

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



LİTYUM-POLİMER BATARYALARDA SOĞUTMA
UYGULAMALARININ OPTİMİZASYONU

ONUR YAŞAR

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Enver YALÇIN (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. M. Ziya SÖĞÜT

Prof. Dr. Erhan PULAT

Doç. Dr. Nadir İLTEN

Dr. Öğr. Üyesi V. Gökhan DEMİR

BALIKESİR, HAZİRAN-2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Lityum-Polimer Bataryalarda Soğutma Uygulamalarının Optimizasyonu**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur YAŞAR

ÖZET

**LİTYUM-POLİMER BATARYALARDA SOĞUTMA UYGULAMALARININ
OPTİMİZASYONU
DOKTORA TEZİ
ONUR YAŞAR
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ENVER YALÇIN)
(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. T. HİKMET KARAKOÇ)
BALIKESİR, HAZİRAN - 2023**

Lityum-polimer bataryalar, havacılık sektöründe özellikle insansız hava araçlarında kullanılan batarya türlerinden birisidir. Tüm batarya sistemlerinde olduğu gibi, ağırlık ve ağırlığına oranla düşük kullanım süresi gibi problemlerin yanında, bataryanın şarj ya da deşarjı sırasında karşılaşılan en önemli sorunlardan bir tanesi de ısınma problemidir. Lityum-polimer bataryaların uzun süreli kullanılmaları sonucunda hücre sıcaklıkları yükselmekte ve yükselen hücre sıcaklıkları bataryaya zarar vermektedir. Bu sebeple lityum-polimer bataryalarda ısının etkili ve kısa sürede uzaklaştırılması sistem güvenliği ve performansı açısından önemlidir. Bu çalışmada lityum-polimer bataryaların hava ile soğutulması ve batarya modellerinin yüzeylerinden olan ısı transferi kabiliyetinin artırılması incelenmiştir. İnsansız hava araçlarında uçuş esnasında özellikle kalkış ve iniş durumlarında hava direncini azaltmak ve batarya sıcaklıklarını optimum seviyede tutmak için bir soğutma modeli geliştirilmiştir. Batarya modelleri üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiş ve bu batarya modellerinin üst yüzeyleri farklı yükseklik, kalınlık ve hatvelerde alüminyum kanatçıklar ile kaplanmıştır. Batarya modellerinin etrafındaki hava hızlarının ve akış yapılarının görüntülenmesi parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile hava tüneline gerçekleştirilmiştir. Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazında gerçekleştirilen ölçümler; farklı deşarj oranları, farklı hava giriş sıcaklıkları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyon yazılımında analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış, batarya modelleri etrafındaki hız dağılımları ve sıcaklık dağılımları sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Lityum-polimer bataryalar, parçacık görüntülemeli hızölçer, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, soğutma
Bilim Kodları: 91402, 91411, 91412

Sayfa Sayısı:147

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF COOLING APPLICATIONS IN LITHIUM-POLYMER BATTERIES

PH.D THESIS

ONUR YAŞAR

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ENVER YALÇIN)

(CO-SUPERVISOR: PROF. DR. T. HİKMET KARAKOÇ)

BALIKESİR, JUNE - 2023

Lithium-polymer batteries are one of the battery types used in the aviation industry, especially in unmanned aerial vehicles. Like all battery systems, one of the most important problems encountered during charging or discharging of the battery is the heating problem, as well as the problems such as weight and low usage time compared to its weight. As a result of usage of lithium-polymer batteries in long term, the cell temperatures increase and the increasing cell temperatures damage the battery. For this reason, it is important for system safety and performance to transfer heat effectively and in a short time in lithium-polymer batteries. In this study, cooling lithium-polymer batteries with air and increasing the capability of heat transfer from the surfaces of the battery models were examined. A cooling model was developed in unmanned aerial vehicles to decrease air resistance and keep battery temperatures in an optimum level, especially during take-off and landing phases. The battery models were produced using a three-dimensional printer, and the upper surfaces of these battery models were covered with aluminum fins of different heights, thicknesses and pitches. The visualization of the air velocities and flow structures around the battery models were carried out in the air tunnel with particle image velocimetry. Measurements performed with the particle image velocimetry were analyzed with different discharge rates and different air inlet temperatures in the computational fluid dynamics simulation software. The simulation results were compared with the experimental results, and the velocity distributions around battery and temperature dissipations were presented.

KEYWORDS: Lithium-polymer batteries, particle image velocimetry, computational fluid dynamics, cooling

Science Codes: 91402, 91411, 91412

Page Number:147

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
KISALTMALAR LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	2
1.2. Tezin Önemi	4
1.3 Motivasyon ve Amaçlar.....	5
2. PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZÖLÇER YÖNTEMİ	6
2.1 Parçacık Görüntülemeli Hızölçerin Çalışma Şekli	6
2.2 Tohumlama.....	7
2.3 Lazer İle Aydınlatma	8
2.4 Kamera İle Kaydetme	9
2.5 Görüntü İşleme	9
2.5.1 Oto Korelasyon	10
2.5.2 En Küçük Kareler Eşleşmesi	11
2.5.3 Adaptif Korelasyon	11
2.5.4 Çapraz Korelasyon	12
2.5.5 Ortalama Korelasyon.....	12
2.6 İleri Görüntü İşleme Yöntemleri	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1 Deney Düzenegi	16
3.1.1 PIV Cihazı	17
3.1.2 Hava Tüneli	18
3.1.3 Frekans Kontrollü Fan	19
3.1.4 Veri Kaydedici.....	19
3.1.5 Alüminyum Kanatçıklar	19
3.1.6 Batarya Modelleri	20
3.1.7 Lityum-Polimer Bataryalarda Isı Üretimi	22
3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri ve Türbülans Modelleri.....	23
3.2.1 Standart k-ε Modeli	23
3.2.2 RNG k-ε Modeli	24
3.2.3 Realizable k-ε Modeli.....	24
3.2.4 Standart k-ω Modeli	25
3.2.5 SST k-ω Modeli.....	25
3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizlerinde Kullanılan Ağ Yapısı ve Hassasiyet Analizleri	26
3.3.1 Batarya Modellerine Ağ Atılması ve Sınır Şartları	26
3.3.2 Ağ Kalitesinin Belirlenmesi	28

3.3.3 Ağ Hassasiyet Analizleri	31
3.4 Deney Tasarım Yöntemleri	32
3.4.1 Taguchi Yöntemi	32
3.4.2 Yüzey Yanıt Metodu	33
3.5 Değer Optimizasyonu	33
4. BULGULAR	34
4.1 Parçacık Görüntülemeli Hızölçer Cihazından Elde Edilen Bulgular	34
4.2 HAD Analizlerinden ve Minitab Programından Elde Edilen Bulgular	53
4.2.1 Batarya Modellerinden Elde Edilen Sıcaklık Değerleri	53
4.2.2. Batarya Modellerinden Elde Edilen Hız ve Türbülans Dağılımları ve Minitab Programından Elde Edilen Bulgular	77
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
6. KAYNAKLAR.....	94
EKLER	107
Ek A: PIV Cihazı İle Yapılan Deney Sonuçlarına Ait Görseller.	108
Ek B: HAD Analizleri ve Değer Optimizasyonundan Elde Edilen Sonuçlara Ait Görseller.	141
ÖZGEÇMİŞ	146

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1:	Parçacık görüntülemeli hızölçer ve çalışma şekli.....	6
Şekil 2.2:	PIV’de kullanılan korelasyon çeşitleri.....	10
Şekil 2.3:	Oto korelasyon tepecikleri ve bileşenleri.	11
Şekil 2.4:	Çapraz korelasyon tepecikleri ve bileşenleri.	12
Şekil 2.5:	Ortalama korelasyon yöntemi ve korelasyon tepecikleri.....	13
Şekil 2.6:	PIV alt işlemler şeması.	14
Şekil 3.1:	Deney düzeneğinin genel bir görünümü.....	17
Şekil 3.2:	Hava tünelinin genel bir görünümü.	18
Şekil 3.3:	Deneyler için temel alınan lityum-polimer batarya	21
Şekil 3.4:	1 mm kalınlık 10 mm yükseklik ve 2 mm aralığa sahip alüminyum kanatçıklar (1.batarya modeli).	21
Şekil 3.5:	3. batarya modeli için 30 mm eleman boyutunda atılan ağ yapısı.....	27
Şekil 3.6:	Batarya modelleri için kararlı hal koşullarında eleman sayılarına göre maksimum hücre sıcaklıklarının değişimi.	31
Şekil 3.7:	Batarya modelleri için kararlı hal koşullarında eleman sayılarına göre sürüklenme katsayılarının değişimi.	32
Şekil 4.1:	1.batarya modeli için 20 Hz’de alınan ham görüntü.....	35
Şekil 4.2:	2.batarya modeli için 20 Hz’de alınan ham görüntü.....	35
Şekil 4.3:	3.batarya modeli için 20 Hz’de alınan ham görüntü.....	36
Şekil 4.4:	4.batarya modeli için 20 Hz’de alınan ham görüntü.....	36
Şekil 4.5:	1.batarya modeli için 20 Hz’de görüntülenen eksenel hız haritası	37
Şekil 4.6:	1.batarya modeli için 20 Hz’de elde edilen vektör haritası.	38
Şekil 4.7:	1.batarya modeli için 20 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.....	39
Şekil 4.8:	1.batarya modeli için 30 Hz’de alınan ham görüntü.....	40
Şekil 4.9:	2.batarya modeli için 30 Hz’de alınan ham görüntü.....	40
Şekil 4.10:	3.batarya modeli için 30 Hz’de alınan ham görüntü.....	41
Şekil 4.11:	4.batarya modeli için 30 Hz’de alınan ham görüntü.....	41
Şekil 4.12:	2.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen eksenel hız haritası	42
Şekil 4.13:	1.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.....	43
Şekil 4.14:	3.batarya modeli için 30 Hz’de elde edilen vektör haritası.	44
Şekil 4.15:	30 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.....	44
Şekil 4.16:	4.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.....	45
Şekil 4.17:	1.batarya modeli için 40 Hz’de alınan ham görüntü.....	46
Şekil 4.18:	2.batarya modeli için 40 Hz’de alınan ham görüntü.....	46
Şekil 4.19:	3.batarya modeli için 40 Hz’de alınan ham görüntü.....	47
Şekil 4.20:	4.batarya modeli için 40 Hz’de alınan ham görüntü.....	47
Şekil 4.21:	4.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen eksenel hız haritası	48
Şekil 4.22:	2.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.....	49
Şekil 4.23:	3.batarya modeli için 40 Hz’de elde edilen vektör haritası.	50
Şekil 4.24:	40 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.....	50
Şekil 4.25:	4.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.....	51
Şekil 4.26:	1. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının laminar akımda görüntüsü.....	52

Şekil 4.27: 3. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının türbülanslı akımda görüntüsü.....	52
Şekil 4.28: 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	54
Şekil 4.29: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 2.batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	54
Şekil 4.30: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 7.batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	55
Şekil 4.31: 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	56
Şekil 4.32: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	56
Şekil 4.33: 3.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	57
Şekil 4.34: 4.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	57
Şekil 4.35: 1C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	58
Şekil 4.36: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	59
Şekil 4.37: 4.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	59
Şekil 4.38: 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	60
Şekil 4.39: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	60
Şekil 4.40: 4.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	61
Şekil 4.41: 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	62
Şekil 4.42: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 1. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	62
Şekil 4.43: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 4. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	63
Şekil 4.44: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	63
Şekil 4.45: 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	64
Şekil 4.46: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	64
Şekil 4.47: 4.2 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	65
Şekil 4.48: 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	66
Şekil 4.49: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	66
Şekil 4.50: 4.2 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	67
Şekil 4.51: 2C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	68

Şekil 4.52: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 1. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	68
Şekil 4.53: 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	69
Şekil 4.54: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	70
Şekil 4.55: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 3. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	70
Şekil 4.56: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 4. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	71
Şekil 4.57: 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	72
Şekil 4.58: 3.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 5. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	72
Şekil 4.59: 3.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	73
Şekil 4.60: 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	74
Şekil 4.61: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	74
Şekil 4.62: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için kanatsız batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	75
Şekil 4.63: 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.	76
Şekil 4.64: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	76
Şekil 4.65: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için kanatsız batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.	77
Şekil 4.66: 2.32 m/s, 3.2 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızlarına göre simülasyonlardan elde edilen eksenel hızların maksimum değerleri.	78
Şekil 4.67: 2.32 m/s hava giriş hızı için 1. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	78
Şekil 4.68: 2.32 m/s hava giriş hızı için 4. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	79
Şekil 4.69: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 6. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans kinetik enerjisi değerleri.	79
Şekil 4.70: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 6. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans yayılım oranı değerleri.	80
Şekil 4.71: 3.2 m/s hava giriş hızı için 5. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	81
Şekil 4.72: 3.2 m/s hava giriş hızı için 6. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	81
Şekil 4.73: 3.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı 7. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans kinetik enerjisi değerleri. ..	82
Şekil 4.74: 4.2 m/s hava giriş hızı için 4. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	83
Şekil 4.75: 4.2 m/s hava giriş hızı için 5. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	83
Şekil 4.76 : 4.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı 4. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans kinetik enerjisi değerleri.	84

Şekil 4.77: 2.32 m/s hava giriş hızı için kanatsız batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	85
Şekil 4.78: 3.2 m/s hava giriş hızı için kanatsız batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.	85
Şekil 4.79: Maksimum hücre sıcaklığına etki eden parametrelerin Taguchi Yöntemiyle belirlenmesi.....	86
Şekil 4.80: Maksimum hücre sıcaklığına etki eden parametrelerin Taguchi Yönteme göre sıralanması.	87
Şekil 4.81: Maksimum hücre sıcaklığının kanatçık kalınlığı, kanatçık yüksekliği, deşarj oranı, hava giriş hızı ve hava giriş sıcaklığına göre değişim denklemi.	87
Şekil 4.82: 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.	88
Şekil 4.83: 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.	89

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: PIV deneylerinde ana akışkanın sıvı fazında olması durumunda kullanılan partiküller ve özellikleri.....	7
Tablo 2.2: PIV deneylerinde ana akışkanın gaz fazında olması durumunda kullanılan partiküller ve özellikleri.....	8
Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan batarya modelleri ve özellikleri.	22
Tablo 3.2: HAD analizlerinde kullanılan malzemeler ve termofiziksel özellikleri.....	28
Tablo 3.3: HAD analizlerinde kullanılan sınır şartları.	28
Tablo 3.4: HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların maksimum çarpıklık değerleri.	29
Tablo 3.5: HD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların ortalama çarpıklık değerleri.	29
Tablo 3.6: HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların minimum ortogonal kalite değerleri.	30
Tablo 3.7: HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların ortalama ortogonal kalite değerleri.	30

SEMBOL LİSTESİ

C	: Deşarj Oranı
I	: Akım (A)
k	: Türbülans Kinetik Enerjisi
Q	: Isı (J)
T	: Sıcaklık (°C)
t	: Zaman (s)
V	: Gerilim (V)
y⁺	: Boyutsuz Duvar Uzunluğu
ε	: Türbülans Yayılım Oranı
Y	: Hacim (m ³)

KISALTMALAR LİSTESİ

CCD	: Yük Bağlısımlı Aygıt
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
DEHS	: Di Etil Hekza Sebakat
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MP	: Megapiksel
ND:YAG	: Neodymium Doped Ytrium Alüminyum Garnet
ND:YLIF	: Neodymium Doped Ytrium Lithium Flüoride
OCV	: Açık Çevrim Voltajı
PIV	: Parçacık Görüntülemeli Hızölçer
RNG	: Renormalization Group
SST	: Kayma Gerilmesi Taşınımı

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca sağladığı imkânlar, bilgi ve desteği ile bana yol gösteren ve hiçbir yardımını esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Enver YALÇIN, Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ, Doç. Dr. Selçuk EKİCİ'ye teşekkürlerimi sunuyorum.

Deneyleer sırasında bana yol gösteren, Öğr. Gör. Dr. Ali Haydar ERCAN'a ve deney düzeninein kuruluşu sırasında bana yardımcı olan Arş. Gör. Burak TARHAN ve Yaşar KARDEŞ'e de teşekkür ederim. Ayrıca, maddi ve manevi desteği ile her zaman yanımda olan aileme de saygı ve sevgilerimi sunuyorum.

Balıkesir, 2023

Onur YAŞAR

1. GİRİŞ

Günümüzde nüfus artışı ve bu artışa bağlı olarak yaşanan talep ve transport işlemlerindeki yükseliş, çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Fosil yakıtların zamanla tükenmeye başlaması üzerine devletler, fosil yakıt kullanımının azaltılmasına yönelik politikalar geliştirmişler ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir (Amrouche vd., 2016). Elektriğin de araçlarda kullanılabilceğinin anlaşılması ve yaygınlaşması ile bu alana ilgi doğmuştur. Bu bağlamda devletler zamanla elektrikli araç ile hibrit elektrikli araç teknolojilerini geliştirmişlerdir (Hannan vd., 2014). Bu teknolojiler ile birlikte insansız hava araçlarının yaygınlaşmasının ve elektriğin bu alanda kullanılmasının bir sonucu olarak batarya sistemleri öne çıkmıştır (Berber, 2019; Yalın, 2019). Lityum esaslı bataryalar, mühendislikte en çok kullanılan batarya türleri olmuştur. Lityum esaslı bataryalar, yeniden şarj edilebilen yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip ve yüksek yaşam döngüsüne sahip bataryalar olarak karşımıza çıkmaktadır (Venkatesetty ve Jeong, 2002). Havacılık sektörü ve insansız hava araçları göz önüne alındığında en çok tercih edilen batarya türlerinden birisi, lityum-polimer bataryalar olmuştur (Yalın, 2019).

Lityum-polimer bataryalar; insansız hava araçlarında kullanılan batarya türlerinden birisidir (Chang vd., 2016). Lityum-polimer bataryalar, birçok avantaja ve üstünlüğe sahiptir (Kim vd., 2008). Yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek voltaj, lityum-polimer bataryaların en önemli üstünlüklerinden bazılarıdır. İlâveten; kararlılık ve düşük deşarj hızı da bu tür bataryaların diğer avantajları arasında gösterilebilir (Kim vd.,2008).

Lityum-polimer bataryaların birçok alanda yaygın olarak kullanılması, uygulamada birtakım problemleri de beraberinde getirmektedir. Lityum-polimer bataryaların sık kullanılması; sıcaklık artışı, ısıl bozunma, kapasite kaybı gibi sorunlara neden olmaktadır (Arora, 2018). Aşırı ısınma, lityum-polimer bataryalarda istenmeyen bir durum olduğu gibi aşırı soğuma da istenmeyen bir durumdur. Ancak; lityum-polimer bataryalarda aşırı ısınma probleminin daha çok öne çıktığı bilinmektedir. Bu bağlamda; bataryalardaki aşırı ısınma problemini çözmek için çeşitli soğutma yöntemleri geliştirilmiştir. Soğutma amacıyla kullanılan maddeler; hava veya su olabilir. İlâveten; parafin gibi faz değişim malzemeleri de bataryalarda soğutma amacı ile kullanılmaktadır (Wang vd., 2015; Verma vd., 2019).

Hava ile soğutma, en kolay soğutma yöntemlerinden birisi olduğu için batarya soğutma yöntemlerinin en başında gelmektedir (Chen vd., 2016; Saw vd., 2016). Hava ile soğutma metodu, havanın doğal taşınım veya cebri taşınım yöntemiyle doğrudan batarya üzerine gönderilmesi esasına dayanmaktadır (Chen vd., 2016; Berber, 2019). Özellikle zorlanmış taşınım, sıcaklık artışını düşürmede etkili bir yöntem olarak görülmektedir (Rao vd., 2011; Bandhauer vd., 2011). Sıvı kullanılarak yapılan soğutma ise hava kullanılarak yapılan soğutma tekniğine göre biraz daha pahalı ve etkili bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvı kullanılarak yapılan soğutma yönteminin pahalı olmasının nedeni; sıvının hareketi için boru, pompa gibi elemanlara ihtiyaç duyulmasıdır. Bu soğutma yönteminde en çok karşılaşılan sorunlardan birisi de soğutma sıvısının sızmasıdır (Zhang vd., 2015; Chen vd., 2016). Faz değişim malzemeleri ise genel anlamda enerjiyi iyi bir şekilde depolayan malzemeler olarak bilinmektedir (Cabeza vd., 2011). Enerji depolamada uygun olan faz değişim malzemeleri, bataryalarda soğutma yöntemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Chen vd., 2016). Bu yöntem, pasif bir soğutma yöntemidir. Faz değişimi ile yapılan soğutmanın en büyük avantajlarından birisi ise bu soğutma metodunun yüksek verime sahip olmasıdır (Souayfane vd., 2016).

Son yıllarda insansız hava araçlarının önem kazanması, literatüre de yansımış ve bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bataryalarda aşırı ısınmanın önemli bir sorun olduğu da göz önüne alınırsa lityum-polimer bataryaların soğutulması üzerine yapılan çalışmaların artması beklenmektedir.

1.1 Literatür Araştırması

Tezin metodolojisi, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı (PIV) ile alınan ölçümlerden ve yapılan HAD analizlerinden oluşmaktadır. Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazının kullanıldığı alanlar başlıca akışkanlar mekaniği, mikro sistemler, ısı değiştirgeçleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiğidir (Cho vd., 2002; Jian vd., 2006; Raffel vd., 2018; Fang ve Hong, 2018; Park vd., 2018). İlaveten; yanma, ısıtma ve soğutma, yakıt hücreleri ve diğer akış ölçüm yöntemleri ile yapılan çalışmalar da açık literatürde yer almaktadır (Martin vd., 2005; Yamamoto vd., 2006; Keramaris 2016; You vd., 2018). Bunun haricinde bataryaların soğutulması üzerine yapılan çalışmalar da önemli bir yere sahiptir. Literatürde bataryaların soğutulması üzerine yapılmış çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir:

Chen vd., (2016) bataryalarda ceket soğutma, hava ile soğutma ve kanatçık kullanarak soğutulma üzerine yoğunlaşmışlar ve bu yöntemleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Ceket soğutmayı doğrudan ve dolaylı olarak ele almışlar ve bu soğutma yöntemleri için de bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Çıkan sonuçlara göre parazitik güç bakımından hava soğutma, elverişsiz olarak bulunmuştur. İncelenen soğutma yöntemleri arasında dolaylı ceket soğutma, en yüksek sıcaklık farkını vermiştir. Ancak, düşük debilerde dolaylı sıvı soğutmanın bataryalarda kullanılmaması gerektiğini de ileri sürmüşlerdir.

Deng vd., (2018) lityum-iyon bataryaların soğutulması üzerine bir derleme çalışması yapmışlardır. Farklı soğutucuları ve soğutma yöntemlerini de ele alan bu kişiler, önceki çalışmalara da yer vermişlerdir. Hava, nano akışkan, su, yağ...vb soğutucu akışkanları incelemişler ve aktif ile pasif soğutma metotlarından da bahsetmişlerdir. Çalışmanın sonunda ise su ile soğutmanın yağ kullanılarak yapılan soğutmaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir. Soğutucu plaka kullanımının bataryaların soğutulması hususunda etkili olabileceğini fark etmişler ve galyum alaşımlı sıvı metal ve su karışımının iyi bir soğutucu akışkan olabileceğini bildirmişlerdir.

Wiriyasart vd., (2020) batarya soğutma yöntemlerinden biri olarak sıvı ile soğutma metodunu ele almışlar ve nano akışkanlar üzerinde yoğunlaşmışlardır. HAD analizleri ile üç ayrı model üzerinde sıcaklık dağılımlarını incelemişler ve nano akışkan kullanımının konvansiyonel soğutma modülüne göre maksimum hücre sıcaklıklarını yaklaşık %30 oranında düşürdüğünü fark etmişlerdir.

Chen vd., (2020) lityum iyon bataryalarda hava ile yapılan soğutmanın yanı sıra faz değişim malzemeleri ile yapılan soğutmaya da ele almış ve batarya yaşam döngüsünü de hesaba katmışlardır. COMSOL programını kullanarak tek boyutlu elektrokimyasal model üzerinde yoğunlaşan bu kişiler, döngüsel maliyetin faz değişimi ile yapılan soğutmada daha fazla olduğunu ileri sürmüşlerdir. İlâveten, hava ile yapılan soğutmanın faz değişim malzemesi ile yapılan soğutmaya göre yüksek çevre sıcaklıklarında dahi bataryayı güvenli sıcaklık aralığında tutabildiğini fark etmişlerdir.

Kalkan vd., (2021) kese tipi lityum bataryalarda doğal taşınım yoluyla yapılan soğutmaya araştırmışlar ve 1C, 2C, 3C, 4C ve 5C deşarj oranlarındaki sıcaklık dağılımlarını incelemişlerdir. Hem deneysel hem de sayısal simülasyonlar ile sıcaklık dağılımlarını elde

eden bu kişiler, doğal taşınım ile yapılan soğutmanın yetersiz olduğunu ileri sürmüşlerdir. Doğal taşınımın batarya yüzeylerinde 5°C'nin üzerinde sıcaklık farkına sebep olduğunu bildirmişlerdir.

Zhao vd., (2021) elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların hava ile soğutulmasını ele almışlar ve açık literatürdeki önceki çalışmalardan da yararlanarak bir derleme çalışması ortaya koymuşlardır. Hava ile soğutma metodunun farklı uygulama biçimlerine de yer vermişler ve soğutma kanalı kullanımının en popüler dizayn olduğunu ileri sürmüşlerdir. İlâveten, kanatçık kullanımının taşınımı artırdığını da fark etmişlerdir.

Tan vd., (2021) silindirik lityum iyon bataryalarda doğrudan sıvı soğutmasını incelemişler ve bu bağlamda HAD analizlerine başvurmuşlardır. Deneysel bulguları simülasyon sonuçları ile karşılaştıran bu kişiler, doğrudan sıvı soğutma metodunu bir kanal içerisinde uygulamışlardır. Çıkan sonuçlar, bize uygulanan soğutma yönteminin güç tüketimini yaklaşık %96 oranında azaltabileceğini göstermektedir. İlâveten, bu uygulamanın maksimum sıcaklık farkını %18'lere varan bir oranda azaltmada başarılı olduğunu ileri sürmüşlerdir.

1.2. Tezin Önemi

Yapılan bu tez kapsamında havacılıkta önemli bir yeri olan lityum-polimer bataryaların hava ile soğutulmasında etkili bir yöntem olarak düşünülen alüminyum kanatçıkların kullanılması ve insansız hava araçlarında kalkış ve iniş durumlarında hava direncinin azaltılması amaçlanmış ve bu bağlamda bir soğutma modeli geliştirilmiştir. Alüminyum kanatçıkların kullanılması ile batarya üst yüzeyinden olan ısı transferinin artması hedeflenmektedir. Bu yöntem ile bataryalarda önemli bir sorun olan aşırı ısınma probleminin önüne geçilmesi ve uçuş esnasında özellikle kalkış ve iniş durumlarında hava direncinin azaltılması öngörülmektedir.

Tez, iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, parçacık görüntülemeli hızölçer (PIV) kullanılarak yapılan ve batarya etrafında oluşan akış yapısının görselleştirilmesi, hız profillerinin çıkarılmasıdır. PIV cihazı ile yapılan ölçümler için lityum-polimer batarya modeli, üç boyutlu yazıcı ile imal edilmiş ve hava tüneline yerleştirilmiştir. Batarya modellerinin üst yüzeyi alüminyum kanatçıklar ile kaplanmıştır. Belirlenen sınır şartları için farklı debilerde parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile ölçümler alınmıştır.

Tezin ikinci aşamasında sıcaklık dağılımlarını, basınç kayıplarını ve akış karakteristiklerini belirlemek için ANSYS FLUENT 21 programı ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri yapılmıştır. PIV ile sıcaklık dağılımlarını belirlemek ve deneyler için farklı sıcaklıklarda hava tüneline hava göndermek mümkün olmadığı için sayısal simülasyona başvurulmuştur. Hem PIV ölçümleri hem de HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar, birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

1.3 Motivasyon ve Amaçlar

Lityum-polimer bataryalar, havacılık sektöründe ve özellikle insansız hava araçlarında önemli bir yere sahiptir. Lityum-polimer bataryalar, insansız hava araçları için önemli olan elektrik enerjisini sağlamada tercih edilen batarya türlerinden birisidir. Lityum-polimer bataryalar, bu elektrik enerjisinin tamamını karşılayamasa da insansız hava araçları için vazgeçilmez bir batarya türü olacaktır (Yalın, 2019). Bu bağlamda havacılık sektöründe ve insansız hava araçlarında kullanılan lityum-polimer bataryaların sık kullanımı sonucunda aşırı ısınmasını ve performans kaybını önlemek, en önemli hedeflerden birisidir (Berber, 2019).

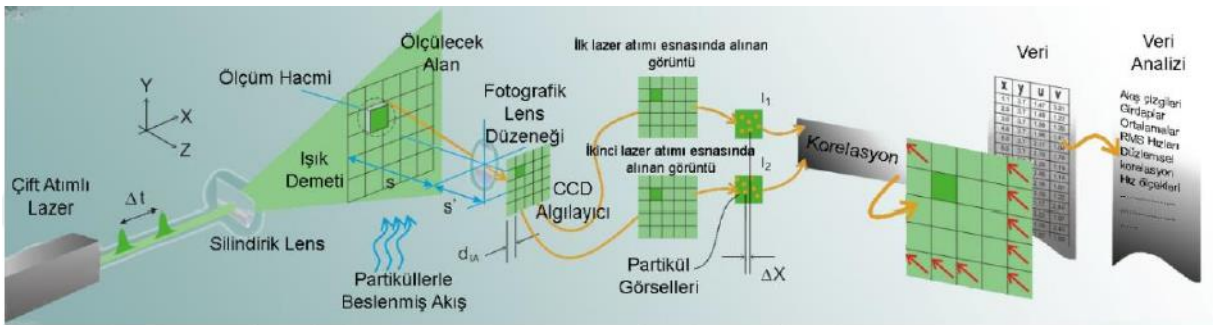
Tez kapsamında alüminyum kanatçıkların lityum-polimer bataryaların soğutulmasındaki etkileri gözlemlenmiş ve hem deneysel çalışma hem de sayısal analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Hız profilleri ve akış karakteristiklerinin belirlenebilmesi için gerekli deneysel ölçümler PIV cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için ise HAD analizlerinden yararlanılmıştır.

2. PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZÖLÇER YÖNTEMİ

2.1 Parçacık Görüntülemeli Hızölçerin Çalışma Şekli

Akış görüntüleme ve akış ölçüm teknikleri, en eski çağlardan bu yana insanoğlunun merak ettiği konulardan birisi olmuştur. Akış görüntüleme ve ölçüm tekniklerinde en eski uygulamalardan birisi Ludwig Prandtl'in su kanalında yaptığı deney gelmektedir. Ludwig Prandtl, mika parçacıkları ile su kanalında hem kararlı hem de kararsız akış yapılarını görselleştirmeyi amaçlayan bir deney yapmıştır (Prandtl, 1904). Daha sonraki yıllarda ise teknoloji ilerledikçe yeni ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir (Manz, 1990; Rotta, 1990). Sıcak tel anemometrisinin bulunması, bunlardan birisidir (Prasad, 2000). Sıcak tel anemometrisinin bulunmasından sonraki yıllarda lazer icat edilmiştir (Prasad, 2000; Corcoran, 2014). Mikroçiplerin de üretilmesiyle akış ölçüm teknikleri bambaşka bir boyuta ulaşmıştır (Guijt vd., 2001; Ming-Peng vd., 2018; Raffel vd., 2018).

Parçacık görüntülemeli hızölçer (PIV); akışa karıştırılan izleyici partiküllerin lazer ile aydınlatılması ve kamera ile kaydedilmesi prensibine dayanan ve bu sayede partiküllerin hızlarını ölçen, akış parametrelerini sunan, akışa müdahale etmeyen bir akış yapısı görüntüleme ve akış hızı ölçme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Parçacık görüntülemeli hızölçer sisteminde izleyici partiküller akışa eklenir veya tohumlanır ve bu partiküller, lazer tarafından aydınlatılır. Aydınlatılan bu izleyici partiküllerin akış içindeki hareketi, kamera tarafından kayıt altına alınır. Kayıt altına alınan görüntüler, bilgisayara aktarılır ve çeşitli korelasyonlar ile anlaşılabilir akış verileri olarak kullanıcıya sunulur (Raffel vd., 2018). Şekil 2.1'de parçacık görüntülemeli hızölçer cihazının çalışma şekli görülmektedir.



Şekil 2.1: Parçacık görüntülemeli hızölçer ve çalışma şekli (Dantec Dynamics Websitesi; Polat, 2019).

Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile görüntü elde etme, sırasıyla tohumlama, lazer ile aydınlatma, kamera ile kaydetme ve görüntülerin işlenmesi gibi birtakım alt proseslerden oluşmaktadır (Jahanmiri, 2011).

2.2 Tohumlama

Tohumlama işlemi, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile görüntü elde etmede gerekli olan proseslerin başında gelmektedir. Bir parçacık görüntülemeli hızölçer sisteminde parçacıkların en önemli işlevi, akışı takip etme ve gelen lazer ışığını yansıtmaktır (Melling, 1997). Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile doğru görüntü alınabilmesi için akışı takip eden parçacıkların normalden çok büyük ya da normalden çok küçük olmaması gerekmektedir (Jahanmiri, 2011). Akışı bozmayacak şekilde akışı takip edebilme ve lazer ışığını yeterli derecede yansıtabilme, akışı takip eden partiküllerde aranan özelliklerin başında gelmektedir (Raffel vd., 2018).

Tohumlama işlemi için kullanılan partiküller; katı, sıvı ve gaz fazında olabilir. Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazında kullanılan akışkanların çeşidine göre bu partiküller de değişmektedir (Melling, 1997). Partiküllerin boyutları, yoğunlukları gibi özellikler de parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan deneylerde önemli diğer parametrelerdir (Jahanmiri, 2011). Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de sırasıyla sıvı ve gaz fazı için kullanılan belirli partiküller ve boyutları verilmiştir (Jahanmiri, 2011; Raffel vd., 2018).

Tablo 2.1: PIV deneylerinde ana akışkanın sıvı fazında olması durumunda kullanılan partiküller ve özellikleri.

Kullanılan Partikülün Fazı	Partikül Malzemesi	Partikülün Ortalama Çapı (µm)
Katı	Polistiren	10 - 100
Katı	Alüminyum	2 - 7
Katı	İçi boş cam küreler	10 - 100
Katı	Sentetik kaplamalar için granüller	10 - 500
Sıvı	Çeşitli yağlar	50 - 500
Gaz	Oksijen kabarcıkları	50 - 1000

Tablo 2.2: PIV deneylerinde ana akışkanın gaz fazında olması durumunda kullanılan partiküller ve özellikleri.

Kullanılan Partikülün Fazı	Partikül Malzemesi	Partikülün Ortalama Çapı (µm)
Katı	Polistiren	0.5 - 10
Katı	Alüminyum oksit	0.2 - 5
Katı	Titanyum oksit	0.1 - 5
Katı	Mikro cam küreler	0.2 - 3
Katı	Mikro cam balonlar	30 - 100
Katı	Sentetik kaplamalar için granüller	10 - 50
Katı	Dioktilftalat	1 - 10
Katı	Duman	< 1
Sıvı	Çeşitli yağlar	0.5 - 10
Sıvı	DEHS sıvısı	0.5 - 1.5
Sıvı	Helyum dolu sabun kabarcıkları	1000 - 3000

2.3 Lazer İle Aydınlatma

Lazer ile aydınlatma, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan ölçümlerde gerekli olan başka proseslerden bir tanesidir. Lazerin görevi, akışı takip eden partikülleri aydınlatmak ve bu sayede izleyici partiküllerin kamera tarafından daha kolay algılanmasını sağlamaktır. Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan ölçümlerde kullanılan lazerler genellikle atımlı lazerler ve dalgalı lazerler olarak iki gruba ayrılmaktadır (Jahanmiri, 2011).

Atımlı lazerler, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı uygulamalarında en çok kullanılan lazer türlerinden birisidir. Bu tür lazerler, çok kısa bir sürede lazer atımını gerçekleştirebilme ve lazer atımı istenilen enerji seviyesinde gönderebilme gibi iki ayrı avantaj sunmaktadırlar. Atımlı lazerler içerisinde en çok kullanılan lazer ise Nd: YAG (neodymium yttrium alüminyum garnet) lazerleridir. Atımlı lazerlerin yanında bir de fazla tercih edilmeyen dalgalı lazerler vardır. Dalgalı lazerlerin başlıca çeşitleri ise argon-iyon lazerleri ve helyum-neon lazerleridir (Jahanmiri, 2011).

2.4 Kamera İle Kaydetme

Kamera ile kaydetme işlemi, PIV ile yapılan hız ölçümlerinde yer alan önemli işlemlerden birisidir (Hain vd., 2007). Lazer tarafından aydınlatılan partiküllerin akış içerisindeki hareketleri, kamera tarafından kaydedilmektedir. Kaydedilen görüntüler, daha sonra bilgisayara aktarılmaktadır (Abdelsalam vd., 2014). Bu sebeple kameralardan alınan görüntüler, sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir (Cao vd., 2014). Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazında kullanılan kameralar; görüntüleri, istenilen zamanda ve doğru bir şekilde kaydedebilmelidir (LaVision, 2015). İlaveten; kullanılan kameraların uzaysal çözünürlükleri ve frekansları da dikkat edilmesi gereken diğer önemli parametrelerdendir (Sayeed-Bin-Asad vd., 2016).

Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan uygulamalarda kameralar için genellikle iki çeşit sensör kullanılmaktadır (Hain vd., 2007). Bu sensörler sırasıyla CCD (Charged Coupled Devices) ve CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) şeklindedir (Abdelsalam vd., 2014). PIV uygulamalarında en sık kullanılan kameralar, CCD sensörlü kameralardır (Cao vd., 2014). CCD sensörlü kameralar; yüksek uzaysal çözünürlük, düşük gürültü düzeyi gibi iki önemli avantaj sağlamaktadırlar (LaVision, 2015). Günümüzde PIV uygulamalarında kullanılan CCD sensörlü kameraların sensör çözünürlükleri, minimum 2 maksimum 29 megapikseldir (Sayeed-Bin-Asad vd., 2016).

2.5 Görüntü İşleme

Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazının çalışma şekli genel olarak yer değiştirme ve zaman gibi iki parametreye dayanmaktadır. Ancak; her bir parçacığın hızını hesaplamak mümkün değildir (Dantec Dynamics Dynamic Studio Manual). Her bir parçacığın hızını hesaplamada en önemli iki engel; parçacık konsantrasyonu ve bindirme oranıdır. Bir PIV sisteminde kameralar tarafından kaydedilen görüntüler, bilgisayara aktarılır ve alt alanlara bölünür (Theunissen vd., 2010). Alt alanlara ayrılan bu görüntüler, sorgulama alanlarında çeşitli korelasyonlar ile değerlendirilir. Bu sebeple görüntü işleme metotları, sorgulama alanlarının boyutları ve bindirme oranı, sonuçların doğruluğu açısından önemli parametrelerdir (Sayeed-Bin-Asad vd., 2016).

Görüntü işlemede kullanılan korelasyonlar, genellikle Hızlı Fourier Dönüşümüne dayanmaktadır. Kullanılan korelasyon yöntemi önemli olup alt alanın boyutları ve bindirme oranı da deney sonuçlarına etki etmektedir (Dantec Dynamics Dynamic Studio

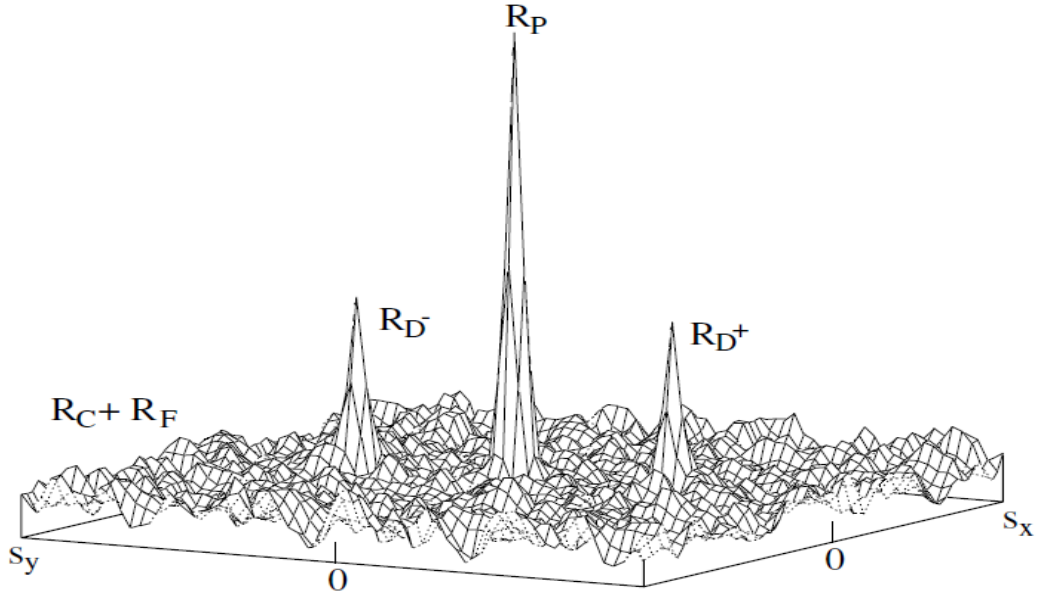
Manual; Dantec Dynamics, 2015). Alt alanın boyutları küçüldükçe uzaysal çözünürlük artmakta ve daha yüksek kalitede görüntüler elde edilebilmektedir. Ancak; daha büyük uzaysal çözünürlük, daha fazla hesaplama zamanı anlamına gelmektedir (Theunissen vd., 2010). Literatürdeki PIV çalışmaları incelendiğinde genellikle 32 x 32 piksel boyutlarında sorgulama alanları ve % 50 bindirme oranının sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Simo Tala vd., 2013). Şekil 2.2’de parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan uygulamalarda kullanılan korelasyon çeşitleri görülmektedir (Sayeed-Bin-Asad vd., 2016).



Şekil 2.2: PIV’de kullanılan korelasyon çeşitleri.

2.5.1 Oto Korelasyon

Oto korelasyon yöntemi, parçacık görüntülemeli hızölçer uygulamalarında görüntü işlemek amacıyla kullanılan bir korelasyon yöntemidir. Oto korelasyon tekniğinde görüntülerin ve lazer atımlarının aynı sensör üzerinde kayıt altına alınması büyük önem taşımaktadır (Adrian, 1991). Aksi takdirde oto korelasyon tekniğinin kullanılması güçleşmektedir. Doğrudan hesaplama, bu yöntemin en büyük dezavantajıdır (Prasad, 2000). Şekil 2.3’de oto korelasyon tepcikleri ve bileşenleri görülmektedir (Raffel vd., 2018).



Şekil 2.3: Oto korelasyon tepelikleri ve bileşenleri.

2.5.2 En Küçük Kareler Eşleşmesi

PIV ile yapılan ölçümlerde kullanılan korelasyon yöntemlerinden birisi en küçük kareler eşleşmesidir (Maas vd., 1994). Bu metot, sorgulama alanlarının döndürülmesi veya sorgulama alanlarının deformasyonu esasına dayanan bir korelasyon yöntemi olup birinci dereceden terimler için kullanışlı bir yaklaşımdır (Tokumaru ve Dimotakis, 1995; Gui ve Merzkirch, 1996). En küçük kareler eşleşmesi; farklı parçacık verilerinde kullanılabilme ve sistematik hataları önleme gibi iki önemli avantaj da sunmaktadır (Gui ve Merzkirch, 2000). Ancak; bu korelasyon yönteminin en büyük dezavantajları ise hesaplama süresinin fazla olması ve yüksek kalitede parçacık görüntüsüne ihtiyaç duymasındır (Stanislas vd., 2003; Kitzhofer vd., 2012; Brücker vd., 2012; Sayeed-Bin-Asad vd., 2016).

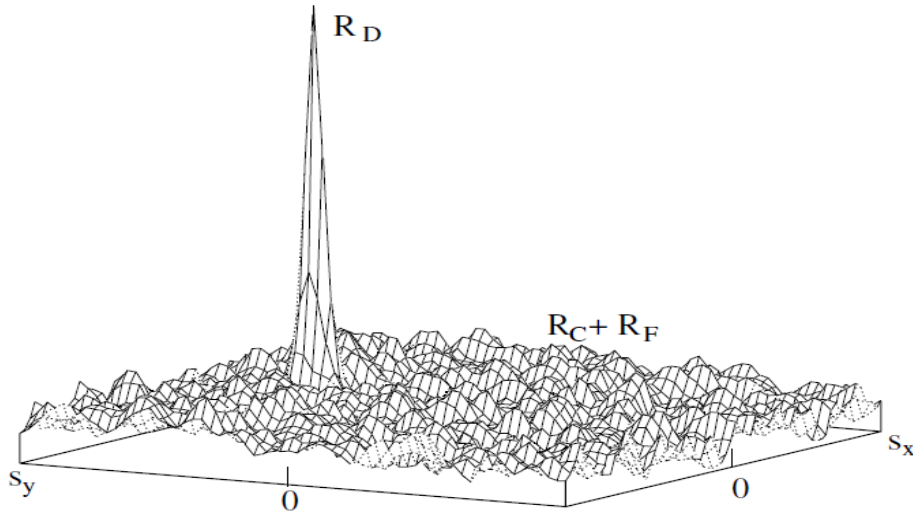
2.5.3 Adaptif Korelasyon

Adaptif korelasyon yaklaşımı, sorgulama pencerelerinin küçültülmesi prensibine dayanan ve bu sayede hız vektörlerinin belirlenmesini sağlayan bir başka korelasyon yöntemidir (Dantec Dynamics Dynamic Studio Manual). Bu korelasyon yönteminde değişen pencereler kullanılarak daha yüksek bir korelasyon tepeliğinin oluşması sağlanmaktadır (Westerweel ve Scarano, 2005). Adaptif korelasyon, parçacık görüntülemeli hızölçer ile yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir yöntem olup uygulamalarda birçok avantaj

sağlamaktadır (Theunissen vd., 2010; Dantec Dynamics A/S, 2012). Yüksek dinamik aralık ve homojen olmayan tohumlamada daha yüksek doğruluk oranı, bu korelasyon yönteminin en büyük avantajları arasında yer almaktadır (Kitzhofer vd., 2012; Brücker vd., 2012; Sayeed-Bin-Asad vd., 2016).

2.5.4 Çapraz Korelasyon

Çapraz korelasyon yöntemi, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan ölçümlerde kullanılan ve genellikle Hızlı Fourier Dönüşümüne dayanan görüntü işleme yöntemlerinden birisidir. Bu korelasyon yöntemi, çoğunlukla tek pozla çekilmiş ikili yapılarda kullanılan ve parçacık görüntülemeli hızölçer uygulamalarında en çok tercih edilen korelasyon yöntemidir. İzleyici partiküllerden alınan görüntülerinin kaydırılması, korelasyon kaybının azaltılması ve sorgulama alanlarının belirlenmesi, çapraz korelasyon yönteminin öne çıkan avantajlarıdır. Şekil 2.4'de çapraz korelasyon yöntemi ve bileşenleri görülmektedir (Raffel vd., 2018).



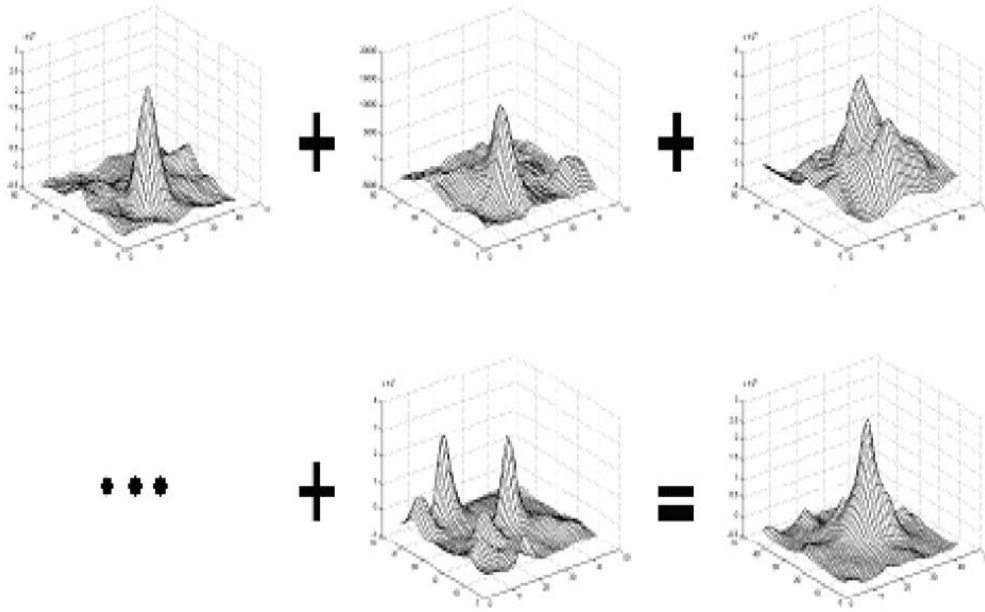
Şekil 2.4: Çapraz korelasyon tepcikleri ve bileşenleri.

2.5.5 Ortalama Korelasyon

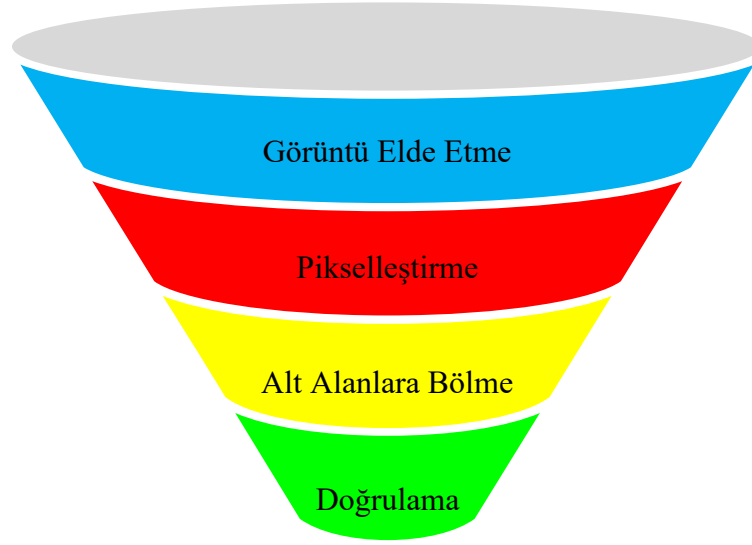
Ortalama korelasyon yöntemi, PIV ile yapılan hız ölçümlerinde izleyici partikül sayısının az olduğu durumlarda kullanılan bir korelasyon tekniğidir (Westerweel, 1997). Bu korelasyon yöntemi, her bir alt alan için ortalama fonksiyonun ortalamasının alınması prensibine dayanmaktadır. Bu işlem, bütün görüntüler için her bir bölgede tekrarlanır. Ortalama korelasyon yönteminde korelasyon tepcikleri, ortalama hızları temsil etmektedir

(Dynamic Studio User's Guide, 2013). Korelasyon tepciklerin değerlendirilmesi ise normal olarak yapılmakta olup korelasyon fonksiyonları birbirine eklenerek korelasyon tepcikleri elde edilmektedir. Şekil 2.5'de ortalama korelasyon tepcikleri ve tepcik oluŐumları, görülmektedir (Dynamic Studio User's Guide, 2013; Karagöz, 2016).

PIV'de yapılan alt iŐlemlerde, öncelikle görüntü elde etme işlemi gerçekleŐtirilir. Ancak; elde edilen ham görüntüler, sonuçları yorumlamada yeterli olmadığı için pikselleŐtirme iŐlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bilgisayarda veri havuzunda toplanan ham görüntülerin pikselleŐtirme iŐleminde sonra görüntüler alt alanlara bölünmektedir. Alt alanlara ayrılan görüntüler, belirlenen bindirme oranları ile sorgulanır ve sorgulanan görüntüler, son olarak doğrulama iŐlemine tabi olurlar. Şekil 2.6'da ise PIV alt işlemler Şeması görülmektedir (Dynamic Studio User's Guide, 2013; Durmuş, 2017).



Şekil 2.5: Ortalama korelasyon yöntemi ve korelasyon tepcikleri.



Şekil 2.6: PIV alt işlemler şeması.

2.6 İleri Görüntü İşleme Yöntemleri

Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile alınan görüntüler ve kayıtlar her zaman doğru verileri içermeyebilir (Hart, 2000). Kaydedilen görüntülerde arka plan gürültüsü, kayıp veriler ve yanlış vektörler bulunabilir. Kayıp veriler, arka plan gürültüsü ve yanlış vektörler, elde edilen görüntülerin doğruluğuna etki etmektedir (Liang vd., 2003). Bu sebeple bahsedilen bu sorunların düzeltilmesi veya giderilmesi gerekmektedir (Westerweel and Scarano, 2005). İşlem sonrası aşama veya diğer adıyla ‘‘post processing’’, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan uygulamalarda kullanılan görüntü değerlendirme yöntemlerinden bir tanesidir (Pun vd., 2007). İşlem sonrası aşama genel olarak üç adımdan oluşmaktadır. Verilerin doğrulaması, yanlış verilerin kaldırılması ve verileri pürüzsüz hale getirme, post processing aşamasının temel adımlarıdır (Liu vd., 2008; Fang ve Hong, 2018).

PIV ile yapılan deneylerde işlem sonrası aşama için birçok yazılım kullanılmaktadır (Westerweel, 1997; Gunes ve Rist, 2007). Bu yazılımlar; genellikle global histogram filtresi, dinamik ortalama değer operatörü ve normalleştirilmiş medyan testi gibi birtakım yöntemleri baz almaktadır (Scarano ve Riethmuller, 2000; Westerweel ve Scarano, 2005). Son zamanlarda ise Kriging İnterpolasyon Yöntemi, işlem sonrası aşama için kullanılmaktadır (Doty vd., 2004; Gunes ve Rist, 2007). Kriging İnterpolasyon Yöntemi, önceden belirlenmiş regresyon ve korelasyon modellerine dayanan bir yöntemdir. Kriging

İnterpolasyon Yöntemi de diğer yöntemler gibi etkili bir yöntem olup PIV ile yapılan deneylerde veriler arası boşlukları doldurmada ve pürüzsüz hale getirmede kullanılmaktadır (Gunes ve Rist, 2007; Raffel vd., 2013; Fang ve Hong, 2018).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında deneyler; Eskişehir Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, PIV Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tezin metodolojisi, iki bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölümde bataryanın üst yüzeyi, alüminyum kanatçıklar kullanılarak kaplanmış ve bu bağlamda batarya modelinin üst yüzeyindeki ve etrafındaki akış yapısı, hız profilleri, göz önüne alınmıştır. Hız profillerinin ve akış karakteristiklerinin görüntülenmesinde parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı kullanılmıştır. Ancak; parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile sıcaklık ölçümleri, gerçekleştirilemeyeceği için sıcaklık dağılımlarını belirlemek amacı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinden yararlanılmıştır. Sonuç olarak, tezin metodolojisi, deneyler ve sayısal çözümleme tabanlı simülasyon olmak üzere iki kısma ayrılmıştır.

3.1 Deney Düzenegi

Deneysel PIV ölçüm çalışmaları, eksenal bir hava tüneli içerisinde gerçekleştirilmiştir. Hava tüneli, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile alınan ölçümlerin kolay bir şekilde görüntülenebilmesi ve ışığı geçirmesi için şeffaf pleksiglastan yapılmıştır. Hava tüneli, 2200 Watt gücündeki frekans kontrollü fan ile bağlantılı olup fanın debisi, 11 kademeye kadar ayarlanabilmektedir. Deney düzeneginin genel bir görünümü, Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Deney düzeneğinin genel bir görünümü.

3.1.1 PIV Cihazı

Deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan parçacık görüntülemeli hızölçer (PIV) cihazı; lazerin aydınlattığı izleyici partiküllerin kamera tarafından kayıt altına alınması ve bu sayede akış karakteristiklerini, bilgisayar ve ilgili program vasıtasıyla kullanıcıya sunan bir hız ölçüm tekniğidir. Hız profillerinin ve akış karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan PIV cihazı; kamera, lazer, senkronizer, tohumlayıcı ve bilgisayar gibi bileşenlerden oluşmaktadır (Prasad, 2000; Jian vd., 2006). Sistemde kullanılan lazerin markası, Litron LDY-304 PIV olup neodymium doped yttrium lithium flüoride tip (Nd: YLIF) lazerdir. Bu lazer, her kavite için 527 nm dalga boyuna ve en az 30 mJ güce sahiptir. Lazerin atım genişliği ise 150 ns'dir.

Sistemde kullanılan kamera ise Phantom v641 marka olup yüksek hızlı kameradır. Bu kamera, CMOS sensörlere sahip olup 4 MP çözünürlüğe sahiptir. Görüntü derinliği ise 12 bit olup piksel boyutu ise 10 μm 'dir. PIV cihazında kullanılan bu kamera, saniyede 6 gigapikselden daha fazla veri sağlama kapasitesine de sahiptir. Eğer; kameradan alınan görüntülerde saniye başına kare sayısı 1450'ye ayarlanırsa çözünürlük 2560 x 1600 piksel olabilmektedir. Ancak, saniye başına kare sayısı 2560'a ayarlanırsa çözünürlük değeri, 1920 x 1080 piksel şeklinde değişmektedir.

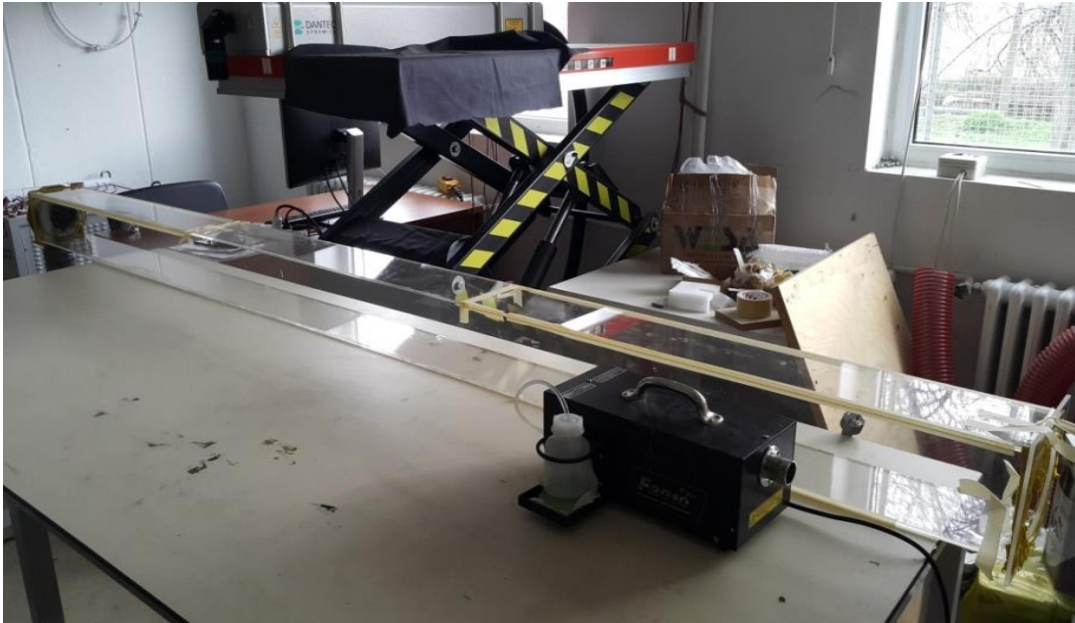
Senkronizer ve kontrol ünitesi ise PIV cihazındaki bileşenlerin zamanında ve birbirleriyle uyumlu olarak çalışmalarını sağlar. Senkronizer, sistem başlatıldığı zaman gerekli başlatma sinyalini oluşturur ve bilgisayara bilgi aktarır (Raffel vd., 2018).

Deney düzeneğinde kullanılan tohumlayıcı ise akışı takip eden izleyici partikülleri üretir. Bu tez kapsamında hava tüneline deneyler yapıldığı için ana akışkan olan hava ile birlikte kullanılabilen 3 µm çaplı yağ damlacıkları, tercih edilmiştir (Jahanmiri, 2011).

PIV ölçümlerinde kullanılan kalibrasyon plakası ise kameranın odaklanması ve tohumlayıcıdan çıkan partiküllerin yer değişiminin hesaplanması hususunda önemli bir elemandır. Dynamic Studio programında ise genellikle kalibrasyon plakasının merkezi ve uç noktaları esas alınarak kameranın kalibrasyon işlemi yapılır (Dynamic Studio Manual; Şöhret, 2017).

3.1.2 Hava Tüneli

Deney düzeneğinde yer alan hava tüneli, 6 mm kalınlığında şeffaf pleksiglastan imal edilmiş olup ölçüleri ise 15 x 15 x 300 cm şeklindedir. Fanın çıkış ağzının ölçülerinin 150 mm x 150 mm olduğu da dikkate alınarak kare kesit alanlı bir hava tüneli seçilmiştir. Pleksiglastarın kesimi lazer ile yapılmış olup bu pleksiglastar, kloroform yapıştırıcı ile birbirine yapıştırılmıştır. Deneylerde kullanılan hava tüneli, Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hava tünelinin genel bir görünümü.

3.1.3 Frekans Kontrollü Fan

Deney düzeneğinde hava tüneline bağlanan fan, invertör bir fan olup radyal salyangoz tiptir. Bu fanın çıkış ağzı 150 mm X 150 mm olup 2200 Watt güce sahiptir. Bu invertör fanın maksimum debisi ve devri sırasıyla 1250 m³/h ve 2850 dev/dak şeklindedir.

3.1.4 Veri Kaydedici

PIV ile yapılan deneylerde hava tünelineki basınç kayıpları, havanın debisi, tünel içerisindeki havanın hızı ve bağıl nemi gibi birtakım parametreleri, belirlemek için veri kaydedici (data logger) kullanılmıştır. Veri kaydedici ile debi, bağıl nem, sıcaklık, mutlak basınç, hız parametreleri okunabilmektedir. Deneylerden önce veri kaydedicinin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyonu yapılmış veri kaydedici ile hava tüneli içerisinde farklı debi değerleri belirlenmiş bu debi değerlerine karşılık gelen hız değerleri kaydedilmiştir. Veri kaydedici ile hava tüneline içerisinde ölçüm almak için tüneline üst yüzeyinde, tüneline başlangıcında olmak üzere bir adet delik açılmıştır.

3.1.5 Alüminyum Kanatçıklar

Tez kapsamında lityum-polimer batarya modelinin üst yüzeyi alüminyum kanatçıklar ile kaplanmıştır. Açık literatürde bataryaların alüminyum kanatçıklar kullanılarak soğutulması üzerine birçok çalışma bulunmaktadır (Lv vd., 2016). Bu çalışmalarda bazıları aşağıda verilmiştir:

Yeow vd. (2012), lityum-iyon bataryaların sıvı ile soğutulmasını incelemişler ve bu amaçla alüminyum kanatçıklar da kullanmışlardır. Sıcaklık dağılımları için sonlu elemanlar yöntemine başvuran bu kişiler, alüminyum kanatçıkların kalınlığını 1.5 mm olarak belirlemişlerdir. Hem tek plakalı hem de çift plakalı soğutma üzerinde yoğunlaşmışlardır. Çalışmanın sonunda ise hücre sıcaklığının soğuk plakanın yerine bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Soğuk plakadaki soğutucu akışkanın doğrultusunun tek soğuk plaka soğutması üzerinde çok fazla etkisi olmadığını fark etmişlerdir. Maksimum hücre sıcaklığının çift plaka ile yapılan soğutmada daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Chen vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada 169 mm x 179 mm x 1mm boyutlarında alüminyum kanatçıklar kullanarak lityum-iyon batarya hücrelerinin soğutulmasını ele almışlar ve deneyler gerçekleştirmişlerdir. Doğrulama amacı ile ANSYS FLUENT programından yararlanan bu kişiler, düşük kütle debisi ile kullanılarak dolaylı yoldan

yapılan sıvı soğutmanın batarya içindeki sıcaklık artışını ve sıcaklık farkını kontrol etmede iyi bir yöntem olmadığını fark etmişlerdir. İlâveten; dolaylı yoldan yapılan sıvı soğutmanın en uzun soğutucu kanal boyundan dolayı, maksimum sıcaklık farkına neden olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Lv vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada faz değişim malzemesi ve alüminyum kanatçıklar kullanarak batarya soğutmasını ele almışlardır. Bu kişiler, lityum-iyon bataryanın soğutulması üzerinde durmuşlar ve alüminyum kanatçıkları 9 mm yüksekliğe sahip olacak şekilde imal ettirmişlerdir. Faz değişim malzemesini ise düşük yoğunluklu polietilen içerikli kompozit malzeme olarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonunda ise düşük yoğunluklu faz değişim malzemesi ile alüminyum kanatçıkların ısı geçişini artırdığını fark etmişlerdir. Özellikle düşük yoğunluklu polietilen kompozit faz değişim malzemesi ile yapılan kanatçıklı soğutmada batarya sıcaklığının 50°C'nin üzerine çıkmadığını bildiren bu kişiler, polietilen kompozit faz değişim malzemesi ile yapılan kanatçıklı soğutma yönteminin hava kullanılarak yapılan soğutmaya göre daha iyi olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Kasper vd. (2021), dikdörtgen kesitli faz değişim kavitesini ele almışlar ve bu kaviteden olan doğal taşınımı incelemişlerdir. Bu kişiler, doğal taşınımı irdelemek için alüminyum kanatçıklar kullanmışlar ve alüminyum oranı ile kanat boşluğu gibi birtakım önemli parametreleri de araştırmışlardır. Optimal alüminyum oranının %15 olduğunu fark etmişlerdir. İlâveten; konvektif iyileştirme faktörünün kanatçıklar arası boşluğun artması ile arttığını ileri sürmüşlerdir. Bu durumun özellikle yukarı eğimli kavitede olduğunu bildirmişlerdir. Aşağı doğru eğimli kavitede doğal taşınımın 25 mm kanatçık arası mesafe durumunda ihmal edilebilir olduğunu bulmuşlardır.

3.1.6 Batarya Modelleri

Tez kapsamında kullanılacak olan lityum-polimer batarya 50 mm x 53 mm x 148 mm boyutlarında olup 7s1p bataryadır (GensAce Web Sitesi). Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazında batarya etrafında oluşan akış yapısını görüntülemek için üç boyutlu yazıcı kullanılarak batarya modeli imal ettirilmiştir. Çünkü; gerçek bataryanın lazer ile temas etmesi, tehlikeli olacağından bu yöntemle başvurulmuştur (Wang vd., 2012; Shironita vd., 2021). Sonrasında ise lazerden gelen ışığın yansımaması ve iyi bir görüntü alabilmek için batarya modeli siyah spreyci boya ile boyanmıştır (Patil vd., 2015). Şekil 3.3'de temel alınan

batarya modeli ve üç boyutlu yazıcıdan imal ettirilen kanatsız batarya modeli görülmektedir.



Şekil 3.3: Deneyler için temel alınan lityum-polimer batarya. (GensAce Websitesi)

PIV ölçümlerinde kullanılan alüminyum kanatçıkların kalınlıkları ise 1 mm ve 3 mm olacak şekilde imal ettirilmiştir. HAD analizleri için iki farklı kanatçık kalınlığı daha ilave edilmiştir. Alüminyum kanatçıklar için ise iki ayrı senaryo düşünülmüştür. Birinci senaryoda iki ayrı kanatçık yüksekliği göz önüne alınmıştır. Kanatçıkların yükseklikleri sırasıyla 10 mm ve 15 mm olarak imal ettirilmiştir. İkinci senaryoda ise kanatçık kalınlığı göz önüne alınmıştır. Şekil 3.4'de 1. batarya modeli ve Tablo 3.1'de ise çalışmada kullanılan batarya modellerine ait özellikler verilmiştir.



Şekil 3.4: 1 mm kalınlık 10 mm yükseklik ve 2 mm aralığa sahip alüminyum kanatçıklar (1.batarya modeli).

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan batarya modelleri ve özellikleri.

Batarya Modeli/ Özellikler	Kanatçık Kalınlığı (mm)	Kanatçık Yüksekliği (mm)	Hatve Uzunluğu (mm)	Kanatçık Sayısı (adet)	Toplam Kanatçık Yüzey Alanı (mm ²)
1. Model	1	10	2	50	61096
2. Model	1	15	2	50	86596
3. Model	3	10	2	30	43816
4. Model	3	15	2	30	59716
5. Model	4.44	10	4	18	32836
6. Model	4.44	15	4	18	42636
7. Model	6.85	10	4	14	29524
8. Model	6.85	15	4	14	37484

Tablo 3.1 incelendiğinde kullanılan batarya modellerine ait dört farklı kanatçık kalınlığı, iki farklı kanatçık yüksekliği, iki ayrı hatve uzunluğu öne çıkmaktadır. Özellikle hatve uzunluğu, kanatçık kalınlığı ve kanatçık yüksekliği kanatçık sayısına ve toplam kanatçık yüzey alanına doğrudan etki etmektedir. Bu bağlamda en yüksek kanatçık yüzey alanı ve en fazla kanatçık sayısı, 2. batarya modeline ait olurken en az kanatçık sayısı ve kanatçık yüzey alanınının 7. batarya modeline ait olduğu görülmektedir.

3.1.7 Lityum-Polimer Bataryalarda Isı Üretimi

Lityum-polimer bataryalar, diğer batarya türlerinde olduğu gibi sık kullanıldığı zaman ısınmakta ve belirli miktarda ısı üretmektedir. Lityum-polimer bataryalarda olan bu ısı üretimi, bataryanın gerilimi, çektiği akım ve açık çevrim voltajı ile orantılıdır. Aşağıda lityum-polimer bataryalarda ısı üretim denklemi verilmiştir (Yeow vd., 2012; Taheri ve Bahrami, 2012):

$$Q = \frac{I}{Y_{\text{hücre}}} \cdot [(V_{\text{ocv}} - V) - I \cdot T \cdot \frac{\partial V}{\partial T}] \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde I, batarya hücresinin çektiği akım olup V, gerilimi; Y ise hacmi temsil etmektedir. Denklem ilk bölümü, tersinmez ısı dağılımını temsil etmektedir. Denklem ikinci bölümünde yer alan T ise batarya sıcaklığıdır. Denklem ikinci bölümü

tersinir ısı dağılımını temsil etmekte olup genelde ihmal edilmektedir (Yeow vd., 2012; Panchal vd., 2016).

