

## Farklı Türbülans Modellerinin Daire ve Kare Kesitli Gaz Yıkayıcıların Hidrodinamik Performansları Üzerindeki Etkileri

*Effects of Different Turbulence Models on Hydrodynamic Performance of Circular and Square Section Scrubbers*

Furkan TÜRKÖĞLU<sup>1</sup>, Seyfettin BAYRAKTAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnş. ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, ıslak venturi tipi gaz temizleyiciler ele alınarak farklı türbülans modellerinin özdeş kare ve daire kesitli gaz temizleyicilerin hidrodinamik performansları üzerindeki etkileri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu kullanılarak incelenmiştir. Verifikasyon ve doğrulama çalışmaları yapılarak sonuçlar literatürdeki sayısal ve deneysel verilerle başarılı bir şekilde mukayese edilmiştir. Daha sonra iki farklı kesit geometrisine sahip gaz temizleyicilerin toplama verimi, basınç düşüşü ve hız dağılımları mukayese edilerek k-epsilon (Standart, Realizable ve RNG) ve k-omega (Standart ve SST) türbülans modellerinin venturi gaz temizleyicilerdeki performansları birbirleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve damlacık toplama verimi açısından Realizable k-epsilon türbülans modelinin diğer modellere nazaran daha başarılı olduğu ancak basınç dağılımlarını tahmininde tüm bu modellerin birbirlerine yakın bir sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Mukayese edilen daire ve kare kesitli özdeş gaz temizleyicilerden birincisinde daha yüksek hız ve dolayısıyla daha düşük basınç dağılımları elde edildiği ancak kare kesitli gaz temizleyicinin damlacık toplama veriminin dairesel kesitli olana nazaran %53 ile daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. **Anahtar Kelimeler:** Islak venturi tipi gaz temizleyiciler, Toplama verimi, Daire kesitli gaz temizleyici, Kare kesitli gaz temizleyici, Türbülans modelleri

### Abstract

In this study, wet venturi-type gas scrubbers are examined and the effects of various turbulence models on the hydrodynamic performance of two identical square and circular cross-section gas scrubbers were investigated using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Verification and validation studies were conducted, and the results were successfully compared with numerical and experimental data obtained from the literature. Then, the collection efficiency, pressure drop, and velocity distributions of gas scrubbers with two different cross-sectional geometries were compared, and the performances of k-epsilon (Standard, Realizable, and RNG) and k-omega (Standard and SST) in venturi gas scrubbers were comparatively presented. It was demonstrated that the Realizable k-epsilon turbulence model performed better than the other models in terms of droplet collection efficiency; however, all models yielded similar results in predicting pressure distributions. Among the identical gas scrubbers with circular and square cross-sections, the former exhibited higher velocity and consequently lower pressure distributions. However, it was concluded that the droplet collection efficiency of the square cross-section gas scrubber was 53% higher than that of the circular one.

**Keywords:** Wet venturi scrubbers, Collection efficiency, Circular scrubber, Square scrubber, Turbulence models

## I. GİRİŞ

İstenmeyen küçük parçacıkları içeren çok fazlı karışımlarda bu parçacıkların ayrıştırılması önemli bir problem olup günümüzde konuyla ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Bunların bir kısmında insan sağlığı ön plana çıkarken

diğerlerinde ise ayrıştırma veriminin artırılması amaçlanmaktadır. Hava kirliliğinin artan etkisiyle birlikte insan sağlığının risk altında olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Bu olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması ve çevre kirliliğinin önlenmesine yönelik yeni teknolojik çözüm arayışları devam etmektedir. Mühendisler atmosfere salınan gazların zararlı etkisini azaltmak ve endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan ve kirlenici içeren çok fazlı karışımların birbirlerinden ayrıştırılması için birçok farklı yöntem geliştirmişlerdir. Hava kirliliğinin insan sağlığına doğrudan etkisi bilinen bir gerçektir. Örneğin Türk Tabipler Birliğine göre hava kirliliğinden kaynaklı olarak her yıl dünyada yaklaşık olarak 150.000 prematüre bebek dünyaya gelmekte ve aynı zamanda çocuk astımı da her geçen yıl artmaktadır. Yine Türk Tabipler Birliğine göre hava kirliliği akciğer hastalıklarında artış, astım nöbetlerinin sıklığında değişim, akut solunum yolu hastalıkları ve çeşitli cilt hastalıklarına doğrudan etki etmektedir [1]. Bu rahatsızlıkların temel nedenleri incelendiğinde hava kirliliğinin en başta gelen etkenlerden biri olduğu görülmüştür. Bundan dolayı yapılan düzenlemelerin 'Gelecek nesiller için yaşanabilir bir dünya bırakalım.' sloganının ötesinde gerçekten yaşamı doğrudan etkileyen kirliliği önlemek adına olması gerekmektedir. Bu noktada mühendislik alanında gelişmelerin insan sağlığı üzerindeki etkisi, tıp alanında koruyucu hekimliğe benzetilebilir. Zira koruyucu hekimlikte hastalığın tedavisinden önce, hastalığı oluşturan etkenlerin ortadan kaldırılması önceliklidir Buradan yola çıkarak toplumsal sağlığın temelinde de mühendisliğin önemli bir mihenk taşı olduğu bu farkındalıkla ortaya konulabilir. Venturi tipli gaz yıkayıcılar ile insan sağlığına zararlı gazların atmosfere salınımı engellenerek sağlık açısından risklerin azaltılması mümkündür. Tekstil ve iklimlendirme gibi karasal sistemlerde uzun süredir kullanılmakta olan gaz temizleyiciler, denizcilik sektörünün çatı kuruluşu olan Uluslararası Denizcilik Örgütünün (International Maritime Organization, IMO) gemilerden kaynaklanan emisyon değerlerinin düşürülmesini sağlayan düzenlemeleri sonrasında gemilerde de yoğun olarak kullanılmaktadır. IMO tarafından yapılan emisyon düzenlemeleri, gemi sahiplerini emisyonu azaltmak için çeşitli alternatif teknolojilere yönlendirmiştir. Güncel yasalara uyum açısından düşük sülfürlü yakıt sarfeden ana makina tercihi en kolay çözüm yöntemi olmasına karşılık, ana makine değişimi veya yeni inşa edilen gemilerde doğal gaz vb. yakıt kullanma ana makine tercihi, maliyetleri çok ciddi arttırdığından dolayı gemi sahipleri gaz temizleyicileri bacaya dahil ederek gemi emisyon yasalarına uyum sağlamayı tercih etmişlerdir.

Günümüzde ıslak, kuru, melez, açık veya kapalı çevrimli gibi farklı türlerde gaz temizleyiciler mevcut olup bunlar arasında yaygın olarak kullanılanlardan bir tanesi ıslak venturi tipi gaz temizleyicilerdir. Bu çalışmada, venturi tipi gaz temizleyicilerdeki akışı

sayısal olarak tahmin etmede kullanılan türbülans modellerinin daire ve kare kesitli venturi tipi gaz temizleyicilerdeki performanslarını gösterilmiştir. Çalışma, ilgili literatürde yaygın olarak kullanılan daire ve kare kesitli geometrileri beraber ele alması ve farklı türbülans modellerinin bu gibi geometrik keşide sahip gaz temizleyicilerdeki performanslarını göstermesi açısından yenilik içermektedir.

