

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜZEY ÜZERİNDEKİ MAKRO YAPILARIN
HİDRODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

AHMET YURTSEVEN

**DOKTORA TEZİ
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. NURTEN VARDAR**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜZEY ÜZERİNDEKİ MAKRO YAPILARIN
HİDRODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

Ahmet YURTSEVEN tarafından hazırlanan tez çalışması 11.03.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Nurten VARDAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nurten VARDAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fahri ÇELİK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Barış BARLAS
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tamer YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Serdar BEJİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Doğada bulunan canlı ve cansızların yüzeylerindeki mikro ya da makro yapıların yüzeye sahip canlı ve cansızların hava ve su ile etkileşimini inceleyen biyomimetik alt bilim dalı son yıllarda bilim adamlarının ilgi alanına girmiştir. Örneğin köpek balıklarının derilerindeki pulların etkisiyle en hızlı yüzme yeteneğine sahip oldukları, lotus bitkisinin yaprağının üzerindeki girinti ve çıkıntılar nedeniyle su geçirmez oluşu ve kelebek kanatlarındaki kendini temizleme özelliğinin kanat yüzeylerinin yapısı nedeniyle gerçekleştiği ispatlanmıştır. Bu gerçekten hareketle doğada bulunan bu özelliğin insan eliyle teknolojiye taşınabileceği düşünülmüştür. Yüzeyler üzerine doğadaki bu yapıları taşıyabilirsek ısıtma, soğutma, hızlandırma, kendi kendine temizlenme gibi özellikleri teknolojiye kazandırabiliriz. Bu olay en kolay biçimde sayısal çözümleme ile tahmin edilebilir. Bunun için düzlem yüzeyler üzerine doğadaki yüzey morfolojileri en basit şekil olan çıkıntılar şeklinde yerleştirilerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Bakış açımın bu konuya doğru yönlenmesi ve ilerlemesini sağlayan hocam Prof. Dr. Nurten VARDAR'a, bu konuda yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen yakın çalışma arkadaşım Taner ÇOŞGUN'a, bu güne kadar gelmemde maddi manevi desteklerini esirgemeyen anneme ve babama, yoğun çalışmalarım sırasında aile sorumluluğumun büyük bir kısmını taşıyan eşime, varlığıyla her an moral depom olan kızıma,

Teşekkürü zevkli bir görev sayarım.

MART, 2019

Ahmet YURTSEVEN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Literatür Özeti	4
1.3 Tezin Amacı	10
1.4 Hipotez	11
BÖLÜM 2	
MATEMATİK MODEL	12
2.1 Yönetici Denklemler	12
2.2 Sonlu Hacimler Metodu	15
BÖLÜM 3	
ÇÖZÜCÜ KÜMELENMESİ	19
BÖLÜM 4	
HÜCRE İÇİ AKIŞ	23
4.1 Çözüm Geometrisi	23
4.2 Çözüm Ağı ve Doğrulama Çalışması	24
4.3 Sonuçlar	26

BÖLÜM 5

HÜCRECİKLİ HÜCRE İÇİ AKIŞ	28
5.1 Çözüm Geometrisi	28
5.2 Çözüm Ağı ve Doğrulama Çalışması	29
5.3 Sınır şartları	31
5.4 Sonuçlar	32

BÖLÜM 6

HÜCRECİKLİ LEVHA ÜZERİNDEKİ AKIŞ	38
6.1 Çözüm Geometrisi	39
6.2 Çözüm Ağı	41
6.3 Sınır Şartları	42
6.4 Sonuçlar	43
6.4.1 Hız Alanları	45
6.4.2 Kanal İçi Fark Basınç Katsayıları	59
6.4.3 Çıkıntılar Üstü ve Hücre İçi Basınç Katsayıları	61
6.4.3.1 Çıkıntı biçimlerinin basınç katsayılarına etkisi	62
6.4.3.2 Çıkıntı yüksekliklerinin basınç katsayılarına etkisi	64
6.4.4 Sürüklenme Kuvvet Katsayıları	67

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	79

SİMGE LİSTESİ

ϕ	Herhangi bir terim
$\bar{\phi}$	Herhangi bir terim ortalaması
ϕ'	Herhangi bir terim çalkantısı
ρ	Yoğunluk
μ	Dinamik viskozite
ν	Kinematik viskozite
t	Zaman
$\bar{v}$	Ortalama hız
∇	Diverjans
Δ	Fark
$\otimes$	Vektörel çarpım
$\bar{p}$	Ortalama basınç
T	Viskoz gerilme tensörü
T_t	Reynolds gerilme tensörü
f_b	Bileşke kuvvetler
I	Birim tensör
u'	x doğrultusundaki hız çalkantısı
v'	y doğrultusundaki hız çalkantısı
w'	z doğrultusundaki hız çalkantısı
μ_t	Türbülans viskozitesi
S	Deformasyon tensörü
k	Türbülans kinetik enerjisi
ε	Türbülans yayılım oranı
C_μ	Model katsayısı
f_μ	Sönüm fonksiyonu
T	Türbülans zaman ölçeği
T_e	Büyük girdap zaman ölçeği
σ_k	Model katsayısı
σ_ε	Model katsayısı
$C_{\varepsilon 1}$	Model katsayısı

$C_{\varepsilon 2}$	Model katsayısı
P_k	Üretim terimi
P_ε	Üretim terimi
f_2	Sönüm fonksiyonu
S_k	Kullanıcı tanımlı kaynak terimi
S_ε	Kullanıcı tanımlı kaynak terimi
ε_0	Çevresel türbülans değeri
C_t	Model katsayısı
$C_{\varepsilon 3}$	Model katsayısı
f_c	Eğrilik düzeltme faktörü
G_k	Türbülans üretimi
G_b	Kaldırma kuvveti üretimi
Υ_M	Sıkıştırılabilirlik düzeltmesi
β	Termal genleşme katsayısı
Pr_t	Türbülans Prandtl sayısı
$\bar{T}$	Ortalama sıcaklık
g	Yerçekimi ivmesi
c	Ses hızı
Re	Reynolds sayısı
Re_{kanal}	Kanal içi Reynolds sayısı
$V_{giriş}$	Kanal giriş hızı
Dh_{kanal}	Kanal hidrolik çapı
C_p	Basınç katsayısı
C_f	Kuvvet katsayısı
F	Kuvvet
A	Alan

KISALTMA LİSTESİ

CIP	Hücrecik içi nokta
COP	Hücrecik üstü nokta
DEM	Ayrık partikül metodu
DNS	Direk sayısal çözümleme
HPC	Yüksek performanslı kümelenme
MPI	Mesaj gönderim arayüzü
ROP	Çıkıntı üstü nokta
RSM	Reynolds gerilme modeli
WSS	Duvar kayma gerilmesi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Köpek balığı derisi replika yüzey işlemesi 4
Şekil 1.2	Hücre içi, tabanına form verilmiş hücre içi ve yüzey formu verilmiş levha üzerindeki akış 10
Şekil 2.1	Seçilen örnek bölgedeki çözüm için kullanılan noktalar 16
Şekil 3.1	80 çekirdekli Beowulf kümelenmesi görseli..... 21
Şekil 3.2	Teze konu olan matematik model için kurulan kümelenme çalışma sistemi 22
Şekil 4.1	Kapak etkili hücre içi akış problemi geometrisi..... 24
Şekil 4.2	Hücre içi akış probleminde kullanılan çözüm ağının merkez kesitteki görünümü 24
Şekil 4.3	Zamana bağlı ve zamandan bağımsız çözüm için hız profilleri 25
Şekil 4.4	Deneysel sonuçlar ile yapılan sayısal çalışmanın karşılaştırılması 26
Şekil 4.5	Çıkıntısız yüzeylere sahip kapak etkili hücre içinde oluşan ana girdap yüzeyi ve girdap merkezi çizgisi ($Re = 100$) 27
Şekil 5.1	a) Çıkıntısız, b) Arka yüzü çıkıntılı, c) Alt yüzü çıkıntılı, d) Ön yüzü çıkıntılı, e) Arka ve Alt yüzleri çıkıntılı, f) Alt ve Ön yüzleri çıkıntılı, g) Arka ve Ön yüzleri çıkıntılı ve h) Arka, Alt ve Ön yüzleri çıkıntılı hücre geometrileri... 29
Şekil 5.2	Çıkıntı geometrileri ve boyutları 29
Şekil 5.3	Arka, Alt ve Ön yüzleri çıkıntılı geometride kullanılan çözüm ağının kesitler üzerindeki görünümü 30
Şekil 5.4	Çözüm ağı bağımsızlaştırması için kullanılan hız profilleri 30
Şekil 5.5	Üst yüzeyi hareketli, tabanı çıkıntılı hücre içinde $Re = 100$ için yatay ve düşey merkez hatlardaki hız bileşenlerinin karşılaştırılması 32
Şekil 5.6	Farklı yüzeylerine çıkıntı eklenmiş hücre içindeki skaler hız dağılımı ve akım hatları..... 33
Şekil 5.6	Farklı yüzeylerine çıkıntı eklenmiş hücre içindeki skaler hız dağılımı ve akım hatları (Devamı) 34
Şekil 5.7	Normalize edilmiş duvar kayma gerilmeleri 36
Şekil 5.8	Normalize edilmiş girdaplılık değerleri 37
Şekil 6.1	Hücre yüzey açılımı görünümü..... 38
Şekil 6.2	Çözüm hacmi olarak kanal geometrisinin görünümü 39
Şekil 6.3	Düz levha üzerine eklenen kare, yuvarlatılmış kare ve üçgen kesitli çıkıntılar 40
Şekil 6.4	Kare kesitli 5mm yükseklikli çıkıntıların farklı çıkıntı aralıklı durumları 40

Şekil 6.5	Kare kesitli h(yükseklik) aralıklı farklı yüksekliklerde çıkıntı durumları	41
Şekil 6.6	Çözümde kullanılan ağ yapısı	42
Şekil 6.7	Kare kesitli, $s = h$, $h = 5\text{mm}$ için sırasıyla $0.015 \times V_{\text{giriş}}$, $0.045 \times V_{\text{giriş}}$, $0.075 \times V_{\text{giriş}}$, $0.090 \times V_{\text{giriş}}$ ve $0.120 \times V_{\text{giriş}}$ hızları için eş yüzey görünüşleri ..	44
Şekil 6.8	Hücreciklerde oluşan girdapların hız alanı (resampled volume)	45
Şekil 6.9	Hücreciklerde oluşan girdapların basınç alanı görünüşleri	45
Şekil 6.10	$Re=10000$ üç farklı kesit geometrisinde ve üç farklı aralık değerinde hız dağılımları	47
Şekil 6.11	$Re=20000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları	48
Şekil 6.12	$Re = 30000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları	49
Şekil 6.13	$Re = 50000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları	50
Şekil 6.14	$Re = 70000$ 'de hızında üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları	51
Şekil 6.15	$Re = 100000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları	52
Şekil 6.16	$Re = 10000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları	53
Şekil 6.17	$Re = 20000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları	54
Şekil 6.18	$Re = 30000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları	55
Şekil 6.19	$Re = 50000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları	56
Şekil 6.20	$Re = 70000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları	57
Şekil 6.21	$Re = 100000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları	58
Şekil 6.22	Üç farklı aralık değerinde Reynolds sayısına bağlı fark basınç katsayıları .	59
Şekil 6.23	Çıkıntı yüksekliğine ve Reynolds sayısına bağlı fark basınç katsayıları	61
Şekil 6.24	Çıkıntı üzeri (ROP), hücrecik üzeri (COP) ve hücrecik içi (CIP) basınç ölçüm noktaları.....	61
Şekil 6.25	Farklı Reynolds sayılarında, Kare, Üçgen ve Yuvarlatılmış kare biçimli, $s = h, 2h$ ve $4h$ durumunda CIP, COP ve ROP noktalarında basınç katsayıları .	63
Şekil 6.26	Farklı Reynolds sayılarında, kare biçimli, $s = h, 2h$ ve $4h$ durumunda ve $h=5\text{mm}, 2,5\text{mm}, 1,25\text{mm}$ yüksekliklerinde COP & ROP ve CIP basınç katsayıları.....	65
Şekil 6.27	Üç farklı kesit geometrisi için altı farklı hızda $s = h, 2h$ ve $4h$ durumunda toplam sürüklenme kuvvet katsayıları	68
Şekil 6.28	Farklı çıkıntı durumlarında, altı farklı Reynolds sayısı için $s = h, 2h$ ve $4h$ durumunda basınç kaynaklı ve kayma gerilmesi(sürtünme) kaynaklı kuvvet katsayıları	69
Şekil 6.29	Kare biçimli üç farklı çıkıntı yüksekliği için altı farklı Reynolds sayısında $s = h, 2h$ ve $4h$ durumunda C_{fb} ve C_{fs} katsayıları	71

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Gerçeklenebilir $k - \varepsilon$ türbülans modeli için model katsayıları.....	15

YÜZEY ÜZERİNDEKİ MAKRO YAPILARIN HİDRODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Ahmet YURTSEVEN

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurten VARDAR

Bu tezde doğada görülen makro yapıların teknolojik cihazların yüzeylerine işlenmesi durumunda hidrodinamik açıdan nasıl davranacağı araştırılmıştır. Doğadaki makro yapıları modelleyen en basit geometri kübik hücredir. Öncelikle kapak etkili kübik hücre içerisindeki akım incelenmiştir. Sonrasında kapak etkili hücre duvarlarına çıkıntılar eklenmiş, daha sonra kanal modellemesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme 3 boyutlu, türbülanslı, zamandan bağımsız, sıkıştırılamaz akım yaklaşımı ile StarCCM+ ticari kodu kullanılarak sonlu hacimler yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Altı farklı Reynolds sayısı için hız, basınç, kuvvet değerleri bulunmuştur. Çalışmanın sonunda yüzey üzerindeki makro yapıların düzlem yüzeylere göre hidrodinamik yapıyı oldukça değiştirdiği ve bu değişikliklerin makro yapıların biçim ve büyüklüklerine de doğrudan bağlı olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, biyomimetik, makro yapılar, hidrodinamik, kapak etkili hücre

**INVESTIGATION OF EFFECT OF MACRO STRUCTURES ON SURFACES FROM
VIEW POINT OF HYDRODYNAMICS**

Ahmet YURTSEVEN

Department of Naval Architecture and Marine Engineering
PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Nurten VARDAR

In this thesis, it was investigated how the macro structures seen in nature behave hydrodynamically in the case of processing the surfaces of technological devices. The simplest geometry that modeled macro structures in nature is the cubic cell. Firstly, the flow within the cap-acting cubic cell was examined. Then, riblets were added to the lid-driven cavity walls, and channel modeling was then performed. Modeling was performed by finite volume method using StarCCM + commercial code with 3-dimensional, turbulent, time-independent, incompressible current approach. Velocity, pressure and force values were found for six different Reynolds numbers. At the end of the study, it was found that the macro structures on the surface changed the hydrodynamic structure in comparison with the plane surfaces and these changes were directly related to the shapes and sizes of the macro structures.

,

Keywords: Computational Fluid Dynamics, biomimetic, macro structures, hydrodynamics, lid-driven cavity

1.1 Giriş

Hem doğa bilimleri hem de mühendislik alanında birçok problem katı-sıvı etkileşimleri ile irdelenmektedir. Gerek iç akışlarda gerekse dış akışlarda katı yüzeyler ile akışkan madde arasındaki etkileşimler her zaman merak konusu olmuş ve olmaya devam etmektedir. Akışkan molekülleri ve katı yüzeyler arasındaki hidrodinamik ilişki hem akışın durumunu hem de geometri üzerindeki kuvvet, ısı transferi, aşınma gibi birçok olguları belirlemektedir. Dış akış problemleri özelinde düşünüldüğünde, akışkan içerisinde bulunan geometrilerin üzerine gelen kuvvetler oldukça fazla araştırılmıştır. Özellikle hava, kara ve deniz ortamlarında hareket eden araçların tasarımlarında bu kuvvetlerin irdelenmesi araç dinamiği, araç konforu ve en önemlisi yakıt sarfiyatı açısından önem taşımaktadır. Dış akışlarda kuvvetin incelenmesi için ilk akla düz levha problemi gelmektedir. İlerleyen bölümlerde ayrıntıları verilecek olan dış akışlarda ortaya çıkan kuvvetler ve kaynakları bilim adamlarını ve mühendisleri bu kuvvetlerde azaltmayı sağlayacak çalışmalara yönlendirmiştir.

Dünya genelinde birçok yöntemle sürüklenme kuvvetlerinde azalma sağlayacak uygulamalar çalışılmaktadır. Genel olarak kuvvet azaltma yöntemleri doğadan esinlenerek ortaya çıktığı için bunlara biyomimetik yöntemler ismi verilmektedir. Bu yöntemler temel olarak aktif yöntemler ve pasif yöntemler olmak üzere iki kategoride ele alınmaktadır. Aktif yöntemler kendi alt kırılımlarında biyonik jet yüzey ile kuvvet azaltımı, ısıtılmış yüzey ile kuvvet azaltımı ve hava kabarcıkları ile kuvvet azaltımı başlıklarından oluşmaktadır. Pasif yöntemler ise kendi alt kırılımlarında yumuşak

kaplamalı yüzeyler ile kuvvet azaltımı, hidroforik kaplamalı yüzeyler ile kuvvet azaltımı ve çıkıntılı yüzeyler ile kuvvet azaltımı başlıklarından oluşmaktadır[1].

Biyonik Jet Yüzey ile Kuvvet Azaltımı

Genellikle köpek balıklarının hızlı yüzmelerindeki etkilerin başında gelmektedir. Köpek balıkları yüzerlerken ağızlarının yarım açık olduğuna dikkat edilmelidir. Hayvanın yarım açık olan ağzından yüzdüğü sırada belirli bir hızda su içeri alınıp, 5-7 adet açıklığa sahip solungaçları üzerinden geçerek dışarı atılmaktadır. Başlarda bu davranışın yalnızca hayvanın sudaki oksijenden yararlanması ve solunumunu sağlaması için geliştiği düşünülmüştür. Ancak akışkan analizleri sonucunda bu davranışın solungaçlar arasından dışarı atılan suyun bir jet akış oluşturduğu, bu akışın düşük hızlı akış bölgesini genişlettiği, aynı zamanda jet akışın iz bölgesinde oluşan helisel girdaplı bölgenin hayvanın derisine yakın bölgedeki viskoz sınır tabakayı kalınlaştırarak duvar kayma gerilmelerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Duvar kayma gerilmelerindeki azalma da doğrudan sürüklenme kuvvetinde azalma sağladığı görülmüştür[2].

Isıtılmış Yüzey ile Kuvvet Azaltımı

Bir yüzeyi ısıtmak, o yüzeye yakın akışkan bölgesindeki akışkanın viskozitesini düşüreceğinden, yüzeye yakın bölgedeki hız dağılımlarını daha stabil ve uniform duruma getirmeyi sağlar. Doğada bu durum düşük sürüklenme direncine sahip olan yunuslarda görülebilir. Yunus balıklarının vücut sıcaklıkları ve yüzdükleri akışkanlar arasında doğrudan bir ilişki olduğu bulunmuştur. Daha önce yapılan bazı deneylerde 26 m/s hızda giden bir torpido için ısıtılmış yüzey uygulaması ile sürüklenme direncinden %42.3 oranında azalma elde edilmiştir[3].

Hava Kabarcıkları ile Kuvvet Azaltımı

Katı bir cisim üzerinden akan akışkanlarda duvara yakın bölgelerde oluşan sınır tabaka gereği akışkan katmanları arasında hız farkları oluşmaktadır. Akışkan katmanları arası oluşan bu hız farkları, bu katmanlar arasında sürtünme oluşmasına neden olmaktadır. Bu sürtünme kuvveti akışkanın viskozitesine bağlı olarak değişir. Gazlar sıvılara nazaran viskozitesi hayli küçük akışkanlardır. Viskozitesi yüksek olan sıvı akışkan içerisinde hareket eden bir katı cismin cidarlarına viskozitesi daha düşük olan gaz akışkan kaplandığı takdirde sınır tabaka içindeki sürtünmeden kaynaklı direnç değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Yüzey üzerinde hava baloncukları oluşturularak cismin bir

hava cebi içerisinde hareketi sağlandığında cisim üzerine etkiyen sürtünme kaynaklı dirençte %10-15 oranında düşüş elde edilebilmiştir[4][5][6].

Yumuşak kaplamalı yüzeyler ile kuvvet azaltımı

Cisimler üzerine genellikle PVC plastisol malzemeden yapılan bir kaplama ile cisim yüzeyinin elastisite modülünün azaltılmasıyla yüzey dinamiği ve akışkan dinamiği etkileşiminden dolayı sürüklenme kuvvetlerinde azalmaların olduğu görülmüştür. Bu uygulamanın avantajları, uygulamanın basit oluşu, uygulama maliyetlerinin azlığı ve üretilmiş her cisme uygulanabilme esnekliğidir. Ancak en büyük dezavantajı uygulanan kaplamanın ömrünün az olmasıdır.[7][8].

Hidrofobik / süperhidrofobik kaplamalar ile kuvvet azaltımı

Doğada bazı bitkilerin yapraklarında karşımıza çıkan ıslanmama etkisi, son yıllarda kuvvet azaltımı çalışmalarında model olmuştur. Özellikle lotus bitkisinin yapraklarında görülen ıslanmama özelliği yaprak yüzeyindeki akışkan temas açılarının 164° ve 3° olmasından kaynakladığı bilinmektedir. ıslanmama özelliği genellikle iki temel parametreye bağlıdır. Bunlar yüzey kimyası ve yüzey morfolojisidir. Süperhidrofobik bir yüzey eldesi için mikron seviyelerinde yüzey işleme ile birlikte hidrofobik etkiye sahip kimyasallardan bir kaplama uygulaması yapılması gerekmektedir. Böylelikle yüzey üzerinde kaymama şartı engellenerek yüzey üzerindeki hızın sıfırdan farklı olması sağlanıp, sürüklenme kuvvetinde bir azalma elde edilir[9][10][11][12].

Çıkıntılı yüzeyler ile kuvvet azaltımı

Köpek balığı derisi incelendiğinde yüzeyde mikro özelliklere sahip pullarla örülmüş bir yüzey morfolojisi olduğu görülebilir. Düşük yüzey gerilimi ve momentum transferi sağlayacak şekilde bu yüzey elemanları türbülans girdapçıklarını etkin bir şekilde kontrol edebilirler. Bu metot ile ilk uygulanan ürün bir yüzücü mayosudur. Köpek balığı derisi örnek alınarak hazırlanmış bu tekstil ürünü ile olimpik yarışlarda ciddi başarılar elde edilmiştir. [13].

Sürüklenme azaltımı yöntemlerinin arasında en çok uygulanan cisim yüzeylerinde geometrik geliştirme işlemleridir. Bu yöntemlerde cismin üretildiği malzemenin yüzey

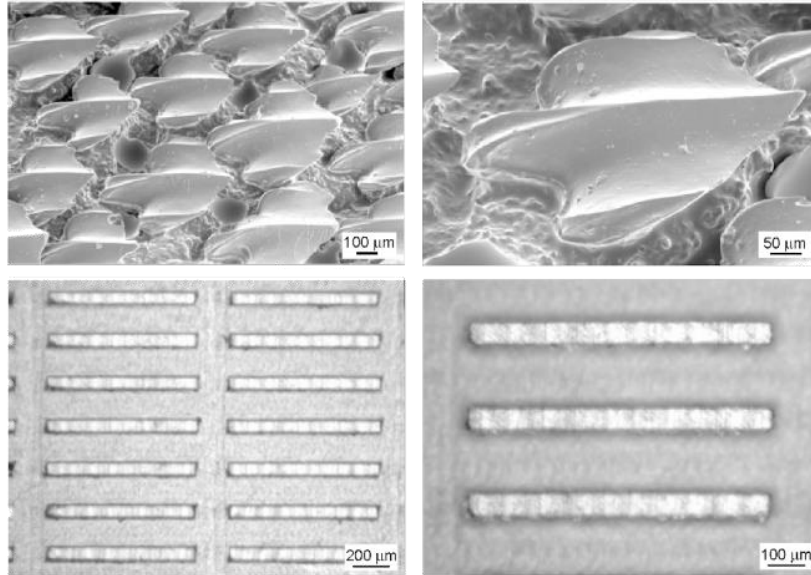
pürüzlülüğünü değiştirecek şekilde kimyasal ve lazere yüzey işleme yöntemleri ile mikro boyutta yüzey morfolojisi oluşturulmaktadır.

Ancak mikro boyutlarda yüzey pürüzlülüklerinin etkileri sayısal simülasyon çalışmalarında bugün için çözücü kapasiteleri gereği uygulanamaz durumdadır. Cisimlerin yüzeylerinde uygulanacak yüzey işleme uygulamalarının boyutları sayısal simülasyon çalışmaları için milimetre boyutlarında alınması gerekmektedir.

1.2 Literatür Özeti

Daha önceden yapılmış çalışmalar incelendiğinde gerek kuvvet azaltımı gerekse yüzey üzerindeki akış dinamiği davranışları konusunda az sayıda kaynağa rastlanmıştır. Bu çalışmaların birçoğu doğadan esinlenerek geliştirilen yüzey özelliklerini içerdiğinden genel biyomimetik başlığında özetlenebilir. Bugüne kadar yapılmış biyomimetik çalışmalardan bazı örnekler aşağıda değerlendirilmiştir.

Bhushan ve ark. yaptıkları çalışmada köpek balığı derisi ve lotus bitkisinin yapraklarından esinlenerek yapay yüzeyler üretmişler, oluşturulan yüzey yapılarının kuvvet azaltımı etkilerini araştırmışlardır. Köpek balığı derisinden esinlenerek oluşturdukları replika yüzeyler Şekil 1.2 'de verilmiştir.



Şekil 1.1 Köpek balığı derisi replika yüzey işleme

Şekilden de görüleceği üzere replika yüzey üzerinde akım, çıkıntılar doğrultusunda alınmıştır. Sürüklenme kuvvetindeki azalmanın etkinliğini elde etmek için basınç düşüşü ölçümlerinden ve kuvvet ölçümlerinden yararlanılmıştır[14].

Bixler yaptığı çalışmada pirinç bitkisinin yaprak yüzeyini ve kelebek kanatlarının yüzey formlarından esinlenerek hazırlanmış yüzeylerin sürüklenme kuvveti üzerindeki etkisi ve yüzeylerin kendi kendilerini temizleme özelliklerini incelemiştir. Viskozitenin, hızın ve ıslanabilirliğin yüzey morfolojisi, sürüklenme ve kendini temizleme gibi davranışlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda hem pirinç yaprağı hem de kelebek kanadı modelinde temas açısının artışı ile sürüklenme kuvvetinde azalma elde ederken, kendini temizleme özelliğinde artma tespit etmiştir. Viskozitesinin artışı ile yüzey üzerinde ince bir akışkan katmanı oluşmasına ve bunun sonucunda sürüklenme kuvvetinde azalmaya neden olduğu görülmüştür [15].

Pu ve ark. çalışmalarında köpek balığı derisinden esinlenerek hazırladıkları farklı tiplerdeki çıkıntılı yüzeyler üzerinde sürüklenme kuvveti azalmasını incelemiştir. Çalışmalarında köpek balığı derisinin morfolojik yapısının sürüklenme azalması etkisinin tek başına doğru sonucu vermediğini, yüzey morfolojisi ile birlikte köpek balığı pullarının aslında çok elastik bir yapıda örülmüş bir ağ yapısı olduğunu gözlemlemiştir. Yüzeye yapılacak benzeşimlerde yalnız yüzey formunu değil yüzeyin elastisitesinin de benzeştirilmesinin zorunlu olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca elastik bir ağ şeklinde örülen yüzeydeki pulların üzerinin köpek balığı tarafından salgılanan bir mukus tabakası ile kaplandığını da gözlemlemiştir. Tüm bu parametrelerin bir araya geldiğinde doğru oranda sürüklenme azalımı sağlandığını söylemişlerdir[16].

Boomsma ve Sotiropoulos çalışmalarında üç boyutlu olarak köpek balığı derisinde yer alan pulları modellemiş ve hem sıralı hem de şaşırtmalı olarak bir yüzey üzerine uygulamışlardır. Elde ettiği bu benzeşim yüzeyi üzerindeki akışı doğrudan sayısal simülasyon(DNS) modeli ile çözmüştür. Sonuçlarını çukur tip çıkıntı formu verilmiş yüzey sonuçları ile kıyaslamışlardır. Kendilerinin ürettiği üç boyutlu gerçek geometrilerde düz yüzeye göre sürüklenme kuvvetinde %40 artış tespit etmişlerdir. Buna rağmen aynı düzende çukur ve çıkıntı eklenmiş yüzey sonuçları %5 sürüklenme kuvvetinde azalma sağlamıştır. Çukur ve çıkıntıların Reynolds gerilmelerini düşürürken,

köpek balığı pullarının Reynolds gerilmelerini artırdığını bulmuşlardır. Gerçek pul geometrileri ile elde edilen yüzeyde ikincil akımların ve üç boyutluluk etkisinin sürüklenme kuvvetini artırdığını bildirmişler ve çalışmanın sonunda köpek balığı derisindeki pulların boyutlarının ve düzeninin gerçek boyutlar ve düzen kullanarak kurgulanması gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca köpek balığının yüzeyine gelen akımın dinamiğinin tam olarak bilinmeden sayısal olarak pul geometrileri ile sürüklenme kuvvetinde azalmanın bulunamayacağını söylemişlerdir[17].

Martin ve Bhushan yaptıkları çalışmada ilk kez Makasgaga kuşunun gagasında keşfedilmiş olan çıkıntılı yüzey formunun replikasını oluşturarak farklı formlarda deneylerini ve sayısal çalışmalarını yapmışlardır. Çalışmalarını köpek balığı derisi replikaları ile kıyaslamışlardır. Temel olarak köpek balığı derisi formundaki çıkıntılı yüzeylerde çıkıntıların akışa paralel olarak alındığı ve sürüklenme kuvvetini azaltmak için çıkıntılar arası mesafeyi girdap çaplarından küçük tutarak girdapların yüzeyden itilmesini sağladığını söylemişlerdir. Kullandıkları Makasgaga formu yüzeyin köpek balığı derisi kadar iyi sonuç vermediğini ancak %6 ile %12 oranında basınç düşüşü azalttığını bulmuşlardır[18].

Saravi ve Cheng çalışmalarında pasif sürüklenme kuvvet azaltımı metotlarının genel incelemelerini yapmışlardır. Deneylerde ve sayısal modellemelerde çıkıntı geometrisinin türbülanslı sınır tabaka üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Genellikle yapılan çalışmalarda çıkıntı geometrilerinin ve çıkıntı boyutlarının etkilerinin incelendiğini ancak çıkıntıların yüzey üzerindeki yoğunluklarının öneminin de araştırılması gerektiğini ortaya koymuşlardır[19].

Luo ve ark. doğadan esinlenerek hazırlanmış yüzeyler üzerindeki akış durumunda sürüklenme kuvvet azaltımı çalışmalarının genel bir değerlendirmesini yapmışlardır. Sonuçlarında sürüklenme kuvvet azaltımında özellikle yüzey morfolojisine ek olarak köpek balıklarında gerçekleşen yüzey üzerinin mukus katmanı ile kaplanması durumunun önemli bir konu olduğunu, bununla birlikte yüzeyin akıma karşı hücum açılarının ihmal edilemeyecek etkiler oluşturduğunu söylemişlerdir[20].

