

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**KANATÇIK TİPİ DİKDÖRTGEN GİRDAP ÜRETECİNİN
DÜZ ZEMİNDE AÇI, YÜKSEKLİK VE UZUNLUK
PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ ANALİZİ İLE GELİŞTİRİLMESİ**

**Hazırlayan
Muhammed ÇETİNTAŞ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurcan SARIKAYA BAŞTÜRK**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2021
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**KANATÇIK TİPİ DİKDÖRTGEN GİRDAP ÜRETECİNİN
DÜZ ZEMİNDE AÇI, YÜKSEKLİK VE UZUNLUK
PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ ANALİZİ İLE GELİŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Muhammed ÇETİNTAŞ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurcan SARIKAYA BAŞTÜRK**

**Ağustos 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Muhammed ÇETİNTAŞ

İmza

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Kanatçık Tipi Dikdörtgen Girdap Üretecinin Düz Zeminde Açı, Yükseklik ve Uzunluk Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi ile Geliştirilmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Muhammed ÇETİNTAŞ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Nurcan SARIKAYA BAŞTÜRK

Sivil Havacılık ABD Başkanı

Prof. Dr. İlke TÜRKMEN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Nurcan SARIKAYA BAŞTÜRK'e, teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, kendileriyle ilgilenemediğim zamanlarda anlayış ve fedakârlık gösteren aileme de sonsuz teşekkürler ederim.

Muhammed ÇETİNTAŞ

Ağustos 2021, KAYSERİ

KANATÇIK TİPİ DİKDÖRTGEN GİRDAP ÜRETECİNİN DÜZ ZEMİNDE AÇI, YÜKSEKLİK VE UZUNLUK PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ İLE GELİŞTİRİLMESİ

Muhammed ÇETİNTAŞ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurcan SARIKAYA BAŞTÜRK

ÖZET

Sunulan tez çalışmasında düz zemin üzerinde sıfır basınç gradyeni altında türbülanslı hava akımına karşı yerleştirilmiş kanatçık tipi dikdörtgen girdap üreticinin Ansys Fluent yazılımı kullanılarak Kayma Gerilmesi Taşınım (Shear Stress Transport- SST) $k-\omega$ türbülans modeli ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hesaplamaları yapılmıştır. Girdap üreticinde açı, yükseklik ve uzunluk değerlerinin değişmesi ile kendi üzerinde oluşan sürüklenme kuvveti, vorteks merkezinin dikey yönde alt bölgesindeki azami hızı ($V_{x_{max}}$), azami vortisite değeri, sirkülasyon kuvveti ve türbülans girdap frekansı açısından belirlenen mesafeler içerisinde kıyaslamalar yapılmıştır.

Yapılan analizin sonuçlarının literatürde mevcut olan çalışmalarla doğrulanabilmesi için girdap üretici 3.23m mesafede yerleştirilmiş ve giriş hızı 34m/s seçilmiştir. Girdap üreticinin ilk yüksekliği 10.2mm ($h \sim 0.226\delta$) ve uzunluğu 59.4mm (açıklık oranı=5.8) olarak ayarlanmıştır. Test edilecek girdap üretici açısı 13° , 15.5° , 18° , 20.5° , 23° ; test edilecek yükseklikler 0.5h, 0.75h, 1h, 1.25h, 1.50h, 2h ve test edilecek uzunluklar 0.4L, 0.6L, 0.8L, 1L, 1.2L, 1.4L olarak belirlenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucu girdap üretici belirlenen mesafede 13° yerleştirme açısında en iyi sonucu verirken, yükseklik 1h değerlerinde, uzunluk da 1L ve 1.2L değerleri arasında kabul edilebilir şekilde performans artışı sergilemiştir. İncelemeler sonunda $V_{x_{max}}$ hızının girdap üretici üzerindeki geri tutunma mesafesine bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Girdap üretici, Pasif akış kontrolü, Hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD), Sıfır basınç gradyeni.

IMPROVEMENT THE ANGLE, HEIGH AND LENGTH PERFORMANCE OF THE VANE-TYPE RECTANGULAR VORTEX GENERATOR ON FLAT PLATE WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS

Muhammed CETINTAS

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, August 2021**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Nurcan SARIKAYA BASTURK

ABSTRACT

In this paper, we performed computational fluid dynamics (CFD) analysis of vane-type rectangular vortex generator placed on the turbulent boundary layer at zero pressure gradient on the flat plate using Ansys Fluent with Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ turbulence model. By changing angle, height and lengt of vortex generator, we compared the results within the determined distance in terms of drag coefficient, maximum speed in the lower region of the vortex center in the vertical direction ($V_{x_{max}}$), peak vorticity, circulation strenght and turbulence eddy frequency.

In order to verify the results of the analysis with previous studies in literature, vortex generator is placed at 3.23m downstream of flat plate and inlet speed is set to 34m/s. The initial vortex generator height was set to 10.2mm ($\sim 0.226\delta$) and lenght was set to 59.4mm (aspect ratio=5.8). Vortex generators to be tested angles determined as 13° , 15.5° , 18° , 20.5° , 23° and heights determined as 0.5h, 0.75h, 1h, 1.25h, 1.50h, 2h and lengths determined as 0.4L, 0.6L, 0.8L, 1L, 1.2L, 1.4L.

As a result of our analysis, at the certain distance the vortex generator gave the best results at 13° angle of incidence, the height gave the best results at 1h, and the length showed an acceptable performance increase between 1L and 1.2L. Our investigations showed that, $V_{x_{max}}$ velocity is related to reattachement point on vortex generator.

Keywords: Vortex Generator, Passive flow control, Computational Fluid Dynamics (CFD), Zero pressure gradient.

İÇİNDEKİLER

KANATÇIK TİPİ DİKDÖRTGEN GİRDAP ÜRETECİNİN DÜZ ZEMİNDE AÇI, YÜKSEKLİK VE UZUNLUK PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ İLE GELİŞTİRİLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Genel Bilgiler ve Literatür Araştırması.....	4
1.2. Standart Yollarla Girdap Üretici Tasarımı	12

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği.....	14
2.2. Tasarım	15
2.3. Ağ Oluşturma	16
2.3.1. Ağ Bağımsızlığı.....	17
2.4. Kurulum.....	24

3. BÖLÜM**GİRDAP ÜRETECİNİN AÇI, YÜKSEKLİK VE UZUNLUK DEĞERLERİNİN
SAYISAL ANALİZLERİ**

3.1. Giriş	26
3.2. Açı Testi	30
3.3. Yükseklik Testi.....	40
3.4. Uzunluk Testi.....	58

4. BÖLÜM**TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER**

4.1. Tartışma, Sonuç ve Öneriler	67
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ.....	77

KISALTMALAR

A	: Açı (girdap üretici)
L	: Uzunluk (girdap üretici)
h	: Yükseklik (girdap üretici)
AR	: Girdap üretici açıklık oranı (L/h)
SST	: Kayma gerilmesi taşınım modeli (Shear Stress Transport)
ρ	: Akışkan yoğunluğu
Γ	: Sirkülasyon kuvveti ($\Gamma = \omega_{azami} \cdot \pi \cdot R_{0.5} / 0.693$)
ω	: Vortisite ($= \omega_x + \omega_y + \omega_z$)
ω_x	: Akış yönündeki vortisite miktarı
ω_{azami}	: Akış yönündeki azami vortisite değeri
Rö	: Öncül Test
C_L	: Taşıma kuvveti katsayısı
C_d	: Sürüklenme kuvveti katsayısı
Pa	: Paskal
CFD	: Computational Fluid Dynamics
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
SBVG	: Sınır tabaka altı girdap üretici
MVG	: Mikro girdap üretici
AoA	: Kanat hücum açısı
$\Delta (x, y \text{ veya } z)$	: Son konum ile ilk konumun farkı
VG	: Vortex generator
$V_{x_{max}}$	: Vorteks merkezinin dikey yönde alt bölgesindeki azami hız

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Girdap üretici optimizasyon aşamaları.....	13
Tablo 2.1. Test ortamlarının düğüm sayıları.....	21
Tablo 2.2. Girdap üreticilerine etki eden sürüklenme ve taşıma kuvveti.	23



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Zıt yönlü girdap üretici ve paralel yönlü girdap üretici (Burada; w: dış açıklık, A: açı, h: yükseklik, L: uzunluk, s: iç açıklık mesafesidir.)	12
Şekil 2.1. Sonlu analiz alanı	15
Şekil 2.2. Girdap üretici boyutsal özellikleri	16
Şekil 2.3. Öncül Test (Rö) (Hız girişi $x=0$ tarafındadır.)	19
Şekil 2.4. Öncül Test (Rö) Hız konturu (m/s)	20
Şekil 2.5. Bölgesel sıkıştırılmış ağların bağımsızlık çalışması (Hız girişi $x=0$ tarafındadır, R1'den R4'e doğru ağ yoğunluğu artırılmıştır.).....	20
Şekil 2.6. Hız konturları (m/s) (İlk kontur $\Delta x=0$ cm lokasyonunda, orta kontur $\Delta x=5$ cm lokasyonunda ve sonuncu kontur $\Delta x=15$ cm lokasyonunda oluşan vortekse aittir.)	22
Şekil 2.7. Sıkıştırılmış yapılandırılmış ağ ile oluşturulan analiz ortamı (8.147.629 hücre)	24
Şekil 3.1. Vorteks alt akış yolu hız parametreleri (Sınır tabaka hız profili ölççeği her girdap üreticinin belirlenen mesafelerde alt akış bölgesinde oluşturduğu vorteksin merkezine yerleştirilmiştir.)	27
Şekil 3.2. Azami vortisite (ω_{azami}) kıyaslama grafiği (Grafikte Deney* ve Sayısal Analiz*; Brian vd. [43], Sayısal Analiz ise sunulan tez çalışması sonucudur.).....	28
Şekil 3.3. 23° girdap üretici tarafından $\Delta x=15$ cm lokasyonunda oluşturulan vorteks merkezinin y ve z eksenindeki lokasyon kıyaslama grafiği (Deney* ve Sayısal Analiz*; Brian vd. [43], Sayısal Analiz ise sunulan tez çalışması sonucudur.).....	28
Şekil 3.4. Girdap üretici boyutsal özellikleri	29
Şekil 3.5. $\Delta x=15$ cm Azami vortisite değişim grafiği ($\omega_{azami} s^{-1}$).....	31
Şekil 3.6. Açıya bağlı sirkülasyon kuvveti (m^2/s) değişim grafiği.....	31
Şekil 3.7. Açıya bağlı sirkülasyon kuvveti/sürüklenme kuvveti ve türbülans girdap frekansı yüksekliği/sürüklenme kuvveti kıyaslama grafiği (Artış oranını görüntüleyebilmek için 23° 'den elde edilen oranlar her iki kıyaslama için 1 kabul edilmiştir.).....	32

- Şekil 3.8. Açıya bağlı kayma gerilmesi değişimi konturu (Burada; a) 13° , b) 15.5° , c) 18° , d) 20.5° , e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin alt akış yolu boyunca zeminde oluşturduğu kayma gerilmesinin konturlarıdır.) 33
- Şekil 3.9. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu türbülans frekans ($\omega_{\text{frekans}}\text{s}^{-1}$) konturu (Burada; a) 13° , b) 15.5° , c) 18° , d) 20.5° , e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin türbülans frekansı konturlarıdır. Zemine yakın bölgelerde frekans değeri çok yüksek olduğu için oluşturulan konturda 4000s^{-1} üzeri değerler kırmızı olarak gösterilmiştir.)..... 35
- Şekil 3.10. $\Delta x=15\text{cm}$ hız konturu (Burada; a) 13° , b) 15.5° , c) 18° , d) 20.5° , e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin hız konturlarıdır. Konturdaki azami hız 30m/s 'dir.) 36
- Şekil 3.11. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda açığa bağlı $V_{x_{\max}}$ hızı grafiği 37
- Şekil 3.12. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda açığa bağlı sınır tabaka hız profili 37
- Şekil 3.13. $\Delta y=0.5h$ bölgesel yatay hız konturları (Burada; a) 13° , b) 15.5° , c) 18° , d) 20.5° , e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin hız konturlarıdır.) 38
- Şekil 3.14. Açığa bağlı sürüklenme kuvveti grafiği 39
- Şekil 3.15. 13° açı ile yerleştirilmiş girdap üreticinin zemin basınç konturları ve akış hızı çizgileri 40
- Şekil 3.16. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}^{**}$ lokasyonu sınır tabaka hız profili (** olarak işaretlenenler $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonuna ait hız profilleridir.) 41
- Şekil 3.17. Vorteks bölgesi hız değişimi grafiği ($\Delta x=15\text{cm}$ ile $\Delta x=20\text{cm}$ arasındaki değişim değerleridir.)..... 42
- Şekil 3.18. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu yüksekliğe bağlı sirkülasyon kuvveti (m^2/s) grafiği 43
- Şekil 3.19. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu R_{05} yarıçap ortalaması 44
- Şekil 3.20. $\Delta x=15\text{cm}$, ω_{azami} noktasından $\omega_{\text{azami}}/2$ noktasına kadar vortisite konturu. (Vortisite boyutları Şekil 3.19.'da verilen $\Delta x=15\text{cm}$ R_{05} yarıçapı grafiği aracılığıyla verilmiştir. Her konturun kırmızı bölgesi Şekil 3.21.'de verilen ω_{azami} $\Delta x=15\text{cm}$ değerlerine, mavi bölgesi ise $\omega_{\text{azami}}/2$ ve altına eşittir. Burada; a) $0.5h$ b) $0.75h$ c) $1h$ d) $1.25h$ e)

1.5h ve f) 2h girdap üreteçlerine aittir. Görseller Tecplot programı aracılığı ile çizilmiştir [74].)	45
Şekil 3.21. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu yüksekliğe bağlı azami vortisite (ω_{azami})	45
Şekil 3.22. Yüksekliğe bağlı kayma gerilmesi konturu (Burada; a) 0.5h, b) 0.75h, c) 1h, d) 1.25h, e) 1.5h, f) 2h yüksekliklerinde girdap üreteçlerinin alt akış yolu boyunca zeminde oluşturduğu kayma gerilmesinin konturudur.)	46
Şekil 3.23. Azami kayma gerilmesi ve vorteks çemberi yok olma mesafesinin yüksekliğe bağlı yer değişimi grafiği (Grafikte çember yok olma mesafesi vorteks çemberinin girdap üretici sonrası alt akış yolunda yok olma mesafesini tanımlamaktadır. 2h azami kayma gerilmesi mesafesi inceleme alanının dışarısında kalmıştır.)	47
Şekil 3.24. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu hız konturu (Burada; a) 0.5h, b) 0.75h, c) 1h, d) 1.25h, e) 1.50h ve f) 2h yüksekliğine sahip girdap üreteçleridir. Konturdaki azami hız 30m/s'dir.)	49
Şekil 3.25. $\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonuna kadar z eksenı üzerinde vorteksin yatay hareket grafiği	50
Şekil 3.26. $\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonuna kadar y eksenı üzerinde vorteksin dikey hareket grafiği	51
Şekil 3.27. Yüksekliğe bağlı sürüklenme kuvveti grafiği	52
Şekil 3.28. 1h girdap üretici izo-yüzeyleri (Mavi yüzey -30pa, kırmızı yüzey +30pa basınç alanına tekabül etmektedir.)	53
Şekil 3.29. Gelişim bölgesinde oluşan basınç alanı konturu (1h)	54
Şekil 3.30. Basınç gelişim bölgesinde yüksekliğe bağlı basınç alanı yarıçapı ($P_{\text{max}}/2$)	55
Şekil 3.31. Vorteks basıncı bölgesi basınç alanı konturu (1h)	56
Şekil 3.32. 1h girdap üretici (-30pa, +30pa) izo-yüzeyleri	57
Şekil 3.33. Zıt girdap üreteçlerinin vorteks yaklaşma konturları	58
Şekil 3.34. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu R_{05} yarıçapı grafiği	59
Şekil 3.35. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu uzunluğa bağlı ω_{azami} grafiği	60
Şekil 3.36. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu uzunluğa bağlı sirkülasyon kuvveti (Γ) (m^2/s)	60
Şekil 3.37. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu sınır tabaka hız profili	61

Şekil 3.38. $\Delta x=15\text{cm}$ hız konturu (Burada; a) $0.4L$, b) $0.6L$, c) $0.8L$, d) $1L$, e) $1.2L$, f) $1.4L$ uzunluğunda girdap üreticilerinin hız konturlarıdır. Konturdaki azami hız 30m/s 'dir.)	62
Şekil 3.39. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu vorteks $V_{x_{\max}}$ hızı grafiği	63
Şekil 3.40. $\Delta y=0.5h$ lokasyonu hız dağılım konturu (Burada; a) $0.4L$, b) $0.6L$, c) $0.8L$, d) $1L$, e) $1.2L$ ve f) $1.4L$ girdap üreticilerinin hız dağılım konturlarıdır.)	64
Şekil 3.41. Geri tutunma mesafesi (Δr_x : geri tutunma x eksen mesafesi).....	65
Şekil 3.42. Girdap üretici uzunluğuna bağlı sürüklenme kuvveti grafiği.....	66



GİRİŞ

Akış kontrolü yöntemleri uzun yıllardır hayatımızda olan ve Prandtl'ın [1] getirdiği sınır tabaka teorisi ile son bir asırdır önemi daha da anlaşılan, akışı istenilen fazda tutmaya yarayan yöntemlerdir. Akış kontrolü tekniklerinin çoğu, taşıma kuvvetini (C_L) artırmak, sürüklenmeyi (C_{dD}) azaltmak, akışa bağlı yayılan ses miktarını düşürmek gibi amaçlar için aktif veya pasif yöntemlerden faydalanmaktadır [2]. İstenilen etkileri sağlaması açısından enerji girdisine ihtiyaç duyan aktif yöntemler gerektiği zamanda devreye girmek, kullanım ihtiyacı dışında yapı kaynaklı sürüklenmenin önüne geçmek gibi birçok avantaja sahiptir [3, 4]. Fakat pasif yöntemler ise çalışmasında herhangi bir enerji girdisine ihtiyaç duymadıkları ve komplike sensörler ile birlikte ileri düzey algoritmalar kullanmadıkları için aerodinamik verimliliğe basit bir şekilde katkı sağlamaktadırlar [5].

Bir zemin üzerindeki akış kontrolü; laminar akış mesafesini, türbülansa geçiş bölgesini veya ayrılışa başlama mesafesini belirlemek için yapılmaktadır [6]. Laminer akışlı yüzeyler üzerindeki sürtünme kuvveti, aynı Reynold sayısındaki türbülanslı yüzeylere göre oldukça az yüzey sürtünme kuvveti oluşturmaktadır ve bu sayede uçaklarda ve diğer araçlarda yakıt verimini oldukça artırmaktadır [7]. Fakat türbülanslandırılmış akışlara kıyasla aynı ters basınç gradyenine maruz kalmış laminar akışlar akış ayrılışına daha yatkınlardır [8]. Yüzeydeki bu ayrılış sebebiyle türbinler ve uçak kanadı gibi yapılarda yüksek miktarda enerji kaybı yaşanmakta ve laminar akış fazından kazanılmak istenen verim düşmektedir [9].

Günümüzde türbülanslı tetikleyerek akış ayrılışını önleyen çok sayıda yöntem mevcuttur [10]. Bu yöntemlerden birisi olan girdap üretici birçok çalışmada [11-13] etkin şekilde akış ayrılışını geciktirdiği için sunulan tez çalışmasında girdap üreteçleri incelenmiştir. Fakat girdap üreteçlerinde performansı etkileyen çok fazla parametre bulunmaktadır. Bu sebeple performans iyileştirmesi yapabilmek için çok fazla sayıda test ve inceleme yapılması gerekmektedir. Sunulan tez çalışmasında ise bu alanı daraltmak için düz bir

zemin üzerinde kanatçık tipi dikdörtgen girdap üreticinin yalnızca açısı, yükseklik ve uzunluk değerlerini belirlenen aralıklarla değiştirerek sayısal analizleri yapılmıştır.

Tez Çalışmasının Amacı ve Yöntemi

Literatürde mevcut birçok çalışmada girdap üreticilerinin geometrik, boyutsal ve konumsal özelliklerinde deneyler vasıtasıyla iyileştirmeler yapılmıştır [5, 14-16]. Fakat kanat üzerinde 0 ile 20°'lik hücum açısı aralığında bir girdap üreticini test etmek için; paralel veya zıt yönlü olması, girdap üretici açısı, yüksekliği, uzunluğu, iç ve dış açıklığı, kanat üzerindeki konumu ve tasarım biçimlerinin her birisi devreye girdiğinde, binin üzerinde deneyin yapılması gerekmektedir. Bu durum ise mühendislik çalışmalarında maliyet ve zaman açısından verimli olmamaktadır.

Son yıllarda hem görüntüleme sistemlerinin iyileşmesi hem de sayısal analizlerin bilgisayar ortamlarına taşınması sayesinde bu soruna çözüm olarak düz veya eğimli bir zeminde (sıfır basınç gradyeni veya ters basınç gradyeni altında) girdap üreticilerinin karakteristiği incelenmeye başlanmıştır [13, 17-19]. Bu tip çalışmalar girdap üreticilerinin akış prensiplerini formülize ederek aktif girdap üreticilerinin üretilebilmesi için temel bir veri kaynağı sağlamayı amaçlamaktadır [13]. Aynı zamanda bu analizler sırasında ortaya çıkan iyileştirilmiş girdap üreticileri, pasif girdap üretici uygulamalarının geliştirilmesine de katkı sağlamaktadır [17].

Düz zeminde girdap üreticinin oluşturduğu akışın veya diğer adıyla vorteksin karakteristiğinin çözülmesinde ise genellikle 4 temel unsur sorgulanmaktadır [13, 19, 20]. Bunlar; azami vortisite (ω_{azami}) değeri, vorteks merkezi seyri, yarı sönümlenme çapı ($R_{0.5}$: vorteks yarıçapı) ve vorteks sirkülasyonudur (Γ : dönü kuvveti). Bu değerlendirme yöntemleri sayesinde girdap üreticinin geometrik, boyutsal ve konumsal özelliklerindeki değişimlerin oluşan vorteks üzerindeki etkileri incelenmektedir.

Fakat bu alanda gelişmelerin devam edebilmesi için düz zemindeki girdap üreticilerinin inceleme yöntemlerinin artması, HAD uygulamalarının ve türbülans modellerinin gelişmesi ve buna ek olarak analiz programları için yapılan ağ kalitesinin artırılması gerekmektedir. Bu sayede sayısal ve deneysel veriler arasında bir uyum oluşup

analizlerde ortaya çıkan çözümlene eksikliklerinin yerine deneysel verilerle uyulan sonuçlar vasıtasıyla girdap üreticilerinin prensiplerinin çözülmesi sağlanacaktır.

Sunulan tez çalışmasında ağ modellemesinin gelişebilmesi adına bölgesel olarak yoğunlaştırılmış, düşük geçiş oranına sahip yapılandırılmış ağ ile çok sayıda aç, yükseklik ve uzunluk değerinin yeni yorumlama yollarına imkân tanıyacak şekilde analizleri yapılmıştır. Bu sayede girdap üreticilerinin etki prensiplerinin formüle edilebilmesine ve aktif akış kontrollü girdap üretici uygulamalarında kullanılabilmesine yardımcı olunmuştur. Ayrıca bulunan yeni yorumlama yöntemleri ile HAD analizlerinin zafiyetleri olduğu alanlara değinilmeden performans çalışmaları yapılması için yeni adımlar atılmıştır.

Tez Çalışmasının Organizasyonu

Bu tez çalışmasının organizasyonu şu şekildedir:

Tez çalışmasının birinci bölümünde; genel bilgiler ve literatür taramasına yer verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümde; hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (HAD) temel esaslarına ve Ansys programının kurulumu hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde; girdap üreticinin aç, yükseklik ve uzunluk değerlerinin sayısal analizleri yapılmış ve değerlendirmeler ortaya konulmuştur.

Dördüncü bölümde ise tartışma, sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Akış ayrılışını önleme konusunda uygulanabilirliği kolay ve geniş aralıklarda ters basınç gradyenine karşı koyabilecek yaklaşım bulmak uzun yıllardır mühendisliğin önemli problemlerinden birisi olmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak için Taylor [14, 21] ve Bruynes [22] kanatçık şeklinde bir girdap üretici ortaya koymuş, sınır tabakanın yüksek momentumlu bölgelerinden geçen hava akımını düşük enerjili bölgelere transfer ederek akış ayrılışını geciktirmişlerdir.

1.1. Genel Bilgiler ve Literatür Araştırması

Girdap üreticilerinin yüzey üzerinde verimli bir şekilde akış ayrılışını önleyebilmesi için her başarılı akış kontrol yöntemi gibi sisteme kazandırdıklarının kaybettirdiklerinden daha fazla olması gerekmektedir. Girdap üreticilerinde kazanılan avantajların artması için oluşturduğu vorteks enerjisinin yüksek olması gerekmektedir. Aynı zamanda bu yüksek enerjiyi üretirken en büyük dezavantajlarından birisi olan sürüklenme kuvvetine de minimum miktarda sebebiyet vermesi gerekmektedir.

Literatürde mevcut önceki çalışmalarda, oluşan sürüklenme kuvvetini pasif kontrol yöntemleriyle minimize etmek için ya geometrik özellikler üzerinde iyileştirme yoluna gidilmiş ya da boyutsal ve konumsal iyileştirmeler üzerinde çalışmalar yapılmıştır [15, 23-25].

Tanner; girdap üreticilerinde konumsal iyileştirme sağlayabilmek için yaptığı çalışmalar sırasında girdap üreticilerinin performansının artırılabilmesi için en iyi yerin akış ayrılışından önce geçiş bölgesine yakın yerler olduğunu belirtmiştir [26].

Jones; zıt yönlü kanatçık tipi girdap üreticilerinin birbirine çok yakın yerleştirildiğinde alt akış bölgesinde yüzeyden ayrılışı tetiklediğini, taşıma kuvveti kazancını kaybedip

sadece faydasız sürüklenmeye yol açtığını ortaya koymuştur [27]. İlerleyen yıllarda farklı çalışmalarda da benzer raporlamalara yer verilmiş zıt girdap üreteçleri için iç açıklığın çok kritik ayarlamalar gerektirdiğini paralel girdap üreteçlerinde ise daha geniş kullanım alanı olduğu belirtilmiştir [28]. Raykowski buna ek olarak alt akış yönünde uzun bir alanda akış ayrışması potansiyeli var ise paralel girdap üreteçlerinin zıt yönlü girdap üreteçlerinden daha avantajlı olduğunu, fakat zıt yönlü girdap üreteçlerinin sürüklenme kuvvetini azaltma potansiyelinin daha fazla olduğunu belirtmiştir [29].

Gould; paralel ve zıt yönde yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin uygunluğunu CF-100 uçağında uçuşa yakın Reynold değerinde incelediği çalışmasında, paralel bir girdap üretecinin düşük sürüklenme kuvveti oluşturması için yüksekliğinin olabildiğince düşük ve açıklık mesafesinin ters etkileşimi engelleyecek kadar büyük tutulması gerektiğini, aynı zamanda girdap üreteci açısının da en efektif taşıma kuvveti/sürüklenme kuvveti (C_L/C_d) oranı sağlayan açılarda yerleştirilmesi gerektiğini söylemiştir [30].

Pearcy; şok kaynaklı akış ayrışmasının önlenmesinde çeşitli girdap üreteçlerini ve optimum yerlerini belirlemeye çalışmış ve aynı zamanda geleneksel girdap üreteçlerinin hangi boyutlarda veya hangi konfigürasyonda daha efektif olduğuna dair geniş bir çalışma yapmıştır. Verdiği bilgilere göre en yüksek kazanca sahip açıklık (L/h) oranının 2.5 civarlarında olduğu görülmektedir [16].

Gad-el-Hak; girdap üreteçlerinin optimizasyonu ile ilgili 3 kaynaktan [14-16] aktardığı bilgilere göre, düşük Reynold değerleri için kullanılacak girdap üreteçlerinin; kanatçık açısının 15° 'den küçük, açıklık oranının 1 ile 2 aralığında, yüksekliğinin ise sınır tabaka yüksekliğine yakın değerlerde olması gerektiğini söylemiştir [5]. Paralel girdap üreteçlerinde ise açıklığın, en az 3h kadar olması gerektiğini aksi taktirde Gould'un da belirttiği gibi düşük basınç bölgesinin yüksek basınç bölgesiyle etkileşimi sonucu performans kaybı yaşanabileceğini belirtmiştir [30].

Miller; MOD-2 rüzgâr türbini üzerinde yaptığı çalışmalarda %100'ü girdap üreteçli, %70'i girdap üreteçli ve girdap üreteçsiz yapıları kıyaslamış ve %100 girdap üreteçli türbinlerin enerji veriminin kısmi girdap üreteçli türbinlere göre %7 daha fazla performans sağladığını belirtmiştir [31].

Gyatt; rüzgâr türbinleri üzerinde yaptığı çalışmasında kiriş uzunluğunun %10'u ($c/x=0.1$) bölgesine yerleştirilen girdap üreteçlerinin diğer konumlara göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir [32]. Fakat bilindiği üzere kanat üzerinde Reynold sayısının artması geçiş bölgesinin yerinin öne taşınmasına sebebiyet vermektedir [33]. Girdap üreteçleri ise geçiş bölgesinin yukarısında bulunduğu daha efektiftir. Bu sebeple düşük Reynold değerlerinde girdap üreticinin kirişe göre konumu daha aşağılara taşınabildiği gibi yüksek hızlı yapılarda ise daha önlere alınabilmektedir.

Nickerson; NACA0024 kanat profiline sahip rüzgâr türbini üzerinde yaptığı çalışmasında 100.000 ile 200.000 arasında değişen 3 ayrı Reynold değeri için paralel kanatçık tipi girdap üreteçlerini farklı kiriş bölgelerinde denemiş ve düşük Reynold değerlerinde de girdap üreteçlerinin performansının daha fazla olduğunu belirtmiştir [34].

Bragg vd.; Kanard kanat profiline sahip Voyager uçağının erken aşamada stola girmesini ve burun aşağı dengesizliğini önlemek için uçakta genel aerodinamik dizaynı veya motor tipini değiştirmek yerine kanat üzerine girdap üretici yerleştirerek düzeltme yoluna gitmiş ve girdap üretici üzerinde yaptığı çalışma sırasında en düşük sürüklenme kuvvetinin sınır tabakaya gömülü ($h < \rho$) girdap üreteçlerinden elde edildiğini belirtmiştir [35].

Daha öncesinde bahsedildiği gibi girdap üreticinin yüksekliğinin azaltılması oluşturduğu sürüklenme kuvvetini azaltmaktadır, fakat ne kadar düşürüleceği ile ilgili uygulama alanları uzun yıllar problem olmuştur. Bu sorun ile ilgili Kueth; ilk başarılı çalışmaları gerçekleştirerek firar kenarında sınır tabakanın 0.42 ve 0.27 mertebelerine yerleştirilmiş paralel girdap üreteçleriyle yayılan ses miktarını azaltmıştır [36].

Lin vd.; flaplar üzerinde performans iyileştirmesi sağlamak için yapılan çalışmada girdap üretici yüksekliğini, kiriş uzunluğunun (h/c) %0,18'i kadar tutularak yaptığı kıyaslamalarda sınır tabakanın altına yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin olumlu sonuç verdiğini ortaya koymuşlardır [37, 38]. İlerleyen yıllarda h/ρ (üreteç yüksekliği/sınır tabaka kalınlığı) oranlarının 0.2'ye kadar geldiği yüksekliklerde ($h=0.2\rho$) yerleştirilen girdap üreteçlerinin de kısa mesafede iyi şekilde akış ayrışımı engellediğini belirtmiştir [39].

Ashill vd.; rüzgâr tüneli içerisine yerleştirdiği tümsek üzerinde farklı geometrik şekillerdeki sınır tabaka altı (SBVG) girdap üreteçlerinin deneysel ve sayısal verileri (HAD verileri) üzerinden kıyaslamalara gitmiş, girdap üreticinin uzunluğunun belirli bir açı değerine kadar sirkülasyon miktarını artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmasında zıt yönlü girdap üreteçlerinin daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir [40].

Bir girdap üreticinin ne kadar uzun mesafeye etki etmesinde ilk etken paralel ya da zıt yönlü olmasıyken ikinci etken ise ne kadar güçlü vorteks ürettiğidir [4, 29]. Girdap üretici yüksekliği arttıkça sürüklenme kuvveti artırdığı gibi belirli bir yüksekliğe kadar dönü kuvveti de artmakta ve daha uzun akış ayrılışlarını engelleyebilmektedir. Bu sebeple geleneksel girdap üreteçleri hücum kenarına yakınken mikro girdap üreteçleri ise ayrılış bölgesine daha yakındır [12, 13, 41, 42]. Normal bir uçak kanadında mikro girdap üreteçlerinin uzun mesafede ayrılış önleme konusunda yetersiz kalabileceği de düşünülmelidir [29]

Son yıllarda kanat üzerinde girdap üretici deneyleri yerine düz zeminlere yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin hareketleri incelenmeye başlanmıştır [13, 17, 42-45]. Bu sayede girdap üreticinin ürettiği vorteksin izlediği yol, vorteks boyutu ve sirkülasyon kuvveti gibi veriler HAD analizleriyle kıyaslanarak, kanat üzerine yerleştirilmeden yayılım oranları ve performans değerleri hesaplanabilmekte, kanat üzerinde yapılacak çalışma sayısı azaltılabilmektedir.

Brian vd.; düz zemin üzerindeki sayısal çalışmasında Spalart-Allmaras (S-A) ve Kayma Gerilmesi Taşınım (SST) $k-\omega$ türbülans modelini düz ve ikizkenar yamuk girdap üreteçleri üzerinde kıyaslamış, SST $k-\omega$ modelinin sönümleme miktarının S-A modeline göre daha düşük olduğunu fakat iki modelin de parçacık görüntülemeli hız ölçüm metodu ile çıkan sonuçlarla kıyaslandığında uzun mesafede yüksek sönümlemeye sebep olduğunu ortaya koymuştur [43].

