
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BİYOGAZ REAKTÖRÜNDEKİ KARIŞTIRICININ TÜRBÜLANSLI AKIŞ KOŞULLARINDA SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ahmet Fırat ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Fırat ÇELİK

04/12/2023

BİYOGAZ REAKTÖRÜNDEKİ KARIŞTIRICININ TÜRBÜLANSLI AKIŞ KOŞULLARINDA SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Fırat ÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2024

ÖZET

Yapılan bu tez çalışmasında, biyogaz reaktörü olarak adlandırılan tank geometrisinin, tank içerisindeki karıştırıcı şeklinin ve açısal hızının akış karakteristiği üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiş ve biyogaz üretimi açısından performansı değerlendirilmiştir. Tank geometrisi olarak alışılagelmiş silindirik ve kesik konik tip biyogaz reaktörü kullanılmıştır. Dört kanatlı, altı kanatlı ve yeni tasarlanan matkaplı Rushton tipi karıştırıcılar incelenmiştir. 25-1000 rpm aralığındaki açısal hızlar için çalışma gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmada ANSYS Fluent R 19 paket programı kullanılmıştır. Farklı türbülans modelleri (Standart k-ε, Standart k-ω, RSM ve LES) kullanılarak yapılan doğrulama çalışmasından sonra çalışmaya Standart k-ε türbülans modeli ile devam edilmiştir. Sonuçlar elde edilen hız dağılımları, güç tüketimi, türbülans kinetik enerji (k), türbülans kinetik enerji yayılım hızı (ε), basınç ve ölü bölge hacmi üzerinden değerlendirilmiştir. Rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasında yüksek açısal hızlarda silindirik altı kanatlı Rushton karıştırıcı dört kanatlıya kıyasla türbülansı daha fazla artırdığı için ve diğer parametreler açısından avantajlı olduğu için Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasında altı kanatlı Rushton karıştırıcı kullanılmıştır. Vorteks tankı ile silindir tankı kıyaslanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında hız bölgelerine ayrılarak ayrıntılı bir biçimde yüksek ve düşük hız bölgeleri incelenmiştir. Yer çekiminin etkisinden ötürü reaktörün alt bölgelerinde hız azalmaktadır. 60º ’lik ters konik biçiminde oluşturulan vorteks reaktörü bu etkiyi azaltmakta ve biyogaz üretimine olumlu yönde etki etmektedir. Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasında ise vorteks şeklindeki biyogaz reaktörünün içerisine altı kanatlı Rushton karıştırıcı ve yeni tasarlanmış olan Matkaplı Rushton Karıştırıcısının akış karakteristiği üzerine etkisi incelenmiştir. Tezin son aşamasına geçildiğinde düşük açısal hızlar çalışılmıştır. Bunun sebebi ise yüksek hızlarda mikroorganizmaların ölmesidir. Yapılan bu tez çalışmasında biyogaz üretiminin tek bir parametreye bağlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, vorteks reaktörü içerisindeki Matkaplı Rushton karıştırıcının 100 rpm açısal hızında daha verimli bir karıştırma olduğu gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 91440

Anahtar Kelimeler : Biyogaz reaktörü, karıştırıcı, türbülanslı akış.

Sayfa Adedi : 79

Danışman : Prof. Dr. Oğuz TURGUT

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE MIXER IN THE BIOGAS REACTOR UNDER TURBULENT FLOW CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Fırat ÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2024

ABSTRACT

In this thesis study, the effect of the tank geometry, stirrer shape and angular velocity in the tank, on the flow characteristics, called the biogas reactor, was numerically examined and its performance in terms of biogas production was evaluated. Conventional cylindrical and truncated conical type biogas reactor was used as tank geometry. Four-wing, six-wing and newly designed drill Rushton type mixers were examined. The study was carried out for angular speeds in the range of 25-1000 rpm. ANSYS Fluent R 19 package program was used in the numerical study. After the validation study using different turbulence models (Standard k-ε, Standard k-ω, RSM and LES), the study continued with the Standard k-ε turbulence model. The results were evaluated based on the obtained velocity distributions, power consumption, turbulent kinetic energy (k), turbulent kinetic energy dissipation rate (ε), pressure and dead zone volume. In the cylindrical type reactor with Rushton stirrer study, a six-bladed Rushton mixer was used in the vortex type reactor with Rushton stirrer study because the cylindrical six-blade Rushton mixer increases turbulence more than the four-blade one at high angular speeds and is advantageous in terms of other parameters. Vortex tank and cylinder tank were compared. In the analysis results, high and low speed zones were examined in detail by dividing them into speed zones. Due to the effect of gravity, the velocity decreases in the lower regions of the reactor. The vortex reactor, created in a 60º reverse conical shape, reduces this effect and has a positive effect on biogas production. In the vortex type reactor study with drilled Rushton mixer, the effect of the six-blade Rushton mixer inside the vortex-shaped biogas reactor and the newly designed Drilled Rushton Mixer on the flow characteristics was examined. In the final phase of the thesis, low angular velocities were studied. The reason for this is that microorganisms die at high speeds. In this thesis study, it was concluded that biogas production does not depend on a single parameter. As a result, it was observed that the Drill Rushton mixer in the vortex reactor provided more efficient mixing at an angular speed of 100 rpm.

Science Code : 91440
Key Words : Biogas reactor, mixer, turbulent flow.

Page Number : 79
Supervisor : Prof. Dr. Oğuz TURGUT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın oluşmasında bilgisini ve deneyimlerini esirgemeyen ve ayrıca tez çalışmam esnasında bana Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Akış Laboratuvarında çalışma ortamı sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Oğuz TURGUT başta olmak üzere Tez Savunma Başkanı Prof. Dr. Kamil ARSLAN ve Tez Savunma Üyesi Dr. Üyesi Tamer ÇALIŞIR'a, ayrıca tez kapsamında yapmış olduğum sayısal çalışmama vermiş olduğu teknik desteğinden ötürü Dr. Öğr. Gör. Emre Aşkın ELİBOL'a teşekkürü borç bilirim. Desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi ve bu zorlu süreçte manevi desteklerini esirgemeyen başta aile fertlerim Mehmet Nahit ÇELİK, Dicle ÇELİK, İnci ÇELİK GÜNDOĞMUŞ, Okan GÜNDOĞMUŞ ve Ahmet OLCAN'a ayrıca Hatice Merve Özcan, Hilmi Yavuz AĞA, Arş. Gör. Bedrettin Mahmut KOCAGİL, Arş. Gör. Görkem AĞÖREN, ve son olarak Genel Müdürüm Hakan İŞÇİ ve HTM Tasarım Makine Sanayi ve Ticaret A. Ş. 'deki çalışma arkadaşlarıma bana verdikleri destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 5

3. SAYISAL ÇALIŞMALAR 13

3.1. Sayısal Çalışmaların Fiziksel Tanımı 13

3.1.1. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasının fiziksel tanımı 13

3.1.2. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasının fiziksel tanımı 15

3.2. Korunum Denklemleri 20

3.3. Sınır Şartları 23

3.3.1. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasının sınır şartları 23

3.3. Sınır Şartları 23

3.3.1. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasının sınır şartları 23

3.3.2. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasını sınır şartları 23

3.3.3. Mevcut tez kapsamında yapılan matkaplı rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmanın sınır şartları 24

Sayfa

4. ÇALIŞMA SONUÇLARI 29

4.1. Çalışmanın Doğrulanması 29

4.2. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Silindir Tipi Reaktör Çalışmasının Sonuçları 31

4.2.1. Sonuçların zamana göre kıyaslanması 31

4.2.2. Hız dağılımları 33

4.2.3. Türbülans kinetik enerjisi (k) 39

4.2.4. Türbülans kinetik enerjinin yayılma Hızı (ε) 42

4.2.5. Basınç dağılımı 43

4.3. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Çalışmasının Sonuçları 46

4.3.1. Hız dağılımları 46

4.3.2. Türbülans kinetik enerjisi (k) 51

4.3.3. Türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı (ε) 57

4.4. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Matkaplı Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Çalışmasının Sonuçları 62

4.4.1. Hız dağılımları 62

4.4.2. Türbülanslı kinetik enerji (k) 64

4.4.3. Türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı (ε) 66

5. SONUÇ VE TARTIŞMA 69

5.1. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Silindir Tipi Reaktör Çalışmasının Sonucundaki Çıkarımlar 69

5.2. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Sayısal Çalışmanın Sonucundaki Çıkarımlar 70

5.3. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Matkaplı Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Çalışmanın Sonucundaki Çıkarımlar 71

5.4. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalardan Çıkartılan Genel Sonuçlar 71

Sayfa

5.5. Tartışma 72

KAYNAKLAR 73

ÖZGEÇMİŞ 79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Literatürdeki alışmalar 10

Çizelge 3.2. Tankların ve karıştırıcının geometrik parametreleri 15

Çizelge 4.1.Güç tüketimlerinin mukayesesi 29

Çizelge 4.2. Beşinci saniyedeki en yüksek hız dağılımı (m/s) 39

Çizelge 4.3. Beşinci saniyedeki H=0,196 m'deki türbülans kinetik enerji dağılımı 42

Çizelge 4.4. Beşinci saniyedeki H=0,196 m'deki türbülans kinetik enerji yayılma hızı dağılımı 43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Karıştırmalı Biyogaz Reaktörü 4

Şekil 3.1. (a) 2-boyutlu tankın, (b) 3-boyutlu tankın ve (c) hareket eden kısmın görünümü 14

Şekil 3.2. (a) Altı ve (b) Dört kanatlı karıştırıcının görünümü 14

Şekil 3.3. Geometrik sembollere sahip karıştırıcıyı içeren tank geometrileri: (a) Silindirik tank, (b) Vorteks tankı 16

Şekil 3.4. Vorteks tank geometrisi 17

Şekil 3.5. Altı-kanatlı rushton karıştırıcı 18

Şekil 3.6. Matkaplı Rushton 19

Şekil 3.7. Rushton karıştırıcının hareketli kısmı 19

Şekil 3.8. Sabit kısım olan vorteks tankındaki Matkaplı Rushton karıştırıcının hareketli kısmı 20

Şekil 3.9. Çözüm alanındaki sınır şartları 23

Şekil 3.10. Ağ yapısının görünümü (a) Üstten görünüş, (b) Yandan görünüş 25

Şekil 3.11. Çürütücü tankı içindeki karıştırıcı bölgesinin ağ yapısı 26

Şekil 3.12. Matkaplı Rushton karıştırıcının ağ yapısı 27

Şekil 4.1. Mevcut çalışmanın literatür çalışması ile doğrulanması: (a) Güç tüketimi-Re ve b) hız-reaktör yüksekliği 30

Şekil 4.2. Altı-kanatlı karıştırıcının 405 rpm açısal hızındaki birer saniyelik değişiminindeki hız dağılımlarının yandan görünümdeki hız vektörleri 32

Şekil 4.3. Altı-kanatlı karıştırıcının 405 rpm açısal hızındaki z=0,196 m konumunda birer saniyelik değişiminindeki türbülans kinetik enerjisinin üstten görünümleri 33

Şekil 4.4. Dört-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının yandan görünüşleri 35

Şekil 4.5. Altı-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının yandan görünüşleri 36

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.6. Dört-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının z=0,196 m konumundaki üstten görünümdeki hız vektörleri 37

Şekil 4.7. Altı-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının z=0,196 m konumundaki üstten görünümdeki hız vektörleri 38

Şekil 4.8. Dört-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki türbülans kinetik enerjisi konturları 40

Şekil 4.9. Altı-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki türbülans kinetik enerjisi konturları 41

Şekil 4.10. Dört-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki basınç konturları 44

Şekil 4.11. Altı-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki basınç konturları 45

Şekil 4.12. Voteks (60°) reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm 47

Şekil 4.13. 90° (silindir) reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm 49

Şekil 4.14. Yan görünümde vorteks tankının türbülans kinetik enerji konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm 52

Şekil 4.15. Yan görünümde silindir tankının türbülans kinetik enerji konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm 55

Şekil 4.16. Üstten görünümde vorteks reaktörün türbülanslı girdap dağılım hatları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm, ve (g) 350 rpm 58

Şekil 4.17. Üstten görünümde silindir reaktörün türbülanslı girdap dağılım hatları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm 60

Şekil 4.18. Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm 63

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.19. Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm 64

Şekil 4.20. Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün (vorteks) yandan görünümdeki türbülans kinetik enerji konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm 65

Şekil 4.21. Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün (Vorteks) yandan görünümdeki türbülans kinetik enerji konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm 66

Şekil 4.22. Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm 67

Şekil 4.23. Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm 68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{B_d}$	Bölme Kalınlığı (mm)
Bw	Bölme Genişliği (mm)
C	Karıştırıcının Konumu (mm)
D	Tank Çapı (mm)
d	Karıştırıcının Dış Çapı (mm)
$\mathbf{d_1}$	Karıştırıcı İçin Hareketli Kısmın Çapı (mm)
$\mathbf{d_2}$	Hareketli Kısmın Çapı (mm)
$\mathbf{d_Ş}$	Karıştırıcı Şaftının Çapı (mm)
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Türbülans Kinetik Enerjisinin Yayılma Hızı
F	Kuvvet (N)
$\vec{\mathbf{g}}$	Yerçekimi Kuvveti (m/s^2)
$\boldsymbol{G_k}$	Ortalama Hız Gradyantlarından Türbülans Üretimi
H	Tank Yüksekliği (mm)
$\mathbf{h_1}$	Karıştırıcı Yüksekliği (mm)
$\mathbf{h_2}$	Karıştırıcı İçin Hareketli Kısmın Yüksekliği (mm)
$\mathbf{h_3}$	Hareketli Kısmın Yüksekliği (mm)
k	Türbülans Kinetik Enerjisi (m^2/s^2)
P	Statik Basınç (Pa)
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk (kg/m^3)
$\boldsymbol{\mu_T}$	Türbülans Viskozitesi (m^2/s)
$\boldsymbol{\sigma_\varepsilon}$	ε İçin Türbülans Prandtl Sayısı
$\boldsymbol{\sigma_k}$	k İçin Türbülans Prandtl Sayısı
$\mathbf{t_1}$	Karıştırıcının Kalınlığı (mm)
$\boldsymbol{\tau}$	Reynolds Gerilim Tensörü
$\mathbf{W_1}$	Karıştırıcı Genişliği (mm)

Kısaltmalar	Açıklamalar
ÇRÇ	Çoklu Referans Çerçeveleri
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Large Eddy Simulation
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
SH	Sonlu Hacimler
SF	Sonlu Farklar
TKE	Türbülans Kinetik Enerjisi
TKEYH	Türbülans Kinetik Enerjisinin Yayılma Hızı
TK	Toplam Karışım
Y/Ç	Yüksekliğin Çapa Oranı

1. GİRİŞ

Artan enerji tüketimi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının ve geliştirilmesinin önemini artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyogaz, organik maddelerin anaerobik çürütülmesiyle üretilen ve metanca zengin bir gaz karışımıdır. Biyogaz enerjisi, enerji geri kazanımının yanı sıra yan ürün olarak gübre üretimi ve organik atıkların bertaraf edilmesini sağlaması nedeniyle araştırmacılar arasında önemli bir ilgi kazanmıştır [1].

Anaerobik çürütme yenilenebilir enerjinin doğal bir çeşididir. Anaerobik çürütme, çamur hacmini azaltmak ve çamurla ilgili kokuları gidermek için çamurdaki organik bileşikleri yenilenebilir enerjiye yani biyogaza dönüştürme kabiliyeti nedeniyle atık su-çamur yönetiminde yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Biyogaz, mikroorganizmalarla organik maddelerin anaerobik çürümesiyle elde edilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. [2-4]. Dahası, anaerobik çürütme, organik maddeyi daha basit bileşiklere parçalayan ve sonunda yüksek kaliteli bir yakıt olan biyogaz üreten bir dizi biyokimyasal adımı içeren karmaşık ve çok aşamalı bir süreçtir [5-7].

Biyogaz üretimi sera gazı emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğu için çevreye faydalıdır. Karıştırma işleminin verimliliği, geçmişte laboratuvar ölçeğinde yaygın olarak incelenen karıştırma hızı da olmak üzere çeşitli parametrelerden etkilenir [2].

Biyogaz üretimi genellikle sindirici olarak adlandırılan büyük çap-yükseklik oranlarına sahip kapalı silindir içinde gerçekleşir [2-9].

Biyokütle hacmini homojenleştirmek için bir karıştırma işlemi gereklidir. Bu sayede biyogaz üretimi maksimize edilebilir ve çürütücüdeki organik maddelerin ayrışması için en uygun koşullar yaratılabilir.

Çürütücüde karıştırmanın amaçları şunlardır:

1. Uçucu yağ asitleri nedeniyle hem partikül çökelmesinin hem de köpük oluşumunun önlenmesi,
2. Karışımda oluşan gaz kabarcıklarının kaçmasına izin verilmesi [10],

3. Gaz-sıvı kütle transferi ve sürekli karışımdaki mikroorganizma teması yoluyla biyogaz desorpsiyonunun sağlanması,
4. Homojen sıcaklık dağılımının sağlanmasıdır [11].

Karıştırma işlemi, genel olarak, gaz devridaimi, mekanik pompalama ve mekanik karıştırma dahil olmak üzere birçok yolla gerçekleştirilebilir. Burada mekanik karıştırma, homojenleştirmeyi kolayca sağlayabilmektedir. Bu nedenle çeşitli katı-sıvı etkileşimini içeren endüstriyel işlemde yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Ayrıca, güç tüketimi açısından en verimli karıştırma cihazı, karıştırıcı tabanlı mekanik karıştırıcı veya çark olarak da adlandırılan mekanik karıştırıcıdır [13].

Literatürde anaerobik çürütücüde karıştırmanın optimizasyonuna odaklanan pek çok çalışma bulunmaktadır. Ancak karıştırma rejimleri ve karıştırma düzeninin geometrisi bağlamında hala tartışmalıdır. Karıştırma işleminin performansını arttırmak için çözünebilir karışımın, biyokütlenin, pH'ın ve sıcaklığın homojen bir dağılımına sahip olmak gerekir. Karışımın homojenliğinin çürütücünün tüm hacminde arttığını gösteren birçok çalışma bulunmaktadır [14-18]. Karıştırma işlemi, biyogaz üretiminde toplam güç tüketimi ve biyogaz üretim oranları açısından sistemin verimliliğini belirleyen en önemli faktörlerden biridir [19-23].

Çürütücüde karıştırmanın özelliklerini anlamak ve endüstriyel ölçekte yüksek verimli karıştırma elde etmek için farklı karıştırma rejimlerinin test edilmesi ekonomik olarak mümkün değildir. Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD)'nin laboratuvar ölçekli deneyleri ve bilgisayarlı simülasyon modelleri, anaerobik çürütücüdeki karışımı tam ölçekte araştırmak için uygun yaklaşımlardır [24-27].

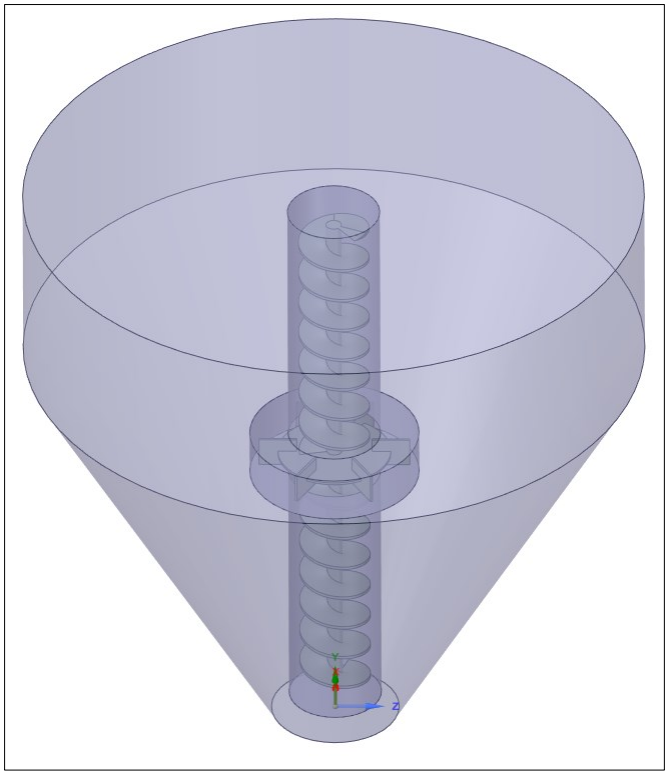
Ancak bu iki seçenek arasında HAD, daha az zaman gerektirmesi açısından verimli ve çoklu deney yapmanın üstesinden gelen güçlü bir araçtır. Karıştırma tanklarında farklı akış modellerinin çalışılmasında yaygın olarak kullanılması, pahalı deneysel çalışmalara kıyasla düşük maliyetli ve kısa süreli bir işlem olmasından kaynaklanmaktadır [13, 28]. Ayrıca HAD, çürütücü konfigürasyonunun tasarlanmasında ve reaktör üretiminden önce optimum karıştırıcının seçilmesinde yardımcı olmaktadır.

Mekanik karıştırmanın değerlendirilmesi, kayma gerilimlerini ve akış modellerini ve bunların mikrobiyoloji ve biyogaz üretimi üzerindeki etkilerini tahmin etmek için hem çarkın hem de çürütücünün geometrik kısıtlamalarını gerektirir [29].

Diğer taraftan, karıştırmayı değerlendirmeye yönelik çalışmaların çoğu sadece laboratuvar ölçekli deneylere odaklanmışken, biyogaz tesislerinde iç enerji tüketimi ve iç enerji tüketimi açısından daha yüksek verim elde etmek için karıştırma işleminin büyük ölçekli biyogaz tesislerine ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Biyogaz üretim oranları, düşük devirlerde çürütücülerde homojenizasyonu ve viskozitenin ve hızın düzgün dağılımını geliştirmek için birçok farklı tipte karıştırıcı ve bunların değiştirilmiş versiyonları kullanılmıştır [30-32]. Literatürde, 10-100 rpm arasındaki karıştırıcı hızında ve laminer akış rejiminde aralıklı karıştırmanın, artan biyogaz üretimi bağlamında olumlu olduğu ancak bunun laboratuvar ölçekli çürütücülerle sınırlı olduğu ve tam ölçekli çürütücüye ölçeklendirildiğinde artabileceği ileri sürülmektedir.

Son çalışmalarda, alandaki araştırmaların, karışımın mikrobiyal düzeydeki etkisinin incelenmesi bağlamında kaydığı gözlemlenmiştir [33-35]. Diğer taraftan, bazı çalışmalar yalnızca çark ve çürütücünün akış düzenine, parçacık hızına, hız gradyanına ve hidrodinamiğine odaklanmaktadır [32,36,37].

Yapılan bu tezin amacı, mikroorganizmalara zarar vermeden biyogaz reaktörü olarak adlandırılan tank geometrisinin, tank içerisindeki karıştırıcı şeklinin ve açısal hızının akış karakteristiği üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmek ve biyogaz üretimi açısından performansı değerlendirmektir. Şekil 1.1'de tez kapsamında çalışılmış olan Vorteks tankının içinde yer alan Matkaplı Rushton karıştırıcısı görülmektedir.



Şekil 1.1. Karıştırmalı Biyogaz Reaktörü

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, biyogaz üretimi için kullanılan biyogaz tankındaki karıştırıcının performansına ilişkin literatürde yer alan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Wu [13] yapmış olduğu çalışmada, yumurta şeklindeki anaerobik çürütücülerdeki mekanik çekişli tüp karışımını karakterize etmiştir. Akış modellerinin simülasyonu, 400 ila 750 rpm arasında açısal hızlarda bir karıştırıcı ile HAD modeli geliştirmiştir. Sonuç olarak, belirtilen herhangi bir çürütücü için karıştırıcı yerleşiminin optimal bir değeri mevcuttur. Belirli bir toplam karışım (TK) seviyesinde karıştırıcının dönüş hızının artmasıyla birlikte bütün işlem tankı içindeki ortalama hız doğrusal olarak artarken, karıştırma enerji seviyesi üstel olarak artar. Mekanik çekiş borusuyla karıştırma, harici pompalanan sirkülasyondan daha verimlidir. Yumurta şeklindeki çürütücülerde karıştırma, silindirik çürütücülere göre daha verimlidir.

Zhang ve ark. [23] yapmış oldukları çalışmada, anaerobik tek ve birlikte sindirimde karıştırma modunu ve güç tüketimini araştırmak için HAD kullanmışlardır. Hammadde olarak sığır gübresi ve mısır koçanı, çürütücü olarak ise karıştırmalı tank reaktörü kullanmışlardır. Standart k-ε modelinin diğer türbülans modellerine göre daha uygun olduğunu görmüşlerdir. Anaerobik birlikte sindirim için hammadde oranını optimize etmek amacıyla gaz üretimi yerine net güç üretimi olan yeni bir endeks önermişlerdir. Bu nedenle, birlikte sindirimin güç tüketimi, karıştırma modunun değiştirilmesi ve hammadde oranının optimizasyonu yoluyla geliştirileceği kanısına varmaktadırlar.

Wu ve Chen [36] yaptıkları çalışmada sıvı gübrenin Newton tipi olmayan bir akışkan olduğu ve akışın süreklilik, momentum ve k-ε Standart türbülans denklemleri HAD yazılımı olan Fluent ile, laboratuvar ölçekli, ölçek büyütmeli ve pilot anaerobik çürütücülerin akış alanlarını simüle etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmanın sonucunda sıvı gübredeki toplam katı konsantrasyonunun artmasıyla birlikte viskozite ve kayma geriliminin katlanarak arttığını gözlemlemişlerdir. Giriş akış hızının arttırılması, yalnızca karışım bölgesindeki hız büyüklüğünü artırabilir, ancak genel akış düzenini değiştiremez veya ölü bölgeyi önemli ölçüde azaltamaz. Ölçek büyütmeli sindiriciler için birim sindirici hacmi başına güç girişi logaritmik olarak artmaktadır.

Caillet ve ark. [38] yaptıkları çalışmanın nihai hedefi, kanalizasyon çamuru, biyolojik atık ve şeker kamışından elde edilen sirke gibi parçacıklı karışımın birlikte sindiriminin modellenmesi ve optimize etmektir. LES türbülans modellini OpenFOAM yazılımında sonlu hacim yöntemi kullanılarak çözdürmüşlerdir. Karıştırıcı dönüşünü karakterize etmek için kayan ağ yöntemi kullanmışlardır. Karışım ve mikroorganizmalar arasındaki temasın anaerobik sindirim süreci üzerinde önemli bir etkisi olduğunu görmüşlerdir. Elde edilen sonuçlarda çürütücü içindeki hız ve sıcaklık profillerini incelemişlerdir. Anaerobik sindirimde karışımın fiziksel özelliklerinin yanı sıra akışların özellikleri ve biyogaz verimi arasında güçlü bir bağlantı olduğunu göstermişlerdir.

Ding ve ark. [39] yapmış oldukları çalışmada, biyohidrojen üretimi için kullanılan laboratuvar ölçekli sürekli karıştırmalı tank reaktöründe gaz-sıvı iki fazlı akışının HAD simülasyonları ile reaktör tasarımında hidrodinamik ve reaktör konfigürasyonunu optimize etmişlerdir. Optimize ettikleri çarkı 50 ila 70 rpm arasındaki hızlardaki hidrodinamik davranışı, ekonomik biyohidrojen üretimi için en uygun olan olduğunu göstermişlerdir. Karıştırıcı tipinin ve hızının akış düzenini önemli ölçüde etkilediği ve dolayısıyla biyohidrojen üretimi için farklı optimum verimlilikler sunduğu gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarının, optimize edilmiş bir karıştırıcının reaktörde daha düşük karıştırıcı hızıyla daha iyi hız dağılımı oluşturabildiği, dolayısıyla karıştırıcı çalıştırıldığında normal bir karıştırıcıya göre daha yüksek ortalama hidrojen verimi ve daha az başlatma süresine ihtiyaç duyulduğu göstermişlerdir.

Bridgeman [40] yapmış olduğu çalışmada, mekanik olarak karıştırılmış kanalizasyon çamurunun laboratuvar ölçeğinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile modellemiştir. Çalışmadan çıkarılacak sonuçlar, arıtma çamurunun artan katı içeriğinin laboratuvar ölçekli bir anaerobik çürütücünün karıştırma özellikleri üzerindeki etkileri önemli olduğudur. Buradan biyogaz üretim veriminin hız gradyanları ile ilgili olduğunu görülmüştür.

Dama ve ark. [41] yaptıkları çalışmada, akışı yönlendirmek ve biyokütlenin karışmasını arttırmak için perdeli anaerobik reaktör kullanmışlardır. Yapmış oldukları bu deneyde kanallaşma ve ölü boşluklu bölgeler gözlemlemişlerdir. Bölmeler arasındaki yuvanın şeklinin etkisini belirlemek için bölmeler arasındaki giriş ve çıkışlar HAD programıyla

mukayese edilmiş ve sonuçlar boya izleyici deneyi sırasında gözlemlenen akış modeli, Fluent tarafından tahmin edilen modele benzerlik göstermiştir.

Mohammadrezaei ve ark. [42] yapmış oldukları çalışmada, biyogaz tesisi için uygun bir mekanik karıştırıcının belirlenmesi ve sığır gübresinin akış düzeninin simüle edilmesi amacıyla HAD kullanmışlardır. Optimum karıştırıcı tasarımını seçmek için altı kanatlı karıştırıcı, dört kanatlı karıştırıcı ve altı düz kanatlı disk karıştırıcı olmak üzere üç tip karıştırıcı üzerinde çalışmışlardır. Kararlı durum koşulları altında Standart k-ε türbülans modeli aracılığıyla çoklu referans çerçevesi yaklaşımıyla Fluent yazılımını kullanılarak simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre altı kanatlı karıştırıcı çarkı diğer iki çarka göre daha uygundur. Bu tip karıştırıcının reaktörün hem merkezinde hem de yan duvarlarında uygun karıştırma sağladığını, ölü boşlukları azalttığını ve reaktör içindeki kütle ve ısı transferini iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Shen ve ark. [44] yapmış oldukları çalışmada, anaerobik sindirim için pirinç samanından verimli biyogaz üretimi için karıştırma performanslarını araştırmak için HAD simülasyonları ve deneyler yapmışlardır. Sonuç olarak, biyogaz üretimi için pirinç samanının verimli anaerobik sindirimi için 80 rpm'de üçlü çarkların en iyi karıştırma seçeneği olduğunu göstermişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlarda, en yüksek biyogaz verimi için en kısa 46 güne ulaşmışlardır.

Ahmed ve ark. [45] yapmış oldukları çalışmada, farklı gaz akış hızları ve çark hızları için çift Rushton karıştırıcılı biyoreaktörde çeşitli akış rejimlerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. HAD yazılımı olan ANSYS CFX ile simülasyonlar yapmışlardır. Gaz akış hızı, karıştırıcı hızının gaz tutma ve güç tüketimi üzerindeki etkisini de incelemişlerdir.

Huang ve ark. [46] bir biyogaz tesisi için artan biyogaz üretim hızı için hammaddenin eşit şekilde dağıtılması amacıyla karıştırılarak optimize edilebilmesi için bu çalışmayı yapmışlardır. Çürütücüye, çıkışları tabanın çok üzerinde olacak şekilde bir hidrolik karıştırıcı monte edilebilir. HAD yazılımıyla su kullanılarak Euler-Euler Modeli 0,75 m^3'lük bir çürütücü tank için simüle etmişlerdir. Sonuç olarak, optimum giriş hızının, daha yüksek bir gaz üretim oranı için çürütücü yapısına ve bulamacın karıştırılmasına uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Karaeva ve ark. [47] yapmış oldukları çalışmada dikey silindirik anaerobik çürütücüde iki hidrolik karıştırma sistemi için standart ve modernize hallerini mukayese etmişlerdir. Metan fermantasyon işleminin verimliliğinin analizine odaklanmıştır. Sonuç olarak önerilen modernize edilmiş hidrolik karıştırma sisteminin gerçekleştirilen sayısal çalışmaları, standart olana göre avantajlarını göstermiştir. Modernleştirilmiş karıştırma sisteminin kullanılmasının maksimum etkisi, Y/Ç oranı 0,7 ila 1 olan anaerobik çürütücülerde gözlenmiştir. Bu aparatlarda karıştırma için gereken sürenin, standart karıştırma sistemine sahip benzer anaerobik çürütücülerdekinden iki kat daha küçük olduğunu saptamışlardır.

