



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.07.2024
Kabul Tarihi : 19.08.2024

Received Date : 24.07.2024
Accepted Date : 19.08.2024

YÜKSEK VERİMLİ SWIFT SIKLONDA GİRİŞ HIZININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF INLET VELOCITY EFFECT ON HIGH EFFICIENCY SWIFT CYCLONE

Nihan BABAOĞLU^{1*} (ORCID: 0000-0003-3356-9407)

İbrahim ARARAT¹ (ORCID: 0009-0000-1626-1334)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nihan BABAOĞLU, nuygur@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek verimli Swift (HE) tipi siklonda giriş hızının toplama verimi ve basınç kayıplarına olan etkileri nümerik yöntemler kullanılarak ortaya koyulmuştur. 10 – 20 m/s aralığında altı farklı giriş hız değerleri için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada daha iyi sonuçlar elde etmek için küçük elemanlar ile gridleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Reynolds Stress Model (RSM) türbülanslı akışın çözümlenmesi için kullanılmıştır. Çözümleme her bir giriş hızı için transient olarak 5 ms'lik 1000 adım ile 10000 iterasyon ile gerçekleştirilmiştir. Partiküllerin boyut dağılımlarını belirlemek için Rosin-Rammler metodu kullanılmıştır. Giriş hızının artışı teğetsel hızı artırdığı için partiküle etki eden santrifüj kuvveti artmıştır. Buda partiküllerin siklon duvarına doğru hareket etmesine ve toplama veriminin artmasına neden olmuştur. Giriş hızının artışı ile birlikte, dönen akışın artması dolayısıyla basınç kaybının çok fazla arttığı görülmektedir. Bu değişimin üstel olarak arttığı görülür. Giriş hızının artışıyla birlikte siklon duvarlarında oluşan basınçlar aşırı derecede artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek verimli Swift siklon, basınç kaybı, toplama verimi, giriş hızı, kesme çapı.

ABSTRACT

In this paper, study is performed in order to demonstrate the effect of the inlet velocity on collection efficiency and pressure drop by using numerical methods. Numerical simulation is accomplished for six different inlet velocity at range of 10-20 m/s. Gridding was done with small elements to obtain better results. Turbulent flow is analyzed using Reynolds Stress Model (RSM). Set appropriate time steps to model the transient processes is 1000 for 5 ms with 10000 iterations. Rosin-Ramler size distribution method was used to calculate particle mass fraction. Centrifugal force increased because that for value of inlet velocity increases, the tangential velocity enhances. Based on this situation, it can be concluded that for the particles to move towards the cyclone wall and the collection efficiency increased. It is seen that with the increase in inlet velocity, the pressure drop increases greatly due to the increase in the rotating flow. It is expressed that this change increases as exponentially. It is also observed pressure on cyclone wall markedly increased with the increase inlet velocity.

Keywords: High efficiency Swift cyclone, pressure drop, collection efficiency, inlet velocity, cut-off diameter.

GİRİŞ

Siklon ayırıcılar, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle, bir gaz-partikül karışımından partikülleri ayıran toz toplayıcılarıdır. Başka bir ifade ile yoğunluk farkından dolayı yoğun maddenin hafif olandan ayrılmasına yardımcı olan statik cihazlardır (Brar & Elsayed, 2018). Basit yapısı, ucuz üretim ve bakım maliyetleri ayrıca düşük hızlar da dahil olmak üzere çok çeşitli çalışma ortamlarına yönelik esneklikleri nedeniyle (Yoshida, 2013) siklon ayırıcılar en yaygın olarak kullanılan partikül giderme ekipmanlarıdır. Siklonlarda ayırma çoğunlukla parçacık atalet kuvveti tarafından belirlendiğinden, bu klasik cihazlar, küçük partiküller için daha düşük ayırma verimliliğine sahiptirler (Yang vd., 2023). Endüstrinin birçok dalında siklon ayırıcıların kullanımı oldukça yaygındır. Endüstrilerden kaynaklanan partikül formundaki kirleticilerin ön arıtımında siklonların yeri çok önemlidir. Örneğin, endüstride yanma prosesi yoluyla sıcak buhar üretmek için kazanların kullanılması neticesinde, katı partiküler madde, NO₂ ve SO₂ gibi artık gaz formunda kirleticiler içeren baca gazı emisyonları üretmektedir. Bu yanmadan kalan katı partiküllerin yüzdesi çok yüksektir ve bu da kullanılan yakıtın toplam ağırlığının yaklaşık %5'i kadardır (Gao vd., 2022; Jion vd., 2023). Tüm bu nedenlerden dolayı bu ve benzeri oluşumların ortaya çıktığı özellikle kimyasal prosesler, ilaç endüstrisi, tarım, petrol rafinerileri vb. birçok alanda kullanımları söz konusudur (Babaoğlu vd., 2021).

