T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİRE VE KARE EN KESİTLİ VENTURİ TİPLİ GAZ TEMİZLEYİCİLERİN TASARIM VE AKIŞ ANALİZLERİ

Furkan TÜRKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR

Mayıs, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİRE ve KARE EN KESİTLİ VENTURİ TİPLİ GAZ TEMİZLEYİCİLERİN TASARIM ve AKIŞ ANALİZLERİ

Furkan TÜRKOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 08/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Seyfettin Bayraktar
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Seyfettin Bayraktar, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Aykut Safa, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mustafa Atmaca, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Seyfettin Bayraktar sorumluluğunda tarafımca hazırlanan daire ve kare en kesitli venturi tipli gaz temizleyicilerin tasarım ve akış analizleri başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Furkan TÜRKOĞLU

İmza

Aileme,

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve hem teknik olarak hem de yol göstermesiyle bana ışık olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Seyfettin Bayraktar'a teşekkürü bir borç bilirim.

Furkan TÜRKOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv
SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
1.1 Konunun Önemi ... 16
1.2 Farklı Sektörlerde Kullanılan Gaz Temizleme Sistemleri ... 17
1.3 Denizcilik Sektöründe Kullanılan Gaz Temizleme Sistemleri ... 19
1.4 Yıllara Göre Gaz Yıkayıcı ile Donatılan Gemi Sayısı ... 21
1.5 İşletme Prensiplerine Göre Denizcilikte Kullanılan Gaz Yıkayıcı Türleri ... 21
1.6 Çevrim Türlerine Göre Denizcilikte Kullanılan Islak Gaz Yıkayıcı Türleri ... 24
1.6.1 Açık Döngülü Sistemler ... 24
1.6.2 Kapalı Döngülü Sistemler ... 25
1.6.3 Melez (Hibrid) Sistemler ... 26
1.7 Venturi Yıkayıcı ... 29
1.8 Literatür Taraması ... 30
2 HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ METODU **37**
2.1 Euler-Euler yaklaşımı ... 38
2.2 Euler-Lagrange yaklaşımı ... 38
2.3 Akışı Yöneten Denklemler ... 39
3 PARAMETRİK ÇALIŞMALAR **43**
3.1 Analizlerin Karşılaştırması ve Doğrulanması ... 44
3.2 Ağdan bağımsızlık çalışması ... 46
3.3 Sınır şartları ... 50
3.4 Kare ve daire kesitli gaz temizleyici tasarımları ... 51
4 SONUÇLAR ve ÖNERİLER **91**
KAYNAKÇA **93**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **98**

SİMGE LİSTESİ

k	Kinetik enerji
ε	Kinetik enerji kayıp oranı
ρ	Suyun özgül kütlesi
μ	Dinamik viskozite
μ_{eff}	Efektif kinematik viskozite
μ_t	Türbülans viskozitesi
c_μ	Dinamik viskozite
α_ε	Kinetik enerji kayıp oranı
t	Zaman
p	Basınç
u_i	Hız Bileşeni x yönünde
ν	Kinematik viskozite
$Re_{D_{hd}}$	Reynolds sayısı
μm	Mikrometre
D	Hidrolik çap
η	Venturi verimi
L	Venturi boy uzunluğu
$\dot{m}_{su}$	Kütlesel su debisi
δ_{ij}	Kronecker delta
v_t	Eddy viskozitesi
p_ρ	Parçacık yoğunluğunu
d_p	Parçacık çapı
u_p	Parçacık ortalama hızı

C_D	Sürüklenim katsayısı
u_{df}	Parçacık difüzyonu hızı
T_L	Türbülans uzunluk ölçeği
I	Türbülans Yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

AFM	Ayrık faz Modeli (Discrete Phase Model DPM)
AHM	Akışkan Hacim Modeli (Volume Of Fluid VOF)
BM	Birleşmiş Milletler
CKM	Cebirsel Karışım Modeli (ASMM)
ÇKA	Çevre Koruma Ajansı (Environment Protect Agency EPA)
EKA	Emisyon Kontrol Alanları (Emission Control Area ECA)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
SDG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG)
MARPOL	Denizde Kirliliğin Önlenmesi Sözleşmesi
SO_x	Sülfür oksit
IMO	Uluslararası Denizcilik Örgütü
UST	Uluslararası Standart Teşkilatı (ISO)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Basit filtreleme [3] 18
Şekil 1.2 Elektrostatik çökeltme yöntemi [4] 18
Şekil 1.3 Islak gaz temizleyici [8] 19
Şekil 1.4 Gaz yıkayıcı ile donatılan gemi sayısı [12] 21
Şekil 1.5 Gemilerde Gaz Yıkayıcı Tipleri [13] 22
Şekil 1.6 Islak Gaz Temizleyici [14] 23
Şekil 1.7 Kuru Gaz Temizleyici [14] 23
Şekil 1.8 Açık sistem döngüsü [15] 25
Şekil 1.9 Kapalı sistem [15] 26
Şekil 1.10 Püskürtme Kulesi [2] 28
Şekil 1.11 Siklonik Gaz Yıkayıcı [2] 28
Şekil 1.12 Venturi Gaz Yıkayıcı [2] 30
Şekil 3.1 2b görünüş venturi [5] 43
Şekil 3.2 0,02 kg/s debide tek fazda (15 m/s) ve çift fazda (10 m/s) hız profil 44
Şekil 3.3 Basınç düşüşü 0,02 kg/s debide 10 m/s gaz akışında 45
Şekil 3.4 70 m/s boğaz hızında karşılaştırma 45
Şekil 3.5 34 m/s boğaz hızında karşılaştırma 46
Şekil 3.6 Ağ örgüsü daire kesitli venturi yapısı (lüle yok) 47
Şekil 3.7 Ağ örgüsü daire kesitli venturi yapısı 47
Şekil 3.8 Ağ örgüsü daire kesitli venturi giriş bölgesi 48
Şekil 3.9 Ağ örgüsü kare kesitli venturi yapısı 48
Şekil 3.10 Ağ örgüsü kare kesitli venturi giriş bölgesi 49
Şekil 3.11 Ağ eleman sayısı-verim ilişkisi 50
Şekil 3.12 Hız dağılımı 0,02 kg/s debide 10 m/s gaz akışında 52
Şekil 3.13 Basınç dağılımı 0,02 kg/s debide ve 10 m/s gaz akışında 53
Şekil 3.14 Sınır şartları (a) yandan görünüş (b) 54
Şekil 3.15 Kare kesitli geometri 3 boyutlu görünüş 54
Şekil 3.16 Daire kesitli geometri 3 boyutlu görünüş 56
Şekil 3.17 Genel boyutlar 56
Şekil 3.18 Daire ve kare kesitli gaz yıkayıcılarda tek fazda 16,5 m/s'de basınç ve hız . 57
Şekil 3.19 16,5 m/s yalnız hava hızında (a) kare ve (b) daire kesitli yıkayıcıda hız 58
Şekil 3.20 16,5 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız 58
Şekil 3.21 16,5 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç 59

Şekil 3.22 16,5 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda hız (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s debide hız (f) 0,038 kg/s debide giriş vektörü (g) 0,075 kg/s debide giriş vektörü 61

Şekil 3.23 16,5 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı debilerde hız profilleri 62

Şekil 3.24 16,5 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debisinde basınç.. 62

Şekil 3.25 16,5 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s debilerinde hız (f) 0,038 kg/s debide giriş vektörü (g) 0,075 kg/s debide giriş vektörü 64

Şekil 3.26 33 m/s hava girişinde daire ve kare kesitli venturi gaz yıkayıcılarının hız profilleri 65

Şekil 3.27 33 m/s yalnız hava hızında (a) kare (b) daire kesitli yıkayıcıda hız..... 65

Şekil 3.28 33 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız 66

Şekil 3.29 33 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç.. 66

Şekil 3.30 33 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız..... 68

Şekil 3.31 33 m/s hava girişinde kare kesitli venturi gaz yıkayıcı farklı su debilerinde hız..... 69

Şekil 3.32 33 m/s hava girişinde kare kesitli venturi gaz yıkayıcı farklı debilerde basınç 69

Şekil 3.33 33 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s debilerinde hız (f) 0,038 kg/s debide giriş vektörü (g) 0,075 kg/s debide giriş vektörü 71

Şekil 3.34 50 m/s yalnız hava hızında kare ve daire kesitli yıkayıcıda basınç..... 72

Şekil 3.35 50 m/s yalnız hava hızında (a) kare ve (b) daire kesitli yıkayıcıda hız..... 73

Şekil 3.36 50 m/s hava hızı girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debisinde hız.... 73

Şekil 3.37 50 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç... 74

Şekil 3.38 50 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız..... 76

Şekil 3.39 50 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız 76

Şekil 3.40 50 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç.... 77

Şekil 3.41 50 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız (f) 0,075 kg/s debide giriş vektörü 79

Şekil 3.42 75 m/s yalnız hava hızında kare ve daire kesitli yıkayıcıda hız 80

Şekil 3.43 75 m/s yalnız hava hızında (a) daire ve (b) kare kesitli yıkayıcıda hız..... 80

Şekil 3.44 75 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı debilerde hız..... 81

Şekil 3.45 75 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç... 81

Şekil 3.46 75 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız..... 83

Şekil 3.47 75 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız 84

Şekil 3.48 75 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç 84

Şekil 3.49 75 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız 86

Şekil 3.50 5 farklı hava hızında daire ve kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç düşüşü 88

Şekil 3.51 Farklı hava hızlarında daire ve kare kesitli gaz yıkayıcılarda basınç düşüşünün sıvı/gaz oranı 89

Şekil 3.52 Yıkayıcılardaki verim değerleri 90

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Literatür özeti 33
Tablo 3.1 Venturi boyutları (mm) 44
Tablo 3.2 Ağ örgüsü-verim 49
Tablo 3.3 Yapılan Analizler 55
Tablo 3.4 Venturi geometrisinin isimlendirmesi 56
Tablo 3.5 Farklı hava hızında oluşan farklı su debilerinde kare ve daire kesitli yıkayıcıda maksimum hız değerleri 87
Tablo 3.6 Farklı hava hızında oluşan farklı su debilerinde kare ve daire kesitli yıkayıcıda boğaz bölgesinde statik basınç (kPa) 87
Tablo 3.7 Farklı hava girişinde farklı debilerde kare ve daire kesitli yıkayıcıda verim 90

ÖZET

Daire ve Kare En Kesitli Venturi Tipli Gaz Temizleyicilerin Tasarım ve Akış Analizleri

Furkan TÜRKOĞLU

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR

Dünyadaki artan hava kirliliği insan sağlığı ve sürdürülebilir bir çevre için ciddi riskler taşımaktadır. Dünyada deniz taşımacılığı ticaretin büyük bir kısmını oluşturulduğundan, emisyonların azaltılması için gemi bacalarındaki emisyon değerleri Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından ciddi yasal düzenlemeler ile kısıtlanmıştır. Mevcut gemilerin emisyon değerlerinin azaltılması için ise birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Maliyet ve işçilik açısından venturi tipi gaz yıkayıcıları diğer emisyon düşürücülerden daha ideal olduğundan dünyada gemi sahipleri tarafından daha çok tercih edilmektedir.

Bu çalışmada kükürt emisyonunu azaltmak için kullanılan daire ve kare kesitli venturi tipli gaz temizleyicileri 40 farklı durumda, k-epsilon türbülans modeli kullanılarak ayrık faz modeli (AFM) yardımıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri yapılmıştır. Özdeş kare ve daire kesitli venturi tipli yıkayıcıları verim, basınç düşüşü, hız açısından karşılaştırılarak incelenmiştir. Daire kesitli gaz yıkayıcılarda basınç düşüşü, kare kesitli gaz yıkayıcıya göre daha fazla olmaktadır. Kare kesitli gaz yıkayıcının daire kesitli gaz yıkayıcıya göre aynı hava hızı ve su debisinde veriminin daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Aynı su debisinde verim, gaz hızı artışıyla artmaktadır. Lülelerden gönderilen debi artışı verimi azalttığı da gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Venturi, HAD, AFM, Emisyon, Baca

ABSTRACT

Design and Flow Analyses of Circular and Square Cross Sectional Venturi Type Scrubbers

Furkan TÜRKOĞLU

The Department Of Naval Architecture and Marine Engineering

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR

Increasing air pollution around the world poses serious risks for human health and a sustainable environment. Since maritime transport constitutes a large part of the trade in the world, emission values in ship smokestacks have been restricted by serious legal regulations by the International Maritime Organization (IMO) in order to reduce emissions. There are many different methods to reduce the emission values of existing ships. Since venturi type scrubbers are more ideal than other emission reducers in terms of cost and labor, they are preferred by ship owners around the world.

In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes were carried out with the help of discrete phase model (DPM) using the k-epsilon turbulence model in 40 different cases of circular and square cross-section venturi type scrubbers used to reduce sulfur emissions. Square and circular cross-section venturi type washers with identical hydraulic diameters were compared and examined in terms of efficiency, pressure loss and speed. The pressure drop in circular section scrubbers is higher than in square section scrubbers. The efficiency of the same square and circular cross-section scrubbers was compared by calculating the venturi scrubber efficiency using the dpm method. It was calculated that the efficiency of the square section washer was higher than that of the circular section washer at the same air speed and water flow rate.

As air speed increases at the same water flow rate, efficiency increases. It has also been shown that increasing the water flow rate sent through the nozzles reduces efficiency.

Keywords: Venturi, CFD, DPM, Emission Funnel

1 GİRİŞ

1.1 Konunun Önemi

İnce parçacıkları içeren çift faz karışımlarda farklı fazların birbirlerinde ayrıştırılması önemli bir konudur ve günümüzde bu konuyla ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmaların bir kısmında insan sağlığı ön plana çıkarken bir diğer kısmında ise endüstride verimi artırmak amacıyla yapılmaktadır.

Artan hava kirliliğinin etkisiyle birlikte insan sağlığının risk altında olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Bu etkilerin ortadan kaldırılması ve çevre kirliliğinin önüne geçmeye yönelik yeni teknolojik çözüm arayışları devam etmektedir. Mühendisler atmosfere salınan gazların zararlı etkisini azaltmak ve endüstride farklı fazlardaki parçacıklı karışımların birbirlerinden ayrıştırılması için birçok farklı yöntem geliştirmişlerdir. Venturi tipli yıkayıcılar da bunlardan birisidir. Bu tezde venturi tipli gaz temizleyiciler incelenmiştir.

Her yıl yaklaşık olarak 150.000 prematüre çocuk dünyaya gelmekte [1] ve aynı zamanda çocuk astımı da her geçen yıl artmaktadır [1]. Türk Tabipler Birliğine göre hava kirliği akciğer hastalıklarında artış, astım nöbetlerinin sıklığında değişim, akut solunum yolu hastalıkları ve çeşitli cilt hastalılarına doğrudan etki etmektedir[1]. Bu temel nedenler incelendiğinde hava kirliliğinin sağlık üzerine etkisi bilinmektedir, dolayısıyla artık yapılan düzenlemeler ‘Gelecek nesiller için yaşanabilir bir dünya bırakalım.’ sloganının ötesinde gerçekten yaşamı doğrudan etkileyen kirliliği önlemek adına önlemler alınması gerekmektedir. Bu noktada mühendislik alanında gelişmelerin insan sağlığı üzerindeki etkisi, tıp alanında koruyucu hekimliğin hastalığın tedavisinden önce, hastalığı oluşturan etkenlerin ortadan kaldırılması başlığına dahil edilebilir. Toplumsal sağlığın temelinde mühendisliğin önemli bir kilit taşı olduğu da bu farkındalıkla ortaya konulabilir. Dolayısıyla endüstriyel gelişmelerin hızla arttığı bu dönemde ‘toplumsal sağlığı koruyucu mühendislik’ tanımı yapılan bu çalışma için kullanılabilir. Venturi tipli yıkayıcılar ile insan sağlığına zararlı gazların atmosfere salınımı engellenerek sağlık açısından önlemler alınabilir.

Çevresel etkilerinin zararlı sonuçlarının yanı sıra, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından yapılan emisyon düzenlemeleri, gemi sahiplerini emisyonu azaltmak için çeşitli alternatif teknolojilere yönlendirmiştir. Güncel yasalara uyum açısından düşük

sülfürlü yakıt sarf eden ana makina tercihi en kolay çözüm yöntemi olmasına karşılık, gemi sahipleri tarafından bir ana makine değişimi veya yeni inşa edilen gemilerde doğal gaz vb. yakıt sarf eden ana makine tercihi, maliyetleri çok ciddi boyutlara ulaştığından gemi sahipleri gaz temizleyicileri bacaya entegre ederek gemi emisyon yasalarına uyum sağlamayı tercih etmişlerdir. Bunun yanında endüstride, tekstilde, iklimlendirme gibi alanlarda da gaz ile karışmış haldeki parçacıkların gazdan arındırılması işleminde gaz temizleyiciler kullanılmaktadır.

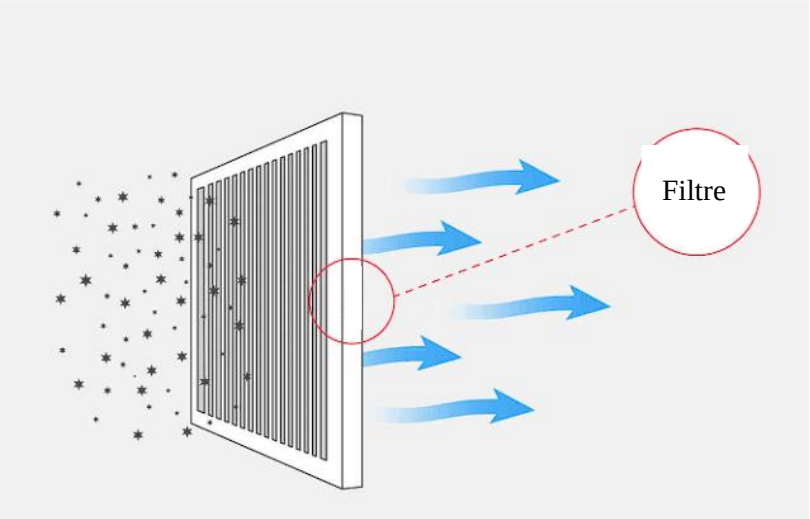
1.2 Farklı Sektörlerde Kullanılan Gaz Temizleme Sistemleri

Artan hava kirliliğinin kaynağı olarak endüstriyel üretim alanında ortaya çıkan gazlar toplumsal sağlığı, çevreyi ve canlıları doğrudan tehdit etmektedir. Bunun önüne geçmek amacıyla bir dizi gaz temizleyici çeşidi kullanılmaktadır.

Bunlardan başlıca yöntemler ise;

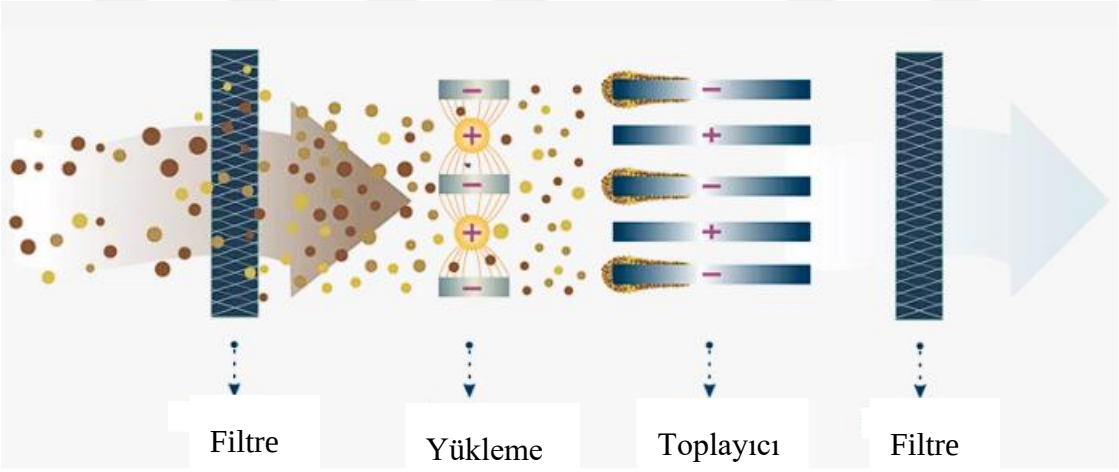
- Basit filtreleme yöntemi
- Elektrostatik çökeltme yöntemi
- Scrubber (Gaz) yıkayıcı yöntemi

Basit filtreleme yönteminde **Şekil 1.1**'de görüldüğü üzere parçacık kirletici maddeleri filtreleyen ve temiz gazın geçmesine izin veren gözenekli yapıdan kirli gaz akışı geçirilir. Parçacıklar bu gözenekli yapıya tutunarak içerisinde kalır ve gazdan kirli parçacıklar arındırılmış olur. Bu yöntem araçlarda, ev tipi temizleyicilerde çok sık kullanılmaktadır. Ancak belirli çapın altındaki parçacıklar filtrenin gözeneklerinden geçerek arındırılamamaktadır. Daha küçük yapıdaki parçacıklar için daha gelişmiş filtrasyon yöntemleri kullanılmaktadır [2].



Şekil 1.1 Basit filtreleme [3]

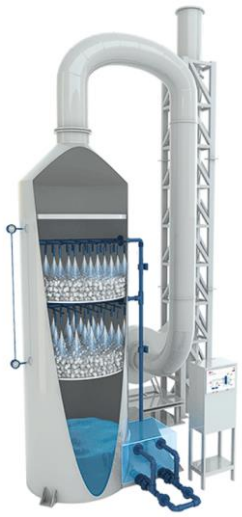
Elektrostatik çökeltme yönteminde ise **Şekil 1.2**'de görüldüğü üzere gerilim ile topraklanmış toplama yüzeyi arasına giren gazlar iyonlaşır ve yüklü plakaya doğru iyonlar çekilerek gazdan parçacıklar ayrıştırılır. Kirli gazın içerisinde bulanan metal iyonları elektrik yükü ile yüklendiklerinden dolayı toplayıcı kısmında zıt yüklerin birbirini çekme prensibiyle metal yüklerin toplanması sağlanır. Metal yüklü kirleticilerden arındırılan gaz ise temizlenmiş olarak filtreden çıkar.



Şekil 1.2 Elektrostatik çökeltme yöntemi [4]

Gaz yıkayıcı (scrubber) yöntemi ise **Şekil 1.3**'de görüldüğü üzere örnek olarak bir ıslak gaz yıkayıcı gösterilmiştir. Bu tipte ise bir yıkayıcı gemilerdeki baca gazlarının temizliği için kullanılan bir yöntemdir. Yukarıda sayılan yöntemler arasında maliyet ve verim

açısından değerlendirildiğinde en sık tercih edilen yöntem olduğu söylenmektedir [5],[6],[7].



Şekil 1.3 Islak gaz temizleyici [8]

Kirli gaz içerisinde bulunan parçacıkların büyüklüğüne göre gaz temizleyici türü değişebilir. Buna göre parçacık büyüklüğü Çevre Koruma Ajansı (ÇKA) tarafından sınıflandırılmıştır. Islak gaz temizleyiciler 2.5 mikron ve daha küçük parçacıkları 'ince' ve 10 mikron ila 2.5 mikron arasındaki parçacıkları ise 'kalın' olarak sınıflandırılmıştır[9]. Gaz temizleyiciler çevresel kirliliğin azaltılmasında, insan sağlığının korunmasında, hava kalitesinin yükseltilmesinde, asit yağmurları ve korozyonun önlenmesinde, temizleyici teknolojileri sayesinde enerji geri kazanımı gibi birçok noktada kullanılmaktadır.

Denizcilik sektöründe artan baca gazı emisyonlarının önüne geçmek için bir dizi yeni önlem getirilmiştir. Buna göre artık gemi bacalarının emisyon değerlerinin binde 5'lerin altında olması gerekmektedir. Bu düzenlemelerin ardından gemi sahipleri, emisyon değerlerini düşürmek için farklı metotları aramışlardır. Hem maliyet açısından hem de gemi yük taşıma kapasitesi değişmeden emisyon değerlerinin düşürülmesi için gaz temizleyicilerinin gemilere eklenmesinin ideal bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir [10].

1.3 Denizcilik Sektöründe Kullanılan Gaz Temizleme Sistemleri

Çevre kirliliğinin insan sağlığına etkileri tüm dünya tarafından artık kesin olarak kabul edilmiştir, ancak kirliliğin önlenmesi için yapılan düzenlemelerin ülkeden ülkeye

değiştiği bilinmektedir. Denizcilik sektörü, dünya ticaretinin önemli bir sac ayağını oluşturduğundan kirlilik konusunda ciddi önlemlerin alınması ve uygulanması tüm dünya açısından kritik öneme sahiptir. Bu konuda Birleşmiş Milletler (BM) bünyesinde 2020 yılında Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) yaptığı düzenlemeyle %3,5 olan yakıt neticesinde oluşan egzoz gazının sülfür oranını %0,5'e düşürülmesi kararını vermiştir. Bu kararla birlikte 8,5 milyon ton SO_X üretiminin önüne geçilmiş olması beklenmekte ve ayrıca SO_X emisyonun dünya çapında %77 oranında düşmesi beklenmektedir. BM bünyesindeki IMO himayesi altındaki gemilerden denizlerde kirliliğin önlenmesine ilişkin sözleşmede (MARPOL) yeni limitler tanımlanmış ve sözleşme standartları geliştirilmiştir. Bu yeni düzenleme ile birlikte dünyada astım, felç, akciğer kanseri gibi birçok hastalığın azalması beklenmektedir [1] .

Yeni düzenleme ile birlikte düşük sülfürlü yakıtların tedarikçi firmalardan temin edilebilmesi için IMO birçok farklı anlaşma ve düzenleme getirmiştir. Buna göre düşük sülfür emisyonu için, yüksek sülfür içeren yakıtla düşük sülfür içeren yakıt harmanlanarak düşük sülfürlü yakıt elde edilmesi ile de düşük sülfür emisyonu oluşturan yakıt oluşturulabilir ve bu yakıt kullanılabilir. Bunun ötesinde doğal yakıt olan doğal gaz, bioyakıtlar da kullanılabilir.

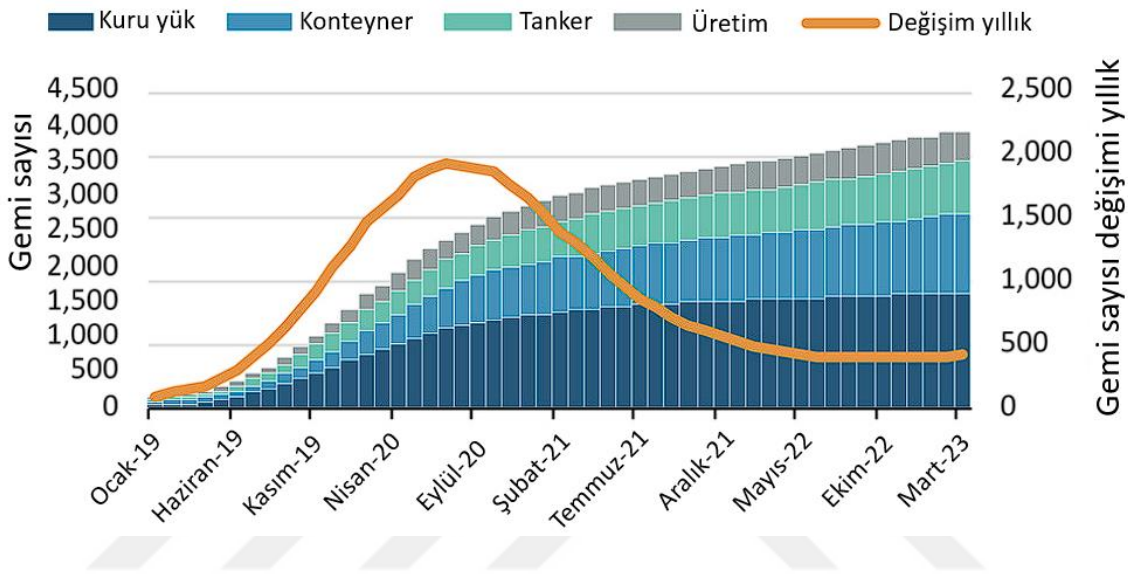
UST (ISO) standartları ile 2020 yılında gelen düzenleme ile SO_X oranının maksimum %0,5 olması için kullanılacak yakıtların özellikleri gösterilmiştir. (UST 8217 ve UST/PAS 23263:2019)

Gemilerde emisyonun istenen değerlerde olmasını sağlamak için çeşitli yöntemler mevcuttur. İlk olarak bayrak devleti onaylaması halinde baca ve kazanlarda 'scrubber' olarak isimlendirilen gaz yıkayıcıların kullanılması ile bacadan düşük sülfürlü gaz emisyonunun sağlanması veya bacadan çıkan gazların sülfür oranını düşüren ana makinede yapılacak olan yeni modifikasyon yöntemi, veyahut yakıtın sıvılaştırılmış doğalgaz (SDG) değiştirilerek düşük sülfürlü egzoz gazı elde edilebilir [11].

Bu üç yöntem düşünüldüğünde yakıtın cinsinin değişmesi, ana makine ve kazanlardaki uyumun incelenmesi daha maliyetli olduğundan, IMO 2020 düzenlemesi için otorite olan gemi bayrak devletinin izin vermesi halinde, bacada gaz yıkayıcı dönüşümü yapılması tercih edilen bir yöntemdir [11].

1.4 Yıllara Göre Gaz Yıkayıcı ile Donatılan Gemi Sayısı

IMO 2020 düzenlemelerinin ardından gaz yıkayıcı ile donatılan gemi sayısının her geçen gün arttığı görülmek ile birlikte **Şekil 1.4**'te görüldüğü üzere grafikte artış hızı azalmaktadır. En fazla kuru yük gemilerinde donatılan yıkama sistemi sayısı da yine grafikten okunmaktadır. Mart 2023 tarihi itibariyle donatılan toplam gemi sayısı ise 4000 sayılarına dayandığı görülmektedir [12].



Şekil 1.4 Gaz yıkayıcı ile donatılan gemi sayısı [12]

1.5 İşletme Prensiplerine Göre Denizcilikte Kullanılan Gaz Yıkayıcı Türleri

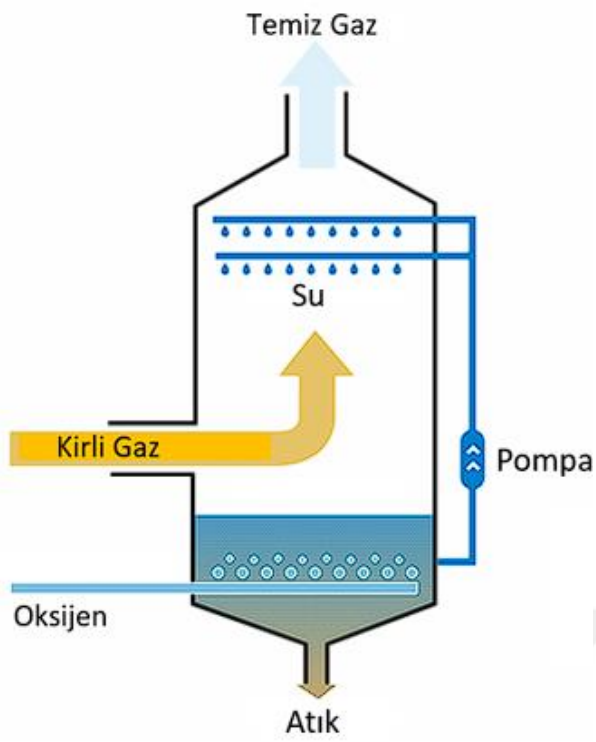
Yıkayıcılar gaz temizleme sistemi olarak işletme yöntemi ve çevrim türlerine göre iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. **Şekil 1.5**'te gaz yıkayıcı tipleri gösterilmiştir. İşletme yöntemine göre ıslak ve kuru olmak üzere iki farklı işletme yöntemi mevcuttur. Islak gaz yıkayıcı türlerinde çevreye ve insan sağlığına zararlı gazlar su gibi çözücülerle çözünerek yıkama yapılarak atmosfere salınır [13].



Şekil 1.5 Gemilerde Gaz Yıkayıcı Tipleri [13]

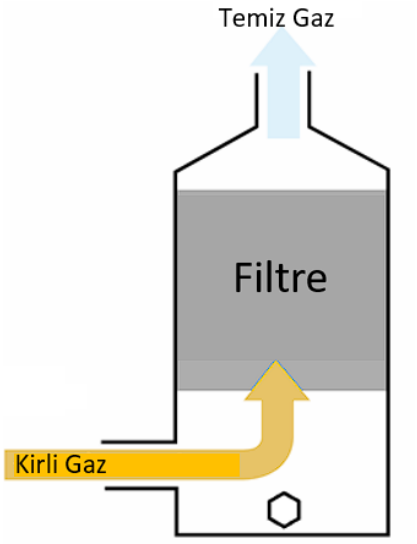
Kuru yöntemde ise herhangi bir sıvı olmadan gazı Kalsiyum oksit (CaO) olarak da bilinen doğal maden parçacıklarının arasından egzoz gazı geçirilerek temizleme işlemi yapılmaktadır. Temizleme işleminin ardından ürün olarak elde edilen alçı ise faydalı ürün olarak inşaatlarda kullanılabilmektedir. Ancak bu yöntemde temizleyici özelliğinden yararlanılan kalsiyum oksit ve oluşan alçının depolama sorunu önemli bir konudur ve gemi gibi ticari bir faaliyet yürüten bir sistemde alan sorunu önemli bir konudur. Dolayısıyla kuru gaz temizleyicilerinin gemilerdeki tercihi konusunda dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 1.6'da görüldüğü üzere ıslak yıkayıcılarda gaz yıkayıcıya giren kirli, gaz, su vb. sıvılarla kirlilik etkisinden arındırılarak temiz bir şekilde atmosfere salınır. Sıvı ile karışan kirletici etkili karışım ise oksijen yardımıyla zehirli etkisi azaltılarak uygun depolama alanında biriktirilir ya da belirlenen alanlarda denize bırakılır.