Torotwa ve Ji [48] yaptıkları çalışmada, dört karıştırıcı tasarımının (çapa, testere dişli, karşı akışlı ve Rushton karıştırıcıi) akış özelliklerini incelemek için deneysel testler ve ANSYS Fluent kullanılarak HAD Standart k-epsilon (ε) türbülans modeliyle Çoklu Referans Çerçevesi (MRF) yaklaşımı simüle edilmiştir. Kullanılan yaklaşımda, mekanik olarak karıştırılan tanklarda tahmin edilmesi genellikle zor olan karıştırma dinamiklerini açıkça ortaya koymuştur. Karıştırıcı-kanat konfigürasyonunun, mekanik olarak karıştırılan bir karıştırıcının performansını önemli ölçüde etkilediği kanıtlamışlardır. En iyi karıştırma tasarımlarına ulaşmak, tasarımın bir fonksiyonu olarak karıştırma kalitesini artıracak ve iyi derecede homojenlik oluşturacağını göstermişlerdir.

Leonzio [49] yapmış olduğu çalışmada biyogaz üreten anaerobik bir çürütücü için daha iyi geometrik konfigürasyon ve karıştırma sistemi oluşturmak amacıyla Standart k-ε türbülans modeli COMSOL Multiphysics™ 4.2 yazılımı ile HAD analizi geliştirmiştir. Sürekli karıştırmalı tank reaktörleri olarak üç farklı senaryo ele alınmıştır. Karıştırma sistemi olarak sıvı devridaimi için harici pompalar kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, akışkanın anaerobik çürütücünün yan yüzeyine teğet olarak girdiği yenilikçi konfigürasyonun daha iyi bir çözüm olduğunu göstermektedir. Ortalama hız ve hız gradyanının akış desenleri, ortamı, varyansı ve standart sapması göz önüne alındığında, sıvının yanal yüzeye teğet girdiği anaerobik çürütücünün daha yüksek hız tekdüzeliği ve daha düşük ölü bölgeler için daha uygun bulunmuştur. Harici devridaim pompalarına sahip yenilikçi bir karıştırma sistemi önermektedirler.

Manea ve Robescu [50] yapmış oldukları çalışmada anaerobik çürütme prosesindeki karıştırma işlemi için optimum parametre değerlerini belirlemek amacıyla, laboratuvar

ölçekli bir anaerobik çürütücüde ölçülen değerlerle karşılaştırılarak anaerobik çürütücüdeki merkezi karıştırıcı için optimum geometri ve nominal şaft hızını belirlemişlerdir. Dört kanatlı ve altı kanatlı rotor için optimum akış üzerinde çalışmışlardır. Sonuç olarak, atıksu arıtma çamurundaki katı madde konsantrasyonu bilinerek yoğunluk ve kinematik viskozite belirlemişlerdir.

Üç boyutlu geometriler bilgisayar destekli çeşitli yazılımlarla oluşturulmaktadır. Ağ yapısı, geometrinin tüm hacminin bölünmesiyle oluşturulmaktadır. Karıştırıcı kanatlarının yakınında ağ nispeten incedir ve karıştırıcıden uzakta ise kaba olabilir ve boyut fonksiyonları ağ büyümesini kontrol etmek için kullanılmaktadır [13, 49, 51-53].

Sıvı, katı ve gaz gibi farklı fazların özellikleri tanımlanmaktadır. Problemin doğasına (tek fazlı veya çok fazlı) bağlı olarak, anaerobik çürütücüdeki karışım üzerindeki geometri ve sınır koşullarının etkisini anlayabilmek için farklı türbülans modelleri ve çözücüler ile çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Literatürde yapılmış olan HAD simülasyonlarını içeren çalışmaların özeti Çizelge 2.1'de [54] verilmiştir. Çizelge 2.1'de yapılan çalımalardaki türbülans modeli, akışkanın özelliği, kullanılan yöntem ve sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatürdeki alışmalar [54]

Çalışma	Türbülans Modeli	Akışkan Özelliği	HAD /Method	İnceleme Sonuçları
Wu [13]	k–ε	Newtonsel değil	ANSYS Fluent/ ÇRÇ	Enerji seviyelerini ve ölü bölgeleri karıştırma
Zhang [23]	k–ε	Newtonsel değil	FLUENT	Akış düzeni
Ding [32]	k–ε	Newtonsel değil	ANSYS CFX	Optimize edilmiş karıştırıcı tasarımı/hız dağılımı
Wu ve Chen [36]	k–ε	Newtonsel değil	ANSYS Fluent/ SH	Akış düzeni ve ölü bölgeler
Vesvikar [37]	k–ε	Newtonsel	CFX/ SF	Gaz dağıtımı ve akış düzenleri
Caillet [38]	LES	Newtonsel ve değil	Open FOAM/ SH	Akış düzeni ve ölü bölgeler
Bridgeman [40]	Realizable k–ε	Newtonsel değil	FLUENT	Biyogaz verimiyle birleştirilmiş akış modelleri
Dama [41]	k–ε	Newton tipi	FLUENT	Hız profili ve akış modelleri
Mohammadrezaei [42]	k–ε	Newtonsel değil	FLUENT/ ÇRÇ	Optimum mekanik karıştırıcı ve akış düzenleri
Maier [43]	Euler-Euler çok fazlı	Newtonsel değil	Fluent/ SH	Karıştırma davranışları
Shen [44]	Standart k–ε	Newtonsel değil	Mixsim	Optimum karıştırma hızı
Ahmed [45]	k–ε	Newtonsel değil	ANSYS CFX/ Euler	Güç tüketimi ve karıştırma süresi
Huang [46]	-	Newtonsel değil	FLUENT	Optimum giriş hızının ve yüksek gaz üretim oranı
Karaeva [47]	k–ε	Newtonsel	COMSOL	Hidrolik karıştırmada geometrik parametreler
Torotwa [48]	k–ε	Newtonsel	COMSOL / Euler	Gaz karışımında akış düzeni
Leonzio [49]	k–ε	Newtonsel değil	ÇRÇ	Kayma hızı, hız gradyanı ve akış düzeni
Elena [50]	Navier Stokes	Newtonsel	Mixsim	Nominal karıştırma hızı ve karıştırıcı geometrisi
Terashima [51]	k–ε	Newtonsel değil	ANSYS CFX	Akış dağılımı
Li [55]	Laminer akış	Newtonsel	ANSYS CFX	Karıştırıcı ile akış ve hız tahmini
Meroney [56]	k–ε ve k–ω	Newtonsel	ANSYS Fluent/ SH	Karışım hacmi devir süresi/Karışım difüzyon süresi
Azargoshasb [57]	RNG k–ε	Newtonsel	FLUENT	VFA'nın konsantrasyon profilleri

Son bulgulara göre Singh ve ark. [58] yaptığı çalışmadan karıştırıcı ve çürütücü tasarımının, tank içindeki çamurun karıştırma verimliliği ve homojenliği üzerinde dikkate değer bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Literatürden, çark geometrisi ve çürütücü hidrodinamiğinin modifikasyonunun, anaerobik bir çürütücüde karıştırmayı optimize etmenin en iyi yolu olan çürütücüdeki hız ve viskozitenin homojen dağılımını destekleyebileceği sonucuna varılmıştır.

Ayrıca toplam karıştırma süresi karıştırıcı geometrisi ve dönüş hızına göre de belirlenmektedir. Karıştırma süresi karıştırıcının daha yüksek devir sayısıyla azaltılabilir ancak diğer taraftan mikrobiyal topluluğu etkileyecek ve dolayısıyla biyogaz üretim oranlarını azaltacak yüksek kayma gerilimleri oluşturacaktır. Karıştırma işlemi akış düzeninin bir fonksiyonu olarak meydana geldiğinden, anaerobik çürütücülerin hidrodinamik ve karıştırma özellikleri, geleneksel kimya mühendisliği ve akışkanlar dinamiği teknikleri kullanılarak belirlenebilir.

Şenol ve ark. [59] yapmış oldukları bir dizi çalışmada anaerobik biyogaz reaktörü içerisindeki organik maddelerin karıştırılması ile mikroorganizmaların eşit şekilde dağıldığı göstermişlerdir. Ayrıca, yaptıkları bazı deneysel çalışmaların karışım aralığı ve süresinin 12 saatte bir 3 dakika [60] ve 3 saatte bir 3 dakika [61] olarak seçildiği görülmüştür. Yani, araştırmacılar için optimum karıştırma süresi belirsizliğini korumaktadır. Ancak HAD çalışmalarında saat bazında kararsız rejimde simülasyonlar yapmak oldukça zaman alıcıdır.

Mevcut tez çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. İlk çalışma olan Rushton karıştırıcılı silindir reaktör çalışmasında, karışım aralığı bir defa ve süresi ise toplamda 5 saniye olarak seçilmiştir. Bu 5 saniye boyunca dört kanatlı karıştırıcı ve altı kanatlı Rushton karıştırıcının 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm dönme hızları için simüle edilmiş, yerel ve ortalama olmak üzere hız dağılımına, türbülans kinetik enerjisine, türbülans kinetik enerjisinin yayılma hızı ve basınç dağılımına olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca doğrulama çalışması olarak 6-kanatlı Rushton karıştırıcısında 402 rpm değeri için Standart k-ε, RSM, k-ω ve LES türbülans modelleri kullanılmış ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Biyogaz üretmek için gerekli gübre-su karışım oranının belirsizliğinden dolayı, çalışmada karıştırıcıların karışım üzerindeki etkisinin iyi anlaşılması adına akışkan olarak su kullanılmıştır.

Literatür çalışmalarına bakıldığında, farklı karıştırıcı açısal hız değerleri ve farklı karıştırıcı tiplerini kullanan HAD simülasyon çalışmaları mevcut olmasına rağmen, akış modelini hız dağılımı, ölü bölge hacmi, türbülans kinetik enerjisi ve türbülanslı girdap dağılım oranı açısından birlikte inceleyen çalışmalar çürütücü tank geometrisine rastlanmamıştır. Ayrıca konuyla ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde çoğunda klasik 90° eğimli silindirik tank geometrisinin benimsendiği görülmektedir.

İkinci çalışma olan Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmada, HAD simülasyonları kullanarak akış modellerini hız dağılımı, türbülanslı kinetik enerji ve türbülanslı girdap sönümleme oranı açısından anlamak ve bunların biyogaz üretiminin alt aşamaları ile olan ilişkileri hakkında çıkarımda bulunmaktır. Mevcut sayısal çalışma, içinde 6 kanatlı Rushton çark bulunan hem klasik 90° eğimli silindirik hem de sahip 60° ters konik şeklindeki yeni tank (bundan sonra Vorteks tankı olarak anılacaktır) için, karıştırıcı açısal hızı 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm aralığında gerçekleştirilmiştir. Biyoatıkların çoğunun viskozite ve yoğunluk değerleri aynı anda bilinmediğinden çürütücü tankında akışkan olarak yine su kullanılmıştır.

Son olarak matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasında, HAD simülasyonu kullanarak akış modellerini hız dağılımı, türbülanslı kinetik enerji ve türbülanslı girdap yayılma hızı açısından anlamak ve bunların biyogaz üretiminin alt aşamaları ile ilişkisi hakkında çıkarımlarda bulunmaktır. Mevcut çalışmada vorteks geometrisine sahip 60° ters konik şeklindeki anaerobik çürütücü tankta, 6 kanatlı Rushton karıştırıcısı ve yeni tasarlanan Matkaplı Rushton karıştırıcısının 25, 50, 75 ve 100 rpm açısal hızları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda olduğu gibi biyogaz üretmek için gerekli gübre-su karışım oranının belirsizliğinden dolayı, çalışmada karıştırıcıların karışım üzerindeki etkisinin iyi anlaşılması adına akışkan olarak yine su kullanılmıştır.

3. SAYISAL ÇALIŞMALAR

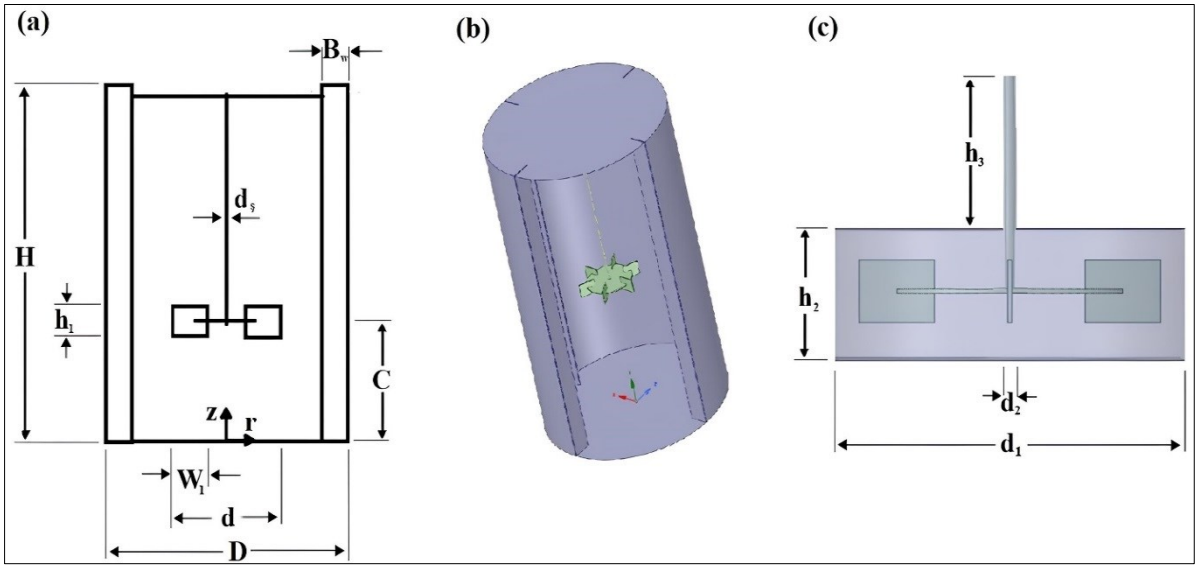
Bu bölümde tez kapsamında yapılan üç adet çalışma için, korunum denklemleri, fiziksel tanımları, sınır şartları ve çözüm metotları verilmiştir.

3.1. Sayısal Çalışmaların Fiziksel Tanımı

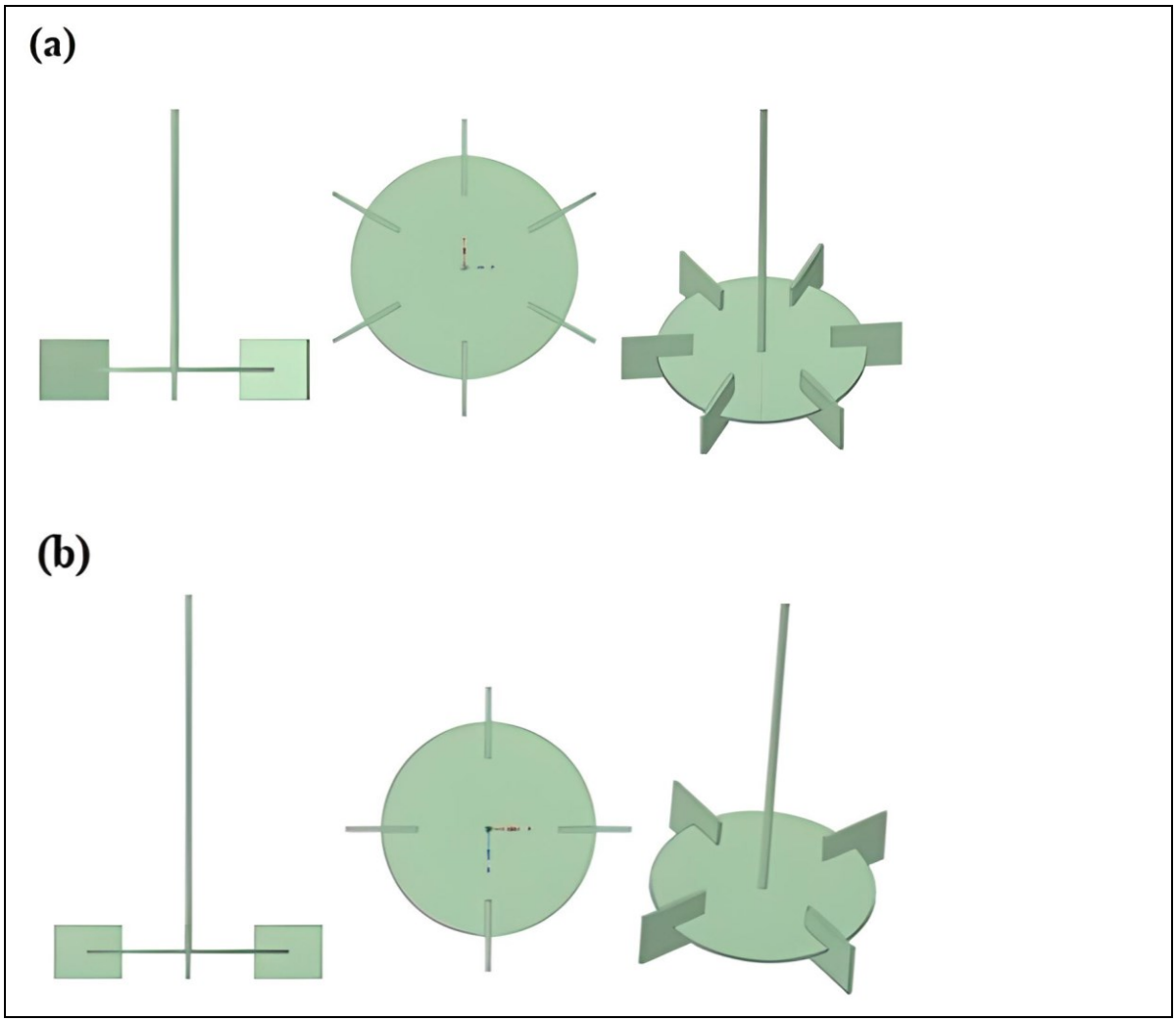
3.1.1. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasının fiziksel tanımı

Rushton karıştırıcılı silindir reaktör tipi çalışmada ilk olarak bölmeli (akım kırıcı) silindirik tipteki çürütme tankRushton karıştırıcılı silindir reaktör kullanılmıştır. Çürütme tankının içerisine yerleştirilen 4 kanatlı Rushton ve 6 kanatlı Rushton karıştırıcıları için 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm açısal hızlarında analizler yapılmıştır. Akışkan olarak $\rho = 998\ \mathrm{kg}/\mathrm{m}^3$ ve $\mu = 0.001\ \mathrm{Pa}\cdot\mathrm{s}$ özelliklerine sahip su kullanılmıştır. Doğrulama çalışması için 6-kanatlı Rushton karıştırıcısında 402 rpm değeri için Standart k-ε, RSM, k-ω ve LES türbülans modelleri kıyaslanarak çalışmada türbülans modeli olarak Standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Karıştırmalı tank reaktörünün geometrik detayları Şekil 2a'da verildiği gibidir. Koordinat ekseni şekilde görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Karıştırma tank reaktörünün yüksekliği ve çapı sırasıyla H=450 mm ve D=294 mm'dir. Sıvının yüzeyindeki girdabı azaltmak için tankın dış kenarlarına dört adet bölme konulmuştur. Bölme genişliği B_w=D/10 ve bölme kalınlığı B_d=1 mm'dir. Bölmeler, karıştırmalı tank reaktörünün etrafına eşit açılarla yerleştirilmiştir. Yerleştirilen iki karıştırıcı tankın tam merkezinden C=2D/3=196 mm yükseklikte konumlandırılmıştır. Karıştırıcının genişliği W_1=24,5 mm ve yüksekliği h_1=19,5 mm'dir. Şaftın çapı $d_Ş$=3 mm'dir. Karıştırıcının kalınlığı t_1=1 mm'dir. Kanatlarla birlikte karıştırıcının çapı d=98 mm'dir. Altı kanatlı karıştırma tankının 3-boyutlu görünümü Şekil 3.1 b'de görüldüğü gibidir. Şekil 2b'deki hareketli kısmı oluşturan karıştırıcının detaylı görünümü ise Şekil 2c'de verilmiştir. Şekil 3.1 2c'de karıştırıcı için hareketli kısmın çapı d_1=111,72 mm, yüksekliği h_2=40 mm ve şaft için hareketli kısmın çapı d_2=4 mm, yüksekliği h_3=230 mm olan iki adet silindirden oluşmaktadır. Karıştırmalı tank reaktöründe kullanılan karıştırıcı tiplerinde 4-kanatlı karıştırıcı Şekil 3.1 3a'da, diğer karıştırıcı tipi olan 6-kanatlı Rushton karıştırıcı Şekil 3.1 3b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. (a) 2-boyutlu tankın, (b) 3-boyutlu tankın ve (c) hareket eden kısmın görünümü



Şekil 3.2. (a) Altı ve (b) Dört kanatlı karıştırıcının görünümü

3.1.2. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasının fiziksel tanımı

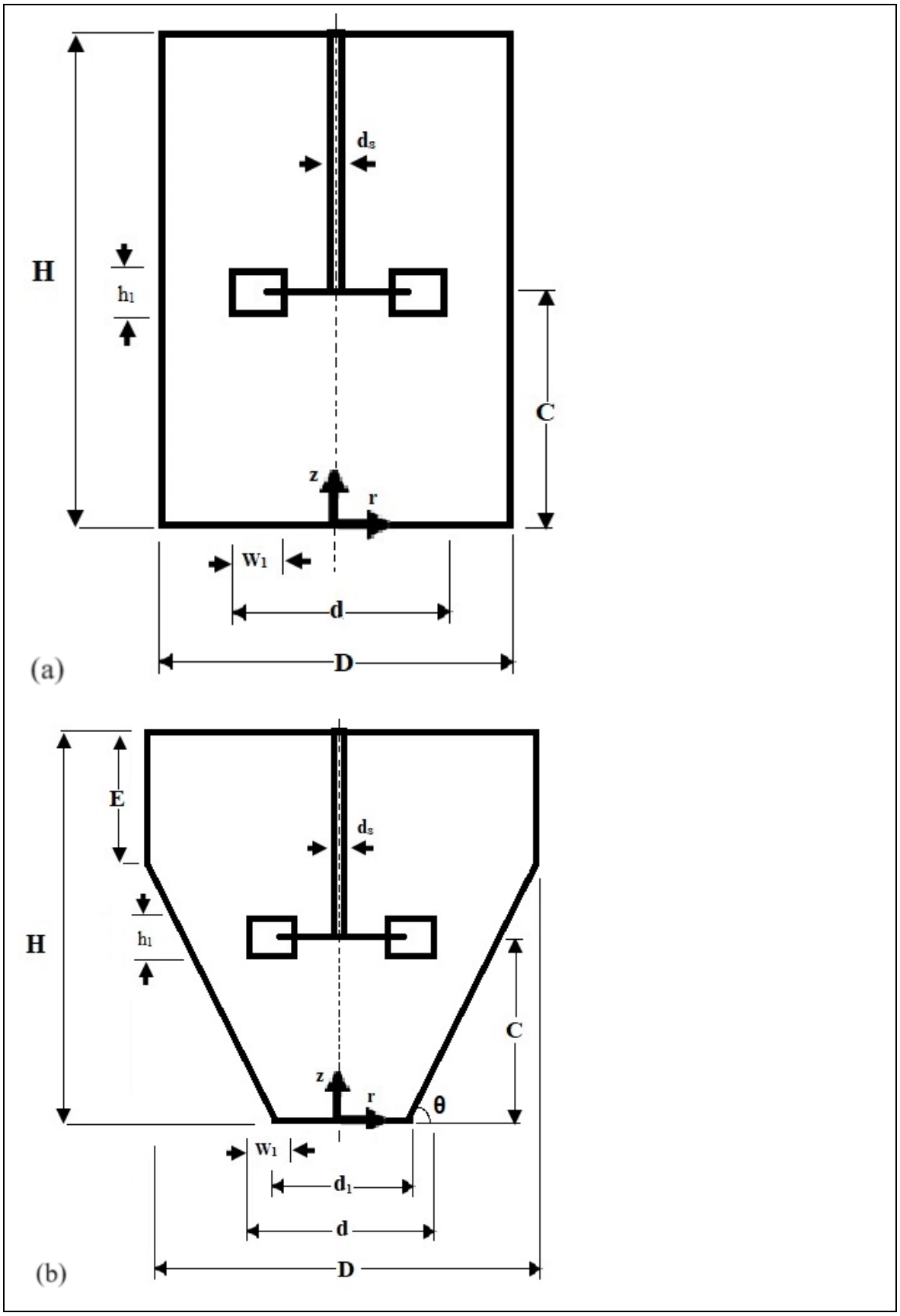
Çalışmada ikinci olarak silindirik ve vorteks olarak adlandırılan 60° ters konik şeklindeki anaerobik çürütme tankları kullanılmıştır. Tez çalışması yürütülürken biyogaz üretim verimini artırmayı düşünürken aynı zamanda üretime uygunluğu da göz önünde bulundurulduğu için vorteks reaktörüne akım kırıcı yerleştirilmemiştir. Çürütme tankları içerisine yerleştirilen 6 kanatlı Rushton karıştırıcı için 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm açısal hızlarında analizler yapılmıştır. Akışkan olarak $\rho = 998\ \mathrm{kg/m^3}$ ve $\mu = 0.001\ \mathrm{Pa \cdot s}$ özelliklerine sahip su kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak Standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Simülasyonlar her iki tankın hacmi yaklaşık 30,5 litre tutularak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4'te iki farklı anaerobik çürütücü tankı geometrisi gösterilmektedir; her ikisinin de içinde 6 kanatlı Rushton karıştırıcı bulunmaktadır. Şekil 4 (a) ve (b)'de sırasıyla 90° silindirik tank ve vorteks tankının geometrik sembolleri bulunmaktadır.

Karıştırıcı, tankların iç duvarlarından aynı mesafeye yerleştirilir. θ değeri vorteks ve silindirik tanklar için sırasıyla 60° ve 90°'dir. Tankların ve karıştırıcıların geometrik parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tankların ve karıştırıcının geometrik parametreleri

Parametreler	Silindirik Tank (mm)	Vorteks Tankı (mm)
H	450	404
C	202	202
d_1	-	83
d	98	98
D	294	404
E	-	119
w_1	24,5	24,5
h_1	19,5	19,5
d_s	3	3

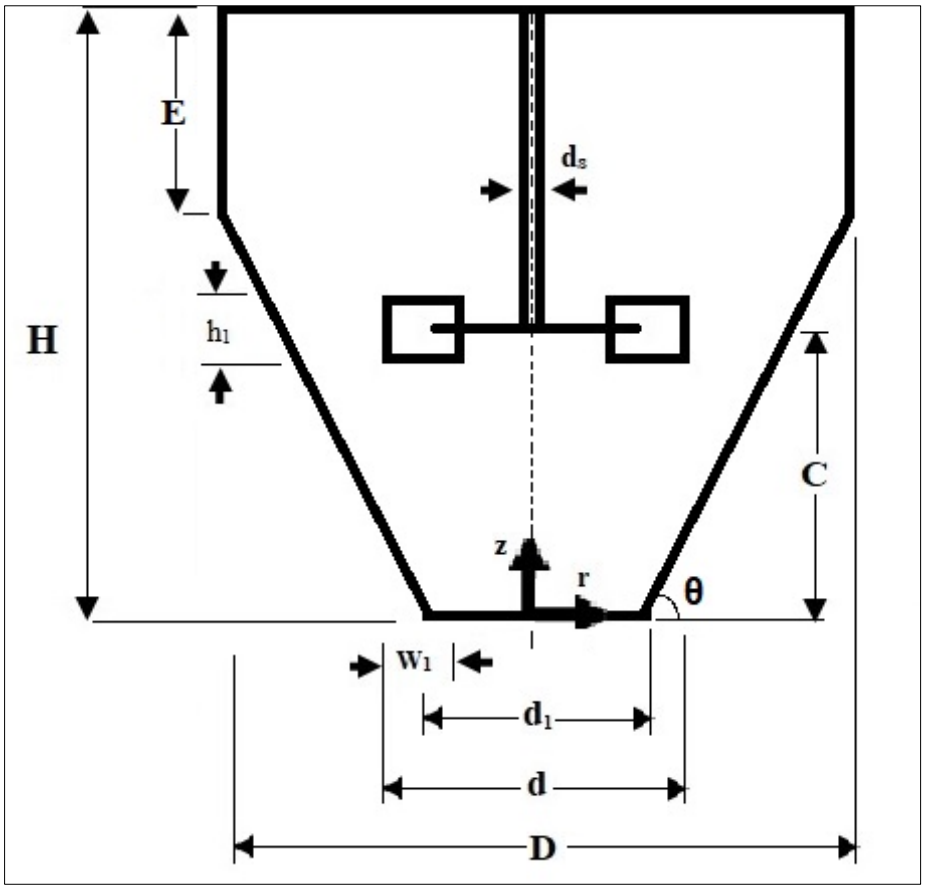


Şekil 3.3. Geometrik sembollere sahip karıştırıcıyı içeren tank geometrileri: (a) Silindirik tank, (b) Vorteks tankı

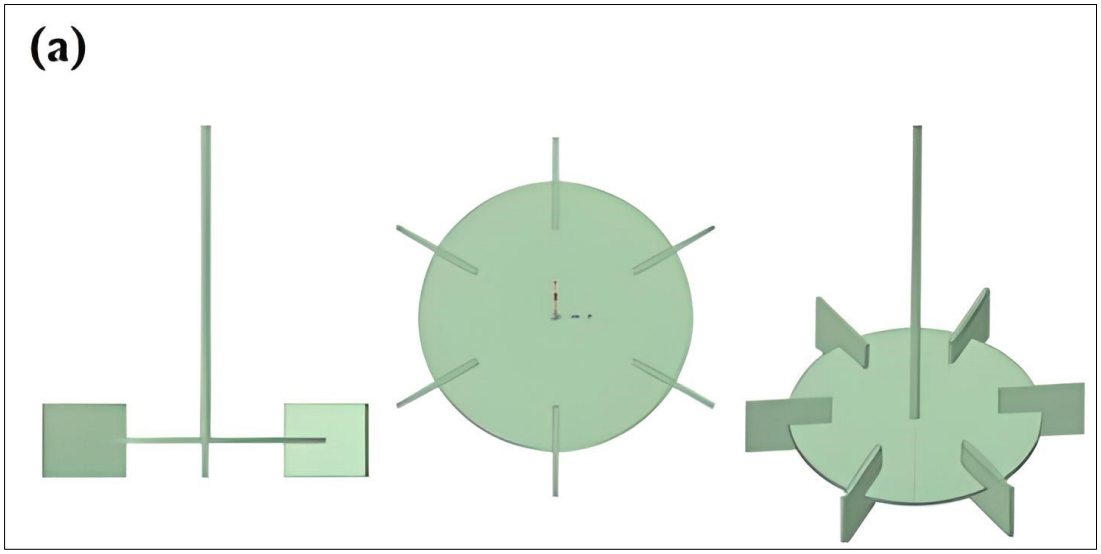
3.1.3. Mevcut tez kapsamında yapılan matkaplı rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasının fiziksel tanımı

Çalışmada üçüncü olarak vorteks tipindeki çürütme tankı kullanılmıştır. Çürütme tankının içerisine yerleştirilen 6 kanatlı Rushton ve yeni tasarlanmış olan Matkaplı Rushton karıştırıcı için 25, 50, 75 ve 100 rpm açısal hızlarında analizler yapılmıştır. Akışkan olarak su, türbülans modeli olarak Standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Şekil 3.4'te vorteks olarak adlandırılan 60° ters konik şeklindeki anaerobik çürütücü tank geometrisi bulunmaktadır. Koordinat ekseni şekilde görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Karıştırma tank reaktörünün yüksekliği ve çapı sırasıyla H=404 mm ve D=404 mm'dir. Rushton karıştırıcının genişliği W_1=24,5 mm ve yüksekliği h_1=19,5 mm'dir. Şaftın çapı $d_Ş$=3 mm'dir. Karıştırıcının kalınlığı t_1=1 mm'dir. Kanatlarla birlikte karıştırıcının çapı d=98 mm'dir. Karıştırcının z eksenindeki yerden yüksekliği C=202mm'dir. Şekil 3.4'te verilen parametreler Çizelge 2'de verilen vorteks tankı parametreleri ile aynıdır. 6 kanatlı Rushton karıştırıcının 3-boyutlu görünümü Şekil 3.5'da görüldüğü gibidir.