## II. LİTERATÜR TARAMASI

Farklı sistemlerden ve/veya taşıtlardan salınan yanma sonucu gazlar doğrudan havaya karıştığında insan sağlığı için büyük riskler taşıyabilmektedir. Bu riskleri ortadan kaldırmak veya en azından azaltmak için çeşitli yasal düzenlemeler yapılmıştır. IMO tarafından benimsenen Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesine Dair Uluslararası Sözleşme (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL*) Ek-VI'ya göre dünya üzerindeki denizler Emisyon Kontrol Alanları, EKA (Emission Control Areas, ECA) ve EKA dışı bölgeler olarak ayrılmıştır. IMO yönetmeliklerine göre  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$  gibi zararlı parçacıklı bileşenler EKA bölgesinde kullanılan yakıtta oransal olarak 0,10 ve 0,50 arasında olmalı ve bu sınırları aşmamalıdır. Yapılan yeni düzenlemeler ile gemilerin dönüşüm süreci de başladığından mühendisler bu dönüşümü daha ucuz ve kolay yapabilmenin yollarını aramaya koyulmuştur. Yapılan çalışmalarda birçok farklı tasarım ortaya konulmuş ve baca gazı için farklı tipte baca gaz temizleyici oluşturulmuş ve farklı lüle geometrisi, giriş hızı, sıvı türü için araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, Guerra vd. [2] venturi tipli yıkayıcılarda deneysel ve sayısal çalışmalar yaparak basınç düşüşü, akışkan profili ve lüle adet ve konumunun akışkan davranışına olan etkilerini incelemişlerdir. Yang vd. [3] halka bölmeli ve bölmesiz venturi tipi bir yıkayıcıda gaz-sıvı akışını sayısal yöntemlerle incelemiş ve çeşitli değişkenlerin sıvı gaz karışımına etkilerini göstererek ideal geometriye sahip venturiyi boyutlandırmışlardır. Baca gazlarının temizlenmesinde kullanılan lülelerin uygun bir şekilde konumlandırılmasına yönelik çalışmada Giroth vd yeni tasarımlarının %40 daha verimli olduğunu ve ticari baca temizleyicilere nazaran daha ekonomik olduğunu iddia etmişlerdir [4]. Bal vd. [5] filtreli muhafaza havalandırma sistemli bir venturi yıkayıcıda hidrodinamik performansını artırmak için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu kullanarak basınç düşüşlerini tahmin etmişlerdir. Brown vd. [6] enerji santrallerinde  $SO_2$  emisyonunu azaltmak için kullanılan kireç bulamacının yıkayıcıya uygun noktadan püskürtülmesi için uygun lüle adedini sayısal yöntemlerle ele almışlardır. Jonivd. [7] bacalardan atmosfere salınan gazların temizlenmesinde literatürde yeni bir teknoloji olan kabarcıklı ıslak yıkama yöntemi ile bacanın basınç düşüşünü incelemiş ve atık parçacıklarının ayrılması işleminde verimi %83 olarak hesaplamışlardır. Wang vd. [8] kirliliği azaltmak için ıslak baca sisteminde su akışı yardımıyla kirliliği azaltan filtreleri incelemişlerdir. Çalışmada uygun su

akış hızı, filtrenin verimi ve performansının iyileştirilmesi konusuna öncelik vermişlerdir. Bir diğer çalışmalarında Guerra vd. [9] venturi tipli yıkayıcılarda sıvı enjeksiyonu sonrasında aksel olarak gaz ve sıvı hızının damlacık boyutuna etkisini incelemişlerdir. Lüle sayısının damlacık boyutuna etkisi de dikkate alınmış ve sıvı ve gaz hızlarındaki artışın damlacık boyutunu küçülttüğü gösterilmiştir. Luan vd. [10] kare kesitli venturi yıkayıcılardaki hız, basınç düşüşü ve kinetik enerji gibi değişkenleri HAD metodu yardımıyla inceleyerek kare kesitli geometrilerdeki avantajları ortaya koymuşlardır. Çalışmada, k-epsilon türbülans modeli yardımıyla 12 m/s gaz girişi ile dairesel kesitli gaz temizleyicilerle karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre kare kesitli yıkayıcılarda akış profili dairesel kesitlere nazaran daha dağınık bir formdadır. Kare kesitten dolayı oluşan geri akış gösterilerek dairesel kesitli yıkayıcı ile mukayese edilmiş ve kare kesitli venturinin yıkama verimi ve basınç düşüşünün daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Ali vd. [11] venturi tipli yıkayıcılarda Eulerian-Lagrange metodu kullanılarak 0.09, 0.115 ve 0.14 kg/s gibi farklı gaz debilerinde  $TiO_2$  hidrofobik gazın temizleme verimini; hız dağılımını, basınç düşüşünü ve kinetik enerji değişimlerini hesaplamışlardır. Venturi yapısı geometrik özelliklerinden dolayı birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin; Ulas [12] yapmış olduğu çalışmada değişken kesitli venturilerin roket yakıtlarında kütle akışını kontrol edebilmek için kullanılmasının ideal bir çözüm olduğunu deneysel olarak göstermiştir. Manzano vd. [13] üç farklı geometri için gerçekleştirilen HAD analizleri yardımıyla geometrinin basınç düşüşü üzerindeki etkisini ele alarak kavitasyon ile genişleme açısı arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir. O'Hern, vd. [14] venturi-lüle tasarımları için yedi farklı ampirik formül geliştirerek bunların performanslarını deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlarda %5 ile %18 arasında hata payı olduğu görülmüştür. Wilson vd. [15] venturi tipli mikro kabarcıklı oksijen üreticisi için çeşitli geometriler üzerinde çalışarak HAD yardımıyla farklı değişkenlerin kabarcık üretimine etkisi için üç farklı hava ve akış hızlarıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve deneysel verilerle karşılaştırmalar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre kabarcık oluşumunda boğaz uzunluğu ve genişleme açısı küçük bir etkiye sahiptir. Shi vd. [16] yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalarda kavitasyonu çoklu faz metodu, k-epsilon türbülans modeli ve Schnerr-Sauer kavitasyon modeli kullanarak incelemişlerdir. Silva [17] deneysel ve HAD metotlarından yararlanarak venturi geometrisini incelemiştir. 1.27 metre uzunluğundaki venturi gaz yıkayıcıda 34 m/s ve 70 m/s hava hızında 0.013 kg/s ve 0.075 kg/s sıvı debisinde deneyler yapmış ve basınç ve hız profillerini göstermiştir. Ardından bu deneysel sonuçları Ayrık faz metoduyla, AFM (Discrete Phase Method, DPM) incelemiş ve deneysel sonuçlara ek olarak ampirik formüllerle de elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır. Xu vd. [18] yaptıkları çalışmada

dairese kesitli venturilerde yanlış okumaya yol açan sebepleri AFM ile inceleyerek deneysel sonuçlarla kıyaslamıştır. Atmaca vd. [19]. jet akışı üreten üç farklı lüle geometrisindeki akışı k-epsilon türbülans modeli kullanarak incelemişler ve sayısal sonuçları deneysel verilerle doğrulamışlardır. Kare kesitli venturi gaz temizleyicilerinin sayısal simülasyonu Luan vd tarafından ele alınarak venturi tüplerinin katran giderme verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar sayısal gerçekleştirilmiştir [20]. Turkoglu ve Bayraktar [21] lüle pozisyonlarının venturi geometrisinin hidrodinamik performansına etkisini göstermiştir. Turkoglu ve Bayraktar [22] tarafından yapılan bibliyografik çalışmada ise kara ve denizcilik sektöründe kullanılan gaz temizleyiciler hakkında literatür incelenmesi yapılarak gaz temizleyicilerinin önemi ortaya konulmuştur. Yapılan literatür çalışmasında genel olarak daire kesitli ıslak venturi tipi gaz temizleyici geometrileri ile çalışıldığı görülmüş ise de, kesit geometrisi dairesel olmayan gaz temizleyicilerin de uygulamalarda dikkate alındığı ifade edilmiştir. Bu gibi farklı en-kesit geometrilerde sahip gaz temizleyicilerdeki tek ya da çok fazlı akışın HAD metodu ile ele alındığı çalışmalarda farklı türbülans modellerinin kullanıldığı da yukarıdaki çalışmalarda görülmektedir. Bu çalışma, yaygın olarak kullanılan daire- ve kare-kesitli gaz temizleyicileri basınç düşüşü, hız dağılımları ve toplama verimi gibi farklı değişkenler açısından karşılaştırarak her iki geometrinin bir diğerine göre üstünlük ve zayıflıklarını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bunun dışında, iki-denklemlili türbülans modelleri olan k-epsilon ve k-omega türbülans modellerinin farklı türlerinin bu gibi geometrilerdeki performansları da gösterilmiştir.

