

## Yatay Bir Boruda Dışarıdan Oluşturulan Farklı Geometrilerdeki Dönel Akışın Isı ve Akış Karakteristiklerinin Sayısal Analizi

Ahmet Numan ÖZAKIN<sup>1\*</sup>, İlhan Volkan ÖNER<sup>2</sup>

### Öz

Bu çalışmada, boru girişine bağlı üç farklı girdap üreticinin (Üçgen-Dairesel-Kare) kullanılmasıyla indüklenen türbülanslı akışı incelemek için sayısal bir model tasarlanmıştır. Bu doğrultuda 1000 W/m<sup>2</sup> sabit ısı akışına sahip yatay bir boru üzerinde sayısal analizler HAD ortamında 5000, 10000 ve 15000 olmak üzere üç farklı Reynolds sayısında yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, nispeten yüksek basınç düşüşüne neden olmasına rağmen, üçgen girdap üreticiden geçen akış en iyi soğutma performansını gösterdi. Üçgen girdap üretici için en yüksek Nusselt sayısı 15000 Reynolds sayısında yaklaşık 51.88 olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Isı transferi iyileştirme, dönel akış, dönel akış oluşturuucu

## Numerical Analysis of Heat and Flow Characteristics of Decaying Flow in Different Geometries Created Externally in a Horizontal Pipe

### Abstract

In this study, a numerical model was designed to examine turbulent flow induced by the use of three different swirl generators (Triangular-Circular-Square) attached at the pipe inlet. In this respect, numerical analyses on a horizontal pipe with a constant heat flux of 1000 W/m<sup>2</sup> were done at three different Reynolds numbers: 5000, 10000, and 15000 in the CFD environment. According to the results of the study, the flow through the triangular swirl generator showed the best cooling performance, although it caused relatively high pressure drop. The highest Nusselt number for triangular swirl generator was determined to be approximately 51.88 at 15000 Reynolds numbers.

**Keywords:** Heat transfer enhancement, swirl flow, swirl generator

<sup>1</sup>Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye, ahmet.ozakin@atauni.edu.tr

<sup>2</sup>Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye, ivoner@atauni.edu.tr

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3065-0189> <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-2083-8703>

## 1. Giriş

Dönen akış, klasik bilimden bu yana ısı transfer oranlarını arttırmak için kullanılmıştır. Dönen akışlar, ısı transfer katsayısını veya kütle transfer katsayısını arttırmak için dairesel borularda kullanılırlar. Borularda dönen akış, üç farklı teknik kullanılarak üretilebilir. Bunlar; aktif, pasif ve bileşik yöntemlerdir. (Bergles, 1997).

Pasif yöntemler kullanılarak üretilen dönen akışlar, akış yolu boyunca sürekli girdap yeteneği ile daha esnek sınıflandırılabilir (Chen ve ark., 2016). Bunun için genellikle teğetsel girişler, radyal girdap kanatları ve aksel girdap kanatları gibi dönel akış üreten elemanlar kullanılmaktadır. Girdap elemanları kesikli (decaying) dönüğe sebep olan jeneratörlerde boru girişine yerleştirilebileceği gibi kılavuzlu girdaplarda, akış yolu boyunca yerleştirilebilir. Bunun yanında girdabı sürdürmek için aktif bir kaynağın olmaması, dönen akışın akış yolu boyunca azalmasına neden olabilir. Isı ve kütle transferinin iyileştirilmesinin büyük önem taşıdığı çok sayıda kimyasal ve mekanik sistemde de girdaplı akışlar istenir (Liu ve ark., 2013).

(Yılmaz ve ark., 1999) tarafından yapılan deneysel çalışmada, farklı açılarda takılan kılavuz kanatların kullanılmasıyla hareketlendirilen dönel akışta, bozulan girdabın ısı transferi ve sürtünme özellikleri incelenmiştir. Kanat açısının bir fonksiyonu olarak Reynolds sayısı, Prandtl sayısı ve Nusselt sayısının bir korelasyonu önerilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre dönel akışın performansının, yüksek kanat açıları ve nispeten düşük Reynolds sayıları ile aksel akıştan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Dönel akışlar ısı değiştiricileri, türbinler, yanma odası, roketler, pnömatik taşıma sistemleri gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Örneğin bir yanma odasında dönel akışların oluşturulması, girdap yoğunluğunun yönetilmesiyle boyutları kolayca ayarlanabilen devridaim kabarcıklarının olumlu rolü sayesinde alevin kalitesini iyileştirir.