Yao vd.; mikro ve geleneksel girdap üreteçlerinin parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu ve HAD analizi aracılığı ile izlediği yolu, vorteks boyutunun mesafeye bağlı değişimini ve sirkülasyon kuvvetini kıyaslamış, mikro girdap üreteçlerinde sirkülasyon kuvvetinin, sönümlenme miktarının ve vorteks boyutunun $20h$ ve üzeri alt akış yolunda HAD analizleri vasıtasıyla iyi şekilde tahmin edilemediğini ortaya koymuştur [13]. Buna ilave olarak bir girdap üreticinin ileriki dönemlerde aktif akış kontrollü

uygulamalarla da kullanılabilmesine imkân sağlamak için düz zemindeki davranış prensiplerinin tamamıyla çözülmesi gerektiğini söylemiştir. Ayrıca sınır altı girdap üreteçlerinin gelecekteki aktif akış kontrolü yöntemlerine daha uyumlu olduğunu ve bu sebeple düz zeminde hareket prensiplerinin çözülmesinin oldukça önemli olduğunu belirtmiştir. Düz zemindeki karakteristiğinin çözülmesinde ise 4 temel unsurdan bahsetmiştir [13, 19]. Bunlar; vorteks yoğunluğu (Azami vortisite($\omega_{x,azami}$)), vorteks merkezinin hareketinin izlenmesi, vorteks sirkülasyon kuvveti (Γ), yarı sönümlenme çapıdır ($R_{0.5}$). Elde edilen bilgilerle ise bir girdap üreticinin etki prensipleri çözümlenerek ileriki çalışmalarda bu etkilerin formülize edilmesi ve aktif girdap üreteçlerinin üretiminin kolaylaştırılması planlanmaktadır [13].

Fernandez-Gamiz; düz zemine yerleştirdiği 20° ile 35° aralığındaki girdap üreteçlerinin HAD analizini ve deneysel sonuçlarını kıyaslamış, 25° üzerinde sayısal verilerin doğruluğunun azaldığını belirtmiştir [44].

Li vd.; düz zemin üzerine yerleştirdiği üçgensel girdap üreticinin yükseklik ve yerleştirme açısı değişiminin alt akışa etkisini HAD analizi ve deneysel veriler ile kıyaslayarak sayısal incelemesini yapmış, kanat üzeri yaptığı testlerde girdap üreteçlerinin stol açısını yükselttiğini belirtmiştir [17].

Wik vd.; düz zemine yerleştirilmiş sınır altı girdap üreticinin (SBVG) sayısal analizinde türbülans modellerini kıyaslamış, seçilen türbülans modelinin sonucu doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur [46]. Yaptığı incelemelerde Spalart-Allmaras (S-A) türbülans modeli vorteksin yatay eksen üzerindeki hareketini iyi ölçüde tahmin ederken dikey eksenindeki hareketini büyük ölçüde sapmayla göstermiştir. SST k- ω modeli ise iki ekseninde de deneysel verilerle uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur. İki türbülans modeli de sirkülasyon kuvvetini deneysel verilere yakın hesaplamıştır. Fakat vorteks büyüklüğünün konuma göre artışını deneysel verilerden daha büyük hesaplamış ve mesafeye bağlı azami vortisite değişimini deneysel verilerden daha düşük göstermiştir.

Jirasek; düz ve ters basınç gradyenine maruz kalmış zemine yerleştirilmiş aktif ve pasif girdap üreteçlerinin HAD analizini ve deneysel sonuçlarını kıyaslamış, çalışmasında alt akış alanındaki yetersiz hücre sayısının deneysel verilerden sapmaya sebebiyet verdiğini belirtmiştir [47].

Velte vd.; düşük Reynold değerlerinde düz zemine yerleştirilmiş yüksek açılı (20° - 40° aralığında) girdap üreteçlerinin alt akış bölgesini stereoskopik parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu ile incelemiştir [45]. 20° ile 40° aralığında vorteks çapının, sirkülasyon miktarının ve vorteks merkezi hızının açığa bağlı olduğunu fakat vorteks çapının açı ile ilişkisinin sınır tabaka ve üzeri yükseklikteki girdap üreteçlerinde daha az etkin olduğunu ortaya koymuşlardır.

Stillfried; difüzörler üzerindeki çalışmasında ters basınç gradyeni ve sıfır basınç gradyeni üzerine yerleştirilen pasif ve aktif girdap üreteçlerinin deneysel verileri ile HAD analizinin sonuçlarını kıyaslamış, uzak mesafede HAD analizi ile verilerin yeterince uyumlu sonuç vermediğini belirtmiştir [48].

McConnell; deneysel çalışmasında flap üzerine 60° 'de yerleştirdiği üçgen girdap üretici modelinin değişik boyutlarda ve açıklık oranlarında kıyaslamasını yapmış ve uzunluk değişiminin yaptığı testlerde çok ufak kazanımlar sağladığını belirtmiştir [49].

Godard; ters basınç gradyeni üzerinde yaptığı değişik boyut ve geometrilerdeki testlerinde, üçgen girdap üreteçlerinin dikdörtgen girdap üreteçlerinden daha az sürüklenme kuvveti oluşturup daha çok kayma gerilmesine sebep olduğu ve bu sayede tutunmayı daha çok artırdığını, 18° girdap üretici açısının diğer değerlerden daha iyi olduğunu ve uzunluğun yüksekliğe oranının (açıklık oranı=2) 2 kat olması gerektiğini belirtmiştir [4].

Ibarra-Udaeta vd.; dikdörtgen girdap üreticinin h ve A açısından sayısal analizini yapıp sonuçlarını Bray'ın [50] deneysel verileriyle kıyaslamış, sayısal analizlerin tutarlı sonuçlar verdiğini belirtmiştir [18]. Başka bir çalışmada ise dikdörtgen girdap üreticinin ve 'cell-set model' girdap üretici uygulamasının büyük girdap simülasyonu ve Reynold ortalamalı Navier-stokes modelleri üzerinden düz zeminde vorteks yolu, vorteks hızı, sirkülasyon gücü ve kayma gerilmesi açısından kıyaslamasını yapmıştır [51].

Velte; ters basınç gradyenine maruz kalmış girdap üreteçlerinin stereoskopik parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu ile ve büyük girdap simülasyonu modeli üzerinden kıyaslamasını yapmış, analizin deney ile uyumlu olduğunu belirtmiştir. Fakat benzer sonuçları Reynold ortalamalı Navier-stokes modeli üzerinden alamamıştır [52].

Fouatih vd.; NACA4415 kanat profili üzerinde değişik boyutlardaki geleneksel dikdörtgen ve üçgensel girdap üreticilerinin deneylerini yapmış, kanat profili C_{Lmax} ve C_d değerinin girdap üretici açısıyla arttığını belirtmiştir. Kanat profili stol açılarından sonra ise C_d değerinin girdap üretici açısına bağlı olarak azaldığını gözlemlemiştir. Geleneksel ve sınır tabaka altı (mikro) girdap üreticilerini kıyasladığında ise C_{Lmax} 'ın geleneksel girdap üreticiyle daha yüksek çıkmasına karşın, C_L/C_d oranının mikro girdap üreticilerinde yüksek olduğunu belirtmiştir. Ayrıca girdap üretici kalınlığının performansa negatif etkisinin olduğunu belirtmiştir [53].

Yan vd.; NACA0018 kanat profili üzerine yerleştirdiğı girdap üretici testlerinde girdap üretici uzunluğunun iki katına çıkması durumunda 15° kanat hücum açısında (AoA) C_L ve C_d değerlerinde önemli bir fark olmadığını belirtmiştir. 16° kanat hücum açısında ise $2L$ uzunluğundaki girdap üreticinin, C_L değerine az miktarda katkı sağladığını belirtirken, C_d değeri üzerinde oldukça yüksek oranda olumsuz etki oluşturduğunu belirtmiştir [54].

Baldacchino vd.; DU97-W-300 kanat profili üzerinde yaptığı iyileştirme çalışmasında değişik boyutlardaki girdap üreticilerinin boyutsal (açı, yükseklik ve uzunluk) ve konumsal testlerinde, uzunluk değeri için, C_{Lmax} kazanımının uzunlukla mantıksal bir ilişkisini bulamamış, C_L/C_d oranının ise test ettiği aralıkta uzunluk artışı ile birlikte arttığını söylemiştir [55].

Gao vd.; DU97-W-300 kanat profili üzerinde yaptığı girdap üretici çalışmasında girdap üretici uzunluğunun 17mm'den 20.4mm'ye artmasının hem taşıma kuvveti hem de sürüklenme kuvveti üzerinde negatif etki oluşturduğunu söylemiştir [56].

Li vd.; türbin kanatlarının kök kısımlarındaki akış ayrılışını önlemek için geliştirmeye çalıştığı üçgen tip zıt girdap üreticilerinin dış açıklık oranının ve buna bağlı olarak vorteks merkezinin birbirine olan mesafesinin akış performansına etkisini sayısal ve deneysel analizlerle incelemiş, dış açıklık oranının belirli bir değerden sonra performans kaybına sebep olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda 62m/s hızda verilen girdap üreticinde en ideal açıklık oranının 5h mesafesi olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında vorteks alanı, sirkülasyon miktarı ve vorteks merkezinin izlenmesi gibi incelemelere yer vermiştir [57].

Zhen vd.; Aludra İnsansız Hava Aracı'nın performansının iyileştirilmesi için geliştirmeye çalıştığı girdap üreteçlerinin performansı üzerinde yaptığı sayısal analiz ve deneysel incelemelerinde, sayısal analizlerin (RANS-Spalart-Allmaras) deneylerle uyumlu olduğunu, dikdörtgen ve eğimli girdap üreteçlerinin üçgen girdap üreteçlerinden daha avantajlı olduğunu belirtmiştir [58].

Shim vd.; parçacık görüntülemeli hız ölçümü metodu ile hem laminar hemde türbülanslı tabakada sınır tabaka yüksekliğinde üretilen üçgen, yamuk ve dikdörtgen girdap üreteçlerinin performansının uzunluk ve açı ilişkisini sıfır basınç gradyeni üzerinde incelemiştir; A: 10°'deyken uzunluğun artması azami vortisiteyi %11 kadar azaltmış, 15°'de %6 kadar artırmış, 20°'de iken ise uzunluğun 2.5 katına çıkması azami vortisiteyi %96 artırmıştır. Üçgen girdap üretici dışındaki diğer modellerde ise 15°'den sonra açığa bağlı azami vortisite kazanımında azalma meydana gelmiş, üçgen girdap üretici ise azami vortisite kazanımında doğrusal olarak artış göstermiştir [59].

Li vd.; çalışmasında çeşitli geometrilerde girdap üreticini sınır altı (mikro) ve sınır seviyesinde yerleştirerek test etmiş, dikdörtgen girdap üreteçlerinin hem sürüklenme kuvvetinin hem de vortisite miktarının diğer geometrik şekilli girdap üreteçlerinden daha yüksek olduğunu, ikizkenar yamuk girdap üreteçlerinde ise vortisite miktarının neredeyse dikdörtgen girdap üreteçleriyle aynı seviyede olduğunu fakat daha az sürüklenme oluşturduğunu belirtmiştir [60].

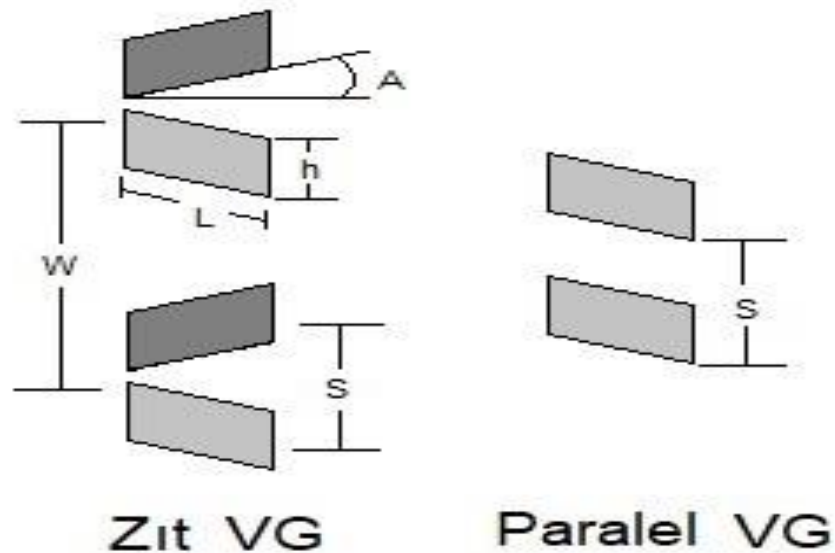
Soucková vd.; girdap üreteçleri üzerine yaptığı sayısal ve deneysel analizlerde düşük profil girdap üreteçlerinin kanat üzerine yerleştirme lokasyonlarının geleneksel girdap üretici yerleştirme lokasyonlarına kıyasla daha hassas olduğunu belirtmiştir [61].

Serakawi vd.; girdap üreteçlerinde açıklık oranının ($AR=L/h$) performansa etkisini araştırmış ve L uzunluk değerinin artmasının akış ayrılışını azalttığını belirtmiştir [62].

Angele vd.; deneysel olarak yaptığı geleneksel girdap üreteçlerinin arka akış alanını inceleme çalışmasında vorteks merkezi yatay hareketinin dikey harekettten daha fazla olduğunu ve akış boyunca vorteks boyutunun arttığını gözlemlemişlerdir [63].

1.2. Standart Yollarla Girdap Üretici Tasarımı

Girdap üreticilerini bir uygulama alanına yerleştirmeden önce performansının iyileştirilebilmesi için incelenmesi gereken birçok faktör vardır. Bugüne kadar her uygulamada kullanılabilecek bir tasarım oluşturulabilmiş değildir. Girdap üreticinin kullanılacağı kanat profili, maruz kalacağı hız ve girdap üreticiden istenilen etki göz önünde bulundurulduğu zaman, iyileştirme çalışmasının her seferinde baştan alınması gerekmektedir. Bunlar belirlendiği zaman ise uygun maliyetli bir modelin mi yoksa yüksek maliyetli ama çeşitli avantajlara sahip olan ileri düzey bir modelin mi seçileceğini belirlemek gerekmektedir. Bunlar arasında akış şekilli girdap üreticileri [64, 65] veya aktif kontrollü girdap üreticileri daha avantajlı sonuçlar ortaya koymaktadır. Fakat hem bir test programında hesaplanması daha zordur hem de üretim açısından pahalı ve çoğu zaman bakım maliyetleri sebebiyle tercih edilememektedir. Bu sebeple hızlı üretim ve etkili uygulama yöntemleri sayesinde dikdörtgen veya açılı kanatçık tipi basit modeller günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 1.1.'de zıt ve paralel yönlü girdap üreticileri verilmiştir.



Şekil 1.1. Zıt yönlü girdap üretici ve paralel yönlü girdap üretici (Burada; w : dış açıklık, A : açı, h : yükseklik, L : uzunluk, s : iç açıklık mesafesidir.)

Seçilen bir girdap üretccinin belirli bir Reynold değccerinde optimizasyon aşamaları Tablo 1.1.’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Girdap üretccci optimizasyon aşamaları.

1. Uygulanacak bölgenin incelenmesi;
1.1 Sınır tabaka analizi
1.2 Stol karakteristiğı
2. Girdap üretcccinin tasarımı [29];
2.1 Hücüm kenarı dik
2.2 Hücüm kenarı açılı
2.3 Akış şekilli [64]
3. Girdap üretccci yönü;
3.1 Birbirine paralel
3.2 Birbirine zıt
4. Boyutsal optimizasyon süreci [29];
4.1 Girdap üretccci açısı
4.2 Girdap üretccci yüksekliğı
4.2.1 Sınır tabaka altında kalan girdap üretccci (SBVG<0.5ρ)
4.2.2 Sınır tabaka üstünde kalan girdap üretccci (geleneksel)
4.3 Girdap üretccci uzunluğı
4.4 İç açıklık
4.5 Kirişcc göre konumu [5, 6]
4.6 Zıt yönlüler kanatçıklarda dış açıklık [5, 6, 50]
5. Birbirine yakın sonuç veren girdap üretccçleriyle en son bulunan girdap üretccci iki sonucu ayırabilmek için tekrar test edilir.

Bu tarz bir optimizasyon süreci yaklaşık binin üzerinde sayısal analizin ve deneysel gözlemin yapılması anlamına gelmektedir. Bu sebeple girdap üretccci optimizasyonunu uygun maliyet ve zaman ile yapmak için sunulan tez çalışmasında A° , h ve L iyileştirmesi yapılmış ve sonuçları incelenmiştir.

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği

Akış hesaplamaları iki temel üzerinde ilerlemektedir. Bunlardan ilki deneysel çalışma diğeri ise hesaplama çalışmasıdır. Deneysel gözlemler ya doğrudan gerçek ortamlarında incelenmektedir ya da rüzgâr tünelleri, su tünelleri gibi test ortamlarında test edilmektedirler. Hesaplama çalışmaları ise akış denklemlerinin yani diferansiyel denklemlerin sayısal veya analitik çözümü ile gerçekleşmektedir. Mühendislik çalışmalarında ise çoğu zaman iki temel esas bir arada ve birbirlerini doğrulayıcı biçimde kullanılmaktadır. Çünkü test ortamlarında cisim üzerindeki fiziksel kuvvetleri test edebilmemiz mümkünken akış alanı hakkında görsel değerlendirmelerin alınması pek kolay olmamaktadır. Bunu elde edebilmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri kullanılmaktadır. HAD analizleri sayesinde bir iyileştirme uygulamasının deney sayısı ciddi ölçüde azalmakta ve toplam süreç oldukça kısalmaktadır.

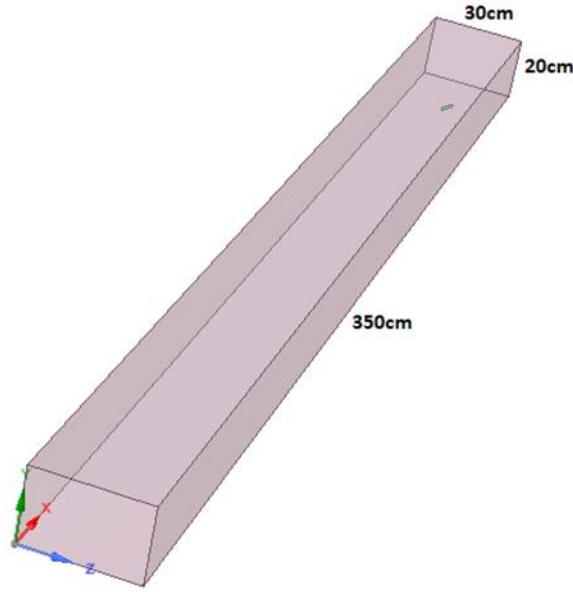
HAD analizleri temelde iki ortamı çözmektedir. Bunlardan ilki olan laminar akış bu tarz analizlerle kolaylıkla çözülebilirken, ikincisi olan türbülanslı akış için evrensel bir model yoktur. Kullanım alanına ve türbülans miktarına göre belirlenen bir türbülans modeli ile sonlu alandaki işlemlerin çözülmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir. HAD analizleri ile sonlu alandaki işlemlerin çözülmesi üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; sonlu analiz alanının oluşturulması ve test edilecek yapının yerleştirilmesi, uygun ağ yoğunluğunun ve biçiminin belirlenmesi ve belirlenen model ile alanın çözümlenip yorumlanmasıdır.

Bu işlem adımlarını uygulamak için çok sayıda yazılım ortaya çıkmıştır. Sunulan tez çalışmasında gerçekleştirilen HAD analizleri son yıllarda yaygın şekilde kullanılan

Ansyes Fluent 2018.1 ile yapılmıştır [66]. Ansyes; üzerinde sayısal işlemlerin yapılmasının yanında birçok alt program ve çözücü vasıtasıyla veri işleme, görselleştirme ve iyileştirme gibi çalışmaları da yapmaya imkân vermektedir. Bu sebeple çizim-tasarım, ağ kurma ve sonuçların incelenmesi Ansyes ile yapılmıştır.

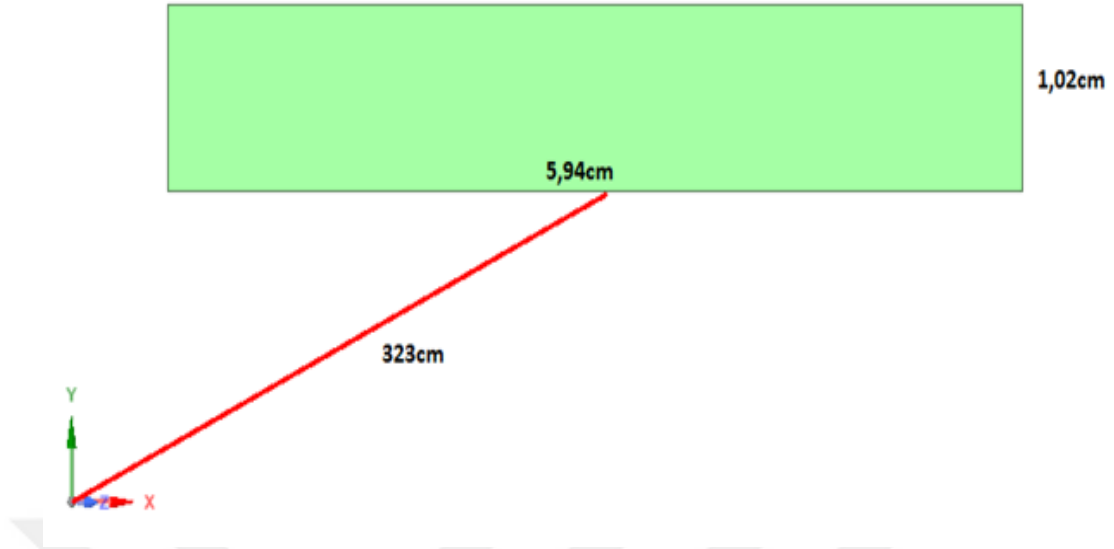
2.2. Tasarım

Ansyes kendi içerisinde basit veya ileri düzey işlemlere hizmet veren birkaç çizici program bulundurmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı Spaceclaim, Design Modeller ve ICEM CFD'dir. Ansyes aynı zamanda harici kaynaklardan da (Solidworks, Catia vb.) uygun formattaki projeleri kolaylıkla alabilmektedir. Sunulan tez çalışmasında dahili bir alt program olan Spaceclaim tercih edilmiştir. Şekil 2.1.'de sonlu analiz alanı görülmektedir.



Şekil 2.1. Sonlu analiz alanı

Oluşturulan sonlu analiz alanı 350cm taban uzunluğuna, 20cm yüksekliğine ve 30cm genişliğine sahiptir. Girişi 'Hız Girişi', yan yüzeyleri ve tepe yüzeyi 'Simetri', girdap üretici ve alt yüzeyi 'Duvar', çıkışı ise 'Basınç Çıkışı' olarak atanmıştır. Şekil 2.2.'de girdap üreticinin boyutsal özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Girdap üretici boyutsal özellikleri

Kullanılan sonlu analiz alanı, girdap üretici ve yerleştirme mesafesi Brian vd. [43] ile aynı özellikte seçilmiş olup 6.06cm^2 yüzey alanına sahiptir. Ağın kalitesini artırabilmek adına kalınlık atanmamış ve Fluent çözücü programında girdap üreticinin yüzeylerinden biri gölge yüzey olarak belirlenmiştir.

2.3. Ağ Oluşturma

HAD analizlerinde akış değişkenlerinin (ortam verilerinin) çözülebilmesi için sonlu analiz alanının uygun küçüklükte hücrelere ayrılması gerekmektedir. Seçilen analiz modeli vasıtası ile her hücre arasında sayısal hesaplama yapıp ortam verileri elde edilmektedir. Bu verilerin deneysel sonuçlarla uyumlu olabilmesi için ağ kalitesinin yüksek, hücre yoğunluğunun ise gerekli bölgelerde diğer bölgelerden daha fazla olması gerekmektedir. Fakat kaliteli ve iyi yoğunlaştırılmış bir ağ oluşturmak sayısal analizlerde en çok zaman harcanan işlem adımlarındandır [47]. Ağ oluşturma süresini hızlandırmak ve kalitesini artırmak için bugüne kadar birçok ağ oluşturma programı yapılmıştır. Ansys'in ağ oluşturmak için geliştirdiği ICEM CFD tez çalışmasında tercih edilmiştir.

Kaliteli bir ağ için bazı temel şartlar vardır. Bunlardan en önemli olanları hücrelerde çarpıklık oranı, en-boy oranı ve geçiş oranıdır.

Çarpıklık; üçgen veya dörtgen yüzeyle ağlarda eşkenar üçgenlikten ya da dikdörtgenlikten sapma ile yani açıları arasındaki benzerliğin azalması ile orantılı olarak artmaktadır ve işlem kalitesini en çok etkileyen unsurlardandır. En-boy oranı; oluşturulan hücrenin köşegenleri arasındaki uzunluk oranına denir. Sayısal çözüm esnasında hücrenin noktaları arasındaki işlem kalitesini azaltma ve yakınsama güçlüklerine yol açabilmektedir. Geçiş oranı ise; bir hücreden komşu bir hücreye geçerken aralarındaki boyutsal farklılık sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Yüksek geçiş oranı olan ağlarda düğümler arasında yapılan işlem hatalı yayılım sergilemekte ve yakınsama problemi olmaktadır. Bu tarz oranların yüksek olması hatalı ve uyumsuz analizlere yol açmaktadır.

Ağ tipleri ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki yapılandırılmamış ağ olup değişik şekillerde hücrelerden oluşmaktadır. Bu hücrelerin tanımlamaları için HAD yazılımlarının kendi algoritmaları bulunmaktadır. İkincisi ise yapılandırılmış ağlardır. Bu tarz ağlarda hücreler koordinat düzleminde i, j ve k indisleriyle tanımlanmaktadır. Kurulumu için belirlenen bir kenardan düğüm sayısı ve yerleşim şekli seçilip diğer kenara kadar tüm hücreler bu düğüme bağlı olarak oluşturulmaktadır. İki ağ tipinin de avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar bulunmaktadır. Basit veya az eğimli geometrilere çarpıklık oranı, en-boy oranı ve geçiş oranının düşük olabilmesi için yapılandırılmış ağlar tercih edilmektedir. Fakat yüksek eğimli karmaşık yüzeylerin analizlerinde yapılandırılmış ağlar yüksek çarpıklık oranı sebebiyle avantajını kaybetmektedir. Bu tarz durumlarda yapılandırılmamış ağları seçmek hem kurulum hızını artırmaktadır hem de daha doğru sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Sunulan tez çalışmasında analiz yüzeylerinin basit geometrilere oluşmasından dolayı yapılandırılmış ağ tercih edilmiştir.

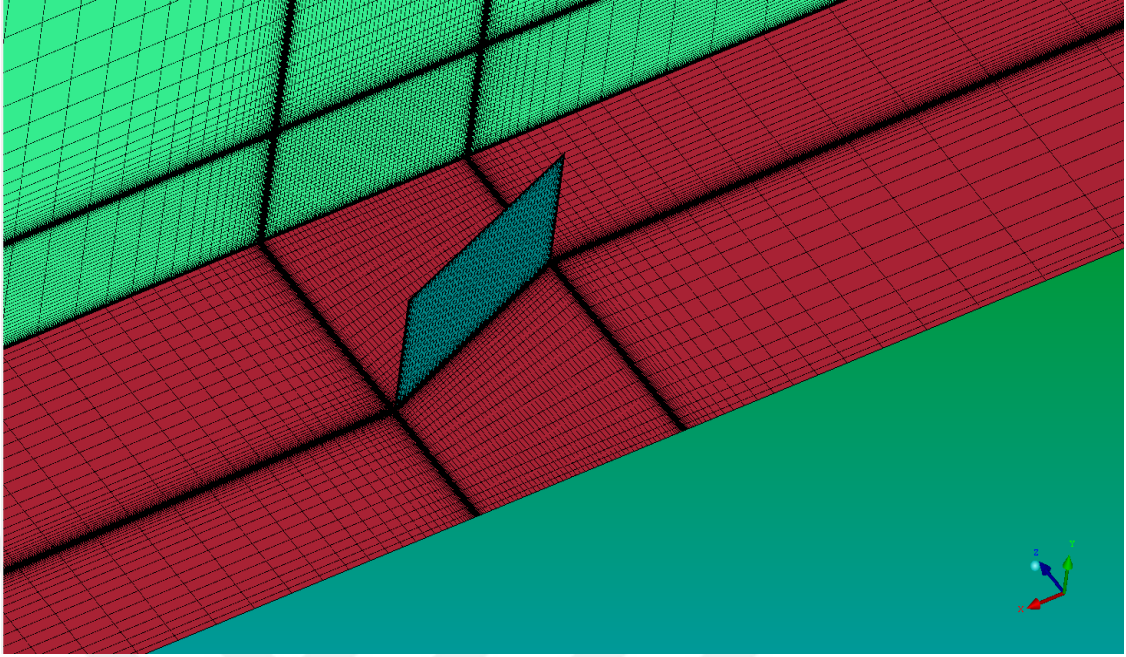
2.3.1. Ağ Bağımsızlığı

Ağ bağımsızlığı, bir analizin sonucunun ağın artırılması ile değişmemeye başlaması durumuna denir. Ağ bağımsızlığını elde etmek için genellikle her yönde hücre sayısı iki kat artırılır ve analiz tekrar yapılır. Hücre sayısının artması ile sonuçlarda kayda değer bir değişiklik oluşmamaya başladığında sonuç artık ağdan bağımsız olarak kabul edilir. Fakat kalitesiz bir ağda hücrelerin küçülmesi yani sayısının artması çarpıklığı, en-boy

oranını veya geçiş oranını değiştirmeyeceği için ağ bağımsızlığı çalışmasından önce ağın temel özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Sunulan tez çalışmasında yüksek türbülans oluşumu ve geniş analiz alanı ihtiyacı olduğu için ağ bağımsızlığının her yönde iki kat artırılarak yapılması mümkün değildir. Bu tarz çalışmalarda ağ artışı bölgesel olarak ayarlanmadığı takdirde hücre sayısı 15 ile 25 milyona kadar artabilmektedir [44]. Sunulan tez çalışmasında bu durumu önleyebilmek adına analiz alanı önem derecesine göre farklı bölgelere ayrılmıştır. Ağ çalışması için belirlenen bölgeler sırasıyla akış gelişim bölgesi, girdap üretici bölgesi ve vorteks taşınım bölgesi olarak üçe ayrılmıştır. Akış gelişim bölgesinde sınır tabaka analizlerinin yapılabilmesi için y^+ değeri 1 civarında seçilip, sınır tabaka gelişimini hesaplayabilecek sayıda yatay ve dikey yapılandırılmış ağ oluşturulmuştur. Girdap üretici bölgesi ve vorteks taşınım bölgesi ise ağ yoğunluğu bakımından ikiye ayrılmıştır. Girdap üretici etrafında vorteks gelişimi olacağı için en yoğun ağ bu bölgede oluşturulup, sonrasında ise akış boyunca olabildiğince düşük geçiş ve en-boy oranına sahip hücreler vasıtasıyla spiral şeklinde hareket eden vorteksin taşınmasına imkân verilmiştir.

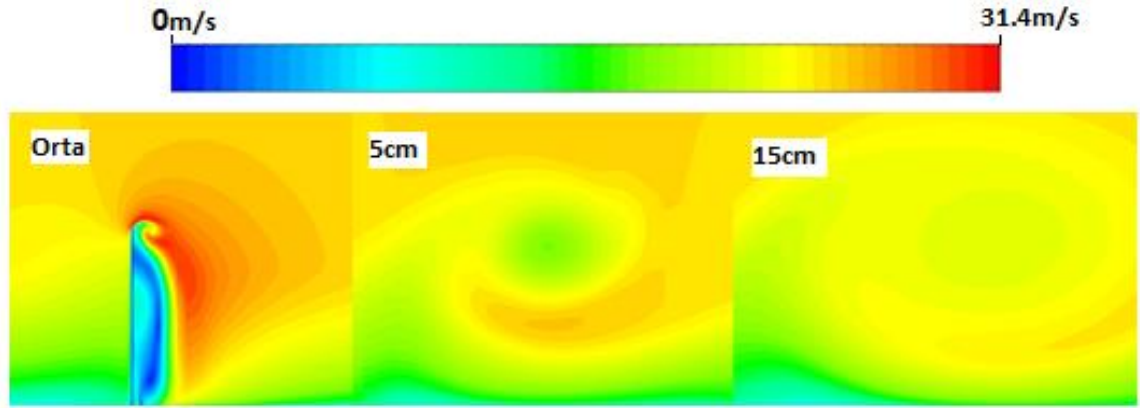
Ağ bağımsızlığı çalışmasına başlamadan önce, oluşturulması gereken hücre sayısı tam olarak bilinmediğinden, doğru ilerleyip ilerlemediğini kıyaslayabilmek adına yoğunluğu bölgesel olarak ayarlanmamış her yönde çok sayıda hücreye sahip öncül bir test ortamı kurulmuştur. Bu test ortamını oluşturabilmek için analiz ortamından daha küçük bir alanda ve daha düşük giriş hızında girdap üretici yerleştirilmiştir. Yapılan test ortamı 1m uzunluğunda oluşturulup, girdap üretici ise açıklık oranı (L/h) 2 olacak şekilde ayarlanmıştır. Giriş hızı düşük türbülans değeri oluşturması adına 25m/s olarak belirlenmiştir. Belirlenen düşük değerler sayesinde girdap üretici üzerinde dikey ve yatay yönde gerekli ağ sayıları daha esnek şekilde hesaplanıp, alt akış alanında ise kullanılan bilgisayar kapasitesini aşmadan yoğunlaştırma imkânı bulunmuştur. Şekil 2.3.'te öncül test ortamının (Rö) ağ çalışması görülmektedir.



Şekil 2.3. Öncül Test (Rö) (Hız girişi $x=0$ tarafındadır.)