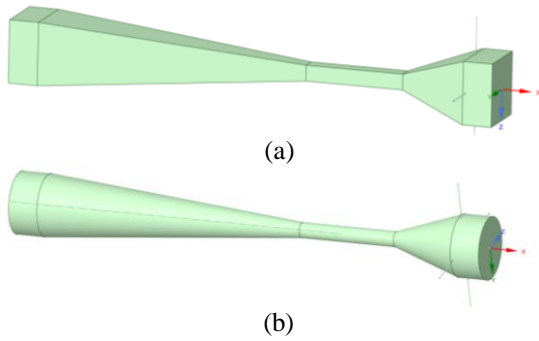
### III. METOD

Günümüzde herhangi bir mühendislik problemi deneysel ya da sayısal çalışmalardan biri veya her ikisi kullanılarak çözülebilmekte ise deneysel çalışma yapmak personel, zaman ve yüksek maliyetler gerektirdiği için bir diğer alternatif olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile problemlerin çözülmesi bilgisayar teknolojilerindeki ilerleme ve güvenilir sayısal metotların varlığı ile beraber oldukça yaygın hale gelmiştir. Islak venturi tipi gaz temizleyicilerdeki çok fazlı akışın incelendiği bu çalışmada Ayrık Faz Metodu (AFM) kullanılarak probleme etki eden değişkenlerin etkisi incelenmiştir. HAD analizleri temelde i) ön işlemler, ii) çözüm süreci ve iii) sonuçlar olmak üzere 3 adımda gerçekleştirilir. Birinci adımda problemin tanımlanarak geometrisinin çizilmesi ve bu geometrinin her birinde ilgili akış denklemlerinin çözdürüleceği küçük alan veya hacimlere bölünerek ağ adı verilen yapıların oluşturulması, probleme ait bilinen sınır ve başlangıç şartlarının belirlenmesi gerekir. İkinci adım olan çözümlenme kısmı probleme atanan sınır şartlarıyla problemin sonuçlarının elde edilmesine kadar olan süreçtir. Üçüncü adım ise elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak ham verilerin alınıp işlenmesi ve

yorumlanmasını sağlayacak grafik ve resimlerin elde edilmesini kapsar. Bu üç adımdan en önemlisi ön işlemler kısmıdır. Zira bu adımda uygun ağ örgüsünün oluşturulmaması ve problemin iyi tanımlanamaması, çözüme kavuşturulamamasına neden olabilir. Bu nedenle, aşağıdaki bölümlerde öncelikle bunlara yer verilmiştir.

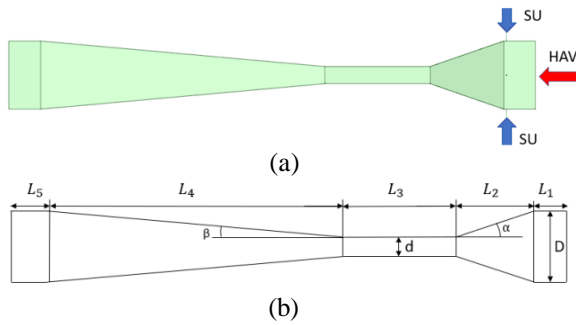
### 3.1. Gaz Temizleyici Tasarımı

Bu çalışma kapsamında en-kesitleri hariç geometrik olarak aynı ölçülere sahip eşdeğer iki adet gaz temizleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bunlardan biri kare kesitli, diğeri ise daire kesitli gaz temizleyici olup tasarımlar Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Tasarlanan kare (a) ve daire (b) kesitli gaz temizleyiciler.

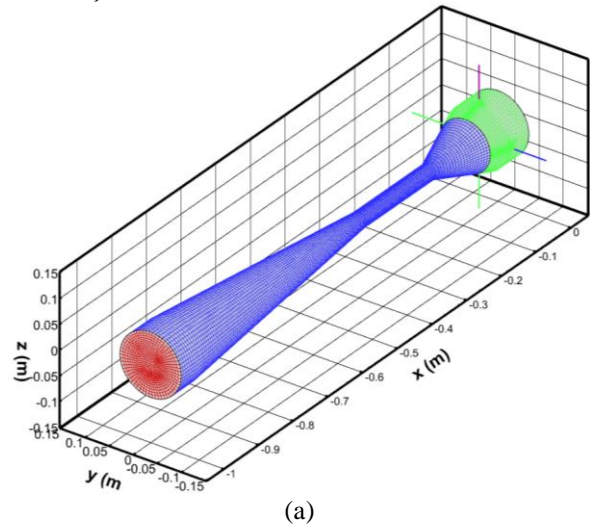
İlgili tasarımlara ait ölçüler ise Şekil 2’de gösterilmiş olup  $L_1=60$  mm,  $L_2=140$  mm,  $L_3=200$  mm,  $L_4=540$  mm ve  $L_5=60$  mm olup  $d=31.8$  mm ve  $D=127$  mm olarak tanımlanmıştır. Dairesel ve kare kesitli venturi tasarımları için ASME, 2005 [23] standartları ve Luan vd., [20] tarafından sunulan önerilerden yararlanılmıştır. İlgili standartta daralma ve genişleme açıları  $\alpha=19^\circ$  ve  $\beta=5^\circ$  olarak önerildiği için bu çalışmada söz konusu açı değerleri kullanılmıştır. Diğer geometrik boyutlar için de literatür bilgileri dikkate alınmıştır (Baylar vd., 2009). Temizlenecek gaz (hava) Şekil 2’e göre sağ taraftan temizleyiciye girerken temizleyici akışkan (su) ise, gaz temizleyiciye dik olarak konumlandırılan 4 adet lüleden gaz püskürtülmektedir.

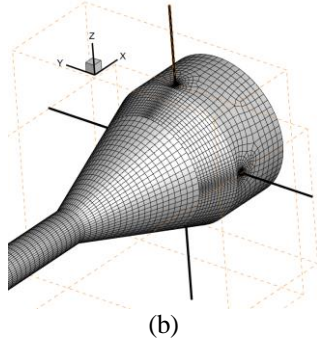


Şekil 2. Hava ve su girişleri (a) ile venturi boyutları (b).

