



**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**VORTEKS MİKSERLER:  
GAZ VE GAZ-KATI KARIŞMA İÇİN YENİ STRATEJİLER**

**DOKTORA TEZİ**

Gözde GEÇİM

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

**EKİM 2022**

T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**VORTEKS MİKSERLER:  
GAZ VE GAZ-KATI KARIŞMA İÇİN YENİ STRATEJİLER**

**DOKTORA TEZİ**

**Gözde GEÇİM**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ertuğrul ERKOÇ**

**EKİM 2022**







20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 211N034 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez, 118M391 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi ile desteklenmiştir.

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Gözde GEÇİM

İmzası:

X



*Eşime ve aileme,*

## ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım sırasında değerli bilgi birikimini ve tecrübesini benimle paylaşan, desteğini esirgemeyen çok kıymetli tez hocam Sayın Doç. Dr. Ertuğrul ERKOÇ'a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde yer alan Prof. Dr. Ali SÜRMEK ve Prof. Dr. Osman Nuri ŞARA'ya tezim boyunca verdikleri tavsiyelerden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince manevi desteklerini her zaman hissettiğim, tüm zorlu ve sıkıntılı dönemlerimde yanımda olan çok değerli dostlarım Mehtap ÖZEKMEKÇİ, Hilal DOĞANAY KATI, Duygu GAZİOĞLU RÜZGAR ve Ayşe Gül TÜRE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Ayşenur YEŞİLYURT ve Msc. Sinan DÖNMEZ'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında desteklerini sunan Prof. Dr. Kevin Van Geem, Prof. Dr. Geraldine Heynderickx ve Dr. Yi Ouyang ile LCT (Gent Üniversitesi, Belçika) ekibine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini ve katkılarını hep hissettiğim annem Gülten SALKIÇ, babam İdris SALKIÇ ve kardeşim Mete SALKIÇ'a en içten kalbi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Tüm doktora eğitimim boyunca manevi desteğini en çok hissettiğim ve bu hayattaki en büyük şansım olan eşim Serkan GEÇİM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

211N34 nolu proje ile tez çalışmalarımı destekleyen Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve 118M391 nolu proje ile tez çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi iletirim.

2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı kapsamında doktora öğrenimimi destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ekim 2022

Gözde GEÇİM

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| ÖNSÖZ.....   | vii       |
| İÇİNDEKİLER .....  | viii      |
| KISALTMALAR .....  | x         |
| SEMBOLLER .....  | xii       |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....   | xiv       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....   | xv        |
| ÖZET.....  | xx        |
| SUMMARY .....  | xxii      |
| <b>1. GİRİŞ... ..</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Karışma: Bilimsel ve Endüstriyel Önemi.....                          | 1         |
| 1.2 Gaz Karışmasının Önemi .....   | 3         |
| 1.3 Gaz-Katı Karışmasının Önemi .....                                    | 4         |
| 1.3.1 Gaz-katı akışkanlaşma .....  | 4         |
| 1.4 Tezin Amacı ve Planı .....   | 7         |
| <b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>                                    | <b>9</b>  |
| 2.1 Gaz Akış Hidrodinamiği .....   | 9         |
| 2.1.1 Sınırlı çarpan jet reaktörler .....                                | 9         |
| 2.1.2 T-jet reaktörler .....   | 12        |
| 2.1.3 Vorteks mikser .....   | 16        |
| 2.2 Gaz-Katı Akış Hidrodinamiği .....                                    | 18        |
| 2.2.1 Akışkan yatak karakteristik özellikleri .....                      | 18        |
| 2.2.1.1 Minimum akışkanlaşma hızı, $U_{mf}$ .....                        | 18        |
| 2.2.1.2 Minimum kabarcıklaşma hızı, $U_{mb}$ .....                       | 20        |
| 2.2.1.3 Maksimum akışkan (terminal) hızı, $U_t$ .....                    | 21        |
| 2.2.1.4 Partikül çap dağılımı ve ufalanma.....                           | 22        |
| 2.2.1.5 Partiküllerin sınıflandırılması .....                            | 22        |
| 2.2.1.6 Akışkanlaşma kalitesi .....                                      | 24        |
| 2.2.2 Gaz-katı akışkan yatak türleri .....                               | 25        |
| 2.2.2.1 Devirdaimli akışkan yatak (circulating fluidized bed, CFB) ..... | 25        |
| 2.2.2.2 Döner akışkan yatak (rotating fluidized bed, RFB) .....          | 26        |
| 2.2.2.3 Sabit geometrideki döner akışkan yatak (RBR-SG/GSVR).....        | 29        |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>  | <b>36</b> |
| 3.1 Gaz Akış Hidrodinamiği .....   | 36        |
| 3.1.1 Akışkanlar .....   | 36        |
| 3.1.2 Vorteks karışma çemberi .....                                      | 36        |
| 3.1.3 Gaz akış görüntüleme ve PIV sistemi .....                          | 38        |
| 3.1.3.1 Gaz akış görüntüleme.....  | 38        |
| 3.1.3.2 Gaz PIV akış alanı.....  | 40        |
| 3.1.4 Türbülans özellikleri .....  | 41        |
| 3.1.5 Deney koşulları .....  | 42        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.1.5.1 Benzer gazların akış hidrodinamiği .....                                 | 42         |
| 3.1.5.2 Farklı gazların akış hidrodinamiği .....                                 | 43         |
| 3.2 Gaz-Katı Akış Hidrodinamiği .....  | 44         |
| 3.2.1 Malzeme .....  | 44         |
| 3.2.2 Partikül üretimi .....   | 44         |
| 3.2.2.1 ZnO üretimi .....  | 44         |
| 3.2.2.2 SiO <sub>2</sub> üretimi .....   | 45         |
| 3.2.2.3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> üretimi .....                             | 45         |
| 3.2.2.4 TiO <sub>2</sub> üretimi .....   | 45         |
| 3.2.3 Partikül karakterizasyonu .....  | 45         |
| 3.2.4 Gaz-katı akış görüntüleme sistemi .....                                    | 46         |
| 3.2.4.1 Vorteks akışkan yatak sistemi .....                                      | 46         |
| 3.2.4.2 Gaz-katı akış görüntüleme sistemi .....                                  | 47         |
| 3.2.4.3 Basınç analizi .....   | 48         |
| <b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>   | <b>51</b>  |
| 4.1 Gaz Akış Hidrodinamiği .....   | 51         |
| 4.1.1 Vorteks mikserde benzer gazların akış hidrodinamiği karakterizasyonu .     | 51         |
| 4.1.1.1 Akış mekanizması .....   | 51         |
| 4.1.1.2 Gaz fiziksel özelliklerinin etkisi .....                                 | 65         |
| 4.1.2 Vorteks mikserde farklı gazların akış hidrodinamiği karakterizasyonu ...   | 84         |
| 4.1.2.1 Akış mekanizması .....   | 84         |
| 4.1.2.2 Gaz hacim oranının akışın kritik <i>Re</i> sayısı üzerindeki etkisi..... | 99         |
| 4.2 Gaz Katı Akış Hidrodinamiği .....  | 100        |
| 4.2.1 Partikül karakterizasyonu .....  | 101        |
| 4.2.1.1 Partikül boyut analizi .....   | 101        |
| 4.2.1.2 Partikül yığın yoğunluğu .....   | 103        |
| 4.2.1.3 FTIR analizi .....   | 104        |
| 4.2.1.4 XRD analizi .....  | 106        |
| 4.2.1.5 SEM analizi .....  | 112        |
| 4.2.2 Akış görüntüleme ve basınç verilerinin analizi .....                       | 119        |
| 4.2.2.1 ZnO .....  | 119        |
| 4.2.2.2 SiO <sub>2</sub> .....   | 129        |
| 4.2.2.3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                     | 139        |
| 4.2.2.4 TiO <sub>2</sub> .....   | 149        |
| 4.2.2.5 Farklı $D_{jet}/D_ç$ .....   | 159        |
| 4.2.2.6 Akış görüntüleme ve basınç analizi sonuçlarının karşılaştırılması ..     | 168        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>  | <b>171</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>   | <b>174</b> |
| <b>EKLER .....</b>   | <b>183</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>246</b> |

## KISALTMALAR

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | : Alüminyum Dioksit                                      |
| <b>Ar</b>                          | : Argon  |
| <b>CCD</b>                         | : Charged Coupled Device                                 |
| <b>CFB</b>                         | : Circulating Fluidized Bed (Devirdaimli Akışkan Yatak)  |
| <b>CFD</b>                         | : Computational Fluid Dynamics                           |
| <b>CH<sub>4</sub></b>              | : Metan  |
| <b>CIJ</b>                         | : Confined Impinging Jets                                |
| <b>CMOS</b>                        | : Complimentary Metal Oxide Semiconductor                |
| <b>CNC</b>                         | : Computer Numerical Control                             |
| <b>Ç</b>                           | : Çöktürme   |
| <b>DIA</b>                         | : Digital Image Analysis                                 |
| <b>dk</b>                          | : Dakika   |
| <b>DSMC</b>                        | : Direkt Monte Carlo Simülasyonu                         |
| <b>D<sub>v(50)</sub></b>           | : Ortalama partikül boyutu                               |
| <b>FCC</b>                         | : Fluid Catalytic Cracking (Akışkan Katalitik Parçalama) |
| <b>FFT</b>                         | : Fast Fourier Transform                                 |
| <b>FTIR</b>                        | : Fourier Transform Infrared Spectroscopy                |
| <b>GSVR</b>                        | : Gaz-Katı Vorteks Reaktor,                              |
| <b>H<sub>2</sub></b>               | : Hidrojen   |
| <b>HiGee</b>                       | : Yüksek Yerçekimi, G                                    |
| <b>IA</b>                          | : Interrogation Area                                     |
| <b>Kn</b>                          | : Knudsen Sayısı   |
| <b>L</b>                           | : Litre  |
| <b>LED</b>                         | : Light Emitting Diod                                    |
| <b>MIVM</b>                        | : Multi-Inlet Vortex Mixer                               |
| <b>mm</b>                          | : Milimetre  |
| <b>mV</b>                          | : Milivolt   |
| <b>N<sub>2</sub></b>               | : Azot   |
| <b>Nd-YAG</b>                      | : Neodyum Doned Yitrium Alüminyum Garnet                 |
| <b>NO<sub>x</sub></b>              | : Nitrik Oksitler  |

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>PB</b>              | : Partikül Boyutları                           |
| <b>PC</b>              | : Polikarbonat                                 |
| <b>PIV</b>             | : Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm             |
| <b>PMMA</b>            | : Polimetil Metakrilat                         |
| <b>PVDF</b>            | : Polivinilidin Florür                         |
| <b>RBR-SG</b>          | : Sabit Geometrideki Döner Akışkan Yatak       |
| <b>Re</b>              | : Reynolds Sayısı                              |
| <b>RFB</b>             | : Rotating Fluidized Bed (Döner Akışkan Yatak) |
| <b>rms</b>             | : Root Mean Square                             |
| <b>RTD</b>             | : Residence Time Distribution                  |
| <b>SEI</b>             | : İkincil Elektron Görüntü                     |
| <b>SEM</b>             | : Scanning Electron Microscopy                 |
| <b>SFB</b>             | : Sabit Yataklı Akışkan Yatak                  |
| <b>SiO<sub>2</sub></b> | : Silisyum Dioksit                             |
| <b>SJ</b>              | : Sol-Jel                                      |
| <b>SO<sub>2</sub></b>  | : Sülfür Dioksit                               |
| <b>TEOS</b>            | : Tetraetilortosilikat                         |
| <b>TiO<sub>2</sub></b> | : Titanyum Dioksit                             |
| <b>TTIP</b>            | : Titanyum İsopropoksit                        |
| <b>XRD</b>             | : X-Ray Difraksiyon                            |
| <b>YYPE</b>            | : Yüksek yoğunluklu polietilen                 |
| <b>VR</b>              | : Vorteks Reaktör                              |
| <b>ZnO</b>             | : Çinko Oksit                                  |
| <b>ZP</b>              | : Zeta Potansiyeli                             |

## SEMBOLLER

|                      |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| $C_0 C_\infty$       | : Başlangıç Derişimi, Sonsuz Derişim |
| $D_a$                | : Geri Akış Katsayısı                |
| $D_{AA}$             | : Kütle Difüzyon Katsayısı           |
| $D_\zeta$            | : Çember Çapı                        |
| $D_{jet}$            | : Jet Çapı                           |
| $d_p$                | : Partikül Çapı                      |
| $f(Hz)$              | : Analizin Frekansı                  |
| $G_{xx}$             | : Pik Enerjisi                       |
| $I_0$                | : Teğetsel Gaz Açıklık Genişliği     |
| $M_R$                | : Momentum Oranı                     |
| $M_w$                | : Molekül Ağırlığı                   |
| $N_{Sc}$             | : Schmidt Sayısı                     |
| $Q_s$                | : Katı Akış Hızı                     |
| $t_b$                | : Döner Akışkan Yatak Kalınlığı      |
| $U_g$                | : Gaz Hızı                           |
| $U_{mf}$             | : Minimum Akışkanlaşma Hızı          |
| $X(f)$               | : FFT                                |
| $x(t)$               | : Zaman Alanı Sinyali                |
| $V_s$                | : Katı Hacmi                         |
| $W_{smin}, W_{smax}$ | : Minimum ve Maksimum Katı İçeriği   |
| $\beta$              | : Yarı yükseklikteki pik genişliği   |
| $\theta$             | : Bragg Açısı                        |
| $\lambda$            | : X-ray Dalga boyu                   |
| $\vartheta$          | : Yüzeysel Hız                       |
| $\mu$                | : Dinamik Viskozite                  |
| $\rho_p$             | : Partikül Yoğunluğu                 |
| $\phi$               | : Partikül Küreselliği               |
| $\rho_g$             | : Gaz Yoğunluğu                      |
| $\mu_g$              | : Gaz Viskozitesi                    |

|  |   |
|--|---|
| $\epsilon_{mf}$  | : Minimum Akışkanlaşmada Yatak Boşluğu                      |
| $\Delta P$   | : Basınç Düşüşü   |
| $\tau_s$   | : Partikül Kalma Süresi                                     |
| $\nu$  | : Kinematik Viskozite                                       |
| $\sigma_{\vartheta_r}, \sigma_{\vartheta_z}$                   | : Hızın $r$ ve $z$ eksenlerindeki standart sapması          |
| $\bar{\vartheta}$  | : Ortalama Hız  |
| $\langle \vartheta_r \rangle$ ve $\langle \vartheta_z \rangle$ | : $\vartheta_r(i)$ ve $\vartheta_z(i)$ 'nin ortalama değeri |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|  |     |
|--|-----|
| Çizelge 3.1 : Oda koşullarındaki akışkan özellikleri.....  | 36  |
| Çizelge 3.2 : Jetlerdeki gaz akış hızı ve yüzeysel hızları*.....   | 42  |
| Çizelge 3.3 : Jetlerin eşit $Re$ sayıları için oda koşullarındaki gaz karışımı özellikleri.<br>.....   | 43  |
| Çizelge 3.4 : Ar/H <sub>2</sub> içindeki farklı $yH_2$ kesirleri için ortalama fiziksel özellikler. ...  | 44  |
| Çizelge 3.5 : Gaz-katı akışkanlaşma vorteks mikser özellikleri.....  | 47  |
| Çizelge 4.1 : Akış rejimi geçişlerinin karşılaştırılması.....  | 71  |
| Çizelge 4.2 : Akış rejimi geçişlerinin karşılaştırılması.....  | 91  |
| Çizelge 4.3 : Farklı gaz hacim oranlarındaki kritik $Re$ sayıları.....   | 99  |
| Çizelge 4.4 : Zeta potansiyeli (ZP) ve ortalama partikül Boyutları (PB).....   | 101 |
| Çizelge 4.5 : Master Sizer sonuçlarına göre ortalama partikül boyutu.....  | 103 |
| Çizelge 4.6 : Akışkanlaşma deneylerinde kullanılan partiküllerin yığın yoğunlukları.<br>.....  | 104 |
| Çizelge 4.7 : XRD spektrumuna göre belirlenen partikül özellikleri.....  | 112 |
| Çizelge 4.8 : Farklı metodlar ile ölçülen ortalama partikül boyutu karşılaştırılması.<br>.....   | 117 |
| Çizelge 4.9 : Partikül boyutu, yoğunluk, yatak özellikleri ve Geldart'ın grup analizi.<br>.....  | 118 |
| Çizelge 4.10 : Farklı partiküller için basınç düşüşü analizine göre belirlenen $Re_{mf}$ ,<br>$Re_{cf}$ ve $Re_t$ değerleri (R1).....                  | 168 |
| Çizelge 4.11 : Farklı geometriler için basınç düşüşü analizine göre belirlenen $Re_{mf}$ ,<br>$Re_{cf}$ ve $Re_t$ değerleri (TiO <sub>2</sub> -3)..... | 168 |
| Çizelge 4.12 : Farklı partiküller için akış görüntüleme deneylerine göre belirlenen<br>akış rejimi haritası (R1).....                                  | 170 |
| Çizelge 4.13 : Farklı geometriler için akış görüntüleme deneylerine göre belirlenen<br>akış rejimi haritası (TiO <sub>2</sub> -3).....                 | 170 |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.1 : Akışkan yatak [26].  | 5  |
| Şekil 1.2 : Akışkanlaşma rejimleri [27].   | 6  |
| Şekil 1.3 : Sabit yatak, yoğun faz akışkanlaşma ve seyrek faz akışkanlaşma arasındaki ilişki [21].   | 6  |
| Şekil 2.1 : CIJ'lerin deneysel ve CFD modeli ve 3 boyutlu sınır koşulları [41].  | 10 |
| Şekil 2.2 : İki boyutlu anlık hız vektörleri [43].   | 11 |
| Şekil 2.3 : Hızlı kamera ile çekilen anlık görüntüler a) $Re = 100$ b) $Re = 150$ c) $Re > 500$ [32].  | 12 |
| Şekil 2.4 : T-jet reaktörlerin şematik gösterimi [45].   | 13 |
| Şekil 2.5 : Hızlı kamera ile çekilen anlık görüntüler a) $Re = 30$ b) $Re = 50$ c) $Re = 215$ [53].  | 14 |
| Şekil 2.6 : Mikromikserin T bölgesinde deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması [34].  | 15 |
| Şekil 2.7 : MIVR şematik gösterimi [63].   | 16 |
| Şekil 2.8 : Gaz vorteks ünitesi, önden ve yandan görünüm [33].   | 18 |
| Şekil 2.9 : Minimum akışkanlaşma hızı $Um_f$ 'nin gaz hızına bağlı basınç düşüşü değişiminden belirlenmesi [21].   | 19 |
| Şekil 2.10 : Grup A partikülleri için yatak genişlemesi [67].  | 21 |
| Şekil 2.11 : Hava için partiküllerin oda koşullarındaki Geldart Sınıflandırması [70].  | 23 |
| Şekil 2.12 : Akışkanlaşma rejimleri ve basınç düşüşü profilleri [7].   | 24 |
| Şekil 2.13 : Devirdaimli akışkan yatak şematik gösterimi [74].   | 25 |
| Şekil 2.14 : Döner akışkan yatak şematik gösterim [78].  | 27 |
| Şekil 2.15 : GSVR tasarımı [82, 83].   | 29 |
| Şekil 3.1 : a) Reaktörün taban görünümü b) Reaktörün karşıdan görünümü.  | 37 |
| Şekil 3.2 : Deneysel kurulum.  | 38 |
| Şekil 3.3 : Ölçüm düzlemlerinin şematik gösterimi (a) radyal düzlemler (b) eksenel düzlemler.  | 39 |
| Şekil 3.4 : Karışma çemberinin PIV kamerasından elde edilen çerçevesi a) radyal izleme penceresi b) Hedef görüntüleme çerçevesinin çapraz-korelasyon haritası c) hedef görüntüleme bölgesinin ve hesaplanan vektörlerin yakın gösterimi. | 41 |
| Şekil 3.5 : Gaz-katı akış hidrodinamiği deneysel kurulumu.   | 47 |
| Şekil 3.6 : Karışma çemberi fark basınç sensörü lokasyonları.  | 50 |
| Şekil 4.1 : Jetlerin karışma düzlemi bölgesinde $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığındaki zaman ortalamalı akış alanı.  | 52 |
| Şekil 4.2 : Düzlem-1'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.   | 54 |
| Şekil 4.3 : Düzlem-2'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.   | 54 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Şekil 4.4</b> : Düzlem-3'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....   | <b>55</b> |
| <b>Şekil 4.5</b> : Düzlem-4'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....   | <b>55</b> |
| <b>Şekil 4.6</b> : Çember uzunluğuna göre kritik bölgelerin zaman ortalamalı akış görüntüleri.....  | <b>56</b> |
| <b>Şekil 4.7</b> : $rz$ düzleminde farklı $Re$ sayıları için elde edilen akış görüntüleri.....  | <b>57</b> |
| <b>Şekil 4.8</b> : Akışın belirlenen kritik bölgelerinin anlık görüntüleri a) düzlem-1 b) düzlem-2 c) düzlem-3 d) düzlem-4.....   | <b>59</b> |
| <b>Şekil 4.9</b> : Akışın belirlenen kritik noktalarının zaman ortalamalı hız vektörleri. ....  | <b>60</b> |
| <b>Şekil 4.10</b> : Akışın belirlenen kritik noktaları için anlık hız vektörleri (düzlem-3)..   | <b>60</b> |
| <b>Şekil 4.11</b> : $rz$ düzleminde $Re = 30$ to $Re = 300$ aralığında belirlenen boyutsuz türbülans yoğunluğu değerleri. ....  | <b>62</b> |
| <b>Şekil 4.12</b> : Çember uzunluğu boyunca boyutsuz türbülans yoğunluğu. ....  | <b>62</b> |
| <b>Şekil 4.13</b> : Düzlem-2'deki boyutsuz türbülans yoğunluğu değerleri. ....  | <b>62</b> |
| <b>Şekil 4.14</b> : Düzlem-3'teki boyutsuz türbülans yoğunluğu değerleri.....   | <b>63</b> |
| <b>Şekil 4.15</b> : $rz$ düzleminde kritik bölgelerin karşıdan görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları. ....  | <b>64</b> |
| <b>Şekil 4.16</b> : Kritik bölgelerin taban görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları. .  | <b>64</b> |
| <b>Şekil 4.17</b> : $rz$ düzleminde çeşitli $Re$ sayıları için zaman ortalamalı akış görüntüleri. ....  | <b>66</b> |
| <b>Şekil 4.18</b> : Jetlerin karışma bölgesi için zaman ortalamalı akış görüntüleri. ....   | <b>66</b> |
| <b>Şekil 4.19</b> : Düzlem-4'te $Re = 30$ ve $Re = 280$ arasındaki zaman ortalamalı akış görüntüleri (rms). ....  | <b>69</b> |
| <b>Şekil 4.20</b> : Çember uzunluğuna göre zaman ortalamalı akış görüntüleri (D: Düzlem).....   | <b>70</b> |
| <b>Şekil 4.21</b> : Düzlem-4'teki anlık akış görüntüleme sonuçları. ....  | <b>71</b> |
| <b>Şekil 4.22</b> : Akışın belirlenen kritik noktalarındaki anlık hız vektör haritası.....  | <b>73</b> |
| <b>Şekil 4.23</b> : $rz$ düzleminde boyutsuz türbülans yoğunluğunun $Re$ sayısı ile değişimi a) $H_2/H_2$ b) $N_2/N_2$ c) $Ar/Ar$ .....   | <b>74</b> |
| <b>Şekil 4.24</b> : $rz$ düzleminde kritik bölgelerin karşıdan görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları. ....  | <b>77</b> |
| <b>Şekil 4.25</b> : Kritik bölgelerin taban görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları (düzlem-4). ....  | <b>78</b> |
| <b>Şekil 4.26</b> : Aynı gaz hızlarındaki zaman ortalamalı akış görüntüleme sonuçları. ...  | <b>80</b> |
| <b>Şekil 4.27</b> : Kararlı akış rejimi (her biri için $Re = 50$ ) ve kararsız akış rejimindeki (hidrojen için $Re = 160$ ; azot ve argon için $Re = 240$ ) radyal hızların karşılaştırılması. .... | <b>83</b> |
| <b>Şekil 4.28</b> : Akışkan partikülleri üzerine etkiyen kuvvetlerin gösterimi. ....  | <b>84</b> |
| <b>Şekil 4.29</b> : Girdap yapısının gösterimi a) Hidrojen b) Azot ve Argon.....  | <b>84</b> |
| <b>Şekil 4.30</b> : Jetlerin karışma düzlemi için zaman ortalamalı akış görüntüleme sonuçları. ....   | <b>85</b> |
| <b>Şekil 4.31</b> : $rz$ düzleminde çeşitli $Re$ sayıları için zaman ortalamalı akış görüntüleri a) $Ar/H_2$ b) $Ar/N_2$ . ....   | <b>86</b> |
| <b>Şekil 4.32</b> : Düzlem-4'te $Re = 30$ ve $Re = 280$ arasındaki zaman ortalamalı akış görüntüleri (rms). ....  | <b>88</b> |
| <b>Şekil 4.33</b> : Çember uzunluğuna göre zaman ortalamalı akış görüntüleri.....   | <b>89</b> |
| <b>Şekil 4.34</b> : Düzlem-4 ve düzlem-20'deki anlık akış görüntüleme sonuçları. ....   | <b>91</b> |
| <b>Şekil 4.35</b> : Akışın belirlenen kritik noktalarındaki anlık hız vektör haritası.....  | <b>93</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Şekil 4.36</b> : $rz$ düzleminde boyutsuz türbülans yoğunluğunun $Re$ sayısı ile değişimi.<br>a) Ar/H <sub>2</sub> b) Ar/N <sub>2</sub> . .....   | <b>94</b>  |
| <b>Şekil 4.37</b> : $rz$ düzleminde kritik bölgelerin karşıdan görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları. ....   | <b>96</b>  |
| <b>Şekil 4.38</b> : Kritik bölgelerin taban görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları (düzlem-4). ....   | <b>97</b>  |
| <b>Şekil 4.39</b> : Kararlı akış rejimi (Ar/H <sub>2</sub> için $Re = 90$ ve Ar/N <sub>2</sub> için $Re = 120$ ) ve kararsız akış rejimlerindeki (Ar/H <sub>2</sub> için $Re = 180$ ve Ar/N <sub>2</sub> için $Re = 240$ ) radyal hızların karşılaştırılması. .... | <b>98</b>  |
| <b>Şekil 4.40</b> : Hidrojen hacim oranına göre ortalama kritik $Re$ değişimi. ....  | <b>100</b> |
| <b>Şekil 4.41</b> : Partikül boyut dağılımı. ....  | <b>102</b> |
| <b>Şekil 4.42</b> : ZnO FTIR analizi. ....   | <b>104</b> |
| <b>Şekil 4.43</b> : SiO <sub>2</sub> FTIR analizi. ....  | <b>105</b> |
| <b>Şekil 4.44</b> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> FTIR analizi. ....  | <b>106</b> |
| <b>Şekil 4.45</b> : TiO <sub>2</sub> FTIR analizi. ....  | <b>106</b> |
| <b>Şekil 4.46</b> : ZnO-1 XRD difraktogramı. ....  | <b>107</b> |
| <b>Şekil 4.47</b> : ZnO-2 XRD difraktogramı. ....  | <b>107</b> |
| <b>Şekil 4.48</b> : SiO <sub>2</sub> -1 XRD difraktogramı. ....  | <b>108</b> |
| <b>Şekil 4.49</b> : SiO <sub>2</sub> -2 XRD difraktogramı. ....  | <b>108</b> |
| <b>Şekil 4.50</b> : SiO <sub>2</sub> -3 XRD difraktogramı. ....  | <b>109</b> |
| <b>Şekil 4.51</b> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 XRD difraktogramı. ....  | <b>109</b> |
| <b>Şekil 4.52</b> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 XRD difraktogramı. ....  | <b>110</b> |
| <b>Şekil 4.53</b> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 XRD difraktogramı. ....  | <b>110</b> |
| <b>Şekil 4.54</b> : TiO <sub>2</sub> -1 XRD difraktogramı. ....  | <b>111</b> |
| <b>Şekil 4.55</b> : TiO <sub>2</sub> -2 XRD difraktogramı. ....  | <b>111</b> |
| <b>Şekil 4.56</b> : TiO <sub>2</sub> -3 XRD difraktogramı. ....  | <b>112</b> |
| <b>Şekil 4.57</b> : ZnO SEM analizi. ....  | <b>113</b> |
| <b>Şekil 4.58</b> : SiO <sub>2</sub> SEM analizi. ....   | <b>114</b> |
| <b>Şekil 4.59</b> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SEM analizi. ....   | <b>115</b> |
| <b>Şekil 4.60</b> : TiO <sub>2</sub> SEM analizi. ....   | <b>116</b> |
| <b>Şekil 4.61</b> : ZnO minimum akışkanlaşma $Re$ . ....   | <b>119</b> |
| <b>Şekil 4.62</b> : ZnO-1 gaz-katı akış görüntüleri. ....  | <b>120</b> |
| <b>Şekil 4.63</b> : ZnO-2 gaz-katı akış görüntüleri. ....  | <b>121</b> |
| <b>Şekil 4.64</b> : $Re = 10 - 700$ için ortalama fark basınç verilerinin $Re$ sayısına bağlı değişimi (ZnO-1). ....   | <b>123</b> |
| <b>Şekil 4.65</b> : ZnO-1 partikülleri yatak genişlemesi. ....   | <b>123</b> |
| <b>Şekil 4.66</b> : $Re = 10 - 500$ için ortalama fark basınç verilerinin $Re$ sayısına bağlı değişimi (ZnO-2). ....   | <b>124</b> |
| <b>Şekil 4.67</b> : ZnO-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....   | <b>128</b> |
| <b>Şekil 4.68</b> : SiO <sub>2</sub> minimum akışkanlaşma $Re$ . ....  | <b>129</b> |
| <b>Şekil 4.69</b> : SiO <sub>2</sub> -1 gaz-katı akış görüntüleri. ....  | <b>130</b> |
| <b>Şekil 4.70</b> : SiO <sub>2</sub> -2 gaz-katı akış görüntüleri. ....  | <b>131</b> |
| <b>Şekil 4.71</b> : SiO <sub>2</sub> -3 gaz-katı akış görüntüleri. ....  | <b>132</b> |
| <b>Şekil 4.72</b> : $Re = 10 - 550$ için ortalama fark basınç verilerinin $Re$ sayısına bağlı değişimi (SiO <sub>2</sub> -1). ....   | <b>133</b> |
| <b>Şekil 4.73</b> : $Re = 10 - 1000$ için ortalama fark basınç verilerinin $Re$ sayısına bağlı değişimi (SiO <sub>2</sub> -2). ....  | <b>134</b> |
| <b>Şekil 4.74</b> : $Re = 10 - 1500$ için ortalama fark basınç verilerinin $Re$ sayısına bağlı değişimi (SiO <sub>2</sub> -3). ....  | <b>135</b> |
| <b>Şekil 4.75</b> : SiO <sub>2</sub> -1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....   | <b>138</b> |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 4.76 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> minimum akışkanlaşma <i>Re</i> .....   | 139 |
| Şekil 4.77 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 gaz-katı akış görüntüleri.....  | 140 |
| Şekil 4.78 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 gaz-katı akış görüntüleri.....  | 141 |
| Şekil 4.79 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 gaz-katı akış görüntüleri.....  | 142 |
| Şekil 4.80 : <i>Re</i> = 10 – 400 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1). .....                     | 143 |
| Şekil 4.81 : <i>Re</i> = 10 – 2000 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2). .....                    | 144 |
| Şekil 4.82 : <i>Re</i> = 10 – 1300 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3). .....                    | 145 |
| Şekil 4.83: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).....  | 148 |
| Şekil 4.84 : TiO <sub>2</sub> minimum akışkanlaşma <i>Re</i> .....   | 149 |
| Şekil 4.85 : TiO <sub>2</sub> -1 gaz-katı akış görüntüleri.....  | 150 |
| Şekil 4.86 : TiO <sub>2</sub> -2 gaz-katı akış görüntüleri.....  | 151 |
| Şekil 4.87 : TiO <sub>2</sub> -3 gaz-katı akış görüntüleri.....  | 152 |
| Şekil 4.88 : <i>Re</i> = 10 – 450 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (TiO <sub>2</sub> -1). .....                                   | 153 |
| Şekil 4.89 : <i>Re</i> = 10 – 2000 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (TiO <sub>2</sub> -2). .....                                  | 154 |
| Şekil 4.90 : <i>Re</i> = 10 – 600 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (TiO <sub>2</sub> -3). .....                                   | 155 |
| Şekil 4.91 : TiO <sub>2</sub> -1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).....   | 158 |
| Şekil 4.92 : Farklı $D_{jet}/D_c$ için minimum akışkanlaşma <i>Re</i> .....  | 159 |
| Şekil 4.93 : R2-TiO <sub>2</sub> -3 gaz-katı akış görüntüleri.....   | 160 |
| Şekil 4.94 : R3-TiO <sub>2</sub> -3 gaz-katı akış görüntüleri.....   | 161 |
| Şekil 4.95 : <i>Re</i> = 10 – 1300 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (R2-TiO <sub>2</sub> -3). .....                               | 162 |
| Şekil 4.96 : <i>Re</i> = 10 – 2000 için ortalama fark basınç verilerinin <i>Re</i> sayısına bağlı değişimi (R3-TiO <sub>2</sub> -3). .....                               | 163 |
| Şekil 4.97 : R2-TiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).....  | 167 |
| Şekil 4.98 : Artan ortalama partikül boyutuna göre <i>Re</i> operasyon aralığı. ....   | 169 |
| Şekil 4.99 : Artan yatak boşluğuna göre <i>Re</i> operasyon aralığı. ....  | 169 |
| Şekil 4.100 : Artan çember çapına göre <i>Re</i> operasyon aralığı. ....   | 169 |
|  |     |
| Şekil A.1 : Duman enjeksiyonunun argon (Ar(D)/H <sub>2</sub> ) ve hidrojen (Ar/H <sub>2</sub> (D)) gazı ile verilmesi sonuçları. ....                                    | 184 |
| Şekil A.2 : Düzlem-5'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (CH <sub>4</sub> /CH <sub>4</sub> ) <i>Re</i> = 20 ve <i>Re</i> = 280 aralığında karşılaştırılması. ....  | 185 |
| Şekil A.3 : Düzlem-10'daki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (CH <sub>4</sub> /CH <sub>4</sub> ) <i>Re</i> = 20 ve <i>Re</i> = 280 aralığında karşılaştırılması. .... | 185 |
| Şekil A.4 : Düzlem-15'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (CH <sub>4</sub> /CH <sub>4</sub> ) <i>Re</i> = 20 ve <i>Re</i> = 280 aralığında karşılaştırılması. .... | 186 |
| Şekil A.5 : Düzlem-20'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (CH <sub>4</sub> /CH <sub>4</sub> ) <i>Re</i> = 20 ve <i>Re</i> = 280 aralığında karşılaştırılması. .... | 186 |
| Şekil A.6 : <i>rz</i> düzleminde <i>Re</i> = 40'ta zaman ortalamalı akış görüntülerinin yakın gösterimi.....   | 187 |
| Şekil A.7 : Düzlem-1'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) <i>Re</i> = 20 ve <i>Re</i> = 280 aralığında karşılaştırılması.....                                 | 188 |
| Şekil A.8 : Düzlem-2'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) <i>Re</i> = 20 ve <i>Re</i> = 280 aralığında karşılaştırılması.....                                 | 189 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil A.9 : Düzlem-3'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....   | 190 |
| Şekil A.10 : Düzlem-5'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....  | 191 |
| Şekil A.11 : Düzlem-10'daki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması..... | 192 |
| Şekil A.12 : Düzlem-15'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması..... | 193 |
| Şekil A.13 : Düzlem-20'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması..... | 194 |
| Şekil A.14 : Akışın belirlenen kritik noktalarının çember uzunluğuna göre zaman ortalamalı hız vektörleri. ....                  | 196 |
| Şekil A.15 : Akışın belirlenen kritik noktalarındaki anlık hız vektör haritası.....  | 197 |
| Şekil A.16 : Düzlem-1'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....  | 198 |
| Şekil A.17 : Düzlem-2'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....  | 199 |
| Şekil A.18 : Düzlem-3'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....  | 200 |
| Şekil A.19 : Düzlem-5'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması.....  | 201 |
| Şekil A.20 : Düzlem-10'daki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması..... | 202 |
| Şekil A.21 : Düzlem-15'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması..... | 203 |
| Şekil A.22 : Düzlem-20'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) $Re = 20$ ve $Re = 280$ aralığında karşılaştırılması..... | 204 |
| Şekil A.23 : Partikül boyut dağılımı.....  | 206 |
| Şekil A.24 : ZnO-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....  | 207 |
| Şekil A.25 : ZnO-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....  | 209 |
| Şekil A.26 : ZnO-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....  | 210 |
| Şekil A.27 : SiO <sub>2</sub> -1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                      | 211 |
| Şekil A.28 : SiO <sub>2</sub> -2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....                                    | 214 |
| Şekil A.29 : SiO <sub>2</sub> -2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                      | 215 |
| Şekil A.30 : SiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....                                    | 218 |
| Şekil A.31 : SiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                      | 219 |
| Şekil A.32 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                        | 220 |
| Şekil A.33 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....                      | 224 |
| Şekil A.34 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                        | 225 |
| Şekil A.35 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....                      | 229 |
| Şekil A.36 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                        | 230 |
| Şekil A.37 : TiO <sub>2</sub> -1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                      | 231 |
| Şekil A.38 : TiO <sub>2</sub> -2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....                                    | 234 |
| Şekil A.39 : TiO <sub>2</sub> -2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                      | 236 |
| Şekil A.40 : TiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....                                    | 238 |
| Şekil A.41 : TiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                      | 239 |
| Şekil A.42 : R2-TiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                   | 240 |
| Şekil A.43 : R3-TiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm). ....                                 | 244 |
| Şekil A.44 : R3-TiO <sub>2</sub> -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2). ....                                   | 245 |

## VORTEKS MİKSERLER: GAZ VE GAZ-KATI KARIŞMA İÇİN YENİ STRATEJİLER

### ÖZET

Endüstriyel açıdan önemli kimyasal reaksiyonların çoğu gazların tek başına veya katı katalizör partikülleri varlığında karışmasını içermektedir. Katalizör aktivitesine ek olarak, reaktörün performansı akış hidrodinamiklerine bağlıdır. Reaksiyonun verimliliği ve güvenliği açısından verimli karışmanın elde edilmesi de çok önemlidir. Gazların hızlı karışmasının gerekli olduğu tek faz endüstriyel reaktörler verimsiz karışmadan kötü etkilenirken, akışkan yatak reaktörler sıcak nokta oluşumu ve düşük verimliliğe sebep olan kanallaşma veya kümeleşme gibi homojen olmayan akış rejimlerinden kötü etkilenmektedir. İki veya daha fazla teğetsel zıt jet ve silindirik bir karışma çemberinden oluşan vorteks mikserler, jetlerin yakınında oluşan dönen vorteks hareketi ve hortum benzeri bir eksen etrafında dönen akışla karakterize edilmektedir. Bu reaktörler ile hem tek faz hem de çok fazlı akışlarda hızlı ve verimli karışma sağlanabilmektedir.

Bu tez kapsamında vorteks mikserdeki gaz akış hidrodinamikleri ve gaz-katı akış hidrodinamikleri iki bölümde çalışılmıştır. İlk bölümde, sunulan vorteks mikserde gazların akış hidrodinamiği, akış görüntüleme ve parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) tekniği kullanılarak Reynolds ( $Re$ ) sayısı 20'den 280'e kadar olan bölgesi için araştırılmıştır. Teğetsel jetlerden gönderilen iki gaz akışının akış rejimi geçişleri, akışın kritik  $Re$  sayısının belirlenmesi ile analiz edilmiştir. Metan gazı kullanılarak gerçekleştirilen gaz akış hidrodinamiği deneylerinde girdap hareketi  $Re = 70$ 'te, akıştaki düzensiz hareketler ise  $Re = 230$  civarlarında oluşmaktadır. Bu bölgeye kadar, çember içerisindeki gaz karışma hidrodinamiği difüzyon mekanizması kontrollüdür.  $Re = 230$ 'dan sonra kararsız yutulma akış rejimi oluşmakta ve taşınım (konveksiyon) mekanizması moleküler difüzyonu bastırmaktadır.

Gazların fiziksel özelliklerinin akış hidrodinamiği ve kararsızlığın başlangıcı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, viskozite ve yoğunluk farklılıklarından dolayı hidrojen, azot ve argon gazları seçilmiştir. Gazların çember içinde tam bir dönüş yaptığı akışın ilk kritik noktasının dinamik basınç olarak da tanımlanabilen atalet kuvvetlerine bağlı olduğu bulunmuştur. En yüksek kinematik viskoziteye sahip hidrojen akışı  $Re = 40$ 'ta, azot ve argon gazları ise  $Re = 70$ 'te tam dönüş hareketi göstermektedir. Bu noktalardan sonra, merkezkaç ve merkezci kuvvetler arasındaki dengenin sonucu olarak sürekli halde bir dönen akış oluşumu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, kararsız yutulma rejiminin başlangıcı hidrojen akışı için  $Re = 150$ 'de, azot için  $Re = 200$ 'de ve argon için  $Re = 220$ 'de oluşmuştur. Bu çalışma, gaz özelliklerinin sadece kritik noktalarda değil, aynı zamanda vorteks mikserde oluşan girdaplı akış modelinin şekli üzerinde de etkili parametreler olduğunu göstermektedir.

Farklı gazların gaz akış hidrodinamiği, farklı  $Re$  sayılarında argon ile farklı gazların - hidrojen ve azotun- karışmasını, her bir jeti farklı bir gazla besleyerek araştırılmıştır. Akışın ilk kritik noktası Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> akışları için aynı  $Re$  sayılarında ( $Re \cong 70$ ) gözlenirken, ikinci kritik nokta Ar/H<sub>2</sub> akışı için  $Re \cong 120$ 'de, Ar/N<sub>2</sub> akışı için  $Re \cong$

190'da bulunmuştur. Artan  $Re$  sayısı ile akışkan partikülleri arasındaki artan kayma gerilimi nedeniyle taşınım mekanizması difüzyon mekanizmasının üstesinden gelmeye başlamaktadır. Hidrojen daha yüksek gaz hızına ve dolayısıyla aynı  $Re$  sayısında azot gazından daha yüksek bir kayma gerilimine sahip olduğundan, Ar/H<sub>2</sub> akışının kritik  $Re$  sayısının Ar/N<sub>2</sub> akışından daha düşük olduğu bulunmuştur.

Tezin ikinci ve son bölümünde, daha iyi bir performans elde etmek adına akışkan yatak için yeni bir kavramsal yaklaşım tanıtılmış ve gaz-katı akış hidrodinamiği incelenmiştir. Geleneksel akışkan yataklarda, katılar sürekli fazda iken gazlar ise dağıtılmış fazdır. Bu konseptte gaz fazının sürekli faz ve katıların dağıtılmış faz olduğu homojen katı ve gaz karışımı sağlayan bir akış rejimi elde edilmesi ile akışkan yatak performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle gaz-katı hidrodinamiği, değişen jet ve çember çapı oranlarına sahip vorteks mikserlerde değişen yoğunluk ve boyutlardaki partiküller kullanılarak çalışılmıştır. Çalışma, hızlı kameranın kullanıldığı akış görüntüleme ile jetler ve çember boyunca fark basınç sensörleri kullanılarak kaydedilen anlık basınç değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Akış görüntüleme deneylerine göre belirlenen minimum akışkanlaşma  $Re$  sayıları basınç düşüşü analizi sonuçları ile aynı bulunmuştur. Katı dağılımının en optimum olduğu  $Re$  aralıklarının ( $Re_{mf}$  ve  $Re_t$  aralığı) fark basınç transdüserleri kullanılarak belirlenebileceği gösterilmiştir. Basınç analizi deneylerinin bu reaktörlerde uygulanabilir olması ile akışkanlaşmanın görüntülenebilir olmadığı endüstriyel sistemlerde basınç değerlerine göre akışkanlaşma rejimlerinin belirlenebileceği doğrulanmıştır. Ayrıca boyut, yoğunluk ve porozitenin gaz-katı akış hidrodinamikleri üzerinde kompleks etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Gaz akış hidrodinamiği, Gaz-katı akış hidrodinamiği, Vorteks Mikser, Akış görüntüleme, PIV, Basınç sinyal analizi.

## VORTEX MIXERS: NEW STRATEGIES FOR GAS and GAS-SOLID MIXING

### SUMMARY

Many industrially important chemical reactions involve mixing of gases alone or in the presence of solid catalysts. Apart from the catalyst activity, the performance of the reactor directly depends on the hydrodynamics of the reactor and efficient mixing is crucial for the safety and yield of the operation. While single phase industrial reactors suffer from poor mixing where rapid mixing of gases are necessary, fluidized bed reactors suffer from non-homogeneous flow regimes such as channelling and slugging which results in formation of hot spots and low yield. Vortex mixers, consisting of a cylindrical chamber connected by two or more tangentially opposed jets, create swirling vortex patterns near the jets, characterized by flow which rotates along an axis, like a tornado can deliver rapid and efficient mixing both in single and multiphase flows.

In the scope of this thesis, gas phase flow hydrodynamics, and gas-solid flow hydrodynamics in vortex mixers were studied in two parts. In the first part, flow hydrodynamics of gases in the proposed vortex mixer was explored by utilizing flow visualization and particle image velocimetry (PIV) techniques for  $Re$  numbers from  $Re = 20$  to 280. The detection of the critical  $Re$  number of flow where both jets fed the same gas, was performed to analyse the flow regime transitions of two gas streams coming from two tangential jets. Results demonstrate that methane flow started to swirl around  $Re = 70$ , and the instabilities in the flow started around  $Re = 230$ , below which, gas-flow hydrodynamics was diffusion controlled. Beyond  $Re = 230$ , unsteady engulfment flow regime occurs and convection dominates the diffusion.

To examine the influence of physical parameters on gas-flow hydrodynamics, three gases, namely; hydrogen, nitrogen, and argon were selected due to the viscosity and density differences they offer. The initial critical point of flow, where gases rotate completely in the chamber, is affected by the inertial force in terms of dynamic pressure. While hydrogen had the greatest kinematic viscosity and completed a full rotation at  $Re = 40$ , nitrogen and argon completed a full turn at  $Re = 70$ . Following these, continuous rotating flow was observed due to the equilibrium between centrifugal and centripetal forces. Similarly, the formation of engulfment regime was detected earlier for hydrogen, at  $Re = 150$ , than for nitrogen at  $Re = 200$  and argon at  $Re = 220$ . Gas properties were found to have an influence not only on critical points but also on the shape of the swirling flow pattern.

The gas-flow hydrodynamics of different gases, hydrogen, and nitrogen, with argon at various  $Re$  numbers was also investigated by feeding each jet with a different gas. While the first critical point was found to be at the same  $Re$  number ( $Re = 70$ ) for both Ar/H<sub>2</sub> and Ar/N<sub>2</sub>, the second critical point was discovered to be at  $Re = 120$  for Ar/H<sub>2</sub> and  $Re = 190$  for Ar/N<sub>2</sub>. Because of the increasing shear stress between fluid particles, the convection dominates diffusion as  $Re$  number increases. Because

hydrogen has a faster gas velocity and consequently a larger shear stress than nitrogen at the same  $Re$  number, the critical  $Re$  number of the Ar/H<sub>2</sub> flow was discovered to be lower than the critical  $Re$  number of the Ar/N<sub>2</sub> flow.

In the second and final section of the thesis, for a better performance, a new conceptual approach for a fluidized bed were introduced and its hydrodynamics were studied. In classical fluidized beds, solids are the continuous phase and the gas is the distributed phase. In this concept, to improve the performance of the fluidized bed by having a flow regime providing homogeneous mixture of solids and gases, where the gas phase is the continuous phase and the solids are the distributed phase is aimed. For this reason, gas-solid hydrodynamics of particles with varying densities and sizes in vortex mixers with varying jet and chamber diameter ratios were examined. The study was performed by visual experiments using a fast camera, and by instantaneous pressure values recorded using differential pressure transducers along the jets and the chamber. The minimum fluidization  $Re$  numbers determined from the flow visualization study were found to be the same with the results obtained from pressure analysis study. The optimum operation flow regime where solids are distributed homogeneously (between  $Re_{mf}$  and  $Re_t$ ) can be determined online using the differential pressure transducers for the proposed vortex mixer. The implementation of pressure analysis in these reactors supported the fact that fluidization regimes and hydrodynamics may be monitored and controlled based on pressure signals in industrial systems where fluidization is not visible. Furthermore, it was discovered that particle size, density, and porosity all have complicated effects on gas-solid hydrodynamics.

**Keywords:** Gas flow hydrodynamics, Gas-solid flow hydrodynamics, Vortex mixer, Flow visualization, PIV, Pressure signal analysis.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Karışma: Bilimsel ve Endüstriyel Önemi

Karışma 1950'li yıllardan beri var olan Uhl ve Gray ile Nagata sayesinde doruk noktasına ulaşan bir disiplindir [1]. Karışma terimi, herhangi bir malzemede bulunan renk, yoğunluk, bileşim veya sıcaklık gibi homojensizliklerin azaltılması olarak tanımlanmaktadır [2]. Böylece prosesin ısı ve kütle transferi ile farklı malzeme ve fazların kimyasal reaksiyonu iyileştirilebilmektedir [3]. Karışma, özellikle kimyasal reaksiyon hızının karışma hızından daha yüksek olduğu kristalizasyon veya polimerizasyon reaksiyonları gibi birçok endüstriyel proses için kritiktir [4]. Kimyasal reaksiyonlar çoğunlukla iki veya daha fazla kimyasal bileşenin farklı fazlarda temas halinde bulunmasını gerektirmektedir. Kimyasal reaktörlerdeki karışma, temas halinde bulunan bu kimyasal bileşenlerin karışma mekanizmasının çalışmasını kapsamaktadır [5]. Proseslerde verimsiz karışma, derişim farkı, homojensizlik ve karışma yoğunluğuna bağlı ürün dağılımından dolayı oluşabilmektedir. Verimsiz karışma yüzünden oluşan istenmeyen yan ürünler ve bu ürünlerin ayrımı için harcanan enerji kaybı reaksiyonlarda düşük seçiciliğe sebep olmaktadır [6].

Karışma prosesleri endüstride birçok konuda var olduğu ve iyileştirilmesi gerektiği için öncelikle karışma proseslerinin sınıflandırılarak tanımlanması gerekmektedir. Karışma prosesleri, içerisinde madde transferinin gerçekleştiği fazları esas alarak sınıflandırılmaktadır. Nienow ve diğ. [7]'nin kriterine göre karışma prosesleri şu şekilde tanımlanmaktadır:

- Tek-faz sıvı karışma: bütün fazlar karışabilir sıvılardan oluşmaktadır.
- Sıvı-sıvı karıştırılmayan karışma (immiscible): bütün fazlar karışamayan sıvılardır, örneğin yağ ve su gibi. Bu durumda amaç, mekanik karışma ile fazlar arası yüzey alanını arttırmak ve kütle transferini iyileştirmektir.
- Katı-sıvı karışma: bu karışma prosesinde amaç, kimyasal reaksiyon özelinde katı partikülleri sıvı faz içerisinde askıda bırakmaktır.

- Gaz-sıvı karışma: Kütle transferini iyileştirmek için fazlar arası ara yüzey yaratabilmek amacıyla gaz baloncuklarının sıvı ortamı içerisinde dağılımını kapsamaktadır.
- Katı karışma: Bütün fazlar genellikle toz haline getirilmiş katılardır. Katı karışmanın amacı, uniform bileşimde bir toz elde edebilmek için farklı tozların karıştırılmasıdır [7].

Ayrıca tek-faz sıvı karışmaya odaklanarak bir proses, taşınımlı (konvektif) ve difüzyif karışma olmak üzere iki aşamaya ayrılmaktadır [6]. Taşınımlı karışma malzemenin reaktör boyunca büyük boyutlu ediler (akışkanın genel akışından sapma hareketi) sayesinde yayılmasını içermektedir. Bu proses, boyut ölçeğinden dolayı makrokarışma olarak da adlandırılmaktadır. Taşınımlı karışma ek olarak küçük ölçekli ediler sayesinde malzemenin mikroskopik ölçekte homojenleşmesini de içermektedir ki bu durum mikrokarişma olarak tanımlanmaktadır. Moleküllerin rastgele hareketi ve birbirleri ile temas etmesi ile bütün boyut ölçeklerinde gerçekleşen karışma ise difüzyif karışma olarak adlandırılmaktadır. Sıvı difüzyonunda, molekül teması çok kısa bir sürede gerçekleşmektedir, difüzyon kimyasal reaksiyon için en son ve gerekli adım olmasına rağmen prosesin tamamına katkısı taşınım etkilerinden daha düşüktür [5].

Karışmanın diğer bir önemli sınıflandırılması ise reaktörlerin hidrodinamik rejimlerine göre yapılmaktadır. Hidrodinamik rejim ise boyutsuz sayı olan  $Re$  sayısı ile ilişkilendirilmektedir.  $Re$  sayısı atalet ve viskoz kuvvetlerin birbirine oranı ile tanımlanmaktadır. Düşük  $Re$  sayılarında laminar rejimler gerçekleşmektedir ve akış profili küçük boyutlu ediler olmadan da oldukça geniştir. Laminar rejimlerde, taşınımlı karışma mekanizması farklı fazlar arası yüzey alanını arttırmak için bileşenleri reaktör boyunca dağıtmakta ve akışkanı deforme etmektedir [8]. Laminar karışma rejiminde akışkan, azalan kalınlıktaki tabakalara ayrılmaktadır. Difüzyif karışma mekanizması ise yalnızca bu tabakaların kalınlığı yeteri kadar düşük bir seviyeye azaldığında önem kazanmaktadır. Yüksek  $Re$  sayılarında, akış rejimi en küçük ölçeğe kadar farklı boyutlardaki vortekslerin oluşumu ile türbülans durumuna gelmektedir. Türbülans rejimlerde karışma, türbülans karışma olarak adlandırılır ve malzemenin büyük ediler ile reaktör boyunca yayılmasını ve küçük ediler ile de transportun difüzyonla gerçekleşeceği bir seviyeye kadar homojenleşmesini içermektedir [5].

## 1.2 Gaz Karışmasının Önemi

Gaz akışlarının karışma problemlerinin giderilmesi endüstriyel açıdan çok önemlidir. Gaz karışma koşulları ve parametrelerinin, kimyasal ve nükleer reaksiyonları içeren endüstriyel proseslerin dönüşüm ve seçicilik performansı üzerinde oldukça büyük bir etkisi vardır [9, 10]. Gaz akış hidrodinamiğinin geliştirilmesi ise akışkan yatak ve reaksiyon çemberlerinde yüksek reaksiyon hızı ve mükemmel reaktan dağılımı elde edilmesini sağlayan homojen gaz karışımlarının elde edilmesinde önem arz etmektedir [11-13]. Gazlaştırma ve oksidasyon reaksiyonlarında ve yanma odalarında yeterli enerji salınımının ve yeterince yüksek yanma verimliliğinin elde edilmesi de gaz karışımlarının kalitesine bağlıdır [14]. Ayrıca homojen bir gaz karışımının elde edilmesi reaktör veya gaz kalibrasyon ünitelerine bilinen konsantrasyonlarda gaz beslemesi yapılabilmesi açısından önemlidir. Bir prosesin gaz karışma kalitesi de prosesin verimliliğini etkilemektedir. Örneğin, endüstriyel gaz motorlarına homojen olmayan hava ve yakıt beslemesinin yapılması gaz motorunun kararsız bir şekilde çalışmasına ve aşırı miktarda çevresel emisyonla sebep olmaktadır. Bu sebeple gaz motorunun maksimum performansta çalışabilmesi için uygun hava/yakıt karışımının beslenmesi elzemdir [15].

Gaz karışmasının endüstriyel açıdan birçok önemi bulunmasına karşın literatürde sıvı karışma çalışmalarına oranla çok az sayıda çalışılmıştır. Homojen gaz akışlarının elde edilmesi için genellikle jet reaktörler tercih edilmektedir [16, 17]. Jet reaktörler, karışıklı konumlandırılmış iki giriş jeti ve bir karışma çemberinden oluşan ve karışma zamanının milisaniye seviyelerinde olduğu karışma jetleridir [18]. Yaygın olarak kullanılan çeşitleri ise giriş jetlerinin dikdörtgen şeklinde olduğu T-jet reaktörler ve silindirik biçimde olduğu sınırlı çarpan jetlerdir (Confined Impinging Jets, CIJs) [18]. Bu reaktörler yüksek transfer katsayıları ve karışma verimlilikleri ile diğer ekipmanlara oranla daha düşük basınç düşüşü oluşması sebebiyle birçok endüstri ve mühendislik alanında kullanılmaktadır [17]. Ayrıca mini/mikroreaktörlerin de endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmasıyla birlikte, jet reaktörlerde (çarpan jetler ve T-mikserler gibi) karışma mekanizmasını etkileyen operasyonel ve geometrik parametrelerin, hem deneysel hem de hesaplamalı tekniklerle çalışılması, birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Ancak, bu reaktörlerin karışma mekanizmaları genellikle viskoz yapıdaki sıvı sistemleri için çalışılmış, sürekli gaz akış sistemleri için tamamıyla çalışılmamıştır. Gazların difüzyon katsayıları sıvılara kıyasla yüksek olduğu için çok

düşük akış hızlarında bile karışma mekanizması etkili ve yüksek oranda difüzyon mekanizması bağımlı olarak tanımlanmaktadır [19]. Ayrıca bu sürekli jet sistemlerinde jetlerin eşit momentuma sahip olması gereksinimi operasyonel açıdan bir takım sınırlandırmaları getirmektedir. Bu sebeple jetlerin eşit momentum gereksinimi olmadığı ve karışma çemberine teğetsel olarak bağlandığı vorteks tip jet reaktörler alternatif olmaktadır. Vorteks mikserlerde sınırlı sayıda sıvı karışma hidrodinamik çalışması bulunmakla birlikte gazların karışma ve akış hidrodinamikleri çalışılmamıştır.

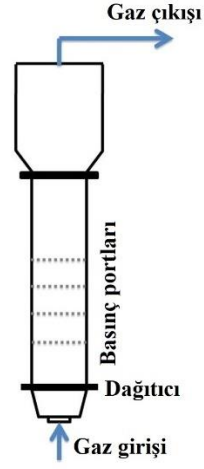
### **1.3 Gaz-Katı Karışmasının Önemi**

Gaz-katı akışlar genellikle bir gaz ve içerisinde askıda bulunan katı partiküller ile tanımlanmaktadır [20]. Bu tanıma göre gaz-katı akışlar çok sayıda endüstriyel proseste yer almakta ve farklı fenomenlerde oluşmaktadır. Örneğin gaz-katı akışları, katı yakıt yanmasında, toz kömür yanması ile katı atık yakımında ve roket sevkedici yanma reaksiyonlarında yer almaktadır. Genellikle ilaç, gıda, kömür ve maden işleme endüstrilerinde görülen partiküllerin pnömatik olarak iletiminde de gaz-katı akışları ile karşılaşmaktadır. Akışkanlaşma ise en yaygın olarak görülen gaz-katı akış operasyonudur ve hidrokarbonların katalitik olarak parçalanmasından kimyasalların ve sıvı yakıtların Fischer-Tropsch sentezi ile üretilmesine kadar birçok önemli uygulamada kullanılmaktadır. Bu sebeple endüstriyel proseslerin optimum tasarımı ve gaz-katı akış davranışı içeren akışkanlaşma prosesinin çalışılması oldukça önemlidir [21].

#### **1.3.1 Gaz-katı akışkanlaşma**

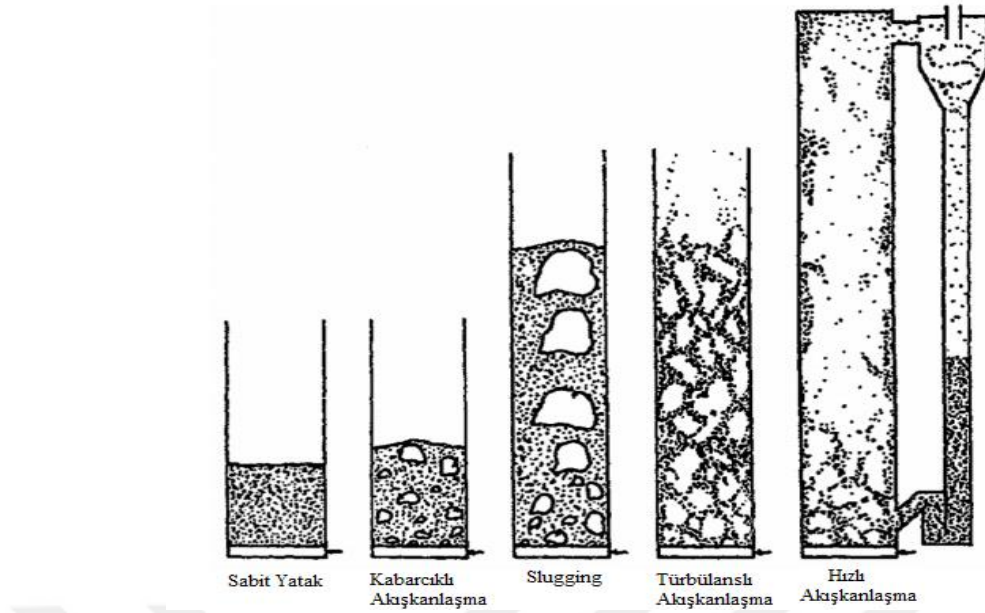
Akışkanlaşma, yığılı biçimdeki hareketsiz partiküllerden oluşan sabit haldeki yatağın dağıtıcı elekten beslenen gaz ile birlikte sıvı hareketine benzer davranış göstermesi olarak tanımlanmaktadır [22]. Gaz-katı akışkanlaşma ise gaz operasyonu ile askıda bulunan partikül yatağını akışkan hale getirme olarak tanımlanmaktadır. Kömür gazlaştırma, enerji üretimi, akışkan katalitik parçalama (FCC), taşıyıcı gazdan seyreltik bileşenlerin adsorpsiyonu, partikül kaplaması, kurutma, kalsinasyon, polietilen üretimi, biyokütle gazlaştırması ve ilaç üretimi gibi endüstrilerde akışkan yataklar tercih edilmektedir (Şekil 1.1). Akışkan yatakların önemi mükemmel ısı ve kütle transferi, çalışma kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı artmaktadır [23, 24].

Akışkanlaşma prosesi, endüstride katı karışma, yüksek gaz-katı ve katı-katı temas verimliliklerinden dolayı fazla kullanılmaktadır [25].

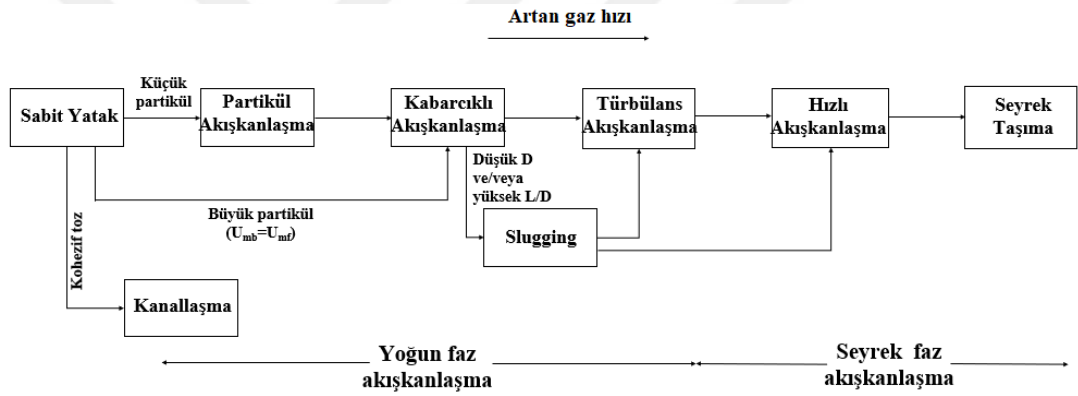


Şekil 1.1 : Akışkan yatak [26].

Akışkan hızının artırılmasıyla akışta gözlenen farklı davranışlar akışkanlaşma rejimi olarak tanımlanmaktadır. Akışkanlaşma rejimleri Şekil 1.2’de verilmiştir. Sabit halde bulunan yatakta akışkan hızı arttıkça, yatak içerisinde kabarcıkların oluşarak kaynamaya benzer bir davranışın oluşmaya başladığı görülmektedir, akışkan yatağın bu davranışı kabarcıklı akışkanlaşmadır. Hız arttıkça oluşan kabarcıkların yatak genişliğine kadar büyüdüğü ve küme (slug) formları oluşturduğu rejim kümeleşme (slugging) akışkanlaşma rejimidir. Artan hız ile oluşan bu kanallar birleşerek yatakta boşluklar ve katı kümeleri oluşturmaktadır. Bu rejim ise türbülanslı akışkanlaşmadır. Buraya kadar gerçekleşen akışkanlaşma rejimleri yoğun faz akışkanlaşma olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1.3) [21]. Gaz hızı daha da arttırılırsa yatak hızlı akışkanlaşma rejimine geçmektedir. Bu durumda yatağın üst bölümünde katı derişimi yüksek, alt bölümünde ise düşüktür. Bu rejimden sonra hız arttığında katıların kolon dışına kadar taşınabildiği pnömatik rejim gözlenmektedir [27]. Partiküllerin tamamıyla akışkan yatak dışına taşındığı bu akışkanlaşma rejimi bölgesi ise seyrek faz akışkanlaşma olarak tanımlanmaktadır [21].



Şekil 1.2 : Akışkanlaşma rejimleri [27].



Şekil 1.3 : Sabit yatak, yoğun faz akışkanlaşma ve seyrek faz akışkanlaşma arasındaki ilişki [21].

Gazın dağıtıcı bir elekten gönderilerek dağılık faz (dispersed) ve katının ise sürekli fazda (continuous) olduğu geleneksel akışkan yatakların mükemmel gaz-katı teması, çok yüksek ekzotermik reaksiyonlarda bile sıcak nokta (hot spot) oluşmaması, iyi gaz-partikül ve yatak-duvar ısı transferinin gerçekleşmesi, katıların kolayca taşınımı gibi avantajları bulunmaktadır. Fakat, akışkan yatakların daha fazla dezavantajı bulunmaktadır. Bunlar dağılımdan dolayı gazın geniş kalma zamanı dağılımına sahip olması ve kabarcıklar halinde baypasının gerçekleşmesidir. Ayrıca yoğun karışmadan dolayı katıların da geniş kalma zamanı dağılımı olmaktadır. Bunun yanı sıra yatak iç ekipmanları erozyona uğramakta ve katalizör partikülleri aşınmaktadır. Kalma zamanı dağılımının geniş olması kimyasal reaksiyonlarda dönüşüm ve seçiciliği

düşürmektedir. Akışkan yatakların en önemli dezavantajı ise endüstriyel ölçeklendirilmesinin hayli zor olmasıdır [28]. Geleneksel akışkan yatakların aksine katının dağınık faz ve gazın sürekli fazda olduğu vorteks tipi jet mikser geometrisinin akışkan yatak olarak kullanılması ile bu dezavantajların önüne geçileceği düşünülmektedir. Geleneksel akışkan yatağa göre katı beslemesinin daha az ve gaz akışının daha fazla olması ile kimyasal reaksiyonlarda elde edilen dönüşüm az olsa bile seçicilik daha yüksek olacaktır. Bu sebeple vorteks tipi akışkan yatakta öncelikle gaz-katı karışma hidrodinamiklerinin belirlenmesi ve akışkanlaşma rejimlerinin ortaya çıkarılması önemlidir.

#### 1.4 Tezin Amacı ve Planı

Sürekli jetlerdeki tek faz akış hidrodinamiği incelendiğinde, çalışmaların genellikle sıvı faz akış sistemleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak bu jet mikserlerdeki gaz akış hidrodinamiğinin ortaya çıkarılması oldukça önemlidir. Çarpan jet veya T-jet mikserlerdeki gibi jetlerin eşit momentum gereksiniminin olmadığı vorteks gaz mikserler ise katı katalizör sistemlerinin kullanıldığı kimyasal endüstrilerinde yüksek kullanım potansiyeline sahiptir. Kanalların katalizör partikülleri ile kaplandığı durumlarda küçük boyutlarda kullanılabilecekleri gibi, daha büyük boyutları ise sabit yatak, dolgulu kolon ve akışkan yatak gibi sistemler için alternatif oluşturmaktadır. Ek olarak, bu reaktörler her bir sabit yatak için ayrı ayrı kullanılarak gazların kötü dağılımını engellemektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, teğetsel jet girişlerine sahip vorteks tipi mikserde gaz akış ve gaz-katı akış hidrodinamiklerinin araştırılmasıdır. Gaz akış hidrodinamiği çalışması benzer gaz ve farklı gazların akış hidrodinamikleri olmak üzere iki bölümde çalışılmıştır. Gaz-katı akış hidrodinamiği çalışması için ise farklı yoğunluk ve boyutlardaki farklı partiküllerin akışkanlaşma karakteristikleri incelenmiştir. Ayrıca vorteks akışkan yatağın çember ve jet çapı oranının etkisi de ortaya çıkarılmıştır.

Gaz akış hidrodinamiği çalışmasının birinci bölümünde 5 mm besleme jeti ve 10 mm karışma çemberi geometrisi olan vorteks jet mikserin akış mekanizması metan gazı kullanılarak belirlenmiştir. Jetlerin  $Re$  sayısı aralığı akış rejimi değişimlerinin belirlenebilmesi için laminar bölgede ve hem kararlı hem de kararsız akışları kapsayacak şekilde seçilmiştir. Vorteks mikserdeki gaz akışının deneysel olarak görüntülenmesine ek olarak parçacık görüntülemeli hız ölçüm (Particle image

velocimetry, PIV) tekniği ile akış alanının ve karışma çemberinin trblanı özelliklerinin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde gaz fiziksel özelliklerinin akış hidrodinamiği üzerindeki etkisinin araştırılması için farklı yoğunluk ve viskoziteye sahip hidrojen, azot ve argon gazları kullanılmıştır. Jetlerden benzer gazlar gönderilerek, üç farklı gaz için akış profilleri ortaya çıkarılmıştır. Böylece gazların fiziksel özelliklerinin gaz akış hidrodinamikleri üzerindeki etkisi akış görüntüleme ve PIV deneyleri ile kritik  $Re$  bölgesi ve akıştaki kararsızlıklar belirlenerek araştırılmıştır.

Çalışmanın nc bölümünde ise jetlerden farklı gazlar gönderilerek, farklı gazların ve ortalama gaz fiziksel özelliklerinin akış hidrodinamikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, argon gazı sırasıyla hidrojen ve azot gazları ile karıştırılarak iki set deney yapılmıştır. Argon ve azot gazları yoğunluk, viskozite, difüzyon katsayıları gibi benzer fiziksel özelliklere sahipken, argon ve hidrojen için bu değerler oldukça farklıdır. Gaz zellikleri arasındaki bu benzerlik ve farklılığın akış mekanizması ve akış rejimi geçişleri üzerindeki etkileri, karışma çemberinin akış görüntüleme ve PIV deneyleri ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde ise gaz akış hidrodinamikleri belirlenen vorteks mikser geometrisi gaz-katı akış hidrodinamiğinin ortaya çıkarılması için kullanılmıştır. Vorteks reaktörler, geleneksel akışkan yatak reaktörlerin aksine gazın sürekli katının ise çember içerisinde dağıtılmış olduğu yeni nesil akışkan yatak reaktörler olarak tanımlanabilmektedir. Bu bölümde gaz ve katı özellikleri (yoğunluk, viskozite ve büyüklük gibi), gaz besleme hızı, katı yükleme ve  $Re$  sayısı ile ortam koşullarının minimum akışkanlaşma hızı, kritik minimum akışkanlaşma hızı, maksimum terminal hız, katı tutuşu ve akışkanlaşma yüksekliliği üzerindeki etkileri deneysel akış görüntüleme ve basınç verilerinin analizi ile belirlenmiştir. Böylece elde edilen gaz-katı karışma performansı sonuçları ve hidrodinamik tasarım parametrelerinin daha sonra belirlenebilecek birçok gaz-katı prosesi için uygulanabilir olması hedeflenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

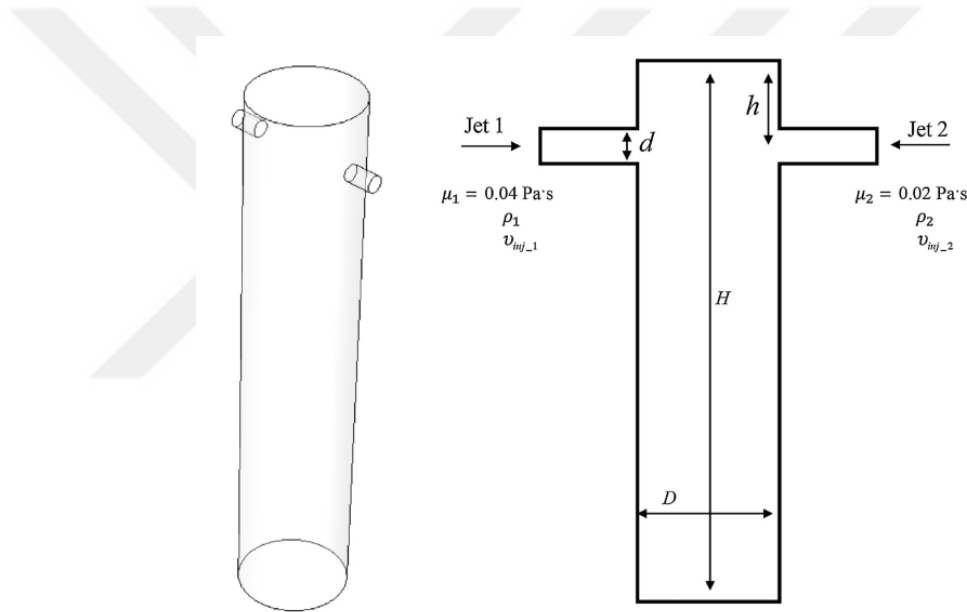
### 2.1 Gaz Akış Hidrodinamiği

Literatürde sınırlı sayıda çalışılmış olan gaz akış hidrodinamiği mekanizmasının belirlenebilmesi için, CIJ, T-jet ve vorteks jetler kullanılarak sıvı ve gaz akış hidrodinamiği ve karakterizasyonunu içeren çalışmalar incelenmiştir. CIJ ve T-jetler kullanılarak operasyonel parametrelerin akış alanı ve karışma mekanizması üzerindeki etkilerinin incelendiği birçok çalışma bulunmasına rağmen, vorteks mikserlerin hidrodinamik ve karışma mekanizmalarının incelendiği sıvı akış çalışmaları da oldukça sınırlıdır. Gaz akış hidrodinamiği çalışmaları incelendiğinde ise V-tip, vorteks üniteleri, çarpışmalı jetler ve mikrokanallar gibi farklı tipte geometrilerin gaz karışma hidrodinamiklerinin ortaya koyulması için kullanıldığı görülmektedir. Fakat, mikrometre aralığındaki jet reaktörlerde gerçekleştirilen gaz karışma çalışmaları genellikle hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) veya direkt Monte Carlo simülasyonu (DSMC) gibi nümerik metodlar kullanılarak yapılmıştır [12, 13, 29-31]. Sınırlı sayıdaki deneysel gaz karışma çalışmaları genellikle reaktör çıkışında gaz konsantrasyonlarının ölçülmesi [11] veya PIV [9, 32, 33] ve basınç hassasiyetli boyama (pressure sensitive paint, PSP) [34, 35] metodları ile gerçekleştirilmiştir.

#### 2.1.1 Sınırlı çarpan jet reaktörler

Çarpan akım, akışkanların bir çarpma yüzeyinde eş veya eş olmayan çarpışmasını içeren yeni bir teknolojidir ve ilk defa Erperin tarafından sunulmuştur [36]. Bu çarpma bölgesinde elde edilen yüksek-bağıl faz hızı, türbülans yoğunluğu ve kayma hızları, ısı ve kütle transfer katsayılarını ve karışma verimliliğini büyük ölçüde iyileştirmektedir [37]. Bu teknoloji, sentetik polimer üretimi, mikroskopik karışma, ıslak partiküllerin kurutulması, absorpsiyon, gazlaştırma ve yanma gibi birçok mühendislik uygulamasında kullanım alanı bulmaktadır. Son yıllarda, CIJ'ler özellikle akışın hızlı homojenizasyonunun gerektiği sürekli sistemler için geleneksel karışma tanklarına alternatif olarak görülmektedir [3, 37-40]. Sınırlı çarpan jetler, yarı-sınırlı

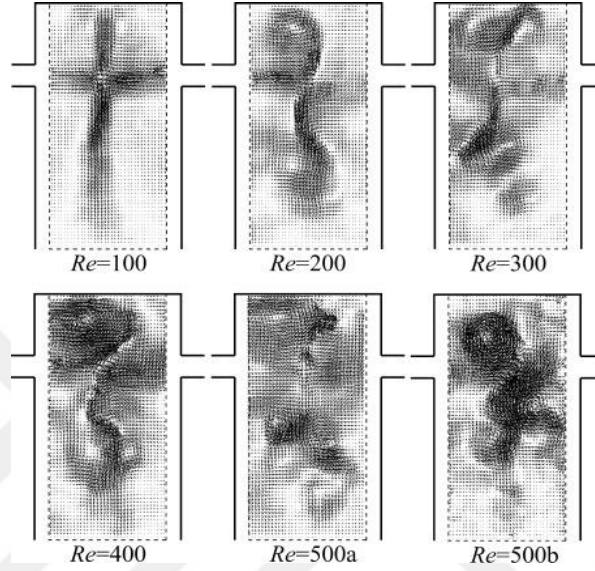
bir çemberin üst bölgesine konumlandırılan iki karşılıklı jetten akışkan girişinin (genellikle 1m/s-100m/s hızlarında) ve çemberin alt bölgesinden akışkan çıkışının gerçekleştiği jetlerdir (Şekil 2.1) [41]. Jetlerden gelen akışlar çemberde çarpışmakta ve daha sonrasında elde edilen karışım akışı çemberin çıkış bölgesine doğru hareket etmektedir. Bu reaktörlerin çalışma prensibi olan çarpışmanın amacı ise çarpışma bölgesinde momentum, ısı ve kütle transfer hızlarının artırılmasıdır. Son yıllarda çarpan jetlere olan ilgi artmıştır, bunun sebebi geleneksel reaktörlerden daha iyi ve daha hızlı karışmanın sağlanması ve hızlı reaksiyon prosesleri için daha kısa karışma zamanının elde edilebilmesidir. Buradaki anahtar performans elemanı ise yüksek türbülans enerji kaybolma bölgesi üretilerek sıvının bu bölgeye doğru akışının sağlanmasıdır [42].



**Şekil 2.1** : CIJ'lerin deneysel ve CFD modeli ve 3 boyutlu sınır koşulları [41].

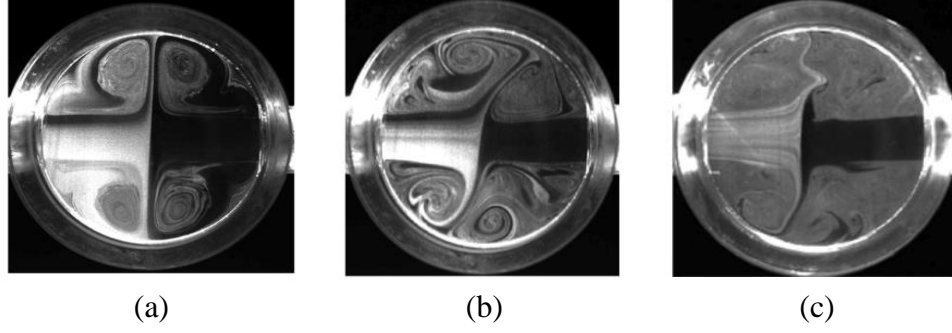
Akış rejimi değişimlerinin gözlemlendiği kritik  $Re$  sayısının belirlendiği akış rejimi karakterizasyonu karışma hidrodinamiklerinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Son yıllarda, CIJ ve T-jet reaktörler kullanılarak kritik  $Re$  sayısının belirlendiği, hem operasyonel hem de tasarım parametrelerinin etkileri sıvı akış sistemleri için ortaya koyulmuştur. CIJ'lerde,  $Re = 100$ 'de ayrılmış (segregated) akış rejimi gözlenmektedir (Şekil 2.2). Bu rejimde, aksel akış oluşmakta ve çember, jetlerden gelen akışlar tarafından ikiye ayrılmaktadır. Bu sistemin kritik akış  $Re$  sayısı 120 olarak belirlenmiştir, çünkü bu  $Re$  değerinde akışın türbülans yoğunluğu değeri iki katına çıkmaktadır.  $Re = 200$ 'de ise kendi kendini sürdürülebilir (self-sustainable) kaotik rejim gözlenmektedir. Bu akış rejiminde ise akışın aşağı yönünde (downstream)

vorteksler oluşmakta ve akıştaki ayırım (segregation) jetlerin radyal titreşim hareketleri ile azalmaktadır.  $Re$  sayısının 500'e kadar artırılması ile, radyal salınım yerine jetlerin aksenel salınımları gözlenmektedir. Bu akış rejimi bölgesi ise kaotik rejim olarak adlandırılmaktadır.  $Re$  sayısının daha da artırılması ile akış daha düzensiz hale gelmekte ve verimli karışmanın gözleendiği girdap kopması (vorteks shedding) rejimi oluşmaktadır [32, 43].



Şekil 2.2 : İki boyutlu anlık hız vektörleri [43].

Li ve diğ. [32] CIJ reaktörünün  $100 \leq Re \leq 1000$  aralığındaki dinamik davranışını belirlemek için akışkan olarak hava kullanmıştır. Akış hidrodinamikleri, akış görüntüleme ve PIV deneysel metodları kullanılarak belirlenmiştir. Çarpışmalı jetlerin  $Re$  sayısı, reaktör geometrisi ve giriş sınır koşulları, aksenel düzensizlikleri etkileyen en önemli faktörler olarak belirlenmiştir. Çember çapı, tepe ve çemberin şeklinden daha önemli bulunmuştur. Akış  $Re = 100$ 'de ayrılmış iken (Şekil 2.3a) radyal sapma eğilimindeki salınımların (deflective oscillation) etkisi ile  $Re = 150$ 'de akış davranışı değişmiştir (Şekil 2.3b).  $Re$  sayısının 500'ün üstüne artırılması ile hem radyal hem de aksenel salınımların etkisiyle çarpışma bölgesi kaybolmuş ve akış rejimi kaotik hale gelmiştir (Şekil 2.3c).

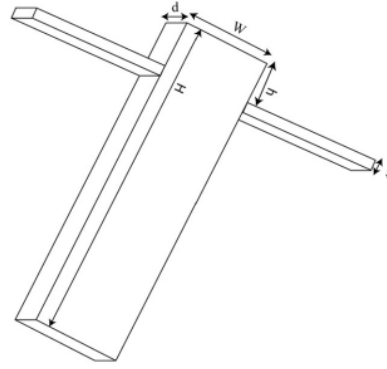


**Şekil 2.3 :** Hızlı kamera ile çekilen anlık görüntüler a)  $Re = 100$  b)  $Re = 150$  c)  $Re > 500$  [32].

Jet mikserler içerisinde kaotik akışın oluşumu, akışkan alt akımlarının katlanma ve genişmesine bağlı konsantrasyon ve karışma uzunluk ölçeklerinin azalması sebebi ile karışma mekanizmasını iyileştirmektedir [39]. Haas-Santo ve diğ. [11], V-tip mikser geometrisi kullanarak benzer molekül ağırlıklı argon/azot ve farklı molekül ağırlıklı helyum/azot gazlarının karışma davranışını araştırmıştır. V-tip mikserler çarpışmalı jetlerin farklı bir çeşididir. Bu geometride jetler karışma çemberine V şekli oluşturacak biçimde bir açıyla konumlandırılmaktadır. Bu çalışmada, gazların tamamıyla karıştığı karışma uzunluğu ve bu karışma için gerekli süre olan karışma zamanı belirlenmiştir. Bu değerler, V-tip mikserin çıkış bölgesine konumlanan ölçme cihazı kullanılarak akışkan konsantrasyonlarının laminar bölgede ölçülmesi ile belirlenmiştir. Akış rejimi difüzyona bağlı olmakla birlikte, kanal geometrisi ile iyileştirilebilen akışkan akımlarının kayma gerilimi daha iyi karışma için önemli bir parametre olarak belirlenmiştir [11].

### 2.1.2 T-jet reaktörler

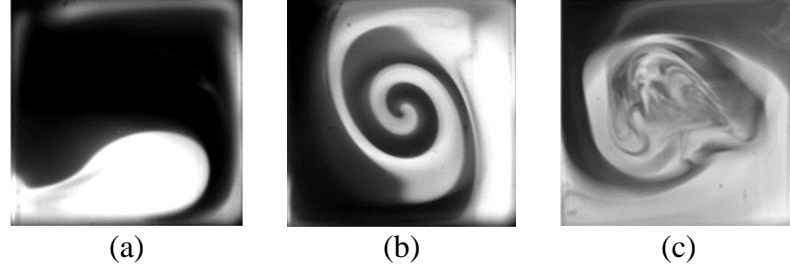
Karşılıklı jet reaktörlerin diğer bir önemli çeşidi olan T-jet reaktörler ise genellikle kare veya dairesel jetler ve prizmatik karışma çemberlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.4) [44]. Bu reaktörler de basit geometrileri ve hızlı karışma potansiyelleri sebebi ile son yıllarda oldukça dikkat çekmiştir [39]. T-jet reaktörler ve CIJ'lerin akış profili ve rejimleri birbirinden oldukça farklıdır. T-jet reaktörlerin jetleri, karışma çemberinin tüm derinliği boyunca uzanmakta ve CIJ'lerde gözlenen jetlerin radyal dağılımını engellemektedir [44]. T-jet reaktörler genellikle mikromikser aralığında ve jet genişlikleri karışma çemberi genişliğinin yaklaşık olarak eş veya yarı boyutlarında olmaktadır [18].



**Şekil 2.4** : T-jet reaktörlerin şematik gösterimi [45].

$Re$  sayısının akış rejimi üzerindeki etkisi T-jet reaktörlerde de çalışılmıştır. Geleneksel T-jet reaktörlerde sıvı akış hidrodinamiğinde, tabakalı (stratified) rejim  $Re \leq 136$ , vorteks rejim  $Re \geq 136$  ve yutulma (engulfment) rejimi ise  $Re \cong 200$  değerlerinde gözlenmektedir [46]. Tabakalı akış, düşük  $Re$  sayılarında gözlenmektedir ve akış difüzyon kontrollü olduğu için karışma yavaştır. Ancak daha yüksek  $Re$  sayılarında gözlenen vorteks ve yutulma akış rejimlerinde akışkan akımları daha yüksek bir yüzey alanında küçük difüzyon mesafesinde karşılaşmaktadır. Böylece difüzyon zamanı azalmakta ve karışma performansı iyileşmektedir [46, 47-49].

Mariotti ve diğ. [48], T-jet reaktörlerin kullanıldığı jetlerden tek akışkanın gönderildiği çalışmalarına ek olarak, metilen mavisi ve askorbik asit karışma performansını metilen mavisi indirgenme reaksiyonu üzerinde incelemiştir. Tek akışkan olarak su kullanılan çalışmalara benzer akış rejimleri bulunmasına rağmen (tabakalı, vorteks, ve kararsız yutulma akış rejimleri), reaktanların yoğunluk farklarından kaynaklanan tabakalara ayrılma etkileri, tabakalı ve vorteks akış rejimlerinde gözlenmektedir. Tabakalara ayrılma etkisi yutulma akış rejiminde, taşınım mekanizması difüzyondan daha etkili olduğu için azalmaktadır. Geleneksel karışma geometrilerine ek olarak, jetleri hizalı olmayan (nonaligned) T-jet reaktörlerde sıvı karışma mekanizması çalışılmıştır [49-53]. Bu hizasız reaktörlerde,  $Re > 40$ 'ta vorteks akış rejimi oluşumu gözlenmektedir. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi bu sistemde de akış rejimi üç bölgeye ayrılmıştır: tabakalı akış, kararlı yutulma akış ( $40 < Re < 215$ ) ve kararsız yutulma akış rejimi ( $Re > 215$ ) [53].

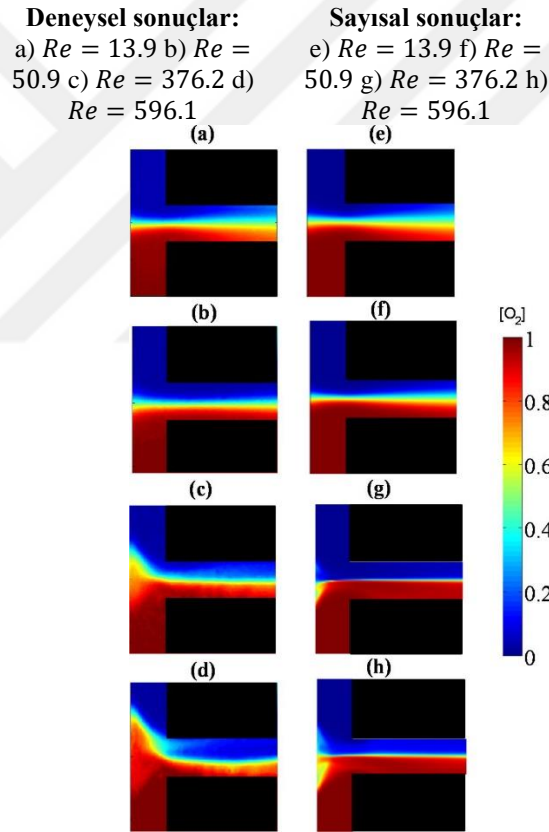


**Şekil 2.5 :** Hızlı kamera ile çekilen anlık görüntüler a)  $Re = 30$  b)  $Re = 50$  c)  $Re = 215$  [53].

Gobby ve diğ. [29] metanol buharı ve oksijen gazlarının farklı konfigürasyonlardaki T-tip ve V-tip mikromikserlerdeki karışma dinamiklerini CFD metodu ile incelemişlerdir. Jetler arasındaki açının değiştirilmesi karışma performansını etkilememiştir, ancak jetlerden önce bir klape eklenerek (throttle) akışkanın jete giriş hızının artırılması karışma uzunluğunu önemli ölçüde azaltmıştır. Düşük gaz akış hızlarında ise, gazların daha düşük mesafelerde karıştıkları gözlenmiştir. Mikroakışkan ünitelerde, akışın Knudsen sayısı ( $Kn$ ) genellikle 1'den büyüktür [30]. Bu akış genellikle sürekli akış denklemlerinin kullanımının uygun olmadığı seyreltik (rarefied) akış bölgesi olarak adlandırılmaktadır.  $Kn > 0.001$ 'den büyük olduğu geçiş ve serbest moleküler akış bölgelerinde ise mikrokanallar DSMC metodu ile simüle edilmiştir [12, 54]. Serbest moleküler bölgede, duvar etkileri ve giriş-çıkış bölümleri arasındaki basınç farkı etkisiz bulunmuştur. Darbandi ve diğ. [54] tarafından azot ve karbonmonoksit gazlarının mikro/nano kanallardaki karışması çalışılmış ve kütle fraksiyon gradyanına bağlı olarak difüzyonun azaldığını gösterilmiştir.