Şekil 1.6 Islak Gaz Temizleyici [14]

Kuru gaz temizleyicilerde ise **Şekil 1.7**'de görüldüğü üzere gazdan kirletici parçacıklar filtre yardımıyla temizlenir. Endüstriyel tesislerde en sık kullanılan yöntem olan kuru gaz temizleyicileri atıkların depolanması ve düşük enerji ihtiyacı dolayısıyla sıkça tercih edilmektedir.



Şekil 1.7 Kuru Gaz Temizleyici [14]

Gemilerde kullanılacak olan herhangi bir sistem; geminin sınırlı bir alan oluşu, taşıma maliyetlerine etkisi, bakım ve tutum gibi etkenler düşünülerek tercih edilirler. Yukarıda sayılan ıslak ve kuru gaz temizleyicilerinin her birinin hem avantajları hem de dezavantajları mevcuttur. Gemi gibi uluslararası çalışan ve standartları sağlamak için katı kurallara tabi olan bir alanda egzoz gazı emisyonunun IMO standartlarını karşılaması için üç sistem de kullanılabilir (Basit filtreleme, elektrostatik çökelti ve gaz yıkayıcı yöntemleri). Ancak elektrostatik yakalama yöntemi maliyet açısından daha yüksek olduğundan, kuru gaz yıkayıcı yöntem ise oluşan atıkların depolanması ve denize doğrudan atılamaması gibi nedenlerden tercih edilmemektedir.

Gemilerde kullanılan ıslak gaz temizleyiciler, oluşan gaz atıklarını, hem derişimini düşürerek denize atabilmekte hem de atık depolama kuru gaz temizleyicilerde atık olarak oluşan alçıdan daha kolay olduğundan tercih edilmektedir. Islak gaz yıkayıcılarda egzoz gazını temizlemek için kullanılan suyu denizden ya da geminin bünye tanklarından temin etmekte veyahut her iki sistemi beraber kullandığı sistemler olarak ayrılabilmektedir. Egzoz gazı temizleyici suyunun devir daim olması türüne göre sistemler birbirlerinden ayrılırlar.

1.6 Çevrim Türlerine Göre Denizcilikte Kullanılan Islak Gaz Yıkayıcı Türleri

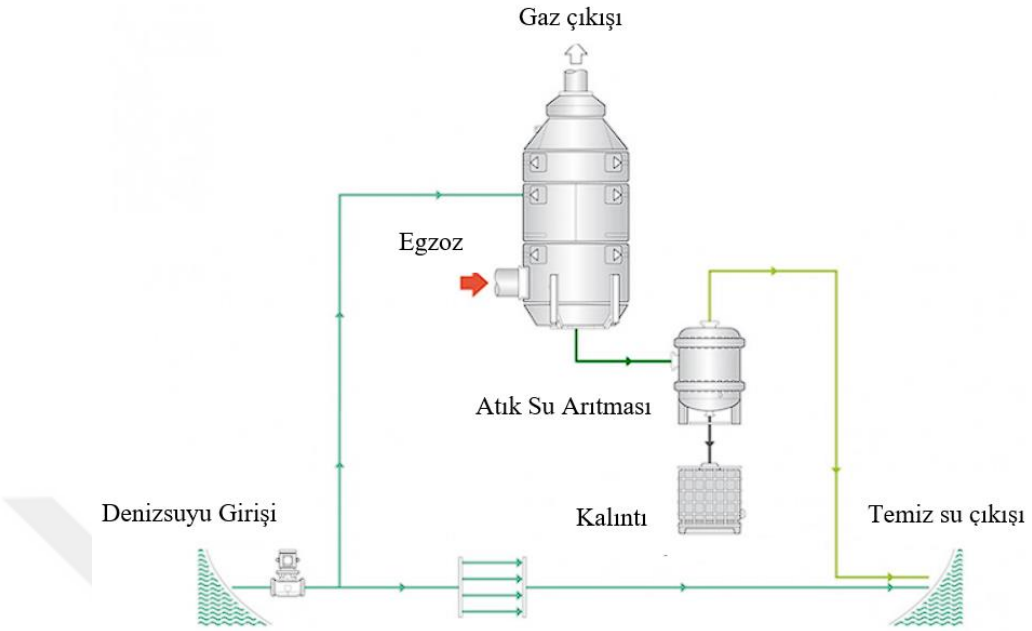
Çevrim türlerine göre;

- Açık döngülü sistemler
- Kapalı döngülü sistemler
- Melez (Hibrid) sistemler,

1.6.1 Açık Döngülü Sistemler

Islak yıkayıcılarda zehirli ve zararlı gazların arındırılması için farklı çevrimler kullanılmaktadır. Sistem işleyişi zehirli parçacıkların ortamdan arındırılması amacı olması hepsinin ortak noktasıdır. Farkı sistemin temizleyici suyun nereden temin edildiği ile başlamaktadır. Buna göre **Şekil 1.8**'de [15] açık döngülü sistemlerde sadece deniz suyu kullanılarak egzoz gazlarının temizlenmesi yapılmaktadır. Deniz suyu dışında herhangi bir kimyasal kullanılmamaktadır. Deniz suyunun alkali yapısı zehirli gazları arındırdığından dolayı deniz suyundaki tuzluluk oranı önemli bir bağlayıcıdır. Dolayısıyla tuzluluğun az olduğu Baltık gibi bölgelerde açık döngülü sistemler yıkayıcı olarak pek kullanılmazlar.

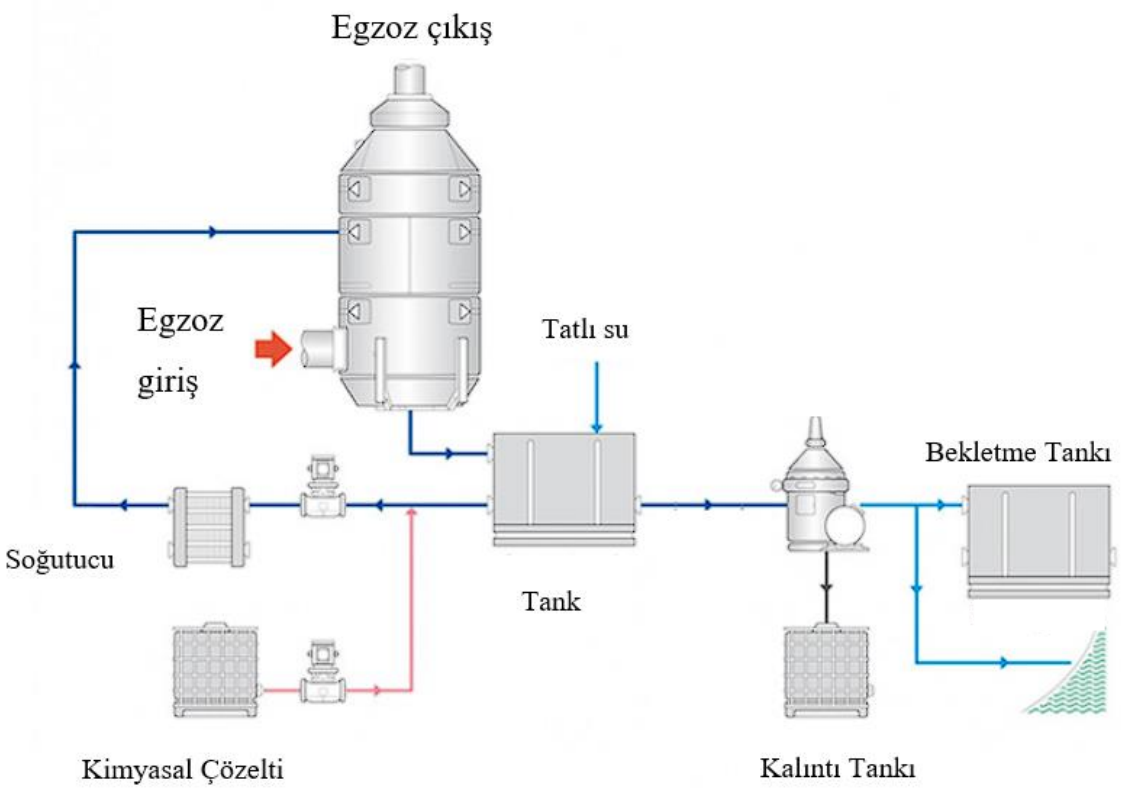
Sistem temizleyici olarak sadece deniz suyu kullandığı için ciddi bir güç gerekmektedir. Güç dezavantajının dışında sistemin kurulumunun daha kolay olduğu da bilinmektedir.



Şekil 1.8 Açık sistem döngüsü [15]

1.6.2 Kapalı Döngülü Sistemler

Kapalı döngülü sistemlerde **Şekil 1.9**'da ise temizleyici kimyasal olarak sodyum hidroksit kullanılarak atmosfere zararsız gaz salınımı yapılması sağlanmaktadır. Ancak bunun için birden fazla ekipman kullanılması gerekmektedir. Egzoz gazında bulunan SO_X, sodyum sülfata dönüştürülür. Pompa emiş basıncının çok düşmesini önleyen sirkülasyon pompası ve bu pompa için destekleyici proses tankına ihtiyaç vardır.



Şekil 1.9 Kapalı sistem [15]

1.6.3 Melez (Hibrid) Sistemler

Melez (Hibrid) sistemlerde ise hem kapalı hem de açık sistemlerin beraber çalışarak oluşturulan bir temizleme yöntemi bulunmaktadır. Açık sisteme denizde geçiş yaparken kapalı döngüye ise EKA bölgelerinde (Baltık Denizi, Kuzey Denizi, Porto Riko ve ABD Virgin Adaları) ve limanda geçebilme imkânı sunan bu sistem en çok tercih edilen yöntemdir [15]. Düşük sülfürlü yakıtı sahip olduğu sistemlerle her zaman kullanım imkanı sunduğundan melez (Hibrid) yöntem sık tercih edilmektedir. Yeni düzenlemelerin sülfür oranı isterilerini karşılamak için eski gemilerin dönüşümünde en çok kullanılan yöntem olduğunda söylenebilmektedir [15].

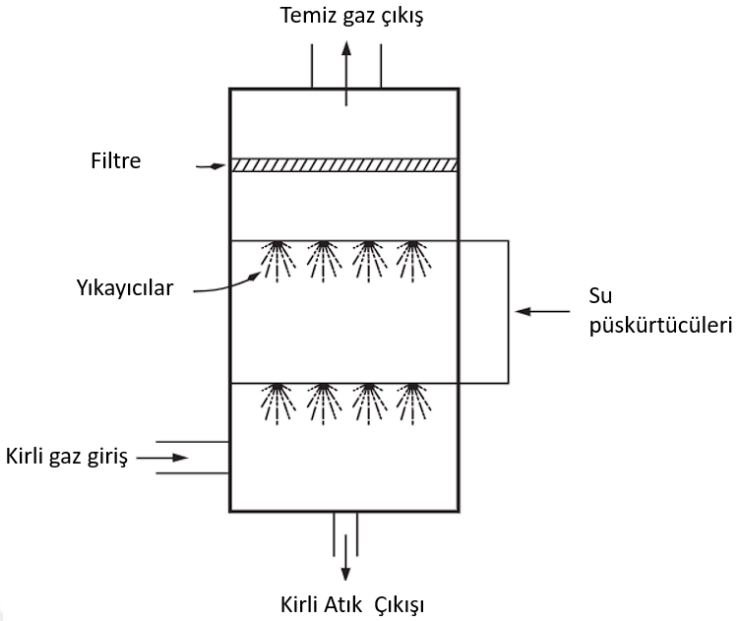
Gemilerde ana makineden çıkan kükürt emisyonlu gazlar baca içerisinde yıkanarak temizlendikten sonra atmosfere salındığı bu yöntemlerde gösterilmiştir. Açık, kapalı veya melez (Hibrid) sistemlerin farkı, sistemin su kaynağı ve kullanılan temizleyici açısından kaynaklanmaktadır. Baca sistemlerinde farklı yıkayıcı türleri kullanılmaktadır. Bacaya giren gazın hızlandırılarak baca içerisine daha iyi yayılmasını sağlayan geometrik kesite venturi denilmektedir. Aşağıdaki başlıklarda farklı türdeki yıkayıcılar sırasıyla gösterillmiş en sonda ise kapsamlı olarak venturi tipli yıkayıcılar incelenmiştir.

Gaz yıkayıcı türlerinde atmosfere salınan havanın kükürt gazı etkisiyle kirlenmesini önlemek için yapılan sistemler gösterilmiştir. Ancak sistemler incelendiğinde görülmektedir ki atmosfere gönderilmek yerine bu zararlı gazlar çeşitli bağlayıcılarla gazdan ayırılıp depolanmakta ve denize verilmektedir. Çevre otoriteleri yayınladıkları raporlarla aslında gaz yıkayıcılarda havaya karışmak üzere olan kirli gazların temizlenmediğini sadece hava yerine denize gönderildiğini ve bunun da denizdeki yaşamı olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir[16]. Bu türden olumsuzluklara rağmen gaz yıkayıcı türleri yıkama yöntemine göre birbirlerinden ayrılmaktadır.

Gaz yıkayıcılar;

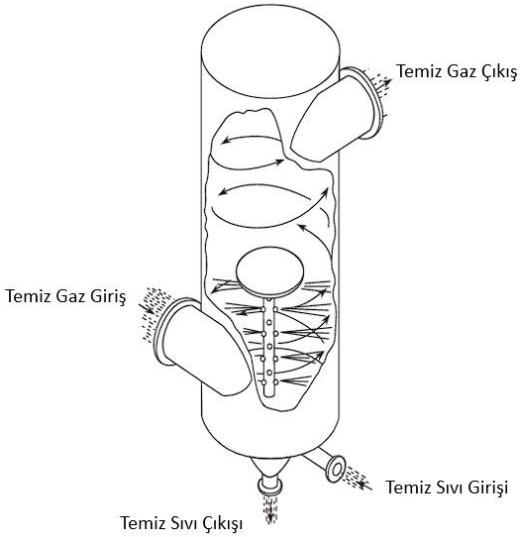
- Püskürtme Kulesi
- Siklonik Püskürtme Kulesi
- Dinamik Yıkayıcı
- Plakalı Yıkayıcı
- Venturi Yıkayıcı olarak sınıflandırmaktadır.

Şekil 1.10'da görüldüğü üzere püskürtme kulesi gaz yıkayıcıları en basit formdaki gaz yıkayıcılardır ve gazın içerisinde bulunan 5 μm ve üzerindeki parçacıklı gazları temizleme verimleri %90'lara ulaşmaktadır. Parçacık boyutu azaldıkça verim de azalmaktadır. Püskürtme kuleleri bakım ve maliyet açısından düşük maliyetli olduğundan günümüzde daha sık tercih edilmektedir.



Şekil 1.10 Püskürtme Kulesi [2]

Siklonik püskürtme kulelerinde ise basit püskürtme kulelerine göre daha karmaşık bir yapısı bulunmaktadır. **Şekil 1.11**'de görüldüğü üzere Siklonik gaz yıkayıcı gösterilmiştir. Bu gaz yıkayıcılarda gaz girişi konik şekilden dolayı siklonik hareket yaparak yıkayıcı duvarlarına teğet olarak hareket etmektedir. Yıkayıcı sıvısı ise merkezden duvarlara doğru püskürtülerek temizleme işlemini yaparak gazı zararlı gazlardan arındırmaktadır. Bu yöntemde 5 μm ve üzerindeki çaplı kirletici parçacıklarında verim %95'lere kadar ulaşabilmektedir. Bu yöntem püskürtme kulesi yöntemine göre daha verimlidir. Ancak, kurulum ve bakım maliyetleri daha fazladır[2].



Şekil 1.11 Siklonik Gaz Yıkayıcı [2]

Dinamik yıkayıcılarda ise püskürtme kulelerinden farklı olarak bir rotora bağlı olan temizleme sıvısı kullanıldığından bu gaz yıkayıcılara dinamik gaz yıkayıcı ismi verilmiştir. Bu tür yıkayıcıların verimi püskürtme kulesi yıkayıcılara benzerdir. Ancak maliyet açısından değerlendirildiğinde dinamik yıkayıcılarda rotor bulunması hem yatırım maliyetini hem de gerekli enerji maliyetini arttırmaktadır[2].

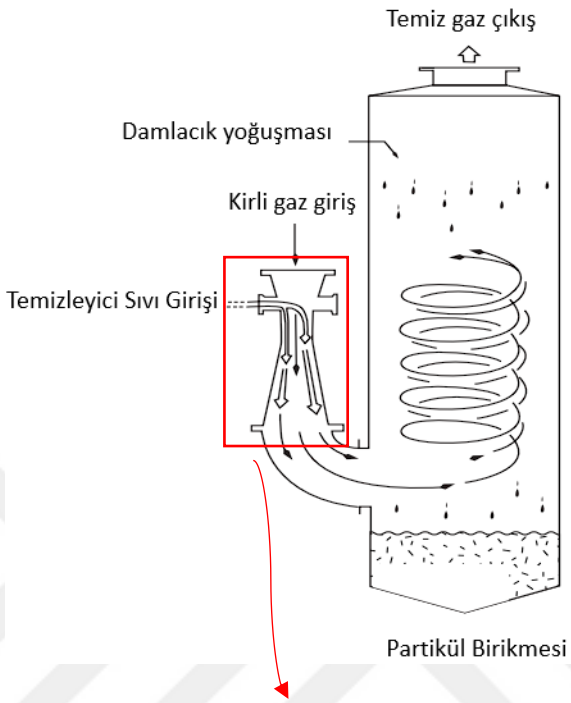
Plakalı gaz yıkayıcıları ise içerisinde bulunan plakaların delikli yapısı yardımıyla dikey bir şekilde çalışarak alttan gelen kirli gazı her plakanın içerisinden akan temizleme sıvısı yardımıyla temizler alttan gelen gazın hızı sayesinde parçacıklar plakaların üzerinde birikerek bakım tutum esnasında temizlenir[2].

1.7 Venturi Yıkayıcı

Gaz temizleme işlemi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Venturi yıkayıcılar geometrik yapısı sayesinde temizleme işlemi yapmaktadır. Venturi yıkayıcılarda kesit alanı daralıp genişlemektedir. Yapısal olarak daralıp genişlemesi akışkan-sıvı karışımın en dar bölge olan 'boğaz' bölgesinde hızın artmasından kaynaklı daha kolay karışarak gaz içerisindeki parçacıkların genişleme bölgesine doğru ilerledikçe topaklanmasına yol açar. Ardından siklonik temizleyiciden geçirilerek bacadan dışarı atılır. Venturi yıkayıcıların verimi diğer metotlardan daha yüksektir[2]. Venturi tipleri üç temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar yakınsama (converge), ıraksama (difüzör) ve boğaz (throat) şeklinde ayrılabilirler. Ayrıca lüle kısmı sıvı salınımı için kullanılır. Bu sıvı salınımı ise gaz yakalamak amacıyla gönderilmektedir. Venturi geometrilerinin hidrodinamik yaklaşımının incelenmesi genellikle talep gören bir konu olduğu gibi, küçük tanecik karışımlarının atomizasyon hallerini incelemek zordur. Dolayısıyla bu alandaki gelişmeler her gün güncelliğini korumakta ve değişmektedir.

Endüstriyel modelde insan sağlığı açısından toz ve küçük parçacıklar zararlı olduğundan insan sağlığı için bunların iyi bir şekilde giderilmesi çok önemli bir konudur. Bundan dolayı atmosfere gönderilen zararlı parçacıkları yakalamak için mühendislik devreye girmektedir. Yakalama işlemi için birçok araç günümüz endüstrisinde kullanılmaktadır. Venturi yıkayıcıların temizleme verimlerinin diğer gaz temizleyicilerden yüksek olduğu bilinmektedir. Ancak venturi daha pahalı bir metottur [2]. Zira hem küçük parçacıklar uzaklaştırmak hem de gaz birleşenleri verimli bir şekilde temizlemek gemiler için ideal

bir yöntemdir [17]. **Şekil 1.12**'de endüstriyel tipli venturi gaz yıkayıcı ve baca görülmektedir.



Şekil 1.12 Venturi Gaz Yıkayıcı [2]

1.8 Literatür Taraması

Egzoz gazları hayatımızın büyük bir bölümünde kullanılan endüstriyle alakalı olarak insan sağlığı için büyük riskler taşımaktadır. Dolayısıyla bu riski ortadan kaldırmak veya azaltmak için çeşitli yasal düzenlemeler getirilmiştir. BM'ye bağlı olan IMO Marpol Ek VI'e göre EKA ve EKA dışı bölgeler olarak ayrılmış ve bu şekilde insan sağlığına ve çevreye zararlı gazların salınımına önlem getirmiştir. Yasal düzenlemeye göre NO_2, SO_2, CO_2 gibi zararlı parçacıkların bileşenlerin EKA bölgesinde kullanılan yakıta oransal olarak 0,10 (%99) ve 0,50 (%95) oranları arasında olmalı ve bu sınırları aşmamalıdır.

Yapılan bu yeni düzenleme ile gemilerin dönüşüm süreci de başladığından mühendisler bu dönüşümü daha ucuz ve kolay yapabilmenin yollarını aramaya koyulmuştur. Yapılan çalışmalarda birçok farklı tasarım yapılmış ve baca gazı için farklı tipte temizleyici ve geometri oluşturulmuştur. Baca gazının temizlenmesi için kullanılan lüle geometrileri, giriş hızları, kullanılan sıvı türü gibi birçok alanda araştırma yapılmıştır. Örneğin Vadile G. Guerra vd.[6] venturi tipli yıkayıcılarda hem deneysel hem de HAD metoduyla

incelenmiştir. Basınç düşüşü, akışkan profili ve lüle sayısının ve lüle konumunun akışkana etkisini ve basınç düşüşüne etkisini incelemiştir.

Shua Yang vd. [7] yaptıkları çalışmada halka bölmeli ve halka bölmesiz venturi tipi bir yıkayıcıda gaz-sıvı akışını HAD kullanılarak incelenmiş ve çalışmada çeşitli değişkenlerin sıvı gaz karışımına etkileri incelenerek ideal geometrideki venturinin boyutlandırılması yapılmıştır. Giroth vd.[18] yaptıkları çalışmada baca gazları için baca temizliği yapan lüle pozisyonun optimizasyonunu Ansys programında gerçekleştirilmişler ve önerilen baca tasarımının %40 daha verimli olduğunu ve ticari yıkayıcılara göre daha ekonomik olduğunu göstermişlerdir. Manisha Bal vd. [19] ise yaptıkları çalışmada sistemi filtreli muhafaza havalandırma sistemli (filtered containment venting system) venturi yıkayıcı ve filtreden oluşan sistemin mevcut yıkayıcının performansını artırmak için hesaplamalı akışkanlar (HAD) yöntemi incelenmiş ve basınç düşüşleri tahmin edilmiştir. Kathleen Brown vd. [20] enerji santrallerinde SO_2 emisyonunu azaltmak için kullanılan kireç bulamacının (lime slurry) uygun noktadan püskürtülmesi için kullanılan lülelerin sayısının optimize etmiştir. Bu optimizasyon işlevi için HAD kullanılmıştır. Johni J.Numberi vd. [21] bacalardan atmosfere salınan gazların temizlenmesinde literatürde yeni bir teknoloji olan kabarcıklı ıslak yıkama (bubble wet scrubbers system) yöntemi ile çalışmada bacanın basınç düşüşü incelemiş ve atık parçacıklarının ayrılması konusunda veriminin %83,26 olarak hesaplamıştır. Wang S. vd.[22] ise kirliliği azaltmak için ıslak baca sisteminde su akışı yardımıyla kirliliği azaltan filtreler incelemiştir. Çalışma, uygun su akışının hızını ve ayrıca filtrenin verimini ve performansının iyileştirilmesi konusunda yapılmıştır.

Bir başka çalışmasında da Vadile G. Guerra vd.[23] Venturi tipli yıkayıcılarda sıvı enjeksiyonu sonrasında eksenel olarak gaz hızının, sıvı hızının ve damlacık boyutuna etkisi incelenmiştir. Nozul sayısının damlacık boyutuna etkisi de incelenmiş ve sıvı ve gaz hızlarındaki artışın damlacık boyutunu küçülttüğü çalışmada gösterilmiştir. Luan vd. [24] ise kare kesitli venturi yıkayıcılardaki hız, basınç düşüşü ve kinetik enerji gibi değişkenleri HAD yardımıyla inceleyerek kare kesitli geometrilerdeki avantajları yaptığı çalışma ile göstermiştir. K-epsilon türbülans modeli yardımıyla 12 m/s gaz girişi ile dairesel kesitli gaz temizleyicilerle karşılaştırma yaparak sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre kare kesitli yıkayıcılar akış profili olarak dairesel kesitlere göre daha dağınık bir formda hız profiline sahip olduğu gösterilmiştir. Kare kesitten dolayı oluşan geri akış

(backflow) gösterilerek dairesel kesitli yıkayıcı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca kare kesitli venturinin kirletici yıkama verimi ve basınç düşüşünün daha yüksek olduğu da çalışmada gösterilmiştir. M.Ali vd.[25] venturi tipli yıkayıcılarda Eularian-Lagrange metodu kullanılarak 0,09, 0,115 ve 0,14 kgs^{-1} gibi farklı gaz akışında TiO_2 hidrofobik gazının temizlenme verimi; hız, basınç düşüşü, kinetik enerji gibi değişkenler hesaplanmıştır.

Venturi geometrik özelliklerinden dolayı birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin; Ulas [26] yapmış olduğu çalışmada değişken kesitli venturilerin roket yakıtlarında kütle akışını kontrol edebilmek için kullanılmasının ideal bir çözüm olduğunu deneysel olarak çalışmasında göstermiştir. Tolga[27] değişken alanlı akış hızı kısılabilen venturi kavistasyonunu Schnerr-Sauer kütle taşınımı yöntemi, k-omega SST türbülans modeli kullanarak hem deneysel hem de OpenFoam yazılımı ile incelenmiştir.

Venturi veriminin çeşitli değişkenlere bağlı olduğu göz önünde bulunduğundan ideal venturi tasarımı da ön plana çıkmaktadır. Çeşitli geometri tasarımlarıyla parçacıkların uzaklaştırılmasında farklı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin J.Manzano vd.[28] üç farklı geometride gerçekleştirilen HAD analizi yardımıyla geometrinin basınç düşüşü üzerindeki etkisini incelenmiştir. Kavitasyon etkisinin azaltılmasının ve ıraksama açısının basınç düşüşünde doğrudan etkisi olduğu da gösterilmiştir. O'Hern, vd.[29] ise yedi farklı ampirik formül geliştirip venturi geometrisi ve lüle geometrisi tasarımı yaparak en ideal geometri tasarımı yaparak bu geometrik tasarımı deneysel verilerle karşılaştırarak sonuçlar elde etmiştir. Elde edilen sonuçların %5 ila %18 arasında hata payı olduğu görülmüştür. Wilson vd. [30] ise venturi tipli mikro kabarcıklı oksijen üreticisi için çeşitli geometrileri üzerinde çalışarak HAD yardımıyla çeşitli değişkenlerin kabarcık üretimine etkisi için üç farklı hava ve akış hızlarıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve deneysel verilerle karşılaştırılmalar yapılmıştır. Buna göre kabarcık oluşumunda boğaz uzunluğu ve ıraksama açısı küçük bir etkiye sahiptir. Hongbo Shi vd. [31] yaptıkları deneysel ve teorik çalışmalarda kavitasyonu iki fazlı akışlarda çoklu faz metodunu inceleyerek k-ε modelinde Navier-Stokes RANS çözümleyicisiyle Schnerr-Sauer kavitasyon modeli kullanarak HAD analizleri yapılarak venturi tüplerindeki kavitasyonu hesaplamış ve ayrıca bir yarı ampirik model geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulamıştır. Silva [32] hem deneysel hem de HAD çalışması ile venturi geometrisini incelemiştir.1,27 metre uzunluğundaki venturi gaz yıkayıcıda 34 ve 70 m/s hızlarında 0,013 ve 0,075 kg/s debide deneyler yapılarak basınç ve hız profillerini göstermiştir. Ardından bu deneysel sonuçları

ayrık faz metoduyla (AFM) incelemiş ve deneysel sonuçlara ek olarak ampirik formüllerle de yaptığı sonuçları karşılaştırmıştır. Xu vd. [33] yaptıkları çalışmada ise venturi metrede yanlış okuma yapmaya yol açan sebepleri ayrık faz metoduyla (AFM) inceleyerek deneysel sonuçlarla kıyaslayarak açıklamıştır. **Tablo 1.1**,'de görüldüğü üzere literatürdeki çalışmalar listelenmiştir. Dairesel geometrilerin HAD analizleri incelenmiştir. Türbülans modeli olarak genellikle k-epsilon kullanılmıştır. HAD analizlerinde akışkan fazlarına göre farklı modellerde kullanılabilir. Akışkan hacim modeli (AHM) modeli çift fazdaki akış için, Lagrange parçacık ise çift fazda parçacıkların takibi için kullanılır. Schiller–Naumann modeli ise akışkanlarda oluşan kabarcıklar için kullanılmıştır [7].

Atmaca M, vd. ise yaptığı çalışmada jet akışı üreten 3 farklı lüle geometrisinin k-epsilon türbülans modeli kullanarak HAD analizleri ile incelenerek deneysel verileri doğrulamıştır [34].

Tablo 1.1 Literatür özeti

Çalışma	Kullanılan metot	Gaz temizleyici en-kesit geometrisi	HAD'de kullanılan model	Kullanılan türbülans modeli	İncelenenler
Vadile G Guerra vd.,2012[6]	HAD	Kare	AHM	k-Epsilon	Sıvı ve gaz girişlerinin damlacık boyutuna etkisi
Shua Yang vd.,2019[7]	HAD	Dairesel	Schiller–Naumann model	k-Epsilon	HAD Venturi boyutlandırılmasın halka bölmeli venturilerde incelenmesi
Giroth vd.,2022[18]	HAD	Dairesel	Fluid-Specific Model	k-Epsilon	Lüle optimizasyonunun Ansys'de incelenmesi
Manisha Bal vd.,2017[19]	HAD	Dairesel	AHM	k-Epsilon	Had ile basınç düşüşü incelenmesi

Tablo 1.1 Literatür özeti (devamı)

Çalışma	Kullanılan metot	Gaz temizleyici en-kesit geometrisi	HAD'de kullanılan model	Kullanılan türbülans modeli	İncelenenler
K. Brown vd.,2014[20]	HAD	Dairesel	Lagrange partükül+AFM	-	Lüle optimizasyonu Ansys'de kireç bulamacını kullanarak HAD ile yapılması
Wang S vd.,2022[22]	HAD	Dairesel	-	-	Islak Baca sistemleri için filtre verimi ve performans artırımı
Vadile G Guerra vd.,2009[23]	HAD	Kare	-	-	Lüle pozisyonu optimizasyonu
Z.Luan vd.,2017[24]	HAD	Kare	AFM	k-Epsilon	Kare yıkayıcıda basınç düşüşü, hız profilleri incelenmesi
M.Ali vd.,2013[25]	HAD	Dairesel	Lagrange partikcle tracking+AFM	k-Epsilon	Farklı hızlarda gaz akışında Eularian-Lagrange metodunda TiO ile temizleme verimi incelenmesi
Hasan Tolga,2020[27]	Deneysel ve HAD	Dairesel	Schnerr-Sauer	k-omega	Venturi geometsinin kavitasyonun open foamda incelenmesi

Tablo 1.1 Literatür özeti (devamı)

Çalışma	Kullanılan metot	Gaz temizleyici en-kesit geometrisi	HAD'de kullanılan model	Kullanılan türbülans modeli	İncelenenler
J.Manzano vd.,2016[28]	HAD	Dairesel	Sonlu Elemanlar Methodu (FVM)	Reynols Stress Model (RSM)	Farklı geometrilerde kavitasyon ve ıraksama açılarının basınç düşüşü etkisini incelenmesi
O'Hern vd.,2022[29]	Ampirik	Dairesel	-	k-Epsilon	Ampirik formüllerle Venturi ve lüle tasarımı yapıp deneysel karşılaştırılması
Wilson vd.,2021[30]	Had ve Deneysel	Dairesel	AFM	k-Epsilon	Had analizleriyle kabarcık oluşumunu 3 farklı hava ve 3 farklı akışta incelemiş ve deneysel olarak karşılaştırılması
H. Shi vd.,2019[31]	Had,Deneysel ve Ampirik	Dairesel	Schnerr-Sauer	k-Epsilon	Had analizi ile çift fazlı akışta kavitasyon incelenmiş ve yarı ampirik formül geliştirilmiş ve deneysel doğrulanması

Silva,2008[32]	Had,Deneysel ve Ampirik	Dairesel	AFM	k-Epsilon	Dairesel kesitli venturi yıkayıcının 3 farklı basınç ve hızdaki basınç düşüşü ve hız profilleri, verimi hem deneysel hem de ampirik olarak hesaplanması
Xu vd., 2014[33]	HAD	Dairesel	AFM+Euler	Reynols Stress Model (RSM)	Çift fazlarda hatalı okuma sebeplerinin uzun bir boğaza sahip bir venturideki incelenmesi

Yukarıdaki tablolarda deneysel, ampirik ve HAD yöntemleriyle yapılan çalışmalar gösterilmiştir. Bu çalışmada ise daire ve kare kesitli venturi gaz yıkayıcılar ayrık faz metoduyla (AFM) incelenerek iki farklı kesitte yeni geometriler tasarlanarak k-epsilon türbülans modelinde HAD analizleri yardımıyla kirletici gazı yıkama verimi, basınç düşüşü ve hız profilleri hesaplanmıştır.