(Widmann ve ark., 2000) kaskat dönel jeneratörleri kullanarak yürüttükleri bir çalışmada kanatlı ve kademeli girdap jeneratöründen geçen hava akışını, bir referans püskürtmeli yanma ünitesine giren yanma havası akışını karakterize etmek için hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, reaktöre giden havaya istenen açısal momentumu veren 12 kanatlı kademeli (kaskat) girdap jeneratöründeki aerodinamiği simüle etmek için üç boyutlu  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Kesikli dönel akışın incelendiği bir başka çalışmada, araştırmacılar (Algifri ve ark., 1988) iş akışkanı olarak kullandıkları hava için ısı transfer katsayılarını, ısıtılmış bir boru boyunca ölçmüşlerdir. Çalışma sonuçları, dönel akışta ısı transfer katsayılarını tahmin etmek için önerilen bir ifade ile karşılaştırılmıştır. Benzer bir çalışmada ise, araştırmacılar (Farias ve ark., 2001) tek bir teğetsel giriş vasıtasıyla hareketlendirilen dönel laminar decaying akışına maruz kalan boru içindeki kütle transferinin sayısal modellemesini yapmışlardır.

(Zhang ve ark., 2003) tarafından yapılan bir çalışmada, dairesel kanalda dönen türbülanslı akışların ve ısı transferinin sayısal bir simülasyonu sunulmuştur. Çalışmada yeni bir cebirsel Reynolds stres modeli ile zaman ortalamalı korunum denklemleri çözülmüştür. Simülasyon farklı akış koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarında iş akışkanı için; aksel ve teğet hızları, türbülans kinetik enerjisi, sıcaklık ile kanalın iç ve dış yüzeylerinde yerel ısı transfer katsayılarının sonuçları sunulmuştur.

Benzer bir çalışmada araştırmacılar, (Eiamsa-Ard ve ark., 2012) kısa uzunluklu burğu şeklindeki şeritler (twisted tape) tarafından üretilen türbülanslı decaying akışın, yerel ısı transfer katsayısı ve akış özelliklerinin deneysel ve sayısal sonuçlarını  $Re=5200-15300$  aralığında sunmuşlardır. Deneysel sonuçlar, bu girdap üreticilere sahip borunun, girdap üretici olmayan borudan daha yüksek yerel Nusselt sayısına sahip olduğunu ortaya koymuştur.

(Saqr ve ark., 2014) tarafından yürütülen sayısal bir çalışmada, giriş girdap yoğunluğunun ve akış yönünde girdap bozulmasının, akıştaki ısı transferi ve yerel entropi üretimi üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla, türbülanslı boru akışları incelenmiştir. Çalışmada, RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes), enerji ve entropi denklemleri ile  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, girdap sayısının bir fonksiyonu olarak entropi artışı tahmin etmek için yeni bir CFD tabanlı ampirik korelasyon önerilmiştir.

Bir başka sayısal optimizasyon çalışmasında, (Yeşildal, 2021) boru girişine yerleştirilen aksel girdaplı akış üreticinin ısı transfer parametrelerinin (Reynolds sayısı, sarmal açısı ve adım) optimum değerlerin Yanıt Yüzey Yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda Reynolds sayısının kare etkileri ile Reynolds sayısı ve kanat açısının birleşik etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirtilmiştir. Hedef fonksiyonu olarak belirlenen ısı transfer katsayısı için matematiksel bir model önerilmiştir.

(Bilen ve ark., 2022) boru girişine sabitlenmiş farklı girdap açlarına ( $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $41^\circ$  ve  $50^\circ$ ) sahip girdap üreticilerin bir boru akışında ısı transferi ve akışkan akış özelliklerine etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yerel ve ortalama Nusselt (Nu) sayıları ve sürtünme faktörü (f) için girdapsız boru akışının yanı sıra Re sayısı ve girdap açısının bir fonksiyonu olarak da ampirik korelasyonlar önermişlerdir.

(Bali ve ark., 2014) yatay bir borudaki ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerini, bir veya iki pervane tipi girdap üreticinin karşılaştırmalı analizine odaklanarak, decaying girdap akışı durumunda incelediler. Deneyleri, 5000 ile 30000 arasında değişen Reynolds sayılarında gerçekleştirdiler. Birinci girdap üreticinin etkisinin azaldığı bir konumda ikinci girdap üreticinin kullanılmasının ısı transferini önemli ölçüde arttırdığı sonucuna vardılar.