3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri ve Türbülans Modelleri

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri, akışkan akımı problemlerinde sıkça kullanılan ve simülasyon amacı ile tercih edilen metotlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinin temeli, akış problemlerinde çok önemli olan korunum denklemlerine dayanmaktadır. Kütle, momentum ve enerjinin korunumu olan bu denklemlerin çözümünde çeşitli bilgisayar yazılımlarını kullanan ve bu sayede akış problemlerinde çok önemli olan HAD analizlerinin birçok uygulama alanı mevcuttur. Bu uygulama alanları; ısıtma, faz değişimi, kimyasal reaksiyonlar...vb örnek olarak gösterilebilir (Norton vd., 2007; Zhao vd., 2016).

Çalışma kapsamında parçacık görüntülemeli hızölçer cihazından elde edilen hız dağılımlarının karşılaştırılması ve sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri, yapılmıştır. HAD analizleri için açık erişimde olan ANSYS FLUENT 21 programı kullanılmıştır. HAD analizleri için kullanılan türbülans modellerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

3.2.1 Standart k-ε Modeli

Standart k-ε modeli, yüksek Reynolds sayıları için geliştirilen ve HAD analizi uygulamalarında sıklıkla tercih edilen türbülans modellerinden birisidir. Launder ve Spalding tarafından geliştirilen standart k-ε modeli, basit oluşu ve kullanım kolaylığı gibi birçok avantaja da sahiptir (Launder ve Spalding, 1974). Özellikle iç akışlarda yaygın olarak kullanılan bu model, k-ε türbülans modelleri içerisinde ilk sırada gelmektedir (Zhai vd., 2007; Cabezon vd., 2011; Yusof vd., 2020). Standart k-ε modeline ait taşıyıcı denklem aşağıda verilmiştir (Cabezon vd., 2011; Gildeh vd., 2013; Shaheed vd., 2019):

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 3} P_{cb}) \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de yer alan $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ sabitlerinin değerleri sırasıyla 1.44 ve 1.92’dir (Cabezon vd., 2011).

3.2.2 RNG k-ε Modeli

RNG k-ε modeli, standart k-ε modeli gibi Reynolds Ortalamalı Navier Stokes temelli bir türbülans modelidir. Türbülans oluşumu ve dağılımı bakımından standart k-ε modeline benzeyen bu model, daha kompleks akışlar için iyi sonuçlar vermektedir. Standart k-ε modeline göre en önemli farklılıklarından birisi ise temel denklemlerinde yer alan model sabitlerinin farklı olmasıdır (Yakhot ve Orszag, 1986). RNG k-ε modeline ait taşıyıcı denklemler aşağıda verilmiştir (Orszag vd., 1993):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k - C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon - S_\varepsilon \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemde $C_{1\varepsilon}$, C_2 sabitlerinin değerleri sırasıyla 1.42 ve 1.68'dir (Escue ve Cui, 2010).

3.2.3 Realizable k-ε Modeli

Realizable k-ε Modeli, k-ε türbülans modellerinden biri olup yüksek türbülanslı akışlar için geliştirilmiştir (Zhai vd., 2007). Standart k-ε modeli ile karşılaştırıldığında ayrılma içeren akışlarda daha iyi sonuçlar veren bu model, iki denklemlilik türbülans modelleri sınıfına dahil edilmektedir (Shih vd., 1995). Türbülans Prandtl sayısını analitik olarak hesaplayan bu model, literatürde de sıklıkla kullanılmaktadır (Shih vd., 1995; Van Maele ve Merci, 2006; Rezaeiha vd., 2019). Eşitlik 3.4 ve 3.5'de Realizable k-ε modeline ait taşıyıcı denklemler verilmiştir (Bulat ve Bulat, 2013; Shaheed vd., 2019):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(Dk_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \varepsilon \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D\varepsilon_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \sqrt{2C_{1\varepsilon}} S_{ij} \varepsilon - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemde $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ sabitlerinin değerleri sırasıyla 1.44 ve 1.9'dur (Fluent, 2011a; Fluent, 2011b; Zhang vd., 2020).

3.2.4 Standart k- ω Modeli

Standart k- ω modeli, iki denklemlili Reynolds Ortalamalı Navier Stokes temelli türbülans modelleri sınıfında yer almaktadır (Saffman, 1970). Standart k- ω modeli, büyük çalkantıların türbülans frekansı olan ω değerini kullanan bir modeldir. Standart k- ω modelinin en büyük avantajı ise duvar yakınlarında iyi sonuçlar vermesidir (Yusof vd., 2020). Standart k- ω modeli için yürütücü denklem aşağıda verilmiştir (Wilcox, 2008):

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{ob} \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6'da yer alan α ve β değerleri, sırasıyla 0.52 ve 0.09'dur (Yusof vd., 2020).

3.2.5 SST k- ω Modeli

SST k- ω modeli, literatürde standart k- ε modeli ile standart k- ω modelinin kombinasyonu şeklinde karşımıza çıkmaktadır (Menter, 1993). Ters basınç gradyanlarında ve pürüzsüz yüzeylerde kullanılabilen bu model, karışım fonksiyonunu içermektedir (Launder ve Spalding, 1972; Wilcox, 1998; Rezaeiha vd., 2019). SST k- ω modeli için yürütücü denklem aşağıda verilmiştir (Menter, 1994; Fluent, 2011a; Fluent, 2011b; Abd Halim vd., 2018):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho P - \beta^* \rho \omega k \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan β^* sabitinin değeri ise 0.09'dur (Fluent 13, User Guide). Literatürde rüzgâr tüneli ile yapılan HAD analizi çalışmalarında RNG k- ε modeli, en çok tercih edilen türbülans modellerinden birisidir. Özellikle bataryaların rüzgar tüneline zorlanmış taşınım ile soğutulması üzerine yapılan çalışmalarda RNG k- ε Gelişmiş Duvar Yaklaşımı tercih edilmektedir (Li vd., 2013). Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Li vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada silindirik lityum iyon bataryaların hava tüneline zorlanmış taşınımına göre soğutulmasını ele almışlardır. Bu kişiler, hem deneysel hem de sayısal simülasyona başvurmuşlardır. HAD analizlerini gerçekleştirmek için FLUENT programını kullanmışlar ve hem kararlı hem de kararsız hal koşullarında simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. HAD analizlerinde türbülans modeli olarak ise RNG k-ε Gelişmiş Duvar Yaklaşımı'nı kullanmışlardır. Çalışmanın sonunda ise geliştirilen iki boyutlu modelin bataryalar üzerindeki maksimum sıcaklığı tahmin etmede başarılı olduğunu vurgulamışlardır. HAD analizlerinin yapmış oldukları çalışma için yararlı olduğunu da ileri sürmüşlerdir.

He vd. (2014), çoklu bataryaların hava tüneline soğutulmasını incelemişler ve türbülanslı akışı iki boyutlu analiz etmek için RNG k-ε Gelişmiş Duvar Yaklaşımı'nı seçmişlerdir. Kararlı ve kararsız hal koşullarına göre yaptıkları çalışmada modül üzerindeki sıcaklık artışının hava giriş hızı ile ilişkisi olduğunu bildirmişlerdir. 1 m/s hava hızından elde edilen sıcaklık artışının 2.5 m/s hava hızına göre daha yüksek olduğunu ileri sürmüşlerdir. İlâveten; hücreler arası mesafenin de önemli olduğunu vurgulayan bu kişiler, hücreler arası mesafenin 5 mm'den 17 mm'ye çıkmasının bazı hücrelerde sıcaklık artışını bir nebze düşürdüğünü de vurgulamışlardır. Pompa gücünün hava hızı ile üstel değiştiğini açıklamışlar ve HAD analizlerini genel olarak başarılı bulmuşlardır.

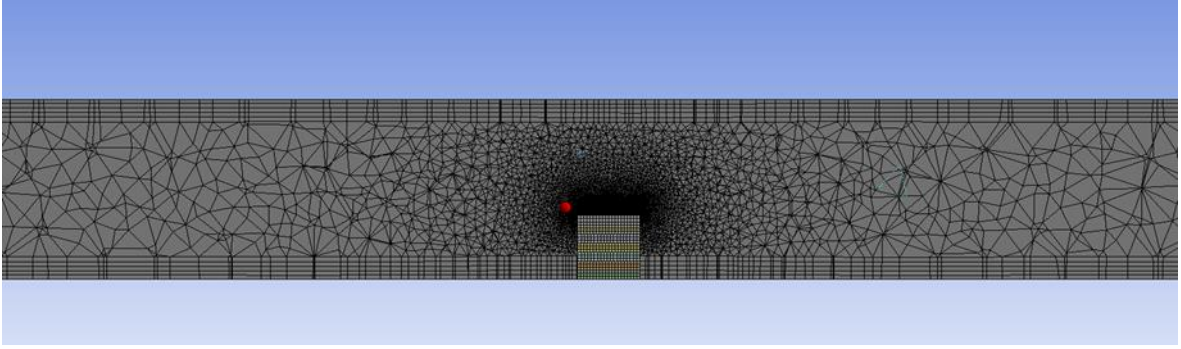
Yukarıda yer alan çalışmalar incelendiğinde RNG k-ε Gelişmiş Duvar Yaklaşımı, bataryaların hava tüneline zorlanmış taşınım ile soğutulmasında oldukça iyi sonuçlar veren bir türbülans modeli olarak karşımıza çıkmaktadır (He vd., 2014). Bu tez kapsamında HAD analizleri için RNG k-ε Gelişmiş Duvar Yaklaşımı, kullanılmıştır.

3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizlerinde Kullanılan Ağ Yapısı ve Hassasiyet Analizleri

3.3.1 Batarya Modellerine Ağ Atılması ve Sınır Şartları

Tez kapsamında batarya modellerinde ağ yapısı oluşturmak için ANSYS 21 programı kullanılmıştır. ANSYS, sonlu hacim yöntemine dayanan hem kararlı hem de kararsız analiz yapılmasına olanak sağlayan bir sayısal simülasyon programıdır (Xia ve Sun, 2002). ANSYS 21 programı yardımıyla batarya modellerinde ağ yapısı oluşturulurken tetrahedral ve hegzahedral elemanlar kullanılmıştır. Tetrahedral ve hegzahedral elemanlar, en çok tercih edilen eleman türlerindedir. Hegzahedral elemanlar, kalite bakımından tetrahedral

elemanlara göre daha avantajlıdır. Tetrahedral elemanlar ise kompleks geometrilere kullanımı kolay olan eleman türlerindedir (Jeong ve Seong, 2014). Elde edilen sonuçların hassasiyet ve doğruluğu açısından cidar yakınlarına ince ağ atılmıştır (Abobaker vd., 2020). Şekil 3.5’de 3. batarya modeli için 30 mm eleman boyutunda atılan ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 3.5: 3. batarya modeli için 30 mm eleman boyutunda atılan ağ yapısı.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde analiz sonuçlarının doğruluğu açısından sınır şartları, büyük bir öneme sahiptir. Özellikle, ağ yapısı oluşturulurken boyutsuz duvar uzunluğunu temsil eden y^+ değeri, önemli bir parametredir. y^+ değerinin doğru aralıkta olması, analiz sonuçlarına doğrudan etki etmektedir. RNG k- ϵ Gelişmiş Duvar Yaklaşımı için duvar yakınlarında $y^+ \leq 1$ olacak şekilde sınır tabaka kalınlığı belirlenmiştir (Salim ve Cheah, 2009; Liu vd., 2012; Gopalakrishnan ve Disimile, 2016). y^+ değerlerinin dışında; kullanılan akışkan, çözüm algoritması, çözüm derecesi, türbülans modeli, kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri, akışkanın giriş hızı ve sıcaklığı da büyük öneme sahiptir (Lo vd., 2013; Yetik, 2020). Literatürde yer alan HAD analizleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde SIMPLE algoritması, en çok tercih edilen çözüm algoritmalarından birisidir. SIMPLE algoritması, simülasyonlarda daha az çözüm süresi gerektiren bir algoritma olduğu için HAD analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Robertson vd., 2015). Yine, literatürde yer alan HAD analizi ile ilgili çalışmaların çoğunluğunda ikinci dereceden çözüm kullanılmıştır (Yetik ve Karakoç, 2021). İnsansız hava araçlarının çalışma sıcaklıklarının 263 K ile 323 K arasında değiştiği göz önüne alınırsa batarya soğutulmasında kullanılan ana akışkan olan havanın giriş sıcaklığı 268 K, 273 K, 278 K ve 283 K olarak ele alınmıştır (Hernandez-Lopez vd., 2013). Uluslararası

Standart Atmosfer Tablosundan elde edilen verilere göre bu sıcaklık değerleri, 790 – 3110 m yüksekliğe tekabül etmektedir (Uluslararası Standart Atmosfer Tablosu).

Aşağıda Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de sırasıyla analizlerde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri ve analiz sınır şartları verilmiştir (Li vd., 2013; Maleki vd., 2014; Panchal vd., 2016; Salloomi ve Al-Sumaidae, 2017; Yetik, 2020):

Tablo 3.2: HAD analizlerinde kullanılan malzemeler ve termofiziksel özellikleri.

Özellik / Malzeme	Batarya	Alüminyum 7075
Yoğunluk (kg/m ³)	2101	2805
Özgül Isı (J/kgK)	1200	850
Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	30	130

Tablo 3.3: HAD analizlerinde kullanılan sınır şartları.

Sınır Şartları	Kullanılan Değerler/Parametreler
Ana Akışkan	Hava
Kullanılan Türbülans Modeli	RNG k-ε Gelişmiş Duvar Yaklaşımı
Batarya Deşarj Oranı	1C, 2C, 3C
Hava Giriş Hızı (m/s)	2.32, 3.2, 4.2
Hava Giriş Sıcaklığı (K)	268, 273, 278, 283
Çözüm Algoritması	SIMPLE
Çözümlerin Derecesi	İkinci Derece

3.3.2 Ağ Kalitesinin Belirlenmesi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizlerinde ağ yapısında yer alan elemanların boyutları kadar kaliteleri de önemli bir yere sahiptir. Eleman kalitesi belirlenirken iki önemli parametre öne çıkmaktadır. Bu parametreler sırasıyla çarpıklık ve ortogonal kalitedir (Haldar vd., 2022). Çarpıklık, kısaca üçgen veya kare eleman yapısından ıraksama olarak tanımlanmaktadır. Ortogonal kalite ise çarpıklıktan farklı olarak eleman yüzeyi ile merkezi arası mesafe ile komşu elemanlar arası mesafenin oranı olarak karşımıza çıkmaktadır (Korkmaz ve Kaçar, 2021). Bu iki parametrenin belirli aralıklarda olması eleman kalitesine doğrudan etki etmektedir. Açık literatürde yer alan çalışmalarda çarpıklık faktörünün 0.94’ün üzerinde olmaması ve ortogonal kalitenin de 0.15’in altına

düşmemesi önerilmektedir (Fatchurrohman ve Chia, 2017). Batarya modelleri için ağ yapısı oluşturulurken bu değerler göz önünde bulundurulmuştur. Aşağıda Tablo 3.4, Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de batarya modelleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların sırasıyla maksimum çarpıklık, ortalama çarpıklık, minimum ortogonal kalite ve ortalama ortogonal kalite değerleri verilmiştir.

Tablo 3.4: HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların maksimum çarpıklık değerleri.

Batarya Modeli/ Eleman Boyutu	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm	10 mm
1. Model	0,84333	0,84479	0,83651	0,8421	0,83316
2. Model	0,83156	0,84973	0,84428	0,80404	0,84876
3. Model	0,84791	0,88559	0,90342	0,91753	0,86215
4. Model	0,84112	0,8474	0,89716	0,87615	0,8624
5. Model	0,84622	0,83857	0,86847	0,84549	0,84233
6. Model	0,84621	0,83506	0,86322	0,85133	0,84943
7. Model	0,83222	0,84462	0,87578	0,86407	0,8568
8. Model	0,84023	0,85911	0,89292	0,85737	0,84912

Tablo 3.5: HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların ortalama çarpıklık değerleri.

Batarya Modeli/ Eleman Boyutu	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm	10 mm
1. Model	0,21829	0,21516	0,20952	0,20869	0,21007
2. Model	0,21502	0,20942	0,20477	0,20413	0,20669
3. Model	0,23485	0,23379	0,22843	0,22291	0,22373
4. Model	0,23161	0,23197	0,2283	0,22488	0,22617
5. Model	0,2408	0,2403	0,22913	0,22547	0,2245
6. Model	0,23911	0,23716	0,23083	0,22669	0,23105
7. Model	0,24308	0,23763	0,22926	0,22543	0,22553
8. Model	0,23938	0,2371	0,2293	0,2258	0,22864

Tablo 3.6: HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların minimum ortogonal kalite değerleri.

Batarya Modeli/ Eleman Boyutu	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm	10 mm
1. Model	0,15667	0,15521	0,16349	0,1579	0,16684
2. Model	0,16844	0,15027	0,15572	0,19596	0,15124
3. Model	0,17317	0,15844	0,15648	0,15397	0,16192
4. Model	0,15888	0,17938	0,15482	0,16555	0,15697
5. Model	0,15378	0,16143	0,1747	0,15451	0,15767
6. Model	0,15379	0,16494	0,1807	0,17671	0,15057
7. Model	0,18006	0,15902	0,18707	0,15102	0,15174
8. Model	0,15977	0,16045	0,18212	0,18707	0,15088

Tablo 3.7: HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısındaki elemanların ortalama ortogonal kalite değerleri.

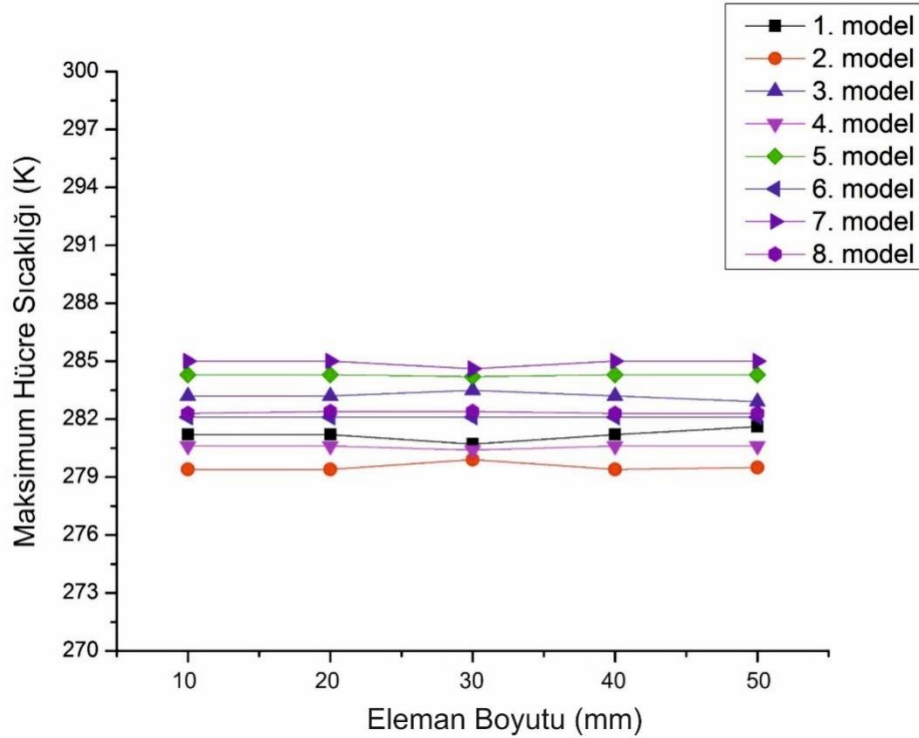
Batarya Modeli/ Eleman Boyutu	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm	10 mm
1. Model	0,78328	0,78823	0,7949	0,79485	0,79275
2. Model	0,78503	0,79142	0,79937	0,79864	0,79568
3. Model	0,77349	0,77693	0,78312	0,7871	0,78402
4. Model	0,77582	0,77865	0,78374	0,78593	0,7826
5. Model	0,77075	0,77231	0,78371	0,78671	0,78548
6. Model	0,77279	0,77545	0,7822	0,78493	0,77941
7. Model	0,76831	0,77464	0,78362	0,78655	0,78394
8. Model	0,77092	0,77426	0,78291	0,78566	0,78162

Tablo 3.4, Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7 incelendiğinde batarya modelleri için atılan ağ yapısındaki elemanların en düşük çarpıklık ve ortogonal kalite değerlerinin kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmektedir. İlaveten; batarya modelleri için atılan ağ yapısındaki elemanların ortalama çarpıklık değerleri mükemmel olup ortalama ortogonal kaliteleri ise çok iyi bir derecededir. Sonuç olarak, bu batarya modelleri için atılan ağ yapısının kaliteli olduğu anlaşılmaktadır (Fatchurrohman ve Chia, 2017; Patil vd., 2020).

3.3.3 Ağ Hassasiyet Analizleri

ANSYS ile yapılan sayısal simülasyonlarda elde edilen sonuçların doğruluğu açısından ağ hassasiyet analizlerinin yapılması gerekmektedir. Ağ hassasiyet analizlerinde yer alan modeller, farklı eleman boyutlarında ve sayılarında belirlenen sınır şartları kullanılarak analiz edilmekte ve elde edilen sonuçlar arasındaki farklar incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar arasındaki farka göre ağ yapısının doğruluğu anlaşılmaktadır. Çıkan sonuçlara göre eleman boyutu ve sayısı seçilmektedir (Ejeh vd., 2019).

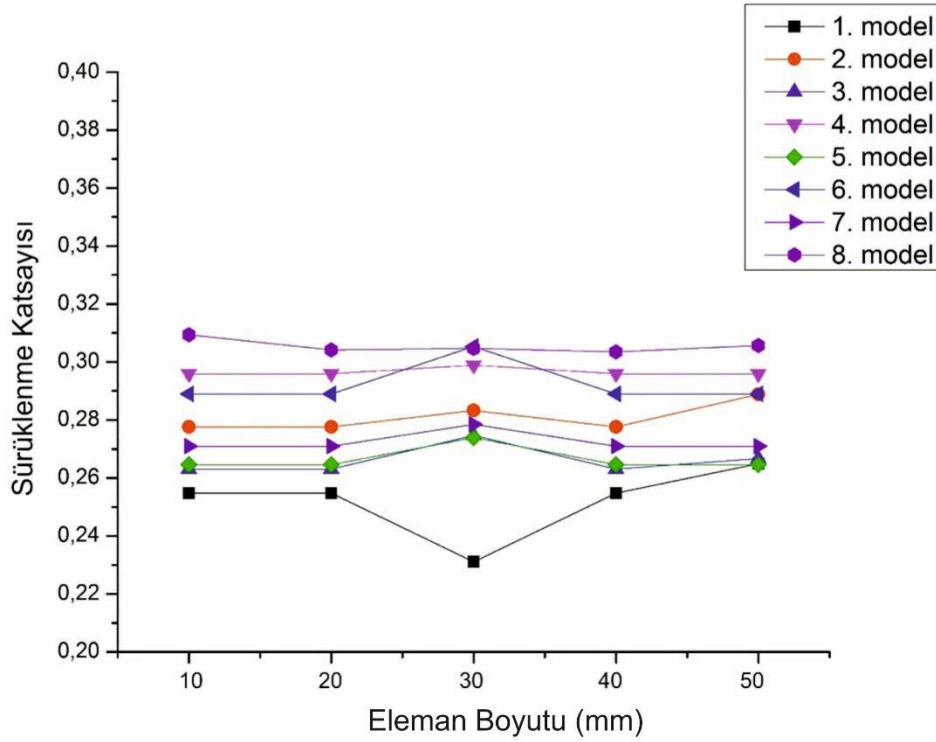
Bu tez kapsamında sayısal simülasyon sonuçları incelenmiş ve çeşitli eleman sayısı ve boyutlarına göre maksimum hücre sıcaklıkları ve sürüklenme katsayıları karşılaştırılmıştır. Aşağıda Şekil 3.6'da kararlı hal koşullarında ağ hassasiyet analizleri için elde edilen maksimum hücre sıcaklıklarının değişimi görülmektedir.



Şekil 3.6: Batarya modelleri için kararlı hal koşullarında eleman sayılarına göre maksimum hücre sıcaklıklarının değişimi.

Şekil 3.6'da verilen bulgular incelendiğinde eleman boyutlarına göre batarya modellerinin maksimum hücre sıcaklıklarının fazla değişmediği görülmektedir. Bu değişim oranı, bize ağ bağımsızlık analizlerinin başarılı olduğunu göstermektedir (Alaimo vd., 2015; Ahmed

vd., 2021). Şekil 3.7’de ise kararlı hal koşullarında ağ hassasiyet analizleri için elde edilen sürüklenme katsayılarının değişimi görülmektedir.



Şekil 3.7: Batarya modelleri için kararlı hal koşullarında eleman sayılarına göre sürüklenme katsayılarının değişimi.

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere eleman boyutlarına göre sürüklenme katsayılarında da birtakım değişiklikler mevcuttur. Tıpkı, eleman boyutlarına göre maksimum hücre sıcaklıklarının değişim grafiklerinde olduğu gibi sürüklenme katsayılarında da ağ hassasiyet analizleri tercih edilmiştir. Ağ hassasiyet analizlerinde hücre sıcaklıkları dikkate alınmıştır (Alaimo vd., 2015; Ahmed vd., 2021). Ağ hassasiyet analizleri ile elde edilen bulgulara göre HAD analizleri kapsamında 30 mm eleman boyutu seçilmiştir.

3.4 Deney Tasarım Yöntemleri

3.4.1 Taguchi Yöntemi

Taguchi Yöntemi, deney tasarımında çoklu karar vermeye olanak sağlayan ve özellikle endüstriyel alanda ürün kalitesine etki eden faktörleri ortaya çıkaran bir yöntemdir (Hamzaçebi ve Kutay, 2003; Bilga vd., 2016). Taguchi Yöntemi, çoklu karar verme ile birlikte optimizasyon ve performans geliştirmeye de olanak sağlamaktadır. Bir ürünün kalitesinin üretimden önceki aşamalarda da olabileceğine dikkat çeken Taguchi, istatistiksel kontrol faktörünü de öne çıkarmıştır (Taguchi ve Wu, 1979). Özellikle bu kontrol

faktöründe kontrol edilemeyen değişkenlerin sayısının azaltılması gerektiğini savunmuştur (Margavio vd., 1993; Jeyapaul vd., 2005). Taguchi Yöntemi, günümüzde kalite yönteminde, endüstriyel alanda ve tıp sektöründe kullanılmaktadır (Aly vd., 1990; Chen ve Sun, 1999). İlâveten; bu yöntem, kimya sektöründe, metalurjide ve yapay sinir ağlarında da kullanılmaktadır (Saigal ve Leisk, 1992; Khaw vd., 1995; Chen ve Sheui, 2002).

3.4.2 Yüzey Yanıt Metodu

Yüzey yanıt metodu, deneysel tasarım için analizlerde kullanılan ve deneylerin girdileri ile çıktıları arasında matematiksel bir denklem kurmaya yarayan bir metottur (Box ve Wilson, 1992). Yüzey yanıt metodu, deney tasarımında çoklu bağımsız değişkenleri içerdiği gibi istatistiksel anlamda da analize olanak sağlar (Chelladurai vd., 2021). Yapılan analizlerde elde edilen denklemler, birinci dereceden olabildiği gibi ikinci dereceden denklemler de olabilir (Khuri ve Mukhopadhyay, 2010). Esneklik ve optimum noktanın belirlenebilir olması, ikinci dereceden denklemlerin avantajları arasındadır (Thompson, 1982; Koç ve Kaymak-Ertekin, 2010).

3.5 Değer Optimizasyonu

Değer optimizasyonu, bir üretimde veya bir deneyde risk faktörlerinin belirlenmesi ve en optimum çözümlerin üretilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Değer optimizasyonu, deneysel değerlerin analizi ve yönetimi yapılması ve oluşacak risk durumlarının önüne geçilmesi esasına dayanmaktadır. Belirlenen bir değere göre risk faktörleri belirlenir ve bu değere göre değer analizi ve değer yönetimi yapılır. Değer optimizasyonu günümüzde çoğunlukla ekonomi ve üretim alanında kullanılmaktadır (Krehl & Partner Websitesi; Zajac ve Olsen, 1993; Dahooie vd., 2020).

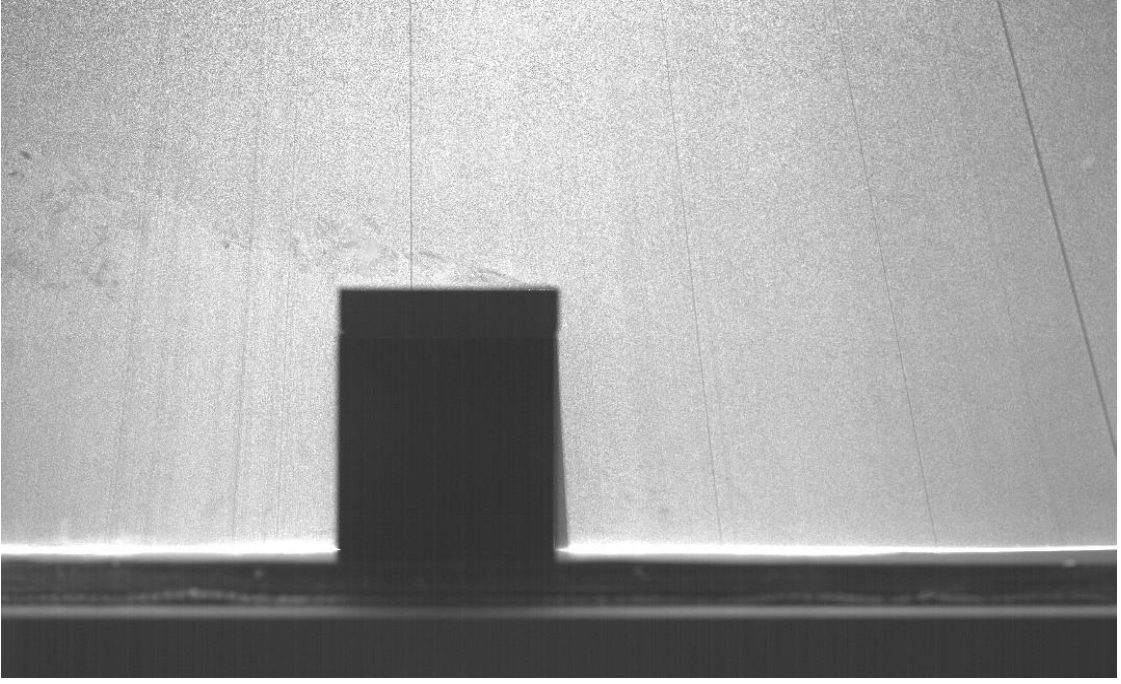
4. BULGULAR

4.1 Parçacık Görüntülemeli Hızölçer Cihazından Elde Edilen Bulgular

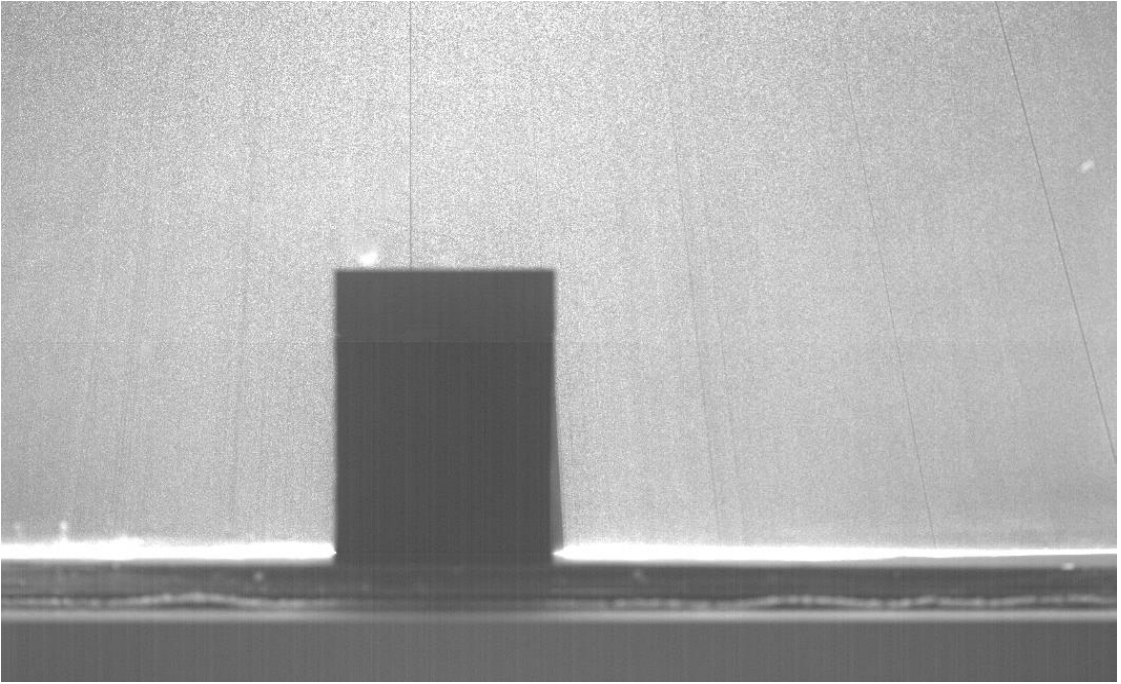
Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan deneylerde fandan çıkan hava, tünele gönderilmiş; lazer, kamera ve izleyici partiküllerin kullanılması ile batarya modelleri etrafındaki akış yapısı, hız ve vektör haritaları elde edilmiştir. Deneylerde gerçek bataryanın lazer ile teması tehlikeli olduğundan üç boyutlu yazıcıdan imal edilmiş batarya modelleri kullanılmıştır (Wang vd., 2012; Shironita vd., 2021). Toplamda dört ayrı batarya modeli için üç ayrı fan frekansında deneyler yapılmış ve her bir ölçüm için 60 adet görüntü alınmıştır. Alınan görüntüler, Dynamic Studio 2015a programında Adaptif Korelasyon metodu ile işlenmiştir. İşlenen görüntülerden hız haritaları, vektör haritaları ve vortisite konturları elde edilmiştir. PIV cihazı ile alınan ölçümlerde yapılan kabuller aşağıda verilmiştir:

1. Gerçek batarya yerine üç boyutlu yazıcıdan imal edilmiş batarya modeli kullanılmıştır.
2. Batarya modeli imal edilirken gerçek bataryanın veri listesindeki ölçüleri, esas alınmıştır.
3. Batarya modellerinin üst yüzeyine yapıştırılan kanatçıklar, paslanmaz alüminyumdan imal edilmiştir.
4. Kanatçıkların boyutlandırılmasında kanatçık yüksekliği, kanatçıklar arası mesafe ve kanatçık kalınlığı olmak üzere üç temel parametre esas alınmıştır.

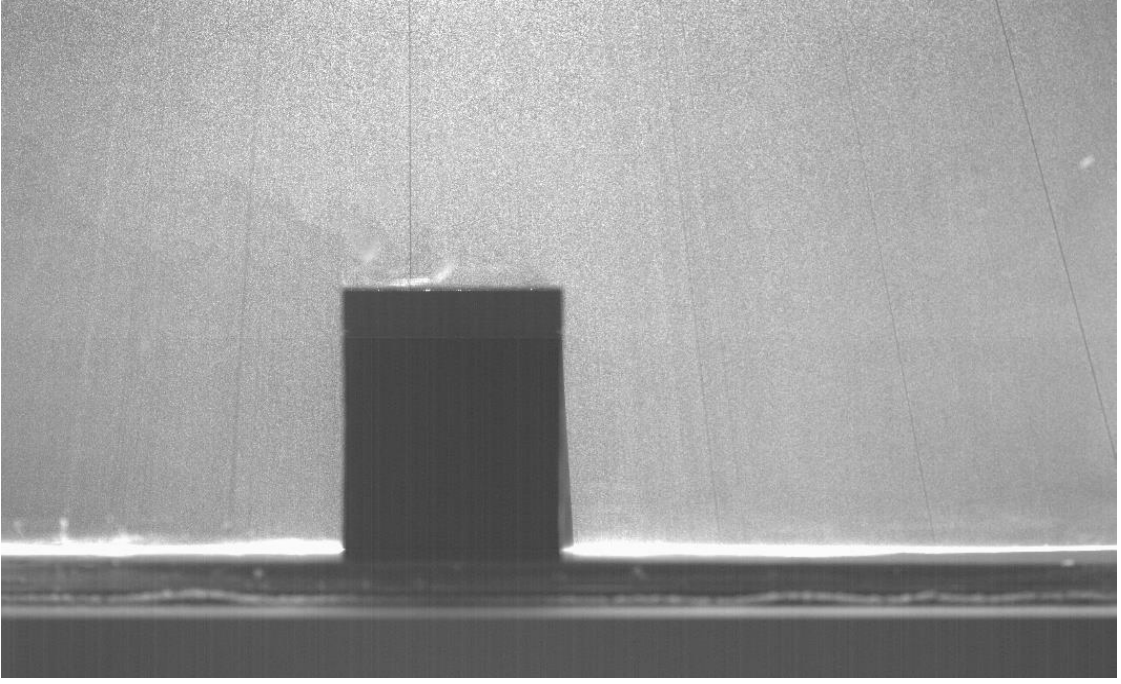
20 Hz fan frekansı için batarya modelleri üzerinde alınan ham görüntüler sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.5'de ise 20 Hz fan frekansı için 1.batarya modeli etrafındaki eksenel hız haritaları görülmektedir.



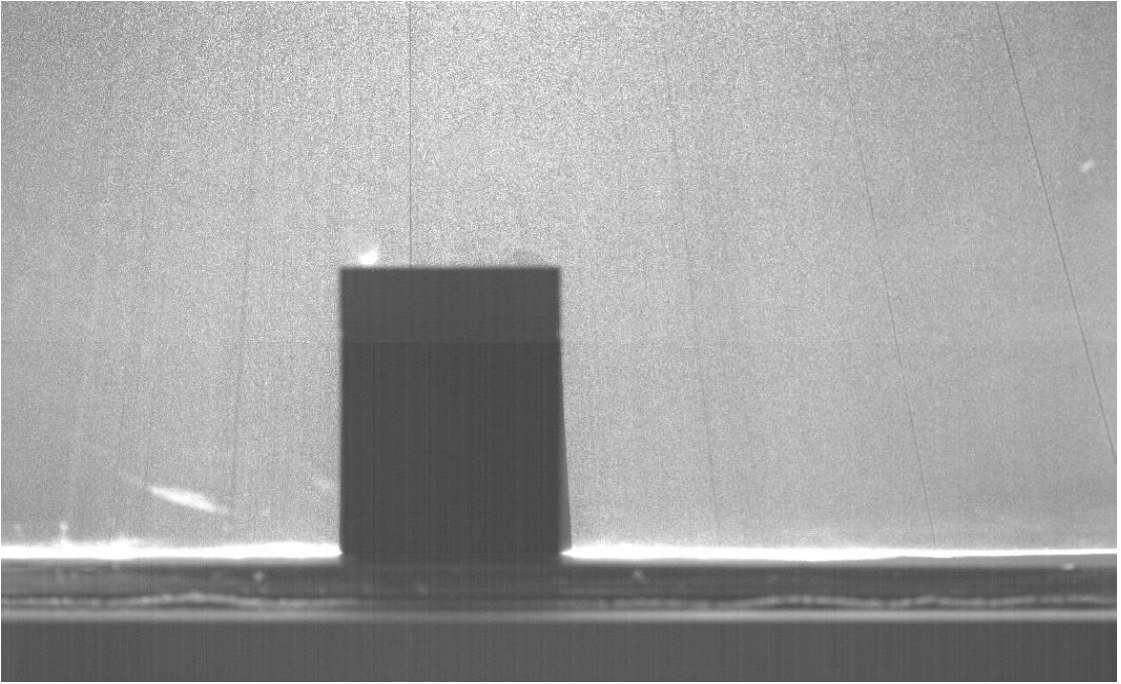
Şekil 4.1: 1.batarya modeli için 20 Hz'de alınan ham görüntü.



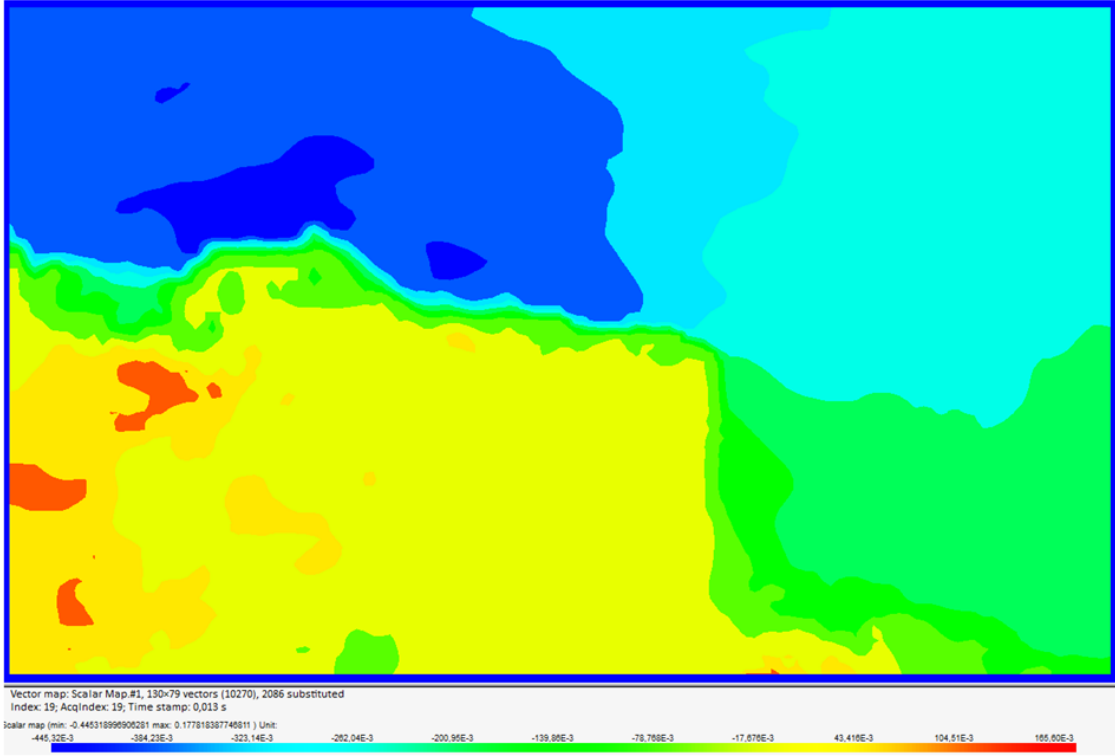
Şekil 4.2: 2.batarya modeli için 20 Hz'de alınan ham görüntü.



Şekil 4.3: 3.batarya modeli için 20 Hz'de alınan ham görüntü.



Şekil 4.4: 4.batarya modeli için 20 Hz'de alınan ham görüntü.



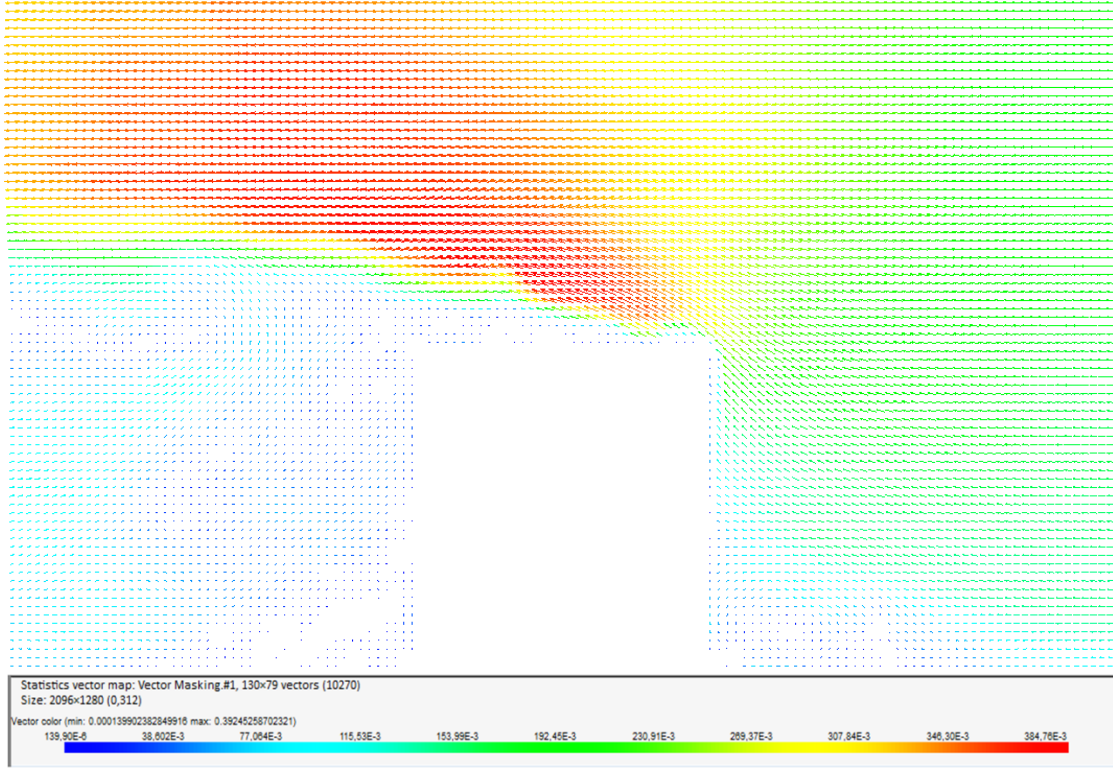
Şekil 4.5: 1.batarya modeli için 20 Hz’de görüntülenen aksenal hız haritası.

Şekil 4.5’de verilen aksenal hız haritasına bakıldığında dört batarya modeli için de elde edilen aksenal hız dağılımlarının maksimum değerlerinin, $-x$ yönünde olduğu gözlenmiştir. 1. batarya modeli için elde edilebilecek maksimum aksenal hız değeri yaklaşık 4.45 m/s’dir. 20 Hz fan frekansında dört batarya modelinde elde edilebilecek maksimum hız değerleri arasında çok fazla fark olmadığı gözlenmiştir.

Batarya modellerinin arkasında oluşan resirkülasyon bölgeleri ele alındığında $+x$ yönünde resirkülasyon bölgelerinin hızları, maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Bu bağlamda; en yüksek hıza sahip resirkülasyon bölgesi 1. batarya modelinde gözlenmiş olup değeri yaklaşık olarak 1.65 m/s’dir. Dört batarya modelinin arkasındaki resirkülasyon bölgelerinin hızları hemen hemen birbirine eşittir.

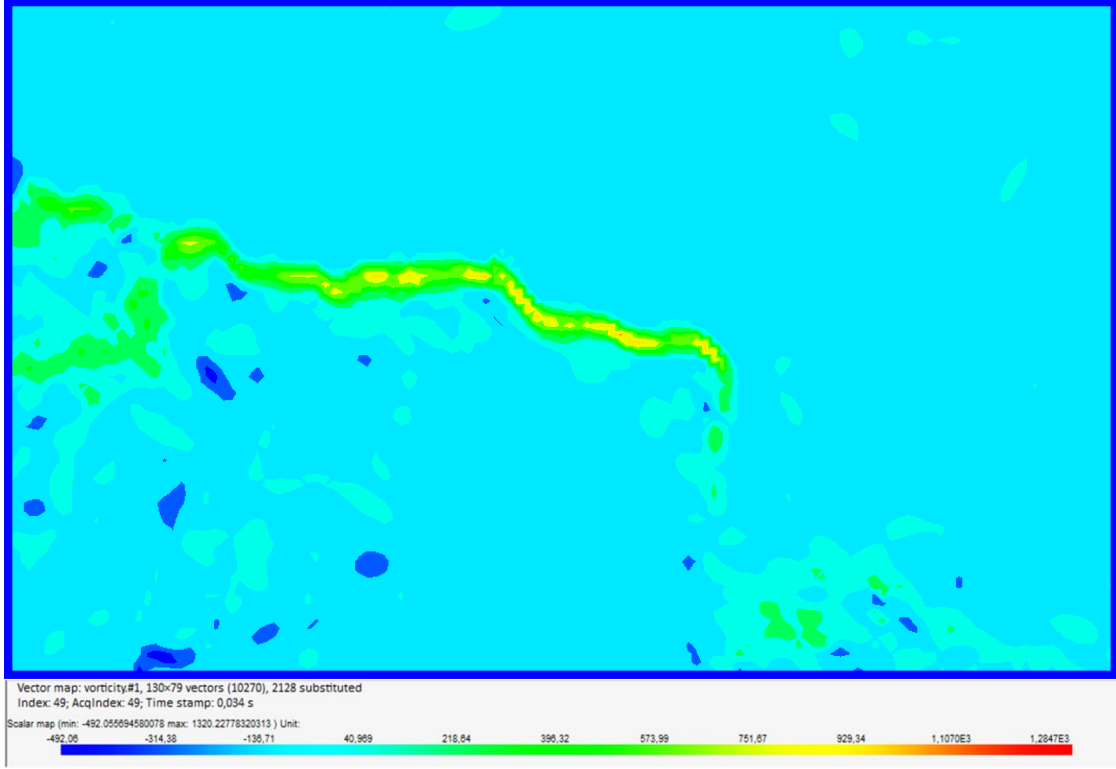
Eksenal hız haritaları ile karşılaştırıldığında bileşke hız haritalarının aksenal hız haritaları ile büyük ölçüde benzer olduğu gözlenmiştir. y eksenini boyunca olan hız değişimleri çok fazla olmadığı için aksenal hız haritaları ile bileşke hız haritaları arasında çok fazla fark yoktur. Elde edilebilecek maksimum hız değerleri ele alındığında 1. batarya modelinde elde edilen maksimum hız değerleri diğer batarya modellerine nazaran biraz daha fazladır.

Hız değerleri arasındaki bu fark, gönderilen ana akımın türbülanslı olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak; akım türbülanslı olmasına rağmen batarya modellerinin küçük olmasından dolayı hız değerleri arasındaki farkın çok fazla olmadığı görülmektedir. Şekil 4.6'da 20 Hz fan frekansında 1. batarya modeli etrafında oluşan vektör haritaları verilmiştir.



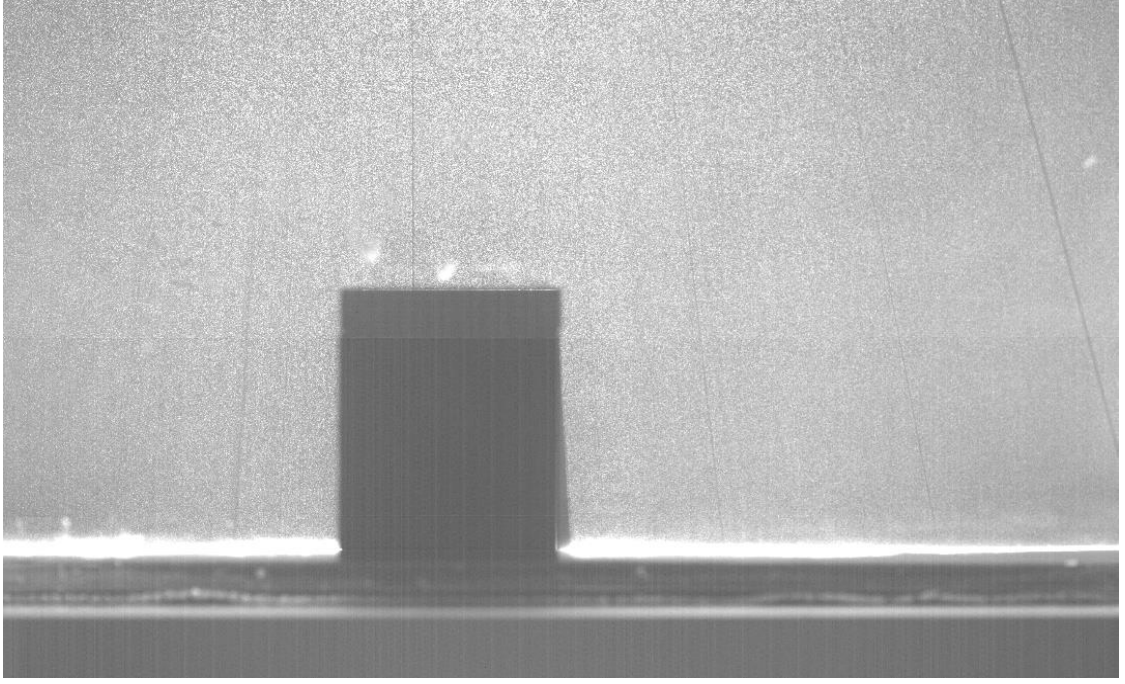
Şekil 4.6: 1.batarya modeli için 20 Hz'de elde edilen vektör haritası.

Şekil 4.6'da verilen vektör haritası incelendiğinde 1.batarya modeli etrafındaki vektörlerin hız değerlerinin 3.8 m/s değerini geçebileceği görülmektedir. Özellikle batarya modelinin arkasında görüntülenen vektör hızlarının en düşük değerde olduğu anlaşılmaktadır. Batarya modelinin arkasındaki vektör hızlarının yaklaşık değeri 1.4 m/s'dir. Şekil 4.7'de ise birinci modelin arkasında ve önünde oluşan vortisite konturları görülmektedir.

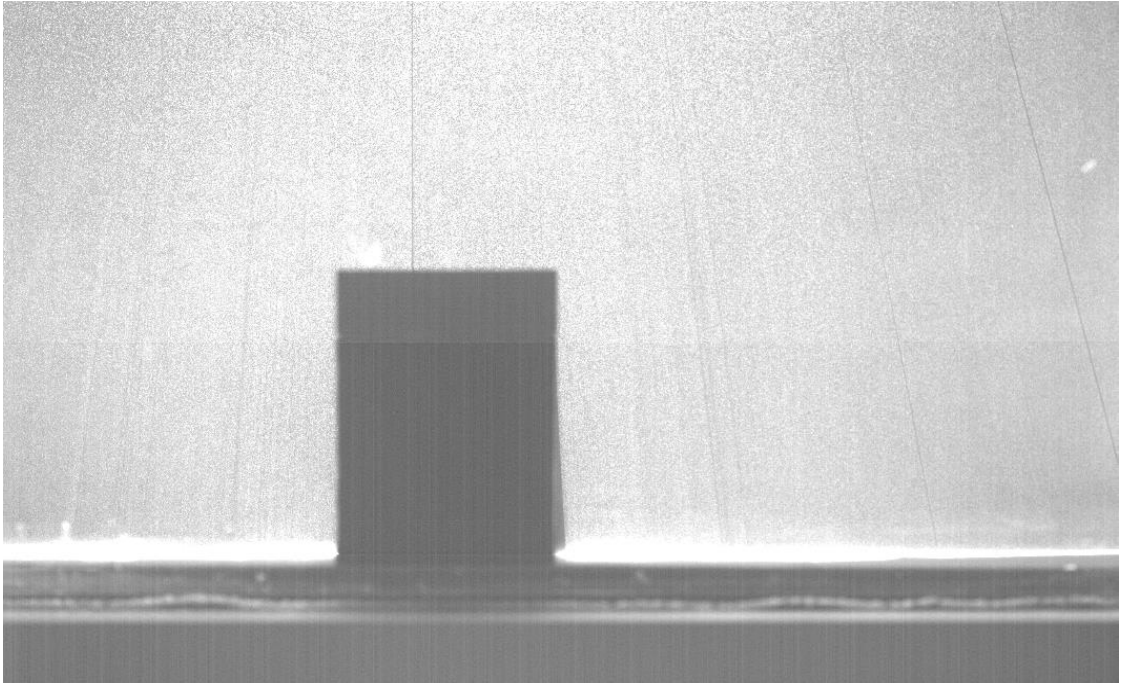


Şekil 4.7: 1.batarya modeli için 20 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.

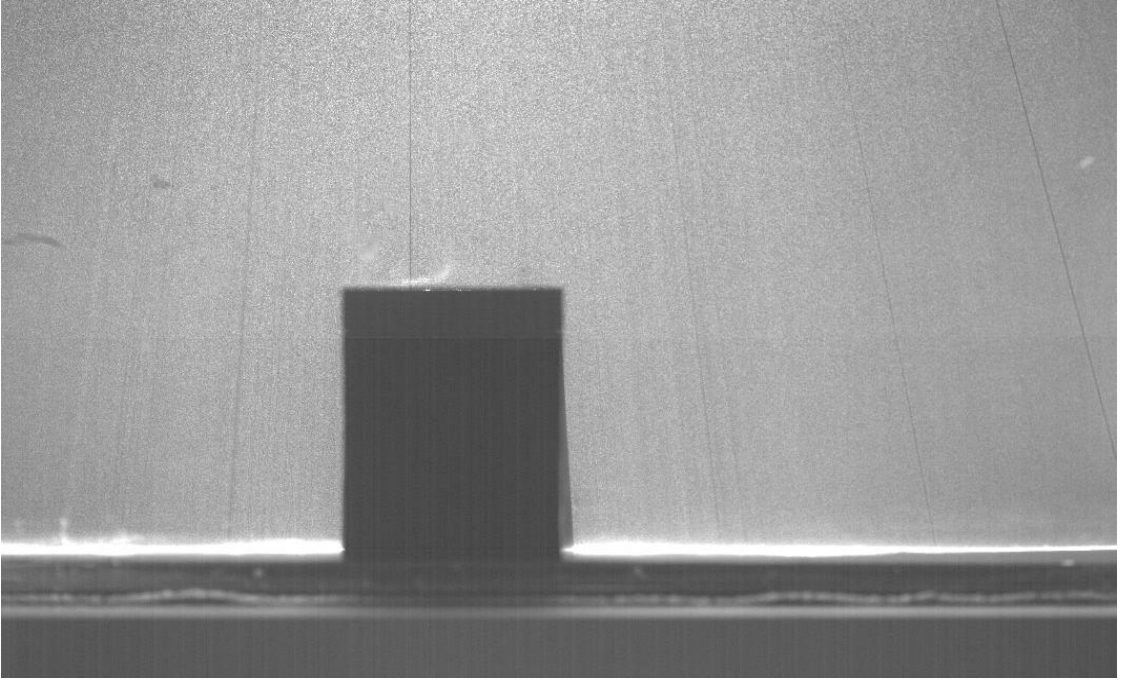
Şekil 4.7’de görüntülenen vortisite konturlarına göre batarya modelinin etrafında oluşan vortisitelerin batarya modelinin serbest yüzeyini takip ettiği anlaşılmaktadır. Batarya modelleri arasında karşılaştırma yapıldığında vortisite konturlarına ait en yüksek hız değerlerinin 1. batarya modeline ait olduğu görülmektedir. Batarya modelleri için vortisite konturlarına ait hız değerleri, yaklaşık olarak 4-5 m/s arasındadır. Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de 30 Hz fan frekansında PIV’de alınan dört batarya modeli için ham görüntüler verilmiştir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de ise Dynamic Studio programında 30 Hz fan frekansı için 2. ve 1. batarya modellerinden elde edilen eksenel ve bileşke hız haritaları görülmektedir.



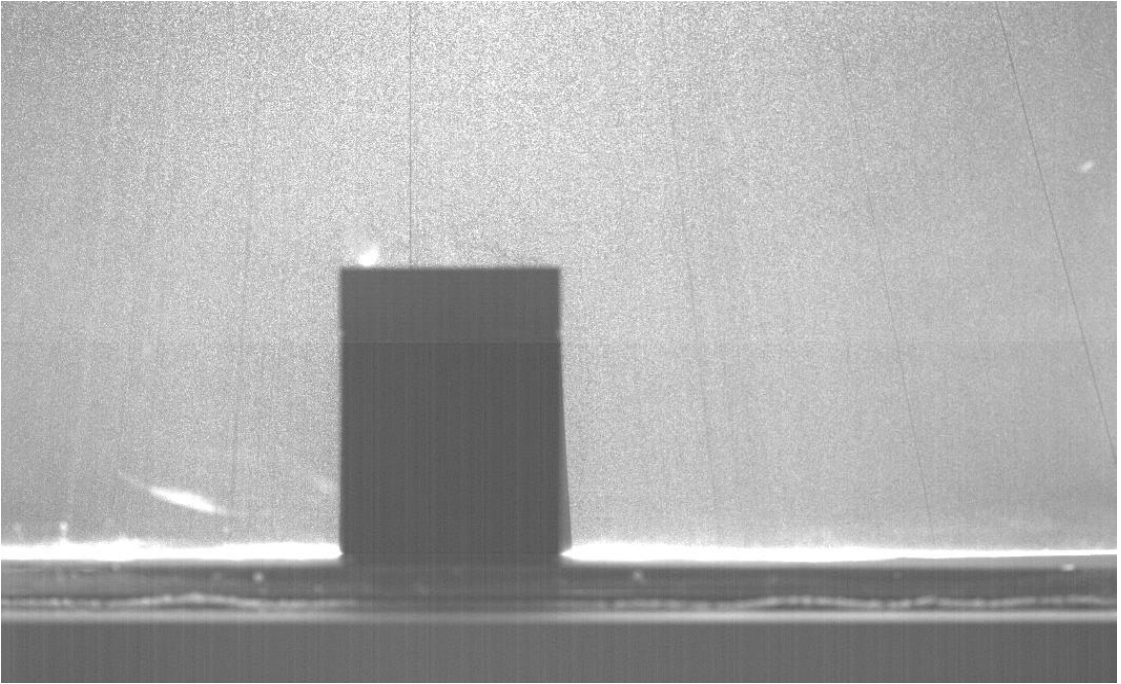
Şekil 4.8: 1.batarya modeli için 30 Hz’de alınan ham görüntü.



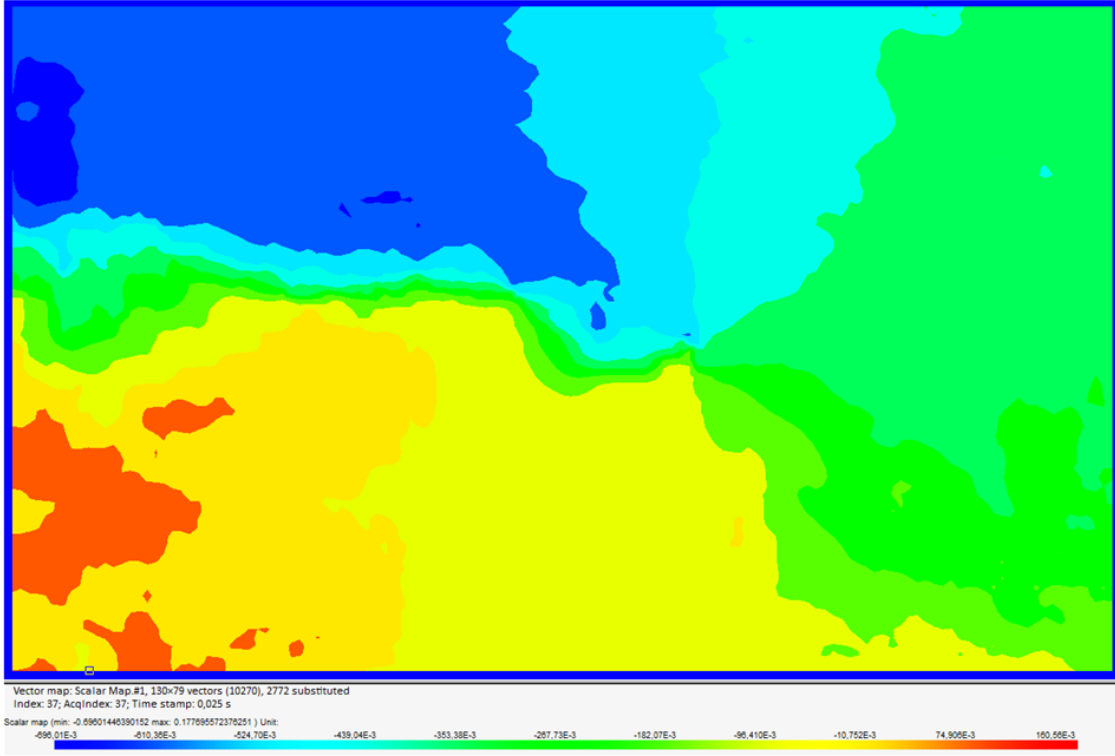
Şekil 4.9: 2.batarya modeli için 30 Hz’de alınan ham görüntü.



Şekil 4.10: 3.batarya modeli için 30 Hz'de alınan ham görüntü.

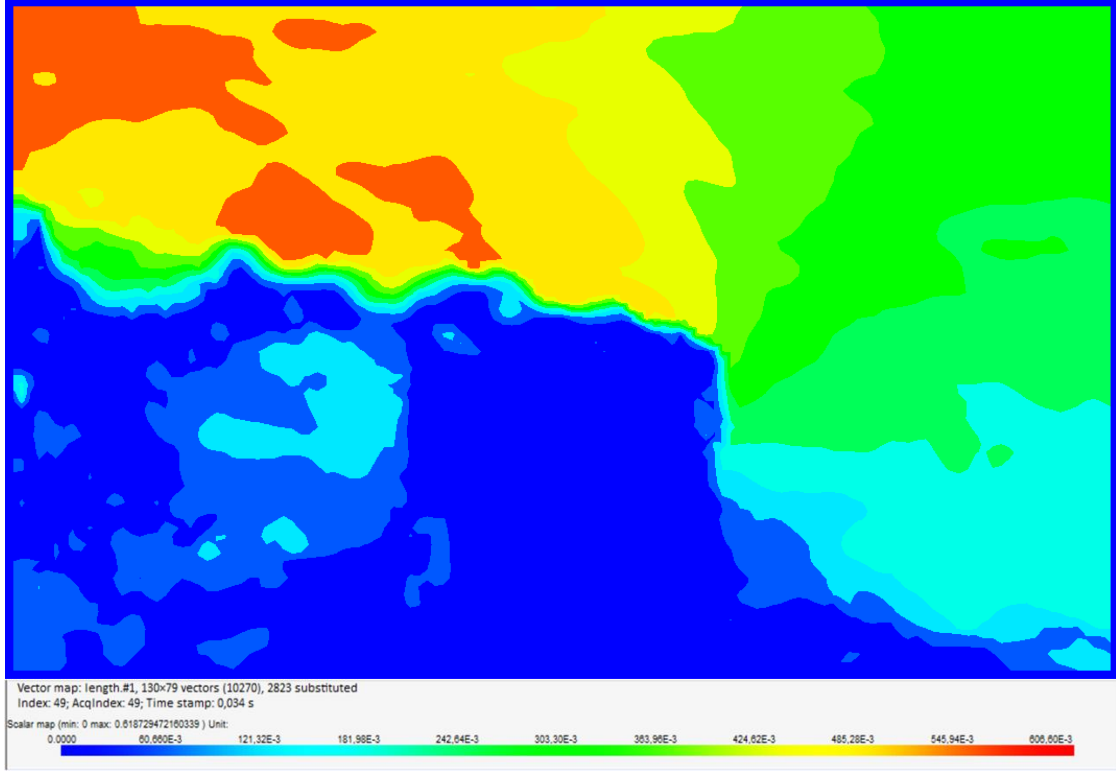


Şekil 4.11: 4.batarya modeli için 30 Hz'de alınan ham görüntü.



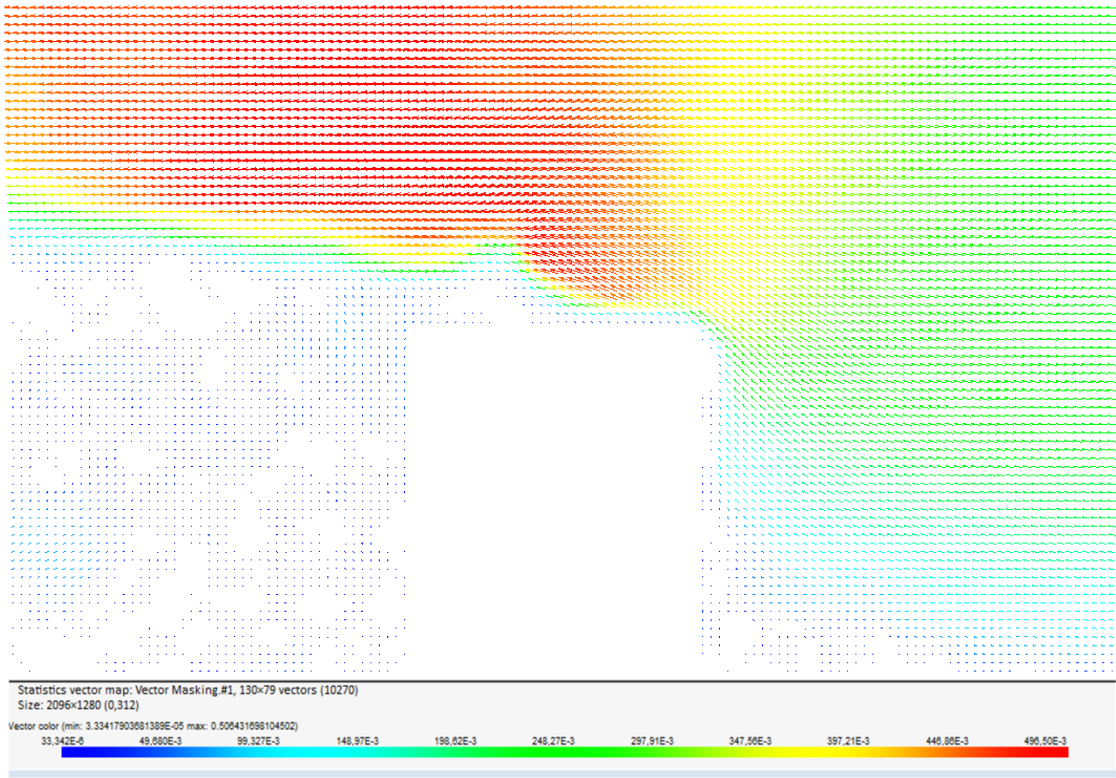
Şekil 4.12: 2. batarya modeli için 30 Hz'de görüntülenen eksenel hız haritası.

