T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NEWTONYEN OLMAYAN AKIŞKANLARIN TAYLOR-COUETTE AKIŞLARINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Hüseyin ELÇİÇEK

DOKTORA TEZİ
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi. Bülent GÜZEL

Mart, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NEWTONYEN OLMAYAN AKIŞKANLARIN TAYLOR-COUETTE AKIŞLARINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Hüseyin ELÇİÇEK tarafından hazırlanan tez çalışması 05.03.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi. Bülent GÜZEL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi. Bülent GÜZEL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Kunt ATALIK, Üye
Boğaziçi Üniversitesi _____

Doç. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Nurten VARDAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Metin MURADOĞLU, Üye
Koç Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi. Bülent GÜZEL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Newtonyen olmayan akışkanların Taylor-Couette akışlarındaki davranışlarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hüseyin ELÇİÇEK

İmza

Aileme
ve biricik Eşime

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın planlanmasından tamamlandığı ana kadar her türlü konuda maddi ve manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim, danışmanlığında çalışmaktan mutlu olduğum, değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Bülent GÜZEL'e, HAD çalışmalarının gerçekleştirilmesinde bilgi ve tecrübesiyle tezime katkı sağlayan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen hocam Doç. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR'a ve bilimsel anlamda bilgi, görüş ve tecrübelerini benimle paylaşan Tez İzleme Komitesi üyelerinden değerli hocam Prof. Dr. Ömer AKGİRAY'a

Dostluk, dünya üzerinde en zor kurulan kazanılan değerlerden birisidir. Öyle ki, onu kazanmak için ayrı, kaybetmemek için ayrı çaba harcamak gerektir. Yıldız Teknik Üniversitesi çalışma hayatına başladığım günden bugüne desteği, dostluğu, samimiyeti ile her zaman yanımda olacak olan değerli dostum Zafer AYDIN'a, aynı zaman da tez çalışmasının her aşamasında yanımda olan ve her anlamda desteklerini esirgemeyen abilerim Kenan ARI, Hakan BAKIR, Mesut TOK, Selçuk YÜZER ve dostum Doğan TUPTAŞ'a

Akademik çalışmaların yanı sıra üniversite hayatım boyunca çok güzel dostluklar ve arkadaşlıklar edindiğime inanıyorum, isimlerini tek tek yazamadığım tüm dostlarıma, abilerime, hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma can-ı gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca, tez çalışmam esnasında bana sürekli destek veren ve yanımda olan aynı zamanda akademik bilgi ve deneyimleri ile her zaman yardımcı olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Kaan ÖZDEMİR'e ve akışkanların reolojik ölçümleri esnasında çalışmalarıma yardımcı olan ve vakit ayıran teşekkürü her zaman bir borç bileceğim Arş. Gör. Duygu ÖZMEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda, eğitim hayatımın her anında madden ve manen desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen bana her koşulda güvenen ve yanımda olan annem Sitti ELÇİÇEK, babam Mehmet Ali ELÇİÇEK'e ve her zaman duaları ile desteklerini yanımda hissetiğim çok değerli kardeşlerime,

Ayrıca tez çalışmam boyunca, her türlü sıkıntımı paylaşan ve çalışmalarıma büyük bir özveriyle destek olan sevgili eşim, Makbule Zehra ELÇİÇEK'e şükranlarımı sunar, çalışmanın bilim dünyasına ve insanlığa faydalı olmasını temenni ederim.

Hüseyin ELÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xii

TABLO LİSTESİ xvii

ÖZET xviii

ABSTRACT xx

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.1.1 Taylor-Couette Akışı 2

1.1.2 Newtonyen akışkanlar için TC rejim geçişleri 4

1.1.3 Newtonyen bir akışkanın temel tanımı 5

1.1.4 Literatür çalışmaları 6

1.1.5 Farklı disiplinlerde gerçekleştirilen çalışmalar 12

1.2 Tezin Amacı 18

1.3 Hipotez 19

2 MATERYAL VE METOT 20

2.1 Deneylerde kullanılan akışkanların hazırlanması 20

2.2 Deney düzeneği 21

2.3 Temas açısının ölçülmesi 23

2.4 Işık mikroskobu kullanılarak yüzey özelliklerinin tespiti 26

2.5 Yüzey pürüzlülük ölçümleri 27

2.5.1 Aritmetik ortalama yükseklik (Ra) 28

2.5.2 Profilin karelerinin ortalamasının karekökü (Rq) 29

2.5.3 On nokta yüksekliği (Rz) 29

2.5.4 Deneysel çalışmalardan elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları 30

2.6 Akışkanların reolojik ölçümleri 32

3 DIŞ SİLİNDİR SABİT İKEN AKIŞ YAPILARININ DEĞİŞİMİ 34
3.1 Giriş . . . 34
3.2 Akış yapılarının değişimi . . . 38
3.2.1 Newtonyen akışkan için deney sonuçları . . . 42
3.2.2 Newtonyen olmayan (shear-thinning) akışkan için deney sonuçları 44
3.2.3 Silindirler arasındaki boşluğun etkisinin incelenmesi . . . 53

4 DIŞ SİLİNDİR HAREKETİNİN AKIŞ YAPILARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ 60
4.1 Newtonyen akışkan . . . 60
4.1.1 Silindirlerin aynı yöne dönme durumu . . . 60
4.1.2 Silindirlerin zıt yöne dönme durumu . . . 72
4.2 Newtonyen olmayan (shear-thinning) akışkan . . . 80
4.2.1 Silindirlerin aynı yöne dönme durumunda . . . 80
4.2.2 Silindirlerin zıt yöne dönme durumu . . . 95

5 SÜPERHİDROFOBİK YÜZEY ETKİSİ 113
5.1 Giriş . . . 113
5.1.1 Yüzey etkinliğinin ölçülmesi . . . 120
5.2 Sonuçlar . . . 122
5.2.1 Newtonyen akışkan kullanımı durumu . . . 123
5.2.2 Newtonyen olmayan (shear-thinning) akışkan kullanımı durumu 125

6 HERSCHEL–BULKLEY AKIŞKANININ İNCELENMESİ 134
6.1 Giriş . . . 134
6.2 Sonuçlar . . . 137
6.2.1 Normal yüzey durumu . . . 138
6.2.2 Süperhidrofobik yüzey durumu . . . 142

7 NÜMERİK SİMÜLASYON 144
7.1 Giriş . . . 144
7.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları . . . 146
7.2.1 Problemin geometrisi ve sınır şartları . . . 150
7.2.2 Yakınsama kriteri . . . 151
7.2.3 Ağ yapısının seçimi . . . 152
7.2.4 Uygun çözücü modelinin seçimi . . . 154
7.3 HAD simülasyon sonuçları . . . 154
7.3.1 Newtonyen akışkan kullanım durumu . . . 154
7.3.2 Newtonyen olmayan akışkan kullanım durumu . . . 157

8 TAYLOR-COUETTE REAKTÖRÜNÜN DENİZCİLİK SEKTÖRÜNE UYGULANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ 163

8.1 Balast Suyu Arıtımında Alternatif Seçenek Olarak Değerlendirilen TC-UV Reaktörü 163
8.1.1 Özet 163
8.1.2 Giriş 163
8.1.3 Materyal ve Metot 167
8.1.4 Sonuçlar 170
8.2 TC reaktörünün grafen-oksit üretiminde kullanımı 176
8.2.1 Özet 176
8.2.2 Giriş 177
8.2.3 Sonuçlar 180
8.2.4 Newtonyen akışkan durumu 180
8.2.5 Shear-thinning akışkan durumu 181
8.2.6 Aynı yöne dönme durumu 182
8.2.7 Zıt yöne dönme durumu 186

9 SONUÇ VE ÖNERİLER **190**

Kaynakça **192**

Tezden Üretilmiş Yayınlar **193**

SİMGE LİSTESİ

d	Silindirler arasındaki boşluk, mm
E	UV ışın şiddetini, mJ/cm^2
F	Yüzeye uygulanan kuvvet, N
H	Silindir yüksekliği, mm
I	UV ışınım dağılımı
I_0	UV kaynağının yüzeyindeki UV ışınımını
k	Azimut dalga boyu
κ	Akış davranış indeksi, kg.sn^{-2}/m
l	Efektif kayma uzunluğu
N	Son popülasyon miktarı, CFU/mL
N_0	Popülasyonun ilk yoğunluğunu, CFU/mL
Ra	Aritmetik ortalama yükseklik
Re	Reynolds sayısı
Re_{cw}	İç duvar yüzeyindeki Reynolds sayısı
Rf	Wenzel pürüzlülüğü
R_i	İç silindir yarıçapı, mm
$Re_{G,l}$	lokal Reynolds sayısı
R_o	Dış silindir yarıçapı, mm
Re_s	Shear Reynolds sayısı
Rz	On nokta yüksekliği
Rq	Profilin karelerinin ortalamasının karekökü
Ta	Taylor sayısı
η	Yarıçaplar oranı

Γ	En-boy oranı
ω_i	İç silindir dönme hızı, rad/s
ω_o	Dış silindir dönme hızı, rad/s
μ	Akışkan viskozitesi, Pa.s
μ_{ref}	Refereans viskozite, Pa.s
α	absorbans katsayısı, cm^{-1}
λ	Eksenel dalga boyu, mm

KISALTMA LİSTESİ

BWMC	Gemi Balast Suyu ve Sedimanlarının Kontrolü ve Yönetimi
CA	Temas açısı
CCF	Dairesel Couette akışı
CVF	Bobin vorteks akışı
CP	Couette-Poisuille
CO_2	Karbon Dioksit
DIN	Alman Standart Enstitüsü
fps	frame per second
FVF	Kılçık vorteks akışı
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
IMO	Uluslararası Denizcilik Örgütü
IPS	İç içe geçen spiraller
ISO	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
M_A	Moleküler ağırlık
MARPOL	Denizlerin Gemilerden Kirlenmesini Önleme Uluslararası Sözleşmesi
MEPC	Deniz Çevresini Koruma Komitesi
MWVF	Modüle dalgalı vorteks akışı
NO_x	Nitrojen Oksit Türevleri
N-S	Navier-Stokes
PAA	Poliakrilamit
PEO	Polietilen oksit
pSVF	Kısmi spiral vorteks akışı
RIB	Ribbon vorteks yapısı

rpm	devir/dak
SH	Süperhidrofobik
SHS	Süperhidrofobik yüzey
SVF	Spiral vorteks akışı
SO_2	Kükürt dioksit
TC	Taylor–Couette
TC-UV	Taylor–Couette Ultraviyole
TTVF	Türbülanslı Taylor vorteks akışı
TVF	Taylor vorteks akışı
UV	Ultraviyole
UVP	Ultrasonik hız profili
WIB	Dalgalı iç sınır akışı
WOB	Dalgalı dış sınır akışı
wSVF	Dalgalı spiral vorteks akışı
WVF	Dalgalı vorteks akışı
XG	Xanthan çözeltisi
μm	Mikrometre

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Klasik TC düzeneği 2
Şekil 1.2 Akış rejimlerinin görsel olarak görünümü 3
Şekil 1.3 Farklı Reynolds sayılarında tespit edilen akış yapıları 4
Şekil 1.4 Kritik Reynolds sayısının çap oranına bağlı olarak değişimi 4
Şekil 1.5 Tek yönlü kayma akışının şematik gösterimi 6
Şekil 1.6 Dairesel Couette akışının rejim geçiş sınırları 7
Şekil 1.7 Dış silindir üzerinde açılan kanallar 8
Şekil 1.8 wSVF akışından TVF akışına geçiş 11
Şekil 1.9 TC akışında ortaya çıkan ikincil akışlar 11
Şekil 1.10 Biyofilm ayrıştırılmasında kullanılan TC reaktörü 17
Şekil 2.1 Deney düzeneğinin şematik görünümü 22
Şekil 2.2 Zamana bağlı akış değişiminin elde edilmesi 23
Şekil 2.3 Temas açısı ölçüm cihazının şematik gösterimi 24
Şekil 2.4 Yüzey ile sıvı arasındaki ilişki 24
Şekil 2.5 Normal yüzey ile akışkan temas açıları 25
Şekil 2.6 Hidrofobik yüzey ile akışkan temas açıları 25
Şekil 2.7 Couette akışının süperhidrofobik yüzey üzerindeki temsili 26
Şekil 2.8 Çalışmalarda kullanılan ışık mikroskobu 27
Şekil 2.9 Normal ve hidrofobik yüzeyin ışık mikroskobu altındaki görüntüleri 27
Şekil 2.10 Deneysel çalışmalarda kullanılan profilometre 28
Şekil 2.11 Aritmetik ortalama yükseklik (Ra) 29
Şekil 2.12 On nokta yükseklik (Rz) 30
Şekil 2.13 Normal yüzeyin profili 31
Şekil 2.14 Hidrofobik yüzeyin profili 31
Şekil 2.15 Eş eksenli tip reometre ve şematik görünümü 32
Şekil 2.16 Cone/plate tip reometre 32
Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan akışkanlara ait reolojik özellikler . 38
Şekil 3.2 İki farklı yarıçap oranında normalleştirilmiş hız, kesme hızı, viskozite ve *ReG,l* profillerinin karşılaştırılması 40
Şekil 3.3 % 75 gliserin çözeltisine ait akış yapılarının a) anlık ve b)uzay zaman grafikleri ile gösterimi 43

Şekil 3.4 % 75 gliserin çözeltisinin TC deney düzeneği içerisindeki akış yapılarının iç silindirin dönme hızına bağlı olarak dönüşümü 44
Şekil 3.5 Hız, kayma hızı, viskozite ve *ReG,l*, profilleri, TVF kritik geçiş değerine karşılık gelen silindirler arasındaki mesafe boyutsuz tanımlanmıştır 45
Şekil 3.6 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 xanthan çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri 47
Şekil 3.7 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği 49
Şekil 3.8 % 0,1 xanthan çözeltisi için CCF ile TVF geçişi sırasında görülen akış yapılarının şematik görünüşü 50
Şekil 3.9 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği 51
Şekil 3.10 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği ($\eta = 0,643$) 55
Şekil 3.11 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği ($\eta = 0,643$) 56
Şekil 3.12 Yeni akış yapılarının büyütülmüş görüntüsü 56
Şekil 3.13 Farklı shear-thinning indeks ve yarıçap oranları için TVF akışına geçişi tanımlayan kritik Reynolds değerlerinin karşılaştırılması 59
Şekil 4.1 Iooss (1986) tarafından yapılan çalışmada incelenen akış yapılarının şematik görünümü 61
Şekil 4.2 Heise ve ark. (2013) tarafından gözlemlenen akış yapılarının a) deneysel ve b) nümerik olarak görünümü 63
Şekil 4.3 Hız ve kayma hızının iç silindirin dönme hızına bağlı olarak değişimi 63
Şekil 4.4 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait akış yapılarının anlık görüntüleri 66
Şekil 4.5 Zamana bağlı olarak gliserin akışkanın anlık görüntülerin değişimi a-) Re_{cwi}=390, Re_{cwo}=283 b-) Re_{cwi}=520, Re_{cwo}=373 66
Şekil 4.6 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği ($\omega_o = 33rpm$) 68
Şekil 4.7 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği ($\omega_o = 43,5rpm$) 70
Şekil 4.8 Ortaya çıkan SVF akış yapılarının karşılaştırılması 70
Şekil 4.9 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği ($\omega_o = 53rpm$) 72
Şekil 4.10 Silindirler arasındaki boşlukta zıt yöne dönme sonucunda hız ve kayma hızı değişimleri 73
Şekil 4.11 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 75 gliserin çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri 75

Şekil 4.12 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği ($\omega_o = -27rpm$) 77
Şekil 4.13 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği ($\omega_o = -33rpm$) 78
Şekil 4.14 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği ($\omega_o = -42rpm$) 80
Şekil 4.15 Hız, kayma hızı, viskozite ve Reynolds profilleri, normalize edilmiş grafikler 81
Şekil 4.16 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için akış yapılarının anlık görüntüleri 83
Şekil 4.17 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için uzay-zaman grafiği 86
Şekil 4.18 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG çözeltisinin kayma hızı değişimi . 86
Şekil 4.19 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için uzay-zaman grafiği 88
Şekil 4.20 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için uzay-zaman grafiği 90
Şekil 4.21 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG için uzay-zaman grafiği 92
Şekil 4.22 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG için uzay-zaman grafiği 93
Şekil 4.23 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG için uzay-zaman grafiği 95
Şekil 4.24 Silindirler arasındaki boşlukta zıt yöne dönme sonucunda hız, kayma hızı, viskozite ve $Re_{G,l}$ değişimleri 96
Şekil 4.25 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için akış yapılarının anlık görüntüleri (zıt yön) 98
Şekil 4.26 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için akış yapılarının uzay-zaman grafiği (zıt yön) 99
Şekil 4.27 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için akış yapılarının uzay-zaman grafiği (zıt yön) 101
Şekil 4.28 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG için akış yapılarının uzay-zaman grafiği (zıt yön) 102
Şekil 4.29 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG için akış yapılarının uzay-zaman grafiği (zıt yön) 104
Şekil 4.30 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG için akış yapılarının uzay-zaman grafiği (zıt yön) 106
Şekil 4.31 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG için akış yapılarının uzay-zaman grafiği (zıt yön) 108
Şekil 4.32 Radyal Reynolds sayısı ve silindirlerin dönme oranının (ω_2/ω_1) kritik Taylor sayısı üzerindeki etkisi 109
Şekil 4.33 Radyal Reynolds sayısı ve Silindirlerin dönme oranının (ω_2/ω_1) kritik dalga sayısı üzerindeki etkisi 110
Şekil 5.1 Deniz üstü, denizaltı ve su altı mermilerinde aktif ve pasif yüzey sürtünme azaltma yöntemleri 115

Şekil 5.2 (a) Temas açısının şematik olarak görünümü, (b) hidrofilik, (c) hidrofobik, (d) süperhidrofobik yüzey 116
Şekil 5.3 Doğada bulunan bazı süperhidrofobik yüzeyler 116
Şekil 5.4 Temas açısının yüzey pürüzlülük ve görünen temas açısına bağlı olarak değişimi 117
Şekil 5.5 Deneysel çalışmalarda kullanılan akışkanlara ait reolojik özellikler . 122
Şekil 5.6 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 75 gliserin çözeltisi için akış yapılarının uzay-zaman grafiği 125
Şekil 5.7 Hız, kayma-hızı viskozite ve lokal Reynolds profilinin boyutsuz olarak değişimi 126
Şekil 5.8 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri 128
Şekil 5.9 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,2 XG çözeltisi için akış yapılarının uzay-zaman grafiği 130
Şekil 5.10 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri 131
Şekil 5.11 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,1 XG çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri 133
Şekil 6.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan carbopol akışkanının reolojik özellikleri 138
Şekil 6.2 TC deney düzeneği içerisindeki akan ve akmayan bölgelerin şematik gösterimi 139
Şekil 6.3 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,01 carbopol çözeltisine ait anlık görüntüler 140
Şekil 6.4 Farklı Re_{cw} değerlerinde % 0,02 carbopol çözeltisine ait anlık görüntüler 142
Şekil 6.5 Farklı Re_{cw} değerlerinde <% 0,01 carbopol çözeltisine ait anlık görüntüler 143
Şekil 7.1 Segregated çözüm yöntem aşamalarının şematik gösterimi 147
Şekil 7.2 ANSYS CFX için genel çözüm sürecinin akış şeması 148
Şekil 7.3 Sayısal hesaplamada kullanılan çalışma alanının şematik gösterimi . 150
Şekil 7.4 Çalışma bölgesi ve sınır şartları 151
Şekil 7.5 Simülasyon işlemi içerisinde gerçekleşen bir yakınsama örneği 152
Şekil 7.6 Nümerik çalışmalarda kullanılan ağ yapısının görünümü 153
Şekil 7.7 Çalışma bölgesindeki ağların büyüklükleri (a) ve en kötü ağ elemanının olduğu yer (b) 153
Şekil 7.8 Gliserin çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri 156
Şekil 7.9 Gliserin akışkanına ait akım çizgilerinin boşluktaki dağılımı 157

Şekil 7.10 % 0,1 XG çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri 158
Şekil 7.11 % 0,2 XG çözeltisinin akış yapılarının deneysel ve nümerik görüntüleri159
Şekil 7.12 a-) % 0,1 ve b-) % 0,2 XG çözeltisine ait akım çizgilerinin boşluktaki dağılımı 160
Şekil 7.13 % 0,01 carbopol çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri 161
Şekil 7.14 % 0,02 carbopol çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri 161
Şekil 7.15 a-) % 0,01 ve b-) % 0,02 carbopol çözeltisine ait akım çizgilerinin boşluktaki dağılımı 162
Şekil 8.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi 168
Şekil 8.2 Farklı gliserin konsantrasyonlarda ortaya çıkan akış yapıları a-) % 60 b-) % 75 172
Şekil 8.3 Farklı çap oranlarında oluşan TVF vorteks yapıları 172
Şekil 8.4 *E. coli* inaktivasyon verimliliği a-) C.UV ve TC-UV rektörleri b-) TC-UV reaktörü içerisindeki farklı akış yapıları 174
Şekil 8.5 İstenmeyen türlerin taşınımın şematik gösterimi a-) C.UV b-) TC-UV 175
Şekil 8.6 Zıt yöne dönme koşullarında ortaya çıkan akış yapıları 175
Şekil 8.7 TC-UV reaktöründe ortaya çıkan akış yapılarının kritik sınır değerleri ($\eta = 0,868$). 176
Şekil 8.8 Gliserin çözeltisinin farklı Reynolds sayılarındaki uzay zaman grafiği 181
Şekil 8.9 Xanthan çözeltisinin aynı yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a)n=0,50 ve (b)n=0,39 ($\eta = 0,643$) 183
Şekil 8.10 Xanthan çözeltisinin aynı yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a) n=0,45 ve (b) n=0,33 ($\eta = 0,868$) 186
Şekil 8.11 Xanthan çözeltisinin zıt yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a) n=0,50 ve (b) n=0,39 ($\eta = 0,643$) 187
Şekil 8.12 Xanthan çözeltisinin zıt yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a) n=0,33 ve (b) n=0,45 ($\eta = 0,643$) 189

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 TVF geçiş rejiminin farklı çaplardaki kritik Reynolds sayıları 5
Tablo 1.2 Rejim geçişlerinin kritik Reynolds sayıları 5
Tablo 2.1 Ortalama yüzey pürüzlülük parametrelerinin karşılaştırılması 30
Tablo 2.2 Eş eksenli silindir sistemine ait özellikler 33
Tablo 3.1 Akışkanlara ait reolojik parametrelerin değerleri 39
Tablo 3.2 Dış silindir sabit iç silindir hareketli iken ortaya çıkan akış yapılarının kritik geçiş değerleri ve akış karakteristiklerinin özeti ($\eta = 0{,}868$) . 53
Tablo 4.1 İç ve dış silindir hareketli iken ortaya çıkan akış yapılarının kritik geçiş değerleri ve akış karakteristiklerinin özeti ($\eta = 0{,}868$) 112
Tablo 5.1 Literatürde yapılmış bazı çalışmaların özeti 120
Tablo 5.2 Akışkanlara ait reolojik parametrelerin değerleri 122
Tablo 6.1 Carbopol akışkanına ait reolojik parametrelerin değerleri 138
Tablo 8.1 Silindirlerin geometrik özellikleri ve boyutsuz parametreler 168
Tablo 8.2 Deneylerde kullanılan akışkanların reolojik özellikleri 168

ÖZET

Newtonyen olmayan akışkanların Taylor-Couette akışlarındaki davranışlarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi

Hüseyin ELÇİÇEK

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Bülent GÜZEL

Taylor-Couette reaktörleri akış yapılarının rejim geçişleriyle birlikte ortaya çıkan ikincil akış yapıları nedeniyle yüksek karıştırma verimi ve enerji dağılımı sağlarlar. Bundan dolayı arıtma proseslerinde sağlamış oldukları yüksek verimlilik nedeniyle alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, dar ve geniş boşluklarda Taylor-Couette reaktöründe Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanlar kullanılarak akış yapıları ve geçiş değerleri üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında, Taylor vorteks akış yapılarından önce aksisimetrik olmayan akış yapılarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda shear-thinning özelliğine sahip akışkanlarda Taylor vorteks akış yapısından modüle edilmiş ddalgalı vorteks akış yapısına geçiş sürecinde farklılıkların oluştuğu gözlemlenmiştir. Newtonyen ve shear-thinning akışkanlar için, birincil ve ikincil akış yapılarının kritik değerlerini ve akış durumlarının yapısal özellikleri Reynolds sayısı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ortaya çıkan vorteks yapılarının shear-thinning akışkanlarda değişken eksenel dalga boyuna sahip olduğu ve eksenel doğrultuda kaydığı gözlemlenmiştir. Kritik geçiş değerlerini karşılaştırabilmek amacıyla üç farklı Reynolds sayısı kullanılmıştır. Shear-thinning akışkanlarda viskozite gap boyunca değişmektedir. Reynolds sayısı tanımında viskozite ifadesi yerine gap içerisindeki tek bir değer kullanılması durumunda kritik akış yapılarının tanımlanmasında tutarsız sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Lokal viskoziteye göre tanımlanan yerel Reynolds sayısı kullanıldığında shear-thinning etkisinin kritik Reynolds sayısı üzerinde monotonik bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen çıktıların pratik uygulamalar için değerli

bilgi ve deneyim sağlayacaktır. Elde edilen sonuçların, yüksek kaliteli grafen oksit ürünleri sentezlemek için TC reaktörünün etkili bir şekilde tasarlanmasına ve geliştirilmesine yardımcı olacağına inanıyoruz. Elde edilen sonuçlar ayrıca TC reaktörlerindeki Newtonyen olmayan akışkan ve akış yapı etkileşiminin daha iyi anlaşılmasını sağlacaktır. Bu tez aynı zamanda grafit oksidasyon seviyesinin iyileştirilmesi üzerine daha yoğun araştırmalara ilham ve motivasyon da sağlayacaktır. Elde edilen sonuçlar ayrıca, balast suyunda doğal olmayan türlerin inaktivasyonunda alternatif bir yöntem olarak Taylor-Couette UV reaktörlerininde tasarlanabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Taylor-Couette akışı, Newtonyen olmayan akışkan, Rejim geçişleri, Akış yapıları, Süperhidrofobik yüzey

ABSTRACT

Experimental and numerical investigation of non-Newtonian fluids in Taylor-Couette flows

Hüseyin ELÇİÇEK

Department of Naval Architecture and Marine Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Bülent GÜZEL

Taylor-Couette reactors may offer an alternative treatment method in ballast water treatment or for flocculation of small size particles to be removed in water treatment processes due to created high energy dissipation and momentum transfer by Taylor vortices occurred during transitional flow regimes. In such cases, working fluids may show shear-thinning behaviour. In this study, the effect of shear-thinning behaviour on the flow structures and transition thresholds is experimentally investigated for Taylor-Couette flows having xanthan solutions in narrow and wide gap cases. The experiments presented in this paper establish the existence of non-axisymmetric flow structures before the Taylor vortex flow regime and an instability threshold to the modified wavy vortex flow from Taylor vortex flow in shear-thinning fluids i.e. altering the instability mechanisms. The critical Reynolds numbers for the first and second instabilities and the structural characteristics of the flow states are identified for Newtonian and shear thinning fluids in comparison. The vortices have varying axial wavelength and also drift along the axis in shear-thinning fluids. The variation of the critical Reynolds number with the shear-thinning index has been shown through three different Reynolds number definitions. It is shown that when the Reynolds number is defined using a single preferred value of radially varying viscosity, decreasing shear-thinning index may delay the appearance of Taylor vortices depending on the gap ratio. When the local Reynolds numbers defined based on the local viscosity have been taken into account, shear thinning index has a monotonic effect on the critical Reynolds number which decreases with decreasing shear-thinning index in both narrow and wide gaps in transition to Taylor vortex flow regime.

Results of this study should provide valuable information and experience for practical applications. Presented observations will help in designing and development of new TC reactors to synthesize high-quality products e.g. graphene-oxide solutions. Obtained results also provide a deeper understanding of the flow-structure interactions when changing the inner cylinder speed in TC reactors having non-Newtonian fluids. This thesis will also contribute to inspiration and motivation in carrying more intensive researche on improvement of the graphite oxidation level. The obtained results also show the possibility of utilizing the Taylor-Couette UV reactors as an alternative method in inactivation of non-native species in ballast water treatment.

Keywords: Taylor-Couette, non-Newtonian fluids, transition, flow structures, Superhydrophobic surfaces

1
Giriş

1.1 Literatür Özeti

Endüstriyel proseslerde ve teknolojinin gelişiminde, akışkan özelliklerinin ve kulanılan reaktörler içerisindeki akış davranışlarının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda akış yapılarında meydana gelen rejim değişimlerinin bilinmesi, ısıtma proseslerinde, sürtünme azalmasının tespiti ve taşıtların modellenmesi üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Ayrıca taşıtlarda motor performansını, yakıt tüketimini ve yapısal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Çünkü türbülanslı akış, laminer akışa göre çok daha yüksek sürtünme ve ısı kayıplarının oluşmasına neden olurlar. Bu gibi etkilerden dolayı, rejim geçişlerinin kritik değerlerinin ve geçişe yol açan ilgili fiziksel mekanizmaların bilinmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla rejim geçişlerinin belirlenmesi üzerine literatürde pek çok deneysel, teorik ve nümerik çalışma bulunmaktadır.

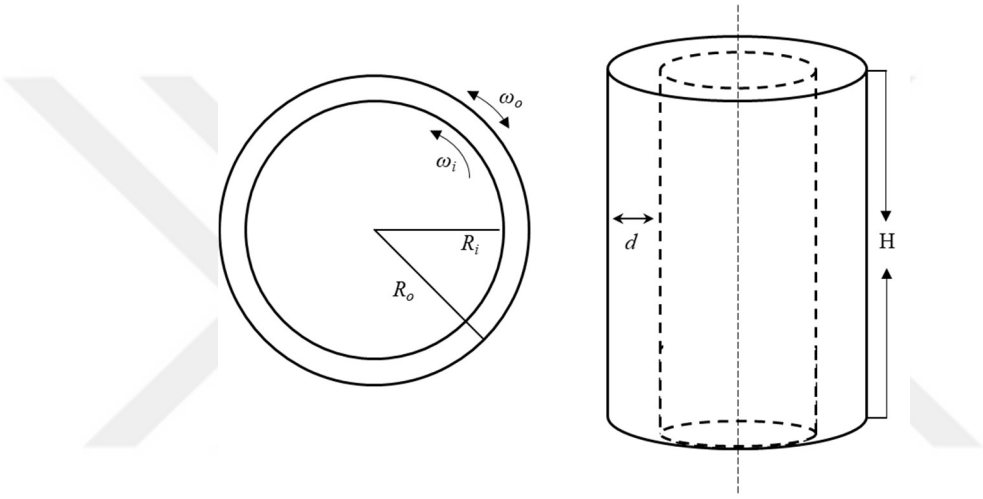
Reynolds (1883) yapmış olduğu deneysel çalışmada, boru içerisindeki bir akışkanın davranışını incelemiştir. Çalışmada belirli bir akışkan hızında laminer akışı, hızın artırılmasıyla laminer akış çizgilerinin yavaş yavaş bozulduğunu ve hızın daha da artırılmasıyla karmaşık özellikler gösteren türbülans akış rejimine geçişi gözlemlemiştir. Ortaya çıkan bu farklı akış yapılarının, akışkanın yoğunluğuna (ρ), hızına (u), dinamik viskozitesine (μ) ve boru yarıçapına (d) bağlı olduğunu gözlemlemiştir. Bu rejim geçişleri Reynolds sayısı (Denklem 1.1) kullanılarak açıklamaktadır [1].

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u d}{\mu} \tag{1-1}$$

Özellikle endüstride kullanılan kompleks akışkanların rejim geçişlerinin karakterize edilmesi oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu amaçla literatürde genellikle bağımsız dönen iki eşmerkezli silindir arasındaki akış (Taylor-Couette) gibi basitleştirilmiş geometriler kullanılmaktadır.

1.1.1 Taylor-Couette akışı

Taylor–Couette (TC) akışı akışkanlar mekaniğinin temel bir problemi olarak kabul edilmekte ve "*Akışkanlar dinamiğinin Hidrojen atomu*" olarak isimlendirilmektedir [2]. TC akışı ilk olarak Fransız Maurice Marie Alfred Couette ve İngiliz Geoffrey Ingram Taylor tarafından çalışılmış ve bundan dolayı bu tür akışlara bu iki araştırmacının ismi verilerek Taylor-Couette akışı veya dairesel Couette akışı olarak isimlendirilmiştir [3], [4]. Klasik TC akışı, iç içe geçmiş iki silindir arasında sıkıştırılamaz Newtonyen bir akışkanın akışı olarak tarif edilmektedir. Klasik TC düzeneği Şekil 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.1 Klasik TC düzeneği.

TC reaktörlerinde ortaya çıkan akış yapıları, iç ve dış silindirin dönme hızlarına bağlı olarak iç ve dış silindirlerin dönme hızlarından elde edilmiş Reynolds sayıları ile tanımlanmaktadır (Re_i ve Re_o).

$$\mathrm{Re}_i = \frac{\rho \omega_i R_i d}{\mu}, \mathrm{Re}_o = \frac{\rho \omega_o R_o d}{\mu} \tag{1-2}$$

Bu eşitliklerde sırasıyla; iki silindir arasındaki boşluk $d=(R_o-R_i)$, akışkanın dinamik viskozitesi μ, iç ve dış silindirin dönme hızları ω_i ve ω_o olarak ifade edilmektedir. Kritik Reynolds sayısı çap (η) ve en-boy (Γ) oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki şekilde formülize edilmiştir.

$$\eta = \frac{R_o}{R_i} \tag{1-3}$$

$$\Gamma = \frac{H}{d} \tag{1-4}$$

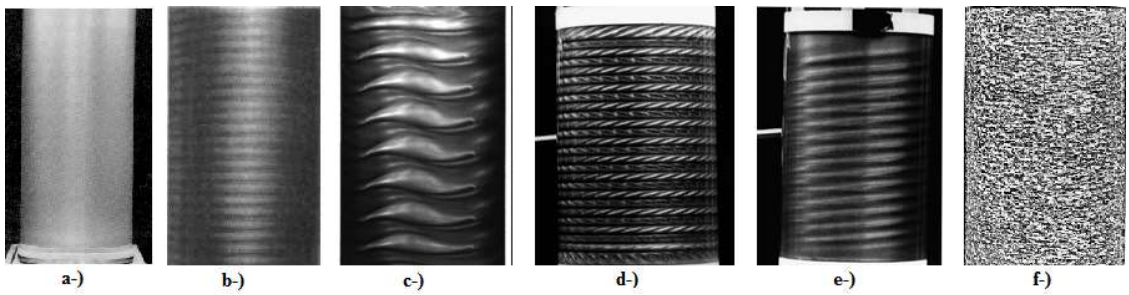
TC akışında bir diğer önemli boyutsuz ifade Taylor sayısıdır (*Ta*). Taylor, Reynolds sayısını modifiye ederek bu eşitliği elde etmiştir. Taylor sayısı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$Ta = \frac{(1+\eta)^4}{64\eta^2} \frac{(R_o - R_i)^2 (R_o + R_i)^2 (\omega_i - \omega_o)^2}{\nu^2} \tag{1-5}$$

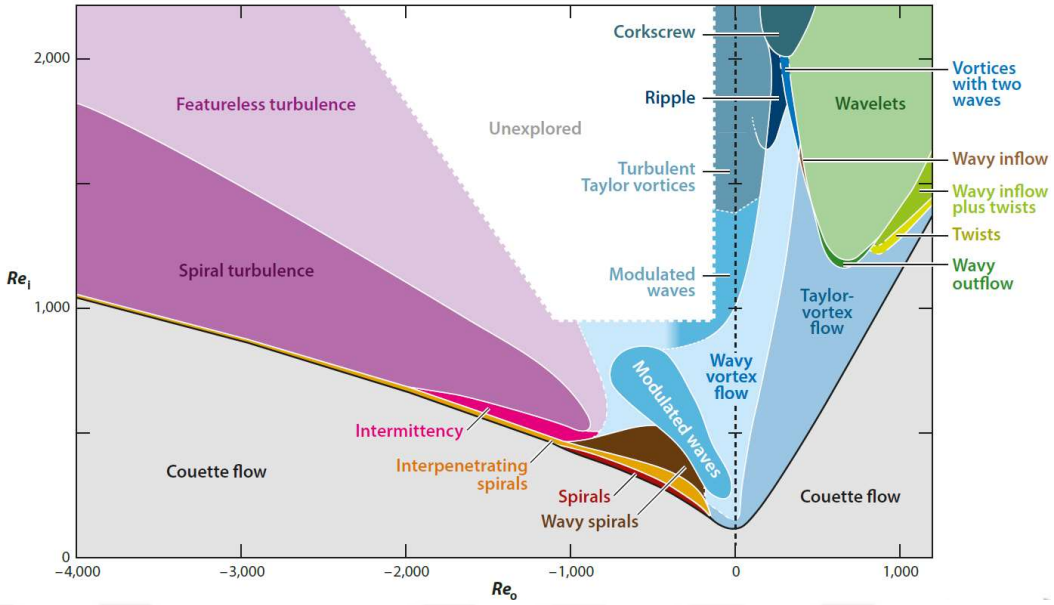
Aynı zamanda çalışmalarda kullanılan bir diğer boyutsuz sayı "*shear*" Reynolds sayısıdır.

$$\mathrm{Re}_s = \frac{2R_i R_o \left(R_o - R_i\right)}{\nu \left(R_o + R_i\right)} \left|\omega_o - \omega_i\right| \tag{1-6}$$

Coles (1965) yapmış olduğu çalışmada, farklı iç ve dış silindirin dönme hızlarında birbirinden farklı birden fazla akış yapılarının meydana geldiğini belirtmiştir. Yapmış olduğu deneysel çalışmalar neticesinde η=0,874 çap oranı için 28 farklı akış yapısının Reynolds sayısına bağlı olarak oluştuğunu gözlemlemiştir. Bu akış yapılarından bazıları; Taylor vorteks akışı (TVF), dalgalı vortex akışı (WVF), modüle dalgalı vorteks akışı (MWVF), spiral vorteks akışı (SVF), türbülanslı Taylor vorteks akışı (TTVF) ve türbülanslı akış şeklindedir. Bu akış rejimleri iç ve dış silindirin dönmee hızına bağlı olarak farklı Reynolds sayılarında oluşmaktadır [5]. Ortaya çıkan bu akış yapıları iç ve dış silindirin hızına bağlı olarak Andereck (1986) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucunda detaylı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 1.2) [6].



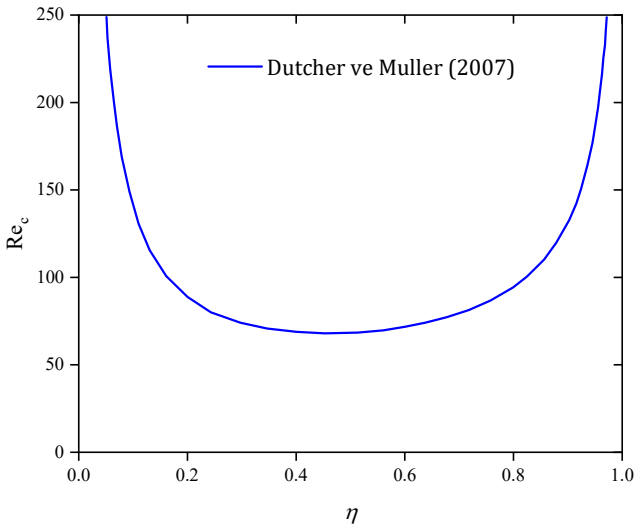
Şekil 1.2 Akış rejimlerinin görsel olarak görünümü a-) Couette akışı b-) TVF c-) WVF d-) bükümlü (twisted) vorteks e-) SVF f-) türbülans.



Şekil 1.3 Farklı Reynolds sayılarında tespit edilen akış yapıları (η=0,883) [6].

1.1.2 Newtonyen akışkanlar için TC rejim geçişleri

Newtonyen bir akışkan için Taylor Couette akışında oluşan akış yapıları kullanılan silindirlerin çap oranına bağlı olarak değişmektedir [7], [8]. Dutcher ve Muller (2007) yapmış oldukları çalışmada, Couette akışından TVF akışına geçiş için kritik Reynolds sayısının çap oranına bağlı olarak değişimini ifade eden bir fonksiyon önermişlerdir. Bu fonksiyonuna göre kritik Reynolds sayısının Şekil 1.4'te görüldüğü gibi değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 1.4 Kritik Reynolds sayısının çap oranına bağlı olarak değişimi [8].

Farklı araştırmacılar tarafından Couette akışından TVF akışına geçiş, farklı çap oranlarına karşılık kritik Reynolds sayıları Tablo 1.1'de özetlenmiştir. Diğer akış rejimleri için kritik değerler ise Nemri (2013) tarafından yapılan çalışmada ortaya konulmuştur. Farklı çap oranlarına göre rejim geçişleri Tablo 1.2'de verilmiştir [9].

Tablo 1.1 TVF geçiş rejiminin farklı çaplardaki kritik Reynolds sayıları.

Çap oranı (η)	Kritik Re Sayısı	Kaynak
0,85	125	[9]
0,877	119	[5], [10]
0,877	119,3	[7]
0,877	122	[11]
0,68	79,6	[7]
0,68	80	[11]
0,65	75	[12]

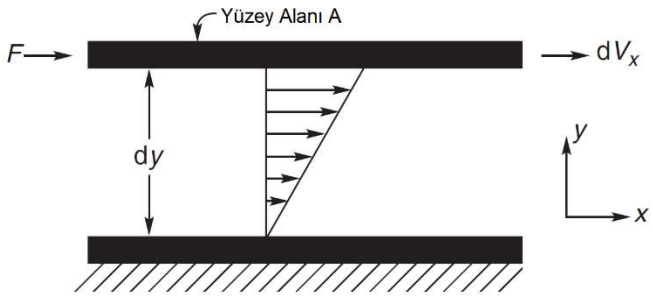
Tablo 1.2 Rejim geçişlerinin kritik Reynolds sayıları [9].

η=0,85		η=0,687	
Akış yapıları	Kritik Re Sayısı	Akış yapıları	Kritik Re Sayısı
Couette	Re ≤ 125	Couette	Re ≤ 79
TVF	125≤ Re ≤ 165	TVF	79 ≤ Re ≤ 387
WVF	165 ≤ Re ≤ 680	WVF	387 ≤ Re ≤ 1793
MTVF	600 ≤ Re ≤ 1150	MTVF	1793 ≤ Re ≤ 2133
TTVF	Re > 1150	TTVF	Re > 2133

1.1.3 Newtonyen bir akışkanın temel tanımı

Birbirinden *dy* kadar uzakta iki paralel düzlem arasında yer alan ve Şekil 1.5'te gösterildiği gibi bir sıvı tabakasını düşünelim. Bu sıvı tabakasına şekilde gösterildiği gibi bir kuvvet uygulandığında akışkan tabakalarını kesmeye zorlayacak ve uygulanan kuvvete eşit ve zıt yönlü bir iç sürtünme kuvveti ile dengelenecektir. Sıkıştırılamaz bir Newtonyen akışkan için laminer akışta ortaya çıkan kayma gerilmesi akışkanın kayma hızı ve viskozitesine bağlı olarak değişmektedir. Kayma hızı, akışkan içerisindeki hız gradyanı tanımlanmaktadır. Kayma gerilmesinin, viskozite ve kayma hızına bağlı ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{F}{A}=\tau_{yx}=\mu\left(-\frac{dV_x}{dy}\right)=\mu\dot{\gamma}_{yx} \tag{1-7}$$



Şekil 1.5 Tek yönlü kayma akışının şematik gösterimi.

Viskozite, sabit olduğu durumlarda kayma hızı ve gerilmesinden bağımsızdır ve yalnızca akışkanın cinsine, sıcaklığına ve basıncına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 1.5 ve Denklem 1.7, temel akış durumunu temsil etmektedir. Daha karmaşık üç boyutlu Newtonyen akışkanın *x* düzlemi için kısmi diferansiyel denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [13], [14]. Diğer düzlemler için de benzer kayma gerilmesi ifadesi benzer şekilde elde edilebilir.

$$\tau_{xx}=-2\mu\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}+\frac{\partial V_z}{\partial z}\right) \tag{1-8}$$

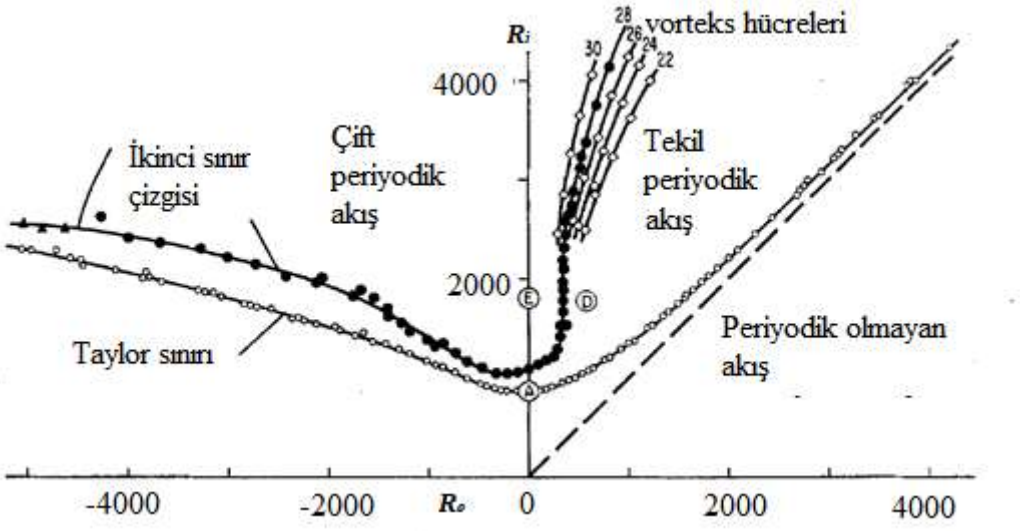
$$\tau_{xy}=-\mu\left(\frac{\partial V_x}{\partial y}+\frac{\partial V_y}{\partial x}\right) \tag{1-9}$$

$$\tau_{xz}=-\mu\left(\frac{\partial V_x}{\partial z}+\frac{\partial V_z}{\partial x}\right) \tag{1-10}$$

1.1.4 Literatür çalışmaları

TC deney düzeneği, akışın görselleştirilmesinin kolaylığı, dar boşluklarda çalışma imkanı sağlaması ve akış çizgilerinin belirgin bir şekilde ortaya çıkması gibi önemli avantajları nedeniyle literatürde çok fazla kullanım alanı bulmaktadır. Literatürde ilk deneysel çalışma 1886 yılında Couette tarafından ve ilk matematiksel çalışma 1923 yılında Taylor tarafından gerçekleştirilmiş olup, bu çalışmaların ardından birçok nümerik ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

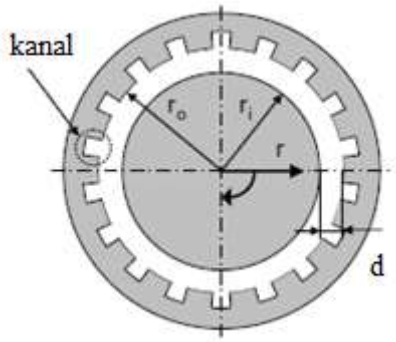
Basınç ve hız profili, ilk olarak Wendt (1933) tarafından çalışılmış ve ayrıca farklı hız değerleri için tork ölçümleri yapılmıştır [15]. Bir diğer önemli çalışma ise Taylor (1936) tarafından gerçekleştirilmiştir. Taylor yapmış olduğu çalışmada farklı iç silindir çapları için tork ölçümleri gerçekleştirmiştir [16]. Taylor vorteks akışın tork ölçümlerinin, iç silindirin dönme hızına bağlı olarak matematiksel ifadesi Donnelly and Simon (1960) tarafından ortaya konulmuştur [17]. Nakabayashi ve ark. (1982) yapmış oldukları çalışmada yüzey pürüzlülüğünün iç içe geçmiş iki silindir arasındaki akışa etkilerini araştırmışlardır. Silindirin yüzey pürüzlülüğünün hem geçiş rejiminde hem de tam gelişmiş türbülanslı akış bölgelerinde sürtünme katsayısı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [18]. Coles (1964) yapmış olduğu çalışmada ilk dairesel Couette akışının stabilitesini ve rejim geçiş sınırlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda rejim geçişleri iç ve dış silindirin dönme hızlarına bağlı olarak Şekil 1.6'da görüldüğü gibi gerçekleşmiştir [5].



Şekil 1.6 Dairesel Couette akışının rejim geçiş sınırları [5].

Taylor-Couette akışının çap oranı akış yapılarını etkileyen en önemli parametreler arasında yeralmaktadır. Çap oranı oluşan Taylor halkalarının sıklığını ve belirginliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Sadece iç silindir hareketli ve η=0,909 iken Taylor halkaları belirgin ve sık bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Ancak çap oranı η=0,5 olduğunda, Taylor halkalarının belirginliği azalmakta ve daha az sayıda Taylor halkası oluşmaktadır [19]–[21]. Mehidi ve ark. (2008) iç silindirin dönme hızına bağlı olarak dairesel Couette akışından Taylor vorteks rejimine geçişi nümerik

olarak incelenmişlerdir [22]. Lee ve ark. (2009) yapmış oldukları çalışmada dış silindir üzerinde oluşturulan kanalların (Şekil 1.7) TC akışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, dış silindir üzerinde bulunan kanalların laminer geçiş üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Ancak, artan kanal sayısı türbülanslı Taylor vorteks akışına geçişi hızlandırmıştır [23]. Xu ve ark. (2010) iki eş eksenli konik silindir arasındaki akışın davranışlarını sadece iç silindir hareketli iken sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, meridional ve radyal akış konik silindir içerisindeki akış yapılarının oluşumunu etkilediği belirtilmektedir. Meridional akış küçük tepe açısında veya temel akış ve helisal girdaplarda etkili iken, radyal akış daha büyük tepe açısında veya sabit vorteks akışında etkilidir [24]. Naseem ve ark. (2019) geniş boşluk kullanılarak Taylor Couette akışındaki kararsızlıklar incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda iki spesifik vorteks akışı gözlemlenmiştir. Birinci vorteks akış silindirin orta kısmında oluşurken ve ikinci akış dış silindir yakın oluşmuştur. Silindirlerin dönmesiyle vorteks akışı iç silindirden dış silindire doğru hareket eder. Ayrıca türbülanslı akış yapıları görüntü işleme ile analizi gerçekleştirilmiş ve vortekslerin bozulma süreleri incelenmiştir [25].



Şekil 1.7 Dış silindir üzerinde açılan kanallar [23].

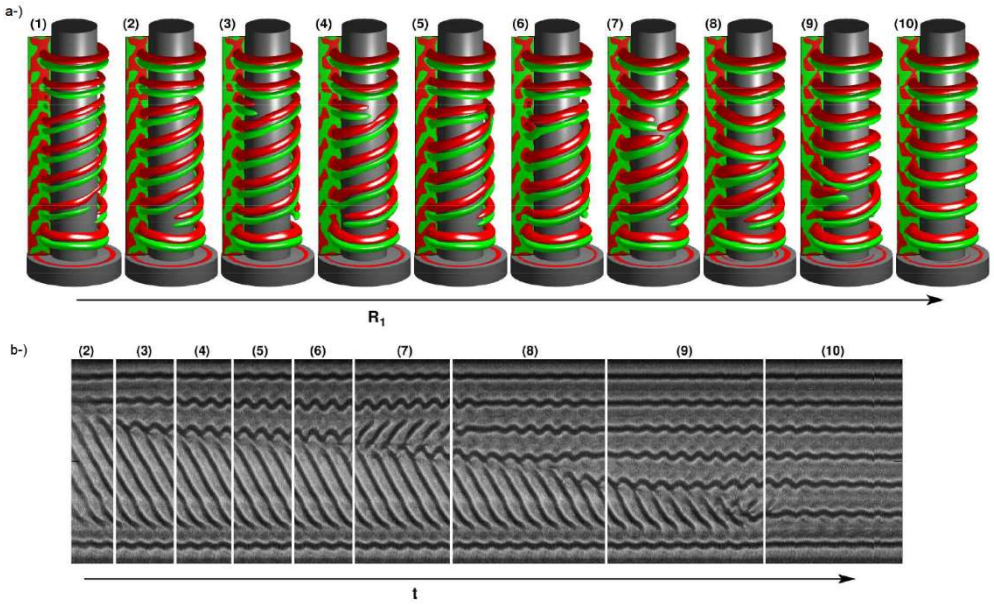
Ravelet ve ark. (2010) iki eksenel silindir arasındaki akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar farklı silindir hızları için tork verilerini elde etmişlerdir. Ayrıca, iç silindir hareketli ve dış silindir sabit iken histerez olmadan geçişin her yerde sürekli ve pürüzsüz olduğu ancak silindirlerin ters dönmesiyle iki farklı geçişin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [26]. Tokgoz ve ark. (2011), akış yapılarının tamamen türbülanslı Taylor-Couette akışının tork değerlerine etkisi,

tomografik PIV kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Akış yapılarının, silindirlerin dönme hızından büyük ölçüde etkilendiğini doğrulamışlardır [27]. Li ve ark. (2010) iki konik silindir arasındaki Taylor vorteks akışının geçiş rejimini nümerik analiz yöntemini kullanarak incelmişlerdir. Çalışma sonucunda kritik Reynolds sayısının 117 olduğu vurgulanmıştır [28]. Xu ve ark. (2010) iki eş eksenli konik silindir arasındaki akışın davranışını nümerik olarak incelenmişlerdir. Taylor-Couette akışının konik silindirler arasındaki rejim geçişlerini incelemeye çalışmışlardır. Ortaya çıkan akış yapılarının meridional akış ve radyal akış tarafından belirlendiğini vurgulamışlardır. Küçük tepe açısına sahip konik akışta meridional akış etkili iken, tepe açısının artmasıyla radyal akışın etkili olduğu belirtilmiştir [24]. Sodjavi ve ark. (2018) iç silindir yüzeyindeki oluşturulan kanal sayısının sürtünme ve akış üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 0,9375 çap oranına sahip bir TC deney düzeneği kullanılmıştır. İç silindirlerin yüzeyinde oluşturulan kanalların akış yapılarının oluşumunda herhangi bir etkisi yokken, sürtünme katsayısında artışa neden olduğu rapor edilmiştir [29]. Dou ve ark. (2008) enerji gradyan metodunu kullanarak Taylor Couette akışındaki kararsızlıkları analiz etmişlerdir. Araştırmacılar enerji gradyan teorisi ile Taylor-Couette akışındaki rejim geçiş koşullarının düzlemsel Couette akışı ile ilişkilendirilebileceğini belirtmişlerdir. Enerji gradyanı teorisi, akış kararsızlıkların belirlenmesi ve türbülanslı rejime geçiş için düzlemsel ve dönen akış konfigürasyonlarında kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir [30]. Kikura ve ark. (2005) manyetik özellik gösteren akışkanların hız profilini ultrasonik hız profili (UVP) metodunu kullanarak ölçmüşlerdir. Çalışma sonuçları UVP yönteminin, küçük en boy oranı için manyetik özellik gösteren akışkanın yapısı hakkında bilgi sağlayabildiğini göstermiştir [31]. Spandan ve ark. (2016) iki farklı çap oranına sahip TC deney düzeneğini kullanarak türbülans akışta oluşan akış yapılarını incelemişlerdir. Çap oranının oluşan akış yapıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca her iki yarıçap oranında akış yapılarının silindir boyunca homojen dağılım gösterdiğini gözlemlemişlerdir [32].

Koeltzsch ve ark. (2003) yüzey aktif maddesi kullanılarak türbülanslı akışta sürtünme azalmasını incelemişlerdir. Çalışmada dış silindir hareketli iken iç silindir sabit tutulmuştur. Reynolds sayısı 15000'e eşit iken maksimum sürtünme azalması

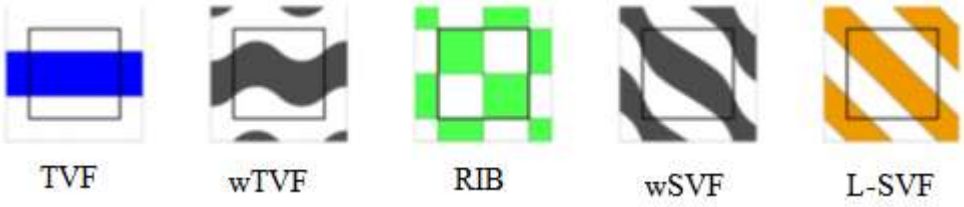
%30 olarak bulunmuştur [33]. Murai ve ark. (2008) TC deney düzeneğini kullanarak hava kabarcıklarının rejim geçişine ve sürtünme azalmasına olan etkilerini incelemişlerdir [34]. Srinivasan ve ark. (2015) iç silindir yüzeyini süperhidrofobik kaplama ile kaplayarak türbülanslı akışta meydana gelen sürtünme azalmasını araştırmışlardır. Çalışmada, Reynolds sayısı $8x10^4$ iken maksimum sürtünme azalması değerinin %22 olarak gözlemlenmiştir [35]. Yapılan farklı bir çalışmada, Bhambri ve ark. (2017) üç farklı polisakaritin türbülanslı akışta sürtünme azalmasına olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan selüloz nanokristallerin %30 oranında sürtünme azalmasına katkı sağladığı vurgulanmıştır. Maksimum sürtünme azalması ise %80 ile yüzey aktif maddesinin kullanımı ile elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca, Reynolds sayısının sürtünme azalmasına olan etkileri ayrıca incelenmiştir [36]. Keller ve ark. (1975) polimer kullanımı ile türbülans akışta %50 sürtünme azalması olduğunu belirtmişlerdir [37]. Bhambri ve ark. (2016) sıcaklık-duyarlı polimer malzemesi sürtünmeyi azaltmak amacıyla TC deney düzeneğinde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 400 ppm konsantrasyonda sürtünmenin %50 oranında azaldığı rapor edilmiştir [38]. Greidanus ve ark. (2011) Taylor-Couette deney düzeneğinde bazı ticari ürünlerin yüzey sürtünmesini azaltmak amacıyla kullanılmasını araştırmışlardır. Sürtünme azalmasını tork ölçümlerini yaparak gerçekleştirmişlerdir. Tork ölçümleri sonucunda kullanılan ticari ürünlerin sürtünme azalması üzerinde etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir [39].

Altmeyer ve ark. (2010) Taylor-Couette deney düzeneğini kullanarak Taylor vorteksleri ile spiral vortekslerin arasındaki geçişlerini incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada akış yapılarının, wSVF akış yapısından TVF akış yapısına geçiş verilerini deneysel ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır (Şekil 1.8). Düşük iç silindir hızlarında akış tamamen wSVF hakim iken, iç silindir hızının artırılmasıyla kademeli olarak TVF tüm silindir boyunca oluşmaktadır. Araştırmacılar deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının birbiri ile uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir [40].



Şekil 1.8 wSVF akışından TVF akışına geçiş a) simülasyon b) deneysel sonuçlar [40].

Hoffmann ve ark. (2009) Taylor vorteks akışında ortaya çıkan ikincil akışların, dalgalı Taylor ve spiral vortekslerin arasındaki geçişlerin bifürkasyon davranışı, dinamiklerini ve yapısal özelliklerini simülasyon analizi ile incelemişlerdir. Araştırmacılar ortaya çıkan ikincil akışları Şekil 1.9'da görüldüğü gibi sınıflandırmışlardır [41].



Şekil 1.9 TC akışında ortaya çıkan ikincil akışlar [41].

Climent ve ark. (2007) kabarcıkların TC deney düzeneği içerisinde meydana gelen akış davranışlarını incelemişlerdir. Kabarcıklar iç silindirin dönme hızına bağlı olarak, iç silindir cidarı boyunca Taylor vortekslerin merkezinde veya dalgalı vortekslerin içinde belirli bölgelerde birikme eğiliminde olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca kabarcıkların çeşitli rejim geçişlerini özetleyen bir faz diyagramı araştırmacılar tarafından oluşturulmuştur [42].

1.1.5 Farklı disiplinlerde gerçekleştirilen çalışmalar

Taylor-Couette deney düzeneği temel akışkanlar mekaniği uygulamaları dışında; reaksiyon, filtreleme, ekstraksiyon, biyoreaktör, ısı transferi ve üretim prosesleri gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Literatürde farklı disiplinlerde yapılmış çalışmalar bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

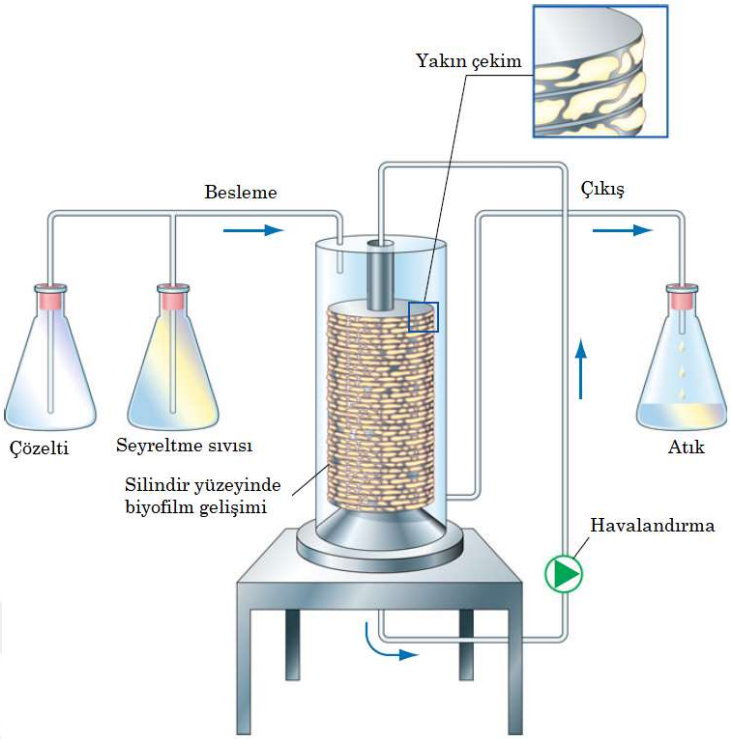
Mao ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada Taylor-Couette deney düzeneğini kullanarak farklı akış yapılarında flokülasyon verimliliğini araştırmışlardır. Çalışma neticesinde flokülasyon verimliliğinin WVF akışında maksimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Diğer akış rejimlerinde verimliliğin düştüğü tespit edilmiştir. WVF akışındaki dalgaların zamanla daralıp genişlemesinden dolayı parçacıkların etkileşiminin arttığını ve bununla birlikte flokülasyon verimliliğinin arttığını belirtmişlerdir [43]. Lee ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada Taylor vorteksinin kristalleşme üzerindeki etkisini iç silindirinin dönme hızı, besleme konsantrasyonu ve besleme akış hızı parametrelerini dikkate alarak incelemişlerdir. İç silindirin dönme hızının artmasıyla türbülanslı Taylor vorteksi, kristalleştiricinin giriş bölgesinde daha yüksek süper doyma noktasına indüklenmesini sağlar ve bu durum daha küçük kristal boyutunun oluşmasına neden olur [44]. Kang ve ark. (2003) Taylor vorteksinin, kalsiyum karbonat kristali üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda Taylor vorteksleri, kristal çekirdekleşmesi ve büyümesi gibi kristalleşme kinetiğinin önemli parametreleri üzerinde etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir [45]. Ahmad ve ark. (2014) iç ve dış silindirleri birbirine zıt yönde dönen bit TC deney düzeneği kullanarak kadmiyum ekstraksiyonunu incelemişler ve sonuçları klasik reaktör ile karşılaştırmışlardır. Yüksek karıştırma hızlarında oluşan türbülanslı akışının kadmiyum ekstraksiyonunu artırdığını tespit etmişlerdir. Ekstraksiyon verimliliği klasik karıştırmalı bir reaktör ile karşılaştırıldığında, TC deney düzeneğinin %15 daha fazla ekstraksiyon verimliliğine sahip olduğu vurgulanmıştır [46]. Forney ve ark. (2003) üç farklı reaktör kullanarak *Escherichia coli* (*E.coli*) için inaktivasyonunu araştırmışlardır. TC deney düzeneğinin kullanımı ile uniform olmayan radyasyon seviyelerinin ve UV reaktörlerinde konsantrasyon sınır tabakası gibi sorunların büyük ölçüde ortadan kaldırıldığı görülmüştür. Aynı zamanda UV lambalarının

bakım gereksinimlerinin azalmasına katkı sağlamıştır. TC deney düzeneğinin diğer iki reaktöre göre *E.coli* inaktivasyon da daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir [47]. Forney ve ark. (2008) yapmış oldukları çalışmada *E.coli* inaktivasyonunu TC deney düzeneği kulanarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, türbülanslı ve özellikle Taylor-Couette akışında UV ışınlarının akış içerisinde daha düzenli yayıldığını göstermektedir. Bu durum *E.coli* inaktivasyonunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir. Bununla birlikte, çok yüksek iç silindir hızlarında *E.coli* inaktivasyonu için çok uzun reaktörlerin gerekli olduğunu belirtmişlerdir [48]. Ye ve ark. (2008) laminer Taylor-Couette akışında UV dezenfeksiyonu deneysel ve sayısal olarak incelenmişlerdir ve aynı zamanda elde edilen veriler türbülanslı akış ve laminer Poiseuille akış sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Laminer Taylor-Couette akışının inaktivasyon seviyesinin Laminer Poiseuille akışına göre daha yüksek olduğu hem deneysel hem de nümerik analiz sonuçlarında vurgulanmıştır [49]. Orlowska ve ark. (2014) *E.coli* bakterisinin inaktivasyonu için pilot ölçekli Taylor-Couette UV ünitesi kullanarak TC akışı ile Couette-Poisuille (CP) akış koşullarını karşılaştırmışlardır. Deney sonuçları TC akışının CP akışına kıyasla daha yüksek mikrobiyal inaktivasyon verimliliğine sahip olduğunu rapor etmişlerdir [50]. Benschop ve ark. (2018) yapmış oldukları çalışmada TC deney düzeneğini kullanarak, sürtünmeyi farklı yüzey koşullarını inceleyerek ölçmüşlerdir [51]. Dłuska ve ark. (2007) TC deney düzeneğini kullanarak homojen ve küçük damlacık boyutuna sahip emülsife yakıt elde edilebileceğini göstermişlerdir. Aynı zamanda kompakt yapısı nedeniyle TC deney düzeneğinin emülsife yakıt enjeksiyonunda dizel motorlarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir [52]. Ameer ve ark. (1999) yapmış oldukları çalışmada TC reaktörünün yoğun bakım ünitelerinde akut hastaları için bölgesel heparinizasyon işlemlerinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [53]. Kong ve Vigil (2013) yapmış oldukları Chlorella vulgaris türü kullanılarak TC deney düzeneğinin mikroalg yetiştirme potansiyeli araştırılmıştır. Biyokütle verimliliği iç silindir dönme hızının artmasıyla arttığı, ancak daha yüksek dönme hızlarında verimliliğe önemli ölçüde katkı sağlamadığı görülmüştür. Genel olarak, biyokütle üretimi ve karbondioksit yakalama için fotobiyoaktör olarak TC reaktörünün kullanılabileceği göstermişlerdir [54]. Papáčeka ve ark. (2011) mikroalg gelişimini modelleyebilmek amacıyla fotobiyoreaktör olarak TC

reaktörünü tercih etmişlerdir [55]. Baek ve ark. (2018) gazların çözünürlüğünü ve çözünme hızını artırmak için TC deney düzeneğini kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda N_2O indirgeme hızının yaklaşık %22 oranında arttığı belirtilmiştir. Araştırmacılar gaz halindeki maddenin çözünürlüğünün ve çözünme hızını arttırmak için TC deney düzeneğinin alternatif karıştırıcı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [56]. Kim ve ark. (2014) elektroforez kaplama yönteminde kullanılan karbon karasını polimer ile kaplamak için Taylor-Couette reaktörünü kullanmışlardır. Klasik reaktörlerde homojen bir akışkan hareketinin sağlanmasındaki ve kütle taşınımının sürekliliğindeki zorluklar nedeniyle TC reaktörü tercih edilmiştir. İç silindirin dönme hızının artmasıyla, karbon siyahının homojen dağılımından dolayı boyut ve yoğunlukta azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Boyut ve yoğunluğun azalması ile siyah pigmentin elektrik alanın altındaki hareketinin düzelmesine neden oldu. TC reaktörünün kullanımı, siyah pigmentlerin özelliklerinin iyileşmesine ve verimliliğin artmasına katkı sağlamıştır [57]. Park ve ark. (2015) grafen oksitin hazırlanmasında grafitin oksitlenebilmesi için TC reaktörünü kullanmışlardır. TC reaktörünün kullanımı ile grafit ve oksitleyici ajanların karışımının ve kütle transferinin verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamıştır. Bu durum grafitin grafen oksit dönüşüm verimliliğini artırmıştır. Aynı zamanda grafen oksit üretim reaksiyon süresinin önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir [58]. Park ve ark. (2017) yapmış oldukları bir diğer çalışmada TC deney düzeneğinde sülfürik asitin yeniden kullanımı ile grafen oksit üretimini incelemişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda sülfürik asidin bu şekilde yeniden kullanımı ile hem grafen oksit üretim maliyetinin düşürülmesine hem de çevre dostu bir üretim prosesi gerçekleştirdiklerini vurgulamışlardır. Aynı zamanda önerilen bu çevre dostu grafen oksit üretim prosesinin kısa sürede endüstriye uygulanacağını belirtmektedirler [59]. Park ve ark. (2017) TC deney düzeneğini kullanarak, kayma gerilmesinin etkisi ile grafen oksit üretimini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, Kayma gerilmesiyle birlikte oluşan Taylor vortekslerin, yüksek verimlilikte (>% 90) geniş yüzey alanına sahip tek katmanlı grafen oksit üretimini 60 dk içerisinde gerçekleştirildiğini rapor etmişlerdir [60]. Yapılan farklı bir çalışmada da TC deney düzeneği kullanılarak yüksek kaliteli grafen dispersiyonunun elde edilebileceğini vurgulamışlardır. Grafen

oksit elektronik cihazlar, kompozit malzemeler, enerji depolama sistemleri ve ısı üreten/dağıtan cihazlar dâhil olmak üzere birçok uygulamada etkin olarak kullanıldığından üretilen grafen oksitin kalitesi önem taşımaktadır [61]. Hajmohammadi ve Ali (2019) manyetik alanın, iki silindir arasında bulunan nano-akışkanın akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, manyetik alan iç ve dış silindirlerin kayma gerilmesini ve ısı transferini önemli ölçüde etkilemektedir [62]. Park ve ark. (2016) arsenik gideriminde kullanılan Fe_3O_4, Taylor-Couette akış reaktörü kullanılarak grafen/CNT ile fonksiyonlandırılmıştır. Bu yöntem kullanılarak fonksiyonlandırılmış Fe_3O_4'ün yüzey temas alanını artığından dolayı arsenik giderim verimliliğini artırdığı gözlemlenmiştir [63]. Dutta ve Ray (2004) yapmış oldukları çalışmada üç farklı organik bileşiğin fotokatalitik bozunmasının yanı sıra akış gelişimini de araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda, gelişmekte olan ülkelerde TC reaktörünün suyun arıtımında kullanılabileceğini vurgulamışlardır [64]. Patel ve ark. (2010) Trichoderma reesei Rut C-30 mikroorganizmasının yetiştirilmesi, protein üretim ve morfolojisini incelmek için TC biyoreaktörü tasarlamışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kayma hızının artmasıyla düşük protein üretim hızı ve aktivitesi gözlemlenirken, parçalanma oranının arttığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, hücre kalınlığı silindir hızının 100 rpm 'den 400 rpm artmasıyla 8,3 μm değerinden 4,3 μm değerine azalmıştır. Araştırmacılar, tasarlanan TC biyoreaktörü ile daha büyük boyutta mikroorganizmaların daha büyük örnekleme hacimlerinde yetiştirilmesine imkân sağladığını belirtmişlerdir [65]. Cojocaru ve ark. (2009) çapraz akışlı ultrafiltrasyon membranında, permeat akısını arttırmak ve tıkanmaları azaltmak amacıyla iç silindiri hareketli bir membran modülü kullanarak optimizasyon işlemi yapmışlardır. İç silindirin dönmesi ile oluşan türbülanslı akış, akı ve membran geçirgenliğini artırırken akı düşüşündeki azalma meydana gelmiştir. Ayrıca membran yüzeyinin kendi kendini temizleme etkisine yol açmıştır [66]. Qiao ve ark. (2018) Taylor-Couette biyoreaktörünün farklı yüzeylerinden oksijen taşınımını hem deneysel hem de simülasyon olarak gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen hem deneysel hem de simülasyon sonuçlarına göre, denge oksijen konsantrasyonunun ve kütle transfer katsayısının Reynolds sayısı ile arttığı görülmüştür [67]. Pineda ve Kang (2016) TC deney düzeneğinde nano absorbant

kullanarak CO_2 absorbsiyonunu araştırmışlardır. Türbülanslı Taylor-Couette akışında Reynolds sayısı $4x10^4$ iken CO_2 absorpsiyonun %20 arttığı gözlemlenmiştir [68]. Fénot ve ark. (2011) yapmış oldukları çalışmada, farklı geometrik ve fiziksel parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmacıların nümerik ve deneysel sonuçlarını karşılaştırmışlardır [69]. Liu ve ark. (2011) TC deney düzeneğinde Şekil 1.7'de olduğu gibi dış silindirin iç yüzeyinde oluşturulan farklı kanallarının sıcaklık gradyanı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonuçları Reynolds sayısının küçük olduğu durumlarda sıcaklık gradyanına bağlı kaldırma kuvvetinin helisel akış oluşturduğunu göstermiştir. Düz ve 6 kanallı dış silindirin sıcaklık gradyanı üzerine etkili olmadığı bulunmuştur. Aynı zamanda sıcaklık gradyanı arttıkça geçiş rejimi için kritik Reynolds sayısının azaldığı gözlemlenmiştir [70]. Hubacz ve ark. (2013) etkili karışım ve ısı transferi sağlaması nedeniyle nişasta jelatinleşmesi prosesinde TC reaktörü kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, çap oranı 0,808 iken düşük silindir hızlarında bile nişasta jelatinleşme derecesinde artış gözlemlenmiştir. Çap oranı 0,762 olduğunda nişasta üretiminde artış meydana gelirken mekanik enerjinin yayılmasında azalma ve bazı olumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu olumsuz etkilerin üstesinden gelmek için daha yüksek iç silindir hızlarının gerekli olduğu vurgulanmaktadır [71]. Aynı zamanda TC reaktörü dinamik kayma gerilmesi sağlaması nedeniyle biyofilmlerden bakterilerin ayrıştırılması amacıyla kullanılmaktadır [72], [73]. Rochex ve ark. (2008) kayma gerilmesinin biyofilm oluşumu üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla konik TC reaktörünü (Şekil 1.10) kullanmışlardır [74].



Şekil 1.10 Biyofilm ayrıştırılmasında kullanılan TC reaktörü [72].

TC deney düzeneği proteinlerin maruz kaldığı akış koşullarını ve davranışını incelemek amacıyla literatürde kullanılmaktadır [75], [76]. Ayrıca akış rejimlerin belirginliği, kontrol edilebilirliği ve deney düzeneğinin kurulumun kolay olması nedeniyle birçok biyomühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir [77]–[79]. Aynı zamanda akış içerisinde ölü bölgelerin olmaması, biyoreaktör boyunca rejimin stabil olması diğer önemli tercih edilme şartları arasındadır [80]. TC reaktörü, Taylor vortekslerin filtre yüzeyini sürekli temizlemesi ve konstrasyon polarizasyon oluşumunun minimum düzeyde oluşması nedeniyle filtrasyon proseslerinde de tercih edilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Endüstriyel proseslerde ve teknolojinin gelişiminde, akışkan özelliklerinin ve bu akışkanların reaktör içerisindeki davranışlarının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan döner tip reaktörlerin en fazla kullanım alanları arasında filtre ve karıştırma sistemleri yer almaktadır. Son yıllarda döner tip reaktörler içerisinde Taylor-Couette reaktörü deney düzeneği kurulumunun basitliği ve içerisindeki akış yapılarının kontrol edilebilme kolaylığı gibi avantajları nedeniyle akademide ve endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu reaktörlerin kullanıldığı alandaki sıvılar dikkate alındığında, yağ/yakıt karışımları, çamur çözeltileri, petrol sondaj işlemleri, grafen çözeltileri gibi Newtonyen olmayan akışkanların çok fazla kullanıldığı görülmektedir. Bundan dolayı özellikle Newtonyen olmayan akışkanların TC reaktörü içerisindeki davranışının belirlenmesi proses verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin literatür çalışmaları içerisinde yeralan Newtonyen olmayan akışkan olarak kabul edilen grafitin TC reaktörü içerisindeki oksidasyon seviyesi TVF akışında artış gösterirken, WVF akışında oksidasyon seviyesinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

Bununla birlikte Newtonyen olmayan akışkanlar için reaktör içerisinde ortaya çıkan akış yapılarını tanımlamada farklı araştırmacılar tarafından kullanılan Reynolds sayılarında akış yapılarının karakterizasyonunda tutarsız sonuçların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Aynı zamanda, farklı yüzey koşularının (hidrofobik yüzey) akış stabilitesi ve akış yapılarının geçişi üzerindeki etkileri birçok mühendislik uygulamasında önem arzetmektedir. Örneğin, boru akışlarında rejim geçişinin gecikmesi, akışkan transferini gerçekleştirmek için gereken güçte önemli bir azalmaya yol açabilmektedir. Daha büyük ölçekli yüzeylerde meydana gelecek düzenlemelerle önemli bir tasarruf kaleminin ortaya çıkacaktır.

Ortaya çıkan bu gerekçelerden dolayı bu çalışmada öncelikle, Newtonyen olmayan (shear-thinning) akışkanların; akışkan karakteristik özelliklerinin, silindirler arasındaki boşluk oranının, silindirlerin dönme hızlarının ve yönlerinin TC reaktörü içerisinde oluşan akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerleri üzerindeki etkilerinin

belirlenmesi, aynı zamanda ortaya çıkan akış yapıları ve rejim geçiş değerlerini tanımlamak amacıyla literatürde kullanılan Reynolds sayılarına alternatif bir Reynolds sayısının tanımlanması ve süperhidrofobik yüzey koşullarının etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında ayrıca, grafen oksit kalitesini artırabilme potansiyeli ve balast suyu arıtma sistemi için alternatif bir filtre sistemi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması ile birlikte özellikle Newtonyen olmayan akışkanların kullanıldığı endüstrilerde akış davranışının ve kritik rejim geçişlerinin proses verimliliği üzerindeki farkındalığını artırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Tez çalışmasında, iki farklı boşluk oranına sahip TC reaktörü kullanılarak Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanların, reaktör içerisindeki davranışı incelenecektir. Çalışmada Newtonyen akışkan olarak gliserin, Newtonyen olmayan akışkan olarak ise xanthan (power-law) ve carbopol (Herschel–Bulkley) çözeltileri kullanılacaktır. Literatürde Newtonyen olmayan akışkanların iç içe geçmiş silindirler içerisinde oluşan akış yapılarını tanımlamada kullanılan Reynolds sayılarının akışkan karakteristiğinin değişimi ile tutarlı sonuçlar vermediği gözlemlenmiştir. Bu karmaşıklığı giderebilmek amacıyla, bu tez çalışmasında tanımlanacak yeni bir Reynolds sayısı tanımlanacaktır.

Aynı zamanda, Taylor-Couette akışlarında enerji aktarımı, akışkan tabakaları arasında kayma (shear) ve momentum transferi yoluyla akışı yönlendiren iç ve dış silindirin dönmesi sonucunda sağlanmaktadır. Bu nedenle, silindirlerin dönme hızlarının ve yönlerinin, silindirler arasındaki boşluk miktarının, akışkan özelliklerinin ve silindir yüzey özelliklerinin silindir içerisindeki akışkana aktarılacak olan enerjiyi önemli oranda etkileyeceği ve bu durumun oluşacak akış yapılarını ve kritik rejim değerlerini etkileyeceği düşünülmektedir. Bu hipotez, ortaya çıkacak ikincil akış yapılarının endüstriyel alanda özellikle grafen oksit kalitesinin ve balast suları içerisindeki zararlı türlerin inaktivasyon verimliliğinin artırılmasına ve proseslerin geliştirilmesinde önemli çıkarımlara sahip olacağı düşünülmektedir.

2
Materyal ve Metot

Bu bölümde deney düzeneğinin spesifik özellikleri, kullanılan akışkanların analizlerinin gerçekleştirme prosedürleri, çalışılan farklı yüzeylerin analizleri ve kullanılan yöntemler hakkında detaylı bilgi verilecektir.

2.1 Deneylerde kullanılan akışkanların hazırlanması

Deneysel çalışmalarda Newtonyen akışkan olarak gliserin kullanılmıştır. Gliserin, eczacılıkta, kozmetik ürünlerin üretiminde, gıda endüstrisinde, kâğıt imalatında ve kauçuk endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda, kararlı bir yapıya sahip olması ve toksik özellik göstermemesi nedeniyle deneysel çalışmalarda da Newtonyen akışkan olarak tercih edilmektedir. Newtonyen olmayan akışkan olarak ise xanthan (pseudoplastic ya da shear-thinning), carbopol çözeltisi (dilatant ya da shear-thickening) tercih edilmiştir. Xanthan ve carbopol toz halinde temin edilmiş olup uygun oranlarda su ile karıştırılarak Newtonyen olmayan akışkan karışımları hazırlanmıştır. Xanthan gıda, ilaç ve petrol endüstrilerinde geniş bir uygulama yelpazesine sahip moleküler ağırlığı yüksek olan bir polisakkarit biyopolimeridir. Xanthan çözeltisi ticari olarak satılan food grade 80 mesh xanthan tozu (Meihua Group Co. Ltd. - ρ=1500 kg/m^3, ortalama M_A: 4×10^6–12×10^{6}Da) kullanılarak iki farklı konsantrasyonda (%0,1-0,2) hazırlanmıştır. Xanthan tozu uygun oranlarda su kullanılarak, sabit sıcaklıklı bir manyetik karıştırıcı kullanılarak homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım içerisindeki kabarcıklar tamamen uzaklaşana kadar karışım oda sıcaklığında bekletilmiş ve daha sonra deneyler gerçekleştirilmiştir.

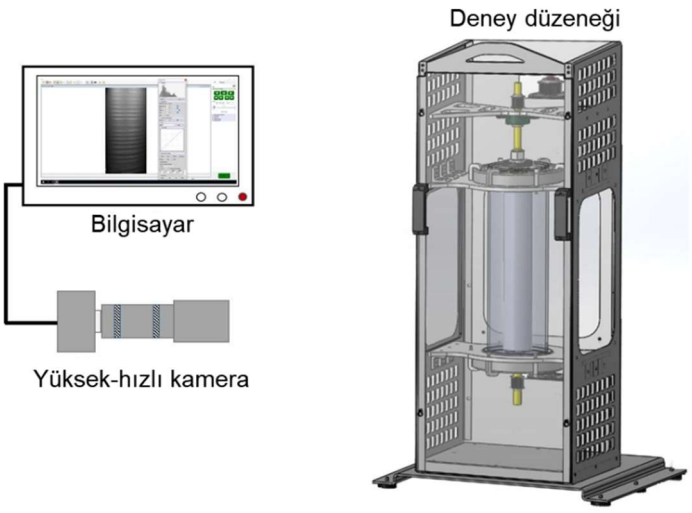
Carbopol kozmetik ürünlerinde ve eczacılık endüstrisinde, düşük toksisitesi, kararlı yapısı ve düşük konsantrasyonlarda yüksek viskozite özelliği göstermesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Carbopol çözeltisinin reolojik özellikleri çözeltinin konsantrasyonuna ve asitliğine bağlı olarak değişmektedir. Carbopol çözeltisinin hazırlanma prosedürleri şu şekilde özetlenebilir. Carbopol 950 tozu (ρ= 1400

kg/m^3) uygun oranlarda su karışımı içerisine azar azar ilave edilerek sabit sıcaklıklı manyetik karıştırıcı ile 1500 rpm hızında karıştırılarak homojen karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımın nötralizasyon işlemi için NaOH (%30 w/w) çözeltisi kullanılmıştır. NaOH çözeltisi pH = 7,00 ± 0,50 değerine ulaşana kadar ilave edilmiştir. Nötralizasyon işlemi ile polimer zincirlerini negatif olarak yüklenir ve bu negatif yüklerin birbirini itmesi ile polimer kabarcıkları şişmeye ve sıkışmaya başlar. Sonunda akma gerilmesine sahip jelimsi bir akışkan elde edilmiş olur [81]. Deneysel çalışmalarda kullanılan akışkanlar iki farklı konsantrasyonda hazırlanarak deneyler gerçekleştirlmiştir.