Yüksek hızlı kameralar ile gerçekleştirilen akış görüntüleme tekniklerine ek olarak basınç-hassasiyetli boyama (PSP) metodu Huang ve diğ. [34] tarafından azot/oksijen gazlarının T-tip mikromikserlerdeki akış mekanizmasını incelemek için kullanılmıştır. Şekil 2.6'da deneysel ve sayısal çalışma sonucunda gözlenen akış rejimleri karşılaştırılması verilmiştir. Laminar rejimde düşük gaz akış hızlarında ( $Re = 13.9$  ve  $Re = 36.7$ ) gaz karışmasının ana mekanizması, kanal çıkışındaki yüksek karışma verimliliğinin sebebi olarak basit moleküler difüzyon olarak gösterilmiştir. Akış hızı arttıkça ( $Re = 176.1$  ve  $Re = 376.2$ ), kanal çıkışında ölçülen karışma değeri gaz moleküllerinin kalma sürelerinin azalmasına bağlı moleküler difüzyonun da azalması ile negatif yönde etkilenmiştir.  $Re$  sayısı 500 değerlerindeki akış rejimi karakterize edilen asimetric akış biçimi sebebi ile kararsız yutulma akış rejimi olarak tanımlanmıştır. Aynı grubun devam çalışmasında oksijen gazının azot, argon ve

helyum gibi farklı gazlar ile T-tip mikserlerdeki karışma hidrodinamikleri çalışılmıştır. Düşük akış hızlarında, gazlar arasındaki difüzyon katsayısı karışma kalitesi üzerinde oldukça etkili olarak bulunmuştur. Akış hızının artırılması ile oluşan gazların dinamik viskozite farkı ise karışma verimliliğini iyileştirmede aktif rol oynamaktadır [35]. Gazların yüksek viskozite değerleri ise gazlar arası kayma geriliminin azalmasına bağlı taşınım hareketinin azalması sebebi ile akış gelişmesini engellemektedir [11, 34]. Hidrojen ve oksijen gazlarının T-tip mikser içerisindeki karışma hidrodinamiğinin incelendiği çalışmada yüksek difüzyon katsayısına sahip hidrojen moleküllerinin düşük giriş hızlarında akışı domine ettiği görülmektedir. Ancak gelen akış hızı arttıkça daha yüksek momentuma sahip olan oksijen molekülleri hidrojen moleküllerinin ana kanala girmesini engellemektedir [30].



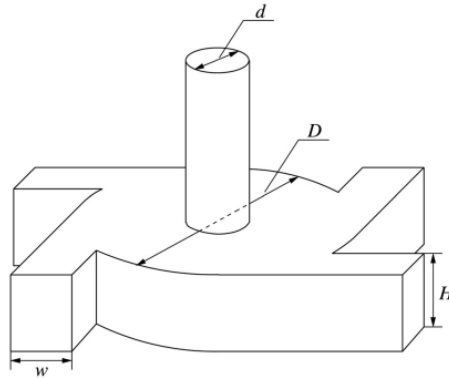
**Şekil 2.6** : Mikromikserin T bölgesinde deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması [34].

Jetler ister T-jet ve CIJ'lerdeki gibi karşılıklı, ister ise V-tip veya ok-tip (arrow-type) mikserlerdeki gibi belirli bir açı ile konumlandırılmış olsun, çarpışmalı jetlerin dinamiği jetlerin momentumuna bağlıdır. Bu sebeple de jetlerin yarattığı kuvvetin birbiri ile yarışması veya farklı olması belirli bir sistem için hız farklılıkları üzerinde sınırlamalar getirebilmektedir. Bu durumlarda etkin karışma için jetlerin

momentumunun eşit olmasını gerektirmeyecek başka tasarımların kullanılması oldukça önemlidir.

### 2.1.3 Vorteks mikser

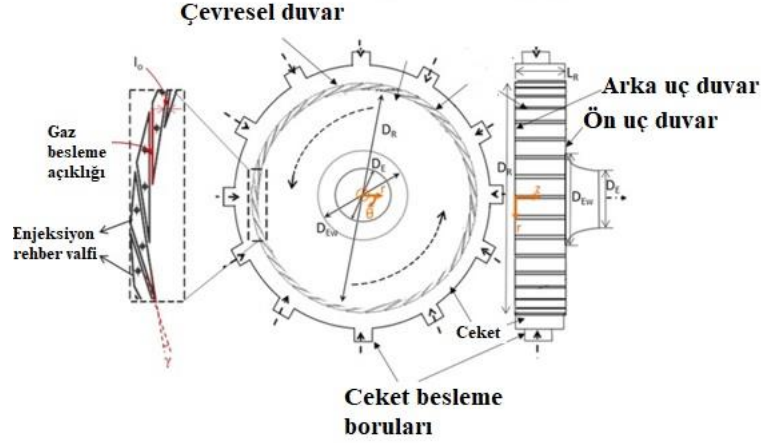
CIJ veya T-jet reaktörler ile 1.5 ms gibi kısa bir sürede hızlı karışma sağlanabilmektedir, ancak iki giriş jetinin eşit momentuma sahip olması gerekmektedir. Bu gibi sınırlamaların ortadan kaldırılması için Liu ve diğ. [55] tarafından çok-girişli vorteks mikser (multi-inlet vortex mixer, MIVM) reaktörleri geliştirilmiştir (Şekil 2.7). Böylelikle CIJ reaktörlerin sağladığı hızlı mikrokarişma, ölçeklendirilebilme ve çalışma kolaylığı gibi avantajlar korunmuştur. MIVM, konsept olarak her bir jetin, hücredeki mikrokarişmayı sağlamak amacıyla birbirinden bağımsız olarak momentum katkısında bulunmasına dayanmaktadır. Böylece, jetlerden biri veya daha fazlası yüksek hacimsel akış hızında, diğer jet ise daha düşük bir akış hızında gönderilebilmekte ve iyi bir karışma elde edilmektedir [55]. Genel tanım olarak vorteks mikser reaktörler, silindirik bir çembere iki veya daha fazla teğetsel karşılıklı jetin bağlanması ile oluşmaktadır [56]. Bu reaktörlerde jetlerin yanında bir eksen etrafında dönen akış olan hortum benzeri girdaplı (swirling) vorteks hareketi gözlenmektedir [50, 56]. Bir çarpışma bölgesi olmadığından gelişmiş karışmanın elde edilmesi için CIJ'lerdeki gibi jetlerin eşit momentuma sahip olması zorunlu bir durum değildir [57-60]. Vorteks reaktörlerin prizmatik çember geometrileri sadece sıvılar için mikroreaktör sistemlerinde çalışılmış olup [46,51,52], küçük çaplı (1 mm jet çapı ve 2-4 mm çember çapı) silindirik çemberleri ise sıvı öncü maddeler (precursor) kullanılarak nanopartikül üretiminde test edilmiştir [61,62].



Şekil 2.7 : MIVR şematik gösterimi [63].

CIJ ve T-jetler kullanılarak operasyonel parametrelerin akış alanı ve karışma mekanizması üzerindeki etkilerinin incelendiği birçok çalışma bulunmasına rağmen, vorteks mikserlerin hidrodinamik ve karışma mekanizmalarının incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Çok sayıda jetin kullanıldığı çok girişli vorteks reaktörlerde (MIVM), vorteks davranışı zorlandırılmış vorteks bölgesi (reaktörün radyal merkezine yakın) ve serbest vorteks bölgesi (radyal merkezden uzak) olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır [58]. Bu bölgelerin belirlenmesi türbülans yoğunluğu ve vortisite (girdap) kuvveti değerleri ile yapılmaktadır, ki bu değerler zorlandırılmış vorteks bölgesinde serbest vorteks bölgesinden daha yüksektir [58]. Ancak vorteks merkezi çember merkezi etrafında hareket etmektedir. Bu durum türbülans hız dalgalanmalarının artması ile türbülans kinetik enerjisinin artmasına sebep olmaktadır [59]. Akışta girdapların ve taşınımın etkisi ile oluşan hız dalgalanmalarının oluşması karışmanın daha etkili olmasını sağlamaktadır [66]. Böylece akışın ısı ve kütle transferi de sınır tabaka kalınlığının azalması ve fazlar arası kararlı etkileşimin oluşması ile iyileşmektedir [67].

Niyogi ve diğ. [9] tarafından kullanılan gaz vorteks ünitesi (GVU) (Şekil 2.8), iki normal-birim eksenli paralel düz disk, uç duvarlar ve bir yanal çevresel duvar tarafından sınırlanan sabit bir akış alanı ünitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada gaz vorteks ünitesi kullanılarak stereo-PIV, Lazer Doppler Anemometri (LDA), basınç sensörleri ve yüzey yağ akış görüntüleme teknikleri ile gaz akış hidrodinamikleri endüstriyel uygulamalara uygun olarak araştırılmıştır. *Re* sayısı arttıkça uç duvarların sınır tabakası, yığın akış hidrodinamikleri üzerinde daha az etkili bulunmuştur. Ek olarak, gaz-vorteks ünitesindeki ikincil akışlar Niyogi ve diğ. [33] tarafından, hem deneysel hem de sayısal olarak çalışılmıştır. İkincil akışların, vorteks ünitesi içerisinde akışın girdap davranışı daha güçlü olduğunda oluşmaya başladığı bulunmuştur.



**Şekil 2.8** : Gaz vorteks ünitesi, önden ve yandan görünüm [33].

Literatürde gaz akış hidrodinamiği çalışmaları olmasına rağmen, gaz akış hidrodinamiğinin altında yatan mekanizmanın tamamıyla ortaya çıkarılması gerekmektedir. Yukarıda verilen gaz çalışmaları genellendiğinde, gaz akış hızları, reaktör konfigürasyonu ve gazların fiziksel özelliklerinin gaz akış hidrodinamikleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

## 2.2 Gaz-Katı Akış Hidrodinamiği

Akışkan yataklarda gaz-katı akış hidrodinamiği ısı ve kütle transferi, gaz-katı karışması, radyal ve aksenal sıcaklık gradyanleri, gaz fraksiyonları ve yatakta gaz ve katı tutuşu gibi proseslerin en temel durumlarını büyük ölçüde etkilemektedir [66]. Gaz-katı akışkan yataklar partikül ve akışkanlaşan gaz içeren karmaşık dinamik sistemlerdir. Lineer olmayan partikül-partikül ve partikül-gaz etkileşimleri gaz-katı iki fazlı akışın kompleks akış davranışına yol açmaktadır. Gaz katı akış karakteristiği partikül boyutu, katı ve gaz arasındaki yoğunluk farkına bağlı değişmektedir [67]. Bu bölümde, öncelikle gaz-katı akışkan yatak hidrodinamiğinin bütünüyle anlaşılabilmesi için akışkan yatakların karakteristik özellikleri tanımlanmıştır. Sonrasında ise literatürde yer alan ve endüstride kullanılan akışkan yatak türleri sunulmuştur.

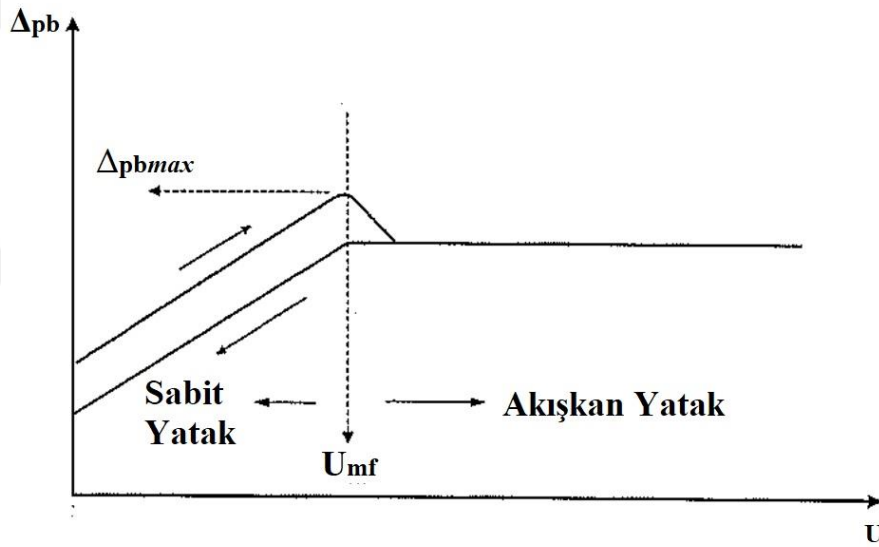
### 2.2.1 Akışkan yatak karakteristik özellikleri

#### 2.2.1.1 Minimum akışkanlaşma hızı, $U_{mf}$

Minimum akışkanlaşma hızı,  $U_{mf}$ , yatakta hareket eden gaz üzerindeki sürüklenme kuvvetlerinin yataktaki partikül ağırlığına eşit olduğu andaki yüzeysel gaz hızıdır ve

ampirik olarak yataktaki basınç düşüşünün yüzeysel gaz hızına göre değişiminden tespit edilmektedir (Şekil 2.9). Başka bir deyişle dinamik basınç düşüşü ile gaz hızı arasındaki ilişki ile belirlenebilmektedir. Dinamik basınç gradyeni ise,  $\frac{dp_d}{dH}$ , toplam basınç gradyeni ile ilişkilendirilmektedir (Denklem 2.1) [21].  $U_{mf}$ , partikül özelliklerinin (partikül çapı ( $d_p$ ), partikül yoğunluğu ( $\rho_p$ ) partikül küreselliği ( $\phi$ )), gaz özelliklerinin (gaz yoğunluğu ( $\rho_g$ ), gaz viskozitesi ( $\mu_g$ )) ve yatak özelliklerinin (minimum akışkanlaşmada yatak boşluğu, ( $\epsilon_{mf}$ )) fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca  $U_{mf}$ , partikül yatağındaki basınç düşüşü veya genişletilmiş yatak yüksekliğinin artışı olarak kabul edilmektedir [22, 23].

$$\left(-\frac{dp_d}{dH}\right) = \left(-\frac{dp}{dH}\right) - \rho g \quad (2.1)$$



**Şekil 2.9** : Minimum akışkanlaşma hızı  $U_{mf}$ 'nin gaz hızına bağlı basınç düşüşü değişiminden belirlenmesi [21].

Sabit bir yataktaki basınç düşüşü minimum akışkanlaşma koşullarının altında denklem 2.2'de verilen Ergun denklemi ile ifade edilmektedir [21].

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \alpha_{mf})^2}{\alpha_{mf}^3} \frac{\mu U_{mf}}{\varphi^2 d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \alpha_{mf})}{\alpha_{mf}^3} \frac{\rho U_{mf}^2}{\varphi d_p} \quad (2.2)$$

$\varphi$  burada partiküllerin küreselliği ve  $L_{mf}$  ise minimum akışkanlaşmadaki yatak yüksekliği olarak tanımlanmıştır. Tamamen akışkanlaşmış bir yatağın kesit alanına

göre ortalaması alınmış basınç düşüşü değeri hareket halindeki gaz-katı karışımının ağırlığını dengelemektedir (Denklem 2.3).

$$-\frac{dp}{dH} = [\rho_p(1 - \alpha) + \rho\alpha]g \quad (2.3)$$

Genellikle, yatak boşluğu  $\alpha$  yatak yüksekliğinden bağımsız olarak Denklem 2.4'teki şekilde ele alınmaktadır:

$$\alpha = 1 - \frac{M_p}{\rho_p A L_f} \quad (2.4)$$

$M_p$  yataktaki partiküllerin toplam kütlesi,  $A$  yatağın kesit alanı ve  $L_f$  ise genişlemiş yatak yüksekliğidir. Denklem 2.3 ve 2.4'ten Denklem 2.5 elde edilmektedir:

$$-\frac{dp_d}{dH} = (\rho_p - \rho) + (1 - \alpha)g \quad (2.5)$$

Minimum akışkanlaşma koşulları altında ise denklem 2.5 aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = \frac{\Delta p_d}{L_{mf}} = (\rho_p - \rho) + (1 - \alpha_{mf})g \quad (2.6)$$

$$Ar = 150 \frac{(1 - \alpha_{mf})^2}{\alpha_{mf}^3 \varphi^2} Re_{pmf} + 1.75 \frac{1.75}{\alpha_{mf}^3 \varphi} Re_{pmf}^2 \quad (2.7)$$

Minimum akışkanlaşmada Arşimed sayısı ( $Ar$ ) ve partikül  $Re$  sayısı aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [21].

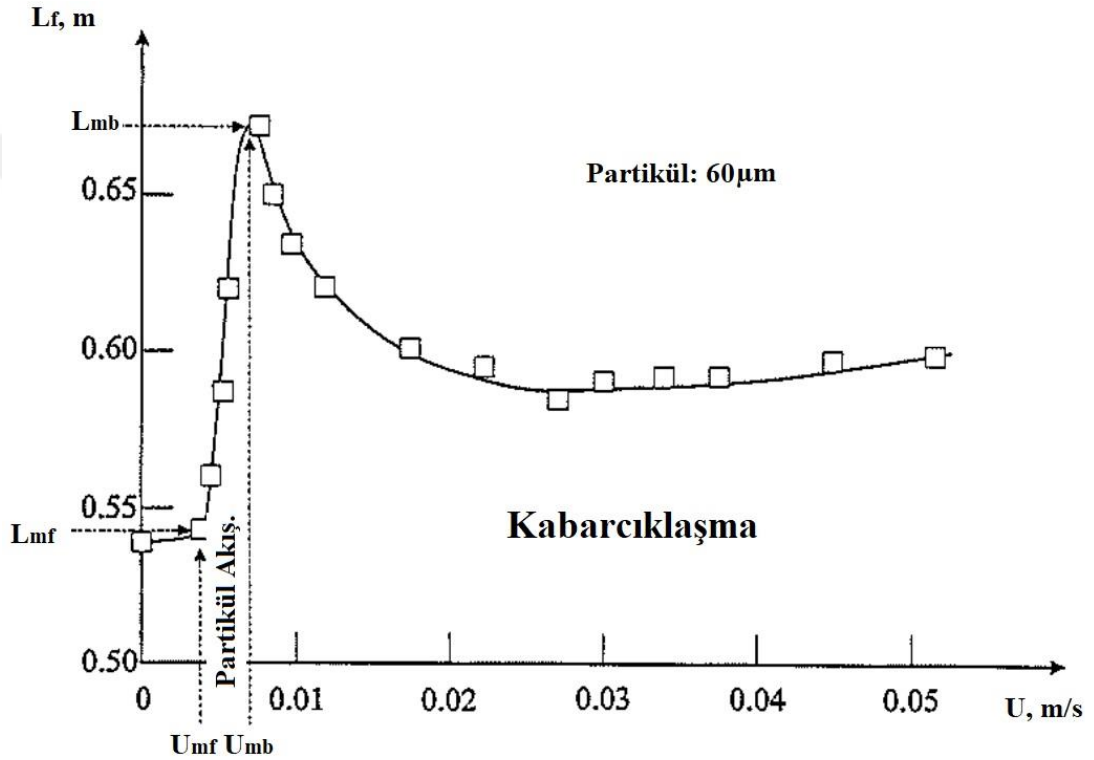
$$Ar = \frac{\rho(\rho_p - \rho)gd_p^3}{\mu^2} \quad (2.8)$$

$$Re_{pmf} = \frac{\rho U_{mf} d_p}{\mu} \quad (2.9)$$

### 2.2.1.2 Minimum kabarcıklaşma hızı, $U_{mb}$

Partikül akışkanlaşma rejiminin üst sınırındaki gaz hızları minimum kabarcıklaşma hızı olarak tanımlanmaktadır. Partikül akışkanlaşma rejiminin çalışma aralığı Şekil

2.10'dan görüldüğü üzere oldukça dardır.  $U_{mf}$ 'nin üzerindeki gaz hızlarında ise yatak yüksekliği artan hız ile minimum kabarcıklaşma noktasına ulaşana kadar artmaktadır. Gaz hızının daha da arttırılması ile kabarcıklı akışkanlaşma rejiminin başladığı yatak yüksekliğinde azalma oluşmaktadır. Kabarcıklı akışkanlaşma rejiminde, kabarcıklar yatağın katı karışması, sürüklenme, ısı ve kütle transferi gibi akış ve transport fenomenlerini etkilemektedir. Kabarcıklı akışkanlaşmada gaz hızı arttıkça kabarcık hareketi daha şiddetli olmakta ve bu durum yataktaki basınç dalgalanmalarının genliğinin artması ile tespit edilebilmektedir [21].



Şekil 2.10 : Grup A partikülleri için yatak genişlemesi [67].

### 2.2.1.3 Maksimum akışkan (terminal) hızı, $U_t$

Maksimum akışkan (terminal) hızı, gaz-katı akışkanlaşma sürecinde katı partiküllerin gaz akışı ile yataktan dışarı taşındığı gaz hızıdır.  $d_p$  boyutundaki bir partikül bir akışkan içinden aşağı doğru düşerken, son serbest-düşme hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$U_t = \left[ \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D} \right] \quad (2.10)$$

Bir akışkan yataktan partiküllerin dışarı taşınmasını engellemek veya azaltmak için gaz hızı  $U_{mf}$  ile  $U_t$  arasında tutulmalıdır.  $U_{mf}$  hesaplanırken yatakta gerçekte bulunan partiküllerin ortalama çap değeri alınırken,  $U_t$  hesaplanırken yatakta bulunan en küçük boyutlu partiküllerin boyutu dikkate alınmaktadır [69].

#### 2.2.1.4 Partikül çap dağılımı ve ufalanma

Akışkan yataklarda taneciklerin ufalanması, taneciklerin yüzeylerinde meydana gelen aşınma sebebiyle oluşmaktadır. Ufalanma ile oluşan zerrelere üst sınırı 50-100  $\mu\text{m}$  arasındadır. Ufalanma hızı; partikül özellikleri, katı konsantrasyonu, partikül boyutu, yatakta kalma süresi, partikül sıcaklığı ve işletme gaz hızı vb. gibi birçok faktöre bağlıdır [69].

#### 2.2.1.5 Partiküllerin sınıflandırılması

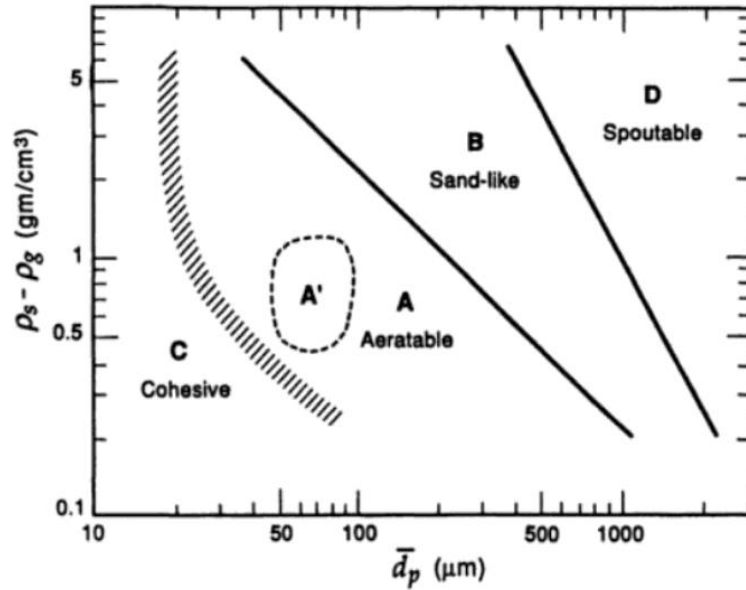
Partiküller akışın davranışına göre Geldart tarafından dört sınıfa ayrılmıştır [68]. Partikül çapları;  $D > B > A > C$  şeklinde sıralanmaktadır.

- *Geldart A-Aeratable (Havalandırılabilir partiküller)*: Küçük ortalama parçacık boyutuna ve/veya düşük partikül yoğunluğuna ( $< 1.4 \text{ g/cm}^3$ ) sahip katı partiküllerdir. Bu partiküller düşük gaz hızlarında ve yüksek gaz hızlarında kontrollü kabarcıklaşma ile kolayca akışkanlaştırılabilmektedir. Çünkü Geldart A partiküllerinde partiküller arası kuvvetler var olmasına karşın, hidrodinamik kuvvetlerden daha küçüktür. Böylece akışkanlaştıklarında önemli ölçüde genişlemekte ve gaz akışı kesildiğinde yatağın sabit haline dönmesi uzun bir süre almaktadır. [7]. Akışkan katalitik parçalanma (Fluid Catalytic Cracking) (FCC) katalizörleri bu sınıflandırmanın bir örneğidir.
- *Geldart B-Sandlike (Kuma benzer partiküller)*: Partikül boyutu  $40 \mu\text{m} < \bar{d}_p < 500 \mu\text{m}$  ve yoğunluğu  $1.4 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 4 \text{ g/cm}^3$  aralığındaki partiküllerdir. Bu katılar şiddetli kabarcıklaşma hareketi ve fazla büyüeyebilen kabarcıklar ile akışkanlaştırılabilmektedir.
- *Geldart C-Kohezif (çok ince partiküller)*: Partiküller arası kuvvetleri gaz tarafından partiküle uygulanan hidrodinamik kuvvetlerden büyük olduğu için bu partiküllerin normal akışkanlaştırılması oldukça zordur. Sonuç olarak, gaz faz yatak içerisinde çatlak veya kanal oluşumuna sebep olmaktadır (Şekil 2.12). Yüz pudrası, un ve nişasta bu sınıfın tipik örnekleridir.

- *Geldart D-Spoutable (çok büyük ve/veya yoğun partiküller)*: Bu partiküllerin derin yataklarını akışkanlaştırmak oldukça zordur. Eğer gaz dağılımı homojen değil ise büyük kabarcık oluşumu veya ciddi kanallaşma, fişkırtma/püskürme davranışı gözlenmektedir. Tahılların kurutulması, kahve çekirdeklerinin kavrulması, kömürün gazlaştırılması bu sınıflandırmaya girmektedir [69].

Geldart B ve D partiküllerinde partiküllerarası kuvvetler yoktur ve kabarcıklar yatak derinliği ve gaz hızıyla yalnızca kolonun boyuyla sınırlı bir şekilde gelişmektedir. Bir dağıtıcı elek yerine gaz akışı yalnızca bir delikten gönderilirse A ve C partiküllerinde mümkün olmayan yatakta püskürme hareketi gözlenebilmektedir [7].

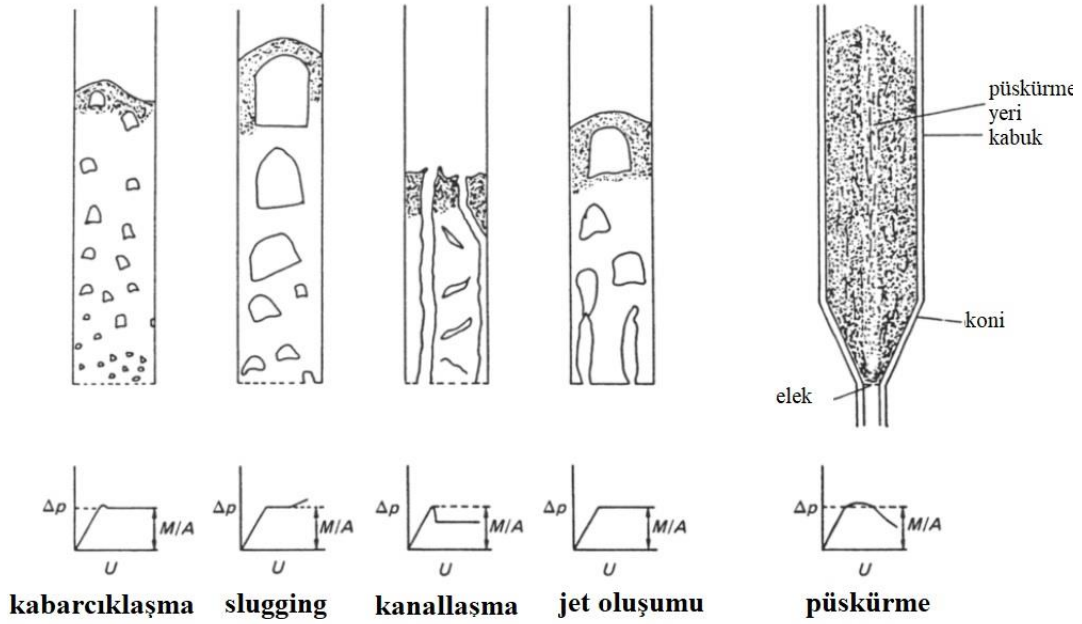
Geldart'ın sınıflandırması açık ve kullanımı oldukça kolaydır. Oda koşullarında ve gaz hızının  $10U_{mf}$ 'den küçük olduğu durumlarda hava akışkanlaşması için Şekil 2.11'deki gibi gösterilmektedir. Bu şekil, yoğunluğu ve ortalama partikül boyutu bilinen herhangi bir katı partikül için oluşması beklenen akışkanlaşma tipini göstermektedir [69, 70].



**Şekil 2.11** : Hava için partiküllerin oda koşullarındaki Geldart Sınıflandırması [70].

Granüler katı partiküller için (Geldart B ve D), minimum akışkanlaşma hızının üzerindeki gaz hızı artışları gaz hızı ve yatak derinliği ile artan kabarcıkların oluşumuna sebep olmaktadır. Bu noktadan sonra yatağın basınç düşüşü -eğer yatak yeterince derin ise yatak çapının iki katından fazla- salınım yapmaya başlamaktadır. Ve kabarcıklar kesit alanının görece büyük bir bölümünü kaplamaktadır. Bu büyük

kabarcıklar küme (slug) olarak adlandırılmaktadır ve yatayın üst yüzeyinde düzenli piston-benzeri hareketlere sebep olmaktadır (Şekil 2.12) [7].



**Şekil 2.12 :** Akışkanlaşma rejimleri ve basınç düşüşü profilleri [7].

### 2.2.1.6 Akışkanlaşma kalitesi

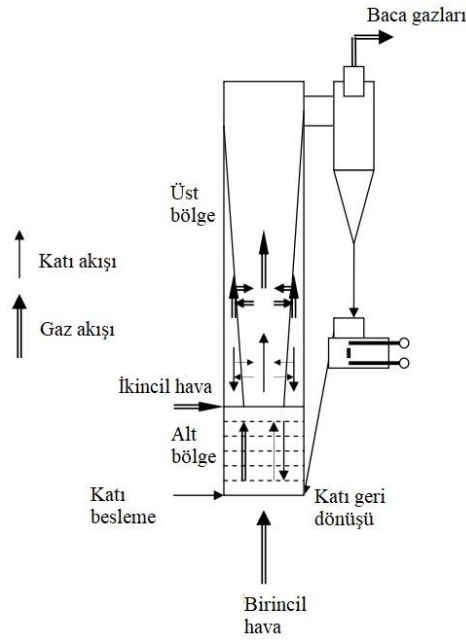
Dağıtıcı elekten gelen gaz ve katı yatağı boyunca elastik olmayan enerji kaybı ile tanımlanan kabarcık dağılımı, akışkanlaşma kalitesinde önemli bir rol oynamaktadır [26]. Akışkanlaşma hallerinin ve rejim belirlenmesinin karakterizasyonu, Kolmogorov entropi (kaos analizi) ve basınç sapma genliği ile yapılmaktadır [71]. Kolmogorov entropi minimum kümeleşme (slugging) rejiminde, kaotik (zamana bağlı) ve stokastik (konuma bağlı) proseslerde sistemin dinamik ölçüsüdür. Akışkanlaşma kalitesi veya akışkanlaşma hali değiştiğinde kolmogorov entropi de değişmektedir [72]. Akışkanlaşma kalitesi; yatakta mekanik karıştırıcı kullanımı, gaz akışının pulslu verilmesi, manyetik alan yaratan ferromanyetik partiküllerin kullanımı, akustik alan ile titreştirme, döner dağıtıcılar, gazın açılı beslenmesi ve mekanik titreşim ile artırılabilir. Mekanik titreşim ile birlikte gaz, akışkan yatağa titreşimli kinetik enerji beslenmektedir. Yatağın titreştirilmesi, minimum akışkanlaşma hızını azaltmaktadır ve bu yöntem yapışan (kohezif) partiküller, granüler malzemenin kurutulması ve birikme kontrolü için oldukça etkilidir [73].

## 2.2.2 Gaz-katı akışkan yatak türleri

Akışkan yatak reaktörlerin geleneksel sabit yataklı akışkan yataktan (SFB) başka, Devirdaimli, Döner yataklı ve Döner yataklı-sabit geometrili çeşitleri literatürde ve endüstrideki uygulamalarda yer almaktadır.

### 2.2.2.1 Devirdaimli akışkan yatak (circulating fluidized bed, CFB)

Devirdaimli akışkan yatak, yüksek gaz hızlarında katı sirkülasyonunun gerçekleştiği riser (gazın reaktörden siklona beslendiği bölüm), downcomer (aşağı iniş borusu), siklon, vana ve sifondan oluşan bir akışkan yatak çeşididir. Gaz girişinin boru çapı yatakta kanallaşma oluşmaması açısından önemlidir [26]. Devirdaimli akışkan yataklarda katı partiküller, yataktan tek bir partikülün taşınmasını sağlayacak gaz hızlarının biraz altında çalışmaktadırlar. Bu nedenle havalı taşıma sistemlerinde olduğu gibi partiküller yataktan hemen dışarı atılamamaktadır. Tam tersine, yatak içinde farklı çaptaki partiküller yukarı ve/veya aşağı hareket edip bir araya gelerek kümeler oluşturmakta ve partiküllerin büyük oranda geri dönüşümü sağlanmaktadır. Bu uzun parçalar halindeki katı tanecik kümeleri yukarı-aşağı ve yatay yöndeki hareketleri sırasında da parçalanarak tekrar birleşmekte ve sürekli bir hareketlilik sağlanmaktadır. Genelde hızlı akışkanlaşma rejiminde çalışan devirdaimli akışkan yataklarda, kabarcıklı akışkan yatak olarak adlandırılan alt bölge ve halkasal (annular) akış yapısında olan seyrek fazlı bir üst bölge bulunmaktadır [74].



Şekil 2.13 : Devirdaimli akışkan yatak şematik gösterimi [74].

CFB'deki gaz-katı akışın dinamik davranışı, basınç sapmalarının analizi ile karakterize edilmiştir. Kütle akısının artışıyla güç değeri iki katı değerine artmaktadır. Seyrek akıştan yoğun akışa geçiş bölgesinde güç değeri yaklaşık olarak 3.5-5 kPa<sup>2</sup>/Hz arasındadır ve besleyicinin (riser) alt tarafında yoğun bir yatak elde edilmektedir. Besleyicideki katı yüklemesinin arttırılmasıyla, akışkanlaşma rejimi seyreltik akıştan yoğun akışa ve daha sonra hızlı akışkanlaşmaya değişmiştir. Bu durum fark basınç sensörleri belirlenen statik basınç profili ile gösterilmiştir. Güç spektral yoğunluğu seyreltik veya yoğun akışta basınç sapmalarının biçimi ile belirlenmektedir. Eğer ölçüm noktasında yoğun bir gaz-katı akışı varsa güç-yasası ile iki farklı bölge gözlenmektedir. Gaz hız sapmaları ve katı kümeleri (cluster) basınç sapmaları için önemli faktörler olarak belirlenmiştir [75]. Yüzeysel gaz hızı, statik yatak yüksekliği, partikül boyutu ve basınç probunun etkileri Xiang ve diğ. [67] tarafından araştırılmıştır.

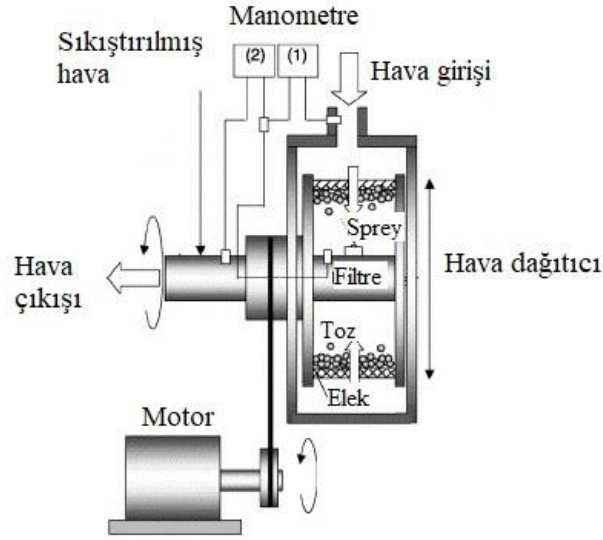
#### **2.2.2.2 Döner akışkan yatak (rotating fluidized bed, RFB)**

Sabit yataklı akışkan yataklarda yerçekimi gaz-katı sürüklenme kuvveti ile dengelenmektedir. Yerçekimi akış rejimini ve çalışma koşullarını belirlemekte ve sınırlamaktadır. Özellikle, gaz-katı kayma hızı ve buna bağlı gaz-katı kütle ve ısı transferi yerçekimi tarafından sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlandırmayı gidermek için uygulanan manyetik alan ve merkezkaç alanda akışkanlaşma bugüne kadar geliştirilen önemli alternatif proseslerdir. Merkezkaç alan iki şekilde üretilebilmektedir: a) döner tank b) gaz veya sıvı faz gibi birincil fazın sabit bir tanka teğetsel olarak beslenmesi.

Döner gaz-katı akışına sahip bir reaktör, bir çok proses için kullanılabilir; nükleer yakıtların yanması, kurutma, hızlı gaz-katı katalitik reaksiyonlar, nano-boyutlu partiküllerin akışkanlaşması, granülleşme ve ince partiküllerin kaplanması, dizel motor çıkışlarından NO<sub>x</sub> ve dumanın ayrılması ve birçok HiGee (Yüksek Yerçekimi, G) uygulaması [76].

Merkezkaç alandaki akışkanlaşma döner akışkan yataklar olarak tanımlanmakta ve geleneksel döner akışkan yataklar (Conventional Rotating Fluidized Bed) olarak bilinmektedir. Simetri eksenine motor tarafından akışkanlaşma çemberini döndürmek için uygulanan merkezkaç kuvveti bulunmaktadır. Bu kuvvet, çoklu gaz açıklık (slot) girişlerinden gaz beslemesiyle ve akışkanlaşma çemberi içindeki gazın merkezde konumlandırılan bacadan çıkması ile oluşan radyal gaz-katı sürüklenme kuvveti ile

dengelenmektedir. Böylece, silindirik biçimli partikül yatağının radyal akışkanlaşması elde edilmektedir. Merkezdeki döner baca, belirli katı besleme ve akışkanlaşma gaz akışı hızlarında partiküllerin akışkanlaşma çemberinden kaybını önleyecek ve çemberdeki katı yüklemesini arttıracak şekilde tasarlanmaktadır (Şekil 2.14) [77].



Şekil 2.14 : Döner akışkan yatak şematik gösterim [78].

1G-Geldart D tipi partiküllerin Wilde ve Broqueville [77] tarafından çalışıldığı döner yatak reaktörlerde, teorik olarak maksimum katı yüklemesinde bacadan gerçekleşen katı kaybının hızı katı yüklemesiyle orantılı, baca rotasyon hızı ile ters orantılı bulunmuştur. Akış rejimi, yüksek oranda çemberdeki katı yüklemesine, düşük oranda baca dönme hızı ve akışkanlaşma gaz akış hızına bağlı bulunmuştur [77].

Wilde ve Broqueville [79] başka bir çalışmasında akışkanlaşma çemberini büyük çap-küçük yoğunluklu polimer partikülleri ve küçük çap-büyük yoğunluklu alümina partiküllerini döner akışkan yatak geometrisi akışkanlaşması için kullanmıştır. RFB’de partikül üzerindeki merkezkaç kuvveti radyal olarak uygulanan sürüklenme kuvveti ile dengelenmektedir. Merkezkaç kuvvetinden dolayı mükemmel gaz-katı ayrışması sağlanabilmekte ve bu durum ekzotermik/endotermik reaksiyonlar ve kurutma uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Yüksek dönme hızları daha fazla gaz çıkışına olanak sağlayarak, kabarcık veya kanal oluşumunu önemli ölçüde engellemektedir. Bu durum, gaz faz polimerizasyon reaksiyonlarında da verimliliği arttırmakta ve kohezif Geldart C grubu mikro ve nano ölçekli partiküllerin akışkanlaşmasında avantajlı olmaktadır. RFB’de teğetsel gaz-katı kayma hızı radyal gaz-katı kayma hızına göre

küçüktür. Gaz açıklıklarının etrafında teğetsel gaz-katı kayma hızı çok büyüktür. Gaz katı kayma hızı, gaz besleme hızı ile partikül rotasyon hızı arasındaki farka bağlıdır. Bu iki kuvvet akışkanlaşma çemberinin tasarımına, iç ve dış baca çapına, uzunluğuna, gaz giriş sayısına ve yüzey alanı ile besleme açılara bağlıdır. Katı akış hızı, vidalı besleyici ve döner vida ile kontrol edilmekte ve katılar pnömatik olarak beslenmektedir. Katıların teğetsel ivmelenmesi için gaz çembere teğetsel olarak beslenmektedir ve katı giriş borusu 30°'lik plexiglass borudan yapılmıştır. Bu tip akışkan yataklarda, gaz girişine daha çok önem verilmektedir çünkü burada gaz ve katı arasındaki momentum ve enerji transferi önemlidir. Katı yüklemesi arttığında veya gaz girişlerindeki gaz akış hızı kontrol edilmediğinde kanallaşma oluşmaktadır. Bu durum partikül yatağının zayıf akışkanlaşmasına sebep olmaktadır [79].

*RFB avantajları (SFB ve CFB ye göre):*

- Akışkanlaşma gazı çıkış hızının kontrol edilmesi,
- Düşük parçacık sürüklemesi,
- Daha yüksek akışkan hızlarında akışkanlaşma,
- Yüzey alanına göre daha yüksek akışkan verimliliği,
- Akışkanın limitli yan geçişi,
- Yüksek kayma hızları,
- Daha kısa kalma süreleri,
- Uniform gaz katı etkileşimi, iyileştirilmiş ısı ve kütle transferi [80, 81].

*RFB dezavantajları:*

- Döner tank sınırlamaları ve titreşimsel problemler [80],
- Motor ve döner geometrinin pratikte kullanım zorluğu,
- Sızdırmazlık ve akışkanın çembere beslemesi/ayrılması zorluğu,
- Sürekli çalışma zorluğu [82].

Döner akışkan yataklarda karşılaşılan bu zorluklar sabit geometrideki döner akışkan yataklar (RBR-SG) ile elimine edilmektedir.

### 2.2.2.3 Sabit geometrideki döner akışkan yatak (RBR-SG/GSVR)

GSVR, çoklu gaz giriş açıklıklarıyla gazın teğetsel olarak akışkanlaşma çemberine beslendiği ve böylelikle partikül yatağının teğetsel dönüşünün sağlandığı yeni konsept reaktörlerdir (Şekil 2.15). Katı yüklemesi yeterince yüksek olduğunda, sabit geometride kararlı halde bir döner akışkan yatak elde edilmektedir. Bu durum merkezde yer alan bacadan gerçekleşen katı kaybını minimuma indirmekle gerçekleşmektedir. Partikül yatağının teğetsel akışkanlaşması ve partikül yatağı dönme hızı, teğetsel gaz-katı sürüklenme kuvveti ve kayma gerilimi ile belirlenmektedir [82, 83].

Gaz katı döner akışkan yatak vorteks çemberler koloidal çekirdek nükleer roketlerinde, gaz faz polimerizasyonda, akışkan katalitik parçalanma, biyokütle pirolizi ve gazlaştırılmasında, yanma proseslerinde, baca gazından  $SO_2/NO_x$  adsorpsiyonunda ve yapışan partiküllerin düşük sıcaklıktaki ıslak kaplanmasında kullanılmaktadır [84].



Şekil 2.15 : GSVR tasarımı [82, 83].

GSVR içindeki katı miktarı arttıkça akışkanlaşma kapasitesi artmaktadır, ancak bu durum basınç düşüşünün artmasına ve dolayısıyla proses fiyatlarının da daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta ise merkezde yer alan bacadan çıkan gaz ile birlikte katı kaybının oluşmamasıdır. Katı yüklemesi gerektiğinden daha az olduğunda gaz katı akışında halkasal gaz kanalları oluşmakta ve katı partiküller bu kanallara girememektedirler. Bu yüzden uniform olmayan akış modelleri gözlemlenmektedir. Kümeleşme olarak tanımlanan kanallaşmada her iki faz, küme olarak tanımlanan ayrı yığınlar olarak hareket etmektedir. Bu katı kümelerinin boyutları reaktörün karakteristik boyutları ile karşılaştırılabilecek

seviyeye gelmektedir. En düşük katı yüklemelerinde kanallaşma, daha yüksek katı yüklemesinde kararlı akışkanlaşmaya geçişte ise kümeleşme oluşmaktadır.

Geleneksel akışkan yataklarda, ara yüzey kütle, momentum ve ısı transfer katsayıları yer çekimi alanında terminal veya serbest düşme hızını geçemeyen gaz-katı kayma hızı ile sınırlandırılmıştır. Bu yüzden minimum akışkanlaşma hızına yakın gaz hızlarında ve sadece belirli partiküllerde uniform dağılım elde edilebilmektedir. Kanallaşma ve kümeleşmeden kaçınmak için partikül yatağı genişlik/yükseklik oranı belirli bir aralıkta olmalıdır. Bu tarz sınırlandırmalar yüksek yerçekimi (yüksek G) alanına karşı akışkanlaşma ile kaldırılmaktadır.

### *Yüksek G alanı*

Partiküllerin yüksek G alanı ile akışkanlaşması, 1960'lı yılların sonlarından itibaren biyokütle kurutulması, nükleer reaktörlerin geliştirilmesi ve roketler için kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek G akışkan yataklar daha yüksek gaz-katı kayma hızlarında daha yoğun ve uniform olarak çalıştırılabilmektedirler. Yüksek G'de, yüksek partikül yatağı genişlik/yükseklik oranı, ince partikül yatakları ile kanallaşmamadan çalışılmasına izin vermektedir. Bu yüzden oldukça kısa gaz-katı etkileşim zamanları birçok endüstriyel uygulamaya olanak sağlamakta ve daha aktif katalizörlerin kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Gaz faz polimerizasyonu, yapışan tozların üretim veya kaplanması gibi birçok farklı uygulama düşünülmüş ancak bunların ölçeklendirilmesi ve ticarileştirilmesi zorlu bulunmuştur. Vorteks çemberler hareket eden bir geometriye sahip olmadığından endüstriyel uygulamayı kolaylaştırmaktadır. Ancak partikül rotasyon hızı gaz akış hızından bağımsız olarak kontrol edilememektedir. Bu durum da vorteks çember tasarımının düzgün bir şekilde tasarlanmasını ve çalışma kolaylığının olmasını gerektirmektedir. Yüksek G akışkanlaşmada yatak boyunca hidrostatik basınç yüksek oranda düştüğü için kabarcık oluşumunun önüne geçilmektedir [83]. Vorteks çemberde katı yüklemesi partikül akış hızı ile doğru orantılı olmaktadır [84, 85].

Ekatpure ve diğ. [76] sabit geometrideki döner yatak geometrisini, üç farklı çap ve yoğunluktaki polietilen (YYPE) katı partiküllerinin akış hidrodinamiğini  $30^\circ$  olarak konumlandırılan teğetsel gaz açıklıklarının genişliğine bağlı olarak çalışmıştır. Basınç düşüşü hesaplamaları için gaz kütle akış hızı ( $G_M$ ), katı partikül miktarı ( $W_s$ ) ve teğetsel gaz açıklık genişliği ( $I_o$ ) kullanılmıştır [76, 82]. Basınç düşüşü partikül çapı

ile ters orantılı bulunmuştur. Partikül çapı azaldığında partikül yüzey alanı artmakta, bu sebeple gaz rotasyon hızında daha fazla azalmaya sebep olmaktadır. Bu yüzden daha büyük partikül çaplarında, GSVR'deki basınç düşüşü maksimum katı içeriğine ulaşana kadar daha büyük olmaktadır. Toplam basınç düşüşü [76];

$$\Delta P_{toplam} = \Delta P_{GSVR,ana} + \Delta P_{çıkış} + \Delta P_{siklon} \quad (2.11)$$

$$\Delta P_{GSVR,ana} = \Delta P_{giriş\ açıklıkları} + \Delta P_{statik-yatak} + \Delta P_{teğetsel\ yatak} + \Delta P_{vorteks} \quad (2.12)$$

Niyogi ve diğ. [24] ise yatay ekseninde bir silindirik ünite ve çevresinde açısız olarak 10° ile konumlandırılan 36 adet gaz besleme açıklığı içeren gaz-katı vorteks reaktörünü yarı kristalin (YYPE) ve amorf (PC) malzemeler için kullanmıştır. Çalışma sonucunda belirli gaz akış hızı için gaz besleme açıklıklarının genişliğinin beslenen gazın açısını, radyal ve açısız hız bileşenlerini belirlediği bulunmuştur. Deneysel çalışmaya ek olarak üç boyutlu simülasyon çalışmaları da yapılmıştır [24].

Yüksek G akışkanlaşma, Eliaers ve diğ. [86] tarafından biyokütle kurutulması için çalışılmıştır. Geleneksel akışkan yataklarda gerçekleştirilen biyokütle kurutulmasında karşılaşılan kabarcık oluşumuna bağlı partikül homojensizliği, azalan yatak yoğunluğu ve terminal hızı geçemeyen gaz-katı kayma hızı gibi dezavantajlar, yüksek G alanı ile aşmaktadır. Vorteks çemberler, gözenekli olmayan malzemelerden yüzeysel nemi göndermek için başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Farklı çember tasarımları ( tek veya çoklu) ve hava besleme sistemleri (uniform, eş veya karşı beslemeli) kullanılarak vorteks çemberdeki biyokütle kurutulmasının modellenmesi ve simülasyonu çalışılmış, maksimum ürün kalitesi ve uniformluğu ile minimum hava tüketimi amaçlanmıştır. Yapılan CFD simülasyonları ve duman izleme deneyleri, teğetsel olarak enjekte edilen gazın bir sonraki açıklığa girmeden partikül yatağıyla etkileşerek bozulduğunu göstermektedir. Hem kesikli hem de sürekli sistem deneyleri göstermiştir ki ara yüzey kütle ve ısı transferi sınırlandırmaları ve partikül içerisindeki nem içeriğinin belirlenen kritik değeri altında uniform olmayan gaz-katı dağılımı oluşmuştur. Hızlı piroliz prosesinde GSVR, aynı çalışma grubu tarafından kullanılmıştır. Hızlı piroliz prosesi, çok yüksek ısıtma ve ısı transfer hızı, keskin sıcaklık kontrolü ve piroliz buharının hızlı soğutulmasını gerektirmektedir. GSVR, yüksek gaz-katı kayma hızı, yüksek taşınım ısı ve kütle transferi katsayısı ve çok kısa

gaz faz kalma süresi özellikleri ile bu üç kriteri de karşılamaktadır. Deneysel verileri karşılaştırmak için yapılan simülasyonlarda zamandan tasarruf edebilmek için vorteks çember geometrisinin 40°'lik bölümü çalışılmıştır. Çalışmada 360° ve 40° geometrilerin basınç düşüşü, yatak kalınlığı, katı hızı ve genel yatak özellikleri sonuçlarının aynı olduğu belirtilmiştir [86].

Açısal katı hızı, artan katı yoğunluğu ve partikül çapı ile azalmaktadır. Bütün yatak akışkanlaştığında ulaşılan minimum hız minimum kritik akışkanlaşma hızı ( $U_{mf,cr}$ ) olarak tanımlanmaktadır. Kovacevic ve diğ. [85] tarafından gerçekleştirilen soğuk akış çalışmasında minimum kritik akışkanlaşma hızı hesaplanmıştır. Bu çalışmada merkezkaç yatak davranışının boyutsuz radyal gaz hızına bağlı haritası çıkartılmış ve boyutsuz partikül çapı yerçekimsel yataklardaki gibi belirlenmiştir. Deneyler üç malzeme ve üç farklı partikül çapı ile dört farklı açısal gaz besleme hızında ve maksimum katı kapasitesinde gerçekleştirilmiştir. Partikül çapı, katı yoğunluğu ve gaz besleme hızının döner akışkan yatak üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Partikül yoğunluğunun artması ile yataktaki kaynama rejimi azalmakta ve yataktaki katı kütlesi arttıkça, yatak yoğun akışkanlaşma rejiminden kaynama rejimine geçmektedir.

Vorteks çember tasarımı yeterli derecede güçlü bir yüksek G alanı ve aynı zamanda yüksek partikül kalma süresini gerektirmektedir. Eliaers ve diğ. [84] kaplama çözeltilerinin yatak stabilitesi üzerindeki etkisini, kaplanmış ve kaplanmamış partiküllerin ayrışmasını yüksek G alanlı vorteks reaktörde çalışmışlardır. Birikme ve kaplama kalitesi lazer difraksiyon, taramalı elektron mikroskopisi (Scanning Electron Microscopy, SEM) ve aktif bileşen salınım testi ile analiz edilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre yüksek G operasyonu, gaz katı kayma hızının, ara yüzey momentum transferinin, kütle ve ısı transferinin artmasını sağlamaktadır. Partikül karakteristiği, gaz-katı sürüklenme ve merkezkaç kuvvetini etkilemektedir. Gaz-katı sürüklenme kuvveti radyal gaz hızı, gaz akış hızı ve çevresel yüzey alanına bağlıdır. Merkezkaç kuvveti ise teğetsel gaz hızı, gaz akış hızı ve gaz giriş açıklık sayısı, boyutu ve açıklık eğimine bağlı bulunmuştur. Teğetsel momentum miktarı gaz giriş açıklık sayısı ve boyutları azaltılarak artırılabilir. Kohezif partikül akışkanlaşması için çok küçük boyuttaki açıklıkların kullanılması gerektiği bulunmuştur [84].

Vorteks çemberin katı çıkışı ve gaz girişi tasarım parametreleri farklı partiküller için Trujillo ve De Wilde [87] tarafından çalışılmıştır. Verimli katı tutuşu (solid hold-up)

ve minimum katı kaybı amaçlanarak gaz ve katı kalma süresi birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmiştir. Merkezkaç kuvveti, sürüklenme kuvvetinden çok büyük olduğunda yoğun ve uniform döner yatak oluşumu gözlenmiştir. Vorteks çemberin en önemli tasarım parametreleri; çap ve uzunluk, baca çapı, ekleme uzunluğu, gaz giriş açıklık sayısı ve boyutu, katı girişi ve çıkışı olarak belirlenmiştir.

Partiküllerin istenilen özelliklerde elde edilebilmesi için döner akışkan yatak kalınlığı ( $t_b$ ), katı hacim kesri, vorteks çember çapı yeterince küçük, gaz enjeksiyon hızı ve verilen gaz akış hızı ise yeterince yüksek olmalıdır. Gaz kütle akış hızı, katı akış hızı, bacadan katı kaybı, katı çıkışı karakteristikleri Trujillo ve De Wilde [87]'nin yaptığı çalışmada sıcaklık, basınç düşüşü ve partikül yatağı dönme hızı ile çevrimiçi olarak ölçülmüştür. Partikül yatağındaki basınç düşüşü gaz akış hızının bir fonksiyonudur ve gaz giriş açıklıklarındaki basınç farkının ölçülmesi ile bulunmaktadır. Yatakta gerçekleşen basınç düşüşü, hidrostatik basınç düşüşünden daha düşükse yatağın radyal olarak akışkanlaşmadığı, kısmi olarak akışkanlaştığı veya hiç akışkanlaşmadığı gibi sonuçlara ulaşılabilmektedir.

Akışkan yataktaki katı hareketi kabarcık hareketi ile ivmelendirilirken, kabarcık çapı, yükselme hızı ve yerel kabarcık kesri emülsiyon hız profillerine bağlıdır. Ek olarak kabarcık özellikleri de mikroskopik partikül-partikül etkileşimlerine kuvvetli oranda bağlı değişmektedir.

İki boyutlu Standart PIV LAvision, 4 MP CCD kamera, Litron laser BJMJ gücünde YYPE, PC, PVDF (Geldart D grubu) partikülleriyle gaz enjeksiyon hızının yatak stabilitesi ve maksimum katı kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak için Kovacevic ve diğ. [60]'nin deneylerinde kullanılmıştır. Gaz akış hızı arttıkça toplam momentum girişi artmaktadır. Bu yüzden gaz enjeksiyon hızının etkisini araştırmak için gaz akış hızı sabit tutulmuş, açıklık genişlikleri değiştirilerek besleme hızı değiştirilmiştir. Gaz enjeksiyon hızı arttıkça yatağın daha kararlı olduğu bulunmuştur. Fakat partikül yoğunluğu arttıkça yatak stabilitesi azalmaktadır. Sonuç olarak, yatak stabilitesi partikül çapı kuvveti ile ters orantılı olarak bulunmuştur [79].

Kovacevic ve diğ. [85] 2D PIV kullanarak 1-2 mm çapında partiküllerin hızını ölçmek için partikül başına 10-40 piksellik görüntüler elde etmişlerdir. PIV ölçümünde akışkanlaşma için kullanılan partiküller izleyici olarak kullanılamamaktadır. Bu sebeple partikül hızı ile akışkan hızı eşleşmemektedir. Partiküllerin yer değiştirmesi

ve iki ardarda görüntü arasındaki zaman, partikül hızını ve partikül akışının 2 boyutlu hız vektör alanını elde etmek için kullanılmıştır. PIV görüntülerinin kaydedildiği alan ve partikül hızları  $-35^\circ$  açısında ölçülmüştür. İki lazer atımı arasındaki zaman 200 ns kadar küçüktür ve GSVR'deki döner yatak görüntü çiftleri yüksek frekansta kaydedilmiştir. İki PIV alanı arasındaki uygun zaman ayırımı genellikle iki görüntü arasındaki partikül yer değiştirmesinin minimum değeri ile belirlenmektedir. Piksel sayısındaki artışın ölçülen partikül hızını etkilemediği görülmektedir.

DaVis yazılımının “Görüntü Düzeltme ve bozulması” aracı kullanılarak işlem sonrası kalitesi doğrulanmıştır. Partikül boyut dağılımı Malvern Mastersizer S ile alan-ağırlıklı ortalama partikül çapına göre hesaplanmıştır. Gaz besleme hızı ve katı kapasitesi, deneyler esnasındaki GSVR performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Yatak yüksekliğinin ortalama bir değeri GSVR dip-duvarında konumlandırılan cetveller ile elde edilmiştir [85].

Sonuç olarak, GSVR'nin çevresel duvarlarına yakın bölgelerde partiküllerin açısız hızı düşük bulunmuş ve hız değeri yarıçap azaldıkça artmıştır. Bunun sebebi gaz giriş açıklıklarının bulunduğu bu bölgede gaz ve partiküller arası etkileşimin zayıf olması sebebiyle gazdan partiküllere gerçekleşen momentum transferinin sınırlı olmasıdır. Gaz ve partiküller etkileşimde buldukça partikül momentum artmakta ve bu da açısız partikül hızının artması ile sonuçlanmaktadır. İki farklı yoğunluktaki partiküllerin kullanılarak gerçekleştiği deneylerde her iki durum için de momentum girişi eşit olmasına karşın ağır partiküllerin daha az ivmelendirildiği görülmüştür. Bütün çalışma koşullarında ve her iki partikül için döner yataktaki yüzeysel gaz hızları hesaplanan kritik minimum akışkanlaşma hızından yüksek bulunmuştur [85].

Agarwal ve diğ. [88] tarafından distribütörde bulunan giriş gazı jetlerinin gelişimini incelemek için dikdörtgen bir akışkan yatak düzeni geliştirilmiştir. Akışkanlaştırılmış bir yatağın ızgara bölgesi bölgesindeki parçacıkların ve jetlerin hareketini anlamak için değişen dağıtıcı türleri ve yatak ortamı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Jetler akışkan yatakların genel performansının ısı, kütle transferi ve reaksiyon çıktılarını önemli ölçüde etkilemektedir. Jet uzunluklarının kontrolü akışkan yataklarda partikül karışmasını iyileştirmekte ve yataklarda gaz baypasını engellemektedir. Jet çapının bilinmesi ile kabarcık boyutu da bilinmektedir. Bu çalışmada yatak 500 W'lık halojen lambalar ile çift görüntülü dijital PIV kamera ile görüntülenmiştir. PIV kamera zamanlayıcı ile kontrol edilmektedir. Deney sistemi siyah perdeler ile çevrilerek

yansımalarından kurtarılmıştır. Hava sisteme nemlendirici ile beslenerek yatakta oluşacak elektrostatik etkilerden kaçınılmıştır. National ins. Acquisition ile fark basınç, giriş basıncı, giriş sıcaklığı ve hava akış hızı kaydedilmiştir. Testlerde partikül boyutu, partikül yoğunluğu, akışkanlaşma hızı, orifis çapı ve sistemdeki orifis açıklığını değiştirmenin etkisi 3 farklı (seramik 550  $\mu\text{m}$ , cam 550  $\mu\text{m}$  ve cam 750  $\mu\text{m}$ ) partikül kullanılarak incelenmiştir. 5 farklı delikli dağıtıcı elek kullanılmıştır.  $U_{mf}$  için fark basınç ölçümü yapılmıştır. PIV non-intrusive optik bir tekniktir ve bir akışkanda askıda kalan partiküllerin hız alan bilgilerini vermektedir. Bilinen zaman aralığında partikül konumu ölçülebilir. PIV ölçümü ile ön duvardaki hızı belirlediği için yatakta homojen akış elde edilmelidir. 25 çift frame görüntü, trigger hızı 7.4 Hz ve 3.38 s boyunca 1 ms'lik zaman ertelemeleri ile ölçümler yapılmıştır. Dijital görüntü analizinde boyutsal koordinatların sonsuz iki boyutlu fonksiyonu (piksel) 12 bit olarak ölçülmektedir [88].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Gaz Akış Hidrodinamiği

##### 3.1.1 Akışkanlar

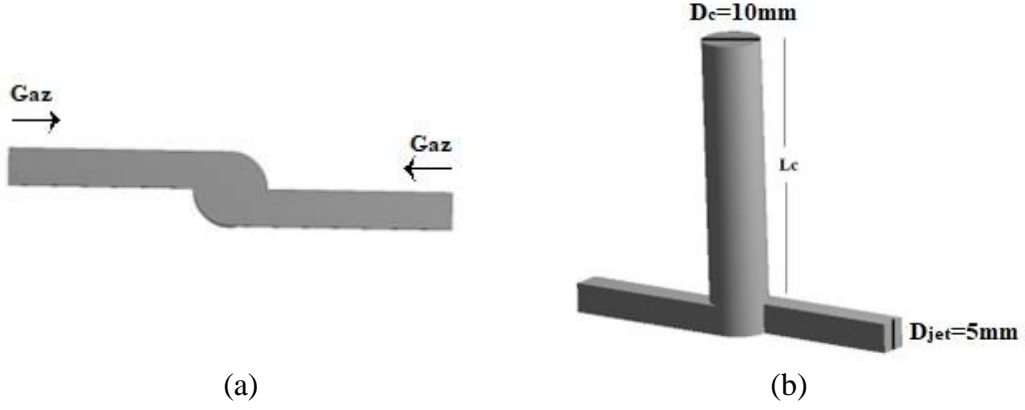
Vorteks mikserdeki gaz akış hidrodinamiklerinin ortaya çıkarılması için metan (CH<sub>4</sub>), hidrojen (H<sub>2</sub>), azot (N<sub>2</sub>) ve argon (Ar) gazları Asalgaz firmasından temin edilmiştir. Gazların saflık değerleri sırasıyla % 99.95, % 99.999, % 99.99 ve % 99.9999'dur. Gazların oda koşullarındaki fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Oda koşullarındaki akışkan özellikleri.

|  | Birim                | Metan<br>(CH <sub>4</sub> ) | Hidrojen<br>(H <sub>2</sub> ) | Azot<br>(N <sub>2</sub> ) | Argon<br>(Ar)         |
|--|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Yoğunluk<br>( $\rho$ )                   | (kg/m <sup>3</sup> ) | 0.668                       | 0.082                         | 1.250                     | 1.620                 |
| Dinamik Viskozite<br>( $\mu$ )           | (kg/m · s)           | 1.09x10 <sup>-5</sup>       | 8.41x10 <sup>-6</sup>         | 1.75x10 <sup>-5</sup>     | 2.12x10 <sup>-5</sup> |
| Kinematik<br>Viskozite<br>( $\nu$ )      | (m <sup>2</sup> /s)  | 1.63x10 <sup>-5</sup>       | 1.03x10 <sup>-4</sup>         | 1.40x10 <sup>-5</sup>     | 1.31x10 <sup>-5</sup> |
| Molekül Ağırlığı<br>( $M_w$ )            | (g/mol)              | 16.00                       | 2.02                          | 28.01                     | 39.90                 |
| Kütle Difüzyon Katsayısı<br>( $D_{AA}$ ) | (m <sup>2</sup> /s)  | 2.18x10 <sup>-5</sup>       | 1.41x10 <sup>-4</sup>         | 2.10x10 <sup>-5</sup>     | 1.82x10 <sup>-5</sup> |
| Schmidt Sayısı<br>( $N_{Sc}$ )           | -                    | 0.75                        | 0.73                          | 0.67                      | 0.72                  |

##### 3.1.2 Vorteks karışma çemberi

Vorteks mikser görüntüleme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için şeffaf polimetilmetakrilat (PMMA) malzeme kullanılmıştır. Vorteks mikserin karşıdan ve tabandan görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.1 :** a) Reaktörün taban görünümü b) Reaktörün karşıdan görünümü.

Vorteks mikser geometrisi hidrolik çapı 5 mm ( $D_{jet} = 5 \text{ mm}$ ) ve kare kesit alanı 5 mm x 5 mm olan iki adet jetin, çapı 10 mm olan silindirik karışma çemberinin ( $D_c = 10 \text{ mm}$ ) teğetsel olarak bağlanmasından oluşmaktadır. Silindirik çember uzunluğu 250 mm ( $L_c = 250 \text{ mm}$ ), jetlerin uzunluğu ise çalışılacak  $Re$  sayısı aralığı için tam gelişmiş akış hidrodinamiklerini sağlayacak şekilde 300 mm ( $L_{jet} = 300 \text{ mm}$ ) olarak belirlenmiştir.  $Re$  sayısı jetlerin akış hızı ayarlanarak aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

$$Re_{jet} = \frac{\rho v_{jet} D_{jet}}{\mu} \quad (3.1)$$

$$v_{jet} = Q/A \quad (3.2)$$

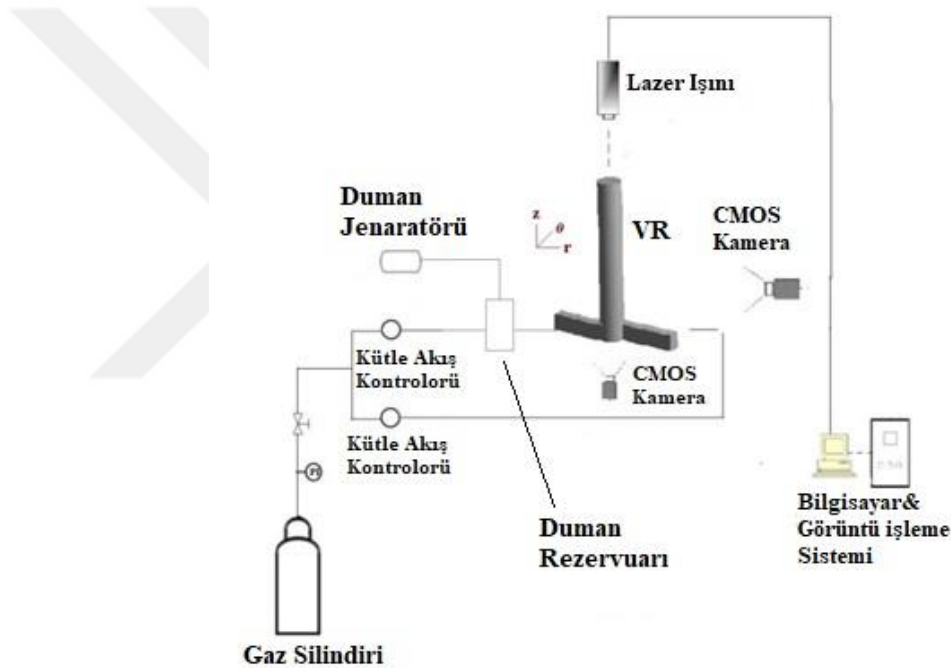
$v_{jet}$  akış hızından hesaplanan jetlerin girişindeki yüzeysel hız ( $m/s$ ),  $Q$  akış hızı ( $m^3/s$ ) ve  $A$  ise jetlerin kesit alanıdır ( $m^2$ ).  $D_{jet}$ , jetlerin hidrolik çapı ( $m$ ),  $\rho$  ve  $\mu$  ise sırasıyla gaz yoğunluğu ( $kg/m^3$ ) ve dinamik viskozite ( $kg/m.s$ ) değerleridir. Jetlerin  $Re$  sayısının yanı sıra hem operasyonel hem de tasarım ile ilgili parametreleri içeren diğer önemli boyutsuz grup ise jetlerin momentum oranı,  $M_R$  olarak bilinmektedir ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_R = \frac{\rho_1 v_{jet-1}^2 A_{jet-1}}{\rho_2 v_{jet-2}^2 A_{jet-2}} \quad (3.3)$$

$A$  her bir jetin kesit alanıdır ve bu çalışmadaki vorteks mikser geometrisi için eşit değere sahiptir.

### 3.1.3 Gaz akış görüntüleme ve PIV sistemi

Gaz akış hidrodinamiği çalışması deneysel kurulum şeması Şekil 3.2’de verilmektedir. Gaz silindirden gelen akış hızını kontrol etmek için Bronkhorst F201-AV kütle akış kontrol cihazları kullanılmıştır. Duman enjekteli akışın elde edilebilmesi için, Safex Fog Generator F2010 marka duman jeneratörü ile duman üretilmiş ve üretilen duman rezervuarda biriktirilmiştir. Akış kontrol cihazlarının yalnızca birinden gelen gaz akışı bu duman rezervuarından geçirilerek jetlerden birine beslenmiştir. Gazların çalışıldığı maksimum akış hızları dumanın yoğuşma durumu göz önüne alınarak belirlenmiştir. Duman yoğuşması gaz akışının kaotik hale geçmesinden sonra gerçekleştiği için çalışmayı etkilememiştir.



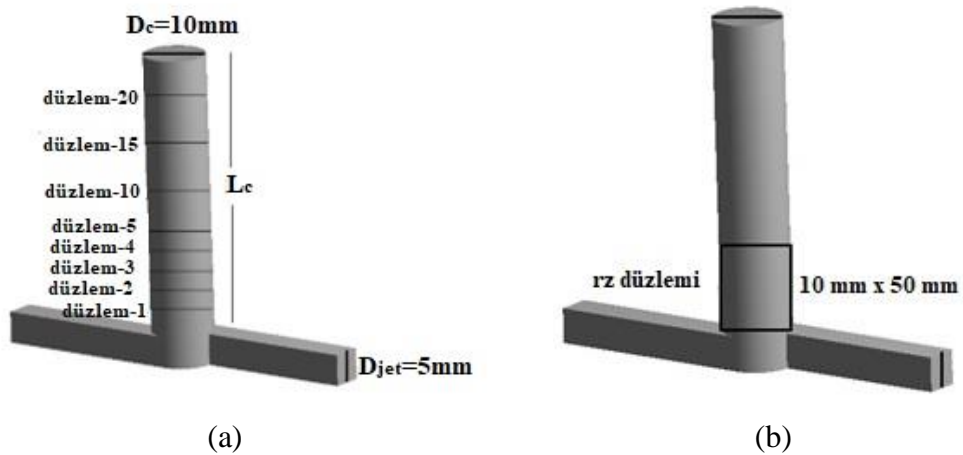
Şekil 3.2 : Deneysel kurulum.

#### 3.1.3.1 Gaz akış görüntüleme

Duman enjekteli gaz akış görüntüleri Dantec Dynamics marka PIV sistemine bağlı CMOS kamera (Speedsense 1040, 2330 x 1723 piksel) ile elde edilmiştir. PIV sistemi çift çerçeve çekimi (double frame acquisition) modunda iken maksimum 96 Hz frekansı ile çalışabilen çift-kaviteli Nd-YAG lazer (532 nm, 50 mJ) sistemi içermektedir. Lazer demeti yaklaşık olarak 1 mm kalınlığında 2-boyutlu ışık düzlemi üretmektedir. Gaz akışının takip edilebilmesi için içerisindeki damlacıkların yoğunluk ve boyutu oldukça önemlidir [89]. Duman içerisindeki damlacıkların ortalama boyutu

$<1 \mu\text{m}$  olduğu için ışık saçılması ve dumanın gaz akışına olan etkisi ihmal edilmiştir [90]. İki poz çekimi arasındaki zaman ise ( $dt$ ), Keane ve Adrian, [91] ve Adrian [92]'in çalışmaları baz alınarak optimize edilmiştir.  $dt$  seçilirken hedef görüntüleme bölgesi (interrogation spot) boyutunun  $dt$ 'ye oranının maksimum 0.25 olmasına dikkat edilmiştir [91, 92]. Partikülün görüntüleme çerçevesinin  $\frac{1}{4}$ 'ünde yer değiştirmesi amaçlanmıştır. Böylece,  $32 \times 32$  piksel görüntüleme bölgesi boyutu için  $dt$ ,  $5164 \mu\text{s}$  olarak belirlenmiştir.

Akış görüntüleri, tabandan itibaren çember uzunluğunun farklı yükseklikleri için kaydedilmiştir. Akış görüntüleme radyal düzlemleri, görüntülenen çember yüksekliği düzleminin çember çapına oranı şeklinde  $\frac{z}{D} = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20$  sırasıyla düzlem-1, düzlem-2, düzlem-3, düzlem-4, düzlem-5, düzlem-10, düzlem-15 ve düzlem-20 olarak isimlendirilmiştir. Akış dinamiklerinin aksel yönde incelenmesi için çemberin iki boyutlu karşıdan görüntüsü alınmıştır. Görüntüler, akışın kararlı olduğu kritik bölgelere kadar 10 Hz, bundan sonraki bölgelerde ise hızlı dinamiklerin de görüntülediğinden emin olmak için 96 Hz olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi radyal düzlemler için  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , aksel düzlem için ise  $10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 'dir. Vektör alanının elde edilmesi için çekilen resimlerin sayısı görüntü işleme (post-processing) zamanı için optimize edilmiştir. 512 adet resmin zaman ortalaması ile 128 adet resmin zaman ortalaması karşılaştırıldığında aynı sonuçlar elde edilmiş ve bu sebeple 128 adet resim yeterli bulunmuştur.



**Şekil 3.3** : Ölçüm düzlemlerinin şematik gösterimi (a) radyal düzlemler (b) aksel düzlemler.

### 3.1.3.2 Gaz PIV akış alanı

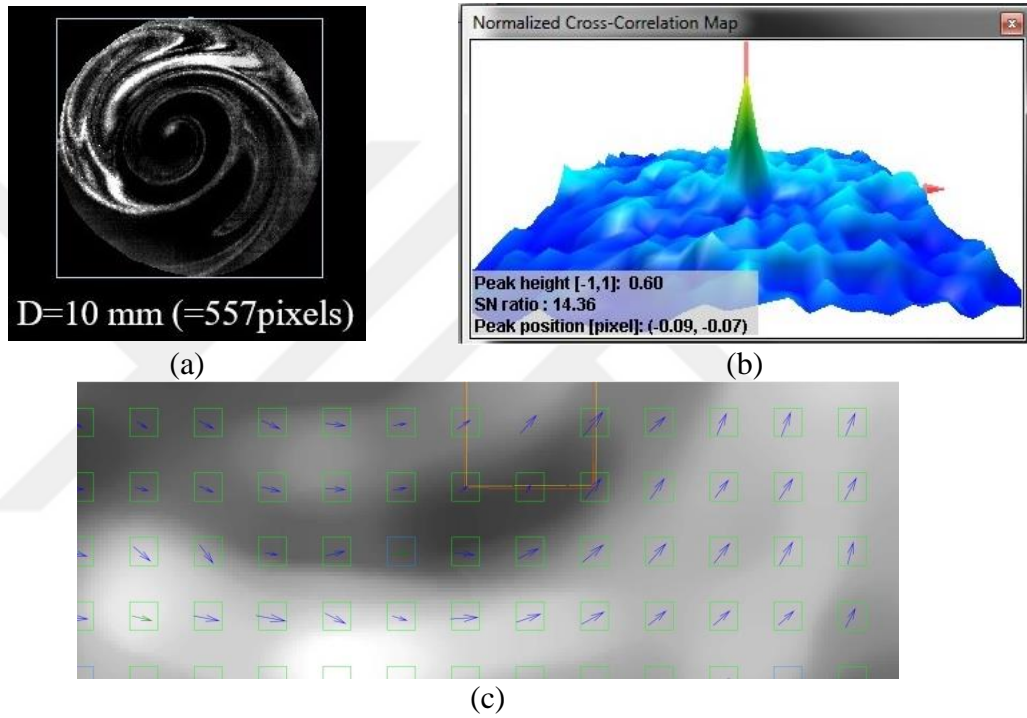
PIV metodu akış karakteristiklerinin deneysel olarak araştırılması için faydalı bir tekniktir. Bu teknikte küçük parçacıkların ardışık iki lazer atımı süresi arasındaki yer değiştirmesinden anlık hız belirlemesi yapılabilmektedir. Çarpan jetlerdeki sıvı-sıvı karışma reaksiyonlarının akış özelliklerinin çalışılmasında PIV kullanımı oldukça ilgi görmüş ve akış özelliklerini karakterize etmek için kullanılmıştır [93].

Akış görüntülerinin işlenmesi için birçok optimizasyon tekniği uygulanmıştır. Daha önceki çalışmalarda hedef görüntüleme bölgesi başına optimum partikül sayısının 10 olması gerektiği belirtilmektedir [89]. Bu çalışmada görüntü işleminin daha verimli yapılabilmesi açısından duman yoğunluğu azalana ve akış kararlı hale gelene kadar beklenmiştir. Hedef görüntüleme bölgesi alanları Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

Akış görüntüleri işlenmeden önce akış ile ilgisi olmayan vektörlerin akış alanından atılması için bir maskeleyme uygulanmıştır. PMMA duvarına vuran ışığın saçılmasını dengelemek için yüksek geçişli (high pass) filtre uygulanmıştır. Ayrıca görüntülerdeki piksel gürültüleri yerel bir filtre kullanılarak minimize edilmiştir. Akışın ortalama davranışını gösteren zaman ortalamalı görüntüler kök ortalamalı kare metodu (root mean square, rms) kullanılarak elde edilmiştir. RMS metodu, piksellerin kendi değerlerinin ortalama değerlerinden standart sapmasını hesaplamakta ve akışın hem kararlı hem de kararsız halleri için daha iyi sonuçlar vermektedir [94].

Çift çerçeve çekimi modunda çekilen görüntülerin, PIV analizleri ile enjekte edilmiş duman partiküllerinin elde edilen iki görüntü arasındaki yer değiştirmesi belirlenmektedir. Görüntüler çiftler halinde yakalanmış ve Dantec Dynamics yazılımındaki Adaptif PIV metodu kullanılarak hız vektörleri elde edilmiştir. Adaptif PIV metodu partikül görüntüleri üzerindeki hız vektörlerini hesaplamak için kullanılan otomatik ve uyarlanabilir bir yöntemdir. Bu metodta, bireysel hedef görüntüleme alanlarının boyut ve biçimleri, yerel duman partiküllerine ve akış gradyanlarına göre ayarlanmıştır ve her seferinde yeni bir hedef görüntüleme alanı belirlenmiştir. Böylece, akış gradyanları bireysel hedef görüntüleme bölgesi alanlarının (interrogation area, IA) (32 x 32, genişlik x yükseklik) seçilmesi ile adapte edilmiştir. Bu durum, çok geçişli (toplam 8 geçiş) PIV algoritması ile hedef görüntüleme bölgesi çerçevesi 128 x 128'den 32 x 32'ye düşürülerek yapılmıştır. (Şekil 3.4). Bundan sonra, vektör haritalarını (3 x 3) ortalama alan boyutuna sahip vektör komşuları üzerinden

aritmetik ortalama alınarak filtrelemek için, ortalama filtre yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen bu vektörler akışın anlık hız vektör haritasını göstermektedir. Zaman ortalamalı vektörlerin analizi için çoklu vektör haritalarının istatistiğini hesaplayan vektör istatistik metodu kullanılmıştır. Böylece anlık hız vektörlerinin standart sapma ve varyanslarını içeren ortalama hız vektörleri elde edilmiştir [94]. Toplam hata ise farklı zamanlarda gerçekleştirilen 6 tekrar deneyi ile hesaplanmıştır. Hedef görüntüleme çerçevesinin uzunluk ölçeği piksel değeri çember çapına bölünerek  $5.57 \times 10^{-4}$  (piksel/m) şeklinde elde edilmiştir [43].



**Şekil 3.4 :** Karışma çemberinin PIV kamerasından elde edilen çerçevesi a) radyal izleme penceresi b) Hedef görüntüleme çerçevesinin çapraz-korelasyon haritası c) hedef görüntüleme bölgesinin ve hesaplanan vektörlerin yakın gösterimi.

### 3.1.4 Türbülans özellikleri

Akış rejimi geçişlerinin ve akışın kritik bölgelerinin analizi için hız sapmalarının belirlenmesi etkili bir yoldur. Bu bağlamda, akışın hem radyal hem de eksenel düzlemleri için türbülans yoğunluğu değerleri belirlenmiştir. Boyutsuz türbülans yoğunluğu değeri her bir noktadaki hız vektörlerinin ortalama değerinden standart sapmaları hesaplanarak elde edilen türbülans kinetik enerjisi ( $m^2/s^2$ ) sonuçlarından hesaplanmıştır (Denklem 3.4-3.5).

$$\text{Türbulans Kinetik Enerjisi (TKE)} = \frac{(\sigma_{\vartheta_r}^2 + \sigma_{\vartheta_z}^2)}{2} \quad (3.4)$$

$$\text{Türbulans Yoğunluğu (TI)} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \times TKE}{\bar{v}} \quad (3.5)$$

$\sigma_{\vartheta_r}$  ve  $\sigma_{\vartheta_z}$  hızın  $r$  ve  $z$  eksenlerindeki standart sapması,  $\bar{v}$  ise ortalama hız değeridir.

### 3.1.5 Deney koşulları

#### 3.1.5.1 Benzer gazların akış hidrodinamiği

Gaz akış alanı karakteristikleri ve akışın kritik  $Re$  sayısının belirlenmesi akışın laminar bölgede gerçekleştirilen görüntüleme deneyleri sonucunda elde edilmiştir. Jetlerin her ikisinden de aynı gazların gönderildiği gaz akış hidrodinamiği çalışmasının iki aşamasında deneyler,  $Re = 30$  ve  $Re = 280$  arasında  $Re = 10$  aralıkları ile gerçekleştirilmiştir. Bu değerler jetlerden birinden gönderilen dumanlı gaz akışının yüksek gaz hızlarındaki yoğunlaşma kısıtlaması göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu sebeple hidrojenin gaz olarak kullanıldığı deneylerde akış görüntüleri  $Re = 200$ 'e kadar  $Re = 10$  aralıkları ile elde edilmiştir. Gaz akış hızları ve yüzeysel gaz hızları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2 : Jetlerdeki gaz akış hızı ve yüzeysel hızları\*.**

| $Re_{jet}$ | CH <sub>4</sub> |                    | H <sub>2</sub> |                   | N <sub>2</sub> |                   | Ar       |                  |
|------------|-----------------|--------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------|------------------|
|            | $Q_{CH_4}$      | $\vartheta_{CH_4}$ | $Q_{H_2}$      | $\vartheta_{H_2}$ | $Q_{N_2}$      | $\vartheta_{N_2}$ | $Q_{Ar}$ | $\vartheta_{Ar}$ |
| 50         | 0.25            | 0.16               | 1.54           | 1.03              | 0.21           | 0.14              | 0.20     | 0.13             |
| 100        | 0.50            | 0.33               | 3.08           | 2.05              | 0.42           | 0.28              | 0.39     | 0.26             |
| 150        | 0.75            | 0.49               | 4.62           | 3.08              | 0.63           | 0.42              | 0.59     | 0.39             |
| 200        | 1.00            | 0.65               | 6.15           | 4.10              | 0.84           | 0.56              | 0.79     | 0.52             |
| 250        | 1.24            | 0.82               | 7.69           | 5.13              | 1.05           | 0.70              | 0.98     | 0.65             |

\*Hacimsel akış hızı,  $Q$ , birimi L/dk, yüzeysel gaz hızları,  $u$ , birimi ise m/s'dir.

### 3.1.5.2 Farklı gazların akış hidrodinamiği

Benzer gazların akış hidrodinamiğine ek olarak jetlerden farklı gazlar aynı  $Re$  sayılarında gönderilmiştir. Bu sebeple gaz fiziksel özelliklerinin ve gaz hacim kesirlerinin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 3.2'deki gaz özelliklerine ek olarak gaz karışımı için ikili kütle difüzyon katsayısı, momentum oranı ve fiziksel parametrelerin oranı hesaplanarak Çizelge 3.3'te verilmiştir. Jetlerin her birinden farklı gazlar gönderildiği için, benzer gazların akış hidrodinamiği deneylerinin aksine burada duman enjeksiyonunun hangi jetten yapılacağı önem arz etmektedir. Bu sebeple her iki gaz karışımı için duman enjeksiyonu önce argon gazı ile daha sonra ise hidrojen veya azot gazı ile gönderilerek deneme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda her iki koşulda ( $Ar/H_2$  ve  $Ar/N_2$  için) elde edilen akış görüntülerinin anahtar-kilit uyumu benzeri birbirini tamamladığı görülmüştür (Şekil A.1). Bu sebeple, duman enjeksiyonunun her iki durumda da aynı olması için argon gazı ile yapılmasına karar verilmiştir.

**Çizelge 3.3 :** Jetlerin eşit  $Re$  sayıları için oda koşullarındaki gaz karışımı özellikleri.

|                 | <b>Birim</b>       | <b>Ar/H<sub>2</sub></b> | <b>Ar/N<sub>2</sub></b> |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| $y_{Ar}$        | -                  | 0.11                    | 0.48                    |
| $y_{H_2}$       | -                  | 0.89                    | -                       |
| $y_{N_2}$       | -                  | -                       | 0.52                    |
| $D_{AB}^*$      | ( $m^2/s$ )        | $7.61 \times 10^{-5}$   | $1.97 \times 10^{-5}$   |
| $M_R$           | -                  | 0.32                    | 1.12                    |
| $\bar{\rho}$    | ( $kg/m^3$ )       | 0.25                    | 1.33                    |
| $\rho_A/\rho_B$ | -                  | 19.82                   | 1.30                    |
| $\bar{\mu}$     | ( $kg/m \cdot s$ ) | $9.84 \times 10^{-6}$   | $1.79 \times 10^{-5}$   |
| $\mu_A/\mu_B$   | -                  | 2.52                    | 1.21                    |
| $\bar{\nu}$     | ( $m^2/s$ )        | $3.87 \times 10^{-5}$   | $1.35 \times 10^{-5}$   |
| $\nu_A/\nu_B$   | -                  | 0.13                    | 0.94                    |
| $\bar{M}_w$     | ( $g/mol$ )        | 6.26                    | 29.34                   |

\*  $D_{AB}$  gazların kütle difüzyon katsayılarıdır.  $Ar/H_2$  ve  $Ar/N_2$  için alt indis A argon gazını, alt indis B ise  $Ar/H_2$  ve  $Ar/N_2$  için sırasıyla hidrojen ve azot gazlarını göstermektedir.

### Gaz hacim oranı etkisi

Benzer fiziksel özelliklere sahip argon ve azot karışımında çember içerisindeki gaz hacim kesirleri birbirine çok yakın değerler olmakla birlikte ( $Ar:N_2=0.48:0.52$ ), argon ve hidrojen gaz karışımında hidrojenin gaz hacim kesri argondan sekiz kat daha yüksektir ( $Ar:H_2=0.11:0.89$ ) (Çizelge 3.3). Bu sebeple gaz hacim kesrinin farklı gazların akış hidrodinamikleri üzerindeki etkisi farklı hidrojen hacim kesirlerinde

beslemeler yapılarak araştırılmıştır. Farklı gaz bileşimleri için ortalama gaz fiziksel özellik değerleri Çizelge 3.4’te verilmektedir.

**Çizelge 3.4 :** Ar/H<sub>2</sub> içindeki farklı  $y_{H_2}$  kesirleri için ortalama fiziksel özellikler.

| $y_{H_2}$ | $y_{Ar}$ | $\bar{\rho}$<br>( $kg/m^3$ ) | $\bar{\mu}^*$<br>( $kg/m \cdot s$ ) | $\bar{v}^*$<br>( $m^2/s$ ) | $\bar{M}_w$<br>( $g/mol$ ) |
|-----------|----------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0.2       | 0.8      | 1.31                         | 1.86                                | 1.42                       | 32.32                      |
| 0.4       | 0.6      | 1.00                         | 1.61                                | 1.60                       | 24.75                      |
| 0.6       | 0.4      | 0.70                         | 1.35                                | 1.94                       | 17.17                      |
| 0.8       | 0.2      | 0.39                         | 1.10                                | 2.82                       | 9.60                       |

\*Dinamik viskozite ve kinematik viskozitenin ortalama değerleri  $10^5$  ile çarpılmıştır.

## 3.2 Gaz-Katı Akış Hidrodinamiği

### 3.2.1 Malzeme

Gaz-katı akış hidrodinamiği deneylerinde kullanılan yüksek saflıkta kuru hava Asalgaz firmasından % 99.995 saflıklarda elde edilmiştir. Silika üretimi için ise tetraetilortosilikat (TEOS) (Merck, %99) ve etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) (İsolab, % 99.9) temin edilmiştir. Alümina üretimi için alüminyum nitrat, Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O (Acros Organics % 95) ve amonyum bikarbonat, (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>) (Sigma Aldrich, % 98) kullanılmıştır. Titanyum dioksit partikülleri ise saf suya titanyum isopropoksitin (TTIP) (Sigma Aldrich, % 97) damlatılması ile temin edilmiştir. Sentezlenen malzemeler haricinde mikron ölçekli malzemeler ticari olarak temin edilmiştir. Ticari olarak temin edilen malzemeler TiO<sub>2</sub>-1µm ( Nanografi, % 99), TiO<sub>2</sub>-P25 (Degussa, % 99.99), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10 µm ( Nanografi, % 99.99) ve ZnO (7.6 µm)’dir.

### 3.2.2 Partikül üretimi

Gaz-katı akış hidrodinamiği deneylerinde ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> partikülleri kullanılmıştır. Bu malzemelerin nanometre ölçeklerinde üretimi için çöktürme ve sol-jel metodları tercih edilmiştir. Gaz-katı akışkanlaşma hidrodinamiğinde çalışılacak partiküller, vorteks mikser reaktörde kullanılması öngörülen kimyasal reaksiyonlar baz alınarak belirlenmiştir.

#### 3.2.2.1 ZnO üretimi

Çinko oksit partikülleri, çinko asetat dihidratın sodyum hidroksit varlığında çöktürülmesi ile elde edilmiştir. Çinko asetat ve sodyum hidroksit derişimleri stokiometrik (1/2) oranda hazırlanmıştır. Hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisi çinko

asetat çözelti üzerine damlatılarak belirli pH değerinde çöktürülmüştür. Daha sonra filtrelenip kurutulan çinko oksit partikülleri 550°C’de 2 saat boyunca kalsine edilmiştir [95].