Boomsma ve Sotiropoulos çalışmalarında daha önce yayınlanmış çıkıntı eklenmiş yüzeylerde sürüklenme kuvvet azaltımı deney sonuçlarını sayısal olarak farklı

boyutlarda çıkıntılar modelleyerek yeniden elde etmeye çalışmışlardır. Sonuçlarında akış içerisindeki ters basınç dağılımlarının sürüklenme kuvvet azaltımında önemli bir parametre olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca akım boyunca oluşan türbülans yoğunluğunun, türbülans kinetik enerjisinin ve girdaplılık değerlerinin doğrudan çıkıntı genişliğine bağlı olduklarını göstermişlerdir. Çıkıntı genişliğinin doğrudan sürüklenme kuvvet azaltımına etki ettiğini söylemişlerdir[21].

Li ve ark. yaptıkları çalışmada çıkıntılı yüzeyler üzerindeki akışta sürüklenme kuvvet azaltımı için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Önceki yapılan çalışmalara ek olarak boyuna çıkıntılı yüzeylerde enine yüzey dalga hareketinin sürüklenme kuvvetine olan etkisini araştırmışlardır. Yüzeyine dalga hareketi verilmemiş olan çıkıntılı yüzeylerde yerel sürüklenme kuvvetinde %4-5 civarında bir azalma sağlanırken, yüzeyine enine doğrultuda dalga hareketi verilmiş çıkıntılı yüzeylerde ise %9-10 oranında azalma elde etmişlerdir. Böylelikle yüzeye eklenmiş enine dalga hareketinin sürüklenme kuvvet azaltımına pozitif katkısı olduğunu tespit etmişlerdir[22].

Kim ve ark. çalışmalarında farklı lazer metotlar ve nano boyama teknolojilerini kullanarak ürettikleri nano boyutlu yüzey formları ve mikro boyutlu çıkıntıların eklendiği yüzeyler üzerinde sürüklenme kuvvet azaltımını araştırmışlardır. Sonuçlarında nano yüzey formları arasında tutabildikleri hava cepleri sayesinde sıvı akışkanın yüzeye minimum seviyede temasını sağlamışlardır. Buna ek olarak yüzeye ekledikleri mikro çıkıntılar sayesinde ikincil girdap oluşumlarını tetiklemişler, böylelikle sürüklenme kuvvetinde azalma elde edebilmişlerdir. Basınç kaybı ölçümleri ile türbülanslı bölgede maksimum %36 oranında sürüklenme kuvvet azaltımı elde etmişlerdir[23].

Benschop ve Breugem, direk sayısal çözüm metodunu kullanarak, zikzaklı çıkıntılar eklenmiş bir yüzey üzerindeki sürüklenme kuvvet azaltımını sayısal olarak çözmüşlerdir. Zikzak açılarına bağlı olarak üretilen yüzeylerde sürüklenme kuvveti azalırken bazı açı değerlerinde de artma elde etmişlerdir. Zikzak açılarının küçük olduğu modellerde genellikle sürüklenme kuvvetlerinde maksimum %73 artış elde edilmişken, zikzak açılarının büyük olduğu modellerde sürüklenme kuvvetinde %2 oranında azalma elde etmişlerdir[24].

Sasamori ve ark. yüzey üzerine boyuna sinusoidal dalga formu elde edecek şekilde çıkıntılar ekleyerek üzerinden geçen akımda sürüklenme kuvvetini araştırmak üzere modeli direk sayısal simülasyon metodu ile sayısal olarak çözmüşlerdir. Eklenen çıkıntıların geometrileri parametrik olarak değiştirilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Parametrik çalışmaların sonucunda maksimum % 10 oranında sürüklenme kuvvetinde azalma elde etmişlerdir[25].

Benodekar ve ark. sıkıştırılamaz akımda, resirkülasyon bölgesinde, akışa dik doğrultu, ince ve kalın çıkıntılar eklenmiş bir yüzeyin sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Çalışmalarında düşük sayısal difüzyon elde edebildiği farklı bir çözüm şeması kullanmışlardır. Türbülans etkilerini modellemek için $k-\varepsilon$ türbülans modelini tercih etmişlerdir. Sonuçlarını yapılmış deneysel çalışmaların sonuçları ile kıyaslamışlar ve yakın sonuçlar elde etmişlerdir[26].

Hong ve ark. yaptıkları çalışmada çıkıntılar eklenmiş bir yüzey üzerindeki laminar akış durumunu zamandan bağımsız koşullar ile sayısal olarak çözmüşlerdir. Çıkıntıların geometrik oranının etkisini, giriş bölgesindeki başlangıç sınır tabaka kalınlığını, ayrılma bölgesini ve yeniden temas uzunluklarını araştırmışlardır. Sonuçlarını çıkıntı geometrik oranı, Reynolds sayısı ve sınır tabaka/çıkıntı yükseklik oranına bağladıkları bir korelasyon geliştirmişlerdir. Çalışmadaki basınç düşüşü sonuçlarını daha önceden yapılmış deneysel çalışma sonuçları ile doğrulamışlardır. Reynolds sayısının artışı ile ayrılma bölgesindeki hızların arttığını, ayrılma akışının güçlendiğini söylemişlerdir. Geometrik oranların çıkıntı öncesi akımı etkilemediğini, ancak ayrılma bölgesinin şekli için önemli bir parametre olduğunu göstermişlerdir[27].

Miyake ve ark. yüzey üzerine akışa dik doğrultu eklenmiş kare kesitli çıkıntılar üzerindeki akış durumunu direk sayısal simülasyon metodu ile çözmüşlerdir. Çıkıntı eklenmiş yüzeyde çıkıntı yüksekliği ve çıkıntı yoğunluğuna bağlı olarak ortalama akışta logaritmik dağılım oluştuğunu görmüşlerdir. Çıkıntı yüksekliklerinin viskoz alt tabaka kalınlığına yakın bir değerde olması durumunda yüzey üzerinde küçük çalkantıların oluştuğunu söylemiş, çıkıntıların yüzey üzerinde girdap oluşumunu artırdığı ve girdabın çıkıntıların çıkış kenarından başladıklarını göstermişlerdir[28].

Taslim ve ark. yaptıkları çalışmada pürüzsüz yüzey, nal kesitli çıkıntı ve çentikli nal kesitli çıkıntı eklenmiş üç farklı yüzey modelini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında çıkıntılı yüzeyleri bir gaz türbini kanadının soğutma kanalları içerisine uygulayarak, toplam ısı transfer etkinliğini araştırmışlardır. Sonuçlarda üç yüzey arasından en yüksek ısı transfer katsayısını pürüzsüz yüzey vermiş olsa da, ısı transfer alanını artması sonucunda nal çıkıntı modeli %27 oranında toplam ısı transfer miktarında artışa neden olduğunu göstermişlerdir[29].

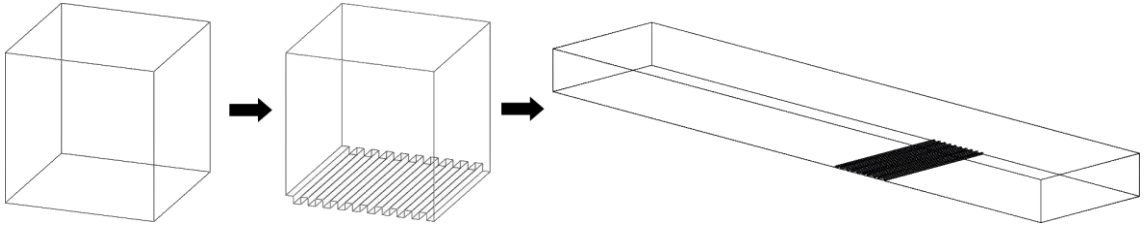
Davies ve ark. kanal yüzeyine mikro çıkıntılar eklenmiş mikro kanatlarda laminar akış formunda sürtünme direncini azaltma üzerine çalışmışlardır. Yüzeyler hidrofobik bir kaplama ile kaplandığı zaman kanal içerisinden geçen akışkanın yalnızca çıkıntı yüzeyleri ile temas haline geçtiği, mikro çıkıntılar arasında oluşan hücrelere giremediği ve bu hücrelerin içerisinde buhar fazında akışkan hapsedildiğini, bu nedenle kanal yüzeylerinde kayma gerilmelerinde düşüşler elde edildiğini gösterilmiştir. Sonuçlarında mikro kanallarda basınç kayıplarında düşüş elde ettiklerini bildirmişlerdir[30].

Lu ve Lu çalışmalarında bir hava kanalındaki türbülanslı akışta partikül birikiminde kanal içerisine yerleştirilen çıkıntıların etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Hazırladıkları simülasyonlarda Reynolds gerilme modeli(RSM) ve ayrık partikül metodundan(DEM) faydalanmışlardır. Sonuçlarında kanal içi sürüklenme kuvveti ile birlikte kanal içi partikül birikim oranında da artış gözlemlemişlerdir. Sonuçları daha önce yapılmış olan çalışmalar ile kabul edilebilir bir yakınlık göstermiştir. Sabit boyutlu çıkıntı uygulamasına oranla kademeli çıkıntı uygulaması partikül birikiminde çok daha verimli sonuçlar vermiştir[31].

Ancrum ve Yaras deneysel olarak çıkıntı eklenmiş yüzeylerde çıkıntı geometrilerinin türbülans yapısına etkisini araştırmışlardır. Geniş aralıklı çıkıntıların enine dalga çiftlerinin birbirlerinin etkilerini düşürdüklerini, buna rağmen dar aralıklı çıkıntıların enine elde edilen girdapları etkileyerek daha güçlü türbülans dalgalanmaları oluşturduklarını bulmuşlardır[32].

1.3 Tezin Amacı

Yapılan detaylı literatür incelemesinde Bölüm 1.2’de de anlatıldığı gibi yüzey üzerine yerleştirilen çıkıntılar (rib, riblet) çoğunlukla akış yönü ekseninde olduğu görülmüştür. Akış yönüne dik yönde çıkıntıların etkisini inceleyen sadece birkaç çalışma ile karşılaşmıştır. Bu tezin amacı ise çıkıntıları akış yönüne dik yönde kullanarak bir inceleme yapmaktır. Cismin yüzeylerine bilinçli yüzey işleme uygulamaları yapılarak yüzey üzerindeki akışta oluşan hidrodinamik yapının, yüzey üzerindeki yapı ile etkileşiminin incelenmesidir. Bu etkileşimin sayısal olarak incelenmesi için bazı akış fenomenlerinden yararlanılacaktır. Özellikle düz levha üzerindeki akışı modellerken, düzenli çıkıntılı yüzey formlarının sayısal olarak irdelenmesi için akışkanlar mekaniğinin fenomenik akışlarından olan hücre içi akış probleminin göz önüne alınması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Çıkıntılı yüzey formu verilmiş düz levha üzerindeki akış problemini incelemek için öncelikle kapak etkili hücre içi akış (Lid-driven cavity) daha sonra yüzeylerine çıkıntı eklenmiş hücre içi akış, en sonda da yüzeylere eklenen çıkıntılarla oluşturulan hücre dizilerinin olduğu düzlemler modellenmiştir. Bu aşamalar Şekil 1.2’de sembolik olarak verilmiştir.



Şekil 1.2 Hücre içi, tabanına form verilmiş hücre içi ve yüzey formu verilmiş levha üzerindeki akış

Öncelikle üst kapak yüzeyine verilen teğetsel hız ile tüm hücre içerisinde bir akış elde edilmiştir. Bu fenomenik akış türünde akışın sahip olduğu özellikler, birincil ve ikincil girdap oluşumları dikkate alınmıştır. İkinci olarak üst kapak harici yüzeylere farklı kesitlerde ve aralıklarda çıkıntı geometrileri eklenerek genel hücre içi akışındaki hidrodinamik yapı değişimleri irdelenmiştir. Son olarak çıkıntılı düzlem üzerindeki akışın araştırılması için, kanal içi akışta düz levha yüzeyinin bir bölümüne çıkıntılar eklenerek kanal içi akışın hidrodinamik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır.

1.4 Hipotez

Doğadan esinlenilerek cisimler üzerine eklenen çıkıntıların cisim üzerinde, etrafındaki akışkan ile etkileşimiyle farklı etkilerin ortaya çıkmasına neden olduğu bilinmektedir. Düz bir yüzey üzerinde de yüzeyin pürüzsüz olduğu andaki akış davranışlarına nazaran çıkıntılar eklenmiş durumda akış hidrodinamiğinin değişeceği ön görülmüştür. Akıştaki bu değişimlerin yüzeye eklenen çıkıntıların geometrik büyüklük ve formlarındaki değişikliklere bağlı olduğu çalışmanın hipotezini oluşturmaktadır. Ortaya çıkacak yeni hidrodinamik yapıdaki bileşenlerin tespiti ve akış davranışındaki değişikliğe etkilerinin araştırılması bu hipotezi destekleyen alt kırılımlardır.

MATEMATİK MODEL**2.1 Yönetici Denklemler**

Yapılan sayısal çalışmada kullanılmış olan sıkıştırılamaz, üç boyutlu ve türbülanslı akış için gerekli denklemler aşağıda verilmiştir[33]. Tüm çözüm hacminde zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin çözülebilmesi için Denklem 1’de gösterildiği gibi tüm terimlerin ortalama değerleri $\bar{\phi}$ ve çalkantı değerleri ϕ' elde edilerek hesaplanmalıdır.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.1)$$

Ortalama alma süreci sürekli hal formu için zaman ortalaması, tekrarlayan zamana bağlı hal için genel ortalama olarak düşünülmelidir. Çözümde kullanılan kütle ve momentum taşınım denklemleri Denklem 2.2 ve Denklem 2.3’te verilmiştir[34].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}}) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}} \otimes \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot \bar{p} \mathbf{I} + \nabla \cdot (\mathbf{T} + \mathbf{T}_t) + \mathbf{f}_b \quad (2.3)$$

Denklem 2.2 ve 2.3’teki ρ yoğunluğu, $\bar{\mathbf{v}}$ ortalama hızı, $\bar{p}$ ortalama basıncı, $\mathbf{I}$ birim tensörü, $\mathbf{T}$ viskoz gerilme tensörünü ve $\mathbf{f}_b$ bileşke gövde kuvvetlerini (yerçekimi ve merkezkaç kuvvet gibi) ifade etmektedir. Bu denklemler esasen orijinal Navier-Stokes denklemleriyle aynıdır. Ancak orijinal Navier-Stokes denklemlerindeki momentum transfer denkleminde tensör formunda $\mathbf{T}_t$, Reynolds gerilme tensörü eklenmiştir.

$$T_t = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Bu tensörün çözümü için çalışmada kullanılan ticari kod iki yaklaşım önermektedir. Yaklaşımların biri “Girdap Viskozite Modeli” iken, diğeri “Reynolds Gerilme Taşınım Modeli” dir.

Girdap viskozite modelleri, moleküler dağılım - difüzyon işlemi ve türbülanslı hareket arasındaki benzeşime dayanmaktadır. Türbülanslı girdap viskozitesi kavramı, Reynolds gerilme tensörünün ortalama akış miktarlarının bir fonksiyonu olarak modellenmesini mümkün kılar. En bilinen model Denklem 2.5’te verilen Boussinesq yaklaşımıdır.

$$T_t = 2\mu_t S - \frac{2}{3}(\mu_t \nabla \cdot \bar{v}) I \quad (2.5)$$

Denklem 2.5’te μ_t türbülans viskozitesini, S deformasyon hız tensörünü, $\bar{v}$ ortalama hızı ve I birim tensörü ifade etmektedir. Özellikle μ_t türbülans viskozitesinin eldesi için çözüme ek taşınım denklemlerine ihtiyaç vardır. Bu denklemlere türbülans modelleri ismi verilir. Girdap viskozite modelleri altındaki bu türbülans modellerinin bazıları Spalart-Allmaras model, $k-\varepsilon$ model, $k-\omega$ model, Eliptik Harman modeli ve V2F modeli olarak sayılabilir. Çalışmada türbülans etkilerini hesaplama sürecine dahil etmek üzere Gerçeklenebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeli tercih edilmiştir.

Gerçeklenebilir $k-\varepsilon$ türbülans modelinde kullanılan türbülanslı girdap viskozitesi Denklem 2.6’ta verildiği şekilde hesaplanır.

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu k T \quad (2.6)$$

Denklem 2.6’da ρ yoğunluğu, C_μ model katsayısını, f_μ sönüm fonksiyonunu ve T türbülans zaman ölçeğini ifade etmektedir. Gerçeklenebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeli için;

$$T = T_e = \frac{k}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

olarak alınır. Burada T_e büyük girdap zaman ölçeğini ifade etmektedir.

Gerçeklenebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeli iki denklemlidir. Bu denklemlerden türbülans kinetik enerji taşınım denklemi Denklem 8’de, türbülans dağılım oranı taşınım denklemi Denklem 2.9’da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T_\varepsilon} C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left(\frac{\varepsilon}{T_\varepsilon} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon \quad (2.9)$$

Denklem 2.8 ve 2.9’da $\bar{\mathbf{v}}$ ortalama hızı, μ dinamik viskoziteyi, σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ model katsayılarını, P_k , P_ε üretim terimlerini, f_2 sönmüm fonksiyonunu ve S_k , S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimlerini ifade etmektedir. ε_0 kaynak terimi içerisindeki çevresel türbülans değerini verirken, çevresel kaynak terimi;

$$T_0 = \max \left(\frac{k_0}{\varepsilon_0}, C_t \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon_0}} \right) \quad (2.10)$$

olarak tanımlanır. C_t model katsayısını ifade eder.

Gerçeklenebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeli için üretim terimleri;

$$P_k = f_c G_k + G_b + Y_M \quad \& \quad P_\varepsilon = f_c S k + C_{\varepsilon 3} G_b \quad (2.11)$$

olarak tanımlanır.

Denklem 2.11’de $C_{\varepsilon 3}$ model katsayısı, f_c eğrilik düzeltme faktörünü, G_k türbülans üretimini, G_b kaldırma kuvvet üretimini ve Y_M sıkıştırılabilirlik düzeltmesini ifade etmektedir.

$$G_k = \mu_t S^2 - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}} - \frac{2}{3} \mu_t (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}})^2 \quad (2.12)$$

$$G_b = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} (\nabla \bar{T} \cdot \mathbf{g}) \quad (2.13)$$

Denklem 2.13’te β termal genleşme katsayısını, Pr_t türbülans Prandtl sayısını, $\bar{T}$ ortalama sıcaklığı ve $\mathbf{g}$ yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (2.14)$$

$$\Upsilon_M = \frac{C_M k \varepsilon}{c^2} \quad (2.15)$$

Denklem 2.15'te C_M model katsayısı ve c ses hızını ifade etmektedir.

$$f_2 = \frac{k}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad \& \quad f_\mu = 1 \quad (2.16)$$

Gerçeklenebilir $k - \varepsilon$ türbülans modeli için model katsayıları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Gerçeklenebilir $k - \varepsilon$ türbülans modeli için model katsayıları

C_M	C_t	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_μ	σ_ε	σ_k
2	1	$\max\left(0.43, \frac{\eta}{5 + \eta}\right)$	1.9	0.09	1.2	1
		$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$				

$$C_{\varepsilon 3} = \begin{cases} 1 & \text{for } G_b \geq 0 \\ 0 & \text{for } G_b < 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

2.2 Sonlu Hacimler Metodu

Tanımlanan tüm bu denklemlerin oluşturduğu matematik model bir çözüm hacminde uygulanmıştır. Söz konusu diferansiyel denklemler, uygulanan geometri ve akış tipinde analitik çözümü mümkün olmayan denklemlerdir. Bu nedenle hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Diferansiyel denklemleri cebirsel hale getirerek çözümünü mümkün kılan bu sayısal çözümler, temel olarak sonlu farklar, sonlu hacimler ve sonlu elemanlar başlıkları altında toplanabilir. Sonlu hacimler yöntemi, sonlu farklar yönteminin özelleşmiş bir biçimidir. Sonlu farklar yöntemi diferansiyel formdaki denklemlerin çözümüne uygunken, sonlu hacimler yöntemi integral formdaki denklemlere uygulanır. Böylece çözüm alanı daha küçük

sonlu hacimlere bölünerek her eleman için ayrı integrasyon yapılır ve hesaplama gerçekleştirilir.

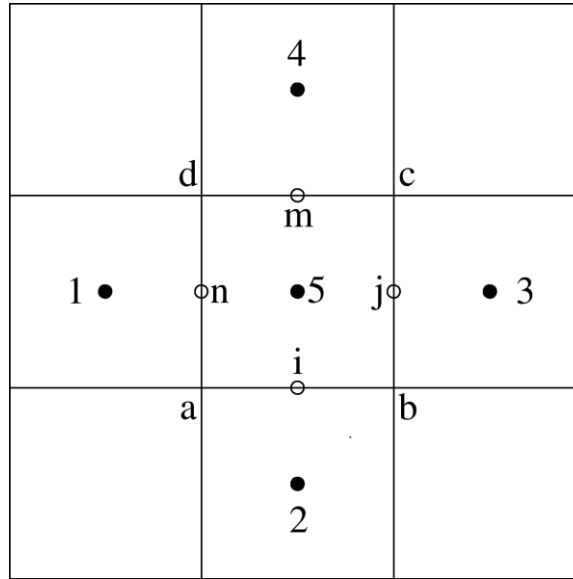
Günümüzde ticari yazılımların büyük bölümü, akışkanlar mekaniği problemlerini çözmek için sonlu hacimler metoduna başvurmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan ticari kod da (CD-Adapco Star-CCM+), yönetici denklemlerin ayrıklaştırılması için sonlu hacimler yöntemi kullanmaktadır.

Sonlu hacimler metodunun genel formülasyonu aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Metodu anlamak için örnek bir zamana bağlı iki boyutlu bir diferansiyel denklem ele alabiliriz.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (2.18)$$

Çözümü gerçekleştirilen akış hacminde keyfi olarak bir bölge seçilmiş olsun. Bu bölge Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Seçilen örnek bölgedeki çözüm için kullanılan noktalar

Akış hacminin bu şekilde daha küçük bölgelere ayırma işlemine çözüm ağı oluşturma ismi verilmektedir. Şekil 2.1’deki a, b, c, d noktaları çözüm ağının kesiştiği noktaları, 1, 2, 3, 4, 5 noktaları ise her bir elemanın merkez noktalarını temsil etmektedir. Merkez hücrenin kenarlarının orta noktaları ise i, j, m, n noktalarıdır. Denklem 2.18 “abcd” noktalarının oluşturduğu alan etrafında integrali alınırsa:

$$\int_{abcd} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) dx dy = - \int_{abcd} \left(\frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} \right) dx dy \quad (2.19)$$

ifadesi elde edilir. Yüzey integral biçiminde olan denklemin sağ tarafını Green Teoremi yardımıyla çizgisel integrale dönüştürürsek:

$$\int_{abcd} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) dx dy = - \oint_{abcd} (E dy - F dx) ds \quad (2.20)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem sonlu hacimler metodunda ayırıklaştırmaya temel oluşturan denklemdir. Ayırıklaştırma uygulandığında tüm akış alanı için çözüm yapılacak bölgeler belirlenmiş olur. Denklem 2.20 “a,b,c,d” noktalarını kullanarak düğüm noktası tipi, ya da elemanların merkez noktaları olan “1, 2, 3, 4 ve 5” noktalarını kullanarak hücre merkezli olarak ayırıklaştırılabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan ticari kod, hücre merkezli ayırıklaştırma yapmaktadır.

Denklem 2.20, hücre merkez noktalarını kullanılarak ayırıklaştırıldığında şu ifade elde edilir:

$$\left(\frac{Q_5^{n+1} - Q_5^n}{\Delta t} \right) A_{abcd} = - \left[E_i \Delta y_{ab} + E_j \Delta y_{bc} + E_m \Delta y_{cd} + E_n \Delta y_{da} \right] + \left[F_i \Delta x_{ab} + F_j \Delta x_{bc} + F_m \Delta x_{cd} + F_n \Delta x_{da} \right] \quad (2.21)$$

Böylece çözülen diferansiyel denklem cebirsel biçime getirilmiş olur. Burada çözülen bağımsız değişkene ait bilgi, komşu hücrelerin merkez noktalarından alınarak hesaplanmaktadır. Burada Şekil 2.1’in merkezindeki çözüm yapılan elemanın alanını, ab, bc, cd ve da ise kenarlarını temsil etmektedir. Denklem 2.21’de yer alan Δx ve Δy mesafelerini tespit etmek için ise çözüm ağı kesişim noktalarının koordinatları kullanılır:

$$\begin{aligned} \Delta y_{ab} &= y_b - y_a, & \Delta y_{bc} &= y_c - y_b, & \Delta y_{cd} &= y_d - y_c, & \Delta y_{da} &= y_a - y_d \\ \Delta x_{ab} &= x_b - x_a, & \Delta x_{bc} &= x_c - x_b, & \Delta x_{cd} &= x_d - x_c, & \Delta x_{da} &= x_a - x_d \end{aligned} \quad (2.22)$$

Denklem 2.21’in çözümü için bir diğer gereken ise hesaplanan E ve F değişkenlerinin çözüm hücresinin kenarlarının(ab, bc, cd ve da) orta noktalarındaki değerleridir. Bu değerler de, komşu iki hücrenin merkezlerindeki değerlerden ortalama alınarak bulunur:

$$\begin{aligned}
E_i &= \frac{1}{2}(E_5^* + E_2^*), & E_j &= \frac{1}{2}(E_5^* + E_3^*) \\
E_m &= \frac{1}{2}(E_5^* + E_4^*), & E_n &= \frac{1}{2}(E_5^* + E_1^*) \\
F_i &= \frac{1}{2}(F_5^* + F_2^*), & F_j &= \frac{1}{2}(F_5^* + F_3^*) \\
F_m &= \frac{1}{2}(F_5^* + F_4^*), & F_n &= \frac{1}{2}(F_5^* + F_1^*)
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Burada değişkenlerin üzerindeki * işareti, değişkenlerin bir önceki zaman adımında hesaplanan değerlerinin kullanıldığını göstermektedir. Bu tarz değer seçimine açık şema ismi verilmektedir. Eğer değişken değerleri bir önceki hesaplanan zaman adımından değil, çözümü gerçekleştirilen zaman adımındaki değerler olarak alınırsa şema kapalı şema olarak isimlendirilir[35]. Bu tez çalışmasında kapalı şema kullanılmıştır.

ÇÖZÜCÜ KÜMELENMESİ

Çok çekirdekli işlemcilerin keşfiyle birlikte ilk yıllarda çekirdekler arasında iletişim iç iletişim ile sağlanırken, son yıllarda ağ teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde bağımsız bilgisayarlar arası verinin kayıpsız transferi mümkün hale gelmiştir[36].

Özellikle mühendislik dallarında kullanılan sayısal çözüm algoritmaları yüksek performanslı bilgisayar kümelerinde hızlı ve stabil olarak çalıştırılabilmektedir. Birlikte aynı ağ üzerinde çalışan bilgisayar kümelerinde çalışan algoritmalar, aynı iş yükünü her bir bilgisayardaki işlemci çekirdeklerine bölerek, aynı anda hesap yapacak şekilde oluşturulabilmektedir. Bu tarz hesaplama yöntemine “Paralel hesaplama” ismi verilir. Paralel hesaplama yaptırılan bilgisayar kümelenmeleri kısaca HPC (High-Performance Cluster: Yüksek Performanslı Kümelenme) olarak isimlendirilir. Ağ üzerindeki ortak çalışma imkanı, bilgisayarların kendi aralarında oluşturulacak bir iletişim ara yüzü sayesinde sağlanmaktadır. HPC sistem modelleri genellikle iş akışını yöneten bir ana bilgisayar ile çözüme katılan çözücü işlemci çekirdeklerini içeren çözüm bilgisayarlarından oluşmaktadır. Bununla birlikte birbirleriyle sürekli iletişim halinde olabilen bilgisayar kümelerinde ortak çalışabilecek program algoritmaları da geliştirmeye başlanmıştır.

Geçmişte paralel hesaplama yapabilmek için yüksek maliyetli donanımlara ve bu donanımlar arasında iş akışını sağlayacak yazılımlara ihtiyaç duyulmaktaydı. 1980’lerin sonlarında iş istasyonlarını birbirlerine bir ağ ile bağlayarak iş istasyonu kümeleri kurulmaya başlanmıştır[37]. Ülkemizde de farklı üniversitelerde yüksek başarımlı hesaplama merkezleri bulunmaktadır. Yüksek başarımlı hesaplama merkezlerine göre

daha düşük maliyetlere kurulabilen “Beowulf” sistemleri son yıllarda yaygınlaşmaya başlamıştır.

HPC sistemlerinde, bu sistemler için özel olarak tasarlanmış donanım elemanları kullanılarak hesaplama sistemi oluşturulur. Beowulf tipi çözücülerde ise gündelik kullanım için tasarlanmış kişisel bilgisayarlar paralel biçimde bir arada çalıştırılarak yüksek çözüm kabiliyetine sahip sistemler, çok daha düşük maliyetle oluşturulabilmektedir. Bu sayede, gerekli çözüm altyapısına sahip olmayan kurum ya da kullanıcılar için düşük maliyetli bir çözücü alternatifi oluşturmaktadır. HPC sistemlerine erişim olanağı olmayan kullanıcılar çözüm alt yapısı için genellikle kişisel bilgisayarlara göre daha yüksek hesaplama kabiliyetine sahip iş istasyonlarını kullanmaktadır. Ancak iş istasyonu sistemlerinde çözüm kabiliyeti arttıkça sistem maliyeti de oldukça yükselmektedir.

HPC kümelenmelerinde mühendislik problemlerinde sık kullanılan sonlu hacimler ve sonlu elemanlar metotları ile çalışan çözücüler çalıştırılmaktadır. Özellikle katı mekaniği ve akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal algoritmalar, büyük ölçekli problemleri çözebilmek için HPC kümelenmelerine ihtiyaç duymaktadır.

Genel olarak HPC teknolojisinde iki temel model vardır. Bunlar Beowulf kümelenmeleri ve iş istasyonu kümelenmeleridir[38]. Beowulf ve iş istasyonu kümelenmeleri arasındaki temel fark çözüm bilgisayarlarında sabit disk olup olmayışıdır[39]. Beowulf kümelenmelerinde çözücü bilgisayarlarda sabit disk bulunmaz. Bu durum çözücü makinelerin çalışabilir olması için ortak dosya sistemine sahip olmalarını gerektirir. Bu nedenle de ana makinede aşırı veri trafiği oluşur. İş istasyonu kümelenmelerinde ise her bir çözücü makina bağımsız sabit diskler içermektedir. Bu da makinelerin bağımsız çalışmaları için ana makineye ihtiyaç duymamalarını böylelikle de ağ da aşırı trafik oluşturmamalarını sağlamaktadır.