Şekil 4.12'de verilen eksenel hız haritası incelendiğinde diğer batarya modellerinde olduğu gibi 2. batarya modeli için de elde edilen eksenel hızların maksimum değerleri, -x yönündedir. 2. batarya modellerinin arkasında oluşan resirkülasyon bölgesi, 30 Hz fan frekansında biraz daha belirgindir. 20 Hz fan frekansı için elde edilen eksenel hız haritalarında olduğu gibi batarya modelinin üzerindeki hızlar, elde edilebilecek maksimum eksenel hızlardır. Bu değer, 2. batarya modeli için 6.96 m/s'dir. İlaveeten; 30 Hz fan frekansı için batarya modellerinden elde edilebilecek eksenel hızların maksimum değerleri arasında çok fazla fark olmadığı da önemli bulgular arasındadır. Dört batarya modelinin arkasında oluşan resirkülasyon bölgeleri karşılaştırıldığında maksimum hız değerleri +x yönünde gözlenmiştir. 2. batarya modeli için bu değer, yaklaşık olarak 1.80 m/s şeklindedir.

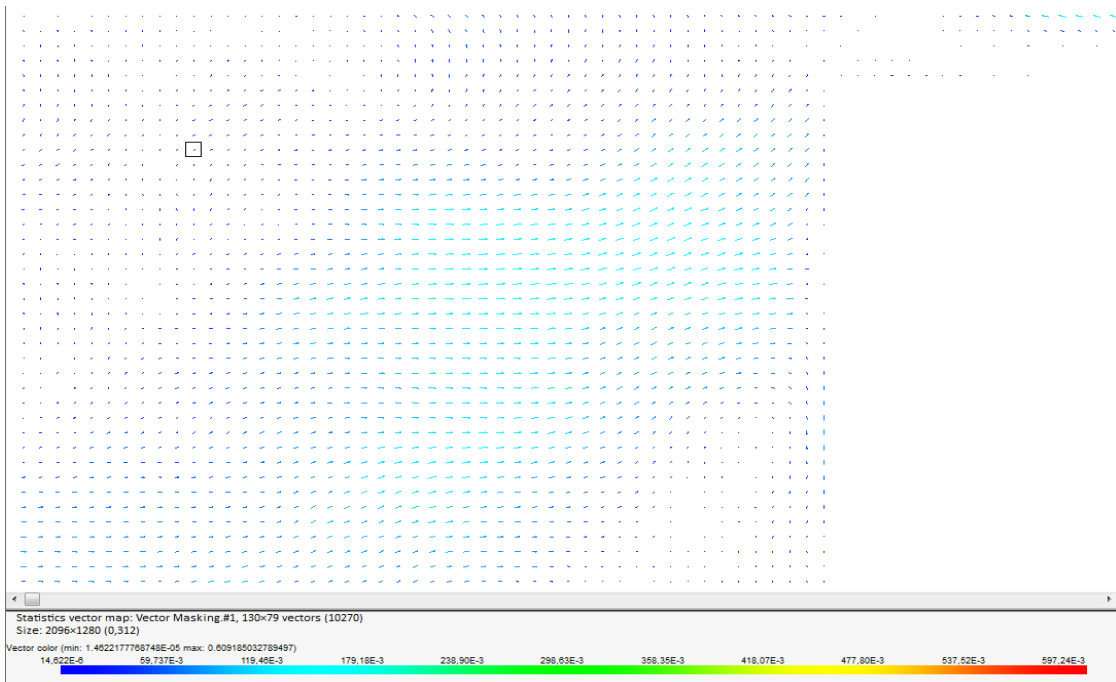


Şekil 4.13: 1. batarya modeli için 30 Hz'de görüntülenen bileşke hız haritası.

Şekil 4.13'de 1. batarya modeli için elde edilen bileşke hız haritasına bakıldığında aksenal hız haritaları ile büyük ölçüde benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu benzerliğin en önemli sebebi ise y eksenindeki hız değişimlerinin x eksenindeki hız değişimlerine göre daha az olmasından kaynaklanmaktadır. 30 Hz fan frekansı için ana akım hızı, 20 Hz frekanstaki hava hızına göre daha yüksek olduğundan elde edilen bileşke hız değerleri 20 Hz frekanstaki hız değerlerine göre daha yüksektir. 1. batarya modeli için bileşke hızların maksimum değerleri yaklaşık 6.1 m/s'dir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de 30 Hz fan frekansı için sırasıyla 3. ve 1. batarya modellerinden elde edilen vektör haritaları verilmiştir.

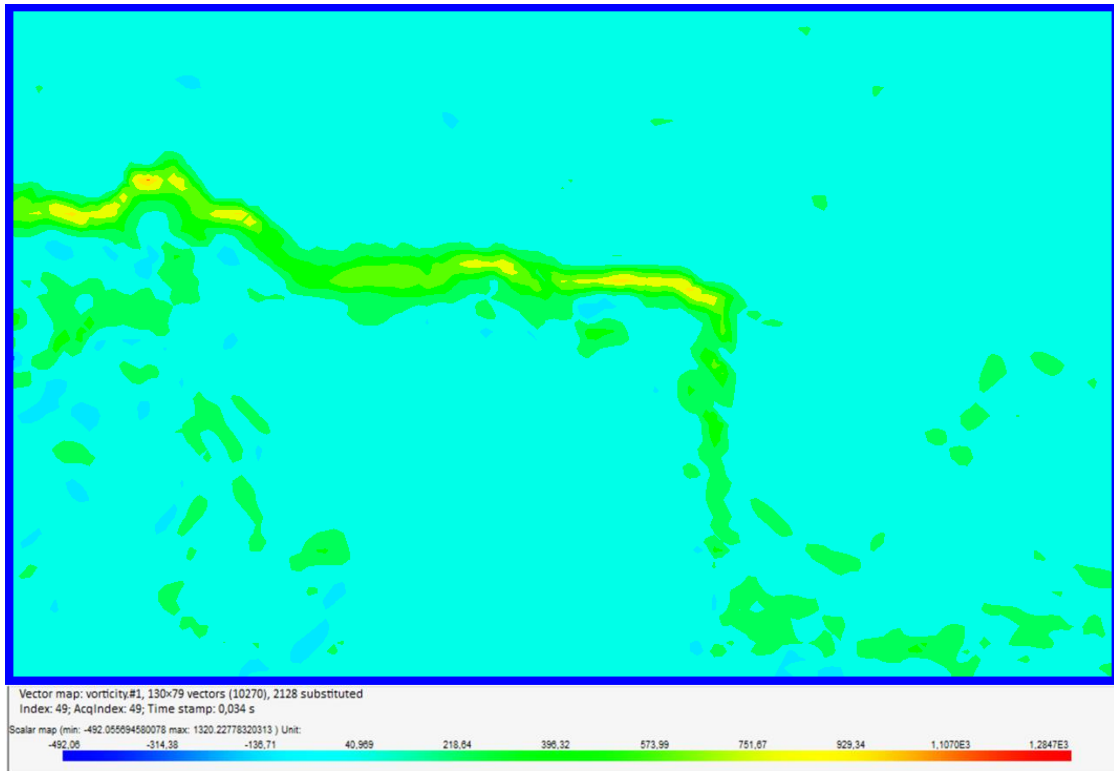


Şekil 4.14: 3.batarya modeli için 30 Hz’de elde edilen vektör haritası.



Şekil 4.15: 30 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.

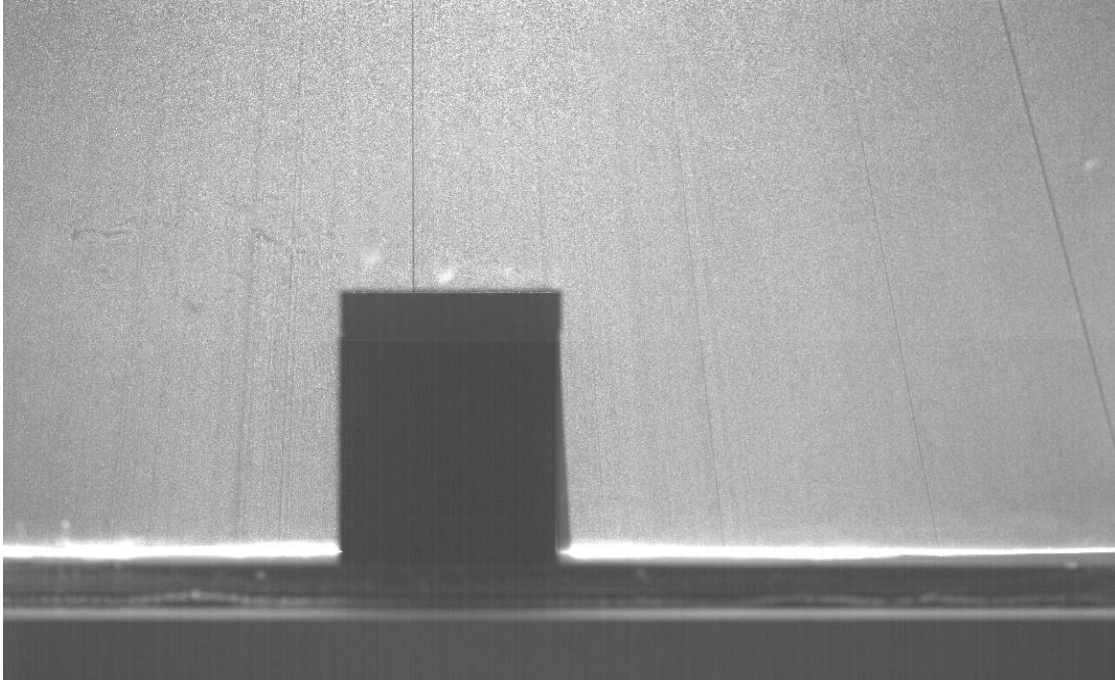
Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilen vektör haritaları incelendiğinde en düşük vektör hızlarının 3. batarya modeline ait olduğu görülmektedir. 30 Hz fan frekansı için dört batarya modelinden elde edilen vektörlerin maksimum hız değeri, yaklaşık olarak 6.04 m/s olarak bulunmuştur. Özellikle türbülans kaynaklı ani hız değişimleri, 1. modelde daha belirgindir. 3. batarya modeli için elde edilen vektör haritalarında batarya modelinin üstünde oluşan küçük akış ayrılması net bir şekilde görülmektedir. 20 Hz fan frekansı için bu akış ayrılması, belirgin değilken; 30 Hz fan frekansında bu durum daha belirgin bir hal almaktadır. 30 Hz frekans için batarya modellerinin arkasında ve önünde oluşan girdap vektörlerinin hız değerlerinin, 20 Hz frekans için oluşan girdap vektörlerindeki hız değerlerine göre biraz daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.16’da 30 Hz fan frekansında 4. batarya modelinden elde edilen vortisite konturları görülmektedir.



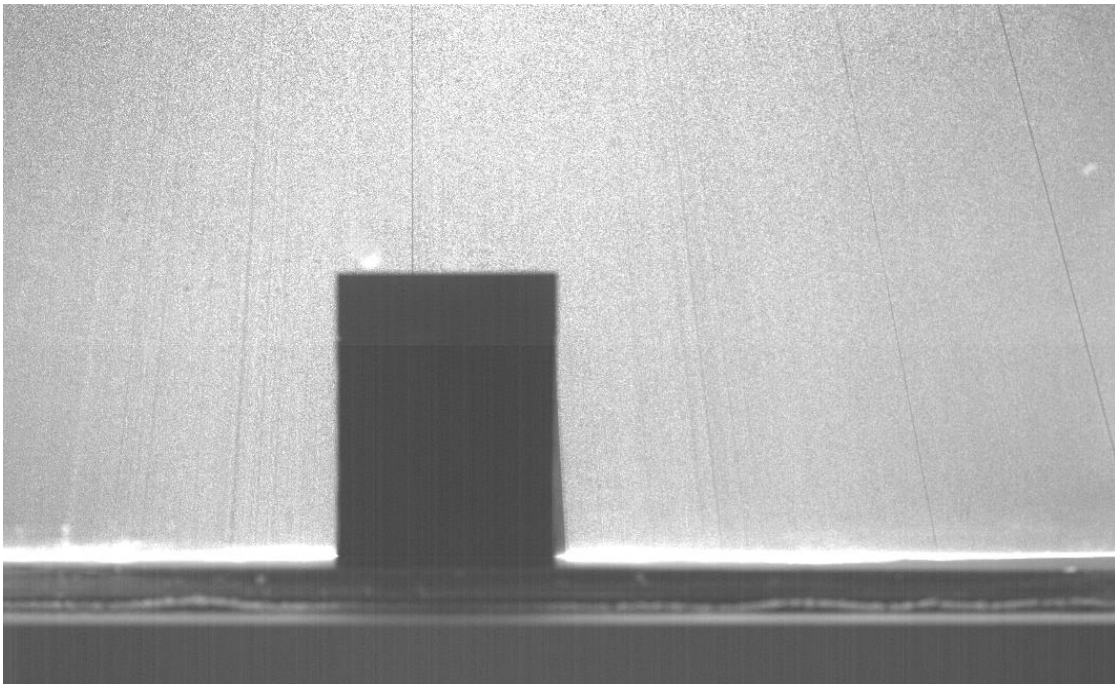
Şekil 4.16: 4. batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.

Şekil 4.16’da görüntülenen vortisite konturları, vektör haritalarından farklı olarak hız dağılımları konusunda birtakım farklılıklar göstermektedir. 1. ve 4. batarya modelleri için vektör haritalarından elde edilen maksimum hız değerleri, aynı frekansta vortisite konturları için 1. ve 3. batarya modellerinde görülmektedir. 30 Hz fan frekansında batarya

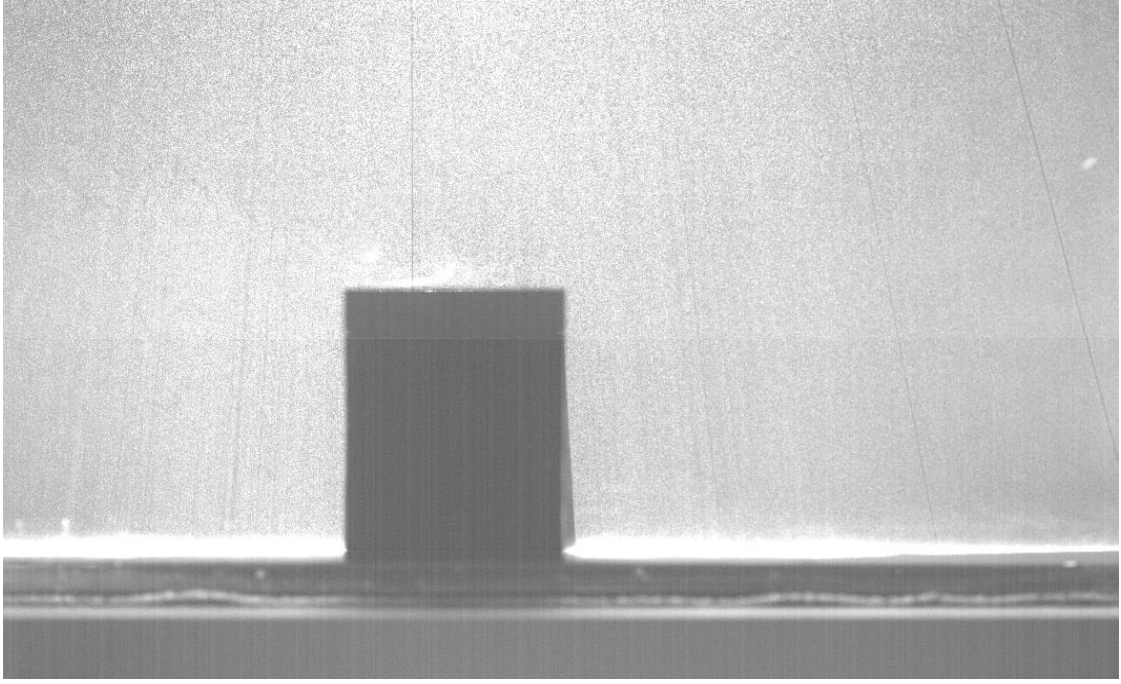
modelleri için vortisite konturlarına ait hız değerleri, yaklaşık olarak 5-7 m/s arasındadır. Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 için ise 40 Hz fan frekansında PIV’de alınan ham görüntüler verilmiştir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de ise ham görüntülerin işlenmesi ile elde edilen 4. ve 2. batarya modellerine ait olan aksenal ve bileşke hız haritaları görülmektedir.



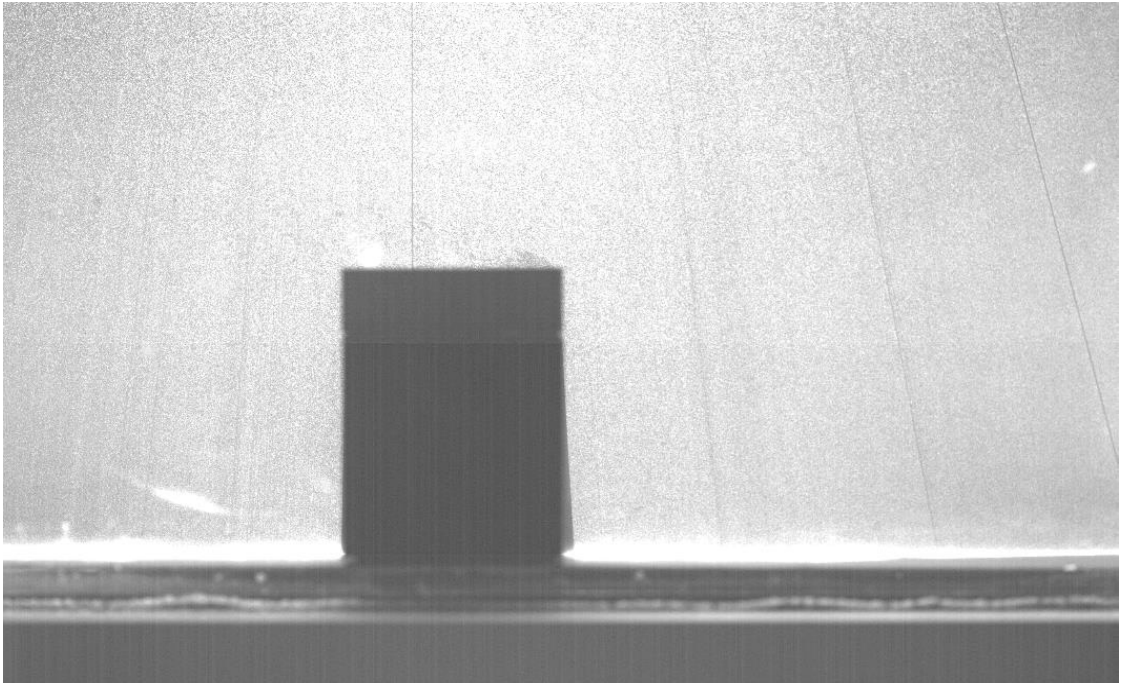
Şekil 4.17: 1.batarya modeli için 40 Hz’de alınan ham görüntü.



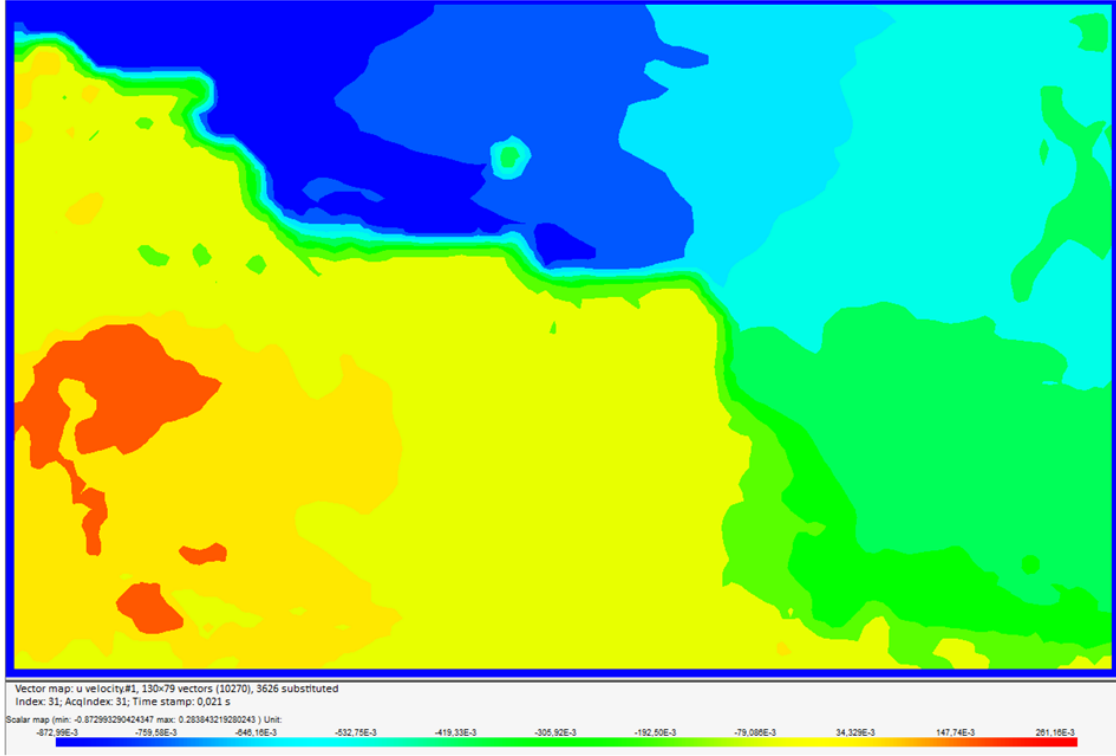
Şekil 4.18: 2.batarya modeli için 40 Hz’de alınan ham görüntü.



Şekil 4.19: 3.batarya modeli için 40 Hz'de alınan ham görüntü.

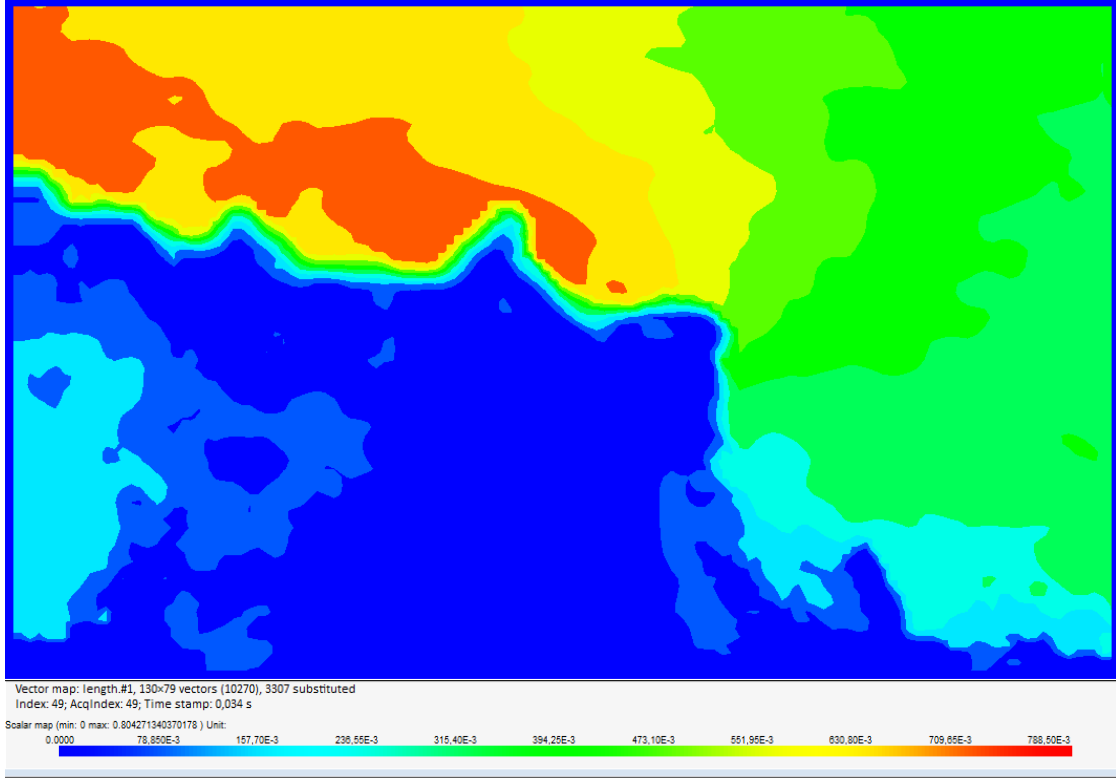


Şekil 4.20: 4.batarya modeli için 40 Hz'de alınan ham görüntü.



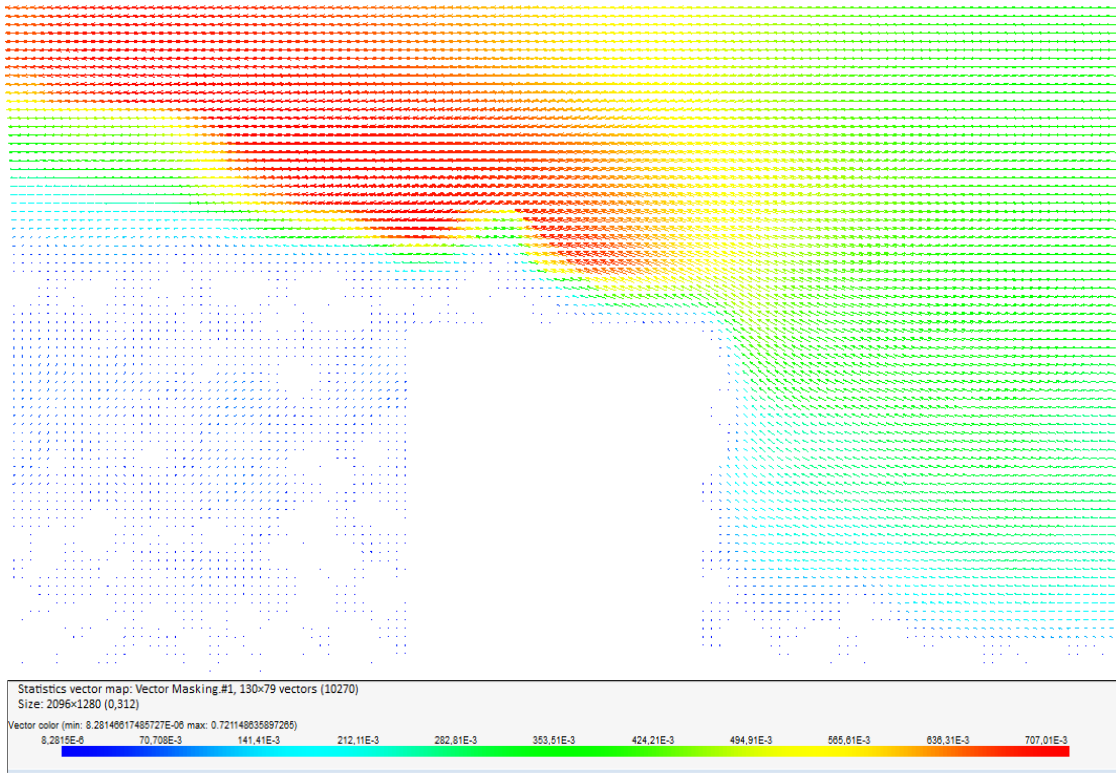
Şekil 4.21: 4.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen eksenel hız haritası.

Şekil 4.21’de verilen eksenel hız haritasına bakıldığında 20 Hz ve 30 Hz fan frekanslarında olduğu gibi 40 Hz fan frekansında da elde edilen maksimum hız değerleri, -x yönünde ve batarya modellerinin üzerinde görülmektedir. Batarya modellerinin arkasında oluşan resirkülasyon bölgesi, göre daha belirgin bir hal almıştır. 4. batarya modeli için ise eksenel hızların maksimum değeri, 8.72 m/s olarak görülmektedir. Batarya modeli arkasında oluşan resirkülasyon bölgeleri ele alındığında maksimum hız değerleri, 4. batarya modeline aittir. 4. batarya modeli için resirkülasyon bölgelerinin yaklaşık hız değeri 2.61 m/s şeklindedir.

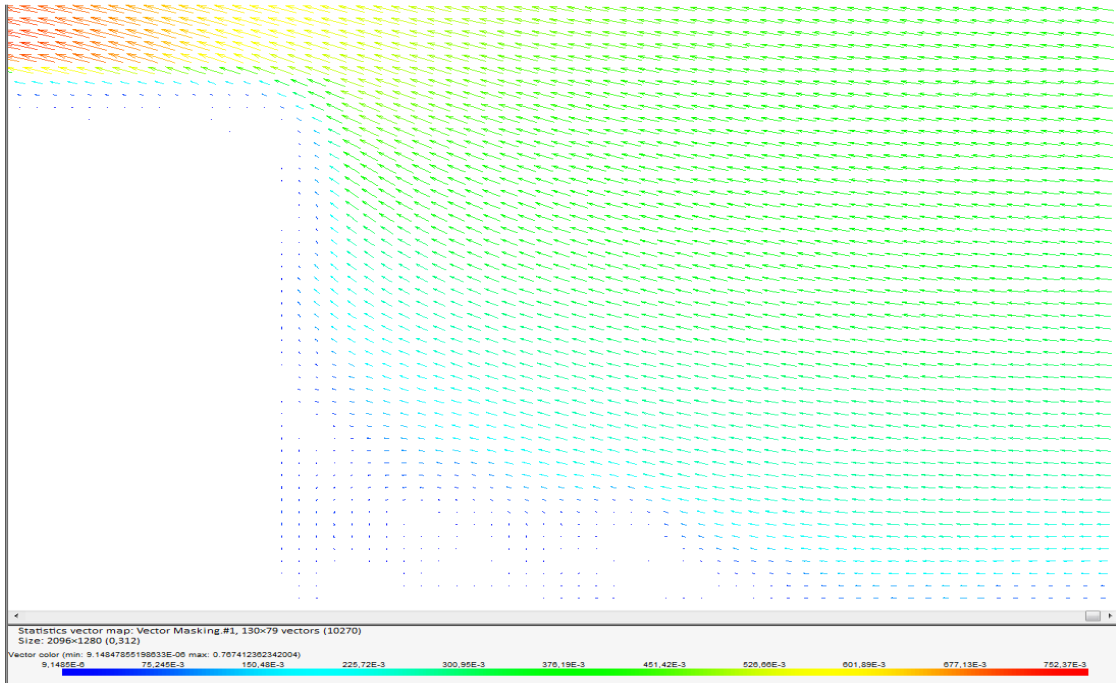


Şekil 4.22: 2.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.

Şekil 4.22’de verilen bileşke hız haritasına göre 40 Hz frekans için elde edilen bileşke hız haritaları, aynı frekans değeri için elde edilen aksenal hız haritaları ile büyük ölçüde uyumludur. 40 Hz fan frekansı için elde edilen bileşke hız değerleri arasında çok farklılık olmadığı görülmektedir. İlâveten; 30 Hz frekans için elde edilen hız haritalarına göre batarya modeli üzerinde oluşan akış ayrılması, 40 Hz fan frekansında tüm batarya modelleri için daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Dört batarya modeli etrafında oluşan hız haritaları incelendiğinde 40 Hz fan frekansı için elde edilen maksimum hız değeri, 3.batarya modeline ait olup yaklaşık değeri ise 8.24 m/s’dir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de ise 40 Hz fan frekansı için 3. ve 1. batarya modellerinden elde edilen vektör haritaları verilmiştir.

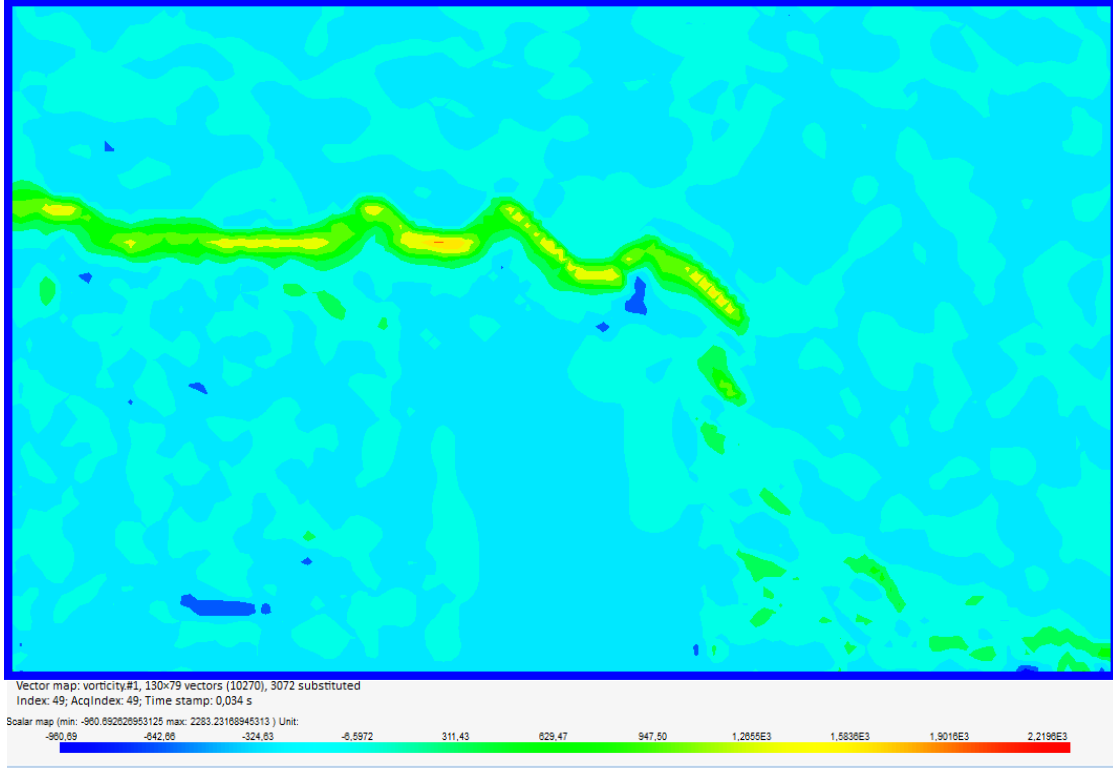


Şekil 4.23: 3.batarya modeli için 40 Hz’de elde edilen vektör haritası.



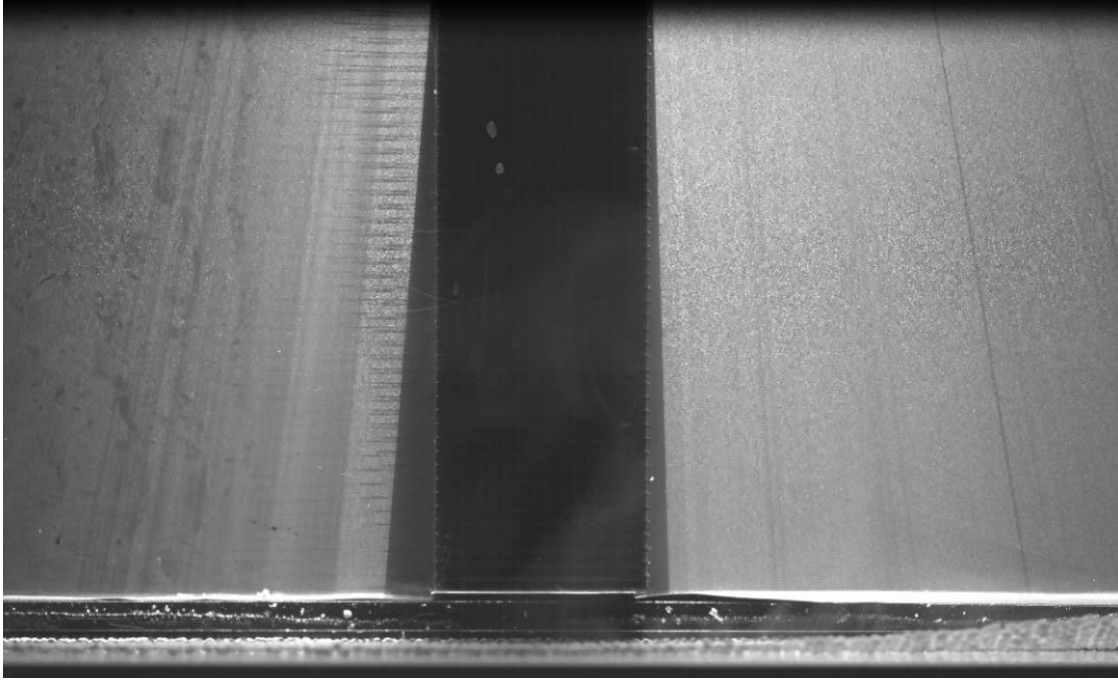
Şekil 4.24: 40 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de verilen vektör haritaları incelendiğinde maksimum hız değerlerinin batarya modelinden ayrılan akış üzerinde olduğu net bir şekilde görülmektedir. Batarya modellerinin arkasında ve önünde oluşan girdap vektörlerinin hızları, 20 Hz ve 30 Hz frekans değerleri için batarya modellerinin arkasında ve önünde oluşan girdap vektörlerine göre daha fazladır. Şekil 4.25’de 40 Hz fan frekansında 4. batarya modelinden elde edilen vortisite konturları görülmektedir.

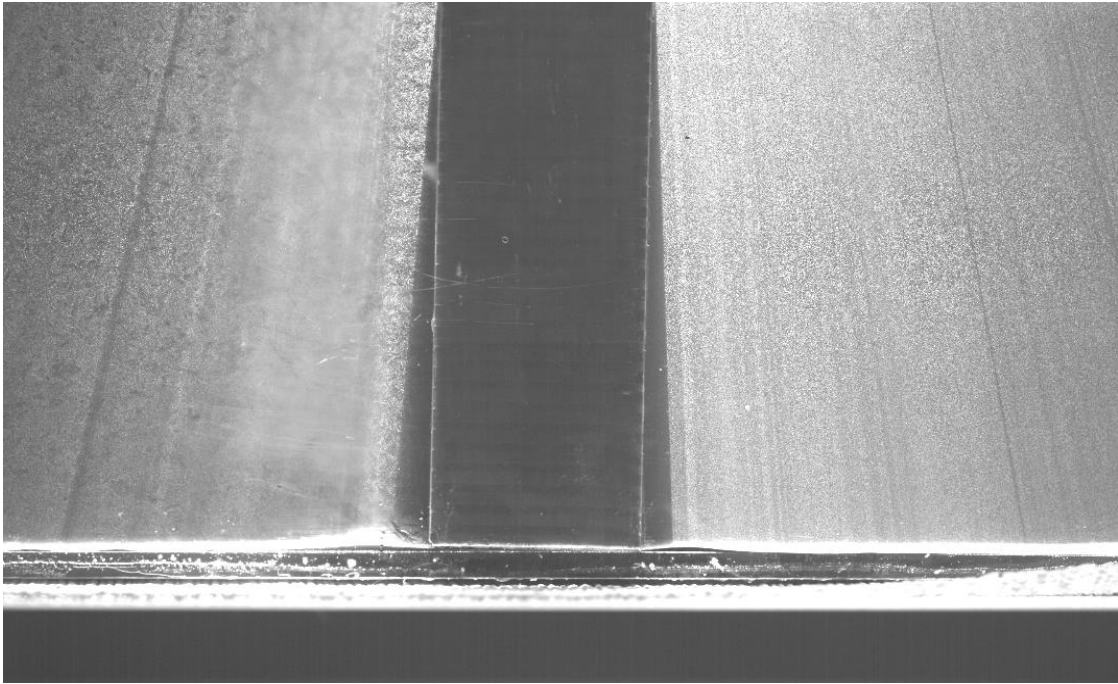


Şekil 4.25: 4.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.

Şekil 4.25’e göre elde edilen vortisite konturlarının akış yapısı ile uyumlu olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle batarya modelinin üst kısmında oluşan akış ayrılması, vortisite konturlarında da kendisini göstermektedir. 40 Hz fan frekansında batarya modelleri için vortisite konturlarının ortalama hız değerleri yaklaşık olarak 7-8 m/s arasında değişmektedir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de ise sırasıyla 1. ve 3. batarya modelleri için laminar ve türbülanslı akım koşullarında batarya modellerinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısı, görülmektedir.



Şekil 4.26: 1. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının laminar akımda görüntüsü.



Şekil 4.27: 3. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının türbülanslı akımda görüntüsü.

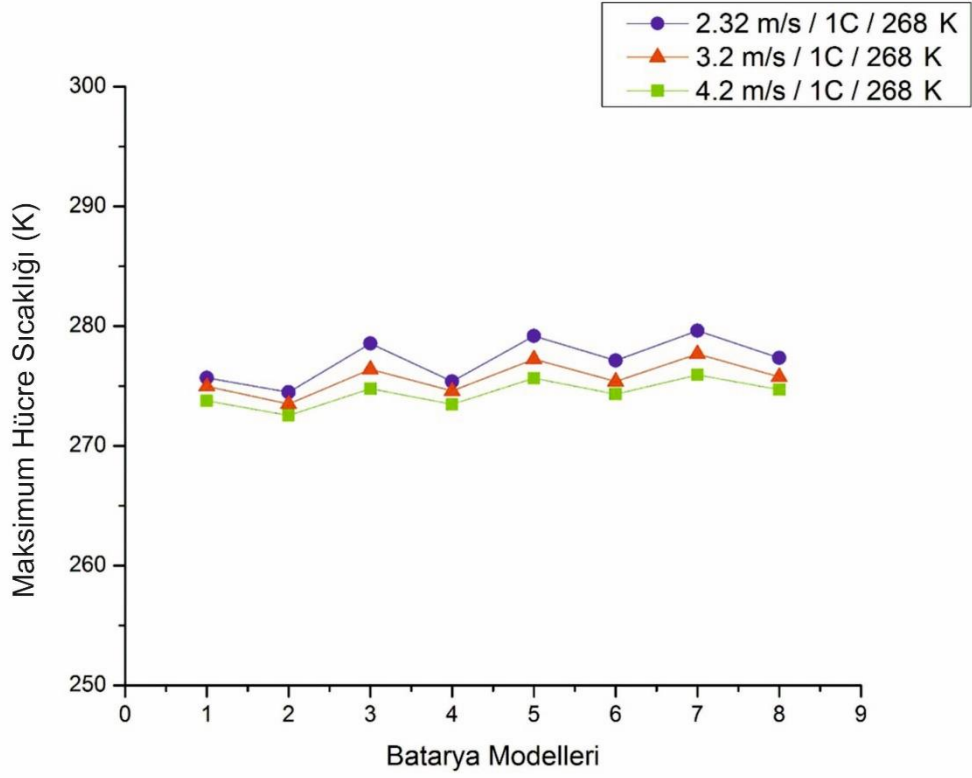
Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de görüldüğü üzere PIV cihazında edilen ham görüntülere göre türbülanslı akım koşullarında kanatçıklar arasından geçen hava akımı, laminar akıma göre

daha karmaşık olmaktadır. Özellikle batarya modellerinin arkasında hava akışını engellemek için sert bir cisim konulduğunda gelen türbülanslı havanın kanatçıklar arasından yüksek hızlarda geçtiği gözlenmiştir. 1. batarya modeli için laminar akış koşullarında kanatçık çıkışındaki akışın oluşturduğu çizgiler, biraz daha belirgindir.

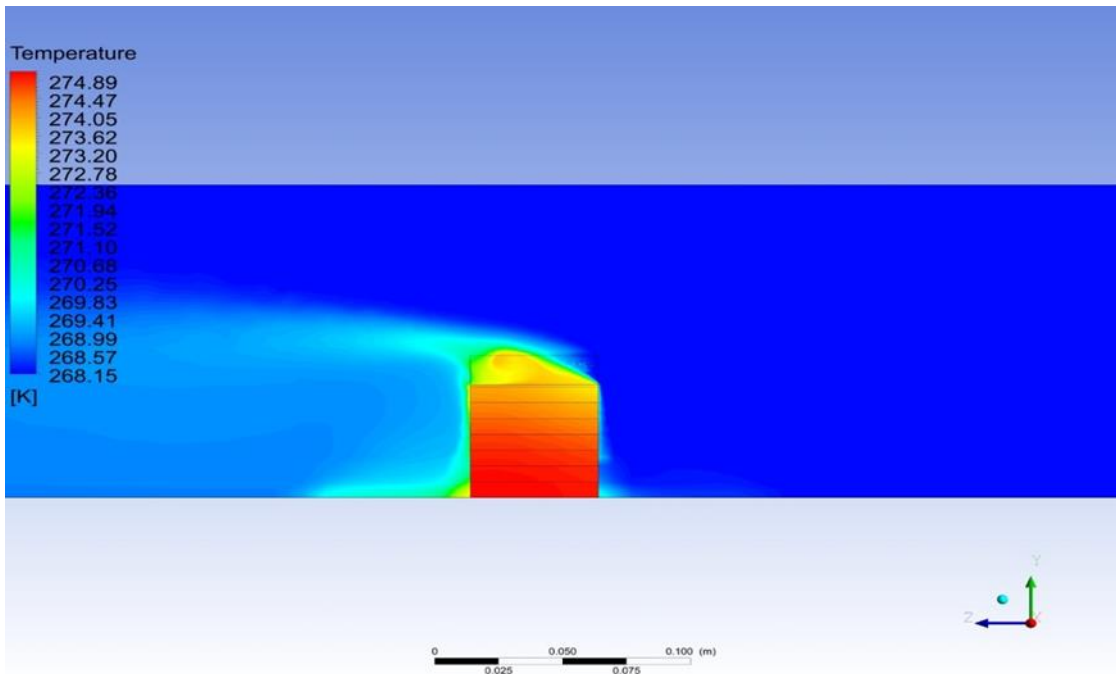
4.2 HAD Analizlerinden ve Minitab Programından Elde Edilen Bulgular

4.2.1 Batarya Modellerinden Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

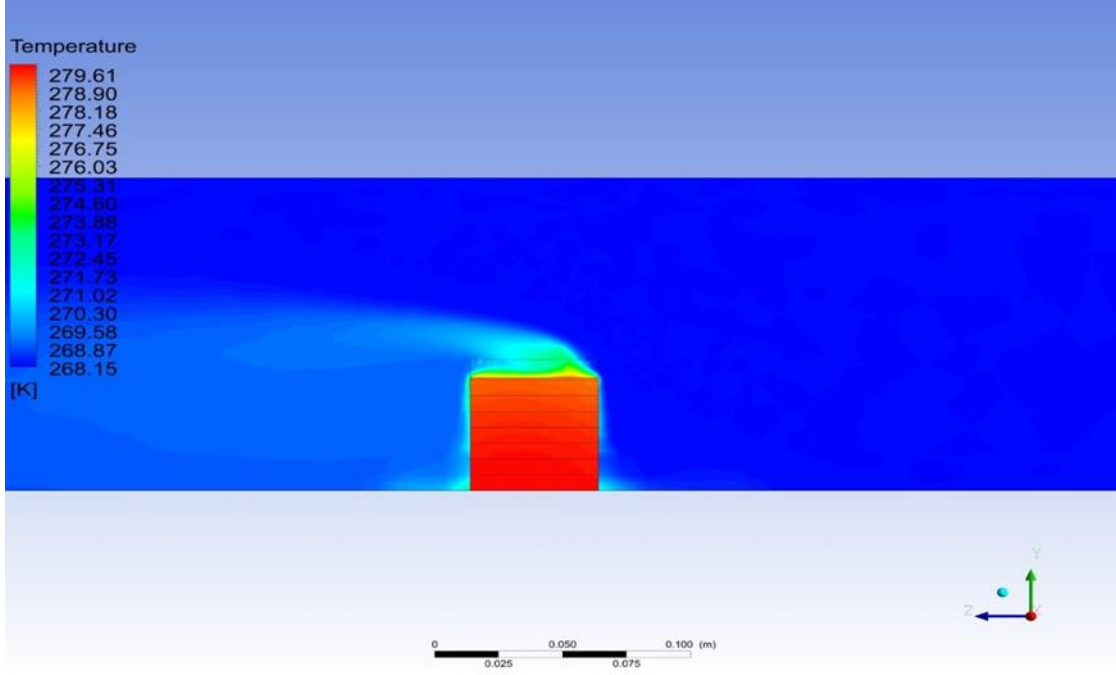
Parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı ile yapılan deneylerin doğrulanması ve karşılaştırılması amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmıştır. PIV cihazı ile sıcaklık ve basınç ölçümü gerçekleştirilemeyeceğinden dolayı, belirlenen sınır şartları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerine başvurulmuştur. Bataryaların genel olarak çalışma sıcaklıklarının maksimum 333 K'e kadar çıkabildiği göz önüne alındığında HAD analizleri, sıcaklık dağılımları konusunda zorunlu bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Wang vd., 2019). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için dört ayrı hava giriş sıcaklığı, üç ayrı hava giriş hızı değeri ve üç ayrı deşarj oranı seçilmiştir. İlâveten; PIV cihazı ile deney yapılan dört ayrı batarya modelinin yanında dört tane daha farklı hatvelere ve kanatçık kalınlığına sahip batarya modelleri de kullanılmış ve bir soğutma modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen soğutma modeli, batarya modelleri üzerinde uygulanmış ve içlerinden en uygun olanı belirlenmiştir. HAD analizleri, kanatçıklı batarya modellerinin yanında aynı sınır şartları için kanatsız batarya modelinde de uygulanmıştır. Bu bağlamda Şekil 4.28'de 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı ve değişen hava giriş hızları için batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları grafik halinde verilmiştir. Şekil 4.29, Şekil 4.30'da ise sırasıyla 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı koşullarında 2. ve 7. batarya modellerine ait analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.28: 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.

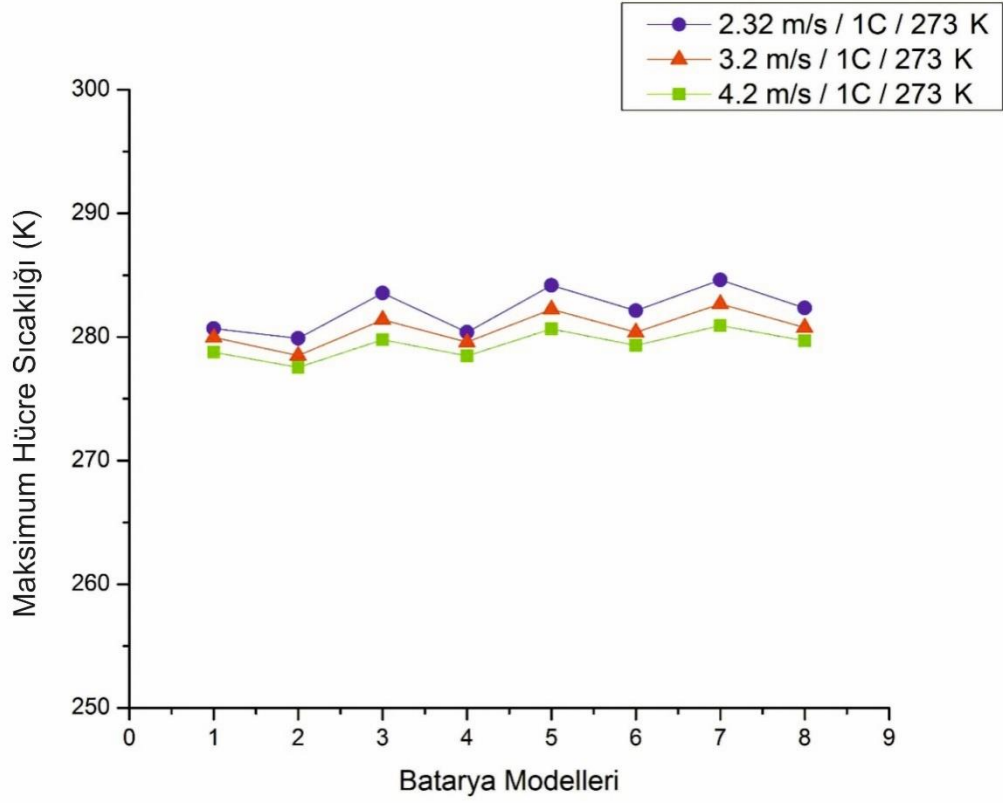


Şekil 4.29: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 2.batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

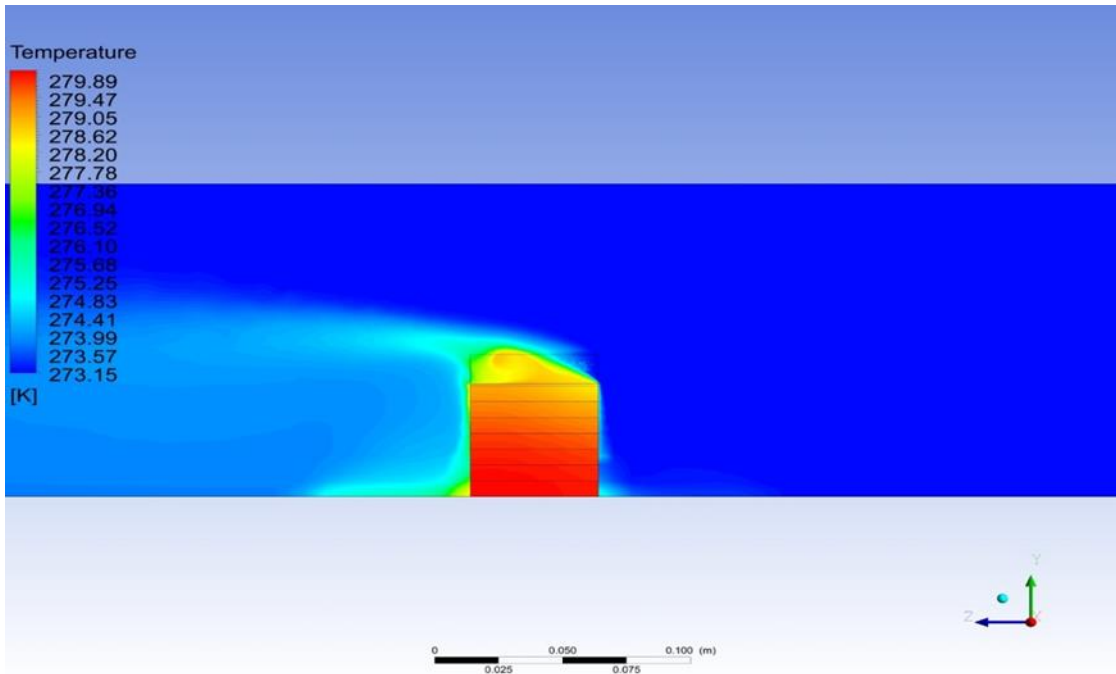


Şekil 4.30: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 7.batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

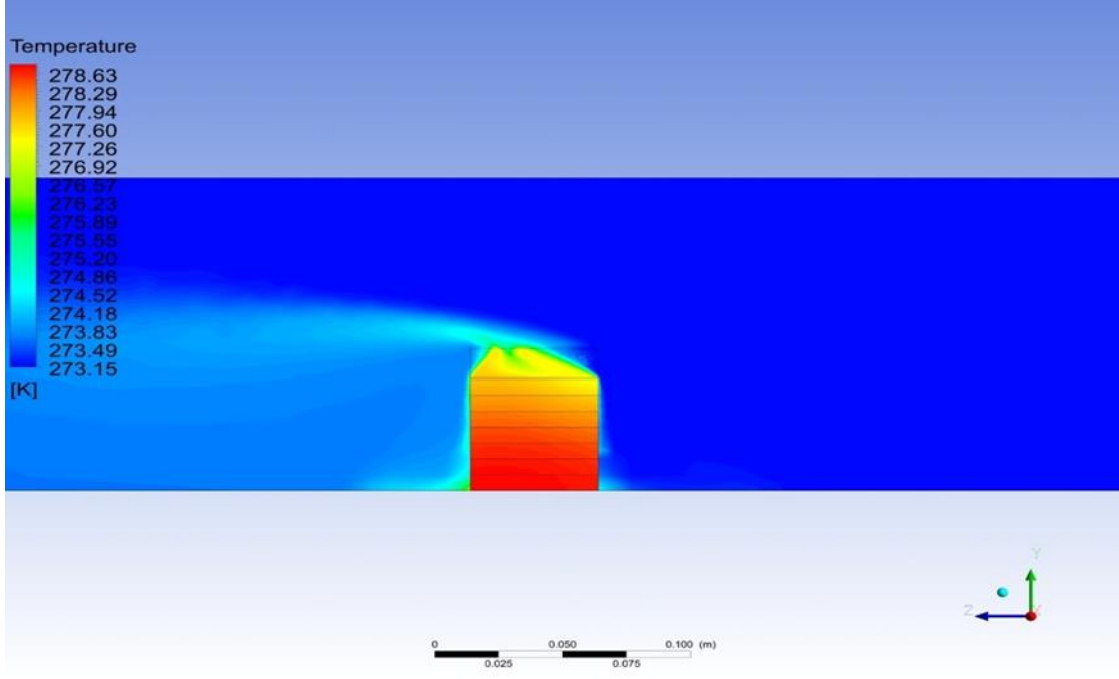
Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da verilen simülasyon sonuçlarına göre 2.32 m/s hava giriş hızı için batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları yaklaşık olarak 274 K ile 280 K arasında değişmektedir. Batarya modelleri üzerinde bulunan kanatçıkların yüksekliği ve sayısı arttıkça hücre sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. Kanatçıkların yüksekliği ve sayısı arttıkça ısı transfer yüzey alanı da artmaktadır. Bu bağlamda en düşük hücre sıcaklıkları, 2. batarya modeline ait olup en yüksek hücre sıcaklıkları ise 7. batarya modeline aittir. Şekil 4.31’de 1C deşarj oranı ve 273 K hava giriş sıcaklığı için değişen hava hızlarına göre elde edilen maksimum hücre sıcaklıklarının dağılımları görülmektedir. Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de ise sırasıyla 2.32 m/s, 3.2 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızları, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir.



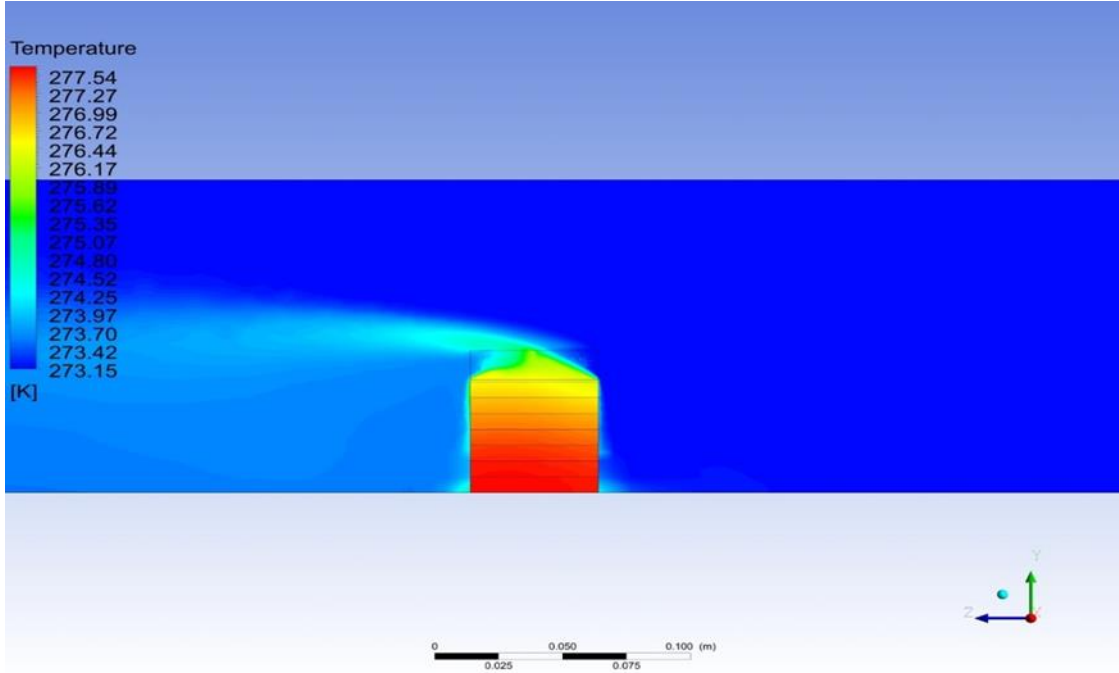
Şekil 4.31: 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.



Şekil 4.32: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.



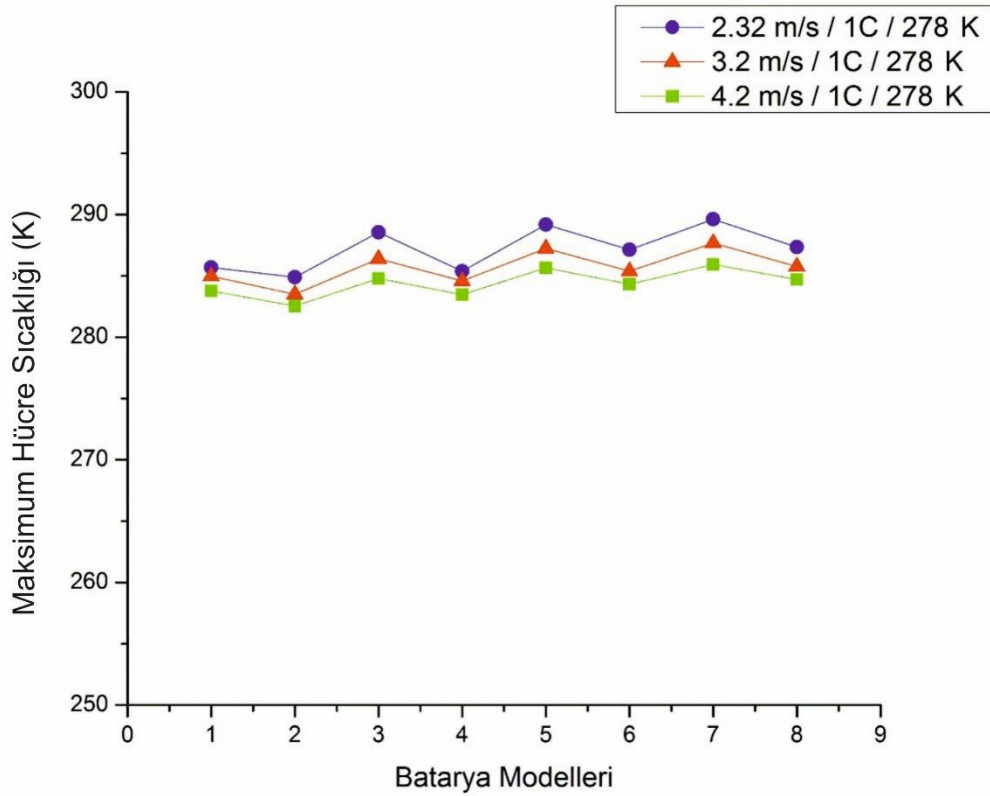
Şekil 4.33: 3.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.



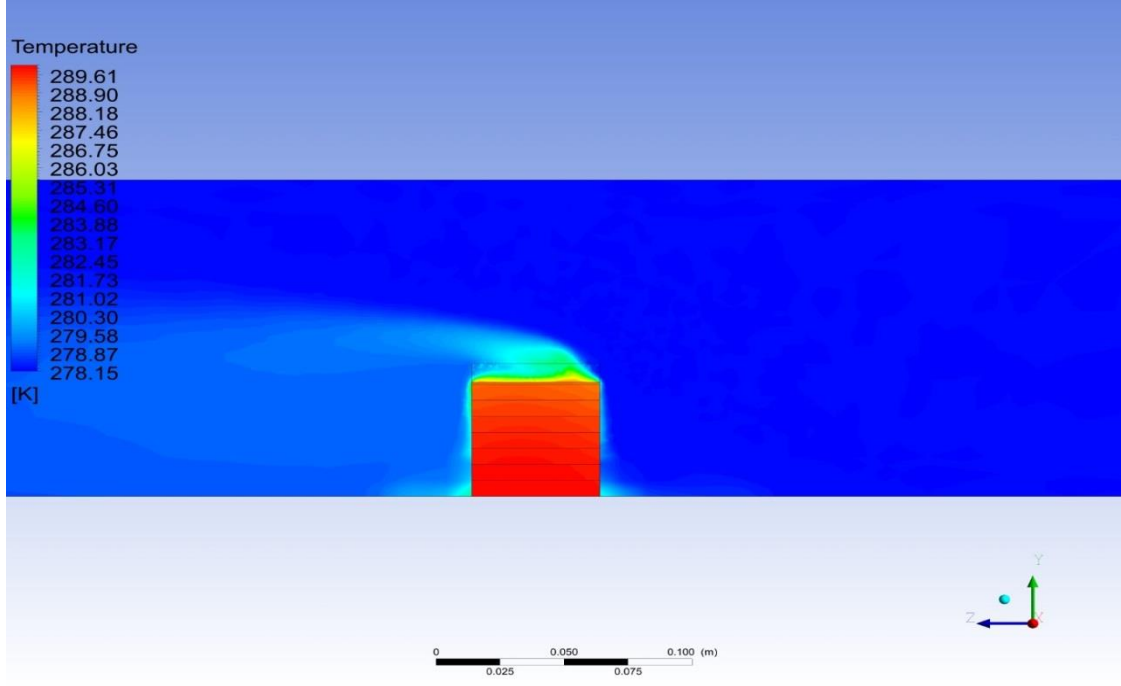
Şekil 4.34: 4.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de verilen analiz sonuçlarına göre soğutma havasının tünele giriş hızı arttıkça hücre sıcaklıkları azalmaktadır. Bu durum, türbülansın artması ile açıklanmaktadır. Türbülansın artması, taşınım ile batarya yüzeyinden transfer olan ısı miktarını da artırmaktadır (Bergman vd., 2011). Bu nedenle, en düşük hücre

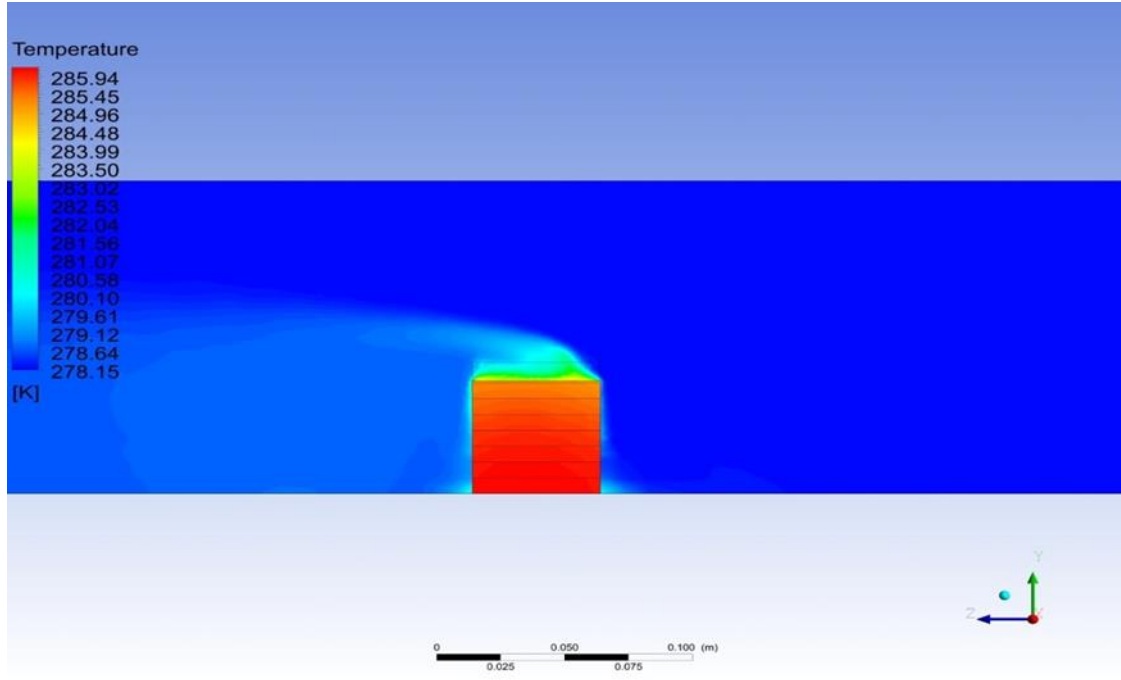
sıcaklık değerleri 4.2 m/s hava giriş hızında ve 2. batarya modelinde gözlenmiştir. 2.32 m/s hava giriş hızı için ise maksimum hücre sıcaklıklarının 285 K'i aşmadığı görülmektedir. Şekil 4.33'de ise 3.2 m/s hava giriş hızı için maksimum hücre sıcaklığının 278.63 K olduğu görülmektedir. Şekil 4.35'de 1C deşarj oranı ve 278 K hava giriş sıcaklığı şartlarında verilen hava giriş hızlarına göre HAD analizlerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıklarının dağılımları; Şekil 4.36, Şekil 4.37'de ise sırasıyla 2.32 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızları, 1C deşarj oranı ve 278 K hava giriş sıcaklığı koşullarında 7. batarya modelinden elde edilen bulgular görülmektedir.



Şekil 4.35: 1C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.



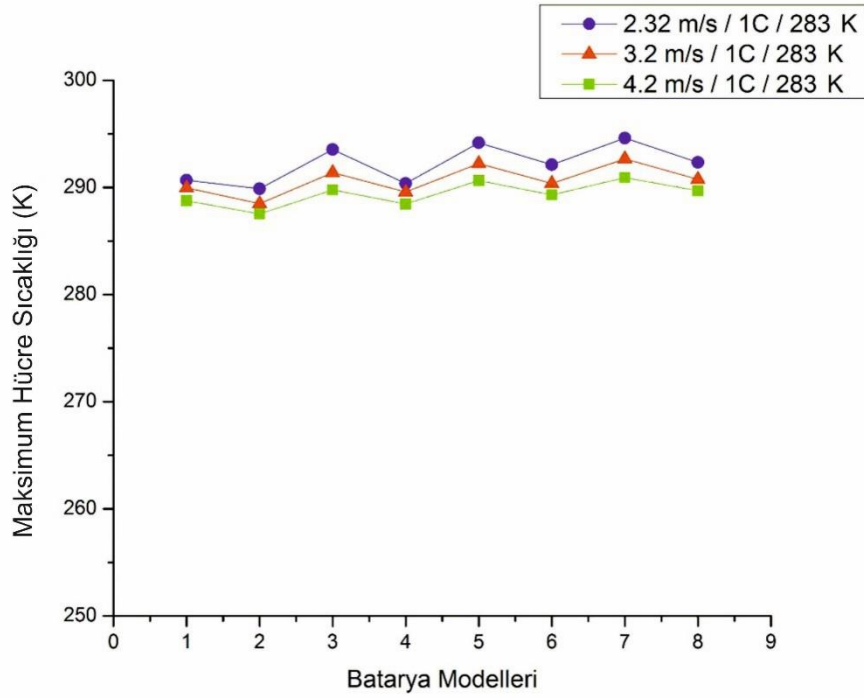
Şekil 4.36: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.