### **3.2.2.2 SiO<sub>2</sub> üretimi**

Silika partiküllerinin üretimi için Stöber ve sol-jel metodları kullanılmıştır [96]. Stöber metodunda, belirli derişimlerde hazırlanan tetraetilortosilikat (TEOS) ve etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımına belirli oranda amonyum hidroksit (NH<sub>4</sub>OH), saf su ve etanol eklenerek 6 saat boyunca oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Çözelti 45°C’de buharlaştırılarak, 10°C/dk ile 1000°C de 2 saat boyunca kalsine edilmiştir. Sol-jel metodunda ise belirli miktarlarda TEOS, etanol ve su karışımının sıcaklığı dakikada 1°C arttırılarak 100°C’de beyaz sol elde edilmiştir. Jelleşme gözlendikten sonra filtrelenip kurutulan silikalar 500°C’de 5 saat boyunca kalsine edilmiştir.

### **3.2.2.3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üretimi**

Alümina üretimi için alüminyum nitrat (Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O, % 95) ve amonyum bikarbonat (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>, % 98) sulu çözeltileri hazırlanmıştır [97]. Alüminyum nitrat çözeltisi amonyum bikarbonat çözeltisine damla damla eklenerek alüminyum katyonu hidroksit formunda elde edilmiştir. 70°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneyde pH değeri 7.5-8.5 aralığında ayarlanarak alüminyum iyonunun çökme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çökelti 3 saat yaşlandırma işleminden sonra filtrelenerek saf su ve etanol ile yıkanıp oda sıcaklığında kurutularak 550 °C’de 5 saat boyunca kalsine edilmiştir.

### **3.2.2.4 TiO<sub>2</sub> üretimi**

Titanyum dioksit partikülleri ise saf suya titanyum isopropoksitin (Sigma Aldrich) damla damla eklenmesi ile çöktürülmüştür. Alkoksit hidrolizi ile birlikte çöken sulu TiO<sub>2</sub> partikülleri santrifüj edildikten sonra saf su ve etanol ile yıkanarak, 80 °C’de 12 saat boyunca kurutulmuştur. Ardından, 400 °C’de 2 saat boyunca kalsine edilmiştir [98, 99].

## **3.2.3 Partikül karakterizasyonu**

Üretilen partiküllerin FTIR, XRD, SEM analizleri yapılarak faz içerikleri, kristal boyutları, kafes parametreleri ve partikül boyutları hesaplanmıştır.

Partiküllerin zeta potansiyeli, ortalama partikül boyutu ve partikül boyut dağılımı analizleri Malvern Marka Partikül Boyut Ölçümü ve Zeta-Sizer ile ölçülmüştür. Zeta-sizer ölçümleri için her bir numuneden 0.01 gram örnek alınarak 100 ml saf su ile seyreltilmiştir. Örnekler çözüldükten sonra % 80 güçte 4 dk'lık veya % 40 güçte 5 dk'lık ultrasonikasyon işlemi uygulanmıştır. Her bir numune 0.45 µm'lik filtre ile filtrelenmiştir.

Hazırlanan partiküllerin faz içeriklerini belirlemek için FTIR analizi yapılmıştır. Analizler 4000-450 cm<sup>-1</sup> bant aralığında Perkin Elmer FTIR spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir.

X-ray difraksiyon (XRD) analizleri X-ray ışını 40 kV ve 40 mA'e sahip XRD difraktometresi (D8Advance, Bruker Instrument Co., Ltd., Germany) ile CuKα radyasyonunun (λ=1.5418 Å) 2θ değeri 10-80° aralığında ve 0.02 s<sup>-1</sup> tarama hızı ile yapılmıştır.

Partiküllerin morfolojileri ve yapı özellikleri Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM, Zeiss Supra 50 VP) ile ikincil elektron görüntü (SEI) modunda analiz edilmiştir.

### **3.2.4 Gaz-katı akış görüntüleme sistemi**

#### **3.2.4.1 Vorteks akışkan yatak sistemi**

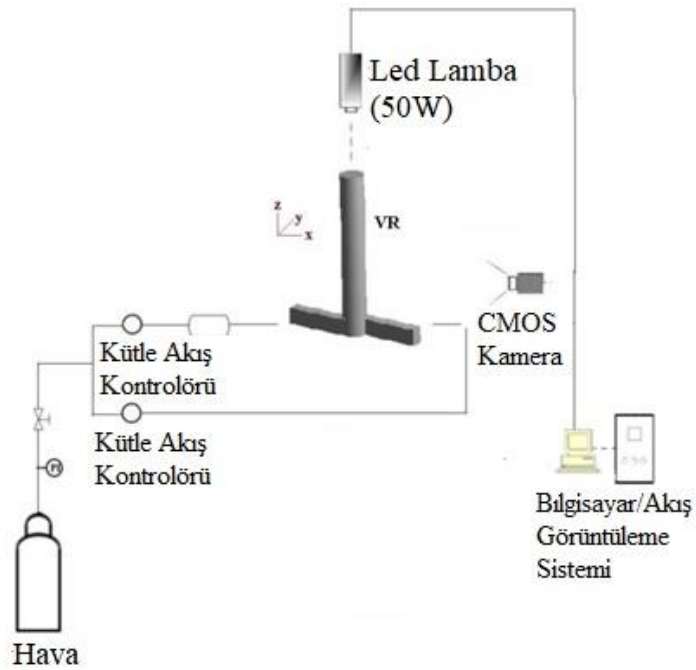
Gaz-katı akış hidrodinamiği deneylerinde kullanılan vorteks akışkan yatak reaktörleri Solidworks programı ile çizilerek CNC makinesi ile laboratuvarında üretilmiştir. Reaktör malzemesi olarak görüntülerin elde edilebilmesi amacı ile PMMA malzeme seçilmiştir. Vorteks mikser geometrisi, uzunluğu 1000 mm ve çapı 10 mm olan karışma çemberi ile bu çembere teğetsel olarak bağlanan ve hidrolik çapı 5 mm olan, 5 mm x 5 mm kesit alanındaki jetlerden oluşmaktadır ( $D_{jet}/D_c = 1/2$ ). Bu geometri, gaz akış hidrodinamiği deneylerinde kullanılan vorteks mikser geometrisi ile aynıdır (Şekil 3.1). Ek olarak, jet çapının çember çapına ( $D_{jet}/D_c$ ) oranı değiştirilerek  $D_{jet}/D_c = 1/2, 1/3, 1/4$  oranlarında reaktörler üretilmiştir. Çember uzunluğu 1 m olarak sabit tutulmuştur.

**Çizelge 3.5 :** Gaz-katı akışkanlaşma vorteks mikser özellikleri.

| Reaktör                                | R1      | R2      | R3      |
|--|---------|---------|---------|
| İç çap (ID) (m)                        | 0.01    | 0.015   | 0.02    |
| Uzunluk (L) (m)                        | 1       | 1       | 1       |
| Uzunluk/Çap Oranı (L/D)                | 100     | 66.67   | 50      |
| Kesit alanı (m <sup>2</sup> )          | 7.9E-05 | 1.8E-04 | 3.1E-04 |
| Jet çapı/Çember Çapı ( $D_{jet}/D_c$ ) | 0.5     | 0.33    | 0.25    |

### 3.2.4.2 Gaz-katı akış görüntüleme sistemi

Gaz-katı karışma hidrodinamiğinin belirlenebilmesi için akış görüntüleme ve akışkanlaşma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te gaz-katı akışkanlaşma deneylerinin şematik gösterimi verilmiştir. Gaz-katı akışkanlaşma görüntüleri Dantec Dynamics marka PIV sistemine bağlı CMOS kamera (Speedsense 1040, 2330 x 1723 piksel) ile elde edilmiştir. Akışın görüntülenebilmesi için, 50 W gücüne sahip LED lamba kullanılmıştır.  $Re$  sayısı jetlerin akış hızı ayarlanarak Denklem 3.1-3.2'deki gibi belirlenmiştir.



**Şekil 3.5 :** Gaz-katı akış hidrodinamiği deneysel kurulumu.

Bu çalışmada kullanılan vorteks mikser reaktörünün gaz-katı akış hidrodinamiği, farklı boyut ve yoğunluktaki partiküller için sabit katı yatak hacminde (5 cm) belirlenmiştir. Bu sebeple her bir partikülden karışma çemberinin 5 cm'lik hacmini dolduracak şekilde kullanılmıştır. Katı partiküller, çembere yerleştirildikten sonra

sabit katı yüksekliğinin ve yatak akış rejiminin elde edilmesi için belirli bir süre beklenmiştir. Ardından Labview® programı ile kontrol edilen akış kontrol cihazları aracılığıyla gaz akışı kontrol edilerek teğetsel jetlerden eşit  $Re$  sayısı değerinde kuru hava beslemesi yapılmıştır. Sabit yatak akış rejiminden başlayarak  $Re$  sayısı arttırılmış ve gaz-katı akış davranışı hem akış görüntüleme hem de basınç sensörleri ile takip edilmiştir.

### 3.2.4.3 Basınç analizi

Gaz-katı akış hidrodinamiklerini belirlemek için basınçtaki dalgalanmaların ortaya çıkarılması oldukça önemlidir. Basınç dalgalanmaları, parçacık özellikleri ve morfolojisi, yatak geometrisi, statik yatak yüksekliği, basınç probu pozisyonu ve gaz hızına bağlıdır. Basınç dalgalanmalarının sebepleri; yerel kabarcık kaynaklı dalgalanma, küresel yatak titreşimleri ve kanallaşma veya türbülanslı akışkanlaşma olabilmektedir. Basınç dalgalanmaları, kolon iç duvarına veya akışkan yatak içine eklenmiş basınç probuna bağlı hassas basınç sensörleri ile ölçülebilmektedir [100].

Basınç dalgalanma yoğunluğu dalgalanma sinyallerinin veya standart sapmanın ortalama genliği ile ölçülmektedir. Dinamik basınç ölçümleri, tek nokta mutlak basıncı yatak ve serbest bölge arası basınç farkı ile 10-1000 Hz arasında ve 30 sn'den kısa sürelerde yapılmaktadır. Basınç dalgalanmasının ana frekansı kabarcık frekansı ile ilişkilidir ve akışkanlaşma kalitesini göstermektedir. Düşük basınç dalgalanma genliği ve yüksek frekansta ısı ve kütle transfer hızları oldukça iyi olmaktadır [100].

Basınç genellikle gaz-katı akışkan yataklardaki hidrodinamiği karakterize etmek için kullanılmaktadır. Basıncı kullanmanın avantajı zor ve endüstri koşullarında bile kolaylıkla ölçülebilmesidir. Ek olarak, basınç sensörü ve basınç musluğu içeren basınç ölçüm sistemi dayanıklı, ucuz ve neredeyse ölçüm noktasındaki akışı etkilemeyerek kesintisiz davranmaktadır. Yatak basınç dalgalanmaları yataktaki kabarcık hareketi ile bağlantılıdır.

Farklı akışkanlaşma rejimleri için yataktaki basınç ölçüm analizleri zaman, frekans alanı ve boşluk/uzay (state space) alanı baz alınarak yapılmaktadır. Zaman alanı kullanılarak yapılan analizler en basit yaklaşımdır. Akışkan yataklarda basınç dalgalanmalarının standart sapması kullanılarak akış rejimleri belirlenmektedir, fakat dezavantajı akış dinamiklerinin indirekt olarak ölçülmesidir. En yaygın uygulanan frekans alanı ise güç spektrumudur. Uzun zaman ölçeklerinde ( $> 1$  s) geçiş etkilerini

yakalayabilmek için, geçiş güç spektral yoğunluğu veya küçük dalga analizi uygulanabilmektedir. Uzay alan analizi için ise Kolmogorov entropi ile elde edilen bilgi, frekans alanı ile elde edilen ortalama frekansa eşdeğerdir.

*Zaman alanı analizi:* En basit yöntem ölçülen sinyalin veri noktalarının sırasının grafiğe dökülmesidir. Bu yolda sinyali beklemek ve yataktaki sapma davranışlarını veri düzenleme ile daha fazla işlemek önerilmektedir. Geniş olarak uygulanan alan analizi, basınç sinyallerinin genliğini belirlemektir ve standart sapma, varyans veya ortalama mutlak sapma olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra Gaussian dağılımı için standart sapmanın 0.8 katı alınarak ölçülmektedir. Bu analizin avantajı dış etkenlere karşı daha hassas olmasıdır.

*Frekans alanı analizi:* Akışkan yataklarda kaydedilen basınç sinyallerini araştırmak için genel bir araçtır. Bu analiz Fourier transform kullanılarak gerçekleştirilmektedir [101].

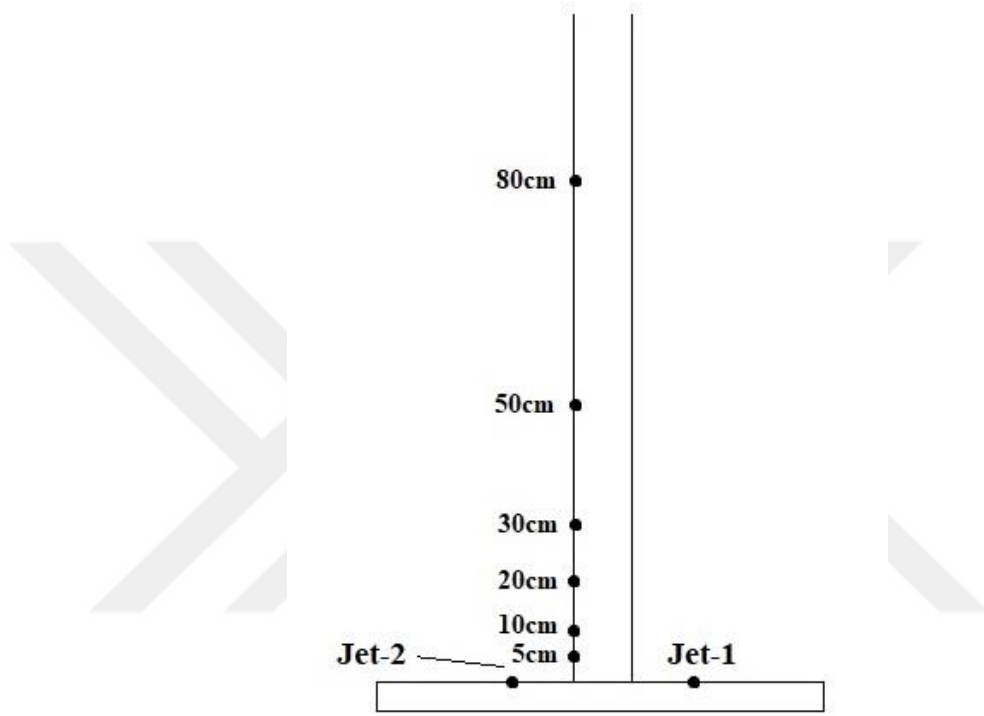
Bu çalışmada, gaz-katı akışkanlaşma hidrodinamiğinin belirlenmesi için karışma çemberinin ve jetlerin farklı noktalarına fark basınç sensörleri yerleştirilmiştir (Şekil 3.6). Validyne marka fark basınç sensörleri, 10 ile -10 volt aralığında gerilim sinyallerini elde etmek için kullanılmıştır. Dijital sinyal elde edebilmek için, analogtan dijital sinyale dönüştürücü kullanılmıştır. Daha sonra verilerin proses edilebilmesi için bu dönüştürücü bilgisayara bağlanmıştır. Farklı noktalardaki basınç değerleri 300 Hz'de ölçülerek çemberin belirli bölgelerindeki basınç farkları belirlenmiştir. Bu şekilde minimum akışkanlaşma bölgesi, akışın kararlı halden kaotik akış rejimine geçtiği kritik noktalar tespit edilmiştir.

Tabandan 80 cm'ye kadar olan bölge arasındaki basınç farkı (0-80 cm) belirlenmiştir (Şekil 3.6). Ayrıca jetlerden birine fark basınç sensörü ile gönderilen gaz akışının basınç dalgalanması izlenmiştir. Zamana bağlı elde edilen basınç değerlerinin ortalama değerleri alınarak  $Re$  değerine bağlı gaz-katı akış hidrodinamiği incelenmiştir. Ayrıca zamana bağlı alınan basınç değerlerinin frekans alanı analizinin yapılabilmesi için her bir akış durumu için güç spektrumları elde edilmiştir. Güç spektrumları hızlı Fourier transformasyonu (Fast Fourier Transform, FFT) ile yapılmıştır. Güç spektrumu analizi Labview ® programı kullanılarak zamana bağlı basınç farkı verilerinin frekans spektrumunun elde edilmesine dayanan bir tekniktir ve

Denklem 3.6'ya göre hesaplanmıştır [102]. Frekans değerlerine karşılık elde edilen sinyal gücü ( $G_{xx}$ ) sonuçları güç spektrumu olarak adlandırılmaktadır.

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (3.6)$$

$x(t)$  zaman alanı sinyali,  $X(f)$  FFT,  $f$  ise analizin frekansıdır.



Şekil 3.6 : Karışma çemberi fark basınç sensörü lokasyonları.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Gaz Akış Hidrodinamiği

Gaz akış hidrodinamiği çalışması içerisinde jetlerin her birinden benzer ( $\text{CH}_4/\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2/\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2/\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}/\text{Ar}$ ) ve farklı gazlar ( $\text{Ar}/\text{H}_2$ ,  $\text{Ar}/\text{N}_2$ ) gönderilerek vorteks mikser geometrisi içerisindeki karışma hidrodinamikleri ve akış mekanizmaları iki ana bölümde incelenmiştir.

#### 4.1.1 Vorteks mikserde benzer gazların akış hidrodinamiği karakterizasyonu

Benzer gazların akış hidrodinamiği çalışmasında öncelikle jetlerin her birinden metan gazı gönderilerek vorteks mikserdeki akış mekanizması ve akış rejimleri belirlenmiştir. İkinci bölümde ise farklı yoğunluk ve viskozite değerlerine sahip hidrojen, azot ve argon gazları kullanılarak, fiziksel özelliklerin akış hidrodinamikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

##### 4.1.1.1 Akış mekanizması

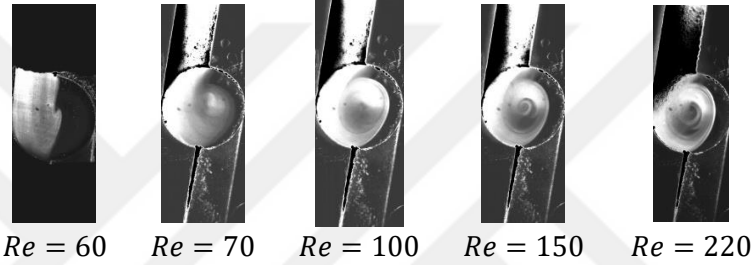
Vorteks mikser içerisinde jetlerin her birinden metan gazı gönderilerek akış görüntüleme ve PIV akış alanı karakterizasyonu deneyleri sonucunda çember içerisindeki karışma hidrodinamikleri ve akış rejimi mekanizmaları belirlenmiştir.

#### Zaman ortalamalı akış görüntüleme

Gaz akış hidrodinamiği çalışmasının ilk yaklaşımı belirlenen  $Re$  aralığında akış yapısının belirlenmesi ve CMOS kamera ile gerçekleştirilen akış görüntüleme deneylerinden akış rejiminin gözlenmesidir. Şekil 4.1-4.5, çalışılan  $Re$  aralığı için belirlenen düzlemlerdeki anlık 128 adet akış görüntüsünün rms (root mean square) ortalamalarından elde edilen zaman-ortalamalı akış görüntülerini göstermektedir.

Bu çalışmada, karışma çemberi iki bölgeye ayrılarak incelenmiştir. İlk bölge jetlerden gönderilen akışkanların buluştuğu ve her iki jetten gelen akışkanın neredeyse sabit güçlü atalet kuvvetlere sahip olduğu karışma düzlemidir. Diğer bölge ise atalet kuvvetlerinin konuma bağlı olarak değiştiği bölgedir (Ek F, video 1 ve video 2). Bu

bağlamda, jetlerin kesit alanı 5 mm x 5 mm olduğu için tabandan itibaren ilk 5 mm, karışma düzlemi olarak tanımlanmıştır. 5 mm yüksekliğinden sonraki herhangi bir yükseklik ise jetlerin akışın davranışını sınırlayamadığı serbest bölge olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1, karışma düzleminde jetlerin farklı  $Re$  sayıları için elde edilen akışın rms görüntülerini göstermektedir.  $Re = 60$ 'ta jetlerin çember içerisinde tam bir tur hareket edebilmesi için yeterli atalet kuvvetinin olmadığı ve jetlerden gelen akışlar arasında ayrışmanın olduğu aşikardır.  $Re = 70$ 'te saat yönünün tersine dönen gazın girdap hareketi ve oluşan vorteks etrafında bir karışma bölgesi olduğu gözlenmektedir. Girdap hareketi, hizasız jetlere sahip vorteks T-mikserlerdeki yapıya benzer tek bir vorteks hareketi oluşumunu içermektedir [50, 53].



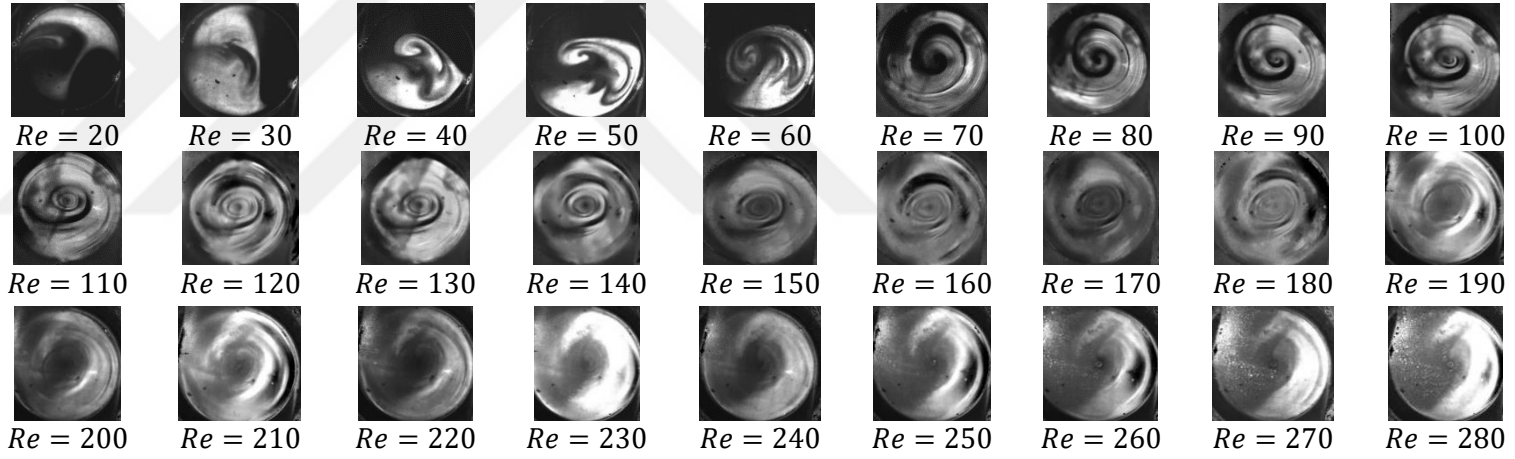
**Şekil 4.1 :** Jetlerin karışma düzlemi bölgesinde  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığındaki zaman ortalamalı akış alanı.

Şekil 4.2'de ise düzlem-1'e ait anlık akış görüntüleri verilmiştir. Düzlem-1'de, girdap vorteks düzeni  $Re = 40$ 'ta tanımlanabilmekte, fakat bu akış hızına kadar jetlerden gelen akışkanın düşük atalet kuvvetleri sebebiyle vorteks akış oluşmamaktadır [46]. Tam bir vorteks rotasyonu ise  $Re = 70$ 'te tek bir vorteks merkezi oluşumu ile gözlenmiştir.  $Re$  sayısının artırılması ile,  $Re = 70$  ve  $Re = 220$  arasında, merkezdeki akış çizgilerinin (flow streamline) izdüşümleri (trajectory) incelenmektedir. Şekil 4.2'de gösterilen,  $Re = 220$ 'deki akış görüntüsü girdap hareketinin akış çizgilerinin kaybolduğunu göstermektedir. Benzer davranış  $Re = 220$  ve  $Re = 280$  arasında da oluşmuştur. Düzlem-1'in değerlendirilmesi yapıldığında, artan  $Re$  sayısı ile akışın iki dönüm noktası belirlenmiştir, birincisi girdap vorteks noktasının başlangıç noktası olan  $Re = 70$  ve ikincisi ise akış çizgilerinin kaybolmaya başladığı ve gazların tamamen karıştığını gösteren  $Re = 220-230$  bölgesidir.

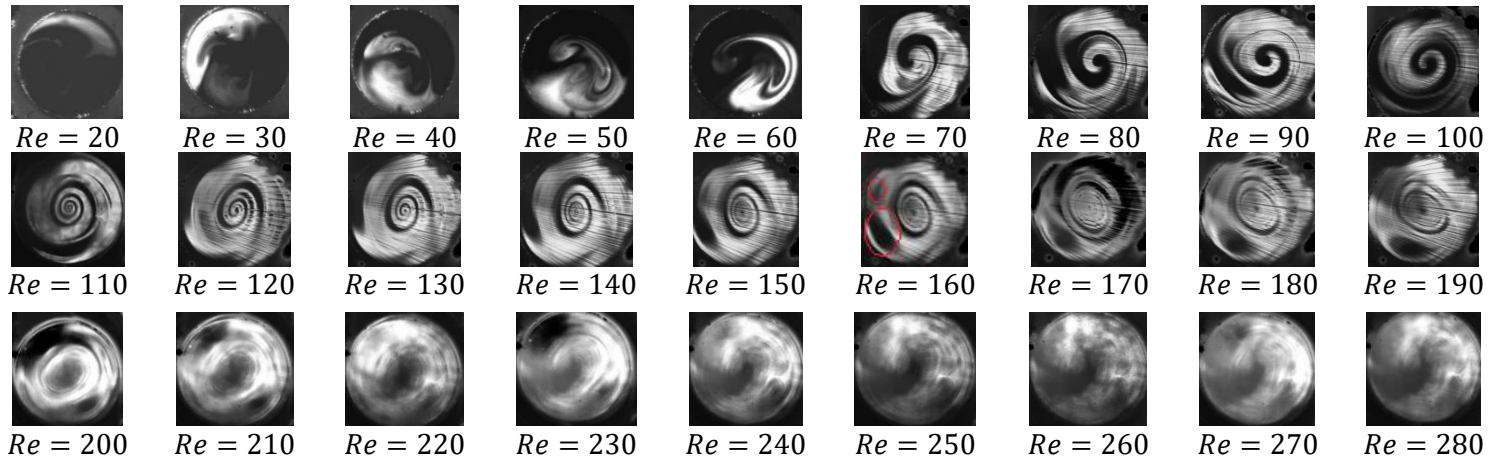
Şekil 4.3 ise, düzlem-2'deki akış görüntülerini göstermektedir. Düzlem-1 ile karşılaştırıldığında akışın geçiş bölgeleri değişmemektedir, ancak bu düzlemde  $Re = 140$  ve  $Re = 230$  aralığında vorteks merkezi etrafındaki eliptik bölgeler gözlenmektedir ( $Re = 160$ 'da gösterilen kırmızı bölge). Bu bölgeler, ölü karışma

bölgeleri olarak bilinmekte ve yörüngesini terketmeyen akış partiküllerinin rotasyonu ile oluşmaktadır [91]. Ancak  $Re$  sayısı arttıkça akış rejimi  $Re = 230$  bölgesinde değişmekte ve bu eliptik bölgeler kaybolmaya başlamaktadır. Jetlerin  $Re$  sayısının artmasıyla oluşan bu akış partiküllerinin yer değiştirmesinin karışma performansını iyileştirdiği bilinmektedir [103]. Şekil 4.4'te gösterilen düzlem-3'e ait akış görüntülerinde ise  $Re = 60$ 'da gelen akışların atalet kuvvetlerinin yarım vorteks profili için yeterli olduğu görülmektedir.  $Re$  sayısının  $Re = 60$  to  $Re = 80$ 'e arttırılmasıyla, ölü karışma bölgeleri olarak bilinen eliptik bölgeler oluşmaya başlamıştır. Düzlem-2'den farklı olarak  $Re = 140$ 'tan sonra ise iki-dört adet eliptik bölge oluşumu tespit edilmiştir ( $Re = 180$ 'de gösterilen kırmızı bölge).  $Re = 250$ 'den sonra ise bu bölgeler kaybolmaya ve akış profili düzlem-1 ve düzlem-2'ye benzemeye başlamıştır. Birinci dönüm noktası olan  $Re = 70$ , bu düzlemde değişmemekle birlikte ikinci dönüm noktası  $Re = 250$ 'ye doğru ilerlemiştir. Şekil 4.5'te ise düzlem-4'e ait akış görüntüleri verilmiştir.  $Re = 90$  ve  $Re = 110$  aralığında akış izdüşümleri daha da incelmış ve eliptik bölgeler görülebilir olmuştur. Vorteks-T mikser çalışmalarında vorteks akış yoğunluğunun çember uzunluğu boyunca azaldığı belirtilmiştir [46]. Fakat, sunulan reaktör geometrisinde vorteks akış etkisinin  $Re = 70$  ve  $Re = 280$  aralığında düzlem-4'e kadar korunabildiği gözlenmiştir.

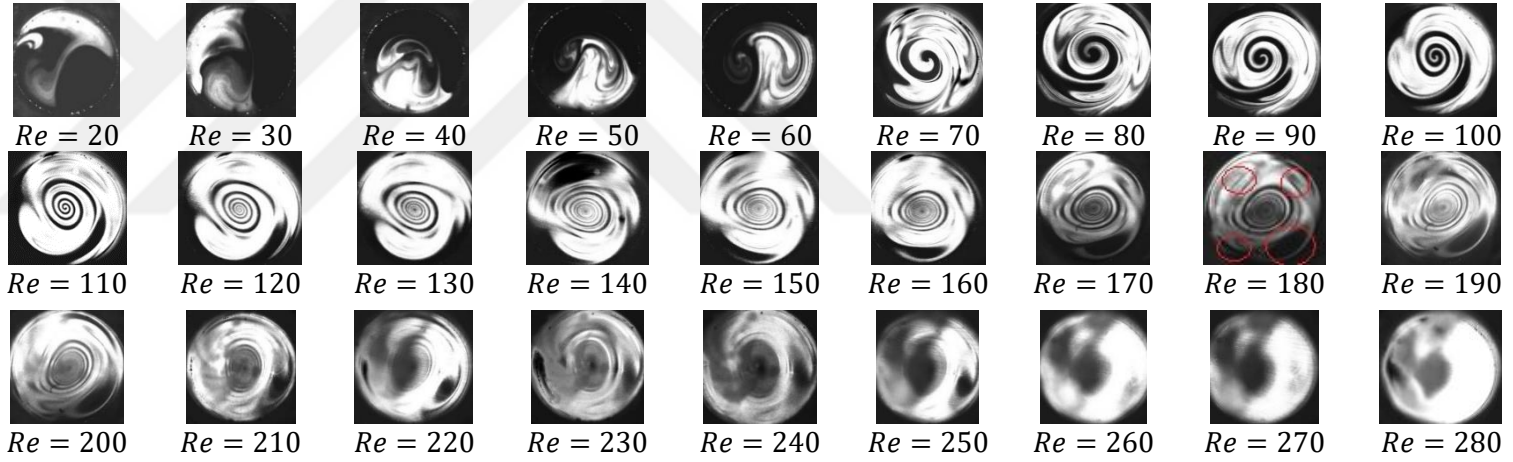
Şekil 4.6 ise çember uzunluğu boyunca akış değişimlerini göstermektedir. Diğer düzlemlere (düzlem-5, düzlem-10, düzlem-15 ve düzlem-20) ait akış görüntüleri de Ekler bölümünde Şekil A.2-Şekil A.5'te verilmiştir. Reaktör çemberinin üst bölgesine doğru dönüm noktaları değişmektedir. Bunun sebebi gaz akışının düşük düzlemlerdekine göre daha düşük atalet kuvvetine sahip olmasıdır. Düzlem-5'e kadar ilk dönüm noktası olan  $Re = 70$  değeri değişmemiştir, ancak ilk dönüm noktaları düzlem-10 ve 15 için  $Re = 80$  ve düzlem-20 için  $Re = 90$  olarak belirlenmiştir. Akışın ikinci kritik dönüm noktası ise düzlem-5'ten daha yukarıdaki düzlemler için  $Re = 250$  ve  $Re = 270$  aralığında değişmektedir. Bunun sebebi düzlem-1 ve düzlem-4 bölgelerinde belirlenen ölü bölgelerin bu  $Re$  sayılarında kaybolmamasıdır.



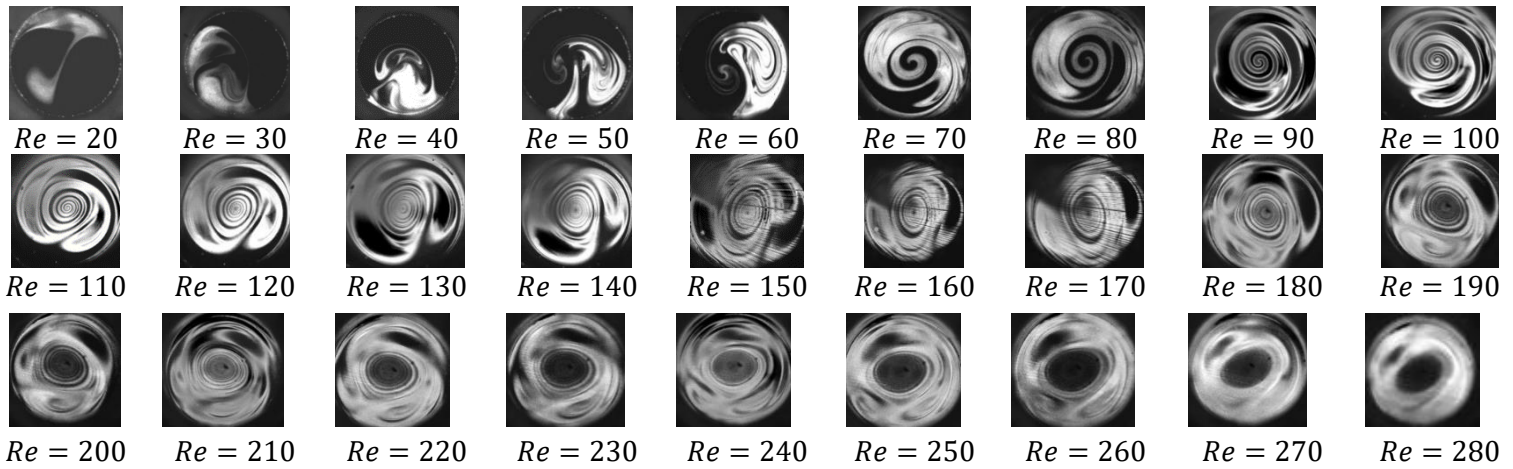
Şekil 4.2 : Düzlem-1'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



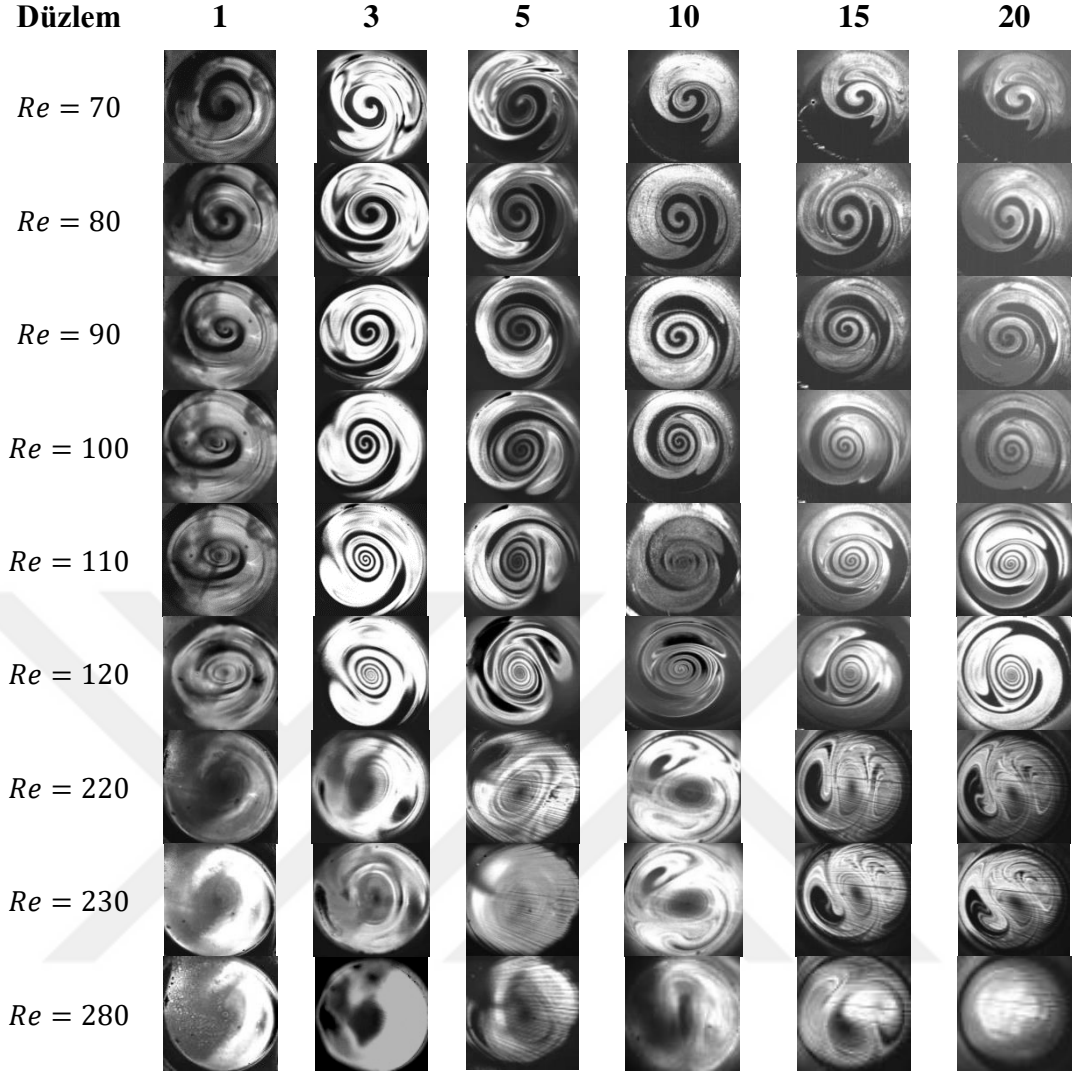
Şekil 4.3 : Düzlem-2'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



Şekil 4.4 : Düzlem-3'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



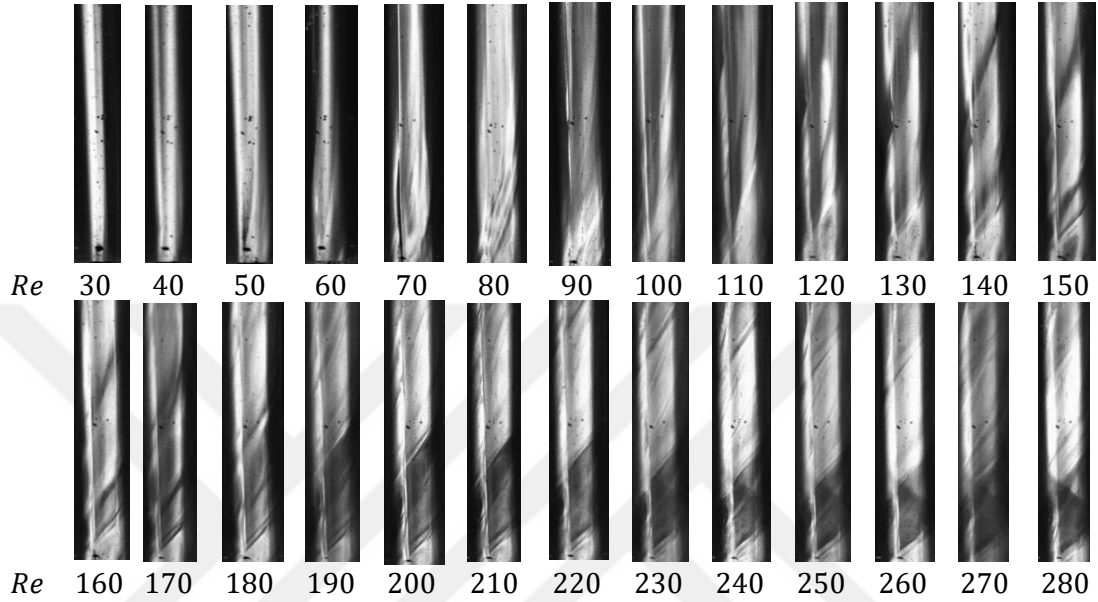
Şekil 4.5 : Düzlem-4'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



**Şekil 4.6** : Çember uzunluğuna göre kritik bölgelerin zaman ortalamalı akış görüntüleri.

Farklı düzlemlerin tabandan akış görüntüleme sonuçlarına ek olarak çemberin karşıdan çekilen akış görüntülerinin de detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Şekil 4.7’de reaktörün tabanından düzlem-5’e kadar karşıdan elde edilen akış görüntüleri  $Re = 30$  ve  $Re = 280$  aralığı için verilmiştir.  $Re = 20$ ’de akış çizgilerinin gözlenmesi zor olduğu için bu  $Re$  değerinin sonuçları verilmemiştir.  $Re = 70$ ’e kadar akış yapısı gaz akışının yetersiz atalet kuvveti sebebi ile neredeyse dümdüz olarak gözlenmiştir.  $Re = 70$ ’de ise Şekil 4.2-4.6 ile tutarlı olarak girdap (swirl) akış davranışı oluşmaya başlamıştır. Düşük  $Re$  sayılarında bile girdap oluşumunun karışmayı iyileştirdiği bilinmektedir [104].  $Re = 70$  ve  $Re = 200$  aralığında ise artan  $Re$  sayısı ile çember içerisinde oluşan girdap sayısı artmaktadır. Diğer bir deyişle gaz hızının artışı girdap açısının azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple  $Re = 90$ ’da

yalnızca bir adet spiral hareketi gözlenirken,  $Re = 200$ 'de spiral hareketi sayamayacak kadar fazladır. Girdap sayısı arttıkça karışma verimliliğinin de arttığı bilinmektedir [104]. Şekil 4.7 gelen jetlerin akış yapısını bütünüyle inceleyebilmek için ilk 5 cm çember yüksekliğini içermektedir, bütün çemberin karşıdan akış profili ise Ekler bölümünde video olarak verilmiştir (Ek F, video 3).



Şekil 4.7 : rz düzleminde farklı  $Re$  sayıları için elde edilen akış görüntüleri.

### Zamana bağlı akış görüntüleme

Zaman ortalamalı görüntüleme sonuçları (Şekil 4.1-4.7) akışın ortalama davranışını gösterdiği için anlık akış görüntülerinin de incelenmesi gerekmektedir. Zaman ortalamalı akış görüntülerinden belirlenen dönüm noktaları için belirli zamanlardaki anlık görüntüler Şekil 4.8'de verilmiştir. Zaman ortalamalı akış görüntüleri ve Şekil 4.8 incelendiğinde, çalışılan gaz vorteks mikserin akış rejimi 3 bölge olarak sınıflandırılmıştır.  $Re < 70$ 'te duman enjekte edilmiş akış, çemberin bir bölgesinde yoğunlaşmıştır ve henüz çemberin içerisinde bir tam tur dönebilecek atalet kuvveti yoktur (Ek F, video 4). Bu bölge ayrık (segregated) akış rejimi yerine tabakalı (stratified) akış rejimi olarak tanımlanmıştır. Çünkü CIJ'lerde gözlemlendiği gibi akış çizgilerinin kesin bir ayrımı yoktur. Hizalanmamış T-jet reaktörlerin aksine [52, 53] vorteks akışı  $Re = 70$ 'te oluşmaktadır.  $70 \leq Re \leq 230$  aralığında akış çizgilerinin vorteks hareketi gözlemlenebilmektedir (Ek F, video 5). Bu bölgede, akışın radyal salınımları düzenli bir şekilde olmakta ve akış herhangi bir aksel salınım tarafından bozulmamaktadır. Bu durum, gazların karışma mekanizmasının  $Re = 230$ 'a kadar

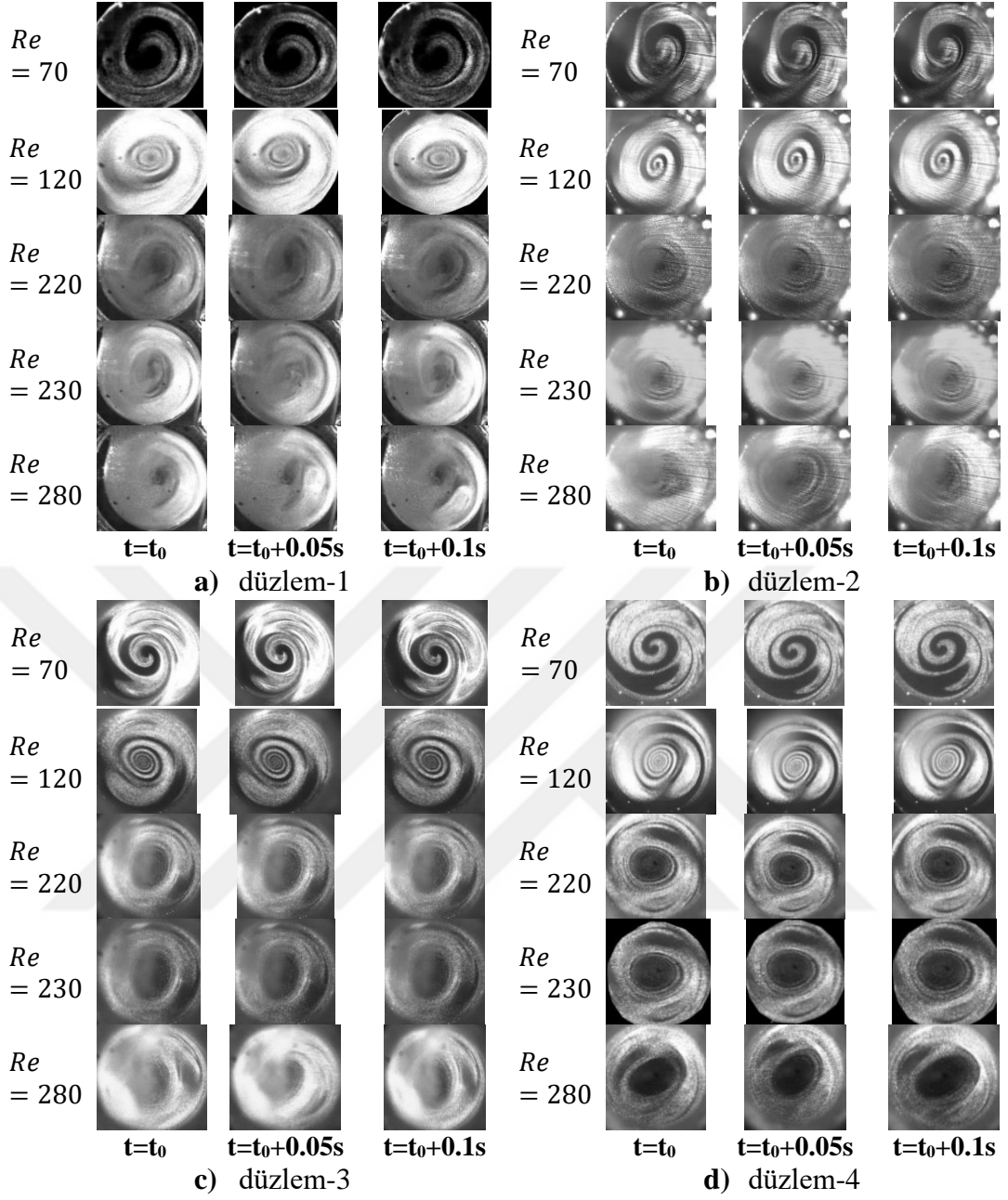
difüzyon bağımlı olduğunu göstermektedir.  $Re = 220-230$  civarında ise akış düzensiz olmaya başlamakta ve salınım frekansları artmaktadır (Ek F, video 6 ve video 7). Bu noktadan sonra ise, sınır tabakası kalınlığı azalmaya başlamakta ve taşınım mekanizması difüzyondan daha baskın olmaktadır. Düzensiz akış davranışı ve kısalmış akış çizgilerinin oluşması bu akış rejimi bölgesinde gözlenmektedir. Bu akış rejimi kararsız yutulma akış rejimi olarak tanımlanmıştır.

### **Akış alanı karakterizasyonu**

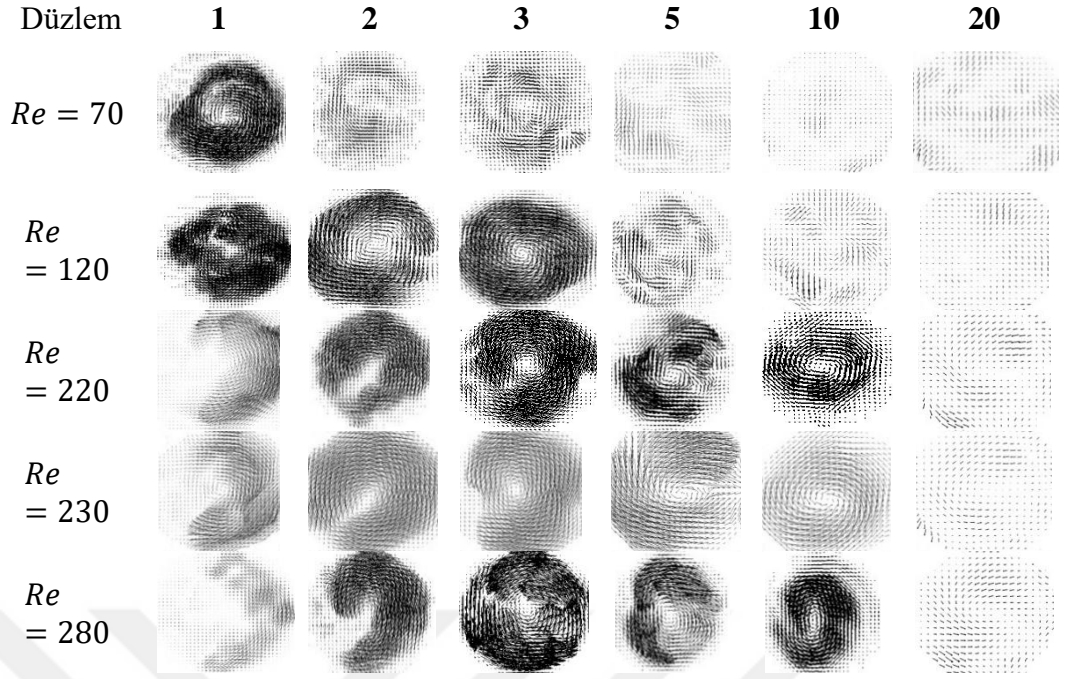
Zaman ortalamalı ve anlık akış görüntülerinden akışın kritik değerleri belirlenmesine rağmen, vorteks çemberdeki gaz akış hidrodinamiklerinin tamamıyla değerlendirilmesi için PIV ölçümlerinden elde edilen hız vektörleri ve türbülans yoğunluğu değerlerinin de incelenmesi gerekmektedir.

Şekil 4.9, akış görüntüleme deneyleri sonucunda belirlenen kritik bölgeleri kapsayan  $Re$  sayılarının zaman ortalamalı hız vektör haritalarını göstermektedir. Vektör haritalarına göre akışın ana karakteristiği jetlerden gelen akışın çember duvarı boyunca gerçekleştirdiği teğetsel akıştır. Gaz akışı çember uzunluğu boyunca ilerledikçe (düzlem-1'den düzlem-20'ye doğru), hız vektörleri ve radyal yöndeki hızlar küçülmektedir. Bunun sebebi akışın burada laminar bölgede olması ve atalet kuvvetini kaybetmesidir. Bu durum düşük  $Re$  sayılarında daha düşük çember yüksekliklerinde gerçekleşirken ( $Re = 70$  için düzlem-3'te), daha yüksek  $Re$  sayılarının laminar bölgeye ulaşması daha uzun mesafe gerektirmektedir ( $Re = 280$  için düzlem-20'de).

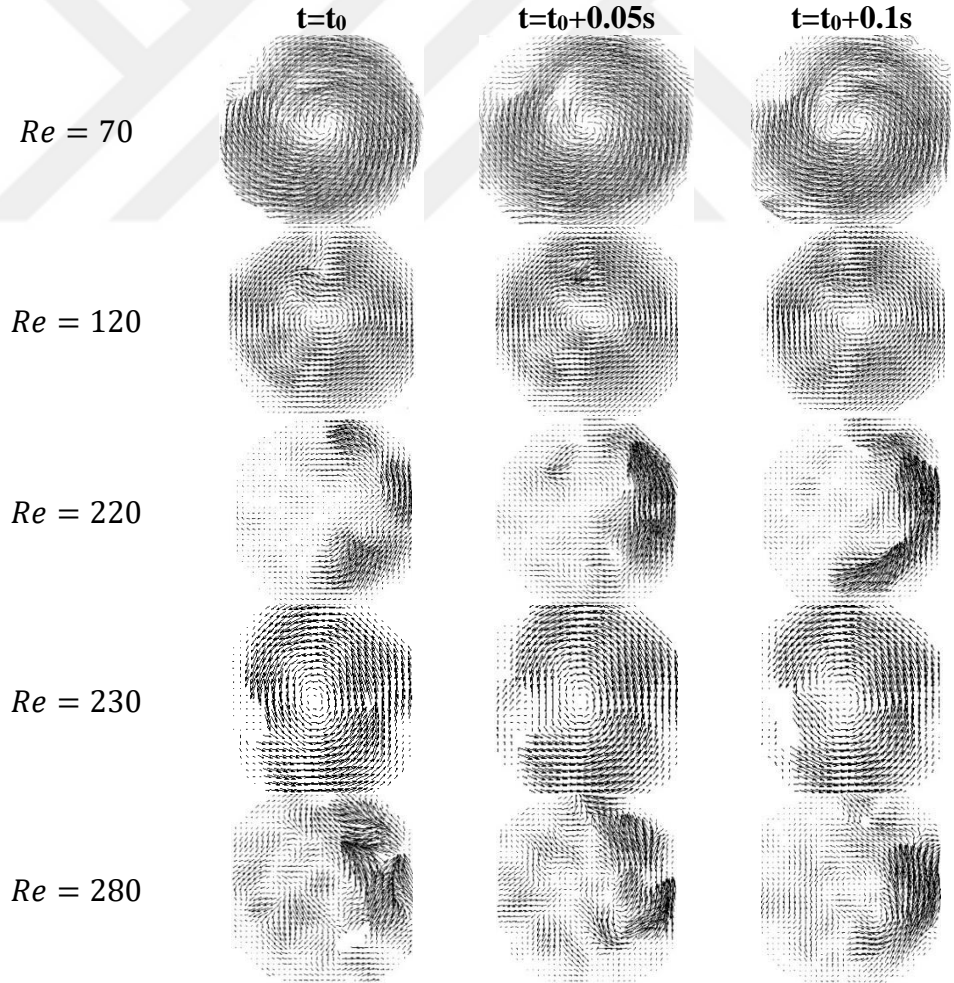
Şekil 4.10'daki anlık hız vektör haritalarında ise akış alanının  $Re = 230$ 'dan  $Re = 280$ 'ye doğru değiştiği görülmektedir.  $Re = 70$  ve  $Re = 120$ 'deki hız vektör haritaları ise zamana bağlı değişmemektedir. Jetlerin teğetsel akışı ile girdap hareketi oluştuktan sonra çember boyunca korunmaktadır. Benzer davranış aynı şekilde  $Re = 220$  ve  $Re = 230$  için de gözlenmiştir. Akış rejimi değişimi bu bölgede başlamasına rağmen akış profilinin büyük değişimi kaotik rejim bölgesi olarak tanımlanan  $Re = 280$ 'de gözlenmiştir.



**Şekil 4.8 :** Akışın belirlenen kritik bölgelerinin anlık görüntüleri a) düzlem-1 b) düzlem-2 c) düzlem-3 d) düzlem-4.



**Şekil 4.9 :** Akışın belirlenen kritik noktalarının zaman ortalamalı hız vektörleri.

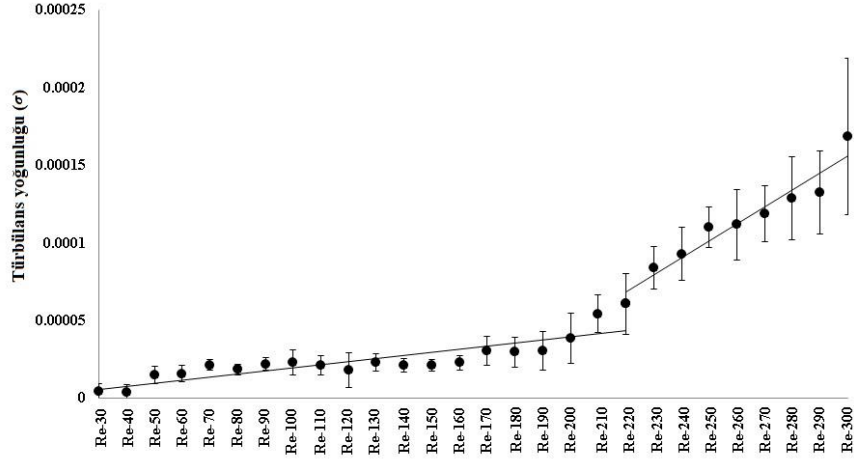


**Şekil 4.10 :** Akışın belirlenen kritik noktaları için anlık hız vektörleri (düzlem-3).

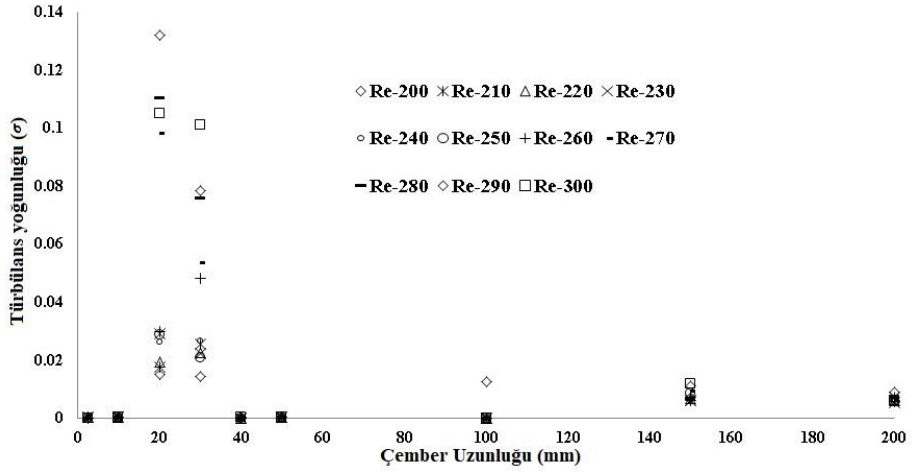
## Türbülans karakteristikleri

Akış hızının gaz akış hidrodinamikleri üzerindeki etkisi hız dalgalanmaları ile karakterize edilebilmektedir. Buna ek olarak, hız dalgalanmalarından hesaplanan türbülans yoğunluğu akış rejimi değişikliklerini belirlemek için önemli bir parametredir. Şekil 4.11, boyutsuz türbülans yoğunluğu değerlerini  $Re$  sayısının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Türbülans yoğunluğu değeri  $Re = 220$  ve  $Re = 230$ 'a kadar sabit olmasına karşın, bu noktadan sonra akış içerisindeki hız dalgalanmalarının etkisi ile artmaya başlamıştır. Şekil 4.11'de iki akış rejimi bölgesi kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bunlardan birincisi türbülans yoğunluğunun  $Re$  ile değişmediği kararlı bölge, ikincisi ise türbülans yoğunluğunun artan  $Re$  ile arttığı bölgedir. Bu iki bölgenin kesişim noktası ise akışın kritik  $Re$  sayısını vermektedir ki bu değer Şekil 4.11'den görüldüğü üzere  $Re = 230$ 'dur. CIJ reaktörlerde karışma kalitesi jetlerin  $Re$  sayısına bağlı akış rejimi geçişlerinde artmaktadır [32, 43]. Benzer olarak bu çalışmada sunulan vorteks reaktör geometrisinde de karışma hidrodinamikleri akışın görüntüleme ve türbülans yoğunluğu ölçümlerine bağlı belirlenen kararsız akış rejimi oluşumu ile iyileşmektedir [105].

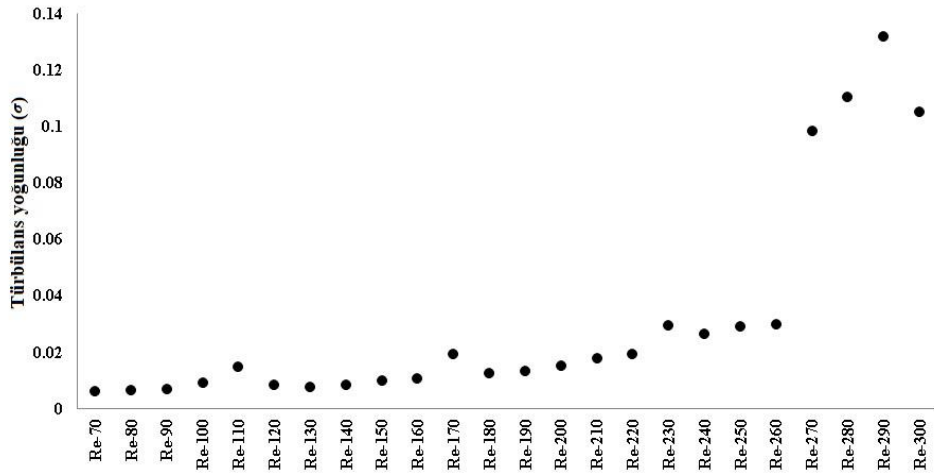
Şekil 4.12 ise radyal düzlemlere bağlı türbülans yoğunluğu değişimini göstermektedir. Ana gaz akış hidrodinamiklerinin  $10 \text{ mm} < L_c < 40 \text{ mm}$  aralığında olduğu gözlenmiştir. Akışın girdap hareketi jetlerden gönderilen gaz akışının atalet kuvvetlerine bağlı oluşmaktadır. Bu girdap hareketi artan türbülans yoğunluğu ile akışın gaz akış hidrodinamiklerini iyileştirmektedir [58]. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te ise düzlem-2 ve düzlem-3'teki türbülans yoğunluğu değerleri verilmiş ve kritik  $Re$  sayıları buralarda sırasıyla  $Re = 270$  ve  $Re = 260$  olarak belirlenmiştir.



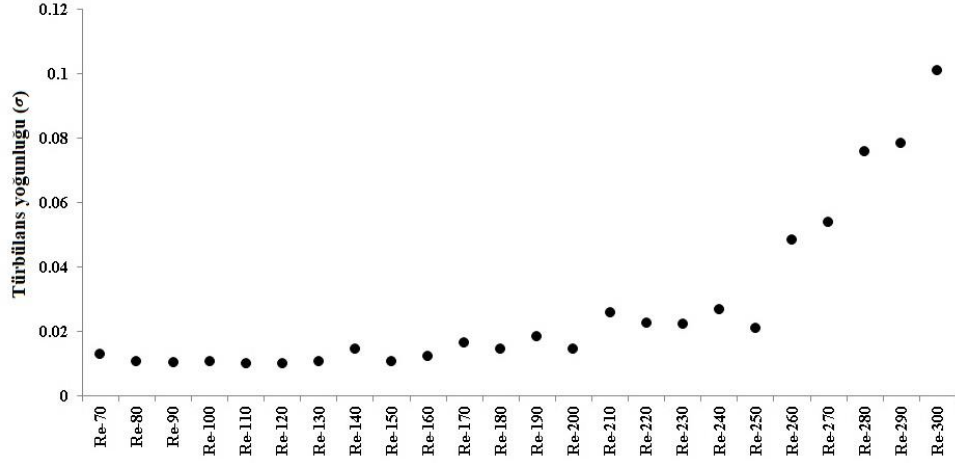
Şekil 4.11 : rz düzleminde  $Re = 30$  to  $Re = 300$  aralığında belirlenen boyutsuz türbülans yoğunluğu değerleri.



Şekil 4.12 : Çember uzunluğu boyunca boyutsuz türbülans yoğunluğu.



Şekil 4.13 : Düzlem-2'deki boyutsuz türbülans yoğunluğu değerleri.



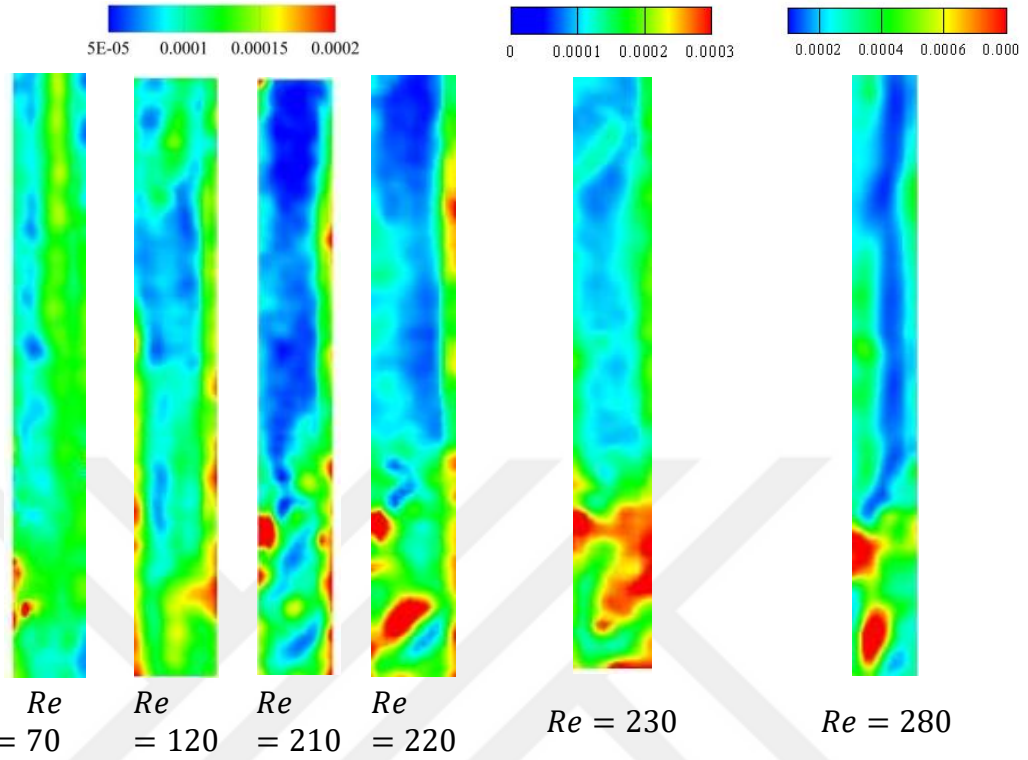
Şekil 4.14 : Düzlem-3'teki boyutsuz türbülans yoğunluğu değerleri.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da ise  $Re$  sayısı etkisini gözlemlemek için türbülans yoğunluğu kontur haritaları verilmiştir. Kontur haritalarındaki kırmızı renk yüksek hız dalgalanmalarına sahip yüksek türbülans yoğunluğu bölgelerini gösterirken, mavi renk düşük bölgeleri göstermektedir. Çember içerisindeki hız dalgalanmalarının oluşumu akışkan akımlarının komşu bölgelere transferi ile gaz akış hidrodinamiklerini geliştirdiği için yüksek oranda tercih edilmektedir [46, 43, 47, 53].

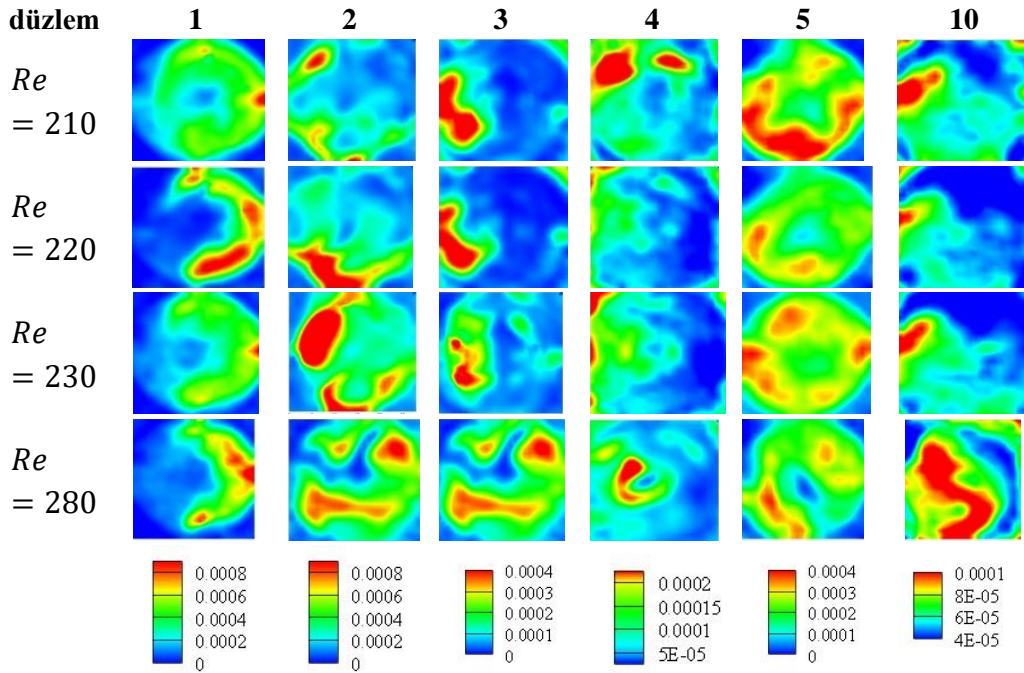
Çemberin karşıdan görüntülerinden elde edilen türbülans yoğunluğu haritalarına göre,  $Re = 70$ 'te akış dalgalanmaları girdap hareketinden dolayı genellikle  $z$  eksenini boyunca oluşmaktadır (Şekil 4.15).  $Re = 230$  ve  $Re = 280$ 'de görüldüğü üzere akışın kritik bölgesinden sonra ise akış dalgalanmaları artmaktadır. Kritik bölgeye kadar ise ( $Re = 210$  ve  $Re = 220$ ) akış vorteks hareketini koruyabilmek için teğetsel bir şekilde dalgalanmaktadır. Genel olarak, bütün  $Re$  değerlerinde, daha yüksek türbülans yoğunluğu bölgeleri zorlanmış vorteks bölgesi olarak tanımlanan düzlem-4'ten daha düşük yüksekliklerde gözlenmektedir. Daha düşük türbülans yoğunluğu bölgeleri ise daha yüksek düzlemlerde gözlenmekte ve bu düzlemler serbest vorteks bölgesi olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 4.16 ise kritik  $Re$  sayısından sonra farklı düzlemlerdeki türbülans yoğunluğu değişimini göstermektedir. Kritik bölgeden sonra türbülans yoğunluğu değerlerinin artan yöndeki eğilimi açıkça görülmektedir. Düzlem-3'te,  $Re = 230$  ve  $Re = 280$  değerlerindeki kontur seviyeleri  $Re = 210$  ve  $Re = 220$ 'nin iki katıdır. Ayrıca düzlem-4'te ise  $Re = 280$  kontur seviyesi aynı düzlemdeki diğer  $Re$  sayılarının iki katıdır. Bu bağlamda, haritaların altındaki kontur seviyelerinden de anlaşılacağı gibi,

laminar akış oluşumu nedeniyle daha yüksek türbülans yoğunluklu bölgeler çember uzunluğu ile azalmaktadır.



Şekil 4.15 :  $rz$  düzleminde kritik bölgelerin karşıdan görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları.



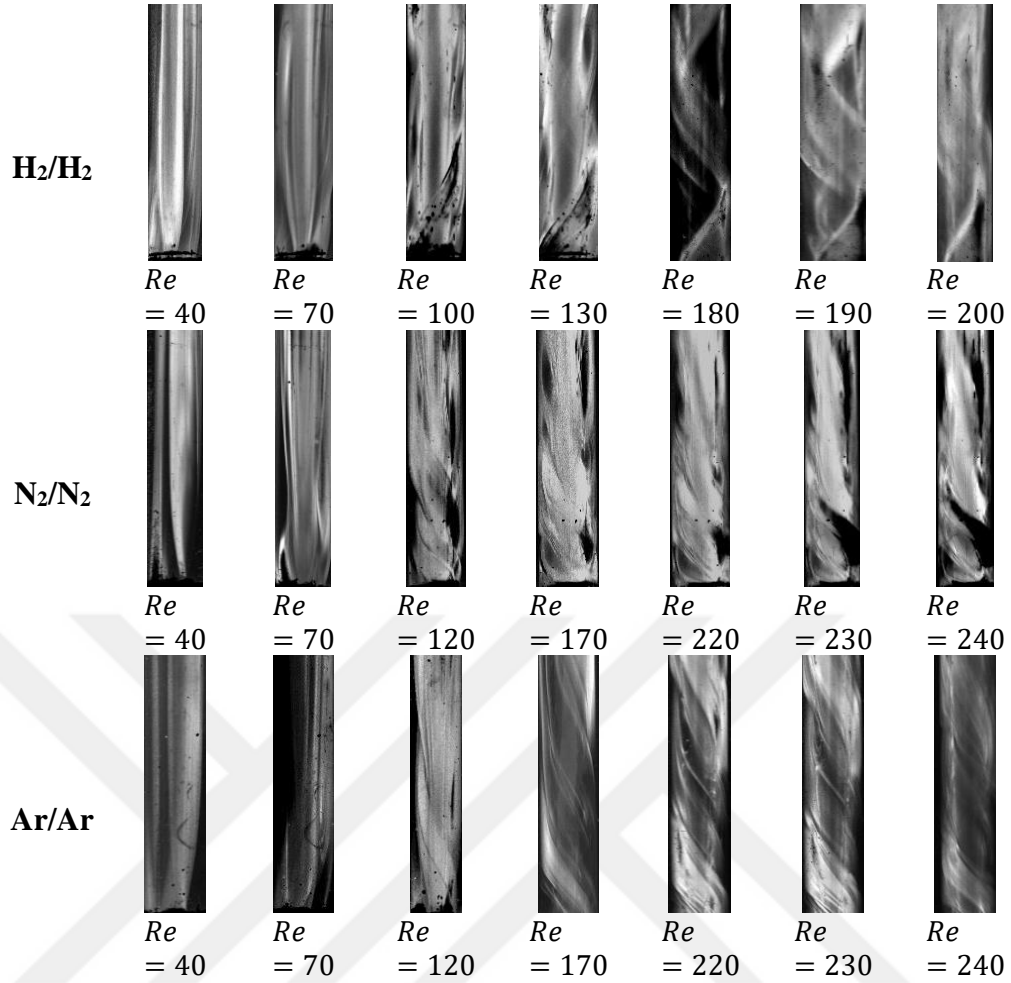
Şekil 4.16 : Kritik bölgelerin taban görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları.

#### 4.1.1.2 Gaz fiziksel özelliklerinin etkisi

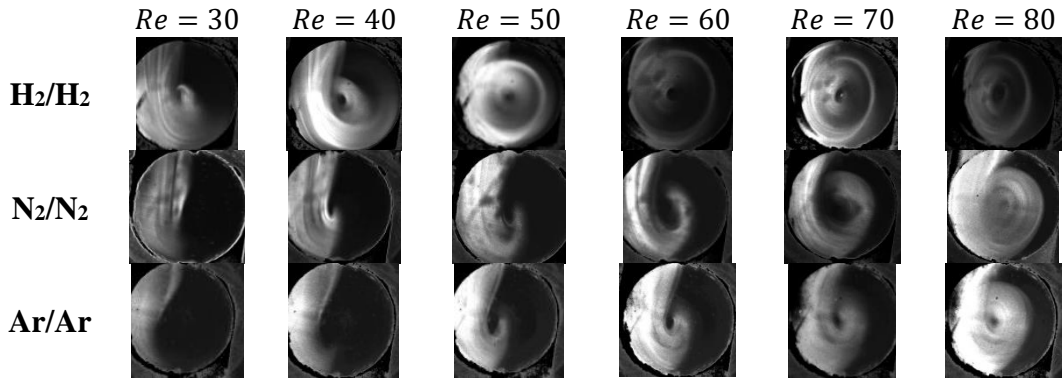
Vorteks mikser içerisinde jetlerin her birinden benzer gazlar gönderilerek gazların fiziksel özelliklerininin karışma hidrodinamikleri ve akış rejimi mekanizmaları üzerindeki etkileri akış görüntüleme ve PIV akış alanı karakterizasyonu deneyleri sonucunda karşılaştırılmıştır.

#### Zaman ortalamalı akış görüntüleme

H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Ar/Ar gazlarının zaman ortalamalı akış davranışları vorteks çemberin hem karşıdan hem de tabandan elde edilen görüntüleri ile analiz edilmiştir. Şekil 4.17, seçilen *Re* sayıları için 10 mm x 50 mm düzleminin karşıdan zaman ortalamalı akış görüntülerini göstermektedir. Azot ve argon gazlarının akış çizgileri *Re* = 70'e kadar çizgi-benzeri akış gibi oldukça düzdür. Ancak hidrojenin akışındaki girdap oluşumu *Re* = 40'ta dahi gözlemlenmektedir (Şekil A.6). Karışma düzleminin (10 mm x 10mm) görüntülerine göre de hidrojen gazı *Re* = 40'ta çemberdeki tam rotasyonunu tamamlarken, azot ve argon gazları ise *Re* = 70'de tam rotasyon gerçekleştirmektedir. Bu noktalarda bütün gazların dinamik basınçları çok benzerdir. Bu *Re* değerlerinin altında ise gazların çember içerisindeki akışları ayrılmıştır. *Re* = 140 – 150 değerlerinde hidrojenin akış çizgileri düşük akış hızlarındaki gibi keskin değildir ve akış çizgilerinin birbiri içine geçmiş yapısını gözlemlemek mümkündür. Ancak argon ve azot gazları için bu durum *Re* = 210 – 230 değerlerinde tespit edilmiştir. Dahası, hidrojenin akış profili argon ve azotunkinden oldukça farklıdır, hidrojen akış profili daha büyük açıya sahip vidaya benzer bir akış profili gösterirken, azot ve argon gazları daha küçük açılı ve kuvvet uygulanmış yay formuna benzer akış profili göstermektedir.



**Şekil 4.17 :** *rz* düzleminde çeşitli *Re* sayıları için zaman ortalamalı akış görüntüleri.



**Şekil 4.18 :** Jetlerin karışma bölgesi için zaman ortalamalı akış görüntüleri.

Taban akış görüntüleme deneyleri ise 10 mm ile 200 mm yükseklikleri arasındaki çember yüksekliklerini içermektedir. Düzlem-4'teki gaz akış davranışları Şekil 4.19'da karşılaştırılmıştır. Diğer düzlemlere ait sonuçlar Ekler bölümünde verilmiştir (Şekil A.7-A.13). *Re* = 100'de hidrojen akışında akış çizgileri yok olmakta ve vorteks merkezi etrafındaki eliptik bölgeler oluşmaya başlamaktadır. Bu durum artan *Re* sayısı ile taşınım davranışının iyileştiğini göstermektedir. Karışma düzleminde (Şekil

4.18'de) gösterilen azot ve argon akışları arasındaki benzerlik, daha yüksek radyal düzlemlerde de gözlemlenmiştir. Azot ve argon gazlarının duman enjekteli gaz akışı  $Re = 30$ 'da çemberin bir kısmında kalırken,  $Re = 70$ 'te tam girdap dönüşü elde edilmiştir.  $Re$  sayısının daha da artmasıyla akış çizgileri daha incelmış ve  $Re = 220$  civarına kadar eliptik bölgeler oluşmuştur. Artan  $Re$  sayısı ile akışın gelişimi azot ve argon gazları için birbirine çok benzerdir; çember içerisinde sadece hafif dönme farklılıkları gözlenmektedir. Ayrıca bu akışlarda girdap merkezinin girdap merkezi etrafında çok küçük bir eksende gezinme hareketi yaptığı da tespit edilmiştir.

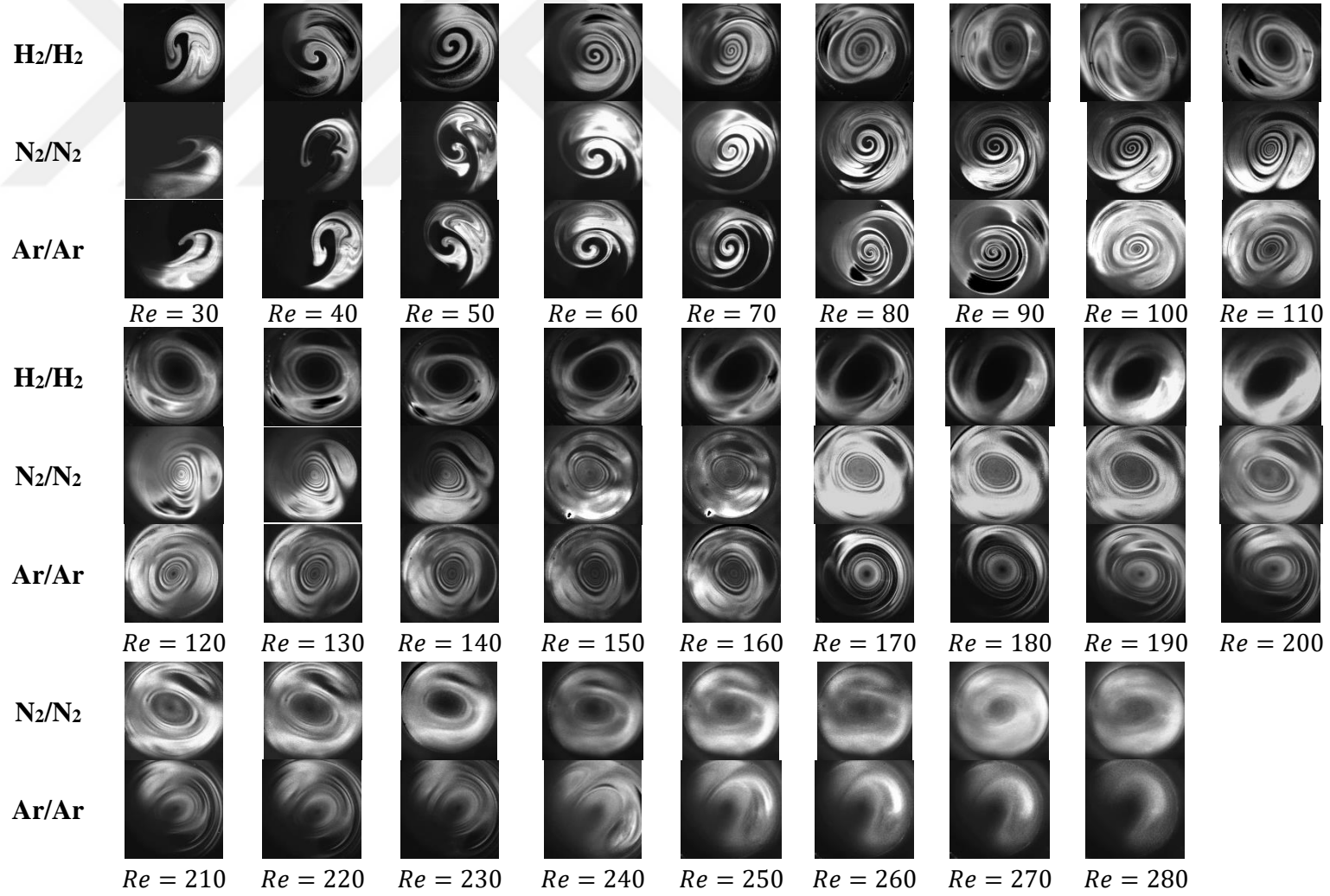
Şekil 4.20, gaz akışlarının belirlenen dönüş noktaları için çember uzunluğuna göre akış değişimlerini göstermektedir. Gazların her biri için ilk dönüş noktasının kararlılığı ( $Re_{H_2} = 40$ ,  $Re_{N_2,Ar} = 70$ ) düzlem-20'ye kadar korunmuştur. Girdap hareketi nedeniyle, tüm ölçüm düzlemlerinde tek bir vorteks gözlemlenmiştir ve vorteks hareketi çemberin sınırlı geometrisi nedeniyle karışma çemberi boyunca devam etmiştir [59, 106, 107]. Düzlem-5 ve düzlem-20 arasında ise hidrojen için  $Re = 90$ 'da, azot ve argon için  $Re = 120$ 'de iki-dört adet eliptik nokta gözlenmiştir. Bu düşük akış hızlarında gaz karışımı sadece kısa ara yüzeylerde difüzyon nedeniyle meydana geldiğinden, bu eliptik noktalar sıvı parçacıklarının dönmesinden ve gaz karışımının iyileştirilmesinden sorumludur [103]. Gaz akışının  $Re = 150$ 'deki ikinci dönüş noktasından sonra hidrojen için ve  $Re = 220$ 'de azot ve argon için, akış çizgilerinin kaybolması ve çemberin dumanla dolu olarak gözlenmesi düzlem-5'ten sonra gaz akışlarının daha iyi karışmasının bir sonucudur.

### **Zamana bağlı akış görüntüleme**

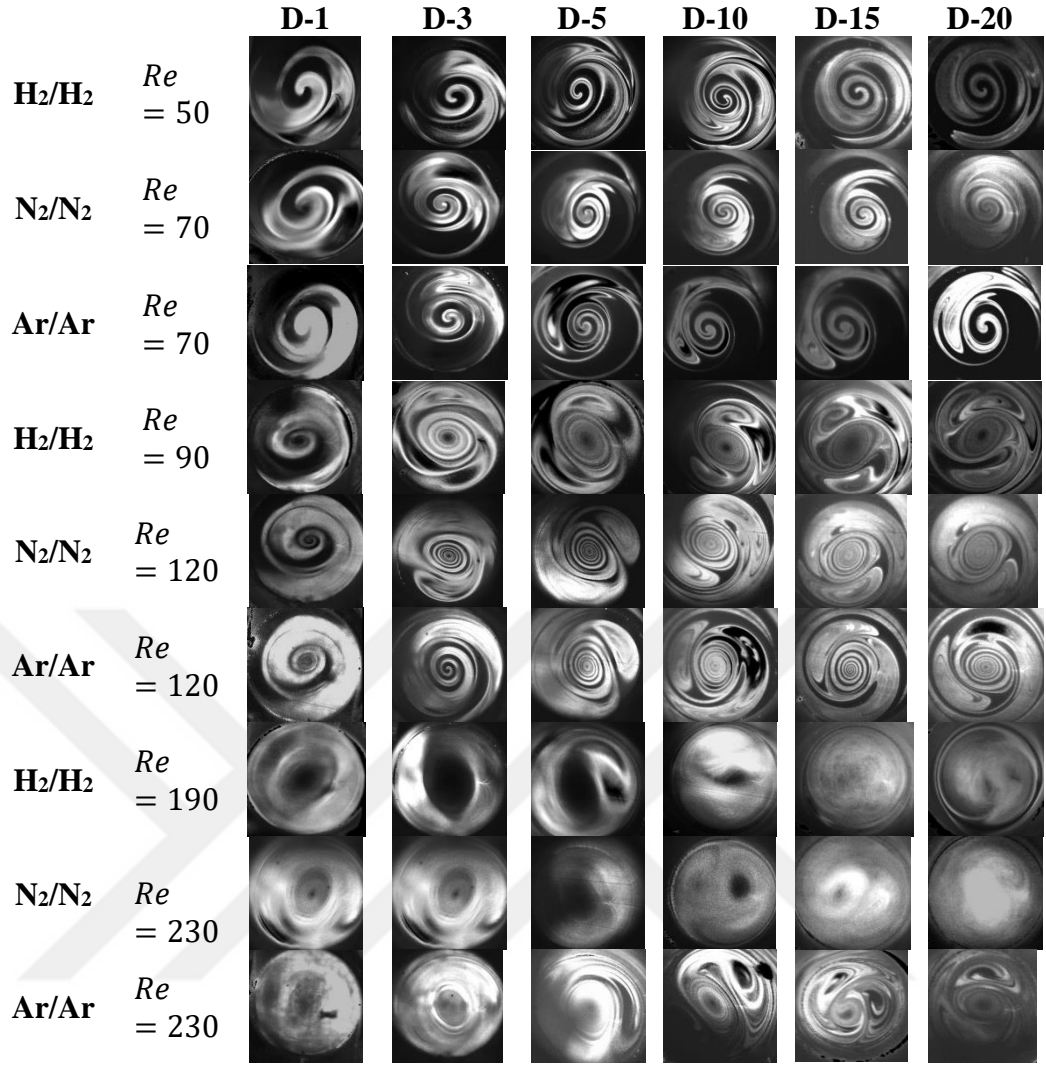
Şekil 4.21, düzlem-4 için hidrojen, azot ve argon gazlarının anlık akış görüntülerini göstermektedir. Kararlı akış rejiminin kaotik akış rejimine dönüştüğü her bir gaz akışı için kritik  $Re$  sayısı tayini, zaman ortalamalı akış görüntülerine göre yapılmıştır (Şekil 4.19 ve 4.20). Zaman ortalamalı sonuçlara göre, hidrojen gazı akışının iki kritik noktası vardır. Birincisi, gaz akışının tam bir dönüşe sahip olmak için yeterli atalet kuvvetine sahip olduğu  $Re = 40$ , ikincisi ise akış çizgilerinin kaybolmaya başladığı ve hem radyal hem de aksenal salınımların oluştuğu  $Re = 150$ 'dir. Bu, akışın farklı zamanlarda  $Re = 40$  ve  $Re = 150$ 'de kararlı olduğu ve  $Re = 150$  ile  $Re = 200$  arasındaki girdap merkezi etrafındaki gaz akışı salınımları nedeniyle akışın kararsız olduğu anlık görüntülerle tutarlıdır (Ek F, video 8). Azot ve argon için  $Re =$

70 ve  $Re = 120$ 'de kararlı akış rejimi gözlenirken,  $Re = 200$  ve  $Re = 220$ 'de kararsız akış rejimi oluşumu başlamıştır (Ek F, video 9 ve 10). Önerilen bu vorteks mikser geometrisinde hidrojen, azot ve argon için akış rejimi üç bölgede sınıflandırılmıştır: Tabakalı akış rejimi, vorteks akış rejimi ve kararsız yutulma akış rejimi (Çizelge 4.1) [32, 43]. Tabakalı ve vorteks akış rejimlerinde, karışma davranışı moleküler difüzyona bağlıdır. Hız arttıkça, akışın kritik  $Re$  sayısından sonra eksenel kararsızlıklar oluşmakta ve dolayısıyla karışım fenomeni taşınım mekanizması tarafından baskın olmaktadır [68, 69].