Siklonlarda basınç düşüşü ve toplama verimliliği olmak üzere iki kritik parametre kullanılarak siklon performansı değerlendirilir. Bu iki parametre ekonomik olma ve verimlilik bakımından toplama verimini temsil ederler ve yine bu parametreler büyük oranda siklon geometrisi ve işletme şartlarına bağlı olmaktadır (Sun & Yoon, 2018). Siklon geometrisi ve işletme şartlarının siklon performansı üzerine etkisi siklonlarla ilgili birçok deneysel çalışmada incelenmiştir (Venkatesh vd., 2020; Wasilewski & Brar, 2017).

Literatürde şimdiye kadar yapılmış olan çalışmaların çoğu, siklon girişini, girdap bulucu boyutlarını, siklon tasarımını, silindirik ve konik parçaların uzunluğunu değiştirmeye odaklanmıştır. Ayrıca, bazı çalışmalarda özel olarak siklonun alt bölgelerine yerleştirilen bir karşı koni gibi siklon içine ek sabit elemanların yerleştirilmesi de düşünülmüştür (Wasilewski vd., 2021). Geometrik özellikler ve çalışma faktörlerinin (giriş hızı, akışkan sıcaklığı vb.) performans üzerindeki etkilerini, yani basınç düşüşü ve toplama verimliliğini kapsamlı bir şekilde incelemek için araştırmacılar, siklonlarla ilgili çok sayıda deneysel araştırma ve model çalışmaları yapmışlardır (Leith & Mehta, 1973; Lim vd., 2003). Tüm bunlara ilaveten siklon performansını daha uygun bir şekilde tahmin