

Geri Basamak Akışlarında Basınç Gradyeni Değişiminin Akış ve Isı Transferi Üzerine Etkileri

Effects of Pressure Gradient Change on Flow and Heat Transfer in Backward-Facing Step Flow

Murat Ateş 

Doktora Öğrencisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
Bursa, Türkiye

Erhan Pulat 

Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa,
Türkiye

* Corresponding author: murates10@gmail.com

Geliş Tarihi / Received: 18.10.2022
Kabul Tarihi / Accepted: 17.11.2022

Araştırma Makalesi/Research Article
DOI: 10.5281/zenodo.7364799

ÖZET

Geri basamak akışları geçmişten günümüze hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı transferi incelemeleri için gerek deneysel gerek nümerik olarak oldukça fazla sayıda çalışmaya konu olmuştur. Bu akışlarının tipik özelliklerinin aniden değişen kanal yüksekliğinden sonra meydana gelen akış ayrılması ve kanal uzunluğu yeteri kadar uzunsa oluşan akışın yeniden birleşmesi gelmektedir. Hem laminar hemde türbülanslı akış örneklerini görebileceğimiz bu tür akışlarda, akışın yeniden birleşmesine bağlı olarak ısı transferi de gerçekleşmektedir. Bu çalışmada kapalı bir kanalda türbülans şiddetinden bağımsız olarak basamak öncesinde belirlenmiş bir noktadan itibaren kanal çıkışına doğru daralan ve genişleyen kanal geometrisine bağlı olarak basamak sonrası yeniden birleşme ve ısı transferi incelenmiştir. Literatür çalışmalarında oldukça yaygın olarak incelenen deneysel bir çalışmadaki sonuçlara; ANSYS Fluent programında Standard $k-\epsilon$ modeli kullanılarak ulaşılmıştır. Uygulanan nümerik model ile deneysel verilere ulaşılmasının ardından, daralan ve genişleyen kanal geometrisi kullanılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Basınç gradyeni etkisinin kanal çıkışına doğru azaldığı durumlarda yeniden birleşme bölgesinin kanal çıkışına doğru ilerlediği ve ısı transferi kapasitesinin azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri basamak akışları, yeniden birleşme, ısı transferi, akışkanlar mekaniği

ABSTRACT

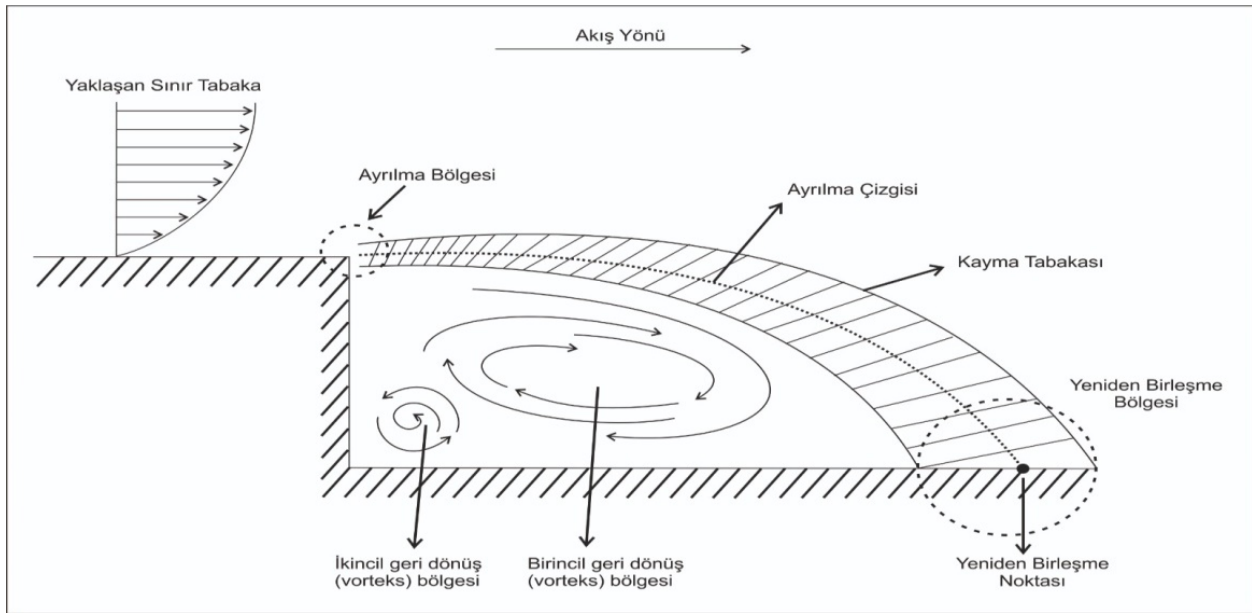
Backward-facing flows have been the subject of numerous experimental and numerical studies for computational fluid dynamics and heat transfer studies from past to present. The typical features of these flows are the separation of the flow after the abruptly changing channel height and the recombination of the formed flow if the channel length is long enough. In such flows, where we can see both laminar and turbulent flow examples, heat transfer also takes place due to the recombination of the flow. In this study, post-step recombination and heat transfer due to the channel geometry that narrows and expands towards the channel exit from a determined point before the step independent of the turbulence intensity in a closed channel were investigated. The results of an experimental study that is widely discussed in literature studies; it has been reached by using the Standard $k-\epsilon$ model in ANSYS Fluent. After reaching the experimental data with the applied numerical model, the results obtained by using the narrowing and expanding channel geometry were examined. It has been determined that in cases where the pressure gradient effect decreases towards the channel exit, the re-unification region moves towards the channel exit and the heat transfer capacity decreases.