Teze konu olan matematik modelin çözümü için Linux işletim sistemi ile çalışan 80 çekirdekli bir “Beowulf” kümelenmesi inşa edilmiştir. Kullanılan tüm makineler gündelik kullanıma uygun olarak üretilen kişisel bilgisayarlardır. Küme elemanı her bir çözücü bilgisayar Intel I5 3.2 Ghz dört çekirdekli işlemci ve 12 GB DDR3 Ram içermektedir. Ana makina ise yine Intel I5 serisi dört çekirdekli 3.2 Ghz işlemci ve 32 GB

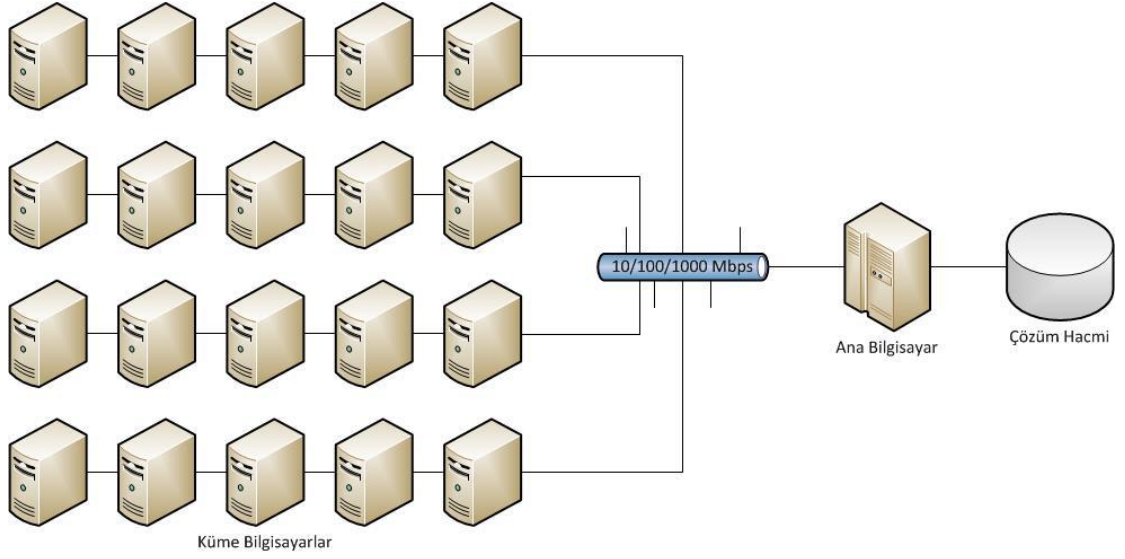
DDR3 Ram ihtiva etmektedir. Her bir makine bağımsız çalışmasını sürdürebilmesi için bir çekirdek ayrılarak üç çekirdek halinde çözüme dahil edilmektedir. Bilgisayarların paralel olarak çalışmaları için 10/100/1000 Mbit/s ağ alt yapısı kullanılmıştır. 20 çözücü bilgisayar 1 ana bilgisayardan oluşturulan Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi'ndeki Ses Altı Rüzgar Tüneli Laboratuvarı'nda kurulan Beowulf kümelenmesi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 80 çekirdekli Beowulf kümelenmesi görseli

HPC kümelenmelerinin hesaplama performanslarının ölçülmesi hesaplama hızının ölçeklenebilmesinde büyük önem taşır. HPC sistemlerinde iki tür işletim sistemi kullanılabilir. Bunlar Microsoft Windows ve Linux dağıtımlarıdır. Uzun süreli paralel çözümlerde stabilizasyon ve performansın sürdürülebilirliği nedeniyle, kurulan Beowulf kümelenmesinde bir Linux dağıtımı olan LinuxMint 17.2 versiyonu kullanılmıştır. İşletim sistemi içerisindeki “ssh” bağlantı platformu kullanılarak diğer makineler ile şifresiz iletişim kurulmuştur. MPI (Message Passing Interface) mesaj gönderim arayüzü kütüphaneleri kullanılarak küme bilgisayarları paralel çözüme geçirilmiştir.

Şekil 3.2'de Küme bilgisayarların çalışmasının sistematikliğini gösteren şematik görünüm verilmiştir.



Şekil 3.2 Teze konu olan matematik model için kurulan kümelenme çalışma sistemi

Çözülecek problemin çözüm hacmi, ana makina üzerinde çalışan programa alınarak, bu kısımda çözüm ağı parametreleri ile başlangıç ve sınır şartları belirlenmiştir. Çözüm ağı oluşturulurken kümelenme elemanı paralel bilgisayarlara, oluşturulan bu çözüm ağından eşit sayılarda eleman olacak şekilde paylaştırılmıştır. Çözüm hesaplanmaya başlandığında paylaştırılan çözüm ağı elemanları her bir işlemci çekirdeğinde bağımsız olarak çözülmüştür. Makinalar arasında paylaştırılan çözüm hacmi elemanlarının sınırlarındaki hız, sıcaklık, basınç gibi değişken değerleri ağ yapısı üzerinde iletişim kurularak diğer makinelere gönderilmiş ve iterasyonlar sonunda çözüm tamamlanmıştır.

HÜCRE İÇİ AKIŞ

Doğada göller, nehirler gibi su kaynaklarında, atmosferik olaylar için topografya etkisinin irdelenmesinde, mühendislik uygulamalarında ısıtma, soğutma, çökelme, yağlama v.b. problemlerde, problemin basit olarak modellenmesinde sıklıkla kapak etkili hücre içi akış problemi göz önüne alınır[40].

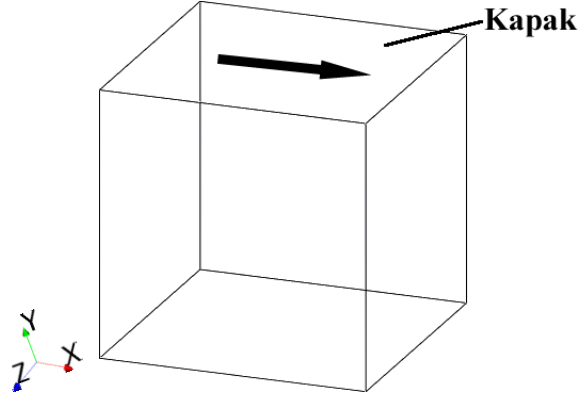
Geometrisinin basit olmasına karşın akış formundaki karmaşık davranışlar nedeniyle kapak etkili hücre içi akış problemi bilimsel çalışmalarda test problemi olarak yaygın olarak kullanılır[41].

Temelde kübik bir boşluk olan geometride kapak ismi verilen üst yüzey belirli bir yönde teğetsel hız ile çekilmekte, bu hız şartı nedeniyle hücre içerisinde bulunan akışkanda girdaplı bir akış oluşmaktadır.

Hücre içerisinde sürüklenme etkisi ile merkezi konumda ve duvarlar ile sınırlandırılmış şekilde büyük bir girdap ortaya çıkar. Bu girdaba birincil girdap ya da ana girdap ismi verilir. Akışın doğası gereği ana girdabın tetiklediği hücrenin alt köşe bölgelerinde ana girdaba göre ters yönde hareket eden daha küçük köşe girdapları oluşur. Bu girdaplara da ikincil girdap adı verilmektedir.

4.1 Çözüm Geometrisi

Şekil 4.1'de kapak etkili hücre içi akış probleminde kullanılan hücre geometrisi şematik olarak verilmiştir. Üst yüzey (lid) hareketli(driven) yüzey olarak tanımlanır.

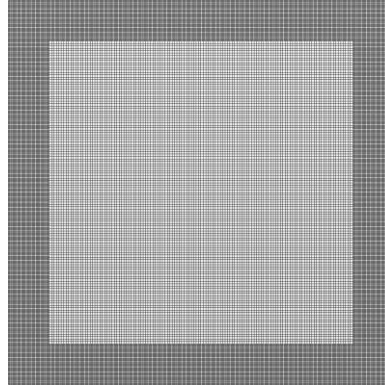


Şekil 4.1 Kapak etkili hücre içi akış problemi geometrisi

Hücre probleminde geometrinin düzgün olması yapısal çözüm ağı elde edilmesi için son derece elverişlidir. Her bir ayrit eşit sayıda parçaya bölünerek çözüm ağı oluşturulur. Problem geometrisinin basitliği nedeniyle hem üç boyutlu hem de iki boyutlu olarak ele alınabilir. Yapılan sayısal çözümlemelerde üç boyutlu hücre içindeki akımın yapısında görülen ayrıntıların iki boyutlu çözümleme sonucunda görülemediği anlaşıldığından problemin üç boyutlu çözülmesi gerekliliğine karar verilmiştir.

4.2 Çözüm Ağı ve Doğrulama Çalışması

Şekil 4.2’de kapak etkili hücre içi akış probleminde kullanılan çözüm ağının merkez kesit düzlemindeki görünümü verilmiştir.

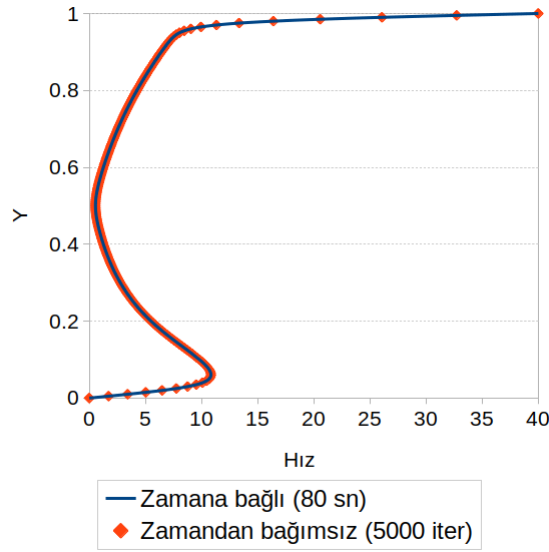


Şekil 4.2 Hücre içi akış probleminde kullanılan çözüm ağının merkez kesitteki görünümü

Şekil 4.2’den görüldüğü gibi duvarlara yakın bölgelerde çözüm ağı, hacmin merkezine göre daha sık olarak oluşturulmuştur. Çözüm ağı bağımsızlık çalışması yapıldığında bu sıklıkta bir çözüm ağına ihtiyaç olmadığı görülmüştür.

Ancak çalışmanın sonraki aşamalarında duvarlara eklenecek çıkıntılarda ihtiyaç duyulan sık çözüm ağı yapısının, çıkıntısız geometrideki sonuçlar ile kıyaslanabilmesi için çıkıntısız geometriye de bu sıklıkta çözüm ağının uygulanması gerekmiştir.

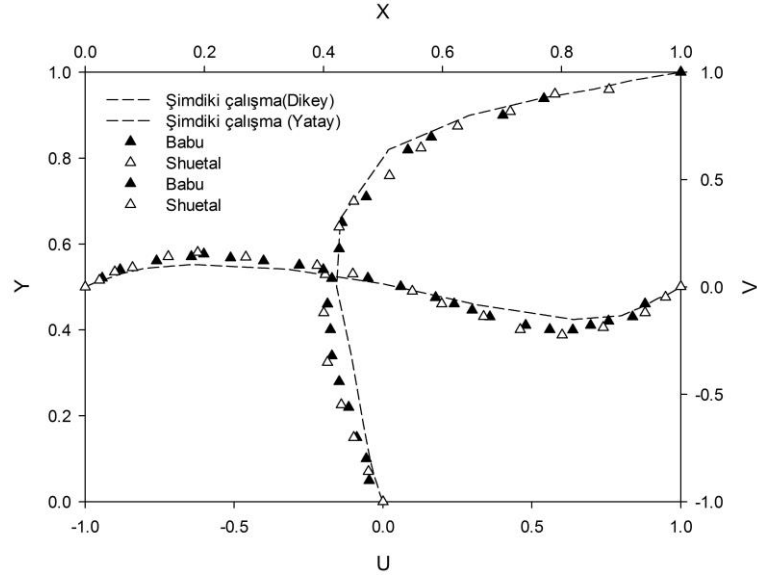
Şekil 4.3'de görüldüğü gibi çözümün yakınsama parametresi olarak dikey hız profili gelişimi incelenmiştir. Bunun için problemin zamana bağımlı ve zamandan bağımsız durumunda hız profilleri karşılaştırılmış ve hız profillerinin birbirine yaklaştığı iterasyon adedi bütün çözümlerde kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Zamana bağımlı ve zamandan bağımsız çözüm için hız profilleri

Çözüm ağı bağımsızlığı ile birlikte her sayısal çalışmada ihtiyaç duyulduğu gibi bu çalışmada da deneysel veriler ile doğrulama yapılmıştır.

Şekil 4.4'de Chen ve ark. tarafından yapılan çalışmada dikkate alınan sonuçlar ile yapılmış olan sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir.



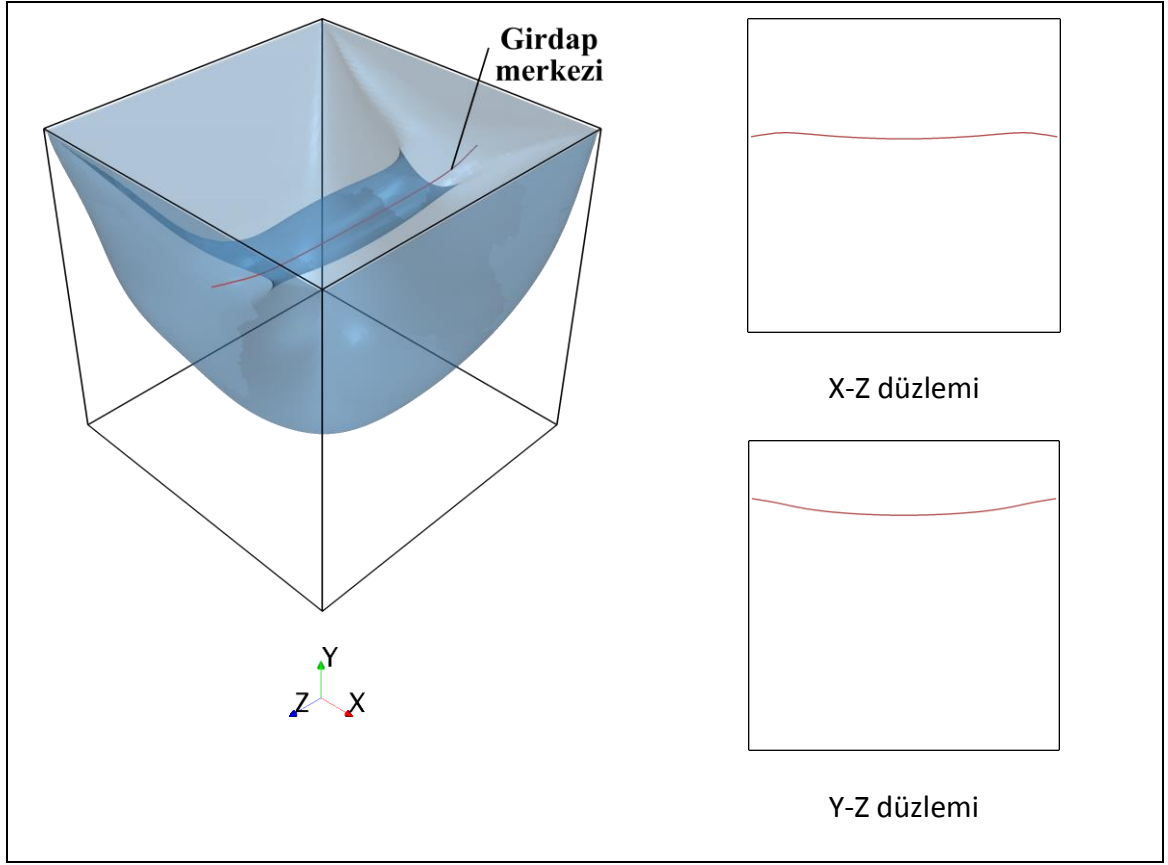
Şekil 4.4 Deneysel sonuçlar ile yapılan sayısal çalışmanın karşılaştırılması

Grafikten görüldüğü gibi sonuçlar yeteri derece yakınlık göstermektedir[42].

4.3 Sonuçlar

Şekil 4.5'de hücre içerisinde oluşan ana girdabın yüzey görünümü ve girdap merkez çizgisinin X-Z, Y-Z düzlemlerindeki yeri gösterilmiştir.

Şekil 4.5'den görüleceği gibi ana girdap merkez çizgisi, hücrenin sağ ve sol duvarlarına doğru eğilmekte ve tüm hücre içerisinde simetrik olmayan bir yapı kazanmaktadır. Bu durum iki boyutlu çözümlemelerden elde edilen sonuçlarda görülmemektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi problemin üç boyutlu olarak çözülmesinin ana sebebi budur.



Şekil 4.5 Çıkıntısız yüzeylere sahip kapak etkili hücre içinde oluşan ana girdap yüzeyi ve girdap merkezi çizgisi ($Re = 100$)

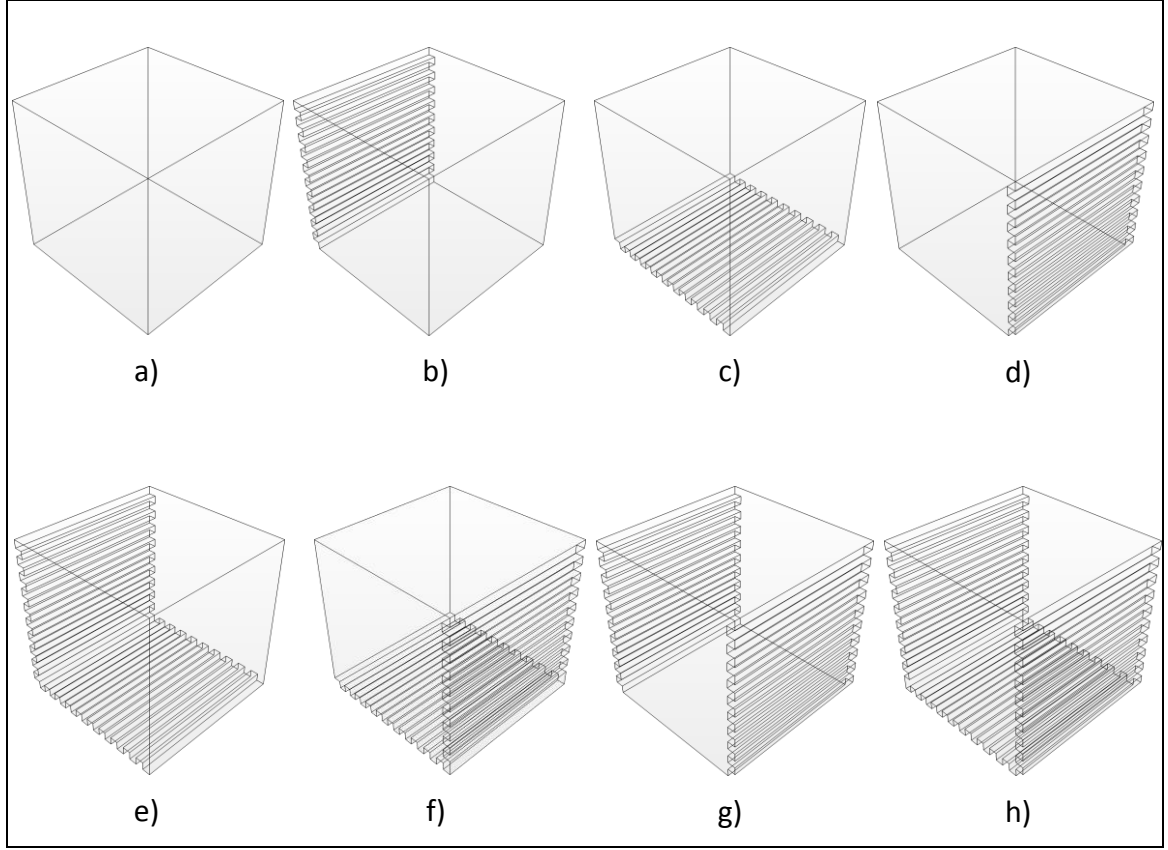
HÜCRECİKLİ HÜCRE İÇİ AKIŞ

Önceki bölümde açıklanan hücre içi akış probleminde, hücre içerisindeki farklı duvarlara çıkıntılar eklenerek bir kademe ileri götürülmüş, hücre duvarlarına eklenen çıkıntıların hücre içi akışı nasıl etkilediği incelenmiştir.

5.1 Çözüm Geometrisi

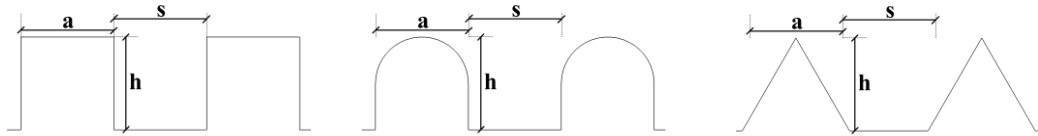
Şekil 5.1'de çözüm için kullanılan hücrelerin hangi duvarlarına çıkıntı eklendiği detaylı olarak verilmiştir.

Kübik hücre yapısına uygun olacak şekilde farklı hücre duvarlarına kare kesitli çıkıntılar eklenerek kübik hücrecikler oluşturulmuştur. Hücre duvarlarına eklenen çıkıntıların kesitleri sabit kabul edilmiş ve ayrit uzunlukları hem makro yüzey yapıları elde edilebilmesi hem de mevcut çözüm alt yapısının yeterli olabilmesi için hücre boyutunun % 5'i olarak alınmıştır. Yüzeylere, kesitleri kare, yuvarlatılmış kare ve üçgen geometrilere sahip farklı tipte çıkıntılar eklenmiştir.



Şekil 5.1 a) Çıkıntısız, b) Arka yüzü çıkıntılı, c) Alt yüzü çıkıntılı, d) Ön yüzü çıkıntılı, e) Arka ve Alt yüzleri çıkıntılı, f) Alt ve Ön yüzleri çıkıntılı, g) Arka ve Ön yüzleri çıkıntılı ve h) Arka, Alt ve Ön yüzleri çıkıntılı hücre geometrileri

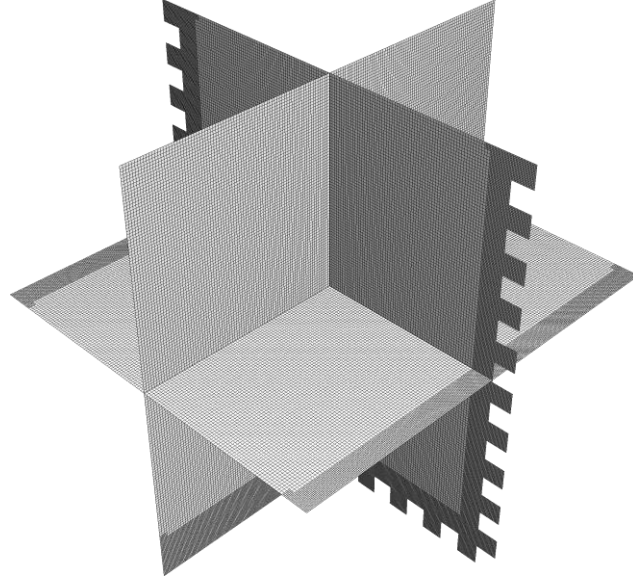
Çıkıntı geometrilerinin temel boyutları yükseklik (h), genişlik (a) ve aralık (s) olarak Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Çıkıntı geometrileri ve boyutları

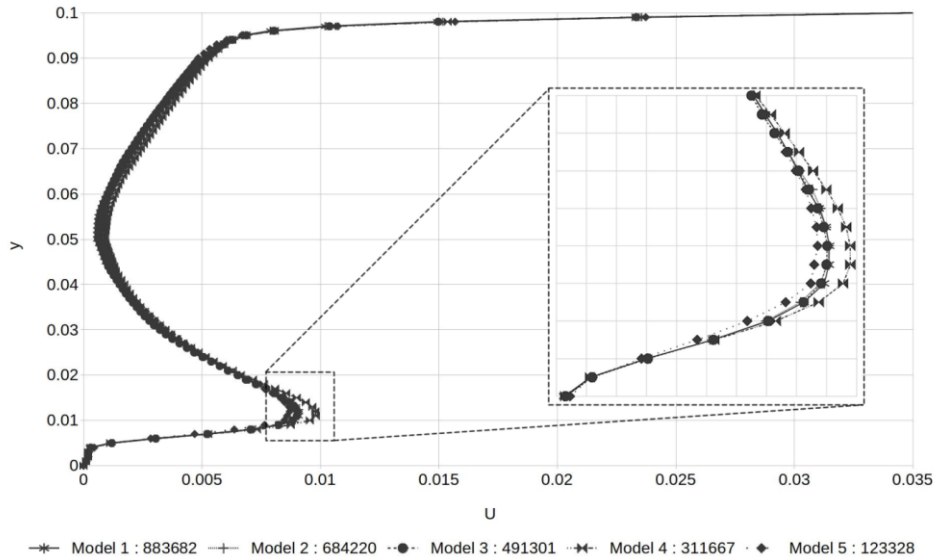
5.2 Çözüm Ağı ve Doğrulama Çalışması

Şekil 5.3'de arka, alt ve ön yüzüne çıkıntı eklenmiş geometri için kullanılan çözüm ağı görseli verilmiştir.



Şekil 5.3 Arka, Alt ve Ön yüzleri çıkıntılı geometride kullanılan çözüm ağıının kesitler üzerindeki görünümü

Çıkıntılar arasında oluşturulan hürecikler içerisinde hücre içi akış davranışının elde edilebilmesi için hüreciklerin bulunduğu bölgelerde hücre merkezine göre iki kat daha yüksek çözünürlüklü çözüm ağı üretilmiştir. Sayısal çalışmada sonuçların çözüm ağıından bağımsızlaşması için bir çözüm ağı bağımsızlaştırması çalışması yapılmıştır. Farklı çözüm ağı modellerinde elde edilen Y doğrultusundaki hız profilleri Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.4 Çözüm ağı bağımsızlaştırması için kullanılan hız profilleri

Eleman sayıları 883682, 684220, 491301, 311667 ve 123328 olan beş farklı çözünürlükte çözüm ağı kullanılarak hücre merkezinde Y doğrultusundaki hız değerleri karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi Model 2 ile Model 3 arasında çözüm ağının etkisinin fazla olmadığı görülerek 491301 elemana sahip Model 3 çözüm ağının kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir.

5.3 Sınır şartları

Hücrenin üst yüzey +x yönünde hareketlidir.

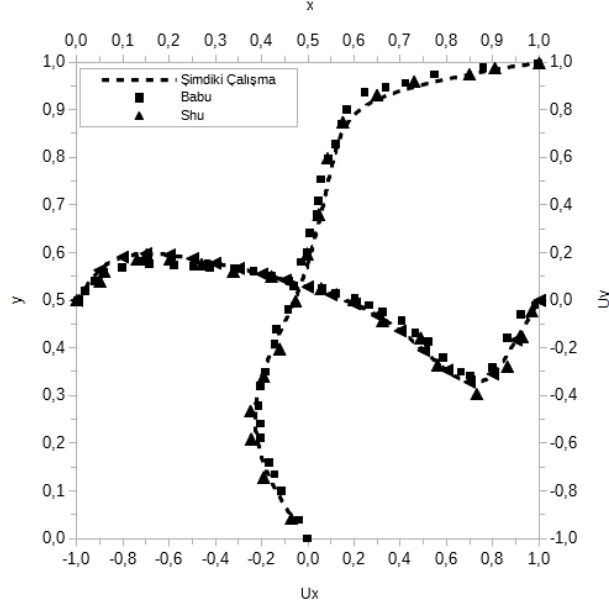
Hücrenin üst yüzey dışındaki tüm yüzeylerinde kaymama şartı ($u = v = w = 0$) kabul edilmiştir.

Çıkıntılar arası uzaklıkların (s), çıkıntı yüksekliğine (h) oranı, $s / h = 1, 2, 3, 4$ olarak alınmıştır.

$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$ ρ akışkan yoğunluğu [kg/m^3], V üst yüzey hızı [m/s], L hücre kenar uzunluğu [m] ve μ akışkan viskozitesi [kg/m.s].

$Re = 100, 500, 1000$ ve 2000 'de çözümler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçların referans çalışmaların sonuçları ile yeterli yakınlıkta olduğu Şekil 5.5'de görülmektedir[42].

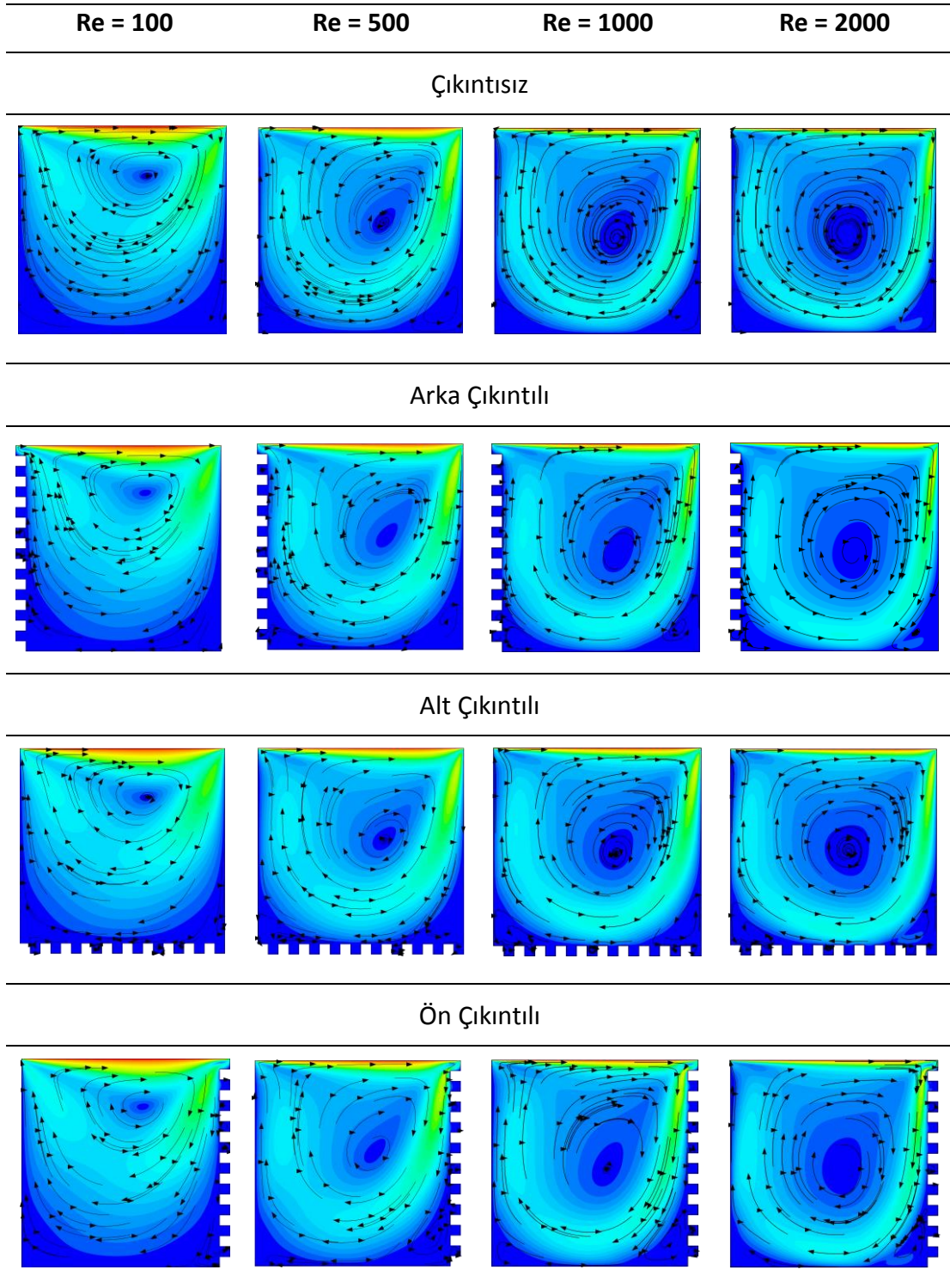


Şekil 5.5 Üst yüzeyi hareketli, tabanı çıkıntılı hücre içinde $Re = 100$ için yatay ve düşey merkez hatlardaki hız bileşenlerinin karşılaştırılması

5.4 Sonuçlar

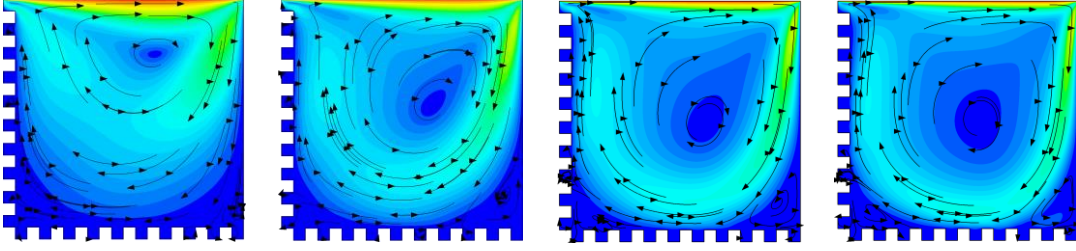
Hücrecikli hücre içi akış probleminin çözümüyle hız, basınç, girdaplılık ve duvar kayma gerilmesi değişkenleri incelenmiştir. Hücrenin geometrik formu yüzeylerdeki toplam sürüklenme kuvvetlerinin incelenmesi, bir yüzeyin belirli bir yönde ürettiği kuvvet, karşıt yüzeyde ters yönde ortaya çıktığından ve toplamda bulunan kuvvet değerlerinden oldukça uzak değerler verdiği için dolaylı olarak çok efektif olmamıştır. Bu nedenle kuvvet değeri yerine duvar kayma gerilmesi olarak (Wall Shear Stress: WSS) tercih edilmiştir. WSS değerleri çıkıntısız modelde elde edilen ortalama WSS değeri ile normalize edilerek kullanılmıştır. Aynı şekilde girdaplılık değerleri çıkıntısız girdaplılık değeri ile normalize edilerek kullanılmıştır. Şekil 5.6'da hücrenin farklı yüzeylerinde bulunan çıkıntıların skaler hız dağılımlarını ve akım hatlarını nasıl etkilediği gösterilmiştir. $Re = 100$ durumunda hücre içerisindeki ana girdabın, tüm geometrik biçimlerde, çözümleme sonunda henüz gelişmemiş olduğu ve girdap merkezinin akışı tetikleyen üst duvara yakın bölgelerde olduğu görülmüştür. Reynolds sayısının 500 değerinden 2000 değerine artırılmasıyla ana girdap merkezinin hücre merkezine yaklaştığı ve hücre içini dolduracak şekilde geliştiği görülmüştür. Hücrenin kapak hareketinin tersi yönündeki arka yüzeyine eklenen çıkıntıların $Re = 100$ 'de çıkıntısız hücreye göre girdap şeklinde herhangi bir değişim görülmezken, $Re = 500, 1000, 2000$

değerlerinde ana girdabın formundaki değişiklik de Şekil 5.6'da net olarak görülmektedir.