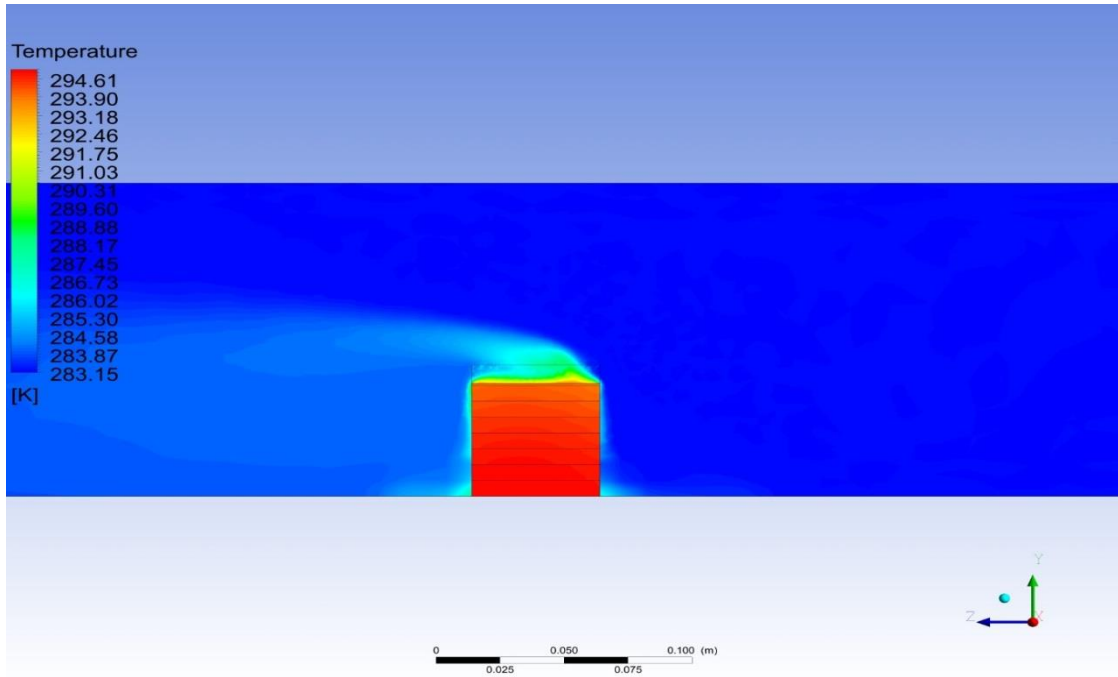
Şekil 4.37: 4.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de görüldüğü üzere 7. batarya modeli için hava giriş hızınının 2.32 m/s’den 4.2 m/s’ye çıkması maksimum hücre sıcaklıklarında yaklaşık olarak 4 K’lik bir azalmaya sebep olmaktadır. Şekil 4.38’de 283 K hava giriş sıcaklığı, 1C deşarj oranı ve değişen hava hızlarına göre elde edilen maksimum hücre sıcaklıklarınının batarya

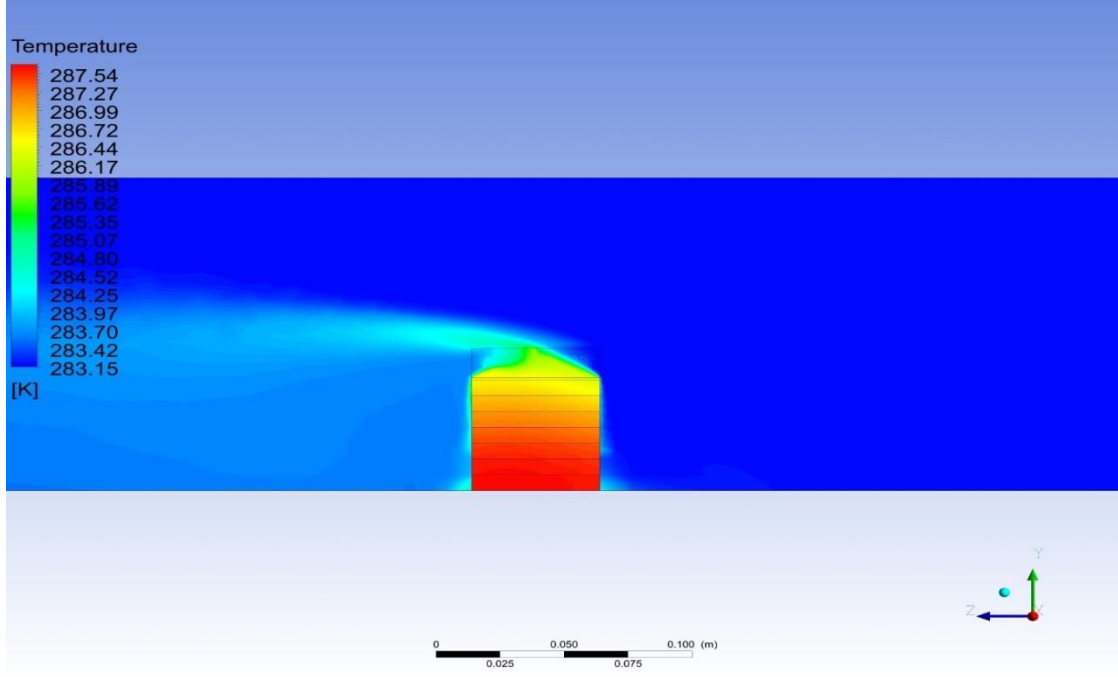
modellerine göre değişimleri verilmiştir. Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’da ise sırasıyla 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı, 2.32 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızlarında 7. ve 2. batarya modellerinden elde edilen sayısal simülasyon sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.38: 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.

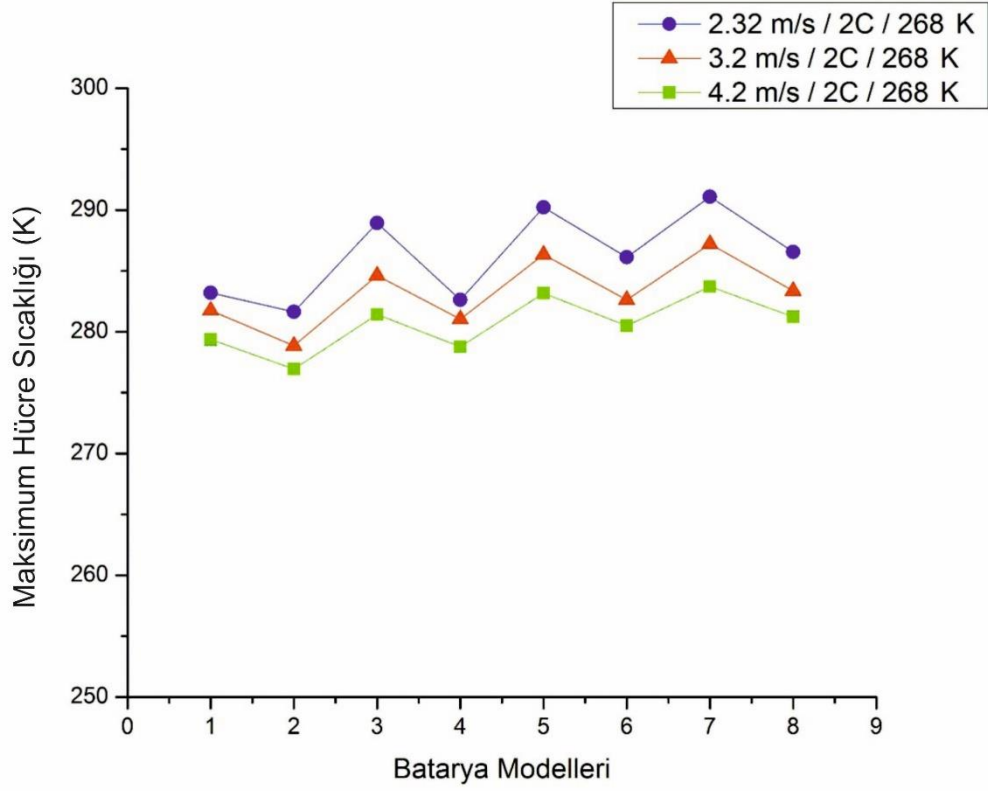


Şekil 4.39: 2.32 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

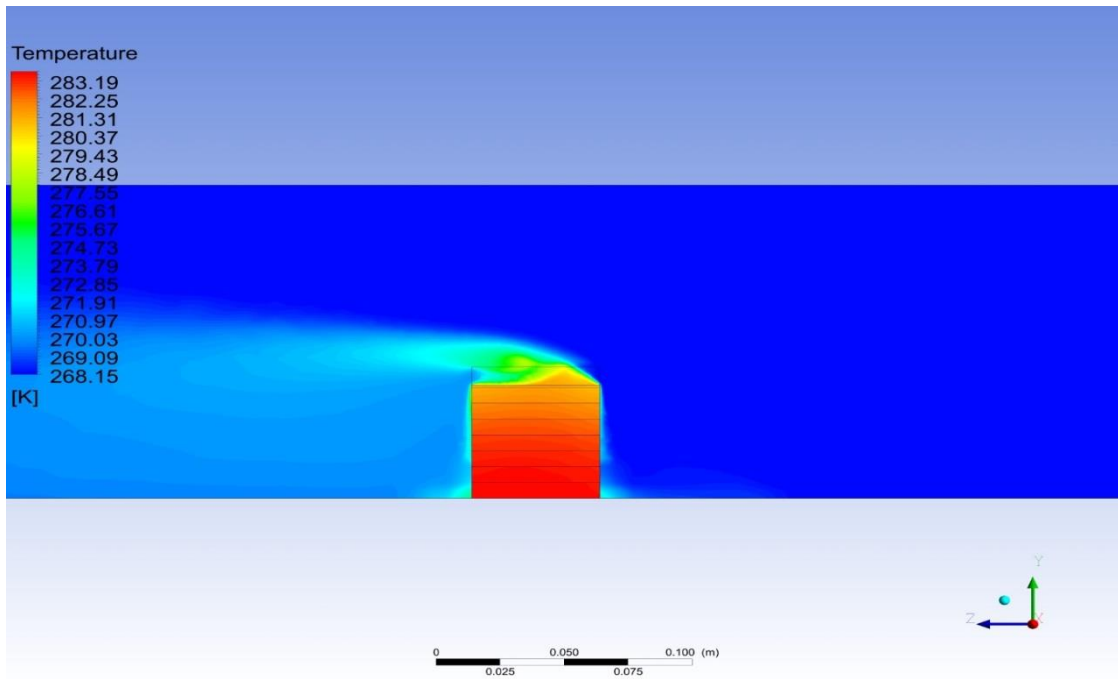


Şekil 4.40: 4.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

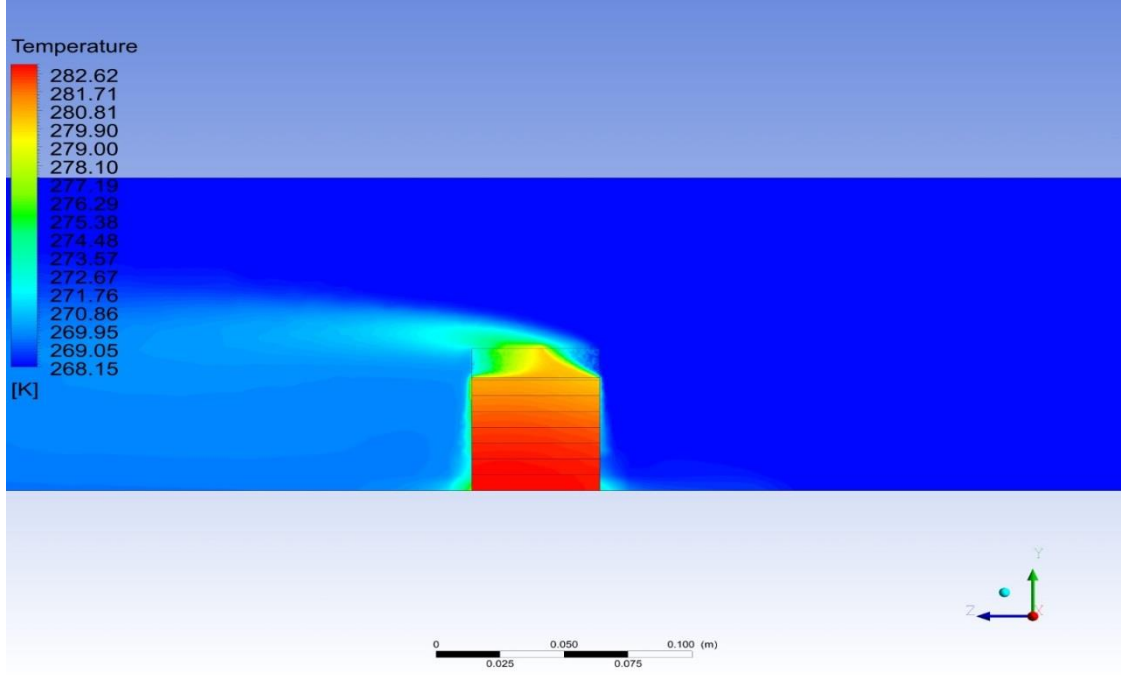
Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’da verilen bulgulara göre batarya modellerine ait elde edilebilecek maksimum hücre sıcaklıklarının yaklaşık olarak 287 K ile 295 K arasında değiştiği görülmektedir. Soğutma havasının tünele giriş sıcaklığı 5 K arttırıldığında maksimum hücre sıcaklıkları da 5 K artmaktadır. 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı ve 2.32 m/s hava giriş hızı için maksimum hücre sıcaklıkları, 7. batarya modelinde gözlenmiş olup bu değer yaklaşık olarak 295 K’dir. Aynı sınır şartları altında hava giriş hızının artması, batarya modellerinde 1 K ile 2 K’lik bir sıcaklık düşüşüne sebep olmaktadır. Şekil 4.41’de 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için verilen hava giriş sıcaklıklarına göre maksimum hücre sıcaklıkları görülmektedir. Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de ise 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için sırasıyla 1. 4. ve 7. batarya modellerinden elde edilen sıcaklık dağılımları görülmektedir.



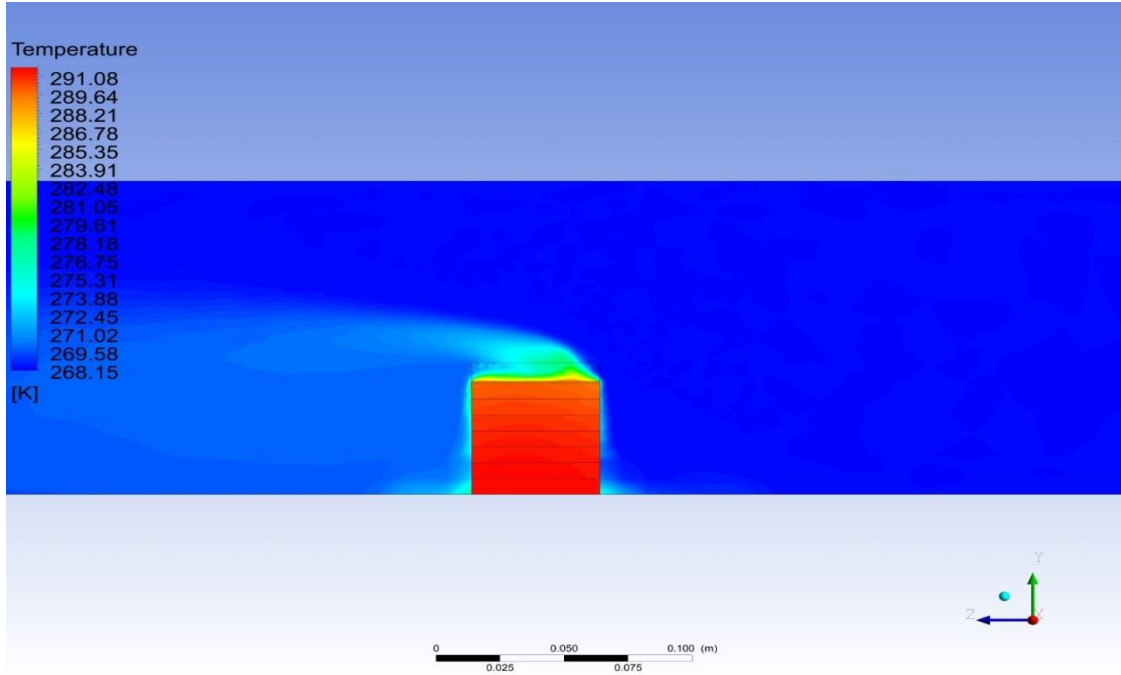
Şekil 4.41: 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.



Şekil 4.42: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 1. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.



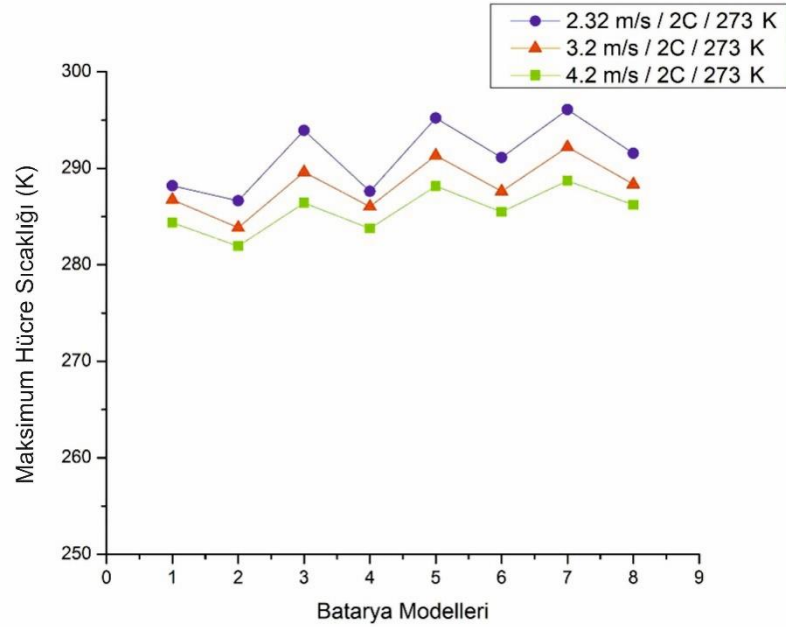
Şekil 4.43: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 4. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.



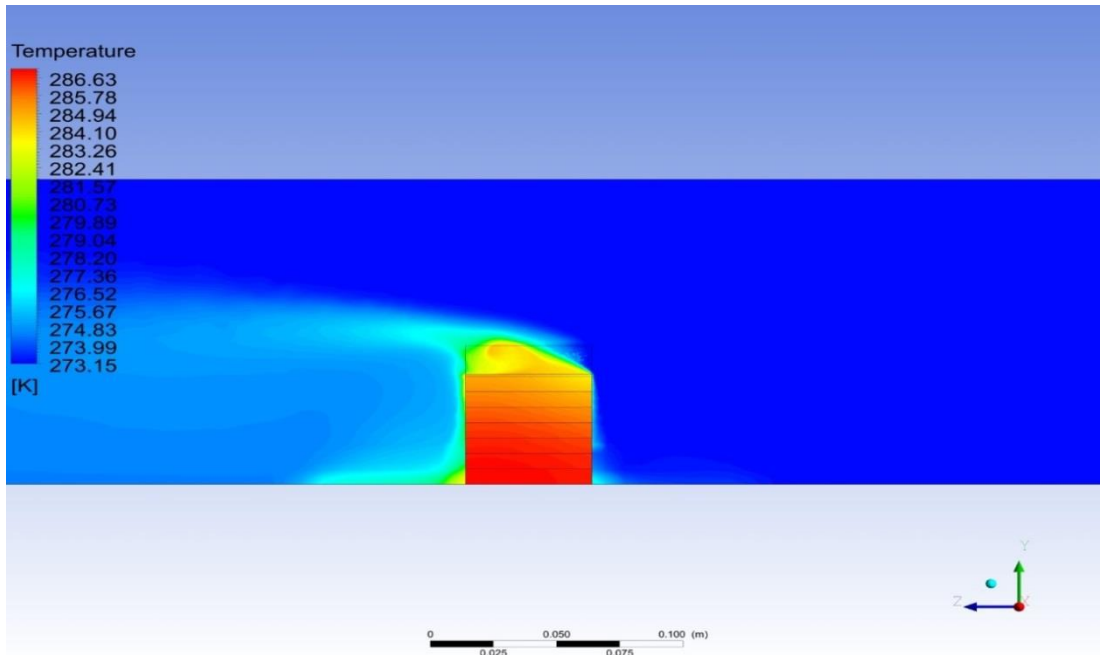
Şekil 4.44: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.41’de görüldüğü üzere deşarj oranındaki artış, maksimum hücre sıcaklık değerlerinde ve bataryalar arası sıcaklık farklarında artışa neden olmuştur. Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44 incelendiğinde ise 1. batarya modelinden 7. batarya modeline doğru sıcaklık değerlerinin genel olarak arttığı görülmektedir. Şekil 4.45’de 2C deşarj oranı, 273

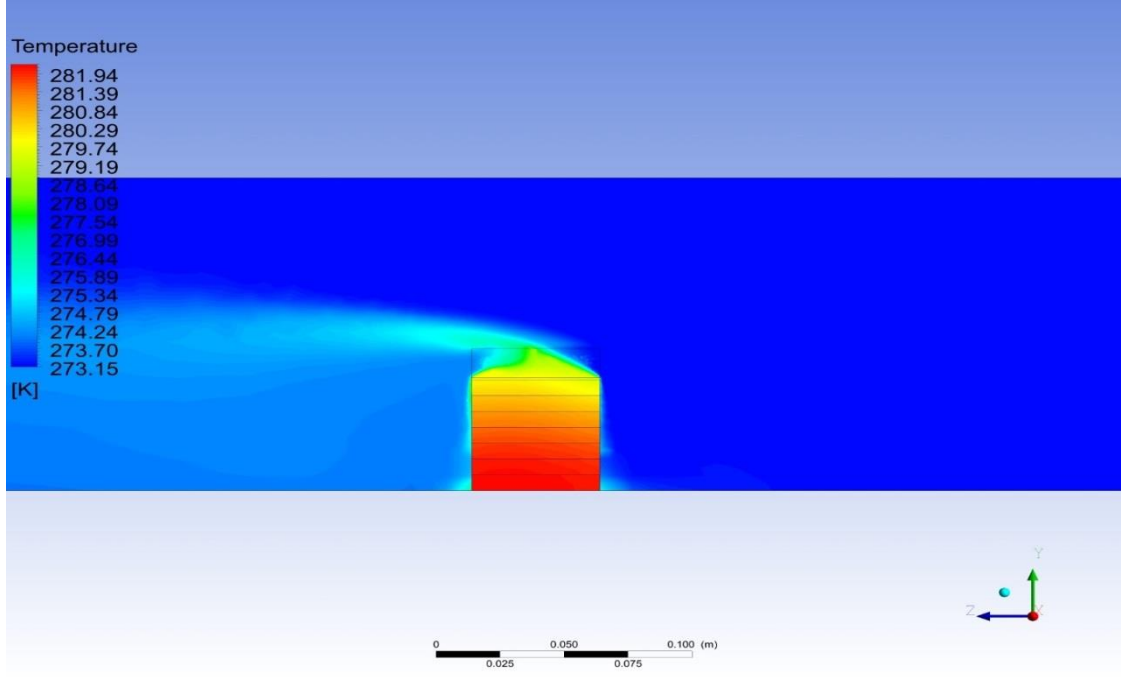
K hava giriş sıcaklığı için maksimum hücre sıcaklıklarının hava giriş hızlarına göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de ise 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için sırasıyla 2.32 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızlarına göre 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.45: 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.

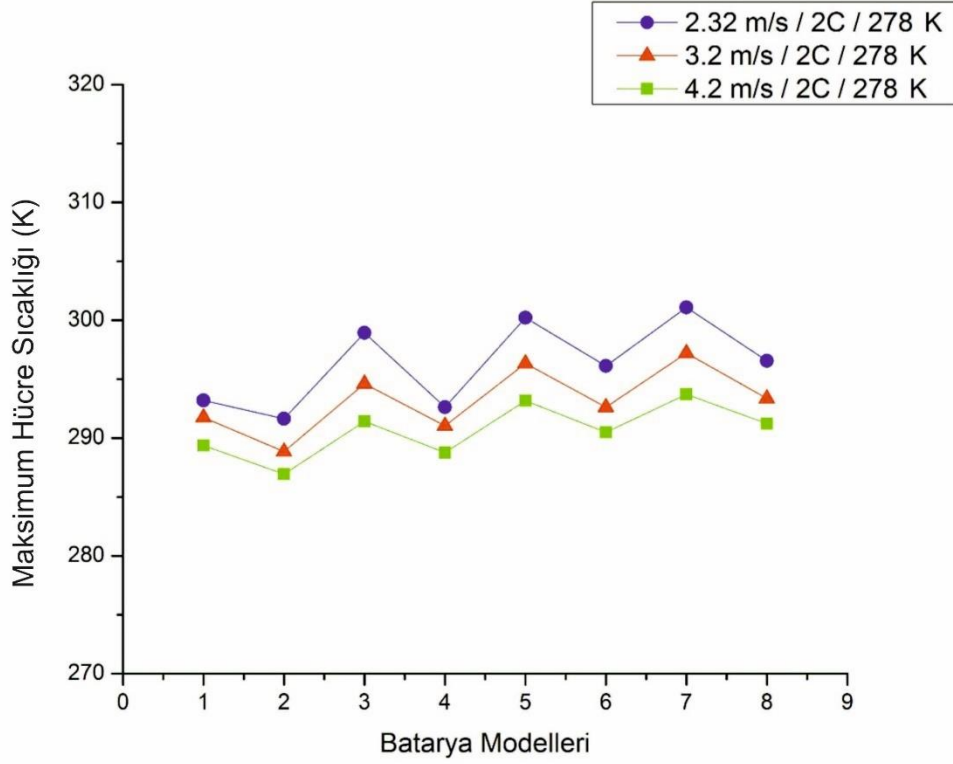


Şekil 4.46: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

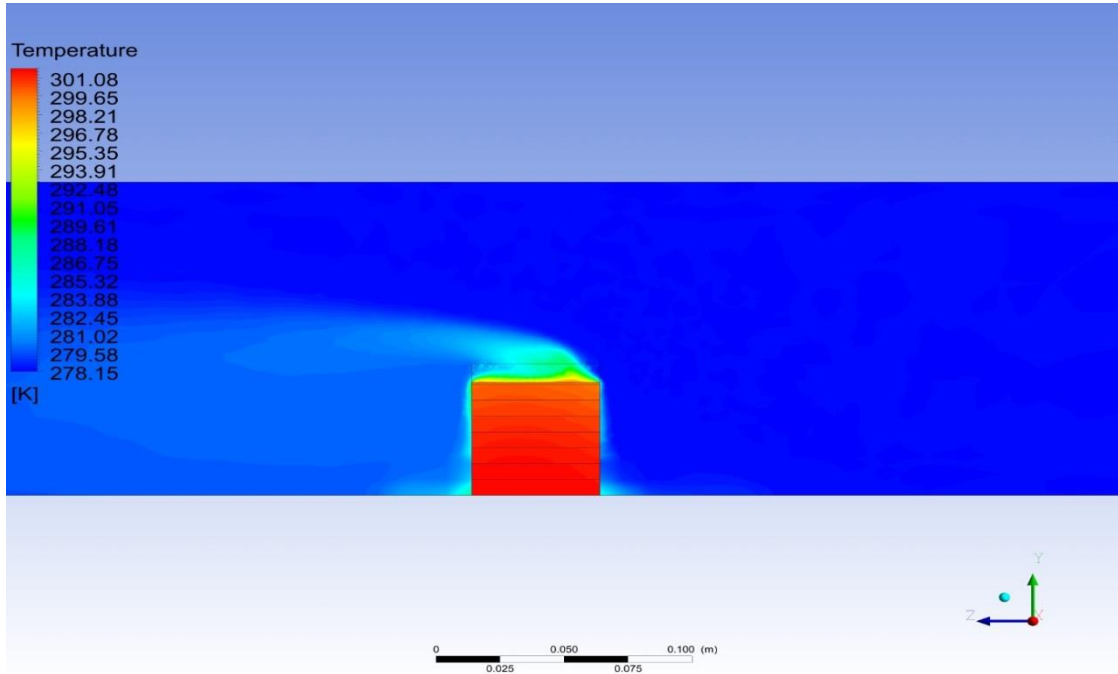


Şekil 4.47: 4.2 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

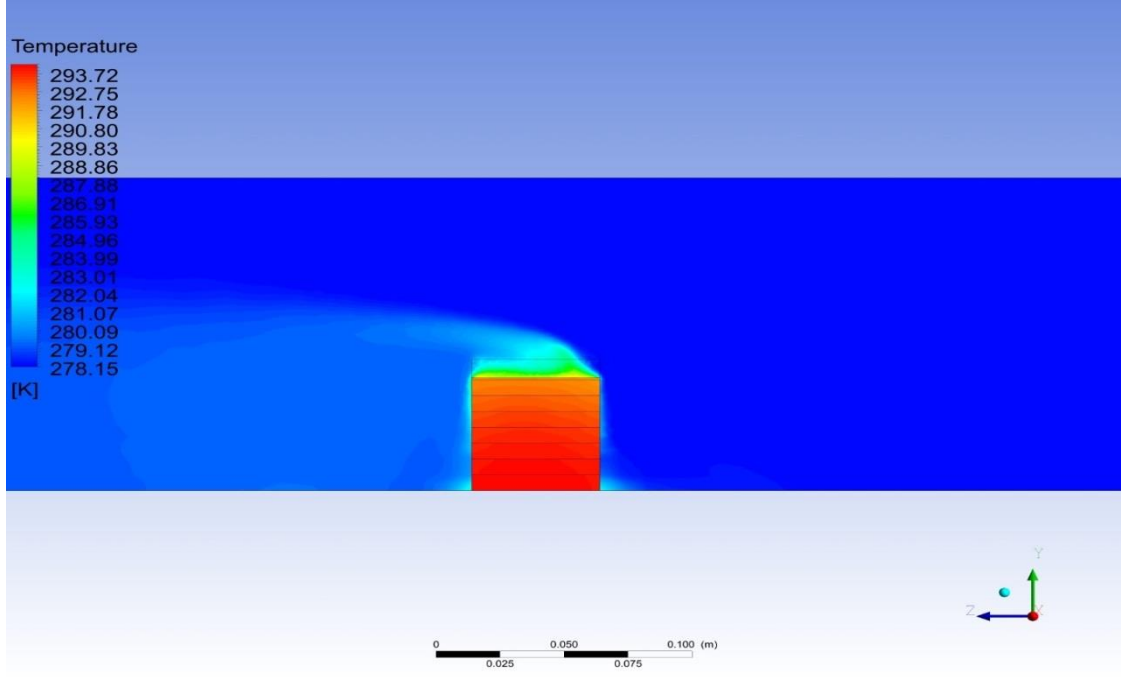
Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de verilen analiz sonuçları bize 2. batarya modeline ait maksimum hücre sıcaklıklarının 281 K değerine kadar düştüğünü göstermektedir. 7. batarya modeli için maksimum hücre sıcaklıkları, hava giriş hızına göre 295 K değerini aşmaktadır. Şekil 4.48’de 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı şartlarında batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıklarının hava giriş hızlarına göre değişimleri grafik halinde verilmiştir. Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de ise 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı için sırasıyla 2.32 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızlarında 7. batarya modelinden elde edilen simülasyon sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.48: 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.

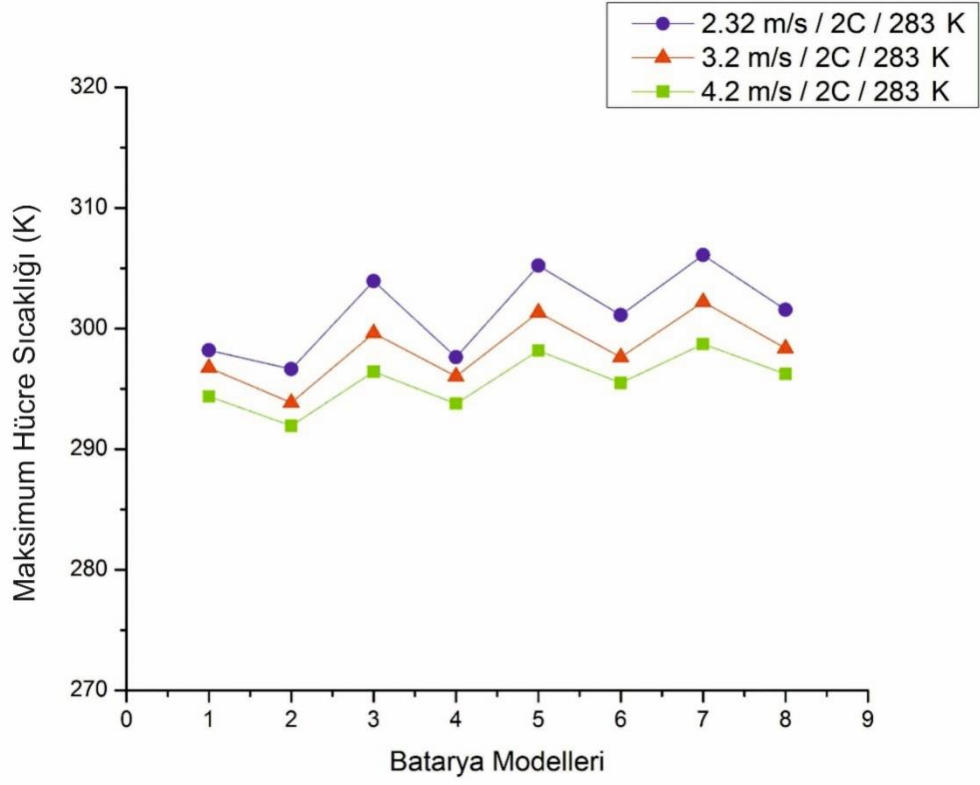


Şekil 4.49: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

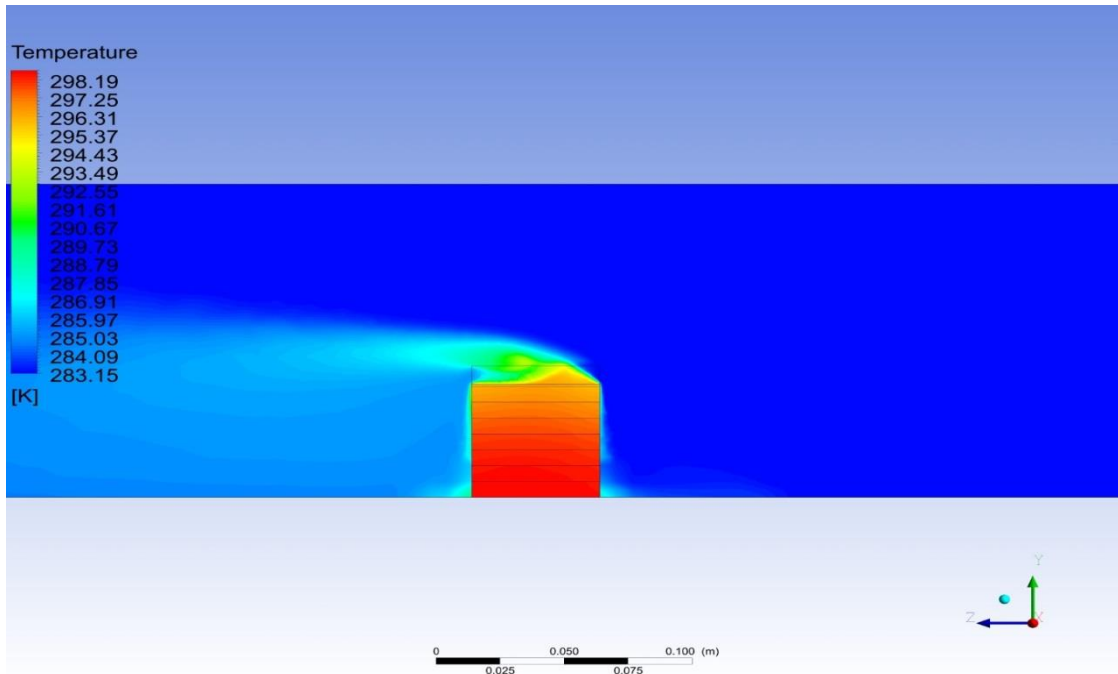


Şekil 4.50: 4.2 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de görülen simülasyon sonuçları bize 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı şartlarında maksimum hücre sıcaklıklarının 300 K’nin üzerine çıkabileceğini göstermektedir. Özellikle 2.32 m/s hava giriş hızı için bu değer yaklaşık olarak 302 K şeklindedir. Batarya modelleri üzerindeki kanatçıkların kalınlıkları ve yükseklikleri, hücre sıcaklıklarına doğrudan etki etmektedir. Kanatçık kalınlığının artması, birim alana düşen kanatçık sayısını azalttığından en yüksek sıcaklıkların 7. batarya modelinde görülmesi, beklenen bir durumdur. Şekil 4.51’de 2C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı şartlarında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilebilecek maksimum hücre sıcaklıkları, verilmiştir. Şekil 4.52’de ise 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 1. batarya modelinden elde edilen analiz sonuçları görülmektedir.

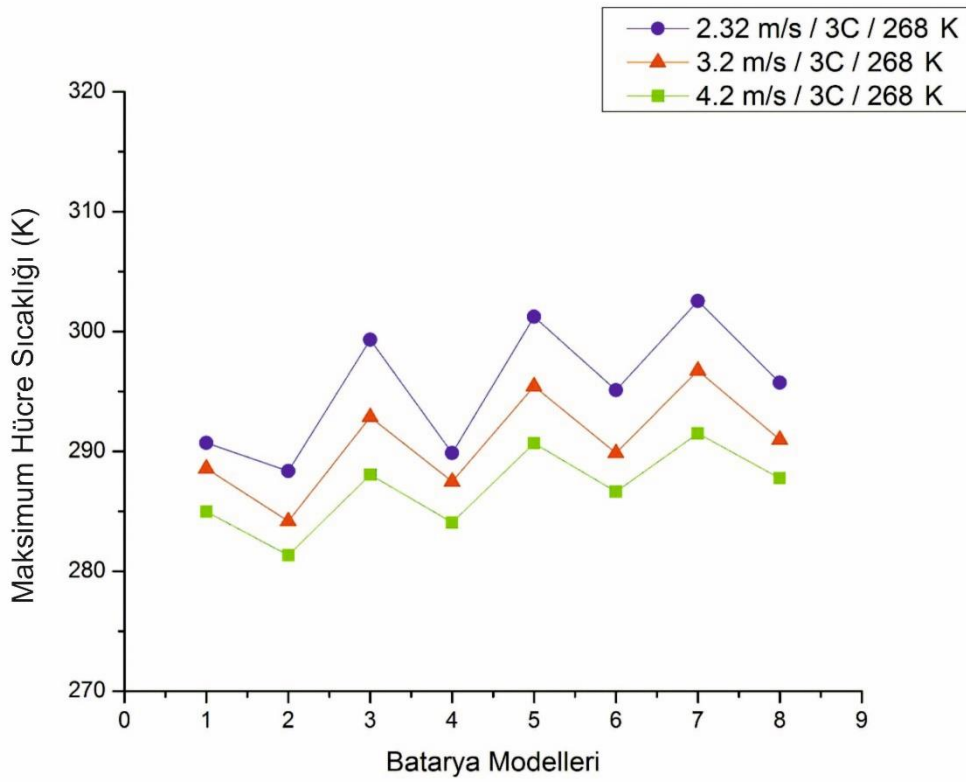


Şekil 4.51: 2C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.

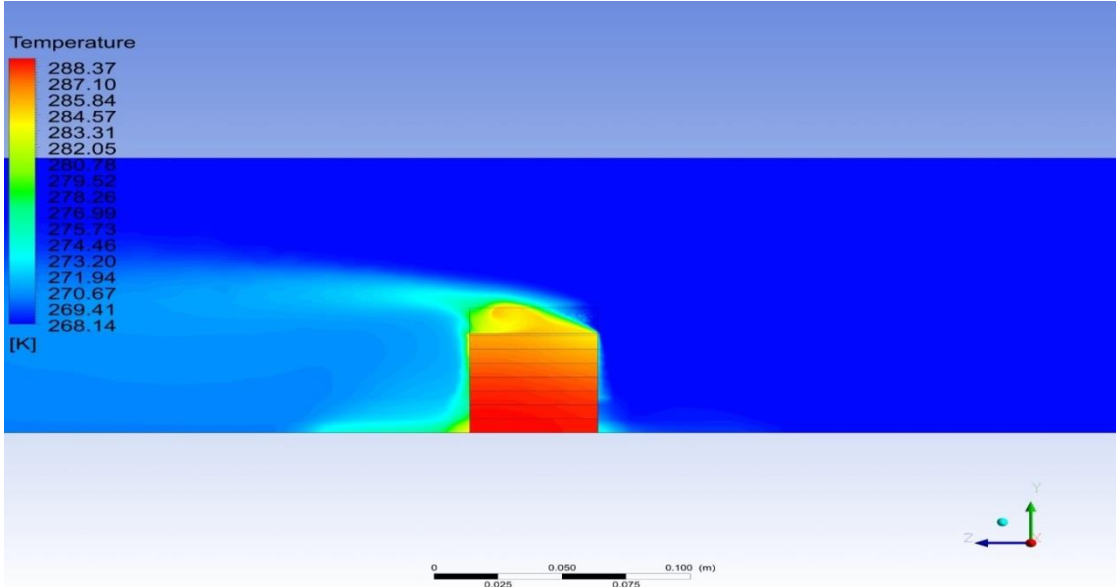


Şekil 4.52: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 1. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

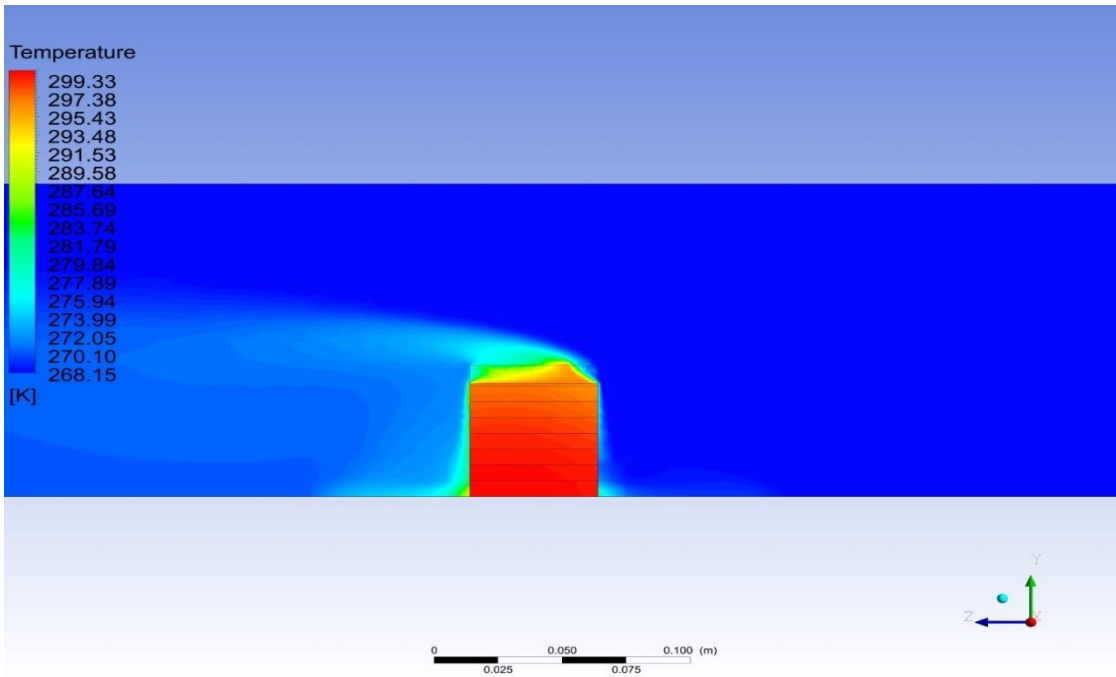
Şekil 4.51’de görüldüğü üzere 2.32 m/s hava giriş hızı için 7. batarya modelinde yaklaşık olarak 305 K’e varabilen hücre sıcaklıkları gözlenmiştir. Genel olarak 8. batarya modelinden 1. batarya modeline doğru maksimum hücre sıcaklıklarının azaldığı net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.52’de verilen sonuçlar ise aynı sınır şartlarında 1. batarya modeli için maksimum hücre sıcaklıklarının 300 K’nin üzerine çıkmadığını göstermektedir. Şekil 4.53’de 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı şartlarında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen simülasyon sonuçları, grafik halinde verilmiştir. Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da ise 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için gerçekleştirilen ve 2. 3. ve 4. batarya modellerine ait sayısal simülasyon sonuçları görülmektedir.



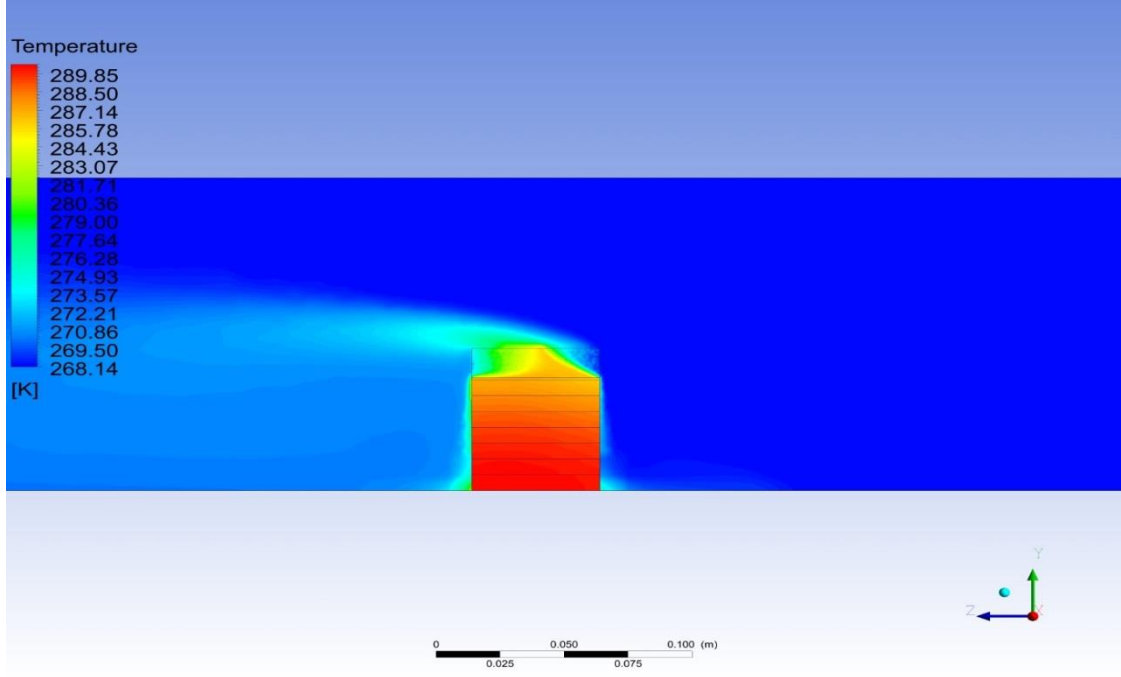
Şekil 4.53: 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.



Şekil 4.54: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 2. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

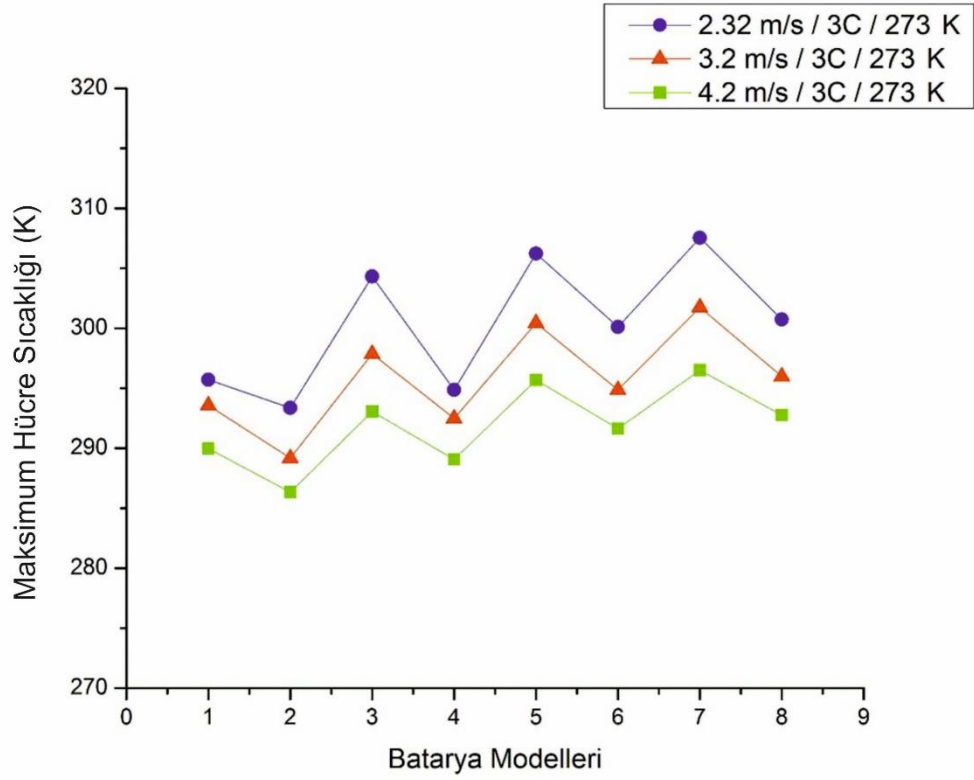


Şekil 4.55: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 3. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

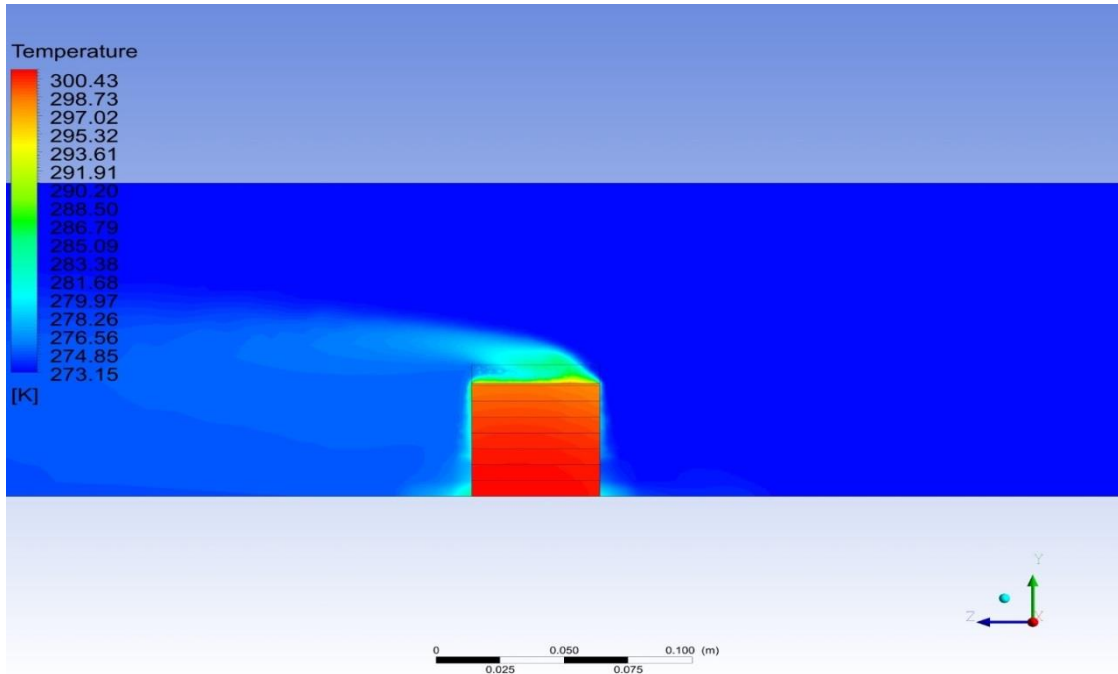


Şekil 4.56: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı için 4. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

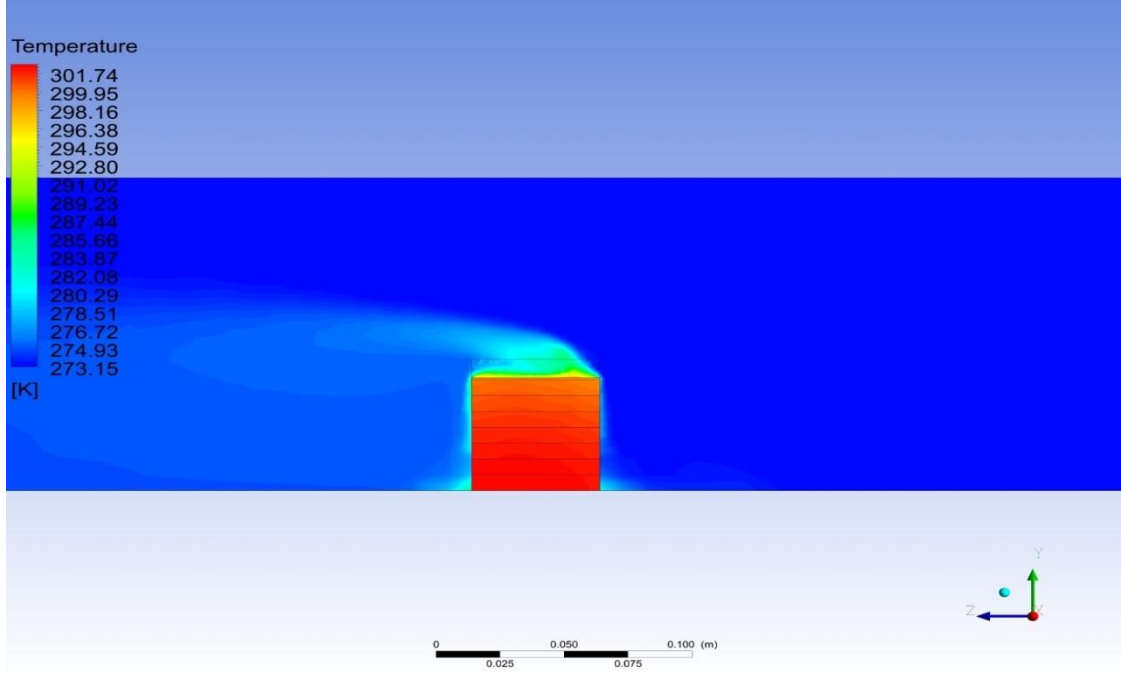
Şekil 4.53, Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da verilen analiz sonuçlarına göre maksimum hücre sıcaklıkları, 305 K'nin üzerine çıkmamaktadır. Bataryaların maksimum çalışma sıcaklığının 333 K olduğu düşünülürse bu sıcaklık değerleri, uygun olarak kabul edilebilir. Şekil 4.57'de 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı şartlarında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen HAD analizi sonuçları görülmektedir. Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da ise 3.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için gerçekleştirilen ve 5. ve 6. batarya modellerine ait sıcaklık dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.57: 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.

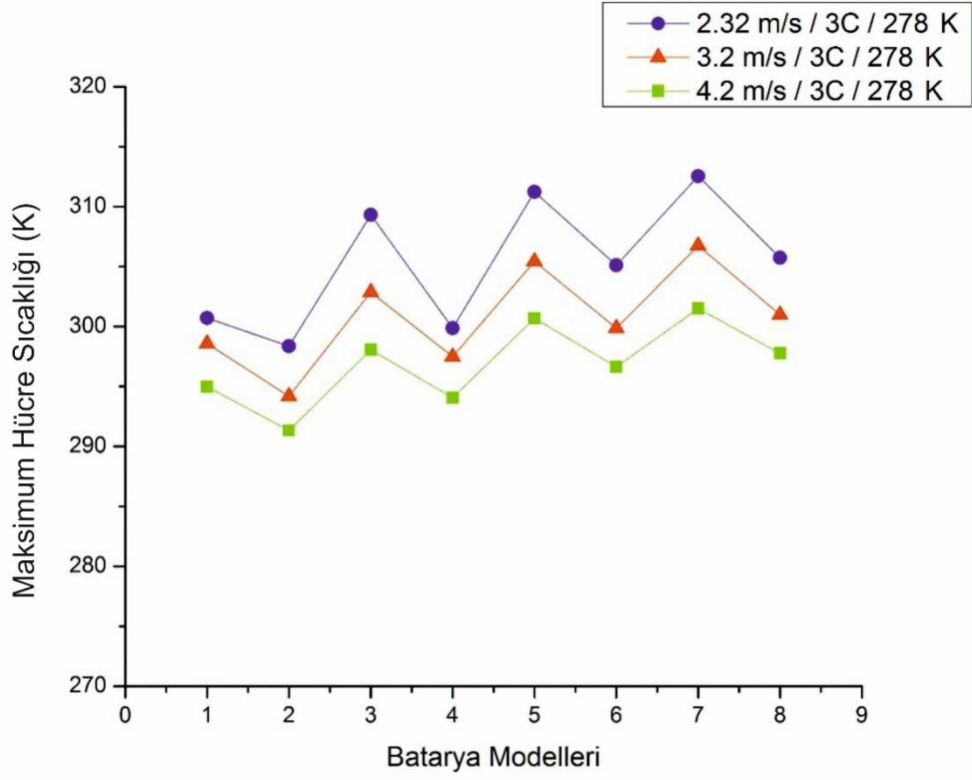


Şekil 4.58: 3.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 5. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

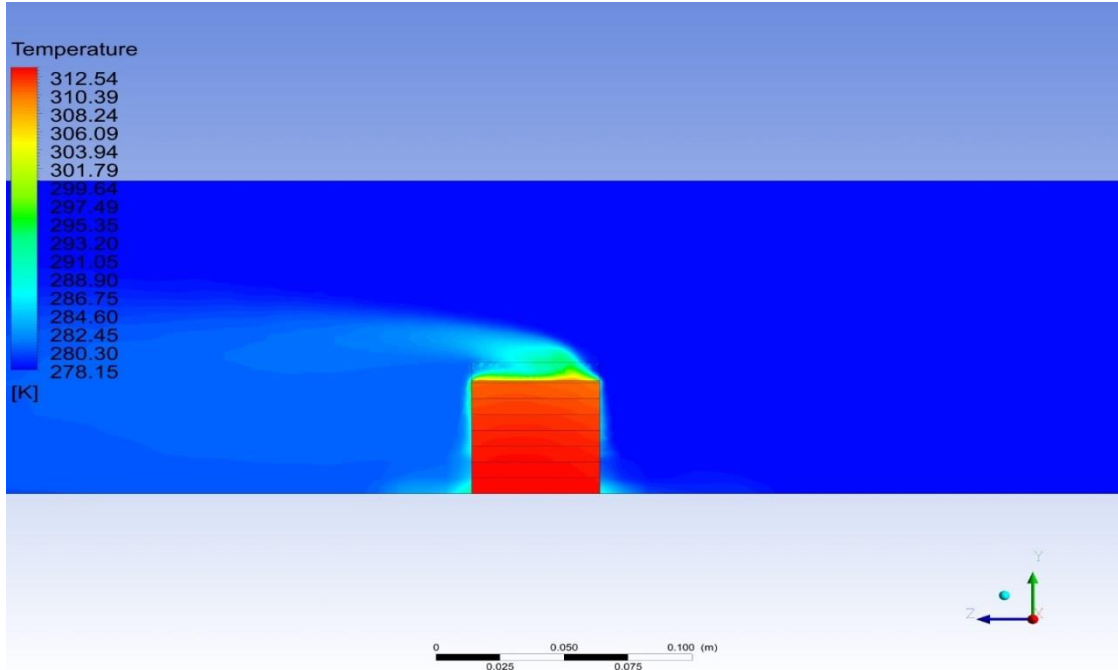


Şekil 4.59: 3.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

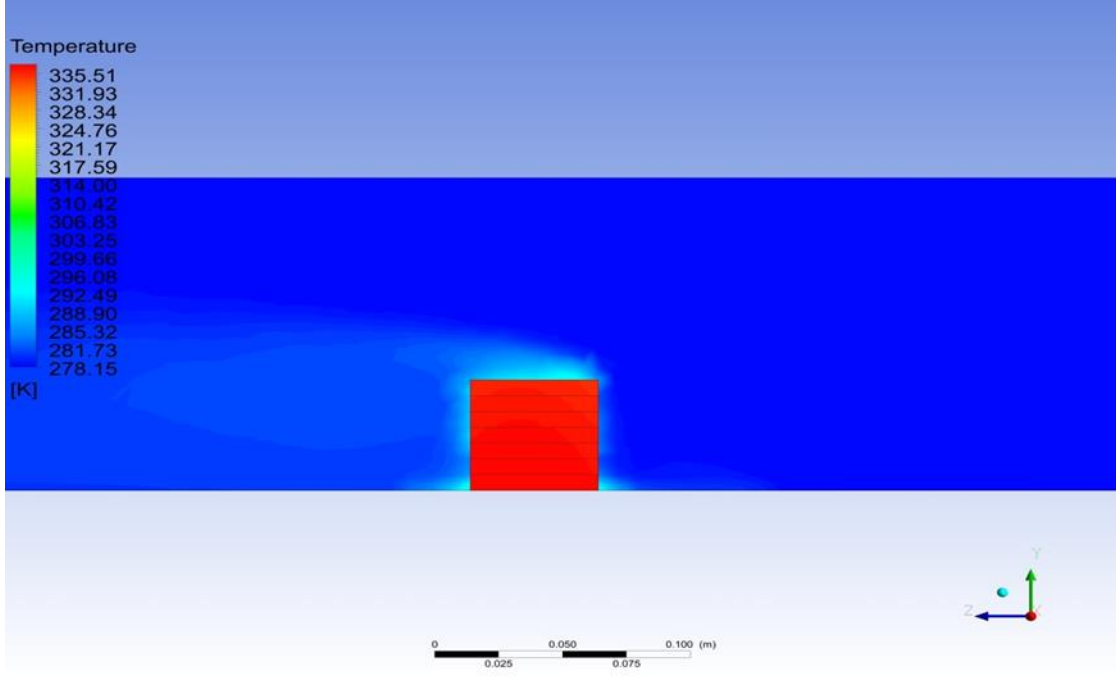
Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59’da verilen HAD analizi sonuçları, bize maksimum hücre sıcaklıklarının 308 K’nin üzerine çıkmadığını göstermektedir. 1C ve 2C deşarj oranları ile karşılaştırıldığında batarya modelleri arasındaki sıcaklık farklarının arttığı görülmektedir. Bu durum, yüksek deşarj oranlarında daha fazla ısı üretiminin varlığı ile açıklanabilir. 3.2 m/s hava giriş hızı için bu değer 302 K şeklindedir. Şekil 4.58 ve Şekil 4.59’da görüldüğü üzere hücre sıcaklıkları üst hücrelere doğru giderek azalmaktadır. Bu durum, kanatçıkların batarya modellerinin üst yüzeyine bitişik olmasından kaynaklanmaktadır. 5. ve 7. batarya modelleri arasındaki sıcaklık farkı ise yaklaşık olarak 1 K şeklindedir. Şekil 4.60’da 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı şartlarında batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıklarının hava giriş hızlarına ve batarya modellerine göre dağılımları görülmektedir. Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de ise sırasıyla 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. ve kanatsız batarya modellerine ait simülasyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.60: 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.

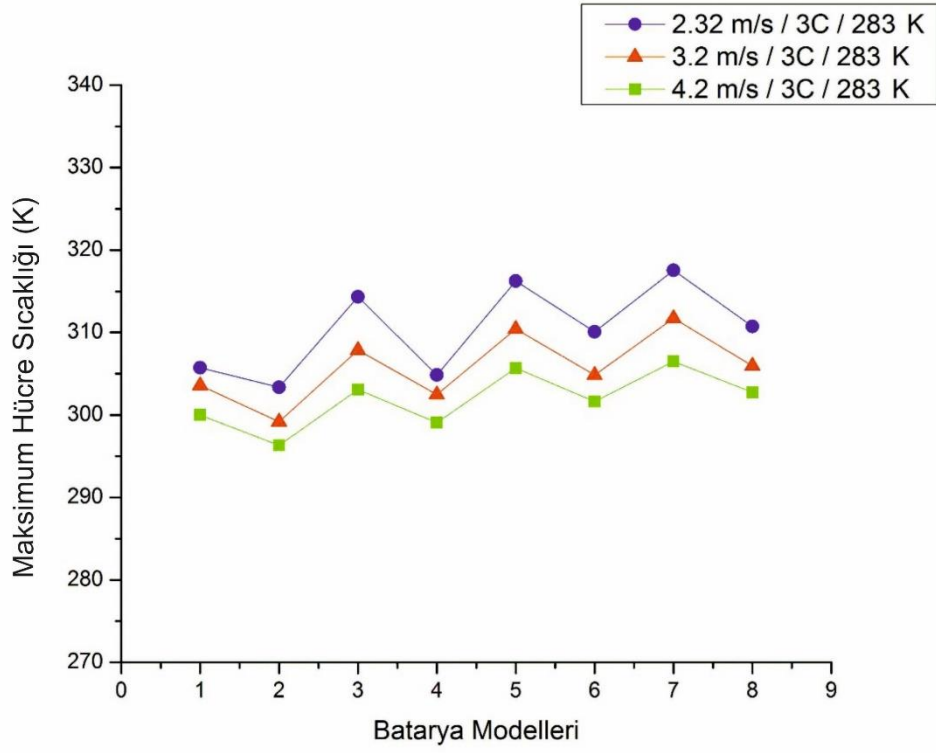


Şekil 4.61: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

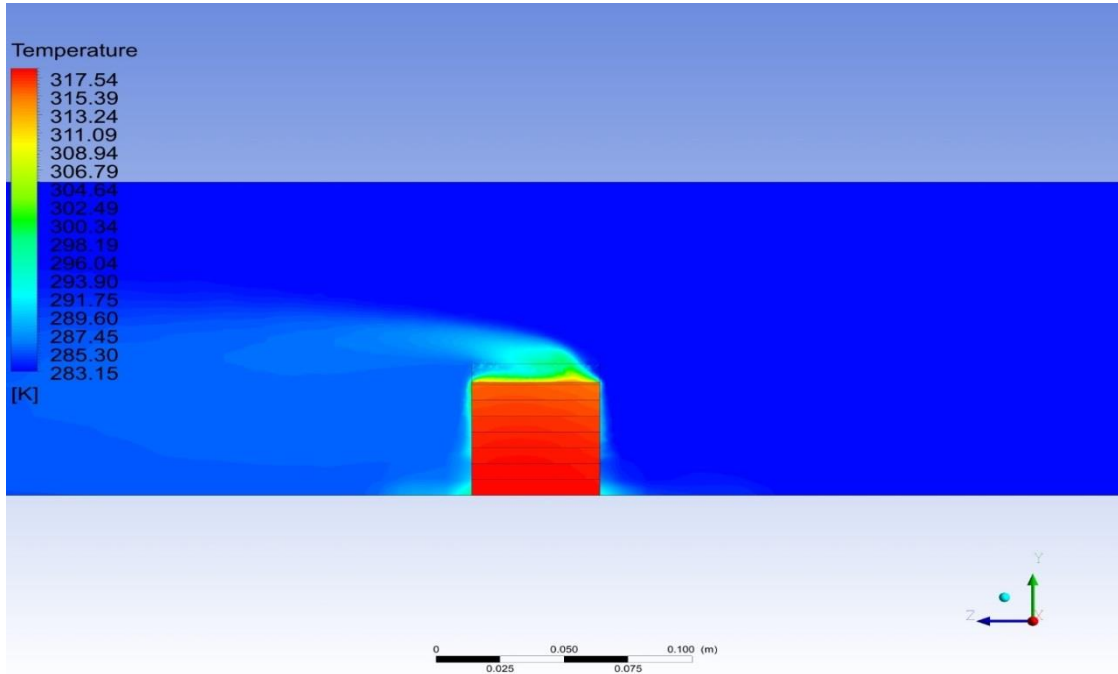


Şekil 4.62: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için kanatsız batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

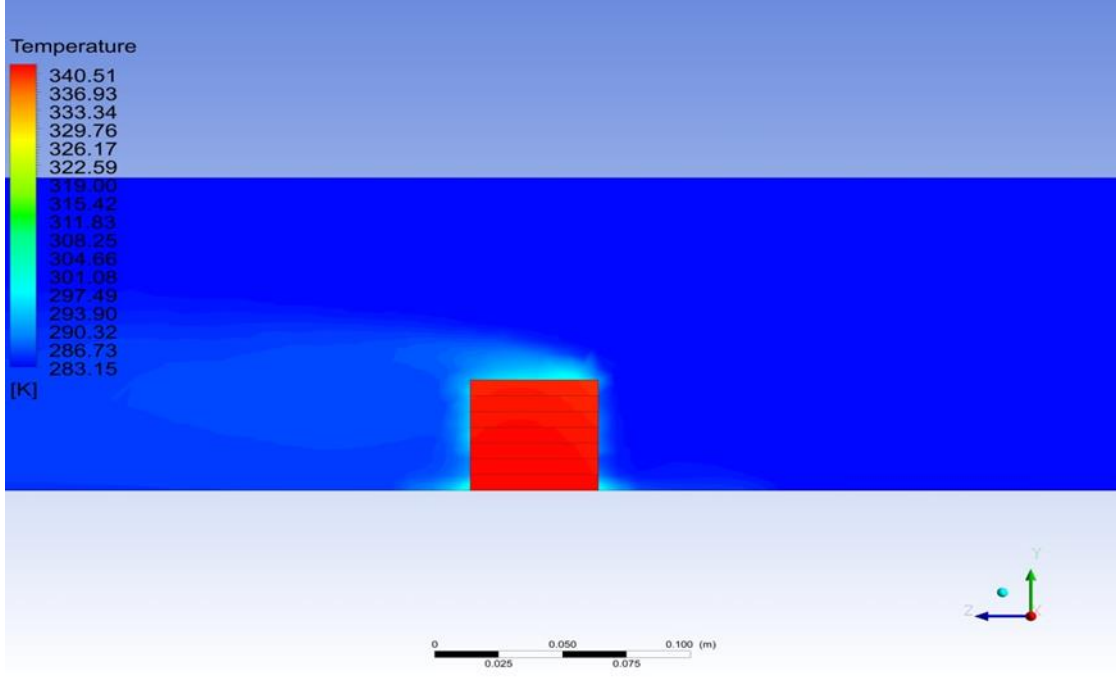
Şekli 4.60, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de verilen analiz sonuçları, düşük hava giriş sıcaklığının ve yüksek deşarj oranının maksimum hücre sıcaklıklarını artırdığını göstermektedir. Özellikle Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de bu durum, çok net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.61 ve Şekil 4.62, bize kanatçık kullanımı ile hücre sıcaklıklarında önemli ölçüde azalma olduğunu göstermektedir. Kanatsız batarya modelinde sıcaklık değerleri, 335 K civarındadır. Bu sıcaklık değeri, bataryaların kullanıldığı maksimum sıcaklık değerini aştığından tehlikeli bir durum arz etmektedir (Wang vd., 2019). Şekil 4.63’de 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 2.32 m/s, 3.2 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızı şartlarında batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıklarının değişimleri görülmektedir. Şekil 4.64 ve Şekil 4.65’de ise sırasıyla 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı şartlarında 7. ve kanatsız batarya modellerine ait HAD analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.63: 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları.