etmek için, çok büyük deneysel veri setlerine göre önerilmiş olan Lapple modeli (Lapple, 1950), Barth modeli (Barth, 1956), Iozia ve Leith modeli (Iozia & Leith, 1989) ve Muschelknautz modeli (Hoffmann vd., 2003) gibi basit modeller oluşturulmuştur.

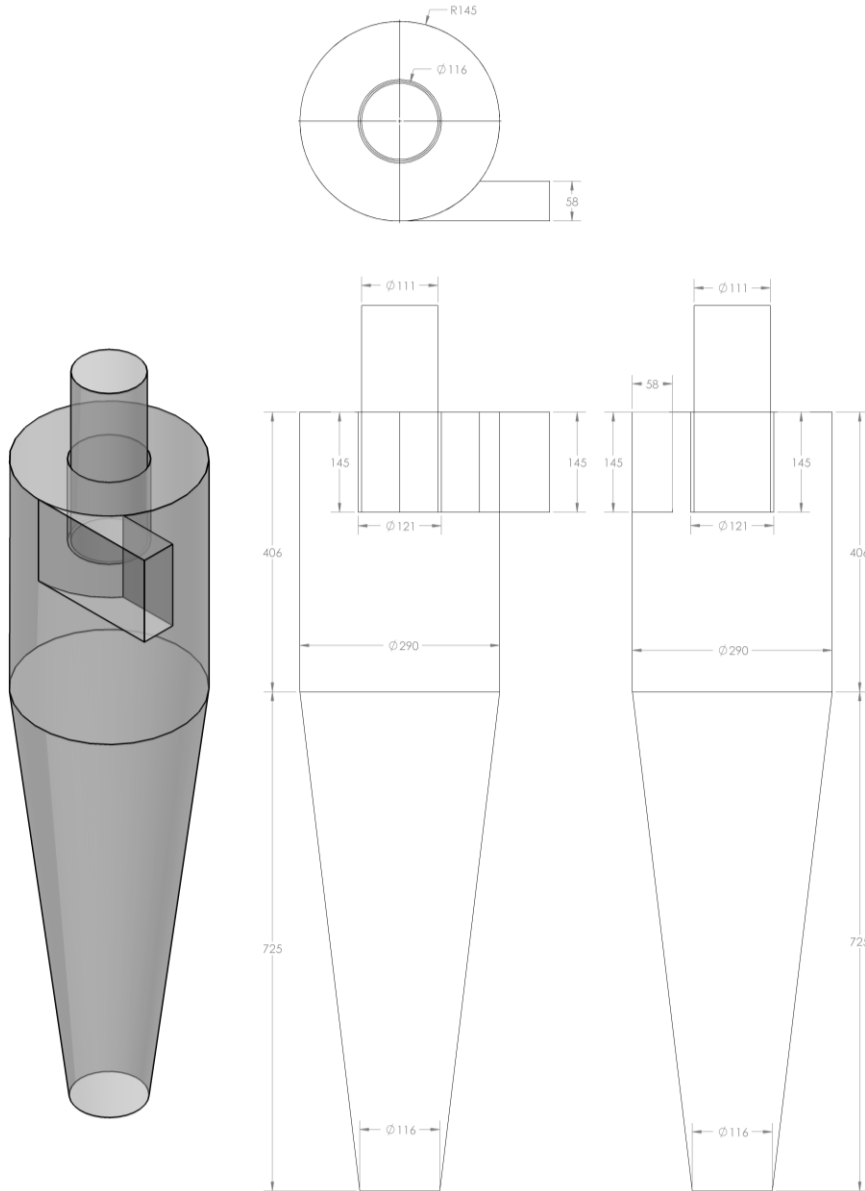
Fakat bu modellerde sınırlayıcı faktörlerin olması, deneysel verilerle karşılaştırıldığında yalnızca kabul edilebilir sonuçları tahmin edebilmeleri, bu modellerin değişken siklon geometrik tasarımlarında kullanılmalarını pek verimli kılmamıştır. Bununla birlikte son zamanlarda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) tekniği, düşük maliyet, yüksek doğruluk avantajlarıyla siklon performansını tahmin etmek için güçlü bir araç haline gelmiştir (Brar & Elsayed, 2018; Griffiths & Boysan, 1996). Dahası CFD tekniğine ek olarak optimizasyon araçları da kullanılarak optimum siklon geometrileri elde edilmektedir. Örneğin, Safikhani tarafından yapılan çalışmada, çok amaçlı optimizasyon (MOO) süreci için ihtiyaç duyulan veriler CFD teknikleri kullanılarak üretilmiştir. CFD tekniğinin siklonun içindeki akış alanı özelliklerini ve parçacık yörüngelerinin yanı sıra basınç düşüşünü de tahmin etme konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğu bu çalışmada belirtilmiştir (Safikhani, 2016).

