterdiklerinden bunlarla ilgili teknolojiler de farklılık göstermektedir [Yüceer, 1994].

Günümüzün bilinen teknolojileri içerisinde atıksu arıtma tesisi tipinin seçiminde, atıksu özelliği çok önemli olsa bile iklim, yer, enerji maliyeti gibi etkenler de önemli rol oynar. Atıksuların organik olduğu düşünüldüğünde atıksu arıtma sistemlerinin de biyolojik arıtmada yoğunlaşması normaldir [Curi, 1994].

Biyolojik arıtma mekanizmasının içerisinde yer alan havalı (aerobik) arıtma prosesi, evsel ve endüstriyel atıksularda başarıyla uygulanabilen ve en fazla kabul gören bir prostir. Aerobik arıtma, atıksularda tabii olarak bulunan bakterilerin, oksijen ile aktif hale getirilip, su içinde kirliliği yaratan organik maddelerle beslenip onları yok etme esasına dayanır [Arbiogaz, Katalog].

Biyolojik arıtma prosesi içerisinde çok önemli bir yere sahip olan aerobik arıtma prosesinin çeşitli sistemlerinde kullanılan düşük hızlı mekanik yüzey

havalandırıcılar (aerator), su yüzeyinde konumlandırılmış bir pervaneye sahiptir ve aşağıdan yukarıya doğru düşey yönde sıvıyı sürükler. Mekanik yüzeysel havalandırıcılar, suyu emerek etrafa püskürtmek suretiyle hem oksijen transferini hem de havuz içinde karışımı sağlarlar. Çalışma prensiplerine göre yatay milli veya düşey milli olarak ikiye ayrılırlar. Yüzeysel havalandırıcılar, bir köprü üzerine yerleştirilerek sabit bir noktada çalıştırılabildikleri gibi, özellikle su seviyesi değişken olan havuzlarda veya geniş lagünlerde, yüzer bir sistem üzerine oturtulabilirler. Yüzeysel havalandırıcılar yavaş ve hızlı tip olarak iki farklı hızda yapılabilirler [Tesisat Mühendisliği Dergisi, 2003].

### **1.1. Düşük Hızlı Düşük Milli Mekanik Yüzey Havalandırıcının Tarihsel Gelişimi**

Mekanik havalandırmayla ilgili ilk fikirler, 1910'ların sonunda Avrupa'da, özellikle İngiltere'de ortaya çıkmış ve yavaş bir şekilde Birleşik Devletler'e yayılmıştır. 1929'a kadar, İngiltere'de mekanik havalandırma üniteleri difüze havalandırma üniteleri içerisinde sınıflandırılmıştır. Birleşik Devletler'de aktif çamur tesisleri için yaklaşık 100 adet mekanik havalandırmanın kullanıldığı, bir gezgin olan Roe (1938) tarafından kayıtlara alınmıştır.

1950 ve 1960'larda Birleşik Devletler'de pek çok düşük hızlı mekanik yüzey havalandırıcı satılmış ve onlar tatmin edici bir performans sergilemiştir. Bununla beraber, birim değerlendirme metodları genellikle kabul görmemiş ve proses performansında test çalışmaları amaçlanmıştır. Az zaman içerisinde havalandırıcı bakımı ve güvenilirliği ile ilgili olarak dişli redüktörlerde kusurlar görülmeye başlamış ve ilk çalıştırmadan kısa bir zaman sonra redüktörler iflas etmiştir.

1950'lerin kaliteli pervaneleri, basit radyal akış cihazları olmuştur. Pervane dizaynlarının büyük çoğunluğu, Birleşik Devletler firmaları tarafından Avrupa'dan ithal edilmiştir. Bıçak dizaynındaki yenilikler Birleşik Devletler üreticileri tarafından ayrıca geliştirilmiştir. 1960'lardan bu zamana, bu dizayn değerlerinin hesaplanması için güvenilir olmayan test prosedürleri mevcuttur. Pervane hızı, havuz geometrisi ve diğer önemli bağımlı değişkenlerin etkileri ya tam olarak bilinmemiş

ya da başarısızlıkların sonucunda anlaşılmıştır. Sonuç olarak, çoğu sistemlere uygun dizaynlar yapılmıştır.

Büyük karıştırıcı üreticilerinden Lightnin firması, 1960'lardan beri pek çok gelişmiş pervane kullanımıyla (4 kanatlı eğimli bıçak türbin) düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pazarında büyük bir güç olmuştur. Kısa bir zaman sonra, Philadelphia Motor'un Karıştırma Birimi, özel olarak dizayn ettikleri redüktörler kullanmış ve daha az arızalara neden olan yeni pervanelerle piyasaya girmişlerdir.

Lightnin ve Philadelphia karıştırıcı şirketleri, 1980'lerin ortasına kadar Birleşik Devletler'de düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pazarında liderliklerini sürdürmüşler ve katılarda askıya alma ve sıvılarda karışım için en iyi yaklaşımla birbiriyle çok yakın ilişki halinde olmuşlardır.

Yüksek saflıktaki oksijen üreticilerinden Eimco firması, prosesleri için düşük hızlı düşey mil makinaları kullanarak Carrousel oksidasyon hendeği prosesinde başarılı olmaya devam etmiştir. İlave olarak, çoğu düşük hız üniteleri, aktif çamur sistemlerinde iyi performans sergilemişlerdir [Müller et al., 2002].

## **1.2.Düşük Hızlı Düşey Milli Mekanik Yüzey Havalandırıcılarla İlgili Yapılan Bilimsel Çalışmalar**

Kırke ve El Gezawy çalışmalarında, 1.8 m çapında düşey eksenli akış pervanesi ve akış borusu düzeneği kullanarak, rezervuar ve göl gibi yapılarda oksijeni muhafaza etmek amacıyla su sirkülasyonunu araştırmışlardır. Testler, teorik debi tahminleri, güç tüketimi ve rezervuar içerisinde güncel tam ölçekli testler kullanılarak bir akış borulu (draft tube) pervane ve bir akış borusuz aynı pervanenin performansını kıyaslamak için 1/6 ölçeğinde model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu, literatürde şimdiye kadar her bir mekanik karıştırıcıdan çok daha düşük spesifik bir enerji tüketimidir ve sonuçlar, 1000 megalitre kapasitede bir rezervuarın, yaklaşık 12 gün içerisinde 200 W giriş gücüyle tamamen sirküle edilebileceğini veya bu seviyenin üzerinde çözünmüş oksijenin temini amacıyla daha geniş bir rezervuar içerisinde belli bir seviyenin üzerinde su sirküle edilebileceğini göstermektedir. Kendiliğinden oksijen ilavesi olmaksızın türbülans boyunca enerji tüketen karıştırma

prosesine nazaran difüzyon, fotosentez, rüzgar ve dalga hareketlerinin doğal prosesleriyle oksijenlenmenin olduğu yerde daha düşük seviyelerden yüzeye kadar su sirkülasyonu ile oksijen koşullarının en iyi şekilde temin edilebileceğini savunmuşlardır [Kırke and El Gezawy, 1995].

Rao ve Kumar çalışmalarında, dikdörtgen tanklı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının ölçek kriterlerini ve enerji korunumlarını incelemiştir. Yüzey havalandırma çalışmalarında, en-boy oranı  $L/W= 1.5$  ve  $L/W= 2$  olan iki tip dikdörtgen tank yapmışlar ve oksijen transfer oranı  $k$ , birim hacim başına teorik güç  $X$  ve güç sayısı  $P_0$  'la ilişkili simülasyon denklemleri geliştirmişlerdir.

$X$  parametresi,  $F^{4/3}R^{1/3}$  eşitliğiyle belirlenir, burada  $F$  ve  $R$  sırasıyla pervanenin Froude ve Reynolds sayılarıdır. Sonuçlar  $P_0$  'ın Reynolds sayısı,  $R$  veya Froude sayısı,  $F$  ile tekil olarak simüle edilemeyeceğini göstermiştir. Burada ölçek etkilerindeki sonuçların, hem  $F$  hem de  $R$  'nin etkilerini birleştirmek için gerekli olduğu görülmektedir. Dikdörtgen havalandırma tankları için  $P_0$  'ın her iki en-boy oranının  $X$  'le önemli bir şekilde bağlantılı olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte bu tür bağıntılar farklı en-boy oranlarına bağlıdır. Bu çalışma, eğer havalandırma tankları göreceli olarak daha yüksek giriş güçlerinde çalışırsa enerjinin büyük ölçüde korunacağını göstermiştir. Çalışma aynı zamanda daha küçük boyutlu tankların büyük boyutlu tanklarla kıyaslandığı zaman daha fazla enerji korunumlu ve ekonomik olduğunu göstermiştir [Rao and Kumar, 2006].

Bhuyar, Thakre ve Ingole çalışmalarında, kentsel ve evsel atıksularda kullanılan oksidasyon hendeği için eğimli bıçaklı mekanik yüzey havalandırıcı dizayn etmişlerdir. Havalandırma deney malzemesi, oksidasyon hendeği içerisindeki eğimli bıçaklı mekanik yüzey havalandırıcının dizayn karakteristikleri çalışmaları için yumuşak çelik sacdan yapılmıştır. Çalışmada, havalandırıcı çapı ( $D$ ), hız ( $N$ ) ve batma derinliği ( $h$ ) gibi çeşitli dinamik parametreler için laboratuvar ortamında geliştirilen, üretilen ve test edilen 6 farklı havalandırıcı konfigürasyonu kritik olarak denenmiştir. Farklı konfigürasyonların test edilmesinin dışında, eğimli bıçak rotoru,  $47^\circ$  açılı bıçak tipli potansiyel bir havalandırıcı olarak ortaya çıkmıştır. Toplam oksijen transfer katsayısının ( $K_L a$ ),  $10.33 \text{ h}^{-1}$  kadar olduğu gözlemlenmiş ve

optimum havalandırıcı verimi (AE), 2.269 kgO<sub>2</sub>/kWh bulunmuştur. Eğimli bıçak rotorunun standart havalandırıcı veriminin (SAE), oksidasyon hendeği prosesleri için kullanılan diğer havalandırıcılara kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Boyutsal analiz, havalandırıcı davranışının tanımlandığı denklemlerin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Bhuyar, Thakre ve Ingole, bir sonraki çalışmalarında, hendek içerisinde yer alan prosesi daha iyi anlamak için yeni bir HAD model geliştirmişlerdir. Deneyler ışığında gözlemlenen değerlerle birlikte, kıyaslama amacıyla veri üretmek için tek faz model uygulanmış, çalışmada 3 boyutlu, kararlı akış ve  $k - \varepsilon$  türbülans model kullanılmış ve simulasyon çalıştırılmıştır [Bhuyar et al., 2007] .

Jenkinson, Hall ve Gregory çalışmalarında, bir laboratuvar ölçeğinde hazırladıkları havalandırılmış stabilizasyon havuzu için HAD tekniklerini uygulamaya çalışmışlardır. Bir laboratuvar düzeneği, durgun su tankı içerisinde küçük ölçekli bir mekanik yüzey havalandırıcısının hidrolik etkilerini incelemek için kurulmuştur. 0.5 L/s'den 4 L/s'ye kadar sirkülasyonu olan küçük bir düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı kullanılmıştır. Havalandırıcı, bir tank içerisinde çalıştırılmış ve havalandırıcı tarafından oluşturulan hız şekilleri, bir akustik doppler hızölçeri kullanılarak ölçülmüştür. Hız profilleri, bir HAD modeli içerisinde kullanılmak için dağılım parametrelerine dönüştürülmüştür. Lokal bir türbülans zaman ölçek metodu, havalandırıcı mesafesinin bir fonksiyonu olarak yaklaşık bir dağılım değerini belirlemek için kullanılmıştır. Analiz, çeşitli özdeş koşullar altında farklı havalandırıcı güç ayarlarıyla denenmiştir. 3 başarılı çalıştırma tamamlanmıştır. Tank içerisindeki düzensiz şekiller, havalandırıcı tarafından meydana gelmiş ve bir zaman ortalamalı istatistiksel türbülans yaklaşımı kullanılarak kolaylıkla yeniden çözümlenemeyen türbülans yapıları üretilmiştir. Grafik çalışmaları, aynı havuz içerisinde gerçekleştirilmiş, çevresel bir akım yönü sağlanarak modifiye edilmiştir. Çalışmalar, havalandırıcı kullanılarak ve havalandırıcı kullanılmaksızın, farklı akış yönü oranlarında gerçekleştirilmiştir. Grafik çalışmaları sonuçları denenmiş ve literatürde kullanılmak üzere analizlerin karşılaştırılması için bazı tipik parametreler çıkarılmıştır. 2 boyutlu bir HAD model, FLUENT ticari paketi kullanılarak havalandırıcı olmaksızın havuz içerisinde akışkan akış modeli için çalıştırılmıştır. Modelleme sonuçları, havuz içerisinden alınan derin ortalamalı bir akustik doppler hızölçeriyle ölçülen hız ölçümleri ile

karşılaştırılmıştır. Pek çok HAD modelleme parametreleri, ızgara (grid) büyüklüğü ve yapısı, türbülans modelleme ve sınır koşulları modellemesini kapsayacak şekilde çeşitlidir. Model, akustik doppler hızölçeri verileriyle dikkatli bir şekilde kıyaslanmıştır. FLUENT modelleme sonuçları, bir yapısal ızgara (grid) üzerinde çözünen maddenin taşınım denklemlerinin çözüldüğü ikinci bir HAD modeline de uygulanmıştır [Jenkinson et al., 2000].

## 2. ATIKSU ARITMA PROSESİ

### 2.1. Tanım

Nüfusun hızlı artması ve sanayileşme ile birlikte oluşan atıksular, tabiatın özümleyebileceği miktarı aşmış ve alıcı ortamları kirlilik tehlikesi ile karşı karşıya bırakmıştır. İnsanoğlunun çeşitli faaliyetleri sonucu oluşan evsel veya endüstriyel atıksuların, ihtiva ettikleri kirletici ve bazen de zehirli parametreler sebebiyle alıcı ortam olarak tarif edilen deniz, nehir, göl gibi bir su kaynağına arıtılmadan, kontrolsüz bir şekilde deşarj edilmeleri, o su kaynağının zaman içinde bir daha kullanılamayacak şekilde tahribine yol açar [Arbiogaz, Katalog]. Doğal ekolojik dengeyi olumsuz yönde etkileyebilecek ve diğer faydalı kullanımlarını engelleyecek bu durumun önüne geçebilmek için atıksuları uzaklaştırmadan önce arıtılması zorunluluğu gündeme gelmiştir.

Kaynaklarına bağlı olarak atıksu özellikleri önemli farklılıklar gösterir ve bu farklılıklara göre arıtma yöntemleri de değişir. Atıksuların genellikle %99'undan daha yüksek bir kısmı su ve yalnız geri kalan kısmı kirletici maddelerden oluşmaktadır [Öztürk ve ark., 2005 ]. Kirleticiler, su içerisinde çözünmüş halde veya askıda katı olarak ta bulunabilirler. Bu maddelerin özelliklerine göre kullanılan arıtma yöntemi de değişir.

Atıksu arıtma, çeşitli kullanımlar sonucu oluşan atıksuların deşarj edildikleri alıcı ortamın fiziksel, kimyasal, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerini değiştirmeyecek hale getirmek için uygulanan fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerin birini yada birkaçını kapsamaktadır. Atıksu içindeki kirleticilerin uzaklaştırılması amacı ile atıksu karakterine göre birincil, ikincil ve ileri arıtma yöntemleri kullanılır. Şekil 2.1.'de arıtılmış suyun denize döküldüğü bir atıksu arıtma tesisi prosesi, şematik olarak verilmiştir.



**Şekil 2.1.** Atıksu arıtma tesisi şematik gösterimi [Mundt, 2006]

### 2.1.1. Fiziksel Arıtma

Fiziksel arıtma, atıksudaki kirlilikleri fiziksel işlemler kullanarak ayıran, atıksuyun fiziksel formunu değiştiren bir arıtma prosesidir. Genellikle atıksudaki katı maddeler ile özgül ağırlığı sudan farklı olan kirlenici parametreleri atıksudan ayırmak ve diğer arıtma proseslerinin verimini artırabilmek için uygulanırlar. Genel olarak biyolojik veya kimyasal arıtma tesislerinin başında da fiziksel arıtma tesisleri kullanılır. Bu şekilde atıksu içerisinde bulunan kirlenicilerin bir kısmının giderilmesi mümkün olacaktır. Kimyasal veya biyolojik arıtma tesislerin başında kurulan fiziksel arıtma tesisleri, hem ana arıtma sistemine gelecek kirlilik yükünü azaltacak, ana arıtma tesisi içerisindeki boru, vana vb. ekipmanların zarar görmesini engelleyecek, aynı zamanda ana arıtma tesisinin işletme maliyetini de düşürecektir.

Fiziksel arıtma teknolojileri genellikle mekanik işlemler olup, arıtma tesislerinin ilk ünitelerini oluşturur. Atıksu debi ve kirlilik yüklerinin sabit olmayıp gün boyunca değişimler gösterdiği tesislerde, homojen yapıda ve kararlı debide atıksu elde etmek için fiziksel arıtma ünitelerinin önemli rolleri vardır. En çok kullanılan fiziksel işlemler; ön çökeltme, dengeleme, ızgaralama, öğütme, kum veya yağ tutma, flotasyon, mekanik filtrasyon, buharlaştırma ve adsorbsiyondur [Arbiogaz, Katalog].

### 2.1.2. Kimyasal Arıtma

Kimyasal arıtma prosesleri, atıksudaki kirletici parametrelerin kimyasal yapısını değiştirme esasına dayanır. Genellikle ön arıtma ünitesi olarak biyolojik parçalanma özelliği az ya da hiç olmayan kirleticilerin atıksudan ayrılması amacıyla uygulanırlar. Kirleticiler, biyolojik arıtmada olduğu gibi tam manasıyla yok olmasalar bile, tabiata daha az zararlı veya zararsız biçime dönüştürülerek sudan ayrılıp, çamur keki halinde uzaklaştırılırlar. Bu sebeple, biyolojik arıtmaya göre daha fazla çamur çıkar ve çamur tasfiyesi ünitesinin büyüklüğü artar. En çok kullanılan kimyasal arıtma prosesleri; PH ayarlama, pıhtılaştırma-yumaklaştırma, çöktürme, oksidasyon, indirgeme, iyon değiştirme ve dezenfeksiyondur [Arbiogaz, Katalog].

### 2.1.3. Biyolojik Arıtma

Biyolojik arıtma, atıksuda kolloidal<sup>[1]</sup> veya çözünmüş halde bulunan biyolojik olarak parçalanabilir maddelerin mikroorganizmalar tarafından besin ve enerji kaynağı olarak kullanılmak suretiyle atıksudan uzaklaştırılması esasına dayanır. Diğer bir deyişle, atıksuların biyolojik olarak arıtılmasında, atıksuların çeşitli bakteriler yardımı ile biyolojik olarak parçalanması işlemi uygulanır [Arbiogaz, Katalog].

Biyolojik arıtma yöntemleri, temelde havalı (aerobik) ve havasız (anaerobik) olarak ikiye ayrılır. Aerobik prosesler arıtmanın oksijenli ortamda gerçekleştiği prosesler olup proses; aktif çamur sistemleri, damlatmalı filtreler ve aerobik stabilizasyon havuzları gibi yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Atıksuyun anaerobik şekilde arıtılması, organik ve inorganik maddelerin moleküler oksijenin bulunmadığı bir ortamda, anaerobik mikroorganizmalar tarafından çözülmesiyle gerçekleşir. Anaerobik arıtımın en çok uygulandığı birimler çamur çürütme tanklarıdır.

---

<sup>[1]</sup> Bir maddenin kendisi için çözücü olmayan bir ortamda  $10^{-5}$ - $10^{-7}$ cm boyutlarında dağılmasıyla oluşan çözelti. Örneğin; kükürdün, kilin, sabunun suda dağılmasıyla kolloidal çözelti oluşur.

#### 2.1.4. Çamur Arıtma

Gerek arıtma prosesinin bir parçası ve gerekse ilgili yönetmelikler uyarınca bulunması şart olan çamur arıtma üniteleri, modern arıtma tesislerinin ayrılmaz bir organıdır.

Arıtma prosesi sonucunda ortaya çıkan çamurun susuzlaştırılması için kullanılan ekipmanlar, genellikle tesisin en pahalı kısmı olmaktadır. Bu sebeple, çamur susuzlaştırma ekipmanı olarak kullanılabilecek filtre-pres, santrifuj dekantör gibi elemanların boyutlarını küçültebilmek için çamur tasfiye tesisleri kurulmalı ve atık çamur miktarı en az olan arıtma prosesleri kesinlikle tercih edilmelidir. Uygulamada en çok kullanılan çamur tasfiye üniteleri; yoğunlaştırma, stabilizasyon, susuzlaştırma, termik kurutma ve yakmadır [Arbiogaz, Katalog].

#### 2.1.5. İleri ve Son Arıtma

İleri ve/veya son arıtma genelde, klasik biyolojik arıtmadan çıkan atıksuyun kalitesini daha fazla iyileştirmek için uygulanan arıtma olup burada; azot ve fosfor giderme, filtrasyon, adsorpsiyon, dezenfeksiyon, iyon değiştirme, ultrafiltrasyon, ters ozmoz ve kimyasal çöktürme metotları verilmektedir.

### 2.2. Biyolojik Arıtım Mekanizmasına Giriş

Doğada kendiliğinden var olan bu arıtma yöntemi, teknolojik imkanlar kullanılarak çok miktarda atığın hızlı ve kontrollü olarak arıtılmasını temin etmektedir. Biyolojik arıtma ile fiziksel yollarla sudan ayıramayan, kirlilik yaratan organik maddeler mikroorganizmalar yardımıyla giderilmektedir. Havalandırılan atıksu içindeki organik maddeler, mikroorganizmalarca besin maddesi olarak kullanılıp parçalanmakta ve karbondioksit ve su gibi son ürünlere dönüşürken yeni mikroorganizmalar da oluşmaktadır. Havalandırma sonucu oluşan “aktif çamur” ; mikroorganizma toplulukları, cansız organik maddeler ve bir kısım inorganik maddelerden meydana gelir. Mikroorganizmalar; bakteriler, protozoalar, mantarlar, tek hücreliler, sinek larvaları ve kurtlardan ibarettir [Arbiogaz, Katalog].

Biyolojik arıtma sırasında atıksuyun içinde bulunan askıdaki koloidal veya erimiş organik maddeler bakterilerce parçalanmakta ve çökebilen biyolojik floklar (yumak) ile sıvının içinde kalan veya gaz olarak atmosfere kaçan sabit inorganik bileşenlere dönüşmektedir. Biyolojik arıtma aslında organik kirleticilerin doğada yok edilmeleri için yeralan biyoflokülasyon ve mineralizasyon proseslerin kontrollü bir çevrede ve optimum şartlarda tekrarlanmasından başka birşey değildir. Böylece doğadaki reaksiyonlar hızlandırılarak daha kısa bir sürede, emniyetli bir ortamda gerçekleştirilmektedir.

Organik kirleticilerin yok olması çok sayıda ve değişik mikroorganizmalarca gerçekleştirilmektedir. Bu mikroorganizmalar çok genel bir şekilde aerobik, fakültatif ve anaerobik olarak sınıflandırılabilirler. “*Aerobik*” mikroorganizmaların yaşamlarını sürdürebilmek için moleküler oksijene ihtiyaç vardır. Bunun için yalnız havalı ortamda var olabilirler. Bunların tam tersine “*anaerobik*” mikroorganizmalar oksijensiz ortamda yaşamakta, enerji ihtiyaçlarını organik maddelerden karşılamaktadır. “*Fakültatif*” mikroorganizmalar ise hem havalı hem de havasız ortamda yaşayabilmektedir [Curi, 1994].

Doğada herhangi bir organik kirletici alıcı bir ortama (akarsu, göl, deniz v.s.) akıtıldığında burada bulunan aerobik mikroorganizmalar faaliyete geçerler ve

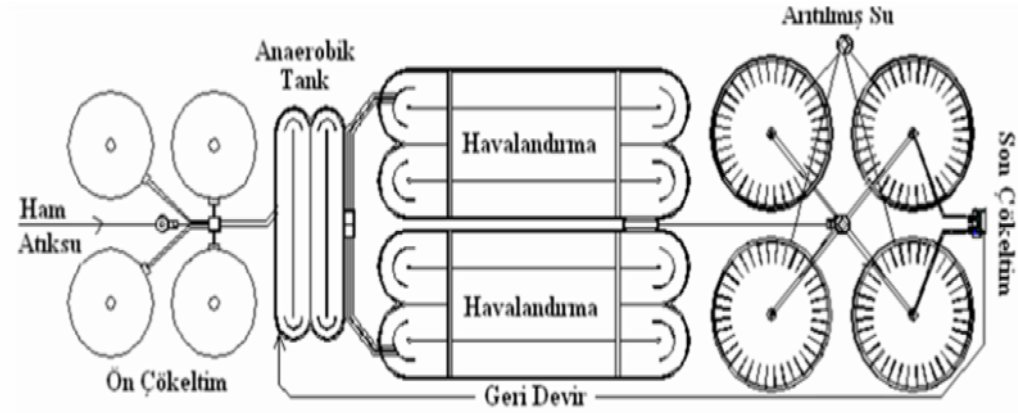
**Organik madde + O<sub>2</sub> + aerobik mikroorganizmalar →**

**CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + inorganik maddeler + daha fazla mikroorganizmalar**

reaksiyonuna uygun olarak organik kirleticileri bertaraf ederler. Bu proses, ortamda yeterli oksijen bulunduğu müddetçe devam edebilir. Ancak organik kirleticilerin miktarı fazla olduğu takdirde bakterilerce kullanılan oksijen, sisteme atmosferden veya başka kaynaklardan eklenen oksijenden fazla olmakta ve böylece kısa bir süre içinde mevcut oksijen yok olmakta ve sistem anaerobik (havasız) şartlara dönüşmektedir. Bu şartlar altında biyolojik parçalanmayı sürdüren bakteriler metan, karbondioksit ve az miktarda H<sub>2</sub>S gibi gazlar meydana getirmektedir [Curi, 1994].

Biyolojik arıtma sistemleri ayrıca kullanılan mikroorganizmaların sistemdeki durumuna göre askıda ve sabit film (biyofilm) prosesleri olarak ta

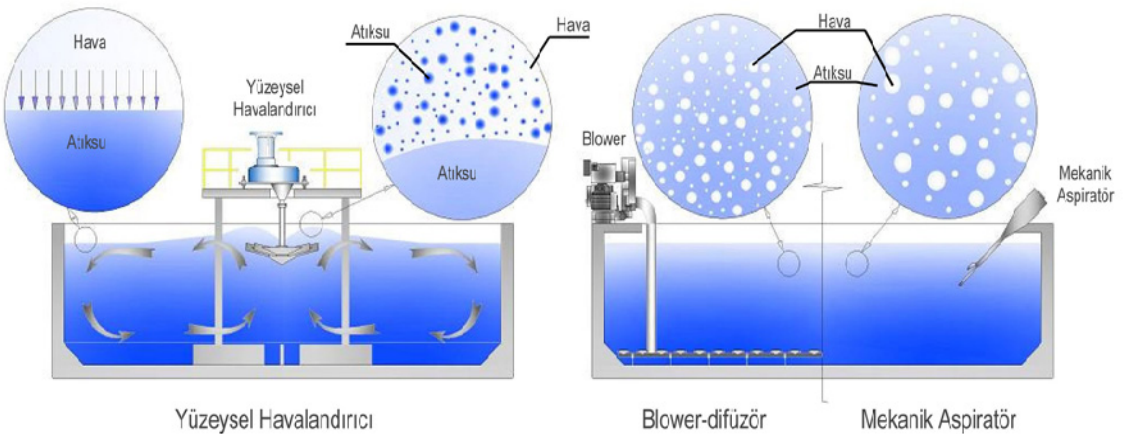
sınıflandırılabilirler [Öztürk ve ark., 2005]. Şekil 2.2.'de biyolojik arıtma ünitesi akım diyagramı verilmiştir.



**Şekil 2.2.** Biyolojik arıtma ünitelerinin basitleştirilmiş akım diyagramı [Ulusoy, 2009]

### 2.2.1. Havalı (Aerobik) Biyolojik Arıtma

Tamamen atıksuyun içine oksijen/hava verilerek yapılan arıtma türüdür. Havalandırma, sıvı içerisindeki oksijen konsantrasyonunu artırmak için hava girişi prosesi şeklinde gerçekleşir. Havalandırma, sıvı içerisinde kabarcık oluşumuyla, hava içerisine sıvı püskürtülerek veya yüzey absorpsiyonunu artırmak için sıvı karışımıyla gerçekleştirilebilir. Şekil 2.3.'de havalandırma şekillerine ait örnekler verilmiştir.



**Şekil 2.3.** Havalandırma prosesleri [Sartes Mühendislik Taahhüt Sanayi ve Ticaret A.Ş., Firma Kataloğu]

Havalı (aerobik) biyolojik arıtma prosesleri, yüksek verimle çalışan ve kirletici parametreleri gerçek anlamda yok ederek tam arıtma sağlayan proseslerdir.

Havalı proses ile atıksu içerisinde bulunan organik maddeler, sisteme verilen oksijenin de yardımıyla bakterilerce biyolojik olarak parçalanmakta veya besi maddesi olarak tüketilmekte ve çökebilir floklar veya gaz halinde çevreye zararsız sabit inorganik maddelere dönüşmektedir [Arbiogaz, Katalog].

Bütün aerobik arıtma sistemlerinde organik atıklar sentez ve oksidasyon yolu ile yok olurlar. Diğer bir deyişle, organik maddelerin bir kısmı yeni hücrelere dönüşürken (sentez) geri kalan kısmı gerekli enerjiyi üretmek amacıyla oksidasyona tabi tutulurlar. Organik maddeler yok olmaya başlayınca biyolojik hücrelerin bir kısmı gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla kendi kendini oksitler ki buna “*içsel solunum*” denir [İleri, 2000].

Biyolojik arıtma esas itibarıyla, tabiatın kendi kendine yaptığı organik maddeleri parçalama prosesinin, bir arıtma tesisinde kontrol altında hızlandırılması ve daha verimli olarak gerçekleştirilmesidir. Uygulamada en çok kullanılan havalı biyolojik arıtma prosesleri klasik aktif çamur, uzun havalandırmalı aktif çamur, havalandırmalı lagün, saf oksijenli sistemler, stabilizasyon havuzları, kontakt stabilizasyon, oksidasyon hendekleri, kademeli havalandırma, tadil edilmiş havalandırma, yüksek hızlı havalandırma, damlatmalı filtreler ve biyodisk sistemidir [Arbiogaz, Katalog].

#### **2.2.1.1. Klasik Aktif Çamur Süreci**

Bu sistemin esas tabiatla olan olayların hızlandırılmış bir şeklidir [Yüceer, 1994]. Aktif çamur prosesi, havalı biyolojik arıtma metotları arasında geniş uygulama alanı bulmaktadır. Aktif çamur süreci ilk defa 1900' lü yılların başında İngiltere'nin Manchester kentinin atıksularının arıtılması amacı ile uygulanmıştır [Toprak, 2000]. Bu metot 1912-1914 yıllarında geliştirilmiş ve karmaşık biyolojik mekanizması nedeni ile araştırmacıların diğer proseslere kıyasla daha fazla ilgisini çekmiştir. Bu sebeple aktif çamur prosesinin yıllar içerisinde birçok çeşidi (modifikasyonu) geliştirilmiştir [Öztürk ve ark., 2005 ]. Yaygın olarak kullanılması ise 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Bu orijinal prosesin birçok çeşitleri geliştirilerek kullanılmaktadır. Aktif çamur süreci, atıksuyun bünyesindeki çözünmüş partiküller



çökeltim tankından ibarettir. Çökeltim çamuru geri döngüyle tankın girişine verilir ve bir kısmı da sistemden uzaklaştırılır [Kargı, 1995].

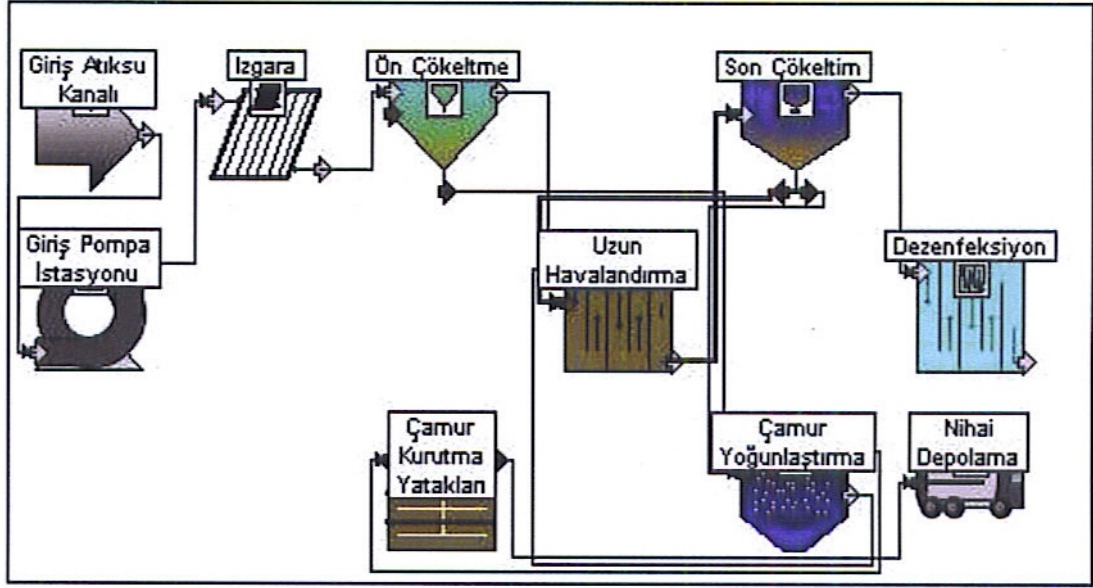
Süreçte atıksu, mikroorganizmaların yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu havalandırma havuzuna verilir. Organik madde, mikrobiyal büyüme için hem karbon hem de enerji kaynağı olarak görev alır ve yeni hücrelerin sentezinde kullanılır. Ayrışma ürünleri olarak karbondioksit ve su oluşur. Reaktörün içeriği "*karişik sıvı askıda katı madde*" (mixed liquor suspended solids, MLSS) veya "*karişik sıvı askıda uçucu katı madde*" (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS) olarak tanımlanır ve büyük oranda mikroorganizmalardan, inert ve biyolojik olarak ayrışamayan maddelerden ibarettir. Mikroorganizmalar, genellikle, % 70 ila %90 oranında organik, % 10 ila %30 oranında ise inorganik maddelerden meydana gelmişlerdir. Mikroorganizmaların özellikleri atıksuyun kimyasal bileşimine ve organik maddeyi stabilize ettikleri ortamın çevresel özelliklerine bağlıdır [Toprak, 2000].

#### **2.2.1.2. Uzun Havalandırılmal Aktif Çamur Prosesi**

Uzun havalandırılmal aktif çamur prosesi, yaygın kullanımlı bir aktif çamur çeşididir. Bu prosesin Avrupa'da Pasver tipi oksidasyon hendekleri ve Amerika'da paket tesisler şeklinde çeşitli uygulamaları vardır.

Uzun havalandırma sistemlerinde ön çökeltme havuzu ve çamur çürütücüler yoktur. Bundan dolayı, bu tip tesislerin inşaatı ve işletmesi konvansiyonel aktif çamur tesislerine göre çok daha kolaydır [Öztürk ve ark., 2005].

Yatırım, işletme ve bakım masrafları düşük olup uzun havalandırma süresi gerektirir. Şekil 2.5.'te uzun havalandırılmal aktif çamur süreci proses akış şeması görülmektedir.



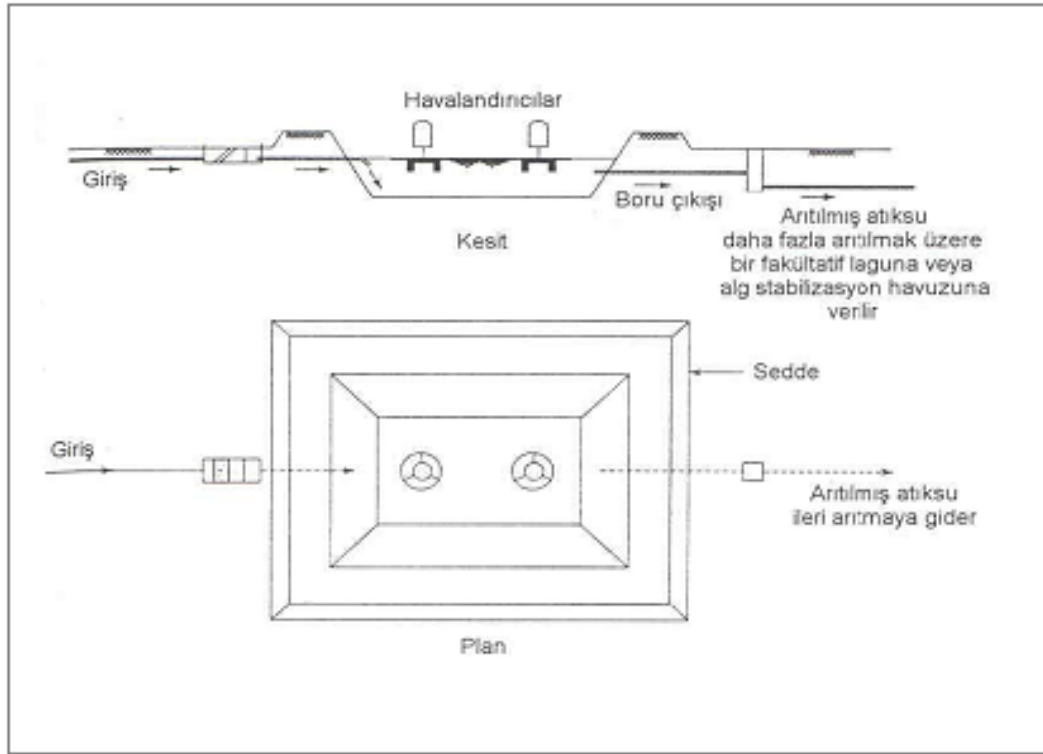
**Şekil 2.5.** Uzun havalandırmalı aktif çamur süreci proses akış şeması [Yıldırım, 2006]

Bu sistemde ham atıksu, ızgara ve kum tutuculardan sonra doğrudan doğruya havalandırma havuzuna verilir. Buradaki şartlar tamamen aerobik özelliktedir. Atıksuyun havalandırma havuzundaki kalış süresinin uzun olmasından dolayı bu prosese “uzun havalandırma prosesi” denmektedir. Bu sistem her ne kadar enerji tüketimi fazla olan bir proses olsa da, işletme kolaylıkları yüksek enerji bedelini dengelemektedir. Konvansiyonel aktif çamur sistemine göre bir diğer avantajı da %97-98 mertebesinde BOI giderim kapasitesidir. Atıksu, üçüncü kademe arıtımından sonra tekrar kullanılacak ise, bu proses özellikle tercih edilen prosestir [Öztürk ve ark., 2005].

Bu sistemde çamurun çürütülmesi işlemi genel olarak uygulanmaz.

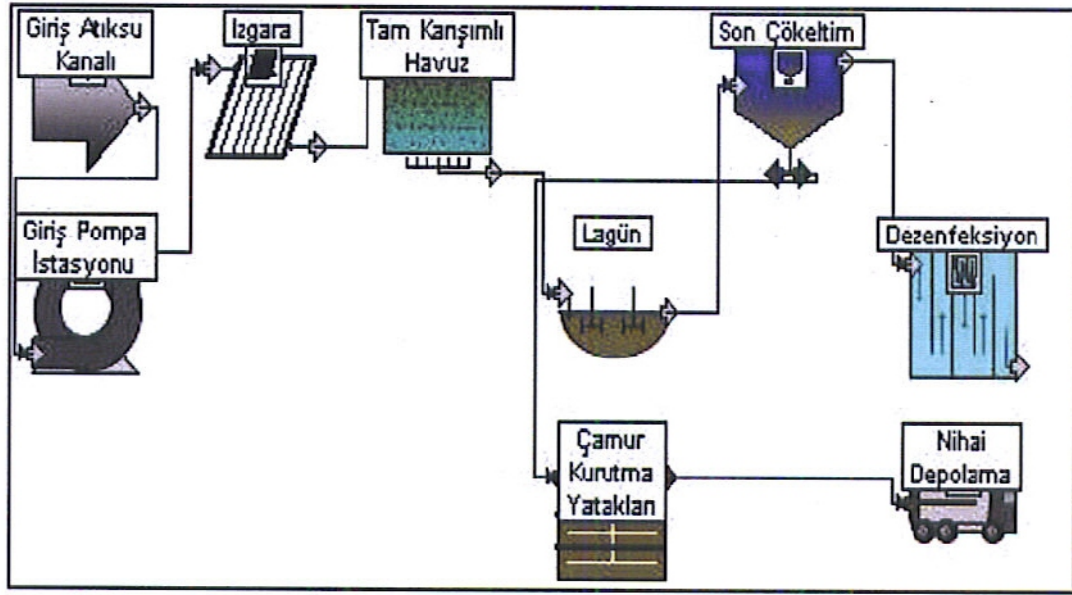
### 2.2.1.3. Mekanik Havalandırmalı Lagünler

Havalandırmalı lagünler, 2.5-5 metre derinliğinde toprak yapılar olup havalandırma, dubalar veya sabit kolonlar üzerine yerleştirilen mekanik havalandırıcılarla yapılır. Ham atıksu ızgaradan geçirildikten sonra mekanik havalandırıcının bir tarafından verilir ve belli bir havalandırma süresinin ardından diğer taraftan alınır. Stabilizasyon havuzları ile karşılaştırıldıklarında derinliklerinin fazla ve alıkoyma sürelerinin daha kısa olması bakımından %10-20 daha küçüktürler [Toprak, 2000]. Şekil 2.6.’da mekanik havalandırmalı lagün resmi görülmektedir.



**Şekil 2.6.** Mekanik havalandırılmalı lagün [Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010]

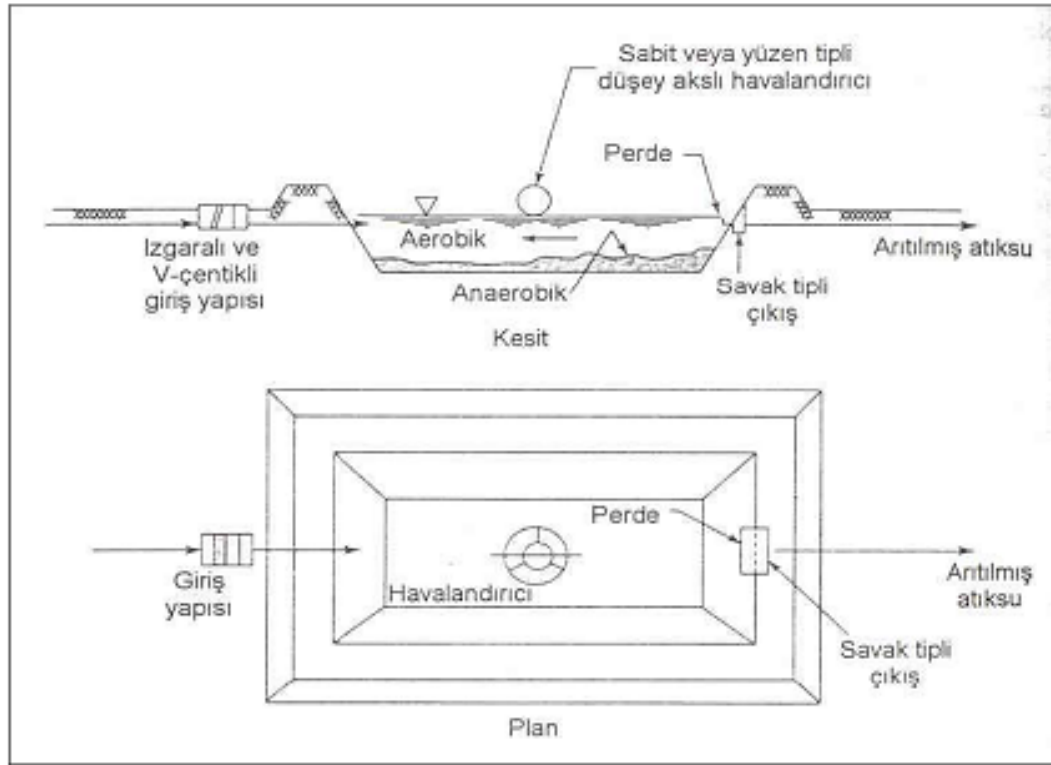
Havalandırılmalı lagünler, esasta aktif çamur metoduna benzer özellikler gösterirler. Ancak bunlarda son çökeltim havuzundan sonra biyolojik çamur geri dönüşü uygulanmaz. Ayrıca, havalandırılmalı lagünlerdeki atıksu bekleme süreleri diğer aktif çamur sistemlerine kıyasla çok daha uzundur. Bu tür sistemlerde oksijen temini dışarıdan suni olarak verilenin yanı sıra, sistemdeki fotosentez reaksiyonlarıyla da gerçekleşir. Havalandırılmalı lagünlerde havuz hacmi başına verilen organik madde, diğer aktif çamur sistemlerine kıyasla çok düşüktür. Havalandırılmalı lagünlerden sonra bir çökeltme işlemi yer alır. Bu lagünlerin derinlikleri genellikle 3-5 m arasındadır. Havalandırma işlemleri sonucunda tüm lagün derinliği boyunca oksijenli bir ortam yaratılması durumunda bu tür lagünlere “*kesintisiz akışlı aerobik havalandırılmalı lagünler*” denir. Sadece yüzeye yakın tabakaları oksijenli, dip tabakaları ise oksijensiz olan sistemlere “*fakültatif havalandırılmalı lagün*” adı verilir [Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği, 1991]. Şekil 2.7.’de havalandırılmalı lagün proses akım şeması görülmektedir.



Şekil 2.7. Havalandırılmalı lagün proses akım şeması [Yıldırım, 2006]

Bu arıtma sistemlerinin esas fonksiyonu atık dönüşümüdür. Diğer askıda katı madde sistemlerinde olduğu gibi havalandırma ile oluşturulan türbülans, sistemin içeriğinin askıda tutulmasını sağlar. Bu havuzların tasarımında büyük esneklikler vardır. Bu tip lagünler bir taraftan basit fakültatif tipte, diğer taraftan da çamur geri devrinin yapıldığı daha verimli ve yoğun üniteler olarak projelendirilebilirler. Her iki durumda da bunların inşaatları ve işletilmeleri çok kolaydır. Bu nedenle, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde yaygın kullanım alanına sahiptirler [Öztürk ve ark., 2005].

Fakültatif havalandırılmalı lagünlerde birim hacme düşen enerji girdisi, istenen oksijen miktarının sıvıya dağılması için yeterli fakat bütün katıları askıda tutmak için yeterli değildir. Bunun sonucunda, lagüne giren askıdaki katı maddelerin bir kısmı ve substrat giderimiyle oluşan katı maddeler tabana çökmeye çalışırlar ve tabanda anaerob bozunma meydana getirirler. Evsel ve endüstriyel atıksuların arıtımında başarıyla kullanılmaktadırlar. Şekil 2.8'de fakültatif havalandırılmalı lagün resmi görülmektedir.



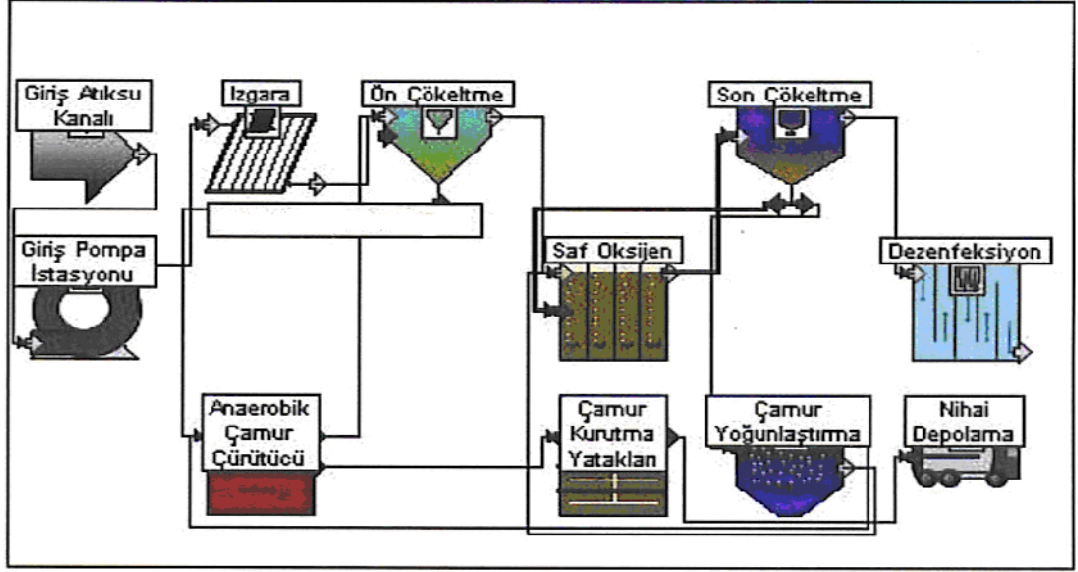
**Şekil 2.8.** Fakültatif havalandırmalı lagün [Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010]

Kesintisiz akışlı aerobik lagünlerde enerji girdisi, istenilen miktardaki oksijeni sıvı içerisine dağıtacak ve bütün katıları askıda tutacak şekilde oluşturulmuştur. Bu lagünlerde katı madde çökmesi olmaz ve katı maddeler havalandırılmış olarak sistemi atıksu ile beraber terkeder. Katıların geri döndürüldüğü aerobik lagünler, uzun havalandırmalı tesislere benzerler. Enerji girdisi hem oksijen ihtiyacını karşılayacak hem de tüm katıları askıda tutacak şekilde olmalıdır. Katı maddelerin atıksu ile beraber dışarı çıkması engellendiği için ve geri döndürüldüğünden bu tip lagünlerdeki katı madde konsantrasyonu yüksektir [Soli and Shyam, 1998].

#### 2.1.1.4. Saf Oksijenli Sistemler

Yüksek BOI içeren atıksulardan BOI giderilmesinde oksijen sınırlamalarını önlemek için oksijenle zenginleştirilmiş hava ya da saf oksijen kullanılır [Kargı, 1995].

Saf oksijenli sistemler atıksu özelliklerindeki değişimlere daha iyi adapte olabilir ve çamur üretimi hava ile çalışılan sistemlerden daha azdır. Şekil 2.9.'da saf oksijenli sistem süreci şematik olarak gösterilmiştir.

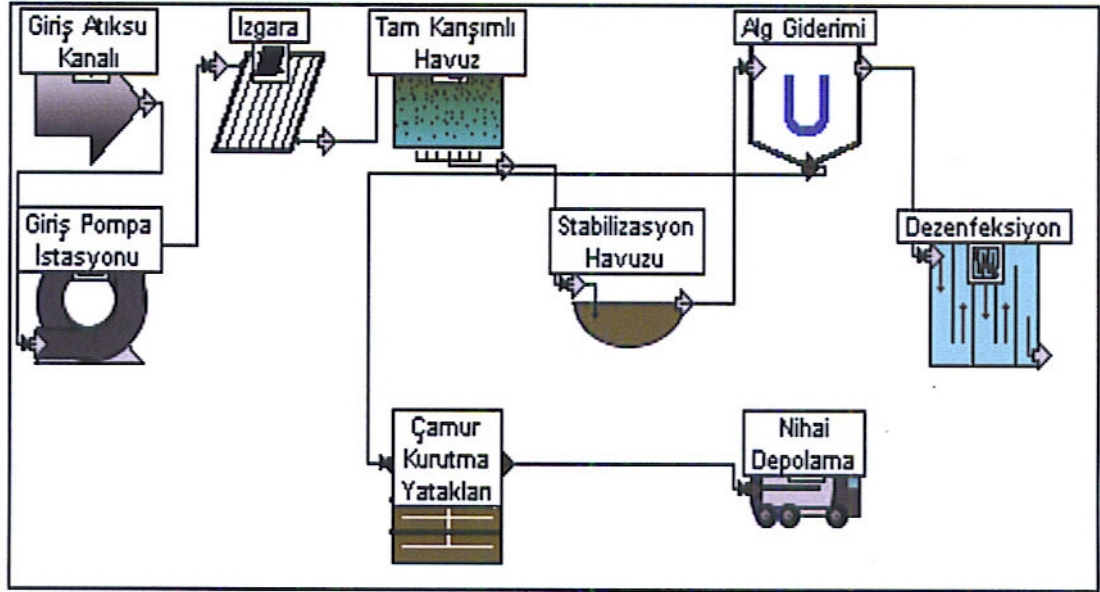


Şekil 2.9. Saf oksijenli sistem proses akış şeması [Yıldırım, 2006]

#### 2.1.1.5. Stabilizasyon Havuzları

Stabilizasyon havuzları, atıksuların bir noktadan girip arıtılmış suyun bir noktadan alındığı büyük ve sığ havuzlardır. Temel olarak dört ana biyolojik faaliyet oluşmaktadır. Bunlar karbonlu maddelerin bakteriler tarafından oksidasyonu, azotlu maddelerin nitrifikasyonu, dip çamurlarındaki çamurlu maddelerin parçalanması ve alglerin fotosentezidir. Bu sistemlerde algler, bakteriler gibi diğer mikroorganizmalarla birlikte “simbiyotik” (birbirinden beslenme ilişkisi) olarak yaşarlar [EPA, 1980].