Çalışma akışkanı olarak havayı kullanan araştırmacılar (Aydın ve ark., 2014), boru yüzeyini sabit sıcaklıkta tutarak, 20000 ile 56000 arasında değişen Reynolds sayılarında decaying girdap akışını deneysel olarak araştırdılar. Çalışmada araştırmacılar, helisel girdap üreticilerinin farklı boru

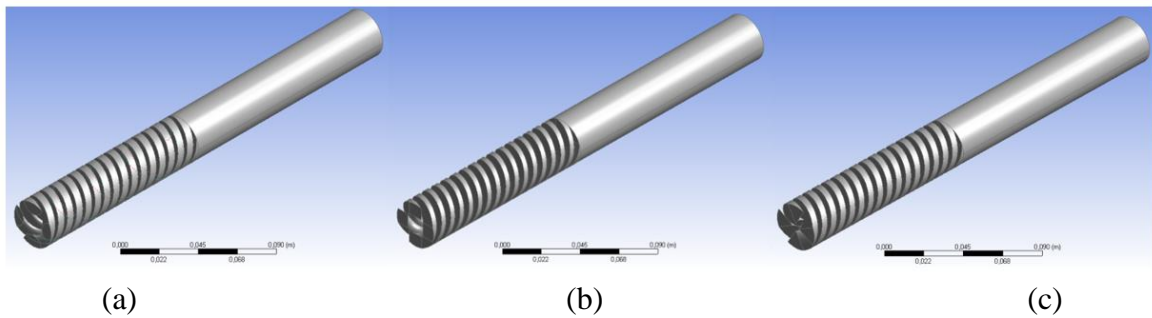
uzunluklarında ( $h = 15, 20, 25$  ve  $30$  mm) ve boru uzunluğu-çap oranlarında ( $U / D = 10, 20, 30$  ve  $40$ ) ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerini incelediler. Çalışma sonuçlarına göre  $Re$ ,  $h$  ve  $L/D$  etkilerinin kritik olarak birbirine bağımlı olduğu sonucuna varılmıştır.

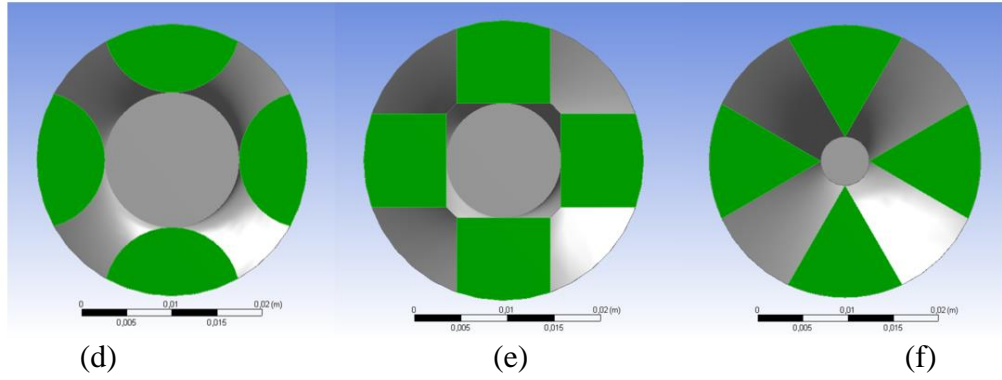
Bir girdaplı sıvı akışında, ana akım hızının teğetsel bileşeni, ortaya çıkan hız üzerinde önemli ölçüde etkilidir (Siddique ve ark., 2016). Dönel akışlar için, girdap sayısı da ( $S$ ), girdap derecesini veya hem çevresel hem de eksenel momentumlar arasındaki oranı tanımlayan önemli bir parametredir (Chen et al., 2016).

Literatürdeki bulgular ve öneriler ışığında bu çalışmada, decaying swirl jeneratörlerin dairesel bir borudaki türbülanslı girdaplı akışların ısı transfer özelliklerine etkisi, CFD simülasyonları ile sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada boru girişine adapte edilen eşit akış yüzey alanlarına sahip decaying elemanlar dairesel, kare ve üçgen profilli olarak tasarlanmıştır. Farklı Reynolds sayılarında (5000, 10000, 15000) ANSYS-Fluent yazılımı yardımıyla farklı akış profillerinde (kare, üçgen, daire) eksenel girdaplar oluşturularak üretilen decaying akışların ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristiklerine olan etkilerini incelemek amacıyla test bölgesi modellenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Eşit akış alanına ( $340 \text{ mm}^2$ ) sahip farklı geometrilerdeki dönel (dönel kısım uzunluğu  $120$  mm, dönme açısı  $105^\circ$ , dönme adedi  $4$ ) akışların yatay bir boru içerisinde ( $d=30\text{mm}$ ,  $L=150$  mm) ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristiklerine olan etkilerinin sayısal olarak incelendiği bu çalışmada, üç farklı akış geometrisi (karesel, dairesel ve üçgensel) kullanılmıştır. CFD simülasyonlarında kullanılan akış geometrileri ve test bölgesi (yatay boru) Şekil 1'de görülmektedir. CFD analizleri için  $150$  mm boyundaki test bölgesi olan yatay borunun dış yüzeyinden  $1000 \text{ W/m}^2$  sabit ısı akısı uygulanmıştır. Ayrıca iş akışkanı olarak sıvı fazdaki su,  $20^\circ\text{C}$  sıcaklıkta dönel elemanlar yardımıyla farklı Reynolds sayılarında (5000, 10000 ve 15000) test bölgesine giriş yapmaktadır. CFD analizlerinde katı yüzeyler çıkarılarak sadece akış hacmi modellenmiştir.