### 3.2. Ağ Yapısı

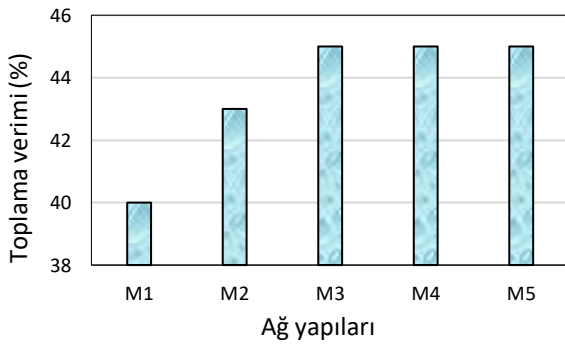
Çift fazlı akışın gerçekleşeceği çalışma bölgesi, tasarımları yapılan gaz temizleyicilerin kendileri olduğundan dolayı, öncelikle temizleyicilerin yüzey alanlarına uygun birer ağ örgüsü oluşturulmuş ve yüzeydeki ağ yapıları dikkate alınarak temizleyici içerisinde akışkanların geçeceği hacim ağları oluşturulmuştur. Şekil 3a’da gösterilen ağ örgüsünde her ne kadar çoğunlukla dikdörtgenler prizması şeklindeki elemanlar kullanılmış olsa da geometrinin gerektirdiği bölgelerde üçgen prizma şeklindeki ağ elemanlarının kullanılması yoluna da gidilmiştir. Boğaz kısmında dikdörtgenler prizması şeklindeki ağ elemanları mevcut iken boğazdan dış bölgelere doğru üçgen ağ elemanların varlığına ağırlık verilmiştir. Çift fazlı akış durumunda gaz (hava) ile sıvı (su) gaz temizleyicinin boğaz olarak adlandırılan en dar bölgesinde karışacaklarından ve su damlacıkları tarafından gaz moleküllerinin tutulması esas olarak bu bölgede olacağından dolayı buraya doğru daha sık ağ elemanı kullanılmıştır. HAD analizleri açısından önem arz eden bir diğer bölge ise lüle ile gaz temizleyicinin birleştiği yerdir. Lüle çapı gaz temizleyici çapına nazaran oldukça küçük ( $d/D=0.25$ ) olduğundan, bu birleşme bölgesinde kullanılan ağ elemanlarının uygun şekilde seçilmesi gerekmiştir (Şekil 3b). HAD analizlerinde tercih edilecek  $y^+$  değeri kullanılan türbülans modellerine ve -gerekli ise- kullanılan çeper fonksiyonlarına bağlı olup k-epsilon türbülans modeli için  $30 \leq y^+ \leq 300$ , k-omega türbülans modeli için  $y^+ \leq 1$  olması tavsiye edilmektedir, ancak, çeper fonksiyonunun tercih edilmesi durumunda  $y^+=10$ ’a kadar da kullanılabilen rapor edilmiştir (Majumdar, 2022). Bu çalışmada, k-omega türbülans modelinin kullanıldığı analizlerde  $y^+ < 7$  olacak şekilde ağ üretilmiştir.





Şekil 3. Gaz temizleyiciler için türetilen ağ yapısının a) genel ve b) yakın görünümü.

Analiz sonuçları geliştirilen ağ örgüsünün dışında, ağ elemanı sayısına da bağlı olduğundan dolayı mevcut ağ örgüsü korunarak aynı geometri ve sınır şartları için 5 farklı sayıda ağ elemanı sayısı ile analizler tekrarlanmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması olarak nitelenen bu çalışma kapsamında M1=152000 eleman, M2=183000 eleman, M3=210219 eleman, M4=285473 eleman ve M5=353247 elemandan oluşacak şekilde farklı sayıda ağ elemanı ile analizler yapılarak sonuçlar toplama verimi cinsinden mukayese edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere verim değeri eleman sayısı M3 ve M5 noktaları arasında %45 ile sabit olduğundan dolayı, türbülans modellerinin etkisinin deneneceği geri kalan tüm çalışmalar M3=210219 adet ağ elemanı sayısı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Ağ eleman sayısı ve verim ilişkisi.

### 3.3. Çözücü

Bu çalışmada geliştirilen sayısal modelin doğruluğu literatürdeki ilgili çalışmalar dikkate alınarak gösterildikten sonra kare ve daire en kesitlere sahip venturi yıkayıcıların damlacık toplama verimleri ve hız ile basınç dağılımları farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan Ansys Fluent yazılımında venturi ile ilgili çok fazlı akış analizlerinde kullanılabilecek iki farklı yaklaşım mevcut olup bunlar Euler-Euler ve Euler-Lagrange metotlarıdır. Aşağıda her iki yaklaşımdan kısaca bahsedilmiştir.

#### 3.3.1. Euler-Euler (E-E) yaklaşımı

Bu yaklaşımda bir faz diğerinin içine giremediğinden dolayı faz hacim oranı olarak tanımlanan bir kavram ortaya çıkmakta olup bu hacim oranının zamanın sürekli bir fonksiyonu olduğu varsayılır ve toplamları her zaman bire eşitlenir. Her fazın korunum denklemleri benzer yapıdaki fazlar için tek bir denklem elde edilmek için kullanılır. Bu yaklaşımda hacimsel model ve karışım modeli gibi iki farklı model mevcuttur [26]. Bu yaklaşımın dezavantajı parçacıkların farklı olması durumunda her parçacık için ayrı bir faz ataması yapılmasının gerekmesi olup bu zorunluluk problemin çözüm süresinin uzamasına neden olabilmektedir.

#### 3.3.2. Euler-Lagrange (E-L) yaklaşımı

E-L yaklaşımında ikinci faz yeterince seyreltik olması durumunda kullanılır. Bu noktada damlacıkların birbiri ve gaz fazı üzerindeki etkileri ihmal edilir. Modelde parçacık ve damlacıkların rotaları ayrı ayrı hesaplandığından sıvı kurutucularda, yakıt püskürtme gibi yerlerde kullanılabilir ancak sıvı-sıvı fazlarında hacim oranının ihmal edilemediği karışımlarda kullanılamaz.

Ansys Fluent kullanıcı rehberine göre ayrık faz oranı %10 ve altında olması durumunda E-L yaklaşımı AFM ile beraber hesaplanmalıdır [27]. AFM, ikinci fazın sürekli fazda dağılmış küre biçimindeki damlacık/parçacıklardaki ısı ve kütle transferi ve hareket denklemlerinin hesaplanmasına fırsat verir. AFM bazı durumlar için sınırlayıcı etkiler ortaya çıkarabilmektedir. Örneğin; ikinci fazın küresel yapıdaki damlacık/parçacıklardan oluştuğunu ve ikinci fazın yeterince seyreltik durumda olması bu varsayımlardandır. Venturi yıkayıcılarda hız ve basınç gibi hidrodinamik özellikler deneysel, ampirik ve HAD yöntemiyle hesaplanabilmektedir. AFM, akışkan içerisinde bulunabilen sıvı, katı veya gaz parçacıklarını ayırt etmek için kullanılmaktadır ve Navier - Stokes denklemlerini kullanarak bu gibi parçacıkların izlediği yörüngeler hesaplanabilir. Ayrık fazın sürekli faz ile enerji, momentum ve kütle etkileşimi bulunmakta ise de kendi içerisindeki etkileşimi göz ardı edilir.

#### 3.4. Akışı Yöneten Denklemler

Newtonyen ve sıkıştırılmaz kabul edilen akışkanların akışına ait temel denklemler kütle korunumu (Eşitlik 1) ve momentumun korunumu (Eşitlik 2) olup aşağıda verilmişlerdir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' v_j'} \right) \quad (2)$$

Eşitlik 2’de sol taraf momentumun taşınmasını, sağ taraftaki 1. terim basınç gradyanını, 2. terim viskoz gerilmeleri,  $-\rho \overline{u'_i v'_j}$  terimi Reynolds gerilmesi olarak da bilinen türbülans gerilmesini ifade etmekte olup bu eşitlikte yer alan bileşenlerin çözülebilmeleri için ilave denklemlere ihtiyaç duyulur. Eşitlik 3’te Reynolds gerilmesinin Boussinesq yaklaşımı ile açılımı gösterilmiştir [28].

