

**T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**DİKDÖRTGEN KESİTLİ GENİŞLEYEN BİR KANALDAKİ
TÜRBÜLANSLI VE AYRILMALI AKIŞTA GİRDAP ÜRETİCİ
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulahap SAVUL

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı**

EYLÜL, 2023

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DİKDÖRTGEN KESİTLİ GENİŞLEYEN BİR KANALDAKİ
TÜRBÜLANSLI VE AYRILMALI AKIŞTA GİRDAP ÜRETİCİ
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulvahap SAVUL
(Y2113.080007)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kenan KAYA

EYLÜL, 2023

ONAY SAYFASI

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “DİK DÖRTGEN KESİTLİ GENİŞLEYEN BİR KANALDAKİ TÜRBÜLANSLI VE AYRILMALI AKIŞTA GİRDAP ÜRETİCİ ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Kaynakça’ da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (21/09/2023)

Abdulahap SAVUL

ÖNSÖZ

Günümüzde tasarlanan mühendislik sistemlerinde enerji verimliliği, enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve yenilenebilir enerjiden henüz yeterince yararlanılamaması nedeniyle, ilk sırada gelmektedir. Mühendislik proseslerinde enerji kayıplarının fazla olduğu yerlerden birisi de akışkan taşıma sistemleridir. Bu bakımdan, kanallardaki basınç kayıplarını en aza indirmek mühendislerin tasarım aşamasında karşılaştığı problemlerden birisidir. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile, bir mühendislik tasarımının verimli olup olmadığı deneysel yöntemlere başvurulmaksızın, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak çok daha düşük bir maliyetle ön görülebilmektedir. Bu çalışmada da HAD yöntemlerinden faydalanılarak seçilen bir akış problemi üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada bana bilgi birikimi ile desteğini gösteren ve benim HAD ile tanışmamı sağlayan yeri geldiğinde maddi ve manevi her türlü yardımını sunan çok saygıdeğer hocam olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kenan KAYA' ya teşekkürlerimle beraber saygılarımı arz ederim.

Eylül 2023

Abdulvahap SAVUL

DİKDÖRTGEN KESİTLİ GENİŞLEYEN BİR KANALDAKİ TÜRBÜLANSLI VE AYRILMALI AKIŞTA GİRDAP ÜRETİCİ ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, genişleyen bir dikdörtgen kanalda silindirik girdap üreticilerin türbülanslı akışta akım ayrılması ve buna bağlı olarak kanaldaki basınç kaybı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sayısal çözümler ANSYS *Fluent* çözücüsü kullanılarak yapılmış, türbülans modeli olarak ise bir Eddy viskozitesi modeli olan *k-epsilon Realizable* modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntem daha önce yapılmış olan bir deneysel çalışmanın sonuçları kullanılarak doğrulandıktan sonra ilk olarak, kanal girişine tek sıra girdap üretici yerleştirildiği ve genişleme açısının 30° , 45° , 60° ve 90° , girdap üretici/giriş kanalı yükseklik oranının 0.25 ve 0.5 olduğu durumlar için hız ve basınç alanları elde edilmiş, girdap üreticilerin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar birbirleri ile karşılaştırılarak etkinlikleri tartışılmıştır. Sonrasında ise ek olarak genişleme açısının 45° , girdap üretici/giriş kanalı yükseklik oranının da 0.25 olduğu durumda kanal girişinde çift sıra ve eğimli yüzeyde tek ve çift sıra girdap üretici olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. Her bir durum için girdap üreticilerin akış alanında yarattığı etki akım çizgileri yardımıyla görsel olarak sunulmuş ve bunun üzerinde topolojik bir analiz yapılmış, ayrıca kanal alt duvarı boyunca duvar kayma gerilmesinin değişimi, yeniden tutunma noktasının konumu, kanaldaki toplam basınç kaybı ve statik basınç geri kazanım katsayısı gibi parametrelerle de sonuçlar nicel olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, kanal girişine yerleştirilen tek sıra girdap üreticilerin yeniden tutunma noktasını yukarı akım yönünde taşıdığı, buna karşılık kanaldaki basınç kaybını artırdığı görülmüştür. Basınç kaybındaki bu artış girdap üretici/giriş kanalı yükseklik oranının artırılmasıyla daha da artmış, statik basınç geri kazanım katsayısı her iki yükseklik oranı için de negatif olarak elde edilmiştir. Eğimli yüzey üzerine yerleştirilen çift sıra girdap üreticinin basınç kaybını azalttığı ve statik basınç geri kazanım katsayısını da artırdığı tespit

edilmiş, sıra sayısının artırılmasıyla kanalın enerji verimliliğinin daha da iyileştirilebileceği ön görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Girdap üretici, Akım ayrılması, Aerodinamik

**NUMERICAL INVESTIGATION ON EFFECT OF VORTEX GENERATORS
ON TURBULENT FLOW WITH SEPARATION IN A DIVERGING
CHANNEL OF RECTANGULAR CROSS-SECTION**

ABSTRACT

In this study, effect of cylindrical vortex generators on flow separation in turbulent flow and the resulting pressure loss in an expanding rectangular duct is investigated. Numerical calculations are conducted using ANSYS *Fluent* solver, and the *k*-epsilon Realizable model, which is an Eddy viscosity model, is used as the turbulence model. Once the numerical method used in this study is validated using the results of a previous experimental study, firstly, a single row of vortex generators is placed at the duct entrance for expansion angles of 30°, 45°, 60° and 90°, while vortex generator/entrance channel height ratios of 0.25 and 0.5 are employed. Velocity and pressure fields are obtained for the cases where vortex generators are used and the cases where they are not used are compared, and their effectiveness is discussed. Additionally, three distinct cases are examined: double rows at the duct entrance, and single and double rows of vortex generators on the slanted surface, where the expansion angle is 45° and the vortex generator/entrance channel height ratio is 0.25. For each case, effect of the vortex generators on the flow field is presented qualitatively with the help of streamlines, and a topological analysis is made on it, also, results are evaluated quantitatively with the parameters such as variation of wall shear stress along the duct bottom wall, the location of the reattachment point, the total pressure loss through the duct, and the static pressure recovery coefficient. As a result, it has been observed that the single row vortex generators placed at the duct entrance move the reattachment point upstream, while increasing the pressure loss throughout the duct. This increase in pressure loss increases further by increasing the vortex generator/entrance channel height ratio, and a negative static pressure recovery coefficient is obtained for both height ratios. It has been determined that the double row vortex generators placed on the slanted surface reduce the pressure loss and

increase the static pressure recovery coefficient, and it is predicted that the energy efficiency of the duct can be further improved by increasing the number of rows.

Keywords: Vortex generator, Flow separation, Aerodynamics

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
SEMBOLLER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xiii
I. GİRİŞ.....	14
A. Literatür Özeti	15
II. SAYISAL YÖNTEM.....	20
A. Sayısal Yöntemin Doğrulanması.....	20
B. Geometri.....	23
C. Ağdan Bağımsızlık Çalışması	27
III. SAYISAL ÇÖZÜM SONUÇLARI.....	30
A. Kanal Girişinde Tek Sıra GÜ	30
B. Kanal Girişinde ve Eğimli Yüzeyde Tek ve Çift Sıra GÜ	40
IV. SONUÇ.....	45
V. KAYNAKLAR.....	47
MAKALELER	47
ÖZGEÇMİŞ.....	50

KISALTMALAR LİSTESİ

GÜ : Girdap Üretici

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

SEMBOLLER LİSTESİ

D	: Girdap üretici çapı
D_h	: Hidrolik çap
f	: Sürtünme faktörü
h	: Kanal girişinin yüksekliği
$h_{GÜ}$: Girdap üretici yüksekliği
H	: Kanal yüksekliği
L	: Kanal toplam uzunluğu
L_g	: Kanal girişinin uzunluğu
N	: Düğüm noktası
$p_ç$: Kanal çıkışındaki ortalama basınç
p_g	: Kanal girişindeki ortalama basınç
R	: Statik basınç geri kazanım katsayısı
Re	: Reynolds sayısı
S	: Eyer noktası
V_g	: Kanal giriş hızı
W	: Kanal genişliği
z	: Kartezyen koordinat sisteminin akım yönündeki bileşeni
z_R	: Yeniden tutunma noktası
ΔP	: Basınç farkı
ε	: Türbülans sönmeme katsayısı
μ	: Dinamik viskozite

ρ : Yoğunluk

τ_w : Kayma gerilmesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1. Sayısal yöntemin doğrulanması için kullanılan yapısal çözüm ağı 21
- Şekil 2. Sayısal çözüm ve deney sonuçlarının karşılaştırılması..... 23
- Şekil 3. Sayısal çözümlerde kullanılan geometrik modellere ait **a)** ön ve sağ iz düşüm görüntüleri ile kanala ait geometrik parametreler, **b)** GÜ' lere ait geometrik parametreler ile bunların kanal içerisindeki yerleşimi, **c)** kanal girişinde çift sıra GÜ, **d)** eğimli yüzey üzerinde tek sıra GÜ ve **e)** eğik yüzey üzerinde çift sıra GÜ olduğu durumlarda GÜ' lerin kanal içerisindeki yerleşimi..... 25
- Şekil 4. Sayısal çözümlerde kullanılan geometrik modellere ait **a)** kanal girişinde tek sıra GÜ olduğu durumdaki izometrik görüntüleri (solda GÜ olmayan, sağda GÜ olan) ve **b)** $\alpha = 45^\circ$ için kanal girişinde çift sıra ve eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumdaki izometrik görüntüleri 27
- Şekil 5. Ağdan bağımsızlık çalışmasında kullanılan modele ait **a)** çözüm hacmi ve sınır şartları, **b)** kanal giriş bölgesine yerleştirilmiş GÜ' ler ve **c)** oluşturulan hibrit çözüm ağı..... 28
- Şekil 6. Duvar kayma gerilmesinin alt duvar boyunca değişimi **a)** 30° genişleme açısı, **b)** 45° genişleme açısı, **c)** 60° genişleme açısı ve **d)** 90° genişleme açısı 32
- Şekil 7. $\alpha = 30^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri **a)** GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$ 34
- Şekil 8. $\alpha = 45^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri **a)** GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$ 35
- Şekil 9. $\alpha = 60^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri **a)** GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$ 36
- Şekil 10. $\alpha = 90^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri **a)** GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$ 37

Şekil 11. $\alpha = 30^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar a) GÜ yok, b) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve c) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$	38
Şekil 12. $\alpha = 45^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar a) GÜ yok, b) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve c) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$	39
Şekil 13. $\alpha = 60^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar a) GÜ yok, b) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve c) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$	39
Şekil 14. $\alpha = 90^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar a) GÜ yok, b) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve c) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$	40
Şekil 15. $\alpha = 45^\circ$ ve $h_{GÜ}/h= 0.25$ kanal girişinde tek ve çift sıra ile eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumda duvar kayma gerilmesinin değişimi	41
Şekil 16. $\alpha = 45^\circ$ ve $h_{GÜ}/h= 0.25$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri a) kanal girişinde çift sıra GÜ, b) eğimli yüzeyde tek sıra GÜ ve c) eğimli yüzeyde çift sıra GÜ	43
Şekil 17. $\alpha = 45^\circ$ ve $h_{GÜ}/h= 0.25$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar a) kanal girişinde çift sıra GÜ, b) eğimli yüzeyde tek sıra GÜ ve c) eğimli yüzeyde çift sıra GÜ	44

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1. Düz kanal için yapılan sayısal çözümlerde elde edilen sürtünme faktörü değerleri.....	22
Çizelge 2. Kanala ait sabit geometrik parametreler ve sayısal değerleri	27
Çizelge 3. Ağdan bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar	29
Çizelge 4. Yeniden tutunma noktalarının konumu, statik basınç geri kazanım katsayısı ve basınç kaybı.....	32
Çizelge 5. $\alpha = 45^\circ$ için kanal girişinde tek ve çift sıra, eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumlarda yeniden tutunma noktalarının konumu, statik basınç geri kazanım katsayısı ve basınç kaybı	42

I. GİRİŞ

Mühendislik tasarımlarında enerjiyi verimli kullanan sistemler tasarlamak büyük bir öneme sahiptir. Bu bakımdan; akış prosesi içeren sistemlerde ters basınç gradyanı nedeniyle akışkanın tutunduğu katı yüzeyden ayrılması ile meydana gelen; sürtünmenin artmasına, kanatlarda kaldırma kuvvetinin azalmasına ve böylece kayıpları artırarak genel sistem performansının düşmesine neden olan sınır tabaka ayrılmasının, sınır tabaka kontrolü ile ortadan kaldırılmasına yönelik pasif ve aktif olmak üzere birçok yöntem geliştirilmiştir. Pasif yöntemlerden birisi de kanatlar, kanallar ve düz plakalar gibi katı yüzeyler üzerindeki akışı kontrol etmek ve manipüle etmek için kullanılan ve akışa maruz kaldıklarında girdap oluşturan, üzerine yerleştirildiği yüzeyin boyutlarına göre küçük boyutlarda ve aerodinamik profile sahip yapılardan oluşan girdap üreticilerdir (GÜ).

Ayrılma noktasından önce yerleştirilen GÜ' ler, akışa momentum kazandırarak ters basınç gradyanlarına karşı direnç sağlar ve akışın tutunmasına yardımcı olurlar. GÜ' ler akış ayrılmasının planlanandan ya da beklenenden daha geç ve firara yakın bir yerde olmasını sağlamaktadırlar. GÜ' leri ilk olarak 1995'te Taylor yatay eksenli türbinde kullanmış ve verimi %24 arttırdığını gözlemlemiştir.

GÜ' ler, genel olarak mühendislik uygulamalarında ters basınç gradyanının meydana geldiği durumlarda sınır tabaka ayrılmasını kontrol etmek, türbin kanatlarında kaldırma kuvvetini artırmak ve aerodinamik performansı iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca laminer akıştan türbülanslı akışa geçişi de hızlandırır. GÜ' ler düşük maliyetli, küçük boyutlu, uygulaması basittir. GÜ'ler birçok şekilde üretilebilir, örneğin dikdörtgen, üçgen, daire, kanat profili ve yamuk. GÜ' lerin yerleştirilmesinde iki temel tip vardır. Aynı yönlü konfigürasyon GÜ' ler aynı açıda yerleştirilir. Zıt yönlü konfigürasyonda ise iki GÜ arasında sanki ayna varmış gibi simetri alınarak yerleştirilir.