Raoufi vd. klasik bir siklonda girdap bulucunun simülasyon ve optimizasyonunda CFD tekniğini kullanmışlardır (Raoufi vd., 2008). Yine Zhao ve ark., geleneksel tek girişli (SI) ve spiral çift girişli (DI) olmak üzere farklı iki tip siklonu karakterize etmek için CFD'yi kullanmışlardır (Zhao vd., 2006). Safikhani ve ark. yuvarlak ve kare siklonlarda CFD çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Safikhani vd., 2011). Farklı bir çalışmada ise Elsayed ve Lacor CFD tekniklerini kullanarak siklon ayırıcılarda akış alanının farklı yönlerini ortaya koymuşlardır (Elsayed & Lacor, 2011b, 2011a, 2013).

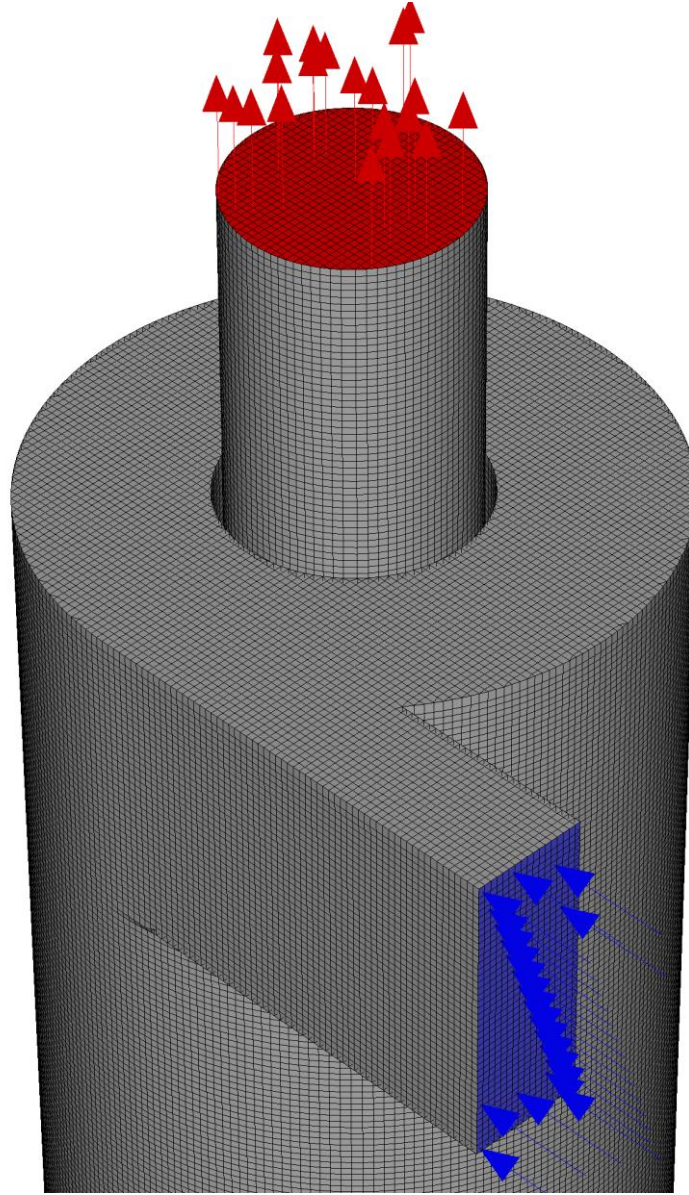
Bu çalışma kapsamından, Yüksek Verimli Swift tipi siklon ayırıcının giriş hızının siklonun ayırma verimi ve basınç kayıplarına olan etkisi incelenmiştir. Çalışma ANSYS Fluent 2019 ortamında 6 yüzlü elemanlar kullanılarak mesh edilerek gerçekleştirilmiştir. Giriş hızı için 10 farklı hızda çalışma yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında 290 mm çapa (D) sahip Swift Yüksek Verimli (HE) siklonda giriş hızının ayırma verimi ve basınç kayıplarına olan etkileri ortaya koyulmuştur. Çalışmada kullanılan siklon geometrisinin izometrik görünümü Şekil 1’de verilmiş olup, temel olarak silindir, koni, giriş ve girdap bulucudan oluştuğu görülmektedir. Giriş hızının toplama verimi ve basınç kayıpları üzerine olan etkisinin ortaya koyulması adına, 10 - 20 m/s hız aralığında altı farklı değer için CFD çalışmaları yapılmıştır. Her bir hız değeri için ANSYS Fluent programında 5 ms’lik adımlarla 1000 adım sonucunda elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Gridleme işlemi maksimum skewness değeri 0,7 olan 1339879 adet altı yüzlü elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Böylece elde edilen sonuçların daha doğru olması sağlanmıştır. Akış alanında akışkanın türbülanslı akış özelliklerinin hesaplanması için Reynold Stress Türbülans Model (RSM) kullanılmıştır. Partiküllerin hareketleri için ise Discrete Random Walk (DRW) ve Random Eddy Lifetime (REL) tekniklerine ait ayarlar uygulanmıştır. Sınır koşulları için giriş, çıkış ve diğer yüzeyler için sırasıyla Velocity-Inlet, Pressure-Outlet ve Wall olarak seçilmiştir. Rosin-Ramler boyut dağılımı metodundan yararlanılarak 0,1 μm ile 5 μm arasındaki 200 farklı çap ve 2700 kg/m³ yoğunluklu partiküller akışkan ile aynı hızla giriş yüzeyine dik şekilde siklona giriş yüzeyinden akış alanına dahil edilmiştir. Sınır koşullarının ayrık faz ayarları giriş, çıkış ve toz çıkışı için sırasıyla; Reflect, Escape ve Trap olarak ayarlanmıştır. Her bir geometri için 10000 iterasyon gerçekleştirilmiş ve CFD çalışmalarının süreklilik hatası 10⁻⁵ ‘ten küçüktür. Statik basınç, teğetsel ve eksenel hız profilleri siklon üst yüzeyinden 0,75D kadar aşağıda yatay eksen doğrultusunda elde edilmiştir. Bu profiller Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’te sunulmuştur.