**Şekil 1.** Çalışmada incelenen swirl akış geometrileri. (a)-(d) Dairesel akış hacmi ve akış alanı, (b)-(e) Karesel akış hacmi ve akış alanı, (c)-(f) Üçgensel akış hacmi ve akış alanı.

Sayısal çalışma için tasarımları yapılan geometrilere ANSYS-Fluent 16.0 yazılımı ile analizler yapılmıştır. Yapılan sayısal analizler için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- İş akışkanı olarak sıvı fazda ve sıkıştırılmaz su kullanılmıştır.
- Suyun fiziksel özellikleri sabittir.
- Test bölgesi içerisindeki su akışı daimidir.
- Test bölgesi kararlı olarak kabul edilmiştir.
- Yer çekimi etkileri dikkate alınmamıştır.

Belirtilen kabuller göz önünde bulundurularak yapılan CFD analizlerinde aşağıda verilen korunum denklemleri kullanılmıştır. Bu bağlamda kütle korunumu denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

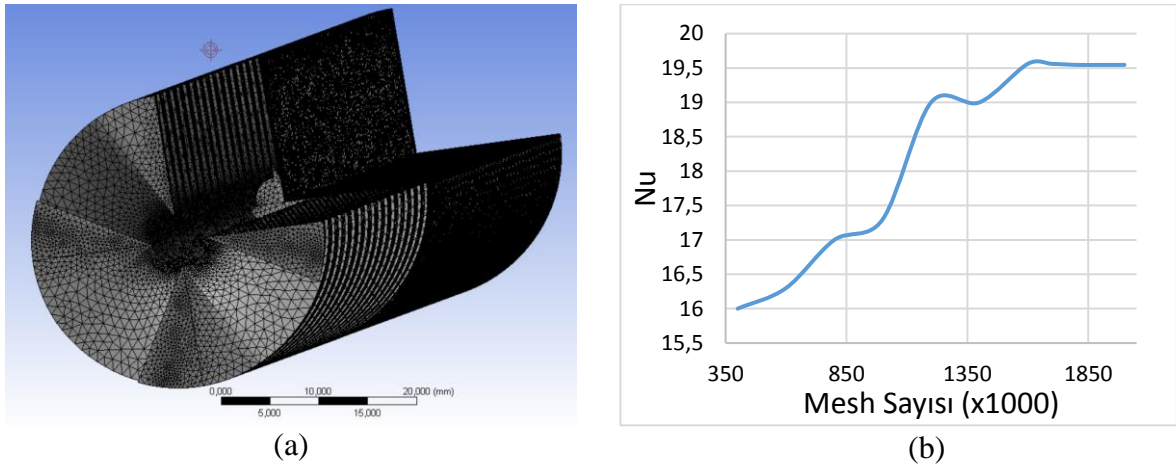
Momentumun korunumu denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

enerjinin korunumu denklemi;

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

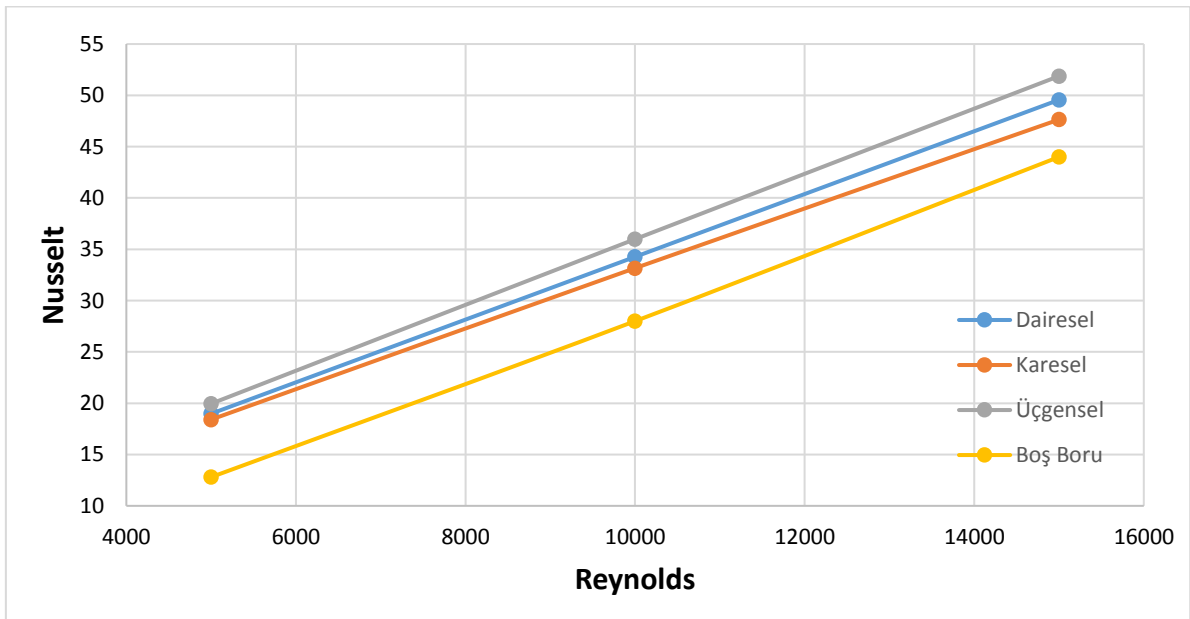
şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca çalışmanın CFD analizlerinde türbülans modeli “k-ε RNG” ile “Enhanced Wall Functions” şartları kullanılmıştır. Çalışmanın ağ yapısı kısmında dairesel, karesel ve üçgensel akış kesitine sahip akış hacimleri için sırasıyla 1615353, 1785662 ve 1916491 adet mesh elemanı kullanılmıştır. Çalışmada bütün geometriler için yaklaşık 400000 adet mesh elemanı ile başlanarak kademeli olarak mesh eleman sayısı artırılmış ve belirtilen sayılara ulaşıldığında “Orthogonal Quality” % 90-% 92 arasında oluşturulmuştur. Bu çalışma için kullanılan mesh görüntüsü ve sonuçların mesh elemanından bağımsızlık analizi sonuçları Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. (a) Üçgensel akış hacmi için mesh görüntüsü, (b) üçgensel model 5000 Reynolds için mesh bağımsızlık analizi.