2 HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ METODU

Günümüz teknolojisi ile beraber artık bilgisayar kapasitesi artmış ve çözüme kavuşması gereken problemler de daha karmaşık hale gelmiştir. Bir mühendislik probleminin çözümünde laboratuvar ortamında deneysel faaliyet ile problemin çözüme kavuşturulmaya çalışılması hem zaman hem de maliyet açısından zor bir süreçtir. Bu çalışmada kullanılacak olan çift fazlı akış problemi benzeri problemlerin çözümünde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemine başvurulması problemin hem daha ekonomik hem de daha kısa sürede çözülmesini sağlamıştır. Had metodu bilgisayar aracılığıyla akışkan davranışını tanımlayan kompleks diferansiyel denklemleri çözülmesini ve bu çözümlerinde istenmesi durumunda hem görsel hem de sayısal olarak elde edilmesini sağlamaktadır.

HAD analizleri temel olarak 3 ayrı başlık olarak;

- Ön işlemler
- Çözüm süreci
- Sonuçlar

incelenebilir. Birinci adımda problemin tanımlanması ve sabit değişkenlerin belirlenmesi olarak ifade edilir. İkinci adım çözümleme kısmındaysa probleme atanan sınır şartlarıyla problemin sonuçlarının elde edilmesine kadar olan süreçtir. Üçüncü adım ise elde edilen sonuçlardan okuma yapılarak sonuçların yorumlanmasıdır.

Bu üç adımdan en önemlisi ön işlemler kısmıdır. Zira bu adımın sınırlarının iyi belirlenememesi ve problemin iyi tanımlanamaması, çözüme kavuşturulmamasına neden olabilir.

Bu çalışmada daire ve kare en kesitli venturi tipli gaz temizleyicilerin tasarım ve akış analizleri yapılmıştır. HAD analizi süreçlerini incelerken önce geometrilerin modelleme programlarıyla modellenmesi ve çözüm yapılabilmesi için ağ örgüsünün geometriye atılması ardından bir venturi tipli bir yıkayıcının sıvı ve gaz giriş bölgelerinden giren sıvı ve gazların doğru yoğunlukta, hız da ve debide seçilip atanması problemin çözdürülmesi anlamına gelmektedir.

Sonuçlarda ise verilen sınır şartlarına göre venturi yıkayıcının verimi ve performansı elde edilmiş ve incelenmiştir. Analizin doğru sonuç vermesi sınır şartlarının doğru belirlenmesinden geçmektedir. HAD analizleri ile çok faz çalışmalarında iki çeşit sayısal yöntem bulunmaktadır. Euler-Euler ve Euler-Lagrange yaklaşımı şeklinde iki farklı yaklaşım bulunmaktadır.

2.1 Euler-Euler yaklaşımı

Bu yaklaşımda farklı fazlar birbirinin içine geçmiş bir süreklilikle ele alınmaktadır. Bir faz başka bir fazın içine giremediğinden faz hacmi fraksiyonu olarak tanımlanan kavram ortaya çıkmaktadır. Bu hacim fraksiyonlarının zamanın sürekli fonksiyonu olduğu varsayılır ve toplamları bire eşittir. Her fazın korunum denklemleri benzer yapıdaki fazlar için tek bir denklem elde edilmek için kullanılır.

Fluent programında iki farklı Euler-Euler tipi model mevcuttur, bunlar hacimsel model (AHM), karışım modeli (Mixture) Eularian modeli olarak sınıflandırılabilir [35].

Bu yaklaşımın en büyük dezavantajı parçacıkların farklı olması durumunda her parçacık için ayrı bir faz ataması yapılması gereksinimi yaklaşımın hesaplama süresinin uzamasına ve HAD analizlerinin dezavantaja dönmesine neden olacaktır.

2.2 Euler-Lagrange yaklaşımı

Bu yaklaşımda ise ikinci faz Fluent tarafından yeterince seyreltik olması durumunda kullanılır. Bu noktada damlacıkların birbiri üzerindeki ve gaz fazı üzerindeki etkiler ihmal edilir. Ayrıca bu modelde parçacık ve damlacıkların rotaları ayrı ayrı hesaplandığından sıvı kurutuculardа, yakıt püskürtme gibi yerlerde kullanılabilir ancak sıvı-sıvı fazlarında hacim oranın ihmal edilemediği karışımlarda kullanılamaz [35].

Bu yaklaşımları inceledikten sonra analizin hangi modelle çözülmesi halinde gerçek sonucu elde edileceği ortaya çıkmaktadır. Fluent kullanıcı rehberine göre ayrık faz oranı %10 ve altında olması durumunda Euler-Lagrange yaklaşımı kullanılmalıdır. Fluent programında bu yaklaşımı 'Ayrık faz modeli' ile hesaplanmalıdır[35]. **Ayrık Faz Modeli (AFM)** Fluent programında ikinci fazın sürekli fazda dağılmış küre biçimindeki parçacıklardaki ısı ve kütle transferi ve hareket denklemlerinin hesaplanmasına fırsat verir. Ayrık faz modelinde bazı durumlar için sınırlayıcı etkiler ortaya çıkmaktadır, örneğin; ikinci fazın küresel yapıdaki parçacıklardan oluştuğunu ve ikinci fazın yeterince

seyreltik durumda olması varsayımlarıdır. Bu durumlar dışındaki hallerde çözümlerden doğru sonuçlar almayı Fluent programının teyit edemeyeceği de açıktır.

Venturi yıkayıcılarda hız ve basınç benzeri hidrodinamik özellikler deneysel, ampirik ve HAD yöntemiyle hesaplanabilmektedir. HAD yardımıyla yapılan bu tezde SST k-epsilon türbülans metodu kullanılmıştır. HAD metodunda akışkanların farklı fazlarda olması durumunda farklı metotlar mevcuttur. Bunlar;

- Akışkan hacim modeli (AHM)
- Cebirsel karışım modeli (CKM)
- Kavitasyon modeli
- Ayrık faz modeli (AFM) olarak sınıflandırılabilmektedir.

AHM modeli genellikle birbirlerine karışmayan fazlar için kullanılmaktadır. Cebirsel karışım modeli ise AHM modeline benzerdir, fakat fazlar birbirlerine karışabilir. Sıvı içerisinde boyut olarak küçük kabarcıkların modellenmesinde ve analizlerinde kullanılmaktadır. Kavitasyon modeli ise AHM modeline benzerliği bulunmaktadır, ancak bu modelde farklardan birisi fazların birbirlerine dönüşebildiği analizlerde kullanılmaktadır.

Ayrık faz modeli (AFM) de ise sürekli akışkanlar içerisinde bulunan sıvı, katı veya gaz parçacıklarını ayırt etmek için kullanılmaktadır. Navier Stokes denklemleri kullanılarak çözülen bir yöntemdir. Bu yöntemde parçacıkların izlediği yörünge hesaplanabilmektedir. Parçacıkların izlediği yörüngelerin bulunabilmesi için ayrık faz olarak incelenerek simüle edilir. Ayrılan fazın sürekli faz ile enerji momentum, kütle etkileşimi bulunmaktadır ancak ayrık fazın kendi içerisindeki etkileşimi göz ardı edilerek daha denklemeler daha kolay hale getirilmektedir. Ayrılan fazın sürekli fazın %10'u kadar olması durumunda yöntemin doğru çalıştığı bilinmektedir [35]. Bu çalışmamızda ayrık faz modeli kullanılarak gaz yıkayıcılarda parçacıkların yörüngeleri takip edilerek gaz yıkayıcının veriminin hesaplanması bu yöntem sayesinde gerçekleşmiştir.

2.3 Akışı Yöneten Denklemler

Türbülans akışlar genel olarak hız formlarındaki değişkenlikleri ifade eden modellemelerdir. Hız akışının düzensiz olduğu bölgelerde momentum ve enerji değerleri de değişeceği aşikardır, dolayısıyla bu değişkenliğin ifade edilmesi ve türbülanslı bölgede

enerji, hız, momentumun da hesaplanması gerekmektedir. Bu düzensiz bölgede hız formu hesaplanabilmesi için korunum denklemleri hız vb. değerlere ulaşılabilir. Birbirinden farklı birçok türbülans modeli bulunmaktadır ve hepsinin birbirinden farklı avantajları mevcuttur[36]. En çok kullanılan türbülans modeli iki ayrı denklemle elde edilen hız ve uzunluk gibi değerlerin belirlendiği çift denklemlerdir.

Bunlardan en çok kullanılanı epsilon modelidir. Önerildiği günden bugüne genel kabul gören bu model endüstriden genel mühendislik problemlerine kadar birçok alanda temel türbülans modeli olarak kullanılmaktadır. Denklemlerin geliştirilmesi halen devam etmekte olduğu bilinmektedir ve bu tezde kullanılan Fluent programında da geliştirilmiş k-ε modeli olan RNG kullanılmıştır. RNG k-ε modeli Navier Stokes denklemleri kullanılarak elde edilmektedir. Türbülans kinetik enerji k ve dağılım hızı ε aşağıdaki denklemlerle elde edilmektedir. Akışı analizi için korunum denklemleri kütlenin korunumu, momentum korunumu ve enerji denklemleri venturi yıkayıcı için aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Denklemler (2.1, 2.2, 2.3)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial \left(\rho U_i U_J\right)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_J}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_J} - \overline{u_i' v_j'}\right) \tag{2.2}$$

$$\overline{-u_i' u_j'} = v_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_J} - \frac{\partial U_J}{\partial x_J}\right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{2.3}$$

Momentum denklemleri ise (2.2) numaralı denklem ile gösterilmiştir. Buna göre Reynolds sayısı venturi için $1{,}4\,x\,10^5$ değeri ile $7\,x\,10^4$ ile $2{,}5\,x\,10^5$ arasında olduğundan ideal akışkan modeli kullanılmıştır [37]. Ayrıca 3 boyutlu HAD analizleri yapıldığından, Navier Stokes 3 boyutlu denklemleri ile venturi yıkayıcı için kullanılmıştır ve (2.2) denklemi üç eksene uygun olarak gösterilmiştir. (2.3) denkleminde ise Reynolds stresinin Boussinesq yaklaşımı ile açılımı gösterilmiştir [38]. v_t ve k ise sırasıyla eddy viskozitesini ve türbülans kinetik enerjisini göstermektedir. δ_{ij} kronecker deltayı göstermektedir. (2.4) denkleminde türbülans kinetik enerji ve (2.5) denklemlerinde ise türbülans kinetik enerji yetimi denklemlerini sırasıyla göstermektedir. (2.6) kinematik

viskozite açılımını göstermektedir. Reynolds sayısı ise (2.7) numaralı denklem ile gösterilmiştir. Venturi verimi ise (2.8) numaralı denklem ile gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) \tag{2.5}$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.6}$$

$$Re_{D_{hd}} = \frac{u_{venturi} D}{\nu} \tag{2.7}$$

$$Venturi\ verimi\ \eta = \frac{Yakalanan\ Tanecik\ Sayısı}{Toplam\ Tanecik\ Sayısı} \tag{2.8}$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3\rho}{4 d_p \rho p} C_D (u - u')|u - u'| - \frac{1}{p_p}\nabla P + \frac{(\rho - \rho_p)}{\rho_p} g \tag{2.9}$$

$$I = 0.16x\left(Re_{D_{hd}}\right)^{-1/8} \tag{2.10}$$

$$T_L = L\ x\ 0.07 \tag{2.11}$$

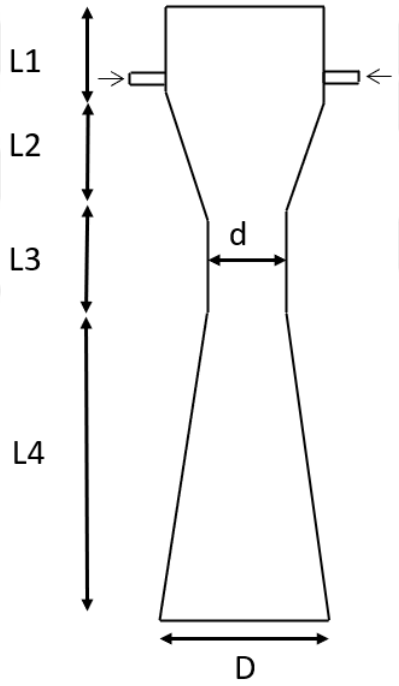
(2.9) numaralı denklemde ise AFM metodunda Lagrange yaklaşımı ile parçacık takibi için kullanılan denklem verilmiştir. u_p parçacık ortalama hızı, t zaman, ρ ve p_ρ ise akışkan ve parçacık yoğunluğunu, d_p parçacık çapı, C_D sürüklenim katsayısı, u lokal akışkan hızı, $u' = u_p + u_{\mathrm{d}f}$ denkleminde $u_{\mathrm{d}f}$ parçacık difüzyonu hızı, P akışkan basıncı, g yerçekimi ivmesi olarak gösterilmiştir [39]. Türbülans yoğunluğu ise I ile (2.10) numaralı denklem ile gösterilmiştir. Reynolds değeri (7) numaralı denklem ile gösterilmiştir ve 1,4 x 10^5 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerin (2.10) numaralı denklemde kullanılarak türbülans yoğunluğu %3 olarak hesaplanmıştır. T_L ise (2.11) türbülans uzunluk ölçeği denklemi verilmiştir. (2.11) denkleminde bulunan L değeri kare ve daire kesitli yıkayıcıda 0,127 olarak hesaplanmıştır. (2.11) numaralı denklemde bu

değer 2,5 x 10^{-3} olarak hesaplanmıştır. HAD analizlerinde parçacık takibi için (2.10) ve (2.11) denklemlerden çıkan değerler HAD analizi programında türbülans değerleri başlığında manuel olarak yerine yazılarak HAD programında sonuçlar elde edilmiştir. AFM metodu için yukarıdaki denklemler HAD programının arka planda çalışan denklemler bulunduğu gibi kullanıcı hesaplanması ile programa girilmesi gereken denklemler de yukarıda hesaplanarak gösterilmiştir. (2.7), (2.10), (2.11) numaralı denklemlerde başta Reynolds hesaplanıp ardından sırasıyla denklemlerin sonucu bulunarak bu değerler programa girilerek analizler yapılmıştır. Analizlerin güvenilir sonuçlar verdiğinin doğrulanabilmesi için 3.bölümde gösterilecek olan doğrulama işlemleri, deneysel ve HAD analizi yapılmış çalışmalar için yapılarak tezimizde kullanılan yaklaşımın literatüre uygun olduğu gösterilmiştir.

3 PARAMETRİK ÇALIŞMALAR

Khadra vd.[5], tarafından kullanılan venturi parametrik çalışma için kullanılmaktadır. Girişim temizleyicileri yakınsama, boğaz ve ıraksama bölümlerinin bir kombinasyonudur. Gaz venturide akarken su gaz akışına jet olarak gönderilir.

Bu çalışmada kullanılacak geometrilerin ideal geometriler olabilmesi için literatürde kullanılan HAD analiz ve sonuçları incelenerek sınır şartlarının doğrulaması yapılmıştır. Bunun için **Şekil 3.1**'de Khadra vd. [5] çalışmasında kullanılan geometriler modellenerek çalışmadaki sınır şartları altında çalışmadaki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede bu tez için yeni tasarlanan geometrilerin verim, hız ve basınç düşüşü gibi hesaplamalarındaki sonuçların doğruluğu da gözlenebilmiştir.



Şekil 3.1 2b görünüş venturi [5]

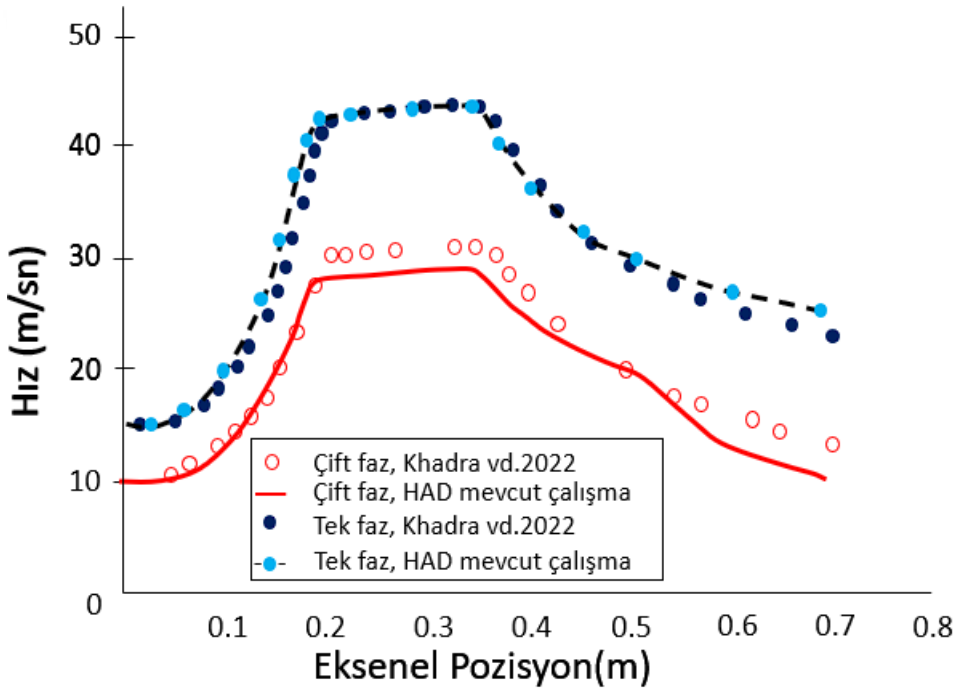
Bunun için öncelikle 2 boyutlu olarak 685 mm uzunluğunda venturi modellenerek HAD analizleri Khadra makalesi sınır şartlarına göre **Tablo 3.1**'e göre modellenmiştir. Boyular mm cinsinden olarak verilmiştir. Yakınsama açısı giriş bölümünden boğaz bölümüne gelen kısım, ıraksama bölgesi ise boğaz bölgesinden çıkış bölgesine doğru olan bölgedir.

Tablo 3.1 Venturi boyutları (mm)

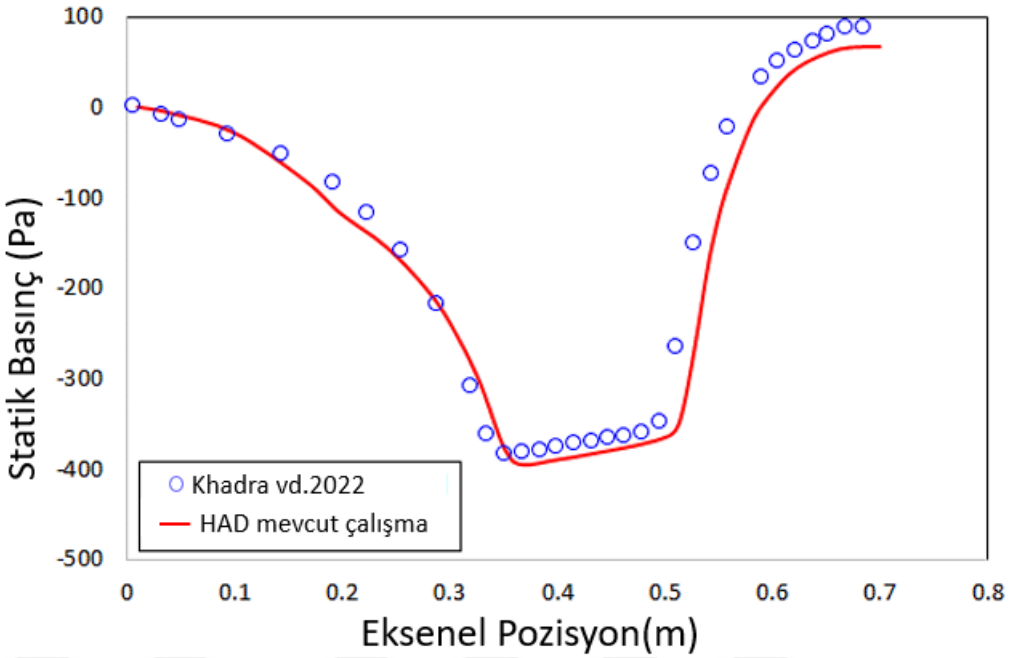
Giriş çapı (D)	750
Boğaz çapı (d)	122.5
Giriş Uzunluğu, L_1	50
Yakınsama Uzunluğu, L_2	130
Boğaz Uzunluğu, L_3	165
Iraksama Uzunluğu, L_4	340
Yakınsama Açısı (α_0)	17°
Iraksama Açısı (α_1)	5°

3.1 Analizlerin Karşılaştırması ve Doğrulanması

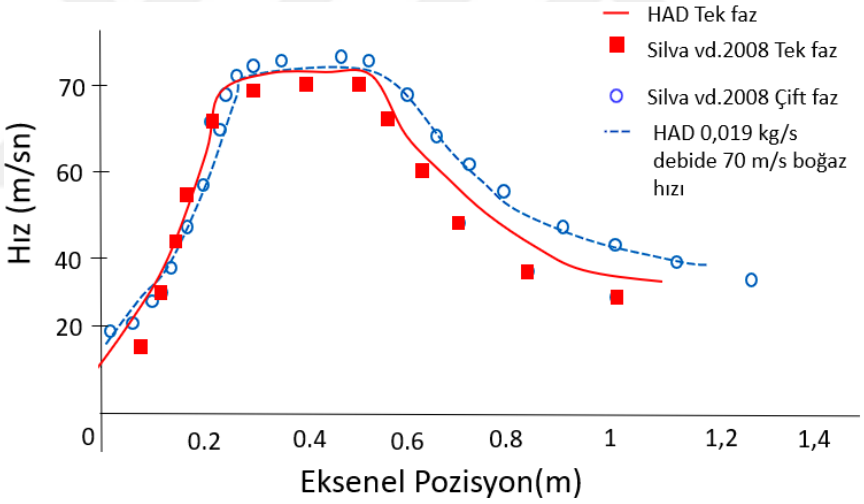
Parametik çalışmalardan önce Khadra vd.[5] ve Silva vd. [32] çalışmaları kullanılarak model doğrulaması yapılmıştır. Bunun için (**Şekil 3.2**) çift ve tek fazda hız ve (**Şekil 3.3**) basınç dağılımlarında 0,02 kg/s debide 10 ve 15 m/s hız girişindeki değerlerde mevcut HAD çalışmalarıyla karşılaştırılarak birbirlerine yakın sonuçlar bulunduğu gösterilmiştir.



Şekil 3.2 0,02 kg/s debide tek fazda (15 m/s) ve çift fazda (10 m/s) hız profil



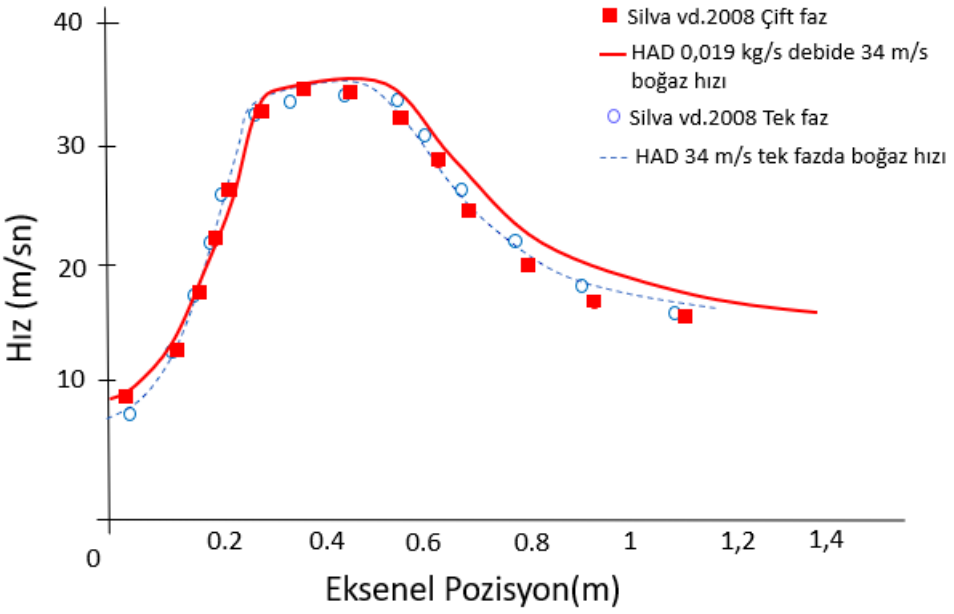
Şekil 3.3 Basınç düşüşü 0,02 kg/s debide 10 m/s gaz akışında



Şekil 3.4 70 m/s boğaz hızında karşılaştırma

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere Silva tasarladığı venturi geometrisine herhangi bir akışkan göndermeden tek faz hava akışıyla ve çift fazdaki venturi geometrisinin hız profilini çıkarmıştır. Bu tez kapsamında yapılan analizde ise kırmızı çizgiyle ifade edilerek gösterilmiştir. Boğaz bölgesinde akışkan hızı 70 m/s olacak şekilde giriş havası venturi çıkış hızı yapılan analiz sonucunda 33,5 m/s olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışmanın, Silva vd. çalışması ile uyumlu olduğu da **Şekil 3.4**'te gösterilmiştir. Çift fazın olduğu durumda (mavi ile gösterilen çizgi ve simge) ise venturide çift faz AHM ile boğaz

bölgesindeki hızı 70 m/s olan hava girişi ile birlikte lüleden 0,019 kg/s debide su girişi verilerek hız profili çıkarılmıştır. Bu grafiğe göre mevcut çalışma ile Silva vd.[32] çalışması ile birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Iraksama bölgesinde çıkış hızı mevcut HAD çalışmasında 40 m/s olarak hesaplanmıştır.



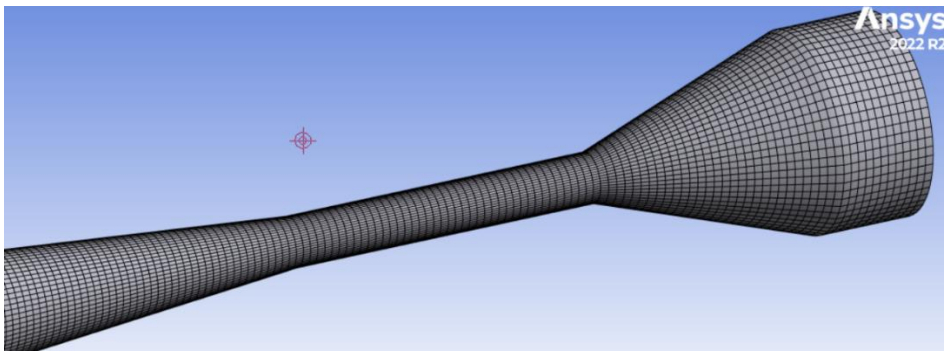
Şekil 3.5 34 m/s boğaz hızında karşılaştırma

Şekil 3.5'da ise görüldüğü üzere tek fazda ve çift fazda venturide literatürdeki çalışma HAD analizlerindeki hız profiliyle doğrulanmıştır. Silva vd [32] 0,5 m eksenel konumunda boğaz bölgesinde hız 34 m/s olarak gösterilmiştir. Mevcut HAD çalışmasında ise 0,5 m eksenel konumunda 34,24 m/s olarak yakınsamaktadır. Mavi çizgiler tek fazı kırmızı çizgi ve işaretler ise çift fazı temsil etmektedir. Ayrıca çift faz (AHM) akışkan hacmi yaklaşımıyla boğaz bölgesindeki hızı 34 m/s olan hava girişi ile birlikte lüleden 0,019 kg/s debide su girişi verilerek hız profili çıkarılmıştır. Bu grafiğe göre mevcut çalışma ile Silva vd. [32] çalışması ile birbiriyle uyumlu olduğu her iki durum olan tek ve çift faz için görülmektedir. Iraksama bölgesinde çıkış hızı mevcut HAD çalışmasında 17 m/s olarak hesaplanmıştır.

3.2 Ağdan bağımsızlık çalışması

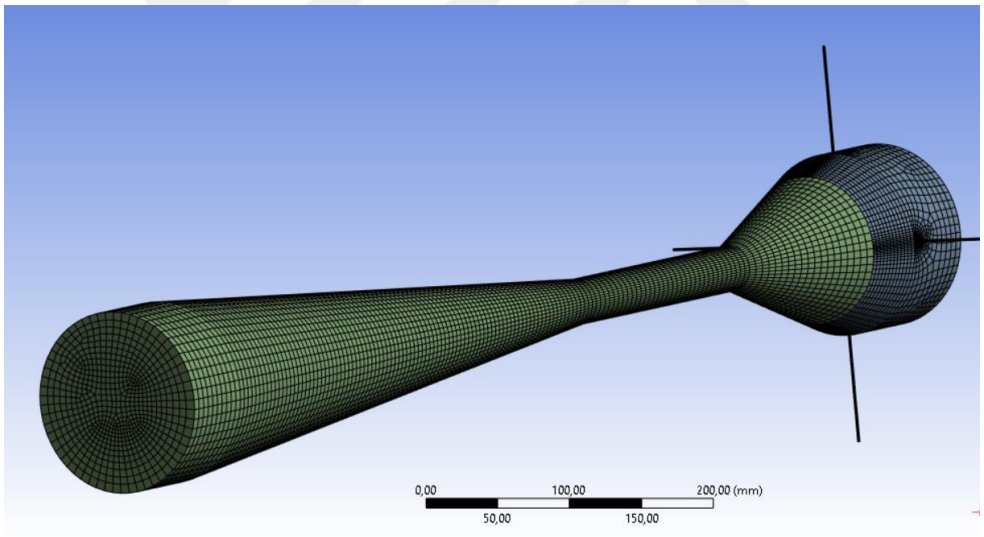
Bu çalışmada tasarlanan geometrilerin HAD analizlerinin sonuçlarının doğru olması için kullanılan ağ örgüsü yapısı, ağ boyutu bağımsızlaştırılma çalışması yapılmıştır. Bunun için Khadra vd. [5] yaptığı çalışmadaki doğrulama yöntemi gibi 6 farklı ağ örgüsü

sayısından verim ile ağ örgüsü sayısının değişmediği noktanın ağ boyutu seçilerek analizler yapılmıştır. **Şekil 3.6**'da daire kesitli venturi ağ örgüsü yapısı ile görülmektedir.



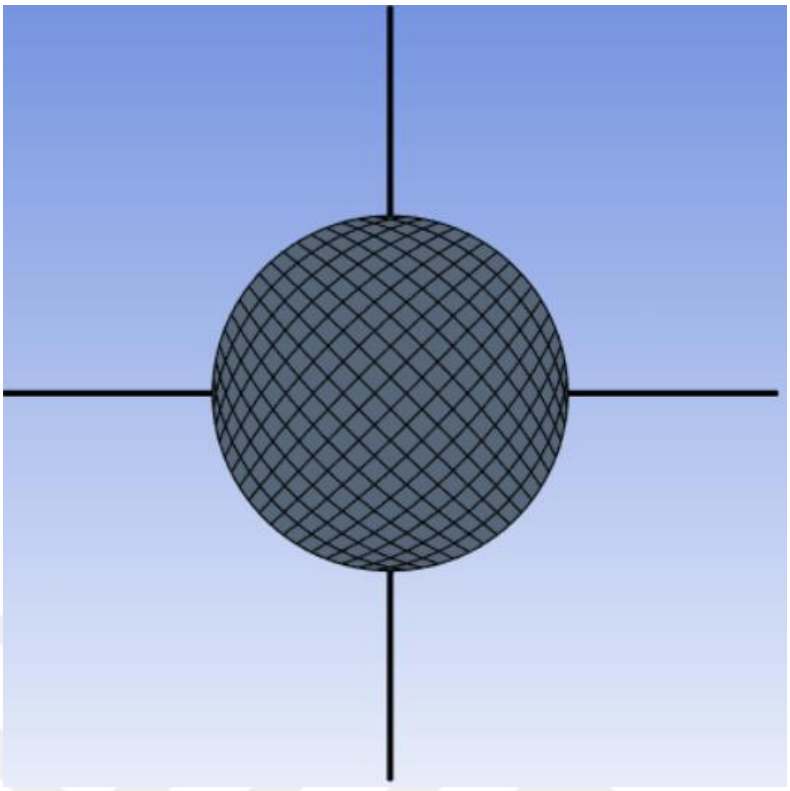
Şekil 3.6 Ağ örgüsü daire kesitli venturi yapısı (lüle yok)

Ağ örgüsü yapısında 6 mm eleman boyutunda elemanlar kullanılmıştır. **Şekil 3.7**'de görüldüğü üzere ağ örgüsü yapısı dikdörtgenler prizması (hexagon mesh) şeklinde ağırlıklı olarak modellenmiştir. Dikdörtgenler prizması ağ örgüsünün olmadığı bölgelerde ise üçgensel (tetra mesh) yapısı kullanılmıştır.