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

Burada yer alan  $\nu_t$  ve  $k$  sırasıyla eddy viskozitesini ve türbülans kinetik enerjisini göstermekte iken  $\delta_{ij}$  kronecker delta’yı ifade etmektedir. HAD analizlerinde kullanılabilecek birçok türbülans modeli bulunmaktadır ve hepsinin birbirinden farklı avantajları mevcuttur. Özellikle endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilenleri türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve türbülans kinetik enerjisinin yitim hızını ( $\varepsilon$ ,  $\omega$  gibi) gösteren iki denklemlilik türbülans modelleridir. Çalışmada standart k-epsilon (SKE) ve standart k-omega (SKO) türbülans modelleri ile bunların türevleri olarak bilinen RNG k-epsilon (RNG KE) ve Realizable k-epsilon (RKE) ve SST k-omega (SST KO) türbülans modellerinin venturi tipi gaz temizleyicilerdeki performansları değerlendirilmiştir. Bu modellerden SKE türbülans modeli ait taşınım denklemlerinin ilki olan türbülans kinetik enerjisi,  $k$  Eşitlik (4)’te, türbülans kinetik yitim oranı,  $\varepsilon$  ise Eşitlik (5)’te gösterilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

Eşitlik 4’te sol tarafın 1. terimi türbülans kinetik enerjisinin zamana bağlı değişimini, 2. terimi ise türbülans kinetik enerjisinin akışkanın hareketiyle birlikte taşınmasını ifade etmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki terimler ise sırasıyla yayılma, türbülans kinetik enerjisinin üretimini ve son olarak yitimini temsil etmektedir. Benzer durum Eşitlik 5 için de ifade edilebilir. Eşitliklerde yer alan  $\mu_t$  türbülans viskozitesi ve  $C_\mu$  katsayı olup Eşitlik 6’daki gibi tanımlanmışlardır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \cdot \frac{k}{\varepsilon}} \quad (6)$$

RKE modeline ait türbülans kinetik enerjisi ve yitim oranı ise Eşitlik (7) ve (8)’de sunulmuştur.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + C_{1k} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2k} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \frac{1}{1 + \beta \frac{\varepsilon}{k}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot (1 - \eta) \quad (8)$$

(9) numaralı denklem RNG k- $\varepsilon$  türbülans modelinin enerji yitim oranını göstermektedir. (10) numaralı eşitlik düşük türbülanslı bölgelerde doğruluğu arttıran ilgili denklemler verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \frac{1}{1 + \beta \frac{\varepsilon}{k}} \quad (9)$$

(10) numaralı eşitlikte SST k- $\omega$  türbülans modelinin türbülans kinetik enerjisi, (11) numaralı eşitlikte enerji yitim oranı verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^+ \rho k \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (11)$$

Eşitlik 12’de gösterilen Reynolds sayısı değeri  $7 \times 10^4 \leq Re \leq 2.5 \times 10^5$  olacak şekilde hesaplanmıştır [29].

$$Re_{D_{hd}} = \frac{u_{venturi} D}{\nu} \quad (12)$$

Damlacık toplama verimi Eşitlik 13’te gösterilmiştir.

$$Toplama \ verimi \ \eta = \frac{Yakalanan \ Tanecik \ Sayısı}{Toplam \ Tanecik \ Sayısı} \quad (13)$$

Eşitlik 14 ile AFM metodunda Lagrange yaklaşımı ile parçacık takibi temsil edilmektedir. Burada  $u_p$  parçacık ortalama hızı,  $t$  zaman,  $\rho$  ve  $p_p$  ise akışkan ve parçacık yoğunluğunu,  $d_p$  parçacık çapı,  $C_D$  direnç katsayısı,  $u$  yerel akışkan hızı,  $u' = u_p + u_{df}$  eşitliğinde  $u_{df}$  parçacık difüzyonu hızı,  $P$  akışkan basıncı,  $g$  yerçekimi ivmesi olarak gösterilmiştir [30].

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3\rho}{4d_p \rho_p} C_D (u - u') |u - u'| - \frac{1}{\rho_p} \nabla P + \frac{(\rho - \rho_p)}{\rho_p} g \quad (14)$$

Diferansiyel formdaki türbülans modeli denklemlerinin çözümleri için başlangıç şartı olarak türbülans yoğunluğu (Eşitlik 15)  $I=0.03$  ve karakteristik uzunluk (Eşitlik 16)  $T_L = 2.5 \times 10^{-3}$  mm olarak tanımlanmıştır. Simülasyonlarda havanın giriş debisi 0.987 kg/s olarak dikkate alınmıştır. Hem hava hem de su girişi uniform olarak kabul edilmiştir.

$$I = 0.16x(Re_{D_{hd}})^{-1/8} \quad (15)$$

$$T_L = L \times 0.07 \quad (16)$$

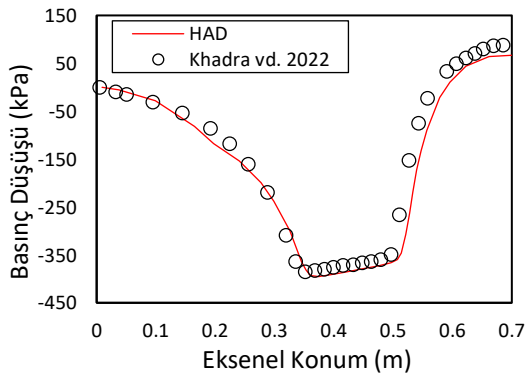
AFM metodunda su damlacıklarının ölçülerinin interpolasyonu için Rosin-rammler metodu tercih edilmiştir. Damlacıkların akış hızı 16 m/s, toplam akış debisi  $6.6 \times 10^{-4}$  kg/s ve yayılım parametresi ise 3.5

olarak tanımlanmıştır. Her bir damlacık boyutu  $1 \times 10^{-5}$  m olarak dikkate alınmış olup bunların yüzey normali doğrultusunda püskürtüldüğü varsayımı yapılmıştır. Zaman adımı 0,1 saniye olarak belirlenmiş olup, verifikasyon çalışması dahil, analizler 455 zaman adımı için yapılmıştır. Basınç ve hız değişkenleri birbirlerine bağlı (coupled); basınç, momentum, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji yitimi ile enerji denklemleri 2.dereceden uzaysal ayrıklaştırma ile çözdürülmüştür.

## IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Verifikasyon ve Doğrulama

Verifikasyon çalışmaları için Khadra vd. [31] tarafından sunulan veriler, doğrulama için de Silva vd [17] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları dikkate alınmıştır. Bu amaçla, aynı geometrik ölçüler ve sınır şartları kullanılarak çift fazlı akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmada hava boğazdan 10 m/s hızla akarken su da lülelerden 0.05 kg/s debi ile gaz temizleyiciye püskürtülmüştür. Şekil 5'te görüldüğü üzere bu sayısal çalışma ile Khadra vd. [31] tarafından elde edilen basınç dağılımları birbirleriyle oldukça uyumludurlar.

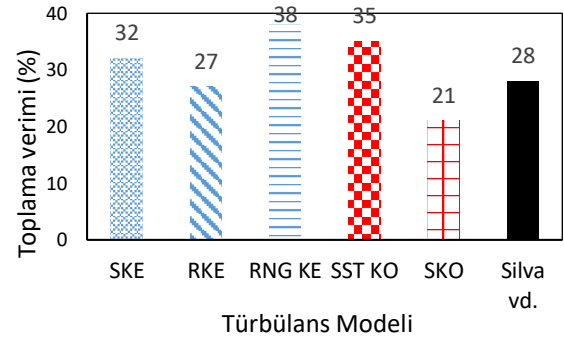


Şekil 5. Khadra vd. [31] ile yapılan mukayese.