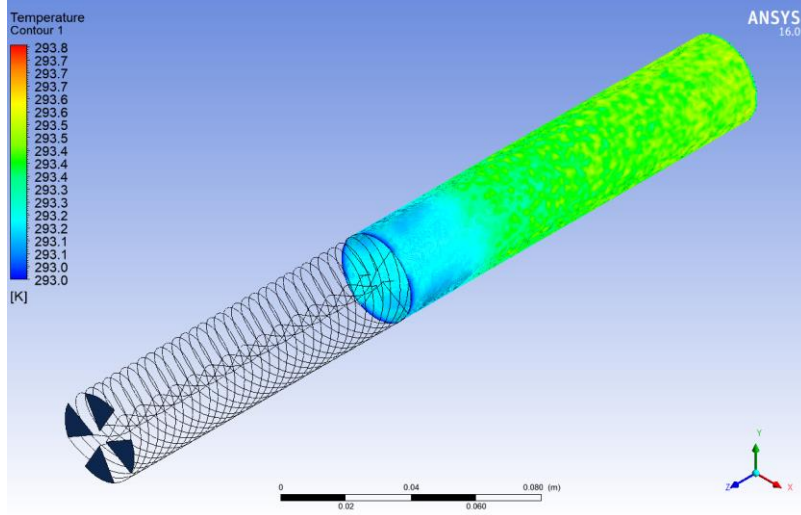
### 3. Bulgular ve Tartışma

Farklı geometrilerde dönel akışların ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristiklerinin incelenmesi amacıyla yapılan bu sayısal çalışmada 9 adet CFD analizi yapılmıştır. Çalışma sonuçlarında dairesel, karesel ve üçgensel kesit alanlarına sahip akış hacimleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile oluşturduğu karakteristik Şekil 3'te verilmiştir.

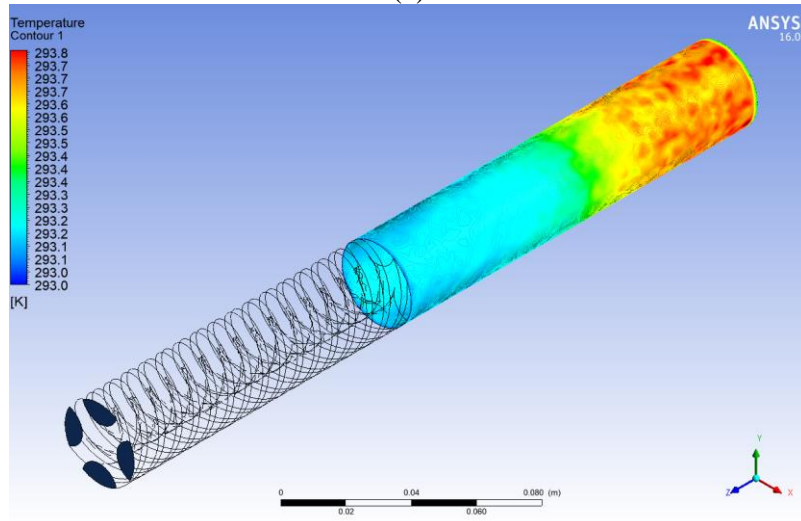


Şekil 3. (a) Farklı Reynolds sayıları için farklı akış geometrilerinin ısı transferi performansları.