A. Literatür Özeti

Literatürde sınır tabaka ayrılmasının kontrolü için GÜ' lerin kullanıldığı birçok deneysel çalışma mevcuttur. Canepa vd. (2008) düz levha üzerindeki türbülanslı akışta ters basınç gradyanı oluşturulması durumunda meydana gelen sınır tabaka ayrılmasının kontrolü için deneysel bir çalışma yapmışlar, sınır tabaka ayrılmasının kontrolü için düşük profilli (sınır tabaka kalınlığının %20' si kadar yükseklikte) ve yamuk şekline sahip GÜ' leri kullanmışlardır. Sonuç olarak GÜ' lerin akım ayrılmasını belirgin bir şekilde geciktirdiğini gözlemlemişlerdir. Dogan ve Erzincan (2023) dikdörtgen kesitli bir kanalda yapmış oldukları deneysel çalışmada özgün tipte bir GÜ' nün sürtünme faktörü ve ısı transfer katsayısına etkisini araştırmışlar, önerdikleri özgün tip GÜ' lerin kullanılmasıyla, ısı transfer katsayısındaki artışın kayıp katsayısındaki artışa oranı ile ifade edilen ısı iyileştirme faktörünün (*thermal enhancement factor, TEF*) 1.59' a kadar çıkarılabileceğini göstermişlerdir. Lengani vd. (2011) de ters basınç gradyanı oluşturulan bir düz levha üzerindeki türbülanslı akışta sınır tabaka ayrılmasının kontrolü için düşük profilli GÜ kullanarak bir deneysel çalışma yapmışlar, GÜ' lerin sınır tabaka ayrılmasını büyük ölçüde baskılayarak basınç kaybını azalttığını gözlemlemişlerdir. Evrard vd. (2017) Ahmed modeli ve gerçek bir otomobil modeli üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada, üst yüzeye yerleştirdikleri silindirik tip ve kanatçık tipi GÜ' lerin sürüklenme kuvvetini artırdığını belirtmişlerdir. Godard ve Stanislas (2016) rüzgâr tüneli içerisine konumlandırılmış bir tümsek yapısı üzerine yerleştirilen üçgen profilli GÜ' lerin farklı dizilişlerdeki performansını deneysel olarak araştırmışlar; üçgen profilin dikdörtgen profile göre sürüklenme kuvvetini daha çok düşürdüğünü ve karşı yönlü dizilişin eş yönlü dizilişe göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Ma vd. (2017) türbülanslı geri basamak akışı için yaptıkları deneysel çalışmada basamağın hemen gerisine düşük profilli takoz tip GÜ yerleştirmişler, sonuç olarak yeniden tutunma uzunluğunun %29.1 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

Sınır tabaka ayrılmasının GÜ kullanılarak kontrol edilmesiyle ilgili sayısal çalışmalar da mevcuttur. Habchi vd. (2021) eddy viskozitesi modellerinden ikisi olan $k - \omega$ SST ve $k - \varepsilon$ RNG türbülans modellerini kullanarak üç boyutlu sayısal çözümler yapmış, sonuçlarını PIV ölçümleriyle karşılaştırmışlardır. Bunun için dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine, yine dikdörtgen profile sahip GÜ yerleştirmişlerdir. Sonuç olarak $k - \omega$ SST türbülans modelinin deneysel ölçüm sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar

verdiğini tespit etmişlerdir. Min vd. (2012) özgün tip bir GÜ yerleştirdikleri dikdörtgen kesitli kanalda türbülanslı hava akışı ve ısı transferi için $k - \varepsilon$ RNG türbülans modelini kullanarak sayısal çözümler yapmışlar ve sonuç olarak ısı transfer katsayısı ve kayıp katsayısında artış olduğunu belirtmişlerdir. Wang vd. (2023) dairesel boru içerisine yerleştirilen delikli GÜ'lerin akış ve ısı transferi etkinliğini $k - \omega$ SST türbülans modelini kullanarak incelemişler, sonuç olarak ısı iyileştirme faktöründe genel olarak bir artış gerçekleşmediğini bildirmişlerdir. Karkaba vd. (2023) ise yaptıkları sayısal çalışmada farklı geometrik şekillerdeki GÜ'lerin çok sıralı olarak dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine yerleştirilmesinin türbülanslı akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini $k - \omega$ SST türbülans modeli kullanarak incelemişler, çok sıralı yerleşimin tek sıralı yerleşime göre ısı iyileştirme faktöründe %14' lük bir artış sağladığını bildirmişlerdir.

Borrajo-Pérez vd. (2023) ısı transferinin iyileştirilmesi için GÜ'leri dikdörtgen bir kanal üzerindeki ve laminer akış rejimi içindeki etkisini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Toplam 22 farklı model için değişken enine perdeli dört düzen incelenip en iyi genel performans, GÜ'lerin önünde delikli düzenleme kullanılarak elde etmişlerdir. %1 ila %14 arasında değişen bir ısı transferi artışı ve buna karşılık, basınç düşüşü %3'ten %17'ye yükseldiğini gözlemlemişlerdir.

Cheawchan vd. (2022) yukarı akışa yerleştirilmiş dikdörtgen kanatlı GÜ'ler ile geriye bakan bir rampayı geçen akış, OpenFOAM tabanlı RANS simülasyonları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Çok sayıda eğimli GÜ kullanıldığında, açıklık yönünde yeniden birleştirme konumlarının ve duvar gerilimi dağılımlarının doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği akış ayırma bölgesinde önemli değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Çoklu GÜ'lerin etkinliğinin, diğerlerinin yanı sıra bitişik GÜ'ler arasındaki ayırma mesafesine ve kanat geliş açısına karşı duyarlı olduğu saptanmıştır.

Fu vd. (2023) 3000 ila 18.000 Reynolds sayısı aralığında delta kanatçık uzunlamasına GÜ'lere sahip dikdörtgen mini kanallar sayısal olarak simüle edilmiş ve GÜ'lerin kanal yüksekliğinin üzerinde akış ve ısı transferi ele alınmıştır.

Gönül vd. (2023) bir mikro kanala farklı boyut, sayı ve hücum açılarında GÜ'ler yerleştirilerek akış yapısının kontrolü ve mümkün olan en düşük basınç kaybıyla ısı transferini iyileştirilmesi sağlanmıştır. Bunun için mikro kanalı, ısı transferini iyileştirmek için farklı boyutlarda, sayılarda ve hücum açılarında dikdörtgen GÜ'ler

ekleyerek akış yapısını ve ısı transferini tahmin etmek için HAD ile çözümleme yapılmıştır. Isı transferi, girdapların dönen akışı tarafından üretilen sıvı karışımıyla önemli ölçüde artırılır ve akışkan karışımında artış sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Hassanzadeh vd. (2019) Çapraz akış düzleminde paralel plakalar arasında ileri üçgen kesitli GÜ' ler kullanılarak gelişmiş kanallar geliştirilmiş ve 400 ile 1000 arasındaki laminer rejimde birkaç Reynolds sayısında sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak kanalda GÜ sayısı arttıkça duvara yakın hız büyüklüğü, sıcaklık gradyanı ve ısı transfer katsayısı yükseltildiği hesaplanmıştır.

Khoshvaght-Aliabadi vd. (2015) Farklı delta-kanatçık düzenine sahip GÜ (girdap üretici) kullanan bir tüpteki ısı transferi iyileştirmesi araştırılmıştır. Delta kanatçıkların uzunlamasına ve öne doğru düzenlenmesine sahip on dört GÜ eki, 350 mm uzunluğunda, 14,5 mm genişliğinde ve 0,6 mm kalınlığında alüminyum levhalardan yapılmıştır. Tüp içinde GÜ eklerinin kullanımından elde edilen ısı transferi ve basınç düşüşü sonuçları, düz tüp için elde edilenlerle karşılaştırılır. Düz tüp boyunca geçiş akışında, Notter-Rouse denkleminin mevcut deneysel Nusselt sayısını Gnielinski denkleminde daha iyi tahmin ettiği bulunmuştur. Ayrıca deneysel sonuçlar, tüp içinde GÜ eklerinin kullanılmasının düz tüpe göre daha yüksek ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü sağladığını ve bu parametrelerin delta-kanatçıkların artmasıyla arttığını ortaya koymaktadır.

Lin, J.C. vd. (2002) sınır katmanı akış ayırma kontrolüne ilişkin çeşitli araştırma çabalarını vurgulamaktadır. Düşük profilli GÜ' lerin tipik olarak akım ayrılması konumlarının nispeten sabit olduğu ve birbirlerine oldukça yakın yerleştirilebildiği uygulamalar için en iyi olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük hızlı ters basınç gradyanlı akışlardaki karşılaştırmalı akım ayrılması kontrol çalışmaları, düşük profilli GÜ' ler tarafından üretilen gömülü akış yönünde (uzunlamasına) girdapların hem 2B hem de 3B türbülanslı sınır tabakası ayrımlarını azaltmanın en etkili ve verimli yolunu sağladığını göstermektedir. Ek olarak, deneysel sonuçlar, GÜ' lerin ultra kompakt serpantin bir kanal içine düzgün bir şekilde yerleştirilmesiyle toplam basınç geri kazanımının %5' e kadar arttığı gözlemlenmiştir.

Lu, F. K vd. (2023) GÜ kullanan asimetrik bir difüzörün akış ayırma kontrolü ve performans değerlendirmesini incelemiştir. Toplam 3 adet GÜ kullanılmış olup 12

farklı konfigürasyonu ile deneyi yapmışlar ve GÜ' lerin bozulmamış akışın iki boyutluluğunu bozduğu, genellikle ayırma bölgesini azalttığı bulmuşlardır.

Mukut vd. (2014) ayırma akış kontrolünün bir aracı olarak plazma GÜ' süne dair bir dizi deneyler yapılmıştır. Tipik geleneksel girdap üretici, duvara dik bir kanada ve ana akışa karşı bir sapma açısında olup burada geliştirilen bir plazma girdap üretici 0° lik bir sapma açısında ayarlandıktan sonra kanat ucuna açıkta kalan bir elektrot yerleştirilmiş ve kanat içine başka bir elektrot gömülmüştür. Akış yönünde ters yönde dönen girdaplar, akış ayrılmasını kontrol etmeye yardımcı olan aşağı akışta kanatlı tip plazma girdap üretici tarafından üretilip plazma girdap üreticinin etkisi, 20° eğimli bir eğim üzerindeki türbülanslı bir sınır tabakası üzerinde incelenmiştir. Ayırma akışı, bir duman teli kullanılarak görselleştirilmiştir ve hız profilleri, bir sıcak telli anemometre kullanılarak ölçüldükten sonra plazma GÜ' ler, geleneksel girdap oluşturucuya benzer şekilde ayrılmayı bastırmış ve performansı doğrulamıştır. Plazma girdap üreticinin akış yönünde girdaplar üretebildiği ve sınır tabakası ile dış serbest akış arasındaki karışımı geliştirerek akış ayrılmasını bastırdığı bulunmuştur.

Xu vd. (2017) GÜ eklenmiş bir borudaki ısı transferi ve duvar sürtünmesi sayısal olarak incelenmiştir. Pürüzsüz bir boru içerisine yerleştirilen GÜ' lerin farklı açılarının ve blokaj oranlarının etkileri incelenmiştir. 6000-33000 aralığındaki Reynolds sayılarına sahip bir hava akışı ve boru modeli yüzeyinde sabit bir ısı akışı için GÜ' lerin olduğu ve olmadığı HAD simülasyonları yapılmış ve dört GÜ, borunun iç yüzeyine dairesel bir şekilde yerleştirilmiştir.

Ke vd. (2019) dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine yerleştirilmiş delta kanadı şeklindeki GÜ' lerin farklı dizilişleri için laminer akış rejiminde sayısal çözümler yapmış, GÜ' lerin sıra sayısı ve en-boy oranı artırıldığında ısıl iyileştirme faktörünün düştüğünü belirtmişlerdir.

Bu çalışmada genişleyen bir dikdörtgen kesitli kanalda kanal girişine tek sıra GÜ yerleştirildiği ve genişleme açısının 30°, 45°, 60° ve 90°, girdap üretici/giriş kanalı yükseklik oranının 0.25 ve 0.5 olduğu durumlar için hız ve basınç alanları elde edilmiş, girdap üreticilerin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar birbirleri ile karşılaştırılarak etkinlikleri tartışılmıştır. Sonrasında ise ek olarak genişleme açısının 45°, girdap üretici/giriş kanalı yükseklik oranının da 0.25 olduğu durumda kanal girişinde çift sıra ve eğimli yüzeyde tek ve çift sıra girdap üretici olmak üzere üç farklı

durum incelenmiştir. GÜ' lerin akış alanında yarattığı etki akım çizgileri yardımıyla görsel olarak sunularak topolojik analize tabi tutulmuş, yeniden tutunma noktasının konumu ve kanaldaki toplam basınç kaybı gibi parametrelerle de sonuçlar nicel olarak değerlendirilmiştir.

II. SAYISAL YÖNTEM

A. Sayısal Yöntemin Doğrulanması

GÜ' lerin incelendiği sayısal çözümlerin öncesinde, kullanılan sayısal yöntemin doğrulanması amacıyla Doğan ve Erzincan' ın (2023) dikdörtgen kesitli kanal için yapmış oldukları deneysel çalışmanın sonuçları kullanılmıştır. Buna göre, GÜ kullanılmayan kanal için elde edilen ve tanımı Denklem (1) ile verilen Darcy sürtünme faktörü, f , değerleri karşılaştırılmıştır.

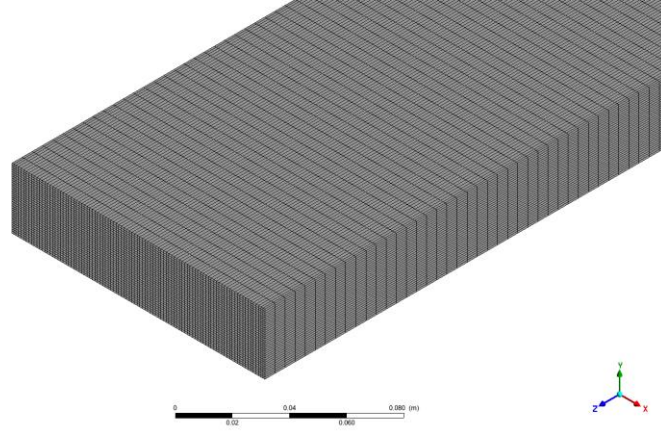
$$f = \frac{\Delta P}{0.5\rho V_{in}^2} \frac{D_h}{L} \quad (1)$$

Burada ΔP kanalın giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı (Pa), ρ havanın yoğunluğu (kg/m^3), V_{in} kanal girişindeki ortalama hız (m/s), D_h kanal girişindeki hidrolik çap (m) ve L kanalın toplam uzunluğudur (m). Reynolds sayısının tanımı ise Denklem (2) ile verilmiştir:

$$\text{Re} = \frac{\rho V_{in} D_h}{\mu} \quad (2)$$

Burada μ havanın dinamik viskozitesidir (kg/ms).

Oluşturulan yapısal çözüm ağı aşağıdaki Şekil 1' de görülmektedir. Yaklaşık 1 milyon prizmatik elemandan oluşan bir çözüm ağı kullanılmıştır.



Şekil 1. Sayısal yöntemin doğrulanması için kullanılan yapısal çözüm ağı

Sayısal çözümler ANSYS *Fluent* çözücüsü kullanılarak yapılmıştır. Türbülans modeli olarak $k - \epsilon$ *Realizable* türbülans modeli kullanılmıştır. Tüm konveksiyon terimleri *second order upwind* interpolasyon yöntemiyle ayrıklaştırılmıştır. Süreklilik, momentum korunum denklemleri ile türbülans transport denklemleri *coupled* şeması kullanılarak iteratif bir şekilde çözülmüştür. Momentum denklemlerindeki basınç terimi ikinci mertebe (*second order*) interpolasyon ile ayrıklaştırılmıştır. Gradyan rekonstrüksiyonu için ise en küçük kareler hücre temelli (*least squares cell based*) interpolasyon yöntemi kullanılmıştır.