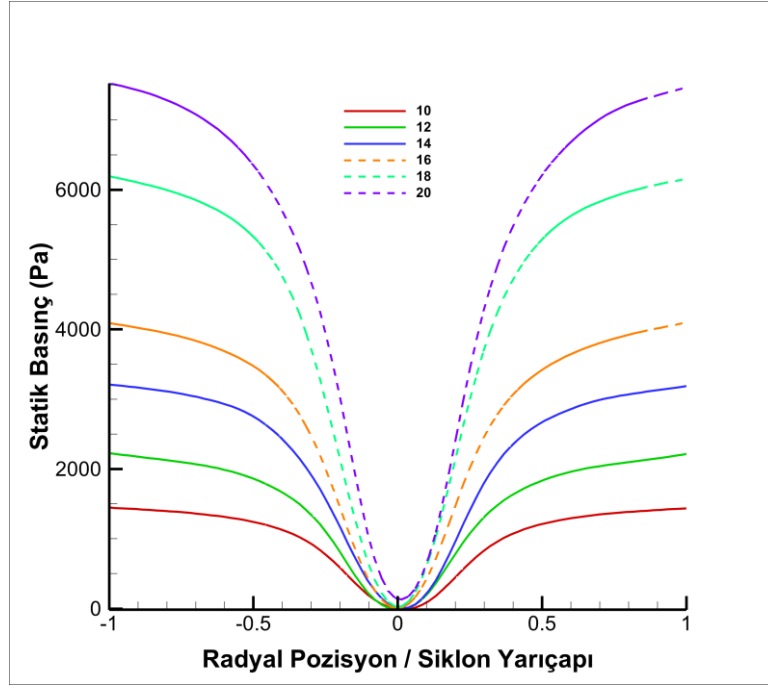
Şekil 1. Swift HE Siklon Geometrisi (Tüm Boyutlar mm)



Şekil 2. Swift HE Siklon Grid Görünümü (1339879 Eleman)

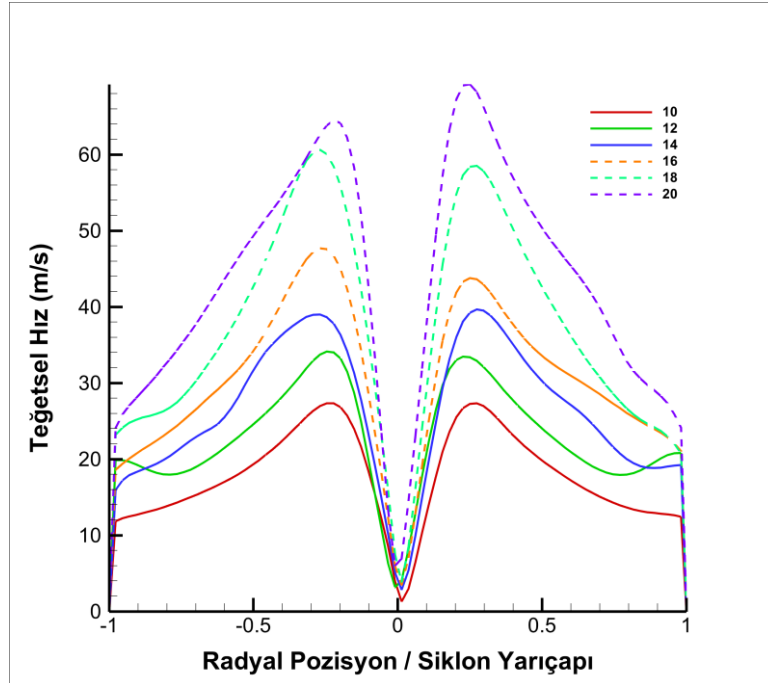
BULGULAR VE TARTIŞMA

Giriş hızı siklon performansının (toplama verimi ve basınç kayıpları) değerlendirilmesinde oldukça önemli bir parametredir (Gimbun vd., 2005; Griffiths & Boysan, 1996). Bu çalışmada Swift HE siklonda giriş hızının toplama verimi ve basınç kayıplarına olan etkisi ortaya koyulmuştur. Bu amaçla siklon çapının %75'i kadar aşağıda siklon merkezinden geçen yatay eksen boyunca alınmış statik basınç, teğetsel ve eksenel hız profilleri Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5 oluşturulmuştur. Basınç profiline bakıldığında Şekil 3 U şeklinde bir profil gözlemlenirken, bu durum siklon duvarlarından merkeze doğru basıncın düştüğünü ifade eder. Giriş hızının artmasıyla birlikte çok fazla miktarda basınç artışı söz konusu olmuştur. Ancak farklı giriş hızlarındaki basınç profilleri farklı genliklerde benzer trendler sergilemişlerdir. Basınç düşmeleri merkeze doğru artarak azalmıştır, yani merkeze doğru giderken daha çok azalmıştır.