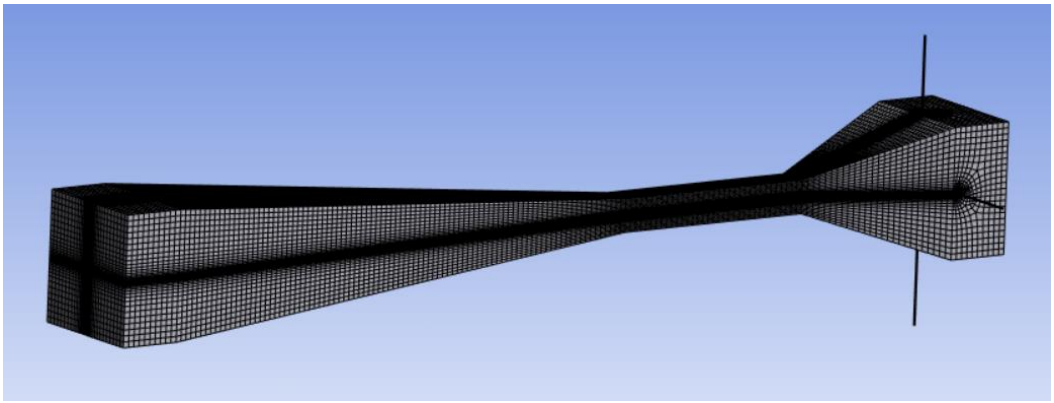
Şekil 3.7 Ağ örgüsü daire kesitli venturi yapısı

Şekil 3.8'de daire kesitli venturi gaz yıkayıcının giriş bölgesine atılan ağ örgüsü yapısı görülmektedir. Merkezde dikdörtgenler prizması ile modellenmiş iken ağ örgüsü merkezden dışarıya doğru üçgensel ağ örgüsü yapısı da kullanılmıştır. Ayrıca venturiye bağlanan lüleler de dikdörtgenler prizması ağ örgüsü yapısı ile modellenmiştir.

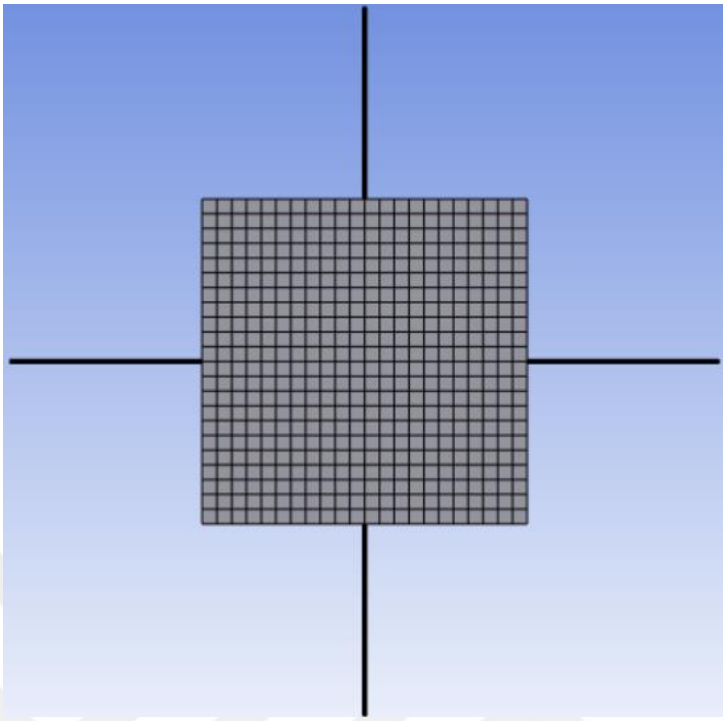


Şekil 3.8 Ağ örgüsü daire kesitli venturi giriş bölgesi

Şekil 3.9'de kare kesitli venturi yapısında yapılan ağ çalışması gösterilmiştir. Ağ çalışması her iki geometri için (kare ve daire) 6 mm boyutunda ağ yapısıyla modellenerek gösterilmiştir. **Şekil 3.10**'da ise kare kesitli venturi yıkayıcının giriş bölgesinde yapılan ağ çalışması görülmektedir. Ağ yapısının düzenli oluşu analizin doğrulanması açısından önemli bir konu olduğundan ağdan bağımsızlaştırma çalışması yapılmıştır.



Şekil 3.9 Ağ örgüsü kare kesitli venturi yapısı

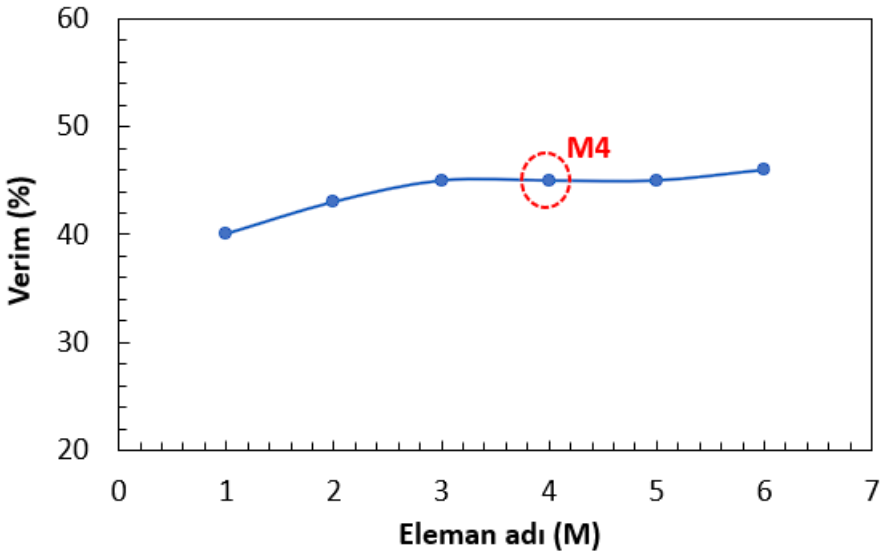


Şekil 3.10 Ağ örgüsü kare kesitli venturi giriş bölgesi

Tablo 3.2'de ağ örgüsü tablosu ve yıkayıcının ağ sayısındaki parçacık yakalama verimi gösterilmiştir **Tablo 3.2**'de görüldüğü üzere M3 noktası ile M5 noktası arasında verim değeri sabit olduğundan M4 noktası seçilmiştir. Ayrıca M5 noktası simülasyon süresi bakımından M4'e göre daha uzun olduğundan 6 mm eleman boyutu (M4) seçilerek çalışmaya devam edilmiştir [19].

Tablo 3.2 Ağ örgüsü-verim

Ağ adı	Eleman sayısı	Yakalanan/Gönderilen tanecik	Verim	Verim (%)	Eleman boyutu (mm)
M1	152550	101/251	0,40239	40	20
M2	183000	109/251	0,434263	43	10
M3	210219	114/251	0,454183	45	8
M4	285473	113/251	0,450199	45	6
M5	353247	113/251	0,450199	45	5
M6	428884	116/251	0,462151	46	4,5



Şekil 3.11 Ağ eleman sayısı-verim ilişkisi

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere verim değeri eleman sayısı M3 ve M5 noktaları (sırası ile eleman sayısı 285473 ve 353247) arasında sabit olduğundan ağ örgüsü çalışması yapılmıştır. Buna göre verim değeri M4 noktasında değişen sayıdaki eleman sayısı verimi değiştirmediğinden çalışmalar 285.473 eleman sayısı üzerinden devam edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

3.3 Sınır şartları

Deneysel sonuçlara analiz sonuçlarının yaklaşabilmesi için sınır şartlarının doğru belirlenmesi ve belirlenen sınır şartlarının aynı zaman da işlem yükünün bilgisayar tarafından hesaplanabilir olması sınır şartlarının belirlenmesi esnasında titiz bir çalışma yürütülmesi gerektiğini göstermektedir.

Sınır şartları, analizin ilkesel olarak sınıflandırılıp denklemlerle çözümü yapılacak probleme değişkenlerinin atanmasıdır. Bu çalışmada kullanacağımız yıkayıcının giriş hızı, su giriş debisi, kullanılan türbülans modelinin belirlenmesi, gibi konular analizin gerçek sonuca olan yakınsamasını doğrudan etkiler. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan analizlerde; daha önce deneysel verileri elde edilmiş bir gaz yıkayıcının deneysel ve HAD sonuçlarının birbirleriyle örtüşmesi doğru sınır şartlarının belirlenmesinden geçmektedir. Analizlerde giriş hızı, su giriş debisi ve ağ örgüsü boyutu, türbülans modeli, çift faz etkileşim türü deneysel sonuçlardaki basınç düşüşü, çıkış hızları incelenecektir. Giriş hızları metre/s olarak ve akışkan debisi kg/s olarak verilmiştir. Yıkayıcı çeperlerinde

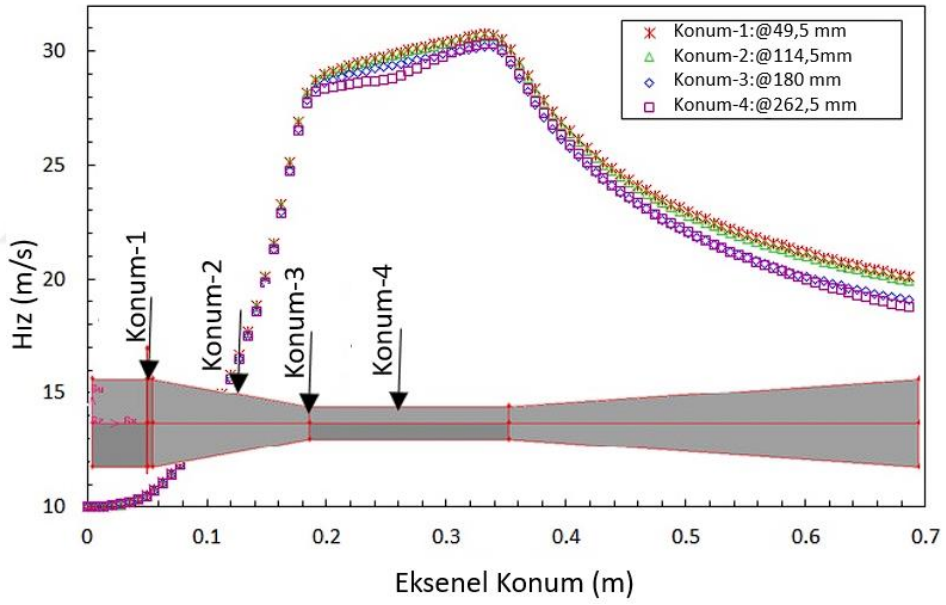
kaymamazlık şartı kullanılmış olup analiz için 1 atm basınçta, oda sıcaklığında ve yerçekimi 9,81 m/s^2 verilmiştir. İncelenen modellerde yıkayıcıların birbirleriyle mukayeseleri ile verim karşılaştırılması yapılıp venturi tipine göre verimin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Venturi veriminin bulunmasında çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Rudnlck vd.[40] teorik açıdan bu inceleme yapılmıştır. Khadra vd. ise basınç düşüşünden venturi verimi hesaplayarak farklı geometriler arasından mukayese yapmışlardır[5]. Ayrık Faz Modeli ile su fazındaki gaz fazıyla olan etkileşimi incelenmiştir. Buna göre venturi çeperleri sınır şartlarına göre tanecik yakalayıcı olarak tanımlanarak toplam giren tanecik sayısının venturi tarafından yakalanan sayısıyla olan oranı venturi verim olarak hesaplanmıştır. (8) numaralı denklemle gösterilmiştir.

3.4 Kare ve daire kesitli gaz temizleyici tasarımları

Bu bölümde literatürdeki çalışmalardan yola çıkılarak geliştirilen kare ve daire kesitli geometrilerin farklı debilerdeki HAD çalışmalarıyla elde edilen hız ve basınç düşüşleri gösterilmiştir. Kare ve daire kesitli gaz yıkayıcıların boyutları özdeş olarak incelenmiş ve geometrinin basınç ve hız üzerindeki etkisi gösterilmiştir. **Şekil 3.14**'te tasarlanan yıkayıcı gösterilmiştir. Yan kesit görünüşü verilen bu geometriden iki farklı kesitte kare ve daire kesitli yıkayıcı dizayn edilerek 0,019-0,038-0,075 farklı debilerde L1 bölgesinde 1,5 mm çapında 4 lüleden akış gönderilerek basınç ve hız etkisi incelenmiştir.

Yapılan doğrulama çalışmalarının ardından kare ve daire kesitli iki farklı geometri tasarlanıp HAD analizleri yapılmıştır. Tasarımlarda ise Luan vd. [41] yaptığı kare kesitli venturi yıkayıcı geometrisi referans olarak kullanılmış ve ayrıca daire kesitli venturi tasarımı içinse ASME 2017 [42] standartlarından alınarak standarda göre yakınsama açıları tavsiyeleri alınmış 19 ve 5 derece olarak alınmış ve ayrıca Ahmet vd. [43] geometrik boyutlandırmalarından faydalanılmış ve modellenmiştir. Modellenen geometride lüle konumlarının belirlenmesi için aşağıdaki doğrulama yapılarak en ideal lüle konumunun giriş bölgesinde olduğu görülmektedir. Venturi yıkayıcılarda boğazdaki hızlandırılmış gaz akışının yüksek kinetik enerjisi kritik öneme sahiptir. Hız ve basınç arasındaki ilişkiden dolayı temizleyici verimi düşünüldüğünde basınç düşüşünün korunması gereklidir. Bu amaçla dört farklı yerde lüle konumlandırılarak hız ve basınç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Konum-1 yakınsama bölgesi tam sınırında, Konum-2 yakınsama bölgesi ortasında, Konum-3 yakınsama ve boğaz bölgesi kesişiminde ve

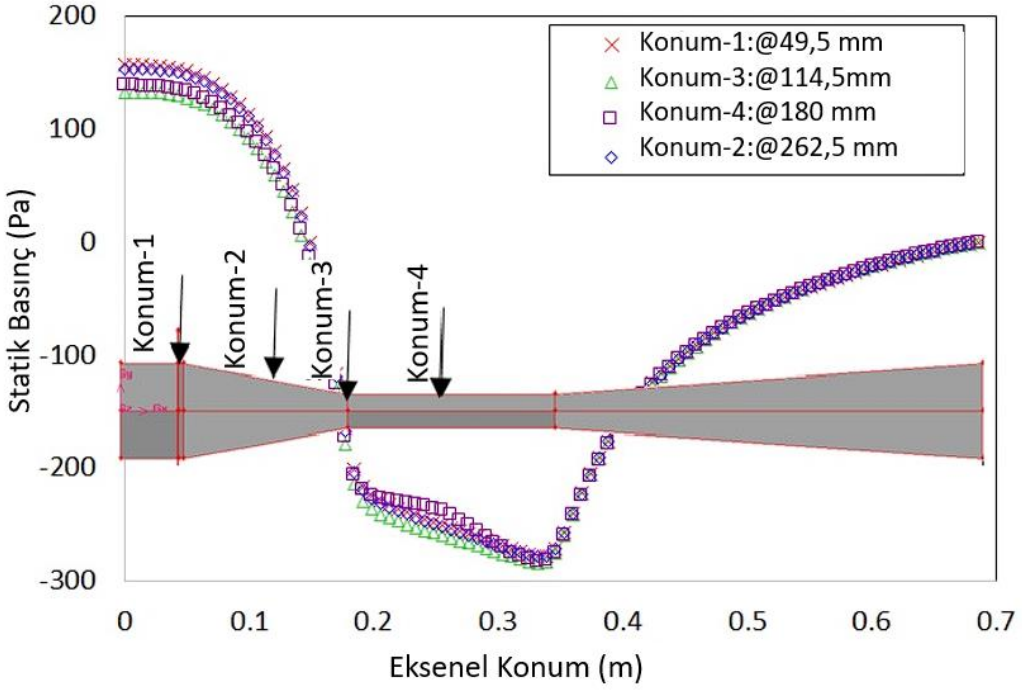
Konum-4 ise boğaz bölgesi ortasında olacak şekilde incelenmiştir. **Şekil 3.12**'de görüldüğü üzere 10 m/s giriş hızında 28 m/s'ye yakınsama bölgesinde ulaştığı görülmektedir. Venturinin en küçük kesitli bölgesi boğaz bölgesi olduğundan bu noktada hız maksimuma ulaşır. Khadra vd. [5] makalesine göre tasarlanan geometrilerin lüle konumları hem hızı hem de basıncı doğrudan etkilediği gösterilmiştir. Konum-1'de lüle yıkayıcının girişinden 49,5 mm'de, Konum-2'de yıkayıcının girişinden 114,5 mm uzaklığa, Konum-3'de lüle yıkayıcının girişinden 180 mm'de, Konum-4'de lüle yıkayıcının girişinden 262 mm'de hesaplamalar yapılmıştır. Konum-1 ve 2 ile 3'ile 4'te **Şekil 3.12**'de görüldüğü üzere lülelerin birbirlerine yakın konumlarda olduklarından sonuçlarında birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Konum-1'de hız değeri 22 m/s, ve Konum-2'de hız değeri 21 m/s ile Konum-3 ve Konum-4'e göre daha yüksek hızda çıkış olduğu görülmektedir. Konum-4 gaz akışının en düşük hızı 19 m/s ile verirken, Konum-3 ise 20 m/s hız hesaplanmıştır.



Şekil 3.12 Hız dağılımı 0,02 kg/s debide 10 m/s gaz akışında

Şekil 3.13'te görüldüğü üzere hızdaki değişim basıncı da etkilemektedir. Konum-1'de boğaz bölgesinde hız en düşük olduğundan basınç dağılımı düğer konumlara göre daha yüksektir. Venturi girişi ve çıkışı arasındaki basınç düşüşü Konum-1 ve 2'de en yüksek Konum-3 ve 4'te ise en düşük olarak hesaplanmıştır. Venturi dizaynında basınç düşüşü önemli faktörlerdendir. Yıkayıcının giriş ve çıkışında ölçülen statik basınç farkı dikkate alınır. Basınç düşüşünün doğru hesaplanması belirli sistem için doğru venturi seçimine

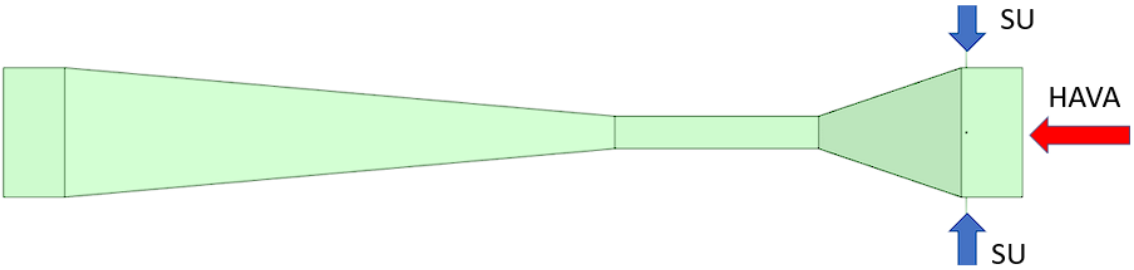
yardımcı olur. Venturiye su enjekte edilmese dahi sürtünme gazı akışından kaynaklanan enerji kaybı sebebiyle boğaz bölgesinde yüksek gaz hızı her zaman gereklidir. Yüksek gaz hızı venturide daha yüksek toplama ve temizleme verimi sağlar. Bernoulli eşitliğine göre hızın maksimum olduğu noktada basıncın en düşük olması gerekir. Bu nedenden dolayı boğaz bölgesinde basınç en aza inerek vakum oluşmasına neden olur. **Şekil 3.13**'de görüldüğü üzere yakınsama ve boğaz kısımlarında basınç değerleri azalmakta ıraksama bölgesinde ise artmaya başlamaktadır. Verimi yüksek bir venturi için lülenin yakınsama ve boğaz bölümlerinin kesişimine yerleştirilmesiyle boğazda en düşük basınç ve en yüksek hızın elde edilebileceği, yakınsama bölümünün yukarı kısmına lüle eklenmesi ile de en yüksek basınç düşünün elde edileceği sonucuna varılabilir. Boğaz bölümündeki gaz sürtünmesi basınç düşüşüne katkısı olan tek parametredir. Sürtünme dolayısıyla basınç kaybı ıraksak bölümde tekrar geri kazanılsa da sürtünmeden dolayı basınç düşüşü meydana gelmektedir. Dolayısıyla Konum-1'deki lüle pozisyonu yıkayıcı için ideal nokta olarak düşünüldüğünden çalışma Konum- 1 üzerinden devam etmiştir.



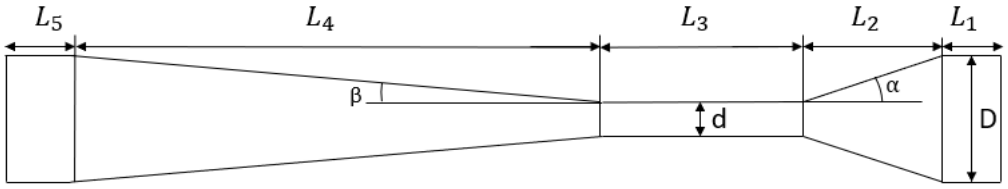
Şekil 3.13 Basınç dağılımı 0,02 kg/s debide ve 10 m/s gaz akışında

Silva vd.[32]çalışmasında tasarladığı venturi yıkayıcı için hem deneysel çalışmalar hem de HAD analizleri yapmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmamızda Silva vd.[32] açık

olarak paylaştığı sonuçları kullanılan metotla doğrulayarak parametrik olarak çalışmalar yapılmıştır. **Şekil 3.14**'de sınır şartları ve yandan görünüş verilmiştir.

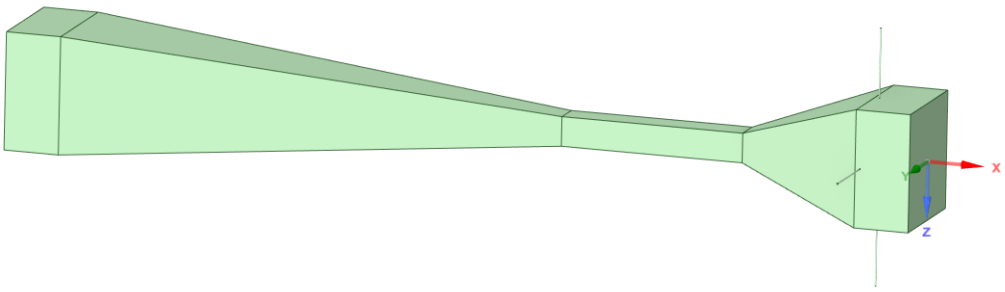


(a)



Şekil 3.14 Sınır şartları (a) yandan görünüş (b)

Şekil 3.15'de kare kesitli venturi yıkayıcı tasarımının 3 boyutlu görünüşü bulunmaktadır. Kare ve daire kesitli yeni tasarımlarda her iki geometrinin boyları, yakınsama açıları, boğaz açıları aynı dizayn edilmiştir. Kare ve daire kesitli venturi yıkayıcının hidrolik çapları eşitlenerek özdeş geometrilerin temizleme verimi, basınç düşüşü ve hız profilleri etkisi incelenerek kesitin etkisi incelenmiştir.



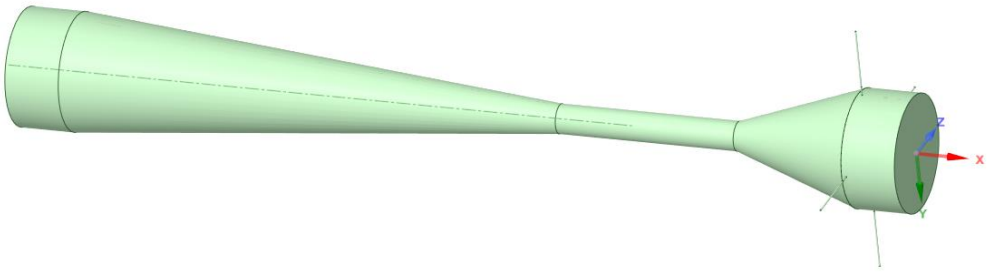
Şekil 3.15 Kare kesitli geometri 3 boyutlu görünüş

Tablo 3.3'de ise bu çalışmada yapılan bütün analizler gösterilmiştir. Lülelerden giren suyun debisi 0,001-0,005-0,019-0,038-0,075 kg/s şeklinde 5 farklı debide gönderilmiştir. Hava giriş hızı ise 16,5 m/s, 33 m/s, 50 m/s, 75 m/s olarak girilerek venturi geometrilerinin temizleme verimleri HAD yardımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 3.3 Yapılan Analizler

Kesit ismi	Geometri	Su debisi (kg/s)	Hava Hızı (m/s)
D1	Dairesel	0,001	16,5
D2	Dairesel	0,005	
D3	Dairesel	0,019	
D4	Dairesel	0,038	
D5	Dairesel	0,075	
D6	Dairesel	0,001	33
D7	Dairesel	0,005	
D8	Dairesel	0,019	
D9	Dairesel	0,038	
D10	Dairesel	0,075	
D11	Dairesel	0,001	50
D12	Dairesel	0,005	
D13	Dairesel	0,019	
D14	Dairesel	0,038	
D15	Dairesel	0,075	
D16	Dairesel	0,001	75
D17	Dairesel	0,005	
D18	Dairesel	0,019	
D19	Dairesel	0,038	
D20	Dairesel	0,075	
K1	Kare	0,001	16,5
K2	Kare	0,005	
K3	Kare	0,019	
K4	Kare	0,038	
K5	Kare	0,075	
K6	Kare	0,001	33
K7	Kare	0,005	
K8	Kare	0,019	
K9	Kare	0,038	
K10	Kare	0,075	
K11	Kare	0,001	50
K12	Kare	0,005	
K13	Kare	0,019	
K14	Kare	0,038	
K15	Kare	0,075	
K16	Kare	0,001	75
K17	Kare	0,005	
K18	Kare	0,019	
K19	Kare	0,038	
K20	Kare	0,075	

Şekil 3.16'da dairesel kesitli yeni tasarlanan geometrinin boyutlu görünüşü görülmektedir. L1 giriş bölümünden 4 farklı lüle ile su girişi olurken koordinat sistemi ile gösterilen noktadan ise hava girişi gönderilmektedir.



Şekil 3.16 Daire kesitli geometri 3 boyutlu görünüş

Boyutların birebir aynı olması hem çalışmada kesit geometrilerinin verime etkisini incelemeyi kolaylaştırmak amacıyla **Şekil 3.17**'de yeni tasarlanan geometrilerin boyutları gösterilmiştir.

Dizayn	D(mm)	d(mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3(mm)	L_4(mm)	L_5(mm)	α(∘)	β(∘)
Daire	127	31,8	60	140	200	540	60	19	5
Kare	127	31,8	60	140	200	540	60	19	5

Şekil 3.17 Genel boyutlar

Lülelerden gelen akışın etkisi için öncelikli olarak kare ve daire geometrisine lüleden akışkan olmadan sadece 16,5 m/s hava akışı girişten gönderilerek incelenmiştir. Ardından iki farklı geometride eşit hava girişinde farklı su girişi debilerinde basınç ve hız değerleri eksenel pozisyona göre gösterilmiştir.

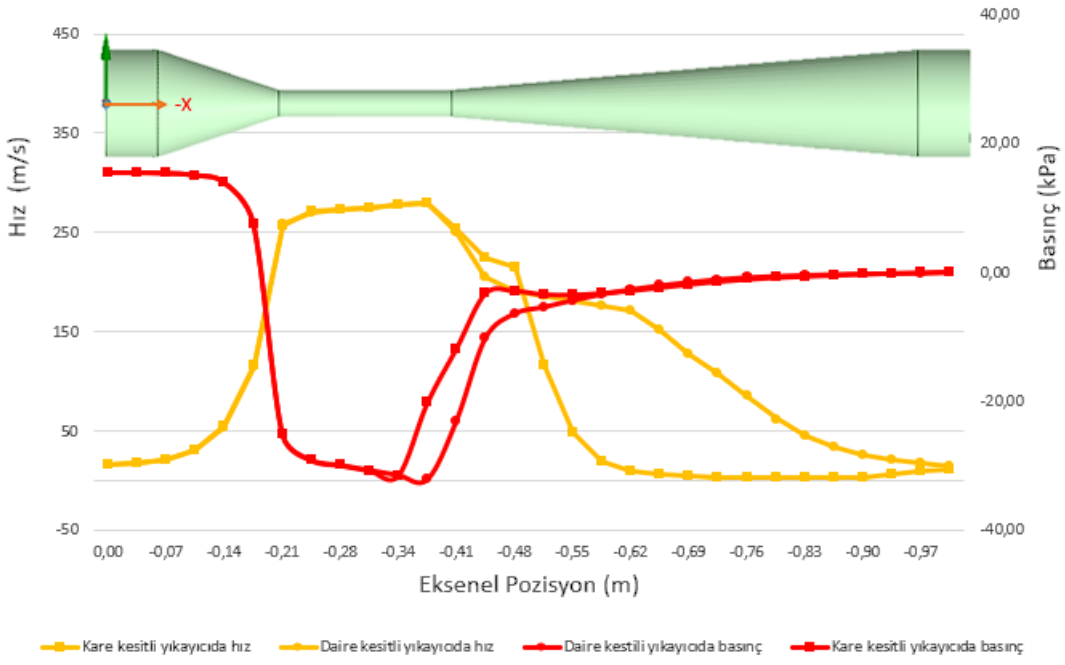
Tablo 3.4 Venturi geometrisinin isimlendirmesi

0-60 mm	Giriş	L1
60-200 mm	Yakınsama	L2
200-400 mm	Boğaz	L3
400-940 mm	Iraksama	L4
940-1000 mm	Çıkış	L5

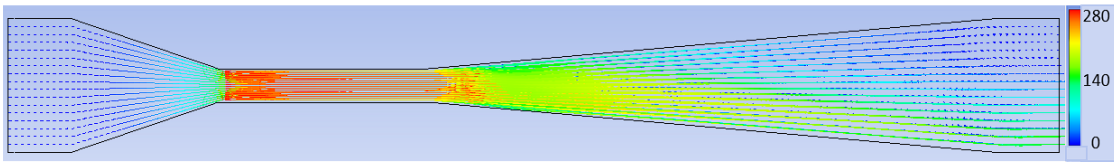
Bu çalışmada kullanılan grafiklerde eksenel pozisyonlar venturi yıkayıcının hangi bölgesine denk geldiğini yukarıdaki **Tablo 3.4**'de görülmektedir. Buna göre eksenel pozisyonda 0 ila 60 mm arasında giriş bölümü olarak, 60 ila 200 mm arasında yakınsama bölümü olarak,200 ila 400 mm arasında boğaz bölümü, 400 ila 940 mm arası ıraksama

bölümü, 940 ila 1000 mm arası ise çıkış bölümü olarak isimlendirilmektedir. Basınç düşüşünün fazla olması venturi geometrilerinde enerji transferi etkileşimin fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca sıvı faz debisinin artmasının da basınç düşüşünü arttırdığı gösterilmiştir [19].