Keywords: Backward-facing step flow, reunification, heat transfer, fluid mechanics.

1. GİRİŞ

Günlük hayatımızın birçok noktasında geri basamak akışlarının farklı uygulamaları ile farkında olmadan karşılaştığımız bir gerçektir. Bu akışlarda akışkanlar mekaniğinde ele alınan temel olaylardan laminer ve türbülanslı akışların örneklerini bulabilmekteyiz. Laminer ve türbülanslı akışlar uygulama alanlarına göre gerek hesaplamalarda gerekse tasarım parametrelerinin belirlenmesinde büyük bir etkiye sahiptir. Soğutma sistemleri, yanma odaları, enerji üretimi, hidrolik makinelerin çalışmaları gibi birçok alanda uygulamada karşımıza çıkan bu akışların özelliklerinin bilinmesi gerekli tasarımların yapılabilmesi, optimum tasarım parametrelerinin belirlenebilmesi, etkinlik katsayısının artırılması ve ele alınan sistemlerin yüksek verimle çalışabilmesi için önem arz etmektedir.

Bir geri basamak akışının genel yapısı Şekil 1’de gösterilmektedir. Akış yönü boyunca kanal yüksekliğinde basamağa bağlı olarak oluşan ani değişim ve akışın basamak sonrasında kanal tabanından ayrılarak yeniden birleşme noktasından itibaren akış istikameti ve tersine doğru ayrılması geri basamak akışının tipik özelliğidir. Birleşme sonrasında geri dönen bu akış literatürde bu olayın geri basamak akışı olarak adlandırılmasına neden olmuştur. Standart bir geri basamak akışı geometrisinde değişen kanal yüksekliğine yaklaşan sınır tabaka akışı, ayrılma bölgesinden itibaren ayrılma çizgisi boyunca hareket ederek yeniden birleşme bölgesi içinde yer alan yeniden birleşme noktasında ayrılan akış kanal tabanı ile buluşmaktadır. Akış istikametinin tersine doğru yeniden birleşme noktası ile ayrılma noktası arasında ise geri dönüş ya da başka bir ifadeyle vorteks bölgeleri oluşmaktadır.



Şekil 1. Geri basamak akışı temel yapısı (Ateş ve Pulat, 2020)

Geri basamak akışlar ile ilgili olarak araştırmacılar oldukça fazla sayıda deneysel ve nümerik çalışma gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalardan birkaçını kronolojik olarak ifade etmek gerekirse; Bradshaw ve Wong (1972) türbülans uzunluk ölçeğinin yeniden birleşme sonrasında basamak yüksekliğinden görece bağımsız olduğunu ifade etmiştir. Eaton ve Johnston (1981) farklı deneyler gerçekleştirerek yeniden birleşme uzunluklarını karşılaştırdıklarında birbirinden bağımsız farklı değişkenlerin etkilerini incelemiştir. Armaly ve ark. (1983), farklı akış rejimlerindeki ayrılma uzunluklarının karakteristiklerinde Reynolds sayısı etkisini; Vogel ve Eaton (1985) ise basamak sonrasında sabit ısı akışı uygulanmış bir düzende yeniden birleşme üzerinde ısı transferi etkisini

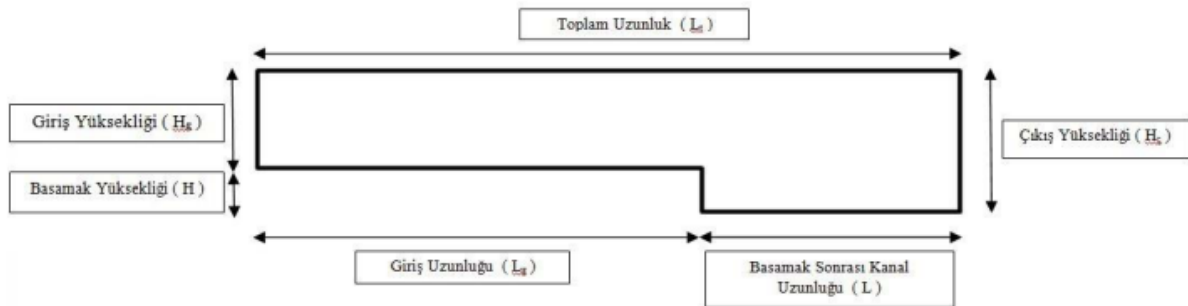
incelemiştir. Driver ve Seegmiller (1985), kapalı bir kanaldaki tavan genişliğini değiştirerek basınç gradyenindeki değişimin, yeniden birleşme noktası üzerinde etkili bir parametre olduğunu tespit etmiştir. Isomoto ve Honami (1989), basamaktan sonraki türbülansın, yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesinde etken olduğunu ifade etmişlerdir. Chiang ve ark. (1997), kapalı kanaldaki akıştaki tavan bölgesindeki akış ayrışmasına Reynolds sayısının etkisinin olmadığını ifade etmiştir.