Akış yapılarının gözlemlenmesi için hazırlanan akışkan numunesinin içerisine yaklaşık %1 oranında anizotropik ışığı yansıtan çift renkli toz ilave edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bu toz, akış çizgileri boyunca yönlendiği için akış yapılarının net bir şekilde gözlemlenmesine yardımcı olur [82].

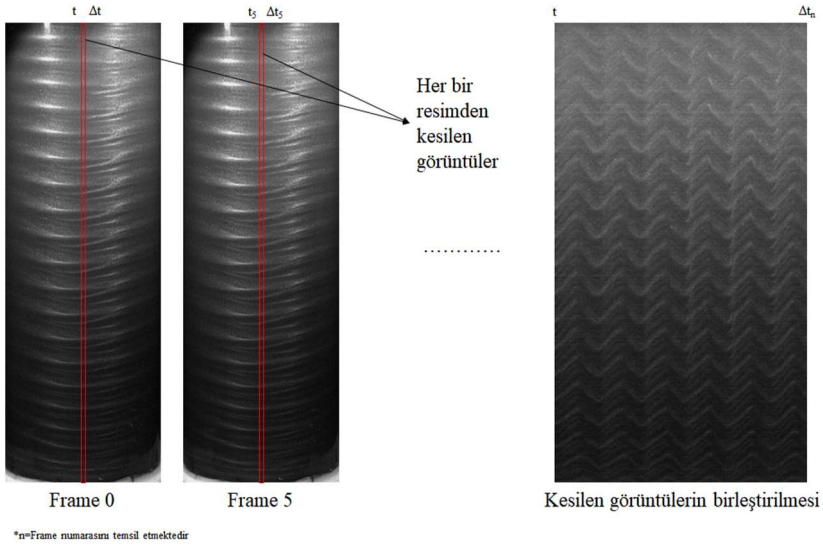
2.2 Deney Düzeneği

Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanların davranışı ve geçiş rejimlerini inceleyebilmek amacıyla Taylor-Couette deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir. Deneyler de farklı çaplara sahip iki adet iç ve dış silindir kullanılmıştır. Dış silindir (R_o= 72 ± 0,01 mm ve R_o= 70 ± 0,01 mm) şeffaf akrilik bir silindirden oluşmaktadır. Işık yansımalarını minimize etmek ve daha iyi görüntü elde edebilmek amacıyla iç silindir (R_i= 62,5 ± 0,01 mm ve R_i = 45 ± 0,01 mm) siyah akrilik boya ile kaplanmıştır. İç ve dış silindirler 500 mm yüksekliğine sahiptir ve bu silindirler iki motor tarafından bir sürücü yardımı ile kontrol edilmektedir. Sürücü üzerinden iç ve dış silindirlerin dönüş hızları kontrol edilmektedir. Bunun yanı sıra iç ve dış silindirlerin hızı bir takometre ile de doğrulanmaktadır. Kullanılan motorlar ile deneysel çalışmalarda iç silindir hızı durağan halden 300 rpm hızına kadar kademeli olarak artırılarak akış yapıları incelenmiştir. Deney düzeneği iki adet led ışık yardımı ile aydınlatılmıştır.



Şekil 2. 1 Deney düzeneğinin şematik görünümü.

Deneylerde akış yapıları ve geçiş rejimleri Phantom Miro ex4 marka yüksek hızlı kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Deneyler öncesi görüntü çözünürlüğü, parlaklık ve netlik dikkate alınarak kamera ayarları optimize edilmiş ve videolar 250 fps hızında çekilmiştir. Elde edilen videolar frame-frame ayrıştırılarak resimlere dönüştürülmüş ve akış rejiminde meydana gelen değişim incelenmiştir. Videolardan elde edilen her bir frame, görüntü işleme metodu ile zamana bağlı olarak tek bir bölgeden geçen akışkanın davranışı incelenmiştir. Her bir görüntünün merkezinden çok ince bir kesit kesilmiş ve kesilen her bir görüntü bir araya getirilerek akışkanın davranışı gözlemlenmiştir (Şekil 2.2). Videoların görüntülere ayrıştırılması ve kesilen görüntülerin bir araya getirilmesinde Python programı kullanılmıştır.



Şekil 2. 2 Zamana bağlı akış değişiminin elde edilmesi.

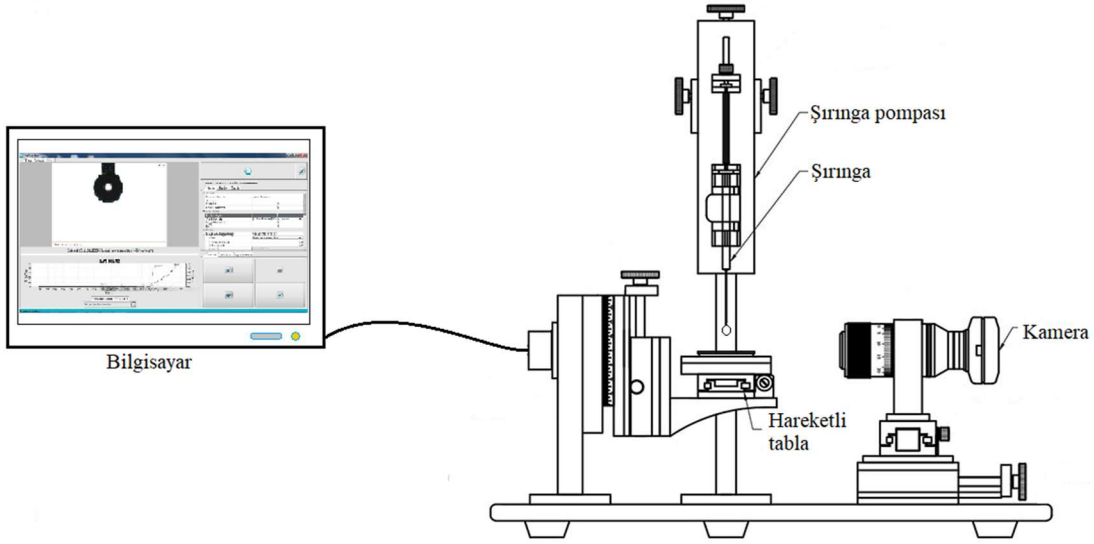
2.3 Temas açısının ölçülmesi

Deneysel çalışmalarda hidrofobisitenin akış yapıları ve geçiş rejimleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, iç silindir yüzeyi hidrofobik sprey (WetProof Super Hydro) kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzey temas açısının değişimi Theta Attention Optical Tensiometer (Şekil 2.3) cihazı kullanılarak incelenmiştir. Temas açısı ölçümünde silindir yüzeyine damlatılan sıvı yüzeyi ile sıvının temas ettiği yüzey arasında kalan açı ölçülmektedir. Bu amaçla öncelikle ölçüm yapılacak numune tutucu tablaya yerleştirilir ve bilgisayar ekranından yüzeyin ve şırınga ucunun görünmesi sağlanır. Şırınga tepesindeki vida yardımıyla sıvı damlası oluşturulur. Daha sonra bu sıvı damlası yüzey üzerine damlatıldığı anda bilgisayar ekranından program çalıştırılarak ölçüm başlatılır. Kullanılan program yardımıyla kamera damlanın yüzey ile yaptığı açıyı damlanın sağ taraftan ve sol taraftan hesaplayarak ortalama değeri elde edilir. Yapılan ölçümler neticesinde yüzey ile sıvı arasındaki açıya bağlı olarak dört farklı gruba ayrılmaktadır. Şekil 2.4'te bu gruplandırmanın şematik gösterimi görülmektedir. Temas açısı $10°<\theta<90°$ ise hidrofilik yüzey, $90°<\theta<150°$ ise hidrofobik yüzey olarak tanımlanır. Hidrofobik yüzey kaplamaları mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Bu yüzeylerin yanı sıra, temas açısı $\theta<10°$ 'den küçük olduğu durumlarda süperhidrofilik, $\theta> 150°$ büyük olduğu durumlarda ise süperhidrofobik

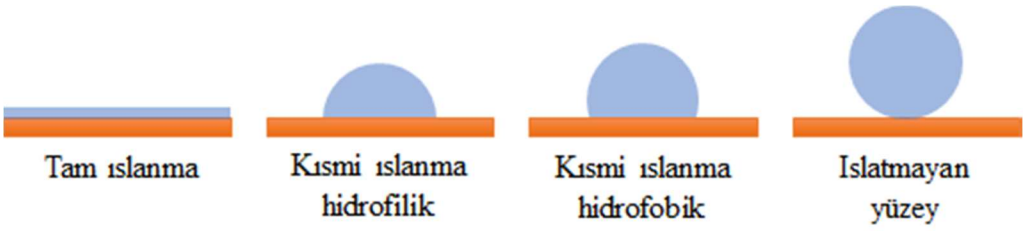
yüzey olarak tanımlanmaktadır [83]. Temas açısı literatürde yaygın olarak kullanılan Young eşitliği kullanılarak karakterize edilmektedir.

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SL}}{\gamma} \tag{2. 1}$$

Eşitlikteki, γ sıvı/hava yüzey gerilimini, γ_{SL} katı/sıvı yüzey gerilimini, γ_{SA} katı/hava yüzey gerilimini temsil etmektedir [84].



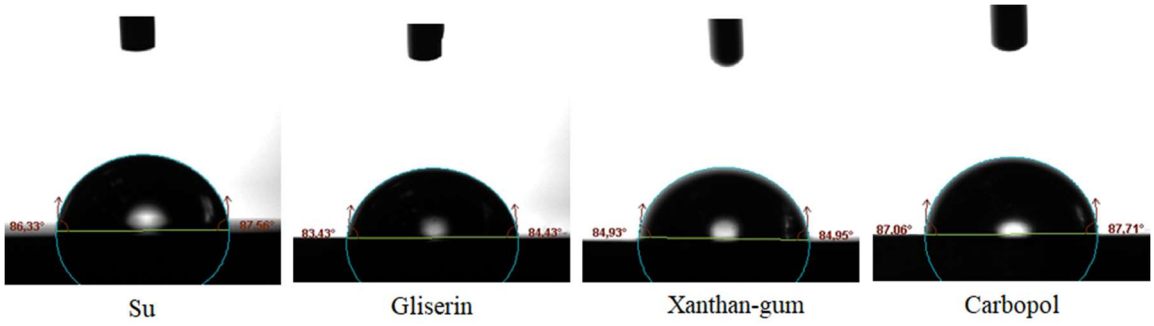
Şekil 2. 3 Temas açısı ölçüm cihazının şematik gösterimi.



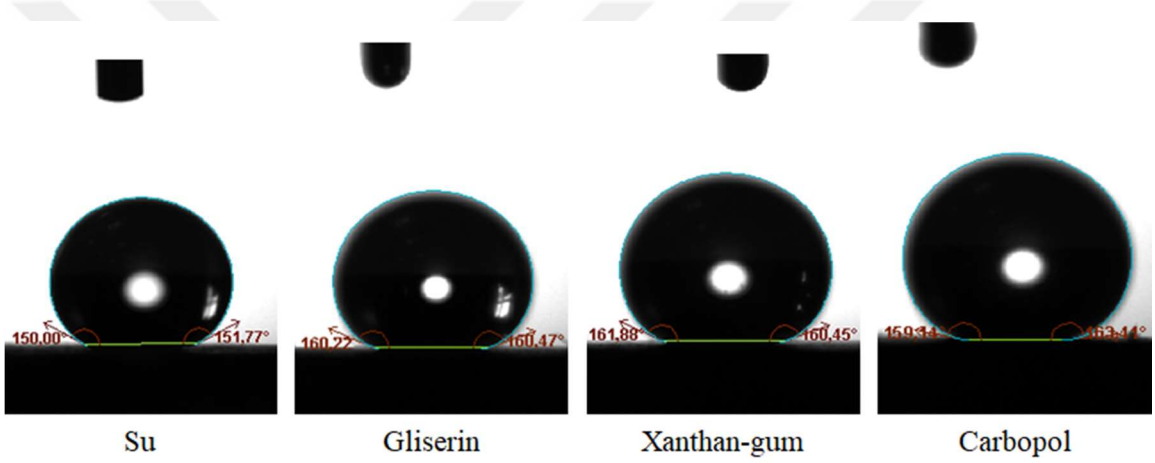
Şekil 2. 4 Yüzey ile sıvı arasındaki ilişki.

Deneysel çalışmalarda hazırlanan tüm akışkan numunelerinin, normal ve hidrofobik yüzey ile yapmış oldukları açı ölçülmüştür. Yapılan ölçümler Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da özetlenmiştir. Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi kaplama sonrası elde edilen yüzeyin süper hidrofobik özellik gösterdiği görülmüştür. Kaplama öncesi temas

açısı θ<87° değeri civarında iken, kaplama sonrası temas açısı değerinin θ>150° civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 5 Normal yüzey ile akışkan temas açıları.



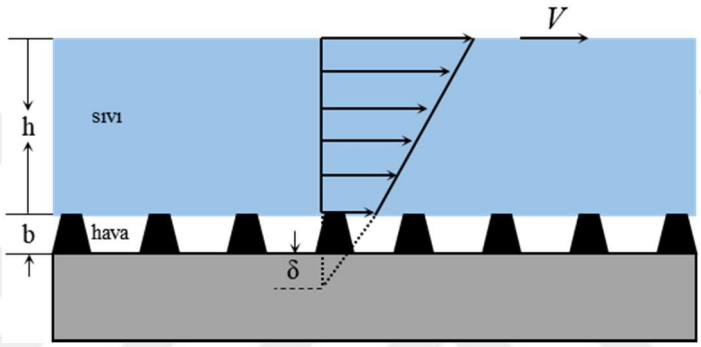
Şekil 2. 6 Hidrofobik yüzey ile akışkan temas açıları.

Süperhidrofobik yüzeyler akışkanlar mekaniğinde, akış stabilitesi ve rejim geçişleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bundan dolayı süperhidrofobik yüzeyler, kendi kendini temizleyen yüzeylerin imalatı, sürtünme azaltma ve ısı aktarımı gibi birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır [85], [86]. Özellikle mikro kanallarda rejim geçişin gecikmesi ihtiyaç duyulan güçte önemli oranda azalmaya yol açmaktadır. Güçteki bu azalma büyük ölçekli akış tesislerinde önemli ölçüde kar elde edilmesine sebep olmaktadır [86]. Aynı zamanda araştırmacılar, laminer akıştaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla hidrofobik yüzeylerin etkilerini araştırmışlardır [87], [88]. Laminer akışta yapılan çalışmalarda, Watanabe ve ark. (1999) tarafından süperhidrofobik yüzeylerin kullanımı ile %14'lük, Ou ve ark. (2004) tarafından yapılan farklı bir çalışmada %40'lık sürtünme azalmasının

meydana geldiği rapor edilmiştir [89], [90]. Türbülanslı kışta ise, Daniello ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada hidrofobik yüzeylerin kullanımı ile %50 oranında sürtünme azalmasını deneysel olarak tespit etmişlerdir [91].

Choi ve Kim tarafından süper hidrofobik yüzeylerde Couette akışının temsili (Şekil 2.7) ve kayma uzunluğu (δ) aşağıdaki gibi tarif edilmiştir [92]. Eşitlikte yer alan μ_l sıvının viskozitesini, μ_a havanın viskozitesini tarif etmektedir.

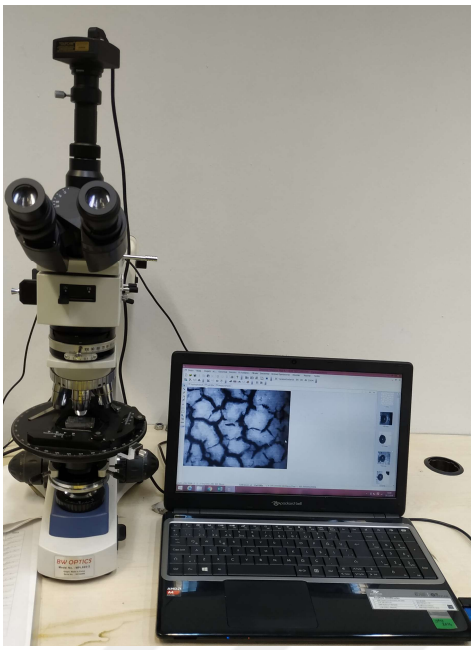
$$\delta = b\left(\mu_l / \mu_a - 1\right) \tag{2. 2}$$



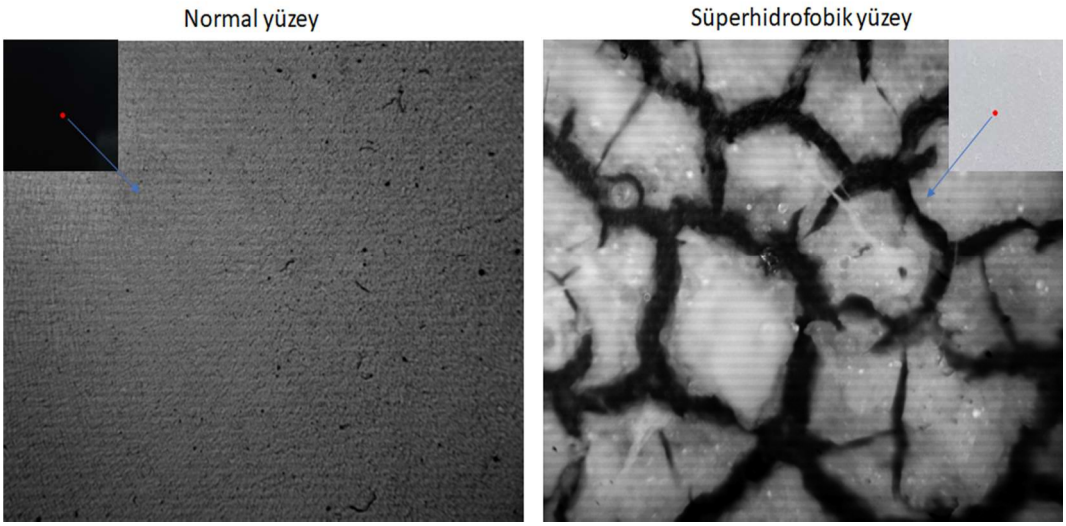
Şekil 2. 7 Couette akışının süperhidrofobik yüzey üzerindeki temsili.

2.4 Işık mikroskobu kullanılarak yüzey özelliklerinin tespiti

Deneysel çalışmalarda kullanılan iç silindirlerin yüzeyleri akrilik ve süperhidrofobik olarak kaplanmıştır. Kaplanan bu yüzeylerin morfolojisini karşılaştırabilmek amacıyla ışık mikroskobu (BW-Optics, MPL620-2) kullanılmıştır (Şekil 2.8). Normal yüzeye ve süperhidrofobik yüzeye ait görüntüler Şekil 2.9'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi normal yüzey pürüzsüz bir yüzeye sahip iken süperhidrofobik yüzey de homojen olmayan bir şekilde dağılmış çatlaklar dikkat çekmektedir. Yapılan ölçümler neticesinde, bu çatlakların genişliğinin 80-120 mikron arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2. 8 Çalışmalarda kullanılan ışık mikroskobu.



Şekil 2. 9 Normal ve hidrofobik yüzeyin ışık mikroskobu altındaki görüntüleri.

2.5 Yüzey pürüzlülük ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü akışkanlar mekaniğinde özellikle türbülans akışa geçişi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri literatürde yaygın bir şekilde çalışılmaktadır [93], [94]. Bir yüzeyin süperhidrofobik özellik gösterebilmesi için, yüzeyin pürüzlü ve yüzey enerjisinin düşük olması gerekmektedir. Bundan dolayı deneysel çalışmalarda kullanılan normal ve hidrofobik yüzeylerin, yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo-SJ-400

marka/model optik profilometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan profilometre Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Her numune yüzeyinin beş farklı bölgesinden alınan yüzey pürüzlülük değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ortalaması alınarak karşılaştırılmıştır.

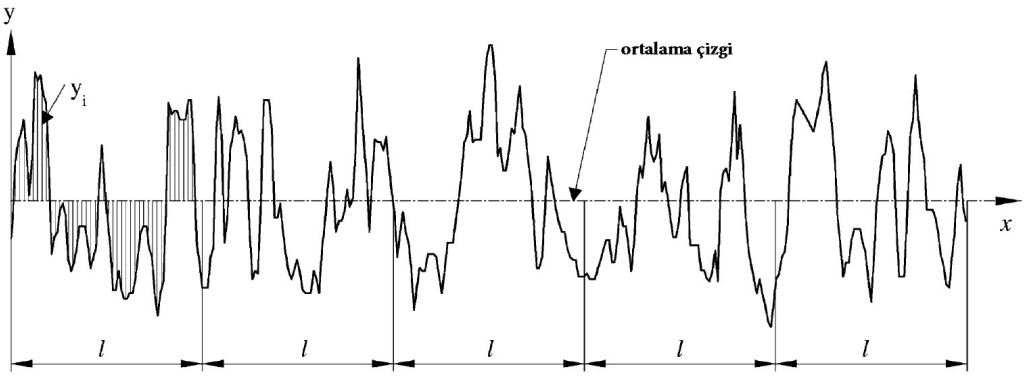
Şekil 2. 10 Deneysel çalışmalarda kullanılan profilometre.

2.5.1 Aritmetik ortalama yükseklik (Ra)

Aritmetik ortalama yükseklik, yüzey özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan yüzey pürüzlülük parametresidir. Bu parametre, bir örnekleme uzunluğu boyunca yüzeydeki girinti ve çıkıntıların ortalama çizgiden mutlak sapması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.11). Aynı zamanda bu parametreyi ifade eden matematiksel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l \left| y\left(x\right)\right| \cdot dx \qquad (2.3)$$

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left| y_i \right| \qquad (2.4)$$



Şekil 2. 11 Aritmetik ortalama yükseklik (Ra) [95].

2.5.2 Profilin karelerinin ortalamasının karekökü (Rq)

Bu parametre, bir örneklem uzunluğu boyunca yüzey profilinin karelerinin ortalamasının karekökü olarak tanımlanmaktadır. Aritmetik ortalama yükseklik değerine göre daha hassastır. Bu parametrenin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l \left| y\left(x\right)\right|^2 dx} \tag{2. 5}$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^{\,2}} \tag{2. 6}$$

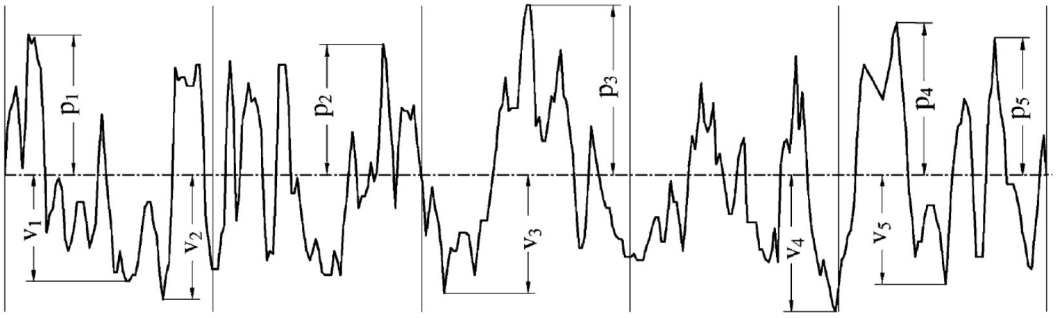
2.5.3 On nokta yüksekliği (Rz)

Bu parametre girinti ve çıkıntıların ölçümünde, aritmetik ortalama yükseklik değerine göre daha hassas sonuçlar elde edilmektedir. Rz iki farklı uluslararası standart tarafından tanımlanmıştır. ISO'ya göre örneklem uzunluğu boyunca en yüksek beş zirvenin ortalaması ile en düşük beş vadi arasındaki yükseklik farkı olarak tanımlanmaktadır. DIN standardına göre ise örneklem uzunluğu boyunca en yüksek beş zirvenin ve en düşük beş vadinin toplamının ortalaması olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.12'de on nokta yüksekliğinin hesaplanması görülmektedir. ISO ve DIN standartlarına göre kullanılan matematiksel eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i - \sum_{i=1}^{n} v_i \right) \quad (2.7)$$

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i + \sum_{i=1}^{n} v_i \right) \quad (2.8)$$

Denklemlerde yer alan, *n* örneklem sayısını, *p* zirveleri, *v* vadileri temsil etmektedir.



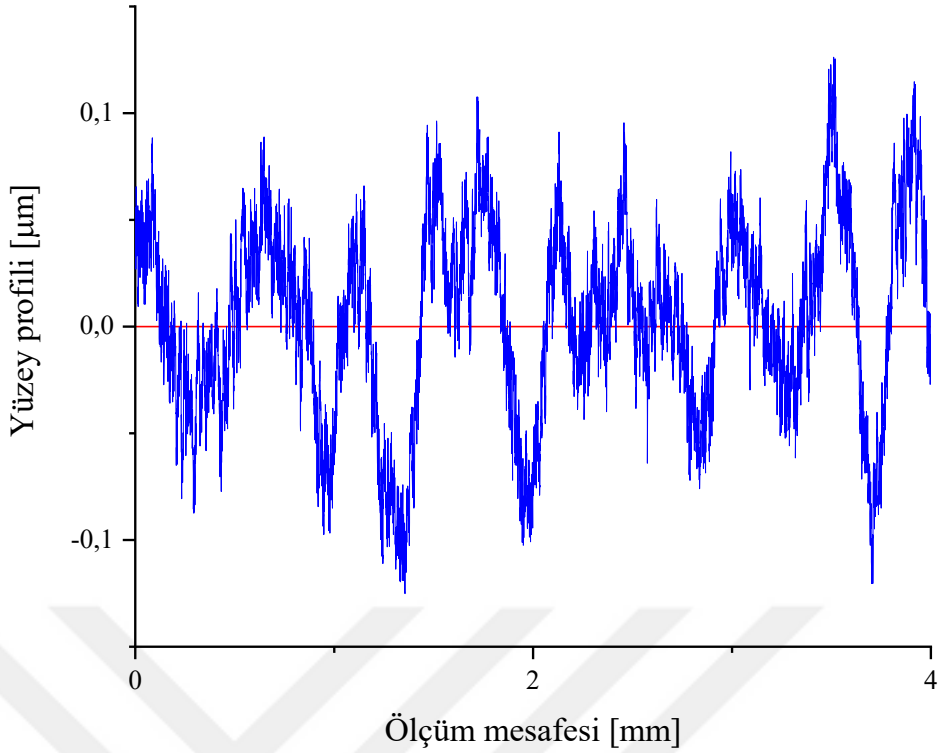
Şekil 2. 12 On nokta yükseklik (Rz) [95].

2.5.4 Deneysel çalışmalardan elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları

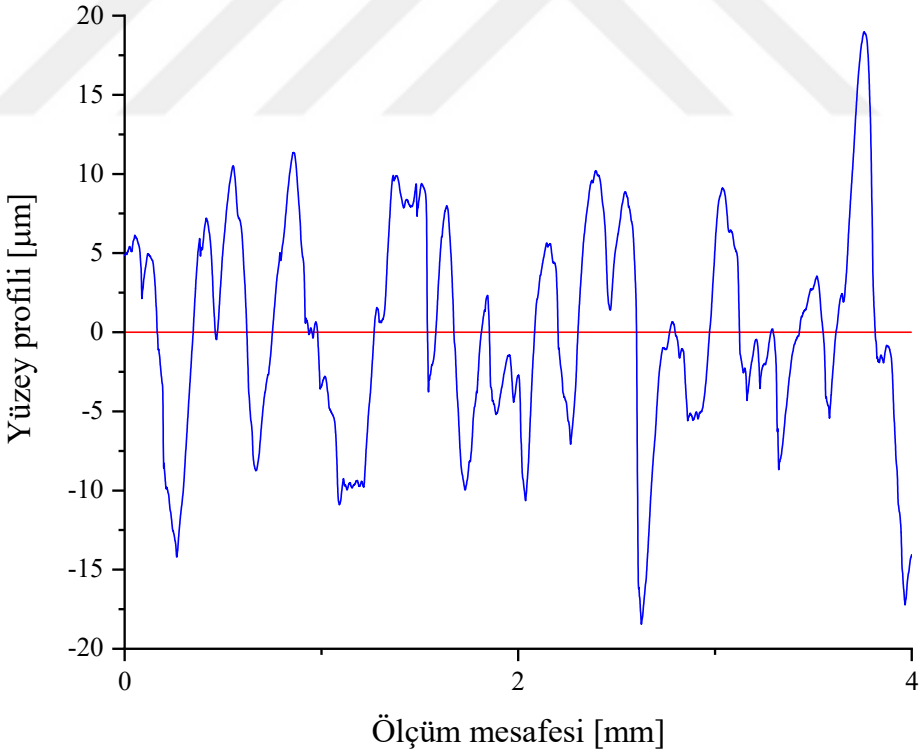
Normal ve hidrofobik yüzeylerin profilometre ile incelenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Beş farklı ölçümün ortalaması alınarak elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri grafik edilmiştir. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te normal ve hidrofobik yüzeye ait yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları görülmektedir.

Tablo 2. 1 Ortalama yüzey pürüzlülük parametrelerinin karşılaştırılması.

Parametreler	Normal Yüzey [µm]	Hidrofobik [µm]
Ra	0,086	11,32
Rz	0,5	54,24
Rq	0,1	13,78



Şekil 2. 13 Normal yüzeyin profili.



Şekil 2. 14 Hidrofobik yüzeyin profili.

2.6 Akışkanların reolojik ölçümleri

Deneysel çalışmalarda akışkanların reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla, eş eksenli reometresi (Brookfield Rheometer) ve ayrıca basınç (stress) ve gerilim (strain) kontrollü 50 mm çapında 1° açılı cone/plate (Anton Paar, MCR 302) reometresi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan reometreler Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da verilmiştir. Eş eksenli reometrenin özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Tüm akışkanlar, kayma hızı kontrollü ve kayma hızı 1–1000 s^{-1} aralığı seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık su banyosu destekli peltier sistemiyle 20±0,1 °C'de sabit tutulmuştur. Carbopol çözeltisinin akma gerilmesini belirleyebilmek için ise gerilme kontrollü ölçümler yapılmıştır. Yapılan her bir ölçüm en az üç kez tekrarlanmıştır.

Şekil 2. 15 Eş eksenli tip reometre ve şematik görünümü.

Şekil 2. 16 Cone/plate tip reometre.

Tablo 2. 2 Eş eksenli silindir sistemine ait özellikler.

CC3-40	Değer
SR aralığı, s^{-1}	2-2148
SS, Pa	8,61-287
Viskozite aralığı, Pa.s	0,004-1,338
Ölçüm hacmi, ml	72
R_i, mm	20
R_a, mm	21
R_s, mm	3,5
Ölçüm geometrisi açısı, α°	120
L', mm	20,5
L'', mm	22
L, mm	60

Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde xanthan ve carbopol akışkanları için iki ayrı model kullanılmıştır. Xanthan çözeltisinin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde power-law modeli kullanılmıştır. Power-law modeline ait eşitlik Denklem 2.9'de verilmiştir.

$$\mu = \kappa \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \tag{2. 9}$$

Bu eşitlikte μ akışkanın dinamik viskozitesini (Pa.s), κ akış davranış indeksini ($kg.sn^{-2}/m$), γ kayma hızını ($1/s$) ve n ise power law indeksi temsil etmektedir.

Carbopol akışkanının reolojik özelliklerinin belirlenmesinde ise Herschel-Bulkley modeli kullanılmıştır. Herschel-Bulkley modeline ait eşitlik Denklem 2.10'da verilmiştir.

$$\tau = \tau_y + \kappa \cdot \dot{\gamma}^n; \quad \mu = \tau_y + \kappa \cdot \dot{\gamma}^{n-1}; \quad \tau > \tau_y \tag{2. 10}$$

Bu eşitlikte τ_y akışkanın akma gerilmesini temsil etmektedir. Deneysel verilerden elde edilen ölçüm sonuçları ilgili bölümlerde sunulmuştur.

3
Dış silindir sabit iken akış yapılarının değişimi

Bu bölümde, farklı silindir çapları içinde oluşan akış yapıları, bu akış yapılarının davranışı ve kritik geçiş değerlerinin belirlenmesi deneysel olarak incelenmiştir. Newtonyen olmayan akışkanların ikincil akış yapılarının oluşum kronolojisinin Newtonyen akışkan kullanımı sonucunda oluşan akış yapıları ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda oluşan akış yapılarının karakterizasyonu akışkan özellikleri ile değişimi karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

3.1 Giriş

Türbülanslı akış rejimine geçiş sürecindeki akışkanın davranışı ve kritik geçiş şartlarının belirlenmesi hem doğal hem de zorlanmış akışlarda büyük önem arz etmektedir. Türbülans akışı, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerini belirli bir kritik seviyenin üzerinde aşması sonucunda meydana gelmektedir. Bu geçiş değeri Reynolds sayısı (Re) ile tanımlanmaktadır. Bu rejim geçişi hâlâ tam olarak anlaşılmamasına rağmen, belirli bir akış konfigürasyonunda Newtonyen bir akışkanın geçişini öngörebilecek genel bir teori bulunmamaktadır. Genel Re tanımı, boru akışlarında, TC akışında, düzlemsel Poiseuille akışı gibi birçok akış rejimini tanımlada deneysel olarak belirlenmektedir. Örneğin Rayleigh-Benard konveksiyonunda olduğu gibi süperkritik bir geçiş olması durumunda, kritik Rayleigh sayısına ulaşıldığında akış kararsız hale gelir ve daha karmaşık bir akış yapıları gözlemlenir. Bu durum lineer stabilite analizi ile sonsuz küçük büyüklükteki kontrol hacimleri için bir çözüm sunmaktadır. Ancak bu durum boru akışlarında kritik olmayan bir geçiş durumunda, kritik Reynolds sayısında kararsızlıklar oluşmaya başlar ve viskoz dağılım zayıflar. Bu bölgede akış tamamen laminer değildir ve laminer ve türbülanslı akışın karışımdan oluşan bir geçiş bölgesi oluşur. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte akış kademeli olarak çalkantılı hale dönüşür. Bu bölgede lineer stabilite analizinin kullanımı sonucunda elde edilen çözümler doğru sonuç vermemektedir. Taylor-Couette ve kıvrılmış boru akışlarında, türbülans akış rejimine geçmeden önce hem süperkritik hem de subkritik geçiş

gözlemlenmektedir. Bu tür akışlarda, santrifüj etkileri oluşan akış yapılarını önemli ölçüde etkilerken ikincil akış yapılarının oluşumu da gözlemlenir.

Taylor-Couette düzeneği, kurulumun basitliği ve giriş etkilerinin olmadığı, periyodikliği ve uzun gözlemler sağlaması nedeniyle Newtonyen akışkanların davranışını incelemede birçok araştırmacı tarafından geniş çapta kullanılmaktadır. Viskozite, düşük Reynolds değerlerinde akışı kararlı yapıda tutar. İç içe geçmiş iki silindir arasında Newtonyen akışların akışında, laminer akışın (Couette akışı) Taylor vorteks akışına geçişini belirlemede lineer stabilite analizi ile doğru yaklaşımlar elde edilmektedir [96]. Taylor (1923) lineer stabilite analizini kullanarak her iki silindirin tüm hareket şartları için kritik akış yapılarını belirlemiştir. Silindirlerin aynı veya zıt yöne dönüşlerinin oluşan akış yapıları üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu ve subkritik akış yapılarının meydana geldiğini gözlemlemiştir. Taylor vorteks yapıları önemli enerji dağılımı ve momentum transferi sağlaması nedeniyle birçok endüstriyel alanda farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Özellikle membran ayrıştırma ve flokülasyon proseslerinde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

Stokes (1880) yapmış olduğu çalışmada, dış silindir sabit ve iç silindir hareketli iken santrifüj kararsızlıklarının ortaya çıktığını belirtmiştir. Akışın hareketli iç silindirden durağan haldeki dış silindire doğru hareketi sonucunda kompleks ikincil akış yapılarının oluşabileceğini ortaya koymuştur [97]. Andereck ve ark. (1986) tarafından yapılan çalışmada, iç ve dış silindirin Reynolds sayılarına bağlı olarak Newtonyen akışkanının (η=0,883) subkritik ve süperkritik akış yapılarına geçişin kritik değerleri haritalandırılmıştır. Yapmış oldukları çalışma sonucunda subkritik geçiş esnasında ortaya çıkan türbülanslı spirallerin, boru içerisinde meydana gelen türbülanslı akışa benzer şekilde oluştuğu ortaya konulmuştur. Aynı silindirlerin birbirlerine göre zıt yönde dönüşü esnasında, spiral vorteks akışı (SVF), iç içe geçen simetrik olmayan akış yapılarının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [6]. Wereley ve Lueptow (1998) tarafından yapılan çalışmada, dalgalı ve dalgalı olmayan akışkanların eksenel ve radyal hızları PIV ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir. Araştırmacılar, akışın eksenel ve radyal hızlarının silindir yüzey hızının yaklaşık %2–7 arasında değişim gösterdiğini gözlemlemişlerdir [98]. Yapılan farklı bir

çalışmada ise, hız değişimlerinin aksine, dönen silindirden elde edilen tork ölçümleri ve geçiş ve akış rejimlerinin değişimlerinde ortaya çıkan enerji harcamasına bağlı olarak akışın karakterize edilebileceğini vurgulamışlardır [99]. Martinez-Arias ve ark. (2014) yapmış oldukları çalışmada, oluşan vorteks sayısının tork verisini önemli ölçüde etkilediğini ve türbülans akışına yakın Reynolds sayıların da 9 farklı yapı gözlemlerken farklı sayıda vorteks sayısının oluştuğunu tespit etmişlerdir [100].

Newtonyen olmayan akışkanların kullanımına, birçok denizcilik uygulamalarında ve özellikle arıtma prosesi gibi birçok uygulamada karşılaşılmaktadır. Newtonyen olmayan akışkanlar ile ilgili endüstride ve akademide birçok çalışma bulunmasına rağmen, akış yapılarının oluşumu ve kritik geçiş değerlerinin belirlenmesi son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır [101]–[103] ve literatürde sınırlı sayıda deneysel veri bulunmaktadır. Newtonyen olmayan akışkanların karakterizasyonunun da yapılan hatalar ve akışkan özelliklerine bağımlı yeni parametreler, örn. viskozite-kayma hızı bağımlılığı, verilerin karşılaştırmasını daha da karmaşıklaştırmaktadır. Lockett ve ark. (1992) yapmış oldukları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak TC akışında elastik olmayan sıvıların davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar akışkanın shear-thinning özelliğinin Taylor sayısı ve oluşan dalga sayısı üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu ve aynı zamanda çap oranına bağlı olarak akışı stabilize ve destabilize etkisine sahip olduğunu belirtmişlerdir [104]. Escudier ve ark. (1995) shear-thinning akışkanı (xantan çözeltisi) ile Taylor-Couette düzeneğinde akışkanın eksenel ve teğetsel hızlarını LDA kullanarak ölçmüşlerdir. Çalışmada Newtonyen akışkanı ile karşılaştırıldığında vortekslerin iç ve dış jetlerinin hızları arasında asimetri olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca oluşan Taylor vortekslerinin konumunun shear-thinning akışkanlarda kaymaya uğradığını belirtmişlerdir [105]. Yi ve Kim (1997) polyacrylamide, xanthan gum, and polyacrylic acid çözeltilerinin TC akışı içerisindeki kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar ortaya çıkan akış kararsızlıklarının Newtonyen akışkanına benzer şekilde oluştuğunu vurgulamışlardır. Aynı zamanda kayma hızının akışın stabilitesi üzerine önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [106]. Akışkan özelliklerine bağlı olarak farklı reolojik parametrelerin TC akışının stabilitesi üzerine etkisi birçok araştırmacı

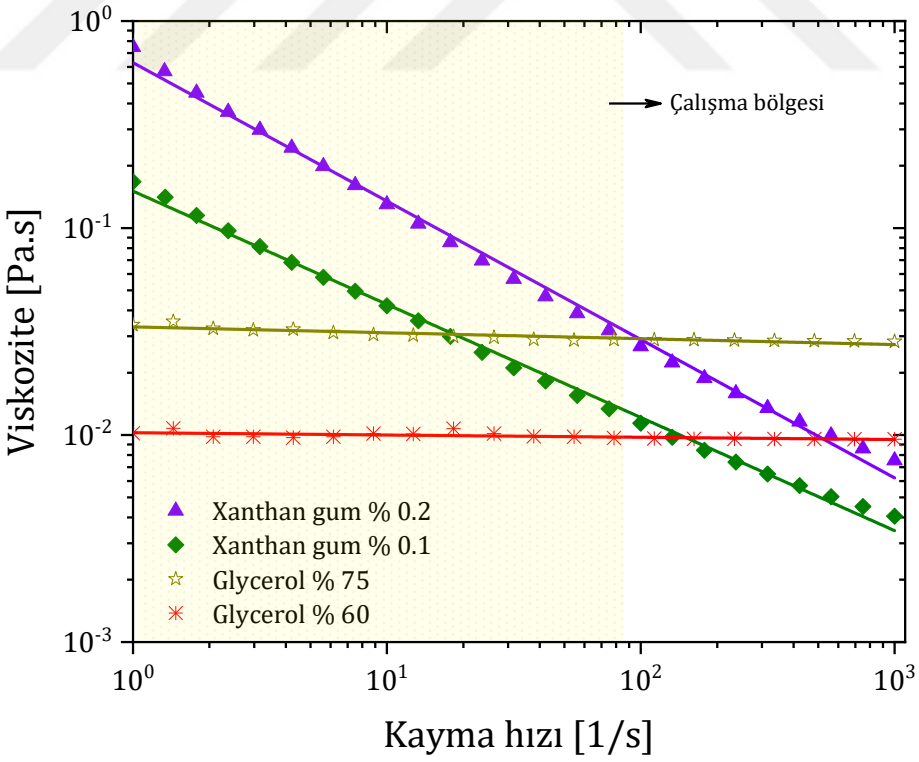
tarafından lineer stabilite analizi kullanılarak araştırılmıştır. Caton (2006) power-law akışkanları için lineer stabilite analizini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda power-law indeksinin (n<0.2) artmasıyla birlikte ortaya çıkan birincil kararsızlıkların, toroidal aksisimetrik vortekslerden ($\partial/\partial\Theta$=0) aksisimetrik olmayan vortekslere dönüştüğünü vurgulamıştır [107]. Alibenyahia ve ark. (2012) lineer stabilite analizini kullanarak power-law akışkanı için farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Araştırmacılar silindirler arasındaki boşluğun azalması ile dalga boyunun arttığını, boşluğun artması ile ise azaldığını belirtmişlerdir [108]. Nemri ve ark. (2013) tek fazlı akışın dinamikleri ile karışım mekanizmaları arasındaki ilişkiyi PIV-PLIF ölçümleri kullanarak araştırmışlardır [9]. Bahrani ve ark. (2015) shear-thinning akışkanların etkilerini geniş boşluk kullanılarak incelemişlerdir. Araştırmacılar akışkanın shear-thinning özelliğinin dalga boyunun değişimi üzerinde önemli etkisinin olduğunu ve kritik TVF geçişinde Reynolds sayısının monotonik olmayan bir değişim gösterdiğini bildirmişlerdir [101]. Majji ve ark. (2018), Taylor-Couette deney düzeneğinde partikül konsantrasyonun ve boyutunun, partikül içeren akışkanların rejim geçişleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar partikül yoğunluğunun kritik Reynolds sayısı ve oluşan akış yapıları üzerinde önemli etkisinin olduğunu belirlemişlerdir. Aynı zamanda CCF akışından TVF rejim değişikliği gerçekleşirken simetrik olmayan akış yapılarını, yani spiral vorteks akışını (SVF) ve ribbon akışını (RIB), gözlemlemişlerdir. Ayrıca deneysel çalışmalara ilave olarak lineer stabilite analizi gerçekleştirmişlerdir. Lineer stabilite analizi sonucunda viskozite profilinin silindirler arasındaki boşluk boyunca partikül yoğunluğuna bağlı olarak farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu viskozite profili değişiminin akış yapıları üzerinde etkisinin olmadığını vurgulamışlardır [109]. Cagney ve Balabani (2019) Newtonyen ve shear thinning akışkanlarını kullanarak, akış görselleştirmesi yöntemini ve PIV ölçümlerini yöntemleri ile TC akışı içerisindeki davranışlarını incelemişlerdir. Shear-thinning etkisinin, eksenel dalga boyunda artışa ve vortisite büyüklüğünde ise azalmaya sebep olduğunu belirtmişlerdir [103].

Literatürde, Newtonyen olmayan akışkanların rejim geçişlerini tanımlayabilmek amacıyla kullanılan Reynolds sayısının tanımı belirsizliğini korumaktadır. Bu bölümde Newtonyen olmayan shear-thinning akışkanının süper kritik rejim

geçişleri deneysel olarak incelemiştir. İlk olarak, iç silindirin hızı kademeli olarak artırılarak farklı shear-thinning özelliklere sahip akışkanların TC deney düzeneği içerisinde ortaya çıkan akış yapıları gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapılarının kritik değerlerini tanımlayabilmek amacıyla üç farklı Reynolds sayısı kullanılmıştır. Aynı zamanda ortaya çıkan vortekslerin dalga boyları ve dalga genişlikleri akışkanların reolojik özelliklerine bağlı olarak rapor edilmiştir.

3.2 Akış yapılarının değişimi

Bu bölümde kullanılan xanthan ve gliserin çözeltilerine ait reolojik özellikler Şekil 3.1'de verilmiştir. Kullanılan akışkanların, akışkanın durum gösterge (shear-thinning indeks - n) ve kıvam gösterge (consistency index - κ) değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen deneylerde dış silindir sabit iken iç silindir hızı kademeli olarak artırılarak, ortaya çıkan akış yapıları, kritik geçiş değerleri ve akış yapılarının karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntülerin işlenmesi ve sonuçların sunulması ilgili detaylar Materyal ve Metot kısmında detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3. 1 Deneysel çalışmalarda kullanılan akışkanlara ait reolojik özellikleri.

Tablo 3. 1 Akışkanlara ait reolojik parametrelerin değerleri.

Çözelti	***n***	***κ***	***μ* [Pa.s]**
Gliserin %75	-	-	0,028
Gliserin %60	-	-	0,0096
Xanthan %0,1	0,45	0,236	-
Xanthan %0,2	0,38	0,674	-

Farklı akış rejimlerinin belirlenmesinde atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını temsil eden merkezkaç kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranını temsil eden Reynolds sayısı ve/veya Taylor sayısı genellikle kullanılır. Bu boyutsuz ifadeler Denklem 3.1 ve 3.5 tanımlanmıştır. Kritik Reynolds sayısı (Re_c) CCF akışından birincil kararsızlığın ortaya çıktığı TVF akış yapılarının meydana geldiği değeri temsil eder. Bu geçiş Newtonyen akışkanları için yarıçap oranına bağlıdır. Reynolds sayısının tanımında Newtonyen akışkanı için laminar Taylor-Couette akışı azimut hız profili tanımlanmaktadır. Azimut hız profili ile denklemi analitik olarak Denklem 3.1'de tanımlanmıştır.

$$u_\theta(r) = Ar + \frac{B}{r}, \quad A = \frac{\omega_o - \eta^2\omega_i}{1-\eta^2}, \quad B = \frac{R_i^2\left(\omega_i - \omega_o\right)}{1-\eta^2} \tag{3. 1}$$

Dış silindir sabit iç silindir hareketli iken, hız profili ve kayma hızı profili sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$u_\theta(r) = \frac{\omega_i R_i^2}{R_i^2 - R_o^2}\left[r - \frac{R_o^2}{r}\right], \quad \dot{\gamma}_{r\theta} = \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} = \frac{2B}{r^2} \tag{3. 2}$$

Hız profili ve kayma-hızı profili shear-thinnig akışkanları için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

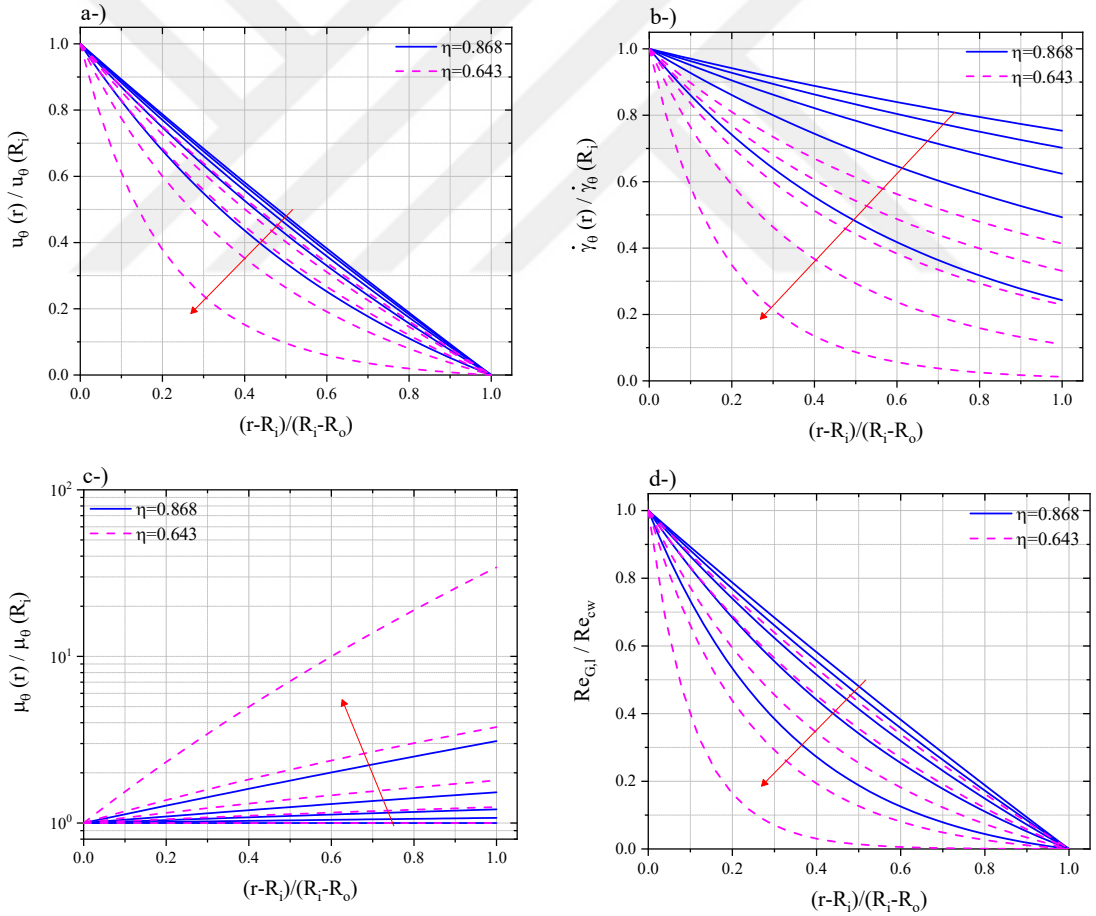
$$\left(\frac{u_\theta(r)}{\omega_i r}\right) = \left[\frac{1}{R_o^{2/n}} - \frac{1}{R_i^{2/n}}\right]^{-1}\left[\frac{1}{R_o^{2/n}} - \frac{1}{r^{2/n}}\right], \quad \phi = \omega_i\left[\frac{1}{R_o^{2/n}} - \frac{1}{R_i^{2/n}}\right]^{-1}, \quad \beta = \frac{1}{R_o^{2/n}} \tag{3. 3}$$

$$u_\theta(r) = \phi r\left(\beta - \frac{1}{r^{2/n}}\right), \quad \dot{\gamma}_{r\theta} = \frac{2}{n}\frac{\phi}{r^{2/n}} \tag{3. 4}$$

Viskozite profili ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mu_\theta\left(r\right) = K\left|\frac{2}{n}\frac{\phi}{r^{2/n}}\right|^{n-1} \tag{3. 5}$$

İki farklı boşluk oranında kullanılan akışkanlar için normalleştirilmiş hız, kayma hızı ve viskozite profilleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Newtonyen akışkan (n=1) bir karşılaştırma parametresi olarak baz alınmıştır. Artan shear-thinning etkileri ile hız profilinin Newtonyen akışkanından saptığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.2a). Tüm koşullarda dış duvarda kayma hızının minimum olduğu ve iç duvara doğru arttığı görülmektedir. Duvarlardaki kayma hızları arasındaki fark, artan kayma inceltici etkilerle ve aynı zamanda boşluk büyümesiyle birlikte daha belirgin hale geldiği görülmüştür (Şekil 3.2b). Bununla birlikte shear-thinning etkilerinin artmasıyla viskozitenin dış duvara doğru arttığı görülmektedir (Şekil 3.2c). Yarıçap oranının artarak 1'e yaklaşması ile, boşluk boyunca viskozite değişimi n'den bağımsız hale geldiği ve akışın Newtonyen akışkanlarına benzer şekilde davrandığı görülmektedir (Şekil 3.2c).



Şekil 3. 2 İki farklı yarıçap oranında n = 1, 0,8, 0,6, 0,4, 0,2 için normalleştirilmiş hız, kayma hızı, viskozite ve $Re_{G,l}$ profillerinin karşılaştırılması. Kırmızı ok n'nin azalan değerlerini göstermektedir.

Newtonyen olmayan akışkanların viskozitesi akış alanı boyunca değiştiğinden boru akışı gibi akışlarda akış yapılarını ve kritik geçiş değerlerini karşılaştırabilmek için literatürde farklı Reynolds sayıları tanımlanmıştır [110]. Benzer şekilde, Newtonyen olmayan akışkanın indeks değerinin Taylor-Couette akışlarında rejim geçişleri üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla farklı Reynolds sayıları tanımlanmış ve kullanılan Reynolds sayılarının akış alanındaki viskozitenin belirli değerlerine göre TC akışını stabilize veya destabilize ettiği görülmektedir. Literatürde Newtonyen olmayan akışkanların kritik geçiş değerlerini tanımlamada yaygın olarak kullanılan Reynolds sayısı, ortalama (nominal) kayma hızı ifadesine karşılık gelen boşluk değerindeki kayma hızı ($\omega_i R_i/d$) ifadesi kullanılarak elde edilmektedir. Alibenyahia ve ark. (2012) aynı yarıçap oranı için n değerinin etkisini farklı kritik Reynolds sayılarını kullanarak incelemişlerdir ve kritik Re_c değerlerinde %30'a varan farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Alibenyahia ve ark. (2012), ortaya çıkan bu karmaşıklığı giderebilmek amacıyla yeni bir Reynolds sayısı tanımlamışlardır. Bu ifade çeşitli akış rejimlerinin doğrudan karşılaştırılmasını sağlayan, maksimum kayma hızına karşılık gelen iç duvar viskozitesini (Re_{cw}) kullanmışlardır. Re_c ifadesinin Re_{cw}'ye dönüşümü aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [108];

$$\frac{\mathrm{Re}_c}{\mathrm{Re}_{cw}} = \left[\frac{2}{n} \frac{1}{R_1} \frac{1}{1-\eta^{2/n}} \right]^{n-1}, \quad R_1 = \frac{\eta}{1-\eta} \tag{3.6}$$

Bu çalışmada, boru akışlarında Guzel ve ark. (2009) tarafından Newtonyen olmayan akışkanlar için tanımlanan Reynolds sayısı (Re_G) ifadesi kullanılmıştır [111]. Guzel ve ark. (2009) tarafından boru akışları için tanımlanan Re_G ifadesi Taylor-Couette akışı için viskozite profili ve kayma-hızı profili hız profillerinden elde edilmiştir. İlk olarak lokal Re_G ($ReG,l(r)$) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathrm{Re}_{G,l}(r) = \frac{\rho u_\theta(r)\, d}{\mu(r)} \tag{3.7}$$

burada $u_\theta(r)$ azimuthal hız profilini ve $\mu(r)$ ise viskozite profilini göstermektedir ve bu ifadeler boşluk boyunca değişen kayma hızı profiline bağlıdırlar. Ortalama $ReG,l(r)$ değeri, akış alanı boyunca atalet ve viskoz kuvvetler arasındaki yerel bozuklukları daha iyi temsil etmektedir ve bu ifade aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\mathrm{Re}_G = \frac{2}{\left(R_o^2 - R_i^2\right)} \int_{R_i}^{R_o} \mathrm{Re}_{G,l}(r) r dr \tag{3.8}$$

Reynolds ifadesi belirlenen sınır şartlarının çözülmesi sonucunda aşağıdaki gibi yeniden tanımlanmıştır.

$$\mathrm{Re}_G = \frac{2\rho d}{\left(R_o^2 - R_i^2\right)} \int_{R_i}^{R_o} \frac{u_\theta(r)}{\mu(r)} r dr = \frac{\rho u_{mean} d}{\mu} \tag{3.9}$$

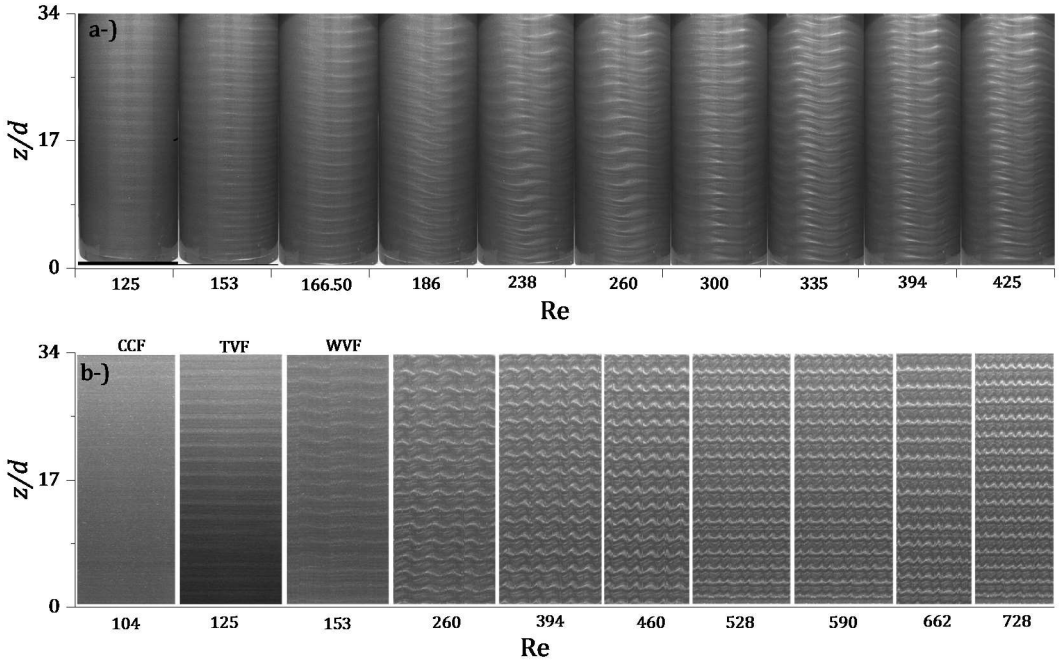
Denklemde yer alan ortalama hız ifadesi (u_{mean}) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$u_{mean} = \frac{2}{R_o^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_o} u_\theta r dr = \frac{2R_o^2}{1-\eta^2} \left[\frac{AR_o}{3}\left(1-\eta^3\right) + \frac{B}{R_o}\left(1-\eta\right) \right] \tag{3.10}$$

3.2.1 Newtonyen akışkan için deney sonuçları

Newtonyen akışkanı olarak %75 gliserin çözeltisi η=0,868 yarıçap oranına sahip TC deney düzeneği kullanıldığında ortaya çıkan akış yapıları ve kritik Reynolds değerleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir. TC deney düzeneği içerisinde gözlemlenen akış yapılarının anlık görüntüleri Şekil 3.3a'da, uzay-zaman grafikleri ise Şekil 3.3b'de verilmiştir. Uzay zaman grafikleri nasıl oluşturulduğu Materyal ve Metot bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır. Dış silindir sabit, iç silindir hızının yavaşça artıtılması sonucunda silindir içerisinde ilk olarak CCF akış yapısı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla Re=120 değerine ulaştığında CCF akış yapısı içerisinde silindirin alt ve üst ksımlarında Ekman vorteks halkalarının oluştuğu gözlemlenmiştir [112] Reynolds sayısının artarak 125 değerine ulaşması ile silindirin tamamında TVF akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Silindir içerisinde toplam 42 adet vorteks yapısı oluşurken bu akış yapılarınındalga boyunun λ=20,35 mm (2,14d) olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan toplam vorteks sayısının yaklaşık olarak en boy oranı ile (42,1) eşit olduğu görülmektedir. En boy oranı arasındaki küsürat genellikle silindirin üst ve alt kısımlarındaki vorteks yapılarının dalga boylarının diğer bölgelerdeki dalga boylarından daha büyük olduğu görülmüştür. Literatürde yapılan farklı çalışmalarda da benzer sonuçların görüldüğü gözlemlenmiştir. [100], [112]. Taylor girdapları içerisindeki sıvı parçacıkları sürekli olarak iç ve dış duvarlar arasında hareket etmektedir. Sıvı

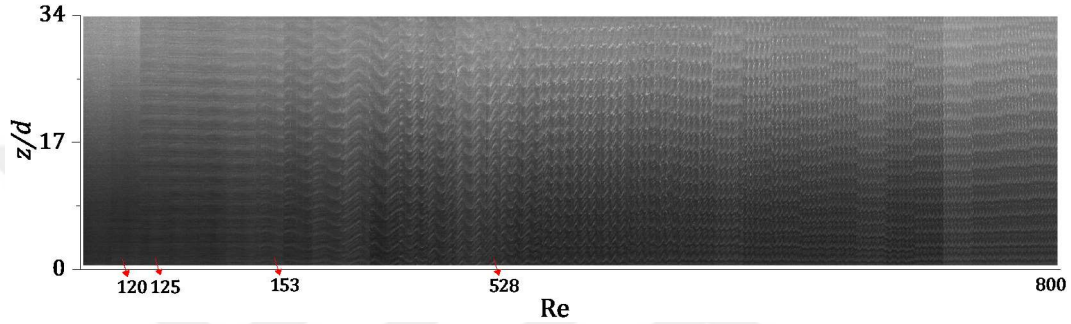
genellikle hareketli olan iç silindir yüzeyinden durağan haldeki dış silindir yüzeyinde hızını kaybederek sönümlenir ve vorteks halkalrı oluşur. Silindir içerisinde oluşan TVF halkalarının silindir içerisinde 125≤Re≤153 aralığında kararlı olduğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmaya devam etmesiyle birlikte Re=153 değerinde TVF akış yapısının simetrik olmayan vorteks halkalarına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu akış yapıları dalgalı vorteks akışı (WVF) olarak isimlendirilmektedir. Bu bölümde ortaya çıkan akış yapılarının dalga boyunun artarak λ=20,52 mm (2,16d) değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. TVF akış yapısının WVF akış yapısına geçişteki Reynolds sayısının kritik değere olan oranı η=0,868 çap oranı için Re/Re_c=1,22 olarak hesaplanmıştır. İç silindir hızı artarak Re=528 değerine ulaştığında WVF akış yapısının modüle dalgalı girdap akış (MWVF) yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmaya devam etmesiyle birlikte oluşan dalgalı vorteks yapılarının dalga boyunun azaldığı bununla birlikte genliğinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 3 %75 gliserin çözeltisine ait akış yapılarının a) anlık ve b)uzay zaman grafikleri ile gösterimi.

Bununla birlikte Newtonyen akışkanı kullanımı durumunda silindir içerisinde oluşan gözlemlenen akış yapılarının tüm dönme hızlarındaki gösterimi uzay-zaman grafikleri ile Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Çalışma aralığı Reynolds değeri 0 – 800

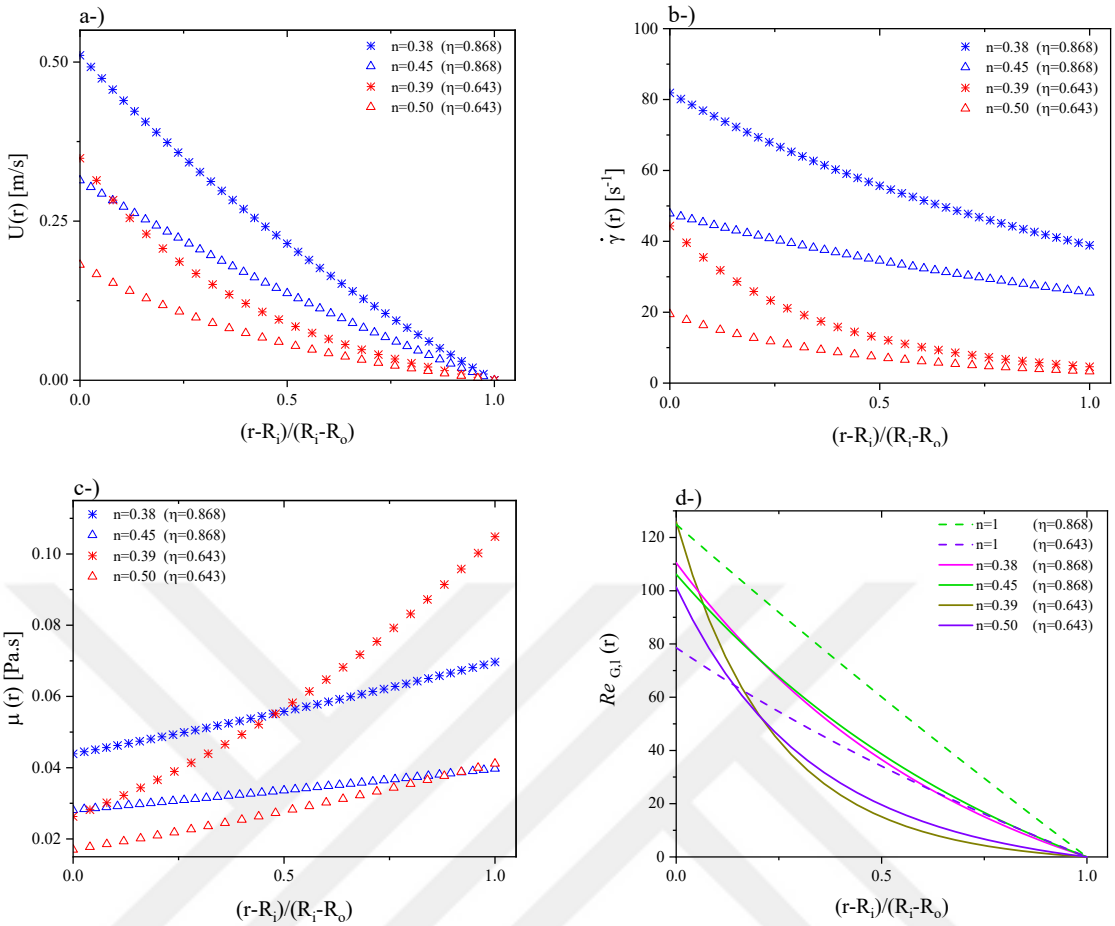
şeklindednir. Şekilden açıkça tüm akış yapıları arasındaki geçiş net bir şekilde gözlemlenmektedir. CCF akış yapısının iç silindir hızının artışı ile birlikte Ekman vorteks yapılarına ve TVF ile WVF akış yapılarına geçiş görülmektedir. Re=125 değerinde iken silindir içerisinde toplam 42 vorteks yapısı gözlemlenirken akış yapısının WVF akış yapısına dönüşümü sonucunda toplam vorteks sayısının değişmediği ancak iç silindir hızının artarak Re=196 değerine ulaştığında ise 36'ya düştüğü gözlemlenmiştir. Kritik değerlerde gözlemlenen akış yapıları ve bu akış yapılarının karakteristikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 %75 gliserin çözeltisinin TC deney düzeneği içerisindeki akış yapılarının iç silindirin dönme hızına bağlı olarak dönüşümü.

3.2.2 Newtonyen olmayan (shear-thinning) akışkan için deney sonuçları

Taylor-Couette akışında shear-thinning özelliklere sahip bir akışkanın kullanılması, ortaya çıkan yeni bir parametrenin (*n*) akış yapıları üzerinde etkisinin önemli hale geldiği görülmektedir. Bu akış yapılarını tanımlama da klasik Reynolds sayısının kullanılması uygun olmamakta ve tutarsız sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır [108]. Hız, kayma-hızı ve viskozite profilleri Şekil 3.5'te analitik eşitlikler kullanılarak çizilmiştir. Denklem 3.7'de tanımlanan lokal Reynolds sayısının (*ReG,l(r)*) boru içerisindeki değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu Reynolds sayısı akış içerisindeki, iç kuvvetler ile viskoz kuvvetlerin arasındaki lokal düzensizlikleri tanımlamaktadır. Şekil 3.5c incelendiğinde shear-thinning özellikler ile önemli ölçüde değişime uğradığı görülmektedir. Aynı zamanda silindirler arasındaki boşluğun artması ve shear-thinning özelliğin azalmasıyla birlikte silindirin iç cidarı ile dış cidarı arasındaki farkın artmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı, shear-thinning akışkanların TC reaktörleri içerisindeki davranışını, oluşan akış yapılarını ve kritik geçiş değerlerini etkilemektedir.

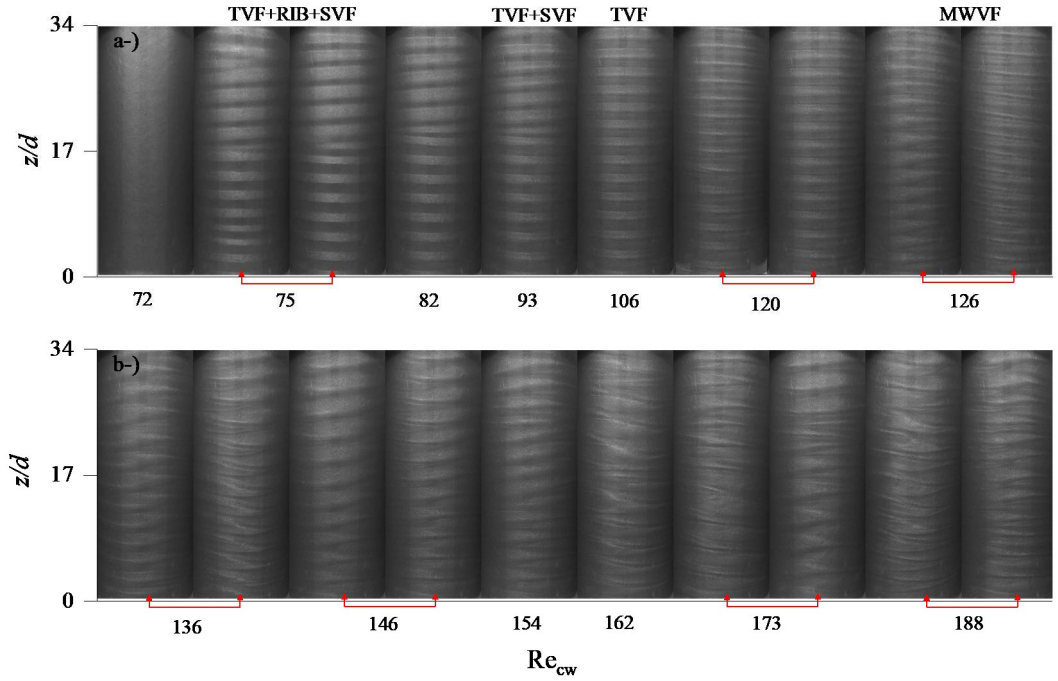


Şekil 3. 5 Hız, kayma hızı, viskozite ve *ReG,l*, profilleri, TVF kritik geçiş değerine karşılık gelen silindirler arasındaki mesafe boyutsuz tanımlanmıştır.

Lokal Reynolds sayısı, akış içerisindeki, iç kuvvetler ile viskoz kuvvetlerin arasındaki lokal düzensizlikleri tanımlamaktadır. Şekil 3.5d incelendiğinde, lokal Reynolds sayısının her iki çap oranında xanthan %0,1 ve 0,2 çözeltilerinin iç silindire yakın bölgelerde kesiştiği görülmektedir. Bu kesişmenin her iki durumda da 0,2 değerinde oluştuğu görülmüştür. Bundan dolayı Reynolds sayısının tanımında sabit bir viskozite değerinin kullanılarak rejim geçişlerinin tanımlanmasında Reynolds sayılarında tutarsız sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır [108]. Bununla birlikte shear-thinning indeks değerinin akış rejimleri üzerinde etkisinin monotonik olmayan bir etki ortaya koyduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde tartışılacaktır.

Shear-thinning akışkanlarının TC deney düzeneğinde kullanımı sonucunda, shear-thinning indeks değerine bağlı olarak Newtonyen akışkanından farklı akış

rejimlerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Bu çalışmada Alibenyahia ve ark. (2014) tarafından Newtonyen olmayan akışkanların rejim geçişlerini tanımlamada kullanılan Re_{cw} değeri kullanılmıştır. Akış desenlerinin, Re_{cw} 72 ile 188 arasındaki farklı değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için gözlemlenen geçiş rejimlerinin anlık görüntülerini Şekil 3.6'da gösterilmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte, dairesel Couette akışından (CCF), ilk kararsız akış yapılarının oluşumunun başlangıcına farklı akış yapıların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.6 incelendiğinde, silindirin alt kısımlarında Taylor vorteksleri net bir şekilde gözlemlenirken, üst kısımda ise vorteks hareketlerinin spiral bir şekilde gerçekleştiği ve bu hareketin $75<Re_{cw}<106$ arasında devam ettiği gözlemlenmiştir. $Re_{cw}=106$ değerine ulaştığında silindirin tamamında TVF akışının ortaya çıktığı görülmüştür. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla, Newtonyen akışından farklı olarak, $Re_{cw}=126$ değerinde WVF akışı gözlemlenmeden bazı dalgalı akış yapılarının silindir içerisinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Daha yüksek Re_{cw} değerlerinde, düzensiz akış yapıları daha da artmış ve düzensiz dalgalı yapılar tüm silindir içerisinde egemen olmuştur. Şekil 3.6b incelendiğinde, dalgalı akış yapılarının karmaşık hale geldiği görülmektedir. Silindirin üst kısımlarında akış alt kısımlara göre daha karmaşık hale geldiği görülmektedir. Şekil 3.6'da görülen kırmızı oklar, aynı dönüş hızında ve farklı zaman periyotlarındaki anlık görüntüleri temsil etmektedir. Shear-thinning özelliğinin eksenel dalga boyu (Taylor girdaplarının büyüklüğü) üzerindeki etkisi de Şekil 3.6'da açıkça görülmektedir. Elde edilen bu gözlemler, Şekil 3.7'de verilen uzay-zaman grafiğinde daha ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

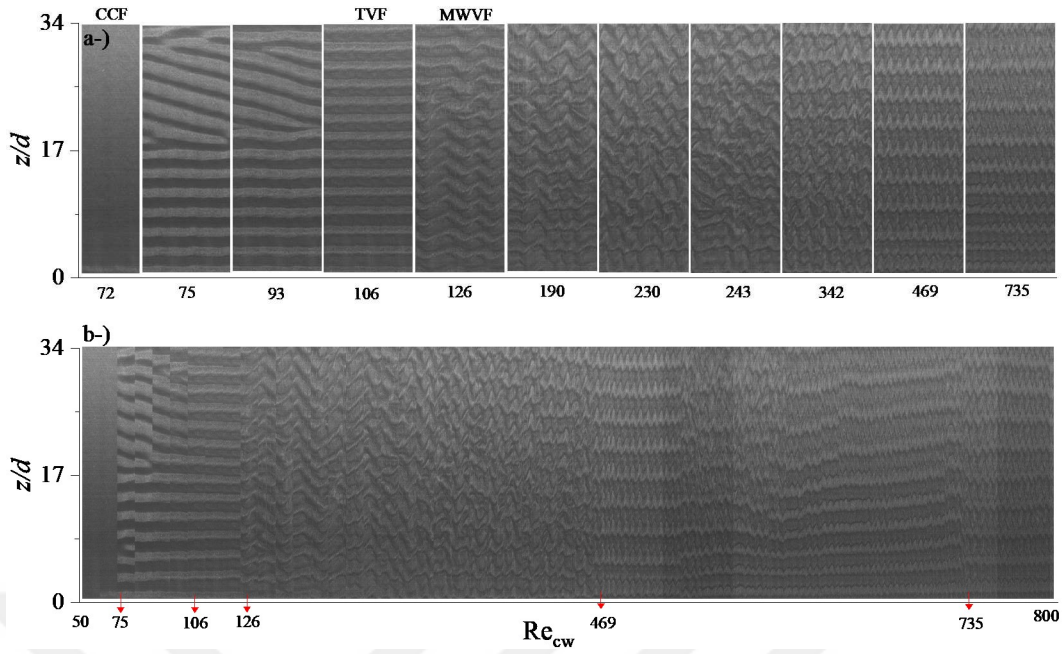


Şekil 3. 6 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri.

Taylor-Couette deney düzeneğinde (η=0,868) %0,1 xanthan çözeltisi çalışma sıvısı olarak kullanıldığında, TVF akış yapısı öncesinde ve sonrasında simetrik olmayan akış yapılarının ortaya çıktığı gözlemlenmektedir (Şekil 3.7a). TC deney düzeneğinde Newtonyen bir akışkan kullanıldığında ve silindirler birbirine göre zıt yönde döndürüldüğünde, spiral vorteksler (SPI), birbirine geçen spiraller (IPS) ve farklı yapıda dairesel vorteks yapıları ortaya çıkmaktadır [6]. Ortaya çıkan bu spiral vorteks yapıları literatürde yapılan farklı çalışmalarda da gözlemlenmiştir. TC deney düzeneği içerisinde viskoelastik akışkan kullanımı sonucunda akış içerisindeki ilk bozunmaların SVF akışı şeklinde olduğu yapılan farklı çalışmalarda vurgulanmıştır [113], [114]. Viskoelastik akışkan kullanımı durumunda, örn. poliakrilamid (PAA) veya polietilen oksit (PEO) çözeltileri, SVF vorteks yapılarının oluşumunun polimer moleküllerinin azimuthal yönünde gerilmesiyle hoop gerilmelerinden (ilk normal stres farkı) kaynakladığı vurgulanmıştır. [2], [115]–[118]. Oysaki Newtonyen akışkanlarda bu akış yapısı santrifüj kuvvetlerinin etkisiyle oluştuğu yapılan farklı çalışmalarda vurgulanmıştır [6], [119]. %0,1 xanthan çözeltisi kullanımı durumunda dairesel Couette akışından TVF akışına geçişi esnasında spiral vorteks (SVF) ve ribbon akış (RIB) yapılarının oluştuğu

gözlemlenmiştir. Şekil 3.7a'da uzay-zaman grafikleri, 250 fps ile elde edilen görüntülerin, görüntü-işleme gerçekleştirildikten sonra 3s süreler halinde birleştirimesi sonucunda elde edilen grafikler sunulmuştur. Benzer akış yapıları (RIB ve SVF) Majji ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir. Aynı zamanda yapmış oldukları lineer stabilite analizi sonucunda, silindirler arasındaki boşlukta oluşan viskozite profil değişiminin boşluk boyunca değişen partikül konsantrasyonundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ancak bu değişimin kritik geçiş değerleri ve akış yapıları üzerinde herhangi bir etkisinin bulunmadığını ifade etmişlerdir. Modifiye viskozite profilinin akışı stabilize ettiğini öngörürken, akışa partikül ilave edilmesi ile, Reynolds sayısında efektif viskozite kullanıldığında akışı destabilize ettiğini göstermişlerdir. Şekil 3.7a incelendiğinde, Re_{cw}=75, silindirin üst kısımlarında spiral vorteks akışı (SVF) ve alt kısımda ise TVF akışının oluştuğu gözlemlenmiştir. Silindirin en üst kısmında ise TVF ve SVF akış yapılarının kesişimi sonucunda RIB akış yapılarının oluştuğu görülmektedir. Şekil 3.7a'da görüldüğü gibi aynı eksenel yükseklikte, RIB akış yapısı aşağı ve yukarı yönde hareket eden vortekslerin arasında zaman içerisinde değişmektedir [109]. Şekil 3.7a'da, Re_{cw}=75 değerinde ilk olarak CCF, SVF, RIB ve Taylor vorteks yapılarının bir arada olduğu bir akış deseni gözlemlenmiştir. TVF yapısının eksenel dalga boyunun yukarıdan aşağı 2,74d ila 2,85d arasında değiştiği gözlemlenmiştir. RIB akış yapısı aşağı ve yukarı yönde birbirine göre zıt yönde hareket eden vortekslerin çakışması sonucunda oluşmaktadır. İç silindir hızının artması ile RIB yapısının kaybolduğu görülmüştür. Re_{cw} 75-106 aralığında, SVF ve TVF akış yapılarının bir arada olduğu ve Re_{cw}>75 koşulu gerçekleştiğinde ise RIB akış yapısının tamamen kaybolduğu görülmüştür. İç silindirin bir tam dönüşünde SVF vorteks yapısı eksenel doğrultuda, Re_{cw}=75, 1,22d yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

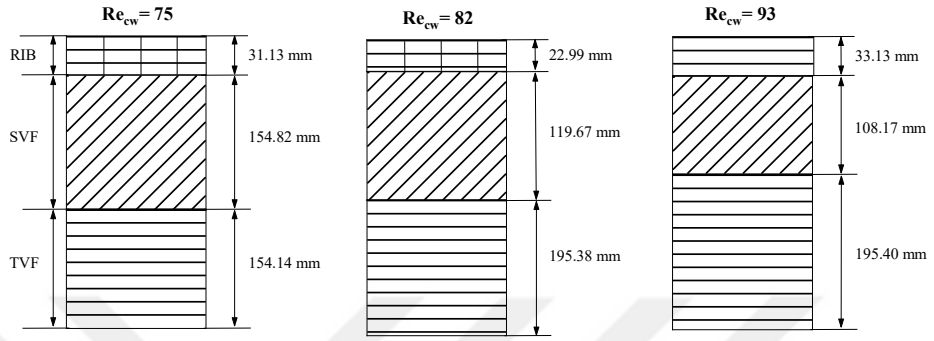
Şekil 3.7b'de, %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafikleri bir araya getirilerek CCF akışından türbülanslı MWVF akışına kadar tüm akış geçişleri bir arada gösterilmiştir. Newtonyen bir akışkan için CCF, TVF, WVF ve MWVF akış geçişleri gözlemlenirken, %0,1 xanthan çözeltisinin WVF akış yapısı görülmemiştir. Gözlemlenen akış yapıları, CCF, kısmi SVF, RIB ve TVF, kısmi TVF ve SVF, TVF ve MWVF şeklindedir.



Şekil 3. 7 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

Bu çalışmada kullanılan shear-thinning indeks aralığında, TVF akış yapısına geçiş için gerekli dönme hızı Newtonyen akışkanından daha yüksek hız değerlerinde gerçekleşmiştir. TVF akış yapısının shear-thinning indeks değerine önemli ölçüde bağlı olduğu görülmüştür. %0,1 xanthan çözeltisi için TVF akış yapısı Re_{cw} =106 değerinde iken gerçekleşmiştir. Aynı zamanda Newtonyen akışkanlarda WVF akış yapısı gözlemlenene kadar vorteks sayısı ve dalga boyu değişmez iken, %0,1 xanthan çözeltisi için Re_{cw}=106 değerinde, silindirin üst kısmında 2,49d, ve silindirin alt kısmında 2,92d aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. TVF akışı sırasında iç silindir hızının artması ile Taylor girdapları kararsız hale gelmekte ve eksensel dalgalanma ile birlikte azimut dalgalanması ortaya çıkmaktadır. Re_{cw}=126 değerine ulaştığında, eksenel olmayan salınımlı düzensiz MWVF akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. Re_{cw}>230 koşulu gerçekleştiğinde, düzensiz akış çizgilerinin ortaya çıktığı rastgele bir akış deseni gözlemlenir. Re_{cw}=342 değerine ulaştığında, küçük dalga genliği ve daha yüksek azimut frekansına sahip MWVF akış yapılarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Daha yüksek Re_{cw} değerlerinde gözlenen dalgalı akış yapılarının farklı azimut frekanslarına ve dalga genliklerine sahip olduğu görülmüştür. Şekil 3.7a detaylı bir şekilde incelendiği takdirde yüksek Re_{cw} değerlerinde, üst kısımlarda düzensiz akış yapısının ortaya çıktığı gözlenmiştir.