Bu havuzlar, evsel atıksulardan endüstriyel atıksulara kadar geniş bir aralığa sahip atıksuların arıtılmasında kullanılırken tropik iklim kuşağından kutupsal iklim kuşağına kadar değişen iklim koşulları altında işletilmektedirler [Toprak, 2000]. Şekil 2.10’da stabilizasyon havuzu proses akım şeması verilmiştir.

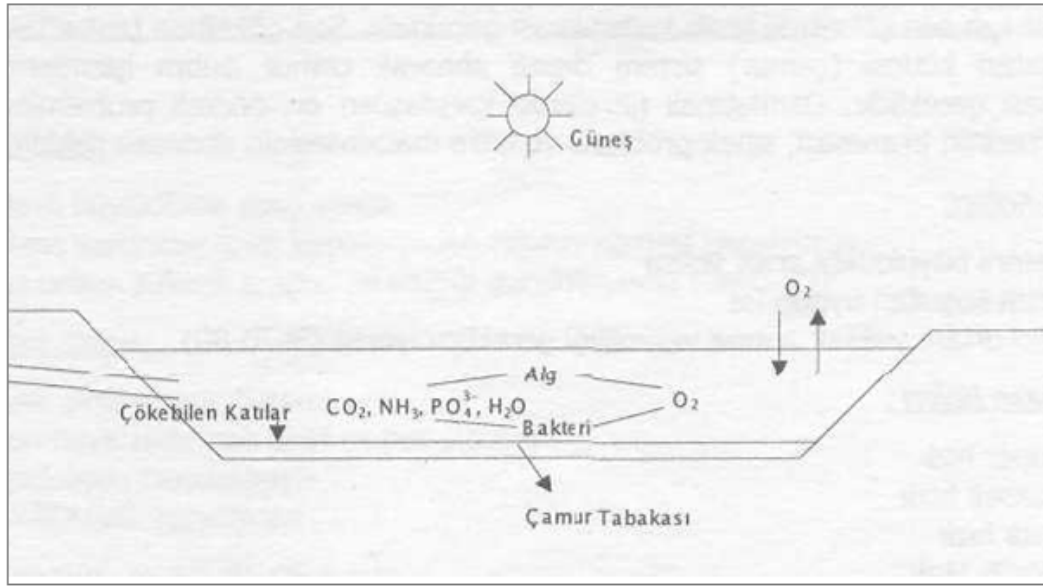


**Şekil 2.10.** Stabilizasyon havuzu proses akım şeması [Yıldırım, 2006]

Atıksuda bulunan organik madde stabilizasyonundan genelde sistemde bulunan bakteriler sorumludurlar. Bu bakteriler, anaerobik şartlarda organik asitler, aerobik şartlarda ise  $\text{CO}_2$  ve su üretirler. Bu nedenle sistem sürekli olarak aerobik tutulmaya çalışılır. Sistemin aerobik tutulması, sistemdeki alglerle birlikte yüzeysel oksijen transferi sayesinde sağlanır. Algler güneş enerjisini kullanarak fotosentez yoluyla sisteme oksijen verir [Muslu, 1994].

Aerobik şartlarda çökelen organik maddeler önce uçucu yağ asitlerine daha sonra da oluşan bu asitler metan bakterileri tarafından metan ve karbondioksit dönüştürülür.

Stabilizasyon havuzlarının işletim özelliklerinin daha iyi bilinmesi ve biyolojik reaksiyonların tanımlanmasına bağlı olarak bu havuzlar aerobik, anaerobik, fakültatif, olgunlaştırma ve havalandırılmalı havuzlar olmak üzere 5'e ayrılır. Şekil 2.11.'de stabilizasyon havuzu kesiti görülmektedir.



**Şekil 2.11.** Stabilizasyon havuzu kesiti [Dağ, 2003]

Aerobik havuzlarda derinlik, ışık geçirimini ve fotosentezle alg oluşumunu maksimize etmek için yaklaşık 0.3 m veya daha az olur. Aerobik şartlar havuz derinliğinin tümünde her zaman korunur.

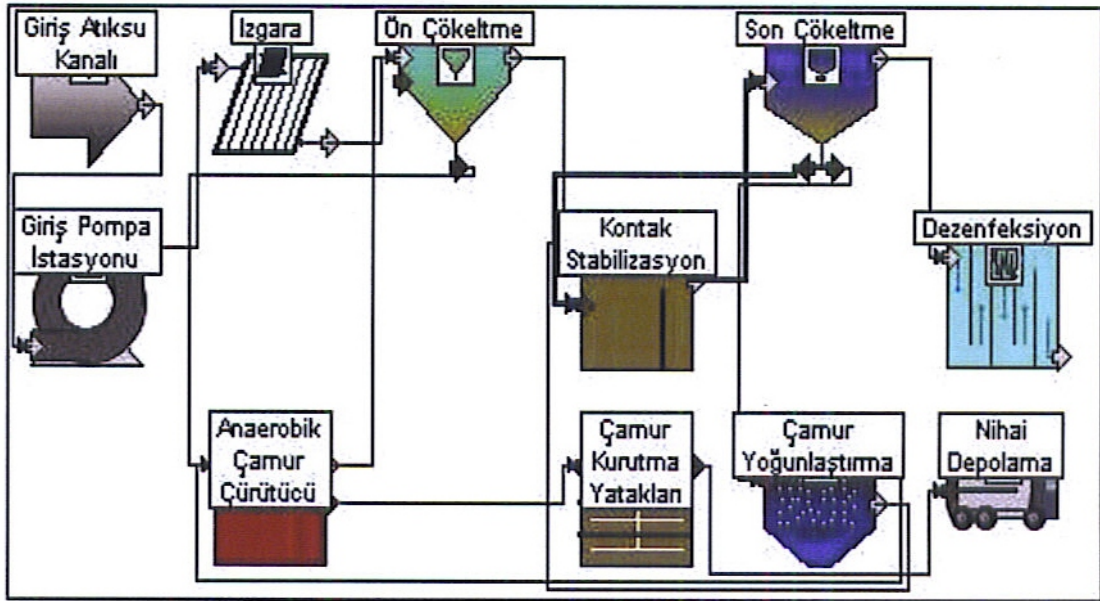
Fakültatif havuzlar en yaygın kullanılan tipi oluşturur. Derinlikleri 1-3 m arasında değişir. Havuzda üst tabaka aerobik, alt tabakada ise anaerobik ayrışım oluşur. Alglerle bakteriler arasında ortak bir yaşam vardır. Alglerin ürettikleri oksijen, bakterilerin organik maddeyi ayrıştırmaları sırasında kullanılır [Toprak, 2000] .

Havalandırılmalı stabilizasyon havuzunda havayı temin etmek için oksijen ihtiyacı, mekanik havalandırıcılarla ya da difüzörlerle sağlanır. Derinlikleri genel olarak 2-6 m arasında değişir [EPA, 1980].

#### **2.2.1.6. Kontakt Stabilizasyon**

Kontakt(temas) stabilizasyon metodu, aktif çamurun absorplama özelliklerinden faydalanmak amacıyla geliştirilmiştir. Kontakt stabilizasyon prosesi, BOİ'nin büyük bir kısmını askıda veya kolloidal formda olduğu atıksuların arıtılmasında uygulanmaktadır. Çökeltmiş atıksular geri devir çamuru ile karıştırılıp kontakt havuzunda 30-90 dakika süreyle havalandırılır. Bu esnada organik maddeler çamur

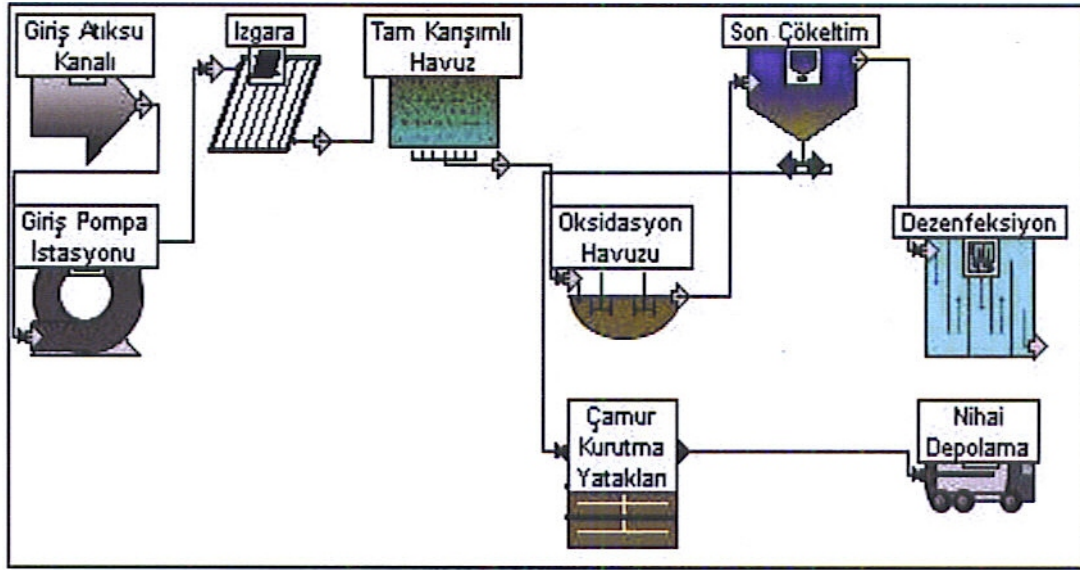
flokları tarafından absorbe edilir. Son çökeltme havuzunda çamur, tasfiye edilen sudan ayrılır ve geri döndürülerek havalandırma havuzunda havalandırılır. Geri dönen çamurun bir kısmı sabit bir madde konsantrasyonu elde etmek için sistemden dışarı atılır [Metcalf and Eddy, 1991]. Şekil 2.12.'de kontakt stabilizasyon süreci proses akış şeması verilmiştir.



**Şekil 2.12.** Kontakt (temas) ve stabilizasyon süreci proses akış şeması [Yıldırım, 2006]

#### 2.2.1.7. Oksidasyon Hendeği

Oksidasyon hendeği, klasik aktif çamur sistemlerinin bir modifikasyonudur. Oksidasyon hendekleri dairesel yada oval şekilde hendekler olup rotor, yüzey havalandırıcı gibi mekanik yöntemlerle havalandırılırlar. Izgaradan geçirilerek veya çökeltiye katılarak katılarından arındırılmış atıksu hendek içinde hareket ederken havalandırılarak organizmalar tarafından karbon ve azot bileşiklerinden arıtılır [Kargı, 1995]. Bu hendekler genellikle yüksek alıkonma süresi gerektirirler. Şekil 2.13.'de oksidasyon hendeği süreci proses akış şeması verilmiştir.

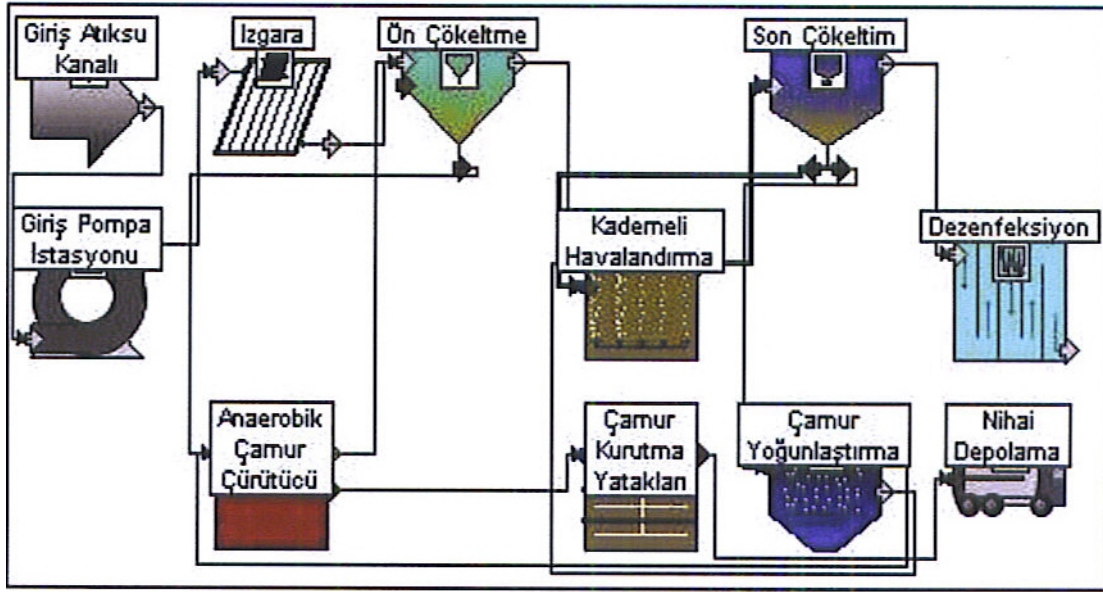


**Şekil 2.13.** Oksidasyon hendeği proses akış şeması [Yıldırım, 2006]

Hendek derinliği 1-1,5 m arasında değişir. Atıksuyun hidrolik bekleme zamanı 0,5-1,5 gün, çamurun ise 20-30 gündür, dolayısı ile çamurun % 95'i devamlı mekanizma içinde döner (3000-5000 mg/L'dir). Sistemden alınan çamur kısmen stabilize olduğundan işlenmesi kolaydır. Sistemin sonunda bir çökeltme havuzu vardır. Nüfusu 200-65000 olan kesimlerde rahatlıkla kullanılır. Sıcak iklimlerde stabilizasyon havuzlarından dolayı pek fazla rağbet görmemiştir. 1000 kişiye kadar hizmet eden sistemlerde oksidasyon hendekleri çökeltme havuzu görevini de yerine getirmektedir [Yüceer, 1994].

#### 2.2.1.8. Kademeli Havalandırma

Kademeli havalandırma sisteminin temel teorisi aktif çamur sistemiyle aynı olmasına rağmen oksijen ihtiyacının daha üniform olması ve bu yüzden temin edilen oksijenin daha verimli bir şekilde kullanılmasıyla klasik aktif çamur sisteminden ayrılır. Atıksuyun farklı noktalardan havuza verilmesi nedeniyle yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip bir aktif çamur oluşur ve böylece kısa bekleme süresi içerisinde daha fazla organik maddenin giderilmesi temin edilir [Metcalf and Eddy, 1991]. Şekil 2.14'de kademeli havalandırma sisteminin çalışma prosesi şematik olarak görülmektedir.



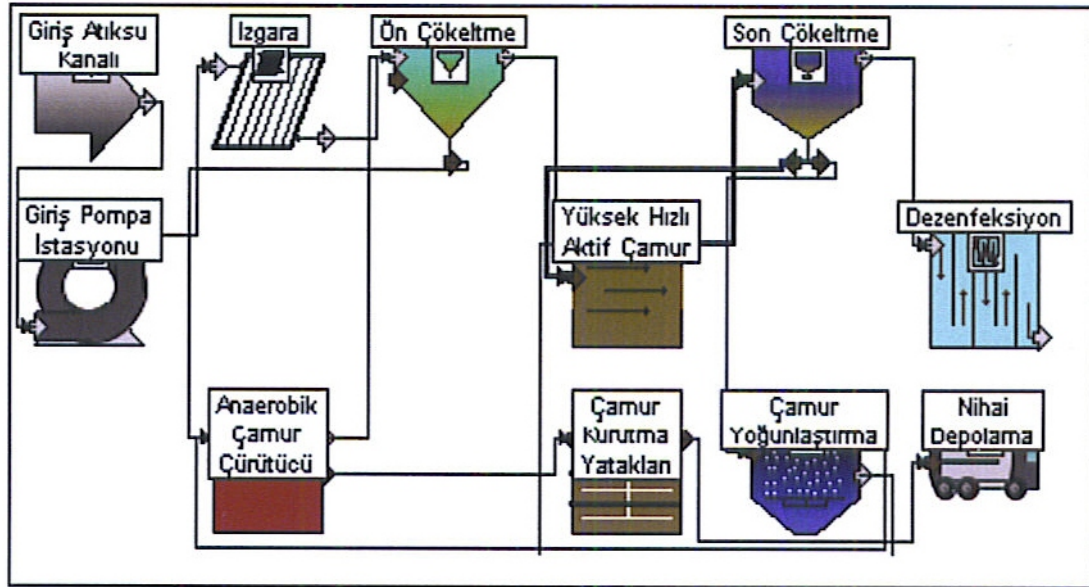
Şekil 2.14. Kademeli havalandırma proses akış şeması [Yıldırım, 2006].

#### 2.2.1.9. Tadil Edilmiş Havalandırma

Tadil edilmiş havalandırma uygulanan sistemlerle klasik yada lineer değişen havalandırma uygulanan sistemler arasındaki temel fark, tadil edilmiş havalandırma sistemlerinde 1,5-3 saat gibi daha kısa havalandırma süresinin ve daha yüksek bir besi/mikroorganizma oranının kullanılmasıdır. Ayrıca havalandırma havuzundaki askıda katı madde konsantrasyonu da nispeten yüksektir [Metcalf and Eddy, 1991].

#### 2.2.1.10. Yüksek Hızlı Havalandırma

Yüksek hızlı havalandırma, askıda katı madde konsantrasyonu çok yüksek olan ve havalandırma havuzunun büyük hidrolik yüklere maruz bırakıldığı ve bu sayede de besi maddesi/mikroorganizma oranları da yüksek bir sistemdir. Mikroorganizmalar havuzda uzun süre kalmış olur [Metcalf and Eddy, 1991]. Şekil 2.15’de yüksek hızlı havalandırma proses akış şeması verilmiştir.



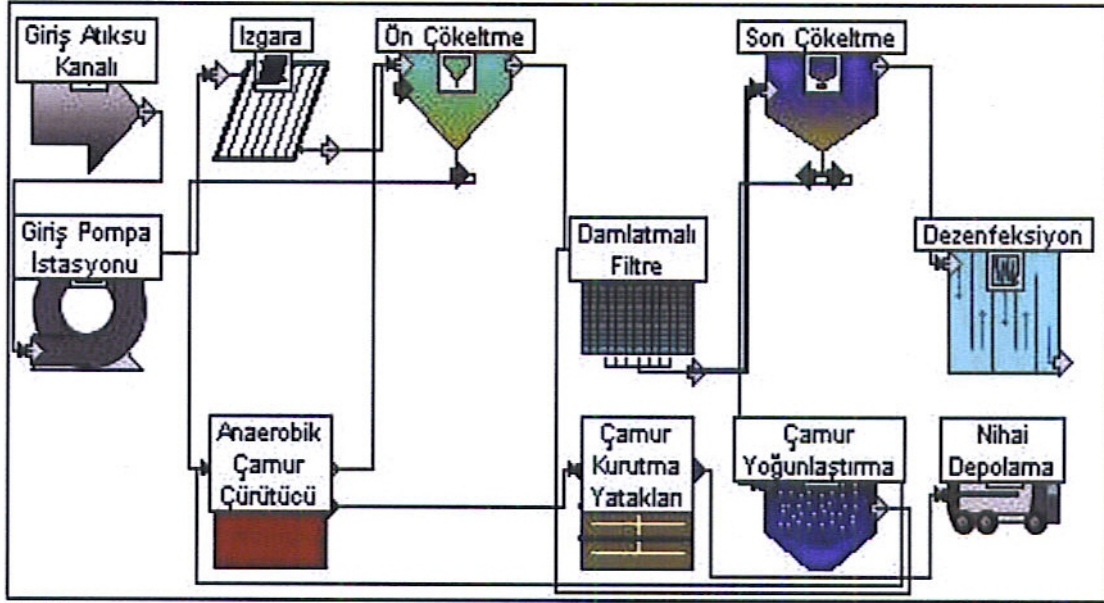
Şekil 2.15. Yüksek hızlı havalandırma proses akış şeması [Yıldırım, 2006].

#### 2.2.1.11. Damlatmalı Filtreler

Atıksuların, değişik dolgu malzemeleri üzerinde dağıtılarak aşağıya doğru akıtılmaları prensibi ile çalışmaktadır. Dolgu malzemesi üzerinde biyofilm tabakası oluşmakta ve mikroorganizma, oksijen ihtiyacını havadan almaktadır. Damlatmalı filtreler, üzerinde mikroorganizmaların biyofilm halinde büyüdüğü katı tanecikler içeren bir dolgu kuleden ibarettirler [Kargı, 1995]. Damlatmalı filtrelerde taş veya plastik dolgu malzemesi kullanılabilir. Filtre malzemesi derinliği, taş dolgu filtrelerde 1.8-2.4 m, plastik dolgu için 3.0-12.2 m aralığındadır. Atıksu bu filtre yatağından geçerken, dolgu malzemesi üzerinde bakteriler bir biyofilm tabakası oluşturur. Kullanılan dolgu malzemesinin arasında boşluklar bulunur. Böylece, mikroorganizmaların dolgu malzemesi üzerinde bir tabaka halinde yaşamaları, organik maddelerle beslenmeleri ve hava geçişi ile oksijen transferi sağlamaları mümkün olur. Mikroorganizmalar belirli bir kalınlığa ulaştıktan sonra, dolgulardan koparlar ve çıkış suyundaki bu biyofilm parçacıkları son çöktürme havuzlarında çökeltilerek sudan ayrılırlar [Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010].

Damlatmalı filtreler, uygulanan organik ve hidrolik yüke bağlı olarak düşük hızlı ve yüksek hızlı olmak üzere sınıflandırılırlar. Eğer damlatmalı filtreler ön arıtma

amacıyla kullanılıyorsa bunlara “*kaba filtreler*” de denir [Soli and Shyam, 1998]. Şekil 2.16.’da damlatmalı filtre proses akış şeması görülmektedir.



Şekil 2.16. Damlatmalı filtre proses akış şeması [Yıldırım, 2006]

Damlatmalı filtreler, işletmesi kolay, verimleri yüksek sistemlerdir. Eğimli arazilere kurulu, atıksu pompajı gerektirmeyen yerleşimler için oldukça uygundur [Metcalf and Eddy, 1991].

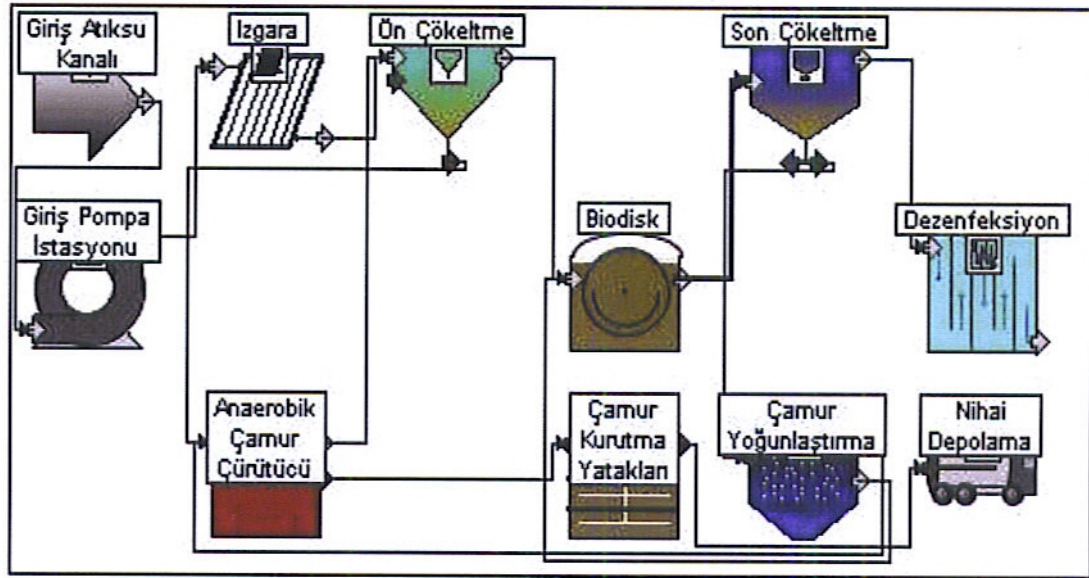
### 2.2.1.12 Biyodiskler

Oksijenli arıtma yöntemlerinden biri olan biyodisk sistemi, diskin suya teması ile aldığı bakterileri mekanik ekipmanın rotasyonel dönüşü sayesinde hava ile temas ettirilerek arıtılmasını amaçlayan mekanik bir biyolojik arıtma sistemidir. Biyodiskler, günümüzde kullanılan teknolojik havalandırma sistemlerine göre daha basit bir mekanik aksamaya sahiptir.

Döner biyolojik disk (biyodisk) sistemleri, mikroorganizmaların üzerinde üremesi için uygun bir yüzeyi sağlayacak şekilde yapılmış, gelen atıksuyun muhtemel korozif özelliğinden etkilenmeyecek plastik malzemelerin diskler halinde, döner bir shaft (mil) üzerine yerleştirildiği veya içi dolgu malzemesi ile dolu delikli tambur şeklindeki silindirik bir yapıdan oluşmaktadır. Oksijen ihtiyacı, dönme sırasında havadan sağlanmaktadır. Disklerin yüzeylerinde mikroorganizmalar biyolojik film oluşturur. Diskler kısmen batırıldıkları için yüzeyde kalan (hava ile

temas eden) döngüleri biyofilmlerin oksijen ihtiyacını karşılamaktadır. Biyodisklerde genelde uygulanabilir çaplar 1.5-3.0 m'dir. Şaftın her 1 metresine 2 cm aralıklarla 20-30 adet disk yerleştirilebilir ve uzunluk 6 m'ye kadar çıkabilir. Dolgulu tambur tiplerinde ise istenen toplam dolgu malzemesi yüzeyi sağlanacak şekilde boyutlandırma yapılmaktadır. Döner disk veya tambur şaftlarının her biri ayrı bir silindir haznesine (kanala), % 45'i su içinde batık olacak şekilde monte edilir [Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010].

Biyodiskler, genel karakteri ile aktif çamuru andırır. Yalnız havalandırma havuzu yerine döner diskler bulunmaktadır. Atıksu, uzun ve sığ tankların içerisine konur, diskler atıksu içine %40-50 oranında batık şekilde 2-10 devir/dakika hızıyla döndürülür. Organizmalar, disk yüzeyinde biyofilm şeklinde büyürler ve atıksudaki organik bileşikler biyofilm içine difüzlenirken (yayılırken) organizmalar tarafından karbondioksit oksitlenirler. 13 °C'nin altında verim oldukça düşer ve yeni biyofilm tabakası 10-15 gün arasında oluşur [Metcalf and Eddy, 1991]. Şekil 2.17.' de döner biyolojik disk proses akış şeması görülmektedir.



Şekil 2.17. Döner biyolojik disk proses akış şeması [Yıldırım, 2006]

### 2.2.2. Havasız (Anaerobik) Biyolojik Arıtma

Oksijensiz ortamda gelişebilen metan bakterilerinin, kirlilik yaratan organik maddelerle beslenmesi ve organik moleküllerin parçalanması neticesinde kirliliğin giderilmesine dayanan bu arıtma prosesinde, metan gazı esaslı biyogaz, yani kullanılabilir bir son ürün oluşturmaktadır. Anaerobik proses, biyolojik arıtma tesislerinden çıkan fazla çamurun çürütülmesi için de kullanılabilir [Arbiogaz, Katalog].

Atıksuyun anaerobik şekilde arıtılması, organik maddelerin moleküler oksijenin bulunmadığı bir ortamda anaerobik mikroorganizmalar tarafından çözülmesiyle gerçekleşir. Bu teknoloji, septik tank ve havuzdan başlayıp içerisinde sıcaklık kontrolü ve karışımın uygulandığı yüksek verimli reaktörlere dönüşmüştür [Metcalf and Eddy, 1991].

Bu biyolojik işlem sırasında organik maddeler öncelikle kendilerini oluşturan yapıtaşları gruplarına enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalarla ayrıştırılır yani hidrolize olur ve daha sonra hidrolize olan bileşiklerden oluşan moleküller, bir grup mikroorganizma vasıtasıyla organik asitlere ve alkole dönüştürülür. Organik asitler, bir grup anaerobik mikroorganizma tarafından asetik asit, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>'ye ve bunlar da son olarak metan oluşturan mikroorganizmalar tarafından metana dönüştürülürler. Anaerobik arıtma uygulamaları; sürekli karışimli reaktörler, anaerobik filtreler ve akışkan yataklı sistemlerdir [İleri, 2000].

### 2.3. Havalandırma Ekipmanları

Günümüzde üretilen havalandırıcı ekipmanlarının teknik özellikleri ve kapasiteleri hızlı bir gelişim göstermektedir. Bazıları her sistemde uygulanabildikleri halde bazı havalandırıcılar ise belirli havuz geometrileri gerektirirler. Tablo 2.1.'de değişik havalandırıcıların teknik özellikleri sunulmuştur.

Havalandırıcılar, atıksuyun içerisine oksijen verilmesi işleminde kullanılan mekanik havalandırıcılar olarak adlandırılır. Ekipmanı belirleyen parametre, vereceği oksijen miktarıdır [MMO, Yayın No:354, 2004]. Esas olan parametreler;

Kapasite :---- kgO<sub>2</sub>/kg B.O.İ.

Oksijen Transfer Miktarı :---- kgO<sub>2</sub>/kWh

Su derinliği :----m,

Devir sayısı :----d/dk

**Tablo 2.1.** Bazı havalandırıcıların teknik özellikleri [Toprak, 2000]

| Ekipman                        | Özellikleri                                                                                                                                                         | Kullanılan süreç                                                                  | Olumlu yönleri                                                                                                                       | Olumsuz yönleri                                                                                                                 | Verim ( * ) |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Difüze havalandırıcılar</b> |                                                                                                                                                                     |                                                                                   |                                                                                                                                      |                                                                                                                                 |             |
| Poroz difüzörler               | İnce ve orta büyüklükte hava kabarcıkları oluştururlar. Seramik kubbeler, plakalar, tüpler veya plastik kaplı tüp veya kutular kullanılır.                          | Yüksek hızlı, klasik, uzun havalandırma, modifiye, temas-stabilizasyon süreçleri. | İyi bir karışım yaratır ve su sıcaklığını belli bir değerde tutar. Değişken hava debisi ile işletimde elastikiyet sağlar.            | Yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetine sahiptir. Hava filtresi kullanılmalıdır. Havuz belirli bir geometriye sahip olmalıdır. | 1.1-1.5     |
| Poroz olmayan difüzörler       | Kabarcık kutularından, nozullardan, vanalardan orifislerden imal edilirler. Bazı tipleri plastik “check” vana ile teçhiz edilir. Büyük hava kabarcıkları oluşturur. | Poroz difüzörlerinin ile aynıdır.                                                 | Tıkanma sorunu yaratmaz ve su sıcaklığını belirli bir değerde tutar. Düşük bakım ve onarım masrafına sahiptir.                       | İlk yatırım masrafı yüksektir. Oksijen transfer verimi düşük, enerji maliyeti ise yüksektir.                                    | 0.7-1.1     |
| Tüp havalandırıcı              | Oldukça iyi bir hava-su teması sağlar. Silindir aparatı plastik veya paslanmaz çelikten imal edilir.                                                                | Mekanik havalandırma lagünler                                                     | Ekonomik açıdan oldukça çekicidir. Bakım ve onarım masrafı düşüktür. Oksijen transfer verimi yüksektir. Montaj kolaylığına sahiptir. | Tüm havuz içeriğinde iyi ve üniform bir karışım yaratamaz. Yüksek hızlı biyolojik süreçlere uygulanabilirliği düşüktür.         | 1.1-1.6     |
| Jet havalandırıcı              | Basınçlı hava su ile bir nozulda karıştırılır ve bir huni şeklindeki düzenek ile sisteme verilir.                                                                   | Poroz difüzörlerinin ile aynıdır.                                                 | Özellikle derin havuzlar için uygundur. Orta sınıf bir maliyet sergiler.                                                             | Belirli bir havuz geometrisi gerektirir. Nozullar sık tıkanabilir. “Blower” ve pompa kullanılır. Ön arıtım uygulanmalıdır.      | 1.5-2.1     |

**Tablo 2.1.** Bazı havalandırıcıların teknik özellikleri (Devamı) [Toprak, 2000]

| <b>Mekanik yüzeysel havalandırıcılar</b>                                                                       |                                                                                                                                    |                                                                      |                                                                                                             |                                                                                                                       |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Radyal<br>20 d/d                                                                                               | Düşük devirlidir ve türbin çapı büyüktür. Dubalara veya betonarme - çelik sabit köprülere monte edilebilir. Redüktör gerektirir.   | Poroz difüzörlerinin ile aynıdır.                                    | Havuzun geometrisinde ve tasarımında esneklik sağlar. Yüksek pompaj kapasitesine sahiptir.                  | Soğuk hava şartlarında türbinde donma meydana gelebilir. Eksenel tipe kıyasla ilk yatırım maliyeti yüksektir.         | 1.2-2.8 |
| Eksenel<br>300-1200 d/d                                                                                        | Yüksek devirlidir ve türbin çapı küçüktür. Dubalara veya betonarme - çelik sabit köprülere monte edilebilir. Redüktör gerektirmez. | Mekanik havalandırmalı lagünler.                                     | İlk yatırım maliyeti düşüktür. Değişik su seviyelerinde işletilebilir. Elastik işletim özelliği sergiler.   | Soğuk hava şartlarında türbinde donma meydana gelebilir. Karıştırma kapasitesi düşüktür.                              | 1.2-1.5 |
| Fırça rotor                                                                                                    | Düşük devirlidir ve redüktör gerektirir.                                                                                           | Oksidasyon hendekleri, havalandırmalı lagün veya aktif çamur süreci. | İlk yatırım maliyeti nispeten düşüktür. Bakım ve onarım kolaylığına sahiptir.                               | Verimi etkileyebilecek işletim ile ilgili değişkenlere oldukça duyarlıdır ve belirli bir havuz geometrisi gerektirir. | 1.5-2.1 |
| Batık türbinler                                                                                                | Düşük devirli türbine sahiptir. Difüzörlere veya borulara basınçlı hava sağlar.                                                    | Poroz difüzörlerinin ile aynıdır.                                    | İyi bir karışım sağlar. Derin havuzlara uygulanabilir. İşletimi oldukça elastiktir. Donma tehlikesi yoktur. | Hem "blower" hem de redüktör gerektirir. Güç gereksinimi ve maliyeti yüksektir.                                       | 1.0-1.5 |
| (*) : kg O <sub>2</sub> /kWh olarak; 0 mg/L çözülmüş oksijen, 20 °C sıcaklık, 14.7 psi basınç ve temiz su için |                                                                                                                                    |                                                                      |                                                                                                             |                                                                                                                       |         |

Seçilen havalandırıcı, sadece organik maddenin ayrıştırılması için gerekli olan oksijen ihtiyacını karşılamamalı, aynı zamanda iyi bir karışım da elde etmelidir.

Tank içerisindeki akım hızı 0.30 m/sn mertebesinde olmalıdır. Bu nedenle, havalandırıcının pompaj kapasitesi oldukça önemlidir. Havalandırıcıların pompaj kapasiteleri düşükse, havalandırıcılar daha sık yerleştirilmelidir ve ayrıca havuz derinliği düşük tutulmalıdır. Tablo 2.2.'de karışım gereksinimleri sunulmuştur.

Havalandırma sistemleri genelde temiz su için birim kWh enerji kullanımı ile suya kazandırılan kg olarak oksijen miktarı ile tanımlanan transfer verimi ile sınıflandırılırlar [MMO, Yayın No:354, 2004].

**Tablo 2.2.** Havalandırıcı karışım gereksinimleri [Toprak, 2000]

| Havalandırıcı | Genel özelliği   | Karışım özelliği              | Debi / Güç                                |
|---------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|
| Difüze        | Küçük kabarcıklı | Çok hatlı, tüm tabanda etkili | 2.20 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .saat |
| Difüze        | Büyük kabarcıklı | Spiral dönme etkisi           | 1.20 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> .saat |
| Mekanik       | Düşük devirli    | Tüm tank içeriğinde etkili    | 13 W/m <sup>3</sup>                       |

## 2.4. Mekanik Havalandırma

Mekanik havalandırma, mekanik cihazlar tarafından suya oksijen transferi olarak literatürlerde tanımlanmıştır. Bu sebeple yüzey çalkalama ve karıştırma ile sıvı hacmi içerisine atmosferik oksijenin girişine sebep olur.

Mekanik havalandırma cihazları, operasyon ve ekipmanın fiziksel konfigürasyonu temel alınarak sınıflandırılabilir. Mekanik havalandırma ekipmanları:

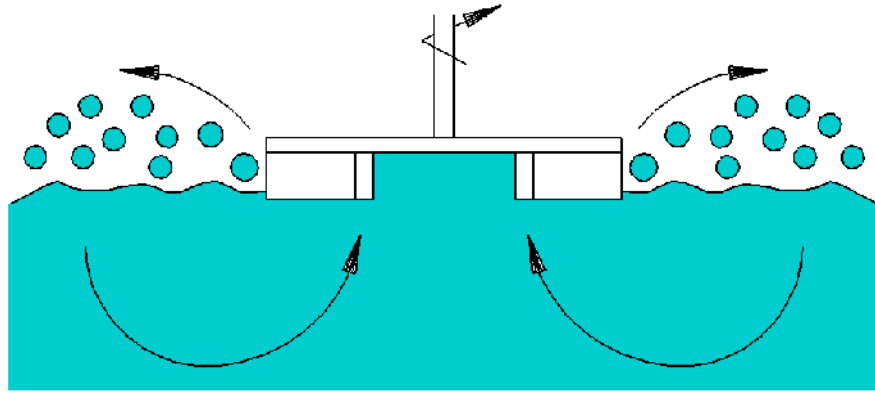
1. Düşük hızlı yüzey havalandırıcılar
2. Yüksek hızlı yüzey havalandırıcılar
3. Eksenel yüzey havalandırıcılar
4. Yatay milli havalandırıcılar
5. Dalgıç türbin havalandırıcılar
6. Jet tip havalandırıcılar

olarak sınıflandırılmaktadır. Burada tez konusuna bağlı olarak sadece düşük hızlı mekanik yüzey havalandırıcılardan bahsedilecektir.

### 2.4.1. Düşük Hızlı Mekanik Yüzey Havalandırıcılar

Mekanik havalandırma türleri içerisinde en çok uygulama alanı bulan havalandırıcılar, düşey milli düşük devirli tipte olanlardır. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılar, su yüzeyinde konumlandırılmış bir pervaneye sahiptir ve aşağıdan yukarıya doğru düşey yönde sıvıyı sürükler [Philadelphia Mixers Solution, Brochure]. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı

pervanesi daima akışkan yüzeyinde yerleşmiştir. Pervanenin dönüşü su içerisine oksijen transferi yaratarak sıçrama ve püskürtme yaratır. Pervanenin dönüşü aynı zamanda tüm havuz boyunca dağıtılmış oksijence zengin akışkanı radyal olarak dışarı pompalayan büyük aktif çamur hacimleri yaratır. Bu yüksek hacim pompalama, sıvı türbülansı, akış ve dibe çöken katı süspansiyonları meydana getirir. Pervane, dikine emdiği suyu havuz yüzeyine paralel olarak püskürtür. Doymuş oksijenli su, büyük hacimli doymamış sıvı içerisine karışır. Atıksu, sprey halinde püskürtülürken oluşan ince hava kabarcıkları, havuzdaki karışım ile en alt noktalara ulaşır ve oksijen transferini gerçekleştirir. Kabarcıklar, hava içerisinde kendi yolları üzerinde oksijen değiş tokuşu yaparlar. Su yüzeyindeki damlacık etkileri, akıntıda yerdeğişimi yaratarak oksijenden yoksun suyla havalandırılmış suyu karıştırır [Toprak, 2000]. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı, suyu yüzeyden zerrecikler halinde havaya püskürterek su yüzeyinin sürekli yenilenmesini sağlar ve bu sayede sonsuz sayıda tekrarlanan yeni sıvı-gaz arayüzeyleri oluşturur [Civelekoğlu, 2003].



**Şekil 2.18.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı akış davranışı [Philadelphia Mixers Solutions]

Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılar, biyolojik arıtma tesisleri havalandırma havuzları başta olmak üzere, havalı çamur stabilizasyonu, dere, nehir, göl vb. tabii su rezervlerinin havalandırılması, gazların sıvılara transferi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [Eimco Water Technologies, 2004].

Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcıların diğer havalandırma sistemlerine göre aşağıdaki üstünlükleri göz ardı edilmemelidir.

#### **A. Blower-difüzör sistemlerine kıyasla;**

- İlk yatırım maliyeti düşüktür.
- Blower binasına ihtiyaç olmadığından arazi ve inşaat maliyeti sıfırdır.
- Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı maliyeti blower+difüzör+difüzör borulama maliyetlerinin toplamından düşüktür.
- Montajı çok kolaydır. Bir yüzeysel havalandırıcı montajı vinç yardımıyla ve 4 adamla 6 saatte tamamlanır.
- Dalgıç mikser kullanımına gerek yoktur. Bu ekipmanın mekanik, elektrik donanım ve montaj maliyetleri sıfırdır.
- Tamamen yerli malzeme ile üretilebilir.
- İnsan sağlığını olumsuz etkileyecek düzeyde gürültü problemi yaratmaz.

#### **B. Dalgıç veya yüzeysel aspiratör sistemlerine kıyasla;**

- Saha şartlarında çok daha yüksek verime sahip olduğundan ve büyük güçlerde üretildiğinden, daha az sayıda ekipman elektrik donanımı maliyeti düşürür.
- Blower kullanımına hiçbir zaman gerek olmaz.
- Çevresel etkileri daha azdır.
- İnsan sağlığını olumsuz etkileyecek düzeyde gürültü problemi yaratmaz.
- Geri dönüşümlü malzemeden imal edilmektedir [Sartes Mühendislik Taahhüt Sanayi ve Ticaret A.Ş., Katalog]

Düşük hızlı havalandırma sistemleri, dizaynda basitlik, kurulum kolaylığı, suya batmayan parçalarla birlikte daha kolay koruma ve az işletim kontrol gereksinimi için basitleştirilmiştir. Üniteler, birkaç kilowattan 150 kW'ın üzerine kadar sıralanan motor gücüne sahiptir. Carrousel oksidasyon hendeği prosesleri için kullanılan düşük hızlı yüzey havalandırıcılar, 4 W'la 150 kW aralığındadır. Düşük hızlı düşük milli mekanik yüzey havalandırıcıların, çok yüksek pompalama kapasitesi, büyük hacimlerde mükemmel karıştırma ve katı süspansiyon sağlama gibi avantajları vardır.

Havalandırıcının çalışma verim kapasitesi genellikle 1.2-1.6 kgO<sub>2</sub>/kWh'tir. Pervanenin suya batma seviyesi 10 cm ila 30 cm'dir. Pervane çapı 0,60 m ile 3 m arasında değişken olup, genellikle düşük devirle çalışmaktadır [MMO, Yayın No:354, 2004].

Oksijen transferinde sonuçlar büyük arayüzey alanlarında üretilir. Gaz fazı sürekli, sıvı faz ise süreksiz olarak düşünülebilir. Oksijen birikimi sonsuzdur. Bu yüzden oksijen transferi, atmosfere doğru yeni sıvı arayüzeylere maruz kalabilen pervanedeki oranla sınırlandırılmıştır. Düşük hızlı yüzey havalandırıcılar, kaba kabarcıklı difüze tip havalandırıcıya kıyasla çok daha iyi oksijen transfer verimine sahiptir. Şekil 2.19.'da bir düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının çalışma sırasındaki resmi verilmiştir.



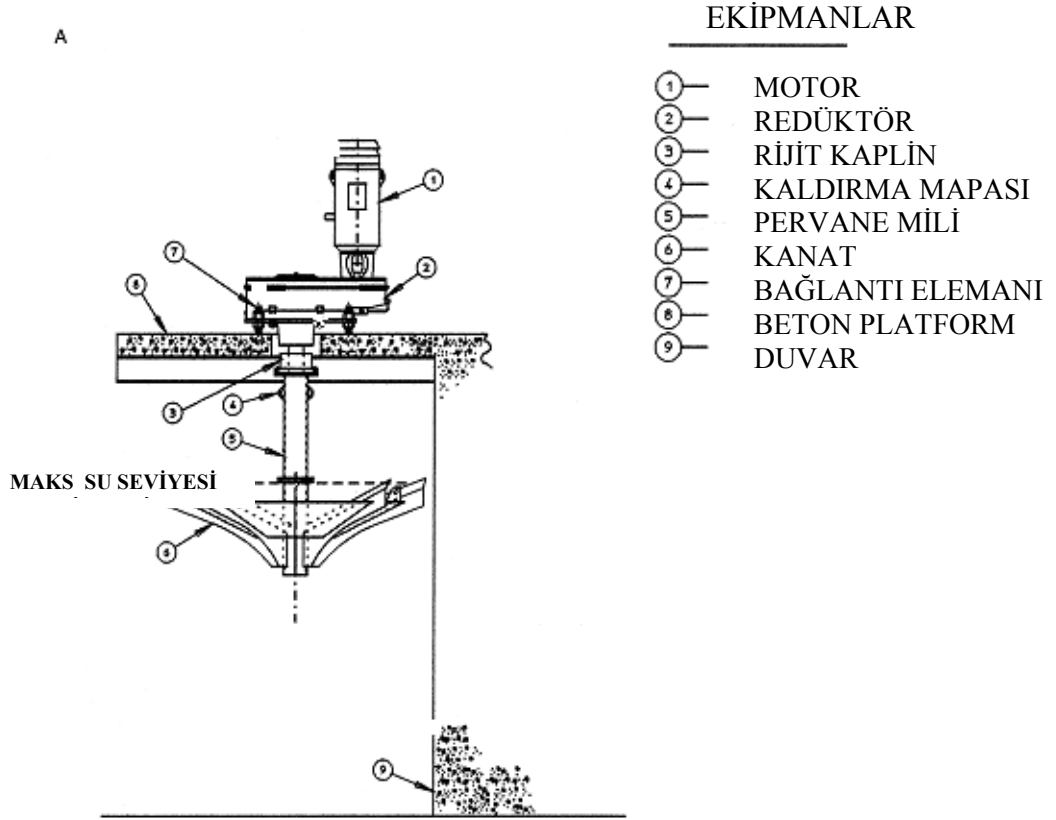
**Şekil 2.19.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcısı çalışma esnasındaki resmi [Eimco Water Technologies, 2004]

Düşük hızlı havalandırıcılar, yüksek derecede yüksek pompalama kapasitesine sahiptir. Düşük hızlı havalandırıcı, tipik olarak sıvı pompalamak için radyal biçimdeki pervanelerin konfigüre edilmesinde kullanılır. Bu yüzden havalandırıcı, genel olarak bir radyal akış cihazı olarak düşünülebilir. Şekil 2.20.'de düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesi görülmektedir [Astim, Katalog].



**Şekil 2.20.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesi [Astım, Katalog]

Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılar, büyüklük ve ağırlığından dolayı tipik olarak köprüye monte edilmiştir fakat onlar gereken yerde yüzer tip olarak monte edilebilmektedir. Şaft ve pervane, tahrik ünitesinin üzerinden monte edilmiştir. Platform ve köprü dizaynları, eğilme momenti ve titreşim için hesaplanmalı ve önceden tahmin edilen maksimum moment en az 4 kez dizayn edilmelidir (moment ve pervane yan kuvvetler). Sıçrama etkileri, havalandırma tankının uygun geometrik dizaynıyla minimize edilebilir. Yüzey havalandırıcılarında oluşan ısı kaybı, kış aylarıyla ilgilidir ve biyolojik arıtma sistemlerinde tahmin yoluyla belirlenir [MMO, Yayın No:354, 2004]. Şekil 2.21.'de düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı ekipmanları gösterilmiştir.



**Şekil 2.21.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı ekipmanları  
[Müller et al., 2002]

#### 2.4.1.1. Düşük Hızlı Mekanik Yüzey Havalandırıcılarda Performans Değer Aralığı

Düşük hızlı mekanik yüzey havalandırıcıların performansı, pervane batma derinliği, havuz hacmi başına güç girişi, havalandırıcı pompası, havuz geometrisi, ünitelerin sayısı ve mesafesi, akım kırıcı kullanımı, akış borusu, yedek pervane, sıcaklık ve atıksu karakteristikliklerine bağlıdır. Genelde küçük üniteler güç başına çok büyük ünitelerden daha fazla yüksek oksijen transferine sahiptir. Bununla birlikte, verilen her havalandırıcı için havalandırma içindeki sıvı hacmi, oksijen transfer oranında, daha küçük sıvı hacmi etkisine sahiptir.

Bugün, düşük hızlı yüzey havalandırıcıların performansı, “*standart havalandırma verimi (SAE)*” ile normal olarak sıcaklık, basınç ve “*çözünmüş oksijen (DO)*”

konsantrasyonun standart koşullar altında zaman başına kütle oksijen transferi olarak ifade edilir [Müller et al., 2002].

#### **2.4.1.2. Düşük Hızlı Mekanik Yüzey Havalandırıcı Performansını Etkileyen Faktörler**

Düşük hızlı mekanik yüzey havalandırıcıların oksijen transfer performansını etkileyen önemli faktörler; pervane tipi, pervane hızı, pervane batma derinliği, havuz geometrisi ve yedek karıştırma, akım kırıcılar (baffles) ve akış borularını (draft tubes) kapsamaktadır.

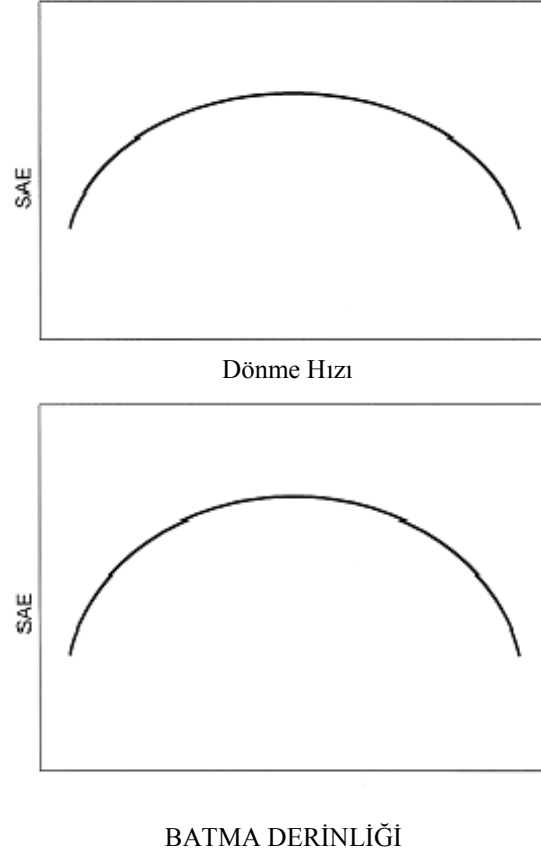
**Pervane tipi:** Pervanenin karakteristikleri, havalandırıcı performansı üzerinde önemlidir. Pompalama ve kayma karakteristikleri ve buna bağlı olarak oksijenleşme kabiliyeti, pervane özellikleriyle değişecektir. Üreticiler, hava kabarcıklarının sürüklenme ve efektif karıştırma gelişimi ve yüksek hava/sıvı yüzeyiyle üretilecek olan dayanıklı pervaneleri üretmek için yatırım yapmışlardır. Her cihaz, düşük bir güç girişinde yüksek “*standart oksijen transfer oranı (SOTR)*” başarısı için dizayn edilen farklı karakteristiklere sahiptir.

**Pervane hızı:** Pervane hızı, tek faz sıvılarda batmış mikserler için sağlanan güç, pompalama ve kayma denklemleriyle ifade edilen önemli bir operasyonel değişkendir. Bu denklemlerdeki sabitlere rağmen aynı eğilim gösteren değerler, yüzey havalandırıcılar için farklı olacaktır. Verilen bir yüzey pervanesi, daha yüksek bir hızda çalıştırılan pervaneye oranla aynı güç girişi için daha düşük bir hızda daha fazla su pompalayacaktır. Böylece, her bir havalandırıcıya bağlı olan hızın önemi, kendi karakteristik ilişkilerini sergileyecektir. Şekil 2.22.’de düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesinin çalışma esnasındaki resmi verilmiştir.