Geri basamak akışlarında ısı transferi karakteristiklerine ve akış karakteristiklerine etkileri inceleyen birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Lee ve Matescu (1998), Iwai ve ark. (2000), Pulat ve Diner (2001), Barkley ve ark. (2002), Biswas ve ark. (2004), Chen ve ark. (2006), Khanfer ve ark. (2008), Hossain ve ark. (2013), Togun ve ark. (2014), Ateş (2015), Chen ve ark. (2018) ve Ateş ve Pulat (2020) farklı Reynolds sayıları, farklı basamak genişleme oranları, farklı türbülans modellemeleri ve farklı türbülans şiddetleri uygulayarak akış karakteristikleri üzerindeki değişimleri incelemiştir.

Bu makaleye konu olan çalışma ise geri basamak akışlarında basınç gradyeninin akış karakteristiği ve ısı transferi üzerine etkileridir. Bu amaçla Vogel ve Eaton (1985) tarafından ele alınan deneysel düzenekte ısı transferi incelemesinde irdelenmeyen basınç gradyeni değişiminin, Driver ve Seegmiller (1985) tarafından ele alınan düzenekte irdelenmeyen sabit ısı akısı uygulamasıyla birlikte değerlendirilen ısı transferinin aynı çalışmada ele alınmasıdır. Driver ve Seegmiller (1985) çalışmasında kullanılan farklı basınç gradyeni değişimleri, Vogel ve Eaton (1985) çalışmasında kullanılarak yerel Stanton sayısı üzerinden ısı transferi ve yeniden birleşme uzunluğu üzerinden akış karakteristiği incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bilgisayar destekli mühendislik yaklaşımı ile gerçekleştirilen ve bu makaleye konu olan çalışmada öncelikli olarak Vogel ve Eaton (1985) tarafından ele alınan deneysel düzeneğin iki boyutlu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de gösterilen standart geri basamak akışı geometrisi çizilerek, sırasıyla giriş yüksekliği (H_g) 152 mm, basamak yüksekliği (H) 38 mm, çıkış yüksekliği (H_c) 190 mm, basamak sonrası kanal uzunluğu (L) 190 mm ve kanalın toplam uzunluğu (L_t) 3040 mm olarak girilmiştir.

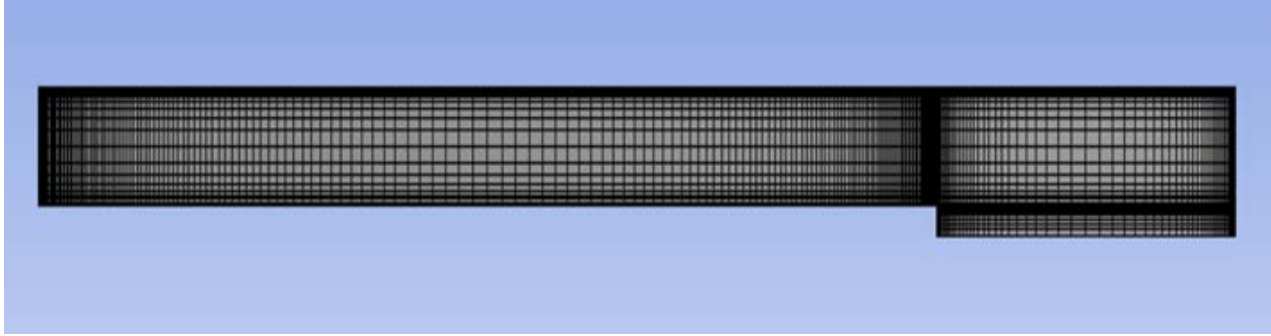


Şekil 2. Geri Basamak Akışı Geometrisi

Ele alınan geometrinin çizilmesi, nümerik çalışmada kullanılacak olan ağ örgü yapısının (mesh) oluşturulması, oluşturulan ağ örgü yapısı ardından türbülans modellemeleri için simülasyonların uygulanması ANSYS Student 2020 R1 programı içerisinde yer alan FLEUNT analiz sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tasarıma konu olan geometrinin ağ örgü yapısının oluşturulmasında özellikle kanalın üst ve alt tabanlarındaki bölgelerde, kanal genişliğinin değiştiği bölgelerde ağ örgüsünün daha sık bir şekilde

oluşturulmasına dikkat edilmiştir. Şekil 3'te yer alan örgü yapısı 5671 düğüm noktası (node) ve 5400 hücreden (element) oluşmaktadır.