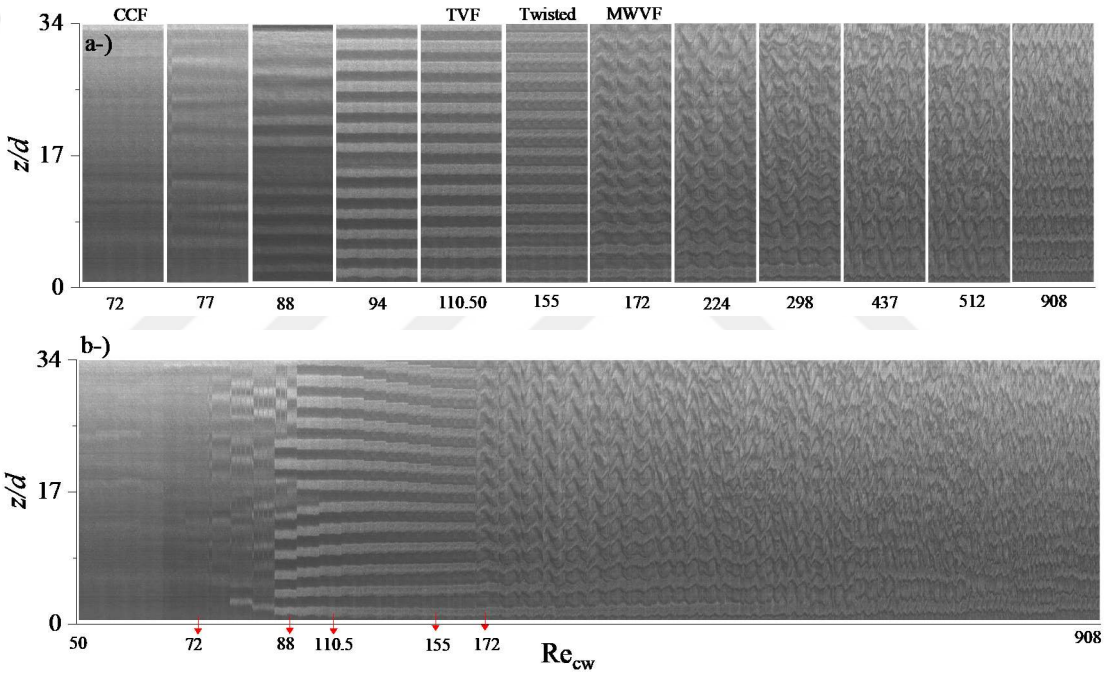
Re_{cw}=735 değerinde, dalgalı akış yapılarının azimut frekansları, alt kısmında daha düzenli bir davranış sergilerken ve üst kısımda daha kaotik olduğu görülmektedir. Şekil 3.8, CCF ve TVF akış geçişi sırasında ortaya çıkan akış yapılarının gelişimini şematik olarak göstermektedir. Aynı zamanda RIB, SVF ve TVF akış yapılarının toplam genişliklerinin değişimi de gösterilmektedir.



Şekil 3. 8 %0,1 xanthan çözeltisi için CCF ile TVF geçişi sırasında görülen akış yapılarının şematik görünüşü.

TC deney düzeneğinde %0,1 xanthan çözeltisi kullanımında, oluşan akış yapılarının farklı dalga boyu ve vorteks sayısına sahip oldukları gözlemlendi. Örneğin Newtonyen akışkanı için, silindirler arasındaki boşlukta 42 vorteks yapısı gözlemlenirken, %0,1 xanthan çözeltisinde vorteks sayısının 32'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda eksenel dalga boyları da sırasıyla λ/d=2,14 (n=1) ile 2,49 (n=0,45) arasında değiştiği görülmüştür. Benzer sonuçlar literatürde farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulanmıştır [102], [109]. Cagney ve Balabani (2019) yapmış oldukları çalışmada, shear-thinning akışkanlarda oluşan toplam vorteks sayısının Newtonyen akışkanına göre yaklaşık %30 azaldığını göstermişlerdir. Vortekslerde meydana gelen bu değişim, iç ve dış jetlerin büyüklüğündeki farktan kaynaklanmaktadır. Shear-thinning akışkanlarda dış jetin aksine iç jetin hızı çok daha düşüktür [102]. TC düzeneğinde shear-thinning akışkan kullanımında, iç silindire yakın bölgede düşük viskozite (yüksek kayma hızından dolayı) ve yüksek azimut hızı ile birlikte dış silindire doğru daha yüksek momentum transferine neden olurken dış silindirin yakınında yüksek viskozite ve düşük hız ile birlikte düşük momentum aktarımı gerçekleşir. İç ve dış jetlerin büyüklüğü arasındaki bu farklılıklar akış içerisindeki asimetriye ve dalga boylarında bir artışa neden olurlar (Şekil 3.7b). TVF akış yapısının oluşumu öncesinde RIB ve SVF oluşan

koşullarda, Newtonyen akışkanının aksine, viskoz kuvvetlerin üzerinde santrifüj kuvvetlerin hâkim olduğunu göstermektedir [109]. Santrifüj kuvvetlerin viskoz kuvvetleri üzerinde hâkim olduğu zaman TVF akış yapıları oluşmaktadır. Shear-thinning akışkanlarda iç jetin dalga genliklerinin dış jetin dalga genliğinden daha büyük olduğu yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır [9], [98], [102]. Newtonyen akışkanların dalga genlikleri sabit iken shear-thinning akışkanlarda WVF akış yapısında eksen boyunca dalga genliğinin değişken olduğu görülmüştür. Buna ilave olarak Newtonyen durumunda iç silindir hızının artmasıyla oluşan vortekslerin konumu neredeyse değişmez iken shear-thinning akışkanlarda eksenel olarak kaydığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 9 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

TC deney düzeneğinde %0,2 xanthan çözeltisi farklı Re_{cw} değerlerinde elde edilen uzay-zaman grafikleri Şekil 3.9a'da gösterilmektedir. İç silidir hızı kademeli olarak artırıldığında, silindirler arasında SVF ve RIB akış yapılarının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Re_{cw}=77 değerinde ilk olarak, dairesel Couette akışı (CCF) ile birlikte Ekman halkaları gözlemlendi. Re_{cw}=88 ve 94 aralığında CCF akışından TVF akış tam olarak gerçekleşmedi, kısmi TVF akış yapıları görülmüştür. Re_{cw}=110,50 değerine ulaştığında TVF akış yapılarının silindirin tamamını kapladığı görülmüştür. Silindir içerisinde toplam 30 adet zamandan bağımsız eksenel

simetrik vortekslerin dalga boyunun λ=2,86d olduğu bulunmuştur. TVF akış yapısının oluşum sürecinde gerçekleşen akış yapılarının, %0,1 xanthan çözeltisi ve Newtonyen akışkanından tamamen farklı olduğu gözlemlenmiştir. İç silindirin dönme hızının artmasıyla, twisted Taylor vorteks yapıları Re_{cw}=155 değerine ulaştığında görünmeye başlamıştır. İç silindir hızının artırılmasıyla silindirin üst kısımlarında dalgalı akış yapılarının gözlemlendiği ve Re_{cw}=172 değerine ulaştığında akışın MWVF yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Oluşan toplam vorteks sayısının azalarak 28 olduğu ve dalga boyunun 2,32d ile 3,54d arasında değişim gösterdiği ve dalga genliklerinin silindirin alt tarafına doğru azaldığı belirlenmiştir. İç silindir hızının daha da arttırılarak Re_{cw}=224 ulaştığında, silindirin üst kısmında MWVF akış yapılarında bozulmaların meydana geldiği gözlenmiştir. İç silindir hızının daha da artırılarak Re_{cw}=298'e ulaştığında, MWVF akış yapısının neredeyse tamamen kaybolduğu ve daha düzensiz akış yapısına dönüştüğü görülmektedir. Re_{cw} değerinin daha da artmasıyla türbülanslı MWVF akış yapısı oluşur. %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafikleri bir araya getirilerek CCF akışından türbülanslı MWVF akışına kadar tüm akış geçişleri Şekil 3.9b'de bir arada gösterilmiştir. Şekil 3.9b'den de açıkça görüldüğü gibi, WVF akış yapısı oluşmadan TVF akış yapısı MWVF akış yapısına dönüşmektedir.

Shear-thinning ve Newtonyen akışkanların kritik geçiş değerleri ve eksenel dalga boyları Tablo 3.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Shear-thinning akışkan kullanımı sonucunda TVF akış yapısından MWVF akış yapısı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı karşılaştırma yapabilmek amacıyla shear-thinning akışkanlarda Tablo 3.2'de MWVF akış yapısı yerine WVF akış yapısı kullanılmıştır. Tablo 3.2'den de açıkça görüldüğü gibi WVF akış yapısının shear-thinning akışkanlarda Newtonyen akışkanına göre daha kısa Reynolds aralığında stabil kaldığı görülmektedir. Shear-thinning akışkanlarda, WVF vortekslerinin silindir içerisinde yukarıdan aşağıya doğru değişen azimut frekanslarına ve dalga genliklerine sahip olduğu da gözlenmektedir. Newtonyen akışkanlarındaki WVF vorteks yapılarının, shear-thinning akışkanlarınınkine kıyasla daha küçük eksenel ve daha büyük azimut dalga boylarına sahip olduğu görülmektedir.

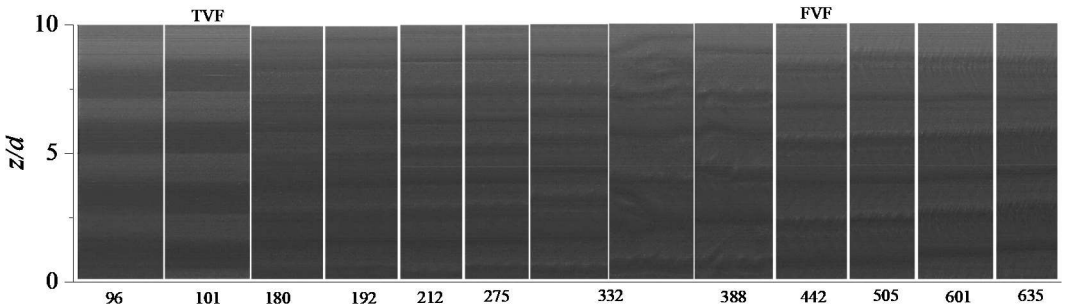
Tablo 3. 2 Dış silindir sabit iç silindir hareketli iken ortaya çıkan akış yapılarının kritik geçiş değerleri ve akış karakteristiklerinin özeti (η = 0,868).

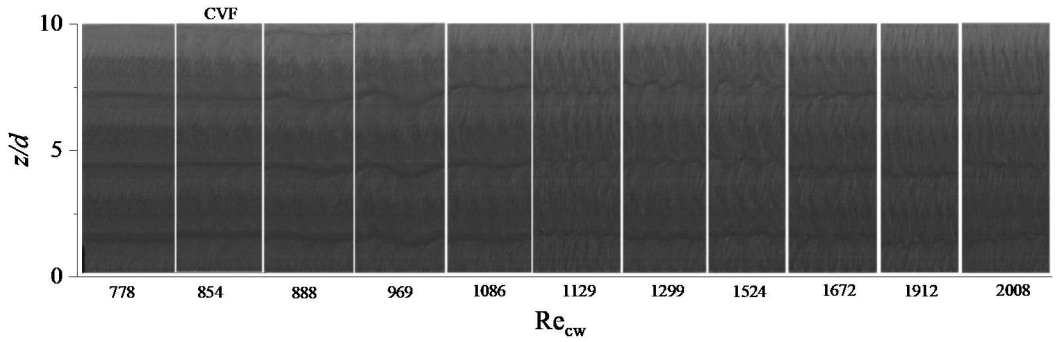
Akış yapısı	n	Kritik geçiş değerleri	Akış karakteristikleri
Taylor vorteks akışı (TVF)	1,00	Re_c=125	λ=2,14d
	0,45	Re_{cw}=106	λ=2,49d - 2,92d
	0,38	Re_{cw}=110,50	λ=2,70d - 2,95d
Dalgalı vorteks akışı (WVF)	1,00	$1{,}22Re_c<Re<4{,}23Re_c$	λ=2,16d - 2,61d
	0,45	$1{,}19Re_{cw}<Re_{cw}<2{,}29Re_{cw}$	λ=2,24d - 3,20d
	0,38	$1{,}55Re_{cw}<Re_{cw}<2{,}70Re_{cw}$	λ=2,32d - 3,54d

3.2.3 Silindirler arasındaki boşluğun etkisinin incelenmesi

Akış yapılarının geçişi ve oluşumu oldukça karmaşık süreçlerdir ve deney düzeneğinin konfigürasyonuna ve geometrisine bağlı olarak birçok farklı parametreden etkilenmektedirler. Aynı zamanda bu parametreler birçok olası akış bozunumlarını da önemli ölçüde etkilemektedir. TC akışında akış yapılarının oluşumunda ve oluşan bu akış yapıları üzerinde bozucu etkiye sahip olan en önemli parametre santrifüj kuvvetleridir. Silindir içerisinde santrifüj kuvvetler çap oranına (boşluğa) bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Martinez-Arias ve ark (2014) yapmış oldukları çalışmada iç silindirin dönme hızının tork ve oluşan akış yapıları üzerindeki etkisi çap oranına bağlı olarak incelemişlerdir. Çalışmada çap oranının azalmasıyla silindir içerisindeki toplam vorteks sayısının azaldığı vurgulanmıştır. [100]. Bu tez çalışmasında yarıçap oranı değişiminin akış düzenlerinin oluşumu üzerindeki etkisi ve shear-thinning akışkanları kullanılarak kritik geçiş değerleri ve oluşan akış yapıları incelenmiştir. Newtonyen akışkanı (%75 gliserol) için yarıçap oranı η=0,868 olduğunda Taylor vorteks yapıları Re=120 gelişmeye başlarken Re_c=125 değerine ulaştığında tamamen geliştiği gözlemlenmiştir. Yarıçap oranı η=0,643 olduğu durumda ise, TVF akış yapısının çok daha erken Re_c=79 değerinde gerçekleştiği gözlemlenirken Taylor vorteks yapısının daha uzun Reynolds sayısı aralığında için sabit kaldığı görülmüştür. TVF akış yapısında WVF akış yapısına geçiş Re=891 değerinde gerçekleşmiştir. Çap oranı 0,868 için Re/Re_c=1,22 iken, bu değer η=0,643 için 11,24 olarak değiştiği görülmüştür. Momentum transferi yarıçap oranın artmasıyla daha güçlü hale gelmektedir [100]. Yarıçap oranı 0,643 ve %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafikleri, dar boşluk (η=0,868) durumundakine benzer bir şekilde elde edilmiştir. Bu konfigürasyonda gözlemlenen eksenel

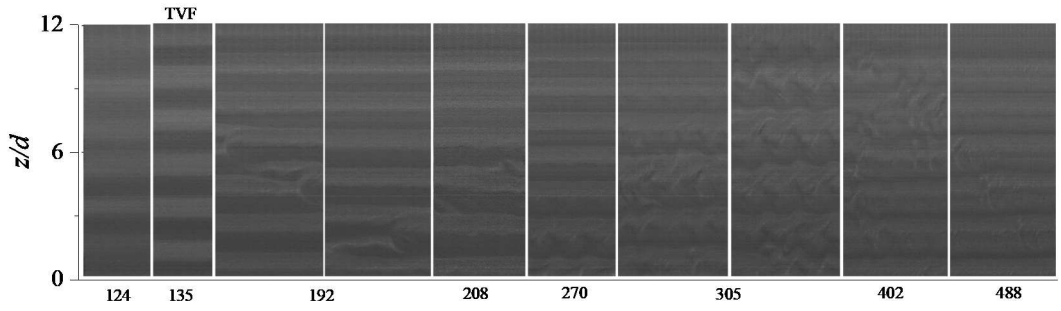
simetrik ve eksenel simetrik olmayan akış yapıları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Kritik geçiş değerleri Re_{cw} cinsinden ifade edilmiştir. İç silindirin dönme hızının arttırılmasıyla ilk olarak CCF akış yapısıyla birlikte zayıf TVF akış yapıları gözlemlenmiştir. TVF akış yapıları Re_{cw}= 101'e ulaştığında silindirin tamamında açıkça görülebilir hale gelmiştir ve 16 adet zamandan bağımsız eksenel simetrik vorteks yapılarının λ=2,08d dalga boyuna sahip olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısının daha da artmasıyla birlikte eşlenik olarak hareket eden vorteks yapılarının arasındaki yapı bozunarak şekillerini kaybederler ve bütünleşik bir şekilde hareket ederler. Re_{cw} değeri 332'ye ulaştığında, dar aralıkta gözlemlenen SVF, RIB veya WVF gibi akış yapılarına benzerlik göstermeyen düzensiz bir akış yapısı görülmüştür. Re_{cw} değerinin daha da artırılmasıyla birlikte girdap sayısının 14'e düştüğü ve Re_{cw}=442 değerine ulaştığında silindirin tamamında yeni bir akış yapısının geliştiği gözlemlenmiştir. Bu akış yapısına literatürde rastlanmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmada bu akış "*kılçık vorteks akışı*" (FVF) olarak adlandırılmıştır. Re_{cw} değeri 778'e kadar artırıldığında, vorteks çiftlerinin birleşmeye başladığını ve vorteks çiftinin içindeki sınırların kaybolarak toplam vorteks sayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Re_{cw}=854 değerine ulaştığında ise, FVF akış yapısının bir diğer literatürde bulunmayan akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Başlangıçta bu akış yapısı zayıf bir şekilde gözlemlenirken, iç silindir hızının artmasıyla birlikte silindirin tamamını kapladığı görülmüştür. Bu akış yapısı da "*bobin vorteks akışı*" (CVF) olarak adlandırılmıştır. Bu akış yapıları 888<Re_{cw}<1086 aralığında farklı azimut dalga frekansına ve dalga genliğine sahip dalgalı hale dönüştüğü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Re_{cw} değeri 1129'a ulaştığında, toplam CVF vorteks sayısının arttığı görülmektedir.

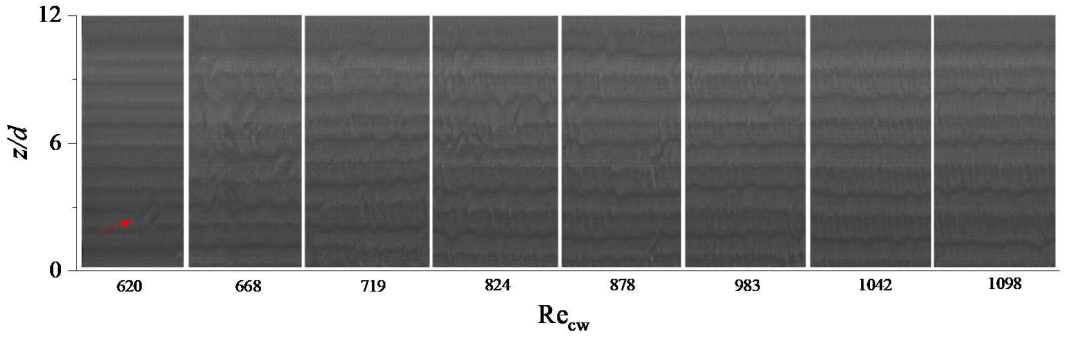




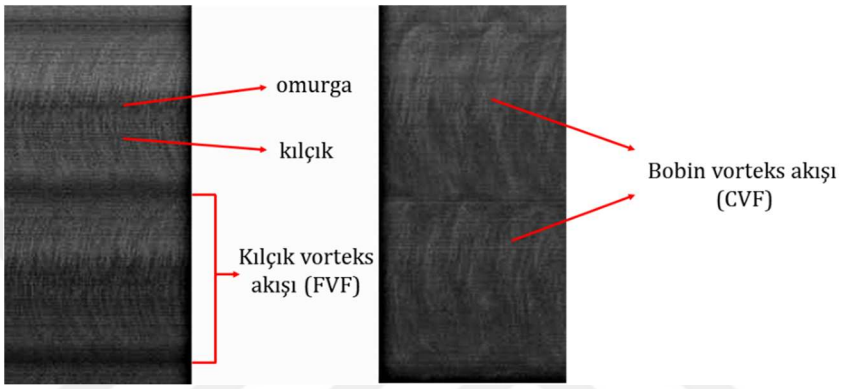
Şekil 3. 10 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (η=0,643).

Benzer şekilde %0,2 xanthan çözeltisinin (n=0,39) TC deney düzeneği içerisinde oluşan akış yapılarının uzay-zaman grafikleri ve deneylerden elde edilen kritik geçiş değerleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte CCF akış yapısı Re_{cw}=124 değerine ulaştığında Taylor vorteks akış yapıları zayıf bir şekilde görünmeye başlamıştır. Re_{cw} 135'e ulaştığında, TVF akışı silindirin tamamında belirginleşmiştir. Silindirler arasındaki boşlukta 16 eksenel simetrik toroidal vorteks yapısı gözlemlenirken, bu akış yapılarının dalga boyu λ=2,23d olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.11'den açıkça görülmektedir ki, Re_{cw} değerinin artarak Re_{cw}=192 değerine ulaştığında silindirler arasındaki boşluğun merkezinde ve tabanında akış yapılarında lokal bozulmaların ortaya çıktığı görülmektedir. Re_{cw} artırılarak 270 değerine ulaştığında TVF akış yapısından eksenel simetrik olmayan akış yapılarına geçiş gelişmeye başlamıştır. Re_{cw}=488'e ulaştığında düzensiz akış yapıları FVF akış yapılarına dönüşmüştür. Re_{cw}=620 değerine ulaştığında ise, iki komşu FVF akış yapısının bozunarak birleşmeye başladığı görülmektedir. Oluşan yeni akış yapılarının (FVF ve CVF) büyütülmüş görüntüsü Şekil 3.12'de gösterilmiştir.





Şekil 3. 11 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (η=0,643).



Şekil 3. 12 Yeni akış yapılarının büyütülmüş görüntüsü.

Bu çalışma kapsamında, akışkanın shear-thinning özelliğinin akış yapılarının oluşumu üzerine önemli etkisi olduğunu ve aynı zamanda silindirler arasındaki mesafenin değişmesi ile farklı akış yapılarının ortaya çıktığı görülmektedir. von Karman yapmış olduğu çalışmada akışkan parçacıklarının hareketli iç silindirin yakınında daha hızlı hareket ettiğini ve bundan dolayı dış silindirin yakınında bulunanlara kıyasla daha büyük bir merkezkaç kuvveti etki ettiğini belirtmişlerdir. Parçacıklar üzerine etkiyen merkezkaç kuvvetleri arasındaki fark, aynı zamanda azimut hızının fonksiyonu olan radyal basınç gradyanı ile dengelenirler. von Karman bu parametreler arasındaki farklılıkların akış yapısında düzensiz davranışların ortaya çıkmasına sebep olduğunu bildirmiştir [120]. Düşük Reynolds sayılarında, viskozite ortaya çıkan bozulmaları azaltırken kararsızlıkları bastırır. Newtonyen bir akışkan akış alanı içerisinde sabit viskozite profiline sahiptir ve iç silindirin yanındaki akışkan dış silindire doğru hareket ederken, dış silindirin yanındakiler iç silindire doğru hareket ederler. Akışkan tabakalarının birbiri arasındaki değişimi sonucunda ikincil akışlar silindir boyunca bir çift simetrik vorteks şeklinde ortaya

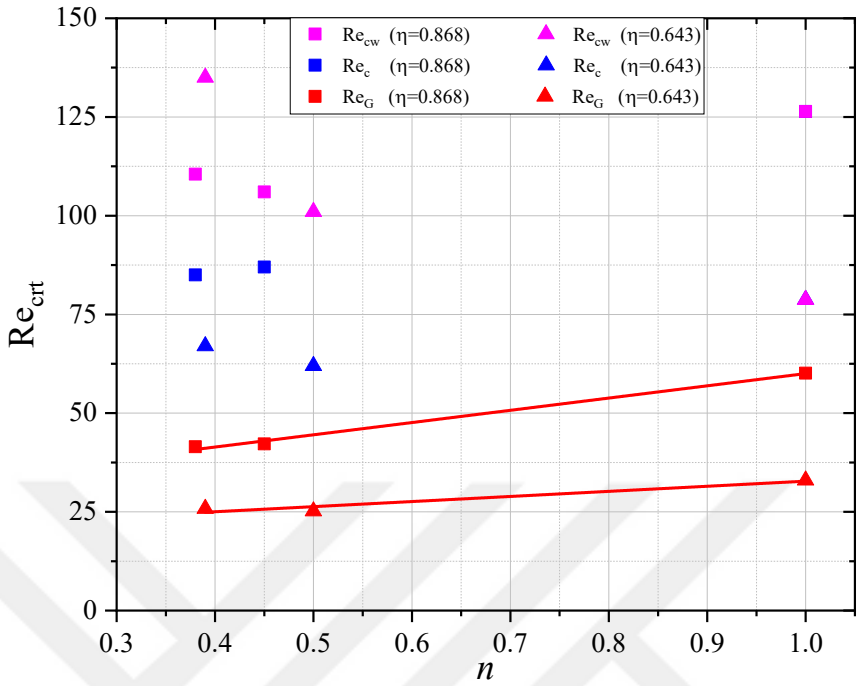
çıkarlar. Akışkan parçacıkları Taylor vorteksleri içerisinde iç ve dış silindirler arasında sürekli hareket halindedirler. Akış içerisinde kütle ve açısal momentum sürekli korunum halindedir. Akış alanı içerisindeki akışkan parçacıkları açısal momentumunun etkisi ile vorteks içerisinde sürekli olarak yeniden dağıtılırlar. Shear-thinning akışkanlarda ise viskozite profili hareketli olan iç silindirde durağan haldeki dış silindire doğru artmaktadır. İç silindir yakınındaki akışkan parçacıkları kalın bir viskozite profiline doğru (dış silindir yüzeyi) daha hızlı hareket ederken, dış silindir yakınındaki akışkan parçacıkları daha ince bir viskozite profiline doğru (iç silindir yüzeyi) çok daha yavaş hareket etmektedirler. Newtonyen akışkan durumdan farklı olarak meydana gelen bu değişim, Newtonyen akışkanlarında gözlenmeyen farklı eksenel simetrik olmayan akış yapıları oluşumuna sebep olurlar. Oluşan farklı akış yapılarına ilave olarak, kritik geçiş değerleri için elde edilen Reynolds sayılarında da farklılıkların ortaya çıktığı görülmektedir. Newtonyen akışkanından daha erken bir kritik geçiş gerçekleşir ve aynı zamanda akışkanın shear-thinning karakteristiğine bağlı olarak kararsız akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Kritik geçiş değerlerinin (Re_{cw} değerleri için) monotonik olmayan sonuçlar ortaya koyduğu gözlenmiştir. Benzer sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarda da görülmüştür [102], [108].

İki farklı yarıçap oranında (η) xanthan ve gliserin çözeltileri kullanılarak TVF yapısının oluşumunun kritik Reynolds (Re_c) değişimi, üç farklı Reynolds sayısı ile shear-thinning indeks (n) değerine bağlı olarak Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçların literatürde yapılan çalışmalarla iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [101], [108]. Şekil 3.13 shear-thinning indeks değerinin yarıçap oranına bağlı olarak Taylor girdaplarının oluşumu üzerinde akışı stabilize veya destabilize etkisinin bulunup bulunmadığına göre değerlendirilmektedir. Shear-thinning akışkanlarda kritik Reynolds ifadesinin belirlenmesi amacıyla tek bir viskozite değerinin kullanılamayacağı bir önceki bölümde açıklanmaya çalışılmıştı. Alibenyahia ve ark. (2012), lineer stabilite analizi ve deneysel sonuçlar arasında tutarsız sonuçların ortaya çıktığını gözlemlemiştir. Aynı zamanda, Reynolds sayısının tanımında referans viskozitesinin kullanımının uygunsuz sonuçlar doğurduğunu göstermiştir. Araştırmacılar Reynolds sayısının viskozite ifadesi için iç duvar viskozitesi tanımlanmış, ve bu ifade kullanılarak elde

edilen kritik Reynolds ifadesinin (Re_{cw}) akışı stabilize ettiğini göstermişlerdir. Kritik Reynolds tanımında Re_c kullanıldığında, TVF akışına geçiş üzerindeki etkisinin monotonik olmadığını, yani Newtonyen akış durumundan *n* değerinin azalması ile birlikte ilk önce akışı destabilize ettiği görülmüştür. Shear-thinning indeks değerinin azalması ile akışın dengelendiğini ve stabilize olduğu görülmektedir. Bu sonuç literatürde yapılan çalışmalarla uyum içerisindedir [101], [102], [104]. Re_{cw} kullanıldığında ise, *n* değerinin azalması silindirler arasındaki boşluğun artmasıyla birlikte, Taylor girdaplarının geçişi ve oluşum süreci gecikirken (daha yüksek kritik Reynolds sayısı), silindirler arasındaki boşluğun azalmasıyla akışın kararsızlaştığı görülmektedir. Yarıçap oranının artması ile ve özellikle 1'e yakın koşullarda, kritik Reynolds sayısının (Re_{cw}) shear-thinning indeks değerinden bağımsız hale geldiği Alibenyahia ve ark. (2012) tarafından belirtilmiştir. Reynolds sayısında kullanılan viskozite ifadesinin, tek bir viskozite ile tanımlanamayacağı, shear-thinning değerinin azalmasının akışı kararsızlaştırıcı bir etkiye sahip olduğu, yani Taylor vorteks oluşumunun her zaman daha erken gerçekleşeceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada tanımlanan Re_G ifadesinin akış alanı içerisinde kritik Reynolds sayısının tanımlamak amacıyla kullanıldığında, kritik geçiş değerinin shear-thinning indeks değerine bağımlılığının monotonik olduğu görülmüştür. Azalan *n* değeri ile birlikte Taylor vorteks oluşumunun daha erken gerçekleşeceği görülmektedir. Ancak bu bağımlılık silindirler arasındaki boşluğun artmasıyla zayıflar ve shear-thinning indeks değerine karşı daha az duyarlı olduğu görünür.

İç silindir hareketli dış silindir sabit tutulduğunda, viskoz dağılım iç duvarın yakınında gerçekleşir. Referans viskozite $\mu_{ref} = \kappa \cdot \left(\frac{R_i \omega_i}{d} \right)^{n-1}$ değeri iç silindir yüzeyinin daha uzağında ki bir noktayı temsil etmektedir. İç duvar viskozitesinin ise sadece iç silindir yüzeyindeki viskoziteyi temsil ettiği görülmektedir. Kullanılan bu viskozite değerlerinin, silindirler arasındaki boşluğun herhangi bir noktasındaki yerel kuvvetleri temsil etmediği ve kritik Reynolds sayısında kullanılamayacağı görülmektedir. Bu nedenle, tek bir viskozite değeri yerine viskozite profilinin

kullanımı ile daha anlamlı ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.



Şekil 3. 13 Farklı shear-thinning indeks ve yarıçap oranları için TVF akışına geçişi tanımlayan kritik Reynolds değerlerinin karşılaştırılması.

4
Dış silindir hareketinin akış yapıları üzerindeki etkisi

Bu bölüm de üçüncü bölüme ilave olarak dış silindirin dönme hızının ve yönünün akış yapıları ve kritik geçiş değerleri üzerine etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Newtonyen ve Newtonyen olmayan (xanthan) akışkanlarının TC deney düzeneği içerisinde kullanımı durumunda ortaya çıkan akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerleri ve bununla birlikte oluşan akış yapılarının karakterizasyonları yapılmıştır.

4.1 Newtonyen akışkan

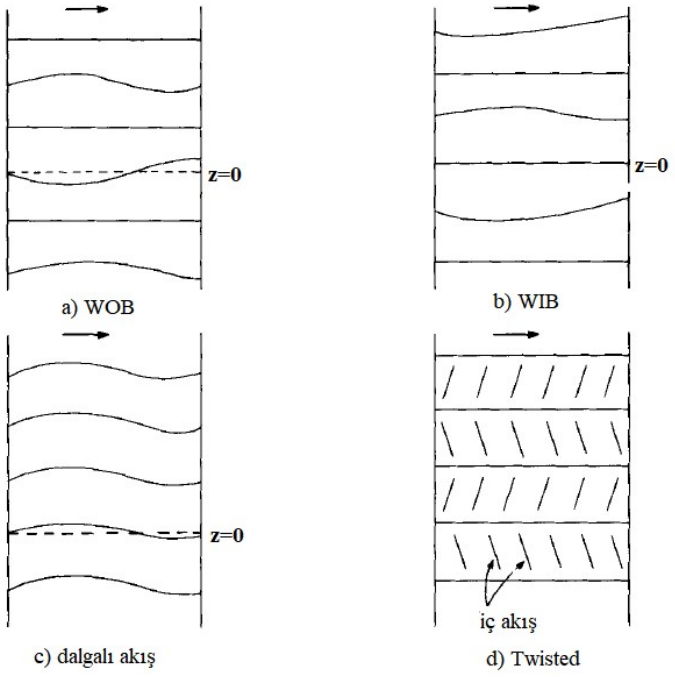
4.1.1 Silindirlerin aynı yöne dönme durumu

Eş merkezli silindirler arasındaki akışın akışkanlar mekaniğinde bir paradigma olarak önemi, Di Prima & Swinney (1985) ve Tagg (1994) tarafından yapılan çalışmalarda belgelenmiştir [121], [122]. Bu çalışmalarla birlikte, Taylor-Couette akışının literatürde çok sayıda çalışmada tercih edilmesinin nedeni, türbülans akışına geçiş sırasında sistem içerisinde oluşan doğrusal olmayan akış yapılarının düzenli bir şekilde ilerlemesi ve gözlemlenmeye imkan sağlamasıdır. Ortaya çıkan akış yapılarının ve rejim geçişlerinin iç silindirin dönme hızı ile birlikte yüksek doğrulukta kontrol edilebilmesi en önemli etkenler arasındadır. Örneğin, dış silindir sabit iken (ω_o=0) ve iç silindir hızı kademeli olarak artırılarak, düşük hız değerlerinde tamamen azimuthal Couette akışı ve hız değerlerinin artması ile oluşan türbülanslı Taylor girdapları arasında oluşan kritik rejim geçişleri ve hız değerleri ortaya çıkar [6]. Türbülans akışına geçişte meydana gelen düzenli geçiş Taylor-Couette çalışmalarını ilgi çekici kılmaktadır.

Yapılan ilk çalışmalarda sabit azimut akışından Taylor vorteks yapılarına geçiş bu çalışmaların temel odak noktası olmuştur. Özellikle kritik rejim geçişlerinde ortaya çıkan hız değerlerinin değişimi sağlayan çeşitli varyasyonları Taylor-Couette akış deneylerinde araştırılmıştır. Özellikle Andereck ve ark. (1986) tarafından yapılan çalışmada dış silindirin hareketli olması ile birlikte yeni akış rejimlerinin ortaya

çıktığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Iooss (1986) yapmış olduğu çalışmada, dalgalı iç sınır akışı (WIB) ile dalgalı dış sınır akışının (WOB) dalgalı girdap akışı (WVF) akışına dönüşümünün matematiksel olarak nasıl elde edildiğini göstermiştir (Şekil 4.1) [123].

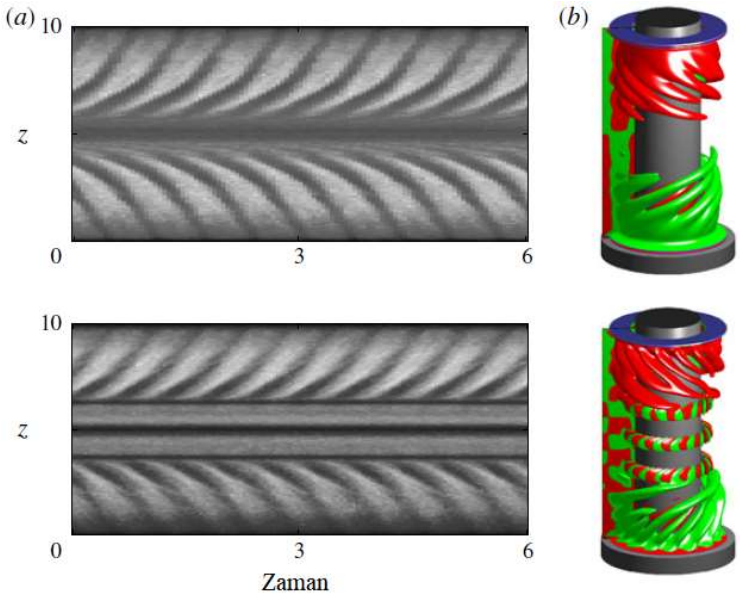
Silindirlerin aynı yöne dönme veya sadece iç silindir hareketli olduğu durumlarda, akış doğrusal santrifüj kuvvetlerin etkisi ile süperkritik akış yapıları oluşur ve ortaya çıkan bu akış yapıları (Taylor vorteks yapıları) kritik Reynolds sayısını aşması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Oysaki silindirlerin zıt yöne dönme koşullarında, subkritik rejim geçişleri ortaya çıkacaktır, yani rejim geçişinde laminer akış yapısı ara geçiş yapıları gözlemlenmeden türbülanslı hale gelecektir ve aynı zamanda bu şartlarda laminer ve türbülanslı akış yapılarının bir arada görülebilmektedir [2], [121], [124].



Şekil 4. 1 Iooss (1986) tarafından yapılan çalışmada incelenen akış yapılarının şematik görünümü [123].

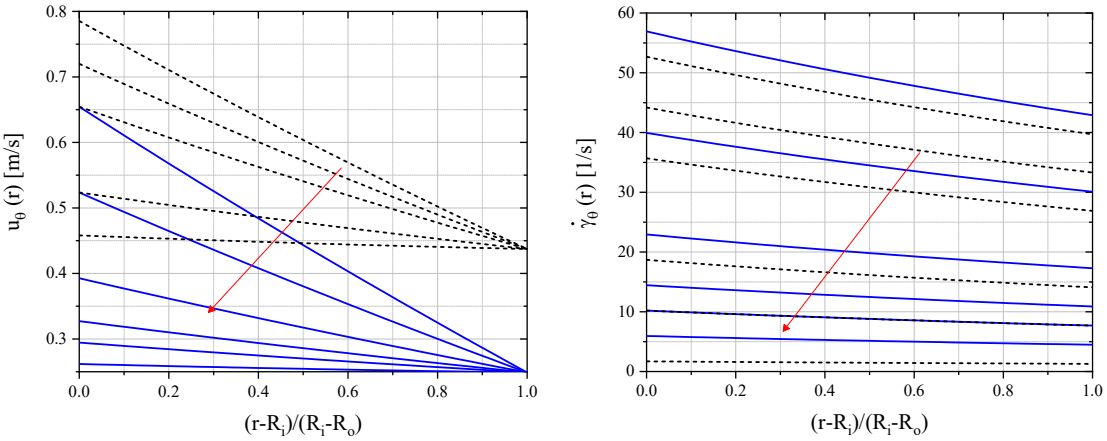
Heise ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada aynı yönde hareket eden silindir koşullarında eksenel simetrik ve eksenel-simetrik olmayan akış yapıları hem deneysel hem de nümerik olarak incelenmiştir. Araştırmacılar çalışma sonunda aşağı ve yukarı yönlü hareket eden iki farklı spiral vorteks akışının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ortaya çıkan akış yapılarının deneysel ve nümerik olarak

gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Dış silindirin Reynolds değerinin azalması ile birlikte, kısmen histeretik geçişlerin farklı eksenel simetrik çok hücreli akış yapılarına geçişleri gözlemlenir. Bu geçişler esnasında her zaman toplam vorteks yapılarının ve özellikle Ekman vorteks yapılarının dalga boylarında bir azalmanın meydana geldiği, araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [125]. Ikeda ve Maxworthy (1994) iç ve dış silindirin aynı yöne dönmesi sonucunda iki farklı durum için ortaya çıkan akış yapıları incelenmiştir. Birinci durumda dış silindir sabit bir dönme hızında dönerken iç silindirin dönme hızı artırılmıştır. Bu durumda iç silindirin dönme hızına bağlı olarak silindirler arası boşlukta çeşitli akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. İkinci durumda ise iç silindir istenilen son (maksimum) dönme hızında dönerken, dış silindir durağan halden dönme hızı kademeli olarak artırılmaya başlanmıştır. Dış silindirin dönme hızı CCF akış yapısı gözlemlenene kadar artırılmıştır. Elde edilen iki sonuç karşılaştırıldığında farklılıkların ortaya çıktığı ve ikinci yöntem de elde edilen kritik Reynolds sayısının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun histerezis etkisinden kaynaklandığı yani girdaplar oluştuktan sonra bozunmalarının gerçekleşmesi için daha düşük bir dönme oranı gerektiği vurgulanmıştır. Aynı zamanda araştırmacılar yapmış oldukları çalışmada silindirlerin aynı yöne dönmesi sonucunda iki yeni akışkan yapısının oluştuğunu gözlemlenmiştir. Bu akışkan yapıları araştırmacılar tarafından "*unstable irregularities*" ve "*temporal irregularities*" olarak isimlendirilmiştir. İç silindirin dönme hızının artmasıyla birlikte vorteks yapıları üzerindeki dalgaların genliğinin kırıldığı ve bununla birlikte düzensizliklerin başladığı belirtilmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapılarının zamanla sürekli olarak ilerlediği ve literatürde gözlemlenen akış yapılarına benzemediği vurgulanmıştır. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte ortaya çıkan bu düzensiz akış yapılarının ortadan kaybolduğu wTVF akışının oluştuğu görülmüştür [126].



Şekil 4. 2 Heise ve ark. (2013) tarafından gözlemlenen akış yapılarının a) deneysel ve b) nümerik olarak görünümü [125].

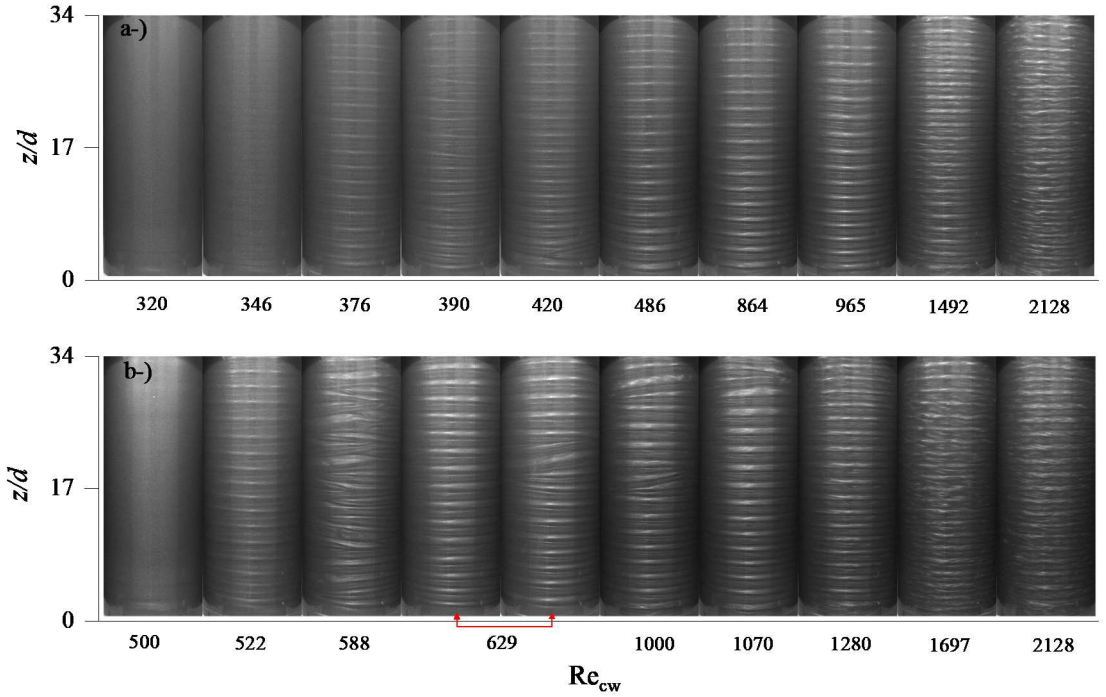
Hem iç hem de dış silindirin aynı yöne dönmesi sonucunda silindirler arası boşlukta oluşan, hız, kayma hızı iç silindirin dönme hızına bağlı olarak değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekiller üzerinde gösterilen kırmızı okun yönü, iç silindirin dönme hızının azalma yönünü belirtmektedir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi iç silindirin dönme hızının artmasıyla birlikte iç ve dış silindir arasındaki hız ve kayma hızı büyüklük farkının arttığı görülmüştür.



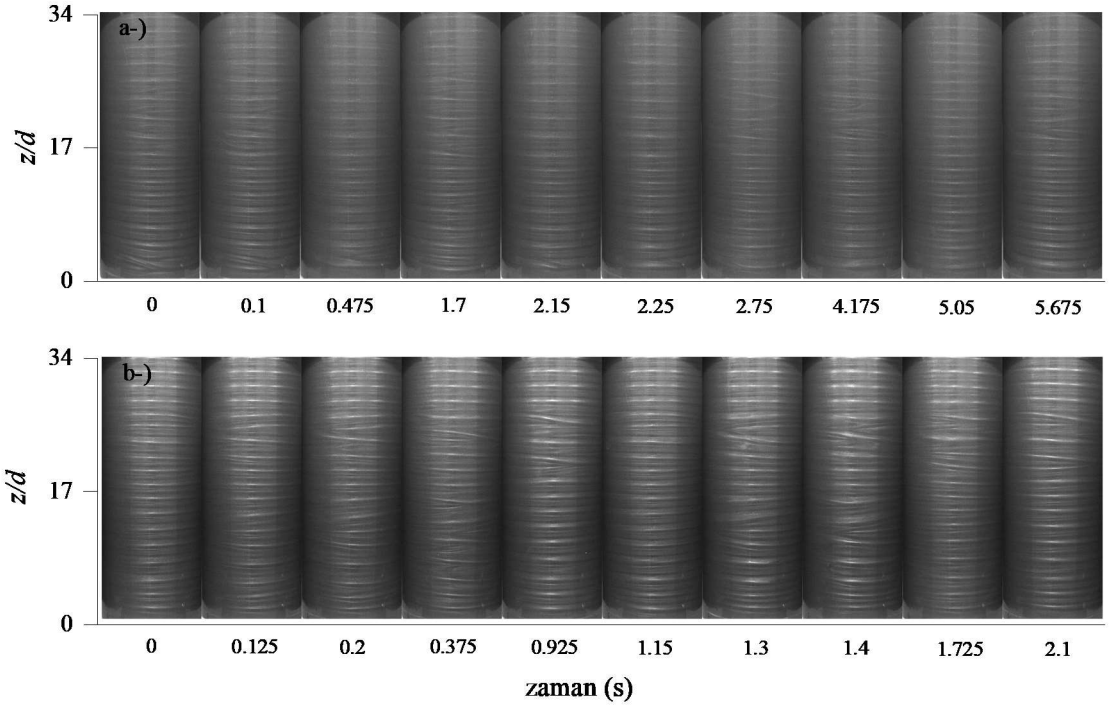
Şekil 4. 3 Hız ve kayma hızının iç silindirin dönme hızına bağlı olarak değişimi (kırmızı ok dış silindirin dönme hızının azalma yönünü göstermektedir).

Newtonyen akışkanın TC deney düzeneğinde kullanımı sonucunda, sadece iç silindir hareketli dış silindir sabit iken elde edilen akış yapıları bir önceki bölümde detaylı olarak incelenmiş ve elde edilen akış yapıları ve kritik değerleri literatürde gerçekleştirilen çalışmalarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu bölümde yapılan bu çalışmalara ilave olarak dış silindirin dönme yönünün ortaya çıkan akış rejimleri ve kritik geçiş değerleri üzerine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, dış silindir sabit bir hızda dönerken, iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda ortaya çıkan akış yapıları incelenmiştir. %75 gliserin çözeltisi için gözlemlenen geçiş rejimlerinin anlık görüntüleri iç ve dış silindirlerin dönme hızına bağlı olarak Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Ortaya çıkan akış yapıları incelendiğinde Newtonyen akışkan kullanımı ile dış silindirin dönme hızının artırılması ile birlikte akış yapılarının düzenli Couette akışından düzensiz akış yapılarına değişimi görülmektedir. Anlık görüntüler ile silindirler arasında meydana gelen akış yapılarının tam olarak belirlenemeyeceği görülmektedir. Şekil 4.4b Re_{cwo}=629 değerinde ilk durumda akış TVF akış yapısı gözlemlenirken ikinci durumda, akış içerisinde aşağı ve yukarı yönlü spirallerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumu daha belirgin olarak gözlemleyebilmek için sabit iç ve dış silindir dönme hızlarında zamana bağlı olarak akış yapılarının değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Re_{cwi}=390, Re_{cwo}=283 ve Re_{cwi}=520, Re_{cwo}=373 değerlerinde farklı periyotlarda elde edilen görüntüler incelendiğinde tek bir anlık görüntünün verilen şartlarda ortaya çıkan akış yapısını tam olarak ifade edemeyeceği görülmektedir. Dış silindir sabit bir dönme hızında dönerken, iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte silindir içerisinde ilk olarak CCF akış yapısı gözlemlenmiş ve ilk rejim geçişinin TVF akışı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte WVF akışı gözlemlenmeden aşağı ve yukarı yönlü hareket eden spiral vorteks akış yapılarının gözlemlenmiştir. Bu gözlem, literatürde daha önce gözlemlenmiş olan rejim geçişlerinden farklılık göstermektedir. Ancak Ikeda ve Maxworthy (1994) yapmış olduğu çalışmada, Andereck ve ark. (1983) [127] tarafından gözlemlenen akış yapılarından farklı akış yapıları gözlemlemiştir. Ikeda ve Maxworthy gözlemlemiş oldukları düzensiz akış yapıları tüm silindir içerisine yayıldığı görülmüştür. İç Reynolds sayısının daha da arttırılmasıyla, ortaya çıkan bu düzensiz akış yapıları kaybolarak dalgalı Taylor girdap akışı neredeyse tamamen geri oluştuğu

gözlemlenmiştir. İç Reynolds sayısı arttırıldıktan sonra, düzensiz akış bölgelerinin yanındaki girdaplar büyümeye başlamış ve çevredeki girdapların dalga boyunun iki katına ulaşarak vorteks çifti haline geldiği belirtilmiştir. Vorteks büyüklüklerindeki düzensiz dağılım aynı zamanda Baxter ve Andereck tarafından yapılan çalışmada da vurgulanmıştır [128]. Araştırmacılar ortaya çıkan büyük vorteks yapılarının geçici olmadığını ve silindirin farklı bölgelerinde oluşabileceğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda büyük vorteks yapılarının görünümünün histerik olduğu vurgulanmıştır. Ikeda ve Maxworthy, yüksek dış silindir dönme hızlarında silindir içerisinde "*temporal irregularities*" akış yapılarını gözlemlemişlerdir. Bu düzensiz akış yapıları yerel olarak ortaya çıktığı ve genellikle silindir içerisinde dikey doğrultuda (aşağı ve/veya yukarı) hareket ettiğini gözlemlemişlerdir. Bu akış yapıları dikey doğrultuda büyüyerek aynı yöne hareket eden bir girdapla bir araya gelerek yeniden birleştiği görülmüştür. Ortaya çıkan bu düzensiz akış yapıları silindirin belirli bölgelerinde oluşarak silindir içerisindeki tüm vorteks çiftlerinin uzunluğunu etkilemiş ve hiçbir zaman silindir içerisine tamamen yayılmadığı görülmüştür. Araştırmacılar silindir içerisinde belirli bir zamanda birden fazla düzensiz akışkan yapılarının oluştuğunu ve aynı dönme hızında hiçbir düzensiz akışkan yapısının oluşmadığı bir an gözlemlenebilmektedir. Bu çalışmada benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Şekil 4.5a incelendiğinde iç ve dış silindirin aynı yöne dönme koşullarında ve sabit dönme hızlarında 5,05 saniyesinde görüldüğü gibi düzensiz bir akış yapısı silindir içerisinde görülmemektedir. Diğer anlardaki akış yapılarına bakıldığında, silindir içerisinde akışı bozan düzensiz akış yapılarının varlığı görülmektedir. Bu düzensiz akış yapıları farklı zamanlarda ve silindir boyunca rastgele konumlarda oluştuğu gözlemlenmiştir. Benzer sonuçların Ikeda ve Maxworthy tarafından yapılan çalışmada da gözlemlendiği görülmüştür. Belirli bir ortalama dönüş hızında, düşük kayma hızlarında, düzensiz akış yapılarının oluşması için gereken süre maksimum iken artan kayma hızlarında, bu süre minimum olmakta, yüksek kayma hızlarında ise tekrar maksimuma ulaşmaktadır. Newtonyen akışkanlarda dış silindirin dönme hızına bağlı olarak silindirler arasındaki boşlukta kayma hızının değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir. Elde edilen bu gözlemler, uzay-zaman grafiklerinde ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.



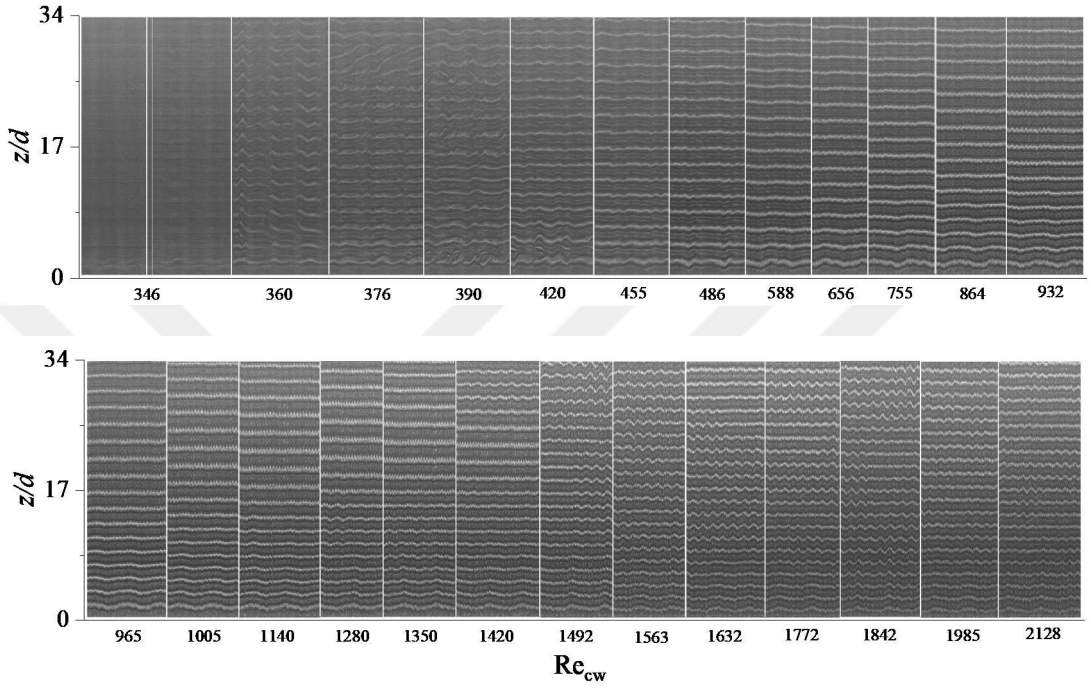
Şekil 4. 4 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait akış yapılarının anlık görüntüleri.



Şekil 4. 5 Zamana bağlı olarak gliserin akışkanın anlık görüntülerin değişimi a-) Re_{cwi}=390, Re_{cwo}=283 b-) Re_{cwi}=520, Re_{cwo}=373.

Taylor-Couette deney düzeneğinde (η=0,868) %75 gliserin çözeltisi çalışma sıvısı olarak kullanıldığında, ilk olarak elde edilen görüntülerin anlık görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen bu sonuçların silindir içerisinde oluşan akış yapısını tek başına tanımlamada yeterli olmayacağı anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçları daha detaylı olarak inceleyebilmek amacıyla uzay-zaman grafikleri çıkarılmıştır. Şekil 4.6'da dış silindir sabit bir hızda (ω_o=33 rpm) dönerken, iç silindir hızının artırılmasıyla akış yapılarının değişimi uzay-zaman grafikleri ile gösterilmiştir. Silindirlerin aynı yöne dönmeleri sonucunda ilk rejim geçişinin CCF akış yapısından TVF akış yapısına dönüştüğü, ancak bu akış yapısının belirgin bir şekilde oluşmadığı görülmüştür. Burada oluşan akış yapılarının eşlenik vorteks genişliklerinin 2,01d ile 2,30d arasında değiştiği gözlemlenirken, 38 adet vorteks yapısı görülmüştür. Dış silindir sabit kaldığı durumda ortaya çıkan TVF, WVF ve MWVF akış yapılarının, dış silindirin sabit hızda hareketi ve iç silindir hızının kademeli olarak artırılmasıyla aynı düzende oluşmadığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artırılarak Re_{cwi}=360 değerine ulaştığında, TVF akış yapısının bozunarak WVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Akış yapısının WVF akış yapısına dönüşmesiyle eşlenik vorteks genişliğinin azalarak 1,94d ile 2,23d arasında değişirken, toplam vorteks sayısı artarak 40 olmuştur. İç silindir hızının artırılarak Re_{cwi}=376 değerine ulaştığında WVF akışının üst kısımlarında SVF akışının oluştuğu net bir şekilde görülmektedir. Bu akış yapısı anlık görüntülerde belirgin bir şekilde görülmemektedir. Re_{cwi}=420 değerine ulaştığında ise silindirin üst kısımlarında kaybolurken, silindirin alt kısmında vorteksler arasında düzensiz ikincil bir akışın oluştuğu görülmektedir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte bu düzensiz akış yapılarının tamamen ortadan kaybolduğu görülmüştür. Ancak silindirin alt kısmındaki akışta dalgalamaların meydana geldiği ve tüm çalışma boyunca devam ettiği görülmüştür. Re_{cwi}=455 değerinde düzensiz akış yapıları gözlemlenmezken, vorteks yapıları arasında akış çizgilerinin oluşmaya başlamıştır. Burada toplam vorteks sayısı değişmezken, eşlenik vorteks genişliğinin 2,23d ile 2,30d aralığında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Re_{cwi}=455 değerine ulaşıldığında ise toplam vorteks sayısının ve silindirin genelinde eşlenik vorteks genişliğinin değişmediği görülürken, silindirin alt kısımlarındaki eşlenik vorteks genişliğinin (2,01d) azaldığı gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=1492 değerinde ortaya çıkan akış yapısı incelendiğinde, akış yapısı bir bölgede belir bir anda stabil iken, bir zaman sonra dalgalı hale geldiği görülmüştür. Bu düzensiz akış yapısı silindir boyunca homojen olmayan bir şekilde dağıldığı görülmüştür. İç silindir hızının

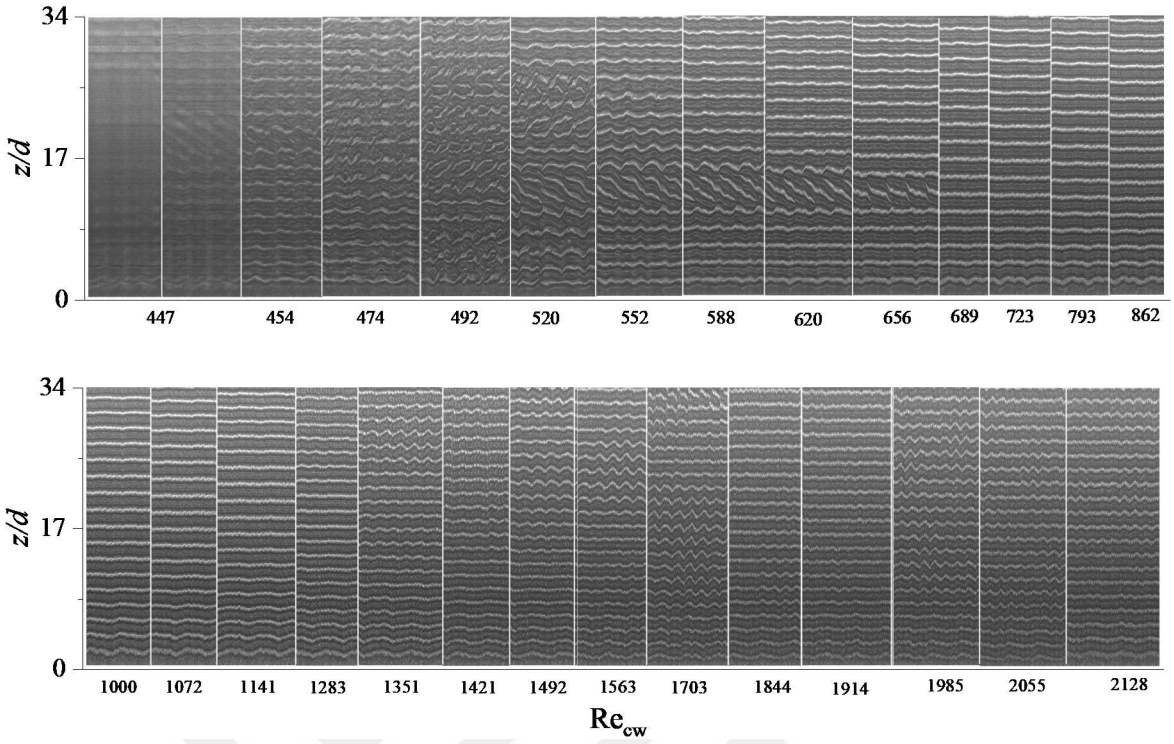
artmasıyla birlikte dalgalı akış yapısının silindir içerisindeki bulunma süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde uzay zaman grafikleri, bir önceki bölümde detaylı olarak bahsedildiği gibi elde edilmiştir, görüntü-işleme gerçekleştirildikten sonra farklı zamanlarda veriler sunulmuştur. Zaman referans olarak uzay zaman grafikleri üzerinde kırmızı bir çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 4. 6 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği (ω_o=33rpm).

Dış silindirin dönme hızı artırılarak sabit bir dönme hızında dönerken, iç silindirin dönme hızı kademeli olarak artırılarak akış yapılarında meydana gelen değişim uzay-zaman grafikleri ile Şekil 4.7'de incelenmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde düzensiz akış yapılarının daha belirgin bir şekilde silindir içerisinde oluştuğu ve iç silindirin dönme hızının artırılmasıyla birlikte kaybolduğu görülmektedir. Re_{cwi}=447 değerinde iken silindirin alt ve üst kısımlarında Ekman vorteks yapılarının oluştuğu ancak belirli bir zaman sonra bu vorteks yapılarının arasında SVF akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda SVF vorteks yapılarının alt kısımlarında bulunan vorteks yapılarında dalgalanmaların oluştuğu görülmektedir. Bu bölümde silindirin üst kısımda yer alan vorteks yapılarının eşlenik vorteks genişlikleri 2,01d ve 2,23d iken silindirin alt kısmında 1,87d ve 2,01d

eşlenik vorteks genişliğine sahip oldukları gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte, düzensiz akış yapılarının oluştuğu ancak Re_{cwi}=447 değerine ulaştığında düzensiz vorteks akışları arasında SVF akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Reynolds değerine artırılarak 552 değerine ulaştığında ise SVF yapısının alt ve üst kısımlarında oluşan akış yapılarının daha düzenli bir akış yapısına dönüştüğü vorteks yapılarında dalgalanmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu kısımda, silindirin üst kısımlarında vorteks yapılarının eşlenik vorteks genişlikleri 1,87d iken, SVF vorteks akış yapısına doğru ilerledikçe eşlenik vorteks genişliklerinin 2,52d arttığı görülmüştür. Bu artışının en önemli sebebinin genişleyip daralan SVF vorteks yapısının hareketinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bölümde ortaya çıkan SVF akış yapısının silindir içerisinde sürekli bulunmadığı görülmüştür. Bu SVF akış genişleyip daralan yatay V şeklinde görülmektedir. Şekil 4.8'de silindir içerisinde oluşan kısmi SVF (pSVF) akış yapısı ile klasik SVF akışı yapısının oluşumu gösterilmiştir. İç silindir hızı artırılarak Re_{cwi}=689 değerine ulaştığında silindir içerisinde oluşan pSVF akış yapısının tamamen ortadan kaybolduğu ve TVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. TVF akış yapısının silindir boyunca vorteks genişlikleri 1,94d ile 2,30d aralığında değiştiği görülmüştür. İç silindir hızının artmasıyla birlikte silindirin alt kısmında oluşan akış yapılarında dalgalanmaların meydana geldiği görülmüştür. Re_{cwi}=1351 değerine ulaştığında silindir üst kısmında dalgalı akışın daha belirgin bir şekilde oluştuğu gözlemlenirken, silindirin alt kısımlarında da akışta dalgalanmalar görülmektedir.



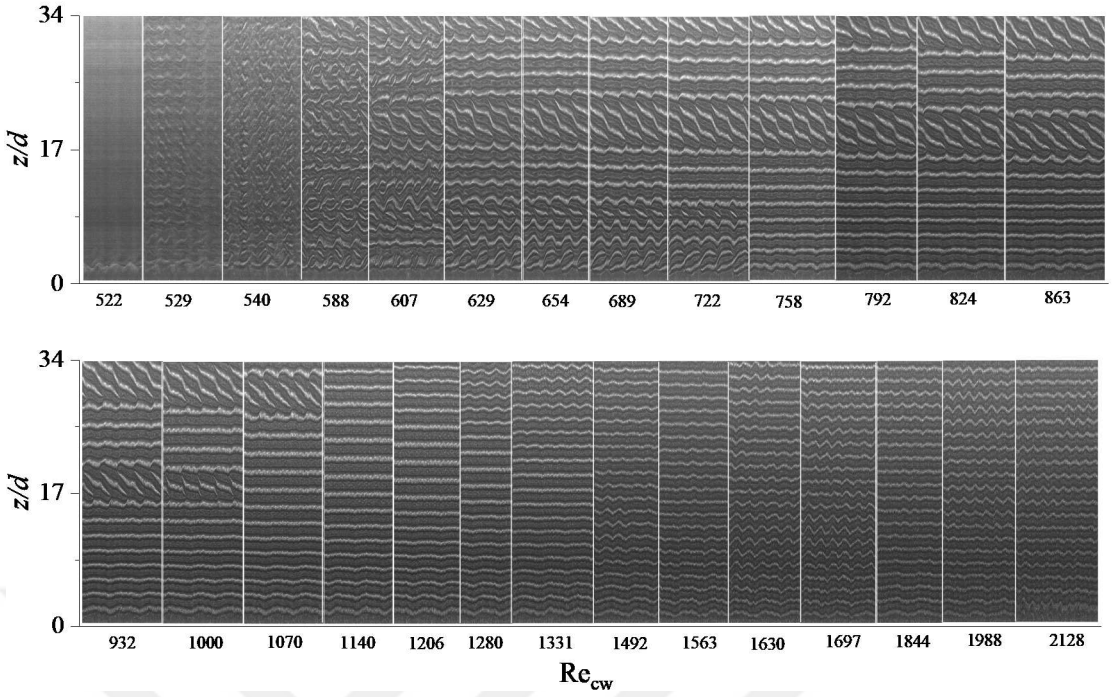
Şekil 4. 7 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği (ω_o=43,5rpm).

Şekil 4. 8 Ortaya çıkan SVF akış yapılarının karşılaştırılması.

Dış silindirin dönme hızının daha da artırılmasıyla birlikte silindirler arasındaki boşlukta oluşan akış yapılarında farklılıkların ortaya çıktığı görülmüştür (Şekil 4.9). Silindir içerisinde oluşan düzensiz akış yapısının iç silindir hızının artmasına karşılık silindir içerisinde daha uzun süre devam ettiği görülmüştür. Bu düzensiz

akış yapısı silindir içerisinde $607<Re_{cwi}<1070$ aralığında neredeyse tüm iç silindir dönüşlerinde aynı konumda kaldığı görülmüştür. $Re_{cwi}=629$ değerinde iken pSVF vorteks yapısının toplam genişliği 5,92*d* iken TVF yapılarının eşlenik vorteks genişliklerinin 2,15*d* ile 2,39*d* aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. $Re_{cwi}=863$ değerine ulaştığında ise pSVF vorteks yapısının toplam genişliği 4,98*d* değerine azalırken, silindirin üst kısımda yer alan eşlenik vorteks yapılarının genişlikleri 2,51*d* ile 2,59*d* aralığında değişirken, silindirin alt kısmındaki akış yapılarının genişlikleri 1,90*d* ile 2,03*d* aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. İç silindir hızı daha da artırılarak $Re_{cwi}=1000$ değerine ulaştığında ise pSVF vorteks yapısının toplam genişliği azalarak 3,65*d* genişliğine ulaşmıştır. Silindirin üst kısımda yer alan eşlenik vorteks yapılarının genişlikleri 2,43*d* ile 2,59*d* aralığında değişirken, silindirin alt kısmındaki akış yapılarının genişlikleri 1,95*d* ile 2,19*d* aralığında değişimi gösterdiği bulunmuştur. $Re_{cwi}=1140$ değerine ulaştığında silindir içerisinde tamamen pSVF akışının ortadan kaybolduğu gözlemlenmiştir. Silindir içerisindeki eşlenik vorteks genişliği ise, silindirin üst kısmından alt kısmına doğru sırasıyla 1,86*d*, 2,39*d*, 2,43*d*, 2,51*d*, 2,10*d*, 2,02*d*, 1,90*d* ve 1,86*d* aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. $Re_{cwi}=1280$ değerinde silindirin üst kısmında akış yapılarında dalgalanmalar görünmeye başlamış ve $Re_{cwi}=1988$ değerine ulaşıldığında ise silindirin tamamında dalgalı akış yapısı gözlemlenmiştir.

Silindirlerin aynı yönde dönmesi durumunda silindirler arasında oluşan toplam vorteks sayısı azalırken vorteks girdaplarının büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum "end-wall" etkisi ile açıklanabilmektedir [119]. Yapılan deneysel çalışmalar görüldüğü gibi dip etkisinin (end-wall effect), dış silindirin dönme hızına bağlı olarak akış yapılarında önemli etkileri olduğu görülmüştür.



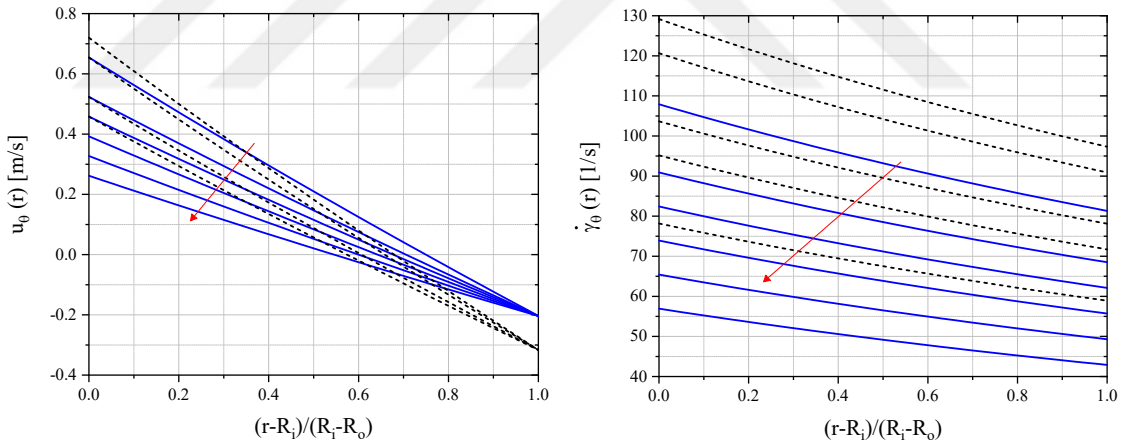
Şekil 4. 9 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği (ω_o=53rpm).

4.1.2 Silindirlerin zıt yöne dönme durumu

Silindirlerin aynı yöne dönmelerinin aksine, silindirler zıt yöne döndürüldüklerinde birçok farklı akış yapısının oluştuğu görülmüştür. Zamandan bağımsız ortaya çıkan Taylor vorteks yapılarının yerine, Couette akışı hem eksenel hem de azimuthal doğrultularda hareket eden spiral vorteks yapılarının oluşumuna yol açmaktadır [6]. Krueger ve ark. (1966) lineer stabilite analizini kullanarak dış silindirin zıt yönde dönmesi durumunda laminer Couette akışının ilk olarak bir eksenel-simetrik olmayan kararsız bir akış yapısına dönüştüğünü göstermişlerdir [129]. Silindirler arasında oluşan spiral vorteks yapısı aynı zamanda "*barber pole*" yapısı [130] olarak ta adlandırılmaktadır. Ortaya çıkan bu akış yapılarının kaynağının belirsizliği yapılan çalışmalarda da ortaya konulmuştur [131]. Her ne kadar literatürde $\eta \geq 0{,}5$ orta veya büyük yarıçap oranlarının akış yapılarının oluşumu üzerine etkileri araştırılmış olsa da, küçük yarıçap oranlarında ortaya çıkan akış yapıları henüz netleştirilmemiştir. Bununla birlikte dış silindir tarafında akış stabilizasyonunu sağlayan silindirlerin birbirlerine göre zıt yöne dönüşü de açık bir konudur. Silindirlerin zıt yönde dönme durumlarında, artan dış silindir hızı akışı dengelerken

ve iç silindir rotasyonu akışı dengesizleştirmektedir. İç silindir ile açısal hızın sıfır olduğu radyal konum arasındaki bölgede akış kararsızdır. Viskozite, dar aralıklı silindirik TC akışı için stabilize ettiği Taylor tarafından gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmalarda ortaya konulmuştur [96].

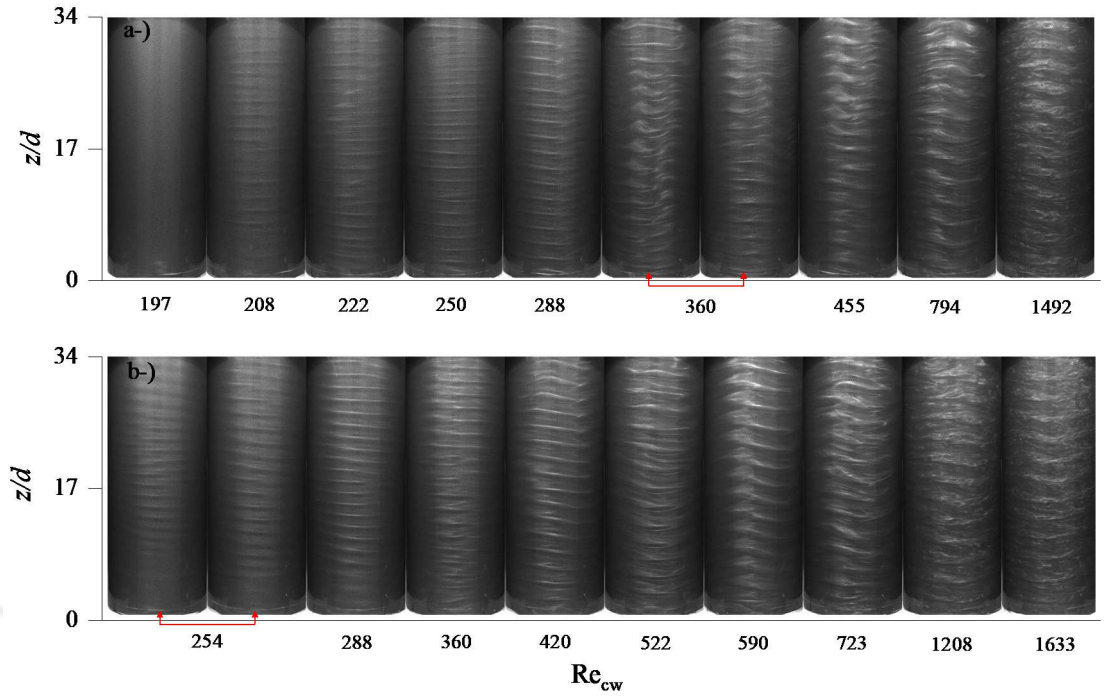
Bu bölümde TC deney düzeneği içerisinde Newtonyen akışkan kullanılarak, silindirlerin zıt yöne dönmeleri durumunda ortaya çıkan akış yapıları incelenmiş ve karakterize edilmiştir. İlk olarak, iç ve dış silindirin birbirlerine göre zıt yöne dönmesi sonucunda silindirler arası boşlukta oluşan, hız ve kayma hızının değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir. İki farklı dış silindir dönme hızı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ok yönü iç silindirin dönme hızının azalan doğrultuda olduğunu belirtmektedir. Silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda silindirler arasında oluşan kayma hızı değişim büyüklüğünün arttığı görülmüştür. Silindirler arasındaki boşlukta silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda azimuthal hız büyüklüğünün değişiminin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.10a). Şekiller üzerinde gösterilen kırmızı okun yönü, iç silindirin dönme hızının azalma yönünü belirtmektedir.



Şekil 4. 10 Silindirler arasındaki boşlukta zıt yöne dönme sonucunda hız ve kayma hızı değişimleri.

Newtonyen akışkanın TC deney düzeneğinde silindirlerin aynı yöne dönmeleri sonucunda ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri bir önceki bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde bu çalışmalara ilave olarak dış silindirin üç farklı sabit dönme hızı seçilerek, silindirlerin birbirlerine göre zıt yönde dönmesi sonucunda ortaya çıkan akış yapıları, kritik geçiş değerleri ve akış yapılarının

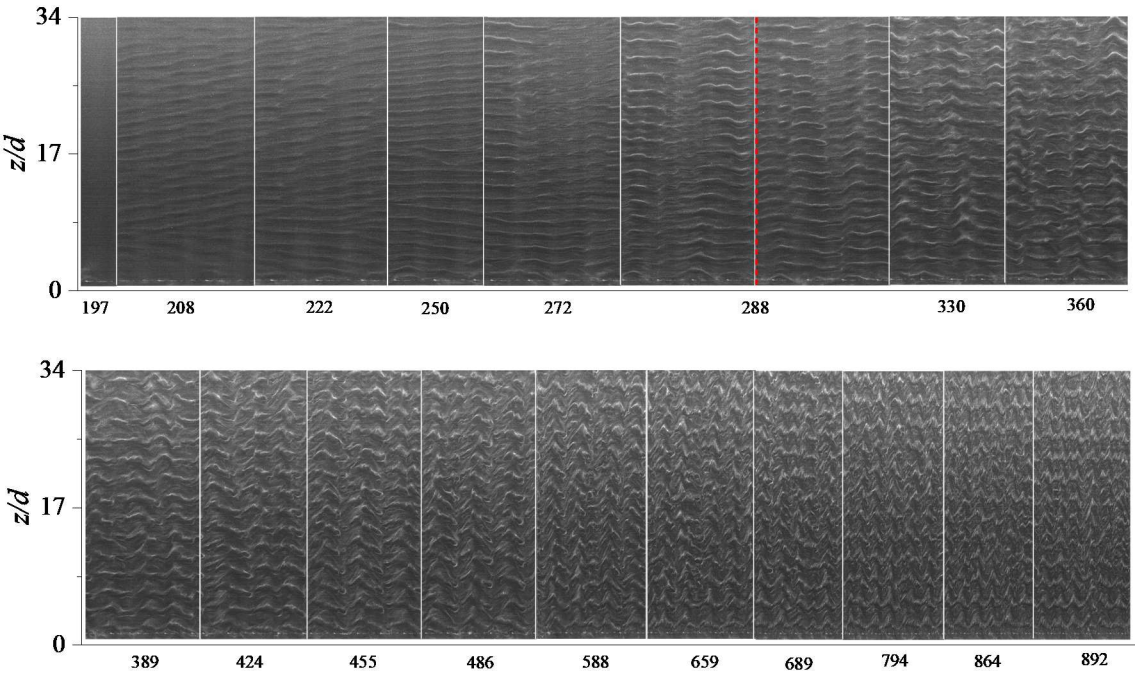
karakterizasyonu yapılacaktır. %75 gliserin çözeltisi için gözlemlenen geçiş rejimlerinin anlık görüntüleri iç ve dış silindirlerin dönme hızına bağlı olarak Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Dış silindir zıt yönde sabit bir dönme hızında dönerken, iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte, silindir içerisinde ilk olarak dairesel Couette akışı (CCF) gözlemlenmiştir. Silindirlerin aynı yöne dönmesi durumunda CCF akışında ilk bozunma TVF akışı oluşurken bu akış yapısı belirgin bir şekilde görünmemektedir. Zıt yöne dönme koşulları incelendiğinde CCF akış yapısından sonra ilk bozunma sonucunda silindir içerisinde SVF, RIB ve IPS akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapıları ve elde edilen kritik rejim geçiş değerlerinin aynı zamanda Andereck ve ark. (1986) tarafından yapılan çalışma ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür [6]. Zıt yöne dönme koşullarında, aynı yöne dönme koşullarında oluşan akış yapılarından farklı akış yapılarının oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.11'de iki farklı dış silindirin zıt yöne dönmesi koşullarında iç silindirin dönme hızının artırılması sonucunda ortaya çıkan akış yapılarının anlık görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.11a dış silindir sabit bir hızda zıt yönde hareket ederken, Şekil 4.11b'de dış silindir hızının artması sonucu oluşan akış yapıları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11a'da ilk akış bozunmasının Re_{cwi}=208 değerinde silindir içerisinde SVF ve IPS akış yapıları birarada gözlemlenirken, Şekil 4.11b'de ise ilk akış bozunması Re_{cwi}=254 değerinde RIB, SVF ve IPS akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte her iki durumda da, akış yapılarının dalgalı vorteks akış yapısına ve türbülanslı dalgalı vorteks akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Şekillerde kırmızı çizgilerle birleştirilen görüntüler, aynı dönme hızlarında farklı zaman dilimlerinde elde edilen görüntüleri göstermektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen anlık görüntülerin, ortaya çıkan akış yapısını tanımlamada tek başlarına yeterli olmayacağı görülmektedir. Farklı zaman dilimlerinde sunulan anlık görüntülerin akış yapısını tanımlamada yanlış sonuçların ortaya çıkmasına neden olabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı deneysel çalışmalardan elde edilen veriler uzay-zaman grafiklerinde ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

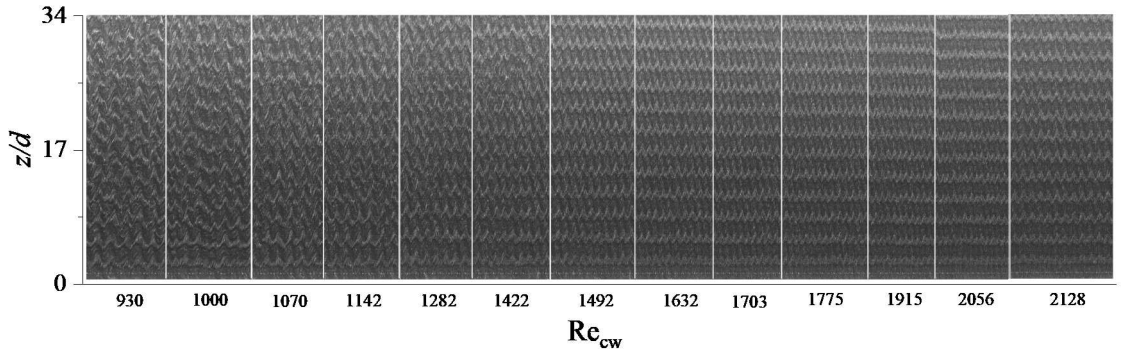


Şekil 4. 11 Farklı Re_{cw} değerlerinde %75 gliserin çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri.

Taylor-Couette deney düzeneğinde (η=0,868) %75 gliserin çözeltisinin silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri elde edilmiş ve görüntü işleme yöntemi kullanılarak akış karakterize edilmiştir. Dış silindirin zıt yöne dönme hızının akış yapıları üzerine etkisini gözlemleyebilmek amacıyla dış silindirin üç farklı dönme hızı durumu incelenmiştir. İlk yapılan deneysel çalışma sonuçları, uzay-zaman grafiği olarak Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Dış silindir sabit bir dönme hızında hareket ederken, iç silindir hızı kademeli olarak artırılarak ortaya çıkan akış yapıları gözlemlenmiştir. Silindir içerisinde ilk olarak CCF akış yapısının ortaya çıktığı ve iç silindir hızının artmasıyla birlikte (Re_{cwi}=208) ilk bozunmaların silindir içerisinde SVF ve IPS akış yapıları belirgin bir şekilde görülmektedir. Re_{cwi}=208 değerinde oluşan akış yapısı detaylı olarak incelendiğinde, süreksizlikler açıkça görülmektedir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte Re_{cwi}=250 değerine ulaştığında oluşan akış yapısı TVF akış yapılarına benzemesine rağmen silindirin alt ve üst kısmında oluşan akış yapılarında düzensiz davranışlar görülmektedir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla Re_{cwi}=288 değerine ulaştığında akış yapılarında belirgin dalgalanmaların meydana geldiği

gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=288 değerinin farklı anlarında elde edilen görüntüler kırmızı kesikli çizgi ile ayrıştırılarak gösterilmiştir. Ortaya çıkan akış yapılarında benzer akış yapılarının oluştuğu görülmektedir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte, dalgalı akış yapısı MWVF akışına ve karmaşık/türbülanslı akış yapısına değişim gösterdiği görülmüştür. Re_{cwi}=288 değerinde toplam 40 adet vorteks yapısı oluşurken, bu akış yapılarının eşlenik vorteks genişlikleri silindirin üst kısmında 2,16d ile 2,37d arasında değişim gösterirken, silindirin alt kısımlarında ise vorteks genişliği azalarak 1,87d değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=330 değerinde iken oluşan toplam vorteks sayısının azaldığını (36 adet) ve bu vorteks yapılarının eşlenik vorteks genişlikleri silindir boyunca 2,23d ile 2,52d arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=455 değerinde ise toplam vorteks sayısı azalarak 34'e düştüğünü ve bu vorteks yapılarının eşlenik vorteks genişlikleri 2,37d ile 2,80d arasında değişmiştir. Re_{cwi}=1492 değerine ulaştığında ise toplam vorteks sayısı daha da azalarak 30 değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu vorteks yapılarının eşlenik vorteks genişliğinin silindir boyunca 2,80d'ye ulaştığı gözlemlenmiştir.