AFM kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada Lagrange yaklaşımı ile ikinci fazın ayrık faz olarak modellenmesine imkân tanınmış ve böylece gaz temizleyiciye 4 adet lülede su damlacıklarının gönderilmesi mümkün olmuştur. Bu damlacıklar gaz moleküllerini yakalayarak tutmaktadır.

### 4.2. Türbülans Modellerinin Performansları

Türbülans modellerinin damlacık toplama verimini tahmin etmedeki yeterliliklerini görmek üzere havanın gaz temizleyicinin boğaz kısmından 70 m/s hız, suyun ise lülelerden 0.038 kg/s debi ile püskürtüldüğü durumdaki damlacık toplama verimi Silva vd. [17] tarafından deneysel olarak %28 bulunan toplama verimi ile mukayese edilmiştir. Şekil 6'da sunulduğu üzere deneysel sonuçlara en yakın toplama verimi RKE türbülans modelinin kullanılmasıyla %27 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Farklı türbülans modelleri ile elde edilen toplama verimi.

Tablo 1'de gösterildiği üzere toplama verimini en yakın değerde hesaplayan RKE türbülans modeli iken SKE %4 sapma oranı ile ikinci en başarılı modeldir. Buna karşın KE modelinin diğer versiyonları olan RNG-KE ve SKO ve SST-KO ise deneysel sonuçlarla uyumlu olmayan sonuçlar vermişlerdir.

Tablo 1. Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan toplama verim değerleri.

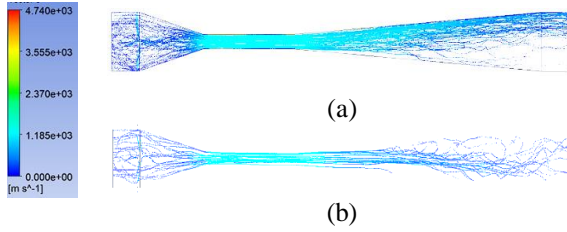
Deney ve türbülans modelleri	Verim %	Fark %
Silva vd., [17]	28	-
RKE	27	1
SKE	32	4
SKO	21	7
SST-KO	35	7
RNG-KE	38	10

İncelenen beş farklı türbülans modeli içerisinde toplama verimi açısından en iyisinin RKE, en kötüsünün ise SKO olduğu bulunmuştur. Tablo 1'de mukayeseli olarak bu farklar gösterilmiş ve Silva, vd. [17] çalışmasına en yakın verim değerinin RKE modeli elde edildiği gösterilmiştir. Deneysel çalışmada debileri 0.038 kg/s olan su ve 0.987 kg/s alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) kullanılmıştır. Yoğunluğu  $3970 \text{ kg/m}^3$  olan bu kimyasal madde deneylerde  $10 \mu\text{m}$  boyutunda 300 gram toz olarak kullanılmıştır. Benzer şartlar sağlanarak AFM ve RKE türbülans modelinin kullanılması durumunda gaz temizleyicideki su damlacıklarının dağılımı Şekil 7'de sunulmuştur.

Tablo 2. RKE ve AFM ile gerçekleştirilen çalışmada kullanılan değerler.

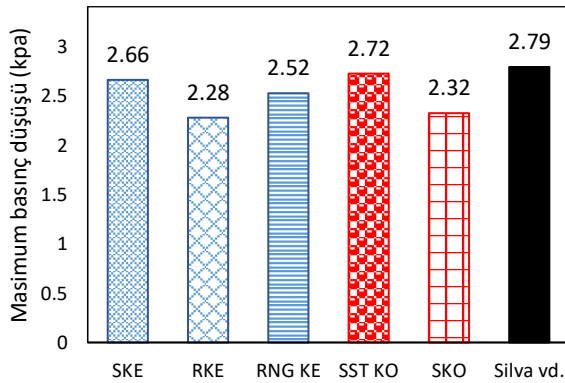
Değişken	Değer	Birim
Su debisi	0.038	(kg/s)
Damlacık çapı	10	( $\mu\text{m}$ )
Damlacık miktarı	300	(gr)
Damlacık yoğunluğu	3970	( $\text{kg/m}^3$ )
Damlacık debisi	0.987	(kg/s)

Şekil 7’de su damlacıklarının gaz temizleyici çıkışına kadar olan aksel mesafe boyunca kare-kesitli ve daire-kesitli gaz temizleyicilerde nasıl taşındığı görülmektedir. Damlacıklar geometrik özelliklerden dolayı başlangıçta birbirlerine oldukça yakın ve dolayısıyla yoğun olarak görülmekte iken gaz temizleyicinin ilerleyen kısımlarında değişen yapıdan dolayı daha dağılmış haldedirler. Bu durum türbülans etkisinin ve gaz akışı içinde damlacıkların dağılmasının bir sonucudur.



**Şekil 7.** Su damlacıklarının a) kare-kesitli ve b) daire-kesitli gaz temizleyicideki akışı.

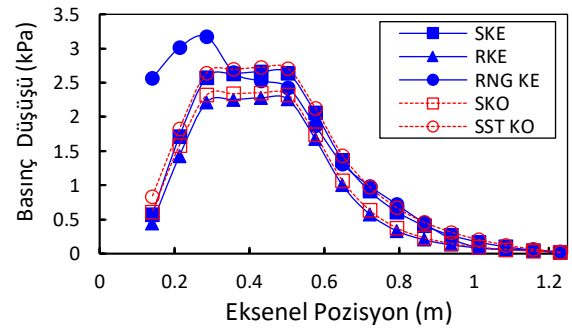
Şekil 8’de daire kesitli gaz temizleyicinin yakınsama bölgesindeki maksimum basınç düşüşlerinin farklı türbülans modelleri kullanılarak hesaplanmış değerleri gösterilmektedir. Bu çalışmaya ait sayısal sonuçlar Silva vd. tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ölçülen 2.79 kPa ile karşılaştırılmıştır. Toplama veriminin tahmininde deneysel veriye en yakın değeri veren RKE türbülans modelinin basınç düşüşü söz konusu olduğunda en kötü model olduğu görülmektedir. Maksimum basınç düşüşünün tahmininde SST-KO türbülans modelinin daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. RKE modelinden sonra en uzak tahminin SKO türbülans modeli ile elde edildiği ortadadır.