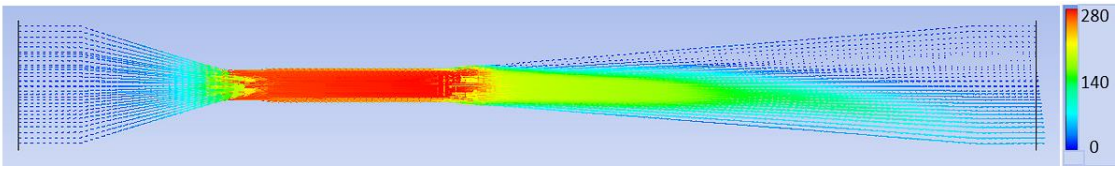
Şekil 3.18'de görüldüğü üzere kare ve daire kesitli yıkayıcıda herhangi bir akışkan girişi olmadan yalnız 16,5 m/s hava gönderilerek yapılmıştır. Buna göre her iki kesit maksimum hız değeri 279 m/s olarak hesaplanmıştır. Tek faz daire ve kare kesitli geometrilerde basınç düşüşü ise venturinin performansının gözlenebilmesi açısından önemli bir konudur. Buna göre basınç düşüşünün giriş ve çıkış arasında fazla olması kıyaslaması tek faz incelenerek yorumlanabilmektedir. Su debisinin basınç düşününe etkisi bu yolla gözlenebilmektedir. Yine **Şekil 3.18**'de yalnız hava girişinde daire ve kare kesitli gaz yıkayıcıda basınç düşüşü gösterilmiştir. Görüldüğü üzere ise tek fazda maksimum statik basınç düşüşü-32.2 kPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 Daire ve kare kesitli gaz yıkayıcılarda tek fazda 16,5 m/s'de basınç ve hız



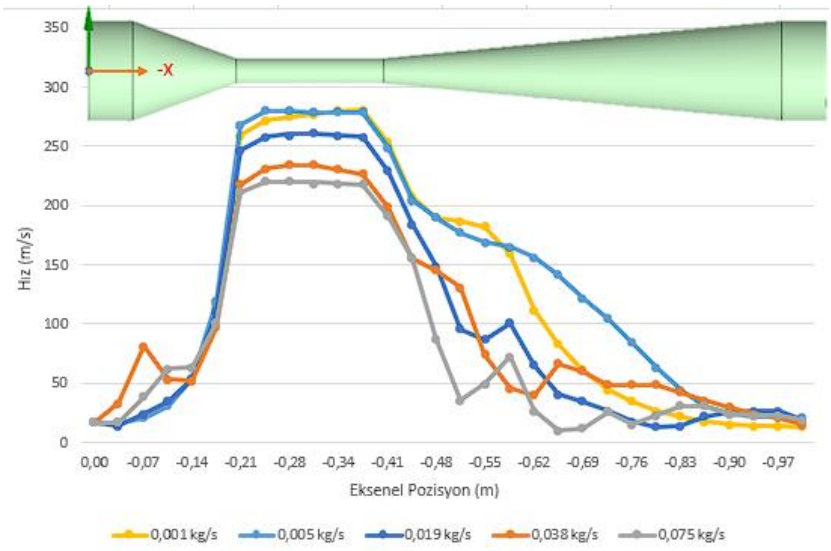
(a)



Şekil 3.19 16,5 m/s yalnız hava hızında (a) kare ve (b) daire kesitli yıkayıcıda hız

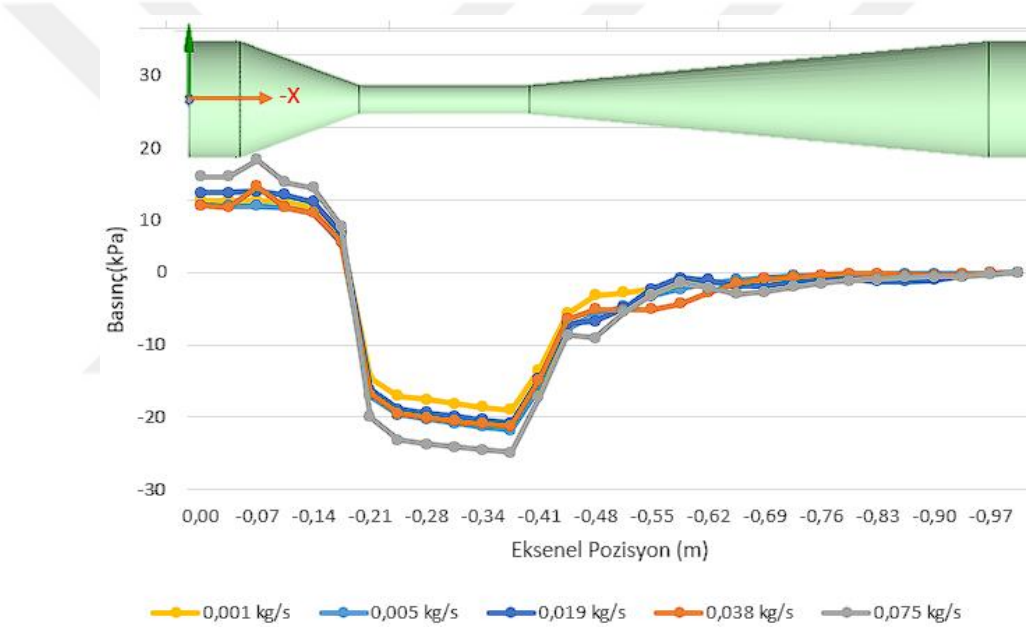
Şekil 3.19'da ise tek fazda sadece hava hızında kare ve daire kesitli venturi gaz yıkayıcılarının hız profilleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere boğaz bölgesinde hız profillerinin yoğunlaştığı görülmektedir. Tek fazda boğaz hızları ve basınç düşüşleri incelendikten sonra daire ve kare kesitli yıkayıcıya su gönderilerek hız ve basınç düşüşleri incelenmiştir.

Daire kesitli geometrilerin performansları HAD analizi ile farklı su debilerinde incelendiğinde sonuçlar aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. **Şekil 3.20**'de görüldüğü üzere boğaz bölgesinde (-0,2 m ila 0,4 m arasında) maksimum hıza ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.20 16,5 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız

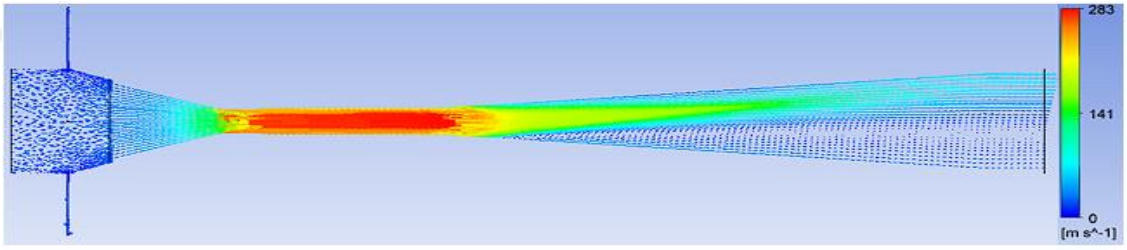
Su debisi değerleri değiştikçe hava su karışımının boğaz bölgesinde ulaştığı maksimum hız değerleri değişmektedir. Basınç düşüşleri ise farklı su debilerine göre **Şekil 3.21**'de görülmektedir. Buna göre su debisi değeri 16,5 m/s hava girişinde 0,019 kg/s debide boğaz bölgesinde maksimum basınç düşüşü -20,8 kPa olarak hesaplanmıştır. Su debisi 0,019 artırılarak 0,038 kg/s yapıldığında ise boğaz bölgesinde basınç düşüşü -21,3 kPa olarak görülürken 0,075 kg/s su debisinde -24,9 kPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre debi artışının daire kesitli venturi geometride basınç düşüşünü arttığı görülmektedir [19] [44]. Su debisi olmadan tek faz akış incelendiğinde daire kesitli venturi basınç düşüşü -32,2 kPa olarak hesaplanmıştır. Daire kesitli venturi gaz yıkayıcı için sınır şartlarını kare kesitli venturi gaz yıkayıcı için uygulayarak aşağıdaki sonuçlar elde edilerek her iki geometrinin karşılaştırılması yapılmıştır.



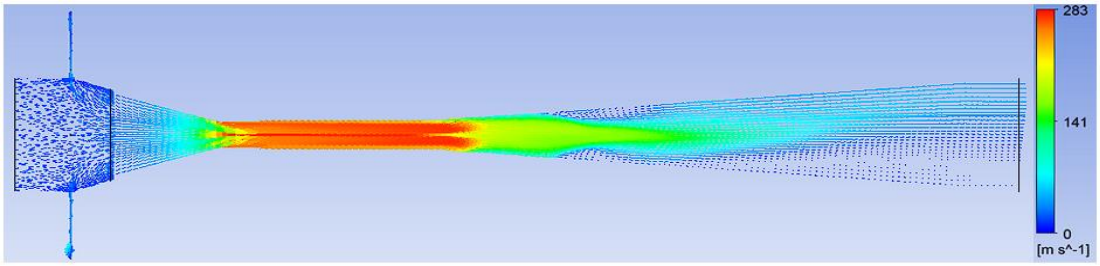
Şekil 3.21 16,5 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç

Şekillerde görüldüğü üzere 5 farklı su debisinde için hız profilleri gösterilmiştir. Renklerin mavi, yeşil, sarı ve kırmızı olarak sınıflandırıldığında maviden kırmızıya hız değeri artışını temsilen gösterilmiştir. Görüldüğü üzere tek faz hızından farklı olarak debi artışıyla birlikte hız azalmıştır. Buna göre **Şekil 3.22** (a)'da 0,001 kg/s debi değeri için 16,5 m/s hava hızındaki hız profili gösterilmiştir. 0,001 kg/s su debisinde 280 m/s, 0,005 kg/s su debisinde ise 279 m/s, 0,019 kg/s su debisinde 260 m/s hesaplanmış iken, debi 0,038 olduğunda boğaz bölgesinde hız değeri 234 m/s olarak hesaplanmıştır. 0,075 kg/s su debisinde ise 220 m/s olarak hesaplanmıştır. Su debisi arttıkça hava-su karışımının

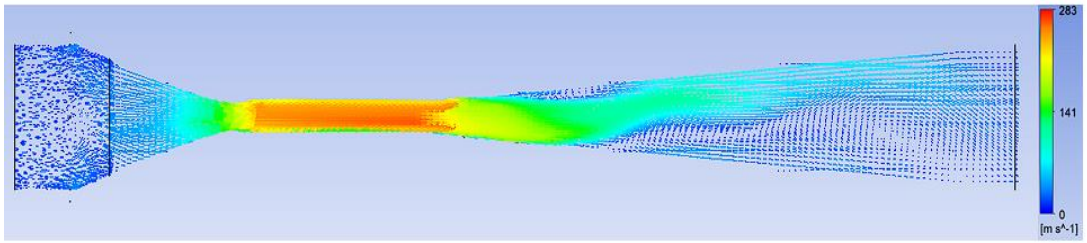
boğaz bölgesinde oluşturduğu maksimum hızı değeri yavaşlamaktadır. Buna boğaz bölgesindeki renklerden de anlaşılacağı üzere kırmızı renginin yoğunluğundan hızın bu noktada en yüksek olduğu hesaplanmıştır. **Şekil 3.22** (b)'de 0,005 kg/s su debisinde 16,5 m/s hava hızı girişinde hız profili gösterilmiştir. Boğaz bölgesindeki kırmızı rengin yoğunluğunun nispeten azalması 0,001 su debisindeki boğaz bölgesindeki hıza nazaran hızın azaldığını göstermektedir. **Şekil 3.22** (c)'de 0,019 kg/s su debisinde 16,5 m/s hava hızında daire kesitli gaz yıkayıcının hız profili verilmiştir. **Şekil 3.22** (d)'de 0,038 kg/s su debisinde hız profilleri, **Şekil 3.22** (e)'de ise 0,075 kg/s su debisinde 16,5 m/s hava hızındaki hız profilleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere artan debi değeri ile birlikte boğaz bölgesinde oluşan hız azalmaktadır [45].



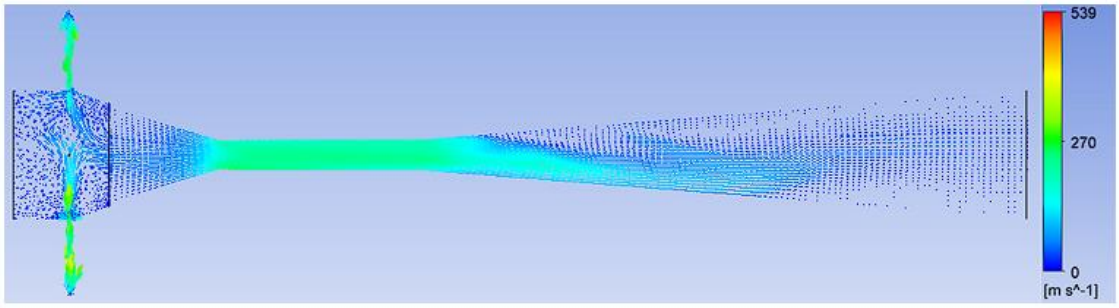
(a)



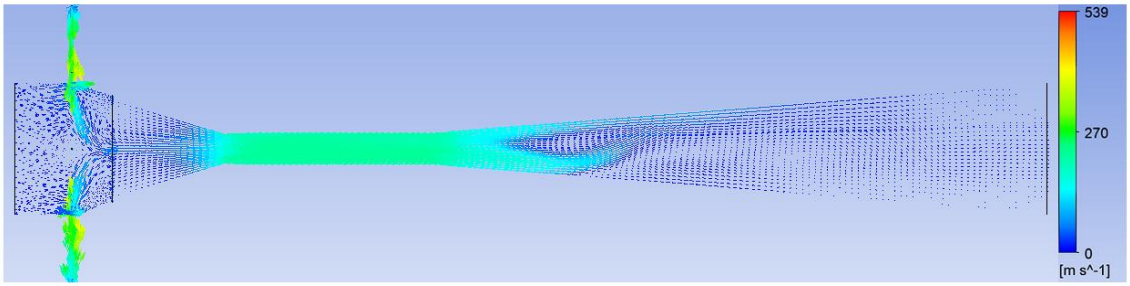
(b)



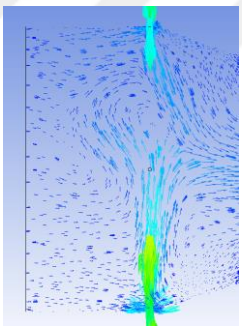
(c)

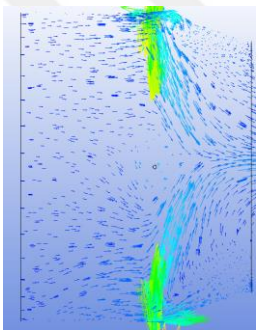


(d)



(e)



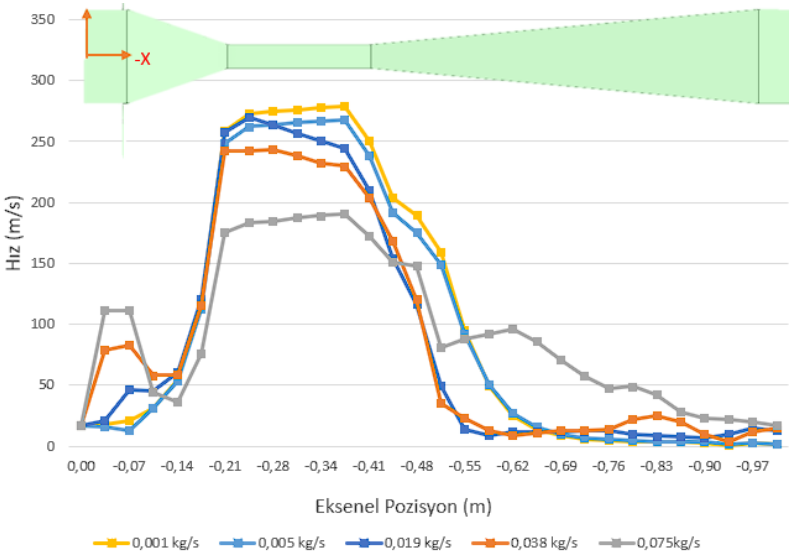


(f) (g)

Şekil 3.22 16,5 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda hız (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s debide hız (f) 0,038 kg/s debide giriş vektörü (g) 0,075 kg/s debide giriş vektörü

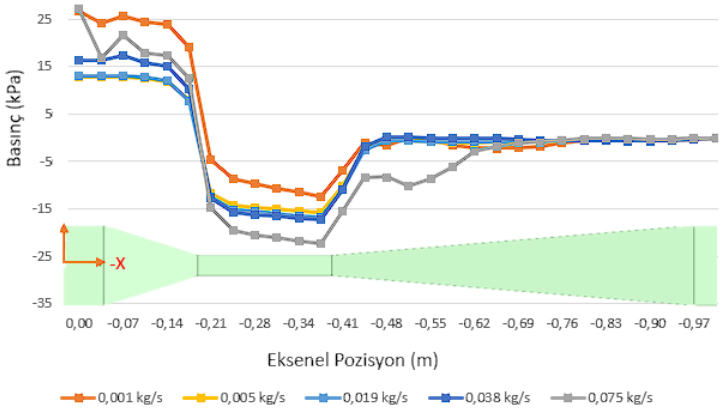
Daire kesitli yıkayıcılar ile kare kesitli yıkayıcıların incelendiği bu çalışmada yukarıda verilen debi değerlerinin aynısı kare geometriler için de uygulanmıştır. Buna göre **Şekil**

3.23'de görüldüğü üzere kare kesitli gaz temizleyici de 5 farklı debi değerinde hız profilleri verilmiştir.



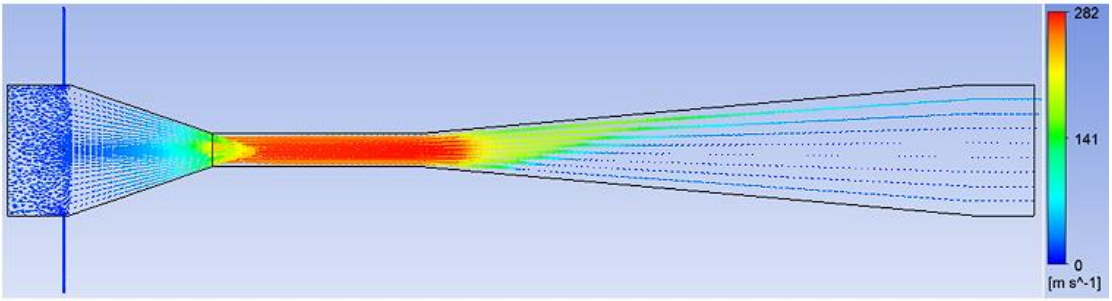
Şekil 3.23 16,5 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı debilerde hız profilleri

Şekil 3.23'de görüldüğü üzere kare kesitli venturi gaz yıkayıcılarda geri akış (backflow) oluşumuna rastlanmaktadır[24]. Gaz yıkayıcı verimi boğaz bölgesindeki hız etkilediğinden gaz yıkayıcılar için hız önemli bir konudur [46]. **Şekil 3.24**'de görüldüğü üzere kare kesitli geometrinin basınç düşüşleri debi arttıkça artmaktadır [19]. Basınç düşüşü grafiklerinde ele alınan değerler boğaz bölgesinde oluşan sıfırın altındaki maksimum değerlere göre karşılaştırılmalar yapılmıştır. 0,001 kg/s su debisinde basınç düşüşü görüldüğü üzere -12,3 kPa olarak gösterilmiştir. 0,005 kg/s su debisinde değerinde ise -15,8 kPa, 0,019 kg/s su debisinde -16,7 kPa, 0,038 kg/s su debisinde -17,3 kPa, 0,075 kg/s su debisinde -22,3 kPa olarak hesaplanmıştır.

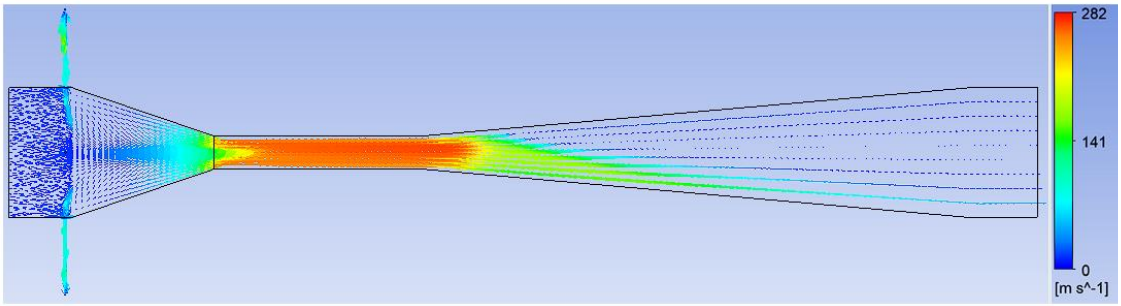


Şekil 3.24 16,5 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debisinde basınç

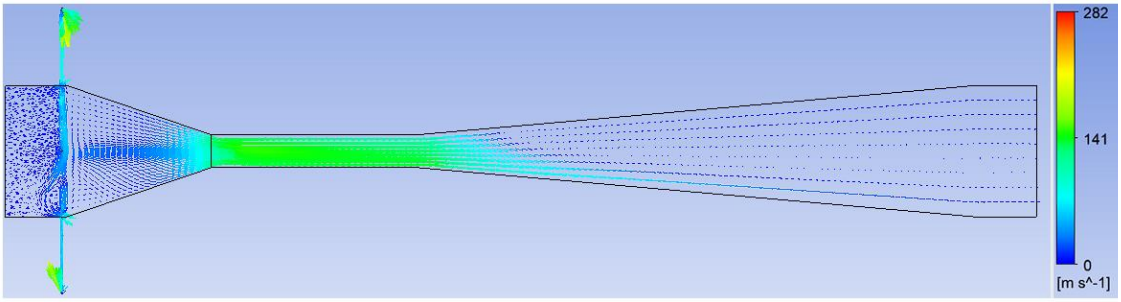
Aşağıdaki görsellerde ise 5 farklı debide hız profilleri 0,001 kg/s'den 0,075 kg/s'ye kadar gösterilmiştir. Buna göre su debisinin artışıyla boğaz bölgesinde oluşan hız azalmaktadır [45]. Kare kesitli gaz yıkayıcıda boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değerleri ise sırasıyla gösterilmiştir. Buna göre **Şekil 3.25** (a)'da 0,001 kg/s su debisinde maksimum hız değeri görüldüğü üzere 279 m/s olarak gösterilmiştir. **Şekil 3.25** (b)'de 0,005 kg/s su debisinde ise 279 m/s, **Şekil 3.25** (c)'de 0,019 kg/s su debisinde 267 m/s, **Şekil 3.25** (d)'de 0,038 kg/s su debisinde 243 m/s, **Şekil 3.25** (e)'de ise 0,075 kg/s su debisinde 190 m/s olarak gösterilmiştir.



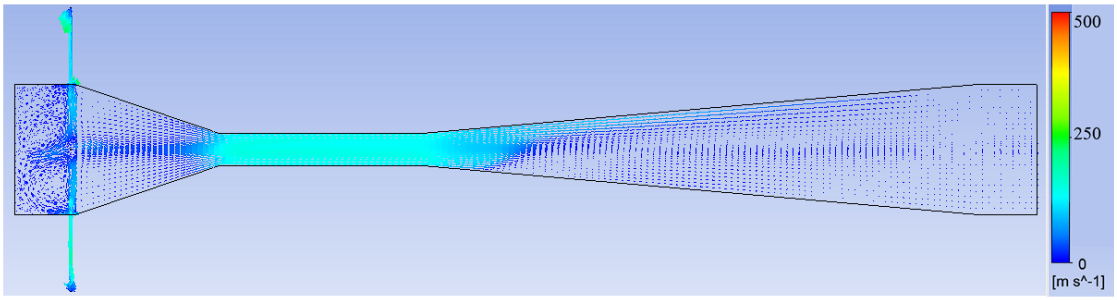
(a)



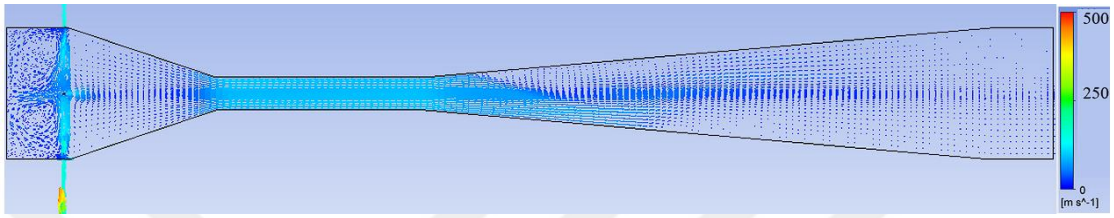
(b)



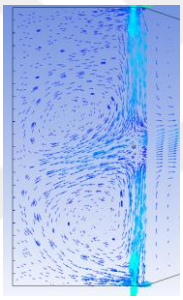
(c)

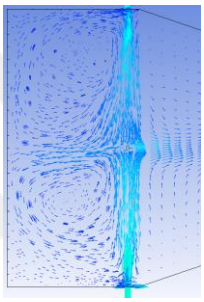


(d)



(e)



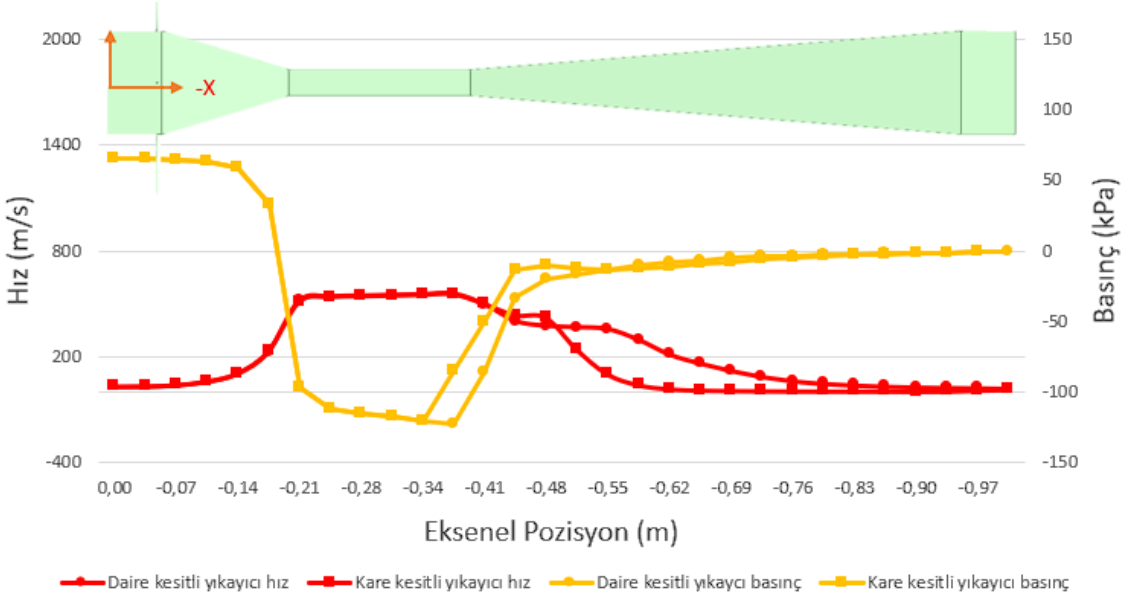


(f) (g)

Şekil 3.25 16,5 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s debilerinde hız (f) 0,038 kg/s debide giriş vektörü (g) 0,075 kg/s debide giriş vektörü

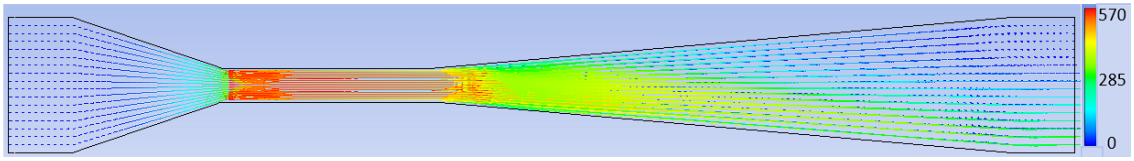
Hız girişinden giren hava hızını 33 m/s ile kare ve daire kesitli geometrilerin hız ve basınç düşüşleri incelenmiştir. Buna göre öncelikli olarak su debisi olmadan yalnız hava akışı girişten gönderilerek basınç ve hız düşüşü incelenmiştir (**Şekil 3.27**). Ardından 16,5 m/s hız değerlerinde olduğu gibi 0,001- 0,005- 0,019- 0,038- 0,075 olmak üzere 5 farklı su debisi değerlerinde kare ve daire kesitli yıkayıcılar incelenmiştir. Hız değerleri her iki geometri için incelendiğinde boğaz bölgesinde 557 m/s olarak hesaplanmıştır. Herhangi bir debi olmadan tek fazda iken basınç ve hız profilleri gösterilmiştir. Geometriler farklı olmasına rağmen boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değerleri aynı olarak

hesaplanmıştır. Her iki kesitli gaz yıkayıcının basınç düşüşleri ve hız değerleri **Şekil 3.26**'da gösterilmiştir. Grafikten de görülüğü üzere statik basınç düşüşü maksimum olarak hesaplanarak -122 kPa olarak basınç düşüşü hesaplanmıştır.

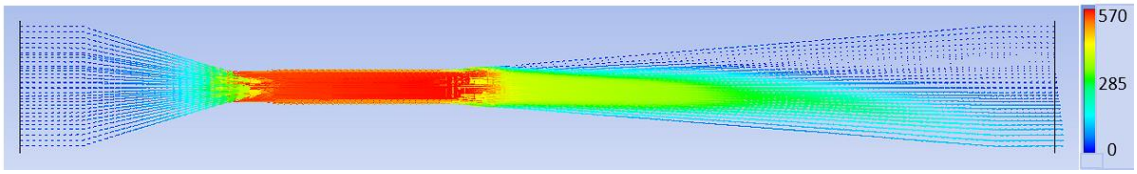


Şekil 3.26 33 m/s hava girişinde daire ve kare kesitli venturi gaz yıkayıcılarının hız profilleri

Şekil 3.27 (a)'da tek faz girişinde kare gaz yıkayıcıda hız profili gösterilmektedir. **Şekil 3.27** (b)'de daire kesitli venturi gaz yıkayıcılarda tek fazda iken hız profili gösterilmiştir.



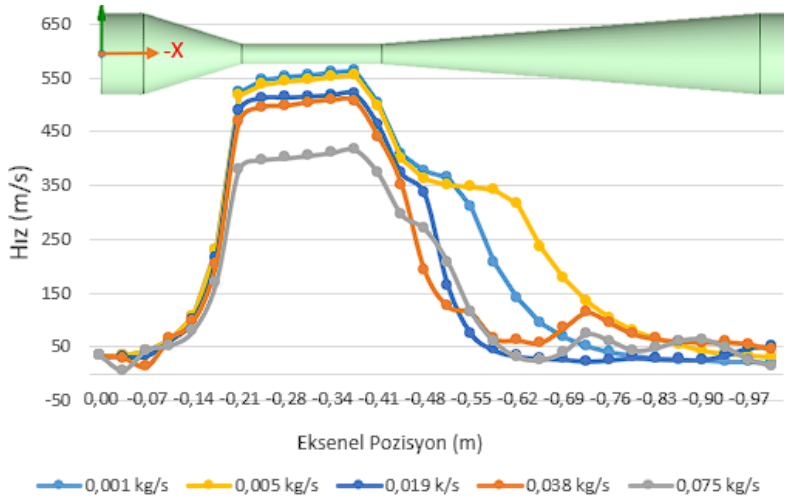
(a)



Şekil 3.27 33 m/s yalnız hava hızında (a) kare (b) daire kesitli yıkayıcıda hız

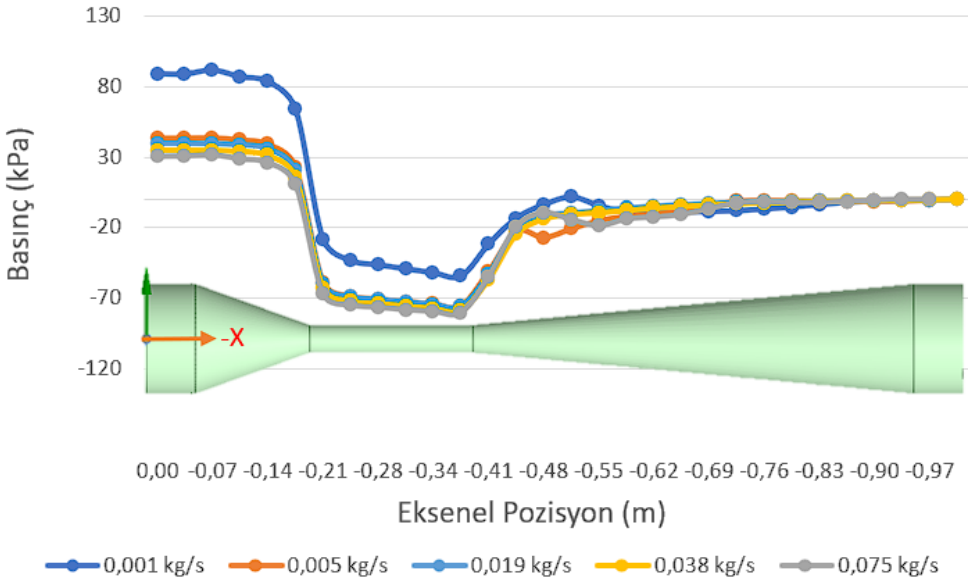
Tek fazlı yapılan incelemenin ardından 5 farklı su debisinde ile hız ve basınç profilleri incelenerek **Şekil 3.28**'de daire kesitli geometri için hız profilleri gösterilmiştir. Boğaz bölgesi çıkışında maksimum hıza ulaşan hava-su karışımı 0,001 kg/sn su debisinde en

büyük hıza ulaşmıştır. **Şekil 3.29**'de ise 5 farklı su debisinde için daire kesitli yıkayıcıda 33 m/s için basınç düşüşü görülmektedir.