Aşağıdaki Çizelge 1’ de sayısal çözümler yardımıyla hesaplanan Darcy sürtünme faktörü (f_{HAD}) değerleri 5000 ile 35000 arasında değişen altı farklı Reynolds sayısı için sunulmuştur. Ayrıca Doğan ve Erzincan’ ın (2023) deneysel çalışmasına ait sonuçlar verilmiştir. Burada Denklem (3a) ve (3b) ile verilen Petukhov ve Blasius bağıntıları, gerçekte dairesel borular için elde edilmiş olup bu bağıntılar yardımıyla elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir. Çizelge 1’ de ϵ HAD sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki yüzdelik farkı göstermektedir. Bu sonuçlara göre HAD sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum sapma %20’ den az olmaktadır. Normalize ortalama kare hata karekökü (*Normalized Root Mean Square Error*) ise 0.17 olarak bulunmuştur. Düzenli bir değişim olmamakla birlikte, genel olarak Reynolds sayısı arttıkça HAD değerleri deneysel değerlere yaklaşmaktadır. Reynolds sayısı 25000’ den büyük türbülanslı akışlarda dikkörtgen kanalda elde edilen Darcy sürtünme faktörü değerleri, deneysel değerler ile Petukhov ve Blasius bağıntıları yardımıyla hesaplanan değerlere çok yakın çıkmaktadır. Genel olarak, sayısal ve deneysel f değerleri arasındaki sapmanın en büyük nedenlerinden birinin, kanal giriş şartları olduğu düşünülmektedir. Sayısal çözümlerde kanal

girişindeki hız profili tamamen üniform iken, deneysel çalışmada bu şekilde bir hız profili elde edilmesi oldukça zordur.

$$f_{Petukhov} = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (3a)$$

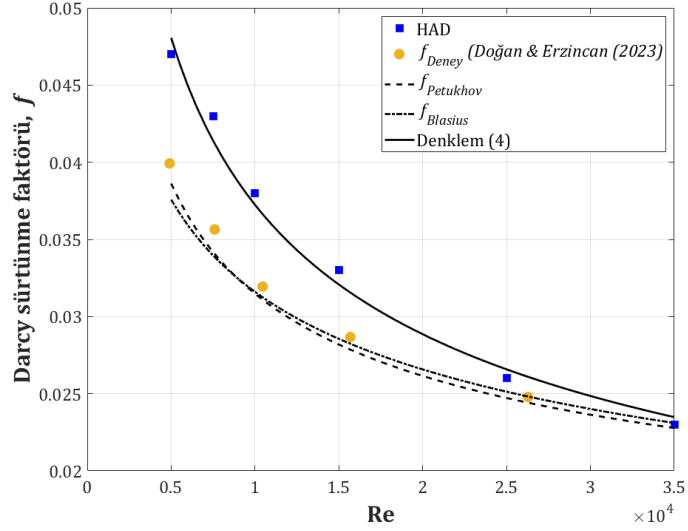
$$f_{Blasius} = 0.316 Re^{-0.25} \quad (3b)$$

Çizelge 1. Düz kanal için yapılan sayısal çözümlerde elde edilen sürtünme faktörü değerleri

Re	f_{HAD}	f_{Deney}	% ε	$f_{Petukhov}$	$f_{Blasius}$
5000	0.047	0.040	16.72	0.039	0.038
7500	0.043	0.036	19.61	0.034	0.034
10000	0.038	0.032	17.93	0.031	0.032
15000	0.033	0.029	14.58	0.028	0.029
25000	0.026	0.025	6.75	0.025	0.025
35000	0.023	-	-	0.023	0.023

Şekil 2' de sayısal çözümler yardımıyla elde edilen Darcy sürtünme faktörü değerleri (içi dolu kare sembolü ile gösterilmiş), Doğan ve Erzincan (2023)' in deneysel çalışmasından alınan değerlerle (içi dolu daire sembolü ile gösterilmiş) karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Petukhov (kesik çizgi) ve Blasius (sürekli çizgi) bağıntıları ile hesaplanan değerler de gösterilmiştir. HAD ile elde edilen Darcy sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi için Blasius bağıntısı ile benzer formda, Denklem (4) ile verilen üstel bir korelasyon oluşturulmuştur:

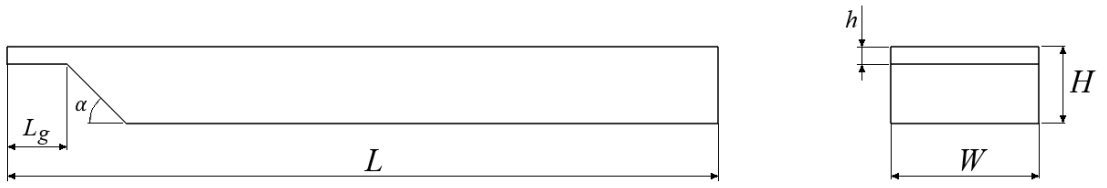
$$f_{HAD} = 1.104 Re^{-0.368} \quad (4)$$



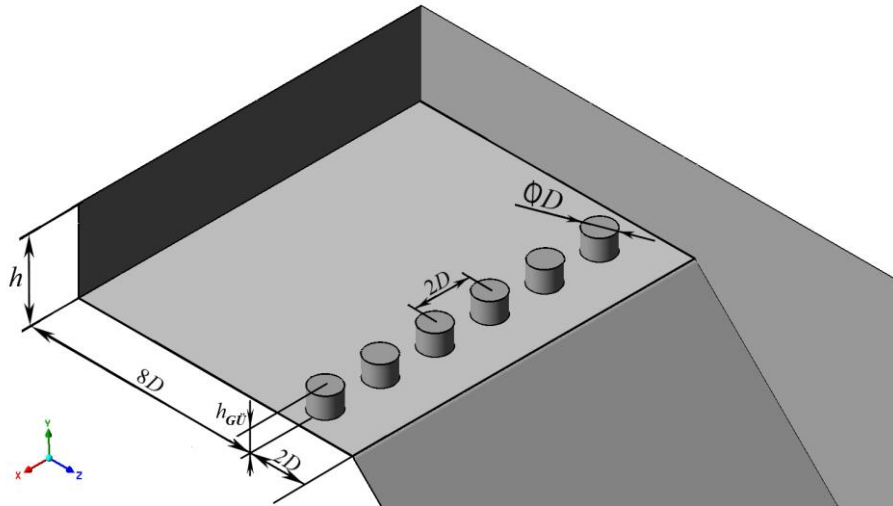
Şekil 2. Sayısal çözüm ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

B. Geometri

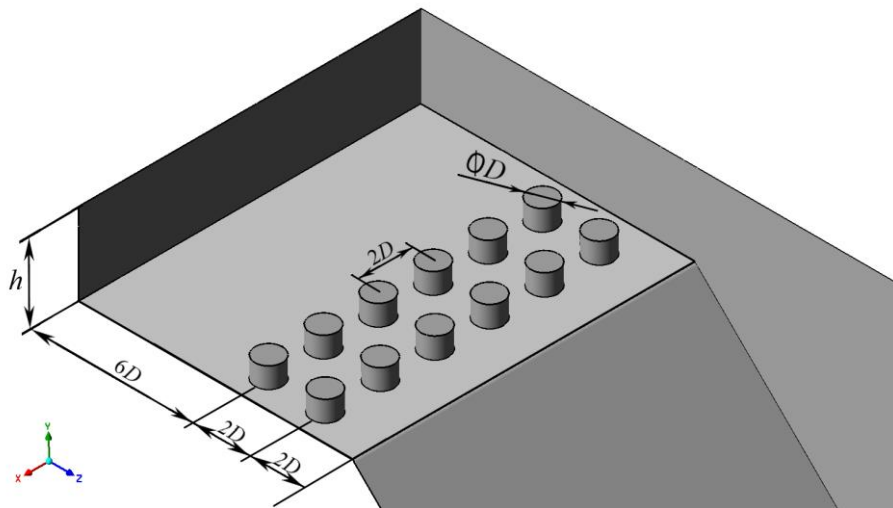
Şekil 3a' da kanalın ön ve sağ iz düşüm görünüşleri ile kanala ait geometrik parametreler gösterilmiştir. Buna göre genişleme açısı α , toplam kanal uzunluğu L , giriş kanalının uzunluğu L_g , giriş kanalı yüksekliği h , genişleme sonrası kanal yüksekliği H , kanal genişliği de W ile gösterilmiştir. Şekil 3b' de ise GÜ' lere ait geometrik parametreler ile GÜ' lerin kanal içerisindeki yerleşimi verilmiştir. Buna göre, kanal içerisine yerleştirilmiş toplamda on iki adet silindirik GÜ bulunmaktadır. GÜ çapı D olmak üzere, GÜ' lerin merkezleri arasındaki mesafe ve bunların giriş kanalının çıkışına olan mesafesi $2D$ kadardır. Şekil 3c-e' de sırasıyla kanal girişinde çift sıra ve eğimli yüzey üzerine yerleştirilmiş tek ve çift sıra GÜ durumları için GÜ' lerin kanal içerisindeki yerleşimleri gösterilmiştir. Şekil 4a' da kanal girişinde tek sıra GÜ olduğu durumlara ait $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90° olmak üzere dört farklı genişleme açısı için GÜ olmayan (solda) ve GÜ olan (sağda) kanal geometrileri gösterilmiştir. Şekil 4b' de ise $\alpha = 45^\circ$ için kanal girişinde çift sıra, eğimli yüzeyde tek sıra ve eğimli yüzeyde çift sıra GÜ olduğu durumlara ait kanal geometrisi gösterilmiştir. Şekil 3 ve 4' de gösterilen ve tüm modeller için sabit olan geometrik parametreler ve sayısal değerleri Çizelge 2' de sunulmuştur. Buna göre GÜ yüksekliğinin giriş kanalı yüksekliğine oranının $h_{GÜ}/h = 0.25$ ve $h_{GÜ}/h = 0.5$ olduğu durumlar için çözümler yapılmıştır. Bu çözümlerin tamamında Reynolds sayısı 5000' dir.



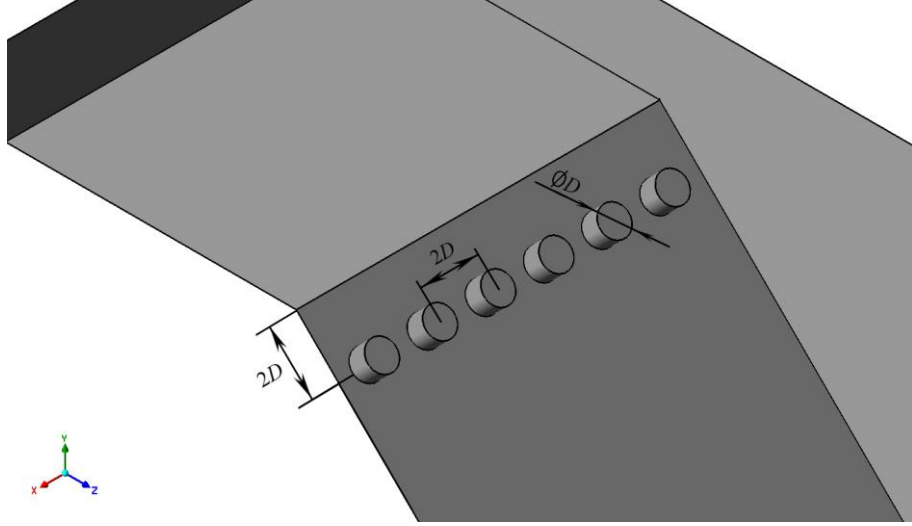
a.



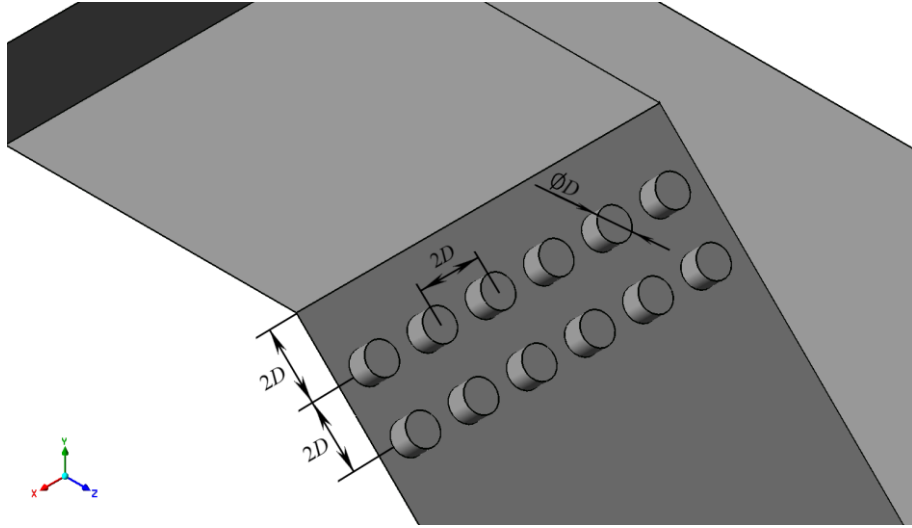
b.



c.

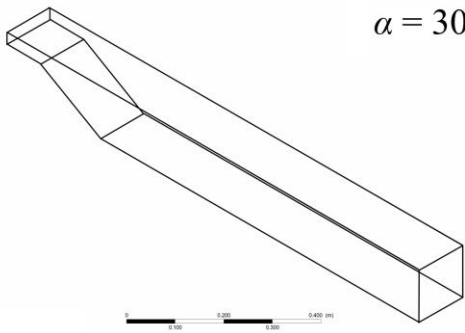


d.



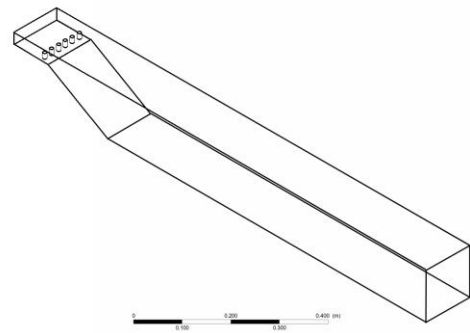
e.

Şekil 3. Sayısal çözümlerde kullanılan geometrik modellere ait **a)** ön ve sağ iz düşüm görünüşler ile kanala ait geometrik parametreler, **b)** GÜ' lere ait geometrik parametreler ile bunların kanal içerisindeki yerleşimi, **c)** kanal girişinde çift sıra GÜ, **d)** eğimli yüzey üzerinde tek sıra GÜ ve **e)** eğik yüzey üzerinde çift sıra GÜ olduğu durumlarda GÜ' lerin kanal içerisindeki yerleşimi

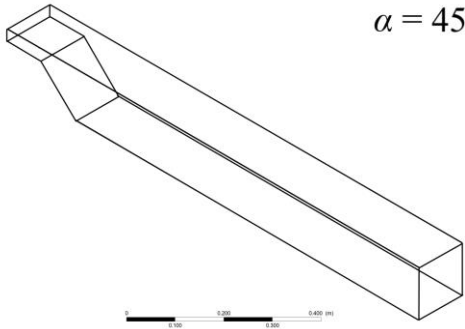


$\alpha = 30^\circ$

ANSYS
2020 R2

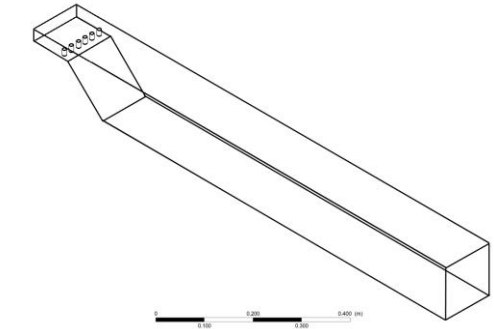


ANSYS
2020 R2

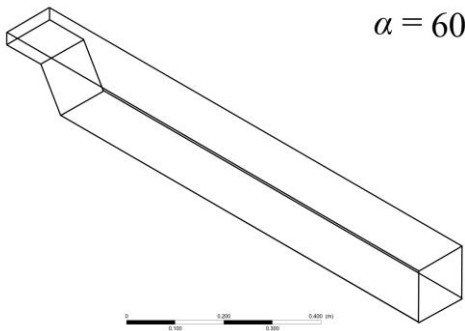


$\alpha = 45^\circ$

ANSYS
2020 R2

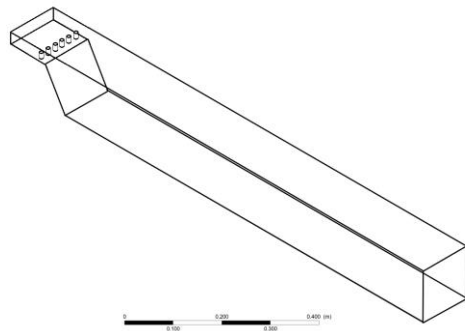


ANSYS
2020 R2

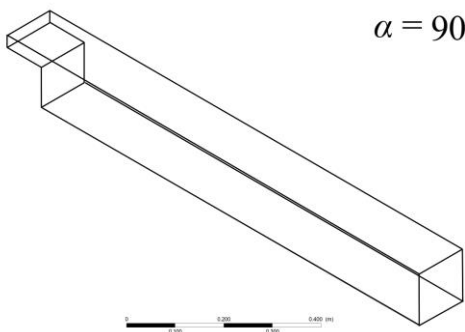


$\alpha = 60^\circ$

ANSYS
2020 R2

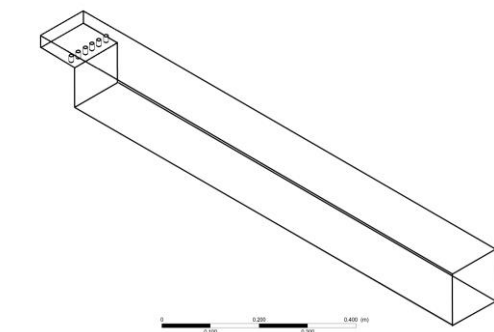


ANSYS
2020 R2



$\alpha = 90^\circ$

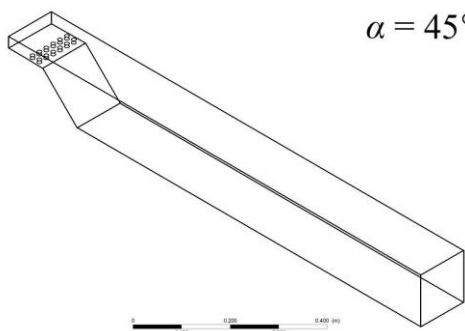
ANSYS
2020 R2



ANSYS
2020 R2

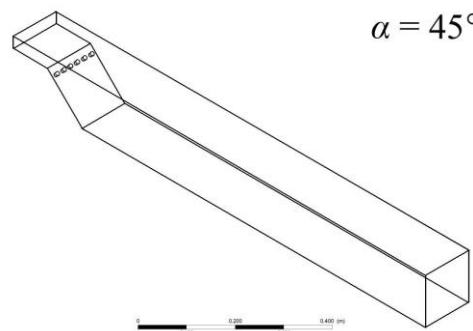


a.