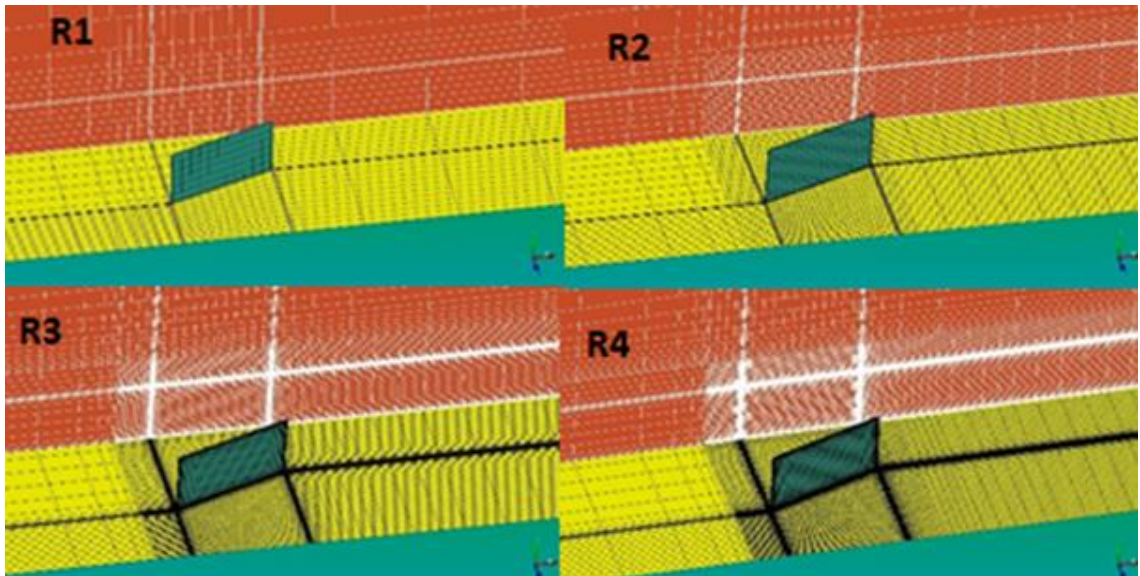
Öncül test ortamında; girdap üretici konumu toplam akış yolunun %40 bölgesinde ($x/c=0.4$), yerleştirme açısı $A=20^\circ$, $L/h=2$, asgari dikgenlik değeri $=0.87$, dikey düğüm sayısı (h) $=60$, yatay düğüm sayısı (L) $=75$, girdap üretici bölgesi hücre sayısı $=488.622$, vorteks taşınım bölgesi hücre sayısı $=323.547$, girdap üretici incelemesi dışındaki bölgede bulunan hücre sayısı $=1.513.431$, en alt katman ağ yükseklik değeri $y^+ < 1$ ve toplam hücre sayısı $2.325.600$ 'dür.

Öncül test ortamında girdap üretici bölgesi ve vorteks taşınım bölgesi için toplam 812.169 hücre tahsis edilmiş fakat dış alanda bulunan ve analizin asıl amacını doğrudan etkilemeyen 1.513.431 hücre seçilen bölgenin çözülüm hızını oldukça ağırlaştırmıştır. Bu sayılara bakıldığı zaman bölgesel olarak sıkıştırılmış ağın önemi açıkça görülmektedir. Bu tarz bir ağ yapısında doğrudan bir ağ bağımsızlığı çalışmasına girildiği zaman, analiz alanındaki hücre sayısında her bir birim artışa karşılık dış alandaki hücre sayısı yaklaşık 2 birim artacağı için ağdan bağımsızlık çalışması analiz yapılamayacak bir hücre sayısı ile sonuçlanabilmektedir. Şekil 2.4.'te öncül test ortamına ait 3 farklı konumdaki hız konturları verilmiştir.



Şekil 2.4. Öncül Test (Rö) hız konturu (m/s)

Öncül test (Rö) hız konturu; $\Delta x=0\text{cm}$ (sunulan tez çalışmasında girdap üretici ortası 0 noktası olarak kabul edilmiştir), $\Delta x=5\text{cm}$ ve $\Delta x=15\text{cm}$ olmak üzere üç farklı konumda oluşturulmuş olup sonraki aşamalarda aynı konumlarda kuvvetin sabitlenmesi ve kontur benzerliğinin artıp azalması dikkate alınarak ağ yoğunluğunun hangi aşamadan sonra benzerliğe ihmal edilebilir derecede katkı sağladığı belirlenmiştir. Şekil 2.5.'te bölgesel olarak sıkıştırılmış 4 farklı ağ ortamı verilmiştir. Tablo 2.1.'de ağ ortamlarının düğüm ve hücre sayıları verilmiştir.



Şekil 2.5. Bölgesel sıkıştırılmış ağların bağımsızlık çalışması (Hız girişi $x=0$ tarafındadır, R1'den R4'e doğru ağ yoğunluğu artırılmıştır.)

Tablo 2.1. Test ortamlarının düğüm sayıları.

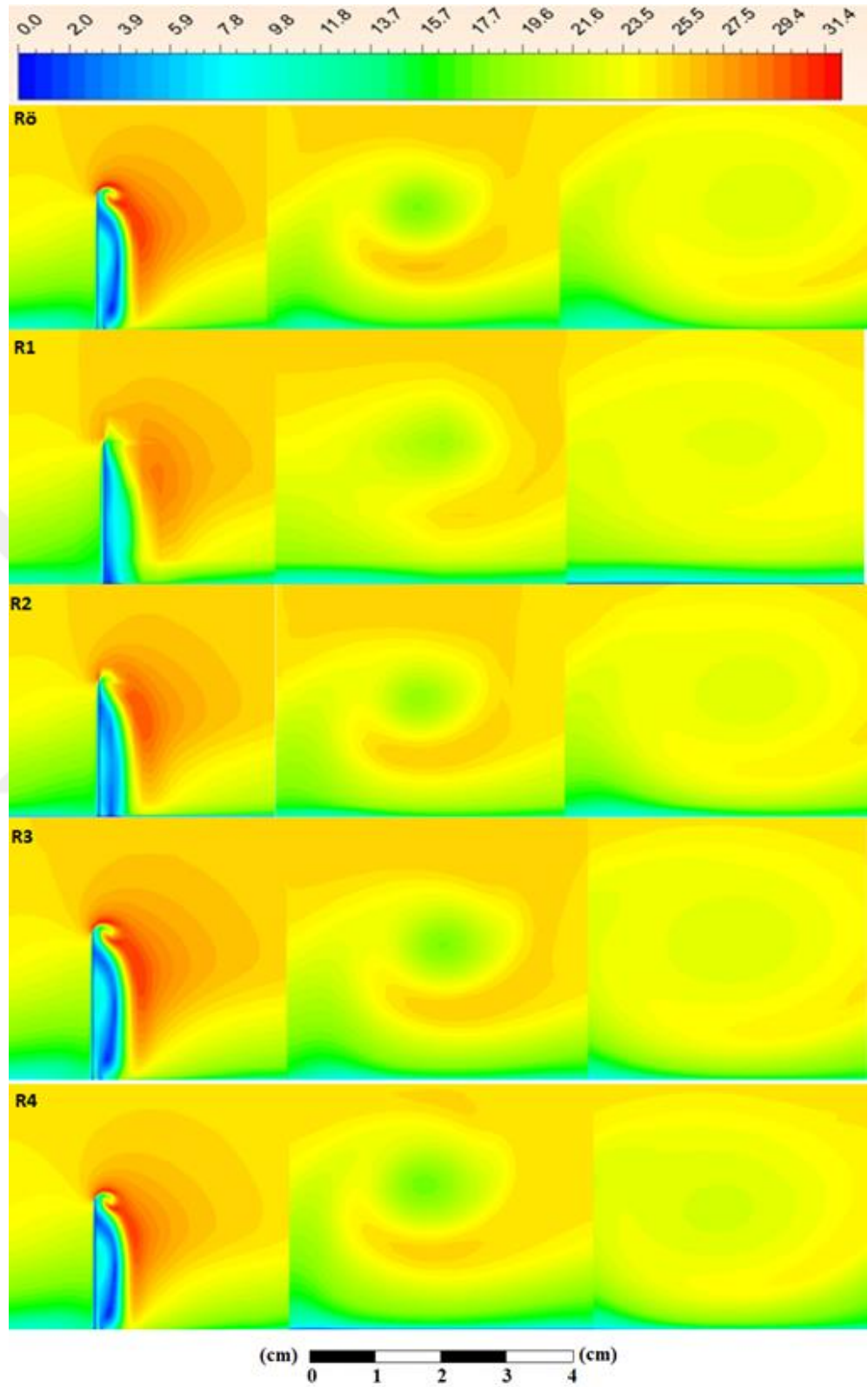
	Girdap Üretici Üzerindeki		Toplam Hücre
	Yatay Düğüm	Dikey Düğüm	
R1	11	16	61.410
R2	22	32	267.216
R3	45	63	1.113.956
R4	60	84	2.946.030

Yatay düğümler ağ bağımsızlığı için kurulan 4 adet test ortamında (R1, R2, R3 ve R4), girdap üretici üzerinde yatay olarak belirlenen düğüm sayılarını, dikey düğümler ise aynı dikey yönde yerleştirilen düğüm sayılarını vermektedir. Toplam hücre sayısı ise alt akış yoluna yerleştirilmiş hücre sayılarını vermektedir.

Girdap üretici üzerinde yerleştirilecek olan düğüm sayılarının belirlenmesi farklı boyutlardaki girdap üretici üzerinde açıklık oranına oranlayarak kullanılacak asgari düğüm sayılarının belirlenmesine imkân sağlamaktadır.

Aynı şekilde alt akış yolunda kullanılması gereken düğüm sayılarının belirlenmesi de taşınımdaki hata miktarının konturlar vasıtasıyla hesaplanmasına ve sunulan tez çalışmasında kullanılan analiz ortamının alt akış yolundaki hücre sayısının belirlenmesine imkân sağlamaktadır.

Şekil 2.6.'da hücre sayılarının konturlar vasıtasıyla kıyaslanması verilmiştir.



Şekil 2.6. Hız konturları (m/s) (İlk kontur $\Delta x=0\text{cm}$ lokasyonunda, orta kontur $\Delta x=5\text{cm}$ lokasyonunda ve sonuncu kontur $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşan vortekse aittir.)

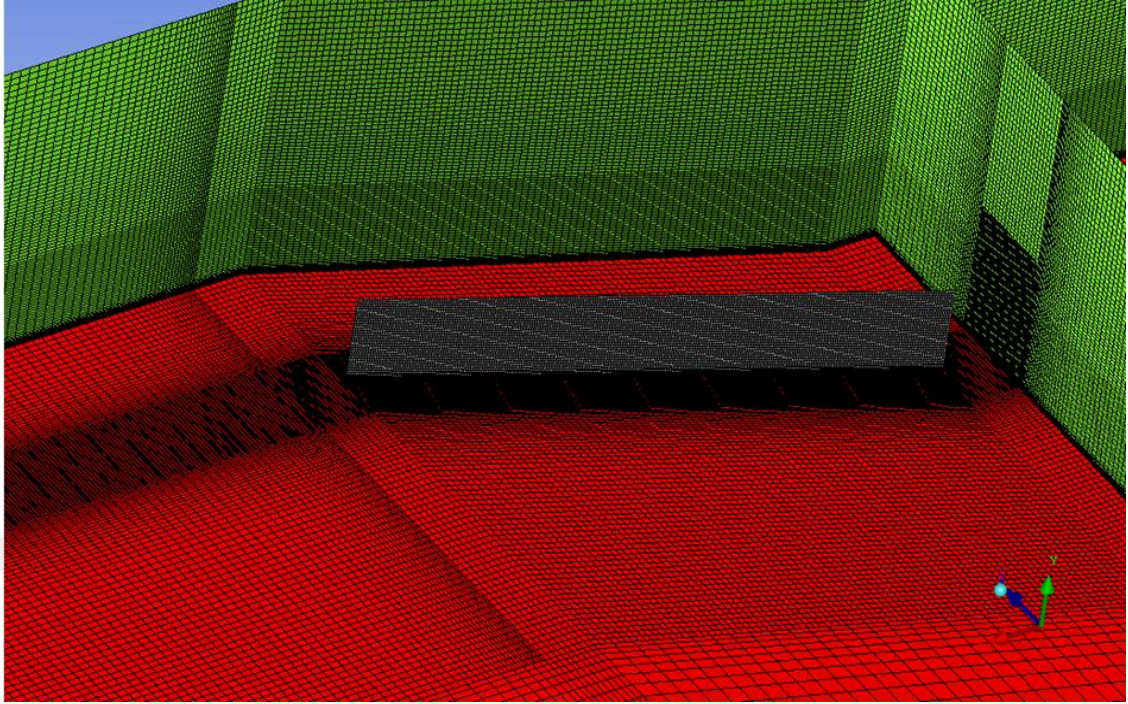
R1 ve R2 test ortamları incelendiğinde girdap üretici üzerindeki vektörel kuvvetlerde kararlılık sağlanamayıp, vorteks taşınım bölgesinde de benzer bir vorteks konturu oluşamamıştır. R3 ve R4 test ortamları incelendiğinde ise hem girdap üretici üzerindeki vektörel kuvvetlerde hem de $\Delta x=5\text{cm}$ vorteks konturunda oldukça uyumlu bir analiz görülmektedir. Tablo 2.2.'de girdap üreteçleri üzerine etki eden vektörel kuvvetler verilmiştir.

Tablo 2.2. Girdap üreteçlerine etki eden sürüklenme ve taşıma kuvveti.

Düzenekler	Sürüklenme Kuvveti (N)	Taşıma kuvveti (N)
Rö	0.041	0.11
R1	0.043	0.11
R2	0.044	0.12
R3	0.041	0.11
R4	0.041	0.11

$\Delta x=15\text{cm}$ alt akış alanında ise vorteks merkezi alt bölgesi azami hızı ($V_{x_{\max}}$), benzer bir profil sergilemiş fakat ilk 5cm akış konturu kadar uyum sağlayamamıştır. Bu sebeple vorteks taşınım bölgesinin tamamında geçiş oranı ve en-boy oranının, $\Delta x=5\text{cm}$ 'deki gibi düşük tutulması hatta mümkünse eşit hücre büyüklüğü olan bir alanda taşınması gerekmektedir. Literatürde mevcut çalışmalarda da alt akış alanındaki düşük hücre sayısının sonuca olumsuz etkisinin olduğu gözlemlenmiştir [47].

Sunulan tez çalışmasında test için kullanılan bilgisayar Bölüm 3'te verilen kurulum girdileri ile yaklaşık 8.2 milyon hücreyi çift hassasiyette çözüm kapasitesini aşmadan çözebilmektedir. Bu sebeple R4 girdap üretici düğüm sayıları ve ilk 5cm ağ yoğunluğu değerlerinin altına inmeden çalışmada kullanılan bilgisayarın hesaplayabildiği azami miktardaki hücre sayısını analiz alanına paylaştırarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 2.7.'de, sunulan tez çalışmasında kullanılan sıkıştırılmış ve yapılandırılmış bloklardan oluşan sonlu analiz ortamı verilmiştir.



Şekil 2.7. Sıkıştırılmış yapılandırılmış ağ ile oluşturulan analiz ortamı (8.147.629 hücre)

2.4. Kurulum

HAD programlarında kurulum aşaması, analiz edilecek ortamın hangi prensiplerle çözüleceğinin belirlendiği alandır. Bilindiği üzere HAD çözümleri laminar ve türbülanslı alanları çözmek için geliştirilmiş olup, laminar alanda çok iyi sonuçlar vermesine karşın türbülanslı akış çözümlerinde her ihtiyacı karşılayan tek bir model kullanılması mümkün değildir. Türbülansın ölçeklerine ve daimî olup olmamasına göre HAD analizlerinde doğrudan sayısal simülasyon, büyük girdap simülasyonu ve Reynold Ortalamalı Navier-Stokes modelleri gibi çeşitli türbülans modellemeleri kullanılmaktadır. Doğrudan sayısal ve büyük girdap simülasyonları daimî olan ve olmayan türbülansları kendi ölçeklerine göre gösterirken hesaplama zorluğundan dolayı her uygulamada kullanılmamaktadır. Reynold Ortalamalı Navier-Stokes modellemelerinde ise küçük ve büyük ölçekteki daimî olmayan türbülans alanları yerine yalnızca daimî türbülans alanları çözülmektedir. Bu çözüm sırasında viskoz, sıkıştırılmaz laminar akış için kullanılan Navier-Stokes hareket denkleminin geliştirilmiş bir modeli olan Reynold Ortalamalı Navier-Stokes denklemi kullanılmaktadır. Aralarındaki fark modele eklenen özgül Reynold gerilme tensörüdür

[33]. Eklenen terim vasıtasıyla denkleme dahil olan bilinmeyenler sayesinde yeni türbülans modelleri oluşturulabilmektedir.

Sunulan tez çalışmasında literatürde daha önce yapılmış deney-hesaplama kıyaslamalarında yüksek doğruluk veren [13, 43, 54] ve yüksek türbülanslı akışların çözümüne imkân sağlayan Menter'in geliştirdiği iki-denklemlili SST $k-\omega$ türbülans modeli [67] kullanılmıştır. Akışkan tipi olarak sabit yoğunluklu gaz seçilmiş, basınç çözüm şemasında basınç ve momentum denklemlerinin eş zamanlı çözülebilmesi ve doğruluğun artırılabilmesi adına çözücü 'Birleşik' (Coupled) olarak tercih edilmiştir. Hız-basınç şemasını yüksek doğrulukta elde edebilmek için hücre yüzeyleri 'İkinci-Derece' (Second-Order Upwind Scheme) alan şeması ile çözülmüştür. Çoğunlukla üçgen yüzeyli ağ yapısı için kullanılan, düğüm değerlerinin ortalaması ile hücre yüzeyi görselini oluşturmaya yarayan 'Düğüm Tabanlı Green-Gauss' (Green-Gauss Node Based) yüzey şeması tez çalışmasındaki dörtgen prizma şekilli ağ ile aynı yönde olmayan akışların hatalı gösterimini önlemek için seçilmiştir. Giriş ve çıkış 'Hız Girişi' ve 'Basınç Çıkışı' olarak seçilip akış sıcaklığı 300K'e (26,85 C°) sabitlenmiş, giriş hızı 34m/s olarak girilmiştir. Yan ve üst yüzeyler yoğun ağ kullanımını önleyebilmek için 'Simetri' olarak seçilmiş, ağ kalitesini artırabilmek için sıfır kalınlıkta 'Gölge Yüzeyli' girdap üretici yerleştirilmiştir.

3. BÖLÜM

GİRDAP ÜRETECİNİN AÇI, YÜKSEKLİK VE UZUNLUK DEĞERLERİNİN SAYISAL ANALİZLERİ

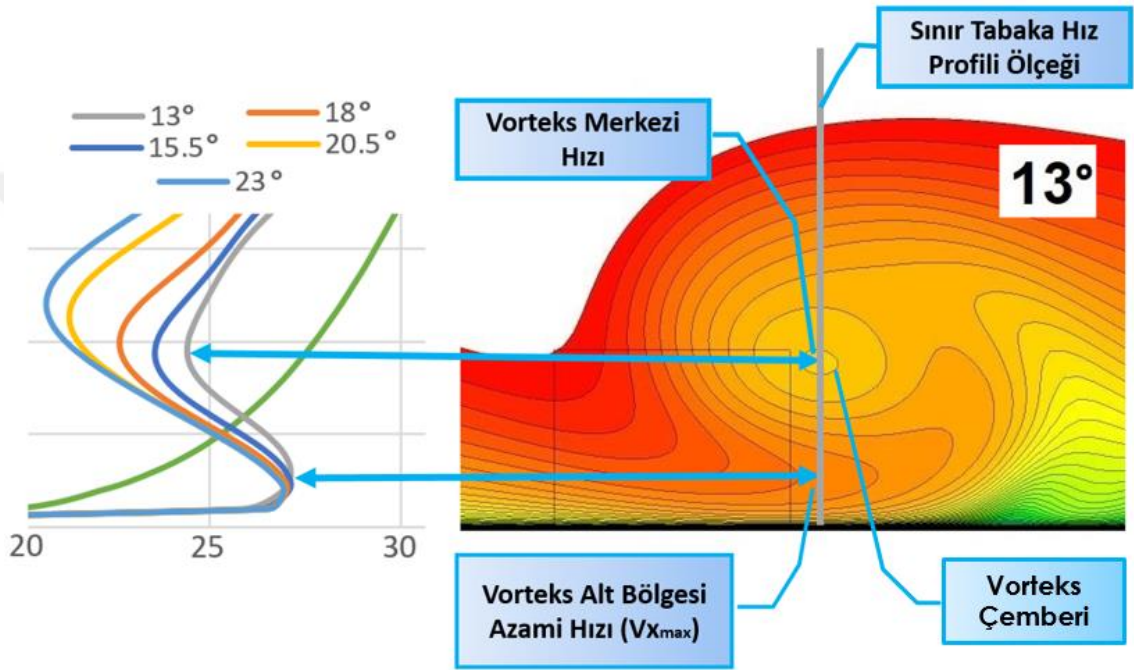
3.1. Giriş

Sunulan tez çalışmasında düz zemin üzerinde sıfır basınç gradyeni altında türbülanslı hava akımına karşı yerleştirilmiş kanatçık tipi girdap üreticinin Ansys Fluent yazılımı kullanılarak Kayma Gerilmesi Taşınım (SST) $k-\omega$ türbülans modeli ile HAD hesaplamaları yapılmıştır.

13° - 23° ve 0.4-1.4L aralığında testleri yapılacak olan girdap üreticilerinin yüksekliği $0.113\delta \leq h \leq 0.452\delta$ aralığında olduğu için sınır altı (mikro) girdap üretici olarak tanımlanmaktadır [12, 13]. Literatürde mevcut çalışmalarda sınır altı girdap üreticilerinin en etkili mesafesinin 5-30h aralığında olduğu bildirilmektedir [12]. Tez çalışmasında, en düşük yükseklik değeri $0.501\text{cm}=0.5h$ olduğu ve bütün yükseklik değerlerinin gözlem mesafesi içerisinde ($<30h$) olabilmesi için analiz bölgesi 15-20cm alt akış mesafesi olarak belirlenmiştir. Girdap üretici uzunluğunun değişmesi sebebiyle belirlenen mesafeler üreticinin sonundan değil orta noktasından ($\Delta x=0\text{cm}$) itibaren hesaplanmıştır.

Girdap üreticilerinde açı, yükseklik ve uzunluk değerlerinin değişmesi ile kendi üzerinde kuvvet farklılıkları ortaya çıktığı gibi alt akış yolunda da basınç ve hız profilleri üzerinde değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Girdap üretici üzerinde oluşan kuvvetlerden birisi olan taşıma kuvvetinin etkileri alt akış yolunda da gözlemlenebildiği için [68, 69] sunulan tez çalışmasında incelenmemiştir. Girdap üreticileri uygulama alanlarında akış ayrılışlarını önlemek için yerleştirildiklerinden sunulan tez çalışmasında da bir akış ayrılışının en düşük direnç kuvveti ile önlenmesi sayısal analiz yoluyla

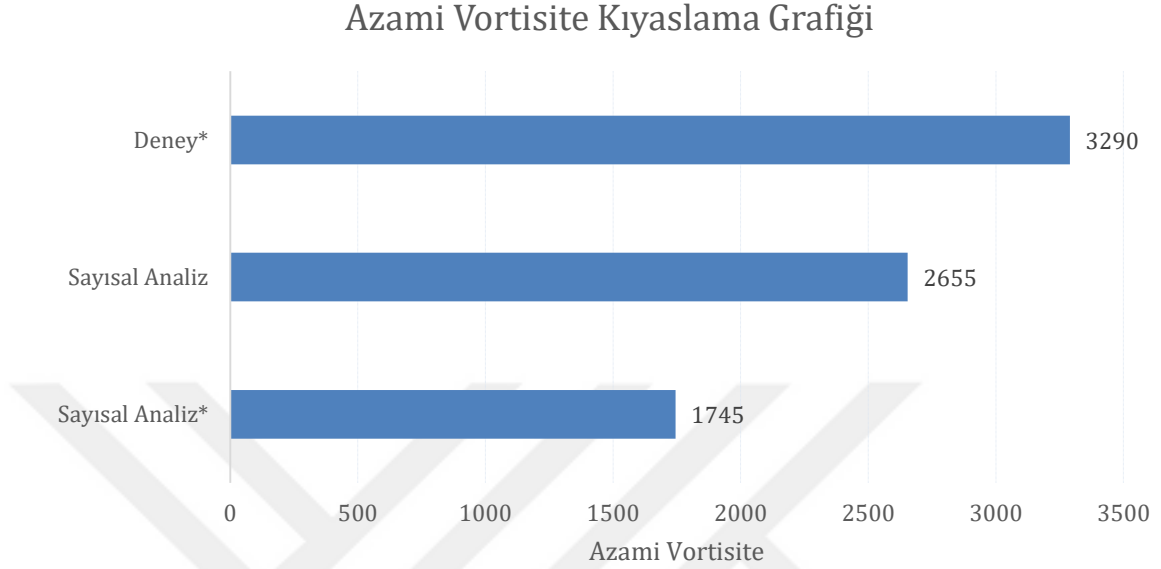
hesaplandığı için bir kanat profilindeki nihai sürüklenme kuvveti yerine girdap üretici tarafından oluşturulan sürüklenme kuvveti üzerinden girdap üretici sorgulanmış olup, alt akış yolunda oluşan vorteksin alt bölgesindeki azami hızı ($V_{x_{max}}$), azami vortisite ve sirkülasyon kuvveti değeri ve birim zamandaki türbülans hareketini tanımlayan türbülans girdap frekansı açısından belirlenen mesafeler içerisinde kıyaslamalar yapılmıştır. Şekil 3.1.'de vorteks alt akış yolu hız parametreleri verilmiştir.



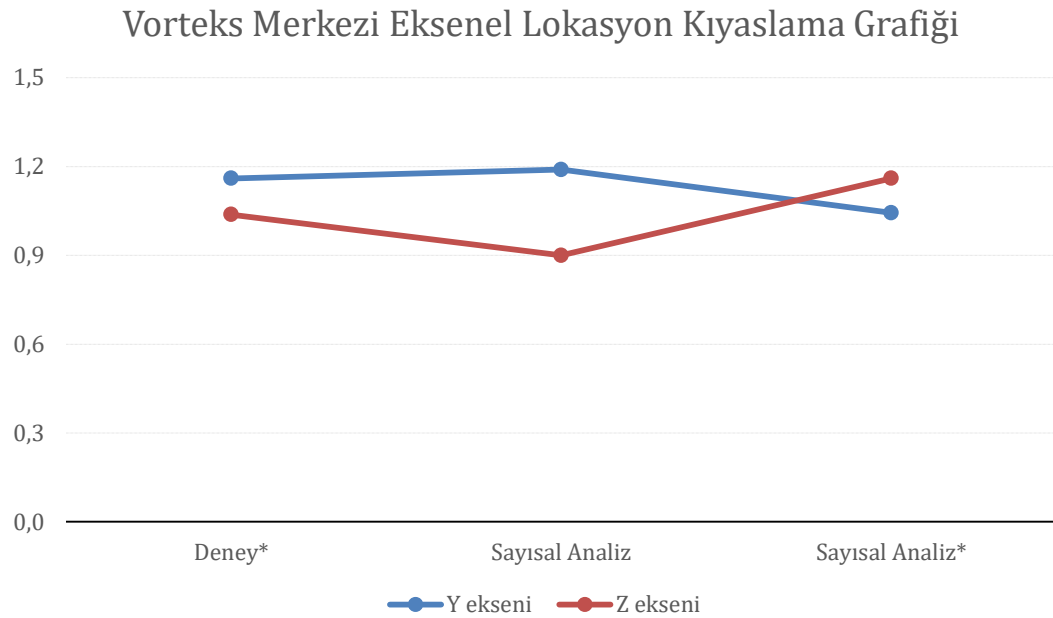
Şekil 3.1. Vorteks alt akış yolu hız parametreleri (Sınır tabaka hız profili ölçeği her girdap üreticinin belirlenen mesafelerde alt akış bölgesinde oluşturduğu vorteksin merkezine yerleştirilmiştir.)

Oluşturulan test ortamının literatürde önceden yapılmış çalışmalarla kıyaslanabilmesi için giriş hızı 34m/s seçilmiş [13 ,43, 54], girdap üreticinin ilk yüksekliği 10.2mm ($1h \sim 0.226\delta$) ve uzunluğu (1L) 59.4mm (açıklık oranı=5.8) ayarlanmış ve düz zemin üzerinde girişe göre 323cm alt akış yoluna yerleştirilmiştir [43]. Belirlenen bölgede sınır tabaka uzunluğu (δ) deneysel [43] ve sayısal analizlerde 45mm çıkmıştır. 23° açıyla yerleştirilmiş girdap üreticinin literatürde mevcut önceki deneysel ve sayısal çalışmalarla azami vortisite kıyaslaması yapıldığında, Brian vd. [43] tarafından deneysel çalışmada $\omega_{azami}=3290s^{-1}$, sayısal analizde ise $1745s^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değer sunulan tez çalışması için yapılan sayısal analizde $2655s^{-1}$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 3.2.'de azami vortisite kıyaslama grafiği ve Şekil 3.3.'te ise vorteks merkezinin y ve z eksenindeki lokasyon kıyaslama grafiği verilmiştir.



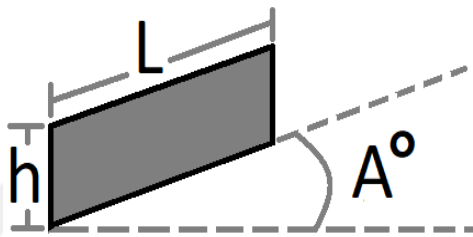
Şekil 3.2. Azami vortisite (ω_{azami}) kıyaslama grafiği (Grafikte Deney* ve Sayısal Analiz*; Brian vd. [43], Sayısal Analiz ise sunulan tez çalışması sonucudur.)



Şekil 3.3. 23° girdap üretici tarafından $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşturulan vorteks merkezinin y ve z eksenindeki lokasyon kıyaslama grafiği (Deney* ve Sayısal Analiz*; Brian vd. [43], Sayısal Analiz ise sunulan tez çalışması sonucudur.)

Sunulan tez çalışmasında kullanılan matematiksel modelden elde edilen vortisite değeri ve vorteks merkezi eksenel lokasyon değerleri incelendiğinde literatür çalışmaları [43] ile uyumlu değerlerin oluştuğu görülmektedir.

Yapılan testlerde girdap üretici açıları 13° , 15.5° , 18° , 20.5° , 23° olarak seçilip; yükseklikler $0.5h$, $0.75h$, $1h$, $1.25h$, $1.50h$, $2h$ ve test edilecek uzunluklar $0.4L$, $0.6L$, $0.8L$, $1L$, $1.2L$, $1.4L$ olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4.'te belirlenen değerlerin görsel karşılıkları verilmiştir.



Şekil 3.4. Girdap üretici boyutsal özellikleri

Analiz ortamlarında bir girdap üreticinin performansını etkileyen açı, yükseklik ve uzunluk değerlerinin birbirleriyle karşılıklı ilişkilerini incelenmesi durumunda 180 adet test yapılması gerekmektedir. Bir analiz için işlem süresi, sunulan tez çalışmasında kullanılan bilgisayarda 2 ile 4 gün arasında sürdüğü için 180 adet testin hesaplanması 1-2 yıl kadar sürmektedir ve bu tarz bir çalışmanın yapılması zaman açısından verimli değildir. Aynı zamanda literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan, mevcut çalışmalarda iyi sonuçlar veren açı, yükseklik ve uzunluk değerleri ve bu değerlere yakın boyutsal özelliğe sahip girdap üreticileri arasından rastgele seçilen değerlerle yapılan analizlerde ise seçilen her boyutsal özelliğin birbirleri ile karşılaşması sonucu işlem sayısının fazla artmasından dolayı gözlemlenmesi istenilen bazı değerlerin azaltılmak zorunda kalınması sebebiyle yeterli miktarda analiz yapılamadığı için sunulan tez çalışmasında bu yöntemin kullanılması uygun görülmemiştir. Bu sebeple açı testleri yapılırken 15cm mesafede oluşan sirkülasyon kuvveti ve türbülans frekansının her ikisinin de girdap üretici tarafından oluşturulan sürüklenme kuvvetlerine oranları alınıp yapılan kıyaslama sonucunda birim sürüklenme kuvveti başına en yüksek sirkülasyon kuvveti ve türbülans frekansı değerini veren girdap üretici açısı belirlenmiştir. Belirlenen açı değeri ile yapılan yükseklik testlerinde 15cm ve 20cm alt

akış mesafesinde vorteks sapma miktarları, azami vortisite azalma oranları, sürüklenme kuvveti, vorteks taşınım yolu ve girdap üretici çevre basıncı incelenmiştir. Yükseklik testleri sırasında incelenen kriterlere göre belirlenen alt akış mesafesinde ve giriş hızında en uygun sonucu veren girdap üretici ile uzunluk testleri yapıp, girdap üretici üzerindeki geri tutunma mesafesinin alt akış yolunda oluşan vorteksin alt bölgesindeki azami hızına ($V_{x_{max}}$) etkisi belirlenmiştir.