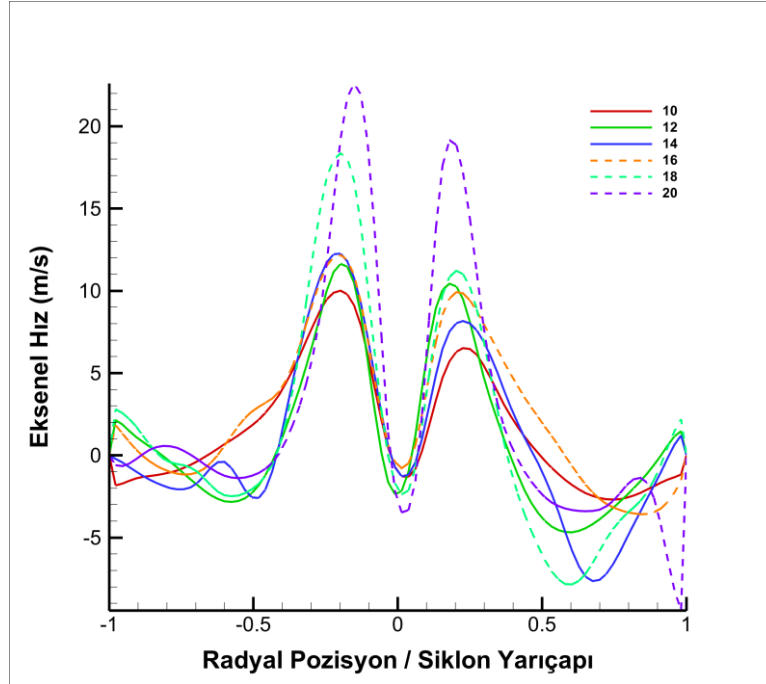
Şekil 3. Statik Basınç Profilleri Farklı Giriş Hızları İçin ($Z = 0,75D$)

Teğetsel hız profilleri incelendiğinde Şekil 4'te görüldüğü gibi M şeklinde profiller ortaya koyulmuştur. Bu şekilden anlaşılacağı üzere teğetsel hız duvarla akışkan arasındaki sürtünme nedeniyle siklon duvarına doğru sıfıra yaklaşmakta, siklon merkezine doğru gidildikçe önce artış trendine girmekte ve sonra azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Ayrıca giriş hızındaki artış etkisiyle teğetsel hızların daha fazla arttığı gözlemlenir. Buna bağlı olarak teğetsel hız artışıyla birlikte ayırma veriminin de arttığı söylenebilir.



Şekil 4. Teğetsel Hız Profilleri Farklı Giriş Hızları İçin ($Z = 0,75D$)

Eksenel hız profilleri incelendiğinde Şekil 5, eksenel hızın teğetsel hızla benzer bir davranış sergilediği görülebilir. Burada eksenel ve teğetsel hızların siklon duvarına doğru sıfıra yaklaştığı açıkça görülmektedir. Bu profillerden de anlaşılacağı üzere aşağı yönlü dış vorteks ve yukarı yönlü iç vorteks oluşumları gözlemlenirken, siklonda merkeze doğru aşağı yönlü akışlar mevcuttur. Fakat yukarı yöndeki akışın aşağı yönlü akışa nazaran daha hızlı olduğu söylenebilir. Öte yandan eksenel hız giriş hızında meydana gelen artışlarla birlikte artma eğilimine girmiştir. Giriş hızının 20 m/s olduğu durumda eksenel hızın maksimum değeri elde edilmiştir.

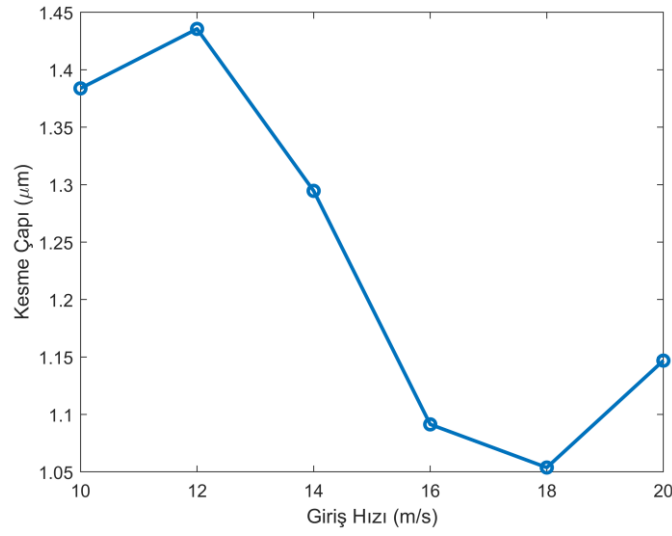


Şekil 5. Eksenel Hız Profilleri Farklı Giriş Hızları İçin (Z = 0,75D)