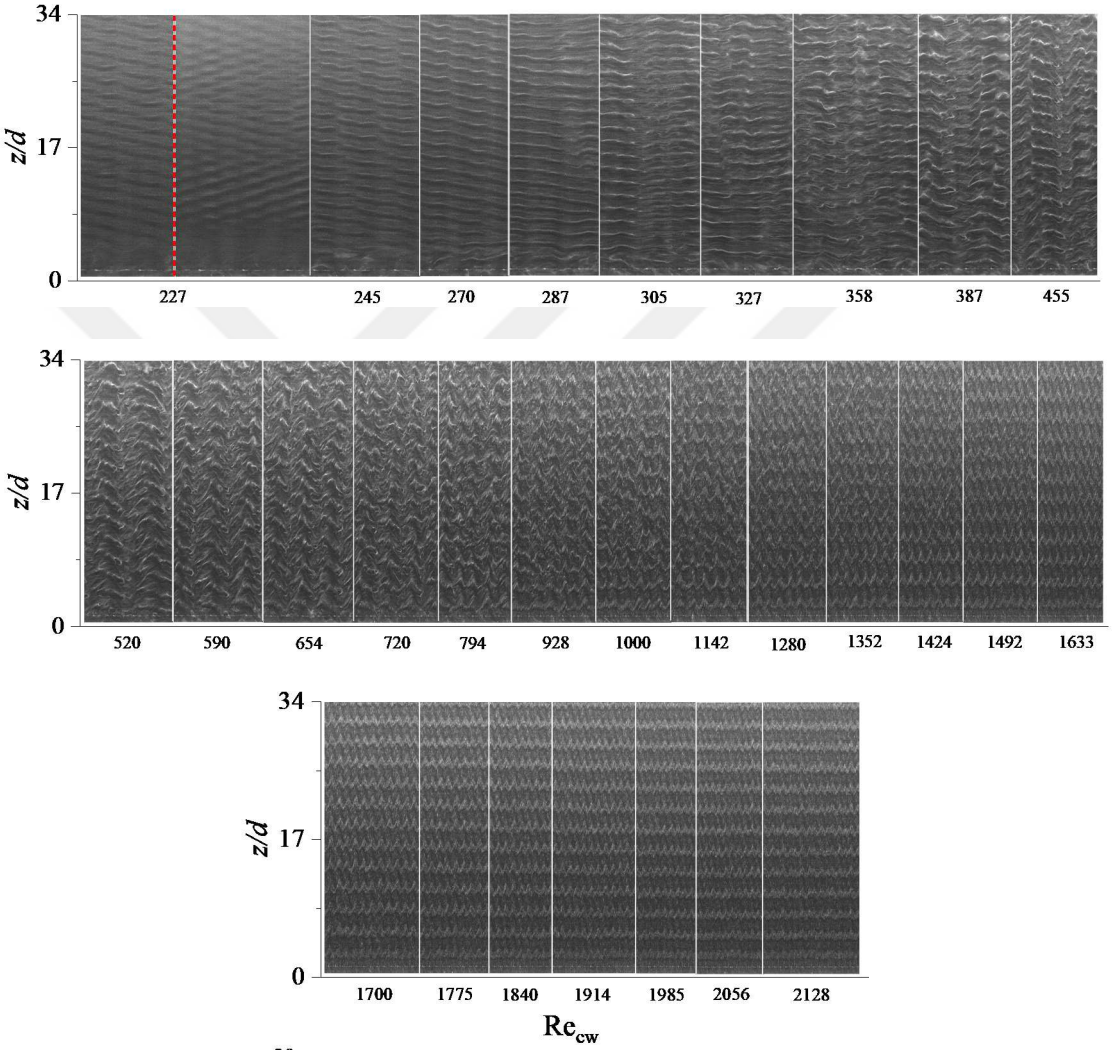




Şekil 4. 12 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği (ω_o=-27rpm).

Dış silindirin zıt yöne dönme hızı artırılarak, aynı şekilde iç silindirin dönme hızı kademeli olarak artırılmış ve ortaya çıkan akış yapıları, kritik değerler ve akış karakterizasyonu incelenmiştir. Silindir içerisinde ilk olarak CCF akış yapısının ortaya çıktığı ve iç silindir hızının artmasıyla birlikte ilk bozunmaların Re_{cwi}=227 değerinde silindirler arasındaki boşlukta SVF ve RIB akış yapılarının bir arada bulunduğu görülmüştür (Şekil 4.13). Aynı zamanda gözlemlenen SVF yapılarının birbirlerine göre zıt yönlerde hareket ettikleri gözlemlenmiştir. Zıt yönde hareket eden SVF yapılarının kesişim noktalarında RIB akış yapısı belirgin bir şekilde oluşmuştur. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte birbirine zıt yönde hareket eden SVF akış yapılarının tamamen ortadan kaybolduğu ve silindir içerisinde sadece SVF yapısının hâkim olduğu görülmektedir. Ancak oluşan bu SVF yapısında süreklilik görülmemekte, dalgalı SVF (wSVF) akış yapısına benzer vorteks yapısına dönüşmektedir. İç silindir hızı artırılarak Re_{cwi}=305 değerine ulaştığında, oluşan vorteks yapılarının azimut yönünde neredeyse birbirlerine göre paralel oldukları gözlemlenirken akış yapısındaki süreksizlik dikkat çekmektedir. İç silindir hızının bir miktar artırılmasıyla birlikte (Re_{cwi}=358) akış yapılarında düzensiz dalgalanmaların oluşmaya başladığı, iç silindir hızının artırılmaya devam edilmesiyle birlikte oluşan düzensiz dalgalı akış yapısının düzenli hale geldiği ve belirli bir dalga boy ve genlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Re_{cwi}=520 değerinde gözlemlenen dalgaların ortalama eksenel dalga boylarının 5,11d ile 5,98d aralığında değişirken dalga genliğinin 2,05d ile 2,51d aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte silindir içerisinde

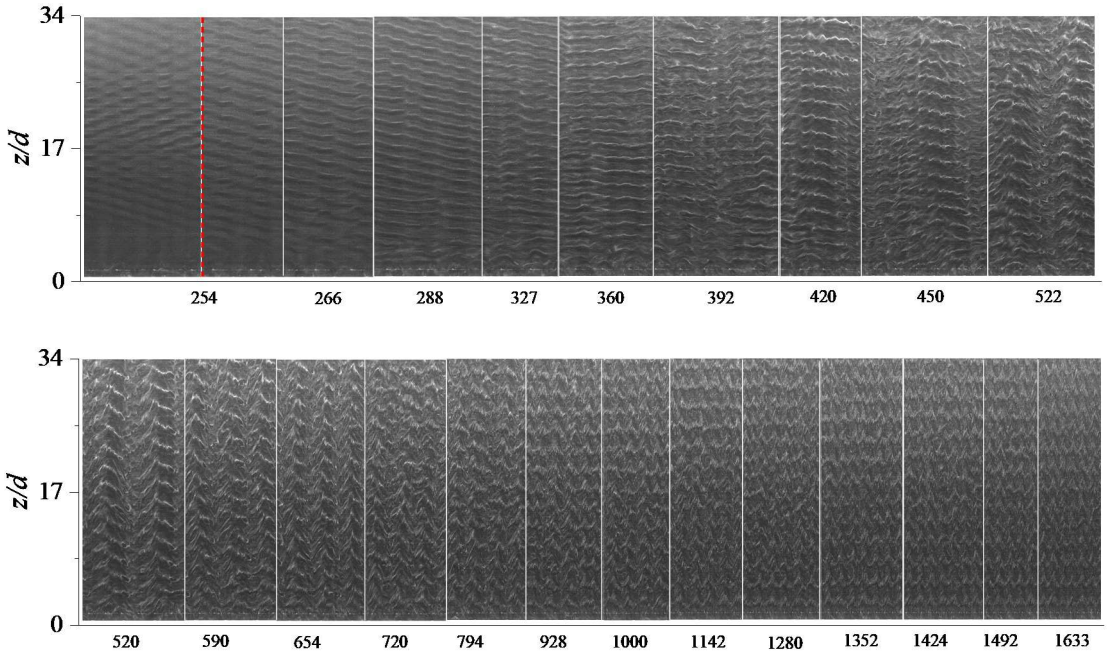
gözlemlenen dalgaların boyunun azalarak ortalama 1,25d olduğu ve bununla birlikte oluşan dalgaların genliğinin ise ortalama 2,17d olduğu gözlemlenmiştir (Re_{cwi}=1633). Re_{cwi}=358 değerinde silindir içerisinde iki adet dalgalı vorteks yapısı gözlemlenirken, Re_{cwi}=1633 değerinde aynı süre içerisinde 10 adet dalgalı vorteks yapısı görülmüştür. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte dalgalı akış yapılarının şekillerinde belirgin bozulmalar meydana gelmiştir.

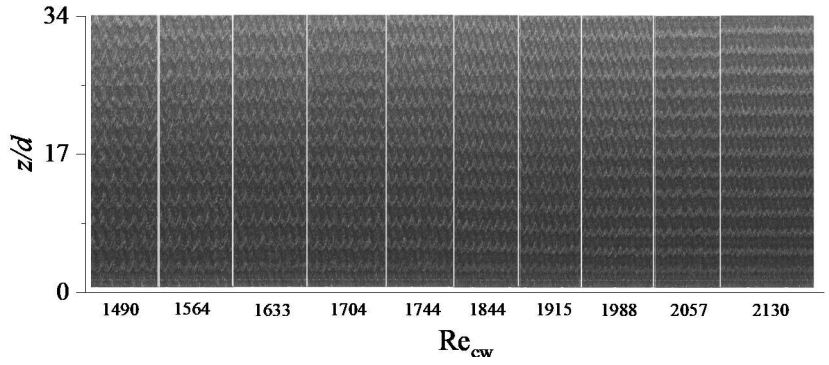


Şekil 4. 13 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği (ω_o=-33rpm).

Dış silindir hızının zıt yönde daha da artırılması ile silindir içerisindeki ilk bozulmanın Re_{cwi}=254 değerinde RIB ve SVF akış yapısı olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 4.14). Aynı dönme hızında belirli bir süre sonra oluşan bu akış yapısının

tamamen SVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmektedir. Oluşan bu SVF akış yapısında kısmi dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte oluşan bu akış yapısının ortadan kaybolduğu görülmektedir. Re_{cwi}=360 değerinde silindir içerisinde oluşan vorteks yapılarının azimut yönünde neredeyse birbirlerine göre paralel oldukları gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte bir önceki bölümde gözlemlenen akış yapısına benzer belirli bir dalga boyu ve dalga genliğine sahip dalgalı akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=520 değerinde ortaya çıkan akış yapısı incelendiğinde, oluşan dalgaların ortalama boyları 6,90*d* iken dalga genliklerinin ortalama 2,35*d* olarak görüntü işleme yöntemi ile hesaplanmıştır. $Re_{cwi=}$1704 değerine artırıldığında oluşan dalgaların ortalama boyları 1,21*d* değerine azalırken, dalga genliklerinin ortalama 1,88*d* olduğu gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=520 değerinde silindir içerisinde iki adet dalgalı vorteks yapısı gözlemlenirken, Re_{cwi}=1704 değerinde aynı süre içerisinde 10 adet dalgalı vorteks yapısı görülmüştür. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte dalgalı akış yapılarının şekillerinde belirgin bozulmalar meydana gelmiştir.



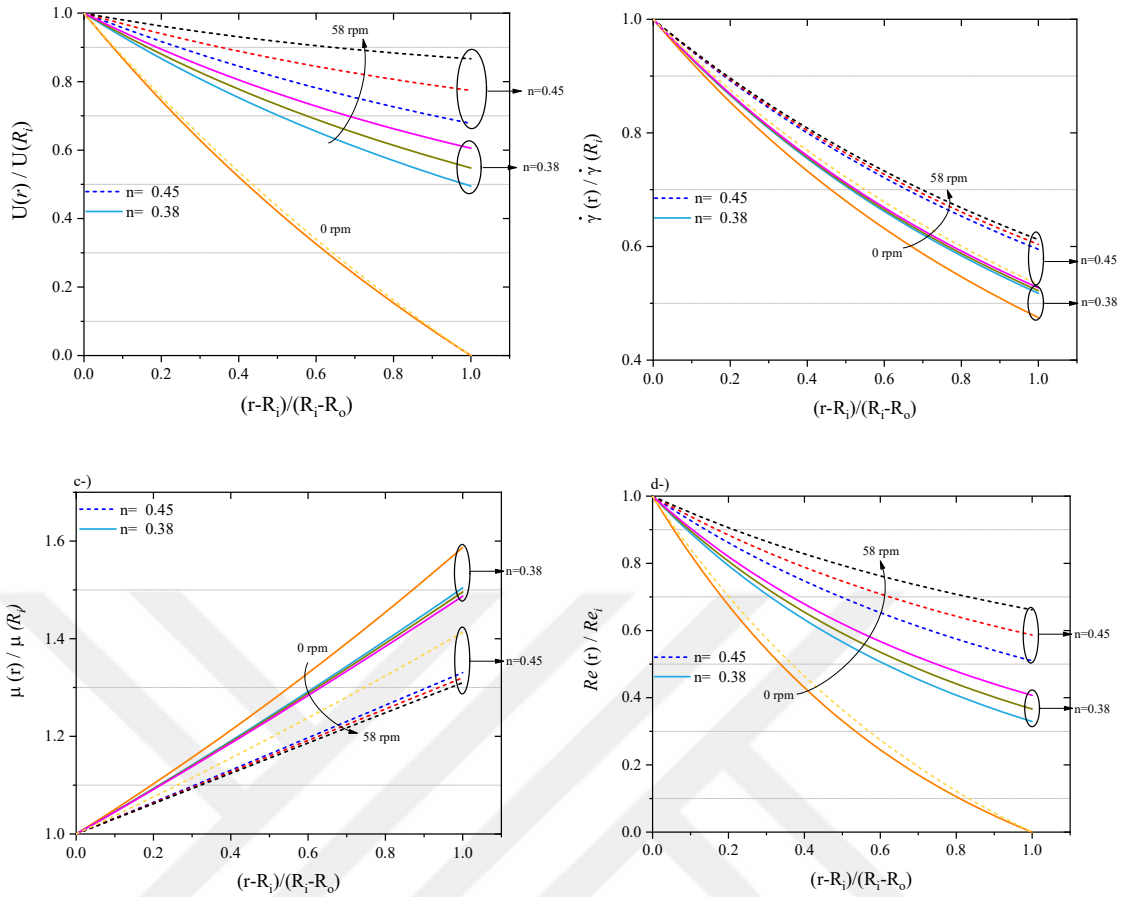


Şekil 4. 14 Farklı Re_{cw} değerlerinde gliserin akışkanına ait uzay-zaman grafiği (ω_o=-42rpm).

4.2 Newtonyen olmayan (shear-thinning) akışkan

4.2.1 Silindirlerin aynı yöne dönme durumunda

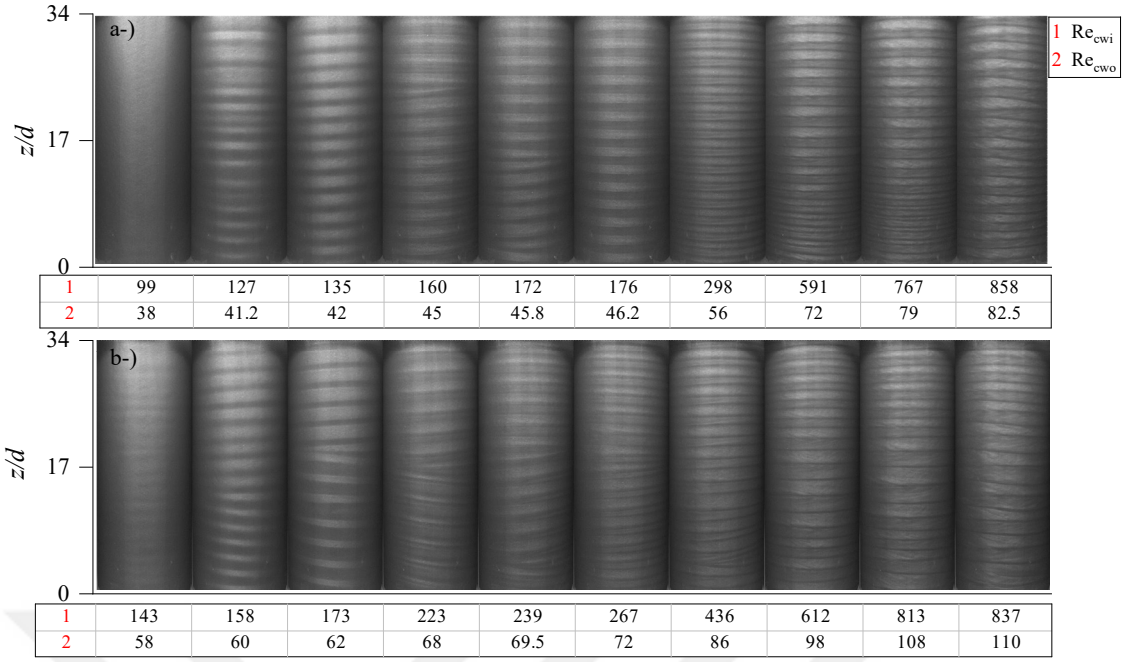
Hem iç hem de dış silindirin aynı yöne dönmesi sonucunda silindirler arası boşlukta oluşan, hız, kayma hızı, viskozite ve $Re_{G,I}$ değişimleri normalize edilerek Şekil 4.15'te sunulmuştur. İki farklı XG çözeltisi için sonuçlar elde edilmiştir ve kesikli çizgi ile n=0,45 çözeltisi, sürekli çizgi ile de n=0,38 çözeltisi gösterilmiştir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi silindirler arasında oluşan akış yapıları üzerinde kayma hızı değişiminin önemli etkisi bulunmaktadır. Şekil 4.15b'de dış silindir durağan halden 58 rpm hızına ulaşana kadar her bir çözelti için farklı kayma hızı profillerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Kayma hızı değişim profilinin dış silindirin dönme hızının artmasıyla birlikte küçüldüğü görülmektedir. Bu bölümde dış silindirin dönme hızı akışkan özelliklerinin değişimi sonucu oluşan akış yapılarında farklılıkların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı bu bölümde, laminer Couette akışının ilk bozulmaya başladığı noktadaki değerler kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 4. 15 Hız, kayma hızı, viskozite ve Reynolds profilleri, normalize edilmiş grafikler.

Shear-thinning akışkanlarının TC deney düzeneğinde kullanımı sonucunda, sadece iç silindir hareketli dış silindir sabit iken Newtonyen akışkanından farklı akış rejimleri ve kritik geçiş değerleri elde edilmiştir. Bu bölümde bu yapılan çalışmalara ilave olarak dış silindirin üç farklı sabit dönme hızı seçilerek, iç silindirin kademeli olarak artırılması sonucunda akış yapılarında ve kritik geçiş değerlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bir önceki bölümde olduğu gibi bu bölümde de akışkanların rejim geçişlerini tanımlamada kullanılan Re_{cw} değerleri kullanılmıştır. %0,2 xanthan çözeltisi için gözlemlenen geçiş rejimlerinin anlık görüntüleri iç ve dış silindirlerin dönme hızına bağlı olarak Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Dış silindir sabit bir dönme hızında dönerken, iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte, silindir içerisinde ilk olarak dairesel Couette akışı (CCF) gözlemlenmiştir. Dış silindirin dönme hızına bağlı olarak CCF akış yapısından, ilk düzenli akış yapısında farklılıklar

gözlemlenmiştir. Şekil 4.16'da iki farklı dış silindir dönmesi koşulunda iç silindirin dönme hızının artması sonucunda ortaya çıkan akış yapılarının anlık görüntüleri gözlemlenmektedir. Şekil 4.16a'da Re_{cwo}=42 ve Re_{cwi}=135 değerlerinde silindir içerisinde akışın tamamen SVF akış yapısı gözlemlenirken, Şekil 4.16b'de Re_{cwo}=60 ve Re_{cwi}=158 değerlerinde ise birbirine zıt yönde hareket eden SVF yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bir önceki bölümden görüldüğü gibi, akışkanın shear-thinning indeks değerinin (n) oluşan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri üzerinde önemli etkisinin olduğu ve aynı zamanda her iki silindirin hareketli olması durumunun akış yapıları üzerinde önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Şekil 4.16a incelendiğinde Re_{cwo}=45 ve Re_{cwi}=160 değerlerinde oluşan SVF akış yapısının, iç silindir hızının artmasıyla birlikte Re_{cwo}=45,8 ve Re_{cwi}=172 değerlerinde görüldüğü gibi silindirin alt kısımlarına doğru ilerlemiştir. Re_{cwo}=46,2 ve Re_{cwi}=176 değerlerine ulaşıldığında ise silindir içerisinde SVF yapısının tamamen ortadan kaybolduğu ve TVF akışının oluştuğu görülmüştür. $176<Re_{cwi}<814$ aralığında bu akış yapısının silindir içerisinde hakim olduğu gözlemlenmiştir. Ancak $Re_{cwi}>176$, iç silindir hızının artmasıyla birlikte vorteks büyüklüklerinin değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Re_{cwo}=82,5 ve Re_{cwi}=858 değerlerine ulaşıldığında ise TVF akış yapısı tamamen bozunarak, WVF akışına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Dış silindir hızının artırılmasıyla ortaya çıkan akış yapılarının anlık görünümleri Şekil 4.16b'de incelendiğinde, Re_{cwo}=98 ve Re_{cwi}=612 değerlerine ulaşıldığında SVF akışının tamamen ortadan kaybolduğu ve TVF akışına benzer bir akışın oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu akış yapısı incelendiğinde silindirin merkezinde oluşan vorteks yapılarının genişlikleri, silindirin üst/alt kısmında oluşan vorteks yapılarının genişliklerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, silindirin alt kısımlarında oluşan akış yapılarında dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu akış yapısı $612<Re_{cwi}<813$ aralığında oluştuğu ortaya çıkmıştır. Re_{cwo}=110 ve Re_{cwi}=837 değerine ulaştığında ise akışın tamamen WVF akışına dönüştüğü görülmektedir. Elde edilen bu gözlemler, uzay-zaman grafiklerinde ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

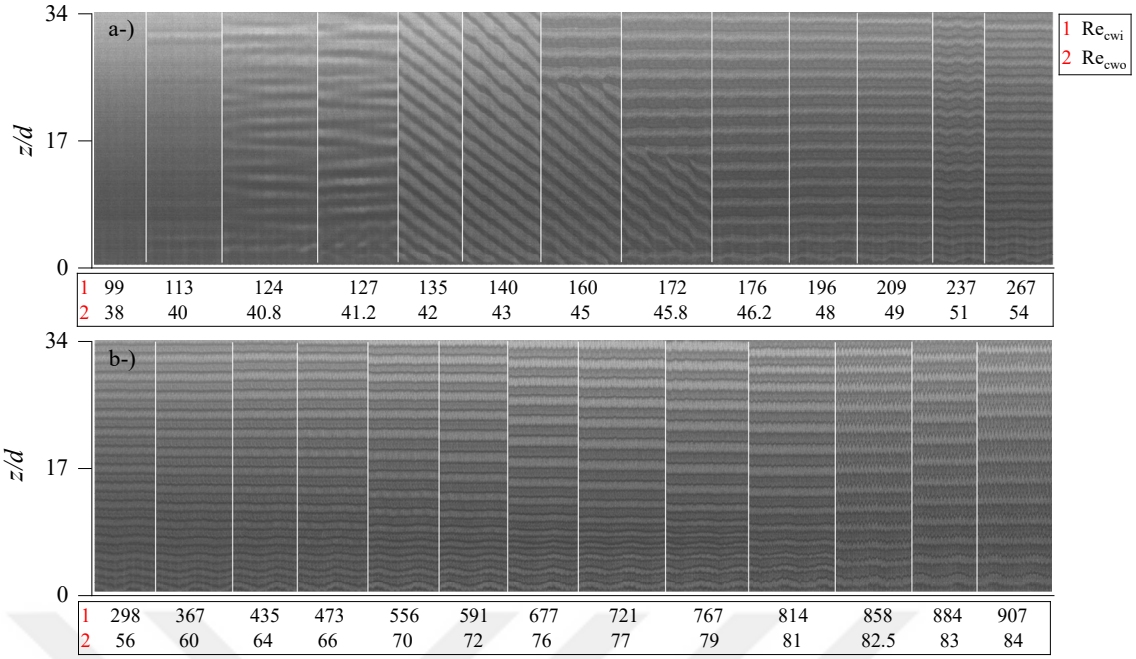


Şekil 4. 16 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri.

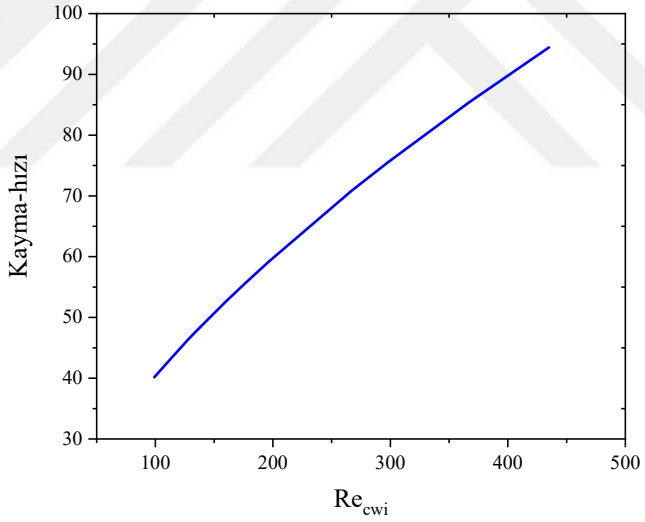
Taylor-Couette deney düzeneğinde (η=0,868) %0,2 xanthan çözeltisi çalışma sıvısı olarak kullanıldığında, silindirlerin aynı yöne hareketleri sonucunda belirgin bir TVF akış yapısının oluşmadığı görülmüştür. Dış silindirin sabit kaldığı durumda ortaya çıkan akış yapıları SVF ve RIB yapıları, dış silindirin sabit hızda ve iç silindir ile aynı yöne döndüğü koşullarda da oluştuğu gözlemlenmiştir. Akış yapılarının oluşumu ve literatür karşılaştırmaları bir önceki bölümde tartışılmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde shear-thinning akışkan kullanılarak dış silindirin hareketli olduğu deneysel çalışmalara rastlanılmamıştır. Dış silindirin iç silindir ile birlikte dönmesi ile silindirler arası boşlukta SVF, RIB, iç içe geçen spiraller (IPS), dalgalı iç içe geçen spiraller ve twisted vorteks yapıları gibi birçok farklı akış rejimlerinin ortaya çıkmaktadır [6]. Bu akış rejimlerinin birçoğu Newtonyen akışkan için deneysel olarak incelenmiştir [5], [132], [133]. Aynı zamanda silindirlerin aynı yöne dönüşü nümerik olarak ta incelenmiştir [119], [134]. Şekil 4.17 dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda ortaya çıkan akış yapılarının uzay-zaman grafikleri gösterilmiştir. Dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindir durağan halden kademeli olarak artırılmaya başlandığında ilk olarak CCF akış yapısının oluştuğu

gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artırılarak Re_{cwo}=40 ve Re_{cwi}=113 değerine ulaştığında akış yapısında ilk bozunmaların başladığı gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapıları ilk olarak silindirin alt ve üst kısımlarında belirginleşmeye başlamıştır. Silindirin diğer kısımlarındaki ikincil akışlar belirgin değildir. Şekil 4.17 incelendiğinde dış silindir sabit hızda dönmesine rağmen, dış yüzeye ait Re_{cwo} değerinin sürekli değiştiği görülmektedir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte dış silindir yüzeyindeki kayma-hızı değeri artmaktadır (Şekil 4.18) ve bu durum Re_{cwo} ifadesinin artmasına neden olmaktadır. Re_{cwo}=40,8 ve Re_{cwi}=124 değerlerinde, silindirler arasındaki boşlukta düzensiz bir akış yapısı gözlemlenmiştir. Bu akış yapıları içerisinde, TVF, SVF ve RIB akış yapılarının oluştuğu görülmektedir. Silindir hızı artırılarak, Re_{cwo}=42 ve Re_{cwi}=135 değerine ulaştığında akışın tamamen SVF akış yapısına dönüştüğü görülmektedir. SVF vorteks genişliğinin silindir boyunca 1,92d ile 1,35d arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda spirallerin -34° açıya sahip olduğu bulunmuştur. İç silindir hızının artmasıyla birlikte, silindirin üst kısmında SVF vorteks genişliklerinin arttığı ve akış yapılarının bozulmaya başladığı görülmüştür. Re_{cwo}=43 ve Re_{cwi}=140 değerinde, silindir üst kısmında SVF vorteks genişliği 2,35d değerine ulaşırken silindirin alt kısımlarında ise bu değer 1,5d civarına düşmektedir. Aynı zamanda SVF vorteks yapılarının uzay zaman grafiğinde görüldüğü gibi üst kısımlardaki açı değeri -38° iken alt kısımlarda -31,5° değerine sahip olduğu bulunmuştur. Silindirin üst kısımlarında vorteks yapıları büyüyerek yavaş yavaş akışı bozucu etki göstermektedir. Silindir hızının artmasıyla birlikte silindirin üst kısımlarındaki yapı bozularak TVF vorteks yapılarına dönüşmektedir. Re_{cwo}=45 ve Re_{cwi}=160 değerinde, Şekil 4.17'den görüldüğü gibi TVF ile SVF yapılarının bir arada olduğu görülmektedir. Silindirin üst kısımlarında oluşan TVF yapı genişliği 2,76d olarak hesaplanmıştır. TVF yapısı altında oluşan SVF vorteks yapılarının genişliklerinin 1,7d ile 1,51d arasında değişim gösterdiği bulunmuştur. İç silindir hızının artmasıyla birlikte silindirin alt kısmında da TVF akış yapısının oluştuğu gözlenmiştir. Silindirin üst kısmında toplam 10 adet TVF yapısı gözlemlenmiştir. Üst kısımda oluşan TVF vorteks yapıları silindirin merkezine doğru ilerleyerek TVF vorteks sayısı artarak 18 olurken, toplam SVF genişliği azalmıştır. Üst kısımlarda oluşan vorteks yapılarının genişliği ise 1,36d–1,50d, SVF genişliklerinin ise ortalama 1,65d olarak hesaplanmıştır. Re_{cwo}=46,2 ve Re_{cwi}=176

değerine ulaştığında ise, SVF akış yapısı tamamen ortadan kalkarak TVF akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Burada oluşan TVF vorteks yapılarının arasında bir azimut değişiminin varlığı görülmektedir. Bu akış yapısı twisted vorteks akışı olarak adlandırılmaktadır. Oluşan vorteks genişlikleri değişmezken 1,36d–1,50d aralığında sabit kalmıştır. Ancak toplam vorteks sayısı artarak 32'ye ulaşmıştır. İç silindir hızı artırıldığında vorteksler arasında oluşan azimut dalgalarının belirginleştiği görülmüştür. Re_{cwo}=49 ve Re_{cwi}=209 değerlerindeki akış yapısı incelendiğinde, toplam vorteks sayısının ve genişliğinin değişmediği gözlemlenmiştir. Silindirin alt kısımlarında akışı bozucu bir etkiye sahip dalgalı bir akış yapısının oluştuğu ve bu bölümde dalga genişliğinin 1,07d'ye düştüğü görülmüştür. Şekil 4.17 incelendiğinde silindirin alt kısımlarında oluşan dalgalı akış yapısının genişliğinin azalarak 0,57d'ye kadar düştüğü, silindirin üst kısımlarında ise vorteks genişliğinin artarak 1,64d'ye ulaştığı görülmüştür. Re_{cwo}=82,5 ve Re_{cwi}=858 değerine ulaştığında akışın tamamen dalgalı akış yapısına dönüştüğü görülmektedir. Aynı zamanda dalgalı vorteks yapıları arasında azimut dalgalarının oluştuğu görülmüştür. Bu kısımda vorteks çiftleri arasında oluşan sınır çizgisin azimut dalgalarının oluşumundan dolayı ortadan kaybolduğu görülmüştür. Bu yüzden bu kısımda eşlenik vorteks genişliği hesaplanmıştır. Eşlenik vorteks genişliğinin 2,29d–2,93d arasında değiştiği hesaplanmıştır. Re_{cwo}=83 ve Re_{cwi}=884 değerinde ise eşlenik vorteks genişliğinin artarak 2,72d – 3,00d arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu bölümde gözlemlenen akış yapıları, CCF, SVF, RIB, TVF, twisted vorteks ve MWVF şeklindedir. Uzay zaman grafikleri, bu bölümde 250 fps ile elde edilmiştir, görüntü-işleme gerçekleştirildikten sonra farklı zamanlarda veriler sunulmuştur. Zamanı referans olarak uzay zaman grafikleri üzerinde kırmızı bir çizgi ile gösterilmiştir.



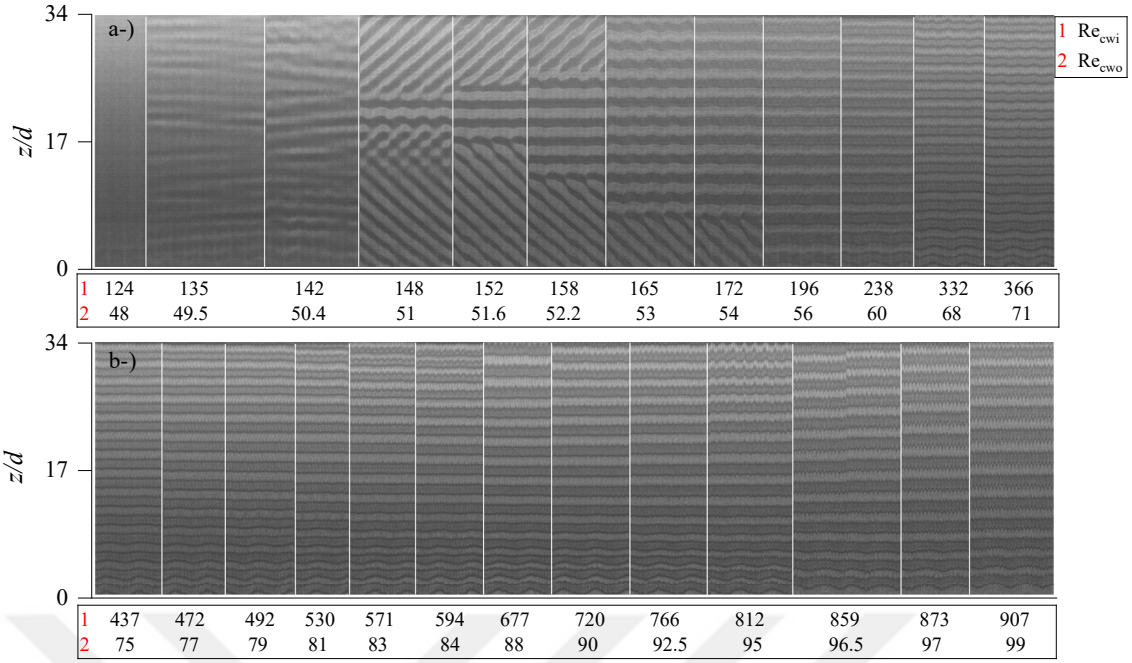
Şekil 4. 17 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.



Şekil 4. 18 Farklı Re_{cwi} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi kayma hızının değişimi.

Dış silindirin dönme hızı artırılarak sabit bir dönme hızında dönerken, iç silindirin dönme hızı kademeli olarak artırılmış ve akış yapılarında meydana gelen değişim uzay-zaman grafikleri ile Şekil 4.19'da verilmiştir. Re_{cwo}=49,5 – 50,4 ve Re_{cwi}=135 – 142 aralığında belirgin olmayan kararsız bir akış yapısı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla Re_{cwo}=51 ve Re_{cwi}=148 ulaştığında belirgin ilk akış yapısı

gözlemlenmiştir. Bu kısımda ortaya SVF, RIB ve dalgalı akış yapıları bir arada gözlemlenmiştir. Üst kısımdaki spirallerin açısı 37° iken alt kısımdaki spirallerin açısı -37° şeklindedir. Aynı zamanda eşlenik vorteks genişlikleri üst kısımda 2,47*d* ve 2,68*d* aralığında değişim gösterirken, alt kısımda ise 2,33*d* ve 2,60*d* aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte, Recwo=51,6 ve Re_{cwi}=152 değerinde, RIB yapısı ortadan kaybolarak, SVF ve TVF yapıları bir arada görülmektedir. SVF ve TVF vorteks yapılarının birleştiği noktalarda RIB akışına benzer bir akış yapısı görülmektedir. RIB vorteks akış yapısı önceki bölümlerde de açıklandığı gibi SVF akış yapısı ile TVF akış yapısının kesişimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu kısımda yer alan TVF akış yapılarının eşlenik vorteks genişlikleri 2,54*d* iken SVF akış yapıları silindirin üst kısmında 2,48*d* ve 2,57*d*, silindirin alt kısmında ise 2,32*d* ve 2,59*d* eşlenik vorteks genişliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda SVF vorteks yapılarının birbirine zıt yönde 38° açıya sahip olduğu bulunmuştur. Re_{cwo}=53 ve Re_{cwi}=165 değerine ulaştığında, üst kısımdaki SVF yapısı tamamen ortadan kaybolarak dalgalı akış yapısına dönüşmüştür. Rec_{wi}=152 değerinde SVF vorteks yapıları arasında TVF toplam genişliği 7,95*d* iken, Recwi=158'e ulaştığında 130,5*d*'e ulaşmıştır. Alt kısımdaki SVF yapısı ise silindirin tabanına doğru ilerlemiş ve Re_{cwo}=56 ve Re_{cwi}=196 değerine ulaştığında ise tamamen ortadan kaybolmuştur. Bu kısımda bir önceki bölümde olduğu gibi akış tamamen TVF akışına dönüşmüştür. Ancak bu kısımda da vorteks çiftleri arasında twisted akış çizgileri görülmektedir. TVF akış yapısının silindir boyunca vorteks genişlikleri 2,50*d* ile 2,77*d* şeklinde değiştiği görülmüştür. İç silindirin dönme hızının artmasıyla birlikte silindir içerisindeki vorteks yapılarının genişlikleri arasındaki farkın arttığı görülmüştür. Re_{cwo}=95 ve Re_{cwi}=812 değerlerine ulaştığında silindirin üst kısmında dalgalı akış yapısı görülsede, Re_{cwo}=97,1 ve Re_{cwi}=873 değerinde tamamen dalgalı akış yapısına ulaşılmıştır.

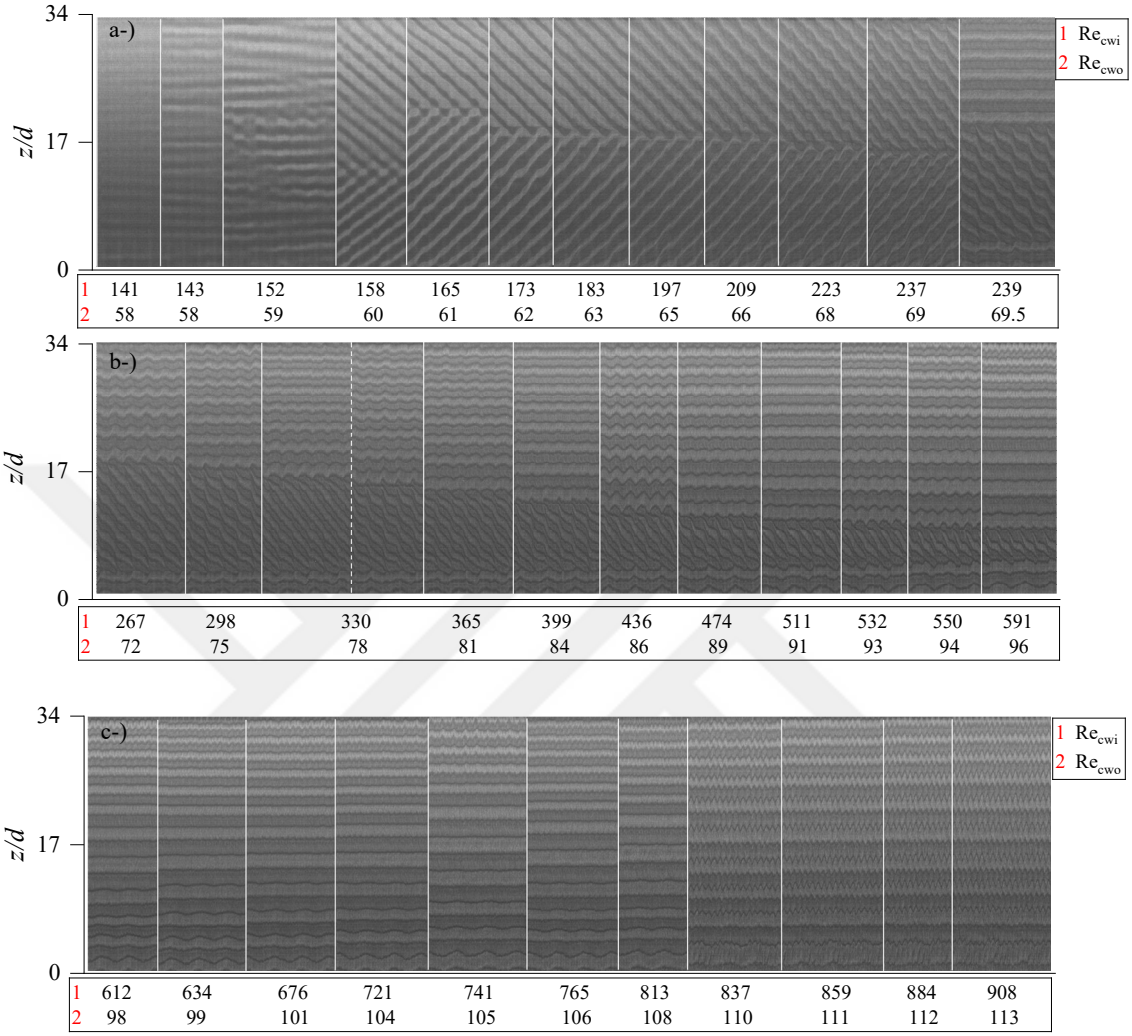


Şekil 4. 19 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

Dış silindirin dönme hızının artırılmasıyla birlikte silindirler arasındaki boşlukta oluşan akış yapılarında farklılıkların ortaya çıktığı görülmüştür (Şekil 4.20). Dış silindir hızı artırılarak sabit bir hızda dönerken, iç silindir hızı kademeli olarak artırılmaya başlanmış ve silindirler arasındaki boşlukta ilk olarak Re_{cwo}=58 ve Re_{cwi}=141 değerinde iken belirgin olmayan bir akış yapısı gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artırılarak Re_{cwo}=60 ve Re_{cwi}=158 değerine ulaştığında birbirine zıt yönde hareket eden SVF yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu SVF vorteks yapılarının kesiştiği noktalarda RIB akış yapısının ortaya çıktığı görülmektedir. Üst kısımdaki spirallerin açısı 38° iken bu akışa zıt yönde hareket eden spirallerin açısı 35° şeklindedir. Aynı zamanda sırasıyla eşlenik vorteks genişliklerinin 2,30d ile 2,50d ve 2,04d ile 2,20d aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte SVF yapıları arasında oluşan RIB vorteks yapısının azaldığı ve SVF yapısının silindirin üst kısmına doğru hareket ettiği görülmüştür. Re_{cwo}=61 ve Re_{cwi}=165 değerlerinde silindirin üst kısmında bulunan SVF akış yapısının silindirin üst tarafına doğru ilerlediği görülmüştür. Bu bölümde silindirin üst kısımda yer alan eşlenik vorteks yapılarının genişlikleri 1,96d ile 2,36d aralığında değişirken, silindirin alt kısmındaki SVF akış yapılarının genişlikleri 2,44d ile 2,57d aralığında

değişim göstermektedir. Silindirin üst kısımlarındaki SVF vorteks yapıları silindirin merkezine doğru 35° açıdan 42° açı değerine değiştiği gözlemlenirken, silindirin merkezinden alt kısımlara doğru aynı açıyla fakat zıt yönde hareket etmektedir. Re_{cwi}=183 ulaştığında üst kısımdaki spirallerin vorteks genişliğinin artarak 2,66*d* ile 2,77*d* ulaştığı görülmüştür. Şekil 4.20a incelendiğinde iç silindir hızı artırılarak Re_{cwo}=66 ve Re_{cwi}=209 değerine ulaştığında üst kısımlardaki SVF yapısının dalgalı SVF (wSVF) yapısına dönüştüğü ve silindirin alt kısımlardaki SVF eşlenik vorteks genişliğinin 2,89*d* değerine artış gösterdiği görülmüştür. Re_{cwo}=69,5 ve Re_{cwi}=239 ise, silindirin üst kısmında TVF akış yapısın, silindirin alt kısmında ise dalgalı akış yapılarının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu TVF ve dalgalı akış yapıları arasında wSVF akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Silindirin üst kısmındaki TVF akış yapısının eşlenik vorteks genişliği 2,44*d* ile 2,57*d* iken, wSVF akış yapısının eşlenik vorteks genişliği 1,35*d* ile 2,57*d* arasında değişim göstermektedir. Re_{cwo}=72 ve Re_{cwi}=267 değerine ulaştığında silindirin üst kısmındaki TVF akış yapısının tamamen dalgalı akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. İç silindir hızının artmasıyla birlikte üst kısımda oluşan dalgalı akış yapısının silindirin alt kısmına doğru ilerlediği görülmüştür. Akış yapıları arasında oluşan wSVF akış yapısının toplam genişliği Re_{cwi}=239'da 16,41*d* iken Re_{cwi}=591 değerinde toplam genişlik 4,46*d* değerine düştüğü görülmüştür. Re_{cwo}=98 ve Re_{cwi}=612 değerine ulaştığında wSVF yapısının tamamen ortadan kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bu bölümde dalga genişliklerinde ve dalga yapılarında farklılıkların olduğu görülmektedir. Re_{cwo}=98 – 108 ve Re_{cwi}=612 – 813 aralığında silindirin merkezi civarında oluşan vorteks yapılarının diğer bölgelerdeki vorteks yapılarından daha geniş bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Re_{cwo}=98 ve Re_{cwi}=612 değerinde silindirin merkezindeki vorteks genişliği 2,33*d* iken silindirin alt ve üst kısımlarındaki vorteks genişlikleri sırasıyla 1,76*d* ile 0,76*d* aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artarak Re_{cwo}=110 ve Re_{cwi}=837 değerine ulaştığında akışın tamamen WVF akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. Bu bölümde ise silindirin alt kısmındaki vorteks genişliğinin büyüyerek arttığı görülmüştür. Silindirin alt kısmındaki vorteks genişliği 3,05*d* iken silindirin üst kısımlarındaki vorteks genişliğinin 1,36*d* ile 1,75*d* aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Diğer bölümlerde silindirin alt kısımlardaki vorteks genişliğinin iç silindir hızının artmasıyla azaldığı gözlemlenirken, bu

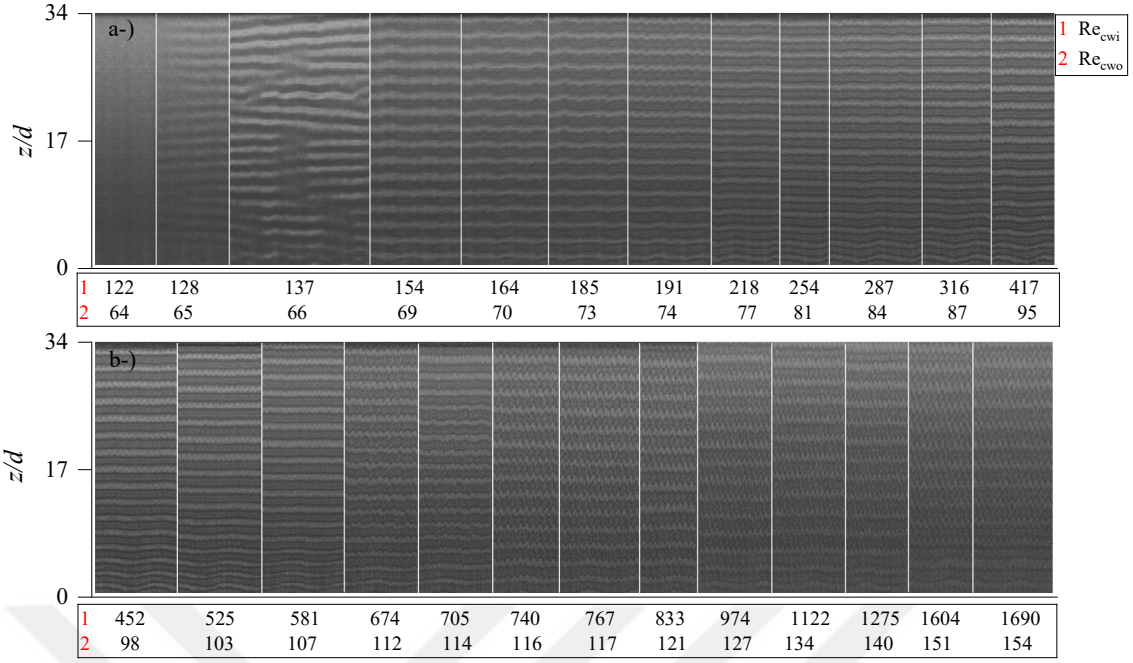
bölümde alt kısımlardaki vorteks genişliğinin iç silindir hızının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 20 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

TC deney düzeneğinde %0,1 xanthan çözeltisi kullanılarak farklı Re_{cwo} değerlerinde iç silindirin dönme hızına bağlı olarak elde edilen uzay-zaman grafikleri Şekil 4.21, 22 ve 23'te gösterilmektedir. Dış silindir hızı sabit bir dönme hızında yönde hareket ederken, iç silidir hızı kademeli olarak artırılmış ve akış yapıları ve kritik geçiş değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmalarda üç farklı dış silindir dönme hızı seçilmiştir. İlk olarak Şekil 4.21 incelendiğinde, Re_{cwo}=65 ve Re_{cwi}=128 değerlerinde silindirler arasında belirgin olmayan akış yapıları gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artırılarak, Re_{cwo}=66 ve Re_{cwi}=137 değerlerine ulaştığında ise karmaşık düzensiz bir akış yapısının ortaya çıkmıştır. Şekil 4.21'de açıkça görülmektedir ki

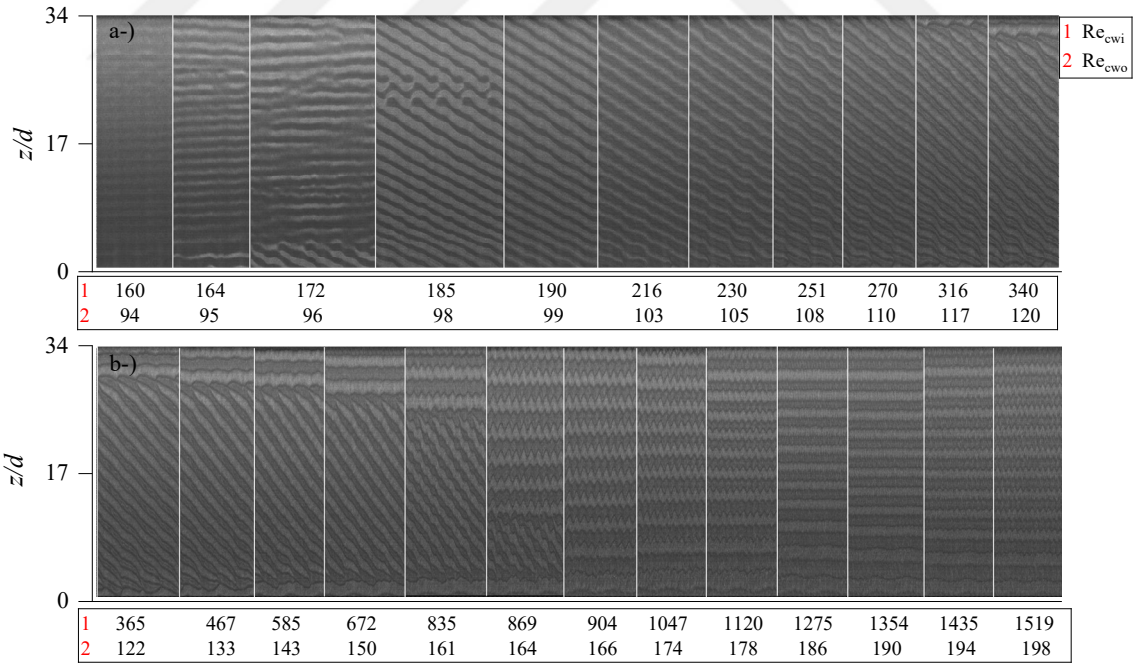
%0,2 xanthan çözeltisi sonucu belirgin bir şekilde ortaya çıkan SVF ve RIB akış yapılarının %0,1 xanthan çözeltisi kullanımında bu dönme hızında oluşmadığı gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=69 ve Re_{cwi}=154 değerlerine ulaştığında silindirler arasındaki boşlukta belirgin ilk akış yapısının TVF olarak oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan eşlenik vorteks yapılarının genişliği 2,14*d* ve 2,28*d* aralığında değişirken, silindir içerisinde toplam 40 adet vorteks oluşumu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte eşlenik vorteks yapıları arasında yeni bir akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Vorteks yapıları arasında oluşan bu akış yapısı vorteks yapılarında dalgalanmalara neden olmaktadır. Re_{cwo}=77 ve Re_{cwi}=218 değerlerinde silindirler arasındaki bu akışın çizgisel bir hale gelerek kaybolduğu görülmektedir. Silindirler arasında oluşan toplam vorteks sayısı değişmezken, eşlenik vorteks yapılarının genişliğinin 2,21*d* ile 1,99*d* aralığında değiştiği görülmüştür. %0,2 xanthan çözeltisi kullanımı sonucunda iç silindir hızının artmasıyla silindirin alt kısmındaki vorteks genişliği azalmasının, %0,1 xanthan çözeltisi kullanımı sonucunda da ortaya çıktığı görülmektedir. Re_{cwo}=77 ve Re_{cwi}=218 değerlerinde silindirin alt kısmındaki eşlenik vorteks genişliği 2,00*d* iken silindirin üst kısımlarındaki vorteks genişliğinin 2,21*d* aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=112 ve Re_{cwi}=674 değerlerine ulaştığında akışta bozulmalar gözlemlenmiş ve dalgalı akış yapısına benzer bir akış gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artarak, Re_{cwo}=116 ve Re_{cwi}=740 değerine ulaştığında akışın tamamen WVF akışına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Akış yapısının dönüşümü sonrasında toplam vorteks sayısının 36 değerine düştüğü ve bununla birlikte eşlenik vorteks genişliğinin 2,28*d* ile 2,50*d* arasında değiştiği görülmüştür. İç silindir hızının artmasıyla birlikte toplam vorteks sayısının giderek azaldığı Re_{cwi}=1690 değerinde 30 sayısına düştüğü, eşlenik vorteks genişliğinin ise 3,00*d*'ye arttığı gözlemlenmiştir. WVF akışında iç silindirin dönme hızının artmasıyla birim zamanda oluşan dalgaların zig-zag sayıları ve bu zig-zag yapılarının boylarının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 21 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

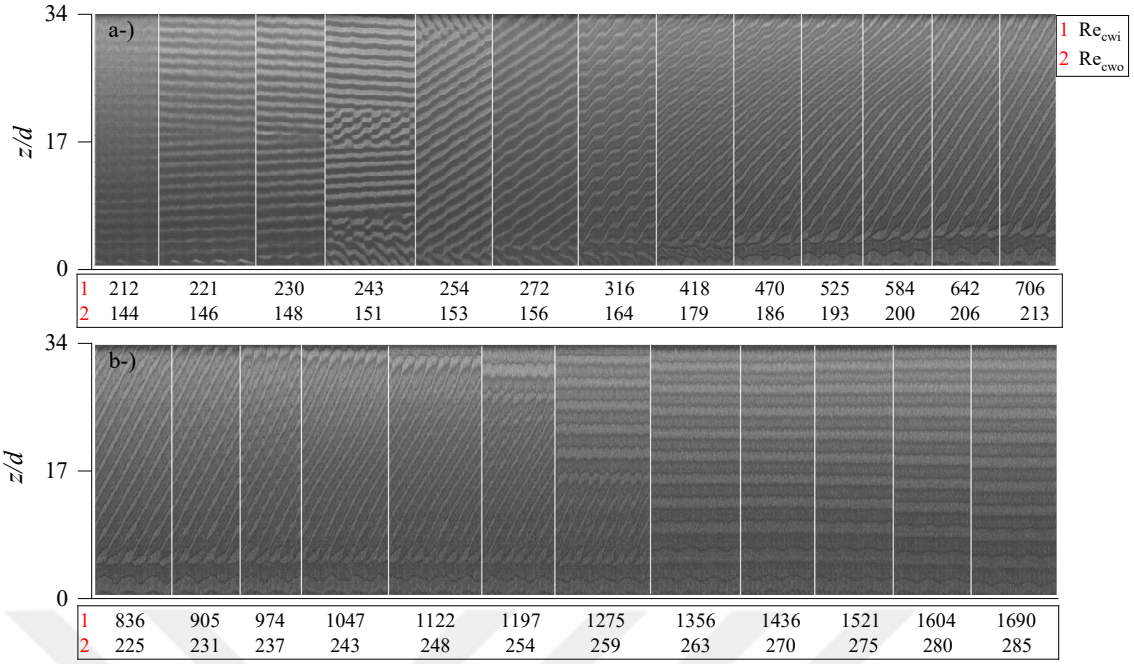
Dış silindirin dönme hızı artırılmış ve iç silindir hızı kademeli olarak artırılarak elde edilen uzay-zaman grafikleri ve kritik geçiş değerleri Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Silindir içerisinde ilk olarak Re_{cwo}=94 ve Re_{cwi}=160 değerlerinde silindirler arasında belirgin olmayan akış yapıları gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artırılarak, Re_{cwo}=98 ve Re_{cwi}=185 değerlerine ulaştığında silindir içerisinde belirgin ve düzenli ilk akış yapısının SVF akışı olarak ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu SVF vorteks akış yapısı silindirin alt kısmında ve üst kısmında farklı davranış gösterdiği görülmüştür. Silindirin alt ve üst kısımlarındaki SVF akış yapılarının kesiştiği noktalarda farklı bir akış yapısının ortaya çıktığı görülmüştür. SVF akış yapıları arasında bir önceki bölümlerde de görüldüğü gibi TVF akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Burada da çok kısa bir aralıkta TVF akış yapısı oluşurken, bu akış yapısı SVF akışı ile birleşmiş ve ortaya Re_{cwo}=98 ve Re_{cwi}=185'da görüldüğü gibi farklı bir akış yapısı gözlemlenmiştir. Bu kısımda üstte yer alan spirallerin açısı -28,5° iken alt kısımdaki spirallerin açısı -21,5° şeklindedir. Aynı zamanda SVF vorteks genişlikleri sırasıyla 1,27d ile 0,73d aralığında değişim gösterdiği bulunmuştur. İç silindir hızının artmasıyla SVF akış yapıları arasında oluşan akış yapısı ortadan kaybolmuş ve sadece SVF akış yapısı gözlemlenmiştir. Burada spirallerin ortalama açısı -27° iken,

vorteks genişliklerinin 1,32d ve 0,93d aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmaya devam etmesiyle, SVF vorteks genişliklerinin azalarak 0,93d ile 0,76d aralığına düştüğü gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=105 ve Re_{cwi}=230 değerine ulaştığında, SVF akış yapısının wSVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=117 ve Re_{cwi}=316 değerine ulaştığında ise SVF akış yapısının üst kısmında TVF akış yapısının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla TVF akış yapısının silindirin üst kısmından silindirin merkezine doğru ilerlediği görülmektedir. Silindirin üst kısmında oluşan bu akış yapısı, Re_{cwi}=316'dan Re_{cwi}=672'ye artırılması sonucunda 7,55d kadar silindirin merkezine doğru ilerlediği görülmüştür. Vorteks genişliği ise sırasıyla 1,37d ile 0,89d aralığında değişim gösterirken, 1,25d ile 0,76d aralığına düştüğü görülmüştür. Re_{cwo}=161 ve değerine ulaştığında silindirin üst kısmındaki TVF yapısının dalgalı akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=835 değerinde dalgalı akış yapısının silindirin üst kısmına uzaklığı 9,61d iken Re_{cwi}=869 değerine artırıldığında bu mesafe doğru 24,50d ulaşmıştır. Re_{cwi}=904 değerine ulaştığında ise akışın tamamen dalgalı akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 22 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

Dış silindirin dönme hızı daha da artırılarak iç silindir hızının değişimi ile elde edilen uzay-zaman grafikleri ve kritik geçiş değerleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Silindir içerisinde ilk olarak Re_{cwo}=144 ve Re_{cwi}=212 değerlerinde silindirler arasında belirgin olmayan akış yapıları gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artırılarak, Re_{cwo}=146 ve Re_{cwi}=221 değerlerine ulaştığında silindir içerisinde belirgin ve düzenli ilk akış yapısının TVF ve SVF akışı olarak ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Silindir içerisinde düzensiz karmaşık bir akış yapısı oluşmuştur. Bu kısımda silindir içerisinde, dalgalı akış, SVF ve RIB akışının bir arada olduğu gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=153 ve değerlerine artırıldığında, SVF akışı oluşmuştur. Silindirin alt ve üst kısımlarında bu SVF akışına zıt yönde hareket eden SVF akışları oluşmuş ve bu akışların kesiştiği noktalarda RIB vorteks akışı oluşmuştur. Üst kısımda oluşan zıt yönlü SVF ve kesişim noktalarında ortaya çıkan RIB vorteks yapısının ortadan kaybolduğu görülmüştür. Silindirin alt kısmında ise zıt yönlü SVF akışının ortadan kaybolmadığı görülmüştür. SVF vorteks yapılarının açısı 28° iken, vorteks genişliklerinin 0,80d ve 0,64d aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=316 değerine artırıldığında ise, SVF akış yapısının wSVF akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. wSVF vorteks yapıları 32° açıya sahip iken, vorteks genişliklerinin 0,86d ve 0,56d aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=179 ve Re_{cwi}=418 değerlerinde, silindirin üst kısımlarında wSVF akış yapısı gözlemlenirken, iç silindir hızı artırılarak Re_{cwo}=193 ve Re_{cwi}=525 değerlerine ulaştığında daha önce görülmemiş bir SVF yapısının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu akış yapısı belirli bir açıya sahip olmaktan ziyade bir eğriselliğe sahip olduğu görülmüştür. İç silindir hızının artmasıyla birlikte bu akış yapısının vorteks genişliğinin 0,46d değerine kadar düştüğü görülmüştür. Re_{cwo}=237 ve Re_{cwi}=974 değerindeki akış yapısı incelendiğinde silindir tepesinde bu akış yapısını bozan ve her bir spiral vorteks akışının uç kısmında boğum boğum bir yapının oluştuğu görülmüştür. İç silindir hızının artmasıyla birlikte bu akış yapısının silindirin merkezine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=265 ve Re_{cwi}=1356 değerinde ise bu akış yapısının tamamen ortadan kaybolmaktadır. Bu kısımdaki akış yapısında yer alan vorteks yapılarının farklı genişliklere sahip olduğu görülmüştür. Eşlenik vorteks genişliğinin 1,50d ile 2,42d arasında değiştiği bulunmuştur. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte vorteks genişliğinin değişim büyüklüğünün azaldığı görülmüştür.



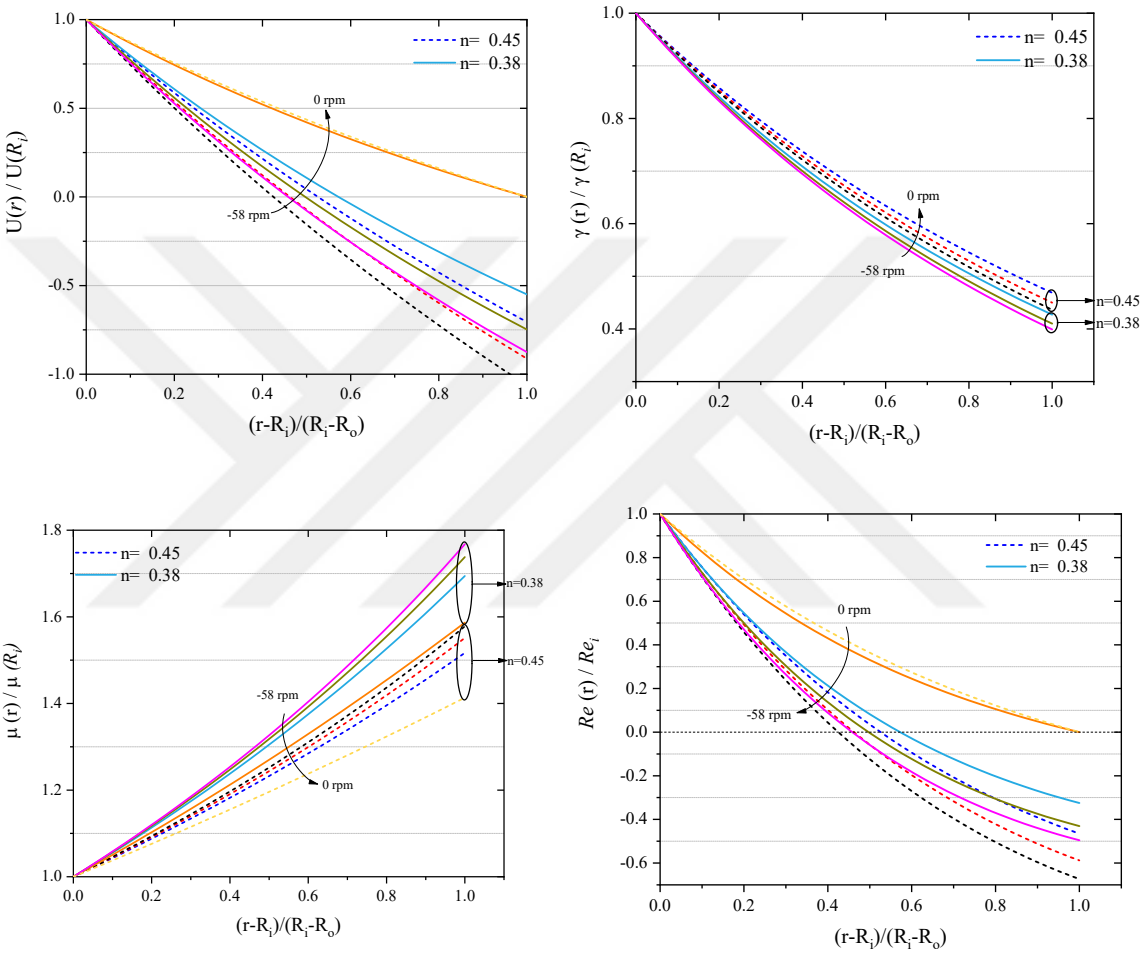
Şekil 4. 23 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

4.2.2 Silindirlerin zıt yöne dönme durumu

Belirli bir eksen boyunca dönen akışkan tabakaları arasındaki kaymanın önemi, özellikle jeofizik, astrofizik ve uzay araştırmalarında önemli bir yere sahiptir. Bu tür akışlarda ortaya çıkan açısal momentum değişiminin belirlenmesi oldukça zordur. Akışkan tabakaları arasındaki kayma (shear) hızı, akışı destabilize etme eğilimindeyken, açısal momentum radyal olarak dışa doğru arttığında dönüş onları stabilize eder (dL/dr>0, Rayleigh kriteri [135])[5].

Hem iç hem de dış silindirin zıt yöne dönmesi sonucunda silindirler arası boşlukta oluşan, hız, kayma hızı, viskozite ve $Re_{G,I}$ değişimleri normalize edilerek Şekil 4.24'de sunulmuştur. İki farklı XG çözeltisi sonuçlar elde edilmiştir ve kesikli çizgi ile n=0,45 çözeltisi, sürekli çizgi ile de n=0,38 çözeltisi gösterilmiştir. Silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda silindirler arasında oluşan kayma hızı değişim büyüklüğünün arttığı görülmüştür. Şekil 4.24'de dış silindir durağan halden -58 rpm hız aralığında her bir akışkan için üç farklı durum incelenmiştir. Her bir koşulda reaktör içerisinde farklı kayma hızı profillerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Silindirler arasındaki boşlukta silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda azimuthal hız büyüklüğünün

değişiminin arttığı ve bununla birlikte kayma hızı değişim profilinin dış silindirin dönme hızının zıt yönde artmasıyla birlikte arttığı görülmektedir (Şekil 4.24a-b). Bu bölümde dış silindirin dönme hızı akışkan özelliklerinin değişimi sonucu oluşan akış yapılarında farklılıkların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı bu bölümde de, laminer Couette akışının ilk bozulmaya başladığı noktadaki değerler kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

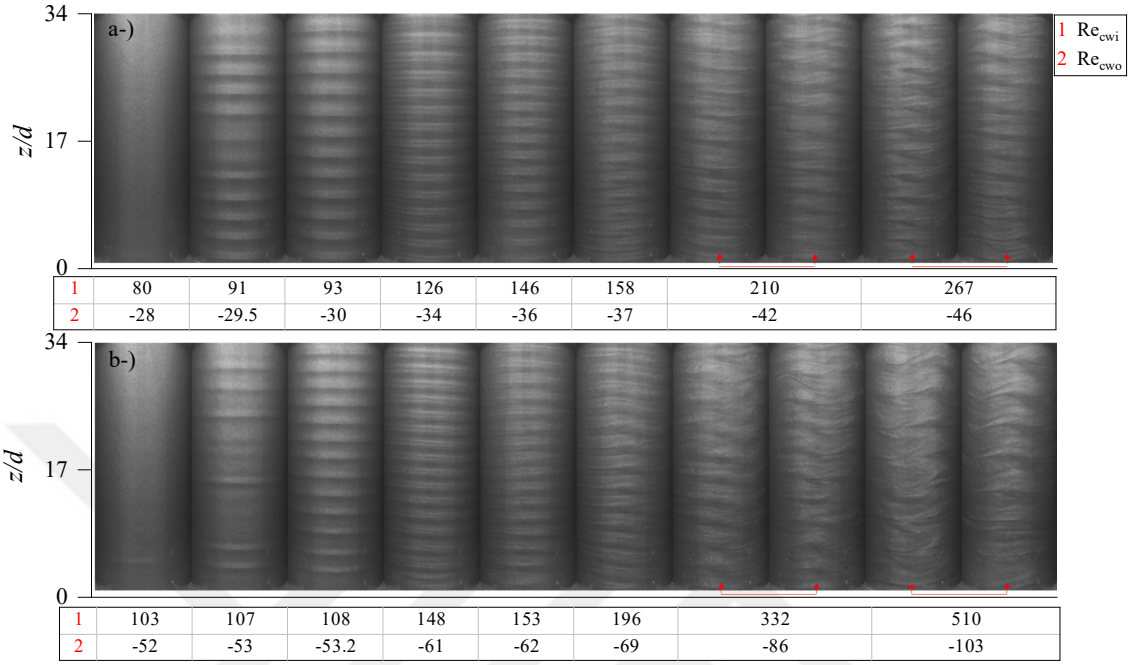


Şekil 4. 24 Silindirler arasındaki boşlukta zıt yöne dönme sonucunda hız, kayma hızı, viskozite ve $Re_{G,I}$ değişimleri.

Shear-thinning akışkanın TC deney düzeneğinde silindirlerin aynı yöne dönmeleri sonucunda ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri bir önceki bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde bu çalışmalara ilave olarak dış silindirin üç farklı sabit dönme hızı seçilerek, iç silindir ile zıt yönde dönmesi sonucunda ortaya çıkan akış yapılarında ve kritik geçiş değerlerinde meydana gelen değişimler

incelenmiştir. %0,2 xanthan çözeltisi için gözlemlenen geçiş rejimlerinin anlık görüntüleri iç ve dış silindirlerin dönme hızına bağlı olarak Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Dış silindir zıt yönde sabit bir dönme hızında dönerken, iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte, silindir içerisinde ilk olarak dairesel Couette akışı (CCF) gözlemlenmiştir. Bir önceki bölümde silindirlerin aynı yöne dönmesi durumunda, CCF akış yapısı düzensiz ve belirgin olmayan bir akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. Silindirlerin zıt yöne dönmesi durumunda ise, CCF akış yapısı ilk olarak bozunmaya başladığında, silindir içerisinde belirgin bir şekilde kısmi Taylor vorteks yapıları gözlemlenmiştir (Şekil 4.25). Ortaya çıkan bu akış yapıları aynı zamanda Newtonyen akışından da farklı davranış gösterdiği görülmüştür. Bilindiği gibi Newtonyen akışkanı kullanım durumunda, silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda SVF, RIB ve IPS gibi akış yapılarının ilk olarak oluşmaya başlandığı görülmüştür. Şekil 4.25'te iki farklı dış silindirin zıt yöne dönmesi durumunda iç silindirin dönme hızının artırılması sonucunda ortaya çıkan akış yapılarının anlık görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.25a'da Re_{cwo}=-29,5 ve Re_{cwi}=91 değerlerinde silindir içerisinde kısmi TVF akış yapısı gözlemlenirken, Şekil 4.25b'de Re_{cwo}=-53 ve Re_{cwi}=107 değerlerinde benzer şekilde kısmi TVF yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapıları incelendiğinde oluşan vorteks yapılarının genişliklerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Şekil 4.25a incelendiğinde, TVF akış yapısının Re_{cwo}=-30 ve Re_{cwi}=93 değerlerine ulaştığında silindirin tamamında ortaya çıktığı ve bu akış yapısının $93<Re_{cwi}<16$ aralığında stabil kaldığı görülmüştür. İç silindir hızı artırılarak Re_{cwo}=-36 ve Re_{cwi}=146 değerine ulaştığında TVF akış yapısının dalgalı akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Dış silindirin zıt yönde dönme hızı artırıldığında TVF akış yapısı Re_{cwo}=-53,2 ve Re_{cwi}=108 değerlerine ulaştığında görülmüştür (Şekil 4.25b). Re_{cwo}=-61 ve Re_{cwi}=148 değerlerinde akış yapılarında dalgalanmalar gözlemlenirken, Re_{cwo}=-62 ve Re_{cwi}=153 değerlerine ulaşıldığında akışın tamamen dalgalı akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Şekillerde kırmızı çizgilerle birleştirilen görüntüler, aynı dönme hızlarında farklı zaman dilimlerinde elde edilen görüntüleri göstermektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen anlık görüntülerin, ortaya çıkan akış yapısını tanımlamada yeterli olmayacağı görülmektedir. Farklı zaman dilimlerinde sunulan anlık görüntülerin akış yapısını tanımlamada yanlış sonuçların

ortaya çıkmasına neden olabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı deneysel çalışmalardan elde edilen veriler uzay-zaman grafiklerinde ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.



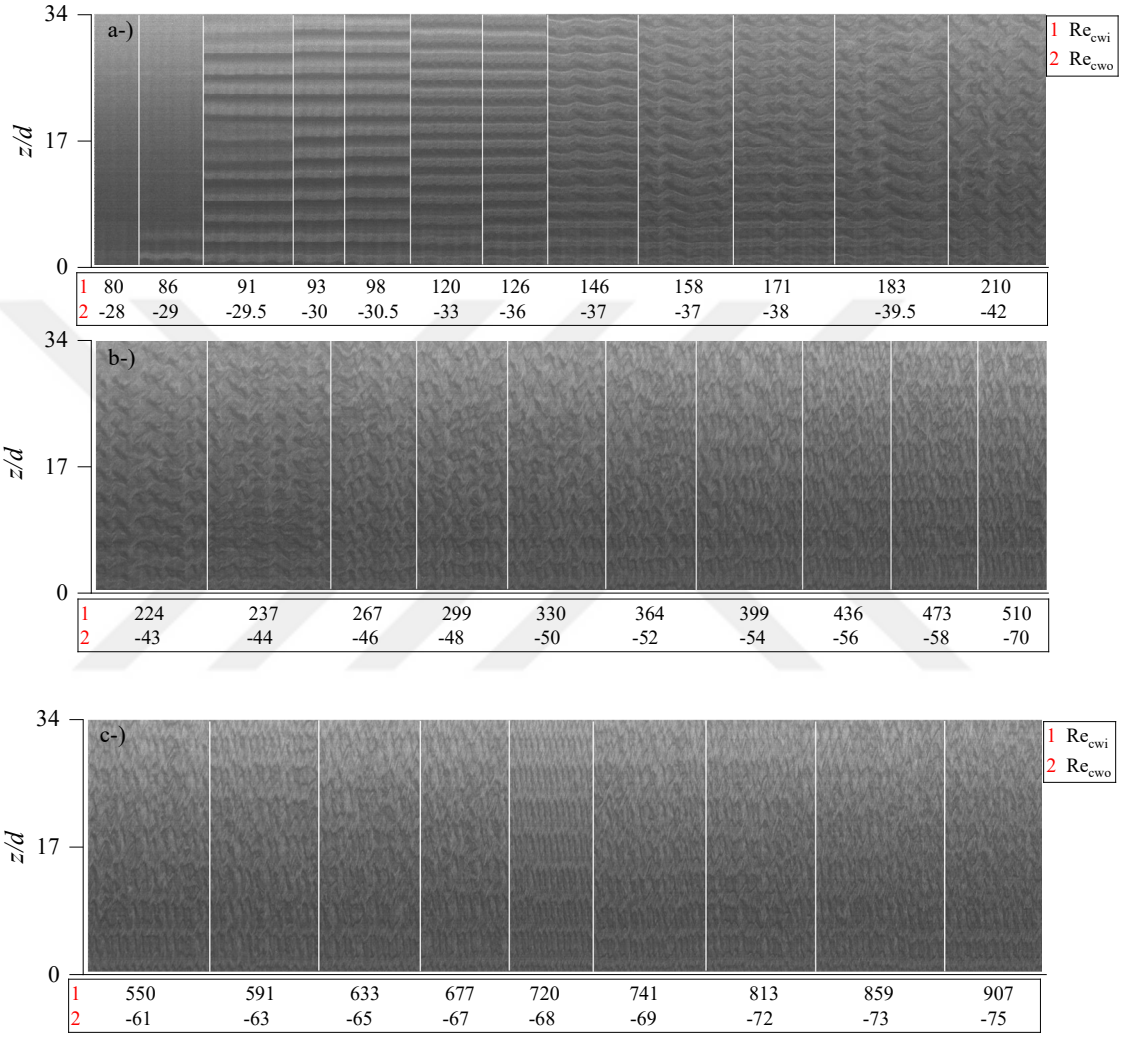
1	80	91	93	126	146	158	210	267
2	-28	-29.5	-30	-34	-36	-37	-42	-46

1	103	107	108	148	153	196	332	510
2	-52	-53	-53.2	-61	-62	-69	-86	-103

Şekil 4. 25 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri (zıt yön).

Taylor-Couette deney düzeneğinde (η=0,868) %0,2 xanthan çözeltisinin silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri incelenmiştir. Dış silindirin zıt yöne dönme hızının akış yapıları üzerine etkisini gözlemleyebilmek amacıyla dış silindirin üç farklı dönme hızı durumu incelenmiştir. İlk yapılan deneysel çalışma sonuçları, uzay-zaman grafiği olarak Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Dış silindir sabit bir dönme hızında hareket ederken, iç silindir hızı kademeli olarak artırılarak ortaya çıkan akış yapıları gözlemlenmiştir. Silindir içerisinde ilk olarak CCF akış yapısının ortaya çıktığı ve iç silindir hızının artmasıyla birlikte ilk bozunmaların silindirin alt kısmında başladığı görülmektedir. Re_{cwo}=-29,5 ve Re_{cwi}=91 değerine ulaştığında silindirin alt ve üst kısmında kısmi olarak Taylor halkalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artarak, Re_{cwo}=-30 ve Re_{cwi}=93 değerlerine ulaştığında ise silindirin tamamında TVF vorteks yapısının belirginleştiği görülmektedir. Toplam 30 adet vorteks yapısı oluşurken, eşlenik vorteks genişliğinin 2,94d olduğu bulunmuştur. Bu akış yapısının

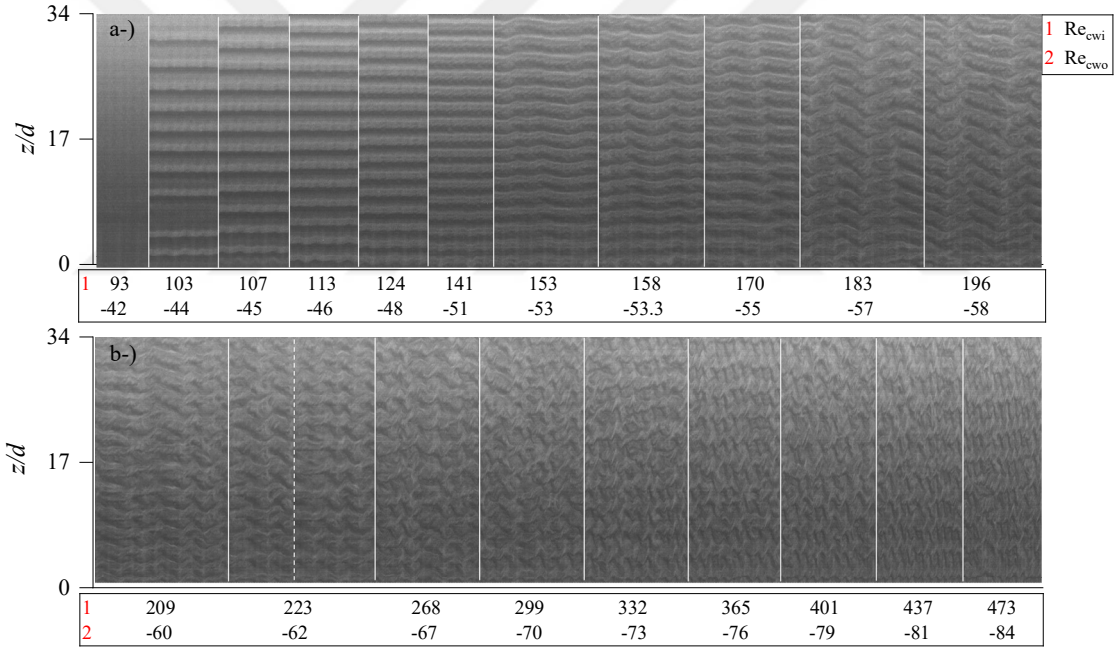
93<Re_{cwi}<126 ve -34<Recwo<-30 aralığında stabil kaldığı görülmüştür. Re_{cwo}=-36 ve Re_{cwi}=146 değerine artırıldığında, akışın dalgalı akış yapısına dönüştüğü ve toplam 36 adet vorteks yapısının gözlemlendiği, bu vorteks yapılarının genişliğinin 2,17d ve 2,25d aralığında değiştiği görülmüştür. Re_{cwi}>210 silindir içerisinde düzensiz karmaşık bir akış yapısının hâkim olduğu gözlemlenmiştir.

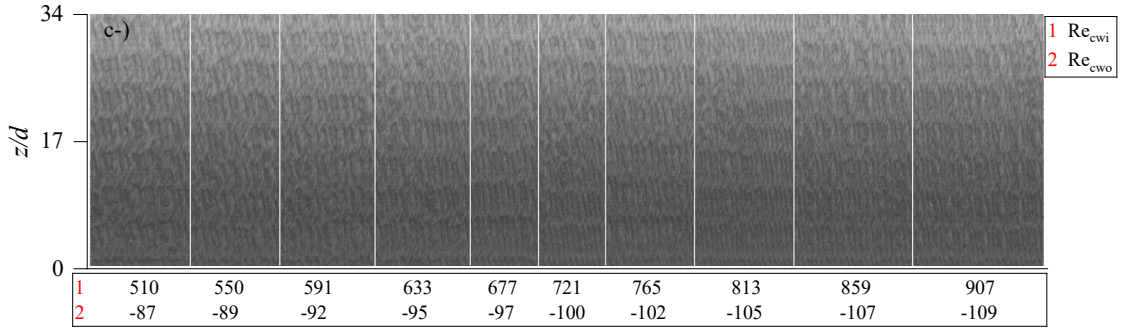


Şekil 4. 26 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (zıt yön).