**Şekil 2.22.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervane çalışma konumu [Landustrie Water Technologie Broshure, 2007]

**Pervane batma derinliği:** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılar, su yüzeyinde yerleşmişler ve pervane suda kısmen batmıştır. Açıkça, pervane ne kadar batarsa, cihaz tahriki için daha çok güç gerekecek ve sıvıya daha fazla güç verme ihtiyacı doğacaktır. Beklenildiği gibi, “*standart oksijen transfer oranı (SOTR)*”, bir noktada batmayla birlikte artacaktır. Aynı durum için ister istemez giriş gücü de artacaktır. Bu yüzden, normal olarak en yüksek “*standart oksijen verimi (SAE)*” değerine ulaşmak için optimum bir batma derinliği olmalıdır. Havalandırıcının bu karakteristiği, bir kontrol parametresi olarak su yüzey yüksekliği kullanılarak yüzey havalandırıcı performansını kontrol etmek için faydalı olacaktır. Şekil 2.23.’de düşük hızlı düşey milli yüzey havalandırıcılar için rotor hızı ve batma derinliğinin SAE üzerindeki etkisi grafik olarak verilmiştir.



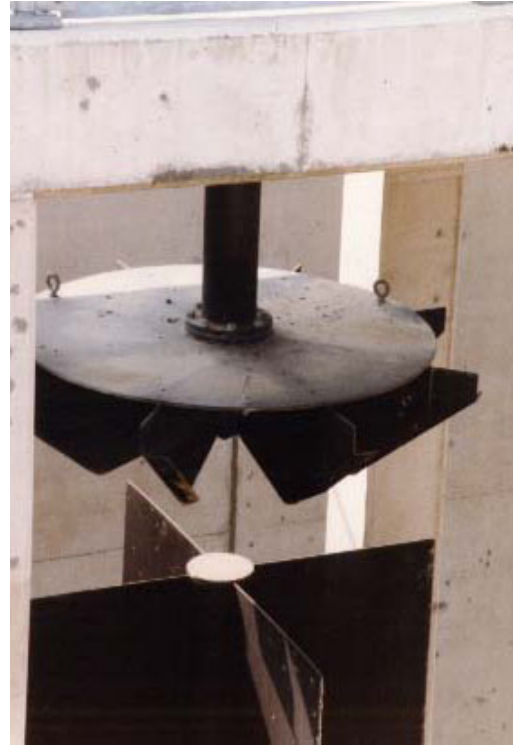
**Şekil 2.23.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılar için rotor hızı ve batma derinliğinin standart oksijen transferi (SAE) üzerindeki etkisi [Müller et al., 2002]

**Havuz geometrisi :** Havalandırma havuzu geometrisi, performansı önemli bir ölçüde etkileyecektir. Çeşitli geometrik konfigürasyonlarda bir havalandırıcı için üretilen bazı yaklaşık hesaplara rağmen bu ilişkiler ampirik kurallardır ve performansı etkileyen faktörler iyice açıklığa kavuşmamıştır. Mühendisler sıklıkla ölçüm ve ölçek performansları denemeleri için alan veya hacim başına havalandırıcı güç girişi kullanırlar. Havuz çap oranı için havuz derinliği ve pervane çapı gibi diğer geometrik ilişkiler, havalandırıcı performansı ile ilgilidir. Genel havuz geometrisinde, türbülans ve sirkülasyon, sistemi etkiler. Mekanik havalandırma cihazlarının bir diğer önemli dizayn özelliği ise bir havuz içerisindeki çoklu üniteleri içermesiyle ilgilidir. Havalandırıcının bir pompa olduğu düşünülürse, her birimin sabit bir su hacminde pompalanacağı varsayımı uygundur ve sonuçta havuz içerisindeki hacmin etkisi belirlenir. Optimal verim için, her ünite tam kapasitede çalıştırılmalıdır.

**Yardımcı karıştırma , akım kırıcılar ve akış boruları:** Yüzey havalandırıcının etki bölgesi, sisteme yardımcı ekipman eklenerek genişletilebilir. Karıştırma cihazları, genellikle düşük karıştırma pervaneleri veya akış borularından oluşur. Bu cihazlar, sirkülasyonu düzeltebilir fakat sıklıkla havalandırıcı *SAE* üzerinde çok az etkiye sahiptir. Bununla beraber bazı durumlarda çok derin tanklarda aşağı pompalanan pervanelere ek durumda *SAE* üzerinde negatif etkileri olabilir. Akış boruları, eğer uygun olmayan şekilde dizayn edilirse, negatif bir etkiye de sahip olabilir, bu yüzden sürtünme basıncı artabilmektedir. Dairesel veya kare tanklarda akım kırıcı kullanımı, daha büyük sistem türbülansı terfisi ve çevrilerden (girdap) kaçınmak için sıklıkla mikserler için tanımlanmıştır. Ancak gerektiği yerlerde girdap etkilerini azaltmak için akım kırıcılar kullanılmaktadır [Müller et al., 2002]. Şekil 2.24 (a)'da akış borulu, Şekil 2.24 (b)'de ise akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli havalandırıcı resimleri görülmektedir.



**Şekil 2.24. (a)** Akış borulu düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı [Biwater Treatment Limited, Brochure].



**Şekil 2.24. (b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı [Biwater Treatment Limited, Brochure].

Oksijenin suya geçişi bir gaz transfer olayıdır. Olay, sıvı ve gaz fazlar arasında ve sıvı ve gaz kütleleri ortak yüzeyinde meydana gelmektedir. Bu bakımdan, oksijenin suya geçişi ve suda çözünmesi olayını, olayın hızını, hıza etkiyen faktörleri ve sınır şartlarını anlamak için gaz transfer esaslarını incelemek gerekir. Bu konuda öncelikle belirtilmesi gereken özellik, oksijenin suda çözünebilen fakat zor çözünen bir madde olduğu, birim su miktarında çözünebilen oksijen miktarının sınırlı olduğu, bu miktarın ve çözünme hızının suyun bütün fiziksel özellikleri gibi ısı ile bağıntılı bulunduğudur. Oksijenin suda böyle zor ve sınırlı olarak çözünmesinden dolayı su kirliliği çok önemli hale gelmektedir. Suyu oranla çok fazla oksijene sahip olan havada, oldukça yüksek derecede kirliliklerde bile canlılar yaşayabildiği halde, su kirliliği belirli sınırları aşar aşmaz, suda havasız mikroorganizmalar dışında, hayat derhal sona ermektedir [Ünal, 1978].

### 3.1. Kütle Transfer Prensipleri

#### 3.1.1. Transferin Fiziksel Mekanizması

Kütle transferi, bir itme kuvveti nedeniyle bir yerden başka bir yere kütle veya moleküllerin hareketini kapsar. Bu hareket, bir akışkan faz içerisinde veya akışkan fazların birkaçı arasında oluşabilir. Havalandırmada kütle transferiyle ilgili durum, iki faz arasındaki transferdir. Oksijen molekülleri, ilk olarak bir gaz fazından sıvı bir yüzeye transfer edilir. Denge, hızla gaz-sıvı arayüzeyinde kurulmuştur. Oksijen molekülleri daha sonra arayüzeyden sıvının esas bölgesine kadar hareket eder [Müller et al., 2002].

#### 3.1.2. Moleküler Yayınım

Suda çözünebilen maddelerin su ile temas halinde olmaları yani bir ortak yüzeye sahip bulunmaları halinde, çözünmüş madde konsantrasyonu zamanla üniform hale gelir. Bu denge olayına *yayınma (difüzyon)* adı verilir. Hiçbir dış etken (karıştırma gibi) olmadan meydana gelen bu yayınma olayının hızı çok düşüktür. Su ve havanın da durgun olarak temasları halinde oksijen molekülleri yayınma ile suya transfer olurlar. Bu yayınmanın hızı Adolf Fick tarafından, Fick kanunu (1885) olarak bilinir [Tesisat Mühendisliği Dergisi, 2003].

### 3.1.2.1. Fick Kanunu Durağan Koşullar

Fick kanunu, sıvıda var olan ve ısı taşınımı oluşturmeyen bir konsantrasyon gradyanındaki proses transferini tanımlar. Bu proseste, sıvı içerisindeki moleküllerin “*Brownian hareketi (Bir sıvıda yüzen veya asılı parçacıkların rastlantısal hareketi)*” taşınmayı sağlar.

$$J = -D \frac{dC}{dy} \quad (3.1)$$

Eşitliğin sol tarafı, birim arayüzey alanı veya kütle akışı başına kütle transfer oranını sağlamaktadır. Negatif işareti, daha yüksek konsantrasyondan daha düşük değere azalan gradyanın yönünde oluşan transferi gösterir. Eşitlikteki oransallık faktörü  $D$ , “*yayınma katsayısı*” veya “*yayınım*” olarak ifade edilir ve ortak gradyandaki akışın doğrusal bağımlılığını belirlemek için kullanılır.

Şekil 3.1.(a)’da durgun bir tank içerisine oksijen moleküllerinin yayılım (difüzyon) taşınması şematik olarak gösterilmektedir. Üst sıvı tabaka, dışarıdan oksijenin girişiyle doyurularak beslenir. Alt sıvı tabaka, başlangıçta oksijenden yoksundur. Brownian hareketi, hem su hem de oksijen moleküllerinin iki tabaka arasında arayüzey boyunca taşınabilmesine neden olur. Moleküllerin bu rastgele hareketinden dolayı, sıvının üst tabakaları içine  $y$  yönünde oksijen nüfuz etmeye başlar. Şekil 3.1.(b), toplam hacmin yarısı doyumluğa eriştiği zaman sıvı alt tabakasını göstermektedir. Penetrasyonun yayılım proseslerinin rastgele doğasından dolayı tüm yerleşimlerde aynı derinlikte olmadığı not olarak söylenebilir. Sonuç olarak Şekil 3.1.(c)’de gösterildiği gibi alt tabakanın toplam hacmi sonsuz bir zamanda doyumluğa ulaşır.

Konsantrasyonun zamanla değişimini tanımlayan diferansiyel eşitliğin, sıvı tabaka içerisinde doğal bir dilimdeki bir kütle denklemi tarafından yayılım (difüzyon) olarak yürütülmesi Fick’in ikinci kanununda verilmiştir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3.2)$$

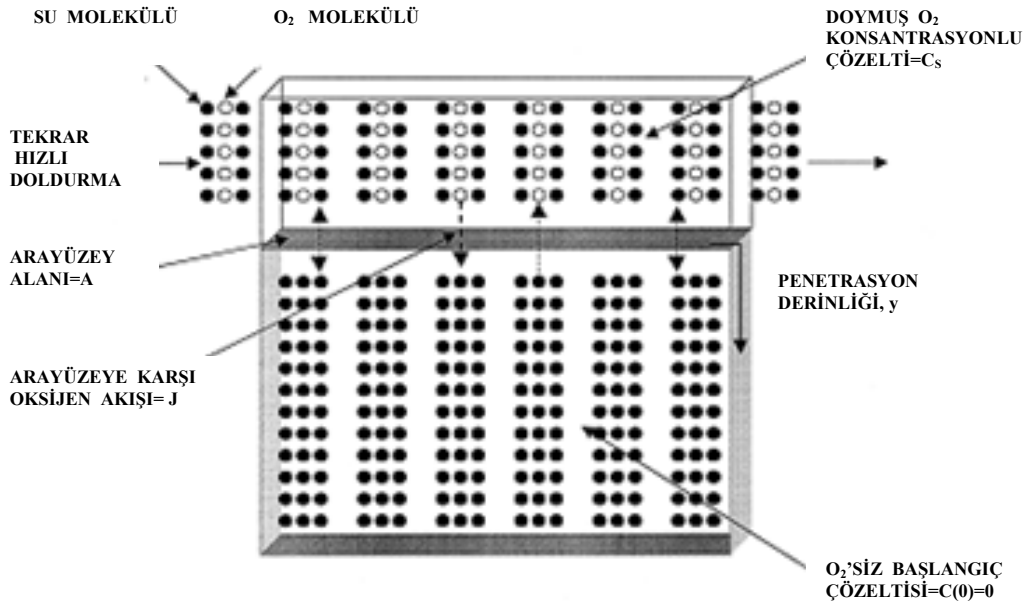
Tank içerisine oksijen penetrasyonunun zaman aralıklı dağıtımı olarak tanımlanan eşitlik, aşağıda verilmiştir.

$$C(t, y) = C_0 + (C_s - C_0) \operatorname{erfc} \left[ \frac{y}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

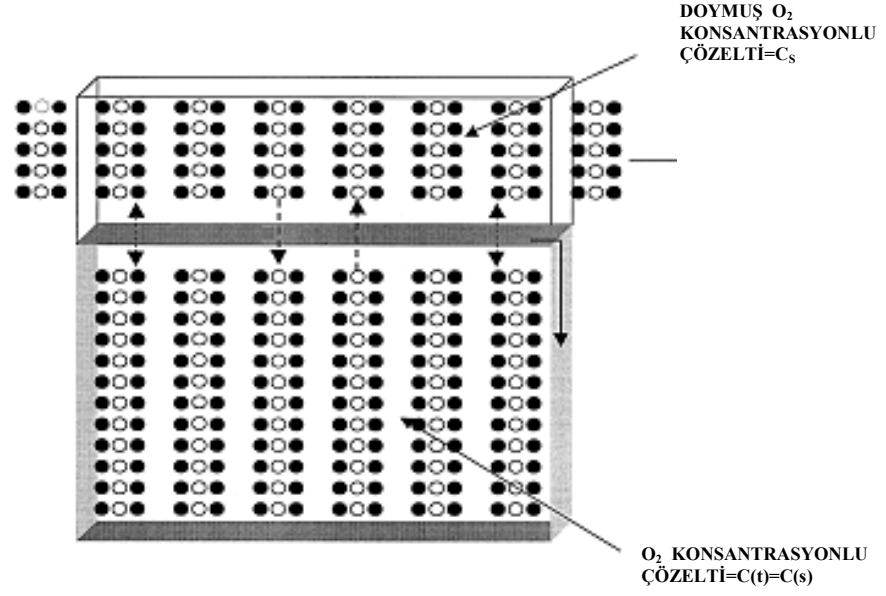
veya

$$C(t, y) = C_0 + 2(C_s - C_0) \phi \left[ -\frac{y}{2\sqrt{Dt}} \right]$$
(3.3)

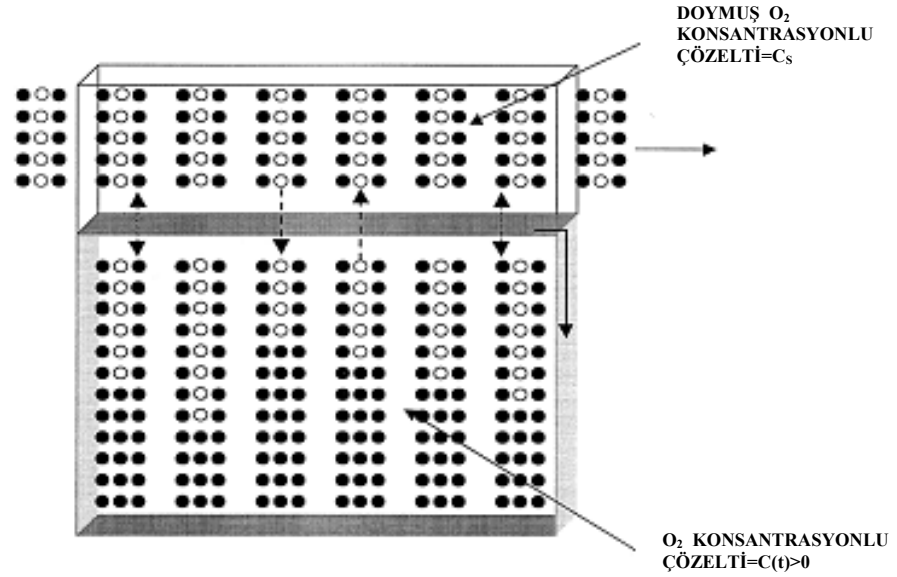
Tamamlayıcı hata fonksiyonu, **erfc** ve kümülatif Gauss hata fonksiyonu,  $\phi$  tablolama programlarında mevcuttur ve istatistiklerde ve mühendislik kataloglarında cetvel haline getirilmiştir.



**Şekil 3.1.(a)**  $t=0$  anında durağan çözelti için oksijen yayılımının şematik gösterimi [Müller et al., 2002]



**Şekil 3.1.(b)**  $t=1/2$  anında durağan çözelti için oksijen yayınının şematik gösterimi [Müller et al., 2002]



**Şekil 3.1.(c)**  $t= t$  sonsuz anında durağan çözelti için oksijen yayınının şematik gösterimi [Müller et al., 2002]

Denklem (3.3)'de hem doygunluk, hem de yayınma değerleri, sıcaklık tarafından etkilenmektedir. Yayınma, ısıyla artarken, doygunluk, ısı artışıyla azalır. Wilke-Chang bağıntısı, çoğunlukla kullanılan ampirik bir bağıntıdır.

$$D_{AB} = \frac{7,4 \times 10^{-12} T \sqrt{\phi M_B}}{\mu_B V_A^{0,6}} = \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (3.4)$$

Burada;

$D_{AB}$  : yayınım,

$M_B$  : moleküler ağırlığın bir fonksiyonu olarak  $B$  çözücüsü içerisindeki  $A$  çözünen maddesinin seyreltisi,

$\mu_B$  çözücünün vizkositesi,

$V_A$  : çözünen maddenin toplam hacmi ve

$T$  : mutlak sıcaklıktır.

Çözücü su ve çözelti eriyik oksijen olduğu zaman Wilke-Chang ifadesi aşağıdaki gibidir.

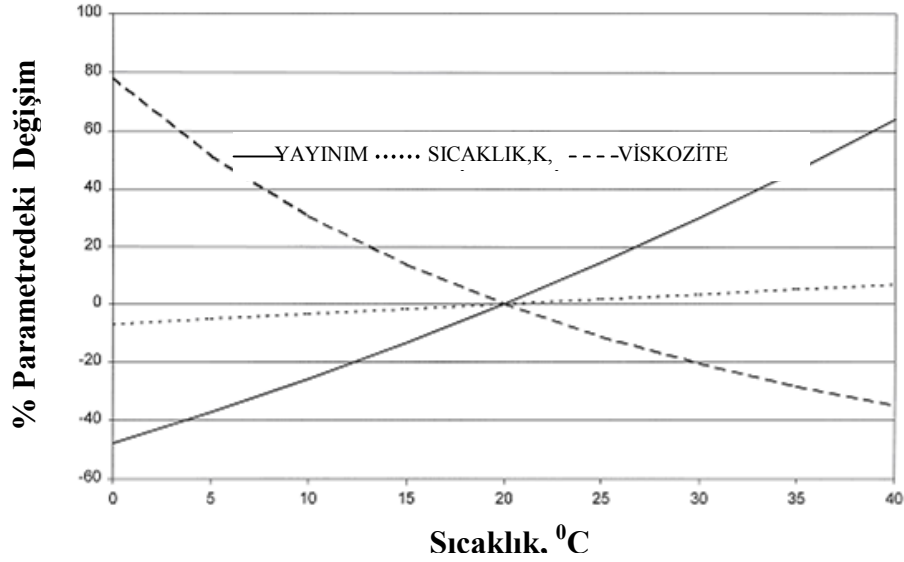
$$D = \frac{6.85 \times 10^{-12} T}{\mu_B} = \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (3.5)$$

$T$  : mutlak sıcaklık ( $K$ ),

$\mu_B$ : centipoise'da su vizkositesidir (g/m-s).

(1 poise = 100 centipoise = 1 g/cm-s).

Suyun viskozitesi sıcaklık arttığında azalır ve akışkan, su moleküllerinin Brownian hareketi üzerinde daha az direnç harcar. Şekil 3.2, standart koşullarda 20 °C sıcaklık kullanılarak Wilke-Chang eşitliğine göre sıcaklık artışıyla birlikte yayınımdaki artışı göstermektedir. Not olarak; yayınım üzerindeki sıcaklık değişiminin ana etkeni viskozitedeki azalmadır.



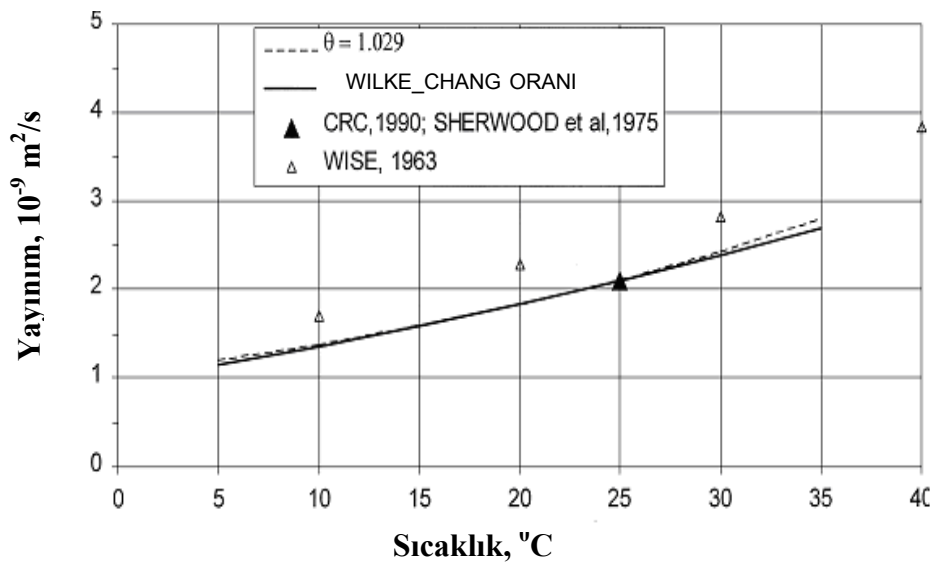
**Şekil.3.2.** Wilke-Chang denklemi kullanılarak viskozitenin, sıcaklık ve oksijen yayınımları üzerindeki değişiminin bağıl etkileri [Müller et al., 2002]

Yayınım değerindeki sıcaklığın etkisine bağlı olarak, toplam bir ifade aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$D_{t,^{\circ}C} = D_{20^{\circ}C} \theta^{t-20} \quad (3.6)$$

Şekil 3.3.'te 25 °C'de  $2,1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s oksijen yayınımları için tipik el kitabı değeri (Weast, 1989) kullanılarak 1,029 fit ölçüsündeki  $\theta$  değeri gösterilmiştir.

### Su İçerisindeki Oksijen Yayınımları



**Şekil 3.3.** Sıcaklığın oksijen yayınımları üzerindeki etkisi [Müller et al., 2002]

Derin bir tank içerisindeki yayılım ile toplam oksijen transferi kütlesi  $M$  ve birim başına arayüzey alanı  $A$  arasındaki bağıntı Şekil 3.1.'deki duruma benzer şekilde aşağıda verilmiştir.

$$\frac{M}{A} = 2(C_s - C_0) \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (3.7)$$

Tankın derinliği  $d$  üzerinde elde edilen ortalama konsantrasyon  $\bar{C}$ , aşağıda gösterildiği gibi elde edilebilir.

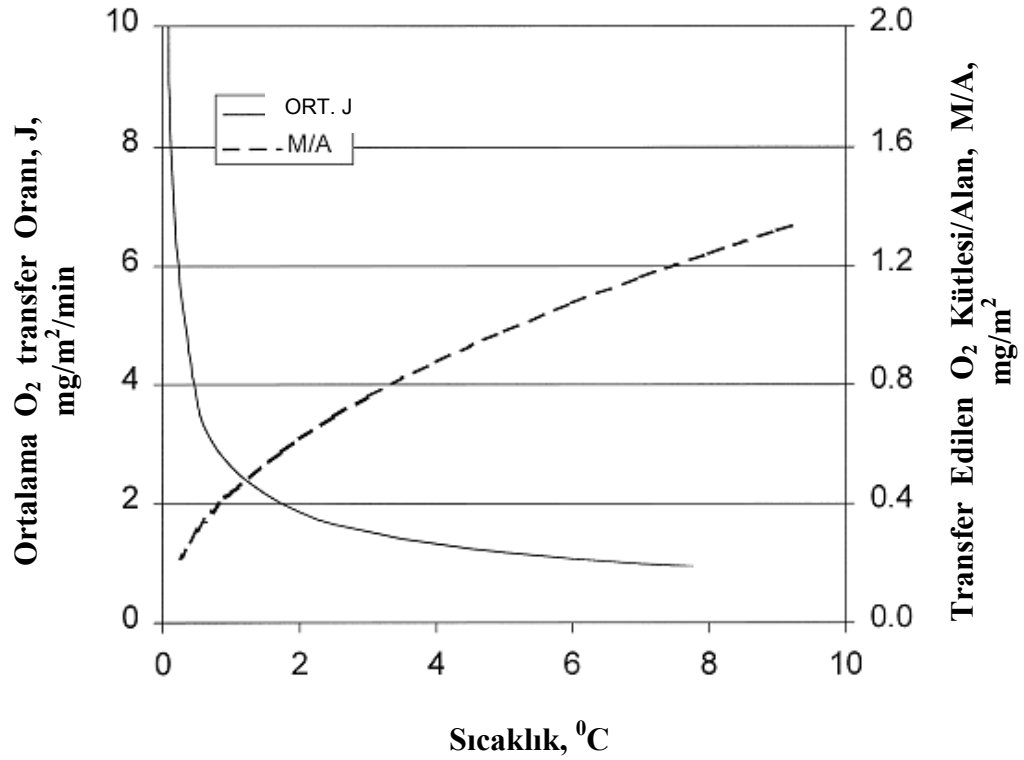
$$\bar{C} = \frac{M}{Ad} = \frac{M}{V} = \frac{2(C_s - C_0)}{t} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (3.8)$$

Tanımlanan süre zarfında toplam oksijen akışı transfer zamanı, denklem (3.7)'ye bölünerek elde edilir.

$$\bar{J} = \frac{M}{At} = 2(C_s - C_0) \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (3.9)$$

$\bar{J}$ , ortalama transfer oranı,  $M/A$ , birim alan başına toplam kütle olarak ifade edilir. Oksijen, arayüzeye bitişik tabakalarda artmaya başlarken, başlangıçtaki yüksek transfer oranı hızlı bir şekilde azalır [Müller et al., 2002].

Şekil 3.4.'de ortalama transfer oranı,  $J$  ve birim alan başına toplam kütle,  $M/A$ , transferin ilk saniyeleri boyunca sağlanmıştır. Oksijen, arayüzey yakınında tabaka içerisinde oluşmaya başladığında, başlangıçtaki yüksek transfer oranları hızlı bir şekilde düşer. Sonuç olarak, oksijenin daha hızlı ilerlemesi için transfere izin veren yığın, eriyik içerisine karıştırılarak bu alt tabakalardan kaldırılması istenir.



**Şekil 3.4.** 20 °C’de Fick yayınımla suya transfer edilen oksijen kütlesi [Müller et al., 2002]

### 3.1.3. Konvektör Taşınımı İçin Yayınımın Kıyaslanması

Eriyik yığını içerisindeki karıştırma ve türbülans, sadece arayüzeydeki ince bir tabakada oluşan moleküler yayınlı sıvının ana kısmındaki gradyanlardaki konsantrasyonların her birini yok eder. Kütle akışı (debi), ölçülen bu konsantrasyon farkı açısından belirlenir ve sıvı film katsayısını temsil eden transfer katsayısı  $k_L$ , ampirik olarak belirlenir. Bu tanımlama aşağıda ifade edilmiştir.

$$J = k_L(C_s - C) \quad (3.10)$$

Kütle akışı, birim sıvı hacmindeki arayüzey alanının birim sıvı hacmine bölünerek bulunan  $a = \frac{A}{V}$  ifadesiyle çarpılarak, sıvı hacim konsantrasyonundaki değişim açısından da ifade edilebilir.

$$J \frac{A}{V} = \frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (3.11)$$

0' dan t' ye kadar başlangıç koşulları arasında  $t$  zamanının integrali alınırsa ifade;

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C_s - C} = k_L a \int_0^t dt \quad (3.12)$$

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_0} = e^{-k_L a t}$$

şeklinde olur.

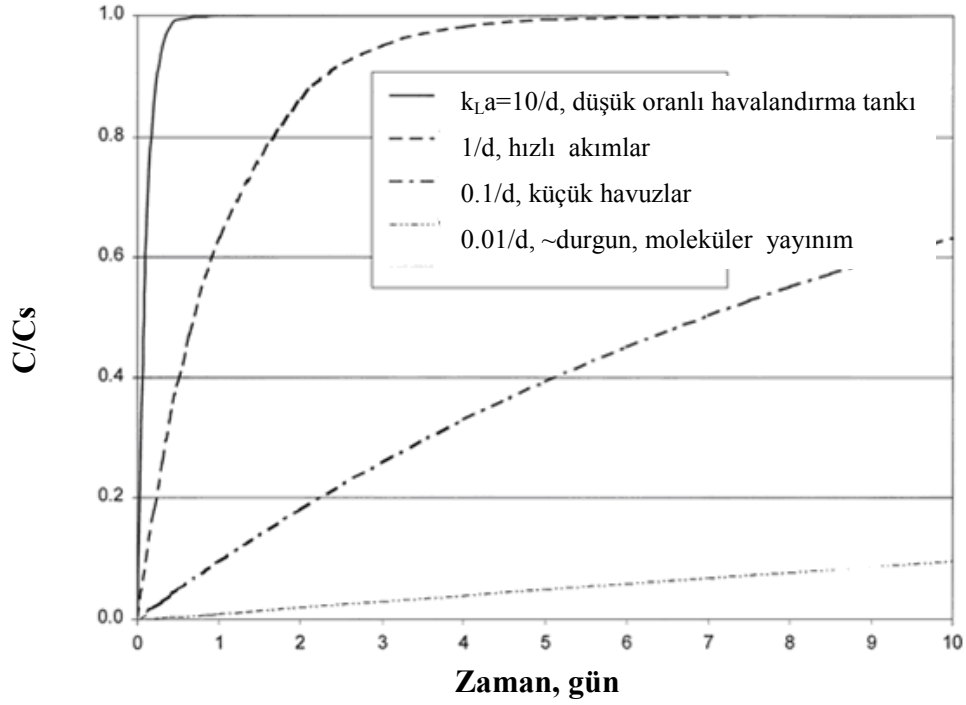
Başlangıç konsantrasyonu 0 olduğunda, zamana bağlı olarak elde edilen nem aşağıdaki verilmiştir.

$$\frac{C}{C_s} = 1 - e^{-k_L a t} \quad ; \quad C_0 = 0 \quad (3.13)$$

Tank derinliğinin bir fonksiyonu olarak moleküler yayınımla elde edilen bağıl nem, aşağıdaki gibi ifade edilir [Müller et al., 2002].

$$\frac{\bar{C}}{C_s} = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad ; \quad C_0 = 0 \quad (3.14)$$

Şekil 3.5.'de havalandırma tankı içerisinde karşılaşılan daha yüksek oranlardan, doğal su sistemlerindeki daha düşük oranlara kadar  $k_L a$  değerlerinin aralığı görülmektedir.



**Şekil 3.5.** Oksijen transfer oranının 0.5 m derinlik ve 20°C'deki arazi koşulları için moleküler yayınımla kıyaslanması [Müller et al., 2002]

### 3.1.4.1. Gaz-Sıvı Transferi

Gaz-sıvı transferi gerek fiziksel, gerek kimyasal ve gerekse biyolojik arıtma süreçlerinde uygulanan temel işlemlerden biridir. Gaz transferi sayesinde proses için ihtiyaç duyulan gazların yüksek hızda hava fazından sıvı fazına; bazı durumlarda da sıvı fazından gaz fazına geçişi sağlanır. Transfer edilen havanın su içerisindeki çözünürlüğünü artırabilmek ve böylece ekonomik ve teknik yönlerden daha verimli hale getirebilmek için gaz transferinin sürece ilişkin tasarım kriterleri çerçevesinde uygulanması önem taşır.

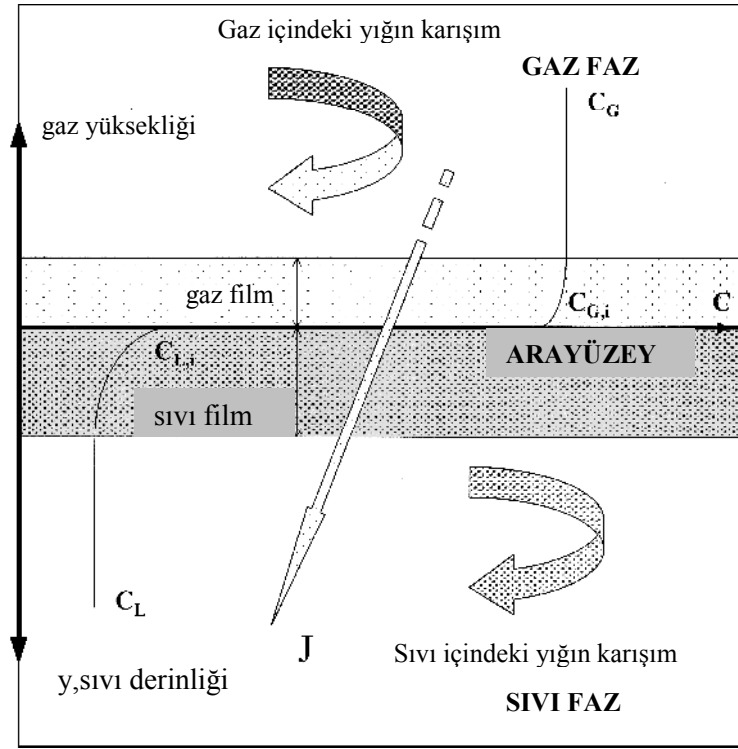
Gaz transferi kısaca gaz moleküllerinin sıvı-gaz ara yüzeyinde yer değiştirmesi olarak tanımlanabilir. Bu değişim süreci sonunda sıvı faz içerisindeki gazların konsantrasyonları, gazların o koşuldaki denge konsantrasyonlarına bağlı olarak artma veya azalma gösterir. Eğer herhangi bir gazın sıvı fazındaki konsantrasyonu mevcut koşuldaki (basınç, sıcaklık, safsızlık vb.) denge konsantrasyonundan düşük ise gaz hava fazından sıvı fazına geçiş yapar (gaz absorpsiyonu); eğer sıvı fazdaki konsantrasyon denge konsantrasyonundan yüksek ise sıvı fazından gaz fazına geçiş olur (desorpsiyon). Ancak bir gazın sıvı içerisindeki konsantrasyonu önemli ölçüde

sıvı-gaz arayüzeyindeki toplam basınçtan etkilenir. Bunun anlamı doğal biçimde yüzeyi atmosfere açık olmayan sıvı kütlelerinde çözünmüş gazların denge konsantrasyonlarının, yüzeyi atmosfere açık olan (standart koşullar) sıvı kütlelerindeki gazların denge konsantrasyonlarından (basınca bağlı olarak) çok daha yüksek olabileceğidir.

Gaz transferi süreci gerek doğal ortamlarda, gerekse mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin kirlilik ihtiva eden yüzeysel sularda organik kirleticilerin belli ölçüde aerobik mikroorganizmalar tarafından sindirilmesi neticesinde su içerisindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu denge konsantrasyonu değerinin altına düşebilir ve böyle durumlarda havadan oksijen emilmesi (absorpsiyonu) süreci başlar. Öte yandan metabolik faaliyetler sonucu açığa çıkan karbondioksit gazı, denge konsantrasyonundan daha yüksek değerlere ulaşabileceğinden desorpsiyon süreci ile havaya geçer. Benzer biçimde alglerin metabolik faaliyetleri sonucu üretilen ve ortama salınan oksijen de zaman zaman suda doygunluk konsantrasyonu değerinin üzerine çıkabilir ve su ortamından desorbe olabilir (uzaklaşır). Benzer biçimde doğal yüzeysel sularda anaerobik koşulların gelişimi neticesi ortama salınan metan ve hidrojen sülfür gibi gazlar da desorpsiyonla ortamdan uzaklaşır.

Atıksu arıtma uygulamalarında gaz transferi işlemlerinde gaz fazı çoğunlukla “hava”, sıvı fazı ise “su yada atıksu” biçiminde karşımıza çıkar. Tüm gaz transferi işlemlerinde transfer mekanizmasının sadece sıvı-gaz arayüzeyinde gerçekleşmesi sebebiyle bu iki faz arasındaki temas yüzeyi (arayüzey) maksimum hale getirilerek gaz transferi kapasitesi en üst düzeyine çıkartılabilir. Bu kapsamda belirli bir hacme sahip bir su kütlelerinin ara yüzeyinin sürekli olarak yenilenmesi sayesinde gaz transferi hızlandırılır [Civelekoğlu, 2003].

Şekil 3.6.’da biri gaz fazında, diğeri ise sıvı fazda kütle transferine direnç gösteren iki faz şematik olarak gösterilmektedir. Şema, aynı zamanda iki faz arasında oluşan süreksizliği de ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 3.6. İki fazda oksijen transfer şeması [Müller et al., 2002]

#### 3.1.4.1. Gaz ve Sıvı Filmler

Havalı biyokimyasal arıtma sistemlerinde havalandırma ünitelerinde oksijenin su içindeki çözünümünü kontrol eden faktör, moleküler yayılım katsayısından ziyade gaz transfer katsayısıdır.

Gaz transfer mekanizmasının açıklamasını yapan çeşitli teoriler içinde en çok kullanılan Lewis-Whitman'ın iki film teorisidir. Bu teori, gaz ve sıvı fazların temas yüzeylerinde iki film teşekkül ettiği varsayımına dayanır. Biri gaz diğeri sıvı olan bu iki film, gaz moleküllerinin sıvı kütlesine kolayca geçmesine karşı koyarlar. Moleküllerin geçiş hızı, kinematik vizkositeye bağlı olan bu film kalınlıkları ile ifade edilebilir [Ünal, 1978].

Oksijen akışı, hem sıvı film katsayısı  $k_L$  ve hem de gaz film katsayısı  $k_G$  kullanılarak denklem (3.10)'a benzer şekilde ifade edilebildiği gibi, hacim değerleri  $C_G$  ve  $C_L$  'den arayüzey değerleri  $C_{G,i}$  ve  $C_{L,i}$  'ye kadar her bir fazda konsantrasyon farkı şeklinde de ifade edilebilir.

$$J = k_G(C_G - C_{G,i}) \quad \text{gaz tabaka} \quad (3.15)$$

$$J = k_L (C_{L,i} - C_L) \quad \text{sıvı tabaka} \quad (3.16)$$

Not olarak; her bir tabakadan geçen oksijen akışı, arayüzeydeki oksijenin birikmesine engel olur [Müller et al., 2002].

#### 3.1.4.2. Doygunluk Konsantrasyonu ve Absorbsiyon

Oksijen, su tarafından moleküler yayınımdan daha büyük bir hızla absorbe edilebilmektedir. Gazların ve bu arada söz konusu olan oksijenin sudaki absorpsiyon (emilim) hızını ve bağlı olduğu faktörleri incelemeyen, bu faktörlerden biri olan ve yayılım hızı hesabında da kullanılan suyun gazla doyma konsantrasyonu ve bu değere etkiyen faktörleri incelemek gereklidir.

Gazların sıvılar içindeki doyma konsantrasyonları, Dalton'un kısmi basınç kanunu ve Henry kanunu ile hesap edilir [Ünal, 1978].

##### 3.1.4.2.1. Henry Kanunu

Herhangi bir gazın sabit ısıda, belirli hacimde bir sıvı içinde çözünen miktarının ağırlığı, o gazın sıvı üzerinde yaptığı basınçla doğru orantılıdır [Ünal, 1978].

Arayüzeydeki konsantrasyonlar arasındaki bağıntılar için kullanılan Henry kanunu olarak adlandırılan denklem, aşağıda ifade edilmiştir.

$$C_{G,i} = H C_{L,i} \quad (3.17)$$

Bu denklem, aynı aktivite veya kimyasal potansiyele sahip arayüzeydeki konsantrasyonun olduğu bir denge denklemi bağıntısıdır. Her iki konsantrasyon, benzer birimlerle ifade edilir. Burada  $H$ , Henry sabiti, gerçek birimi  $(mg/L)_{gaz} / (mg/L)_{sıvı}$  olmasına rağmen, boyutsuz olarak düşünülür [Müller et al., 2002].

### 3.1.4.3. Toplam İtme Kuvveti

İtme kuvveti veya konsantrasyon farkı, gaz ve sıvı yığın fazlarındaki ölçülebilir konsantrasyonlar bakımından ifade edilirken, denklem (3.18)'deki ilk terim, hem sıvı hem de gaz katmanındaki transfere karşı direnç,  $R_L$  ve  $R_G$  sembolleriyle ifade edilir. Parantezin içerisindeki ilk terim, toplam transfer direncinin ( $R_T$ ) tersidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$J = \left[ \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G} \right]^{-1} \left( \frac{C_G}{H} - C_L \right) \quad (3.18)$$

$$R_T = R_L + R_G$$

veya (3.19)

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G}$$

Hem gaz hem sıvı faz dirençleri dikkate alınarak bulunan  $K_L$ , toplam sıvı film katsayısıdır. Her iki dirençteki göreceli kavram, sıvı filminden dolayı direnç ifadesi kullanılarak değerlendirilebilir.

$$\frac{\%R_L}{100} = \frac{R_L}{R_T} = \frac{K_L}{k_L} = \frac{1}{1 + \frac{1}{H \frac{k_G}{k_L}}} \quad (3.20)$$

Gaz faz direnci, oksijen ve nitrojen gibi tipik düşük çözünürlüklü bileşimlerde önemsizdir.  $K_L \cong k_L$ , oksijen transferi ve gaz tarafındaki direnç için ihmal edilebilir. Böylece türbülans ve karıştırma, sadece sıvı için uygulanabilirliğe sahiptir. Gaz fazındaki türbülansın tek etkisi, sıvı faz türbülansının neden olduğu arayüzeydeki kayma gerilmesi olacaktır [Müller et al., 2002].

#### 3.1.4.4. Sıvı Film Katsayısı

Sıvı film katsayısını tanımlayan çok sayıda teori vardır. Nernst tarafından 1904 yılında atılan ilk adım, gaz ve sıvı filmlerindeki durgun atıksuyu kullanan Lewis-Whitman'ın iki film teorisinden ibaret bir denklemdir. Bu teori, gaz ve sıvı fazların temas yüzeylerinde iki film teşekkül ettiği varsayımına dayanır. Biri gaz, diğeri sıvı olan bu iki film, gaz moleküllerinin sıvı kütlesine kolayca geçmesine karşı koyarlar. Moleküllerin geçiş hızı, kinematik vizkositeye bağlı olan bu film kalınlıkları ile ifade edilebilir [Ünal, 1978].

Sıvı film katsayısı, sıvı film kalınlığının  $\delta_L$  bir karakteristik fonksiyonu olarak aşağıda verilmiştir.

$$k_L = \frac{D}{\delta_L} \quad (3.21)$$

$\delta_L$  'nin öngörüsüz tahminlerinin elde edilebilirliğine rağmen, ısı transferindeki yüksek kütle transfer oranlarının etkisi gibi, eşzamanlı kimyasal reaksiyonlarla kütle transfer oranlarının öngörülmesi de yararlı olmuştur. 10 mikrondan 200 mikron kalınlığa kadar çeşitli konsantrasyon gradyanlarından oluşan çok sayıda tipik sıvı filmler, sıvı yığındaki türbülans seviyesine bağlıdır.

Sıvı türbülans parametrelerinin bir fonksiyonu olarak yüzey yenileme oranı  $r$ , bir karakteristik karıştırma uzunluğu  $l$  ve düşey hız dalgalanması  $\bar{v}$  ise denklem aşağıdaki gibidir.

$$r = \frac{\bar{v}}{l} \quad (3.22)$$

O'Connor, iki film teorisine benzer şekilde serilerde 2 direnç gibi oksijen transferi için toplam direnci tanımlamıştır. Viskoz bir laminar alt tabaka, arayüzey ve sıvı hacmi arasında bir türbülans karıştırma bölgesine çok yakındır.

$$\frac{1}{k_L} = \frac{1}{k_\delta} + \frac{1}{k_\tau} \quad (3.23)$$

Brumley ve Jirka, çalışmalarında yukarıdaki kavramsal modelleri, ince kalınlı sınır katmanlara benzer bir yöntemle türbülanslı karıştırma ile yığın içerisine sonradan taşınan ve moleküler yayınma ile bir sınır katmana giren eriyen gazın olduğu bir proses olarak tanımlamışlardır. Sıvı film katsayısının son zamanlardaki gelişimi, arayüze normal hız dalgalanması ve arayüzey yakınındaki hidrodinamikler olarak düşünülebilir. Girdap hareketini tanımlayan hidrodinamik modeller, düzgün yüzeylerle bağlantılı olarak geliştirilmiş ve arayüzey alanının olduğu havalandırma tanklarında kompleks durumlara açık olmadığı görülmüştür.

Açıkça görüldüğü gibi, tüm havalandırma sistem tipleri için uygun olabilecek sıvı film katsayısı için basit bir teorik ifade yoktur. Geliştirilmiş arayüzey alanı, arayüzeydeki hız profili ve hidrodinamikler, sisteme enerji girişinin bir fonksiyonu olacaktır. Böylece, toplam sıvı film katsayısıyla kombine edilen arayüzey alanı ve ampirik korelasyonlar, elde edilen bilgiler ışığında dizayn sistemleri için kullanılabilir [Müller et al., 2002].

## 3.2. Oksijen Transfer Uygulamaları

### 3.2.1. Temel Denklem

Oksijen doygunluk konsantrasyonu  $C_{\infty}^*$ , yığın gaz hacmi fazında konsantrasyonla beraber dengedeki (sonsuz bir zamanda) bir değer olarak belirlenir .

$$C_{\infty}^* = \frac{C_G}{H} \quad (3.24)$$

$$J = K_L (C_{\infty}^* - C_L) \quad (3.25)$$

Zamana bağlı olarak oksijen konsantrasyonundaki değişimin, hacim başına arayüzey alanıyla çarpılarak elde edilen denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L a (C_{\infty}^* - C_L) \quad (3.26)$$

Denklem (3.26), gerçek havalandırma sistemlerindeki oksijen transferini tanımlamak için kullanılan temel denklemdir. Çözeltideki erimiş oksijen konsantrasyonu sıfır olduğu zaman transfer oranı maksimum olur. Erimiş oksijen konsantrasyonu gaz fazıyla denge oluşturduğu zaman transfer oluşmaz.

Oksijen transfer katsayısı  $K_L a$ , sıvı film katsayısı  $K_L$ 'nin ürünüdür ve  $a$ , verilen sıvı bir hacimdeki transfere maruz kalan arayüzey alanıdır. En basit değerler olan  $K_L$  ve  $a$ 'nın tek başına ölçülmesi imkansızdır. Onları birleştiren tek katsayı  $K_L a$ , kompleks alanlı havalandırma sistemlerinde ölçülebilir bir değer elde etmek için şarttır.

Doygunluk değeri  $C^*$ , havalandırma sistemlerinde de ölçülebilen bir değerdir. Sıvı yüzeyindeki yığın atmosferik gaz konsantrasyonu ile dengedeki oksijen doygunluğunun tablo haline getirilmesine rağmen, havalandırma tankları içinde bu koşulların bulunması gerekli değildir. Gerçek değerler, sıvı boyunca artan gazın transfer prosesinden sonuçlanan gaz konsantrasyon hacminin azaltılması ve su altından gazın çıkışıyla artan basınçla özellikle difüze havalandırma sistemleri için etkilidir [Müller et al., 2002].

### 3.2.2. Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler

#### 3.2.2.1. Oksijen Doygunluğu

Denklem (3.24)' te doyma değeri için Henry kanununda kullanılan oksijen doygunluk değeri, hem oksijen gaz faz konsantrasyonu hem de Henry sabitinin bir fonksiyonudur. İdeal gaz kanunundan ,

$$C_G = \frac{nM}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (3.27)$$

Kuru hava için oksijen, hacim başına %20.95'tir. Böylece oksijen kısmi basıncı  $p$ , toplam basınç  $p_t$  ile ilişkilidir.

$$p = 0.2095(p_t - p_v) \quad (3.28)$$

Açık sistemler için buhar basıncı  $p_v$ , hem yüzey hem de yayınımla sıvı sıcaklığında doymuş varsayılır, gaz faz sıcaklığı buhar basıncı üzerinde etkili değildir. Yalnızca sıvı ve gaz faz sıcaklıklarında önemli farkların olduğu karıştırılmış kapalı sistemlerde gaz faz sıcaklığındaki buhar basınçları kullanılır.

Toplam basınç, hem barometrik basınç  $p_b$  hem de havalandırıcı batma derinliğiyle artan basınçla ilişkilidir.

$$p_t = P_b + p_{d_e} \quad (3.29)$$

Efektif basınç  $p_{d_e}$ , spesifik ekipman için alan bilgisi tarafından belirlenir.

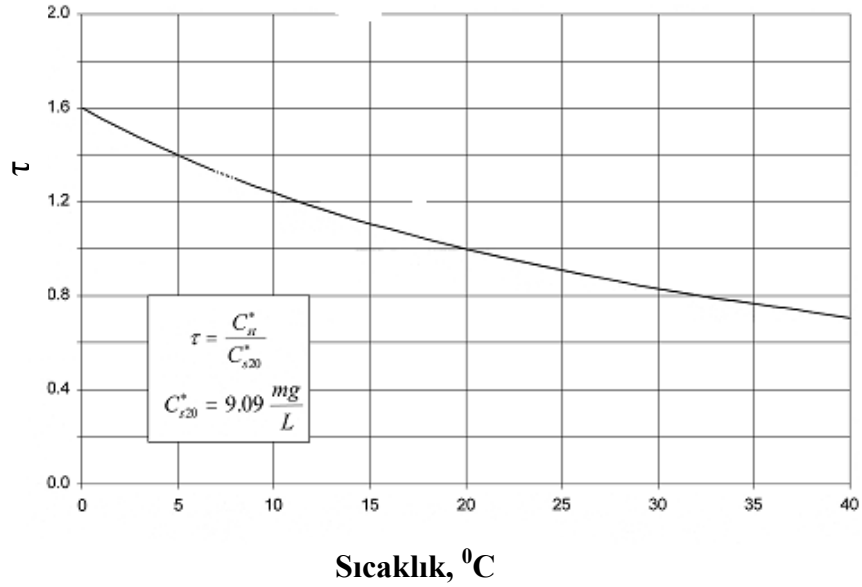
### 3.2.2.1.1. Sıcaklık

Henry kanunu sabiti  $H$ , oksijen doygunluk değerinde bir düşüşe neden olan çözünmüş katı konsantrasyonu ve sıcaklığın artmasıyla artar.

Belirlenen havalandırıcı performansında, 1 atm toplam basınç altındaki doygunluk değeriyle birlikte 20 °C standart bir koşul olarak kullanılır. Doyma değeri sıcaklık doğrulama faktörü  $\tau$ 'yle ilgili denklem aşağıda verilmiştir ve Şekil 3.7.'de gösterilmiştir [Müller et al., 2002].

$$\tau = \frac{C_{st}^*}{C_{s20}^*} \quad (3.30)$$

$$C_{s20}^* = 9,09 \frac{mg}{L}$$



**Şekil 3.7.** Sıcaklığın oksijen doygunluğu üzerindeki etkisi [Müller et al., 2002]

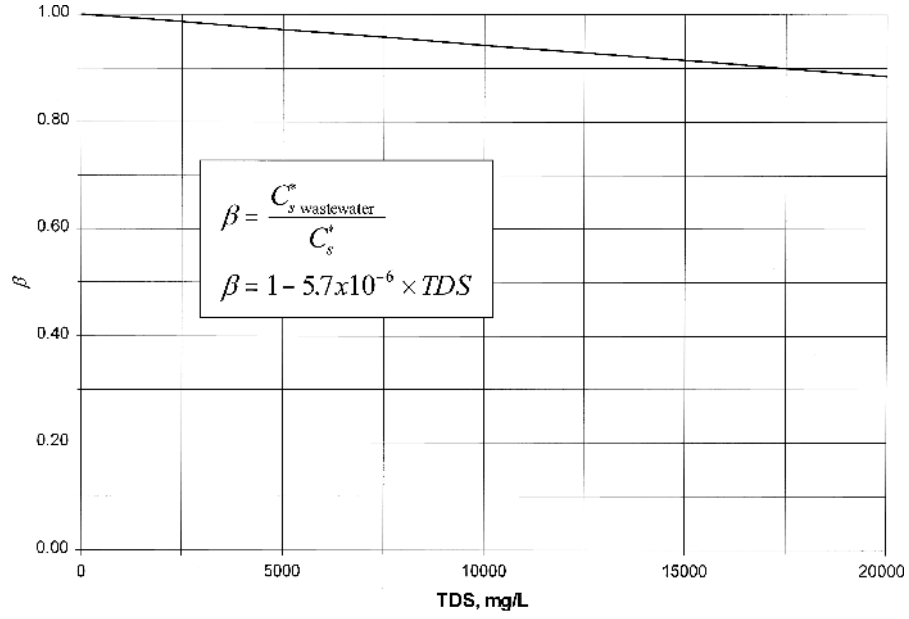
#### 3.2.2.1.2. Atıksu

Oksijen doygunluğundaki atıksuyun bütünü oluşturarak etkilerin hesabı için bir  $\beta$  atıksu özellikleri düzeltme faktörü, temiz su için atıksudaki doygunluk oranı olarak belirlenir. Atıksudaki tuzlar, partiküller ve yüzey aktif maddeler oksijenin çözünürlüğünü azaltır.  $\beta$ , 0.7 ile 0.98 arasında değişmekle beraber, atıksularda en yaygın kullanılan değeri 0.95'tir [Toprak, 2000].

$$\beta = \frac{C_{s_{wastewater}}^*}{C_s^*} \quad (3.31)$$

$$\beta = 1 - 5.7 \times 10^{-6} \times TDS \quad (3.32)$$

Kentsel atıksular için  $TDS < 1500 \text{ mg/L}$ 'de  $\beta$  çoğunlukla 0.99 olarak alınır. Kimyasal atık gibi endüstriyel atıksular için TDS'nin (toplam çözünmüş katı madde)  $10.000 \text{ mg/L}$ 'sinde  $\beta$ , 0.94 kadar düşük olacaktır [Müller et al., 2002]. Şekil 3.8.'de toplam çözünmüş katı maddelerin oksijen doygunluğu üzerindeki etkileri görülmektedir.