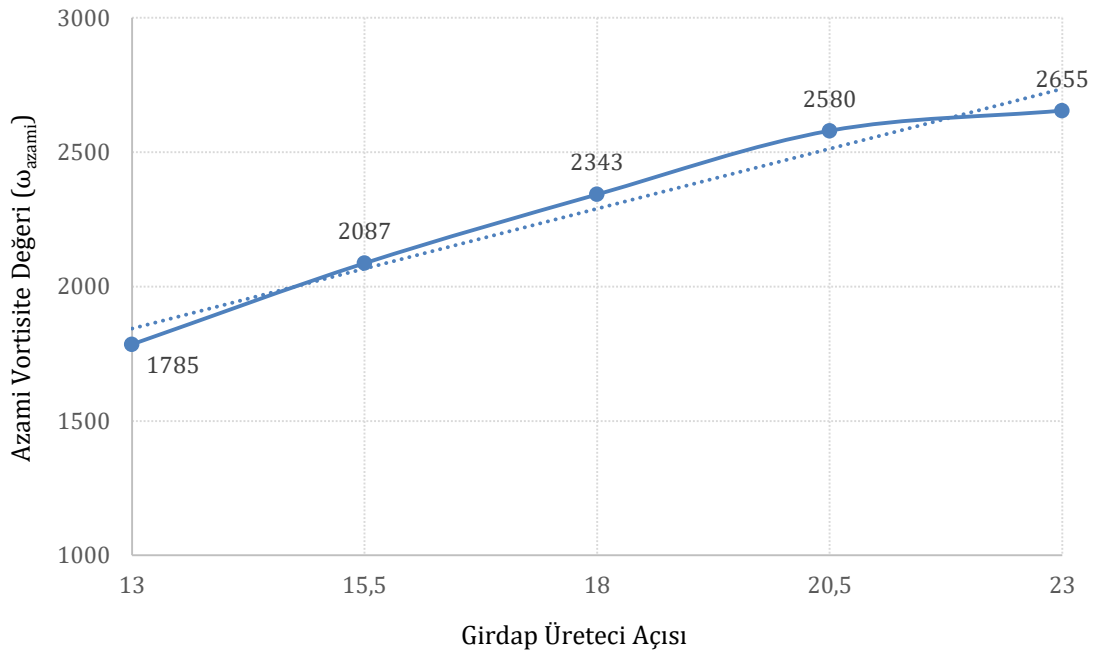
Açı, yükseklik ve uzunluk sınır tabaka hız profilleri incelendiğinde vorteks çemberi yok olma mesafesinde yüksek momentumlu bölgeden düşük momentumlu bölgeye enerji transferi varlığını halen sürdürmektedir. Ancak momentum transferinin sonlandığı alan, sunulan tez çalışmasında azami gözlem mesafesinin dışarısında kaldığı ve sayısal hesaplamalarının yapılamadığı için vorteks çemberinin yok olduğu durumlarda vorteksin sönümlendiği varsayılmıştır ve belirlenen mesafeye kadar taşınmadığı kabul edilmiştir. Bu sayede gerekli işlem adımları azaltılıp her test için öncesinde belirlenen kriterlere göre yüksek kazanımlı girdap üretici üzerinden çalışmalar sürdürülmüştür.

3.2. Açı Testi

Literatürde mevcut olan önceki çalışmalarda 10° yerleştirme açısında $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda vorteks çemberi oluşmamaktadır [43]. Benzer şekilde 25° 'nin üzerinde sayısal analizler deneysel verilerden uzaklaşmaktadır [44]. Bu sebeple tez çalışmasında 13° ve 23° arasında belirlenen 5 ayrı girdap üreticinin sayısal analizi yapılmıştır. Girdap üreticilerinde yerleştirme açısının artması sadece taşıma kuvvetini değil, akışa karşı yüzey alanını da artırmaktadır [18, 68, 69]. Taşıma kuvvetindeki artış ile birlikte sirkülasyon miktarı (dönü kuvveti), azami vortisite ve taşınım mesafesi artarken, yüzey alanı ve akış ayrılığı modelinin değişmesi sebebiyle sürüklenme kuvveti de artmaktadır [13]. Sirkülasyon enerjisinin artması sonucunda da vorteksin zeminle etkileşimi ve yüzeyde oluşturduğu kayma gerilmesi artmaktadır [4, 70].

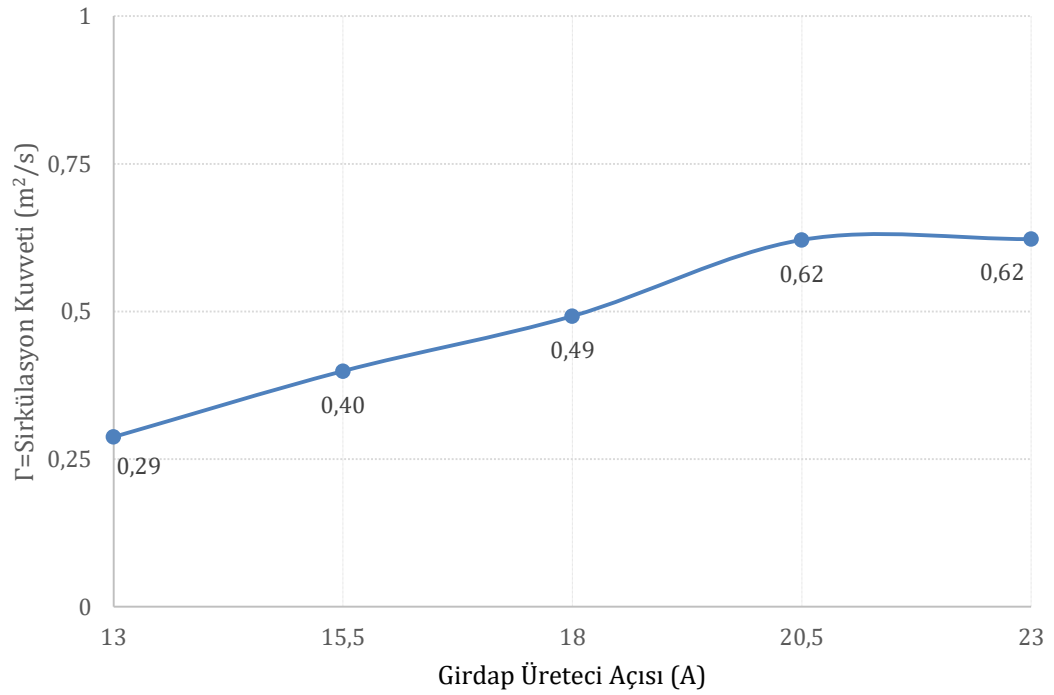
Vortisite; bir akış içerisinde bulunan akışkanın bir nokta etrafında oluşturduğu vektörel dönü kuvvetine denir. ω_{toplam} ; bir akışkanın tüm eksenlerdeki vortisitelerinin toplanması sayesinde bulunur. Fakat sunulan tez çalışmasında ele alınacak vortisite x eksenine doğrultusundaki akış yönlü vortisite miktarını (ω_x) tanımlamıştır [20, 33]. Şekil 3.5.'te açıya bağlı azami vortisite değişimi miktarları verilmiştir. Şekil 3.6.'da açıya bağlı sirkülasyon kuvveti (m^2/s) değişim grafiği verilmiştir.

Açıya Bağlı Vortisite Değişimi (ω_{azami}) Grafiği



Şekil 3.5. $\Delta x=15\text{cm}$ Azami vortisite değişim grafiği ($\omega_{azami} \text{ s}^{-1}$)

Sirkülasyon Kuvveti (Γ) Grafiği



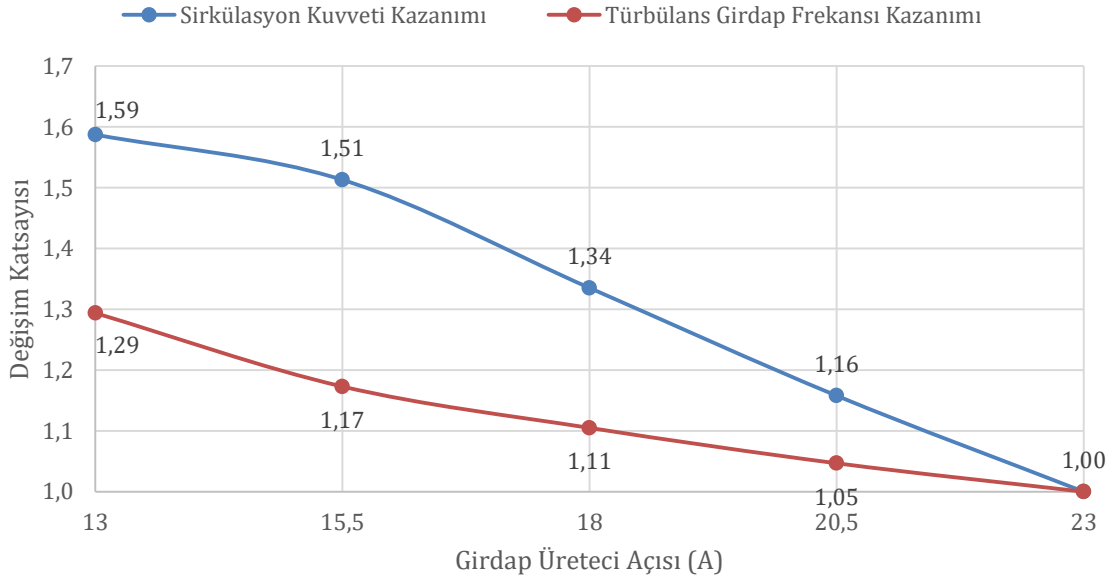
Şekil 3.6. Açıya bağlı sirkülasyon kuvveti (m²/s) değişim grafiği

Sirkülasyon kuvveti Denklem (3.1)'deki gibi ifade edilir [42, 75];

$$\Gamma = \omega_{azami} \cdot \pi \cdot R_{0,5}^2 / 0.693 \quad (3.1)$$

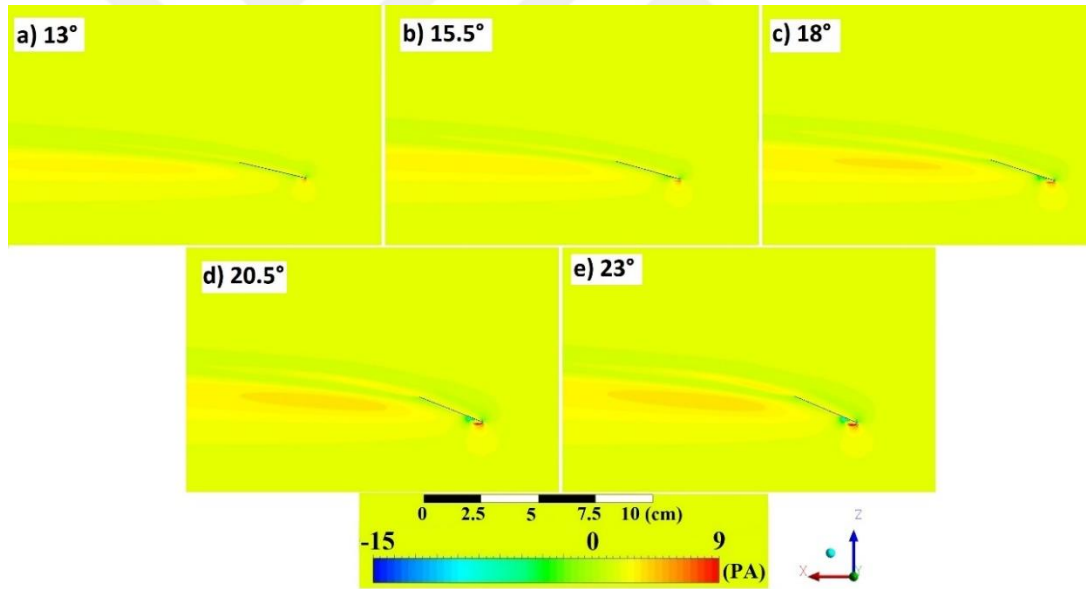
Burada Γ ; sirkülasyon kuvvetine, ω_{azami} ; x eksenini azami vortisite miktarına, π ; 3.14'e ve $R_{0,5}$ ise vortisite değerinin vorteks merkezinden yarı sönümlenme bölgesine olan mesafesine eşittir. 13° ile 23° arasında 5 girdap üreticinin ω_{azami} değerleri ve sirkülasyon kuvvetleri (Γ) kıyaslandığında açı artışının vortisite kazanımına veya korunmasına etkisi 20.5° sonrasında oransal olarak azalma eğilimindedir. Aynı değerlendirme sürüklenme kuvveti için yapıldığında ise birim açı başına oluşan sürüklenme kuvveti artışı yükseliş eğilimindedir (Şekil 3.11.). Sirkülasyon kuvveti ve sürüklenme kuvvetinin açığa bağlı değişimini gösteren meyil çizgileri kıyaslandığında, sürüklenme kuvveti meyil çizgisi daha yüksek oranla artmaktadır. Şekil 3.7.'de açığa bağlı sirkülasyon kuvveti ve türbülans girdap frekansı ile sürüklenme kuvveti oranlarının 23°'yi datum noktası olarak kıyaslama grafiği verilmiştir.

Açıya Bağlı Kıyaslama Grafiği



Şekil 3.7. Açığa bağlı sirkülasyon kuvveti/sürüklenme kuvveti ve türbülans girdap frekansı yüksekliği/sürüklenme kuvveti kıyaslama grafiği (Artış oranını görüntüleyebilmek için 23°'den elde edilen oranlar her iki kıyaslama için 1 kabul edilmiştir.)

Şekil 3.6.'da verilen açıya bağlı sirkülasyon kuvveti (m^2/s) değişim grafiği ve Şekil 3.11.'de sunulan açıya bağlı sürüklenme kuvveti grafiği arasındaki artış farklılığının hesaplanabilmesi için, 23° 'yi datum noktası olarak girdap üretici tarafından $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşturulan sirkülasyon kuvveti başına girdap üretici üzerinde oluşan sürüklenme kuvvetleri oranlandığında, 13° 'nin 1.59 kat daha fazla sürüklenme kuvveti üretmeden sirkülasyon kuvveti oluşturduğu ortaya çıkmaktadır. Oluşturulan sirkülasyon kuvveti/sürüklenme kuvveti kazanım miktarları açıya bağlı olarak karşılaştırıldığında katsayı açı artışı ile birlikte düşmektedir. Bu durumun temel sebebi vorteks alanının açıya bağlı artarak zeminle etkileşmesinden ve akışa karşı alanın artarak sürüklenme kuvveti oluşturmamasından kaynaklanmaktadır [13]. Şekil 3.8.'de açıya bağlı kayma gerilmesi konturu verilmiştir.



Şekil 3.8. Açıya bağlı kayma gerilmesi değişimi konturu (Burada; a) 13° , b) 15.5° , c) 18° , d) 20.5° , e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreticilerinin alt akış yolu boyunca zeminde oluşturduğu kayma gerilmesinin konturlarıdır.)

Açı artışı ile birlikte vorteks alanının artması vorteksin zeminle etkileşimini artırmakta ve daha yüksek kayma gerilmesi (τ) ortaya çıkarmaktadır [4]. Kayma gerilmesinin artması da vorteksin zemin etkileşimi sebebiyle sönümlenmesine neden olmaktadır. Yüksek eğimli yüzeylerde zemine yaklaşma eğilimi ayrılma kabarcığının sönümlenmesi

açısından etkilidir fakat vortisitenin taşınımı ve korunumu düz zemin üzerinde kıyaslanırken bu durum hesaplanamayacağı için istenilmeyen bir etki oluşturacaktır.

Açı artışı ile zemin etkileşimini kıyaslayabilmek için sunulan tez çalışmasında türbülans frekansının zeminden ne kadar yukarı taşındığı hesaplanmıştır. Bilindiği üzere türbülans frekansı; türbülans kinetik enerjisinin (m^2/s^2) kinematik viskoziteye bölümü ile bulunur [71]. Denklem (3.2)'de kinematik viskozitenin formülü verilmiştir.

$$\nu = \mu/\rho \quad (3.2)$$

Burada ν ; kinematik viskozite, μ ; dinamik viskozite, ρ ; yoğunluk değeridir. Dinamik viskozite (μ)'nin kayma gerilmesi ile ilişkisi Denklem (3.3)'te verilmiştir.

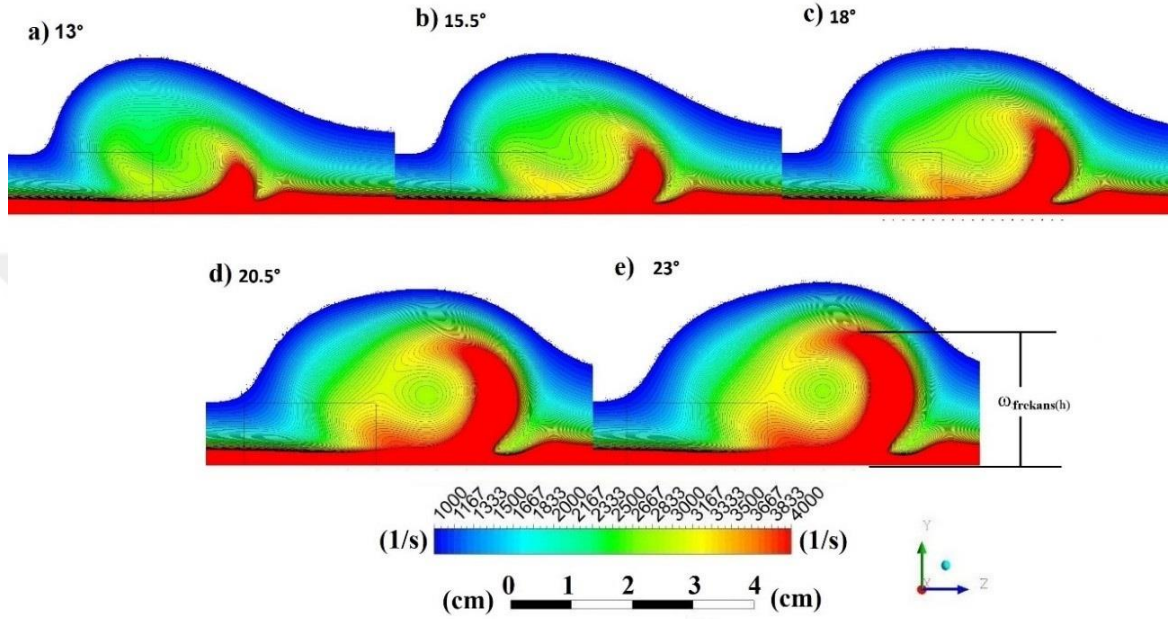
$$\tau = \mu(du/dy) \quad (3.3)$$

Burada τ ; kayma gerilmesi, du/dy ; akışkanın hız gradyenidir [33]. Her iki denklem incelendiğinde zeminde oluşan kayma gerilmesi aynı zamanda türbülans frekansının azalmasına sebep olmaktadır. Vorteksin alt bölgesindeki azami ($V_{x_{max}}$) hızın yükselmesi de türbülans kinetik enerjisinin hesaplama bölgesinde artmasına sebep olmaktadır. Her iki verinin birbirlerine oranı girdap üreticinin ürettiği vorteksin belirlenen mesafede zeminle etkileşme kıyaslamasına imkan vermektedir.

Bu kıyaslamayı yapabilmek için zemin üzerinde, test edilen açı ve yüksekliklerde zeminle eşit seviyede olmayan bir değer ($\omega_{frekans}=4000s^{-1}$) belirlenmiştir. Bu değer yukarısı türbülans konturunda kırmızı olacak şekilde kısıtlanmıştır. Belirlenen değer y eksenindeki yüksekliği türbülans girdap frekansı aracılığıyla girdap üreticinin oluşturduğu dönü kuvveti ortaya çıkmaktadır.

Yüksekliğin açıya bağlı artış oranı ise girdap üreticinin zeminde kaybettiği sirkülasyon kuvvetini vermektedir. Elde edilen yükseklik ile girdap üretici tarafından oluşturulan sürüklenme kuvveti oranlandığında vorteksin birim sürüklenme kuvveti başına zeminle etkileşmeden oluşturduğu türbülans girdap frekansı kazanımını vermektedir.

Şekil 3.9.'da $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşturulan türbülans frekans konturları verilmiştir.

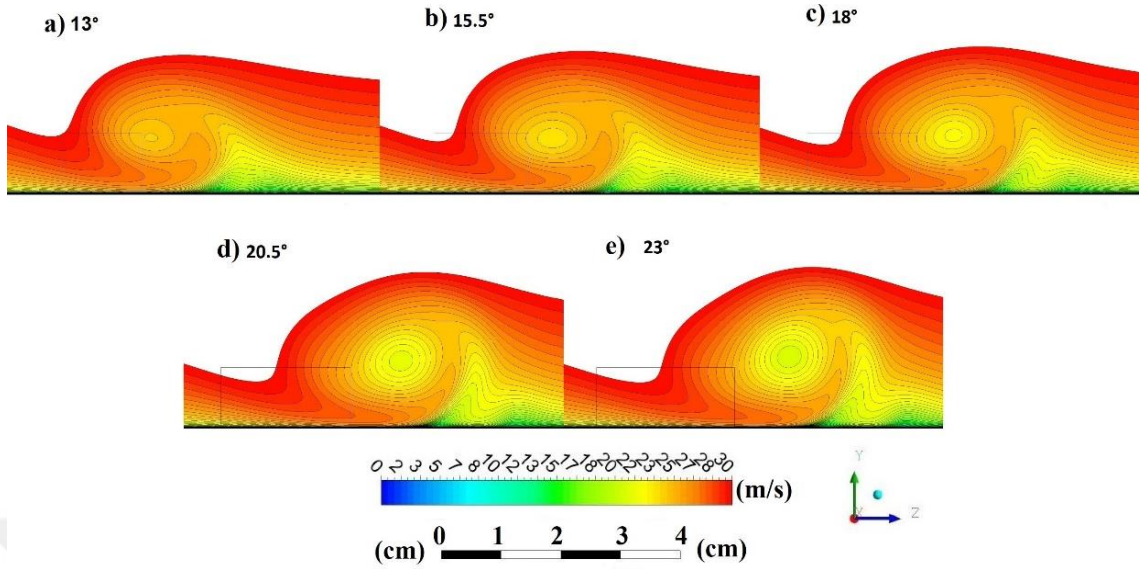


Şekil 3.9. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu türbülans frekans ($\omega_{\text{frekans}}\text{s}^{-1}$) konturu

(Burada; a) 13°, b) 15.5°, c) 18°, d) 20.5°, e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreticilerinin türbülans frekansı konturlarıdır. Zemine yakın bölgelerde frekans değeri çok yüksek olduğu için oluşturulan konturda 4000s^{-1} üzeri değerler kırmızı olarak gösterilmiştir.)

Şekil 3.7.'de verilen açıya bağlı kıyaslama grafiği incelendiğinde 23° datum noktasına kıyasla 13° girdap üretici toplamda daha az türbülans frekansı ve sirkülasyon kuvveti oluştururken, 1.29 kat daha fazla zeminle etkileşmeden taşınan türbülans girdap frekansı oluşturmuş, bu değer açı artışıyla birlikte azalmıştır.

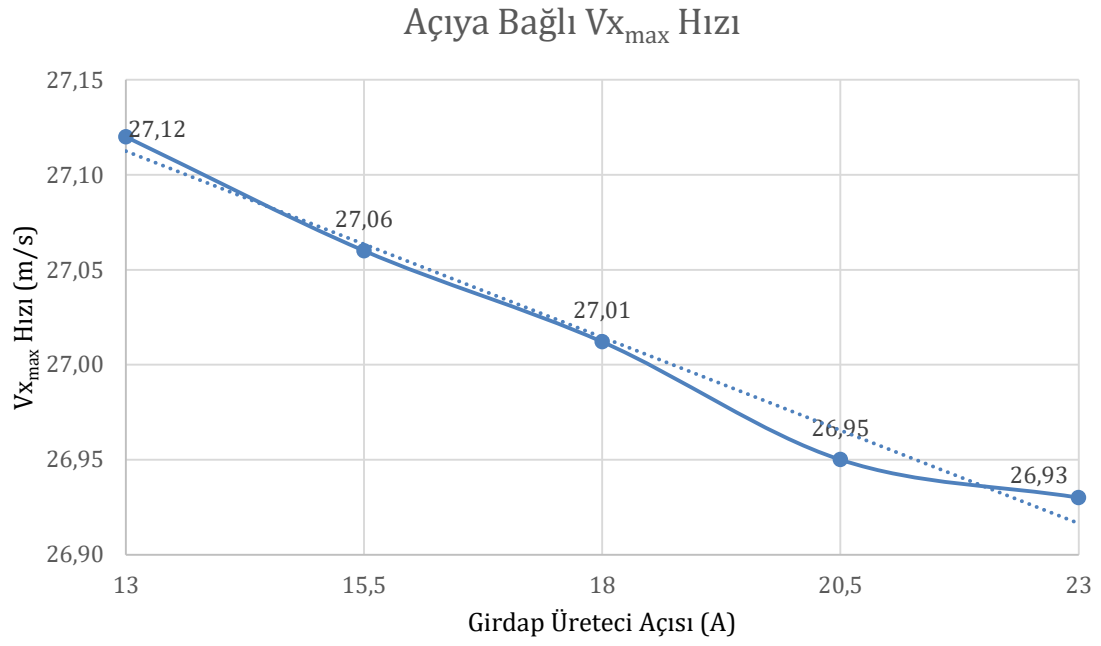
Şekil 3.10.'da $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşan vorteksin hız konturları verilmiştir.



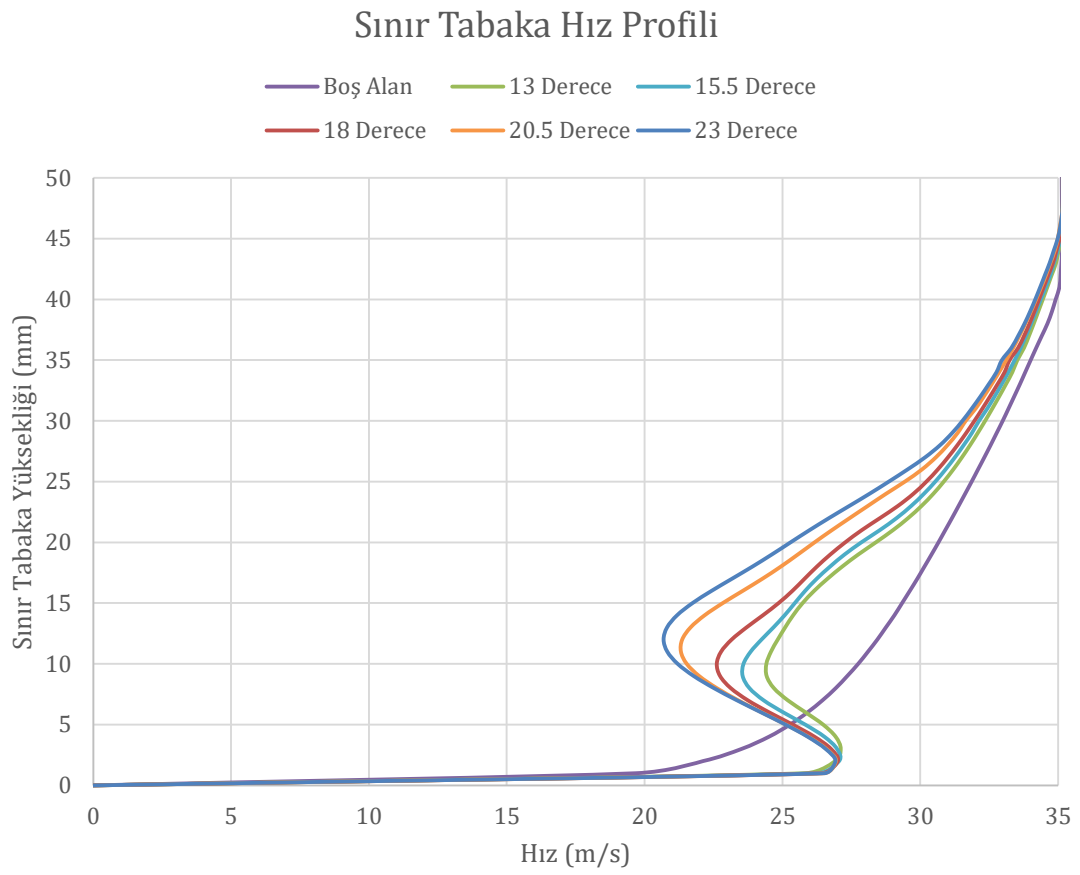
Şekil 3.10. $\Delta x=15\text{cm}$ hız konturu (Burada; a) 13° , b) 15.5° , c) 18° , d) 20.5° , e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreteçlerinin hız konturlarıdır. Konturdaki azami hız 30m/s 'dir.)

Şekil 3.11.'de $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda girdap üretici yerleştirme açısına bağlı $V_{x_{\max}}$ hızı değişimi grafiği verilmiştir. Şekil 3.12.'de ise açı ile $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşan sınır tabaka hız profili arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir.

$\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda girdap üreteçlerinin alt akış yolunda ürettiği vorteks oluşumları (Şekil 3.10.), $V_{x_{\max}}$ hızı grafiği (Şekil 3.11.), zemin kayma gerilmesi konturu (Şekil 3.8.) ve vorteks çemberi hız bilgilerini veren sınır tabaka hız profili grafiği (Şekil 3.12.) incelendiğinde, azami vortisitinin yaklaşık olarak üzerinde bulunduğu vorteks halkası en düşük hıza sahipken vorteks merkezinin zemine dikey yönde alt bölgesinde bulunan $V_{x_{\max}}$ hızı, vorteks halkasındaki hız düşümüne ve vorteks oluşumunun zeminle etkileşimine bağlı olarak alt bölgedeki en yüksek hıza sahiptir.



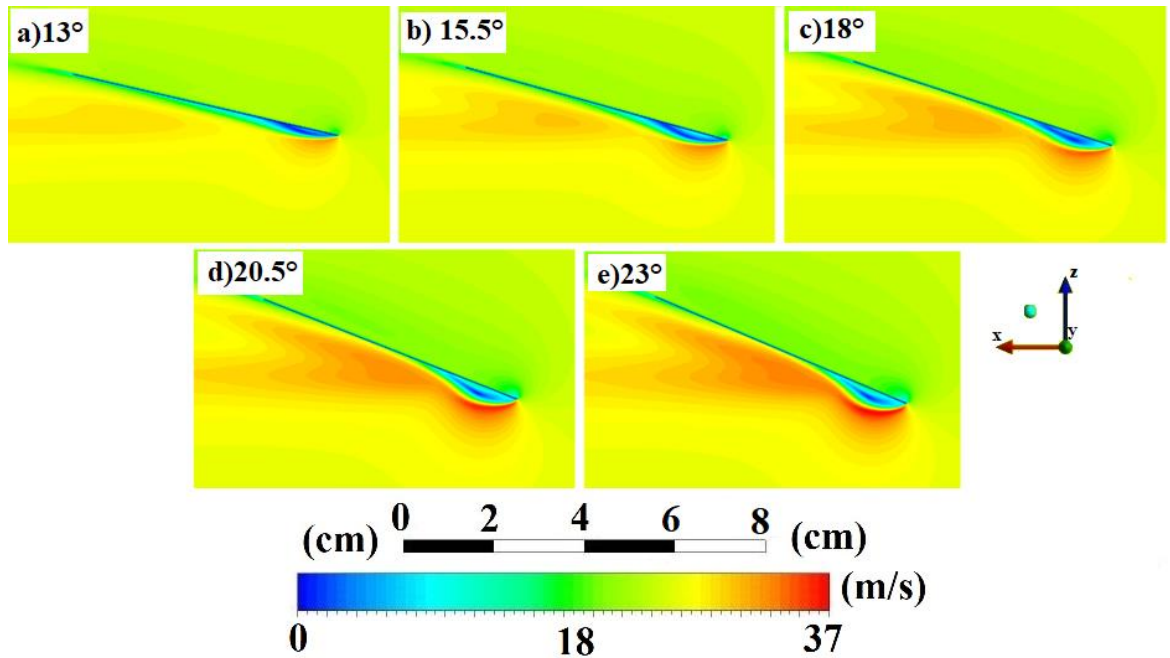
Şekil 3.11. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda açıya bağlı $V_{x_{max}}$ hızı grafiği



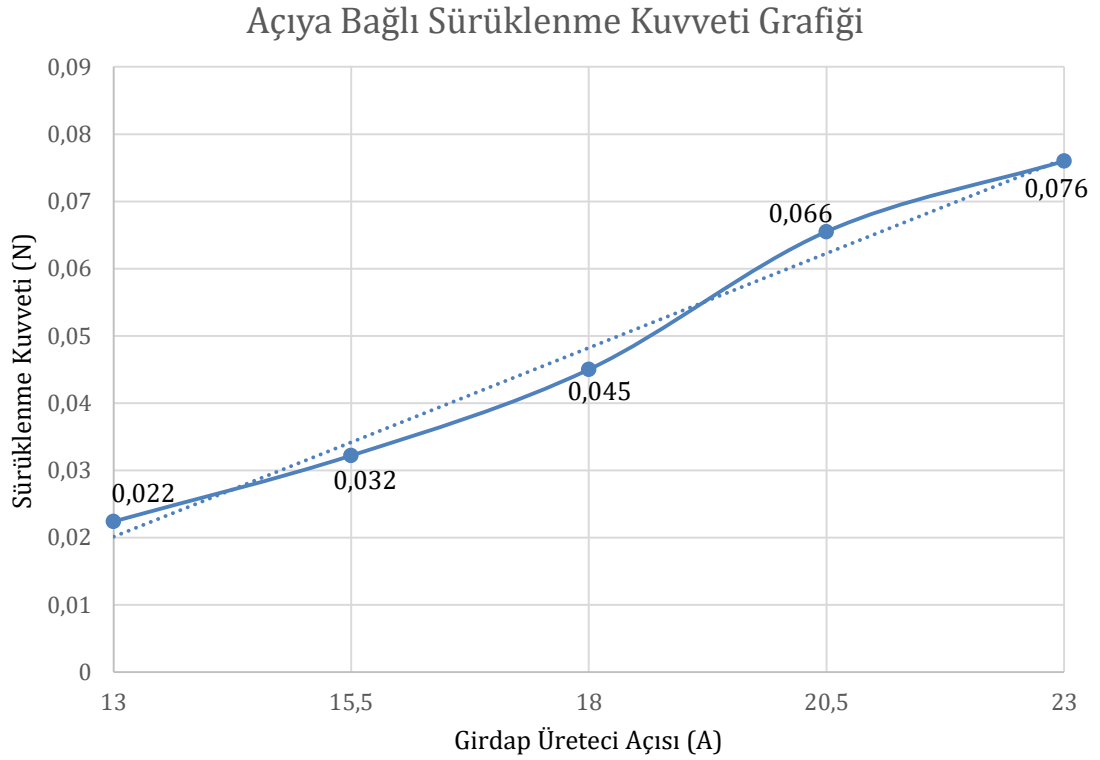
Şekil 3.12. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda açıya bağlı sınır tabaka hız profili

$V_{X_{max}}$ hızı ve sınır tabaka hız grafiği incelendiğinde, açı artışı ile beraber vorteks merkezi ve $V_{X_{max}}$ hızı arasındaki fark artmış fakat $V_{X_{max}}$ hızı incelenen açı değerleri arasında 13° 'de nihai hızına ulaştığı için (27.12m/s) var olan sirkülasyon kuvveti yüzey kayma gerilmesine dönüşmüştür. Girdap üreticinin akışa dik yönlü yüzey alanının artması da sürüklenme kuvvetinin artmasına neden olmuştur. Şekil 3.13.'te $\Delta y=0.5h$ lokasyonunda bulunan açığa bağlı değişen hız konturları üzerinden yatay hız dağılımı incelendiğinde, girdap üreticinin yan yüzeyinde oluşan akış ayrılığı tepe çizgisinden geçen hava miktarını ve sirkülasyon kuvvetini belirlemekte, akışa dik yüzey alanının artmasından ve arka alandaki düşük basıncın azalmasından kaynaklı olarak sürüklenme kuvvetine olumsuz etki göstermektedir.