$\alpha = 45^\circ$

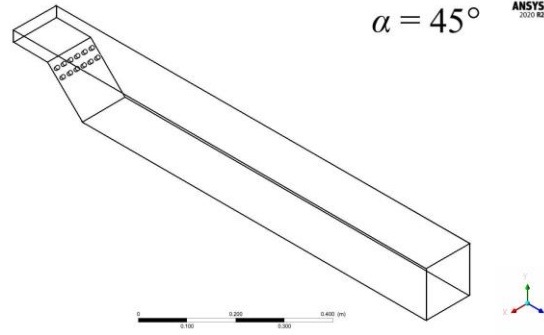
ANSYS
2020 R2



$\alpha = 45^\circ$

ANSYS
2020 R2





b.

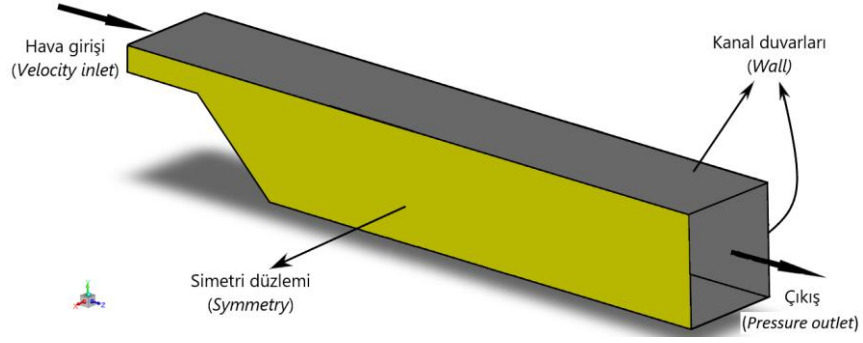
Şekil 4. Sayısal çözümlerde kullanılan geometrik modellere ait **a)** kanal girişinde tek sıra GÜ olduğu durumdaki izometrik görüntüler (solda GÜ olmayan, sağda GÜ olan) ve **b)** $\alpha = 45^\circ$ için kanal girişinde çift sıra ve eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumdaki izometrik görüntüler

Çizelge 2. Kanala ait sabit geometrik parametreler ve sayısal değerleri

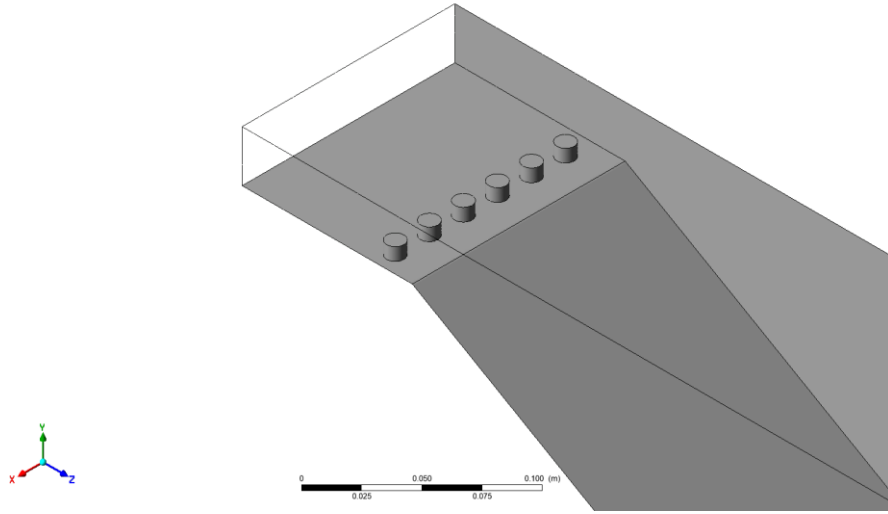
L [m]	H [m]	W [m]	L_g [m]	h [m]	$h_{GÜ}$ [m]	D [m]
1.2	0.13	0.25	0.1	0.03	0.0075	0.01
					0.015	

C. Ağdan Bağımsızlık Çalışması

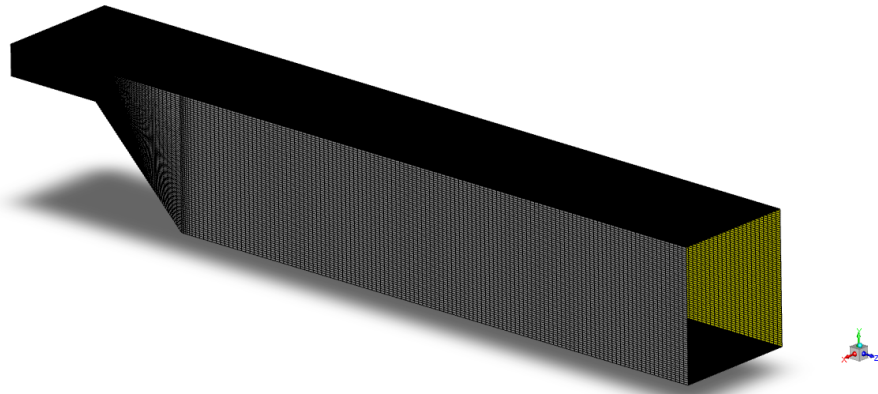
Sayısal modelin doğrulaması yapıldıktan sonra, bu çalışmada asıl söz konusu olan akış problemi için ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Bunun için aşağıdaki Şekil 5a' da geometrisi ve sınır şartları verilmiş olan, 45° açıyla genişleyen kanalda yaklaşık 620 000, 1 100 000 ve 2 300 000 olmak üzere üç farklı eleman sayısı için boyutsuz yeniden tutunma noktasının (*re-attachment point*) konumları karşılaştırılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışmasında kullanılan modelde de genişleme kesitinden yukarı akım yönünde $2D$ uzaklıkta GÜ yerleştirilmiş olup (Şekil 5b), hibrit bir çözüm ağı kullanılmıştır (Şekil 5c). Kullanılan sayısal modelde akımın ve geometrinin simetrisinden faydalanılarak, kanalın sadece yarısı modellenmiştir. Uygulanan sınır şartları ise girişte sabit hız şartının uygulandığı *velocity inlet*, çıkışta 0 Pa sabit basınç şartının uygulandığı *pressure outlet* ve kanalı uzunlamasına kesen orta düzlemde ise *symmetry* sınır şartıdır. Kanal duvarlarında ise kayma olmayan duvar şartı (*no-slip wall*) uygulanmıştır.



a.



b.



c.

Şekil 5. Ağdan bağımsızlık çalışmasında kullanılan modele ait **a)** çözüm hacmi ve sınır şartları, **b)** kanal giriş bölgesine yerleştirilmiş GÜ' ler ve **c)** oluşturulan hibrit çözüm ağı

Çizelge 3' de verilen sonuçlara göre eleman sayısı yaklaşık iki katına çıkarıldığında her bir çözümde elde edilen boyutsuz yeniden tutunma noktasında (z_R/h) bir önceki çözüme göre mutlak değer olarak %3' den az oranda bir değişim olduğu görülmüştür.

Duvara bitişik ağ elemanlarının duvardan boyutsuz uzaklığını belirten y^+ büyüklüğünün (White, 1990) değeri ise 2.3 milyon eleman sayısı için 7' den az olarak elde edilmiş olup, bu değer türbülanslı sınır tabakada örtüşme bölgesi ve dış bölgenin çözülebilmesi için gerekli olan $y^+ \leq 5$ koşuluna yakındır. Sonuç olarak bundan sonraki sayısal çözümlerde 2.3 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağı ayarları kullanılmıştır.

Çizelge 3. Ağdan bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar

Eleman sayısı	z_R/h [-]	Değişim[%]	Maksimum y^+
620 000	25.93	-	10.35
1 100 000	26.57	2.47	8.49
2 300 000	25.83	-2.79	6.37

III. SAYISAL ÇÖZÜM SONUÇLARI

A. Kanal Girişinde Tek Sıra GÜ

Kanalın girişinden itibaren simetri düzlemi üzerinde alt duvar boyunca duvar kayma gerilmesinin (τ_w) değişimi Şekil 6' da gösterilmiştir. Akım ayrılmasının gerçekleştiği bölgede duvar kayma gerilmesi negatif değer almaktadır. Duvar kayma gerilmesinin işaret değiştirdiği nokta ise yeniden tutunma noktasını (*re-attachment point*) göstermektedir. Şekil 6' da kanal girişi (I), eğimli yüzey (II), kanal alt duvarı ise (III) ile numaralandırılmıştır; her bir bölge kesikli düşey çizgiler ile ayrılmıştır. (I) ve (II) bölgeleri küçük resimler ile detaylı olarak şekil üzerinde ayrıca gösterilmiştir. $\alpha = 90^\circ$ durumunda eğimli yüzey bulunmadığından (II) bölgesi gösterilmemiştir. (I) bölgesinde ($z_R/h \leq 3.33$) GÜ olan ve olmayan durumlar arasında belirgin farklar olduğu görülmektedir. Tüm genişleme açıları için, GÜ olmayan durumlarda (I) bölgesinde τ_w düzgün bir şekilde azalmakta, (II) bölgesine yaklaşıldığında tekrar artmaya başlamakta ve (II) bölgesinin başlangıç kesitinde ($z_R/h = 3.33$) ikinci pik değerini almaktadır (ilk pik değer kanal girişinde gerçekleştiği kabul edilmiştir). GÜ olan durumlarda ise τ_w (I) bölgesinde dalgalı bir şekilde azalmakta, ikinci pik değer de yukarı akım yönünde yer değiştirerek GÜ' lerin merkez noktası civarında ($z_R/h \cong 2.67$) gerçekleşmektedir. (I) bölgesinde en yüksek pik değer $h_{GÜ}/h = 0.5$ olduğu durumda elde edilmektedir. Tüm genişleme açıları için (I) bölgesinde kanal girişinden girdap üreticilerin merkez noktasına kadar olan kısımda ($0 \leq z_R/h \leq 2.67$) $h_{GÜ}/h = 0.5$ ve $h_{GÜ}/h = 0.25$ için τ_w profilleri birbirleri ile benzerlik gösterirken, girdap üreticilerin merkezi ile genişleme kesitine kadar olan kısımda ($2.67 \leq z_R/h \leq 3.33$) τ_w profilleri hem genişleme açısı hem de $h_{GÜ}/h$ oranı ile farklılıklar göstermektedir. $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ ve 60° için (II) bölgesinde τ_w minimum değerini almakla birlikte, genişleme açısı büyüdükçe bu minimum değer artmaktadır. Genişleme sonrasındaki kanal alt duvarını temsil eden (III) bölgesinde ise τ_w profilleri büyük ölçüde benzerlik göstermektedir.

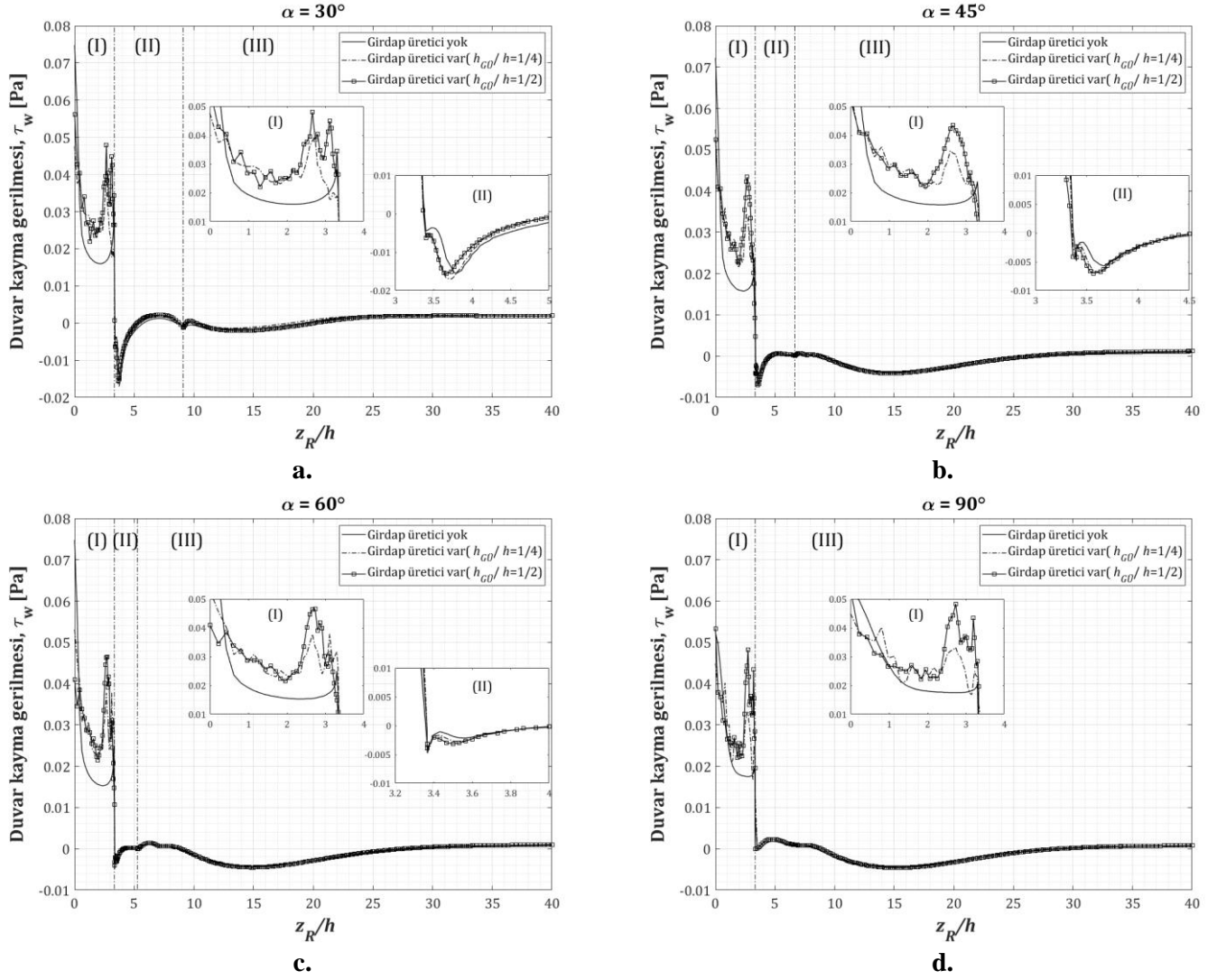
Çizelge 4’ de boyutsuz yeniden tutunma noktalarının konumları (z_R/h) ile kanallara ait statik basınç geri kazanım katsayısı ($R = (p_\zeta - p_g)/(0.5\rho V_g^2)$, p_ζ ve p_g sırasıyla çıkıştaki ve girişteki ortalama statik basınç olmak üzere) verilmiştir. Buna göre, $h_{GÜ}/h = 0.25$ olduğu durumların tamamında GÜ’ lerin ayrılma bölgesini küçülttüğü (z_R/h değerinin azaldığı) görülmektedir. Ayrıca $\alpha = 30^\circ$ dışındaki genişleme açılarında $h_{GÜ}/h = 0.5$ olduğu durumda da $h_{GÜ}/h = 0.25$ olduğu durumdaki kadar olmamakla birlikte, z_R/h azalmıştır.