**Şekil 3.8.** Toplam çözünmüş katı maddenin (TDS) oksijen doygunluğu üzerindeki etkisi [Müller et al., 2002]

### 3.2.2.1.3. Batma Derinliği

20°C sıcaklık ve 1 atm basınç altındaki standart koşullarda oksijen doygunluğundaki batma derinliğindeki yayılım etkisi  $\delta$  aşağıda verilmiştir.

$$\delta = \frac{C_{\infty 20}^*}{C_{s 20}^*} = \frac{P_s + p_{d_e} - p_v}{P_s - p_v} \quad (3.33)$$

$\delta$  değeri ölçüldüğü zaman, efektif basınç belirlenebilir.

$$p_{d_e} = (\delta - 1)(P_s - p_v) = \gamma_w d_e \quad (3.34)$$

Efektif derinliği temsil eden  $d_e$  terimi, tipik olarak toplam batma derinliğinin  $d$  bir kesri olarak verilmiştir [Müller et al., 2002].

$$d_e = 0.4d \quad (3.35)$$

### 3.2.2.2. Oksijen Transfer Katsayısı, $K_L a$

Hem sıvı film katsayısı hem de arayüzey alanı boyunca oluşan transfer, havalandırma sistemindeki ekipmanının üretim tipi ve türbülans seviyesi tarafından

etkilenir. Temiz suda çalışan üreticilerin spesifik ekipmanlarından alınan veriler, 20 °C sıcaklıkta güç girişi veya gaz akışının bir fonksiyonu olarak tipik bir şekilde verilmiştir. Bu yüzden veri, havalandırma tankındaki sıcaklık ve atıksu öğelerinin hesaplanması için ayarlanmalıdır [Müller et al., 2002].

### 3.2.2.2.1. Sıcaklık

Gazların suda çözünürlüğü başta sıcaklık olmak üzere basınç, atıksuyun içerisindeki kirletici unsurlar gibi faktörlere bağlıdır. Sıcaklık arttıkça oksijenin çözünürlüğü azalır. Bu nedenle test şartlarında kullanılan 20 °C'lik sıcaklık değeri ile arazi şartlarındaki sıcaklık değeri kullanılarak transfer verimi düzeltilmelidir [Müller et al., 2002].

Sıcaklıkla artan  $K_L a$ 'daki artış, aşağıdaki bağlantılarda kullanılan sıvı film katsayısı ve yayılım üzerindeki etkilere benzer .

$$K_L a_t = K_L a_{20} \theta^{t-20} \quad (3.36)$$

Burada;

$K_L a_{(T)}$  :  $T$  °C için oksijen kütle transfer katsayısı (1/sn),

$K_L a_{(20^\circ C)}$  : 20 °C için oksijen kütle transfer katsayısı (1/sn),

$T^0$  : sıcaklık (°C) ve

$\theta$  : sıcaklık düzeltme faktörü (Değeri test şartlarına göre değişmekle beraber genel aralığı 1.015 ila 1.040 olarak verilmektedir. Hem difüze hem de yüzeysel mekanik havalandırma sistemleri için kullanılabilecek tipik değeri 1.024'tür [Toprak, 2000].

### 3.2.2.2.2. Atıksu

Atıksudaki çözünmüş organiklerin varlığının  $K_L a$  üzerindeki etkisi, diğer tüm faktörlerin birleşiminden çok daha önemli bir etkiye sahiptir. Deneysel olarak

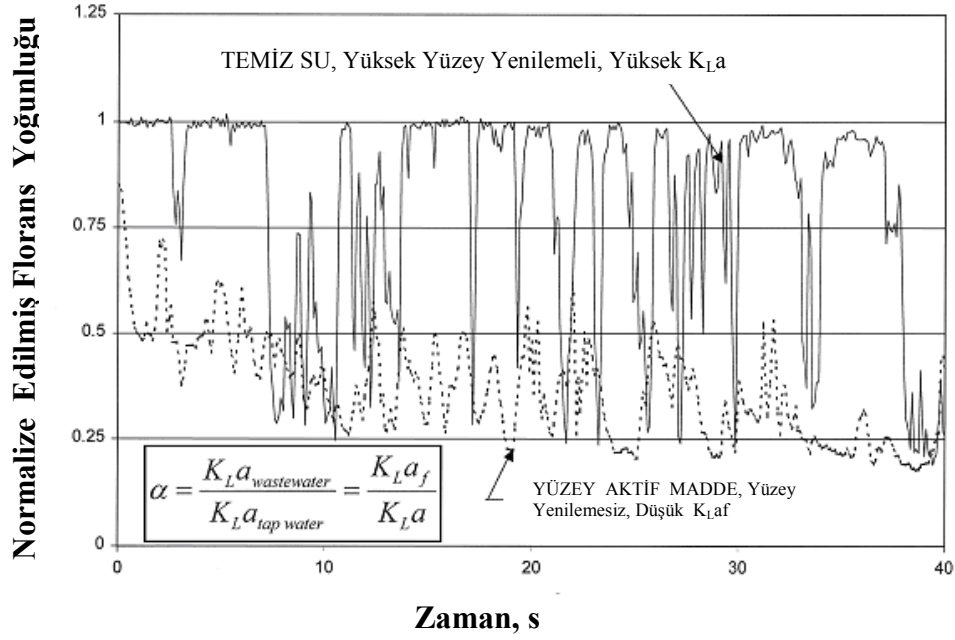
ölçülmüş bir parametre olarak  $\alpha$  karışım şiddeti ve havuz geometrisi düzeltme faktörü, atıksu etkilerinin hesabı için belirlenir [Müller et al., 2002].

$\alpha$  değeri, havalandırma sisteminin tipine, havuz geometrisine, karışım derecesine ve atıksuyun özelliklerine bağlıdır.  $\alpha$ , 0.3 ila 1.2 arasında değişmektedir. Difüze havalandırma sistemi için 0.4 ila 0.8, mekanik yüzeysel havalandırma sistemi için ise 0.6 ila 1.2 arasında seçilebilir. Testte kullanılan havuzun geometrisi ve kullanılan havalandırma sistemi arazi şartlarındakilerden farklı ise,  $\alpha$  dikkatle seçilmelidir [Toprak, 2000].

$$\alpha = \frac{K_L a_{wastewater}}{K_L a_{tapwater}} = \frac{K_L a_f}{K_L a} \quad (3.37)$$

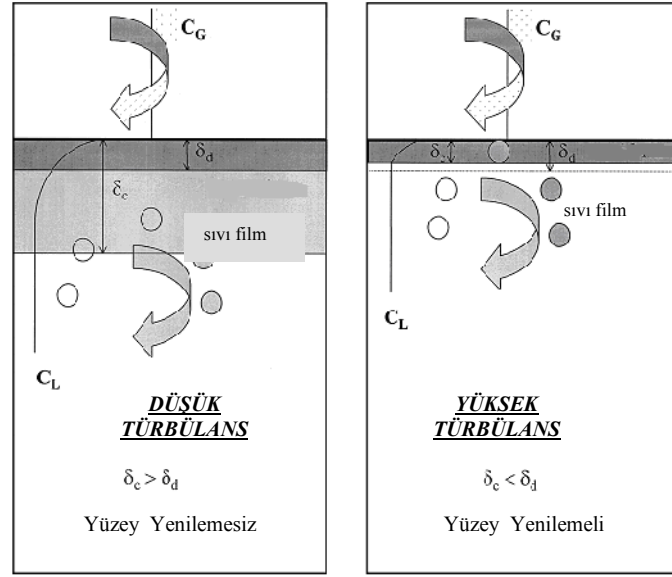
Yüzey aktif maddeler,  $K_L a$ 'yı sıvı film katsayısındaki azalmadan dolayı etkiler fakat yüzey gerilimindeki azalmadan dolayı yüzey alanında bir artış olur. Mancy ve Okun (1965)'a göre, oksijen transfer direnci su yüzeyinde viskoz bir hidrasyon tabakaya neden olur.

Asher ve Pankow (1991 a,b), farklı türbülans seviyelerinde dikey olarak titreşen gridli *yüzey floresans* (cisimler üzerine gelen belli dalga boyundaki dalgalanmalar) kullanarak, arayüzeyde yüzey aktif maddeli ve yüzey aktif maddesiz yüzey yenileme oranlarındaki farkı göstermiştir. Şekil 3.9.'da temiz su içerisindeki daha büyük frekans ve şiddetteki yüzey yenileme oranlarının yüzey aktif maddeninkiyle karşılaştırılması gösterilmiştir. Tipik olarak temiz su dataları için tepe noktası 1 değerine yaklaştığında, yüzey yenileme en yüksek dereceye ulaşır. Şekil 3.10. ve 3.11., türbülans ve yüzey aktif maddelerinin transfer prosesi üzerindeki etkilerini göstermektedir. Düşük türbülans seviyelerindeki temiz arayüzeyler için, yüzeye ulaşamayan yığın karışım, çevriye (girdap) neden olur. Sınır tabaka konsantrasyonu  $\delta_c$ , yayınan alt tabaka kalınlığı  $\delta_d$  (~40 mikron)'den daha büyüktür, bu yüzden yayınım, yığın çözücüye geri dönmeden önce girdabı doyurmak için yeterli zamana sahip değildir. Etki zamanı (~1 s) içinde doyma olduğunda girdap yüzeye ulaşır ve daha sonra yığın akış içerisinde karışır. Yayınma, girdap doygunluğu yüzeyden ayrılmadan önce yeterli zamana sahip olduğunda, bu türbülans seviyelerinde konsantrasyon sınır tabakası  $\delta_c$ , yayınan alt tabaka kalınlığı  $\delta_d$ 'den daha azdır.

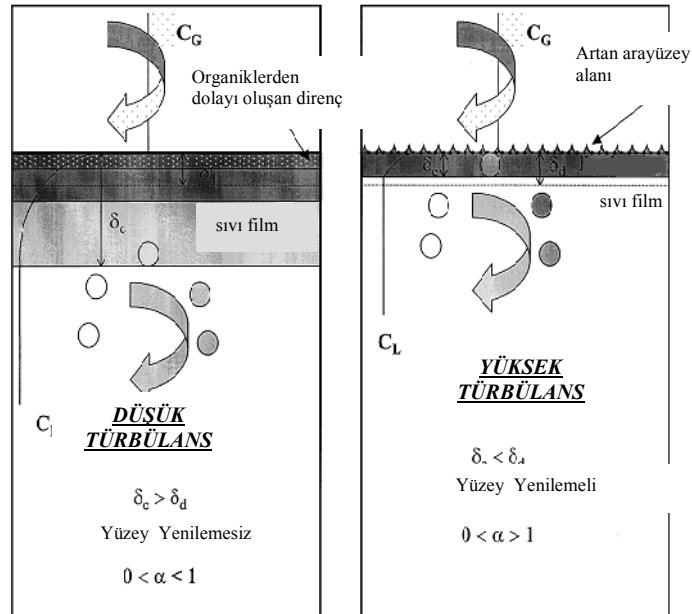


**Şekil 3.9.** Bir su yüzeyinde floresans ölçümü kullanılarak hız dalgalanmalarında , atıksuyun  $K_La$  üzerindeki etkisi [Müller et al., 2002]

Düşük türbülans seviyelerinde bir yüzey aktif maddesi varolduğunda, konsantrasyon profili daha büyük bir derinliğe ulaşır ve  $\delta_c$  artar. Temiz suyla kıyaslandığında ilave direnç, organiklerden dolayı transfer oranını düşürür. Yüzey aktif maddedeki sönümden dolayı türbülans hareketi boyunca arayüzeyde kayma gerilmesi artar. Konsantrasyon dalgalanmaları, grid sisteminin türbülans yoğunluğuna bakılmaksızın Asher ve Pankow'un alt tabaka yayınında asla gözlenmemiştir. Eckenfelder (1970), durgun veya laminar akış koşulları için oksijen transfer yığın direncinin yüksek olduğunu göstermiştir. Orta düzeyli bir aralıkta düşük türbülans koşulları, transfer için yığın direncini düşürür ve yüzey aktif madde arayüzey direnci, transfer oranında önemli bir düşüşe neden olur. Yüksek türbülans seviyelerinde yüzey yenilemeye bağlı oksijen transferi, arayüzey dirençleri içerisindeki yayınma tarafından önemli ölçüde etkilenmez. Bu koşullar altında, arayüzey alanındaki artıştan dolayı  $\alpha > 1$  olabilir (Şekil 3.11.).



Şekil 3.10. Türbülansın temiz sudaki  $O_2$  transferi üzerine etkisi [Müller et al., 2002]



Şekil 3.11. Türbülansın atıksudaki  $O_2$  transferi üzerine etkisi [Müller et al., 2002]

### 3.2.2.3. Sıvı Yığındaki Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonu, $C_L$

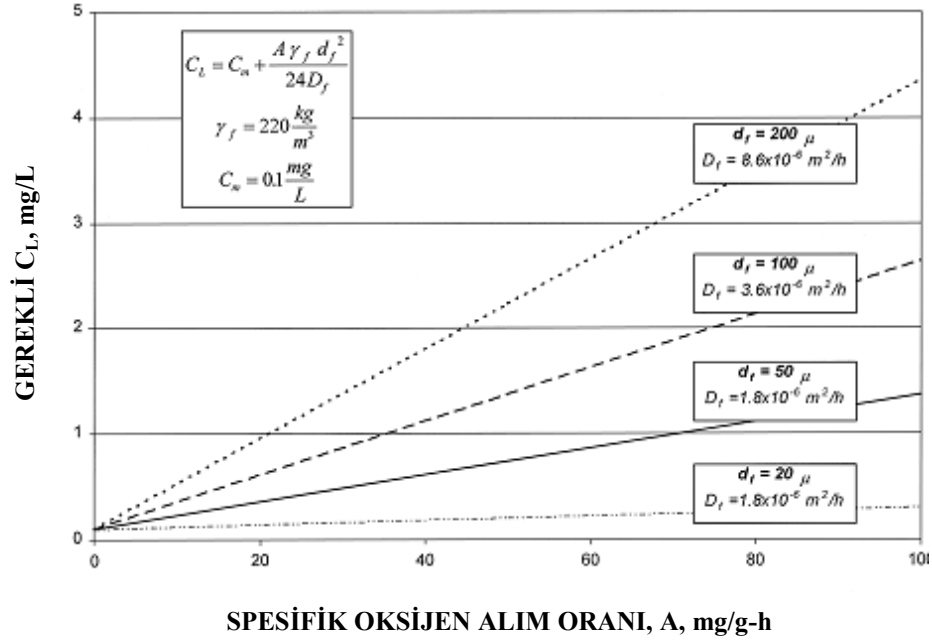
Bir  $C_L$  değeri tayininde iki faktör düşünülebilir: birinci faktör maksimum oksijen kullanım oranını korumak için aktif çamur tarafından minimum çözünmüş oksijen konsantrasyonu, ikinci faktör ise organik yol varyasyonları ve akıştan dolayı değişen oksijen istekleri.

Aktif çamur, biyolojik yumak partiküllerinde çoğunlukla var olan mikroorganizmalardan oluşur.

Floktaki uniform oksijen alım oranı (OUR) varsayılarak flok yüzeyinden küresel floğun merkezine kadar çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki düşüş aşağıda verilmiştir.

$$C_L = C_m + \frac{A\gamma_f d_f^2}{24D_f} \quad (3.38)$$

Daha büyük flok partikülleri ve daha yüksek oksijen oranları gerektiren daha yüksek çözünmüş oksijen değerleri Şekil 3.12’ de verilmiştir.



**Şekil 3.12.** Aktif çamur kütle transfer direncinin gerekli oksijen konsantrasyonu üzerindeki etkisi [Müller et al., 2002]

### 3.3. Dizayn Denklemleri

Havalandırma sistemlerinin dizaynında, analiz için kullanılan temel denklem (3.26)'da verilmişti. Havalandırma ekipmanları için spesifikasyonlar, Tablo 3.1. (ASCE, 1991; ATV, 1996)'deki koşullar altında temiz su verileri için temel olarak verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Havalandırma ekipmanları için spesifikasyonlar [Müller et al., 2002]

| PARAMETRE         | U.S. KULLANIM KOŞULLARI                                                                                | AVRUPA KULLANIM KOŞULLARI                                                                   |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Su tipi           | Temiz su                                                                                               | Temiz su                                                                                    |
| Su sıcaklığı      | 20 °C                                                                                                  | 20 °C                                                                                       |
| C <sub>L</sub>    | 0 mg/L                                                                                                 | 0 mg/L                                                                                      |
| Barometrik basınç | 1 atm                                                                                                  | 1 atm                                                                                       |
| Hava akışı        | 20 °C ve %36 bağıl nem<br>$\gamma=0.075 \text{ lb hava/ft}^3$<br>$=0.01736 \text{ lb O}_2/\text{ft}^3$ | 0 °C ve %0 bağıl nem<br>$\rho=1.293 \text{ kg hava/m}^3$<br>$=300 \text{ g O}_2/\text{m}^3$ |

#### 3.3.1. Standart Oksijen Transfer Oranı, SOTR

Standart oksijen transfer oranı (*SOTR*), standart koşullarda verilen bir su hacmi içerisinde birim zaman başına transfer edilen oksijen kütlesidir. Avrupa literatüründe bu terim “*oksijenleşme kapasitesi (OC)*” olarak adlandırılır.

$$SOTR = V \left( \frac{dC_L}{dt} \right)_{STD} = K_L a_{20} C^*_{\infty 20} V \quad (3.39)$$

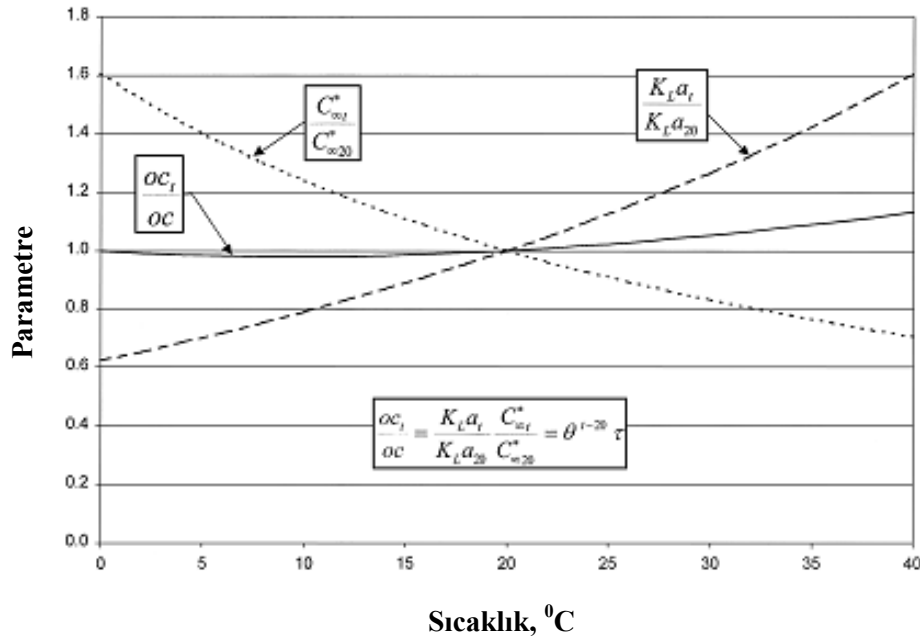
Not olarak; standart koşullar altında çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0 olarak alındığında, transfer için maksimum itme gücü sağlanmış olur [Müller et al., 2002].

### 3.3.2 Spesifik Oksijenlenme Kapasitesi, OC

Havalandırma tankındaki oksijen konsantrasyonundaki değişim oranı dizaynı için bu parametre çoğunlukla Avrupa literatürlerinde kullanılır.

$$OC = \left( \frac{dC_L}{dt} \right)_{STD} = K_L a_{20} C_{\infty 20}^* V = \frac{SOTR}{V} = SOTR_V \quad (3.40)$$

Bu parametre, sistemin “oksijen alım oranı (OUR)” yla aynı birime sahiptir ve sistemdeki reaksiyon oranı hakkında bir fikir verir. Not olarak; hem  $K_L$  hem de  $C_{\infty}^*$ , sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ilk önce artar ve daha sonra azalır. Herhangi bir sıcaklıktaki spesifik oksijen kapasite oranı belirlendiğinde, bu ürünlerdeki sıcaklığın etkisi Şekil 3.13.’de gösterildiği gibi çok daha düşüktür ve oksijen doyma değeri veya oksijen transfer oranından da daha düşüktür [Müller et al., 2002].



**Şekil 3.13.** 0 °C’de çözülmüş oksijen konsantrasyonunun oksijen transfer sıcaklığı üzerindeki etkisi [Müller et al., 2002]

$$\frac{oc_t}{oc} = \frac{K_L a_t}{K_L a_{20}} \frac{C^*_{\infty t}}{C^*_{\infty 20}} = \theta^{t-20} \tau = \frac{OTR_V}{SOTR_V} \quad (3.41)$$

### 3.3.3. Standart Havalandırma Verimi, SAE

Standart havalandırma verimi ( $SAE$ ), ya geciktirme ( $DP$ ) veya kablo gücü ( $WP$ ) ne dayanan güç girişi başına oksijen transfer oranıdır.

$$SAE = \frac{SOTR}{WP} \quad (3.42)$$

Tüm havalandırma cihazları için elektrik gücü, çoklufaz wattmetresi kullanılarak tam olarak ölçülebilir [Müller et al., 2002].

### 3.3.4. Standart Oksijen Transfer Verimi, SOTE

Giderilen birim BOİ başına kullanılan hava miktarı bir tesisten diğerine çok büyük bir değişim gösterdiğinden, tesisler arasında oksijen transfer verimlerinin kıyaslanması son derece yanıltıcıdır. Havuzun bir kenarında gereğinden çok fazla miktarda verilen hava, oksijen transfer veriminin azalmasına ve hatta kısa çevriler yaratarak net transfer hızının azalmasına neden olabilir. Bunun sonucunda oluşacak çok iri hava kabarcıkları havuzda yeterli süre kalamayacak ve hızla yüzeye yükseleceklerdir [Toprak, 2000].

Standart oksijen transfer verimi ( $SOTE$ ), standart koşullarda sıvı içerisinde çözünen veya transfer edilen havalandırma tankları için sağlanan oksijenin bir kısmıdır. Havalandırma sisteminde yayınan asıl dizayn parametresidir.

$$SOTE = \frac{SOTR}{w_0} \quad (3.43)$$

Kuru havadaki oksijen kütle kesri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{w_0}{w} = 0.2095 \frac{mol O_2}{mol hava} \times 32 \frac{g O_2}{mol O_2} \times \frac{mol hava}{28.964 g hava} = 0.2315 \frac{g O_2}{g hava} \quad (3.44)$$

oksijen miktarı oranı kullanıldığında ;

$$w_0(kg / h) = 0.2315 \times 1.293 G_s = 0.30 G_s (m^3_N / h)$$

$$w_0(lb / h) = 0.23 \times 0.075 G_s \times 60 \frac{\min}{h} = 01.04 G_s (scfm) \quad (3.45)$$

olur. Denklem (3.44) içerisinde kullanılan  $SOTE$ , gaz akışının bir fonksiyonu olarak sağlanmıştır [Müller et al., 2002].

$$SOTE = \frac{SOTR(kg / h)}{0.30 G_s (m^3_N / h)}, \quad SOTE = \frac{SOTR(bkg / h)}{1.04 G_s (scfm)} \quad (3.46)$$

## 4. MEKANİK YÜZEYSEL HAVALANDIRMA SİSTEMİNİN TASARIMI

Mekanik yüzeysel havalandırıcılar  $\text{kg O}_2/\text{kWh}$  birimi ile tanımlanan oksijen transfer hızları ile kategorize edilirler. Üretici firmalar tarafından genelde,  $20\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığa ve  $0.0\text{ mg/L}$  başlangıç çözülmüş oksijen konsantrasyonuna sahip temiz su kullanılarak test edilirler. Çözülmüş oksijen konsantrasyonunun sıfıra indirilmesinde sodyum sülfid kullanılır. Test ve ölçümler doğal olarak kararsız şartlarda yürütülür. Günümüzde piyasada üretilen yüzeysel havalandırıcıların oksijen transfer verimleri genelde  $1.20$  ila  $2.40\text{ kg O}_2/\text{kWh}$  arasında değişir. Değişik tip yüzeysel havalandırıcıların oksijen transfer verimleri Tablo 4.1’de özetlenmiştir.

**Tablo 4.1.** Mekanik havalandırıcıların oksijen transfer verimleri ( $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ ) [Toprak, 2000]

| Havalandırıcı tipi                                                                                                                         | Standart şartlarda<br>(a) | Arazi koşullarında<br>(b) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Yüzeysel, düşük devirli                                                                                                                    | 1.20 - 3.00               | 0.70 - 1.50               |
| Yüzeysel, düşük devirli, yükseltme tüplü                                                                                                   | 1.20 - 2.80               | 0.70 - 1.30               |
| Yüzeysel, yüksek devirli                                                                                                                   | 1.20 - 2.20               | 0.70 - 1.20               |
| Yüzeysel, aşağı emme tüplü                                                                                                                 | 1.20 - 2.40               | 0.60 - 1.20               |
| Batık türbin, serpicili                                                                                                                    | 1.20 - 2.00               | 0.70 - 1.10               |
| Batık pervane                                                                                                                              | 1.20 - 2.40               | 0.70 - 1.10               |
| Yüzeysel, fırça veya bıçak tip                                                                                                             | 0.90 - 2.20               | 0.50 - 1.10               |
| (a) : Temiz su, $20\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık, $760\text{ mm Hg}$ basınç, başlangıç DO değeri $0.0\text{ mg/L}$                      |                           |                           |
| (b) : Atıksu, $15\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık, $150\text{ m}$ yükselti, $\alpha = 0.85$ , $\beta = 0.90$ , DO değeri $2.0\text{ mg/L}$ |                           |                           |

**Tablo 4.2.** Düşük devirli yüzeysel havalandırıcılar için  $\alpha$  faktörleri [Toprak, 2000]

| Atıksu tipi           | Giriş BOİ <sub>5</sub><br>(mg/L) | Çıkış BOİ <sub>5</sub><br>(mg/L) | Giriş $\alpha$ | Çıkış $\alpha$ |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|
| Evsel atıksu          | 180                              | 3                                | 0.82           | 0.98           |
| Kağıt ve kağıt hamuru | 187                              | 50                               | 0.68           | 0.77           |
| “Kraft” kağıdı        | 150 - 300                        | 37 - 48                          | 0.48-0.68      | 0.70-1.10      |
| Ağartılmış kağıt      | 250                              | 30                               | 0.83-1.98      | 0.86-1.00      |
| İlaç sanayi           | 4,500                            | 380                              | 1.65-2.15      | 0.75-0.83      |
| Sentetik elyaf sanayi | 5,400                            | 585                              | 1.88-3.25      | 1.04-2.65      |

Tasarım mühendisi, aşağıdaki eşitliği kullanarak, test koşullarında elde edilen oksijen transfer verimini arazi koşullarına dönüştürmelidir:

$$N = (\alpha)(N_0) \left[ \frac{(\beta)(C_{\infty 20}^*) - C_L}{C_{S20}} \right] (\theta)^{T-20} \quad (4.1)$$

$N$  ve  $N_0$ : sırası ile, arazi koşullarında ve standart şartlardaki oksijen transfer verimleri (kg O<sub>2</sub>/kWh),

$\alpha$  : atıksu için oksijen transfer düzeltme faktörü (Tablo 4.2.),

$\beta$  : tuzluluk-yüzey gerilim düzeltme faktörü (= 1),

$C_{\infty 20}^*$  : verilen sıcaklık ve yükselti için temiz sudaki çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu (mg/L),

$C_{S20}$  : 20 °C’de temiz sudaki çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu (mg/L),

$C_L$  : işletme koşullarındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu (= 2 mg/L olarak önerilmektedir),

$\theta$  : sıcaklık düzeltme terimi (= 1.024) ve

$T$  : atıksu sıcaklığı (°C).

## 4.1. Karışım İçin Enerji Gereksinimi

Mekanik yüzeysel havalandırıcıların etkin bir karışım sağlayabilmesi havalandırma havuzunun büyüklüğüne ve biçimine bağlıdır. Havalandırma havuzları kare veya dikdörtgen planlı olabilirler ve bir havuzda birden fazla sayıda yüzeysel mekanik havalandırıcı kullanılabilir. Yüzeysel havalandırıcılar için havuz derinliği ve genişliği Tablo 4.3.'te verilen havalandırıcı özelliklerine bağlıdır. Yaklaşık 11 m'ye varan havuz derinlikleri, batık yükseltme tüpüne sahip havalandırıcılar için uygulanabilmektedir.

**Tablo 4.3.** Yüzeysel havalandırıcıların gücüne bağlı olarak havuz boyutları [Toprak, 2000]

| Havalandırıcı gücü (kW) | Derinlik (m) | Genişlik (m) |
|-------------------------|--------------|--------------|
| 7.5                     | 3.0 - 3.6    | 10.0 - 12.0  |
| 15.0                    | 3.6 - 4.2    | 10.5 - 15.0  |
| 22.5                    | 3.9 - 4.5    | 12.0 - 18.0  |
| 30.0                    | 3.6 - 5.1    | 13.5 - 19.5  |
| 37.5                    | 4.5 - 5.4    | 13.5 - 22.5  |
| 56.0                    | 4.5 - 6.0    | 15.0 - 25.5  |
| 75.0                    | 4.5 - 6.0    | 18.0 - 27.0  |

Mekanik yüzeysel havalandırıcılar için karışım amacı ile gerekli birim güç, havuz, tank veya lagünün geometrisine ve yüzeysel havalandırıcı tasarımına bağlı olarak 20 ila 40 W/m<sup>3</sup>'tür [Toprak, 2000].

## 4.2. Tasarım Parametreleri

Havalandırma havuzundaki MLSS konsantrasyonunu tasarımda seçilen değerde tutmak için uygulanacak geri çevrim oranı aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır:

$$R = \frac{Q_R}{Q_{TASARIM}} \quad (4.2)$$

Burada,

$R$  : geri çevrim oranı ve

$Q_R$  : geri çevrim debisi ( $m^3/gün$ ).

$Q_{TASARIM}$  : tasarım debisi ( $m^3/gün$ ).

Geri çevrim debisi aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$(X_R)(Q_R) = (M)(Q_{TASARIM} + Q_R) \quad (4.3)$$

Burada,

$X_R$  : havalandırma havuzuna geri gönderilen MLSS konsantrasyonu (mg/L).

$X_R$ , emniyetli bir tasarım için genelde 150 mL/g olarak alınan çamur hacim indeksi ( $\dot{CHI}$ ) ile aşağıdaki eşitlik uyarınca hesaplanabilir:

$$X_R = \frac{10^6}{\dot{CHI}} \quad (4.4)$$

Sistemden uzaklaştırılması gereken fazla çamur miktarı,

$$Q_W = \frac{(V_{AT})(M)}{(\theta_C)(X_R)} \quad (4.5)$$

ifadesi ile saptanabilir. Burada,

$\theta_C$  : çamur yaşı (gün) dır.

$V_{AT}$  : Havalandırma havuzu hacmi ( $m^3$ )

$M$  : Havalandırma havuzundaki MLSS konsantrasyonu (mg/L)

Büyüme verimi,

$$Y_0 = \frac{Y}{1 + (\theta_C)(k_D)} \quad (4.6)$$

Burada;

$k_D$  : düzeltme faktörüdür.

uçucu çamur miktarı ise,

$$P_X = (Y_0)(Q_{TASARIM})(C_{BOI-5,GIRIS} - C_{BOI-5,CIKIS,COZUNMUS}) \quad (4.7)$$

denklemleri ile tanımlanmaktadır.

Burada,

$C_{BOI-5,GIRIS}$  : ön çökeltme havuzuna giren  $BOI_5$  konsantrasyonu

$C_{BOI-5,CIKIS,COZUNMUS}$  : Ön çökeltme havuzunda gerçekleşen  $BOI_5$  giderim oranı

## 5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

### 5.1.Giriş

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), İngilizcesi “*Computational Fluid Dynamics (CFD)*”, Akışkanlar Mekaniği konusunun bir alt dalı olarak günümüzde değerlendirilmektedir. HAD metodu, akışkandan kaynaklı problemlerin nümerik algoritmalar ile çözüm yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Özellikle 1990’lardan sonra HAD metodu kullanımının giderek arttığı gözlenmektedir. Bunun ana sebepleri, bilgisayarların günden güne kapasitelerinin artması, deney ve test düzeneklerinin yüksek maliyeti ve deney ve test ile ürün tasarımının sürecinin uzun süreler tutmasıdır.

Genel olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, her türlü akışkan ve akışın değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak üç ana denklem (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınır ve bu denklemler sayısal çözümlerle akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağlı olarak birçok veriye ulaşılır [MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi, 2006].

HAD metodu, bilindiği üzere genel olarak Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi ile çalışmaktadır. Navier-Stokes denklemleri özellikle viskoz etkileri modellediğinden bu denklemler çoğunlukla ticari yazılımların ana denklemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Navier-Stokes haricinde ayrıca viskoz etkileri içermeyen ve ideal akışkan olarak kabul edilebilecek bazı akış problemlerinde Euler denklemleri de kullanılabilir. Euler çözümü daha az işlem kullandığından (herhangi bir türbülans modeli kullanmadığından) Navier-Stokes çözümünden daha kısa sürelerde analizi sonuçlandıracaktır.

HAD metodunda öncelikle akışkan hacmi ve katı hacim birbirinden ayrılarak daha küçük elemanlara bölünmektedir. Bu elemanların oluşturduğu hacime *grid* adı verilmekte olup, çözümün doğruluğunu etkileyen en önemli parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle iki yöntem ile bu grid oluşturulabilir. Öncelikle

günümüzdeki çoğu ticari yazılımın kullandığı Sonlu Hacim Yöntemi (SHY) ve genellikle daha özel çözümler için kullanılan Sonlu Eleman Yöntemidir (SEY).

Sonlu Hacimler Yönteminde, grid elemanları birbirinden ayrık kontrol hacimlerdir. Bu hacimlerde ve hacmin yüzeyleri üstünde Navier-Stokes denklemleri çözülür. Bu yöntemde çözümün yakınsaması ve ıraksaması elemanların düzgünlüğüne göre değişmektedir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde, Navier-Stokes denklemleri Sonlu Elemanlar Yöntemine göre modifiye edilmiştir. Sonlu Hacimler Yöntemine göre daha kararlı bir çözüm sunabilmesine rağmen grid elemanlarının çok düzgün bir şekilde oluşturulması gerekmekte ve Sonlu Hacimler Yöntemine göre daha fazla zaman ve bellek kullanmaktadır. Bu yöntemlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

### **5.1.1. Sonlu Hacimler Yöntemi**

Sonlu Hacimler Yöntemi, 1970'lerin başlarında geliştirilmiştir. Sonlu Hacimler Yöntemi, cebirsel denklem formunda kısmi diferansiyel denklemleri temsil eden ve ölçen bir metottur [LeVeque, 2002 and Toro, 1999]. Aynı zamanda hacim korunum kanunlarının çeşitli tiplerinin (eliptik, parabolik veya hiperbolik gibi) nümerik simülasyonunu en uygun ayarlayan yöntemdir. Akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle transferi veya petrol mühendisliği gibi pek çok mühendislik alanında yaygın bir biçimde kullanılır. Sonlu Hacim Yönteminin önemli özelliklerinden çoğu Sonlu Elemanlar Yöntemininkilere benzerdir. Yapılandırılmış veya yapılandırılmamış ağlar kullanılarak rastgele geometrilerde kullanılabilir. Buradan Sonlu Hacimler Yönteminin bir avantajı, yapılandırılmamış ağlara kolaylıkla formüle edilebilmesidir. Değerler, ağ (mesh) geometrisi üzerinde ayrık yerleşimlerde hesaplanır. Sonlu hacim, bir ağ üzerindeki her düğüm noktasını çevreleyen küçük hacimleri ifade eder. Sınır hacimler, komşu grid noktalar kullanılarak oluşturulur [Patankar, 1980]. Sonlu Hacimler Yönteminde, kısmi diferansiyel denklem içerisinde bir ıraksama terimi içeren hacim integraller, ayrıklık teoremi kullanılarak yüzey integrallere dönüştürülür. Bu terimler, her bir sonlu hacim yüzeyinde akılar olarak değerlendirilir. Çünkü verilen bir hacme giriş yapan akış, komşu hacimden ayrıldığı için özdeştir, bu metodlar korunumludur dolayısıyla Sonlu Hacimler Yöntemi, lokal olarak korunumludur çünkü bir denge yaklaşımına dayanmaktadır. Lokal bir denge

sıklıkla “*kontrol hacmi*” olarak adlandırılan her bir ayrık hücre üzerine yazdırılır; ayrıklık formülü, akışın kontrol hacmi sınırı üzerindeki integral formülüyle oluşturulur. Sonlu Hacimler Yöntemi, pek çok Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği paketlerinde kullanılmaktadır [Eymard et al., 2006].

Sonlu Hacimler Yöntemi, korunum kanunlarının ayrıklaştırılmasında kullanılır. Genel korunum kanunu olarak adlandırılan ve kısmi diferansiyel denklemlerle temsil edilen bu denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot f(u) = 0 \quad (5.1)$$

Burada  $u$ , bir vektörün durumunu temsil etmekte,  $f$  ise akış tansörüyle ilgili bir ifadedir. Sonlu hacim veya hücreler içerisindeki boyutsal bölgeler bir kez daha bölünebilir. Bir partikül hücre  $i$  için toplam hücre hacmi  $v_i$  aracılığıyla integral hacmi alınabilir.

$$\int_{v_i} \frac{\partial u}{\partial t} dv + \int_{v_i} \nabla \cdot f(u) dv = 0 \quad (5.2)$$

İntegrali alınan birinci terimden hacim ortalaması elde edilir ve ikincisine ise ıraksama teoremi uygulandığında ifade,

$$v_i \frac{d\bar{u}_i}{dt} + \oint_{S_i} f(u) \cdot n dS = 0 \quad (5.3)$$

şeklini alır. Burada  $S_i$ , hücrenin toplam yüzey alanı ve  $n$ , yüzeye normal bir birim vektördür. Böylece genel sonuç denklemi aşağıdaki gibi temsil edilir.

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} + \frac{1}{v_i} \oint_{S_i} f(u) \cdot n dS = 0 \quad (5.4)$$

Tekrarlanan kenar akışları için değerler, hücre ortalamalarının interpolasyonu veya ekstrapolasyonu ile yeniden oluşturulabilir. Gerçek nümerik şema, problem

geometrisine ve ağ yapısına bağlı olacaktır. Sonlu hacim şemaları, kenar akışlar boyunca hücre ortalamaları değişimi olarak korunumludur [Toro, 1999].

### 5.1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, esasen yapısal dinamik problemler için 1940 ve 1960 yılları arasında geliştirilen kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan güçlü bir metottur.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen veya fonksiyonel minimizasyonu olarak formüle edilebilen problemleri çözmek için kullanılan nümerik bir tekniktir. İlgilenilen bölge (domain) “*sonlu eleman topluluğu*” olarak gösterilmektedir. Sonlu elemanlardaki yaklaşık fonksiyonlar, araştırılan fiziksel alanın nodal değer terimlerinde belirlenmektedir. Sürekli fiziksel problem, bilinmeyen nodal değerli kesikli sonlu eleman problemine dönüştürülmektedir. Bu yöntemin uygulanması için basit yaklaşım fonksiyonları oluşturulmalıdır. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle, katı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi gibi alanlarda karşılaşılır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere, düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere, kararlı hal, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine ve lineer ve lineer olmayan problemlere uygulanır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, bölge değişimleri, giriş bölgeleri üzerindeki istenilen tahmin değişkenleri veya düzgünlük kayıplarının çözümlerinde olduğu gibi komplike edilmiş bölgeler aracılığıyla kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için iyi bir seçimdir [Pelosi, 2007].

## 5.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)’nin Atıksu Arıtma Sistemlerinde Kullanımı

Atıksu ve içme suyu arıtma tesisleri merkezi alt yapı sistemlerinin önemi yakın gelecekte çok önemli miktarda artmış olacaktır. Arıtma tesislerinin mümkün olduğu kadar verimli çalıştırılması hedeflenerek projelendirilmeleri önemlidir. Bu sektördeki artan canlılık, deneyimli tasarımcılar üzerinde baskı oluşturmaktadır.

Verimli bir tasarım oluşturmak ve aynı zamanda var olan sistem ekipmanlarını denetlemenin bir yolu modern bilgisayar yöntemlerinin kullanılmasıdır.

Bütün içme suyu ve atıksu arıtma tesisi tasarımında dikkat edilen en önemli faktörlerden bir tanesi su akımıdır. Bazı prosesler tam karışmış bir akım gerektirirken (aktif çamur tesisleri, kimyasal dozlama üniteleri ve anaerobik yoğunlaştırıcılar), bazı prosesler piston akım gerektirmektedir (kum filtreleri, durultucular, ozonlama, aktif karbon ve iyon değişimi yöntemlerini kapsayan adsorpsiyon üniteleri ve DAF ünitesi).

Daha önce yapılan çalışmalarda tanımlanan bazı tekniklerle ekipmanlar içerisindeki bütün akım dağılımı belirlenebilmiştir. Fakat bu teknikler, elverişsiz akımlardan kaynaklanan problemlerin tespitine yönelik olup, problem çözücü teknikler değildir. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modellemesi, hem problem tespiti yapmakta hem de problemi çözmek için uygulanabilir yöntemler hakkında bize fikir vermektedir. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanılarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri bilgisayar ortamında sayısal olarak çözülmekte ve akış ile ilgili bazı parametrelerin dağılımlarının elde edilmesine de olanak sağlamaktadır.

HAD modellemesi, su proseslerindeki hidrolik durumun daha iyi bir şekilde anlaşılabilceği çok güçlü bir araçtır. HAD modellemesi, su ve atıksu tesislerinin işletmesinin ve dizaynının geliştirilmesinde kullanılabilmektedir. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modellemesi, hem problem tespiti yapmakta hem de problemi çözmek için uygulanabilir yöntemler hakkında fikir vermektedir. Bu model özellikle reaktör, filtrasyon, eşanjör ve kimya endüstrisi içerisinde yer alan diğer ekipmanların modellemesi için geliştirilmiştir. HAD modellemesi, geometri içerisinde akımın 3 boyutlu hareketini tahmin edebilmektedir.

Her üründe olduğu gibi arıtma tesisi ekipmanları için de tasarlanan ürünün performansının henüz tasarım aşamasındayken bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sayede performans düşüren etkenler tasarım aşamasında elimine edilerek optimum performansa sahip ürünler elde edilebilmektedir. Bunun için her tasarımın istenilen performansı verip vermediği deneyler yardımıyla belirlenebilmekte ve eğer istenilen performans elde edilemiyorsa tasarım değişikliğine gidilmektedir. Bu

döngü, istenilen performansı veren ürün elde edilinceye kadar devam etmektedir. Ancak bu işlemler, her seferinde prototip üretme gerekliliği nedeniyle, zaman alıcı ve yüksek maliyetli olabilmektedir. Ayrıca ürün, belirlenen performansı sağlayamıyorsa performans kaybına neyin sebep olduğunu anlamak klasik deneylerde her zaman çok kolay olmayabilmektedir. Bu durumda performans artırımı için yapılması gereken değişikliklere karar vermek oldukça zorlaşmakta ve bir deneme-yanılma sürecine girilerek tasarımın hem süresi uzamakta hem de maliyeti artmaktadır. HAD kullanarak ürün performansının belirlenmesi ise beraberinde bir takım avantajları da getirmektedir. Bunlardan ilki ürün testi için prototip yapma zorunluluğunun ortadan kaldırılmasıdır. Tasarım tamamen bilgisayar ortamında yapılmakta ve test edilmektedir, dolayısı ile prototip imali için bir yatırıma gerek kalmamaktadır. Bunun yanında yapılan HAD analizleri sonucunda akış alanı tümüyle belirlendiğinden performansı kötü yönde etkileyen unsurlar rahatlıkla saptanıp yapılacak iyileştirmelere kolaylıkla karar verilebilmektedir. Böylece deneme yanılma yöntemine nazaran çok daha kısa sürede nihai ürüne erişilebilmektedir. Hatta akış alanındaki tüm detaylar incelenerek ürün performansının daha da artırılması sağlanabilir [Demiröz ve Budak, 2007].

Bilindiği gibi, kurulu arıtma tesislerinin iyileştirilmesi gittikçe önem kazanmaktadır. Bir aktif çamur tankının karışma karışım özellikleri çok önemlidir. Çünkü bu özellikler hem arıtma verimini hem de çamurun çökelme karakteristiğini etkilemektedirler [Toprak, 2000].

Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler ve yeni nesil yüksek verimli bilgisayar programlarının geliştirilmesi, her tür geometriye sahip aktif çamur reaktörleri ve diğer arıtma ünitelerini de dahil, bu reaktörler içerisindeki gerçek akışkan akımını simule etmeyi mümkün kılmıştır.

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanımı birçok alanda karşımıza çıkar.

**Enerji üretimi:** Enerji üreten sistemler; yanma, ısı transferi, türbülans ve gaz partiküllerinin etkileşimine bağlı karışmış akım fenomeni ve gaz partikülleri ile ilgilidir. HAD, bu sistemlerde kullanılarak, ısı transfer oranı, yanma oranı, akım ve

partikülün iletilme oranı belirlenir. Bu bilgiler daha sonra iyileştirilmesi ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi için kullanılır.

**Hidrodinamik:** Denizaltıların projelendirilmesi için geometrinin ölçekli şekli ve tankların su içindeyken yapılması gereken bazı testler çok önemlidir. Modelin sürüklenme ve su içerisinde kaldırma sonuçları Reynolds ve Froude sayılarının karşılaştırılmasının zorluğundan dolayı, geometrinin tam ölçekli boyutuna bağlıdır.

HAD tahmini ölçek boyutlarına gerek duymadan, tam ölçekli bu geometrilerin simülasyonunu yapabilmektedir. Simülasyonlar, sürüklenmenin azaltılması ve türbülans oluşumu için gerekli yolları belirler. Bu gibi HAD'nin kullanıldığı alanlara pek çok daha örnek verilebilir. HAD, atıksu arıtma tesislerinin dizaynını ve çalışma şeklini iyileştirmek için kullanılmaktadır.

HAD, su içerisinde meydana gelen her türlü prosesin daha iyi anlaşılabilmesine olanak sağlayan çok güçlü bir yöntemdir [Demiröz ve Budak, 2007].

## 5.3.HAD Metodu İşlem Prosesleri

### 5.3.1. Ön İşlem

HAD metodunda, Ön İşlem prosedürü şu şekilde gerçekleşmektedir: Öncelikle geometri ve çözüm çeşidine bağlı olarak (sabit durum veya zamana bağlı) bir akışkan hacmi yaratılır. Bu hacim daha sonra elemanlara ayrılarak (2D Analizler için Quad, Tri elemanlar; 3D Analizler için Tetra, Hex, Wedge elemanlar) grid oluşturulmaktadır. Ayrıca bu grid oluşturulurken sınır tabaka oluşumunun daha net görülebilmesi için de sınır tabaka elemanları da oluşturulmalıdır (Eleman büyüklükleri ve adeti için hesaplama gerekmektedir). Bu işlemden sonra katı ve akışkan hacimleri bölgeler olarak ayrılır ve sınır koşulları atanmaya başlanır. Bu işlem sonunda, akışkanın çeşidi, operasyonel şartları ve akışkanının özellikleri atanarak çözüm işlemine geçilir.

### 5.3.2. Çözüm

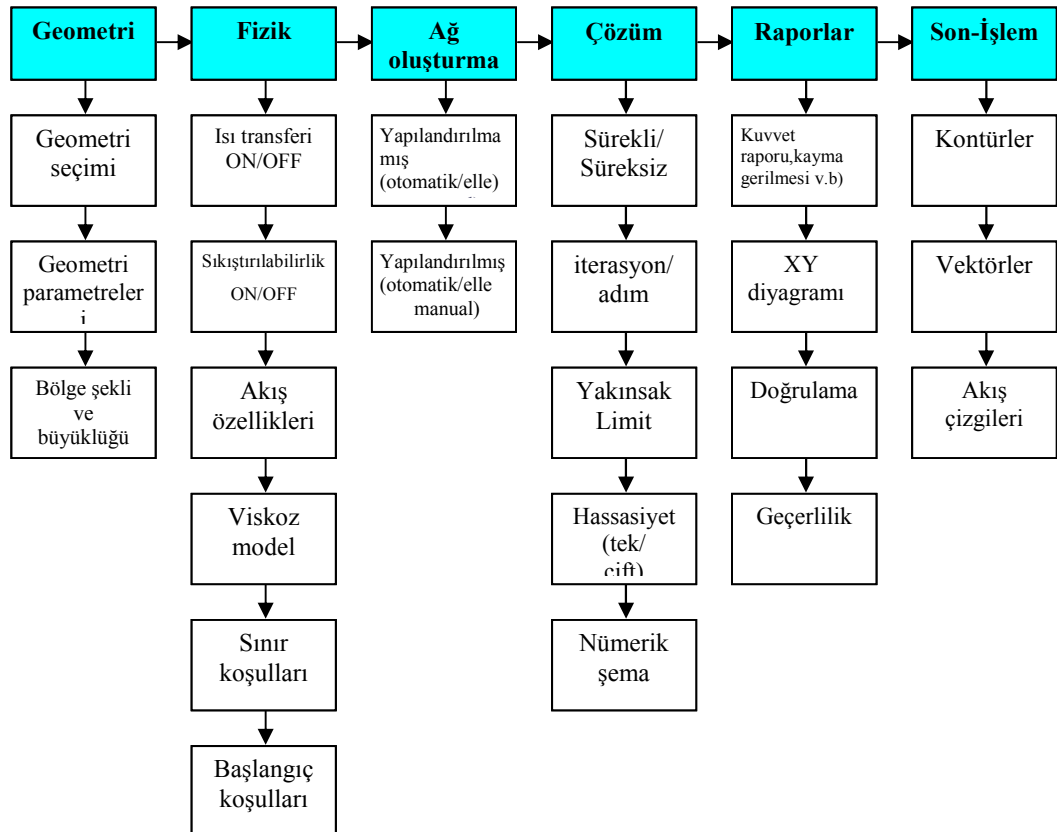
Çözüm, bir dizi iterasyon ve yakınsama kriterlerinin yerine getirilmesi sürecidir. Düğüm noktasına bağlı (Node Based) çözümlerde yakınsama kriteri,

düğüm noktalarında oluşan maksimum ve minimum değerlerinin farkıdır. Bu fark, belirlenen sınıra geldiğinde çözüm otomatik olarak sona erecektir. Elemana bağlı (Cell Based) çözümlerde, elemanın düğüm noktalarında oluşan değerler elemanların, eleman merkez noktalarına göre interpolasyonu ile taşınır. Bu noktada oluşan maksimum ve minimum değerlerin farkı yakınsama kriteri sınıra geldiğinde işlem sona erecektir.