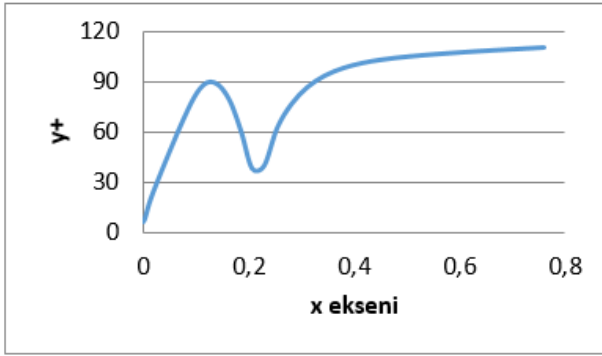
Şekil 3. Kullanılan Ağ Örgü Yapısı

DeneySEL düzeneğin geometrik tasarımı ve ağ örgü modellemesinin yapılmasının ardından sınır şartları, Vogel ve Eaton (1985) çalışmasındaki gibi tanımlanmıştır. Buna göre kanalda akışkan olarak hava kullanılmıştır. Uygulanan diğer sınır şartları ve fiziksel büyüklükleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

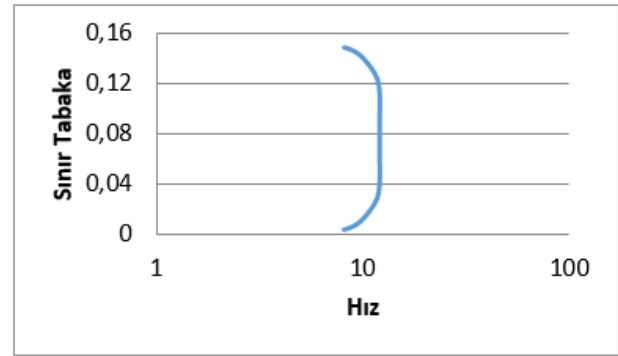
Tablo 1. Sınır Şartları ve Sınır Şartlarının Fiziksel Büyüklükleri

Cidarlara Göre Sınır Şartları		Sınır Şartlarının Fiziksel Büyüklükleri	
Giriş Sınır Şartı	Hız Girişi	Giriş Hızı	11,3 m/sn
		Akışkan Giriş Sıcaklığı	20° C
		Türbülans Şiddeti	% 0,2
Çıkış Sınır Şartı	Basınç Çıkışı	Çıkış Basıncı	0 Pa
Basamak Sonrası Alt Duvar	Sabit Isı Akısı Uygulanmış Duvar	Sabit Isı Akısı	270 W/m ²
Diğer Duvarlar	Adiyabatik Duvar	Adiyabatik Duvarlar	0° C

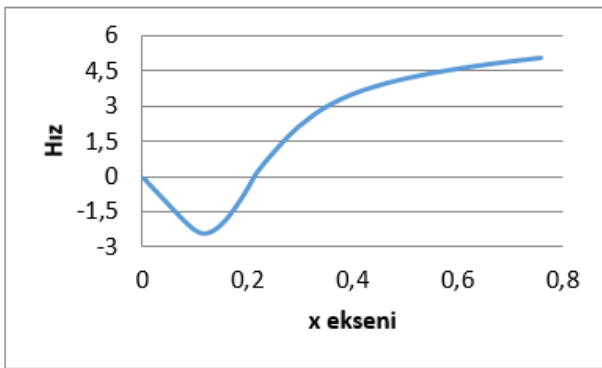
Gerekli tasarımların tamamlanmasının ardından, Standart $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak farklı basınç hız algortimaları, farklı uzaysal ayrıklaştırmalar ve farklı duvar fonksiyonları kullanılarak toplam 60 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Vogel ve Eaton (1985) çalışmasında basamak sonrasındaki ısı transferini ifade eden yerel Stanton (St) sayısına en yakın sonucu veren simülasyona ulaşılarak, nümerik çalışmanın deneysel çalışmayla yakınsaması bir nevi doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama esnasında gerek duvar fonksiyonların önemli bir parametre olan boyutsuz y^+ değeri, gerekse basamağa yaklaşan sınır tabakanın tam gelişmiş olup olmadığı kontrol edilmiştir. İncelemeler sonrasında en yakın sonucun Realizable $k-\epsilon$ türbülans alt modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu modele ilişkin diğer parametreler ise birinci derece uzaysal ayrıklaştırma (spatial discretization), SIMPLE basınç hız bağlantı algoritması (pressure-velocity coupling) ve ölçeklenebilir duvar fonksiyonudur (scalable wall function). Yapılan doğrulama çalışmalarına ilişkin grafikler, basamak sonrası alt duvar için Şekil 4 - 7'de gösterilmektedir.