Dış silindirin zıt yöne dönme hızı artırılarak, aynı şekilde iç silindirin dönme hızı kademeli olarak artırılmış ve ortaya çıkan akış yapıları ve kritik değerler incelenmiştir. Silindir içerisinde ilk olarak Re_{cwo}=-42 ve Re_{cwi}=93 değerlerinde CCF akış yapısının ortaya çıktığı ve iç silindir hızının artmasıyla birlikte ilk bozunmaların Re_{cwo}=-44 ve Re_{cwi}=103 değerlerin de kısmi TVF akış yapısı görülmektedir. Kısmi

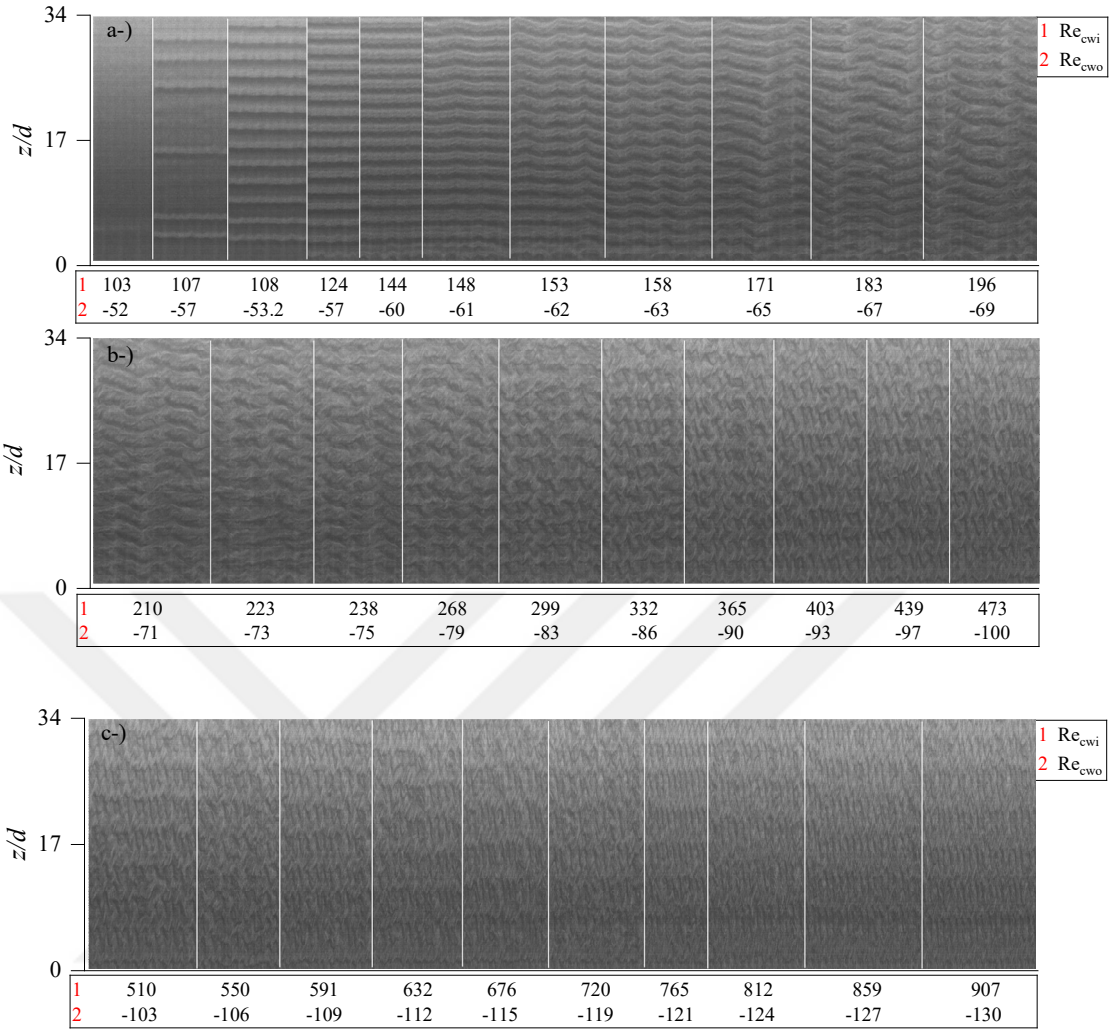
TVF vorteks genişliklerinin silindir üst kısmında ortalama 2,95*d* iken, silindirin alt kısmında 2,61*d* olduğu bulunmuştur. Re_{cwo}=-45 ve Re_{cwi}=107 değerlerine ulaşıldığında ise silindir içerisinde tamamen TVF akışının oluştuğu görülmüştür. Burada toplam 30 adet TVF vorteks yapısı oluşurken, eşlenik vorteks genişliklerinin 2,69*d* ile 2,89*d* arasında değişim gösterdiği bulunmuştur. İç silindir hızı daha da artırılarak Re_{cwo}=-53 ve Re_{cwi}=153 değerlerinde akışın dalgalı akış yapısında dönüştüğü gözlemlenmiştir. Burada oluşan toplam vorteks sayısı 38 iken, dalga genişlikleri silindirin alt ve üst kısımlarında 2,36*d*, diğer kısımlarda ise 2,10*d* aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. Vorteks genişliklerinde meydana gelen bu değişim, iç ve dış jetlerin radyal hızları arasındaki farkların ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Re_{cwo}=-67 ve Re_{cwi}=268 değerlerine artması durumunda akışın düzensiz karmaşık bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir.





Şekil 4. 27 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (zıt yön).

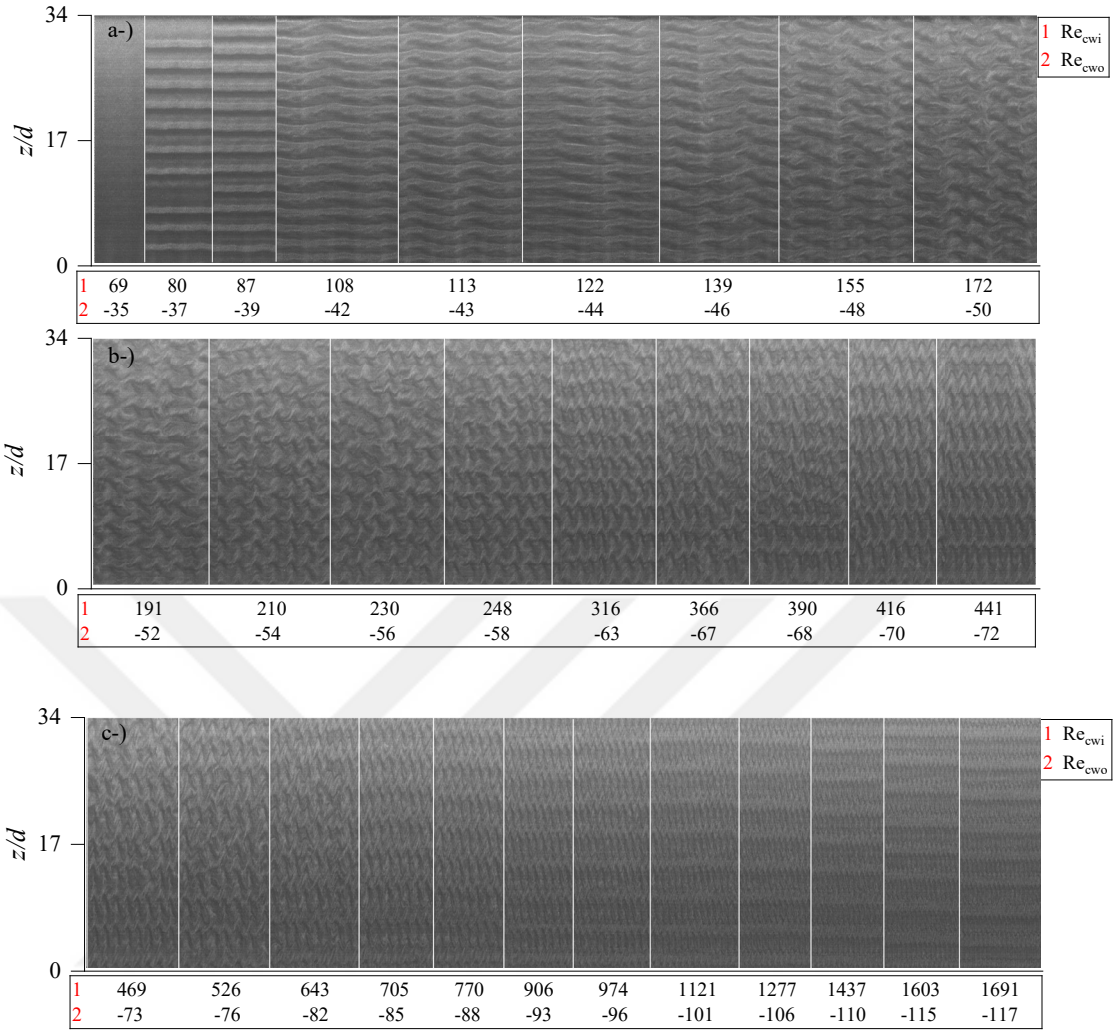
Dış silindir hızının zıt yönde daha da artırılması ile silindir içerisindeki ilk bozulmanın Re_{cwo}=-53 ve Re_{cwi}=107 değerlerinde kısmi TVF akış yapısı ortaya çıkmıştır. Kısmi TVF vorteks genişliklerinin silindir üst kısmında 2,36*d* iken, silindirin alt kısmında 1,89d olduğu bulunmuştur. Re_{cwo}=-53,2 ve Re_{cwi}=108 değerlerine ulaştığında, silindir içerisinde tamamen TVF akışının oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.28). Silindir içerisinde toplam 30 adet TVF vorteks yapısı gözlemlenirken, vorteks genişliğinin 2,50*d* ile 2,77*d* arasında değişim göstermektedir. Şekilden açıkça görülmektedir ki, silindirin alt kısmında oluşan vorteks yapısının büyüklüğünün daha büyük olduğu görülmüştür (3,84*d*). Silindir içerisinde TVF akış yapısının stabil kaldığı koşullarda iç silindir hızının artmasıyla birlikte, vorteks genişliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=-61 ve Re_{cwi}=148 değerlerinde akış içerisinde dalgalanmalar gözlemlenirken, Re_{cwo}=-62 ve Re_{cwi}=153 değerlerinde belirgin bir dalgalı akış yapısı gözlemlenmiştir. Vorteks sayısı artarak 38 olurken, vorteks genişliği de 2,08*d* ile 2,34*d* arasında değişim göstermiştir. Re_{cwo}=-86 ve Re_{cwi}=336 değerlerinde silindir içerisinde dalgalı akış yapısı tamamen düzensiz karmaşık bir yapıya dönüşmüştür. Silindirlerin zıt yönde döndüğü koşullarda oluşan girdap sayısının azalarak vorteks girdaplarının boyutunun arttığı gözlemlenmiştir. Silindirlerin aynı yöne dönmesi durumunda dönme hızının arttırılmasının, zıt yöne dönme durumuna göre daha stabilize edici bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 28 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (zıt yön).

TC deney düzeneğinde zıt yöne dönüşlerde shear-thinning akışkanın akış yapıları ve kritik geçiş değerleri üzerine etkileri inceleyebilmek amacıyla, %0,1 xanthan çözeltisi kullanılmıştır. Farklı Re_{cwo} değerlerinde iç silindirin dönme hızına bağlı olarak elde edilen uzay-zaman grafikleri Şekil 4.29, -30 ve -31'de gösterilmektedir. Bir önceki kısımlarda olduğu gibi burada da, üç farklı dış silindir dönme hızı seçilmiş ve iç silindirin dönme hızına bağlı olarak etkileri araştırılmıştır. Silindir içerisinde ilk yapı bozunması Re_{cwo}=-37 ve Re_{cwi} =80 değerlerinde iken kısmi TVF yapısı olarak gerçekleşmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi silindirin tamamında TVF yapısının tam olarak oluşmadığı gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=-39 ve Re_{cwi}=87 değerlerinde akışın tamamen TVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan eşlenik TVF

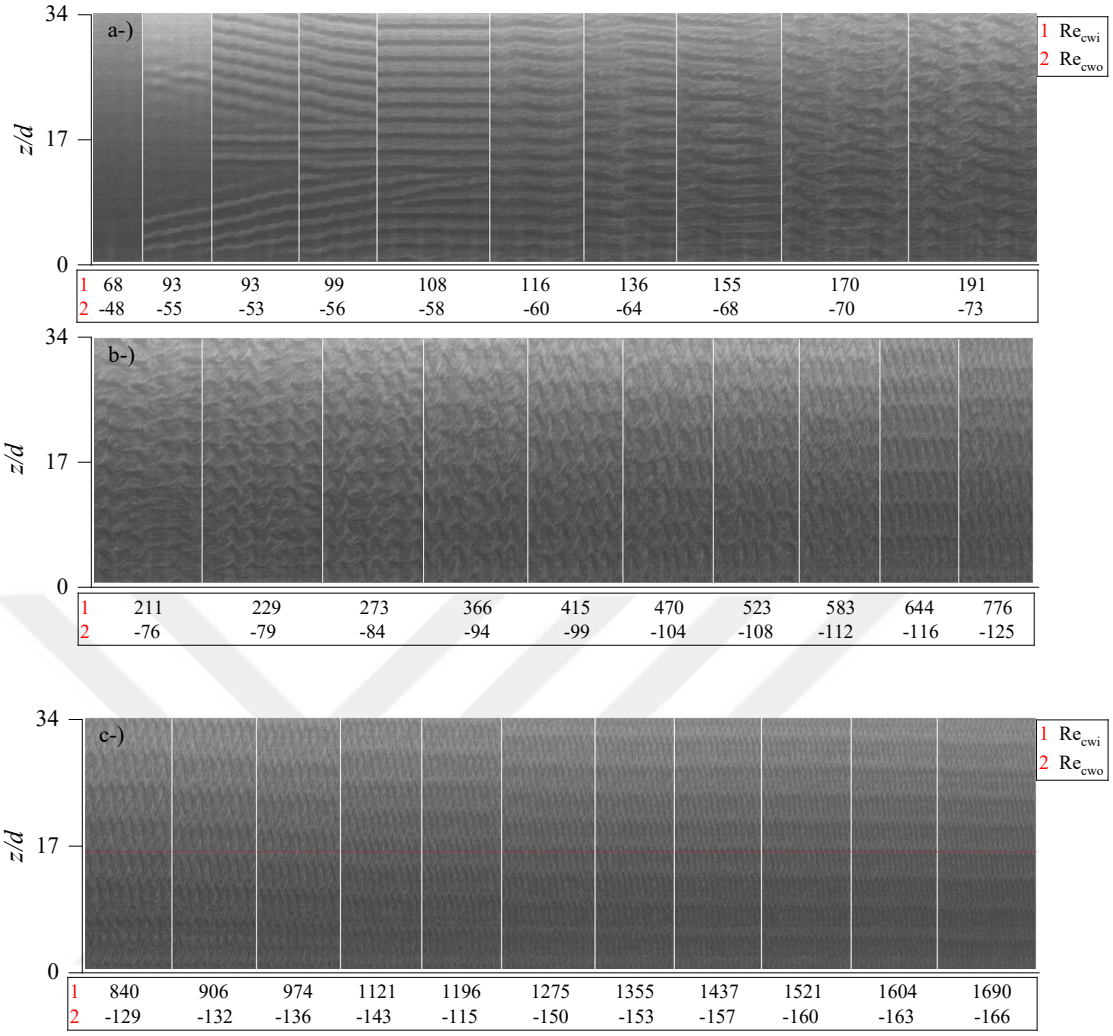
vorteks yapılarının genişliklerinin 2,42d ile 2,85d aralığında değiştiği gözlemlenirken, toplam 30 adet vorteks yapısı görülmüştür. TVF yapısı %0,1 xanthan çözeltisi için çok kısa Re_{cwi} bir aralığında stabil kaldığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılarak, Re_{cwo}=-42 ve Re_{cwi}=108 değerlerine ulaştığında TVF yapısının ortadan kalkarak dalgalı akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Ancak Şekil 29 incelendiğinde silindirin alt kısımlarında tam bir dalgalı akış yapısının oluşmadığı görülmektedir. Bu kısımda eşlenik vorteks yapılarının genişliklerinin 2,00d ile 2,50d aralığında değiştiği gözlemlenirken, toplam vorteks sayısının 32'ye arttığı görülmüştür Akış yapısının dalgalı akış yapısına dönüşümü ile silindir içerisindeki oluşan toplam vorteks sayısı 30 iken artarak 32 olduğu görülmüştür. Bununla birlikte eşlenik vorteks genişliğinin 2,00d'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=-43 ve Re_{cwi}=113 ile Re_{cwo}=-48 ve Re_{cwi}=158 aralığında belirgin bir dalgalı akış yapısının silindir içerisinde stabil kaldığı görülmektedir. 158<Re_{cwi}<230 değerleri arasında iken bir geçiş akışının oluştuğu ve düzensiz akış yapılarının silindir içerisinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=-58 ve Re_{cwi}=248 değerlerine ulaşıldığında ise MWVF akışının oluşmaya başladığı görülmektedir. Burada oluşan MWVF akış yapılarının bir önceki akışkanlarda oluşan yapılardan farklı bir şekilde oluştuğu görülmüştür. Vorteks genişliğinin dar, boyunun uzun olması nedeniyle eşlenik vorteks yapısının birleştiği görülmektedir. Bu yapının görünümü ortaya farklı bir akış yapısının oluştuğu izlenimini vermektedir. İç silindir hızının artmasıyla vorteks genişliği azalırken vorteks boyunun arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 29 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (zıt yön).

Dış silindirin zıt yöne dönme hızının artırılması ile akış yapıları ve kritik değerlerde meydana gelen değişimler iç silindirin dönme hızına bağlı olarak incelenmiştir. Bu şartlar için elde edilen uzay-zaman grafikleri Şekil 4.30'da sunulmuştur. Silindir içerisinde ilk olarak CCF yapısı gözlemlenirken, iç silindir hızının artırılmasıyla silindir içerisinde ilk bozunmaların Re_{cwo}=-55 ve Re_{cwi}=93 değerlerinde, silindirin alt ve üst kısmında SVF yapısı olarak gözlemlenmiştir. Zıt yöne dönme koşullarında bir önceki koşullar incelendiğinde ilk olarak TVF yapıları gözlemlendiği görülürken, bu şartlar altında ilk olarak SVF yapısı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla SVF yapısının silindirin hem alt hem de üst kısmından silindirin merkezine doğru ilerlediği ve silindirin merkezinde TVF yapısının gözlemlendiği

görülmüştür. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla silindir merkezindeki TVF vorteks sayısının arttığı ve bununla birlikte artan santrifüj kuvvetleri ile birlikte silindir içerisinde ortaya çıkan SVF yapılarının TVF vorteks yapısına dönüştüğü görülmektedir. Re_{cwo}=-56 ve Re_{cwi}=99 akış incelendiğinde, silindirin alt ve üst kısımlarındaki akışın tamamı TVF akışına dönüşürken, silindirin merkezine doğru oluşan SVF akışının tam olarak kaybolmadığı görülmektedir. Bu geçiş sırasında silindirin orta kısmında oluşan TVF yapısının eşlenik vorteks genişliğinin 2,60d olduğu gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=-58 ve Re_{cwi}=108 değerlerinde ise silindir içerisinde oluşan TVF yapısının eşlenik vorteks genişliklerinin 1,71d ile 2,42d aralığında değiştiği görülmüştür. Şekil 4.30'dan açıkça görüldüğü gibi silindirin tamamını kaplayacak şekilde TVF akış yapısı oluşmadan, dalgalı akış yapısının Re_{cwo}=-60 ve Re_{cwi}=116 değerlerinde oluştuğu görülmüştür. TVF yapısı oluşumunda silindir içerisinde toplam 36 adet vorteks yapısı oluşurken, akışın dalgalı akış yapısına dönüşümü sonrası toplam eşlenik vorteks sayısının 34'e düştüğü görülmüştür. Bu eşlenik vortekslerin genişliğinin 2,14d ile 2,50d arasında değiştiği bulunmuştur. İç silindir hızının artarak Re_{cwo}=-79 ve Re_{cwi}=229 değerlerine ulaşıldığında, MWVF akışının oluşmaya başladığı görülmektedir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte bir önceki kısımda olduğu gibi vorteks yapılarının genişliğinin azalması ve boylarının artmasıyla, vorteks yapılarının bütünleşik bir görüntü sergilediği görülmüştür. Şekil 4.30c incelendiğinde iç silindir hızının artmasıyla birlikte eksen boyunca oluşan vorteks yapılarının silindirin alt kısmına doğru ilerlediği görülmüştür.

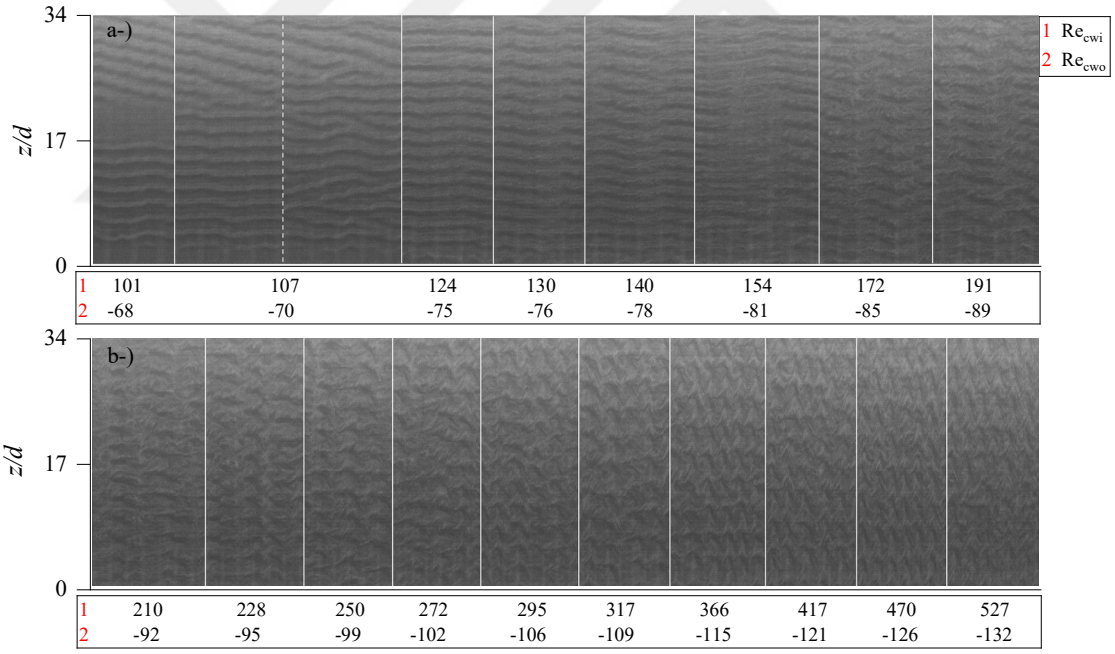


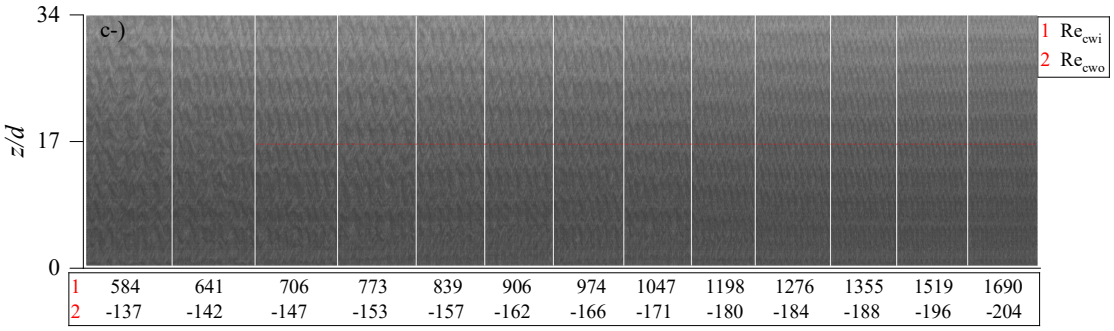
Şekil 4. 30 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (zıt yön).

Dış silindir hızının zıt yönde daha da artırılması ile silindir içerisindeki ilk bozulmanın bir önceki durumlardan farklı gerçekleştiği ve silindir içerisinde ilk olarak Re_{cwo}=-68 ve Re_{cwi}=101 değerlerinde silindirin üst kısımlarında SVF akış yapısı, alt kısımlarda ise dalgalı akış yapısı ortaya çıkmıştır (Şekil 4.31a). İç silindir hızının artırılmasıyla silindir alt kısmında oluşan dalgalı akış yapısının silindirin üst kısmına doğru ilerlediği ve silindirin üst kısmındaki SVF yapılarının vorteks genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. SVF eşlenik vorteks genişliği Re_{cwi}=101 değerinde 2,00d ile 2,21d aralığında iken Re_{cwi}=107 değerine artırıldığında 2,50d ile 3,00d aralığında değişim gösterdiği bulunmuştur. SVF ve dalgalı akış yapısının kesiştiği noktalarda RIB akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cwo}=-75 ve

Re_{cwi}=124 değerlerine ulaştığında, akışın dalgalı akış yapısına dönüştüğü ve eşlenik vorteks genişliğinin 2,00*d* ile 2,63*d* aralığında değiştiği ve toplam vorteks sayısının 38 olduğu gözlemlenmiştir. Bu dalgalı akış yapısının MWVF akış yapısına dönüşmeye başladığı ve iç silindir hızının artmasıyla vorteks genişliğinin azaldığı ve vorteks boyunun arttığı görülmüştür. İç silindir hızının artışıyla birlikte, vorteks yapısının silindirin tabanına doğru ilerlediği görülmüştür.

Zıt yöne dönüş esnasında, saf iç silindir dönüşü ile karşılaştırıldığında, iç silindirden dış silindire açısal hız aktarımının %20'den fazla artış gösterdiği literatürde yapılan çalışmalarla bilinmektedir [136]. Artan dış silindirin dönme hızı ile birlikte tork artmaktadır, bu durum vorteks yapılarının silindirler arası boşluk boyunca ilerlemediğinden dolayı torkun artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda ortalama girdapların dış yüzeyden ayrılması radyal kesintiye yol açtığından, daha güçlü bir karşı dönüş sağlamak için torkta düşüş meydana gelmektedir [137].

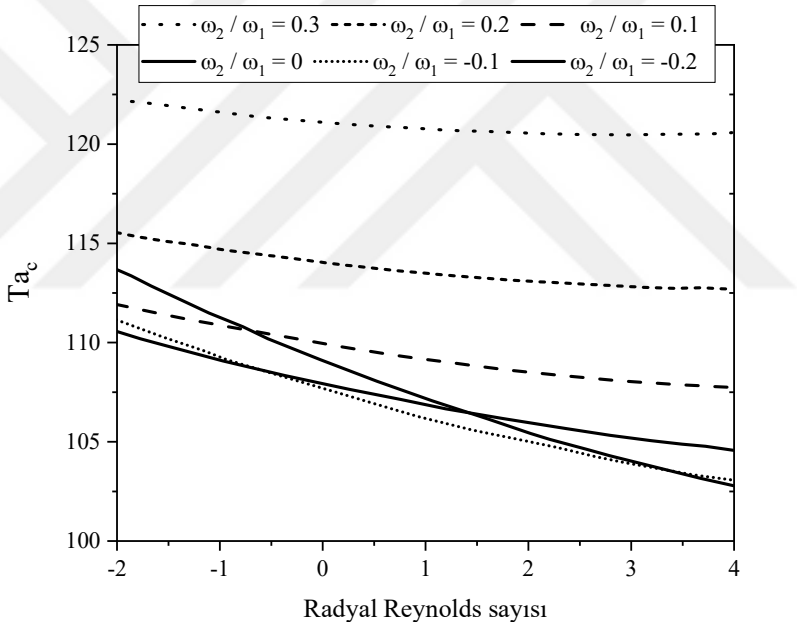




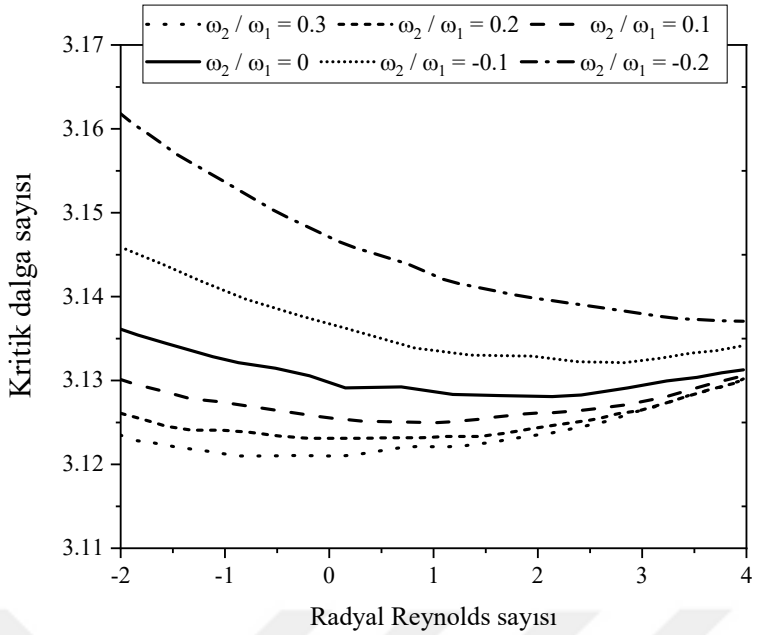
Şekil 4. 31 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği (zıt yön).

TC deney düzeneğinde %0,2 xanthan çözeltisi kullanımında, oluşan akış yapılarının farklı dalga boyu ve vorteks sayısına sahip oldukları gözlemlendi. Dış silindir sabit iken %0,2 xanthan çözeltisinde 32 adet TVF vorteks yapısı gözlemlenirken, aynı yöne dönme koşullarında oluşan vorteks sayısının değişmediği ancak zıt yöne dönme koşullarında azalarak 30'a düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda eksenel dalga boyları da sırasıyla λ/d=2,49 (n=0,45), 2,56 ve 2,94 arasında değişmiştir. Vorteks yapılarında meydana gelen bu değişim, iç ve dış jetlerin büyüklüğündeki farktan kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda girdaplar arası karışım Reynolds sayısı ve viskozite değeri değişirken ve dalga boyuyla ters orantılı değişim gösterdiği bir önceki bölümde açıklanmıştır [103], [138]. Eksenel dalga boylarının Newtonyen akışkanından (2,14) daha büyük olduğu gözlemlenmiştir [139]. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. TC deney düzeneğinde dış silindir sabit iken, iç silindir yakın bölgelerde düşük viskozite (yüksek kesme hızından dolayı) ve yüksek azimut hızı ile birlikte dış silindire doğru daha yüksek momentum transferi gerçekleşirken, dış silindirin iç silindir ile aynı yönde hareketi ile silindirler arasındaki boşlukta azimut hız gradyanının küçüldüğü görülmüştür. Bununla birlikte dış silindir sabit iken dış silindir çevresindeki durağan haldeki sıvı kütlesine, iç silindirin hareketi ile momentum aktarımı gerçekleşirken, dış silindirin hareketli olmasıyla birlikte dış silindirden iç silindire doğru da bir momentum aktarımı gerçekleşmektedir. İç ve dış jetlerin büyüklüğü arasındaki ortaya çıkan farklılıklar akış içerisindeki asimetriye ve dalga boylarında bir artışa neden olurlar. Min ve Lueptow yapmış oldukları çalışmada, dış silindir

hareketinin, iç silindire göre aynı veya ters yönde döndüğü koşullarda oluşan radyal akışın, akışın stabilitesi üzerindeki etkisinin sabit dış silindir koşullarına benzer olduğunu belirtmektedirler. Silindirlerin dönme oranı (ω_2/ω_1) değişiminin çap oranı 0,85 için, akış kararlılığı üzerindeki etkisi Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, Taylor vorteks akışına geçiş için kritik değer, silindirlerin aynı yöne dönme durumunda, zıt yöne dönme koşullarından daha yüksek değerlerde gerçekleşmektedir [140]. Ortaya çıkan bu sonuç, elde edilen deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda vorteks yapılarının eksenel dalga sayısının, radyal Reynolds sayısından bağımsız olarak, zıt yöne dönen silindirler için her zaman aynı yöne dönen silindirlerden daha büyük olduğu belirtilmektedir. Silindirlerin dönme yönüne ve radyal Reynolds sayısına bağlı olarak eksenel dalga sayısının değişimi Şekil 4.33'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 32 Radyal Reynolds sayısı ve silindirlerin dönme oranının (ω_2/ω_1) kritik Taylor sayısı üzerindeki etkisi [140].



Şekil 4. 33 Radyal Reynolds sayısı ve silindirlerin dönme oranının (ω_2/ω_1) kritik dalga sayısı üzerindeki etkisi [140].

İç ve dış silindirlerin dönüş hızlarının oranı akış yapılarının oluşumu üzerinde önemli bir parametredir. Newtonyen akışkan kullanımı durumunda, zorlanmamış Taylor-Couette akışı için, iki silindir aynı yönde dönme koşullarında, daha karmaşık akış yapıları Taylor sayısının yüksek değerlerinde ortaya çıkarken, bununla birlikte, zıt yöne dönen silindirler için, nispeten daha düşük Taylor sayısında karmaşık akış yapıları gözlemlenebilmektedir. Newtonyen akışkan kullanımı durumunda, deneysel çalışma sonuçları göstermektedir ki silindirlerin dönme yönü ve akışkanın shear-thinning özelliği ortaya çıkan akış yapılarının karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir. Newtonyen akışkanlarda zıt yöne dönüşte SVF, RIB, IPS gibi akış yapıları gözlemlenirken, akışkanın Newtonyen olmayan özelliğinin artmasıyla birlikte bu akış yapılarının gözlemlenmediği ve düzenli TVF akışının ortaya çıktığı görülmüştür. Buna ilave olarak akışkanın shear-thinning özelliğinin artarak (n=0,45) Newtonyen özelliğine yaklaşması ile silindir içerisinde SVF, RIB ve IPS akış yapılarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte dış silindirin zıt yöne dönme hızının artmasıyla birlikte Newtonyen akışkanında olduğu gibi TVF akış yapısı gözlemlenmeden, silindir içeresinde SVF, IPS ve dalgalı akış yapıları oluşmuştur.

Çalışmalarda kullanılan shear-thinning ve Newtonyen akışkanların kritik geçiş değerleri eksenel dalga boyları ve boyutsuz eksenel dalga sayıları Tablo 4.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablo 4.1'den açıkça görüldüğü gibi silindirlerin zıt yöne dönmesi durumunda, boyutsuz eksenel dalga sayılarında azalma meydana geldiği görülmektedir. Elde edilen bu sonuçların literatürde sunulan veriler ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir [141], [142]. Bununla birlikte eksenel dalga boylarının da arttığı görülmüştür. Boyutsuz eksenel dalga sayısı (k) Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Tablodan aynı zamanda shear-thinning indeks değerinin azalmasıyla birlikte, boyutsuz eksenel dalga sayılarında azalma meydana geldiği gözlemlenirken, eksenel dalga boylarının arttığı görülmüştür. Silindirlerin birbirine göre zıt yöne dönme koşullarında, dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindir hızının artmasıyla birlikte boyutsuz eksenel dalga sayısının arttığı görülmektedir. Agbessi ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada zıt yöne dönme koşullarında, dış Reynolds sayısının eşik değerinin eksenel simetrik Taylor vorteks yapılarından spiral girdaplara geçişinin artan shear-thinning etkisiyle birlikte arttığı belirtilmektedir [143]. Bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, Agbessi ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmanın aksine akışkanın shear-thinning etkisinin artmasıyla birlikte zıt yöne dönme koşullarında spiral vorteks yapılarının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, shear-thinning etkinin azalmasıyla (n=0,45) birlikte, Re_{cwo}=-55 ve Re_{cwi}=93 değerlerine ulaştığında, silindirin alt ve üst kısmında kısmi SVF yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.30). Dış silindirin bu dönme hızını aşmasıyla birlikte (ω_o>3,66rad/s), silindir içerinde ilk bozunmaların SVF akış yapısı ile başladığı görülmüştür. Agbessi ve ark. (2015) aynı zamanda dar boşlukta (η=0,881) zıt yöne dönme koşullarında, shear-thinning etkinin destabilize özellik gösterdiği, bununla birlikte geniş boşluk (η=0,4) çalışmalarında ise stabilize özellik gösterdiği açıklanmıştır.

$$k = \frac{2\pi d}{\lambda} \tag{4. 1}$$

Dış silindirin aynı ve zıt yöne hareketi sonucunda, silindir içerisinde shear-thinning akışkan kullanımı sonucunda TVF akış yapılarının yanı sıra farklı özelliklerde silindir içerisinde SVF akış yapıları gözlemlenmiştir. SVF akış yapıları özellikle silindirlerin birbirlerine göre aynı yöne dönmeleri sonucunda ortaya çıktığı

gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu SVF akış yapılarının kritik geçiş değerleri, dalga boyları ve spirallerin açı değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 4.1'de sunulmuştur. Bununla birlikte silindirlerin zıt yöne dönmesi sonucunda silindir içerisinde TVF akış yapısının ardından MWVF akış yapıları gözlemlenmiştir. Tablo 4.1 silindirlerin birbirlerine göre dönme yönleri ve hızlarına bağlı olarak ortaya çıkan SVF ve TVF akış yapılarının karakteristik özellikleri görülmektedir. Tabloda yer alan negatif değerler silindirin zıt yönde hareket ettiğini göstermektedir. Negatif açı değerleri ise birbirlerine göre zıt yönde hareket eden spiral vorteks yapılarını temsil etmektedir.

Tablo 4. 1 İç ve dış silindir hareketli iken ortaya çıkan akış yapılarının kritik geçiş değerleri ve akış karakteristiklerinin özeti (η = 0,868).

Akış yapısı	***n***	**Kritik geçiş değerleri ($Re_{cw\sigma}$– Re_{cwi})**	**Akış karakteristikleri (λ–*k*-spiral açı)**		
Taylor vorteks akışı (TVF)	1,00	Re_c=125	λ=2,14*d*	2,94	
	0,45	69– 154	2,19*d*– 2,28*d*	2,86– 2,76	
	0,45	-39– 87	2,42*d* – 2,85*d*	2,6– 2,20	
	0,45*	-58– 108	1,71*d* – 2,42*d*	3,67– 2,60	
	0,38	46,2– 176	2,72*d* – 3,00*d*	2,31– 2,09	
	0,38	56– 196	2,50*d*– 2,77*d*	2,51– 2,27	
	0,38	-30– 93	2,94*d*	2,14	
	0,38	-45– 107	2,69*d*– 2,89*d*	2,34– 2,17	
	0,38	-53,2– 108	2,50*d*– 2,77*d*	2,51– 2,27	
Spiral vorteks akışı (SVF)	1,00				
	0,45	98– 185	1,27*d* – 0,73*d*		-28,5° – -21,5°
	0,45	99– 190	1,32*d* – 0,93*d*		-27°
	0,45	103– 216	0,93*d* – 0,76*d*		-27°
	0,45	153– 254	0,80*d* – 0,64*d*		-28°
	0,38	42– 135	1,35*d* – 1,92*d*		-34°
	0,38	43– 140	1,50*d* – 2,35*d*		-31,5° – -38°
	0,38	51– 148	2,47*d* – 2,65*d* 2,33*d* – 2,60*d*		37° – -37°
	0,38	60– 158	2,30*d* – 2,50*d* 2,04*d* – 2,20*d*		35° – -38°
	0,38	61– 165	1,96*d* – 2,36*d* 2,44*d* – 2,57*d*		35° – -42°
	0,38	63– 183	2,66*d* – 2,77*d*		35° – -42°

* Bu bölümde silindir içerisinde tam bir TVF yapısı mevcut değildir.

5
Süperhidrofobik yüzey etkisi

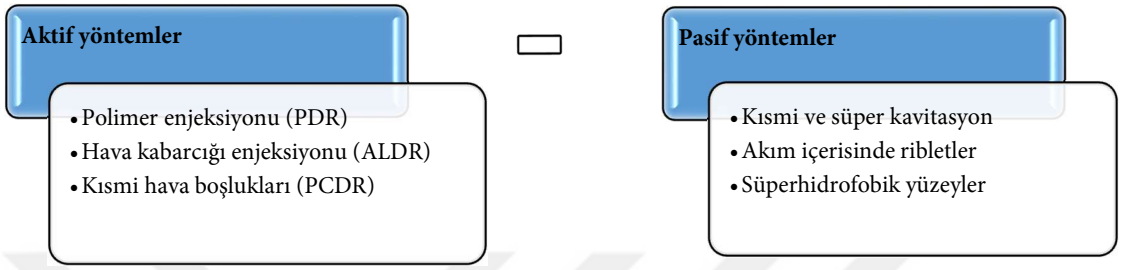
Bu bölümde, süperhidrofobik yüzeyin akış yapıları, kritik rejim geçiş değerleri ve akış yapılarının karakterizasyonu üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda dış silindir sabit iken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması belirlenen parametrelerin değişimi incelenmiştir.

5.1 Giriş

Süperhidrofobik yüzeyler son zamanlarda hem endüstriyel hem de akademik uygulamalarda Ar-Ge ve inovasyon çalışmalarında tercih edilmektedirler. Süperhidrofobik yüzeylerin gelişimi 1930'ların ortalarından itibaren çalışılmaya başlanmış olsa da, son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte süperhidrofobik yüzeyler endüstride geniş uygulama yelpazesi nedeniyle çok ilgi çekmiştir. Süperhidrofobik yüzeylerin kullanımı ile enerji tüketiminin azaltılması [144], [145] ilgi odağının en önemli parametresi olarak dikkat çekmektedir. Özellikle gemi ve denizaltı hareketleri sonucunda ortaya çıkan hidrodinamik sürtünme kuvvetini azaltma yöntemleri en önemli konular arasında yer almaktadır. Hidrodinamik sürtünme kuvvetinin azaltılması, araçların hızlarının artırılmasına katkı sağlamasının yanı sıra tüketilen yakıt miktarını ve salınan CO_2 emisyonlarının azalmasına neden olmakta bunun sonucunda ise küresel ısınma ve iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadırlar. Süperhidrofobik yüzey kullanımı ile bu deniz taşıtlarında sürüklenme kuvvetini önemli ölçüde azaltmaktadırlar [146]. Bununla birlikte hidrofobik yüzeylerin kullanımı ile istenmeyen maddelerin gemi gövdelerinde birikimi önlemekte ve biyolojik kirlenmenin sonucu olarak ortaya çıkan hidrodinamik sürtünme kuvvetini azaltmaktadırlar. Ayrıca, boruların yüzey pürüzlülüğü ve hidrofilik olması nedeniyle boru akışlarında muazzam bir basınç düşüşü meydana gelmektedir. Bu nedenle, bir boru hattı boyunca basınç düşüşünü azaltmak amacıyla güvenilir ve uygun maliyetli bir yöntem olarak süperhidrofobik yüzeylerin kullanımı tercih edilmektedir [147]–[149].

Yüzey sürtünmesi, deniz altı ve deniz üstü taşıtlarında toplam hidrodinamik direncin önemli bir bölümünü oluştururlar; normal koşullarda, gemiler üzerindeki toplam sürtünmenin yaklaşık %50'si ve denizaltılardaki sürtünmenin %60'ı, gövdedeki sürtünme kayma gerilmesinden kaynaklanmaktadır [150]. Deniz taşıtlarında hidrodinamik sürtünme kuvvetini artıran en önemli parametrelerden biriside biyolojik kirlenmedir. Yüzeyde meydana gelen 1 mm kalınlığındaki biyofilm tabakası sürtünmeyi %80 oranında artırırken %15 oranında hız kaybının meydana gelmesine sebep olurlar [151]. Aynı zamanda yüzeyde meydana gelen biyolojik kirlenmedeki %5 oranındaki bir artış, gemi yakıt tüketimini %17 oranında artırırken, emisyon gazlarının (CO_2, NOx ve SO_2) salınımında %14'lük bir artış sağlar [152]. Bununla birlikte asit üreten bakterilerin yüzeyde birikmesi sonucunda gemi gövdelerinde ciddi hasarların oluşmasına neden olabilecek biyolojik korozyon meydana gelebilir [153], [154]. Ortaya çıkan bu zararlı etkilerin giderilebilmesi amacıyla özellikle modern deniz taşıtlarının dizaynında yüzey sürtünmesini minimum düzeye indirgeyecek tasarımlar ile taşıtların hızında ve verimliliğinde önemli oranda iyileştirmelerle yakıt tüketimi ve işletme maliyetlerinde önemli tasarruflar elde edilmektedir. Bununla birlikte sürtünme azalmasının başarılı bir şekilde uygulanması ve geliştirilmesi ile potansiyel ekonomik, stratejik ve çevresel katkılar sağlayacaktır. Yüzey sürtünme kuvvetini azaltabilmek amacıyla uygulamada çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler aktif ve pasif yöntemler olarak sınıflandırılmakla birlikte birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptirler [150]. Şekil 5.1'de bu kullanılan yöntemler listelenmiştir. Aktif yöntemler arasında türbülanslı sınır tabakasına hava kabarcıkları [155] veya yüksek moleküler ağırlıklı polimerlerin [156] enjeksiyonu ve gövdenin altına girintiler veya kısmi hava boşlukları [157] oluşturma gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin kullanımı sonucunda sürtünme azalmasının sürekliliğini sağlamak ve ekonomik olarak uygulanabilir hale gelebilmesi için uzun sefer operasyonları gerekmektedir, aynı zamanda aktif akış yüzeyinde gerçekleştirilecek olan modifikasyonlar ile yakıt ve işletme maliyetlerindeki tasarruflarla dengelenirse [150] nispeten kısa mesafe, hız ve performans gerektiren askeri uygulamalarda da kullanımı uygun olabilecektir. Pasif sürtünme azaltma yöntemlerinde ise sürekli enerji girişi gerektirmezken sürtünme azalmasında aktif yöntemlere göre daha

küçük bir yüzde azalma sağlarlar. Son zamanlarda, gövde üzerinde uygulama alanı bulan süperhidrofobik (SH) kaplamalar, gemiler ve denizaltı araçlarında yüzey sürtünmesinin azaltılmasını sağlamak için potansiyel bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [150]. Ancak, denizcilik uygulamalarında karşılaşılan yüksek Reynolds sayılarında ($Re \sim 10^8 - 10^9$) etkili bir şekilde çalışabilen ölçeklenebilir SH yüzeylerin gelişimi henüz sağlanamamıştır [158].

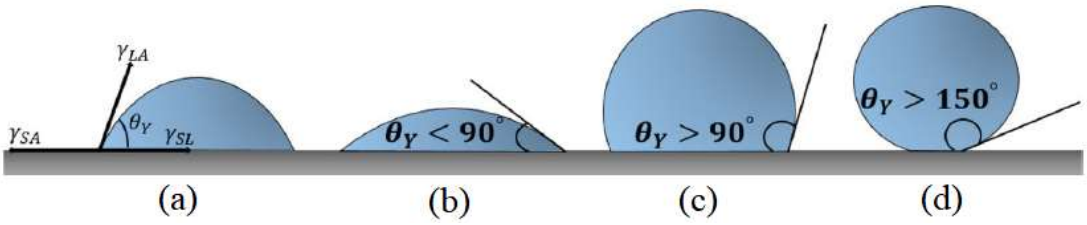


Şekil 5. 1 Deniz üstü, denizaltı ve su altı mermilerinde aktif ve pasif yüzey sürtünme azaltma yöntemleri.

Temas açısı, kayma hızı, hidrostatik/hidrodinamik basınç ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler süperhidrofobik yüzeylerin etkinliğini ve sürtünme kuvvetinin azaltılmasını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu parametreler arasında özellikle temas açısı (CA), bir yüzeyin ıslanabilirliğinin araştırılmasında en önemli parametrelerden biridir. Temas açısını belirleyebilmek amacıyla kullanılan eşitlik Young tarafından önerilmiştir [159]. Young denklemine göre, bir sıvı damlacık ile katı yüzey arasındaki temas açısı şu şekildedir:

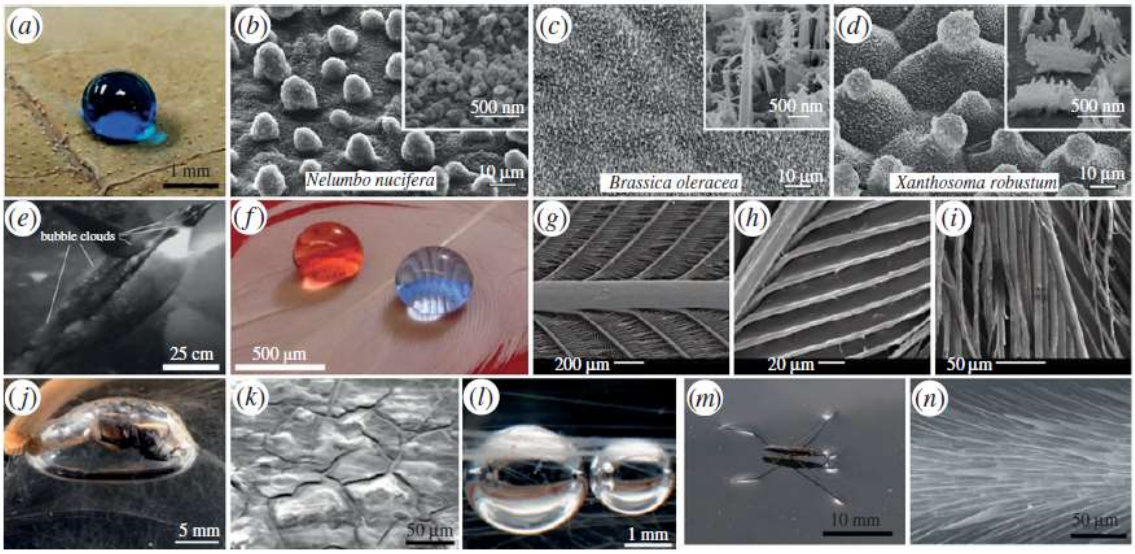
$$\cos\theta_Y = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LA}} \tag{5. 1}$$

Denklemde, θ_Y denge durumundaki temas açısı, γ arayüzey gerilimi ve *S, A* ve *L* ise sırasıyla katı, hava ve sıvı fazlarını temsil eder (Şekil 5.2). θ_Y değerine göre yüzeyler, hidrofobik (θ_Y>90°) ve hidrofilik (θ_Y<90°) olarak sınıflandırılırlar. Aynı zamanda θ_Y>150° olduğunda yüzey süperhidrofobik yüzey (SHS) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5. 2 (a) Temas açısının şematik olarak görünümü, (b) hidrofilik, (c) hidrofobik, (d) süperhidrofobik yüzey.

Doğada sayısız SHS bulunmaktadır, bunlardan bazıları: brokoli, lotus, lahana, hint keneviri ve çeşitli bitkilerin yaprakları [160] (Şekil 5.3a-d), aynı zamanda ördek, kaz ve penguenlerin tüyleri [161], [162] (Şekil 5.3e–i) ve çan örümceklerinin [163] ve su dikeninin [164] tüylü bacakları (Şekil 5.3j–n) süper hidrofobik özellik göstermektedir. Tüm bu yüzeylerin iki ortak özelliği bulunmaktadır. Birincisi, mikrometre ve hatta submikrometre boyutlarında sahip hiyerarşik dokuya sahip olmaları, ikincisi ise, yüzeylerinde genellikle mumsu bir kaplama ile elde edilen düşük yüzey enerjisine sahip olmalarıdır [165].



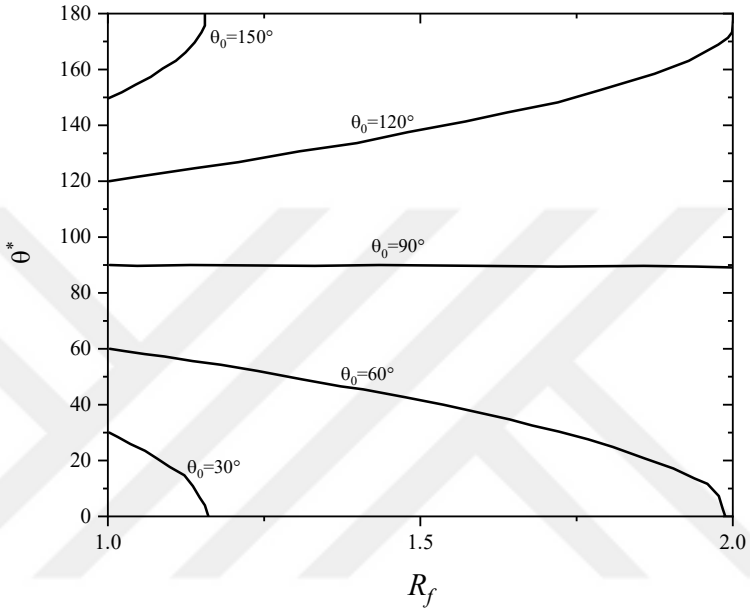
Şekil 5. 3 Doğada bulunan bazı süperhidrofobik yüzeyler.

Hidrofobik özelliği etkileyen bir diğer önemli parametre de malzemenin yüzey pürüzlülüğüdür. Hidrofobik yüzeylerde yüzey pürüzlülüğünün etkisi Wenzel denklemi kullanılarak elde edilmektedir (Denklem 5.2). Yüzey pürüzlülüğünün

görünen temas açısı (θ^*) üzerindeki etkisini ölçen ilk çalışma Wenzel (1936) tarafından gerçekleştirilmiştir [23].

$$\cos\theta^* = R_f \cos\theta_Y \tag{5. 2}$$

Denklemde R_f Wenzel pürüzlülüğü olarak tanımlanmakta ve yüzeyin gerçek alanının yansıtılan alanına oranı temsil etmektedir. Temas açısının pürüzlülük faktörüne göre değişimi, θ^*'ın farklı değerleri için Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5. 4 Temas açısının yüzey pürüzlülük ve görünen temas açısına bağlı olarak değişimi [166].

Sıvı bir katı yüzey üzerinden hareket ettiğinde (aktığında) sıvının hızının katının hızıyla aynı olduğu kabul edilmektedir [41]. Bu durum genellikle "no-slip" (hareketsiz kayma olmayan) olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte, süperhidrofobik yüzeyler, katı-sıvı arayüzünde sıfır olmayan ve yüzey üzerinde kayma hızı sağlayabilen bir hava fraksiyonuna (1 - φ_s) sahiptirler. Pürüzlü yüzeyler arasına köprü oluşturan hava-su arayüzlerinde kayma önleyici sınırlar olarak etkili bir şekilde hareket eder. Akış kısmen bu oluşan yüzey üzerinde kayar ve katı ile sıvı arasındaki azalan yüzey teması nedeniyle duvardaki viskoz kayma gerilimi azalır. Bu yüzey koşullarını matematiksel olarak tanımlayabilmek amacıyla Navier (1823) ve Stokes (1851) [97], [167] tarafından ortaya konulan eşitliklere süperhidrofobik sınır şartları uygulanması ile yeniden modifiye edilebilmektedir. Buna göre

süperhidrofobik yüzey üzerindeki kayma hızı Denklem 5.3 kullanılarak modellenebilmektedir:

$$u_s = l_x \left| \frac{du}{dy} \right|_{y-0} \quad ve \quad \omega_s = l_z \left| \frac{d\omega}{dy} \right|_{y-0} \tag{5.3}$$

Denklemde yer alan burada *x*, *z* akış yönünü temsil ederken *u* ve *ω* verilen yönlerdeki hız bileşenlerini temsil etmektedir. *l* ise efektif kayma uzunluğudur.

Sürtünme azalması kayma hızına ve hava ile kaplanan yüzey alanına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bununla birlikte, SHS'ler üzerindeki türbülanslı akışlarda yapılan sürtünme azalması ölçümleri sonucunda farklılıkların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı sürtünme azalmasını tespit edebilmek amacıyla sadece temas açısı kullanılarak süperhidrofobik yüzeyin karakterize edilmesi doğru değildir [168]. Yüzey karakterizasyon işlemi gerçekleştirilirken yüzey pürüzlülüğü [169], [170], suda çözünmüş hava miktarı [171], duvar kayma gerilmesi [172] ve hidrostatik basınç [168], [173], [174] parametrelerinin de önemli oranda etkili olduğunu göstermişlerdir.

Hidrofobik yüzeylerdeki kayma hızının boru akışlarında önemli bir sürtünme azalmasına neden oldukları daha önceki yapılan çalışmalarda bildirilmiştir. Bu tür yüzeylerin büyük ölçekli akışlar üzerindeki etkileri henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Ancak bu yüzeylerin kullanımı ile hem laminer hem de türbülanslı akışlarda önemli oranda sürtünme azalması sağlanabilmekte [90], [175], ve türbülans rejimine geçişi geciktirmektedir [86]. Bu üstün özelliklerinden dolayı hidrofobik yüzeylerin akış yapısı ve türbülansa geçiş üzerindeki etkileri birçok mühendislik uygulaması için büyük ilgi görmektedir. Örneğin, mikrokanallardaki rejim geçişin gecikmesi, akışkanı hareket ettirmek için gereken güçte önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Türbülanslı akışlar için SHS sürtünmesinin azaltılmasında aynı zamanda Reynolds sayısı önemli rol oynamaktadır [176]. Süperhidrofobik yüzeyler kullanımı ile yapılan ilk deneysel çalışmada laminer bir akış içerisinde %14 sürtünme azalmasına ulaşılabilirken [90], Ou ve ark. (2004) yapmış oldukları çalışmada %40 sürtünme azalması elde etmişlerdir [89]. Özellikle hidrofobik yüzeyin akış stabilitesini ve türbülans rejimine geçişi inceleyen çalışmalar sınırlıdır.

En önemli çalışmalardan biri olarak kabul edilen ve Min ve Kim (2005) tarafından yapılan çalışmada, kanal akışı içerisinde hidrofobik yüzey etkisini lineer stabilite analizini kullanarak incelemişleridir. Araştırmacılar çalışma sonucunda hidrofobik yüzey kullanımı ile kritik Reynolds sayısının arttığını ve laminar-türbülans rejim geçişin önemli ölçüde gecikebileceğini sayısal olarak göstermişlerdir [86]. Laminer sürtünmeyi azaltmak için hidrofobik yüzeylerin kullanımı sonucunda elde edilen önemli etkileri gözlemleyen araştırmacılar kısa süre sonra türbülans akış rejiminde ortaya çıkan sürtünmeyi azaltmak amacıyla bu yüzeyleri kullanmaya başladılar. Min ve Kim (2004) kanal akışının türbülanslı DNS çalışmalarını, cidarda belirlenmiş x-yönü (streamwise) veya z-yönü (spanwise) kayma sınırı koşulları ile gerçekleştirmişlerdir. x-yönü kayması sürtünme azalmasına neden olurken, z-yönü kayması cidara yakın vorteks yapılarının güçlenmesine neden olurken, ortaya çıkan bu durum momentum taşınımının ve duvardaki sürtünme kayma gerilmesinin artmasına neden olmaktadır. Bu sürtünme artışı türbülans rejimine özgüdür ve laminer akış rejimlerinde gözlemlenmez. x-yönü kayması sonucunda ortaya çıkan sürtünme azalması ile z-yönü kayması sonucunda ortaya çıkan sürtünme artışı kısmen dengelenmektedir. Martell ve ark. (2010) yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçlara ulaşmışlardır [177]. Daniello ve ark. (2009) deneysel olarak hidrofobik yüzey kullanımı sonucunda yaklaşık %50 oranında türbülanslı rejimde sürtünme azalması elde etmişlerdir [91]. Aynı şekilde Bidkar ve ark. (2014) tarafından yapılan deneysel çalışmada, rastgele dokulu hidrofobik yüzeyler üzerinde %20-30 arasında türbülanslı rejimde sürtünme azalmasının sağlanabileceğini göstermişlerdir [178]. Watanabe ve ark. (2003) iki eş merkezli silindir kullanarak yüzey özelliklerinin laminer sürtünme azalması üzerine etkilerini araştırmışlardır. Hidrofobik yüzeydeki kayma, duvara yakın hız ölçümleri ile araştırmacılar tarafından bulunmuştur. Maksimum kayma hızı (slip velocity), yarıçap oranı 0,839 iken ve duvar hızının %18'i olarak bulunmuştur. Aynı zamanda kayma hızı yarıçap oranına önemli ölçüde bağlı olduğu vurgulanmıştır. Taylor vorteks yapıları zayıflar, bu nedenle teğetsel yöndeki kayma hızı iki silindir arasındaki basınç farkını azaltır. Aynı zamanda eksenel yöndeki kayma hızı, Taylor vorteks yapılarının eksenel dalga boyunun değişimine de sebep oldukları vurgulanmıştır [179]. Srinivasan ve ark. (2015) TC deney düzeneğini kullanarak

maksimum Reynolds sayısında ($Re=8x10^4$) %22 sürtünme azalması elde etmişlerdir [35]. Taylor-Couette deney düzeneğini kullanarak yapılan farklı bir çalışmada ise %3'lük bir sürtünme azalması ölçülmüştür [180]. Bununla birlikte Van Buren ve Smits (2017) yapmış oldukları çalışmada, SHS pürüzlülüğünü sağlayan yükselti farklılıklarının sürtünme azalmasında önemli etken olduğunu göstermişlerdir. Araştırmada yüzey pürüzlülüğünde yükselti farklılığı ω^+ ifadesiyle tanımlanmaktadır. Çalışmada $\omega^+=35$ iken maksimum sürtünme azalması %35 olarak gözlemlenirken, $\omega^+=2$ değerinde ise sürtünme azalmasının meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Ayan ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmada, süperhidrofobik yüzeyin ve Leidenfrost etkinin yüzeyin sürtünme azaltması üzerindeki etkisini TC deney düzeneğini kullanarak incelemişlerdir. Araştırmacılar süperhidrofobik yüzeylerde özellikle daha yüksek Reynolds sayılarında yüzeyde önemli oranlarda sürtünme azalması meydana geldiğini rapor etmişlerdir [181]. Türbülans akış rejiminde süperhidrofobik yüzey kullanımı ile ortaya çıkan sürtünme azalması ile ilgili yapılmış olan deneysel çalışmalar Tablo 5.1'de özetlenmiştir.

Tablo 5. 1 Literatürde yapılmış bazı çalışmaların özeti.

Araştırmacılar	Deney düzeneği	Reynolds aralığı	% DR	Kaynak
Gogte ve ark. (2005)	Su tüneli	40 - 288	+3 - +18	[182]
Zhao ve ark. (2007)	Su tüneli	1700 - 3300	-5 - +9	[183]
Peguero ve Breuer (2009)	PIV	200	-50 - +40	[184]
Aljallis ve ark. (2013)	Çekme tankı	520 - 5170	-30 - +30	[169]
Bidkar ve ark. (2014)	Su tüneli	1000 - 5000	-13 - +30	[178]
Srinivasan ve ark. (2015)	Taylor-Couette	480 - 3810	0 - +22	[35]
Zhang ve ark. (2015)	PIV	329 - 467	+10 - +24	[185]
Rosenberg ve ark. (2016)	Taylor-Couette	6000 - 9000	+10*	[186]
Van Buren ve Smits (2017)	Taylor-Couette	6000 - 10000	+9*	[187]
Panchanathan ve ark. (2018)	Taylor-Couette	470000	+3*	[180]

*Maksimum sürtünme

5.1.1 Yüzey etkinliğinin ölçülmesi

Süperhidrofobik yüzeylerin sürtünme azalması, akış rejimleri ve kritik geçiş değerleri üzerine etkisini inceleyebilmek amacıyla basit ve güvenilir bir deney

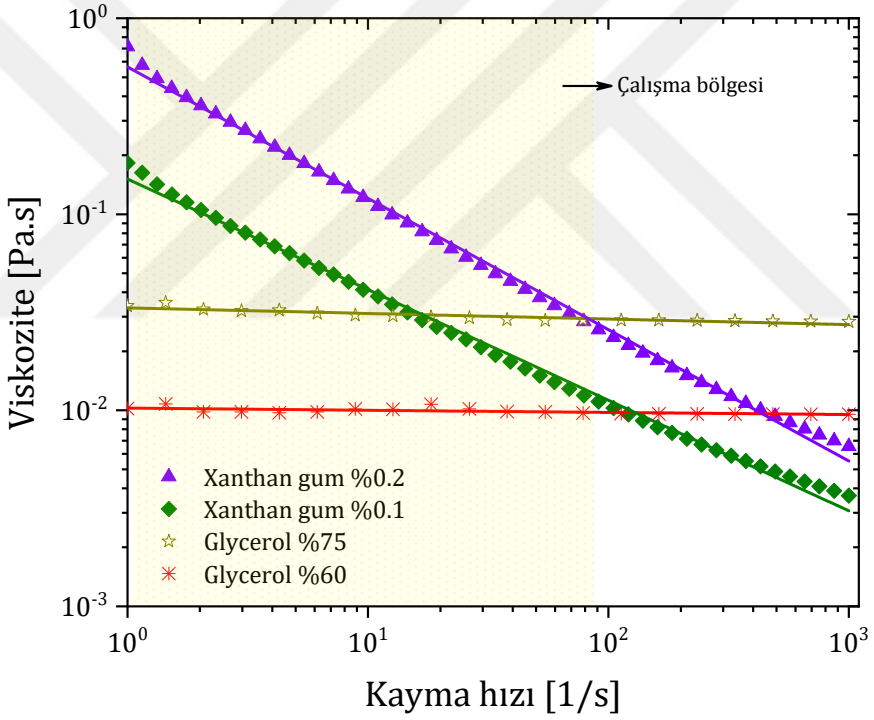
tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır. Boru akışları, su tünelleri, çekme tankları ve PIV gibi deney düzenekleri sürtünmeyi azalmasını incelemek amacıyla birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Bu çalışmada, test yüzeylerindeki sürtünme azalmasını, akış rejimlerini ve kritik rejim geçişlerini inceleyebilmek amacıyla bir Taylor-Couette deney düzeneği kullanılmıştır. Kullanılan deney düzeneği ile ilgili ayrıntılar Materyal ve Metot bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır. TC deney düzeneğinde iç silindir yüzeyi süperhidrofobik sprey ile kaplanarak etkileri incelenmiştir. Elde edilen süperhidrofobik ve normal yüzeyin özellikleri karşılaştırmalı olarak Materyal ve Metot bölümünde detaylı olarak tartışılmıştır.

Sınır tabakası plakanın ön kısmından arka kısmına doğru geliştiğinden dolayı, düz bir plaka, su tüneli veya çekme tankı üzerindeki lokal kesme gerilimi akış yönü boyunca değişmektedir. Oysaki TC deney düzeneğinde ölçülen cidar kesme gerilimi tüm deney yüzeyi boyunca homojen bir lokal kesme gerilimine karşılık gelmektedir. Aynı zamanda, türbülans da tamamen gelişmiş iç (boru) akışlarında düzgün cidar kayma gerilimi elde edebilmek için akış yönünde bir tahrik basınç gradyanı gereklidir. Bu nedenle genellikle test yüzeyi çok kısa tutulmaktadır. Böylece süperhidrofobik yüzey üzerinde sıvı basıncı yaklaşık olarak uniform olmaktadır. Akışkan basıncı, test yüzeyi uzunluğunun değişmesi; arayüz penetrasyon derecesi ve lokal kayma uzunluğu yüzey boyunca farklılıklar gösterecektir. Basınç gradyanı TC deney düzeneği içerisinde azimut yönünden ziyade radyal yönde ortaya çıkmaktadır. TC deney düzeneğini kullanmanın en önemli avantajlarından biriside basınç direnç bileşenlerinin tamamen yokluğudur. Yani sabit dönüş hızında, motor üzerinden aktarılan güç (kayıplarının minimize edilmesiyle) direkt olarak sıvının uygulamış olduğu kesme gerilmelerine bağlıdır.

Çalışmalarda farklı Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanlar kullanılarak, süperhidrofobik yüzeyin bu akışkanların TC deney düzeneğindeki akış yapıları ve kritik rejim geçişleri incelenmiştir. Aynı zamanda silindirler arasındaki boşlukta meydana gelen akış yapıları karakterize edilerek, normal yüzey sonucunda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

5.2 Sonuçlar

Hidrofobik yüzeyin etkisini inceleyebilmek amacıyla, Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanlar kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan xanthan ve gliserin çözeltilerine ait reolojik özellikler Şekil 5.5'te verilmiştir. Kullanılan akışkanların akışkanın durum gösterge (shear-thinning indeks - *n*) ve kıvam göstergesi (consistency index - *k*) değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen deneylerde dış silindir sabit iken iç silindir hızı kademeli olarak artırılarak, ortaya çıkan akış yapıları, kritik geçiş değerleri ve akış yapılarının karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntülerin işlenmesi ve sonuçların sunulması ilgili detaylar Materyal ve Metot kısmında detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 5. 5 Deneysel çalışmalar kullanılan akışkanlara ait reolojik özellikler

Tablo 5. 2 Akışkanlara ait reolojik parametrelerin değerleri.

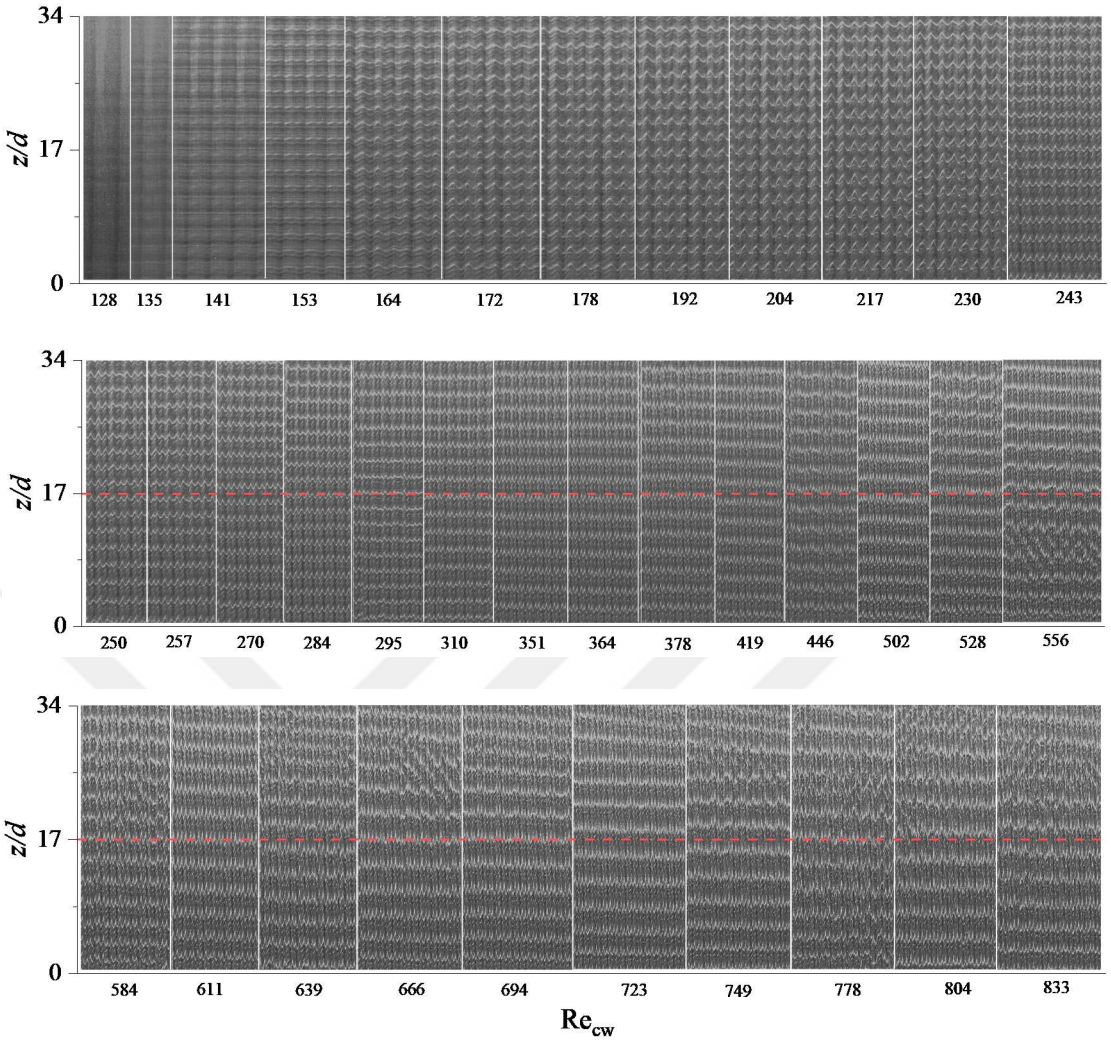
Çözelti	***n***	***κ***	***μ* [Pa.s]**
Gliserin %75	-	-	0,028
Xanthan %0,1	0,436	0,151	-
Xanthan %0,2	0,33	0,564	-

5.2.1 Newtonyen akışkan kullanımı durumu

Taylor-Couette akışında Newtonyen özelliklere sahip akışkanın kullanılması sonucunda ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri Bölüm 3'te detaylı olarak incelenmiştir. Bölüm 3'te kullanılan deney düzeneğinde iç silindir yüzeyi akrilik bir boya ile kaplanmış, bu bölümde ise iç silindir yüzeyi süperhidrofobik sprey kullanılarak kaplanmıştır. Süperhidrofobik iç silindir yüzeyi ile normal yüzey, temas açısı ve yüzey pürüzlülük değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Aynı zamanda her iki yüzeyin özellikleri ışık mikroskobu kullanılarak karşılaştırılmıştır. Işık mikroskobu altında elde edilen görüntüler incelendiğinde akrilik boya ile kaplanmış normal yüzeyin pürüzsüz olduğu gözlemlenirken, hidrofobik yüzey üzerinde rastgele dağılmış oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Süperhidrofobik yüzey üzerinde oluşan bu oyuklar içerisine hapsolan hava sayesinde ve kullanılan akışkan yüzey geriliminin etkisiyle katı yüzey ile temas azalmakta, bununla birlikte ortaya çıkan sürtünme kuvveti azalmaktadır. Hidrofobik yüzey etkisi ilk olarak Newtonyen (gliserin) akışkanı kullanılarak elde edilen sonuçlar normal yüzey ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda ortaya çıkan akış yapıları kritik geçiş değerleri uzay-zaman grafikleri kullanılarak Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Dış silindir sabit iken iç silindir hızının artırılmaya başlanması ile silindirler arasındaki boşluk ilk olarak CCF akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cw}=135 değerine ulaştığında silindirin tamamında TVF akışının ortaya çıktığı görülmüştür. Silindir içerisinde toplam 42 adet vorteks yapısının oluştuğu gözlemlenirken, bu vorteks yapılarının eşlenik vorteks genişliklerinin 2,07d (19,67mm) olduğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte Şekil 5.6'dan da açıkça görüldüğü gibi ilk olarak iç akışta bozunmalar meydana gelmeye başlanmış ve Re_{cw}=164 değerine ulaştığında ise akışın tüm silindir içerisinde WVF akışına dönüştüğü gözlemlenmiştir. WVF akış yapısına geçiş esnasında eşlenik vorteks genişliklerinde ve oluşan toplam vorteks sayısında değişim gözlemlenmemiştir. İç silindir hızının artırılarak Re_{cw}=250 değerine ulaştığında oluşan toplam dalgalı vorteks sayısının azalarak 40'a düştüğü gözlemlenmiştir. Eşlenik vorteks genişlikleri ise silindrin üst kısımlarında değişmezken silindirin alt kısımlarına 2,47d (23,48mm) ile 2,74d (26,02mm) aralığına kadar artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak iç silindir hızının artmasıyla birlikte oluşan dalgalı vorteks

yapılarının dalga genişlikleri ve genliklerinin azaldığı gözlemlenirken, birim zamanda ortaya çıkan dalga sayısının arttığı görülmüştür. Re_{cw}=164 değerinde iken oluşan dalgaların ortalama boyları 2,04*d* iken dalga genliklerinin 1,32*d* olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda iç silindirin bir turunda silindir içerisinde 1,46 vorteks oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cw}=250 değerine ulaştığında, oluşan dalgaların ortalama boyları 1,12*d* 'ye dalga genliklerinin 0,85*d*'ye azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, iç silindirin bir turunda oluşan dalga sayısının artarak 1,57'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızı daha da artırıldığında (Re_{cw}=270) oluşan dalgaların ortalama boyları 0,81*d* 'ye, dalga genliğinin ise 0,71d 'ye düştüğü görülmüştür. İç silindirin bir turunda oluşan dalga sayısı ise 1,45'ye ulaşmıştır. Aynı zamanda Şekil 5.6'da oluşan vorteks yapıları incelendiğinde iç silindir hızının artışıyla birlikte silindirin alt kısmına doğru ilerlediği bununla birlikte oluşan toplam vorteks sayısının azaldığı gözlemlenmiştir.

Newtonyen akışkanının kullanımı sonucunda, hidrofobik yüzeyden elde edilen sonuçlar ile normal yüzeyden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında TVF ve WVF akış yapılarında ortaya çıkan vorteks yapılarının karakterizasyonunun birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ortaya çıkan akış yapılarında herhangi bir farklılığın olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak kritik rejim geçişlerinde hesaplanan Reynolds sayısının arttığı görülmüştür. Örneğin akış yapısı normal yüzey şartlarında CCF akış yapısında TVF akış yapısına geçiş değeri Re_{cw}=125 iken, yüzeyin süperhidrofobik kaplanması sonucunda bu değerin artarak Re_{cw}=135 değerine yükseldiği görülmüştür. Aynı şekilde TVF akış yapısından WVF akış yapısına geçiş değeri normal yüzey koşullarında Re_{cw}=153 iken, süperhidrofobik kaplanması sonucunda Re_{cw}=164'e arttığı bulunmuştur.

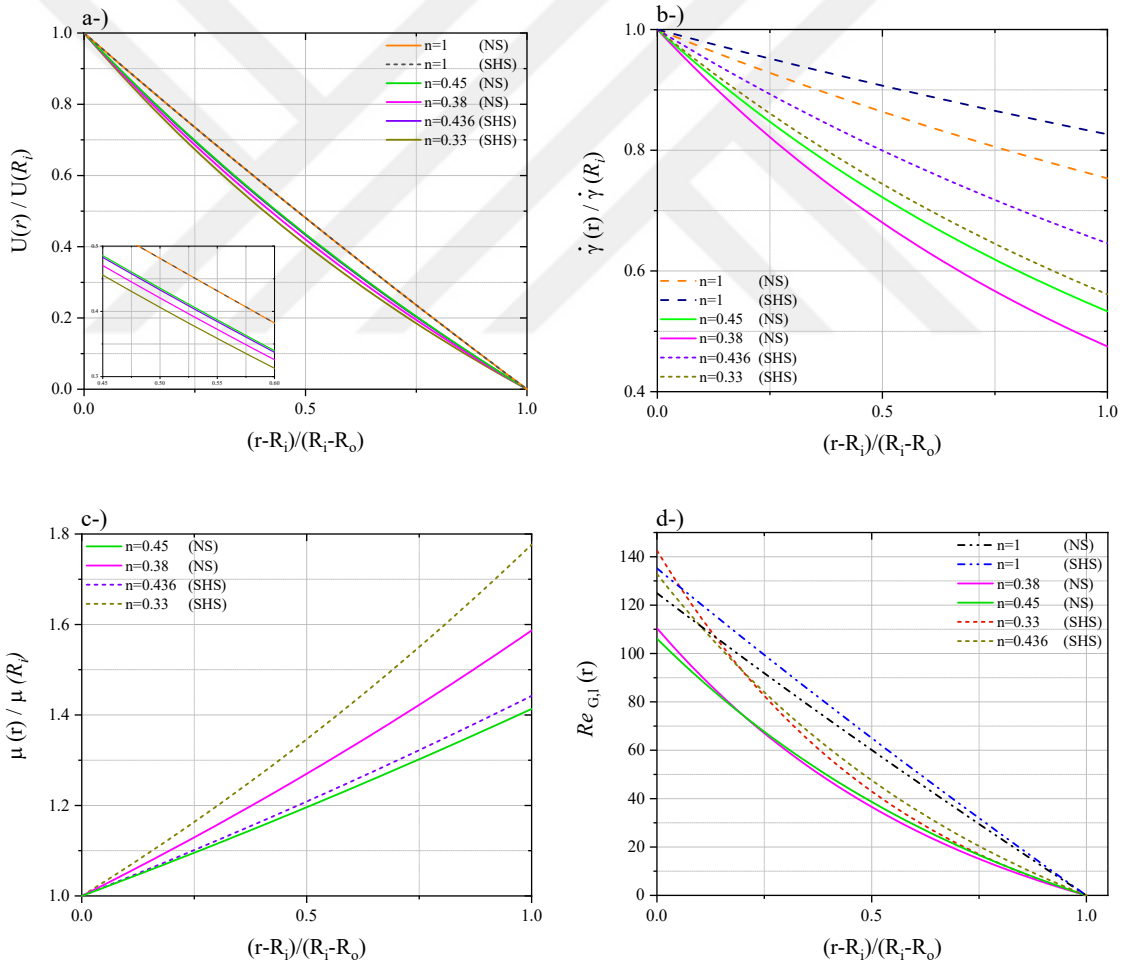


Şekil 5. 6 Farklı Re_{cw} değerlerinde %75 gliserin çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

5.2.2 Newtonyen olmayan (shear-thinning) akışkan kullanımı durumu

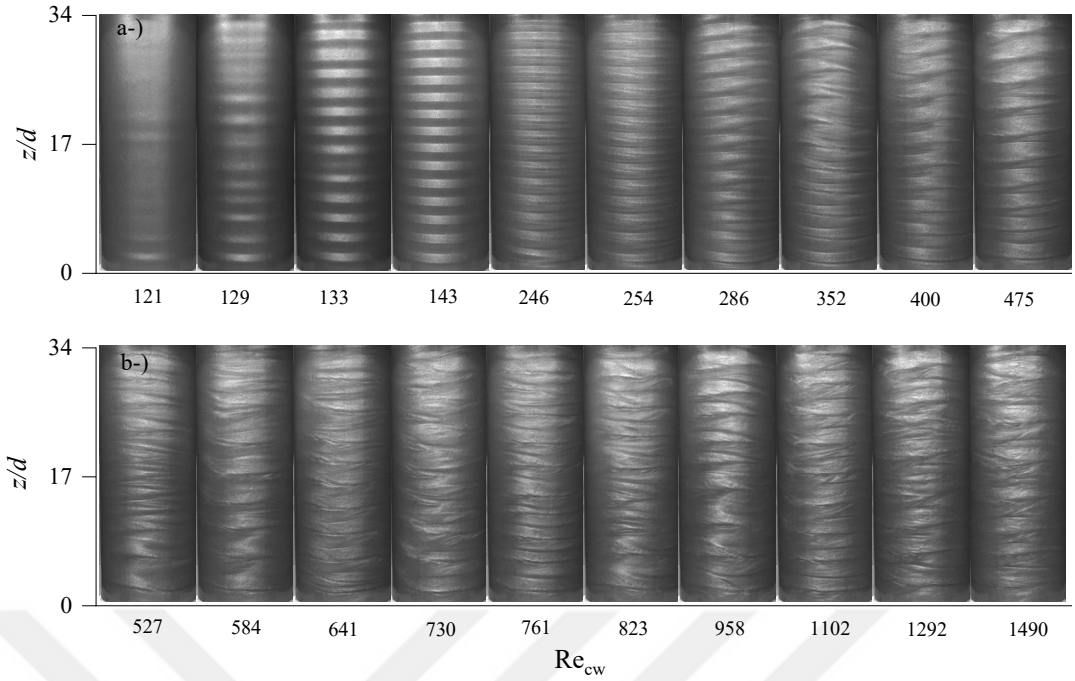
Bu bölümde Newtonyen olmayan akışkan xanthan çözeltisinin iki farklı konsantrasyonu kullanılmıştır. Kullanılan akışkanların özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Newtonyen olmayan akışkanların TC deney düzeneği içerisinde, süperhidrofobik yüzeyin ortaya çıkan akış yapılarına, kritik rejim geçiş değerlerine ve vorteks yapılarının karakterizasyonu üzerine etkileri incelenecektir. Şekil 5.7'de hız, kayma-hızı ve viskozite profilleri boyutsuz olarak normal yüzey koşulları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı zamanda lokal Reynolds sayısının (*ReG,l(r)*) silindirler arasındaki boşluktaki değişimi Şekil 5.7d'de gösterilmiştir. Bu Reynolds sayısı akış içerisindeki, silindirler arasındaki boşlukta iç silindirin dönme hızından

kaynaklanan santrifüj kuvvetler ile akışkanın viskoz kuvvetlerinin arasındaki lokal düzensizlikleri tanımlamaktadır. Şekil 5.7d incelendiğinde normal yüzey sonucunda ortaya çıkan Reynolds profilinin, süperhidrofobik yüzey kullanımı sonucunda da benzer profillere sahip olduğu görülmektedir. Ancak süperhidrofobik yüzey koşullarında ortaya çıkan Reynolds değerinin normal yüzeye göre arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde shear-thinning özellikler ile önemli ölçüde değişime uğradığı görülmektedir (Şekil 5.7c). İç silindir yüzeyinin süperhidrofobik kaplanması sonucunda, iç silindir yüzeyi ile dış silindir arasındaki oluşan kayma-hızı farkının azaldığı görülmektedir. Ortaya çıkan değişim TC akışı içerisinde oluşan vorteks yapılarının davranışını, oluşan akış yapılarını ve kritik geçiş değerlerini etkilemektedir.