### 5.3.3. Son İşlem

Son İşlem, sonuçları görselleştirme ve çözüm sonucu oluşan değerleri grafiklere ve görüntülere aktarma işlemidir. HAD analizlerinde bu çok önemli bir prosedür olarak karşımıza çıkmaktadır. Son işlem bize milyonlarca sayıyı bir görüntü olarak sunarak daha rahat ve anlaşılır bir şekilde sonuçları değerlendirmemizi sağlamaktadır. Fakat, Son İşlem yaparken, analiz çeşidine göre neyi görmek istediğimizi çok iyi bilmemiz gerekir. Bu HAD analizlerindeki Son İşlem için bir çok ticari yazılım kullanılmaktadır [www.sonluelemanlaranalizi.com].

**Tablo 5.1.** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analiz prosesi [Xing and Stern, 2007]



## 5.4. Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri, ismini Claude-Louis Navier ve George Gabriel Stokes'tan almış olan, sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketini tanımlamaya yarayan bir dizi denklemden oluşmaktadır.

Bu denklemler; akışkan içerisindeki birim kütleye etki eden momentum (ivmelenme) değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin (sürtünmeye benzer) toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır. Bu viskoz kuvvetler moleküller arası etkileşimlerden meydana gelmekte ve akışkanın akmaya ne kadar dirençli (viskoz) olduğunu göstermektedir. Böylece, Navier-Stokes denklemlerinin, verilen akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvetler dengesinin dinamik ifadesi olduğu söylenebilir [Clay Mathematics Institute, 2009].

### 5.4.1. Temel Kabuller

Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri, akışkan hareketini modellemek için temelleri sağlar. Katılar için uygulanan hareket kanunları, sıvı ve gazları kapsayan tüm maddeler için de geçerlidir. Bununla birlikte sıvı ve katılar arasındaki asıl fark, sıvıların sınırsız şekil değişimidir. Örneğin; bir akışkana kayma gerilmesi uygulandığında, akışkan partikül katmanları birbirini üzerinde bağıl olarak hareket edecek ve partiküller, eğer kayma kuvveti uygulaması durdulurursa tekrar orijinal haline geri dönmeyecektir. Akışkanın analizi böyle şekil değişimlerinin (distorsiyon) miktarını anlamak için gereklidir.

Bir akışkan partikül, katı bir partikülde olduğu gibi aynı yöndeki bir kuvvet için tepki gösterecektir. Eğer bir partiküle bir kuvvet uygulanırsa, Newton'un ikinci hareket kanununda belirtildiği gibi ivme ile sonuçlanacaktır. Bir cismin momentum değişim oranı, cisim üzerindeki dengede olmayan kuvvetlerin hareketi ile orantılıdır ve kuvvet yönünde yer alırlar. Bir akışkan partikülünde kullanılan kuvvetler, tecrübeler ışığında aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yerçekimi ve elektromanyetiklik gibi kütle kuvvetleri,
- Basınç kuvvetleri,
- Viskoz hareket kuvvetleri,
- Dönme kuvvetleri,

Bir akışkan içerisindeki kayma oranının kayma gerilmesiyle lineer şekilde ilişkili olduğu varsayıldığında akışkan akışı laminardır. Navier (1823), moleküler düşüncelerinden, viskoz bir akış için hareketin denklemini türetmiştir. Stokes da (1845) şimdilerde Navier-Stokes hareket denklemleri olarak bilinen akışkan akışın kullanıldığı temel denklemler ve az farklı bir form içerisinde viskoz bir akışın hareket denklemlerini türetmiştir. Navier-Stokes denklemleri, uygun modifikasyonlarla türbülanslı akımlar için de kullanılabilir.

#### 5.4.2. Sıkıştırılabilir akışlarda korunum denklemleri

Akıştaki temel denklemler; süreklilik denklemi, momentum denklemi (Navier-Stokes) ve enerji denklemidir.

##### Süreklilik denklemi;

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (5.5)$$

##### Momentum (Navier-Stokes) denklemi;

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (5.6)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \quad (5.7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \quad (5.8)$$

Denklem 5.6, 5.7 ve 5.8'deki sol kenardaki terimler sıklıkla atalet terimleri olarak ifade edilir ve momentum değişimlerinden yükselir. Bunlar, basınç gradyanı  $\frac{\partial p}{\partial x}$ , akışı geciktirmek için hareket eden viskoz kuvvetler ve eğer varsa cisim kuvvetleri tarafından hesaplanır.

Atalet terimleri, uzayda aşağı yukarı hareket eden bir akışkan elemanın hızının değişiminin ölçüsünü verir.  $\frac{\partial}{\partial t}$  terimi, sabit bir noktadaki hızın varyasyonunu verir ve lokal türev olarak ta bilinir. Atalet terimlerinden geriye kalan 3 terim birlikte gruplandırılır ve “*taşınım (konvektif) terimler*” veya “*taşınım diferansiyeli*” olarak bilinir.

Viskozite özelliklerinin ve spesifik ısısının sabit olduğu varsayılırsa, yukarıdaki denklem sistemi 6 bilinmeyen içerir. Sadece 5 denklemin mevcut olmasıyla birlikte bir denklem ilavesi kapalı sistem için gereklidir. Genellikle bu basınç için bir bağıntı oluşturulmasıyla sağlanır.

### Enerji denklemi

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \Phi + \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \left( u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (5.9)$$

$\Phi$  dissipasyon faktörü aşağıda verilmiştir.

$$\Phi = 2\mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (5.10)$$

Bu denklemlerde,

$u, v$  ve  $w$ :  $x, y$  ve  $z$  doğrultusundaki hız bileşenleri,

$\rho$ : yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )

$T$ : sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )

$p$ : basınç (Pa)

$\mu$ : viskozite ( $\text{g/m-s}$ ) ve

$c_p$ : sabit basınçtaki spesifik ısıdır ( $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ ).

Korunum denklemi, bir akış içerisindeki maddenin korunumuyla temsil edilen bir ifadedir. Birim hacim ve birim zaman başına, giriş ve çıkıştaki tüm kütle akışlarının toplamı, birim zaman başına yoğunluktaki değişimden dolayı kütle değişimine eşit olmalıdır.

Korunum denklemi, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz, Newtonian veya Newtonian olmayan tüm akışlara uygulanır. Korunum denklemi, bir akış içerisindeki her bir noktadaki kütle korunumu yasasını ifade eder ve bundan dolayı bir akış alanındaki her noktada tatmin edicidir.

### 5.4.3. Sıkıştırılamaz akışlarda korunum denklemleri

Eğer yoğunluk sabitse yukarıdaki denklem sistemi basitleştirilebilir. Eğer ısı da sabit olarak varsayılırsa sistem;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.11)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.12)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.13)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5.14)$$

haline gelir.

Sıkıştırılmaz akışlar için sıcaklık değişimiyle birlikte enerji denklemi sıcaklık değişimi oluşturmak için çözülmelidir. Fakat süreklilik ve momentum denklemlerinin onun üzerindeki etkileri ihmal edilebilir [Sayma, 2009].

## 5.5. HAD ile Çoklu Faz Akış Yöntemleri

Çoklu faz, birden fazla sayıdaki akışkanlar için kullanılır. Her bir akışkan, kendi akış alanına sahiptir veya tüm akışkanlar ortak bir akış alanını paylaşırlar. Genellikle akışkanlar, hava-su gibi farklı kimyasal türlerden oluşur. Bazı uygulamalarda onlar, buhar-su gibi aynı türlerin farklı termodinamik fazlarıyla temsil edilebilirler. Çoklu bileşik ve çoklu faz arasındaki ayırımı yapmak önemlidir. Bir çoklu bileşik akışın, moleküler seviyede karışan kimyasal türlerin karışımından oluştuğu varsayılır. Bu durumda örneğin; akış için ortalama sıcaklık ve hız alanları tek çözülür. Örnek olarak; gaz karışımları ve sıvı içerisindeki çözünmüş madde verilebilir. Bir çoklu faz akış içerisindeki akışkanların, moleküllerden daha büyük mikroskobik ölçekte karıştırıldığı varsayılır. Örnek olarak; bir sıvı içerisindeki gaz kabarcıkları, bir gaz veya diğer sıkıştırılmaz sıvı içerisindeki sıvı damlacıkları verilebilir. Bu durumda her bir akışkan için farklı hız ve sıcaklık alanları v.s. için çözüm gereklidir. Bunlar, faz arayüzeyleri boyunca arayüzey kuvvetleri, ısı ve kütle transferi aracılığıyla birbirleriyle etkileşimli olabilir. Örneğin; eğer soğuk ıslak partiküller, sıcak havanın akışkan akışı içerisine hızlı bir şekilde enjekte edilirse, partiküller arayüzey etkisiyle hızlanacak, partiküller faz sınır boyunca ısı transferi tarafından ısıtılacak ve onlar faz sınırındaki su buharı içerisindeki suyun buharlaşmasıyla kuruyacaktır [Al-Masry, Al-Awal, 2006].

Çoklu akışta, tüm fazları kapsayan akış alanları için kütle korunumu denklemi ve 3 koordinattaki momentum korunumu denklemlerini çözmek, hesap için fazla yeterli değildir. Tüm çoklu akış HAD yaklaşımları sürekli faz için bu korunum denklemlerinin çözümünü yaparken, dağınık fazların davranışın farklı yollarını öne sürmektedir. Bununla beraber, tüm modellerin ölçek faktörleri veya mevcut

proseslerinin geliştirilmesi için güvenilir araçların kullanımı halen devam etmektedir [Walker, 2001].

### 5.5.1. Çoklu Faz Modelleme Yaklaşımları

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği alanındaki gelişmeler, çoklu akış dinamikleri içerisinde daha fazla fikir esaslarını sağlamaktadır. Şu anda çoklu akışkanların nümerik hesapları için iki yaklaşım mevcuttur: Euler-Lagrange yaklaşımı ve Euler-Euler yaklaşımı. Tüm modeller, Navier- Stokes denklemleri kullanılarak sürekli faz akış alanını hesaplarken, dağınık fazlar, ya bir ayrık parçaların (kabarcıklar, partiküller veya topaklar) oluşturduğu bir Lagrange tarzında veya tüm fazların sürekli nüfuziyetinin dikkate alındığı yarı sürekli fazlar olarak hesaplanabilir (Euler-Euler veya çoklu akış yaklaşımı).

#### 5.5.1.1.Euler-Lagrange Yaklaşımı:

Bu yaklaşımla, kabarcık ve partiküllerin, sabit bir boyut ve şekle sahip olduğu düşünülür; hesaplanabilir partiküller daima belirli bir sayıdaki gerçek partikülleri temsil eder. Sayısal çözüm prosedürü içerisinde ilk olarak sürekli faz için zamana bağlı Navier-Stokes denklemleri çözülür; sonraki zaman adımı için partikül hızı ve yeni partikül pozisyonları, daha sonra hesaplanabilir partiküllerin her birisi için sürtünme kanunları kullanılarak hesaplanır. Opsiyonel bir üçüncü adımda, partiküllerin sürekli akış faz alanı üzerindeki etkisinin hesaplandığı ve yeni bir akış alanının adım adım (iteratif) hesaplandığı iki yönlü bağlantı etkileri düşünülebilir. Partikül-partikül veya partikül-duvar etkileşimleri, modelde olduğu gibi dahil edilebilir [Walker, 2001].

Euler-Lagrange çoklu faz modelleme yaklaşımının özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Tek partikül akış hareketinin denklemini çözer.
- Kaynak terim toplamı boyunca faz etkileşimi mevcuttur.
- Kabarcık ve partiküllerin, sabit bir boyut ve şekle sahip olduğu düşünülür.
- Hesaplanabilir partiküller daima belirli bir sayıdaki gerçek partikülleri temsil eder.

- Sürekli faz, zamana bağlı Navier-Stokes denklemleri ile çözülürken, dağınık faz, akış alanı içerisinde hesaplanan partikül, damlacık veya kabarcıkların sürüklenmesiyle çözülür.
- Dağınık faz, akışkan fazla (sürekli faz) momentum, kütle ve enerji değiş tokuşu yapabilir.

Bu model, sprey kurutucular, kömür ve sıvı fuel yanma sistemleri ve bazı partikül yüklü akışların modellenmesinde için uygundur fakat sıvı-sıvı karışımlar, akışkan yatakları veya yüksek hacim oranına sahip dağınık faz uygulamaları için uygun değildir [Ataki, 2006].

#### **5.5.1.2. Euler-Euler Yaklaşımı:**

Euler-Euler veya çoklu faz akış yaklaşımları, faz altındaki her bir düşünce için bir dizi Navier-Stokes denklemlerini ortaya koymaktadır [Walker, 2001]. Euler-Euler model, çoklu faz simülasyonu için çok genel bir yaklaşımdır. Prensip olarak, her çoklu-faz akış bu yolla simüle edilebilir. Her bir akışkan, bir sürekli faz gibi davranır ve her akışkan için korunum kanunları uygulanır [AVL Advanced Simulation Technologies, 2009].

Euler-Euler yaklaşımında, farklı fazlar, matematik olarak sürekli penetrasyon gibi davranır. Diğer fazlar tarafından doldurulamayan bir faz hacmi olduğunda, fazik hacim kesrinin konsepti ortaya konur. Tüm fazlar için benzer yapıya sahip olan korunum denklemleri, her faz için bir dizi denklem sağlanarak elde edilir. Bu denklemler, kinetik teori kullanılarak granüler akış durumunda veya ampirik bilgilerden elde edilen temel bağıntılar sağlanarak birleştirilir [Walker, 2001].

Euler-Euler çoklu faz modelleme yaklaşımının özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Modelde, bir sürekli akış fazı (birincil faz) içinde dağılmış ikincil fazın damlacık veya kabarcığı kullanılır.
- Fazların karışmasına ve ayrılmasına izin verir.
- Her faz için momentum, enerji ve süreklilik denklemini çözer ve hacim oranlarını izler.
- Tüm fazlar için bir tek basınç alanı kullanır.

- Arayüzey sürüklenme katsayısı kullanır.
- Gerçek kütle etkileri ve kaldırma kuvvetlerine izin verir.
- Her faz içerisinde çoklu türler ve homojen reaksiyonlar mevcuttur.
- Fazlar arasında ısı ve kütle transferine izin verir.
- Her bir faz için türbülans denklemlerini çözebilir.

Farklı Euler-Euler çoklu faz modeller mevcuttur. Bunlar; sıvı hacim modeli (VOF), karışım model ve Euler modelidir.

#### **5.5.1.2.1. Akışkan Hacim Metodu (VOF) :**

Daha çok gaz-sıvı iki faz akışların modellenmesi için geliştirilen bu yaklaşımda kabarcıklar, deforme edilebilir olarak kabul edilir; hatta serbest yüzeyler de modellenebilir. Akış vektörlerinin yalnız bir alanı hesaplanır, kabarcıklar; daha düşük yoğunlukla sıvıdan ayırt edilir, bu da hacim oranlarının, temsil edilen yüzeyler için kullanıldığı anlamına gelmektedir. Düzgün kabarcık yüzeylerinin hesabı, yüzeydeki keskin yoğunluk geçişleri ve daha ziyade kaba gridler için kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma yöntemleri serbest yüzey akışlarının hesabı için başarılı bir şekilde uygulanırken, metot, büyük hesaplama ihtiyaçlarıyla ilgili olarak gerçek hayatta reaktör modelleme için hala kısıtlıdır [Walker, 2001]. VOF modelinin uygulamaları, katmanlı akışlar, serbest yüzey akışlar, doldurma, sıçratma, bir sıvı içerisindeki büyük kabarcıkların hareketi, yüzey gerilim tahminleri ve herhangi bir sıvı-gaz arayüzeyindeki kararlı veya zamana bağlı izlemelerdir.

#### **5.5.1.2.2. Karışım Model :**

Karışım model, iki veya daha fazla faz için (sıvı veya partikül) dizayn edilmiştir. Euler modelde olduğu gibi, fazlar devamlı nüfuziyet şeklinde davranır. Karışım model, karışım momentum denklemiyle çözülür ve tanımlı dağınık faz için bağıl hız olarak tarif edilir. Karışım model uygulamaları; düşük yüklemeli partikül yüklü akışlar, kabarcık akışlar, çökeltme ve siklon ayırıcılarını kapsamaktadır [Ataki, 2006].

#### 5.5.1.2.2. Euler Model :

Euler model, her bir faz için bir dizi momentum ve süreklilik denklemini çözer. Bağlantı, basınç ve arafaz değişim katsayısı boyunca gerçekleşir. Granül akışlar için özellikler, kinetik teori uygulamalarından oluşur. Fazlar arasındaki momentum değişimi aynı zamanda karışım tipine bağlı olarak modellenmektedir.

Euler çoklu-faz uygulamaları; kabarcık kolonları, oluklar, partikül süspansiyon ve akışkan yataklarını kapsamaktadır [Ataki, 2006].

### 5.6. Türbülans Modelleri

#### 5.6.1. Tanım

*Türbülans* veya *çalkantı* bir sıvının ya da gazın hareket halindeki düzensizliğidir. Diğer bir deyişle, bir akışkan hareketi içerisinde hız, basınç ve diğer akış miktarlarının zaman ve uzay içerisinde dalgalanmasına “*türbülans*” denmektedir. Türbülans, konvektif (taşınım) etkilerin “*viskoz*” (*akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç*) etkilerden çok daha fazla olduğu akışkan hareketinin kaotik durumudur.

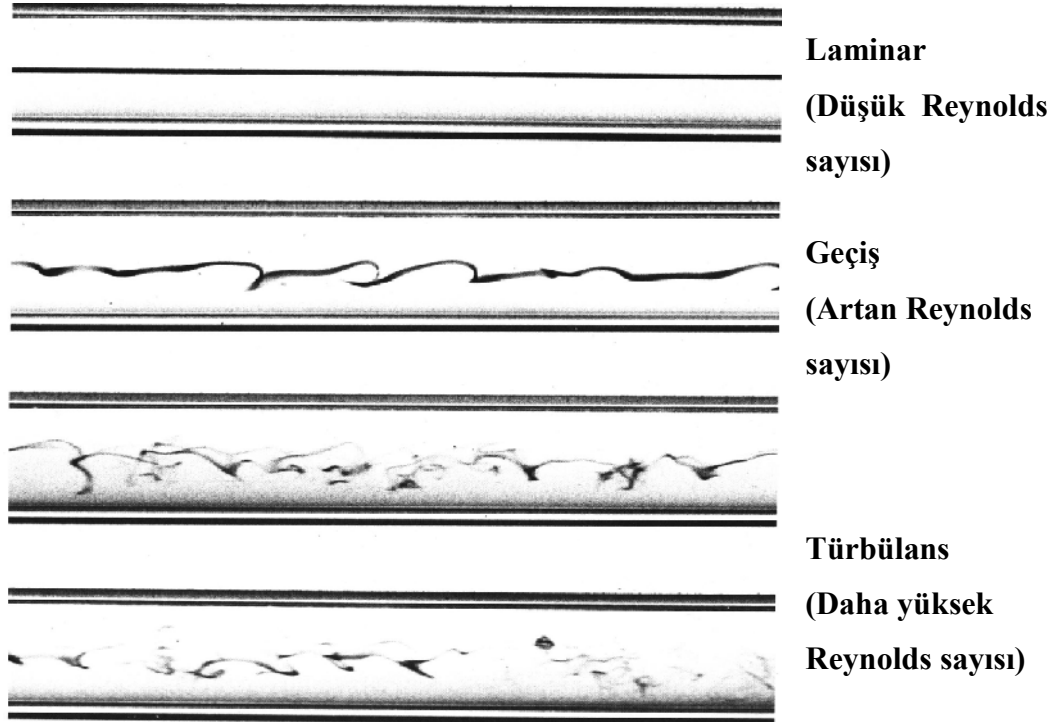
“*Türbülanslı akış*”, bir akışkanın herhangi bir noktasındaki hızının, zamana göre hem doğrultu hem de büyüklük bakımından değişiklik gösterebildiği düzensiz akış biçimi olarak tanımlanmaktadır. Türbülanslı akış, uzay ve zamanda düşük moment difüzyon, yüksek moment konveksiyon ve hızlı basınç ve hız varyasyonları içerir. Türbülanslı akışta, akışkan içinde çevriler (girdap) oluşur ve akışkanın momentumunda ani değişimler meydana gelir. Türbülanslı olmayan akışa laminar (katmanlı) akış denir. Akışın laminar akıştan türbülanslı akışa geçişi, kritik “*Reynolds sayısı*” adı verilen bir değerde gerçekleşir. İp gibi yükselen bir sigara dumanının bir süre sonra dağılıp düzensizleşmesi, türbülanslı akışa örnektir. Doğadaki akışkan hareketleri çoğunlukla türbülanslıdır.

Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını ölçer ve aşağıdaki gibi belirlenir:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (5.15)$$

Burada,  $U$  ve  $L$ , ilgilenilen bölge için uygun hız ve uzunluk ölçüleri karakteristiği,  $\nu$ , dinamik viskozitedir.

Reynolds sayısının yüksek olduğu yüksek hızlarda, büyük uzunluk ölçeklerinde ve düşük viskozitede türbülans oluşur. Re sayısına bağlı akış modelleri Şekil 5.1.'de verilmiştir.



**Şekil 5.1.** Reynolds sayısına bağlı akış modelleri [ANSYS-CFX Training Course Notes, 2006]

### 5.6.2. Sıfır Denklem Modelleri

Bu modellerin ortak tarafı Reynolds gerimesini  $\tau_t$ , denklemlerdeki diğer terimlerin bir fonksiyonu olarak ampirik bir formülle elde etmeleridir. En bilinen sıfır denklem modeli *Boussinesq Hipotezi*'dir.

### 5.6.2.1. Boussinesq Çevri Viskozitesi Yaklaşımı:

Türbülans gerilmelerinin  $(-\rho u', v')$  modellenmesinde kullanılan ve günümüzde birçok türbülans modelinin temelini oluşturan en eski yaklaşım, Boussinesq'nın türbülans viskozitesi kabulüdür. Burada laminar akımdaki viskoz gerilmeler gibi, türbülans gerilmeleri de ortalama hız gradyanlarının oranına bağlıdır [Hınze, 1959]. En genel akım durumları için bu yaklaşımda, ortalama akıma ait momentum denklemindeki türbülans gerilmeleri aşağıdaki şekilde tanımlanır:

Laminar viskoz gerilme,

$$\tau_1 = \rho v \frac{du}{dy} \quad (5.16)$$

benzer olarak,

$$\tau_1 = -\overline{\rho u'v'} = \rho v_t \frac{du}{dy} \quad (5.17)$$

şeklinde alınır. Bu yaklaşımın en önemli sakıncası çevri viskozitesinin, denklem (5.16)'da görüleceği üzere kinematik viskozite  $v$  gibi akışkanın fiziksel bir özelliği olmayıp, akıntıdaki hız çalkantılarına bağlı olmasıdır. Yani aynı akışkanın değişik akımları için değişik değerler alır. Bu durumda türbülanslı sınır tabakası denklemleri ve sınır şekilleri şu şekli alırlar.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = 0 \quad (5.18)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( (v + v_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad (5.19)$$

$$\bar{u}(y=0) = \bar{v}(y=0), \bar{u}(y=\infty) = U_\infty$$

### 5.6.2.2. Prandtl Karışma Uzunluğu Yaklaşımı:

Boussinessq yaklaşımında çevri viskozitesinin ortalama hıza bağımsızlığının büyük bir eksiklik olduğunu gören Prandtl, Reynolds gerilmesinin,

$$\tau_t = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (5.20)$$

şeklinde yazılmasının daha uygun olacağını öne sürmüştür. Burada  $l$ , karışma uzunluğu olmaktadır ve gene akışkanın değil fakat akımın yerel fonksiyonudur. Örneğin; türbülanslı bir jet akımında karışma uzunluğu jetin genişliğiyle doğru orantılıdır. Prandtl yaklaşımında çevri (girdap) viskozitesi,

$$v_t = l^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (5.21)$$

olarak alınmış olmaktadır.

### 5.6.2.3. Von Karman Yaklaşımı

Von Karman, Prandtl'in karışma uzunluğu yaklaşımında karışma uzunluğunu,

$$l = \alpha \left| \frac{d\bar{u}/dy}{d^2\bar{u}/dy^2} \right| \quad (5.22)$$

olarak almanın türbülanslı akım içinde benzeşimi sağlamanın bir koşulu olduğunu görmüştür. Bu sonucun kullanılmasıyla Reynolds gerilmesi,

$$\tau_t = \rho \alpha^2 \frac{(d\bar{u}/dy)^4}{(d^2\bar{u}/dy^2)^2} \quad (5.23)$$

şeklinde elde edilir. Sabit basınçlı gradyanlı bir kanal veya boru akımı durumunda hız profilini bulmak için Von Karman, Reynolds gerilmesinin yüksekliğin doğrusal fonksiyonu olması gerçeğinden hareket ederek (merkezde  $-\partial\bar{p}/\partial x + \partial\tau/\partial y = 0$ ),

$$\tau = \tau_0 \frac{y}{h}, \quad (5.24)$$

almıştır. Burada  $\tau_0$ , duvar üzerindeki gerilme olmaktadır. Bu sonucun, denklem (5.23)'de kullanılması,

$$\frac{\tau_0}{\rho} \frac{y}{h} = \alpha^2 \frac{(d\bar{u}/dy)^4}{(d^2\bar{u}/dy^2)^2} \quad (5.25)$$

diferansiyel denklemini verir. Bu denklemin,  $\bar{u}(y=0) = \bar{u}_{\max}$  sınır koşulu altında ( $y=0$ , akım alanının orta çizgisini gösterir,  $y$  de bu çizgiden olan uzaklığı) integre edilmesiyle,

$$\bar{u} = \bar{u}_{\max} + \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \left[ \ln \left( 1 - \sqrt{\frac{y}{h}} \right) + \sqrt{\frac{y}{h}} \right] \quad (5.26)$$

hız profili ile elde edilir. Referans hızı  $v_{0*}$  kullanılarak eksilen hız profili,

$$\frac{u_{\max} - u}{v_{0*}} = -\frac{1}{\alpha} \left[ \ln \left( 1 - \sqrt{\frac{y}{h}} \right) + \sqrt{\frac{y}{h}} \right] \quad (5.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Prandtl hız profilinde olduğu gibi, bu sonuçlar cidar yakınında ( $y \rightarrow h$ ) geçerli değildir. Bu bölgede laminar bir alt tabaka vardır ve hız dağılımı ayrıca hesaplanmalıdır [Örs, 1994].

### 5.6.3. Tek Denklem Modeli

Tek denklem türbülans modelinde, Reynolds gerilmesini verecek olan çevri viskozitesi birim kütleye düşen akışkan kinetik enerjisinin  $k$  ve karışma uzunluğunun  $l$ , bir fonksiyonu olarak,

$$v_t = Ck^{1/2}l \quad (5.28)$$

olarak yazılır ( $C$ , sabit bir katsayı). Karışma uzunluğu  $l$  ise gene cebirsel bir formülle elde edilir.

$$l = \alpha(1 - e^{-y/\beta}) \quad (5.29)$$

Bu yaklaşımın amacı sıfır denklem modellerinde çevri viskozitesinin sadece lokal değerler kullanılarak elde edilmesinin yarattığı yanlışlardan uzaklaşmaktır. Denklem (5.28)'i uygulayabilmek için karışım uzunluğunun yanında türbülans kinetik enerjisinin de bulunması gerekir. Kinetik enerjinin taşınım denklemi yazılırsa,

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial k}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\tau_1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( c_1 k^{1/2} L \frac{\partial k}{\partial y} \right) - \varepsilon \quad (5.30)$$

sağ tarafta üç terimin bulunduğu görülür. Bunlardan birincisi kinetik enerji üretim terimi, ikincisi difüzyon terimi, sonuncusu da,

$$\varepsilon = \nu \left[ 2 \left( \frac{\partial \bar{u}'}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \bar{v}'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (5.31)$$

şeklinde olan birim kütleye düşen dissipasyon (yayılım) enerjisi terimidir.  $L$  ise türbülans ölçek uzunluğudur. Bu terimlerden sonuncusunun, kinetik enerjinin değişik frekanslarda çalkantılardan meydana geldiği düşünülerek (matematiksel tabirle Fourier serisi açılarak), boyut analizi ile,

$$\varepsilon = c_2 \frac{k^{3/2}}{L} \quad (5.32)$$

şeklinde olması gerektiği gösterilebilir. Burada  $k$ , dalga sayısıdır ve termal sınır tabakasında kullanılan ve gene  $k$  ile ifade edilen diffüzivite katsayısı ile karıştırılmaması gerekir. Böylece dissipasyon terimi, kinetik enerjide olduğu gibi

ikinci bir taşınım denklemi yazılmadan elde edilmiş olur ve modelin ismi de buradan gelir (  $c_1$  ve  $c_2$  sabit katsayılarıdır) [Örs,1994].

### 5.6.4. İki Denklem Modelleri

#### 5.6.4.1. Standart $k$ - $\varepsilon$ Türbülans Modeli

İki denklemlili türbülans modelleri arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi  $k$  ve dissipasyon (yayılma) hızı oranı  $\varepsilon$  için yazılan iki adet taşınım denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir [Kaya ve Karagöz, 2007].

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (5.33)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (5.34)$$

şeklinde yazılabilir. Bu modelde difüvizite terimleri,

$$\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k \quad (5.35)$$

$$\Gamma_\varepsilon = \mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon \quad (5.36)$$

olmaktadır. Hız gradyanından kaynaklanan türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terim,

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5.37)$$

olup burada türbülans viskozitesi, türbülans kinetik enerjisi ve dissipasyon oranı cinsinden,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.38)$$

yazılabilir. Bu modelde  $R = 0$  olup diğer ampirik sabitleri:  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $k$  ve  $\varepsilon$  için tanımlanan türbülans Prandtl sayıları  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  'dir.

#### 5.6.4.2. RNG $k - \varepsilon$ Türbülans Modeli

RNG  $k - \varepsilon$  türbülans modeli, girdaplı akışlar için Yakhot ve Orszag (1986) tarafından düşünülmüş ve geliştirilmiş yine iki denklemlilik bir model olup esas itibariyle Navier-Stokes denklemlerinden renormalizasyon grup teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Bu modelde  $k$  ve  $\varepsilon$  için korunum denklemleri gibi yazılabilir. Temel farkı, sabitlerin farklı olması ve ilave terimlerin gelmesidir. RNG  $k - \varepsilon$  türbülans modelinde;

$$\Gamma_k = \alpha_k \mu_e \quad (5.39)$$

$$\Gamma_\varepsilon = \alpha_\varepsilon \mu_e \quad (5.40)$$

dir. Burada, akışkanın viskozitesi ile türbülans viskozitenin toplamı olan efektif viskozite,

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (5.41)$$

olup aşağıdaki adi diferansiyel denklemin çözümünden elde edilir.

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\mu_e / \mu}{\sqrt{(\mu_e / \mu)^3 - 1 + C_v}} d(\mu_e / \mu) \quad (5.42)$$

Denklem 5.42. ,düşük Re sayısı etkilerini hesaba katmayı sağlamaktadır. Buna karşın, limit halde denklem (5.42)'e yakın değerler verdiği için yüksek Re sayılarında denklem (5.43)'de kullanılabilir.

RNG  $k - \varepsilon$  modelinde,  $\varepsilon$  denklemindeki ilave terim,

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (5.43)$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada  $\eta$ , türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve dissipasyon oranının fonksiyonu olup,

$$\eta = \frac{G_k}{\rho C_\mu \varepsilon} \quad (5.44)$$

yazılabilir. Bu ilave terim, standart  $k - \varepsilon$  modelinde olmayan, yüksek kayma oranları ve akım çizgisi eğrilikleri etkilerini göz önüne alması açısından önemlidir. Kayma oranının kuvvetli olduğu (yüksek  $\eta$ ) durumlarda dissipasyon oranı artmakta, bu da türbülans viskozitesini ve  $k$  değerini azaltmakta yani akıştan daha az enerji çekilmesine yol açmaktadır. Böylece sirkülasyon bölgelerinin büyüklüğü, deneysel verilere daha yakın çıkmaktadır. Bu modelde kullanılan sabitler;  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ,  $C_v = 100$ ,  $\eta_0 = 4.38$ ,  $\beta = 0.012$ ,  $C_\mu = 0.0845$  'dir.

Denklem (5.39) ve (5.40)'daki  $\alpha_k$  ve  $\alpha_\varepsilon$  parametreleri,  $k$  ve  $\varepsilon$  için efektif Prandtl sayılarının tersini göstermekte olup, RNG teorisinden analitik olarak türetilen,

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha - 2.3929}{\alpha_0 - 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu}{\mu_e} \quad (5.45)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır. Burada,  $\alpha_0 = 1$  dir. Yüksek Reynolds sayılarında ( $\mu / \mu_e < 1$ ),  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \cong 1.393$  olmaktadır.

RNG modeli, türbülans viskozitesini uygun bir şekilde düzelterek dönme ve girdap etkilerini göz önüne almaya imkan verir. Düzeltilmiş türbülans viskozitesi için,

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right) \quad (5.46)$$

fonksiyonu kullanılmıştır. Burada  $\Omega$  karakteristik girdap sayısını,  $\alpha_s$  ise girdabın şiddetine göre değişik değerler alabilen girdap sabitidir. Düşük girdaplı durumlar için  $\alpha_s = 0.05$  olarak alınmaktadır. Ancak kuvvetli girdaplarda yüksek  $\alpha_s$  değerleri kullanılır [Kaya ve Karagöz, 2007].

#### 5.6.4.3 $k - \omega$ Türbülans Modeli

Bu iki denklemlilik model, türbülans kinetik enerjisi  $k$ 'nın bir denklemini ve spesifik türbülans dissipasyon oranı (veya türbülans frekansı) için ikinci bir denklemi kapsar [Wilcox, 1998].  $k - \omega$  modelin avantajı, duvara yakın davranışdır. Model,  $k - \varepsilon$  model için gerekli kompleks lineer olmayan sönüm fonksiyonu içermemektedir. Duvara yakın davranış, düşük bir Re sayısı formundan bir duvar fonksiyon formülüne kadar düzgün yerdeğişimine izin veren  $k - \omega$  modelleri için geliştirilmiştir. Türbülans viskozitesinin  $k - \omega$  modelleri varsayımı, türbülans kinetik enerji ve türbülans frekansı yoluyla bağlantılıdır [Menter, 1994].

Türbülans kinetik enerji denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\bar{\rho} \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Pk - \beta^* \rho \omega k \quad (5.47)$$

spesifik dissipasyon oranı denklemi,

$$\bar{\rho} \frac{d\omega}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} Pk - \beta \rho \omega^2 \quad (5.48)$$

çevri viskozitesi aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (5.49)$$

ve yardımcı bağıntılar,

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \quad (5.50)$$

Bu modelde kullanılan sabitler;

$$\alpha = 5/9, \beta = 3/40, \beta^* = 9/100, \sigma = 1/2, \sigma^* = 1/2 \text{ ' dir.}$$

### 5.6.5. Reynolds Gerilme Modelleri

Reynolds gerilme modeli (RSM), Reynolds gerilmelerinin doğrudan taşınım denklemlerinin çözümüyle hesaplanması esasına dayanır. Bu denklemler bazı kabuller altında momentum denklemlerinin salınım büyüklüğü ile çarpılması ve Reynolds ortalamasının alınması ile elde edilirler [Kaya ve Karagöz, 2007]. Bunun da iki yolu vardır: Birincisi Reynolds gerilmesinin taşınım denkleminin yazılıp bu denklemin çözülmesi, ikincisi ise Reynolds gerilmesinin kinetik enerji ve dissipasyonun cebirsel bir fonksiyonu olarak elde edilmesidir. Bu modellerde kinetik enerji ve dissipasyon denklemlerinin de,  $k - \varepsilon$  modelinde olduğu gibi çözülmesi gerektiğinden uygulaması daha zordur ve sayısal olarak daha yoğundur. Reynolds gerilmelerinin doğrudan diferansiyel denkleminin çözülerek elde edilmesi aşağıda anlatılmıştır.

#### 5.6.5.1. Diferansiyel Model:

Bu modelde Reynolds gerilmesinin taşınım denklemi yazılır ve sağ taraftaki terimler akımın fiziğini gözönüne alan yaklaşımlarla basitleştirilerek elde edilir. Önce taşınım denklemi yazılırsa,

$$\frac{D(\overline{u'v'})}{Dt} = D + P + \pi - \varepsilon' + \nu \Delta(\overline{u'v'}) \quad (5.51)$$

Burada;

$D$  : difüzyon terimi,

$P$  : üretim terimi,

$\pi$  : basınç gerinimi ve

$\varepsilon'$  : dissipasyon olmaktadır.

Açılımları ise aşağıdaki gibidir:

$$D = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \overline{u'v'u'} + \frac{\overline{p'v'}}{\rho} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \overline{u'v'v'} + \frac{\overline{p'u'}}{\rho} \right) \quad (5.52)$$

$$P = -\left( \overline{u'u'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \overline{u'v'} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \overline{v'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad (5.53)$$

$$\pi = \frac{\overline{p'}}{\rho} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (5.54)$$

$$\varepsilon' = 2\nu \left[ \overline{\left( \frac{\partial u'}{\partial x} \frac{\partial v'}{\partial x} \right)} + \overline{\left( \frac{\partial u'}{\partial y} \frac{\partial v'}{\partial y} \right)} \right] \quad (5.55)$$

Burada sözü edilen dissipasyon  $\varepsilon'$ , dissipasyon tansörünün (gerilme ve şekil değiştirme hızı matrisleri) sadece bir bileşeni yani  $xy$  bileşeni olup daha önce kullanılan dissipasyon enerjisinden  $\varepsilon$ , denklem farklıdır.

Difüzyon terimi  $D$ , hız çalkantılarının üçüncü momentini ve basınç çalkantılarını içermektedir. Bu terimlerin elde edilmeleri zor olduğundan difüzyon terimi aşağıdaki şekilde basitleştirilir.

$$D = C_s \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{\varepsilon} \left( \overline{u'u'} \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \overline{v'u'} \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k}{\varepsilon} \left( \overline{u'v'} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \right) \right) \right] \quad (5.56)$$

Basınç gerilmesi terimi ise,

$$\pi = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'v'} - C_\gamma P \quad (5.57)$$

olarak alınır. Burada kullanılan sabit katsayıların değerlerinin,

$C_s = 0.25$ ,  $C_1 = 1.5$ ,  $C_\gamma = 0.6$  alınması uygundur.

Dissipasyon tansörü bileşeni  $\varepsilon'$  ise, tansörün lokal olarak izotropik olduğu varsayılarak,  $xy$  doğrultusunda sıfır alınır.

Reynolds gerilmesinin taşınım denklemi, momentum, süreklilik, enerji ve dissipasyon taşınım denklemlerinin meydana getirdiği sistem çözülerek hız ve basınç ortalama değerleri ile, Reynolds gerilmesi ve kinetik enerji ile dissipasyon elde edilir [Örs, 1994].

#### 5.6.5.2. Cebirsel Model

Cebirsel model Reynolds gerilmesi, bir diferansiyel denklem çözülmesi yerine kinetik enerji, dissipasyon ve üretim terimlerinin cebirsel bir fonksiyonu olarak yazılması suretiyle elde edilir. Bu cebirsel fonksiyonun,

$$\overline{u'v'} = \frac{(1 - C_\gamma)(k/\varepsilon)P}{C_1 + (1/2)P'} \quad (5.58)$$

olarak alınması Rodi tarafından önerilmiştir. Burada,

$$P' = \overline{u'u'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \overline{v'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (5.59)$$

olarak tanımlıdır [Örs, 1994].

#### 5.6.6. Duvar fonksiyonları

Duvar fonksiyonları, duvarlarla türbülans bölgesi arasında viskozite etkilerini ilişkilendirmek amacıyla kullanılırlar. Bu fonksiyonların kullanımıyla türbülans modellerinin modifiye edilmesi gerekliliği ortadan kalkar. Yüksek Reynolds sayılı akışlarda duvar fonksiyonları yaklaşımı, duvar civarında çözüm değişkenlerini çok hızlı bir şekilde değiştiren viskoz etkilerin çözümler için gerekli olmayışı ve nümerik olarak yaklaşık doğru sonuç vermesi sebebiyle çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Böylece cidara yakın viskozite etkili bölgenin sık gridlere bölünerek çözümlenmesine gerek kalmamakta, cidarla türbülanslı bölge arasında köprü kurulmaktadır [Kaya ve Karagöz, 2007] .

### 5.6.6.1. Standart Duvar Fonksiyonu:

Standart duvar fonksiyonu çok yaygın olarak kullanılmakta ve genellikle yeterli doğrulukta sonuçlar vermektedir. Ancak cidara yakın yüksek hız ve basınç değişimlerinin olduğu akışlarda ise standart duvar fonksiyonu yaklaşımının kullanılması elde edilen sonuçları büyük ölçüde etkilemekte ve doğru sonuçlardan uzaklaşmaktadır. Hız alanları için kullanılan standart logaritmik duvar kanunu;

$$U^* = \frac{1}{K} \ln(Ey^*) \quad (5.60)$$

Logaritmik hız profili olup, burada,

$$U^* = \frac{U_0 C_\mu^{1/4} k_0^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (5.44) \quad \text{ve} \quad y = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_0^{1/2} y_0}{\mu} \quad (5.61)$$

olmaktadır.  $U^*$ , logaritmik kanun  $y^* > 11.225$  olduğunda uygulanmaktadır.  $y^* < 11.225$  olduğunda ise duvar komşu hücrelerinde aşağıdaki gibi yazılabilen laminar gerilme-uzama ilişkisini

$$U^* = y^* (20) \quad (5.62)$$

denklemini kullanmaktadır.

### 5.6.6.2. Dengeden Uzak Duvar Fonksiyonu:

Cidara yakın bölgeyi iki tabakaya ayırarak geliştirilen dengeden uzak (nonequilibrium) duvar fonksiyonu, standart duvar fonksiyonunda ihmal edilen yüksek hız ve basınç gradyanlarının etkilerini de göz önüne alarak hesaplamalar yapar. Dengeden uzak duvar fonksiyonu bu özelliğinden dolayı yüksek hız ve basınç gradyanlarının görüldüğü akış uygulamalarında ve ısı transferi özelliklerinin incelenmesinde doğru sonuçlara yaklaşmak amacıyla kullanılır. Bu yaklaşımda basınç gradyanına duyarlı ortalama hız için logaritmik kanun,

$$\frac{\tilde{U} C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{K} \ln \left( E \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right) \quad (5.63)$$

olup, burada,

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \frac{y_v}{\rho K \sqrt{k}} \ln \frac{y}{y_v} + \frac{y - y_v}{\rho K \sqrt{k}} + \frac{y_v^2}{\mu} \quad (5.64)$$

fiziksel viskoz alt tabaka kalınlığı,

$$y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2}} \quad (5.65)$$

$$y_v^* = 11.225$$

olarak alınmaktadır [Kaya ve Karagöz, 2007].

### 5.6.7. Direkt Nümerik Benzeşimi (DNS):

DNS, Navier-Stokes ve süreklilik denklemini basit bir şekilde nümerik olarak çözen bir türbülans modelidir. Türbülans akımıyla ilgili olarak tüm uzunluk ve zaman ölçeğinde Navier-Stokes ve süreklilik denklemi tarafından basitçe çözülebilir. Başarılı bir simülasyon için en küçük uzunluk, zaman ve hız ölçeğinin bilinmesi gereklidir. Bu bilgi, uzay grid ve yeterli ölçeklerin zaman adımlarını ayarlamak açısından çok önemlidir.

Grid noktalarında okunan uniform dağılım sayısı,

$$N_{uni} \approx (110 \text{Re}_T)^{9/4} \quad (5.66)$$

$$\text{Re}_T = \frac{u_T L}{\nu} \quad (5.67)$$

$\text{Re}_T$ : türbülans Reynolds sayısını,

$u_T$ : sürtünme hızını,

$L$ : tipik ölçek uzunluğunu,  $\varepsilon = \mu / \rho$ : akışkanın kinematik viskozitesini temsil eder. Tüm miktarlar, integral türbülans ölçeğinde belirlenir.

Zaman adımı sayısı aşağıda verilmiştir.

$$N_{time} = \frac{\Delta t_{total}}{\Delta t}, \quad (5.68)$$

$$\Delta t \approx \frac{0.003}{\sqrt{Re_T}} \frac{L}{u_T} \quad (5.69)$$

Burada  $N_{time}$ , durağan akışa istatistiksel olarak ulaşmak amacıyla gereken zaman adımı sayısını temsil etmektedir [Sodja, 2007].

Genel olarak DNS çok doğru sonuçlar verdiği için, çözümü mümkün olmayan denemeler olduğu durumlarda diğer modelleme yaklaşımlarını doğrulamak için giderek kullanılmaya başlamıştır [Ataki, 2006].

DNS büyük öneme sahiptir. Bilgisayarların gelişiminin bir kazancı, daha yüksek Reynolds sayılarında akışları simüle etme kapasitesidir. Günümüzde DNS'yle elde edilen sonuçların, tecrübelerle kazanılan veriler kadar iyi olduğu düşünülebilir [Sodja, 2007].

#### 5.6.8. Büyük Girdap Benzeşimi (LES):

Büyük Girdap Benzeşimi (LES), daha büyük türbülans girdaplarının çözümünü ve daha küçük türbülans girdaplarının modellemesini doğrudan çözümleyerek, hesap gereksinimlerini azaltmak için çalışır. Böylece daha büyük zaman adımlı ve daha kaba grid üzerinde hesaplamaları sağlar [Walker, 2001].

LES, küçük ölçekli çevrileri modellerken, büyük girdapların olduğu hesaplamaları doğrudan hesaplar. Uzay gridi ve zaman adımları DNS'den çok daha uzundur. Bu yüzden LES, hesaplanabilir güç gereksinimi açısından DNS' den çok daha ekonomiktir.

$$N_{LES} \approx \left( \frac{0.4}{Re_T^{1/4}} \right) N_{DNS} \quad (5.70)$$

LES'in temelinde yatan fikir, “*yakınsama evrimi*” olarak adlandırılır. Büyük ölçekli çevrilerin davranışı, başlangıç ve sınır koşullarındaki akış üzerindeki kuvvetlerin hareketine şiddetle bağlıdır [Sodja, 2007].

$$\frac{u(x+h) - u(x-h)}{2h} = \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2h} \int_{x-h}^{x+h} u(\xi) d\xi \right) \quad (5.71)$$

### 5.6.9. Kayma Gerilim Taşınım (SST) Türbülans Modeli

Bu model, duvara yakın alanlardaki sonuçların doğruluğunu gerçekleştirmek için  $k - \varepsilon$  ve  $k - \omega$  modellerinin kombinasyonu olarak geliştirilmiştir [Samolinski, 2007].

$k - \omega$  türbülans model, performans olarak iyidir, buna karşılık laminar alt tabaka içinde ve sınır tabakanın logaritmik bölgesinde  $k - \varepsilon$  model üstündür. Bununla birlikte,  $k - \omega$  modelin sınır tabaka dışında  $\omega$  serbest akış değerinin spesifikasyonlarıyla son derece etkilendiği gösterilmektedir. Bu yüzden  $k - \omega$  modelin sınır tabaka bölgesindeki girdaplarda iyi tahminler vermediği görülmektedir. Diğer bir deyişle,  $k - \varepsilon$  model, daha dış kısımlarda ve sınır tabaka bölgesindeki girdaplarda  $k - \omega$  modelden daha üstün davranışlıdır fakat sınır tabakanın daha iç bölgelerinde daha kalitesizdir. Her iki modelin en iyi özelliklerini kapsayacak şekilde Menter,  $k - \varepsilon$  ve  $k - \omega$  modellerinden farklı yeni bir iki denklemlilik türbülans model kombine etmiştir. Bu model, iç kısımdaki bölge için  $k - \omega$  gibi davranırken, sınır tabakanın girdap bölgelerinde ve dış kısımlar için  $k - \varepsilon$  gibi davranır.

$k - \varepsilon$  ve  $k - \omega$  iki denklem modelin kombinasyonu aşağıda verilmiştir [Hoffmann and Chiang, 1998].

$$\bar{\rho} \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* \rho \omega k \quad (5.72)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\omega}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \\ + \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (5.73)$$

burada,

$$P_k = \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5.74)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5.75)$$

denklemlerde görülen sabitler aşağıda verilmiştir;

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (5.76)$$

burada  $\phi_1$ ,  $k - \varepsilon$  ile ilişkili bir sabiti,  $\phi_2$  ise  $k - \omega$  ile ilişkili bir sabiti göstermektedir.

Türbülans viskozitesi aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (5.77)$$

burada,

$a_1 = 0.31$ ,  $\Omega$  girdap kuvvetinin mutlak değeri ve,

$$\arg_2 = \left[ 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \nu}{\omega y^2} \right] \quad (5.78)$$

dir.  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  sabitleri,  $\alpha_{k1}$  hariç model için belirleyicidir.

$\phi_1 ; (k - \varepsilon)$  model için sabitler;

$$\alpha_{k1} = 0.85, \alpha_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

$\phi_2 ; k - \omega$  için sabitler ise;

$$\alpha_{k2} = 1, \alpha_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41 \text{ 'dir.}$$

## 6. MODELLEME VE SONUÇLAR

### 6.1. Teorik Model

Tez çalışmasında, düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hidrolöği, akım kırıcı kullanılmadan ve akım kırıcı (baffle) kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiğı (HAD) açısından incelenmiştir. Şekil 6.1.(a). ve 6.1.(b)'de resmi görölen düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının gerçek geometrisini simöle edebilmek için sayısal ağı oluşturulmadan önce havalandırıcının modelini oluşturmak gerekir. Bunun için Pro-Engineer ticari yazılımı, ANSYS tabanlı programlarla sorunsuz ve kaliteli bir şekilde çalıştığı için tercih edilmiştir.