Şekil 4.64: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.



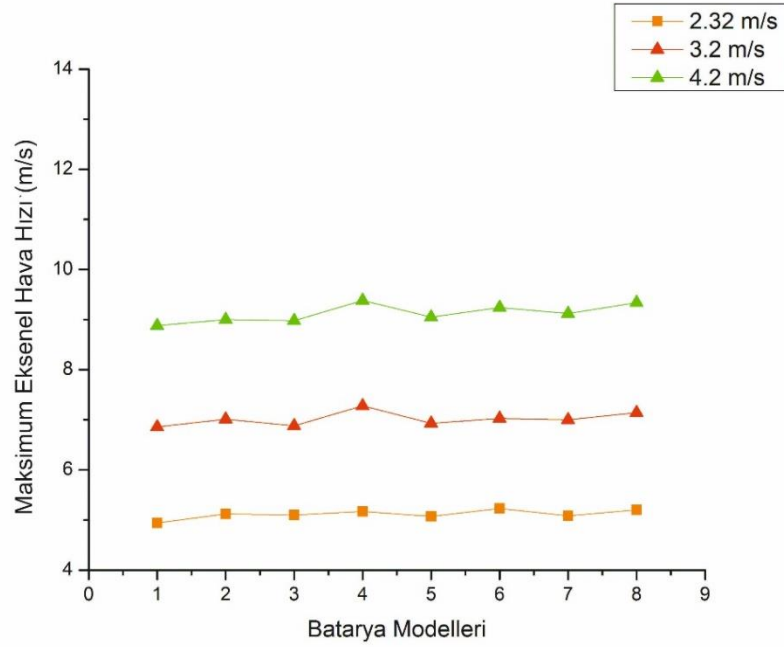
Şekil 4.65: 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için kanatsız batarya modelinden elde edilen sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.63’de görüldüğü üzere 2.32 m/s hava giriş hızı için maksimum hücre sıcaklıkları 317 K’i bulabilmektedir. Şekil 4.64’de 7. batarya modelinde bu durum, çok net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.65’de kanatsız batarya modelinden elde edilen sıcaklık değerlerinin 340 K’e çıktığı görülmektedir. 278 K ve 283 K hava giriş sıcaklığı, 3C deşarj oranı ve 2.32 m/s hava giriş hızı için kanatsız batarya modelinden elde edilen sıcaklıklar, bize yüksek deşarj oranlarında kanatçık kullanmanın önemini bir kez daha göstermektedir (Wang vd., 2019). Geliştirilen bu soğutma modeli, 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığı için maksimum hücre sıcaklıklarında %10’a kadar varabilen bir azalmayı sağlamaktadır.

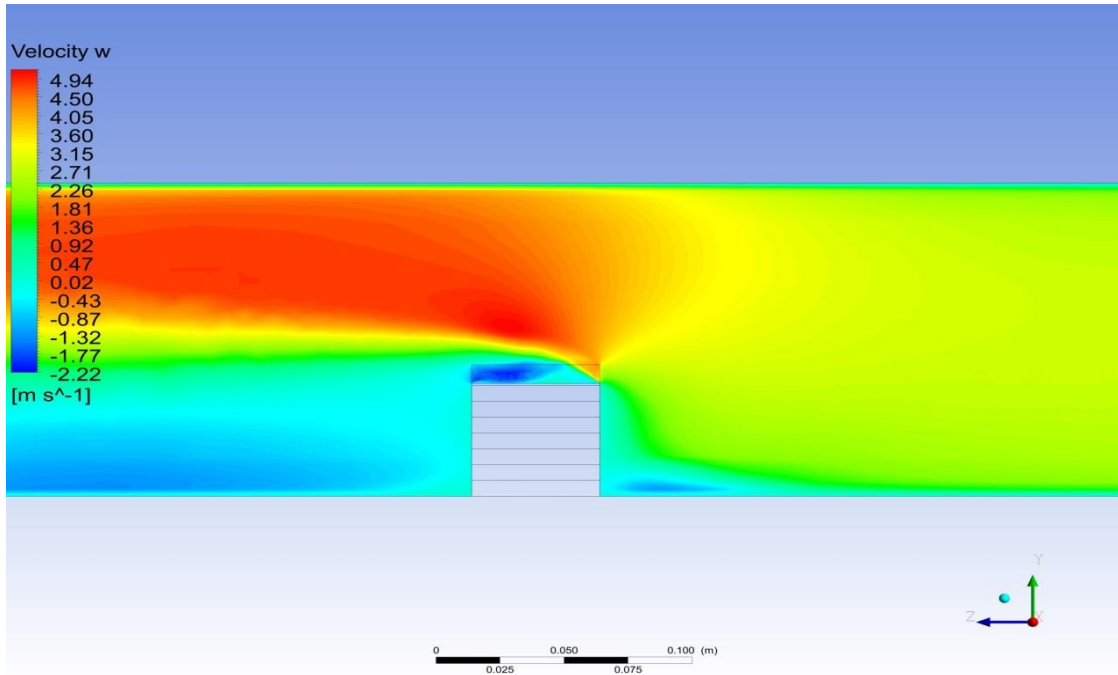
4.2.2. Batarya Modellerinden Elde Edilen Hız ve Türbülans Dağılımları ve Minitab Programından Elde Edilen Bulgular

PIV cihazı ile yapılan deneylerde farklı fan frekansları için hava tünelineki aksel hava hızlarının dağılımları ve hız haritaları çıkarılmıştır. PIV ile yapılan ölçümlerin doğruluğu açısından HAD analizlerinde de üç ayrı hava giriş hızı için aksel hava hızları analiz edilmiştir. 2.32 m/s, 3.2 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızları için aksel hız dağılımları, hız gradyanları ve türbülans değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.66’da hava giriş hızlarına göre simülasyonlardan elde edilen aksel hızların maksimum değerleri görülmektedir. Şekil

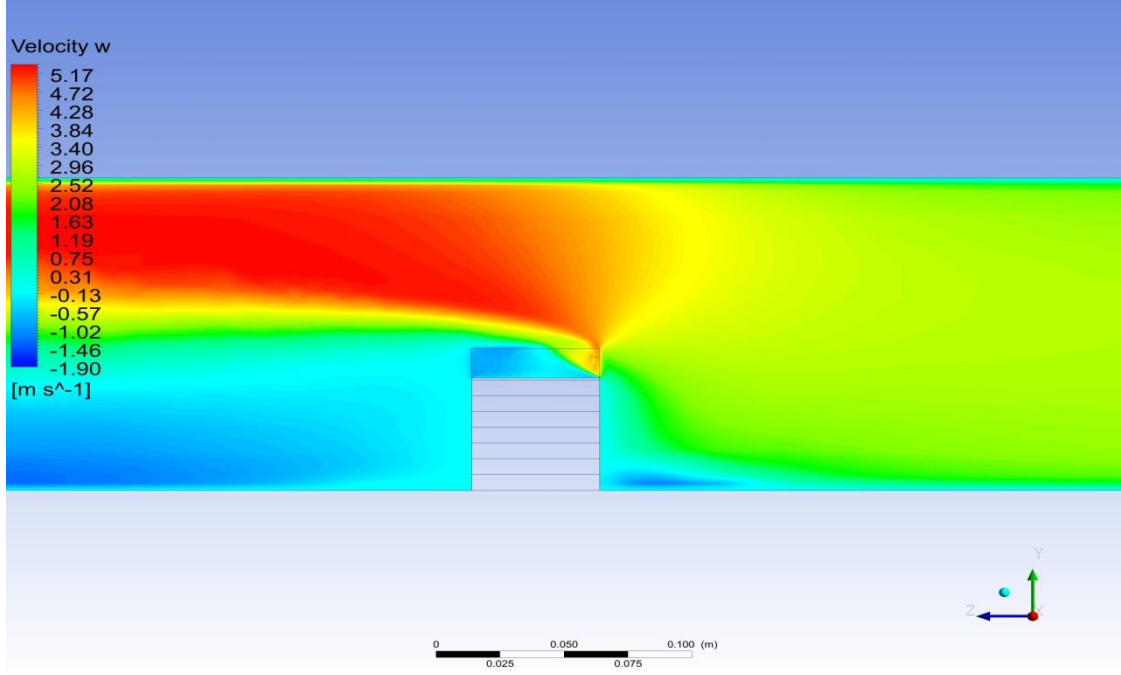
4.67 ve Şekil 4.68’de ise 2.32 m/s hava giriş hızı için sırasıyla 1.ve 4. batarya modellerinden elde edilen hız gradyanları verilmiştir. Şekil 4.69 ve Şekil 4.70’de ise 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı ve 278 K hava giriş sıcaklığı için 6. batarya modelinden elde edilen türbülans değerleri görülmektedir.



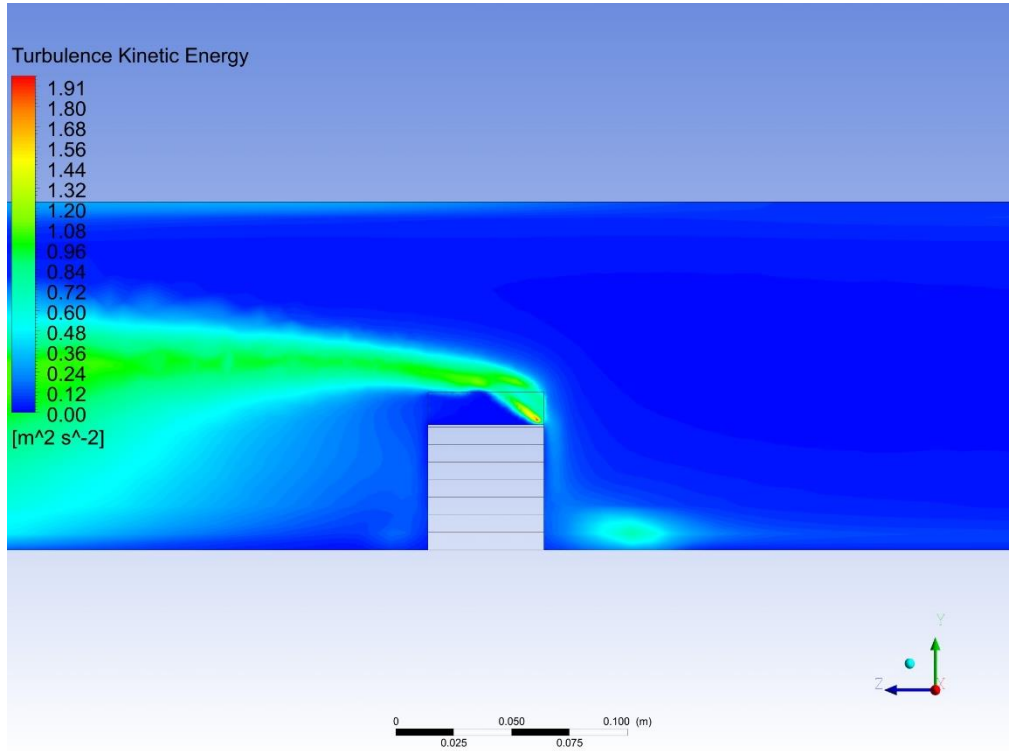
Şekil 4.66: 2.32 m/s, 3.2 m/s ve 4.2 m/s hava giriş hızlarına göre simülasyonlardan elde edilen aksenal hızların maksimum değerleri.



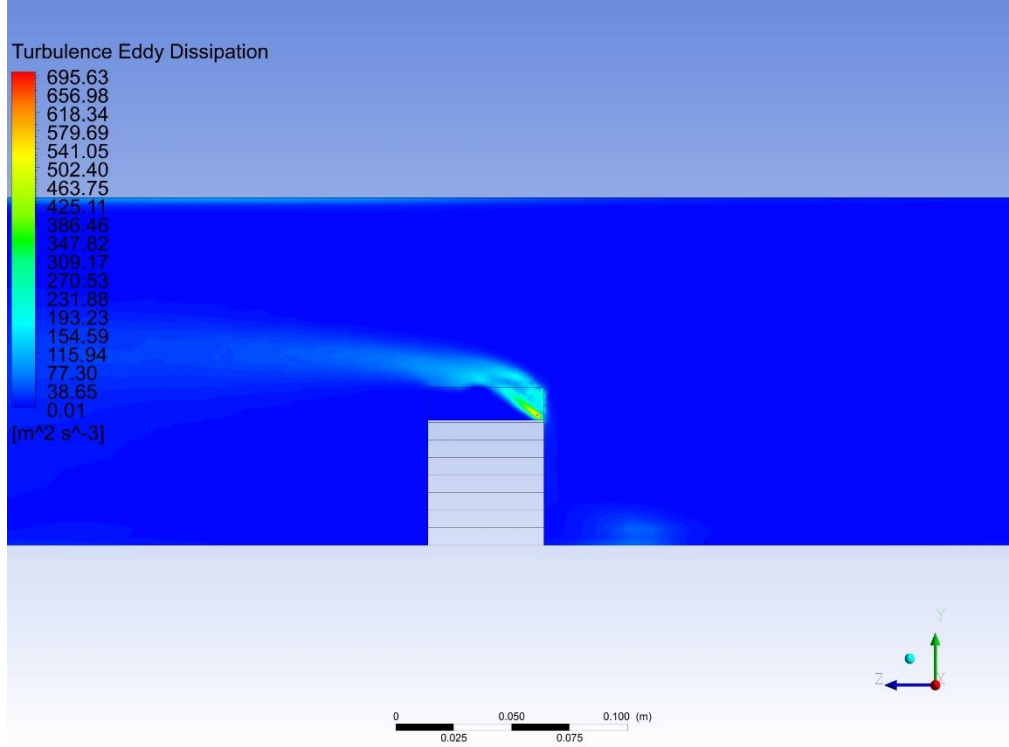
Şekil 4.67: 2.32 m/s hava giriş hızı için 1. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.



Şekil 4.68: 2.32 m/s hava giriş hızı için 4. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.

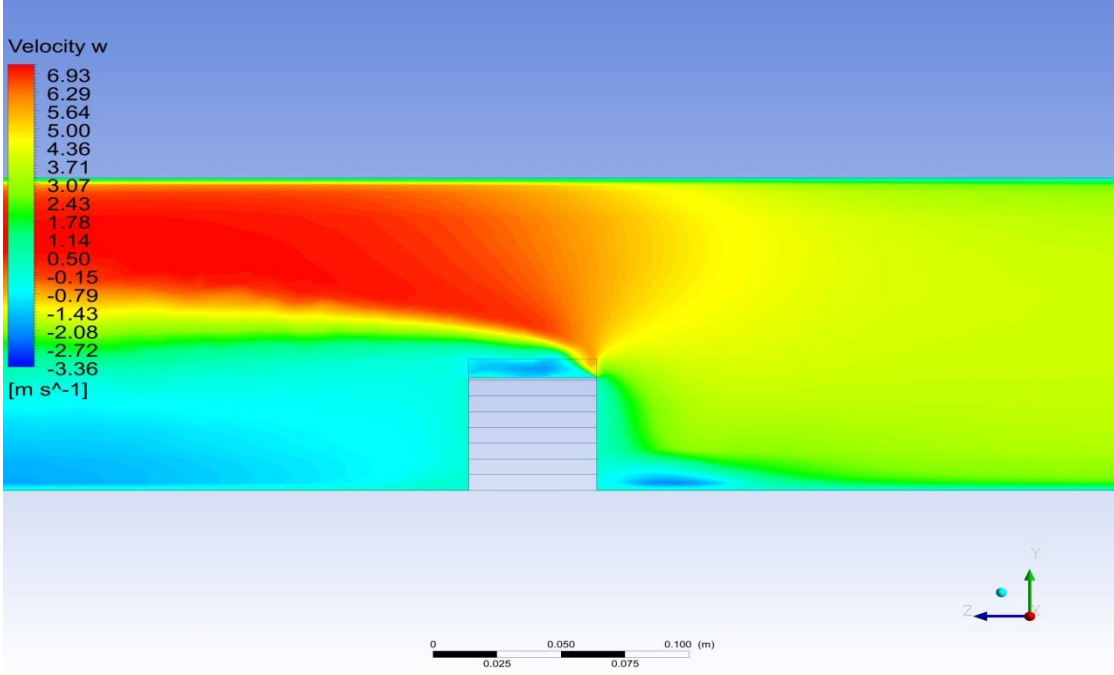


Şekil 4.69: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 6. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans kinetik enerjisi değerleri.

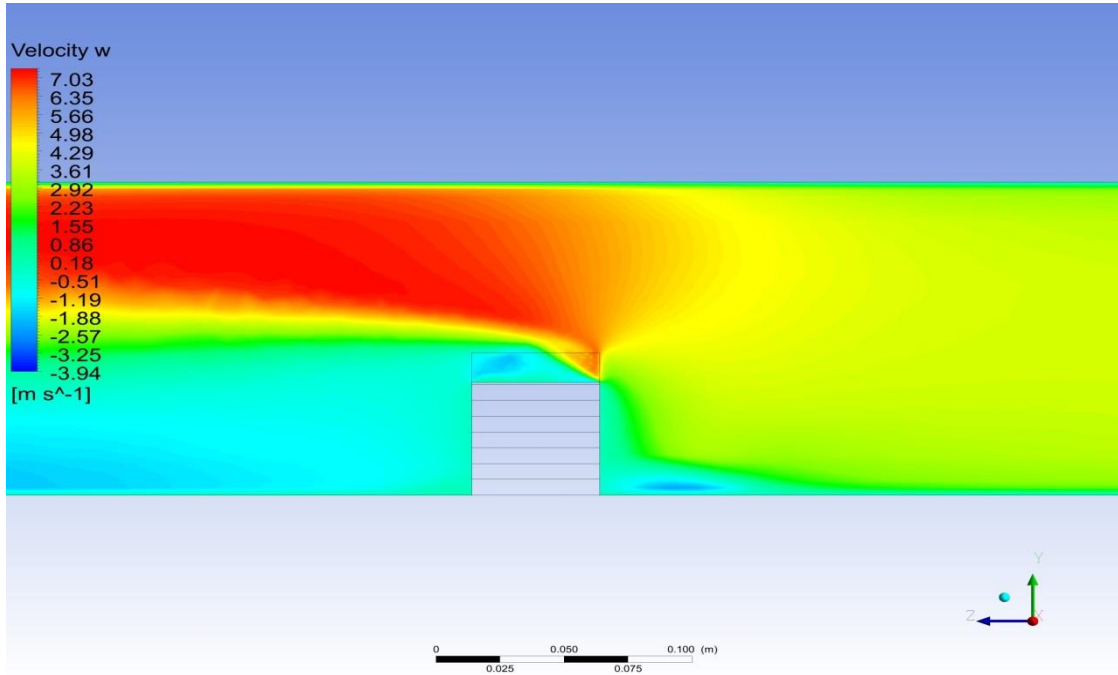


Şekil 4.70: 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı için 6. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans yayılım oranı değerleri.

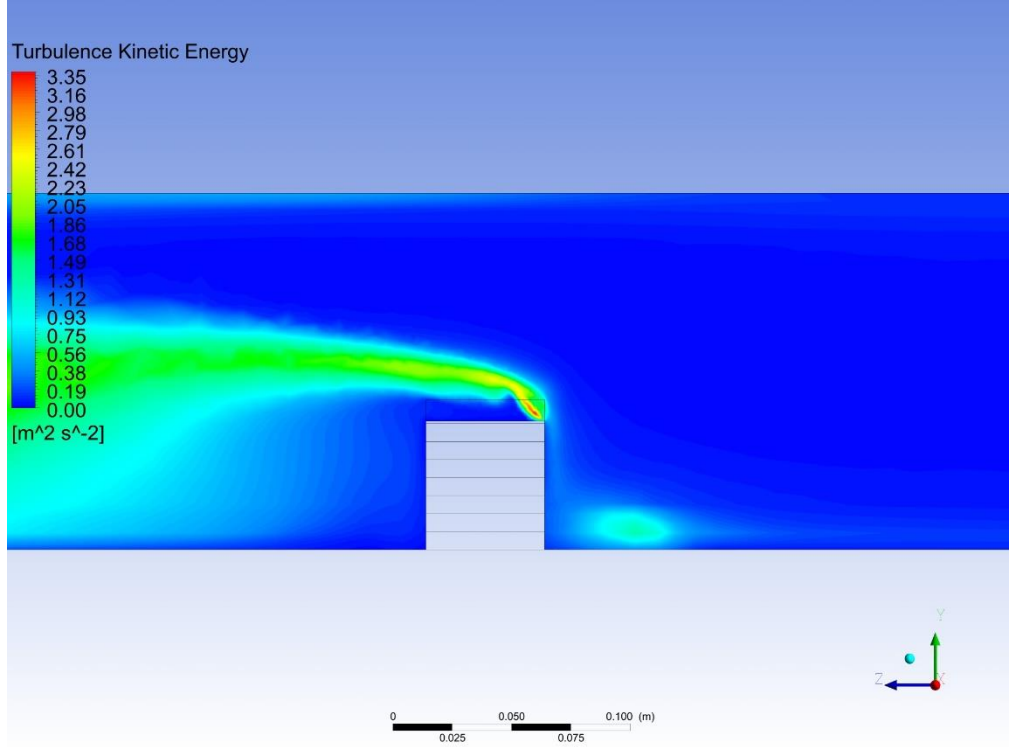
Şekil 4.66’da görüldüğü üzere soğutma havasının tünele giriş hızı arttıkça aksenal hız değerleri de artmaktadır. 2.32 m/s hava giriş hızı için bu değer, yaklaşık olarak 5.3 m/s değerine çıkabilirken 4.2 m/s hava giriş hızında ise aksenal hızların maksimum değeri 9.4 m/s değerine kadar çıkabilmektedir. Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de verilen sonuçlara göre kanatçık yüksekliği arttıkça soğutma havasının geçeceği kesit alanı azaldığından aksenal hız değerleri de artmaktadır (Bergman vd., 2011). Bu bağlamda 4. batarya modelinden elde edilen aksenal hızların 1. batarya modelinden büyük olması beklenen sonuçlar arasındadır. Şekil 4.69’da ise türbülans kinetik enerjisinin maksimum değerlerinin kanat üzerinde ve arkasında olduğu anlaşılmaktadır. 2.32 m/s hava giriş hızı, 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığı ve 6. batarya modeli için bu değer, $1.91 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ’dir. Şekil 4.70’de ise aynı sınır şartları altında türbülans yayılım oranının maksimum değerinin $695.63 \text{ m}^2/\text{s}^3$ olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.71 ve Şekil 4.72’de ise 3.2 m/s hava giriş hızı için 5. ve 6. batarya modellerinden elde edilen hız gradyanları görülmektedir. Şekil 4.73’de ise 3.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı ve 273 K hava giriş sıcaklığı için 7. batarya modelinden elde edilen türbülans kinetik enerjisi değerleri görülmektedir.



Şekil 4.71: 3.2 m/s hava giriş hızı için 5. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.

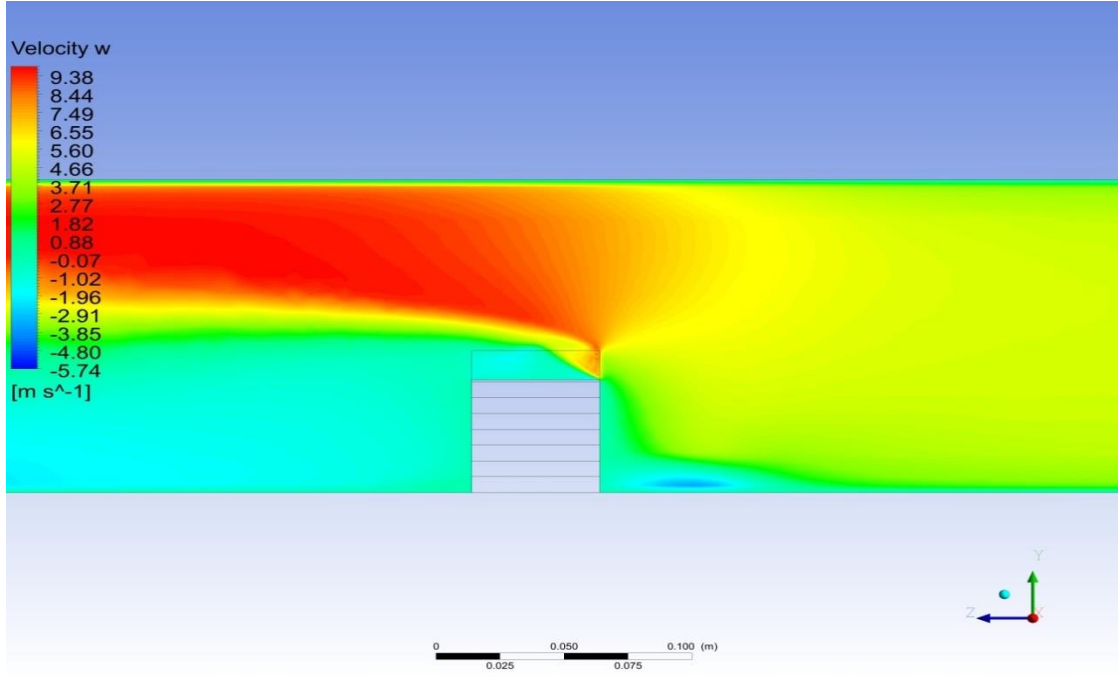


Şekil 4.72: 3.2 m/s hava giriş hızı için 6. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.

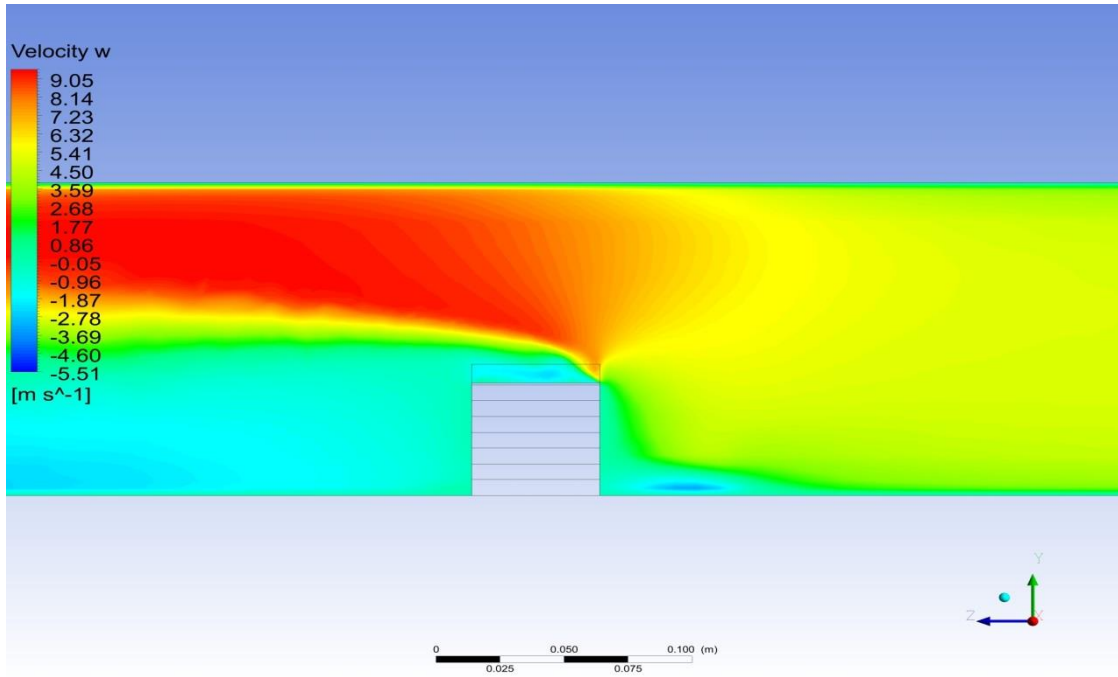


Şekil 4.73: 3.2 m/s hava giriş hızı, 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığı 7. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans kinetik enerjisi değerleri.

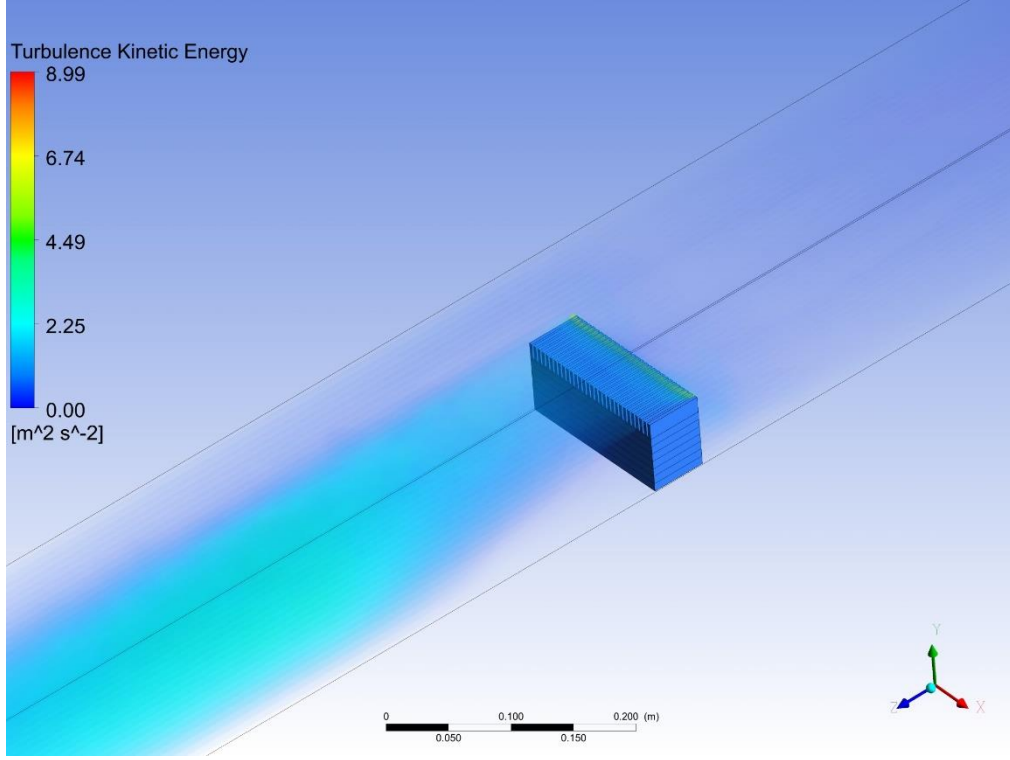
Şekil 4.71 ve Şekil 4.72’de görülen simülasyon sonuçları, bize 3.2 m/s hava giriş hızı için batarya modellerinden elde edilen aksenal hızların maksimum değerlerinin 7 m/s’den büyük olabileceğini göstermektedir. 5. batarya modelinden elde edilen aksenal hızların maksimum değeri 6.93 m/s iken 6. batarya modelinde bu değer 7.03 m/s şeklindedir. Kanatçık yüksekliği ve sayısı arttıkça, hız değerleri de artmaktadır. Şekil 4.73’de ise verilen sınır şartları için yerel türbülans kinetik enerjisi maksimum $3.35 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.74 ve Şekil 4.75’de ise 4.2 m/s hava giriş hızı için 4. ve 5. batarya modellerinden elde edilen hız gradyanları verilmiştir. Şekil 4.76’da ise 4.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı ve 268 K hava giriş sıcaklığı için 4. batarya modelinden elde edilen türbülans kinetik enerjisi değerleri görülmektedir.



Şekil 4.74: 4.2 m/s hava giriş hızı için 4. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.

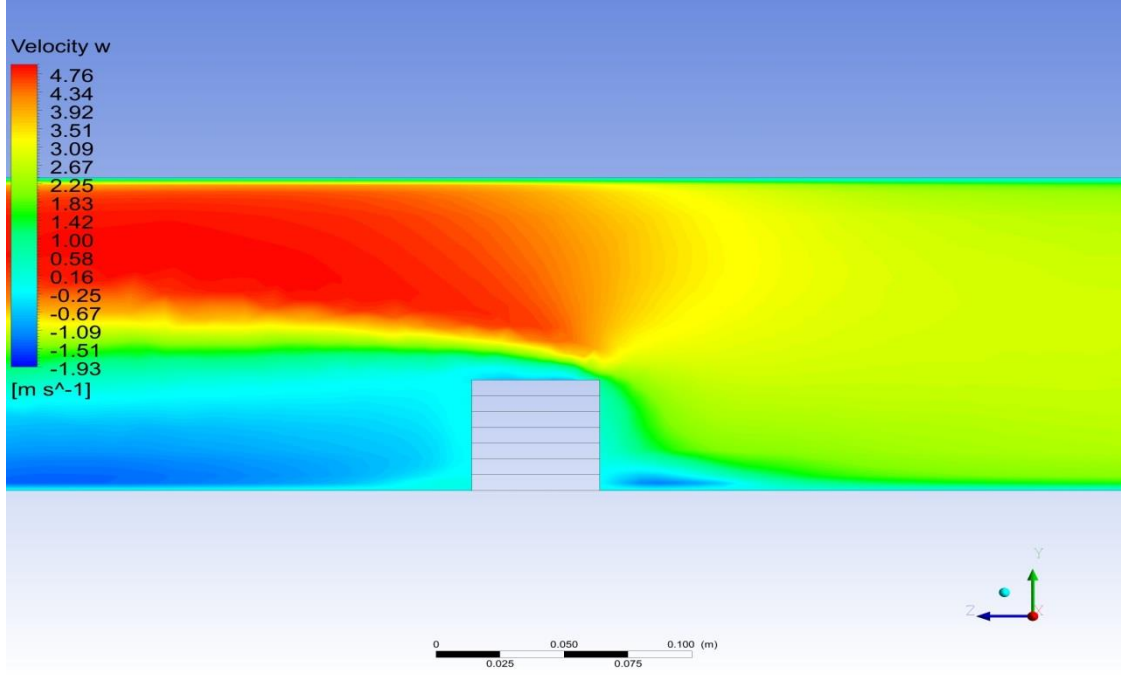


Şekil 4.75: 4.2 m/s hava giriş hızı için 5. batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.

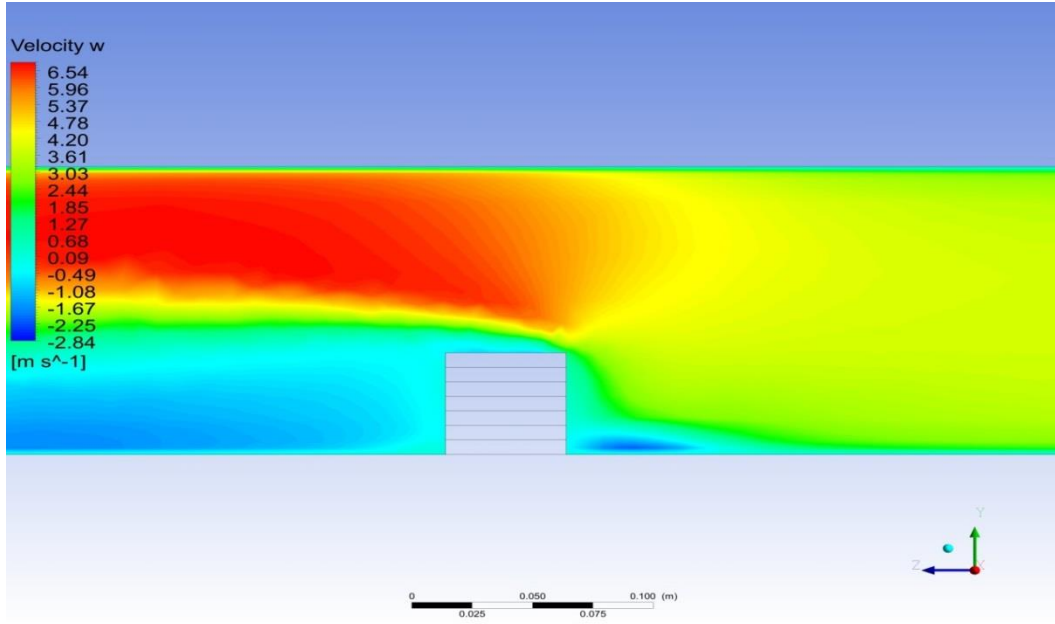


Şekil 4.76 : 4.2 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığı 4. batarya modelinden elde edilen yerel türbülans kinetik enerjisi değerleri.

Şekil 4.74 ve Şekil 4.75’de görüldüğü üzere sayısal simülasyon sonucu elde edilen aksenal hızlarının maksimum değerleri, 9 m/s’den büyük olabilmektedir. Özellikle 4. batarya modelinde bu değer yaklaşık 9.4 m/s olarak gözlenmiştir. Şekil 4.76’da ise türbülans kinetik enerjisinin maksimum değeri $8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ’yi geçmektedir. Hava giriş hızı arttıkça türbülans kinetik enerjisinin de artması beklenen bulgular arasındadır. Verilen hava giriş hızları için türbülans kinetik enerjisi, batarya üzerinde maksimum değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.77 ve Şekil 4.78’de ise kanatsız batarya modeli için sırasıyla 2.32 m/s ve 3.2 m/s hava giriş hızlarında elde edilen hız gradyanları görülmektedir.



Şekil 4.77: 2.32 m/s hava giriş hızı için kanatsız batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.

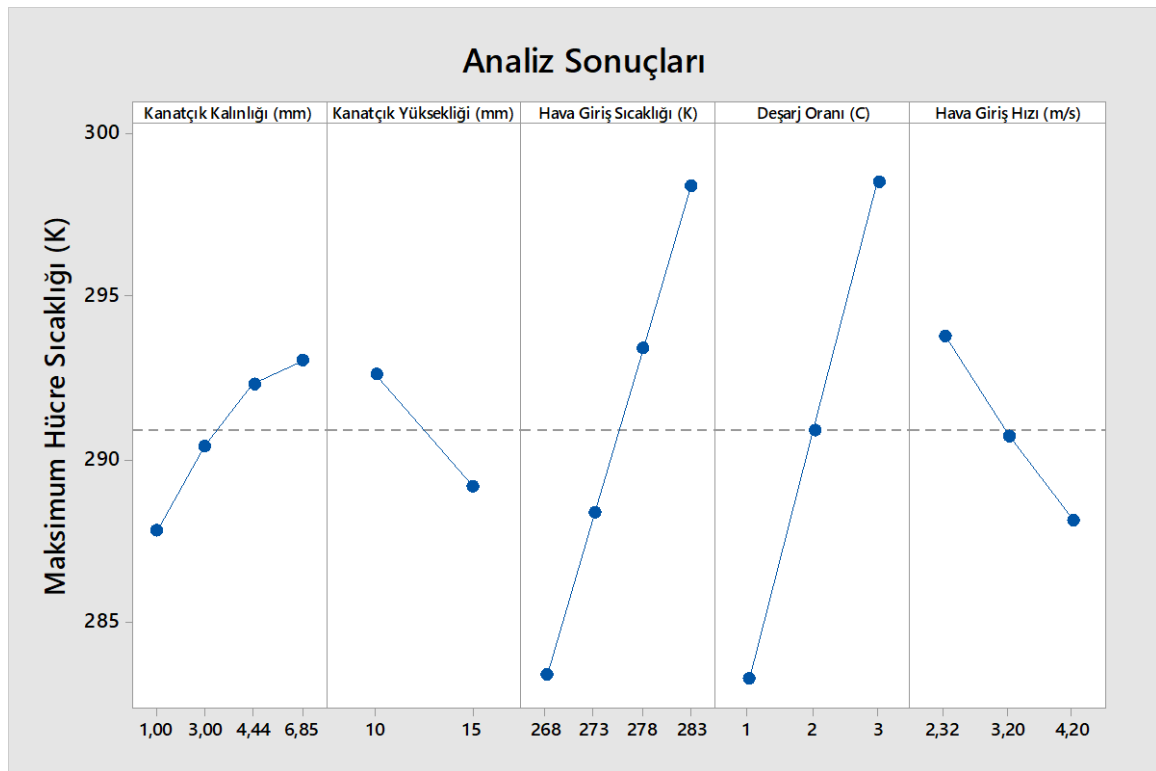


Şekil 4.78: 3.2 m/s hava giriş hızı için kanatsız batarya modelinden elde edilen hız gradyanları.

Şekil 4.77 ve Şekil 4.78’de verilen hız gradyanları, 2.32 m/s ve 3.2 m/s hava giriş hızı için maksimum hız değerlerinin sırasıyla 5 m/s ve 7 m/s değerlerinin altında kaldığını göstermektedir. Kanatlı batarya modellerinde maksimum hava hızı değerleri, sırasıyla 2.32 m/s ve 3.2 m/s hava giriş hızları için 5 m/s ve 7 m/s’nin üzerine çıkabilirken kanatsız batarya modelinde 5 m/s ve 7 m/s değerlerinin altında kalmaktadır. Kullanılan kanatçıklar,

havanın geçebileceği alanı daraltmaktadır. Kanatsız batarya modelinde havanın geçebileceği alan daha büyük olduğundan tünel içindeki hava hızı değerleri, kanatçıklı batarya modellerine göre daha düşük olmaktadır. Genel olarak PIV'den elde edilen hız değerleri, HAD analizlerinden elde edilen hız değerlerine göre düşüktür (Smith vd., 2020).

Minitab Programı, deneysel tasarım amaçlı kullanılan bir programdır (Alin, 2010). Taguchi ve Yüzey Yanıt Metodunda otuzun üzerinde tekrarlar ve iterasyonlar sonucunda çeşitli sonuçlar elde edilmiştir (Woodall vd., 2003; Anderson ve Whitcomb, 2016). Şekil 4.79, Şekil 4.80'de Taguchi ve Yüzey Yanıt Metodu kullanılarak Minitab Programından elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekil 4.81'de ise Yüzey Yanıt Metodu kullanılarak Minitab Programından elde edilen regresyon eşitliği verilmiştir.



Şekil 4.79: Maksimum hücre sıcaklığına etki eden parametrelerin Taguchi Yöntemiyle belirlenmesi.

Sinyal/Gürültü Oranları İçin Sonuç Tablosu

En küçük en iyidir

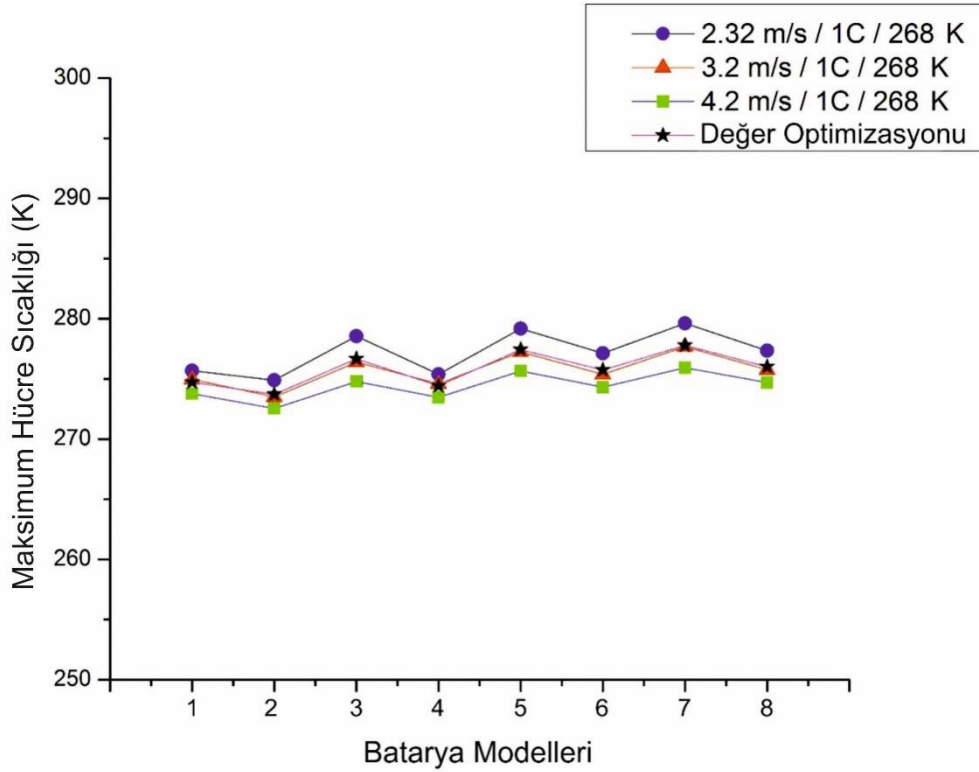
Level	Kanatçık Kalınlığı (mm)	Kanatçık Yüksekliği (mm)	Hava Giriş Sıcaklığı (K)	Deşarj Oranı (C)	Hava Giriş Hızı (m/s)
1	-49,18	-49,32	-49,04	-49,04	-49,36
2	-49,26	-49,22	-49,20	-49,27	-49,27
3	-49,31		-49,35	-49,50	-49,19
4	-49,33		-49,49		
Delta	0,16	0,10	0,45	0,45	0,17
Sıralama	4	5	2	1	3

Şekil 4.80: Maksimum hücre sıcaklığına etki eden parametrelerin Taguchi Yönteme göre sıralanması.

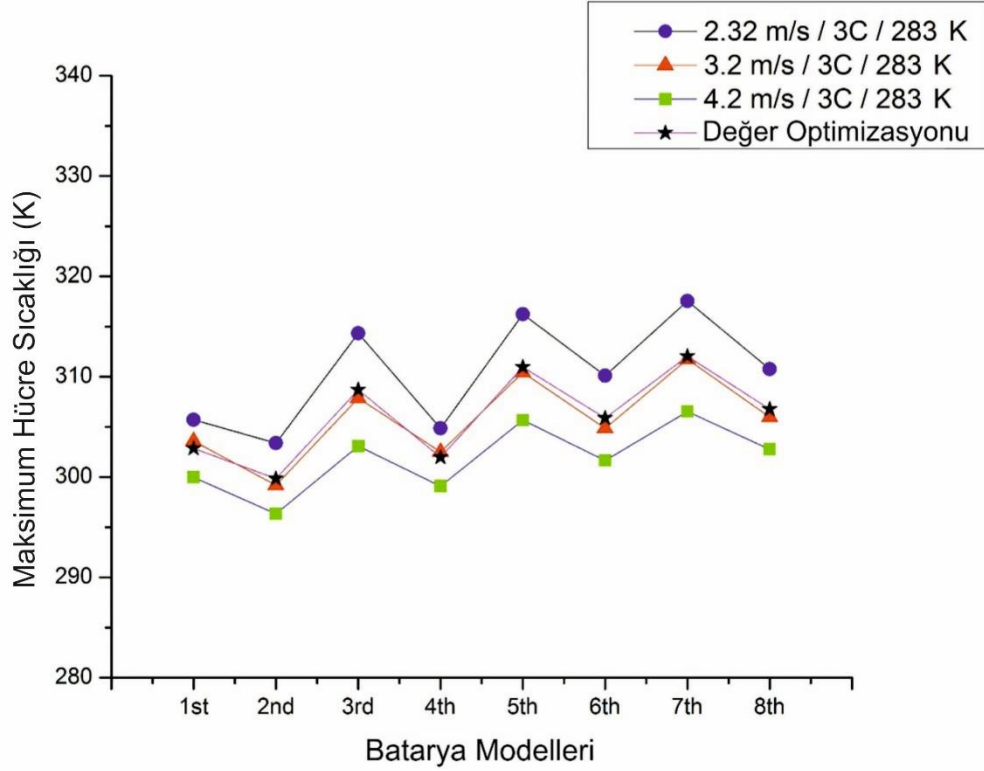
$$\begin{aligned} \text{Maksimum Hücre Sıcaklığı (K)} = & 5 + 2,184 \text{ Kanatçık Kalınlığı (mm)} \\ & - 0,400 \text{ Kanatçık Yüksekliği (mm)} \\ & + 1,011 \text{ Hava Giriş Sıcaklığı (K)} + 14,98 \text{ Deşarj Oranı (C)} \\ & - 4,48 \text{ Hava Giriş Hızı (m/s)} \\ & - 0,1454 \text{ Kanatçık Kalınlığı (mm)*Kanatçık Kalınlığı (mm)} \\ & - 0,00002 \text{ Hava Giriş Sıcaklığı (K)*Hava Giriş Sıcaklığı (K)} \\ & + 0,0004 \text{ Deşarj Oranı (C)*Deşarj Oranı (C)} \\ & + 0,4762 \text{ Hava Giriş Hızı (m/s)*Hava Giriş Hızı (m/s)} \\ & - 0,03505 \text{ Kanatçık Kalınlığı (mm)*Kanatçık Yüksekliği (mm)} \\ & + 0,00002 \text{ Kanatçık Kalınlığı (mm)*Hava Giriş Sıcaklığı (K)} \\ & + 0,4539 \text{ Kanatçık Kalınlığı (mm)*Deşarj Oranı (C)} \\ & - 0,1859 \text{ Kanatçık Kalınlığı (mm)*Hava Giriş Hızı (m/s)} \\ & - 0,00001 \text{ Kanatçık Yüksekliği (mm)*Hava Giriş Sıcaklığı (K)} \\ & - 0,3406 \text{ Kanatçık Yüksekliği (mm)*Deşarj Oranı (C)} \\ & + 0,1661 \text{ Kanatçık Yüksekliği (mm)*Hava Giriş Hızı (m/s)} \\ & + 0,00006 \text{ Hava Giriş Sıcaklığı (K)*Deşarj Oranı (C)} \\ & + 0,00000 \text{ Hava Giriş Sıcaklığı (K)*Hava Giriş Hızı (m/s)} \\ & - 1,4995 \text{ Deşarj Oranı (C)*Hava Giriş Hızı (m/s)} \end{aligned}$$

Şekil 4.81: Maksimum hücre sıcaklığının kanatçık kalınlığı, kanatçık yüksekliği, deşarj oranı, hava giriş hızı ve hava giriş sıcaklığına göre değişim denklemi.

Şekil 4.79, Şekil 4.80’de görüldüğü üzere maksimum hücre sıcaklığına etki eden en önemli parametre deşarj oranı olup kanatçık kalınlığı ise en az etkiye sahiptir. Özellikle hava giriş sıcaklığı ve deşarj oranının azalmasının hücre sıcaklığını düşürdüğü Minitab Programından elde edilen sonuçlarda da kendisini göstermektedir. Bu durum, Minitab Programından elde edilen sonuçların, HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar ile de uyumlu olduğunu göstermektedir. Şekil 4.81 ise Minitab Programı kullanılarak maksimum hücre sıcaklığı ile deşarj oranı, kanatçık kalınlığı ve yüksekliği, hava giriş sıcaklığı ve hızı arasında deneysel bir bağıntı kurulabileceğini göstermektedir. Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’de ise sırasıyla 1C ve 3C deşarj oranlarında 268 K ve 283 K hava giriş sıcaklıklarında batarya modelleri için gerçekleştirilen değer optimizasyonu sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.82: 1C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



Şekil 4.83: 3C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.

Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’de görüldüğü üzere 2.32 m/s hava giriş hızı, çoğu batarya modeli için risk oluşturmaktadır. En az risk oluşturan hava giriş hızının 4.2 m/s olduğu göz önüne alınırsa batarya soğutmada hava giriş hızının artmasının etkili bir yol olduğu düşünülebilir. Bu sebeple hava giriş sıcaklığını artırmak maksimum hücre sıcaklığını azaltacağından önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle, HAD analizleri, Taguchi ve Yüzey Yanıt Metodundan elde edilen sonuçlar da göz önüne alındığında yapılan bu değer optimizasyonun başarılı sonuçlar verdiği savunulabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada lityum-polimer bataryaların zorlanmış taşınımında hava ile soğutulması incelenmiştir. Üst yüzeyleri farklı hatve uzunluklarına, farklı kanatçık yüksekliklerine ve farklı kanatçık kalınlıklarına sahip alüminyum kanatçıklar ile kaplanan batarya modellerinin etrafındaki akış yapısını görselleştirmek ve hava hızlarını ölçmek için parçacık görüntülemeli hızölçer cihazı kullanılmıştır. Ancak, parçacık görüntülemeli hızölçer cihazında sadece hız dağılımları ve akış yapısı elde edildiğinden sıcaklık dağılımlarını incelemek için sayısal simülasyonlara başvurulmuştur. Sayısal simülasyon amacıyla aynı batarya modelleri önce ilgili çizim programında modellenmiş sonrasında ise analiz programı ile belirlenen sınır şartlarında incelenmiştir. Batarya modelleri üzerindeki sıcaklık dağılımları; farklı hava hızları, farklı deşarj oranları, farklı hava sıcaklıkları için analiz edilmiştir. Hem deneysel hem de analiz sonuçları için genel bulgular, aşağıda verilmiştir:

1. Kanatlı batarya modellerinde elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları incelendiğinde en yüksek sıcaklık değerleri, 7. batarya modelinde gözlenmiştir. 7. batarya modeli, diğer batarya modelleri ile kıyaslandığında kanatçıklar arası hatve mesafesinin en yüksek olduğu batarya modellerinden birisidir. Kanatçıklar arası hatve mesafesinin artması birim alana düşen kanatçık sayısını ve dolayısı ile ısı transfer yüzey alanını azalttığından batarya hücre sıcaklıklarının artmasına sebep olmaktadır.
2. Kanatlı batarya modellerinde elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları incelendiğinde en düşük sıcaklık değerleri, 2. batarya modeline aittir. 2. batarya modeli, kanatçık sayısının ve yüksekliğinin en fazla olduğu batarya modellerinden biridir. İlaveten; 2. batarya modeli, kanatçıklar arası hatve mesafesinin en az olduğu batarya modellerinden birisidir. Kanatçık sayısının ve yüksekliğinin artması, ısı transfer yüzey alanını ve ısı geçişini artırdığından daha etkili bir soğutma sağlanmaktadır.
3. Kanatsız batarya modelinde elde edilen sıcaklık değerleri, tüm batarya modellerine nazaran daha fazladır. Bu durum, kanatçık kullanmanın batarya soğutmadaki etkisini göstermektedir.
4. Kanatsız batarya modelinde elde edilen eksenel hava hızları, kanatlı batarya modellerinde elde edilen eksenel hava hızlarına göre daha düşük değerlerdedir. Kanatsız batarya modelinde havanın geçiş alanını azaltan kanatçıklar olmadığı için havanın geçebileceği kesit alanı artmakta ve durum eksenel hava hızı değerlerini düşürmektedir.

5. Aynı sıcaklık değerleri için havanın tünele giriş hızı arttığında batarya hücre sıcaklıkları da azalmaktadır. Çünkü, havanın tünele giriş hızı arttıkça Reynolds sayısı ve beraberinde türbülans da artmaktadır. Artan Reynolds sayısı, ısı transferinde önemli bir boyutsuz sayı olan Nusselt Sayısı ile birlikte ısı transfer katsayısını artırmaktadır. Isı transfer katsayısındaki bu artış, daha fazla ısı geçişini ve aynı zamanda daha fazla basınç kaybını da beraberinde getirmektedir.

6. Batarya hücrelerinin deşarj oranı arttıkça hücrelerin çektiği akım da artmakta ve bu sayede daha fazla akım gerektiren yerlerde kullanılabilirler. Ancak, deşarj oranının artması, bataryanın kullanım süresini kısaltmakta ve hacimsel ısı üretimini artırmaktadır. Hacimsel ısı üretimi arttığından batarya üzerindeki sıcaklıklar artmakta ve daha etkili bir soğutmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, en yüksek hücre sıcaklıkları, 3C deşarj oranında elde edilmiştir.

7. Havanın tünele giriş sıcaklığı azaldıkça batarya hücrelerinin sıcaklık değerleri de azalmaktadır. Bu bağlamda yüksek deşarj oranlarında daha düşük hava giriş sıcaklıkları kullanmak soğutma açısından önemli bir durumdur. Yapılan analiz sonuçlarına göre en düşük hücre sıcaklıkları, 268 K hava giriş sıcaklığında, 1C deşarj oranında ve 2. batarya modelinde gözlenmiştir.

8. Hem PIV hem de HAD analizlerinden elde edilen sonuçlara göre ilk dört batarya modeli içinde 4. batarya modeli, tüm hava giriş hızlarında en yüksek aksel hız değerlerini vermiştir. Bu, dört batarya modeli içinde en düşük aksel hız değerleri ise genel olarak 1. batarya modelinde gözlenmiştir. Bu bağlamda hem PIV hem de HAD analizlerinin, birbirleriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

9. HAD analizlerinden elde edilen hız değerlerinin, PIV cihazı ile yapılan deneylerden elde edilen hız değerlerine göre biraz daha büyük olduğu gözlenmiştir. Literatürde yer alan PIV ve HAD analizleri ile yapılan çalışmalarda bu durum, gözlenmektedir. HAD analizlerinden elde edilen hız profillerinin PIV cihazından elde edilen hız profilleri ile karşılaştırılması konusunda RNG k-ε Gelişmiş Duvar Yaklaşımı, başarılı sonuçlar vermiştir.

10. PIV ölçümlerinde görüntü işleme amacı ile Adaptif korelasyon kullanılmıştır. Adaptif korelasyon, PIV ölçümlerinde daha kolay görüntü işlenmesine olanak sağladığı için bu çalışma kapsamında korelasyon metodu olarak seçilmiştir. PIV'den elde edilen hız dağılımları konusunda adaptif korelasyon metodu; başarılı sonuçlar vermiştir.

11. Kanatlı batarya modelleri ile yapılan HAD analizlerinde üstteki hücrelerin sıcaklık değerleri, alttaki hücrelere göre daha düşük değerlerdedir. Bu bağlamda batarya modellerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri, en altta bulunan hücreye aittir. Bu

durum, kanatçıkların soğutmada en fazla üstte yer alan hücreleri soğutması ile açıklanabilir.

12. Kanatlı batarya modellerinde en yüksek sıcaklık değerleri, 2.32 m/s hava giriş hızı, 3C deşarj oranı ve 283 K hava giriş sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Bu sınır şartları altında elde edilen sıcaklık değerleri, 320 K'nin üzerine çıkmamaktadır. Bu durum, batarya gövdesinden havaya ısı transferinin kanatçıklı yüzeyden gerçekleşmesi ve ısı iletim yönelimi nedeniyle batarya malzemesinin iletim direnci ile açıklanabilir.

13. Kanatsız batarya modelinde 2.32 m/s hava giriş hızı ile yapılan soğutmada 278 K ve 283 K hava giriş sıcaklığı kullanılması, yeterli değildir. Özellikle batarya sıcaklığının 333 K'nin üzerine çıkması, çok tehlikeli sonuçlar doğurmaktadır. Bu bağlamda daha düşük hava giriş sıcaklıkları veya daha yüksek hava giriş hızlarının kullanılması, kanatsız batarya modelinde hücre sıcaklıklarının düşürülmesi açısından daha uygun olacaktır.

14. Taguchi Metodunda ele alınan etken parametreler temelinde deşarj oranı, maksimum hücre sıcaklığına ciddi oranda etki etmektedir. Bu bağlamda deşarj oranının ve hava giriş sıcaklığının azaltılması, batarya kullanımı için de faydalı olacaktır.

15. Hem Taguchi hem de Yüzey Yanıt Metodundan elde edilen sonuçlar, HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar ile uyumlu çıkmıştır. Bu da kurulan model ve sınır şartlarının doğru olduğunu bize göstermektedir. Özellikle Taguchi Yönteminde seçilen parametreler doğrultusunda %94'ün üzerinde güven aralığı bulunmaktadır.

16. Bataryaların soğutulmasında değer optimizasyonu etkili bir yöntemdir. Özellikle hava giriş sıcaklıkları baz alındığında 2.32 m/s hava giriş hızının maksimum hücre sıcaklığını artırması sebebiyle risk oluşturmaktadır. Değer optimizasyonundan elde edilen sonuçlar, hem HAD analizleri hem de deneysel tasarım değerleri ile uyumlu çıkmıştır.

17. Lityum-polimer bataryaların soğutulmasında alüminyum kanatçıklar uygun bir soğutma geometrisidir. Alüminyum kanatçıkların yerine aynı boyutlarda bakır kanatçıkların da kullanımı uygun bir yaklaşım olabilir. Bakırın ısıl iletkenlik katsayısının ve yoğunluğunun alüminyumdan daha yüksek olduğu göz önüne alınırsa daha etkili soğutma yapılabilir. Ancak; bakırın yoğunluğunun alüminyumun yoğunluğundan fazla olması, ağırlık faktörünü de artıracaktır. Özellikle insansız hava araçları için düşünüldüğünde bakır kanatçıkların kullanımı ağırlık açısından bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

18. Çalışma kapsamında soğutma metotlarından olan kanatçıklı geometrinin lityum-polimer bataryalar üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Kanatçıklı geometriler haricinde ısı geçişini artırmada yastık yüzeyli veya dalgalı yüzeyli geometrilerin de kullanımı uygun

olabilir. Yastık yüzeyli gibi değişken geometrideki farklı batarya cidarlarının akışa etkisini ele alan çalışmalarla kullanılan model etrafındaki türbülansı ve ısı geçişini artırmada başarılı sonuçlar elde edilebilir. Bu tür geometrilerin lityum-polimer bataryalarda kullanılması ile daha verimli soğutma elde edilebilir.

19. Görüntülemeye kamera sayısı artırılırsa akışın üç boyutlu görüntülenmesi mümkün olacaktır. Özellikle tomografik PIV yöntemi ile akış, üç boyutlu ve daha detaylı bir şekilde görüntülenmektedir. Hava tüneli ile yapılan çalışmalarda tomografik PIV yönteminin kullanılması, araştırmacıya daha detaylı sonuçlar sunması açısından uygun olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abd Halim, M. A., Mohd, N. N., Nasir, M. M., & Dahalan, M. N. (2018). The evaluation of k- ϵ and k- ω turbulence models in modelling flows and performance of s-shaped diffuser. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15(2).
- Abdelsalam, D.G., Stanislas, M. ve Coudert, S. (2014). PIV camera response to high frequency signal: comparison of CCD and CMOS cameras using particle image simulation. *Measurement Science and Technology*, 25(8), 084007.
- Abobaker, M., Elfaghi, A. M. ve Addeep, S. (2020). Numerical study of wind-tunnel wall effects on lift and drag characteristics of NACA 0012 Airfoil. *CFD Letters*, 12(11), 72-82.
- Adrian, R.J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review Of Fluid Mechanics*, 23(1), 261-304.
- Ahmed, F., Ara, N., Deshpande, V., Mollah, A. S., & Bhowmik, P. K. (2021). CFD validation with optimized mesh using benchmarking data of pebble-bed high-temperature reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 134, 103653.
- Alaimo, A., Esposito, A., Messineo, A., Orlando, C., & Tumino, D. (2015). 3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine. *Energies*, 8(4), 3013-3033.
- Alin, A. (2010). Minitab. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(6), 723-727.
- Aly, N. A., Maytubby, V. J., & Elshennawy, A. K. (1990). Total quality management: An approach & a case study. *Computers & Industrial Engineering*, 19(1-4), 111-116.
- Amrouche, S. O., Rekioua, D., Rekioua, T. ve Bacha, S. (2016). Overview of energy storage in renewable energy systems. *International journal of hydrogen energy*, 41(45), 20914-20927.
- Anderson, M. J., & Whitcomb, P. J. (2016). RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments. Productivity press.
- ANSYS Fluent 13, User Guide.
- Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, 400, 621-640.
- Bandhauer, T.M., Garimella, S. ve Fuller, T.F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(3), R1.

- Berber, C. (2019), *Bataryalarının ısı analizlerinin yapılması ve ısı yönetim sistemleri için soğutma yöntemlerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 574359).
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons.
- Bilga, P. S., Singh, S., & Kumar, R. (2016). Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal of cleaner production*, 137, 1406-1417.
- Box, G. E., & Wilson, K. B. (1992). On the experimental attainment of optimum conditions. In *Breakthroughs in statistics* (pp. 270-310). Springer, New York, NY.
- Brücker, C., Hess, D. ve Kitzhofer, J. (2012). Single-view volumetric PIV via high-resolution scanning, isotropic voxel restructuring and 3D least-squares matching (3D-LSM). *Measurement Science and Technology*, 24(2), 024001.
- Bulat, M. P., & Bulat, P. V. (2013). Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows. *World Applied Sciences Journal*, 27(10), 1263-1266.
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C.D., De Gracia, A. ve Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675-1695.
- Cabezón, D., Migoya, E., & Crespo, A. (2011). Comparison of turbulence models for the computational fluid dynamics simulation of wind turbine wakes in the atmospheric boundary layer. *Wind Energy*, 14(7), 909-921.
- Cao, X., Liu, J., Jiang, N. ve Chen, Q. (2014). Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications. *Energy and Buildings*, 69, 367-380.
- Chang, K., Rammos, P., Wilkerson, S. A., Bundy, M. ve Gadsden, S. A. (2016). LiPo battery energy studies for improved flight performance of unmanned aerial systems. In *Unmanned Systems Technology*, 18, 9837, 98370. International Society for Optics and Photonics.
- Chelladurai, S. J. S., Murugan, K., Ray, A. P., Upadhyaya, M., Narasimharaj, V., & Gnanasekaran, S. (2021). Optimization of process parameters using response surface methodology: A review. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1301-1304.
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C. ve Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854.

- Chen, D. H., & Sun, Y. N. (1999, October). A knowledge guided left ventricular segmentation-the Taguchi approach. In Proceedings of the First Joint BMES/EMBS Conference. 1999 IEEE Engineering in Medicine and Biology 21st Annual Conference and the 1999 Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society (Cat. N (Vol. 2, pp. 1173-vol). IEEE.
- Chen, F., Huang, R., Wang, C., Yu, X., Liu, H., Wu, Q., ... & Bhagat, R. (2020). Air and PCM cooling for battery thermal management considering battery cycle life. *Applied Thermal Engineering*, 173, 115154.
- Chen, J., & Sheui, R. G. (2002). Using Taguchi's method and orthogonal function approximation to design optimal manipulated trajectory in batch processes. *Industrial & engineering chemistry research*, 41(9), 2226-2237.
- Cho, S.H., Lee, I.S., Choi, J.H. ve Nam, Y.S. (2002). PIV Measurement and Numerical Analysis of a New Refrigeration Compartment of a Refrigerator. *Annals-New York Academy Of Sciences*, 972, 260-264
- Corcoran, T.C. (2014). Laser-induced fluorescence spectroscopy (LIF). In *Laser Spectroscopy for Sensing* (pp. 235-257). Woodhead Publishing.
- Dahooie, J. H., Dehshiri, S. J. H., Banaitis, A., & Binkytė-Vėlienė, A. (2020). Identifying and prioritizing cost reduction solutions in the supply chain by integrating value engineering and gray multi-criteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, 26(6), 1311.
- Dantec Dynamics, Dynamic Studio Manual, Private Communication.
- Dantec Dynamics A.S. (2012) Product Information Adaptive Correlation in Dynamic Studio, www.dantecdynamics.com (Erişim Tarihi: 26 Mart 2020).
- Dantec Dynamics, F.E.C.S. (2015). www.dantecdynamics.com (Erişim Tarihi: 19.04.2020).
- Dantec Dynamics Websitesi, <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv> (Erşim Tarihi: 19.04.2020).
- Deng, Y., Feng, C., Jiaqiang, E., Zhu, H., Chen, J., Wen, M., & Yin, H. (2018). Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*, 142, 10-29.
- Doty, M., Henderson, B. ve Kinzie, K. (2004, May). *Turbulent flow field measurements of separate flow round and chevron nozzles with pylon interaction using particle image velocimetry*.(p. 2826). In 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference

- Durmuş, S. (2017). *Gaz türbinlerinde film soğutma akış karakteristiklerinin PIV yöntemiyle incelenmesi*.(DoktoraTezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 458980).
- DynamicStudio User's Guide (2013). Dantec Dynamics A/S, Denmark, 2013.
- Ejeh, C. J., Akhabue, G. P., Boah, E. A. ve Tandoh, K. K. (2019). Evaluating the influence of unsteady air density to the aerodynamic performance of a fixed wing aircraft at different angle of attack using computational fluid dynamics. *Results in Engineering*, 4, 100037.
- Escue, A., & Cui, J. (2010). Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows. *Applied Mathematical Modelling*, 34(10), 2840-2849.
- Fang, C.H.E.N. ve Hong, L.I.U. (2018). Particle image velocimetry for combustion measurements: Applications and developments. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(7), 1407-1427.
- Fatchurrohman, N., ve Chia, S. T. (2017, October). Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: simulation approach. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257(1), 012060. IOP Publishing.
- Fluent, A. N. S. Y. S. (2011a). Ansys fluent theory guide. ANSYS Inc., USA, 15317, 724-746.
- Fluent A. Fluent 4. User's Guide. ANSYS FLUENT Inc. 2011b.
- GensAce Websitesi, <https://www.gensace.de/gens-ace-4400mah-25-9v-65c-7s1p-lipo-battery-pack.html> (Erişim Tarihi: 19.05.2022).
- Gildeh, H. K. (2013). *Numerical modeling of thermal/saline discharges in coastal waters*. University of Ottawa (Canada).
- Gopalakrishnan, R. N. ve Disimile, P. (2016). Development of inlet boundary condition for accurate multi-jet simulations. *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*.4(9), 7-26.
- Gui, L. ve Merzkirch, W. (2000). A comparative study of the MQD method and several correlation-based PIV evaluation algorithms. *Experiments in Fluids*, 28(1), 36-44.
- Gui, L. C. ve Merzkirch, W. (1996). A method of tracking ensembles of particle images. *Experiments in Fluids*, 21(6), 465-468.