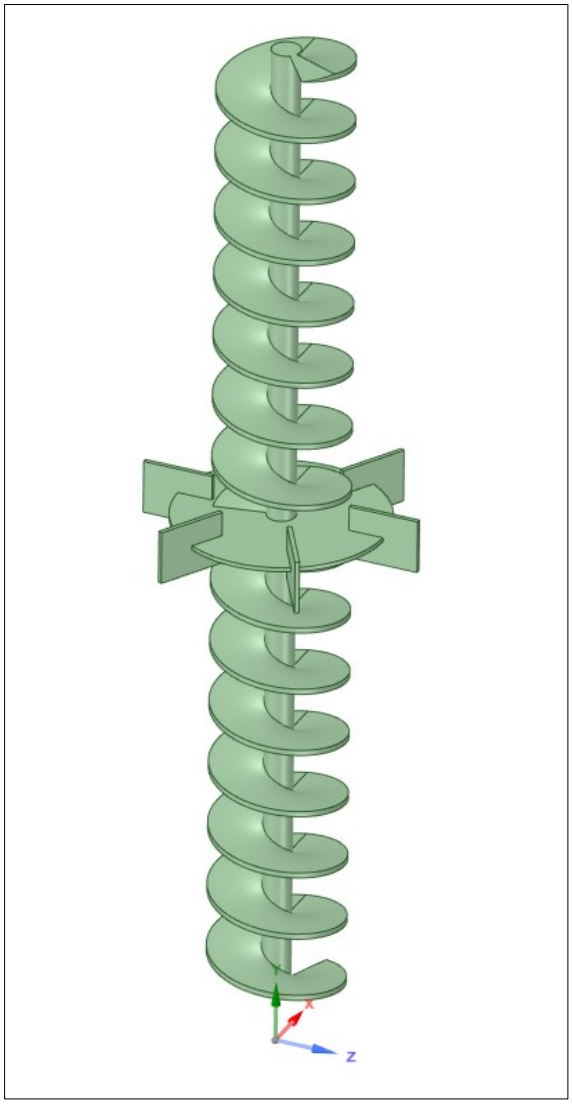
Şekil 3.4. Vorteks tank geometrisi



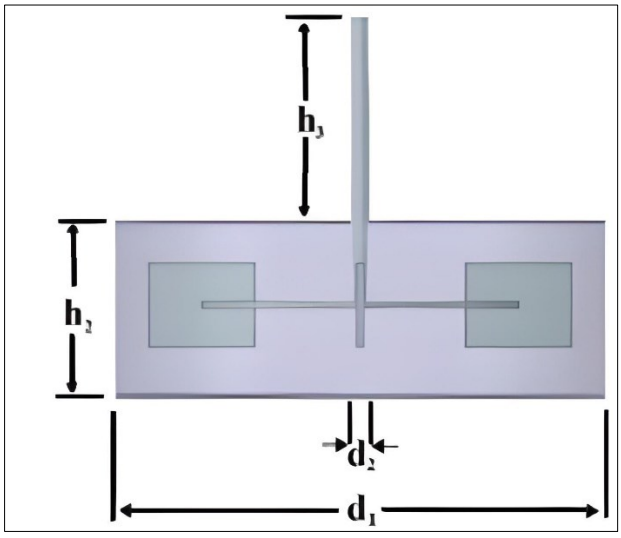
Şekil 3.5. Altı-kanatlı rushton karıştırıcı

Altı kanatlı Rushton karıştırıcı, Şekil 3.6'de gösterilen yeni tasarlanmış olan matkap tipi karıştırıcı ile birleştirilmiştir. Ortaya çıkan bu yeni karıştırıcı Matkaplı Rushton olarak adlandırılmıştır. Yerleştirilen Rushton karıştırıcı tankın tam merkezinden C=202 mm yükseklikte konumlandırılmıştır.

Şekil 3.6'de yer alan Matkaplı Rushton karıştırıcısı aralarında 21,6 mm mesafe olan 2 mm'lik bıçaklara sahiptir. Karıştırıcının çapı 46 mm ve uzunluğu 360 mm'dir.



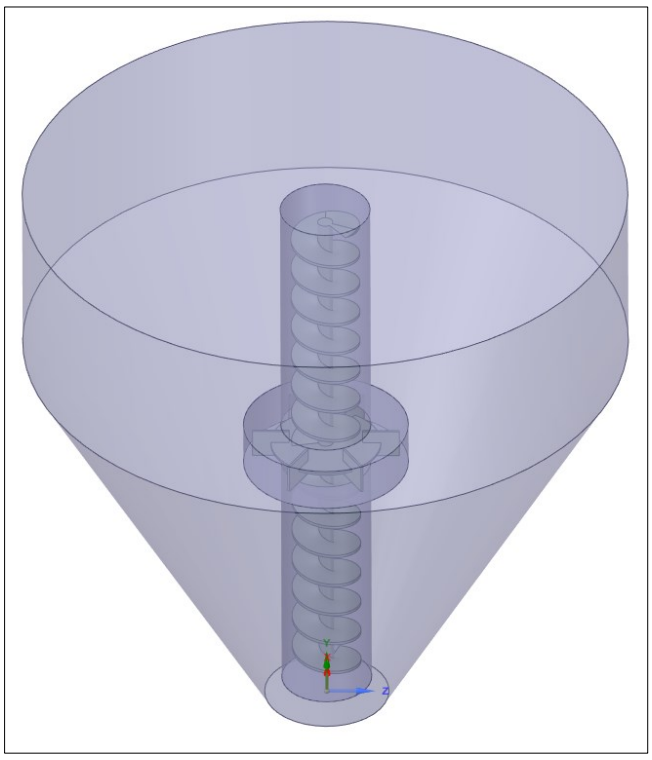
Şekil 3.6. Matkaplı Rushton



Şekil 3.7. Rushton karıştırıcının hareketli kısmı

Hareketli kısmı oluşturan karıştırıcının detaylı görünümü ise Şekil 3.7'de verilmiştir. Hareketli kısmın çapı d_1=111,72 mm, yüksekliği h_2=40 mm ve şaft için hareketli kısmın çapı d_2=4 mm, yüksekliği h_3=230 mm olan iki adet silindirden oluşmaktadır.

Şekil 3.8'de vorteks tankının içerisinde 380 mm uzunluğunda 60 mm çapa sahip hareketli bölgenin 110 mm çaptaki orta kısmı 30 mm yüksekliğe sahiptir.



Şekil 3.8. Sabit kısım olan vorteks tankındaki Matkaplı Rushton karıştırıcının hareketli kısmı

3.2. Korunum Denklemleri

Rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasını Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör ve matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmalarından ayıran özelliklerden birisi zamana bağlı olmasıdır. Bundan ötürü Rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışması için kararsız rejimde süreklilik denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{d\rho}{dt} + div(\rho\vec{u}) = 0 \qquad (3.1)$$

Bu denklemde, ρ-sıvının yoğunluğu, $\vec{u}$-sıvının hızı ve t-zamandır. Sabit kısım ve dönen kısım için momentum denklemi sırasıyla aşağıdaki gibidir [62]:

$$\frac{d(\rho\vec{u})}{dt} + div(\rho\vec{u}\vec{u}) = -div(\mathrm{P}) + div(\tau) + \rho\vec{\mathrm{g}} \tag{3.2}$$

Burada P-statik basınç, τ-Reynolds gerilim tensörü ve $\rho\vec{\mathrm{g}}$ yerçekimi kuvvetidir. Denklem (3.1) ve (3.2) kullanılan türbülans modellerinden gelen denklemler ile birlikte çözülür. Standart k-ε türbülans modeli için türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerji yayılım hızı (ε) için geçerli denklemler aşağıdaki gibi yazılır [62]:

$$\frac{d(\rho k)}{dt} + div(\rho\vec{u}k) = div\left(\frac{\mu_\mathrm{T}}{\sigma_\mathrm{k}}\mathrm{div}(k)\right) + \mathrm{G}_k + \rho\varepsilon \tag{3.3}$$

$$\frac{d(\rho\varepsilon)}{dt} + div(\rho\vec{u}\varepsilon) = div\left(\frac{\mu_\mathrm{T}}{\sigma_\varepsilon}\mathrm{div}(\varepsilon)\right) + \frac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\varepsilon) \tag{3.4}$$

Burada G_k-ortalama hız gradyantlarından kaynaklı türbülans üretimi, μ_T-türbülans viskozitesi, σ_ε-ε için türbülans Prandtl sayısı ve σ_k-k için türbülans Prandtl sayısıdır. $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ sabitlerdir. Standart k-ε türbülans modelinden kaynaklı türbülans sabitleri şu şekildedir: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_\mathrm{k} = 1.0$ ve $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

Bunun yanı sıra Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör ve matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmalar için kontrol hacminin sınırından net kütle akışı, kararlı rejimde sıfırdır. Dolayısıyla, dönen referans çerçevesindeki süreklilik denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$div(\rho\vec{u}) = 0 \tag{3.5}$$

Reaktörün sabit kısmı ve dönen kısmı için momentum denklemleri, denklem (3.6)'da gösterildiği gibidir [62]:

$$div(\rho\vec{u}\vec{u}) = -div(\mathrm{P}) + div(\tau) + \rho\vec{\mathrm{g}} \tag{3.6}$$

Yukarıda gösterilen her iki denklemin sol tarafındaki terim konvektif ivmeyi ifade eder. Her iki denklemin sağ tarafındaki birinci, ikinci ve üçüncü terimler sırasıyla basınç

gradyanını, iç gerilme kuvvetlerini (viskoz etkiler) ve dış cisim kuvvetlerini (yerçekimi kuvvetinden dolayı) temsil eder. τ-sabit özelliklere sahip sıkıştırılamaz bir Newtonsel sıvı için viskoz gerilim tensörüdür.

Zhang ve ark. karıştırmalı tank çalışmalarında [23], CFD simülasyonlarında türbülanslı modellerin performansını nicel olarak değerlendiren hata göstergesinin Standart k-ε türbülanslı modelde en az olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada akış alanını değerlendirmek için Standart k- ε türbülans modeli seçilmiştir. Denklem (3.6) kullanılan türbülans modellerinden elde edilen denklemlerle birlikte çözülmelidir. Standart k-ε türbülans modeli için türbülanslı kinetik enerji (k) ve türbülanslı kinetik enerji yayılım hızı (ε) için denklemler aşağıdaki gibidir [63, 64]:

Türbülanslı kinetik enerji denklemi (k) şu şekilde yazılır:

$$div(\rho\vec{u}k) = div\left(\frac{\mu_T}{\sigma_k}\mathrm{div}(k)\right) + G_k + \rho\varepsilon \qquad (3.7)$$

Burada sol tarafta görülen terim konvektif taşımadır. Ek olarak, G_k'nin kayma nedeniyle türbülans oluşumu olduğu (aynı zamanda ortalama hız gradyanlarından da kaynaklanan), k için σ_k türbülanslı Prandtl sayısı ve μ_T -türbülans viskozitesi olduğu, bu ise aşağıda tanımlanabilecektir:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (3.8)$$

burada Cμ bir sabittir ve değeri 0,09'dur.

Türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı (ε) şu şekilde yazılabilir:

$$div(\rho\vec{u}\varepsilon) = div\left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\mathrm{div}(\varepsilon)\right) + \frac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\varepsilon) \qquad (3.9)$$

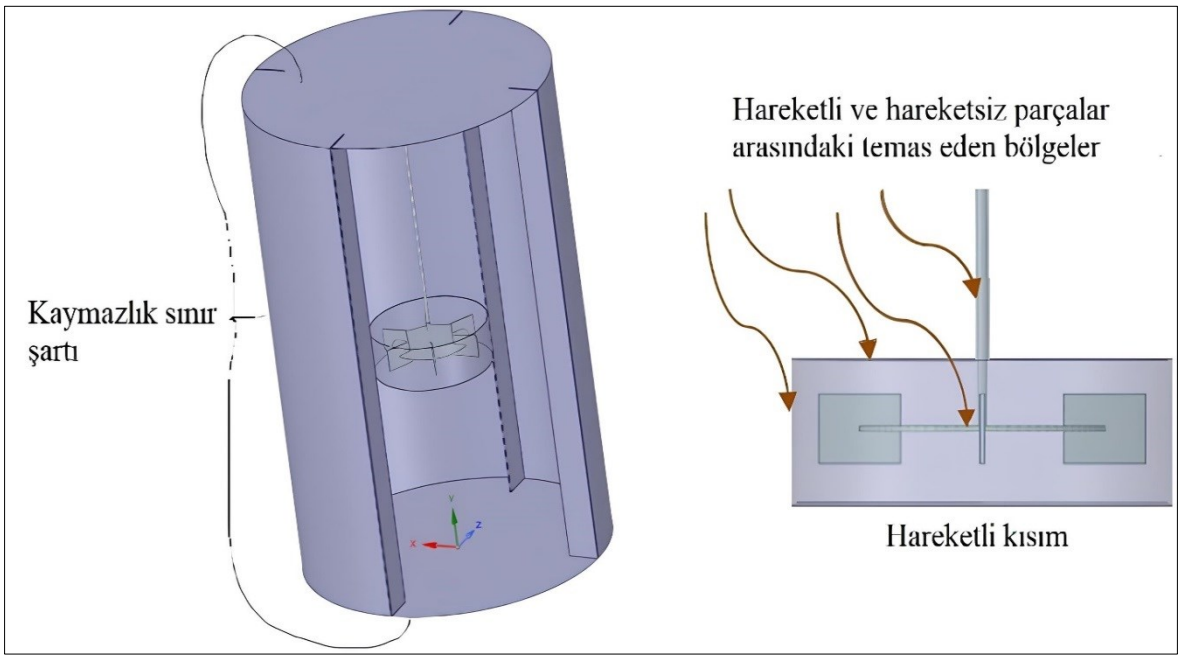
burada σ_ε, ε için türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı Prandtl sayısıdır; $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ sabitlerdir. Standart k-ε türbülanslı modelden kaynaklanan türbülans sabitleri $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k ve σ_ε değerleri sırasıyla 1.44, 1.92, 1.0 ve 1.3'tür.

Yukarıdaki iki denklem artı momentum denklemi, ε_m (momentum girdap yayınım) değerini ve hız dağılımını çözmek için kullanılmıştır.

3.3. Sınır Şartları

3.3.1. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasının sınır şartları

Hareketsiz olan biyogaz reaktörünün tüm duvarlarında hız sıfır olup ($\vec{u}$=0) kaymazlık sınır şartı kullanılmıştır. Bundan dolayı türbülans kinetik enerjisi k=0 ve türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı ε=0'dır. Akışkan olarak kullanılan su, sıkıştırılamaz akışkan olarak kabul edilmiştir. Dönen parça için 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik farklı dönüş hızları dikkate alınmıştır. Hesaplama alanındaki sınır şartları 4-kanatlı karıştırıcı için Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Çözüm alanındaki sınır şartları

3.3.2. Mevcut tez kapsamında yapılan rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasını sınır şartları

Hareketsiz olan biyogaz reaktörünün tüm duvarlarında hız sıfır olup ($\vec{u}$=0) kaymazlık sınır şartı kullanılmıştır. Bundan dolayı türbülans kinetik enerjisi k=0 ve türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı ε=0'dır. Akışkan olarak kullanılan su, sıkıştırılamaz akışkan olarak kabul edilmiştir. Dönen parça için 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm'lik farklı dönüş hızları dikkate alınmıştır.

3.3.3. Mevcut tez kapsamında yapılan matkaplı rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmanın sınır şartları

Tankın dış ve alt duvarında kaymazlık sınır koşulu varsayılmıştır. Dönen ve sabit parçalar genel bağlantı sınır şartı ile birbirine bağlanır. Akışkan olarak kullanılan su, sıkıştırılamaz akışkan olarak kabul edilmiştir. Dönen parça için 25, 50, 75, ve 100 rpm'lik farklı dönüş hızları dikkate alınmıştır.

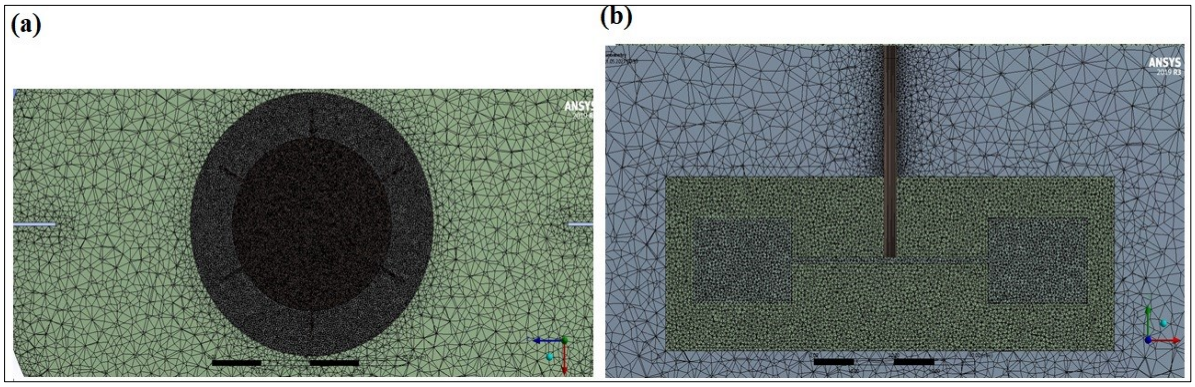
Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalarda, korunum denklemleri sonlu hacimler metodunu temel alan ANSYS Fluent R 19 paket programı kullanılarak çözülmüştür. Hesaplama alanı, iç kısım (dönen alan hacmi) ve dış kısım (karıştırılan tank reaktörünün geri kalanını içeren sabit hacim) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. İç parçayı ayırmak için Kayar Ağ yöntemi kullanılmıştır.

Kayar Ağ yöntemine göre, sayısal alan iki çözüm alanına bölünmektedir. Alanlardan biri karıştırıcı ile hareket ederken diğer alan ise sabittir. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri, Standart k–ε türbülans modeli ile çözülmüştür. Basınca dayalı çözücü, süreklilik ve momentum korunum denklemlerini çözmek için kullanılmıştır. Basınç-hız arasındaki bağlantı SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritması ile çözülmüştür [65]. Tüm korunum denklemleri ikinci dereceden sonlu hacim metodu ile ayrıklaştırılmıştır. Türbülans denklemleri birinci dereceden sonlu hacim ile ayrıklaştırılmıştır. Çözümlere kalıntıların 1×10^{-5} olmasına kadar devam edilmiştir. Sonuçların hücre sayısından bağımsızlığını sağlamak için değişik hücre sayılarında çalışılmıştır.

Rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasındaki 6-kanatlı karıştırıcı için yaklaşık 8×10^5 ile 89×10^5 arasında beş farklı hücre sayısında çalışılmıştır. Benzer şekilde 4-kanatlı karıştırıcı için de beş farklı hücre sayısında çalışılmıştır. 4 ve 6-kanatlı karıştırıcılar için sonuçların ağ yapısından bağımsız olduğu ağ sayıları belirlenmiştir. Optimum ağ sayısı 4 ve 6-kanatlı karıştırıcılar için sırasıyla 8.792.438 ve 8.908.392'dir.

Çözüm alanındaki tipik ağ yapısının üstten ve yandan görünümü 6-kanatlı karıştırıcı için Şekil 3.10 (a) ve Şekil 3.1011 (b)'de verilmiştir. Tüm çalışmalarda 5 saniyelik simülasyon için toplam süre ve 0,02 saniyelik zaman adımı dikkate alınmıştır. Her çalıştırma için

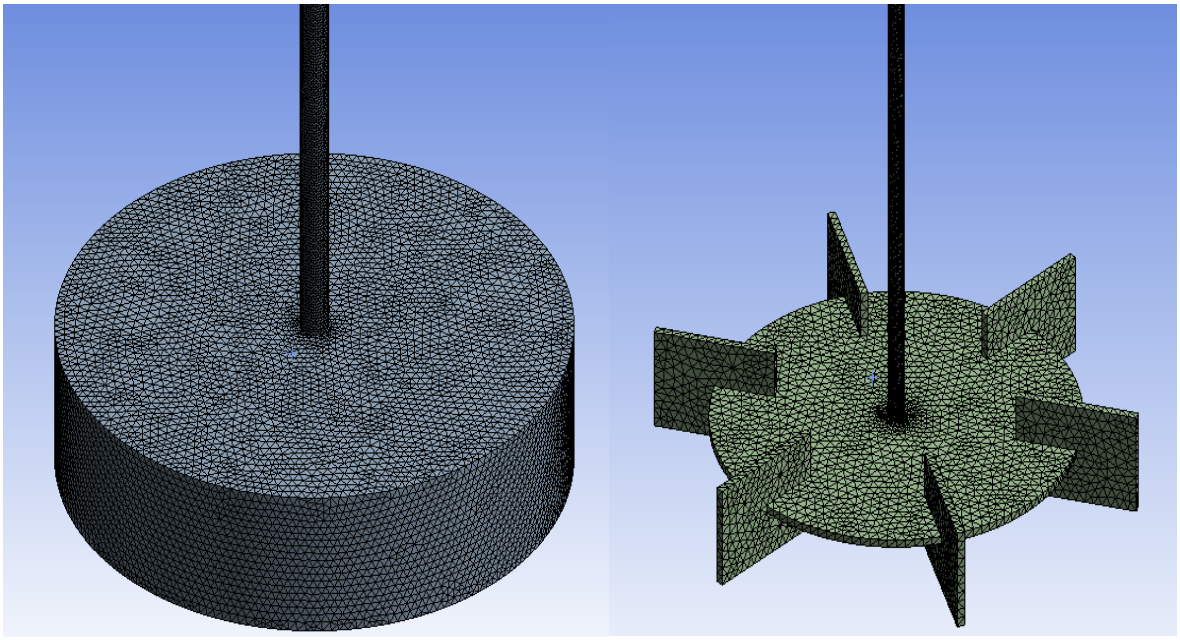
toplam simülasyon süresi değişkenlik gösterip iki adet kişisel bilgisayarda (Intel(R) Core (TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz, Corsair CMW16GX4M1Z3600C18 32 GB (2x16) RAM) 9 ile 21 saattir.



Şekil 3.10. Ağ yapısının görünümü (a) Üstten görünüş, (b) Yandan görünüş

Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasının simülasyonları farklı ağ sayılarından elde edilen sonuçlar, çözümlerin ağ sayısından bağımsız olması için karşılaştırılmıştır. Buna göre vorteks ve 90° tanklar için ağ sayısı sırasıyla 10.486.452 ve 10.571.594 olarak belirlenmiştir. Karıştırıcı bölgesi ve sadece karıştırıcı üzerinde oluşturulan örnek niteliğinde bir dört yüzlü ağ yapısı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

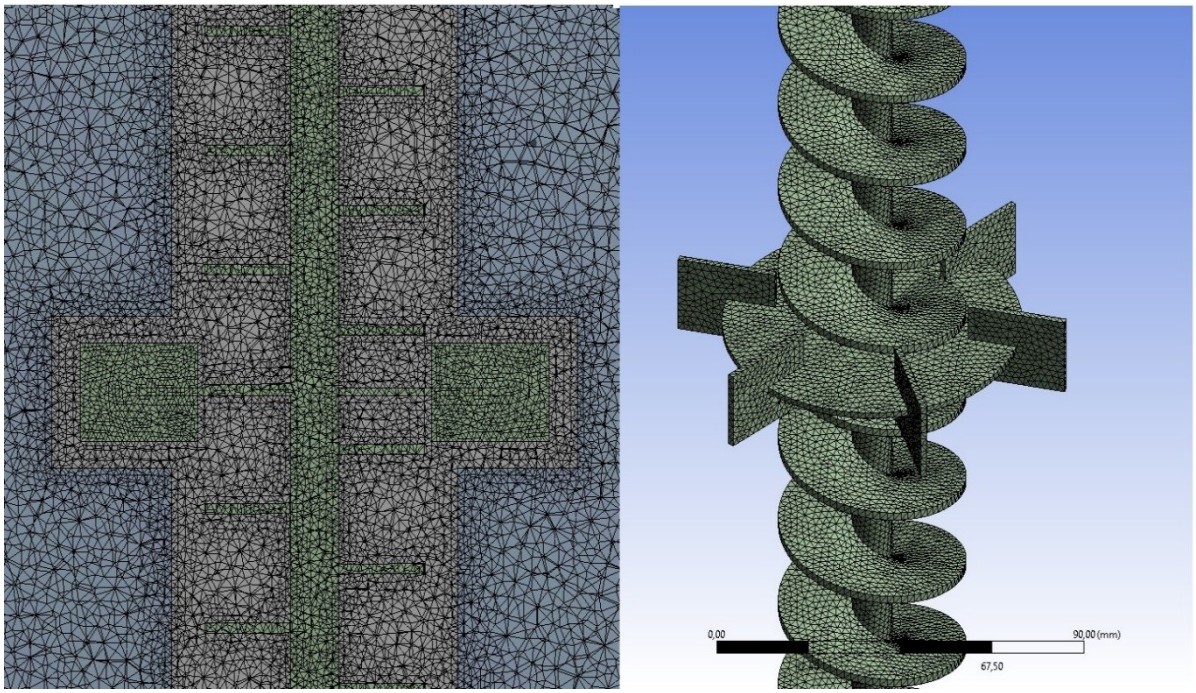
Her çalıştırma için toplam simülasyon süresi değişkenlik gösterip iki adet kişisel bilgisayarda (Intel(R) Core (TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz, Corsair CMW16GX4M1Z3600C18 32 GB (2x16) RAM) 12 ile 28 saattir.



Şekil 3.11. Çürütücü tankı içindeki karıştırıcı bölgesinin ağ yapısı

Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasının simülasyonları için farklı ağ sayılarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak çözümler ağ sayısından bağımsız hale getirilmiştir. Buna 6 kanatlı Rushton karıştırıcına sahip vorteks tankının ağ sayısı 10.486.452'dir. Matkaplı Rushton karıştırıcısına sahip vorteks tankının ağ sayısı 11.261.395 olarak belirlenmiştir. Matkaplı Rushton karıştırıcısına sahip vorteks tank için oluşturulmuş örnek bir dört yüzlü ağ yapısı Şekil 3.12 (a) ve (b)'de gösterilmektedir.

Her çalıştırma için toplam simülasyon süresi değişkenlik gösterip iki adet kişisel bilgisayarda (Intel(R) Core (TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz, Corsair CMW16GX4M1Z3600C18 32 GB (2x16) RAM) 22 ile 45 saattir.