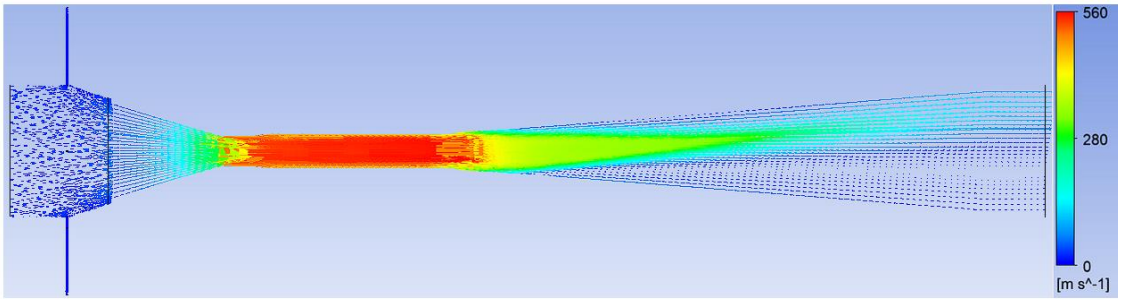
Şekil 3.28 33 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız

Şekil 3.29'de görüldüğü üzere 5 farklı su debisinde basınç düşüşü sırasıyla 0,001 kg/s su debisinde basınç düşüşü görüldüğü üzere -62,4 kPa olarak gösterilmiştir. 0,005 kg/s su debisinde değerinde ise -75,8 kPa, 0,019 kg/s su debisinde -76,1 kPa, 0,038 kg/s su debisinde -79,1 kPa, 0,075 kg/s su debisinde -82,5 kPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre debi artışı daire kesitli venturi geometride basınç düşüşü arttığı görülmektedir [19] [44].

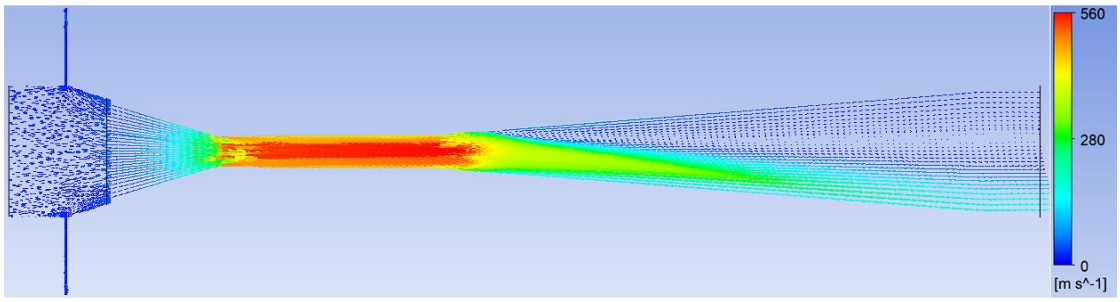


Şekil 3.29 33 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç

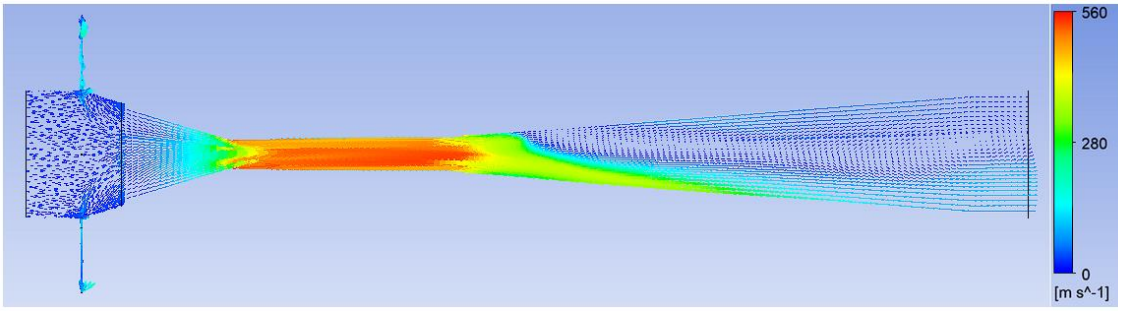
Hava giriş hızı 16,5 m/s'den 33 m/s'ye yükseltilmiştir ve su debisi ise 5 farklı debi ayrı ayrı koşullarda kare ve daire kesitli yıkayıcıya gönderilmiştir. Boğaz bölgesinde hız değerleri renk paleti ile gösterilmiştir. Hız değerinin düşük olduğu yerlerde mavi renkler, hız değerinin yüksek olduğu yerlerde ise kırmızı renklerle hız ifade edilmiştir. Boğaz bölgesinde hızın diğer bölgelere göre yüksek olduğundan kırmızı renk daha yoğun olduğu da aşağıdaki şekillerde görülmektedir. **Şekil 3.30** (a)'da ise 0,001 kg/s su debisi değerinde hız profilli gösterilmiştir. Bu debi değerinde boğaz bölgesinde en yüksek hızın diğer debilerle karşılaştırınca görülmektedir. Buna göre **Şekil 3.30** (a)'da 0,001 kg/s su debisinde maksimum hız değeri görüldüğü üzere 555 m/s olarak gösterilmiştir. **Şekil 3.30** (b)'de 0,005 kg/s su debisinde ise 554 m/s, **Şekil 3.30** (c)'de 0,019 kg/s su debisinde 519 m/s, **Şekil 3.30** (d)'de 0,038 kg/s su debisinde 508 m/s, **Şekil 3.30** (e)'de 0,075 kg/s su debisinde 416 m/s olarak gösterilmiştir. Ayrıca görüldüğü üzere debi artışında boğaz bölgesinde hız değerleri azalmaktadır [45].



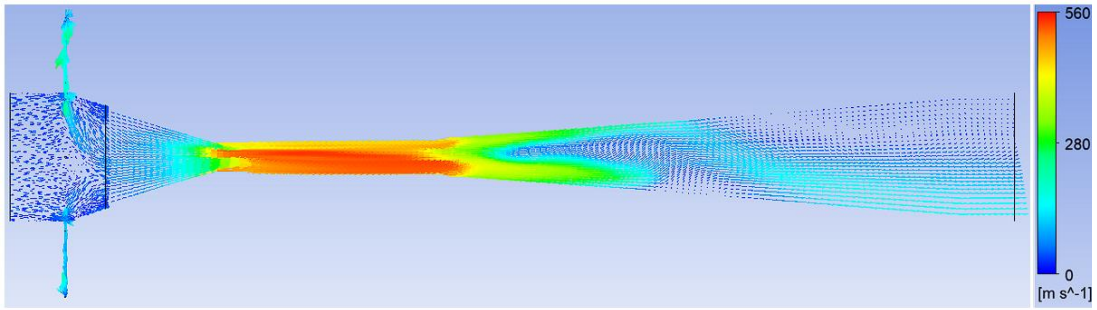
(a)



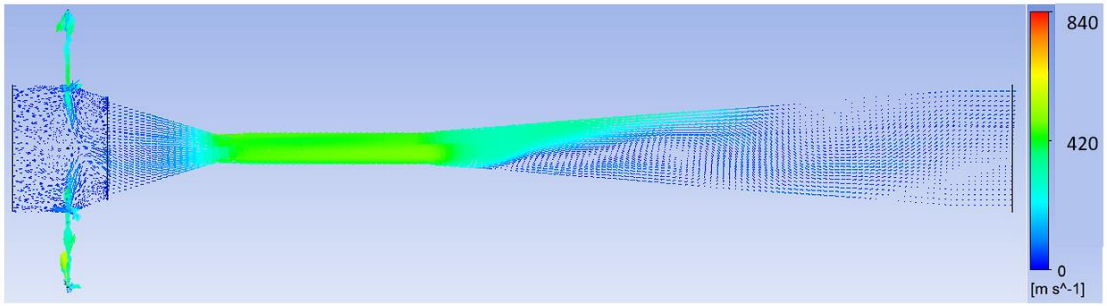
(b)



(c)

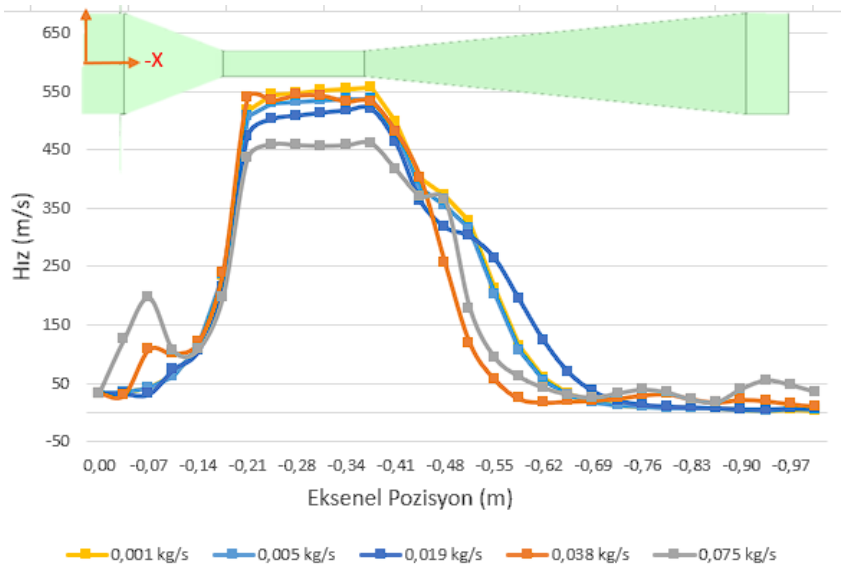


(d)



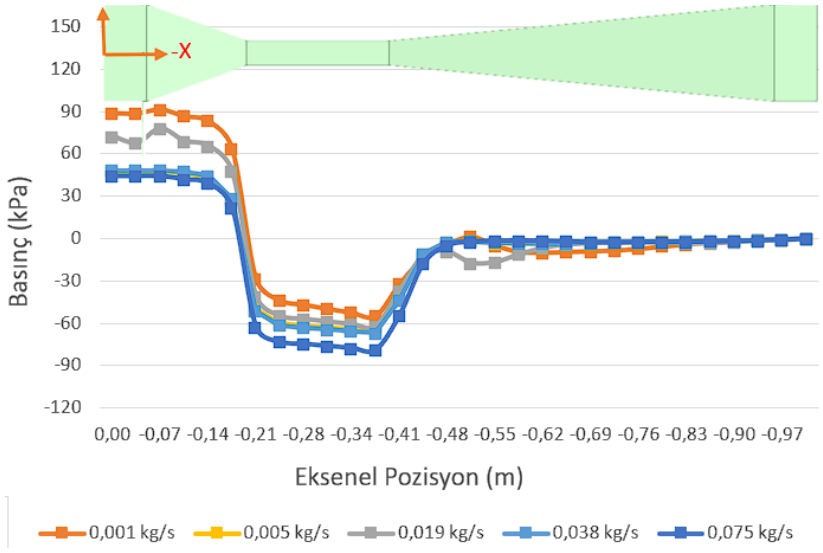
Şekil 3.30 33 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız

0,075 kg/s su debisindeki boğaz bölgesinin hız profili diğer debilere göre daha düşük olduğu aşağıdaki **Şekil 3.30**'de gösterilmiştir. Kare kesitli yıkayıcıda **Şekil 3.31**'de görüldüğü üzere için hız profili verilmiştir. 5 farklı debi değeri için hız değerleri gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere su debisindeki artışıyla birlikte gaz yıkayıcıda oluşan maksimum hız değeri azalmaktadır [45].



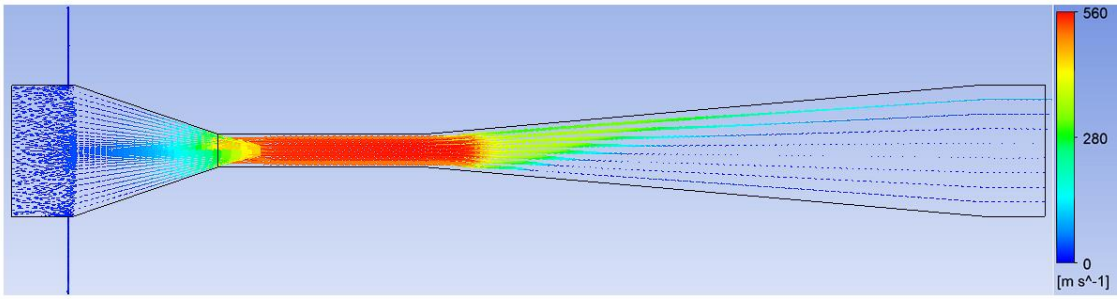
Şekil 3.31 33 m/s hava girişinde kare kesitli venturi gaz yıkayıcı farklı su debilerinde hız

Kare geometride 0,001 kg/s su debisinde diğer debi değerine göre maksimum hız değeri daha fazladır. Hızın boğaz bölgesindeki maksimum değeri en küçük su debisi olan 0,001 kg/s değerinde oluştuğu grafikte de gösterilmiştir. **Şekil 3.32**'de ise kare kesitli gaz yıkayıcı için 5 farklı debide basınç düşüşü değerleri gösterilmiştir. Basınç düşüşü debi değerinin artması ile birlikte arttığı görülmektedir [19] [44]. 0,001 kg/s debi değerinde basınç düşüşü -54,6 kPa iken 0,075 kg/s debi değerinde -79,8 kPa olarak hesaplanmıştır.

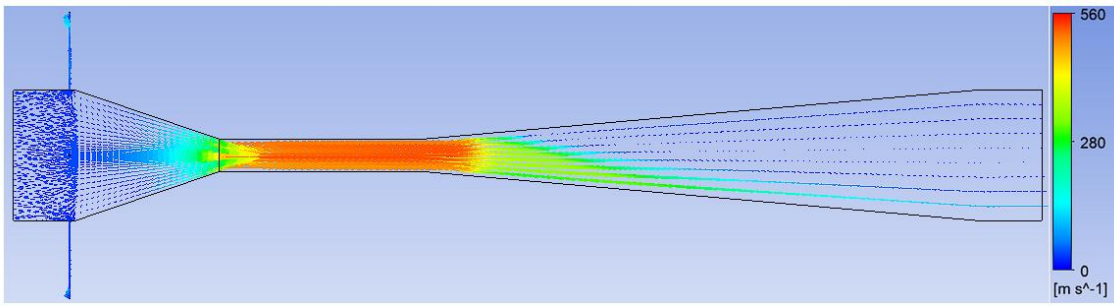


Şekil 3.32 33 m/s hava girişinde kare kesitli venturi gaz yıkayıcı farklı debilerde basınç

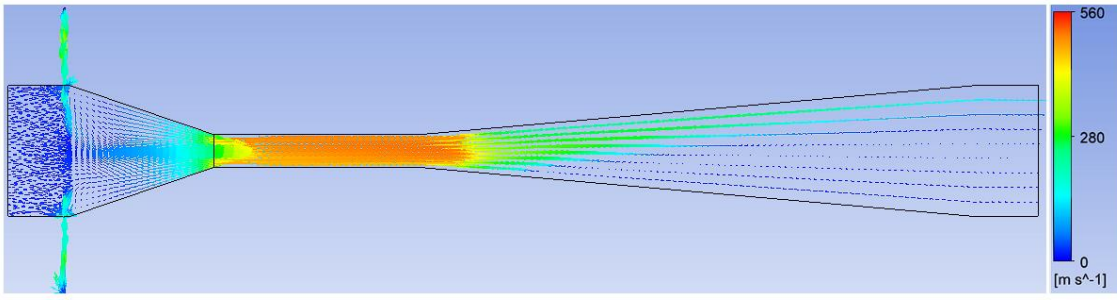
Aşağıdaki verilen şekillerde ise artan su debisi değerlerinde sırasıyla 0,001-0,005-0,019-0,038-0,075 kg/s debi değerlerinde hız profilleri gösterilmiştir. **Şekil 3.33**'de boğaz bölgesinde yoğunlaşan hız profilleri yıkayıcının çıkışına doğru hızın azaldığı ve sıfıra düştüğü görülmektedir. Buna göre **Şekil 3.33** (a)'da 0,001 kg/s debide maksimum hız değeri görüldüğü üzere 555 m/s olarak gösterilmiştir. **Şekil 3.33** (b)'de 0,005 kg/s su debi değerinde ise 542 m/s, **Şekil 3.33** (c)'de 0,019 kg/s su debisinde 537 m/s, **Şekil 3.33** (d)'de 0,038 kg/s su debisinde 519 m/s, **Şekil 3.33** (e)'de 0,075 kg/s su debisinde 460 m/s olarak gösterilmiştir. Görüldüğü üzere su debisi artışında boğaz bölgesinde hız değerleri azalmaktadır [45].



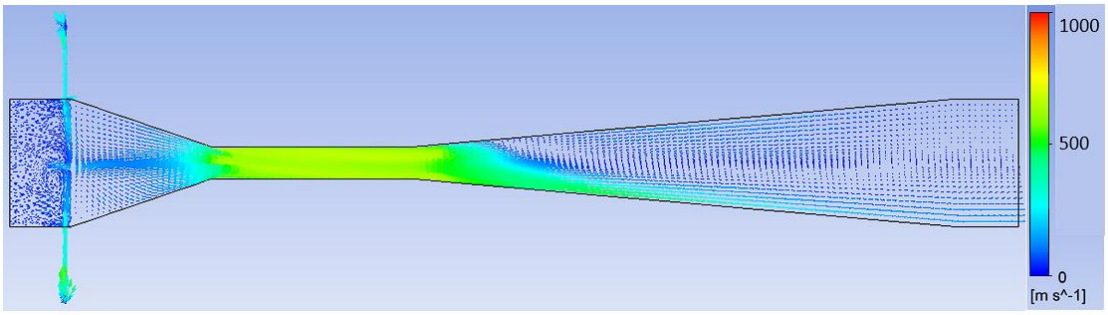
(a)



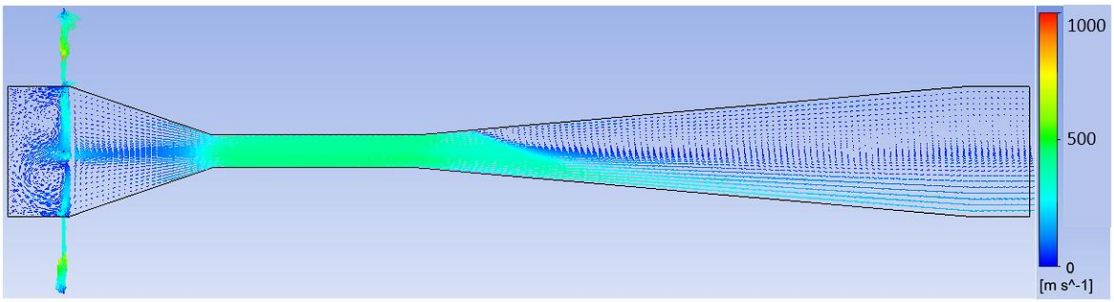
(b)



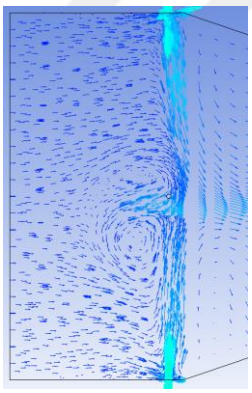
(c)

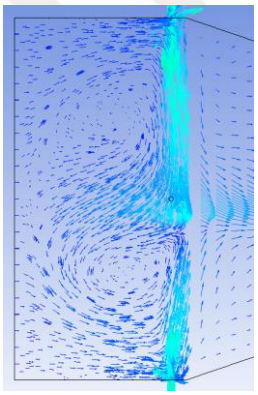


(d)



(e)



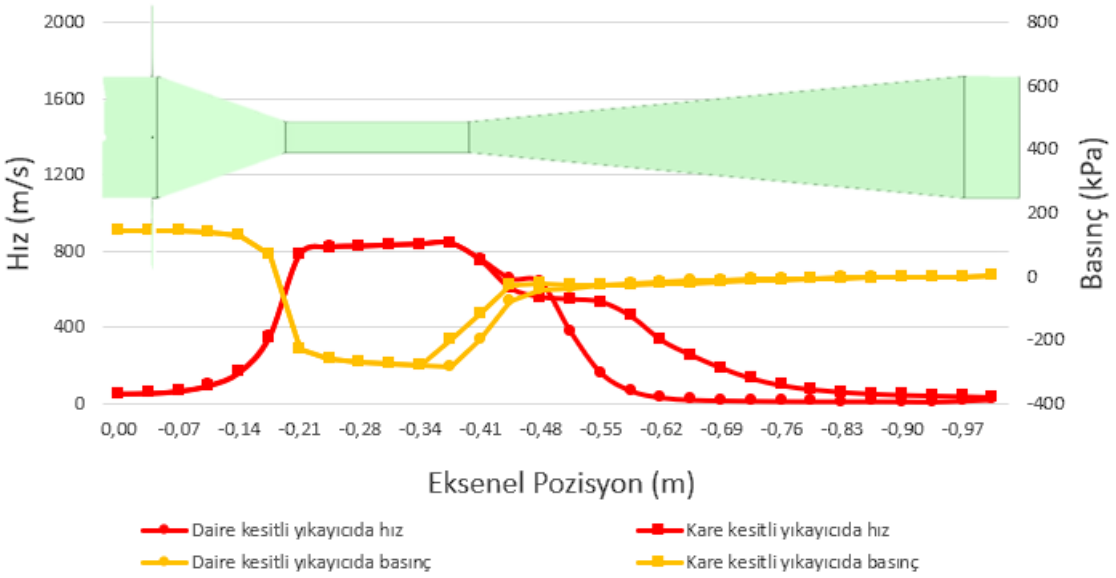


(f) (g)

Şekil 3.33 33 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s debilerinde hız (f) 0,038 kg/s debide giriş vektörü (g) 0,075 kg/s debide giriş vektörü

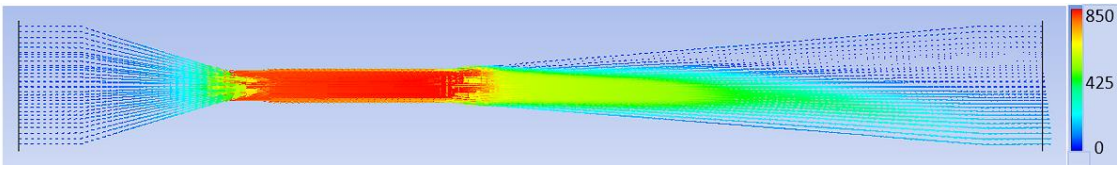
Kare ve daire geometrilerde basınç düşüşü karşılaştırılınca kare geometrinin basınç düşüşü daire kesitli geometriye göre daha azdır. Daire geometrinin basınç düşüşü aynı su debisinde ve hava hızı girişinde kare kesitli venturi yıkayıcıya göre daha fazla olduğu gösterilmiştir.

Şekil 3.34'da ise 50 m/s hız girişinde yalnızca hava gönderildiğinde daire kesitli venturi gaz yıkayıcının hız profili ve basınç düşüşleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere kare ve daire kesitli yıkayıcılar tek faz durumunda kesitleri farklı dahi olsa boğaz bölgesinde aynı hız değeri 839 m/s olarak görülmektedir. Basınç düşüşü değerleri ise tek fazda kare ve daire geometrileri için de yine aynı grafikte gösterilmiştir. Buna göre daire kesitli yıkayıcının maksimum basınç düşüşü yaptığı nokta olan boğaz bölgesinde daire kesitli yıkayıcı ve kare kesitlide -285 kPa olarak hesaplanmıştır.

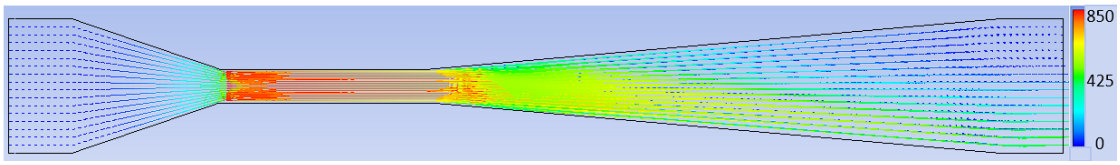


Şekil 3.34 50 m/s yalnız hava hızında kare ve daire kesitli yıkayıcıda basınç

Şekil 3.35 (a)'da tek faz girişinde kare gaz yıkayıcıda hız profili gösterilmektedir. **Şekil 3.35** (b)'de daire kesitli venturi gaz yıkayıcılarda tek fazda iken hız profili gösterilmiştir,

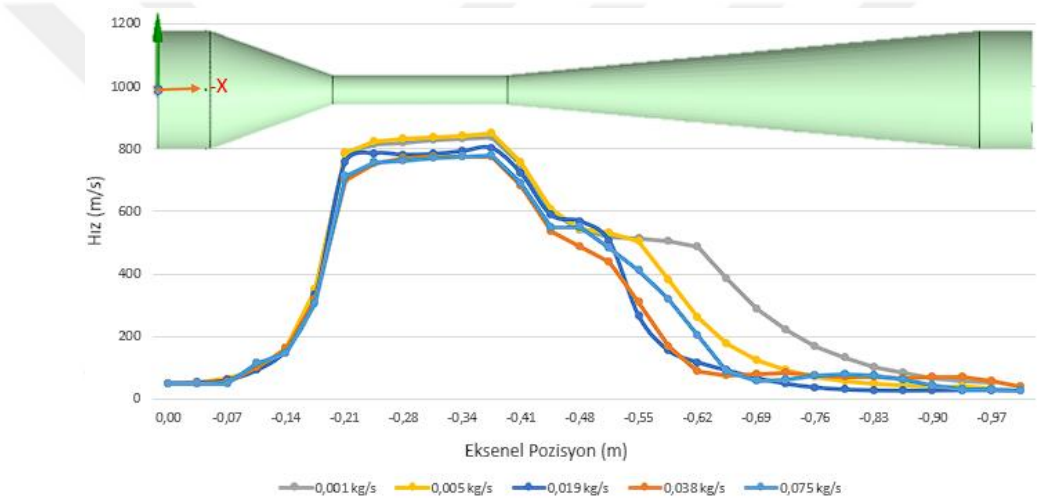


(a)



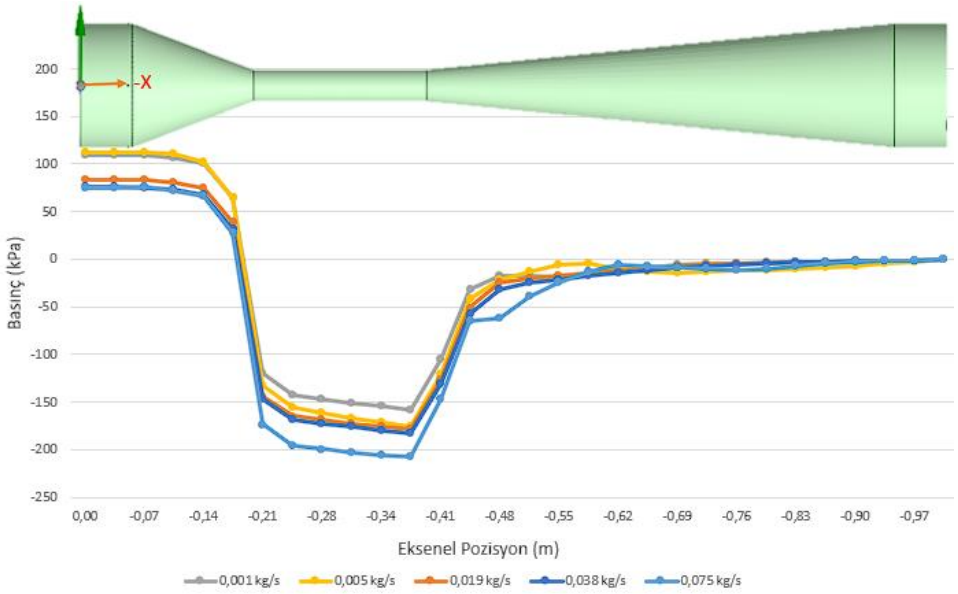
Şekil 3.35 50 m/s yalnız hava hızında (a) kare ve (b) daire kesitli yıkayıcıda hız

Şekil 3.36'da daire kesitli gaz yıkayıcıda 5 farklı su debisi ve hava hızının 50 m/s olduğu durumdaki değerleri gösterilmiştir. Buna göre hava-su karışımı boğaz bölgesinde maksimum hıza ulaşmaktadır. En düşük debi olan 0,001 kg/s su debisi değerinde en yüksek hız değeri olan 838 m/s'ye ulaşmaktadır.



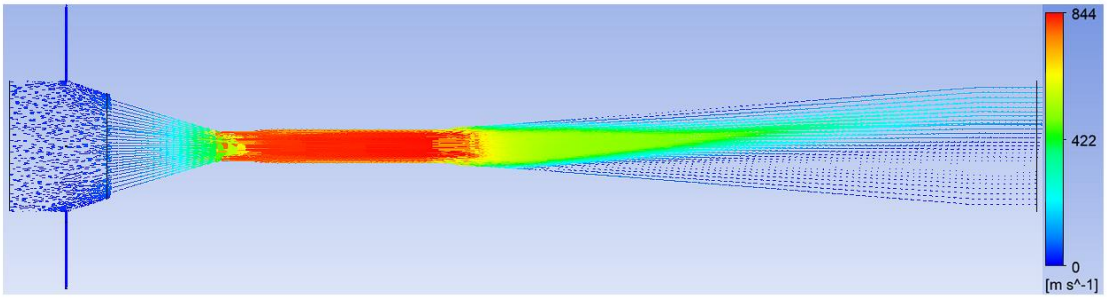
Şekil 3.36 50 m/s hava hızı girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debisinde hız

Şekil 3.37'de daire kesitli yıkayıcılarda 5 farklı su debisinde 50 m/s su debisinde basınç düşüşleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere maksimum basınç düşüşü ile su debisi arasında doğru orantı mevcuttur. Buna göre gaz yıkayıcıya gönderilen debi artınca maksimum basınç düşüşü de artmaktadır. [19] [44]. **Şekil 3.37'**de görüldüğü üzere 5 farklı su debisinde basınç düşüşü sırasıyla 0,001 kg/s debide basınç düşüşü görüldüğü üzere -158 kPa olarak gösterilmiştir. 0,005 kg/s debi değerinde ise -175 kPa, 0,019 kg/s debide -179 kPa, 0,038 kg/s debide -207 kPa, 0,075 kg/s debide -285 kPa olarak hesaplanmıştır.

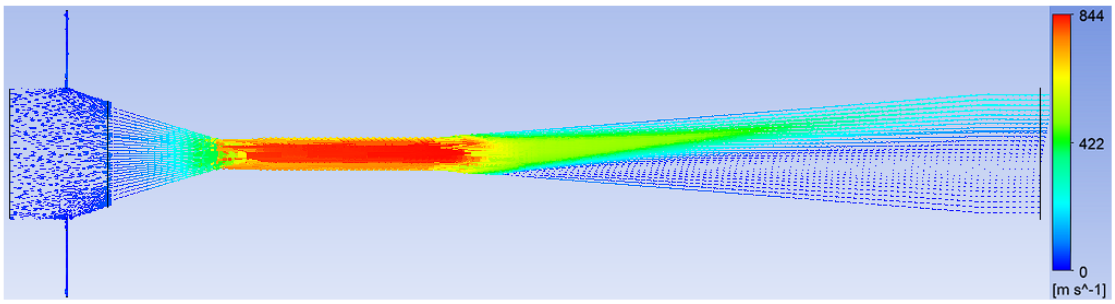


Şekil 3.37 50 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç

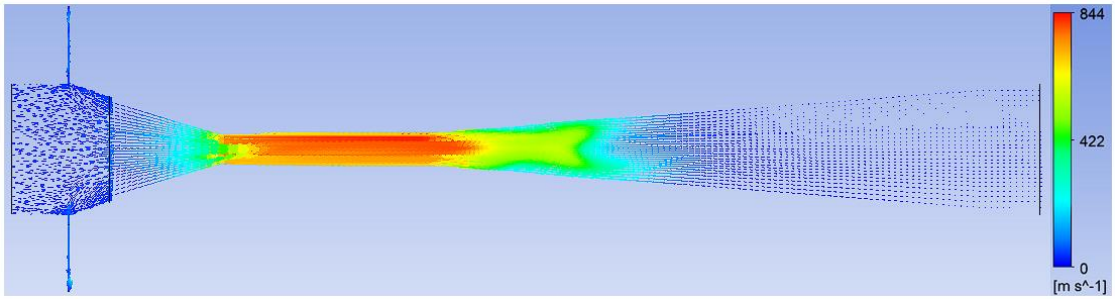
Buna göre **Şekil 3.38** (a)'da 0,001 kg/s su debisinde maksimum hız değeri görüldüğü üzere 838 m/s olarak gösterilmiştir. **Şekil 3.38** (b)'de 0,005 kg/s debi değerinde ise 837 m/s, **Şekil 3.38** (c)'de 0,019 kg/s debide 801 m/s, **Şekil 3.38** (d)'de 0,038 kg/s debide 779 m/s, **Şekil 3.38** (e)'de 0,075 kg/s debide 775 m/s olarak gösterilmiştir. Aşağıda görüldüğü üzere debi artışında boğaz bölgesinde hız değerleri azalmaktadır [45].