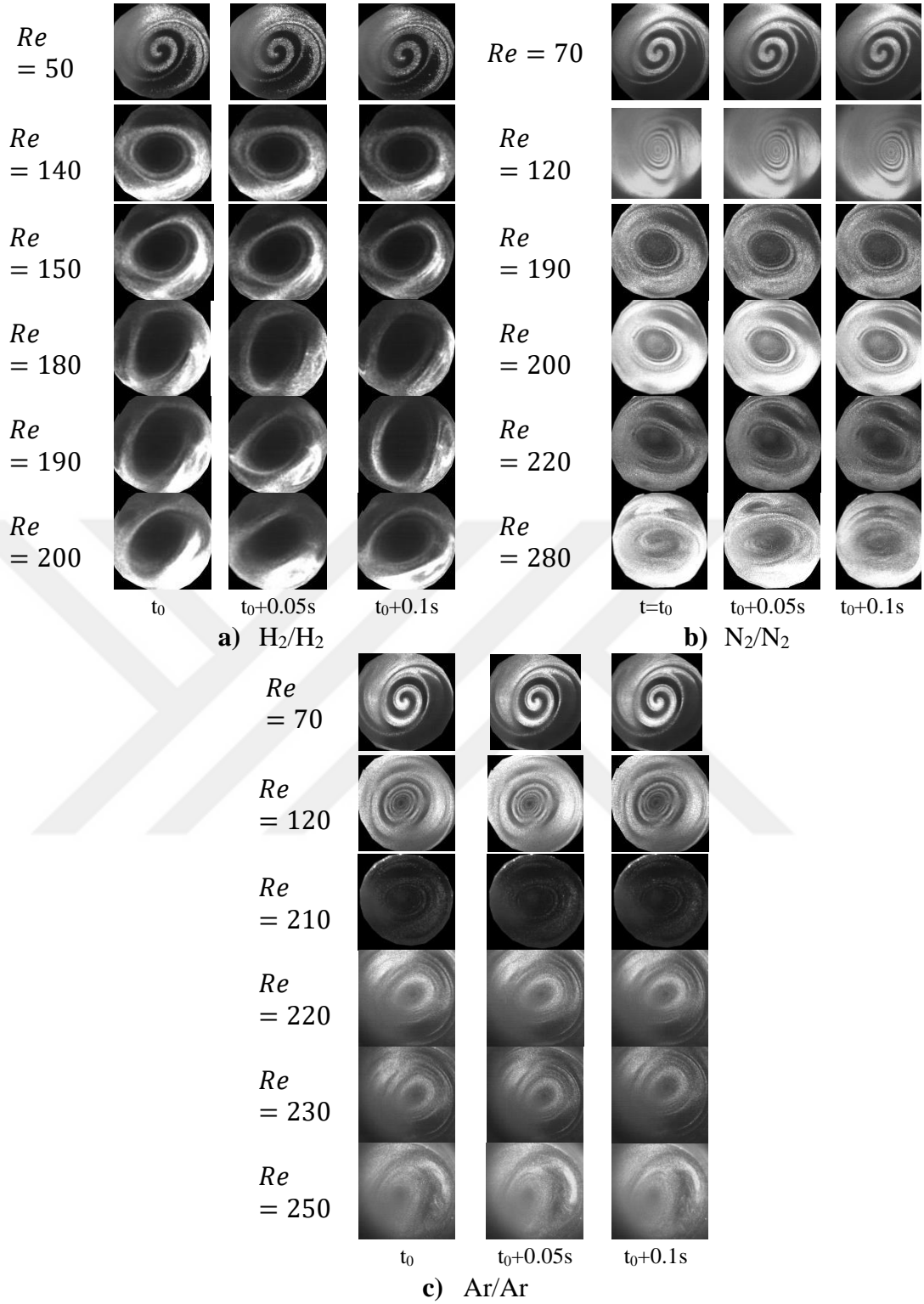




Şekil 4.19 : Düzlem-4'te  $Re = 30$  ve  $Re = 280$  arasındaki zaman ortalamalı akış görüntüleri (rms).



Şekil 4.20 : Çember uzunluğuna göre zaman ortalamalı akış görüntüleri (D: Düzlem).



Şekil 4.21 : Düzlem-4'teki anlık akış görüntüleme sonuçları.

Çizelge 4.1 : Akış rejimi geçişlerinin karşılaştırılması.

|           | Tabakalı akış rejimi | Vorteks akış rejimi   | Kararsız yutulma akış rejimi |
|-----------|----------------------|-----------------------|------------------------------|
| $H_2/H_2$ | $< Re = 50$          | $50 \leq Re \leq 140$ | $\geq Re = 150$              |
| $N_2/N_2$ | $< Re = 70$          | $70 \leq Re \leq 190$ | $\geq Re = 200$              |
| $Ar/Ar$   | $< Re = 70$          | $70 \leq Re \leq 210$ | $\geq Re = 220$              |

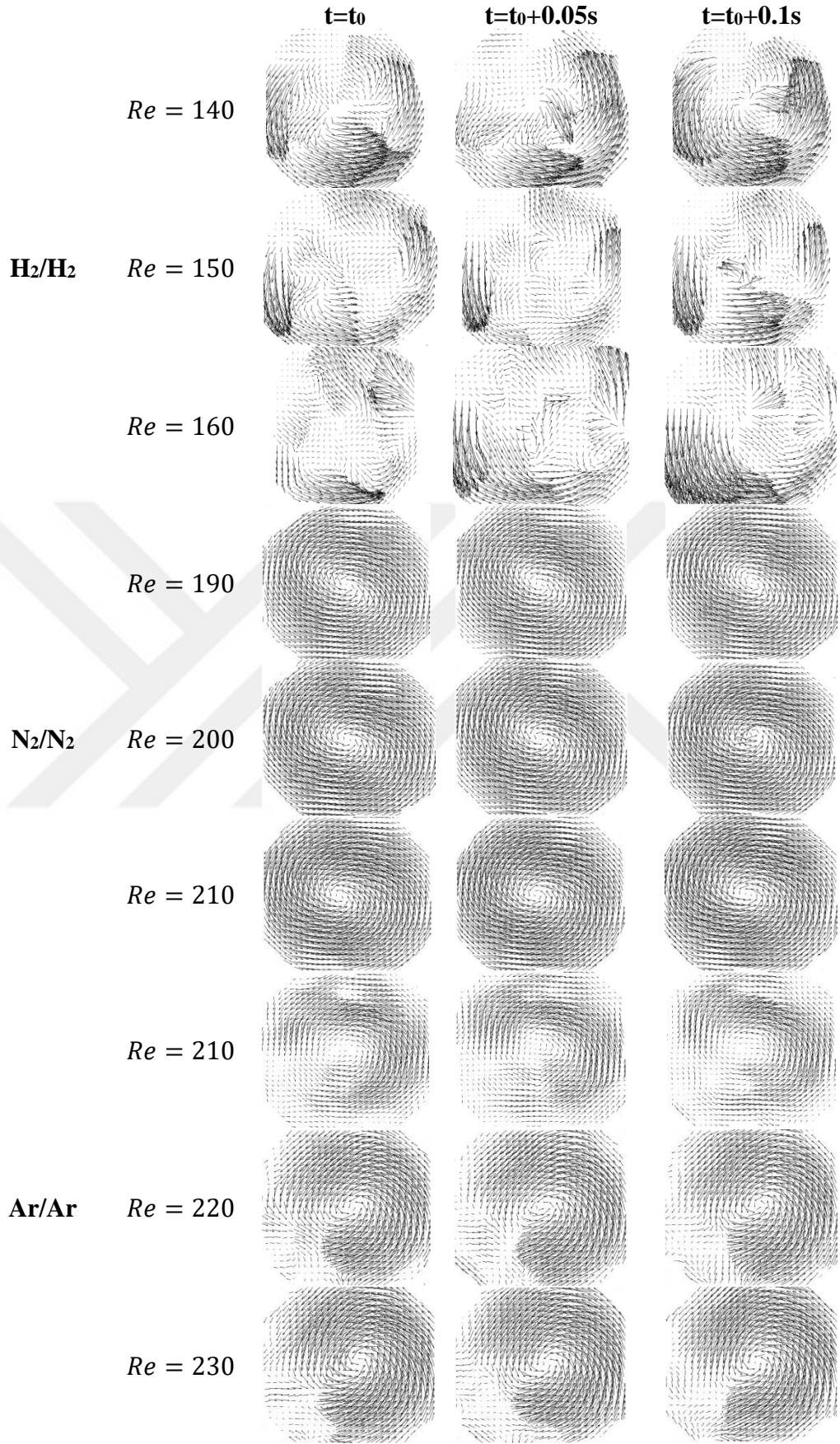
### **Akış alanı karakterizasyonu**

PIV ölçümlerinden, akışların belirlenen noktaları için hız vektör haritaları oluşturularak zaman ortalamalı ve anlık akış alanı karakterizasyonları yapılmıştır. Eklerdeki Şekil A.14, çember uzunluğuna göre belirlenen üç akış rejimi bölgesine atıfta bulunarak, seçilen  $Re$  sayılarının zaman ortalamalı akış alanını göstermektedir. Her bir gaz akışı için bu  $Re$  sayılarındaki akış alanının ana karakteristiği, gelen jetlerin teğetsel akışıdır. Girdap davranışı jetlerin teğetsel akışıyla ortaya çıktığında, çember uzunluğu boyunca korunmaktadır. Gaz akışı çember uzunluğu boyunca hareket ettikçe, gelen jet akışları atalet kuvvetlerini kaybetmekte ve akış laminer hale gelmektedir, bu durumda radyal yöndeki vektörlerde görülmemektedir.

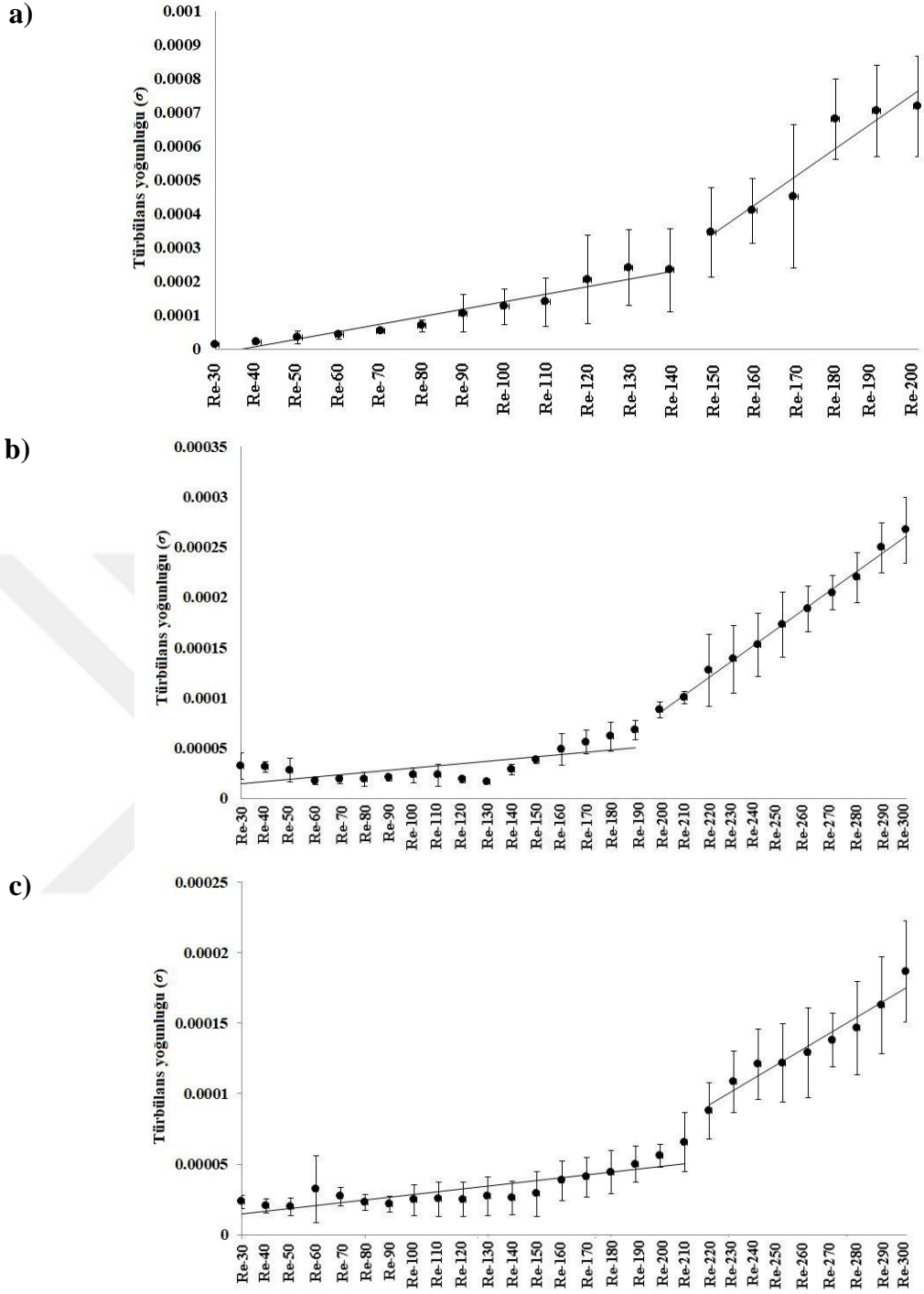
Şekil A.14'teki hidrojen gazının anlık akış alanlarından,  $Re = 50$  ve  $Re = 90$ 'daki hız vektör haritalarının zamanla değişmeyen kararlı rejimde olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, Şekil 4.22'de gösterildiği gibi,  $Re = 140$ 'tan başlayan hidrojen akış alanının girdap merkezinin etrafındaki değişimi gözlenmektedir (Şekil 4.22).  $Re = 40$ 'ta açıkça tanımlanabilen girdap merkezi konumu,  $Re = 150$ 'de tanımını kaybetmekte ve zamana bağlı değişmektedir (Şekil A.15). Akış alanının aynı genel davranışı azot ve argon gazları için de gözlenmiştir.

### **Türbülans karakteristikleri**

Kalitatif akış alanı karakterizasyonu ile birlikte boyutsuz türbülans şiddeti ve türbülans şiddet alanı gibi kantitatif akış değerleri benzer gazların akış hidrodinamiğinin karşılaştırılması için hesaplanmıştır. Bu çalışmada,  $Re$  sayıları laminar bölgede olmasına rağmen, akışın teğetsel jetleri ve girdap deseni tarafından oluşturulan kararsızlıklar türbülansa ve dolayısıyla karışmanın artmasına neden olmaktadır [53]. Şekil 4.23'te, boyutsuz türbülans yoğunluğu ve değişiminin  $Re$  sayısına bağlı değişimi gösterilmektedir. Bu grafiklerden hidrojen için  $Re = 140$  ile  $Re = 150$ , azot ve argon için  $Re = 200$  ve  $Re = 220$  arasında boyutsuz türbülans yoğunluğu değerlerinde bir sıçrama olduğu görülmektedir. Bu noktadan sonra türbülans şiddeti değerleri önceki bölgeye göre daha yüksek bir eğimle artmaktadır. Bu nokta, sürekli akış rejiminin kararsız akış rejimine dönüştüğü akışın kritik  $Re$  sayısını göstermektedir. Akışın bu belirlenen kritik noktaları, Şekil 4.17-4.21'de gösterilen akış görüntüleme sonuçlarıyla tutarlıdır.



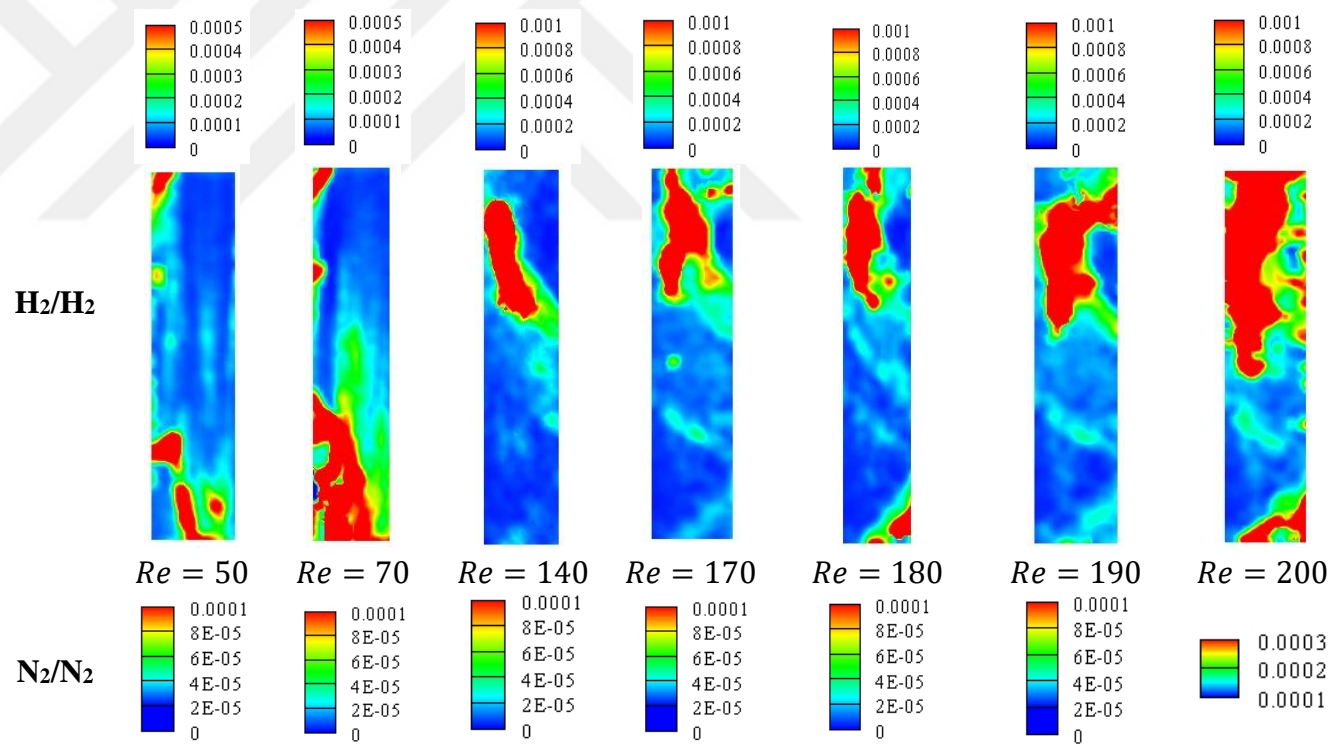
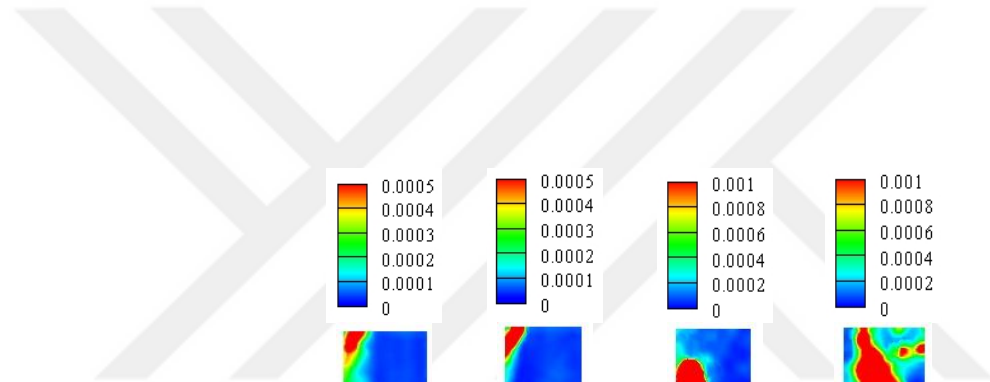
Şekil 4.22 : Akışın belirlenen kritik noktalarındaki anlık hız vektör haritası.

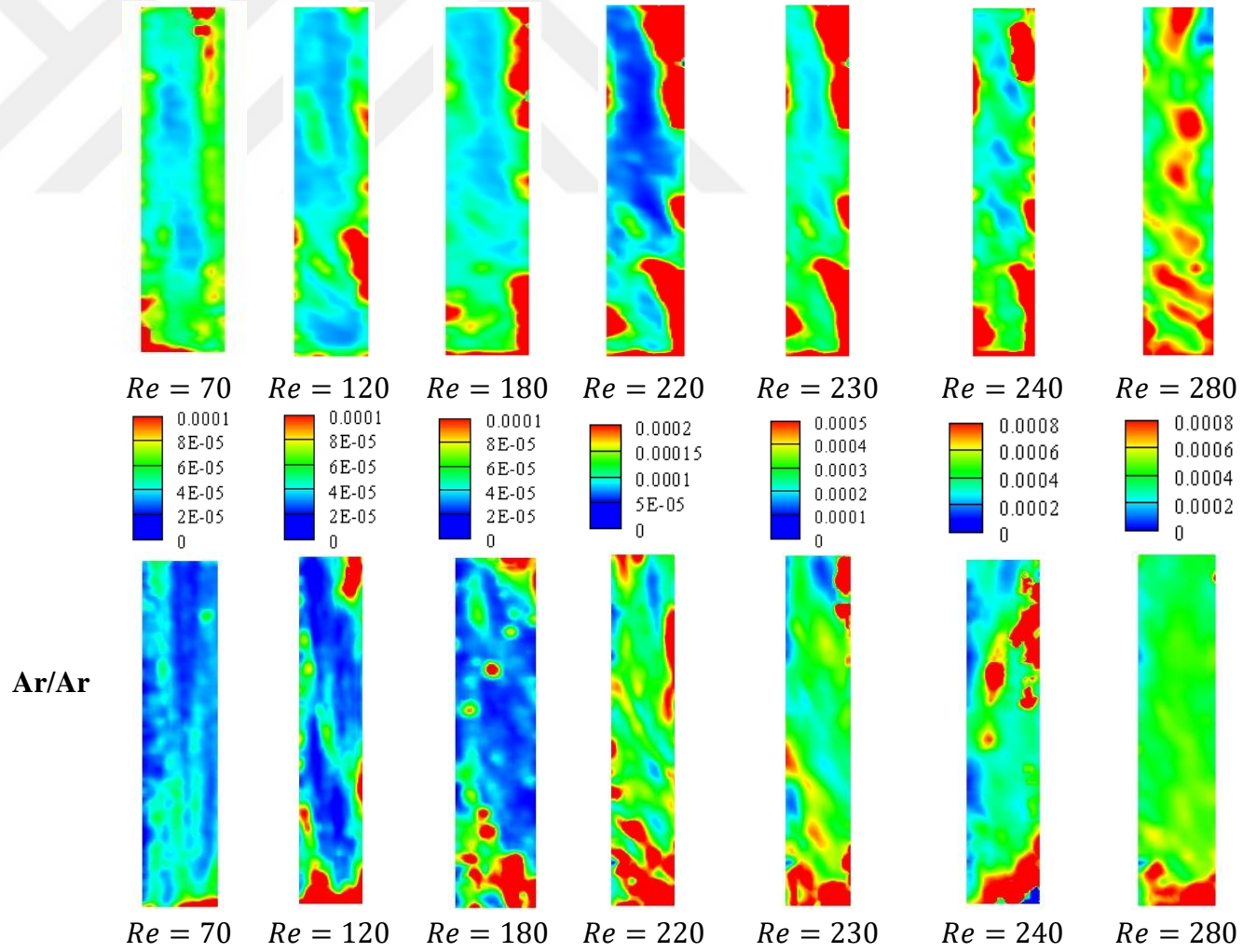


**Şekil 4.23 :**  $rz$  düzleminde boyutsuz turbülans yoğunluğunun  $Re$  sayısı ile değişimi  
a)  $H_2/H_2$  b)  $N_2/N_2$  c)  $Ar/Ar$ .

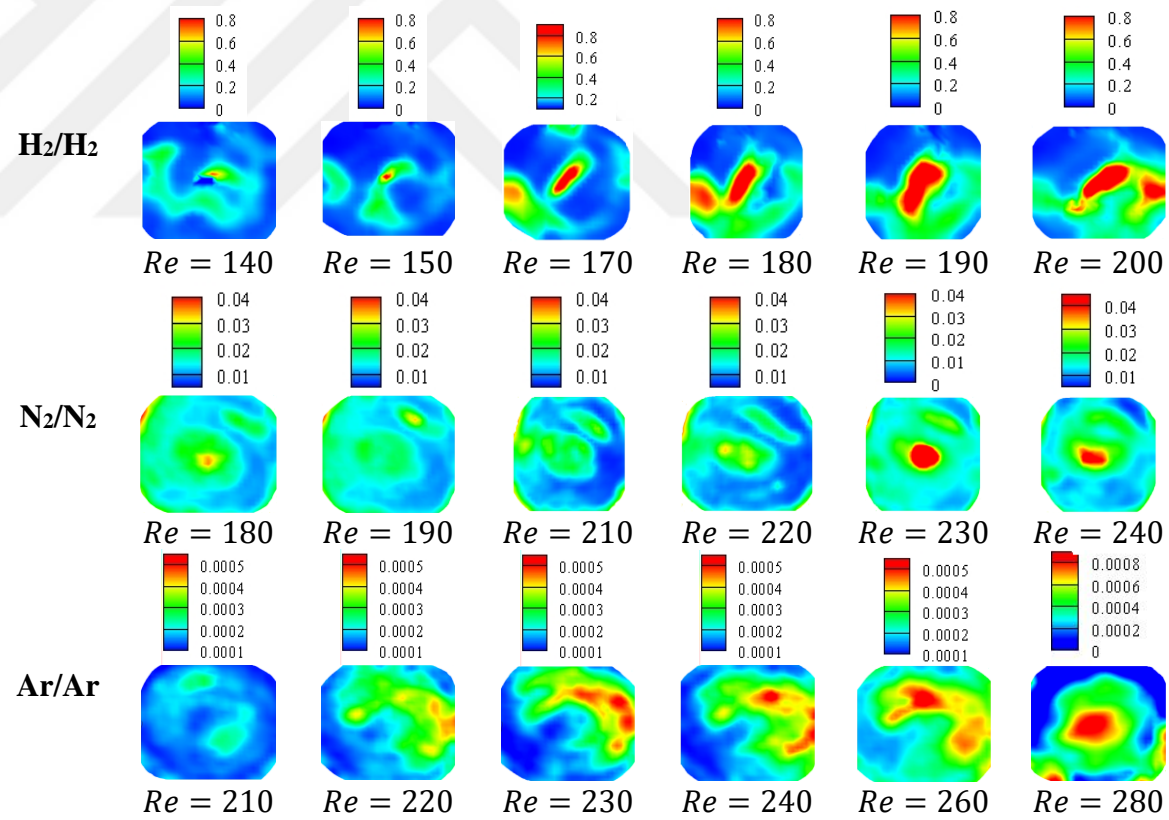
Turbülans yoğunluğu kontur haritalarından (Şekil 4.24) hem  $Re$  sayısı hem de gaz özelliklerinin turbülans yoğunluk alanı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Turbulansın yoğunluğu, çember içindeki hız dalgalanmaları hakkında fikir verdiği için, her bir gaz akışının karışma dinamikleri de değerlendirilebilmektedir. Kırmızı renk ve mavi renk bölgeleri sırasıyla en yüksek ve en düşük turbülans yoğunluk bölgelerini

göstermektedir. Karışma dinamiklerini tamamen analiz etmek için her bir  $Re$  sayısının türbülans yoğunluk seviyeleri de verilmiştir. Türbülans yoğunluğu kontur haritalarından, hidrojen için  $Re = 50$ , azot ve argon için  $Re = 70$ 'te akış dalgalanmalarının dönme hareketinin olmaması nedeniyle esas olarak  $z$  ekseninde boyunca olduğu görülmektedir. Hidrojen için  $Re = 150$ , azot ve argon için  $Re = 230$ 'da gözlemlenebilen akışın kritik noktasından sonra akış dalgalanmaları artmıştır. Girdap profilinin gözlemlenmesinin, büyük ölçekli türbülans dalgalanmalarının sonucu olduğu bilinmektedir [108]. Hidrojen gazının kırmızı renkteki yüksek türbülans yoğunluğu bölgesi, yine Şekil 4.17'de gösterildiği gibi argon ve azot gazlarından daha uzun olan "S" şeklinde bir girdaba neden olduğunu kanıtlamaktadır. Şekil 4.25'te, düzlem-4'teki kritik  $Re$  sayısından önce ve sonra boyutsuz türbülans yoğunluğu değişimi gösterilmektedir. Her bir gaz için kritik noktalardan sonra boyutsuz türbülans yoğunluk değerlerinin artan eğimi açıkça görülmektedir. Kontur haritalarından da görüldüğü gibi girdap merkezi olarak adlandırılabilen vorteks merkezinde türbülans yoğunluğu şiddeti daha yüksektir. Daha yüksek türbülans yoğunluğu bölgesi, zorlanmış girdap bölgesi olarak tanımlanırken, serbest girdap bölgesini gösteren daha küçük türbülans yoğunluğu bölgeleri, çember duvarlarının yakınında gözlenmiştir [58].





Şekil 4.24 :  $rz$  düzleminde kritik bölgelerin karşıdan görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları.

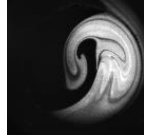


Şekil 4.25 : Kritik bölgelerin taban görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları (düzlem-4).

### **Fiziksel özelliklerin kritik noktalar ve kararsızlık mekanizması üzerindeki etkisi**

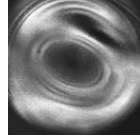
Hem zaman ortalamalı hem de anlık akış görüntüleme ve PIV sonuçları her bir gaz için spesifik kritik  $Re$  sayısı değeri olduğunu göstermiştir. İlk olarak, akışkanın tam rotasyon gösterdiği  $Re$  sayısı hidrojen ( $Re = 40$ ) için argon ve azot gazlarından ( $Re = 70$ ) oldukça farklıdır. Hidrojenin diğer gazlardan önemli ölçüde daha düşük yoğunluk ve daha yüksek kinematik viskoziteye sahip olması, aynı  $Re$  sayılarında daha yüksek hıza ve atalet kuvvete sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Atalet kuvvetinin bir ölçüsü olarak, dinamik basınç (kinetik enerji konsantrasyonu veya momentum hızı olarak da tanımlanabilir) kullanılabilir. Çünkü,  $Re$  sayısı atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranıdır, ve ayrıca dinamik basıncın kayma gerilimine oranı ile de tanımlanabilmektedir. Gazların tam rotasyon gösterdikleri  $Re$  sayılarında her birinin dinamik basınç değerleri aynıdır. Yoğunluk ve jet hızının karesinin çarpımı ( $\rho v^2$ ) hidrojen için  $Re = 40$ 'ta, argon ve azot için  $Re = 70$ 'te 0.05 Pa'dır. Dinamik basınç, jetlerin momentum hızı olarak da tanımlanabilmektedir. Hidrojen daha yüksek kinematik viskoziteye sahip olduğu için tam rotasyonlu akış hareketine daha düşük bir  $Re$  sayısında, fakat daha yüksek hızda ulaşmaktadır. Bu yüzden  $Re$  sayısı açısından bakıldığında daha yüksek kinematik viskozitedeki akışkanların tam rotasyon akış koşullarına daha düşük kinematik viskoziteli akışkanlardan daha önce ulaştığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, daha yüksek kinematik viskoziteye sahip akışkanlar, daha düşük  $Re$  sayılarında tanımlı tek bir vortekse sahip olmaktadır ve kanalda tam vorteks oluşumu, gaz özelliği (yoğunluk) ve hızın fonksiyonu olan jetlerin momentum oranı tarafından yönetilmektedir.

Gaz özelliklerinden bağımsız olarak hızın akış hidrodinamiğine olan etkisi de incelenmiştir. Hidrojen, azot ve argonun neredeyse aynı gaz hızı değerlerindeki akış görüntüleri Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Hidrojenin, azot ve argondan yaklaşık sekiz kat daha düşük  $Re$  sayılarında aynı gaz hızına sahip olduğu açıkça görülmektedir. Hidrojen tabakalı akış rejimindeyken, azot ve argon gazı akışları aynı gaz hızında kararsız yutulma akış rejiminin başlangıcındadır. Bu sonuçlar, hızın etkisinin sıvının fiziksel özelliklerinden bağımsız olmadığını açıkça göstermektedir.



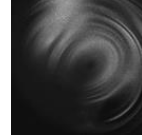
$H_2/H_2$

( $Re = 30, v = 0.61 \text{ m/s}$ )



$N_2/N_2$

( $Re = 220, v = 0.62 \text{ m/s}$ )



$Ar/Ar$

( $Re = 230, v = 0.60 \text{ m/s}$ )

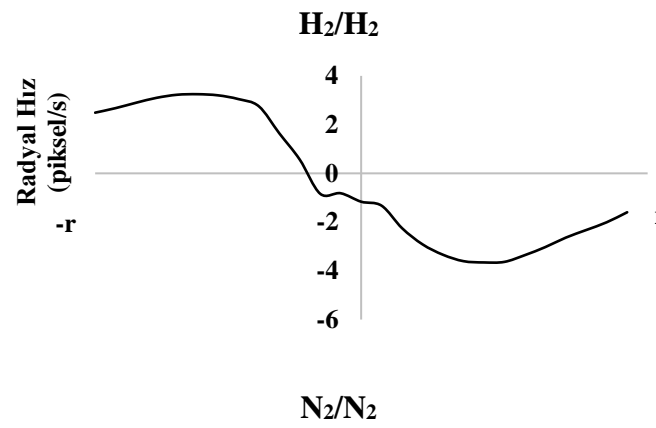
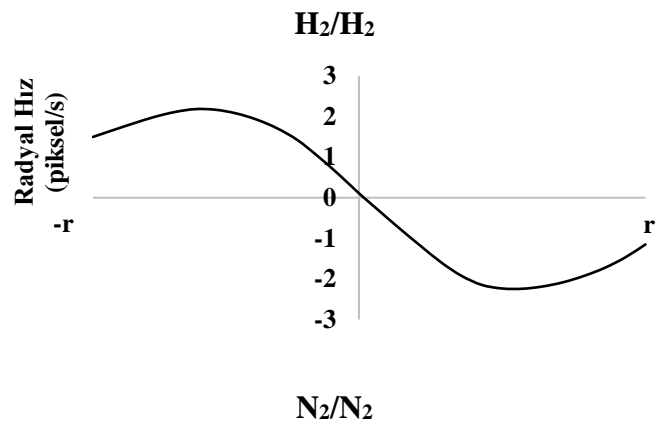
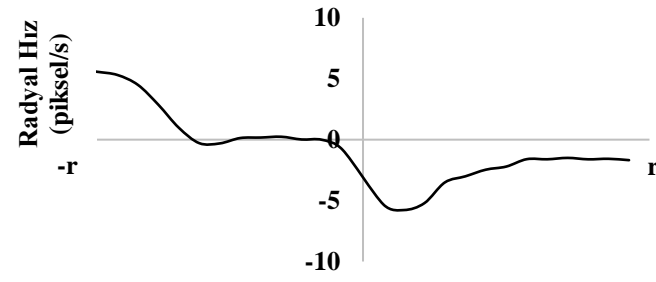
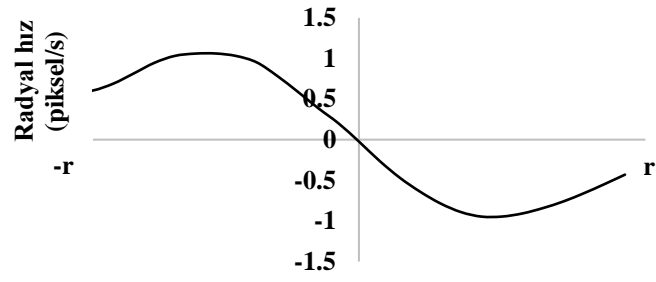
**Şekil 4.26** : Aynı gaz hızlarındaki zaman ortalamalı akış görüntüleme sonuçları.

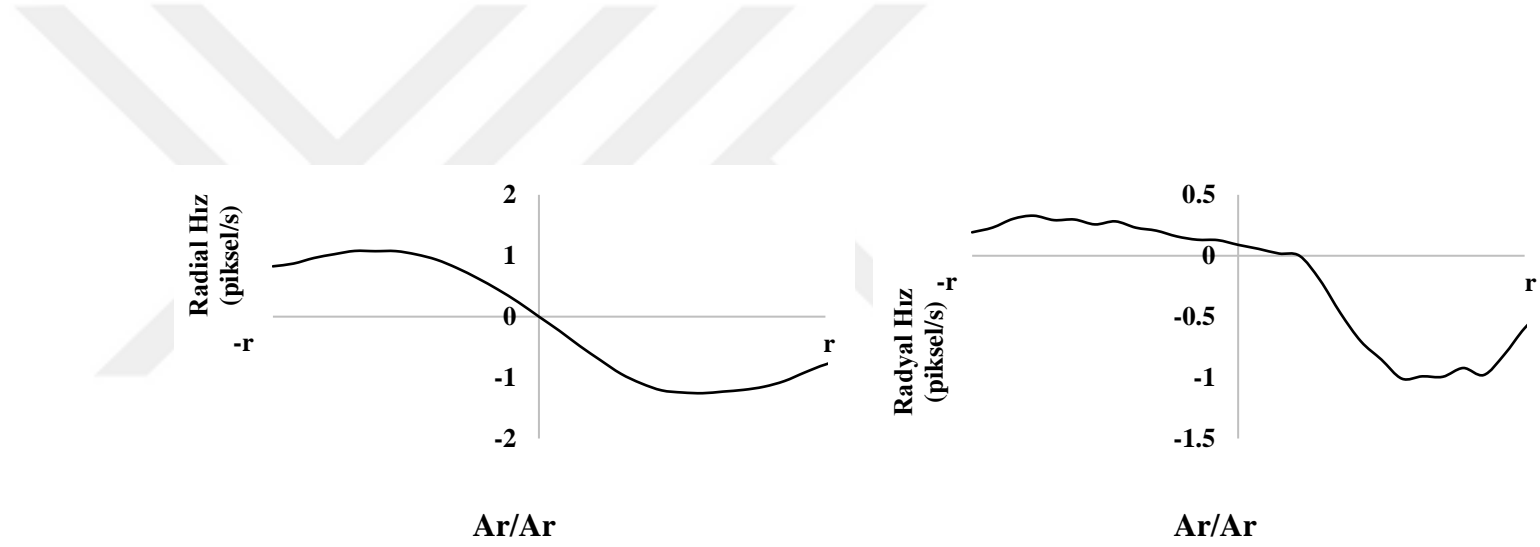
Akışkanların tam rotasyon hareketinden sonra, basınç gradyanları ve viskoz kuvvetlerinin merkezkaç kuvvetleri ile olan dengesi akışı kararlı halde tutmaktadır. Merkezkaç kuvvetleri dönen akışkanı radyal olarak dışarıya doğru çekmeye çalışırken, basınç gradyan kuvveti merkezci (centripetal) kuvvet olarak davranmaktadır ve akışkanı içeri çekmektedir. Bu noktada kararlı halde hızlar sabit olduğu için Euler kuvveti (açısal ivmelenmeden kaynaklı gövde kuvveti) ve Coriolis (dönen akışkan üzerindeki harekete uygulanan kuvvet) kuvvetleri de sıfırdır. Bu sebeple rotasyonel gövde kuvveti yalnızca merkezkaç kuvvetidir [109]. Partiküller arası bağıl bir hareket olmadığı için de akış kayma hızından bağımsız kararlı halde kalabilmektedir [109].

Şekil 4.27,  $r\theta$  düzleminde (alttan görünüm düzlemi) orijinden geçen bir radyal doğru üzerinde kritik  $Re$  sayılarının altında ve üstünde PIV deneyleriyle elde edilen anlık hız profillerini göstermektedir. Kararlı halde, kritik  $Re$  değeri altında, merkezdeki hız değerleri sıfırdır ve merkezden çemberin yarısına kadar gözlenen hız profili klasik zorlanmış vorteks hız profiline aittir. Klasik zorlanmış vorteks profilinde hız değeri çemberin yarısına kadar, yarıçap ile doğrusal olarak değişmektedir. Çemberin yarısı ve duvarı arasında, laminar akış profili gözlenmektedir. Bu durumda, kararlı halde zorlanmış vorteks bölgesi ve laminar bölge olmak üzere iki bölge tanımlanmaktadır. Hız değerleri kritik değerlerin altında bütün  $Re$  sayıları için merkezde sıfır olduğundan, radyal yönde önemli bir basınç gradyanı yaratabilecek olan dinamik basınç değeri de sıfırdır.  $Re$  sayısı arttıkça, atalet kuvvetleri de artmaktadır, fakat aynı zamanda artan basınç gradyanı sebebi ile merkezci (centripetal) kuvvetler de artmaktadır. Kritik noktalarda ise (hidrojen için  $Re = 150$ , azot için  $Re = 200$ , argon için  $Re = 220$ ) artık merkezkaç kuvvetleri basınç gradyan kuvvetini dengeleyememektedir. Şekil 4.27'de gösterildiği gibi anlık hız profilleri dönme düzlemine göre bağıl hareket göstermekte ve ivmelenmektedir (yerel hızlar zamanla değişmektedir). Bu noktada Euler ve Coriolis kuvvetleri de olaya etki etmektedir ki bu vorteks merkezinin tanımı için kompleks hidrodinamiklerin oluşmasına sebep olmaktadır [109]. Akış rejimi geçişlerini gösteren kritik  $Re$  sayısı hidrojen için önemli

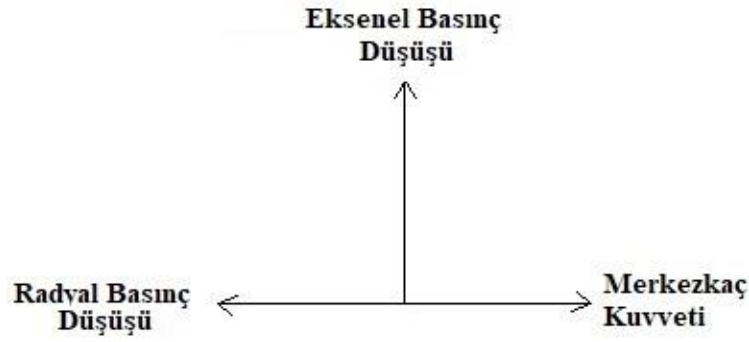
ölçüde düşüktür. Hidrojenin yoğunluğu ve dolayısıyla da eylemsizlik kütlesi daha küçük olduğu için merkezkaç kuvvetleri de daha küçüktür. Kinematik viskozite ve dinamik basınç değerleri ise daha büyük olduğu için aynı  $Re$  sayısında diğer gazlardan daha büyük basınç gradyanı oluşmaktadır. Bu sebeple de merkezkaç ve basınç gradyan kuvvetleri arasındaki denge daha erken kırılmaktadır. Bu çıkarım aynı şekilde eksenel düzlem sonuçlarına da uygundur ve hidrojenin farklı girdap açısı değerlerini açıklamaktadır.

Şekil 4.28'deki gibi merkezkaç kuvvet, akışkanı radyal olarak dışarı iterken, radyal basınç düşme akışkanı içeri çekmekte ve eksenel basınç düşmesi ise yukarı doğru taşımaya çalışmaktadır. Radyal olarak dışarı ve eksenel olarak yukarı olan etkiler girdap akış hareketini etkilemektedir. Gazların fiziksel özelliklerinin etkisi hem kararsızlık hem de girdap açılarında gözlenmektedir. Hidrojenin eksenel basınç gradyanı diğer gazlardan daha büyük ve merkezkaç kuvveti daha küçük olduğu ve girdap hareketi basınç gradyan kuvveti tarafından çekildiği için genişletilmiş bir yay gibi gözükmektedir. Aksine, azot ve argon gazları için basınç gradyanı kuvveti daha düşüktür ve merkezkaç kuvveti daha yüksektir, bu sebeple de girdap hareketi Şekil 4.29'da gösterildiği gibi vida benzeri şekilde gözükmektedir. Sonuç olarak, akışta tam rotasyon hareketi ve kararsızlığın başlaması, kinematik viskoziteye yani gazların fiziksel özelliklerine güçlü bir şekilde bağlıdır.

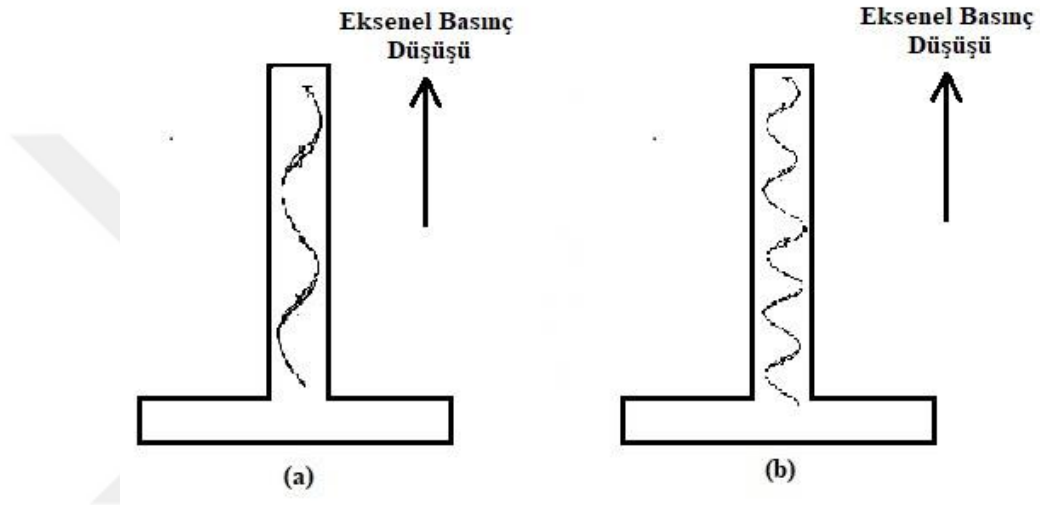




**Şekil 4.27 :** Kararlı akış rejimi (her biri için  $Re = 50$ ) ve kararsız akış rejimindeki (hidrojen için  $Re = 160$ ; azot ve argon için  $Re = 240$ ) radyal hızların karşılaştırılması.



Şekil 4.28 : Akışkan partikülleri üzerine etkiyen kuvvetlerin gösterimi.



Şekil 4.29 : Girdap yapısının gösterimi a) Hidrojen b) Azot ve Argon.

#### 4.1.2 Vorteks mikserde farklı gazların akış hidrodinamiği karakterizasyonu

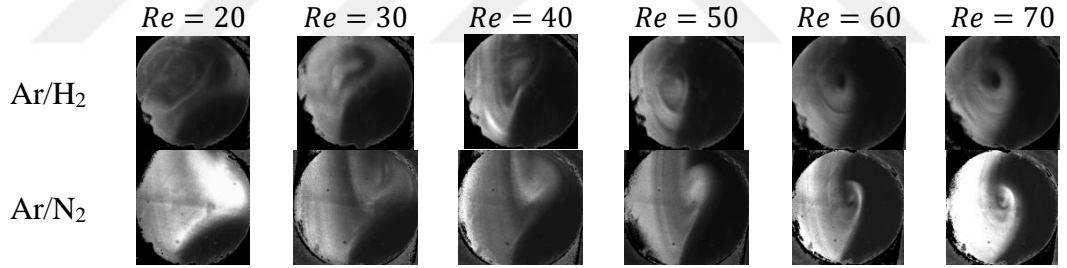
Farklı gazların akış hidrodinamiği iki bölümde incelenmiştir. Vorteks mikser içerisinde jetlerin her birinden farklı gazlar gönderilerek benzer ve farklı özellikteki gazların fiziksel özelliklerininin karışma hidrodinamikleri ve akış rejimi mekanizmaları üzerindeki etkileri akış görüntüleme ve PIV akış alanı karakterizasyonu deneyleri sonucunda karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde ise çember içerisindeki hidrojen hacim fraksiyonunun akış rejimi geçişleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

##### 4.1.2.1 Akış mekanizması

Vorteks mikser içerisinde jetlerden Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> gazları gönderilerek farklı gazların karışma hidrodinamikleri ve akış rejimi mekanizmaları belirlenmiştir.

### Zaman ortalamalı akış görüntüleme

Bu bölümde ilk yaklaşım olarak Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> gaz akışlarının zaman ortalamalı hidrodinamik davranışları incelenmiştir. *Re* aralıkları bölüm 3.1.5.2'ye göre belirlenmiştir. Şekil 4.30'da karışma düzlemi zaman ortalamalı akış görüntüleri gösterilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi karışma düzlemi jetlerin yüksekliğine eşit olan çemberin ilk 5 mm'sini oluşturmaktadır. Yoğunluk ve viskozite değerleri birbirinden oldukça farklı olan argon ve hidrojen gazlarının akışı ilk olarak incelenirken, birbirine çok benzer fiziksel özelliklere sahip argon ve azot gazları devamında verilmiştir. Argon gazı en yüksek moleküler kütleye sahip olduğu için, düşük *Re* sayılarında karışma düzlemine, hidrojen ve azot gazlarından daha önce dağıldığı görülmektedir (Ar/H<sub>2</sub> için *Re* < 40 ve Ar/N<sub>2</sub> için *Re* < 60). Bu *Re* sayılarının devamında karışma düzlemi her iki gelen gazı da simetrik olarak göstermektedir, bu da hidrojen ve azot gazlarının argon gazına karşı yeterli kuvvete sahip olduğu anlamına gelmektedir [30]. *Re* = 60'ta gelen akışın teğetsel davranışı her bir gaz akışı için vorteks mikserin ana karakteristiği olan vorteks profilinin oluşmasına sebep olmuştur [34, 58].

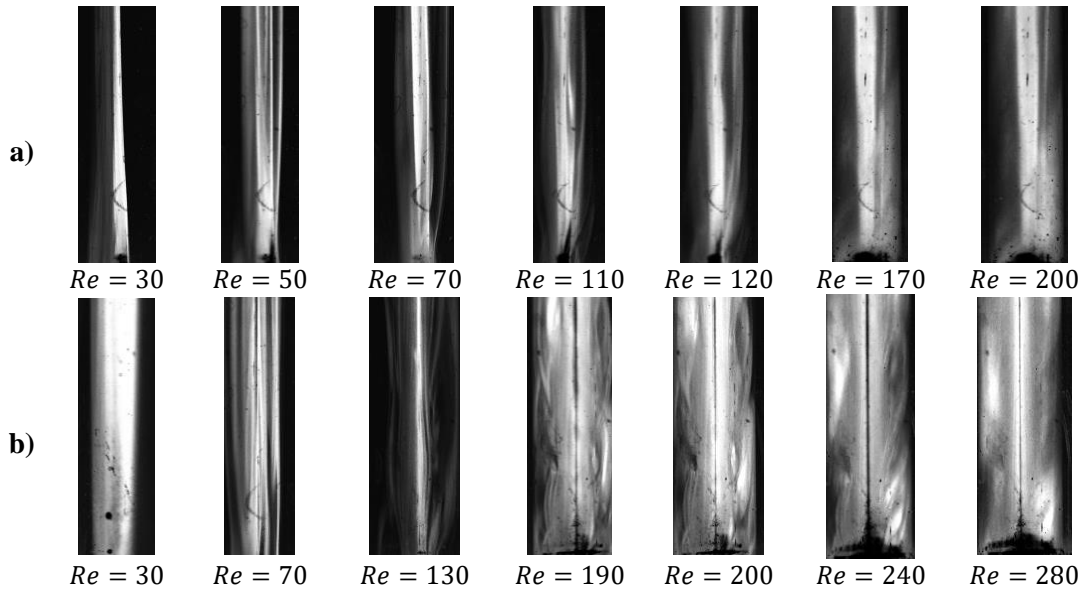


**Şekil 4.30** : Jetlerin karışma düzlemi için zaman ortalamalı akış görüntüleme sonuçları.

Karışma çemberinin karşıdan elde edilen görüntülerinde (Şekil 4.31) Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> akışları *Re* = 70'te çizgi benzeri akış gibi düzdür. Ar/N<sub>2</sub> akışının girdap yapısı *Re* = 130'da açıkça görülebilmektedir. Akış çizgileri oldukça keskin olmasına karşın, iç içe geçmiş yapının oluşumu *Re* = 190'dan sonra görülmektedir. Ancak, Ar/H<sub>2</sub> akışının girdap yapısının karşıdan görüntülenmesi oldukça zor olmasına karşın bu akış davranışının başlangıç değeri *Re* = 70 olarak belirlenmiştir.

Radyal akış görüntüleme deneyleri 10 mm ile 200 mm arasındaki çember uzunlukları için gerçekleştirilmiştir. Düzlem-4'e ait sonuçlar Şekil 4.32'de verilirken diğer düzlemlere ait sonuçlar Ekler bölümünde Şekil A.16-A.22'de verilmiştir. Şekil

4.30'da da gösterildiği üzere vorteks akış davranışı her iki durum için de  $Re = 60$ 'ta oluşmuştur. Akışın  $Re = 100$ 'e kadar gelişimi ise her iki gaz akışı için benzerdir. Ancak, Ar/N<sub>2</sub> akışındaki argon gazına ait akış çizgileri, Ar/H<sub>2</sub> akışından daha incedir. Bunun sebebi ise hidrojenin akış akımları arasındaki kayma hızının azottan daha büyük olmasıdır [11].  $Re = 100$  ile  $Re = 110$  arasında Ar/H<sub>2</sub> akışında vorteks davranışına benzer ikinci bir girdap akışı gözlenmektedir, bu bölge kritik  $Re$  sayısından önce olduğu için oluşan iki girdap davranışı da gözlenebilmektedir (Şekil 4.32).  $Re \geq 120$  ötesinde Ar/H<sub>2</sub> için, gaz akış çizgileri kaybolmakta ve akışın vorteks davranışı neredeyse farkedilemez olmaktadır. Ar/H<sub>2</sub> akışının hidrodinamiği daha yüksek  $Re$  sayıları için de aynı şekilde gelişmektedir. Öte yandan, Ar/N<sub>2</sub> akışının akış çizgileri  $Re = 200$ 'e kadar görülür biçimdedir. Ayrıca akış hidrodinamiğinin gelişimi Ar/H<sub>2</sub> akışından oldukça farklıdır. Ar/N<sub>2</sub> akışının vorteks yapısı birden fazla dönüş içermekte ve vorteksin üst ve alt bölgelerindeki eliptik bölgeler  $Re = 100$  ve  $Re = 200$  arasında oluşmaktadır. Ar/N<sub>2</sub> için akış hidrodinamiklerinin gelişimi  $Re = 210$  ve  $Re = 280$  arasında benzerdir. Zaman ortalamalı akış görüntülerinden akış rejimi değişimlerinin olduğu akışın dönüm noktaları tespit edilebilmektedir. Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> için ilk dönüm noktası benzer olmakla birlikte, ikinci dönüm noktası Ar/H<sub>2</sub> için  $Re = 120$  ve Ar/N<sub>2</sub> için  $Re = 200$  olmak üzere oldukça farklıdır.

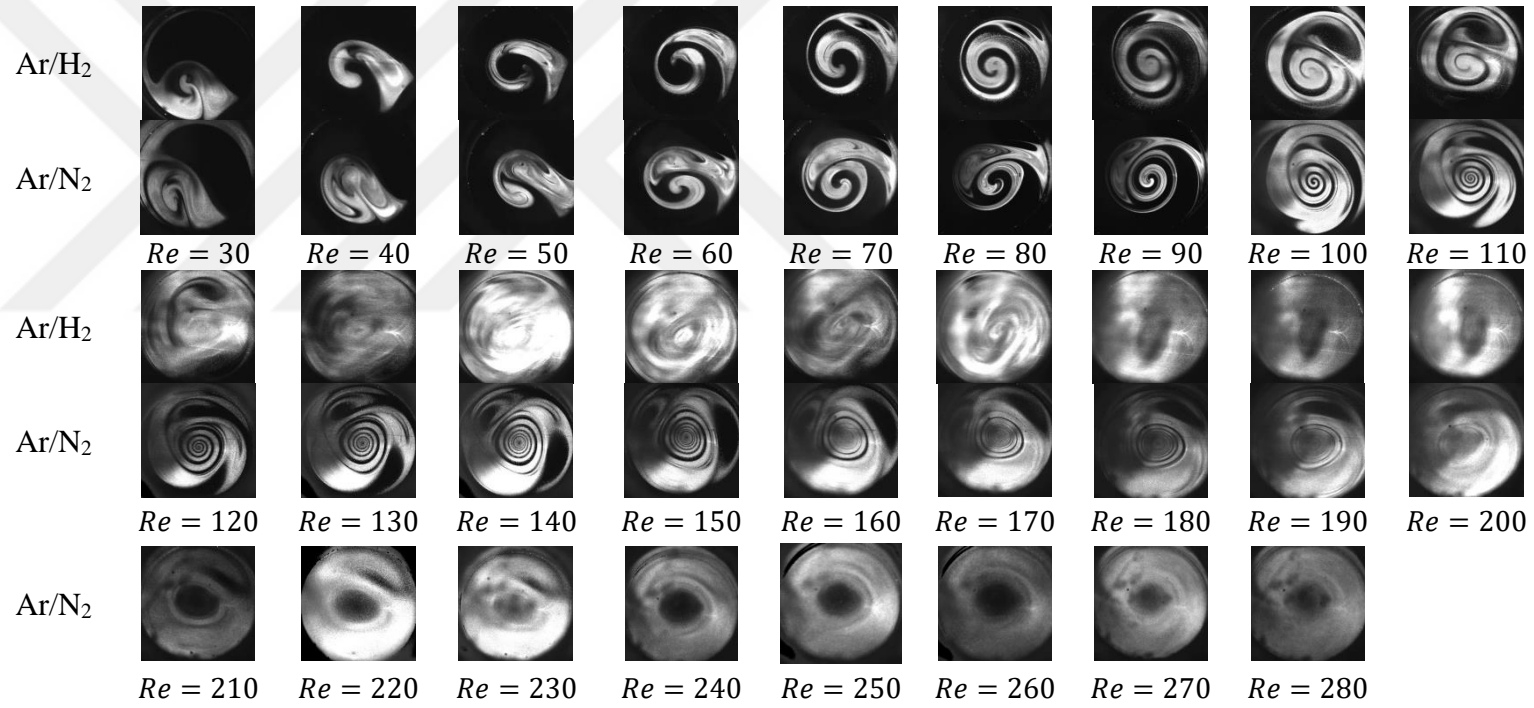


**Şekil 4.31 :**  $rz$  düzleminde çeşitli  $Re$  sayıları için zaman ortalamalı akış görüntüleri a) Ar/H<sub>2</sub> b) Ar/N<sub>2</sub>.

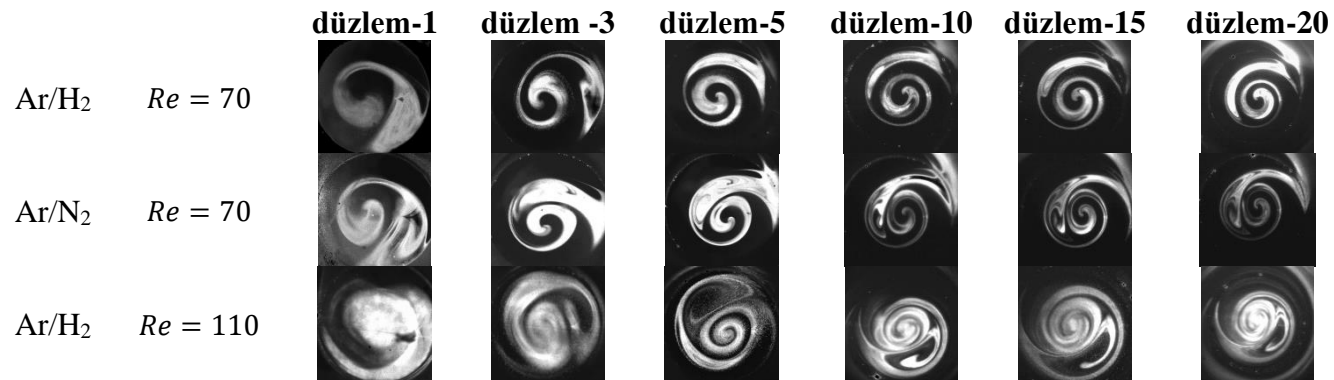
Şekil 4.33 rms görüntülerine göre belirlenen dönüm noktalarının çember uzunluğuna göre değişimini göstermektedir. Her iki gaz akımı için de birinci dönüm noktasındaki

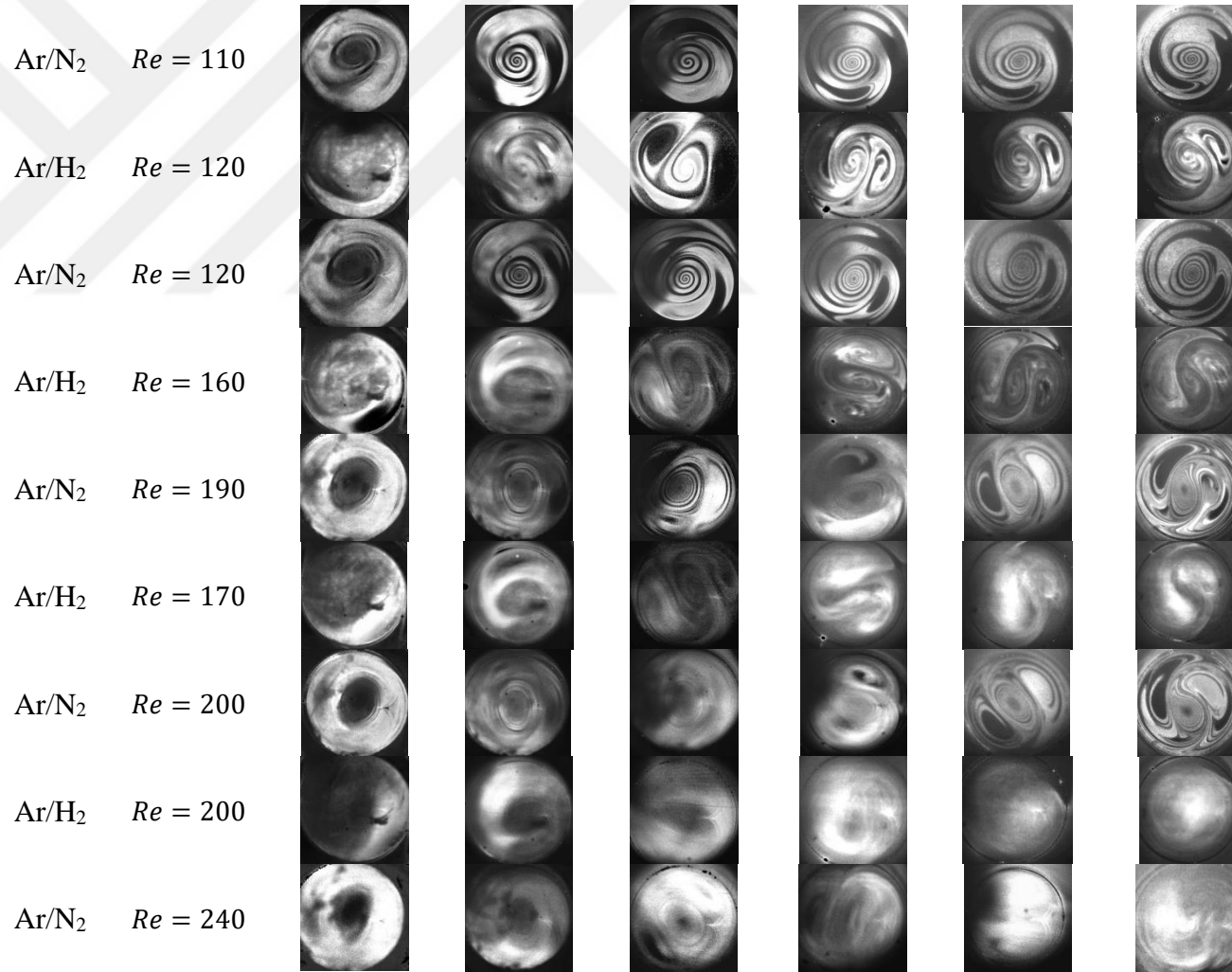
akışın kararlı yapısı düzlem-3'ten düzlem-20'ye kadar korunmaktadır. Bütün radyal düzlemlerde vorteks yapısı gözlenmekte ve vorteks mikserin sınırlı geometrisi sebebiyle karışma çemberi boyunca korunmaktadır [58, 106, 107]. Ar/H<sub>2</sub> akışı için,  $Re = 110$ 'daki ikinci vorteks yapısının oluşumu düzlem-5'ten sonra  $Re = 120$ 'de gözlenmiştir. Argon ve hidrojen gazlarının bütünüyle karışması  $Re = 160$  ile  $Re = 200$  arasında gerçekleşmiştir. Ar/N<sub>2</sub> akışı için ise özellikle düzlem-5'ten sonra  $Re = 110$  ve  $Re = 200$  arasında eliptik bölgelerin oluşumu gözlenmiştir.





Şekil 4.32 : Düzlem-4'te  $Re = 30$  ve  $Re = 280$  arasındaki zaman ortalamalı akış görüntüleri (rms).





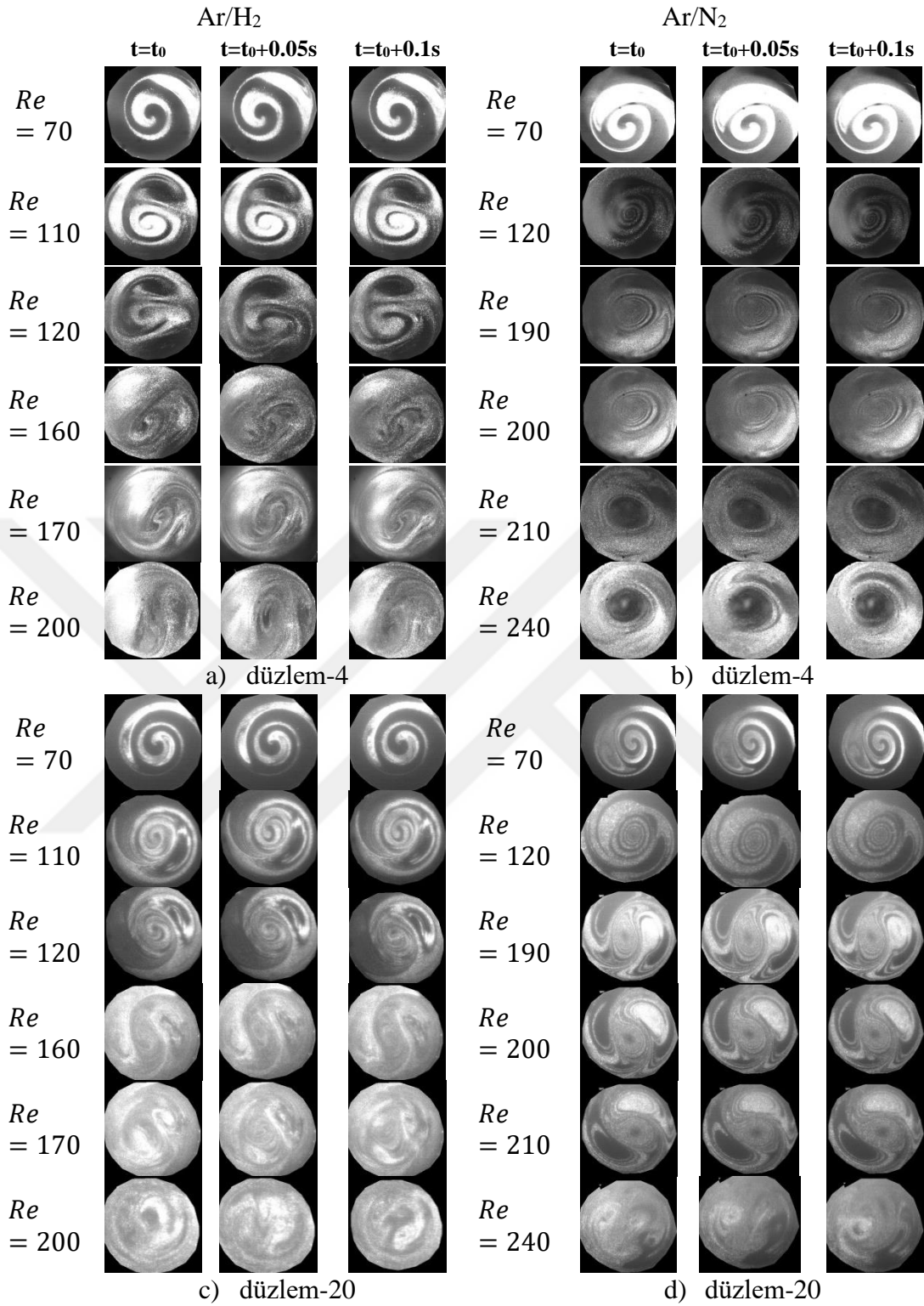
Şekil 4.33 : Çember uzunluğuna göre zaman ortalamalı akış görüntüleri.

### Zamana bağı akış görüntüleme

Bu bölüme kadar Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> gaz akışlarının akış yapısının gelişimi zaman ortalamalı akış görüntülerine göre analiz edilmiş ve gaz akışlarının dönüm noktaları zaman ortalamalı sonuçlara göre belirlenmiştir. Akış hidrodinamiklerindeki büyük radyal değişimlerin gerçekleştiği kritik *Re* sayısının belirlenebilmesi için anlık akış davranışlarının analiz edilmesi de oldukça önemlidir.

Şekil 4.34'te Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> akışlarının belirli zamanlar için düzlem-4 ve düzlem-20'deki anlık akış görüntüleri verilmiştir. Ar/H<sub>2</sub> gaz akışının zaman ortalamalı sonuçlara göre iki dönüm noktası vardır. Birincisi, gaz akışının tam bir girdap dönüşü yapmak için yeterli atalet kuvvete sahip olduğu *Re* = 60 ve *Re* = 70 civarında, ikincisi ise akış çizgilerinin kaybolduğu *Re* = 120'tedir. Bu, akışın *Re* = 70'te kararlı olduğu zamana bağlı anlık görüntülerle tutarlıdır. Öte yandan, hem rms görüntülerinden hem de Şekil 4.34'ten görüleceği üzere akış *Re* = 110'da kararlıdır, ancak bu *Re* sayısındaki akışın ana vorteks yapısı, akışın radyal salınımının başladığına işaret edecek şekilde kendi eksenini etrafında dolaşmaktadır (Ek F, video 11). *Re* = 110'daki akış kaotik akış gibi kararsız akış olarak tanımlanamasa da, bu nokta kararsız akış rejiminin başlangıcıdır. *Re* sayısı 120'ye yükseldiğinde, akıştaki radyal salınımların frekansı artmakta ve vorteks dolaşımının eksenini artmaktadır (Ek F, video 12). *Re* sayısının daha da artmasıyla hem aksenel hem de radyal salınımların oluşumu *Re* = 160 ve *Re* = 200 arasında kararsız yutulma akış rejiminin oluşumunu göstermektedir (Ek F, video 13).

Anlık akış görüntü sonuçlarına göre Ar/N<sub>2</sub> akışı *Re* = 70 ve *Re* = 120'de kararlıdır. Kararsız akış rejimi ise *Re* = 190'da başlamıştır. (Ek F, video 14 ve video 15). Buna göre, tabakalı akış rejimi, vorteks akış rejimi ve kararsız yutulma akış rejimi olarak belirlenen akış rejim geçişleri Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> akışları için Çizelge 4.2'de verilmiştir [32, 43]. Tabakalı ve vorteks akış rejimlerinde karışma difüzyon bağımlıdır. Kritik *Re* sayısından sonra ise, akışta aksenel kararsızlıklar oluşmaktadır. Bu durum kaotik akışlara sebep olan jetlerin teğetsel akış davranışlarıdır. Kararsız akış rejiminde karışma mekanizması difüzyondan bağımsız hale gelmekte ve sadece taşınımına bağımlı olmaktadır [32, 43].



Şekil 4.34 : Düzlem-4 ve düzlem-20'deki anlık akış görüntüleme sonuçları.

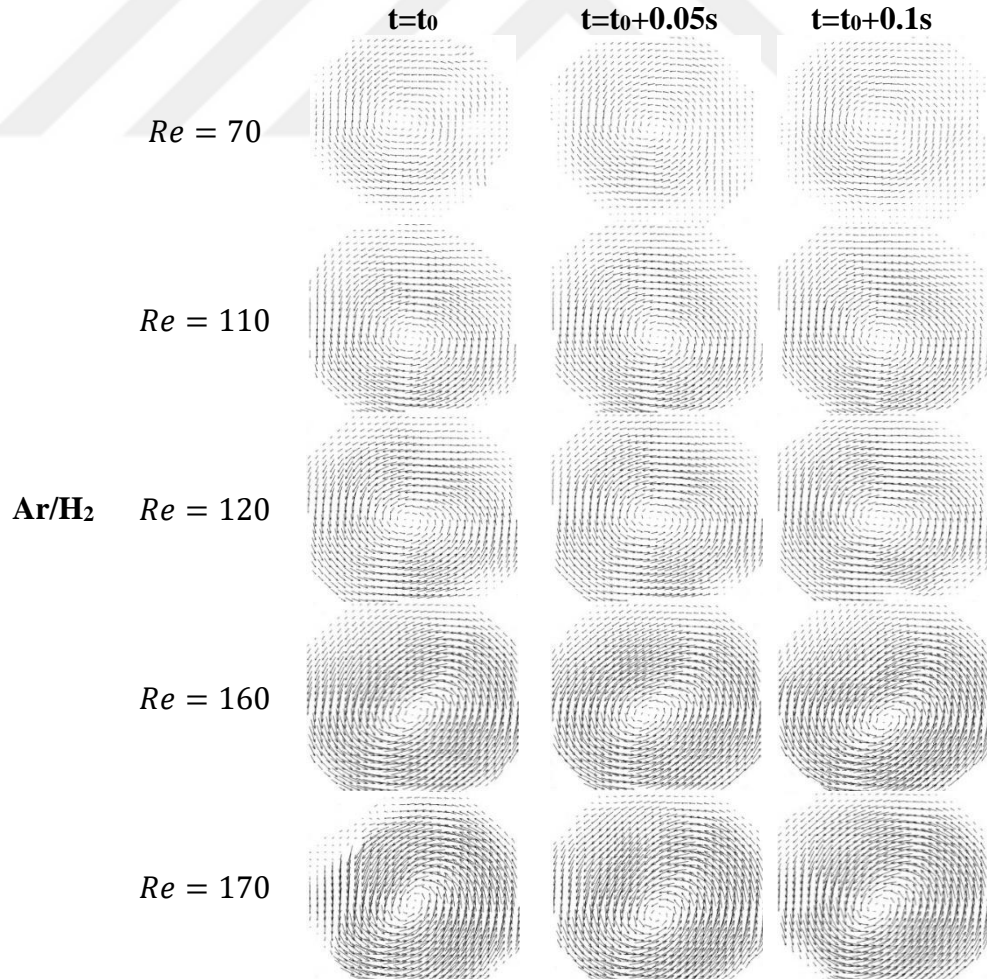
Çizelge 4.2 : Akış rejimi geçişlerinin karşılaştırılması.

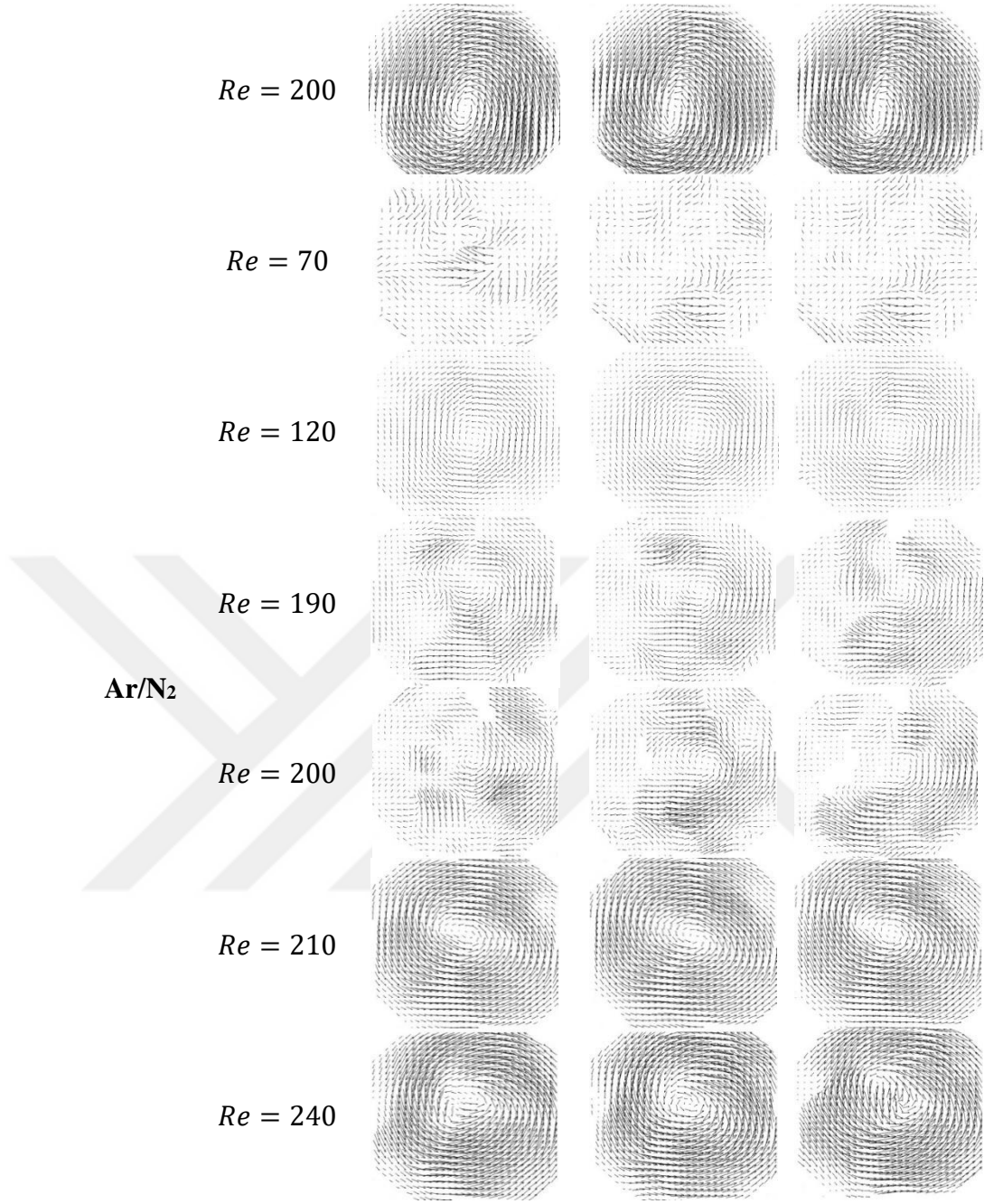
|                   | Tabakalı akış rejimi | Vorteks akış rejimi | Kararsız yutulma akış rejimi |
|-------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|
| Ar/H <sub>2</sub> | $< Re = 70$          | $70 \leq Re < 120$  | $\geq Re = 120$              |
| Ar/N <sub>2</sub> | $< Re = 70$          | $70 \leq Re < 190$  | $\geq Re = 190$              |

### Akış alanı karakterizasyonu

Şekil 4.35, PIV ölçümlerinden elde edilen anlık akış alanı karakterizasyonunun hız vektör haritalarını göstermektedir. Jetlerden gönderilen akışların teğetsel akış davranışı çember uzunluğu boyunca korunmakta ve her iki gaz akışı için ana akış karakteristiği olarak görülmektedir.

Şekil 4.35'teki anlık akış alanı sonuçlarına göre, Ar/H<sub>2</sub> gaz akışı için,  $Re = 70$  ve  $Re = 110$  arasında hız vektör haritaları zamana göre sabit kalmıştır. Ancak  $Re = 120$ 'den sonra  $Re = 200$ 'e kadar vorteks merkezinin yer değiştirmesi artan bir trendle gözlenmiştir. Aynı akış davranışı Ar/N<sub>2</sub> için gözlenmesine karşın, akıştaki vorteks yapısı  $Re = 70$ 'te oluşmamıştır. Kararlı vorteks oluşumu  $Re = 120$ 'de gözlenmektedir.  $Re$  sayısının daha da artırılmasıyla, vorteks gezinme hareketi zamana bağlı değişmektedir. Şekil 4.35'te  $Re = 240$ 'ta, akışın radyal ve eksenel salınımları olduğuna işaret eden, vorteks merkezinin etrafında küçük vortekslerin oluşumu ile vorteks merkezinin bozulduğu görülmektedir.





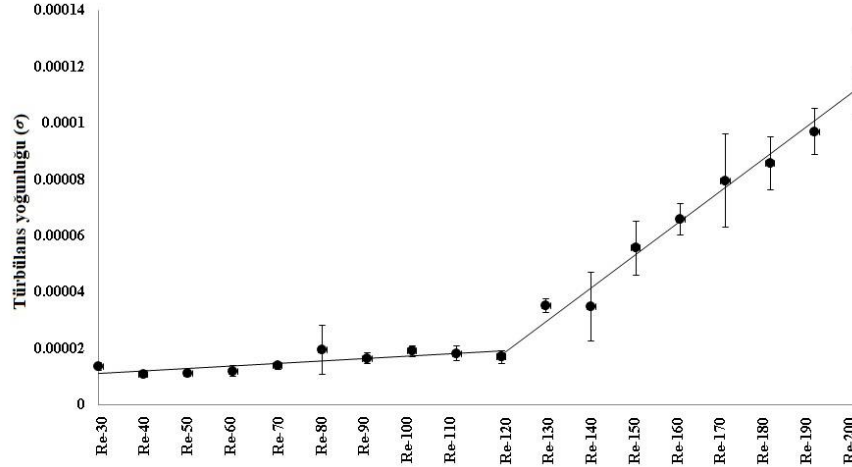
**Şekil 4.35 :** Akışın belirlenen kritik noktalarındaki anlık hız vektör haritası.

### **Türbülans karakteristikleri**

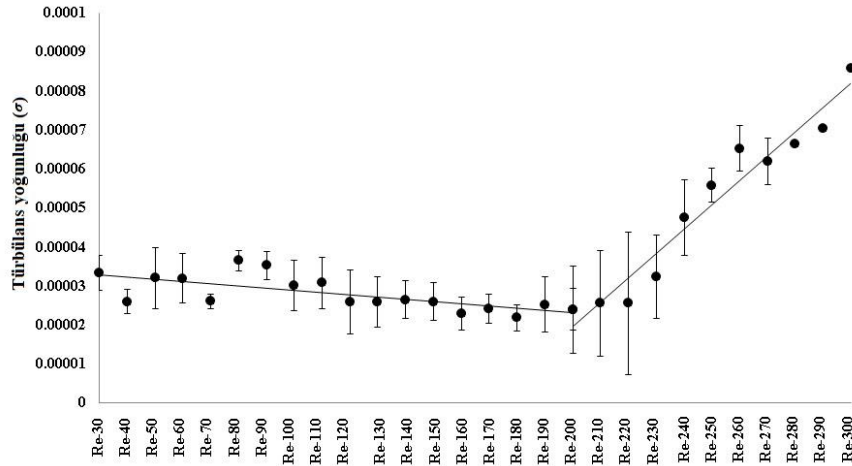
Ek olarak, boyutsuz türbülans yoğunluğu ve türbülans yoğunluğu akış alanını içeren akışın nicel analizi gerçekleştirilmiştir. Akış görüntüleme deneylerinin kritik  $Re$  sayılarını doğrulamak için türbülans yoğunluğunun önemli ölçüde artmaya başladığı kritik  $Re$  sayısı bölgesi belirlenmiştir.  $Re$  sayılarına dayalı boyutsuz türbülans yoğunluğu değerlerinin sonuçları Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Bu grafiklerden, türbülans yoğunluğunun artan eğilimi  $Ar/H_2$  akışı için  $Re = 120$  ve  $Ar/N_2$  akışı için  $Re = 210$ 'da başlamıştır. Boyutsuz türbülans yoğunluğu değerleri bu  $Re$  sayılarına

kadar neredeyse sabittir. Bu noktaların ardından, daha yüksek bir eğimle artmaktadır. Bu durum, jetlerin artan  $Re$  sayısı ile akışın türbülans özelliklerinin artmasına neden olmaktadır. Akışın kararlı akıştan kararsız akış profiline geçtiği akışların kritik  $Re$  sayısı, Şekil 4.30-4.34'te gösterilen akış görüntüleme sonuçlarıyla tutarlıdır.

a)



b)



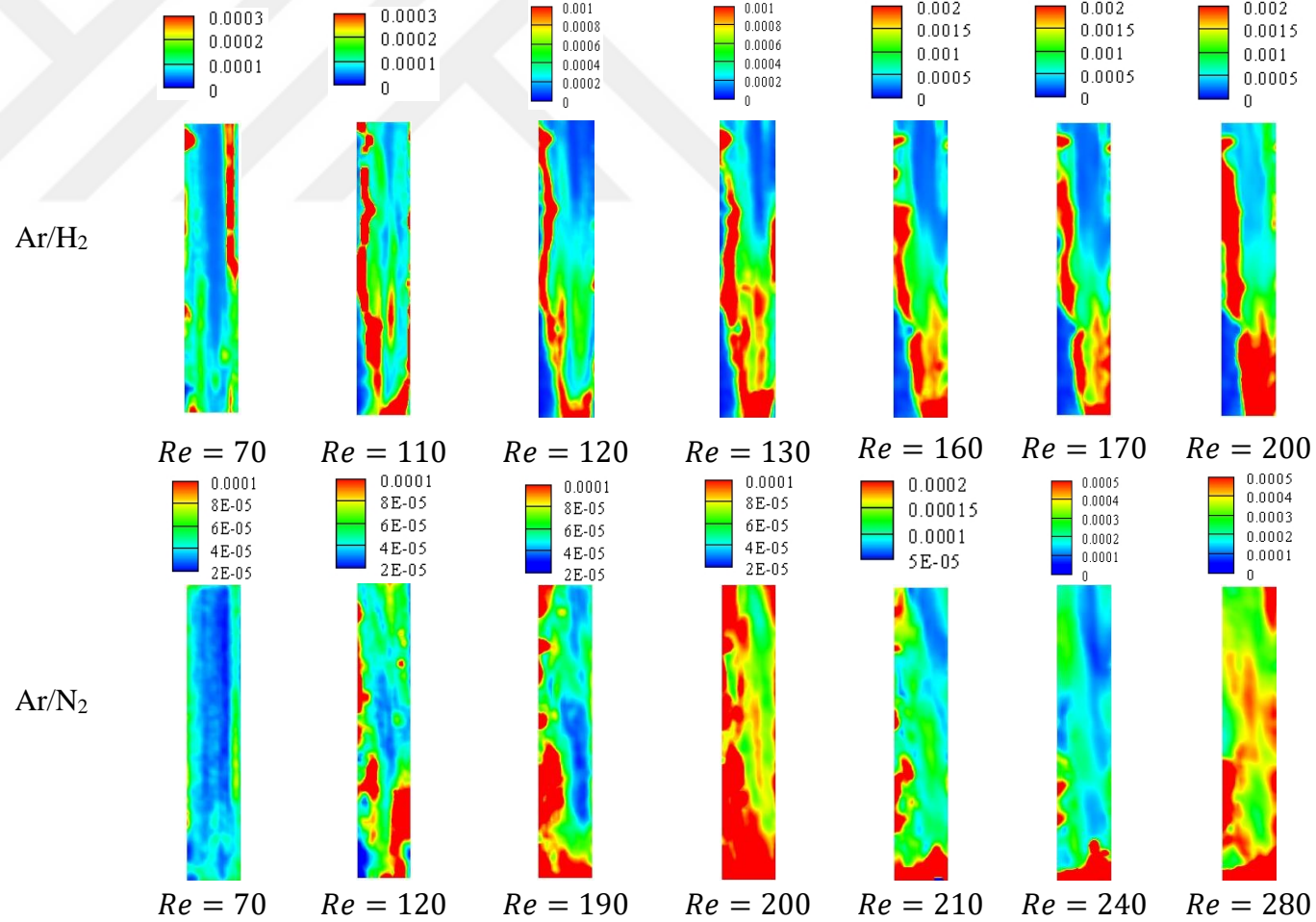
**Şekil 4.36** :  $rz$  düzleminde boyutsuz türbülans yoğunluğunun  $Re$  sayısı ile değişimi. a) Ar/H<sub>2</sub> b) Ar/N<sub>2</sub>.

$Re$  sayısı ve gaz özelliklerinin türbülans yoğunluğu alanı üzerindeki etkisinin incelenmesi için türbülans yoğunluğu kontur haritaları 4.37 ve 4.38'de verilmiştir. Kırmızı renk yüksek türbülans yoğunluğu bölgelerini gösterirken, mavi renk düşük türbülans yoğunluğu bölgelerini göstermektedir. Türbülans yoğunluğu kontur haritalarının karşıdan görüntülerine bakılığında kararlı vorteks rejimi  $Re = 70$ 'de tanımlanabilmektedir (Şekil 4.37). Girdap hareketinin zayıf yapısından dolayı ise akış dalgalanmaları genellikle  $z$  eksenine boyuncadır. Ar/H<sub>2</sub> akışının kritik bölgesi olan  $Re = 110$ 'a kadar Ar/H<sub>2</sub> akışının türbülans yoğunluğu Ar/N<sub>2</sub> akışından neredeyse 3 kat daha yüksektir. Bu noktadan sonra, türbülans yoğunlukları arasındaki fark 10 katına kadar

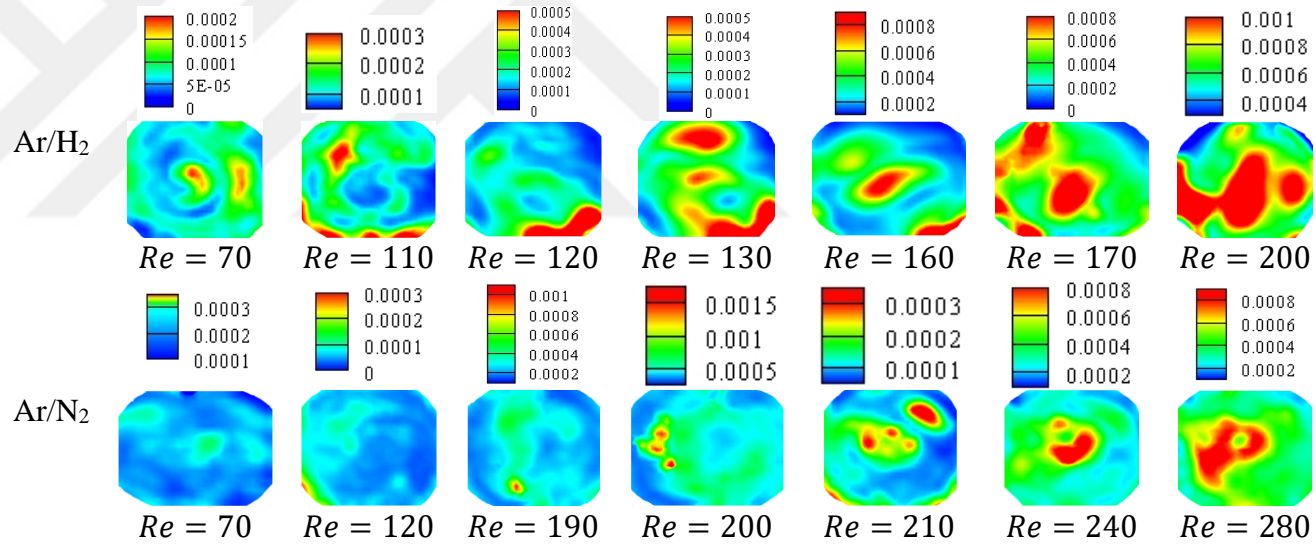
çıkmıştır. Bu, Ar/H<sub>2</sub> akışındaki akış dalgalanmalarının Ar/N<sub>2</sub> akışından daha fazla olduğunun bir göstergesidir. Ar/N<sub>2</sub> akışının kritik bölgesi olan  $Re = 210$ 'dan sonra, türbülans yoğunlukları arasındaki fark 4 katına düşmüştür. Girdap yapısının oluşumu hız dalgalanmalarının sebebi olarak bilinmekte ve çember içerisindeki akışkan partiküllerinin kalma zamanını arttırdığı için de gaz akımları arasındaki karışmayı iyileştirmektedir [108].