GÜ kullanılmayan kanallarda genişlemeden kaynaklı statik basınç geri kazanımının olduğu ($R > 0$), buna karşılık GÜ eklenen kanallarda ise geri kazanılandan daha fazla basınç kaybı olduğu ($R < 0$) görülmektedir. Bu da kanal girişine eklenen tek sıra GÜ’ lerin neden olduğu basınç kaybının, genişleme kaynaklı statik basınç artışından daha fazla olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4’ de ayrıca kanal boyunca gerçekleşen toplam basınç kaybı, ΔP_k , verilmiştir. Basınç kaybı aşağıda verilen Denklem (5) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\Delta P_k = (p_g - p_\zeta) + \frac{1}{2}\rho(V_g^2 - V_\zeta^2) \quad (5)$$

Toplam basınç kayıpları incelendiğinde GÜ olmayan duruma göre basınç kaybındaki yüzdelik artış tüm genişleme açıları için $h_{GÜ}/h = 0.5$ olduğu durumlarda çok daha fazla olmaktadır. $h_{GÜ}/h$ oranı 0.25’ den 0.5’ ye çıkarıldığında, basınç kaybındaki artışa karşılık z_R/h değerinde $h_{GÜ}/h=0.25$ olduğu duruma göre bir azalma görülmemektedir. Ayrıca, basınç geri kazanım katsayısı R değeri negatif yönde daha da artmaktadır. Dolayısıyla, kanal girişine tek sıra halinde yerleştirilen GÜ’ ler için yükseklik oranı $h_{GÜ}/h$ değerinin artırılmasının bir avantajı olmamaktadır.

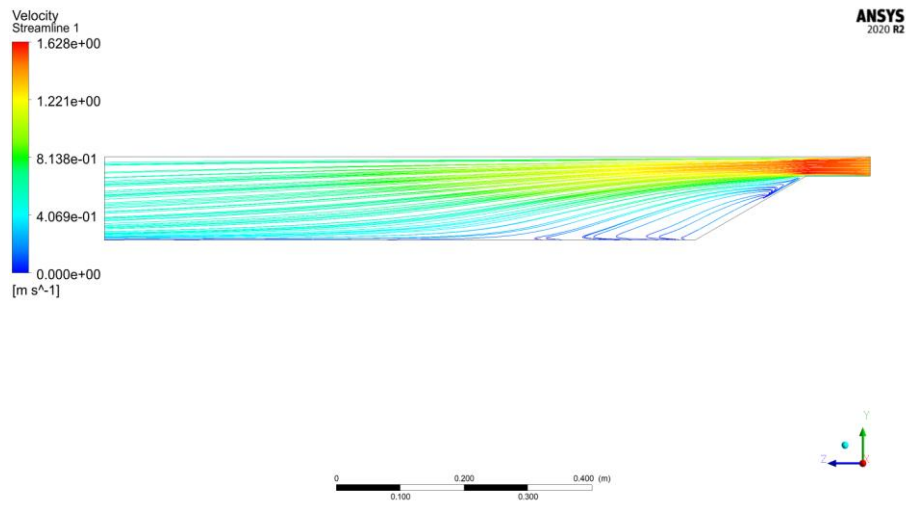


Şekil 6. Duvar kayma gerilmesinin alt duvar boyunca değişimi **a)** 30° genişleme açısı, **b)** 45° genişleme açısı, **c)** 60° genişleme açısı ve **d)** 90° genişleme açısı

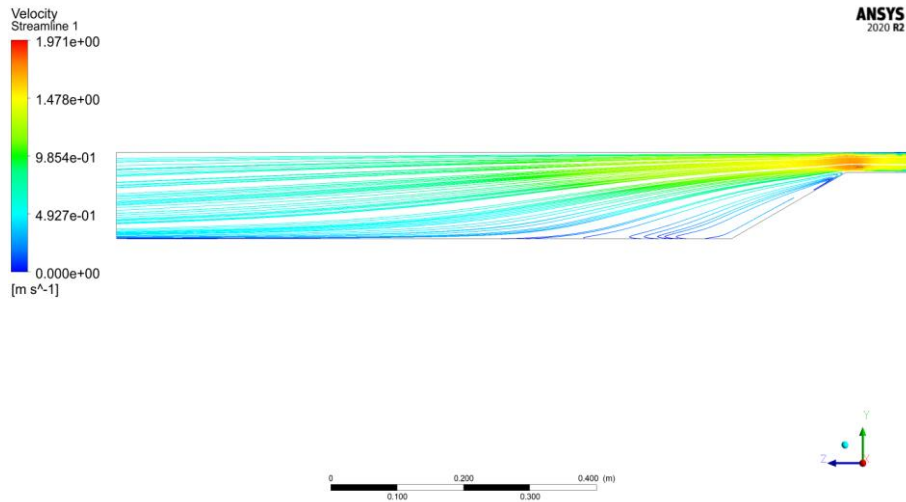
Çizelge 4. Yeniden tutunma noktalarının konumu, statik basınç geri kazanım katsayısı ve basınç kaybı

Çözüm	$h_{GÜ}/h$ [-]	z_R/h [-]	R [-]	ΔP_k [Pa]	$\epsilon_{\Delta P,k}$ [%]
30°- GÜ yok	-	19.3	0.223	0.881	-
30°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.25	18	-0.058	1.223	38.84
30°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.5	20	-0.252	1.459	65.65
45°- GÜ yok	-	27.8	0.107	1.023	-
45°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.25	25.8	-0.044	1.207	17.98
45°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.5	26.5	-0.325	1.549	51.44
60°- GÜ yok	-	28.5	0.087	1.047	-
60°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.25	27	-0.070	1.238	18.26
60°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.5	27.5	-0.353	1.583	51.17
90°- GÜ yok	-	29.2	0.039	1.106	-
90°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.25	28.2	-0.085	1.257	13.66
90°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.5	28.7	-0.373	1.607	45.38

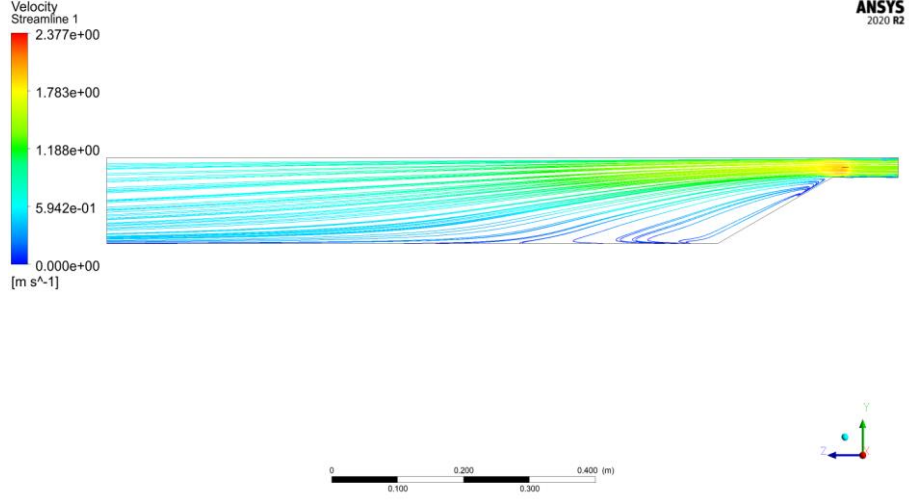
Simetri düzlemi üzerinde oluşturulan akım çizgileri Şekil 7 – 10’ da görülmektedir. Buna göre, kesit genişlemesinin hemen sonrasında meydana gelen akım ayrılmasından kaynaklanan girdap oluşumu 30° genişleme durumunda fazla belirgin olmamakla birlikte, ters akım bölgesi ve kanal alt duvarında oluşan yeniden tutunma noktası (*re-attachment point*) açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 7). Buna karşılık 45°, 60° ve 90° ile genişleyen kanallarda akım ayrılmasını takiben nispeten daha büyük bir girdap oluştuğu ve kanal orta düzlemi civarında yeniden tutunma noktasının oluştuğu görülmektedir (Şekil 8 – 10).



a.

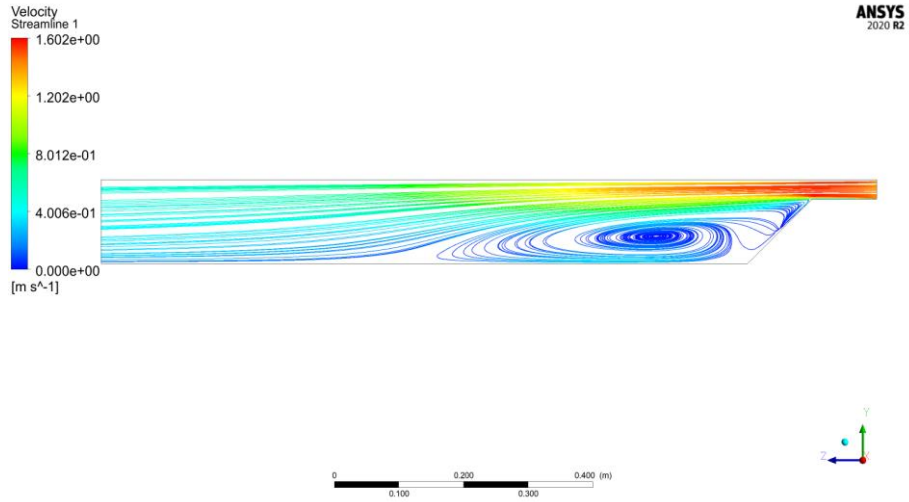


b.

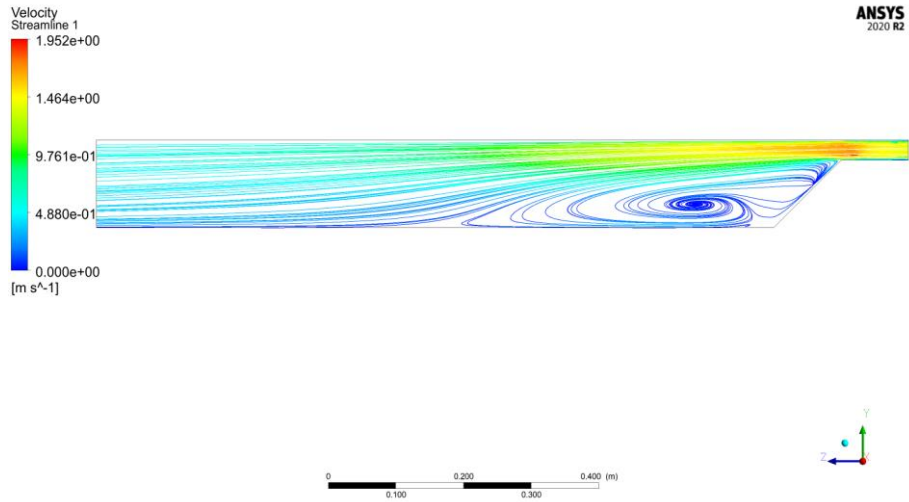


c.

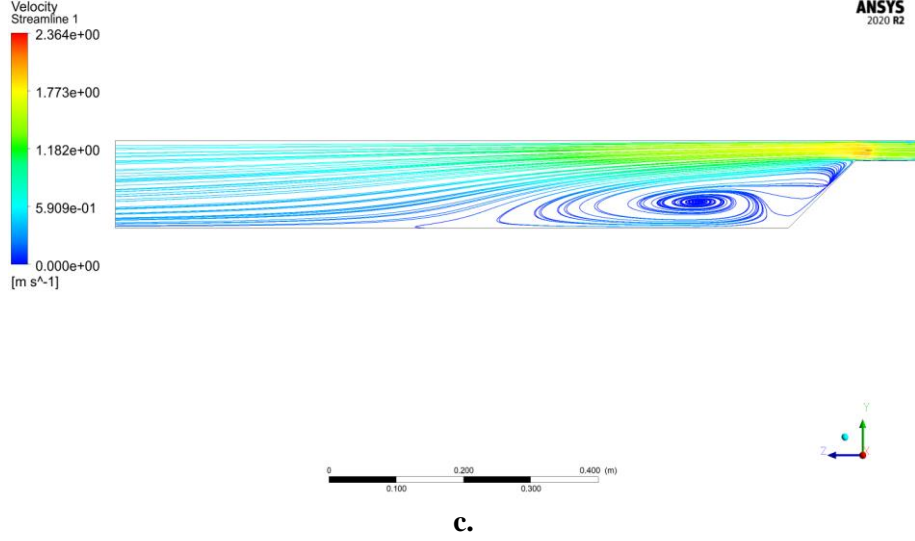
Şekil 7. $\alpha = 30^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri
a) GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$



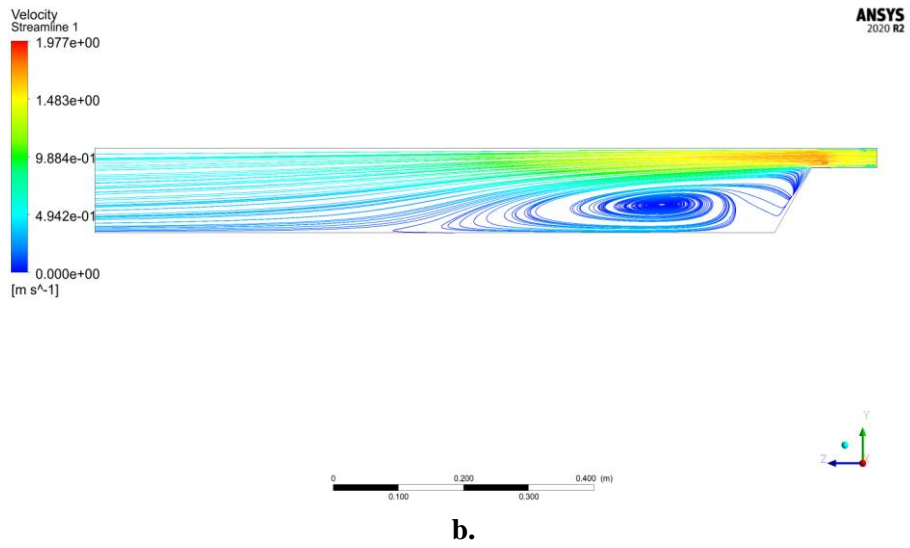
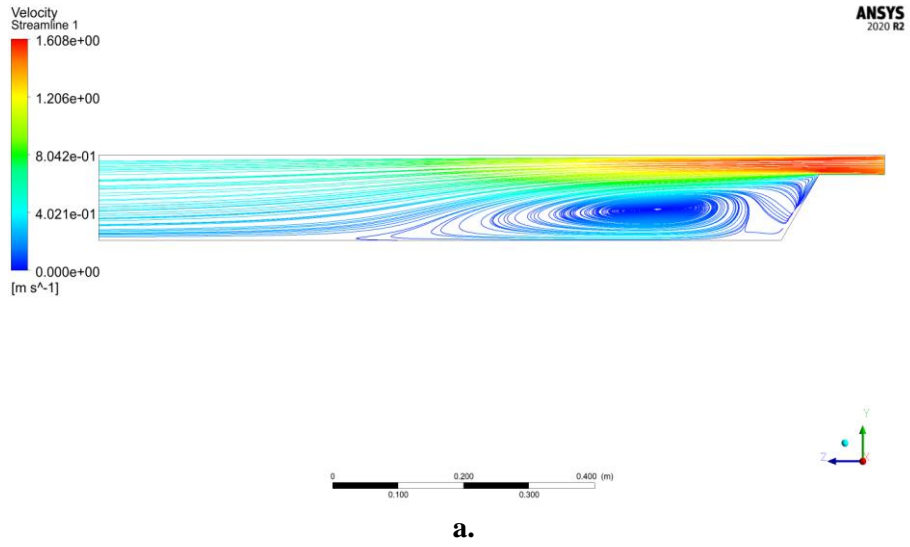
a.