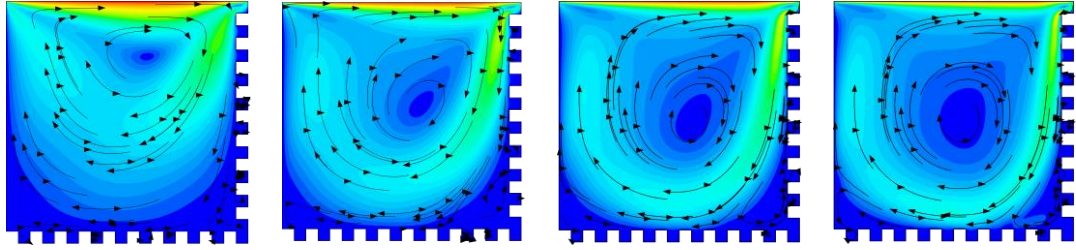


Şekil 5.6 Farklı yüzeylerine çıkıntı eklenmiş hücre içindeki skaler hız dağılımı ve akım hatları

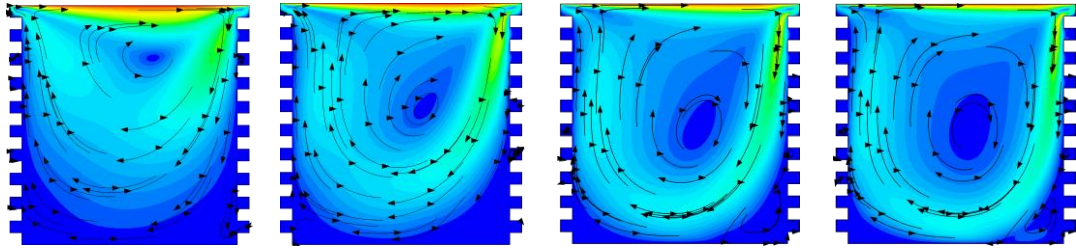
Arka ve Alt Çıkıntılı



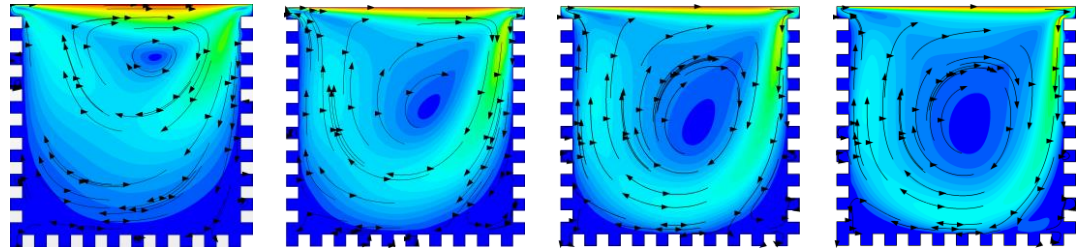
Alt ve Ön Çıkıntılı



Arka ve Ön Çıkıntılı



Arka,Alt ve Ön Çıkıntılı



Şekil 5.7 Farklı yüzeylerine çıkıntı eklenmiş hücre içindeki skaler hız dağılımı ve akım hatları (Devamı)

Ayrıca $Re = 2000$ değerinde ana girdap merkezinin kapak hareketi yönünde hücre merkezinden uzaklaştığı görülmektedir.

Alt yüzeyi çıkıntılı hücre yapısında $Re=100$ 'den $Re=2000$ 'e artarken ana girdap merkezinin kapak hareketi yönünün tersi yönde (arka) hücre merkezine doğru

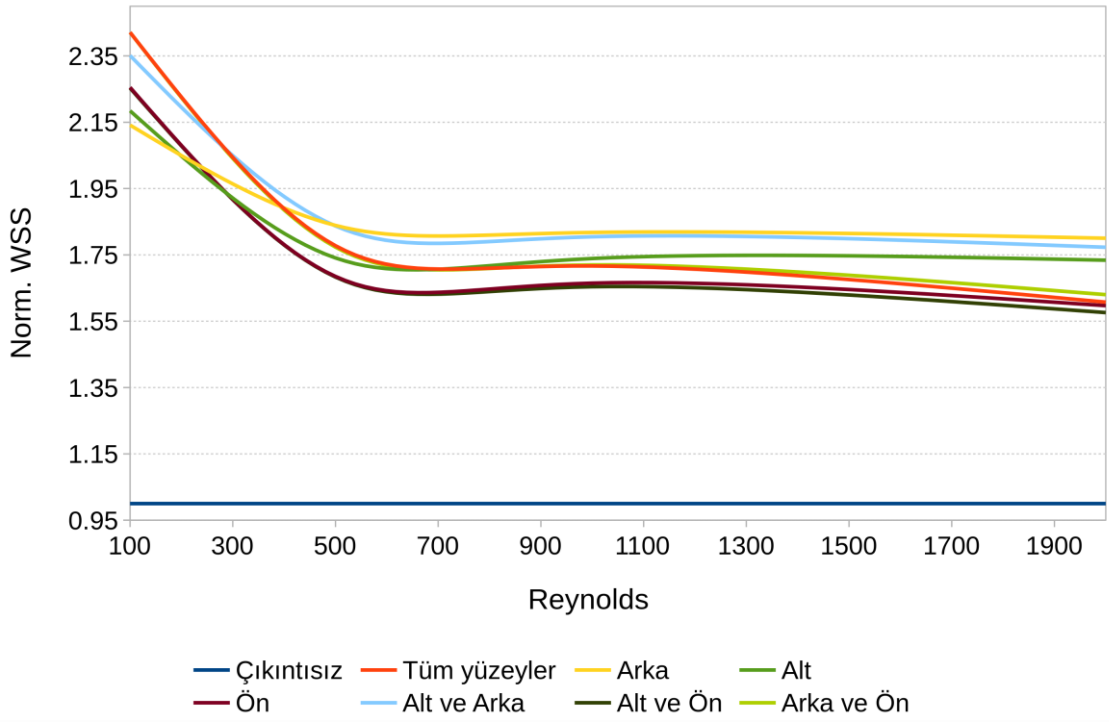
ilerlediği, alt yüzeyden yukarı doğru basılmış ve yan yüzeylere doğru genişleyen formda girdap oluşumu görölmektedir.

Kapak hareketi yönündeki yüzeye (ön) çıkıntı formu uygulandığı durumda ana girdap merkezinin kapak hareketi yönüne ters yönde hücre merkezine doğru ilerlemektedir.

Şekil 5.1.e,f,g,h 'de gösterilmiş olan, iki veya üç yüzeyine çıkıntı eklenmiş hücre içindeki akış incelendiğinde, çıkıntılı yüzeylerin tekil olması durumunda akıma olan etkilerinin birlikte gerçekleştiği görölmektedir.

Şekil 5.6'daki sonuçlar toplu olarak irdelenirse kapak etkili hücre içi akışında, hücre köşe bölgelerinde oluşması beklenen, ana girdabın tersi yönünde hareket eden, ikincil girdapların belirgin şekilde olmadığı çıkıntısız hücre yapısı dışındaki bütün hücre formlarında belirgin şekilde gerçekleştiği net olarak görölmektedir. Özellikle ön ve alt yüzeye eklenen çıkıntıların ikincil girdap oluşumunun düşük Reynolds sayılarında da elde edilmesini sağladığı tespit edilmiştir.

Şekil 5.7'deki grafikte hem bir yüzeye hem de birden fazla yüzeye çıkıntı eklenmesi durumunda tüm yüzey ortalamaları alınarak normalize edilmiş duvar kayma gerilmesi(norm.WSS) değerleri görölmektedir. Grafikteki eğrilerden anlaşılacağı gibi tüm Reynolds sayıları için, duvar kayma gerilmesi en küçük değerlerinin çıkıntısız yüzeylere sahip hücrenin duvarlarında olduğu görölmektedir.

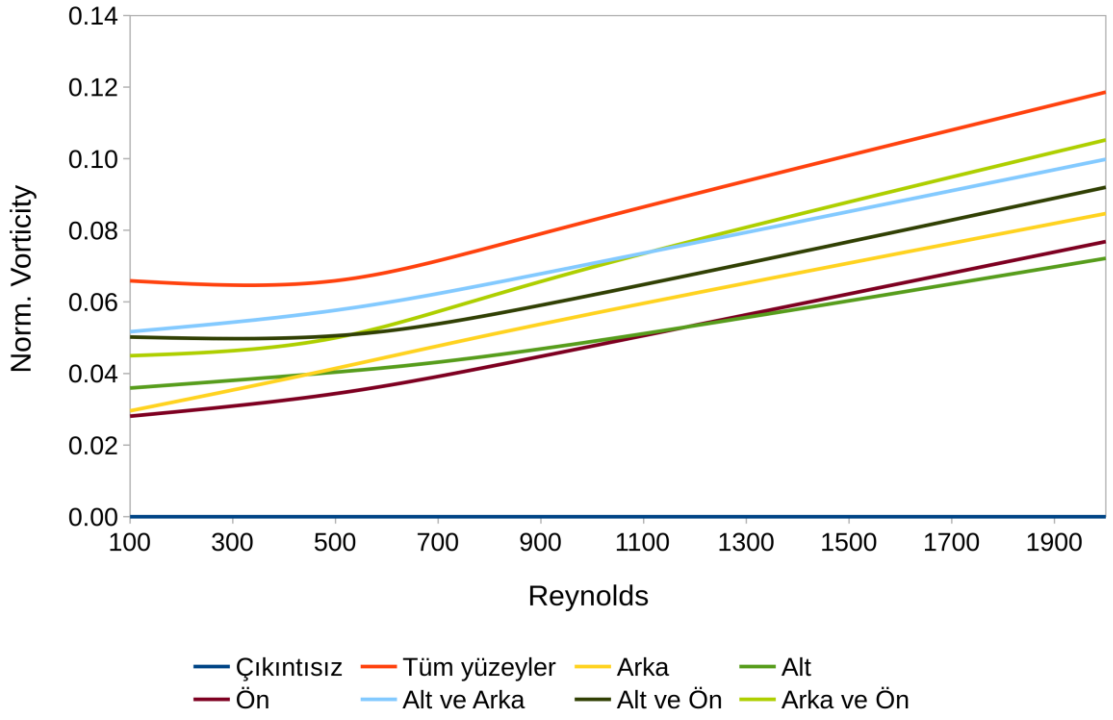


Şekil 5.8 Normalize edilmiş duvar kayma gerilmeleri

Çıkıntı eklenmiş tüm hücre tiplerinde $Re = 500$ değerine kadar Norm.WSS değerleri azalma gösterirken, bu değerden daha yüksek olan Reynolds değerlerinde WSS değerleri sabite yakın eğilim göstermektedir. $Re=500$ değerinden itibaren Norm.WSS'nin sabite yakın davranması hücre içerisindeki ana girdabın yaklaşık olarak gelişmiş olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.8'deki grafikte hem bir yüzeye hem de birden fazla yüzeye çıkıntı eklenmesi durumunda tüm yüzey ortalamaları alınarak normalize edilmiş girdaplılık (Norm.Vorticity) değerleri görülmektedir.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 birlikte değerlendirilirse, normalize edilmiş WSS değerlerinin $Re = 500$ değerine kadar düştüğü, girdaplılık değerinin ise $Re=500$ 'e kadar sabit kaldığı görülür. $Re=500$ 'den sonra Norm.WSS değerlerinin sabit değerlere yaklaşmasına karşın girdaplılık değerlerinin belirgin artış gösterdiği açıktır. Bu durum $Re = 500$ civarında, hücre içinde ana girdabın tam gelişmiş duruma doğru yaklaştığı ve Reynolds sayısının artan değerlerinde tam olarak geliştiği ve şiddetinin arttığını göstermektedir.

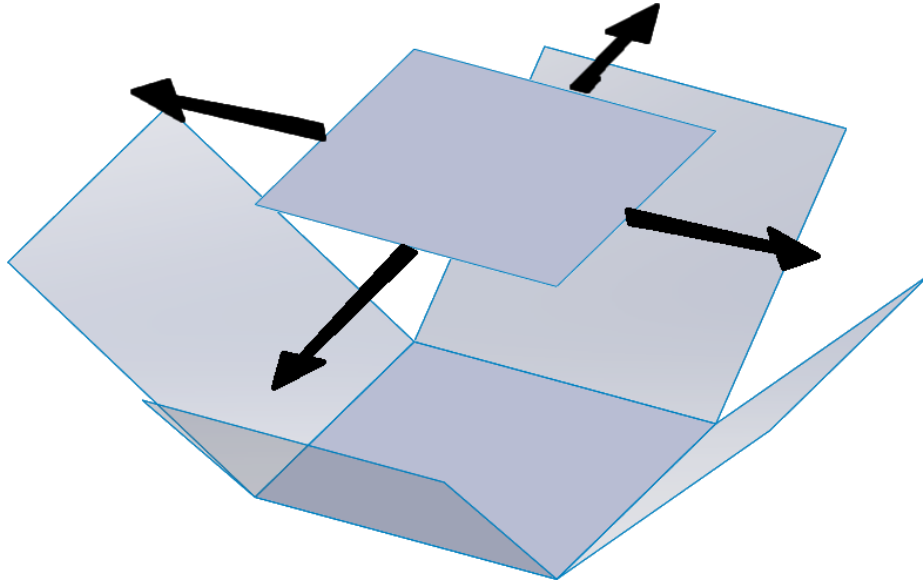


Şekil 5.9 Normalize edilmiş girdaplılık değerleri

Şekil 5.8 farklı yüzeylerine çıkıntı eklenmesi durumunda hücre içindeki akımın girdaplılık değerinin $Re=500$ 'e kadar sabit kalıp, artan Reynolds sayılarında belirgin değişim gösterdiğini açıklamakla beraber, girdaplılık değerinin çıkıntı eklenen yüzeyin/yüzeylerin değişmesi durumunda farklı artış eğilimi gösterdiğini de açıklamaktadır.

HÜCRECİKLİ LEVHA ÜZERİNDEKİ AKIŞ

Bölüm 5’de, hücrenin farklı yüzeylerine kare kesitli çıkıntılar ekleyerek hücrecikli hücre oluşturulmuş ve çıkıntısız hücre içindeki akışın hücre duvarlarına eklenen çıkıntılardan ne şekilde etkilendiği incelenmiştir. İncelemeye konu olan hücrecikli hücrenin üst yüzeyi, tabanı ve yan yüzeylerinin Şekil 6.1’de gösterildiği gibi açıldığı ve sonsuza uzadığı düşünülürse hücre içi akış iki düzlem arasındaki akışa benzetilerek modellenebilir.



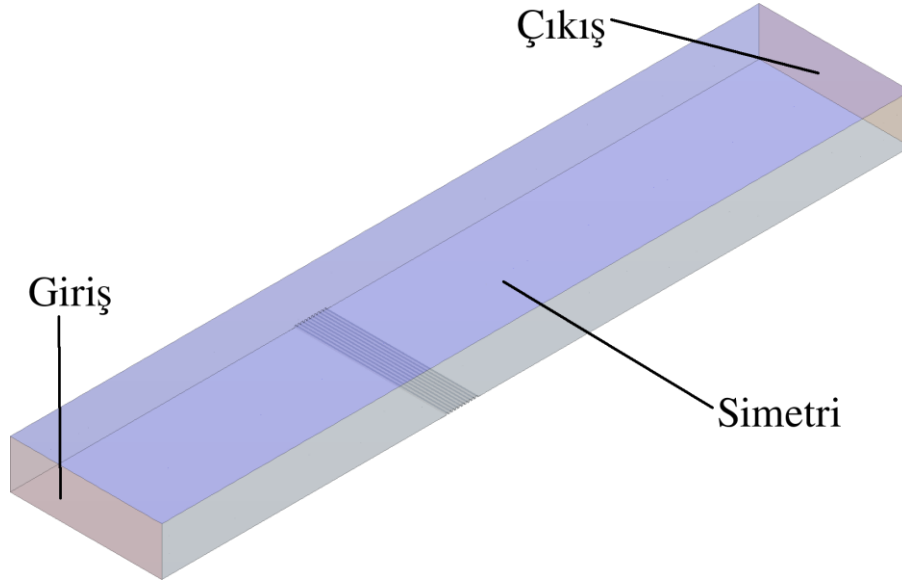
Şekil 6.1 Hücre yüzey açılımı görünümü

Hücrenin üst yüzeyi ve tabanın da yeteri kadar uzaklaştırılmasıyla kanal içindeki herhangi bir akışa yaklaşılabılır. Bu düşünceden hareketle bu bölümde farklı biçim ve boyutlara sahip çıkıntılar farklı aralıklarda herhangi bir düzlem üzerine eklenerek kanal

yüzeyi geometrileri oluşturulmuş ve bu kanallar içerisindeki akışın hidrodinamik davranışı incelenmiştir.

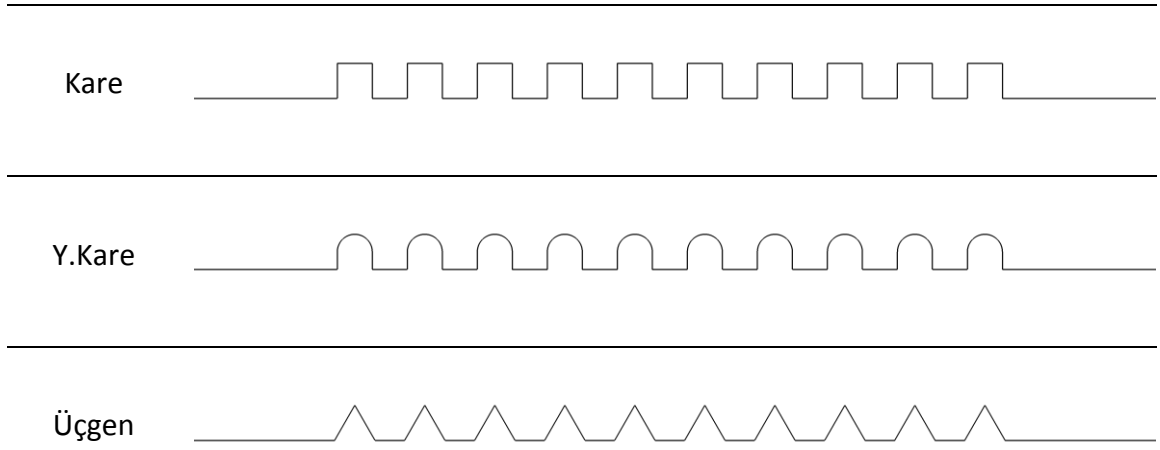
6.1 Çözüm Geometrisi

Şekil 6.2'de çıkıntılar eklenmiş yüzeyin ön ve arka bölümüne çıkıntısız yüzeyler eklenerek oluşturulmuş olan kanal geometrisinin görünümü verilmiştir.



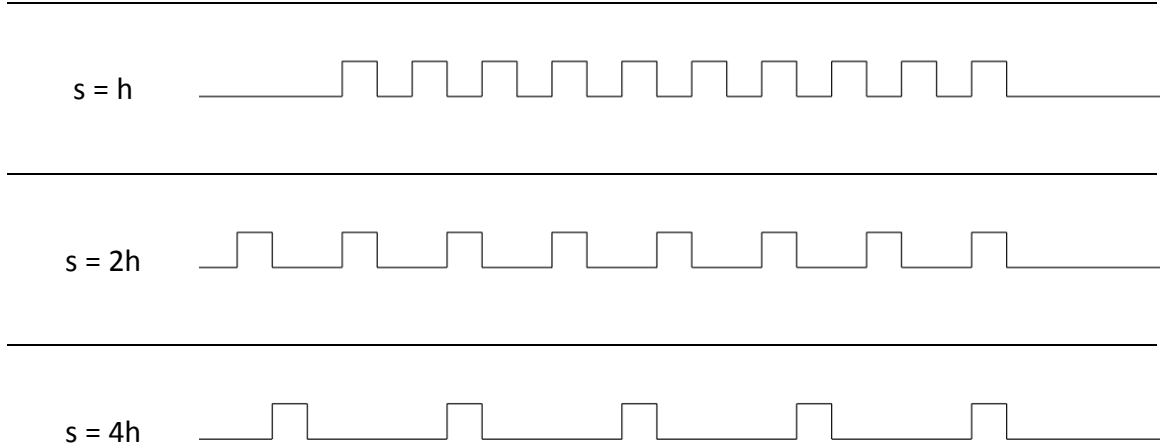
Şekil 6.2 Çözüm hacmi olarak kanal geometrisinin görünümü

Çözüm için kullanılan kanal $(0.45 \times 0.15 \times 2.3) \text{ m}^3$ 'tür. Çalışmada çıkıntıların kanal içi akıştaki hidrodinamik yapıya etkisi üç temel kategoride incelenmiştir. Bu kategorilerin ilki çıkıntıların kesit geometrileri, ikincisi çıkıntılar arası aralık mesafeleri ve son olarak çıkıntıların yüksekliklerinin etkisi olarak sıralanmıştır. Kanal boyları tüm modeller için eşittir. Kanalın alt yüzeyine eklenmiş olan çıkıntılı bölgelerin kanal girişi ve çıkışı yönünde çıkıntısız yüzeyler oluşturulmuştur. Öncelikle, Şekil 6.3'de gösterildiği gibi üç farklı biçim; kare, yuvarlatılmış kare ve üçgen olmak üzere çıkıntılar kanalın alt yüzeyine eklenmiştir.



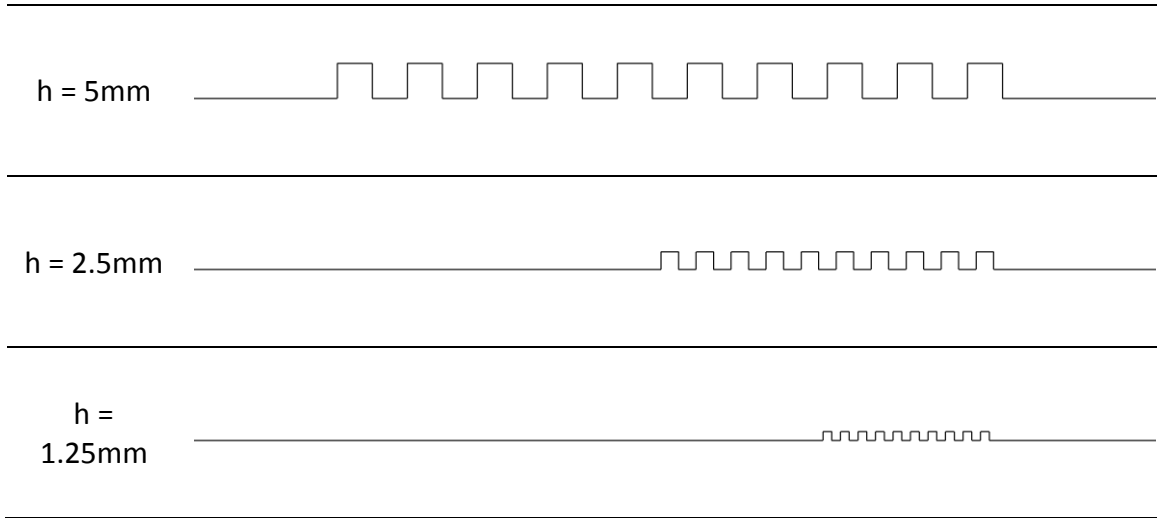
Şekil 6.3 Düz levha üzerine eklenen kare, yuvarlatılmış kare ve üçgen kesitli çıkıntılar

İkinci aşamada kare kesitli çıkıntılar kullanılmış, geometrik oranı (h/a) (yükseklik: h , genişlik: a) sabit ve 1 olarak seçilmiştir. Aralık değeri için $s = h$, $2h$ ve $4h$ olacak şekilde değiştirilmiş ve aralık değerinin akış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Seçilen aralık değerlerine göre çıkıntı yerleşimleri Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.4 Kare kesitli 5mm yükseklikli çıkıntıların farklı çıkıntı aralıklı durumları

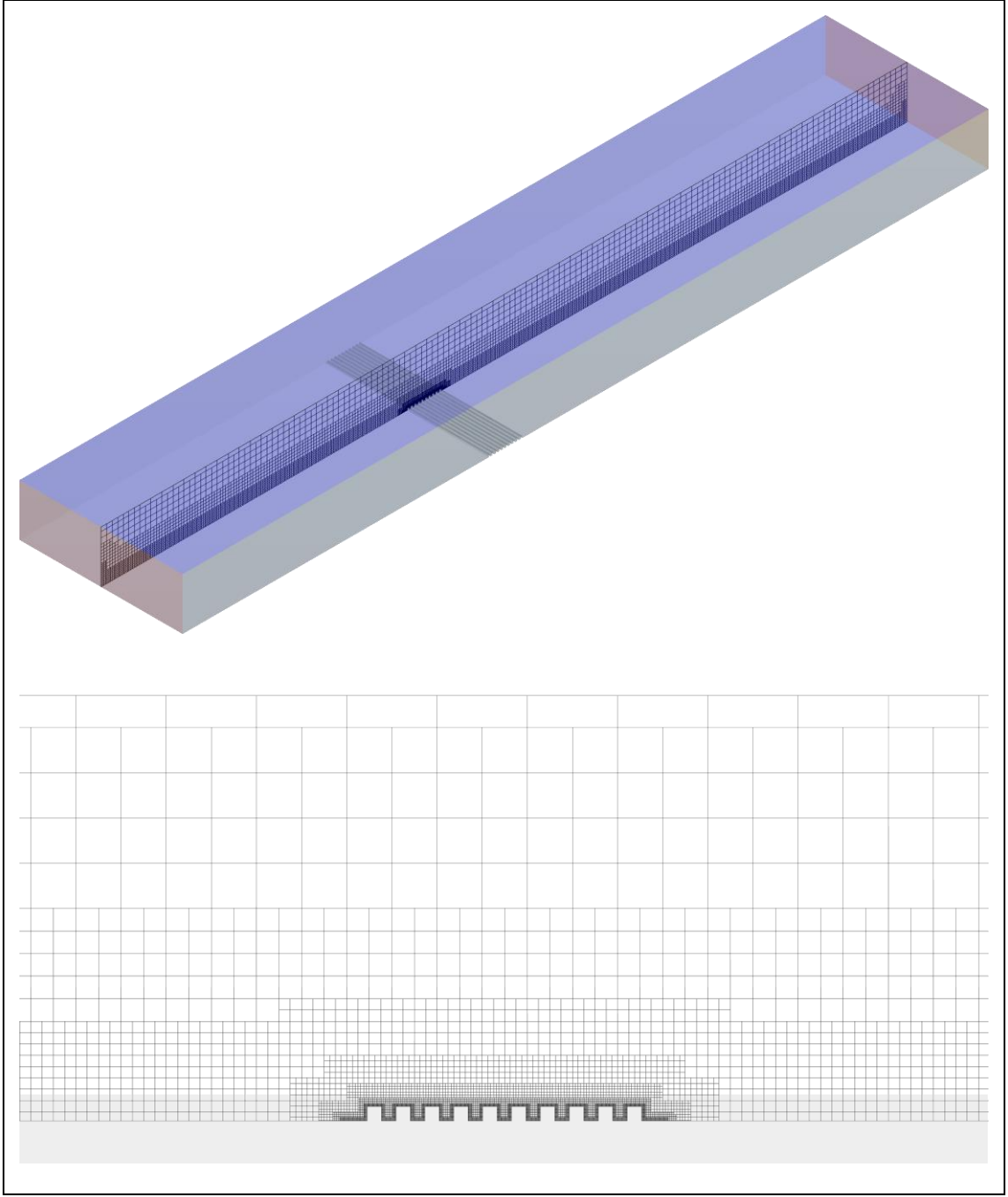
Son olarak Şekil 6.5’te verilmiş olduğu gibi çıkıntıların kanal yüksekliğine göre oranı değiştirilerek, çıkıntı yüksekliklerinin akışa etkisi incelenmiştir. Bunun için $h = 5, 2.5, 1.25$ mm olmak üzere üç farklı çıkıntı yüksekliği kullanılmıştır. Farklı kombinasyonlar yapılarak çıkıntı boyutları ve yerleştirilmelerinin tekli veya çoklu olarak akım üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 6.5 Kare kesitli h (yükseklik) aralıklı farklı yüksekliklerde çıkıntı durumları

6.2 Çözüm Ağı

Çalışmada kullanılan çözüm ağı Şekil 6.6'te gösterilmiştir. Çıkıntı bölgesine çözüm hacminin diğer bölgelerine göre daha hassas çözüm ağı oluşturulduğu Şekil 6.6'dan görülmektedir. Bölüm 4 ve 5'te hücre içi analizin için oluşturulmuş olan çözüm ağı yapısı bu model için de kullanılmıştır. Hürecik içerisindeki eleman adetleri Bölüm 5'teki hürecikler ile aynıdır. Bu şartlarda çözüm ağında 11456000 eleman kullanılmıştır.