Şekil 3.12. Matkaplı Rushton karıştırıcının ağ yapısı

4. ÇALIŞMA SONUÇLARI

4.1. Çalışmanın Doğrulanması

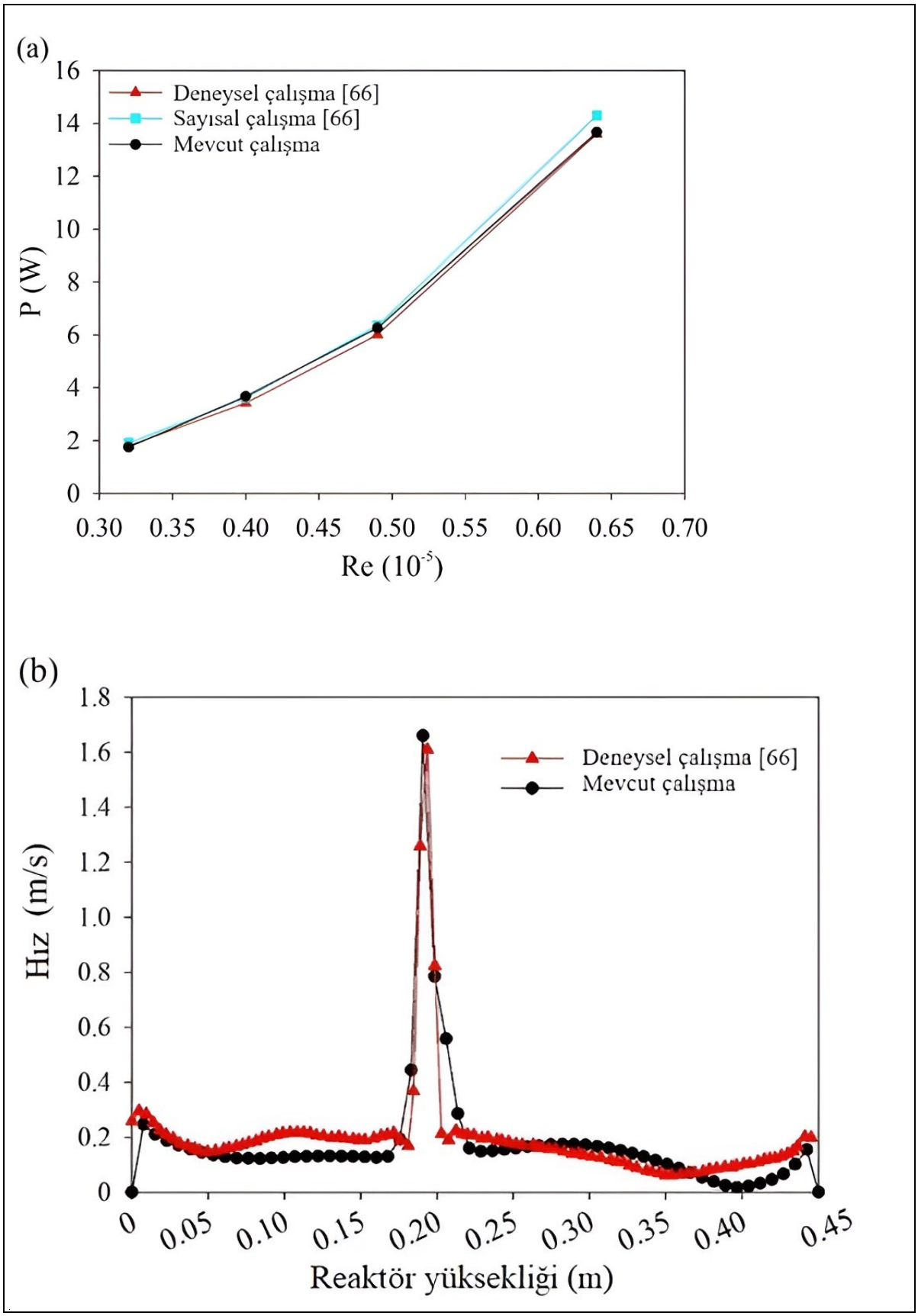
Şekil 2'de verilen tank geometrisi ve karıştırıcı kullanılarak mevcut çalışmanın doğrulaması yapılmıştır. Literatürde bulunan çalışmasının yapılan çalışmanın sonuçlarıyla mukayese edilmesi mevcut sayısal çalışmanın geçerliliği için gereklidir [66]. Farklı türbülans modelleriyle yapılan çalışmadaki güç tüketimi mukayesesi Çizelge 3'te verilmiştir. Güç tüketimi (PC) şu şekilde hesaplanmıştır:

$$PC = \tau \cdot n$$

Çizelge 4.1.Güç tüketimlerinin mukayesesi

	k-ε	RSM	k-ω	LES	Hosseini [66]
PC (W)	13,67	12,19	12,59	12,23	14,31

Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak hareketli yüzeydeki toplam torktan elde edilen güç tüketimi Şekil 4.1 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.1'te düşey eksen tüketilen gücü ifade ederken, yatay eksen Reynolds sayısını ifade etmektedir. Mevcut ve deneysel çalışmaların sonuçları arasındaki güç tüketimi açısından maksimum farklılık %7,3'tür. Bu çalışma sayısal çalışma ile karşılaştırıldığında maksimum sapma %8,4 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1. Mevcut çalışmanın literatür çalışması ile doğrulanması: (a) Güç tüketimi-Re ve b) hız-reaktör yüksekliği

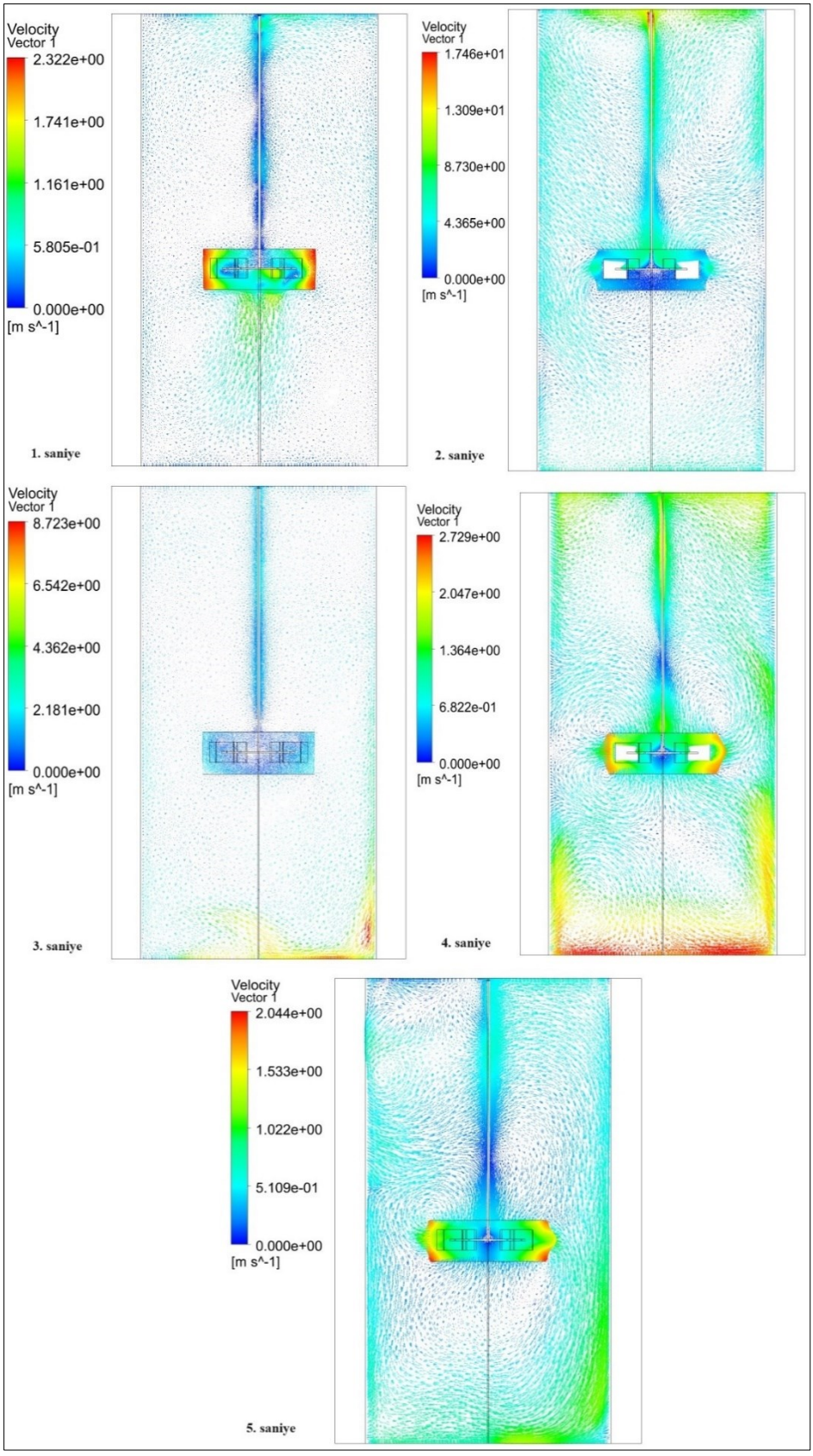
Aynı literatür çalışmasının farklı bir sonucu ile karşılaştırma yapılmış ve Şekil 4.1 (b)'de gösterilmiştir. Reaktör yüksekliği şekilde z eksenine göre alınmıştır. Buna göre r=0,055 m radyal konumdaki radyal hızlar karşılaştırılmıştır. Maksimum değişimin %4,5'i geçmediği görülmüştür. Literatür ile yapılan tüm bu karşılaştırmalar, mevcut sayısal çalışmanın sonuçlarının doğruluğunu göstermektedir.

4.2. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Silindir Tipi Reaktör Çalışmasının Sonuçları

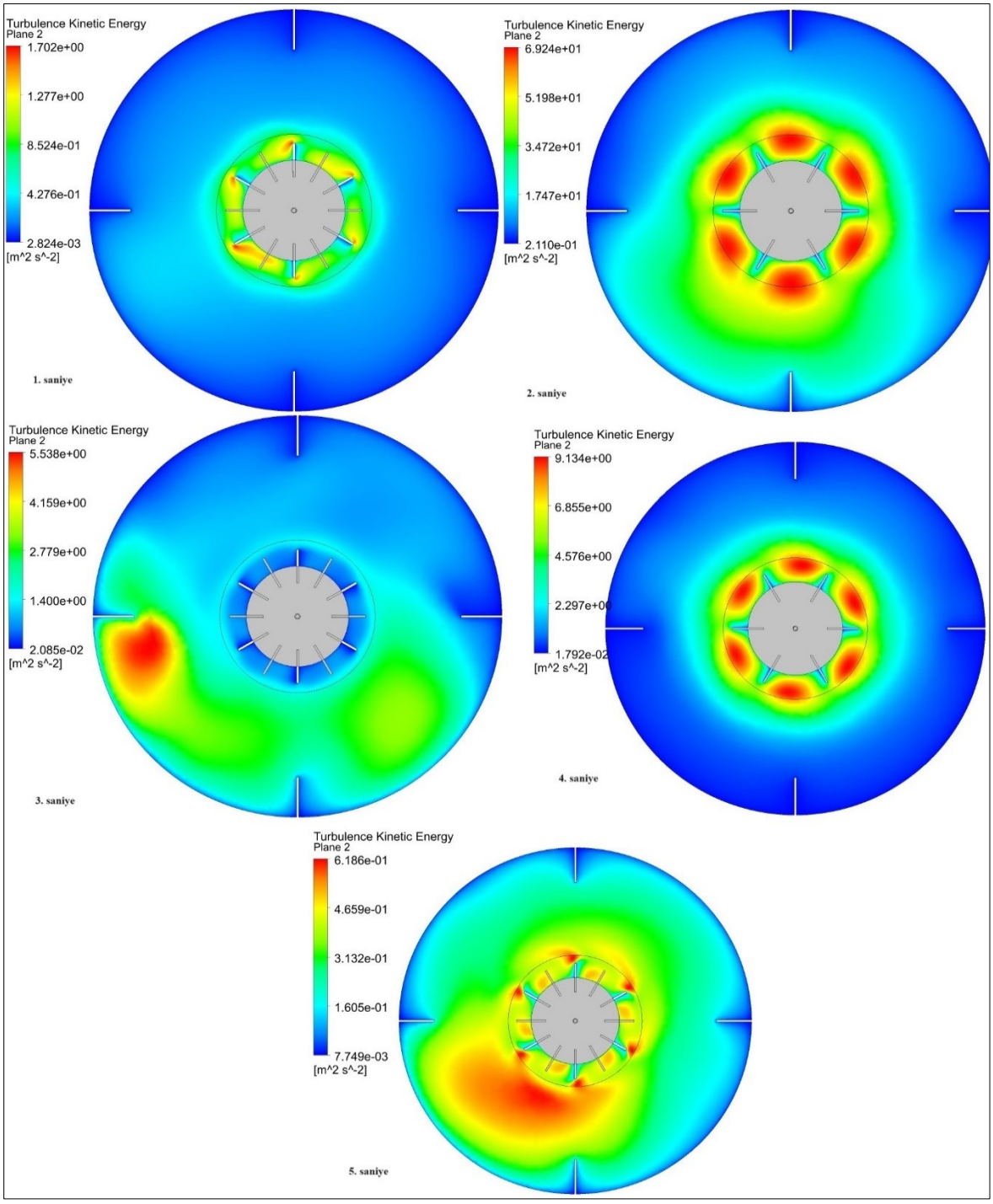
4.2.1. Sonuçların zamana göre kıyaslanması

Zamana bağlı gerçekleştirilen Rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasında birer saniyelik zaman aralıkları dikkate alınmıştır. Literatüre bakılıp elde eldilen sonuçlar karşılaştırıldığında beş saniyelik zaman adımının sonundaki sonuçlar dikkate alınmıştır. Silindir reaktör içerisindeki altı kanatlı Rushton karıştırıcısının 405 rpm açısal hızındaki birer saniyelik zaman aralıklarına ait hız dağılımları Şekil 4.2'de verilmiştir. Mevcut çalışmadaki birer saniyelik zaman aralıklarındaki z=0,196 m yani karıştırcının düşey eksene göre tam ortasındaki türbülans kinetik enerji konturları Şekil 4.3'de verilmiştir.

Kararsız rejimde yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde birer saniyelik zaman aralıklarında akışın halen gelişmekte olduğu görülmektedir. Bundan ötürü mevcut çalışmada beş saniyelik akış rejimlerini incelenmiştir.



Şekil 4.2. Altı-kanatlı karıştırıcının 405 rpm açısal hızındaki birer saniyelik değişiminindeki hız dağılımlarının yandan görünümdeki hız vektörleri



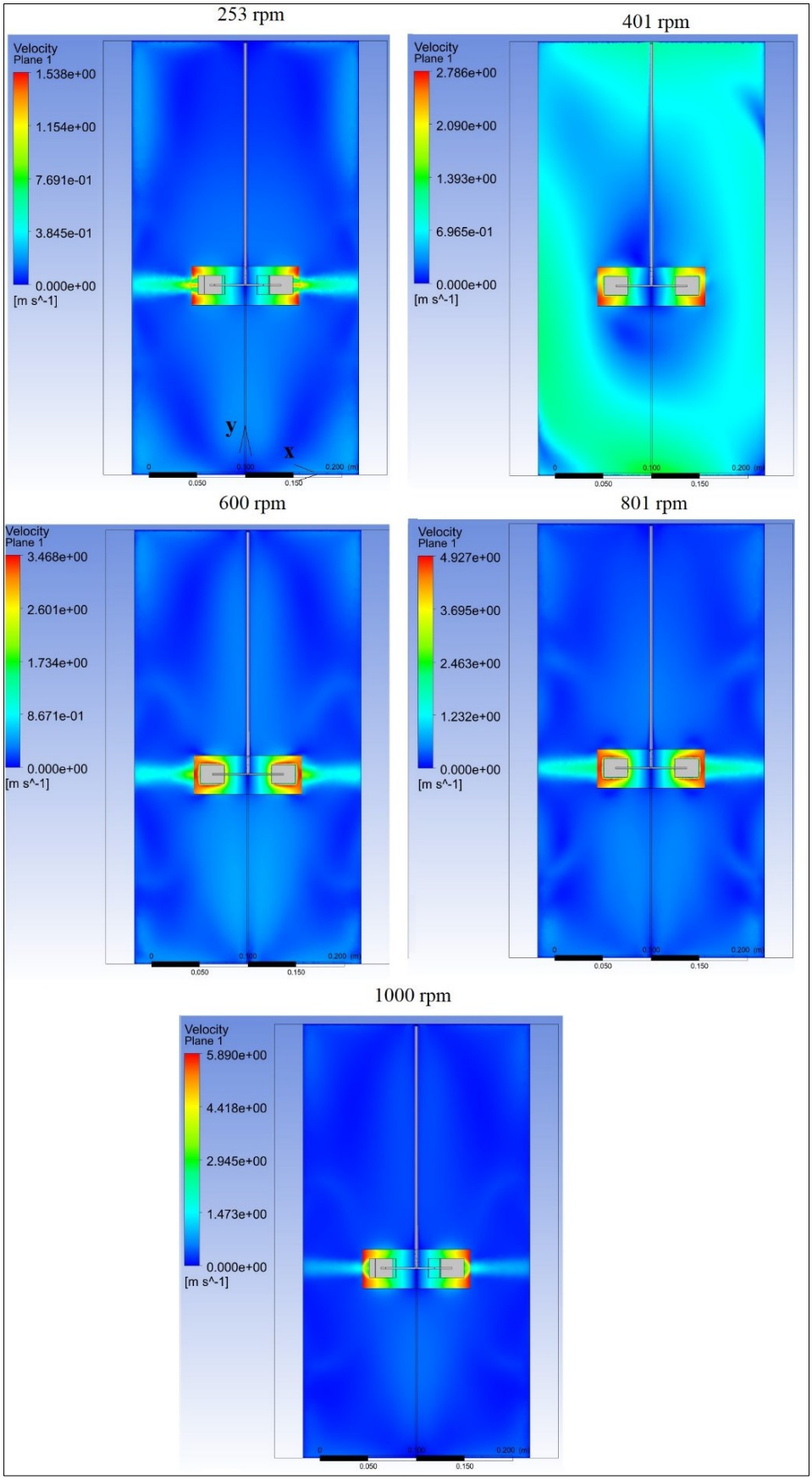
Şekil 4.3. Altı-kanatlı karıştırıcının 405 rpm açısal hızındaki z=0,196 m konumunda birer saniyelik değişiminindeki türbülans kinetik enerjisinin üstten görünümleri

4.2.2. Hız dağılımları

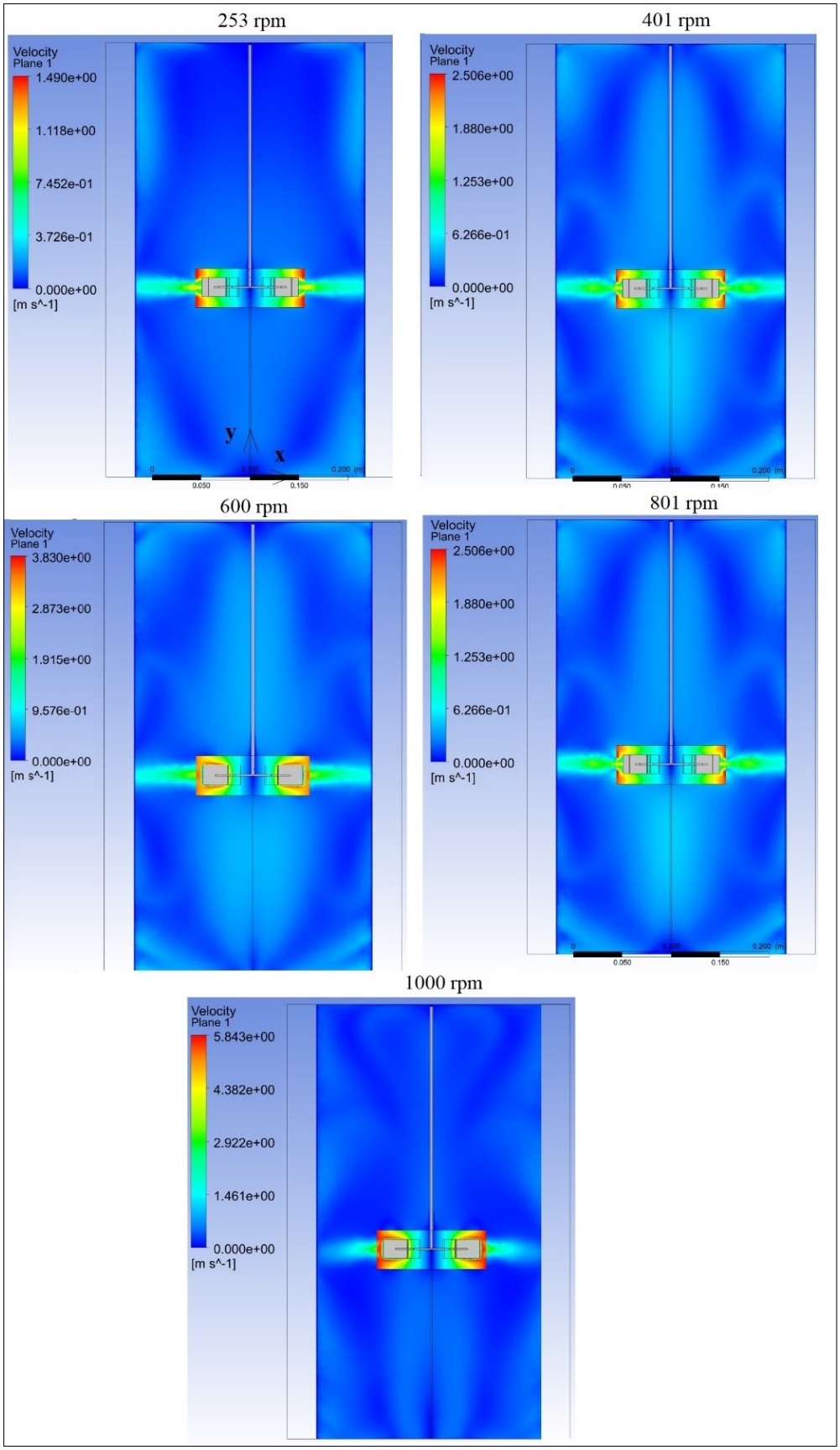
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de karıştırmalı tank reaktörünün dört ve altı-kanatlı karıştırıcıların beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının yandan görünüşleri ve grafikleri verilmiştir.

Akış vektörlerinin en önemli açıklaması, her iki karıştırıcı için de radyal jet karıştırıcı yatay düzleminden kayda değer bir açıyla ayrılması ve radyal jetin reaktör yan duvarının yakınında iki akıma bölünmesidir. Her akış karıştırıcının altında ve üstünde bir sirkülasyon döngüsü oluşturmaktadır. Karıştırıcı tarafından sağlanan enerji oluşan döngülerle ilişkilidir. Açısal hız artarken tüm karıştırıcılar için türbülans yoğunluğu da artmaktadır.

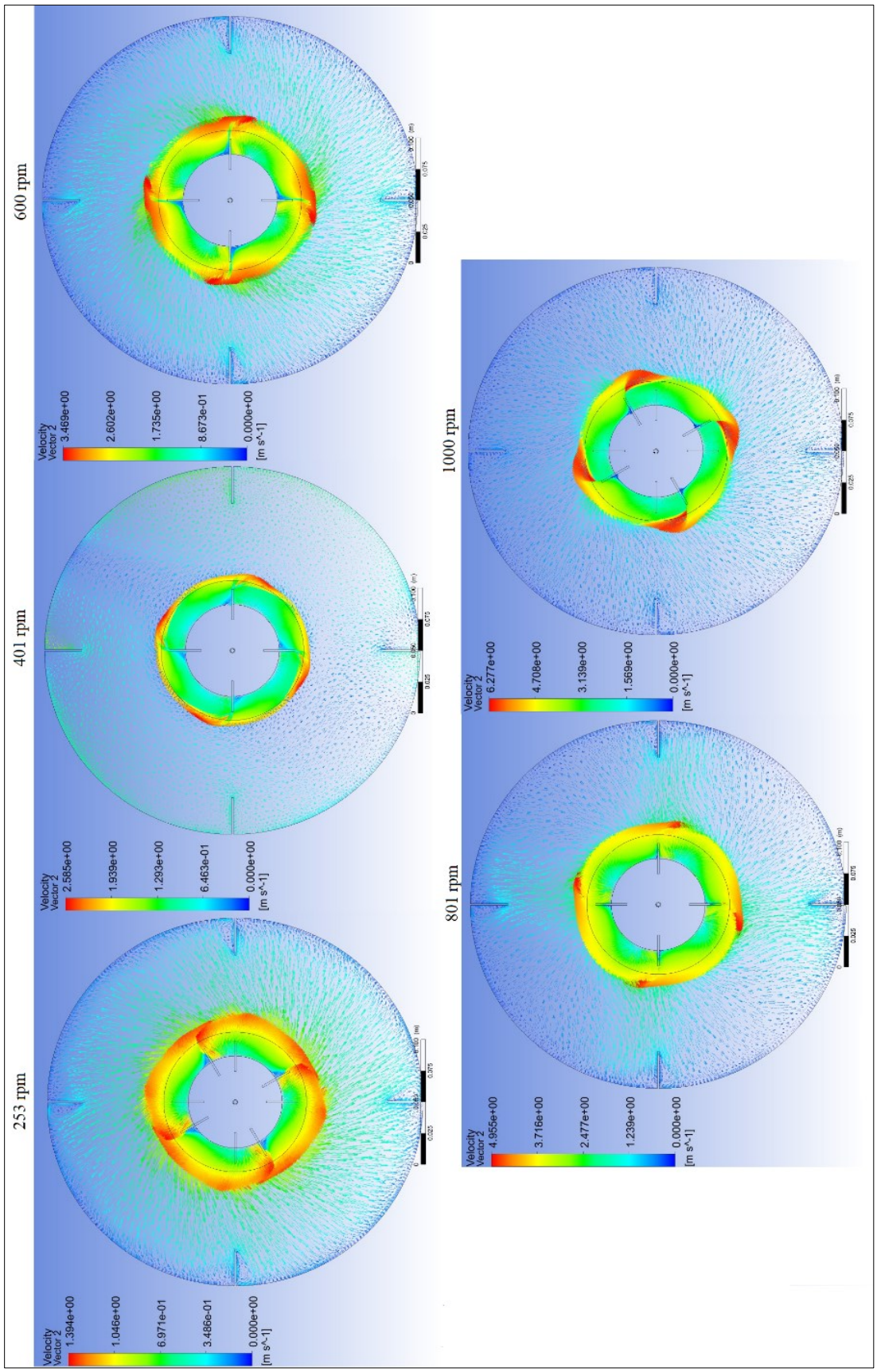
Sonuç olarak, 4-kanatlı karıştırıcının 253, 401 ve 1000 rpm için önden görünüm konturlarının en yüksek hız değerleri 6-kanatlı karıştırıcıya kıyasla daha yüksek iken 600 ve 801 rpm için 6-kanatlı karıştırıcının en yüksek hız değerleri daha yüksektir.



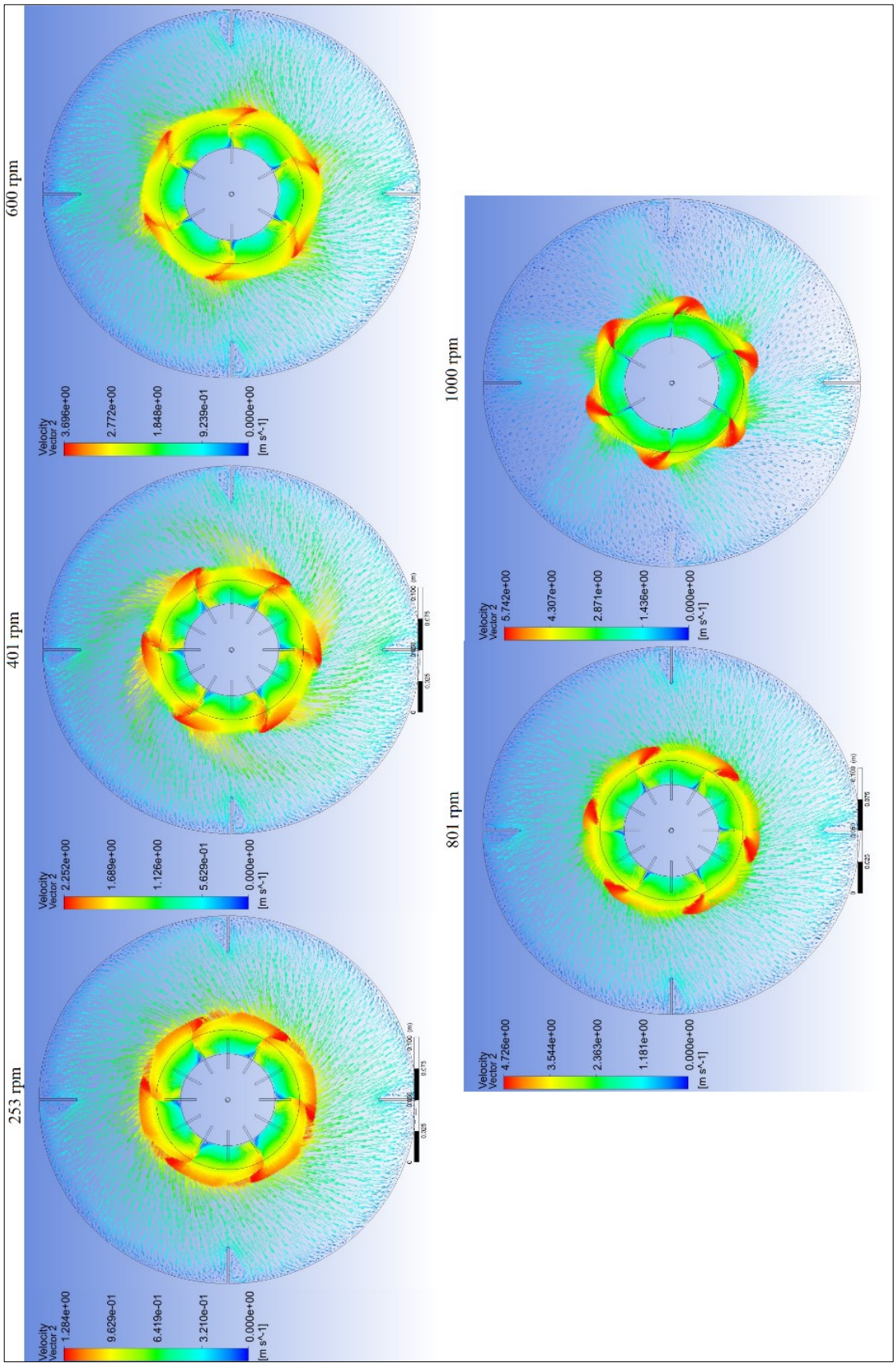
Şekil 4.4. Dört-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının yandan görünüşleri



Şekil 4.5. Altı-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının yandan görünüşleri



Şekil 4.6. Dört-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının z=0,196 m konumundaki üstten görünümdeki hız vektörleri



Şekil 4.7. Altı-kanatlı karıştırıcının beşinci saniyedeki 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının z=0,196 m konumundaki üstten görünümdeki hız vektörleri

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de karıştırmalı tank reaktörünün beşinci saniyedeki dört ve altı-kanatlı karıştırıcıların 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'lik açısal hız dağılımlarının z=0,196 m konumundaki üstten görünümde hız vektörleri görülmektedir.

Sonuçlar göstermektedir ki, hız vektörleri karıştırmalı tank reaktörünün yarıçapı boyunca azalmaktadır. Ayrıca, her iki tip karıştırıcı için de en yüksek hız karıştırıcı ucunda meydana gelmektedir. Sonuç olarak, üstten görünüm şeklinde hız vektörlerinin kıyaslaması, hız dağılımının yandan görünüm konturundaki gibidir. Bu kıyaslamadan çıkarım yapılacak olursa; çalışılan açısal hız aralığına göre düşük ve yüksek rpm değerlerinde 4-kanatlı karıştırıcıda, orta düzey rpm'lerde ise 6-kanatlı karıştırıcıda daha yüksek hız elde edilmektedir. Karıştırmalı tank reaktörünün yüksekliği ile birlikte karıştırıcıların altında ve üstünde radyal hız azalmaktadır. Çizelge 4.2'de verilen genel hız dağılımı kontrol hacminin içerisindeki beşinci saniyedeki en yüksek hızı ifade etmektedir. Sonuçlarda hızın yüksek olması akış içerisindeki türbülansı artırmakta ve karıştırma işlemini olumlu yönde etkilemektedir.