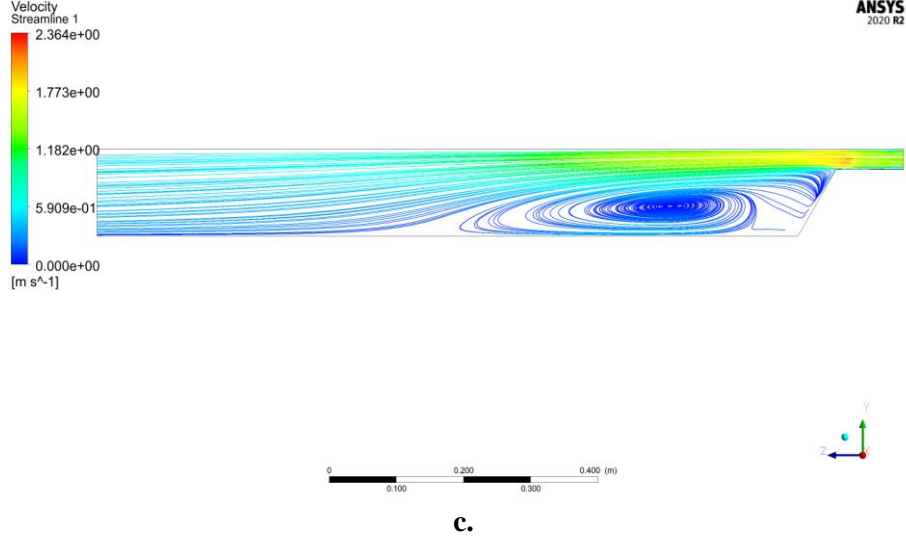


b.

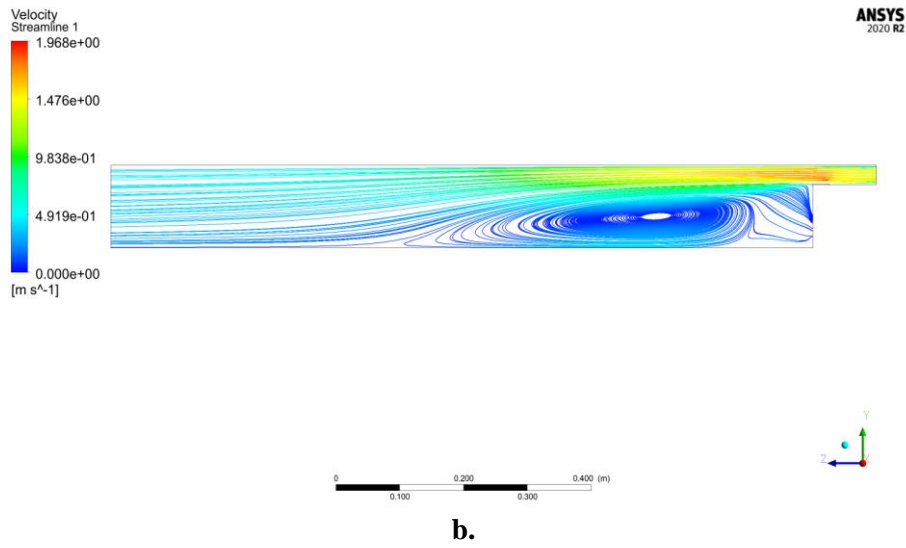
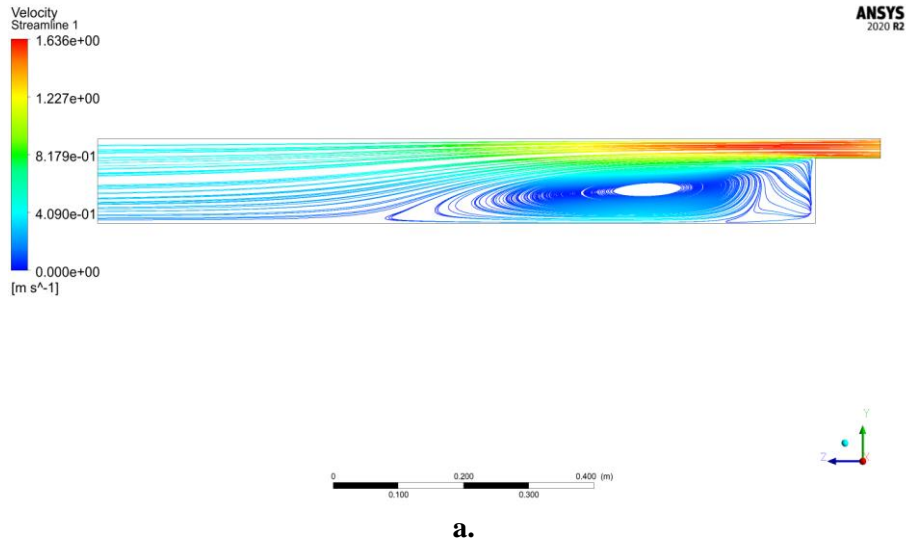


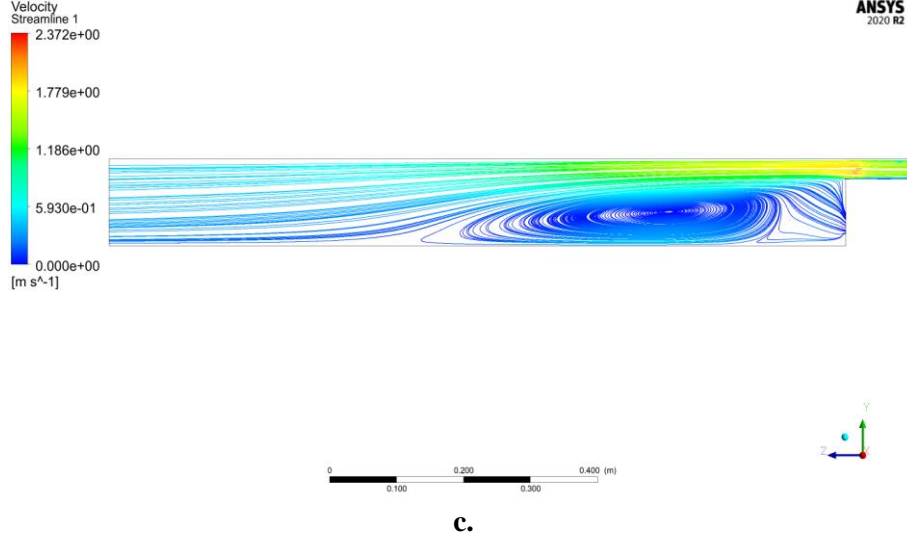
Şekil 8. $\alpha = 45^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri
a) GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$





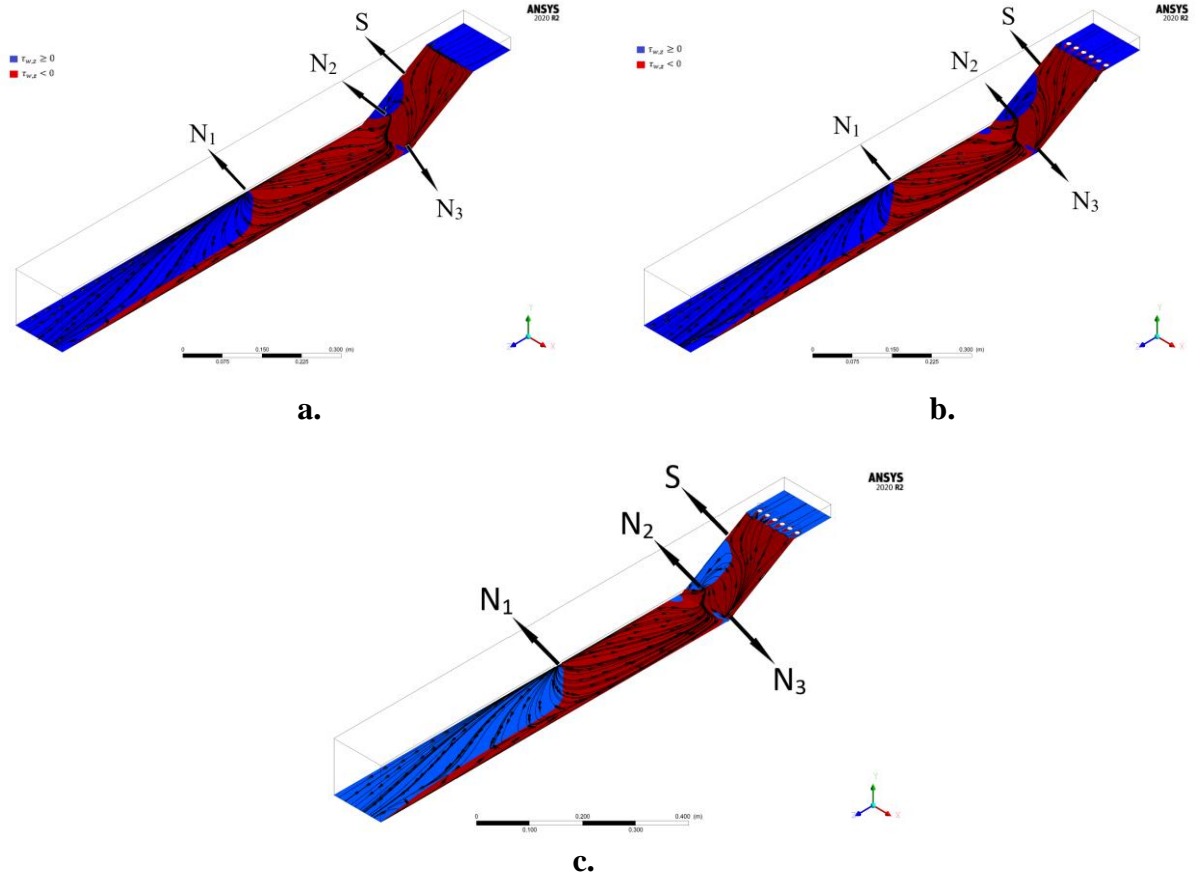
Şekil 9. $\alpha = 60^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri
a) GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$



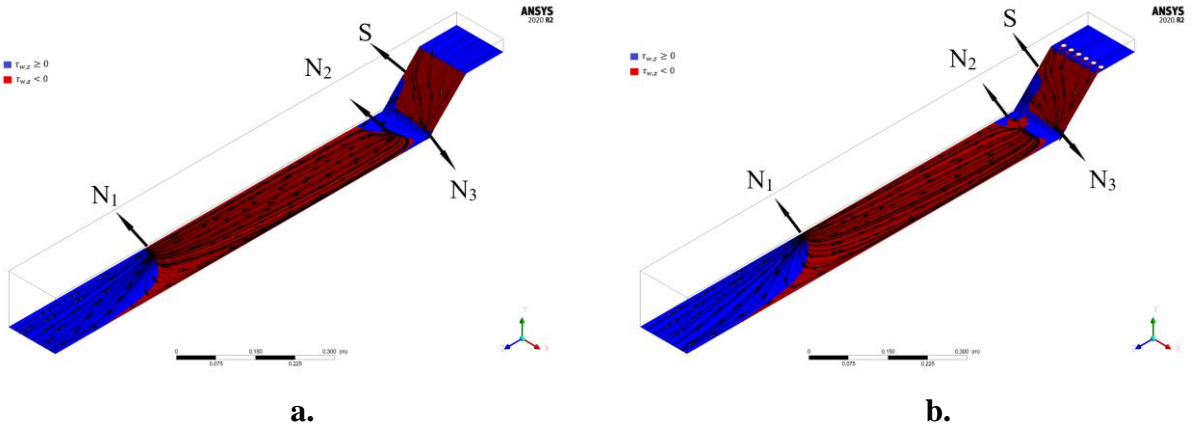


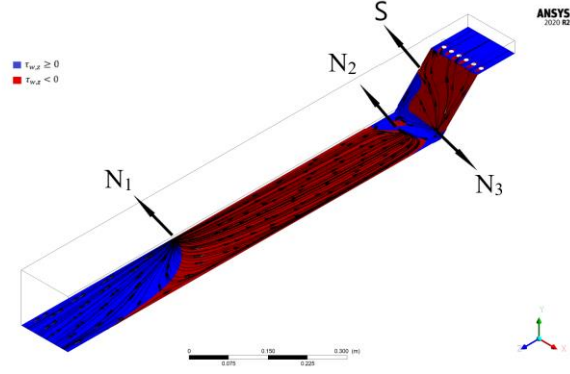
Şekil 10. $\alpha = 90^\circ$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri
a) GÜ yok, **b)** GÜ var - $hG\ddot{u}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $hG\ddot{u}/h=0.5$

Şekil 11’ de kanal alt yüzeyindeki yüzey sürtünme çizgileri ve oluşan tekil noktalar gösterilmiştir. Ayrıca, duvar kayma gerilmesinin z yönündeki bileşeninin ($\tau_{w,z}$) pozitif ve negatif olduğu bölgeler sırasıyla mavi ve kırmızı renk ile işaretlenmiştir. Buna göre, tüm genişleme açıları için GÜ olan ve olmayan tüm kanallarda N_1 , N_2 ve N_3 ile gösterilen üç adet düğüm noktası ile eğimli yüzey üzerinde bir yarı-eyer noktası (S) oluşmaktadır. Burada kanallara GÜ eklenmesiyle N_1 düğüm noktasının kanal girişi yönünde yer değiştirdiği görülebilir. N_3 düğüm noktası genişleme açısı α arttıkça eğimli yüzey üzerinde yukarı akım yönünde yer değiştirirken; $\alpha = 30^\circ$ genişleme açısında eğimli yüzey üzerinde oluşan N_2 düğüm noktası (Şekil 11), diğer genişleme açılarında kanal alt duvarı üzerinde oluşmaktadır (Şekil 12-14). Yarı eyer noktası S ’nin eğimli yüzey üzerindeki konumu $\alpha = 30^\circ$, 45° ve 60° için hemen hemen aynı olmakla birlikte, $\alpha = 90^\circ$ genişleme açısında kanal alt duvarına daha yakın bir noktada oluşmaktadır.