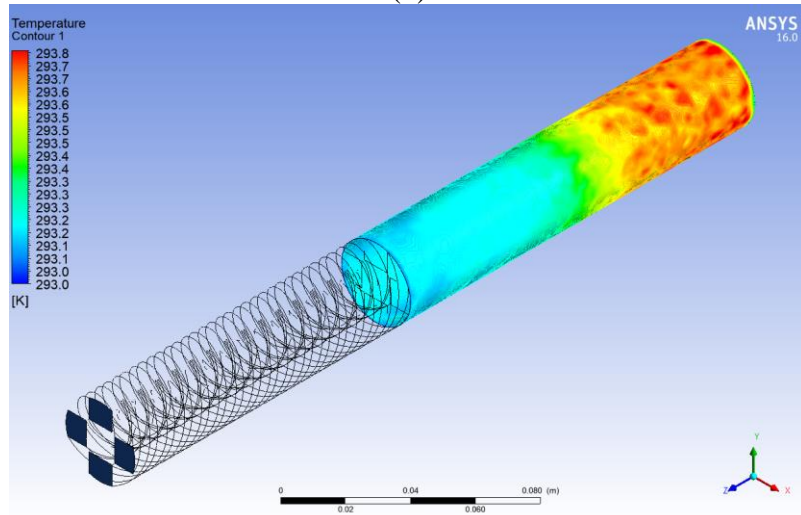
Dairesel yatay boruda boru içerisine farklı bir eleman yerleştirmeden borunun giriş kısmından akışa girdap kazandırarak ekstra bir türbülans sağlamak amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen ısı transferi performansları Şekil 3'te görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde en iyi ısı transferinin üçgensel akış geometrisinde ortaya çıktığı görülmektedir.



(a)



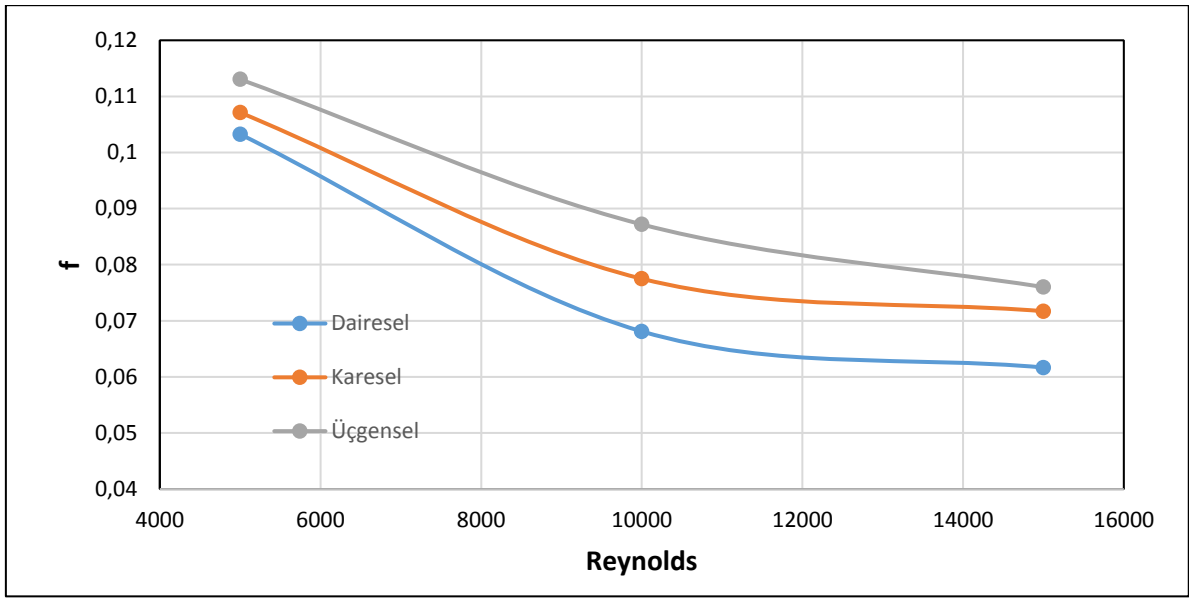
(b)



(c)