Şekil 6.6 Çözümde kullanılan ağ yapısı

6.3 Sınır Şartları

Çözüm hacminin çıkıntılar eklenmiş yüzeyine yakın olan dikey yüzeye giriş sınır şartı, giriş yüzeyinin karşıt yüzeyine çıkış sınır şartı, kanal geometrisinin üst yüzeyine simetri sınır şartı ve kalan diğer tüm yüzeylerine durma koşulu olan duvar sınır şartı tanımlanmıştır. Girişteki hız değeri için düz bir kanalda üniform hız girişi şartıyla akış

problemi çözülerek elde edilen tam gelişmiş hız profili kullanılmıştır. Kanal için kullanılan Reynolds sayısı bağıntısı aşağıdaki gibidir.

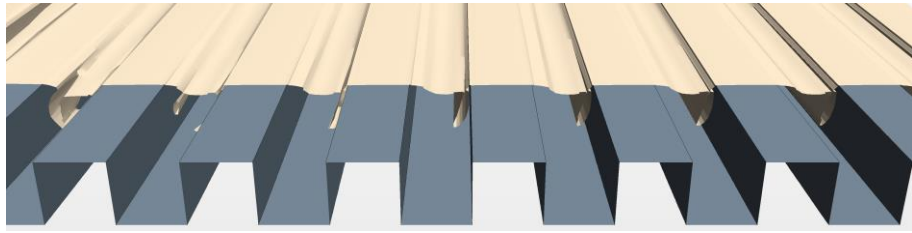
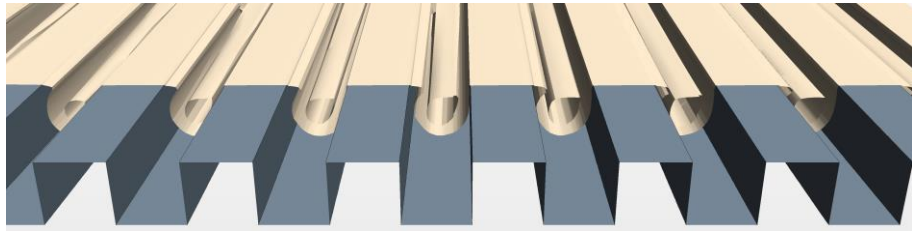
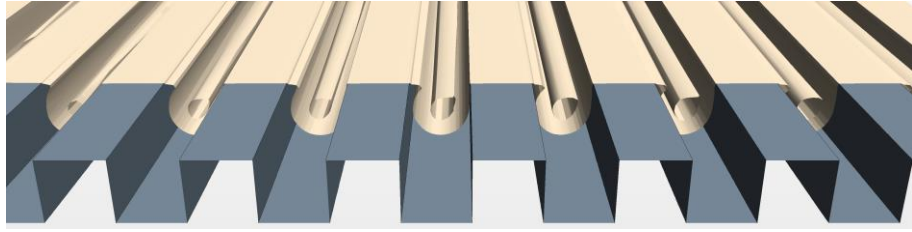
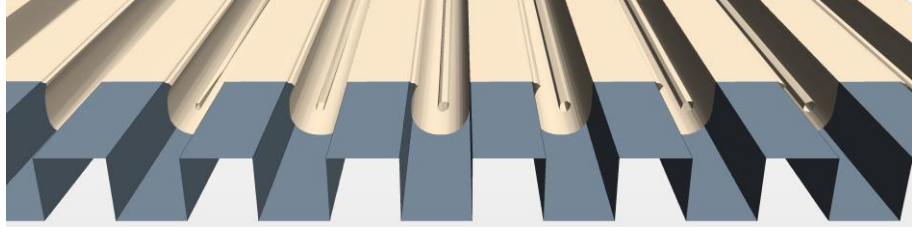
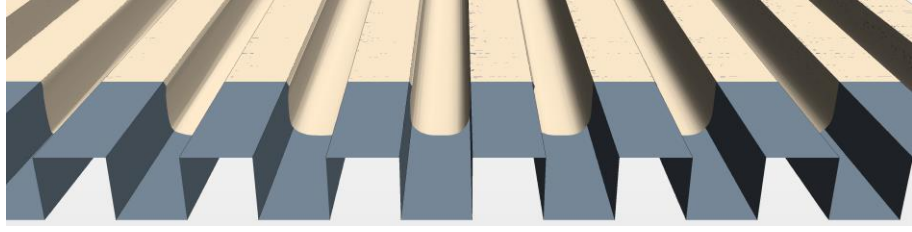
$$Re_{kanal} = \frac{\rho V_{giriş} Dh_{kanal}}{\mu} ; V_{giriş} \text{ kanala giriş hızı [m/s], } Dh_{kanal} \text{ kanal hidrolik çapı [m]}$$

Re = 10000, 20000, 30000, 50000, 70000 ve 100000 olmak üzere altı farklı Reynolds değerinde hız girişi tanımlanmıştır. Çıkış yüzeyinde $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ olarak kabul edilmiştir.

6.4 Sonuçlar

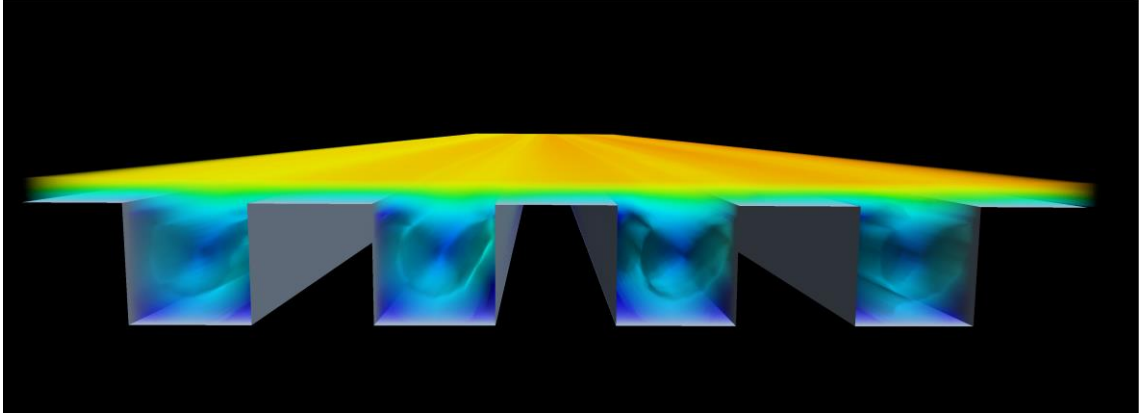
Sayısal çözümler sonucunda elde edilen hız, bölgesel basınç ve sürüklenme kuvvet değerleri incelenerek çıkıntı biçim ve yerleştirmelerinin kanal içindeki akışa hidrodinamik açıdan etkileri ortaya çıkarılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda arka arkaya dizilmiş çıkıntıların çıkıntı aralarındaki boşluklarda kayda değer oranda girdap ve girdapçıklar oluşturması en belirgin etki olarak saptanmıştır.

Şekil 6.7'de Re = 100000'de akışa dik yönde, üç boyutlu çıkıntılar arasındaki hücreciklerde oluşan girdapların farklı hız değerlerinde eş yüzey (iso-surface) görünimleri verilmiştir. Hız değerleri giriş hızının ($V_{giriş}$) %0.15, %0.45, %0.75, %0.90 ve %1.20 'sidir.



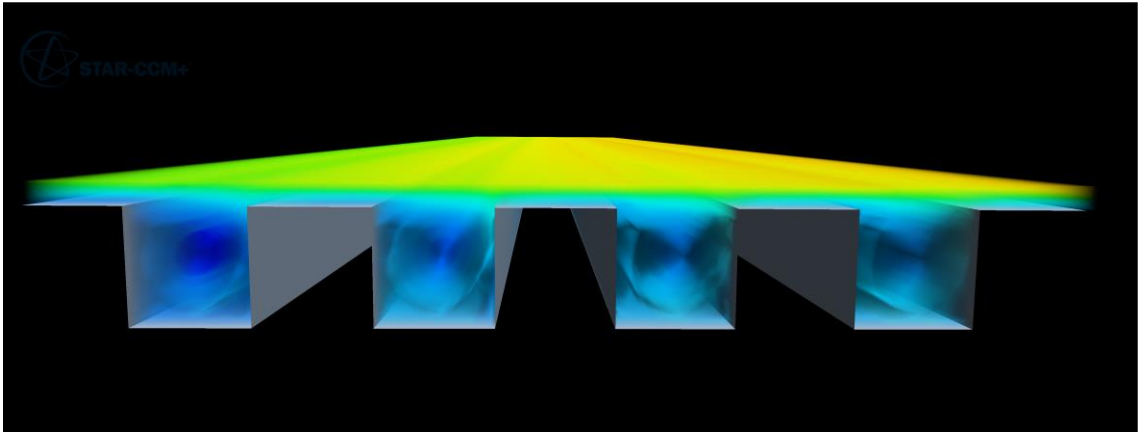
Şekil 6.7 Kare kesitli, $s = h$, $h = 5\text{mm}$ için sırasıyla $0.015 \times V_{\text{giriş}}$, $0.045 \times V_{\text{giriş}}$, $0.075 \times V_{\text{giriş}}$, $0.090 \times V_{\text{giriş}}$ ve $0.120 \times V_{\text{giriş}}$ hızları için eş yüzey görünüşleri

Şekil 6.8’de Şekil 6.7’de eş yüzey görünüşleri verilmiş olan akımın hücrecikler içindeki girdap oluşumlarının hacimsel görünümü verilmiştir.



Şekil 6.8 Hücreciklerde oluşan girdapların hız alanı (resampled volume)

Girdaplı bölgeler yüzey üzerinde çıkıntı üzerine göre farklı basınç değerlerine sahip bölgeler oluşturup sınır tabaka başta olmak üzere yüzey üzerindeki hidrodinamik özellikleri değiştirmektedir. Şekilden de görüleceği üzere hücre içi bölgelerde hızlar çıkıntı üzerine göre daha düşüktürler. Şekil 6.9’da görüldüğü gibi hücre içerisinde, ana akıma göre daha düşük basınçta bölgeleri ifade etmektedir. Böylelikle hücrecikler içinde stabil girdaplar oluşur. Ana akımdan hücrecikler içine doğru sınırlı miktarda kütle girişi gerçekleşir.

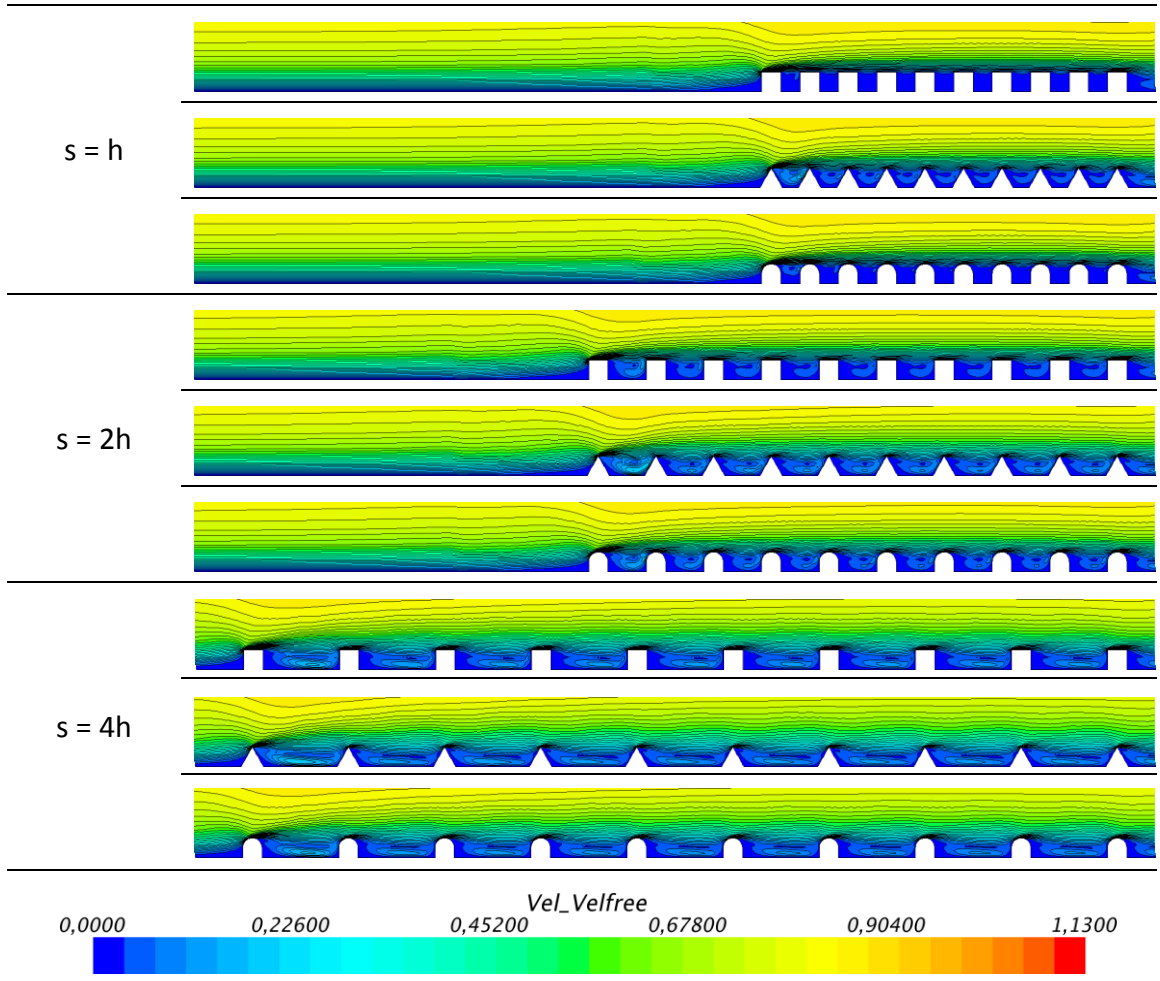


Şekil 6.9 Hücreciklerde oluşan girdapların basınç alanı görünümüleri

6.4.1 Hız Alanları

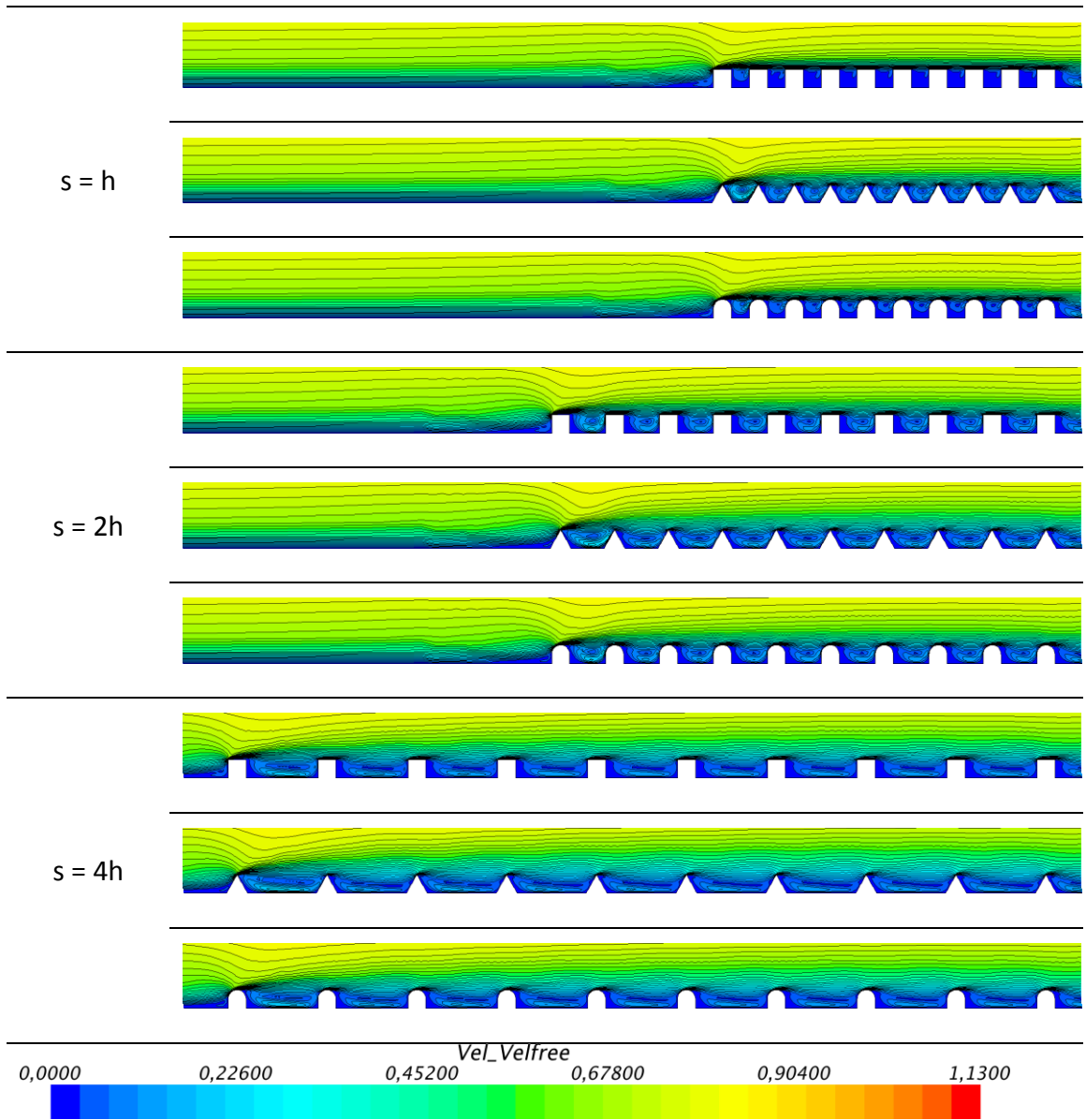
Hesaplama hacmi içerisindeki hız alanları, hacmin orta kesitinde, en geniş çıkıntı aralıklarının($s = 4h$) tamamını kapsayacak şekilde sınırlı bir bölgede görsellenerek verilmiştir. Sonuçlar her bir Reynolds sayısı için, farklı çıkıntı biçim, boyut ve aralıklarına bağlı olarak verilmiştir. Hız değerleri $V_{giriş}$ ile normalize edilmiştir.

Şekil 6.10'de $Re=10000$ 'de üç farklı kesit geometrisi ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir. Çıkıntılı kanal içi akımın sayısal analizlerinde kullanılan Reynolds sayılarının en düşük değeri $Re=10000$ dir. Bu durumda bu analizdeki giriş hızı en düşük hızdır. Bu hız değerinde $s = h$ durumunda hücreciklerde girdap gelişiminin tam olarak gerçekleşmediği Şekil 6.10'da görülmektedir. $s = 2h$ durumunda girdap gelişimleri başlangıç seviyesinde ve $s = 4h$ durumunda girdap gelişimlerinin daha belirgin olduğu da görülmektedir. Ancak girdap merkezlerinin ana akıma yakın olması girdap şiddetlerinin düşük olduğunu göstermektedir.



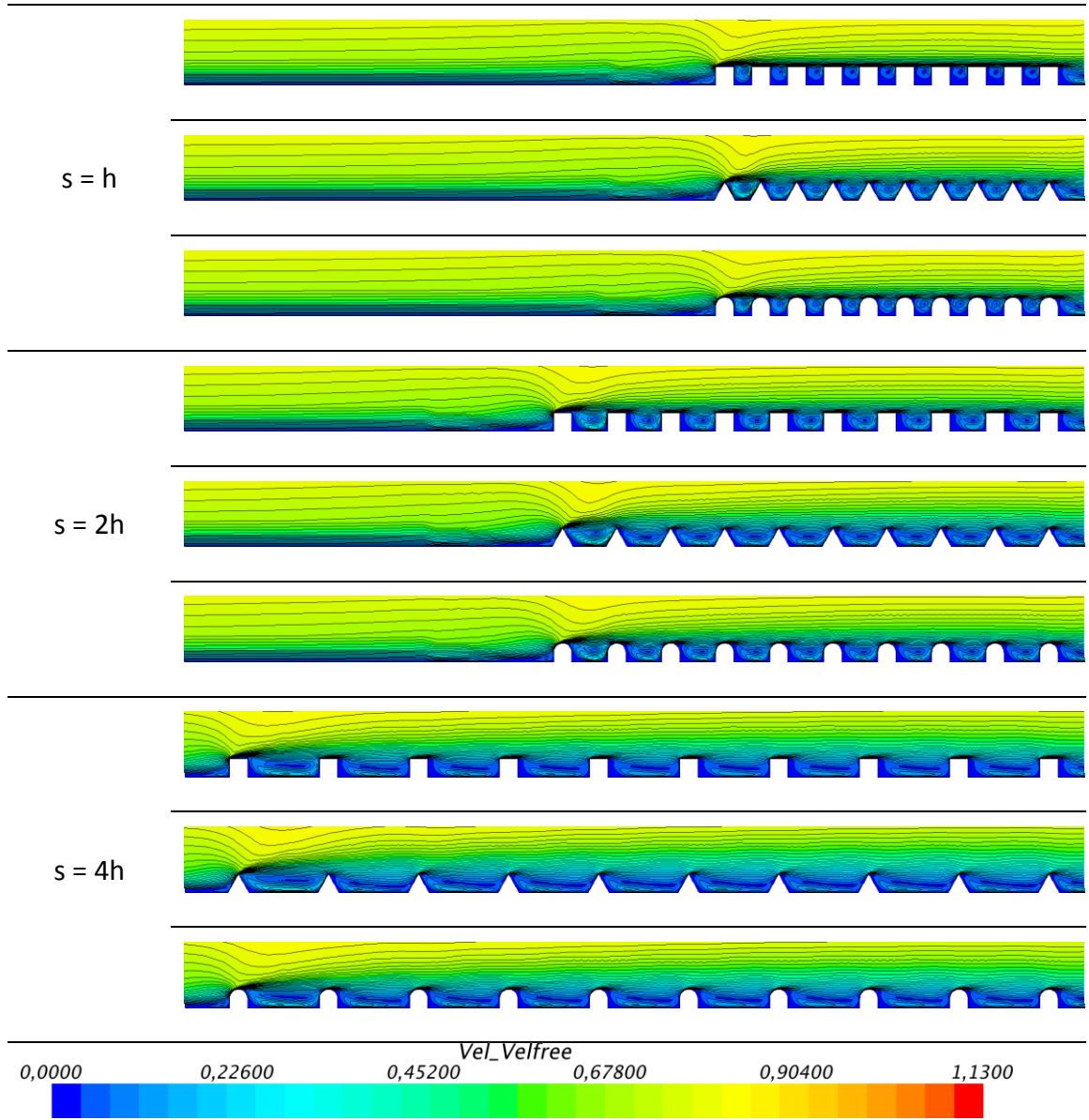
Şekil 6.10 $Re=10000$ üç farklı kesit geometrisinde ve üç farklı aralık değerinde hız dağılımları

Şekil 6.11'de $Re=20000$ 'de üç farklı kesit geometrisi ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir. Aralık değeri $s = h$ durumunda girdap gelişiminin tam olarak sağlanamadığı ancak girdap oluşum izlerinin ortaya çıktığı görülebilmektedir. Çıkıntı biçiminin üçgen olması durumunda, akımın üçgen kesitin ayrıtları üzerinden çok daha kolay şekilde hücre içine girmesi ve akımın rahat yönlendirilmesi sebebiyle diğer biçimlere göre çok daha gelişmiş bir girdap izi ortaya çıkmıştır. $s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında girdap oluşumlarında daha gelişmiş bir yapı karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6.11 $Re=20000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları

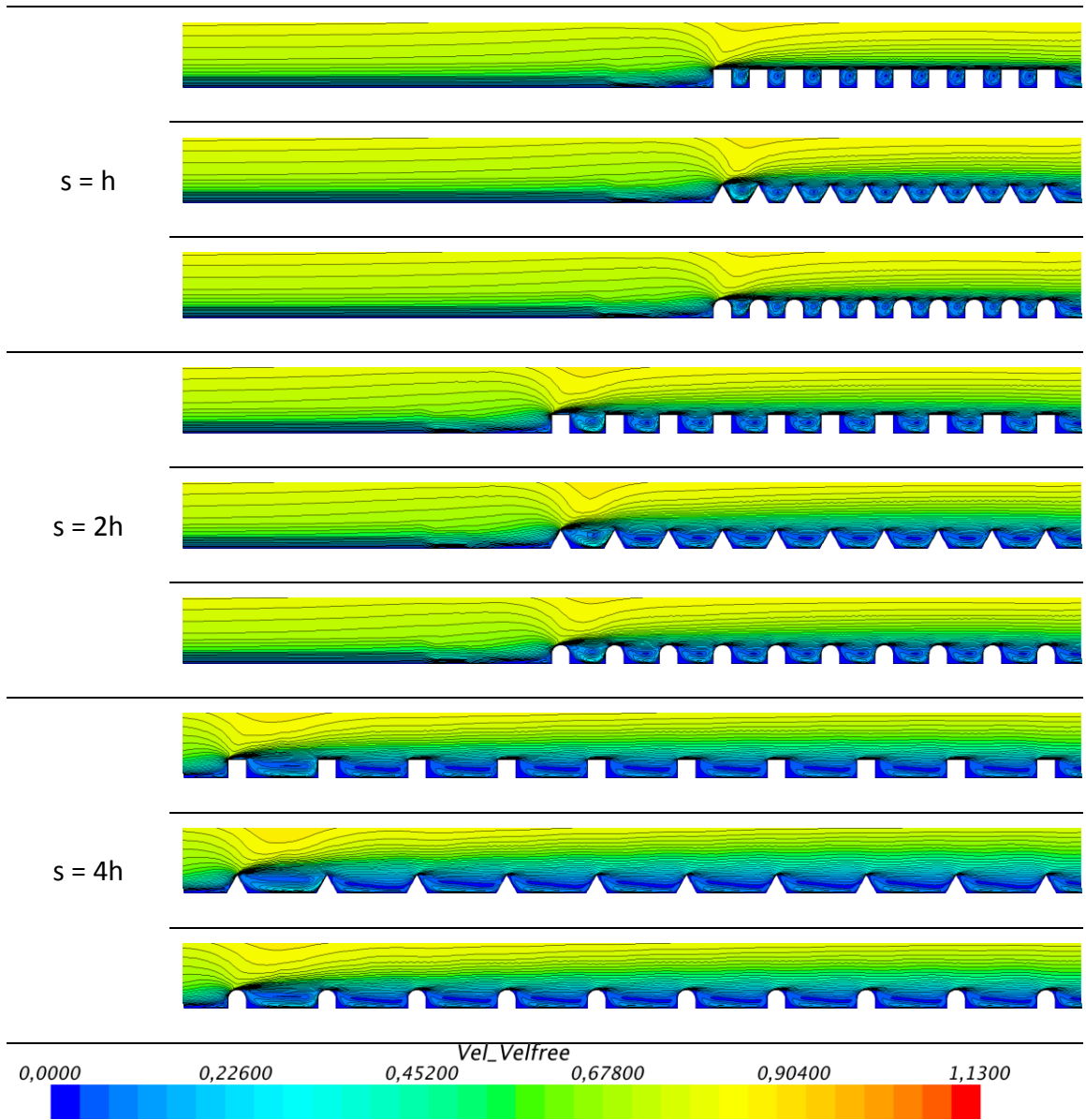
Şekil 6.12'de $Re = 30000$ 'de üç farklı kesit geometrisi ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir. Aralık değerini $s = h$ durumunda hüreciklerde girdap oluşumlarının başladığı ancak girdabın tüm hücreyi dolduramadığı görülmüştür. Üçgen biçimli çıkıntılarda diğer biçimlere göre girdap gelişiminin daha fazla olduğu fakat kübik bir bölge olmayışından dolayı girdabın dairesel bir formda hareket edemediği görülmüştür.



Şekil 6.12 $Re = 30000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları

$s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında girdabın çıkıntılarının hemen arkasına sıkıştığı ve asimetrikleştigi görülmüştür.

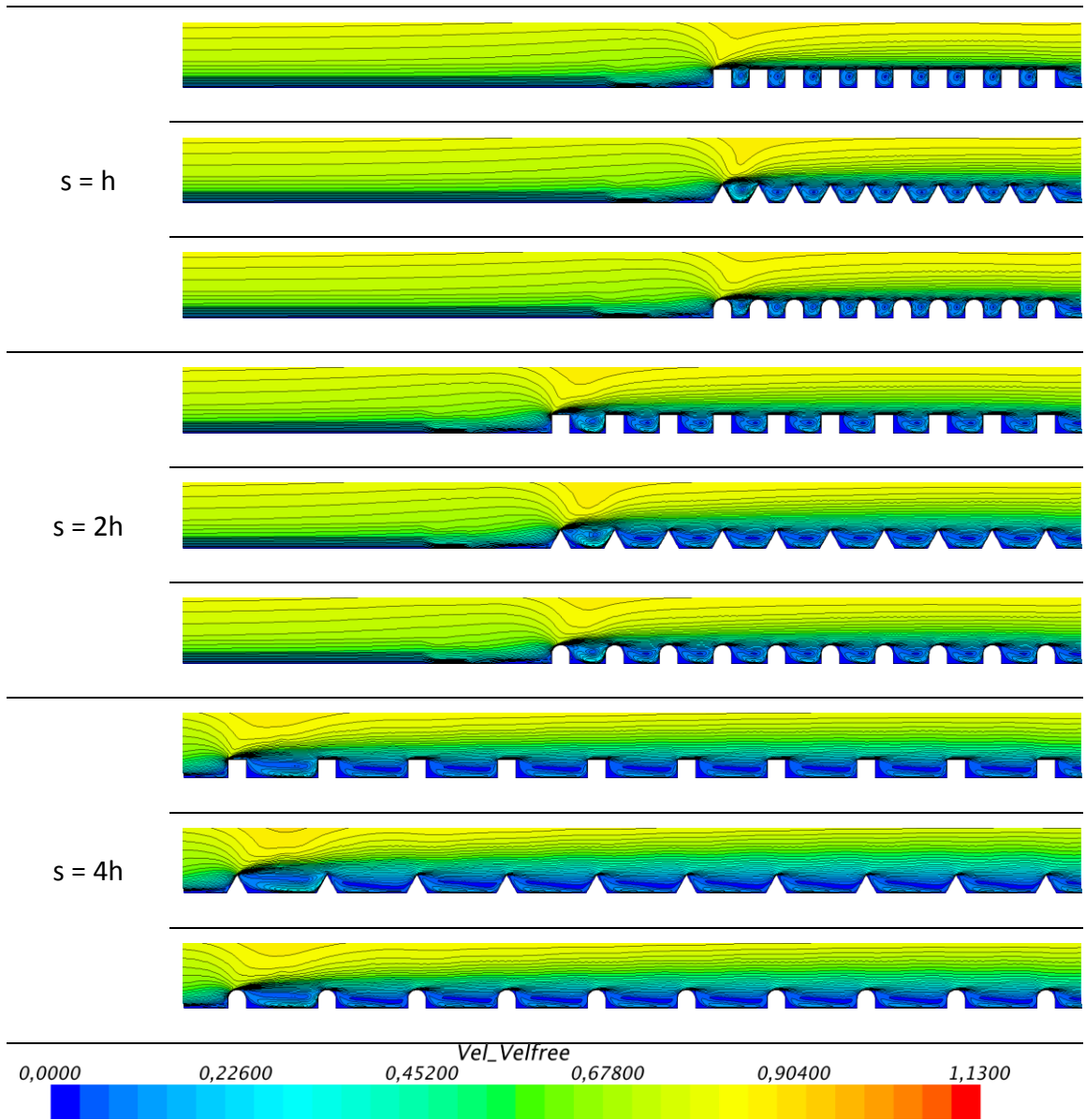
Şekil 6.13'de $Re = 50000$ 'de üç farklı kesit geometrisi ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir. Hürecikler içinde girdapların $s = h$ aralık değerinde ilk kez tam gelişmiş izleri görülmeye başlanmıştır.