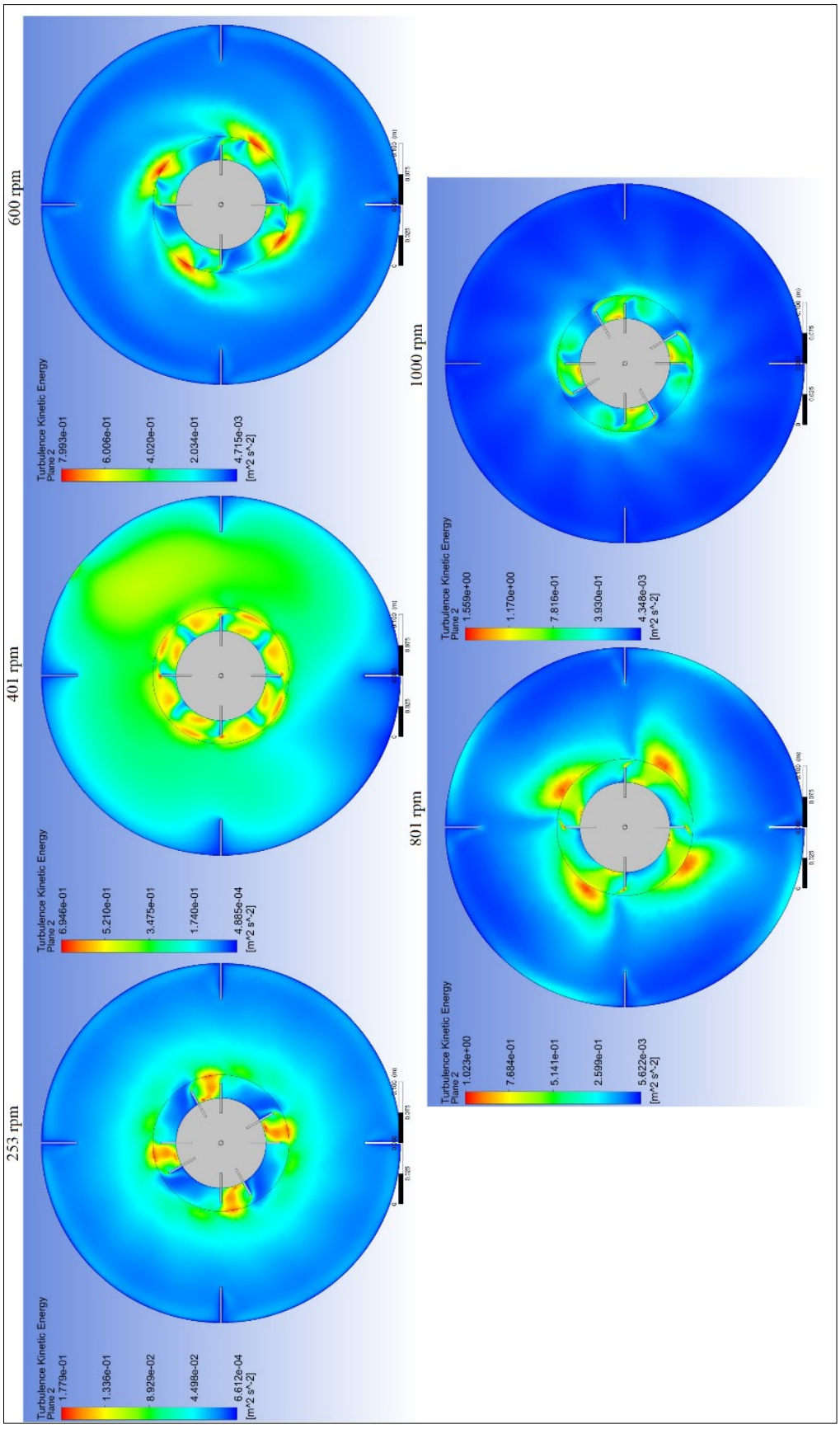
Çizelge 4.2. Beşinci saniyedeki en yüksek hız dağılımı (m/s)

	253 rpm	401 rpm	600 rpm	801 rpm	1000 rpm
4 kanatlı	1,54 m/s	2,79 m/s	3,47 m/s	4,93 m/s	5,89 m/s
6 kanatlı	1,49 m/s	2,51 m/s	3,83 m/s	4,90 m/s	5,84 m/s

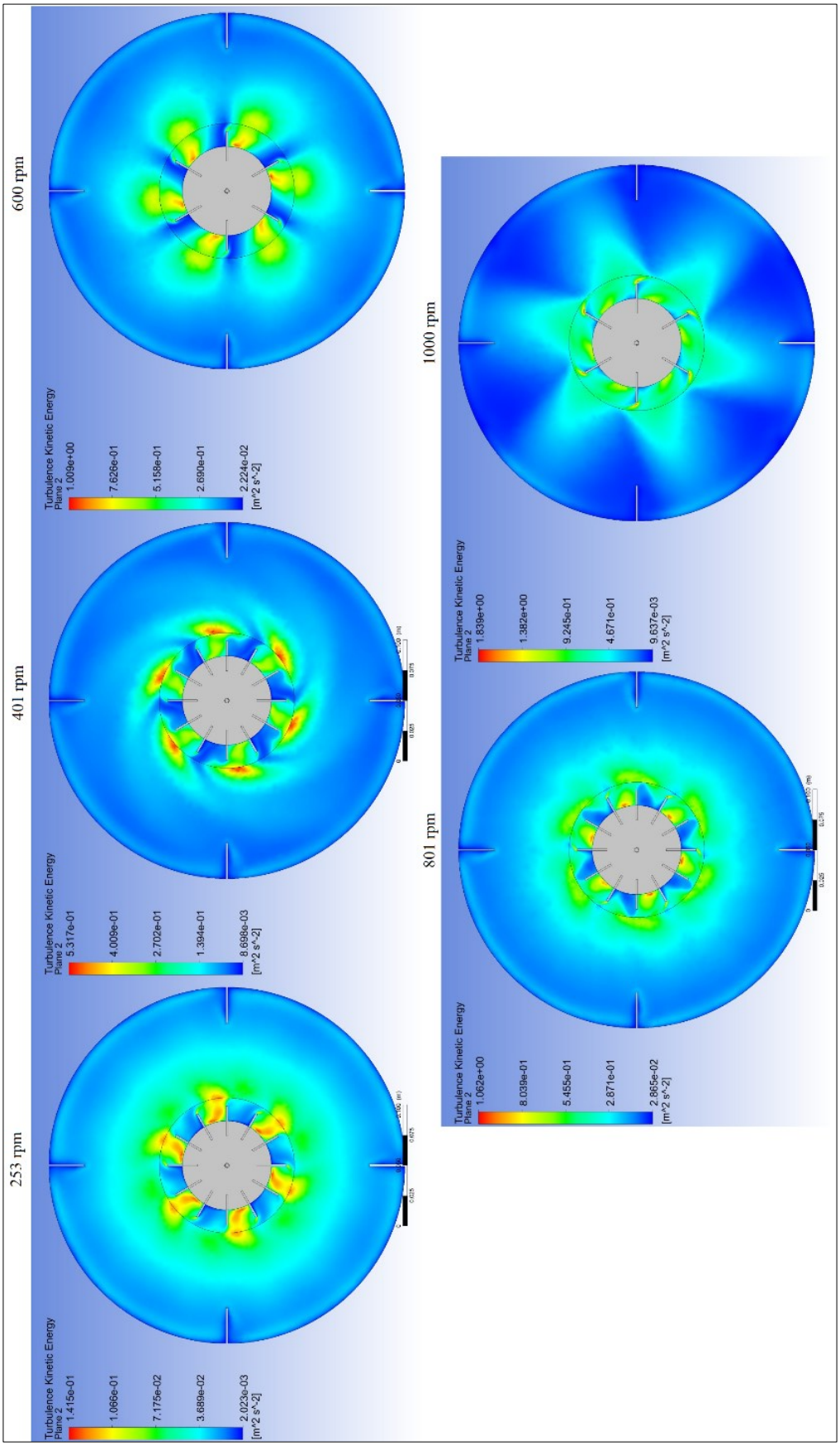
253, 401 ve 1000 rpm açısal hızlarındaki hem önden görünüm hem de z=0,196 m konumundaki üstten görünümlerinin hız büyüklük konturları incelendiğinde, 4-kanatlı karıştırıcının en yüksek hız değerlerinin 6-kanatlıya kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. 600 ve 801 rpm için ise 6-kanatlı karıştırıcının en yüksek hız değerlerinin 4-kanatlıya göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak 6-kanatlı karıştırıcı 4-kanatlıya kıyasla daha iyi bir karıştırma işlemi sunmaktadır.

4.2.3. Türbülans kinetik enerjisi (k)

Türbülans kinetik enerjisi (k) karıştırmalı tank reaktörünün karıştırma süresi ve türbülans parametreleri için önemli rol oynamaktadır. Türbülans kinetik enerjisini artırmak karıştırma süresi ve diğer türbülans parametrelerini iyileştirmektedir.



Şekil 4.8. Dört-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki türbülans kinetik enerjisi konturları



Şekil 4.9 Altı-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki türbülans kinetik enerjisi konturları

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'de her iki karıştırıcı için de beşinci saniyedeki karıştırmalı tank reaktörünün z=0,196 m konumunda radyal yöndeki türbülans kinetik enerjisi görülmektedir. 4-kanatlı karıştırıcı için 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'deki genel türbülans kinetik enerjileri sırasıyla 0,2459, 1,226, 0,9946, 2,029 ve 2,690 m^2/s^2'dir. 6-kanatlı Rushton karıştırıcısı için 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm'deki genel türbülans kinetik enerjileri ise sırasıyla 0,2375, 0,6350, 1,375, 2,013 ve 3,851 m^2/s^2'dir.

4-kanatlı karıştırıcı için açısal hız 253 rpm'den 401 rpm'e çıkarıldığında türbülans kinetik enerjisinde 6 kata yakın bir artış görülürken, 600 rpm'de azalma ve 801 ve 1000 rpm'de tekrar artış gösterdiği görülmüştür. Bu iki tip karıştırıcının açısal hızlarına göre k değerlerinden çıkarılıcak sonuç 253 ve 401 rpm için 4-kanatlı karıştırıcı, diğer rpm değerleri için ise 6-kanatlı karıştırıcıda yüksek olmaktadır. En yüksek k değeri ise 1000 rpm açısal hızında 6-kanatlı karıştırıcıdadır. Türbülans kinetik enerjisi diğer parametreler gibi karışımı etkileyen önemli bir faktördür. TKE'nin yüksek olması kontrol hacmi içerisindeki türbülansın arttığını ve daha iyi bir karıştırma olduğunu sonucu çıkarılmaktadır. Çizelge 4.3'de beşinci saniyedeki tankın 0,196 m yüksekliğinde yani karıştırcının tam merkezinde incelenen TKE sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.3. Beşinci saniyedeki H=0,196 m'deki türbülans kinetik enerji dağılımı

	253 rpm	401 rpm	600 rpm	801 rpm	1000 rpm
4 kanatlı	1,39 m^2/s^2	2,59 m^2/s^2	3,47 m^2/s^2	4,96 m^2/s^2	6,28 m^2/s^2
6 kanatlı	1,28 m^2/s^2	2,25 m^2/s^2	3,70 m^2/s^2	4,73 m^2/s^2	5,74 m^2/s^2

4.2.4. Türbülans kinetik enerjinin yayılma Hızı (ε)

Türbülans kinetik enerjinin yayılımı enerjinin eylemsizlik alt aralığı içinde büyükten küçüğe doğru arttığı hızı temsil etmektedir [69]. Sonuçlar türbülans kinetik enerjinin maksimum dağılım hızının değerlerinin karıştırıcı kanadının ucunda olduğunu göstermektedir. Simülasyon sonuçlarının görsel olarak verilmesinden ziyade sayısal veri olarak verilmesinin sebebi daha anlamlı olmasıdır. Karıştırıcı kanatları tarafından taranan alanın dışında türbülanslı girdap dağılım oranı çok düşük hale gelmektedir. Karıştırmalı tank reaktörünün z=0,196 m'deki türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm açısal hızlarında 4-kanatlı karıştırıcı için sırasıyla 52,86, 467,35, 1094,47,

1146,83 ve 2590,55 m^2/s^3'dür. 6-kanatlı Rushton karıştırıcısı için ise sırasıyla 36,46, 182,25, 663,47, 1270,65 ve 2553,67 m^2/s^3'dür.

Türbülans kinetik enerjinin maksimum yayılma hızının HAD simülasyon sonuçlarından 253 rpm'den 401 rpm'e çıkarılması durumunda 4-kanatlı karıştırıcı için 9 kata yakın bir artış olurken, 6-kanatlı karıştırıcıda ise 6 kata yakın bir artış görülmüştür. Buradan yapılacak çıkarım; açısal hız arttıkça türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı artmaktadır. Her iki karıştırıcı kıyaslandığında 4-kanatlı karıştırıcının tüm açısal hızlar için 6-kanatlı Rushton karıştırıcısına göre ε'ı daha yüksektir. Çizelge 6'da beşinci saniyedeki tankın 0,196 m yüksekliğinde yani karıştırcının tam merkezinde incelenen TKEYH sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.4. Beşinci saniyedeki H=0,196 m'deki türbülans kinetik enerji yayılma hızı dağılımı

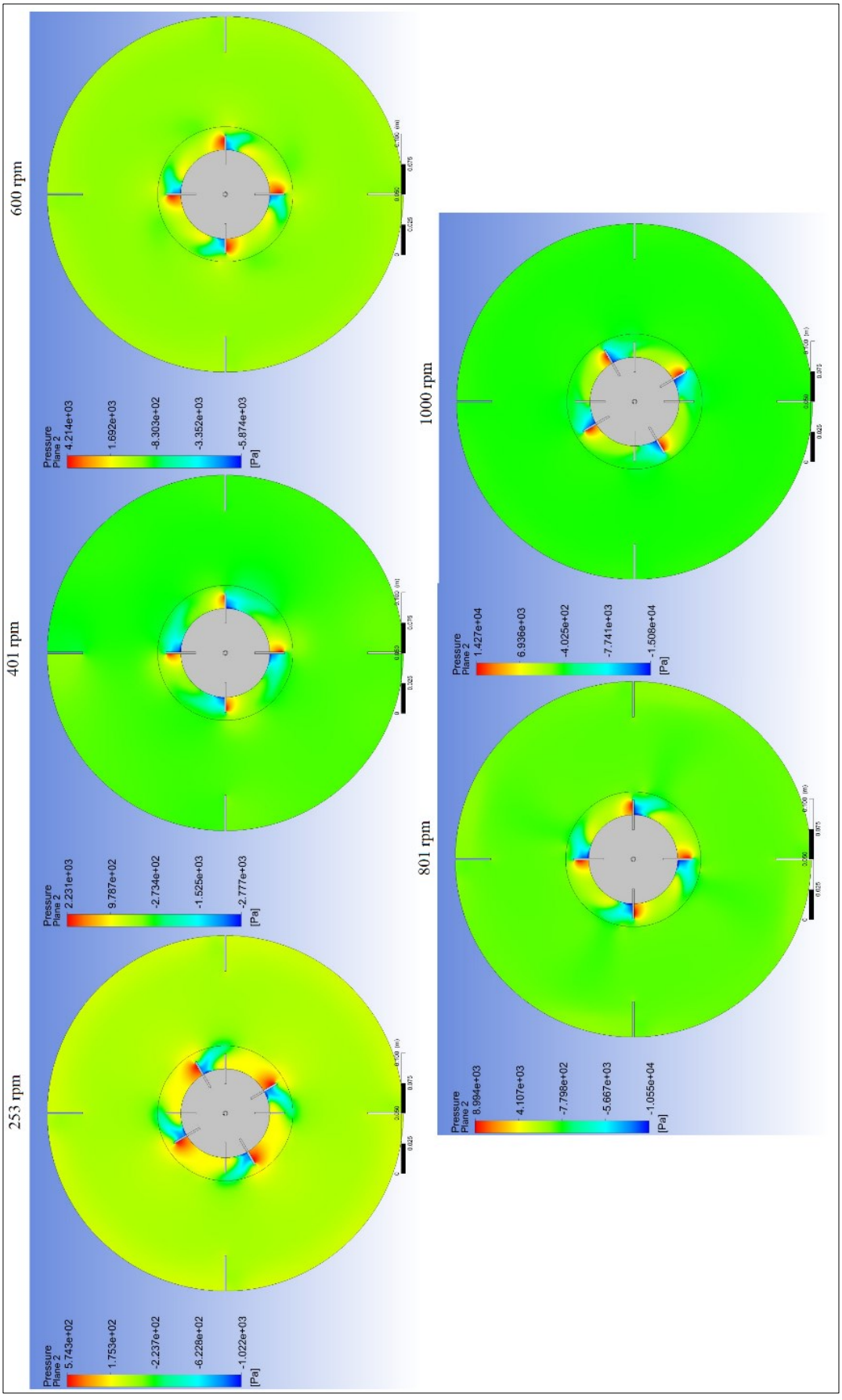
	253 rpm	401 rpm	600 rpm	801 rpm	1000 rpm
4 kanatlı	0,178 m^2/s^3	0,695 m^2/s^3	0,799 m^2/s^3	1,02 m^2/s^3	1,56 m^2/s^3
6 kanatlı	0,142 m^2/s^3	0,532 m^2/s^3	1,01 m^2/s^3	1,06 m^2/s^3	1,84 m^2/s^3

4.2.5. Basınç dağılımı

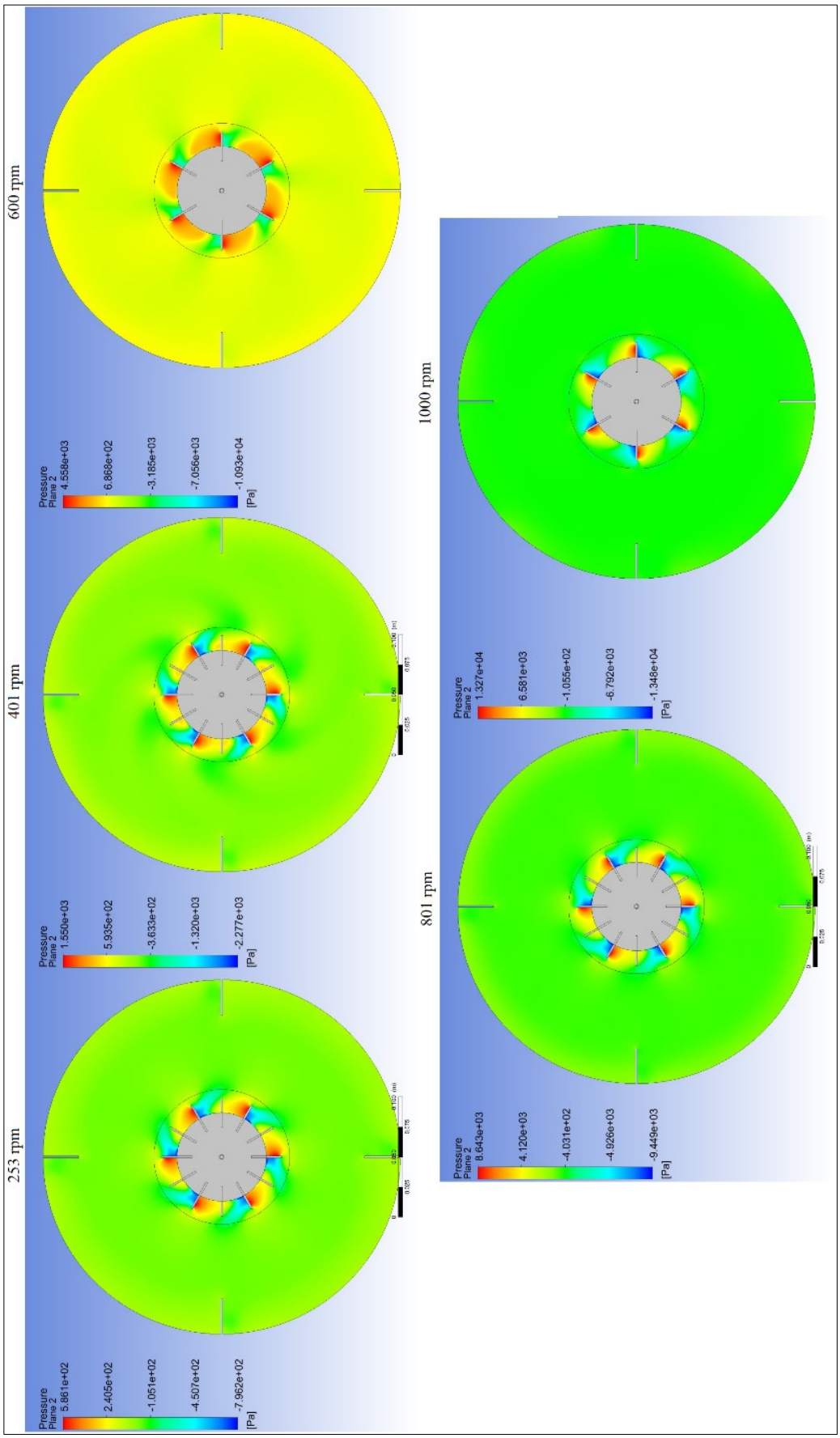
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da 4 ve 6-kanatlı karıştırıcıların beşinci saniyedeki sırasıyla 253, 600 ve 1000 rpm açısal hızlarındaki karıştırmalı reaktör tankındaki z=0,196 m konumunda radyal eksen boyunca olan basınç dağılımları verilmiştir.

Her iki karıştırıcı için de en yüksek negatif basınçların kanadın arka yüzeyinin uç kısmında ve en yüksek pozitif basınçların ise kanatların ön yüzeyinin uç kısmında olduğu görülmüştür.

Karıştırmalı reaktör tankındaki z=0,196 m konumundaki basınç dağılımına bakıldığında 4-kanatlı karıştırıcının pozitif basınç değerlerinin 600 rpm hariç tüm açısal hız değerlerinde 6-kanatlı karıştırıcıya kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4.10. Dört-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki basınç konturları



Şekil 4.11. Altı-kanatlı karıştırıcının z=0,196 m'deki beşinci saniyedeki basınç konturları

4.3. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Çalışmasının Sonuçları

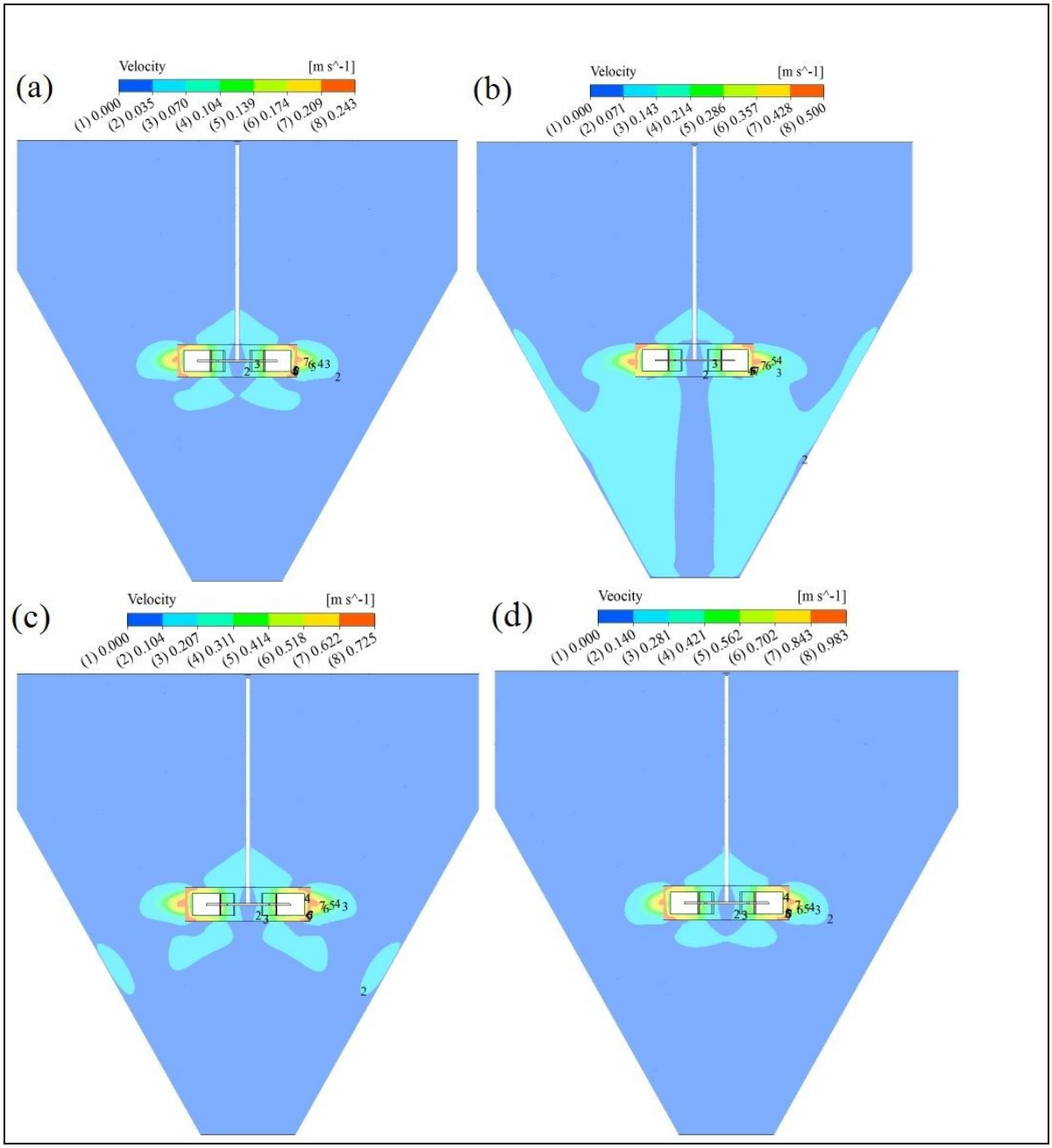
4.3.1. Hız dağılımları

Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasındaki karıştırıcının rpm değerlerinin arttırılması ve reaktör geometrisinin değiştirilmesi, akış düzenini değiştirebilir ve dolayısıyla karıştırma performansını artırabilir. Şekil 3.5'deki vorteks ve 90° tank için 50-350 rpm karıştırıcı hız aralığında simülasyonlar yapılmıştır. Eksenel yöndeki akışkan hareketinin çürütücüdeki genel karışımını etkileyen baskın faktör olduğu görülmüştür. Dolayısıyla analizlerin sonuçlarını sunmak için orta dikey yüzeydeki eksenel hız seçilmiştir. Simülasyonlar Şekil 3.5'teki gibi z-r düzleminde gösterilmektedir. Vorteks ve Silindir tanklar için sayısal analizlerden elde edilen hız eğrileri sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de gösterilmektedir.

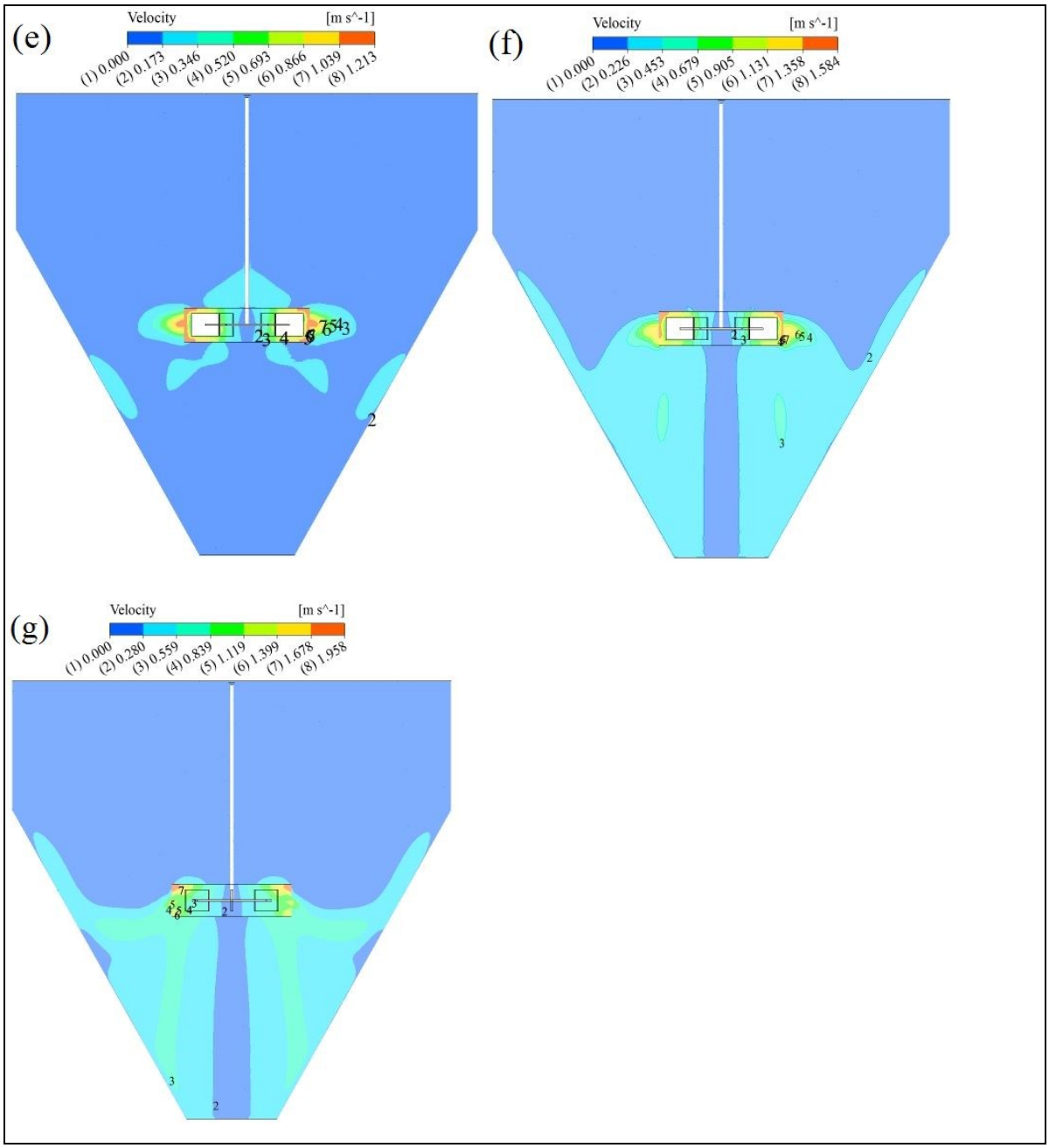
Şekil 4.10'da 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm açısal hızları için sırasıyla 0,243, 0,500, 0,725, 0,983, 1,213, 1,584 ve 1,958 m/s olan maksimum akış hız değerleri gösterilmiştir. 90°'lik tank için hız eğrileri Şekil 4.11'de verilmiştir. Maksimum akış hızı değerleri, Şekil 4.11'de "8" ile etiketlenen konturdan görülebileceği gibi, aynı karıştırıcı hız aralığı için 0,253, 0,520, 0,808, 1,064, 1,342, 1,456 ve 1,828 m/s'dir.

Karıştırıcının açısal hızının 50-250 rpm aralığında 90° tank için elde edilen maksimum yerel hız değerlerinin daha yüksek olduğu, daha yüksek çark hız değerlerinde ise vorteks tank reaktöründe maksimum yerel hız değerlerinin daha yüksek olduğu açıktır. Bu sonuçlar, karıştırıcı açısal hızının arttırılmasının ve reaktör geometrisinin değiştirilmesinin akış düzenini, dolayısıyla karıştırma performansını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. Reaktörün tabanına ve tepesine yakın yerlerdeki akışkanın hızı daha düşük olsa bile muhtemelen bu bölgelerdeki akışkanın çarktan daha az itici kuvvet alması ve dolayısıyla neredeyse durgun haldedir. Buna göre, durgun bölgeler kolaylıkla oluşmakta ve bu da yerel bölgelerde zayıf bir karışım etkisine neden olmaktadır. Reaktör duvarlarının ve tabanının yakınında düşük düzeyde karıştırma meydana gelmiştir. Bu durum mevcut bölgelerde karıştırmanın yetersiz olduğu anlamına gelmektedir. Bu tür yetersiz karıştırma, önemli ölü alanların ve uygun olmayan akış düzeninin bir sonucu olarak biyogaz üretimini azaltabilir. Tüm durumlarda, akış sirkülasyonları karıştırıcının altında ve üstünde net bir

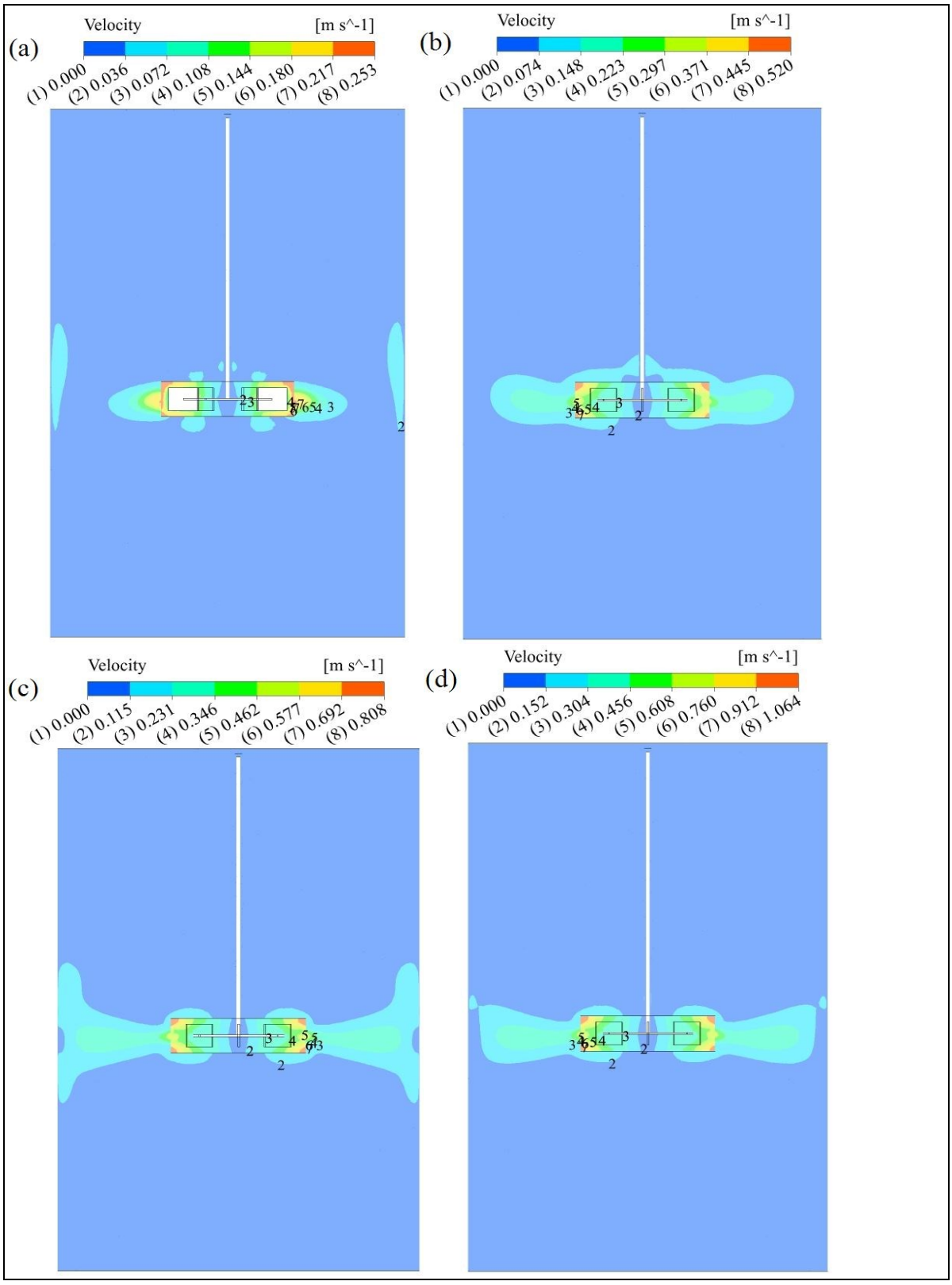
şekilde gözlemlenmiştir. Bu durum da diğer araştırmacılar tarafından bildirilen deneysel ve sayısal simülasyon sonuçlarıyla tutarlıdır [37, 70, 71].