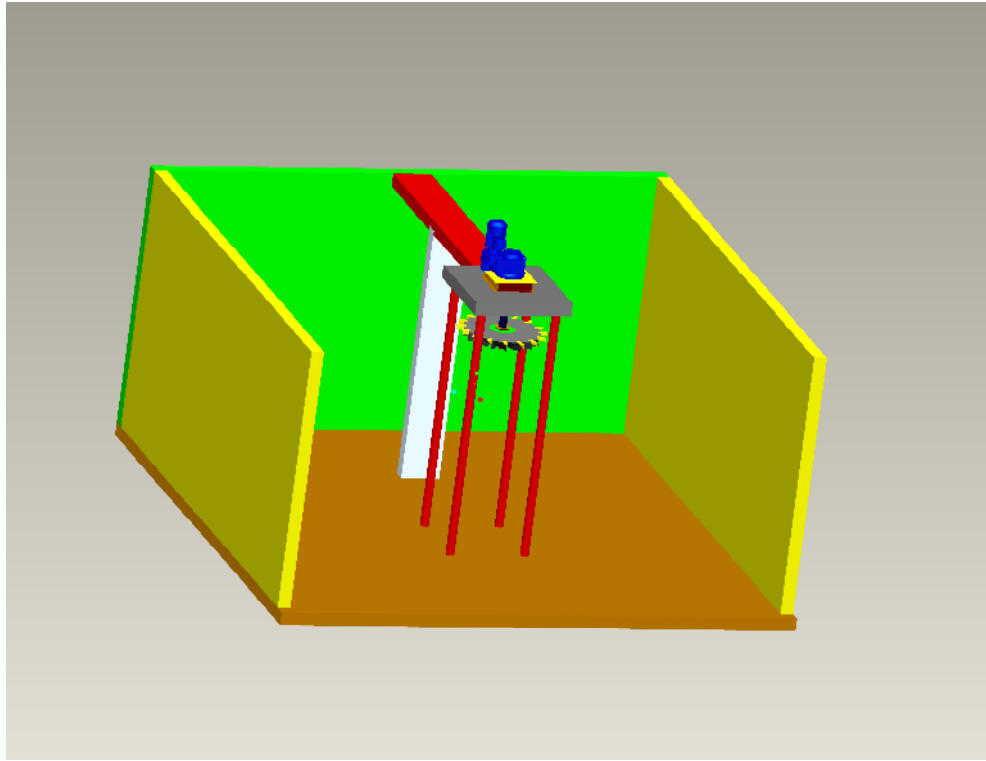


**Şekil 6.1. (a)** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcısı [Astım, Katalog].

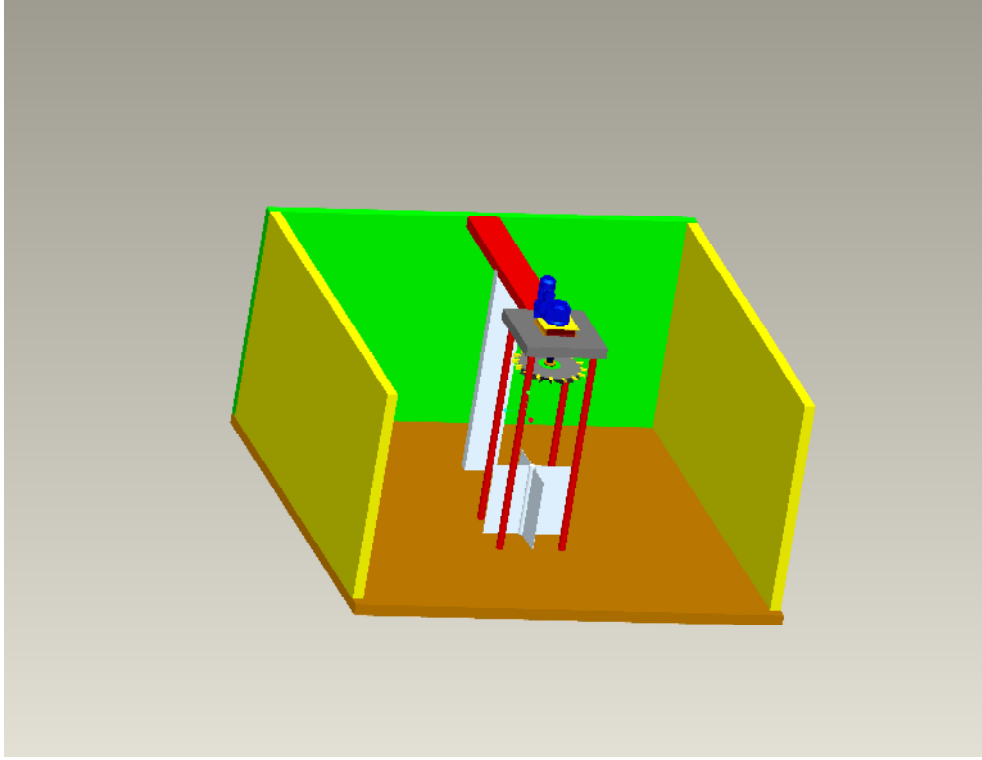


**Şekil 6.1. (b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcısı [Biwater Treatment, Brochure].

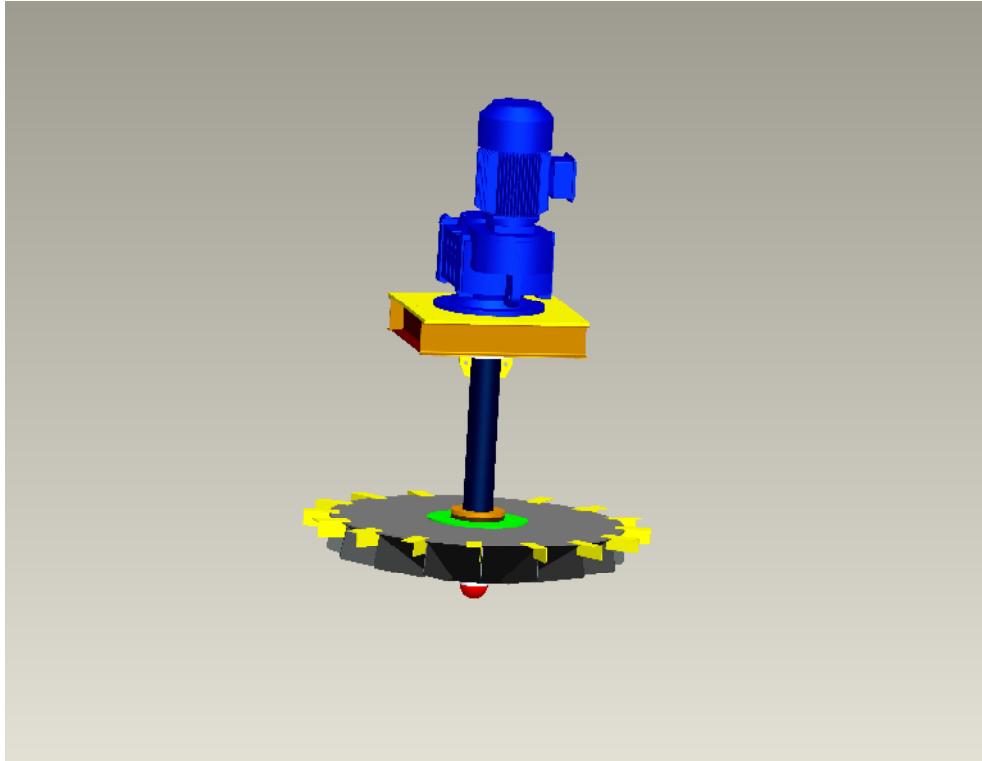
Atıksu arıtma tesislerinin biyolojik arıtma proseslerinde havalandırma amaçlı kullanılan düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcıların hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi için ilk aşama yukarıda bahsedildiği gibi modelin oluşturulmasıdır. Model geometrisi, akım kırıcsız ve akım kırıclı havuz için Şekil 6.2. (a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi Pro-Engineer programında oluşturulduktan sonra farklı kaydet seçeneğindeki \*parasolid\_x.t formatı seçilerek dosya uzantısı \_x.t olarak kaydedilerek ANSYS Workbench yazılımı içerisindeki Design-Modeler programına aktarılmış, burada her iki modelin sadece akışkan kısımları oluşturularak model basitleştirilmiştir. Bu işlem, Design-Modeler programındaki **Fill** seçeneği kullanılarak gerçekleştirilmiş, havuzun boş kısmının akışkanla dolması sağlanmış ve geriye kalan betonarme kısımlarına HAD prosesi açısından ihtiyaç duyulmamıştır. Çünkü HAD yöntemi, yalnızca akışkan bölgelerin çözümünü gerçekleştirdiğinden betonarme yapının kullanılması hem işlemi zorlaştıracığından, hem de çözüme herhangi bir katkısı olmayacağından dolayı kullanılmamıştır.



**Şekil.6.2. (a)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı 3 boyutlu CAD modeli



**Şekil.6.2. (b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı 3 boyutlu CAD modeli



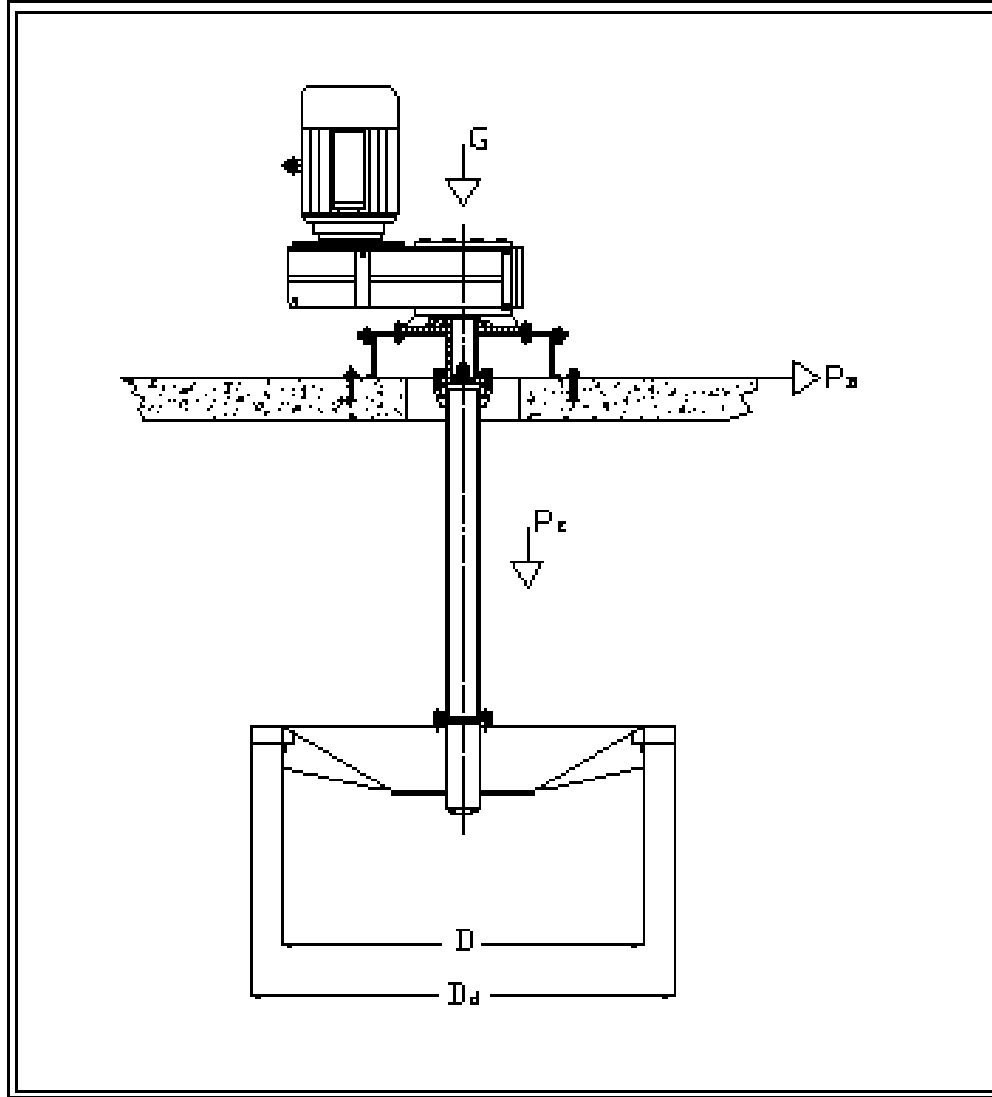
**Şekil.6.2. (c)** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesi 3 boyutlu CAD modeli

Havalandırma havuzlarında, havalandırma ve karıştırma proseslerinin etkili olabilmesi için boyutların birbiriyle orantılı olması gereklidir. Bu çalışmada kullanılan pervane geometrisi, Arbiogaz A.Ş. firmasına ait havalandırıcı modeli esas alınarak oluşturulmuştur. Tablo 6.1.'den, pervane motor gücü 45 kW seçilerek, pervanenin dönme hızı ve pervane boyutları belirlenmiştir. Modellemede kullanılan havalandırıcı havuz boyutları ise U.S. Filter/Envirex Products firmasının kataloğundan alınmıştır (Şekil 6.4.). Katalogta verilen ölçüler, İngiliz birim sisteminden metrik sisteme çevrilerek düzenlenmiştir. Buradaki çizelgede, tablo 6.1'de seçilen pervanenin 60 HP=45 kW motor gücü için belirlenen havuz boyutları kullanılmıştır.

**Tablo 6.1.** Havalandırıcı pervane seçim tablosu [Arbiogaz, Katalog]

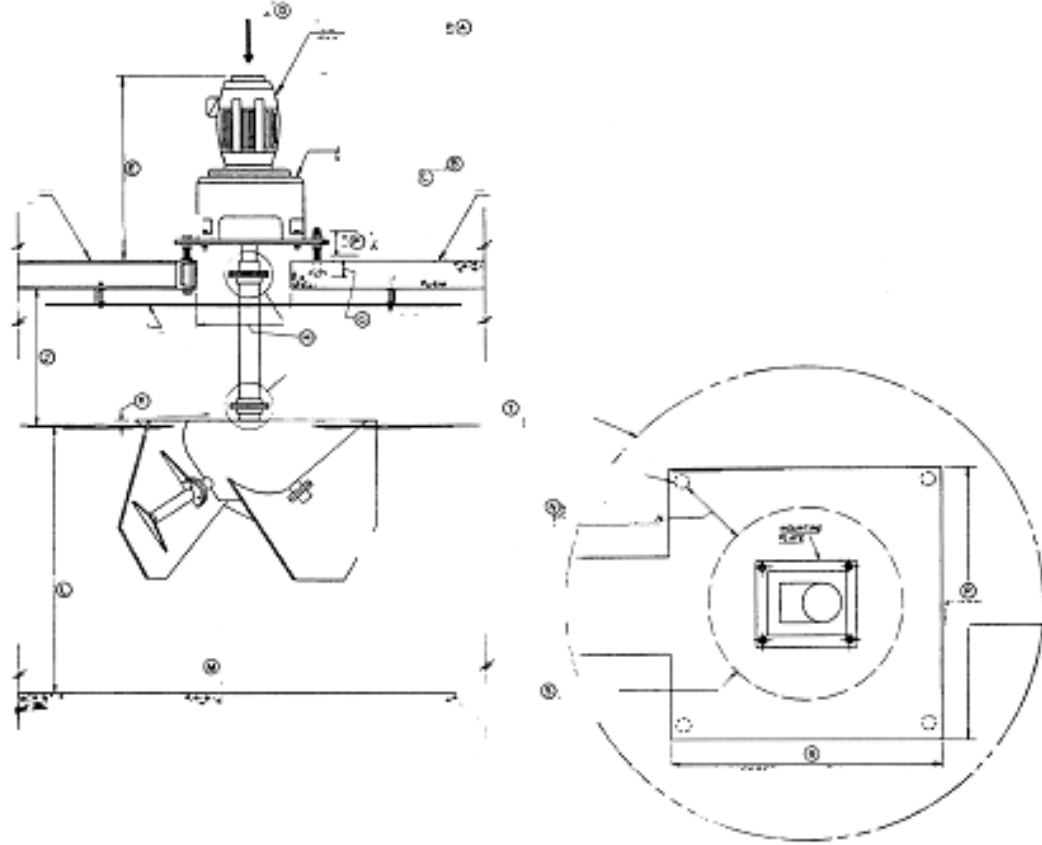
| MOTOR<br>GÜCÜ<br>KW | DEVİR<br>rpm | DİNAMİK YÜK         |                     | AĞIRLIK*<br>G<br>(kg) | PERVANE<br>ÇAPI<br>D<br>(mm) | PERVANE<br>BOYUTLARI<br>DdxH<br>(mm) |     |
|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----|
|                     |              | DÜŞEY<br>PE<br>(kg) | YATAY<br>PR<br>(kg) |                       |                              |                                      |     |
| 18                  | 74           | 578                 | 442                 | 500                   | 1250                         | 1550                                 | 230 |
| 25                  | 57           | 780                 | 686                 | 730                   | 1450                         | 1750                                 | 280 |
| 30                  | 57           | 865                 | 780                 | 730                   | 1530                         | 1830                                 | 300 |
| 37                  | 52           | 1280                | 978                 | 1020                  | 1650                         | 1950                                 | 300 |
| 45                  | 53           | 1440                | 1100                | 1550                  | 1750                         | 2050                                 | 320 |
| 55                  | 53           | 1440                | 1350                | 2230                  | 1750                         | 2050                                 | 320 |
| 75                  | 42           | 2080                | 1930                | 2870                  | 2100                         | 2400                                 | 370 |
| 90                  | 36,4         | 2700                | 2340                | 3500                  | 2400                         | 2700                                 | 370 |
| 110                 | 33,5         | 3300                | 2810                | 3500                  | 2650                         | 2950                                 | 400 |
| 132                 | 33,5         | 3300                | 3380                | 2970                  | 2650                         | 2950                                 | 400 |
| 160                 | 29,5         | 4300                | 4100                | 4120                  | 3000                         | 3300                                 | 420 |

**\*AERATÖR AĞIRLIĞI SEÇİLEN REDÜKTÖRE GÖRE DEĞİŞEBİLİR.**

**Tablo 6.1.** Havalandırıcı pervane seçim tablosu (Devam) [Arbiogaz, Katalog]

Havalandırma havuzunda kullanılan pervanenin tavan ölçüsü, 45 kW motor gücü seçildiğinde,  $\phi 1,75$  m, taban ölçüsü  $\phi 0,677$  m, pervane yüksekliği 0,32 m, bıçak sayısı 16 adet, kanatçık sayısı 16 adet, mil çapı  $\phi 0,2$  m, devir 53 d/d'dır. Havalandırma havuzunda meydana gelen girdap etkilerini azaltmak için havuzun içerisine “akım kırıcı (baffles)<sup>[1]</sup>” denilen engeller yerleştirilmiştir. Akım kırıcı ölçüleri, ASTİM firmasından alınmış olup, boyutlar kullanılan pervane çapına göre 10x2000x2000 mm alınmıştır. Akım kırıcı ortasındaki silindirik parçanın çapı da mil çapıyla aynı olup,  $\phi 0,2$  m alınmıştır.

<sup>[1]</sup> Akışkan sistemlerinde türbülansı ve karıştırmayı artırmak için kullanılan çıkıntılara verilen isim



| A   | B      | C     | D     | E  | F  | G  | H  | J   | K   | L      |        | M      |        | N   | P   | R   | S  | T  |
|-----|--------|-------|-------|----|----|----|----|-----|-----|--------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|----|----|
| HP  | FT LBS | LBS   | LBS   | IN | IN | IN | IN | FT  | IN  | MIN FT | MAX FT | MIN FT | MAX FT | FT  | FT  | FT  | IN | FT |
| 5   | 390    | 100   | 1,690 | 48 | 3  | 7  | 13 | 3.5 | 3   | 5      | 10     | 20     | 40     | 2   | 7   | 6.5 | 40 | 9  |
| 7.5 | 580    | 150   | 1,690 | 48 | 3  | 7  | 13 | 3.5 | 3   | 5      | 12     | 20     | 40     | 2   | 7   | 6.5 | 44 | 10 |
| 10  | 625    | 200   | 1,675 | 48 | 3  | 7  | 13 | 3.5 | 4   | 5      | 14     | 20     | 40     | 3   | 7   | 6.5 | 40 | 16 |
| 15  | 788    | 300   | 1,900 | 48 | 3  | 7  | 13 | 3.5 | 4   | 6      | 16     | 25     | 55     | 3.5 | 7   | 6.5 | 43 | 18 |
| 20  | 1,050  | 400   | 2,050 | 59 | 3  | 7  | 15 | 4.0 | 5   | 6      | 16     | 30     | 60     | 3.5 | 7   | 6.5 | 47 | 22 |
| 25  | 1,313  | 500   | 2,150 | 59 | 3  | 7  | 15 | 4.0 | 5   | 8      | 18     | 35     | 65     | 4.0 | 7   | 6.5 | 50 | 23 |
| 30  | 1,575  | 600   | 2,700 | 59 | 3  | 7  | 15 | 4.0 | 5   | 8      | 18     | 35     | 70     | 4.0 | 7   | 7   | 53 | 25 |
| 40  | 2,500  | 800   | 2,900 | 63 | 3  | 9  | 15 | 4.5 | 6.5 | 8      | 18     | 35     | 75     | 4.5 | 7.5 | 8   | 62 | 27 |
| 50  | 3,125  | 1,000 | 3,900 | 63 | 3  | 9  | 15 | 4.5 | 6.5 | 10     | 20     | 35     | 80     | 4.5 | 7.5 | 8   | 64 | 28 |
| 60  | 3,750  | 1,200 | 4,900 | 63 | 2  | 9  | 18 | 5.0 | 8   | 10     | 20     | 40     | 80     | 5.0 | 7.5 | 8   | 66 | 32 |
| 75  | 4,690  | 1,500 | 5,100 | 77 | 2  | 12 | 18 | 5.0 | 8   | 12     | 22     | 40     | 90     | 5.5 | 8   | 8   | 68 | 34 |
| 100 | 7,725  | 2,000 | 7,350 | 80 | 2  | 12 | 18 | 5.0 | 10  | 12     | 24     | 55     | 110    | 5.0 | 8   | 9   | 80 | 34 |

**Şekil 6.3.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının havuz yerleşim ölçüleri [courtesy of US Filter–Envirex, Waukesha, WI].

### Seçilen Havalandırıcı Değerleri

|                 |                                                          |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| Havuz ölçüsü    | genişlik x en x yükseklik, 12,192 m x 12,192 m x 3,185 m |
| Kanatçık çapı   | 2.05 m                                                   |
| Bıçak sayısı    | 16 adet                                                  |
| Kanatçık sayısı | 16 adet                                                  |
| Devir sayısı    | 53 d/d                                                   |

|                    |                                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------|
| Mil çapı           | 0.2 m                                                  |
| Su seviyesi        | 1.658 m (havuz taban kısmından başlanarak ölçülmüştür) |
| <i>Su seviyesi</i> | 0.15 m (pervane üst yüzeyinden başlanarak ölçülmüştür) |

## 6.2. Model Ağ Yapısı ve Sınır Koşulları

Modelde simülasyona başlamadan önce uygun bir ağ yapısının oluşturulması çok önemlidir. Bu ağ sistemi, hesaplama alanının çok küçük alt hesaplama alanlarına (veya hacimlerine) bölünmesi ve gerekli matematiksel çözümlerin tüm bu ağ elemanlarında ayrı ayrı yapıp daha sonra hepsinin birleştirilerek tüm hesaplama alanı içindeki nihai çözümün elde edilmesi için kullanılır. Ağ sisteminin, simülasyonun sayısal çözüm dengesi ve doğruluğu üzerinde geniş bir etki oluşturduğu bilinmektedir. Model geometrisi, ağ sistemi tarafından tanımlanan kontrol hacimlerinden oluşur. Hesaplama alanı içindeki ağ yoğunluğu ne kadar fazla olursa, genel olarak akışkan dinamiği çözümünün hassasiyeti de o kadar artar denilebilir.

Akış problemlerinde karmaşıklık, 3 boyutlu oluşları ve türbülans etkisinden dolayı denklemlerin, ilgili sınır koşulları ile analitik olarak çözülmesi mümkün değildir. Bu nedenle denklemlerin çözülmesi için çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar sonlu farklar, sonlu hacimler ve sonlu elemanlar ile genellenebilir. Bu yöntemlerin üçü de akışkanlar mekaniği için uygulanabilir, ancak yapılan araştırmalar ve edinilen tecrübeler, sonlu hacimler yöntemi ile kolay ve hassas çözümlerin elde edilebileceğini göstermiştir. Sonlu Hacimler Yönteminin yaygınlaşmasındaki diğer bir etken ise, bu yöntemin kompleks ve eğrisel geometrilerde uygulanabilmesidir.

Denklemler çözülmeden önce akış hacminin ve sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Akış hacminin net olarak bilinmesi önemli olup, denklemlerin hangi hacim için çözüleceği net olarak bilinmelidir. Sonlu Hacimler Yönteminde akış hacmi küçük sonlu hacimlere bölünmekte (discretization) ve ilgili denklemler her bir sonlu hacim için ayrı ayrı çözülmemektedir. Denklemlerin çözümü için sayısal yöntemlere ve gelişmiş bilgisayar programlarına ihtiyaç vardır.

Her ne kadar küçük sonlu hacimlerin kullanılması daha hassas çözümün elde edilmesini sağlasa da, akış hacminin gereğinden fazla sayıda sonlu hacimlere bölünmesi bilgisayar kapasitesini zorlamakta ve analiz zamanını uzatmaktadır. Uygun bölme sayısının bulunması için tavsiye edilen yöntem, bölme işlemine öncelikle büyük sonlu hacimler ile başlamak ve analiz sürecinin belirli bir evresinde sonlu hacimlerin küçük olması gereken yerleri tespit edip, sadece o bölgelerdeki hacimleri daha küçük sonlu hacimlere bölmektir.

Akış hacmi bölündükten sonra yüzeylerdeki sınır şartının tipi, bilgi olarak programa verilmelidir. Akış hacminin hangi bölgelerinin akışkan, hangi bölgelerinin katı sınırlar ile çevrili olduğu bu aşamada tanımlanır. Hangi yüzeyden akış hacmine akışkan aktığı, hangi yüzeyden akışkanın çıkacağı, akış hacminin duvar yüzeyleri ve arayüzeyler bilgi olarak programa bu aşamada verilmektedir.

Bir akışın incelenmesinde, katı yüzeylerinde oluşan sınır tabakaya da önem verilmelidir. Sınır tabakanın göz ardı edilmesi, hem yanlış hız dağılımının elde edilmesi hem de katı yüzeyindeki hız değişimine göre hesaplanan gerilmeler, sürtünme katsayısı ve tork değerinin yanlış bulunmasına neden olmaktadır. Hız değişiminin yüksek olduğu katı yüzeylerine yakın bölgelerde daha yoğun ve sınır tabakanın akışına uygun bölmeler yapılmalıdır.

Ağ yapısının düzgün ve kaliteli olması, sayısal analiz sonuçlarının hassasiyeti üzerinde önemli rol oynar. Tetrahedral ağ (mesh) elamanların dağılımı, düzgünlüğü, ağ yapısının kalitesini etkileyen önemli parametrelerdir. Katı yüzey yakınlarında oluşan sınır tabakaları büyük gradyan bölgeleri oluşturduğundan dolayı, hücreden hücreye geçişlerde, akışkan değişkenlerindeki değişimi minimize edecek şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur.

Yukarıda bahsedildiği üzere, problemin çözümünde sonlu hacimler kullanılmıştır. Pro-Engineer Wildfire programında oluşturulan model, ANSYS Design-Modeler programında gerekli düzenleme ve basitleştirmeler yapıldıktan sonra ANSYS ICEM CFD gelişmiş ağ (mesh) programında sonlu hacimlere ayrılmıştır. Bu programın seçilmesinin amacı ise, HAD analizlerini bilgisayar ortamında daha hassas bir şekilde çözümleyebilmesidir. Çeşitli denemelerde

oluşturulan sonlu hacim boyutunun analiz sonuçlarını hissedilir derecede değiştirdiği gözlemlenmiştir.

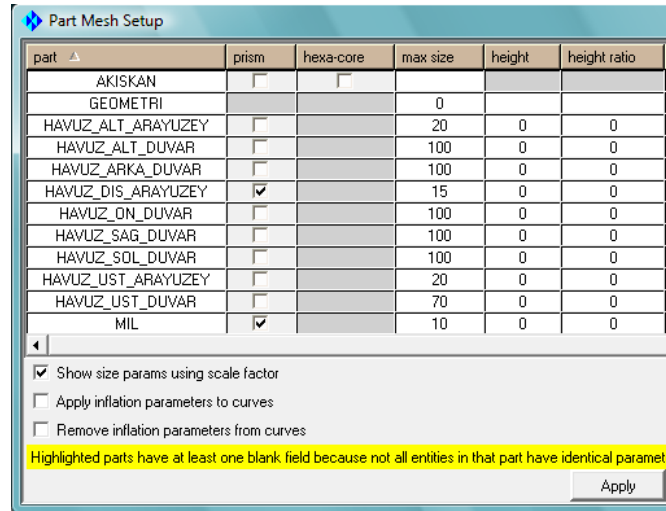
Tez çalışmasında kullanılan havalandırıcı havuz modeli, havuz, havuzun ortasına yerleştirilmiş mil, mile bağlı pervane, pervaneye bağlı bıçak ve kanatçıklardan, ikinci model ise aynı ekipmanların yanında ayrıca akım kırıcı eklenmesiyle oluşmuştur. Bu çalışmada biri sadece betonarme havuzu içerisindeki pervanenin, diğeri ise aynı sisteme ek olarak betonarme havuzun tabanından başlayarak pervaneyle aynı ekseninde yer alan dikey yönde yerleştirilmiş akım kırıcının bulunduğu havuz içerisindeki havalandırılan atıksuyun etkileri, her iki durum için ayrı ayrı incelenmiştir. Ağ yapısının oluşturulabilmesi için Design-Modeler kısmında oluşturulan akışkan model parasolid \_x.t. formatında export edildikten sonra ANSYS ICEM-CFD gelişmiş ağ (mesh) programı içerisinde daha sonra ANSYS CFX programındaki **Moving Reference Frame** (MRF) (model kayar mesh) uygulamasının yapılabilmesi amacıyla iki ayrı model olarak sistem oluşturulmuştur. Tüm yüzey durumlarına uygulanabilirliği, kolay oluşturulabilmesi ve çözümlenebilmesi gibi özelliklerinden dolayı ağ yapısı olarak, yapısal olmayan tetrahedral ağ (mesh) elemanlar kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedildiği gibi hız değişiminin yüksek olduğu pervane miline sınır tabaka bölgesi oluşturulmuştur. Bunun için bu bölgeye daha düzgün geçiş için prizma eleman atanmıştır. Havuz duvarları, boyut itibarıyla büyük olduğundan ve çözümde çok fazla hassasiyete gerek duymadığından ağ ölçüleri büyük seçilmiştir. Buna karşılık pervane kısmı ve akım kırıcı geometrisi, çözümde daha hassas sonuçlara varmak açısından, ayrıca boyutları da göz önüne alınarak daha küçük ağ ölçüleri verilmiştir. Ağ oluşturulduktan sonra HAD analizi yapılabilmesi için pervane ve havuz ağ yapısı, output seçeneği ile ANSYS-CFX programında çalıştırılmak üzere .cfx5 dosya uzantısıyla kaydedilmiştir.

### **6.2.1. Akım Kırıcısız ve Akım Kırıcılı Düşük Hızlı Düşey Milli Mekanik Yüzey Havalandırıcının Sonlu Hacimlere Ayrılması**

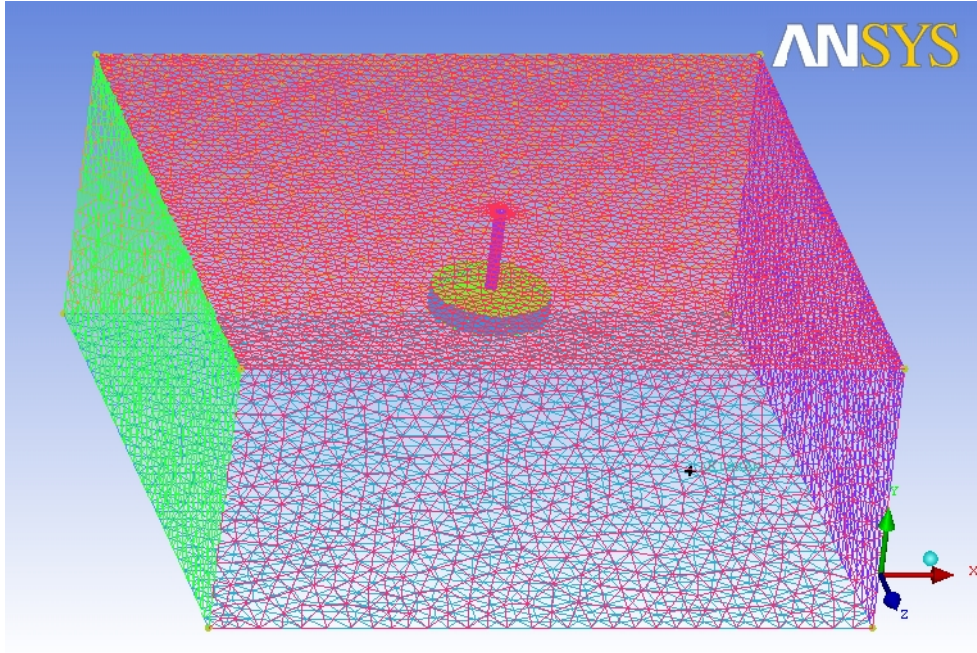
Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun ağırlara bölünmesinde (mesh), geometrinin farklı bölgelerine farklı boyutlarda ağ (mesh) atanmıştır. Şekil 6.4'te bu boyutlar, belirlenen bölgeler için verilmiştir.

Havuz duvarları boyut bakımından büyük olduğundan (12,192x5185mm) ve işlem kolaylığı açısından bu bölgelerdeki her bir ağ ölçüsü maksimum 100 mm aralıktadır verilmiştir. Yalnızca üst duvar ölçüsü, pervane miliyle bağlantılı olduğundan dolayı diğer duvar bölgelerinden daha hassas olarak maksimum 70 mm verilmiştir. Havuz ve pervane, kayar mesh uygulaması için birleşim arayüzündeki alt ve üst değerler de sonuçların daha doğru bulunması açısından maksimum 20 mm verilmiştir. Mil arayüzeyi ise, boyut açısından en hassas ağ atmasına gerek duyduğundan değer olarak maksimum 10 mm aralık verilmiş, ayrıca bölgede daha düzgün hız geçişi olması açısından prizma eleman atanarak sınır tabaka oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, havuz-pervane birleşim arayüzünde dış kısım maksimum 15 mm verilmiş, bu bölgeye de dönel arayüzey bölgesinde olduğundan dolayı daha düzgün değer vermesi için prizma eleman atanmıştır. Havuz iç kısmı, akışkan madde olarak atanmıştır.



**Şekil 6.4.** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun ağ (mesh) ölçüleri

Ağ ayarları yapıldıktan sonra tetrahedral (dört yüzlü) ağ seçeneği çalıştırılmış, daha sonra boyutların uygun olduğu görülmüş ve ANSYS CFX programına Output seçeneğiyle .cfx5 dosyası olarak bilgiler kaydedilmiştir. Akım kırıcsız model için 231133 sonlu hacim elde edilmiştir. Şekil 6.5.'te akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun 3 boyutlu tetrahedral ağ yapısı görülmektedir.



**Şekil.6.5.** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun 3 boyutlu tetrahedral ağ yapısı

Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli havalandırıcı havuzundaki aynı değerler akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı için de kullanılmış, sadece akım kırıcı modeli havuza eklenmiş ve bu bölgedeki akım kırıcı gövde ve silindirik kısmına maksimum 10 mm, akım kırıcı sac kalınlığına ise maksimum 2 mm ağ aralık değeri verilmiştir. Şekil 6.6’da bu boyutlar, belirlenen bölgeler için görülmektedir.

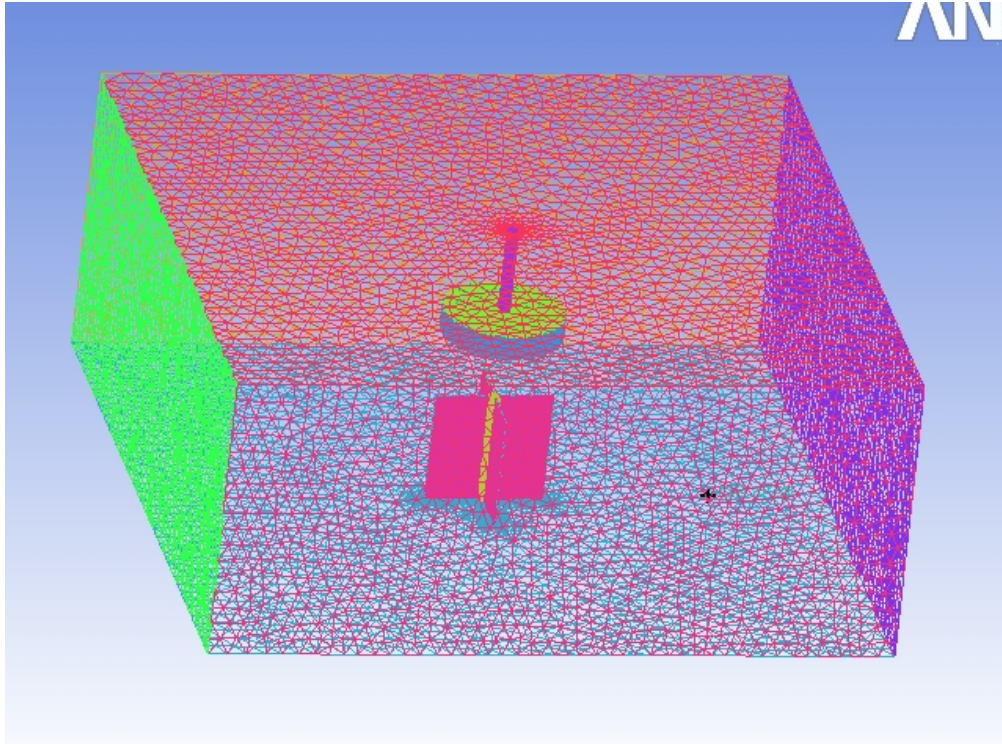
| part               | prsm                                | new-core                 | max size | height | height ratio |
|--------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------|--------|--------------|
| AKIM_KIRICI_GOVDE  | <input type="checkbox"/>            |                          | 10       | 3      | 0            |
| AKIM_KIRICI_FIM    | <input type="checkbox"/>            |                          | 10       | 3      | 0            |
| AKIM_KIRICI_SAC    | <input type="checkbox"/>            |                          | 2        | 3      | 0            |
| AKISCAN            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |          |        |              |
| GEOMETRI           |                                     |                          | 0        |        |              |
| HAVUZ_A_T_ARAYUZEY | <input type="checkbox"/>            |                          | 20       | 3      | 0            |
| HAVUZ_ALT_DUVAR    | <input type="checkbox"/>            |                          | 100      | 3      | 0            |
| HAVUZ_ARKA_DUVAR   | <input type="checkbox"/>            |                          | 100      | 3      | 0            |
| HAVUZ_DIS_AYAYUZEY | <input checked="" type="checkbox"/> |                          | 15       | 3      | 0            |
| HAVUZ_ON_DUVAR     | <input type="checkbox"/>            |                          | 100      | 3      | 0            |
| HAVUZ_SAG_DUVAR    | <input type="checkbox"/>            |                          | 100      | 3      | 0            |
| HAVUZ_SOL_DUVAR    | <input type="checkbox"/>            |                          | 100      | 3      | 0            |
| HAVUZ_USI_ARAYUZEY | <input type="checkbox"/>            |                          | 20       | 3      | 0            |
| HAVUZ_UST_DUVAR    | <input type="checkbox"/>            |                          | 70       | 3      | 0            |
| MIL                | <input checked="" type="checkbox"/> |                          | 10       | 3      | 0            |

☒ Show size params using scale factor  
☐ Apply inflation parameters to curves  
☐ Remove inflation parameters from curves  
Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters

Apply

**Şekil 6.6.** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı havuzunun ağ (mesh) ölçüleri

Akım kırıcılı model için de ağ ayarları yapıldıktan sonra tetrahedral (dört yüzlü) ağ seçeneği çalıştırılmış, daha sonra boyutların uygun olduğu görülmüş ve ANSYS CFX programına Output seçeneğiyle .cfx5 dosyası olarak bilgiler kaydedilmiştir. Akım kırıcılı model için ise 1326887 sonlu hacim elde edilmiştir. Bu sonuçların arasındaki büyük fark, akım kırıcı geometrisinin boyutları ve hassas ağ (mesh) ölçülerinin verilmiş olmasındandır. Şeki 6.7.de akım kırıcılı model için ağ görüntüsü görülmektedir.



**Şekil.6.7.** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının 3 boyutlu tetrahedral ağ yapısı

Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesinde, boyutlar bölgelere göre belirlenmiştir (Şekil 6.8.). Burada dikkat edilmesi gereken nokta, pervane geometrisinde tüm bölgelerin hassas ağ ile oluşturulması gerektiğidir. Burada bıçak için maksimum ağ ölçüsü 10 mm, kanatçık için 7,5 mm, pervane mili için 15 mm verilmiştir. Diğer ölçüler geometri boyutuna göre daha büyük ağ ölçüsünde verilmiştir. Bu modelde de sınır tabaka bölgesi mil ve arayüzey dış kısmı için oluşturulmuştur.

| part                 | prism                               | hexa-core                | max size | height | height ratio |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------|--------|--------------|
| AKISKAN_ARAYUZEY     | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |          |        |              |
| BICAK                | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | 10       | 0      | 0            |
| CISIM                | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |          |        |              |
| GEOMETRI             | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |          |        |              |
| KANATICIK            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | 7.5      | 0      | 0            |
| PERVANE              | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |          |        |              |
| PERVANE_ALT          | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | 20       | 0      | 0            |
| PERVANE_ALT_ARAYUZEY | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | 60       | 0      | 0            |
| PERVANE_DIS          | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | 25       | 0      | 0            |
| PERVANE_DIS_ARAYUZEY | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 40       | 0      | 0            |
| PERVANE_MIL          | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 15       | 0      | 0            |
| PERVANE_UST          | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | 30       | 0      | 0            |
| PERVANE_UST_ARAYUZEY | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | 60       | 0      | 0            |

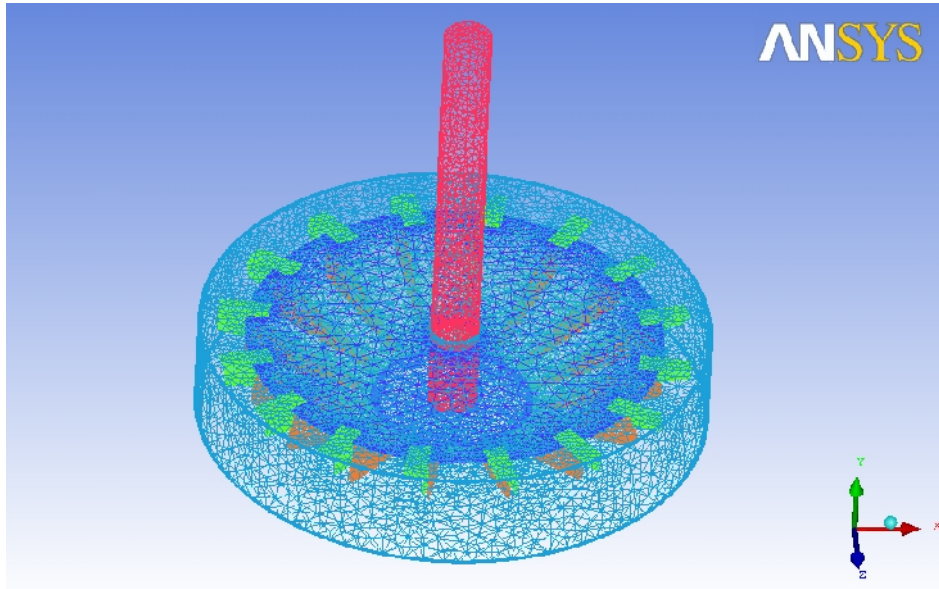
☒ Show size params using scale factor  
☐ Apply inflation parameters to curves  
☐ Remove inflation parameters from curves

Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters

Apply

**Şekil 6.8.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesinin ağ (mesh) ölçüleri

Pervane modeli için ağ ayarları yapıldıktan sonra tetrahedral (dört yüzlü) ağ seçeneği pervane modeli için çalıştırılmış, daha sonra boyutların uygun olduğu görülmüş ve ANSYS CFX programına Output seçeneğiyle .cfx5 dosyası olarak bilgiler kaydedilmiştir. Pervane modeli için 1001847 sonlu hacim elde edilmiştir. Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesinin sonlu eleman ağ görüntüsü şekil 6.9.'da verilmiştir.



**Şekil 6.9.** Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı pervanesinin 3 boyutlu tetrahedral ağ yapısı

### 6.2.2.Çözüm İçin Sınır Şartlarının Verilmesi

Modellerin oluşturulup ağ (mesh) haline getirilmesinden sonra çözüm işlemine geçmek için CFX-Pre yazılımı ile sınır şartlarının verilmesi gereklidir.

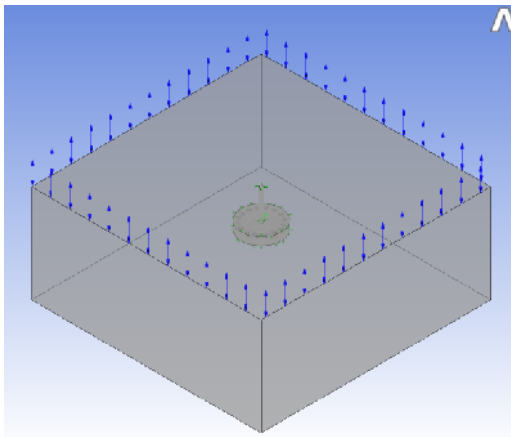
ANSYS ICEM CFX programından *Output* seçeneği ile kaydedilen .cfx uzantılı dosya, CFX-Pre programında ICEM CFD Mesh seçeneğiyle havuz ve pervane olmak üzere iki adet ağ dosyası açılarak Havuz ve Pervane adıyla iki adet bölge (*Domain*) oluşturulur.

Havuzun özelliklerinin girilmesinin ardından pervane için bir bölge (*domain*) oluşturulur.

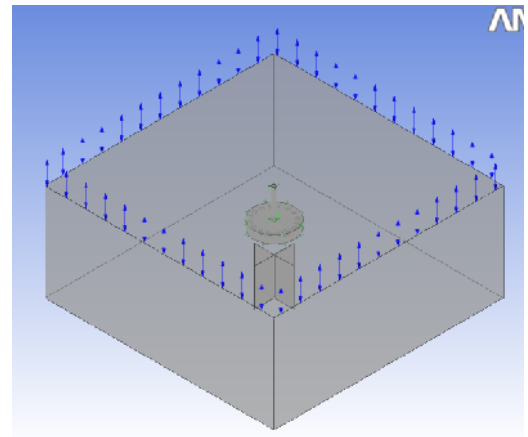
Havalandırıcı pervanenin dönüşü **Moving Reference Frame** (MRF) yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntemde kanadın dönme hızı ve dönüş eksenini verilerek dönme etkileri modellenenbilmektedir. Kullanılan yöntem, Euler-Euler çoklu faz homojen model ve serbest yüzey akış kabulüyle, 3-boyutlu Navier-Stokes denklemlerinin ANSYS-CFX paket programı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çözülmesini içermektedir. Homogeneous multiphase flow (Homojen Çoklu faz Akış), tüm akışkanların aynı hız alanları ve konuyla ilgili diğer alanlar, sıcaklık, türbülans v.b. paylaştığı Euler-Euler çoklu faz durumuyla sınırlandırılmıştır. Bölüm 5.4.1.2.'de bahsedildiği gibi, Euler-Euler çoklu faz modeli her bir akışkan için, bir sürekli faz gibi davranmakta ve her akışkan için korunum kanunları uygulamaktadır. Mekanik yüzey havalandırıcılar, sıvı-gaz birleşim yüzeyinde serbest yüzey akışlı sisteme sahiptir. Bu sebeple Domain kısmında free-surface flow seçeneği işaretlenmiştir. Havuz içerisindeki akışkan çözümü zamandan bağımsız (steady state) olarak seçilmiş, havalandırmadan önceki ve sonraki atıksu prosesleri tezde kullanılmadığından giriş (inlet) ve çıkış (outlet) bölgeleri yerine havuz içerisindeki suyun sabit hacimde olduğu varsayılarak yalnızca havuza atmosferden hava giriş ve çıkışını sağlayan Atmosferik Ortam (ambient) bölgesi oluşturulmuş, burada havuza giren ve havuzdan çıkan hava 25 °C ve 1 atm basınç olarak öngörülmüştür. Duvar yüzey koşulları akış ve katı bölgelerinin sınırlamasını sağlamak amacıyla kullanılır. Duvar koşulları akışın hareketine etki eder. Çalışmada modellenen havuz alt duvar, havuz yan duvarlar ve akım kırıncılı modelde akım kırıncının kenar yüzeyleri, betonarme bölgesindeki katı yüzeyler arasında akış alanı olduğundan dolayı, akışkan

hacmini sınırlayan bu yüzeylere Wall (katı duvar) sınır şartı uygulanmıştır. Katı duvarlarda ise kaymama sınır şartı (No Slip Wall) mevcuttur. Pervane ve havuzun arayüzeyini oluşturan silindirik akışkan bölgesi, arayüzey sınır şartına sahiptirler. Yani bu bölgeler, havuz için sabit (stationary), pervane için ise dönel (rotating) seçilmiştir. Pervanenin dönme hızı 53 d/dk vermiştir. Havuz üst duvar bölgesi ise atmosfere açık olduğundan ve atmosferden oksijen transferini gerçekleştirdiğinden dolayı Opening (giriş ve çıkışa izin veren bölge) sınır şartına sahiptir. Sayısal modele ait havuz içerisinde akışkan olarak temiz suyun 20°C'deki fiziksel özellikleri kullanılmıştır.

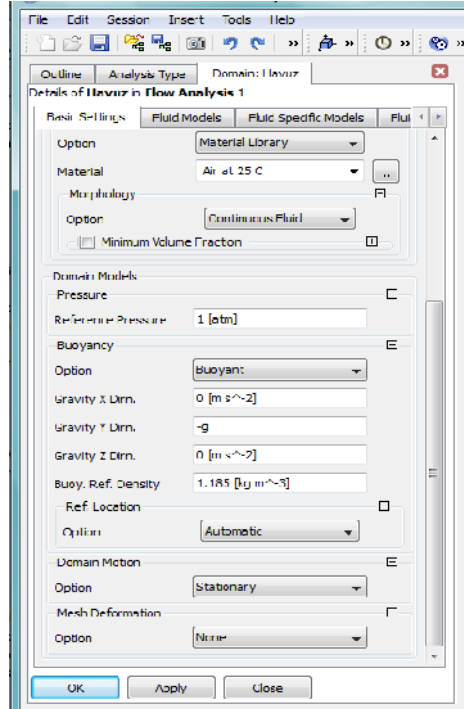
Su bölgesi türbülanslı akış yapısında olduğundan türbülans modeli olarak en yaygın kullanılan iki denklemlilik model olan standart  $k - \varepsilon$  modeli kullanılmıştır. Burada,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  momentum denklemleri,  $k$  denklemi ve  $\varepsilon$  denklemi kullanılmıştır. Ayrıca düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılar, serbest yüzey karakteri gösterdiğinden, veri girişinde free surface flow seçeneği girilmiştir. Şekil 6.10.(a) ve (b)'de sırasıyla akım kırıcsız ve akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının sınır şartı görüntüsü verilmiştir. Şekil 6.11.(a), (b), (c) ve (d)'de, havuz bölgesine ait özellikler, şekil 6.12. (a), (b), (c) ve (d)'de .de ise pervane bölgesine ait özellikler girilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, akım kırıcılı ve akım kırıcsız havalandırıcı modelindeki özelliklerin aynı olmasıdır.