**Şekil 4.** Farklı akış geometrilerinde test bölgesi yüzey sıcaklıkları (a) Üçgensel (b) Dairesel (c) Karesel.

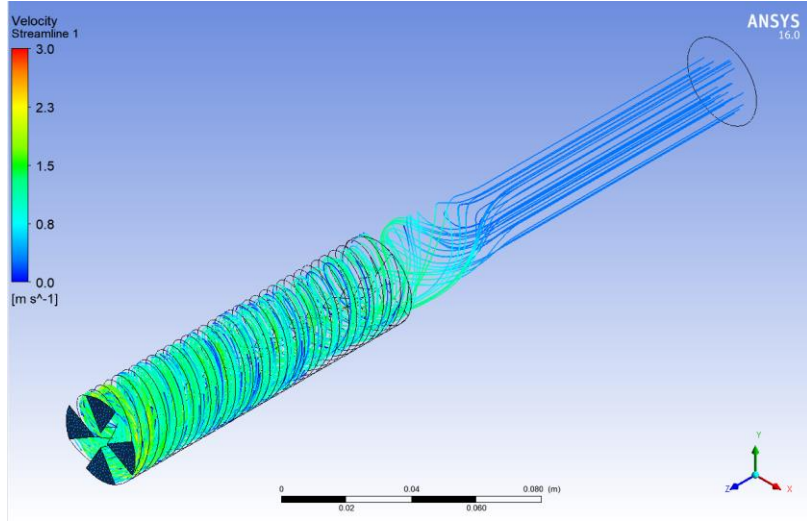
Şekil 3 göz önünde bulundurularak Şekil 4 incelendiğinde üçgenel akış kesitine sahip olan analizlerde en yüksek Nusselt sayısının en iyi soğutma performansına sahip olduğu görülmektedir. Bu soğutma performansını sırasıyla dairesel ve karesel akış kesitine sahip geometri izlemektedir. Üçgenel akış kesitinin diğer akış kesit geometrilerine nispeten daha iyi bir soğutma performansı göstermesinin temel sebebinin test bölgesi olan boru ekseninde keskin köşelere sahip üçgenel akışın daha yüksek türbülansa ve basınç düşüşüne sebep olarak ısı transferini diğer geometrilere kıyasla yüksek bir seviyeye getirmesidir. Bu durum Şekil 5 incelendiğinde de görülmektedir. Şekil 5'te farklı akış kesit geometrilerinde Reynolds sayısının artışıyla birlikte sürtünme katsayısı görülmektedir.



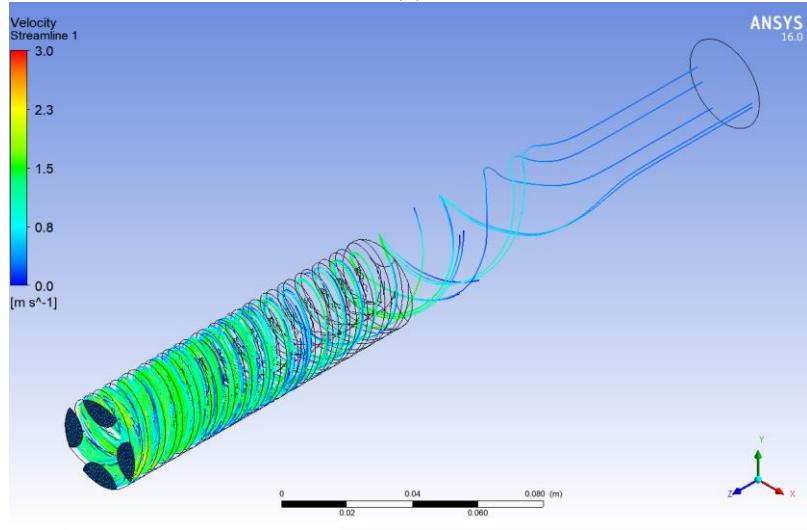
Şekil 5. Farklı Reynolds sayılarında akış geometrilerinin oluşturduğu sürtünme katsayıları.

Şekil 5 incelendiğinde en yüksek ısı transferi performansına sahip olan üçgenel kesitli akış geometrisinin diğer geometrilere kıyasla daha yüksek bir basınç düşüşü oluşturduğu görülmektedir. Dairesel kesitli akış geometrisi ise en düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Dairesel kesitli akış geometrisinin en düşük sürtünme katsayısına sahip olmasının temel sebebi ise oval bir yapıya sahip olması ve keskin köşe noktaları bulundurmamasıdır. Şekil 6'da farklı akış kesit geometrileri için akım iplikçikleri görülmektedir.