**Şekil 8.** Farklı türbülans modelleri ile daire kesitli gaz temizleyicide hesaplanan maksimum basınç düşüşü (x=0,4 m).

Şekil 9’da SKE, RNG-KE ve RKE ile SKO ve SST-KO gibi iki denklemlilik türbülans modelleri kullanılarak hesaplanan basınç düşüşleri, aksel pozisyona bağlı olarak verilmiştir. Islak venturi tipi gaz temizleyici i) giriş bölgesi, ii) boğaz ve iii) çıkış bölgesi olmak üzere 3 farklı bölgeye ayrılıp ayrı ayrı incelenecek olursa,

havanın gaz temizleyiciye girdiği giriş bölgesindeki daralmadan ötürü basıncın hızla azaldığı görülebilir. Giriş bölgesinde RNG-KE türbülans modelinin diğer modellerden daha yüksek değerde basınç düşüşü hesapladığı, bunun dışında kalan diğer tüm türbülans modellerinin ise birbirleri ile daha uyumlu dağılımlar sağladığı ifade edilebilir. Gaz temizleyicinin en dar yeri olan boğaz bölgesinde hava akışı en yüksek hızda gerçekleştiğinden dolayı Bernouilli prensibine göre basınç değeri de bu bölgede en düşük olmaktadır. RNG-KE türbülans modeli boğaz bölgesinde de diğerlerinden farklı bir dağılım izleyerek ayrılmaktadır. Bu bölgede RKE ve SKO benzer dağılımlar gösterirken, SKE ve SST KO birbirleri ile daha yakın değerde basınç düşüşü hesaplamışlardır. Son bölge olan genişleme bölgesinde ise RNG KE de dahil olmak üzere tüm modellerin birbirlerine oldukça yakın basınç düşüşü hesaplayabildikleri görülmektedir. Bunun temel nedenleri olarak akış karakteristiğinin türbülanslı olmasından dolayı seçilen modellerin benzer varsayımlar yapması ve basınç düşüşünün seçilen modellerden ziyade akışın temel özelliklerine ve geometriye bağlı olmasıdır. RKE türbülans modelinin girişten genişleme bölgesine kadar tüm bölgelerde genel olarak daha düşük basınç düşüşü gösterdiği not edilmelidir.

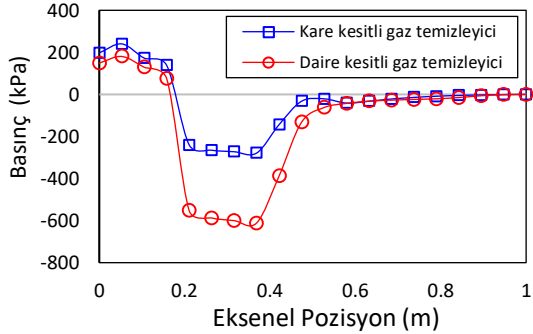


**Şekil 9.** Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan basınç düşüşleri (su debisi=0,038 kg/s, hava debisi=0,01 kg/s).

Gaz temizleyici kesit geometrilerinin akış yapısı ve basınç dağılımlarına olan etkileri Şekil 10’da sunulmuştur. Daire ve kare kesitli gaz temizleyicilerden akmakta olan akış başlangıçta pozitif basınçlara sahipken, hız artışının olduğu boğaz bölgesinde Bernouilli prensibine göre basınç düşmektedir. Basıncıdaki bu düşüş, oluşan yüksek akış hızlarına bağlı olarak negatif değerlere kadar devam etmekte, akabinde yaklaşık 0,4 m civarında en düşük değere ulaşmakta ve genişleme bölgesinde toplanarak sıfır cihaz basıncında gaz temizleyiciyi terk etmektedir. Daire kesitli gaz temizleyicideki basınç düşüşü kare kesitli temizleyiciye göre daha çok olup negatif basınç değeri daha düşük seviyelerde olmaktadır. Bu durum, daire kesitli gaz temizleyicide, kare kesitliye nazaran akışkanın daha az dirençle karşılaşarak daha yüksek hızlarda akabilmekte ve buradaki basınç düşüşünün kare kesitliye nazaran daha yüksek olmasına yol açmaktadır. Elde edilen sonuçta

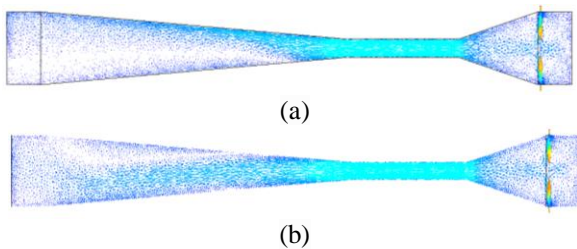


göre, eğer bir uygulamada hız gereksinimi yüksekse daire kesitli gaz temizleyici, amaç sistemde basınç kaybını en az düzeyde tutmak ise kare kesitli gaz temizleyici kullanmanın daha avantajlı olacağını söylemek mümkündür.



Şekil 10. Kare ve daire kesitli gaz temizleyicilerdeki basınç dağılımları.

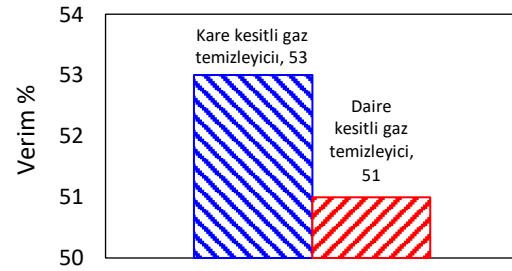
Şekil 11'de kare ve daire kesitli gaz temizleyicilerdeki hız vektörlerinin dağılımları karşılaştırılmıştır. Kare kesitte akış, kanal geometrisinin sınırlarına bağlı olarak daha düzenli bir hız profili sergilemekte ise de köşe bölgelerinde enerji kaybı veya türbülans oluşumu gözlemlenmiştir. Daire kesitli gaz temizleyicide akış, daha az köşe direnci nedeniyle daha pürüzsüz ve hızlı bir şekilde yönlendirilmektedir. Konik yapıdan dolayı akış merkez bölgede hızlanmakta simetrik bir şekilde devam etmektedir. Kare kesitli gaz temizleyicide akışkan daha geniş bir alana yayılarak akış kararlılığı açısından avantaj sağlamaktadır. Kare kesit, köşe bölgelerinde türbülans ve enerji kayıplarına daha yatkın iken daire kesitli gaz temizleyicide geometriden dolayı türbülans daha az oluşarak akış direnci azaltılmaktadır. Bu durum Şekil 10'da gösterilen basınç dağılımında da görülebilmektedir. Uygulama açısından bakıldığında daire kesitli gaz temizleyici daha düşük basınç kaybı ve yüksek hızların gerektirdiği çalışmalarda tercih edilebilir.



Şekil 11. Kare (a) ve daire (b) kesitli gaz temizleyicilerdeki hız vektörleri.

Şekil 12'de RKE türbülans modeli kullanılarak kare ve daire kesitli gaz temizleyicilerdeki toplama verimi değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü üzere kare kesitli gaz temizleyicinin toplama verimi daire kesitli gaz temizleyicinin toplama veriminden %2 daha yüksektir. Bunun nedeni kare kesitli gaz

temizleyicinin içeride akmakta olan akışkanlara daha geniş bir akış alanı sağlayarak damlacıkların tutulmasında avantaj sağlaması ve akışkanın daha türbülanslı olup bunun etkisiyle damlacıkların daha etkili bir şekilde tutulmuş olması olabilir. Daire kesitli temizleyicide, akışın daha hızlı ve simetrik olması, damlacıkların yüzeylerle temasını azaltarak daha düşük bir verime neden olmuş görünmektedir. Dolayısıyla, yüksek verim gereken uygulamalarda kare kesitli gaz temizleyici tercih edilebilir. Ancak, verim farkının %2 gibi küçük bir değer olması da dikkate alındığında daha hızlı akış istenen uygulamalarda dairesel kesitli gaz temizleyici de düşünülebilir.