Şekil 6.13 $Re = 50000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları

Girdaplar dairesel formda ve hücre içini tam olarak doldurmuştur. Girdaplar $s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında çıkıntı arkası bölgeye sıkışmaya devam etmiştir.

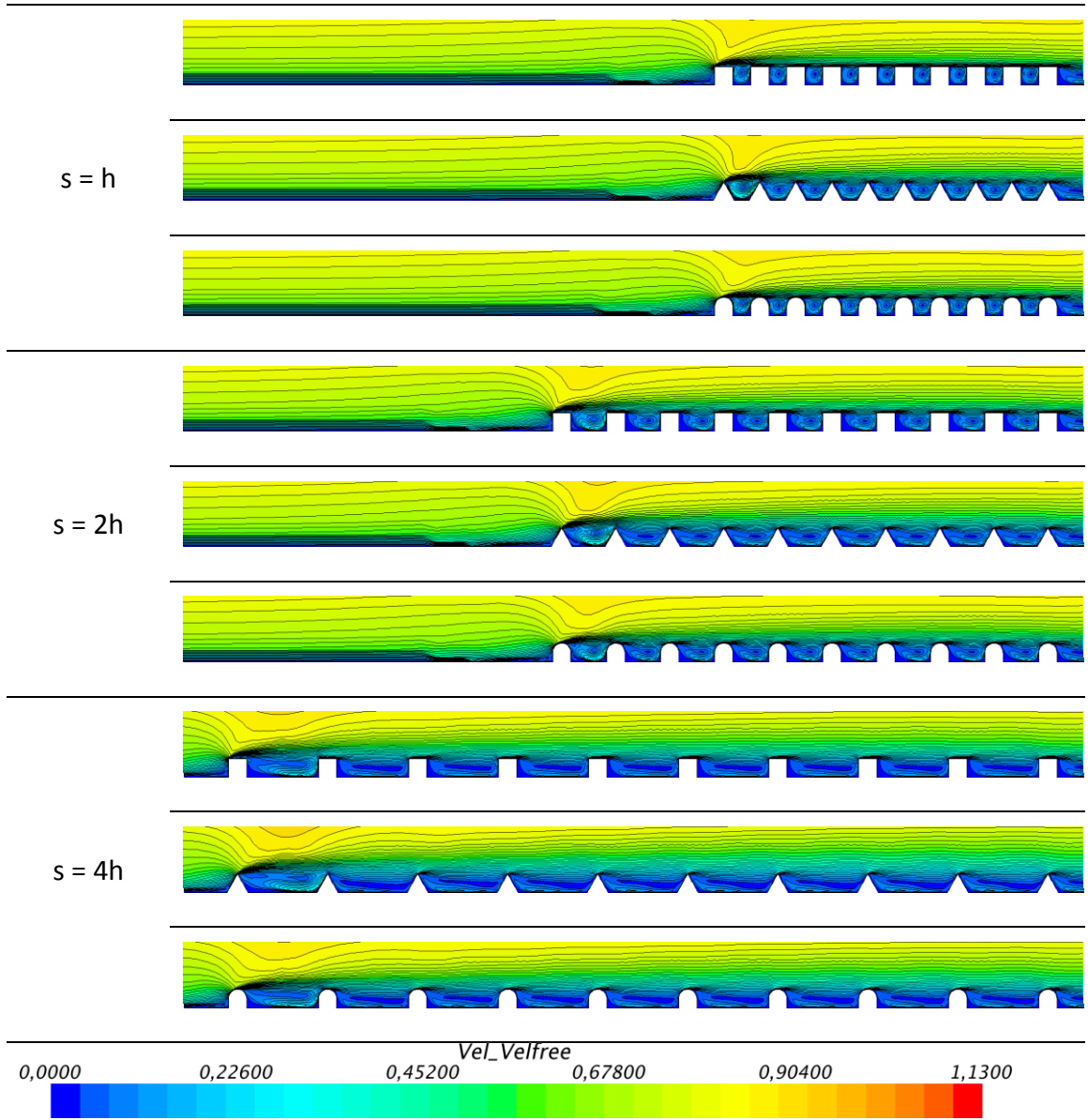
Şekil 6.14'de $Re = 70000$ 'de üç farklı kesit geometrisi ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir.



Şekil 6.14 $Re = 70000$ 'de hızında üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları

$Re=70000$ 'de $s = h$ durumunda girdapların şiddetinin arttığı görülmüştür. $s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında çıkıntı arkasına sıkışan girdapların çıkıntı arkasından uzaklaşarak hücre içini doldurmaya başladığı görülmüştür.

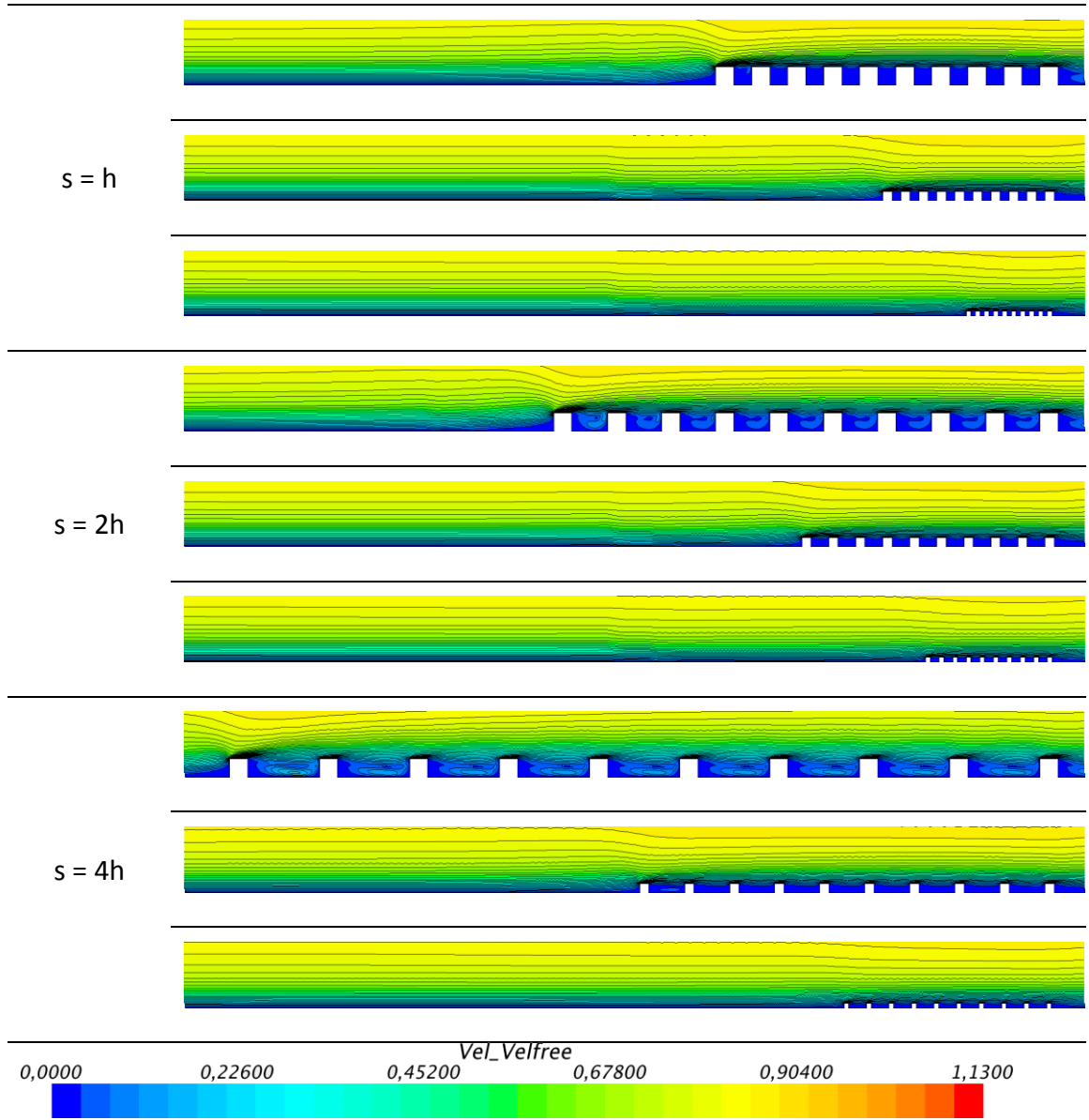
Şekil 6.15'de $Re = 100000$ 'de üç farklı kesit geometrisi ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir.



Şekil 6.15 $Re = 100000$ 'de üç farklı kesit geometrisinde üç farklı aralık değerinde hız dağılımları

$s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında girdabın hücreciğin ana akım yönündeki çıkışına doğru ilerlediği görülmüştür. Ayrıca üçgen biçimli çıkıntılarda girdabın şiddetinin azaldığı ve asimetric bir yapı aldığı görülmektedir. Tüm hız dağılım şekilleri birlikte incelendiğinde ise akımın ilk çıkıntıya çarparak yükseldiği, farklı hızlarda ilk ve ikinci hücrenin içerisinde oluşan girdaplı yapının bu hücreleri takip eden diğer hücrelerdeki girdaplardan farklılık gösterdiği görülür.

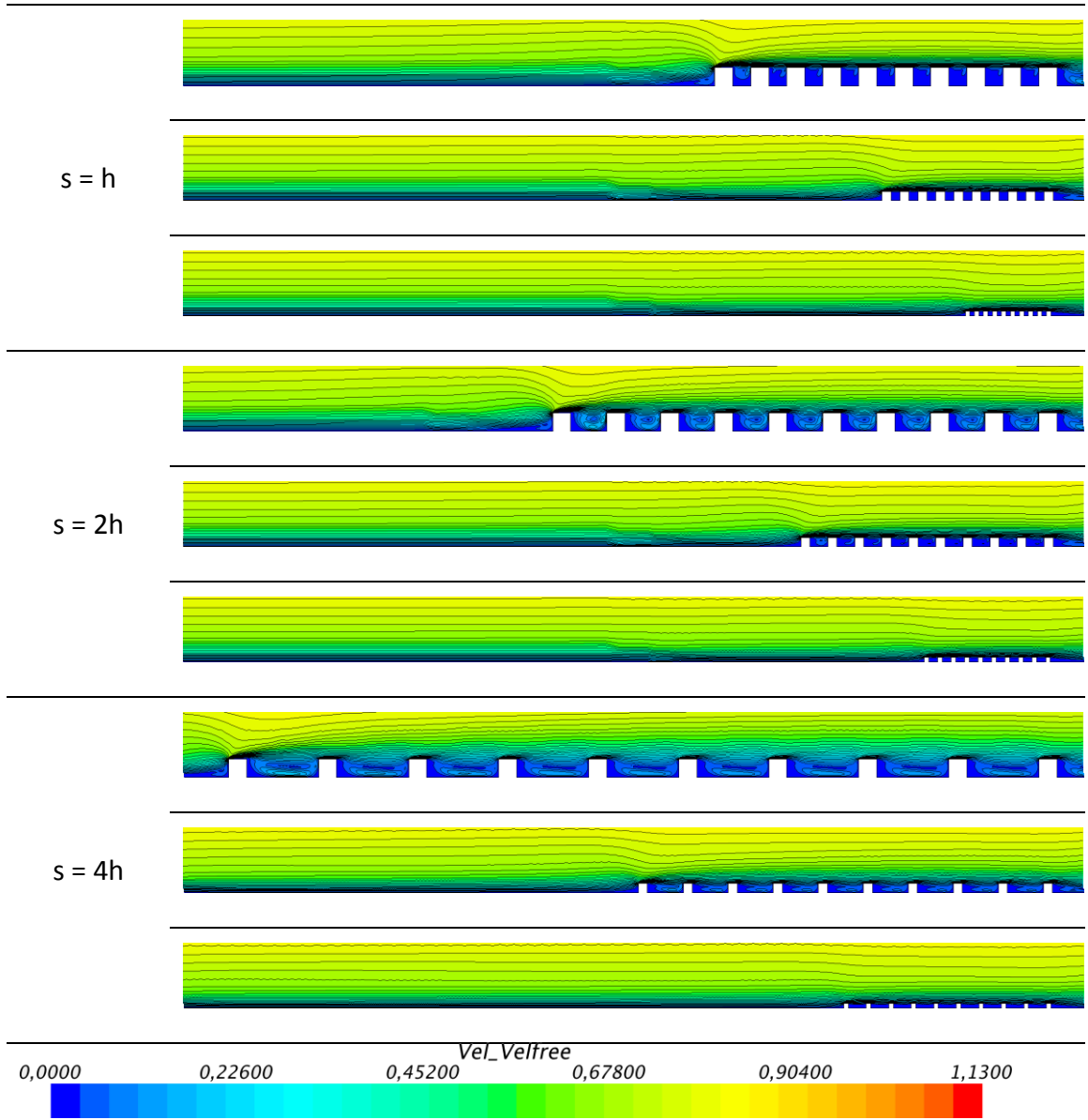
Şekil 6.16'da $Re = 10000$ 'de üç farklı çıkıntı yüksekliği ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir.



Şekil 6.16 $Re = 10000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları

$s = h$ durumunda her üç çıkıntı yüksekliği için hücre içerisinde herhangi bir girdap oluşumuna rastlanmamıştır. $s = 2h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde girdap oluşumu için başlangıç izleri gözlenmiştir. Daha küçük çıkıntı yüksekliklerinde herhangi bir girdap oluşumuna rastlanmamıştır. $s = 4h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde düşük şiddette girdap oluşumuna rastlanmıştır. Bununla birlikte çıkıntı yüksekliğinin $h = 2.5mm$ olması durumunda girdap oluşumu için başlangıç izleri gözlenmiştir. En küçük çıkıntı yüksekliğinde herhangi bir girdap oluşumu gözlenmemiştir.

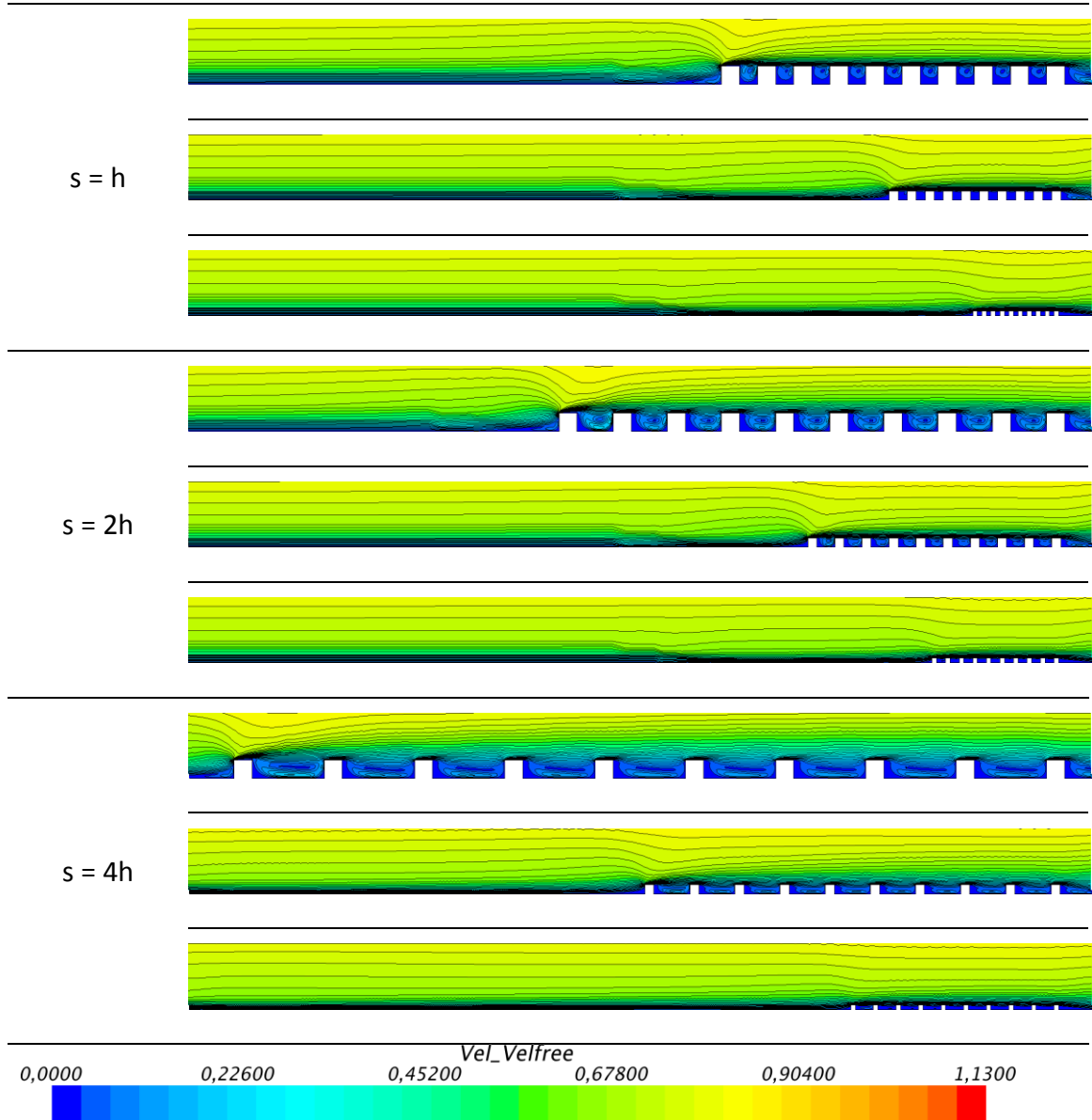
Şekil 6.17'de $Re = 20000$ 'de üç farklı çıkıntı yüksekliği ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir.



Şekil 6.17 $Re = 20000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları $s = h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde hücreciklerde girdap oluşumu için başlangıç izleri görülmeye başlamıştır. Daha küçük çıkıntı yüksekliklerinde herhangi bir girdap oluşumu gözlenmemiştir. $s = 2h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğine sahip modelde düşük şiddette girdap oluşumu gözlenmiş ancak hücreyi tam olarak dolduran bir girdaba rastlanmamıştır. Çıkıntı yüksekliğinin $h = 2.5\text{mm}$ olması durumunda girdap oluşumu için başlangıç izlerine rastlanmıştır. En küçük çıkıntı yüksekliği değerinde herhangi bir girdap oluşumu gözlenmemiştir. $s = 4h$ durumunda en büyük çıkıntı

yüksekliğine ve $h = 2.5\text{mm}$ durumunda düşük şiddette girdap oluşumlarına rastlanırken en küçük çıkıntı yüksekliğine sahip modelde herhangi bir girdap oluşumuna rastlanmamıştır.

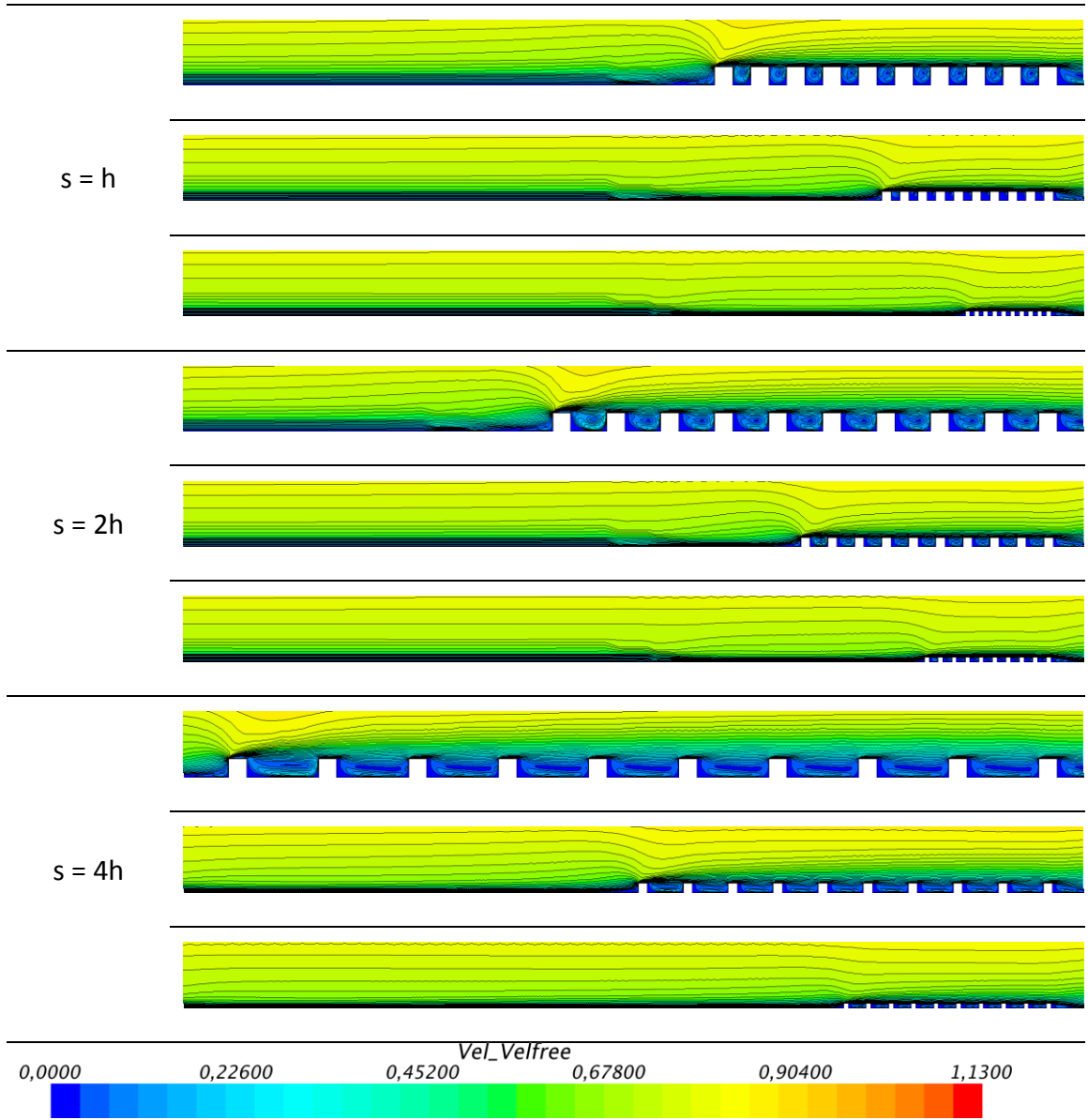
Şekil 6.18'de $Re = 30000$ 'de üç farklı çıkıntı yüksekliği ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir.



Şekil 6.18 $Re = 30000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları $s = h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde hücreciklerde düşük şiddette girdap oluşumu görülmüştür. Daha küçük çıkıntı yükseklik değerlerinde herhangi bir girdap oluşumuna rastlanmamıştır. $s = 2h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde girdap

şiddeti artmış ve gelişmeye başlamış bir girdaplı bölge görülmüştür. Çıkıntı yüksekliği $h = 2.5\text{mm}$ 'de şiddeti düşük girdap oluşumları gözlenirken, en küçük çıkıntı yüksekliğinde herhangi bir girdap oluşumu gözlenmemiştir. $s = 4h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde gelişmiş girdap oluşumları görülürken, $h=2.5\text{mm}$ 'de şiddeti düşük girdaplar ortaya çıkmıştır. En küçük çıkıntı yüksekliğinde ise girdap oluşumunun başlangıç izleri gözlenmiştir.

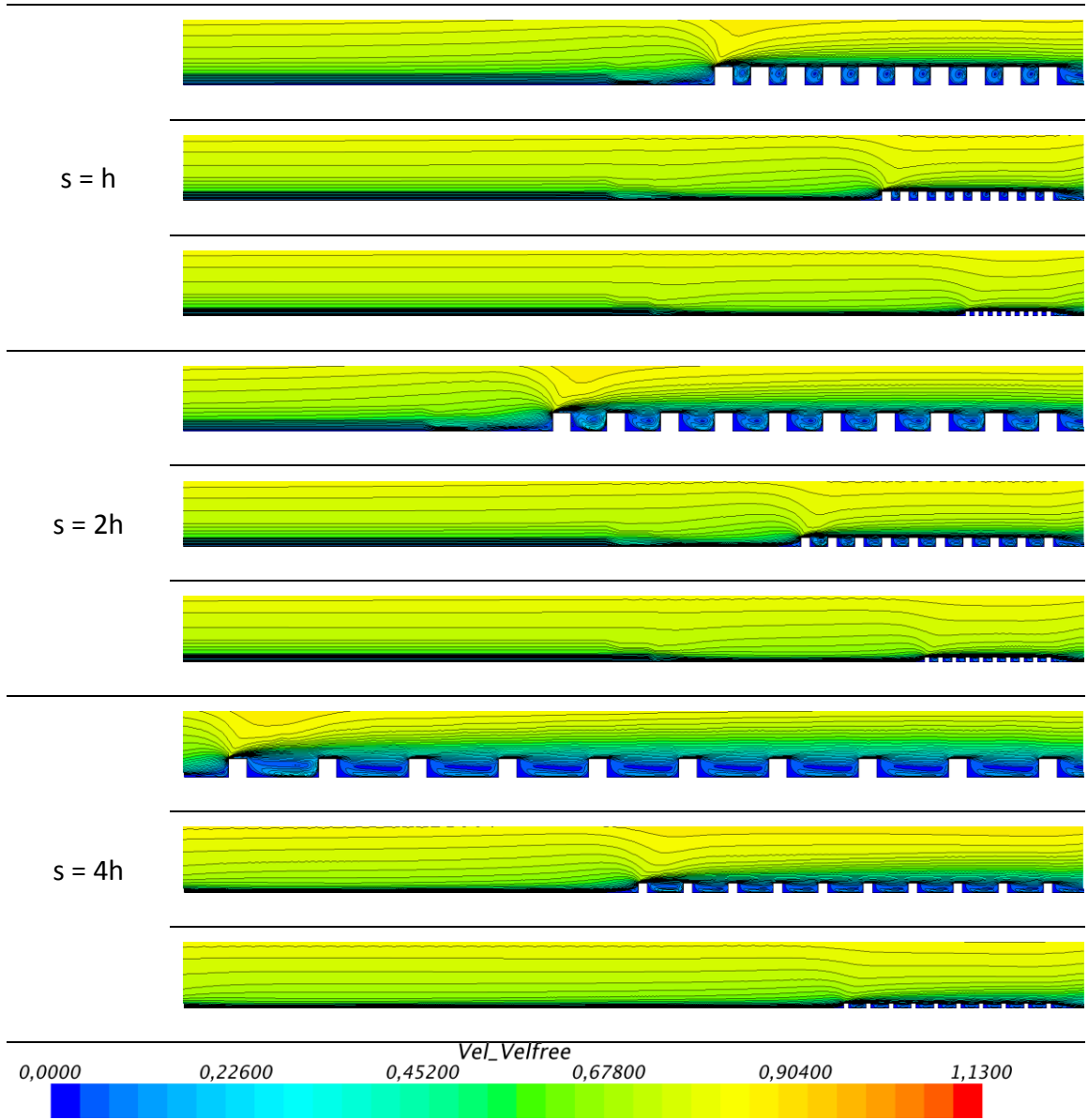
Şekil 6.19'de $Re = 50000$ 'de üç farklı çıkıntı yüksekliği ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir.



Şekil 6.19 $Re = 50000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları

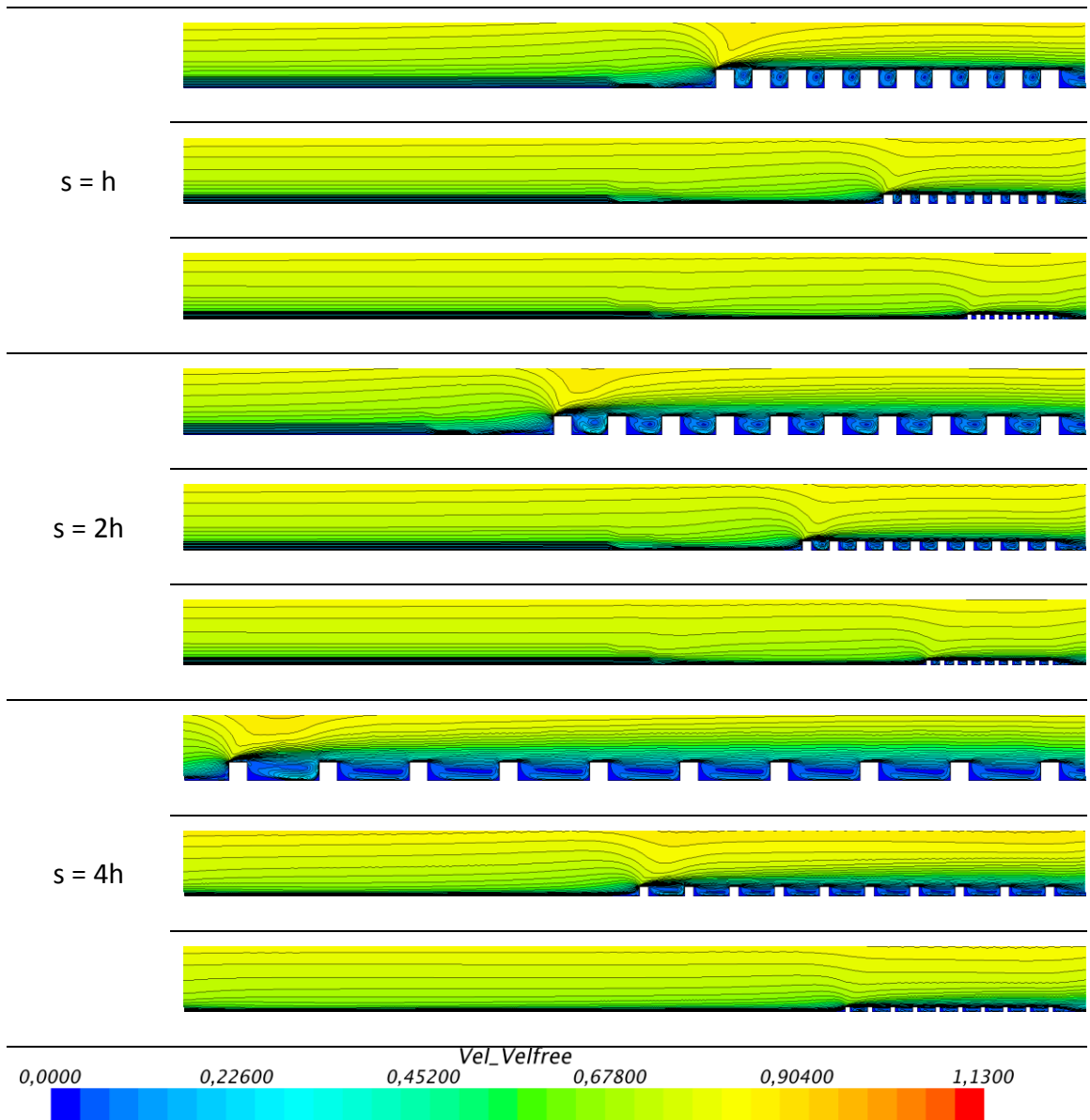
$s = h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde girdap şiddeti artmış, ancak tam gelişmiş ve hücreyi tümüyle kaplayacak bir girdap gözlenmemiştir. Çıkıntı yüksekliği $h = 2.5\text{mm}$ 'de girdap oluşumunun başlangıç izleri görülmüştür. En küçük çıkıntı yüksekliğinde ise herhangi bir girdap oluşumuna rastlanmamıştır. $s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında tam gelişmiş olmayan girdaplar görülmüştür. En küçük çıkıntı yüksekliğinde girdap oluşumunda başlangıç izleri gözlenmiştir.