- Guijt, R. M., Baltussen, E., van der Steen, G., Schasfoort, R. B., Schlautmann, S., Billiet, H. A. ve Van Den Berg, A. (2001). New approaches for fabrication of microfluidic capillary electrophoresis devices with on-chip conductivity detection. *Electrophoresis*, 22(2), 235-241.
- Gunes, H. ve Rist, U. (2007). Spatial resolution enhancement/smoothing of stereo-particle-image-velocimetry data using proper-orthogonal-decomposition-based and Kriging interpolation methods. *Physics of Fluids*, 19(6), 064101.
- Hain, R., Kähler, C. J. ve Tropea, C. (2007). Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras. *Experiments in Fluids*, 42(3), 403-411.
- Haldar, A., Varshney, L. ve Verma, P. (2022). Effect of roughness parameters on performance of solar air heater having artificial wavy roughness using CFD. *Renewable Energy*, 184, 266-279.
- Hamzaçebi, C., & Kutay, F. (2003). Taguchi Metodu: Bir Uygulama. *Teknoloji*, 6.
- Hannan, M. A., Azidin, F. A., & Mohamed, A. (2014). Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 135-150.
- Hart, D.P. (2000). PIV error correction. *Experiments in Fluids*, 29(1), 13-22.
- He, F., Li, X. ve Ma, L. (2014). Combined experimental and numerical study of thermal management of battery module consisting of multiple Li-ion cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 622-629.
- Hernandez-Lopez, D., Felipe-Garcia, B., Gonzalez-Aguilera, D., & Arias-Perez, B. (2013). An automatic approach to UAV flight planning and control for photogrammetric applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(1), 87-98.
- Jahanmiri, M. (2011). *Particle image velocimetry: Fundamentals and its applications*. Chalmers University of Technology.
- Jeong, W., & Seong, J. (2014). Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 78, 19-26.
- Jeyapaul, R., Shahabudeen, P., & Krishnaiah, K. (2005). Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi method—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(11), 1331-1337.
- Jian, W.E.N., Yanzhong, L.I., Aimin, Z.H.O.U. ve Yansong, M.A. (2006). PIV investigations of flow patterns in the entrance configuration of plate-fin heat exchanger. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 14(1), 15-23.

- Kalkan, O., Celen, A., & Bakirci, K. (2021). Experimental and numerical investigation of the LiFePO₄ battery cooling by natural convection. *Journal of Energy Storage*, 40, 102796.
- Karagöz, Ş. (2016). *Ayrık türbülator arkası akış alanının PIV ile incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 425741).
- Kasper, L., Pernsteiner, D., Koller, M., Schirrer, A., Jakubek, S., ve Hofmann, R. (2021). Numerical studies on the influence of natural convection under inclination on optimal aluminium proportions and fin spacings in a rectangular aluminium finned latent-heat thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116448.
- Keramaris, E. (2016). Similarities and differences between hot-film anemometry and particle image velocimetry in open channels. *Procedia Engineering*, 162, 388-395.
- Khaw, J. F., Lim, B. S., & Lim, L. E. (1995). Optimal design of neural networks using the Taguchi method. *Neurocomputing*, 7(3), 225-245.
- Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 128-149.
- Kim, U.S., Shin, C.B. ve Kim, C.S. (2008). Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 180(2), 909-916.
- Kitzhofer, J., Ergin, F. G., ve Jaunet, V. (2012, July). 2D least squares matching applied to PIV challenge data (Part 1). In Proceedings of the 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (pp. 9-12). Lisbon, Portugal
- Koç, B., & Kaymak-Ertekin, F. (2010). Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları. *Gıda*, 35(1), 1-8.
- Korkmaz, C. ve Kacar, İ. (2021). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları için optimum eleman ağ yapısının belirlenmesi*. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar (pp.109-125). Akademisyen Kitabevi A.Ş
- Krehl ve Partner Websitesi, <https://krehl.com/en/value-engineering-value-management/>, (Erişim Tarihi: 10.02.2023).
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). Lectures in mathematical models of turbulence.
- Lauder, B.E., and D.B. Spalding. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Energy* 3:269–89.
- LaVision (2015). *CCD and sCMOS Cameras*. Cited 2 May 2015.

- Li, X., He, F. ve Ma, L. (2013). Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *Journal of Power Sources*, 238, 395-402.
- Liang, D., Jiang, C. ve Li, Y. (2003). Cellular neural network to detect spurious vectors in PIV data. *Experiments in Fluids*, 34(1), 52-62.
- Liu, C. C., Ferng, Y. M., & Shih, C. K. (2012). CFD evaluation of turbulence models for flow simulation of the fuel rod bundle with a spacer assembly. *Applied Thermal Engineering*, 40, 389-396.
- Liu, Z., Jia, L., Zheng, Y. ve Zhang, Q. (2008). Flow-adaptive data validation scheme in PIV. *Chemical Engineering Science*, 63(1), 1-11.
- Lo, L.J., Banks, D. ve Novoselac, A. (2013). Combined wind tunnel and CFD analysis for indoor airflow prediction of wind-driven cross ventilation. *Building and Environment*, 60, 12-23.
- Lv, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Z. ve Yang, C. (2016). Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins. *Applied Energy*, 178, 376-382.
- Maas, H.G., Stefanidis, A. ve Gruen, A. (1994). *From pixels to voxels: Tracking volume elements in sequences of 3D digital images*. In ISPRS Commission III Symposium: Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, 2357, (pp. 539-546). International Society for Optics and Photonics.
- Maleki, H., Wang, H., Porter, W., & Hallmark, J. (2014). Li-Ion polymer cells thermal property changes as a function of cycle-life. *Journal of Power Sources*, 263, 223-230.
- Manz, A., Graber, N., Widmer, H.A. (1990). Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing. *Sensors and Actuators*, 1(1-6), 244-248.
- Margavio, G. W., Margavio, T. M., & Fink, R. L. (1993). Quality improvement technology using the Taguchi method. *The CPA Journal*, 63(12), 72.
- Martin, J., Oshkai, P., & Djilali, N. (2005). Flow structures in a U-shaped fuel cell flow channel: quantitative visualization using particle image velocimetry.
- Melling, A. (1997). Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Measurement science and technology*, 8(12), 1406.

- Menter, F. (1993, July). Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In *23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference* (p. 2906).
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- Ming-Peng, Huang, Z., Yang, X. ve Hui, Y. (2018). Development of microchip electrophoresis and its applications in ion detection. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 46(5), 631-641.
- Norton, T., Sun, D.W., Grant, J., Fallon, R. ve Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, 98(12), 2386-2414.
- Orszag, S. A. (1993). Renormalisation group modelling and turbulence simulations. Near-wall turbulent flows.
- Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R. ve Fowler, M. (2016). Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO₄ battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 1093-1102.
- Park, H., Jung, S. Y., Park, J. H., Kim, J. H. ve Lee, S. J. (2018). Enhancement of measurement accuracy of x-ray PIV in comparison with the micro-PIV technique. *Journal of Synchrotron Radiation*, 25(2), 552-559.
- Patil, A. V., Peters, E. A. J. F., Sutkar, V. S., Deen, N. G., & Kuipers, J. A. M. (2015). A study of heat transfer in fluidized beds using an integrated DIA/PIV/IR technique. *Chemical Engineering Journal*, 259, 90-106.
- Patil, M. S., Seo, J. H., Panchal, S., Jee, S. W. ve Lee, M. Y. (2020). Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 155, 119728.
- Polat, C. (2019). Farklı dizilimlere sahip binalar etrafındaki akış karakteristiklerinin PIV yöntemi ile deneysel olarak incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Prasad, A. K. (2000). Particle image velocimetry. *Current Science-Bangalore*, 79(1), 51-60.
- Prandtl, L. (1904). Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. *Verhandl. III, Internat. Math.-Kong., Heidelberg, Teubner, Leipzig, 1904*, 484-491.
- Pun, C. S., Susanto, A., ve Dabiri, D. (2007). Mode-ratio bootstrapping method for PIV outlier correction. *Measurement Science and Technology*, 18(11), 3511.

- Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T. ve Kompenhans, J. (2013). *Particle image velocimetry: A practical guide*. Springer.
- Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T. ve Kompenhans, J. (2018). *Particle image velocimetry: A practical guide*. Springer.
- Rao, Z. ve Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(9), 4554-4571.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2019). On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy, 180*, 838-857.
- Robertson, E., Choudhury, V., Bhushan, S., ve Walters, D.K. (2015). Validation of OpenFOAM numerical methods and turbulence models for incompressible bluff body flows. *Computers ve Fluids, 123*, 122-145.
- Rotta, J.C. (1990). *Die aerodynamische versuchsanstalt in göttingen, ein werk ludwig prandtls: ihre geschichte von den anfängen bis 1925*. Vandenhoeck ve Ruprecht.
- Saffman, P. G. (1970). A model for inhomogeneous turbulent flow. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 317*(1530), 417-433.
- Saigal, A., & Leisk, G. (1992). Heat treatment optimization of alumina/aluminum metal matrix composites using the Taguchi approach. *Scripta Metallurgica et Materialia;(United States), 26*.
- Salim, S. M. ve Cheah, S. (2009). Wall Y strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. In *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists* (Vol. 2, pp. 2165-2170).
- Salloomi, K. N. ve Al-Sumaidae, S. (2017). Numerical validation of temperature distribution in friction stir welded aluminum 7075-T651 plates using pseudo heat transfer model. In *Annales de chimie Science des Matériaux, 41*(1-2), 29-38.
- Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A.A., Chong, W.T., Kuan, S.H. ve Yew, M.C. (2016). Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling. *Applied energy, 177*, 783-792.
- Sayeed-Bin-Asad, S. M., Lundström, T. S., Andersson, A. G. ve Hellström, J. G. I. (2016). A review of particle image velocimetry for fish migration. *World Journal of Mechanics, 6*(4), 131-149.
- Scarano, F. ve Riethmuller, M. L. (2000). Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Experiments in Fluids, 29*(1), S051-S060.

- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Kheirkhah Gildeh, H. (2019). A comparison of standard $k-\varepsilon$ and realizable $k-\varepsilon$ turbulence models in curved and confluent channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 543-568.
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Zhiqiang, Y., & Jiang, Z. (1995). A new $k-\varepsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Comput. Fluids*, 24, 227-38.
- Shironita, S., Tsuruga, H., Honda, K., Koshika, K., & Umeda, M. (2021). Thermal runaway characteristics of a LiFePO₄-based lithium-ion secondary battery using the laser-irradiation method. *Journal of Energy Storage*, 40, 102715.
- Simo Tala, J.S., Russeil, S., Bougeard, D. ve Harion, J.L. (2013). Investigation of the flow characteristics in a multirow finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 50, 45-53.
- Smith III, L. D., Conner, M. E., Liu, B., Dzodzo, B., Paramonov, D. V., Beasley, D. E., ... & Holloway, M. V. (2002, January). Benchmarking computational fluid dynamics for application to PWR fuel. In *International Conference on Nuclear Engineering* (Vol. 35979, pp. 823-830).
- Souayfane, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Energy and buildings*, 129, 396-431.
- Stanislas, M., Okamoto, K. ve Kähler, C. (2003). Main results of the first international PIV challenge. *Measurement Science and Technology*, 14(10), R63.
- Şöhret, Y. (2017). Gaz türbini soğutma kanallarında rib kullanımının akış yapısına ve ısı transferine etkisinin deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmesi (Doctoral dissertation, Anadolu University (Turkey)).
- Taguchi, G., & Wu, Y. I. (1979). Introduction to Off-line Quality Control (Tokyo, Central Japan Quality Control). *TaguchiIntroduction to Off-line Quality Control1979*.
- Taheri, P. ve Bahrami, M. (2012). Temperature rise in prismatic polymer lithium-ion batteries: An analytic approach. *SAE Int. J. Passeng. Cars-Electron. Electr. Syst*, 5(1), 164-176.
- Tan, X., Lyu, P., Fan, Y., Rao, J., & Ouyang, K. (2021). Numerical investigation of the direct liquid cooling of a fast-charging lithium-ion battery pack in hydrofluoroether. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117279.
- Theunissen, R., Scarano, F. ve Riethmuller, M.L. (2010). Spatially adaptive PIV interrogation based on data ensemble. *Experiments in Fluids*, 48(5), 875-887.

- Thompson, D. (1982). Response surface experimentation 1. *Journal of Food Processing and Preservation*, 6(3), 155-188.
- Tokumaru, P. T., ve Dimotakis, P. E. (1995). Image correlation velocimetry. *Experiments in Fluids*, 19(1), 1-15.
- Uluslararası Standart Atmosfer Tablosu, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118534786.app1>, (Erişim Tarihi: 22.01.2023).
- Van Maele, K., & Merci, B. (2006). Application of two buoyancy-modified $k-\epsilon$ turbulence models to different types of buoyant plumes. *Fire Safety Journal*, 41(2), 122-138.
- Venkatesetty, H. V., & Jeong, Y. U. (2002, January). Recent advances in lithium-ion and lithium-polymer batteries. In *Seventeenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of Conference (Cat. No. 02TH8576)* (pp. 173-178). IEEE.
- Verma, A., Shashidhara, S., ve Rakshit, D. (2019). A comparative study on battery thermal management using phase change material (PCM). *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, 74-83.
- Wang, J., Huang, W., Pei, A., Li, Y., Shi, F., Yu, X., & Cui, Y. (2019). Improving cyclability of Li metal batteries at elevated temperatures and its origin revealed by cryo-electron microscopy. *Nature Energy*, 4(8), 664-670.
- Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of power sources*, 208, 210-224.
- Wang, Z., Zhang, Z., Jia, L., & Yang, L. (2015). Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 78, 428-436.
- Westerweel, J. (1997). Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 8(12), 1379.
- Westerweel, J. ve Scarano, F. (2005). Universal outlier detection for PIV data. *Experiments in Fluids*, 39(6), 1096-1100.
- Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2, pp. 103-217). La Canada, CA: DCW industries.
- Wilcox, D. C. (2008). Formulation of the kw turbulence model revisited. *AIAA journal*, 46(11), 2823-2838.

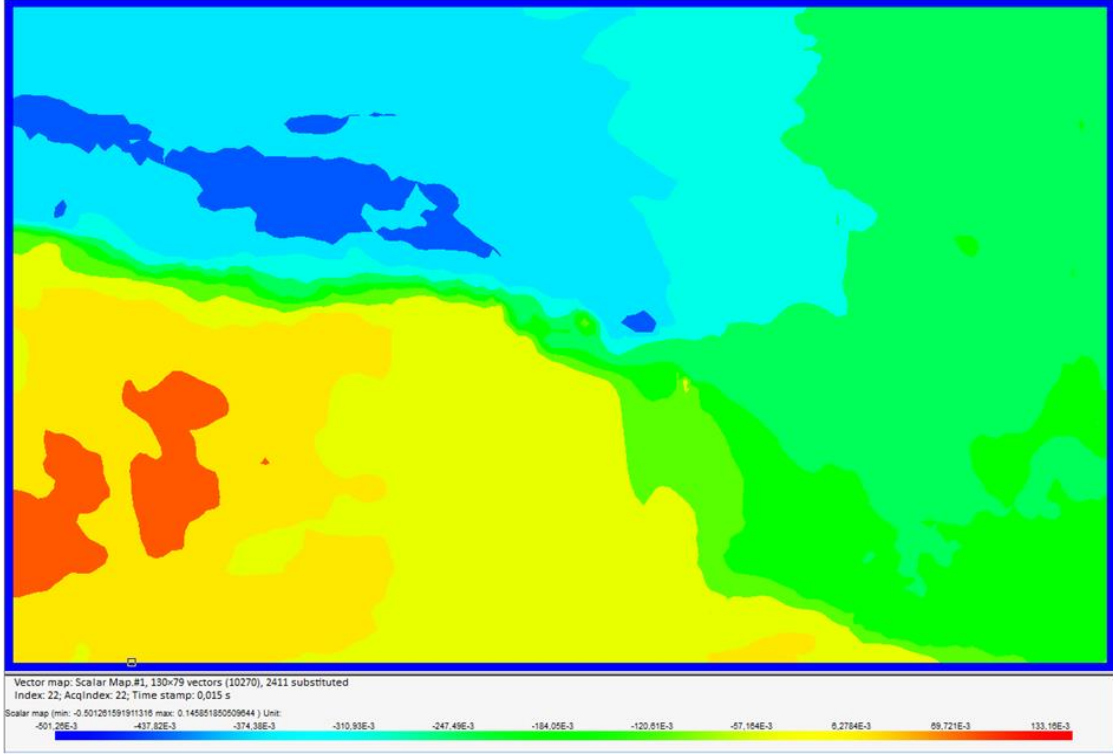
- Wiriyasart, S., Hommalee, C., Sirikasemsuk, S., Prurapark, R., & Naphon, P. (2020). Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules. *Case Studies in Thermal Engineering*, 18, 100583.
- Woodall, W. H., Koudelik, R., Tsui, K. L., Kim, S. B., Stoumbos, Z. G., & Carvounis, C. P. (2003). A review and analysis of the Mahalanobis—Taguchi system. *Technometrics*, 45(1), 1-15.
- Xia, B., ve Sun, D. W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics In Agriculture*, 34(1-3), 5-24.
- Yakhot, V., ve Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3-51.
- Yalın, G. (2019). *PEM yakıt hücresi-lityum polimer batarya hibrit sistemiyle tahrikli mini-ihya üretimi ve enerji yönetim sisteminin modellenmesi* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 614971).
- Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S., ve Onuma, Y. (2006). PIV measurement and turbulence scale in turbulent combustion. *Heat Transfer-Asian Research: Co-sponsored by the Society of Chemical Engineers of Japan and the Heat Transfer Division of ASME*, 35(7), 501-512.
- Yeow, K., Teng, H., Thelliez, M., ve Tan, E. (2012). Thermal analysis of a Li-ion battery system with indirect liquid cooling using finite element analysis approach. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 1(1), 65-78.
- Yetik, O. (2020). Thermal and electrical effects of busbars on Li-Ion batteries. *International Journal of Energy Research*, 44(11), 8480-8491.
- Yetik, O. ve Karakoc, T.H. (2021). Thermal management system with nanofluids for hybrid electric aircraft battery. *International Journal of Energy Research*, 45(6), 8919-8931.
- You, R., Li, H., Wu, H. ve Tao, Z. (2018). PIV flow measurements for a rotating square smooth channel heated by basically uniform heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119, 236-246.
- Yusof, S. N. A., Asako, Y., Sidik, N. A. C., Mohamed, S. B., & Japar, W. M. A. A. (2020). A short review on rans turbulence models. *CFD Letters*, 12(11), 83-96.
- Zajac, E. J., & Olsen, C. P. (1993). From transaction cost to transactional value analysis: Implications for the study of interorganizational strategies. *Journal of management studies*, 30(1), 131-145.

- Zhai, Z. J., Zhang, Z., Zhang, W., & Chen, Q. Y. (2007). Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1—Summary of prevalent turbulence models. *Hvac&R Research*, 13(6), 853-870.
- Zhang, T., Gao, C., Gao, Q., Wang, G., Liu, M., Guo, Y. ve Yan, Y. Y. (2015). Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC. *Applied Thermal Engineering*, 88, 398-409.
- Zhang, X., Weerasuriya, A. U., & Tse, K. T. (2020). CFD simulation of natural ventilation of a generic building in various incident wind directions: Comparison of turbulence modelling, evaluation methods, and ventilation mechanisms. *Energy and Buildings*, 229, 110516.
- Zhao, C. J., Han, J. W., Yang, X. T., Qian, J. P. ve Fan, B. L. (2016). A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process. *Applied Energy*, 168, 314-331.
- Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Zhang, H. (2021). A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 501, 230001.

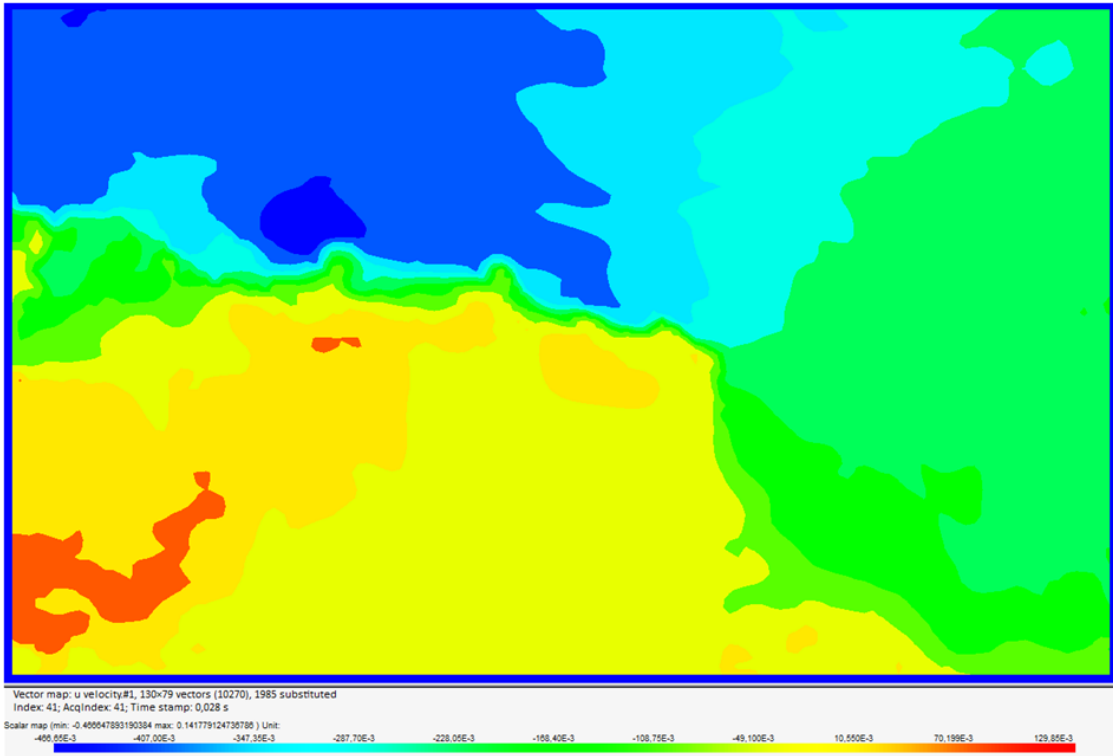
EKLER

EKLER

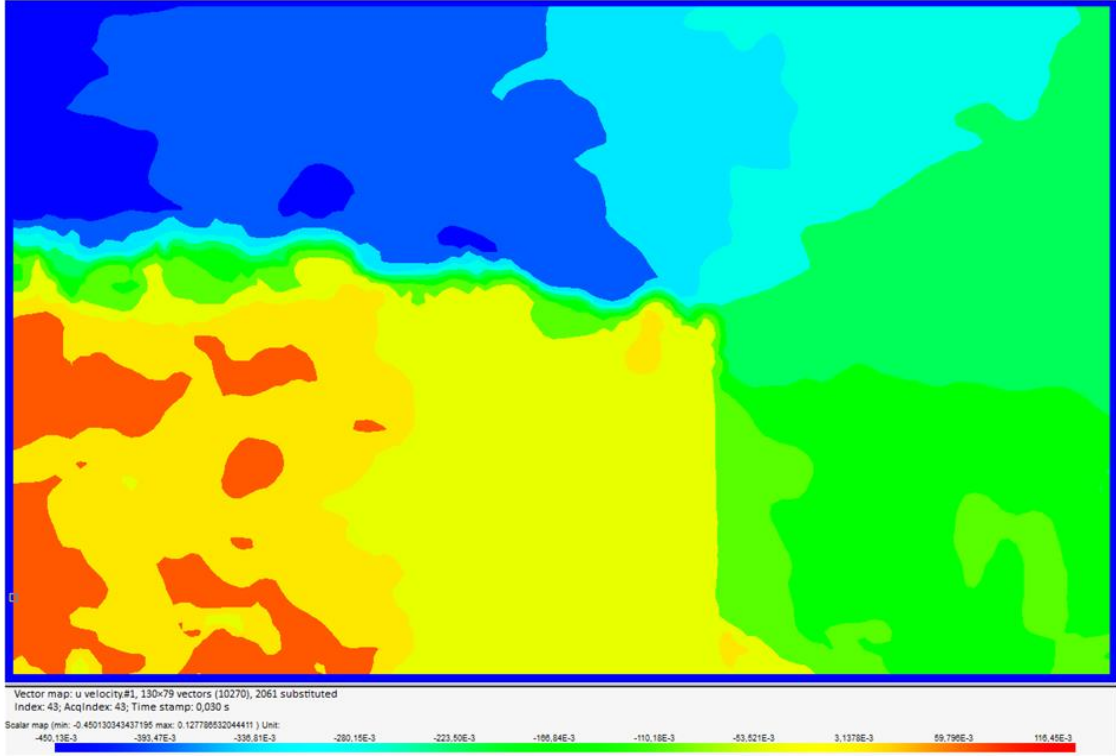
Ek A: PIV Cihazı İle Yapılan Deney Sonuçlarına Ait Görseller.



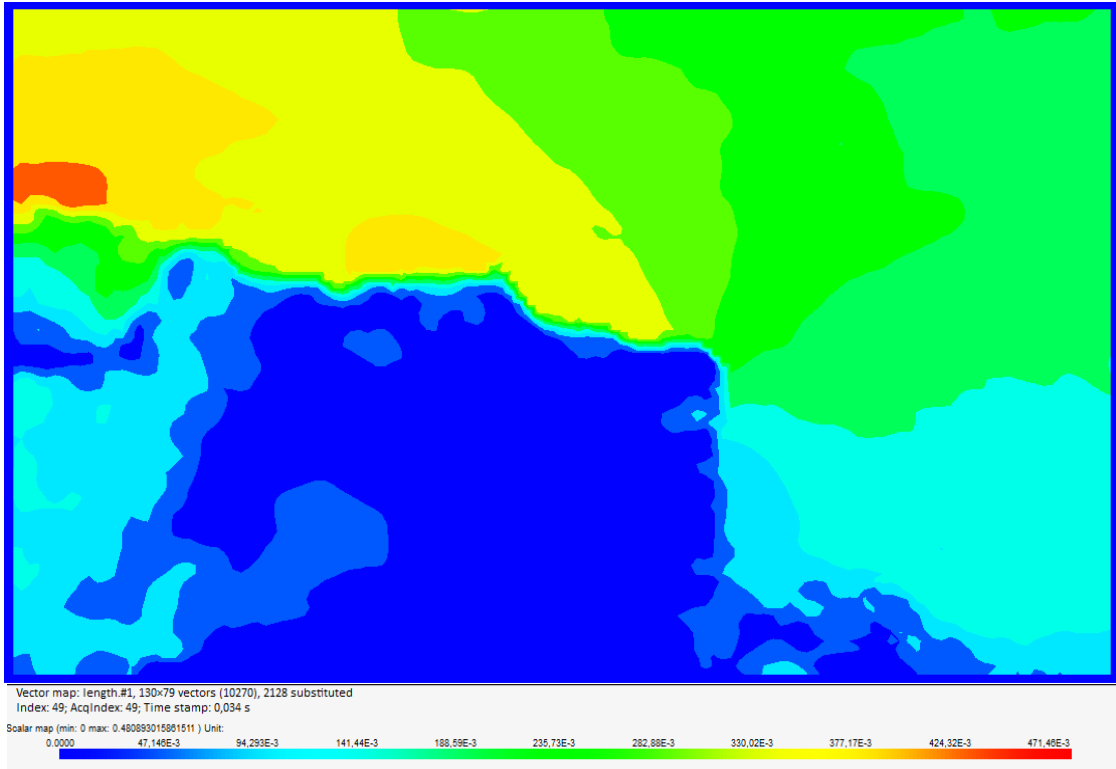
Şekil A.1: 2. batarya modeli için 20 Hz'de görüntülenen aksel hız haritası.



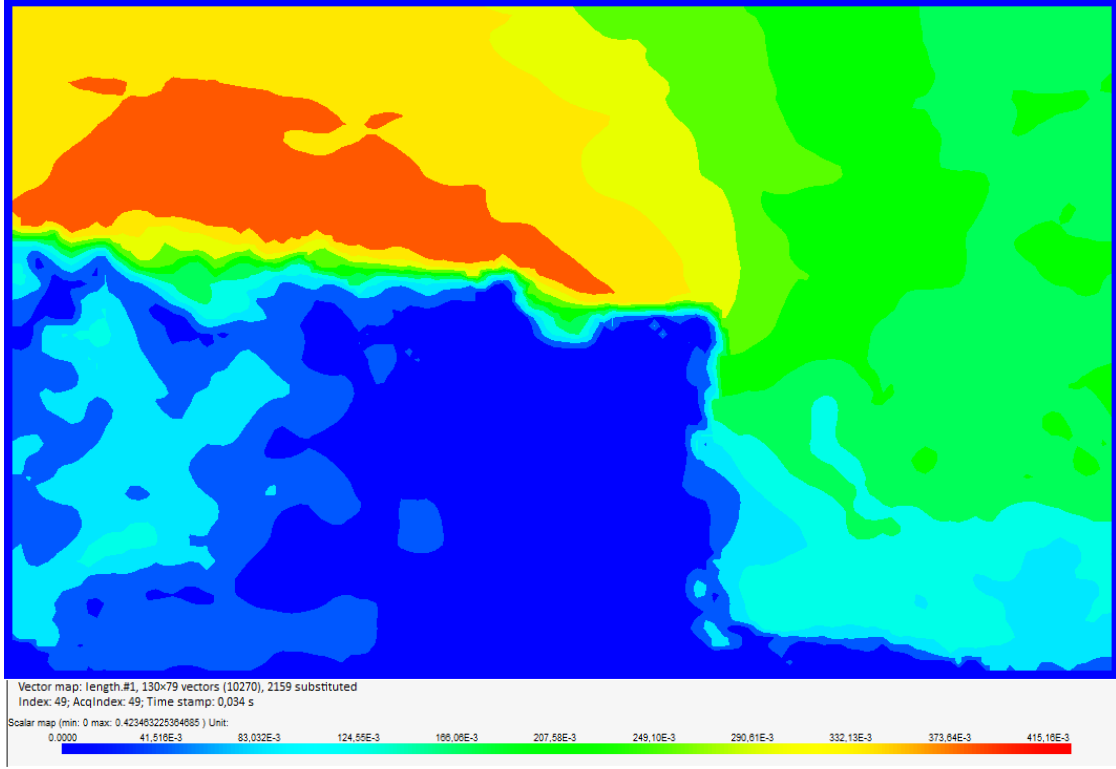
Şekil A.2: 3.batarya modeli için 20 Hz'de görüntülenen aksel hız haritası.



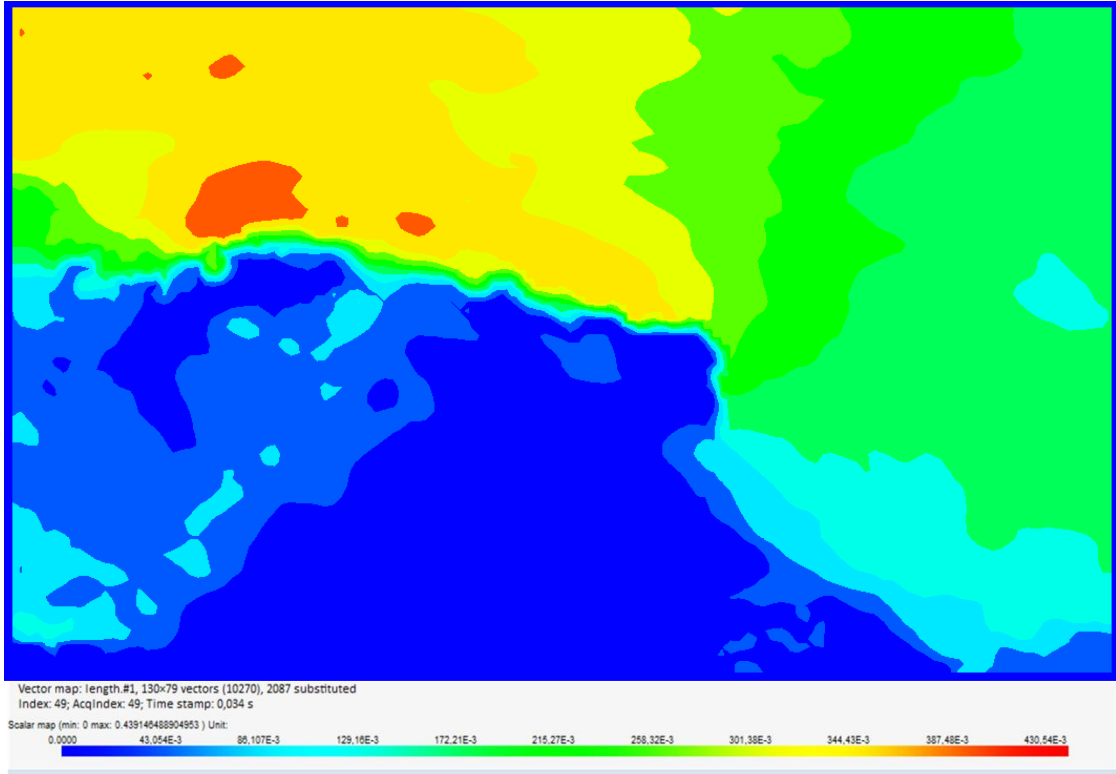
Şekil A.3: 4.batarya modeli için 20 Hz'de görüntülenen aksel hız haritası.



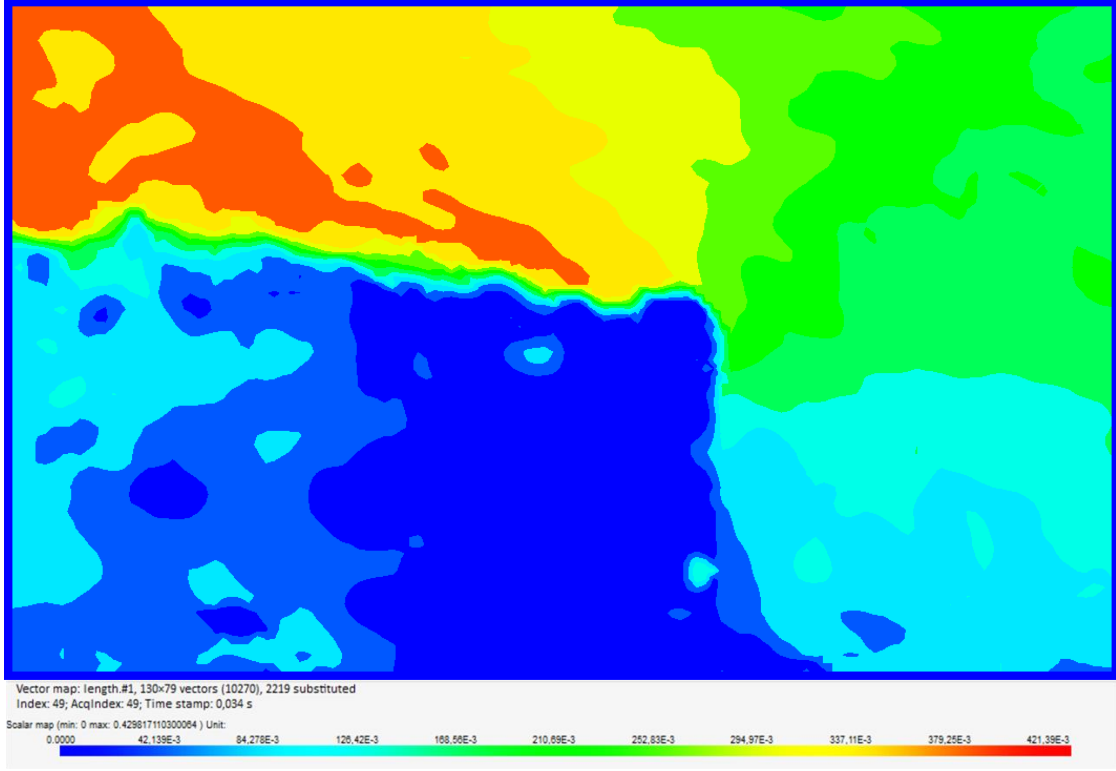
Şekil A.4: 1. batarya modeli için 20 Hz'de görüntülenen bileşke hız haritası.



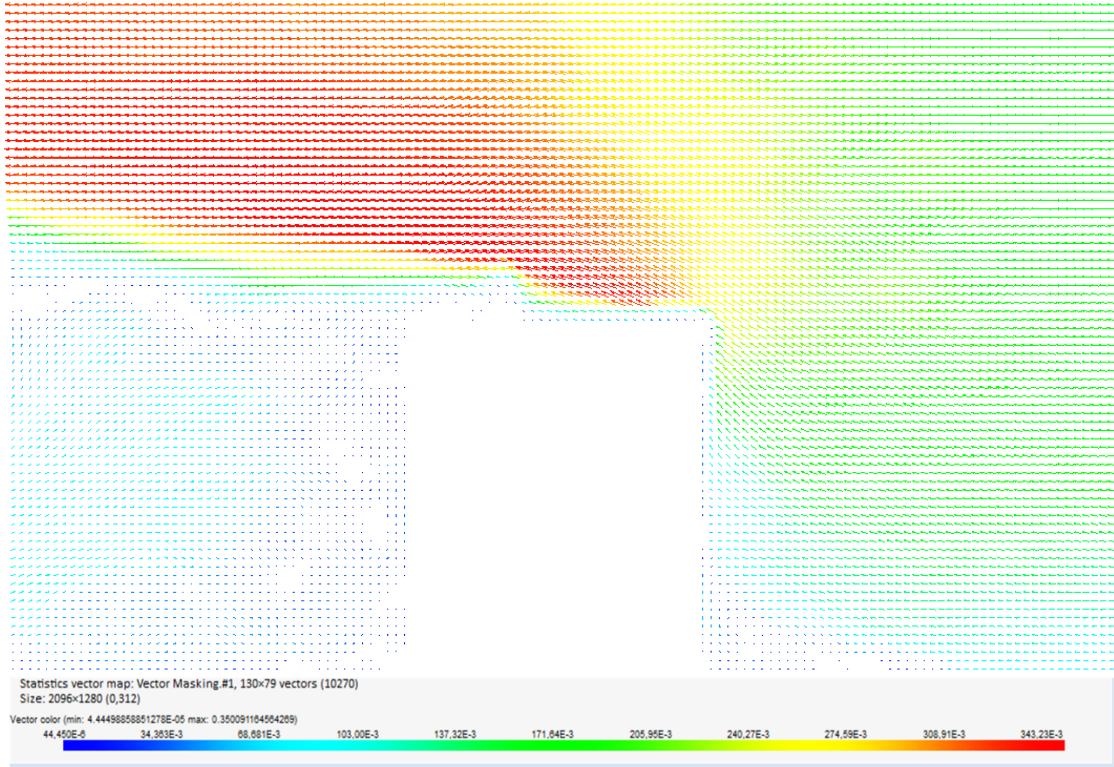
Şekil A.5: 2.bataraya modeli için 20 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



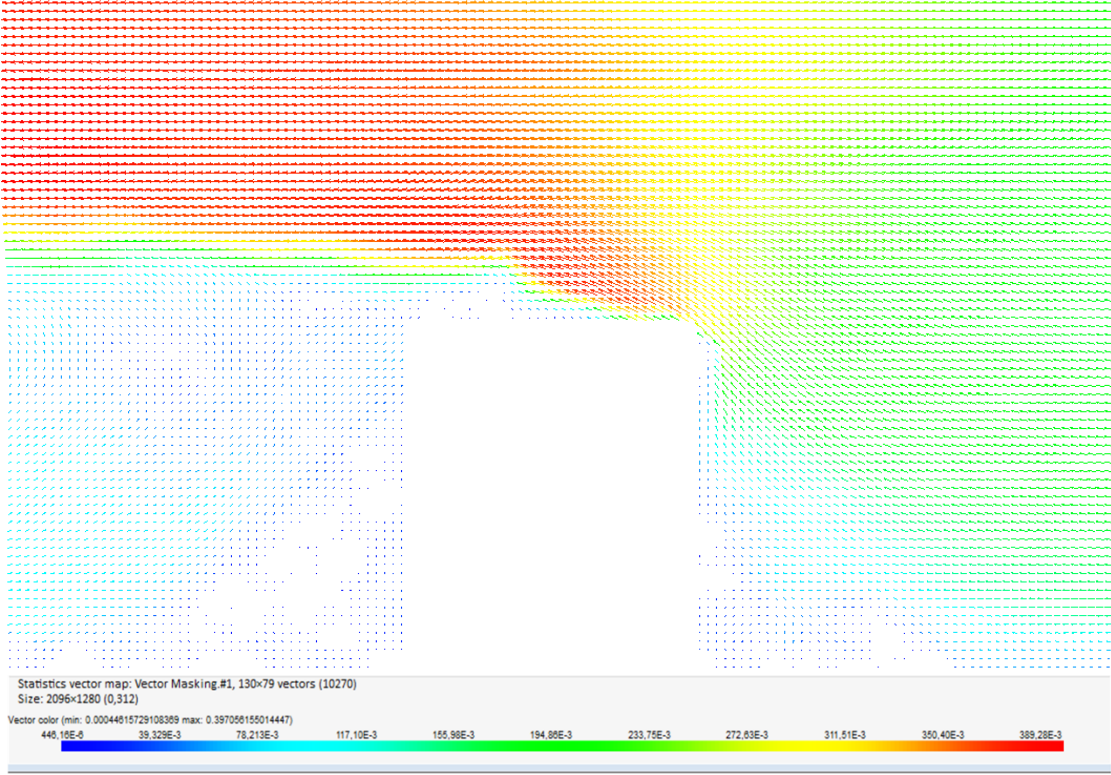
Şekil A.6: 3.bataraya modeli için 20 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



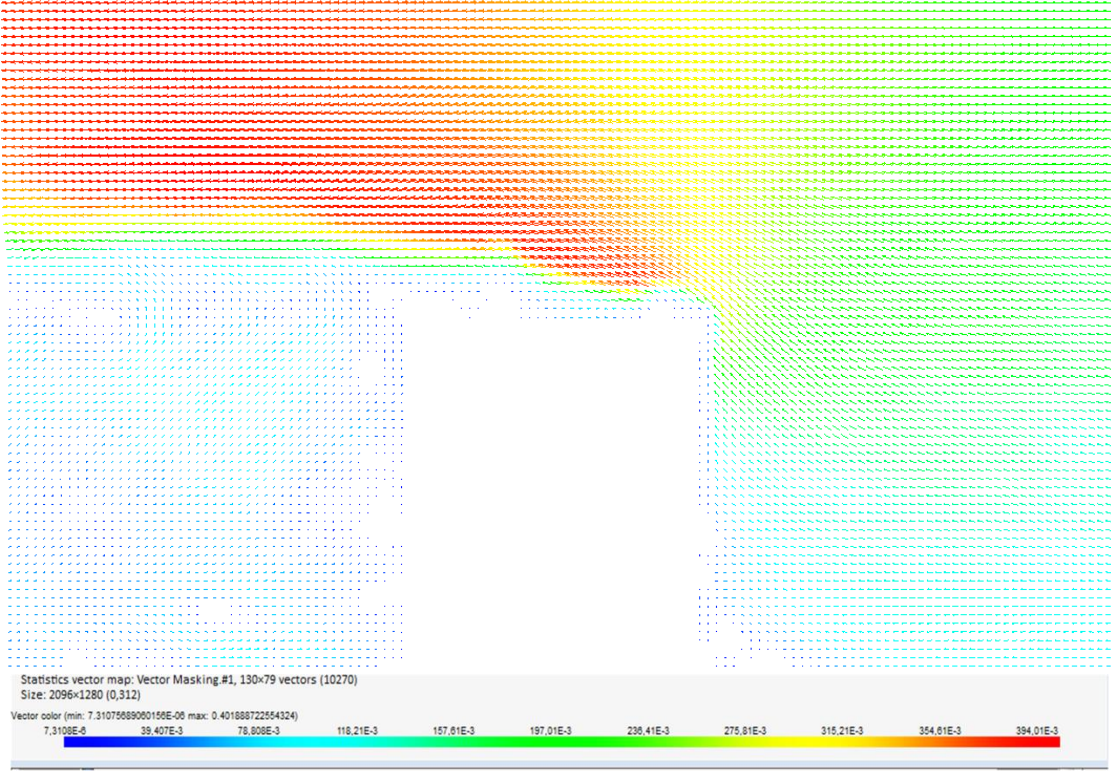
Şekil A.7: 4.batarya modeli için 20 Hz'de görüntülenen bileşke hız haritası.



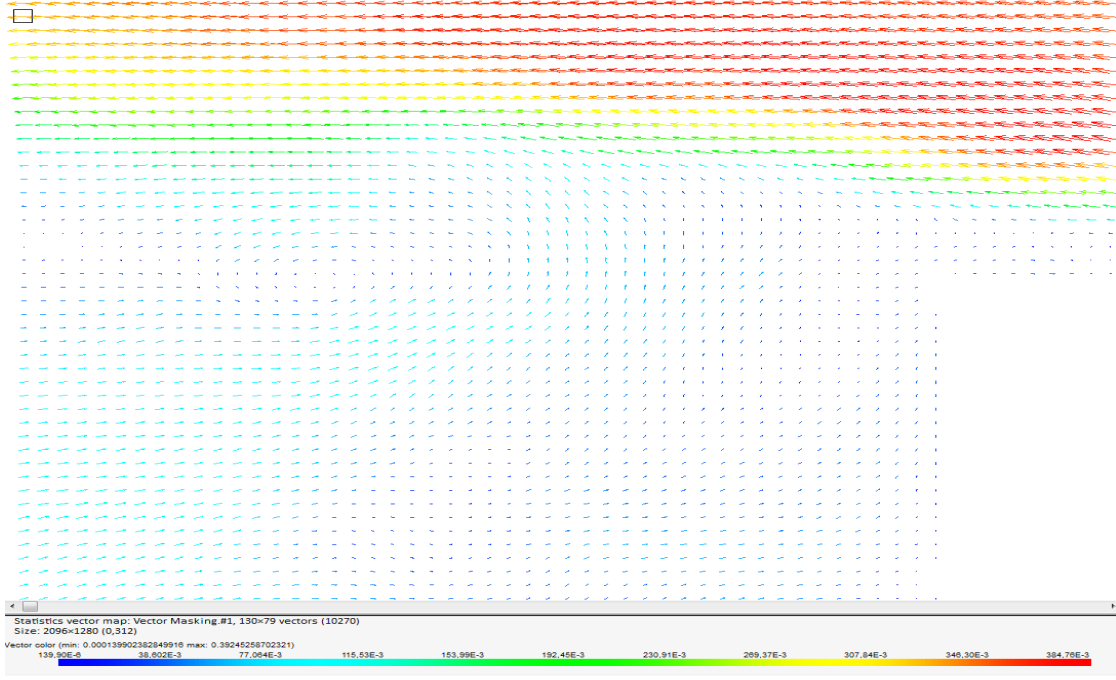
Şekil A.8: 2.batarya modeli için 20 Hz'de elde edilen vektör haritası.



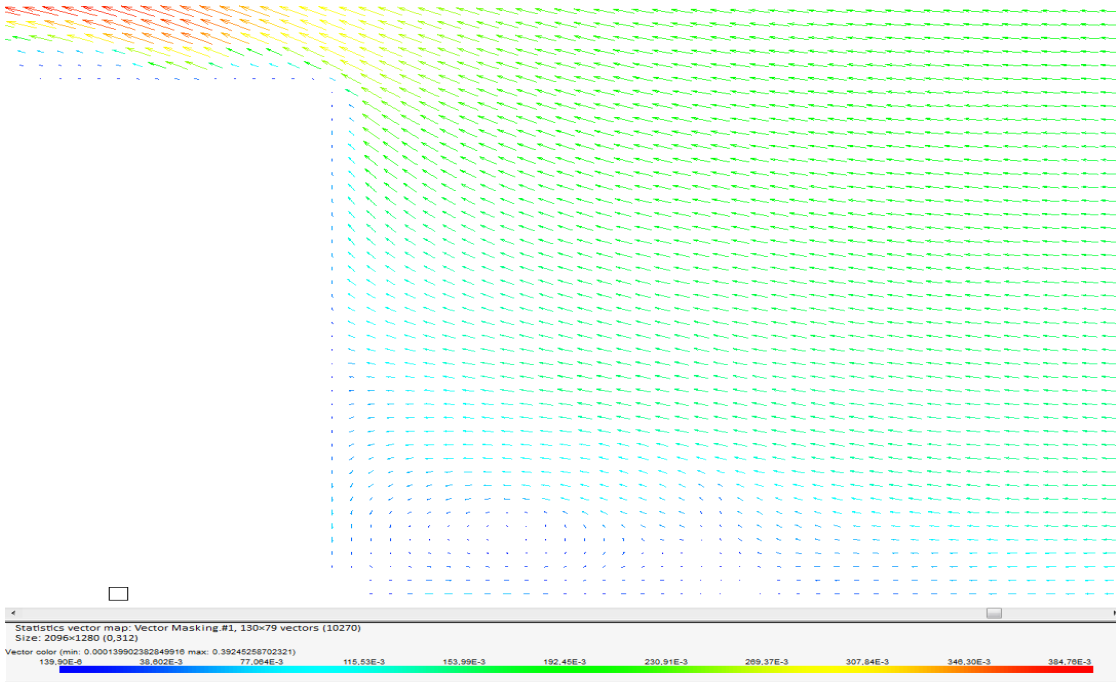
Şekil A.9: 3.batarya modeli için 20 Hz’de elde edilen vektör haritası.



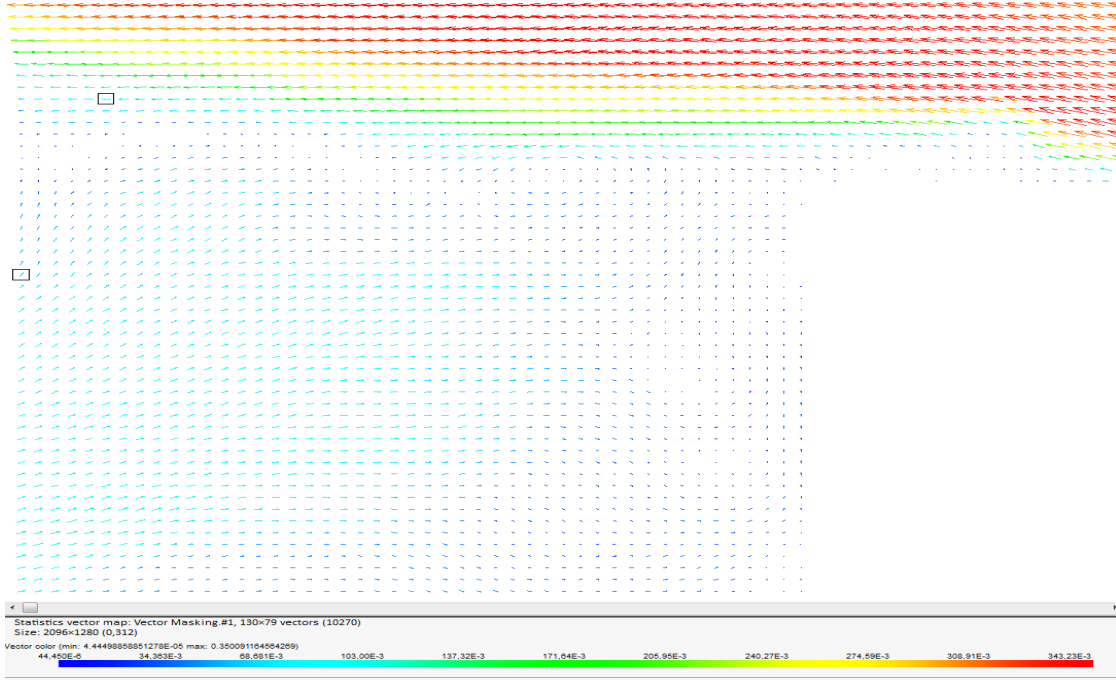
Şekil A.10: 4.batarya modeli için 20 Hz’de elde edilen vektör haritası.



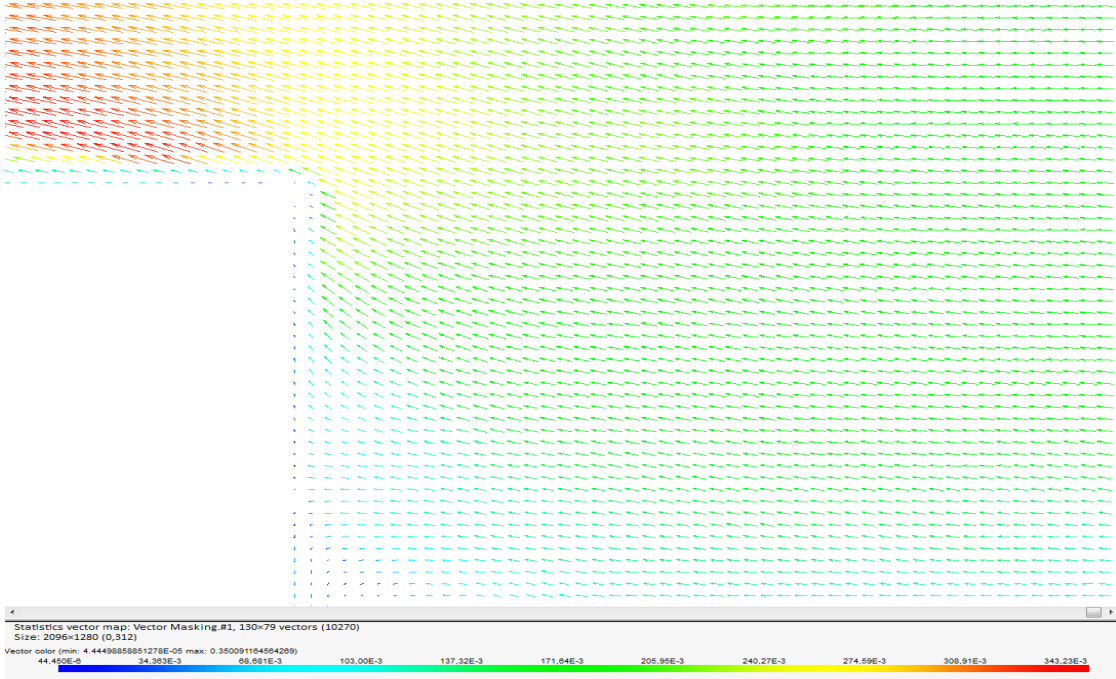
Şekil A.11: 20 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



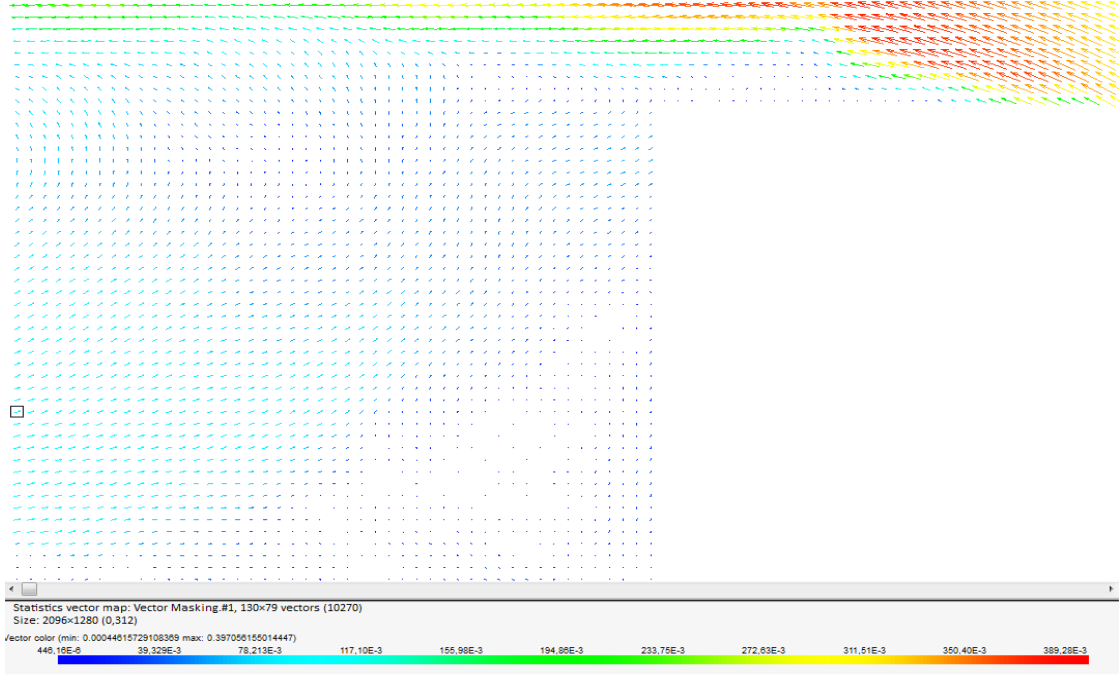
Şekil A.12: 20 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



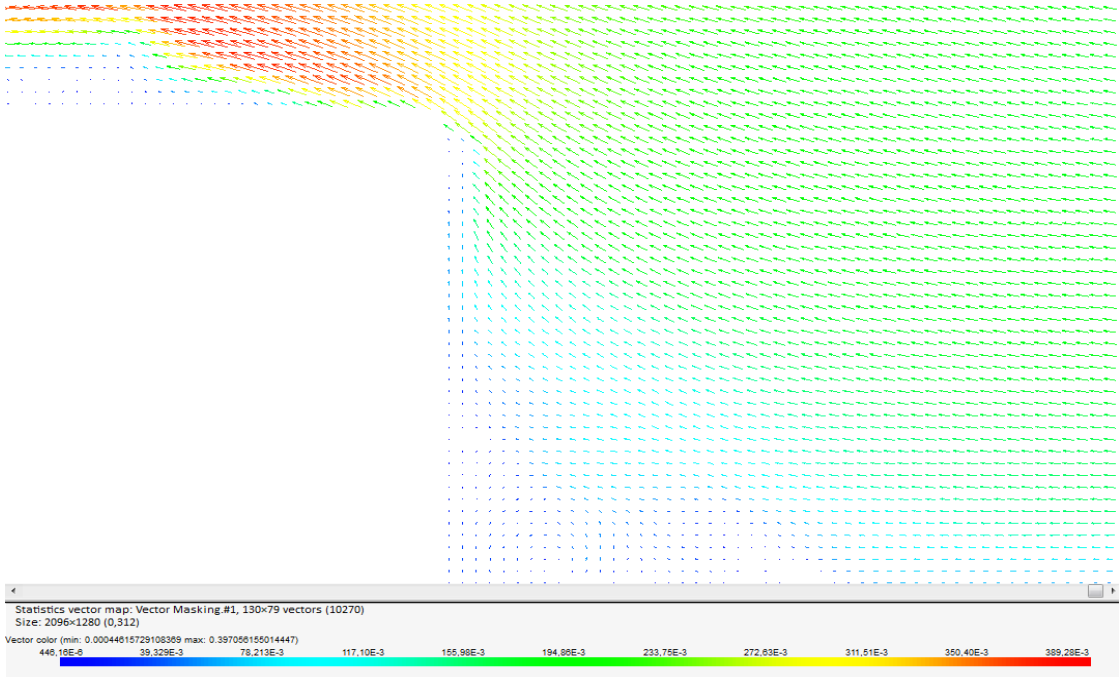
Şekil A.13: 20 Hz frekans değeri için 2. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



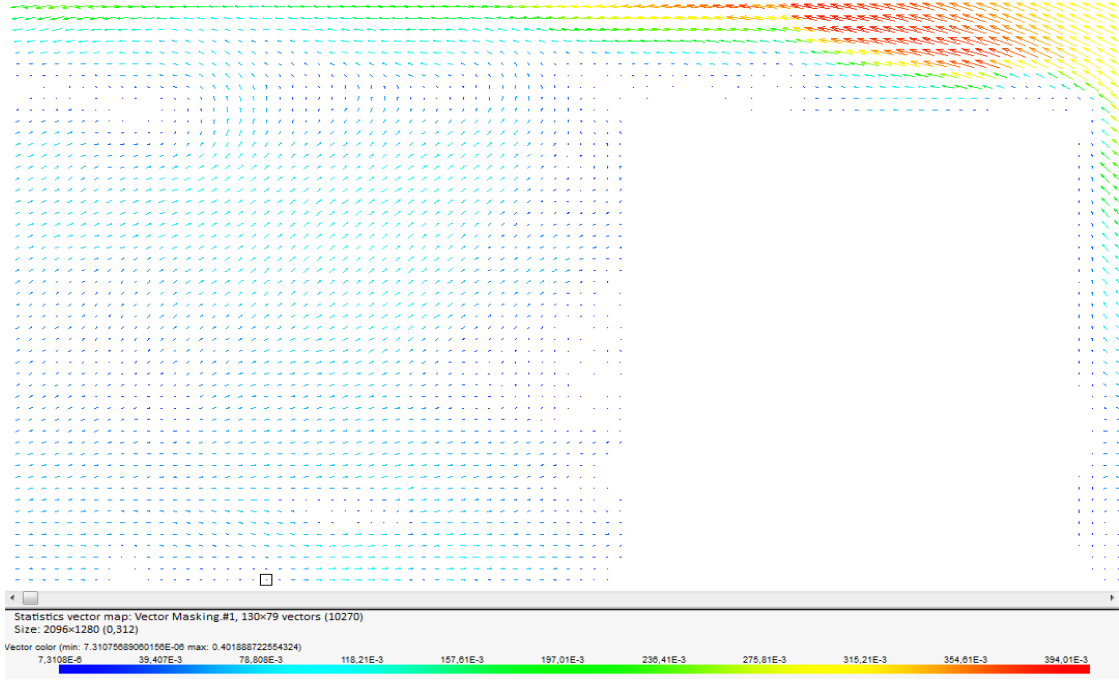
Şekil A.14: 20 Hz frekans değeri için 2. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



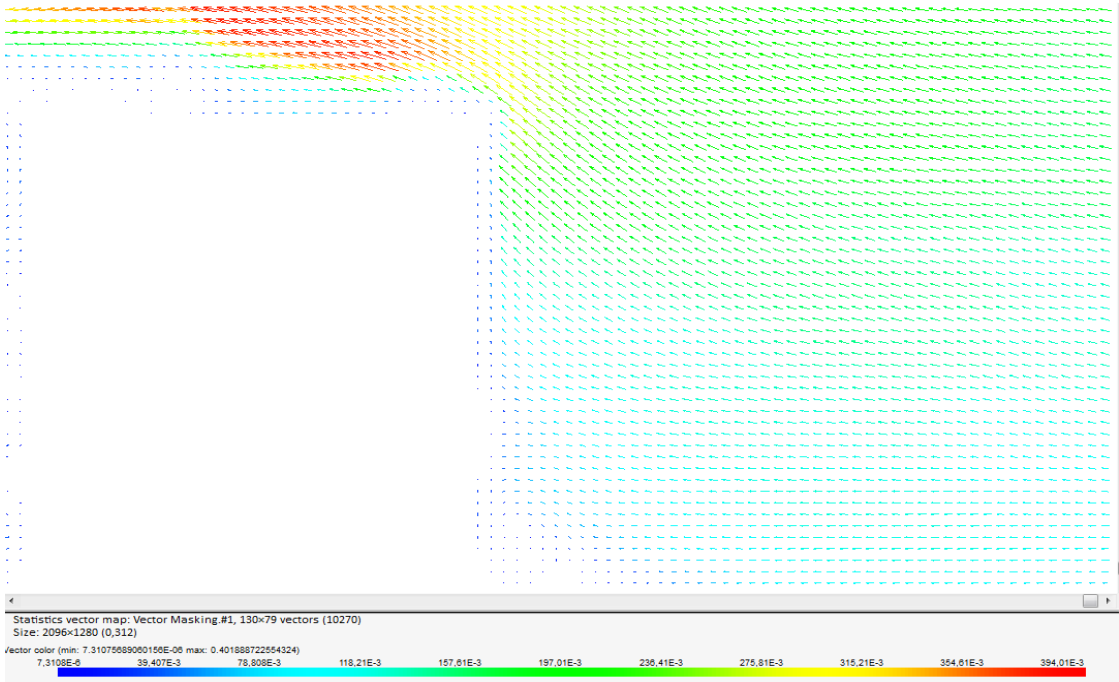
Şekil A.15: 20 Hz frekans değeri için 3. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



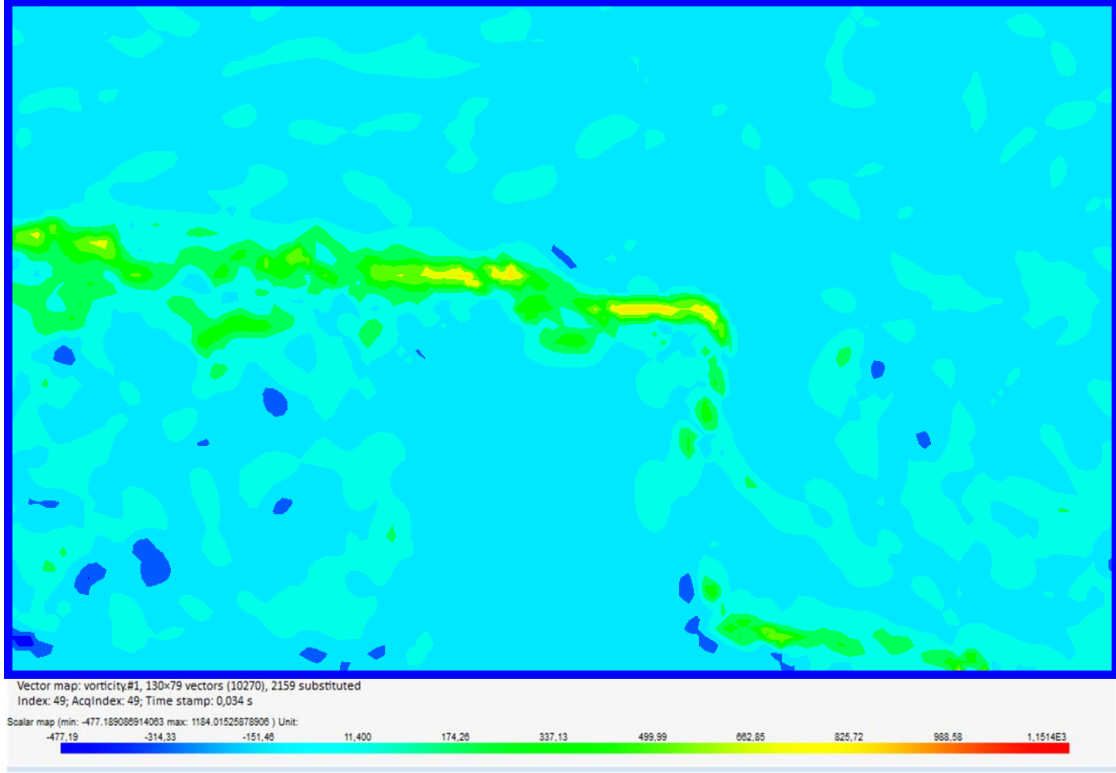
Şekil A.16: 20 Hz frekans değeri için 3. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



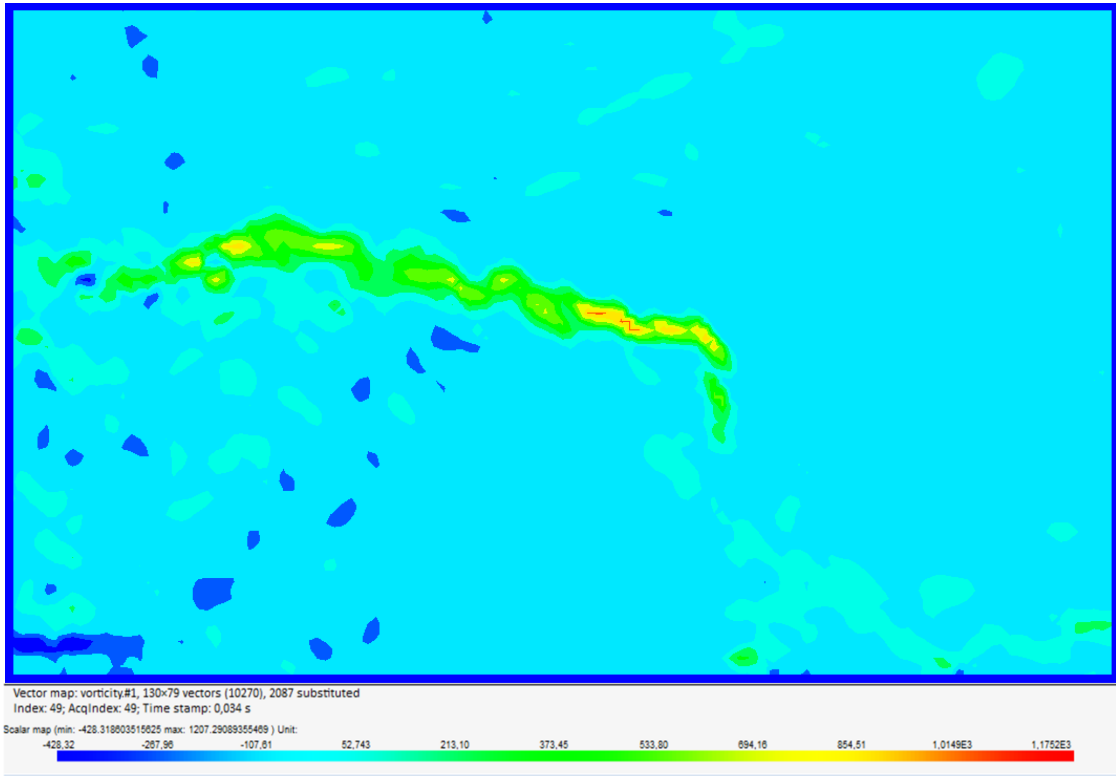
Şekil A.17: 20 Hz frekans değeri için 4. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