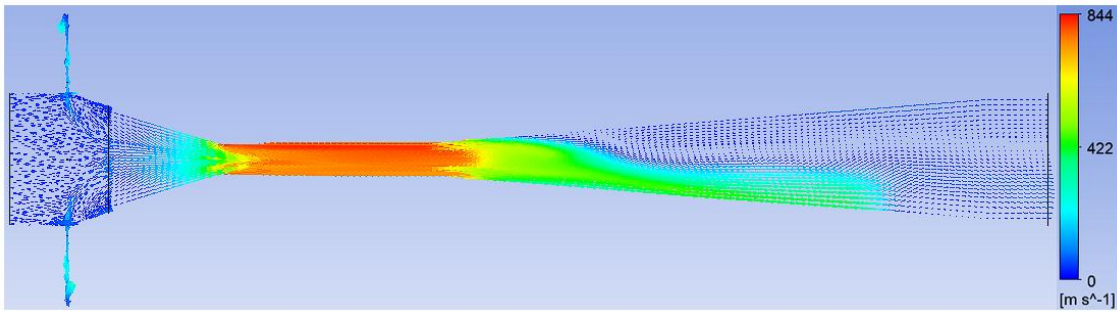
(a)



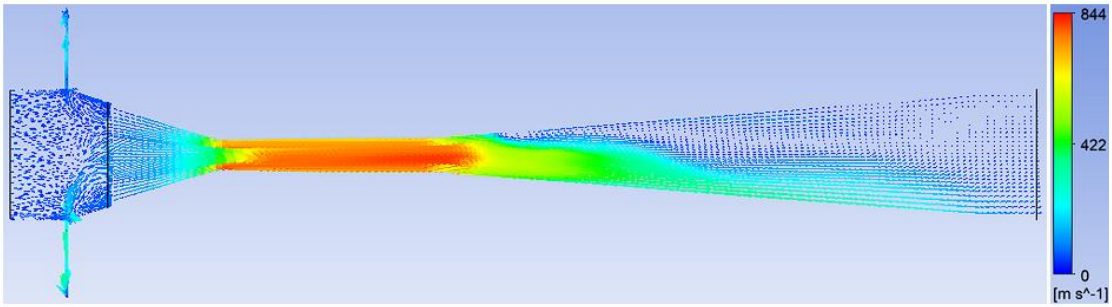
(b)



(c)

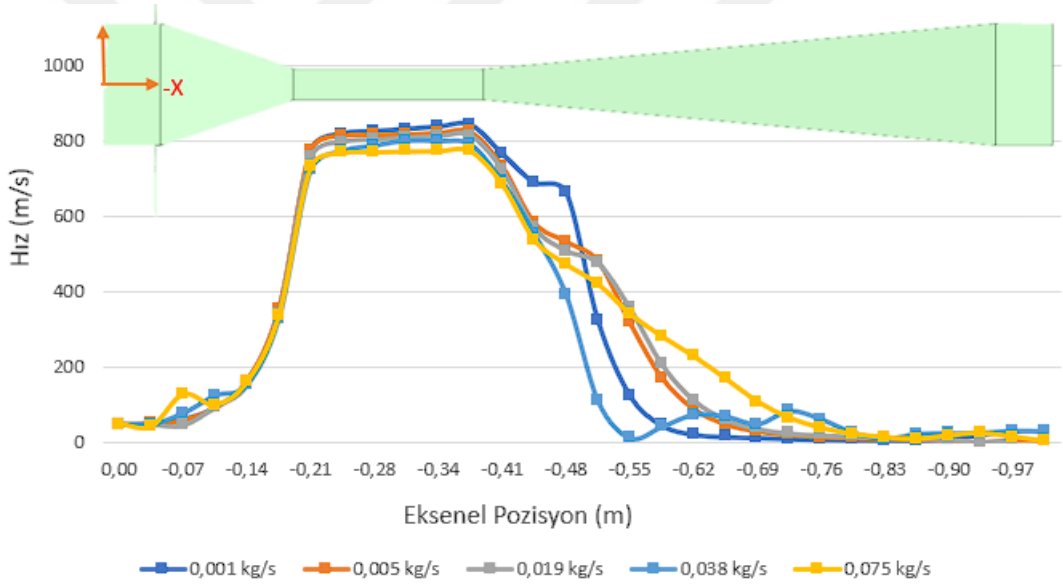


(d)



Şekil 3.38 50 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız

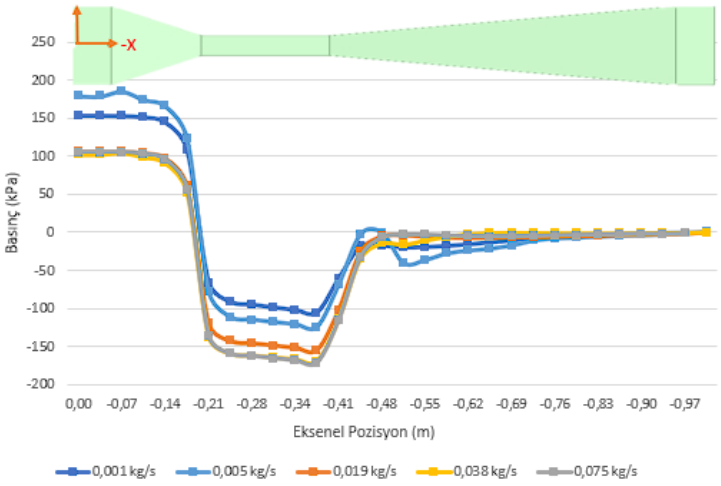
Şekil 3.38'de gösterildiği üzere 50 m/s su debi değerinde kare kesitli yıkayıcıda maksimum hız değerleri 5 farklı debide gösterilmiştir. Boğaz bölgesinde en yüksek hız değeri 0,001 kg/s su debisi değerinde 839 m/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.39 50 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız

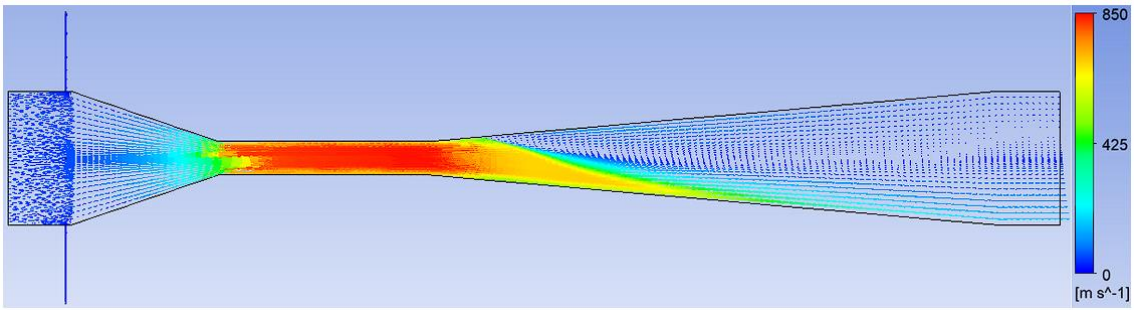
Şekil 3.40'da görüldüğü üzere 5 farklı su debisinde basınç düşüşü sırasıyla 0,001 kg/s su debisinde basınç düşüşü görüldüğü üzere -124 kPa olarak gösterilmiştir. 0,005 kg/s debi değerinde ise -154 kPa, 0,019 kg/s debide -155 kPa, 0,038 kg/s debide -159 kPa, 0,075 kg/s debide -171 kPa olarak hesaplanmıştır. Kare kesitli gaz yıkayıcılarda basınç düşüşleri de daire kesitli gaz yıkayıcılar da olduğu gibi su debisi ile ilişkilidir. Aşağıdaki grafikte de görüldüğü üzere maksimum basınç düşüşü 0,075 kg/s debide hesaplanmıştır.

Su debi artışının kare kesitli venturi geometride basınç düşüşü arttığı görülmektedir [19] [44].



Şekil 3.40 50 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç

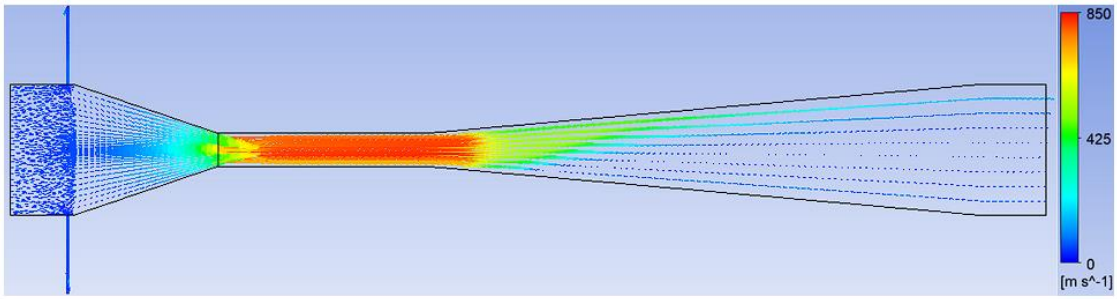
Aşağıdaki şekillerde ise kare kesitli yıkayıcıda 50 m/s hava girişinde 5 farklı su debisi için hız profilleri gösterilmiştir. Aynı değerdeki hava girişinde debi artışı gaz yıkayıcı da boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değerini azaltmaktadır [45]. **Şekil 3.41** (a)'da oluşan maksimum hız boğaz bölgesinde 839 m/sn olarak hesaplanmıştır. **Şekil 3.41** (b)'de ise 0,005 kg/s debi değerinde maksimum hız azalarak 825 m/s olarak hesaplanmıştır.



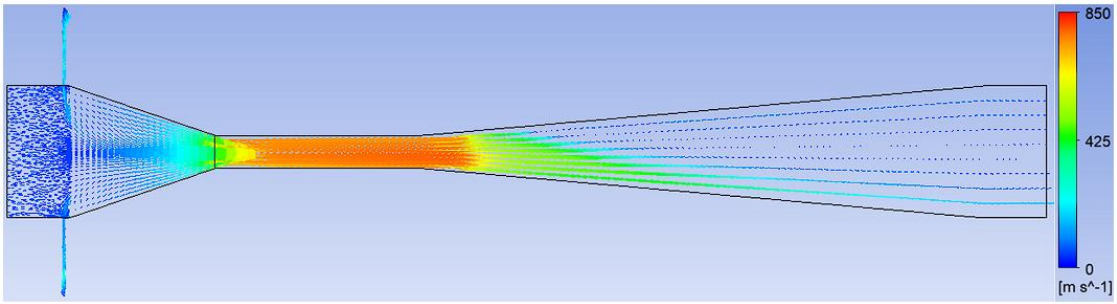
(a)

Artan su debisi değerleriyle, boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değerleri biribirine ters orantıda olduğu aşağıdaki verilen şekillerden de görülmektedir. **Şekil 3.41** (b)'de 0,005 kg/s su debisi değerinde oluşan hız 825 m/s iken **Şekil 3.41** (c)'de 0,019 kg/s debi değerinde 814 m/s olarak oluşan maksimum hız hesaplanmıştır. **Şekil 3.41** (d)'de 0,038 kg/s debi ile gaz yıkayıcı da oluşan maksimum hız değeri ise önceki debilere nazaran

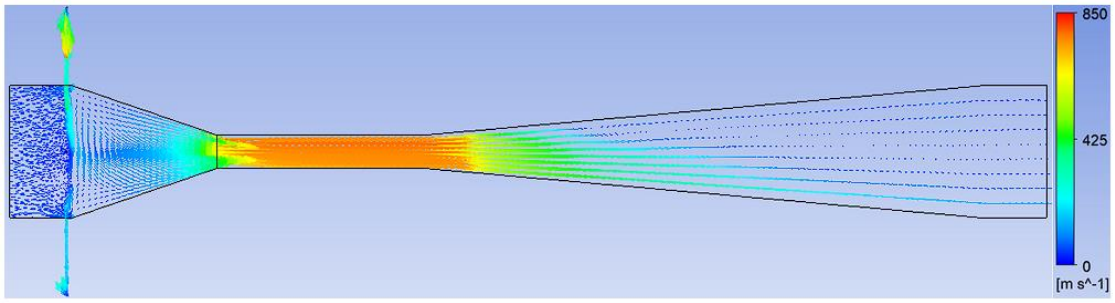
azalarak 802 m/s'ye düşmüştür. 0,075 kg/s su debisinde oluşan maksumum hız değeri ise **Şekil 3.41** (e)'de 775 m/s olarak hesaplanarak gösterilmiştir.



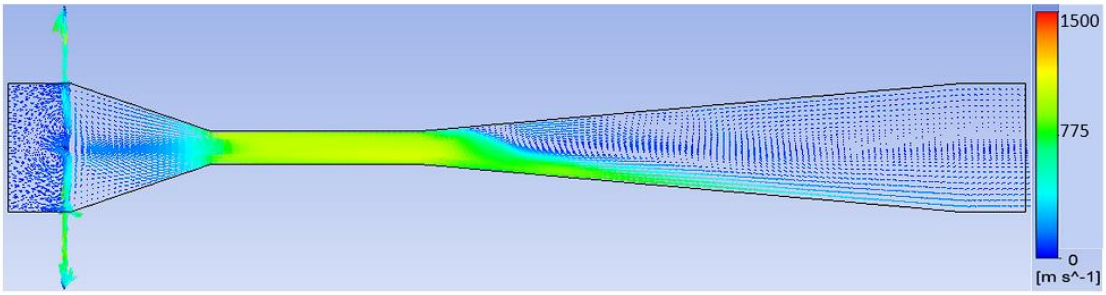
(b)



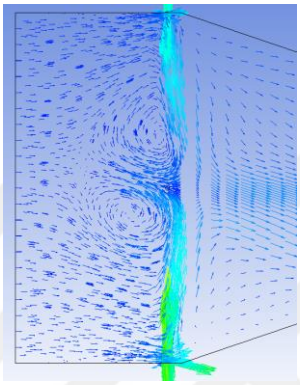
(c)



(d)



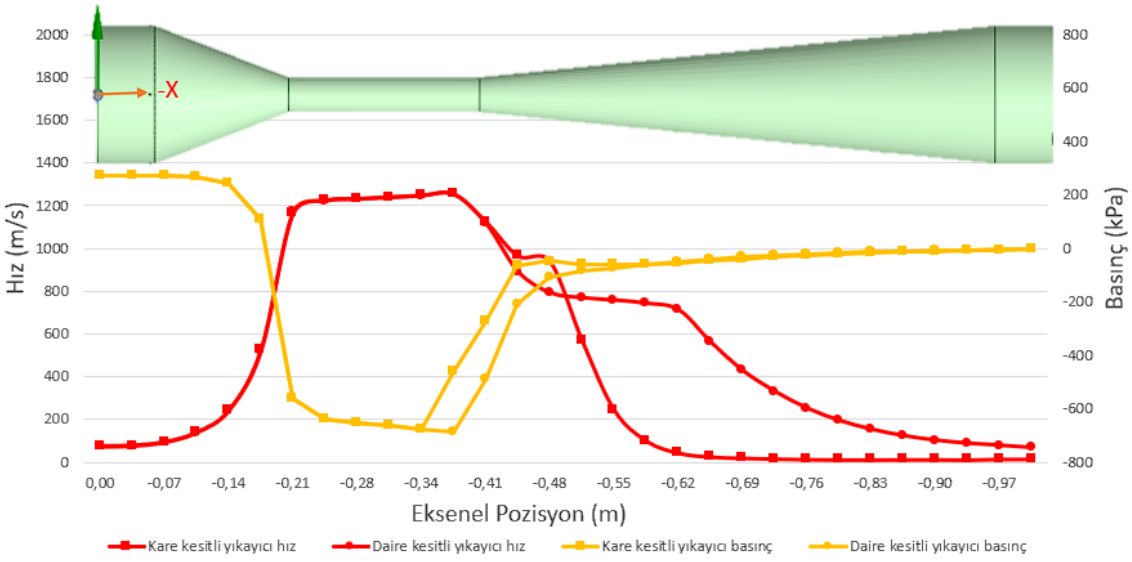
(e)



(f)

Şekil 3.41 50 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız (f) 0,075 kg/s debide giriş vektörü

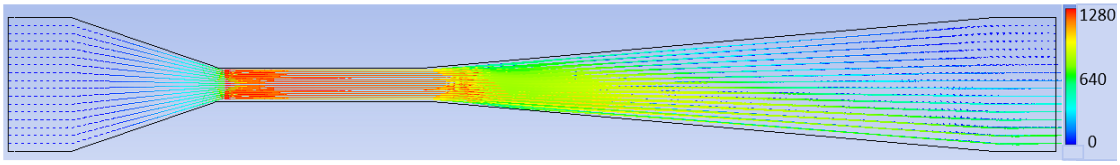
50 m/s hızındaki hava girişinin ardından hız değeri 75 m/s'ye yükseltilerek basınç ve hız değerleri incelenerek farklı hava ve su debisinde birbirinden farklı kesitte kare ve daire geometrileri incelenerek çalışmaya devam edilmiştir. İlk olarak herhangi bir su debisi gönderilmeden yalnız 75 m/s hava hızında aynı hidrolik çapa sahip geometriler incelenerek basınç ve hız değerleri hesaplanmış ve aynı grafik içerisinde hem basınç hem de hız değerleri gösterilmiştir. **Şekil 3.42**'de 1278 m/s olarak her iki kestin de boğaz bölgesinde ulaştığı maksimum hız olarak gösterilmiştir.



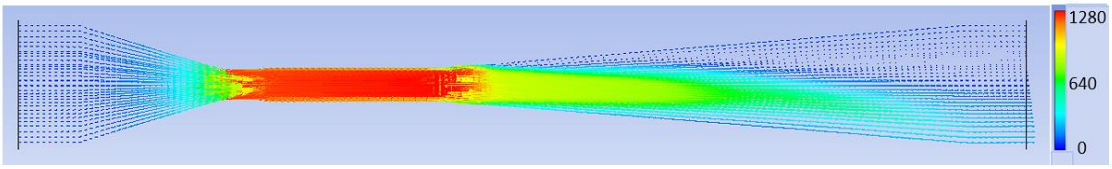
Şekil 3.42 75 m/s yalnız hava hızında kare ve daire kesitli yıkayıcıda hız

Şekil 3.42'de ise basınç düşüşleri verilmiştir. Buna göre daire kesitli yıkayıcının basınç düşüşü kare kesitliye göre daha büyük olduğu da görülmektedir. Her iki kesitli yıkayıcıda oluşan tek fazda yalnızca hava gönderildiği durumda oluşan maksimum statik basınç düşüşü daire kesitli ve kare kesitli gaz yıkayıcıda -685 kPa olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.43 (a)'da tek faz girişinde daire gaz yıkayıcıda hız profili gösterilmektedir. **Şekil 3.43** (b)'de kare kesitli venturi gaz yıkayıcılarda tek fazda iken hız profili gösterilmiştir.



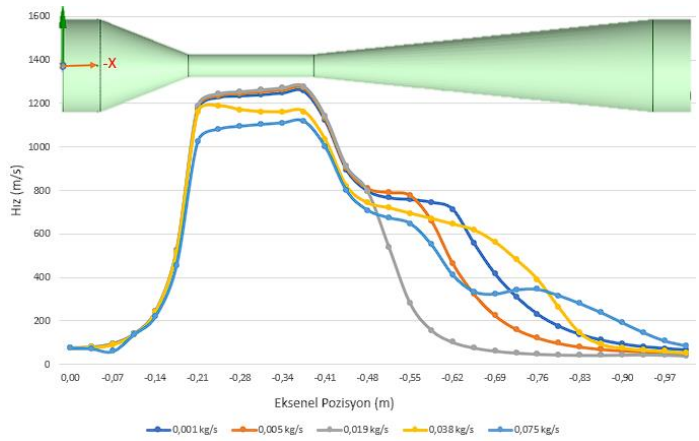
(a)



Şekil 3.43 75 m/s yalnız hava hızında (a) daire ve (b) kare kesitli yıkayıcıda hız

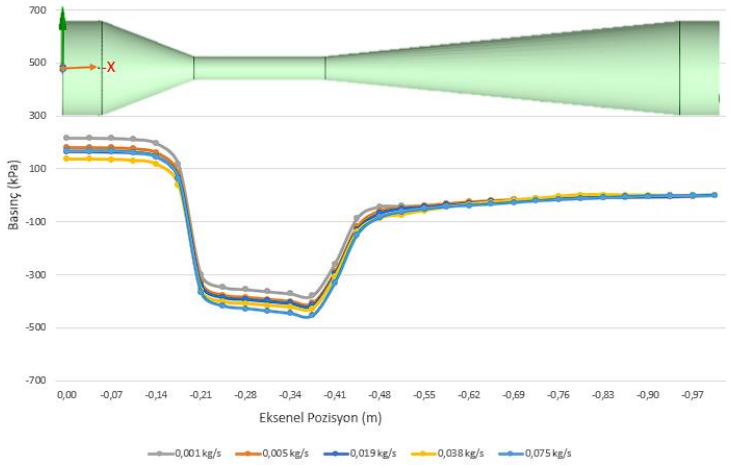
Şekil 3.44'de verilen grafikte ise farklı su debi değerlerinde 75 m/s hava girişinde 5 farklı su debisi için hız profilleri görülmektedir. Gaz yıkayıcıya gönderilen su debi değeri

arttırıldığında boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değerlerinin azaldığı da grafikten görülmektedir.



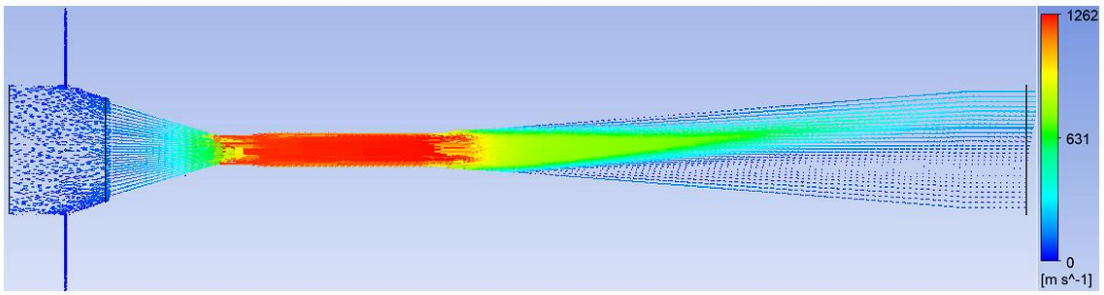
Şekil 3.44 75 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı debilerde hız

Tek fazda su olmadan sadece hava gönderilerek gösterilen hız profillerinin ardından 5 farklı su debisinde hız **Şekil 3.44**'de gösterilmiştir. Su debi artışıyla birlikte boğaz bölgesindeki maksimum hız değerlerinin düştüğü görülmektedir [45]. Basınç düşüşleri ise artan su debisi değerleri ile paralel bir biçimde düştüğünü **Şekil 3.45**'te gösterilmiştir. **Şekil 3.45**'te görüldüğü üzere 5 farklı debide basınç düşüşü sırasıyla 0,001 kg/s debide basınç düşüşü görüldüğü üzere -378 kPa olarak gösterilmiştir. 0,005 kg/s su debisi değerinde ise -407 kPa, 0,019 kg/s su debisinde -413 kPa, 0,038 kg/s debide -427 kPa, 0,075 kg/s debide -454 kPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre su debisi artışı daire kesitli venturi geometride basınç düşüşü arttığı görülmektedir [19] [44]. Buna göre en yüksek basınç düşüşü 0,075 kg/s debi değeri ile -454 kPa olarak gösterilmiştir.

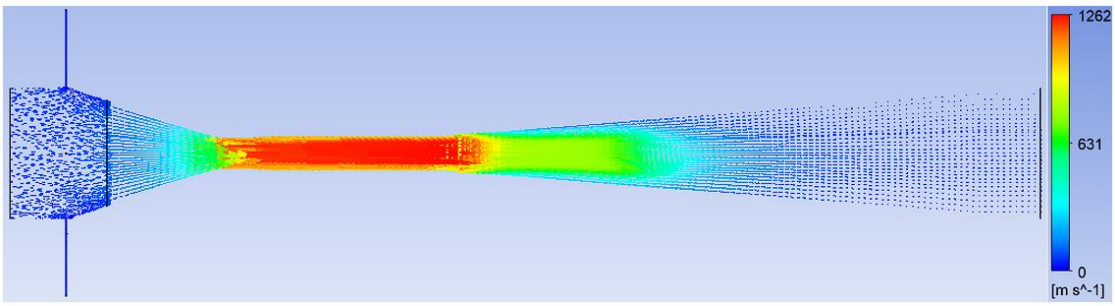


Şekil 3.45 75 m/s hava girişinde daire kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç

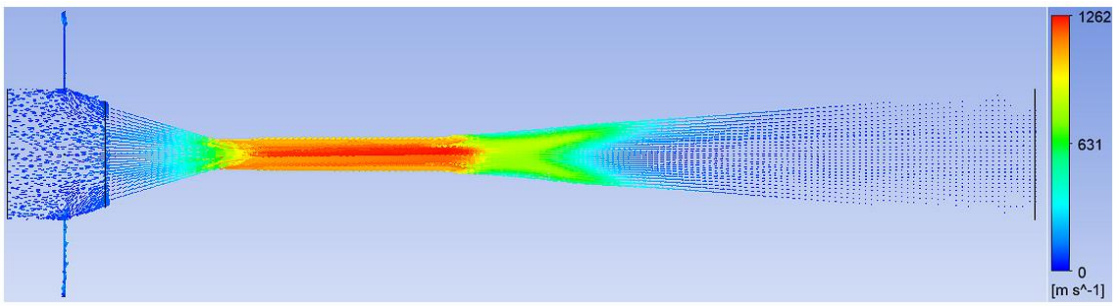
Daire kesitli gaz yıkayıcılarda 5 farklı su debisi değerindeki hız profilleri gösterilmiştir. En yüksek hız değeri boğaz bölgesinde 0,001 kg/s su debisinde 1270 m/s olarak hesaplanarak **Şekil 3.46** (a)'da gösterilmiştir. **Şekil 3.46** (b)'de boğaz bölgesindeki hız ise 0,005 kg/s debinin artmasıyla birlikte 1256 m/s olarak hesaplanmıştır. **Şekil 3.46** (c)'de 0,019 kg/s su debi değerinde oluşan maksimum hızın 1255 m/s, 0,038 kg/s debi değerinde oluşan maksimum hız ise **Şekil 3.46** (d)'de 1187 m/s olarak hesaplanmıştır. **Şekil 3.46** (e)'de ise 1117 m/s maksimum hız değeri olarak hesaplanmış ve gösterilmiştir.



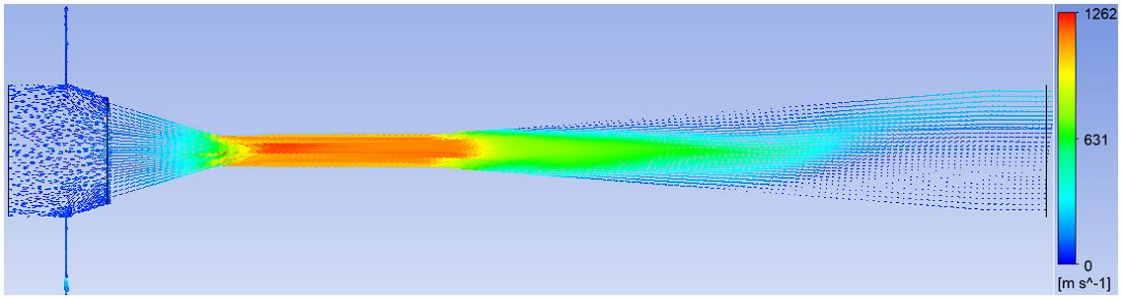
(a)



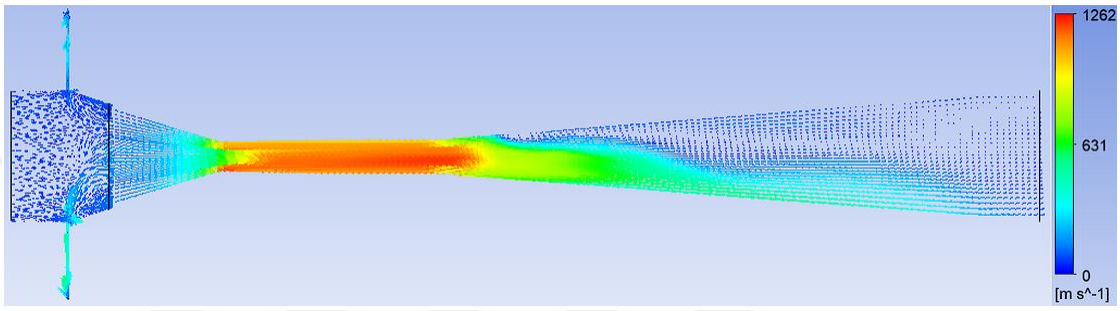
(b)



(c)

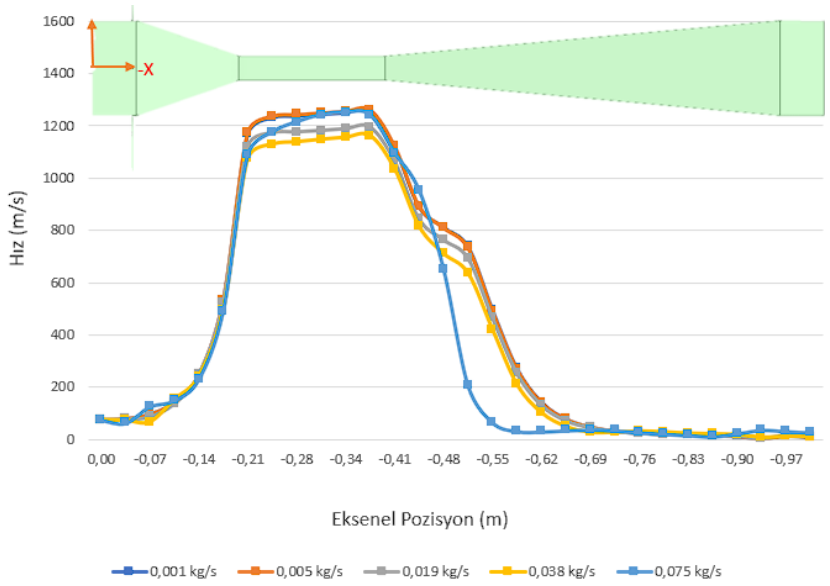


(d)



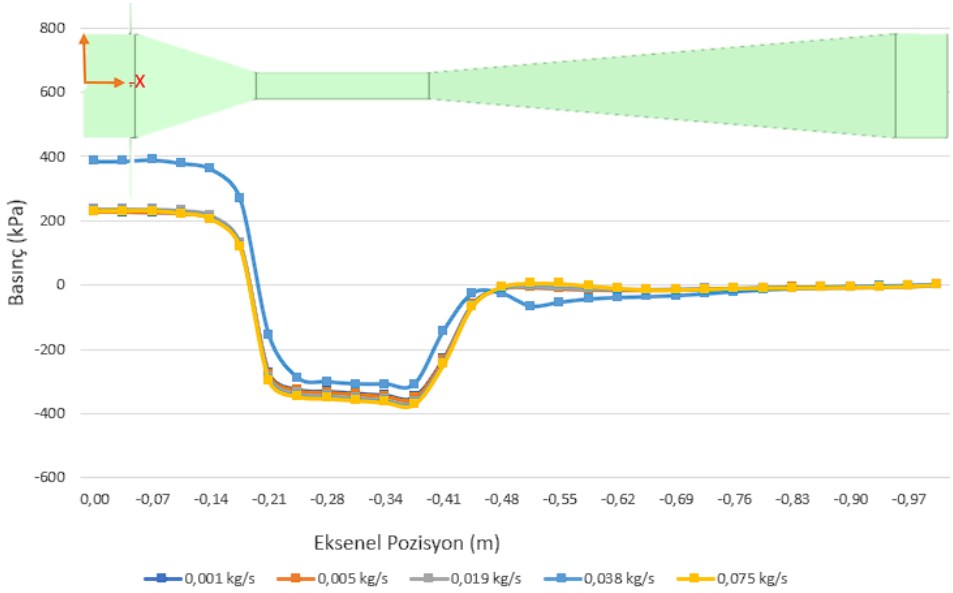
Şekil 3.46 75 m/s hava hızında daire kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız

Daire kesitli gaz yıkayıcı incelendikten sonra kare kesitli yıkayıcı için de 5 farklı su debisinde 75 m/s hava hızı gönderilerek hız profilleri ve basınç düşüşleri incelenmiştir. **Şekil 3.47**'de farklı debiler için hız profilleri gösterilmiştir. Artan su debis, ile boğaz bölgesinde oluşan maksimum hızı düştüğü görülmektedir. Kare kesitli gaz yıkayıcılarda basınç düşüşü ise gösterilmiştir. Buna göre 0,001 kg/s su debisinde basınç düşüşü -309 kPa olarak hesaplanmıştır. Artan su debisi ile birlikte sırasıyla 0,005 kg/s debi için -352 kPa, 0,019 kg/s debi değerinde -362 kPa, 0,038 kg/s debide ise -366 kPa, 0,075 kg/s debide -370 kPa olarak hesaplanmıştır.