Şekil 5. 7 Hız, kayma-hızı viskozite ve lokal Reynolds profilinin boyutsuz olarak değişimi.

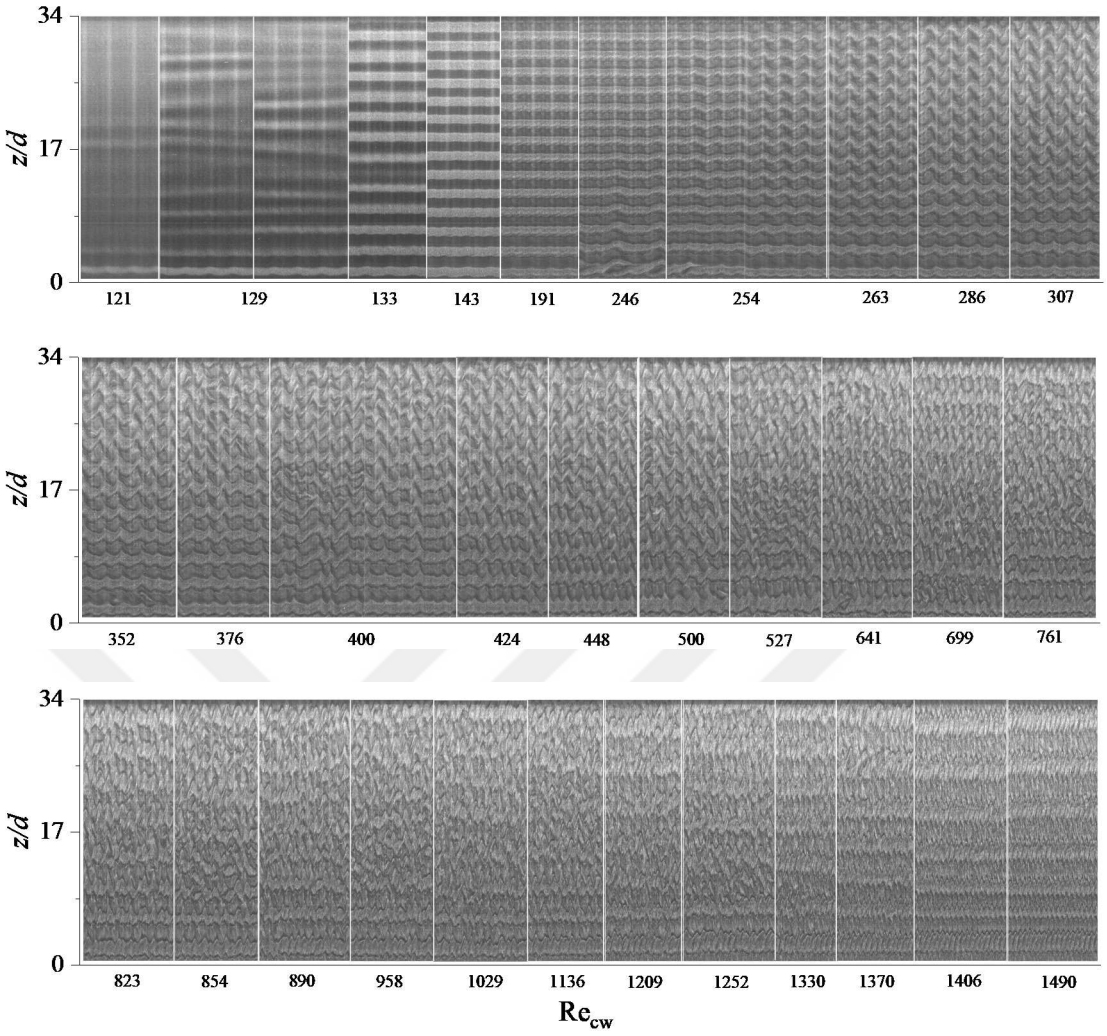
TC deney düzeneği içerisinde xanthan çözeltisi kullanımı sonucunda dış silindir sabit iken iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte ortaya çıkan akış yapıları kritik geçiş değerleri incelenmiştir. İlk olarak %0,2 xanthan çözeltisinin kullanımı sonucunda silindirler arasında oluşturmuş olduğu akış desenlerinin, Re_{cw} 121 ile 1490 arasındaki farklı değerlerinde gözlemlenen geçiş rejimlerinin anlık görüntülerini Şekil 5.8'de gösterilmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte CCF akış yapısından sonra silindir içerisinde Ekman vorteks yapılarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Re_{cw}=121). Şekil 5.8 incelendiğinde, silindirin alt, üst ve merkezinde vorteks yapılarının gelişmeye başladığı görülmektedir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte, silindir içerisinde oluşan vorteks yapısının artmaya başladığı ve Re_{cw}=143 değerine ulaştığında silindirin tamamında TVF akışının ortaya çıktığı görülmüştür. Normal yüzey koşullarında, CCF akış yapısından TVF akış yapısına geçiş sürecinde silindir içerisinde gözlemlenen akış yapılarının, süperhidrofobik iç silindir yüzey koşullarında da benzer şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Süperhidrofobik yüzey koşullarında oluşan akış yapıları Newtonyen akışkanı kullanımı sonucunda oluşan akış yapısı sürecinde oluşmuştur. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte TVF vorteks yapısının dalgalı akış yapısına (WVF) Re_{cw}=254 değerinde ulaştığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmaya devam edilmesiyle birlikte dalgalı vorteks yapısının hareketi dönme yönünde eşlenik vorteks içerisinde bir bombeli eliptik vorteks yapısının genişleyip daralarak yok olduğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmaya devam edilmesiyle birlikte Re_{cw}=1490 değerine ulaşana kadar, oluşan bu dalgalı akış yapısının devam ettiği ancak eşlenik vorteks yapıları arasında çıkan akış yapılarının akışı bozduğu gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapılarının anlık görüntüler ile karakterize edilmeye çalışılması yanlış sonuçların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bundan dolayı ortaya çıkan akış yapıları Şekil 5.9'da verilen uzay-zaman grafikleri kullanılarak daha ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 5. 8 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri.

TC deney düzeneğinde iç silindir yüzeyinin süperhidrofobik kaplanması sonucunda %0,2 xanthan çözeltisinin oluşan akış yapılarının karakterizasyonu ve kritik geçiş değerleri üzerine etkisi zamana bağlı olarak çözümlenmiştir. Elde edilen uzay-zaman grafikleri Şekil 5.9'da detaylı olarak verilmiştir. Şekil 5.9'dan da açıkça görüldüğü gibi zamana bağlı olarak çözümlemelerde ortaya çıkan akış yapılarının anlık görüntülere göre akış yapılarını tanımlamada ve karakterizasyonunda daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Dış silindir sabit iken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda akış içerisindeki ilk bozunmaların Ekman vorteks yapılarının oluşması sonucunda ortaya çıktığı belirgin bir şekilde görülmektedir (Re_{cw}=121). İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte silindir içerisinde oluşmaya başlayan vorteks yapılarının ilerleyerek silindir boyunca geliştiği ve Re_{cw}=143 değerine ulaştığında TVF yapısının silindirler arasındaki boşluğu tamamen kapladığı görülmektedir. Silindir içerisinde toplam 36 adet vorteks yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte silindir içerisinde oluşan eşlenik vorteks yapılarının genişliklerinin silindirin üst kısmından alt kısmına doğru 2,50d ile 2,89d arasında değişim gösterdiği bulunmuştur. Re_{cw}=191 değerine ulaştığında ise toplam vorteks sayısı değişmediği görülmüştür. Aynı zamanda eşlenik vorteks yapılarının

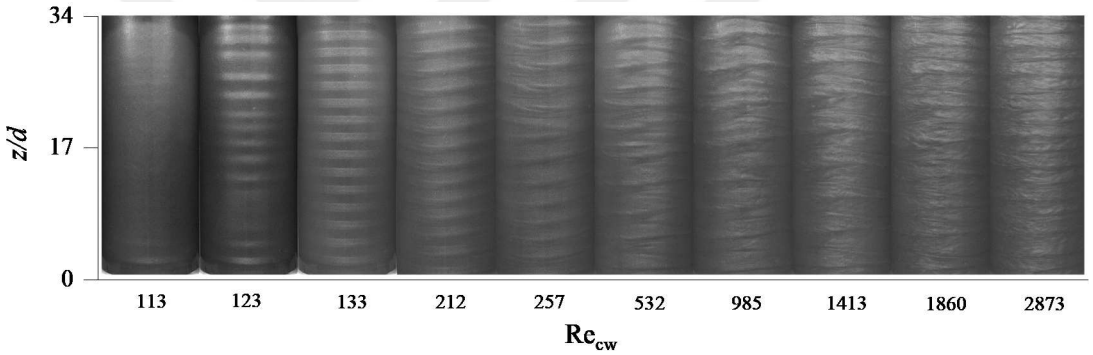
genişlikleri silindir boyunca 2,42d ile 2,50d aralığında değişirken silindir alt kısmında eşlenik vorteks yapılarının genişliğinin 3,13d'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Re_{cw}=246 değerinde silindirin alt kısmında oluşan vorteks yapılarında dalgalanmaların meydana geldiği ve iç silindir hızının artırılarak Re_{cw}=254 değerine ulaştığında silindirin tamamında dalgalı akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu şartlar altında oluşan toplam vorteks sayısının ve eşlenik vorteks genişliklerinin değişmediği gözlemlenmiştir. Re_{cw}=254 değerinde iken, oluşan dalgaların ortalama boyları 3,26d iken dalga genliklerinin silindirin üst kısmında 2,30d silindirin alt kısmında ise azalarak 1,37d değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Silindirin alt kısmında düz bir TVF yapısının sabit kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, iç silindirin bir turunda oluşan dalga sayısının 0,57 olduğu gözlemlenmiştir. Re_{cw}=286 değerinde iken, oluşan dalgaların ortalama boyları azalarak 2,99d olduğu ve dalga genliklerinin ise silindirin üst kısmında 2,42d silindirin alt kısmına doğru azalarak 1,72d değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Silindirin en alt kısmında ise dalgalı akış yapısının oluşmadığı görülmektedir. İç silindirin bir turunda oluşan dalga sayısının 0,54 olduğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte dalgalı vorteks yapılarının Re_{cw}=376 değerinde silindirin üst kısımlarında bozunmaya başladığı görülmüştür ve iç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte vorteks yapılarının birbirleriyle kesişerek düzensiz bir akış yapısının oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Re_{cw}=1209 değerinde silindirin üst kısmında gözlemlenen akış yapısının, geniş boşluk koşullarında gözlemlenen FVF akış yapısına benzediği görülmektedir. Bu akış yapısı silindirin üst kısmından başlayarak tüm silindir boyunca yayıldığı görülmüştür. Normal yüzey kullanımı sonucunda elde edilen akış yapılarının geçişinin süperhidrofobik yüzey sonuçları ile karşılaştırıldığında benzer rejim geçişlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca normal yüzey koşullarında TVF oluşumu için gerekli Re_{cw}=110,5 iken süperhidrofobik yüzey koşullarında Re_{cw} değerinin artarak 143 değerine ulaştığı görülmüştür.



Şekil 5. 9 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,2 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

TC deney düzeneği içerisinde dış silindir sabit iken iç silindir hızının artırılmasıyla %0,1 xanthan çözeltisinin kullanımı sonucunda silindirler arasında ortaya çıkan akış yapılarının, Re_{cw} 113 ile 2873 arasındaki farklı değerlerinde gözlemlenen geçiş rejimlerinin anlık görüntülerini Şekil 5.10'da gösterilmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte CCF akış yapısından sonra silindirin alt kısımlarında Ekman vorteks halkalarının gelişmeye başladığı gözlemlenmiştir (Re_{cw}=113). Şekil 5.10 incelendiğinde, bu vorteks yapıları ilerleyerek silindirin tamamını kapladığı görülmüştür. Re_{cw}=133 değerine ulaştığında silindirin tamamında TVF akış yapısının silindirinin tamamında belirgin bir şekilde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. CCF akış yapısı ile TVF akış yapıları arasında meydana gelen akış yapılarının normal yüzey koşulları ile farklılık gösterdiği görülmüştür. Normal yüzey kullanımı

sonucunda elde edilen akış yapıları süperhidrofobik yüzey sonuçları ile karşılaştırıldığında, normal yüzey koşullarında ortaya çıkan RIB ve SVF akış yapılarının süperhidrofobik yüzey koşullarında oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış dizisinin Newtonyen akışkanı kullanımı sonucunda ortaya çıkan akış yapısı dizine benzer olduğu görülmektedir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte TVF vorteks yapısının dalgalı akış yapısına (WVF) Re_{cw}=212 değerinde ulaştığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmaya devam edilmesiyle birlikte dalgalı vorteks halkalarında bozunmaların meydana geldiği ve iki vorteks halka yapısı kesişerek düzensiz bir akış yapısının oluştuğu görülmüştür. İç silindir hızının artırılmaya devam edilmesiyle birlikte Re_{cw}=2873 değerine ulaşana kadar, oluşan bu dalgalı akış yapısının devam ettiği ancak eşlenik vorteks yapıları arasında çıkan akış yapılarının akışı bozduğu gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapıları uzay-zaman grafikleri kullanılarak daha ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır (Şekil 5.11).

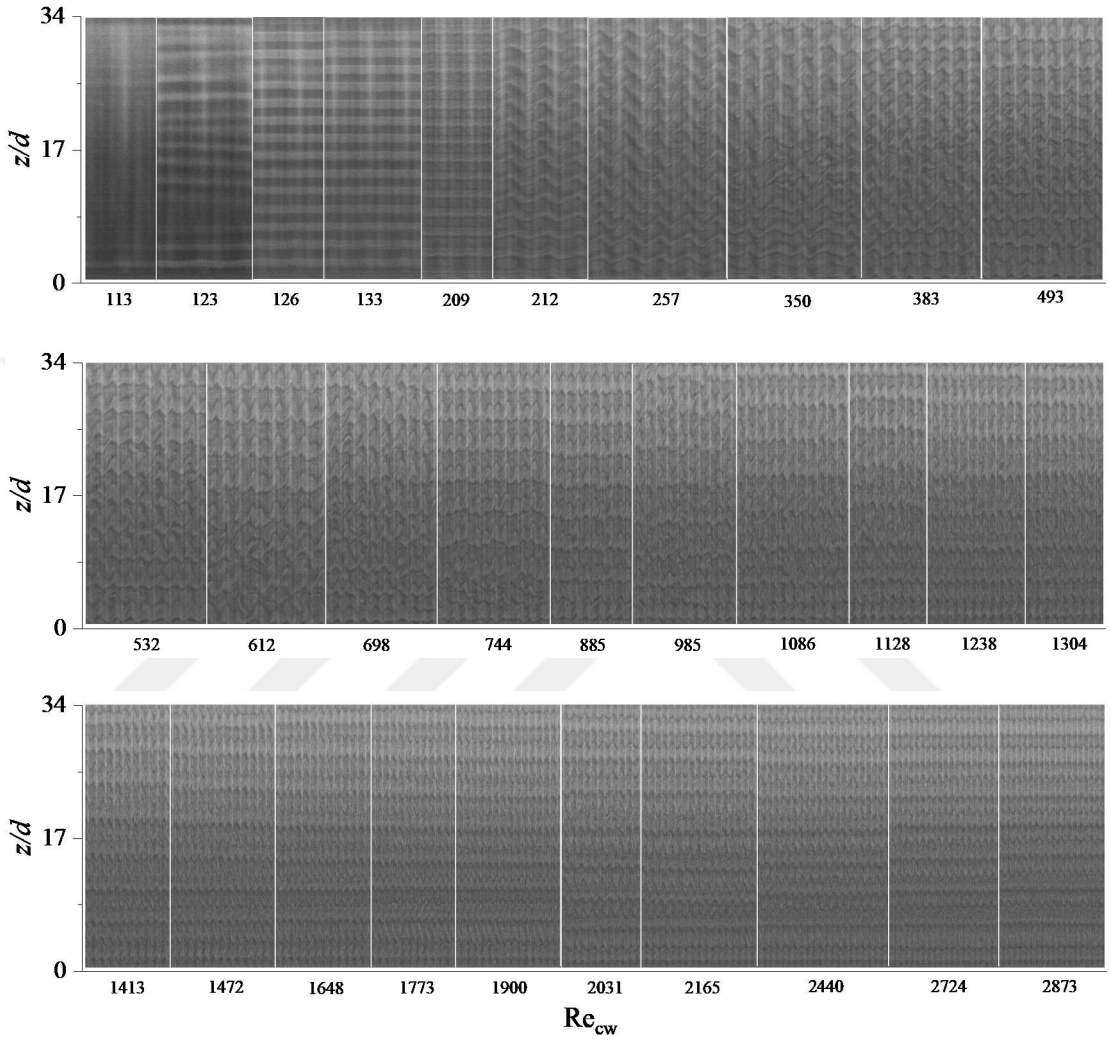


Şekil 5. 10 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri.

TC deney düzeneğinde iç silindir yüzeyinin süperhidrofobik kaplanması sonucunda %0,1 xanthan çözeltisinin kullanımı sonucunda oluşan akış yapılarının karakterizasyonu ve kritik geçiş değerleri üzerine etkisi zamana bağlı olarak çözümlenmiştir. Elde edilen akış yapıları dizisi ve kritik rejim geçiş değerleri uzay-zaman grafikleri ile Şekil 5.11'de detaylı olarak verilmiştir. Dış silindir sabit iken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda akış içerisindeki ilk bozunmaların bir önceki bölümde akış yapısına benzer şekilde oluştuğu ve ilk olarak Ekman vorteks yapılarının silindir içerisinde oluştuğu gözlemlenmiştir (Re_{cw}=113). İç silindir hızının artmaya devam etmesiyle birlikte, Re_{cw}=133 değerine ulaştığında

TVF yapısının silindirler arasındaki boşluğu tamamen kapladığı görülmektedir. Silindir içerisinde toplam vorteks sayısının %0,1 xanthan çözeltisi kullanımı durumunda da değişmediği ve toplam 36 adet vorteks yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte silindir içerisinde oluşan eşlenik vorteks yapılarının genişliklerinin silindirin içerisinde 2,64*d* iken silindirin alt kısmındaki eşlenik vorteks yapısının genişliğinin 2,73*d* olduğu bulunmuştur. Re_{cw}=209 değerine ulaştığında eşlenik vorteks yapıları arasında akış çizgilerinin oluşmaya başladığı belirgin bir şekilde görülmektedir, bununla birlikte toplam vorteks sayısının değişmediği görülmüştür. İç silindir hızı artırılarak Re_{cw}=212 değerine ulaştığında, TVF akış yapısının dalgalı akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. Oluşan bu dalgaların ortalama boyları 5,86d iken dalga genliklerinin 1,70*d* ile 2,27*d* değeri arasında değişim gösterdiği gözlemlenirken silindirin alt kısmında bir önceki bölümde gözlemlendiği gibi düz bir TVF yapısının değişmeyerek stabil kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, iç silindirin bir turunda oluşan dalga sayısının 0,76 olduğu gözlemlenmiştir. Re_{cw}=257 değerinde iken, oluşan dalgaların ortalama boyları azalarak 4,43*d* – 6,39*d* aralığında değiştiği ve dalga genliklerinin ise silindirin üst kısmından silindirin alt kısmına doğru azalarak 2,55*d* – 1,96*d* aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Silindirin en alt kısmında stabil TVF akış yapısında da dalgalanmaların meydana geldiği ve boy ve genliğinin sırasıyla 4,60*d* ve 1,62*d* olduğu bulunmuştur. İç silindirin bir turunda oluşan dalga sayısının 0,80 olduğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte dalgalı vorteks yapılarının Re_{cw}=350 – 450 aralığı incelendiğinde silindir merkezinde akış yapılarında bozunmaların meydana geldiği görülmüştür. Ancak iç silindir hızının artmaya devam etmesiyle birlikte, düzenli vorteks yapılarının tekrar oluştuğu ve bununla birlikte artan Reynolds sayısı ile birlikte dalga boylarının azalarak dalga genliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda silindir içerisinde oluşan vorteks yapılarının silindirin alt kısmına doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Dalgalı vorteks yapısında meydana gelen dalga boyunun azalması ve genlik değerinin artması FVF akış yapısının oluşumunun kaynağı olabileceği görülmektedir. Bu akış yapısının silindir içerisinde homojen bir şekilde yayıldığı görülmektedir. Normal yüzey kullanımı sonucunda elde edilen akış yapılarının geçişinin süperhidrofobik yüzey sonuçları ile karşılaştırıldığında rejim geçişlerinde farklılıkların olduğu

gözlemlenmiştir. En önemli farklılığın CCF akış yapısından TVF akış yapısına geçişte ortaya çıkan RIB ve SVF akış yapılarıdır. Aynı zamanda normal yüzey koşullarında TVF oluşumu için gerekli Re_{cw}=106 iken süperhidrofobik yüzey koşullarında Re_{cw} değerinin artarak 133 değerine ulaştığı görülmüştür.



Şekil 5. 11 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 xanthan çözeltisi için uzay-zaman grafiği.

6
Herschel–Bulkley akışkanının incelenmesi

Bu bölümde, belirli bir akma gerilmesine sahip Newtonyen olmayan carbopol akışkanının normal yüzey koşullarında ve süperhidrofobik yüzey koşullarında ortaya çıkan akış yapıları, kritik rejim geçiş değerleri ve akış yapılarının karakterizasyonu incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda dış silindir sabit iken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması belirlenen parametrelerin değişimi incelenmiştir.

6.1 Giriş

Akma gerilmesine sahip akışkanlar, üzerlerine uygulanan kuvvet sonucunda akma gerilimi, τ_y, olarak adlandırılan kritik değeri aşmadığı sürece katı benzeri bir davranış sergileyen yüksek moleküler ağırlıklı geniş bir akışkan sınıfını temsil etmektedir. Belirli bir akma gerilmesine (yield stress) sahip akışkanlar, petrol, beton veya gıda endüstrileri gibi birçok endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve aynı zamanda günlük yaşantımızda kullandığımız reçel, diş macunu ve çeşitli kozmetik ürünleri gibi akışkanlar akma gerilmesine sahip akışkanlar olarak sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda bu akışkanların kullanımı ile önemli araştırmalar yapılmıştır [188], [189]. Bununla birlikte, akma gerilmesine sahip akışkanlarda meydana gelen kayma ile ilgili çok az çalışma bulunmaktadır [190]–[192]. Akışkan yapı ara yüzünde meydana gelen kayma, akış esnasında ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerinin azaltabilmektedir [193]. Akma gerilmesine sahip akışkanların davranışını inceleyebilmek amacıyla, carbopol çözeltisi reolojik ve hidrodinamik deneysel çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Carbopol çözeltisi aynı zamanda akış içerisinde stabil, ucuz, şeffaf ve zararsız olması en önemli tercih sebepleri arasında yer almaktadır [194]. Newtonyen olmayan viskoplastik akışkanlar yıllar boyunca birçok farklı alanda kullanım alanı bulmaktadır. Bu akışkanlara, 1922'de Bingham [195], [196], 1926'da Herschel-Bulkley [197] ve 1959 Casson [198] yapmış oldukları çalışmalarla dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada

kullanılan carbopol akışkanını tanımlamada Herschel-Bulkley denklemi kullanılmıştır (Denklem 6.1).

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \tag{6. 1}$$

Viskoplastik akışkan kullanılarak çeşitli boru geometrilerinde deneysel ve teorik olarak birkaç çalışma bulunmaktadır [188], [199], [200]. Bununla birlikte silindirler arasındaki boşlukta bingham ve power-law akışkanlarının laminer akış davranışları Fredrickson ve Bird (1958) tarafından analiz edilmiştir [201]. Literatür çalışmaları incelendiğinde Bingham akışkanını ve viscoelastik akışkanlarını kullanarak Taylor-Couette deney düzeneği içerisindeki davranışını inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır [202]–[205]. Eş merkezli iki silindir arasındaki boşluğa belirli bir akma gerilmesine sahip akışkan ile doldurulup iç silindir hızı yavaşça artırıldığında iç silindir duvarındaki gerilim sıvının akma gerilimini aştığında iç silindir yakınındaki akışkan dönmeye başlar. Ancak dış silindir civarındaki akışkan deforme olmaz ve sabit hareketsiz kalır. Bu durum bir akma gerilmesine sahip akışkanının temel Couette akış modelini tarif etmektedir [189]. İç silindir hızının daha da arttırılması sonucunda akışkan bölge dışa doğru büyür ve sonunda tüm boşluğu kaplamaktadır.

Önceki bölümlerde detaylı olarak anlatıldığı gibi, Taylor-Couette deney düzeneği kullanılarak Newtonyen akışkan davranışını inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır [6], [122], [206], [207]. Bununla birlikte Newtonyen olmayan akışkanların Taylor vorteks yapılarının oluşumunu inceleyen çalışmalarda bulunmaktadır [115], [117], [205], [208]–[211]. Nouar ve ark. (1987) ve Naimi ve ark. (1990) yapmış oldukları çalışmada karboksimetil selüloz (CMC) ve carbopol akışkanlarını kullanarak iç silindirin dönme hızına bağlı olarak TC deney düzeneği içerisinde ortaya çıkan Taylor vorteks yapılarının oluşumunu incelemişlerdir [212], [213]. Her iki çalışmada da, sadece eksenel simetrik Taylor girdapları oluşumu gözlemlenmiş, Naimi ve ark. (1990) ise akma gerilmesinin akışı stabilize ettiğini rapor etmişlerdir. Gerçekleştirilen her iki çalışmada, oluşan akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerlerinin incelenmesinin aksine ısı transferi üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmalara ilave olarak viskoplastik akışların TC deney düzeneği içerisindeki hidrodinamik kararsızlıklar birçok çalışmanın odak noktası olmuştur [214]–[216].

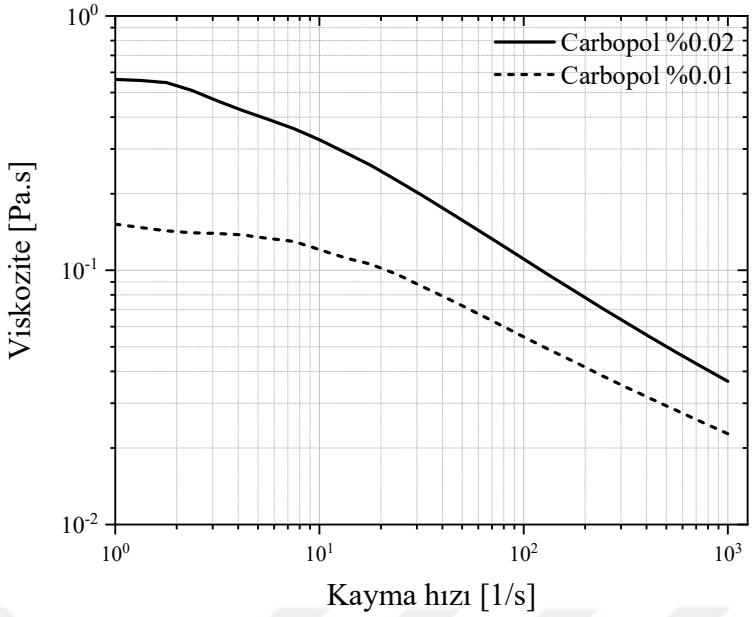
Bu çalışmalar arasında viskoplastik akışkanların hidrodinamik kararsızlıkları inceleyen ilk çalışma özelliği taşıması ve ilginç bir hikâyeye sahip olması nedeniyle Graebel (1964) tarafından yapılan çalışma önemli bir yere sahiptir. Gerçekleştirilen bu çalışma İsrail'de gerçekleştirilen bir sempozyumda bildiri olarak sunulmuş ve uzun bir süre bu çalışmanın farkındalığı oluşmamıştır. Çalışmada lineer stabilite analizi kullanılarak eksenel simetrik akış bozuklukları incelenmiştir. Araştırmacılar çalışma sonunda Bingham akışkanının akma gerilmesine sahip olan bir akışkandan daha kararlı olduğunu belirtmişlerdir. Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanların kullanımı sonucunda TC deney düzeneğinde ortaya çıkan ikincil akışlar daha sonraki yıllarda yapılan birçok çalışma ile ele alınmıştır. Dean (1927, 1928) yapmış olduğu çalışmalarda belirli bir eğriselliğe sahip boru içerisinde merkezkaç kuvvetlerinin oluşumu sonucunda dış silindir cidarında ortaya çıkan basınç gradyanları eşlenik TVF akışının oluşmasına neden olur. Bu durumda, merkezkaç kuvveti sıvı kütlesinin iç silindirden dış silindire doğru hareket etmesine neden olur. Kütlenin korunumu yasası gereğince sıvı kütlesinin yer değişimi meydana gelirken bunun sonucunda da bir çift ikincil vorteks akışının oluşmasına neden olurlar. Yapılan bu çalışmalarda akışkanın iç (atalet) kuvvetlerinin ve yüzeyin eğriselliğinin Newtonyen akışkanlarda ikincil akışın oluşmasına neden olan en önemli parametreler olduğu vurgulanmıştır [217], [218]. Viskoelastik akışkanlarda ise ikincil akışlar boru geometrisinin sahip olduğu eğriselliğin atalet sınırlarında bile ortaya çıktığı görülmüştür. Fan ve ark. (2001) yapmış oldukları çalışmada viskoelastik akışkanlarda ortaya çıkan basınç gradyanının eksenel normal gerilmeler ile dengelendiğini, ancak hareketsiz olan dış çepere doğru yaklaşırken eksenel normal gerilmelerin artması ve bu bölgede atalet kuvvetlerinin azalması ile ikincil akışların oluşumuna katkı sağlayacağı belirtilmiştir [219]. Aynı zamanda akışkanın akma gerilmesinin silindirler arasındaki boşluk büyüklüğüne ve silindirlerin birbirine göre dönme koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan akış yapıları üzerinde stabilize veya destabilize etkisinin bulunduğu yapılan farklı çalışmalarda vurgulanmıştır[107], [202]. Bununla birlikte önceki bölümde de açıklandığı gibi akışkanın shear-thinning özelliğinin TC akışında ortaya çıkan akış yapılarını silindirler arasındaki boşluk oranına ve akışkanın shear-thinning derecesine göre stabilize ve destabilize ettiği yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Bu

çalışmalar arasında Escudier ve ark. (1995) yapmış oldukları çalışmada geniş boşluk kullanımı sonucunda akışkanın shear-thinning özelliğinin dairesel Couette akışı yapısı üzerinde stabilize bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur [105]. Alibenyahia ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada deneysel veriler ile lineer stabilite teorisi sonucunda elde edilen veriler arasındaki uyuşmazlığın, Reynolds (veya Taylor) sayısının hesaplanmasında kullanılan referans viskozitenin tanımının belirsizliği en önemli etken olarak görülmektedir. Bununla birlikte, Reynolds sayısı hesabında iç duvar viskozitesine göre tanımlandığında, shear-thinning özelliğinin tüm çalışmalarda dairesel Couette akışını (boşluk boyutundan bağımsız olarak) stabilize ettiğini göstermişlerdir [108].

Literatür çalışmaları incelendiğinde akma gerilmesi özelliğine sahip birçok çalışma Bingham akışkanı olarak incelenmiş ve çalışmaların çoğunluğunu lineer stabilite analizi kullanılarak akış yapıları üzerine odaklanılmıştır. Deneysel olarak akışkanın akma gerilmesinin akış yapıları ve kritik rejim geçişlerini inceleyen çalışmalara rastlanılmamıştır. Bundan dolayı çalışmamızın bu bölümünde farklı konsantrasyonlara sahip carbopol akışkanı kullanılarak ortaya çıkan akış yapıları, kritik rejim geçiş değerleri ve akış yapılarının karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

6.2 Sonuçlar

Deneysel çalışmalarda kullanılan iki farklı akma gerilmesi özelliklerine sahip carbopol çözeltisi kullanılmış olup, bu akışkanlara ait reolojik Şekil 6.1'de verilmiştir. Aynı zamanda kullanılan akışkanların akışkanın durum gösterge (shear-thinning indeks - n) ve kıvam göstergesi (consistency index - k) değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen deneylerde dış silindir sabit iken iç silindir hızı kademeli olarak artırılarak, ortaya çıkan akış yapıları, kritik geçiş değerleri ve akış yapılarının karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda normal yüzey kullanılarak elde edilen deneyler hidrofobik yüzey kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen görüntülerin işlenmesi ve sonuçların sunulması ilgili detaylar Materyal ve Metot kısmında detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 6. 1 Deneysel çalışmalarda kullanılan carbopol akışkanının reolojik özellikleri.

Tablo 6. 1 Carbopol akışkanına ait reolojik parametrelerin değerleri.

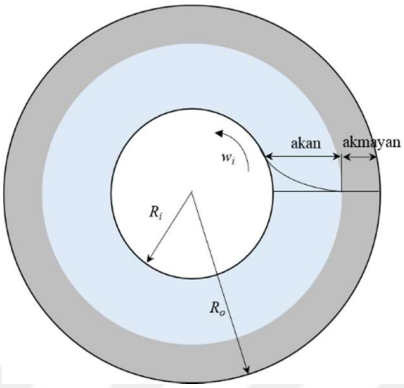
Çözelti	n	κ	τ_y **[Pa]**
Carbopol %0,005*	0,81	0,027	<0,01
Carbopol %0,01	0,63	0,301	0,02
Carbopol %0,02	0,52	0,97	0,04

*Süperhidrofobik yüzey koşullarında kullanılan akışkan.

6.2.1 Normal yüzey durumu

Taylor-Couette akışında önceki bölümlerde Newtonyen ve shear-thinning özelliklere sahip akışkanın kullanılması sonucunda ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde belirli bir akma gerilmesi özelliğine sahip Newtonyen olmayan carbopol akışkanı kullanılarak ortaya çıkan akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda ortaya çıkan akış yapıları karakterize edilerek bir önceki bölümde elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan carbopol akışkanı, iç silindir hızının belirli bir değere ulaşmasına rağmen dış silindir civarında hareketsiz durağan bir akışkan tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Silindir içerisinde oluşan akan (yield) ve akmayan (unyielded) bölgelerin şematik görüntüsü Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Silindir içerisinde oluşan bu durağan akışkan

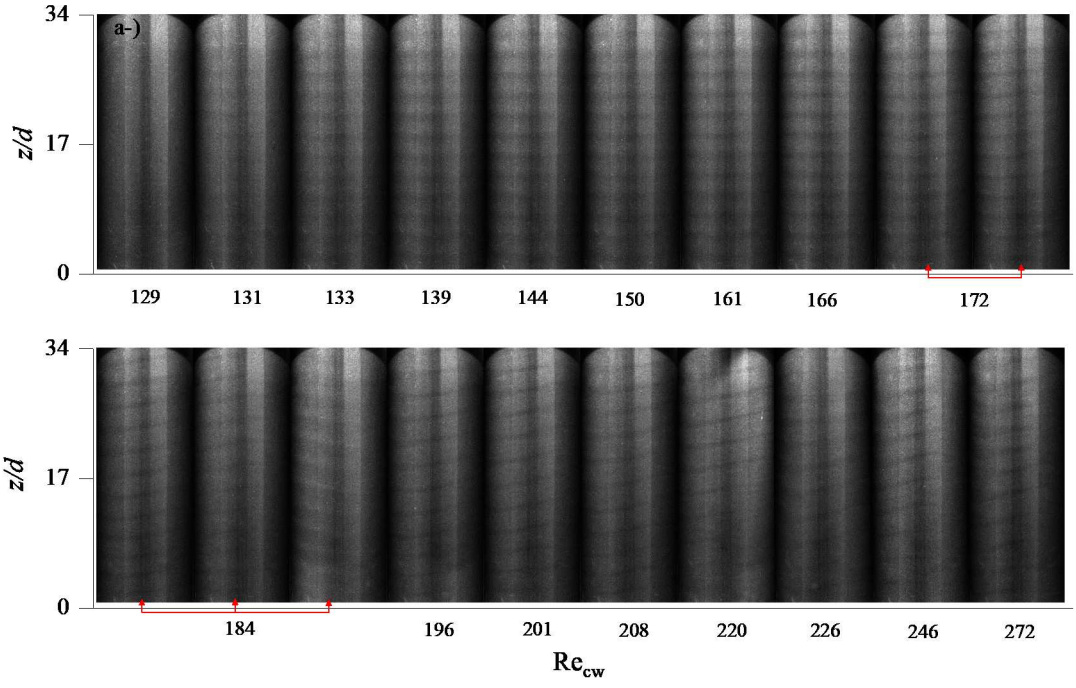
tabakası, silindir içerisinde oluşan vorteks yapılarının gözlemlenebilmesini önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda silindir içerisindeki vorteks yapılarının bir önceki bölümlerde oluşan belirgin vorteks yapılarının aksine belirgin olmayan bir şekilde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu bölümde akış yapılarının görünebilirliğinin net olmaması nedeniyle oluşan vorteks yapıları anlık görüntülerle sunulmuştur.



Şekil 6. 2 TC deney düzeneği içerisindeki akan ve akmayan bölgelerin şematik gösterimi.

Çalışmanın bu bölümünde %0,01 carbopol çözeltisinin TC deney düzeneğinde dış silindir sabit iken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda silindir içerisinde ortaya çıkan akış yapılarının anlık görüntüleri ve kritik rejim geçişi değerleri Şekil 6.3'te verilmiştir. İç silindir hızının artırılmaya başlanması ile silindirler arasındaki boşlukta ilk olarak CCF akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cw}=131 değerine ulaştığında silindir içerisinde Taylor vorteks halkalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cw}=133 değerinde ise silindirin tamamında TVF akışının ortaya çıktığı görülmüştür. Aynı zamanda silindir içerisinde 34 adet toplam vorteks yapısı oluşurken bu vorteks yapılarının ortalama eşlenik vorteks genişliğinin 2,74d (26,07mm) olduğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte Şekil 6.3'ten de açıkça görüldüğü gibi Re_{cw}=172 değerine ulaştığında akışın tüm silindir içerisinde WVF akışına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Oluşan toplam dalgalı vorteks sayısının azalarak 32'e düştüğü gözlemlenmiştir. Eşlenik vorteks genişlikleri ise silindir içerisinde ortalama 2,81d (26,73mm) olduğu gözlemlenmiştir. Silindir içerisinde oluşan bu dalgalı akış yapısının çalışma sınırları içerisinde değişmeden stabil kaldığı gözlemlenmiştir.

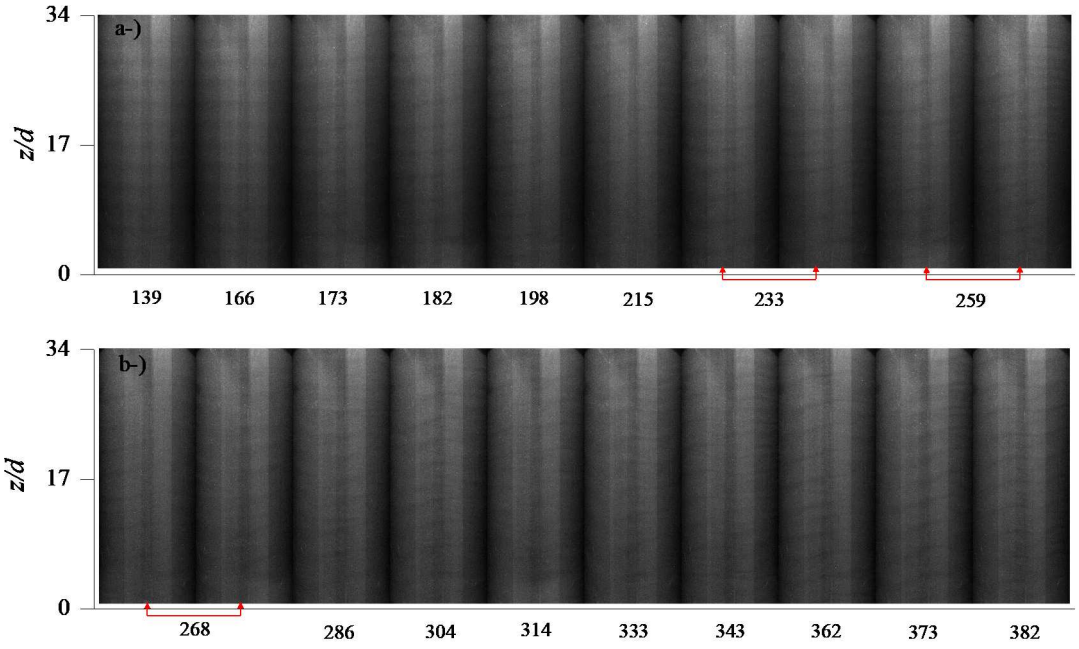
Bununla birlikte Re_{cw}=201 değerinde oluşan akış yapıları incelendiğinde oluşan vorteks yapılarının genişliğinin silindir boyunca homojen bir şekilde dağılmadığı gözlemlenmiştir. Silindirin üst kısımlarında eşlenik vorteks genişliği 2,81*d* (26,73mm) iken silindirin alt kısımlarına doğru ilerken vorteks genişliğinin 3,29*d* (31,28mm)'e kadar ulaştığı ancak silindirin alt kısımlarında tekrardan azalarak 2,68*d* (25,42mm) değerine düştüğü gözlemlenmiştir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte, silindir içerisinde oluşan akış yapısının MWVF yapısına benzediği görülmüştür. Ancak oluşan bu yapının anlık fotoğraf görüntüleri ile net bir şekilde yakalanamamıştır. Re_{cw}=272 değerinde oluşan akış yapıları anlık olarak karakterize edildiğinde silindirin üst kısmından alt kısmına doğru eşlenik vorteks genişliklerinin 2,68*d* (25,42mm), 1,85*d* (17,59mm), 2,13*d* (20,21mm) ve 3,02*d* (28,67mm) şeklinde düzensiz bir şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda farklı anlarda incelenen görüntülerde eşlenik vorteks genişliğinde farklılıkların oluştuğu gözlemlenmiştir.

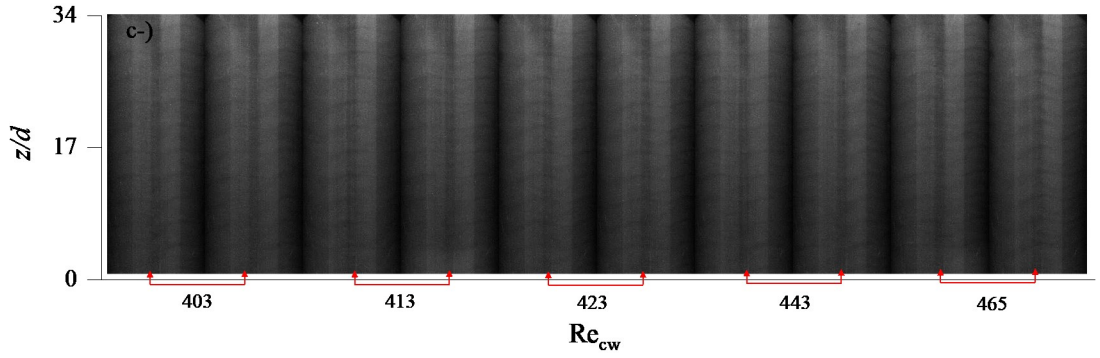


Şekil 6. 3 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,01 carbopol çözeltisine ait anlık görüntüler.

TC deney düzeneği içerisinde %0,02 carbopol çözeltisinin kullanımı sonucunda dış silindir sabit iken iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte ortaya çıkan akış yapılarının anlık görüntüleri ve kritik geçiş değerleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte CCF akış yapısından sonra silindir içerisinde TVF

vorteks halkalarının Re_{cw}=139 değerinde silindirin tamamında ortaya çıktığı görülmüştür. Aynı zamanda silindir içerisinde oluşan toplam vorteks sayısının değişmediğini (34 adet), ve bu vorteks yapılarının ortalama eşlenik vorteks genişliğinin 3,02d (28,70mm) ile 2,61d (24,77mm) aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılmasıyla Re_{cw}=173 değerinde TVF vorteks yapısının WVF akış yapısına ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu bölümde oluşan toplam vorteks sayısının azalarak 32 olduğunu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte oluşan vorteks sayısının eşlenik vorteks genişliğinin 2,67d ile 2,95d aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte eşlenik vorteks yapılarının genişliğinin birbirleri arasındaki farkın önemli ölçüde farklılıklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cw}=233 değerinde eşlenik vorteks yapılarının genişliğinin 2,47d ile 3,64d arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir ve silindirin alt kısımlarına doğru vorteks genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Oluşan bu düzensiz dalgalı akış yapısının iç silindir hızının artışıyla birlikte devam ettiği ve düzensiz dalgalı akış yapısı Re_{cw}=382 değerinde MWVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Oluşan toplam vorteks sayısı azalırken 3,02d ile 3,50d arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.4'te gösterilen kırmızı çizgiler aynı periyotta farklı anlardaki akış yapılarını göstermektedir.





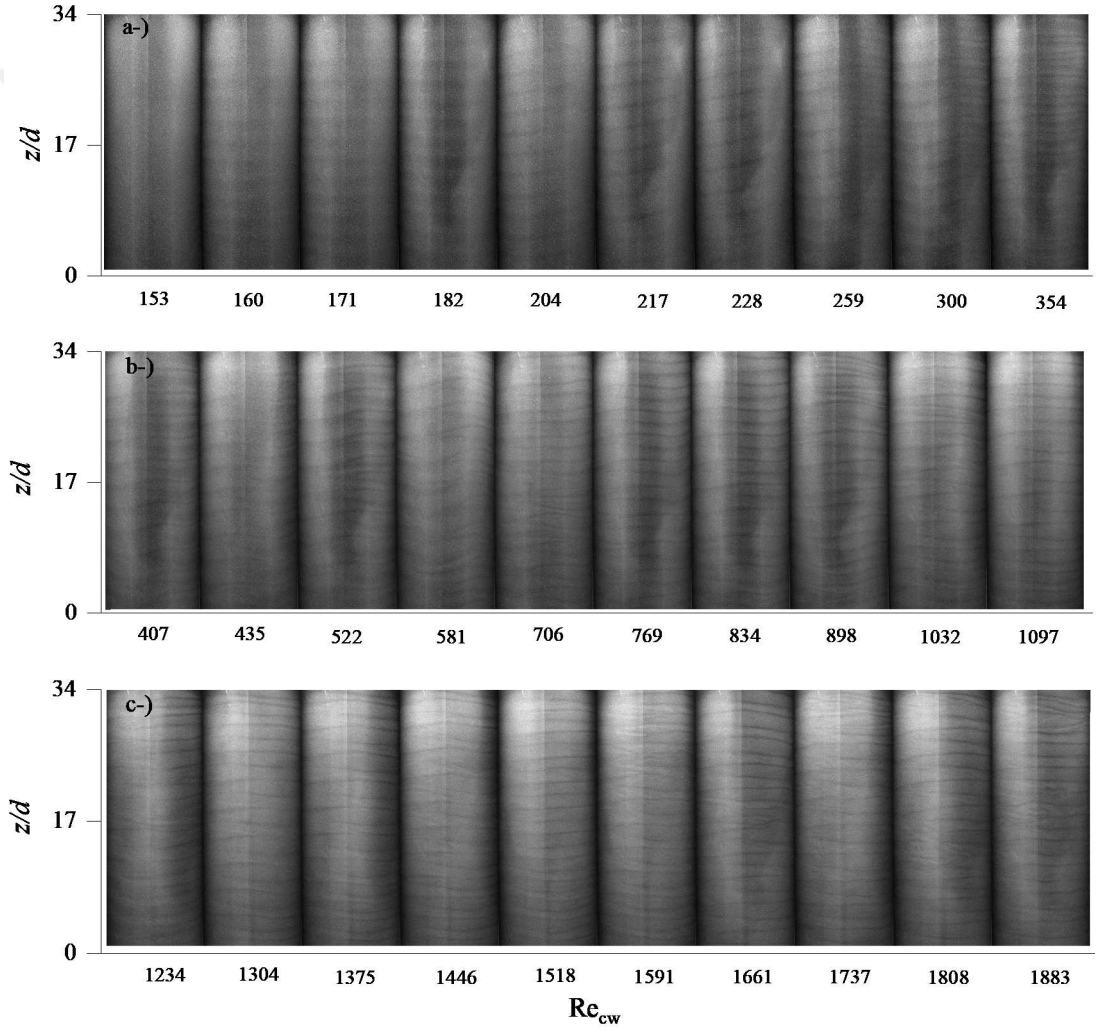
Şekil 6. 4 Farklı Re_{cw} değerlerinde %0,02 carbopol çözeltisine ait anlık görüntüler.

6.2.2 Süperhidrofobik yüzey durumu

TC deney düzeneğinde iç silindir yüzeyinin süperhidrofobik kaplanması sonucunda %0,01'den daha düşük konsatrasyona sahip carbopol çözeltisinin kullanımı sonucunda oluşan akış yapılarının karakterizasyonu ve kritik geçiş değerleri üzerine etkisi anlık görüntüler kullanılarak çözümlenmiştir. İç silindirin dönme hızına bağlı olarak farklı Re_{cw} değerlerinde elde edilen anlık görüntüler Şekil 6.5'te detaylı olarak verilmiştir. Dış silindir sabit iken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda akış içerisindeki ilk olarak CCF akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir (Re_{cw}=153). İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte Re_{cw}=160 silindir içerisinde TVF halkalarının silindiri boyunca yayıldığını ve Re_{cw}=171 değerine ulaştığında ise TVF yapısının silindirler arasındaki boşluğu tamamen kapladığı görülmektedir. Silindir içerisinde toplam 40 adet vorteks yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte silindir içerisinde oluşan eşlenik vorteks yapılarının genişliklerinin 2,06*d* (19,56mm) ile 2,26*d* (21,51mm) aralığında arasında değişim gösterdiği bulunmuştur. Akışkan özelliğinin (n=0,81) Newtonyen akışkana (n=1) yaklaşması ile akış yapı karakteristiğinin Newtonyen akışkan ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Re_{cw}=182 değerine ulaştığında TVF akış yapısının silindir boyunca WVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu şartlar altında oluşan toplam vorteks sayısının azalarak 36 olduğu ve eşlenik vorteks genişliklerinin 2,54*d* (24,12mm) ile 2,88*d* (27,37mm) aralığına kadar artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Re_{cw}=254 değerindeki akış yapıları incelendiğinde eşlenik vorteks genişliklerinin 2,40*d* (22,80mm) ile 2,82*d* (26,72mm) aralığında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Vorteks yapılarının genişlikleri arasında

meydana gelen bu farklılığın vorteks yapılarının düzensiz hareketinden kaynaklanmaktadır. İç silindir hızının devam etmesiyle birlikte eşlenik vorteks yapıları arasındaki dış jet akış çizgilerinin de belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

Normal yüzeyi kullanımı sonucunda CCF akış yapısı TVF akış yapısına kritik geçiş değerleri n=0,63 için Re_{cw}=133, n=0,52 için Re_{cw}=139 iken süper hidrofobik yüzey koşullarında n=0,81 için Re_{cw}=171 değerine çıktığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte TVF akış yapısından WVF akış yapısına geçiş değerleri sırasıyla, 172, 173 ve 182 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. 5 Farklı Re_{cw} değerlerinde <%0,01 carbopol çözeltisi için akış yapılarının anlık görüntüleri.

7
Nümerik Simülasyon

Bu bölümde, deney çalışmalarda kullanılan Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanların normal yüzey koşullarında iç silindir hareketli dış silindir sabit iken hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak ortaya çıkan akış yapıları incelenmiştir. Gerçekleştirilen tüm simülasyonlar deneysel çalışmadaki mevcut veriler kullanılarak modellenmiştir. Sayısal hesaplamalardan elde edilen akış yapıları deneysel ölçümlerle karşılaştırılmışlardır. HAD analizi sonuçlarından elde edilen akış yapıları ve r-z eksenindeki hız vektörleri bu bölümde sunulmuştur.

7.1 Giriş

Eşmerkezli birbirinden bağımsız olarak dönen silindirler arasındaki boşluktaki akış davranışının anlaşılması birçok mühendislik uygulamalarında hem bilimsel hem de pratik olarak önem kazanmıştır. Roket motorları ve çok yakıtlı yüksek/düşük bypasslı turbofan uçak motorlarının yatak muhafazası içindeki pompaların dönen millerinin yağlaması, hareketli silindir(ler) arasındaki akışa iyi bir örnek teşkil etmektedir. İç silindirin (şaft) hareketli olduğu ve dış silindirin (muylu yatağı) sabit olduğu turbo makinelerde yağlama verimliliği çok önemlidir. Düşük dönme hızlarında yağlayıcı yeterince viskozdur ve hızlar akışın laminer olduğu, yüksek şaft hızlarında ise laminer akış ilk olarak eksenel olarak uniform olmayan akış yapılarına daha sonra da simetrik olmayan akış yapılarına dönüşür [220]. Viskoz kuvvetlerin sıvının atalet kuvvetleri üzerindeki etkisinin azalması sonucunda ikincil akış yapıları ortaya çıkmaktadır.

Ortaya çıkan bu ikincil akış yapılarının davranışını anlamak için birçok deneysel çalışma ve sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, bir önceki bölümde de detaylı olarak anlatıldığı gibi ilk olarak 1888 ve 1890 yıllarında Mallock [221], [222] ve Couette [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmalara dayanmaktadır. Bununla birlikte akış içerisindeki ilk karasızlıklar Rayleigh tarafından gerçekleştirilen çalışmada viskoz olmayan akışlar için gerçekleştirilmiştir [135].

Çalışmada silindirlerin birbirlerine göre zıt yönlerde dönmesi sonucunda akışın kararsız hale geldiğini, aynı yönde dönme durumunda ise $\omega_o R_o^2$ değeri $\omega_i R_i^2$ değerinden büyük olduğu koşullarda hareketin kararlı olduğunu vurgulamışlardır. Daha sonraki yıllarda Taylor [96] teorik olarak Bessel Fourier serisi yaklaşımını kullanarak stabilite problemini analiz etmiş ve gerçekleştirmiş olduğu deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu göstermiştir. Ancak yapmış olduğu çalışmanın dar boşluklar için (R_i/R_o=0,94) geçerli olduğunu vurgulamıştır. Jeffreys (1928) yapmış olduğu çalışmada dar boşluklardaki Taylor-Couette akışı ile Rayliegh-Benard konveksiyonu arasındaki benzerliği ilişkilendirmeye çalışmıştır. Bunun için lineer stabilite analizi kullanmış ve daha sonraki yıllarda Chandrasekhar tarafından [223] Taylor numarası (Ta) olarak adlandırılan yeni boyutsuz bir sayının kullanılmasını sağlamıştır [224]. Silindirler arasında ilk akış rejimi geçişinin Couette akışından (CF) TVF akışına geçtiği Ta değeri kritik Taylor sayısı (TaCr) olarak tanımlanmıştır. Chandrasekhar (1958) yapmış olduğu çalışmada hem dar hem de geniş boşluklar için silindirlerin tüm dönme oranı aralığında kullanılabilecek genel bir çözüm elde etmiştir. Ortaya konulan bu çözüm Donnelly (1958) [225] tarafından 0,95 ve 0,5 çap oranları için tork ölçümleri yapılarak doğrulanmıştır. Bununla birlikte Roberts (1965) yapmış olduğu çalışmada geniş boşluk kulanmış ve dış silindir sabit iken kritik Taylor sayısının boşlukla değiştiğini ifade etmişlerdir (Denklem 7.1).

$$Ta_{cr} = 1589{,}2\eta^{-1{,}0964} \qquad (7.1)$$

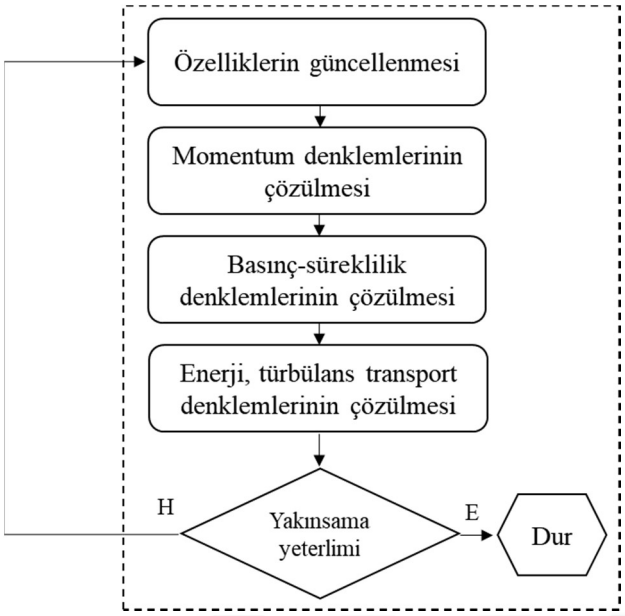
Bu ifade Taylor tarafından kullanılan deney düzeneğine (η = 0,94) uygulandığında, Ta_{cr} değerinin 1701 olduğu ve bu değerinde Taylor tarafından elde edilen değerle (1703) oldukça benzerlik gösterdiği görülmüştür. Eksenel akışın vorteks yapıları üzerindeki etkisi Chandrasekhar tarafından incelenmiş ve eksenel akış varlığın akış yapılarının kararsızlıklarının oluşum sürecini geciktirdiğini göstermişlerdir. Bunun içinde kritik Taylor sayısı Denklem 7.2 kullanılarak belirlenmektedir.

$$Ta_{cr} = 1708 + 27{,}15\mathrm{Re}_z^2 \qquad (7.2)$$

Gerçekleştirilen çalışmalara ilave olarak, Baier (1999) kritik hızın ötesinde, vorteks yapılarının büyüklüklerini, hızlarını ve davranışlarını belirleyebilmek amacıyla bir CFD simülasyonu kullanmıştır [226]. Haut ve ark. (2003) CFD simülasyonunu kullanarak silindirlerin birbirlerine göre aynı yöne dönme koşularında WVF ve türbülanslı TVF akış yapılarını incelemişlerdir. Türbülans akışını modellemek için ise standart k-ε modelini kullanmışlardır. Her iki akış rejim içerisinde simülasyonlardan elde edilen hız profilleri ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada maksimum açısal hız 5 rad/s ($Ta = 5{,}35 \times 10^5$) kullanılmıştır [77]. Vedantam ve ark. (2006) yapmış oldukları çalışmada Eş eksenli silindirlerden biri veya her ikisinin de döndüğü iki akışkan ile doldurulmuş Taylor-Couette deney düzeneğinde, radyal tabakalaşma oluşumu ve ortaya çıkan vorteks yapılarının analizi CFD simülasyonları kullanılarak incelenmiştir [227].

7.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları

Taylor-Couette akışını simülasyon çalışmalarını gerçekleştirebilmek için literatürde çeşitli ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programları kullanılmaktadır. Paket programları arasında FLUENT ve STAR CCM+ akış simülasyonu gerçekleştirmek amacıyla birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılan yazılımlar arasında yer almaktadır. Kullanılan her iki yazılım programı da Navier-Stokes (N-S) denklemlerini çözmektedir. Program arasında kullanmış olduğu çözücüler arasında farklılıklar bulunmaktadır. Bu çözücüler sırasıyla Segregated çözücü ve Coupled çözücülerdir ve bu çalışmada Segregated çözüm yöntemi tercih edilmiştir. Segregated çözüm yöntemine çözüm aşamalarının özeti Şekil 7.1'de gösterilmiştir [228]. Ayrıklaştırma işlemleri her program içinde sonlu hacimler metodu kullanılarak çözümlenmektedir.

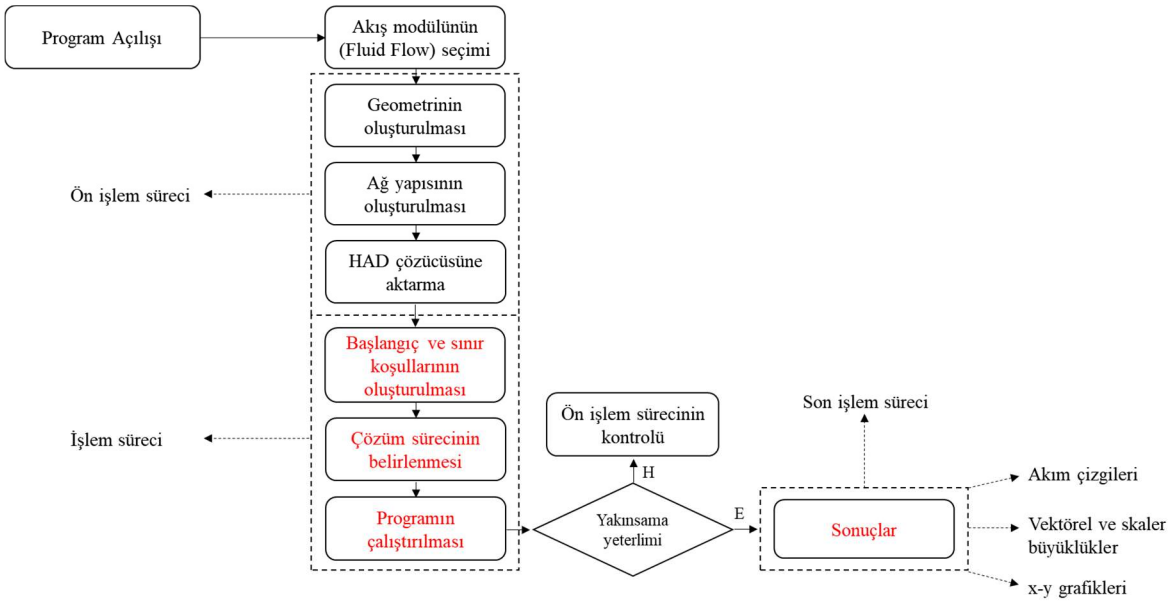


Şekil 7. 1 Segregated çözüm yöntem aşamalarının şematik gösterimi.

Ansys Fluent HAD çözücüsünün Taylor problemlerini doğru bir şekilde çözümlediği yapılan literatür çalışmalarında görülmektedir. Fasel ve Booz (1984) yapmış olduğu nümerik analiz sonucunda elde edilen hız alanlarının ve Sobolik ve ark. (1995) ve Parker ve Merati (1996) tarafından yapılan deneysel çalışmalarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir [229], [230].

Bu çalışmada HAD çözümleyicisi Ansys Fluent 19.0 programı tercih edilmiştir. Ansys Fluent 19.0 öncelikle Taylor-Couette akışı içerisindeki hız alanlarını ve akış yapılarını hesaplamak amacıyla kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen akışkan özellikleri ve kritik geçiş değerleri kullanılarak simülasyon işlemleri karşılaştırılmış ve boşluk içerisinde oluşan hız vektörleri ve akış çizgileri elde edilmiştir.

HAD çözümleyicisinde kullanılacak olan çalışma alanının oluşturulması ve buna uygun ağ yapısının geliştirilmesinde Gambit 2.4.6 programı tercih edilmiştir. Ansys Fluent programı Navier-Stokes ve enerjinin korunumu denklemlerini çözüm ağı olarak adlandırılan ağ elemanı için ayrıştırarak iteratif çözümler sunmaktadır. Ayrıştırılan her ağ elemanındaki değişkenler tüm çözüm uzayı içerisinde çözümlenerek TC deney düzeneği içerisindeki vorteks yapıları tespit edilmiş olacaktır. Ansys Fluent için genel çözüm sürecinin akış şeması Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 2 ANSYS CFX için genel çözüm sürecinin akış şeması.

Bu bölümde TC reaktörü içerisinde hesaplama ortamındaki akış, laminer sıkıştırılamaz ve kararlı bir akış olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte çalışma ortamında ısı transferi ihmal edildiğinden enerji denklemleri kullanılmamıştır. Aynı zamanda çözümlemenin başlangıcında, hesaplama alanı boyunca sıfır akış koşulları uygulanmış ve yerçekimi etkileri dikkate alınmamıştır. Hesaplama ortamında çözümlenen genel sıkıştırılamaz akışlar için yönetici denklemleri, Newton'un ikinci hareket yasası ve kütle korunumundan türetilen üç boyutlu süreklilik ve Navier-Stokes (N-S) denklemleridir. Silindirik koordinat sisteminde N-S denklemleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$r: \quad \frac{D}{Dt}U-\frac{V^2}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r}+\nu\left[\left(\nabla^2-\frac{1}{r^2}\right)U-\frac{2}{r^2}\frac{\partial V}{\partial \theta}\right] \tag{7.3}$$

$$\theta: \quad \frac{D}{Dt}V-\frac{UV}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial \theta}+\nu\left[\left(\nabla^2-\frac{1}{r^2}\right)V-\frac{2}{r^2}\frac{\partial U}{\partial \theta}\right] \tag{7.4}$$

$$z: \quad \frac{D}{Dt}W=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\nu\nabla^2 W \tag{7.5}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r}\left(rU\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}+\frac{\partial W}{\partial z}=0 \tag{7.6}$$

(D/Dt) sembolü bir diferansiyel operatörü temsil etmektedir ve açılımı aşağıdaki gibidir:

$$\frac{D}{Dt}=\frac{\partial}{\partial t}+U\frac{\partial}{\partial r}+\frac{V}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}+W\frac{\partial}{\partial z} \tag{7.7}$$

$\Delta = \nabla^2$ notasyonu ise silindirik koordinatlarda Laplacian operatörünü temsil etmektedir. Laplacian operatörü aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2} \tag{7.8}$$

Denklemde yer alan *U, V, W* hız bileşenlerini, *ν* kinematik viskozite değerini ve *ρ* sıvı yoğunluğunu ve *t* zamanı, *P* ise basınç terimini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial\left(u_i u_j\right)}{\partial x_j}=f_i-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{x_i}+\nu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j x_j} \tag{7.9}$$

$$\frac{\partial\left(\rho u_j\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho u_i u_j\right)}{\partial x_j}=\rho f_i-\frac{\partial p}{x_i}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{7.10}$$

Denklemde yer alan i ve j indisleri yönü tarif etmektedir. Çalışma alanında kullanılan N-S denklemlerine ilave olarak kullanılan süreklilik denklemi aşağıdaki şekildedir (Denklem 7.9).

$$\tau_{rr}=-\frac{2}{3}\mu\nabla\overline{V}+2\mu\frac{\partial U_r}{\partial r} \qquad \tau_{r\theta}=-\mu\left(r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{U_\theta}{r}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial U_r}{\partial \theta}\right)$$

$$\tau_{\theta\theta}=-\frac{2}{3}\mu\nabla\overline{V}+2\mu\left(\frac{1}{r}\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta}+\frac{U_r}{\partial r}\right), \qquad \tau_{rz}=-\mu\left(\frac{\partial U_z}{\partial r}+\frac{\partial U_r}{\partial z}\right) \tag{7.11}$$

$$\tau_{zz}=-\frac{2}{3}\mu\nabla\overline{V}+2\mu\frac{\partial U_z}{\partial z} \qquad \tau_{\theta z}=-\mu\left(\frac{\partial U_\theta}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial U_z}{\partial \theta}\right)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial}\left(rU\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}+\frac{\partial W}{\partial z}=0 \tag{7.12}$$

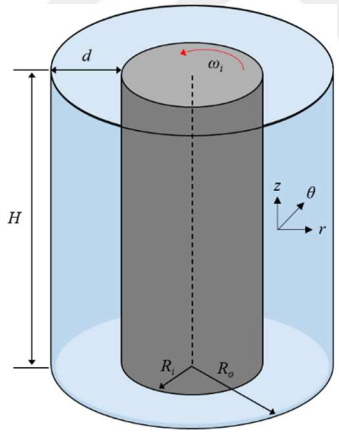
Viskoz gerilme tensörü momentumun üç bileşeninin korunumunu göstermektedir. Sol taraftaki ifade birim hacimdeki momentum değişimini, sağ taraftaki ise akışkana etkiyen viskoz ve basınç kuvvetlerini temsil etmektedir.

7.2.1 Problemin geometrisi ve sınır şartları

Taylor-Couette deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği, akış alanlarını benzeşim ile çözmek amacıyla Şekil 7.3'de gösterilen eş merkezli iç içe geçmiş silindir düzeneği kullanılmıştır. Dış silindir hareketsiz ve iç silindirin dönme hızının etkisi incelenmiştir. Deney düzeneğinin üst kısmındaki akışkan hava ile temas halinde serbest bir yüzey ile sınırlıdır. Deney düzeneğinin boyutlarına ait özellikler 0,868 boşluk oranı için Materyal ve Metot bölümünde verilen boyutlar kullanılmıştır. İç ve dış silindir yüzeyinde kaymama şartı (no-slip condition) kabulü yapılarak, sınır şartları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

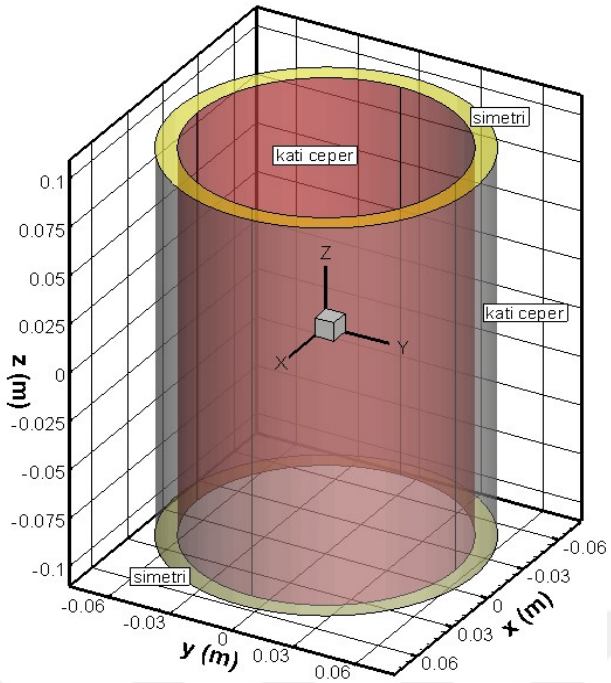
$$R = R_i \quad u_\theta = \omega_i R_i \quad u_r = u_z = 0$$

$$R = R_o \quad u_\theta = u_r = u_z = 0$$



Şekil 7. 3 Sayısal hesaplamada kullanılan çalışma alanının şematik gösterimi.

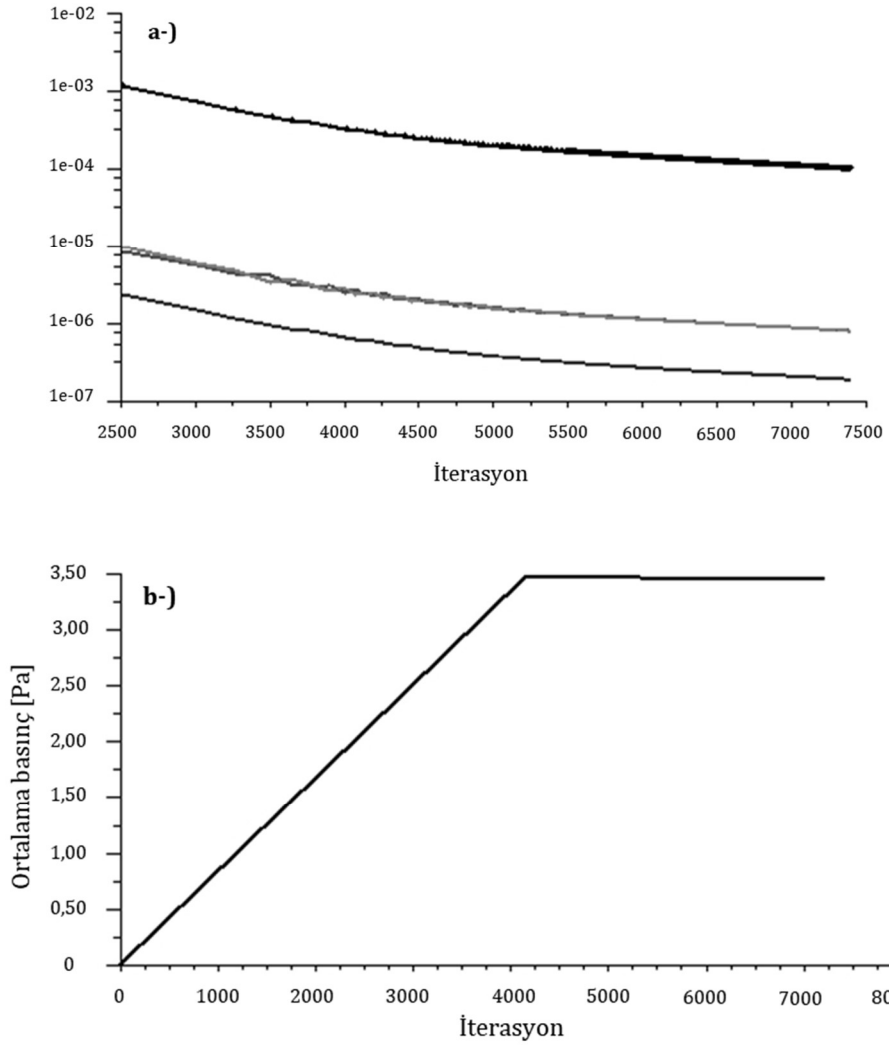
Hesaplama zamanını azaltmak için silindirlerin ve ikisi arasinda kalan hacmin üst ve alt tarafları için simetri şarti uygulanmıştır. İç ve dış silindirler katı çeper olarak tanımlanıp yüzeylerine kaymama-sartı sartı verilmiştir. Sekil 7.4'ten de görülebileceği üzere silindir yüksekliğinin tam ortasına koordinat ekseninin merkezi konumlandırılmıştır.



Şekil 7. 4 Çalışma bölgesi ve sınır şartları.

7.2.2 Yakınsama kriteri

Bir HAD çalışmasında elde edilen sonuçların doğru bir şekilde değerlendirebilmesi için yakınsama kriterinin seçimi önem arz eder. Bu çalışmada simülasyonun başarısını test edebilmek ve simülasyonun bir sonraki zaman adımına ilerletmek amacıyla hem kütle yakınsaması hem de momentum yakınsaması izlenmektedir. Hem kütle hem de momentum koruma artıkları (residual), tüm kontrol hacmi için yakınsama değerine ulaştığında simülasyon bir sonraki zaman adımına ilerlemektedir. Yakınsama işleminin sonuçlanması ise bir noktadaki incelenen değişken değerinin bir önceki noktadaki eski değerin farkının belirlenmiş olan yakınsama kriterine eşit olana kadar iterasyon işlemi devam edecektir. Gerçekleştirilen simülasyon işlemlerinde yakınsama kriteri olarak tolerans değeri tüm değişkenler için en az 10^{-3} olarak belirlenmiştir (Şekil 7.5). Ayrıca, x/d =0,93 değerindeki ortalama basınç değerinin değişimi de kontrol edilerek yakınsama kontrol edilmiştir (Sekil 7.5b).

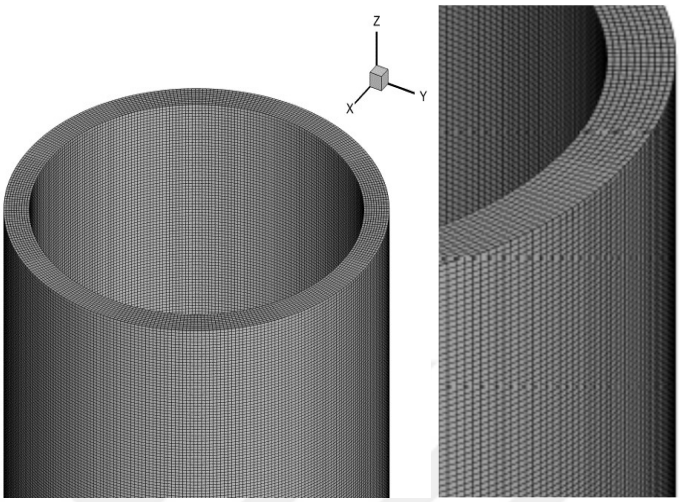


Şekil 7. 5 Simülasyon işlemi içerisinde gerçekleşen bir yakınsama örneği.

7.2.3 Ağ yapısının seçimi

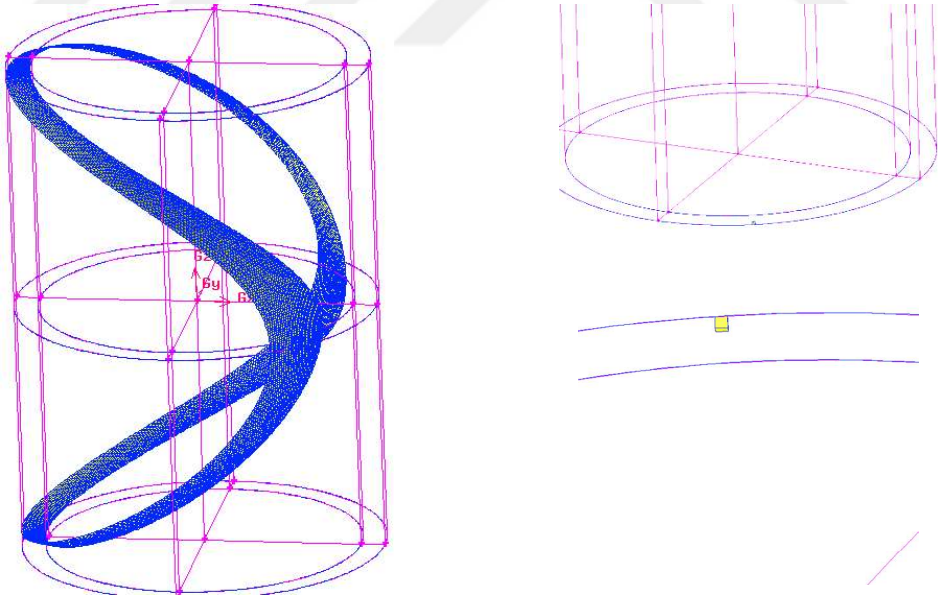
Simülasyon başarısını etkileyen en önemli parametrelerinden biriside çalışma ortamının optimum ağ yapısının belirlenmesidir. Şekil 7.3'de verilen deney düzeneğine ait geometrinin oluşturulabilmesi ve çalışma ortamına uygun ağ yapısının oluşturulabilmesi amacıyla Gambit 2.4.6 programı kullanılmıştır. Çalışmada hassas çözüm elde edebilmek amacıyla yapılandırılmış ağ yapısı kullanılmıştır. Çalışmanın tamamında dörtyüzlü "tetrahedral" elemanlar kullanılmıştır. Çalışma ortamının tamamında çok sık bir çözüm ağının tercih edilmesi pratik olmamaktadır. Bu çalışmada üç farklı sayıda eleman içeren ağ yapısı kullanılarak sonuçların nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışma ortamına ait yapısal

çözüm ağı örneği Şekil 7.6'da verilmiştir. Üretilen ağların kalitesini 1 (en kötü, çarpık) ile 0 (en iyi) arasında değişen bir skala üzerinde gösteren Gambit`e göre en kötü ağ elemanının kalitesi 0,0271908 olmaktadır (Şekil 7.7).



Şekil 7. 6 Nümerik çalışmalarda kullanılan ağ yapısının görünümü.

a-) b-)



Şekil 7. 7 Çalışma bölgesindeki ağların büyüklükleri (a) ve en kötü ağ elemanının olduğu yer (b).

7.2.4 Uygun çözücü modelinin seçimi

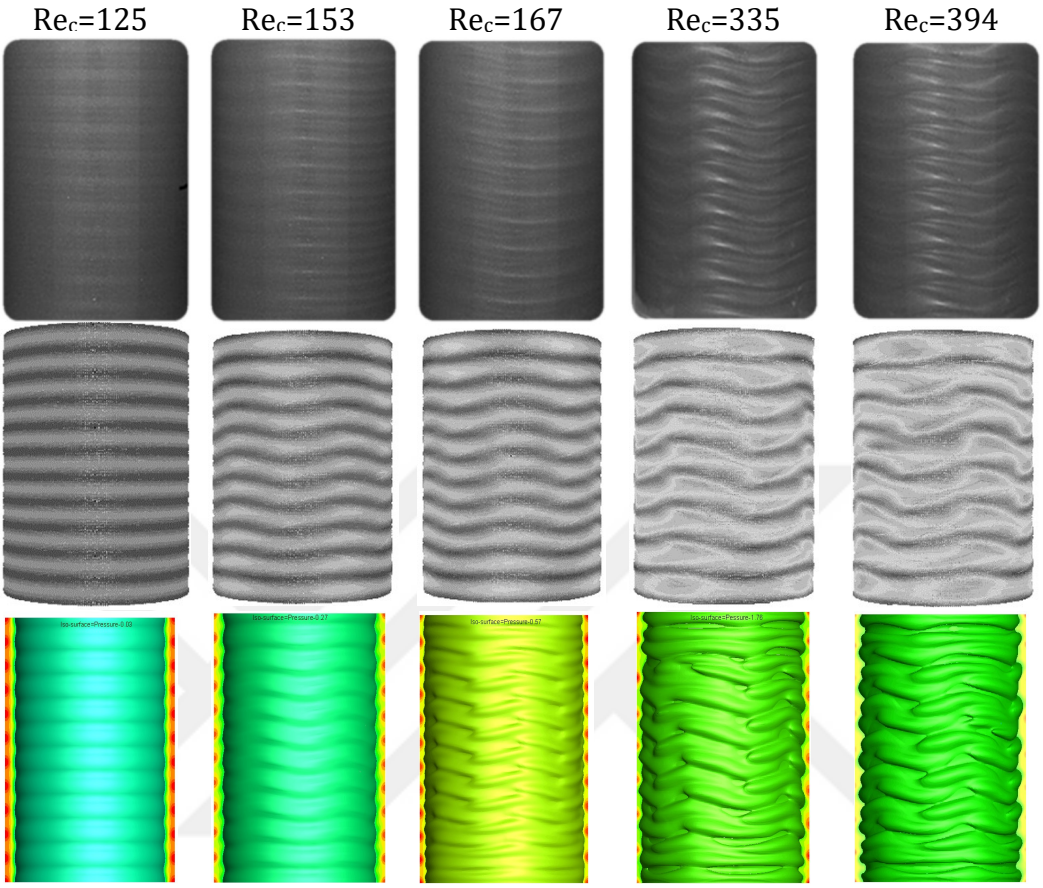
Bu çalışmada akışkan tüm CFD simülasyonları içerisinde izotermal, viskoz ve sıkıştırılamaz (sabit yoğunluklu) bir sıvı olarak kabul edilmiştir. Ağ yapısının oluşturulması ve uygun ağ yapısının belirlenmesinin ardından çözüm için kullanılan tüm denklemlerin (Navier-Stokes, süreklilik vb.) çözülebilecek denklemlere dönüştürülebilmesi için ayrıklaştırılması gerekmektedir. Ayrıklaştırma işlemi genellikle sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacim yöntemi gibi hesaplamaların yapılabileceği eleman veya hacim cinsinden ifade edilmektedir [9,10]. Bu çalışmada sonlu hacim ayrıklaştırması Ansys Fluent programı tarafından gerçekleştirilmiştir. Hız ve basınç alanları, daha büyük zaman adımları için avantajlı olan ve daha kısa surede çözüm sağlayan PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*) algoritması ile çözülmüşlerdir. Zaman adımı $\Delta t = 0{,}01$'ye sabitlenmiştir. Akış simülasyon analizi belirlenen şartlar için başlatılarak ilgilenilen tüm parametreler yakınsayana ya da belirlenen maksimum iterasyon veya zaman adım değerlerine ulaşılana kadar analiz sürdürülmüştür.