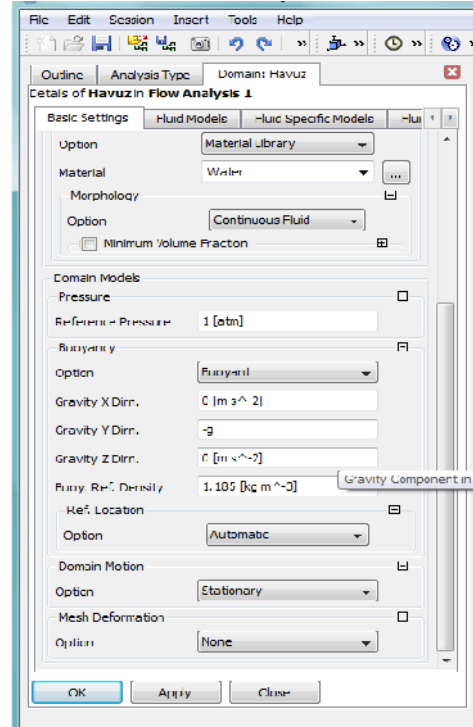
**Şekil 6.10.(a)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının CFX sınır şartları



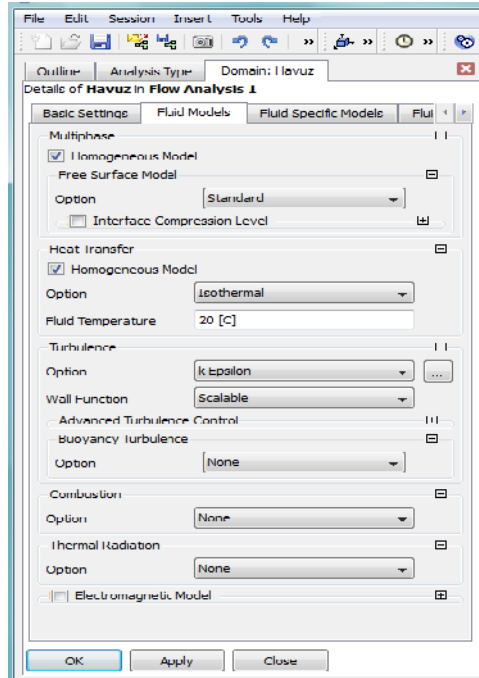
**Şekil 6.10.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının CFX sınır şartları



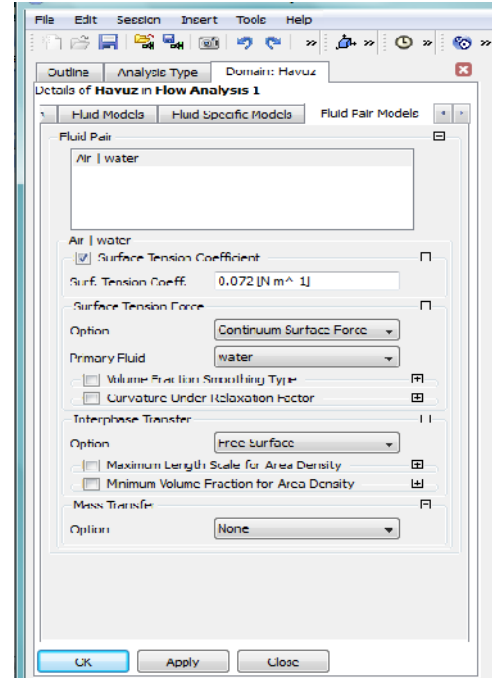
Şekil 6.11.(a) Havuz bölgesi için havanın özelliklerinin girilmesi



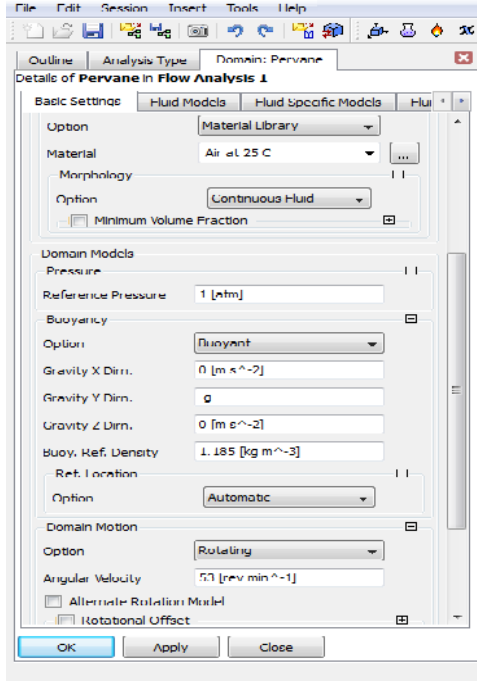
Şekil 6.11.(b) Havuz bölgesi için suyun özelliklerinin girilmesi



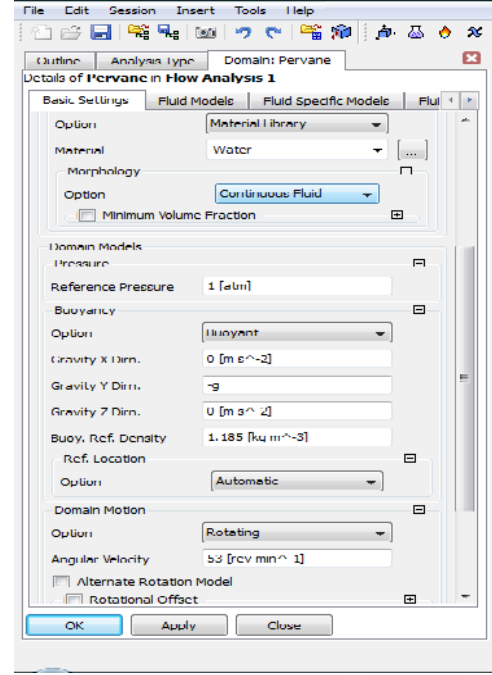
Şekil 6.11.(c) Havuz bölgesi için akış karakterinin girilmesi



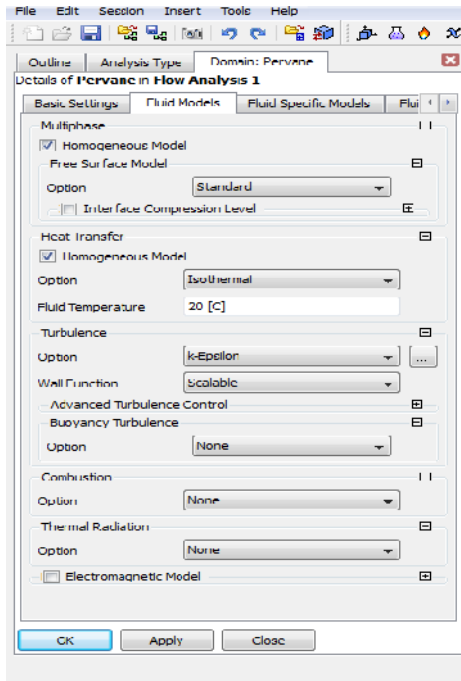
Şekil 6.11.(d) Havuz bölgesi için serbest yüzey modelinin girilmesi



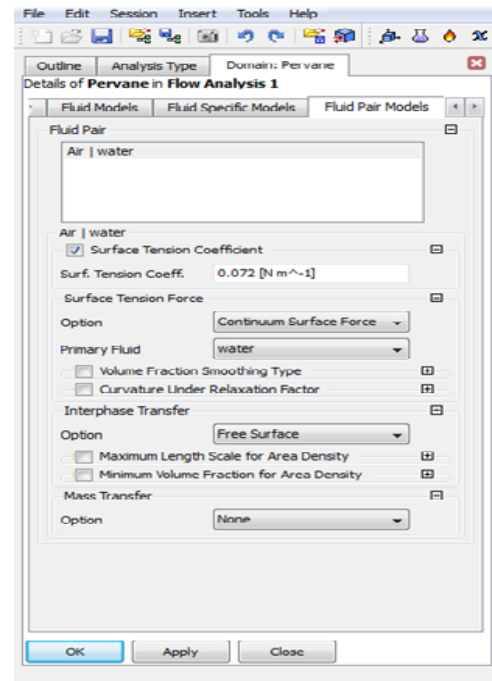
Şekil 6.12.(a) Pervane bölgesi için havanın özelliklerinin girilmesi



Şekil 6.12.(b) Pervane bölgesi için suyun özelliklerinin girilmesi



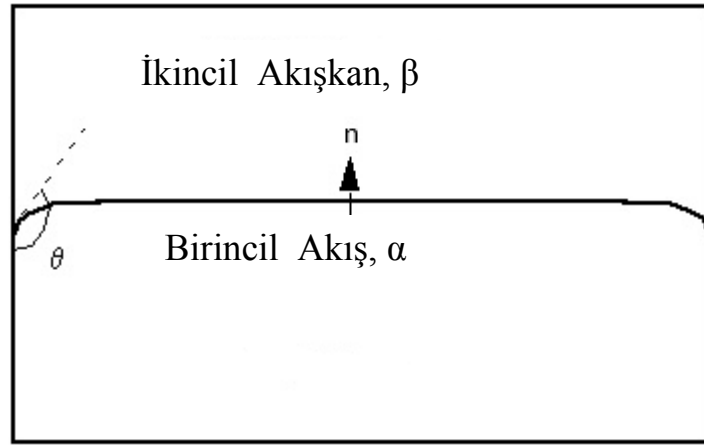
Şekil 6.12.(c) Pervane bölgesi için akış karakterinin girilmesi



Şekil 6.12.(d) Pervane bölgesi için serbest yüzey modelinin girilmesi

### 6.2.2.1. Matematiksel Model:

Serbest yüzey akış, akışkanların ( çoğunlukla su ve hava) ayrı bir çözülebilir arayüzeyle ayrıldığı çoklu faz durumlarını temsil eder. Burada önemli bir ifade yüzey gerilim (surface tension) dir. Yüzey gerilimi, arayüzeyin minimize yüzey alanını etkileyen serbest bir yüzey alanında mevcut olan bir kuvvettir. Bu kuvvet, arayüzeydeki bir basınç süreksizliği ve yapışkan duvarlardaki kapılar (kılcallık) etkisi gibi etkilerin yükselmesini sağlar. Yüzey gerilim modeli, ANSYS-CFX ticari paketinde Continuum Surface Force Modeli (Sürekli Yüzey Kuvvet Modeli) ni kullanır. Bu modellerde yüzey gerilim kuvveti, bir yüzey kuvvetinden ziyade, arayüzeyde hacim kuvveti olarak yoğunlaşmıştır. Serbest yüzey arayüzeyi şekil. 6.13’de gösterilmiştir.



**Şekil 6.13.** Serbest yüzey arayüzeyi şematik gösterimi (CFX Tutorial)

Birincil akışkan  $\alpha$  (sıvı faz) ve ikincil akışkan  $\beta$  (genellikle bir gaz faz) olarak belirlenir. Yüzey gerilim kuvveti, Continuum Surface Force model (Sürekli Yüzey Kuvvet Modeli) ile verilmiştir;

$$F_{\alpha\beta} = f_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (6.1)$$

burada,

$$f_{\alpha\beta} = -\sigma_{\alpha\beta} \kappa_{\alpha\beta} n_{\alpha\beta} + |\nabla r_{\alpha\beta}| \quad (6.2)$$

burada,

$\sigma$  , yüzey gerilme kuvveti,

$n_{\alpha\beta}$ , birinci akıştan ikinci akışa normal vektör arayüzeyi (hacim oranı kullanılarak hesaplanır) ve,

$\kappa$ , yüzey eğimi aşağıda verilmiştir.

$$\kappa_{\alpha\beta} = |\nabla \cdot n_{\alpha\beta}| \quad (6.3)$$

$|\nabla r_{\alpha\beta}|$  terimi, arayüzeyden 0 uzaklıktadır, dolayısıyla yüzey gerilim kuvveti, sadece arayüzeye yakın yerde aktiftir. İki akışkan arayüzey arasında kesiştiği zaman, birinci akışkan boyunca duvarla arayüzey yapan temas açısı belirlemek suretiyle duvar yapışkanlığını hesaplamak mümkündür. Islak parçalar için  $\theta < 90^\circ$  iken ıslak olmayan parçalar için  $\theta > 90^\circ$  'dir.

Hem eğrilik, hem de yüzey gerilim kuvvetinin hesaplamalarında kullanılan arayüzeydeki normal vektörler, duvar temas açısı bakımından tatmin edici olmalıdır. CFX programı içerisindeki yüzey gerilim modeli, iki akışkanlı serbest yüzey akışlar içerisinde şu an için sınırlıdır.

Tez çalışmasında, düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının akış modeli serbest yüzey akışlıdır. Sınır şartlarının girilmesinin ardından hem akım kırıcsız hem de akım kırıcılı modelin formülasyonu CFX-Pre modülü içerisindeki Expression ifadesinde oluşturulmuştur. Burada kullanılan formüller ise serbest yüzey akış için CFX programı içerisinde standardize edilmiş formüllerdir.

| EXPRESSIONS:                                        |
|-----------------------------------------------------|
| air vof = step((y-h)/1[m])                          |
| h = 0.470 [m]                                       |
| ini p = 997 [kg m <sup>-3</sup> ]*g*(h-y)*water vof |
| water vof = 1-air vof                               |

Burada, air vof: havanın hacim oranı; h: pervanenin alt kısmından su seviyesine olan uzaklık (m); ini p: başlangıç basıncı (Pa), water vof: suyun hacim oranıdır.

### 6.3. Çözüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

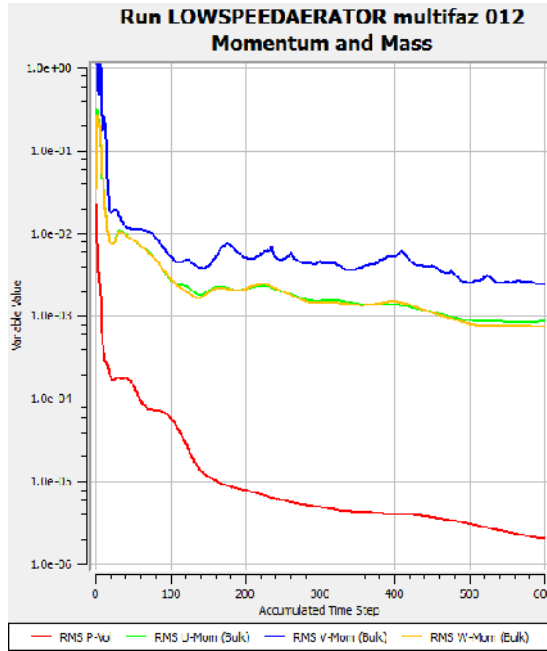
Çözüm işlemleri sonucunda oluşan yakınsama eğrilerine bakılacak olursa, elde edilen eğriler, yakınsama hedefi olan  $10^{-5}$  değerine ulaşmış hatta bu değerinden daha da altına inmişlerdir.

Şekil 6.14.(a)'da akım kırıcsız model için, şekil 6.14.(b)'de ise akım kırıcılı model için atıksuyun momentum ve kütle için yakınsama eğrileri verilmiştir. Şekil 6.14.(c)'de akım kırıcsız model için, şekil 6.14.(d)'de ise akım kırıcılı model için atıksuyun momentum ve kütle için yakınsama eğrilerinin maksimum değerleri verilmiştir. Şekil 6.14.(e)'de akım kırıcsız model için, şekil 6.14.(f)'de ise akım kırıcılı modeli için, havuz ve pervanenin momentum ve kütle yakınsama eğrileri bölgesel olarak verilmiştir. Aynı şekilde Şekil 6.14.(g)'de akım kırıcsız model için, şekil 6.14.(h)'da ise akım kırıcılı model için havuz ve pervanenin momentum ve kütle için yakınsama eğrilerinin maksimum değerleri verilmiştir. Momentum ve kütle eğrilerinin tümüne bakılacak olursa, akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının eğrilerinin birbirine çok yakın olması hatta iç içe geçmesi, oksijen transferinin arayüzeyde daha fazla olduğunu, karışım ve havalandırmanın da bunun sonucu olarak akım kırıcsız modele göre çok daha iyi olduğunu göstermektedir. Maksimum değerlere bakıldığında da atıksuyun havuz ve pervane arasında daha çok nüfuziyetli bölge olduğu söylenebilir.

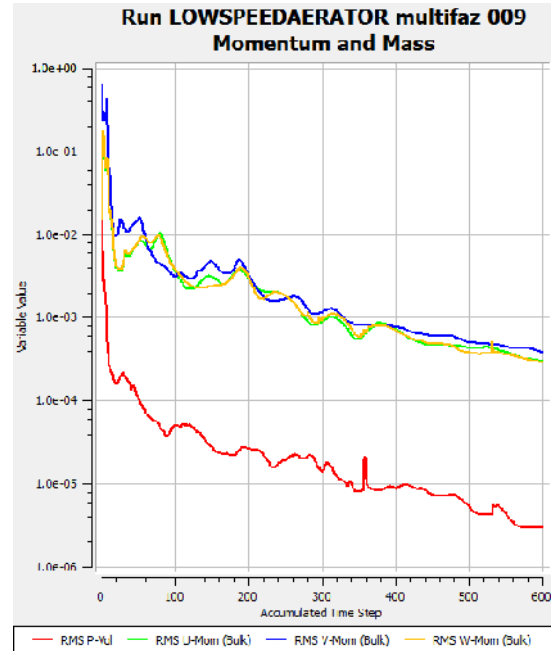
Şekil 6.15.(a)'da akım kırıcsız model için, şekil 6.15.(b)'de ise akım kırıcılı model için atıksuyun türbülans kinetik enerji yakınsama eğrileri verilmiştir. Şekil 6.15.(c)'de akım kırıcsız model için, şekil 6.15.(d)'de ise akım kırıcılı model için atıksuyun türbülans kinetik enerji yakınsama eğrilerinin maksimum değerleri verilmiştir. Şekil 6.15.(e)'de akım kırıcsız model için, şekil 6.15.(f)'de ise akım kırıcılı model için, havuz ve pervanenin türbülans kinetik enerji yakınsama eğrileri ayrı bölgeler olarak verilmiştir. Aynı şekilde Şekil 6.15.(g)'de akım kırıcsız model için, şekil 6.15.(h)'da ise akım kırıcılı model için havuz ve pervanenin türbülans kinetik enerji yakınsama eğrilerinin maksimum değerleri verilmiştir. Türbülans kinetik enerji eğrilerinin tümüne bakılacak olursa, akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının eğrilerinin değer olarak daha düşük olduğu, eğrilerin daha düzgün bir şekilde olduğu görülmektedir. çeşitliliği geniştir.

Karıştırma ve havalandırmanın kalitesi, türbülans kinetik enerjisinin düzenli olarak dağılımına bağlıdır. Bu eğrilerin tümünde akım kırıcılı havalandırıcının daha iyi karıştırma ve havalandırma yaptığı sonucu çıkmaktadır.

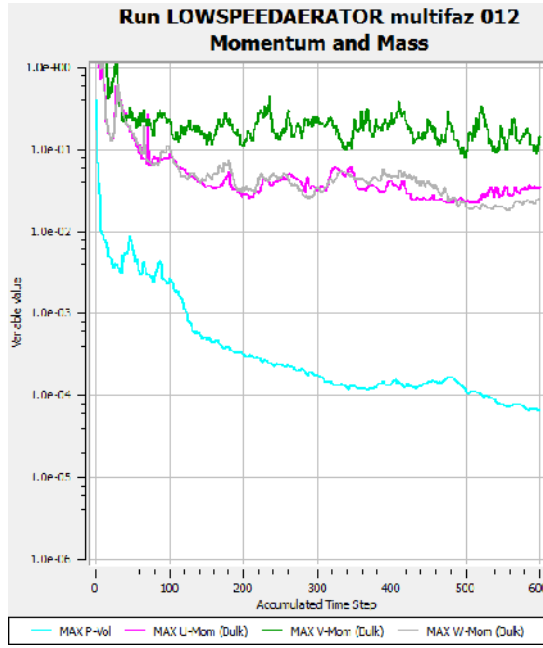
Şekil 6.16.(a)'da akım kırıcısız model için, şekil 6.16.(b)'de ise akım kırıcılı model için atıksuyun hacim oranı yakınsama eğrileri verilmiştir. Şekil 6.16.(c)'de akım kırıcısız model için, şekil 6.16.(d)'de ise akım kırıcılı model için atıksuyun hacim oranı yakınsama eğrilerinin maksimum değerleri verilmiştir. Şekil 6.16.(e)'de akım kırıcısız model için, şekil 6.16.(f)'de ise akım kırıcılı model için, havuz ve pervanenin hacim oranları yakınsama eğrileri ayrı şekilde verilmiştir. Aynı şekilde Şekil 6.16.(g)'de akım kırıcısız model için, şekil 6.16.(h)'da ise akım kırıcılı model için havuz ve pervanenin hacim oranı yakınsama eğrilerinin maksimum değerleri verilmiştir. Hacim oranı eğrilerinin tümüne bakılacak olursa, akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının eğrilerinin daha düzgün ilerlediği yani yakınsadığı, maksimum değerde arayüzeyde daha fazla su-hava hacim oranı gerçekleştiği, bölgeler açısından bakıldığında ise havuz ve pervanedeki atıksuların birbiriyle daha penetrasyon içerisinde oldukları görülmektedir. Bu sonuçlara göre akım kırıcılı modelin arayüzeyde çok daha iyi karışım ve havalandırma gerçekleştirdiği söylenebilir.



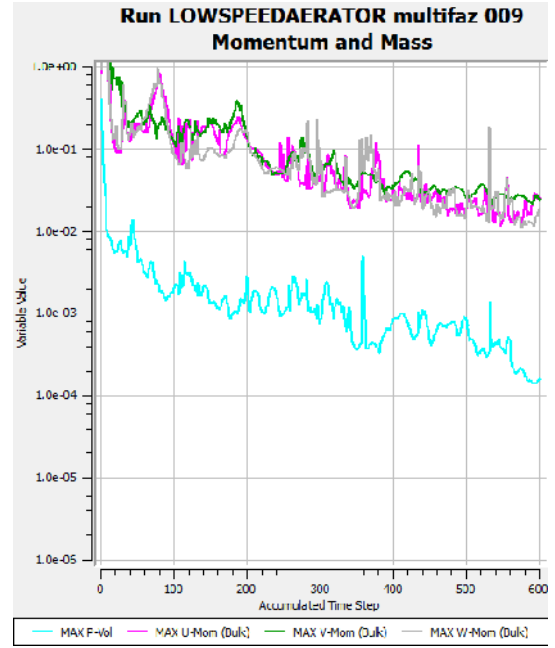
**Şekil 6.14.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi



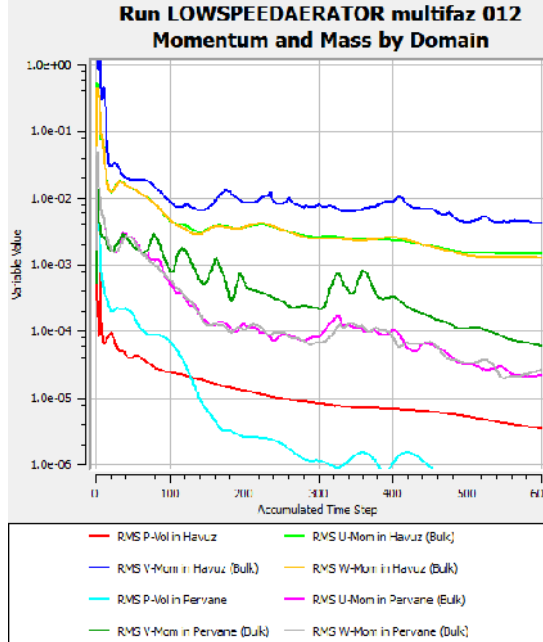
**Şekil 6.14.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi



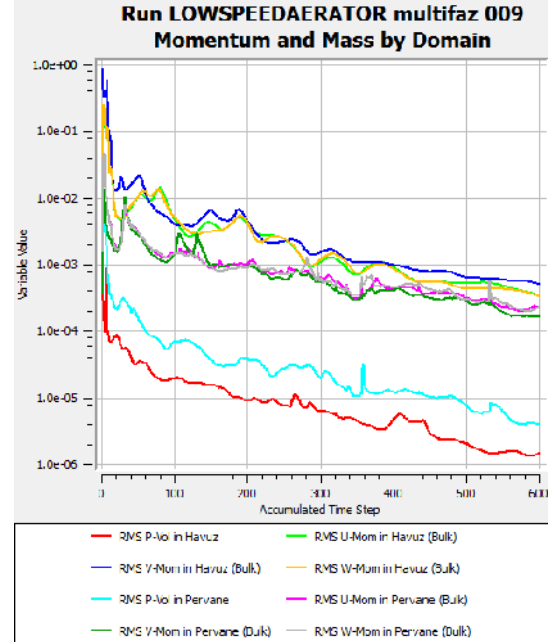
**Şekil 6.14.(c)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi maksimum değerleri



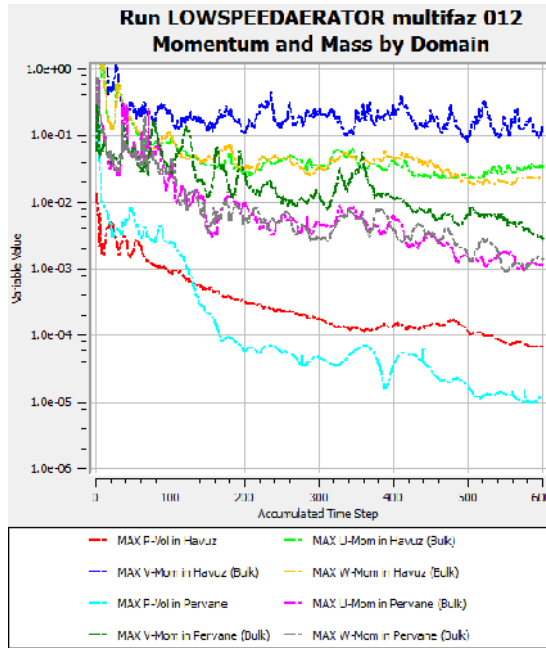
**Şekil 6.14.(d)** Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının süreklilik denklemi maksimum değerleri



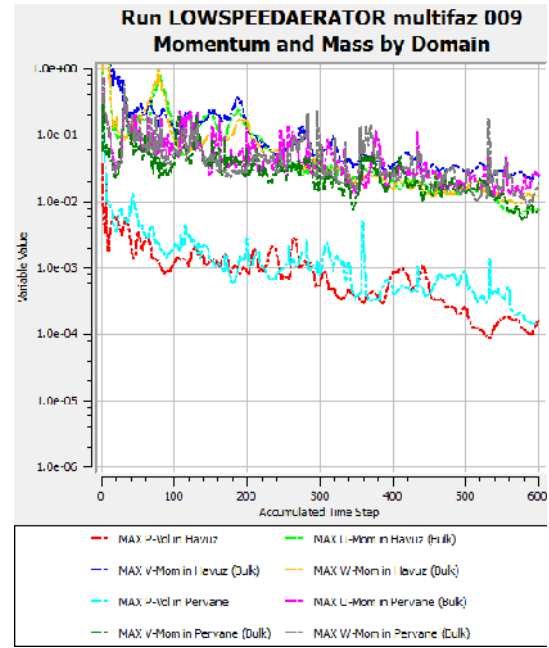
**Şekil 6.14.(e)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi



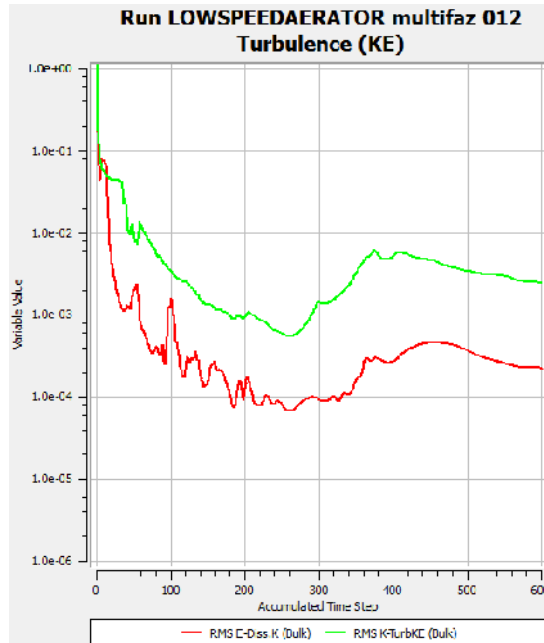
**Şekil 6.14.(f)** Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi



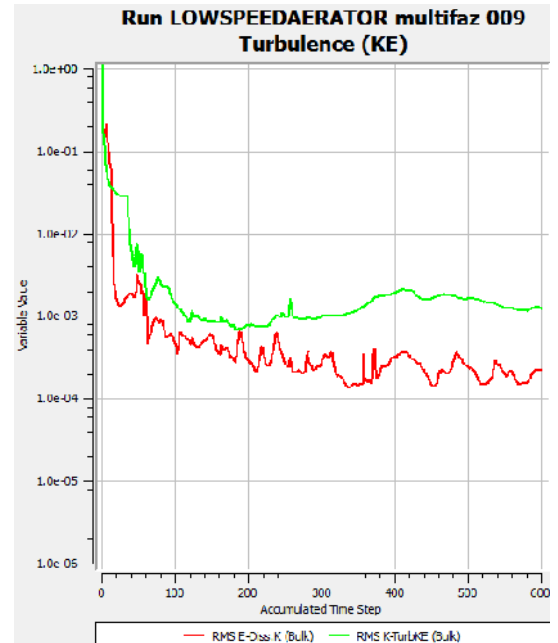
**Şekil 6.14.(g)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi maksimum değerleri



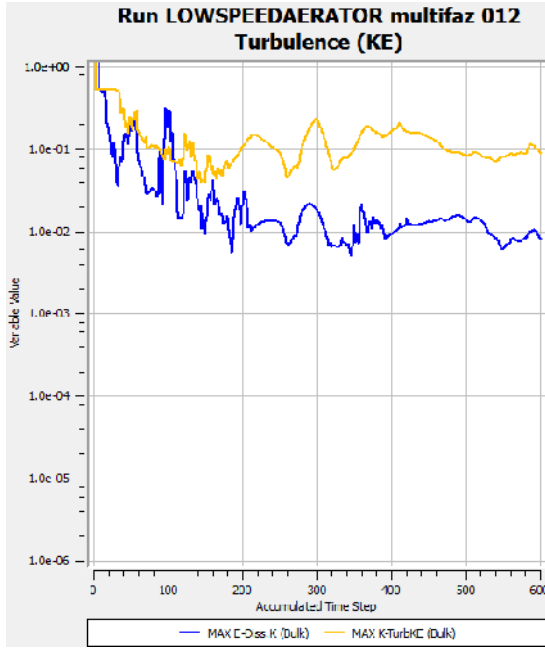
**Şekil 6.14.(h)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından süreklilik denklemi maksimum değerleri



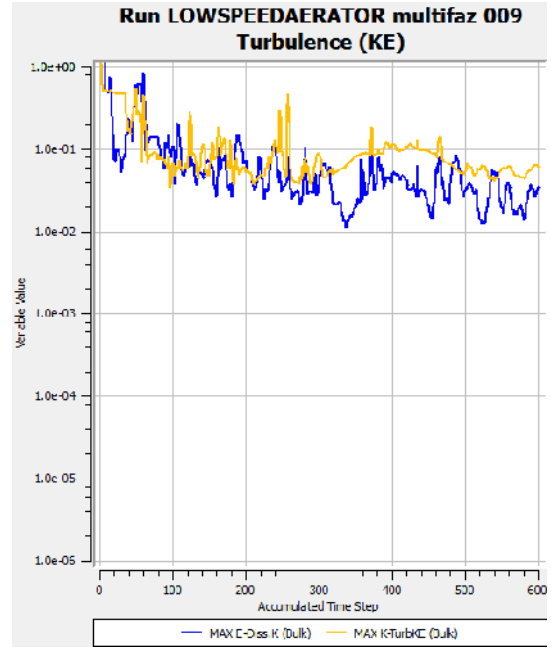
**Şekil 6.15.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi



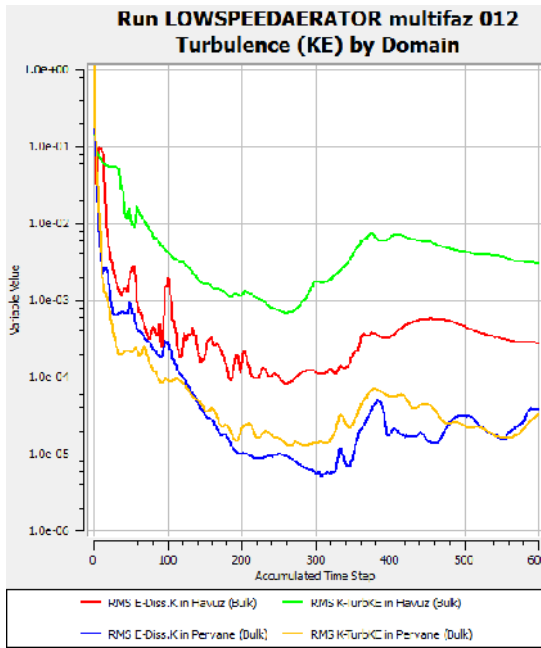
**Şekil 6.15.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi



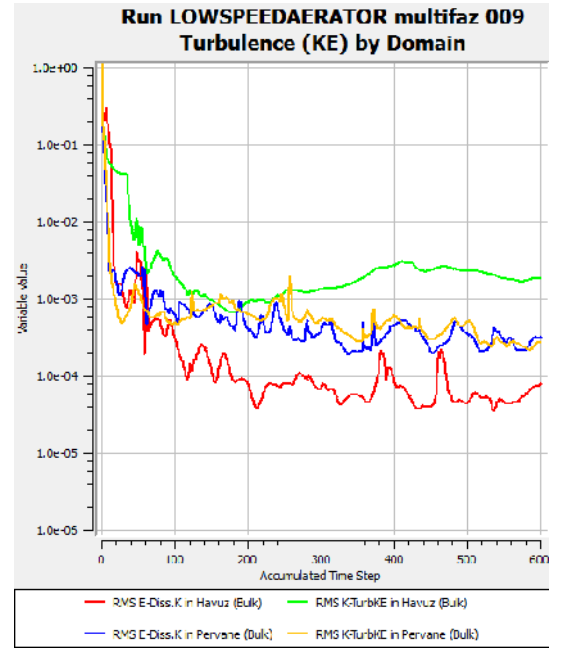
**Şekil 6.15.(c)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri



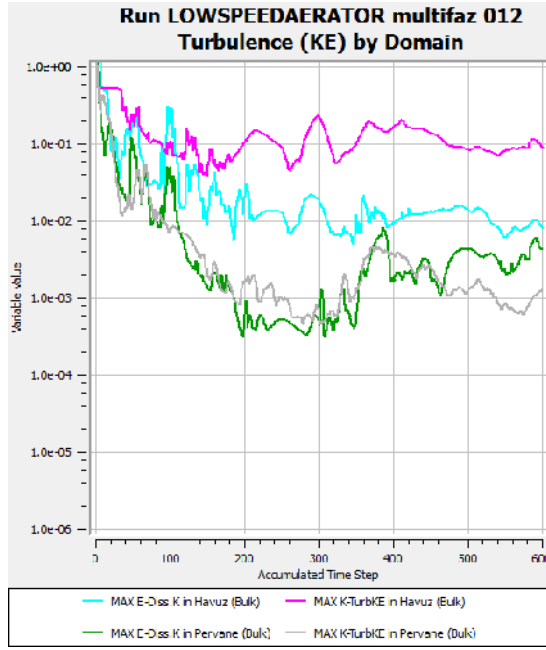
**Şekil 6.15.(d)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri



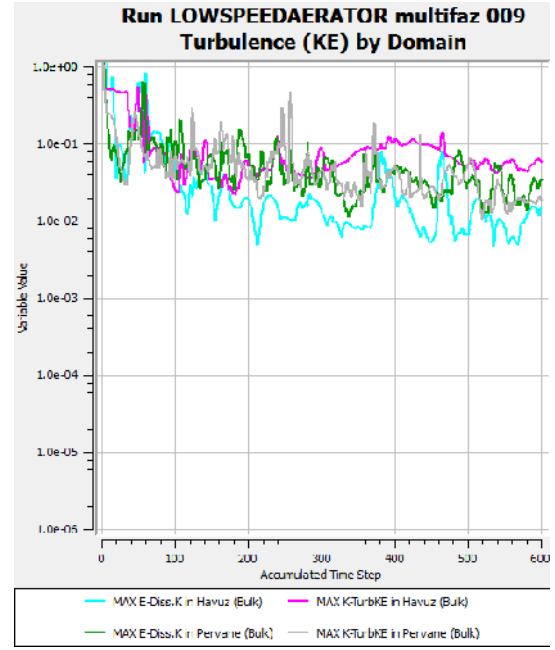
**Şekil 6.15.(e)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi



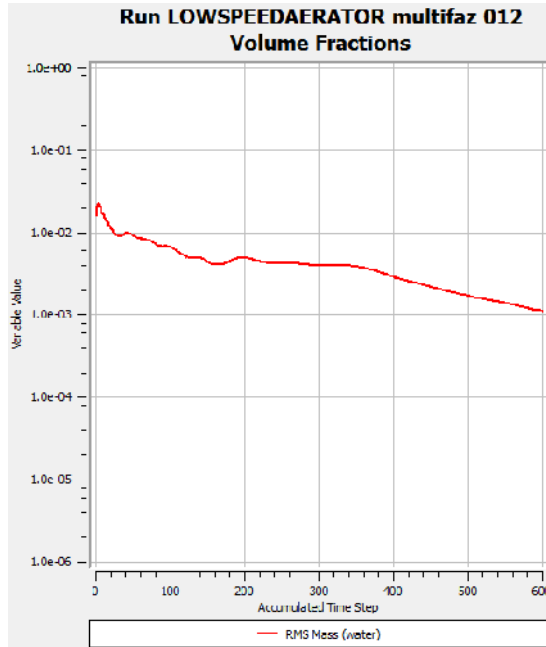
**Şekil 6.15.(f)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi



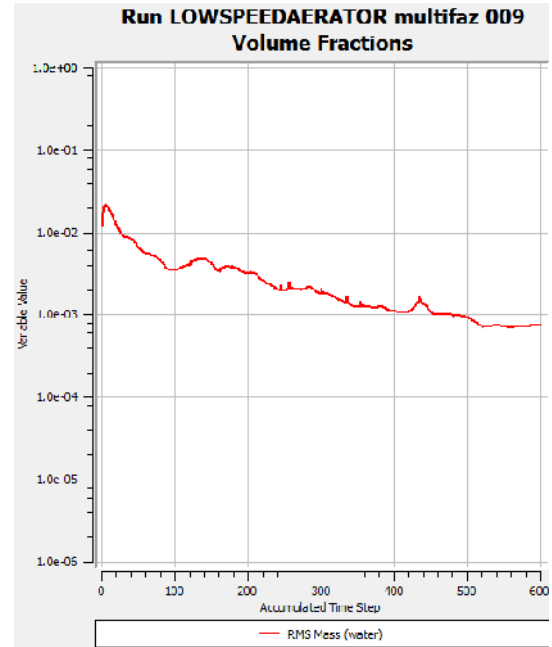
**Şekil 6.15.(g)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri



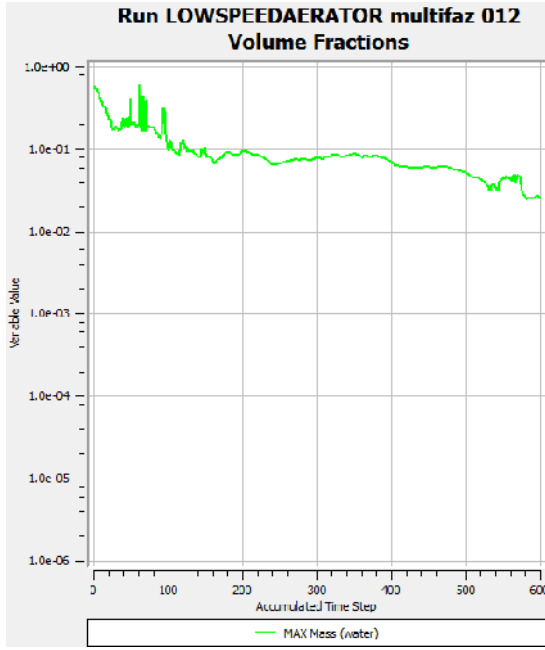
**Şekil 6.15.(h)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından türbülans kinetik enerji denklemi maksimum değerleri



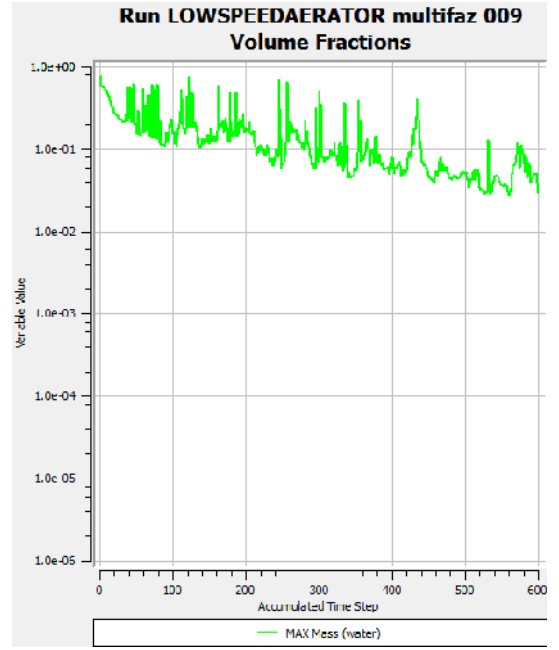
**Şekil 6.16.(a)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı



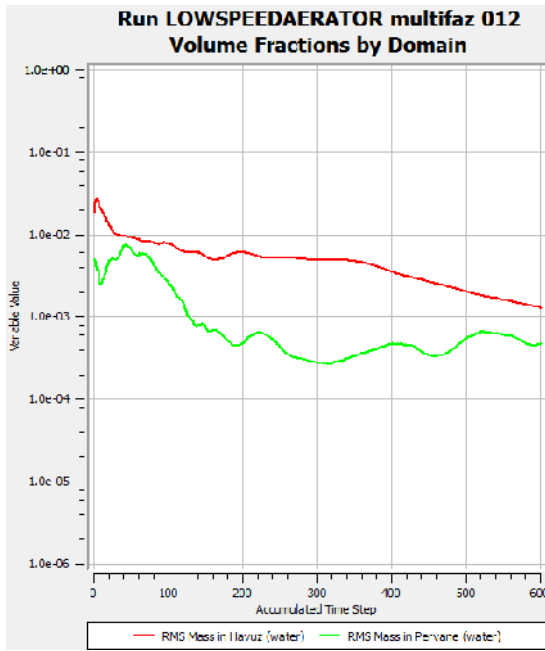
**Şekil 6.16.(b)** Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı



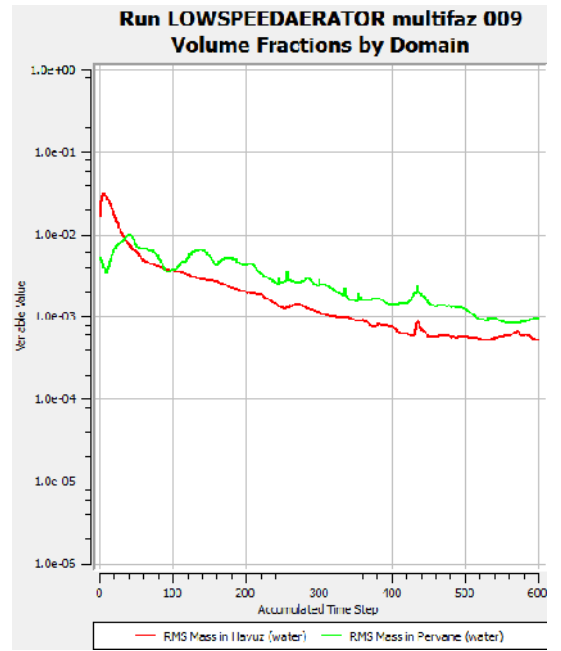
**Şekil 6.16.(c)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı maksimum değerleri



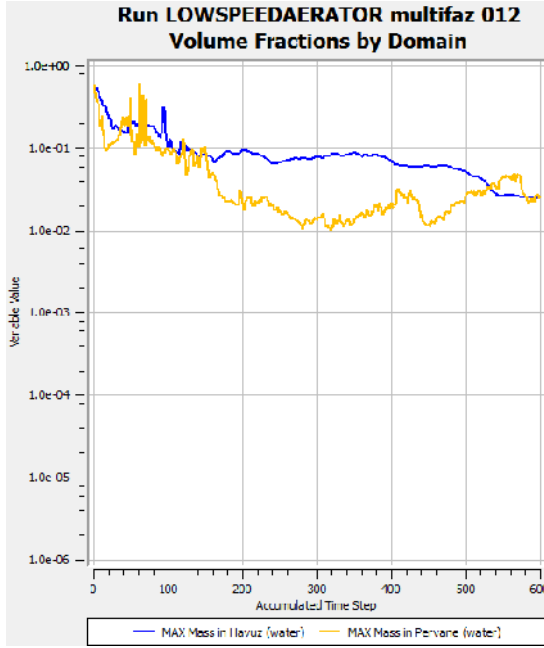
**Şekil 6.16.(d)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hacim oranı maksimum değerleri



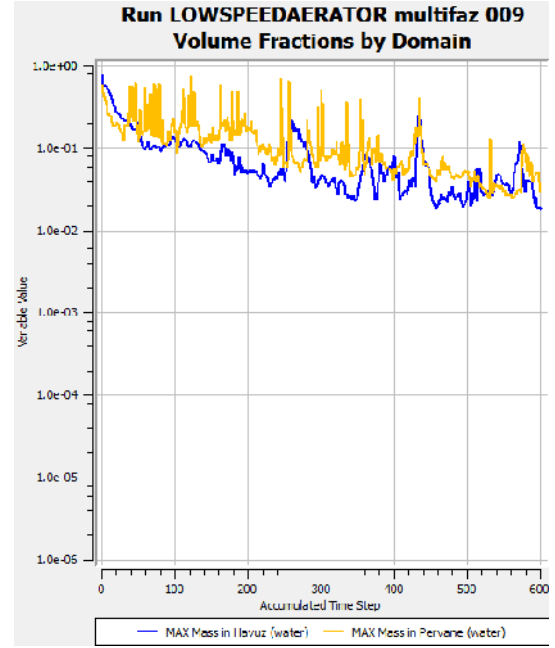
**Şekil 6.16.(e)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı



**Şekil 6.16.(f)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı



**Şekil 6.16.(g)** Akım kırıcsız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı maksimum değerleri



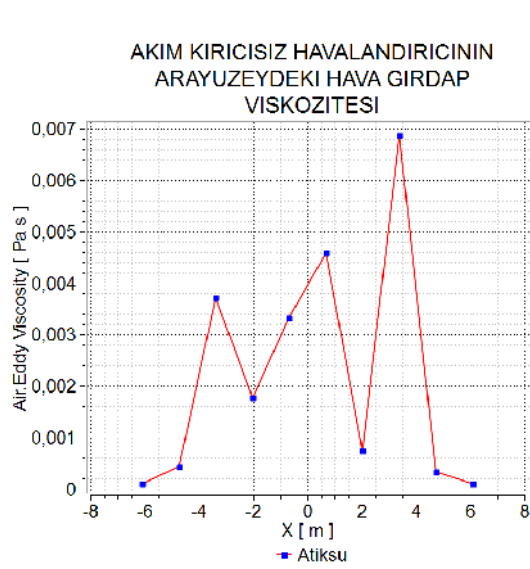
**Şekil 6.16.(h)** Akım kırıclı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının bölgeler açısından hacim oranı maksimum değerleri

Çözümün verdiği sonuçlar hakkında yorum yapabilmek için sistemde belirli düzlemler ve bu düzlemler üzerinde oluşturulacak doğrular incelenmelidir. Düzlemler üzerindeki girdap etkileri, hız ve basınç dağılımları, hacim oranları incelenmeli, oluşturulacak doğrular kullanılarak girdap etkileri, hız ve basınç eğrileri çizdirilmelidir.

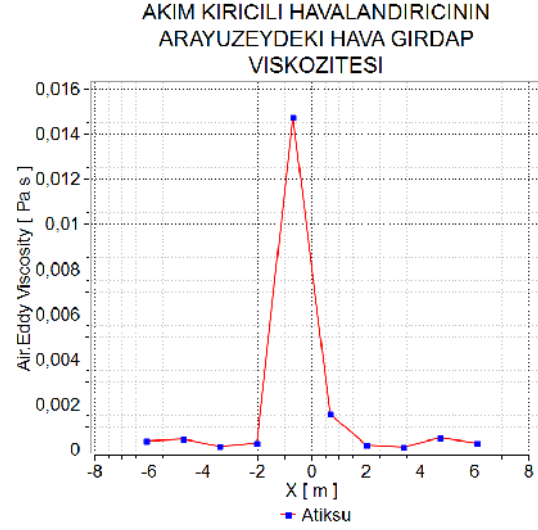
Sınır koşullarını tamamladıktan sonra sıra çözümlmeye gelmiştir. **Solver Control** seçeneğine basarak gelen ekranda iterasyon sayısı olarak 600 yazdıktan sonra OK tuşuna basıp **Write Solver Input File** seçeneğine işaretleyerek sistemdeki bilgileri güncelledikten sonra **Define Run** seçeneğiyle gelen ekrana **OK** dindikten sonra **CFX Solver Manager** programında sistem çalışmaya başlayacaktır. 600 iterasyonu her iki model için aynı anda başlatmak koşuluyla akım kırıcsız model için 36 saatlik bir süre, akım kırıclı model için ise daha çok sayıda sonlu hacim olduğundan dolayı 58 saatlik bir süre sonunda işlem tamamlanmış, sonraki aşamada **CFX Post Processor** programına geçip yapıp görmek istenilen değerler için sınır bölgeleri belirlenerek gerekli bilgilere ulaşılabilir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

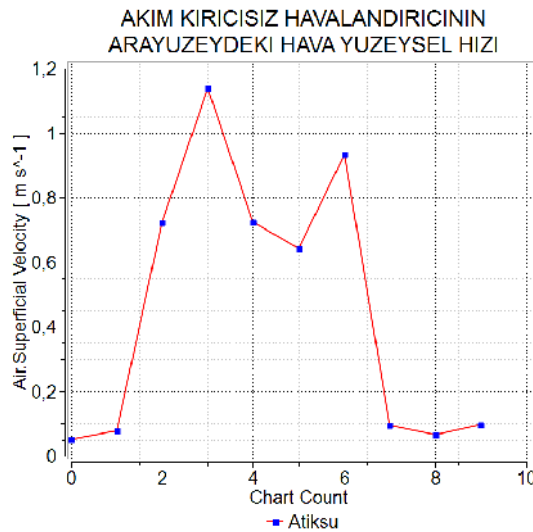
### 7.1. CFX Grafikler



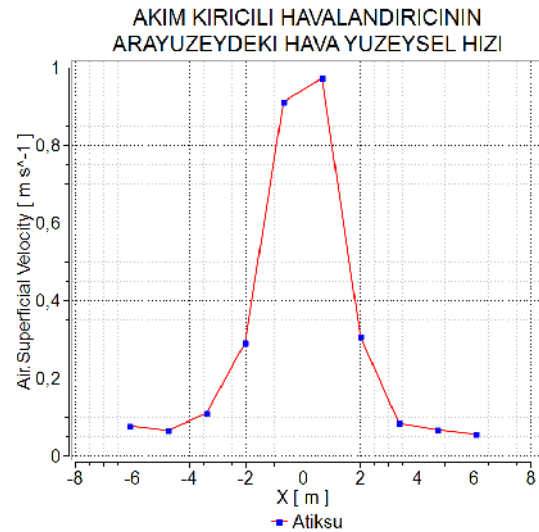
**Şekil 6.17.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için girdap (çevri) viskozitesi eğrisi



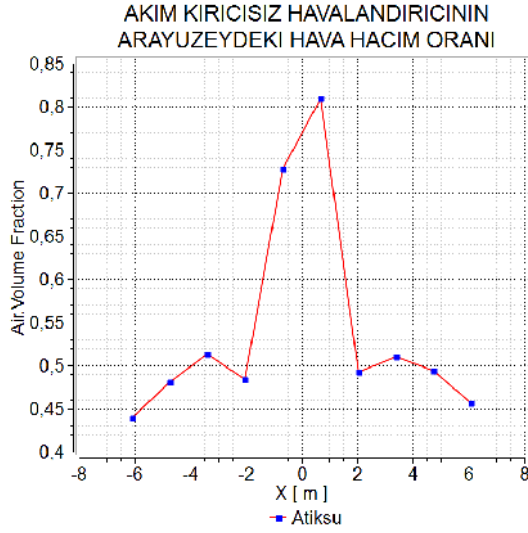
**Şekil 6.17.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için girdap (çevri) viskozitesi eğrisi



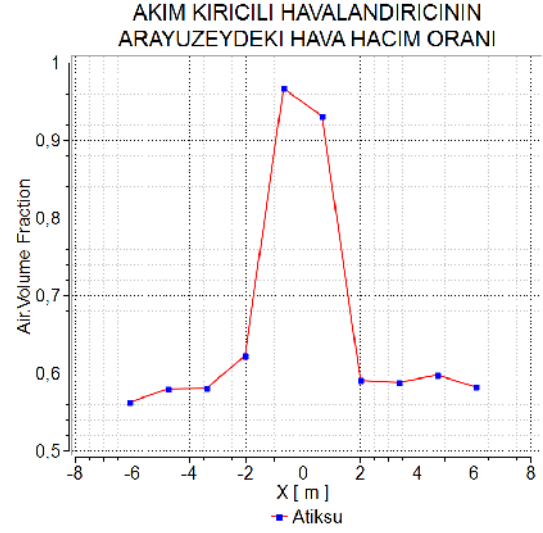
**Şekil 6.18.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için yüzeysel hız eğrisi



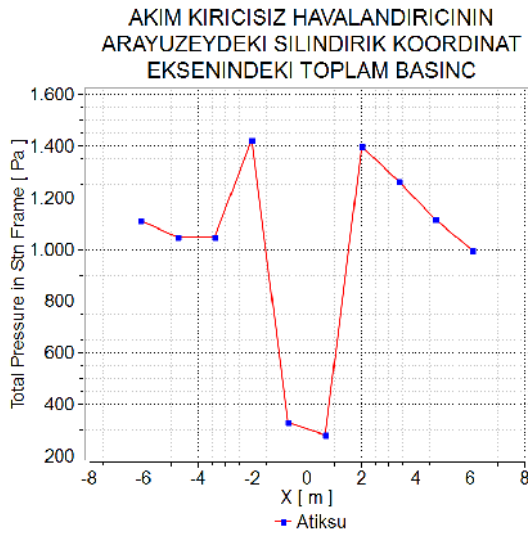
**Şekil 6.18.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava için yüzeysel hız eğrisi



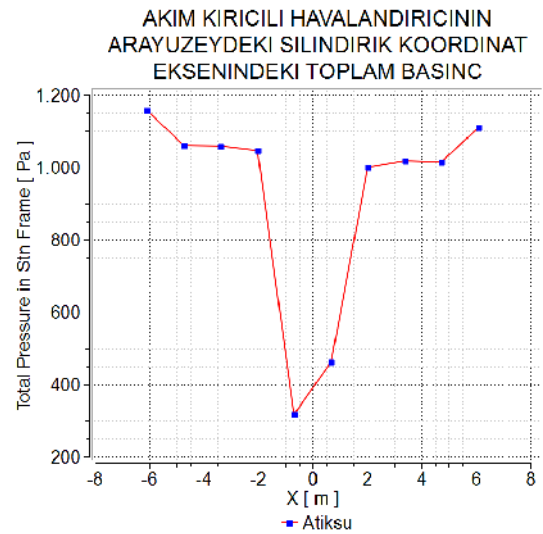
**Şekil 6.19.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı eğrisi