Akış ayrılığı profilinin değişmesi tez çalışmasında Bölüm 3.4.'te sunulan uzunluk etkinliğini değiştirmekte olup, oluşan sürüklenme kuvvetinin uzunluk optimizasyonu sayesinde azaltılmasının gerekliliği görülmektedir. Şekil 3.14.'te açığa bağlı sürüklenme kuvveti grafiği verilmiştir.

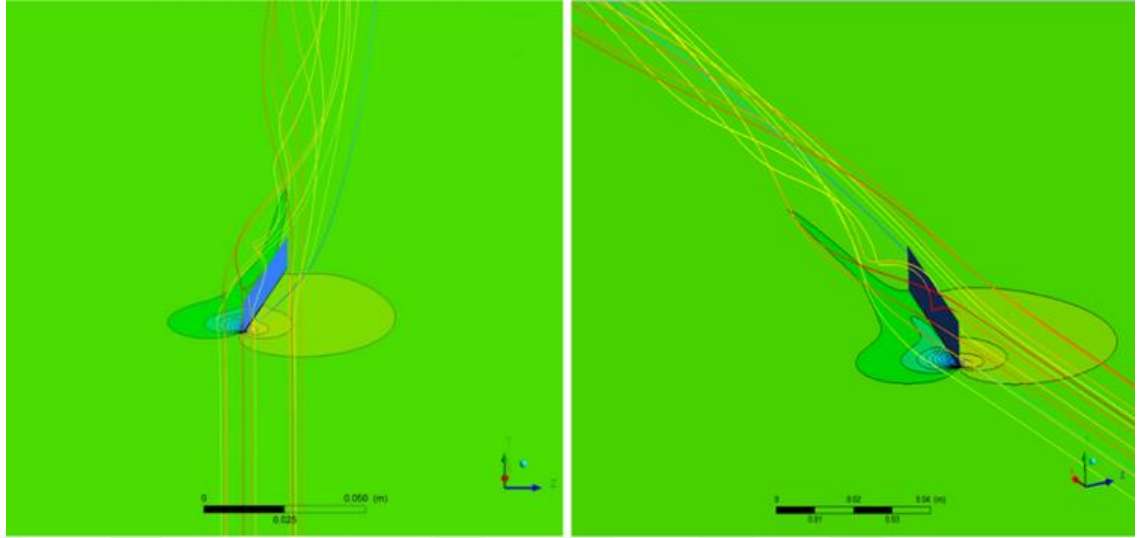


Şekil 3.13. $\Delta y=0.5h$ bölgesel yatay hız konturları (Burada; a) 13° , b) 15.5° , c) 18° , d) 20.5° , e) 23° açı ile yerleştirilmiş girdap üreticilerinin hız konturlarıdır.)



Şekil 3.14. Açıya bağlı sürüklenme kuvveti grafiği

Açıya bağlı sürüklenme kuvveti grafiği incelendiğinde girdap üretici üzerindeki sürüklenme kuvveti 13°'den 23°'ye kadar artış sergilerken 20,5°'den sonra artış miktarı azalma eğilimi göstermiştir. Elde edilen verilerden de anlaşıldığı gibi sürüklenme kuvvetinin girdap üreticiden kazanılacak etkileri sönmölendirmemesi için yerleştirme açısı akış ayrılışının uzunluğuna ve yerleştirilecek konumun eğimine bağlı olarak en düşük değerde tutulmalıdır. $V_{X_{max}}$ hızı grafiği (Şekil 3.11.), zemin kayma gerilmesi konturu (Şekil 3.8.) ve sınır tabaka hız profili grafiği (Şekil 3.12.) incelendiğinde girdap üretici açısının artışı ile zemin etkileşiminin yüksek oranda artması ve azami kayma gerilmesi konumunun yer değiştirmemesi sebebiyle, yüksek eğimli akış ayrılışlarında yüzeye tutunma eğilimini artırmak için h ve L değerlerini değiştirmek yerine öncelikle açı değerini değiştirmek yapılan incelemelerde daha makul bir yaklaşım olarak görülmektedir. Bu durum literatürde mevcut deneysel çalışmalarda [72] ve Bölüm 3.3'te sunulan yükseklik testlerinde de görülmektedir. Şekil 3.15.'te 13° açı ile yerleştirilmiş girdap üreticinin zemin basınç konturları ve akış hızı çizgileri görülmektedir.



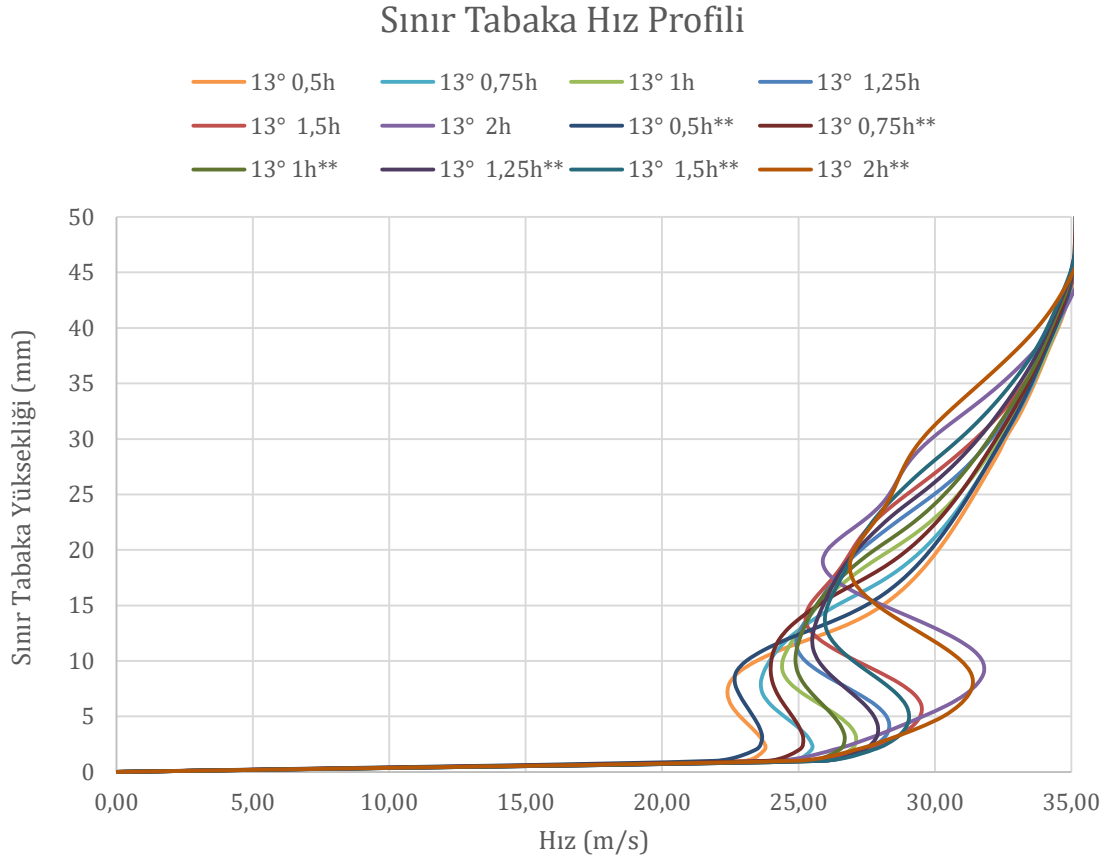
Şekil 3.15. 13° açı ile yerleştirilmiş girdap üreticinin zemin basınç konturları ve akış hızı çizgileri

Sınır tabaka hız profili, sirkülasyon kuvveti, sürüklenme kuvveti ve oluşan vorteksin zemin ile etkileşimi üzerinden yapılan incelemelerde; $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda sirkülasyon kuvveti ve türbülans girdap frekansı üretimi ile girdap üretici sürüklenme kuvveti oranları açısından 13° yerleştirme açısı daha etkili sonuçlar verdiği için ve $V_{x_{\max}}$ hızının açı ile azalması sebebiyle yükseklik testleri 13° yerleştirme açısı ile gerçekleştirilmiştir.

3.3. Yükseklik Testi

Girdap üreteçlerinde yükseklik hava akışına doğrudan engel oluşturduğu için sürüklenme kuvvetini en çok etkileyen faktörlerdendir [13, 17, 54, 60]. Fakat yüksekliğin artırılıp azaltılmasında sürüklenme kuvvetinden tasarruf, belirli bir değere kadar ikincil hesaplamalarda dikkate alınmalıdır. Çünkü vorteks merkezinin aşağıdan ya da yukarıdan taşınması gerektiği uygulamalarda [13] yani kısa veya uzun mesafe taşınması gerektiren ya da yüksek eğimli yapılardan geçmesi istenilen uygulamalarda [73] girdap üreticiden kaynaklanan sürüklenmeyi yüzeyde kazanılan özellikler dengeleyecektir. Girdap üreteçlerinde yükseklik değeri, vorteks merkezinin zemine dikey yönde alt bölgesinde bulunan $V_{x_{\max}}$ hızını artırdığı için kısa mesafelerde sınır altı girdap üreteçleri kullanılırken uzun mesafelerde ise geleneksel, sınır yüksekliğinde

girdap üreteçleri kullanılmaktadır [13]. Şekil 3.16.'da sınır tabaka hız profil ölçęi iki ayrı konuma yerleştirilmiş yüksekliğe bağlı sınır tabaka hız profilleri verilmiştir.

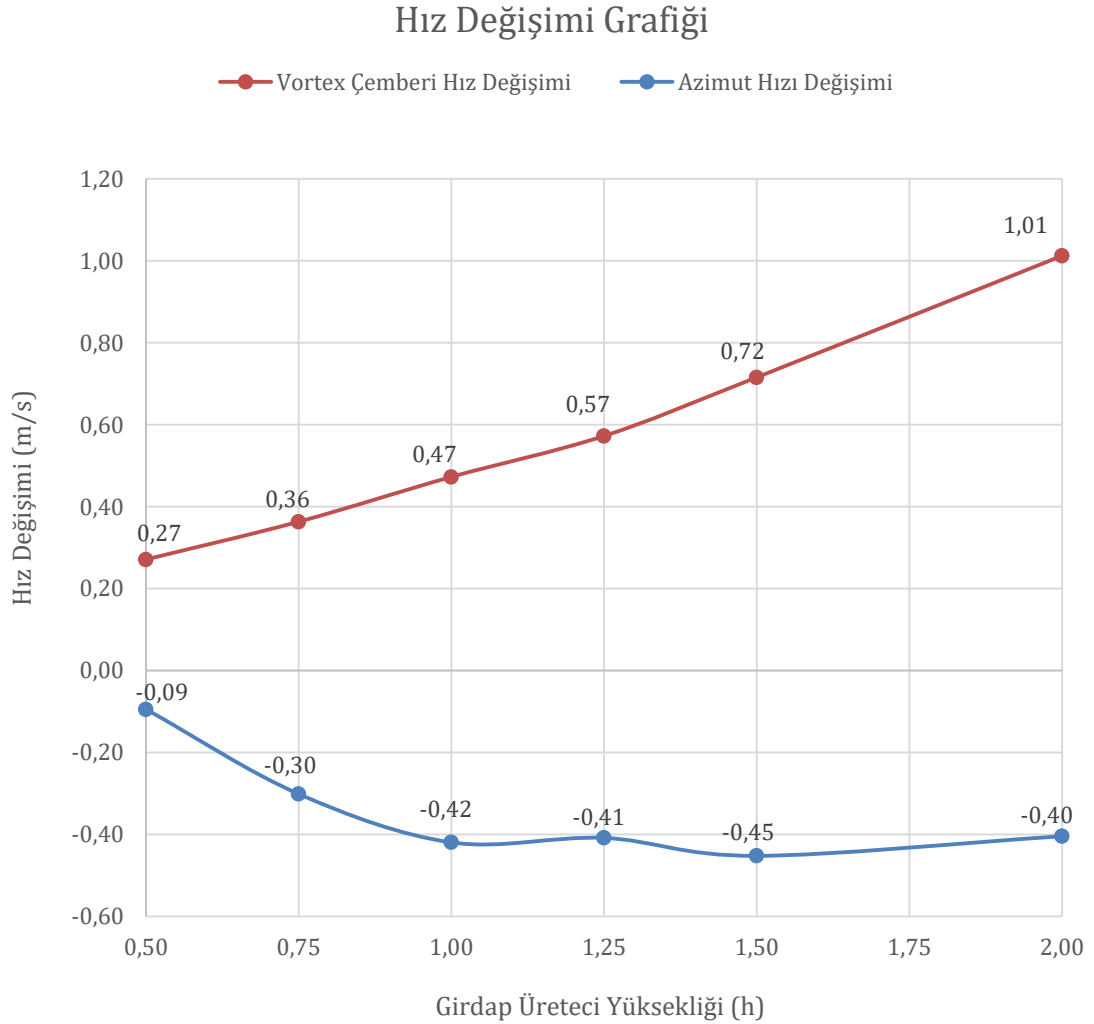


Şekil 3.16. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}^{**}$ lokasyonu sınır tabaka hız profili
(** olarak işaretlenenler $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonuna ait hız profilleridir.)

Sınır tabaka hız profili incelendiğinde yüksekliğin artması vorteks çemberi ile alt bölge ($V_{x_{\max}}$) arasındaki hız farkının artmasına, azalması da hız farkının azalmasına sebebiyet vermektedir. Yükseklikle kazanılan sirkülasyon kuvveti ve vorteks konumu azami kayma gerilmesini ileri taşıdığı için sınır tabaka etkileşimi sebebiyle sönümlenme mesafesini ileri taşıyarak $V_{x_{\max}}$ hızının nihai bir değere ulaşmadan sürekli artmasına sebebiyet vermiştir.

Literatürde mevcut çalışmalarda belirtildiği gibi taşınım mesafesinin artırılabilmesinin en makul yolu yüksekliğin artırılmasıdır [13]. Sınır tabaka hız profili incelendiğinde ise bu durum net bir şekilde görölmektedir.

Şekil 3.17.'de alt akış yolunda $\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ 'ye kadar 5cm mesafede gerçekleşen vorteks bölgesi hız değişimi grafiği verilmiştir.

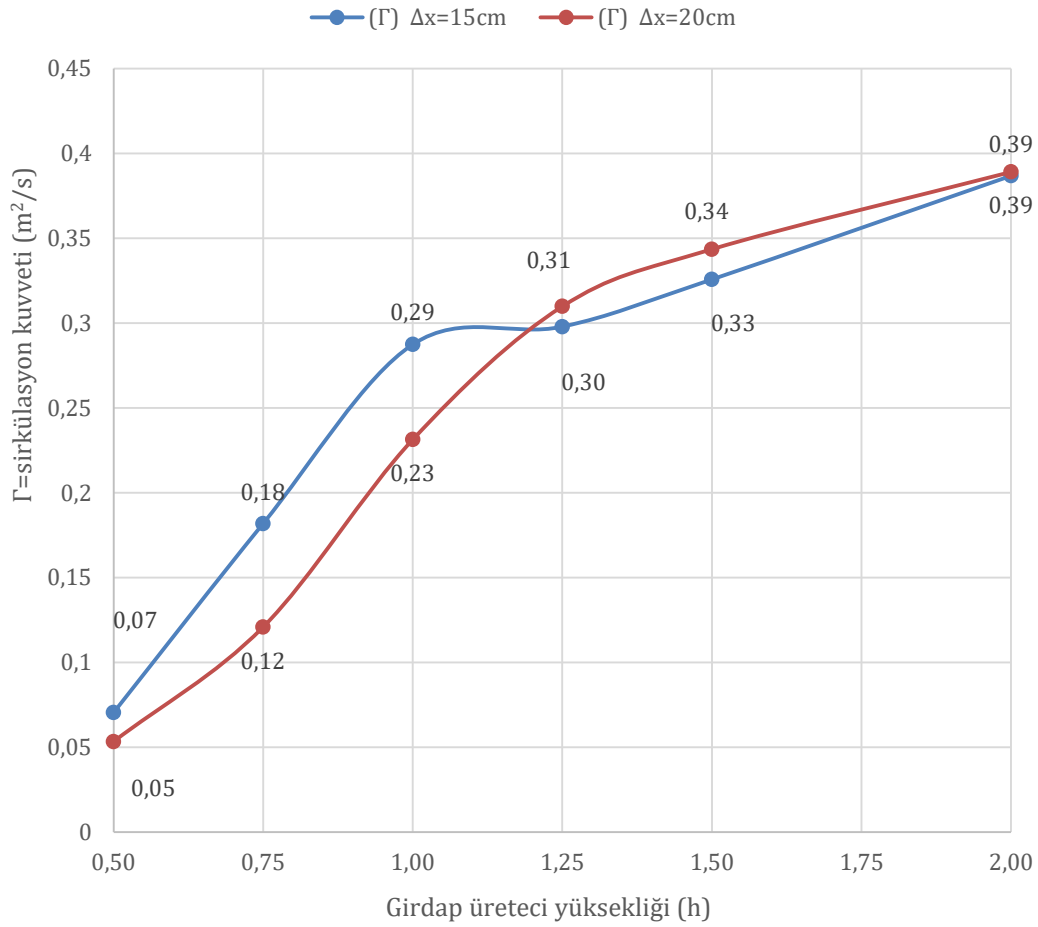


Şekil 3.17. Vorteks bölgesi hız değişimi grafiği ($\Delta x=15\text{cm}$ ile $\Delta x=20\text{cm}$ arasındaki değişim değerleridir.)

$\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonuna kadar değişen vorteks çemberi hızı ve $V_{x_{\max}}$ hızı değerleri incelendiği zaman, vorteks çemberi hızı mesafeye bağlı olarak sürekli artmıştır. Bu durum her h değerinde vorteks sirkülasyon kuvvetinin (Γ) mesafe ile azalmasından kaynaklanmaktadır.

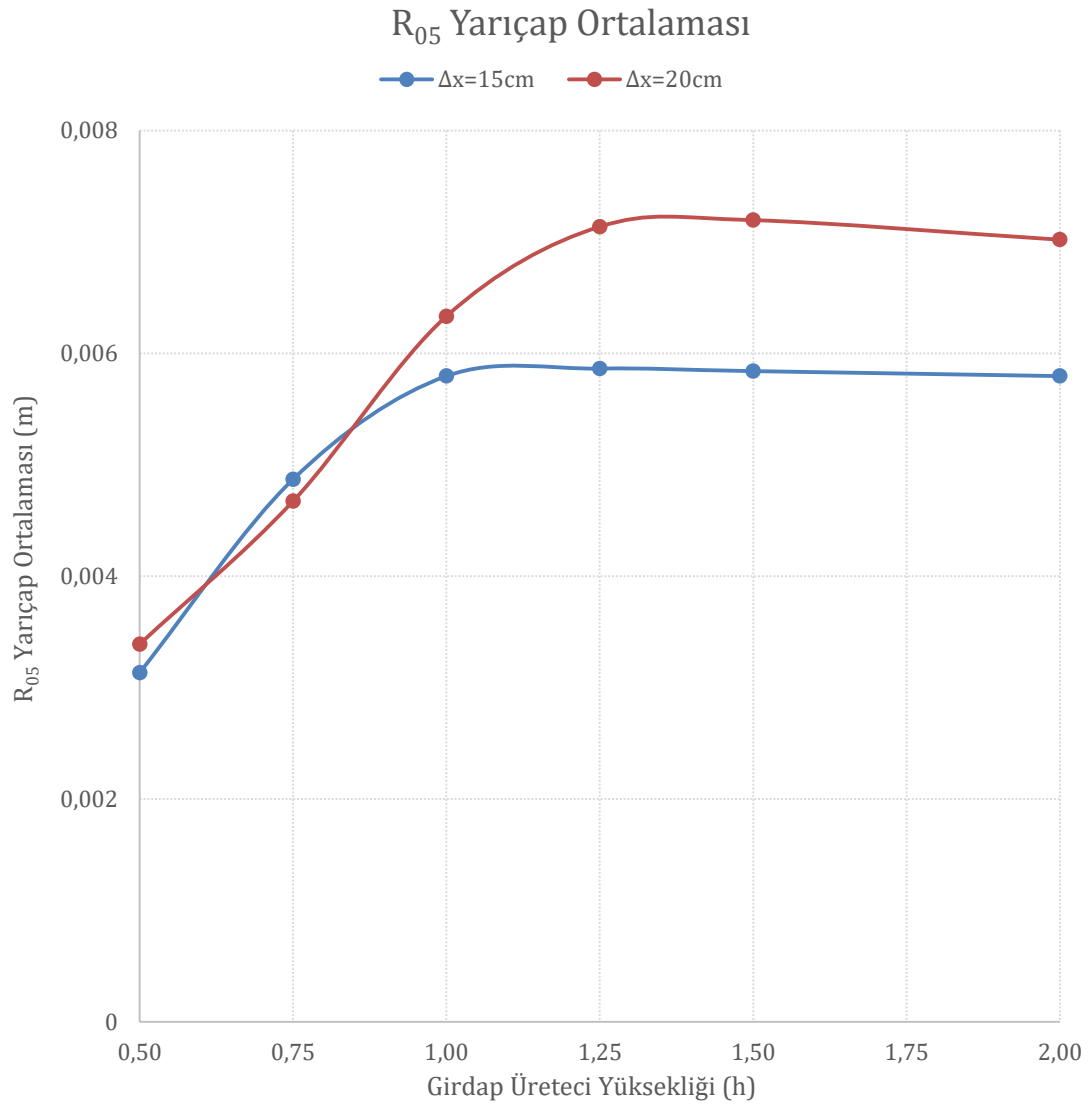
Şekil 3.18.'de $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu yüksekliğe bağlı sirkülasyon kuvveti grafiği verilmiştir.

Sirkülasyon Kuvveti (Γ) Grafiği



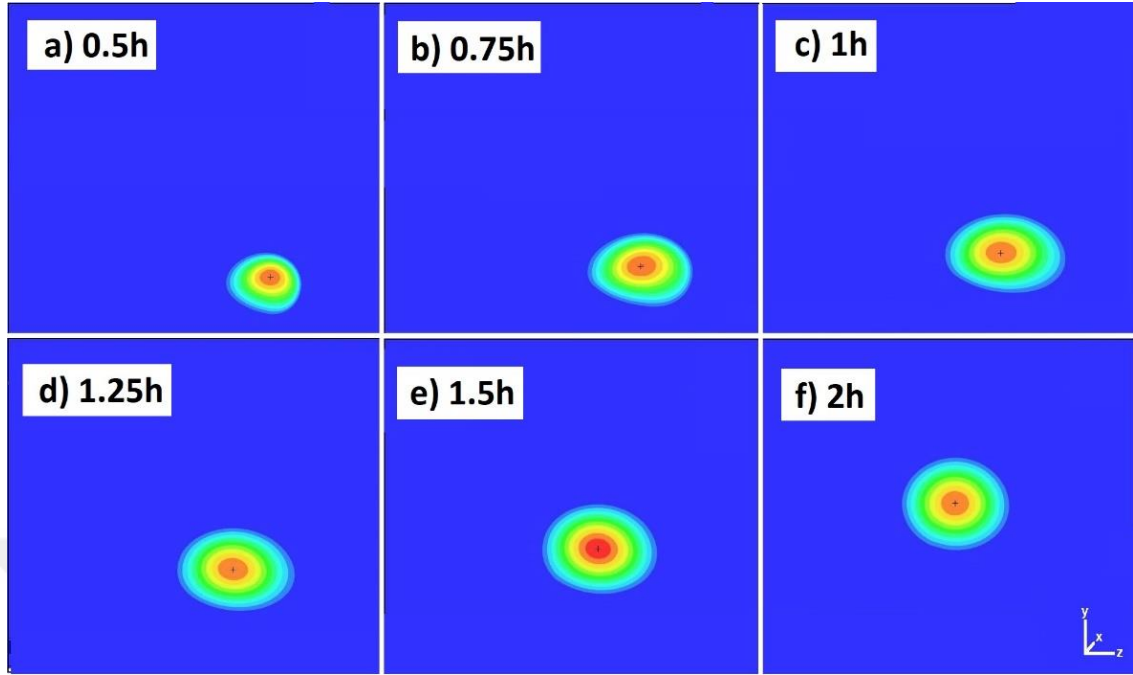
Şekil 3.18. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu yüksekliğe bağlı sirkülasyon kuvveti (m^2/s) grafiği

$V_{x_{\max}}$ hızının $0.5h$ ve $0.75h$ yüksekliklerinde daha düşük oranda azalmasının sebebi her iki girdap üreticinin de var olan enerjisinin (Γ) geri akış mesafelerinde harcanmasından dolayıdır. $1h$ 'dan sonra yavaşlama miktarının sabitlenmesi ise $1h$ değeri için vorteks gelişimini tamamlama noktasının yaklaşık $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda olmasından kaynaklanmaktadır. $1.25h$ ve üzeri yüksekliklerin oluşturduğu vorteks alanı ise halen zeminle yüksek oranda etkileşecek kadar büyümemiş bu sebeple hız kaybı artmamıştır. Bu durum sunulan tez çalışmasında yüksekliğe bağlı R_{05} yarıçap ortalaması grafiği (Şekil 3.16.) ve azami kayma gerilmesi lokasyonu grafiklerinde (Şekil 3.20.) görülmektedir. Şekil 3.19.'da $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonunda oluşan vorteksin alan hesabı için R_{05} yarıçap ortalaması verilmiştir.

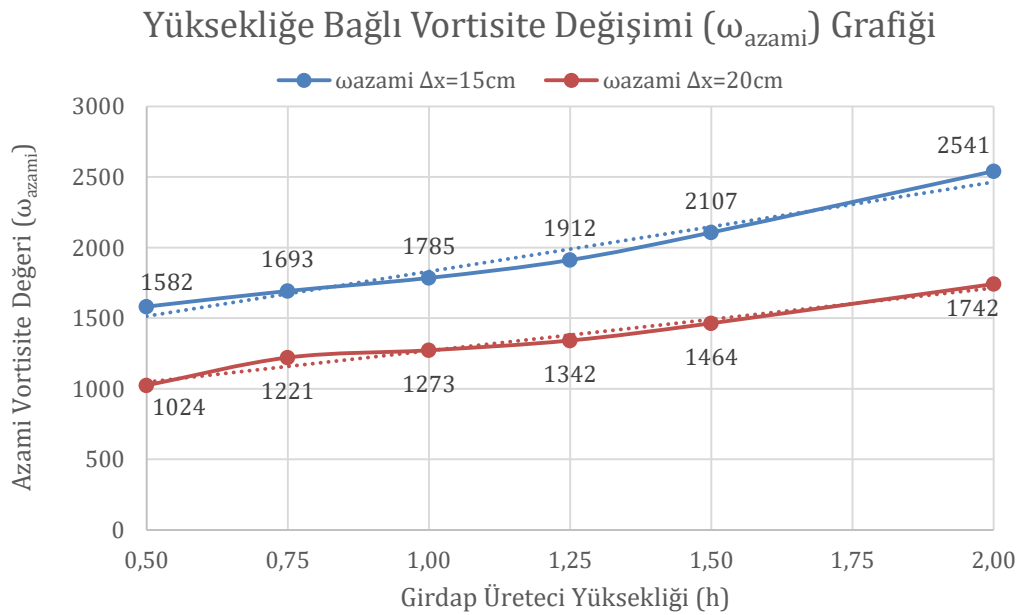


Şekil 3.19. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu R_{05} yarıçap ortalaması

R_{05} yarıçapı vorteksin azami vortisite (ω_{azami}) değerinin yarı sönümlenme uzaklığına olan mesafesini tanımlamaktadır [13, 50]. R_{05} yarıçap mesafenin bulunabilmesi için azami vortisitenin lokasyonu ile yatay ve dikey düzlemde azami vortisitenin yarı değerine ulaştığı noktaların lokasyonları arasındaki mesafenin ortalaması alınır, elde edilen mesafe ile de vorteks alanı, sirkülasyon kuvveti (Γ) ve oluşan vorteksin sönümlenme grafiği bulunmaktadır. Şekil 3.20.'de $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşan vortisite konturları verilmiştir. Şekil 3.21.'de ise yüksekliğe bağlı azami vortisite grafiği verilmiştir.

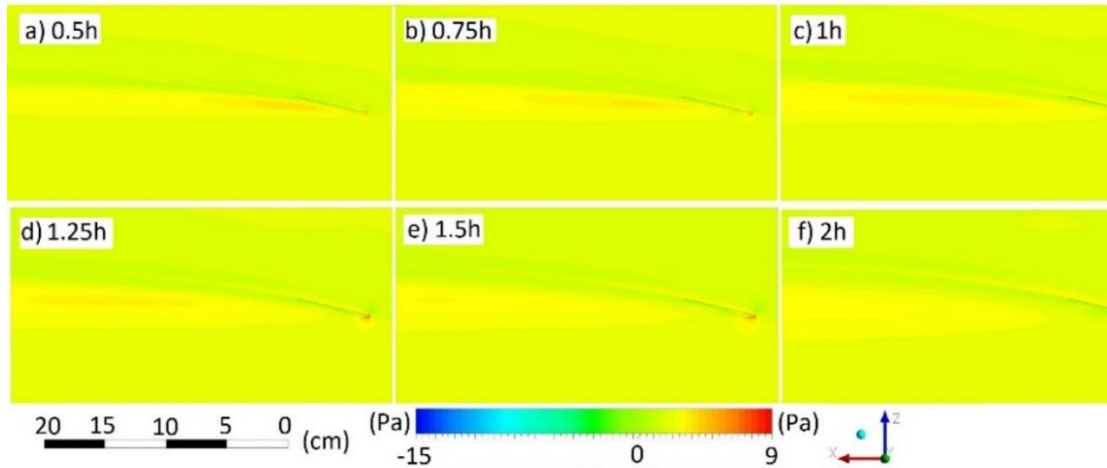


Şekil 3.20. $\Delta x=15\text{cm}$, ω_{azami} noktasından $\omega_{\text{azami}}/2$ noktasına kadar vortisite konturu. (Vortisite boyutları Şekil 3.19.'da verilen $\Delta x=15\text{cm}$ R_{05} yarıçapı grafiği aracılığıyla verilmiştir. Her konturun kırmızı bölgesi Şekil 3.21.'de verilen ω_{azami} $\Delta x=15\text{cm}$ değerlerine, mavi bölgesi ise $\omega_{\text{azami}}/2$ ve altına eşittir. Burada; a) 0.5h b) 0.75h c) 1h d) 1.25h e) 1.5h ve f) 2h girdap üreteçlerine aittir. Görseller Tecplot programı aracılığı ile çizilmiştir [74].)



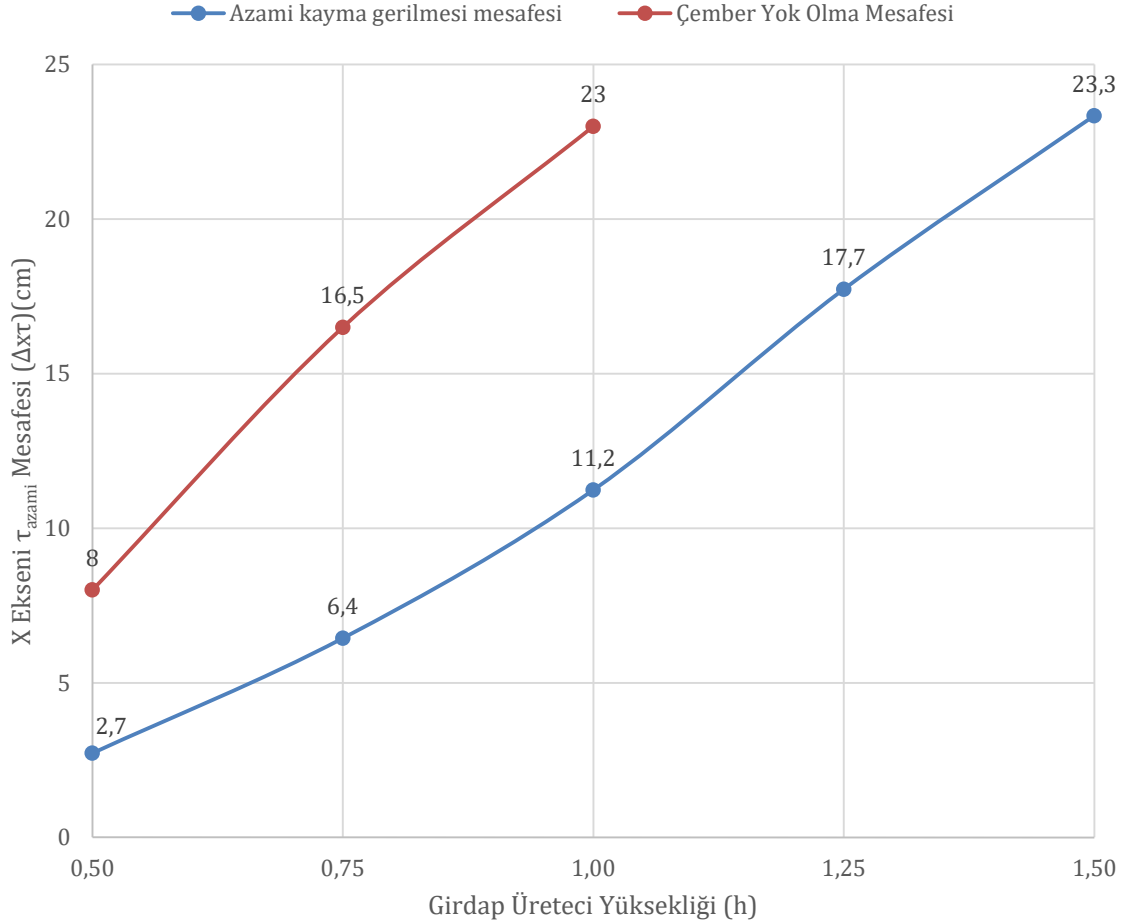
Şekil 3.21. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu yüksekliğe bağlı azami vortisite (ω_{azami})

R_{05} yarıçapı ile yükseklik ilişkisi incelendiğinde, $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda yaklaşık $1h$ en büyük alana sahipken, $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonunda yaklaşık $1.25h$ yüksekliği en büyük alana sahiptir (Grafik eğrisinin zirve noktaları incelendiğinde $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda $1.08h$ 'ın $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonunda ise $1.33h$ en büyük alana sahip olması beklenmektedir). Aynı zamanda vorteks alanının artış miktarları kıyaslandığında yaklaşık $1h$ yüksekliği; $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonuna kadar en hızlı büyümeyi sergilerken, $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonunda büyüme hızını büyük oranda kaybetmiş, $1.25h$ ise geçen mesafede daha hızlı büyümeye imkân bulmuştur. $1.25h$ için bu durumun sebebi yüksekliğin artması sonucunda vorteksin yukarıdan taşınması ve zemin ile etkileşecek kadar alana sahip olması için geçen mesafenin uzamasından kaynaklanmaktadır. Sonrasında da zemin sebebiyle kaybedilen sirkülasyon kuvveti alan artış hızını yavaşlatıp oluşan vorteksin ileri mesafelerde sönümlenmesine sebep olmaktadır. Bu durumun yükseklik ile ilişkisini genelleylebilmek ve daha hızlı şekilde girdap üreticinin yüksekliğe bağlı sönümlenme başlangıcını bulabilmek için Şekil 3.22.'de yüksekliğe bağlı kayma gerilmesinin konturu incelenmiştir. Şekil 3.23.'te ise azami kayma gerilmesi ve vorteks çemberi yok olma mesafesinin yüksekliğe bağlı yer değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.22. Yüksekliğe bağlı kayma gerilmesi konturu (Burada; a) $0.5h$, b) $0.75h$, c) $1h$, d) $1.25h$, e) $1.5h$, f) $2h$ yüksekliklerinde girdap üreticilerinin alt akış yolu boyunca zeminde oluşturduğu kayma gerilmesinin konturudur.)