Şekil 4.38'de radyal düzlem-4'teki türbülans yoğunluğu kontur haritaları gösterilmektedir. Türbülans yoğunluğu değerlerinin artan eğilimi her bir gaz akışında açıkça gözlenebilmektedir. Vorteks davranışının bir sonucu olarak türbülans yoğunluğu değerleri çember merkezine doğru artmaktadır. Kritik  $Re$  sayılarından sonra vorteks merkezinin hareket eden davranışından dolayı yüksek türbülans yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Akışkan partikülleri bu vorteks yapısı içerisinde hapsolmektedir, ki bu durum partiküllerin kalma zamanının çemberin ortalama kalma zamanından daha yüksek olmasına sebep olmaktadır.

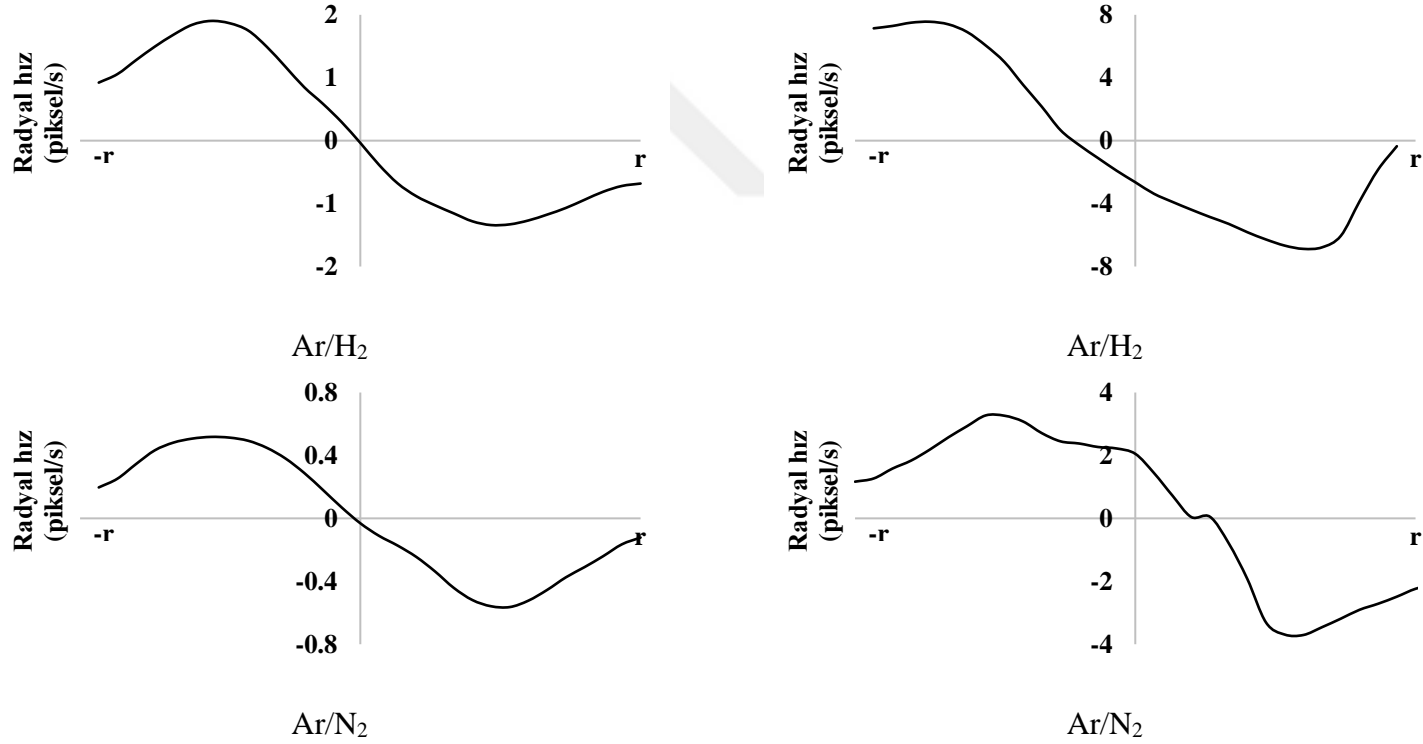
Gaz akış hidrodinamiği çalışmasının ikinci bölümünde (Bölüm 4.1.1.2) akışkan partikülleri üzerine etkiyen kuvvetlerin detaylı açıklaması verilmiştir [110]. Özetlemek gerekirse, basınç ve viskoz kuvvetleri arasındaki denge akışın kritik noktası olarak tanımlanan bir noktada bozulmaktadır. Bu nokta kararsız akış rejiminin başlangıç noktası olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.39'dan görülebileceği üzere, bu durum akış görüntüleme ve PIV deneylerinden elde edilen Ar/H<sub>2</sub> ve Ar/N<sub>2</sub> akışlarının radyal hız profilleri ile de tutarlıdır. Zorlanmış vorteks akış ve laminar akış profillerinin bir örneği olarak radyal merkezde ölçülen radyal hız ve dolayısıyla dinamik basınç değerleri kritik  $Re$  noktasının altında sıfırdır.  $Re$  sayısının kritik noktaların üzerine arttırılmasıyla, atalet kuvvetleri ve de basınç kuvvetleri (yoğunluk ve viskozitenin bir fonksiyonu olarak), merkezkaç kuvvetleri tarafından dengelenemediği ve radyal hızlar zamana bağlı değiştiği için artış göstermektedir.



Şekil 4.37 : rz düzleminde kritik bölgelerin karşıdan görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları.



Şekil 4.38 : Kritik bölgelerin taban görüntülerinin türbülans yoğunluğu haritaları (düzlem-4).



**Şekil 4.39 :** Kararlı akış rejimi ( $Ar/H_2$  için  $Re = 90$  ve  $Ar/N_2$  için  $Re = 120$ ) ve kararsız akış rejimindeki ( $Ar/H_2$  için  $Re = 180$  ve  $Ar/N_2$  için  $Re = 240$ ) radyal hızların karşılaştırılması.

#### 4.1.2.2 Gaz hacim oranının akışın kritik $Re$ sayısı üzerindeki etkisi

Ar/H<sub>2</sub> akışı için jetlerin eşit  $Re$  sayılarında gerçekleştirilen deneylerine ek olarak, farklı hidrojen hacim oranlarının ( $y_{H_2} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ) kritik  $Re$  sayısı üzerindeki etkisinin araştırıldığı akış görüntüleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Argon ve hidrojenin  $Re$  sayılarını oranladığımızda jet çapı aynı ve kinematik viskozite değerleri sabit olduğu ( $\mu/\rho = \nu$ ) için aşağıdaki şekilde yazılmaktadır (Denklem 4.1-4.3). Bu sebeple hidrojenin hızı sabit tutularak belirlenen hacim kesri için argonun hızı ayarlanarak akış rejimi geçişlerinin olduğu kritik noktalar belirlenmiştir

$$Re_{Ar} = \frac{D_{jet} v_{Ar} \rho_{Ar}}{\mu_{Ar}} \quad (4.1)$$

$$Re_{H_2} = \frac{D_{jet} v_{H_2} \rho_{H_2}}{\mu_{H_2}} \quad (4.2)$$

$$\frac{Re_{Ar}}{Re_{H_2}} = \frac{v_{Ar} \nu_{H_2}}{v_{H_2} \nu_{Ar}} \quad (4.3)$$

Bu bölümde akışın kararlı yapıdan kararsız profile döndüğü kritik bölgeler belirlenmiştir. Her bir hidrojen oranı için değişen argon gazı  $Re$  sayısına göre ortalama kritik  $Re$  sayıları belirlenmiştir.

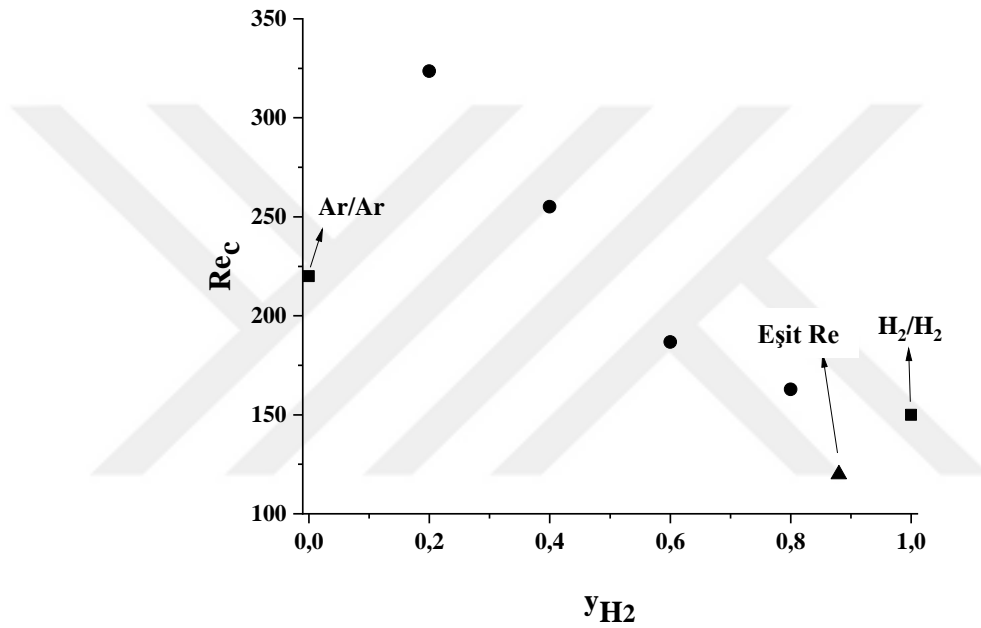
Çizelge 4.3'ten görüldüğü üzere hidrojen, argon ve hidrojen ve argonun ortalaması olmak üzere 3 adet kritik  $Re$  sayısı gösterilmektedir. Aynı zamanda ortalama kritik  $Re$  sayısı için kritik noktadaki dinamik basınç değerleri de verilmiştir. Gönderilen hidrojen hacim oranı arttıkça hidrojen için belirlenen kritik  $Re$  sayısı artmakta ve ortalama kritik  $Re$  sayısı ise azalmaktadır. Bunun sebebi, beslemedeki hidrojen oranı arttıkça beslenen argon gazının hız değerinin düşmesidir.

**Çizelge 4.3 :** Farklı gaz hacim oranlarındaki kritik  $Re$  sayıları.

| $y_{H_2}$ | $Re_{H_2}$ | $Re_{Ar}$ | $\overline{Re}_c$ | $\overline{P}_c$ | $\rho \nu^2 H_2$ | $\rho \nu^2 Ar$ | $\rho \nu^2 Ar / \rho \nu^2 H_2$ |
|-----------|------------|-----------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------------------------|
| 0.2       | 20         | 627       | 323               | 1.38             | 0.014            | 4.362           | 316.098                          |
| 0.4       | 40         | 470       | 255               | 1.06             | 0.055            | 2.454           | 44.451                           |
| 0.6       | 60         | 313       | 187               | 0.73             | 0.124            | 1.091           | 8.780                            |
| 0.8       | 110        | 216       | 163               | 0.77             | 0.417            | 0.515           | 1.235                            |

Şekil 4.40'ta hidrojen hacim oranına göre ortalama kritik  $Re$  sayısının değişimi gösterilmektedir. Jetlerin birinden beslenen hidrojen gazının hacim oranı arttıkça kritik

$Re$  sayısı azalmaktadır. Jetlerin her ikisinden de benzer gazlar gönderildiğinde gözlenen kritik  $Re$  sayısı değerleri ve argon ve hidrojen gazının eşit  $Re$  sayılarında beslendiği kritik  $Re$  sayısı değeri Şekil 4.40'ta gösterilmiştir. Vorteks mikserde hidrojenin karşısından hidrojen gazı gönderildiğinde, aynı ölçüde kuvvetlere sahip oldukları için, hidrojenin karşısından argon gazı gönderildiğinde kuvvetler arası denge daha düşük  $Re$  sayılarında bozulmaktadır. Bu durum  $H_2/H_2$  akışının kritik  $Re$  sayısının eşit  $Re$  değerlerinde beslenen  $Ar/H_2$  akışından neden daha yüksek olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 4.40 : Hidrojen hacim oranına göre ortalama kritik  $Re$  değişimi.

#### 4.2 Gaz Katı Akış Hidrodinamiği

Gaz katı akış hidrodinamiği çalışması içerisinde farklı boyut ve yoğunluktaki katı partiküllerin hava ile karışma hidrodinamikleri farklı vorteks mikser geometrileri için akış görüntüleme ve basınç verilerinin analizi yöntemleri ile incelenmiştir. Gaz-katı akış görüntüleri analizi ile gaz-katı akışkanlaşma hidrodinamiği incelenen partiküllerin çemberin farklı noktasına yerleştirilen fark basınç sensörleri ile basınç farkının belirlenmesi ile gaz-katı akışkanlaşma karakteristiği incelenmiştir. Zamana bağlı elde edilen basınç verilerinin Fourier transform metodu ile güç spektrumları elde edilerek akış profilindeki değişimler analiz edilmiştir.

#### 4.2.1 Partikül karakterizasyonu

Ticari olarak tedarik edilen ve üretilen partiküllerin karakterizasyonu gerçekleştirilerek partiküllerin boyut, yoğunluk ve geometrileri ortaya çıkarılmıştır. Böylece farklı özellikteki partiküllerin gaz-katı akış hidrodinamikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

##### 4.2.1.1 Partikül boyut analizi

Üretilen ve ticari olarak temin edilen partiküllerin öncelikle boyut analizleri verilmiştir. Partikül boyut ölçümü Zeta Sizer ve Master Sizer olmak üzere 2 farklı cihaz kullanılarak yapılmıştır.

##### Zeta-Sizer

Zeta potansiyeli (ZP) değeri taneler arasındaki itme veya çekme değerleri ve tanelerin dağılıma mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir. Partiküllerin kararlı dağılımları zeta potansiyeli değeri  $-30 \text{ mV} < ZP < +30 \text{ mV}$  aralığı dışında iken elde edilmektedir [111]. Çizelge 4.4'te sentezlenen partiküllerin zeta potansiyelleri ve ortalama partikül boyutları gösterilmektedir. Ortalama partikül boyutu değerleri sayıca %1 in altında olan boyut değerleri ihmal edilerek hesaplanmıştır. En düşük partikül boyutuna (PB) sahip ZnO partiküllerinin ZP değeri kararlı bölgede yer almaktadır. Ancak, silika, alümina ve titanyum dioksit partiküllerinin zeta potansiyel değerlerinin kararsız bölgede oldukları ve nano birikmeye meyilli oldukları görülmektedir.

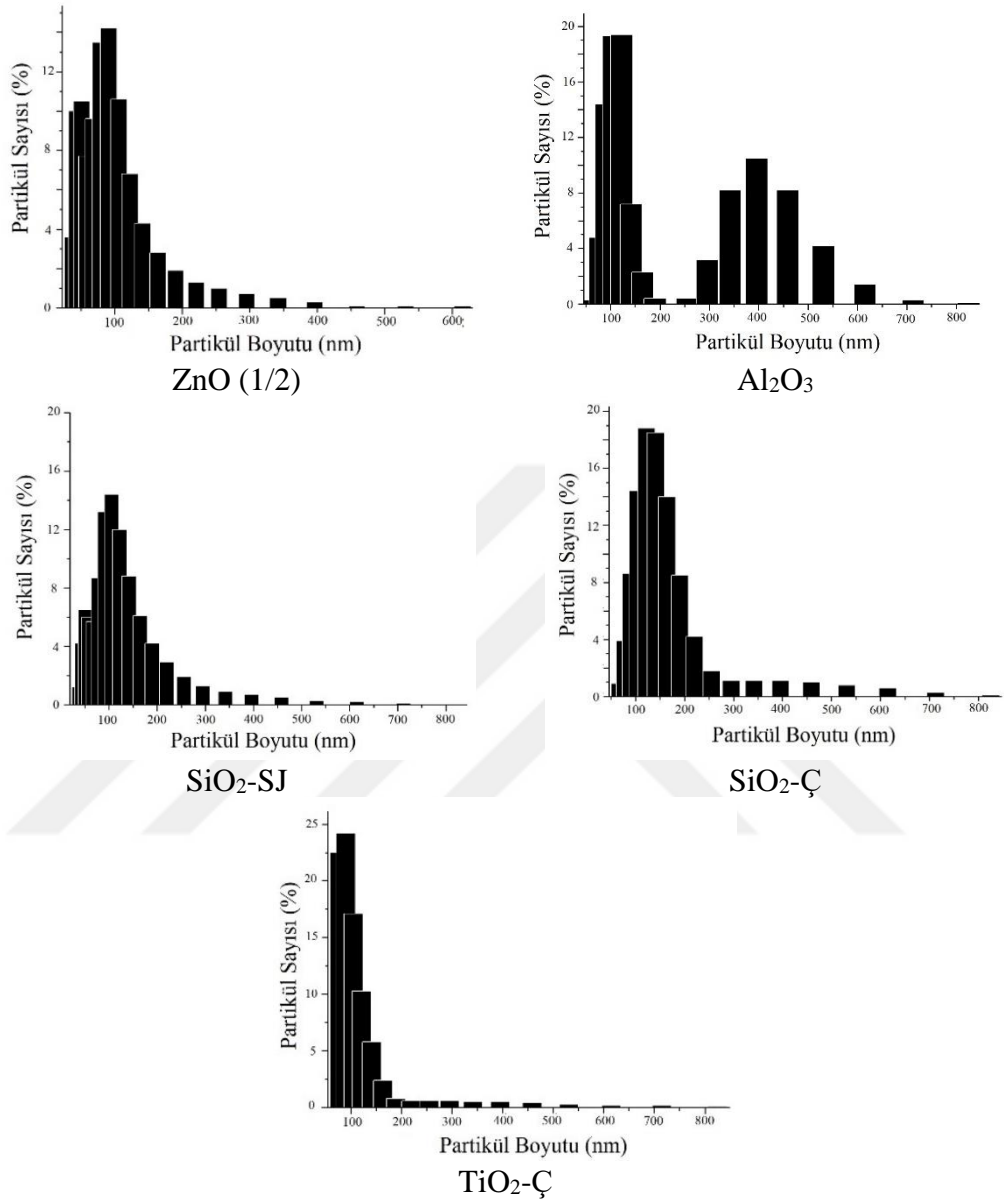
**Çizelge 4.4 :** Zeta potansiyeli (ZP) ve ortalama partikül boyutları (PB).

| Partikül                       | Üretim Yöntemi | ZP (mV) | PB*(nm) |
|--------------------------------|----------------|---------|---------|
| ZnO                            | Çöktürme (Ç)   | 42.80   | 63.82   |
| SiO <sub>2</sub>               | Sol-jel (SJ)   | -21.10  | 96.21   |
| SiO <sub>2</sub>               | Çöktürme (Ç)   | -19.20  | 148.56  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Sol-jel (SJ)   | 15.93   | 220.59  |
| TiO <sub>2</sub>               | Çöktürme (Ç)   | -15.50  | 104.85  |

\*Partikül boyut dağılımına göre %1'in altındaki boyutlar ihmal edilmiştir.

Şekil 4.41'de ise elde edilen partiküllerin partikül boyut dağılımları gösterilmektedir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri hariç diğer partiküllerin nano ölçekte homojen boyut dağılımına sahip oldukları görülmektedir. ZnO partikülleri için partiküllerin çoğu 50-150 nm, SiO<sub>2</sub>-Ç ve SiO<sub>2</sub>-SJ partiküllerinin çoğu 50-200 nm, TiO<sub>2</sub>-Ç partiküllerinin çoğu ise

100 nm civarlarındadır. Ancak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  partiküllerinin partikül boyut dağılımlarının nano ve mikro olmak üzere iki ölçekte değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 4.41 : Partikül boyut dağılımı.

### Master-Sizer

Master sizer ile gerçekleşen partikül boyut ölçümlerinde partikül sayısının %50'nden fazlasının ortalama çapını gösteren  $D_v(50)$  boyutu esas alınmıştır.

**Çizelge 4.5 :** Master Sizer sonuçlarına göre ortalama partikül boyutu.

| Partikül                          | Üretim Yöntemi | D <sub>v</sub> (10) (µm) | D <sub>v</sub> (50) (µm) | D <sub>v</sub> (90) (µm) |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ZnO-1                             | Ticari         | 1.53                     | 7.61                     | 20.40                    |
| ZnO-2                             | Çöktürme       | 3.38                     | 7.41                     | 13.80                    |
| SiO <sub>2</sub> -1               | Sol-jel        | 8.35                     | 56.20                    | 446.00                   |
| SiO <sub>2</sub> -2               | Çöktürme       | 7.45                     | 27.30                    | 47.00                    |
| SiO <sub>2</sub> -3               | Sol-jel        | 4.76                     | 17.10                    | 37.70                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 | Ticari         | 15.90                    | 26.30                    | 40.20                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 | Sol-jel        | 35.50                    | 205.00                   | 437.00                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 | Sol-jel        | 2.93                     | 10.20                    | 61.50                    |
| TiO <sub>2</sub> -1               | Ticari         | 0.38                     | 0.85                     | 83.40                    |
| TiO <sub>2</sub> -2               | Çöktürme       | 2.72                     | 20.90                    | 39.00                    |
| TiO <sub>2</sub> -3               | Ticari         | 1.13                     | 4.87                     | 133.00                   |

Eklerdeki Şekil A.23'te gösterilen partikül boyut dağılımlarına göre ZnO-1 ve ZnO-2, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3 ve TiO<sub>2</sub>-1 ve TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinin çift partikül boyut dağılımı gösterdiği diğer partiküllerin ise daha uniform partikül boyutuna sahip oldukları belirlenmiştir.

#### 4.2.1.2 Partikül yığın yoğunluğu

Gaz-katı akışkanlaşma deneylerinde kullanılan partiküller farklı boyut ve partikül yoğunluklarında (ZnO=5.6 g/cm<sup>3</sup>; SiO<sub>2</sub>=2.65 g/cm<sup>3</sup>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=3.95 g/cm<sup>3</sup>; TiO<sub>2</sub>=4.3 g/cm<sup>3</sup>) seçilmiştir. Bu sebeple sentezlenen ve temin edilen partiküllerin yığın yoğunlukları ölçülmüştür. Belirli miktarlarda alınan (m gram) partiküllerin kapladıkları hacim (v ml) 50 ml'lik mezur kullanılarak ölçülmüştür. Yığın yoğunlukları kg/m<sup>3</sup> olarak aşağıdaki denklem 4.5'e göre belirlenmiştir. Belirlenen partikül yoğunlukları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Üretilen ve ticari olarak temin edilen partiküllerin yığın yoğunlukları incelendiğinde, her bir partikül çeşidi için farklı partikül yığın yoğunluklarının elde edildiği görülmektedir. Bu durumda, yığın yoğunluğun gaz-katı akışkanlaşma üzerindeki etkisi inceleyebilecektir.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4.5)$$

**Çizelge 4.6 :** Akışkanlaşma deneylerinde kullanılan partiküllerin yığın yoğunlukları.

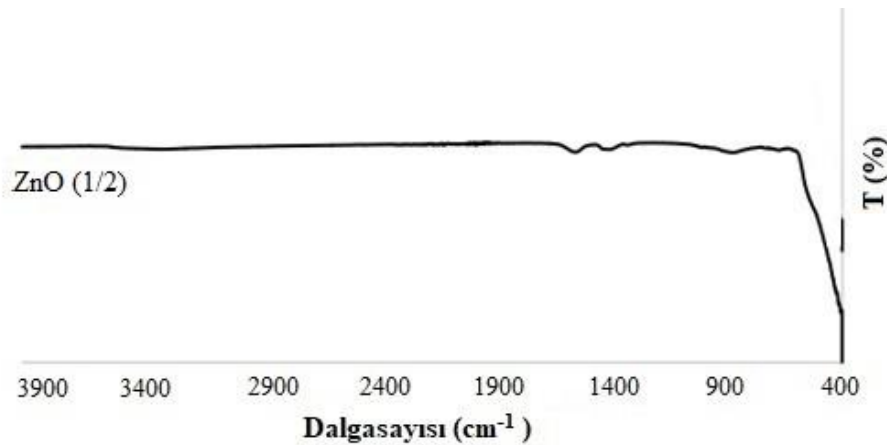
| Partikül                          | m (g) | v (ml) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|-------|--------|-----------------------------|
| ZnO-1                             | 21.44 | 37.00  | 579.42                      |
| ZnO-2                             | 4.63  | 11.80  | 392.71                      |
| SiO <sub>2</sub> -1               | 3.42  | 14.00  | 244.26                      |
| SiO <sub>2</sub> -2               | 5.91  | 6.50   | 909.38                      |
| SiO <sub>2</sub> -3               | 9.34  | 14.00  | 666.79                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 | 7.40  | 5.00   | 1479.72                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 | 10.74 | 12.00  | 894.99                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 | 7.72  | 15.50  | 498.32                      |
| TiO <sub>2</sub> -1               | 8.66  | 10.10  | 857.58                      |
| TiO <sub>2</sub> -2               | 6.88  | 8.40   | 819.07                      |
| TiO <sub>2</sub> -3               | 2.06  | 20.00  | 103.05                      |

#### 4.2.1.3 FTIR analizi

Gaz-katı akış hidrodinamikleri için kullanılan partiküllerden laboratuvarında üretilmiş olan partiküllerin FTIR analizleri aşağıda verilmiştir.

#### ZnO

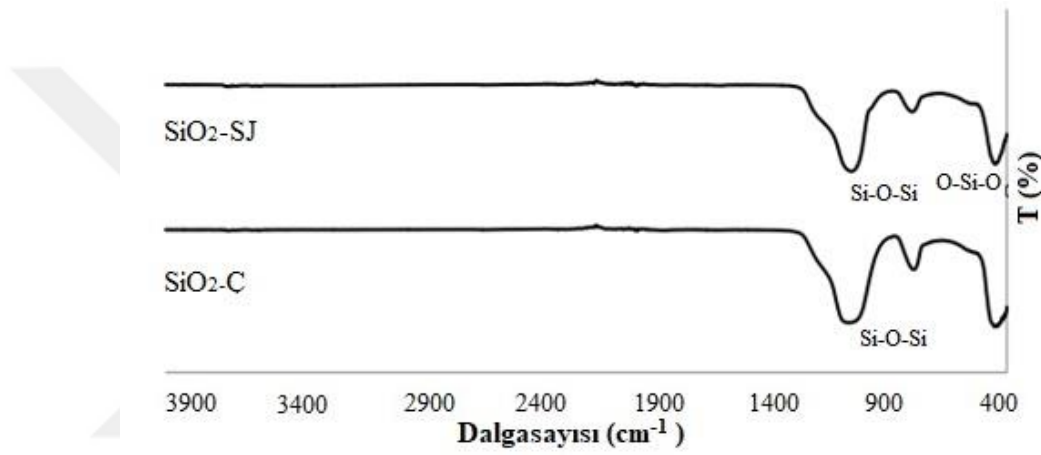
ZnO partiküllerinin karakteristik pikleri 450-600 cm<sup>-1</sup> aralığında gözlenmekte ve çinko oksit partikülleri bu dalga boyunda absorpsiyon yapmaktadır (Şekil 4.42). 493 cm<sup>-1</sup>'deki pik Zn ve O piklerinin titreşimlerine aittir. Stokiyometrik çinko oksit partikülünde (ZnO (1/2)) gözlenen 1410-1560 cm<sup>-1</sup>'deki pikler ise yapıda bulunan çinko asetatı aittir [112].



**Şekil 4.42 :** ZnO FTIR analizi.

## SiO<sub>2</sub>

İki farklı yöntemle üretilen silika partiküllerinin FTIR analizlerine bakıldığında 3437 cm<sup>-1</sup> ve 1632 cm<sup>-1</sup> de herhangi bir pikin veya bandın yer almaması silika yapısında H<sub>2</sub>O moleküllerinin olmadığı veya dikkate değer bir ölçüde olmadığına göstergesidir (Şekil 4.43). 1111 cm<sup>-1</sup> değerindeki güçlü pik ve yanındaki 1188 cm<sup>-1</sup> değerindeki küçük omuz veren pik ise Si-O-Si asimetrik gerilme (stretching) titreşimlerine ait piklerdir. 800 cm<sup>-1</sup>'deki pik Si-O-Si simetrik gerilme titreşimlerini gösterirken, 474 cm<sup>-1</sup>'deki karakteristik pik O-Si-O eğilme (bending) titreşimlerini vermektedir [113].



Şekil 4.43 : SiO<sub>2</sub> FTIR analizi.

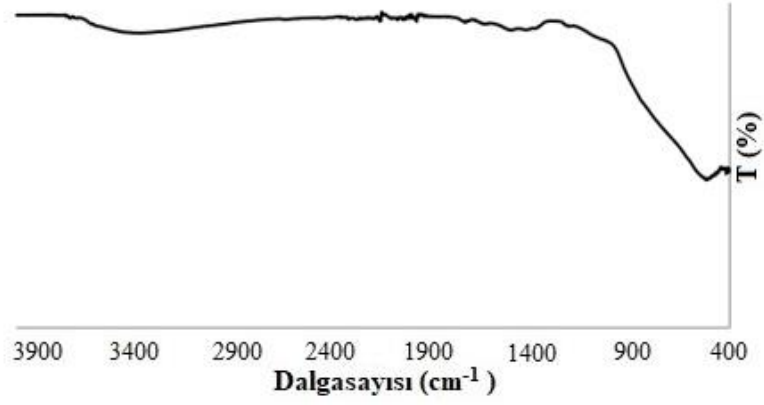
## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Şekil 4.44, çöktürme metoduyla elde edilen alümina partiküllerine aittir. Al-O bağının varlığını gösteren 500-750 cm<sup>-1</sup> aralığındaki pikler  $\delta$ -AlO<sub>6</sub>, 890-800cm<sup>-1</sup>'deki omuz ise  $\delta$ -AlO<sub>4</sub>'e aittir ki bu da  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün hem tetrahedral hem de oktahedral koordinatlar içerdiğini göstermektedir. 3400 cm<sup>-1</sup> değerindeki geniş pik ise <sup>-</sup>OH grubunu göstermekte ve yapı içerisinde az da olsa bağlı su molekülünün bulunduğunu söylemektedir. 1380 cm<sup>-1</sup>'de bulunan düşük şiddetli pik ise yapı içerisinde çok az da olsa NO<sub>3</sub><sup>-2</sup> iyonu olduğunu işaret etmektedir [114].

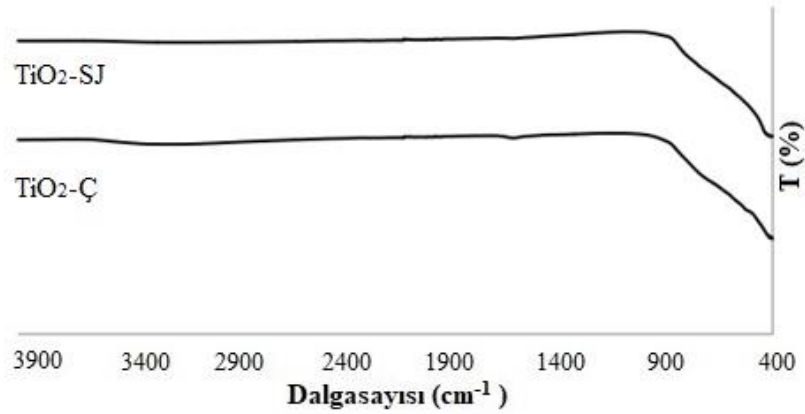
## TiO<sub>2</sub>

Çöktürme metoduyla üretilmiş olan titanyum dioksit partiküllerinin FTIR analizleri 400-4000 cm<sup>-1</sup> aralığında Şekil 4.45'te gösterilmektedir. 400-950 cm<sup>-1</sup> arasında oluşan bant birincil absorpsiyon piklerini göstermektedir. 800 cm<sup>-1</sup> dalga sayısı altında

bulunan pikler inorganik Ti-O-Ti yapısının özünde olan kafes titreşimlerinin varlığını işaret etmekte ve TiO<sub>2</sub> partiküllerinin oluşumunu kanıtlamaktadır. 3440 cm<sup>-1</sup>'deki düşük şiddetli bant ise H<sub>2</sub>O moleküllerinin OH gerilme titreşimlerine aittir [98].



Şekil 4.44 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FTIR analizi.

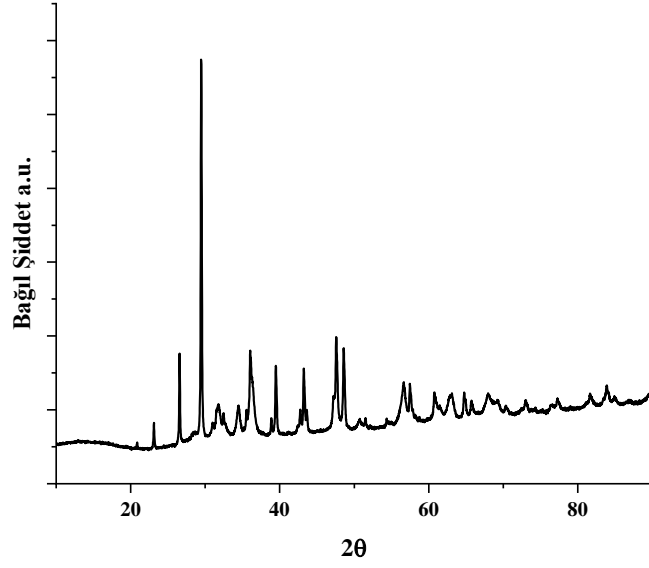


Şekil 4.45 : TiO<sub>2</sub> FTIR analizi.

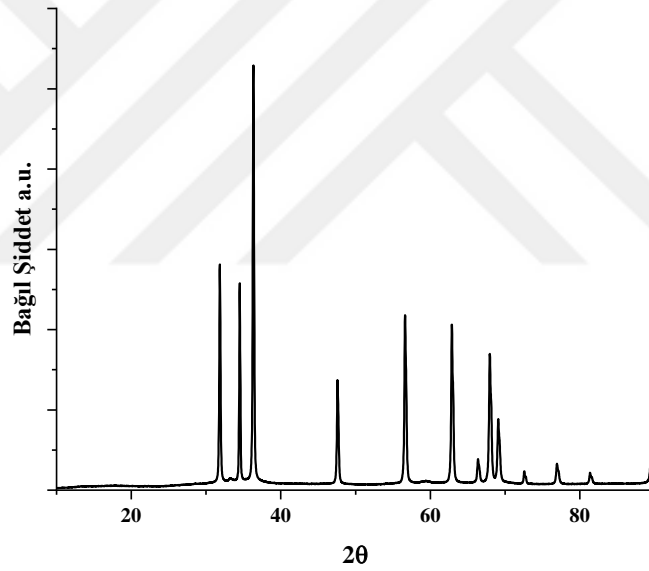
#### 4.2.1.4 XRD analizi

##### ZnO

Çinko oksit partikülleri, çinko oksitin standard kart numarası JCPDS: 36-1451'e göre tanımlanmaktadır [115]. Üretilen partiküllerin XRD spektrumları standard ile karşılaştırıldığında ZnO için en kararlı faz olan hekzagonal wurtiz yapısında oldukları görülmektedir (4.47) [116].



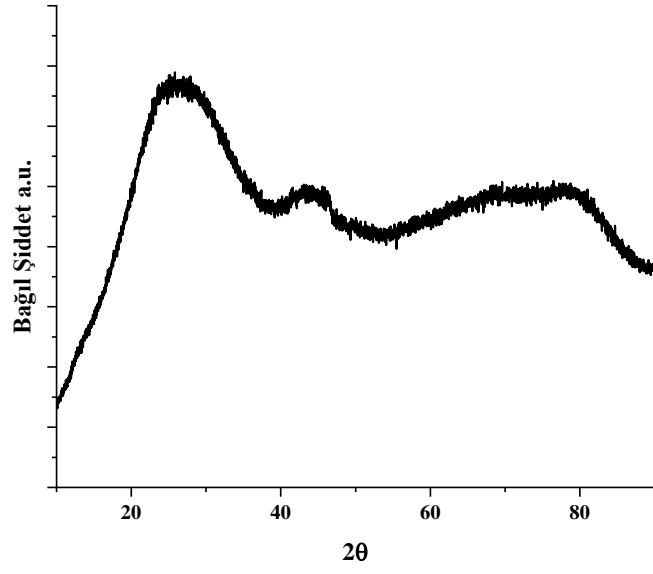
Şekil 4.46 : ZnO-1 XRD difraktogramı.



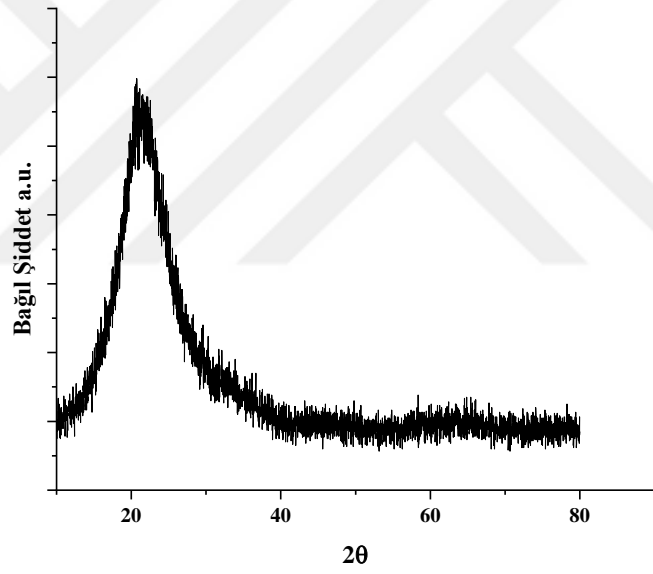
Şekil 4.47 : ZnO-2 XRD difraktogramı.

## SiO<sub>2</sub>

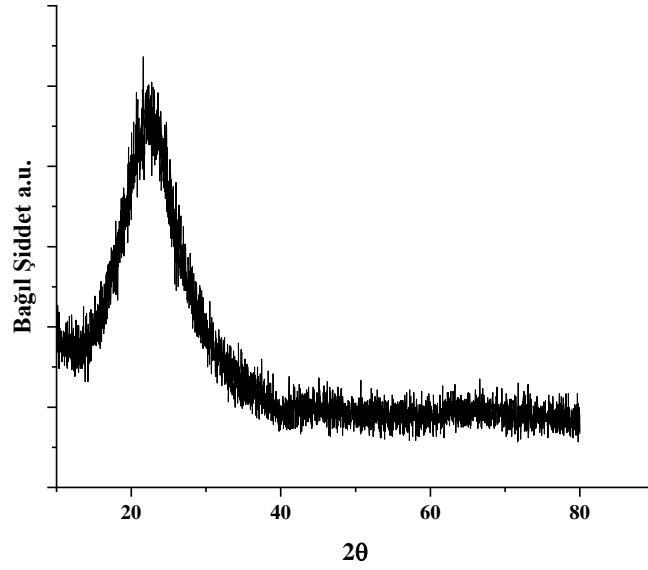
Her iki yöntemle üretilen silika partiküllerinin XRD analizlerine bakıldığında  $2\theta=25^\circ$  (SiO<sub>2</sub>-1),  $2\theta=21^\circ$  (SiO<sub>2</sub>-2) ve  $2\theta=23^\circ$  (SiO<sub>2</sub>-3) değerlerinde uygulanan ısıl işlemden kaynaklı amorf pikin varlığı görülmektedir [117].



Şekil 4.48 : SiO<sub>2</sub>-1 XRD difraktogramı.



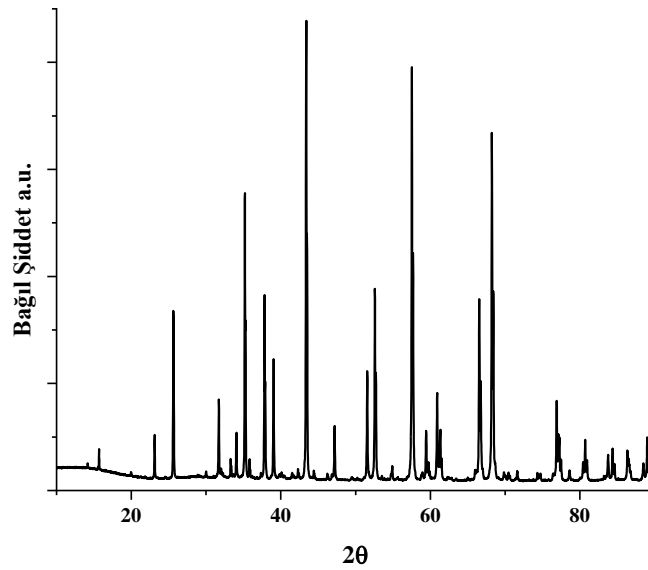
Şekil 4.49 : SiO<sub>2</sub>-2 XRD difraktogramı.



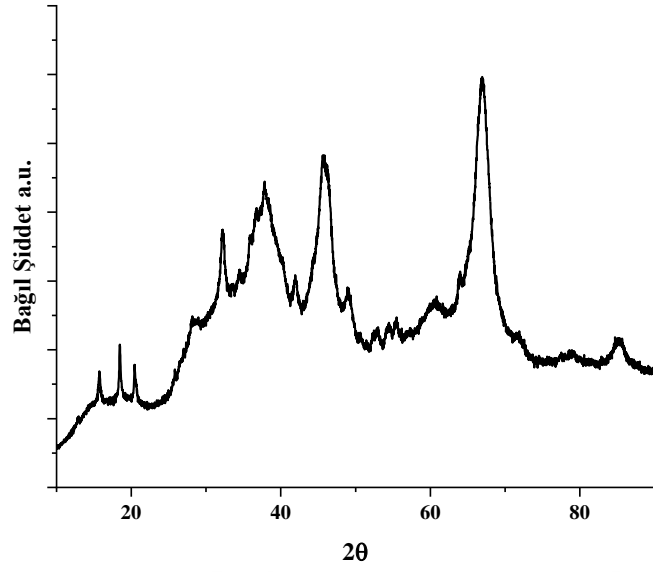
Şekil 4.50 : SiO<sub>2</sub>-3 XRD difraktogramı.

### Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

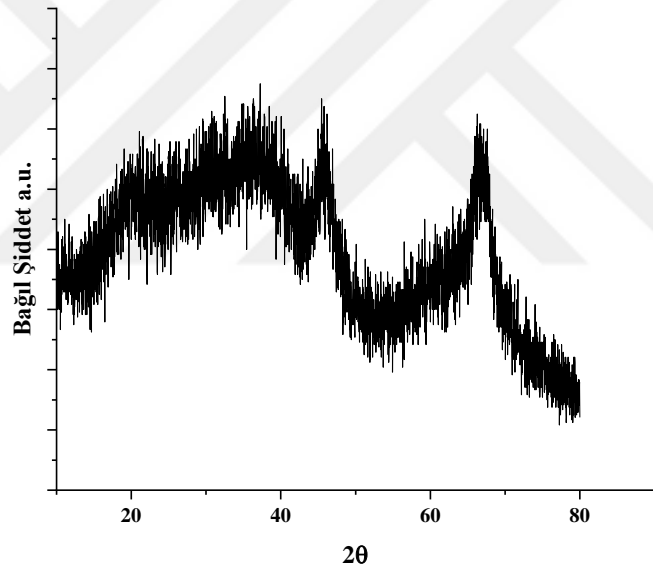
Gamma-alümina için literatürde yer alan JCPDS 29-63 standardına göre karakteristik piklerin  $2\theta=36^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $67^\circ$  değerlerinde olması gerekmektedir [117]. Şekil 4.52-4.53'te çöktürme metodları ile üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2 ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3 partiküllerine ait piklerin gözlenmesi gamma-alümina fazının elde edildiğini göstermektedir. Ticari olarak temin edilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 partiküllerinde de gamma alüminaya ait pikler görülmektedir.



Şekil 4.51 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 XRD difraktogramı.



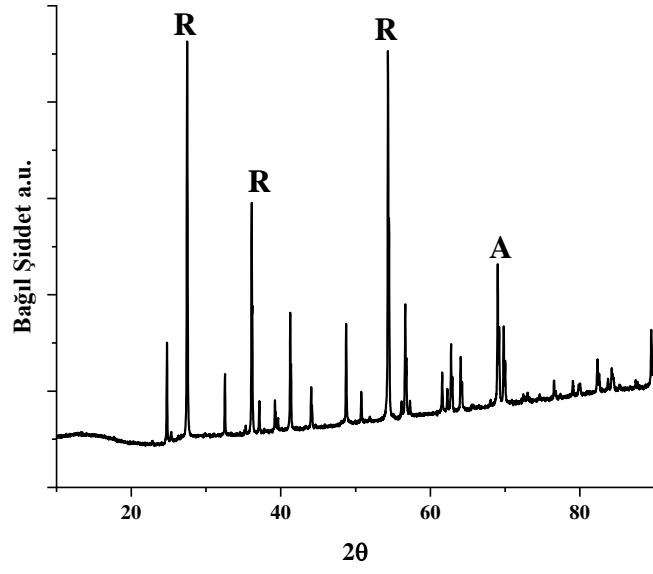
Şekil 4.52 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2 XRD difraktogramı.



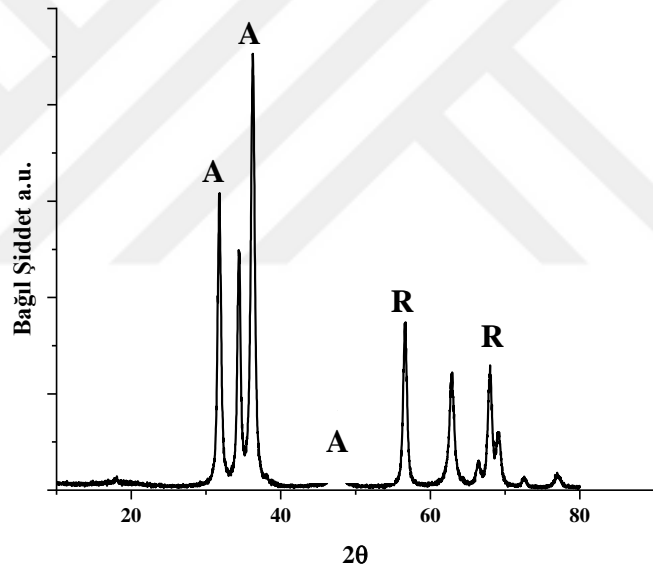
Şekil 4.53 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3 XRD difraktogramı.

## TiO<sub>2</sub>

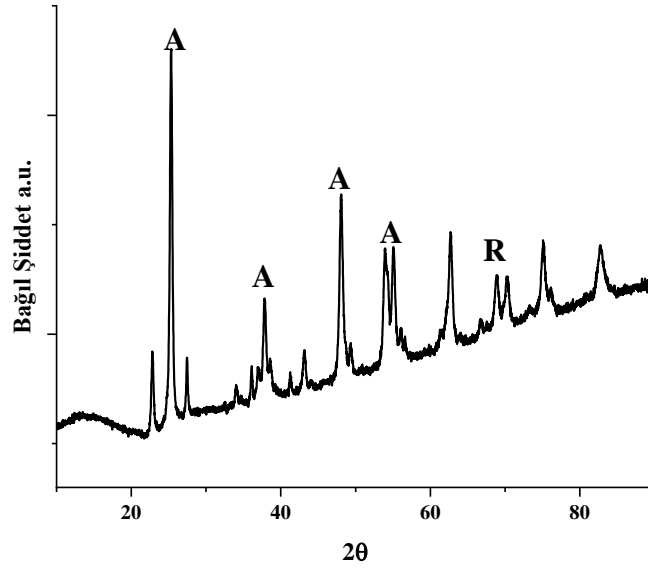
JCPDS 21-1272 ve JCPDS 21-1276 standart kart numaraları sırasıyla anataz ve rutil fazlarına aittir. Şekil 4.54 ve 4.56, ticari olarak temin edilen TiO<sub>2</sub> partiküllerini gösterirken, Şekil 4.55 çöktürme metodu ile üretilen partikülleri göstermektedir. Anataz ve rutil fazlarına ait pikler A ve R olarak tanımlanmıştır [98].



Şekil 4.54 : TiO<sub>2</sub>-1 XRD difraktogramı.



Şekil 4.55 : TiO<sub>2</sub>-2 XRD difraktogramı.



Şekil 4.56 : TiO<sub>2</sub>-3 XRD difraktogramı.

Üretilen partiküller için XRD spektrumlarına göre ortalama kristal boyutu (*d*) ve kafes parametreleri (*a* ve *c*) hesaplanmıştır. Ortalama Kristal boyutu (*d*) Debye-Scherrer denkleminde göre belirlenmiştir (Denklem 4.6) [118, 119].

$$d = \frac{\kappa\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (4.6)$$

$\beta$  maksimum yoğunluk değerine sahip pikin yarı yüksekliğindeki genişliği,  $\kappa$ , 0.9 olarak alınan sabit,  $\lambda$  X-ray dalga boyu ve  $\theta$  ise Bragg (maksimum pikin belirlediği açı) açısıdır.

Çizelge 4.7 : XRD spektrumuna göre belirlenen partikül özellikleri.

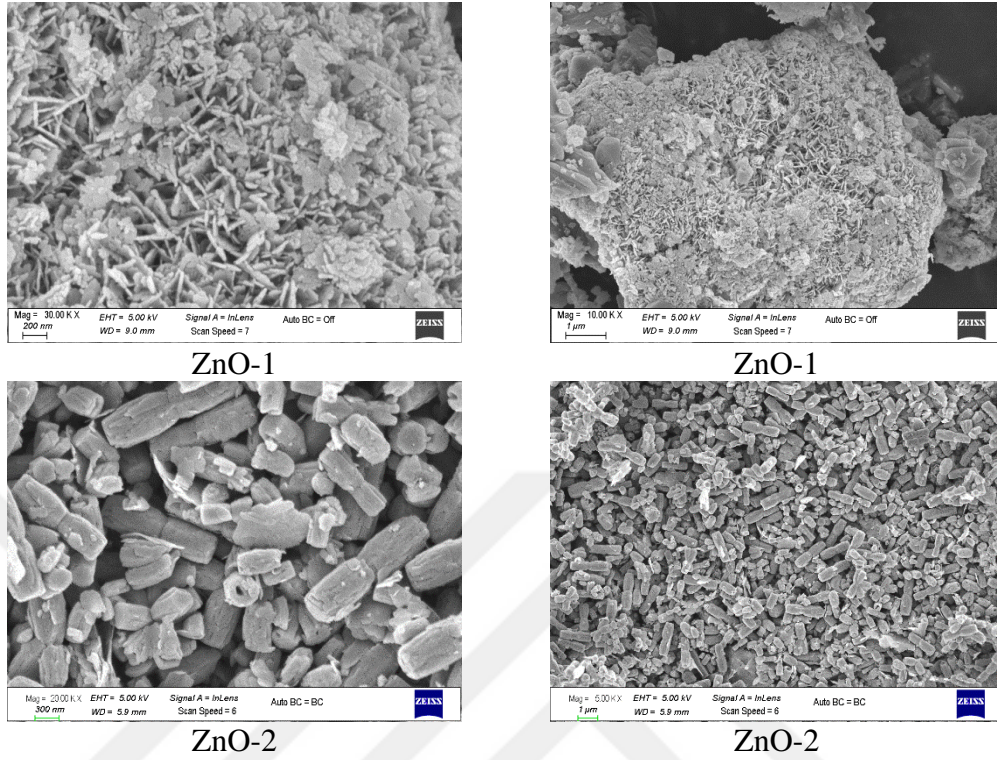
| Partikül            | D (nm) | Partikül                          | D (nm) |
|---------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| ZnO-1               | 44.51  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 | 85.25  |
| ZnO-2               | 40.86  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 | 2.20   |
| SiO <sub>2</sub> -1 | 0.64   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 | 4.13   |
| SiO <sub>2</sub> -2 | 0.99   | TiO <sub>2</sub> -1               | 59.98  |
| SiO <sub>2</sub> -3 | 1.25   | TiO <sub>2</sub> -2               | 13.15  |
|                     |        | TiO <sub>2</sub> -3               | 19.94  |

#### 4.2.1.5 SEM analizi

##### ZnO

Ticari olarak temin edilen ZnO-1 partiküllerinin partikül boyutunun 200 nm civarında olduğu ve pul benzeri yapıda olduğu görülmektedir. Stokiyometrik oranda çöktürme metoduyla hazırlanmış ZnO-2 partiküllerinin kalsinasyon sonrasında partikül boyutu

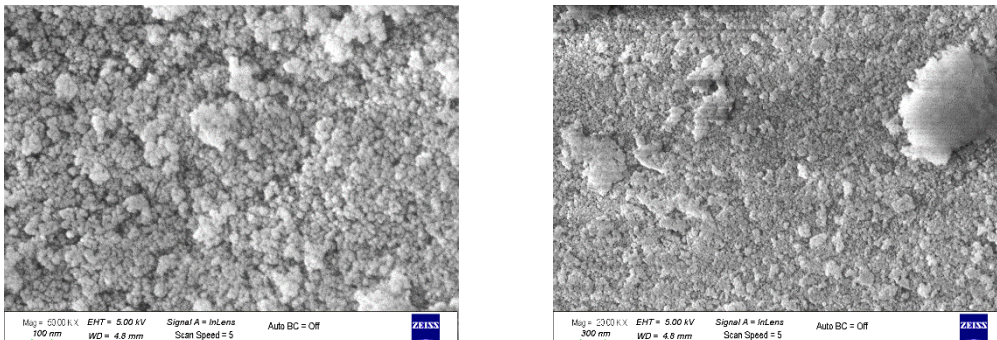
1  $\mu\text{m}$  olarak gözlenmiştir. Partikül morfolojisinin ise hegzagonal silindir yapıda olduğu görülmektedir.

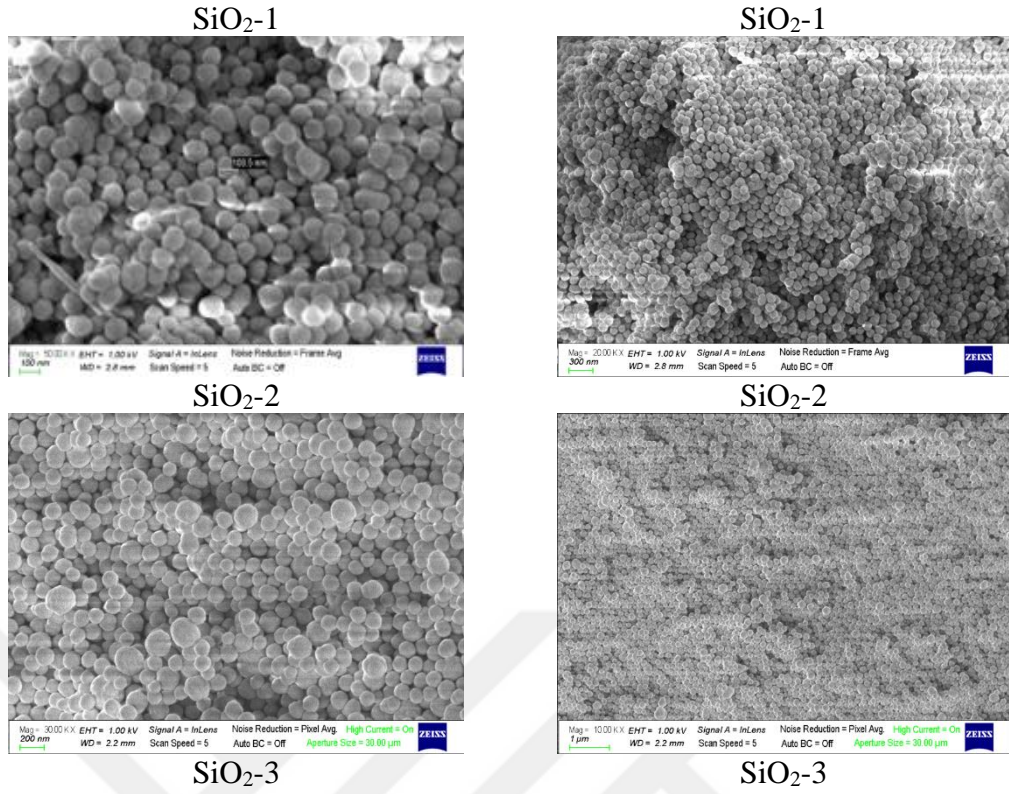


Şekil 4.57 : ZnO SEM analizi.

## SiO<sub>2</sub>

Şekil 4.58’de sol-jel (SiO<sub>2</sub>-1 ve SiO<sub>2</sub>-3) ve çöktürme (SiO<sub>2</sub>-2) metotlarıyla sentezlenen silika partiküllerinin SEM görüntüleri yer almaktadır. Her iki prosesle de elde edilen partiküllerin monodispers (eş dağılımlı) küresel partiküller oldukları görülmektedir. SEM analizlerine göre sol-jel metodu ile üretilen SiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinin boyutu 20 nm SiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinin boyutu ise 100 nm civarlarındadır. Çöktürme metoduyla üretilen partiküllerin (SiO<sub>2</sub>-2) boyutları 100±5 nm boyutlarındadır. Ek olarak, SiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinin diğerlerinin aksine birleşme eğilimi gösterdikleri tespit edilmiştir.

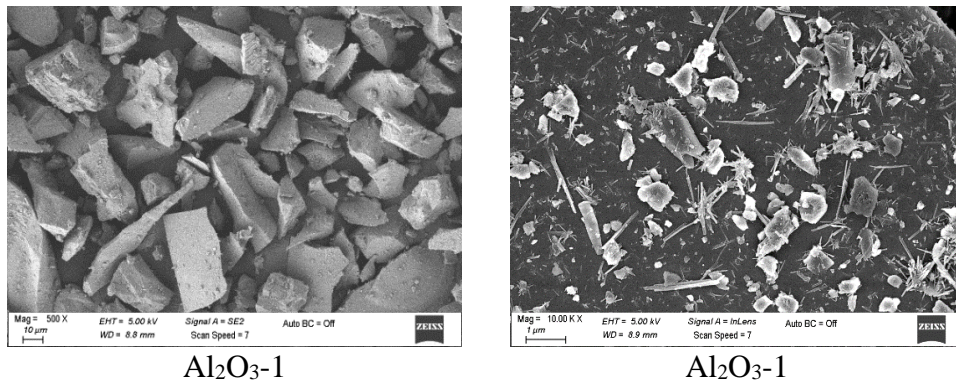


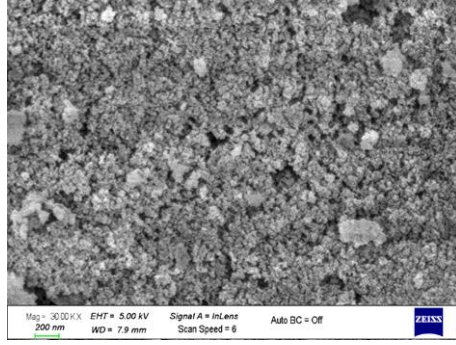


Şekil 4.58 : SiO<sub>2</sub> SEM analizi.

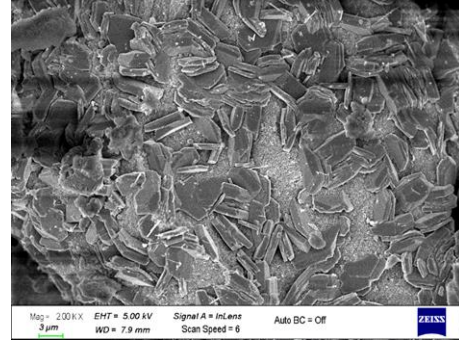
### Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Üretilen alümina partikülerinin (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2 ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3) SEM görüntülerine bakıldığında güçlü bir şekilde aglomerasyon olduğu ve amorf bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.59). Partiküllerin boyutları 5-10 nm boyutlarında olduğu için aglomerasyona meyilli yapıları vardır ve bu sebeple partikül boyutu ölçümü ile SEM görüntüleri için farklılıklar oluşabilmektedir. Ticari olarak temin edilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 partiküllerinin ise boyutları Master Sizer sonuçlarında da belirtildiği üzere 10 µm'den fazladır. Ticari olarak temin edilen ve üretilen partiküller prizmatik yapıdadır.

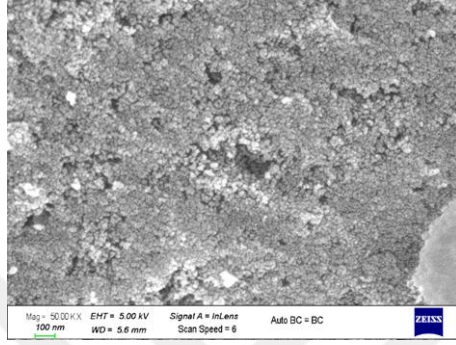




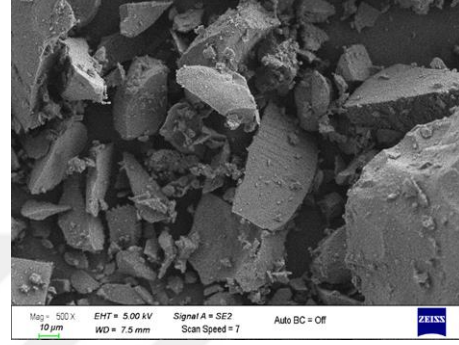
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2



Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2



Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3

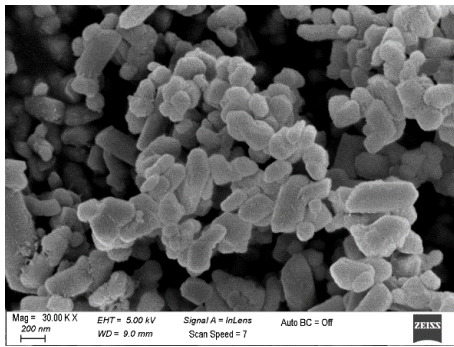


Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3

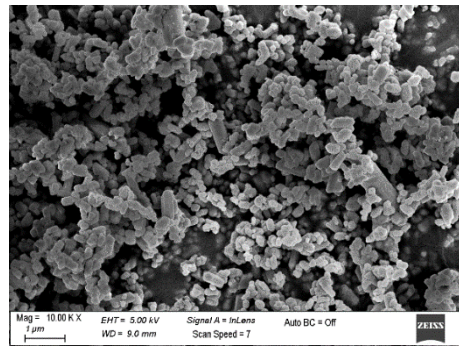
Şekil 4.59 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SEM analizi.

## TiO<sub>2</sub>

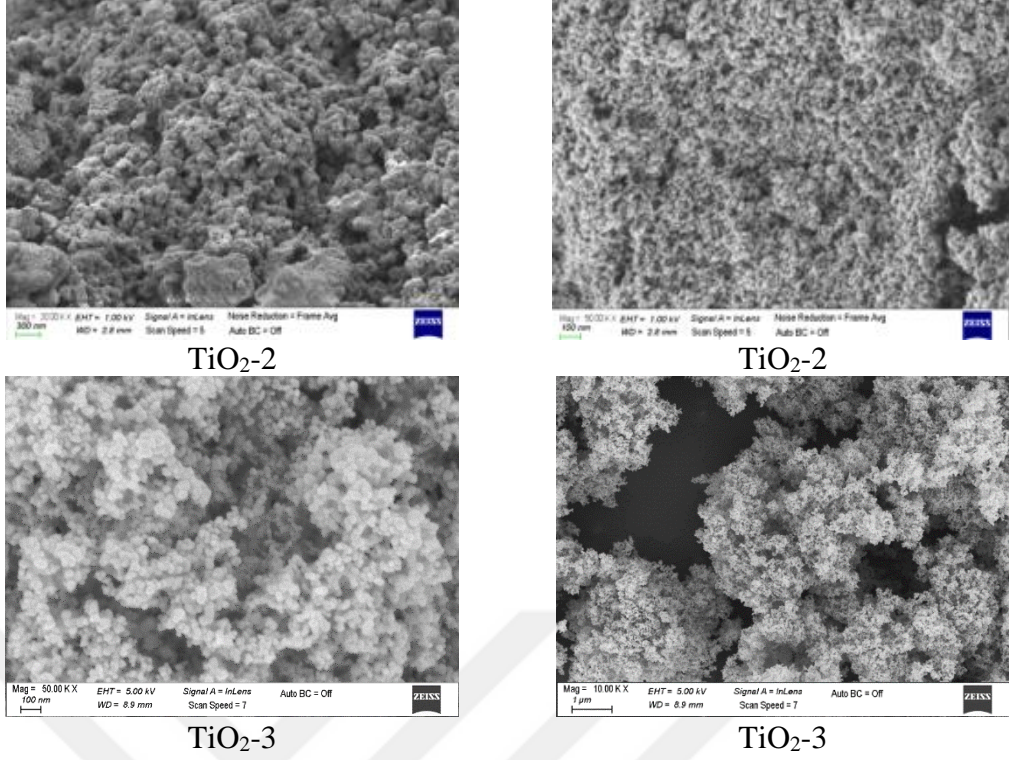
TiO<sub>2</sub> partiküllerinin yüzey morfolojisi SEM ile araştırılmıştır (Şekil 4.60). Ticari olarak temin edilen rutil fazındaki ve 1 µm boyutundaki TiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinin SEM boyutları 200 nm civarlarındadır ve partiküller tetragonal yapıdadır. Çöktürme prosesi ile sentezlenen TiO<sub>2</sub>-2 partikülleri 20-30 nm boyutlarındadır. Ayrıca partiküllerin birikme eğiliminde oldukları görülmektedir [98]. Yine ticari olarak sentezlenen Degussa P25 marka TiO<sub>2</sub>-3 partikülleri ortalama 20 nm boyutunda ve birikme eğilimindedir.



TiO<sub>2</sub>-1



TiO<sub>2</sub>-1



**Şekil 4.60 : TiO<sub>2</sub> SEM analizi.**

Çizelge 4.8’de partiküllerin Zeta Sizer, Master Sizer ve SEM analizleriyle belirlenen ortalama partikül boyutlarının karşılaştırılması verilmiştir. Kullanılan nanomalzemelerin SEM analizlerine göre ortalama aglomere boyutları hesaplanmıştır. Aglomere partikül boyutları mikrometre boyutlarındaki görüntülerdeki 20 adet aglomere haldeki partikülün boyutları hesaplanarak ortalaması alınmıştır. Zeta Sizer metodunda partiküller sıvı ortamında ve yüksek güçte ultrasonikasyon işlemi ile dağıtılarak boyutları ölçülmektedir. Bu sebeple bu metodla partiküller çok iyi şekilde dağıtıldıklarında elde edilen gerçeğe en yakın boyut ölçümleri belirlenmektedir. Aynı şekilde SEM analizlerinde de partiküllerin nano ölçekte incelenebilmesi ile nano boyuttaki ortalama partikül boyutları belirlenebilmektedir. Nanoboyuttaki ince partiküller çok yüksek yüzey alanı/hacim oranlarından dolayı, yüzey alanı gerektiren prosesleri iyileştirmekte ve araştırma laboratuvarlarından yüksek-ölçekli endüstrilere kadar tercih edilmektedir. Fakat nanomalzemelerin güçlü partiküller arası van der Waals kuvvetlerinden kaynaklı gerçekleşen birikme davranışından dolayı verimlilikleri düşmektedir. Akışkan yatakların fazlar arası karışmayı iyileştirdiği, yüksek kütle ve ısı transferi ile efektif yatak yüksekliği boyunca sınırlı basınç düşüşüne sebep olduğu bilinmektedir. Akışkan yatak hidrodinamiği daha önce de belirtildiği üzere partikül boyutu ve yoğunluğuna yüksek oranda bağlıdır. Geldart grup C ( $dp <$

30  $\mu\text{m}$ ) partikülleri genelde gösterdikleri yüksek aglomerasyon sebebi ile akışkanlaşma sırasında yatakta homojensizliklere sebep olmaktadır. Bu durum fazlar arası zayıf karışmaya sebep olmakta ve akışkan yatağın etkinliğini etkilemektedir [120]. Aglomerasyon davranışlarına rağmen, bu çalışmada seçilen partiküllerin vorteks mikser geometrisindeki akışkanlaşma hidrodinamiklerinin ortaya çıkarılması önemlidir. Bu tez çalışmasında kullanılan metal oksit partikülleri gaz-katı akış davranışının hakim olduğu çok sayıda katalitik reaksiyonda kullanılmaktadır. Bu reaksiyonların vorteks mikser reaktöründe geliştirilmesi için öncelikle bu partiküllerin akışkanlaşma davranışları belirlenmesi hedeflenmiştir.

**Çizelge 4.8 :** Farklı metodlar ile ölçülen ortalama partikül boyutu karşılaştırılması.

| Partikül                          | Üretim Yöntemi | Zeta Sizer (nm) | Master Sizer ( $\mu\text{m}$ ) | SEM (nm) | SEM Aglomere boyutu ( $\mu\text{m}$ )* |
|-----------------------------------|----------------|-----------------|--------------------------------|----------|--|
| ZnO-1                             | Ticari         | -               | 7.61                           | 300      | 3.00                                   |
| ZnO-2                             | Çöktürme       | 63.82           | 7.41                           | 500      | 0.83                                   |
| SiO <sub>2</sub> -1               | Sol-jel        | 120.72          | 56.20                          | 20       | 125.00                                 |
| SiO <sub>2</sub> -2               | Çöktürme       | 148.56          | 27.30                          | 110      | -                                      |
| SiO <sub>2</sub> -3               | Sol-jel        | 96.21           | 17.10                          | 175      | -                                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 | Ticari         | -               | 26.30                          | 20000    | 27.00                                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 | Sol-jel        | 83.94           | 205.00                         | 10       | 4.26                                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 | Sol-jel        | 1908.86         | 10.20                          | 10       | 20.96                                  |
| TiO <sub>2</sub> -1               | Ticari         | -               | 0.85                           | 365      | -                                      |
| TiO <sub>2</sub> -2               | Çöktürme       | 375.92          | 20.90                          | 20       | 0.72                                   |
| TiO <sub>2</sub> -3               | Ticari         | -               | 4.87                           | 20       | 2.50                                   |

\*Partiküllerin aglomere boyutları SEM görüntülerinden ortalama boyut olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9’da gaz-katı akış hidrodinamiği çalışmasında kullanılan partiküllerin özellikleri ve yatak özellikleri verilmiştir. Çembere daha önce de belirtildiği üzere sabit 5 ml’lik mezür hacmini karşılayacak kadar partikül yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Fakat yüklenen partiküllerin jet bölgesine de yayılması ile statik yatak yüksekliğinde (3-4.3 cm) farklılıklar gözlenmiştir. Nanopartikül malzemelerin ayrı partiküller yerine daha geniş formlarda yüksek gözenekli aglomere (100-400 $\mu\text{m}$ ) formlarda akışkanlaşabildiği bilinmektedir [121]. Bu sebeple kullanılan partiküllerin boyutlarını veren Master Sizer ortalama boyutları Çizelge 4.9’da verilmiştir. Partikül yoğunluğu ve yığın yoğunluğu değerlerinden yatak boşluğu ( $\epsilon$ ) değerleri hesaplanmıştır. Partikül yığın yoğunluğu azaldıkça partikül içerisindeki porozite arttığı için yatak boşluğu değerleri de artmıştır. Partiküllerin Geldart sınıflandırması ise Şekil 2.11’e göre partikül-akışkan arasındaki yoğunluk farkı ve Master Sizer’ a göre belirlenen ortalama partikül boyutu değerlerine göre belirlenmiştir.

Çizelge 4.9 : Partikül boyutu, yoğunluk, yatak özellikleri ve Geldart'ın grup analizi.

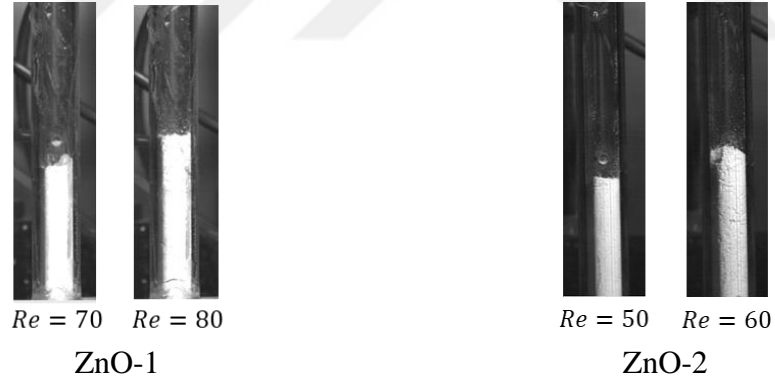
| Partikül özellikleri                 | R1     |                     |                  |         |         |                                |           |           |                  | R2      | R3               |         |         |
|--------------------------------------|--------|---------------------|------------------|---------|---------|--------------------------------|-----------|-----------|------------------|---------|------------------|---------|---------|
|                                      | ZnO    |                     | SiO <sub>2</sub> |         |         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |           |           | TiO <sub>2</sub> |         | TiO <sub>2</sub> |         |         |
| Partikül                             | 1      | 2                   | 1                | 2       | 3       | 1                              | 2         | 3         | 1                | 2       | 3                | 3       | 3       |
| $\bar{d}_p$ (µm)                     | 7.61   | 7.41                | 56.2             | 27.3    | 17.1    | 26.3                           | 205       | 10.2      | 0.85             | 20.9    | 4.87             | 4.87    | 4.87    |
| Yığın yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )  | 579.42 | 392.71              | 244.26           | 909.38  | 666.79  | 1479.72                        | 894.99    | 498.32    | 857.58           | 819.07  | 103.05           | 103.05  | 103.05  |
| Partikül yoğunluğu (m <sup>3</sup> ) | 5610   | 5610                | 2650             | 2650    | 2650    | 3965                           | 3950      | 3950      | 4260             | 4230    | 4230             | 4230    | 4230    |
| Morfoloji                            | Pul    | Hekzagonal silindir | Küresel          | Küresel | Küresel | Prizmatik                      | Prizmatik | Prizmatik | Tetragonal       | Küresel | Küresel          | Küresel | Küresel |
| Katı ağırlığı (g)                    | 2.88   | 2.54                | 1.13             | 4.05    | 2.438   | 6.24                           | 4.23      | 1.83      | 3.67             | 3.28    | 0.103            | 0.44    | 1.5     |
| Yatak hacmi (m <sup>3</sup> )        | 5E-06  | 6E-06               | 5E-06            | 4E-06   | 4E-06   | 4E-06                          | 5E-06     | 4E-06     | 4E-06            | 4E-06   | 1E-06            | 4E-06   | 1E-05   |
| Statik yatak yüksekliği (Hp)(m)      | 0.042  | 0.043               | 0.033            | 0.035   | 0.039   | 0.038                          | 0.040     | 0.031     | 0.041            | 0.029   | 0.042            | 0.038   | 0.033   |
| Yatak boşluğu (ε)                    | 0.90   | 0.93                | 0.91             | 0.66    | 0.75    | 0.63                           | 0.77      | 0.87      | 0.80             | 0.81    | 0.98             | 0.98    | 0.98    |
| Geldart Grubu                        | C      | C                   | A                | A       | C       | A-C                            | B         | C         | C                | C-A     | C                | C       | C       |

## 4.2.2 Akış görüntüleme ve basınç verilerinin analizi

Farklı boyut, yoğunluk ve morfolojideki partiküllerin  $D_{jet}/D_ç=1/2$  geometrisindeki gaz-katı akışkanlaşma hidrodinamikleri ve  $TiO_2-3$  partikülünün  $D_{jet}/D_ç=1/3$  ve  $D_{jet}/D_ç=1/4$  geometrilerindeki akışkanlaşma hidrodinamiklerine bu bölümde yer verilmiştir.

### 4.2.2.1 ZnO

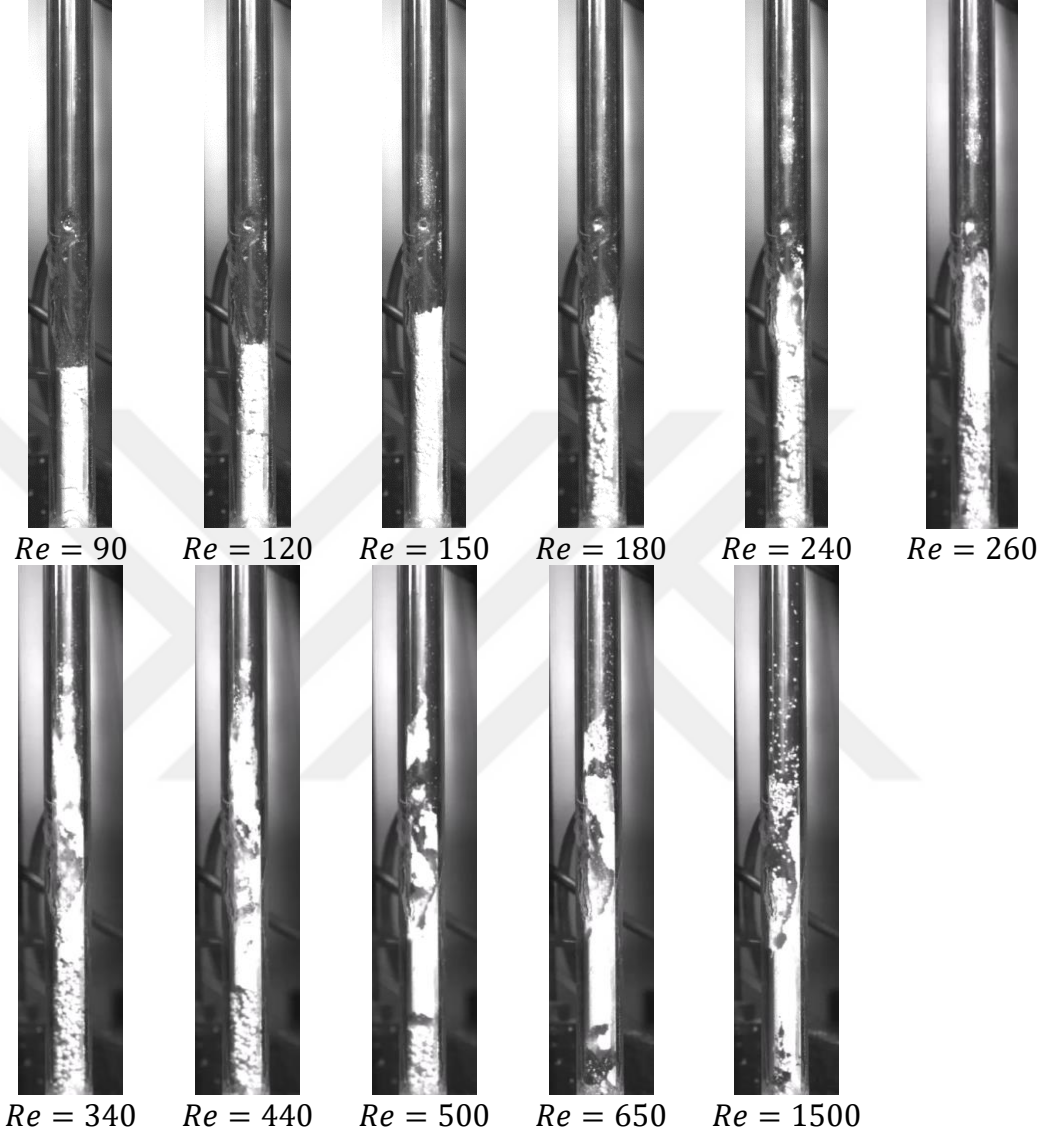
Farklı boyut ve yoğunluktaki ZnO partiküllerinin akışkanlaşma karakteristikleri bu bölümde incelenmiştir. ZnO-1 partikülünün boyutu  $7.6 \mu m$  ve ZnO-2 partikülünün boyutu ise  $7.41 \mu m$ 'dir. Yığın yoğunlukları ise sırasıyla  $580$  ve  $392 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Bu çalışmada, akış görüntüleme deneylerine göre sabit yataktaki katı hareketinin ilk olarak gözlemlendiği  $Re$  sayısı değeri minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı olarak tanımlanmıştır. Partikül boyutu yüksek olan ZnO partiküllerinin  $Re = 260$  değerinde, tane boyutu düşük olan partiküllerin ise  $Re = 60$  değerinde minimum akışkanlaşma özelliği gösterdikleri görülmektedir (Şekil 4.61). ZnO partiküllerinin yoğunluk ve tane boyutu arttıkça partikülün minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısında artış gözlenmiştir.



Şekil 4.61 : ZnO minimum akışkanlaşma  $Re$ .

Farklı  $Re$  değerleri için gaz-katı akış görüntüleri incelendiğinde tane boyutu ve yoğunluğu büyük ZnO-1 partikülleri homojen (partikül) akışkanlaşma özelliği göstermemiştir (Şekil 4.62). Çember boyunca gaz-katı akış görüntüleri incelendiğinde gönderilen gaz akışı ile çember tabanındaki partikül boyutunun arttığı ve ince partiküllerin çember boyunca akışkanlaştığı gözlenmiştir.  $Re = 440$ 'ta ise dipte bulunan büyük boyutlu partiküller hareket etmeye başlamıştır. Ancak bu partiküllerin tamamının akışkanlaşma hareketi göstermesi  $Re = 550$ 'de oluşmuştur. Bütün katı yatağının akışkanlaştığı bu bölge kritik minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı olarak

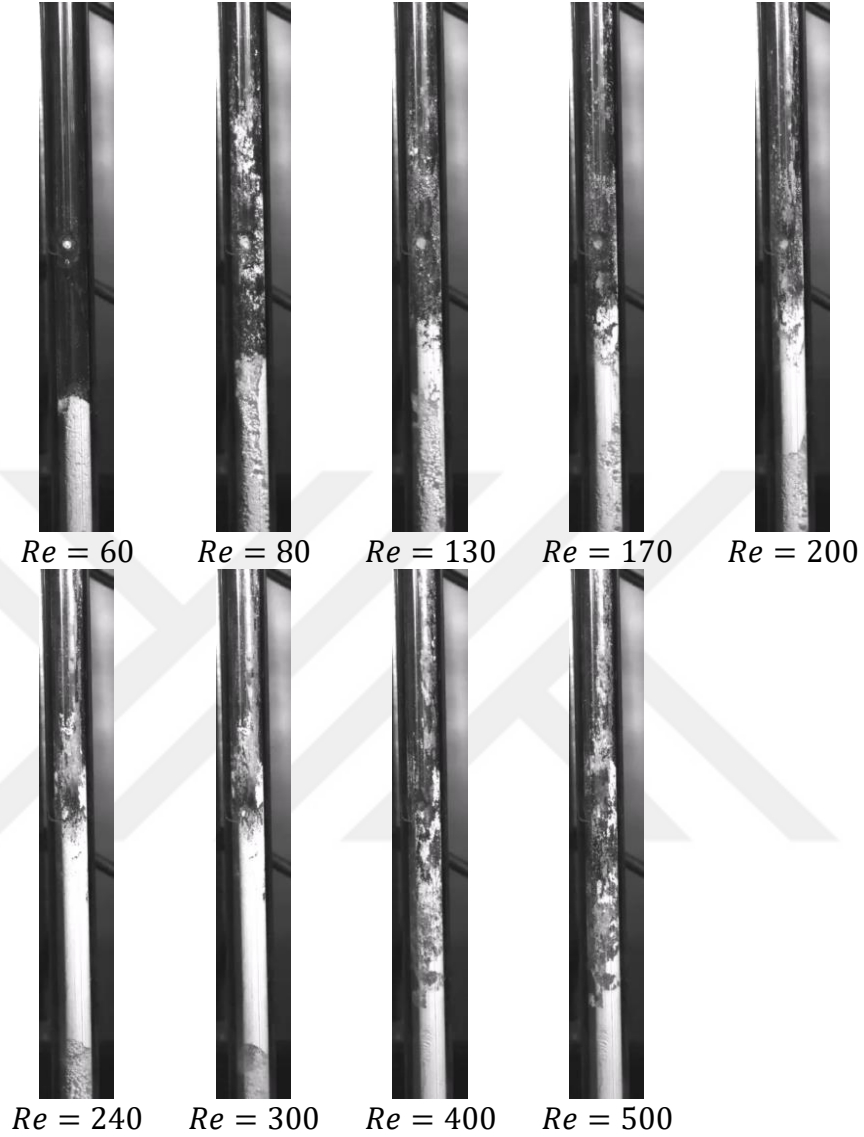
tanımlanmıştır.  $Re = 700$ 'de ise çemberin üst bölgelerinde katı partiküllerin dışarı taşındığı hızlı akışkanlaşma rejimi gözlenmektedir.  $Re = 1500$  ve  $Re = 2000$ 'de ise üst bölgelerde daha büyük partiküller teğetsel akışkanlaşma davranışı göstermektedir.



Şekil 4.62 : ZnO-1 gaz-katı akış görüntüleri.

Aynı şekilde ince tanecikler içeren ZnO-2 partikülleri akışkanlaşma davranışı göstermekte ancak tanecikler arası elektrostatik çekim kuvveti güçlü olduğu için topaklanma ve çember duvarına yapışma problemi gözlenmiştir (Şekil 4.63). İlk katı hareketi  $Re = 60$ 'da gözlenirken bütün katı yatağının akışkanlaşma hareketi gösterdiği nokta  $Re = 300$  olarak belirlenmiştir.  $Re = 350$ 'den sonra ise partiküllerin çember duvarına yapışma probleminden dolayı çemberin yatak bölgesi görünmez olmuştur. Çember yüksekliğinin tamamının incelendiği gaz-katı akış görüntülerine göre akışkanlaşan partiküllerin her iki ZnO yapısında da teğetsel olarak beslenen gazın

momentumunun katı partiküllere aktarılması ile spiral yapıda hareket ettiği gözlenmiştir.

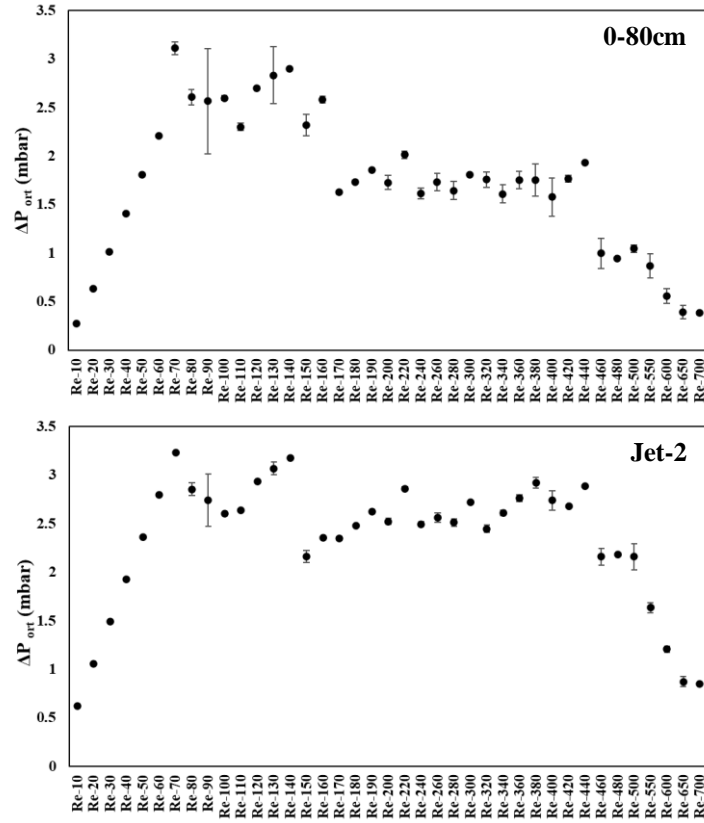


**Şekil 4.63 :** ZnO-2 gaz-katı akış görüntüleri.

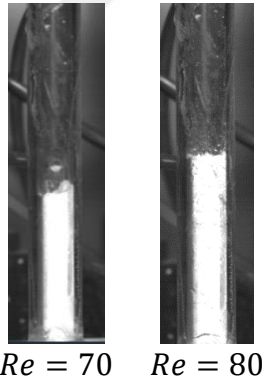
Şekil 4.64-4.67'de ZnO-1 ve ZnO-2 partiküllerinin çemberin farklı noktalarındaki ortalama basınç düşüşü değerlerinin  $Re$  sayısına göre değişimi verilmiştir. Zamana bağlı basınç farkının frekans analizi sonuçları ise güç spektrumları şeklinde 0-80 cm konumunda ZnO-1 için Şekil 4.68 ve ZnO-2 için A.25'te gösterilmektedir. Jet basınç verilerine ait sonuçlar Şekil A.24 ve A.26'da sunulmuştur.

ZnO-1 partiküllerinin  $Re$  sayısına bağlı basınç düşüşü grafiği (Şekil 4.64) geleneksel akışkan yataklarda gözlenen uniform partiküllerin basınç düşüşü grafiğine benzer bir eğilim göstermektedir (Şekil 2.9). Fakat bu çalışmada çalışılan ZnO partikülleri uniform olmayan bir partikül boyut dağılımına sahip oldukları için maksimum basınç

düşüşü noktasından sonra sabit olması beklenen basınç düşüşü değerlerinde azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu durum akışkanlaşma rejiminde gözlenen kabarcıklaşma veya kanallaşma oluşumundan veya farklı boyuttaki partiküllerin farklı  $Re_{mf}$  değerlerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. ZnO-1 partikülleri için  $Re = 70$  değerinden sonra çember yüksekliği boyunca ölçülen basınç düşüşü ani bir azalma göstermektedir. Yatakta maksimum basınç düşüşünün gözlendiği bu nokta minimum akışkanlaşmanın başladığı nokta olarak tanımlanmaktadır. Gaz-katı akış görüntülerine göre ZnO-1 partiküllerinin  $Re = 260$  değerinde hareket etmeye başladığı gözlenmiştir (Şekil 4.62). Bu noktaya kadar görüntüleme deneylerinde katı partikül hareketi gözlenmemesine karşın yatak yüksekliği  $Re = 70$  ile  $Re = 80$  arasında artmaktadır (Şekil 4.65). Akış görüntüleme deneylerinde katı partikül hareketi gözlenmemesine rağmen ortalama basınç düşüşünün bu noktada maksimuma ulaşması ve artan  $Re$  sayısı ile azalması görüntüler ile tespit edilemeyecek boyuttaki çok ince partiküllerin akışkanlaşmaya başladığını göstermektedir. Ortalama basınç düşüşü eğrisine göre ZnO-1 partiküllerinin basınç düşüşünün değişmediği üç farklı bölgesi bulunmaktadır:  $Re = 80$  ile  $Re = 160$  arası ve  $Re = 170$  ile  $Re = 440$  arası ve  $Re = 460$  ile  $Re = 550$  arası. Geleneksel akışkan yataklarda uniform partikül boyut dağılıma sahip partiküller ile elde edilen basınç düşüşü grafiklerine göre basınç düşüşünün hızdan bağımsız olduğu ve değişmediği bölge tam akışkanlaşmanın gerçekleştiği bölge olarak tanımlanmaktadır. Basınç düşüşünün sabit olmaya başladığı nokta ise tam akışkanlaşma  $Re$  sayısı olarak tanımlanmıştır [122]. Basınç düşüşünün sabit olduğu bu bölgede katı partikül, gaz fazın sürüklenme kuvveti ile dengede olarak askıda kalabilmektedir. ZnO-1 partikülleri ile üç farklı sabit basınç düşüşü bölgesinin bulunması uniform olmayan partikül boyutu dağılımının bir göstergesidir. İkinci sabit bölge olan  $Re = 440$ 'tan itibaren gözlenen basınç düşüşü değerindeki azalma noktası ise yataktan partikül çıkışının olduğu nokta olan terminal  $Re$  sayısı olarak tanımlanmıştır. İkinci sabit basınç düşüşü bölgesinden sonra artık yatakta bulunan partiküllerin büyük bir bölümü dışarı çıkmaktadır. Gaz-katı akış görüntülerinde de bu noktada dipte bulunan ve gelen gaz akışı ile aglomere olarak iyice büyüyen partiküllerin hareket etmeye başladığı ve yataktaki katı yoğunluğunun azalmaya başladığı gözlenmiştir.  $Re = 550$ 'de ise basınç düşüşü değeri neredeyse sıfıra yaklaşarak sabitlenmiştir, gaz-katı akış görüntülerinde de artık bütün partiküllerin yatağı terk ettikleri hızlı akışkanlaşma rejimi oluşmaktadır.