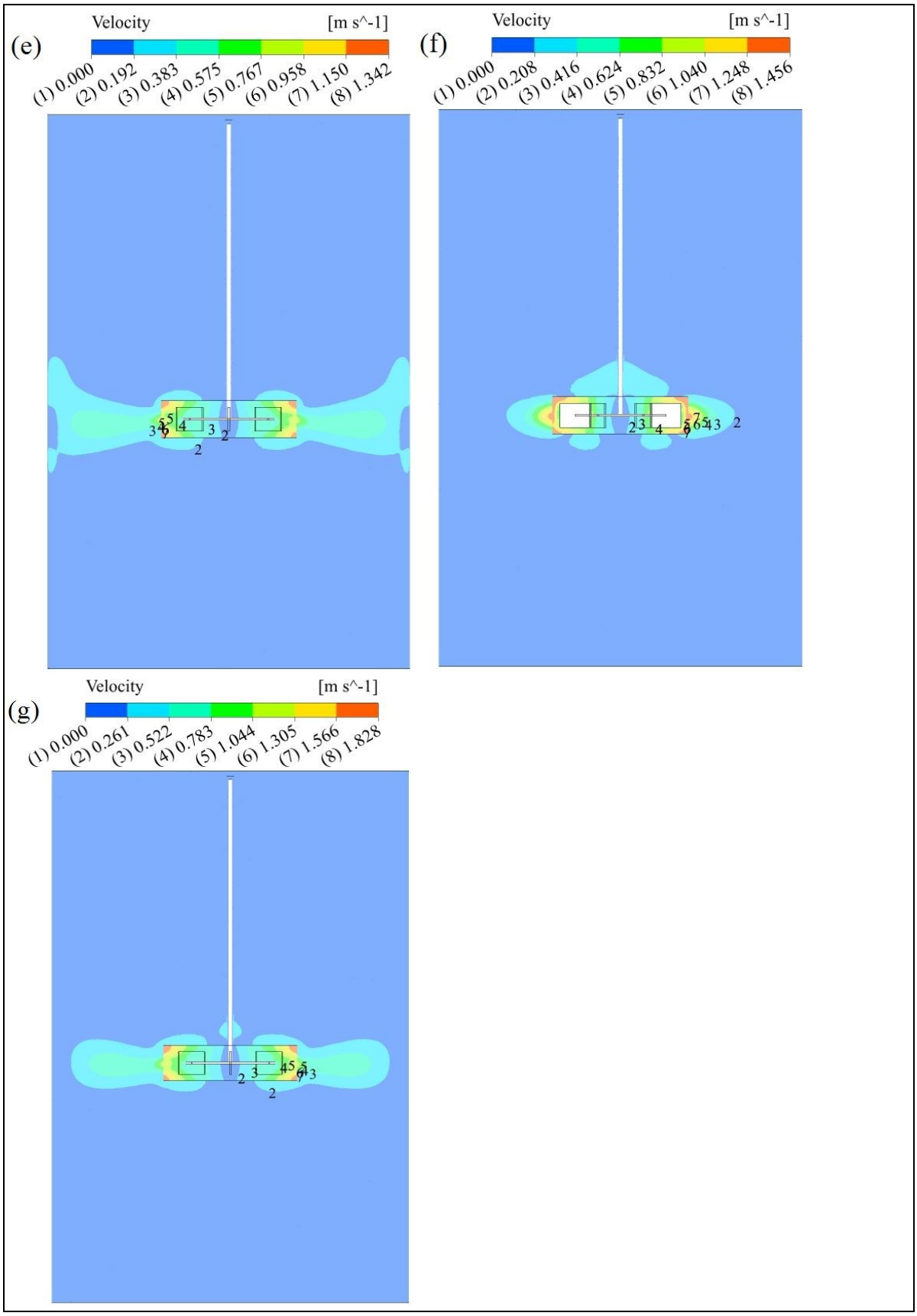
Şekil 4.12. Voteks (60°) reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm



Şekil 4.12. (devam) Voteks (60°) reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm



Şekil 4.13. 90° (silindir) reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm

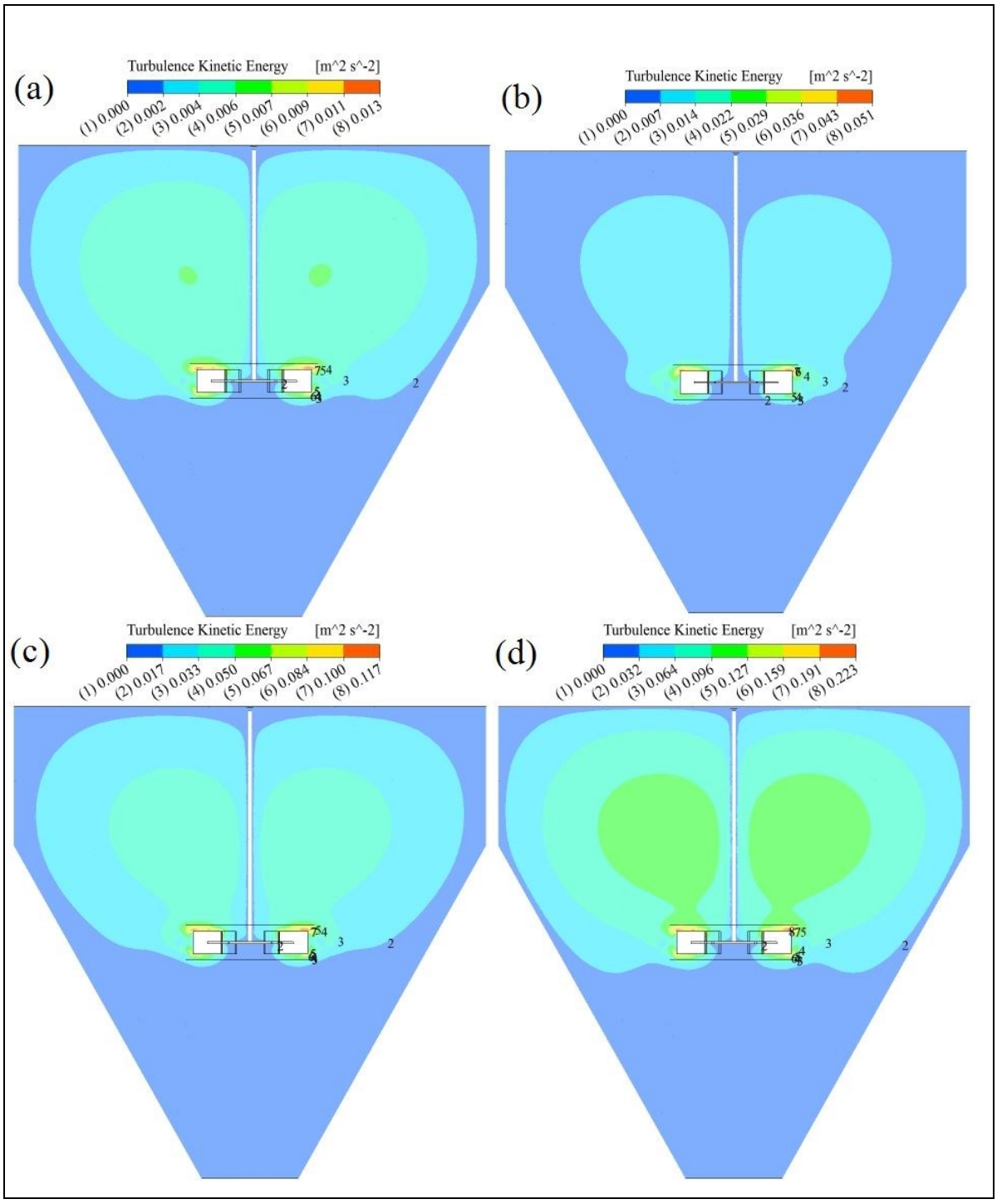


Şekil 4.13. (devam) 90° (silindir) reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm

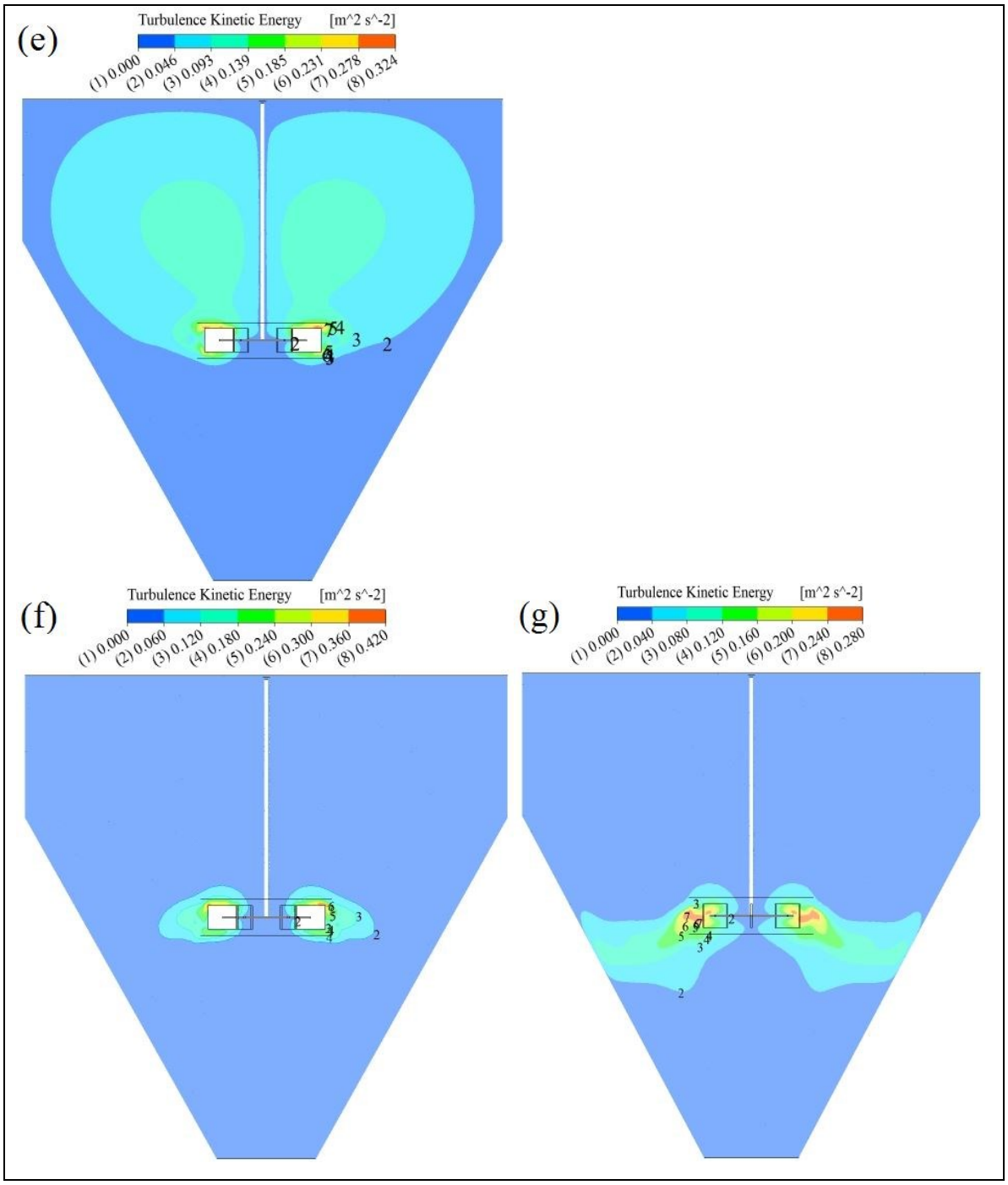
Etkili karıştırma biyolojik proses kalitesi açısından herhangi bir çürütme tesisinin hayati bir olgusudur. Bu bağlamda reaktör içindeki ölü bölge hacminin de dikkate alınması gerekli olabilir. Vesvikar ve Al-Dahnan'ın [37] tanımına göre, reaktördeki hız büyüklükleri maksimum hızın %5'inden daha az olan lokasyonların durgun olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca başka bir literatür çalışmasına göre [27] akış hızının 0,001 m/s'den az olduğu lokasyonların da ölü bölge olarak tanımlanabileceği ifade edilmiştir. Bu çalışmada reaktördeki ölü bölge hacimleri her iki literatür tanımına göre hesaplanmıştır. 90° ve 60° eğimli reaktör tankları için, her iki literatür tanımına göre en düşük ölü bölge hacmi sırasıyla 150 rpm ve 350 rpm'de meydana gelir. Bu ölü bölge hacim değerleri Vesvikar ve Al-Dahnan'ın [37] tanımına göre hesaplandığında 90° ve vorteks tankları için sırasıyla 0,0162 ve $6{,}6525\times10^{-3}$ m^3'tür. Ölçüm ölü bölge hacmi dikkate alınarak değerlendirildiğinde vorteks tankında tank karıştırma performansı açısından üstün gibi görünse de yüksek karıştırma oranlarından mikro yapıların olumsuz etkilendiği göz önünde bulundurulmalıdır [70, 72].

4.3.2. Türbülans kinetik enerjisi (k)

Türbülans kinetik enerjisi (TKE) tanımındaki fiziksel terimler göz önüne alındığında, türbülans etkisi altında çürütücü tankındaki mikrobiyolojik yapıların birbirleriyle etkileşiminin bir işaretidir. Akış düzeni incelenirken karıştırma verimliliğine doğrudan etkisi olan TKE de dikkate alınmaktadır. Şekil 4.14'dee 50-350 rpm açısal hızda vorteks reaktörünün z-r düzlemindeki TKE hatlarını göstermektedir. Tüm devir değerleri için en yüksek TKE değerleri 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm hızlarında sırasıyla 0,013, 0,051, 0,117, 0,223, 0,324, 0,420 ve 0,280 $m^2 \cdot s^{-2}$ olan çark uçlarında gözlenmiştir. 350 rpm dışındaki tüm açısal hız değerlerinde TKE, çark bölgesinde ve çoğunlukla tankın üst kısımlarında etkili bir değere sahiptir. Benzer şekilde Shen ve ark. [44] yaptıkları çalışmada TKE'deki artışın çürütücü tankının duvarları ve alt kısımlarına göre çark bölgesinde daha hızlı gerçekleştiğini belirtmişlerdir.



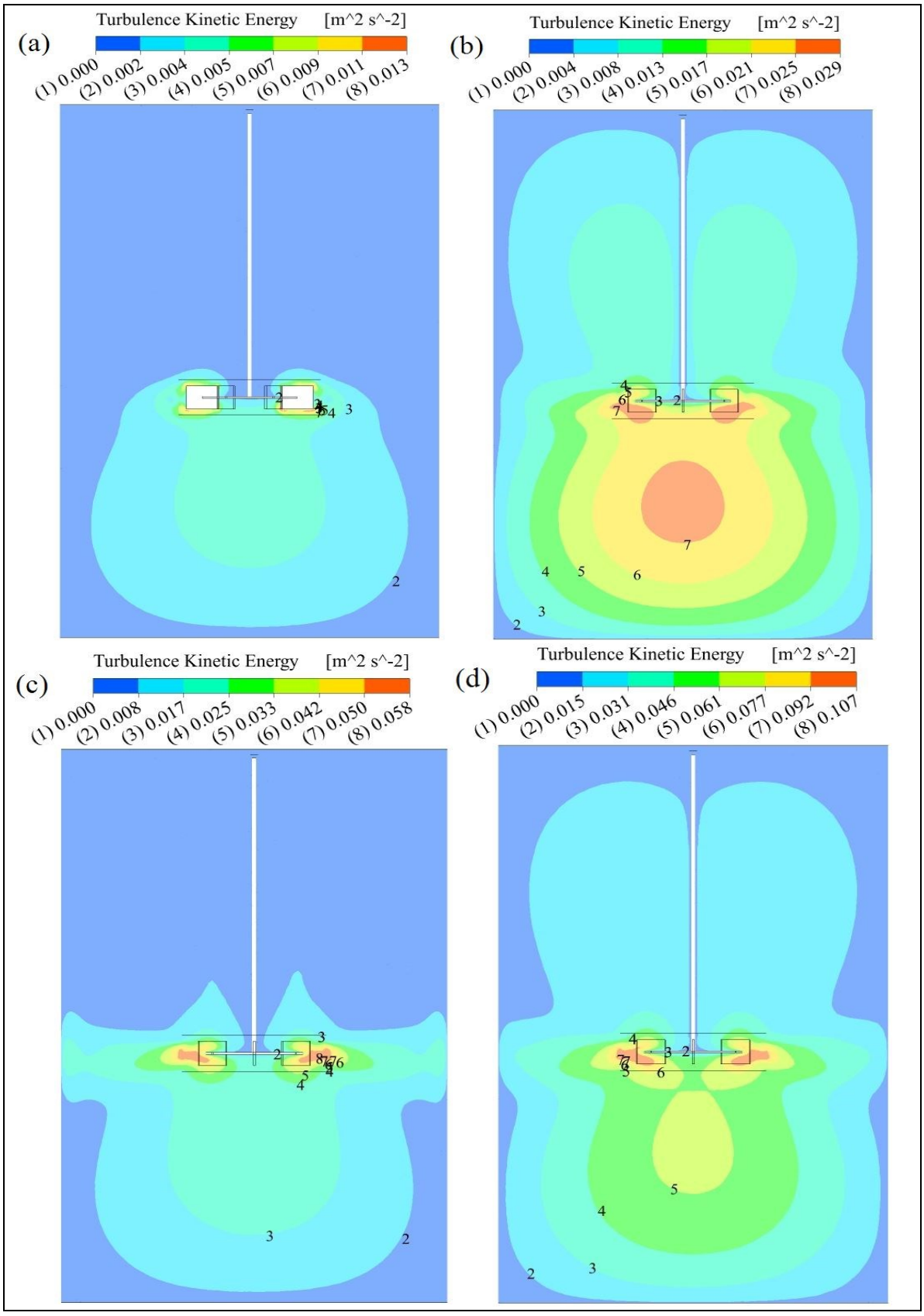
Şekil 4.14. Yan görünümde vorteks tankının türbülans kinetik enerji konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm



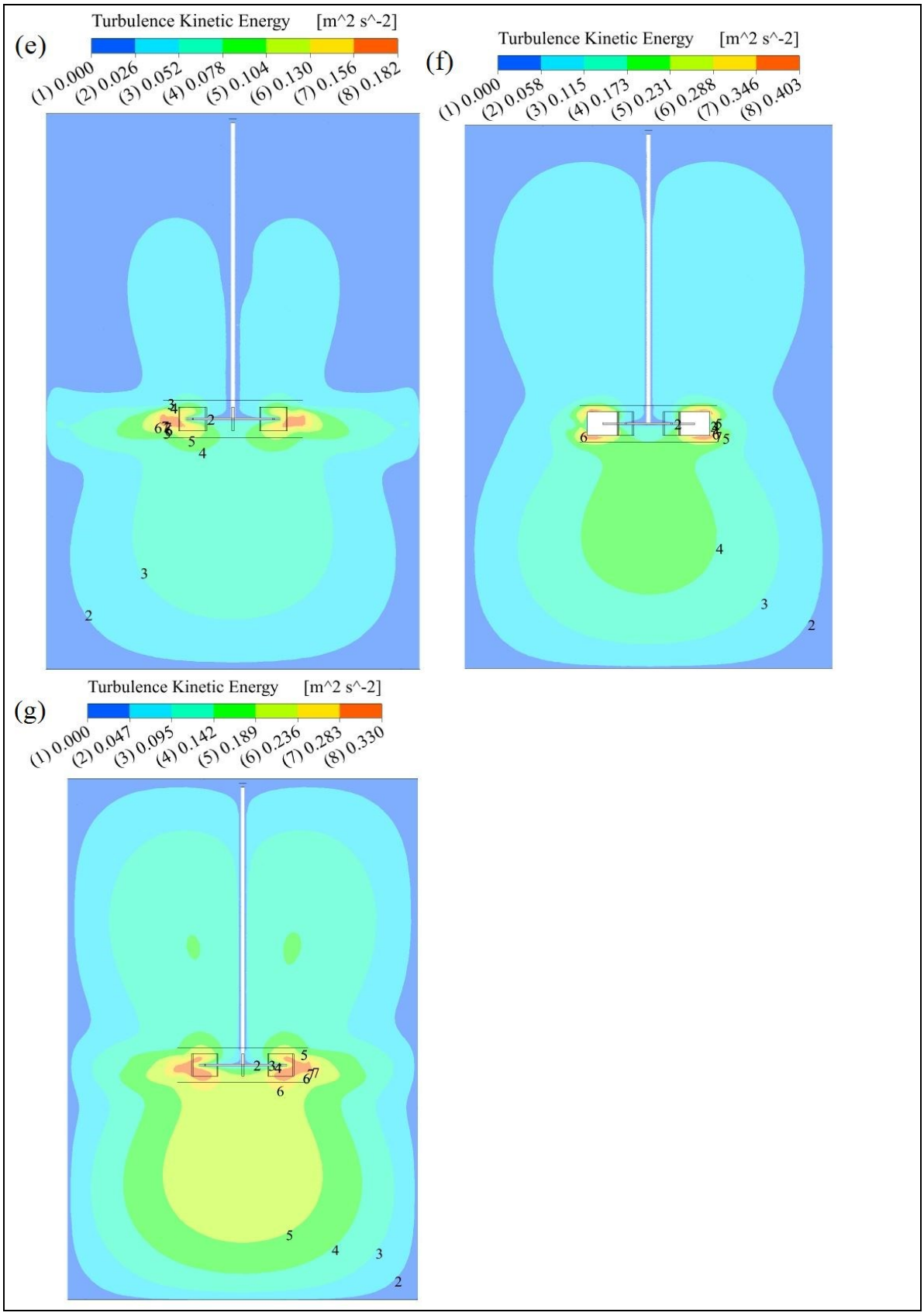
Şekil 4.14. (devam) Yan görünümde vorteks tankının türbülans kinetik enerji konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm

Ayrıca maksimum TKE değeri 50-300 rpm aralığında artarak 300 rpm açısal hızındaki maksimum değerine ulaşmış, ancak 350 rpm'de azalmıştır. Şekil 4.15'de 90°'lik tank için TKE kesiti göstermektedir. "8" etiketli konturlardan görülebileceği gibi en yüksek TKE değerleri 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm için sırasıyla 0,013, 0,029, 0,058, 0,107, 0,182, 0,403 ve 0,330'a eşittir. Vorteks tankına benzer şekilde maksimum TKE değeri

vorteks tankında 300 rpm açısal hıza kadar artmaktadır, ancak 350 rpm'de düşüş meydana gelmektedir. Şekil 4.13'den gözlemlenen diğer bir sonuç ise türbülans etkilerinin tank boyunca mevcut olduğu ve tüm hız değerleri için benzer kontur modeline sahip olduğudur. Her iki tank tipine ait sonuçlar karşılaştırıldığında maksimum TKE değerinin 350 rpm'deki TKE değeri dışında vorteks tankında genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek türbülanslı kinetik enerji ile verimli karıştırma arasındaki ilişki iyi bilinen bir gerçektir. TKE'nin karışım süresi açısından hayati bir rolü olsa da karıştırıcıların hasarları da dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.15. Yan görünümde silindir tankının türbülans kinetik enerji konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm



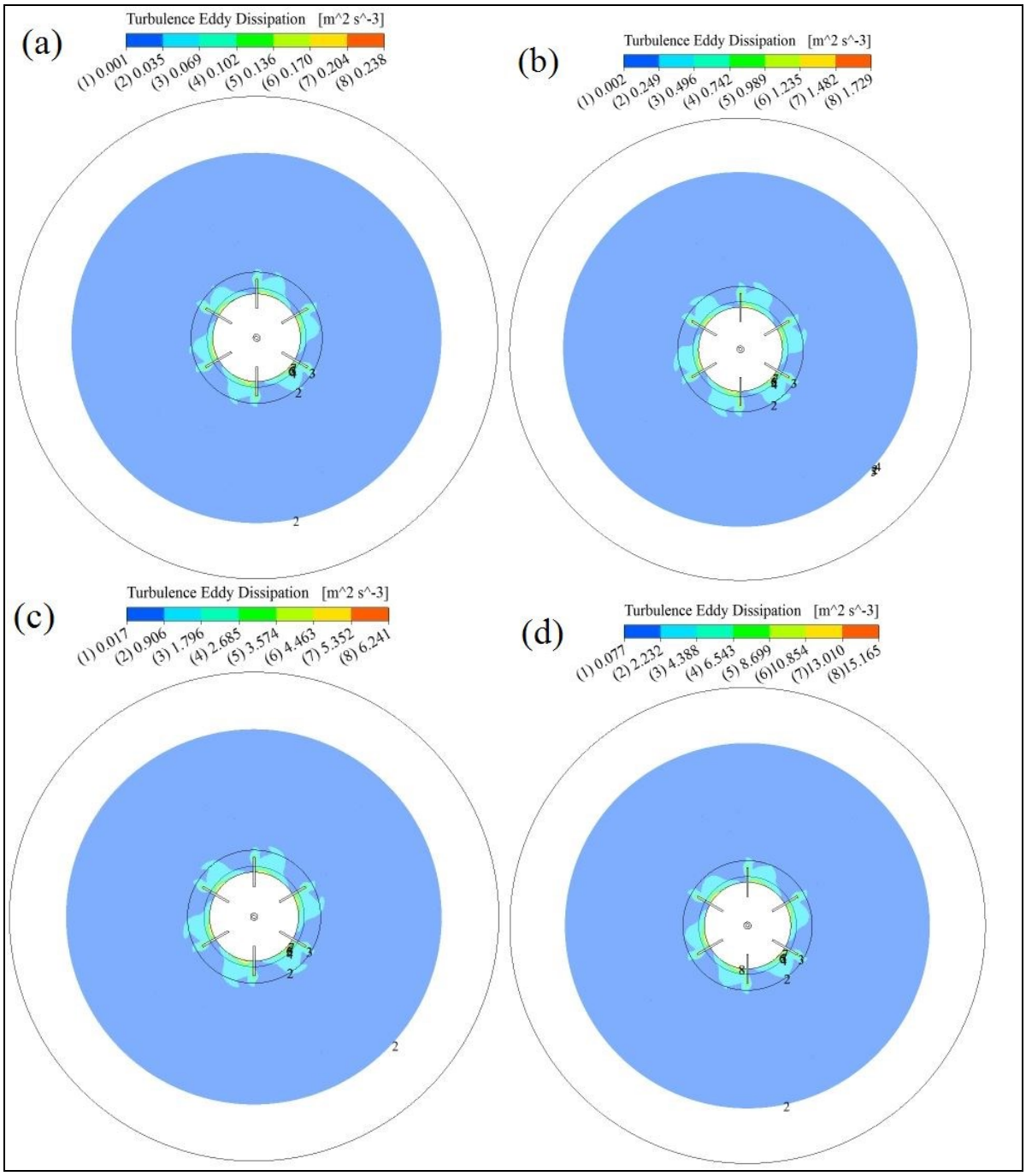
Şekil 4.15. (devam) Yan görünümde silindir tankının türbülans kinetik enerji konturları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm

4.3.3. Türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı (ε)

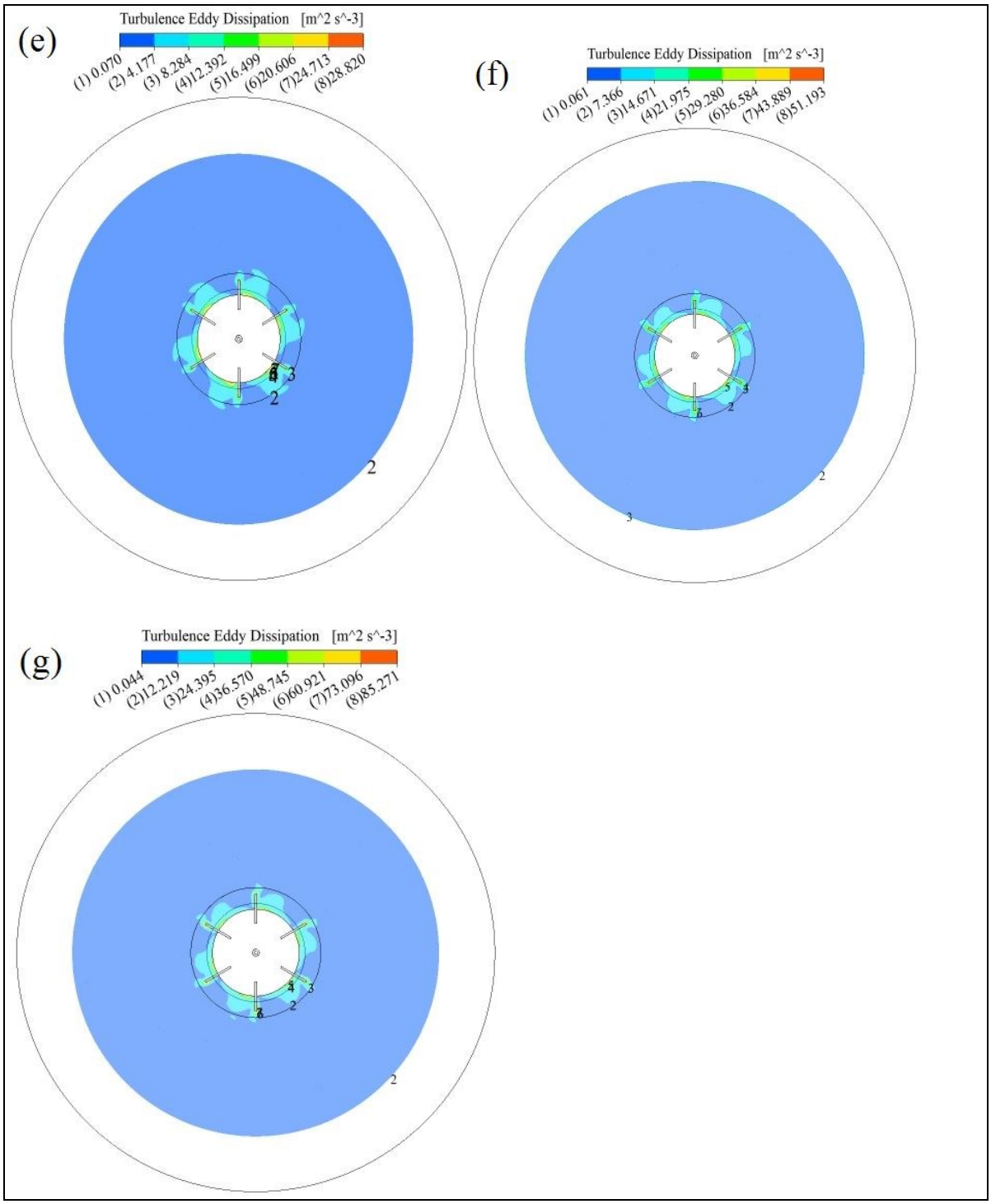
Vorteks reaktörünün z-θ düzlemindeki türbülans kinetik enerjisinin yayılma hızı (TKEYH) dağılımı Şekil 4.16'da göstermektedir. 50-350 rpm açısal hız aralığı için maksimum TKEYH değerleri sırasıyla 0,238, 1,729, 6,241, 15,165, 28,820, 51,193 ve 85,271 $m^2 \cdot s^{-3}$'e eşittir. Ayrıca TKEYH oranının aralıklı da olsa çark bölgesinde daha etkili olduğu görülmektedir. 90°'lik tank için TKEYH konturları 50-350 rpm hız aralığında Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.15'deki etiketli kontur numarasından görüldüğü gibi, maksimum TKEYH değerleri 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm için sırasıyla 0,228, 1,711, 6,323, 14,324, 25,486, 42,230 ve 74,932'dir. Tüm durumlarda iki ortak durum gözlenmiştir.