Azami Kayma Gerilmesi Ve Vorteks Çemberi Yok Olma Mesafesi Grafiği



Şekil 3.23. Azami kayma gerilmesi ve vorteks çemberi yok olma mesafesinin yüksekliğe bağlı yer değişimi grafiği (Grafikte çember yok olma mesafesi vorteks çemberinin girdap üretici sonrası alt akış yolunda yok olma mesafesini tanımlamaktadır. 2h azami kayma gerilmesi mesafesi inceleme alanının dışarısında kalmıştır)

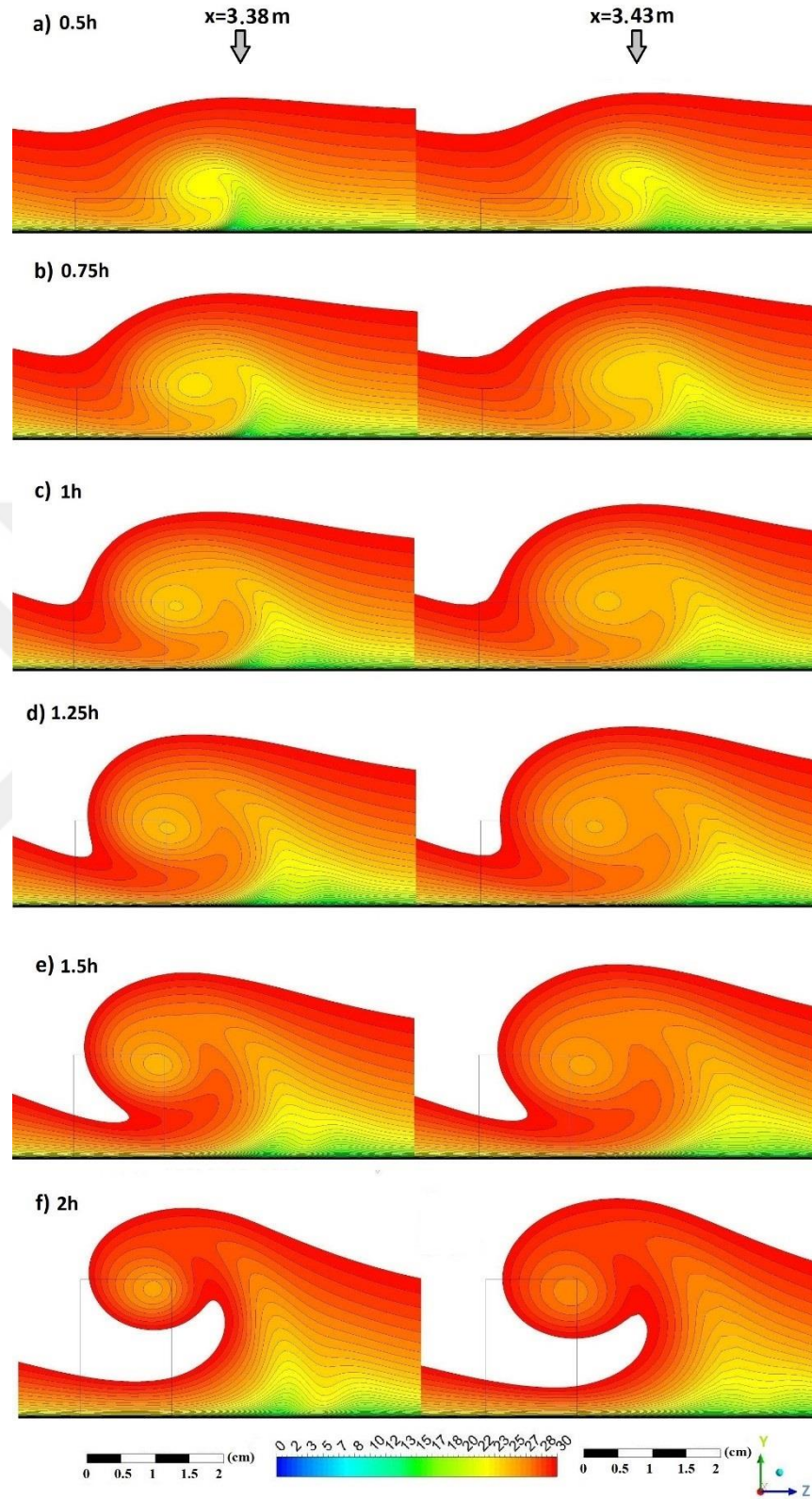
Kayma gerilmesi konturu incelendiğinde, her girdap üretici yüksekliğinin zeminle azami derecede etkileşimi (τ_{azami}) farklı konumlarda oluşmaktadır. h değeri yükseldikçe oluşan vorteks daha yukarıdan taşınmakta ve zeminle yüksek oranda etkileşen vorteks oluşumu ileriye taşındığı için azami kayma gerilmesi (τ_{azami}) daha uzak mesafede ortaya çıkmaktadır. Azami zemin etkileşiminden (τ_{azami}) sonra ise sirkülasyon kuvveti daha hızlı azalmakta ve zemin yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi miktarı tekrar düşmektedir.

Bu durum ise oluşan vorteksin gelişimini tamamladığını ve sonraki aşamalarda sönümlenmeye geçtiğini göstermektedir. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda $1.08h$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonunda $1.33h$ girdap üreticinin en büyük alana sahip olması da benzer şekilde azami kayma gerilmesinin her iki yükseklik için yaklaşık $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonlarında olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.18’de verilen $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonu yüksekliğe bağlı sirkülasyon kuvveti grafiği incelendiğinde azami kayma gerilmesini akışın önceki aşamalarında oluşturan vortekslerin sirkülasyon kuvvetleri halen gelişmekte olan vortekslere oranla daha yüksek oranda azalmaktadır. Sirkülasyon kuvvetindeki azalma miktarı değişiminin sebebi de benzer şekilde azami kayma gerilmesi lokasyonu sonrası vorteks sönümlenmesi sebebiyle oluşmaktadır. Sunulan tez çalışmasında alt akış alanının kısıtlı olmasından ve test edilen bölgede sönümlenen vortekslerin ($0.5h$ ve $0.75h$) sınırlı olmasından dolayı zeminle etkileşme mesafesi ile tam sönümleme mesafesi ilişkisinin hesaplanması mümkün olmamaktadır.

İncelenen veriler sonucunda vorteks taşınımının üç fazda gerçekleştiği görülmektedir. Fazlardan birincisi azami kayma gerilmesinin oluşması, ikincisi azami kayma gerilmesi sonrası vorteks çemberi yok olma lokasyonu ve üçüncüsü ise vorteks çemberi yok olma lokasyonu sonrası sınır tabaka momentum transferinin sönümlenmesidir.

Azami kayma gerilmesi lokasyonu yapılan incelemelerde vorteksin taşınma yüksekliğine ve sirkülasyon kuvvetine bağlıken elde edilen sınırlı verilerle vorteks çemberi yok olma mesafesi incelendiğinde azami vortisite değerinin ve sonucunda sirkülasyon kuvvetinin etkili olduğu görülmektedir. Yüksekliğin artması vorteksin nihai taşınımını artırsada taşınım mesafesinin ikinci aşaması olan vorteks çemberi yok olma mesafesi üzerinde etkisi yükseklik ile birlikte logaritmik oranda artmaktadır. Bu durum yükseklik artışı ile vorteks taşınım kazancının azalmasına sebebiyet vermektedir. Bu sebeple azami kayma gerilmesi sonrası vorteks çemberi yok olma mesafesinin girdap üretici açısı ile ilişkisinin incelenmesi ve girdap üretici optimizasyonunda kullanılması gerekmektedir.

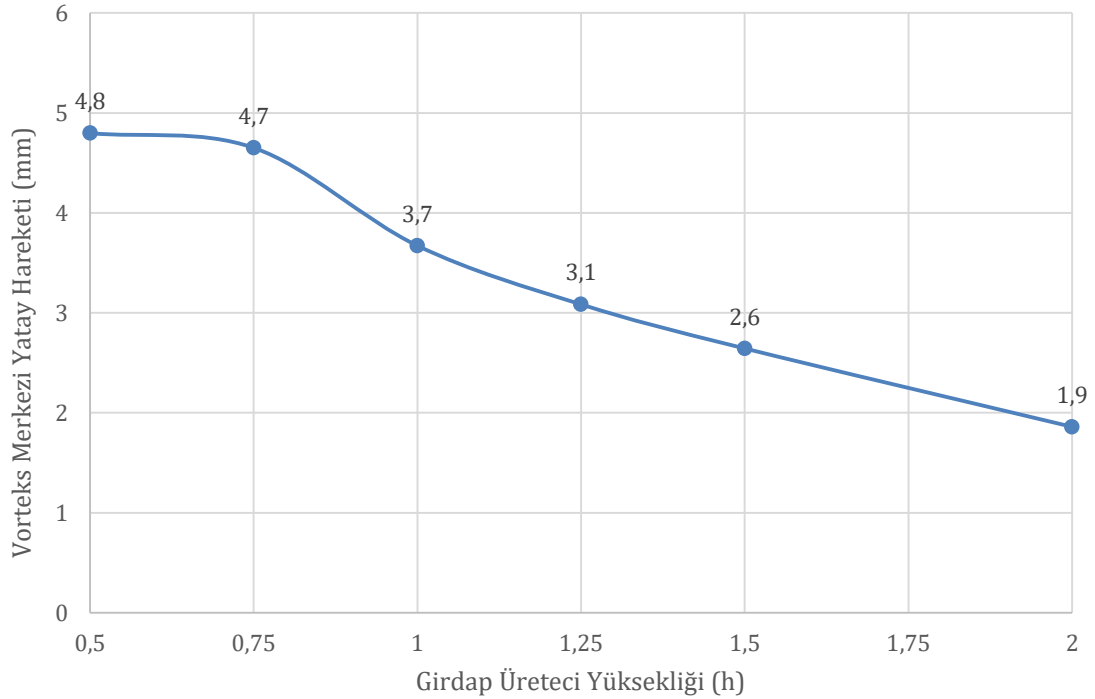
Vorteks çemberi yok olma lokasyonu sonrası sınır tabaka momentum transferinin sönümlenmesi sunulan tez çalışmasında inceleme bölgesinin sınırlı olmasından dolayı incelenememiştir. Şekil 3.24.’te $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonlarına ait hız konturları verilmiştir.



Şekil 3.24. $\Delta x = 15\text{cm}$ ve $\Delta x = 20\text{cm}$ lokasyonu hız konturu (Burada; a) 0.5h, b) 0.75h, c) 1h, d) 1.25h, e) 1.50h ve f) 2h yüksekliğine sahip girdap üreteçleridir. Konturdaki azami hız 30m/s'dir.)

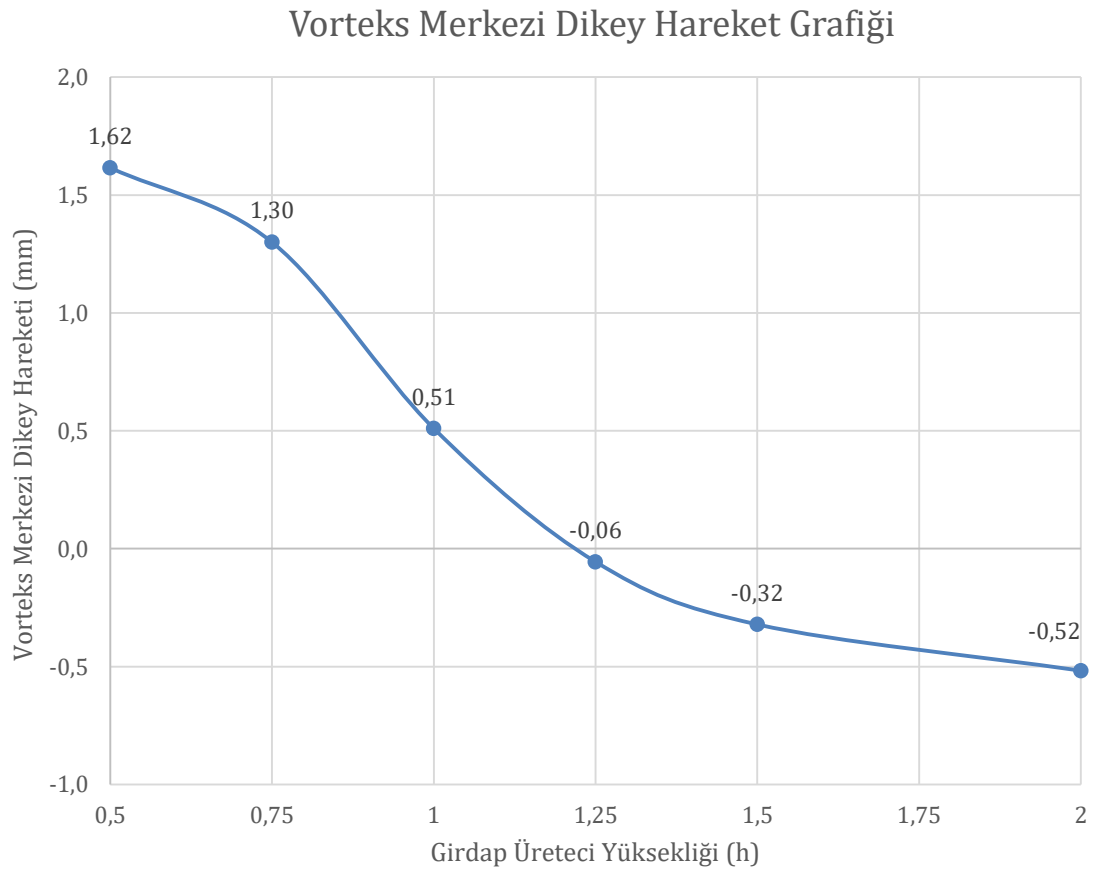
Şekil 3.24.'te verilen $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonlarına ait hız konturları incelendiğinde yükseklik değişimi sonucu oluşan yatay/dikey sapma oranlarında farklılık görülmektedir. Girdap üreticilerinde açı artışı doğrudan hava akışına yön verdiği için vorteksin izlediği yolda hareket oranları incelenememekteydi, fakat yükseklik değişiminde vorteks hareketinin sirkülasyon kuvveti artışı ile ilişkisinin incelenmesi mümkün olmaktadır. Literatürde mevcut önceki çalışmalarda vorteksin izlediği yol [75] ve yüksekliğe bağlı sirkülasyon kuvveti artışı SST k-w türbülans modeli ile yapılan sayısal analizlerle ve deneysel sonuçlarla kıyaslanıp doğrulanmıştır [13, 17]. Bu durum sunulan tez çalışmasında literatürde mevcut önceki çalışmalarla aynı türbülans modelinin kullanılması sayesinde belirlenen mesafelerde girdap üretici tarafından oluşturulan sirkülasyon kuvvetinin vorteks sapma miktarı ile ilişkilendirilmesine imkân sağlamaktadır. Şekil 3.25.'te vorteks merkezinin $\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ 'ye 5cm mesafede z ekseninde yatay olarak yer değişimi grafiği verilmiştir.

Vorteks Merkezi Yatay Hareket Grafiği



Şekil 3.25. $\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonuna kadar z ekseninde vorteksin yatay hareket grafiği

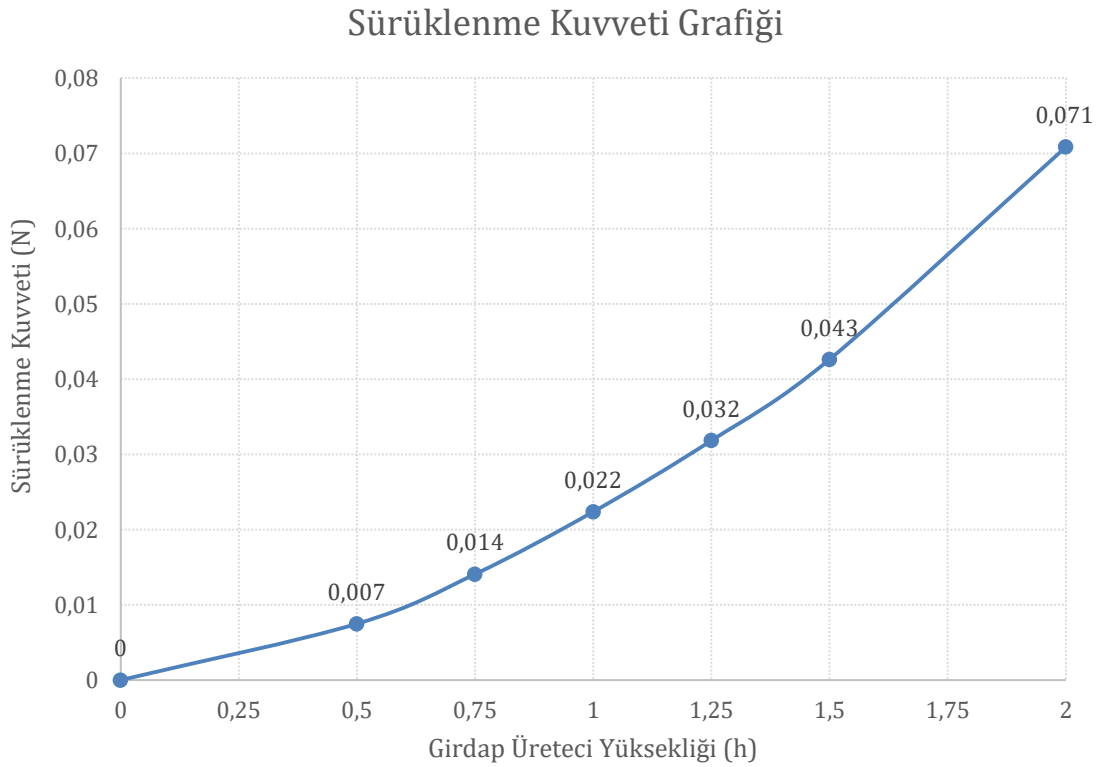
Vorteks merkezi yatay hareket grafiği incelendiğinde 0.5h ve 0.75h değerlerinde 5cm hareket mesafesinde vorteks merkezi z ekseninde pozitif yönde yaklaşık 5mm sapmıştır. Bu durumun sebebi her iki h değerinin de zemine fazla yakın olup sınır tabakanın düşük hız alanlarında kalmasından ve sirkülasyon kuvvetlerini akışın önceki fazlarında kaybetmesinden kaynaklanmıştır. Literatürde mevcut çalışmalarda olduğu gibi yüksek sirkülasyon miktarı taşınım mesafesini artırmakla birlikte sapma miktarını da doğrudan azaltmaktadır [13, 42, 76]. 1h ve üzerine çıkıldığı zaman yatay sapma miktarı; $V_{x_{max}}$ hızı ve sirkülasyon kuvveti ile doğru orantılı olarak azalmıştır. Şekil 3.26.'da vorteks merkezinin $\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ 'ye 5cm mesafede y ekseninde dikey olarak yer değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.26. $\Delta x=15\text{cm}$ 'den $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonuna kadar y ekseninde vorteksin dikey hareket grafiği

Vorteks merkezi dikey hareket grafiği incelendiğinde 0.5h ve 0.75h değerlerinde 5cm hareket mesafesinde vorteks merkezi y ekseninde diğer h değerlerine kıyasla yüksek oranda sapmıştır. Bu durum h değerinin artmasıyla sürekli olarak azalmış ve 1.25h değerinden sonra negatif yönde sapma, dolayısıyla da zemine yaklaşma gerçekleşmiştir. Azami kayma gerilmesini akışın önceki fazlarında gerçekleştiren girdap üreticilerine bakıldığı zaman (0.5h, 0.75h ve 1h) zeminle etkileşim sebebiyle oluşan vorteks yükselme eğilimi göstermiş, azami vortisite mesafesinde bulunan (1.25h) vortekslerin yüksekliği sabit kalıp, halen gelişim aşamasında olan vorteksler ise (1.5h ve 2h) zemine yaklaşma eğilimi göstermiştir.

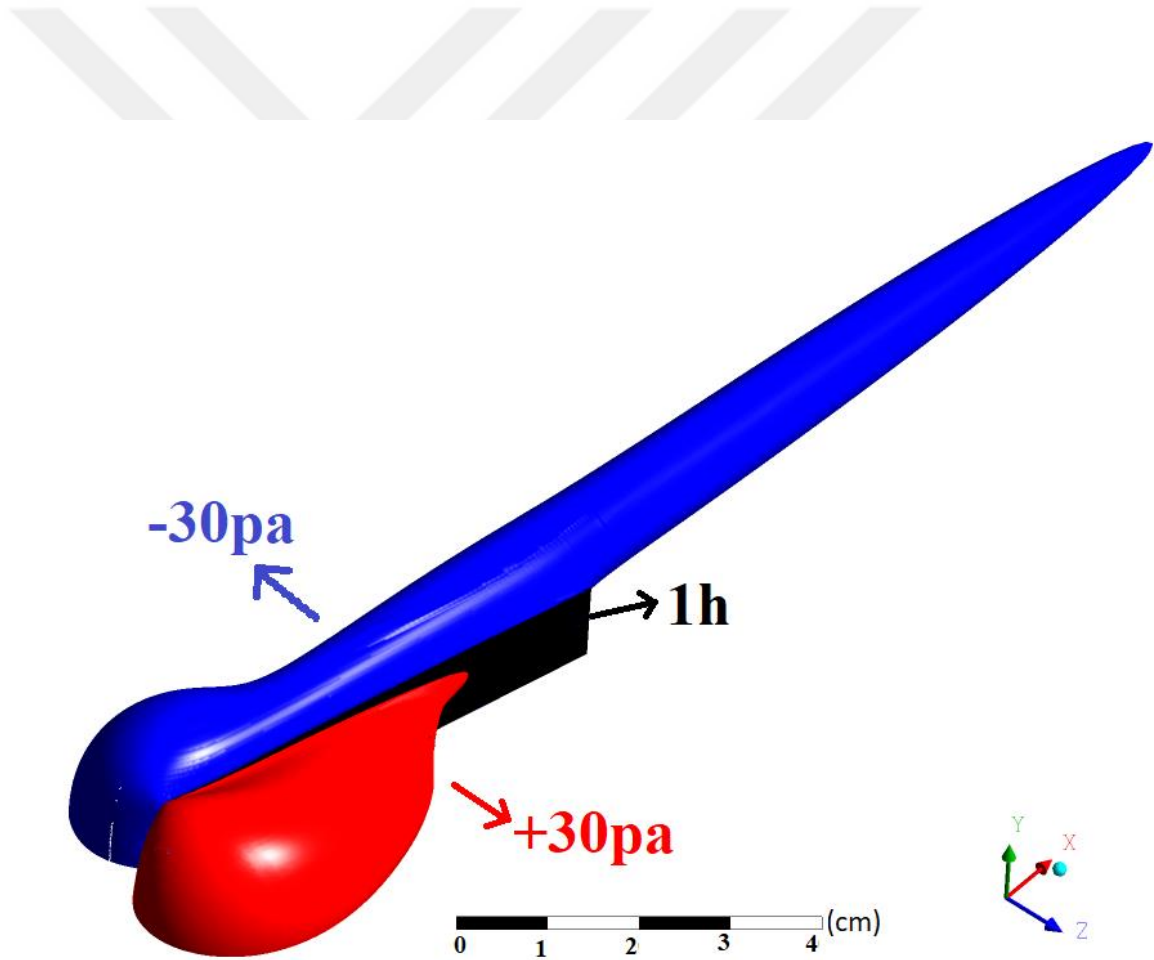
Sunulan tez çalışmasında yapılan incelemelerde $\Delta x=15\text{cm}$ gözlem bölgesini azami kayma gerilmesi ve vorteks çemberi sönümlenme lokasyonlarının içerisinde bulundurmasından ve belirlenen bölgede vorteks etkinliğini 1.25h ve üzeri girdap üreticilerine kıyasla oluşturduğu düşük sürüklenme kuvveti ile birlikte (Şekil 3.27.) sürdürmesinden dolayı devam eden çalışmalar 1h girdap üretici ile yapılmıştır. Şekil 3.27.'de girdap üreticilerinde yüksekliğe bağlı sürüklenme grafiği verilmiştir.



Şekil 3.27. Yüksekliğe bağlı sürüklenme kuvveti grafiği

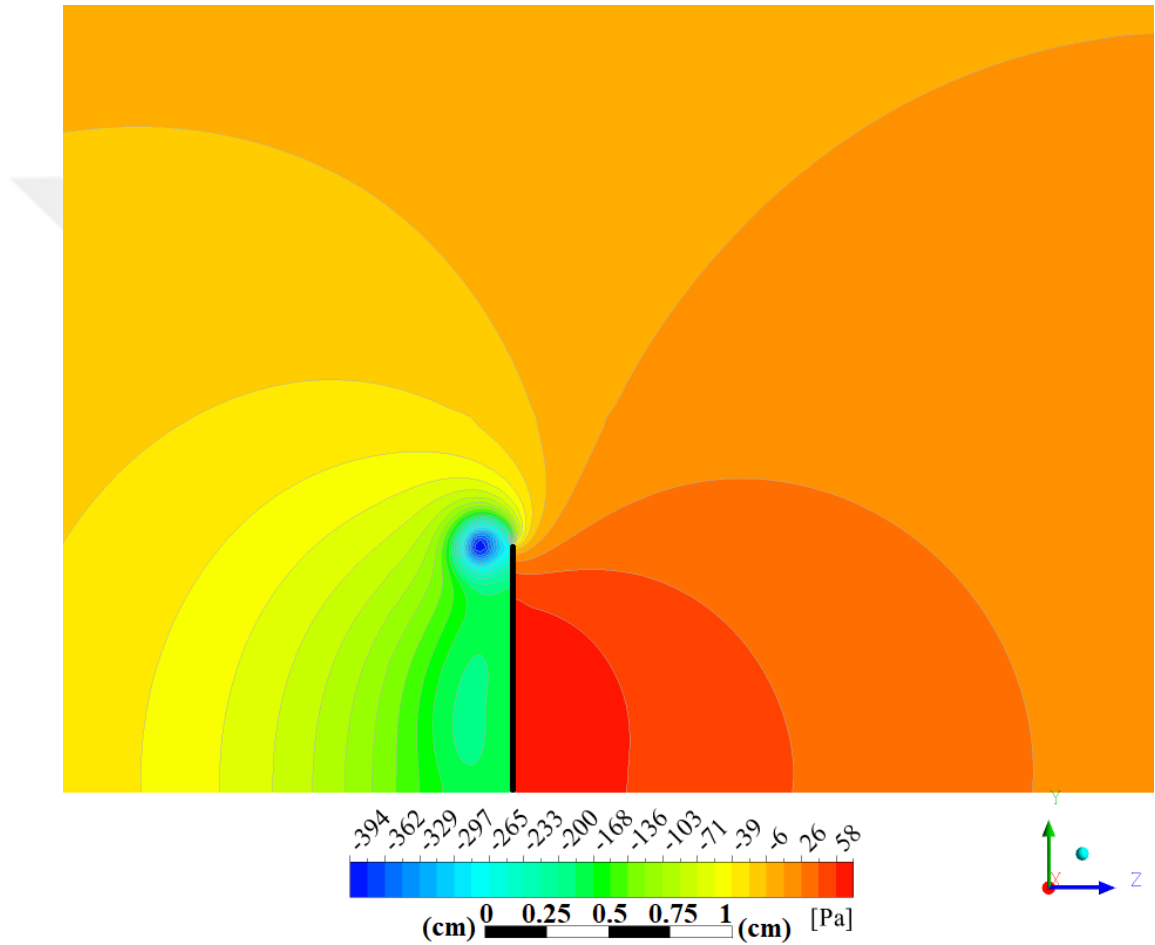
Yükseklik değişimi vorteks taşınım mesafesinin belirlenmesinde önemli rol oynadığı gibi [77] paralel/zıt girdap üreticilerinin iç ve dış (s-w) açıklık oranının belirlenmesinde de rol oynamaktadır [5, 14, 19, 78]. Bilindiği üzere girdap üreticileri birbirlerine olması gerekenden yakın ya da uzak yerleştirildiklerinde düşük ya da yüksek basınç alanlarının birbirleriyle etkileşimleri sonucu girdap üreticileri üzerinde verim kaybı oluşmaktadır [5, 14, 19, 79].

Sunulan tez çalışmasında girdap üretici yüksekliği ile çevre basıncı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 3.28.'de 1h girdap üretici etrafında oluşan basınç alanlarının izo-yüzey görselleştirmesi verilmiştir.



Şekil 3.28. 1h girdap üretici izo-yüzeyleri (Mavi yüzey -30pa, kırmızı yüzey +30pa basınç alanına tekabül etmektedir.)

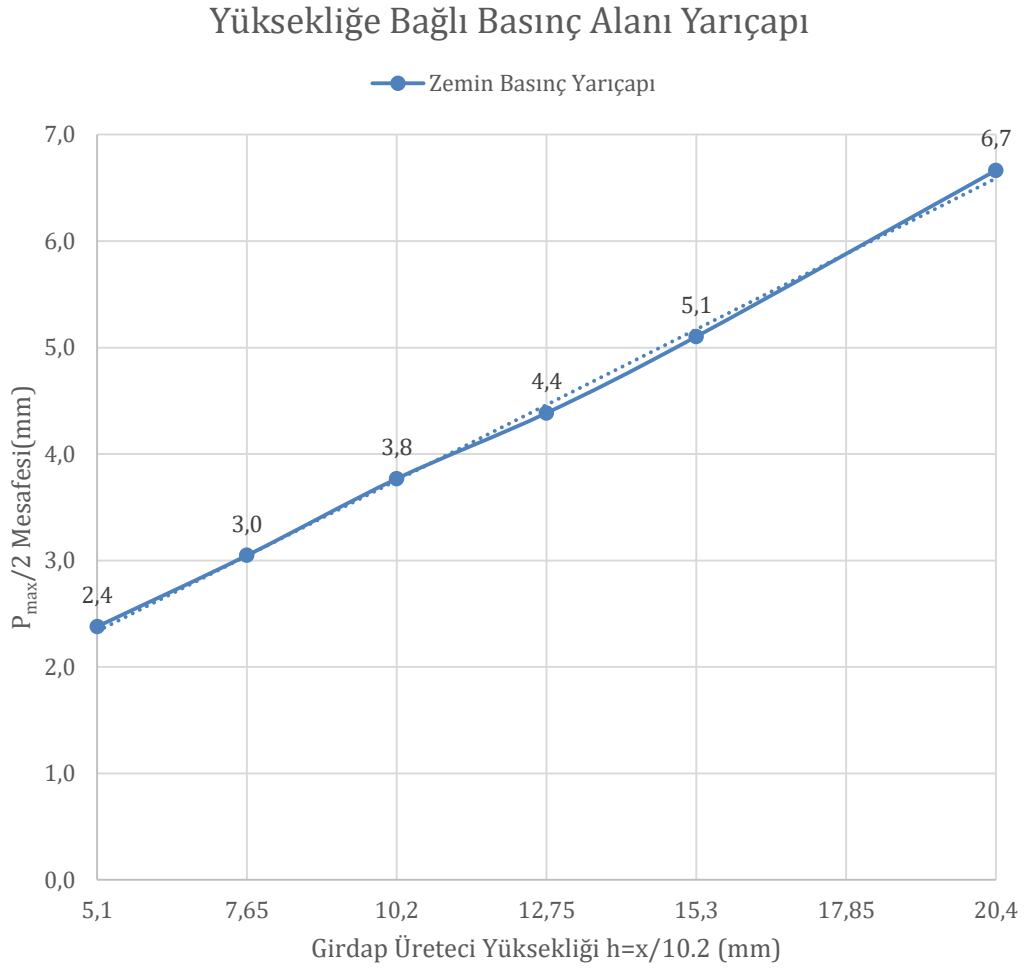
Şekil 3.28.'de görüldüğü gibi basınç alanını oluşturabilmek için 1h girdap üretici etrafına -30pa ve +30pa basınçlara sahip izo-yüzeyleri oluşturulmuştur. Yapılan incelemede basınç alanının girdap üretici etrafında iki ayrı bölgeden oluştuğu görülmüştür. Bu alanlar sunulan tez çalışmasında basınç gelişim bölgesi ve vorteks basıncı bölgesi olarak ikiye ayrılmıştır. Şekil 3.29.'da gelişim bölgesinde oluşan basınç alanı konturu verilmiştir.