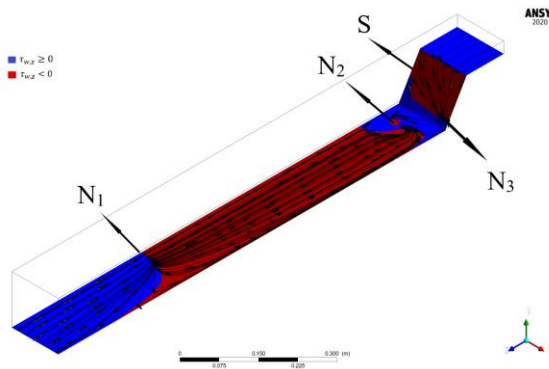
Şekil 11. $\alpha = 30^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar
a) GÜ yok, **b)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve **c)** GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$



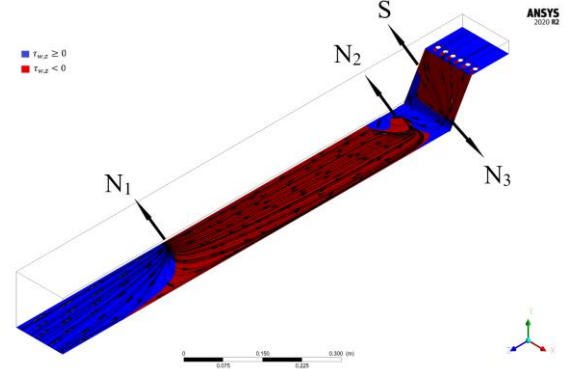


c.

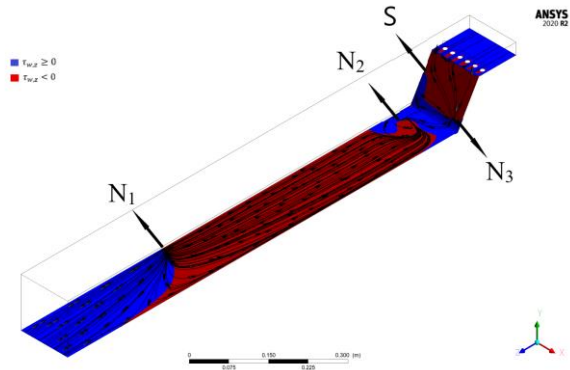
Şekil 12. $\alpha = 45^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar
a) GÜ yok, b) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve c) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$



a.

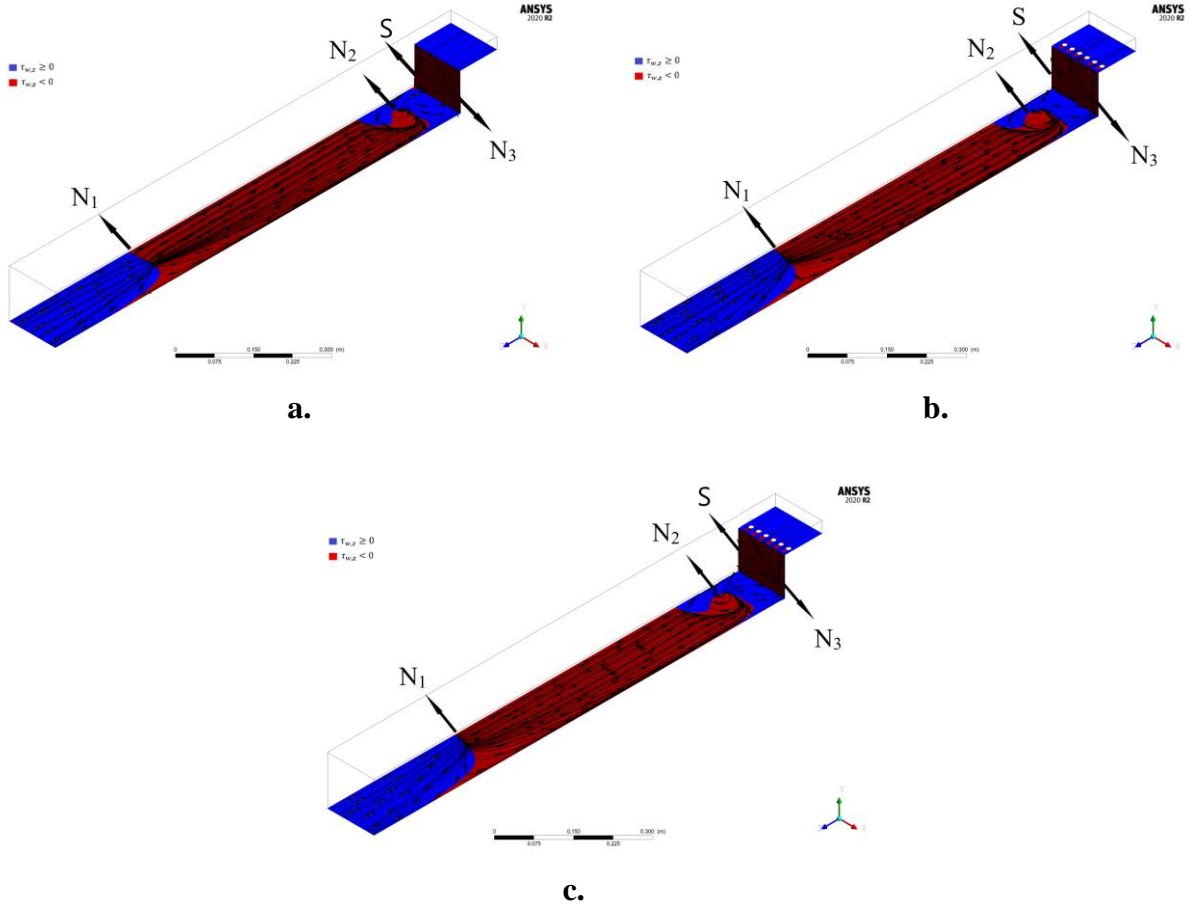


b.



c.

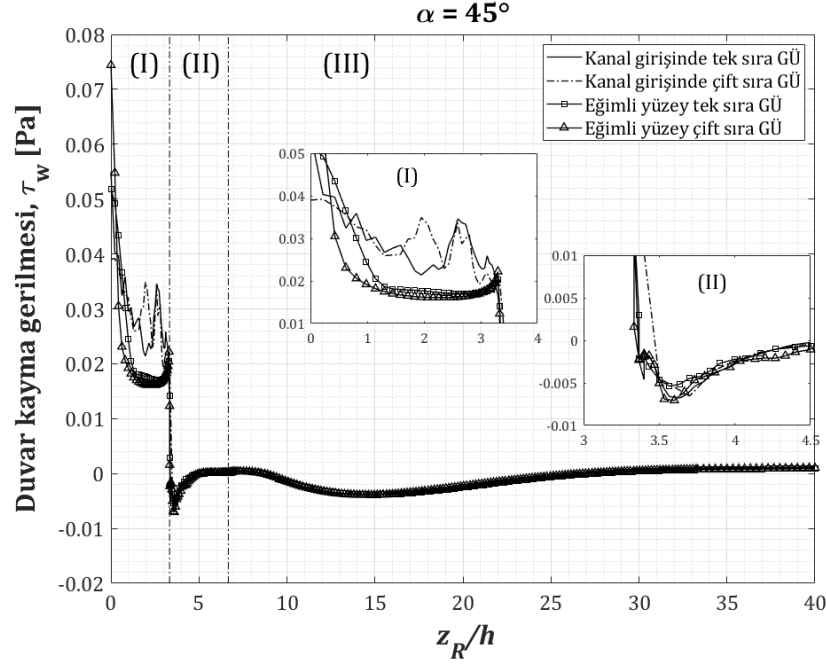
Şekil 13. $\alpha = 60^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar
a) GÜ yok, b) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve c) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$



Şekil 14. $\alpha = 90^\circ$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar
 a) GÜ yok, b) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.25$ ve c) GÜ var - $h_{GÜ}/h=0.5$

B. Kanal Girişinde ve Eğimli Yüzeyde Tek ve Çift Sıra GÜ

Genişleme açısı $\alpha = 45^\circ$ ve girdap üretici yükseklik oranı $h_{GÜ}/h= 0.25$ için kanal girişinde tek ve çift sıra ile eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumlara ait, duvar kayma gerilmesinin (τ_w) simetri düzlemi üzerinde kanal alt duvarı boyunca değişimini veren grafik Şekil 15’ de verilmiştir. Kanal girişinden genişleme kesitine kadar olan bölge (I), genişleme bölgesi (II) ve genişleme sonrası kanal alt duvarı ise (III) ile numaralandırılmıştır. (I) ve (II) bölgelerindeki duvar kayma gerilmesi profilleri ayrıca detaylı olarak küçük resimler ile gösterilmiştir. Kanal girişinde çift sıra GÜ kullanıldığı durumda τ_w profilinde gözlenen başlıca değişiklik ek GÜ sırası üzerinde oluşan bir diğer pik noktasıdır. (II) bölgesinde eğimli yüzey üzerine yerleştirilen tek ve çift sıra GÜ’ ler ise τ_w profilinde dikkate değer bir değişiklik yaratmamaktadır. (III) bölgesinde de τ_w profilleri büyük ölçüde birbiriyile örtüşmektedir.



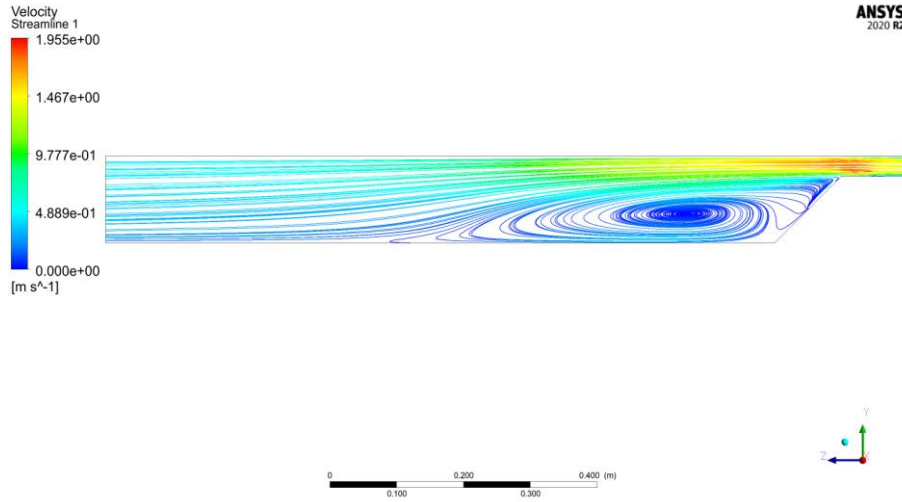
Şekil 15. $\alpha = 45^\circ$ ve $h_{GÜ}/h = 0.25$ kanal girişinde tek ve çift sıra ile eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumda duvar kayma gerilmesinin değişimi

Çizelge 5' de $\alpha = 45^\circ$ için kanal girişinde tek ve çift sıra ile eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumlarda yeniden tutunma noktalarının konumu z_R/h , statik basınç geri kazanım katsayısı R ve basınç kaybı ΔP_k verilmiştir. Ayrıca, GÜ olmayan duruma göre basınç kaybındaki değişim yüzdeler olarak verilmiştir ($\varepsilon_{\Delta P,k}$). Buna göre, kanal girişinde çift sıra GÜ kullanıldığında basınç kaybında meydana gelen artışa karşılık yeniden tutunma noktasının konumundaki (z_R/h) değişim kanal girişinde tek sıra GÜ ile elde edilene göre daha küçük olmaktadır. Eğimli yüzeyde tek sıra ve çift sıra GÜ kullanıldığında ise kanaldaki toplam basınç kaybı ΔP_k GÜ olmayan durumdakine çok yakın olmakta, fakat z_R/h değerindeki değişim kanal girişinde tek sıra GÜ ile elde edilene göre daha az olmaktadır. Basınç geri kazanımı (R) değerleri kanal girişinde çift sıra GÜ kullanıldığında negatif olmaktadır. Buna karşılık eğimli yüzey üzerindeki tek ve çift sıra GÜ durumlarında pozitif olmakta ve GÜ olmayan duruma göre daha büyük R değerleri elde edilmektedir. Sonuç olarak kanal girişinde çift sıra GÜ kullanımının enerji verimliliğini olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Ayrıca eğimli yüzey üzerindeki GÜ sıra sayısı arttıkça kanaldaki basınç kaybının daha da azalacağı ve basınç geri kazanımının da daha da artacağı tahmin edilebilir.

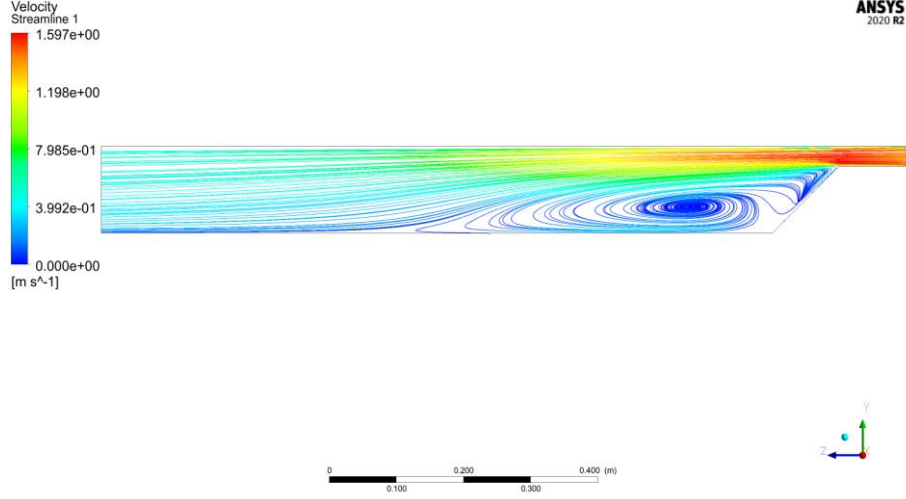
Çizelge 5. $\alpha = 45^\circ$ için kanal girişinde tek ve çift sıra, eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olduğu durumlarda yeniden tutunma noktalarının konumu, statik basınç geri kazanım katsayısı ve basınç kaybı

Çözüm	$h_{GÜ}/h$ [-]	z_R/h [-]	R [-]	ΔP_k [Pa]	$\epsilon_{\Delta P,k}$ [%]
45°- GÜ yok	-	27.8	0.107	1.023	-
45°- kanal girişinde tek sıra GÜ	0.25	25.8	-0.044	1.207	17.98
45°- kanal girişinde çift sıra GÜ		27.4	-0.132	1.314	28.46
45°- eğimli yüzeyde tek sıra GÜ		27.7	0.108	1.022	-0.12
45°- eğimli yüzeyde çift sıra GÜ		27.1	0.119	1.008	-1.43

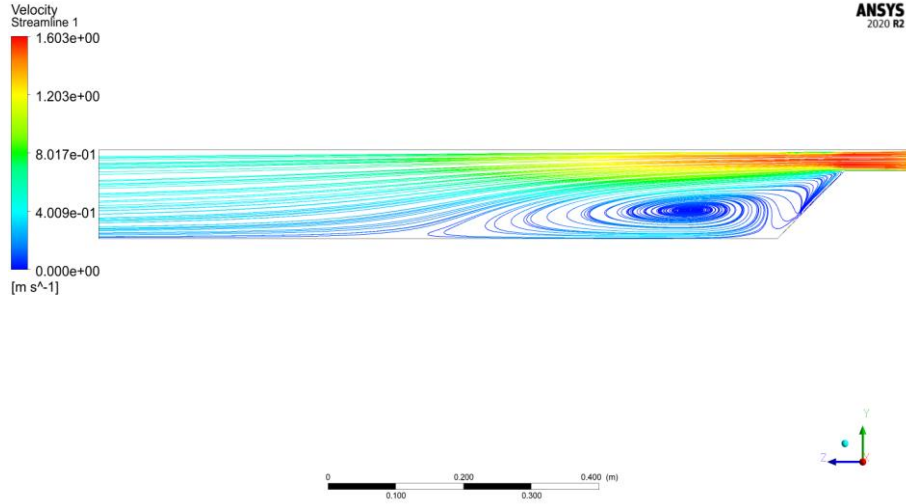
Simetri düzlemi üzerinde oluşturulan akım çizgileri Şekil 16' da görülmektedir. Burada kesit genişlemesinin hemen sonrasında meydana gelen akım ayrılmasından kaynaklanan girdap oluşumu, ters akım bölgesi ve kanal alt duvarında oluşan yeniden tutunma noktası (*re-attachment point*) açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen hız alanı farklı olmakla birlikte, genel olarak akış motifi her üç durum için de benzerdir.



a.