7.3 HAD simülasyon sonuçları

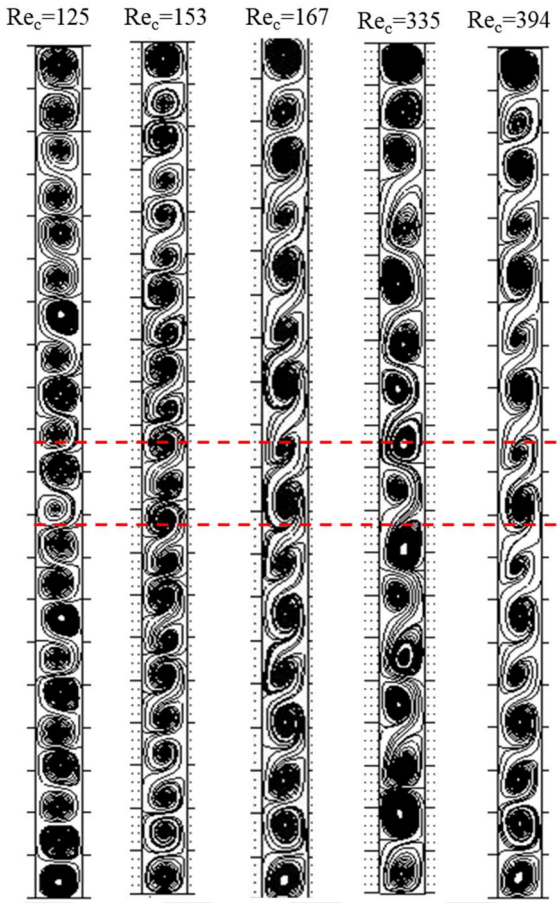
7.3.1 Newtonyen akışkan kullanım durumu

Çalışmada öncelikle literatürde yaygın olarak kullanılan ve birçok çalışmada test edilmiş olan Newtonyen akışkan ve kritik geçiş değerleri kullanılarak simülasyondan elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk simülasyon çalışması CCF akışından TVF akışına geçiş için kritik değer deneysel çalışmalardan Re_c=125 değerinde elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen bazı kritik sınır değerleri kullanılarak ortya çıkan akış yapılarının simülasyonu gerçekleştirilmiş olup deneysel çalışma ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7.8). İç silindir hızı artırılarak Re_c=153 değerine ulaştığında deneysel çalışmalardan TVF akış yapısının WVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 7.8 incelendiğinde artan iç silindir hızına bağlı olarak akış yapılarındaki değişim görülmektedir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte silindir Re_c=125 değerinde iken silindir içerisinde toplam 42 adet vorteks yapısının oluştuğu, Re_c=335 değerine ulaştığında ise toplam vorteks sayısı azalarak 34

değerine düştüğü görülmüştür. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte Re_c=394 değerinde toplam vorteks sayısı daha da azalarak 30 değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Silindir içerisinde toplam vorteks sayısının azalmasına bağlı olarak eşlenik vorteks genişliklerinin arttığı görülmektedir. Elde edilen bu çalışma sonuçlarının aynı zamanda deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Şekil 7.9'da farklı Re_{cw} değerlerinde silindirler arasındaki boşlukta oluşan vorteks yapılarının akım çizgileri gösterilmiştir. Hesaplama alanının eksenel yönü boyunca yani incelenen test alanı içerisinde Re_{cw}=125 değerinde 22 vorteks oluşurken, Re_{cw}=153 değerine arttığında oluşan vorteks sayısının değişmediği ancak Re_{cw}=167 değerine artırıldığında vorteks sayısı azalarak 16 değerine düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte dalga boyunun arttığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte düzenli vorteks hareketinin kaybolduğu ve dalgalı vorteks yapılarının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.9'da kesikli çizgiler arasında oluşan vorteks yapıları incelendiğinde, artan Reynolds sayısı ile birlikte kesikli çizgiler arasında oluşan vorteks sayısının azaldığı ve bununla birlikte vorteks genişliklerinin arttığı gözlemlenmektedir. HAD simülasyonundan elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. İç silindir dönmesiyle birlikte radyal hızın etkisiyle silindir içerisinde vorteks çiftinin oluşumu gözlemlenmiştir. Bu durum iç silindirin cidarına yakın bölgedeki sıvı partikülleri daha yüksek bir merkezkaç kuvveti ile birlikte yüksek teğetsel momentuma sahiptirler. Sabit dış silindir yakınındaki düşük hızlı sıvı radyal olarak bitişik iki vorteks yapılarının giriş bölgelerinde içeri doğru konveksiyon yapar. İki bitişik vorteks yapısı birbiri ile karşılaştığında, her vorteks yapısı iç silindire yakın vorteks çiftinin ortasındaki karışım bölgesine eklenir ve daha sonra dış silindire yakın karıştırma bölgesinden akış geçişi gerçekleşir. Bu durum dış akış bölgesinde önemli miktarda karışımın ve momentum değişiminin oluşumuna neden olur. Benzer karışım prosesi iç akış bölgesinde eşlenik vorteks çiftleri arasında da gerçekleşir. Şekil 7.9'da, vorteks yapısının merkezinin dış silindire doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum ise esas olarak iç silindirin dönüşünden kaynaklanan merkezkaç kuvveti ile sabit dış silindir duvarından kaynaklanan basınç gradyanı arasındaki dengesizlikten kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. 8 Gliserin çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri.

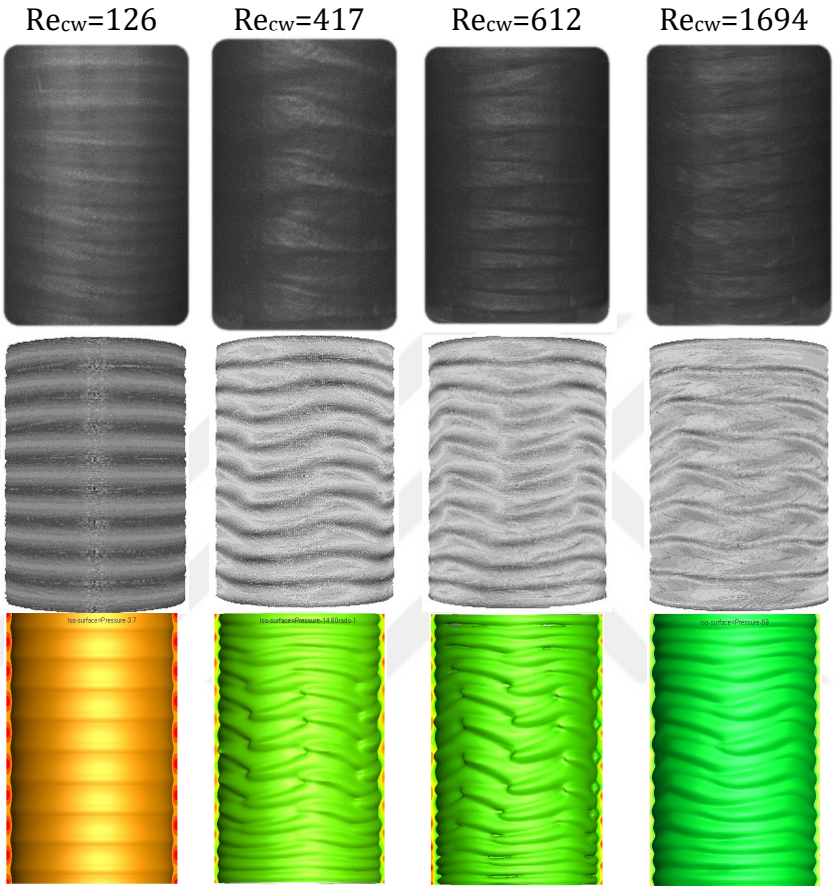


Şekil 7. 9 Gliserin akışkanına ait akım çizgilerinin boşluktaki dağılımı.

7.3.2 Newtonyen olmayan akışkan kullanım durumu

Simülasyon çalışmalarının bu bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan Newtonyen olmayan akışkanların özellikleri ve kritik çalışma sınırları içerisindeki viskozite değerleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak %0,1 XG çözeltisinin simülasyon sonucunda ortaya çıkan akış yapıları deneysel çalışmadan elde edilen verilerle Şekil 7.10'da gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Bu bölümde düşük hız değerlerinde gerçekleştirilen simülasyon işlemlerinin deneysel çalışmalarda gözlemlenen akış yapıları yakalanamamıştır. İç silindir hızının artması ile birlikte simülasyondan elde edilen akış yapıları ile deneysel çalışmalardan elde edilen akış yapılarının birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. iç silindir hızının artmasıyla birlikte Re_{cw}=126 değerinde iken silindir içerisinde simülasyon sonucunda toplam 34 adet vorteks yapısı gözlemlenmiştir. Bununla

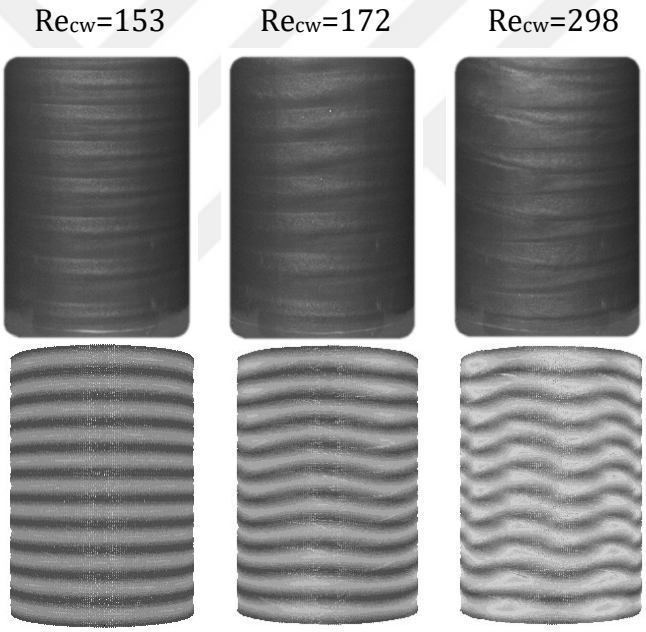
birlikte Reynolds sayısının artmasıyla birlikte Re_{cw}=1694 değerine ulaştığında ise vorteks çiftlerinde birleşmelerin oluştuğu ve oluşan toplam vorteks sayısının azalarak vorteks genişliklerinin arttığı görülmüştür. %0,1 XG çözeltisinin simülasyon sonucundan elde edilen görsel verilerin deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



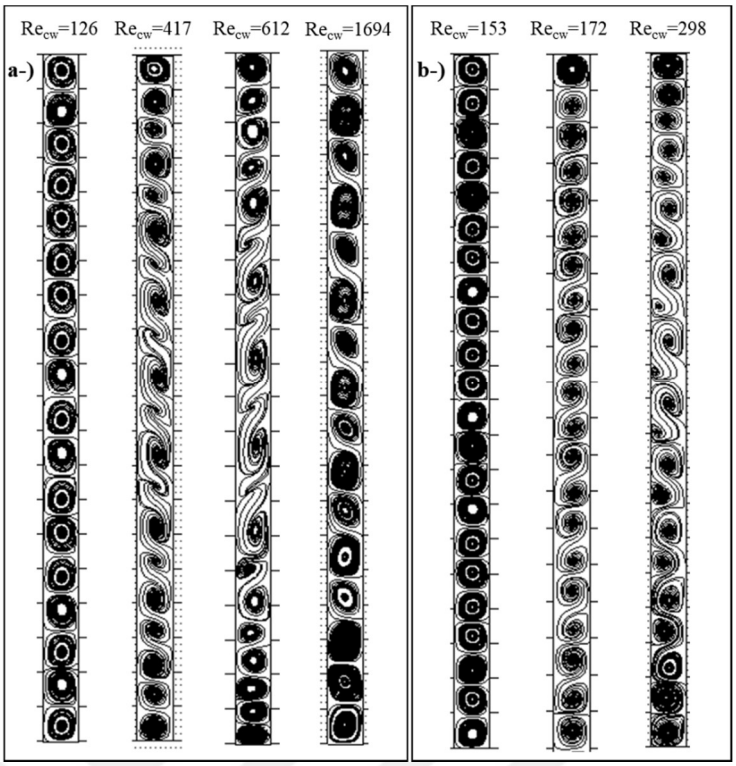
Şekil 7. 10 %0,1 XG çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri.

%0,2 XG çözeltisinin simülasyon sonucunda ortaya çıkan akış yapıları deneysel çalışmadan elde edilen verilerle Şekil 7.11'de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Bu bölümde bir önceki bölümde karşılaşıldığı gibi düşük hız değerlerinde gerçekleştirilen simülasyon işlemlerinin deneysel çalışmalarda gözlemlenen akış yapılarının yakalanamadığı gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artması ile birlikte simülasyondan elde edilen akış yapıları ile deneysel çalışmalardan elde edilen akış yapılarının birbirleriyle benzeşim gözlemlenmesine rağmen akış yapılarında

farklılıklar görülmektedir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte Re_{cw}=153 değerinde iken deneysel çalışmalar sonucunda gözlemlenen akış yapılarının düzenli TVF akış davranışına benzer bir davranış gösterdiği, Re_{cw}=172 değerinde ise akış yapılarında dalgalanmaların oluştuğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarından benzer şekilde akış yapılarının dönüşümü gözlemlenmesine rağmen birebir uyuşmadığı görülmektedir. Aynı şekilde Re_{cw}=298 değerine ulaştığında ise dalga yapılarının genliğinin ve birim zamanda oluşan dalga sayısının artttığı görülmüştür. Simülasyon sonucunda silindir içerisinde toplam vorteks sayılarının değişmediği gözlemlenmiştir. Bu sonuç deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle uyuşmamaktadır. Bununla birlikte, farklı Re_{cw} değerlerinde %0,1 ve %0,2 XG çözeltisinin silindirler arasındaki boşlukta oluşan vorteks yapılarının akım çizgileri Şekil 7.12'de gösterilmiştir.

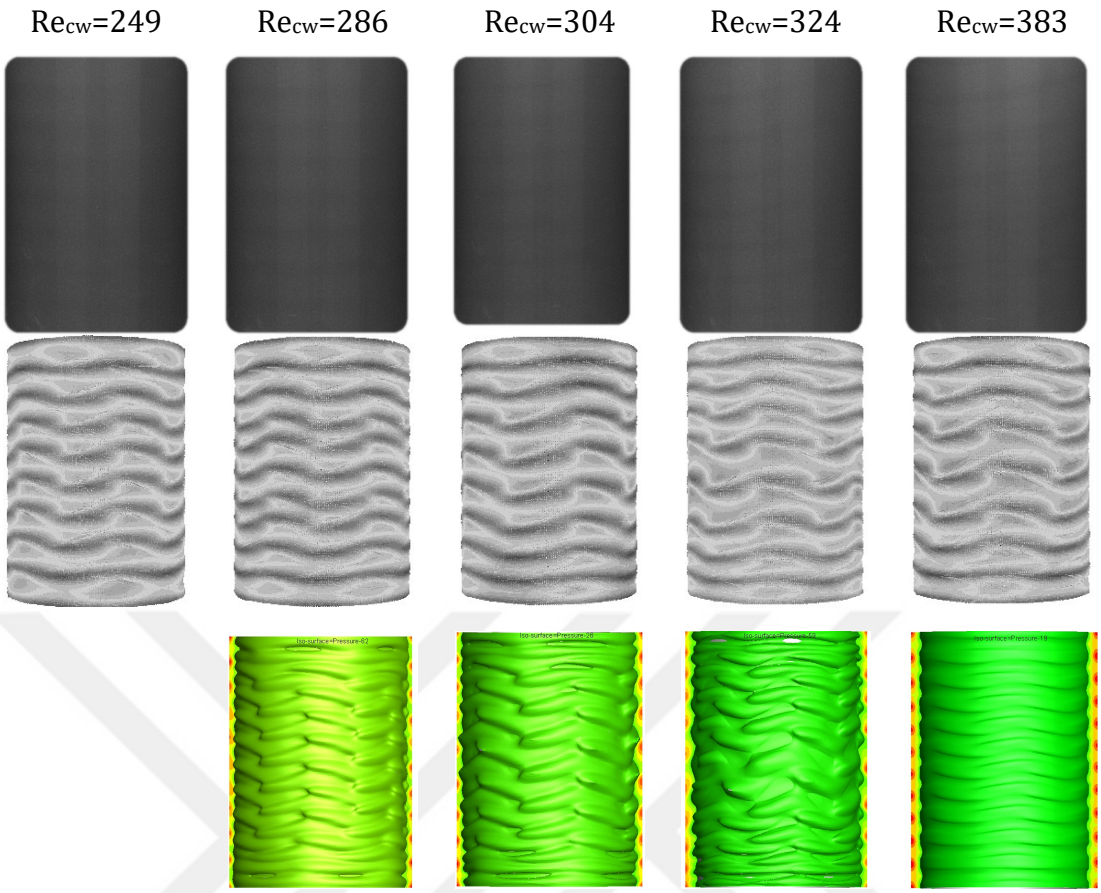


Şekil 7. 11 %0,2 XG çözeltisinin akış yapılarının deneysel ve nümerik görüntüleri.

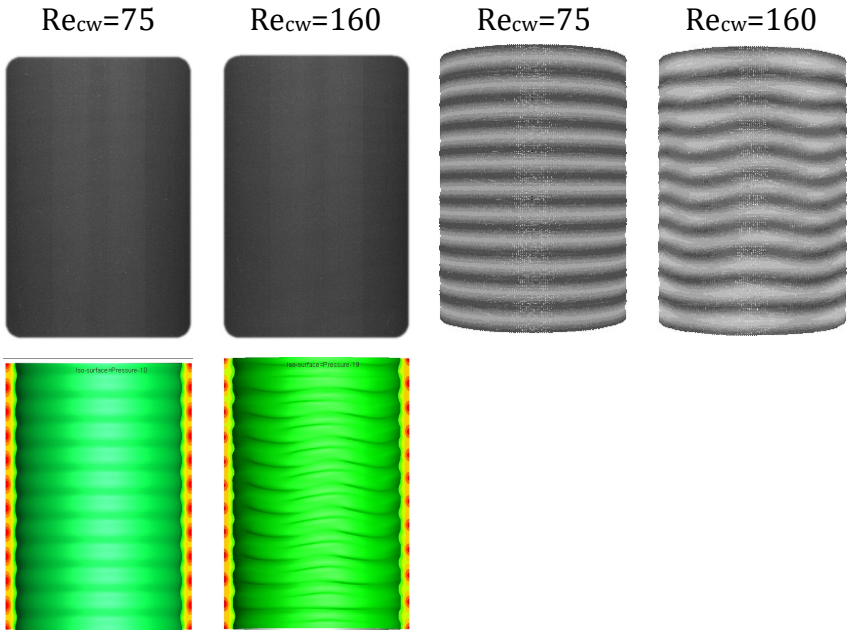


Şekil 7. 12 a-) %0,1 ve b-) %0,2 XG çözeltisine ait akım çizgilerinin boşluktaki dağılımı.

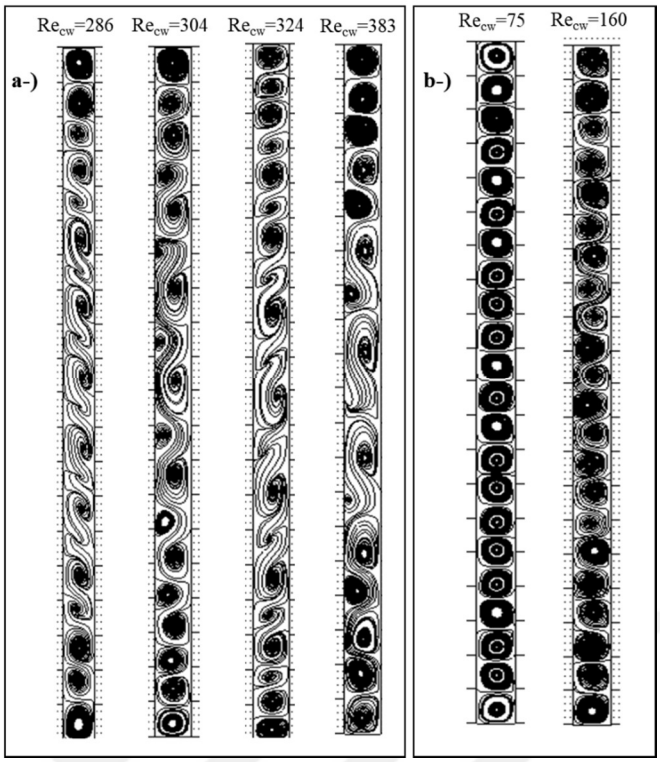
Akma gerilmesine sahip akışkanların (carbopol) simülasyon işlemleri sonucunda ortaya çıkan akış yapılarının deneysel sonuçlarla iki farklı konsantrasyon için Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'te gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonucunda ortaya çıkan akış yapılarının (çalışma sınırları içerisinde) deneysel verilerle uyuşmadığı gözlemlenmiştir. Simülasyon işlemlerinde akışkanın Newtonyen olmayan karakteristiğinin artmasıyla birlikte simülasyon sonuçlarının önemli oranda sapmalar gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Şekil 7.15'te %0,01 ve %0,02 carbopol çözeltisine ait akım çizgilerinin boşluktaki dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 7. 13 %0,01 carbopol çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri.



Şekil 7. 14 %0,02 carbopol çözeltisinin akış yapılarının deneysel, nümerik akış yapıları ve eş basınç çizgileri.



Şekil 7. 15 a-) %0,01 ve b-) %0,02 carbopol çözeltisine ait akım çizgilerinin boşluktaki dağılımı.

8
Taylor-Couette Reaktörünün Denizcilik Sektörüne Uygulanabilirliğinin İncelenmesi

Tez çalışmasının bu bölümünde TC akışının endüstriyel ve akademik uygulanabilirliği ile ilgili iki farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak "Alternatif balast suyu arıtma sistemi" ve "Grafen oksit verimliliğini artırabilmek amacıyla alternatif üretim prosesi" iki farklı alana uygulanabilirliliği incelenmiştir.

8.1 Balast Suyu Arıtımında Alternatif Seçenek Olarak Değerlendirilen TC-UV Reaktörü

8.1.1 Özet

Son yıllarda UV dezenfeksiyon teknolojisi; atık su ve proses suyu arıtımında yerli olmayan türlerin dezenfeksiyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise balast suyunda yaygın olarak bulunan istenmeyen yabancı türlerin dezenfeksiyonunda Taylor-Couette UV reaktörünün kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, deneysel çalışmalarda iki farklı yarıçap oranına sahip Taylor Couette reaktörü ve gliserin çözeltileri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan gliserin çözeltisinin reaktör içerisinde oluşan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri birbirleri ve literatür ile eşzamanlı olarak karşılaştırılmıştır. TC reaktörlerinde ortaya çıkan akış yapıları, partiküllerin eksenel ve radyal olarak karıştırılmasında ve *E.coli*'nin dezenfeksiyon verimliliğinde önemli bir iyileşme sağladığı bilinmektedir. Elde edilen sonuçlar, balast suyunda yerli olmayan türlerin dezenfeksiyonunda Taylor-Couette UV reaktörünün alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

8.1.2 Giriş

Dünyadaki ekonomik, teknolojik ve siyasi gelişmelere paralel olarak deniz ticareti ivme kazanarak artmakta ve bununla birlikte denizyolu taşımacılığı da hızla artmaktadır. Deniz taşımacılığındaki bu hızlı gelişme, deniz suyuna yağlı sintine

suyu, çöp, kanalizasyon, balast suyu ve tank yıkama suyu gibi zararlı kirletici maddelerin salınmasına neden olmuştur [233]. Bu kirleticiler deniz canlılarının yaşamını tehlikeye sokmaktadır. Aynı zamanda kıyı çevrelerini ve insan sağlığını önemli ölçüde tehdit etmektedir. Bunlar arasında, balast suyu deniz ortamını tehdit eden en kirleticiler arasında yer almaktadır. Denizyolu taşımacılığının artmasıyla birlikte her geçen yıl deniz ortamına salınan balast suyu günde ortalama 10000 civarında canlı türünün farklı limanlar arasında taşındığı tahmin edilmektedir. Deniz ortamına salınan bu tür deniz ekosistemlerinin yapısında ve kıyı tahribatında önemli değişikliklere yol açmaktadır. Ayrıca bu tehditin insan sağlığı üzerinde potansiyel bir tehdit olduğu düşünülmektedir [234], [235].

Gemiler tarafından deniz ortamına salınan yabancı istilacı türlerin deniz ortamına girişini önlemek amacıyla IMO tarafından "Gemi Balast Suyu ve Sedimanlarının Kontrolü ve Yönetimi" (BWMC) başlıklı yönetim sözleşmesi 2004 yılında kabul edilmiştir [236]. BWMC kuralları uyarınca, balast suyu arıtımında; ultraviyole (UV), elektroliz, ozonlama, mekanik ve kimyasal filtrasyon sistemleri yaygın olarak kullanılabilmektedir. Bu arıtma sistemleri arasında her birinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, elektrolitik dezenfeksiyon ve biyosit kullanımı etkili bir arıtma yöntemi olarak kabul edilmesine rağmen, balast tanklarından önemli ölçüde korozyon kayıplarının oluşmasına ve kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan istenmeyen yan ürünlerinin oluşmasına yol açmaktadırlar. Bununla birlikte UV dezenfeksiyon işlemi, istenmeyen zararlı yan ürünler üretmeyen ve akış düzenini etkilemeyen birçok avantaja sahip olan, iyi bilinen kimyasal içermeyen bir arıtma prosesi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, balast suyu içerisinde zararlı türlerin dezenfeksiyonunda tercih edilmektedir [237]–[239] ve bununla birlikte balast suyu arıtma teknolojileri arasında yaygın olarak tercih edilmektedir (~%48) [240]. UV dezenfeksiyon arıtma sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar, balast suyu ile deniz ortamına salınan yabancı istilacı türlerin girişini en aza indirmeye ve azaltmaya yöneliktir. Bu çalışmalar arasında Wu ve ark. (2011) balast suyu içerisinde *E.coli* (indikatör mikroorganizma) bakterisini indikataör mikroorganizma olarak kullanarak UV ve UV+ozone (O3) proseslerinin dezenfeksiyon verimliliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda balast suyundaki indikatör mikroorganizmanın dezenfeksiyonunun

UV+ozone verimliliğinin yalnızca UV ünitesi kullanılmasına göre daha etkili olduğu rapor edilmiştir [241]. Monroy ve ark. (2018) UV-C prosesi ile birlikte mekanik filre yönteminin farklı sıcaklıklardaki dezenfeksiyon verimliliğini incelemişlerdir. Proseses verimliliğinin düşük sıcaklıklarda daha da arttığı gözlemlenmiştir [242]. Lu ve ark. (2018) balast suyunda bulunan *E.coli* miikroorganzmasını dezenfeksiyonunu gerçekleştirmek için yüksek dereceli manyetik ayırmalı UV titanyumoksit fotokataliz reaktörünün verimliliğini araştırmışlardır. Araştırmacılar tarafından kullanılan dezenfeksiyon teknolojisinin balast suyunda bulunan *E. Coli* mikroorganizmalarını inaktive etmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir [243]. Jung ve ark. (2012) orta-basınçlı UV (MPUV) prosesinin verimliliğini balast suyunda bulunan farklı yerli türlerin giderim verimliliğini araştırmışlardır. Araştırmacılar MPUV prosesi ile birlikte mekanik filtre kullanılmasının belirlenen türlerinin dezenfeksiyonunu %99,99 oranında başarılı bir şekilde gerçekleştiği rapor edilmiştir[244].

Mevcut geliştirilen teknolojiler arasında alternatif olarak UV prosesi balast suyu arıtımında günümüzde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak güncelliğini korumaktadır. Bundan dolayı geliştirilecek olan UV prosesinin verimliliğini ve performansını geliştirilmesine yönelik teknikler önem kazanmaktadır. Yapılan son çalışmalarda ise Taylor-Couette UV (TC-UV) reaktörlerinin farklı endüstrilerde çeşitli sıvıların dezenfeksiyon işlemini gerçekleştirmek amacıyla alternatif bir yöntem olarak etkin bir şekilde kullanıldığını göstermektedir [47]–[49], [245], [246]. Yüzyılı aşkın bir süredir Taylor-Couette akışları akışkanlar mekaniğinin temel bir problemi olarak birçok çalışmada ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle filtrasyon proseslerinde tercih edilmesiyle, reaktör içerisinde oluşan radyal hızların ve vorteks yapılarının sayesinde filtre yüzeyinde oluşan kek tabakasını minimize etmektedir. Özellikle akış rejimlerinin geçişi esnasında ortaya çıkan santrifüj dengesizliğinin reaktör içerisindeki karışım verimliliğini artırdığı görülmüştür [247]. Taylor-Couette akışında silindirlerin dönüş hızına ve yönüne bağlı olarak 0,88 yarıçap oranı için reaktör içerisinde 26 farklı akış yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir [6]. Rudman (1998) yapmış olduğu çalışmada TC reaktörlerinin karıştırma veriminin dalgalı akıştaki azimuthal dalga uzunluğuna ve sayısına bağlı olduğunu göstermiştir [248]. Öte yandan sıvı-sıvı

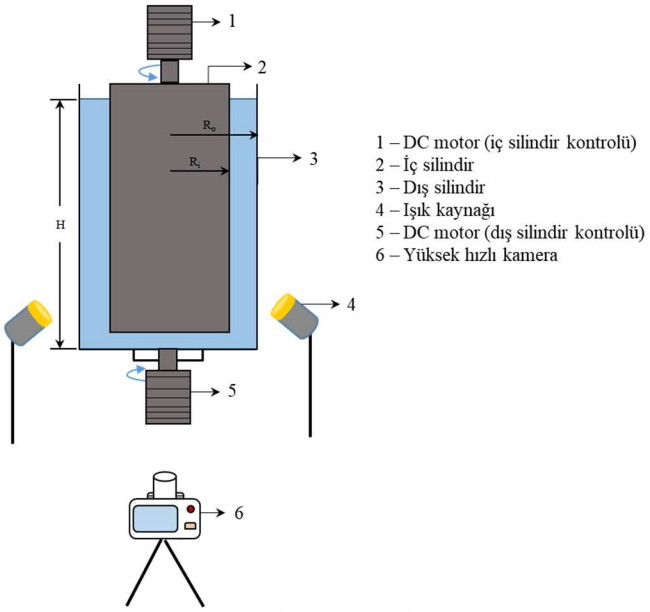
ekstraksiyon uygulamalarında, TVF'de düşük eksenel karıştırma hızlarında yüksek ayırma verimliliğini ulaşılmıştır. İç silindirin dönme hızının artmasıyla, ortaya çıkan vorteks yapıları boşluk içerisinde radyal olarak azimut momentumu taşırlar. Aynı zamanda akış yapısının dalgalı vorteks (WVF) akışına dönüştüğünde, radyal momentum aktarımının yanı sıra akışkan parçacıkları eşlenik vorteks yapıları arasında da eksenel olarak yer değiştirirler. Bu nedenle, WVF akışı karışım verimliliğini önemli ölçüde artırdığı belirtilmektedir [249]. Bu akış yapısında akış vorteks merkezinden eksenel ve radyal doğrultuda yayılırlar. Bundan dolayı oluşan vorteks yapıları eksenel ve rayal karışımın verimliliğinin artmasına olanak sağlarken, reaktör içerisindeki ısı ve kütle taşınımınıda önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bununla birlikte oluşan vorteks yapılarının hareketi dolayısıyla UV reaktörünün üzerinde oluşan kek tabakasının oluşumu önlenmekte ve UV reaktörünün daha uzun süre etkili bir şekilde işletilmesine olanak sağlamaktadır [47], [50], [250]. Forney ve ark. (2008) TC reaktörünü kullanarak sınır yüzeyinin ve dalgalı duvar yapısının *E.coli* dezenfeksiyon verimliliğini incelemişlerdir. İnaktivasyon verimliliğinin dalgalı duvar yüzeyi modifikasyonu ile arttığı vurgulanmıştır. Bununla birlikte yüksek eksenel hızlarda *E.coli* gideriminin başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için daha uzun silindir boylarının gerektiği ayrıca vurgulanmıştır [48]. Ye ve ark. (2008) farklı akış yapılarında optimum dezenfeksiyon verimliliğini araştırmışlardır. Araştırmacılar, laminer TC akışında dezenfeksiyon verimliliğinin türbülans ve laminer TC Poiseuille akışına göre daha verimli olduğunu vurgulamışlarıdır. Ayrıca araştımacılar akış yapılarının belirlenmesinin dezenfeksiyon verimliliğini belirlemede önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir [49]. Orlowska ve ark. (2014) pilot ölçekli bir TC-UV reaktörünü kullanarak farklı akış koşullarında *E.coli* dezenfeksiyon inaktivasyon verimliliğini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, *E.coli* inaktivasyonunun Reynolds sayısına ve boşluk içerisinde oluşan akış yapılarına önemli ölçüde bağlı olduğu vurgulanmıştır. Yapılan bir diğer deneysel çalışmada ise Couette–Poiseuille (CP) akışında inaktivasyon verimliliğinin azaldığı belirtilmiştir [50].

mikrobiyal türlerin dezenfeksiyonunda TC-UV reaktörlerinin kullanımına genellikle gıda endüstrisinde yapılan çalışmalarda rastlanılmıştır. Bu çalışmalarda TC-UV

reaktörlerinde ortaya çıkan akış yapılarının, mikroorganizmaların inaktivasyon verimliliğini artırmada önemli olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada, denizcilik sektöründe arıtma sistemi olarak yaygın bir şekilde kullanılan UV dezenfeksiyon ünitesinin modifikasyonu ile TC-UV ünitesi olarak alternatif bir arıtma sistemi olarak kullanılabileceği araştırılmıştır. TC–UV verimliliğinin artırılabilmesi amacıyla, reaktör içerisinde oluşan akış yapılarının ve bu akış yapılarının kritik değerlerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda, yarıçap oranı ve iç silindir Reynolds sayısının (Re_{cwi}) ikincil sıvı akışları üzerindeki etkisi, iç silindirin dönme hızının çeşitli değerleri için araştırılmıştır.

8.1.3 Materyal ve Metot

Deneysel çalışmalarda iç içe geçmiş eşlenik silindirden oluşan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 8.1'de gösterilmiştir. Deney düzeneğine ait karakteristik özellikler ise Tablo 8.1'de özetlenmiştir. Silindirler arasındaki boşluğun oluşan akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerleri üzerine etkisini inceleyebilmek amaıyla iki farklı yarıçap oranı kullanılmıştır. Kullanılan reaktörde her iki silindir birbirinden bağımsız bir şekilde dönmektedir ve kullanılan sürücü yardımıyla silindir hızları istenilen şekilde ayarlanabilmektedir. İç silindir yüzeyi yansımaları önleyebilmek amacıyla siyah akrilik boya ile kaplanmıştır. Dış silindir görüntünün net bir şekilde gözlemlenebilmesi için şeffaf pleksi malzeme kullaılmıştır. Silindirlerin dönüş hızı aynı zamanda takometre ile de kontrol edilmiştir.



Şekil 8. 1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Tablo 8. 1 Silindirlerin geometrik özellikleri ve boyutsuz parametreler.

Parametre	Kısaltma	Değer
Dış silindir yarıçapı [mm]	R_o	72 ve 70
İç silindir yarıçapı [mm]	R_i	62,5 ve 45
Silindir yüksekliği [mm]	H	500
Boşluk [mm]	d	9,5 ve 25
Çap oranı	η	0,868 ve 0,643
En-boy oranı	Γ	~42 ve 16

Deneysel çalışmalarda iki farklı konsantrasyona sahip gliserin çözeltisi kulanılmıştır. Kullanılan akışkanların reolojisi Anton Paar, MCR 302 reometresi kullanılarak belirlenmiştir. Akışkanın reolojik özellikleri Tablo 8.2'de verilmiştir. Akış içerisindeki akış yapılarının farklılıklarını gözlemleyebilmek amacıyla akışkanın içerisinde ışığı yansıtan çift renkli toz parçacıkları ilave edilmiştir. Görüntüler yüksek-hızlı CCD kamera kullanılarak (Phantom Miro eX4) 800×600 piksel çözünürlüğünde kaydedilmiştir. Daha sonra elde edilen görüntüler görüntü işleme yöntemiyle iyileştirilmiştir.

Tablo 8. 2 Deneylerde kullanılan akışkanların reolojik özellikleri.

Çözelti	ρ [kg/m^3]	μ [Ns/m^2]
Gliserin %60	1148	0,0096
Gliserin %75	1187	0,028

Ortaya çıkan akış yapıları boyutsuz Reynolds sayısı (Re) kullanılarak karakterize edilmiştir. İç (Re_i) ve dış (Re_o) silindirin dönme hızları için tanımlanmış olan Reynolds ifadesi Denklem 8.1'de verilmiştir.

$$\mathrm{Re}_i = \frac{\rho \omega_i R_i d}{\mu}, \quad \mathrm{Re}_o = \frac{\rho \omega_o R_o d}{\mu} \tag{8. 1}$$

Denklemde ρ akışkanın yoğunluğunu, R_i, R_o iç ve dış silindirin yarıçapları, ω_i, ω_o iç ve dış silindirin dönme hızlarını ve μ akışkanın viskozitesini tanımlamaktadır. Bu çalışmada indikatör mikroorganizma olarak *E. coli* kullanılmış ve bu mikroorganizmanın inaktivasyon oranının belirlenebilmesi amacıyla birinci dereceden kinetik model eşitliği (Denklem 8.2) kullanılmıştır.

$$\frac{N}{N_0} = \exp(-k \times E) \tag{8. 2}$$

Denklemde, N (CFU/mL) UV etkisine maruz kaldıktan sonra hayatta kalan popülasyonu, N_0 (CFU/mL) popülasyonu ilk yoğunluğunu, k (cm^2/mJ) birinci dereceden inaktivasyon sabitini, E UV ışın şiddetini (mJ/cm^2) temsil etmektedir.

Silindirler arasındaki boşlukta UV ışınım dağılımını belirlemek için Lambert-Beer eşitliği kullanılmıştır. UV lambaları iç silindirin içine yerleştirilirse boşluk boyunca UV ışınım dağılımı Denklem 8.3 kullanılarak hesaplanabilir [49]. Genel UV ışınım dağılımı (I) ise Denklem 8.4 kullanılarak elde edilir [50].

$$I(r) = I_0 \frac{R_i}{r} \exp(-\alpha(r - R_i)) \tag{8. 3}$$

$$I = \frac{I_0}{\alpha d}\left[1 - \exp\left(-\alpha d\right)\right] \tag{8. 4}$$

burada α, absorbans katsayısı (cm^{-1}) ve I_0, UV kaynağının yüzeyindeki UV ışınımını tanımlamaktadır. TC reaktöründe inaktivasyon hızı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır;

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{kI_0\tau R_c}{\alpha d} \qquad R_c = \frac{2R_i}{R_i + R_o} \tag{8.5}$$

Çalışmada absorbans katsayısı α = 0,5 cm^{-1} olarak ve UV ışınım şiddeti ise 5 - 25 mJ/cm^2 değerleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

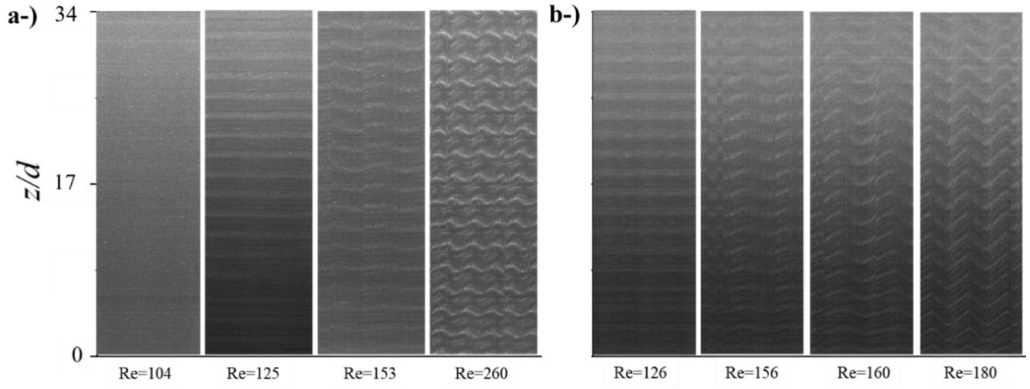
8.1.4 Sonuçlar

Balast suyu arıtma sistemlerine alternatif bir arıtma sistemi olarak TC-UV ünitesini değerlendirebilmek amacıyla, bu bölümde Newtonyen akışkanının TC deney düzeneği içerisinde oluşan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri araştırılmıştır. Aynı zamanda yarıçap oranı değişiminin vorteks oluşumuna etkiside incelenmiştir. Kritik geçiş değerleri deneysel olarak akış görselleştirme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen görüntüler görüntü işleme yöntemi ile uzay-zaman diyagramı olarak görselleştirilmiştir. TC deney düzeneği içerisinde oluşan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri Şekil 8.2'de gösterilmiştir. Dış silindir sabit tutularak iç silindirin hızının artırılması ile birbirinden farklı akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. İstenilen Reynolds sayısına ulaşana kadar iç silindir hızı 5-300 rpm aralığında kademeli olarak artırılarak oluşan akış yapıları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çalışmalarda kullanılan iki farklı gliserol çözeltisine ait uzay-zaman grafikleri Şekil 8.2'de gösterilmiştir. Şekil 8.2 aynı zamanda, akış yapılarının gelişimini Reynolds sayısına bağlı olarak göstermektedir. Reynolds sayısının artışıyla birlikte ortaya çıkan akış yapıları, akışın davranışını da karakterize etmektedir. İki vorteks hücresi arasındaki sınır tabakası durağandır, ve şekilden de vorteksler arasındaki sınır çizgisi belirgin bir şekilde görülmektedir. İç silindir hızının durağan halden artırılmaya başlanmasıyla, ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri Andereck ve ark. (1986) ve Nemri ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların literatür verileri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Şekil 8.2 detaylı olarak incelendiğinde, iç silindir hızının artması ile birlikte ilk olarak dairesel Couette akışı (CCF) gözlemlenmiş ve Re=120 değerinde ulaştığında ise silindirin alt ve üst kısımlarında ekman halkaları görülmüştür. Reynolds değeri artirilarak 125 değerine ulaştığında, CCF akışı Taylor

vorteks akışına (TVF) dönüşmüştür. Bu akış yapısının 125≤Re<153 aralığında stabil kaldığı görülmektedir. Reynolds değeri artırılarak 153 değerine ulaştığında, Taylor vorteks akış yapılarında dalgalanmalar meydana gelmiş ve akışın dalgalı vorteks akışına (WVF) dönüşümü gerçekleşmistir. WVF akış yapısında, akışta eksenel ve radyal olarak bozulmar gözlemlenirken, azimut yönünde dalgalı akış yapısı ortaya çıkmaktadır. TVF akış yapısında partiküller vorteks yapısı içerisinde dairesel olarak düzenli hareket ederken, WVF akış yapısında dairesel hareketin bozulmasıyla birlikte daha düzensiz hareket yapıları ortaya çıkmaktadır. Akonur ve Lueptow (2003) yapmış oldukları çalışma sonucunda, dalgalı akış yapısının karışımı iyileştirdiğini vurgulamışlardır. Ortaya çıkan bu dalgali akış yapısı sayesinde vorteks çiftleri arasında partikül akışının gerçekleşmesi ile, karışımın TVF akışından daha iyi gerçekleştiği yapılan farklı çalışmalarda da vurgulanmıştır [9], [251]. Karışımın derecesi filtrasyon ve seperasyon verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Akonur ve Lueptow (2003) ayrıca Taylor vortisitelerinin WVF akışında eksenel ve radyal olarak azimut momentumunu taşıdığını belirtmişlerdir. Dalgalanmaların jet akışının azimut hız profilinin değişimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte partikül taşınımıda daha da iyileşmekte ve lokal olarak birikmeler Taylor vorteksler sayesinde azalmaktadır.

TC akışlarında ortaya çıkan ikincil akışlar, TC-UV reaktörlerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İkincil akışlar laminer akışa göre daha iyi karışım ve sirkülasyon sağlarlar. Bu akışlar aynı zamanda UV lambanın etkili bir şekilde kullanım ömrünü ve UV ışınlarının yayılımını da etkilerler. Bu nedenle, kritik rejim geciş noktaların ve akış yapılarının doğru olarak belirlenmesi ve bu akış yapılarının kontrol edilebilmesi, balast suyu arıtımında TC-UV reaktör performansını önemli ölçüde artıracaktır.



Şekil 8. 2 Farklı gliserin konsantrasyonlarda ortaya çıkan akış yapıları a-) %60 b-) %75.

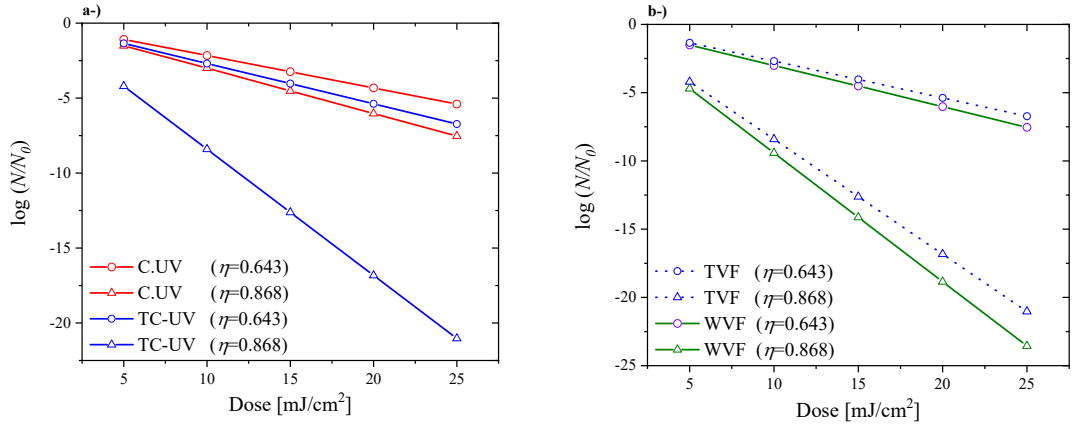
TC reaktöründe ortaya çıkan akış yapıları ve bu akış yapılarının karakteristik özellikleri yarıçap oranına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Akış yapıları ortaya çıkan vorteks sayıları ve bu vortekslerin dalga boyu uzunlukları ile karakterize edilirler. Şekil 8.3 incelendiğinde, iki farklı yarıçap oranı için ortaya çıkan TVF vorteks sayıların da ve dalga boylarında farklılıklar gözlemlenmektedir. η=0,868 yarıçap oranı için, vorteks sayısının 42 ve dalga boyunun λ=20,35 mm (2,14d) olduğu bulunmuştur. Silindirler arası mesafenin artması ile (η=0,643), oluşan vorteks sayısı azalarak 16'ya ve oluşan vortekslerin dalga boyunun artarak λ=50,51 mm (2,02d) değerine ulaştığı görülmüştür. Silindirler arası mesafe oluşan akışkanının karakteristiğini etkilediği gibi, UV ışınlarının reaktör içerisindeki yayılımını ve UV ışınlarına maruz kalma süresini de önemli oranda etkilemektedir. Silindirler arası mesafenin azalmasıyla bakterilerin UV ışınlarına maruz kalma süresi artacak ve bununla birlikte inaktivasyon verimliliği artacaktır.

Şekil 8. 3 Farklı çap oranlarında oluşan TVF vorteks yapıları.

Bu çalışmada *E.coli* indikatör mikroorganizması için kullanılan inaktivasyon sabiti (k=0,43 cm^2 mJ^{-1}). Martínez ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır [252]. TC-UV reaktörün *E.coli* inaktivasyon verimliliği klasik UV (C.UV) reaktörü ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 8.4a'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, *E.coli* inaktivasyonunda TC-UV reaktorü C.UV reaktöründen daha etkili sonuç verdiği görülmüştür. Sonuçlar TC-UV reaktörü kullanımı ile *E.coli* inaktivasyonunda %36 oranında bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. TC-UV reaktörü kullanılarak inaktivasyon oranında sağlanan bu iyileşmenin en önemli nedenleri arasında, reaktör içerisinde oluşan vorteks yapıları sayesinde mikroorganizmaların UV ışın şiddetine daha uzun süre maruz kalma süresinde artmaktadır. *E.coli* hareketli olan iç silindir yüzeyinden durağan haldeki dış silindir yüzeyine doğru taşınırlar. Bununla birlikte oluşan TVF halkalarının sınırları içerisinde hapsolarak sadece bu bölgede sürekli yer değiştirirler. Bu durum daha uzun temas süresi sağlayarak inaktivasyon verimliliğini artırmaktadır. Aynı zamanda TC reaktörü içerisinde ortaya çıkan farklı akış yapıları inaktivasyon verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Orlowska ve ark. (2014) yapmış oldukları çalışmada akış yapı değişiminin inaktivasyon verimliliğini %10-12 oranında etkilediğini belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışma dikkate alınarak akış yapı değişiminin *E.coli* inaktivasyonu üzerine etkisi incelenmiştir. Akış yapısının TVF akış yapısı ve WVF akış yapısı koşullarında *E.coli* inaktivasyon değişimi Şekil 8.4b'de gösterilmiştir. WVF akış yapısına geçişte her iki çap oranında da önemli miktarda iyileşme sağlandığı görülmektedir. TVF akış yapısında inaktivasyon verimliliği WVF akış yapısına göre azalmış olsada klasik UV reaktörü ile karşılaştırıldığında, TC-UV reaktörünün önemli oranda farklılık gösterdiği görülmektedir (Şekil 8.4a).

TC-UV reaktör tasarımın da bir diğer önemli parametre, reaktörler arasındaki mesafedir. Bu parametre dezenfeksiyon verimliliğini önemli ölçüde etkilediğinden dolayı, doğru silindir çaplarının kullanılması önem arz etmektedir. Aynı zamanda hız ve kayma hızı dağılımları, silindirler arasındaki mesafeye bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir ve sonuç olarak, genel dezenfeksiyon verimliliği etkilenmektedir. Şekil 8.4a'da görüldüğü gibi, *E.coli* dezenfeksiyon verimliliği artan yarıçap oranı ile artmaktadır. Silindirler arası mesafenin artması ile UV ışık

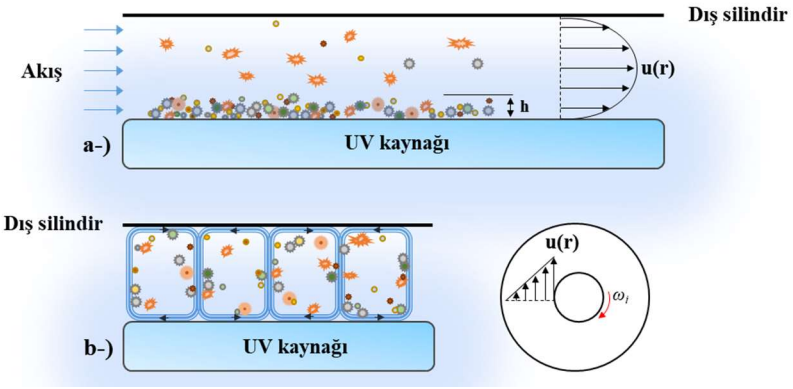
yoğunluğu boşluk boyunca azalır ve böylece *E.coli*'nin inaktivasyon verimliliği azalmaktadır.



Şekil 8. 4 *E. coli* inaktivasyon verimliliği a-) C.UV ve TC-UV rektörleri b-) TC-UV reaktörü içerisindeki farklı akış yapıları.

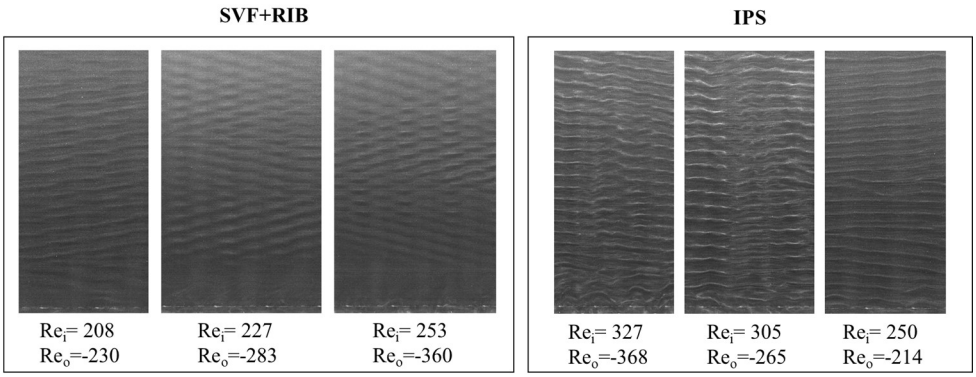
Balast suyu, farklı türlerde zararlı bakteri, tortu ve askıda katı madde içermektedir. Bu kirleticilerin C.UV ve TC-UV reaktörlerinde taşınmasının ve hız dağılımının şematik gösterimi Şekil 8.5'de gösterilmektedir. C.UV reaktörlerinde, UV lamba üzerinde bu kirleticiler zamanla birikerek yüzeyde bir kirletici kek tabakasının oluşumuna neden olurlar. UV radyasyon verimliliğini etkileyen bu birikme dezenfeksiyon proseslerinde en önemli sorunlardan birisi olarak kabul edilmektedir. UV radyasyon verimliliğinin azalmasıyla birlikte, istenmeyen yabancı türlerin inaktivasyonu için yeterli ve gerekli UV dozu azalacaktır ve UV maruziyeti sonucu hayatta kalan türlerin miktarı hızla artacaktır.

Ayrıca, UV yüzeyinde zamanla kirletici miktarının artması ile enerji tüketimi artacak ve bununla birlikte daha sık yüzey temizlik işlemleri ile UV reaktörlerinin kullanım ömrü azalacaktır. Hâlbuki TC-UV reaktöründe ortaya çıkan Taylor vorteks yapıları, UV silindirin yüzeyinin kendi kendini temizlemesini sağlamaktadır. İç silindirin dönme hızının artması ile iki eşlenik vorteks içerisindeki ve arasındaki ikincil akışlar kütle transferini radyal ve azimut olarak önemli ölçüde arttırır. Bu nedenle, TC-UV reaktörü daha yüksek verimlilik ile alternatif bir balast suyu arıtma sistemi olarak öne çıkmaktadır.

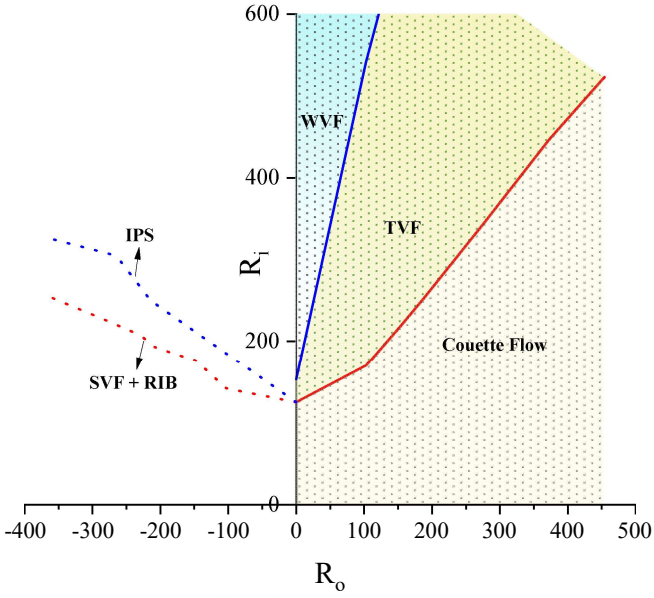


Şekil 8. 5 İstenmeyen türlerin taşınımın şematik gösterimi a-) C.UV b-) TC-UV.

Aynı zamanda, dış silindirin aynı veya zıt yöne dönüşlerinin, akış yapıları ve kritik Reynolds sayısı üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, dış silindirin dönüş yönünün ortaya çıkan akış yapıları ve kritik değerleri önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Sabit dış silindir dönme hızlarında, iç silindirin dönme hızı zıt yönde kademeli olarak artırılarak ortaya çıkan akış yapıları ve kritik geçiş değerleri Şekil 8.6'da gösterilmiştir. Spiral vorteks akışı (SVF), ribbon (RIB) ve iç içe geçen vorteks akış (IPS) yapıları yapılan deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir. İç silindirin dönme hızı ve dış silindirin dönme hızlarına bağlı olarak silindir içerisinde ortaya çıkan akış yapılarının grafik edilmiştir. Bu çalışmada CCF, TVF ve WVF akış yapılarının sınırları dikkate alınmıştır (Şekil 8.7). Ortaya çıkan bu akış yapılarının ve kritik değerlerinin bilinmesi TC-UV reaktörünün işletme verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır. Bu nedenle, boşluktaki akış yapılarının bilinmesi pratik uygulamalarda önem taşır; balast suyundan yabancı türlerin inaktivasyon verimliliğinde artmasını sağlayacaktır. Yapılan deneysel çalışamalar neticesinde TC-UV reaktörünün alternatif bir dezenfeksiyon prosesi olarak kullanılabilecektir.



Şekil 8. 6 Zıt yöne dönme koşullarında ortaya çıkan akış yapıları.



Şekil 8. 7 TC-UV reaktöründe ortaya çıkan akış yapılarının kritik sınır değerleri (η=0,868).

8.2 TC reaktörünün grafen-oksit üretiminde kullanımı

8.2.1 Özet

Grafen tabakalarının kalitesi önemli ölçüde grafitin oksidasyon derecesine ve kullanılan sentez yöntemine bağlıdır. Bu nedenle, çevre dostu ve uygun maliyetli bir proses seçimi, oksidasyon seviyesinin arttırılmasına katkıda bulunmada önemli bir adımdır. Son çalışmalar, Taylor-Couette (TC) reaktörlerinin grafitin oksidasyon seviyesini artırmak için en iyi seçeneklerden biri olduğunu göstermektedir. Grafen çözeltileri shear-thinning özellik göstermektedir ve TC deney düzeneğinde ortaya çıkan akış yapıları, oksidasyon derecesini önemli ölçüde etkilmektedir. Bu çalışmada, shear-thinning akışkan kullanılarak TC reaktöründe ortaya çıkan akış yapıları incelenmiştir. Yarıçap oranı, güç yasası indeksi ve silindirlerin dönüş yönünün akış yapıları ve kritik geçiş değerleri üzerindeki etkisi, eş merkezli silindirler arasında meydana gelen Taylor-Couette akışında deneysel olarak incelenmiştir. Duvar kesme viskozitesi (Re_{cwi} ve Re_{cwo}) ile tanımlanan Reynolds sayıları, çeşitli akış yapılarının kritik koşullarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, akışkan özelliklerinin ve yarıçap oranının, akış yapıları ve kritik değerlerinin üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çeşitli akış

rejimlerinin özellikleri, iç silindir hızının arttırılmasıyla önemli ölçüde değişmektedir. Bu çalışmada dış silindirin dönüş yönünün akış yapıları ve kritik Reynolds sayıları üzerindeki güçlü etkisi de ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar ayrıca TC reaktörlerinde ortaya çıkan akış yapıları ve akışkan özellikleri arasındaki etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Bu yeni bulgular, yüksek kaliteli grafen ürünlerinin sentezlenmesinde kullanılacak olan TC reaktörlerinin tasarımında ve geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

8.2.2 Giriş

Gemiler ve deniz altları için en önemli sorunlardan biriside biyolojik kirleticilerin zamanla yüzeyde birikmesidir. Özellikle gemi gövdelerinde ve boru sistemlerinin yüzeylerinde mikro/makro organizmaların birikmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Biyolojik kirlenme kaynaklı sorunlar denizcilik endüstrisinde iki ana kategoriye ayrılabilir; mikroorganizmaların faaliyetlerinden kaynaklanan mikrobiyal kaynaklı korozyon (MIC) ve gemi gövdelerinde kirleticilerin birikmesi sonucunda hidrodinamik sürtünme ve gövde pürüzlülüğü artmaktadır. Ortaya çıkan bu ve benzeri sorunlar ekonomik ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. Aynı zaman da gemi gövdesinde artan yüke bağlı olarak gemi hızlarının düşmesine ve yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Deniz endüstrisi, gemi ve deniz ortamında sıkça karşılaşılan biyolojik kirlenme nedeniyle ciddi ekonomik kayıplarla karşı karşıyadır. Bundan dolayı biyolojik kirlenmeyi önleme ve kontrolünde kalıcı veya daha uzun vadeli çözümlerin geliştirilmesi önem kazanmıştır [253]. Son yıllarda ortaya çıkan biyolojik kirlenmenin olumsuz etkilerini önlemek amacıyla çeşitli yüzeylerin zehirli boya (antifouling-AF) kullanılarak kaplanması literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [254]–[256]. Biyolojik kirlenmeyi önlemek amacıyla kullanılan boyalar arasında son yıllarda grafen bazlı boyalar oldukça popüler hale gelmiştir. Grafen bazlı boyaların zararsız çevre dostu olması ve biyolojik kirliliği önleme konusunda verimli sonuçlar vermesi nedeniyle en önemli alternatif çözümler arasında yer almaktadır. Özellikle küçük kalınlıkta, yüksek en boy oranı, yüksek spesifik yüzey alanına sahip olması ve kimyasal olarak kararlı bir yapıya sahip olması gibi birçok üstün özelliklere sahiptir [257]. Grafen tabakaları gemi gövdelerinin biyolojik kirlenmesini önlemek ve korozyondan koruması

sağlamak amacıyla tercih edilmektedir [258], [259]. Grafen ve türevlerinin kullanımı, ör. grafen oksit (GO), yüzeye bakteriyel yapışmayı, biyofilm oluşumunu ve bunun sonucunda ortaya çıkan biyolojik kirlenme oluşumunu azaltmada en etkili biyolojik kirlenme kontrol ajanlarından biri olarak kullanılmaktadır [260]–[262].

Kaliteli grafen bazlı malzemeler elde etmek için en önemli aşamalardan biriside grafitin oksidasyon prosesisin verimli bir şekilde yapılabilmesi için doğru prosesin seçimi büyük önem taşımaktadır. Son zamanlarda, Taylor-Couette (TC) reaktörleri, basitliği ve kolay ölçeklendirilmesi olması grafit oksidasyon süreçlerinde tercih edilmektedir [58], [263]. Taylor-Couette akışları birbirinden bağımsız olarak dönen iki eş merkezli silindirden oluşmaktadır. Silindirlerin dönüş hızlarına ve sıvının reolojisine bağlı olarak bir TC reaktöründe çeşitli akış yapıları oluşmaktadır [6]. Dış silindir sabit iç silindir hareketli iken düşük dönüş hızlarında, akış laminerdir ve silindirik Couette akışı (CCF) olarak adlandırılır. İç silindirin artan dönme hızı ile birlikte silindir içerisinde ikincil akış yapıları (Taylor-Couette akışı-TVF) oluşmaktadır ve iç silindir hızının daha da artırılmasıyla ortaya çıkan bu akış yapısında dalgalanmaların meydana geldiği ve dalgalı vorteks akışına (WVF) dönüştüğü gözlemlenmektedir [5]. Ortaya çıkan bu ikincil akış yapılarının etkili radyal karıştırma ve düzgün akışkan hareketi sağlaması nedeniyle, reaktanların kütle transferinin iyileşmesine ve dolayısıyla kimyasal oksidasyon işlemleri sırasında grafitin oksidasyon verimliliğini artırmaktadır. Dahası, bu akış yapıları grafit tabakalarının etkili bir şekilde ayrıştırılması için yüksek duvar kayma gerilmeleri oluştururlar [58], [60]. Park ve ark. (2015), TC reaktörünü kullanarak grafit tabakalarının oksidasyon verimliliğini araştırmışlardır. Çalışma sonunda ortaya çıkan akış yapılarının grafit ve oksitleyici ajanların karıştırma ve kütle transfer verimliliğinin arttığını göstermişlerdir. Tran ve ark. (2016), sıvı grafitin TC reaktörü içerisinde kesme eksfoliasyonu ile birkaç katmanlı grafenin hazırlanmasını incelemişlerdir. Araştırmacılar TC reaktörünün kullanımı ile yüksek kesme kuvvetleri nedeniyle grafit ve çözücünün karışım verimliliğinin arttığını ve böylece grafitin oksidasyon verimliliğini arttırdığını belirlemişlerdir [61]. Park ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada TC reaktörünü kullanarak yüksek verimlilikte (>%90) tek veya birkaç katmanlı GO elde etmişlerdir. Ayrıca, girdapların ortaya çıkan vorteks yapılarının hareketi dolayısıyla reaksiyon süresinin önemli oranda

azaldığını ve grafit oksit tabakalarının eksfoliasyonunun arttığını gözlemlemişlerdir [60]. Kang ve ark. (2017) TC reaktörü kullanarak grafit tabakalarından grafen oksit sentez etkinliğini incelemiş ve sonuçlarını Hummer yöntemiyle karşılaştırmıştır. Çalışma sonunda, Hummer yöntemine kıyasla reaksiyon sürelerinde önemli bir azalma sağlandığını ve bununla birlikte yüksek oksidasyon verimliliğinin (~%93) ortaya çıktığını belirtmişlerdir [264]. AlAmer ve ark. (2019), bir TC reaktörü içerisinde ortaya çıkan akış yapılarının oksidasyon verimliliğine etkisini araştırmışlardır. TVF akış rejimi oluştuğunda oksidasyon seviyesinin arttığını, ancak akış durumu WVF akış yapısında oksidasyon seviyesinin önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Literatürde grafen oksit üretimi için kullanılan TC reaktör çalışmaların tamamı incelendiğinde akış yapı oluşumunun belirli bir kritere dayanmadığı görülmüştür. Oysa TC deney düzeneği içerisinde oluşan akış yapıları, reaktör geometrisi ve akışkan özelliklerine önemli ölçüde bağlıdır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde grafen çözeltilerinin shear thinning özelliğine sahip olduğu görülmüştür [265]–[267]. TC reaktöründe ortaya çıkan akış yapılarının grafit tabakalarının oksidasyonunu ve ayrıştırılmasını ve bunun sonucunda ürün kalitesini önemli ölçüde etkiler [263]. Bu nedenle, elde edilen ürünlerin kalitesi artırmak amacıyla reaktör içerisindeki akış yapı özelliklerinin ve kritik geçiş değerlerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Grafen bazlı ürünlerin üretiminde mevcut literatür çalışmaları, genel olarak grafitin oksidasyon seviyesinin iyileştirilmesine odaklanılmıştır. grafen çözeltilerinin TC reaktörü içerisindeki akış yapısı oluşumları ve kritik geçiş değerleri açıkça tanımlanmamıştır. Ayrıca, silindir dönüş hızlarının ve akışkan özelliklerinin ortaya çıkan akış yapıları üzerine etkisi ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, silindirin dönme hızına ve akışkan reolojisine bağlı olarak akış yapılarının oluşumu ve kritik geçiş değerleri, grafit tabakalarının oksidasyonunu ve tabakaların ayrıştırılmasını iyileştirmek için bu tür çalışmalar önem kazanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, shear-thinning akışkanların TC reaktörü içerisindeki akış yapılarının oluşumunu deneysel olarak incelenmesidir. Ayrıca, grafitin oksidasyon seviyesini doğrudan etkileyen ortaya çıkan akış yapıların kritik geçiş değerlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada silindirlerin aynı ve zıt yöne

dönme koşullarının akış yapıları üzerine ve kritik geçiş değerleri üzerine etkisi ayrıca incelenmiştir. Bu çalışmaları gerçekleştirebilmek amacıyla grafen solüsyonları ile benzer akışkan özelliği gösteren xanthan çözeltisi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda ayrıca iki farklı yarıçap oranında kullanılmıştır. Çeşitli akış yapılarının kritik geçiş değerleri, iç ve dış duvar kesme viskoziteleri kullanılarak, yani Re_{cwi} ve Re_{cwo} ile tanımlanan Reynolds sayıları kullanılarak belirlenmiştir.

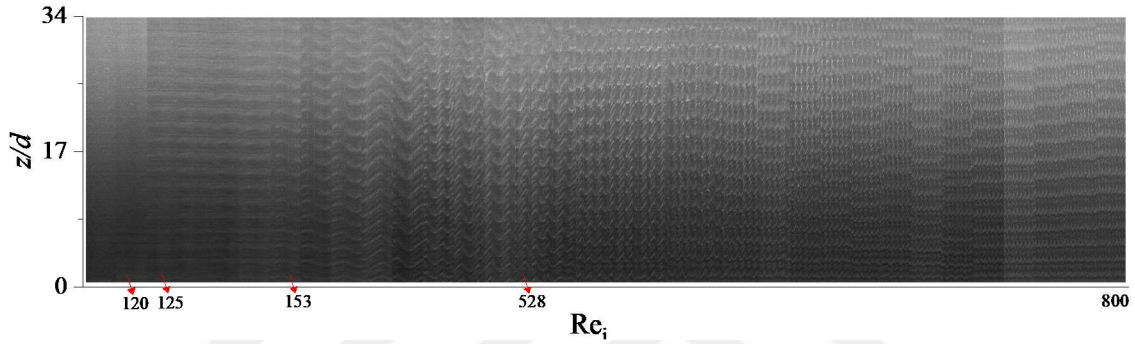
8.2.3 Sonuçlar

Literatür özeti bölümünde detaylı olarak bahsedildiği gibi, TC reaktörlerinde ortaya çıkan akış yapıları grafen oksit üretiminde grafitin oksidasyon seviyesini iyileştirme de kritik öneme sahiptir. Ortaya çıkan TVF akış yapısı oksidasyon seviyesini önemli oranda artırmasına rağmen WVF akış yapısında oksidasyon seviyesinin azaldığı incelenen çalışmalarda vurgulanmıştır. Bundan dolayı reaktör içerisinde oluşan akış yapılarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve kritik rejim geçiş değerlerinin bulunması oksidasyon seviyesini artırmada büyük önem taşımaktadır. Reaktörün geometrik özelliklerinin yanında akışkan özellikleri, hem ortaya çıkan akış yapılarını hemde kritik rejim geçiş değerlerini etkilemektedir. Bundan dolayı bu çalışmada dört farklı xanthan çözeltisi ve iki farklı çap oranına sahip TC reaktörü kullanılmıştır. Bu çalışmalardan elde veriler oluşan akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan akışkanlara ait özellikler Bölüm 3'te detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu çalışmalara ilave olarak dış silindirin dönme hızının ve yönünün etkileri araştırılmıştır. Çalışmada dış silindir maksimum 300rpm dönme hızında işletilmiştir. İlk olarak Newtonyen akışkan kullanılarak deney düzeneğinden elde edilen veriler literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.

8.2.4 Newtonyen akışkan durumu

Deneysel çalışmalarda ilk olarak Newtonyen akışkan TC reaktörü içerisinde dış silindir sabit iç silindir hareketli iken akış yapıları ve kritik rejim geçişi değerleri incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak uzay-zaman grafikleri şeklinde Şekil 8.8'de sunulmuştur. Dış silindir sabit iken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda reaktör içerisinde ilk olarak CCF akış yapısının Ekman halkaları ile birlikte Re_i=120 değerinde gözlemlenmiştir. Kritik rejim geçiş CCF akış yapısından TVF akış yapısına geçiş ise

Re_i=125 değerine ulaştığında gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu TVF akış yapısının 125≤Re_i<153 aralığında değişmeden stabil olarak kaldığı görülmüştür. İç silindir hızının artırılması ile birlikte, akış yapılarında dalgalanmaların başladığı ve akış yapısının Re_i=153 değerinde WVF akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. Elde edilen bu kritik rejim geçiş değerleri literatürde yapılan Coles ve arkl. (1965) ve Nemri ve ark. (2013) çalışmaların verileriyle karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar TVF akış rejimine geçiş değerlerini sırasıyla 119 ve 125 olarak rapor etmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlarla literatür verilerinin uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 8. 8 Gliserin çözeltisinin farklı Reynolds sayılarındaki uzay zaman grafiği.

8.2.5 Shear-thinning akışkan durumu

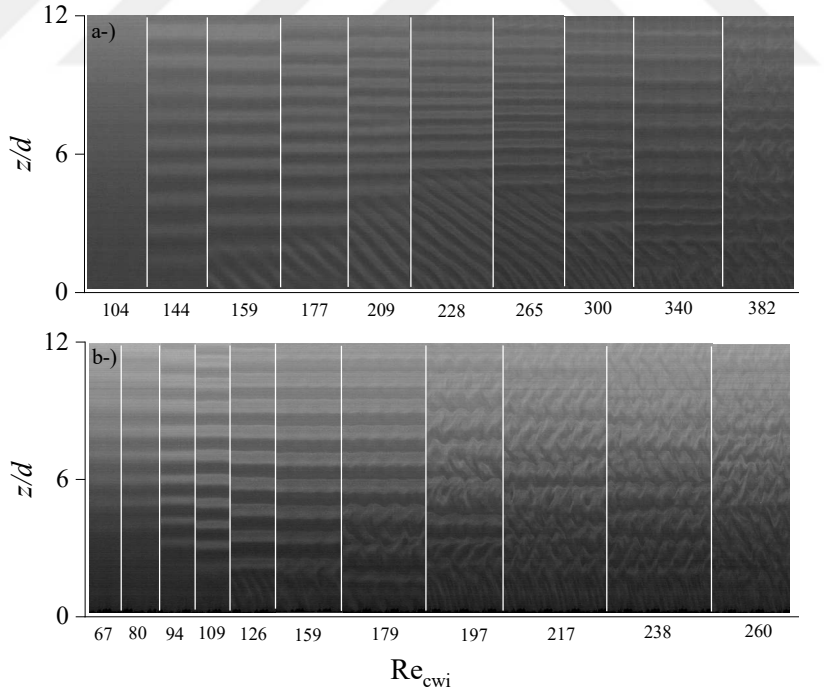
Literatür özeti kısmında da detaylı olarak bahsedildiği gibi grafen çözeltileri shear-thinning özellik göstermektedir. Bu bölümde akışkanın shear-thinning indeks değerinin dört farklı XG çözeltisi için etkileri incelenmiştir. Farklı akış yapılarını tanımlamak için iki farklı yarıçap oranlarına sahip TC reaktörü içerisinde kritik geçiş değerleri belirlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde TC reaktörlerinde grafen oksit çalışmaları dış silindir sabit iç silindir hareketli iken gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda dış silindir sabit tutulduğunda, dış silindir bölgelerinde hidrodinamik olarak sabit durağan bir akış yapısı oluşmakta ve bu bölgede azimut hız değeri sıfıra yaklaşmaktadır. Bu durum karıştırma ve kütle aktarım verimini önemli ölçüde etkilemekte ve grafitin oksidasyon verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı TC reaktörlerinde her iki silindirin de hareketli olmasının grafitin oksidasyon verimliliğini artmasına katkı sağlayacaktır.

Bu bölümde akışkanın shear-thinning indeks değerinin ve silindirlerin dönme yönünün ortaya çıkan akış yapıları ve kritik Reynolds değerleri üzerindeki etkisi XG akışkanı kullanılarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindir hızının kademeli olarak artırılması sonucunda reaktör içerisinde oluşan akış yapılarının ve kritik rejim geçiş değerlerinin farklılıkların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

8.2.6 Aynı yöne dönme durumu

Deneysel çalışmalarda ilk olarak 0,643 yarıçap oranına sahip TC reaktörü kullanılarak silindirlerin aynı yöne dönmesi durumunda ortaya çıkan akış yapıları incelenmiştir. Ortaya çıkan akış yapıları görüntü işleme prosesi sonrasında Şekil 8.9'da görüldüğü gibi uzay zaman grafikleri ile verilmiştir. Dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindirin dönme hızı kademeli olarak artırıldığında ilk olarak CCF akış yapısının Re_{cwi}=104 değerinde oluştuğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılarak Re_{cwi}=144 değerine ulaştığında ise CCF akış yapısının TVF akış yapılarına dönüştüğü gözlemlenmiştir. TVF akışı sırasında silindir içerisinde toplam 24 vorteks yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının dahada artırılmasıyla Re_{cwi} 159 değerine ulaştığında, silindirin alt kısmında TVF akış yapısının SVF akış yapısına dönüşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu bölümde TVF akış yapısı ile SVF akış yapısının silindir içerisinde bir arada hareket ettikleri görülmüştür. Toplam TVF vorteks sayısının azalarak 20 değerine düştüğü görülmüştür. İç silindir hızının artmaya devam etmesiyle birlikte SVF akış yapısının silindirin üst kısmına doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bu bölümde oluşan toplam TVF vorteks sayısının tekrar 24 değerine arttığı görülürken bu vorteks yapılarının genişlikleri azalmıştır. Re_{cwi}=265 değerine ulaştığında spiral vorteks yapısının tekrardan silindirn alt kısmına doğru hareket ettiği ve oluşan toplam vorteks sayısının yeniden azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 8.9a'dan açıkça görüldüğü gibi silindirin merkezinde akış yapısını bozan akış yapılarının oluşmaya başladığı görülmektedir (Re_{cwi}=300). İç silindir hızının daha da artırılarak Re_{cwi}=382oluşan TVF ve SVF akış yapılarının tamamen ortadan kaybolarak düzensiz dalgalı akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan bu dalgalı akış yapılarının farklı uzunlukta dalga boylarına sahip vorteks yapılarının oluştuğu gözlemlenmektedir.

n=0,39 için akış yapı değişimleri ve kritik Reynolds değerleri Şekil. 8.9b'de görülmektedir. Dış silindir sabit iken iç silindir hızı artırılmaya başlandığında CCF akış yapısı Re_{cwi}=94 değerine ulaştığında TVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. TVF akış yapısı öncesinde silindir içerisinde kısmi TVF (pTVF) akış yapısının oluştuğu ve iç silindir hızının artmasıyla TVF akış yapısının gelişerek silindirin tamamen kapladığı görülmüştür. TVF akış yapısının 94<Re_{cwi}<126 aralığında stabil kaldığı gözlemlenmiştir. Xanthan çözeltisinin bu konsantrasyon değerinde hareketli SVF akış yapısının oluşmadığı gözlemlenmiştir. TVF akış yapısının ardından yeni bir akış yapısının silindir içerisinde gelişmeye başladığı görülmektedir. Re_{cwi} 159 değerine ulaştığında bu yeni akış yapısının silindirin alt kısmında gelişmeye başladığı ve silindirin üst kısmına doğru ilerlediği görülmektedir. Bu yeni akış yapısı simetrik olmayan bir şekilde farklı eksenel dalga boyu ile yeni bir akış yapısı silindir içerisinde gelişmiştir. Re_{cwi}>238 koşulunda ise ortaya çıkan bu yeni akış yapısının da silindir içerisinde kaybolduğu görülmüştür. Şekil. 8.9b incelendiğinde TVF akış yapılarının iç silindir hızının artmasıyla toplam vorteks sayılarının azalarak dalga genişliklerinin arttığı görülmüştür.

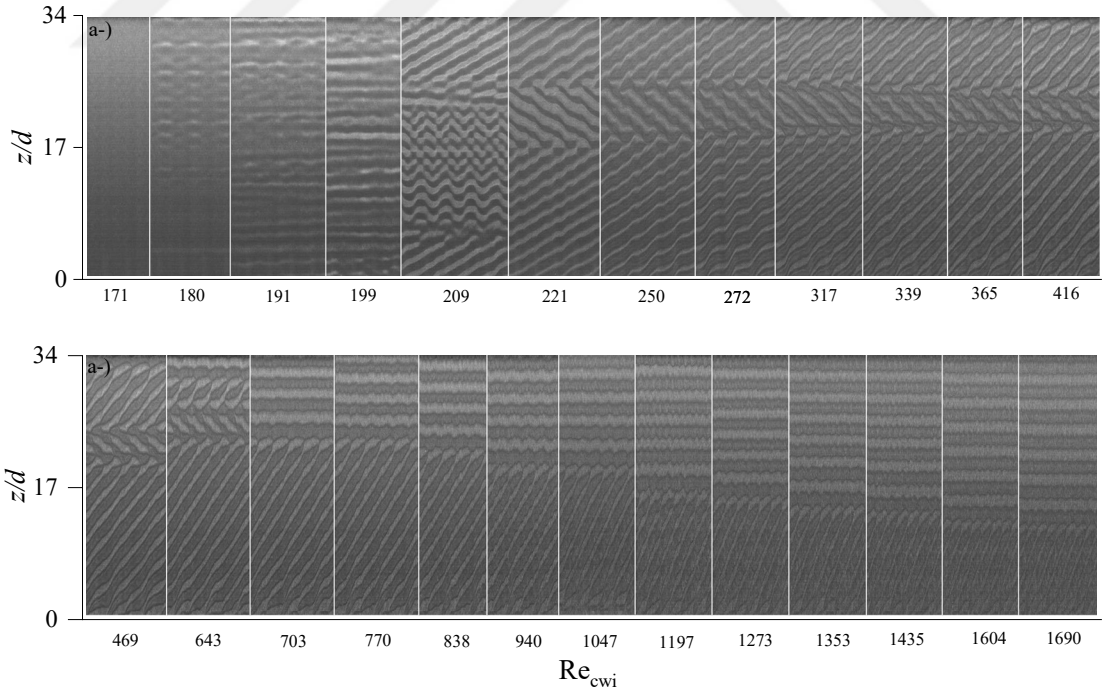


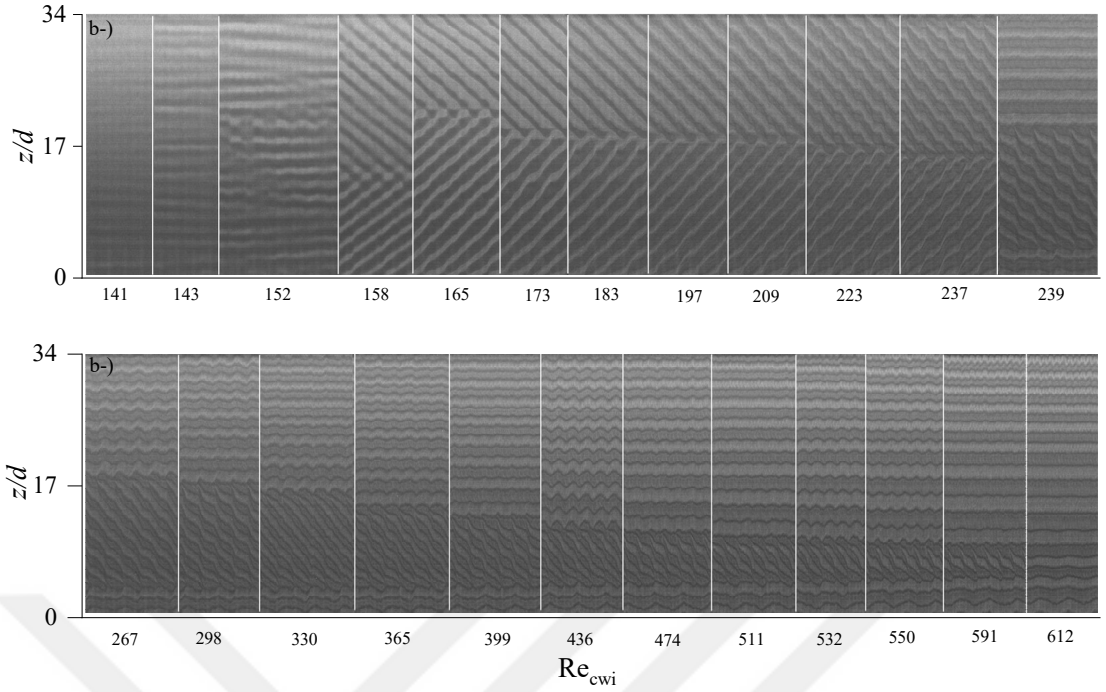
Şekil 8. 9 Xanthan çözeltisinin aynı yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a) *n*=0,50 ve (b) *n*=0,39 (η=0,643).

Bir diğer TC reaktörü içerisinde (η=0,868) iki farklı XG çözeltisinin (n=0,33 ve n=0,45) akış yapılarının ve kritik rejim geçiş değerleri Şekil. 8.10'da verilmiştir. İlk olarak n=0.45 özelliğine sahip XG çözeltisi kullanılmış ve dış silindir sabit iken iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte silindir içerisinde CCF akış yapısının ardından ilk olarak Re_{cwi}=180 değerinde düzensiz akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=197 değerine ulaştığında ise ribbon (RIB) akış yapısının ve zayıf bir şekilde TVF akış yapısının oluştuğu görülmektedir. İç silindir hızının yavaş bir şekilde artırılması sonucunda Re_{cwi}=209 değerine ulaştığında silindirin alt ve üst kısımlarında SVF akış yapısının ve silindirin orta kısmında ise dalgalı akış yapısının oluştuğu görülmüştür. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte silindirin orta kısmında oluşan dalgalı akış yapısının kaybolarak SFV akış yapısına dönüştüğü ve silindirin alt ve üst kısımlardaki SVF akış yapılarının birbirine göre zıt yönde hareket ettiği gözlemlenmiştir (Re_{cwi}=221). Şekil. 8.10a'dan açıkça görüldüğü gibi bu akış yapılarının silindirin alt ve üst kısmına doğru hareket ederek silindirin tamamında oluştuğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte silindirin orta kısmında oluşan SVF akış yapısının toplam boyunun ve SVF vorteks sayısının azalmaya başladığı görülmektedir. Re_{cwi}=703 değerine ulaştığında ise silindirin orta kısmındaki SVF akış yapısının tamamen kaybolduğu ve silindirin üst kısmında TVF akış yapısının oluşmaya başladığı görülmüştür. Recwi=770 değerine ulaştığında ise TVF akış yapılarında dalgalanmalar gözlemlenmiş ancak gözlemlenen bu akış yapısının WVF akış yapısından ziyade TVF akış yapısına benzediği görülmüştür. Bundan dolayı bu akış yapısı dalgalı TVF (wTVF) olarak isimlendirilmiştir. Bu akış yapısı artan iç silindir hızı ile birlikte silindirin alt kısmına doğru ilerlediği görülmüştür. Bu wTVF akış yapıları silindirin alt kısmında gelişmeye başlamıştır. Oluşan wTVF vorteks hücrelerinin sayısı iç silindirin dönme hızının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sınırları içerisinde ortaya çıkan bu wTVF akış yapısının ve SVF akış yapısının silindir içerisinde belirginliğini koruduğu görülmüştür ($770<Re_{cwi}<1690$).

n=0,33 özelliğine sahip XG çözeltisi kullanıldığında ortaya çıkan akış yapıları uzay-zaman grafiği şeklinde Şekil 8.10b'de verilmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte Re_{cwi}=143 belirgin olmayan şekilde TVF akış yapısının oluştuğu görülmektedir. Re_{cwi}=152, simetrik olmayan akış yapılarının silindir içerisinde

oluşmaya başladığı görülmektedir. İç silindir hızının artırılmasıyla birlikte Re_{cwi}=158 değerine ulaştığında birbirine göre zıt yönde hareket eden SVF akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu spiral akış yapılarının aşağı ve yukarı yönlü hareket ettikleri gözlemlenmiştir. Reynolds sayısının daha da artırılmasıyla birlikte SVF vorteks yapılarının silindirin üst kısmına doğru hareket ettiği ve silindirin merkezinde birleştiği görülmektedir. Re_{cwi}=239 değerine ulaştığında silindir alt ve üst kısmında TVF akış yapısının oluştuğu ve bu akış yapıları arasında dalgalı SVF (wSVF) vorteks yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte Re_{cwi}=267 değerine ulaştığında silindirin üst kısmında oluşan TVF akış yapısının WVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artmasıyla birlikte WVF akış yapısının silindirin alt kısmına doğru ilerlediği görülmektedir. Şekil 8.10b'de de açıkça görüldüğü gibi dalgalı akış yapılarının farklı dalga boylarına ve genliklerine sahip olduğu görülmüştür. Re_{cwi}=612 değerine ulaştığında ise dalgalı vorteks yapıları arasında gözlemlenen SVF akış yapılarının ortadan kaybolduğu görülmüştür. Gözlemlenen vorteks yapılarının eksenel dalga boylarında farklılıkların olduğu görülmüştür.