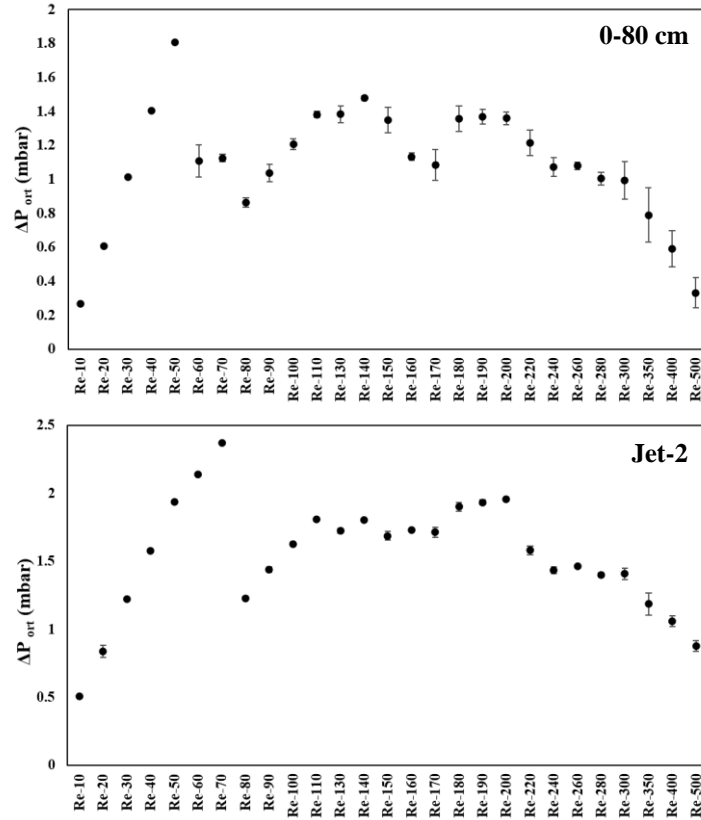
Şekil 4.64 :  $Re = 10 - 700$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi (ZnO-1).



Şekil 4.65 : ZnO-1 partikülleri yatak genişlemesi.

ZnO-2 partikülleri için  $Re = 50$  değerinde çember yüksekliği boyunca ölçülen basınç düşüşü maksimum değerine ulaşmaktadır (Şekil 4.66). ZnO-2 partikülleri için gözlenen basınç düşüşü bölgesi ise gaz-katı akış görüntülerinden de elde edilen minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısına denk gelmektedir.  $Re = 80$  ile  $Re = 300$  arasında ise basınç düşüşü değerinde salınım olduğu görülmektedir. Bu durum akış görüntülerinde de gözlenen kabarcıklı akışkanlaşma rejimi sonucu oluşan karışma düzenindeki ve kabarcık boyutundaki değişimlerin bir sonucudur [122]. Oluşan bu salınım göz ardı edildiğinde, ortalama basınç düşüşü eğrisine göre ZnO-2

partiküllerinin basınç düşüşünün değişmediği iki farklı bölgesi bulunmaktadır:  $Re = 110$  ile  $Re = 150$  arası,  $Re = 180$  ile  $Re = 300$  arası. İkinci bölgenin bitiş noktası  $Re = 300$  terminal  $Re$  sayısı olarak tanımlanmıştır. Bu  $Re$  sayısında katı yatağın tamamının akışkanlaştığı akış görüntülerinden bilinmektedir. Bu noktadan sonra basınç düşüşü değeri azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Katı partiküllerin çemberi terkettiği hızlı akışkanlaşma/taşıma rejimi oluşmaktadır.

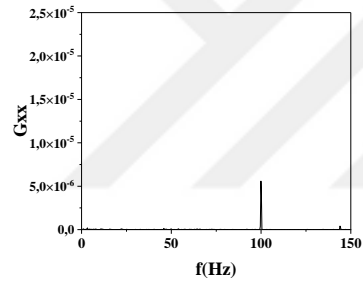


**Şekil 4.66:**  $Re = 10 - 500$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi (ZnO-2).

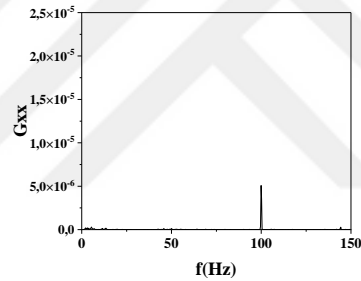
Şekil 4.67'de ZnO-1 partiküllerine ait zamana bağlı olarak elde edilen fark basınç verilerinin Fourier transform analizi ile elde edilen güç spektrumları gösterilmektedir. Yatak genişlemesinin ve maksimum basınç düşüşü değerinin gözlemlendiği  $Re = 70$ 'e kadar çok düşük enerjili 100 Hz'de tanımlı bir pik gözlenmektedir. Belirli frekans değerlerinde gözlenen bu tanımlı pik akışta gerçekleşen bir olayın tekrarlanması anlamına gelmektedir. ZnO-1 partiküllerinin  $Re = 70$  ile  $Re = 420$  arasında gözlenen 100 Hz'deki tanımlı pik akışta her 0.01 s'de bir tekrarlanan bir hareket olduğunu belirtmektedir. Enerji değerinin yüksek veya düşük olması veya değişmesi ise bu gözlenen olayın hangi sıklıkta tekrarlandığını vurgulamaktadır.  $Re = 80$  ile  $Re = 180$  arasında 100 Hz'deki bu pikin enerjisi artmakta, sonrasında azalmakta ve 50 Hz

değerinde düşük enerjili tanımlı bir pik oluşmaktadır.  $Re = 240$ 'ta gözlenen bant halindeki pikler ise akış görüntüleme deneylerinde de gözlenen ortalama büyüklükteki partiküllerin hareketinin bir sonucudur.  $Re = 400$ 'den sonra gözlenen pik enerjilerindeki azalma ikinci tam akışkanlaşma rejiminin bitiş bölgesi olarak tanımlanmakta ve yatağın büyük bölümünün dışarı sürüklenmesi sebebiyle oluşmaktadır.

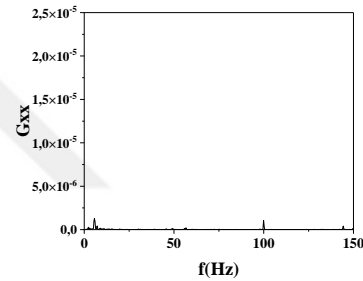
Şekil A.25'te ZnO-2 partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  değeri olan  $Re = 60$ 'a kadar 100 Hz'de tanımlı bir pik elde edilmiştir. Partiküllerin hareket etmeye başlaması ile bu değerdeki frekansın enerji seviyesi artmıştır. Minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısından sonra ZnO-1 partiküllerinde de gözlenen 100 Hz'deki tanımlı pikin yanında 0-50 Hz aralığında birden fazla pikin oluşturduğu bant pikler gözlenmiştir. Tek bir pik yerine bant pikin oluşumu akışta gerçekleşen hidrodinamiklerin karmaşıklaştığını göstermektedir. Bu bölgede kabarcıklı akışkanlaşma rejiminin gözlenmesi ile gaz fazda oluşan kabarcıkların ve katı partiküllerin hareketi bu frekans değerindeki bant piklerin oluşumuna sebep olmuştur.



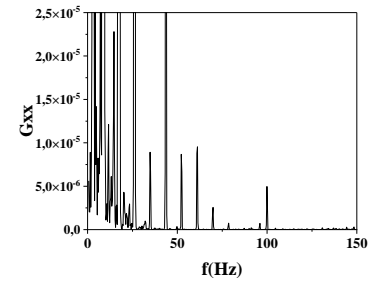
*Re = 20*



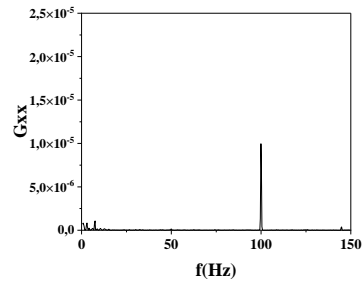
*Re = 40*



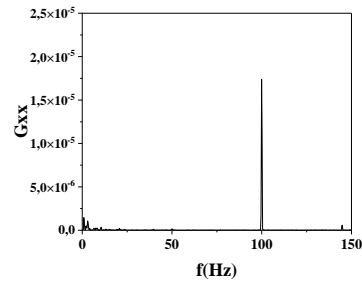
*Re = 60*



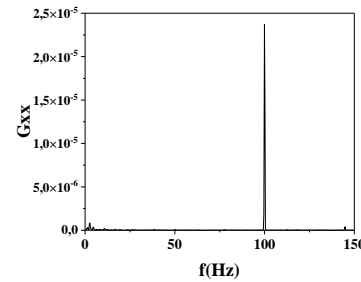
*Re = 70*



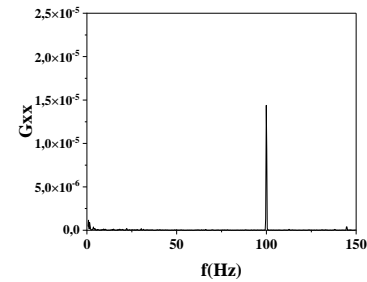
*Re = 80*



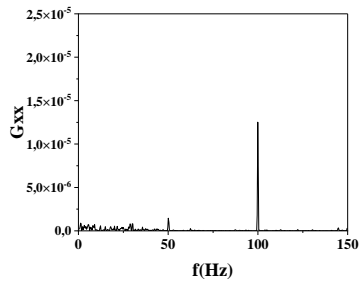
*Re = 100*



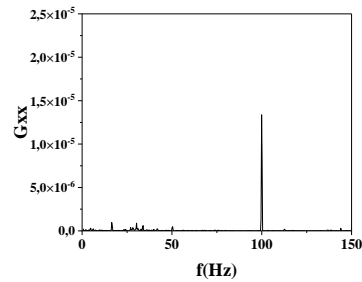
*Re = 120*



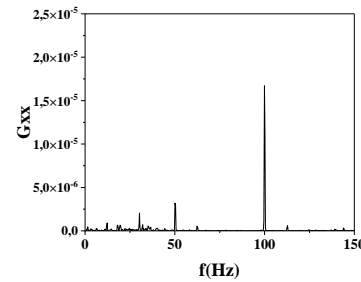
*Re = 140*



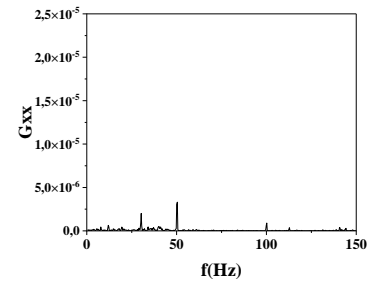
*Re = 160*



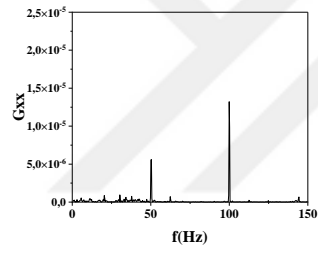
*Re = 150*



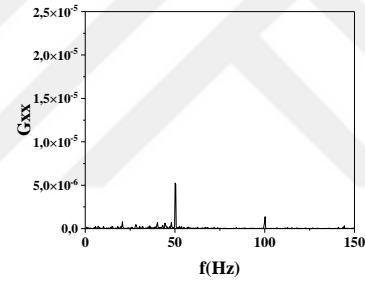
*Re = 180*



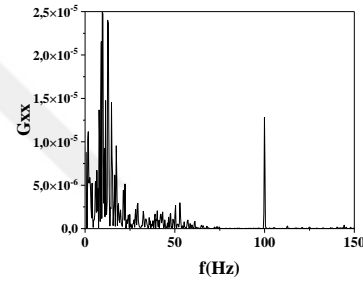
*Re = 190*



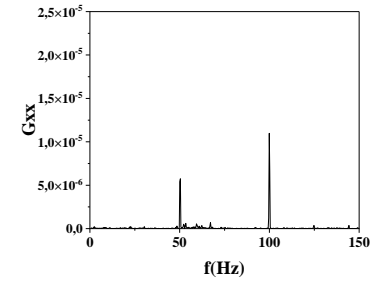
$Re = 200$



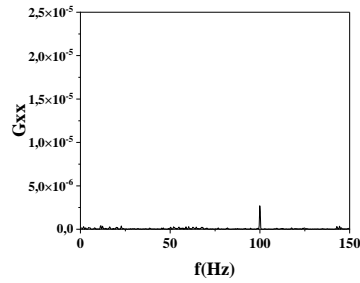
$Re = 220$



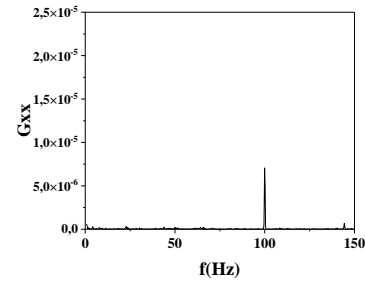
$Re = 240$



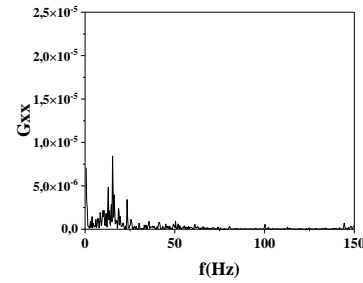
$Re = 260$



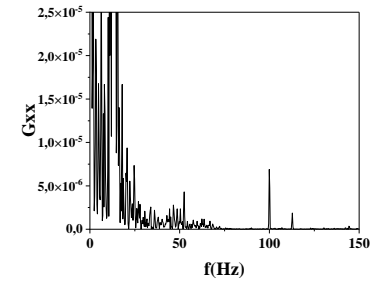
$Re = 280$



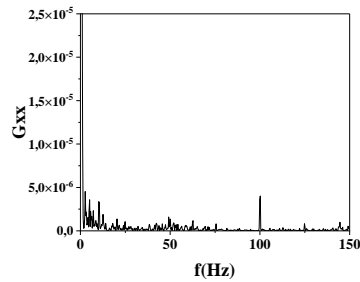
$Re = 300$



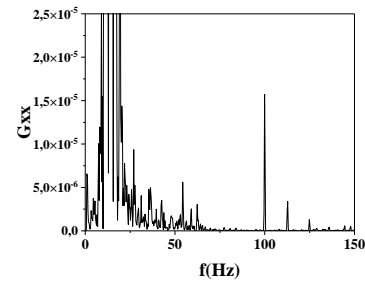
$Re = 320$



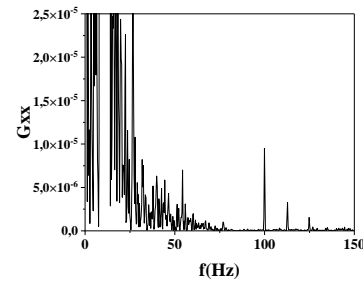
$Re = 340$



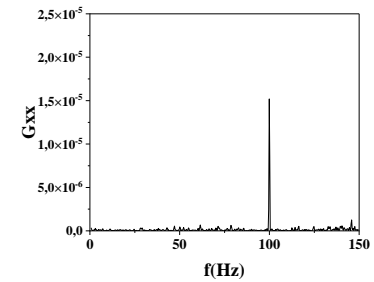
$Re = 360$



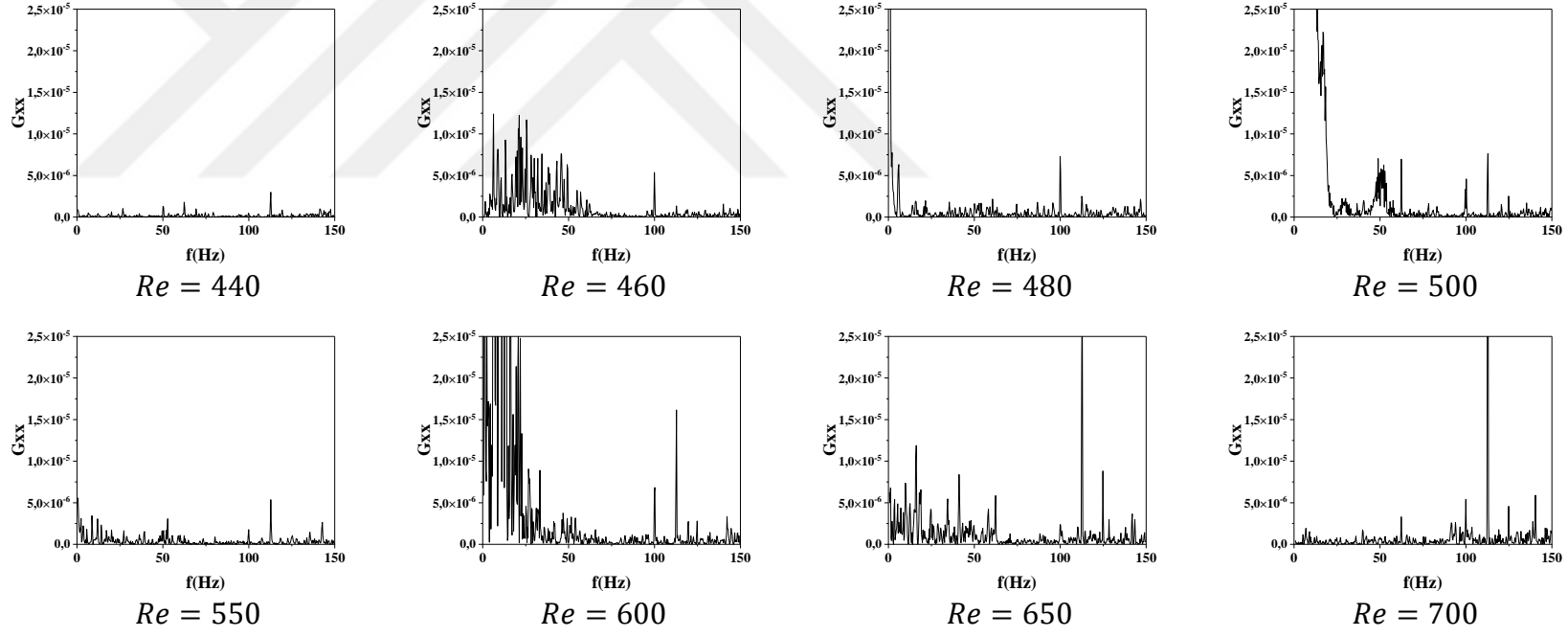
$Re = 380$



$Re = 400$



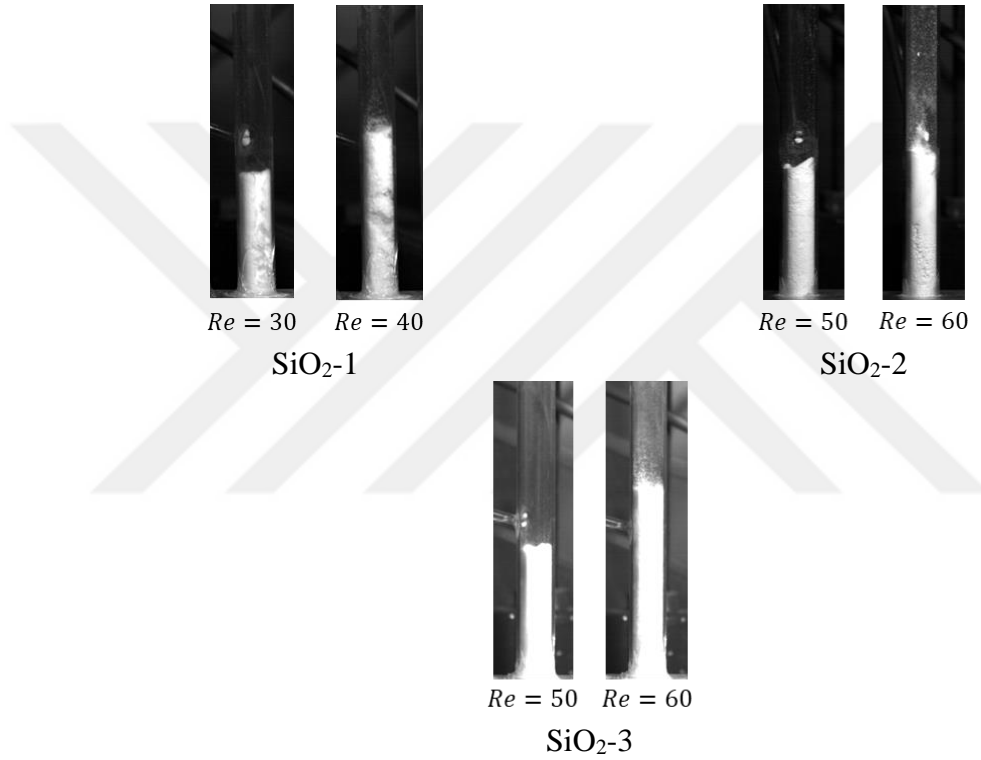
$Re = 420$



Şekil 4.67 : ZnO-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).

#### 4.2.2.2 SiO<sub>2</sub>

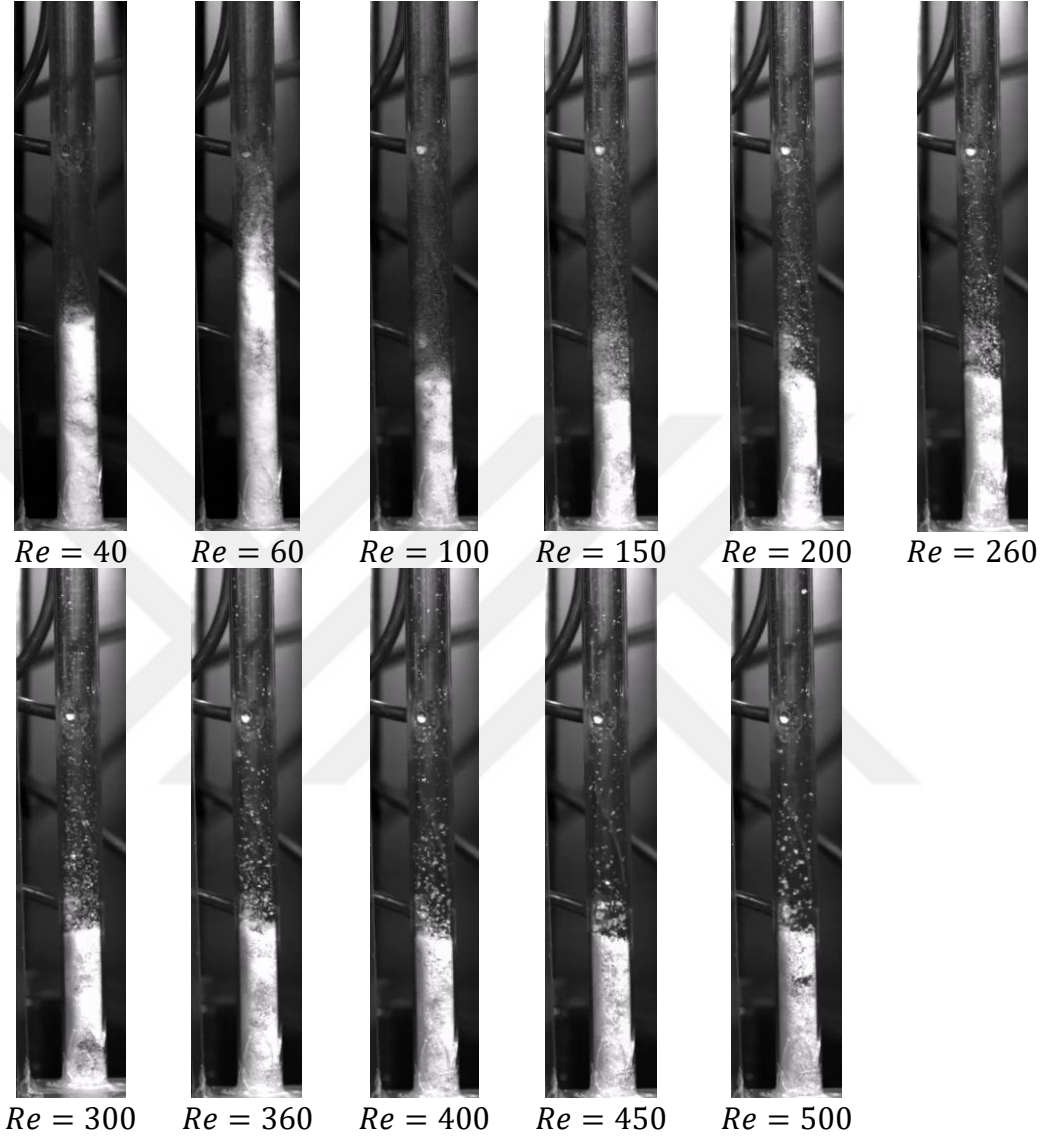
Üç farklı boyut ve yoğunluktaki SiO<sub>2</sub> partiküllerinin akışkanlaşma karakteristikleri bu bölümde incelenmiştir. SiO<sub>2</sub>-1 partikülünün ortalama boyutu 56.2 µm, ve SiO<sub>2</sub>-2 partikülünün boyutu ise 27.3 µm ve SiO<sub>2</sub>-3 partikülünün boyutu 17.1 µm'dir. Yığın yoğunlukları ise sırasıyla 244, 909 ve 666 kg/m<sup>3</sup>'tür. Ortalama partikül boyutu en yüksek ve yoğunluğu en düşük olan SiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinin  $Re = 40$  değerinde, boyutu daha düşük ve yoğunlukları daha fazla olan SiO<sub>2</sub>-2 ve SiO<sub>2</sub>-3 partiküllerin  $Re = 60$  değerinde minimum akışkanlaşma davranışı gösterdikleri görülmektedir (Şekil 4.68).



Şekil 4.68 : SiO<sub>2</sub> minumum akışkanlaşma  $Re$ .

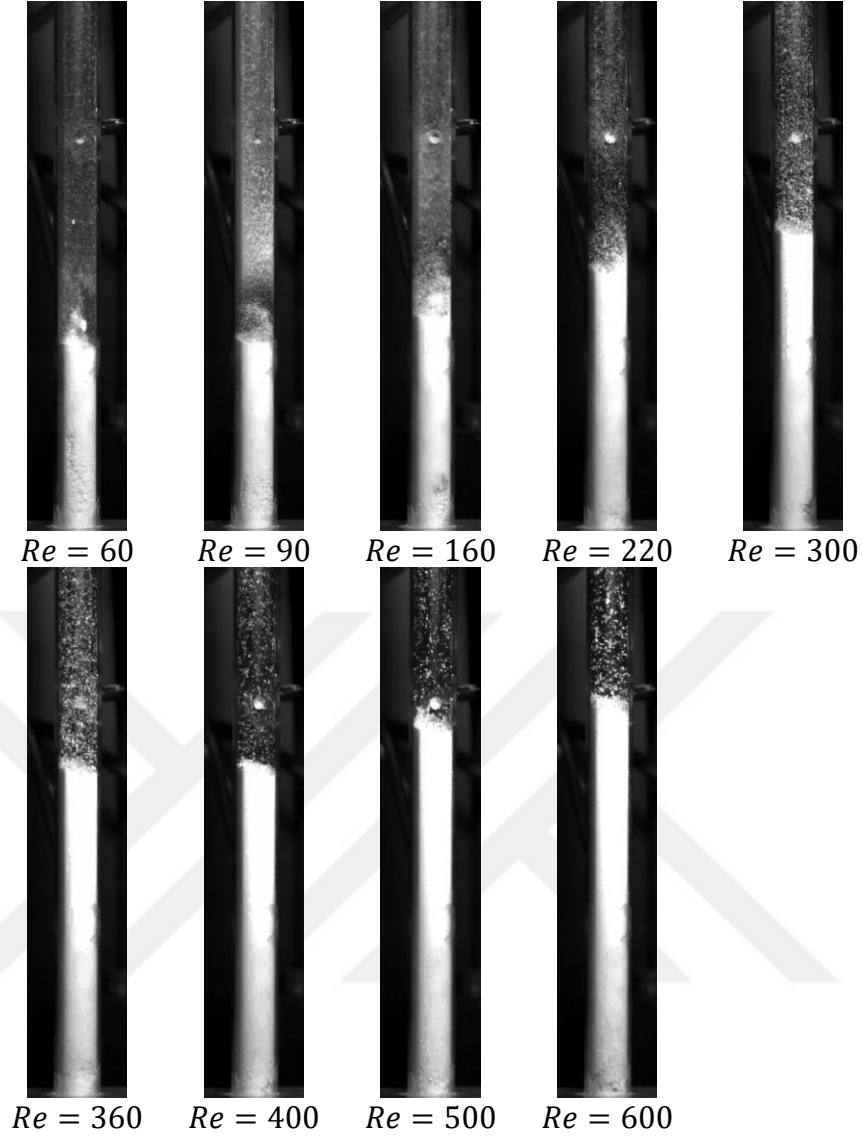
Farklı  $Re$  değerleri için gaz-katı akış görüntüleri incelendiğinde yığın yoğunluğu düşük ve tane boyutu büyük SiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinde kanallaşma gözlenmiştir (Şekil 4.69).  $Re = 50$ 'de bütün yatağın akışkanlaşması ile birlikte yatakta kanal oluşumu gözlenmekte ve  $Re$  sayısı arttıkça küçük kanalların birleşerek daha büyük kanallara yol açtığı görülmektedir ( $60 < Re < 300$ ).  $Re = 100$ 'den itibaren katı partiküllerin birlikte hareket ettiği yığın akışkanlaşma rejimi gözlenmekte ve çember boyunca akışkanlaşan katı partikül boyutu arasında ayrışma oluşmaktadır. Uygulanan  $Re$  koşullarında tanecikler tamamen havalanmıştır, ancak ince partiküllerin çemberin üst bölgelerinde akışkanlaştığı, daha büyük partiküllerin ise çember tabanına yakın

bölgede akışkanlaştığı gözlenmiştir. Partikül boyutundaki bu ayırım var olmakla birlikte  $Re = 300$ 'den itibaren yatakta gözlenen kanallaşma rejimi ve katıların yığın halinde hareketi yerini daha homojen akışkanlaşma rejimine bırakmıştır.



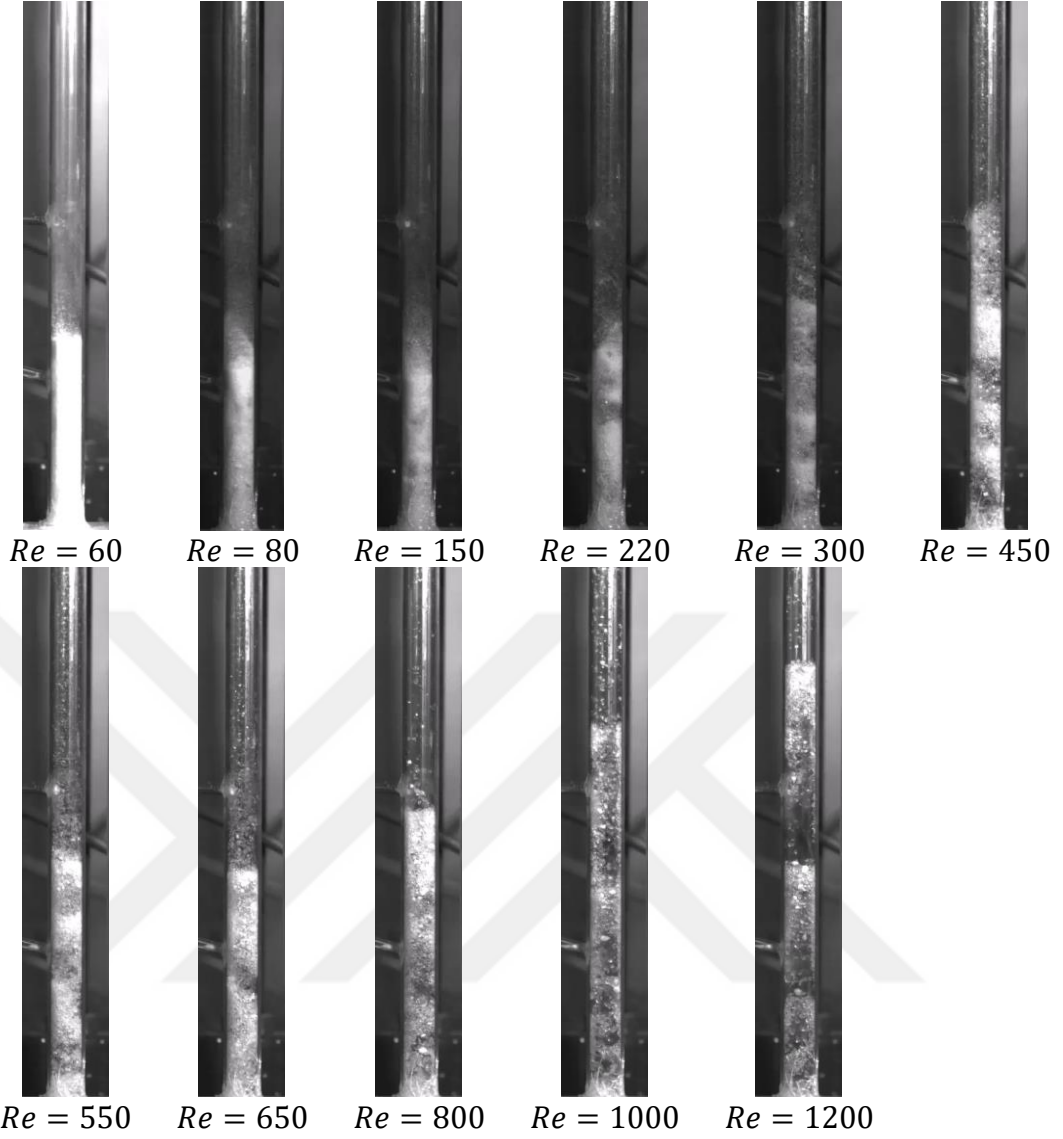
Şekil 4.69 : SiO<sub>2</sub>-1 gaz-katı akış görüntüleri.

SiO<sub>2</sub>-2 partikülleri ise  $Re = 60$ 'ta katı hareketi başladıktan sonra yatağın tamamı  $Re = 140$ 'ta akışkanlaşmaya başlamıştır (Şekil 4.70). Bu nokta SiO<sub>2</sub>-2 partiküllerinin kritik minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı olarak belirlenmiştir. Bu bölgeden sonra  $Re = 220$ 'ye kadar partiküllerin yığın halde akışkanlaştığı ve yatak üst bölgesinin kaynama akış rejiminde olduğu gözlenmiştir. Bu bölgeden sonra ise akışkanlaşma hareketinin daha homojen yapıda olduğu görülmüştür, fakat nanoboyuttaki SiO<sub>2</sub>-2 partiküllerinin çember duvarına yapışma problemi gözlenmiştir.



**Şekil 4.70 :** SiO<sub>2</sub>-2 gaz-katı akış görüntüleri.

Aynı şekilde ince tanecikler içeren SiO<sub>2</sub>-3 partikülleri akışkanlaşmış ancak yatakta kanallaşma oluşmuştur (Şekil 4.71).  $Re = 60$ 'taki ilk katı hareketi ile birlikte yatakta kanal oluşumu gözlenmekte ve  $Re$  sayısı arttıkça küçük kanalların birleşerek daha büyük kanallara yol açtığı görülmektedir ( $60 < Re < 200$ ). Partikül boyutundaki bu ayırım var olmakla birlikte  $Re = 200$ 'den itibaren yatağın tamamının akışkanlaştığı ve  $Re = 300$ 'de ise jetlerden teğetsel olarak beslenen gazın momentumunun partikül yatağına transferi ile yatağın spiral haldeki hareketinin oluşumu başlamıştır. Maksimum olarak verilen  $Re$  sayıları partiküllerin çemberin dibinden tamamen yukarıya doğru hareket ettikleri noktayı göstermektedir.

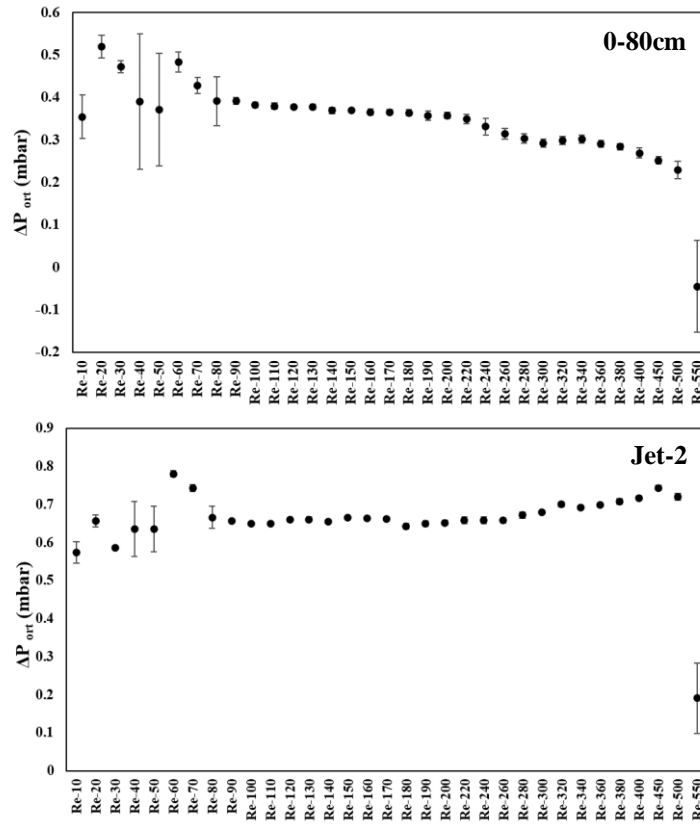


**Şekil 4.71** : SiO<sub>2</sub>-3 gaz-katı akış görüntüleri.

Şekil 4.72-4.74'te SiO<sub>2</sub>-1, SiO<sub>2</sub>-2 ve SiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinin çemberin farklı noktalarındaki ortalama basınç dalgalanma büyüklüklerinin  $Re$  sayısına göre değişimi verilmiştir. Zamana bağlı basınç farkının frekans analizi sonuçları güç spektrumları şeklinde 0-80 cm konumunda SiO<sub>2</sub>-1 için Şekil 4.75'te, SiO<sub>2</sub>-2 ve SiO<sub>2</sub>-3 için Şekil A.28 ve Şekil A.30'da verilmiştir. Jetin basınç düşüşü sonuçları Şekil A.27, Şekil A.20 ve Şekil A.31'de sunulmuştur.

SiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinde  $Re = 60$  değerinde katı yatağının tamamı kaynamaktadır.  $Re = 90$ 'da ise dipteki katı miktarı yoğun olmakla birlikte akışkan yatak rejimi elde edilmektedir (Şekil 4.72).  $Re = 300$ 'de ise dipteki büyük partiküller akışkanlaşmaktadır.  $Re = 20$  ile  $Re = 60$  arasında basınç düşüşünde gözlenen salınım ise yatak genişlemesinin sonucudur. Ortalama basınç düşüşü eğrisine göre

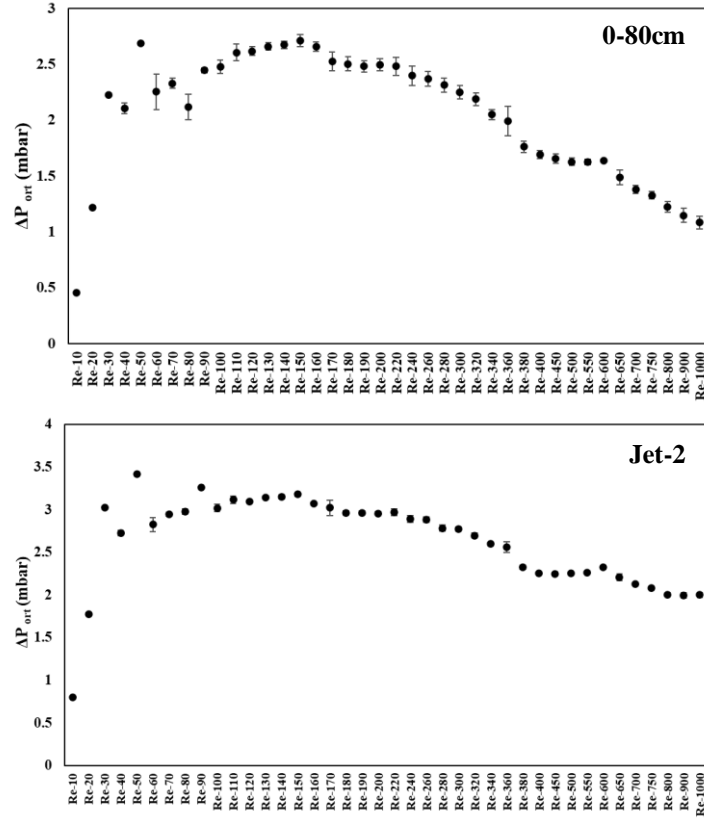
SiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinin basınç düşüşünün değişmediği iki farklı bölgesi bulunmaktadır:  $Re = 90$  ile  $Re = 220$  arası,  $Re = 280$  ile  $Re = 380$  arası. Minimum akışkanlaşma bölgesinden sonra  $Re = 90$ 'a kadar gözlenen basınç düşüşü değerineki salınım ise akış görüntülerinden de gözlemlenen yatakta oluşan küme formundaki kanalların bir sonucudur. Birinci bölgenin bitiş noktası  $Re = 220$ , terminal  $Re$  sayısı olarak tanımlanmıştır. Ortalama basınç düşüşü grafiğinde gözlenen ikinci sabit basınç düşüşü noktası olan  $Re = 380$ 'den sonra basınç düşüşü değeri azalarak sıfıra yaklaşmaktadır.  $Re = 500$ 'den sonra basınç düşüşünün neredeyse sıfır olduğu nokta ise pnömatik taşıma rejiminin olduğu bölgedir.



**Şekil 4.72 :**  $Re = 10 - 550$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi (SiO<sub>2</sub>-1).

SiO<sub>2</sub>-2 partikülleri için ise  $Re = 60$  ve  $Re = 70$ 'te yatağın üst bölgesi kaynamaktadır (Şekil 4.73).  $Re = 130$ 'da ise dipteki partiküller de akışkanlaşmaya başlamaktadır.  $Re = 30$  ile  $Re = 50$  arasında basınç düşüşünde gözlenen salınım ise yatak genişlemesinin sonucudur. Ortalama basınç düşüşü eğrisine göre SiO<sub>2</sub>-2 partiküllerinin basınç düşüşünün değişmediği üç farklı bölgesi bulunmaktadır:  $Re = 110$  ile  $Re = 160$  arası,  $Re = 170$  ile  $Re = 220$  arası,  $Re = 400$  ile  $Re = 650$  arası. Minimum akışkanlaşma bölgesinden sonra  $Re = 110$ 'a kadar gözlenen basınç düşüşü

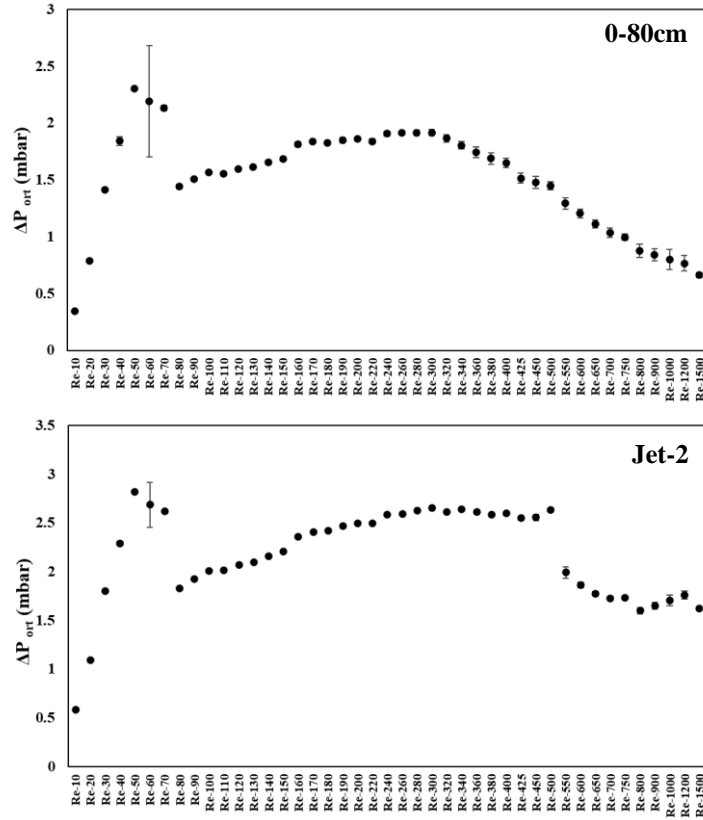
değerindeki salınım ise akış görüntülerinden de gözlemlenen kabarcıklı akışkanlaşma rejimi dolayısıyla karışma düzeni ve kabarcık boyutu değişimleri sebebi ile oluşmaktadır. İkinci bölgenin bitiş noktası  $Re = 220$ , terminal  $Re$  sayısı olarak tanımlanmıştır. Ortalama basınç grafiğinde gözlenen üçüncü basınç düşüşü noktası olan  $Re = 600$ 'den sonra basınç düşüşü değeri azalarak sıfıra yaklaşmakta ve hızlı taşıma rejimi oluşmaktadır.



**Şekil 4.73 :**  $Re = 10 - 1000$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi ( $SiO_2-2$ ).

$SiO_2-3$  partikülleri için minimum ortalama basınç düşüşü eğrisine göre basınç düşüşünün değişmediği iki farklı bölgesi bulunmaktadır:  $Re = 80$  ile  $Re = 150$  arası,  $Re = 160$  ile  $Re = 320$  arası (Şekil 4.74). İlk bölgede gözlenen basınç düşüşündeki düşük eğimli artışın sebebi gaz-katı akış görüntülerinde de gözlenen  $Re = 80$ 'den itibaren yatakta slug formunda kanalların oluşması ve  $Re = 200$ 'e kadar bu slugların birleşerek düz kanallara sebep olmasıdır. Basınç düşüşünün sabit olduğu tam akışkanlaşma rejiminde iki farklı bölgenin oluşmasının sebebi oluşan bu kanalların boyutunun ve şeklinin artan  $Re$  sayısı ile değişmesidir. İkinci bölgenin bitiş noktası  $Re = 320$ , terminal  $Re$  sayısı olarak tanımlanmıştır.  $Re = 320$ 'den sonra basınç düşüşü değeri azalarak sıfıra yaklaşmakta ve partiküllerin çemberin dışına

sürüklendiği akış rejimi başlamaktadır. Türbülanslı akışkanlaşma rejimi bölgesi olarak başlayan bu bölge  $Re$  sayısının artışı ile  $Re = 600$ 'den itibaren hızlı taşıma ve pnömatik rejime değişmektedir. Ayrıca,  $SiO_2-3$  partiküllerinde yüksek  $Re$  değerlerinde partiküller arası etkileşimin artması ve elektrostatik çekim kuvvetleri sebebi ile partiküller çember duvarına yapışmaktadır.



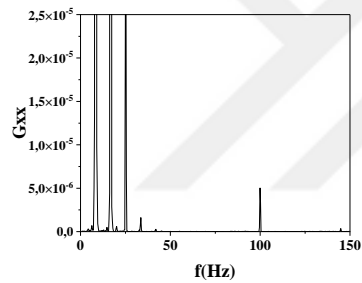
**Şekil 4.74 :**  $Re = 10 - 1500$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi ( $SiO_2-3$ ).

Şekil 4.75'te  $SiO_2-1$  partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  değeri olan  $Re=40$  ve öncesinde 10-20 Hz değerlerinde iki tanımlı pik vardır. Katı hareketi başladıktan sonra ise bu bölgede gözlenen pik sayısı artmakta ve yatak içerisindeki kabarcıklaşma rejiminin sonucu olarak salınım yapmaktadır. Tam akışkanlaşma rejiminin başlangıç noktası olarak belirlenen  $Re=90$ 'dan sonra 100 Hz'de düşük enerjili tanımlı bir pik oluşmaktadır. Partiküllerin dışarı taşındığı  $Re=380$ 'den sonra ise frekans enerjileri azalmaktadır.

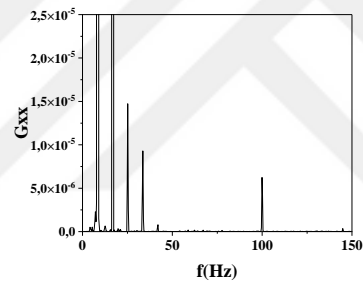
Şekil A.28'de  $SiO_2-2$  partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  değeri olan  $Re = 60$ 'a kadar 10-20 Hz'de tanımlı bir pik elde edilmiştir.  $Re$  sayısı 0-50 Hz aralığında tanımlı salınımlı

bant halinde pikler oluşmuştur.  $Re = 140$  ve  $Re = 220$ 'den sonra bu aralıkta gözlenen bant halinde pikler yerini tek bir pike bırakmıştır. Bu değişimlerin sebebi sırasıyla  $Re = 140$ 'ta dipteki daha büyük boyutlu partiküllerin akışkanlaşmaya başlaması ve  $Re = 220$ 'de ise partiküllerin çemberden dışarı çıkmaya başlamasıdır.

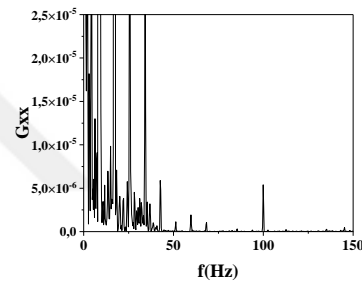
Şekil A.30'da  $SiO_2-3$  partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısından sonra 0-50 Hz arası tanımlı pikler oluşmaktadır. Yatakta oluşan kanallaşmanın sebebi olarak  $Re = 80$ 'den itibaren 0-50 Hz arasına gözlenen tanımlı pikler yerini bant halinde pike bırakmaktadır.  $Re = 50 - 80$  arasında daha düzenli hareket olan kaynama hareketi tekrarlanan hareketlerin sebep olduğu tanımlı pik oluşumuna, daha sonrasındaki kanallaşma oluşumu ise bu frekans değerlerinde bant pik oluşumu ile daha kompleks rejime geçildiğini göstermektedir. Terminal hız bölgesi olarak belirlenen  $Re = 320$  ve taşıma rejimi olarak belirlenen  $Re = 600$ 'den sonra ise gözlenen frekans enerjileri azalmaktadır.



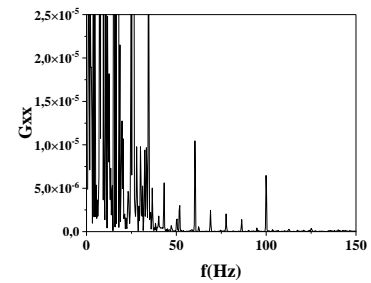
*Re = 20*



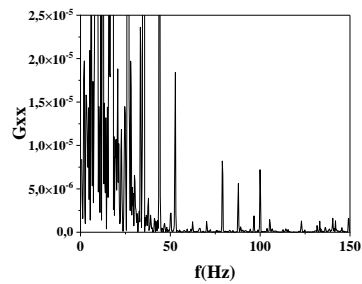
*Re = 30*



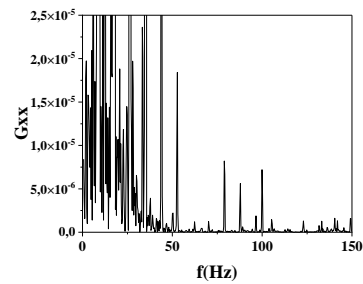
*Re = 40*



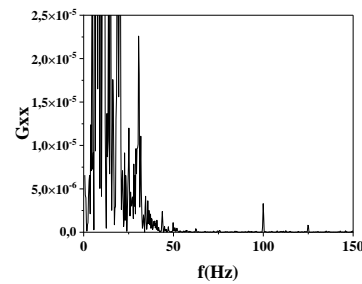
*Re = 50*



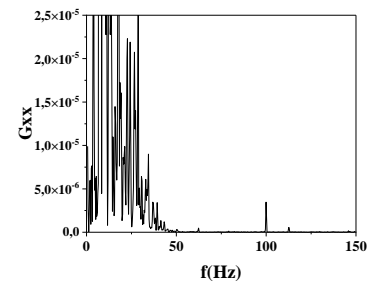
*Re = 70*



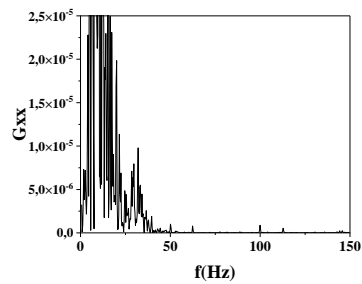
*Re = 80*



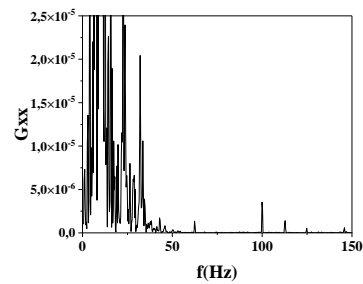
*Re = 90*



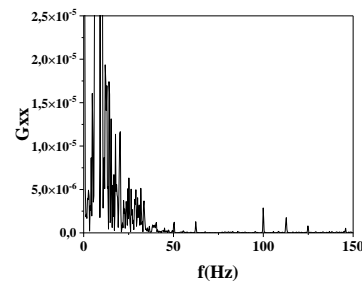
*Re = 100*



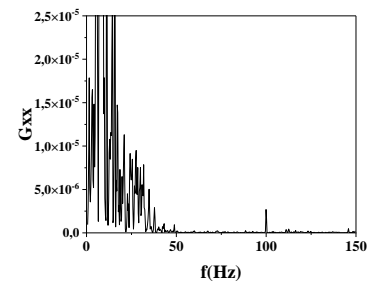
*Re = 120*



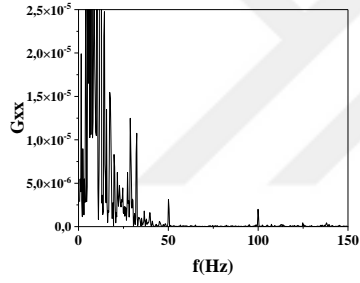
*Re = 140*



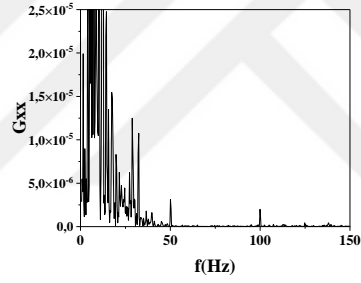
*Re = 160*



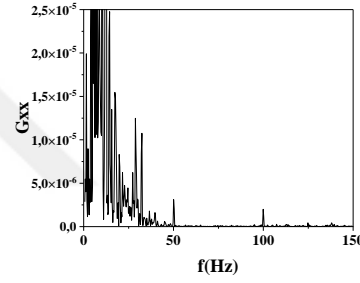
*Re = 200*



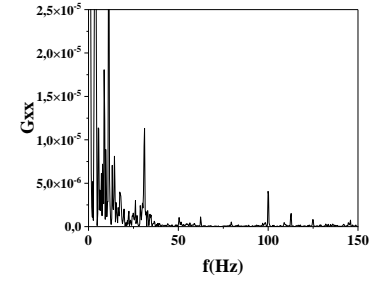
*Re = 220*



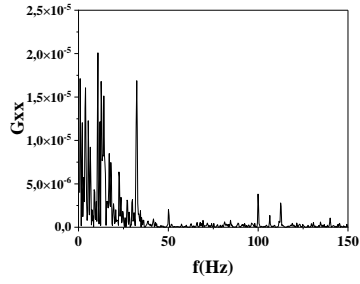
*Re = 240*



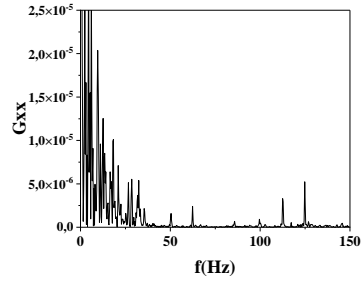
*Re = 260*



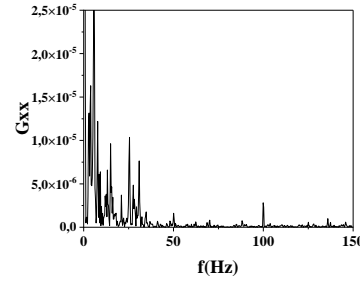
*Re = 280*



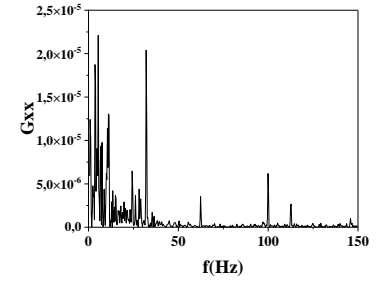
*Re = 300*



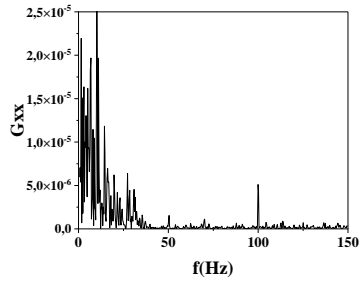
*Re = 320*



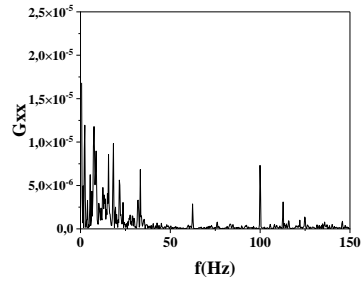
*Re = 340*



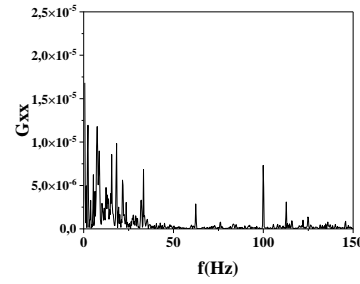
*Re = 360*



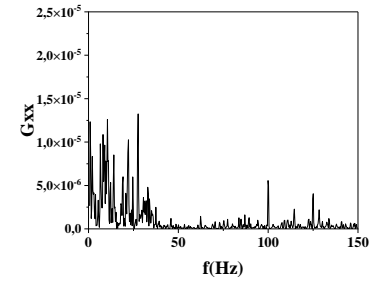
*Re = 380*



*Re = 400*



*Re = 450*

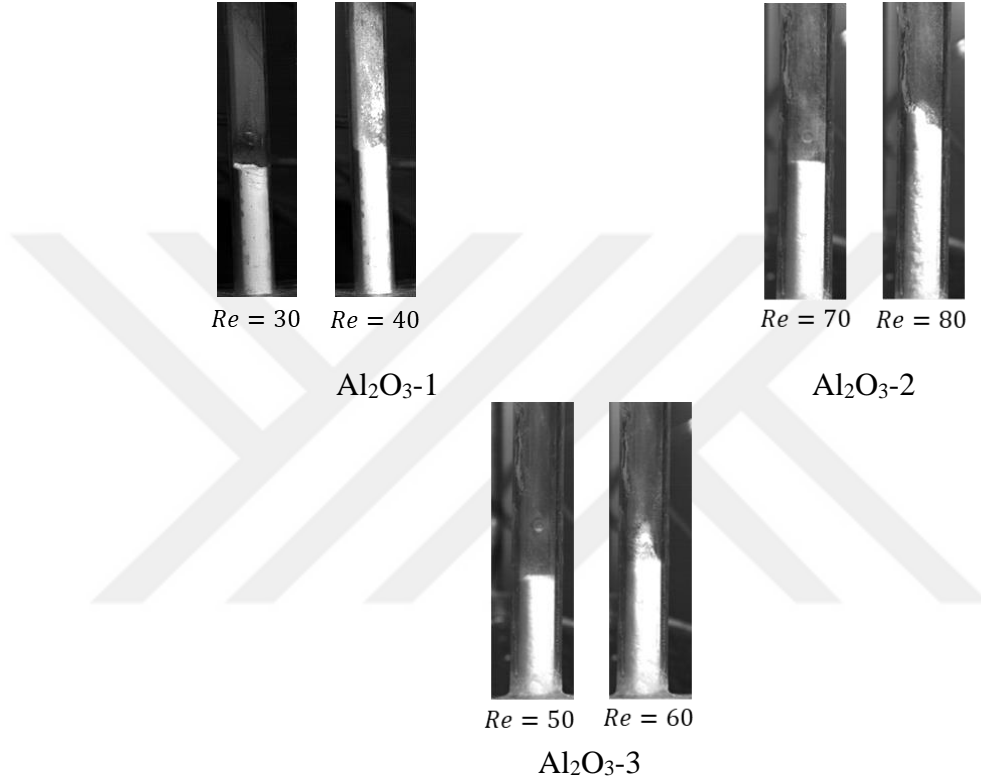


*Re = 500*

Şekil 4.75 : SiO<sub>2</sub>-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).

### 4.2.2.3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Üç farklı boyut ve yoğunluktaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin akışkanlaşma karakteristikleri bu bölümde incelenmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 partikülünün boyutu 26.3 µm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2 partikülünün boyutu 205 µm ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3 partikülünün boyutu 10.2 µm'dir. Yoğunlukları ise sırasıyla 1480, 895 ve 498 kg/m<sup>3</sup>'tür. Artan yığın partikül yoğunluğu ile minimum *Re* akışkanlaşma değeri azalmaktadır (Şekil 4.76).

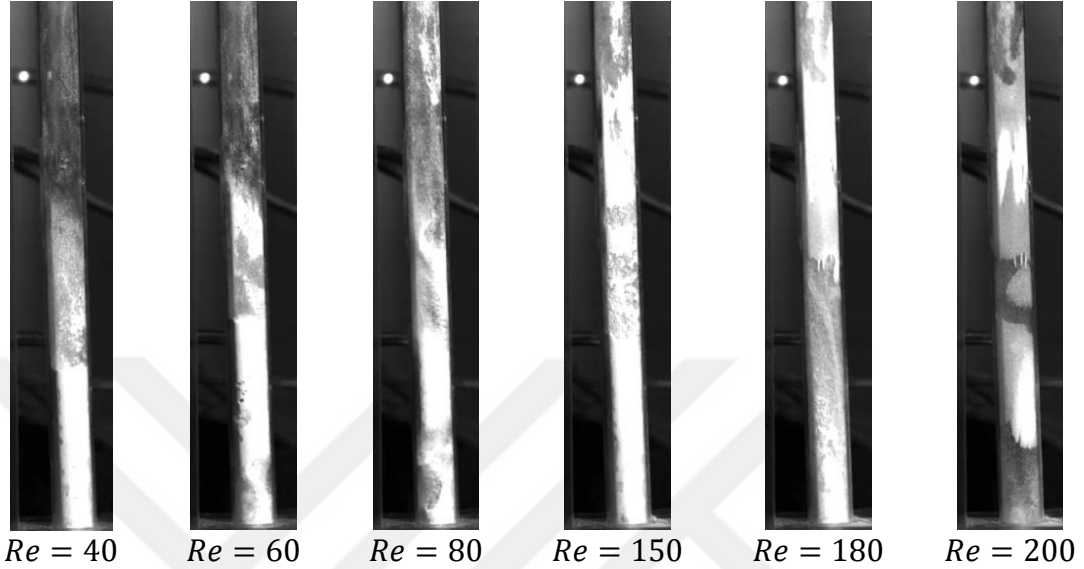


Şekil 4.76 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> minumum akışkanlaşma *Re*.

Farklı *Re* değerleri için gaz-katı akış görüntüleri incelendiğinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 partiküllerinde uygulanan *Re* koşullarında tanecikler tamamen havalanmıştır ancak gaz hızı arttıkça ince partiküllerin akışkanlaştığı, daha büyük partiküllerin ise çember dibinde kaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.77-4.79). Bununla beraber partiküllerin çember duvarına yapıştığı gözlenmiştir.

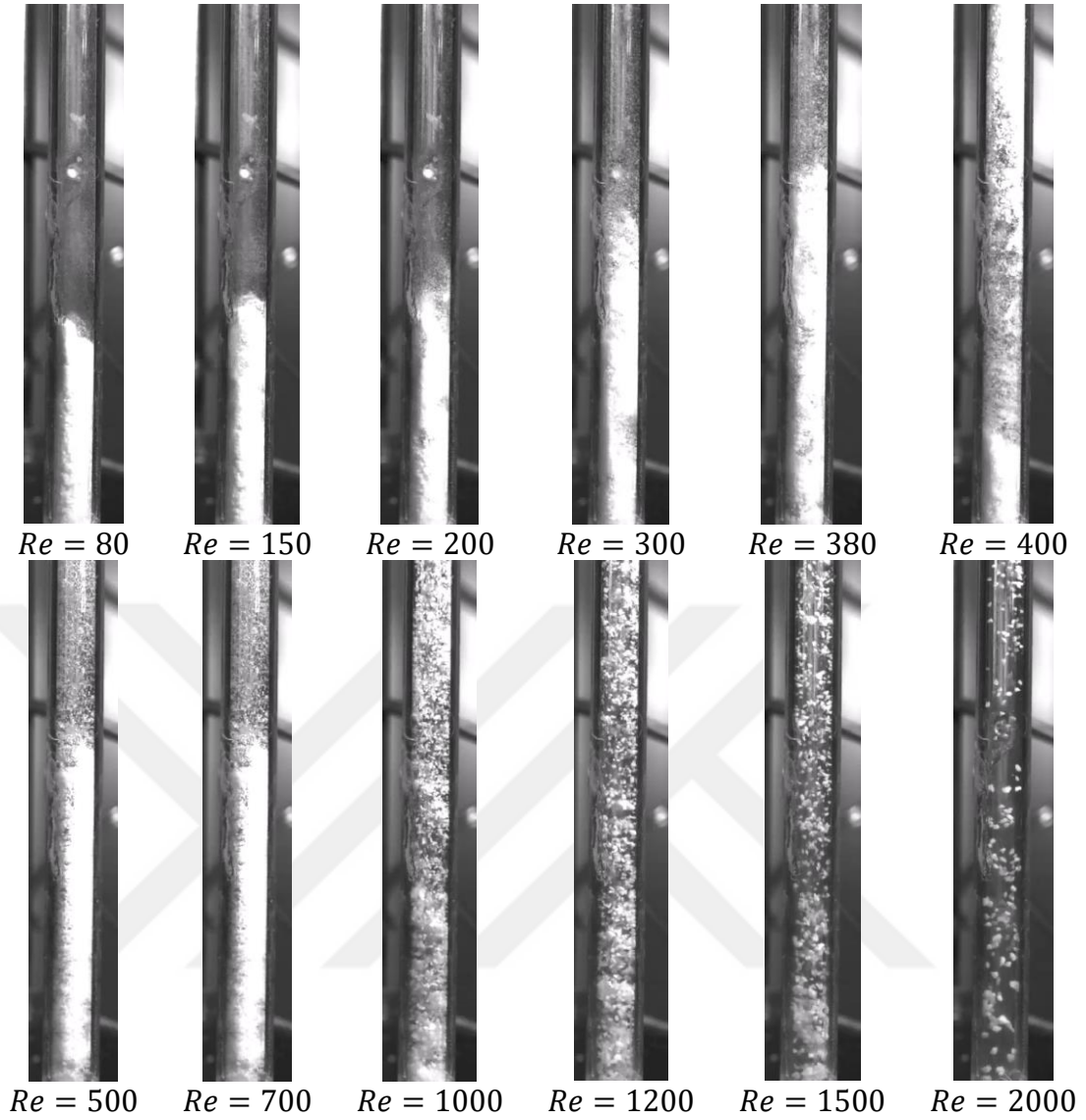
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 partiküllerinin ilk hareketi *Re* = 40'ta gözlendikten sonra yatağın tamamı *Re* = 60'ta kanallı akış rejimi ile akışkanlaşmaktadır (Şekil 4.77). *Re* = 70'ten itibaren ise partiküllerin yığın halde akışkanlaştığı kaynama hareketine benzer bir davranış oluşmuştur. *Re* sayısı arttırıldıkça gözlenen hareket değişmemekle beraber *Re* = 130'da yukarı doğru hareket eden katı partiküller tekrar aşağı dağılarak

düşmektedir. Dağılan partiküllerin spiral hareket oluşumu ile teğetsel akışkanlaşma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu noktadan sonra  $Re = 200$ 'e kadar yataktaki katı yoğunluğun azaldığı ve çemberin üst bölgelerinde türbülanslı akışkanlaşma rejiminin olduğu gözlenmiştir.



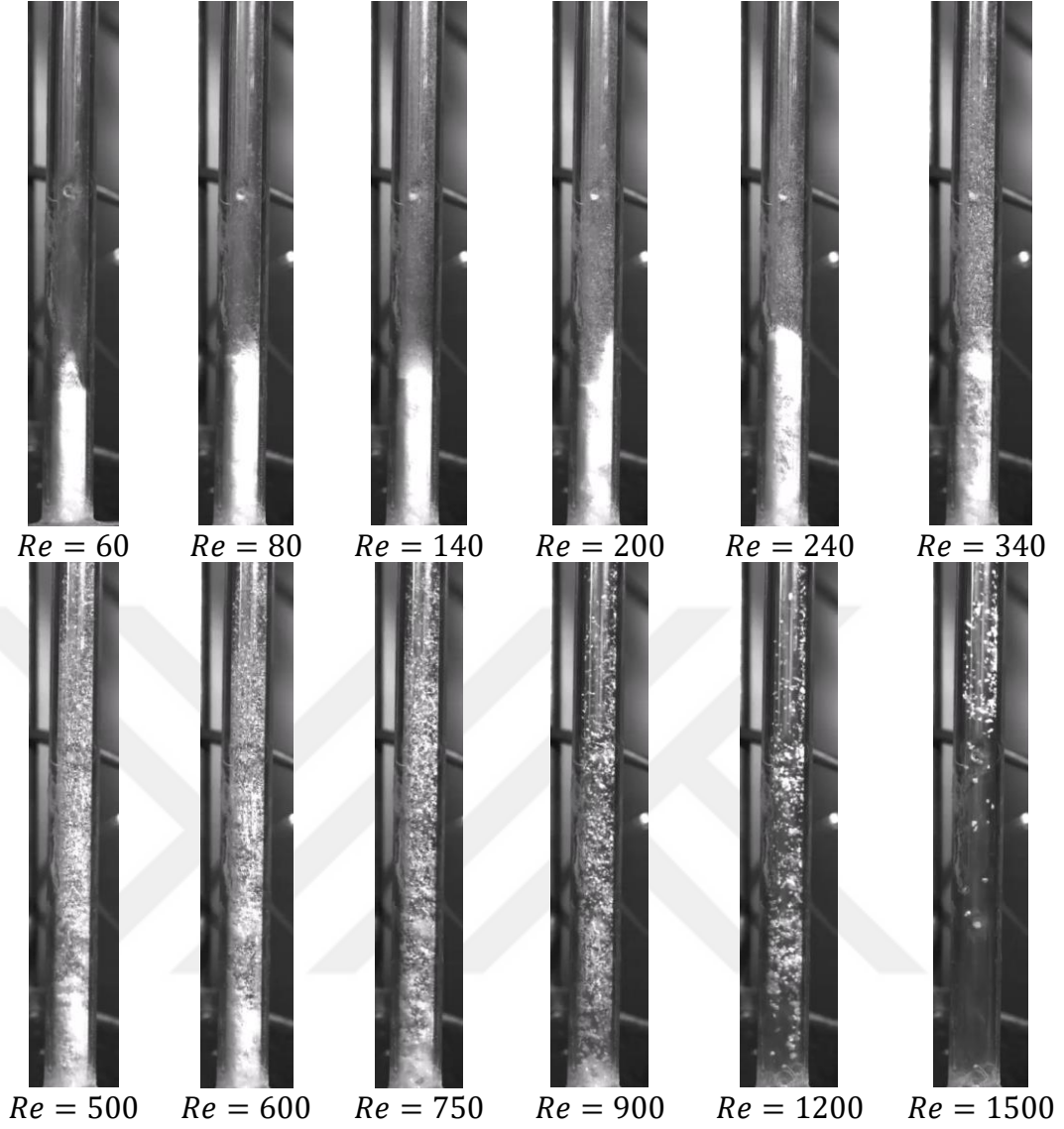
Şekil 4.77 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 gaz-katı akış görüntüleri.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2 partiküllerinin ilk hareketinin gözlemlendiği  $Re = 80$ 'den sonra kaynama hareketine benzer kabarcıklı akışkanlaşma rejimi ile yatağın sabit rejimdeki halinden çok fazla genişlemediği tespit edilmiştir (Şekil 4.78).  $Re = 320$ 'de ise yatağın tamamının akışkanlaştığı kritik minimum akışkanlaşma bölgesi oluşmaktadır. Bu iki bölge arasında kanallı akışkanlaşma rejimi görülmekte ve  $Re$  sayısı arttıkça yatağın yığın halinde hareket ederek gaz boşluklarının olduğu türbülanslı akışkanlaşma davranışı hakimdir.  $Re = 1000$ 'den sonra ise benzer boyuttaki partiküllerin askıda kalarak homojen akışkanlaşma rejimi oluşmuştur. Partiküllerin terminal hızını aşan bu bölgelerde  $Re = 1600$ 'de ise yataktaki katı yoğunluğunun azalması ve jetlerden gelen gazın momentumunu katı partiküllere yeterli şekilde aktarabilmesi ile teğetsel katı akışı oluşmuştur.



**Şekil 4.78** :  $Al_2O_3-2$  gaz-katı akış görüntüleri.

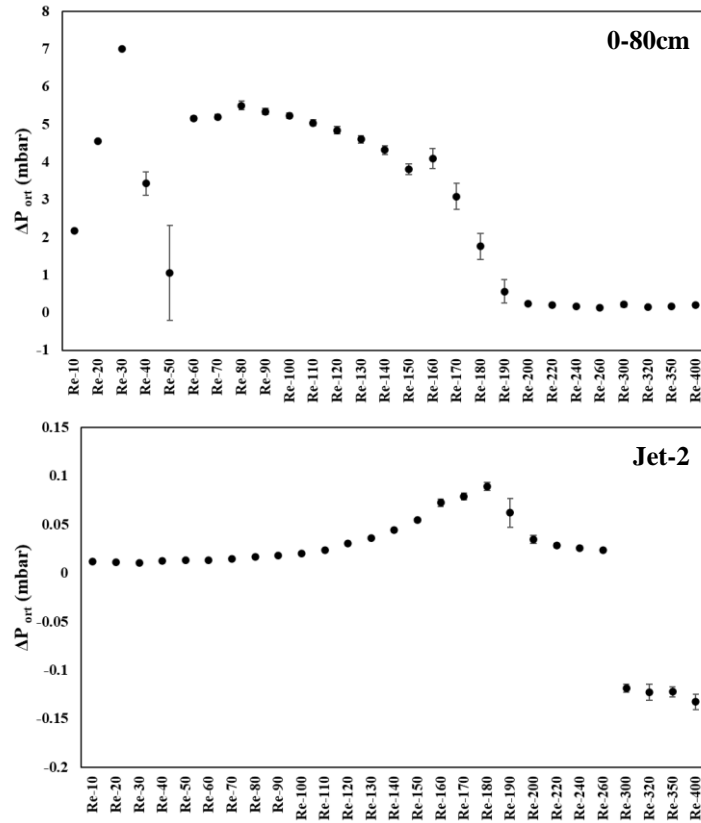
$Al_2O_3-3$  partiküllerinde ise  $Re = 60$ 'ta gözlenen ilk katı hareketinden sonra katı yatağın üst bölgesinin kaynamaya benzer davranış gösterdiği kabarcıklı akışkanlaşma rejimi ile birlikte  $Re = 120$ 'de yatağın tamamı akışkanlaşma hareketi göstermiştir (Şekil 4.79). Yatakta aksenal kanalların oluşumu ile  $Re = 160$ 'ta bu kanallar birleşerek düz kanallar oluşmuştur. Bu durumda katı hareketi daha hızlı ve katı partiküllerin kaynaşma hareketi daha şiddetlidir.  $Re$  sayısı daha da arttıkça yatağın üst yüzeyi kaybolmakta ve partiküllerin terminal hızının aşıldığı türbülanslı akışkanlaşma rejimi oluşmaktadır.  $Re = 750$ 'den sonra ise yatakta katı yoğunluğunun azalması ile yatak boyunca homojen katı dağılımı oluşmuştur.  $Re = 1200$ 'de ise teğetsel akışkanlaşma hareketi gözlenmiştir.



**Şekil 4.79** :  $Al_2O_3$ -3 gaz-katı akış görüntüleri.

Şekil 4.80-4.82’de  $Al_2O_3$ -1,  $Al_2O_3$ -2 ve  $Al_2O_3$ -3 partiküllerinin çemberin farklı noktalarındaki ortalama basınç dalgalanma büyüklüklerinin  $Re$  sayısına göre değişimi verilmiştir. Zamana bağlı basınç farkının frekans analizi sonuçları güç spektrumları şeklinde 0-80 cm konumunda  $Al_2O_3$ -1 için Şekil 4.83’te,  $Al_2O_3$ -2 için Şekil A.33 ve  $Al_2O_3$ -3 için Şekil A.35’te verilmiştir. Jetin basınç düşüşü sonuçları Şekil A.32, Şekil A.34 ve Şekil A.36’da sunulmuştur.  $Al_2O_3$ -1 için  $Re = 40$ ,  $Al_2O_3$ -2 için  $Re = 80$  ve  $Al_2O_3$ -3 için  $Re = 60$  değerinde basıncın azaldığı görülmektedir. Bu değerler görüntülerden de elde edilen minimum akışkanlaşma  $Re$  değerleri ile uyumludur ve basınç analizleri ile gaz-katı akış görüntüleme deneylerinin uyumlu olduğunu göstermektedir.

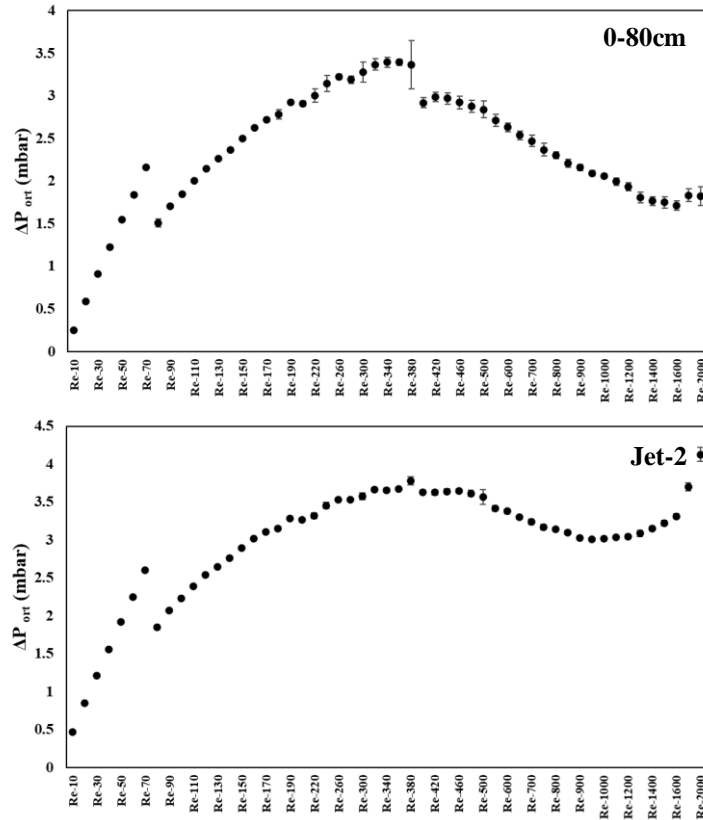
$Al_2O_3$ -1 partiküllerinde  $Re = 30 - 50$  arasındaki salınım oluşan yatak genişlemesinin bir sonucudur (Şekil 4.80).  $Re = 60$ 'tan itibaren ise  $Re = 120$ 'ye kadar sabit basınç düşüşü bölgesi oluşumun sonucu tam akışkanlaşma rejimi oluşmaktadır. Bu bölgede gözlenen basınç düşüşündeki hafif artışın sebebi  $Re = 60$ 'tan itibaren başlayan kabarcıkların oluşumu ve artan  $Re$  ile yatakta kanallaşmanın görülmesidir.  $Re = 120$ 'den itibaren basınç düşüşü azalmaktadır ve yatakta partiküllerin dışarı taşınmaya başladığı türbülanslı akışkanlaşma rejimi gözlenmektedir. Akış görüntülerinden de gözlenen  $Re = 190$ 'dan itibaren yatakta katı yoğunluğunun büyük oranda azaldığı ve basınç düşüşü değerinin sıfıra yakın olduğu hızlı taşıma rejimi oluşmaktadır.  $Al_2O_3$ -1 partiküllerinde bir adet tam akışkanlaşma bölgesinin görülmesinin sebebi bu partiküllerin uniform partikül boyutu dağılımına sahip olmasıdır.



**Şekil 4.80** :  $Re = 10 - 400$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi ( $Al_2O_3$ -1).

$Al_2O_3$ -2 partikülleri için ise  $Re = 80$ 'de yatağın üst bölgesi kaynamaktadır (Şekil 4.81).  $Re = 80$ 'den itibaren basınç düşüşünün yüksek bir trendle artışı kabarcıklı akışkanlaşma rejimi sonucu oluşan farklı karışma düzenleri ve kabarcık boyutlarının bir sonucudur.  $Re = 340 - 360$ 'ta katı yatağının tamamı akışkan haldedir.  $Al_2O_3$ -2 partiküllerinde  $Re = 180 - 380$  ve  $Re = 380 - 500$  aralıklarında iki adet tam

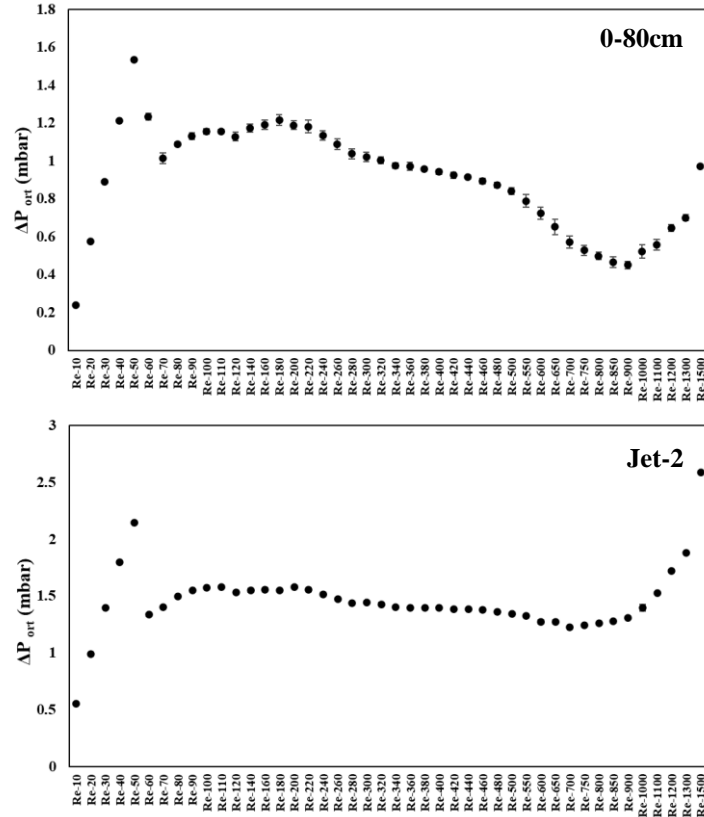
akışkanlaşma bölgesi tanımlanmaktadır.  $Re = 500$ 'den sonra basınç düşüşü azalmaya başladığı için bu nokta terminal  $Re$  sayısı olarak belirlenmiştir. Gaz-katı akış görüntü deneylerinden de gözlenen  $Re = 300$ 'den itibaren oluşan türbülanslı akışkanlaşma rejiminin bir sonucu olarak basınç düşüşü azalmakta ve partikül boyutu küçük olan partiküller yataktan dışarı çıkmaktadır. Daha büyük boyutlu partiküllerin teğetsel davranış gösterdiği  $Re = 1600$ 'de ise sabit basınç düşüşü bölgesi oluşmaktadır.



**Şekil 4.81** :  $Re = 10 - 2000$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi ( $Al_2O_3-2$ ).

$Al_2O_3-3$  partikülleri için  $Re = 80$ 'de yatağın üst bölgesi kaynamaktadır (Şekil 4.82).  $Re = 80$ 'den itibaren basınç düşüşününün  $Re = 120$ 'ye kadar artışı kabarcıklı akışkanlaşma rejimi sonucu oluşan farklı karışma düzenleri ve kabarcık boyutlarının bir sonucudur.  $Re = 340 - 360$ 'ta katı yatağının tamamı akışkan haldedir.  $Al_2O_3-3$  partiküllerinde  $Re = 120 - 240$  ve  $Re = 320 - 500$  aralıklarında iki adet tam akışkanlaşma bölgesi tanımlanmaktadır.  $Re = 500$ 'den sonra basınç düşüşü azalmaya başladığı için bu nokta terminal  $Re$  sayısı olarak belirlenmiştir. Gaz-katı akış görüntü deneylerinden de gözlenen  $Re = 200$ 'den itibaren oluşan ve derecesi artan türbülanslı akışkanlaşma rejiminin bir sonucu olarak basınç düşüşü azalmakta ve öncelikle partikül boyutu küçük olan partiküller yataktan dışarı çıkmaktadır. Daha büyük boyutlu

partiküllerin teğetsel davranış gösterdiği  $Re = 1200$ 'den sonra ise basınç düşüşü değerinde artış gözlenmektedir.



**Şekil 4.82 :**  $Re = 10 - 1300$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi ( $Al_2O_3-3$ ).

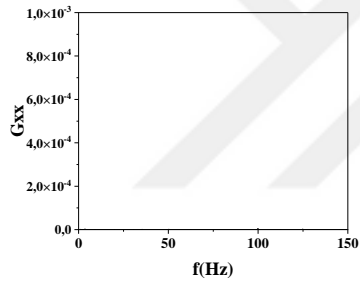
Şekil 4.83'te  $Al_2O_3-1$  partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı ve kritik akışkanlaşma  $Re$  sayılarında 0-50 Hz aralığında salınımlı ve yüksek enerjili pikler oluşmaktadır.  $Re = 100 - 110$  ve  $Re = 150 - 160$  değerlerinde frekans değerlerinde oluşan yüksek enerjili alınımlar ise sırasıyla yatakta oluşan kanallaşma akış rejiminin ve yatağın yığın halde hareket ettiği türbülanslı akış rejiminin sonucudur. Frekans enerji değerlerinin  $Re = 200$ 'den sonra düşük seviyelere inmesi ise oluşan taşıma rejiminin göstergesidir.

Şekil A.33'te  $Al_2O_3-2$  partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısından sonra 0-50 Hz arasında oluşan bant halindeki salınımlı pikler belirlenen tam akışkanlaşma bölgesi boyunca devam etmektedir. Rejim geçişlerinin gözlemlendiği bölgelerde frekans enerjilerinin azaldığı ( $Re = 300$  ve  $Re = 420$ ), taşıma rejimi olmasına rağmen  $Re = 1000$ 'den

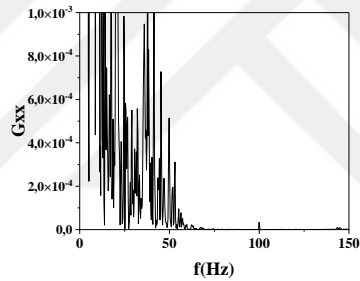
itibaren 0-150 Hz aralığında gözlenen bant halindeki pikler teğetsel akışkanlaşma davranışı sonucu oluşmaktadır.

Şekil A.35'te  $Al_2O_3$ -3 partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısından sonra 0-50 Hz arasında oluşan bant halindeki salınımlı pikler belirlenen tam akışkanlaşma bölgesi boyunca artan enerji değerleri ile devam etmektedir. Rejim geçişlerinin gözlemlendiği bölgelerde piklerdeki salınım kaybolmaktadır ( $Re = 200$  ve  $Re = 220$ ).  $Al_2O_3$ -3 partikülleri ile oluşan türbülanslı akışkanlaşma rejimi ve sonrasındaki teğetsel akışkanlaşma hareketi davranışı sonucu olarak frekans değerlerinde salınım oluşmaktadır.