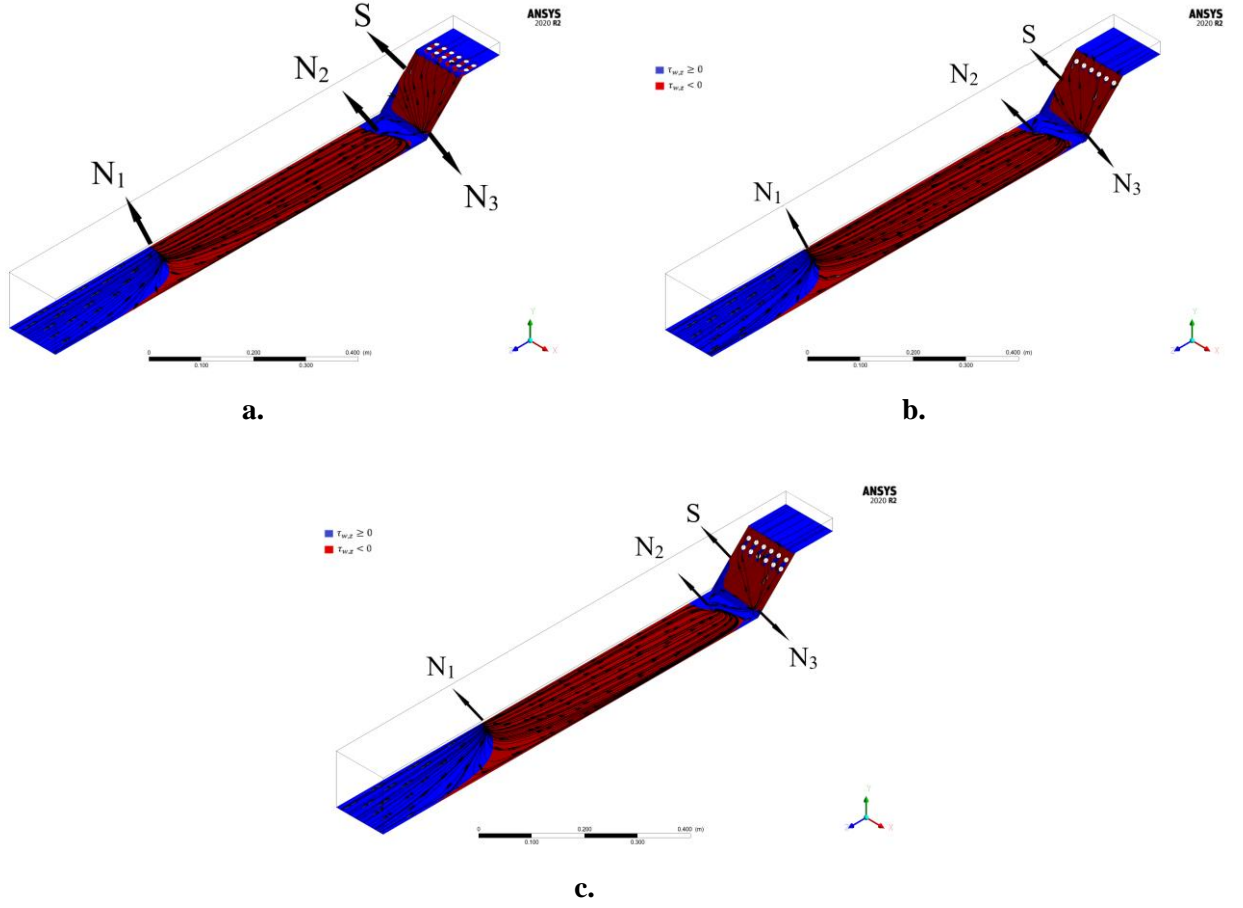
b.



c.

Şekil 16. $\alpha = 45^\circ$ ve $h_{GÜ}/h = 0.25$ için simetri düzlemi üzerinde gösterilen akım çizgileri **a)** kanal girişinde çift sıra GÜ, **b)** eğimli yüzeyde tek sıra GÜ ve **c)** eğimli yüzeyde çift sıra GÜ

Şekil 17' de kanal alt yüzeyindeki yüzey sürtünme çizgileri ve oluşan tekil noktalar gösterilmiştir. Ayrıca, duvar kayma gerilmesinin z yönündeki bileşeninin ($\tau_{w,z}$) pozitif ve negatif olduğu bölgeler sırasıyla mavi ve kırmızı renk ile işaretlenmiştir. Buna göre, her üç durum için de N_1 , N_2 ve N_3 ile gösterilen üç adet düğüm noktası ve eğimli yüzey üzerinde bir yarı-eyer noktası (S) oluşmaktadır. Bu noktaların konumlarının GÜ yerleşiminden hemen hemen etkilenmediği söylenebilir.



Şekil 17. $\alpha = 45^\circ$ ve $h_{GÜ}/h = 0.25$ için kanal alt duvarı üzerindeki yüzey sürtünme çizgileri ve tekil noktalar **a)** kanal girişinde çift sıra GÜ, **b)** eğimli yüzeyde tek sıra GÜ ve **c)** eğimli yüzeyde çift sıra GÜ

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, genişleyen bir dikdörtgen kanalda silindirik GÜ'lerin türbülanslı akışta akım ayrılması ve buna bağlı olarak kanaldaki basınç kaybı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak, kanal girişine tek sıra GÜ yerleştirildiği ve genişleme açısının 30° , 45° , 60° ve 90° , yükseklik oranının da $h_{GÜ}/h=0.25$ ve $h_{GÜ}/h=0.5$ olduğu durumlar için hız ve basınç alanları ANSYS *Fluent* çözücüsü kullanılarak yapılan sayısal çözümlerle elde edilmiştir. Sonrasında ise ek olarak 45° genişleme açısı ve $h_{GÜ}/h=0.25$ için kanal girişinde çift sıra ve eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. Her bir durum için GÜ'lerin akış alanında yarattığı etki akım çizgileri yardımıyla görsel olarak sunulmuş ve bunun üzerinde topolojik bir analiz yapılmış, ayrıca kanal alt duvarı boyunca duvar kayma gerilmesinin değişimi, yeniden tutunma noktasının konumu, kanaldaki toplam basınç kaybı ve statik basınç geri kazanım katsayısı gibi parametrelerle de sonuçlar nicel olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, başlıca aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kanal girişinde tek sıra GÜ kullanıldığında kanal alt duvarındaki yeniden tutunma noktası yukarı akım yönünde yer değiştirmiştir. Bu yer değiştirme $h_{GÜ}/h=0.25$ olduğunda $h_{GÜ}/h=0.5$ olduğu duruma göre daha fazla olmaktadır.
- Kanal girişinde tek sıra GÜ kullanıldığında kanaldaki toplam basınç kaybı, GÜ olmayan duruma göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca yükseklik oranının $h_{GÜ}/h=0.25$ değerinden $h_{GÜ}/h=0.5$ değerine çıkarılmasının basınç kaybı artışında büyük bir etkisi olmakta, GÜ olmayan duruma göre basınç kaybı artış oranı yaklaşık %65'e kadar çıkmaktadır.
- 45° genişleme açısı ve $h_{GÜ}/h=0.25$ için kanal girişinde tek sıra GÜ kullanıldığında statik basınç geri kazanım katsayısının değeri negatif olmaktadır. Bu da kanalda oluşan basınç kaybının genişlemeden kaynaklı basınç geri kazanımından daha büyük olduğunu göstermektedir.

- 45° genişleme açısı ve $h_{GÜ}/h= 0.25$ için kanal girişinde çift sıra GÜ kullanıldığında ise kanaldaki toplam basınç kaybı kanal girişinde tek sıra GÜ olduğu duruma göre daha da artmakta, zaten negatif olan statik basınç geri kazanım katsayısı da azalmaktadır. Yeniden tutunma noktası da kanal girişinde tek sıra GÜ durumuna göre aşağı akım yönünde yer değiştirmektedir.
- 45° genişleme açısı ve $h_{GÜ}/h= 0.25$ için eğimli yüzeyde tek ve çift sıra GÜ kullanıldığında toplam basınç kaybı GÜ olmayan durumdakinden daha az olmakta, statik basınç geri kazanım katsayısı ise daha fazla olmaktadır. Yeniden tutunma noktası da yukarı akım yönünde yer değiştirmekle birlikte, bu yer değiştirme kanal girişinde tek sıra GÜ olduğu durumdakinden daha az olmaktadır. Fakat, eğimli yüzey üzerindeki GÜ' lerin sıra sayısı artırıldıkça sayılan parametrelerde iyileştirme sağlanacağı tahmin edilmektedir.
- Sonuç olarak, eğimli yüzey üzerine yerleştirilen GÜ' lerin enerji verimliliği açısından daha avantajlı olduğu, sıra sayısının artırılmasıyla enerji kaybının daha da azaltılabileceği söylenebilir.

Gelecek çalışmalarda ise ek sayısal çözümler yapılarak aşağıdaki parametreler üzerinde durulabilir:

- GÜ geometrisine ilişkin farklı konfigürasyonların incelenmesi:
 - o Daha küçük GÜ yüksekliği/kanal giriş yüksekliği oranı (örn. $h_{GÜ}/h=0.1, 0.05\dots$)
 - o Eğimli yüzey üzerinde GÜ' lerin farklı dizilişleri (üç veya dört sıralı, saptırmalı diziliş)
 - o Silindirik GÜ' lere kanatçık eklenmesi

V. KAYNAKLAR

MAKALELER

- BORRAJO-PÉREZ, R., MENÉNDEZ-PÉREZ, A., & SACASAS-SUÁREZ, D. (2023). “A Deep Assessment Of A Pair Of Built-In Winglets With Similar Disposition On A Rectangular Channel”, **International Journal of Thermal Sciences**, 189, 108261.
- CANEPA E, LENGANI D, SATTI F, SPANO E, UBALDI M, ZUNINO P (2008). “Boundary Layer Separation Control On A Flat Plate With Adverse Pressure Gradients Using Vortex Generators”, **In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air**, 4238: 1211-1220.
- CHEAWCHAN, A. U., MOHAMED, M. A., NG, B. F., & NEW, T. H. (2022). “A Numerical Investigation On Flow Past Skewed Vortex Generators Ahead Of A Backward Facing Ramp”, **Aerospace Science and Technology**, 123, 107435.
- DOGAN M, ERZINCAN S (2023). “Experimental Investigation Of Thermal Performance Of Novel Type Vortex Generator In Rectangular Channel”, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 144: 106785.
- EVARD A, CADOT O, SICOT C, HERBERT V, RICOT D, VIGNERON R (2017). “Comparative Effects Of Vortex Generators On Ahmed’s Squareback And Minivan Car Models”, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 231(9): 1287-1293.

- FU, H., SUN, H., YANG, L., YAN, L., LUAN, Y., & MAGAGNATO, F. (2023). “Effects Of The Configuration Of The Delta Winglet Longitudinal Vortex Generators And Channel Height On Flow And Heat Transfer In Minichannels”, **Applied Thermal Engineering**, 227, 120401.
- GODARD G, STANISLAS M (2006). “Control Of A Decelerating Boundary Layer. Part 1: Optimization Of Passive Vortex Generators” **Aerospace Science and Technology**, 10(3): 181-191.
- GÖNÜL A, OKBAZ A. (2023). “Enhanced Performance Of A Microchannel With Rectangular Vortex Generators”, **J Ther Eng**, 9(2): 260–278.
- HABCHI C, ONEISSI M, RUSSEIL S, BOUGEARD D, LEMENAND T (2021). “Comparison Of Eddy Viscosity Turbulence Models And Stereoscopic PIV Measurements For A Flow Past Rectangular-Winglet Pair Vortex Generator”, **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, 169: 108637.
- HASSANZADEH, R., & TOKGOZ, N. (2019). “Analysis Of Heat And Fluid Flow Between Parallel Plates By Inserting Triangular Cross-Section Rods In The Cross-Stream Plane”, **Applied Thermal Engineering**, 160, 113981.
- KARKABA H, RUSSEIL S, TALA JS, BOUGEARD D, BOONAERT J, ETIENNE L, PELAY U, LECOEUICHE S (2023). “Effect Of Using Multiple Vortex Generator Rows On Heat Transfer Enhancement Inside An Asymmetrically Heated Rectangular Channel”, **Applied Thermal Engineering**, 227: 120359.
- KE Z, CHEN CL, LI K, WANG S, CHEN CH (2019). “Vortex Dynamics And Heat Transfer Of Longitudinal Vortex Generators In A Rectangular Channel”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 132: 871-885.
- KHOSHVAGHT-ALIABADI, M., SARTIPZADEH, O., & ALIZADEH, A. (2015). “An Experimental Study On Vortex-Generator Insert With Different Arrangements Of Delta-Winglets”, **Energy**, 82, 629-639.
- LENGANI D, SIMONI D, UBALDI M, ZUNINO P, BERTINI F (2011). “Turbulent Boundary Layer Separation Control And Loss Evaluation Of Low Profile

- Vortex Generators”, **Experimental Thermal and Fluid Science**, 35(8): 1505-1513.
- LIN, J. C. (2002). “Review Of Research On Low-Profile Vortex Generators To Control Boundary-Layer Separation”, **Progress in aerospace sciences**, 38(4-5), 389-420.
- LU, F. K., JAMES, S. E., & ZHANG, L. (2023). “Flow Separation Control And Performance Evaluation Of An Asymmetric Diffuser Using Vortex Generators”, **Aerospace Science and Technology**, 136, 108237.
- MA X, GEISLER R, SCHRÖDER A (2017). “Experimental Investigation Of Three-Dimensional Vortex Structures Downstream Of Vortex Generators Over A Backward-Facing Step. **Flow, Turbulence and Combustion**, 98: 389-415.
- MIN C, QI C, WANG E, TIAN L, QIN Y (2012). “Numerical Investigation Of Turbulent Flow And Heat Transfer In A Channel With Novel Longitudinal Vortex Generators”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 55(23-24): 7268-7277.
- MUKUT, A. M. I., MIZUNUMA, H., & HIROMICHI, O. (2014). “Flow Separation Control Using Plasma Vortex Generator”, **Procedia Engineering**, 90, 232-237.
- XU, Y., ISLAM, M. D., & KHAROUA, N. (2017). “Numerical Study Of Winglets Vortex Generator Effects On Thermal Performance In A Circular Pipe”, **International Journal of Thermal Sciences**, 112, 304-317.
- WANG J, FU T, ZENG L, LIEN FS, DENG X, ZHANG F (2023). “Heat Transfer Performance Of Internal Flow By Inserting Punched And Non-Punched Vortex Generators”, **International Journal of Thermal Sciences**, 186: 108135.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Abdulvahap SAVUL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2015, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Y. Lisans:** 2021, İstanbul Aydın Üniversitesi, Yüksek Lisans Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- SAVUL, A. ve KAYA, K. (2023) “Aerodynamic Calculations of a Vortex Generator in a Rectangular Channel”, 1st Izmir Congress on Life, Engineering and Applied Sciences ProceedingsBook, 29-31 July, Izmir.