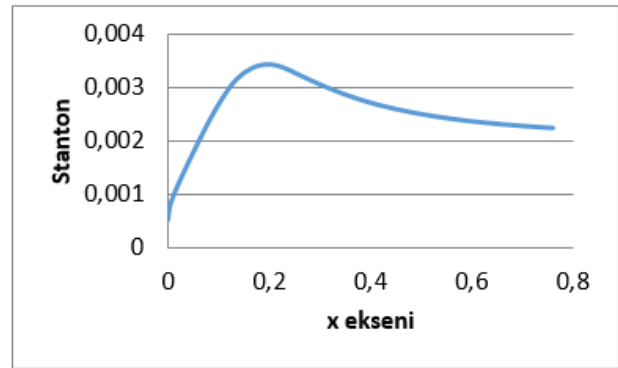
Şekil 4. y^+ Değerleri



Şekil 5. Hız Profili

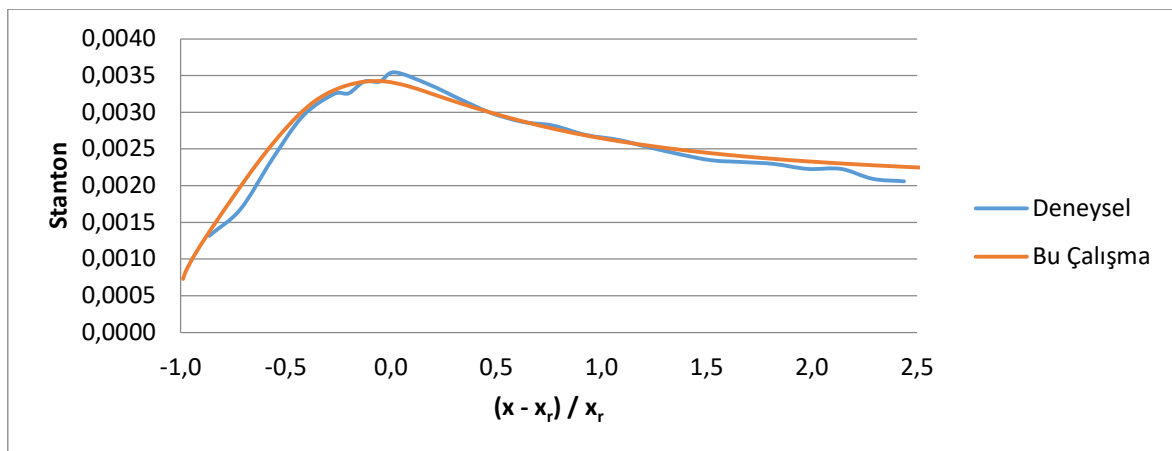


Şekil 6. Yeniden Birleşme Uzunluğu



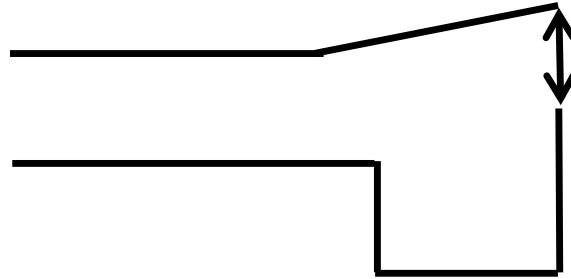
Şekil 7. Stanton Sayısı

Türbülanslı akışlarda y^+ değerinin 30'dan fazla olması beklenmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi bu durum sağlanmıştır. Ayrıca Şekil 5'te görüldüğü üzere akışkanın giriş hızı olan 11,3 m/sn civarlarında sınır tabaka tam gelişmiş akış profilindedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesinde Haque ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, hız bileşeninin negatif değerden pozitif değere geçtiği 0,2128 m yeniden birleşme uzunluğu (x_r) olarak tespit edilmiştir. Bu değer bulunması ile birlikte Şekil 7'deki Stanton sayıları kullanılarak, Şekil 8'deki Vogel ve Eaton (1985) çalışması doğrulanmıştır.



Şekil 8. Stanton Sayısı karşılaştırması

Gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarının ardından, bu çalışmanın temel amacını oluşturan daralan ve genişleyen kanal yükseklikleri kullanılarak akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerinde basınç gradyeninin etkileri incelenmiştir. Daha önceden belirtildiği gibi Driver ve Seegmiller (1985) tarafından kanalın üst duvarında belirlenen noktadan itibaren pozitif ve negatif yönlü olarak uygulanan ve uygulama noktası ise basamak öncesinde $0,47 H$ mesafeden itibaren kanal değişim açıları kullanılarak Vogel ve Eaton (1985) çalışmasındaki geometri modifiye edilmiştir. Şekil 9’da bu değişim bölgesi basit bir şekilde ifade edilmeye çalışılmıştır.