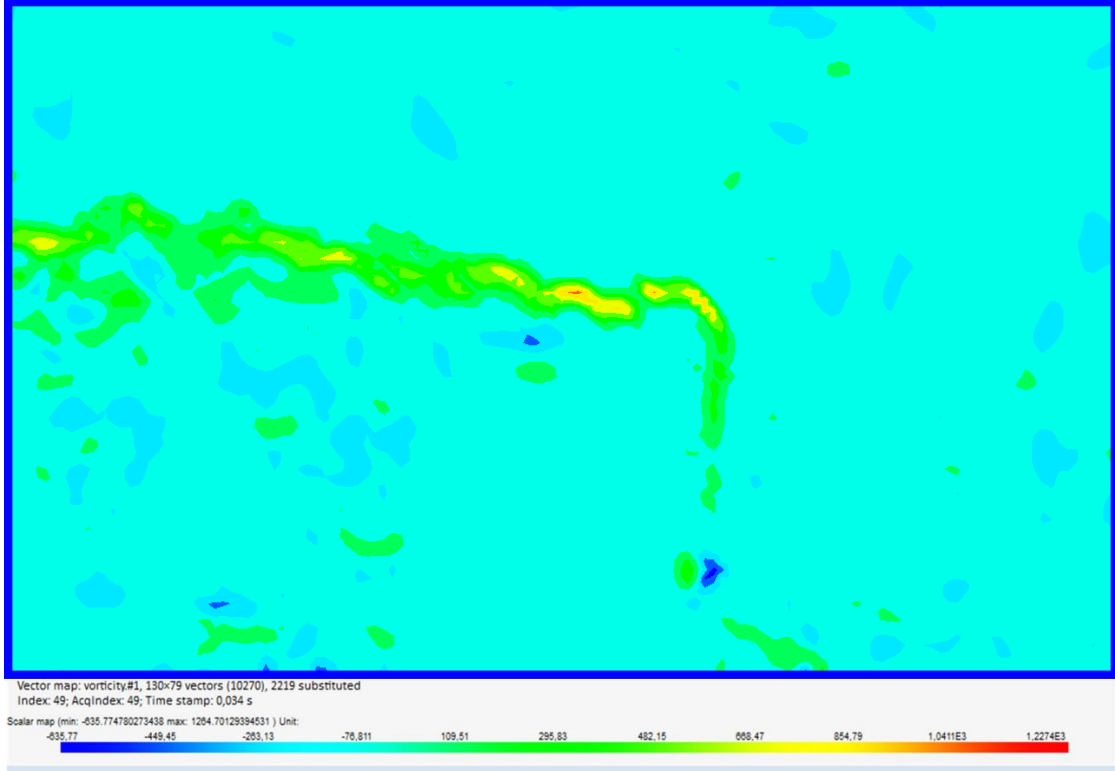
Şekil A.18: 20 Hz frekans değeri için 4. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



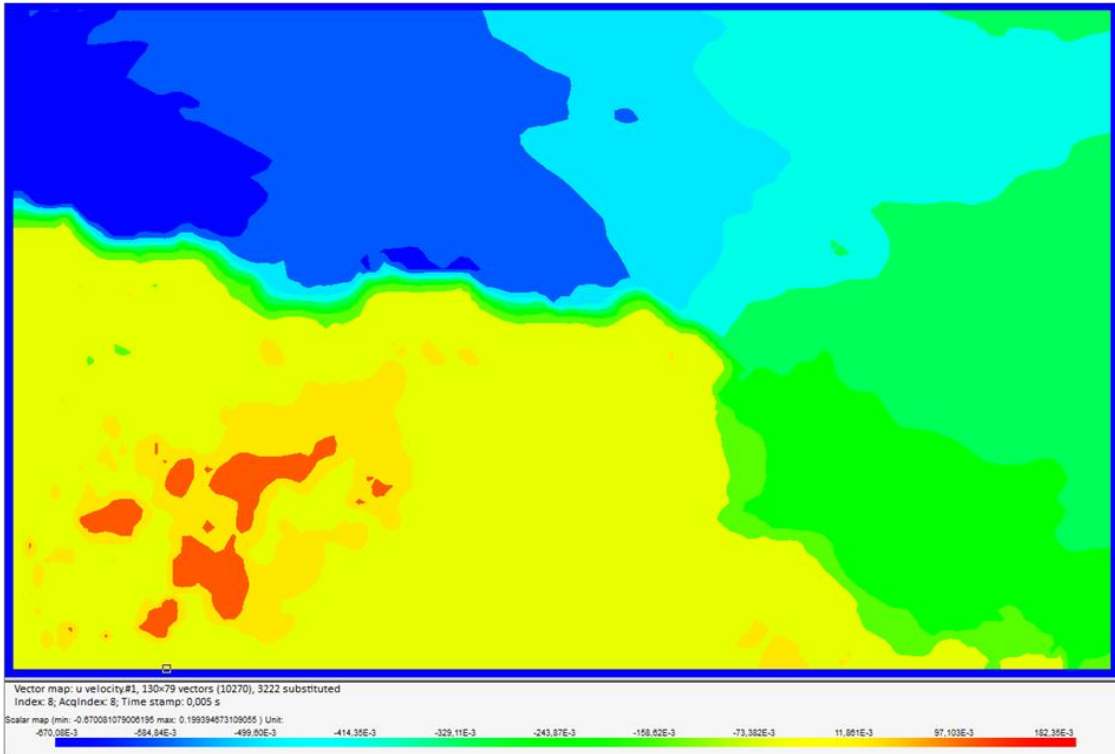
Şekil A.19: 2.batarya modeli için 20 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



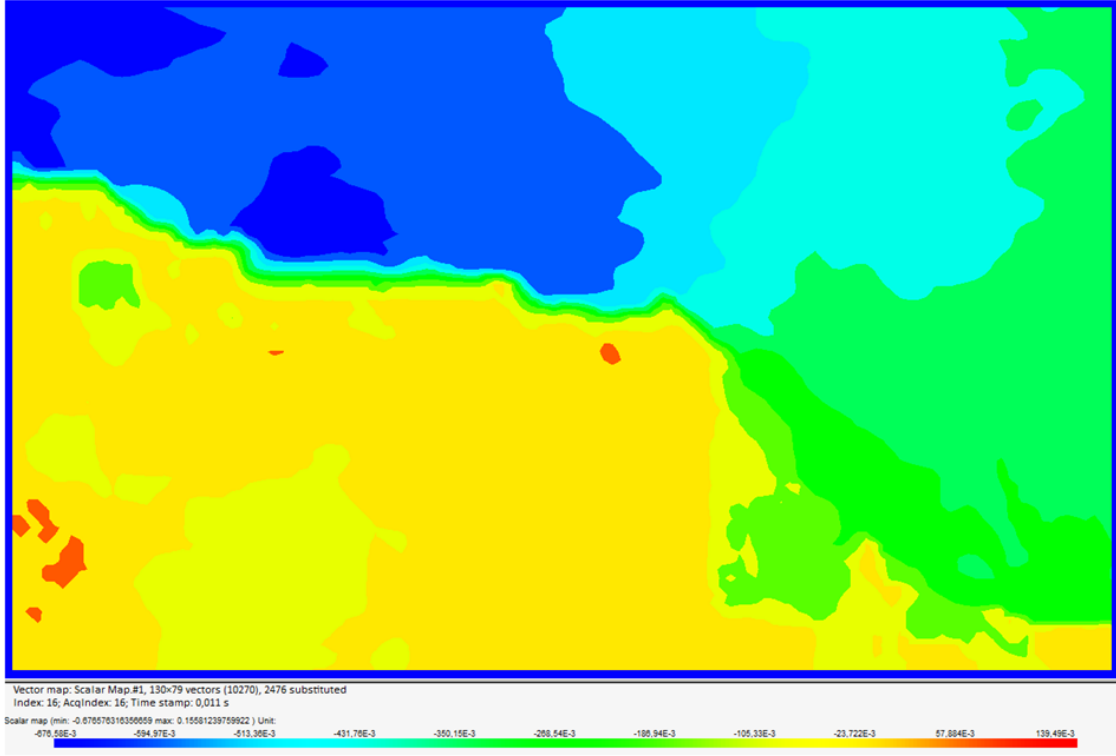
Şekil A.20: 3.batarya modeli için 20 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



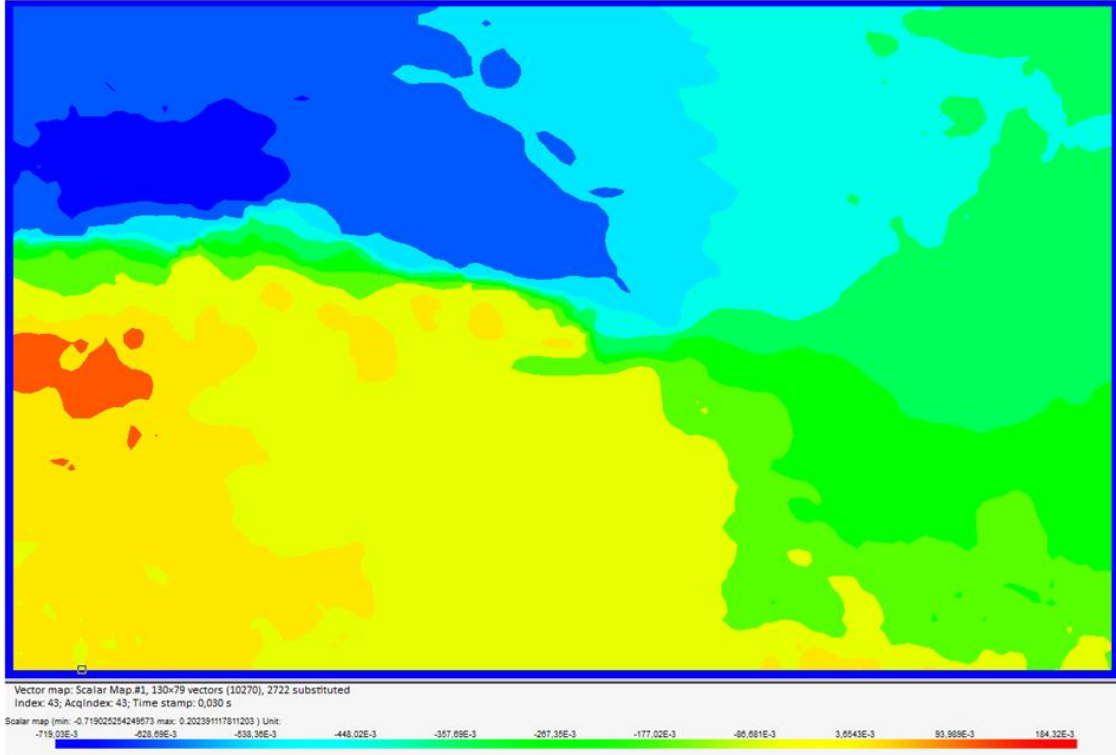
Şekil A.21: 4.batarya modeli için 20 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



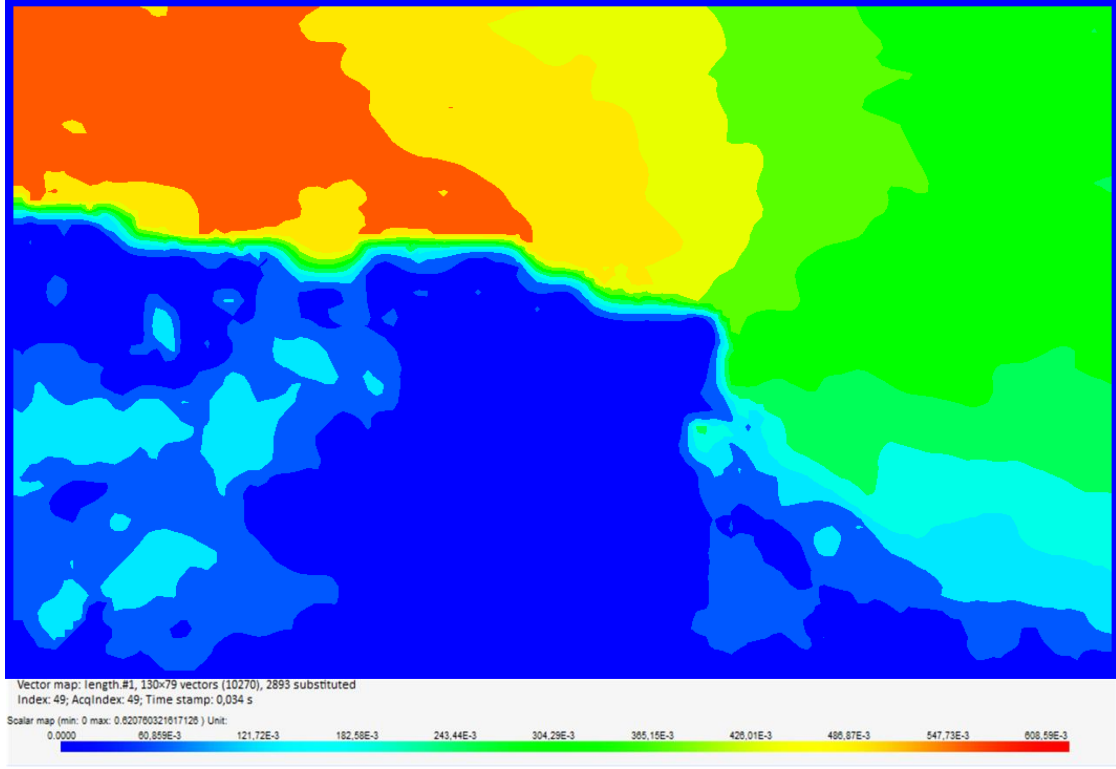
Şekil A.22: 1.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen eksenel hız haritası.



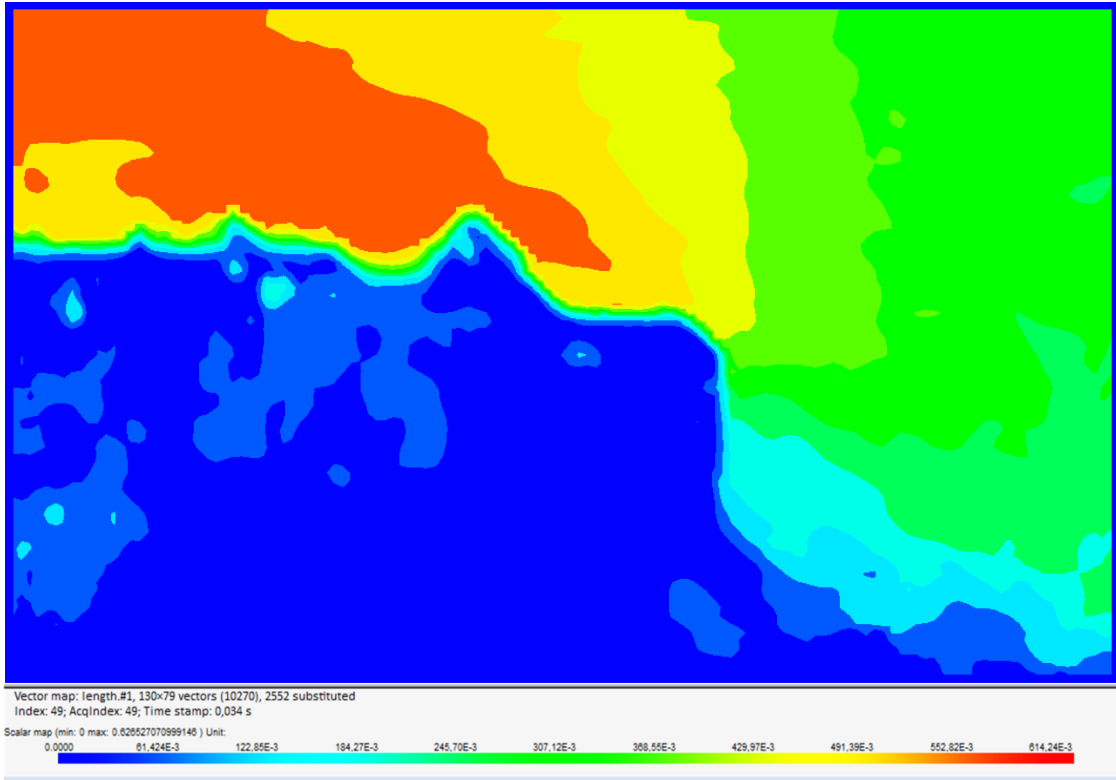
Şekil A.23: 3.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen eksenel hız haritası.



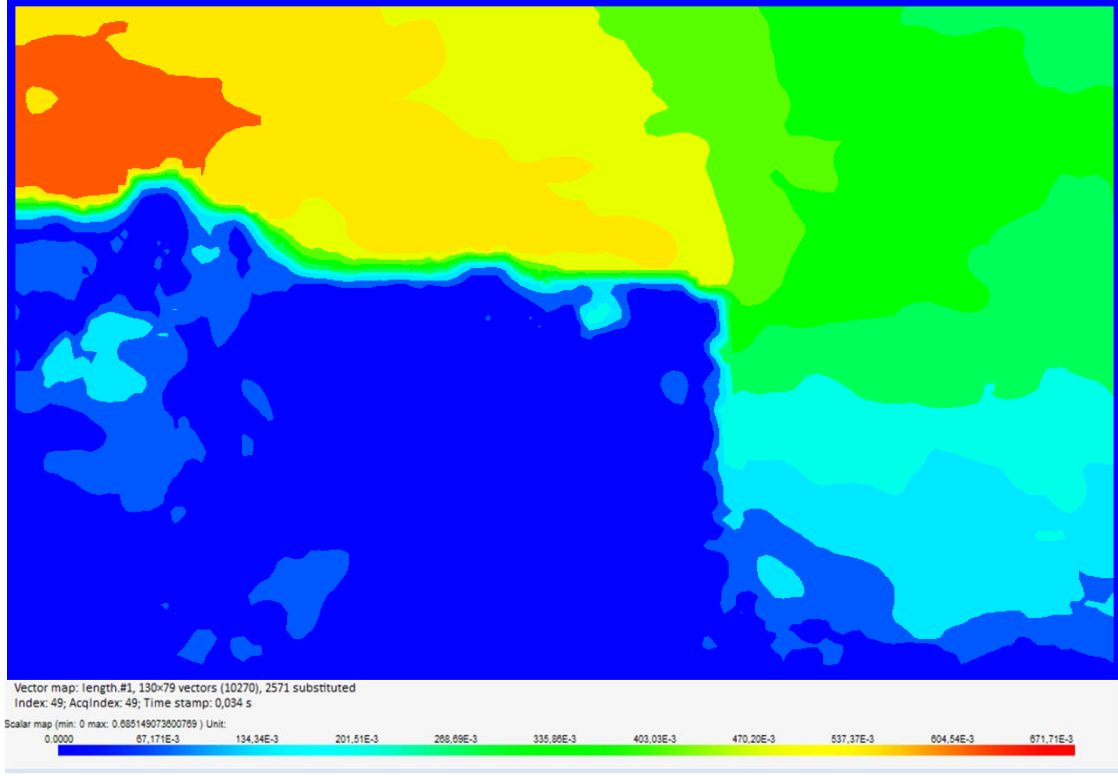
Şekil A.24: 4.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen eksenel hız haritası.



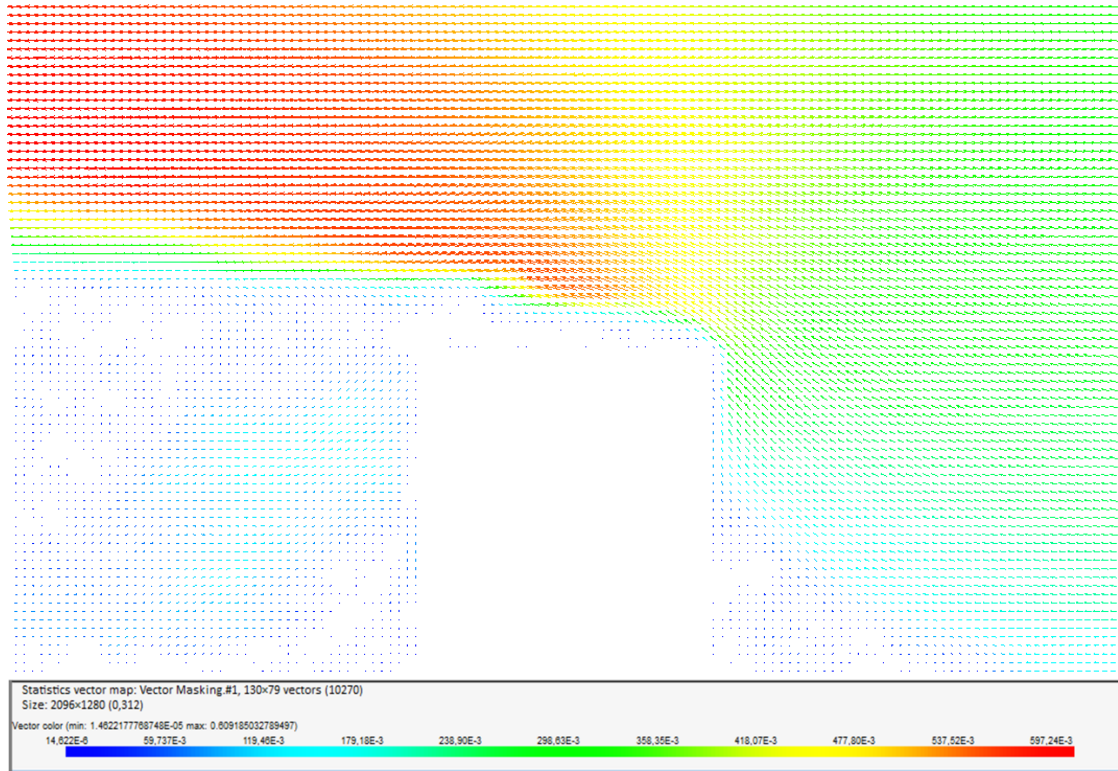
Şekil A.25: 2.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



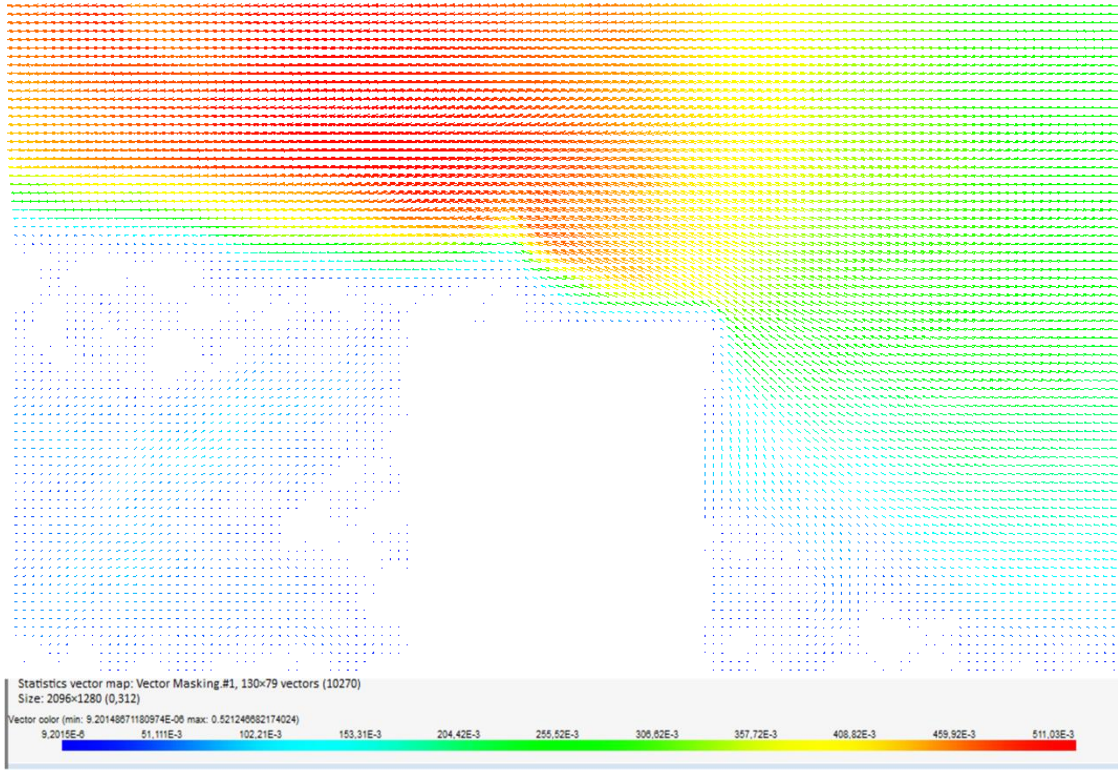
Şekil A.26: 3.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



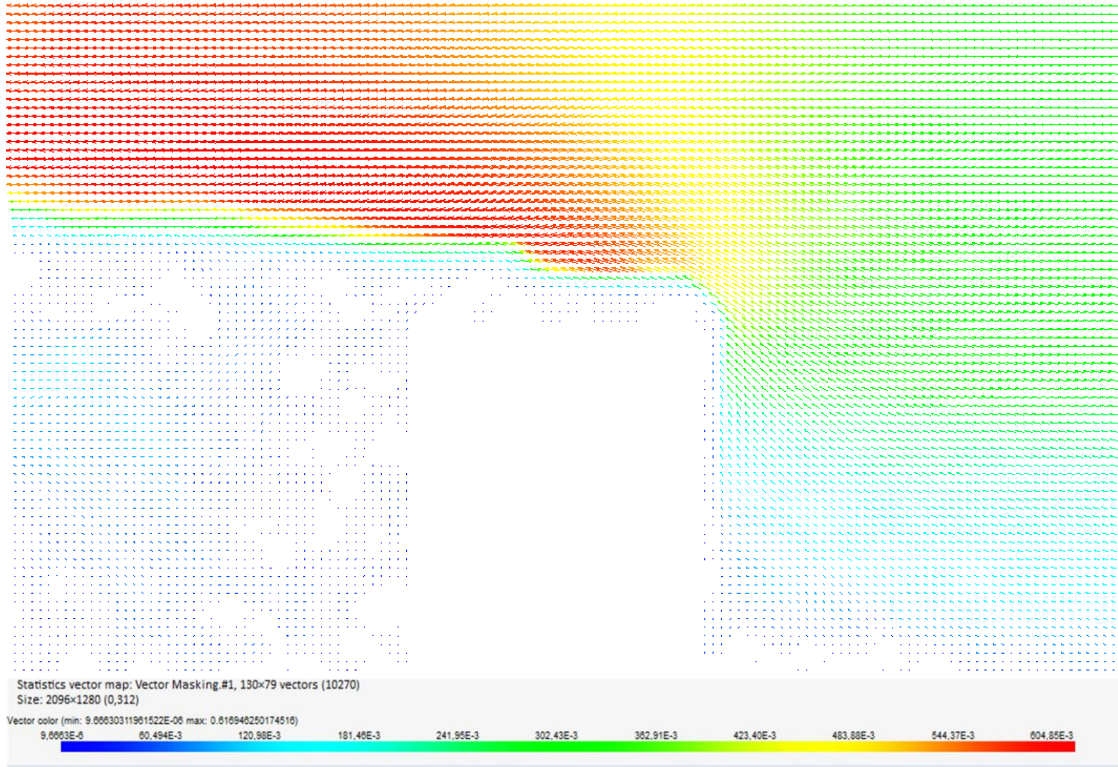
Şekil A.27: 4.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



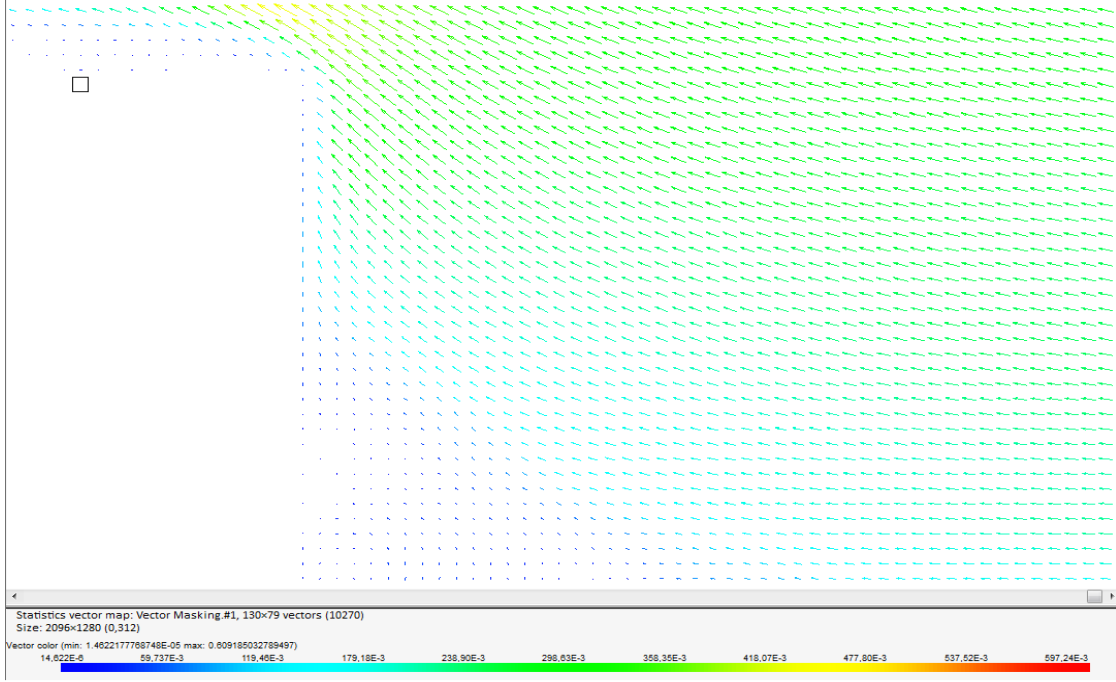
Şekil A.28: 1.batarya modeli için 30 Hz’de elde edilen vektör haritası.



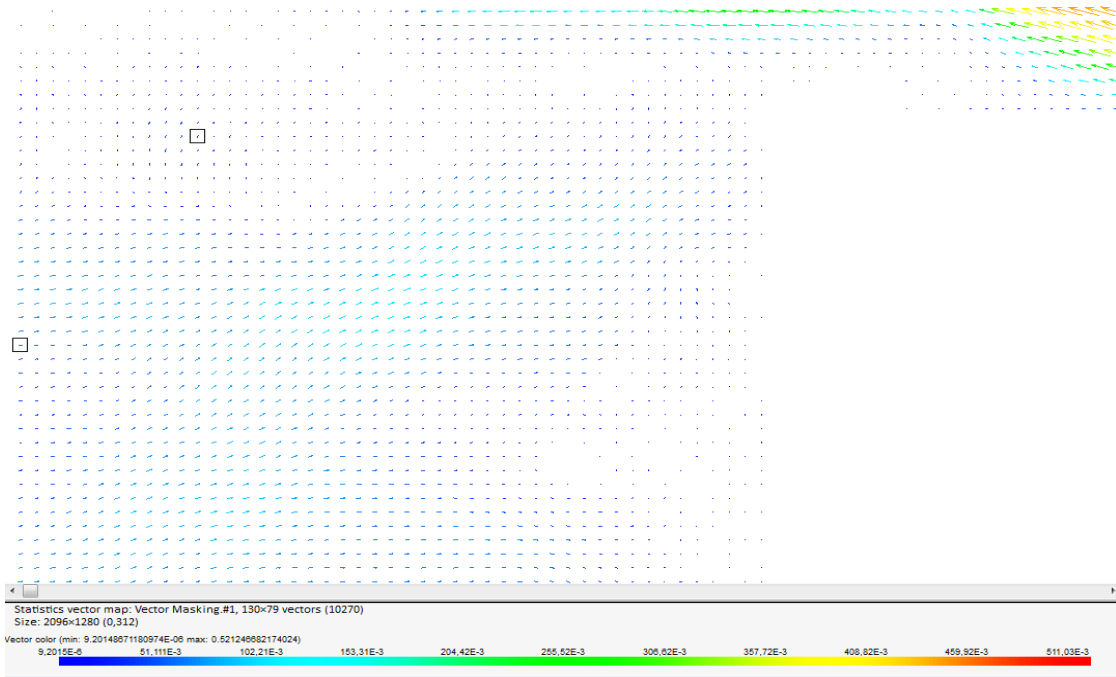
Şekil A.29: 2.batarya modeli için 30 Hz’de elde edilen vektör haritası.



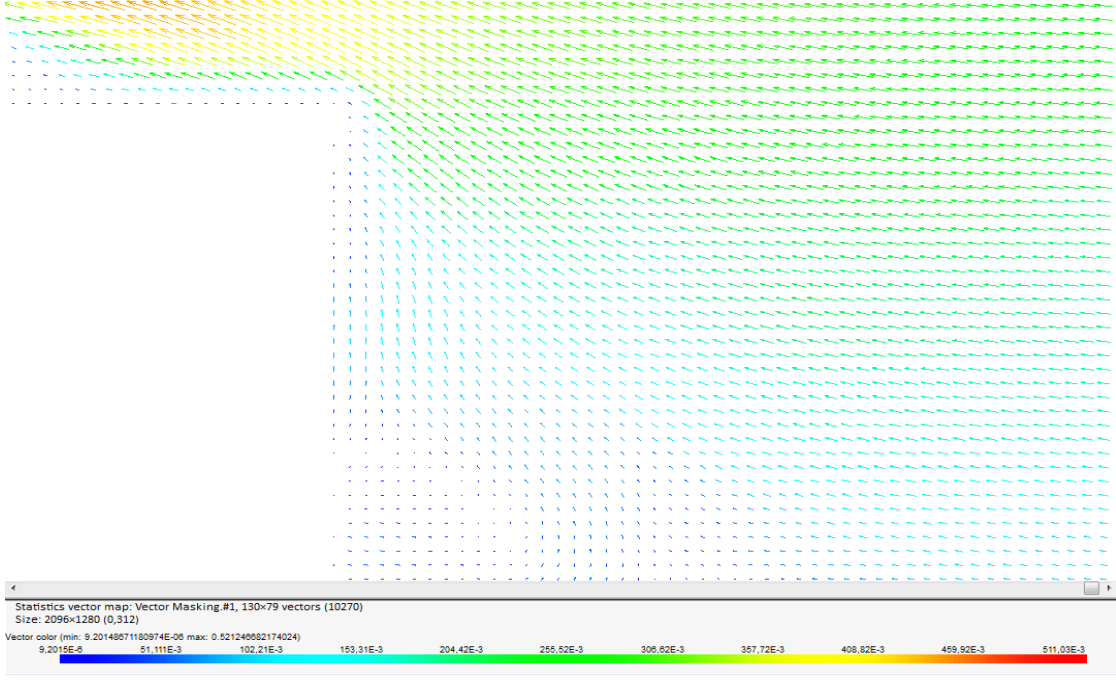
Şekil A.30: 4.batarya modeli için 30 Hz’de elde edilen vektör haritası.



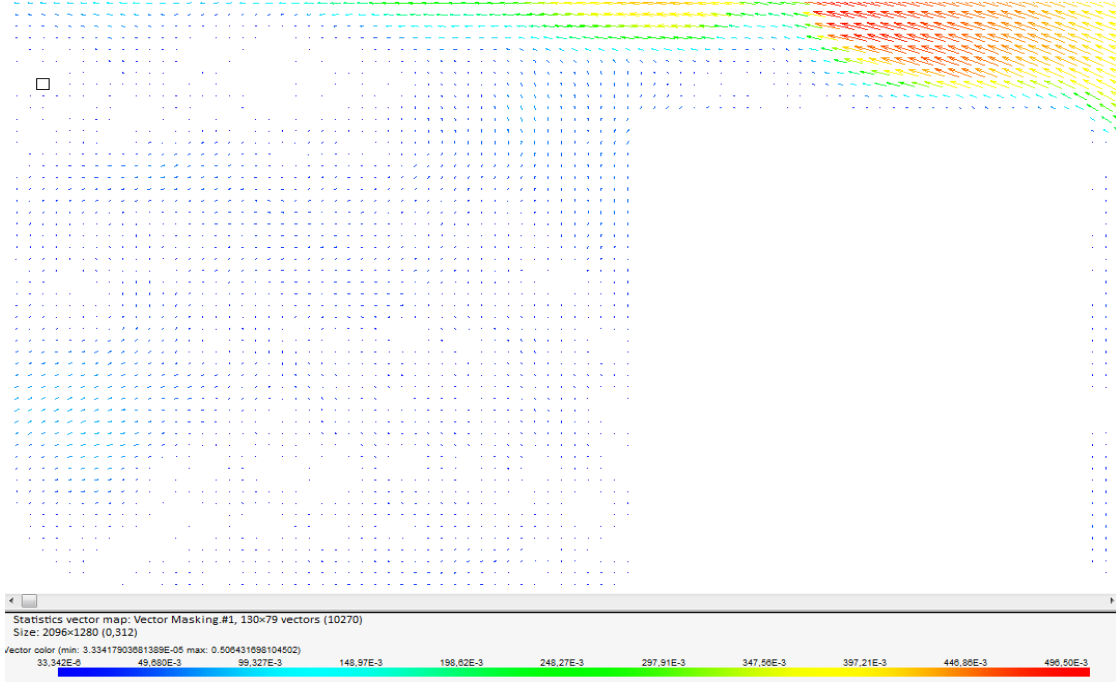
Şekil A.31: 30 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



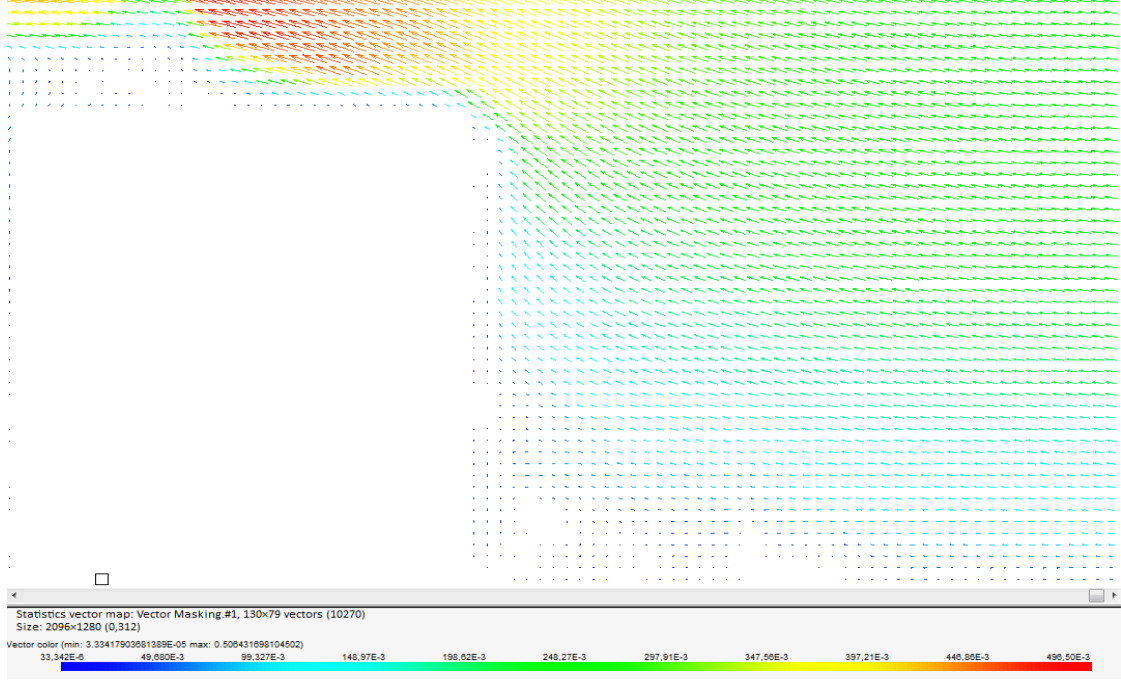
Şekil A.32: 30 Hz frekans değeri için 2. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



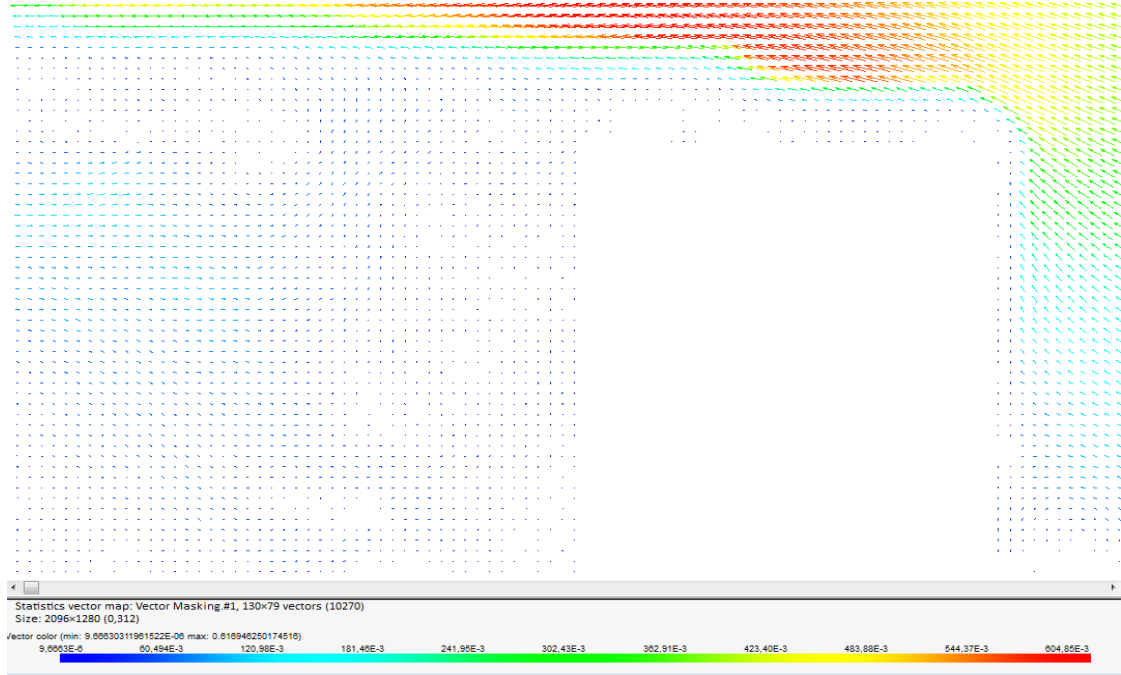
Şekil A.33: 30 Hz frekans değeri için 2. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



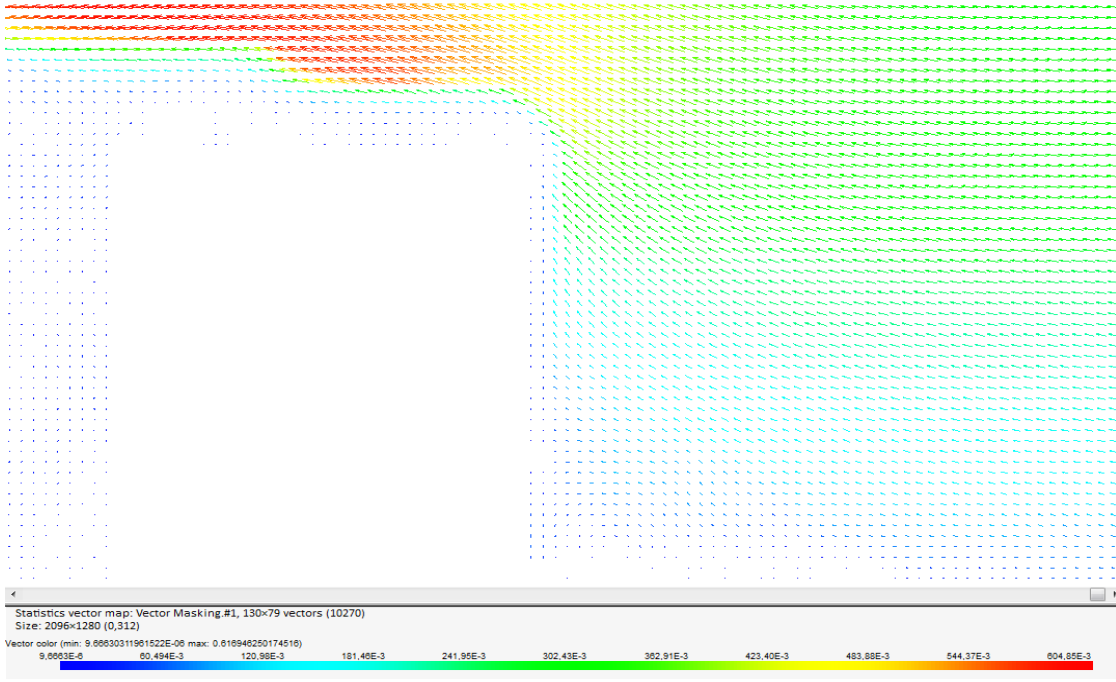
Şekil A.34: 30 Hz frekans değeri için 3. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



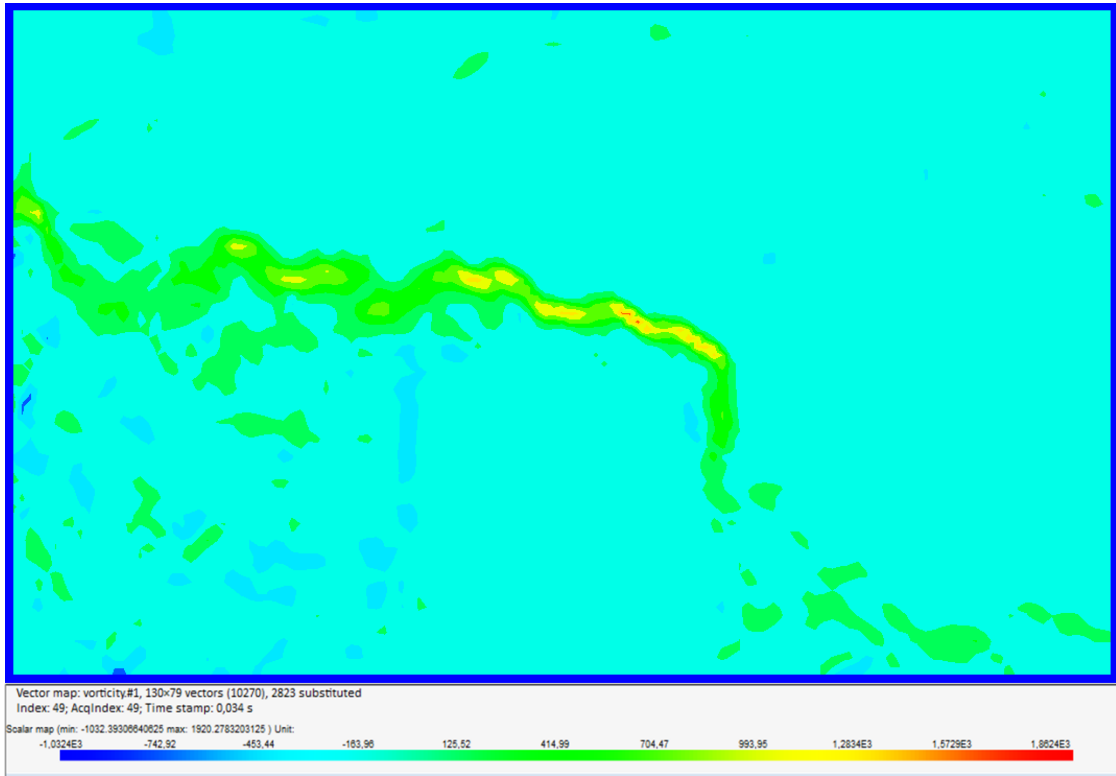
Şekil A.35: 30 Hz frekans değeri için 3. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



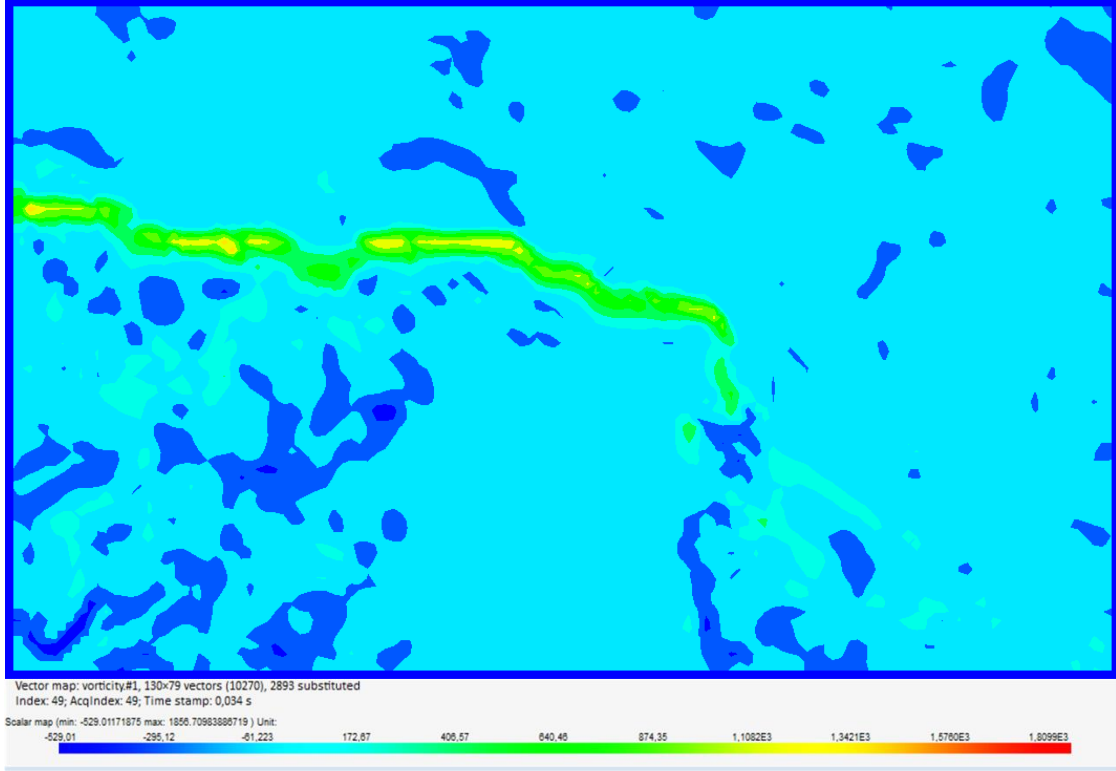
Şekil A.36: 30 Hz frekans değeri için 4. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



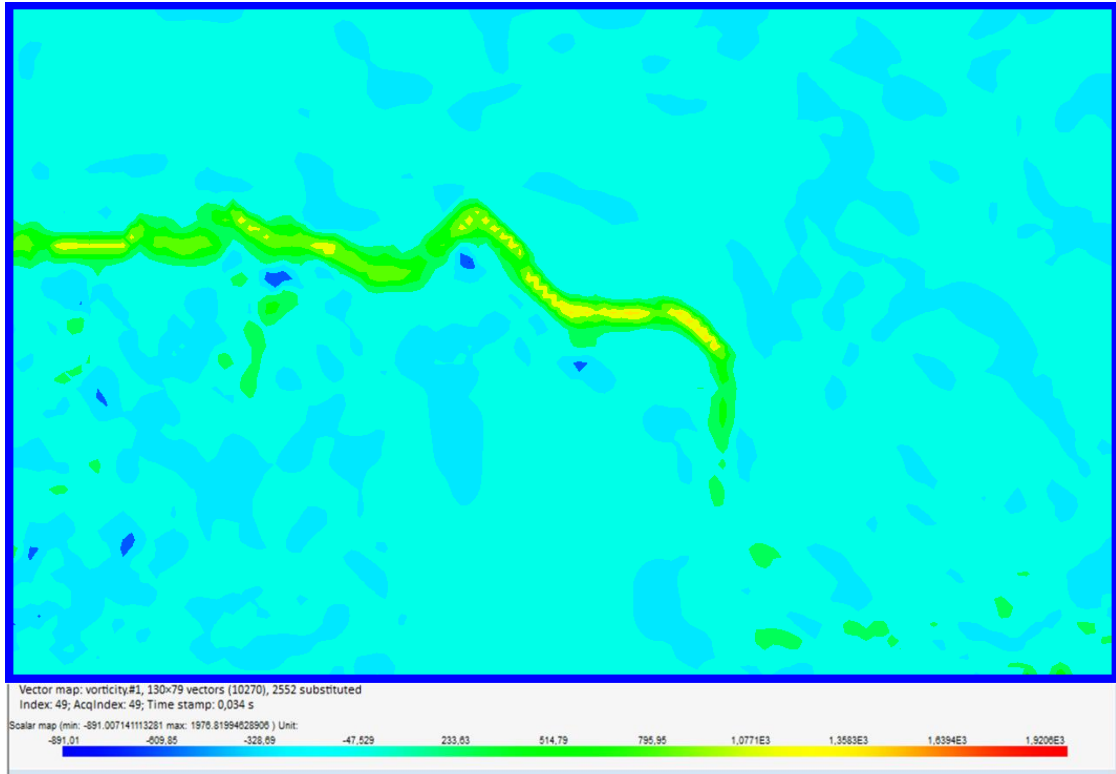
Şekil A37: 30 Hz frekans değeri için 4. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



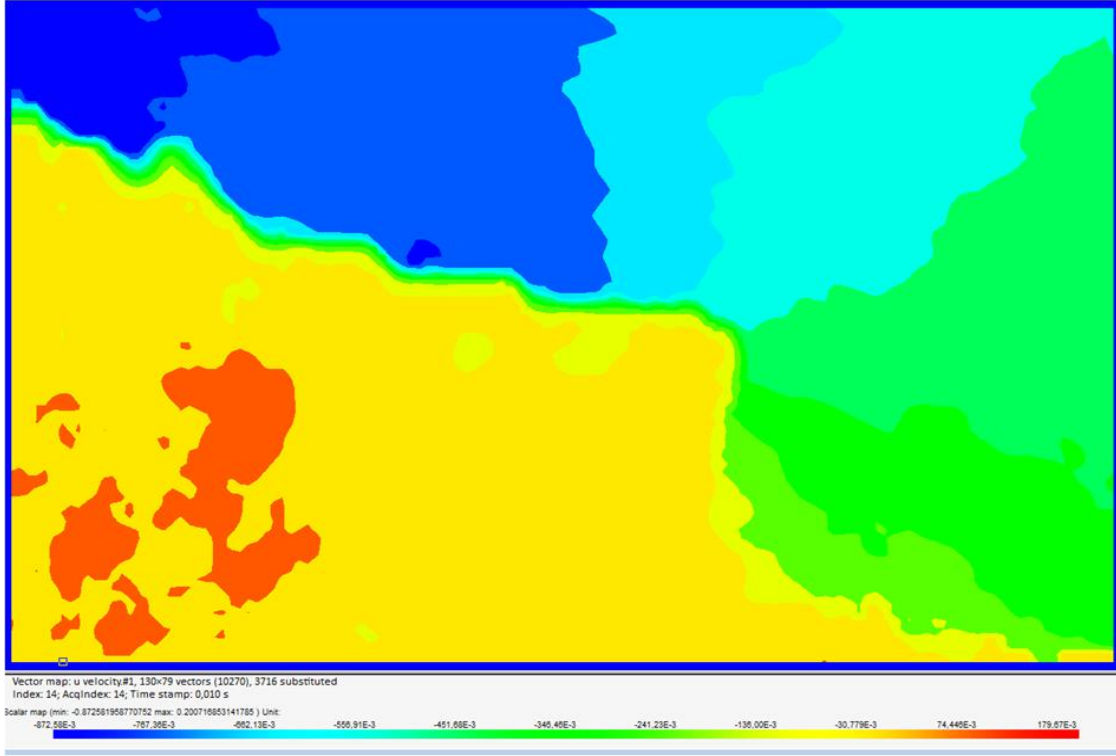
Şekil A.38: 1.batarya modeli için 30 Hz'de görüntülenen vortisite konturları.



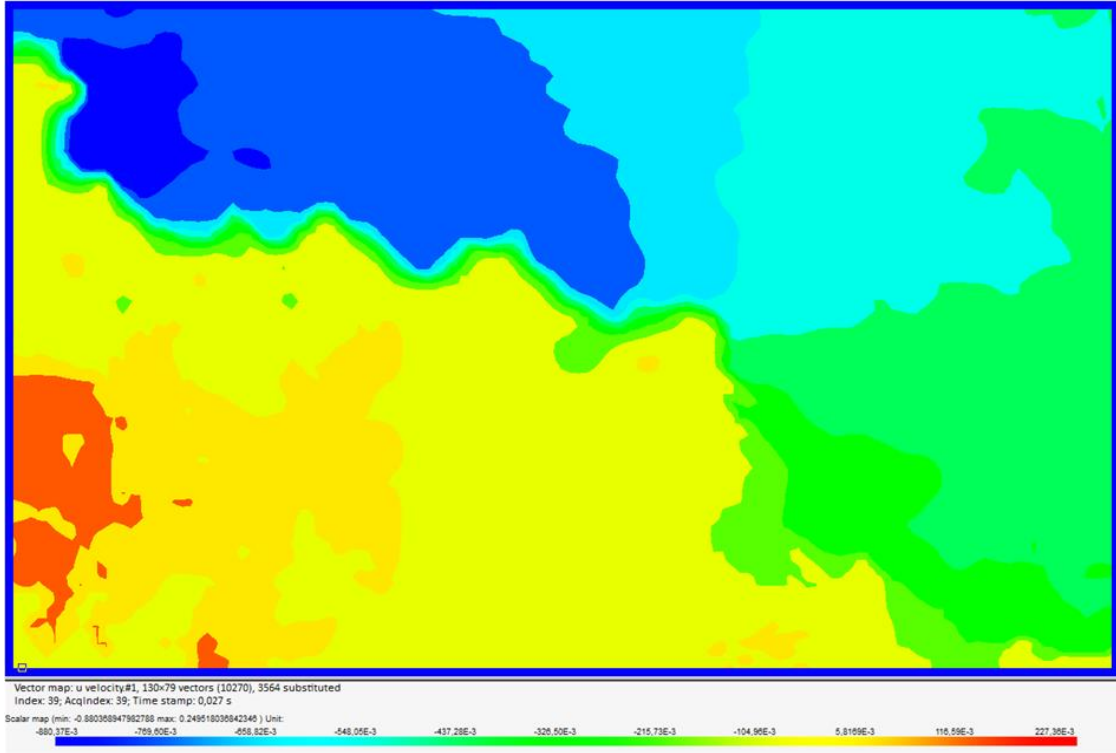
Şekil A.39: 2.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



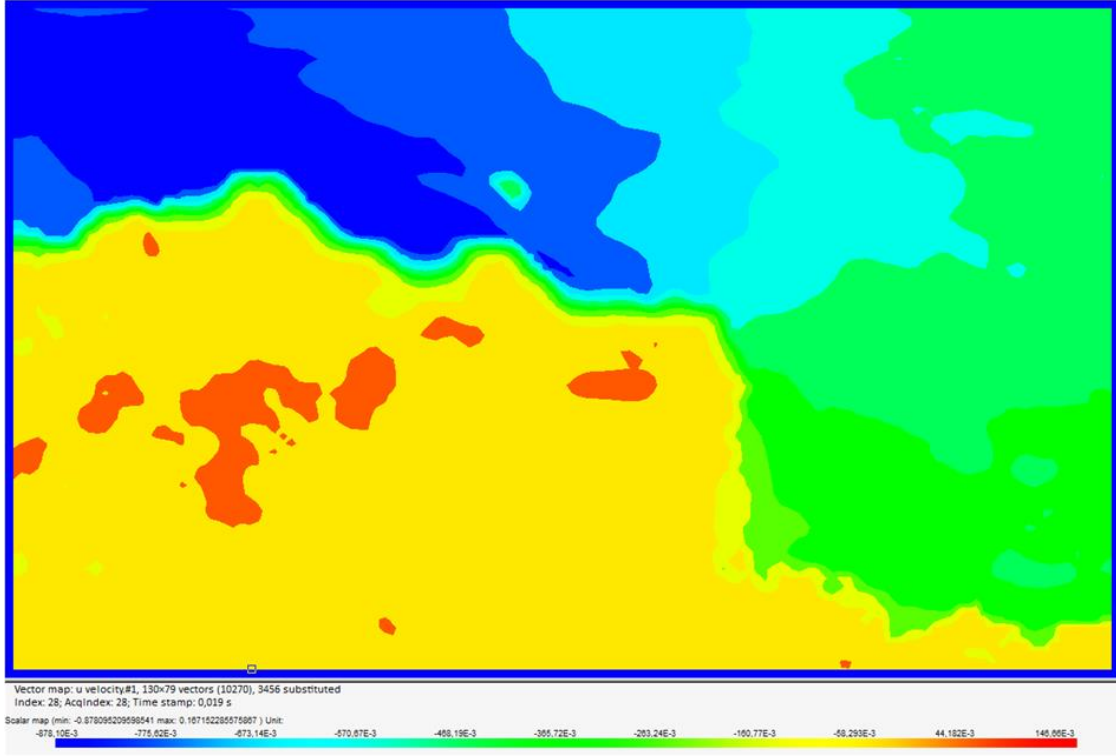
Şekil A.40: 3.batarya modeli için 30 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



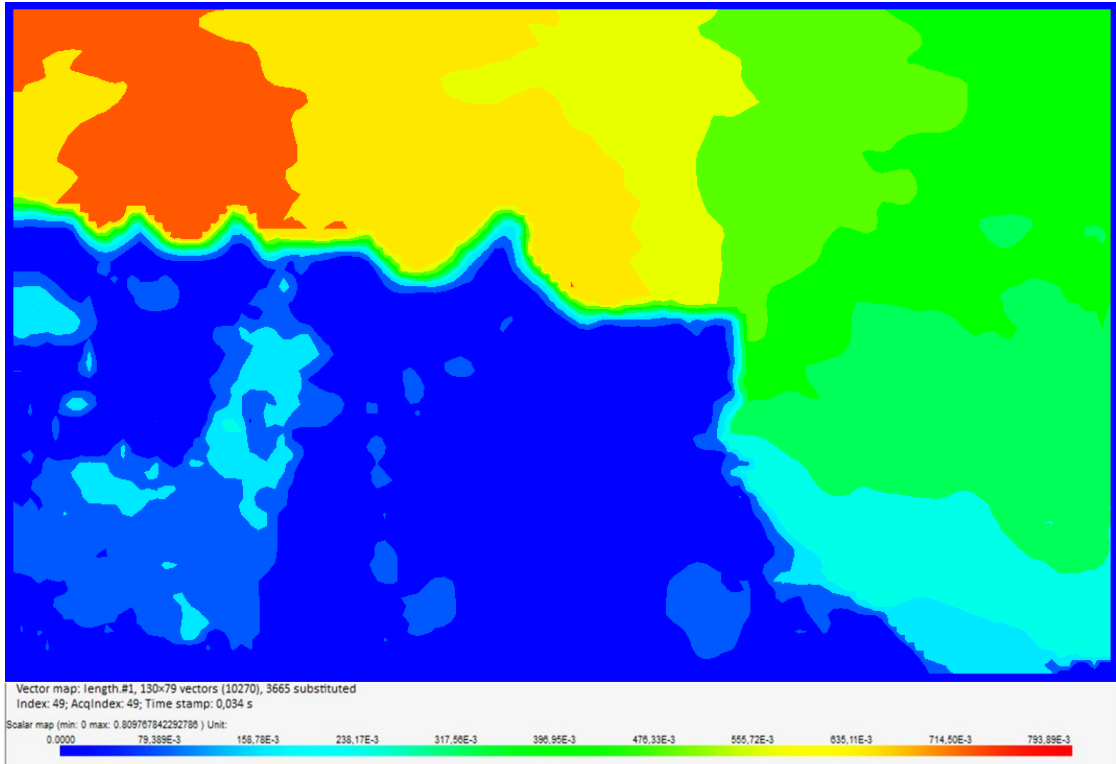
Şekil A.41: 1.batarya modeli için 40 Hz'de görüntülenen aksenal hız haritası.



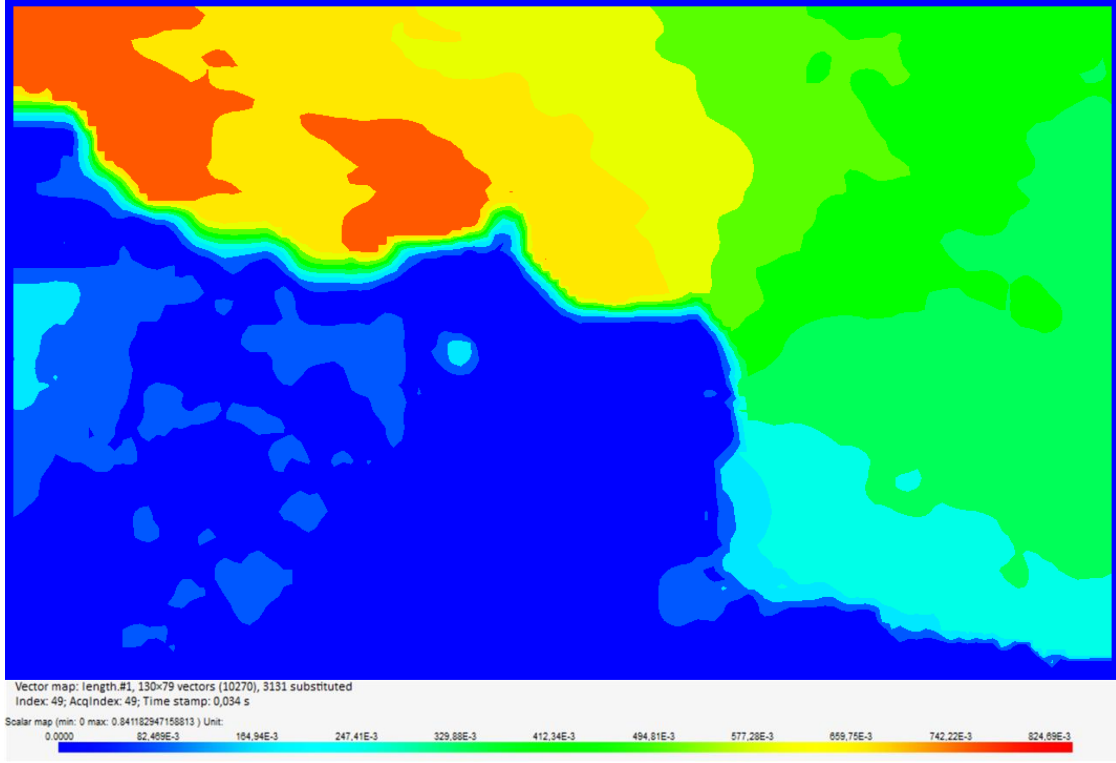
Şekil A.42: 2.batarya modeli için 40 Hz'de görüntülenen aksenal hız haritası.



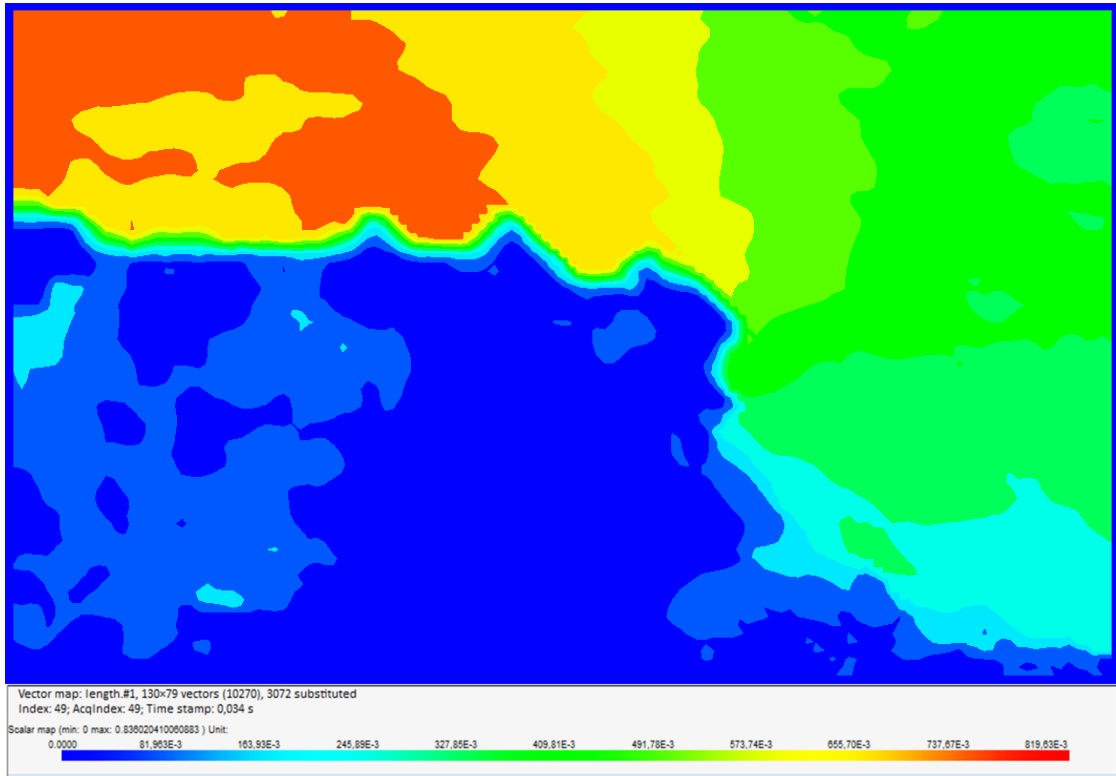
Şekil A.43: 3.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen aksel hız haritası.