Şekil 6.20'de $Re = 70000$ 'de üç farklı çıkıntı yüksekliği ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir.



Şekil 6.20 $Re = 70000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları

$s = h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliği ve $h=2.5\text{mm}$ 'de girdapların tam gelişmediği görülmüştür. En küçük çıkıntı yüksekliğinde herhangi bir girdap oluşumuna rastlanmamıştır. $s = 2h$ durumunda en büyük çıkıntı yüksekliğinde hücre içerisinde tam gelişmiş girdaplara rastlanmıştır. Çıkıntı yüksekliği $h = 2.5\text{mm}$ 'de tam gelişmemiş girdap oluşumu görülmüş ve en küçük çıkıntı yüksekliği durumunda girdap oluşumunun başlangıç izleri gözlenmiştir. $s = 4h$ durumunda girdap oluşumları görülmüş, girdapların en büyük çıkıntı yüksekliğinde tam gelişmiş, $h = 2.5\text{mm}$ 'de tam gelişmemiş oldukları görülmüştür. En küçük çıkıntı yüksekliğinde girdap oluşumu başlangıç izlerine rastlanmıştır.



Şekil 6.21 $Re = 100000$ 'de çıkıntı yüksekliği ve aralık değerlerine göre hız dağılımları

Şekil 6.21'de $Re = 100000$ 'de üç farklı çıkıntı yüksekliği ve üç farklı aralık için çıkıntılı bölgelerdeki hız dağılımları ve akım çizgileri verilmiştir. $s = h$, $2h$ ve $4h$ durumlarında en büyük çıkıntı yüksekliğinde gelişmiş girdaplara, çıkıntı yüksekliği $h = 2.5mm$ 'de tam gelişmemiş girdaplara rastlanmıştır. $s = h$ durumunda en küçük çıkıntı yüksekliğinde girdap oluşumu başlangıç izlerine rastlanmıştır. $s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında en küçük çıkıntı yüksekliğinde gelişmemiş girdap oluşumları gözlenmiştir.

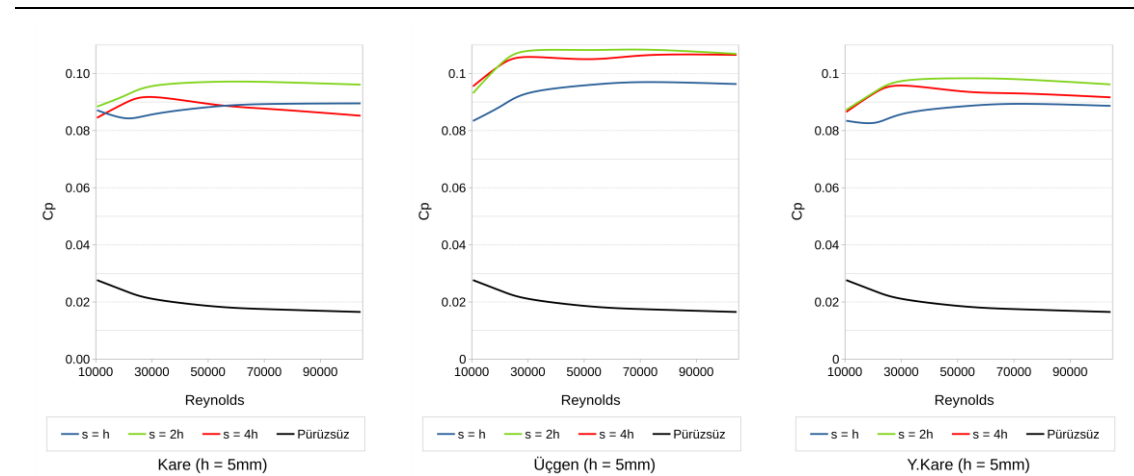
6.4.2 Kanal İçi Fark Basınç Katsayıları

Eklenen çıkıntıların neden oldukları hidrodinamik yapıdaki değişikliklerin kanal içerisindeki basınç düşüşüne etkileri incelenmiştir. Fark basınç değerleri, kanalın çıkıntılı bölgeden önce ve sonra alınan kanal kesitlerinde alan ortalaması alınarak elde edilmiştir. Elde edilen basınç değerleri birçok varyasyonel durum içerisinde irdeleneceği için basınç katsayısına dönüştürülmüştür.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\left(\frac{\rho V^2}{2} \right)} \quad (6.1)$$

Denklem 6.1 herhangi bir uygulama için elde edilen basınç değerinin kinetik enerji (dinamik basınç) değerine oranlanarak fark basınç katsayısının elde edilmesini ifade etmektedir.

Şekil 6.22'de $s = h$, $2h$ ve $4h$ durumları için Reynolds sayısına bağlı olarak farklı çıkıntı biçimlerinde kanal içi akışta fark basınç katsayıları verilmiştir.



Şekil 6.22 Üç farklı aralık değerinde Reynolds sayısına bağlı fark basınç katsayıları

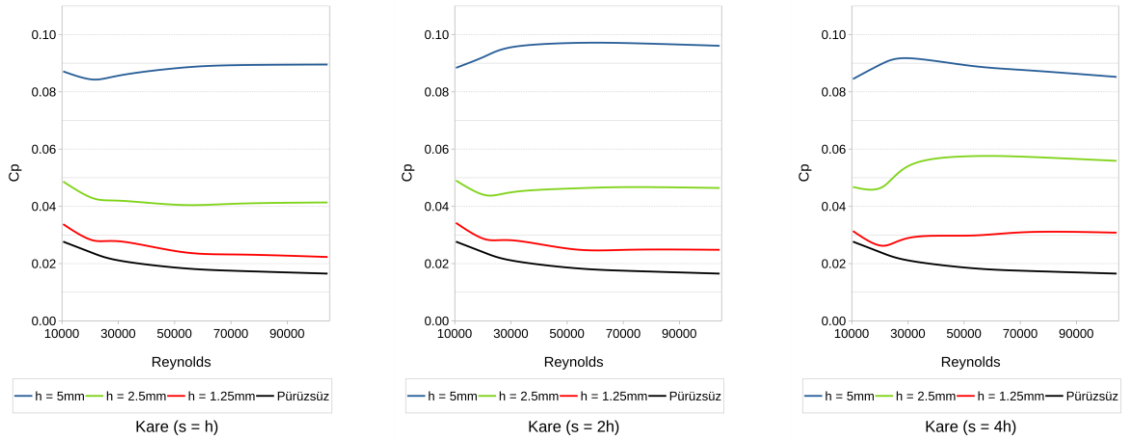
Bu üç grafik birlikte incelendiğinde tüm koşullarda kanal içi fark basınç katsayısı çıkıntısız bir kanalda oluşacak fark basınç katsayısına göre daha yüksektir. Şekil 6.22’de kare biçimli çıkıntı eklenmiş kanal içi akışta Reynolds sayısının artışına bağlı olarak $s = h$ durumunda $Re = 20000$ ’e kadar fark basınç katsayısında azalma görülürken, Reynolds sayısının artışıyla fark basınç katsayısı artmaktadır. $s = 2h$ durumunda $Re = 30000$ ’e kadar fark basınç katsayısı artarak Reynolds sayısının artmasıyla sabite yakın kalmıştır. $s = 4h$ durumunda $Re = 30000$ ’e kadar fark basınç katsayısı artmış ve devamında azalmıştır.

Şekil 6.22’de üçgen biçimli çıkıntı uygulamasında Reynolds sayısının artışına bağlı olarak her üç aralık değerinde benzer bir eğilim görülmüş, $Re = 30000$ ’e kadar fark basınç katsayısı artmış ve devamında ise sabit kalmıştır. $s = 2h$ ve $s = 4h$ durumlarında fark basınç katsayılarının çok yakın değerler verdiği görülmüştür.

Şekil 6.22’de yuvarlatılmış kare biçimli çıkıntı uygulamasında, $s = h$ durumunda fark basınç katsayısı belirli $Re = 20000$ ’e kadar azalıp devamında ise artış görülerek sabit bir değere yakınlaşmıştır. $s = 2h$ ve $s = 4h$ durumunda $Re = 30000$ ’e kadar fark basınç katsayısı yakın değerler göstermiş, devamında ise $s = 2h$ için sabit değerlere yakınlaşmış, $s = 4h$ için azalma göstermiştir.

Kare biçimli çıkıntıların çıkıntı yüksekliklerinin Reynolds sayısına bağlı olarak fark basınç katsayısına etkisinin incelenmesi için üç farklı çıkıntı yüksekliğindeki fark basınç katsayıları Şekil 6.23’de verilmiştir.

Şekil 6.23’deki grafikler birlikte incelendiğinde çıkıntı yüksekliklerinin azalmasına bağlı olarak fark basınç katsayıları çıkıntısız kanal içi akışta elde edilen fark basınç katsayılarına yaklaşmaktadır. $s = h$ iken çıkıntı yüksekliği $h = 5\text{mm}$ durumunda $Re = 20000$ ’e kadar fark basınç katsayısı azalmakta ve devamında artış göstererek sabit kalmaktadır. $s = 2h$ ve $4h$ durumlarında $h = 5\text{mm}$ için $Re = 30000$ ’e kadar fark basınç katsayısı artmış, devamında ise sabit bir değere yakınsamıştır. Çıkıntı yüksekliği $h = 2.5\text{mm}$ için $s = h$ durumunda fark basınç katsayısı azalarak sabit bir değere yakınsamış, $s = 2h$ durumunda $Re = 20000$ ’e kadar düşerek, $Re = 20000$ ’den sonra yükselerek belirli bir değere ulaşmış ve sabit kalmıştır.

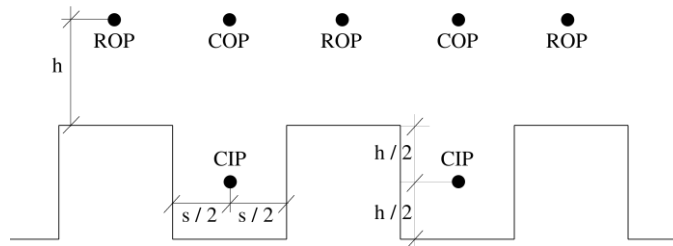


Şekil 6.23 Çıkıntı yüksekliğine ve Reynolds sayısına bağlı fark basınç katsayıları

$s = 4h$ durumunda $Re = 20000$ 'e kadar sabit kalıp, devamında artarak belirli bir değere yaklaşmıştır. Her üç grafik göz önüne alındığında çıkıntısız kanala en yakın fark basınç katsayısı değerleri $h = 1.25\text{mm}$ için $s = h$ durumunda elde edilmiştir.

6.4.3 Çıkıntılar Üstü ve Hücre İçi Basınç Katsayıları

Yüzey üzerine eklenmiş çıkıntıların belirli noktalarından basınç katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bu noktaların yerleşimleri ile ilgili ayrıntılar Şekil 6.24'de verilmiştir. Çıkıntıların üzerindeki noktalara, çıkıntı üstü nokta (ROP), çıkıntılar arası hücreciklerin üzerindeki noktalara hücrecik üstü nokta (COP) ve hücreciklerin tam merkezindeki noktalara, hücrecik içi nokta (CIP) ismi verilmiştir.



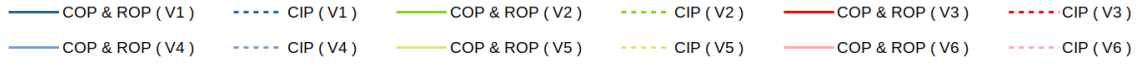
Şekil 6.24 Çıkıntı üzeri (ROP), hücrecik üzeri (COP) ve hücrecik içi (CIP) basınç ölçüm noktaları

ROP ve COP noktaları kanal boyuna peş peşe geldiği ve aynı yüksekliğe sahip oldukları için tek bir eğride (COP & ROP) ve CIP noktalarındaki değerler başka bir eğride gösterilmiştir.

6.4.3.1 Çıkıntı biçimlerinin basınç katsayılarına etkisi

Şekil 6.25'de farklı kanal hızlarında farklı kesit geometrilerinde ve farklı aralık değerlerinde COP & ROP ve CIP noktalarındaki basınç katsayıları verilmiştir. Grafiklerde V1: $Re = 10000$, V2: $Re = 20000$, V3: $Re = 30000$, V4: $Re = 50000$, V5: $Re = 70000$ ve V6: $Re = 100000$ ifade etmektedir.





Şekil 6.25 Farklı Reynolds sayılarında, Kare, Üçgen ve Yuvarlatılmış kare biçimli, $s = h, 2h$ ve $4h$ durumunda CIP, COP ve ROP noktalarında basınç katsayıları

Grafiklerde x eksenini kanal boyuna olan mesafeyi, y eksenini basınç katsayısını (C_p) ifade etmektedir. Aralık durumlarına göre grafikler birlikte incelendiğinde aralık değerinin artışı ile basınç katsayılarının arttığı görülmüştür. Ayrıca hız değerinin artışı ile basınç katsayılarında azalma elde edilmiştir. ROP noktalarında alınan basınç değerleri ile COP noktalarında alınan basınç değerleri birlikte değerlendirildiğinde ROP noktasındaki basınç değerleri o noktanın hem öncesindeki hem de sonrasındaki COP noktasındaki basınç değerinden düşük olduğu görülmüştür. Bu durum COP&ROP eğrisinde basınç değerinde salınımın neden olmuştur. Bu salınımların, kare ve yuvarlatılmış kare biçimlerinde, aralık değerinin artışı ile arttığı, üçgen biçiminde ise önce arttığı sonra ise azaldığı görülmüştür. Özellikle $s = 4h$ durumunda hız artışı ile basınç katsayısı değerlerinin fark edilir şekilde bir bölgeye doğru yaklaştığı görülmektedir. Şekil 6.25.c'de görüldüğü gibi, hız arttıkça farklı renkler ile gösterilmiş olan basınç katsayısı eğrilerinin birbirlerine yaklaşmasından anlaşılabılır. Kare biçimliler incelendiğinde eğrilerin birbirlerine yaklaşmaya başladığı Reynolds sayıları $s = h$, $h = 5\text{mm}$ için $Re=70000$, $s = 2h$, $h = 5\text{mm}$ için $Re=50000$ ve $s = 4h$, $h = 5\text{mm}$ için $Re=30000$ olarak görülmüştür. Bu Reynolds sayılarının hız alanları bölümünde anlatıldığı gibi, hüreciklerde oluşan girdapların girdap gelişimlerini tamamladığı ilk değerler olduğu görülmüştür. Aralık değerinin artışı ile daha küçük Reynolds sayılarında girdap gelişimlerinin tamamlandığı ve basınç katsayılarının sabitleşmeye başladığı görülmüştür. Grafikten anlaşılabacağı üzere, geometrik biçimlerin tümünde, aralık değeri artışı eğri eğimlerini ve kanal boyunca oluşan basınç düşüşünü artırmaktadır.

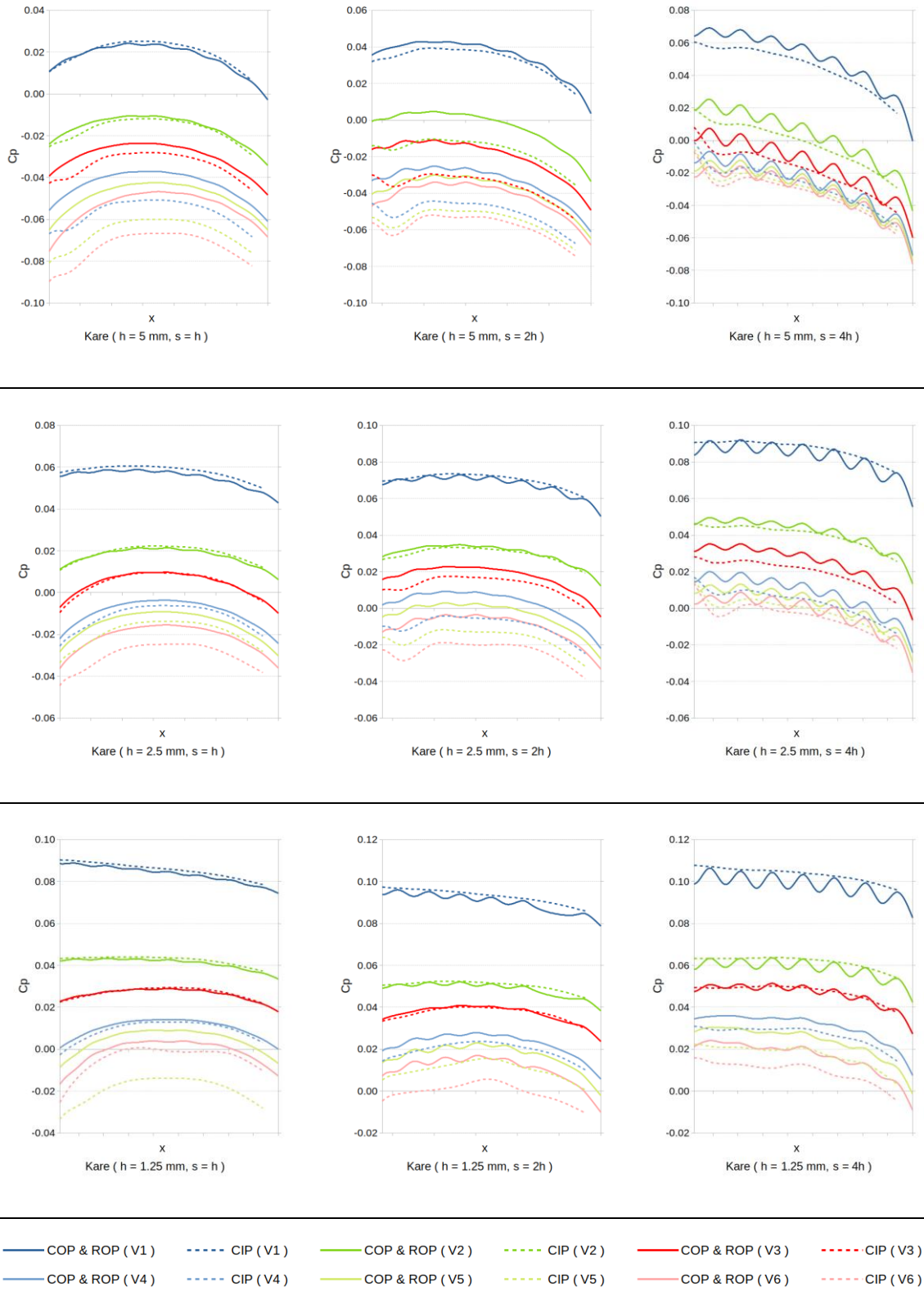
COP ve ROP basınç katsayıları açısından değerlendirme yapılırsa; $s = h$ durumunda, düşük Reynolds sayılarında, tüm geometrik biçimlerde COP ve ROP basınç katsayılarının birbirlerine yaklaştığı, bu durumun yüksek Reynolds sayılarında da üçgen biçim haricinde değişmediği görülmektedir. Üçgen biçimli durumda ise Reynolds sayısının artışı COP ve ROP basınç katsayısı değerlerini beklendiği şekilde değiştirmiştir. Tüm geometrik biçimler bir arada değerlendirilirse kare ve yuvarlatılmış kare

durumunda COP & ROP değerlerinin sadece çıkıntı aralıklarından etkilendiği, üçgen biçiminde ise bu değerlerin hem çıkıntı aralıklarından hem de Reynolds sayısı değerlerinden belirgin şekilde etkilendiği anlaşılır.

Hem COP & ROP değerleri hem de CIP değerleri kk Reynolds sayılarında pozitif değer gösterirken, Reynolds sayısının büyümesiyle negatif değerler elde edilmiştir. Bu durum hız alanları bölümünde kk Reynolds sayılarında şekil 6.8'de ($Re=10000$), $s = h$ durumunda, kare biçimli çıkıntılarda net bir şekilde görülebilmektedir. şekil 6.8'de çıkıntılar arası hücreciklerde herhangi bir girdabın oluşmadığı görülmüş ve şekil 6.25 ile birlikte değerlendirildiğinde girdap oluşumunun başlamadığı durumlarda basınç katsayılarının pozitif olduğu anlaşılmıştır.

6.4.3.2 ıkıntı yüksekliklerinin basınç katsayılarına etkisi

şekil 6.26'de kare biçimli geometri durumunda, farklı Reynolds sayılarında, farklı aralıklarda ve farklı çıkıntı yüksekliklerinde COP & ROP ve CIP basınç katsayıları değişimleri verilmiştir.



Şekil 6.26 Farklı Reynolds sayılarında, kare biçimli, $s = h$, $2h$ ve $4h$ durumunda ve $h=5\text{mm}$, $2,5\text{mm}$, $1,25\text{mm}$ yüksekliklerinde $COP \& ROP$ ve CIP basınç katsayıları

Aralık durumlarına göre grafikler birlikte incelendiğinde aralık değerinin artışı ile basınç katsayılarının arttığı görülmüştür. Tüm grafiklerde Reynolds sayısının artışı basınç katsayılarında azalmaya neden olmuştur. COP & ROP boyunca basınç katsayılarında oluşan salınımlar tüm çıkıntı yüksekliklerinde, aralık değerinin artışı ile artış göstermiştir. Tüm grafiklerde Reynolds sayısının artışı ile basınç katsayısı değerlerinin $s = 4h$ durumunda fark edilir şekilde bir bölgeye doğru yaklaştığı görülmektedir. Bu durum $h = 5\text{mm}$ çıkıntı yüksekliğinde daha belirgindir. Oluşan salınımların çıkıntı yüksekliğinin azalması ve Reynolds sayısının artışıyla düzensizleşerek, farklı bir form kazandığı görülmektedir. Tüm grafiklerde aralık değerinin artışı ile eğri eğimlerinin arttığı, bu artışın kanal boyunca oluşan basınç düşüşünü artırdığı açıktır. Çıkıntı yüksekliğinin azalması ile eğri eğimlerinin azaldığı ve kanal boyunca basınç düşüşlerinde de azalmanın devam ettiği görülmektedir. CIP ve COP basınç katsayıları birlikte değerlendirildiğinde düşük Reynolds sayılarında birbirine yakındır. Çıkıntı yüksekliğinin azalması ile değerlerdeki yakınlık büyük Reynolds sayılarında da görülmeye devam etmektedir. Aralık değerinin artması ile bu yakınlık bozularak basınç katsayıları arasındaki farklar artmıştır.

Çıkıntı yüksekliğinin etkisi açısından bakılırsa $h = 2.5\text{mm}$ ve 1.25mm olması durumlarında, farklı aralıklarda görülen CIP basınç katsayılarının COP basınç katsayılarından büyük olma durumunun, çıkıntı yüksekliğinin $h = 5\text{mm}$ olması durumunda görülmediği ancak büyük Reynolds sayılarında ve büyük aralık değerlerinde $h=5\text{mm}$ 'de de görüldüğü anlaşılmaktadır.

Hem COP & ROP eğrileri hem de CIP eğrileri çıkıntı yüksekliklerinin azalmasıyla büyük Reynolds sayılarında da pozitif değer göstermiştir. Bu durum hız alanları bölümünde Şekil 6.9'da küçük çıkıntı yüksekliğinde girdap oluşumunun başlamaması ile uyumludur.

6.4.4 Sürüklenme Kuvvet Katsayıları

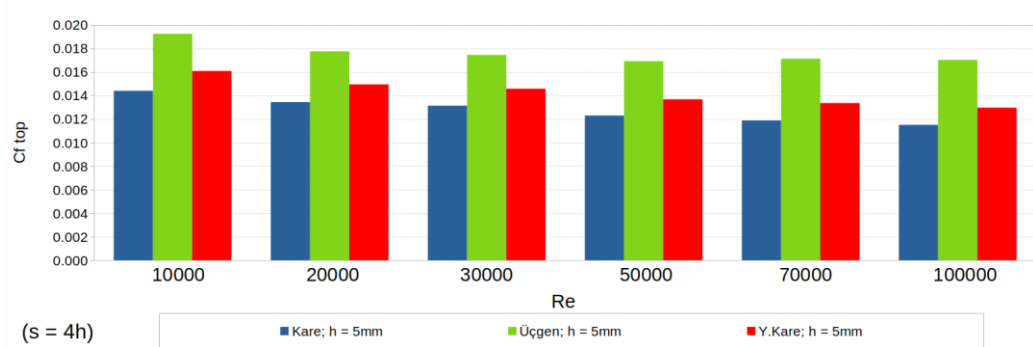
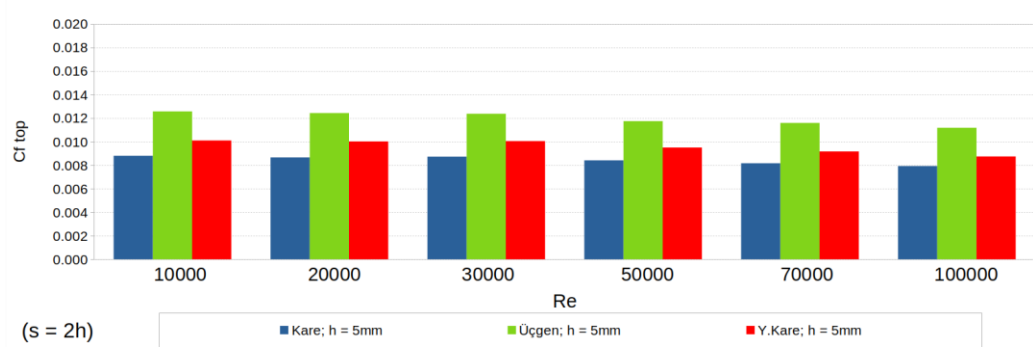
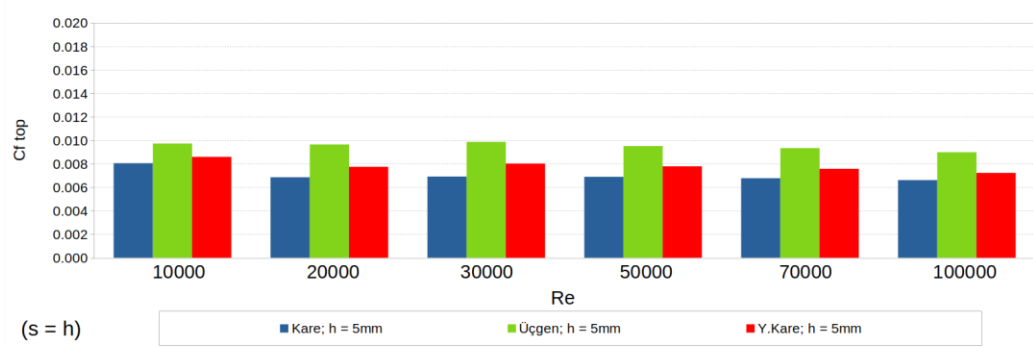
Sürüklenme kuvvetleri çözüm hacminin alt yüzeyindeki çıkıntıların bulunduğu bölge için elde edilmiştir. Sürüklenme kuvvetini oluşturan basınç kaynaklı direnç ve kayma gerilmesi kaynaklı direnç (sürtünme) ayrı ayrı elde edilmiştir. Bu iki kuvvet bileşenin toplamına toplam sürüklenme kuvveti ifadesi kullanılmıştır. Farklı çıkıntı biçimleri ile analizler yapıldığı için kuvvet değerlerinin geometriden bağımsızlaştırılması hedeflenmiş ve sürüklenme kuvveti kuvvet katsayısına dönüştürülmüştür.

$$C_f = \frac{F}{\left(\frac{\rho V^2}{2} A \right)} \quad (6.2)$$

Denklem 6.2 sürüklenme kuvvet katsayıları için oluşturulan genel tanımdır. Kuvvet katsayısı, istenen kuvvet bileşeni, dinamik basınç ve kuvveti oluşturan ıslak alana oranlanarak elde edilmiştir.

Şekil 6.27'de kare, üçgen ve yuvarlatılmış kare biçimli çıkıntılar için altı farklı Reynolds sayısında, $s = h$, $2h$ ve $4h$ durumlarında toplam sürüklenme kuvvet katsayıları verilmiştir.

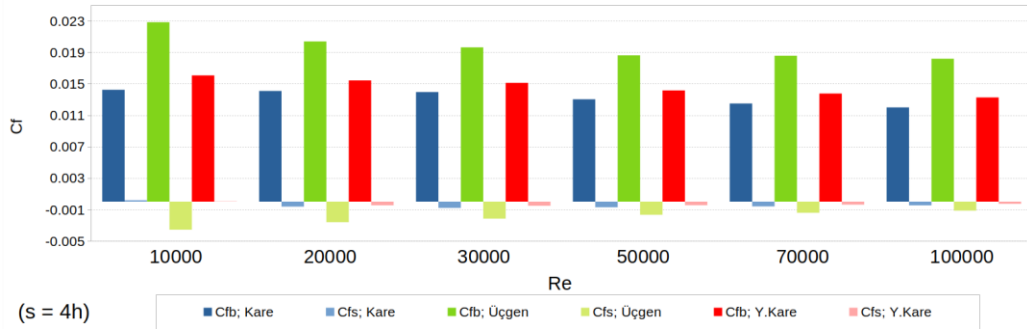
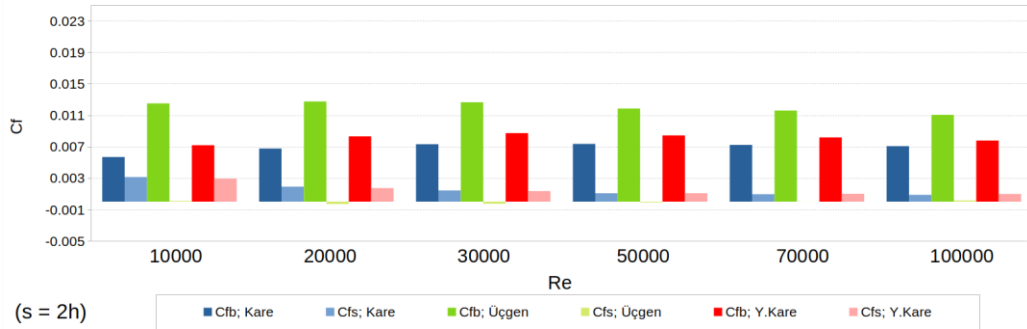
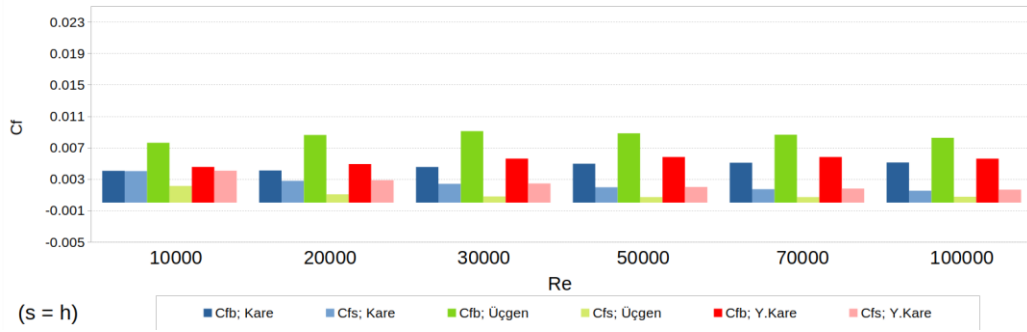
Her üç grafik birlikte incelendiğinde tüm aralık durumlarında ve tüm Reynolds sayılarında en yüksek toplam sürüklenme kuvvet katsayısının üçgen biçimli çıkıntıda elde edildiği görülmektedir. En yüksek ikinci toplam sürüklenme kuvvet katsayısı yuvarlatılmış kare biçimli çıkıntı durumunda iken en düşük toplam sürüklenme kuvvet katsayısı kare biçimli çıkıntı durumunda ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.27 Üç farklı kesit geometrisi için altı farklı hızda $s = h$, $2h$ ve $4h$ durumunda toplam sürüklenme kuvvet katsayıları

Çıkıntılar arası mesafelerinin artması ile tüm biçimlerde toplam sürüklenme kuvvet katsayılarının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte her aralık değerinde Reynolds sayısının artması her üç biçim için toplam sürüklenme direnç katsayısının azalmasına sebep olmuştur.