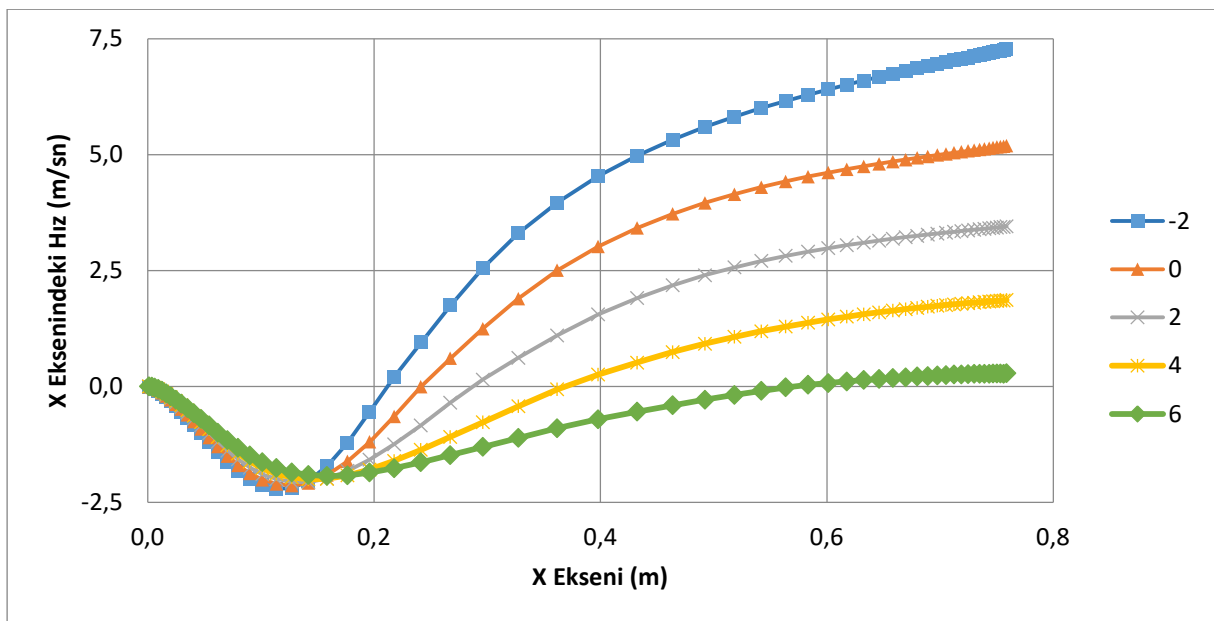


Şekil 9. Geometrik Modifikasyon Bölgesi

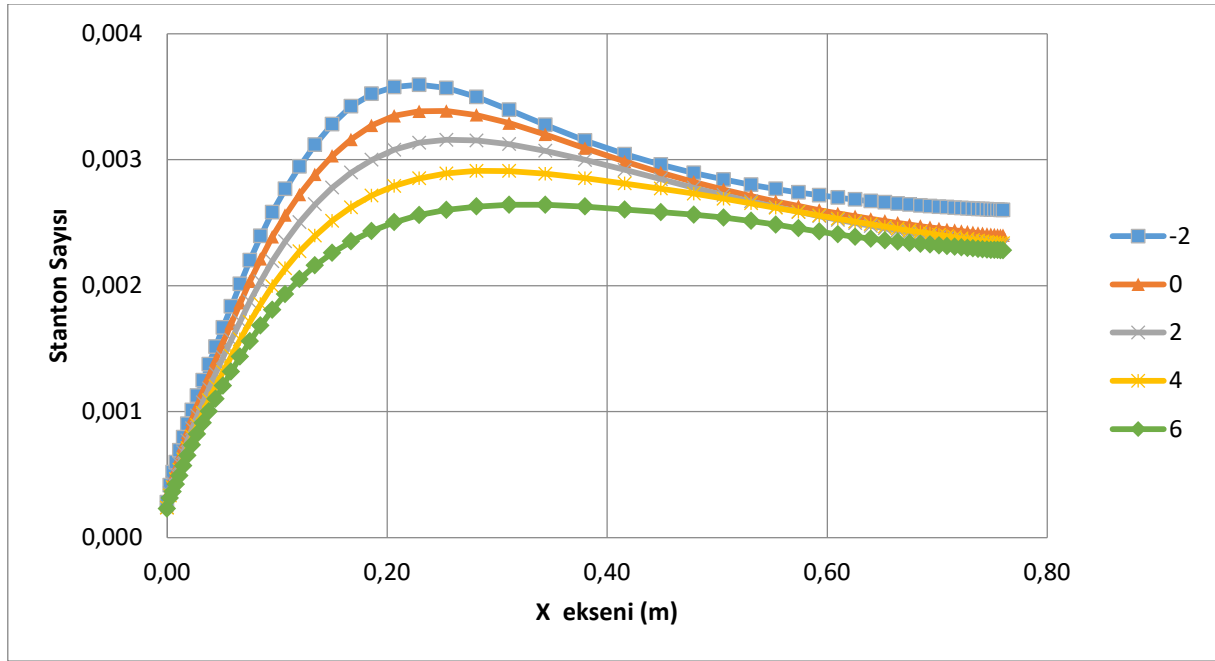
Öncelikli olarak Şekil 10’da genişleme açısına bağlı olarak daralan ya genişleyen kanal çıkışı için yeniden birleşme noktaları belirlenmiş ve bu değerler Tablo 2’de ifade edilmiştir. Şekil 11’de ise aynı şekilde genişleme açısına bağlı olarak basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı gösterilmiştir. Şekil 12’de ise Stanton sayısı ile yeniden birleşme noktası etkileşimi Vogel ve Eaton (1985) çalışmasındaki veriler ile karşılaştırılarak ısı transferi ile ilgili karakteristikler incelenmiştir.