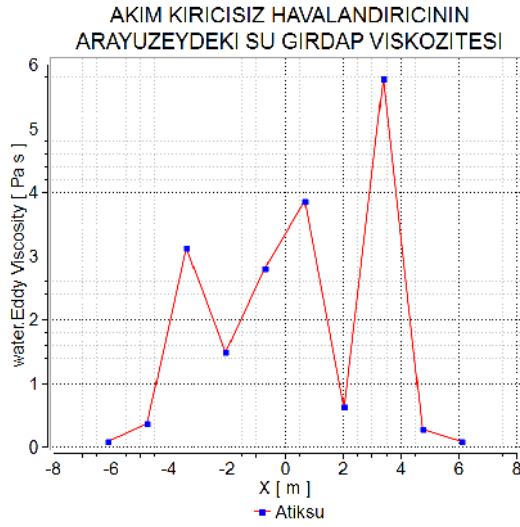
**Şekil 6.19.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı eğrisi



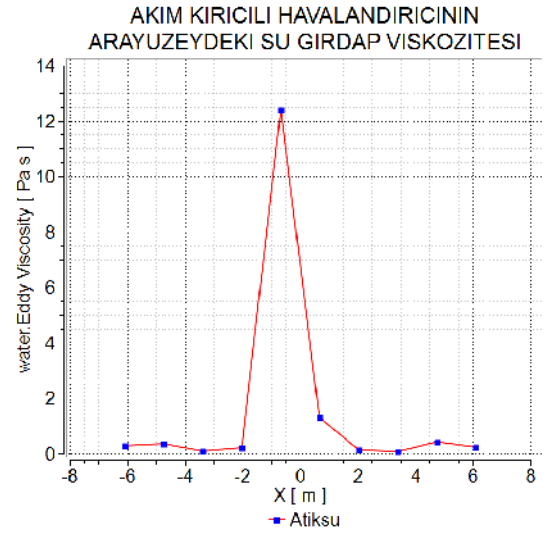
**Şekil 6.20.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat sistemindeki toplam basınç eğrisi



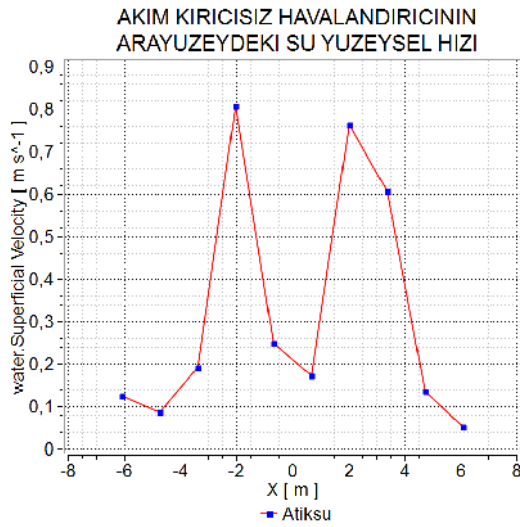
**Şekil 6.20.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat sistemindeki toplam basınç eğrisi



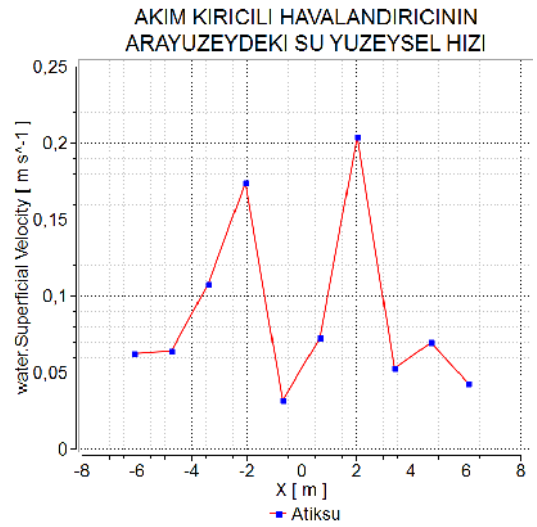
**Şekil 6.21.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için girdap (çevri) viskozite eğrisi



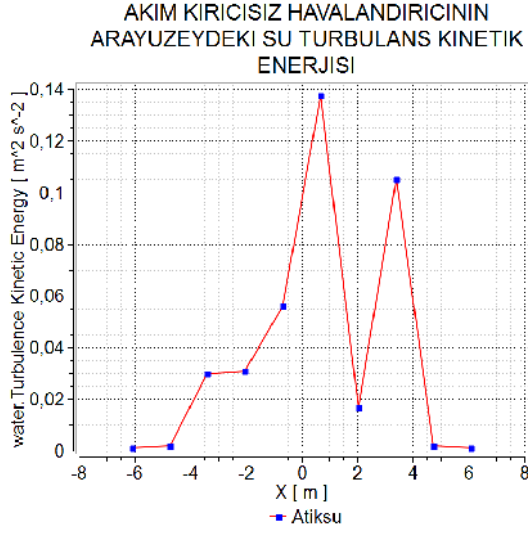
**Şekil 6.21.(b).** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için girdap (çevri) viskozite eğrisi



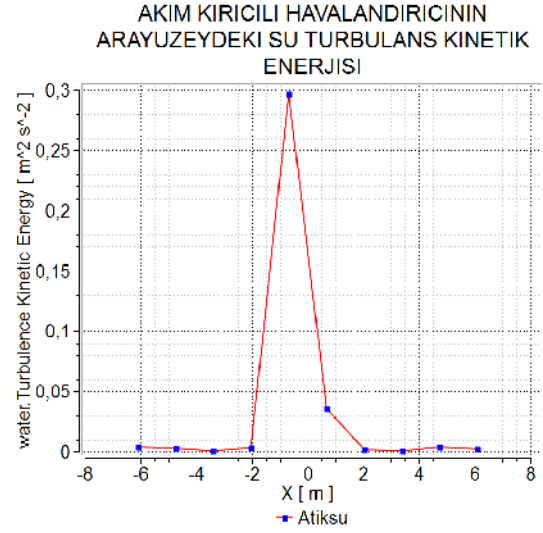
**Şekil 6.22.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için yüzeyel hız eğrisi



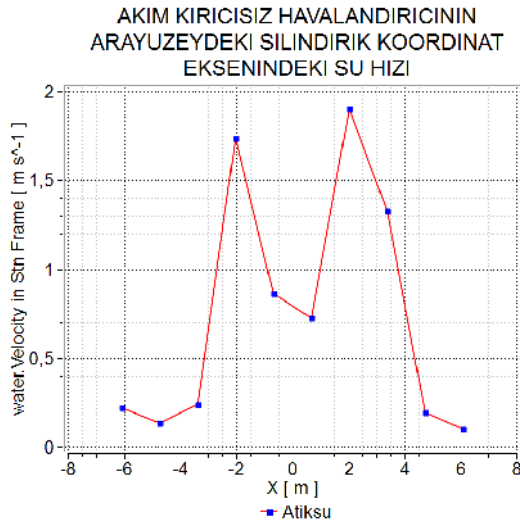
**Şekil 6.22.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için yüzeyel hız eğrisi



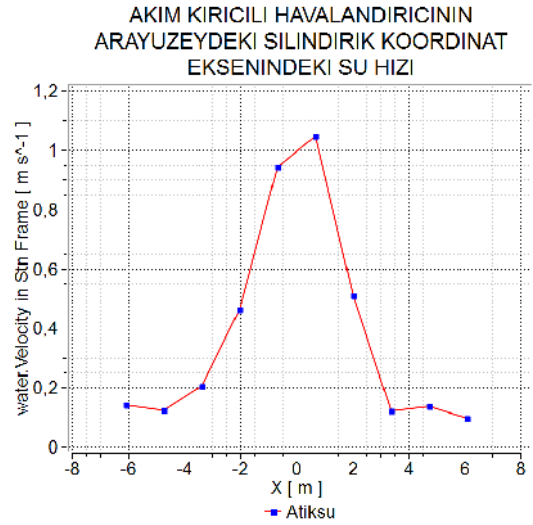
**Şekil 6.23.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının arayüzeydeki su türbülans kinetik enerjisi eğrisi



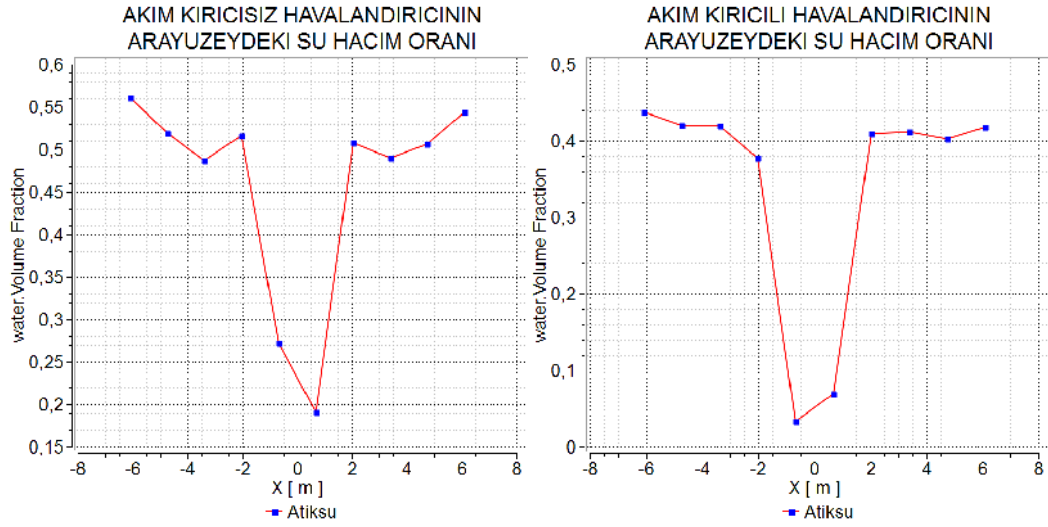
**Şekil 6.23.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının arayüzeydeki su türbülans kinetik enerjisi eğrisi



**Şekil 6.24.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki su hız eğrisi



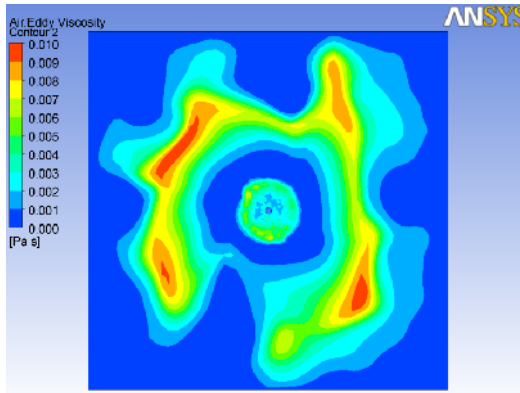
**Şekil 6.24.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki su hız eğrisi



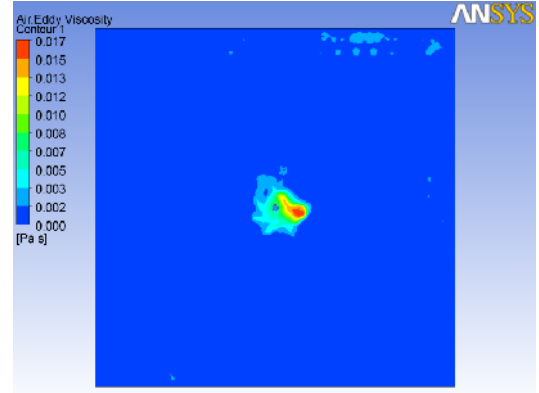
**Şekil 6.25.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için hacim oranı eğrisi

**Şekil 6.25.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su için hacim oranı eğrisi

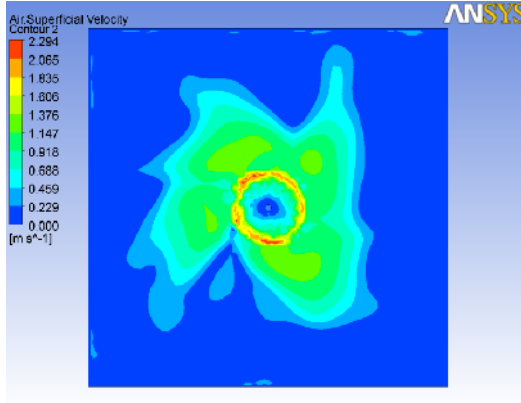
## 7.2. Arayüzey ve YZ Düşey Düzlemindeki HAD Sonuçları



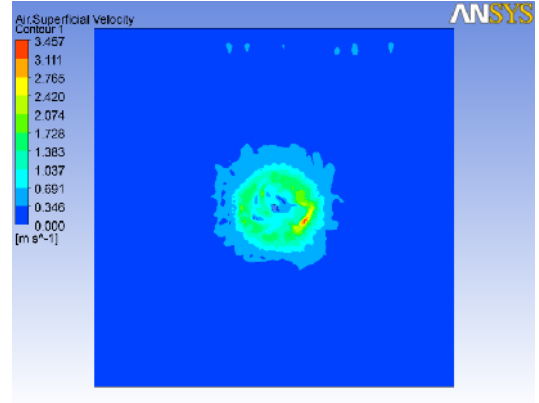
**Şekil 6.26.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın girdap (çevri) viskozitesi



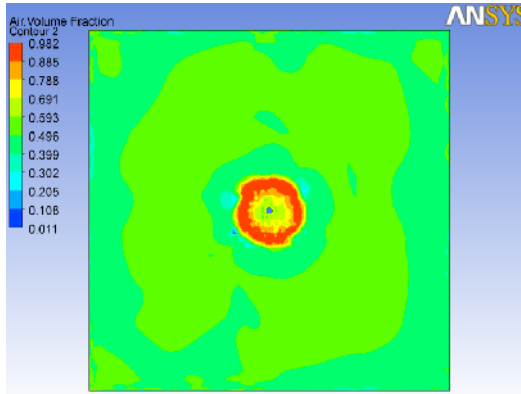
**Şekil 6.26.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın girdap (çevri) viskozitesi



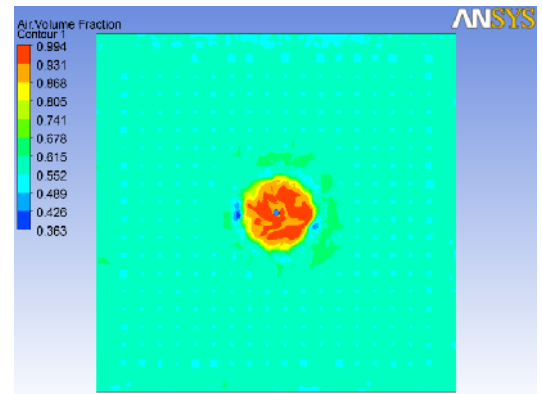
**Şekil 6.27.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın yüzeysel hızı



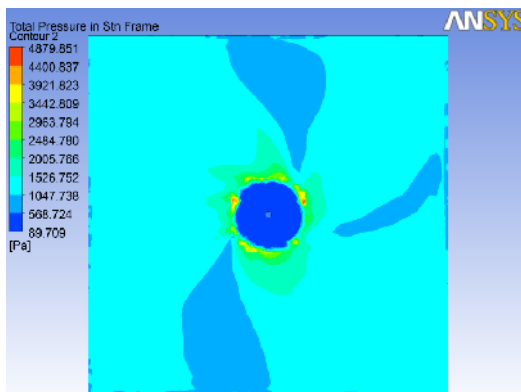
**Şekil 6.27.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki havanın yüzeysel hızı



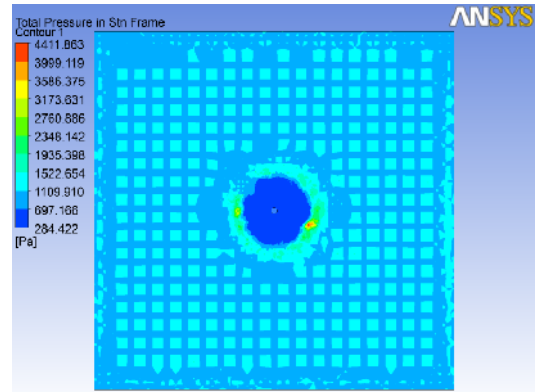
**Şekil 6.28.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki hava hacim oranı



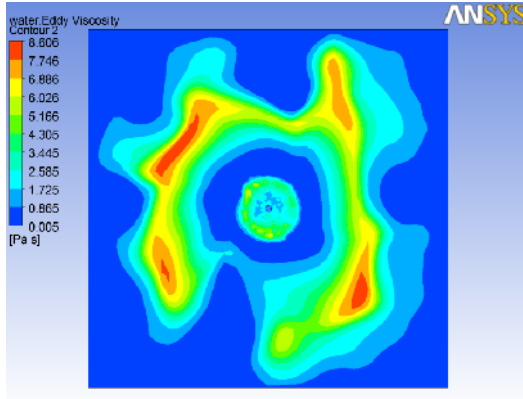
**Şekil 6.28.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki hava hacim oranı



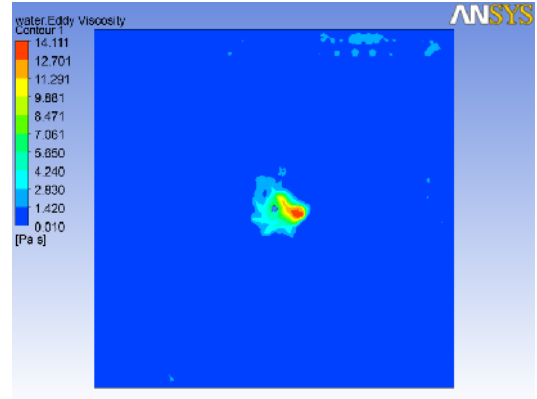
**Şekil 6.29.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı



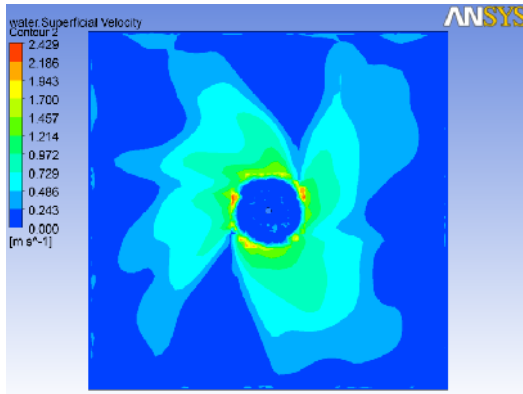
**Şekil 6.29.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı



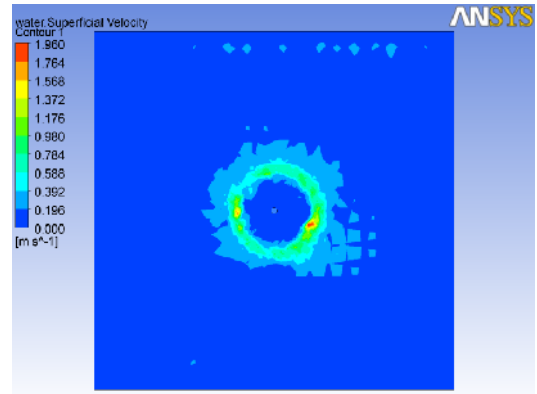
**Şekil 6.30.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun girdap viskozitesi



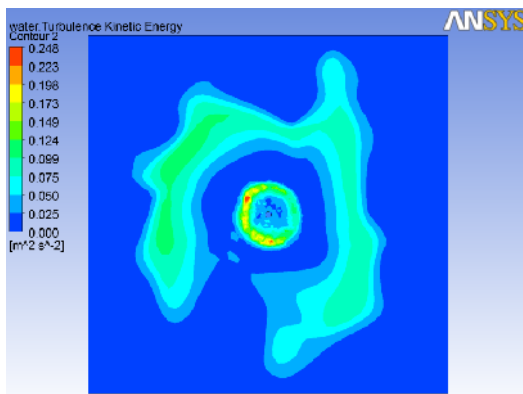
**Şekil 6.30.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun girdap viskozitesi



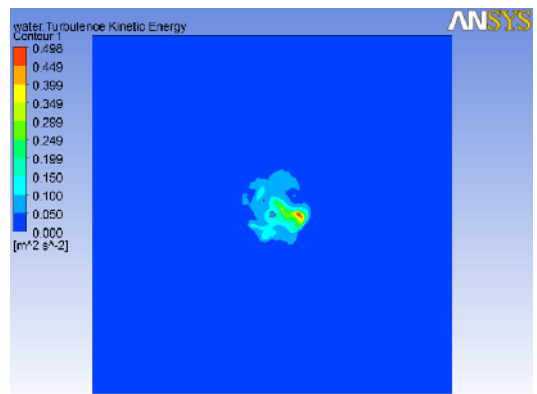
**Şekil 6.31.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su yüzeysel hızı



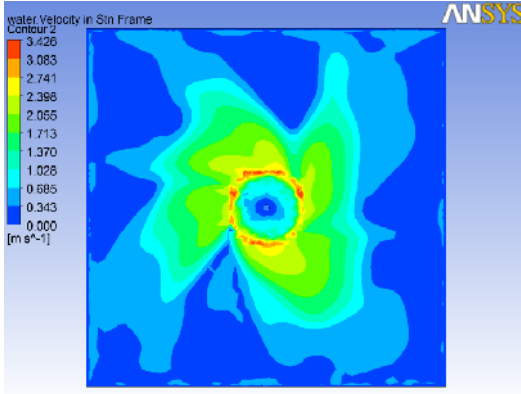
**Şekil 6.31.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su yüzeysel hızı



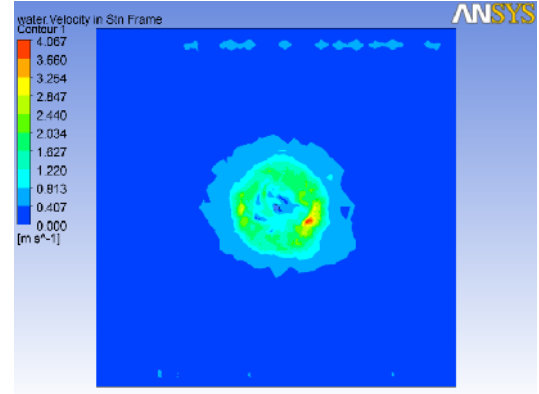
**Şekil 6.32.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun türbülans kinetik enerjisi



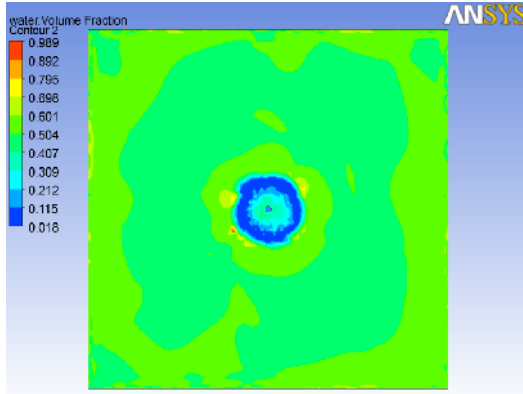
**Şekil 6.32.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzeyindeki suyun türbülans kinetik enerjisi



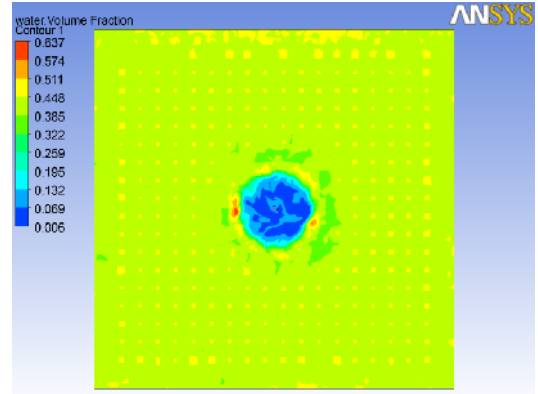
**Şekil 6.33.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzündeki silindirik koordinat sisteminde su hızı



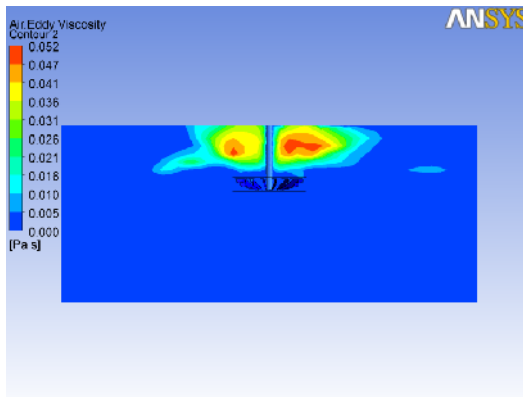
**Şekil 6.33.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzündeki silindirik koordinat sisteminde su hızı



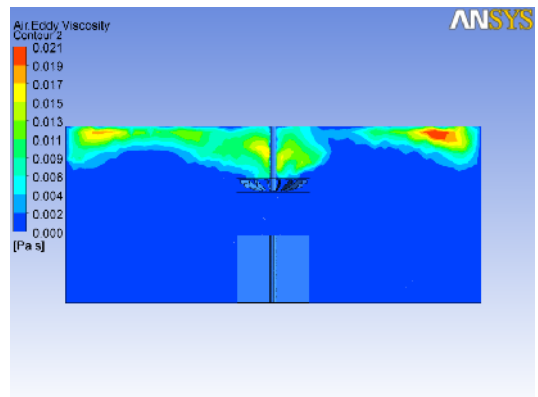
**Şekil 6.34.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzündeki suyun hacim oranı



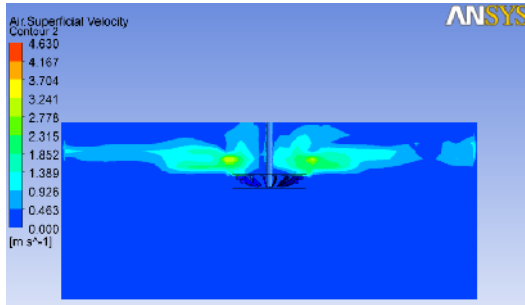
**Şekil 6.34.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava-su arayüzündeki suyun hacim oranı



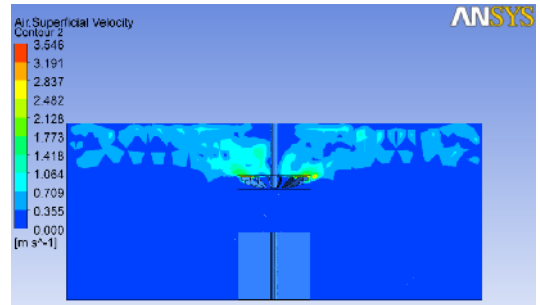
**Şekil 6.35.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava girdap viskozitesi



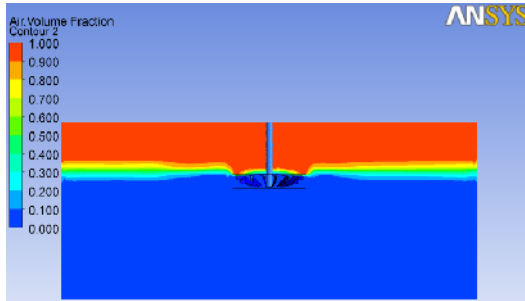
**Şekil 6.35.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı hava girdap viskozitesi



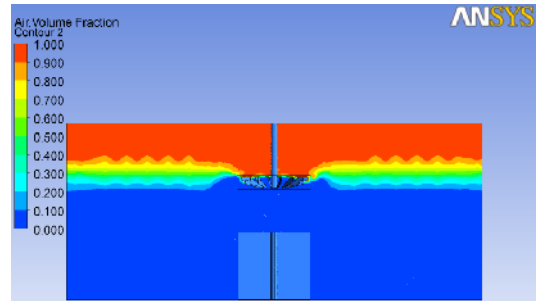
**Şekil 6.36.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava yüzeysel hızı



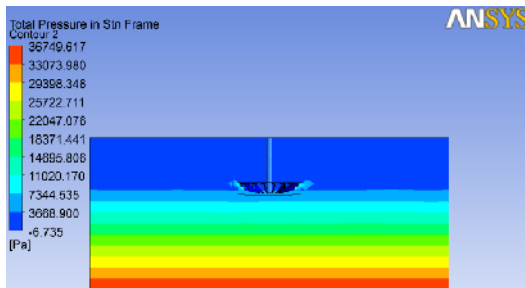
**Şekil 6.36.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava yüzeysel hızı



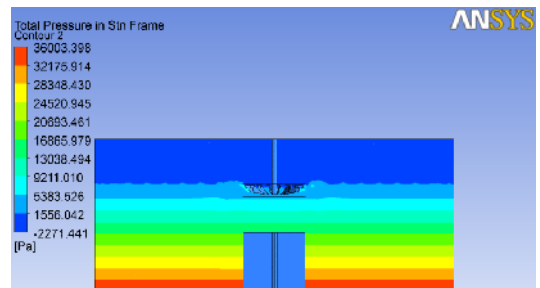
**Şekil 6.37.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı



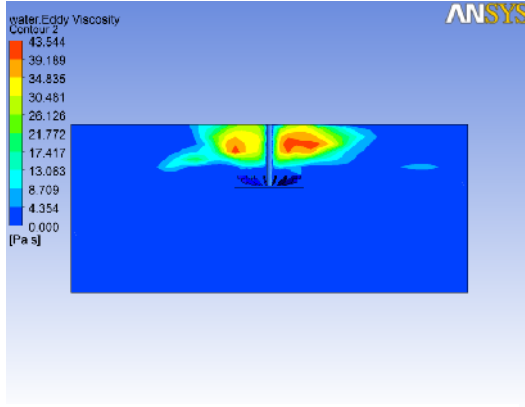
**Şekil 6.37.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hava hacim oranı



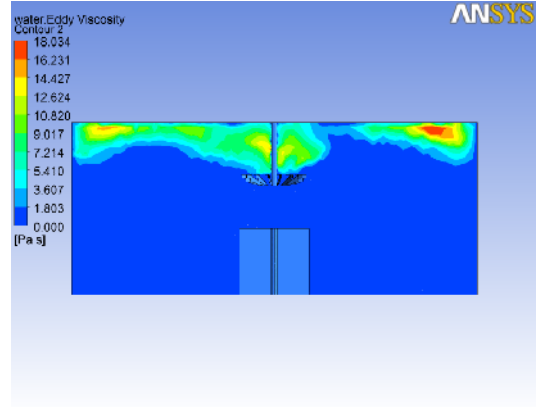
**Şekil 6.38.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı



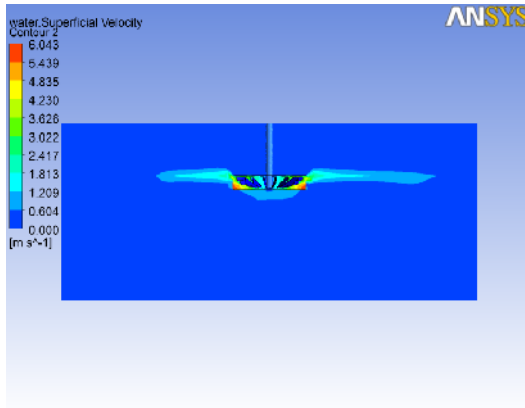
**Şekil 6.38.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat eksenindeki toplam basıncı



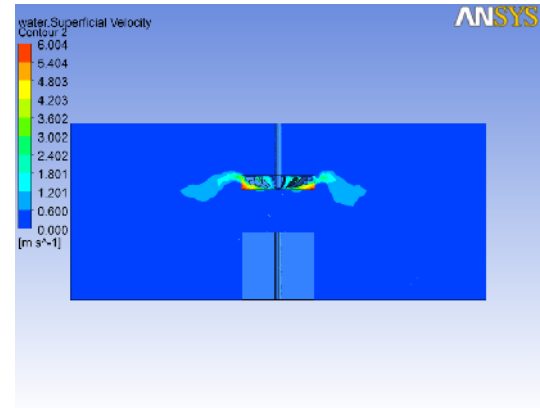
**Şekil 6.39.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su girdap viskozitesi



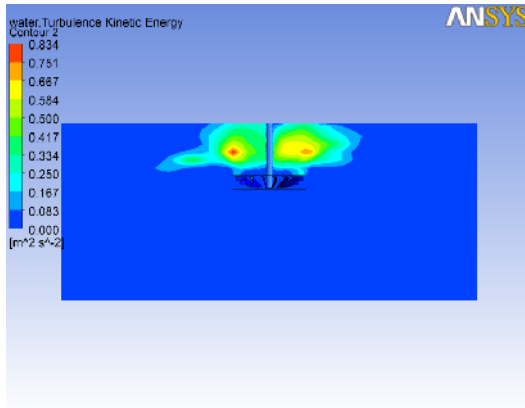
**Şekil 6.39.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su girdap viskozitesi



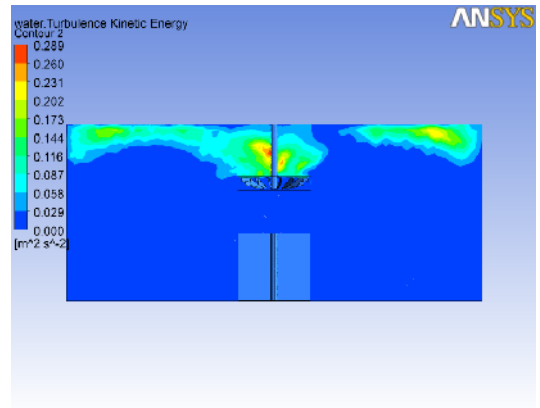
**Şekil 6.40.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su yüzeysel hızı



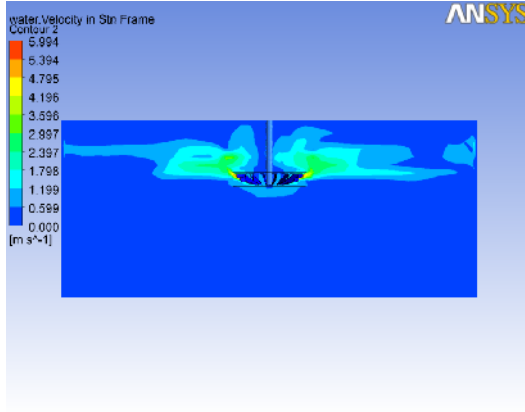
**Şekil 6.40.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su yüzeysel hızı



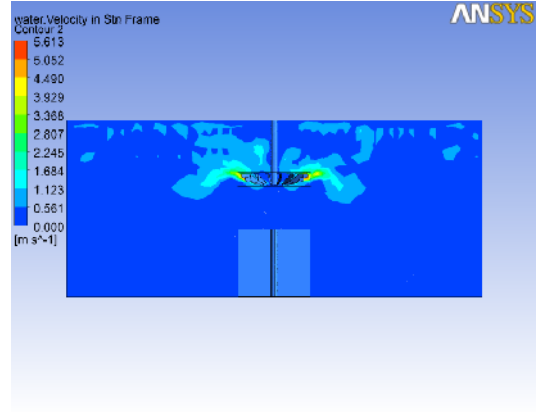
**Şekil 6.41.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su türbülans kinetik enerjisi



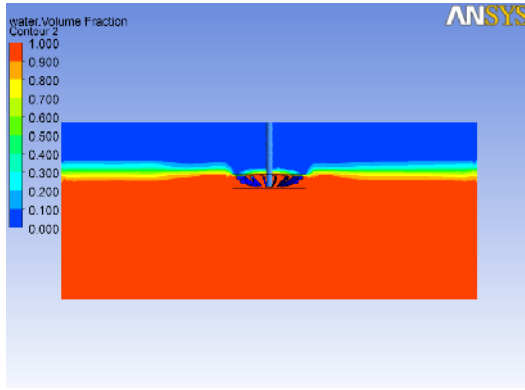
**Şekil 6.41.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su türbülans kinetik enerjisi



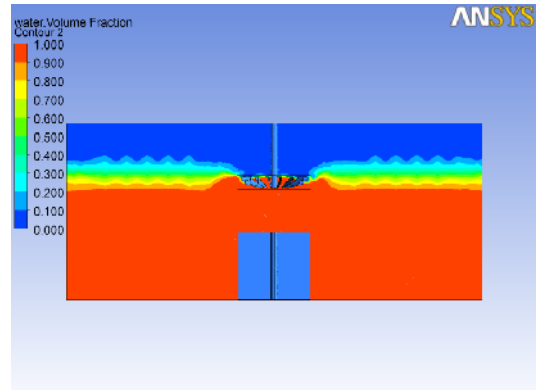
**Şekil 6.42.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat sisteminde su hızı



**Şekil 6.42.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının silindirik koordinat sisteminde su hızı



**Şekil 6.43.(a)** Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su hacim oranı



**Şekil 6.43.(b)** Akım kırıcılı düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının su hacim oranı

### 7.3.Sonuçların Karşılaştırılması ve Öneriler

Bu tezde, atıksu arıtma tesislerinin biyolojik arıtma prosesinde yaygın olarak kullanılan düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının akım kırıcı kullanılmadan ve akım kırıcı kullanılarak matematik modelleri oluşturulmuş ve akışkanın havalandırma havuzu içerisindeki etkileri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodu kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmada, analiz sonuçlarından elde etmek istediğimiz değerlerin, geometrinin hangi bölgesinde bulunduğuyla ilgili olarak ağ (mesh) hassaslaştırılmış, mil ve pervane kısımlarında prizma elemanlar kullanılarak sınır tabakası oluşturulmuş, hassas sonuçlara ihtiyaç duyulmayan bölgelerde ise, ağ (mesh) daha kaba hale

getirilmiştir. Bu işlem, analizin en az elemanla ve en hassas şekilde, mümkün olduğunca az zamanda tamamlanabilmesi için gereklidir. Aksi halde, bu çalışmada önemli olmadığı varsayılan kesitlerde gereksiz hassasiyette mesh oluşturulmuş olacaktır, bu da çözümün tamamlanma süresini çok büyük oranda artıracaktır.

Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının HAD analizinde genel akış denklemlerinden faydalanılarak hız ve hacim oranı analizi hakkında bilgiler elde edilmiştir. Akış için genel denklemler ANSYS-CFX programıyla çözdürülerek havalandırıcının  $x, y$  ve  $z$  momentum eğrileri, hacim oranı eğrisi ve standart  $k - \varepsilon$  türbülans eğrileri elde edilmiştir.

Şekil 6.17.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki havanın girdap viskozite grafikleri karşılaştırıldığında, akım kırıcısız havalandırıcı modeline ait olan eğrinin altında kalan alanın, akım kırıcılı havalandırıcı modelininkinden çok daha büyük çıktığı görülmüş ve girdap viskozitesi daha geniş bir alana yayılmıştır.

Şekil 6.18.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki havanın yüzeysel hız grafikleri iki model için karşılaştırıldığında, akım kırıcısız havalandırıcı modeline ait olan eğrinin altında kalan alan, akım kırıcılı havalandırıcı modelininkinden daha büyük çıkmıştır. Maksimum hız incelendiğinde akım kırıcısız modelin daha yüksek yüzeysel hıza sahip olduğu grafiklerden görülmektedir.

Şekil 6.19.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki havanın hacim oranı her iki model için incelenip grafikler karşılaştırıldığında, akım kırıcılı havalandırıcı modeline ait olan grafiğin daha yüksek hava hacim oranına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 6.20.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenini toplam basınç grafiğine bakıldığında, akım kırıcılı modelin daha düzgün basınç dağılımına sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 6.21.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki suyun girdap viskozite grafikleri karşılaştırıldığında, akım kırıcısız havalandırıcı modeline ait olan eğrinin altında kalan alanın, akım kırıcılı havalandırıcı modelininkinden çok daha büyük

çıkacağı görülmüş ve girdap viskozitesi, atıksu içerisinde daha geniş bir alana yayılmıştır.

Şekil 6.22.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki suyun yüzeysel hız grafikleri incelendiğinde, akım kırıcısız havalandırıcı modeline ait olan eğrinin maksimum değeri, akım kırıcılı havalandırıcı modelinkinden 4 kat daha büyük çıkmıştır.

Şekil 6.23.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki türbülans kinetik enerjisi iki havalandırıcı modeli için incelendiğinde, akım kırıcılı havalandırıcının daha düzenli bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Bunun da sonucu olarak daha kaliteli bir karıştırma ve havalandırma gerçekleşmesidir.

Şekil 6.24.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki silindirik koordinat eksenindeki suyun hızı iki model için de incelendiğinde, akım kırıcısız havalandırıcının, akım kırıcılı modele oranla yaklaşık 2 katı fazla maksimum hız değeri bulunmuştur.

Şekil 6.25.(a) ve (b)'deki havalandırıcı arayüzeyindeki suyun hacim oranı her iki model için incelendiğinde, akım kırıcılı havalandırıcı modeline ait olan grafiğin akım kırıcısız havalandırıcı modelinden daha düzgün dağılıma sahip olduğu görülmektedir.

Grafik ve kontörler incelendiğinde akım kırıcısız modelde efektif olarak daha geniş merkezli girdaplar gözlenlenmiştir. Hız profillerinin, akım kırıcı çevresinde daha düzgün geçişli ve daha küçük hız gradyeni sağladığını göstermektedir

Su-hava arayüzeyindeki akışlar, akım kırıcı kullanımıyla daha düzgün bir model sergilemektedir. Çıktılardaki sonuçlar incelendiğinde, gerçek çalışma koşullarındaki havalandırma ile aynı akış karakteristiği şeklini verdiği açıkça görülmektedir. Havalandırıcıların arayüzey bölgesinde sıçrama (sloshing) şeklinde davranarak atıksuya daha fazla oksijen transferi sağladığı bilindiğinden her iki modelde bu davranış karşılaştırılmış ve akım kırıcının kullanıldığı modelde sıçrama olayının yani oksijen transferinin daha fazla olduğu gözlenmiştir .

Arayüzey bölgesinde suyun hacim oranı incelendiğinde, akım kırıcılı modeldeki suyun hacim oranı değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bunun sonucunda, akım kırıcılı havalandırıcının su-hava serbest yüzeyinde daha fazla oksijen transferi yaratarak daha etkili karıştırma ve havalandırma işlemi gerçekleştirdiği görülmektedir.

Grafik ve CFX çıktılarından elde edilen veriler ışığında, düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcılarda akım kırıcı kullanımı ile hem türbülans özellikleri iyileştirilmekte hem de istenmeyen girdap etkileri düşürülmekte, daha düzgün bir akış yönü ve hız gradyanı elde edilmektedir. Ayrıca havalandırıcılardan beklenen karıştırma ve havalandırma etkilerini de oldukça yükseltmektedir.

Akım kırıcısız düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcı, herhangi bir engelle karşılaşmadığından, suyu pervane ekseninde aynı noktada döndürerek beraberinde su moleküllerini de döndürmüş olmakta ve sadece pervanenin dönüş hızı suyu karıştırdığından girdap etkileri ve hız çoğalmaktadır.

Akım kırıcı kullanımıyla atıksu engelle karşılaştığı için girdabı kırarak hem hızı düşürmekte hem de daha fazla türbülans oluşmasını sağlayarak daha yüksek oranda karıştırma ve havalandırma etkisi göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- 1-AL-MASRY Waheed A.; AL-AWAL Jamad: *Analysis of Bubble Column Hydrodynamics Using Computational Fluid Dynamics*, Research Center College of Engineering King Saud University, 2006
- 2-Aktif Arıtma Teknolojileri A.Ş.; *Firma Kataloğu*, <http://www.aktifaritma.com>
- 3-ANSYS CFX Training Notes; 2007
- 4-ANSYS CFX 5.5 Tutorial; 2009
- 5-Arbiogaz Çevre Teknolojileri İnşaat San. ve Tic. A.Ş.: *Firma Kataloğu*, <http://www.arbiogaz.com/>
- 6-ASTİM Endüstri Tesisleri A.Ş.: *Firma Kataloğu*, <http://www.astim.web.tr>
- 7-ATAKİ, Adel: *Wetting of Structured Packing Elements CFD and Experiment*, Vom Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität; 2006
- 8-Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010
- 9-AVL Advanced Simulation Technologies: *Brochures*, AVL List GmbH; Doc.No: 04-01-05009; Hans-List-Platz 1, A-8020 Graz, Austria; 2009; E-mail: [ast@avl.com](mailto:ast@avl.com), <http://www.avl.com>
- 10-BHUYAR<sup>1</sup>, L.B.; THAKRE<sup>1</sup>, S.B.; INGOLE<sup>2</sup>, N.W.: *Design Characteristics of Curved Blade Aerator W.R.T. Aeration Efficiency and Overall Oxygen Transfer Coefficient and Comparison with CFD Modelling*, <sup>1</sup>P.R.M. Institute of Technology & Research, Badnera, Amravati (M.S), India 444701, <sup>2</sup> Principal, IBSS College of Engineering, Ghatkheda, Amravati (M.S), India 444605, International Journal of Engineering, Science and Technology VOL.1, NO.1, 2009
- 11-Biwater Treatment Limited: *Brochure*
- 12-BOIVIN, M.; SIMONIN, O.; SQUIRES, K.: *On the Prediction of Gas-Solid Flows with Two-Way Coupling Using Large Eddy Simulation*, Physics of Fluids, 2000
- 13-CİVELEKOĞLU, Gökhan: *Arıtma Süreçlerinde Gaz Transferi*; Yüksek Lisans Tezi; Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2003
- 14-CURI, Kriton: *Biyolojik Arıtma*, Boğaziçi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 1994

15-DAĞ, C. Murat; *Eysel Nitelikli Atıksular Arıtma Prosesleri*; ÇevreYüksek Mühendisi, İller Bankası, 2003

16-DEMİRÖZ, Kevser; BUDAK, Fuat: *HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Bilgisayar Modellemesi Kullanılarak Anoksik Tankın Hidroliğinin İncelenmesi*: Çukurova Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana / Türkiye : Ç.Ü.MÜH.M M.FAK.Dergisi, Cilt.22, SAYI.2, 2007

17-ECKENFELDER, W.Wesley; O'CONNOR, Donald, J: *Biological Waste Treatment*, Oxford, New York, Pergamon Press, 1961

18-EPA.: *Development of Standard Procedures for Evaluating Oxygen Transfer Devices*, EPA-600/2-83-102, USEPA, MERL, 1983

19-Eimco Water Tecnologies: *Dorr-Oliver Eimco Equipment,Processes and Services, Municipal Wastewater Treatment*, USA, 2004, [www.glv.com](http://www.glv.com)

20-EYMARD, Robert; GALLOUET Thierry; HERBIN, Rap'haele: *Finite Volume Method Handbook of Numerical Analysis*, Vol. VII, 2006

21-Fluent Inc.: *Chapter 18. Introduction to Modeling Multiphase Flows*, November 28, 2001

22-HINZE, J.O.: *Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory*, McGraw-Hill, York, 1959

23-HOFFMANN Klaus A. CHIANG, Steve T. *Computational Fluid Dynamics*. Engineering Education System, Wichita, Kansaa, USA, Volume II, Third Edition, 1998

24-İLERİ, R: *Çevre Biyoteknolojisi*, Değişim Yayınları, Adapazarı, 2000

25-JENKINSON, R.Wayne; HALL, Eric R.; GREGORY, A. Lawrence: *Computational Fluid Dynamics Modelling of Aerated Stabilization Basins*, Department of Civil Engineering and Pulp and Paper Centre The University of British Columbia, Vancouver, B.C. July, 2000

26-KARGI, F.: *Çevre Mühendisliğinde Biyoprosesler*, D.E.Ü. Matbaası, İzmir, 1995

27- KAYA, Fuat; KARAGÖZ, İrfan: *Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 12, Sayı 1, 2007

28-KIRKE, Brian; EL GEZAWY, Ahmed; *Design and Model Tests for an Efficient Mechanical Circulator/Aerator for Lakes and Reservoirs*, School of Engineering, Griffith University Gold Coast Campus, PMB 50, Australia, (First received August 1995; accepted in revised form May, 1996)

29-Landustrie Watertechnologie: *Broshure*, 2007, [www.landustrie.nl](http://www.landustrie.nl)

- 30-LAROCHE, R. D.: *The Use of Computational Fluid Dynamics for Chemical Process Engineering*, ProceedingsChemputers Europe 4, Barcelona / Spain, February, 1998
- 31-LEVEQUE, Randall: *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, 2002
- 32-MENTER, F.R.: *Two-equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*, AIAA-Journal., 1994
- 33-MICHELE, Volker: *CFD Modeling and Measurement of Liquid Flow Structure and Phase Holdup in Two-and Three-Phase Bubble Columns*, Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität at Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2002
- 34-MMO Yayını: *Atıksu Arıtma Tesisi Pratik Bilgiler El Kitabı*, MMO/2004/354
- 35-MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı 91, 2006.
- 36-MULLER, James A., Ph.D., P.E.; BOYLE, William, C., Ph.D., P.E.; PÖPEL, H. Johannes, Dr.-Ing: *Aeration Principle and Practice*, VOLUME 11, CRC PRESS, 2002
- 37-MUNDT, Kerstin: *Wastewater Treatment in Sweden*, 2006
- 38-MUSLU, Yılmaz: *Atıksuların Arıtılması*, I.T.Ü Matbaası, İstanbul, 1994
- 39-ÖZTÜRK, İzzet; TİMUR, Hacer; KOŞKAN, Ufuk: *Atıksu Arıtımının Esasları, Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü*, 2005
- 40-PATANKAR, S. V.: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York, 1980
- 41-PELOSI, Giuseppe: *The Finite-Element Method, Part I*, Univ. of Florence, 2007
- 42-PhiladelphiaMixers Ltd.: *Wastewastewater treatment*, [www.philadelphiamixers.com](http://www.philadelphiamixers.com)
- 43-POBE, Stephen P.: *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, 2000
- 44-RAO, A.R.; KUMAR, B.: *Rectangular Tank Surface Aerators: Scale Up Criteria and Energy Conservation*, Department of Civil Engineering, Indian Institue of Science, Bangalore, India, 2006
- 45-SAMOLINSKI, Jacek: *Grid Enabled Computational Engineering Design Optimisation*, School of Engineering MSc thesis, Cranfield University School of Engineering, Applied Mathematics and Computing Group, September, 2007
- 46-Sartes Mühendislik Taahhüt Sanayi ve Ticaret A.Ş.: *Firma Kataloğu*

47-Sas Arıtma Sistemleri Ltd. Şti.: *Firma kataloğu*, [www.sasaritma.com.tr](http://www.sasaritma.com.tr)

48-SAYMA, Abdülner: *Computational Fluid Dynamics*, Ventus Publishing Aps, 2009

49-SODJA, Jurij: *Turbulence models in CFD*, University of Ljubljana Faculty for Mathematics and Physics, Department of Physics, March, 2007

50-SOLI, J. Arceivala; SHYAM, R. Asolekar: *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*, McGrawHill, May 2006

51-SOMMERFELD, M.: *Numerical Simulation of the Particle Dispersion in Turbulent Flow*, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1990

52-[www.sonluelemanlaranalizi.com](http://www.sonluelemanlaranalizi.com)

53-<sup>1</sup>STROPKY, Dave; <sup>1</sup>NOWAK Paul; <sup>1</sup>DONG, Suqin; <sup>2</sup>POUGATCH, Konstantin; SALCUDEAN, <sup>2</sup>Martha; PAGORIA, <sup>3</sup>P.S; BARKLEY.W.A;<sup>3</sup>BRYANT, C.W.: *CFD Predictions in Large Mechanically Aerated Lagoons*, <sup>1</sup>Process Simulations Ltd., 206-2386 East Mall, Vancouver, BC, Canada, V6T 1Z3, <sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, 2054-6050 Applied Science Lane, Vancouver, BC, Canada, V6T 1Z4, <sup>3</sup>Weyerhaeuser Company, Environment, Health and Safety, P.O Box 9777, Mail Stop WTC 2G2, Federal Way, WA 98063-9777 ]

54-Tesisat Mühendisliği Süreli Teknik Yayın, Sayı:57, Mayıs-Haziran 2003

55-TOPRAK, Hikmet, (Genişletilmiş 3.Baskı) : *Atıksu Arıtma Sistemlerinin Tasarım Esasları, Cilt- ve Cilt-2*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, No.240-241, ISBN : 975-441-148-4 ve 975-441-149-2, İzmir, 2000

56-TORO, E.F.: *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag., 1999

57- ULUSOY, Gözde, Melodi; *Atıksu Arıtma Sistemleri Biyolojik Süreçler*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, 2009

58-ÜNAL, Güner: *Atıksuların Biyolojik Arıtımında Havalandırma İşlemi*, Türkiye Mühendislik Haberleri, Eylül-Ekim, 1978

59-WILCOX, D. C.: *Turbulence Modelling for CFD*, 2nd Edition, DCW Industries, Inc., La Cañada, California, 1998

60-XING, Tao; STERN, Fred: *Introduction to Computational Fluid Dynamics (CFD)*, IIHR-Hydroscience&Engineering, C. Maxwell Stanley Hydraulics Laboratory, The University of Iowa, September, 2007

61-YILDIRIMER, A. Koray: *Eysel Atıksu Arıtma Tesislerinde Debi-Maliyet İlişkileri*, Çukurova Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 2006

62-YÜCEER, Ahmet: *Atıksu Arıtma Sistemleri Genel Bir Bakış*, Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana, 1994

## ÖZGEÇMİŞ

Canan AKBULUT, 1976 yılında İSTANBUL’da doğmuştur. Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ nü 2003 yılında bitirmiştir. 2007 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü’ nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. İngilizce bilmektedir.