Şekil 6.28'de kare, üçgen ve yuvarlatılmış kare biçimli çıkıntılarda, altı farklı Reynolds sayısı için üç farklı aralık durumunda basınç kaynaklı kuvvet katsayısı (C_{fb}) ve kayma gerilmesi (sürtünme) kaynaklı kuvvet katsayısı (C_{fs}) gösterilmiştir.



Şekil 6.28 Farklı çıkıntı durumlarında, altı farklı Reynolds sayısı için s = h, 2h ve 4h durumunda basınç kaynaklı ve kayma gerilmesi(sürtünme) kaynaklı kuvvet katsayıları

Şekil 6.28’de tüm grafikler birlikte incelendiğinde çıkıntılar arası mesafenin artmasıyla birlikte tüm Reynolds sayılarında C_{fb} artış gösterirken, C_{fs} düşüş göstermektedir. s = h durumunda Reynolds sayısının artışıyla birlikte C_{fb} artış gösterirken, C_{fs} azalma göstermiştir. Ancak bu durum s = 2h durumunda azalmış ve s = 4h durumunda tersine dönerek Reynolds sayısının artışıyla C_{fb} ’nin azaldığı, C_{fs} ’nin arttığı görülmüştür. İlk kez s = 2h durumunda üçgen biçimli çıkıntılarda kayma gerilmesi (sürtünme) C_{fs} ’de negatif değerler görülmeye başlanmıştır. s = 4h durumunda negatif değerler daha belirgin boyutlara ulaşmış ve tüm biçimlerde elde edilmiştir. Bu durum aralık değerlerinin

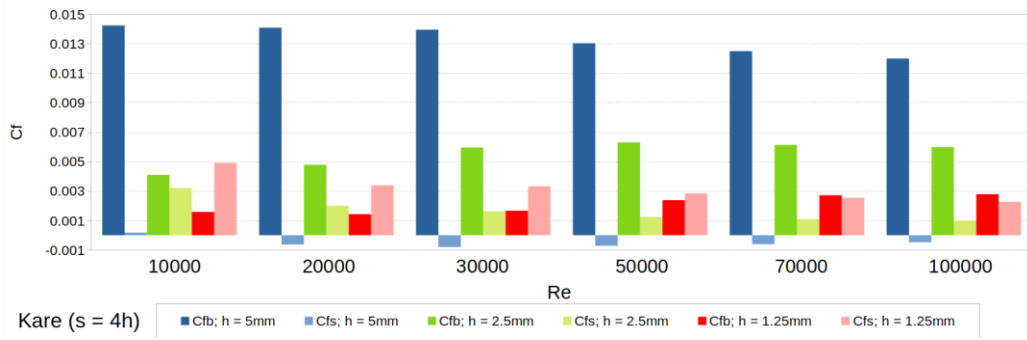
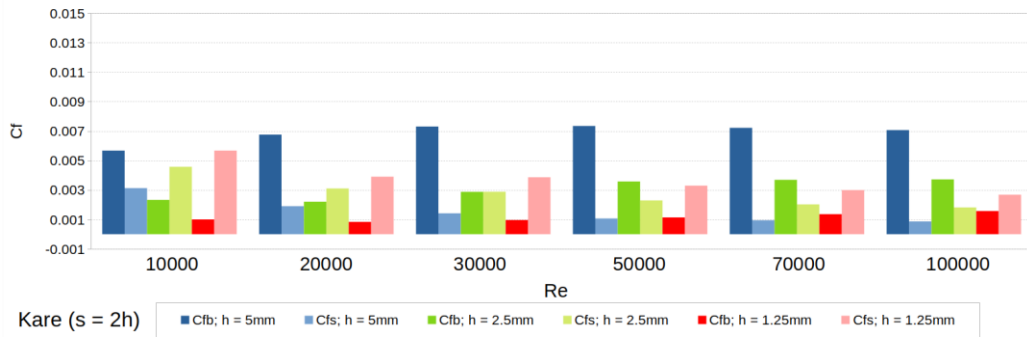
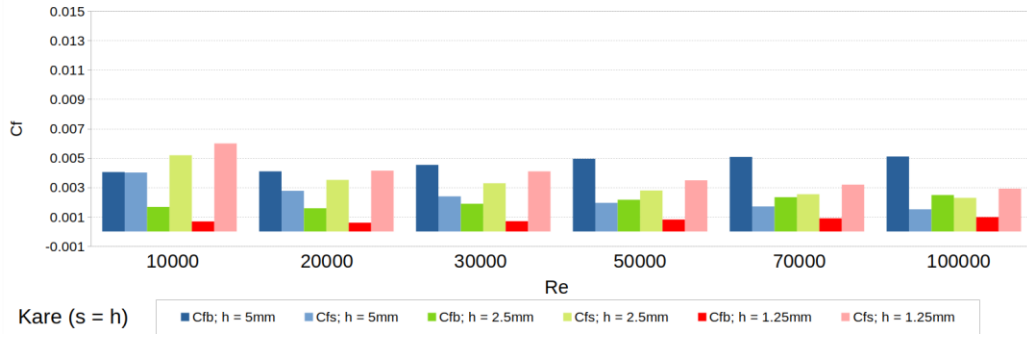
artmasına bağlı olarak hüreciklerde ortaya çıkan negatif yönlü hız vektörlerinin bulunduğu bölgelerin artmasıyla açıklanabilir.

 ıkıntı yüksekliğinin etkisini incelemek üzere kare biçimli çıkıntı uygulamasında çıkıntı yükseklikleri $h = 5$, 2.5 ve 1.25 mm olacak şekilde modellenerek analiz edilmiştir.

Şekil 6.29'da üç farklı çıkıntı yüksekliğine göre altı farklı Reynolds sayısında ve üç farklı aralık durumunda C_{fb} ile C_{fs} değerleri verilmiştir.

Şekil 6.29'da her üç grafik birlikte incelendiğinde çıkıntılar arası mesafenin artmasıyla her Reynolds sayısında ve her çıkıntı yüksekliğinde C_{fb} değerinde artış g r lm  tir. Bununla birlikte aralık değerinin artışına bağlı olarak C_{fs} değerinde azalma g r lm  tir. Ayrıca her Reynolds sayısı için çıkıntı yüksekliklerinin azalmasına bağlı olarak C_{fb} değerinde azalma ve C_{fs} değerlerinde artış elde edilmiştir. $s = h$ durumunda Reynolds sayısının artı ı ile her çıkıntı yüksekliği için C_{fb} 'de artma ve C_{fs} 'de azalma g r lm  tir. $s = 2h$ durumunda Reynolds sayısı artı ı ile $h = 5$ mm için C_{fb} 'de önce artma ve $Re = 50000$ 'den sonra azalma elde edilmiştir. Buna rağmen $h = 2.5$ ve 1.25 mm için bu durum söz konusu olmamıştır. $s = 4h$ durumunda Reynolds sayısının artı ı ile $h = 5$ mm için C_{fb} 'de sürekli bir azalma ve C_{fs} 'de önce artma ve $Re = 30000$ 'den sonra azalma elde edilmiştir.

 ıkıntı yüksekliği $h = 2.5$ mm'de Reynolds sayısındaki artı a bağlı olarak C_{fb} önce artarak $Re = 50000$ 'den sonra azalmakta, C_{fs} ise sürekli azalarak sabit bir değere ulaşmaktadır.  ıkıntı yüksekliği $h = 1.25$ mm için C_{fb} 'de artış, C_{fs} ise azalış ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.29 Kare biçimli üç farklı çıkıntı yüksekliği için altı farklı Reynolds sayısında $s = h$, $2h$ ve $4h$ durumunda C_{fb} ve C_{fs} katsayıları

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz mühendislik uygulamalarında geliştirilen teknolojiler incelendiğinde birçok noktadan bu teknolojilerin doğada bir benzeri olduğu dikkate değer bir konudur. Doğa tarafından güvenilir ve sürdürülebilir olarak kullanılan bazı fizik olaylarının irdelenmesi ve bu irdelemeler ışığında insan yapısı teknolojilerin geliştirilmesi sıkça başvurulmuş bir metot haline gelmiştir. Doğadaki bir biçimden ya da olaydan esinlenerek bir ürün ya da süreç geliştirmeye biyomimik denir. Doğayı taklit etme anlamına gelen bu kelime daha çok mühendisler ve bilim insanları tarafından irdeleme ve benzeşim sağlamayı ifade eder.

Herhangi bir cisim üzerine etkiyen kuvvetlerin tahmini, ısıtma ve soğutma uygulamaları, yüzeylerin temizlenmesi gibi problemler doğaya bakılarak çözülmeye çalışılmaktadır. Özellikle cisimlerin yüzeyleri ile içinde bulundukları akışkan arasında oluşan etkileşim ve bu etkileşimi etkileyen parametrelerin tespiti için yapılan çalışmalardan bu etkileşimi yöneten en temel parametrenin cismin yüzey durumunun olduğu ortaya çıkmıştır. Genel olarak yüzey üzerindeki küçük boyutlu pürüzler ve desenlerin akışkanla cisim arasındaki ilişki üzerinde etkili oldukları bilinmektedir.

Bu tez çalışmasında, yüzeylerin etrafındaki akışkan ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan akış hidrodinamiğinin irdelenmesine çalışılmıştır. Bu irdeleme sayısal yöntemler kullanılarak sağlanmıştır. Doğadaki yüzeylerin morfolojisi incelendiğinde yüzeylerdeki eklentiler ile desenlerin düzensiz ve mikron boyutlarda olduğu görülebilir. Ancak bu boyutlarda bir yüzey morfolojisinin sayısal yöntemlerle modellenmesi günümüz şartlarında zordur. Bu nedenle sayısal yöntemler ile modellenebilecek bir yapının oluşturulması için boyutlar milimetre mertebelerinde (1.25, 2.5, 5 mm) seçilmiştir. Düz

bir yüzey üzerine eklenen sıralı çıkıntılar ile doğal yüzey morfolojileri modellenmiştir. Yüzey üzerine eklenen çıkıntılar arasında doğal olarak oluşan hücrelerde gelişen akışın incelenebilmesi için, öncelikle tek bir kübik hücre ele alınmıştır.

Kapak etkili hücre içi akışların simetrik bir yapıya sahip olmadığı bilinmektedir. Ayrıca hareketli kapak etkisi ile bozulan simetrinin, farklı yüzeylere eklenecek olan hücrecikler sebebiyle artacağı ön görülerek problemin doğru modellenebilmesi için 3 boyutlu çözüm tercih edilmiştir.

Yüzey üzerine eklenen çıkıntıların çevrelerindeki akışı ne şekilde etkilediğini açıklayabilmek için ikinci aşamada iyi bilinen hücre akımını sınırlayan hücre duvarlarına çıkıntılar eklenmiştir. Böylelikle hücrecikli yüzeylere sahip tek bir hücre içindeki akım özellikleri ortaya çıkarılmıştır.

Hücrecikli tek hücrenin yüzeyleri, iki paralel levha arası akışı temsil edecek şekilde bir açılım yapılarak kanal akımına dönüştürülmüştür. Oluşturulan kanalda, alt yüzeyin belirli bölümlerine farklı biçim, aralık ve yüksekliklere sahip olacak şekilde çıkıntılar eklenerek, farklı geometriler oluşturulmuştur. Bu benzeşimle yüzey üzerindeki makro yapıların akışta oluşturduğu hidrodinamik değişiklikler belirlenmiştir.

Kanal içerisinde makro yapıların bulunduğu bölgelerdeki basınç düşüşleri, sürtünme kuvvetleri hesaplanmıştır. Hız alanları ise genel kanal hacminin tamamı için bulunmuştur.

Kapak etkili tek bir hücre içerisinde akımın kapak hareketinden büyük oranda etkilendiği, asimetrik akım alanlarının ortaya çıktığı açık kaynaklarda belirtildiği şekilde görülmüştür. Hücre içinde gelişen ana girdabın şeklinin ve büyüklüğünün farklı yüzeylere eklenen çıkıntılar sebebiyle doğrudan etkilendiği tespit edilmiştir.

Hücrecikli kanal içinde ise çıkıntılar arasında elde edilen hücrelerin her birinin tek bir hücrenin göstermiş olduğu davranışı gösterdiği, bunun sonucunda yüzey üzerindeki akışın hidrodinamiğini değiştirdiği tespit edilmiştir.

Çıkıntılarının öncesinde ve sonrasındaki basınç değerleri kullanılarak elde edilen kanal içi basınç düşüşünün, çıkıntılarının biçimine, yerleşimine ve yüksekliklerine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Basınç düşümü açısından değerlendirildiğinde en yüksek basınç

düşümünün üçgen biçimli, $s = 2h$ ve $h = 5$ mm durumundaki modelde elde edildiği, en düşük basınç düşümünün ise kare biçimli, $s = h$ ve $h = 1.25$ mm durumunda gerçekleştiği görülmüştür.

Hücrecikli kanal içerisinde düz kanala göre toplam kuvvetin arttığı, bu kuvvet artışında basınç kaynaklı kuvvet bileşeninin etkisinin baskın olduğu görülmüştür. En yüksek kuvvet artışı üçgen biçimli çıkıntılar ile elde edilirken, en düşük kuvvet artışına kare biçimli çıkıntıların neden olduğu bulunmuştur.

Toplam kuvvet artışındaki baskın bileşen olan basınç kaynaklı kuvvet bileşeninin en yüksek olduğu model üçgen biçimli çıkıntı modeli iken, en düşük basınç kaynaklı kuvvet bileşeni kare biçimli çıkıntı olması durumunda ortaya çıkmıştır.

Ayrıca basınç kaynaklı kuvvet bileşeninin, çıkıntı yüksekliklerinin azalması ile doğru orantılı olarak azaldığı ve en düşük değerin $h = 1.25$ mm durumunda ortaya çıktığı diğer bir sonuçtur.

Sürtünme kaynaklı kuvvet bileşeninde hidrodinamik yapının değişmesi ile düşüş olduğu tespit edilmiştir. En yüksek sürtünme kuvveti azalmasını sağlayan model hidrodinamik yapının en erken gelişmeye başladığı üçgen biçimli modeldir.

Ancak üçgen biçimli modelde ortaya çıkan toplam kuvvetin yüksek olması nedeniyle sürtünme kaynaklı kuvvet bileşeninin azalması kayda değer değildir. Üçgen biçimli modele göre en yakın sürtünme bileşeni azalmasını sağlayan model ise kare biçimli modeldir.

Çözümlemeler sonucunda elde edilen akım alanlarında en dikkat çeken, çıkıntılar arasındaki hücrelerde, kanal içerisindeki ana akımdan ayrılmış biçimdeki girdaplı bölgelerdir. Bu girdaplar ana akıstan bağımsız olarak hareket eder. Eklenen çıkıntıların yüzey üzerindeki sınır tabakada değişime neden olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle bu bölgede yalnız kuvvet açısından değil ısı transferi ve kütle transferi açısından da yeni incelemelerin yapılması gereklidir. Bu bölgenin ısı transferi etkinliğini artırıcı veya azaltıcı yönde bir etkisinin olması yeni teknolojik gelişmelere kapı açacaktır. Sınır tabakadaki değişikliklerin ne şekilde oluştuğu, bu değişimlerin teknolojik olarak hangi gelişmelere yol açacağını incelemek ileriki çalışmalara konu olacaktır. Ayrıca partiküllü

bir akışta bu bölgelerde partikül birikimi ya da partikülün akış içerisindeki homojenliğini değiştirici bir etki ile de teknolojik ürünler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Fu, Y. F., Yuan, C. Q., ve Bai, X. Q., (2017), "Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces", *Biosurface and Biotribology*, 3(1): 11–24.
 - [2] Zhao, Y. Gu, Zheng, G., J., Z. Liu, Li, W., ve Muhammad, F. K., (2014), "Experimental and numerical investigation on drag reduction of non-smooth bionic jet surface", *Ocean Eng.*, 81:50–57.
 - [3] Ross, J. A., Barnes, F. H., Burns, J. G., ve Ross, M. A. S., (1970), "The flat plate boundary layer. Part 3. Comparison of theory with experiment", *J. Fluid Mech.*, 43(4):819–832.
 - [4] Wang, B., Wang, J., Dou, Z., ve Chen, D., (2014), "Investigation of retention of gases in transverse hydrophobic microgrooved surfaces for drag reduction", *Ocean Eng.*, 79:58–66.
 - [5] Ceccio, S. L., (2010), "Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 42(1):183–203.
 - [6] Gutiérrez-Torres, C. C., Hassan, Y. A., ve Jimenez-Bernal, J. A., (2008), "Turbulence Structure Modification and Drag Reduction by Microbubble Injections in a Boundary Layer Channel Flow", *J. Fluids Eng.*, 130(11):111-304.
 - [7] Kramer, M. O., (1959), "Boundary-Layer Stabilization by Distributed Damping", *Reader's Forum*, 1(1): 69.
 - [8] Muralikrishnan, R. ve Kumaran, V., (2002), "Experimental study of the instability of the viscous flow past a flexible surface", *Phys. Fluids*, 14(2):775–780.
 - [9] Fuaad, P. A., Baig, M. F., ve Ahmad, H., (2016), "Drag-reduction in buoyant and neutrally-buoyant turbulent flows over super-hydrophobic surfaces in transverse orientation", *Int. J. Heat Mass Transf.*, 93:1020–1033.
 - [10] Matin, A., Merah, N., ve Ibrahim, A., (2016), "Superhydrophobic and self-cleaning surfaces prepared from a commercial silane using a single-step drop-coating method", *Prog. Org. Coatings*, 99: 322–329.
 - [11] Balasubramanian, A. K., Miller, A. C., ve Rediniotis, O. K., (2004), "Microstructured Hydrophobic Skin for Hydrodynamic Drag Reduction", *AIAA J.*, 42(2):411–414.
 - [12] Moaven, K., Rad, M., ve Taeibi-Rahni, M., (2013), "Experimental investigation of viscous drag reduction of superhydrophobic nano-coating in laminar and turbulent flows", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 51:239–243.

- [13] Luo, Y., Wang, L., Green, L., Song, K., Wang, L., ve Smith, R., (2015), "Advances of drag-reducing surface technologies in turbulence based on boundary layer control *", *J. Hydrodyn.*, 27(4):473–487.
- [14] Bhushan, B., (2011), "Biomimetics inspired surfaces for drag reduction and oleophobicity/philocity", *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2: 66–84.
- [15] Bixler, G. D. ve Bhushan, B., (2013), "Fluid drag reduction and efficient self-cleaning with rice leaf and butterfly wing bioinspired surfaces", *Nanoscale*, 5(17): 7685–7710.
- [16] Pu, X., Li, G., ve Liu, Y., (2016), "Progress and Perspective of Studies on Biomimetic Shark Skin Drag Reduction", *ChemBioEng Rev.*, 3(1): 26–40.
- [17] Boomsma, A. ve Sotiropoulos, F., (2016), "Direct numerical simulation of sharkskin denticles in turbulent channel flow", *Phys. Fluids*, 28(3):1-19.
- [18] Martin, S. ve Bhushan, B., (2016), "Discovery of riblets in a bird beak (rynchops) for low fluid drag", *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 374(2073):1-17.
- [19] Saravi, S. S. ve Cheng, K., (2013), "A Review of Drag Reduction by Riblets and Micro-Textures in the Turbulent Boundary Layers", *Eur. Sci. J.*, 9(33): 62–81.
- [20] Luo, Y., Yuan, L., Li, J., ve Wang, J., (2015), "Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications", *Micron*, 79: 59–73.
- [21] Boomsma, A. ve Sotiropoulos, F., (2015), "Riblet drag reduction in mild adverse pressure gradients: A numerical investigation", *Int. J. Heat Fluid Flow*, 56: 251–260.
- [22] Li, W., Roggenkamp, D., Jessen, W., Klaas, M., ve Schröder, W., (2016), "Turbulent drag reduction by spanwise traveling ribbed surface waves", *Lect. Notes Mech. Eng.*, 53:363–368.
- [23] Kim, T., Shin, R., Jung, M., Lee, J., Park, C., ve Kang, S., (2016), "Drag reduction using metallic engineered surfaces with highly ordered hierarchical topographies: Nanostructures on micro-riblets", *Appl. Surf. Sci.*, 367: 147–152.
- [24] Benschop, H. O. G. ve Breugem, W. P., (2017), "Drag reduction by herringbone riblet texture in direct numerical simulations of turbulent channel flow", *J. Turbul.*, 18(8): 717–759.
- [25] Sasamori, M., Iihama, O., Mamori, H., Iwamoto, K., ve Murata, A., (2017), "Parametric Study on a Sinusoidal Riblet for Drag Reduction by Direct Numerical Simulation", *Flow, Turbul. Combust.*, 99(1): 47–69.
- [26] Benodekar, R. W., Goddard, A. J. H., Gosman, A. D., ve Issaj, R. I., (1985), "Numerical Prediction of Turbulent Flow over Surface-Mounted Ribs", *AIAA Journal*, 23(3): 359–366.
- [27] Hong, Y., Hsieh, S., ve Shin, H., (1991), "Numerical Computation of Laminar Separation and Reattachment of Flow Over Surface Mounted Ribs", *Journal of Fluid Engineering*, 113: 190-198.

- [28] Yutaka, K. T. and Miyake, N. N., (2002), "Numerical simulation of channel flow with a rib-roughened wall", *Journal of Turbulence*, 3(35): 1-17.
- [29] Taslim, H. L. M. E., Bakhtari, K., (2013), "Experimental and Numerical Investigation of Impingement on a", *Journal of Turbomachinery*, 125: 682-691.
- [30] Davies, J., Maynes, D., Webb, B. W., ve Woolford, B., (2006), "Laminar flow in a microchannel with superhydrophobic walls exhibiting transverse ribs Laminar flow in a microchannel with superhydrophobic walls exhibiting", *Phys.Fluids*, 18: 1-11.
- [31] Lu, H. ve Lu, L., (2017), "Investigation of particle deposition efficiency enhancement in turbulent duct air flow by surface ribs with hybrid-size ribs", *Indoor and Build Environment*, 26(5): 608–620.
- [32] Ancrum, D. B., (2017), "Measurements of the Effects of Streamwise Riblets on Boundary Layer Turbulence", *Journal of Fluid Engineering*, 139: 1–10.
- [33] Hoffman, S. T. C. Klaus A., (2000). *Computational Fluid Dynamics Vol I.*, A Publications of Engineering Education System, New York.
- [34] CD-Adapco, (2015), *StarCCM + ® Documentation, User Guide V10.02.*
- [35] Bekar, A. C., (2018), "Kavitasyon Yapan İki Boyutlu Hidrofoillerin FVM ve BEM İle İncelenmesi", *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- [36] Kohtake, N., Rekimoto, J., ve Anzai, Y., (2001), "InfoPoint: A device that provides a uniform user interface to allow appliances to work together over a network", *Pers. Ubiquitous Comput.*, 5(4): 264–274.
- [37] Sonzogni, V. E., Yommi, A. M., Nigro, N. M., ve Storti, M. A., (2002), "A parallel finite element program on a Beowulf cluster", *Adv. Eng. Softw.*, 33(7–10): 427–443.
- [38] B. J. D. Sloan, ve O. Reilly, (2000), "Building Linux Clusters", *High Performance Linux Clusters with Publisher*, New York.
- [39] Han, S. ve Choi, H. G., (2014), "Investigation of the parallel efficiency of a PC cluster for the simulation of a CFD problem", *Pers. Ubiquitous Comput.*, 18(6): 1303–1314.
- [40] Stefanovic, D. L. ve Stefan, H. G., (2000), "Simulation of transient cavity flows driven by buoyancy and shear", *J. Hydraul. Res.*, 38(3): 181–195.
- [41] Deville, Y. M. M., Lê, T. H., (1992), *Numerical Simulation of 3-D Incompressible Unsteady Viscous Laminar Flows: A GAMM-Workshop*, 1. baskı. *Notes on Numerical Fluid Mechanics (NNFM)* 48.
- [42] Chen, W. H. , Li, K, S, (2013), "A dimension split method for the incompressible Navier–Stokes equations in three dimensions", *Int. J. Numer. METHODS FLUIDS*, 1(73): 409–435.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet YURTSEVEN
Doğum Tarihi ve Yeri : 29.04.1988 , İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : yurtseven1@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y.Lisans	Gemi İnş. ve Mak. Müh.	Gemi Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Çift Lisans	Gemi İnş. ve Mak. Müh.	Gemi Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Sayısal	Fahrettin Kerim Gökay And.	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011-Halen	Yıldız Teknik Üni. Gemi İnş. ve Den. Fak.	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Demirel H., Alarçin F., Su M., Yurtseven A., (2014), "Modified pid control design for roll fin actuator of nonlinear modelling of the fishing boat", Polish Maritime Research, 21: 3-8.
2. Demirel H., Alarçin F., Su M., Yurtseven A., (2014), "Conventional PID and Modified PID Controller Design for Roll Fin Electro-Hydraulic Actuator", Acta Polytechnica Hungarica, 11(3): 233-247.
3. Bilir A.Ç., Doğrul A., Çoşgun T., Yurtseven A., Vardar N., (2016), "A Numerical Investigation of the Flow in Water Jet Nozzles", Journal of Thermal Engineering, 2(5): 907-912.
4. Yurtseven A., Üst Y., Şener B., Kinaci Ö.K., (2016), "Utilization Of Shipboard As A Heat Exchanger In Ship Central Cooling System", Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 34(3): 297-306.
5. Koçal T., Muğan A., Yurtseven A., (2013), "Multi Zones Hvac Systems' Control In Ships With Simulink Application", Journal Of Maritime Transport And Engineering, 2(1): 13-20.

Bildiri

1. Çoşgun T., Yurtseven A., Vardar N., (2018), "A Cfd Study Of Separating Reattaching Flows", ICETI International Conference on Engineering Technology and Innovation , 7-11 Mart 2018, Budapeşte, Macaristan.
2. Yurtseven A., Çoşgun T., Vardar N., (2018), "The Numerical Investigation of High Speed Train-Tunnel Interactions", XXVI International Scientific Conference on Transport, Road Building, Agricultural, Hoisting & Hauling and Military Technics and Technologies, 27-30 Haziran 2018, Burgas, Bulgaristan.
3. Yurtseven A., Çoşgun T., Vardar N., (2017), "Effect Of Ribbed Surface On Heat

- Transfer On Turbulent Flow Over A Flat Plate", 3rd International Conference On Advances In Mechanical Engineering Istanbul 2017, 19-21 Aralık 2017, Istanbul, Türkiye.
4. Çoşgun T., Yurtseven A., Vardar N., (2017), "Effect of Sea Water Usage in Marine Lubrication Applications ", Balkantrib17 9th International Conference On Tribology, 13-15 Eylül 2017, Nevşehir, Türkiye.
 5. Yurtseven A., Çoşgun T., Vardar N., (2017), "Kapali Mekanlarda Havalandırma Ve Kirletici Gaz Tahliyesinin Kısmi Kapak Etkili Hücre Akışı Modeliyle Sayısal Analizi", XX.Ulusal Mekanik Kongre, 5-9 Eylül 2017, BURSA, TÜRKİYE.
 6. Kınacı Ö.K., Çoşgun T., Yurtseven A., Vardar N., (2017), "Ground effect or grounding: Which happens when? ", 17th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, 9-11 Ekim 2017, Lisboa, Portekiz.
 7. Çoşgun T., Yurtseven A., Vardar N., (2017), "3-B Taylor-Couette-Poiseuille Akışlarında Doğrusal Akım Etkisinin Nümerik Modellenmesi", XX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ, 5-9 Eylül 2017, BURSA, TÜRKİYE.
 8. Yurtseven A., Çoşgun T., Vardar N., (2016), "Kapak etkili hücre içindeki akışta yüzey yapısı etkisinin 3 boyutlu sayısal analizi", 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress, 26-28 Ekim 2016, Adana, Türkiye.
 9. Yurtseven A., Çoşgun T., Vardar N., (2016), "Sayısal Akışkanlar Dinamiğinde Yüksek Başarımli Hesaplama: 3 Boyutlu Kapak Etkili Hücre İçi Akışı", 1st International Congress on Ship and Marine Technology, 8-9 Aralık 2016, Istanbul, Türkiye.
 10. Yildiz B., Yurtseven A., Katayama T., (2016), "Effect of Vortex Shedding and Free Surface Interaction on Roll Damping Due to Large Amplitude Roll Motion", the 15 th International Ship Stability Workshop, 15-16 Haziran 2016, Sweden, İsveç.
 11. Bilir A.Ç., Doğrul A., Çoşgun T., Yurtseven A., Vardar N., (2015), "A Numerical

Investigation Of The Flow In Water Jet Nozzles", International Conference On Advances In Mechanical Engineering, 13-15 Mayıs 2015, İstanbul, Türkiye.

12. Çoşgun T., Yurtseven A., Doğrul A., Çakici F., Vardar N., (2015), "CFD Study of Turbulent Flows in Rotating Annular Channels", 17th International Conference on Automotive and Mechanical Engineering, 28-29 Mayıs 2015, İstanbul, Türkiye.
13. Yurtseven A., Genç C., (2013), "Rüzgar Çiftliklerinde Türbin Yerleşimlerinin Konstrüksiyon ve İnşaya Etkisi", 7.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu , 1-2 Kasım 2013, İstanbul, Türkiye.
14. Ağra Ö., Atayılmaz Ö., Yurtseven A., (2012), "Determination of Two-Phase Flow Void Fraction of R600a in a horizontal Tube", ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress, 9-15 Kasım 2012, Houston.Tx, A.B.D.
15. Yurtseven A., Üst Y., (2012), "Gemi Islak alanın ısı değıştirici olarak kullanılmasına yönelik sayısal analiz", Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi, 1-2 Aralık 2012, , İstanbul, Türkiye.
16. Çelebi U.B., Yurtseven A., Çoşgun T., Kökkülünk G., (2011), "Comparison of Marine and Land Transportation Emissions", 1.Uluslararası Gemi İnşaatı ve Denizcilik Sempozyumu, 1-2 Ekim 2011, , İstanbul, Türkiye.