Tablo 2. Farklı Basınç Gradyenlerinde Yeniden Birleşme Noktaları

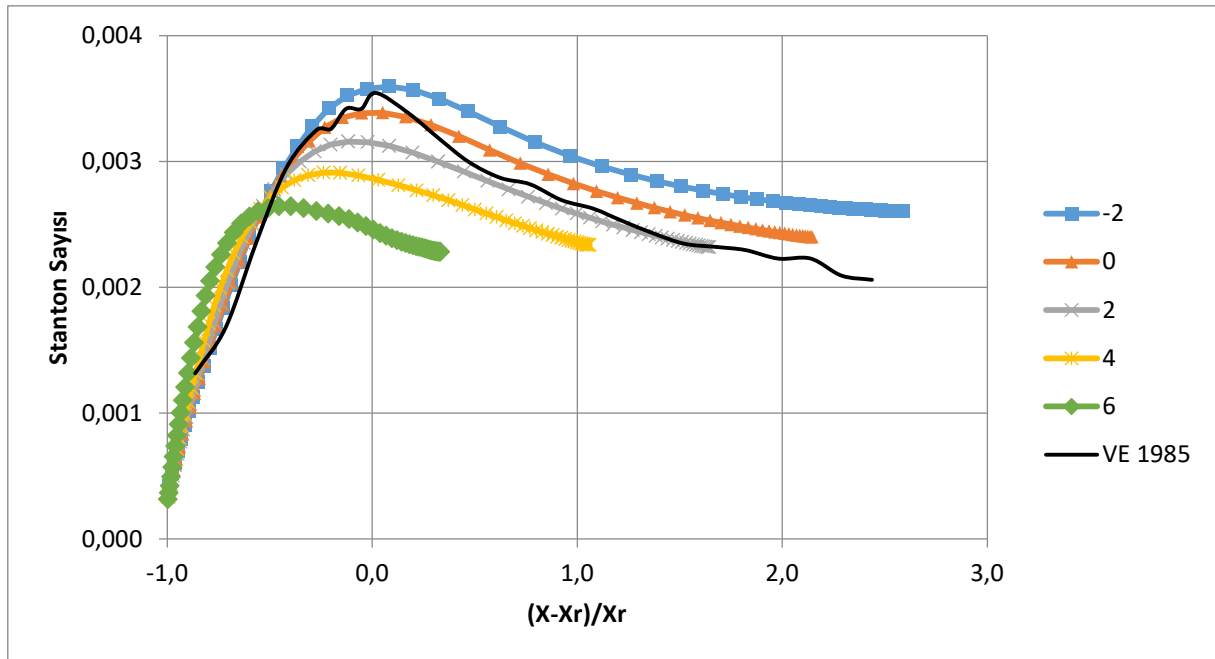
Değişim Açısı (°)	-2	0	2	4	6
Yeniden Birleşme Noktası (m)	0,212	0,242	0,287	0,369	0,571



Şekil 10. Genişleme Açısına Bağlı Olarak Basınç Gradyeni Değişimine Göre Yeniden Birleşme Uzunluğu



Şekil 11. Genişleme Açısına Bağlı Olarak Basınç Gradyeni Değişimine Göre Stanton Sayısı



Şekil 12. Genişleme Açısına Bağlı Olarak Basınç Gradyeni Değişimine Göre Stanton Sayısı ve Yeniden Birleşme Etkileşimi

3. BULGU VE TARTIŞMALAR

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, geri basamak akışlarında basınç gradyeni değişiminin gerek akış karakteristikleri gerekse ısı transferi karakteristiklerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Basamaktan sonra kanal çıkışını doğru daralma olduğunda standart geometrideki yeniden birleşme noktası basamağa doğru gerilemekte, basamaktan sonra kanal çıkışına doğru genişleme olduğunda ise genişleme açısının artışıyla doğru orantılı olarak yeniden birleşme noktası kanal çıkışına doğru ilerlemektedir. Tablo 2'de belirlenen yeniden birleşme noktaları ifade edilmiştir.