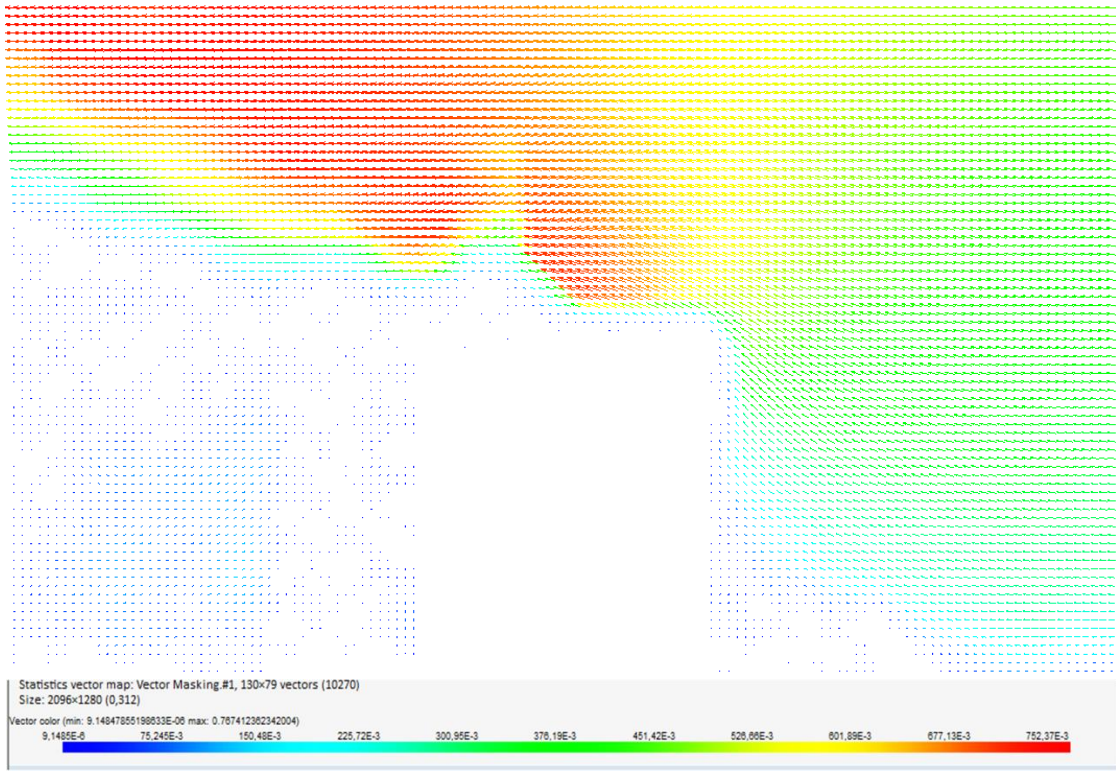
Şekil A.44: 1.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



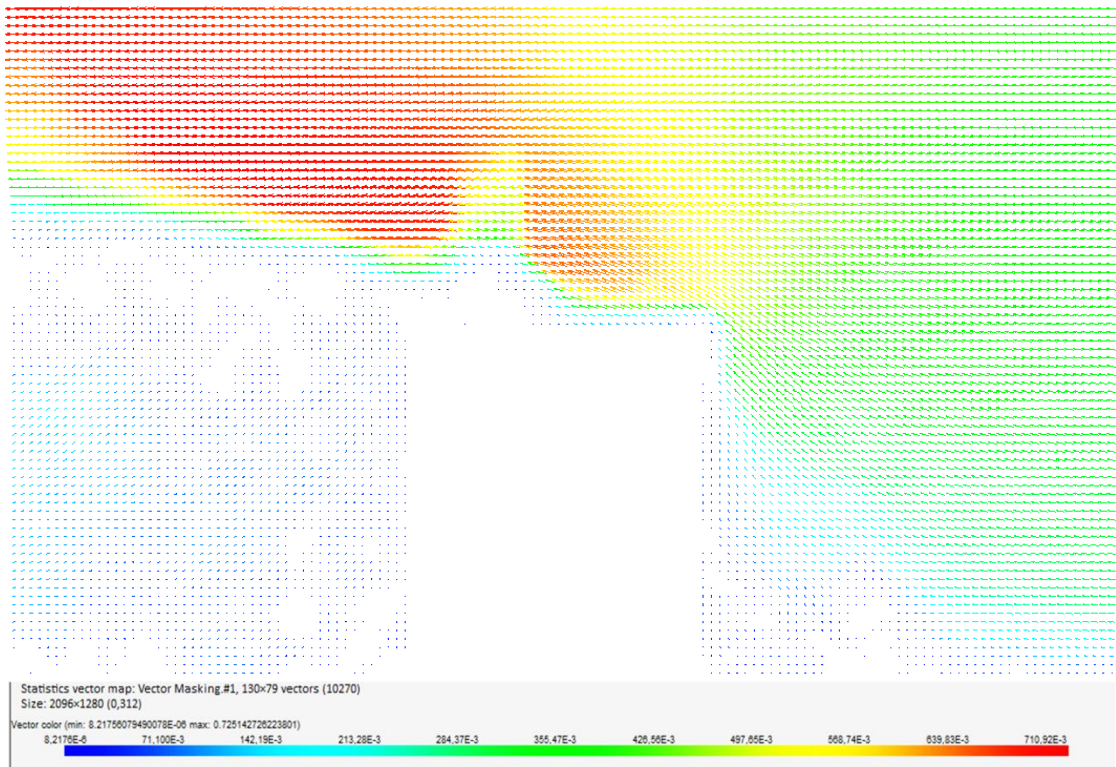
Şekil A.45: 3.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



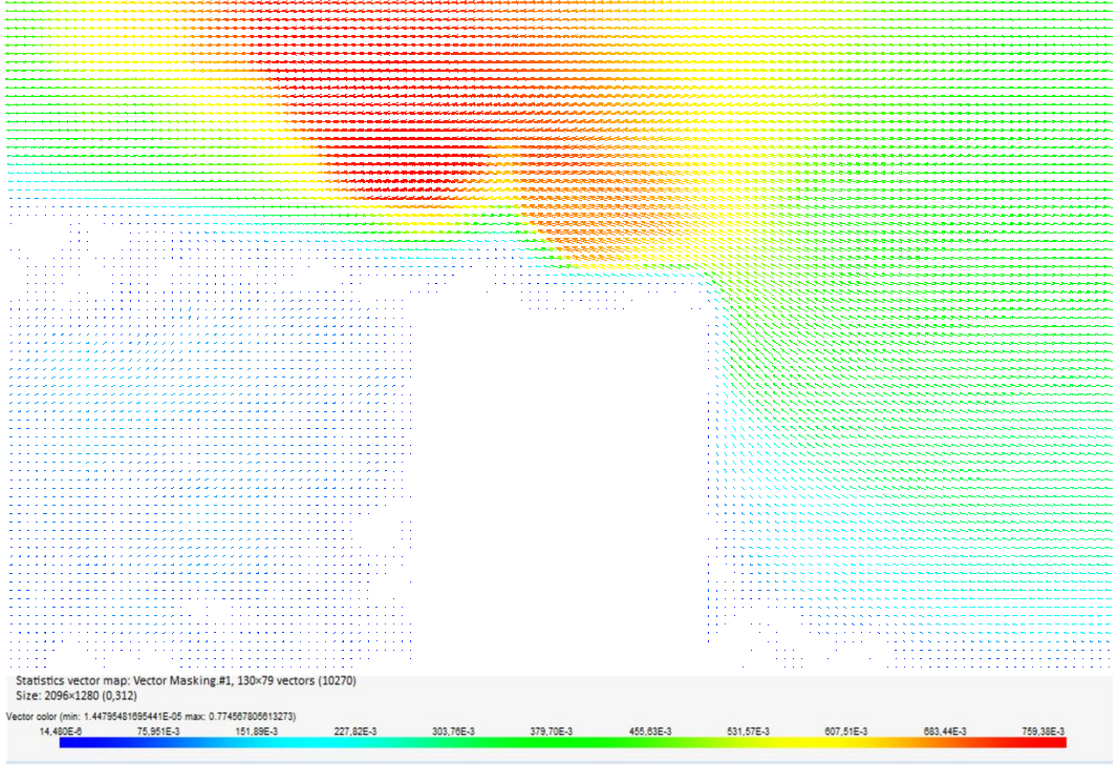
Şekil A.46: 4.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen bileşke hız haritası.



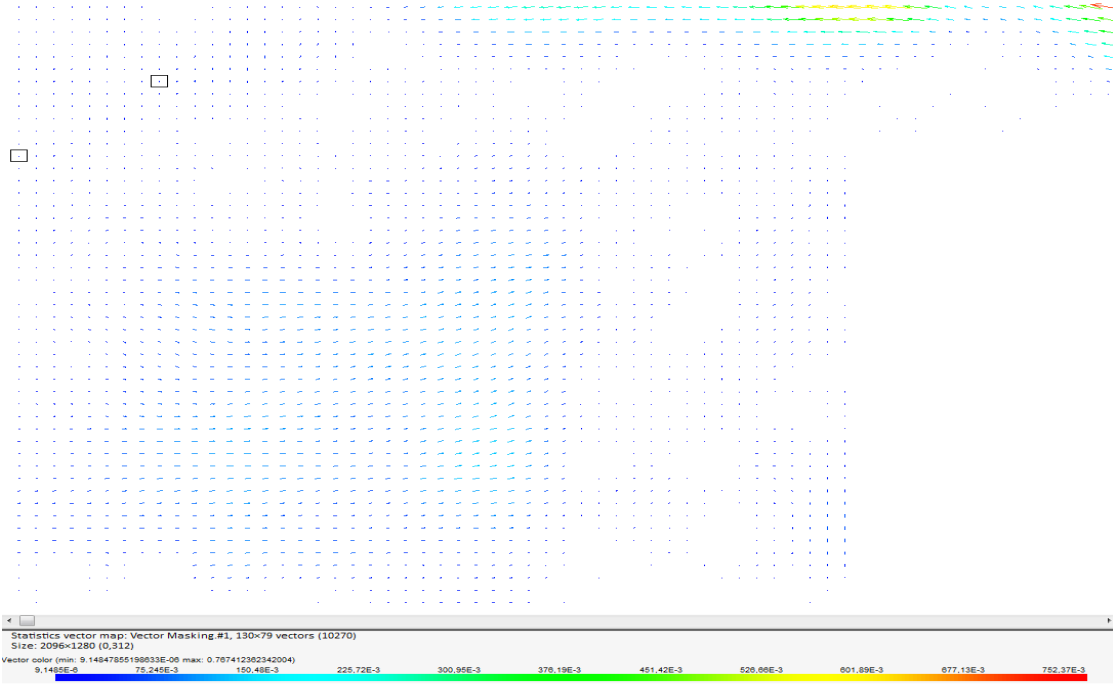
Şekil A.47: 1.batarya modeli için 40 Hz’de elde edilen vektör haritası.



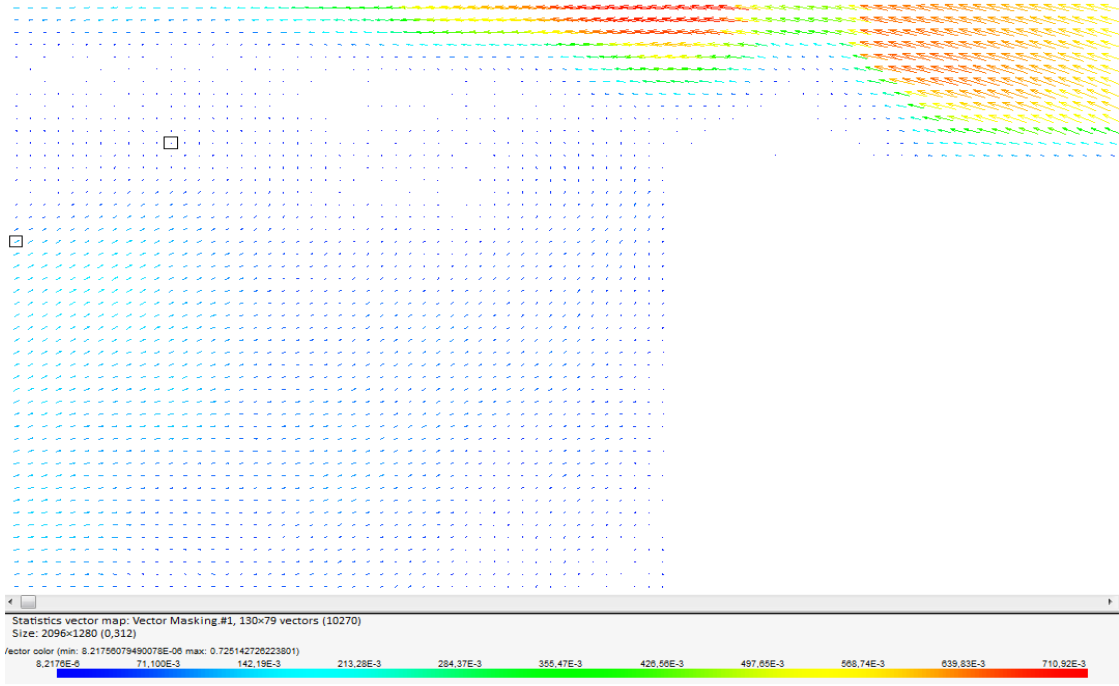
Şekil A.48: 2.batarya modeli için 40 Hz’de elde edilen vektör haritası.



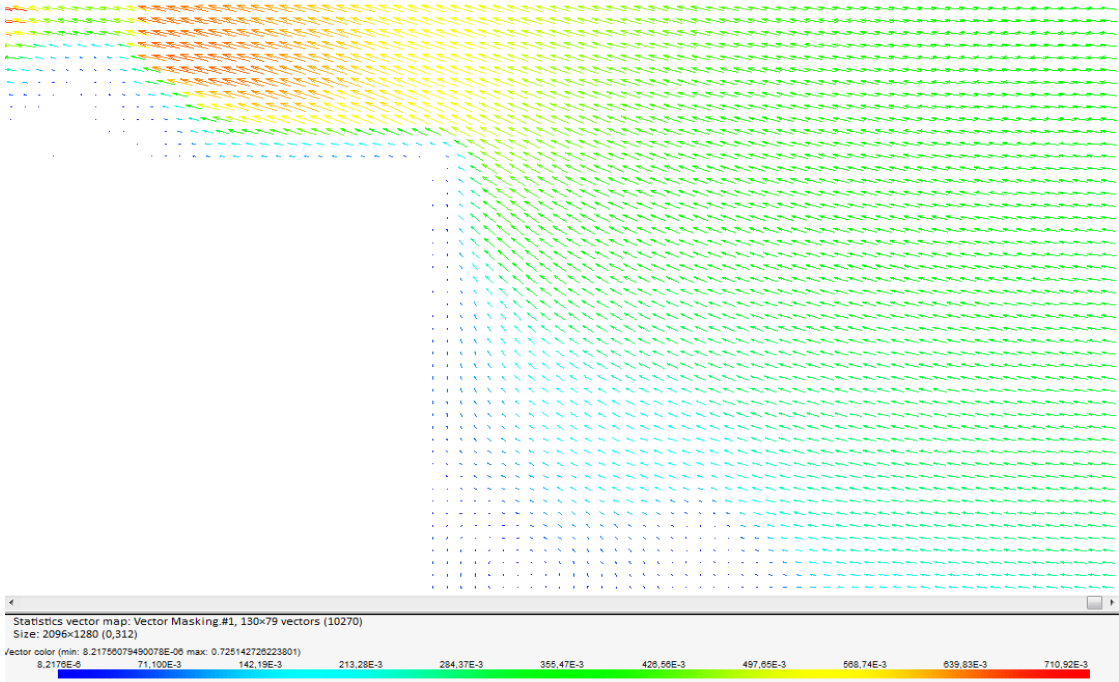
Şekil A.49: 4.batarya modeli için 40 Hz’de elde edilen vektör haritası.



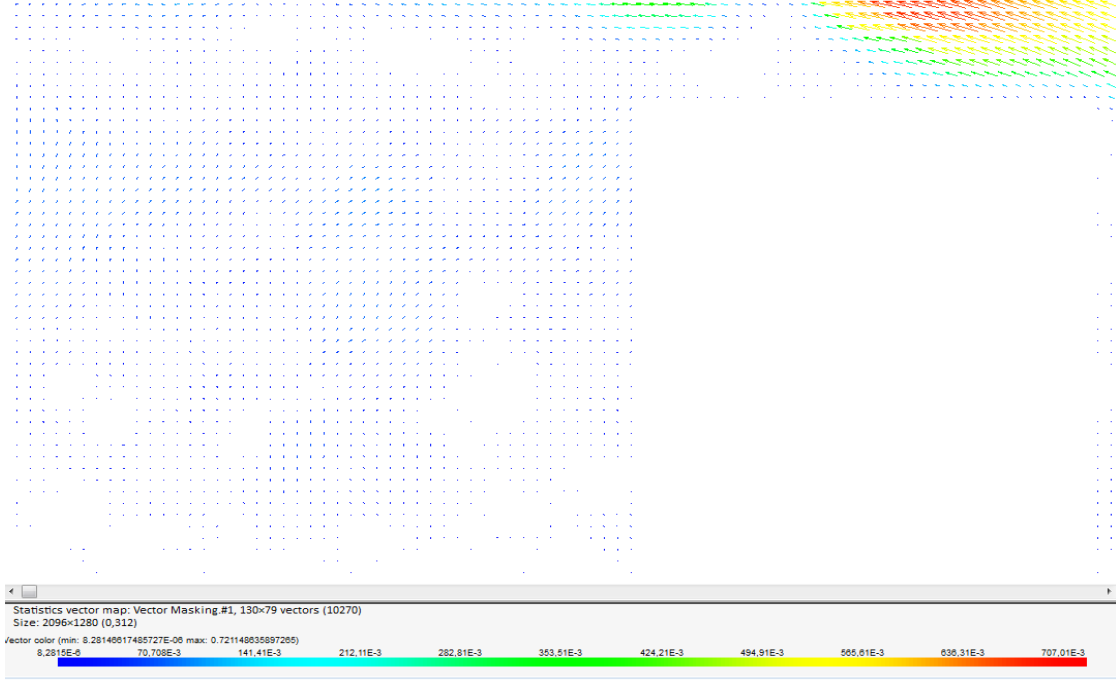
Şekil A.50: 40 Hz frekans değeri için 1. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



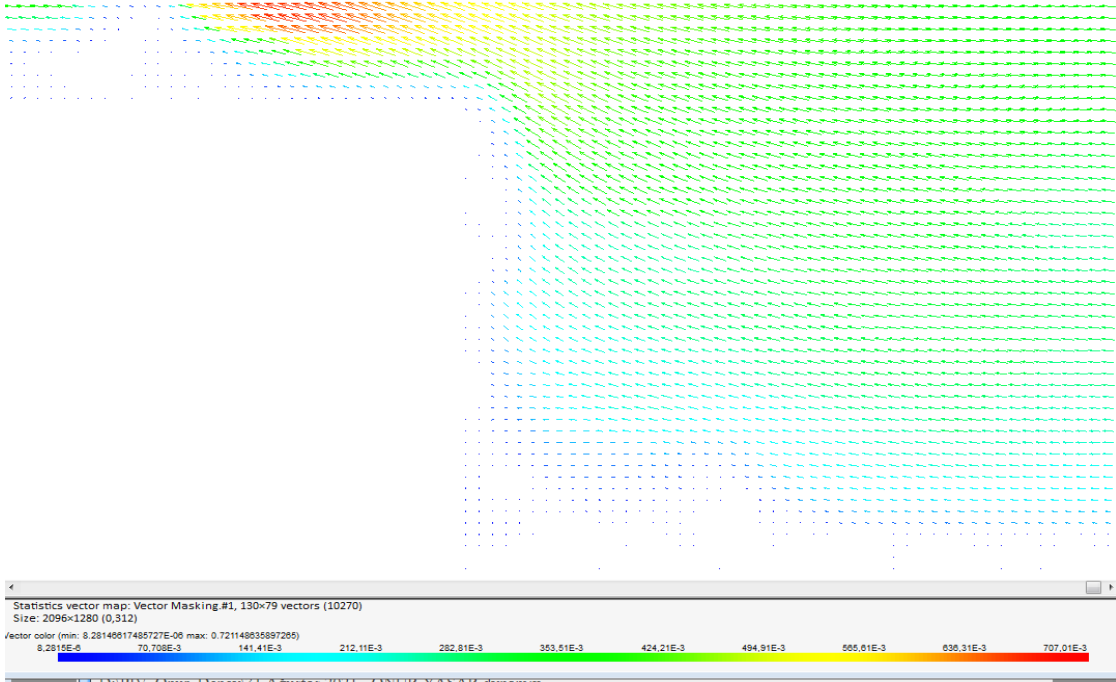
Şekil A.51: 40 Hz frekans değeri için 2. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



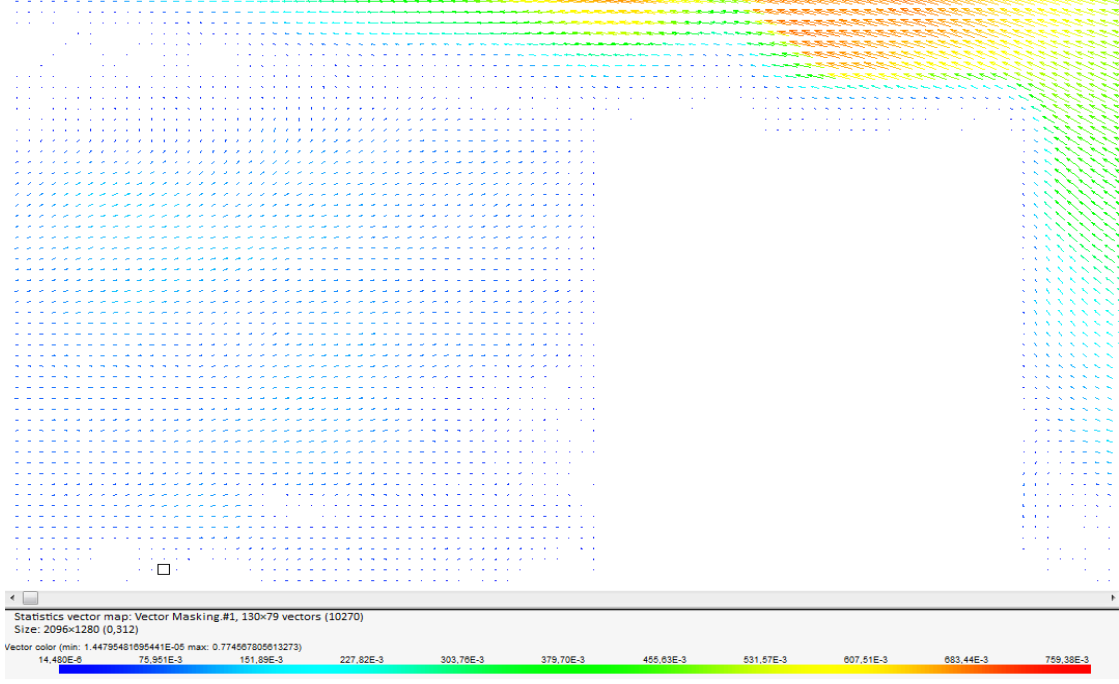
Şekil A.52: 40 Hz frekans değeri için 2. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



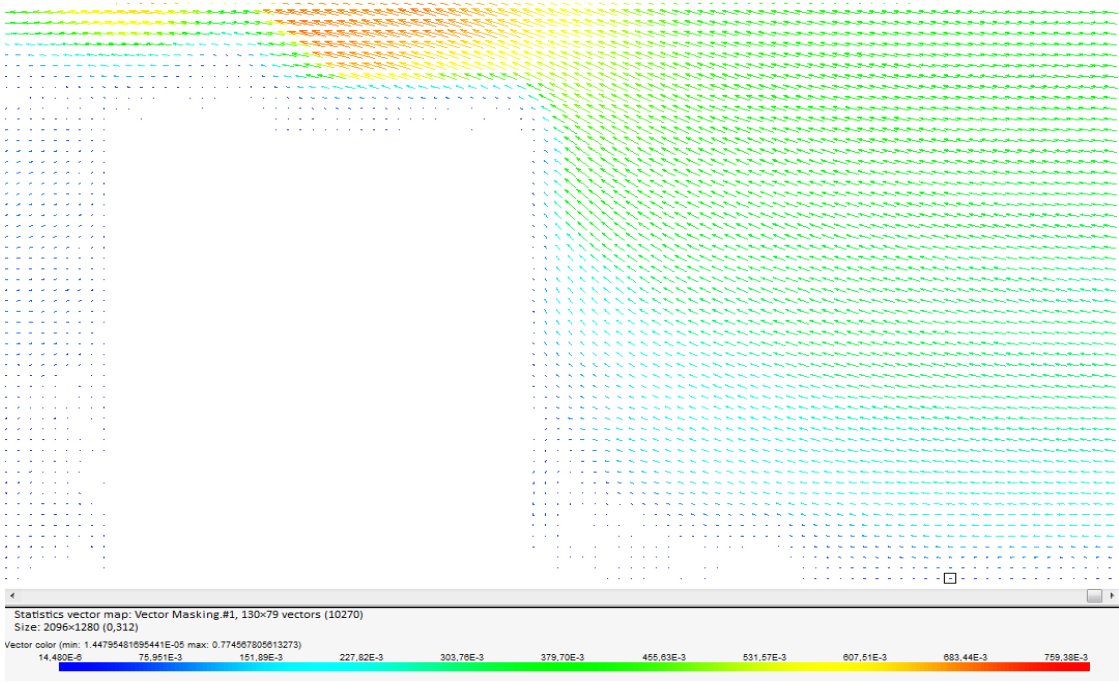
Şekil A.53: 40 Hz frekans değeri için 3. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



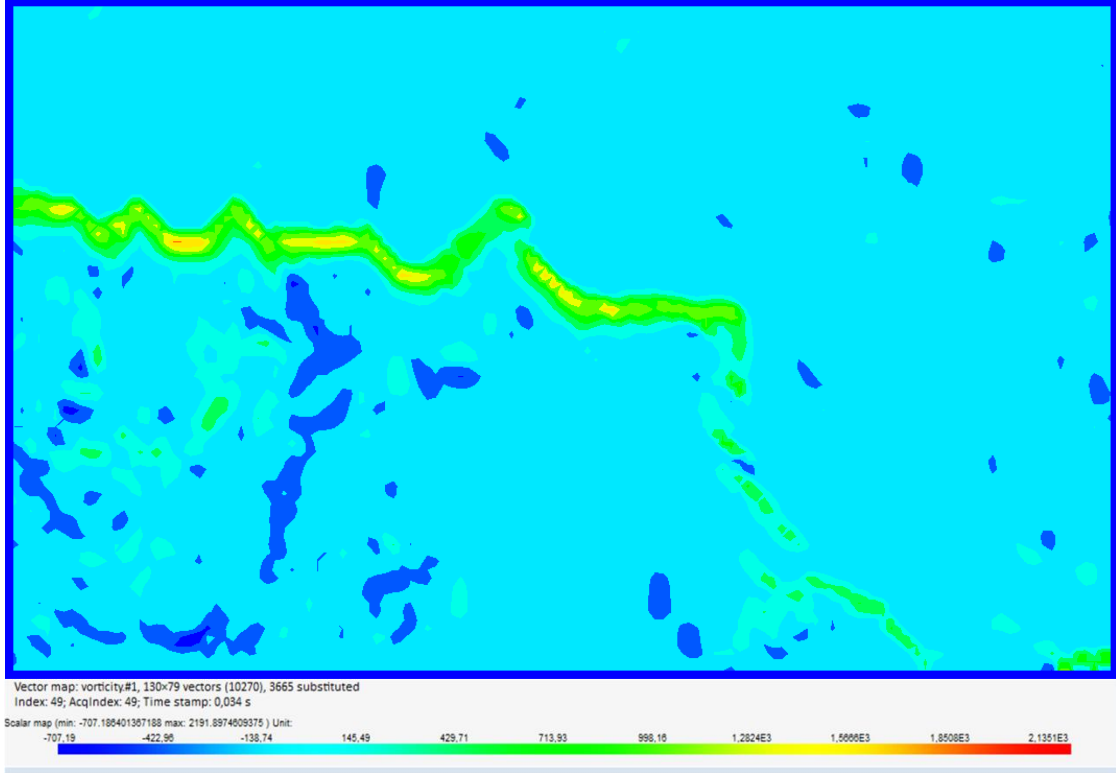
Şekil A.54: 40 Hz frekans değeri için 3. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



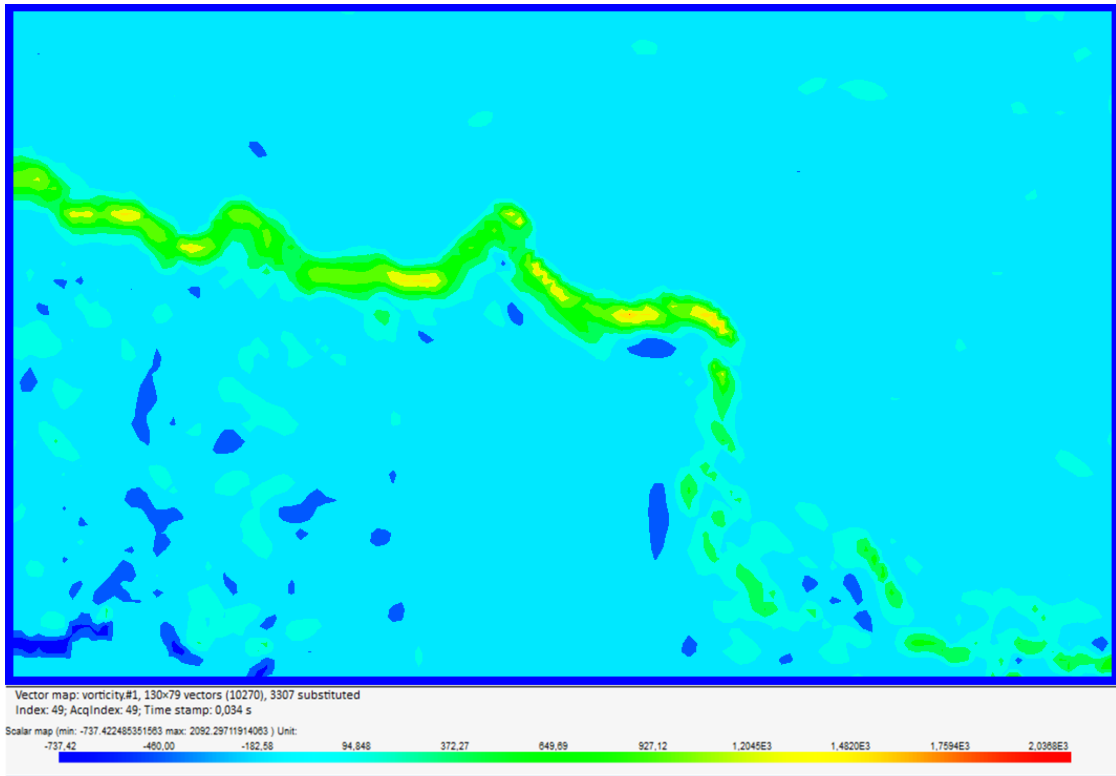
Şekil A.55: 40 Hz frekans değeri için 4. batarya modelinin arkasında oluşan girdap vektörleri.



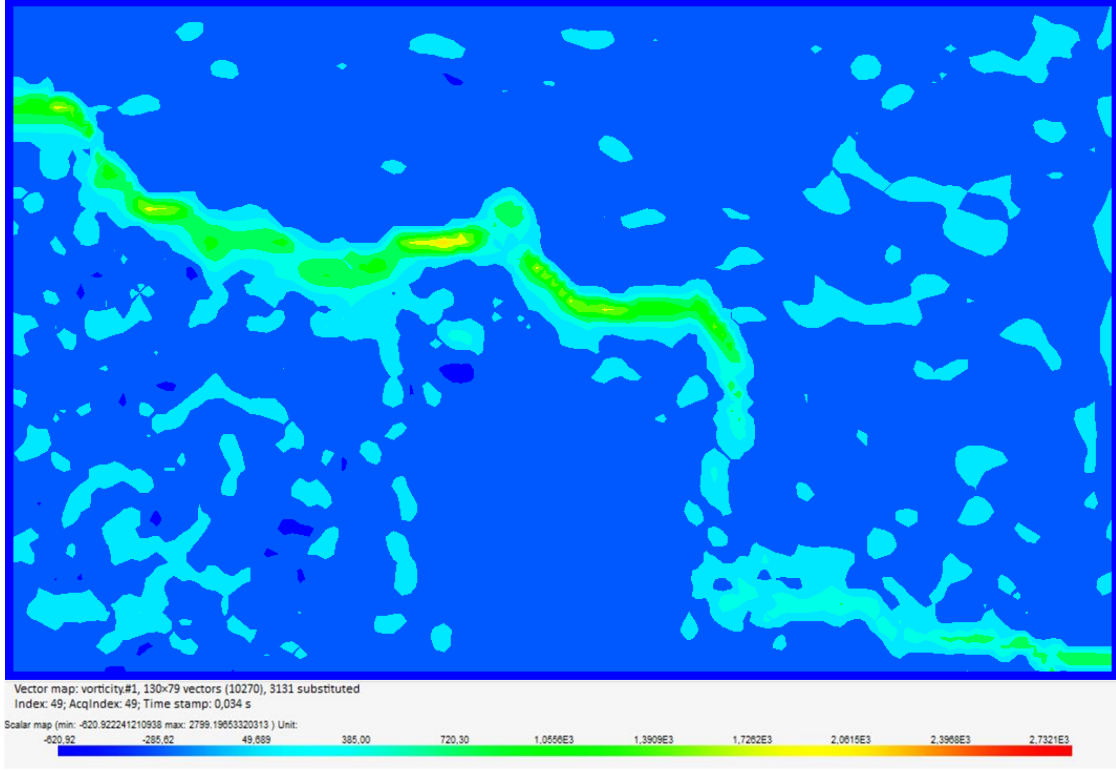
Şekil A.56: 40 Hz frekans değeri için 4. batarya modelinin önünde oluşan girdap vektörleri.



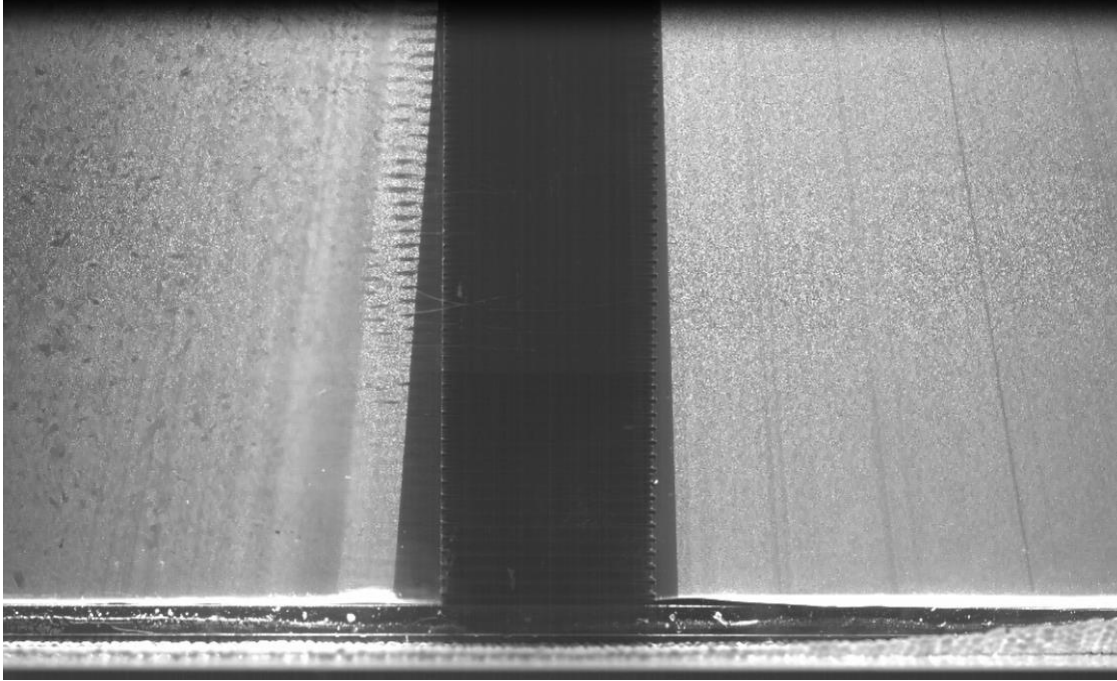
Şekil A.57: 1.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



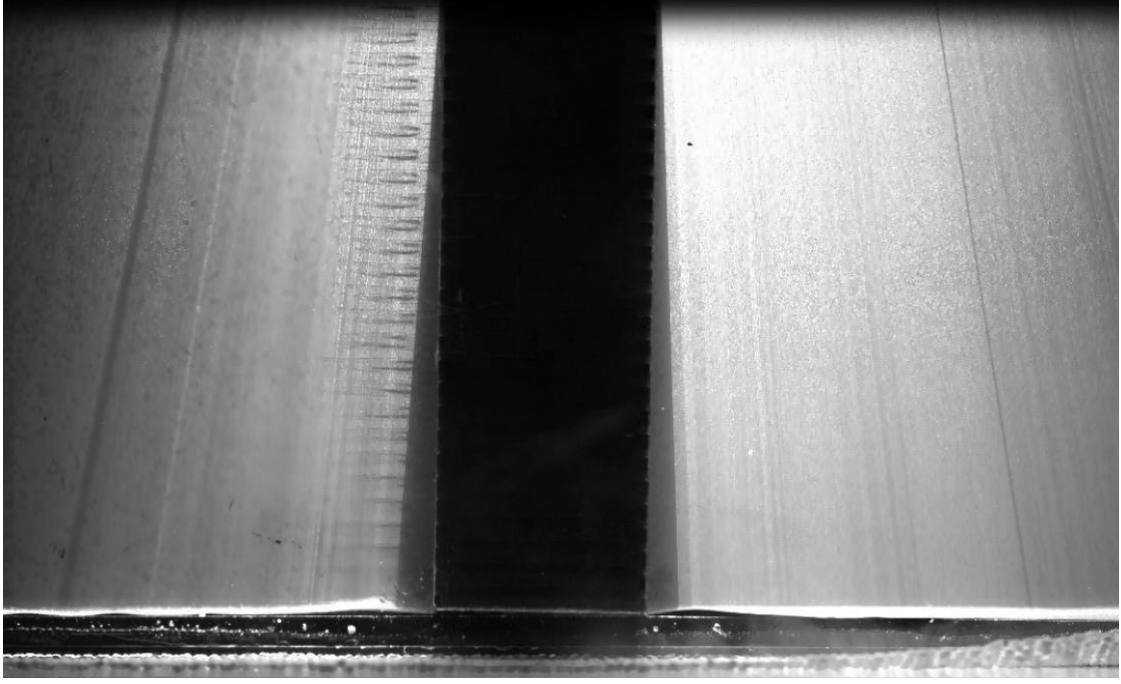
Şekil A.58: 2.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



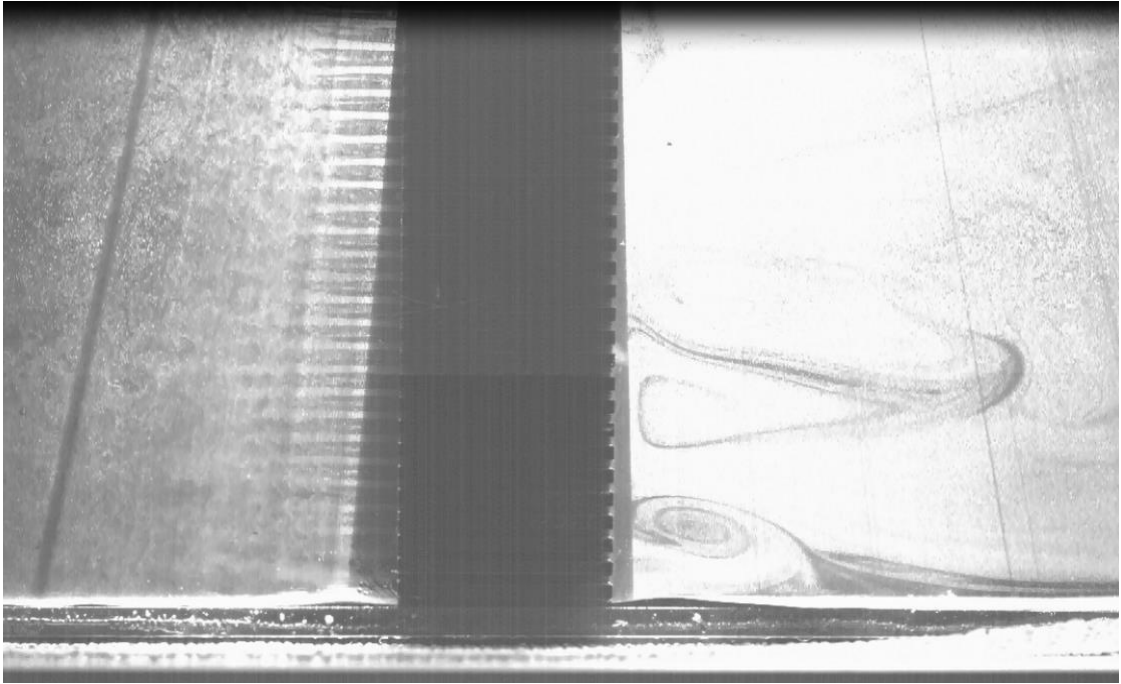
Şekil A.59: 3.batarya modeli için 40 Hz’de görüntülenen vortisite konturları.



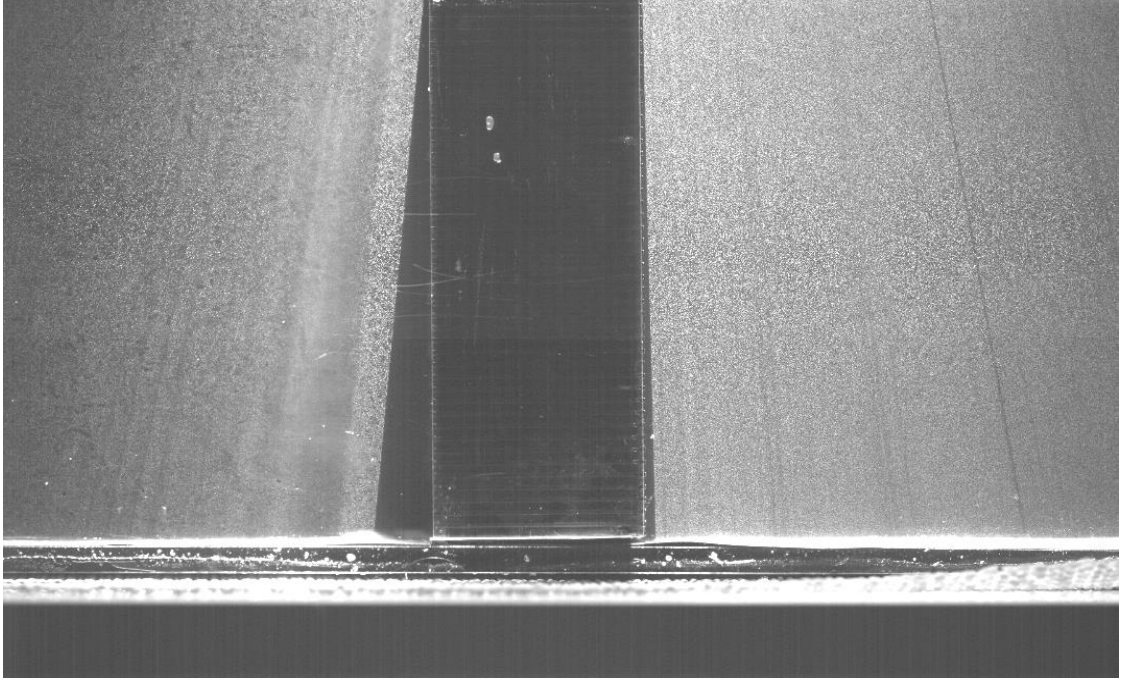
Şekil A.60: 2. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının laminar akımda görüntüsü.



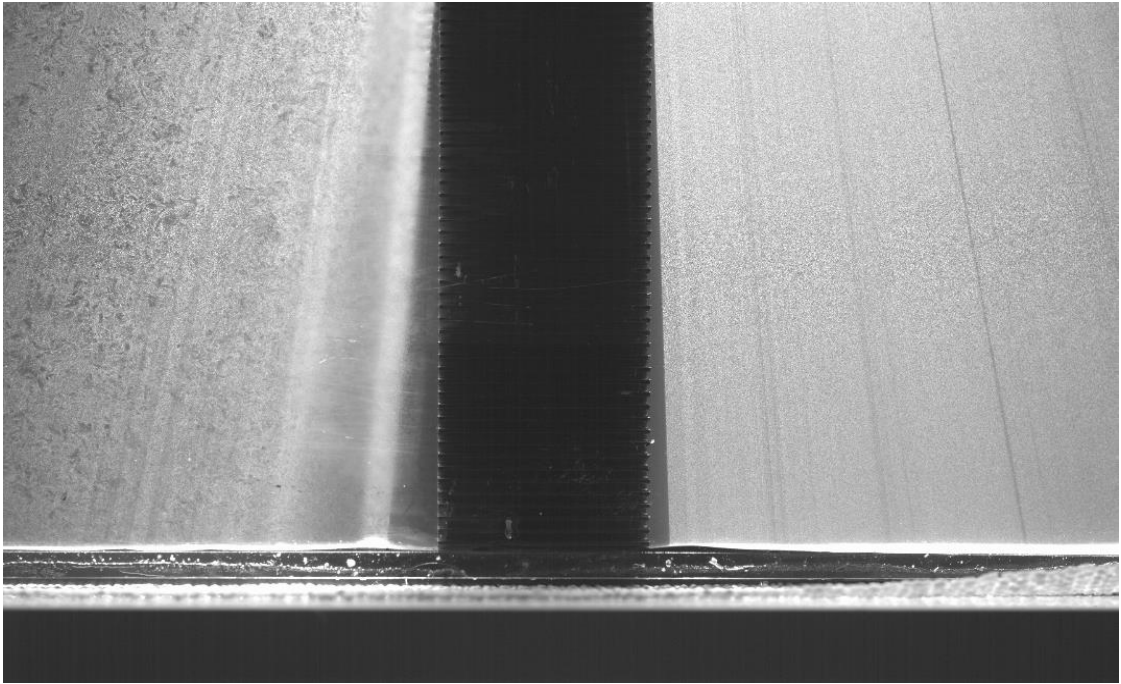
Şekil A.61: 3. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının laminar akımda görüntüsü.



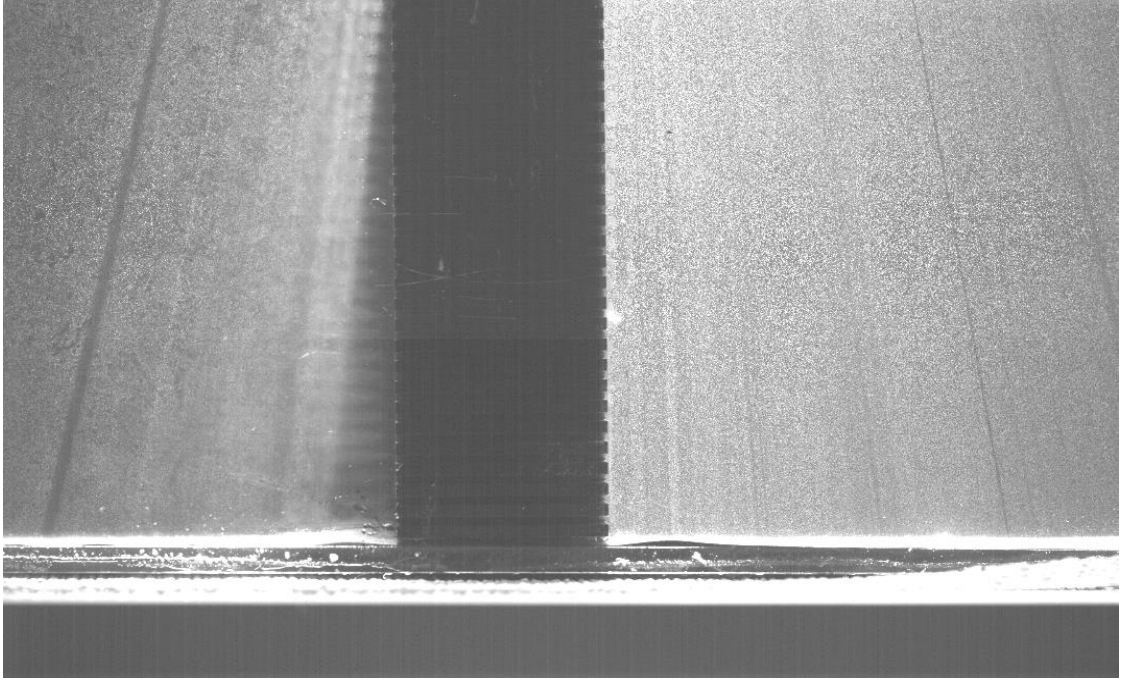
Şekil A.62: 4. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının laminar akımda görüntüsü.



Şekil A.63: 1. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının türbülanslı akımda görüntüsü.

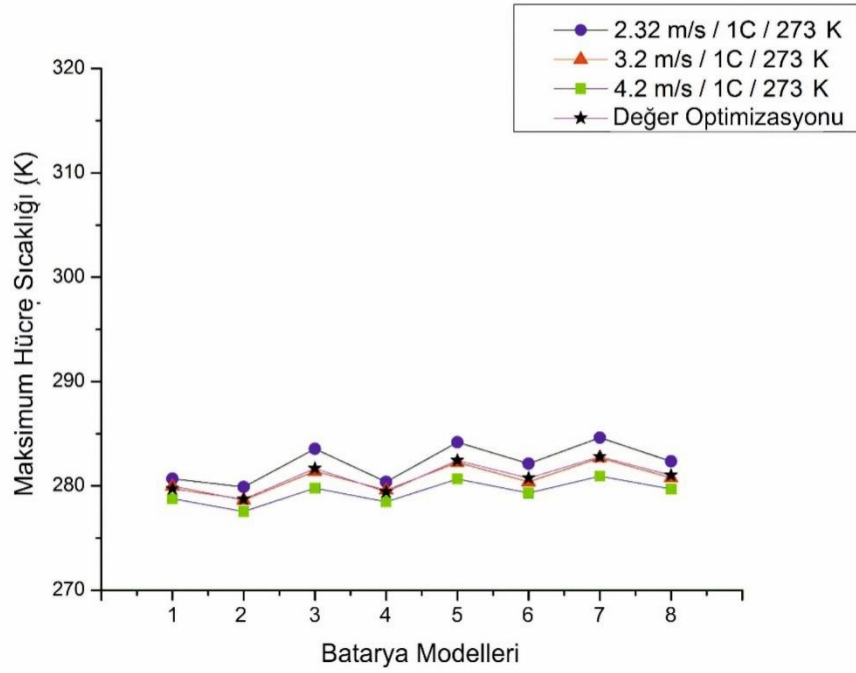


Şekil A.64: 2. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının türbülanslı akımda görüntüsü.

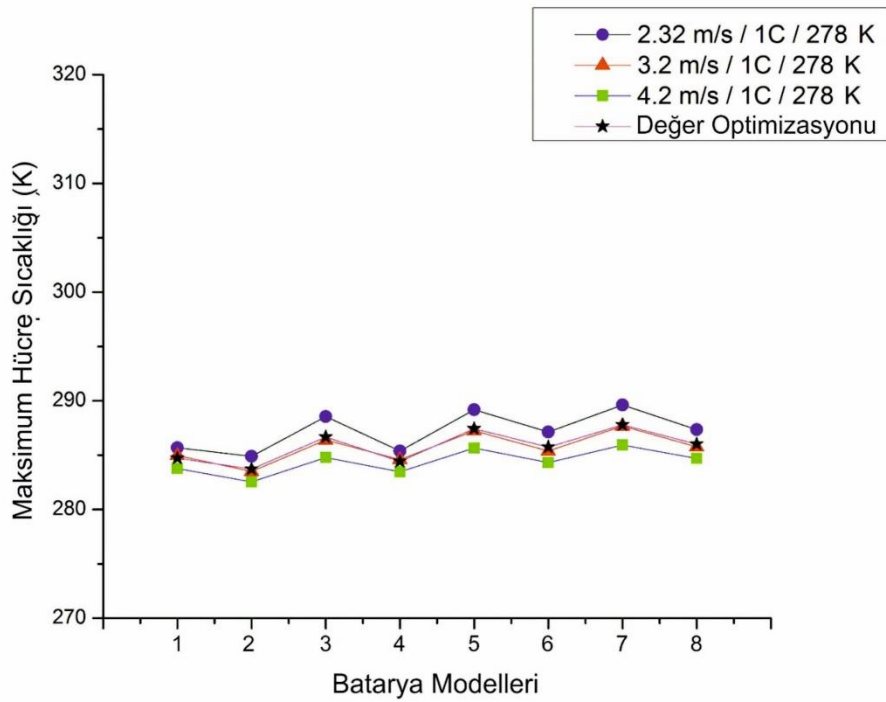


Şekil A.65: 4. batarya modelinin kanatçıkları arasından geçen akış yapısının türbülanslı akımda görüntüsü.

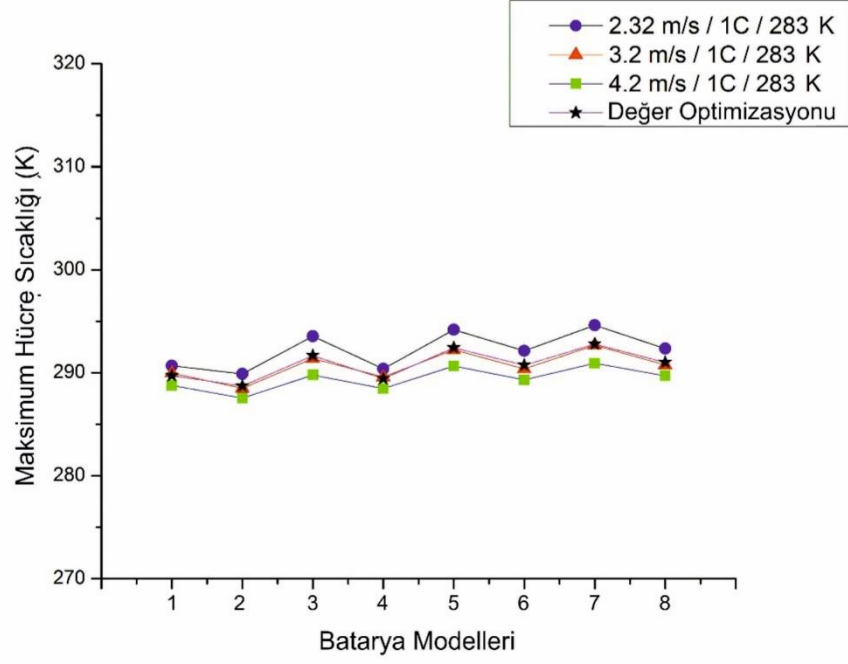
Ek B: HAD Analizleri ve Değer Optimizasyonundan Elde Edilen Sonuçlara Ait Görseller.



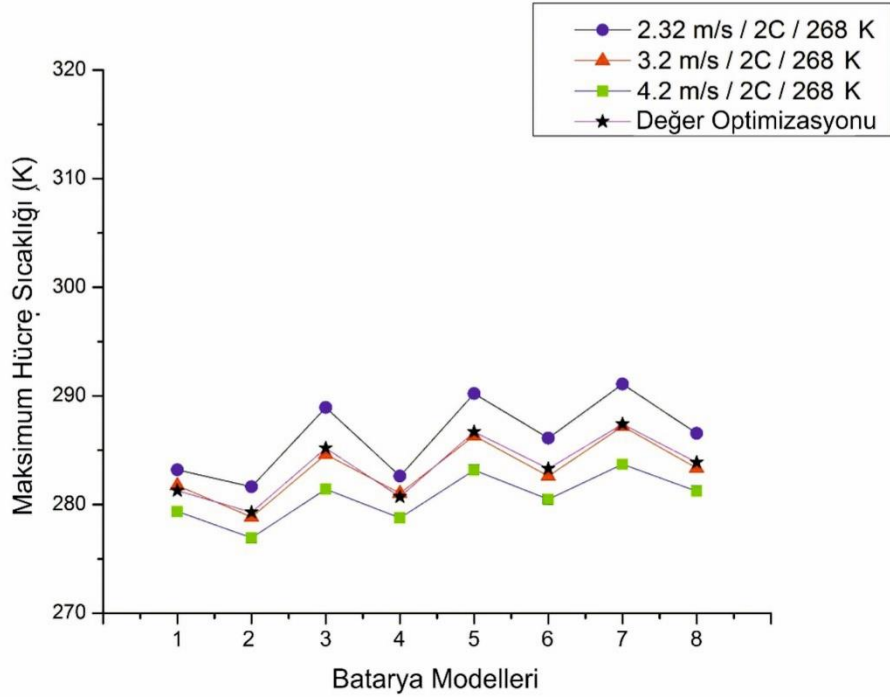
Şekil B.1: 1C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



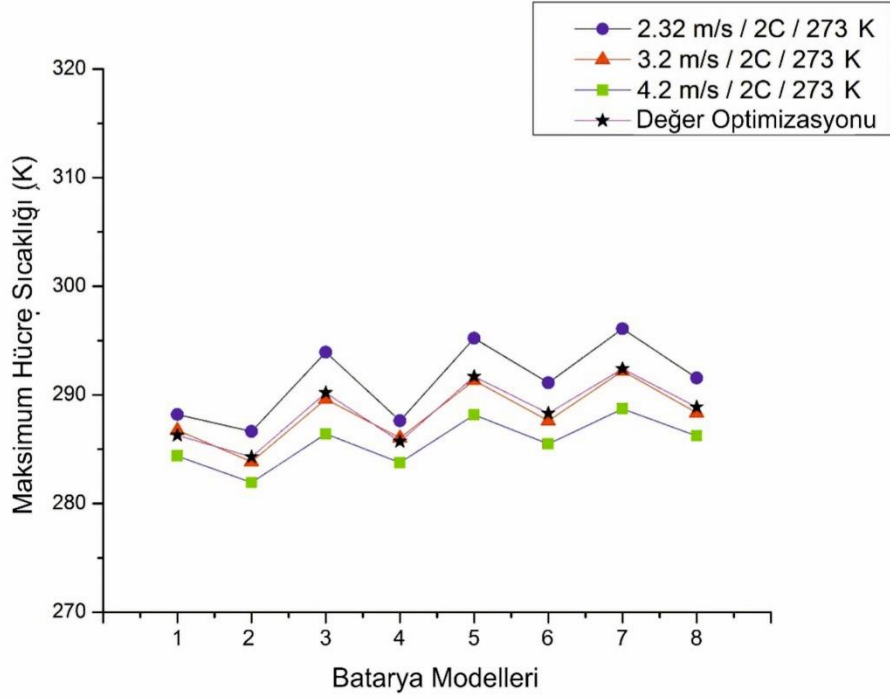
Şekil B.2: 1C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



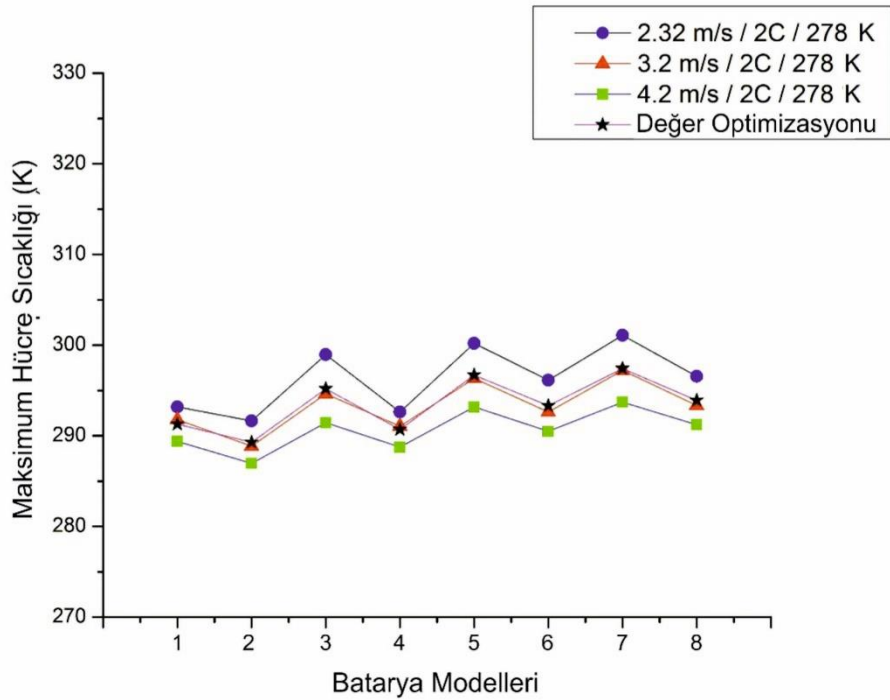
Şekil B.3: 1C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



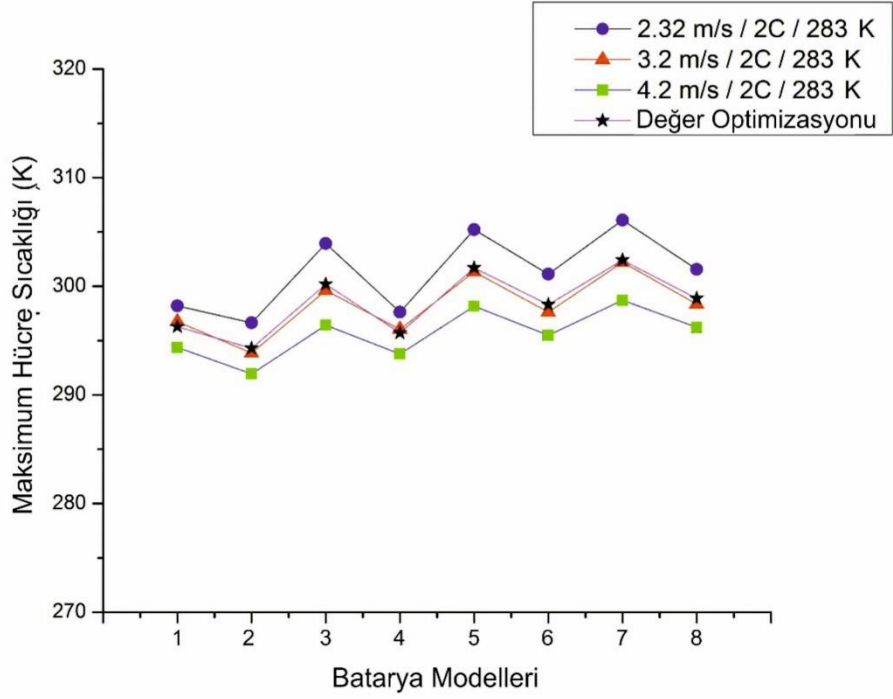
Şekil B.4: 2C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



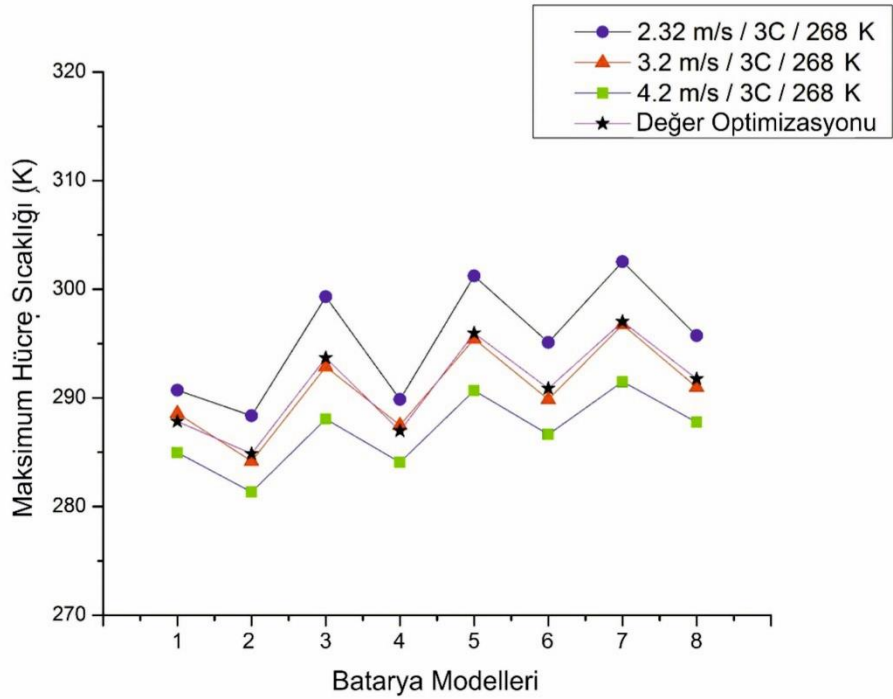
Şekil B.5: 2C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



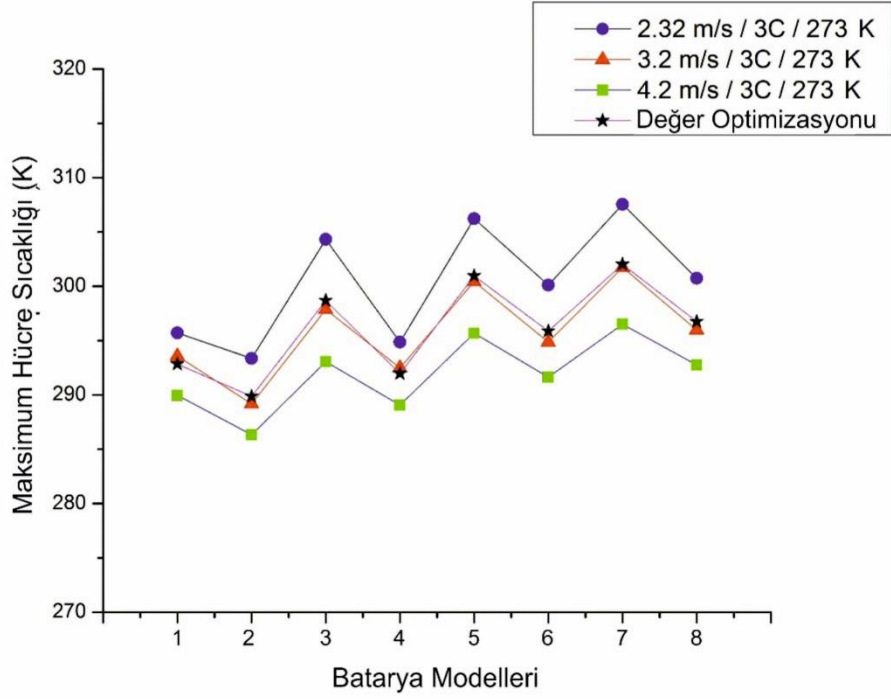
Şekil B.6: 2C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



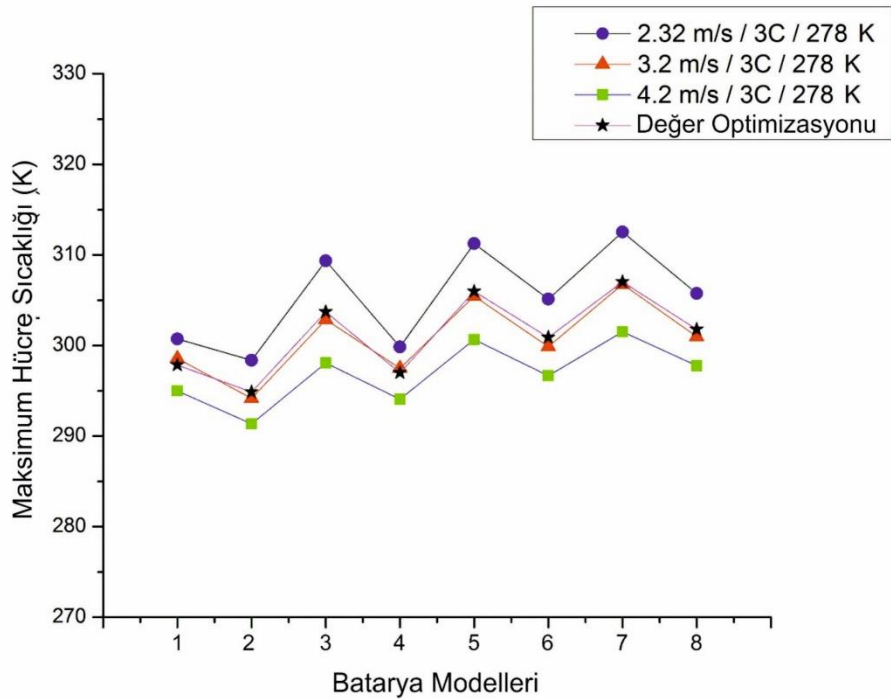
Şekil B.7: 2C deşarj oranı, 283 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



Şekil B.8: 3C deşarj oranı, 268 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



Şekil B.9: 3C deşarj oranı, 273 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.



Şekil B.10: 3C deşarj oranı, 278 K hava giriş sıcaklığında değişen hava giriş hızlarına göre batarya modellerinden elde edilen maksimum hücre sıcaklıkları ve değer optimizasyonu.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Onur YAŞAR
Doğum tarihi ve yeri : 01/07/1992, BALIKESİR
e-posta : onur.yasar@balikesir.edu.tr

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Yüksek Lisans	Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	2014-2017
Lisans	Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü	2010-2014
Lise	Rahmi Kula Anadolu Lisesi	2006-2010

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- 1.Yasar, O., Ozbek, E., Ekici, S., Yalcin, E., Midilli, A., Karakoc, T. H. (2021). Assessment Of Fuel Cell Studies With Particle Image Velocimetry Applications: A Key Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29568-29582.
2. Rohacs, D., Yasar, O., Kale, U., Ekici, S., Yalcin, E., Midilli, A., & Karakoc, T. H. (2023). Past and current components-based detailing of particle image velocimetry: A comprehensive review. *Heliyon*.
3. Yasar, O., Ekici, S., Yalcin, E., & Karakoç, T. H. (2023). Investigation on fin cooling for lithium-polymer batteries. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1. Yasar, O.,Ekici, S.,Yalçın, E.,Karakoç, T. H., (2021). Software Assessment For Particle Image Velocimetry For Aviation Industry. *International Symposium On Sustainable Aviation (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)*. (Yayın No:8193400).
2. Yasar, O.,Ekici, S.,Yalçın, E.,Karakoç, T. H., (2021). An Evaluation Of Particle Image Velocimetry In Terms Of Correlation For Aviation. *International Symposium On Sustainable Aviation (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)*. (Yayın No:8193386).
- 3.Yasar, O.,Ekici, S.,Yalçın, E.,Karakoç, T. H., (2020). An OverviewOf Fuel Cells In Terms Of Particle Image Velocimetry: A Comprehensive Review. *International Symposium On Electric Aviation And Autonomous Systems. (Tam MetinBildiri/Sözlü Sunum)*. (Yayın No:6981930).

- 4.**Yasar, O., Yalçın, E., Söğüt, M. Z., Karakoç, T. H., (2019). An Investigation On Pre-Conditioned Air Supplying Systems For Aircrafts. International Symposium On Sustainable Aviation. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum). (Yayın No:5582884).
- 5.**Ayar, M., Yasar, O., Karakoç, T. H., (2019). PIV Particle Selection To Be Used For UAV Flow Visualization. International Symposium On Electric Aviation Autonomous Systems. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum). (Yayın No:5583202).
- 6.**Yalçın, E., Yaşar, O., Karakoç. T. H., (2018). AnInvestigation On RIM Driven Fan Utilization In Aircraft Engine. InternationalSymposium on Aircraft Technology, MRO Operations. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum). (Yayın No:5582523).