Şekil 12. Kare ve daire kesitli gaz temizleyicilerde toplama verimi

## V. SONUÇ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodu kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, en kesit geometrileri dışında tamamen özdeş olan kare ve dairesel kesitli iki gaz temizleyicinin hidrodinamik performansları SKE, RNG-KE, RKE ve SKO ve SST-KO gibi farklı türbülans modelleri ile incelenmiştir. Her bir türbülans modeli ile elde edilen toplama verimi, literatürde Silva vd. tarafından deneysel olarak hesaplanmış olan toplama verimi değerleri ile karşılaştırılarak deneysel değere en yakın toplama verimi sağlayan RKE türbülans modeli olduğu belirlenmiştir. RKE türbülans modelinin toplama verimindeki bu başarısına karşılık, maksimum basınç düşüşü açısından en kötü performans gösteren modelin de yine RKE olduğu saptanmıştır. Maksimum basınç düşüşünün tahmin edilmesinde deneysel değere en yakın sonuç veren modellerin sırasıyla SST-KO ve SKE ile elde edilmesi, farklı türbülans modellerinin farklı değişkenler söz konusu olduğunda aynı performansı göstermediğini ortaya koymaktadır. Yapılan karşılaştırmalarda, dairesel kesitli gaz temizleyicide daha fazla basınç düşüşü olduğu belirlenmiştir. Köşeli yapısından dolayı içeride neden olduğu türbülanslı akışın bir sonucu olarak ve sağladığı daha düşük hız değerlerinden ötürü kare kesitli gaz temizleyicinin toplama veriminin %53 olarak daire kesitli gaz temizleyici veriminden %2 kadar daha yüksek toplama verimi sağladığı ortaya konulmuştur.

**KAYNAKLAR**

- [1] Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri-Kara rapor, Temiz Hava Hakkı Platformu” 2019.
- [2] Guerra, V.G., Béttega, R., Gonçalves, J.A.S., Coury, J.R. (2012). Pressure drop and liquid distribution in a venturi scrubber: Experimental data and CFD simulation. *Ind Eng Chem Res*, 51(23), 8049–8060.
- [3] Yang, S., Zhao, X., Sun, W., Yuan, J., Wang, Z. (2019). Effect of ring baffle configuration in a self-priming venturi scrubber using CFD simulations. *Particuology*, 47, 63–69.
- [4] Giroth, E.J., Ang, E.B. (2022). The design and evaluation of exhaust gas cleaning system equipped with SOx scrubber,” 2022 IEEE 13th *International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies*, Cape Town, South Africa.
- [5] Bal, M., Meikap, B.C. (2017). Prediction of hydrodynamic characteristics of a venturi scrubber by using CFD simulation, *S Afr J Chem Eng*, 24, 222–231.
- [6] Brown, K., Kalata, W., Schick, R. (2014). Optimization of SO2 scrubber using CFD modeling, *Procedia Engineering*, 170–180.
- [7] Joni, J., Tambing, E., Siregar, S.P., Setiawan, R.P.A., Tambunan, A.H., Siregar, K. (2023). Evaluating the application of bubble wet scrubber systems for gas cleaning in gasification, *Instrumentation Measure Metrologie*, 22(1), 21–27
- [8] Wang, S.C., Gabriela, D. (2022). Filtering analysis of a wet scrubber with computational fluid dynamics simulation. IEEE 4th Eurasia Conference on IOT, *Communication and Engineering (ECICE)*, Yunlin, Taiwan
- [9] Guerra, V.G., Gonçalves, J.A.S., Coury, J.R. (2008). Experimental investigation on the effect of liquid injection by multiple orifices in the formation of droplets in a Venturi scrubber. *J Hazard Mater*. 161(1), 351–359.
- [10] Luan, Z., Liu, X., Zheng, M., Zhu, L. (2017). Numerical simulation of square section venturi scrubber with horizontal spray, *Procedia Computer Science*, 107, 117–121.
- [11] Ali, M., Yan, C., Sun, Z., Wang, J., Gu, H. (2013). CFD simulation of dust particle removal efficiency of a venturi scrubber in CFX. *Nuclear Engineering and Design*, 256, 169–177.
- [12] Ulas, A. (2006). Passive flow control in liquid-propellant rocket engines with cavitating venturi. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(2), 93–97.
- [13] Manzano, J., Palau, C.V., De Azevedo, B.M., Do Bomfim, G.D., Vasconcelos, D.V. (2016). Geometry and head loss in venturi injectors through computational fluid Dynamics. *J Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 3, 482–491.
- [14] O’Hern, H., Murphy, T., Zhang, X., Liburdy, J., Abbasi, B. A. (2022). Design method for low-pressure venturi nozzles, *Applied Mechanics*, 3(2), 390–411.
- [15] Wilson, D.A, Pun, K., Ganesan, P.B., Hamad, F. (2021). Geometrical optimization of a venturi-type microbubble generator using CFD simulation and experimental measurements. *Design*, 5(1), 4.
- [16] Shi, H., Li, M., Nikrityuk, P., Liu, Q. (2019). Experimental and numerical study of cavitation flows in venturi tubes: From CFD to an empirical model. *Chem Eng Sci*, 207, 672–687.
- [17] Silva, A.M., (2008). Numerical and Experimental Study of Venturi Scrubbers, PhD thesis, Universidade do Minho, Portugal.
- [18] Xu, Y., Zhao, Y., Long, Z. (2012). Study on the key factors of wet gas metering overreading in standard venturi tube base on DPM. *Applied Mechanics and Materials*, 220-223, 1693–1697.
- [19] Atmaca, M., Cetin, B., Ezgi, C., Kosa, E. (2021). CFD analysis of jet flows ejected from different nozzles. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3), 940–945.
- [20] Luan, Z., Liu, X., Zheng, M., Zhu, L. (2016) Numerical simulation of square section venturi scrubber with horizontal spray. *Procedia Computer Science*, 107, 117-121.
- [21] Turkoglu, F., Bayraktar, S. (2023). Effects of the Nozzle Location on Hydrodynamic Properties of a Venturi- Type Scrubber. *International conference on innovative academic studies*, 3(1),107-111.
- [22] Turkoglu, S., Bayraktar, S. (2024). Kara ve Denizcilik Sektöründe Kullanılan Gaz Temizleyiciler (Scrubbers) Hakkında Literatür İncelenmesi. The 3rd International Congress on Ship and Marine Technology (GMO-SHIPMAR 2024) Trabzon, Turkey.
- [23] ASME, (2005). Measurement of fluid flow in pipes using orifice, nozzle, and venturi. The American Society of Mechanical Engineers. MFC-3M-2004; United Engineering Center: New York, NY, USA.
- [24] Baylar, A., Aydin, M.C., Unsal, M., Ozkan, F. (2009). Numerical modeling of venturi flows for determining air injection rates using Fluent V6.2. *Math. Comput. Appl.* 14, 97-108.
- [25] Majumdar, P. (2022). Computational fluid dynamics and heat transfer, 2nd Edition, CRC Press.
- [26] Ansys Inc, (2018). ANSYS Fluent Tutorial Guide.
- [27] Ansys Inc, (2016). ANSYS Fluent Tutorial Guide.
- [28] Bolek, A., Bayraktar, (2019). Flow and heat transfer investigation of a circular jet issuing on different types of surfaces. *Sadhana*, 44, 242.
- [29] Brunhart, M., Soteriou, C., Gavaises, M., Karathanassis, I. (2020). Investigation of cavitation and vapor shedding mechanisms in a venturi nozzle. *Physics of Fluids*, 32(8), Article 083306.

- 
- [30] Zahari, N.M., Zawawi, M.H., Sidek, L.M., Mohammad, D., Itam, Z., Ramli, M.Z., Syamsir, A., Abas, A., Rashid, M, (2018). Introduction of discrete phase model (DPM) in fluid flow: A review,” *AIP Conference Proceedings*, 2030 (1).
- [31] Khadra, H., Kouider, R., Tayeb, N.T., Al-Kassir, A., Carrasco-Amador, J.P, (2022). Numerical Simulation of the Cleaning Performance of a Venturi Scrubber. *Energies*, 15(4), 1531.