İncelenen geometrilerde yapılan analizler sonucunda ısı transferi karakteristiklerinde ise yeniden birleşme noktasının basamaktan uzaklaşmasına bağlı olarak akıştaki düzensizliğin azalmasına endeksli ısı transferinin azaldığı tespit edilmiştir. Sabit ısı akısının uygulandığı basamak sonrası alt duvardaki Stanton sayıları Şekil 11’de gösterilmiştir. Şekil 12’de ise modifikasyonların uygulandığı Vogel ve Eaton (1985) çalışmasındaki Stanton sayısı ve yeniden birleşme uzunluğu arasındaki etkileşimi ile basınç gradyeni değişimleri sonucundaki etkileşimler karşılaştırılmıştır. Buradan da görülebileceği gibi yeniden birleşme noktasının kanal çıkışına yaklaşması ile birlikte gerçekleşen ısı transferinde azalma görülmektedir.

4. SONUÇ

Geri basamak akışlarında basamak ile yeniden birleşme bölgesi arasında kalan bölümde oluşan vorteklerden dolayı daha yüksek bir kinetik enerji oluşmaktadır. Oluşan vorteklerdeki yoğunluğun ısı transferini arttırdığı göz önünde bulundurulduğunda, kanal çıkışına doğru daralmanın yaşandığı geometride yeniden birleşme noktasının basamağa yakın olmasından kaynaklı akım ayrışması sonrasında daha büyük bir düzensizlik söz konusudur. Bu nedenle ısı transferi daha yüksektir. Aynı şekilde kanal çıkışı genişledikçe yeniden birleşme noktası kanal çıkışına doğru ilerlemektedir. Böylelikle vorteks bölgesi büyürken akıştaki düzensizlik azalmaktadır. Buna bağlı olarak gerçekleşen ısı transferi kapasitesinde azalmalar görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Armaly, BF., Durst, F., Pereira, JCF., Schönung, B. (1983). Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. *J. Fluid Mech*, 127: 473-496.
- Ateş, M. (2015). Geri Basamak Akışlarında Dış Türbülansın Ve Basınç Gradyeninin Isı Transferi Üzerine Etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Ateş, M., Pulat, E. (2020). Geri basamak akışlarında dış türbülansın akış ve ısı transferi üzerine etkileri. 2nd International Eurasian Conference On Science, Engineering And Technology, 07-09 October 2020, Gaziantep, Turkey.
- Barkley, D., Gomes, MGM., Henderson, RD. (2002). Three-dimensional instability in flow over a backward-facing step. *J. Fluid Mech*, 473: 167-190.
- Biswas, G., Breuer, M., Durst, F. (2004). Backward-facing step flows for various expansion ratios at low and moderate Reynolds numbers. *ASME*, 126: 362-374.
- Bradshaw, P., Wong, FYF. (1972). The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer. *J. Fluid Mech*, 52: 113-135.
- Chen, L., Asai, K., Nonomura, T., Xi, G., Liu, T. (2018). A review of backward-facing step (BFS) flow mechanism, heat transfer and control. *Thermal Science And Engineering Process*, 6: 196-216.
- Chen, YT., Nie, JH., Armaly, BF., Hsieh, HT. (2006). Turbulent separated convection flow adjacent to backward-facing step – effects of step height. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 3670-3680.
- Chiang, TP., Sheu, TWH., Tsai, SF. (1997). Topological flow structures in backward-facing step channels. *Computers & Fluids*, 26: 321-337.
- Driver, DM., Seegmiller, HL. (1985). Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow. *AIAA Journal*, 23: 163-171.
- Eaton, JK., Johnston, JP. (1981). A review for research on subsonic turbulent reattachment. *AIAA Journal*, 19: 1092-1100.

- Haque, A., Ahmad, F., Yamada, S., Chaudhry, SR. (2007). Assessment of turbulence models for turbulent flow over backward facing step. World Congress on Engineering, 2-4 July 2007, London, UK.
- Hossain, MA., Rahman, T., Ridwan, S. (2013). Numerical investigation of fluid flow through a 2D backward facing step channel. *International Journal Of Engineering Research & Technology*, 2: 3700-3708.
- Isomoto, K., Honami, S. (1989). The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward facing step. *Journals of Fluids Engineering*, 111: 87-92.
- Iwai, H., Nakabe, K., Suzuki, K. (2000). Flow and heat transfer characteristics of backward-facing step laminar flow in a rectangular duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 457-471.
- Khanfer, K., Al-Azmi, B., Al-Shammari, A., Pop, I. (2008). Mixed convection analysis of laminar pulsating flow and heat transfer over a backward-facing step. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51: 5785–5793.
- Lee, T., Mateescu, D. (1998). Experimental and numerical investigation of 2D backward facing step flow. *Journals of Fluids and Structures*, 12: 703-716.
- Pulat, E., Diner, M. (2001). Geri basamak akışının nümerik analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 7: 29-34.
- Togun, H., Safaei, MR., Sadri, R., Kazi, SN., Badarudin, A., Hooman, K., Sadeghinezhad, E. (2014). Numerical simulation of laminar to turbulent nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step. *Applied Mathematics and Computation*, 239: 153–170.
- Vogel, JC., Eaton, JK. (1985). Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step. *Journal of Heat Transfer*, 107: 922-929.