Şekil 3.29. Gelişim bölgesinde oluşan basınç alanı konturu (1h)

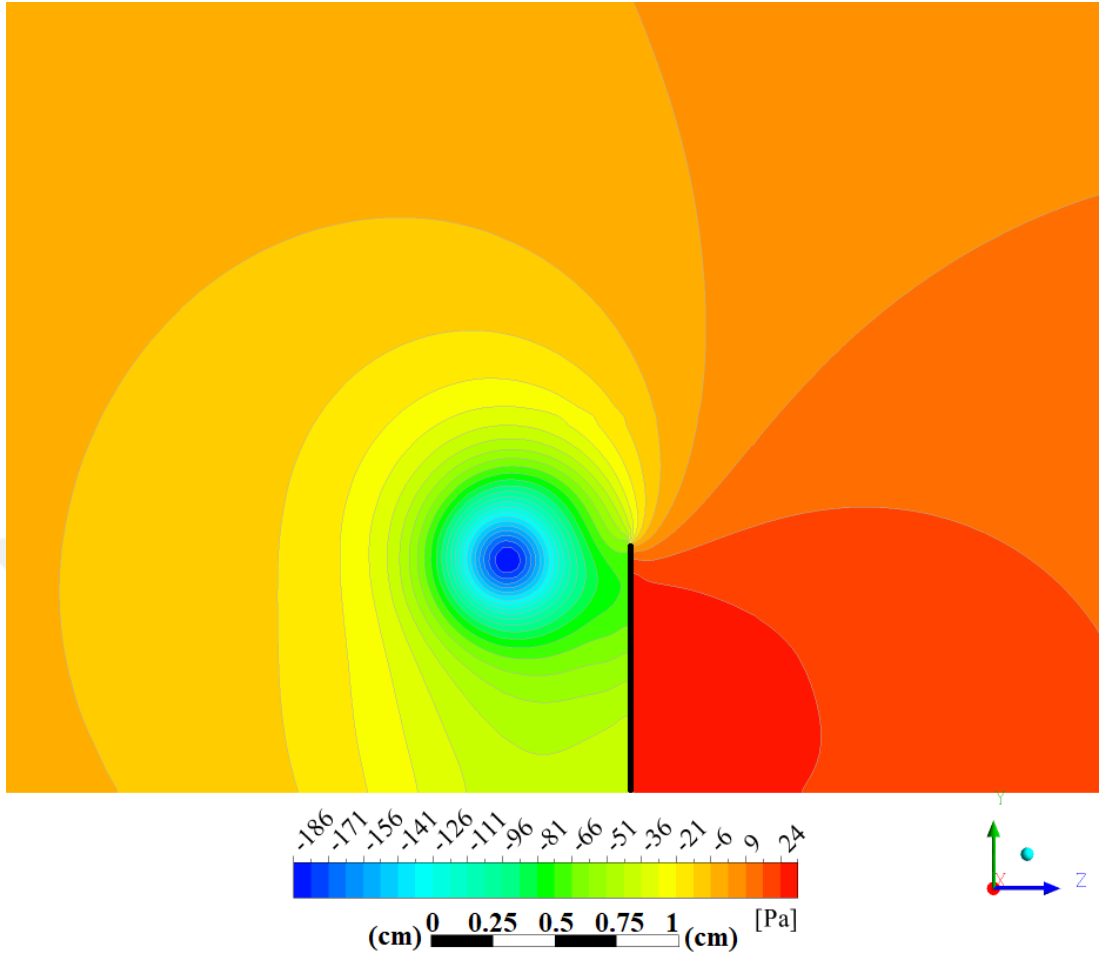
Girdap üreticinin ilk yarısında bulunan gelişim bölgesinde oluşan basınç alanları pozitif ve negatif basıncın yaklaşık olarak aynı şekilde etkin rolde bulunduğu alan olarak görülmektedir. Basınç dağılımları incelendiğinde yayılım itibariyle benzer özellikler barındırmaktadırlar. Girdap üreticinin yakın bölgelerinde basınç halkaları yukarı alanlarda taşınırken, girdap üretici yüksekliği mesafesi kadar dış alanlara bakıldığında en geniş basınç alanı zemin bölgesinde oluşmaktadır. Bu bölgede oluşan basınç alanlarının yüksekliğe bağlı ilişkisini inceleyebilmek için girdap üreticinin hücum

kenarından başlayarak zeminde oluşturduğu pozitif azami basıncın yarı değerine ulaştığı ($P_{\max(zemin)}/2$) noktaya kadar geçen dikey mesafeler hesaplanmıştır. Şekil 3.30.'da basınç gelişim bölgesinde yüksekliğe bağlı basınç alanı yarıçapı grafiği verilmiştir.



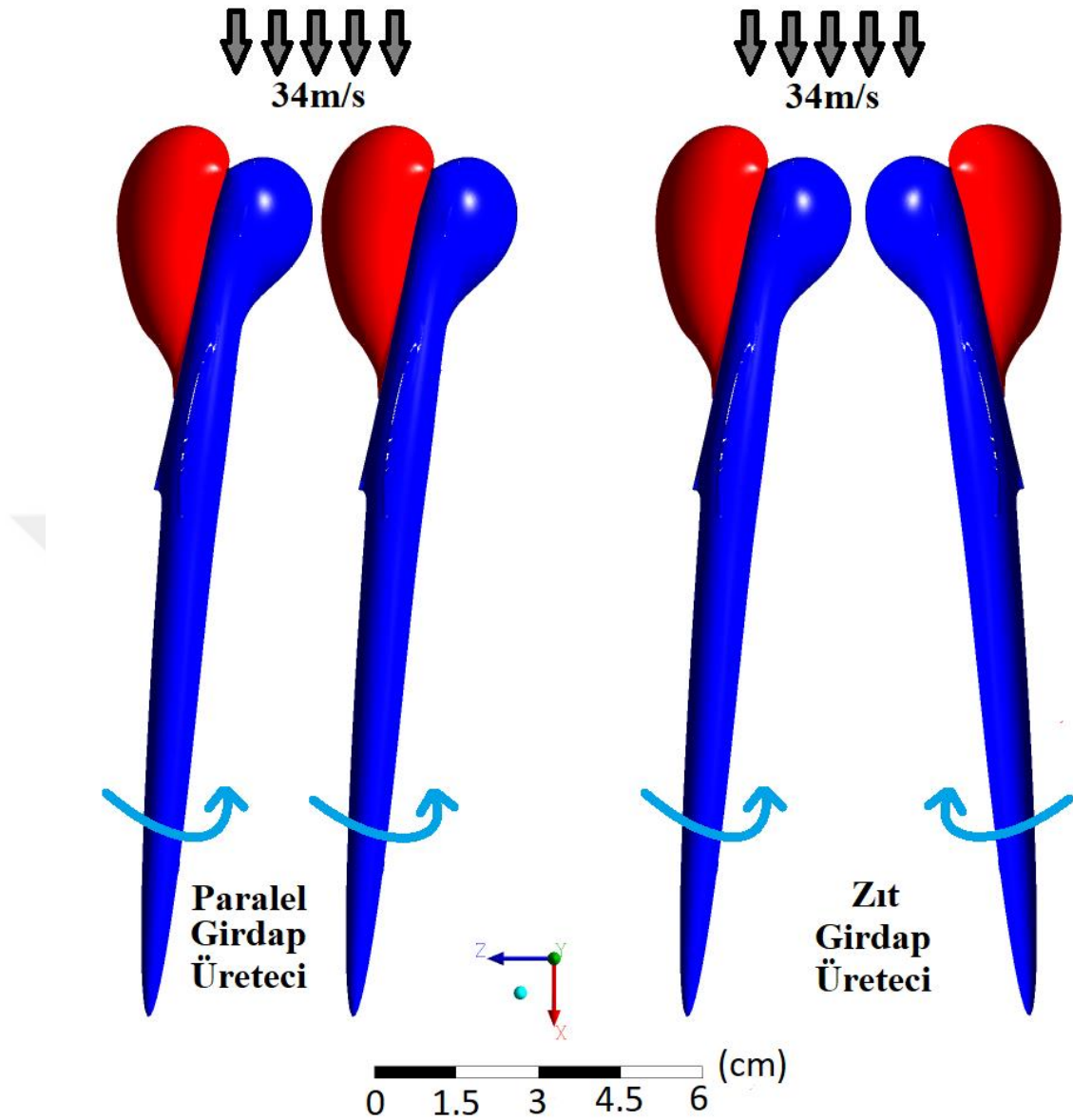
Şekil 3.30. Basınç gelişim bölgesinde yüksekliğe bağlı basınç alanı yarıçapı ($P_{\max}/2$)

Şekil 3.30.'da görüldüğü gibi basınç gelişim bölgesindeki pozitif basınç alanı girdap üreticinin yüksekliği ile birlikte doğru orantılı olarak artmaktadır. Negatif basınç alanında da benzer özellikler görüldüğü için doğru orantılı artışın gerçekleşmesi beklenmektedir. Basınç alanı artış miktarlarının doğru orantılı olması girdap üretici iç açıklık mesafesinin yüksekliğe sabit bir katsayı ile oranlanmasına imkan vermektedir. Şekil 3.31.'de vorteks basıncı bölgesi basınç alanı konturu verilmiştir.



Şekil 3.31. Vorteks basıncı bölgesi basınç alanı konturu (1h)

Girdap üreticinin ikinci yarısında bulunan vorteks basıncı bölgesi incelendiğinde ise bu bölgede negatif basınç etkin rol oynamaktadır. Girdap üretici üzerinde vorteks oluşum aşamasındayken negatif basıncın merkezi aynı zamanda vorteks merkezi ile aynı yere denk gelmektedir. Bu sebeple yüksekliğin artması hem basınç şiddetini negatif değere doğru artırırken hem de basınç merkezini yukarıya taşıyacaktır. Basınç gelişim bölgesi ve vorteks basıncı bölgesi bir arada incelendiğinde oluşan vorteksin yüksek basınçtan düşük basınca geçmeye çalışan hava sebebiyle oluştuğu görülmektedir. Girdap üreticilerinin birbirlerini sönmüleme eğilimleri de bu alanda ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.32.'de paralel ve zıt girdap üreticileri etrafında basınç alanları ile oluşturulan izo-yüzeyler verilmiştir.

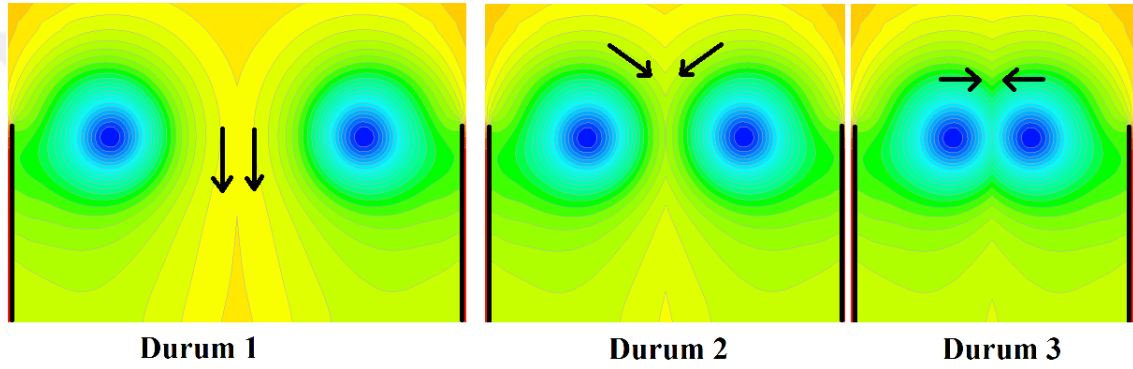


Şekil 3.32. 1h girdap üretici (-30pa, +30pa) izo-yüzeyleri

Paralel ve zıt girdap üreticileri ayrı ayrı değerlendirildiğinde, paralel girdap üreticilerinde sönümlenme; girdap üreticilerinin birbirlerine yaklaşması sırasında basınç gelişim bölgesinde yüksek basınç alanından düşük basınç alanına geçmek isteyen havanın yerine yan girdap üreticiden aldığı yüksek basınç ile bu açığı kapatmasından kaynaklanmaktadır. Pozitif ve negatif basınç alanları bu bölgede eşit rol oynadığı için fazla yaklaşma sonucu vorteks verimi keskin bir şekilde azalmamaktadır.

Zıt girdap üreticilerinde ise literatürde mevcut önceki çalışmalarda belirtilen iç açıklık oranının daha kritik rol oynaması [5, 14, 19] şu şekilde görülmektedir; negatif basınç

alanları birbirlerine yaklaştıkça yüksek basınç bölgesinden düşük basınç bölgesine geçmesi gereken hava miktarı yükselmektedir (Durum 1) ve her iki vorteksin sirkülasyon kuvvetini artırmaktadır [48]. Fakat belirli bir mesafeden sonra bu yaklaşma, bir noktanın etrafında dönen vorteks çemberlerinin birbiri ile karşılaşarak dönme merkezine ters kuvvet oluşturmaya (Durum 2) ve çok kısa mesafelerde yüksek oranda sönümlenmesine sebebiyet vermektedir (Durum 3). Şekil 3.33.'te zıt girdap üreteçlerinin vorteks yaklaşma konturları verilmiştir.



Şekil 3.33. Zıt girdap üreteçlerinin vorteks yaklaşma konturları

İncelenen veriler sonucunda; paralel girdap üreteçlerinde basınç gelişim bölgesinde oluşan ve zemine yakın şekilde ilerleyen basınç alanı girdap üreticinin oluşturduğu vorteksi büyük oranda etkilerken, zıt girdap üreteçlerinde hem basınç gelişim bölgesinde hem de vorteks basıncı bölgesinde oluşan basınç alanları girdap üreticinin oluşturduğu vorteksi etkilemektedir.

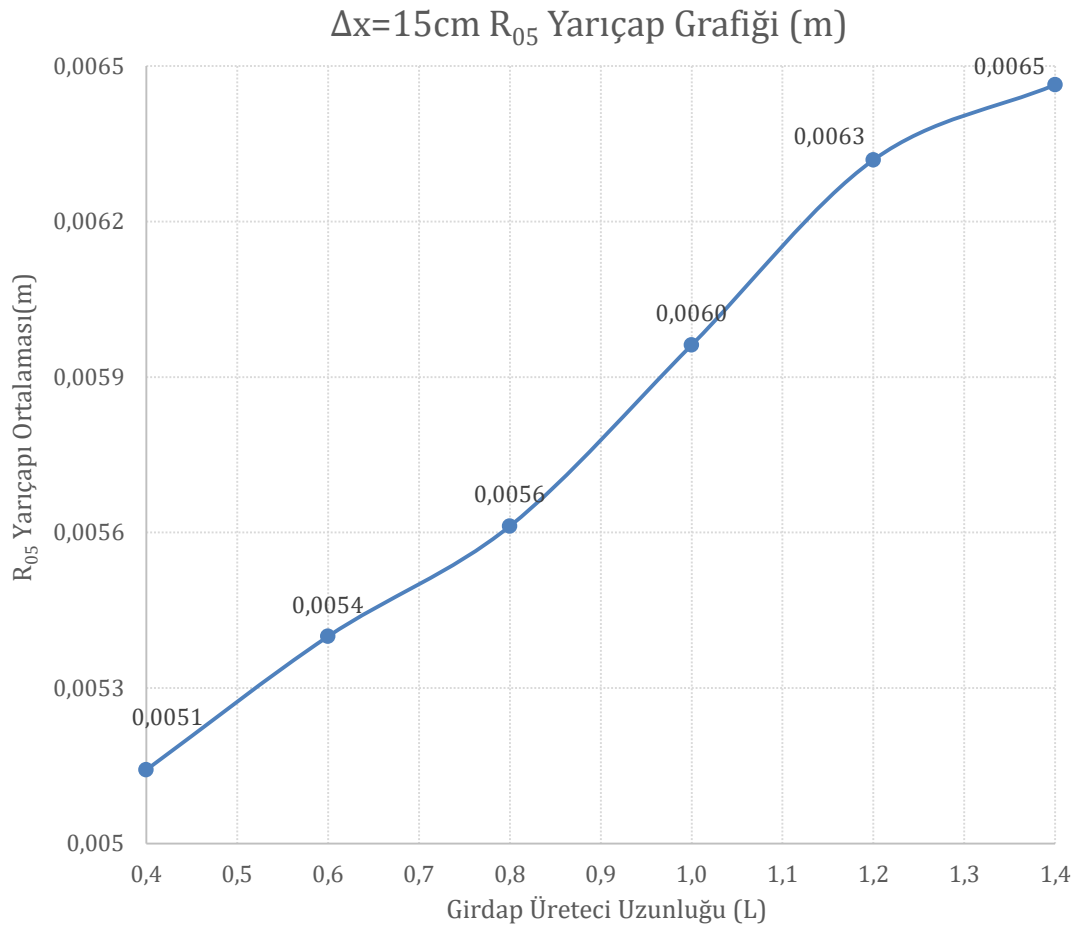
3.4. Uzunluk Testi

Girdap üreteçlerinde uzunluk (L); tasarıma, açığa (A), yüksekliğe (h) ve Reynold değerine bağlı olarak belirlenir. Geleneksel girdap üreteçlerinde açıklık oranı (L/h) genellikle 2~2.5 arasında değişirken [4, 16], sınır altı (mikro) girdap üreteçlerinde bu oran çok daha yüksektir [12, 39].

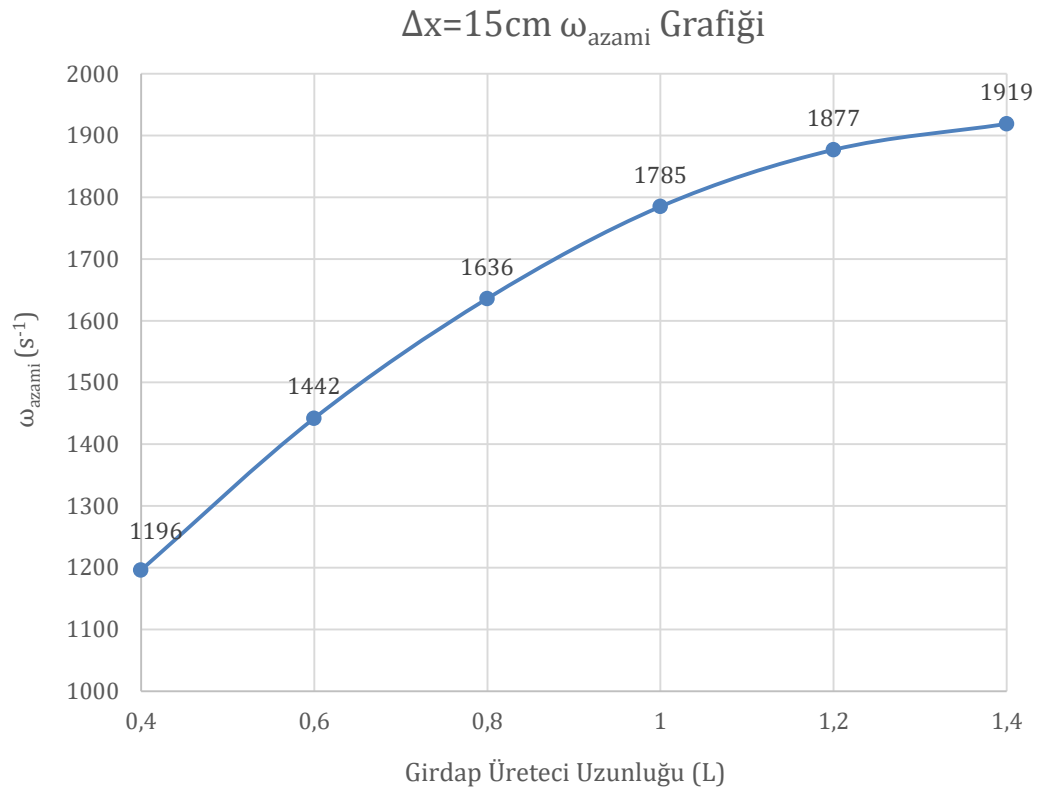
Literatürde mevcut çalışmalarda uzunluk değerinin değişmesi belirli açı aralıklarında performans artışına sebep olmaktadır [40, 59, 62, 77]. Benzer şekilde bu aralıklardan uzaklaşılması da performans kaybına sebebiyet vermiştir [4].

Sunulan tez çalışmasında performans değişikliklerinin sebepleri sayısal analiz yolu ile çözümlenmeye çalışılmıştır.

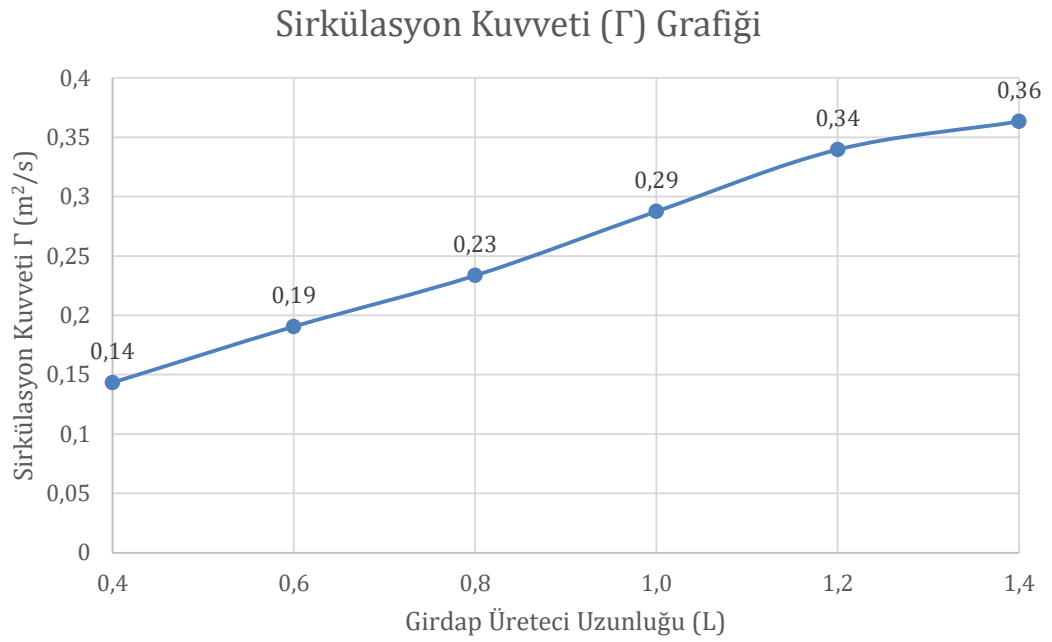
Şekil 3.34.'te $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu R_{05} vortisite yarıçap grafiği, Şekil 3.35.'te $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu uzunluğa bağlı azami vortisite grafiği ve Şekil 3.36.'da ise $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu uzunluğa bağlı sirkülasyon kuvveti grafiği verilmiştir.



Şekil 3.34. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu R_{05} yarıçapı grafiği



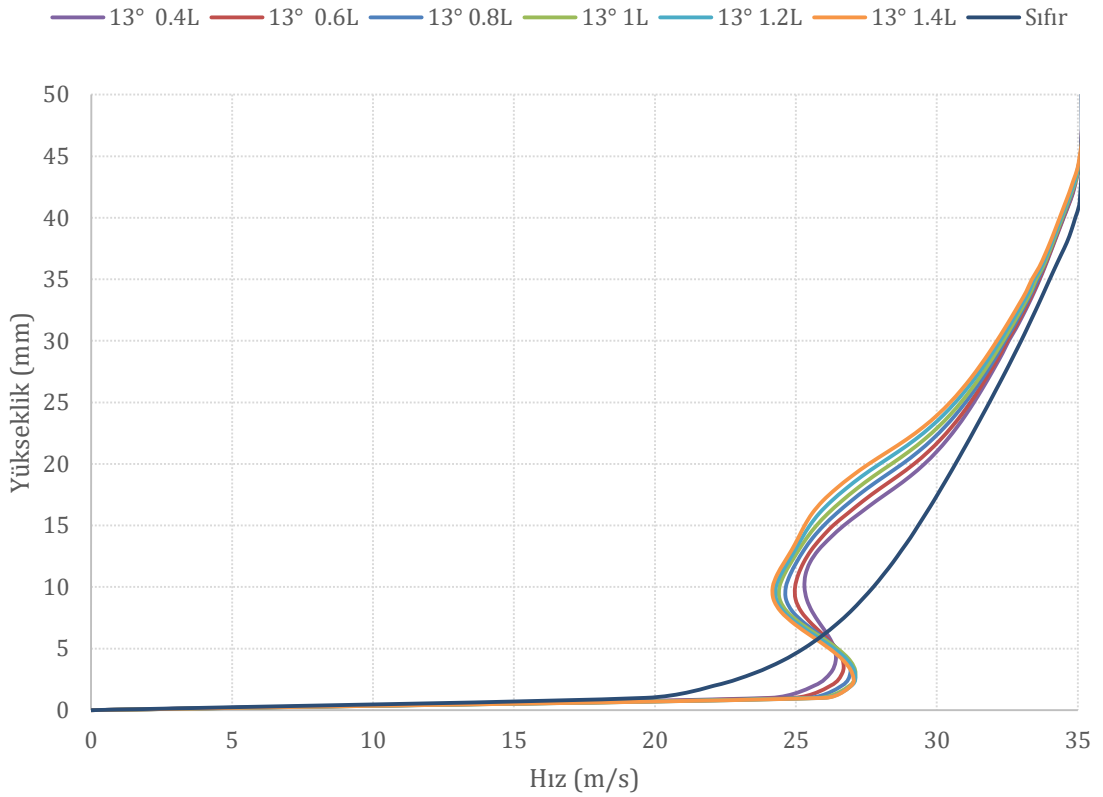
Şekil 3.35. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu uzunluğa bağlı ω_{azami} grafiği



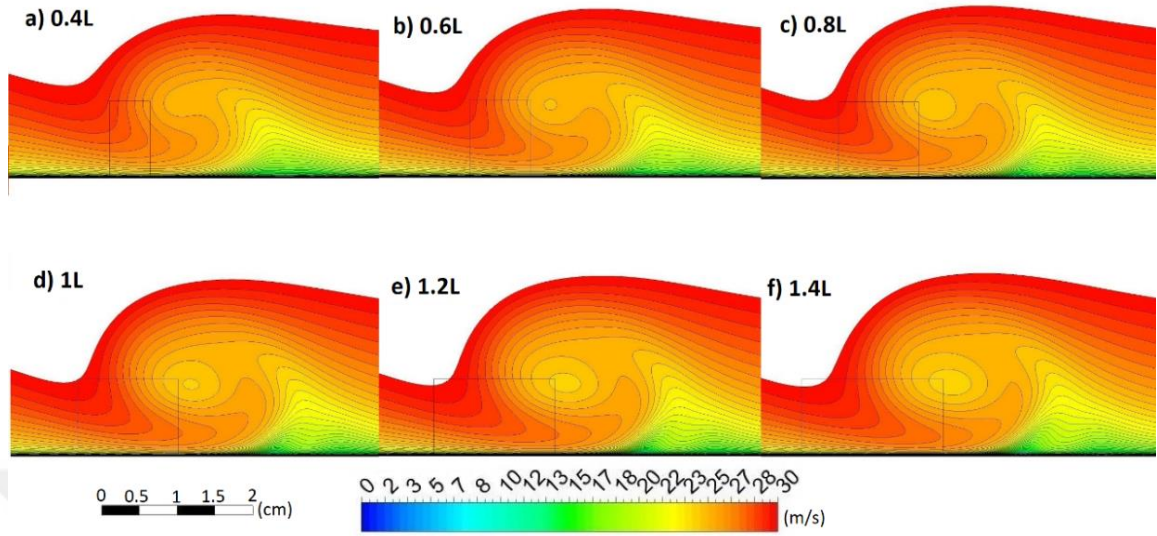
Şekil 3.36. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu uzunluğa bağlı sirkölasyon kuvveti (Γ) (m²/s)

Denklem (3.1)'de verildiği gibi uzunluğa bağlı sirkülasyon kuvveti; R_{05} yarıçapı ve ω_{azami} değerleri ile doğru orantılı artış içerisindedir. R_{05} yarıçapı ve ω_{azami} grafiklerine bakıldığı zaman her iki değer de sirkülasyon kuvvetine logaritmik olarak kazanç sağladığı için ortak değerlendirme yapılmasına imkân tanımaktadır. Şekil 3.36.'da verilen sirkülasyon kuvveti grafiği incelendiğinde oluşan sirkülasyon kuvveti 1.2L değerine kadar doğrusal olarak artmış fakat sonrasında artış miktarında azalma eğilimi görülmüştür. Azalma eğimine bakıldığında uzunluğun 1.4L'den yüksek değerlere ulaşması durumunda şartlar aynı şekilde devam ederse sirkülasyon artışında durma ve azalmaya sebebiyet vermesi beklenmektedir. Bu durum doğrudan taşınım mesafesini ve sapma kararlılığını etkileyip, literatürde mevcut çalışmalarda olduğu gibi kanat üzerinde C_L/C_d oranına olumsuz etki oluşturacaktır [40, 59, 62, 77]. Şekil 3.37.'de $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu sınır tabaka hız profili ve Şekil 3.38.'de ise $\Delta x=15\text{cm}$ hız konturu verilmiştir.

Sınır Tabaka Hız Profili



Şekil 3.37. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu sınır tabaka hız profili

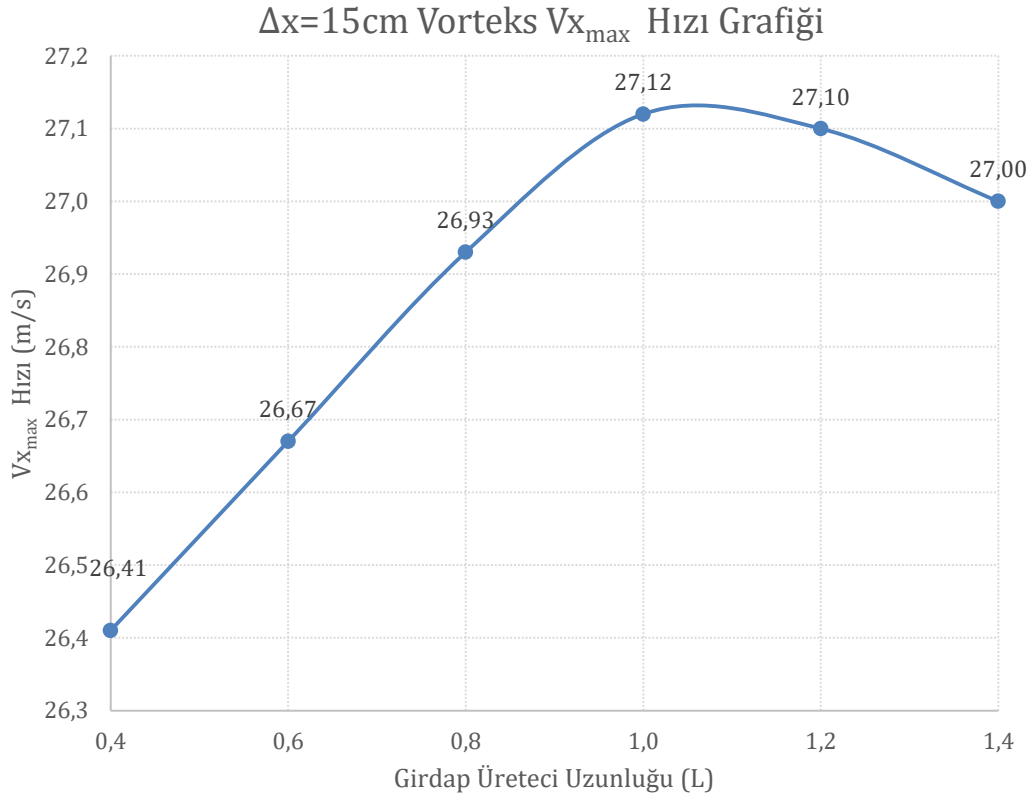


Şekil 3.38. $\Delta x=15\text{cm}$ hız konturu (Burada; a) $0.4L$, b) $0.6L$, c) $0.8L$, d) $1L$, e) $1.2L$, f) $1.4L$ uzunluğunda girdap üreteçlerinin hız konturlarıdır. Konturdaki azami hız 30m/s 'dir.)

Sınır tabaka hız profili ve hız konturları incelendiğinde $0.4L$, $0.6L$ ve $0.8L$ uzunluklarına ait vorteks merkezi ve $V_{x_{\max}}$ hız değerlerinin birbirlerine yaklaştığı görülmektedir. Bu yaklaşım sıfır basınç gradyanindeki türbülanslı hava hız profiline benzediği için vorteks sönümlenme eğilimi olarak görülmektedir.

$1L$ ve üzerinde ise vorteks çemberi hızının uzunluğa bağlı olarak azalmasına rağmen $V_{x_{\max}}$ hızı uzunluğa bağlı olarak artmamıştır.

Şekil 3.39.'da $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşan vorteksin $V_{x_{\max}}$ hızı grafiği verilmiştir.