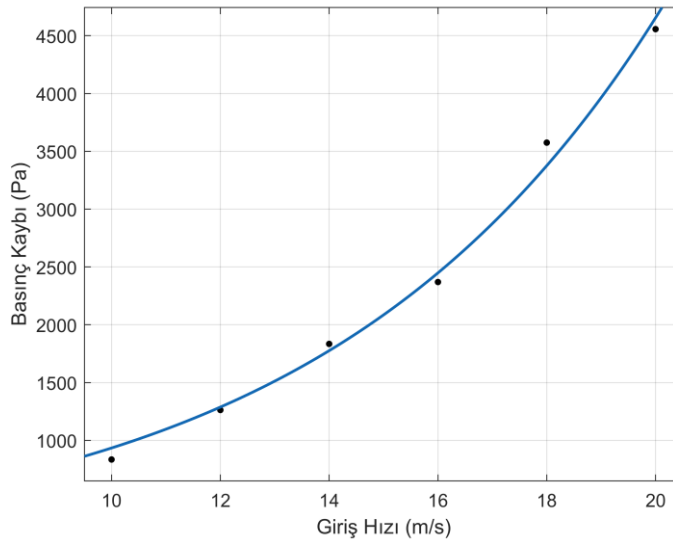
Giriş hızındaki değişimlere bağlı olarak, eksenel ve teğetsel hızlar değişkenlik gösterirken, kesme çapına ve basınç kaybına ait oluşan değişiklikler Tablo 1’de detaylı olarak sunulmuştur. Burada giriş hızının kesme çapını azaltıp, verimi ve basınç kayıplarını arttırdığı açık ve nettir. Şekil 6 incelendiğinde kesme çapının giriş hızındaki değişimden azalan yönde etkilendiği görülebilir. Genel olarak lineer bir azalma şeklinde bir trend oluşmuştur. Bu durum toplama veriminin de arttığını ifade eder. Şekil 7’de ise basınç kayıplarının giriş hızı ile olan ilişkisi verilmiştir. Giriş hızıyla basınç kaybı arasındaki ilişki $\Delta Pa = 187,3924 e^{0,1606 V}$ denklemi kullanılarak ifade edilebilir. Burada bahsi geçen artış üstel olup, sadece artan yönde seyretmektedir. Giriş hızındaki artışların, eksenel ve teğetsel hızları artırdığı düşünüldüğünde, bu durumun basınç kaybı ve toplama verimliliğinde artışlar meydana getirdiği söylenebilir. Yani, teğetsel hız ile eksenel hızların giriş hızının artması neticesindeki artışları toplama veriminin ve basınç kayıplarının da artan yönlü bir trend oluşturmalarına neden olmuştur.

Tablo 1. Giriş Hızına Bağlı Kesme Çapı ve Basınç Kayıpları Değerleri.

Giriş Hızı (m/s)	Kesme Çapı (μm)	Basınç Kaybı (Pa)
10	1,384	834,27
12	1,436	1262,37
14	1,295	1834,08
16	1,091	2369,36
18	1,054	3575,03
20	1,147	4556,78



Şekil 6. Giriş Hızına Bağlı Olarak Kesme Çapının Değişimi



Şekil 7. Giriş Hızı Ve Basınç Kaybı İçin Sunulan Denklemin Eğrisi

SONUÇ

Swift HE tipi bir siklonda giriş hızı artışının toplama verimi ve basınç kaybına olan etkileri CFD tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Bu siklon türünde, akışkan hareketi ve partikül dinamikleri RSM kullanılarak analiz edilmiştir. CFD tekniği sayesinde siklonlarda partikül hareketlerinin asıl özellikleri ve toplama verimi hesaplanması mümkün olabilmektedir. Öte yandan toplama verimi ve basınç kaybına olan etkilerin analiz edilebilmesi için 6 farklı giriş hızı değeri kullanılmıştır. Bu giriş hızlarında ortaya çıkan değişimler ve bu değişimlere bağlı performans analizleri şöyle sıralanabilir.

- Giriş hızı arttığında teğetsel hız, giriş hızına oranla daha fazla artar.
- Giriş hızının artışı eksenel hız değerlerini artırmaktadır.
- Giriş hızının artması toplama verimini genel olarak artırmaktadır.
- Basınç kayıpları giriş hızının artışıyla birlikte üstel artış göstermektedir.
- Giriş hızının 20 m/s olduğu durumda maksimum eksenel hıza ulaşılmıştır.
- Giriş hızındaki artışlar ile birlikte kesme çapı genel olarak azalmıştır, toplama verimi artmıştır