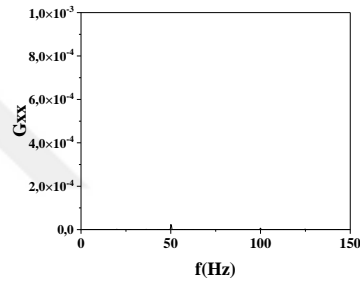




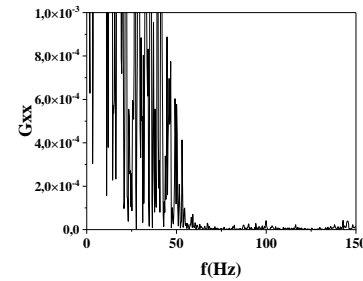
*Re = 30*



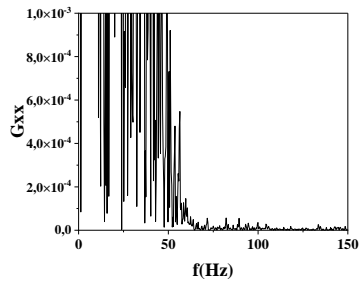
*Re = 40*



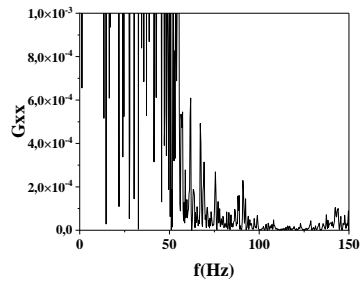
*Re = 50*



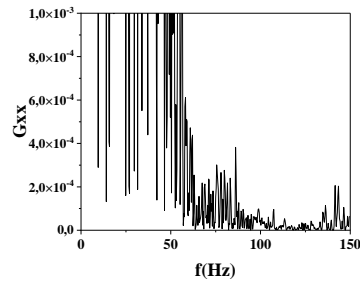
*Re = 60*



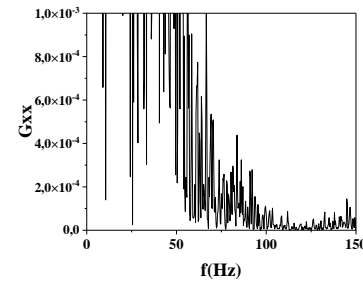
*Re = 70*



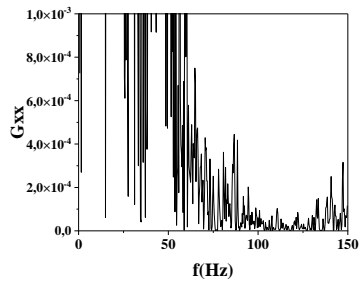
*Re = 80*



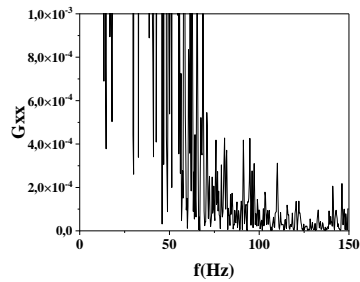
*Re = 90*



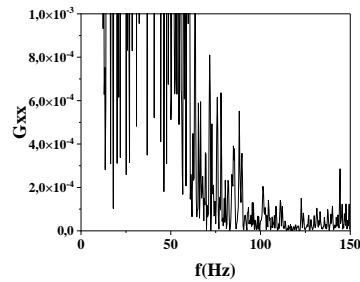
*Re = 100*



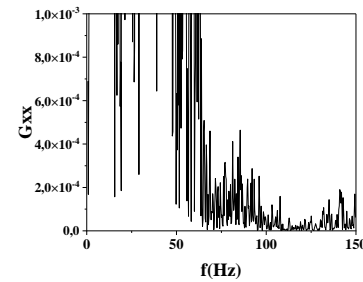
*Re = 110*



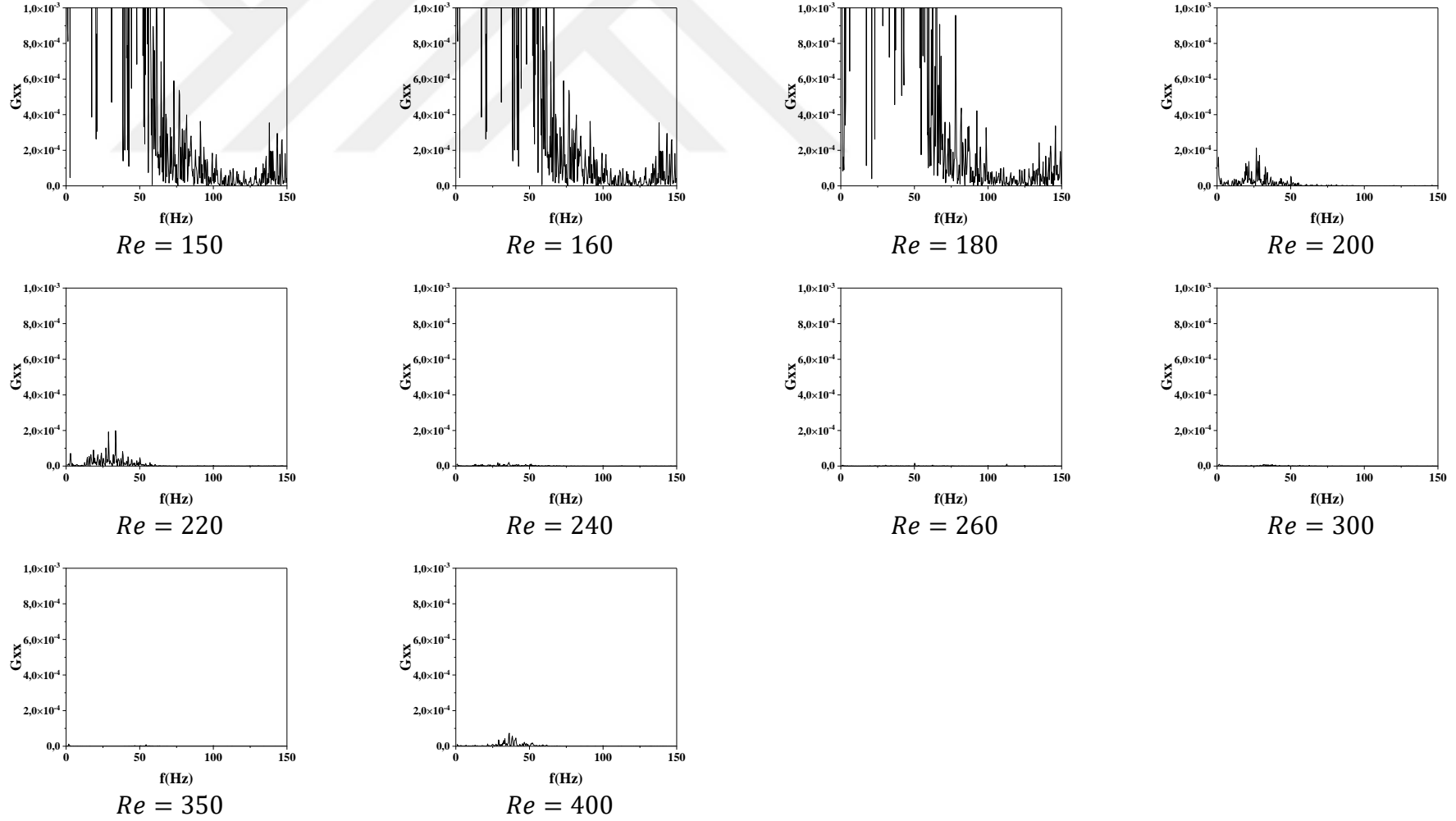
*Re = 120*



*Re = 130*



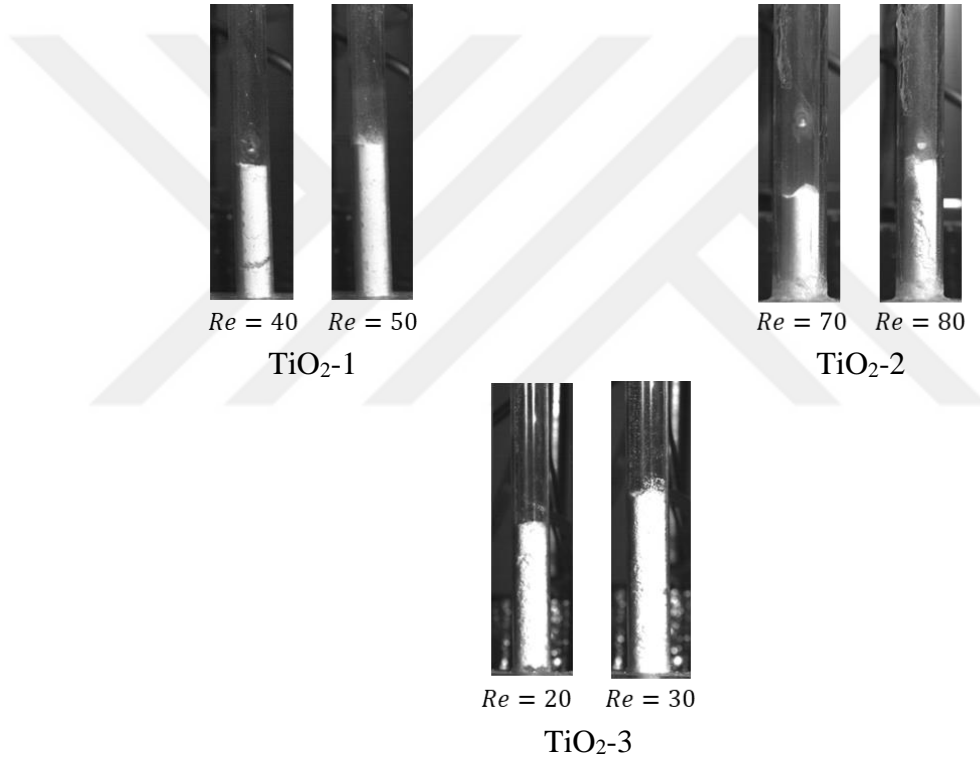
*Re = 140*



**Şekil 4.83:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).

#### 4.2.2.4 TiO<sub>2</sub>

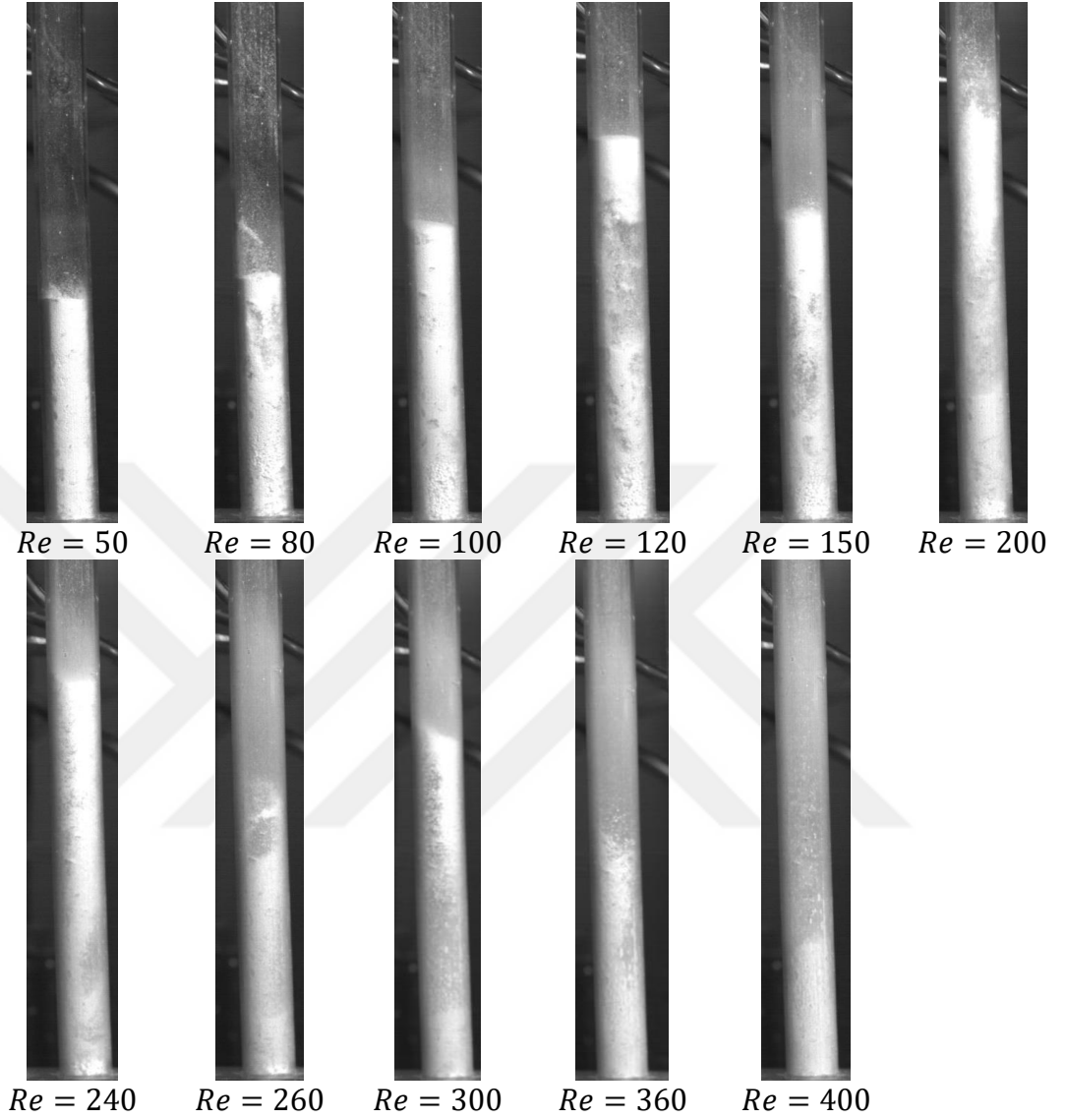
Farklı boyut ve yoğunluktaki TiO<sub>2</sub> partiküllerinin akışkanlaşma karakteristikleri bu bölümde incelenmiştir. TiO<sub>2</sub>-1 partikülünün boyutu 0.85 µm, ve TiO<sub>2</sub>-2 partikülünün boyutu 20.9 µm ve TiO<sub>2</sub>-3 partikülünün boyutu 4.87 µm'dir. Yoğunlukları ise sırasıyla 857, 819 ve 103 kg/m<sup>3</sup>'tür. Yoğunluk değerleri neredeyse aynı olan TiO<sub>2</sub>-1 ve TiO<sub>2</sub>-2 partiküllerinde partikül boyutu düşük olan TiO<sub>2</sub>-1 partikülü  $Re = 50$ , TiO<sub>2</sub>-2 partikülleri ise  $Re = 80$ 'de minimum akışkanlaşma özelliği göstermiştir. Yoğunluğu en düşük olan TiO<sub>2</sub>-3 partikülleri ise  $Re = 30$  değerinde minimum akışkanlaşma göstermiştir (Şekil 4.84).



Şekil 4.84 : TiO<sub>2</sub> minimum akışkanlaşma  $Re$ .

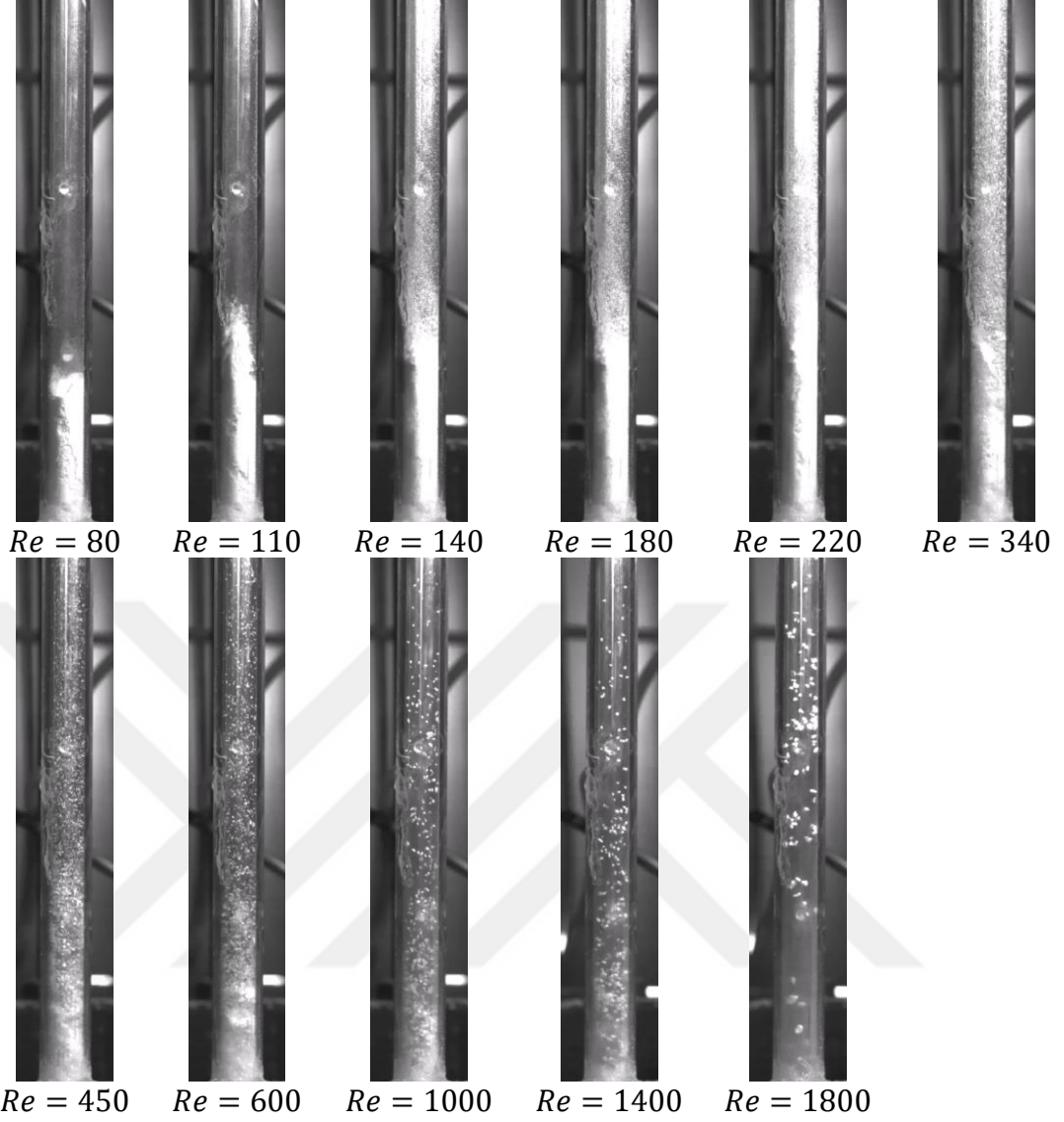
Ticari olarak temin edilen yüksek yoğunluklu ve yaklaşık 1 µm boyutundaki TiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinin minimum akışkanlaşma bölgesine kadar yatak genişlemesi oluşmuştur (Şekil 4.85). İlk partikül hareketinden sonra yatağın üst sınır bölgesinde kaynamaya benzer davranış gözlenmiştir.  $Re$  sayısı arttırıldıkça yatak içerisinde kabarcık oluşumu yerini slug oluşumuna ve slugların büyüyerek çember genişliğine kadar ulaşmasına sebep olmuştur.  $Re = 240$ 'tan itibaren dipte bulunan ve aglomere olmuş daha büyük boyutlu partiküller ile birlikte yatağın tamamı akışkanlaşmaktadır. Fakat,  $Re = 200$ 'den itibaren gözlenen türbülanslı akışkanlaşma rejimi ile yataktaki katı

yoğunluğunun azaldığı ve partiküllerin çember dışına taşınmaya başladığı tespit edilmiştir.



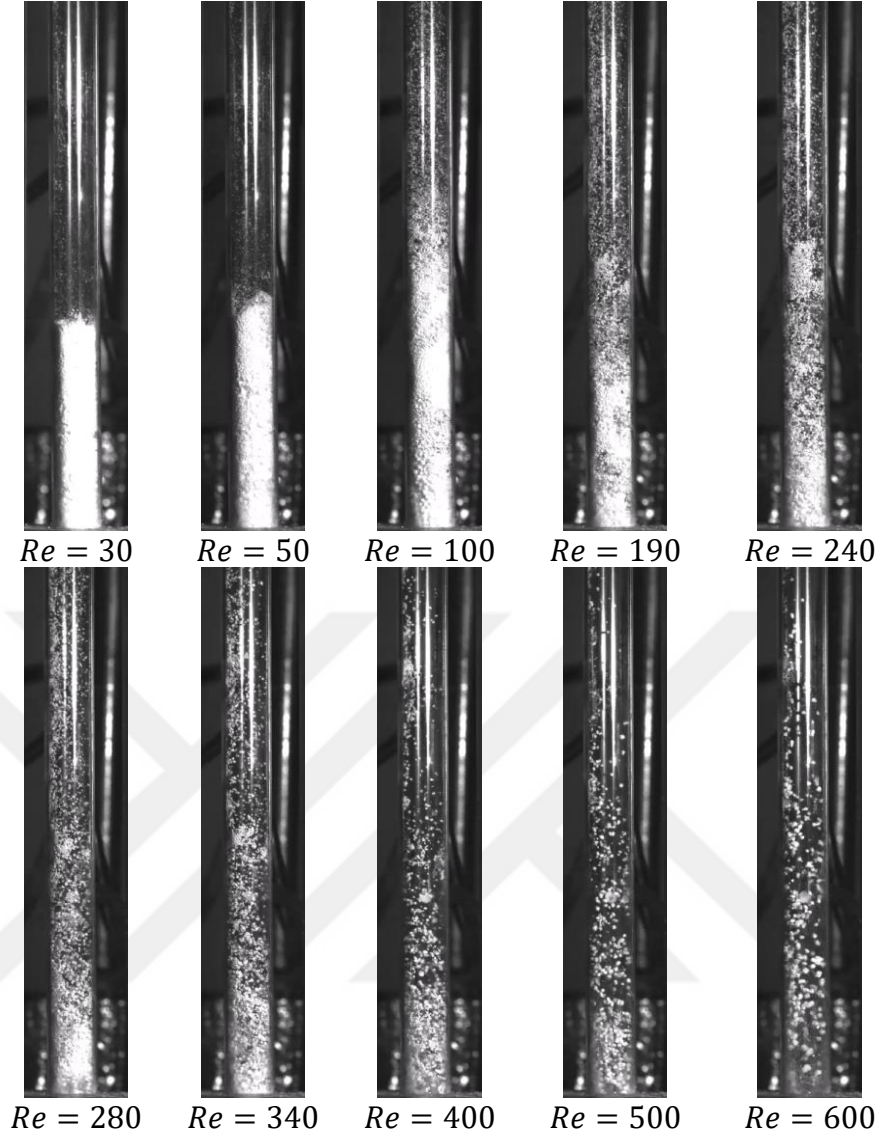
**Şekil 4.85 :** TiO<sub>2</sub>-1 gaz-katı akış görüntüleri.

Farklı  $Re$  değerleri için gaz katı akış görüntüleri incelendiğinde tane boyutu yoğunluğu yüksek ve nanoölçekteki TiO<sub>2</sub>-2 partikülleri homojen akışkanlaşma özelliği göstermektedir (Şekil 4.86).  $Re = 80$ 'deki ilk katı hareketinden sonra  $Re = 140$ 'ta yatağın tamamı akışkanlaşmaktadır. Bu  $Re$  değerleri arasında yatakta kanal oluşumu ve üst bölgeninin sınırının belirsizliği tespit edilmiştir.  $Re$  sayısı arttırıldıkça partiküller yığın halinde yukarı doğru hareket etmekte ve yatakta gaz boşlukları oluşmaktadır. Bu durum yatağın türbülanslı akışkanlaşma rejiminde olduğunu göstermektedir.  $Re = 1000$ 'den sonra partiküller çemberde eşit bir şekilde dağılarak spiral hareketle teğetsel akışkanlaşma davranışı göstermiştir.



**Şekil 4.86 :** TiO<sub>2</sub>-2 gaz-katı akış görüntüleri.

Ticari olarak temin edilen nanoboyuttaki TiO<sub>2</sub>-3 partikülleri ile  $Re = 100$ 'de yatağın tamamı akışkanlaşma davranışı göstermektedir (Şekil 4.87). Partiküller çemberin bütün yüksekliği boyunca akışkanlaşma davranışı göstermekte ve yukarıdan aşağı doğru katı hareketi de gözlenmektedir. Yatak bölgesinde kabarcıklı akışkanlaşma rejimi gözlenirken yatak içerisinde kanal oluşumu veya büyük yığınlar halinde hareket oluşmamıştır.  $Re = 240$ 'tan sonra homojen akışkanlaşma ve çember boyunca homojen katı dağılımı elde edilmiştir.  $Re = 500$ 'de ise yatağın tabana yakın bölgesinde katı rotasyon hareketi oluşmuştur.  $Re = 600$ 'de tabana yakın bölgedeki katı partiküllerde havalanarak hızlı taşıma rejiminin oluştuğu gözlemlenmiştir.

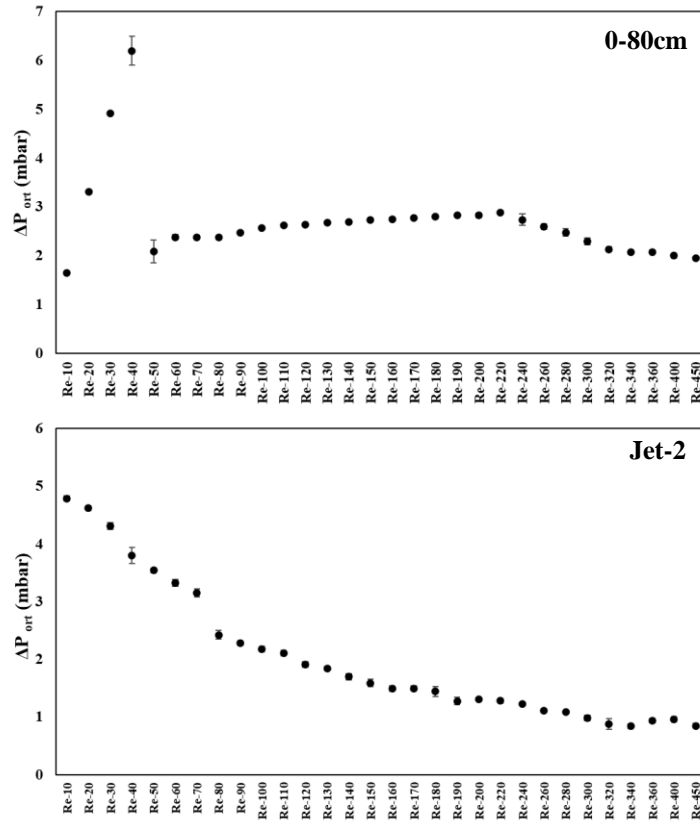


Şekil 4.87 :TiO<sub>2</sub>-3 gaz-katı akış görüntüleri.

Şekil 4.88-4.90'da TiO<sub>2</sub>-1, TiO<sub>2</sub>-2 ve TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinin çemberin farklı noktalarındaki ortalama basınç dalgalanma büyüklüklerinin  $Re$  sayısına göre değişimi verilmiştir. Zamana bağlı basınç farkının frekans analizi sonuçları güç spektrumları şeklinde 0-80 cm konumunda TiO<sub>2</sub>-1 için Şekil 4.91'de, TiO<sub>2</sub>-2 için Şekil A.38'de ve TiO<sub>2</sub>-3 için Şekil A.40'ta verilmiştir. Jetin basınç düşüşü sonuçları Şekil A.37, Şekil A.39 ve Şekil A.41'de sunulmuştur. TiO<sub>2</sub>-1 için  $Re = 40$ , TiO<sub>2</sub>-2 için  $Re = 70$  ve TiO<sub>2</sub>-3 için  $Re = 20$  değerlerinde basınç düşüşünün aniden azaldığı görülmektedir ve bu nokta görüntülerden de elde edilen minimum akışkanlaşma  $Re$  değerleri ile uyumludur.

TiO<sub>2</sub>-1 partiküllerinde minimum akışkanlaşma bölgesinden sonra basınç düşüşü eğrisi  $Re$  sayısından bağımsız olarak sabitlendiği bir bölge bulunmaktadır:  $Re = 100$  ile

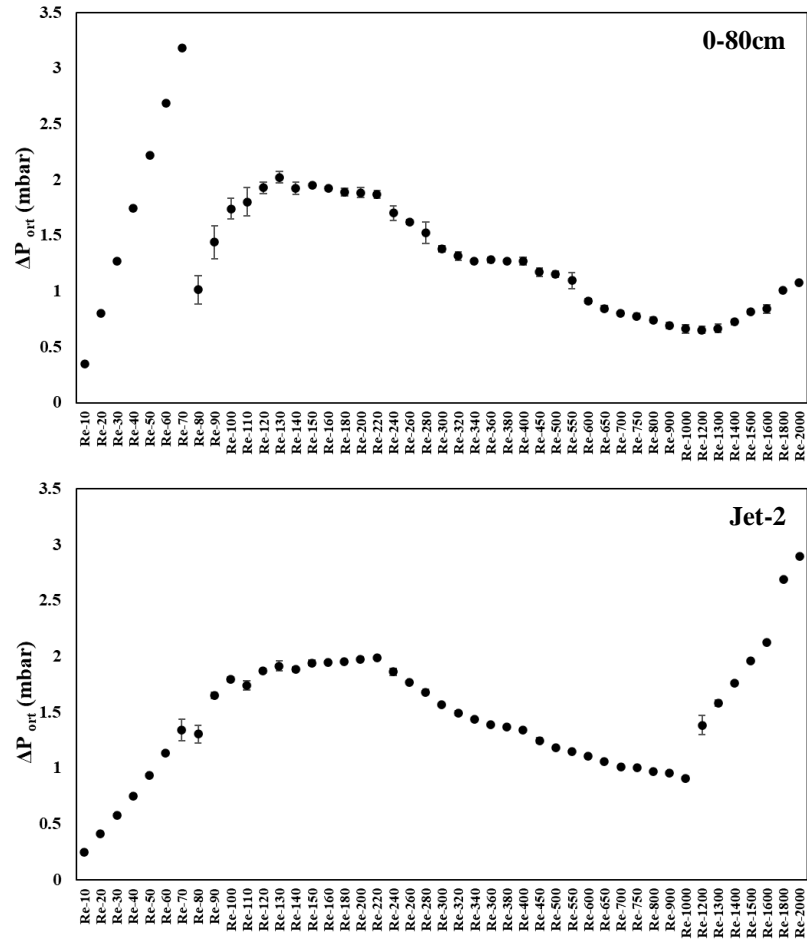
$Re = 220$  arası (Şekil 4.88).  $Re = 100$ 'e kadar basınç düşüşünde gözlenen artışın sebebi bu bölgede gözlenen kabarcıklı akış rejimi ve yatakta oluşan kanallardır.  $Re = 220$ 'den sonra ise yataktaki basınç düşüşü azalmaya başlamaktadır. Akış görüntülerinden de teyit edildiği üzere bu bölgede yatak yığın halinde hareket etmekte ve üst sınır bölgesi olmamakla birlikte türbülanslı akış rejimi gözlenmektedir. Artık bu rejimde partiküller çember dışına çıkmakta ve yataktaki katı yoğunluğu azalmaktadır.



**Şekil 4.88** :  $Re = 10 - 450$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi ( $TiO_2-1$ ).

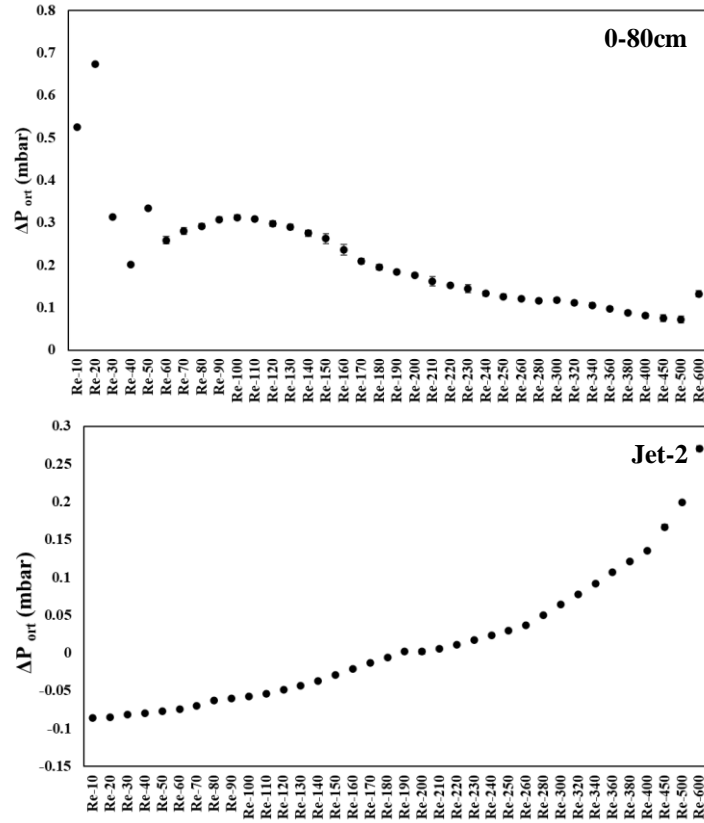
$TiO_2-2$  partiküllerinde minimum akışkanlaşma bölgesinden sonra basınç düşüşü eğrisi  $Re$  sayısından bağımsız olarak sabitlendiği iki bölge bulunmaktadır:  $Re = 100$  ile  $Re = 220$  arası ve  $Re = 340$  ile  $Re = 550$  arası (Şekil 4.89).  $Re = 120$ 'ye kadar basınç düşüşünde gözlenen artışın sebebi bu bölgede yatakta oluşan kanallaşmadır.  $Re = 220$ 'den sonra ise yataktaki basınç düşüşü azalmaya başlamaktadır. Bu noktadan sonra daha ince partiküller yatağı terketmeye başlamaktadır. İkinci bölgede ise daha büyük boyutlu partiküllerin akışkanlaştığı sabit basınç düşüşü bölgesi oluşmaktadır.  $Re = 550$ 'den sonra ise yatak yoğunluğunun azaldığı ve partiküllerin yatağı terkettiği hızlı taşıma rejimi oluşmaktadır.  $Re = 1000$ 'de basınç düşüşünde

gözlenen artışın sebebi ise büyük boyutlu partiküllerin gösterdiği teğetsel akışkanlaşma davranışdır.



**Şekil 4.89** :  $Re = 10 - 2000$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi ( $TiO_2-2$ ).

$TiO_2-3$  partiküllerinde minimum akışkanlaşma bölgesinden sonra basınç düşüşü eğrisi  $Re$  sayısından bağımsız olarak sabitlendiği bir bölge bulunmaktadır:  $Re = 80$  ile  $Re = 140$  arası (Şekil 4.90).  $Re = 80$ 'e kadar basınç düşüşünde gözlenen artışın sebebi bu bölgede yataкта oluşan kabarcıklı akışkanlaşma rejimidir.  $Re = 140$ 'tan itibaren yataktaki basınç düşüşü azalmaya başlamaktadır. Bu bölgede iki farklı trend gözlenmiştir. Bunun sebebi gözlenen türbülanslı akışkanlaşma rejimi sonucu yataktaki katı yoğunluğunun azalmasıdır.  $Re = 500$ 'de basınç düşüşünde gözlenen artışın sebebi ise daha büyük partiküllerin gösterdiği teğetsel akışkanlaşma davranışdır.



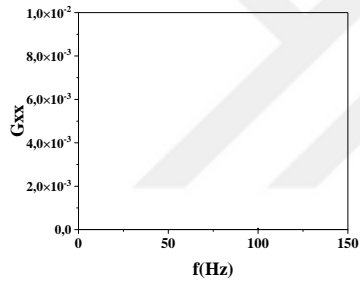
**Şekil 4.90 :**  $Re = 10 - 600$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi (TiO<sub>2</sub>-3).

Şekil 4.91’de TiO<sub>2</sub>-1 partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısından sonra 0-25 Hz arasında oluşan iki tanımlı pik kaynamaya benzer yatağın üst sınırında oluşan düzenli katı hareketinin bir sonucudur.  $Re$  sayısının artırılması ile oluşan kabarcıklı akış rejimi sonucu olarak 0-50 Hz aralığında düşük enerjili bant piklerin oluşumu gözlemlenmiştir. Oluşan gaz boşluklarının büyüyerek kanallaşma oluşturması ile bu bant halindeki piklerin enerjisi az da olsa artmıştır. Bu bölgede gözlenen tanımlı pik ve bant halindeki pikler  $Re$  sayısı arttıkça kaotik akış rejiminin bir göstergesi olarak var olmaya devam etmiştir.

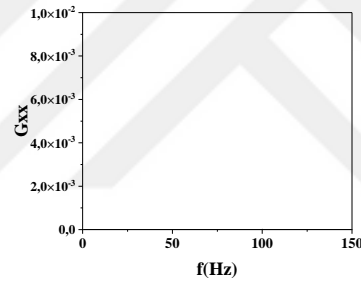
Şekil A.38’de TiO<sub>2</sub>-2 partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. Minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısından sonra 0-25 Hz arasında oluşan düşük enerjili piklerin oluşumu gözlemlenmiştir.  $Re$  sayısının artırılması ile  $Re = 120$ ’de bütün yatağın akışkanlaşması ve sonrasında yatakta oluşan kanallaşmalar 0-50 Hz arasında gözlenen piklerin enerjisinin artmasına sebep olmuştur. Sonrasında artan  $Re$  sayısı ile yataktaki katı yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak oluşan kaotik hareketi temsil eden piklerin enerji seviyeleri düşmüştür.  $Re =$

700,  $Re = 1200$  ve  $Re = 1400$  değerlerinde 120 Hz'de gözlenen tanımlı pik ise akış görüntülerinden tespit edilen teğetsel katı hareketinin bir sonucudur.

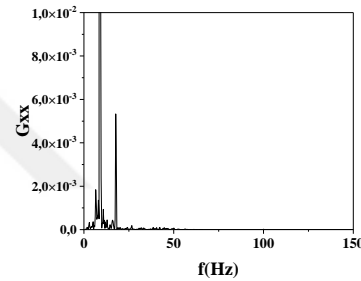
Şekil A.40'ta  $TiO_2-3$  partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir.  $Re = 10$ 'dan itibaren düşük enerjilerde 100 Hz'de tanımlı pik gözlemlenebilmektedir. Bunun sebebi  $TiO_2-3$  partiküllerinin güç spektrumlarının incelendiği enerji seviye aralığının diğer  $TiO_2$  partiküllerine kıyasla daha düşük olması ve bu seviyelerdeki piklerin gözlenebilmesidir.  $Re$  sayısının artırılması ile oluşan kabarcıklı akış rejimi sonucu olarak,  $Re = 70$ 'te 0-100 Hz aralığında birden fazla tanımlı pikin oluşumu tespit edilmektedir. Daha sonra bu tanımlı piklerin çoğunun kaybolması ile 0-30 Hz aralığında daha geniş ve yüksek enerjili bant halinde bir pik ve 50 Hz ile 100 Hz değerlerinde daha az enerjili tanımlı pikler oluşmaktadır.  $Re = 200$ 'den itibaren ise 120 Hz değerinde bir pik oluşumu gözlemlenmektedir. Yatakta gözlemlenen türbülanslı akış rejimi sonucu oluşan bu tanımlı piklerin enerjileri yatakta katı yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak azalmaktadır.



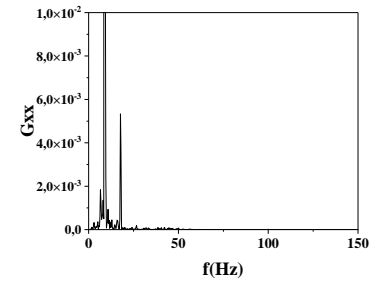
*Re = 40*



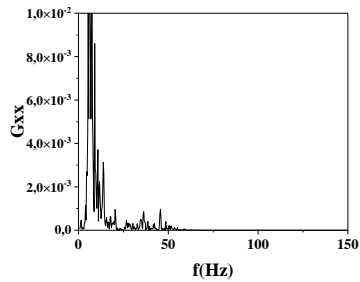
*Re = 50*



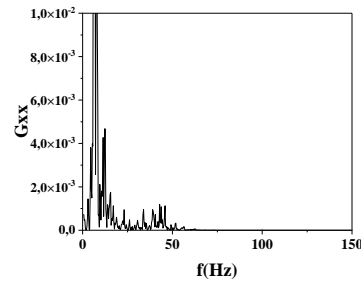
*Re = 60*



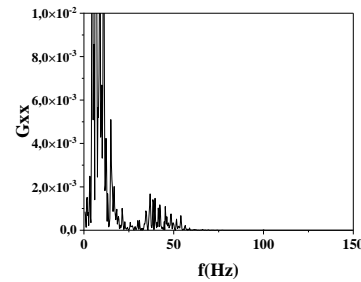
*Re = 70*



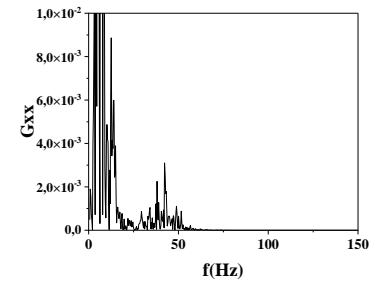
*Re = 80*



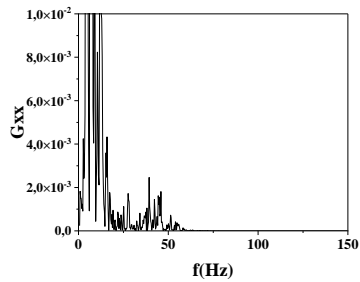
*Re = 90*



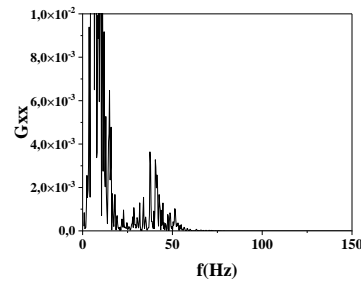
*Re = 100*



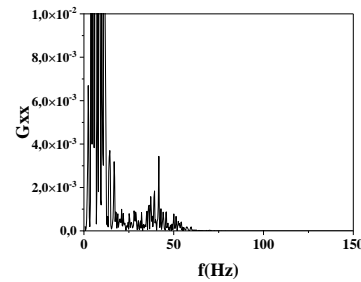
*Re = 110*



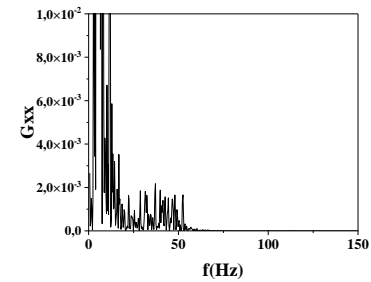
*Re = 120*



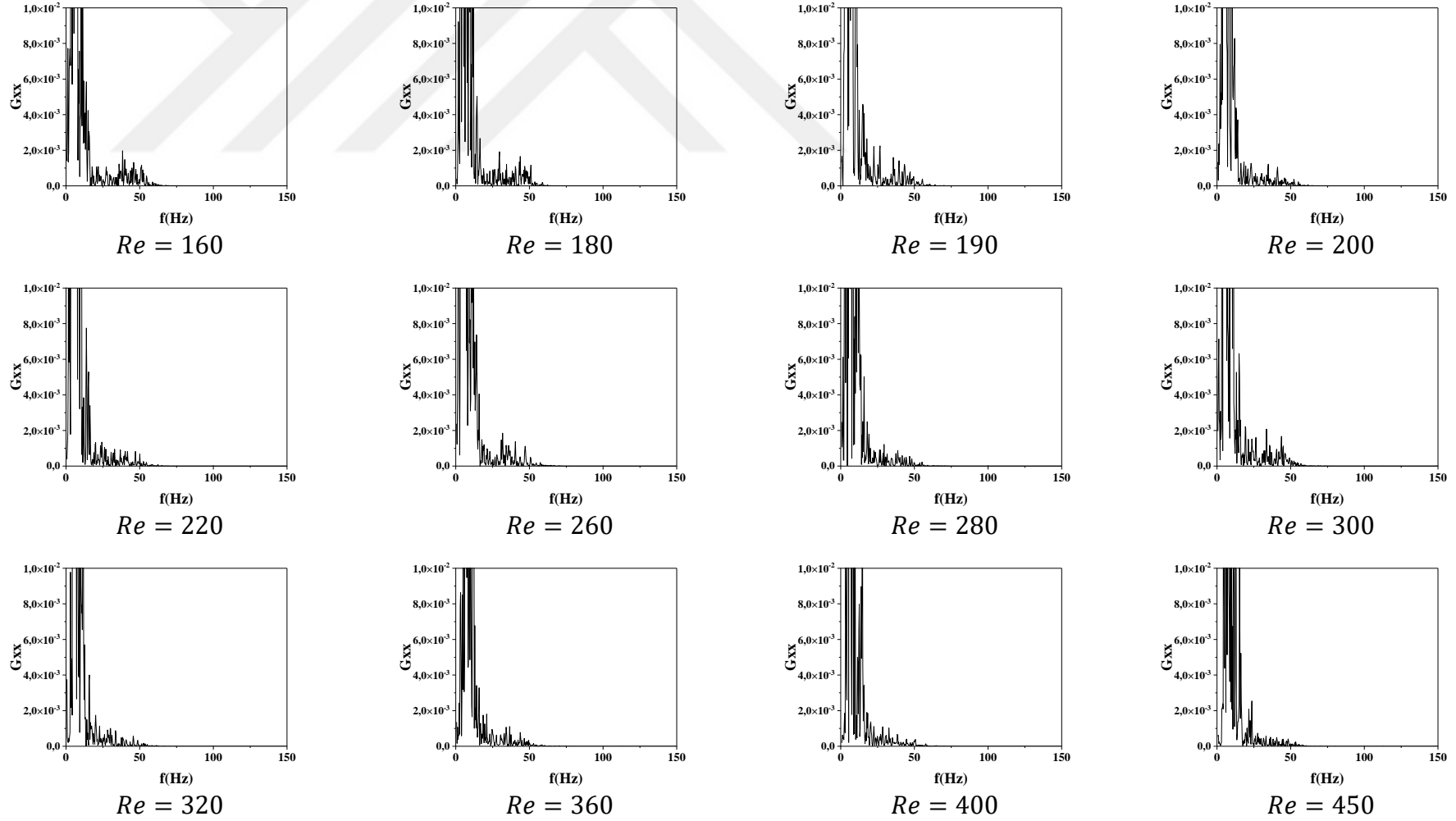
*Re = 130*



*Re = 140*



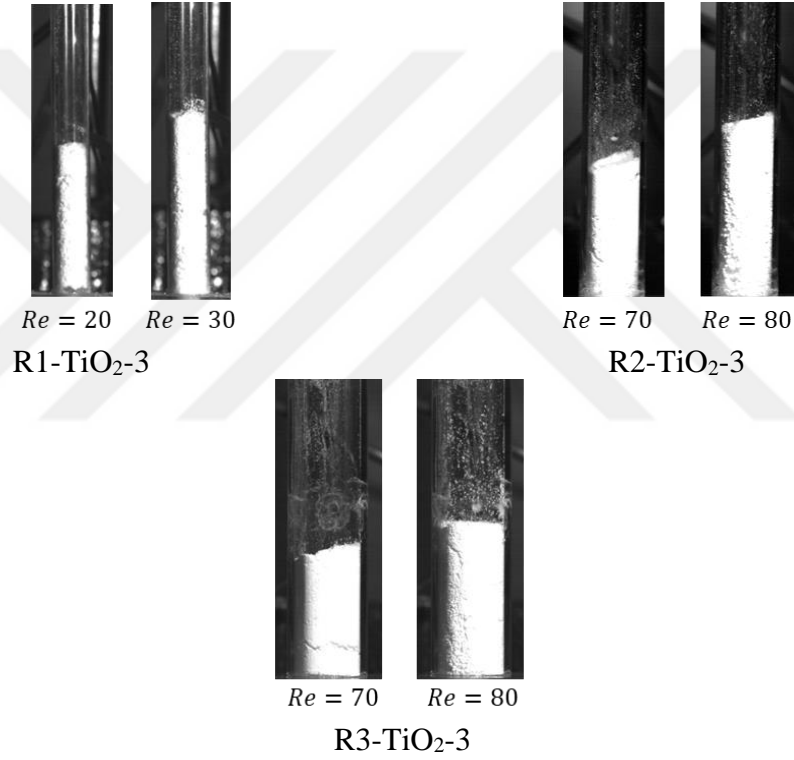
*Re = 150*



Şekil 4.91 :  $TiO_2-1$  fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).

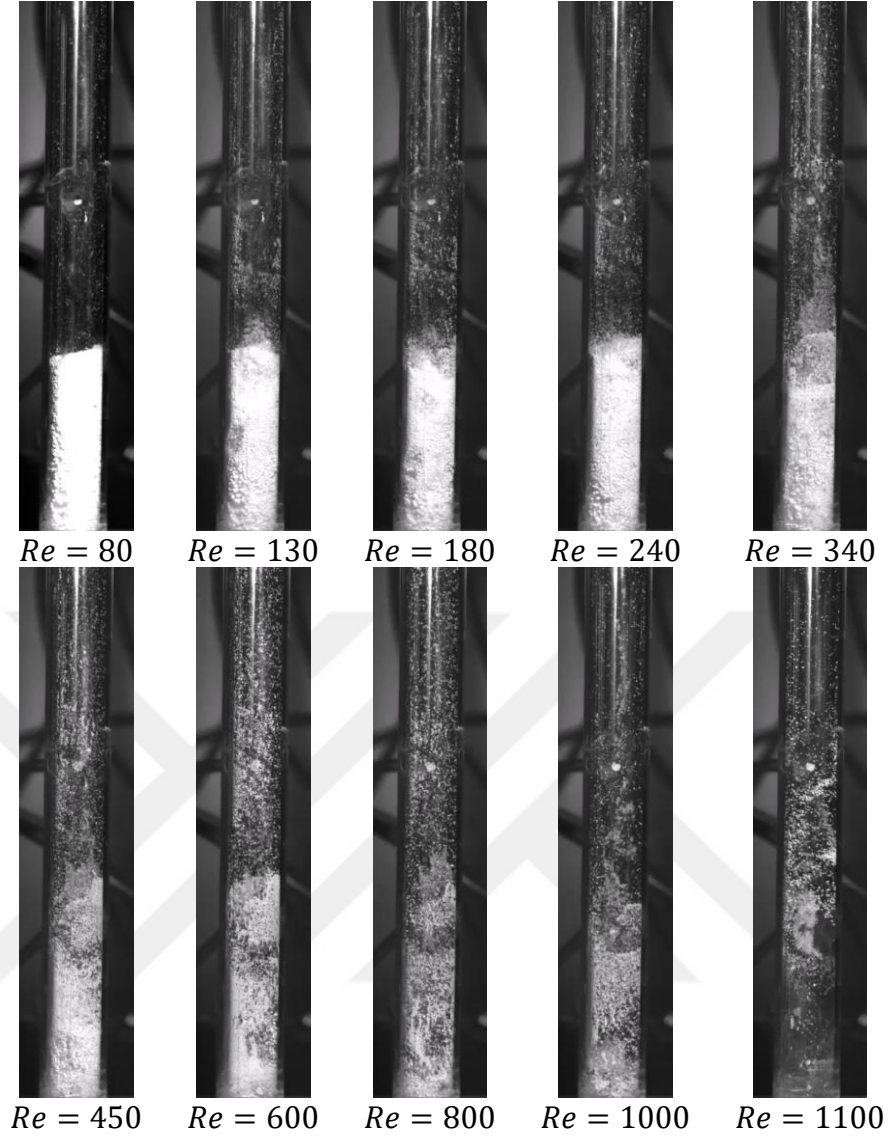
#### 4.2.2.5 Farklı $D_{jet}/D_c$

Reaktör enjektör/çember çap oranının etkisinin incelenmesi için ticari  $TiO_2-3$  partikülleri kullanılarak farklı oranlarda reaktörler için gaz-katı akışkanlaşma deneyleri gerçekleştirilmiştir (1/2, 1/3, 1/4). Enjektör/çember çapı oranı 1/2 olduğunda minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı 30 iken 1/3 ve 1/4 oranlarında  $TiO_2-3$  partikülleri  $Re = 80$  değerinde akışkanlaşmıştır (Şekil 4.92). Çember çapı arttıkça sabit yatak hacmi için kullanılan katı miktarı artmıştır, ancak katı içerisindeki boşluklar değişmediği ve gazın kuvveti katı partikülün kuvvetine eşit olduğu anda akışkanlaşma başladığı için çember çapının belirli orandan sonra etkili olmadığı gözlenmiştir.



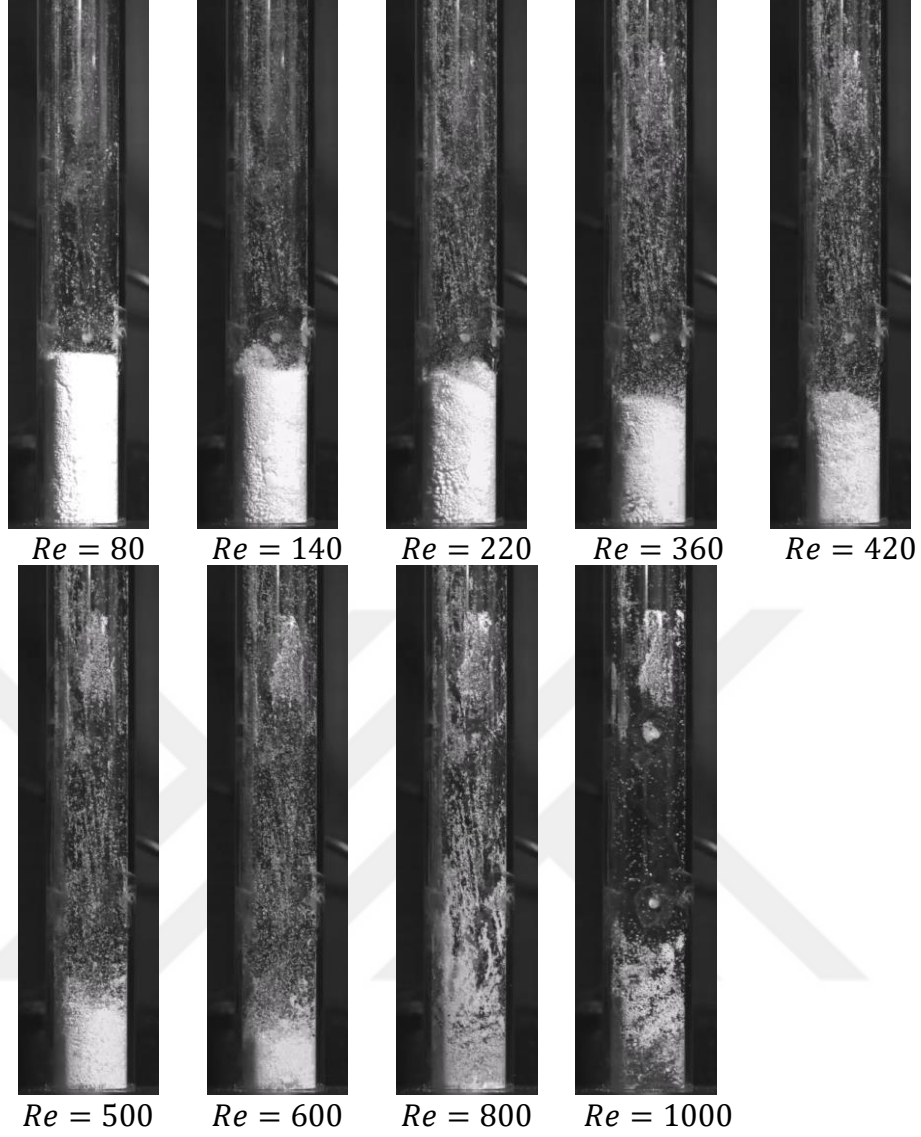
Şekil 4.92 : Farklı  $D_{jet}/D_c$  için minimum akışkanlaşma  $Re$ .

R2-TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinde  $Re = 200$  değerinde dipteki katıların sabit halde olduğu ancak yatağın diğer bölgelerinde homojen partiküllü akışkanlaşmanın olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.93). Yatakta  $Re = 240$ 'a kadar kaynamaya benzer akışkanlaşma davranışı oluşmakta bu bölgede ise yatağın tamamı akışkanlaşma hareketi göstermektedir. Dipteki katılar ise ancak  $Re = 1000$  değerinde akışkanlaşmıştır.  $Re = 1100$ 'de ise teğetsel olarak beslenen gazın ivmelendirmesi ile teğetsel katı hareketi gözlenmiştir.



Şekil 4.93 : R2-TiO<sub>2</sub>-3 gaz-katı akış görüntüleri.

R3-TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinde  $Re = 200$  değerinde dipteki katılar sabit halde iken yatağın tamamında homojen akışkanlaşma elde edilmiştir (Şekil 4.94). Dipteki aglomere olmuş büyük boyutlu katılar ise ancak  $Re = 1500$  değerinde akışkanlaşmıştır.  $Re = 1800$ 'de ise teğetsel olarak beslenen gazın ivmelendirmesi ile spiral katı hareketi gözlenmiştir. Çember çapı 10 mm'den 15 mm'ye yükseldiğinde minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı artmıştır, ancak çember çapı 20 mm iken minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı değişmemiştir. Çember çapının artırılması katı yatağının akışkanlaşma rejimi bölgelerinin geçiş  $Re$  sayısını, terminal  $Re$  değerini ve spiral katı hareketinin olduğu  $Re$  sayısını arttırmıştır. Bunun sebebi yatak hacmi sabit tutulduğu için artan katı miktarı ile jetlerden gönderilen gazın daha yüksek kaldırma kuvvetinin gereksinimi olması ve bu değerlerin daha yüksek  $Re$  sayılarında elde edilebilmesidir.

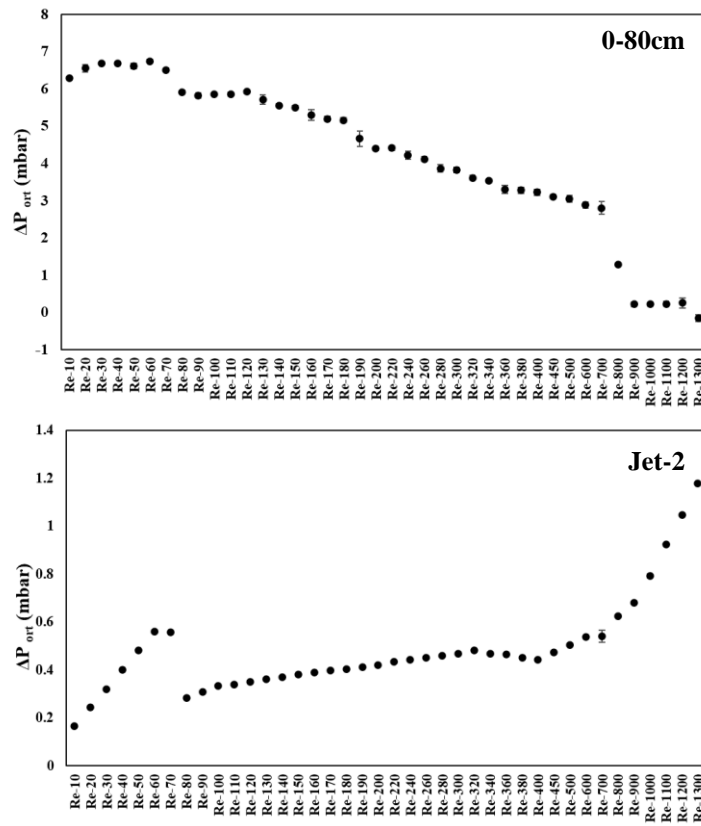


Şekil 4.94 : R3-TiO<sub>2</sub>-3 gaz-katı akış görüntüleri.

Şekil 4.95-4.96'da R2-TiO<sub>2</sub>-3 ve R3-TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinin çemberin farklı noktalarındaki ortalama basınç dalgalanma büyüklüklerinin  $Re$  sayısına göre değişimi verilmiştir. Zamana bağlı basınç farkının frekans analizi sonuçları güç spektrumları şeklinde 0-80 cm konumunda R2-TiO<sub>2</sub>-3 için Şekil 4.95'te ve R3-TiO<sub>2</sub>-3 için Şekil A.43'te verilmiştir. Jetin basınç düşüşü sonuçları Şekil A.42-A.44'te sunulmuştur. R2-TiO<sub>2</sub>-3 ve R3-TiO<sub>2</sub>-3 için  $Re = 80$  değerinde basınç düşüşünün azaldığı görülmektedir ve bu nokta görüntülerden de elde edilen minimum akışkanlaşma  $Re$  değerleri ile uyumludur ve basınç analizleri ile gaz-katı akış deneylerinin uyumlu olduğunu göstermektedir.

R2-TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinde minimum akışkanlaşma bölgesinden sonra basınç düşüşü eğrisi  $Re$  sayısından bağımsız olarak neredeyse sabit olduğu bir bölge bulunmaktadır:

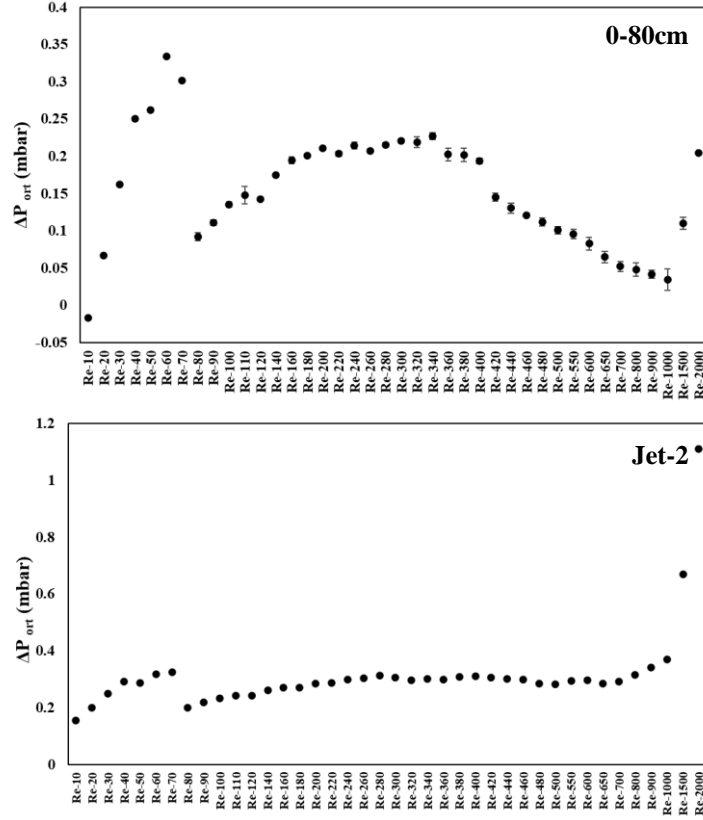
$Re = 80$  ile  $Re = 180$  arası (Şekil 4.95). Bu bölgede basınç düşüşünde gözlenen salınımların sebebi gözlenen kabarcıklı akış rejiminin sonucudur.  $Re = 180$ 'den sonra ise yataktaki basınç düşüşü azalmaya başlamaktadır. Akış görüntülerinden yatağın tamamı  $Re = 240$ 'da akışkanlaşma davranışı göstermekte ve artan  $Re$  sayısı ile türbülanslı akış rejimi gözlenmektedir. Basınç düşüşü analizinden,  $Re = 180$ 'den itibaren partiküllerin yatak dışına çıkmaya başladığı türbülanslı rejim ve sonrası hızlı akışkanlaşma rejimlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.  $Re = 700$ 'den sonra basınç düşüşünün aniden azalarak sıfıra yaklaşması ise burada pnömatik taşıma rejiminin oluştuğu ve çemberde katı partiküllerin yoğunluğunun azaldığını göstermektedir.



**Şekil 4.95 :**  $Re = 10 - 1300$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi (R2-TiO<sub>2</sub>-3).

R3-TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerinde minimum akışkanlaşma bölgesinden sonra basınç düşüşü eğrisi  $Re$  sayısından bağımsız olarak neredeyse sabit olduğu bir bölge bulunmaktadır:  $Re = 160$  ile  $Re = 400$  arası (Şekil 4.96).  $Re = 160$ 'a kadar basınç düşüşünde gözlenen artışın sebebi gözlenen kabarcıklı akış rejiminin sonucudur.  $Re = 400$ 'den sonra ise yataktaki basınç düşüşü azalmaya başlamaktadır. Akış görüntülerinden yatağın tamamı  $Re = 360$ 'da akışkanlaşma davranışı göstermekte ve artan  $Re$  sayısı ile türbülanslı akış rejimi gözlenmektedir. Basınç düşüşü analizinden de  $Re = 360$ 'tan

İtibaren partiküllerin yatak yoğunluğunun hızla azaldığı ve partiküllerin yatak dışına çıkmaya başladığı türbülanslı rejim ve sonrası hızlı akışkanlaşma rejimlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.  $Re = 1000$ 'den sonra basınç düşüşündeki artışın sebebi ise kış görüntülerinden de gözlemlenen  $Re = 900$ 'den itibaren oluşan teğetsel akışkanlaşma hareketinin sonucudur.

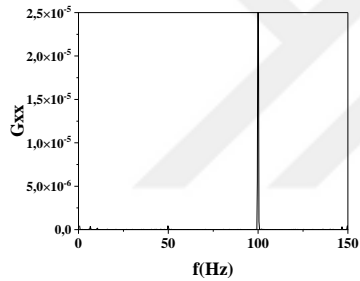


**Şekil 4.96 :**  $Re = 10 - 2000$  için ortalama fark basınç verilerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi (R3-TiO<sub>2</sub>-3).

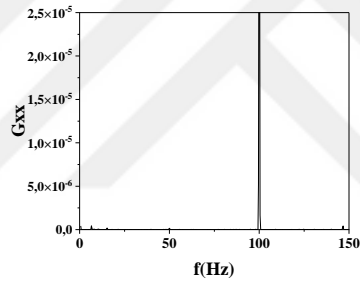
Şekil 4.97'de R2-TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir.  $Re = 10$ 'dan itibaren R1 geometri çemberde düşük enerjilerde gözlenen 100 Hz'deki tanımlı pik daha yüksek enerji seviyelerinde oluşmaktadır. Bunun sebebi artan çember çapı ile oluşan hareketin daha fazla tekrarlanabilmesidir.  $Re$  sayısının artırılması ile oluşan kabarcıklı akış rejimi sonucu olarak,  $Re = 80$ 'den itibaren 0-50 Hz aralığında birden fazla tanımlı pik oluşumu ve artan  $Re$  sayısı ile enerjilerinin artışı tespit edilmektedir.  $Re = 240$ 'tan itibaren ise yatakta gözlemlenen türbülanslı akış rejimi sonucu oluşan bu tanımlı piklerin enerjileri yatakta katı yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak azalmaktadır.

Şekil A.43'te R2-TiO<sub>2</sub>-3 partiküllerine ait fark basınç verilerinin güç spektrumları gösterilmektedir. R1 ve R2 geometrilerinin aksine tanımlı frekanslarda oluşan piklerin enerji seviyeleri daha düşüktür. Bunun sebebi incelenen frekans enerji aralığının diğer geometrilerden daha yüksek olmasıdır. Oluşan kabarcıklı akış rejimi sonucu kabarcık boyutlarındaki değişim frekans enerjilerinde salınımlara sebep olmaktadır.  $Re = 900$ 'den itibaren oluşan teğetsel hareket sonucu bu piklerin enerji seviyelerinde artış gözlenmiştir.

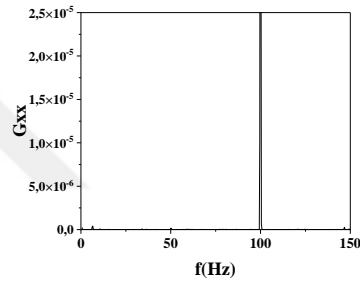




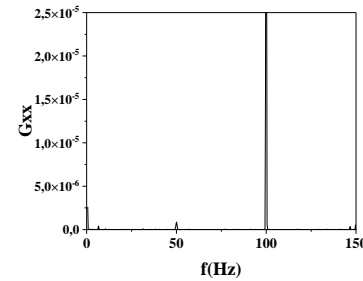
*Re = 10*



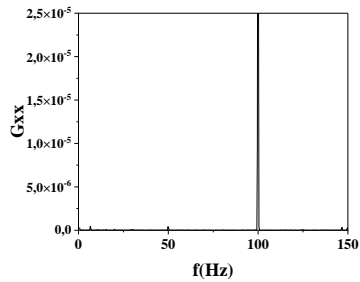
*Re = 20*



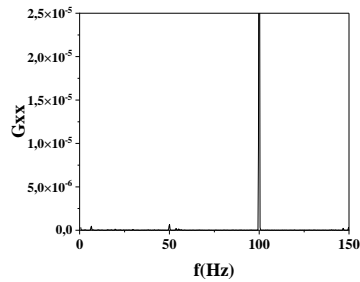
*Re = 30*



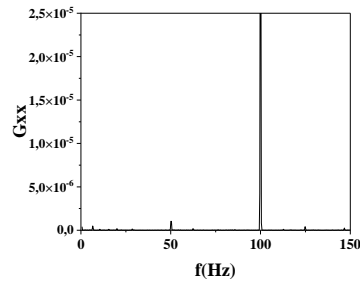
*Re = 40*



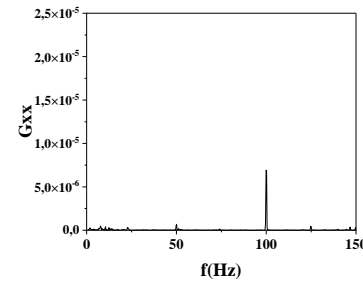
*Re = 50*



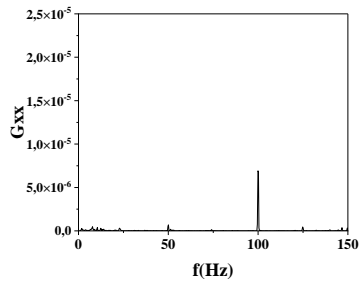
*Re = 60*



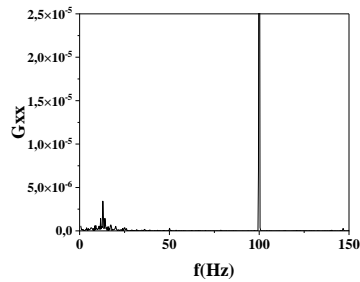
*Re = 70*



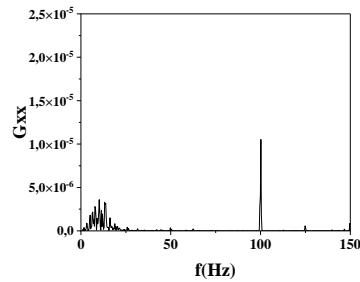
*Re = 80*



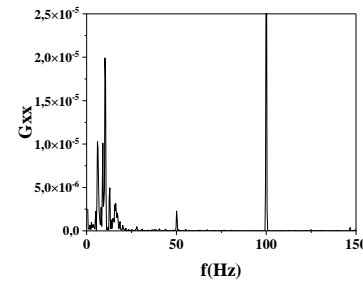
*Re = 90*



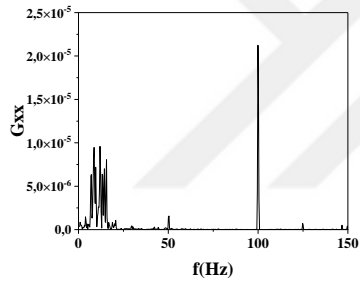
*Re = 100*



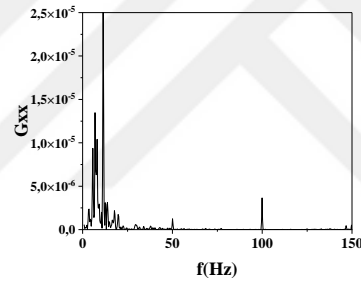
*Re = 120*



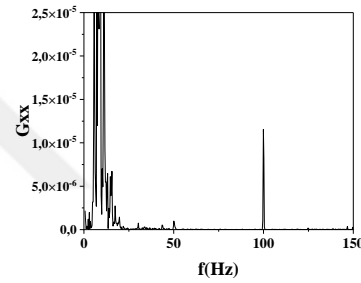
*Re = 140*



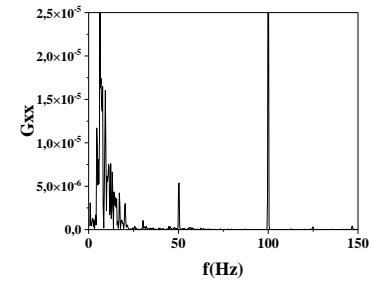
*Re = 160*



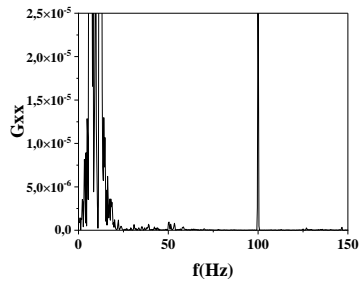
*Re = 180*



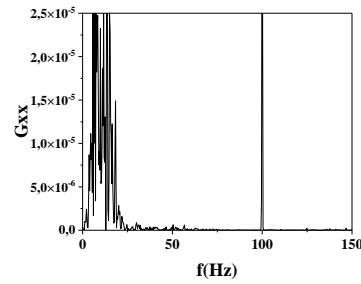
*Re = 200*



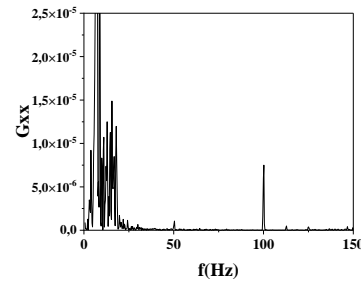
*Re = 220*



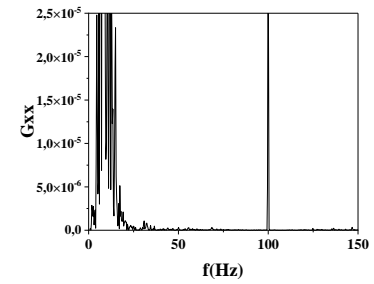
*Re = 240*



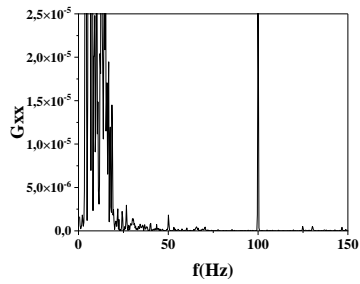
*Re = 260*



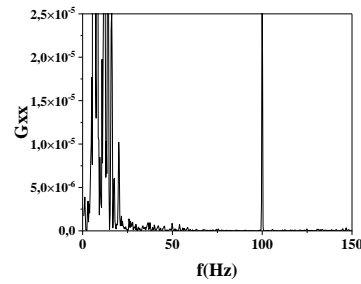
*Re = 280*



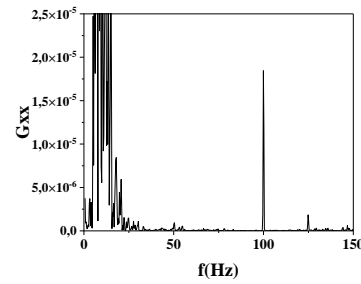
*Re = 300*



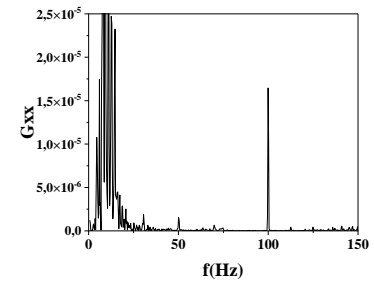
*Re = 320*



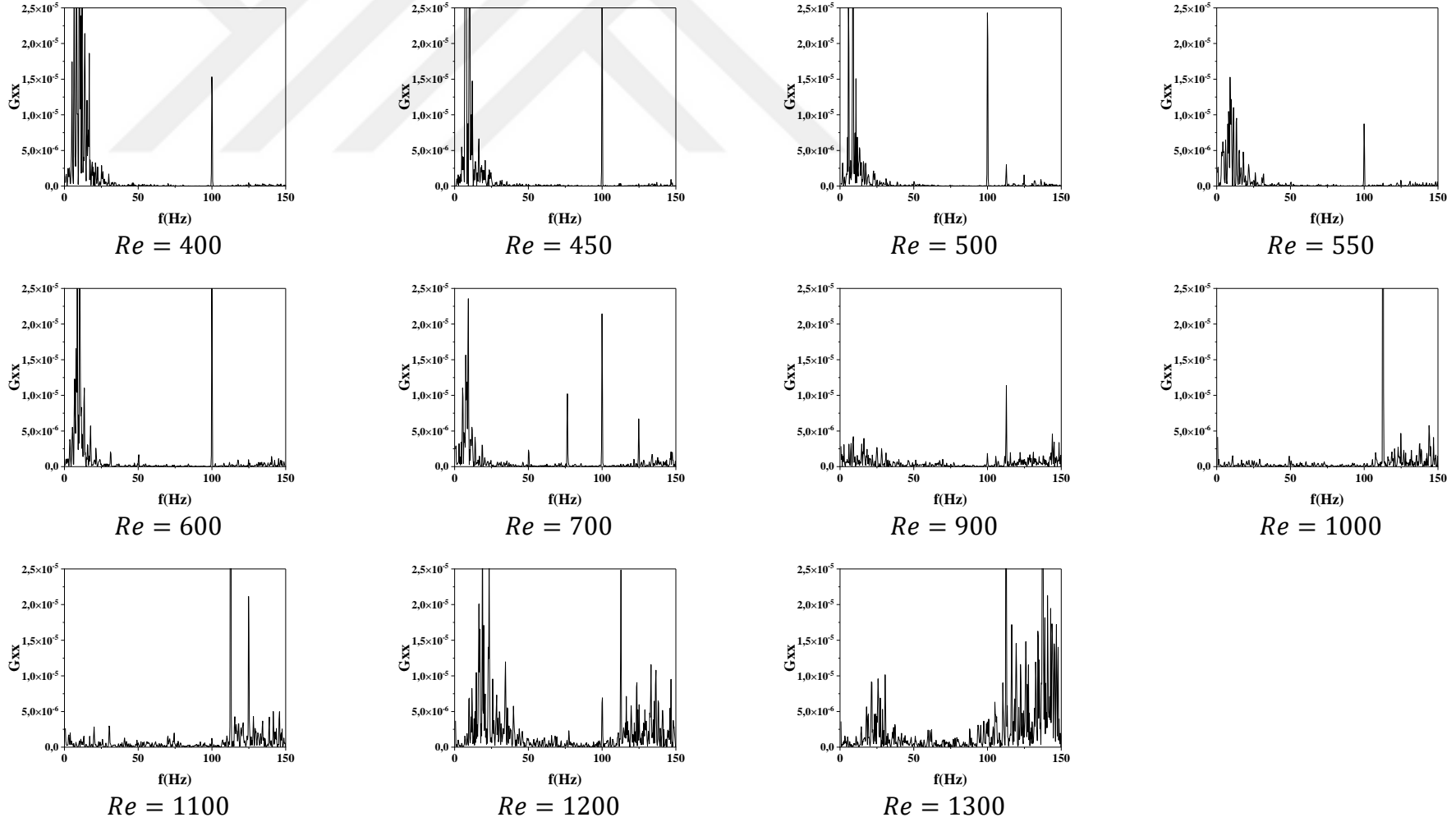
*Re = 340*



*Re = 360*



*Re = 380*



Şekil 4.97 : R2-TiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).

#### 4.2.2.6 Akış görüntüleme ve basınç analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.10-4.14'te basınç düşüşü analizi ve akış görüntüleme deneylerine göre belirlenen akışkanlaşma rejimleri gösterilmektedir. Basınç düşüşü analizine göre basınç düşüşünün maksimum olduğu nokta minimum akışkanlaşma  $Re$  sayısı olarak belirlenmiştir. Ardından basınç düşüşünün sabitlendiği bölge tam akışkanlaşma bölgesi ve basınç düşüşünün azalmaya başladığı nokta ise terminal  $Re$  bölgesi olarak tanımlanmıştır. Basınç düşüşü analizine göre belirlenen minimum  $Re$  sayısı ve terminal  $Re$  sayısı aralığındaki bölgeler bu çalışmada sunulan vorteks mikser geometrisinin çalışma aralıkları olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde gözlenen tam akışkanlaşma bölgelerinde katı partiküllerin askıda kaldığı homojen akışkanlaşma bölgeleri elde edilmiştir. Ayrıca, akış görüntülerine göre belirlenen akışkanlaşma rejimi haritalarına göre de çemberde gözlenen kanallaşma ve kabarcıklaşma gibi homojen olmayan akış profilleri belirlenmiştir. Çalışılan partikül ve vorteks mikser geometrileri için optimum çalışma aralıkları Çizelge 4.10-4.14'e göre verilen sonuçlardan belirlenebilmektedir.

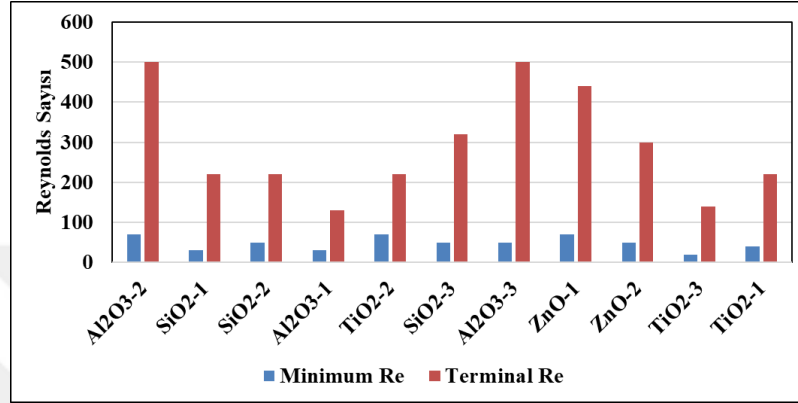
**Çizelge 4.10 :** Farklı partiküller için basınç düşüşü analizine göre belirlenen  $Re_{mf}$ ,  $Re_{cf}$  ve  $Re_t$  değerleri (R1).

| Partikül                          | $Re_{mf}$ | $Re_{cf}$ |         |         | $Re_t$ |
|-----------------------------------|-----------|-----------|---------|---------|--------|
|                                   |           | I         | II      | III     |        |
| ZnO-1                             | 70        | 80-160    | 170-440 | 460-550 | 440    |
| ZnO-2                             | 50        | 110-150   | 180-220 | 240-300 | 300    |
| SiO <sub>2</sub> -1               | 30        | 90-220    | 280-380 | -       | 220    |
| SiO <sub>2</sub> -2               | 50        | 110-160   | 170-220 | 400-650 | 220    |
| SiO <sub>2</sub> -3               | 50        | 80-150    | 160-320 | -       | 320    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 | 30        | 60-130    | -       | -       | 130    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 | 70        | 180-300   | 300-380 | 420-500 | 500    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 | 50        | 120-240   | 320-500 | -       | 500    |
| TiO <sub>2</sub> -1               | 40        | 50-240    | -       | -       | 220    |
| TiO <sub>2</sub> -2               | 70        | 100-220   | 340-550 | -       | 220    |
| TiO <sub>2</sub> -3               | 20        | 80-140    | -       | -       | 140    |

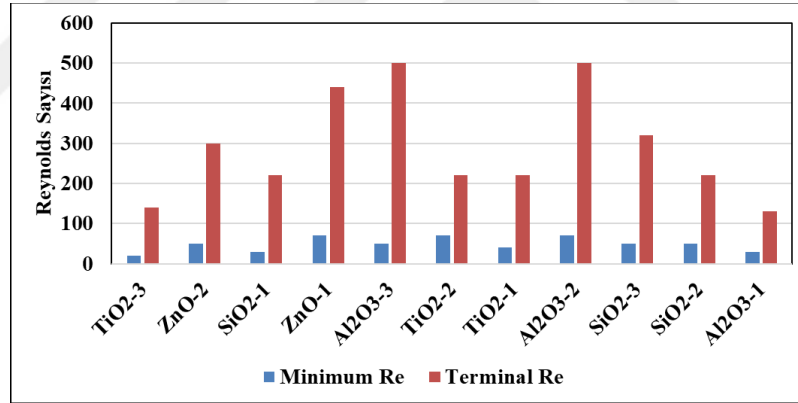
**Çizelge 4.11 :** Farklı geometriler için basınç düşüşü analizine göre belirlenen  $Re_{mf}$ ,  $Re_{cf}$  ve  $Re_t$  değerleri (TiO<sub>2</sub>-3).

| Partikül | $Re_{mf}$ | $Re_{cf}$ |         |     | $Re_t$ |
|----------|-----------|-----------|---------|-----|--------|
|          |           | I         | II      | III |        |
| R1       | 20        | 80-140    | -       | -   | 140    |
| R2       | 60        | 80-180    | 360-700 | -   | 180    |
| R3       | 60        | 160-400   | -       | -   | 400    |

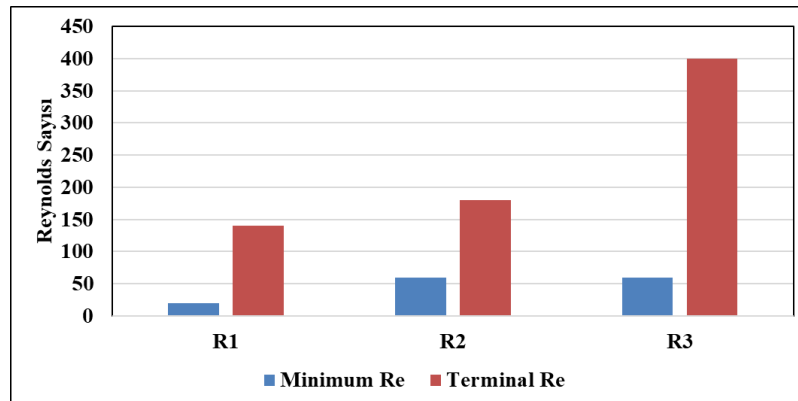
Şekil 4.98-4.100'de ise artan ortalama partikül boyutu, yatak boşluğu ve çember çapına göre gözlenen minimum  $Re$  ve terminal  $Re$  sayıları verilmiştir. Bu grafiklere göre partikül boyutu ve yoğunluğunun vorteks mikserdeki gaz-katı akışkanlaşma hidrodinamiklerini birlikte etkilediği ve bu parametrelerin daha detaylı bir şekilde çalışılması gerektiği bulunmuştur. Artan çember çapı ile birlikte minimum  $Re$  sayısı ve terminal  $Re$  sayısı arasında gözlenen operasyon aralığı artmaktadır.



Şekil 4.98 : Artan ortalama partikül boyutuna göre  $Re$  operasyon aralığı.



Şekil 4.99: Artan yatak boşluğuna göre  $Re$  operasyon aralığı.



Şekil 4.100 : Artan çember çapına göre  $Re$  operasyon aralığı.

**Çizelge 4.12** : Farklı partiküller için akış görüntüleme deneylerine göre belirlenen akış rejimi haritası (R1).

| Partikül                          | Sabit Yatak  | Genişlemiş Yatak   | $Re_{mf}$  | $Re_{mf, cr}$ | Kabarcıklı akış rejimi | Kanallaşma             | Türbülanslı akışkanlaşma | Teğetsel davranış |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|---------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| ZnO-1                             | $Re \leq 70$ | $80 \leq Re < 260$ | $Re = 260$ | $Re = 550$    | X                      | X                      | X                        | $Re = 650$        |
| ZnO-2                             | $Re \leq 50$ | X                  | $Re = 60$  | $Re = 300$    | $60 < Re < 300$        | X                      | X                        | X                 |
| SiO <sub>2</sub> -1               | $Re \leq 10$ | $20 \leq Re < 40$  | $Re = 40$  | $Re = 60$     | X                      | $40 < Re < 100$        | $Re = 100$               | X                 |
| SiO <sub>2</sub> -2               | $Re \leq 30$ | $40 \leq Re < 60$  | $Re = 60$  | $Re = 140$    | $60 < Re \leq 220$     | X                      | X                        | X                 |
| SiO <sub>2</sub> -3               | $Re \leq 20$ | $30 \leq Re < 60$  | $Re = 60$  | $Re = 200$    | X                      | $80 < Re < 200$        | X                        | $Re = 300$        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1 | $Re \leq 20$ | $30 \leq Re < 40$  | $Re = 40$  | $Re = 60$     | $50 < Re < 80$         |                        | $Re = 130$               | $Re = 150$        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2 | $Re < 20$    | $20 \leq Re < 80$  | $Re = 80$  | $Re = 320$    | $80 < Re < 300$        | X                      | $300 < Re < 1000$        | $Re = 1600$       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3 | $Re < 20$    | $20 \leq Re < 60$  | $Re = 60$  | $Re = 120$    | $60 < Re < 120$        | $120 \leq Re \leq 160$ | $160 < Re < 700$         | $Re = 1200$       |
| TiO <sub>2</sub> -1               | $Re < 20$    | $20 \leq Re < 40$  | $Re = 40$  | $Re = 240$    | $50 < Re < 100$        | $100 < Re < 220$       | $Re > 220$               | X                 |
| TiO <sub>2</sub> -2               | $Re \leq 20$ | X                  | $Re = 80$  | $Re = 140$    | X                      | $80 \leq Re \leq 140$  | $140 < Re < 1000$        | $Re = 1000$       |
| TiO <sub>2</sub> -3               | $Re < 10$    | $10 \leq Re < 30$  | $Re = 30$  | $Re = 100$    | $30 < Re < 100$        | X                      | $100 < Re < 500$         | $Re = 500$        |

**Çizelge 4.13** : Farklı geometriler için akış görüntüleme deneylerine göre belirlenen akış rejimi haritası (TiO<sub>2</sub>-3).

| Partikül | Sabit Yatak  | Genişlemiş Yatak  | $Re_{mf}$ | $Re_{mf, cr}$ | Kabarcıklı akış rejimi | Kanallaşma | Türbülanslı akışkanlaşma | Teğetsel davranış |
|----------|--------------|-------------------|-----------|---------------|------------------------|------------|--------------------------|-------------------|
| R1       | $Re < 10$    | $10 \leq Re < 30$ | $Re = 30$ | $Re = 100$    | $30 < Re < 100$        | X          | $100 < Re < 500$         | $Re = 500$        |
| R2       | $Re \leq 30$ | $40 \leq Re < 80$ | $Re = 80$ | $Re = 240$    | $80 < Re < 240$        | X          | $240 \leq Re < 600$      | $Re = 550$        |
| R3       | $Re \leq 30$ | $40 \leq Re < 80$ | $Re = 80$ | $Re = 360$    | $80 < Re < 360$        | X          | $360 \leq Re < 700$      | $Re = 900$        |

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mühendislik uygulamalarının gaz vorteks mikserlerde başarılı bir şekilde geliştirilebilmesi için akış hidrodinamiklerinin ortaya çıkarılması oldukça önemlidir. Vorteks mikser, teğetsel jetler ve bir karışma çemberinden oluşan jet mikserlerin bir türüdür. Bu çalışmada jetlerinin çapı karışma çemberinin yarısı olan vorteks mikser geometrisi için  $20 \leq Re \leq 280$  aralığındaki gaz akış hidrodinamikleri hem akış görüntüleme hem de PIV akış alanı karakterizasyonu ile tanımlanmıştır. Ayrıca gaz-katı akış hidrodinamiklerinin  $Re$  sayısına bağlı değişimi hem akış görüntüleme hem de basınç verilerinin analizi ile ortaya çıkarılmıştır.

Gaz akış hidrodinamiği çalışmasının ilk bölümünde vorteks mikserdeki akış mekanizması jetlerin her ikisinden de metan gazının beslenmesi ile belirlenmiştir.  $Re = 70$ 'e kadar akışkanın düşük atalet kuvveti sebebiyle vorteks akış rejimi oluşumu gözlenmemiştir.  $Re$  sayısının 120'ye artırılması ile akışta düzensizliklerin oluşumu ve vorteks merkezinin hareketi başlamıştır. Karışma çemberinin tabanından gerçekleştirilen deneylere göre farklı düzlemlerdeki eliptik ve hiperbolik bölgelerin yer değiştirmesi çemberdeki akış hidrodinamiğini geliştirmektedir. Bu çalışmada, akışın iki kritik bölgesi olan  $Re = 70$  ve  $Re = 230$  belirlenmiştir. Bu kritik noktalar tabakalı akış, vorteks akış ve kararsız yutulma akışı rejimlerinin geçiş bölgelerini oluşturmaktadır. Türbülans yoğunluğunun  $Re$  sayısına göre dağılımı incelendiğinde,  $Re = 230$ 'dan önce gözlenen sabit türbülans yoğunluğu değerlerine sahip kararlı türbülans yoğunluğu bölgesi ve  $Re = 230$ 'dan sonra gözlenen ve kaotik akış olarak tanımlanan artan türbülans yoğunluğu bölgeleri belirlenmiştir. Radyal düzlemlerin detaylı türbülans yoğunluğu karakterizasyonuna göre vorteks mikserdeki gaz akış hidrodinamikleri  $10 \text{ mm} < Lc < 40 \text{ mm}$  arasında oluşmaktadır.