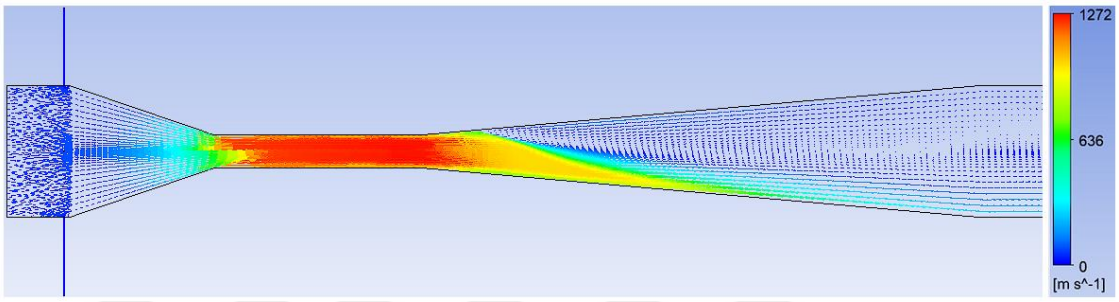
Şekil 3.47 75 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde hız

Şekil 3.48'de görüldüğü üzere 5 farklı su debisinde basınç düşüşü sırasıyla 0,001 kg/s debide basınç düşüşü görüldüğü üzere -309 kPa olarak gösterilmiştir. 0,005 kg/s su debi değerinde ise -352 kPa, 0,019 kg/s debide -362 kPa, 0,038 kg/s debide -366 kPa, 0,075 kg/s debide -370 kPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre su debi artışı kare kesitli venturi geometride basınç düşüşü arttığı görülmektedir [19] [44].

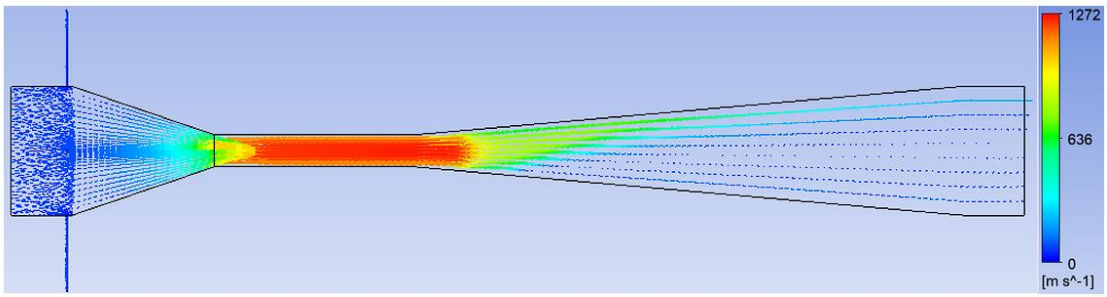


Şekil 3.48 75 m/s hava girişinde kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç

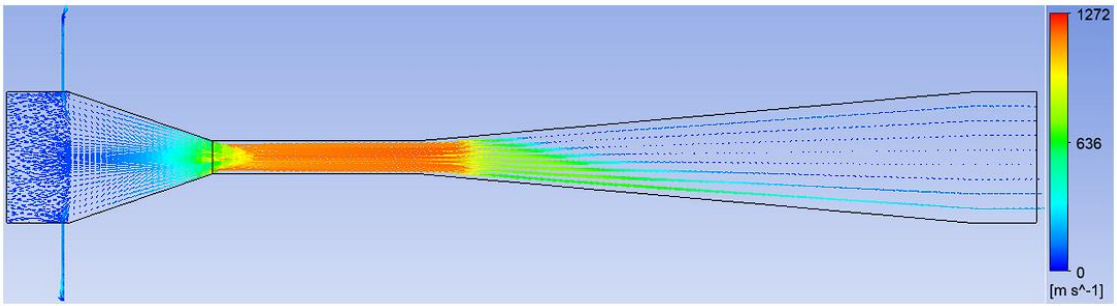
Hız profilleri aşağıdaki görsellerde 5 farklı su debisi için sırasıyla gösterilmiştir. **Şekil 3.49** (a)'da 0,001 kg/s su debisi için boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değeri 1256 m/s olarak hesaplanmıştır.0,005 kg/s debi için ise **Şekil 3.49** (b)'de gösterilerek 1255 m/s hesaplanmıştır.0,019 kg/s debide ise hesaplanan maksimum hız 1251 m/s olarak **Şekil 3.49** (c)'de gösterilmiştir. 0,038 kg/s debide maksimum hız **Şekil 3.49** (d)'de gösterilmiştir. Hesaplanan hız değeri 1193 m/s olarak gösterilmiştir. 0,075 kg/s debide hız değeri 1161 m/s olarak hesaplanmıştır ve **Şekil 3.49** (e)'de gösterilmiştir.



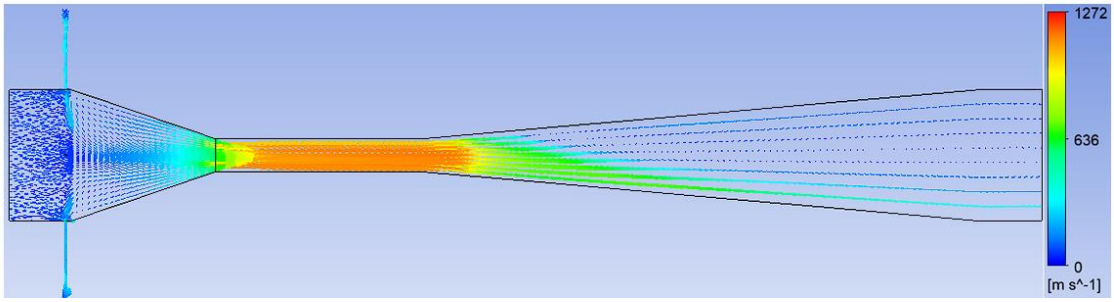
(a)



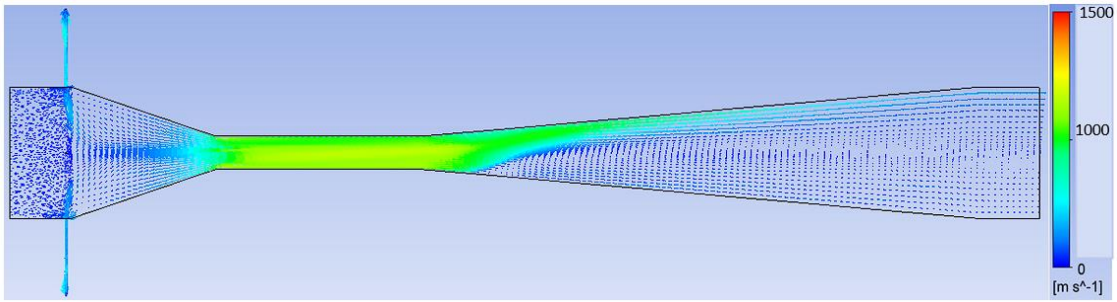
(b)



(c)



(d)



Şekil 3.49 75 m/s hava hızında kare kesitli yıkayıcıda (a) 0,001 kg/s (b) 0,005 kg/s (c) 0,019 kg/s (d) 0,038 kg/s (e) 0,075 kg/s su debilerinde hız

Hız profillerinin gösterilmesinin ardından **Tablo 3.5**'de ise kare ve daire kesitli gaz temizleyicilerinin boğaz bölgesinde oluşan maksimum hızları tablo şeklinde gösterilmiştir. Hız tablosunda görüldüğü üzere kare ve daire kesitli yıkayıcılarda yıkayıcıya gönderilen su debi değerlerinin artması ile boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değeri azalmaktadır [45]. Örneğin 0,001 kg/s su debisinde 16,5 m/s hava hızı gönderilen kare yıkayıcıda oluşan maksimum hız 279 m/s iken 0,075 kg/s su debisinde maksimum hız 190 m/s olarak hesaplanmıştır. Kare ve daire kesitli yıkayıcıların aynı su debisi ve aynı hava hızı gönderildiğinde boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değerleri ise birbirlerine yakın değerlerde oluştuğu görülmektedir.

Tablo 3.5 Farklı hava hızında oluşan farklı su debilerinde kare ve daire kesitli yıkayıcıda maksimum hız değerleri

HIZ (m/s)								
HIZ / DEBİ	Kare Kesitli Gaz Yıkayıcı Hava Girişi				Daire Kesitli Gaz Yıkayıcı Hava Girişi			
	16,5 m/s	33 m/s	50 m/s	75 m/s	16,5 m/s	33 m/s	50 m/s	75 m/s
0,001 kg/s	279	555	839	1255	279	555	838	1270
0,005 kg/s	269	542	825	1255	279	554	837	1256
0,019 kg/s	267	537	814	1251	260	519	801	1255
0,038 kg/s	243	519	802	1193	234	508	779	1187
0,075 kg/s	190	460	775	1161	220	416	775	1117

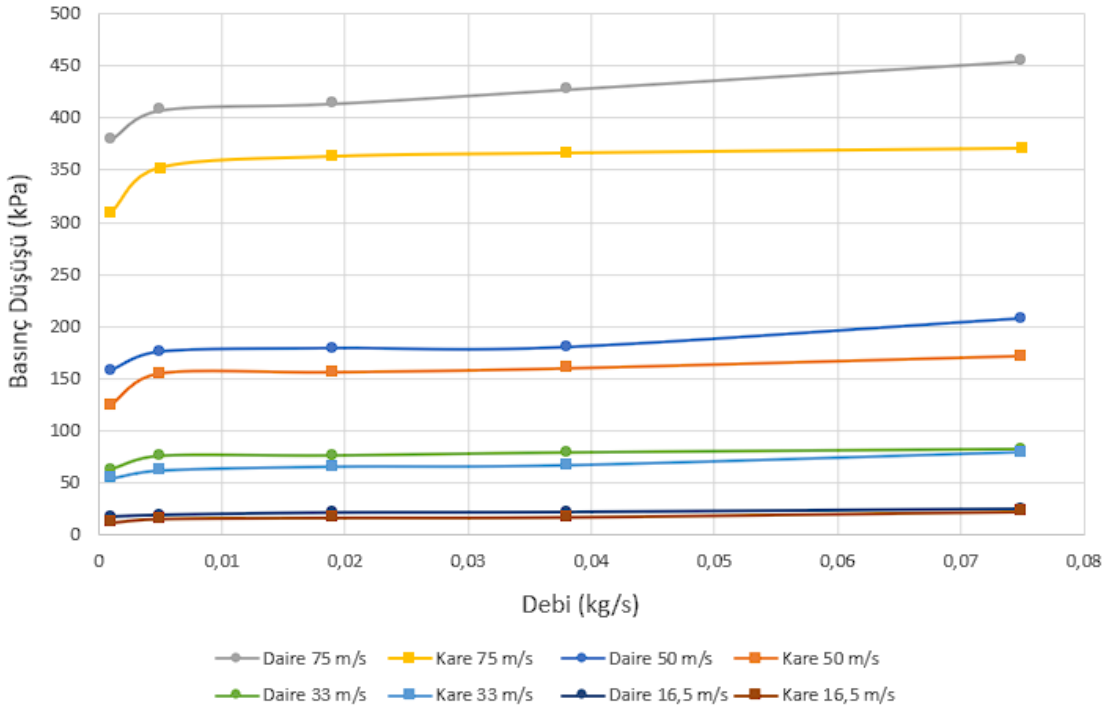
İncelenen hız değerlerinin ardından **Tablo 3.6**'da ise kare ve daire kesitli yıkayıcıların basınç değerleri hesaplanmıştır. Buna göre kare ve daire kesitli yıkayıcılarda yıkayıcıya gönderilen su debisinin değerlerinin artması ile oluşan maksimum basınç düşüşü değerleri artmaktadır [19] [44]. Örneğin 0,001 kg/s su debisinde 16,5 m/s hava hızı gönderilen kare yıkayıcıda oluşan maksimum basınç düşüşü 12,3 kPa iken 0,075 kg/s su debisinde maksimum basınç düşüşü -22,3 kPa olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.6 Farklı hava hızında oluşan farklı su debilerinde kare ve daire kesitli yıkayıcıda boğaz bölgesinde statik basınç (kPa)

BASINÇ (kPa)								
HIZ / DEBİ	Kare Kesitli Gaz Yıkayıcı Hava Girişi				Daire Kesitli Gaz Yıkayıcı Hava Girişi			
	16,5 m/s	33 m/s	50 m/s	75 m/s	16,5 m/s	33 m/s	50 m/s	75 m/s
0,001 kg/s	12,3	54,6	124,4	309	17,3	62,4	158	378,6
0,005 kg/s	15,8	62	154,8	352,1	19	75,8	175,9	407,4
0,019 kg/s	16,7	65,6	155,9	362,8	21,2	76,1	179,2	413,8
0,038 kg/s	17,3	66,9	159,7	366	21,8	79,1	180,2	427,6
0,075 kg/s	22,3	78,9	171,6	370,5	24,9	82,5	207,8	454,9

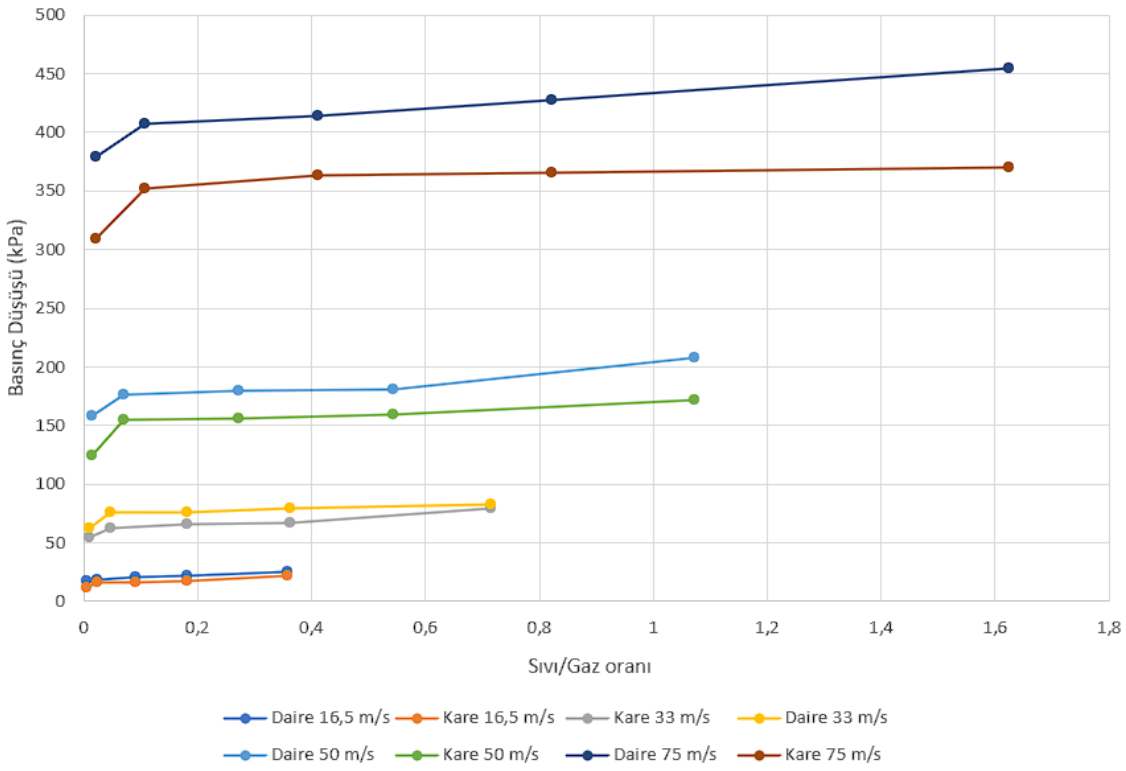
Kare ve daire kesitli yıkayıcıların basınç düşüşlerinin karşılaştırılmalı olarak farklı su debilerindeki durumu aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. **Şekil 3.50**'de 16,5 m/s hava hızı girişinde 5 farklı su debisindeki basınç düşüşleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. 33

m/s, 50 m/s, 75 m/s hava hızı girişinde basınç düşüşleri verilmiştir. Görüldüğü üzere gaz hızı artarsa basınç düşüşü de artar [19].



Şekil 3.50 5 farklı hava hızında daire ve kare kesitli yıkayıcıda farklı su debilerinde basınç düşüşü

Şekil 3.51'de ise daire ve kare kesitli gaz yıkayıcıya gönderilen su debisinin gönderilen hava debisine oranındaki basınç düşüşleri hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere daire kesitli yıkayıcıların basınç düşüşleri kare kesitli gaz yıkayıcının basınç düşüşünden daha büyüktür. Her iki gaz yıkayıcıda (kare ve daire kesitli) gönderilen hava hızı artışıyla basınç düşüşü değerinin arttığı da görülmektedir. İki farklı geometride yüksek hava girişi hızlarında basınç düşüşü değerlerinin arasındaki sapmanın arttığı görülmektedir [19].



Şekil 3.51 Farklı hava hızlarında daire ve kare kesitli gaz yıkayıcılarda basınç düşüşünün sıvı/gaz oranı

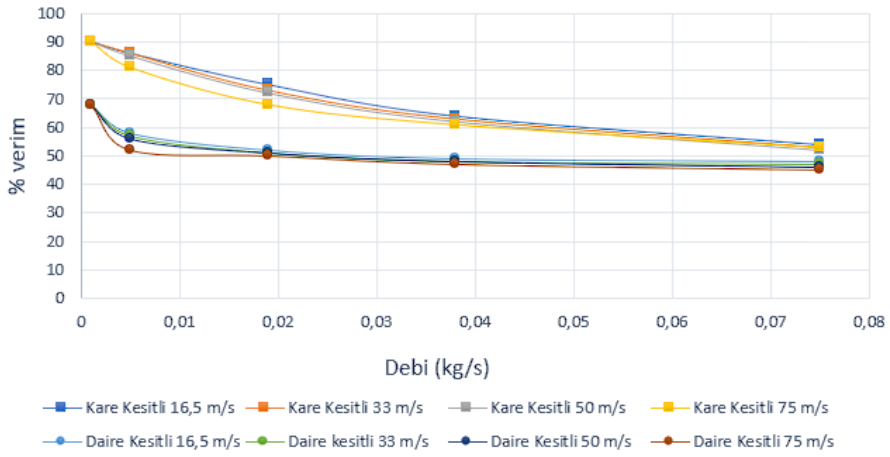
Basınç ve hız değerlerinin gösterilmesinin ardından kare ve daire geometrilerinin verim değerleri

Tablo 3.7'da gösterilmiştir. Buna göre verim değerleri gaz yıkayıcıya gönderilen hava hızı artması ve gönderilen debi azalmasıyla birlikte gaz yıkayıcı verimi artmaktadır [5]. Örneğin tabloda görüldüğü üzere 0,075 kg/s debi değerinde 16,5 m/s hava hızı gönderildiğinde kare kesitli yıkayıcıya verim değeri %54 iken, debi değeri azaltılıp, gaz yıkayıcıya gönderilen debi 0,001 kg/s'ye düşürüldüğünde verim değeri %90'a ulaşmaktadır. Daire kesitli yıkayıcıda örneğin 0,075 kg/s debi değerinde 16,5 m/s hava hızı gönderildiğinde kare kesitli yıkayıcıya verim değeri %48 iken, debi değeri azaltılıp, gaz yıkayıcıya gönderilen debi 0,001 kg/s'ye düşürüldüğünde verim değeri %68'e ulaşmaktadır. Aşağıdaki tabloda ise verimin debi ve hava hızı karşısındaki değerleri gösterilmiştir. Kare ve daire kesitli gaz yıkayıcıların verim değerleri karşılaştırılarak yıkayıcı verimi açıklanarak kare yıkayıcının daha verim değerinin yüksek olduğu HAD çalışması ile gösterilmiştir.

Tablo 3.7 Farklı hava girişinde farklı debilerde kare ve daire kesitli yıkayıcıda verim

Verim %						
Geometri	Debi / Hız (m/s)	0,001 (kg/s)	0,005 (kg/s)	0,019 (kg/s)	0,038 (kg/s)	0,075 (kg/s)
Kare Kesitli	16,5	90	86	75	64	54
	33	90	86	73	63	53
	50	90	85	72	62	52
	75	90	81	68	61	53
Daire Kesitli	16,5	68	58	52	49	48
	33	68	57	51	48	47
	50	68	56	51	48	46
	75	68	52	50	47	45

Maksimum hız boğaz bölgesinde her zaman oluşur ancak debi artışı boğaz bölgesindeki hızı azaltır. Farklı debi ve hava hızlarında daire ve kare kesitli venturilerin verim değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. **Şekil 3.52**'de kare ve daire kesitli gaz yıkayıcıda 4 farklı hava girişi hızında 0,001-0,005-0,019- 0,038- 0,075 kg/s su debilerindeki verim değerleri gösterilmiştir. %90'dan başlayan verim değerleri debi artışıyla %52'ye kadar düştüğü görülmektedir. Her iki grafikten de görüldüğü üzere debi artışı ile verim azalmaktadır [5]. Daire kesitli yıkayıcıda %68'den başlayan verim değerleri debi artışıyla %45'e kadar düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.52 Yıkayıcılardaki verim değerleri

4 SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Literatürdeki daire ve kare kesitli gaz yıkayıcılar incelenmiş, literatürdeki çalışmalar kullanılarak HAD analizleri yapılmıştır. Literatürdeki çalışmaların sonuçları elde edilerek sonuçlar gösterilmiştir. HAD modeli yaklaşımının doğruluğu bu yöntemle yapıldıktan sonra, yeni gaz yıkayıcı geometrisindeki ideal lülenin konumu HAD analizi yardımıyla belirlenmiştir. Lüle konumunun belirlenmesinin ardından literatürdeki kare ve daire kesitli gaz yıkayıcılar incelenerek iki özdeş hidrolik çapta ve uzunlukta kare ve daire kesitli yıkayıcı tasarlanmıştır. Yapılan bu iki gaz yıkayıcı tasarımı farklı debi ve farklı hava hızları sınır şartı belirlenerek HAD analizleri yapılmıştır.

HAD analizlerinde elde edilen sonuçlara göre;

- Birbirinden farklı kesitteki geometri yıkayıcılarda su debisi olmadığında boğaz bölgesindeki maksimum hız değerleri birbirine yakındır ancak su debisi gönderilmesi durumunda boğaz bölgesinde oluşan maksimum hız değerleri farklı oluşmaktadır.
- Özdeş boy ve çaptaki kare ve daire kesitlerindeki geometrilerin hız profili ve basınç düşüşü etkisi farklıdır. Daire kesitli gaz yıkayıcılarda basınç düşüşü, kare kesitli gaz yıkayıcıya göre daha fazla olmaktadır.
- Yıkayıcı veriminin gönderilen su debisine, hava hızına, geometri kesitine gibi birçok farklı değişkenden kaynaklı olarak değiştiği gösterilmiştir.
- Lülelerden gönderilen debi arttıkça temizleme veriminin azaldığı görülmektedir.
- Gaz temizleyiciye giren hava hızının artması durumunda da verimin azaldığı görülmektedir.
- Aynı su debisi gönderilen kare veya daire kesitli yıkayıcıda verim değeri gaz hızı artınca arttığı hesaplanmıştır.
- Daire kesitli yıkayıcıların kare kesitli yıkayıcılara göre aynı su debisi ve hava girişinde basınç düşüşü ve verim değerlerinin daha az olduğu da yapılan çalışmada gösterilmiştir.

Bu çalışmanın ötesinde ise kullanılan hava yerine kirletici gazın modellenmesi ve temizleyici sıvı olarak kullanılan suyun yerine ise glikol veya farklı bir temizleyici kullanılarak HAD analizlerinin yapılmasının literatüre katkı sağlayabileceği

düşünülmektedir. Venturi yıkayıcının HAD analizlerinde k-epsilon türbülans modeli yerine farklı türbülans modelleri kullanılabilir ve farklı debilerde daha fazla analiz de yapılarak literatüre katkı sunulabilir. Gaz yıkayıcılarda kullanım ekseninin yıkayıcı verimine etkisi incelenebilir, gaz yıkayıcı geometrilerinin kesitleri, toplam boyları değiştirilerek basınç düşüşü ve verim incelenebilir. Ayrıca venturi yıkayıcıların havaya gönderilecek olan zararlı parçacıkların deniz suyuna gönderilmesinin çevreye etkisi de incelenerek bu konuda venturi yıkayıcıların çevreye etkileri daha net olarak gösterilebilir.

KAYNAKÇA

[1] K. Rapor, “Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri,” 2021.

[2] D. Mussatti, P. Hemmer, and E. H. Pechan, “Section 6 Particulate Matter Controls Chapter 2 Wet Scrubbers for Particulate Matter.”

[3] Rzero web sitesi, “Basit Filtre.” Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: https://rzero.com/roi/

[4] Alphair web sitesi, “Elektrostatik çökeltme yöntemi.” Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: https://www.alphairesp.com/electrostatic-precipitator-application/

[5] H. Khadra, R. Kouider, N. T. Tayeb, A. Al-Kassir, and J. P. Carrasco-Amador, “Numerical Simulation of the Cleaning Performance of a Venturi Scrubber,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041531.

[6] V. G. Guerra, R. Béttega, J. A. S. Gonçalves, and J. R. Coury, “Pressure drop and liquid distribution in a venturi scrubber: Experimental data and CFD simulation,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 51, no. 23, pp. 8049–8060, Jun. 2012, doi: 10.1021/ie202871q.

[7] S. Yang, X. Zhao, W. Sun, J. Yuan, and Z. Wang, “Effect of ring baffle configuration in a self-priming venturi scrubber using CFD simulations,” *Particuology*, vol. 47, pp. 63–69, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.partic.2019.02.003.

[8] Ergil Web sitesi, “Ergil ıslak gaz temizleyici.” Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: https://ergil.com/scrubber-systems/wet-scrubber/

[9] D. Mussatti, P. Hemmer, and E. H. Pechan, “Section 6 Particulate Matter Controls Chapter 2 Wet Scrubbers for Particulate Matter.”

[10] Ç. Karatuğ, Y. Arslanoğlu, and C. Guedes Soares, “Feasibility Analysis of the Effects of Scrubber Installation on Ships,” *J Mar Sci Eng*, vol. 10, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/jmse10121838.

[11] Z. Nikopoulou, “Incremental costs for reduction of air pollution from ships: a case study on North European emission control area,” *Maritime Policy and*

Management, vol. 44, no. 8, pp. 1056–1077, Nov. 2017, doi: 10.1080/03088839.2017.1342878.

[12] Splash247 web sitesi, “Scrubber ile donatılan gemi sayısı.” Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: https://splash247.com/number-of-scrubber-equipped-vessels-to-grow-despite-drop-in-fittings-last-year/

[13] Marine Insıght, “Gaz yıkayıcı türleri.” Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/

[14] Saferack Web sitesi, “Türlerine göre yıkayıcılar.” Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: https://www.saferack.com/glossary/air-scrubber/

[15] Senmatic web sitesi, “Döngü türlerine göre yıkayıcılar.” Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: https://www.senmatic.com/sensors/knowledge/marine-scrubbers

[16] ICCT, “ICCT Report.” [Online]. Available: https://theicct.org/publications/global-scrubber-discharges-Apr2021

[17] S. Viswanathan, A. W. Gnyp, and C. C. St. Pierre, “Annular flow pressure drop model for pease–anthony-type venturi scrubbers,” *AIChE Journal*, vol. 31, no. 12, pp. 1947–1958, 1985, doi: 10.1002/aic.690311204.

[18] E. J. Giroth and E. B. Ang, “The Design and Evaluation of Exhaust Gas Cleaning System Equipped with SOx Scrubber,” in *2022 IEEE 13th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 25–29. doi: 10.1109/ICMIMT55556.2022.9845278.

[19] M. Bal and B. C. Meikap, “Prediction of hydrodynamic characteristics of a venturi scrubber by using CFD simulation,” *S Afr J Chem Eng*, vol. 24, pp. 222–231, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.sajce.2017.10.006.

[20] K. Brown, W. Kalata, and R. Schick, “Optimization of SO2 scrubber using CFD modeling,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 170–180. doi: 10.1016/j.proeng.2014.09.035.

[21] Joni *et al.*, “Evaluating the Application of Bubble Wet Scrubber Systems for Gas Cleaning in Gasification,” *Instrumentation Mesure Metrologie*, vol. 22, no. 1, pp. 21–27, Feb. 2023, doi: 10.18280/i2m.220103.

[22] S. C. Wang and D. Gabriela, “Filtering Analysis of a Wet Scrubber with Computational Fluid Dynamics Simulation,” in *Proceedings of the 4th IEEE Eurasia Conference on IoT, Communication and Engineering 2022, ECICE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 452–457. doi: 10.1109/ECICE55674.2022.10042826.

[23] V. G. Guerra, J. A. S. Gonçalves, and J. R. Coury, “Experimental investigation on the effect of liquid injection by multiple orifices in the formation of droplets in a Venturi scrubber,” *J Hazard Mater*, vol. 161, no. 1, pp. 351–359, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.101.

[24] Z. Luan, X. Liu, M. Zheng, and L. Zhu, “Numerical Simulation of Square Section Venturi Scrubber with Horizontal Spray,” in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2017, pp. 117–121. doi: 10.1016/j.procs.2017.03.066.

[25] M. Ali, C. Yan, Z. Sun, J. Wang, and H. Gu, “CFD simulation of dust particle removal efficiency of a venturi scrubber in CFX,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 256, pp. 169–177, 2013, doi: 10.1016/j.nucengdes.2012.12.013.

[26] A. Ulas, “Passive flow control in liquid-propellant rocket engines with cavitating venturi,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 17, no. 2, pp. 93–97, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2005.10.003.

[27] B. Hasan Tolga Gümü, “NUMERICAL INVESTIGATION OF CAVITATING FLOW IN VARIABLE AREA VENTURI ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY,” 2020.

[28] J. Manzano, C. V Palau, B. M. De Azevedo, G. V Do Bomfim, and D. V Vasconcelos, “GEOMETRY AND HEAD LOSS IN VENTURI INJECTORS THROUGH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS 1,” *Journal of the*

Brazilian Association of Agricultural Engineering, no. 3, pp. 482–491, 2016, doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p.

[29] H. O'Hern, T. Murphy, X. Zhang, J. Liburdy, and B. Abbasi, "A Design Method for Low-Pressure Venturi Nozzles," *Applied Mechanics*, vol. 3, no. 2, pp. 390–411, Jun. 2022, doi: 10.3390/applmech3020024.

[30] D. A. Wilson, K. Pun, P. B. Ganesan, and F. Hamad, "Geometrical Optimization of a Venturi-Type Microbubble Generator Using CFD Simulation and Experimental Measurements," 2021, doi: 10.3390/designs5.

[31] H. Shi, M. Li, P. Nikrityuk, and Q. Liu, "Experimental and numerical study of cavitation flows in venturi tubes: From CFD to an empirical model," *Chem Eng Sci*, vol. 207, pp. 672–687, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.07.004.

[32] A. M. Silva, "Numerical and Experimental Study of Venturi Scrubbers Simulation and Environmental Impact of Energy Systems View project thermal economical optimisation of CHP systems View project." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/259294959

[33] Y. Xu, Y. Zhao, and Z. Long, "Study on the key factors of wet gas metering overreading in standard venturi tube base on DPM," in *Applied Mechanics and Materials*, 2012, pp. 1693–1697. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.220-223.1693.

[34] M. Atmaca, B. Çetin, C. Ezgi, and E. Kosa, "CFD analysis of jet flows ejected from different nozzles," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 16, no. 3, pp. 940–945, Sep. 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctab022.

[35] Ansys Inc., "ANSYS Fluent Tutorial Guide," 2016. [Online]. Available: http://www.ansys.com

[36] N. V. Ananthanarayanan and S. Viswanathan, "Effect of nozzle arrangement on Venturi scrubber performance," *Ind Eng Chem Res*, vol. 38, no. 12, pp. 4889–4900, 1999, doi: 10.1021/ie9902131.

[37] M. Brunhart *et al.*, "Investigation of cavitation and vapor shedding mechanisms in a Venturi nozzle," *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 8, Aug. 2020, doi: 10.1063/5.0015487.

[38] A. Bolek and S. Bayraktar, “Flow and heat transfer investigation of a circular jet issuing on different types of surfaces,” no. September, 2019, doi: 10.1007/s12046-019-1226-6S.

[39] N. M. Zahari *et al.*, “Introduction of discrete phase model (DPM) in fluid flow: A review,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Nov. 2018. doi: 10.1063/1.5066875.

[40] S. N. Rudnlck, J. L. M. Koehler, K. P. Martln, D. Lelth, and D. W. Cooper$, “Particle Collection Efficiency in a Venturi Scrubber: Comparison of Experiments with Theory.”

[41] Z. Luan, X. Liu, M. Zheng, and L. Zhu, “Numerical simulation of square section venturi scrubber for biomass tar removal,” 2016.

[42] ASME, “AN AMERICAN NATIONAL STANDARD Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi,” 2017. Accessed: Apr. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/mfc-3m-measurement-fluid-flow-pipes-using-orifice-nozzle-venturi

[43] A. Baylar, M. Cihan Aydin, M. Unsal, and F. Ozkan, “NUMERICAL MODELING OF VENTURI FLOWS FOR DETERMINING AIR INJECTION RATES USING FLUENT V6.2,” 2009.

[44] P. Goel and A. K. Nayak, “Numerical investigation of aerosol collection efficiency in a venturi scrubber,” 2018. [Online]. Available: https://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org

[45] S. Ali *et al.*, “Experimental investigation of aerosols removal efficiency through self-priming venturi scrubber,” *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 52, no. 10, pp. 2230–2237, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.net.2020.03.019.

[46] M. A. Martins Costa *et al.*, “Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream,” 2005.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

Effects of the Nozzle Location on the Hydrodynamic Properties of a Venturi Type Scrubber, 3rd International Conference on Innovative Academic Studies,