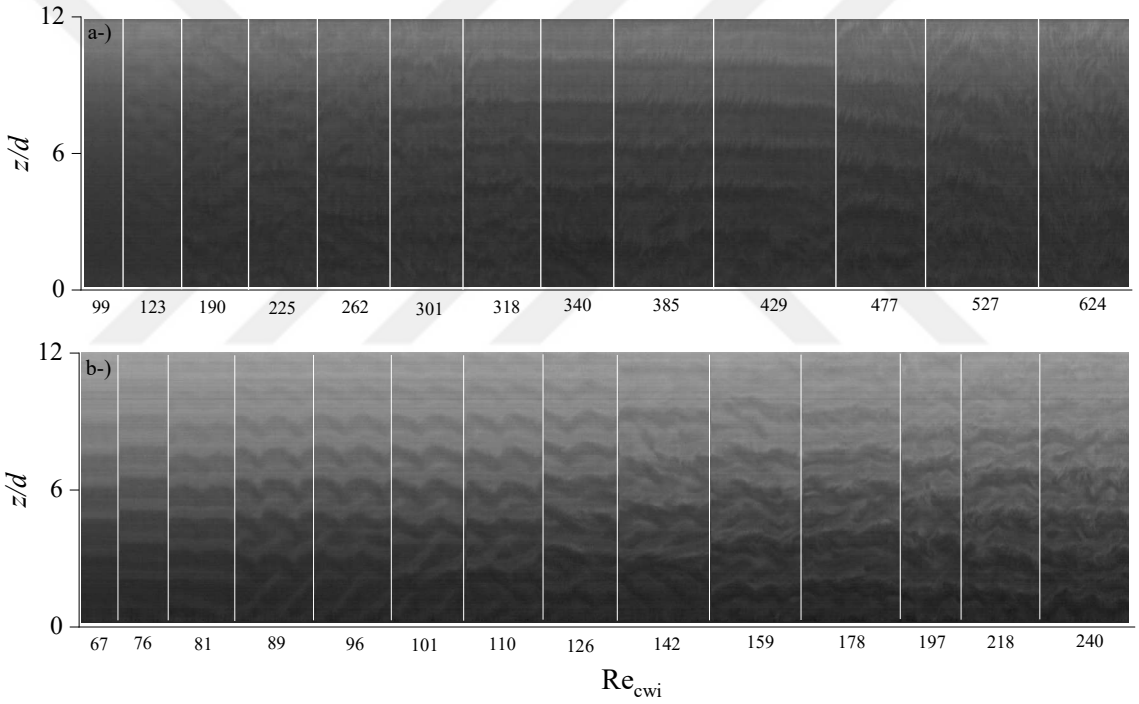


Şekil 8. 10 Xanthan çözeltisinin aynı yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a) n=0,45 ve (b) n=0,33 (η=0,868).

8.2.7 Zıt yöne dönme durumu

Bu bölümde bir önceki bölümden farklı olarak silindirlerin birbirlerine göre zıt yönme durumlarının akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerleri üzerine etkileri incelenmiştir. İlk olarak geniş boşluk koşullarında (η=0,643) n=0,5 ve n=0,39 değerleri için elde edilen uzay zaman grafikleri Re_{cwi} değerine bağlı olarak uzay zaman grafikleri şeklinde Şekil 8.11'de verilmiştir. İlk olarak n=0,5 değerine sahip XG akışkanının davranışı incelendiğinde (Şekil 8.11a), dış silindir sabit bir hızda dönerken zıt yönde iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte $123<Re_{cwi}<301$ aralığında bazı düzensiz akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=301 değerine ulaştığında silindir üst kısmında ilk düzenli akış yapısının gelişmeye başladığı görülmüştür. Re_{cwi}=340 değerine ulaştığında ise oluşan bu akış yapısının silindirin alt kısmına doğru ilerlediği görülmüştür. Ortaya çıkan bu TVF akış yapısının daha önce gözlemlenen akış yapılarına benzemediği ve görülmektedir. Re_{cwi} değeri 477'ye ulaştığında TVF akış yapısının kaybolarak düzensiz akış yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 8.11b'de ise n=0,39 değerine sahip

akışkanın Re_{cwi} değerine bağlı olarak elde edilen uzay zaman grafikleri verilmiştir. Dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindir hızının artırılmasıyla birlikte ilk olarak TVF akış yapısının Re_{cwi}= 76 iken oluştuğu gözlemlenmiştir. İç silindir hızı artırılarak Re_{cwi}=81 değerine ulaştığında TVF akış yapısının dalgalı vorteks akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapısının Re_{cwi}=142 değerine kadar silindir içerisinde görülmektedir. Dalgalı akış yapısının iç silindir hızının artmasıyla birlikte sürekli olarak geliştiği ancak silindirin alt kısmında akışı bozucu ikincil akışların oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 8.11b'den de görüldüğü gibi WVF akışının silindirin tamamına yaılmadığı görülmektdir. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla birlikte WVF akış yapısının düzensiz akış yapılarına dönüştüğü gözlemlenmiştir.

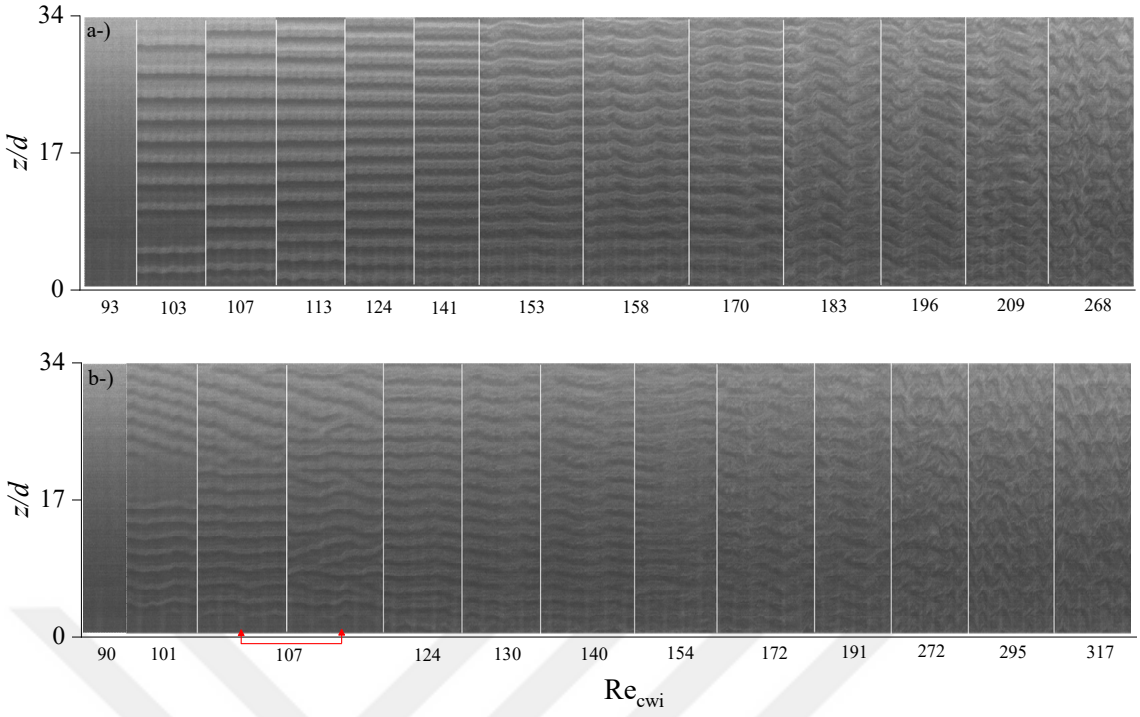


Şekil 8. 11 Xanthan çözeltisinin zıt yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a) n=0,50 and (b) n=0,39 (η=0,643).

TC reaktörü içerisinde dar boşluk koşullarında (η=0,868) XG akışkanının zıt yöne dönme koşullarında oluşan akış yapılarının uzay-zaman grafikleri Şekil 8.12'de verilmiştir. Silindir içerisinde ilk olarak n=0,33 özelliğine sahip XG çözeltisi kullanılmıştır. Dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindir hızının zıt yönde artırılması sonucunda ilk olarak CCF akış yapısının Re_{cwi}=103 değerinde TVF akış

yapısına kısmi olarak dönüştüğü gözlemlenmiştir. İç silindir hızının artırılması ile Re_{cwi}=107 değerine ulaştığında ise silindirin tamamında TVF akış yapısının görüldüğü gözlemlenmiştir. Re_{cwi}=141 değerine ulaştığında ise twisted akış yapısının oluştuğu görülmüştür. İç silindir hızının daha da artırılması sonucunda Re_{cwi}=153 değerine ulaştığında, twisted akış yapısında dalganmaların meydana geldiği ve akışın WVF akış yapısına dönüştüğü görülmüştür. İç silindir hızının daha da artırılması sonucunda (Re_{cwi} >209) WVF akış yapısının düzensiz akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 8.12a'den de açıkça görüldüğü gibi Re_{cwi}=107 değerine ulaştığında silindir içerisinde toplam 32 vorteks yapısı oluşurken, Re_{cwi}=141 değerine ulaştığında ise vorteks sayısının artarak 40 olduğu belirlenmiştir. Oluşan bu dalga yapılarının eksenel dalga boyları sırasıyla λ/d=2,85-2,11 şeklinde değiştiği gözlemlenmiştir.

Silindir içerisinde ilk olarak n=0,45 özelliğine sahip XG çözeltisi kullanıldığında ortaya çıkan akış yapıları ve kritik rejim geçişi değerleri Şekil 8.12b'de verilmiştir. Dış silindir sabit bir hızda dönerken iç silindir hızının zıt yönde kademeli olarak artırılması sonucunda silindir içerisinde oluşan CCF akış yapısının Re_{cwi}=101 değerinde SVF ve TVF akış yapısına dönüşmüştür. Silindirin alt kısmında TVF akış yapısı oluşurken silindirin üst kısmında SVF akış yapıları görülmüştür. İç silindir hızının artmasıyla birlikte TVF ve SVF akış yapılarının silindirin tamamını kapladığı ve Re_{cwi}=124 değerinde iken TVF akış yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 8.12b'den de gmrüldüğü gibi TVFa kış yapısı çok kısa bir Reynolds aralığında stabil kalmaktadır. Reynolds sayısı 130 değerine ulaştığında ise TVF akış yapısının stabilitesinin bozulduğu gözlemlenmiş ve akışın dalgalı akış yapısına dönüşmüştür. İç silindir hızının daha da artırılmasıyla Re_{cwi}=272 değerine ulaştığında WVF akış yapısında bozulmalar meydana geldiği görülmektedir. Silindir içerisindeki toplam vorteks sayısının Re_{cwi}=124 ve 140 değerinde 40 olduğu gözlemlenirken, eksenel dalga boyunun 2,30d ile 1,93d aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 8.12b'de görülen kırmızı oklar farklı zamanlarda aynı dönme koşullarında ortaya çıkan akış yapılarını göstermektedir.



Şekil 8. 12 Xanthan çözeltisinin zıt yöne dönme koşullarında oluşan akış yapıları (a) n=0,33 ve (b) n=0,45 (η=0.868).

9
Sonuç ve Öneriler

Tez çalışmasında Newtonyen ve Newtonyen olmayan akışkanların TC reaktörü içerisindeki akış yapılarının ve kritik rejim geçiş değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu çalışmalara ilave olarak süperhidrofobik yüzey koşullarının akış yapılarının değişimi üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiştir. Bununla birlikte yapılan deneysel çalışmalara ilave olarak nümerik simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Deneysel çalışmalarda iki farklı boşluk oranı kullanılarak, boşluk oranının akış yapıları ve kritik geçiş değerleri üzerine etkileri incelenmiştir. Newtonyen olmayan akışkan kullanımı durumunda, silindirler arası boşluk oranının artması ile birlikte kayma hızı değişiminin önemli oranda arttığı gözlemlenmiştir. Kayma hızında meydana gelen bu değişim silindirler arasındaki boşlukta viskozite değişiminide önemli ölçüde etkilemiştir.
- Kayma hızı profilinin değişmesi ile birlikte silindir içerisinde farklı akış yapılarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle geniş boşluk oranı (η=0,643) kullanımı durumunda, daha önce literatürde karşılaşılmamış iki yeni akış yapısının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan bu akış yapıları kılçık vorteks akışı (FVF) ve bobin vorteks akışı (CVF) olarak isimlendirilmiştir.
- Newtonyen olmayan akışkanların dar boşluk oranına (η=0,868) sahip TC reaktörü içerisinde kullanımı sonucunda, TVF akış yapısının oluşumu öncesi ve sonrasında simetrik olmayan akış yapılarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.
- Ortaya çıkan bu akış yapılarını tanımlamada, literatürde mevcut Reynolds sayılarının kullanımı sonucunda akışkan karakteristiğinin değişimi ile ortaya çıkan tutarsızlıkların, bu çalışmada boşluk boyunca ortaya çıkan viskozite değişiminin dikkate alınarak tanımlanan Reynolds sayısı (Re_G) kullanımı ile ortadan kalktığı görülmüştür.
- Dar boşluk oranı kullanımı durumunda, dış silindirin dönme yönünün ve dönme hızının akış yapıları ve kritik rejim geçiş değerleri üzerinde önemli değişikliklere

neden olduğu gözlemlenmiştir. Silindirlerin aynı yöne dönme durumunun zıt yöne dönme durumuna göre, Newtonyen olmayan akışkan kullanımı durumunda simetrik olmayan akış yapılarının silindirler arasındaki boşlukta oluştuğu gözlemlenmiştir.

- İç silindir yüzeyinin süper hidrofobik kaplanması sonucunda, ortaya çıkan akış yapılarında ve kritik rejim geçiş değerlerinde önemli değişimlerin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle akış yapısının, CCF akış yapısından TVF akış yapısına geçişte Reynolds sayısının % 8 – 30 aralığında artış gösterdiği gözlemlenmiştir.
- TC reaktörü içerisinde akma gerilmesine sahip akışkan kullanımı sonucunda, hareketsiz dış silindir civarında durağan bir akışkan tabakasının oluştuğu ve oluşan bu durağan akışkan tabakasınından dolayı ortaya çıkan akış yapıları belirgin bir şekilde gözlemlenememektedir.
- Gerçekleştirilen nümerik simülasyon sonrasında Newtonyen akışkanı kullanımı sonucunda ortaya çıkan akış yapıları deneysel sonuçlar ile benzer sonuçlar gösterirken, Newtonyen olmayan akışkan kullanımı sonucunda özellikle Herschel–Bulkley akışkanı kullanımı durumunda ortaya çıkan akış yapılarının deneysel sonuçlar ile uyuşmadığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasından ortaya çıkan sonuçların aynı zamanda, endüstriyel kullanım alanlarına da uygulanabileceğini göstermiştir. TC reaktörlerinde ortaya çıkan ikincil akış yapıları, partiküllerin eksenel ve radyal olarak karışım verimliliğinin artmasına ve bununla birlikte UV reaktörlerinde dezenfeksiyon ve grafit oksidasyon verimliliğinde önemli bir iyileşme sağlayacaktır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar; balast suyu arıtma sistemlerine alternatif arıtma sistenin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda grafen oksit verimliliğini artırabilmek için TC reaktörleri içerisindeki akış yapılarının bilinmesinin önemi vurgulanmıştır.

Kaynakça

[1] O. Reynolds, "An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, c. 174, ss. 935-982, 1883.

[2] M. A. Fardin, C. Perge, ve N. Taberlet, "'The hydrogen atom of fluid dynamics' – introduction to the Taylor–Couette flow for soft matter scientists", Soft Matter, c. 10, sy 20, ss. 3523-3535, Nis. 2014, doi: 10.1039/C3SM52828F.

[3] Couette M., "Oscillations tournantes d'un solide de révolution en contact avec un fluide visqueux", Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, c. 105, ss. 1064-1067, 1887.

[4] Taylor Geoffrey Ingram, "VIII. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders", Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, c. 223, sy 605-615, ss. 289-343, Oca. 1923, doi: 10.1098/rsta.1923.0008.

[5] D. Coles, "Transition in circular Couette flow", Journal of Fluid Mechanics, c. 21, sy 3, ss. 385-425, Mar. 1965, doi: 10.1017/S0022112065000241.

[6] C. D. Andereck, S. S. Liu, ve H. L. Swinney, "Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders", Journal of Fluid Mechanics, c. 164, ss. 155-183, Mar. 1986, doi: 10.1017/S0022112086002513.

[7] A. Esser ve S. Grossmann, "Analytic expression for Taylor–Couette stability boundary", Physics of Fluids, c. 8, sy 7, ss. 1814-1819, Tem. 1996, doi: 10.1063/1.868963.

[8] C. S. Dutcher ve S. J. Muller, "Explicit analytic formulas for Newtonian Taylor-Couette primary instabilities", Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, c. 75, sy 4 Pt 2, s. 047301, Nis. 2007, doi: 10.1103/PhysRevE.75.047301.

[9] M. Nemri, E. Climent, S. Charton, J.-Y. Lanoë, ve D. Ode, "Experimental and numerical investigation on mixing and axial dispersion in Taylor–Couette flow patterns", Chemical Engineering Research and Design, c. 91, sy 12, ss. 2346-2354, Ara. 2013, doi: 10.1016/j.cherd.2012.11.010.

[10] P. R. Fenstermacher, H. L. Swinney, ve J. P. Gollub, "Dynamical instabilities and the transition to chaotic Taylor vortex flow", Journal of Fluid Mechanics, c. 94, sy 1, ss. 103-128, Eyl. 1979, doi: 10.1017/S0022112079000963.

[11] C. S. Dutcher ve S. J. Muller, "Spatio-temporal mode dynamics and higher order transitions in high aspect ratio Newtonian Taylor–Couette flows", Journal of Fluid Mechanics, c. 641, ss. 85-113, Ara. 2009, doi: 10.1017/S0022112009991431.

[12] Y. Takeda, K. Kobashi, ve W. E. Fischer, "Observation of the transient behaviour of Taylor vortex flow between rotating concentric cylinders after

sudden start", Experiments in Fluids, c. 9, sy 6, ss. 317-319, Eyl. 1990, doi: 10.1007/BF00188759.

[13] R. B. Bird, R. C. Armstrong, ve O. Hassager, "Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1, 2nd Ed.: Fluid mechanics", 1987.

[14] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, Transport Phenomena, Revised 2nd Edition. .

[15] F. Wendt, "Turbulente Strömungen zwischen zwei rotierenden konaxialen Zylindern", Ing. arch, c. 4, sy 6, ss. 577-595, Ara. 1933, doi: 10.1007/BF02084936.

[16] Taylor Geoffrey Ingram, "Fluid friction between rotating cylinders I—Torque measurements", Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences, c. 157, sy 892, ss. 546-564, Ara. 1936, doi: 10.1098/rspa.1936.0215.

[17] R. J. Donnelly ve N. J. Simon, "An empirical torque relation for supercritical flow between rotating cylinders", Journal of Fluid Mechanics, c. 7, sy 3, ss. 401-418, Mar. 1960, doi: 10.1017/S0022112060000177.

[18] K. Nakabayashi, Y. Yamada, ve T. Kishimoto, "Viscous frictional torque in the flow between two concentric rotating rough cylinders", Journal of Fluid Mechanics, c. 119, ss. 409-422, Haz. 1982, doi: 10.1017/S0022112082001414.

[19] R. Ostilla-Mónico, R. Verzicco, S. Grossmann, ve D. Lohse, "The near-wall region of highly turbulent Taylor–Couette flow", Journal of Fluid Mechanics, c. 788, ss. 95-117, Şub. 2016, doi: 10.1017/jfm.2015.675.

[20] R. O. Monico, E. van der Poel, R. Verzicco, S. Grossmann, ve D. Lohse, "Exploring the phase diagram of fully turbulent Taylor–Couette flow", J FLUID MECH, c. 761, ss. 1-26, 2014, doi: 10.1017/jfm.2014.618.

[21] S. Grossmann, D. Lohse, ve C. Sun, "High–Reynolds Number Taylor-Couette Turbulence", Annual Review of Fluid Mechanics, c. 48, sy 1, ss. 53-80, 2016, doi: 10.1146/annurev-fluid-122414-034353.

[22] M. N. Noui-Mehidi, J. I. Inayat-Hussain, ve N. Ohmura, "Analysis of quasi-steady acceleration in circular Couette flow", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, c. 13, sy 9, ss. 1796-1800, Kas. 2008, doi: 10.1016/j.cnsns.2007.04.013.

[23] S.-H. Lee, H.-T. Chung, C.-W. Park, ve H.-B. Kim, "Experimental investigation of the effect of axial wall slits on Taylor–Couette flow", Fluid Dyn. Res., c. 41, sy 4, s. 045502, May. 2009, doi: 10.1088/0169-5983/41/4/045502.

[24] X. Xu, P. Wen, L. Xu, ve D. Cao, "Occurrence of Taylor vortices in the flow between two rotating conical cylinders", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, c. 15, sy 5, ss. 1228-1239, May. 2010, doi: 10.1016/j.cnsns.2009.05.061.

[25] U. Naseem, M. B. Awan, B. Saeed, N. Abbas, S. Nawaz, ve M. Hussain, "Experimental investigation of flow instabilities in a wide gap turbulent

rotating Taylor-Couette flow", Case Studies in Thermal Engineering, c. 14, s. 100449, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100449.

[26] F. Ravelet, R. Delfos, ve J. Westerweel, "Influence of global rotation and Reynolds number on the large-scale features of a turbulent Taylor–Couette flow", Physics of Fluids, c. 22, sy 5, s. 055103, May. 2010.

[27] S. Tokgoz, G. E. Elsinga, R. Delfos, ve J. Westerweel, "Experimental investigation of torque scaling and coherent structures in turbulent Taylor–Couette flow", J. Phys.: Conf. Ser., c. 318, sy 8, s. 082018, Ara. 2011, doi: 10.1088/1742-6596/318/8/082018.

[28] Q. Li, P. Wen, ve L. Xu, "Transition to Taylor vortex flow between rotating conical cylinders", Journal of Hydrodynamics, Ser. B, c. 22, sy 2, ss. 241-245, Nis. 2010, doi: 10.1016/S1001-6058(09)60050-0.

[29] K. Sodjavi, F. Ravelet, ve F. Bakir, "Effects of axial rectangular groove on turbulent Taylor-Couette flow from analysis of experimental data", Experimental Thermal and Fluid Science, c. 97, ss. 270-278, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.04.022.

[30] H.-S. Dou, B. C. Khoo, ve K. S. Yeo, "Instability of Taylor–Couette flow between concentric rotating cylinders", International Journal of Thermal Sciences, c. 47, sy 11, ss. 1422-1435, Kas. 2008, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.12.012.

[31] H. Kikura, M. Aritomi, ve Y. Takeda, "Velocity measurement on Taylor–Couette flow of a magnetic fluid with small aspect ratio", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, c. 289, ss. 342-345, Mar. 2005.

[32] V. Spandan, R. Ostilla-Monico, D. Lohse, ve R. Verzicco, "Identifying coherent structures and vortex clusters in Taylor-Couette turbulence", J. Phys.: Conf. Ser., c. 708, s. 012006, Nis. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/708/1/012006.

[33] K. Koeltzsch, Y. Qi, R. S. Brodkey, ve J. L. Zakin, "Drag reduction using surfactants in a rotating cylinder geometry", Exp Fluids, c. 34, sy 4, ss. 515-530, Nis. 2003, doi: 10.1007/s00348-003-0590-4.

[34] Y. Murai, H. Oiwa, ve Y. Takeda, "Frictional drag reduction in bubbly Couette–Taylor flow", Physics of Fluids, c. 20, sy 3, s. 034101, Mar. 2008, doi: 10.1063/1.2884471.

[35] S. Srinivasan, J. A. Kleingartner, J. B. Gilbert, R. E. Cohen, A. J. B. Milne, ve G. H. McKinley, "Sustainable Drag Reduction in Turbulent Taylor-Couette Flows by Depositing Sprayable Superhydrophobic Surfaces", Phys. Rev. Lett., c. 114, sy 1, s. 014501, Oca. 2015, doi: 10.1103/PhysRevLett.114.014501.

[36] P. Bhambri, R. Narain, ve B. Fleck, "Drag Reduction Using Polysaccharides in a Taylor–Couette Flow", Polymers, c. 9, sy 12, 2017.

[37] A. Keller, G. Kiss, ve M. R. Mackley, "Polymer drag reduction in Taylor vortices", Nature, c. 257, sy 5524, s. 304, Eyl. 1975, doi: 10.1038/257304a0.

[38] P. Bhambri, R. Narain, ve B. A. Fleck, "Thermo-responsive polymers for drag reduction in turbulent Taylor–Couette flow", Journal of Applied Polymer Science, c. 133, sy 46, 2016, doi: 10.1002/app.44191.

[39] A. J. Greidanus, R. Delfos, ve J. Westerweel, “Drag reduction by surface treatment in turbulent Taylor-Couette flow”, J. Phys.: Conf. Ser., c. 318, sy 8, s. 082016, Ara. 2011, doi: 10.1088/1742-6596/318/8/082016.

[40] S. Altmeyer vd., “End wall effects on the transitions between Taylor vortices and spiral vortices”, Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, c. 81, sy 6 Pt 2, s. 066313, Haz. 2010, doi: 10.1103/PhysRevE.81.066313.

[41] C. Hoffmann, S. Altmeyer, A. Pinter, ve M. Lücke, “Transitions between Taylor vortices and spirals via wavy Taylor vortices and wavy spirals”, New J. Phys., c. 11, sy 5, s. 053002, May. 2009, doi: 10.1088/1367-2630/11/5/053002.

[42] E. Climent, M. Simonnet, ve J. Magnaudet, “Preferential accumulation of bubbles in Couette-Taylor flow patterns”, Physics of Fluids, c. 19, sy 8, s. 083301, Ağu. 2007, doi: 10.1063/1.2752839.

[43] Y. Mao, Q. Chang, L. Zeng, ve C. Yu, “Velocity Field Structure and Flocculation Efficiency in Taylor-Couette Flow”, Separation Science and Technology, c. 48, sy 4, ss. 659-663, Oca. 2013, doi: 10.1080/01496395.2012.692420.

[44] S. Lee, C.-H. Lee, ve W.-S. Kim, “Taylor vortex effect on flocculation of hairy crystals of calcium lactate in anti-solvent crystallization”, Journal of Crystal Growth, c. 373, ss. 32-37, Haz. 2013, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2012.10.012.

[45] S. H. Kang vd., “Effect of Taylor vortices on calcium carbonate crystallization by gas–liquid reaction”, Journal of Crystal Growth, c. 254, sy 1, ss. 196-205, Haz. 2003, doi: 10.1016/S0022-0248(03)01152-7.

[46] A. L. Ahmad, A. Kusumastuti, M. M. H. Shah Buddin, C. J. C. Derek, ve B. S. Ooi, “Emulsion liquid membrane based on a new flow pattern in a counter rotating Taylor-Couette column for cadmium extraction”, Separation and Purification Technology, c. 127, ss. 46-52, Nis. 2014, doi: 10.1016/j.seppur.2014.02.029.

[47] L. J. Forney, C. F. Goodridge, ve J. A. Pierson, “Ultraviolet Disinfection: Similitude in Taylor−Couette and Channel Flow”, Environ. Sci. Technol., c. 37, sy 21, ss. 5015-5020, Kas. 2003, doi: 10.1021/es0303236.

[48] L. J. Forney, Z. Ye, ve T. Koutchma, “UV Disinfection of E. coli Between Concentric Cylinders: Effects of the Boundary Layer and a Wavy Wall”, Ozone: Science & Engineering, c. 30, sy 6, ss. 405-412, Kas. 2008, doi: 10.1080/01919510802473872.

[49] Z. Ye, L. J. Forney, T. Koutchma, A. T. Giorges, ve J. A. Pierson, “Optimum UV Disinfection between Concentric Cylinders”, Ind. Eng. Chem. Res., c. 47, sy 10, ss. 3444-3452, May. 2008, doi: 10.1021/ie0703641.

[50] M. Orlowska, T. Koutchma, M. Kostrzynska, J. Tang, ve C. Defelice, “Evaluation of mixing flow conditions to inactivate Escherichia coli in opaque liquids using pilot-scale Taylor–Couette UV unit”, Journal of Food Engineering, c. 120, ss. 100-109, Oca. 2014, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.07.020.

[51] H. O. G. Benschop vd., “Drag-reducing riblets with fouling-release properties: development and testing”, Biofouling, c. 34, sy 5, ss. 532-544, May. 2018, doi: 10.1080/08927014.2018.1469747.

[52] E. Dłuska, R. Hubacz, S. Wroński, J. Kamieński, M. Dyląg, ve R. Wójtowicz, "The Influence of Helical Flow on Water Fuel Emulsion Preparation", Chemical Engineering Communications, c. 194, sy 10, ss. 1271-1286, Haz. 2007, doi: 10.1080/00986440701293959.

[53] G. A. Ameer, G. Barabino, R. Sasisekharan, W. Harmon, C. L. Cooney, ve R. Langer, "Ex vivo evaluation of a Taylor-Couette flow, immobilized heparinase I device for clinical application", PNAS, c. 96, sy 5, ss. 2350-2355, Mar. 1999, doi: 10.1073/pnas.96.5.2350.

[54] B. Kong ve R. D. Vigil, "Light-limited continuous culture of Chlorella vulgaris in a Taylor vortex reactor", Environmental Progress & Sustainable Energy, c. 32, sy 4, ss. 884-890, 2013, doi: 10.1002/ep.11834.

[55] Š. Papáček, V. Štumbauer, D. Štys, K. Petera, ve C. Matonoha, "Growth impact of hydrodynamic dispersion in a Couette–Taylor bioreactor", Mathematical and Computer Modelling, c. 54, sy 7, ss. 1791-1795, Eki. 2011, doi: 10.1016/j.mcm.2010.12.022.

[56] S. Baek, K. H. Kim, I. Choi, O. J. Kwon, ve J. J. Kim, "N2O dissolution with Couette-Taylor flow mixer for the effective electrochemical N2O reduction reaction", Chemical Engineering Journal, c. 335, ss. 915-920, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.cej.2017.11.042.

[57] M. Kim vd., "Preparation of black pigment with the Couette–Taylor vortex for electrophoretic displays", Chemical Engineering Science, c. 119, ss. 245-250, Kas. 2014, doi: 10.1016/j.ces.2014.08.036.

[58] W. K. Park vd., "Facile synthesis of graphene oxide in a Couette–Taylor flow reactor", Carbon, c. 83, ss. 217-223, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.carbon.2014.11.024.

[59] W. K. Park vd., "Toward Green Synthesis of Graphene Oxide Using Recycled Sulfuric Acid via Couette–Taylor Flow", 24-Oca-2017. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsomega.6b00352. [Erişim: 19-May-2019].

[60] W. K. Park vd., "High-efficiency exfoliation of large-area mono-layer graphene oxide with controlled dimension", Scientific Reports, c. 7, sy 1, s. 16414, Kas. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-16649-y.

[61] T. S. Tran, S. J. Park, S. S. Yoo, T.-R. Lee, ve T. Kim, "High shear-induced exfoliation of graphite into high quality graphene by Taylor–Couette flow", RSC Adv., c. 6, sy 15, ss. 12003-12008, Oca. 2016, doi: 10.1039/C5RA22273G.

[62] M. R. Hajmohammadi ve M. H. Haji Molla Ali Tork, "Effects of the magnetic field on the cylindrical Couette flow and heat transfer of a nanofluid", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, c. 523, ss. 234-245, Haz. 2019, doi: 10.1016/j.physa.2019.02.037.

[63] W. K. Park vd., "Feasible water flow filter with facilely functionalized Fe3O4-non-oxidative graphene/CNT composites for arsenic removal", Journal of Environmental Chemical Engineering, c. 4, sy 3, ss. 3246-3252, Eyl. 2016, doi: 10.1016/j.jece.2016.06.028.

[64] P. K. Dutta ve A. K. Ray, “Experimental investigation of Taylor vortex photocatalytic reactor for water purification”, Chemical Engineering Science, c. 59, sy 22, ss. 5249-5259, Kas. 2004, doi: 10.1016/j.ces.2004.07.091.

[65] N. Patel, V. Choy, T. White, G. Munkvold, ve J. Thibault, “Design of a novel Couette flow bioreactor to study the growth of fungal microorganism”, Journal of Biotechnology, c. 145, sy 3, ss. 264-272, Şub. 2010, doi: 10.1016/j.jbiotec.2009.11.023.

[66] C. Cojocaru, G. Zakrzewska-Trznadel, ve A. Miskiewicz, “Removal of cobalt ions from aqueous solutions by polymer assisted ultrafiltration using experimental design approach: Part 2: Optimization of hydrodynamic conditions for a crossflow ultrafiltration module with rotating part”, Journal of Hazardous Materials, c. 169, sy 1, ss. 610-620, Eyl. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.148.

[67] J. Qiao, W.-C. Yan, J. H. Teoh, Y. W. Tong, ve C.-H. Wang, “Experimental and computational studies of oxygen transport in a Taylor-Couette bioreactor”, Chemical Engineering Journal, c. 334, ss. 1954-1964, Şub. 2018, doi: 10.1016/j.cej.2017.11.137.

[68] I. Torres Pineda ve Y. T. Kang, “CO2 absorption enhancement by nanoabsorbents in Taylor–Couette absorber”, International Journal of Heat and Mass Transfer, c. 100, ss. 39-47, Eyl. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.086.

[69] M. Fénot, Y. Bertin, E. Dorignac, ve G. Lalizel, “A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow”, International Journal of Thermal Sciences, c. 50, sy 7, ss. 1138-1155, Tem. 2011, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.013.

[70] D. Liu, I.-S. Kang, J.-E. Cha, ve H.-B. Kim, “Experimental study on radial temperature gradient effect of a Taylor–Couette flow with axial wall slits”, Experimental Thermal and Fluid Science, c. 35, sy 7, ss. 1282-1292, Eki. 2011, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.016.

[71] R. Hubacz, N. Ohmura, ve E. Dluska, “Intensification of Starch Processing Using Apparatus with Couette–Taylor Flow”, Journal of Food Process Engineering, c. 36, sy 6, ss. 774-785, 2013, doi: 10.1111/jfpe.12046.

[72] T. Guélon, J.-D. Mathias, ve P. Stoodley, “Advances in Biofilm Mechanics”, içinde Biofilm Highlights, H.-C. Flemming, J. Wingender, ve U. Szewzyk, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, ss. 111-139.

[73] A. H. Rickard, A. J. McBain, A. T. Stead, ve P. Gilbert, “Shear Rate Moderates Community Diversity in Freshwater Biofilms”, Appl Environ Microbiol, c. 70, sy 12, ss. 7426-7435, Ara. 2004, doi: 10.1128/AEM.70.12.7426-7435.2004.

[74] A. Rochex, J.-J. Godon, N. Bernet, ve R. Escudié, “Role of shear stress on composition, diversity and dynamics of biofilm bacterial communities”, Water Research, c. 42, sy 20, ss. 4915-4922, Ara. 2008, doi: 10.1016/j.watres.2008.09.015.

[75] Y. F. Maa ve C. C. Hsu, “Effect of high shear on proteins”, Biotechnol. Bioeng., c. 51, sy 4, ss. 458-465, Ağu. 1996, doi: 10.1002/(SICI)1097-0290(19960820)51:4<458::AID-BIT9>3.0.CO;2-H.

[76] L. Ashton, J. Dusting, E. Imomoh, S. Balabani, ve E. W. Blanch, “Shear-Induced Unfolding of Lysozyme Monitored In Situ”, Biophys J, c. 96, sy 10, ss. 4231-4236, May. 2009, doi: 10.1016/j.bpj.2009.02.024.

[77] B. Haut, H. Ben Amor, L. Coulon, A. Jacquet, ve V. Halloin, “Hydrodynamics and mass transfer in a Couette–Taylor bioreactor for the culture of animal cells”, Chemical Engineering Science, c. 58, sy 3, ss. 777-784, Şub. 2003, doi: 10.1016/S0009-2509(02)00607-3.

[78] G. A. Ameer, E. A. Grovender, B. Obradovic, C. L. Cooney, ve R. Langer, “RTD analysis of a novel Taylor-Couette flow device for blood detoxification”, A.I.C.H.E. J., c. 45, sy 3, ss. 633-638, Oca. 1999, doi: 10.1002/aic.690450320.

[79] S. J. Curran ve R. A. Black, “Quantitative experimental study of shear stresses and mixing in progressive flow regimes within annular-flow bioreactors”, Chemical Engineering Science, c. 59, sy 24, ss. 5859-5868, Ara. 2004, doi: 10.1016/j.ces.2004.07.044.

[80] S. J. Curran ve R. A. Black, “Taylor-Vortex Bioreactors for Enhanced Mass Transport”, içinde Bioreactors for Tissue Engineering: Principles, Design and Operation, J. Chaudhuri ve M. Al-Rubeai, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005, ss. 47-85.

[81] L. Jørgensen, M. L. Merrer, H. Delanoë-Ayari, ve C. Barentin, “Yield stress and elasticity influence on surface tension measurements”, Soft Matter, c. 11, sy 25, ss. 5111-5121, Haz. 2015, doi: 10.1039/C5SM00569H.

[82] C. Schäfer, A. Morozov, ve C. Wagner, “Geometric scaling of elastic instabilities in the Taylor–Couette geometry: A theoretical, experimental and numerical study”, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 259, ss. 78-90, Eyl. 2018, doi: 10.1016/j.jnnfm.2018.06.002.

[83] A. M. A. Mohamed, A. M. Abdullah, ve N. A. Younan, “Corrosion behavior of superhydrophobic surfaces: A review”, Arabian Journal of Chemistry, c. 8, sy 6, ss. 749-765, Kas. 2015, doi: 10.1016/j.arabjc.2014.03.006.

[84] Bormashenko Edward, “Wetting transitions on biomimetic surfaces”, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, c. 368, sy 1929, ss. 4695-4711, Eki. 2010, doi: 10.1098/rsta.2010.0121.

[85] Y. Xiang, Y. Xue, P. Lv, D. Li, ve H. Duan, “Influence of fluid flow on the stability and wetting transition of submerged superhydrophobic surfaces”, Soft Matter, c. 12, sy 18, ss. 4241-4246, May. 2016, doi: 10.1039/C6SM00302H.

[86] T. Min ve J. Kim, “Effects of hydrophobic surface on stability and transition”, Physics of Fluids, c. 17, sy 10, s. 108106, Eki. 2005, doi: 10.1063/1.2126569.

[87] J. Ou ve J. P. Rothstein, “Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces”, Physics of Fluids, c. 17, sy 10, s. 103606, Eki. 2005, doi: 10.1063/1.2109867.

[88] A. Busse, N. D. Sandham, G. McHale, ve M. I. Newton, “Change in drag, apparent slip and optimum air layer thickness for laminar flow over an idealised superhydrophobic surface”, Journal of Fluid Mechanics, c. 727, ss. 488-508, Tem. 2013, doi: 10.1017/jfm.2013.284.

[89] J. Ou, B. Perot, ve J. P. Rothstein, “Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces”, Physics of Fluids, c. 16, sy 12, ss. 4635-4643, Kas. 2004, doi: 10.1063/1.1812011.

[90] K. Watanabe, Y. Udagawa, ve H. Udagawa, “Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall”, Journal of Fluid Mechanics, c. 381, ss. 225-238, Şub. 1999, doi: 10.1017/S0022112098003747.

[91] R. J. Daniello, N. E. Waterhouse, ve J. P. Rothstein, “Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces”, Physics of Fluids, c. 21, sy 8, s. 085103, Ağu. 2009, doi: 10.1063/1.3207885.

[92] C.-H. Choi ve C.-J. Kim, “Large Slip of Aqueous Liquid Flow over a Nanoengineered Superhydrophobic Surface”, Phys. Rev. Lett., c. 96, sy 6, s. 066001, Şub. 2006, doi: 10.1103/PhysRevLett.96.066001.

[93] S. G. Kandlikar, D. Schmitt, A. L. Carrano, ve J. B. Taylor, “Characterization of surface roughness effects on pressure drop in single-phase flow in minichannels”, Physics of Fluids, c. 17, sy 10, s. 100606, Eki. 2005, doi: 10.1063/1.1896985.

[94] W. Wu ve U. Piomelli, “Effects of surface roughness on a separating turbulent boundary layer”, Journal of Fluid Mechanics, c. 841, ss. 552-580, Nis. 2018, doi: 10.1017/jfm.2018.101.

[95] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, ve H. H. Soliman, “Roughness parameters”, Journal of Materials Processing Technology, c. 123, sy 1, ss. 133-145, Nis. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2.

[96] G. I. Taylor, “Stability of a Viscous Liquid Contained between Two Rotating Cylinders”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, c. 223, ss. 289-343, 1923.

[97] G. G. Stokes, “On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids”, Mathematical and Physical Papers, Tem-2009. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: /core/books/mathematical-and-physical-papers/on-the-theories-of-the-internal-friction-of-fluids-in-motion-and-of-the-equilibrium-and-motion-of-elastic-solids/03959CB979233BCA95EB128CC5FF6D41. [Erişim: 20-Eki-2019].

[98] S. T. Wereley ve R. M. Lueptow, “Spatio-temporal character of non-wavy and wavy Taylor–Couette flow”, Journal of Fluid Mechanics, c. 364, ss. 59-80, Haz. 1998, doi: 10.1017/S0022112098008969.

[99] B. Eckhardt, S. Grossmann, ve D. Lohse, "Torque scaling in turbulent Taylor–Couette flow between independently rotating cylinders", Journal of Fluid Mechanics, c. 581, ss. 221-250, Haz. 2007, doi: 10.1017/S0022112007005629.

[100] B. Martínez-Arias, J. Peixinho, O. Crumeyrolle, ve I. Mutabazi, "Effect of the number of vortices on the torque scaling in Taylor–Couette flow", Journal of Fluid Mechanics, c. 748, ss. 756-767, Haz. 2014, doi: 10.1017/jfm.2014.213.

[101] S. A. Bahrani, C. Nouar, A. Neveu, ve S. Becker, "Transition to chaotic Taylor-Couette flow in shear-thinning fluids", içinde 22ème Congrès français de mécanique, Lyon, France, 2015.

[102] N. Cagney ve S. Balabani, "Taylor-Couette flow of shear-thinning fluids", Physics of Fluids, c. 31, sy 5, s. 053102, May. 2019, doi: 10.1063/1.5088143.

[103] N. Cagney ve S. Balabani, "Influence of Shear-Thinning Rheology on the Mixing Dynamics in Taylor-Couette Flow", Chemical Engineering & Technology, c. 42, sy 8, ss. 1680-1690, 2019, doi: 10.1002/ceat.201900015.

[104] T. J. Lockett, S. M. Richardson, ve W. J. Worraker, "The stability of inelastic non-Newtonian fluids in Couette flow between concentric cylinders: a finite-element study", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 43, sy 2, ss. 165-177, Tem. 1992, doi: 10.1016/0377-0257(92)80023-Q.

[105] M. P. Escudier, I. W. Gouldson, ve D. M. Jones, "Taylor Vortices in Newtonian and Shear-Thinning Liquids", Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, c. 449, sy 1935, ss. 155-176, 1995.

[106] M.-K. Yi ve C. Kim, "Experimental studies on the Taylor instability of dilute polymer solutions", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 72, sy 2, ss. 113-139, Eki. 1997, doi: 10.1016/S0377-0257(97)00032-3.

[107] F. Caton, "Linear stability of circular Couette flow of inelastic viscoplastic fluids", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 134, sy 1, ss. 148-154, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.jnnfm.2006.02.003.

[108] B. Alibenyahia, C. Lemaitre, C. Nouar, ve N. Ait-Messaoudene, "Revisiting the stability of circular Couette flow of shear-thinning fluids", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 183-184, ss. 37-51, Eyl. 2012, doi: 10.1016/j.jnnfm.2012.06.002.

[109] M. V. Majji, S. Banerjee, ve J. F. Morris, "Inertial flow transitions of a suspension in Taylor–Couette geometry", Journal of Fluid Mechanics, c. 835, ss. 936-969, Oca. 2018, doi: 10.1017/jfm.2017.754.

[110] B. Güzel, I. Frigaard, ve D. M. Martinez, "Predicting laminar–turbulent transition in Poiseuille pipe flow for non-Newtonian fluids", Chemical Engineering Science, c. 64, sy 2, ss. 254-264, Oca. 2009, doi: 10.1016/j.ces.2008.10.011.

[111] B. Güzel, T. Burghelea, I. A. Frigaard, ve D. M. Martinez, "Observation of laminar–turbulent transition of a yield stress fluid in Hagen–Poiseuille flow",

Journal of Fluid Mechanics, c. 627, ss. 97-128, May. 2009, doi: 10.1017/S0022112009005813.

[112] O. Czarny, E. Serre, P. Bontoux, ve R. M. Lueptow, "Interaction between Ekman pumping and the centrifugal instability in Taylor–Couette flow", Physics of Fluids, c. 15, sy 2, ss. 467-477, Oca. 2003, doi: 10.1063/1.1534108.

[113] H. W. Friebe, "Das Stabilitätsverhalten verdünnter Lösungen sehr langkettiger Hochpolymerer in der Couette-Strömung", Rheol Acta, c. 15, sy 6, ss. 329-355, Haz. 1976, doi: 10.1007/BF01517227.

[114] R. Haas ve K. Bühler, "Einfluß nichtnewtonscher Stoffeigenschaften auf die Taylor-Wirbelströmung", Rheol Acta, c. 28, sy 5, ss. 402-413, Eyl. 1989, doi: 10.1007/BF01336807.

[115] R. G. Larson, E. S. G. Shaqfeh, ve S. J. Muller, "A purely elastic instability in Taylor–Couette flow", Journal of Fluid Mechanics, c. 218, ss. 573-600, Eyl. 1990, doi: 10.1017/S0022112090001124.

[116] R. G. Larson, "Instabilities in viscoelastic flows", Rheola Acta, c. 31, sy 3, ss. 213-263, May. 1992, doi: 10.1007/BF00366504.

[117] S. J. Muller, R. G. Larson, ve E. S. G. Shaqfeh, "A purely elastic transition in Taylor-Couette flow", Rheol Acta, c. 28, sy 6, ss. 499-503, Kas. 1989, doi: 10.1007/BF01332920.

[118] H. Giesekus, "Zur Stabilität von Strömungen viskoelastischer Flüssigkeiten", Rheol Acta, c. 5, sy 3, ss. 239-252, Eyl. 1966, doi: 10.1007/BF01982435.

[119] N. Ait-Moussa, S. Poncet, ve A. Ghezal, "Numerical Simulations of Co- and Counter-Taylor-Couette Flows: Influence of the Cavity Radius Ratio on the Appearance of Taylor Vortices", American Journal of Fluid Dynamics, c. 5, sy 1, ss. 17-22, 2015.

[120] T. Von Kármán, "Uber laminare und turbulente Reibung", Z. Angew. Math. Mech., c. 1, ss. 233-252, 1921.

[121] R. Tagg, "The Couette-Taylor Problem", Nonlinear Science Today, c. 4, sy 3, ss. 1-25, 1994.

[122] R. C. di Prima ve H. L. Swinney, "Instabilities and transition in flow between concentric rotating cylinders", Hydrodynamic Instabilities and the Transition to Turbulence, ss. 139-180, 1981.

[123] G. Iooss, "Secondary bifurcations of Taylor vortices into wavy inflow or outflow boundaries", Journal of Fluid Mechanics, c. 173, ss. 273-288, Ara. 1986, doi: 10.1017/S0022112086001179.

[124] R. Tanaka, T. Kawata, ve T. Tsukahara, "DNS of Taylor-Couette flow between counter-rotating cylinders at small radius ratio", Int J Adv Eng Sci Appl Math, c. 10, sy 2, ss. 159-170, Haz. 2018, doi: 10.1007/s12572-018-0217-x.

[125] M. Heise, C. Hoffmann, C. Will, S. Altmeyer, J. Abshagen, ve G. Pfister, "Co-rotating Taylor–Couette flow enclosed by stationary disks", Journal of Fluid Mechanics, c. 716, Şub. 2013, doi: 10.1017/jfm.2012.530.

[126] E. Ikeda ve T. Maxworthy, “Spatially forced corotating Taylor-Couette flow”, Phys. Rev. E, c. 49, sy 6, ss. 5218-5224, Haz. 1994, doi: 10.1103/PhysRevE.49.5218.

[127] Andereck, C. D., Dickman, R., ve Swinney, L. H., “New flows in a circular Couette system with co-rotating cylinders”, The Physics of Fluids, c. 26, sy 6, s. 1395, 1983.

[128] Baxter, G. W. ve Andereck, C. D., “Formation of Dynamical Domains in a Circular Couette System”, Phys. Rev. Lett., c. 57, s. 3046, 1986.

[129] E. R. Krueger, A. Gross, ve R. C. D. Prima, “On the relative importance of Taylor-vortex and non-axisymmetric modes in flow between rotating cylinders”, Journal of Fluid Mechanics, c. 24, sy 3, ss. 521-538, Mar. 1966, doi: 10.1017/S002211206600079X.

[130] R. P. Feynman, R. B. Leighton, ve M. Sands, The Feynman Lectures on Physics, Vol. II: The New Millennium Edition: Mainly Electromagnetism and Matter. Basic Books, 1964.

[131] A. Prigent ve O. Dauchot, “‘Barber pole turbulence’ in large aspect ratio Taylor-Couette flow”, Phys. Rev. Lett., c. 89, sy 1, s. 014501, Haz. 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.89.014501.

[132] A. Goharzadeh ve I. Mutabazi, “Experimental characterization of intermittency regimes in the Couette-Taylor system”, Eur. Phys. J. B, c. 19, sy 1, ss. 157-162, Oca. 2001, doi: 10.1007/s100510170360.

[133] J. J. Hegseth, G. W. Baxter, ve C. D. Andereck, “Bifurcations from Taylor vortices between corotating concentric cylinders”, Phys. Rev. E, c. 53, sy 1, ss. 507-521, Oca. 1996, doi: 10.1103/PhysRevE.53.507.

[134] J. Antonijoan ve J. Sánchez, “Transitions from Taylor vortex flow in a co-rotating Taylor–Couette system”, Physics of Fluids, c. 12, sy 12, ss. 3147-3159, Kas. 2000, doi: 10.1063/1.1313385.

[135] Lord Rayleigh, “On the dynamics of revolving fluids”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, c. 93, sy 648, ss. 148-154, Mar. 1917, doi: 10.1098/rspa.1917.0010.

[136] D. P. M. van Gils, S. G. Huisman, G.-W. Bruggert, C. Sun, ve D. Lohse, “Torque Scaling in Turbulent Taylor-Couette Flow with Co- and Counterrotating Cylinders”, Phys. Rev. Lett., c. 106, sy 2, s. 024502, Oca. 2011, doi: 10.1103/PhysRevLett.106.024502.

[137] H. J. Brauckmann ve B. Eckhardt, “Intermittent boundary layers and torque maxima in Taylor-Couette flow”, Phys. Rev. E, c. 87, sy 3, s. 033004, Mar. 2013, doi: 10.1103/PhysRevE.87.033004.

[138] N. Ohmura, K. Kataoka, Y. Shibata, ve T. Makino, “Effective mass diffusion over cell boundaries in a Taylor-Couette flow system”, Chemical Engineering Science, c. 52, sy 11, ss. 1757-1765, Haz. 1997, doi: 10.1016/S0009-2509(97)00012-2.

[139] K. Watanabe, S. Sumio, ve S. Ogata, "Formation of Taylor Vortex Flow of Polymer Solutions", J. Fluids Eng, c. 128, sy 1, ss. 95-100, Oca. 2006, doi: 10.1115/1.2137350.

[140] K. Min ve R. M. Lueptow, "Hydrodynamic stability of viscous flow between rotating porous cylinders with radial flow", Physics of Fluids, c. 6, sy 1, s. 144, Haz. 1998, doi: 10.1063/1.868077.

[141] D. Adebayo, J. Al-Ameri, I. Tyukin, ve A. Rona, "Linear stability analysis of the flow between rotating cylinders of wide gap", European Journal of Mechanics - B/Fluids, c. 72, ss. 567-575, Kas. 2018, doi: 10.1016/j.euromechflu.2018.07.002.

[142] F. E. Bisshopp, "Asymmetric Inviscid Modes of Instability in Couette Flow", The Physics of Fluids, c. 6, sy 2, ss. 212-217, Şub. 1963, doi: 10.1063/1.1706720.

[143] Y. Agbessi, B. Alibenyahia, C. Nouar, C. Lemaitre, ve L. Choplin, "Linear stability of Taylor–Couette flow of shear-thinning fluids: modal and non-modal approaches", Journal of Fluid Mechanics, c. 776, ss. 354-389, Ağu. 2015, doi: 10.1017/jfm.2015.326.

[144] M. J. Walsh, "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique", AIAA Journal, May. 2012, doi: 10.2514/3.60126.

[145] K. Fukuda, J. Tokunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki, ve Y. Kunitake, "Frictional drag reduction with air lubricant over a super-water-repellent surface", J Mar Sci Technol, c. 5, sy 3, ss. 123-130, Ara. 2000, doi: 10.1007/s007730070009.

[146] H. Dong, M. Cheng, Y. Zhang, H. Wei, ve F. Shi, "Extraordinary drag-reducing effect of a superhydrophobic coating on a macroscopic model ship at high speed", J. Mater. Chem. A, c. 1, sy 19, ss. 5886-5891, Nis. 2013, doi: 10.1039/C3TA10225D.

[147] M. A. Daeian, A. Moosavi, A. Nouri-Borujerdi, ve E. Taghvaei, "Drag reduction in a channel with microstructure grooves using the lattice Boltzmann method", J. Phys. D: Appl. Phys., c. 50, sy 10, s. 105301, Şub. 2017, doi: 10.1088/1361-6463/aa59d5.

[148] J. Javaherchian ve A. Moosavi, "Pressure drop reduction of power-law fluids in hydrophobic microgrooved channels", Physics of Fluids, c. 31, sy 7, s. 073106, Tem. 2019, doi: 10.1063/1.5115820.

[149] H. Asadzadeh, A. Moosavi, ve A. Etemadi, "Numerical Simulation of Drag Reduction in Microgrooved Substrates Using Lattice-Boltzmann Method", J. Fluids Eng, c. 141, sy 7, Tem. 2019, doi: 10.1115/1.4042888.

[150] Marc Perlin ve Steven Ceccio, Mitigation of Hydrodynamic Resistance: Methods to Reduce Hydrodynamic Drag. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015.

[151] J. C. Lewthwaite, A. F. Molland, ve K. W. Thomas, “An Investigation into the Variatıon of Ship Skin Frictional Resistance with Fouling”, Royal Institution of Naval Architects Transactions, c. 127, 1985.

[152] S. Dobretsov, “9 - Expected effect of climate change on fouling communities and its impact on antifouling research”, içinde Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies, C. Hellio ve D. Yebra, Ed. Woodhead Publishing, 2009, ss. 222-239.

[153] Alexander I. Railkin, Marine Biofouling: Colonization Processes and Defenses. 2003.

[154] T. Munk, D. Kane, ve D. M. Yebra, “7 - The effects of corrosion and fouling on the performance of ocean-going vessels: a naval architectural perspective”, içinde Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies, C. Hellio ve D. Yebra, Ed. Woodhead Publishing, 2009, ss. 148-176.

[155] S. L. Ceccio, “Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection”, Annual Review of Fluid Mechanics, c. 42, sy 1, ss. 183-203, 2010, doi: 10.1146/annurev-fluid-121108-145504.

[156] E. S. Winkel vd., “High-Reynolds-number turbulent boundary layer friction drag reduction from wall-injected polymer solutions”, Journal of Fluid Mechanics, c. 621, ss. 259-288, Şub. 2009, doi: 10.1017/S0022112008004874.

[157] K. A. Lay, R. Yakushiji, S. Mäkiharju, M. Perlin, ve S. L. Ceccio, “Partial Cavity Drag Reduction at High Reynolds Numbers”, c. 54, sy 2, ss. 109-111, 2010.

[158] K. B. Golovin, J. W. Gose, M. Perlin, S. L. Ceccio, ve A. Tuteja, “Bioinspired surfaces for turbulent drag reduction”, Philos Trans A Math Phys Eng Sci, c. 374, sy 2073, Ağu. 2016, doi: 10.1098/rsta.2016.0189.

[159] T. Young, “III. An essay on the cohesion of fluids”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, c. 95, ss. 65-87, Oca. 1805, doi: 10.1098/rstl.1805.0005.

[160] B. Mockenhaupt, H.-J. Ensikat, M. Spaeth, ve W. Barthlott, “Superhydrophobicity of Biological and Technical Surfaces under Moisture Condensation: Stability in Relation to Surface Structure”, Langmuir, c. 24, sy 23, ss. 13591-13597, Ara. 2008, doi: 10.1021/la802351h.

[161] S. Srinivasan vd., “Quantification of feather structure, wettability and resistance to liquid penetration”, Journal of The Royal Society Interface, c. 11, sy 96, s. 20140287, Tem. 2014, doi: 10.1098/rsif.2014.0287.

[162] J. Davenport, R. N. Hughes, M. Shorten, ve P. S. Larsen, “Drag reduction by air release promotes fast ascent in jumping emperor penguins—a novel hypothesis”, Marine Ecology Progress Series, c. 430, ss. 171-182, 2011.

[163] D. Neumann ve A. Kureck, “Composite structure of silken threads and a proteinaceous hydrogel which form the diving bell wall of the water spider Agyroneta aquatica”, Springerplus, c. 2, May. 2013, doi: 10.1186/2193-1801-2-223.

[164] E. Lepore, M. Giorcelli, C. Saggese, A. Tagliaferro, ve N. Pugno, "Mimicking water striders' legs superhydrophobicity and buoyancy with cabbage leaves and nanotube carpets", Journal of Materials Research, c. 28, sy 7, ss. 976-983, Nis. 2013, doi: 10.1557/jmr.2012.382.

[165] B. Bhushan ve Y. C. Jung, "Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction", Progress in Materials Science, c. 56, sy 1, ss. 1-108, Oca. 2011, doi: 10.1016/j.pmatsci.2010.04.003.

[166] M. Nosonovsky ve B. Bhushan, "Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces", Microsyst Technol, c. 11, sy 7, ss. 535-549, Tem. 2005, doi: 10.1007/s00542-005-0602-9.

[167] Navier, L. M. H., "Mémoire sur les lois du mouvement des fluides", Mem. Acad. R. Sci., c. 6, ss. 389-440, 1827.

[168] J. W. Gose vd., "Characterization of superhydrophobic surfaces for drag reduction in turbulent flow", Journal of Fluid Mechanics, c. 845, ss. 560-580, Haz. 2018, doi: 10.1017/jfm.2018.210.

[169] E. Aljallis, M. A. Sarshar, R. Datla, V. Sikka, A. Jones, ve C.-H. Choi, "Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds number boundary layer flow", Physics of Fluids, c. 25, sy 2, s. 025103, Şub. 2013, doi: 10.1063/1.4791602.

[170] H. Ling, S. Srinivasan, K. Golovin, G. H. McKinley, A. Tuteja, ve J. Katz, "High-resolution velocity measurement in the inner part of turbulent boundary layers over super-hydrophobic surfaces", Journal of Fluid Mechanics, c. 801, ss. 670-703, Ağu. 2016, doi: 10.1017/jfm.2016.450.

[171] H. Ling, J. Katz, M. Fu, ve M. Hultmark, "Effect of Reynolds number and saturation level on gas diffusion in and out of a superhydrophobic surface", Phys. Rev. Fluids, c. 2, sy 12, s. 124005, Ara. 2017, doi: 10.1103/PhysRevFluids.2.124005.

[172] B. V. Hokmabad ve S. Ghaemi, "Effect of Flow and Particle-Plastron Collision on the Longevity of Superhydrophobicity", Sci Rep, c. 7, sy 1, ss. 1-10, Oca. 2017, doi: 10.1038/srep41448.

[173] L. Lei, H. Li, J. Shi, ve Y. Chen, "Diffraction Patterns of a Water-Submerged Superhydrophobic Grating under Pressure", Langmuir, c. 26, sy 5, ss. 3666-3669, Mar. 2010, doi: 10.1021/la903150h.

[174] D. Dilip, N. K. Jha, R. N. Govardhan, ve M. S. Bobji, "Controlling air solubility to maintain 'Cassie' state for sustained drag reduction", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, c. 459, ss. 217-224, Eki. 2014, doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.07.006.

[175] T. Min ve J. Kim, "Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag", Physics of Fluids, c. 16, sy 7, ss. L55-L58, May. 2004, doi: 10.1063/1.1755723.

[176] S.-H. Park, S. Lee, D. Moreira, P. R. Bandaru, I. Han, ve D.-J. Yun, "Bioinspired superhydrophobic surfaces, fabricated through simple and scalable roll-to-roll processing.", Sci Rep, c. 5, s. 15430, Eki. 2015, doi: 10.1038/srep15430.

[177] M. B. Martell, J. B. Perot, ve J. P. Rothstein, "Direct numerical simulations of turbulent flows over superhydrophobic surfaces", Journal of Fluid Mechanics, c. 620, ss. 31-41, Şub. 2009, doi: 10.1017/S0022112008004916.

[178] R. A. Bidkar, L. Leblanc, A. J. Kulkarni, V. Bahadur, S. L. Ceccio, ve M. Perlin, "Skin-friction drag reduction in the turbulent regime using random-textured hydrophobic surfaces", Physics of Fluids, c. 26, sy 8, s. 085108, Ağu. 2014.

[179] K. Watanabe, T. Takayama, S. Ogata, ve S. Isozaki, "Flow between two coaxial rotating cylinders with a highly water-repellent wall", American Institute of Chemical Engineers. AIChE Journal; New York, c. 49, sy 8, ss. 1956-1963, Ağu. 2003.

[180] D. Panchanathan, A. Rajappan, K. K. Varanasi, ve G. H. McKinley, "Plastron Regeneration on Submerged Superhydrophobic Surfaces Using In Situ Gas Generation by Chemical Reaction", ACS Appl. Mater. Interfaces, c. 10, sy 39, ss. 33684-33692, Eki. 2018, doi: 10.1021/acsami.8b12471.

[181] M. Soltani Ayan, M. Entezari, ve S. F. Chini, "Experiments on skin friction reduction induced by superhydrophobicity and Leidenfrost phenomena in a Taylor-Couette cell", International Journal of Heat and Mass Transfer, c. 132, ss. 271-279, Nis. 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.165.

[182] S. Gogte vd., "Effective slip on textured superhydrophobic surfaces", Physics of Fluids, c. 17, sy 5, s. 051701, Nis. 2005, doi: 10.1063/1.1896405.

[183] Jia-peng Zhao, Xiang-dang Du, ve Xiu-hua Shi, "Experimental research on friction-reduction with super-hydrophobic surfaces", Journal of Marine Science and Application, c. 6, ss. 58-61, 2007.

[184] Peguero, C. ve Breuer, K., On Drag Reduction in Turbulent Channel Flow over Superhydrophobic Surfaces, c. 132. Springer Proceedings in Physics, 2009.

[185] Zhang, J., Tian, H., Yao, Z., Hao, P., ve Jiang, N., "Mechanisms of drag reduction of superhydrophobic surfaces in a turbulent boundary layer flow".

[186] B. J. Rosenberg, T. Van Buren, M. K. Fu, ve A. J. Smits, "Turbulent drag reduction over air- and liquid- impregnated surfaces", Physics of Fluids, c. 28, sy 1, s. 015103, 2016, doi: 10.1063/1.4939272.

[187] T. Van Buren ve A. J. Smits, "Substantial drag reduction in turbulent flow using liquid-infused surfaces", Journal of Fluid Mechanics, c. 827, ss. 448–456, 2017, doi: 10.1017/jfm.2017.503.

[188] N. J. Balmforth, I. A. Frigaard, ve G. Ovarlez, "Yielding to Stress: Recent Developments in Viscoplastic Fluid Mechanics", Annual Review of Fluid Mechanics, c. 46, sy 1, ss. 121-146, 2014, doi: 10.1146/annurev-fluid-010313-141424.

[189] R. B. Bird, G. C. Dai, ve B. J. Yarusso, "The Rheology and Flow of Viscoplastic Materials", Reviews in Chemical Engineering, c. 1, sy 1, ss. 1–70, 1983, doi: 10.1515/revce-1983-0102.

[190] A. Sunarso, T. Yamamoto, ve N. Mori, "Numerical Analysis of Wall Slip Effects on Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Macro and Micro Contraction Channels", J. Fluids Eng, c. 129, sy 1, ss. 23-30, Oca. 2007, doi: 10.1115/1.2375127.

[191] T. Sochi, "Slip at Fluid-Solid Interface", Polymer Reviews, c. 51, sy 4, ss. 309-340, Eki. 2011, doi: 10.1080/15583724.2011.615961.

[192] H. A. Barnes, "A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 56, sy 3, ss. 221-251, Mar. 1995, doi: 10.1016/0377-0257(94)01282-M.

[193] F. Ahonguio, L. Jossic, ve A. Magnin, "Influence of surface properties on the flow of a yield stress fluid around spheres", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 206, ss. 57-70, Nis. 2014, doi: 10.1016/j.jnnfm.2014.03.002.

[194] J. M. Piau, "Carbopol gels: Elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges: Meso- and macroscopic properties, constitutive equations and scaling laws", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 144, sy 1, ss. 1-29, Haz. 2007, doi: 10.1016/j.jnnfm.2007.02.011.

[195] E. C. Bingham, An investigation of the laws of plastic flow. Washington: Govt. Print. Off., 1917.

[196] E. C. Bingham, Fluidity and plasticity. New York: McGraw-Hill, 1922.

[197] W. H. Herschel ve R. Bulkley, "Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen", Kolloid-Zeitschrift, c. 39, sy 4, ss. 291-300, Ağu. 1926, doi: 10.1007/BF01432034.

[198] N. Casson, "Rheology of disperse systems", Pergamon Press, London, s. 84, 1959.

[199] A. Wachs, G. Vinay, ve I. Frigaard, "A 1.5D numerical model for the start up of weakly compressible flow of a viscoplastic and thixotropic fluid in pipelines", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 159, sy 1, ss. 81-94, Haz. 2009, doi: 10.1016/j.jnnfm.2009.02.002.

[200] K. D. Nikitin, M. A. Olshanskii, K. M. Terekhov, ve Y. V. Vassilevski, "A numerical method for the simulation of free surface flows of viscoplastic fluid in 3D", Journal of Computational Mathematics, ss. 605-622, 2011.

[201] A. Fredrickson ve R. B. Bird, "Non-Newtonian flow in annuli", Industrial & Engineering Chemistry, c. 50, sy 3, ss. 347-352, 1958.

[202] M. P. Landry, I. A. Frigaard, ve D. M. Martinez, "Stability and instability of Taylor–Couette flows of a Bingham fluid", Journal of Fluid Mechanics, c. 560, ss. 321-353, Ağu. 2006, doi: 10.1017/S0022112006000620.

[203] J. Jeng ve K.-Q. Zhu, "Numerical simulation of Taylor Couette flow of Bingham fluids", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 165, sy 19, ss. 1161-1170, Eki. 2010, doi: 10.1016/j.jnnfm.2010.05.013.

[204] B. M. Baumert ve S. J. Muller, "Flow regimes in model viscoelastic fluids in a circular couette system with independently rotating cylinders", Physics of Fluids, c. 9, sy 3, ss. 566-586, Mar. 1997, doi: 10.1063/1.869209.

[205] N. Latrache, O. Crumeyrolle, ve I. Mutabazi, "Transition to turbulence in a flow of a shear-thinning viscoelastic solution in a Taylor-Couette cell", Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, c. 86, sy 5 Pt 2, s. 056305, Kas. 2012, doi: 10.1103/PhysRevE.86.056305.

[206] E. L. Koschmieder, Bénard cells and Taylor vortices. Cambridge University Press, 1993.

[207] P. Chossat ve G. Iooss, The Couette-Taylor Problem, c. 102. Springer Science & Business Media, 2012.

[208] Y. L. Joo ve E. S. Shaqfeh, "A purely elastic instability in Dean and Taylor–Dean flow", Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, c. 4, sy 3, ss. 524-543, 1992.

[209] M. Avgousti ve A. N. Beris, "Non-axisymmetric modes in viscoelastic Taylor-Couette flow", Journal of non-newtonian fluid mechanics, c. 50, sy 2-3, ss. 225-251, 1993.

[210] S. J. Muller, E. S. G. Shaqfeh, ve R. G. Larson, "Experimental studies of the onset of oscillatory instability in viscoelastic Taylor-Couette flow", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, c. 46, sy 2, ss. 315-330, Nis. 1993, doi: 10.1016/0377-0257(93)85053-D.

[211] U. A. Al-Mubaiyedh, R. Sureshkumar, ve B. Khomami, "Influence of energetics on the stability of viscoelastic Taylor–Couette flow", Physics of Fluids, c. 11, sy 11, ss. 3217-3226, 1999.

[212] C. Nouar, R. Devienne, ve M. Lebouche, "Convection thermique pour l'écoulement de Couette avec debit axial; cas d'un fluide pseudo-plastique", International journal of heat and mass transfer, c. 30, sy 4, ss. 639-647, 1987.

[213] M. Naimi, R. Devienne, ve M. Lebouché, "Etude dynamique et thermique de l'écoulement de Couette-Taylor-Poiseuille; cas d'un fluide présentant un seuil d'écoulement", International journal of heat and mass transfer, c. 33, sy 2, ss. 381-391, 1990.

[214] Graebel, W., "The hydrodynamic stability of a Bingham fluid in Couette flow", program adı: Proceedings of International Symposium on 2nd Order Effects in Elasticity, Plasticity and Fluid Dynamics, Haifa, Israe, 1964, ss. 636-649.

[215] J. Peng ve K.-Q. Zhu, "Linear stability of Bingham fluids in spiral Couette flow", Journal of Fluid Mechanics, c. 512, ss. 21-45, 2004.

[216] M. P. Landry, "Taylor-Couette instability of a Bingham fluid", University of British Columbia, 2003.

[217] W. R. D. M.A, “Note on the motion of fluid in a curved pipe”, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, c. 4, sy 20, ss. 208-223, Tem. 1927, doi: 10.1080/14786440708564324.

[218] W. R. Dean, “Fluid Motion in a Curved Channel”, Proc R Soc Lond A Math Phys Sci, c. 121, sy 787, s. 402, Kas. 1928, doi: 10.1098/rspa.1928.0205.

[219] Y. Fan, R. I. Tanner, ve N. Phan-Thien, “Fully developed viscous and viscoelastic flows in curved pipes”, Journal of Fluid Mechanics, c. 440, ss. 327-357, Ağu. 2001, doi: 10.1017/S0022112001004785.

[220] D. S. Adebayo ve A. Rona, “The Three-Dimensional Velocity Distribution of Wide Gap Taylor-Couette Flow Modelled by CFD”, International Journal of Rotating Machinery, 2016.

[221] A. Mallock, “IV. Determination of the viscosity of water”, Proceedings of the Royal Society of London, c. 45, sy 273-279, ss. 126-132, 1889.

[222] A. Mallock, “III. Experiments on fluid viscosity”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, sy 187, ss. 41-56, 1896.

[223] S. Chandrasekhar, “The stability of viscous flow between rotating cylinders”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, c. 246, sy 1246, ss. 301-311, Ağu. 1958, doi: 10.1098/rspa.1958.0139.

[224] H. Jeffreys, “Some cases of instability in fluid motion”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, c. 118, sy 779, ss. 195-208, Mar. 1928, doi: 10.1098/rspa.1928.0045.

[225] Donnelly R. J. ve Chandrasekhar Sivaramakrishna, “Experiments on the stability of viscous flow between rotating cylinders I. Torque measurements”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, c. 246, sy 1246, ss. 312-325, Ağu. 1958, doi: 10.1098/rspa.1958.0140.

[226] G. Baier, “Liquid-liquid extraction based on a new flow pattern: Two-fluid Taylor-Couette flow”, 1999.

[227] S. Vedantam, J. B. Joshi, ve S. B. Koganti, “Three-Dimensional CFD Simulation of Stratified Two-Fluid Taylor-Couette Flow”, The Canadian Journal of Chemical Engineering, c. 84, sy 3, ss. 279-288, 2006.

[228] Yavuz Hakan Özdemir, “Gemi Direncinin ve Hareketlerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.

[229] V. Sobolík, B. Benabes, ve G. Cognet, “Study of Taylor-Couette flow using a three-segment electrodiffusion probe”, J Appl Electrochem, c. 25, sy 5, ss. 441-449, May. 1995, doi: 10.1007/BF00260686.

[230] J. Parker ve P. Merati, “An Investigation of Turbulent Taylor-Couette Flow Using Laser Doppler Velocimetry in a Refractive Index Matched Facility”, J. Fluids Eng, c. 118, sy 4, ss. 810-818, Ara. 1996, doi: 10.1115/1.2835513.

[231] J. H. Ferziger ve M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, 3. bs. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.

[232] K. A. Hoffmann ve S. T. Chiang, Computational Fluid Dynamics. Engineering Education System, 2000.

[233] H. Elcicek, A. Parlak, ve M. Cakmakci, “Effect of Ballast Water on Marine and Coastal Ecology”, Journal of Selcuk University Natural and Applied Science, c. 0, sy 0, ss. 454-463-463, Kas. 2013.

[234] L. A. Drake, M. A. Doblin, ve F. C. Dobbs, “Potential microbial bioinvasions via ships’ ballast water, sediment, and biofilm”, Marine Pollution Bulletin, c. 55, sy 7, ss. 333-341, Oca. 2007, doi: 10.1016/j.marpolbul.2006.11.007.

[235] B. Werschkun vd., “Emerging risks from ballast water treatment: The run-up to the International Ballast Water Management Convention”, Chemosphere, c. 112, ss. 256-266, Eki. 2014, doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.03.135.

[236] International Maritime Organization (IMO), “International Convention for the Control and Management of Ships’ Ballast Water and Sediments”, London, 2004.

[237] T. D. Waite vd., “Removal of natural populations of marine plankton by a large-scale ballast water treatment system”, Marine Ecology Progress Series, c. 258, ss. 51-63, Ağu. 2003, doi: 10.3354/meps258051.

[238] J. Moreno-Andrés, L. Romero-Martínez, A. Acevedo-Merino, ve E. Nebot, “UV-based technologies for marine water disinfection and the application to ballast water: Does salinity interfere with disinfection processes?”, Science of The Total Environment, c. 581-582, ss. 144-152, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.077.

[239] N. B. Petersen, T. Madsen, M. A. Glaring, F. C. Dobbs, ve N. O. G. Jørgensen, “Ballast water treatment and bacteria: Analysis of bacterial activity and diversity after treatment of simulated ballast water by electrochlorination and UV exposure”, Science of The Total Environment, c. 648, ss. 408-421, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.080.

[240] O.-K. Hess-Erga, J. Moreno-Andrés, Ø. Enger, ve O. Vadstein, “Microorganisms in ballast water: Disinfection, community dynamics, and implications for management”, Science of The Total Environment, c. 657, ss. 704-716, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.004.

[241] D. Wu, H. You, R. Zhang, C. Chen, ve D.-J. Lee, “Ballast waters treatment using UV/Ag–TiO2+O3 advanced oxidation process with Escherichia coli and Vibrio alginolyticus as indicator microorganisms”, Chemical Engineering Journal, c. 174, sy 2, ss. 714-718, Kas. 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.09.087.

[242] O. Casas-Monroy, R. D. Linley, P.-S. Chan, J. Kydd, J. Vanden Byllaardt, ve S. Bailey, “Evaluating efficacy of filtration+UV-C radiation for ballast water

treatment at different temperatures", Journal of Sea Research, c. 133, ss. 20-28, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.seares.2017.02.001.

[243] Z. Lu, K. Zhang, Y. Shi, Y. Huang, ve X. Wang, "Efficient Removal of Escherichia coli from Ballast Water Using a Combined High-Gradient Magnetic Separation-Ultraviolet Photocatalysis (HGMS-UV/TiO2) System", Water Air Soil Pollut, c. 229, sy 8, s. 243, Tem. 2018, doi: 10.1007/s11270-018-3902-2.

[244] Y. J. Jung, Y. Yoon, T. S. Pyo, S.-T. Lee, K. Shin, ve J.-W. Kang, "Evaluation of disinfection efficacy and chemical formation using MPUV ballast water treatment system (GloEn-PatrolTM)", Environmental Technology, c. 33, sy 17, ss. 1953-1961, Eyl. 2012, doi: 10.1080/09593330.2012.655315.

[245] L. J. Forney, J. A. Pierson, ve Z. Ye, "Juice irradiation with Taylor-Couette flow: UV inactivation of Escherichia coli", J. Food Prot., c. 67, sy 11, ss. 2410-2415, Kas. 2004, doi: 10.4315/0362-028x-67.11.2410.

[246] F. Crapulli, "Disinfection and advanced oxidation of highly absorbing fluids by UV/VUV light: process modeling and validation", Electronic Thesis and Dissertation Repository, Nis. 2015.

[247] S. T. Wereley, A. Akonur, ve R. M. Lueptow, "Particle–fluid velocities and fouling in rotating filtration of a suspension", Journal of Membrane Science, c. 209, sy 2, ss. 469-484, Kas. 2002, doi: 10.1016/S0376-7388(02)00365-4.

[248] Rudman, M. J. ve Blackburn, H. M., "Turbulent Taylor–Couette flow", program adı: 13th Australasian Fluid Mech. Conf., 1998, ss. 163-166.

[249] S. T. Wereley ve R. M. Lueptow, "Inertial particle motion in a Taylor Couette rotating filter", Physics of Fluids, c. 11, sy 2, ss. 325-333, Oca. 1999.

[250] E. Dluska, J. Wolinski, ve S. Wronski, "Toward Understanding of Two-Phase Eccentric Helical Reactor Performance", Chemical Engineering & Technology, c. 28, sy 9, ss. 1016-1021, Eyl. 2005, doi: 10.1002/ceat.200500140.

[251] A. Akonur ve R. M. Lueptow, "Three-dimensional velocity field for wavy Taylor–Couette flow", Physics of Fluids, c. 15, sy 4, ss. 947-960, Mar. 2003, doi: 10.1063/1.1556615.

[252] L. Romero-Martínez, J. Moreno-Andrés, A. Acevedo-Merino, ve E. Nebot, "Improvement of ballast water disinfection using a photocatalytic (UV-C + TiO2) flow-through reactor for saltwater treatment", Journal of Chemical Technology & Biotechnology, c. 89, sy 8, ss. 1203-1210, 2014, doi: 10.1002/jctb.4385.

[253] R. L. Townsin, "The Ship Hull Fouling Penalty", Biofouling, c. 19, sy sup1, ss. 9-15, Oca. 2003, doi: 10.1080/0892701031000088535.

[254] M. Lejars, A. Margaillan, ve C. Bressy, "Fouling Release Coatings: A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings", Chem. Rev., c. 112, sy 8, ss. 4347-4390, Ağu. 2012, doi: 10.1021/cr200350v.

[255] W. J. Yang, K.-G. Neoh, E.-T. Kang, S. L.-M. Teo, ve D. Rittschof, "Polymer brush coatings for combating marine biofouling", Progress in Polymer Science, c. 39, sy 5, ss. 1017-1042, May. 2014, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2014.02.002.

[256] A. G. Nurioglu, A. C. C. Esteves, ve G. de With, "Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications", J. Mater. Chem. B, c. 3, sy 32, ss. 6547-6570, Ağu. 2015.

[257] M. Yi ve Z. Shen, "Fluid dynamics: an emerging route for the scalable production of graphene in the last five years", RSC Adv., c. 6, sy 76, ss. 72525-72536, Tem. 2016, doi: 10.1039/C6RA15269D.

[258] M. S.-L. Yee, P.-S. Khiew, W. S. Chiu, Y. F. Tan, Y.-Y. Kok, ve C.-O. Leong, "Green synthesis of graphene-silver nanocomposites and its application as a potent marine antifouling agent", Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, c. 148, ss. 392-401, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.colsurfb.2016.09.011.

[259] R. Ding vd., "A brief review of corrosion protective films and coatings based on graphene and graphene oxide", Journal of Alloys and Compounds, c. 764, ss. 1039-1055, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.06.133.

[260] C. Parra vd., "A nanomolecular approach to decrease adhesion of biofouling-producing bacteria to graphene-coated material", J Nanobiotechnology, c. 13, Kas. 2015, doi: 10.1186/s12951-015-0137-x.

[261] L. Shi vd., "The Antibacterial Applications of Graphene and Its Derivatives", Small, c. 12, sy 31, ss. 4165-4184, 2016, doi: 10.1002/smll.201601841.

[262] N. Yadav vd., "Graphene Oxide-Coated Surface: Inhibition of Bacterial Biofilm Formation due to Specific Surface–Interface Interactions", ACS Omega, c. 2, sy 7, ss. 3070-3082, Tem. 2017, doi: 10.1021/acsomega.7b00371.

[263] M. AlAmer, A. R. Lim, ve Y. L. Joo, "Continuous Synthesis of Structurally Uniform Graphene Oxide Materials in a Model Taylor–Couette Flow Reactor", Ind. Eng. Chem. Res., c. 58, sy 3, ss. 1167-1176, Oca. 2019.

[264] B. K. Kang vd., "Synthesis and characterization of a mesoporous and three dimensional N-doped graphene structure via the Couette-Taylor flow and hydrothermal method", Journal of the European Ceramic Society, c. 37, sy 12, ss. 3673-3680, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.001.

[265] D. V. Kosynkin vd., "Graphene Oxide as a High-Performance Fluid-Loss-Control Additive in Water-Based Drilling Fluids", ACS Appl. Mater. Interfaces, c. 4, sy 1, ss. 222-227, Oca. 2012, doi: 10.1021/am2012799.

[266] Y. H. Shim, K. E. Lee, T. J. Shin, S. O. Kim, ve S. Y. Kim, "Wide concentration liquid crystallinity of graphene oxide aqueous suspensions with interacting polymers", Mater. Horiz., c. 4, sy 6, ss. 1157-1164, Eki. 2017.

[267] X. Zhang, Y. Tang, X. Wang, J. Zhang, D. Guo, ve X. Zhang, "Dispersion and Rheological Properties of Aqueous Graphene Suspensions in Presence of Nanocrystalline Cellulose", J Polym Environ, c. 26, sy 8, ss. 3502-3510, Ağu. 2018, doi: 10.1007/s10924-018-1237-0.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: helcicek@gmail.com

SCI, SSCI, AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. H. Elçiçek ve B. Güzel, "On non-axisymmetric flow structures of graphene suspensions in Taylor–Couette reactors", Int. J. Environ. Sci. Technol., Mar. 2020, doi: 10.1007/s13762-020-02713-0.

2. H. Elçiçek ve B. Güzel, "Effect of shear-thinning behaviour on flow regimes in Taylor-Couette flows", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, s. 104277, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jnnfm.2020.104277.

Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. H. Elçiçek ve B. Güzel, "TC-UV Reactors Evaluated as an Alternative Option in Treatment of Ballast Water", JEMS Maritime, Mar. 2020, doi: 10.5505/jems.2020.84803.

Konferans Bildirileri

1. H. Elçiçek ve B. Güzel, "Experimental investigation of the hydrophobicity on deposition velocity", In *4th International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS),* 02-06 May. 2018.

2. H. Elçiçek ve B. Güzel, "Experimental investigation of the effects of biofouling on ship drag", In *3th International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS),* 03-07 May. 2017.