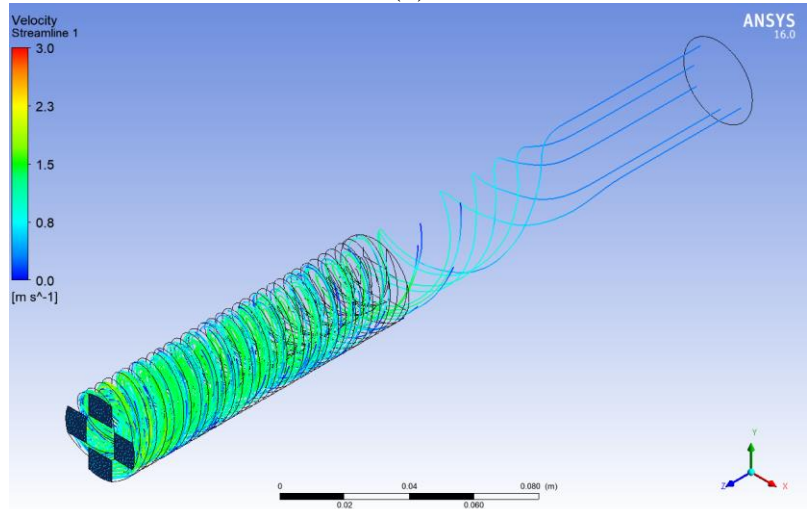




(a)



(b)



(c)

**Şekil 6.** Farklı akış kesit geometrileri için akım iplikçikleri (a) Üçgensel (b) Dairesel (c) Karesel.

Şekil 6 incelendiğinde üçgensel akış kesiti geometrisine sahip olan akış için aynı şartlar altında test bölgesi girişinde daha yüksek bir türbülans oluştuğu görülmektedir. Şekil 5'te verilen sürtünme katsayısı eğrisinde üçgensel akış geometrisinin nispeten daha yüksek bir sürtünmeye sahip olması

test bölgesi girişinde daha yüksek bir çalkantı oluşturması sebebiyledir. Bu çalkantı ise ısı transferi performansının yüksek olmasının temel sebebi olarak ortaya konulabilir.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, yatay bir borudaki ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristikleri akışa dışarıdan bir girdap kazandırarak CFD ortamında analiz edilmiştir. Sayısal modelleme kararlı hal koşullarında ve k-ε türbülans modeli ile yapılmıştır. Üç farklı Reynolds sayısında farklı akış geometrileri ve boş boru için analiz sonuçları ortaya konulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre en iyi ısı transferi performansı üçgenel geometriye sahip olan akışta gerçekleşmiştir. Boş boruya kıyasla üçgenel akış kesitine sahip geometri kullanıldığında Nusselt sayısında yaklaşık %17.9 iyileşme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sürtünme faktörü açısından ise en yüksek basınç kaybı değerinin 5000 Reynolds değerinde üçgenel kesit geometrisinde olduğu, ortalama olarak ise üçgenel kesitli geometrideki sürtünme faktörü değerinin dairesel kesitli geometriye göre %18,53 fazla olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, yatay borulardaki ısı transferi uygulamalarında boru içerisine müdahale etmeden akışa dışarıdan bir girdap kazandırmanın ısı transferi karakteristiklerine olumlu bir etki sağladığı belirlenmiştir.

#### Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### Kaynaklar

- Algifri, A.ve ark., (1988). Heat transfer in turbulent decaying swirl flow in a circular pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(8), 1563-1568.
- Aydin, O.ve ark., (2014). An experimental study on the decaying swirl flow in a tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 55, 22-28.

- Bali, T.ve ark., (2014). Experimental investigation of decaying swirl flow through a circular pipe for binary combination of vortex generators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 53, 174-179.
- Bergles, A. (1997). Heat transfer enhancement—the encouragement and accommodation of high heat fluxes.
- Bilen, K.ve ark., (2022). Thermo-hydraulic performance of tube with decaying swirl flow generators. *Applied thermal engineering*, 200, 117643.
- Chen, B.ve ark., (2016). Fluid dynamics and heat transfer investigations of swirling decaying flow in an annular pipe Part 2: Fluid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 1012-1028.
- Eiamsa-Ard, S.ve ark., (2012). Decaying swirl flow in round tubes with short-length twisted tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 649-656.
- Farias, N.ve ark., (2001). Finite element simulation of mass transfer in laminar swirling decaying flow induced by means of a tangential inlet in an annulus. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190(35-36), 4713-4731.
- Liu, S.ve ark., (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 64-81.
- Saqr, K. M.ve ark., (2014). Effects of swirl intensity on heat transfer and entropy generation in turbulent decaying swirl flow. *Applied thermal engineering*, 70(1), 486-493.
- Siddique, H.ve ark., (2016). *Effect of swirl flow on heat transfer characteristics in a circular pipe*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Widmann, J. F.ve ark., (2000). Aerodynamic study of a vane-cascade swirl generator. *Chemical Engineering Science*, 55(22), 5311-5320.
- Yeşildal, F. (2021). Numerical Optimization of Heat Transfer Parameters in a Pipe with Decaying Swirl Flow Generators Using Response Surface Methodology. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 5(2), 9-14.
- Yilmaz, M.ve ark., (1999). Enhancement of heat transfer by turbulent decaying swirl flow. *Energy conversion and management*, 40(13), 1365-1376.
- Zhang, J.ve ark., (2003). Simulation of swirling turbulent flows and heat transfer in an annular duct. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, 44(6), 591-609.