1. Maksimum TKEYH değerleri karıştırıcı kanat uçlarında oluşmuştur.
2. TKEYH karıştırıcı bölgesinin dışında dağılımı çok düşük hale gelmiştir.

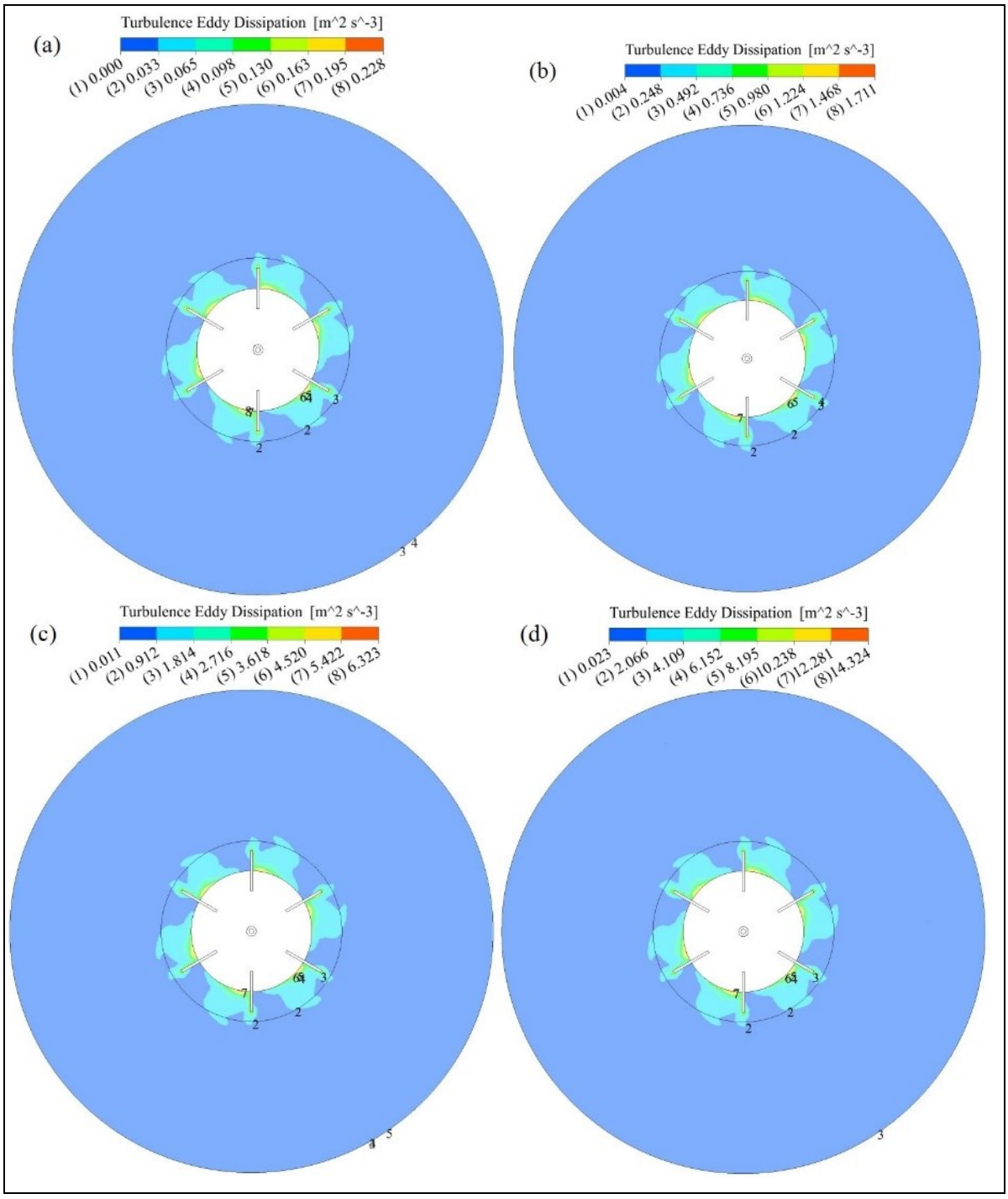
Özellikle ilk sonuç Vilardi ve Verdone [71]'nin gözlemlediği duruma benzerdir. 60° ve 90° tanktaki maksimum TKEYH değerleri karşılaştırıldığında 60° tank için elde edilen sonuçlar daha da gelişmiştir. Daha yüksek bir TKEYH değeri, fiziksel açıdan enerjinin viskoz alt aralıkta en sonunda termal iç enerjiye dönüşeceği anlamına gelir [72].



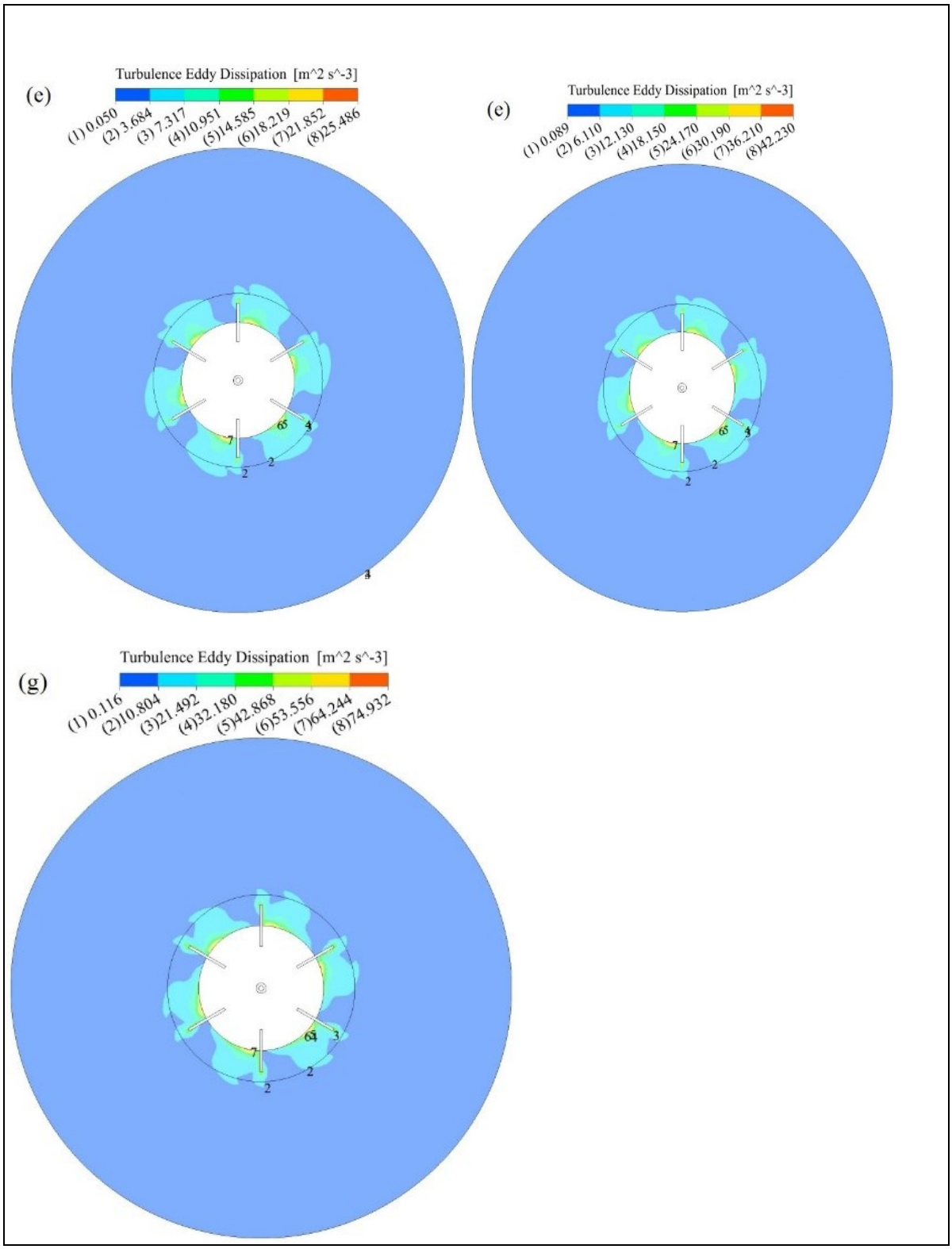
Şekil 4.16. Üstten görünümde vorteks reaktörün türbülanslı girdap dağılım hatları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm, ve (g) 350 rpm



Şekil 4.16. (devam) Üstten görünümde vorteks reaktörün türbülanslı girdap dağılım hatları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm, ve (g) 350 rpm



Şekil 4.17. Üstten görünümde silindir reaktörün türbülanslı girdap dağılım hatları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm



Şekil 4.17. (devam) Üstten görünümde silindir reaktörün türbülanslı girdap dağılım hatları: (a) 50 rpm, (b) 100 rpm, (c) 150 rpm, (d) 200 rpm, (e) 250 rpm, (f) 300 rpm ve (g) 350 rpm

4.4. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Matkaplı Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Çalışmasının Sonuçları

4.4.1. Hız dağılımları

Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasındaki karıştırıcı yapısının değişmesi ve açısal hız değerlerinin arttırılmasıyla karıştırma performansını iyileştirebilir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.8'deki vorteks tankının içerisinde hem Ruston hem de Matkaplı Rushton karıştırıcıları için 25-100 rpm karıştırıcı hız aralığında simülasyonlar yapılmıştır. Eksenel yöndeki sıvı hareketi çürütücünün genel karışımını etkileyen baskın faktördür, bu nedenle analizlerin sonuçlarını sunmak için orta dikey yüzeydeki eksenel hız seçilir.

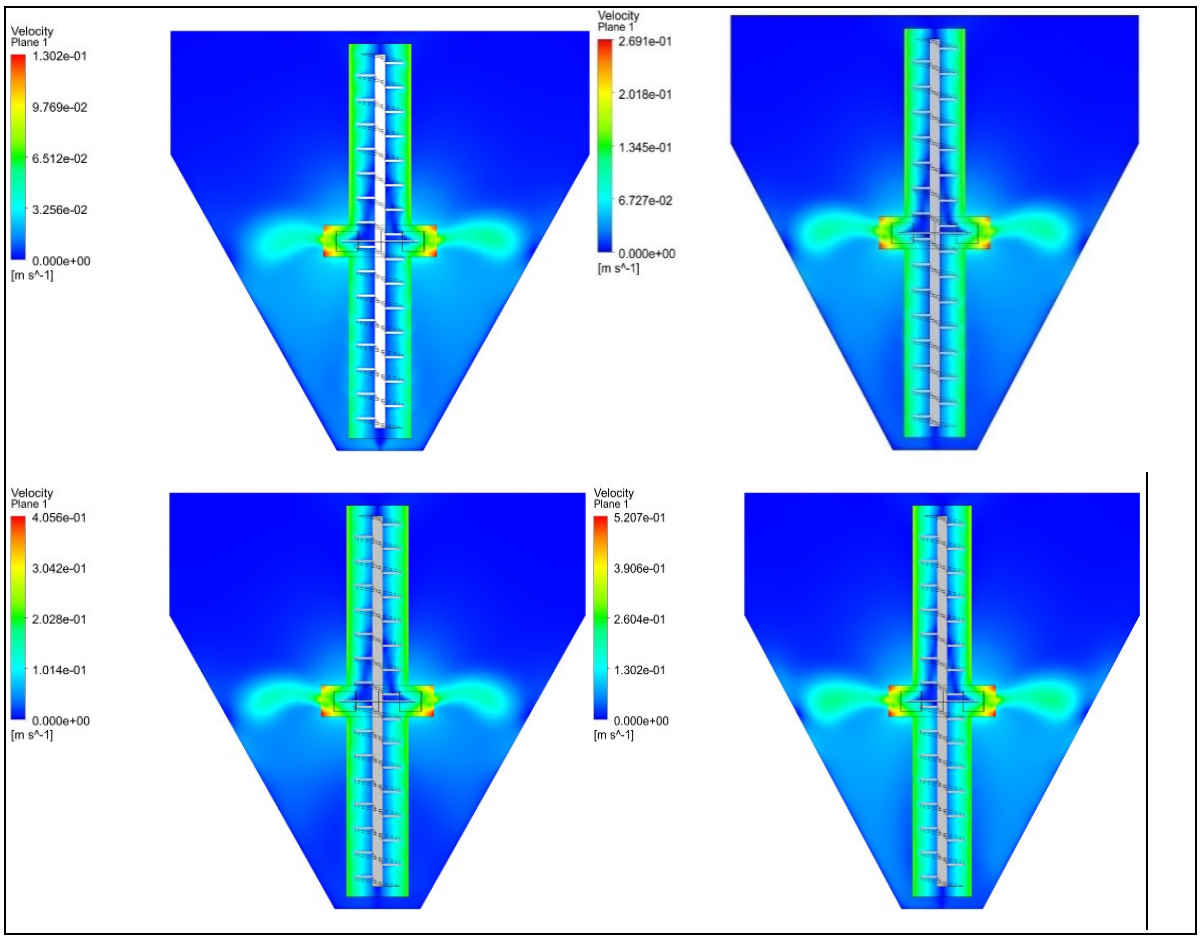
Matkaplı Rushton ve Ruston karıştırıcıları için sayısal analizlerden elde edilen hız konturları sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de z-r düzleminde gösterilmektedir. Şekil 31'de 25, 50, 75 ve 100 rpm açısal hızları için sırasıyla 0,130, 0,269, 0,405 ve 0,502 m/s olan maksimum akış hız değerleri gösterilmiştir.

Şekil 4.19'da 25, 50, 75 ve 100 rpm açısal hızları için sırasıyla 0,124, 0,268, 0,378 ve 0,499 m/s olan maksimum akış hız değerleri gösterilmiştir.

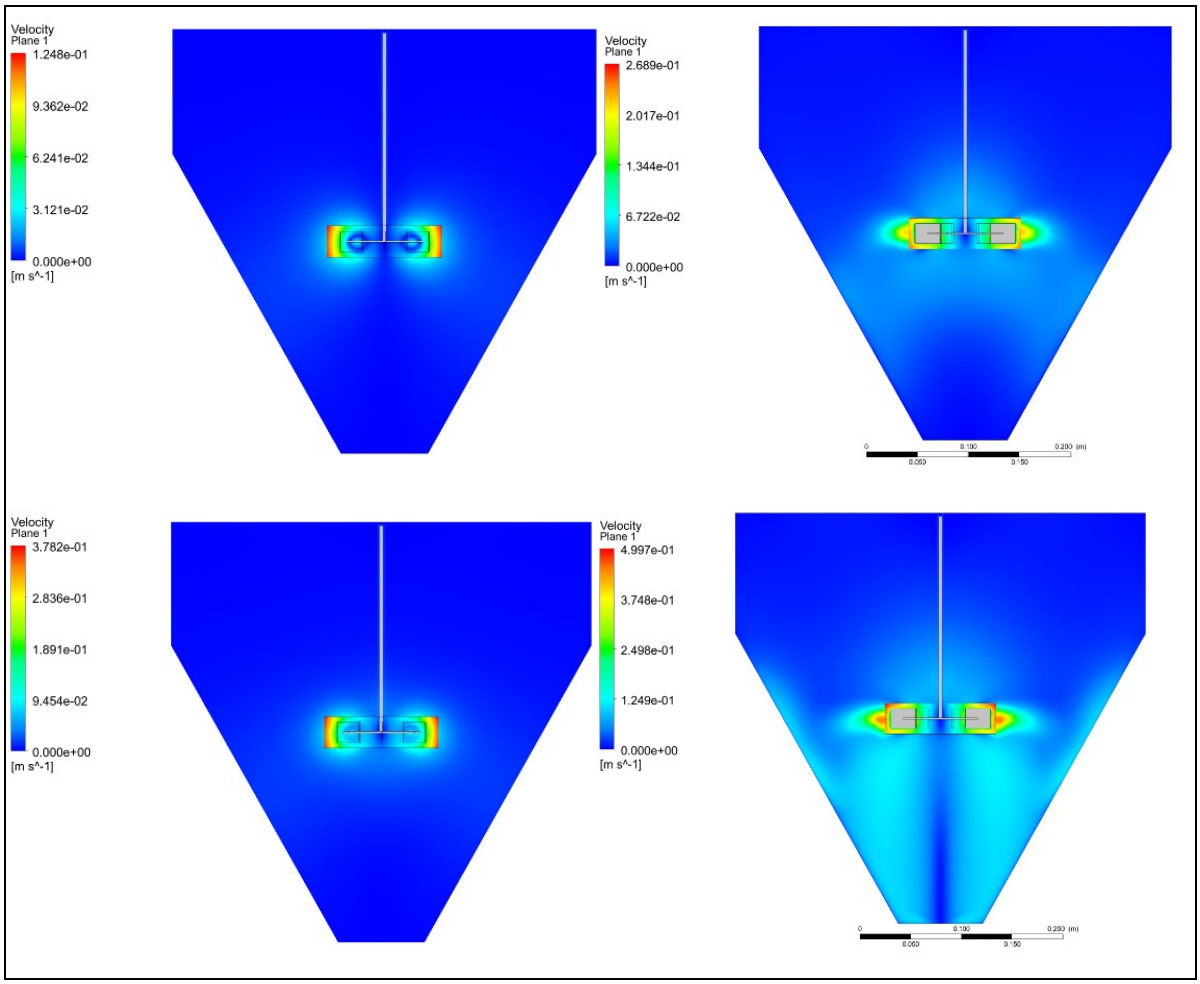
Vorteks tankındaki Matkaplı Rushton karıştırıcısının vorteks tankındaki altı kanatlı Rushton karıştırıcısına kıyasla tüm açısal hızlarında maksimum yerel hız değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca karıştırıcı kanatlarına yakın akışkan, literatür çalışmasında olduğu gibi özellikle kanatların kenarlarında daha yüksek hız değerlerine sahiptir [40].

Bu çalışmada etkili karıştırma için Wu [27] ve Vesvikar ve Al-Dahhan [37] tanımlarına göre, reaktördeki ölü bölge hacimleri hesaplanmıştır. Vorteks tankında Matkaplı Rushton karıştırıcısı için her iki literatür tanımına göre en düşük ölü bölge hacmi sırasıyla 25, 50, 75 ve 100 rpm açısal hızları için de Rushton karıştırıcısından düşüktür. Bu ölü bölge hacim değerleri Vesvikar ve Al-Dahnan tanımına göre hesaplandığında açısal hızlar için sırasıyla 0,01995, 0,021922, 0,021963 ve 0,01957 m^3'tür. Ölçme ölü bölge hacmi dikkate alınarak değerlendirildiğinde 100 rpm açısal hızındaki karıştırma performansı açısından üstün gibi

görünse de yüksek karıştırma oranlarının mikroyapıları olumsuz etkilediği göz önünde bulundurulmalıdır [70].



Şekil 4.18. Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm



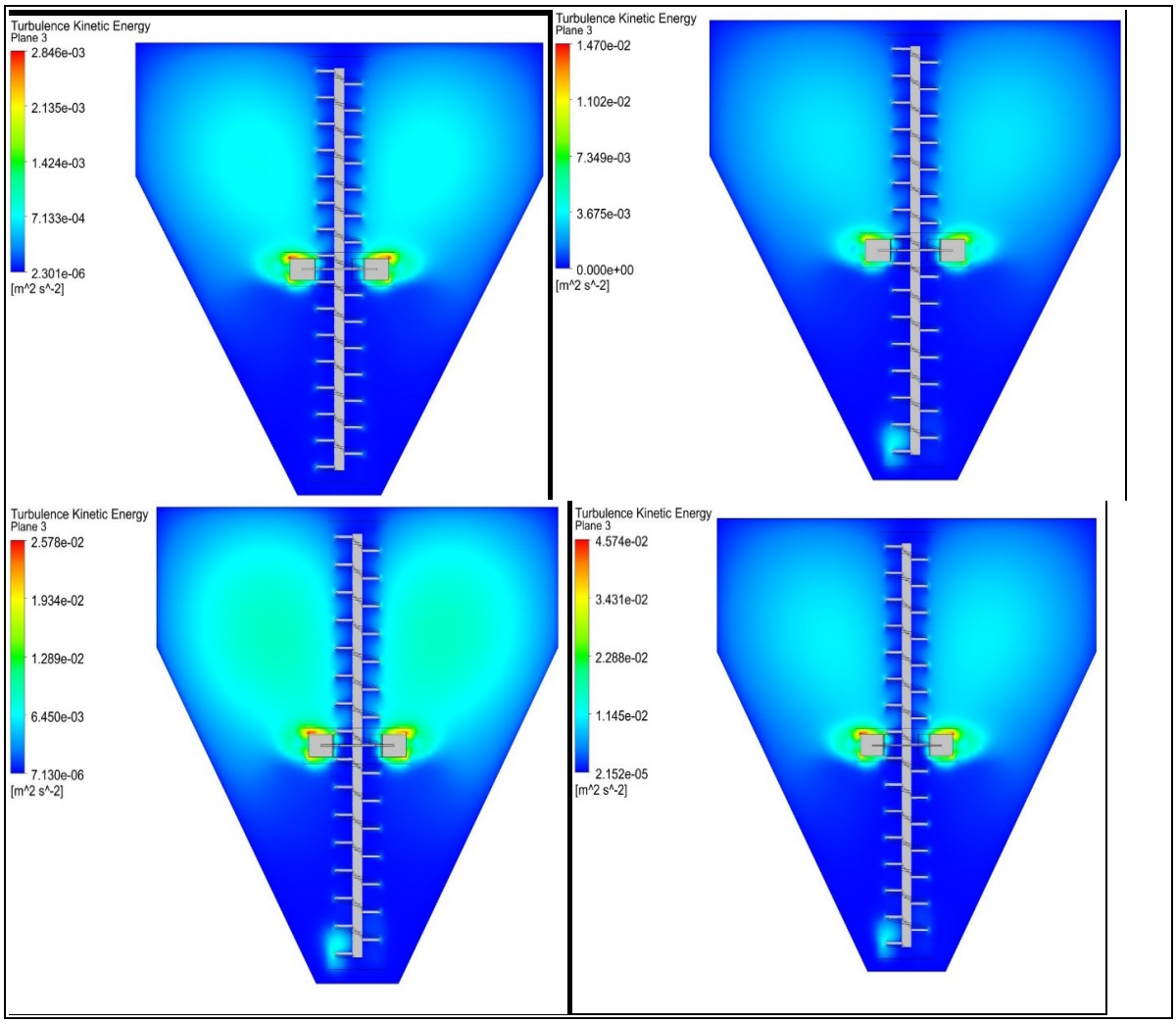
Şekil 4.19. Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki hız konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm

4.4.2. Türbülanslı kinetik enerji (k)

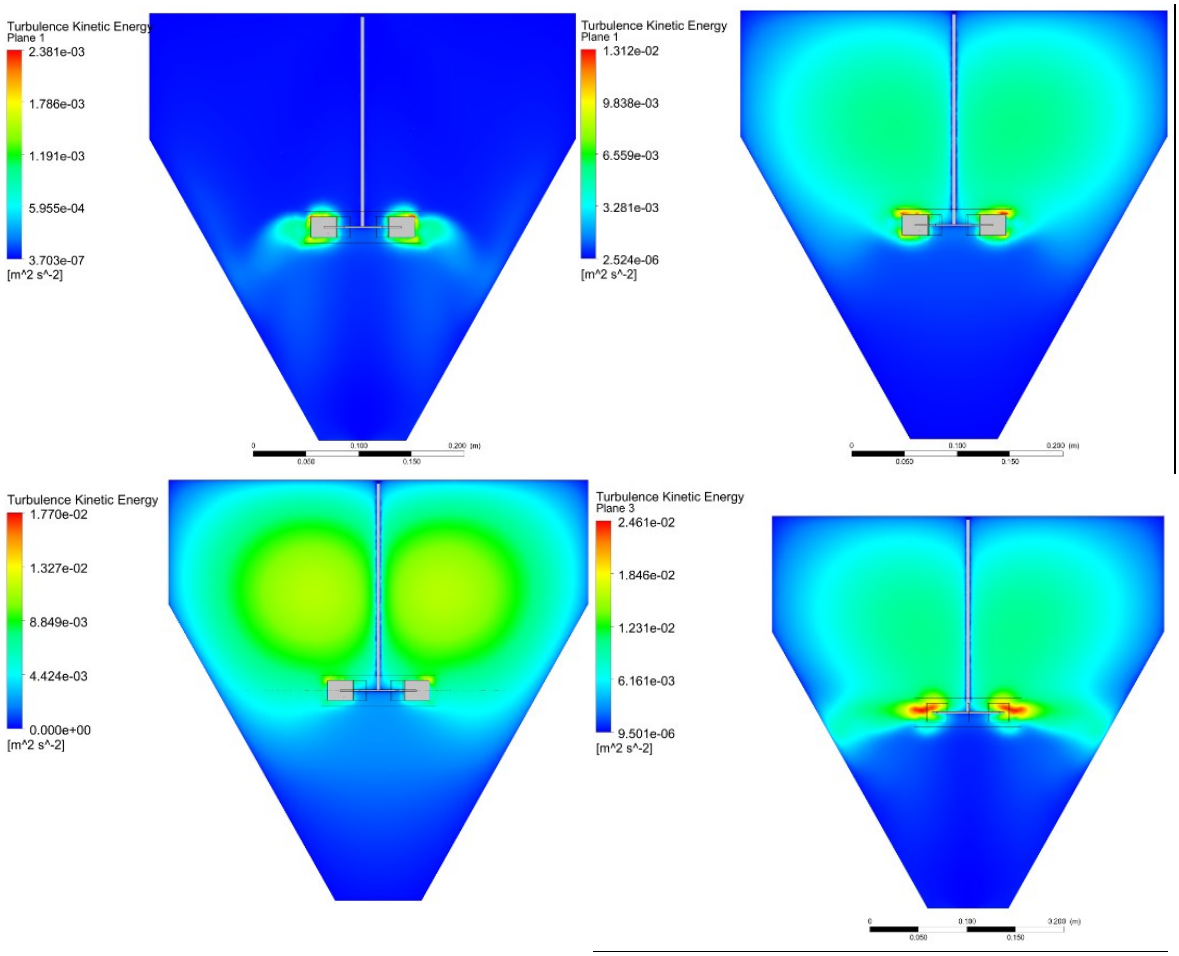
Şekil 4.20'de 25-100 rpm açısal hızda Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tank reaktörünün z-r düzlemindeki TKE konturlarını göstermektedir. Tüm rpm değerleri için en yüksek TKE değerleri, 25, 50, 75 ve 100 rpm için sırasıyla 0,0028, 0,0143, 0,025 ve 0,045 m^2/s^2 karıştırıcının uçlarında görülmektedir. Tüm açısal hız değerlerinde TKE çark bölgesinde ve daha çok tankın üst kısımlarında etkin bir varlık göstermektedir.

Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörünün TKE konturları Şekil 4.21'de göstermektedir. En yüksek TKE değerleri 25, 50, 75 ve 100 rpm için sırasıyla 0,0023, 0,013, 0,017 ve 0,024 m^2/s^2'dir. Vorteks tankı içerisindeki iki farklı karıştırıcıların TKE'leri karşılaştırıldığında bütün açısal hızlar için matkaplı Rushton karıştırıcısı altı kanatlı Rushton karıştırıcısına kıyasla daha yüksek değerleri sahiptir. Bunun yanı sıra en yüksek TKE değeri matkaplı

Rushton karıştırıcısının 100 rpm açısal hızındadır. Yüksek türbülanslı kinetik enerji ile verimli karıştırma arasındaki ilişki iyi bilinen bir gerçektir. Bu yüksek değerler karıştırıcıların yanı sıra tankın geometrisinden de kaynaklıdır.