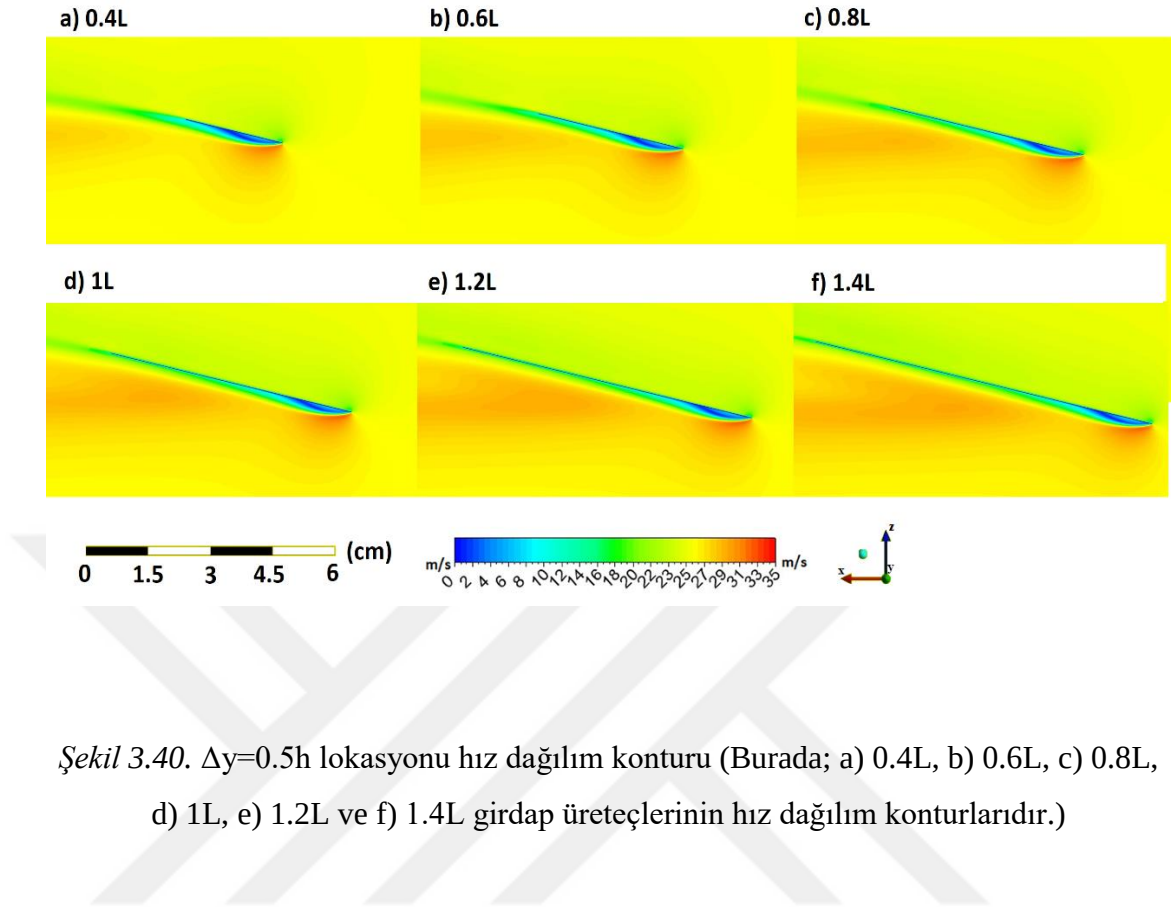


Şekil 3.39. $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu vorteks $V_{x_{\max}}$ hızı grafiği

$V_{x_{\max}}$ hızı grafiği incelendiğinde, $1L$ değeri vorteks çemberindeki düşük basınçtan kaynaklanan enerjiyi en yüksek oranda $V_{x_{\max}}$ hızına dönüştürmektedir. $1L$ uzunluğundan sonra vorteks merkezi hızındaki azalmayla aynı oranda $V_{x_{\max}}$ hızında artış gerçekleşmemiştir. Şekil 3.34.'te verilen R_{05} yarıçapı incelendiğinde uzunluğun artması vorteks alanını ve sirkülasyon miktarını artırdığı için zeminle etkileşimin $V_{x_{\max}}$ hızını azaltacak kadar artmaya başladığı nokta hızın azalmaya başladığı noktadan, yani $1L$ uzunluğundan sonra ortaya çıkmaktadır. $1.2L$ değerinden sonra sirkülasyon kuvvetindeki artış oranının azalma eğilimi göstermesi de bu sebepten meydana gelmektedir.

Sunulan tez çalışmasında $V_{x_{\max}}$ hızının azalmasının girdap üretici üzerindeki hava akışıyla ilişkisini inceleyebilmek için yatay akış değerlendirilmesi yapılmıştır.

Şekil 3.40.'da girdap üreticinin yatay orta noktasını tanımlayan $\Delta y=0.5h$ lokasyonuna ait hız dağılım konturu verilmiştir.



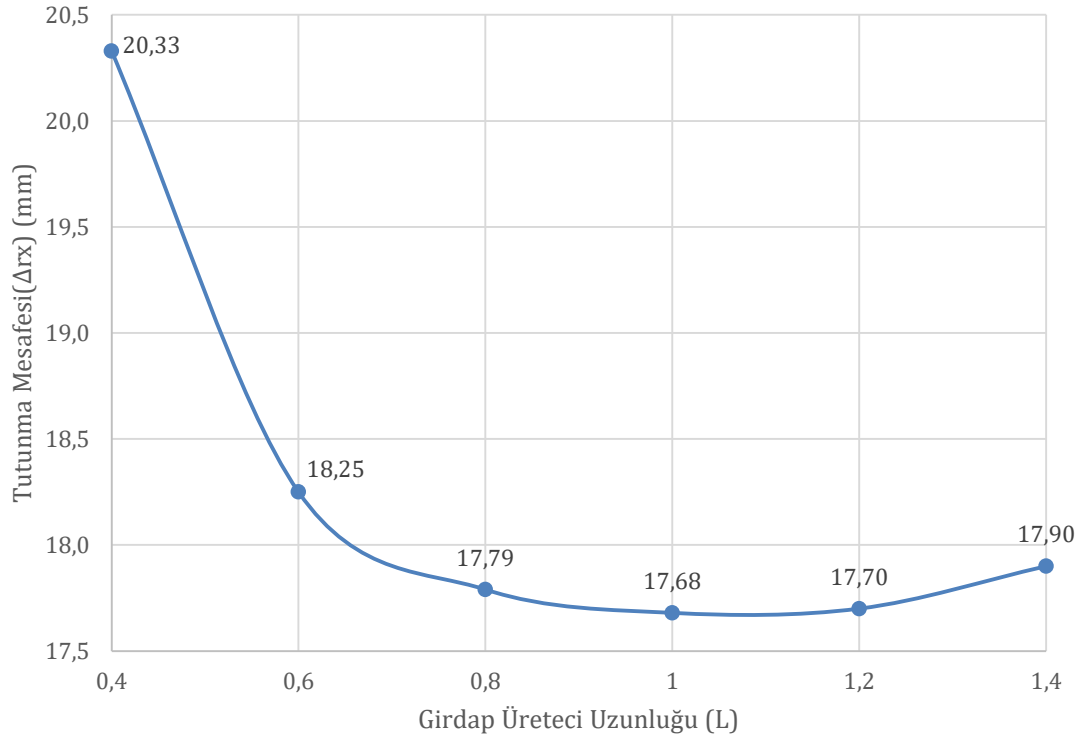
Şekil 3.40. $\Delta y=0.5h$ lokasyonu hız dağılım konturu (Burada; a) 0.4L, b) 0.6L, c) 0.8L, d) 1L, e) 1.2L ve f) 1.4L girdap üreteçlerinin hız dağılım konturlarıdır.)

Girdap üreteçlerinin orta yüksekliklerinde ($\Delta y=0.5h$) oluşturulan hız konturları incelendiğinde ayrılan akışın geri tutunma mesafesinde farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

Test edilen girdap üreteçlerinde akış ayrılışı aynı noktadan başladığı için bu mesafenin $V_{x_{max}}$ hızı ile ilişkisinin değerlendirilmesi uzunluk değerinin optimizasyonuna yardımcı olmaktadır. Bu incelemeyi yapabilmek için sunulan tez çalışmasında girdap üreteçleri üzerindeki akış ayrılışı noktasından geri tutunma noktasına kadar geçen mesafe x eksenini üzerinden hesaplanmıştır.

Şekil 3.41.'de girdap üretici uzunluğu ile geri tutunma mesafesi ilişkisi grafiği verilmiştir.

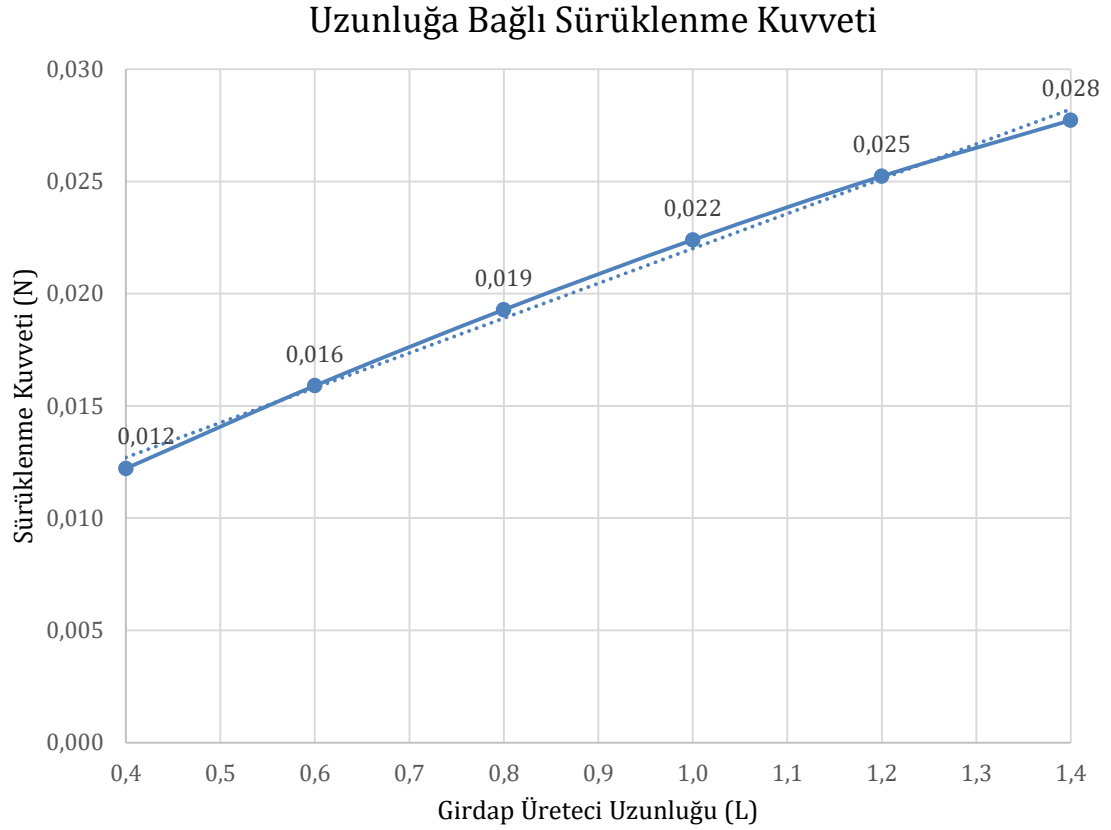
Geri Tutunma Mesafesi Grafiği



Şekil 3.41. Geri tutunma mesafesi (Δr_x : geri tutunma x eksen mesafesi)

Yapılan incelemelerde 1L değerine kadar uzunluk artışı ile birlikte tutunma mesafesinde azalma meydana gelmiş ve 1L değerinden sonra ise tekrar artış başlamıştır. Artış ve azalış miktarları $V_{x_{max}}$ hızıyla kıyaslandığında benzer bir profil ortaya çıkmaktadır. $V_{x_{max}}$ hızının artması taşınım mesafesini artırdığı için yapılan değerlendirmelerden çıkarılan sonuca göre sınır altı girdap üreteçlerinde uzunluk performansı doğrudan geri tutunma mesafesiyle hesaplanabilmektedir. Ek olarak geri tutunma mesafesinin uzunluğa bağlı değişmesi girdap üreteçlerinde en son iyileştirmenin uzunluk değerinde yapılması gerektiğini de göstermektedir. Çünkü sıfır basınç gradyeni hız profiline bakıldığında sınır tabakanın yüksek katları daha hızlı hava akımına sahiptir ve yüksek katlarda akış hızının artması geri tutunma mesafesini uzatmaktadır [33]. Aynı zamanda akışa karşı açının artması da geri tutunma mesafesini belirli değerlere kadar artırmaktadır. A ve h değerlerinin değişmesiyle her iki akış olayının girdap üretici üzerinde görülmesi sebebiyle öncelikle açı-yükseklik iyileştirmesi yapılması

gerekmektedir. Şekil 3.42.'de girdap üretici uzunluğuna bağlı sürüklenme kuvveti grafiği verilmiştir.



Şekil 3.42. Girdap üretici uzunluğuna bağlı sürüklenme kuvveti grafiği

$V_{x_{max}}$ hızı ve geri tutunma mesafesi değerlendirildiğinde 1L ve 1.2L uzunlukları birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği için belirlenen açı, yükseklik ve reynold değerinde en uygun uzunluktaki girdap üretici bu iki değer arasında görülmektedir. Girdap üreteçlerinde uzunluğa bağlı sürüklenme kuvveti grafiğine bakıldığı zaman oluşan sürüklenme kuvvetinin yaklaşık olarak doğrusal bir artış sergilediği görülmektedir. Aynı zamanda $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonu vorteks $V_{x_{max}}$ hızı grafiğinin eğri üzerindeki tepe noktası hesaplandığında 1.06L uzunluğunda $V_{x_{max}}$ hızının 27.13m/s hıza çıkması beklenmektedir. Buradan da 1L ve 1.2L uzunlukları arasından 1L değerine yakın girdap üreteçlerinin belirlenen açı, yükseklik ve reynold değerinde daha iyi performans vereceği ortaya çıkmaktadır.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, yapılan tez çalışmasının sonuçları değerlendirilip ileriki çalışmalar için yapılabilecek yeni uygulamalara dair önerilere yer verilmiştir.

4.1. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Girdap üretici tasarımıında A açısı, h yüksekliği ve L uzunluğu birbirleri ile ilişkilidir. Herhangi birisinin yükselmesi veya azalması durumunda diğer değerlerin tekrar optimize edilmesi gerekmektedir. Fakat uygulama açısından tüm olasılıkların bir kanat üzerinde yapılması mümkün değildir. Bu sebeple sunulan tez çalışmasında önceden belirlenen, zemin ile etkileşim, taşınım mesafesi, sönümlenme miktarı, $V_{X_{max}}$ hızı ve sapma miktarları gibi kriterlere dayanarak, düz bir zemin üzerine yerleştirilmiş dikdörtgen girdap üreticinin A, h ve L değerleri sırasıyla incelenmiştir.

Bu kriterler esas alınarak açısız olarak yüksek performans gösteren girdap üretici ile yükseklik testine geçilip, belirlenen yükseklikler arasında benzer şekilde diğer girdap üreticileri arasından avantaja sahip olan girdap üretici ile de uzunluk testleri yapılmıştır. Bu işlemlerdeki temel amaçlar; literatürde düz zeminde yapılan çalışmalara yeni yorumlama yöntemleri kazandırmak, bu yorumlama yöntemleri ile girdap üreticilerinin etki prensiplerinin çözülüp formülize edilmesini sağlayacak veri elde etmek ve HAD analizlerinin çözümleme zorlukları çıktıkları alanlara farklı yollarla temas etmeyi sağlamaktır. Bu gelişmeler sayesinde ilerleyen zamanlarda ihtiyaca göre çalışabilen aktif kontrollü girdap üreticilerinin verimli bir şekilde üretilebilmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir. Sınır altı girdap üreticilerinin yapısı gereği sadece kısa mesafeye etki ettikleri için sunulan tez çalışmasında 15cm ve 20cm mesafede incelemeler yapılmıştır.

Açısal (A) değerlendirmelerde vorteksin zemin ile etkileşimini kayma gerilmesi değerleri ile yapmak yerine, dikey görsele taşıyarak türbülans girdap frekansı değerinin konumsal yüksekliği ile sorgulanmış, belirlenen frekans değerinin ulaştığı yükseklik ile sürüklenme kuvveti oranlanıp, sınır tabaka etkileşimi ve döndürme kuvveti üzerinden avantajlar değerlendirilmiştir. Aynı zamanda bu değerlendirmenin etkinliği sirkülasyon kuvveti kıyaslama grafiği ve zemin kayma gerilmesi konturları ile karşılaştırılmıştır. Sunulan tez çalışmasında 23° 'yi datum noktası olarak girdap üretici tarafından $\Delta x=15\text{cm}$ lokasyonunda oluşturulan sirkülasyon kuvveti başına girdap üretici üzerinde oluşan sürüklenme kuvvetleri oranlandığında, 13° 'nin 1.59 kat daha fazla sürüklenme kuvveti üretmeden sirkülasyon kuvveti oluşturduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda 13° diğer girdap üreteçlerine kıyasla toplamda daha az türbülans girdap frekansı ve sirkülasyon kuvveti oluşturmaya rağmen, 23° 'ye oranla 1.29 kat daha fazla zeminle etkileşmeden türbülans girdap frekansı oluşturmuş, bu oran açı artışıyla birlikte azalmıştır. Sınır tabaka hız profili incelemelerinde açı artışının girdap üretici etkinliğindeki ana rolünün akış ayrılışlarında dikey kararlılık olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede girdap üretici açısının artırılmasının yüksek akış ayrılışlarında düşük açılı girdap üreteçlerine kıyasla daha etkili önleyeceği görülmüştür.

Girdap üreteçlerinde yükseklik değerinin, yatay ve dikey sapma miktarlarına etkisi incelenmiş, yapılan değerlendirmelerde azami kayma gerilmesi mesafesinin dikey sapma oranıyla ilişkisi belirlenip gelişmekte olan vorteksin aşağı yönlü sapma miktarının, sönümlenmeye başlayan vorteksin ise yukarı yönlü sapma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. $\Delta x=15\text{cm}$ ve $\Delta x=20\text{cm}$ lokasyonları arasında $0.75h$ girdap üreticinin vorteks çemberinin sönümlenmesi sebebiyle basınç ve uzunluk testlerinde tercih edilmezken, $1h$ değerinin ilgili aralıkta vorteks çemberini koruması ve düşük sürüklenme kuvveti oluşturmaya sebebiyle diğer girdap üreteçlerinden daha verimli kabul edilmiş sonraki çalışmalarda tercih edilmiştir. Ayrıca girdap üreticinin yüksekliği ile çevresinde oluşturduğu basınç alanının doğru orantılı artış gösterdiği ve çevresinde oluşturduğu basınç alanlarının iki ayrı bölge halinde incelenmesi gerektiği belirlenmiştir. Yapılan incelemelerde paralel girdap üreteçlerinde etkin alan basıncı girdap üreticinin ön yarısına denk gelirken zıt girdap üreteçlerinde ise hem ön hem de arka bölgedeki basıncın etkin rol aldığı gözlemlenmiştir.

Uzunluk (L) incelemelerinde; girdap üretici üzerindeki geri tutunma mesafesinin alt akış yolundaki $V_{x_{max}}$ hızı ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. En kısa geri tutunma mesafesini oluşturan uzunluk değerinin bulunması sayesinde hem deneysel hem de sayısal incelemelerde hızlı bir şekilde en etkili zemin momentum transferini sağlayan uzunluk değerinin grafiğinin çıkarılabilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerde en yüksek $V_{x_{max}}$ hızının 1L ile 1.2L aralığında olduğu belirlenmiş, $V_{x_{max}}$ hızı grafiği 1.06L değerinde tepe noktasına ulaştığı için 1L ile 1.2L aralığında 1L değerine yakın girdap üreticilerinin daha etkili momentum transferi sağladığı gözlemlenmiştir.

İlerleyen çalışmalarda yapılan değerlendirmeler deneysel yollarla kıyaslanabilir ve gelişen aktif akış kontrollü girdap üretici uygulamaları için kullanılabilir veri kaynağı oluşturulabilir. Aynı şekilde düz zemin üzerinde yapılan çalışmalar ters basınç gradyenine maruz kalmış eğimli yüzeylerde incelenerek akış ayrılışının gerçekleştiği yüzeylerde de etkinliği doğrulanabilir.

KAYNAKLAR

1. Prandtl, L., 1904. Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung. **Proceedings of the Third International Congress on Mathematical Education**, 484-491.
2. Gad-el-Hak, M., 1996. Modern developments in flow control. **Appl. Mech. Rev.**, **4**: 365-379.
3. King, R., 2014. Active flow and combustion control. **Springer International Publishing, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design**, **127**: 413.
4. Godard, G., Stanislas, M., 2006. Control of a decelerating boundary layer. Part 1: Optimization of passive vortex generators. **Aerospace Science and Technology**, **10**(3): 181-191.
5. Gad-el-Hak M., 2000. Flow control: passive, active, and reactive flow management. **Cambridge University Press**, 421.
6. Gad-el-Hak, M., Bushnell, D. M., 1991. Separation control: Review. **J. Fluids Eng.**, 113.
7. Joslin, R. D., 1998. Aircraft laminar flow control. **Ann. Rev. Fluid Mech.** **30**: 1-29.
8. Schubauer, G. B., Spangenberg W.G., 1960. Forced mixing in boundary layers. **Journal of Fluid Mechanics**, **8**(1): 10-32.
9. Chang, P. K., 1976. Control of flow separation. **Washington DC: Hemisphere Publishing Corporation**, 537.
10. Lin, J. C., Howard, F. G., Bushnell, D. M., Selby G. V., 1990. Investigation of several passive and active methods for turbulent flow separation control. **AIAA**. **90.1598**.
11. Jenkins L., Gorton S. A., Anders S., 2002. Flow control device evaluation for an internal flow with an adverse pressure gradient. **40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**, **10.2514/6.2002-266**.
12. Lin, J. C., 2002. Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation. **Prog. Aero. Sci.**, **38**(4-5): 389-420.
13. Yao, C., Lin, J., Allan, B., 2009. Flow-field measurement of embedded streamwise vortex generated from passive flow-control devices. **International Journal of Flow Control**, **1**(4): 255-270.

14. Taylor, H. D., 1947. The elimination of diffuser separation by vortex generators. **United Aircraft Corporation Report No: R-4012-3.**
15. Pauley, W., Eaton, J., 1987. An experimental study of the development of longitudinal vortex pairs embedded in a turbulent boundary layer. **19th AIAA, Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference, 10.2514/6.1987-1309.**
16. Pearcey, H. H., 1961. Shock induced separation and its prevention by design and boundary layer control, pp. 1166-1344, *In: Boundary Layer and Flow Control, its principles and application 2st Edition*, Pergamon, Oxford, 768.
17. Li, X., Yang, K., Wang, X., 2019. Experimental and numerical analysis of the effect of vortex generator height on vortex characteristics and airfoil. **Aerodynamic Performance. Energies, 12(5): 959.**
18. Ibarra-Udaeta, I., Errasti, I., Fernandez-Gamiz, U., Zulueta, E., Sancho, J., 2019. Computational characterization of a rectangular vortex generator on a flat plate for different vane heights and angles. **Applied Sciences, 9(5): 995.**
19. Wendt, B. J., Greber, I., Hingst, W. R., 1993. Structure and development of streamwise vortex arrays embedded in a turbulent boundary layer. **AIAA Journal, 31(2): 319-325.**
20. Wendt, B., 1998. Initial peak vorticity behavior for vortices shed from airfoil vortex generators. **36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.**
21. Taylor H. D., 1948. Application of vortex generator mixing principle of diffusers, **United Aircraft Corporation, R-15064-5**
22. Bruynes, H., 1951. Fluid mixing device. U.S. Patent 2,558,8 16.
23. Mccullough, G. B., Nitzberg, G. E., Kelly, J. A., 1951. Preliminary investigation of the delay of turbulent flow separation by means of wedge-shaped bodies. (Web page: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc58702>), (Date accessed: 23 May 2021)
24. Stephens, A. V., Collins G. A., 1955. Turbulent boundary layer control by ramps or wedges. **Australian ARC Report ACA-55.**
25. Lin, J. C., Howard, F. G., Selby, G. V., 1990. Small submerged vortex generators for turbulent flow separation control. **Journal of Spacecraft and Rockets, 27(5): 503-507.**

26. Tanner, L. H., Pearcey, H. H., Tracy, C. M., 1954. Vortex generators: their design and their effects on turbulent boundary layers. **Rep. Aero. Res. Coun. 16487.**
27. Jones, J. P., 1955. The calculation of the paths of vortices from a system of vortex generators, and a comparison with experiment. **Aeronautical Research Council Current Papers**, 1393.
28. Senoo, Y., Nishi, M., 1974. Improvement of the performance of conical diffusers by vortex generators. **J. Fluids Eng.**, **96**(1): 4-10.
29. Raykowski, K. A., 1999. Optimization Of A Vortex Generator Configuration For A Piper Cherokee Wing. Embry-Riddle Aeronautical University Archives. Master's Thesis, Daytona Beach, 172.
30. Gould, D. G., 1956. The use of vortex generators to delay boundary layer separation; theoretical discussion supported by tests on a cf-100 aircraft. **National Aeronautical Establishment Laboratory Report LR-183.**
31. Miller, G. E., 1984. Comparative performance tests on the MOD-2 2.5mw wind turbine with and without vortex generators. **Proc. Workshop on Horizontal Axis Wind Turbine Technology**, N95- 27978.
32. Gyatt, G. W., 1986. Development and testing of vortex generators for small horizontal axis wind turbines. **DOE/NASA/0367-1 NASA CR-179514 AV-FR-86/822, Nay- I 0922.**
33. Çengel, Y. A., Cimbala, 2018. Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları. 3. Baskı, Palme Yayınevi, 984.
34. Nickerson, J. D., 1986. A study of vortex generators at low reynolds numbers. **24th Aerospace Sciences Meeting. 10.2514/6.1986-155.**
35. Bragg, M. B., Gregorek G. M., 1987. Experimental study of airfoil performance with vortex generators. **Journal of Aircraft**, **24**: 305-309.
36. Kuethe, A. M., 1972. Effect of streamwise vortices on wake properties associated with sound generation. **J. Aircr.**, **9**: 715-719.
37. Lin, J. C., Robinson, S. K., McGhee, R. J., 1994. Separation control on high-lift airfoil via micro-vortex generators. **J. Aircr.**, **31**(6): 1317-1323.
38. Lin, J., Robinson, S., McGhee, R., Valarezo, W., 1992. Separation control on high reynolds number multi-element airfoils. **AIAA 92-2636.**
39. Lin, J. C., 1999. Control of turbulent boundary-layer separation using micro-vortex generators, **AIAA 99-3404.**

40. Ashill, P., Fulker, J., Hackett, K., 2001. Research at DERA on sub boundary layer vortex generators (SBVGs). **39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**.
41. Martuccio, M. T., 1994. "A wind tunnel investigation of the effects of micro-vortex generators and gurney flaps on the high lift characteristics of a business jet wing., **Nasa Tm-110626, N95-30827.2750**.
42. Yao, C., Lin, J., Allen, B., 2002. Flow-field measurement of device-induced embedded streamwise vortex on a flat plate. **1st Flow Control Conference**.
43. Brian, A., Chung-Sheng, Y., Lin, J., 2002. Numerical simulations of vortex generator vanes and jets on a flat plate. **AIAA 2002-3160**.
44. Fernandez U., 2013. Fluid Dynamic Characterization of Vortex Generators and Two-dimensional Turbulent Wakes. School of Industrial Engineering of Barcelona, Master's Thesis, Catalonia, B 13756-2014.
45. Velte, C. M., Hansen, M. O., Okulov, V. L., 2009. Helical structure of longitudinal vortices embedded in turbulent wall-bounded flow. **Journal of Fluid Mechanics, 619:** 167-177.
46. Wik, E., Shaw, S., 2004. Numerical simulation of micro vortex generators. **2nd AIAA Flow Control Conference**.
47. Jirasek, A. 2005. Vortex-Generator Model and Its Application to Flow Control. **Journal of Aircraft, 42(6):** 1486-1491.
48. Stillfried, F., 2012. Computational Fluid-Dynamics Investigations Of Vortex Generators For Flow-Separation Control, Royal Institute of Technology School of Engineering Sciences, Master's Theses, Stockholm.
49. McConnell, C. R., 2005. Experimental Aerodynamic Analysis of a Wing-Flap System with Delta Vortex Generators, Aerospace Engineering University of Tennessee, Master's Theses, Knoxville.
50. Bray, T. P., 1998. A Parametric Study of Vane and Air-Jet Vortex Generators. Cranfield University College of Aeronautics, Master's Theses, Bedford, UK.
51. Ibarra-Udaeta, I., Portal-Porras, K., Ballesteros-Coll, A., Fernandez-Gamiz, U., Sancho, J., 2020. Accuracy of the cell-set model on a single vane-type vortex generator in negligible streamwise pressure gradient flow with rans and les. **Journal of Marine Science and Engineering, 8(12):** 982.

52. Velte, C. M., Hansen, M. O., Cavar, D., 2008. Flow analysis of vortex generators on wing sections by stereoscopic particle image velocimetry measurements. **Environmental Research Letters**, 3(1): 1-11.
53. Fouatih, O. M., Medale, M., Imine, O., Imine, B., 2016. Design optimization of the aerodynamic passive flow control on NACA 4415 airfoil using vortex generators. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, 56: 82-96.
54. Yan, Y., Avital, E., Williams, J., Cui, J. 2019. CFD analysis for the performance of micro-vortex generator on aerofoil and vertical axis turbine. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 11(4): 043302.
55. Baldacchino, D., Ferrira, C., De-Tavernier, D., 2018. Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil, **Wind Energy**, 21(9): 745-765.
56. Gao, L. Y., Zhang, H., Liu, Y. Q., Han, S. H., 2014. Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines, **Renewable Energy**, 76(2015): 303-311.
57. Li, X., Liu, W., Zhang, T., Wang, P., Wang, X., 2019. Analysis of the effect of vortex generator spacing on boundary layer flow separation control. **Applied Sciences**, 9(24): 5495.
58. Zhen, T. K.; Zubair, M., Ahmad, K. A., 2011. Experimental and numerical investigation of the effects of passive vortex generators on Aludra UAV performance. **Chin. J. Aeronaut.**, 24: 577–583.
59. Shim, H., Lee, J., Chae, H., Park, S. 2017. Wake characteristics of vane-type vortex generator. **Proceedings of the 2nd World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer**.
60. Li, B., Cao, H., Deng, S., 2014. Vortex generator design and application on the flow control of top-mounted subsonic intake at high angle of attack. **Journal of Vibroengineering**, 16(2): 808-817.
61. Soucková, N., Kuklová, J., Popelka, L., Matejka, M., 2012. Visualization of flow separation and control by vortex generators on an single flap in landing configuration. **EPJ Web Conf.**, 25: 1–12.
62. Serakawi, A. R., Ahmad, K. A., 2012. Experimental study of half-delta wing vortex generator for flow separation control. **Journal of Aircraft**, 49(1): 76-81.

63. Angele, K. P., Grewe, F., 2006. Instantaneous behavior of streamwise vortices for turbulent boundary layer separation control. **Journal of Fluids Engineering**, **129**(2): 226-235.
64. Domel, A. G., Saadat, M., Weaver, J. C., Haj-Hariri, H., Bertoldi, K., Lauder, G. V., 2018. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance. **Journal of The Royal Society Interface**, **15**(139).
65. Hansen, M. O. L., Velte, C. M., Øye, S., Hansen, R., Sorensen, N. N., Mikkelsen, R. 2016. Aerodynamically shaped vortex generators. **Wind Energy**, **19**: 563–567.
66. Ansys® Academic Research Mechanical, Release 18.1.
67. Menter, F. R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, **AIAA Journal**, **32**(8): 1598-1605.
68. Kutta W. 1902. Lift forces in flowing fluids, **Illustrated Aeronautical Communications**, **3**: 133.
69. Joukowski N. 1912. On the shape of the lifting surfaces of kites. **Z Flugtech Motorluftschif-fahrt 1-281**: 3-81.
70. Godard, G., Foucaut, J., Stanislas, M., 2006. Control of a decelerating boundary layer. Part 2: Optimization of slotted jets vortex generators. **Aerospace Science and Technology**, **10**(5): 394-400.
71. Ansys® 18.1, CFX modelling Guide, 3.2.12. Omega (Turbulence Eddy Frequency), ANSYS, Inc.
72. Seshagiri, A., Cooper, E., Traub, L., 2009. Effects of vortex generators on an airfoil at low reynolds numbers. **Journal of Aircraft- J. AIRCRAFT**, **46**: 116-122
73. Velte, C., M., Hansen, M., Jonck, K., 2007. Experimental and numerical investigation of the performance of vortex generators on separation control. **Journal of Physics: Conference Series** **75**.
74. Tecplot® 2021, Tecplot 360, (Web sayfası: www.tecplot.com), (Erişim tarihi: 13 Haziran 2021)
75. Urkiola, A., Fernandez-Gamiz, U., Errasti, I., Zulueta, E., 2017. Computational characterization of the vortex generated by a vortex generator on a flat plate for different vane angles. **Aerosp. Sci. Technol.**, **65**: 18–25.

76. Portal-Porras, K., Fernandez-Gamiz, U., Aramendia, I., Teso-Fz-Betoño, D., Zulueta, E., 2021. Testing the accuracy of the cell-set model applied on vane-type sub-boundary layer vortex generators. **Processes** **2021**, **9**: 503.
77. Nasuhbeyoğlu, B., Albayrak, K., 2014. Vortex Generator Design For High Subsonic Inlets, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 85.
78. Pauley, W. R., Eaton, J. K., 1988. Experimental study of the development of longitudinal vortex pairs embedded in a turbulent boundary layer. **AIAA J.**, **26**: 816–823.
79. Lödgborg, O., Fransson, J. H. M., Alfredsson, P. H., 2009. Streamwise evolution of longitudinal vortices in a turbulent boundary layer, **J. Fluid Mech.**, **623**: 27–58.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER:

Adı Soyadı: Muhammed ÇETİNTAŞ

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM:

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Elektrik-Elektronik Bölümü, Kayseri	2017
Lise	Küçükçekmece Anadolu Lisesi, İstanbul	2010

İŞ DENEYİMLERİ:

Yıl	Kurum	Görevi
2017-Halen	Türk Havayolları Teknik A.Ş.	Teknisyen

YABANCI DİL:

İngilizce