KAYNAKLAR

- Babaoğlu, N., Parvaz, F., Hosseini, S., & Elsayed, K. (2021). Giriş kesit şeklinin çok girişli bir gaz siklonun performansı üzerindeki etkisi. *Powder Technology*.
- Barth, W. (1956). Design and Layout of the Cyclone Separator on the Basis of New Investigations. *Brennstow-Wärme-Kraft (BWK)*, 8(4), 1–9.
- Brar, L. S., & Elsayed, K. (2018). Analysis and optimization of cyclone separators with eccentric vortex finders using large eddy simulation and artificial neural network. *Separation and Purification Technology*, 207, 269–283. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.013>
- Elsayed, K., & Lacor, C. (2011a). Modeling, analysis and optimization of aircyclones using artificial neural network, response surface methodology and CFD simulation approaches. *Powder Technology*, 212(1), 115–133. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.05.002>
- Elsayed, K., & Lacor, C. (2011b). Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters. *Computers and Fluids*, 51(1), 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.010>
- Elsayed, K., & Lacor, C. (2013). The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES. *Computers and Fluids*, 71, 224–239. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.09.027>
- Gao, Y., Zhang, M., Guo, J., & Xu, L. (2022). Impact of the oxidation of SO₂ by NO₂ on regional sulfate concentrations over the North China Plain. *Atmospheric Pollution Research*, 13(3), 101337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101337>
- Gimbun, J., Chuah, T. G., Fakhru'l-Razi, A., & Choong, T. S. Y. (2005). The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(1), 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.03.005>
- Griffiths, W. D., & Boysan, F. (1996). Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. *Journal of Aerosol Science*, 27(2), 281–304. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00549-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00549-8)
- Hoffmann, A. C., Stein, L. E., & Bradshaw, P. (2003). Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation. *Appl. Mech. Rev.*, 56(2), B28--B29.
- Iozia, D. L., & Leith, D. (1989). Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 10(3), 491–500. <https://doi.org/10.1080/02786828908959289>
- Jion, M. M. M. F., Jannat, J. N., Mia, M. Y., Ali, M. A., Islam, M. S., Ibrahim, S. M., Pal, S. C., Islam, A., Sarker, A., Malafaia, G., Bilal, M., & Islam, A. R. M. T. (2023). A critical review and prospect of NO₂ and SO₂ pollution over Asia: Hotspots, trends, and sources. *Science of The Total Environment*, 876, 162851. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162851>
- Lapple, C. E. (1950). Gravity and Centrifugal Separation. *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, 11(1), 40–48. <https://doi.org/10.1080/00968205009344283>
- Leith, D., & Mehta, D. (1973). Cyclone performance and design. *Atmospheric Environment* (1967), 7(5), 527–549. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90006-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90006-1)
- Lim, K. S., Kwon, S. B., & Lee, K. W. (2003). Characteristics of the collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air. *Journal of Aerosol Science*, 34(8), 1085–1095. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00079-X)
- Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., & Ebrahimi, R. (2008). Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(1), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.08.004>
- Safikhani, H. (2016). Modeling and multi-objective Pareto optimization of new cyclone separators using CFD, ANNs and NSGA II algorithm. *Advanced Powder Technology*, 27(5), 2277–2284. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.08.017>
- Safikhani, H., Akhavan-Behabadi, M. A., Nariman-Zadeh, N., & Mahmood Abadi, M. J. (2011). Modeling and multi-objective optimization of square cyclones using CFD and neural networks. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(3), 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.07.004>
- Sun, X., & Yoon, J. Y. (2018). Multi-objective optimization of a gas cyclone separator using genetic algorithm and

computational fluid dynamics. *Powder Technology*, 325, 347–360. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.012>

Venkatesh, S., Suresh Kumar, R., Sivapirakasam, S. P., Sakthivel, M., Venkatesh, D., & Yasar Arafath, S. (2020). Multi-objective optimization, experimental and CFD approach for performance analysis in square cyclone separator. *Powder Technology*, 371, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.080>

Wasilewski, M., & Brar, L. S. (2017). Optimization of the geometry of cyclone separators used in clinker burning process: A case study. *Powder Technology*, 313, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.025>

Wasilewski, M., Singh Brar, L., & Ligus, G. (2021). Effect of the central rod dimensions on the performance of cyclone separators - optimization study. *Separation and Purification Technology*, 274(May), 119020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119020>

Yang, H., Wang, N., Cao, Y., Meng, X., & Yao, L. (2023). Effects of helical fins on the performance of a cyclone separator: A numerical study. *Advanced Powder Technology*, 34(1), 103929. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103929>

Yoshida, H. (2013). Effect of apex cone shape and local fluid flow control method on fine particle classification of gas-cyclone. *Chemical Engineering Science*, 85, 55–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.060>

Zhao, B., Su, Y., & Zhang, J. (2006). Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(12 A), 1158–1165. <https://doi.org/10.1205/cherd06040>