Şekil 4.20. Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün (vorteks) yandan görünümdeki türbülans kinetik enerji konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm



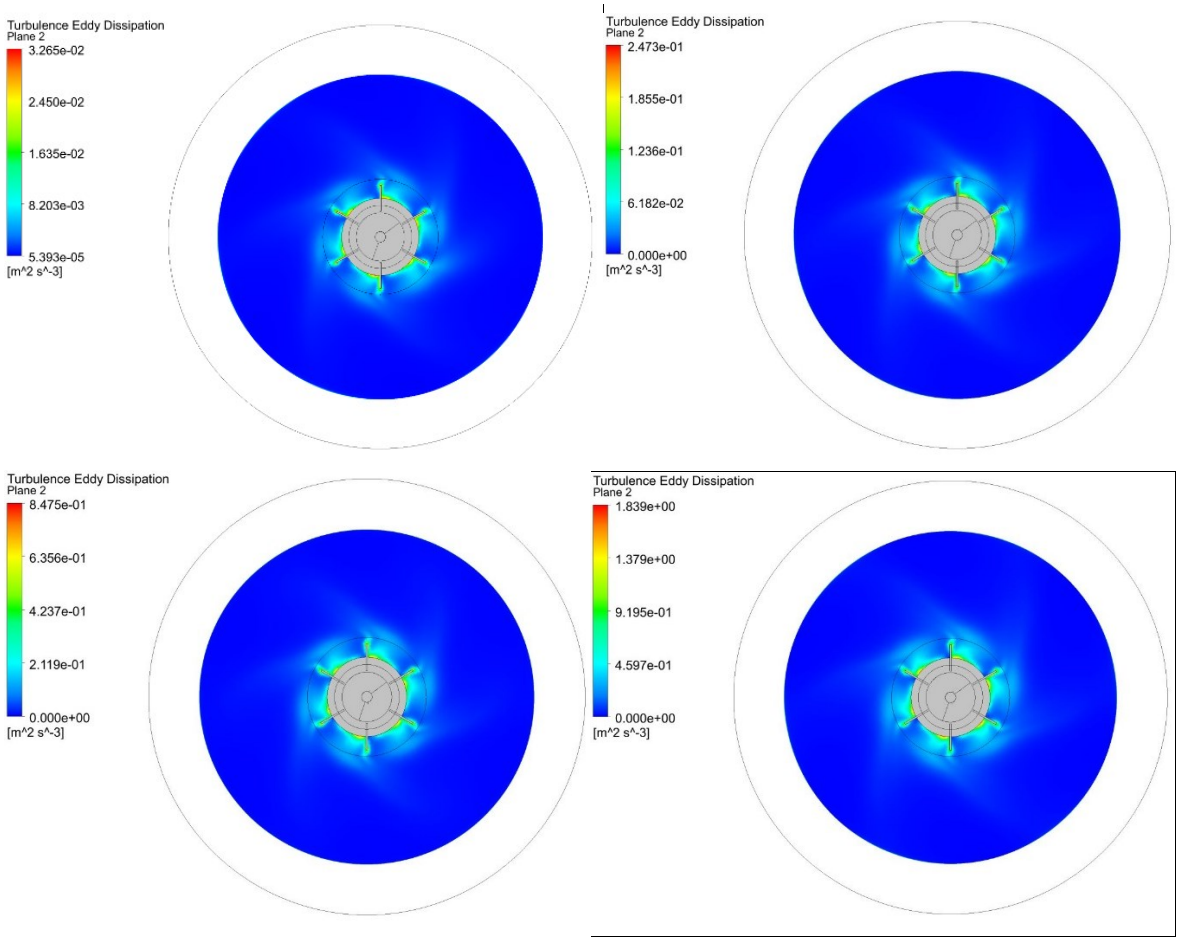
Şekil 4.21. Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün (Vorteks) yandan görünümdeki türbülans kinetik enerji konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm

4.4.3. Türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı (ε)

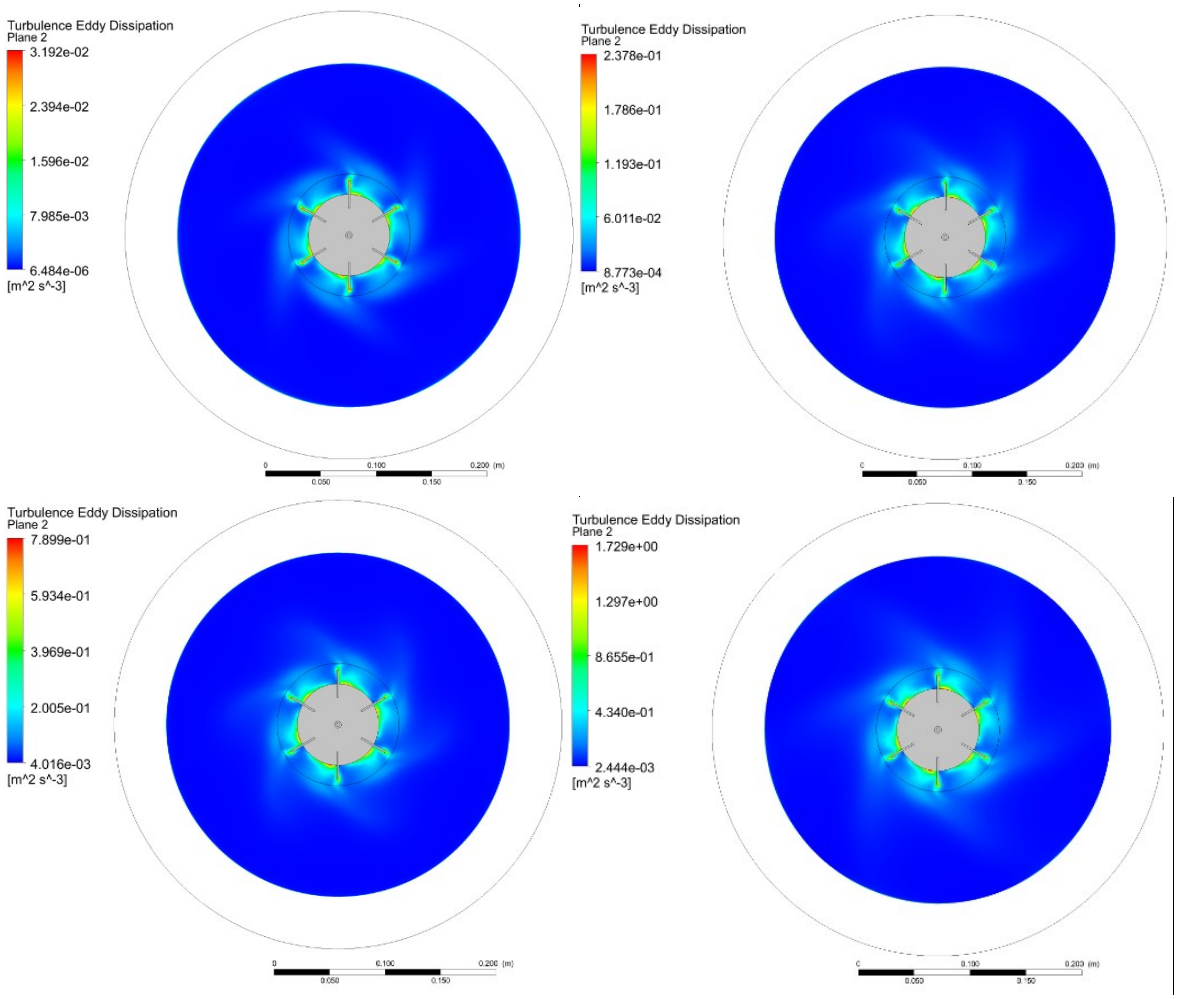
Şekil 4.22'de vorteks tankındaki matkaplı Rushton karıştırıcısının z-θ düzlemindeki türbülans kinetik enerjisinin yayılma hızı (TKEYH) göstermektedir. 25 rpm açısal hızlık artış kullanılarak 25-100 rpm açısal hız aralığı için maksimum TKEYH değerleri sırasıyla 0,0326, 0,2473, 0,8475 ve 1,839 m^2/s^3'e eşittir. Ayrıca TKEYH oranının aralıklı da olsa çark bölgesinde daha etkili olduğu görülmektedir. Vorteks tankının içerisindeki altı kanatlı Rushton karıştırıcısı için TKEYH konturları Şekil 36'da 25-100 rpm açısal hız aralığı verilmiştir. Kontur sayısından görüldüğü gibi, maksimum TKEYH değerleri sırasıyla 25, 50, 75 ve 100 rpm için 0,0319, 0,2378, 0,7899 ve 1,729 m^2/s^3'e eşittir.

Her durumda için de maksimum TKEYH değerleri karıştırıcı kanat uçlarında bulunmaktadır ve TKEYH karıştırıcı bölgesinin dışında çok düşük olur. Özdeş tank

içerisinde bulunan her iki tip karıştırıcı için tüm açısal hız değerlerinde matkaplı Rushton karıştırısının TKEYH değerleri daha yüksektir.



Şekil 4.22. Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm



Şekil 4.23. Rushton karıştırıcılı vorteks reaktörün yandan görünümdeki türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı konturları: (a) 25 rpm, (b) 50 rpm, (c) 75 rpm, (d) 100 rpm

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez kapsamında yapılmış olan üç adet sayısal çalışmadan çıkarılan sonuçlar sunulmuştur. Mevcut tez kapsamında Rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasında, zamana bağlı bir şekilde dört kanatlı karıştırıcı ve altı kanatlı Rushton karıştırıcının 253, 401, 600, 801 ve 1000 rpm dönme hızları Standart k-ε türbülans modeli akışkan olarak su kullanılara simüle edilmiştir.

Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasında, silindir ve vorteks tankları içinde 6 kanatlı Rushton karıştırıcısı bulunan 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm aralığında açısal hızları Standart k-ε türbülans modeli akışkan olarak su kullanılara simüle edilmiştir Matkaplı Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmada, vorteks tankında, 6 kanatlı Rushton karıştırıcısı ve Matkaplı Rushton karıştırıcısının 25, 50, 75 ve 100 rpm açısal hızları için Standart k-ε türbülans modeli akışkan olarak su kullanılara simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

5.1. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Silindir Tipi Reaktör Çalışmasının Sonucundaki Çıkarımlar

Karıştırmalı tank reaktörünün 4 ve 6-kanatlı karıştırıcılarının; akış düzeni, türbülans parametreleri ve güç tüketimi HAD tekniği kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Rushton karıştırıcılı silindir tipi reaktör çalışmasının sonuçları, 6-kanatlı Rushton karıştırıcısı için k-ε, RSM, k-ω ve LES türbülans modelleri kullanılarak 402 rpm açısal hızlarında oluşturulan HAD simülasyonlarının deneysel sonuçlarla kıyaslanması sonucu Standart k-ε türbülans modelinin deneysel verilerle daha uyumlu olduğu görülmüştür. 253, 401 ve 1000 rpm için 4-kanatlı karıştırıcının en yüksek hız değerlerinin 6-kanatlıya kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. 600 ve 801 rpm için ise 6-kanatlı karıştırıcının en yüksek hız değerlerinin 4-kanatlıya göre daha yüksek olduğu görülmüştür. 4-kanatlı karıştırıcı için 253 rpm'den 401 rpm'e çıkıldığında türbülans kinetik enerjisinde 6 kata yakın bir artış görülürken, 600 rpm'de azalma ve 801 ve 1000 rpm'de tekrar artış gösterdiği görülmüştür. En yüksek k değeri ise 1000 rpm açısal hızında 6-kanatlı karıştırıcıdadır. 253 rpm'den 401 rpm'e çıkıldığında türbülans kinetik enerjinin maksimum yayılma hızı 4-kanatlı karıştırıcı

için 9 kata yakın bir artış olurken, 6-kanatlı karıştırıcıda ise 6 kata yakın bir artış görülmüştür. Her iki karıştırıcı kıyaslandığında tüm açısal hızlarda 4-kanatlı Rushton karıştırıcı 6-kanatlı Rushton karıştırıcısına göre ε'ı daha yüksektir. Karıştırmalı reaktör tankındaki merkez olan z=196 mm konumundaki basınç dağılımına bakıldığında 4-kanatlı karıştırıcının pozitif basınç değerlerinin 600 rpm hariç tüm açısal hız değerlerinde 6-kanatlı karıştırıcıya kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.

5.2. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Sayısal Çalışmanın Sonucundaki Çıkarımlar

Rushton karıştırıcılı vorteks tipi reaktör çalışmasında, 6 kanatlı Rushton karıştırıcılı silindirik perdesiz reaktör tankının 90° ve 60° eğime sahip olduğu iki farklı durum için sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizin doğruluğu sağlandıktan sonra akışın türbülanslı yapısı Standart k-ε denklemi ile modellenmiştir.

50-350 rpm açısal hız aralığı için elde edilen sonuçlar, hız dağılımı, ölü bölge hacmi, türbülanslı kinetik enerji ve türbülans kinetik enerjisinin yayılım hızı açısından değerlendirilmiştir. Reaktör tankının z-r düzleminde elde edilen hız dağılımı sonuçlarına bakıldığında 60° (vorteks) tanktaki maksimum hız değeri 300 ve 350 rpm açısal hız için 90° (silindir) tanka göre daha yüksektir. Bu durum iyi bir karıştırma işlemiolduğunu göstermektedir. Bu maksimum hız değerleri genellikle karıştırıcı bölgesindeki kanat uçlarında mevcuttur. 60°'lik bir tank için en düşük ölü bölge hacmi 350 rpm'dir; 90°'lik tank için 150 rpm açısal hızda meydana gelmiştir. İki farklı tank için ölü bölge hacim miktarları birlikte değerlendirildiğinde 60° tanktaki ölü hacmin daha düşük olduğu izlenmiştir. Z-r düzleminde elde edilen maksimum türbülans kinetik enerji değerleri dikkate alındığında 60° tanktaki TKE değerlerinin 350 rpm açısal hız dışındaki tüm açısal hız değerlerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca çark bölgesindeki maksimum TKE değerleri 50-300 rpm aralığında artarken, 350 rpm açısal hızında TKE azalmaktadır. Bu durum yüksek açısal hız değerlerinde karışımın kalitesinin azalacağını göstermektedir. Z-θ düzlemindeki TKEYH konturları incelendiğinde 60° tanktaki maksimum TKEYH değerlerinin daha yüksek olduğu kolaylıkla görülmektedir. Karıştırıcının kanat uçlarında maksimum hız ve TKE değerleri oluştuğundan TKEYH değeri de aynı bölgelerde maksimuma ulaşır.

5.3. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Matkaplı Rushton Karıştırıcılı Vorteks Tipi Reaktör Çalışmanın Sonucundaki Çıkarımlar

Son çalışmada, 60° ters konik şeklindeki vorteks geometrisine sahip anaerobik çürütücü tankın içerisinde 6 kanatlı Rushton karıştırıcısı ve yeni tasarlanan matkaplı Rushton karıştırıcısının olduğu iki farklı durum için sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizin doğruluğu sağlandıktan sonra akışın türbülanslı yapısı Standart k-ε denklemi ile modellenmiştir.

25-50-75-100 rpm açısal hızları için elde edilen sonuçlar, hız dağılımı, ölü bölge hacmi, türbülanslı kinetik enerji ve türbülans kinetik enerjinin yayılma hızı dağılımı açısından değerlendirilerek sunulmuştur. Reaktör tankının Z-R düzleminde elde edilen hız dağılımı sonuçlarına bakıldığında, vorteks tankının içerisindeki Matkaplı Rushton karıştırıcısının maksimum hız değeri, tüm açısal hız değerleri için Rushton karıştırıcısına göre daha yüksektir. Bu maksimum hız değerleri genellikle karıştırıcı bölgesindeki kanat uçlarında görülmektedir. Vorteks tankındaki Matkaplı Rushton karıştırıcısının Rushton karıştırıcısına kıyasla ölü bölge oranı daha düşüktür. 100 rpm açısal hız değerindeki ölü bölge en az olmasına karşın bunu 25 rpm açısal hızı izlemektedir.

Z-R düzleminde elde edilen maksimum türbülans kinetik enerji değerleri dikkate alındığında bütün açısal hız değerleri için vorteks tankındaki Matkaplı Rushton karıştırıcısının değerleri Rushton karıştırıcısına göre daha yüksektir. Yüksek TKE değeri biyogaz üretimini pozitif yönde etkilemektedir.

Z-θ düzlemindeki TKEYH konturları incelendiğinde vorteks tankındaki Matkaplı Rushton karıştırıcısının tüm açısal hız değerleri için Rushton karıştırıcısına kıyasla daha yüksektir. Maksimum hız ve TKE değerleri karıştırıcı kanat uçlarında oluştuğundan, TKEYH değeri de aynı bölgelerde maksimum değerine ulaşmaktadır.

5.4. Mevcut Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalardan Çıkartılan Genel Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasında reaktör geometrisi, karıştırıcı geometrisi ve karıştırıcının açısal hızının biyogaz üretimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Silindirik reaktörün duvarlarının ve tabanının yakınında hız çok düşük olduğundan düşük düzeyde karıştırma meydana

gelmektedir. Vorteks reaktörü ile geometriden kaynaklı bu ölü hacim azaltılmıştır. Aynı şekilde hız dağılımı, TKE ve TKEYH'nın da vorteks reaktöründe daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Karıştırıcı geometrisinin biyogaz üretimi üzerindeki etkisi bilinen bir gerçek olmakşa birlikte, dört kanatlı Rushton'dan altı kanatlıya geçildiğinde daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bunun üzerine matkaplı Rushton karıştırıcısının karıştırma üzerindeki performansı daha da artmıştır. Açısal hızın artmasıyla birlikte hız dağılımı, TKE ve TKEYH değerleri de artmakta fakat yüksek açısal hız değerlerinde mikroorganizmalar zarar görmekte ve biyogaz üretimi azalmaktadır. Tüm bu paramaetreler değerlendirildiğinde mevcut çalışmadan çıkartılacak sonuç vorteks reaktörü içerisinde matkaplı Rusthon karıştırıcısının 100 rpm açısal hızında biyogaz üretimi diğerlerine kıyasla daha yüksektir.

5.5. Tartışma

Bu tez kapsamında incelendiği üzere biyogaz üretiminin sadece bir değişkene bağlı olmadığını birçok değişkene bağlı olduğunu görülmüştür. Bu değişkenler üzerinde çalışılması gerektiğini göstermektir.

Biyogaz reaktöründeki organik karışımın akış modelini görselleştirmek için HAD'nin kullanılması, akış davranışı hakkında bize bilgi vermektedir [69]. Biyogaz teknolojilerinin ve yeni reaktör tasarım teknolojilerinin hızla gelişmesi ile karıştırma teknolojisine olan gerekliliğin artacaktır. Bu sayede HAD yönteminin karıştırma teknolojilerinin gelişimine öncülük etmeye devam edeceği beklenmektedir.

Aşırı ısınmanın istenmediği biyolojik flokların kullanıldığı reaktörlerde bu durum dikkate alınmalıdır. Biyoatıkların çoğunun viskozite ve yoğunluk değerleri aynı anda bilinmediğinden akışkan olarak su kullanılmasına rağmen bu çalışmanın sonuçlarının gelecek araştırmacılara yol göstereceği düşünülmektedir. Okuyucuların bu çalışmanın sonuçlarından faydalanacağı düşünülmektedir ancak çalışma sıvısının su yerine gerçek bir biyoatık olduğu konusunda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Lijó, L., González-García, S., Bacenetti, J., and Moreira, MT. (2017). *The environmental effect of substituting energy crops for food waste as feedstock for biogas production*. Energy, 137:1130-1143.

2. Bergamo, U., Viccione, G., Coppola, S., Landi, A., Meda, A., C., and Gualtieri, C. (April 2020). *Analysis of anaerobic digester mixing: comparison of long shafted paddle mixing vs gas mixing.* Water Science Technology, 81 (7): 1406–1419.

3. Mao, C., Feng, Y., Wang, X. and Ren, G. (2015). *Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 540–555.

4. Tobo, Y. M., Bartacek, J., and Nopens, I. (2020). *Linking CFD and kinetic models in anaerobic digestion using a compartmental model approach*. Processes, 8(6), 703.

5. Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J. and Dewil, R. (2008*). Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge*. Progress in Energy and Combustion Science, 34, 755-781.

6. Suryavanshi, S., Eddé, B., Fox, L. A., Guerrero, S., Hard, R., Hennessey, T., Kabi, A., Malison, D., Pennock, D., Sale, W. S., Wloga, D., and Gaertig, J. (March 2010). *Tubulin glutamylation regulates ciliary motility by altering inner dynein arm activity*. Current Biology. 9;20(5):435-40

7. Parawira, W. (2012). *Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production*. Critical Reviews in Biotechnology, 32:2, 172-186.

8. Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Stinner, W., Schmalfuß, T., Scheftelowitz, M., Nelles, M. and Liebetrau, J. (2018). *Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany*. Chemie Ingenieur Technik, 90(1–2), 17–35

9. Kiran, E. U., Trzcinski, A. P., Ng, J. W., and Liu, Y. (2014). *Bioconversion of food waste to energy: a review*. Fuel, Volume 134, pp. 389-399.

10. Andreas Lemmer, A., and Johannes Krümpel, J. (2017). *Demand-driven biogas production in anaerobic filters.* Applied Energy, Volume 185, Part 1, Pages: 885-894.

11. Singh, H., Padhi, T., Kashyap, A., and Taneja, S. (2023). *Recent advances in biogas production using various bio-waste's and its potential application: An overview*. Materials Today: Proceedings.

12. Wu, B. (2009). *CFD analysis of mechanical mixing in anaerobic digesters.* Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers, 52(4):1371-1382.

13. Wu, B. (2010). *CFD simulation of mixing in egg-shaped anaerobic digesters*. Water Research, 44(5):1507-1519.

14. Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*; Wiley: Hoboken, NJ, USA.

15. Rico, C., Rico, J. L., Muñoz, N., Gómez, B., and Tejero, I. (2011). *Effect of mixing on biogas production during mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure in a pilot plant*. Engineering in Life Sciences, 11, 476–481.

16. Jobard, M., Pessiot, J., Nouaille, R., Fonty, G., and Sime-Ngando, T. (2015). *Microbial diversity in support of anaerobic biomass valorization*. Critical Reviews in Biotechnology, 37, 1–10.

17. He, Q., Xu, P., Zhang, C., Zeng, G., Liu, Z., Wang, D., Tang, W., Dong, H., Tan, X., and Duan, A. (2019). *Influence of surfactants on anaerobic digestion of waste activated sludge: Acid and methane production and pollution removal.* Critical Reviews in Biotechnology, 39, 746–757.

18. Cumby, T. (1990). *Slurry mixing with impellers: Part 1, theory and previous research*. Journal of Agricultural Engineering Research, 45, 157–173.

19. Chen, Y.R. (1981*). Impeller power consumption in mixing livestock manure slurries*. Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers, 24, 0187–0192.

20. Naegele, H. J., Lemmer, A., Oechsner, H., and Jungbluth, T. (2012). *Electric Energy Consumption of the Full Scale Research Biogas Plant "Unterer Lindenhof". Results of Longterm and Full Detail Measurements.* Energies, 5, 5198–5214.

21. Lindmark, J., Thorin, E., Fdhila, R. B., and Dahlquist, E. (2014). Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 1030–1047.

22. Ratanatamskul, C., and Saleart, T. (2015). *Effects of sludge recirculation rate and mixing time on performance of a prototype single-stage anaerobic digester for conversion of food wastes to biogas and energy recovery*. Environmental Science and Pollution Research, 23, 7092–7098.

23. Zhang, Y., Yu, G., Yu, L., Siddhu, M. A. H., Gao, M., Abdeltawab, A. A., Al-Deyab, S. S., and Chen, X. (2016). *Computational fluid dynamics study on mixing mode and power consumption in anaerobic mono- and co-digestion.* Bioresource Technology, 203, 166–172.

24. Dapelo, D., Alberini, F., and Bridgeman, J. (2015). *Euler-Lagrange CFD modelling of unconfined gas mixing in anaerobic digestion*. Water Research, 85:497-511.

25. Sadino-Riquelme, C., Hayes, R. E., Jeison, D., and Donoso-Bravo, A. (2018). *Computational fluid dynamic (CFD) modelling in anaerobic digestion: General*

application and recent advances. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 48(1):39-76.

26. Subramanian, B., Miot, A., Jones, B., Klibert, C., and Pagilla, K. R. (2015). *A full-scale study of mixing and foaming in egg-shaped anaerobic digesters*. Bioresource Technology, 192:461-470.

27. Wu, B. (2011). *CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters*. Water Research, 45(5):2082-2094.

28. Karim, K., Varma, R., Vesvikar, M., and Al-Dahhan, M. (2004). *Flow pattern visualization of a simulated digester*. Water Research, 38(17):3659-3670

29. Singh, B., Szamosi, Z., and Siménfalvi, Z. (2018). *Hydrodynamic factors in an anaerobic digester*. In The Publications of the MultiScience—XXXII. MicroCAD International Scientific Conference; University of Miskolc: Miskolc, Hungary, Volume 2018, pp. 5–6.

30. Pagilla, K. R., Craney, K. C., and Kido, W. H. (1997). *Causes and effects of foaming in anaerobic sludge digesters*. Water Science and Technology, 36, 463–470.

31. Battista, F., Fino, D., Mancini, G., and Ruggeri, B. (2016). *Mixing in digesters used to treat high viscosity substrates: The case of olive oil production wastes*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4, 915–923.

32. Ding, J., Wang, X., Zhou, X.-F., Ren, N.-Q., and Guo, W.-Q. (2010). *CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production*. Bioresource Technology, 101, 7005–7013.

33. Latha, K., Velraj, R., Shanmugam, P., and Sivanesan, S. (2019). *Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production.* Journal of Cleaner Production, 210, 388–400.

34. Nguyen, L. N., Johir, A. H., Commault, A., Bustamante, H., Aurisch, R., Lowrie, R., and Nghiem, L. D. (2019). *Impacts of mixing on foaming, methane production, stratification and microbial community in full-scale anaerobic co-digestion process.* Bioresource Technology, 281, 226–233

35. Ghanimeh, S. A., Al-Sanioura, D. N., Saikaly, P. E., and El-Fadel, M. (2018). *Correlation between system performance and bacterial composition under varied mixing intensity in thermophilic anaerobic digestion of food waste*. Journal of Environmental Management, 206, 472–481.

36. Wu, B., and Chen, S. (2008). *CFD simulation of non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters.* Biotechnology and Bioengineering, 99, 700–711.

37. Vesvikar, M. S., and Al-Dahhan, M. (2005). *Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD.* Biotechnology and Bioengineering, 89, 719–732.

38. Caillet, H., Bastide, A., Chuppa-Tostain, G., Petit, and T., Adelard, L. (2018). *Anaerobic Digestion of Vinasse and CFD Modelling Approach*. International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Czech Republic, Prague.

39. Ding, J., Wang, X., Zhou, X., Ren, N., and Guo, W. (2010). *CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production.* Bioresource Technology, Volume 101, Issue 18, Pages 7005-7013.

40. Bridgeman, J. (2012). *Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester*. Advances in Engineering Software, 44, 54–62.

41. Dama, P., Bell, J., Brouckaert, C. J., Buckley, C., and Stuckey, D. C. (2000). *Computational fluid dynamics: Application to the design of the anaerobic baffled reactor*. In Proceedings of the WISA 2000 Biennial Conference, Sun City, South Africa, pp. 1–7.

42. Mohammadrezaei, R., Zareei, S., and Behroozi-Khazaei, N. (2017). Improving the performance of mechanical stirring in biogas plant by computational fluid dynamics (CFD). Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 19, 91–97.

43. Maier, C., Weichselbaum, W., Schlerka, M., and Harasek, M. (2010). *Development of Agitation Systems in Biogas Plants: Investigation of Mixing Characteristics, Improvement of Energy Efficiency and Scale-Up Using Computational Fluid Dynamics.* Chemical Engineering Transactions, Milano, Italy, Volume 21, pp. 1195–2000.

44. Shen, F., Tian, L., Yuan, H., Pang, Y., Chen, S., Zou, D., Zhu, B., Liu, Y., and Li, X. (2013). *Improving the Mixing Performances of Rice Straw Anaerobic Digestion for Higher Biogas Production by Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation.* Applied Biochemistry and Biotechnology, 171, 626–642.

45. Ahmed, S. U., Ranganathan, P., Pandey, A., and Sivaraman, S. (2010). *Computational fluid dynamics modeling of gas dispersion in multi impeller bioreactor*. Journal of Bioscience and Bioengineering, 109, 588–597.

46. Huang, R., Long, Y., Luo, T., Mei, Z., Wang, J., and Long, E. (2014). *The Research on Optimization of the Multiphase Flow Field of Biogas Plant by Using CFD Software*. Journal of Energy and Power Engineering, 8.

47. Karaeva, J. V., Khalitova, G. R., Kovalev, D. A., and Trakhunova, I. A. (2015). *Study of the Process of Hydraulic Mixing in Anaerobic Digester of Biogas Plant*. Chemical and Process Engineering, 36, 101–112.

48. Torotwa, I., and Ji, C. (2018). *A Study of the Mixing Performance of Different Impeller Designs in Stirred Vessels Using Computational Fluid Dynamics*. Designs, 2, 10.

49. Leonzio, G. (2018). *Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digesters using CFD analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 123, 578–589.

50. Manea, E., and Robescu, D. (2012). *Simulation of mechanical mixing in anaerobic digesters.* UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 74, 235–242.

51. Terashima, M., Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H., Takahashi, H., Li, Y., and Noike, T. (2009). *CFD simulation of mixing in anaerobic digesters.* Bioresource Technology, 100, 2228–2233.

52. Rivard, C.J., Kay, B. D., Kerbaugh, D. H., Nagle, N. J., and Himmel, M. E. (1995). *Horsepower requirements for high-solids anaerobic digestion.* Applied Biochemistry and Biotechnology, 51, 155–162

53. Devals, C., Heniche, M., Takenaka, K., and Tanguy, P. (2008). *CFD analysis of several design parameters affecting the performance of the Maxblend impeller*. Computers & Chemical Engineering, 32, 1831–1841.

54. Singh, B., & Singh, N., & Conka, Z., Kolcun, M., Siménfalvi, Z., Zsolt, P., Szamosi, Z. (2021). *Critical Analysis of Methods Adopted for Evaluation of Mixing Efficiency in an Anaerobic Digester.* Sustainability, 10.3390/su13126668.

55. Li, M., White, G., Wilkinson, D., and Roberts, K. J. (2004). LDA Measurements and CFD Modeling of a Stirred Vessel with a Retreat Curve Impeller. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2004, 43, 6534–6547.

56. Meroney, R., N., and Colorado, P. (2019). *CFD simulation of mechanical draft tube mixing in anaerobic digester tanks*. Water Research, 43, 1040–1050.

57. Azargoshasb, H., Mousavi, S., Amani, T., Jafari, A., and Nosrati, M. (2015). *Three-phase CFD simulation coupled with population balance equations of anaerobic syntrophic acidogenesis and methanogenesis reactions in a continuous stirred bioreactor*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 27, 207–217

58. Singh, B., Szamosi, Z., and Siménfalvi, Z. (2019). *State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 141, 922–936.

59. Şenol, H., Elibol, E. A., Açıkel, Ü., ve Şenol, M. (2017). *2016'da Türkiye'de kanatlı hayvanlardan üretilebilecek biyogaz ve elektrik enerji potansiyeli*. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 6(1), 1-11.

60. Şenol, H., Demir, S., and Elibol, E. A. (2020). *Investigation of biogas production by applying thermal pretreatments from mixtures of different fruit wastes and organic raw chicken waste.* Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 35:2, 979-990.

61. Şenol, H., Elibol, E. A., ve Açıkel, Ü. (2018). *Farklı ham sığır gübresi/mezbaha atıkları karışım oranlarının biyogaz üretimi üzerindeki etkisinin araştırılması*. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 7(1), 11-21, 2018.

62. Mousavi, S.E., Choudhury, M.R. and Rahaman, M.S. (2019). *3-D CFD-PBM coupled modeling and experimental investigation of struvite precipitation in a batch stirred reactor*. Chemical Engineering Journal, 361, 690–702.

63. Launder, B. E., and Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*.

64. Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Pearson, England.

65. Martínez-Delgadillo, S. A., Alonzo-Garcia, A., Mendoza-Escamilla, V. X., Gonz´alez-Neria, I. and Y´a˜nez-Varela, J. A. (2019). *Analysis of the turbulent flow and trailing vortices induced by new design grooved blade impellers in a baffled tank*. Chemical Engineering Journal, 358, 225–235.

66. Hoseini, S., Najafi, G., Ghobadian, B., and Akbarzadeh, A. (2021). *Impeller shape-optimization of stirred-tank reactor: CFD and fluid structure interaction analyses.* Chemical Engineering Journal 413:127497.

67. Kolmogorov, A. N. (1941). *Dissipation of energy in locally isotropic turbulence.* Akademiia Nauk SSSR Doklady, 16.

68. Guan, X., Li, X., Yang, N., and Liu, M. (2020). *CFD simulation of gas-liquid flow in stirred tanks: Effect of drag models*. Chemical Engineering Journal, 386:121554.

69. Murthy, B., Kasundra, R., and Joshi, J. (2008). *Hollow self-inducing impellers for gas–liquid–solid dispersion: Experimental and computational study.* Chemical Engineering Journal, 141(1-3):332-345.

70. Mohammadrezaei, R., Zareei, S., and Behroozi-Khazaei, N. (2018). *Optimum mixing rate in biogas reactors: Energy balance calculations and computational fluid dynamics simulation*. Energy, 159:54-60.

71. Vilardi, G., and Verdone, N. (2020). *Production of metallic iron nanoparticles in a baffled stirred tank reactor: Optimization via computational fluid dynamics simulation*. Particuology, 52:83-96.

72. Kolmogorov, A. N. (1991). *Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 434(1890):15-17.



Gazili olmak ayrıcalıktır