Gazların fiziksel özelliklerinin akış hidrodinamiği ve kararsızlığın başlangıcı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, viskozite ve yoğunluk farklılıklarından dolayı hidrojen, azot ve argon gazları seçilmiştir. Karşıdan görüntüleme deneylerine göre,  $H_2/H_2$  için  $Re = 40$ 'ta ve  $N_2/N_2$  ve  $Ar/Ar$  için  $Re = 70$ 'te girdap davranışı oluşumu gözlemlenmiştir. Gazların fiziksel özelliklerinin akış rejiminin gelişiminde ve çember

içerisinde oluşan girdap hareketinin açısı üzerinde önemli etkisi olduğu bulunmuştur. Hidrojenin akış hidrodinamiği, argon ve azota göre daha düşük  $Re$  sayılarında gelişmektedir, çünkü uygulanan herhangi bir  $Re$  sayısı için hidrojen gazı, daha yüksek kinematik viskozitesi sebebiyle diğer gazlardan daha yüksek bir gaz akış hızına sahiptir. Merkezdeki radyal hızlar sıfır olduğundan ve radyal hız çemberin yarısına kadar yarıçapla doğrusal olarak değiştiğinden, kararlı halde iken zorlanmış bir vorteks hareketinin klasik profili, basınç gradyanı ve viskoz kuvvetlerin merkezkaç kuvvetleri ile olan denge durumu olarak tanımlanmıştır. Kritik noktalardan sonra merkezkaç kuvveti artık basınç gradyen kuvvetini dengeleyememekte ve bu sebeple radyal düzlemdeki yerel hızlar zamanla değişmektedir.

Farklı gazların akış hidrodinamiği çalışmasında, her iki gaz bileşimi için de tabakalı akış rejiminden vorteks akış rejimine geçiş  $Re = 60$ 'ta gerçekleşmiştir. Bu  $Re$  sayısının altında gaz akışı mekanizması difüzyon ile ilerlemektedir.  $Re$  sayısı arttıkça, akışkan alt akımları arasındaki kayma gerilimi akışa hakim olmaya başlamaktadır. Akışın kritik  $Re$  sayısı olarak tanımlanan ikinci geçiş bölgesi, hidrojenin daha yüksek gaz akış hızı ve momentumu nedeniyle  $Ar/H_2$  için daha düşük  $Re$  sayısında belirlenmiştir.  $Ar/H_2$  akışı için kritik  $Re$  sayısı  $H_2/H_2$  akışından daha düşük bir bölgede sonuçlanmaktadır. Bunun sebebi  $Ar/H_2$  akışı için gönderilen hidrojenin, kendisinden daha düşük hıza ve atalet kuvvetine sahip olan argon ile karşılaşmasıdır. Böylece argonun karşısından gönderilen hidrojen akışı, argonun üstesinden hidrojenden daha kolay gelmektedir. Bunun aksine, benzer gaz hızları ve atalet kuvvetine sahip olan  $Ar/N_2$  akışı için kritik  $Re$  sayısı,  $N_2/N_2$  veya  $Ar/Ar$  akışlarıyla benzer bulunmuştur.

Bu tez çalışmasının son bölümü olarak vorteks mikser içerisindeki gaz-katı akış hidrodinamiği çalışmaları akış görüntüleme ve basınç analizi metodları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katı partikül boyutu, katı yüklemesi ve akışkanlaşma gaz hızı akışkanlaşma davranışını ve dolayısıyla karışma kalitesini etkileyen en önemli parametrelerdir. Kullanılan partiküller farklı morfoloji ve partikül boyutlarına sahip oldukları için reaktör içerisinde gaz akışı ile birlikte gözlenen katı akış davranışlarında da farklılıklar tespit edilmiştir. Bunlardan en önemlisi bazı partiküllerin birikme eğilimi gösterirken bazılarının göstermemesi, reaktör çemberi içerisinde farklı düzlemlerde katı hareketlerinin yoğunlaşmasıdır. Gaz-katı dağılımı ve bunun değişimi bir akışkan yatak sistemi için oldukça etkili olduğundan yataktaki katı dağılımını veya boşluk dağılımını ölçebilmek oldukça önemlidir. Yatakta katı partiküllerin ayrışması

karişmayı etkilemekte ve bu da gaz reaktanının d6n6ř6m6ne etki etmektedir. Bu sebeple çalışmanın bu aşamasında her bir katı partik6l için yataktaki gaz-katı akış rejimi incelenmiş ve yatak içerisindeki katı miktarı belirlenmiştir. Çemberin farklı noktalarına yerleştirilen fark basınç sens6rleri ile çemberin farklı noktalarındaki basınç farkları 6l6lm6ř ve katı fazın dağılmış halde olduğu tam akışkanlaşma b6lgeleri belirlenmiştir. Farklı partik6llerin farklı yoğunluk ve boyutlarında farklı akışkanlaşma karakteristiklerinin elde edilmesi partik6l boyutu ve yoğunluğunun akışkanlaşma hidrodinamiği 6zerindeki kompleks etkisinin 6nemini g6stermektedir. Basınç analizi ve akış g6r6nt6leme deneylerine g6re her bir partik6l için tam akışkanlaşma rejiminin g6zlendiği operasyon  $Re$  aralığı ( $Re_{mf}$  ve  $Re_t$  arası) b6lgeleri belirlenmiştir. Basınç analizi deneylerinin bu reakt6rlerde uygulanabilir olması ile akışkanlaşmanın g6r6nt6lenebilir olmadığı end6striyel sistemlerde basınç değerlerine g6re akışkanlaşma rejimlerinin belirlenebileceği doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmasının devamı olarak aşağıdaki çalışmaların gerçekleştirilmesi 6nerilmektedir :

- 1) alışmaya sıvılar da eklenerek fiziksel 6zellik etkilerinin daha geniş bir aralıkta incelenmesi.
- 2) Gaz faz çalışmaları için basınç analizlerinin yapılması.
- 3) Reaksiyon alışmaları.
- 4) Farklı yoğunluk ve boyuttaki partik6llerin belirli oranlarda kariştırılarak gaz-katı akış hidrodinamiği iyileştirilmesi.
- 5) Gaz fiziksel 6zelliklerinin gaz-katı akış hidrodinamiğine etkisi.

## KAYNAKLAR

- [1] **Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A., Kresta, S.M.** (2003). *Handbook of industrial mixing: science and practice*. New Jersey, John Wiley & Sons.
- [2] **Bothe, D.** (2010). Evaluating the quality of a mixture: Degree of homogeneity and scale of segregation. In M. Bockhorn & W. Peukert, *Micro and Macro Mixing, Analysis, Simulation and Numerical Calculation*, (pp. 17-35) Verlag Berlin Heidelberg:Springer.
- [3] **Shi, Z., Du, K., Liu, H., Wang, F.** (2015). Experimental study of mixing enhancement of viscous liquids in confined impinging jets reactor at low jet Reynolds numbers. *Chemical Engineering Science*, 138, 216-226.
- [4] **Erkoç, E., Fonte, C.P., Dias, M.M., Lopes, J.C.B., Santos, R.J.** (2016). Numerical study of active mixing over a dynamic flow field in a T-jets mixer—Induction of resonance. *Chemical Engineering Research Design*, 106, 74-91.
- [5] **Santos, R.J.** (2003). *Mixing mechanisms in reaction injection moulding-RIM: An LDA/PIV experimental study and CFD simulation*. (Doctor of Philosophy). University di Porto, Engineering Faculty, Porto.
- [6] **Bourne, J.** (1997). *Mixing in single-phase chemical reactors*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [7] **Nienow, A.W., Edwards, M.F., Harnby, N.** (1997) *Mixing in the process industries*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [8] **Edwards, M.** (1992). Laminar flow and distributive mixing, In A.W., Nienow, M.F., Edwards, N. Harnby, *Mixing in the Process Industries* (2nd ed., pp. 200-224) Oxford:Butterworth-Heinemann.
- [9] **Niyogi, K., Torregrosa, M.M., Pantzali, M.N., Heynderickx, G.J. Marin, G.B. Shtern, V.N.** (2017). On near-wall jets in a disc-like gas vortex unit. *AIChE Journal*, 63(5), 1740-1756.
- [10] **Zhang, J.H., Wang, Z.B., Zhao, H., Tian, Y.Y., Shan, H.H., Yang, C.H.** (2015). Multi-scale CFD simulation of hydrodynamics and cracking reactions in fixed fluidized bed reactors, *Applied Petrochemical Research*, 5, 255-261.
- [11] **Haas-Santo, K., Pfeifer, P., Schubert, K., Zech, T., Hönicke, D.** (2005). Experimental evaluation of gas mixing with a static microstructure mixer, *Chemical engineering science*, 60(11), 2955-2962.
- [12] **Wang, M. & Li, Z.** (2006). Gas mixing in microchannels using the direct simulation Monte Carlo method, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 49(9-10), 1696-1702.

- [13] **Yan, F. & Farouk, B.** (2002). Numerical simulation of gas flow and mixing in a microchannel using the direct simulation Monte Carlo method, *Microscale thermophysical engineering*, 6(3), 235-251.
- [14] **Noël, F., Serra, C.A., Le Calvé, S.** (2019). Design of a novel axial gas pulses micromixer and simulations of its mixing abilities via computational fluid dynamics, *Micromachines*, 10(3), 205.
- [15] **Romańczyk, M. & Elsner, W.** (2019). Effect of Cylindrical Turbulators on the Mixing Process in Basic Venturi Gas Mixer Using OpenFOAM, *MATEC Web of Conferences*, 252, EDP Sciences, (pp. 04004).
- [16] **Alboiu, E.F., Rus, S., Alboiu, N.I., Degeratu, M.** (2017). Continuous flow type gas blending facility used for autonomous and system diving, *Energy Procedia*, 112, 3-10.
- [17] **Nada, S., Fouda, A., Elattar, H.** (2016). Parametric study of flow field and mixing characteristics of outwardly injected jets into a crossflow in a cylindrical chamber, *International Journal of Thermal Sciences*, 102, 185-201.
- [18] **Sultan, M.A., Pardilhó, S.L., Brito, M.S., Fonte, C.P., Dias, M.M., Lopes, J.C., Santos, R.J.** (2019). 3D Mixing Dynamics in T-Jet Mixers, *Chemical Engineering Technology*, 42(1), 119-128.
- [19] **Esmaelzade, G., Moshammer, K., Fernandes, R., Markus, D., Grosshans, H.** (2019), Numerical study of the mixing inside a jet stirred reactor using large eddy simulations, *Flow, Turbulence Combustion*, 102, 331-343.
- [20] **Crowe, C. Schwarzkopf, J. Sommerfeld, M. Tsuji, Y.** (2011). Droplet-Particle Cloud Equations, *In Multiphase Flows with Droplets Particles* (2nd edition pp. 235-258), New York: CRC Press.
- [21] **Fan, L.S. & Chao Z.** (1999). *Principles of gas-solid flows*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [22] **Kumaş, F.** (2009). *Akışkan Yatakta Hidrodinamik Yapının Sistem Davranışına Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Dumlupınar Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- [23] **Anantharaman, A. Cocco, R.A. Chew, J.W.** (2018). Evaluation of correlations for minimum fluidization velocity (Umf) in gas-solid fluidization, *Powder technology*, 323, 454-485.
- [24] **Niyogi, K. Torregrosa, M.M. Pantzali, M.N. Heynderickx, G.J. Marin, G.B.** (2017). Experimentally validated numerical study of gas-solid vortex unit hydrodynamics, *Powder Technology*, 305, 794-808.
- [25] **Cano-Pleite, E., Shimizu, Y., Acosta-Iborra, A., Mawatari, Y.** (2016). Effect of vertical vibration and particle size on the solids hold-up and mean bubble behavior in a pseudo-2D fluidized bed, *Chemical Engineering Journal*, 304, 384-398.
- [26] **Zhang, C. Li, P. Lei, C. Qian, W. Wei, F.** (2018). Experimental study of non-uniform bubble growth in deep fluidized beds, *Chemical Engineering Science*, 176, 515-523.

- [27] **Puchyr, D.M.J.** (1998). *A predictive model for a circulating fluidized bed riser reactor*, (Doctor of Philosophy). University of Calgary, Department of chemical and petroleum engineering, Calgary.
- [28] **Werther, J. & Hartge, E. U.** (2004). Modeling of industrial fluidized-bed reactors. *Industrial & engineering chemistry research*, 43(18), 5593-5604.
- [29] **Gobby, D., Angeli, P., Gavriilidis, A.** (2001) Mixing characteristics of T-type microfluidic mixers, *Journal of Micromechanics microengineering*, 11(2), 126.
- [30] **Hussain, M., Pöschel, T., Müller, P.** (2019) Mixing of rarefied gases in T-shape micromixers, *Applied Thermal Engineering*, 146, 39-44.
- [31] **Le, M. & Hassan, I.** (2007). DSMC simulation of gas mixing in T-shape micromixer, *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2370-2377.
- [32] **Li, W.F. Du, K.J. Yu, G.S. Liu, H.F. Wang, F.C.** (2014). Experimental study of flow regimes in three-dimensional confined impinging jets reactor, *AIChE Journal*, 60(8), 3033-3045.
- [33] **Niyogi, K., Torregrosa, M.M., Marin, G.B., Heynderickx, G.J., Shtern, V.N.** (2018). On the mechanisms of secondary flows in a gas vortex unit, *AIChE Journal*, 64(5), 1859-1873.
- [34] **Huang, C.-Y., Wan, S.-A., Hu, Y.-H.** (2017). Oxygen and nitrogen gases mixing in T-type micromixers visualized and quantitatively characterized using pressure-sensitive paint, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 111, 520-531.
- [35] **Huang, C.-Y., Hu, Y.-H., Wan, S.-A., Nagai, H.** (2020). Application of pressure-sensitive paint for the characterization of mixing with various gases in T-type micromixers, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 156, 119710.
- [36] **Elperin, I.** (1961). Heat and mass transfer in opposing currents, *Journal of Engineering Physics*, 6(6), 62-68.
- [37] **Liu, X., Yue, S., Lu, L., Gao, W., Li, J.** (2018). Flow simulation and experimental study of a dynamic asymmetric impinging stream, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 73(12), 863-880.
- [38] **Zhang, J.-W., Li, W.-F., Xu, X.-L., Liu, H.-F., Wang, F.-C.** (2019). Experimental investigation of three-dimensional flow regimes in a cross-shaped reactor, *Physics of Fluids*, 31(3), 034105.
- [39] **Zhang, J.-w., Liu, S.-f., Cheng, C., Li, W.-f., Xu, X.-l., Liu, H.-f., Wang, F.-c.** (2019). Investigation of three-dimensional flow regime and mixing characteristic in T-jet reactor, *Chemical Engineering Journal*, 358, 1561-1573.
- [40] **Fonte, C.P., Sultan, M.A., Santos, R.J., Dias, M.M., Lopes, J.C.B.** (2015). Flow imbalance and Reynolds number impact on mixing in Confined Impinging Jets, *Chemical Engineering Journal*, 260, 316-330.

- [41] Brito, M.S.C.A., Esteves, L.P., Fonte, C.P., Dias, M.M, Lopes, J.C.B., Santos, R.J. (2018). Mixing of fluids with dissimilar viscosities in Confined Impinging Jets, *Chemical Engineering Research Design*, 134, 392-404.
- [42] Liu, M., Gao, Z., Yu, Y., Li, Z., Han, J., Cai, Z., Huang, X. (2019). PIV experiment and large eddy simulation of turbulence characteristics in a confined impinging jet reactor, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(1), 10-20.
- [43] Santos, R.J., Erkoç, E., Dias, M.M., Teixeira, A.M., Lopes, J.C.B. (2008). Hydrodynamics of the mixing chamber in RIM: PIV flow-field characterization, *AIChE Journal*, 54(5), 1153-1163.
- [44] Brito, M., Dias, M.M. Santos, R., Lopes, J.C.B., Fonte, C. (2020). Fully resolved modelling and simulation of micromixing in confined impinging jets, *Chemical Engineering Science*, 211, 115299.
- [45] Sultan, M.A., Fonte, C.P., Dias, M.M., Lopes, J.C.B., Santos, R.J. (2012). Experimental study of flow regime and mixing in T-jets mixers, *Chemical engineering science*, 73, 388-399.
- [46] Ansari, M.A., Kim, K.-Y., Kim, S.M. (2018). Numerical and experimental study on mixing performances of simple and vortex micro T-mixers, *Micromachines*, 9(5), 204.
- [47] Andersson, B. Andersson, R. Håkansson, L. Mortensen, M. Sudiyo, R. Van Wachem, B. (2011). *Computational fluid dynamics for engineers*, Cambridge university press, Cambridge.
- [48] Mariotti, A., Antognoli, M., Galletti, C., Mauri, R., Salvetti, M.V., Brunazzi, E. (2020). The role of flow features and chemical kinetics on the reaction yield in a T-shaped micro-reactor, *Chemical Engineering Journal*, 396, 125223.
- [49] Camarri, S. Mariotti, A. Galletti, C. Brunazzi, E. Mauri, R. Salvetti, M.V. (2020). An overview of flow features and mixing in micro T and arrow mixers, *Industrial Engineering Chemistry Research*, 59(9), 3669-3686.
- [50] Chan, S.T., Ault, J.T. Haward, S.J. Meiburg, E. Shen, A.Q. (2019). Coupling of vortex breakdown and stability in a swirling flow, *Physical Review Fluids*, 4, 084701.
- [51] Ansari, M.A., Kim, K.-Y., Anwar, K., Kim, S.M. (2012). Vortex micro T-mixer with non-aligned inputs, *Chemical Engineering Journal*, 181-182, 846-850.
- [52] Rabani, R., Talebi, S., Rabani, M. (2016). Numerical analysis of lamination effect in a vortex micro T-mixer with non-aligned inputs, *Heat and Mass Transfer*, 52, 611-619.
- [53] Zhang, W., Zhang, J.-w., Li, W.-f., Liu, H.-f., Wang, F.-c. (2020) Flow regimes and mixing characteristics in non-aligned T-jets reactors, *Chemical Engineering Science*, 228, 115991.
- [54] Darbandi, M., Sabouri, M., Schneider, G.E. (2016). A Comparative Study on the Molecular-and Continuum-Based Simulation Methods for Gas Flow and Mixing in Micro/Nanochannels, *Proceeding of 3rd*

*International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer, Ottawa, Canada.*

- [55] **Liu, Y., Cheng, C., Prud'homme, R.K., Fox, R.O.** (2008). Mixing in a multi-inlet vortex mixer (MIVM) for flash nano-precipitation, *Chemical Engineering Science*, 63(11), 2829-2842.
- [56] **Cheng, J.C., Olsen, M.G. Fox, R.O.** (2009). A microscale multi-inlet vortex nanoprecipitation reactor: Turbulence measurement and simulation, *Applied Physics Letters*, 94, 204104.
- [57] **Shi, Y., Fox, R. O., Olsen, M.G.** (2011). Confocal imaging of laminar and turbulent mixing in a microscale multi-inlet vortex nanoprecipitation reactor, *Applied Physics Letters*, 99, 204103.
- [58] **Hitimana, E., Fox, R.O., Hill, J.C., Olsen, M.G.** (2019). Experimental characterization of turbulent mixing performance using simultaneous stereoscopic particle image velocimetry and planar laser-induced fluorescence, *Experiments in Fluids*, 60, 1-13.
- [59] **Liu, Z. Hill, J.C. Fox, R.O. Olsen, M.G.** (2014). Investigation of Turbulent Mixing in a Macro-Scale Multi-Inlet Vortex Nanoprecipitation Reactor by Stereoscopic-PIV, *Fluids Engineering Division Summer Meeting, American Society of Mechanical Engineers*, V01DT26A006.
- [60] **Valente, I., Celasco, E., Marchisio, D., Barresi, A.** (2012). Nanoprecipitation in confined impinging jets mixers: Production, characterization and scale-up of pegylated nanospheres and nanocapsules for pharmaceutical use, *Chemical engineering science*, 77, 217-227.
- [61] **Hosni, M., Farhat, S., Ben Amar, M., Kanaev, A., Jouini, N., Hinkov, I.** (2015). Mixing strategies for zinc oxide nanoparticle synthesis via a polyol process, *AIChE Journal*, 61(5), 1708-1721.
- [62] **Bensaid, S., Deorsola, F., Marchisio, D., Russo, N., Fino, D.** (2014). Flow field simulation and mixing efficiency assessment of the multi-inlet vortex mixer for molybdenum sulfide nanoparticle precipitation, *Chemical Engineering Journal*, 238, 66-77.
- [63] **Shi, Y., Fox, R.O., Olsen, M.G.** (2014). Micromixing visualization and quantification in a microscale multi-inlet vortex nanoprecipitation reactor using confocal-based reactive micro laser-induced fluorescence, *Biomicrofluidics*, 8(4), 044102.
- [64] **Habchi, C., Lemenand, T., Della Valle, D., Peerhossaini, H.** (2010) Turbulent mixing and residence time distribution in novel multifunctional heat exchangers-reactors, *Chemical engineering processing: process intensification*, 49(10), 1066-1075.
- [65] **Afanasenkov, V. & Kulakov, P.** (2019). Research of the mixing process in vortex static type devices, *MATEC Web of Conferences*, 298, 00069.
- [66] **Tarakçıoğlu, A.** (2015). *Bazı Türk Linyitlerinin Akışkan Yatak Gazlaştırmada Gazlaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

- [67] **Xiang, J., Li, Q., Tan, Z., Zhang, Y.** (2017). Characterization of the flow in a gas-solid bubbling fluidized bed by pressure fluctuation, *Chemical Engineering Science*, 174, 93-103.
- [68] **Geldart, D.** (1986). *Gas fluidization technology*. United States: N.p.
- [69] **Kunii, D. & Levenspiel, O.** (1991) *Fluidization engineering*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [70] **Geldart, D.** (1973). Types of gas fluidization, *Powder technology*, 7, 285-292.
- [71] **Zijerveld, R.C., Johnsson, F., Marzocchella, A., Schouten, J.C., Van Den Bleek, C.M.** (1998). Fluidization regimes and transitions from fixed bed to dilute transport flow, *Powder technology*, 95(3), 185-204.
- [72] **Marzocchella, A., Zijerveld, R.C., Schouten, J.C, van den Bleek, C.M.** (1997). Chaotic behavior of gas-solids flow in the riser of a laboratory-scale circulating fluidized bed, *AIChE journal*, 43(6), 1458-1468.
- [73] **Cano-Pleite, E., Shimizu, Y., Acosta-Iborra, A., Mawatari, Y.** (2016). Effect of vertical vibration and particle size on the solids hold-up and mean bubble behavior in a pseudo-2D fluidized bed, *Chemical Engineering Journal*, 304, 384-398.
- [74] **Yıldırım, U.** (2012). *Sirkülasyonlu akışkan yatakta üst bölgede gaz katı iki fazlı akışın zamana bağlı sayısal çözümlemesi.* (Yüksek Lisans Tezi). Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- [75] **van der Schaaf, J., Johnsson, F., Schouten, J.C., van den Bleek, C.M.** (1999). Fourier analysis of nonlinear pressure fluctuations in gas–solids flow in CFB risers—Observing solids structures and gas/particle turbulence, *Chemical Engineering Science*, 54(22), 5541-5546.
- [76] **Ekatpure, R.P., Suryawanshi, V.U., Heynderickx, G.J., De Broqueville, A., Marin, G.B.** (2011). Experimental investigation of a gas–solid rotating bed reactor with static geometry, *Chemical Engineering Processing: Process Intensification*, 50(1), 77-84.
- [77] **De Wilde, J. & de Broqueville, A.** (2008). Experimental study of fluidization of 1G-Geldart D-type particles in a rotating fluidized bed with a rotating chimney, *AIChE journal*, 54(8), 2029-2044.
- [78] **Watano, S., Imada, Y., Hamada, K., Wakamatsu, Y., Tanabe, Y., Dave, R. N., Pfeffer, R.** (2003). Microgranulation of fine powders by a novel rotating fluidized bed granulator. *Powder Technology*, 131(2-3), 250-255.
- [79] **De Wilde, J. & de Broqueville, A.** (2007). Rotating fluidized beds in a static geometry: experimental proof of concept, *AIChE Journal*, 53(4), 793-810.
- [80] **Kovacevic, J., Pantzali, M., Heynderickx, G., Marin, G.** (2014). Bed stability and maximum solids capacity in a gas–solid vortex reactor: experimental study, *Chemical Engineering Science*, 106, 293-303.
- [81] **De Wilde, J. & de Broqueville, A.** (2010). A rotating chimney for compressing rotating fluidized beds, *Powder technology*, 199(1), 87-94.

- [82] **De Wilde, J. & de Broqueville, A.** (2008). Experimental investigation of a rotating fluidized bed in a static geometry, *Powder Technology*, 183(3), 426-435.
- [83] **De Wilde, J.** (2014) Gas–solid fluidized beds in vortex chambers, *Chemical Engineering Processing: Process Intensification*, 85, 256-290.
- [84] **Eliaers, P., de Broqueville, A., Poortinga, A., van Hengstum, T., De Wilde, J.** (2014). High-G, low-temperature coating of cohesive particles in a vortex chamber, *Powder technology*, 258, 242-251.
- [85] **Kovacevic, J.Z., Pantzali, M.N., Niyogi, K., Deen, N.G., Heynderickx, G.J., Marin, G.B.** (2015). Solids velocity fields in a cold-flow gas–solid vortex reactor, *Chemical Engineering Science*, 123, 220-230.
- [86] **Eliaers, P., Pati, J.R., Dutta, S., De Wilde, J.** (2015). Modeling and simulation of biomass drying in vortex chambers, *Chemical Engineering Science*, 123, 648-664.
- [87] **Trujillo, W.R. & De Wilde, J.** (2017). Influence of solids outlets and the gas inlet design on the generation of a gas-solids rotating fluidized bed in a vortex chamber for different types of particles, *Chemical Engineering Science*, 173, 74-90.
- [88] **Agarwal, G., Lattimer, B., Ekkad, S., Vandsburger, U.** (2011). Influence of multiple gas inlet jets on fluidized bed hydrodynamics using Particle Image Velocimetry and Digital Image Analysis, *Powder technology*, 214(1), 122-134.
- [89] **Husted, B.P., Petersson, P., Lund, I., Holmstedt, G.** (2009). Comparison of PIV and PDA droplet velocity measurement techniques on two high-pressure water mist nozzles, *Fire safety journal*, 44(8), 1030-1045.
- [90] **Safex Fog Generator F2010.** (2020). *Instruction Manual*, Retrieved September 22, 2022, from [https:// www.dantecdynamics.com/safex-fog-generators](https://www.dantecdynamics.com/safex-fog-generators).
- [91] **Keane, R.D. and Adrian, R.J.** (1990). Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems, *Measurement science technology*, 1(11), 1202.
- [92] **Adrian, R.J.** (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annual review of fluid mechanics*, 23, 261-304.
- [93] **Zhang, J., Liu, Y., Qi, G., Jiao, W., Yuan, Z.** (2016). Flow characteristics in free impinging jet reactor by particle image velocimetry (PIV) investigation, *Fluid Dynamics Research*, 48, 045505.
- [94] **Dantec Dynamics GmbH.** (2015). *Dynamic Studio User Guide*, Publication no.: 9040U1859.
- [95] **Chen, X., Li, Y., Pan, X., Cortie, D., Huang, X., Yi, Z.** (2016). Photocatalytic oxidation of methane over silver decorated zinc oxide nanocatalysts, *Nature communications*, 7, 1-8.
- [96] **Stöber, W., Fink, A., Bohn, E.** (1968). Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range, *Journal of colloid interface science*, 26(1), 62-69.

- [97] **Yoshida, H., Matsushita, N., Kato, Y., Hattori, T.** (2003), Synergistic active sites on SiO<sub>2</sub>- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- TiO<sub>2</sub> photocatalysts for direct methane coupling, *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(33), 8355-8362.
- [98] **Buraso, W., Lachom, V., Siriya, P., Laokul, P.** (2018). Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles via a simple precipitation method and photocatalytic performance, *Materials Research Express*, 5, 115003.
- [99] **Delekar, S., Yadav, H., Achary, S., Meena, S., Pawar, S.** (2012). Structural refinement and photocatalytic activity of Fe-doped anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles, *Applied surface science*, 263, 536-545.
- [100] **Bi, H.T.** (2007) A critical review of the complex pressure fluctuation phenomenon in gas–solids fluidized beds, *Chemical Engineering Science*, 62(13), 3473-3493.
- [101] **Van Ommen, J.R., Sasic, S., Van der Schaaf, J., Gheorghiu, S., Johnsson, F., Coppens, M.-O.** (2011). Time-series analysis of pressure fluctuations in gas–solid fluidized beds—A review, *International Journal of Multiphase Flow*, 37(5), 403-428.
- [102] **National Instruments.** (2020). *Using Fast Fourier Transforms and Power Spectra in LabVIEW*, Retrieved September 22, 2022, from <https://www.ni.com/en-tr/innovations/white-papers/06/using-fast-fourier-transforms-and-power-spectra-in-labview.html>.
- [103] **Shirmohammadi, F. & Tohidi, A.** (2019). Mixing enhancement using chaos theory in fluid dynamics: Experimental and numerical study, *Chemical Engineering Research Design*, 141, 350-360.
- [104] **Liu, Z., Hitimana, E., Olsen, M.G., Hill, J.C., Fox, R.O.** (2017). Turbulent mixing in the confined swirling flow of a multi-inlet vortex reactor, *AIChE Journal*, 63(6), 2409-2419.
- [105] **Gonçalves, N.D., Salvador, H.M., Fonte, C.P., Dias, M.M., Lopes, J.C.B., Santos, R.J.** (2017). On the 2D nature of flow dynamics in opposed jets mixers, *AIChE Journal*, 63(6), 2335-2347.
- [106] **Liu, Z., Fox, R.O., Hill, J.C., Olsen, M.G.** (2015). A Batchelor vortex model for mean velocity of turbulent swirling flow in a macroscale multi-inlet vortex reactor, *Journal of Fluids Engineering*, 137(4), 041204.
- [107] **Liu, Z., Passalacqua, A., Olsen, M.G., Fox, R.O., Hill, J.C.** (2016). Dynamic delayed detached eddy simulation of a multi-inlet vortex reactor, *AIChE Journal*, 62(7), 2570-2578.
- [108] **Shi, Y.** (2012) *Experimental and computational investigation of turbulent mixing in microscale reactors*. (Doctor of Philosophy). Iowa State University, Chemical Engineering, Iowa.
- [109] **Childs, P.R.N.** (2010) *Rotating flow*, Elsevier, UK.
- [110] **Gecim, G. & Erkoc, E.** (2022). Hydrodynamics of Similar Gases in Vortex Mixers: Effect of Physical Properties on the Onset of Instability, *Industrial Engineering Chemistry Research*, 61(2), 1192-1206.
- [111] **Marsalek, R.** (2014). Particle size and zeta potential of ZnO, APCBEE procedia, 9, 13-17.

- [112] **Jeyasubramanian, K., Hikku, G., Sharma, R.K.** (2015). Photo-catalytic degradation of methyl violet dye using zinc oxide nano particles prepared by a novel precipitation method and its anti-bacterial activities, *Journal of water process engineering*, 8, 35-44.
- [113] **Musić, S., Filipović-Vinceković, N., Sekovanić, L.** (2011). Precipitation of amorphous SiO<sub>2</sub> particles and their properties, *Brazilian journal of chemical engineering*, 28(1), 89-94.
- [114] **Parida, K., Pradhan, A.C., Das, J., Sahu, N.** (2009). Synthesis and characterization of nano-sized porous gamma-alumina by control precipitation method, *Materials Chemistry Physics*, 113(1), 244-248.
- [115] **Shirdel, B. & Behnajady, M.A.** (2017). Sol-gel synthesis of Ba-doped ZnO nanoparticles with enhanced photocatalytic activity in degrading Rhodamine B under UV-A irradiation, *Optik*, 147, 143-150.
- [116] **Khan, S., Noreen, F., Kanwal, S., Hussain, G.** (2017) Comparative synthesis, characterization of Cu-doped ZnO nanoparticles and their antioxidant, antibacterial, antifungal and photocatalytic dye degradation activities, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 12(3), 877-889.
- [117] **Hosseini, S.A., Niaei, A., Salari, D.** (2011), Production of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from Kaolin, *Open Journal of Physical Chemistry*, 1, 23-27.
- [118] **Cullity, B.D.** (1978). *Elements of X-ray diffraction*, Addison, Wesley Mass, Reading, Massachusetts.
- [119] **Kelsall, R.W., Hamley, I.W., Geoghegan, M.** (2005). *Nanoscale Science and Technology*, John Wiley & Sons, England.
- [120] **Ali, S. S., Basu, A., Alfadul, S. M., Asif, M.** (2019). Nanopowder fluidization using the combined assisted fluidization techniques of particle mixing and flow pulsation. *Applied Sciences*, 9(3), 572.
- [121] **Quevedo, J. A., Omosebi, A., & Pfeffer, R.** (2010). Fluidization enhancement of agglomerates of metal oxide nanopowders by microjets. *AIChE journal*, 56(6), 1456-1468.
- [122] **Sivri, A. C.** (2020) *A Study on the Hydrodynamics of a Bench-Scale Top-Fed Bubbling Fluidized Bed Gasifier using Biomass and Coal as Feedstocks*. (Doctor of Philosophy). West Virginia University. Mechanical Engineering. West Virginia.

## **EKLER**

**EK A:** Ar/H<sub>2</sub> akış deneme deneyleri.

**EK B:** Metan gazına ait zaman ortalamalı akış görüntüleri.

**EK C:** Benzer gazların akış hidrodinamiğine ait sonuçlar.

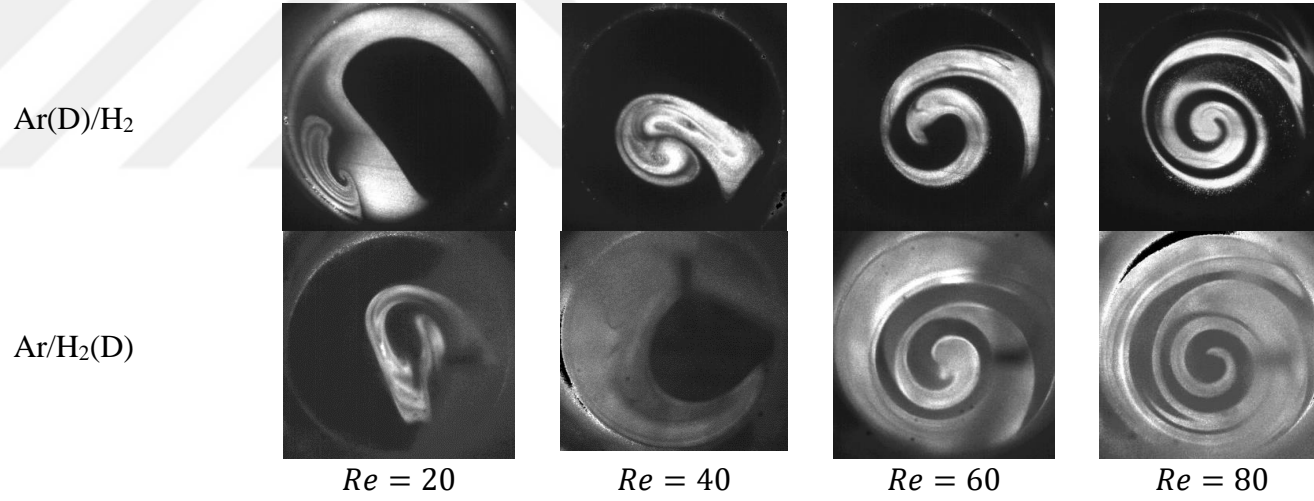
**EK D:** Farklı gazların akış hidrodinamiğine ait sonuçlar.

**EK E:** Gaz-katı akış hidrodinamiğine ait sonuçlar.

**EK F:** Akış videoları CD'si.

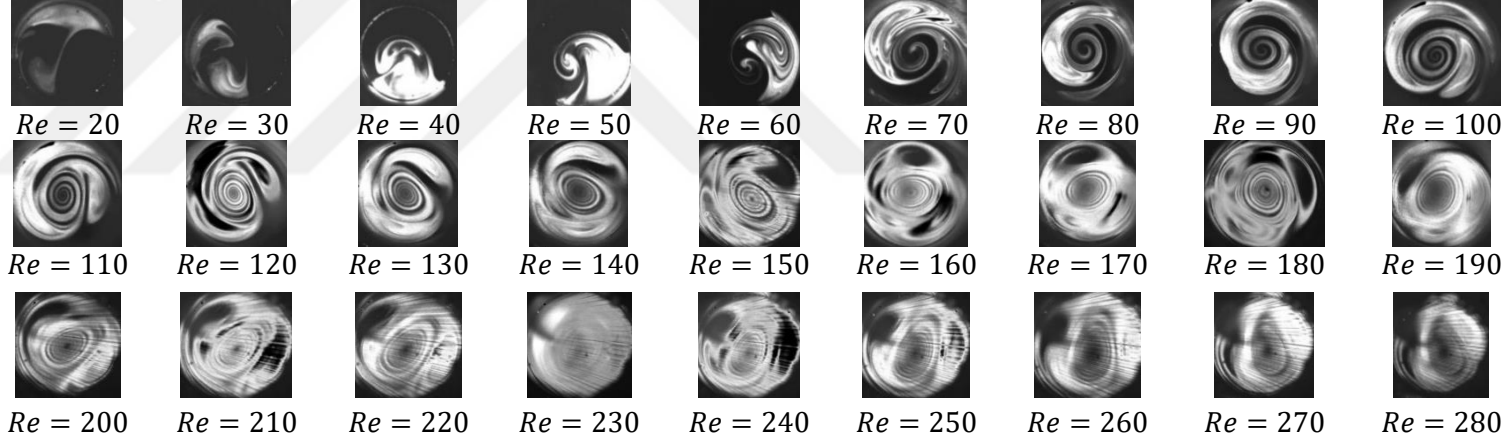


EK A

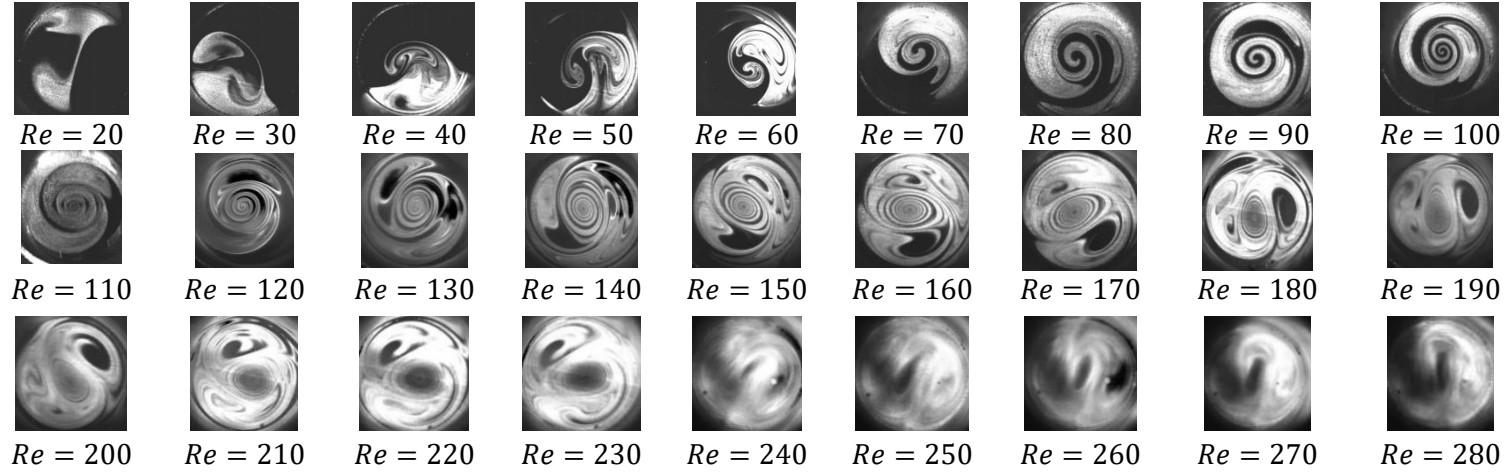


Şekil A.1 : Duman enjeksiyonunun argon (Ar(D)/H<sub>2</sub>) ve hidrojen (Ar/H<sub>2</sub>(D)) gazı ile verilmesi sonuçları.

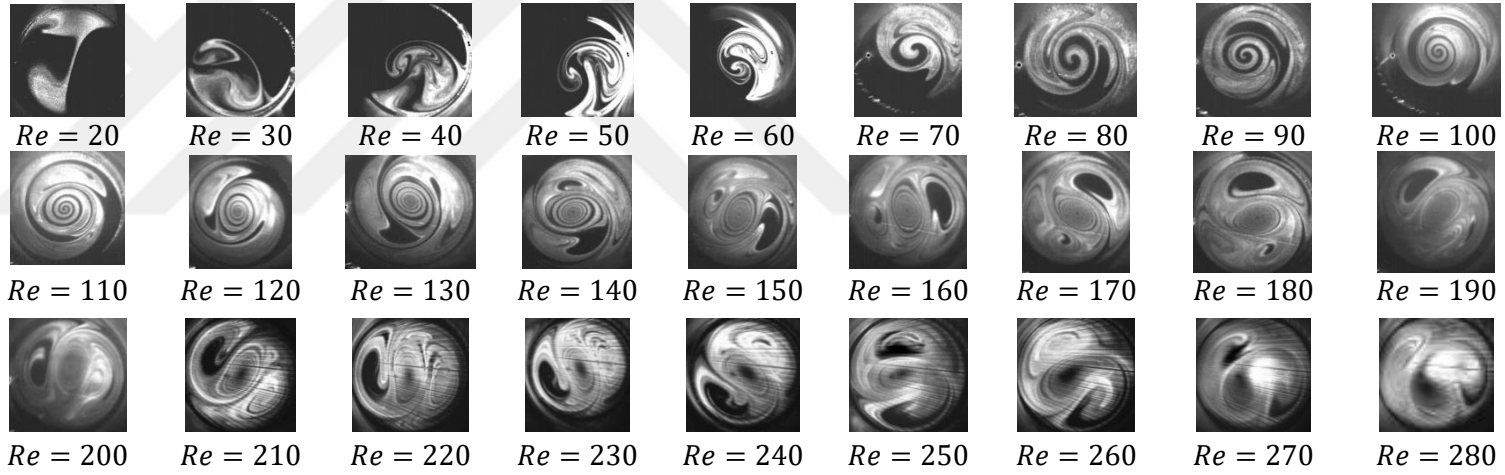
## EK B



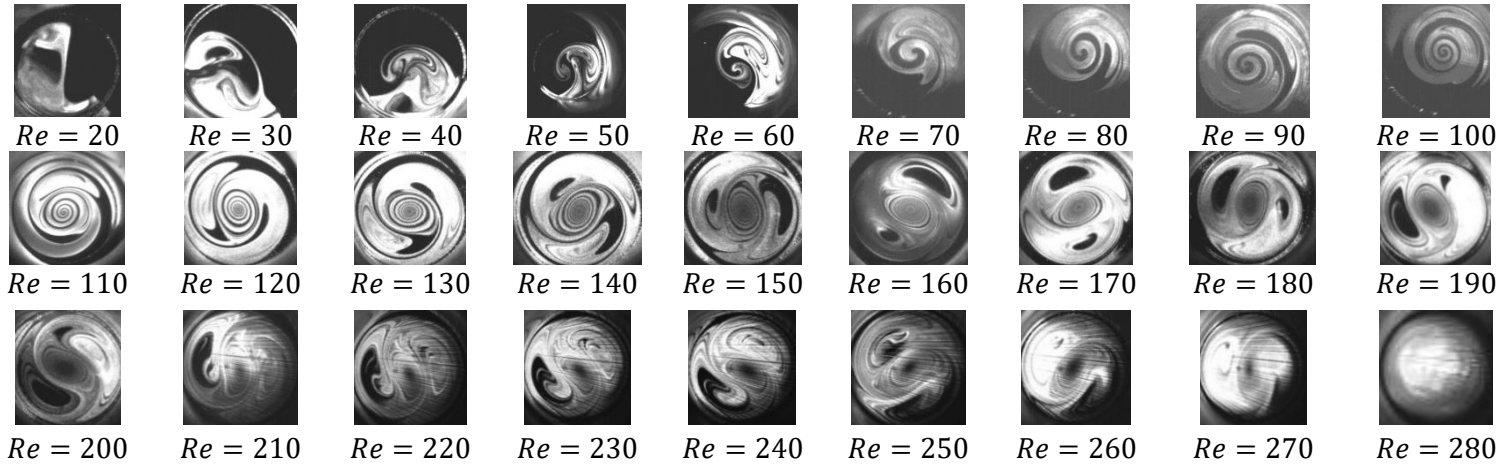
Şekil A.2 : Düzlem-5'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin ( $\text{CH}_4/\text{CH}_4$ )  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



Şekil A.3 : Düzlem-10'daki zaman ortalamalı akış görüntülerinin ( $\text{CH}_4/\text{CH}_4$ )  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

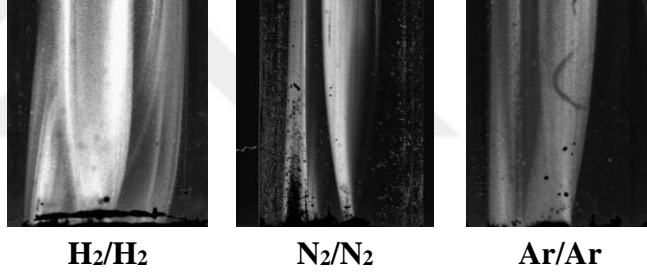


**Şekil A.4 :** Düzlem-15'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin ( $\text{CH}_4/\text{CH}_4$ )  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

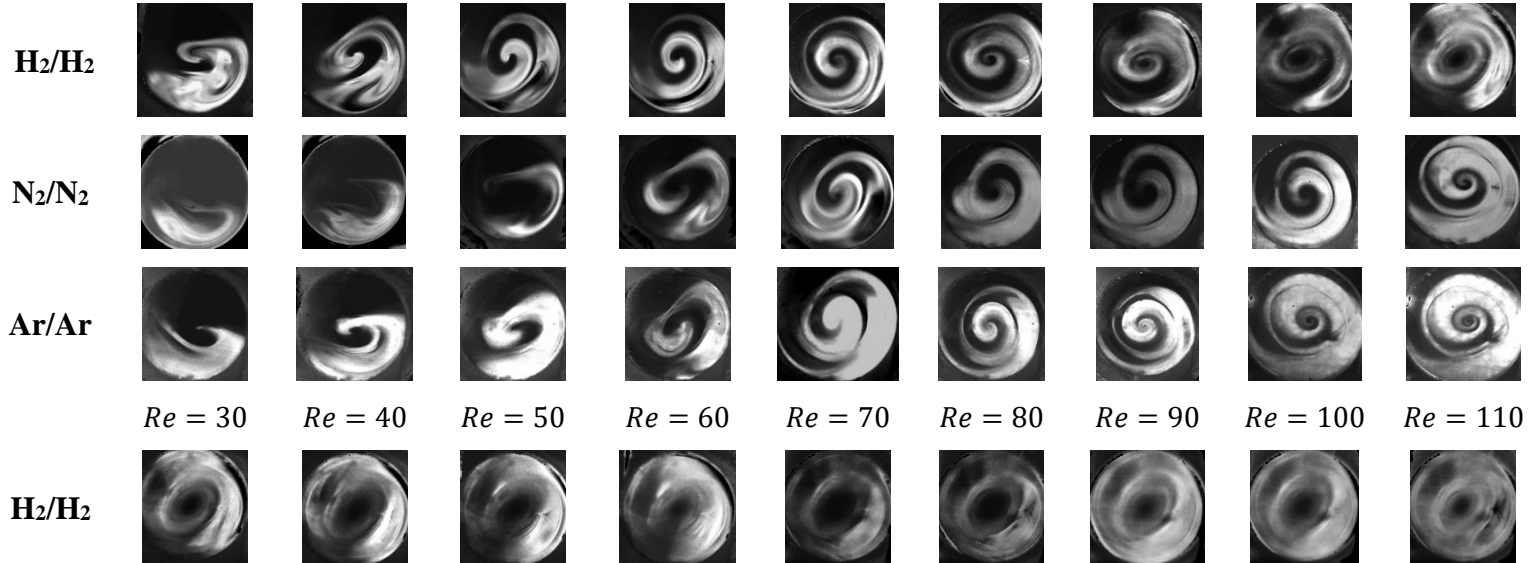


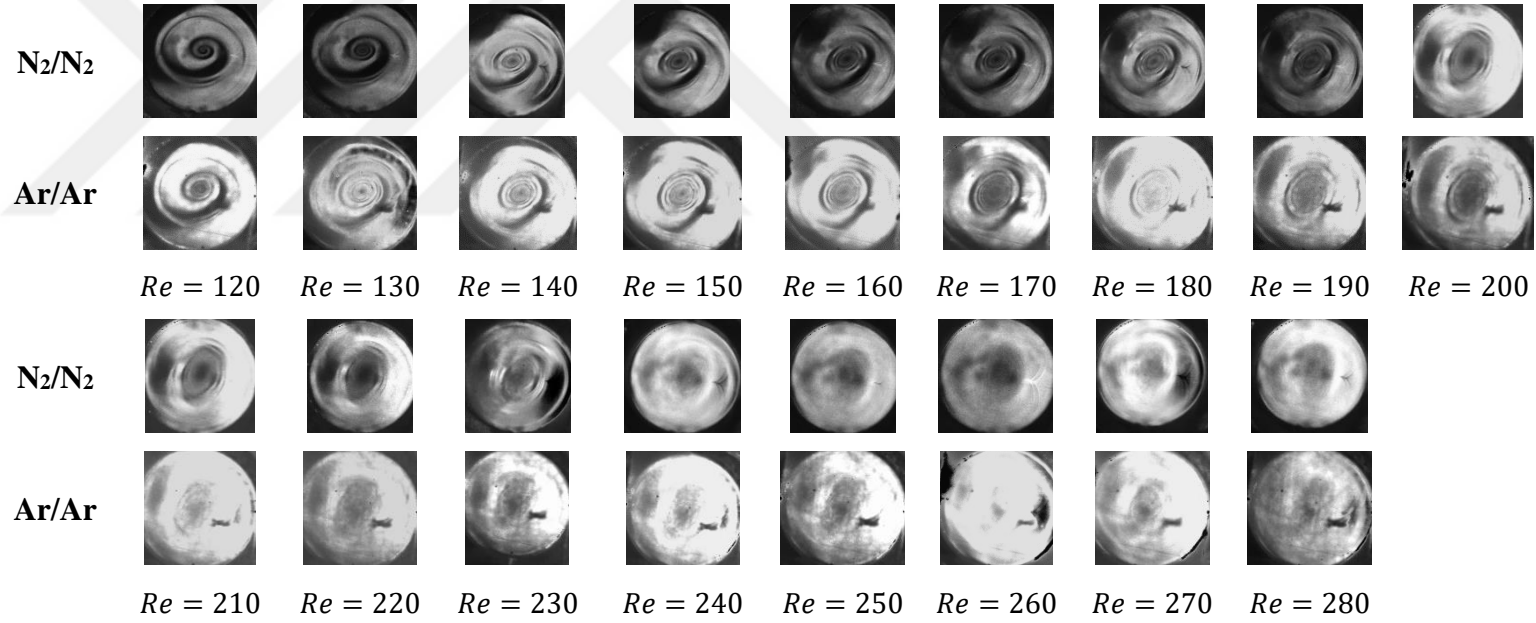
**Şekil A.5 :** Düzlem-20'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin ( $\text{CH}_4/\text{CH}_4$ )  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

EK B

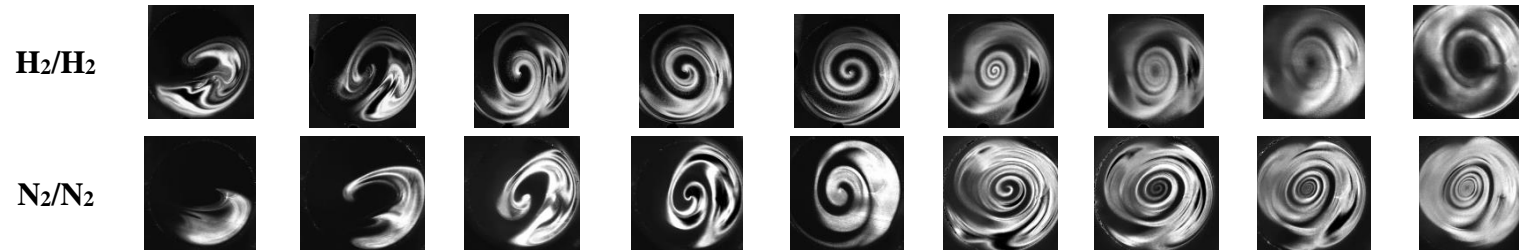


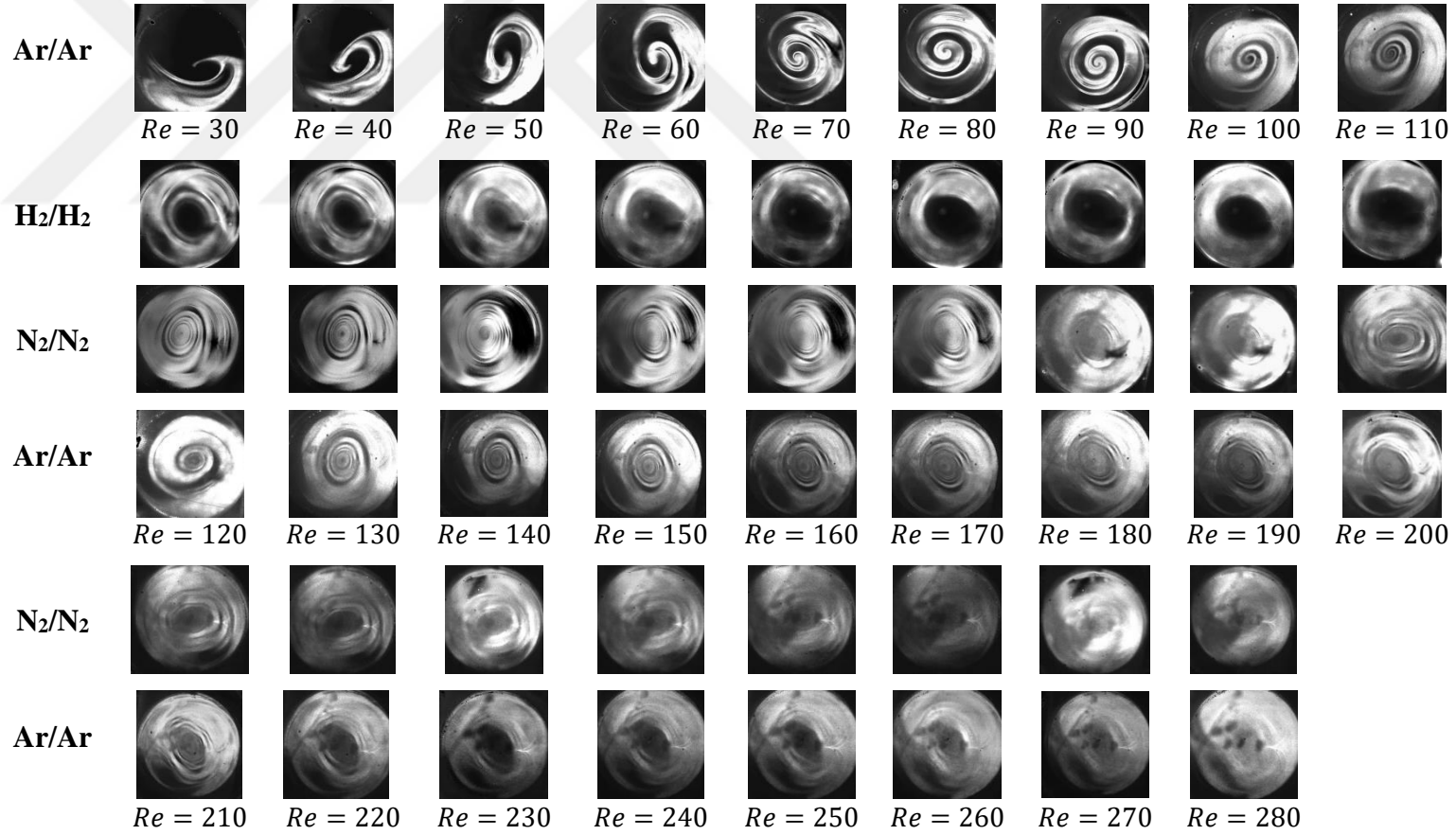
Şekil A.6 :  $rz$  düzleminde  $Re = 40$ 'ta zaman ortalamalı akış görüntülerinin yakın gösterimi.



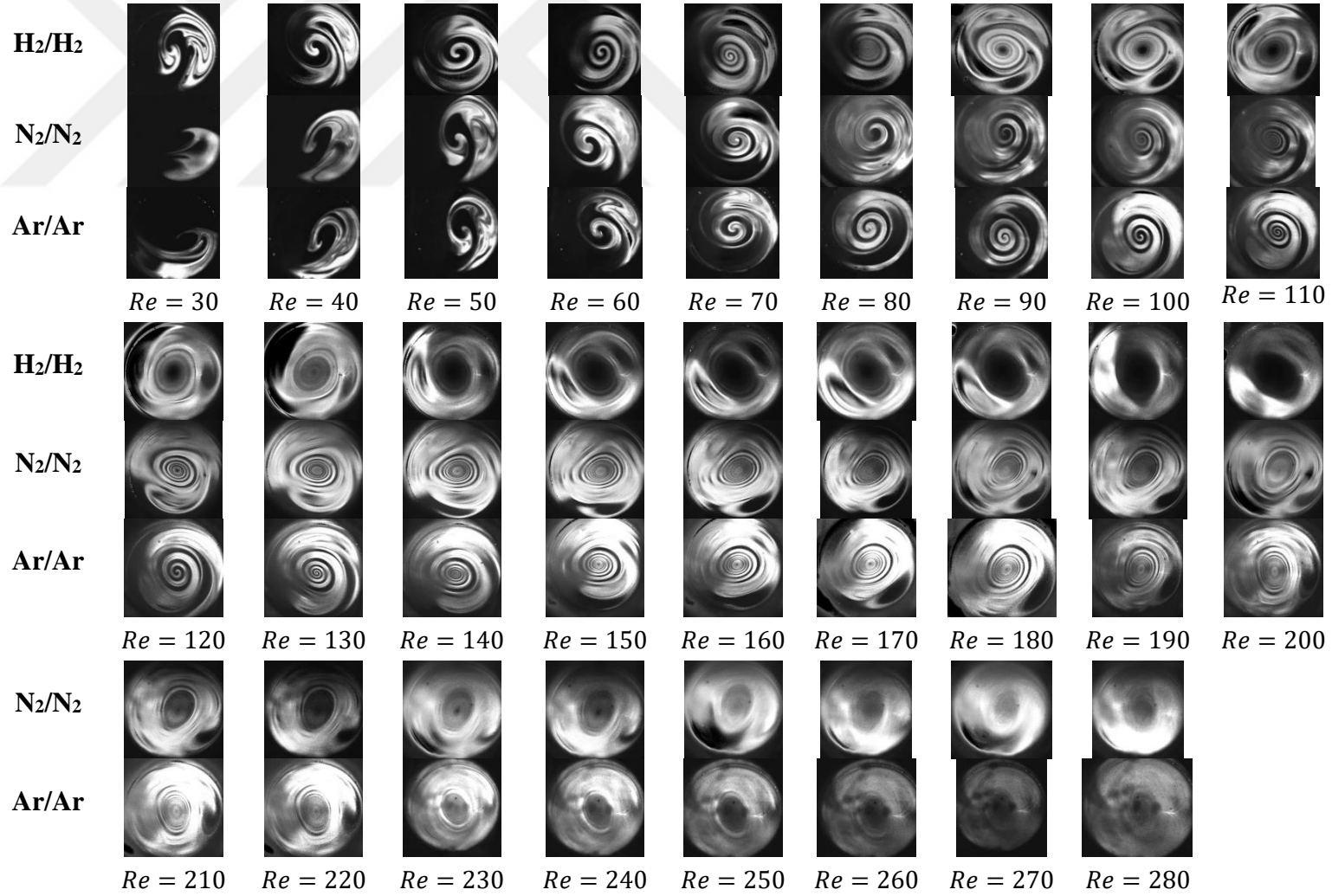


Şekil A.7 : Düzlem-1'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

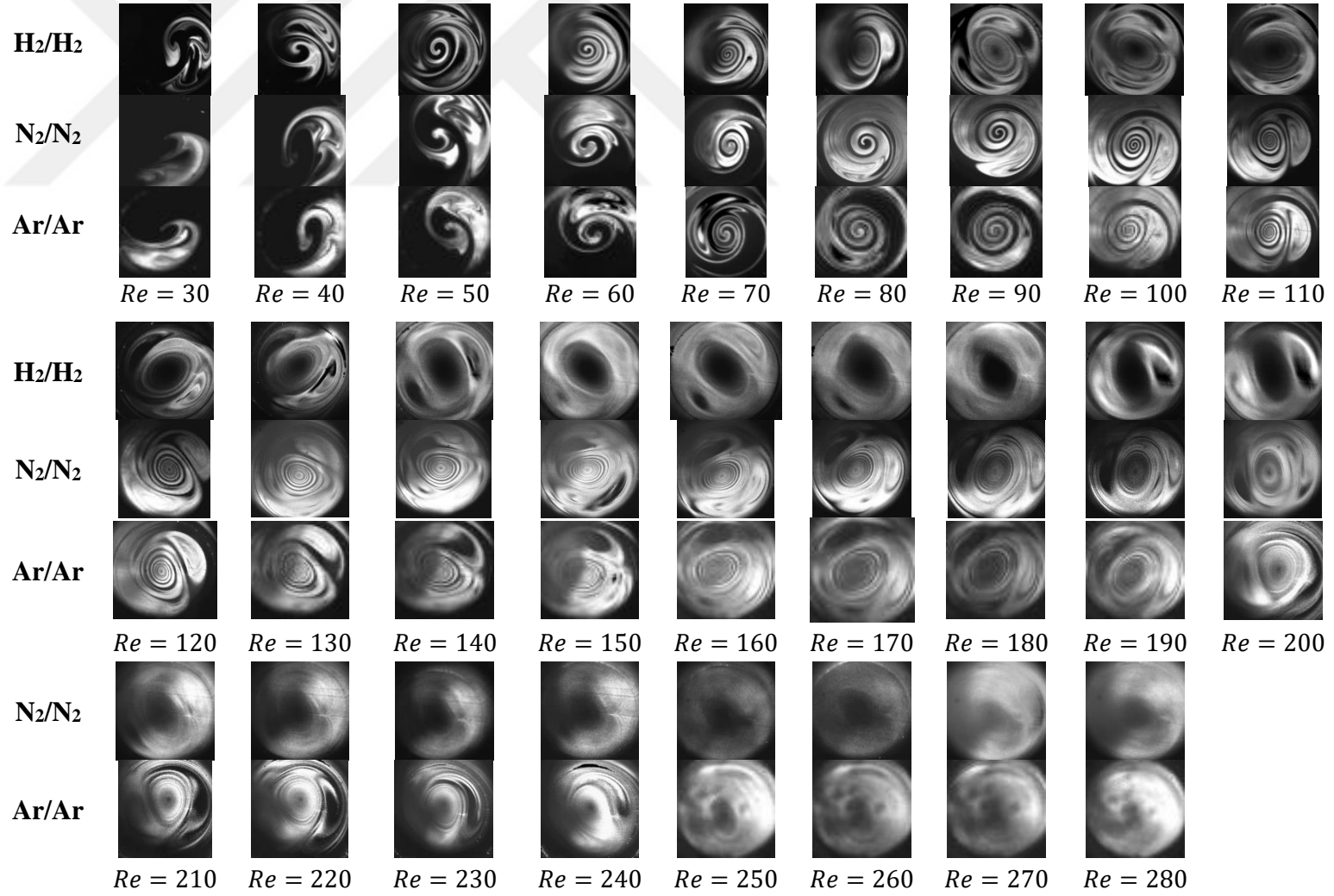




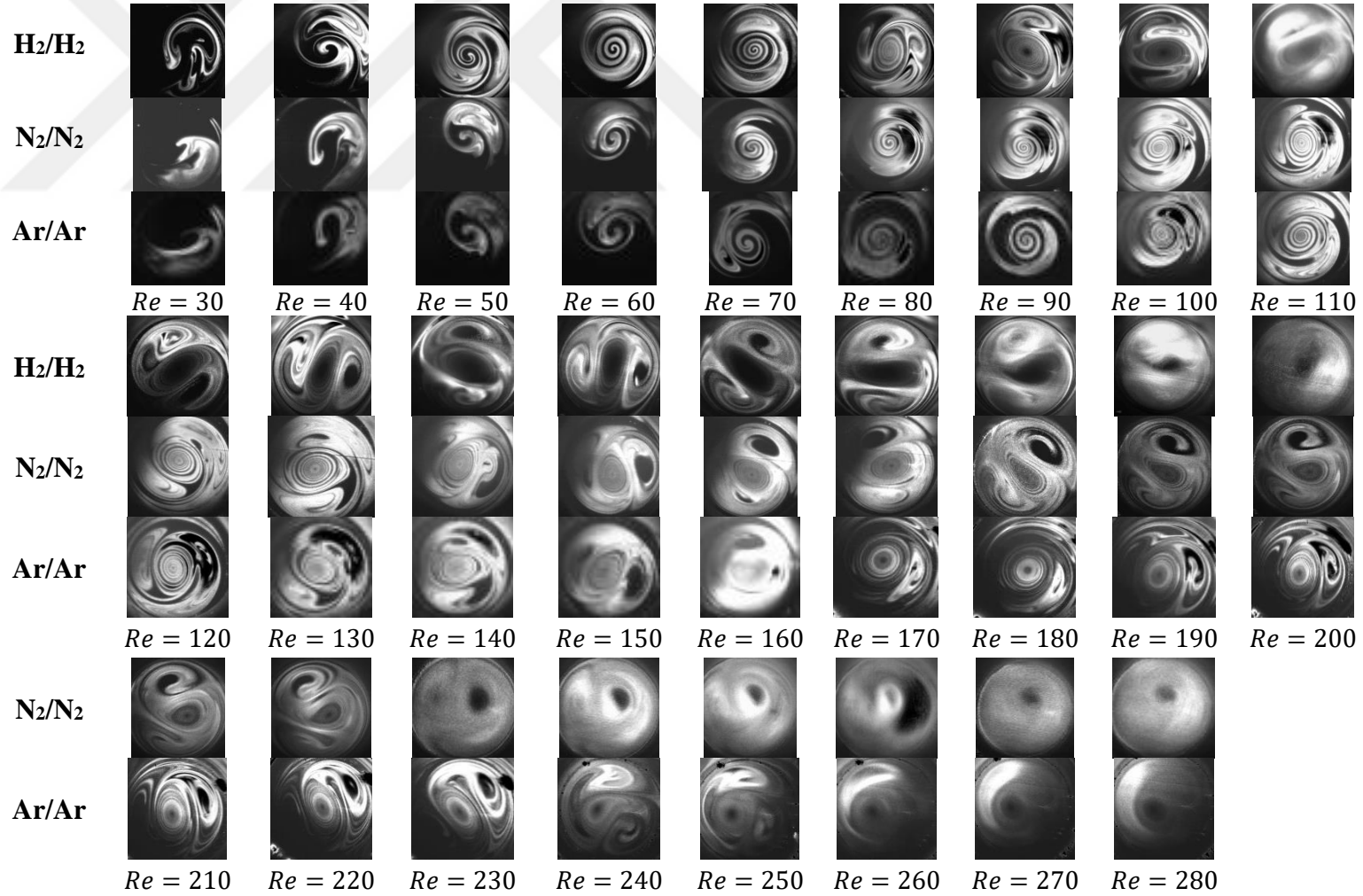
**Şekil A.8 :** Düzlem-2'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



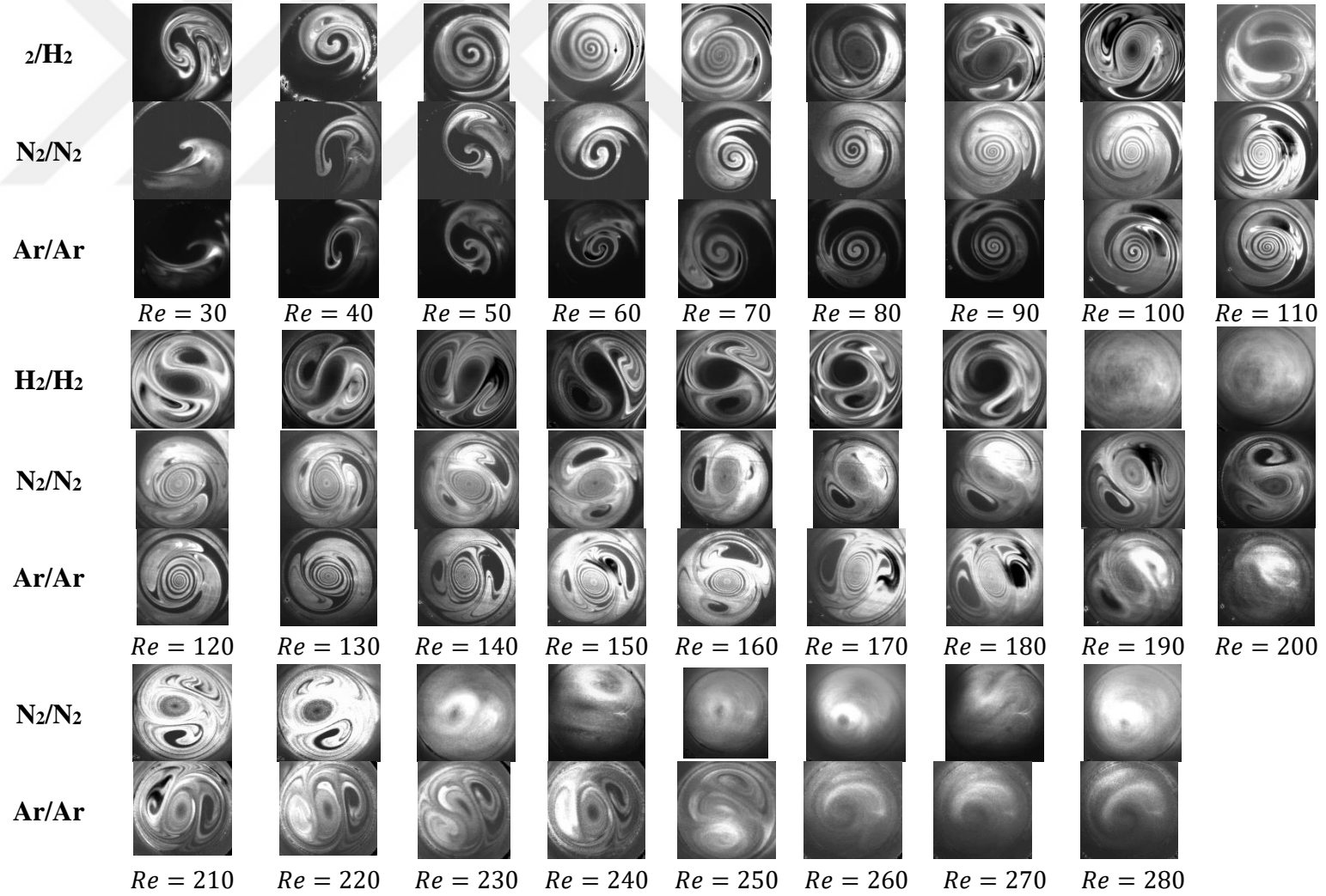
Şekil A.9 : Düzlem-3'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



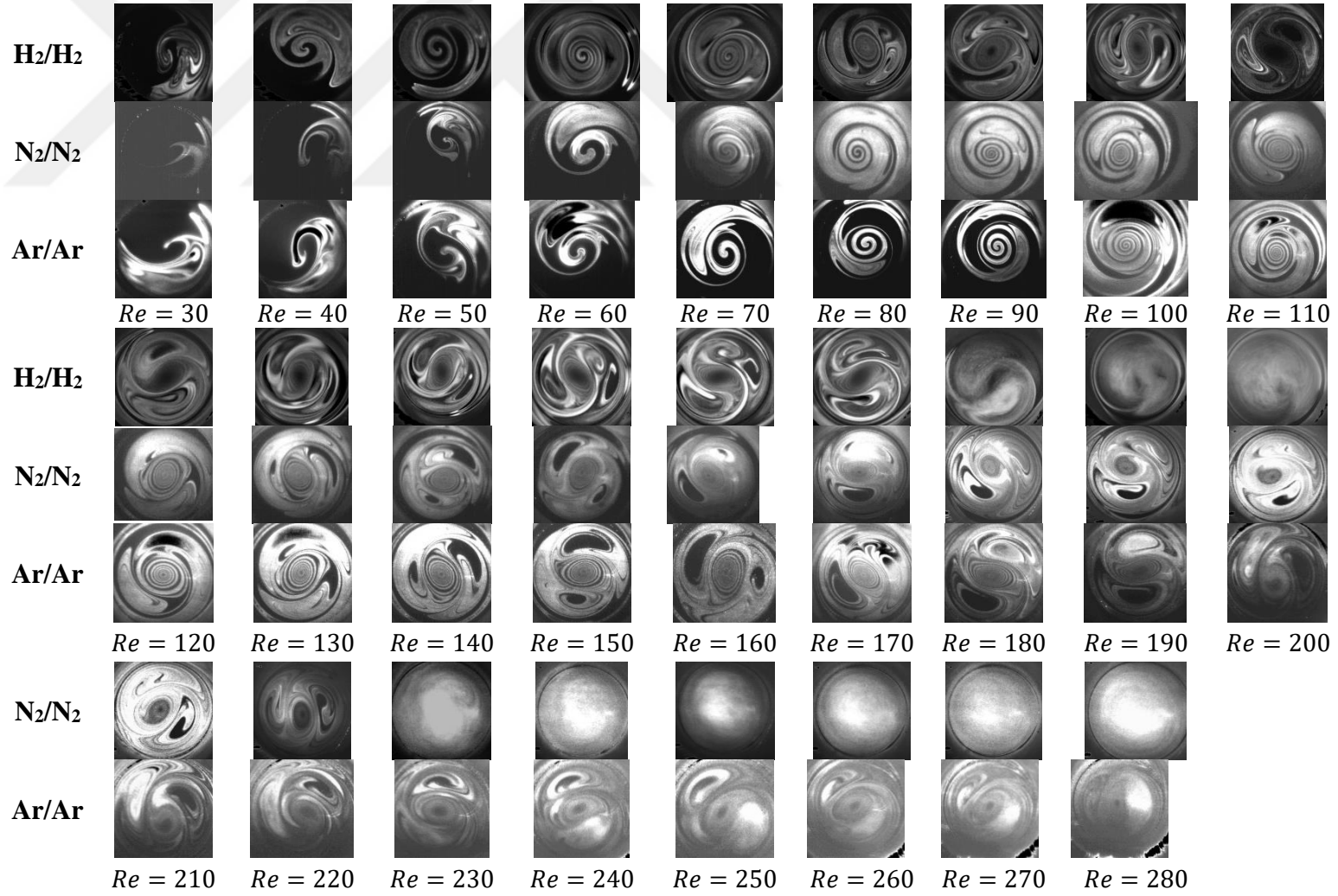
Şekil A.10 : Düzlem-5'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



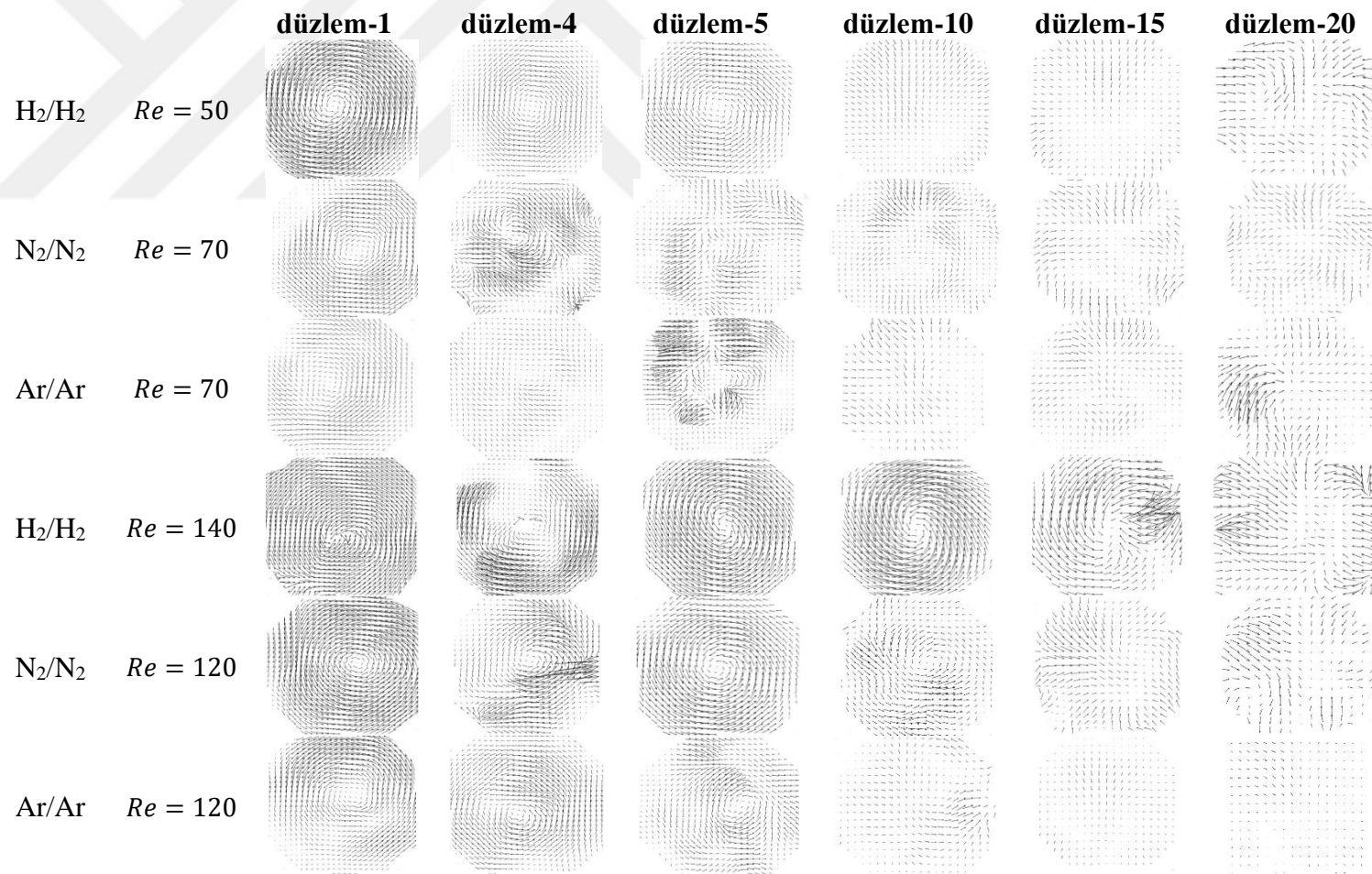
Şekil A.11 : Düzlem-10'daki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

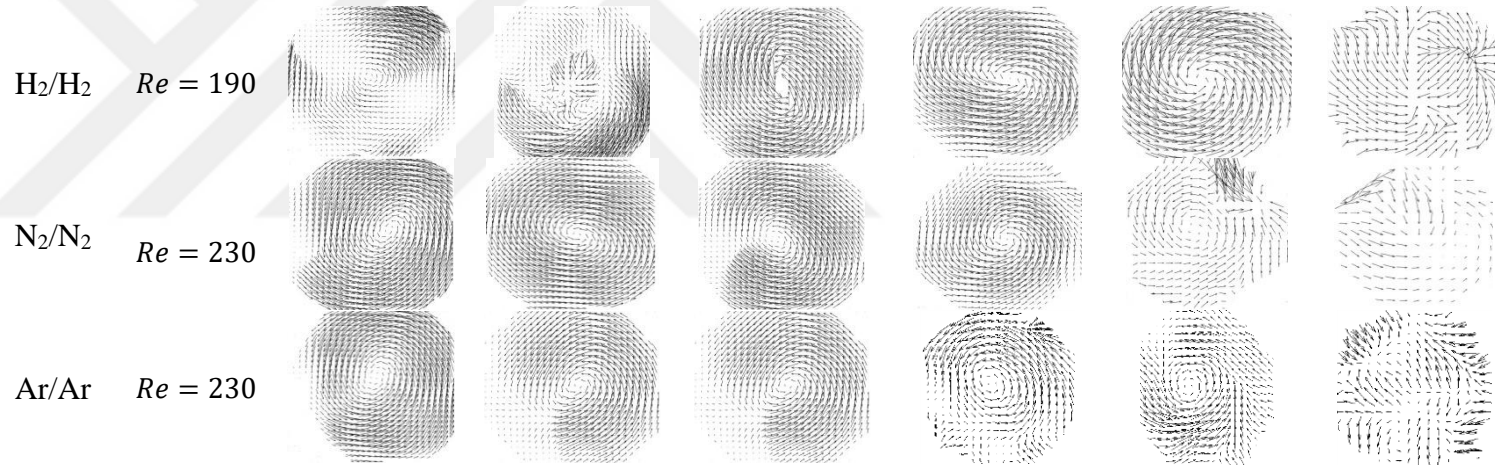


Şekil A.12 : Düzlem-15'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

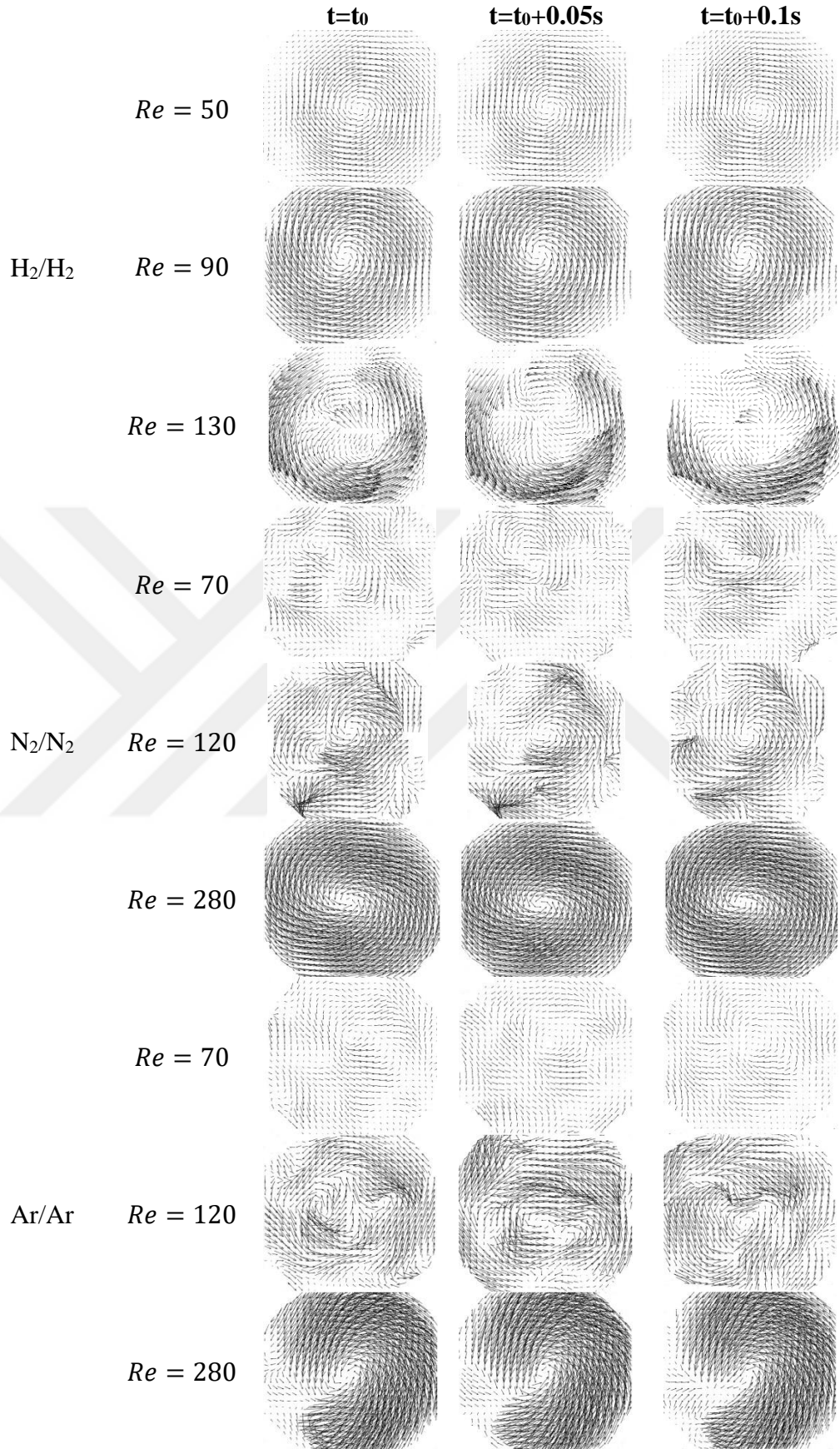


Şekil A.13 : Düzlem-20'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



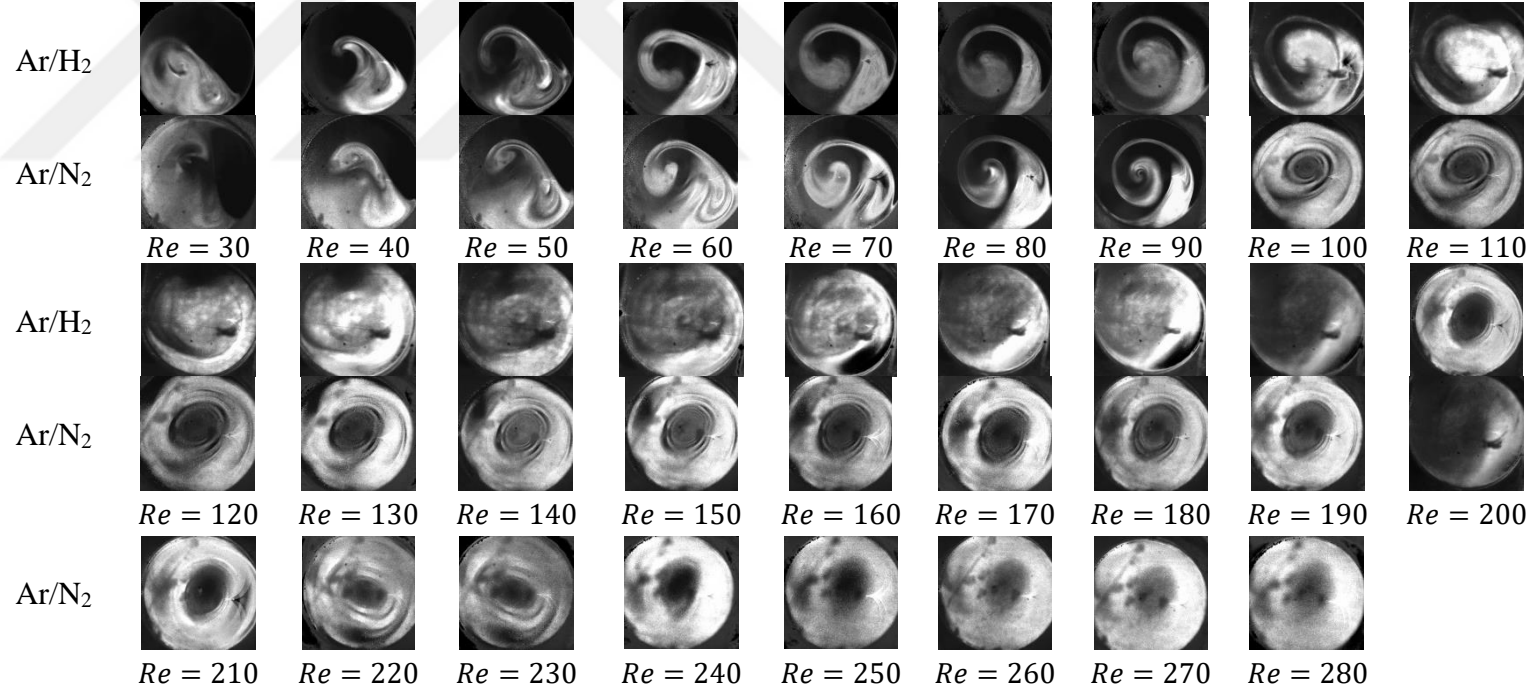


**Şekil A.14 :** Akışın belirlenen kritik noktalarının çember uzunluğuna göre zaman ortalamalı hız vektörleri.

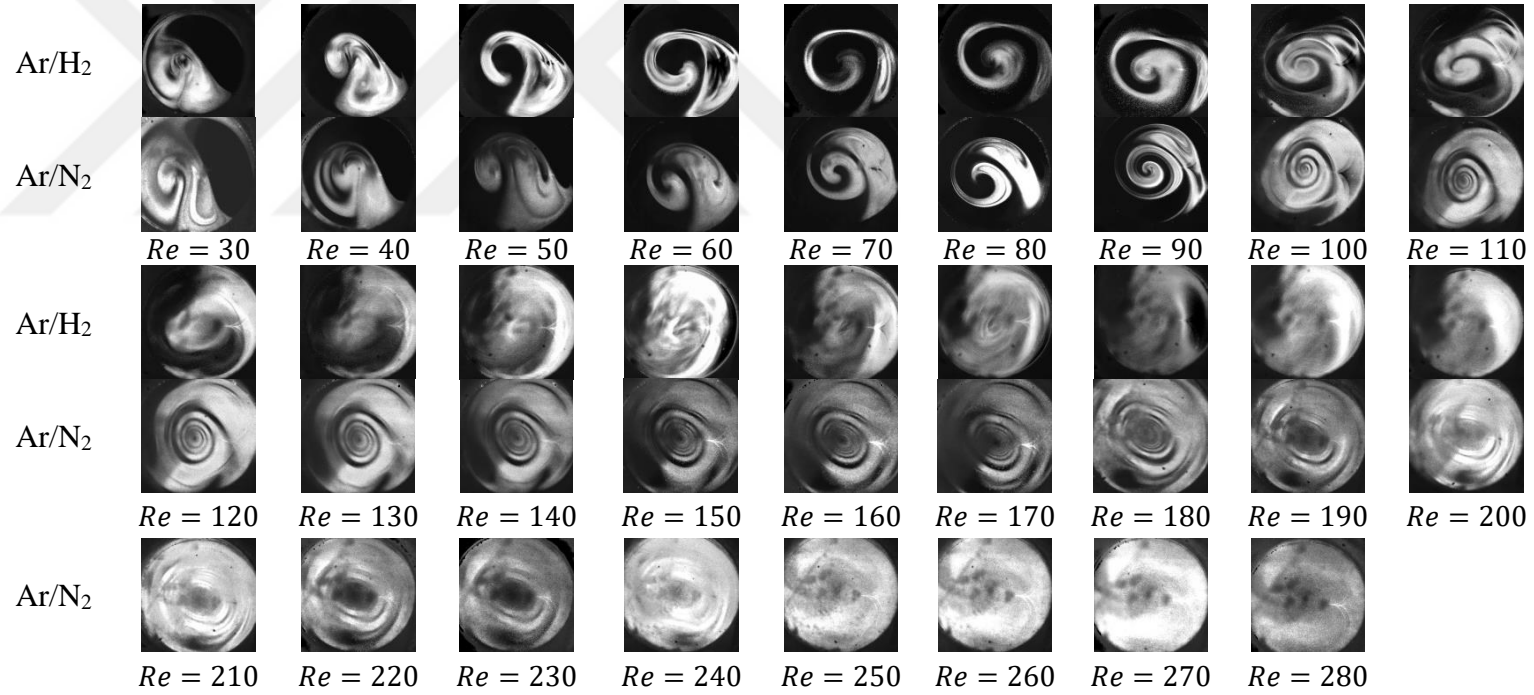


Şekil A.15 : Akışın belirlenen kritik noktalarındaki anlık hız vektör haritası.

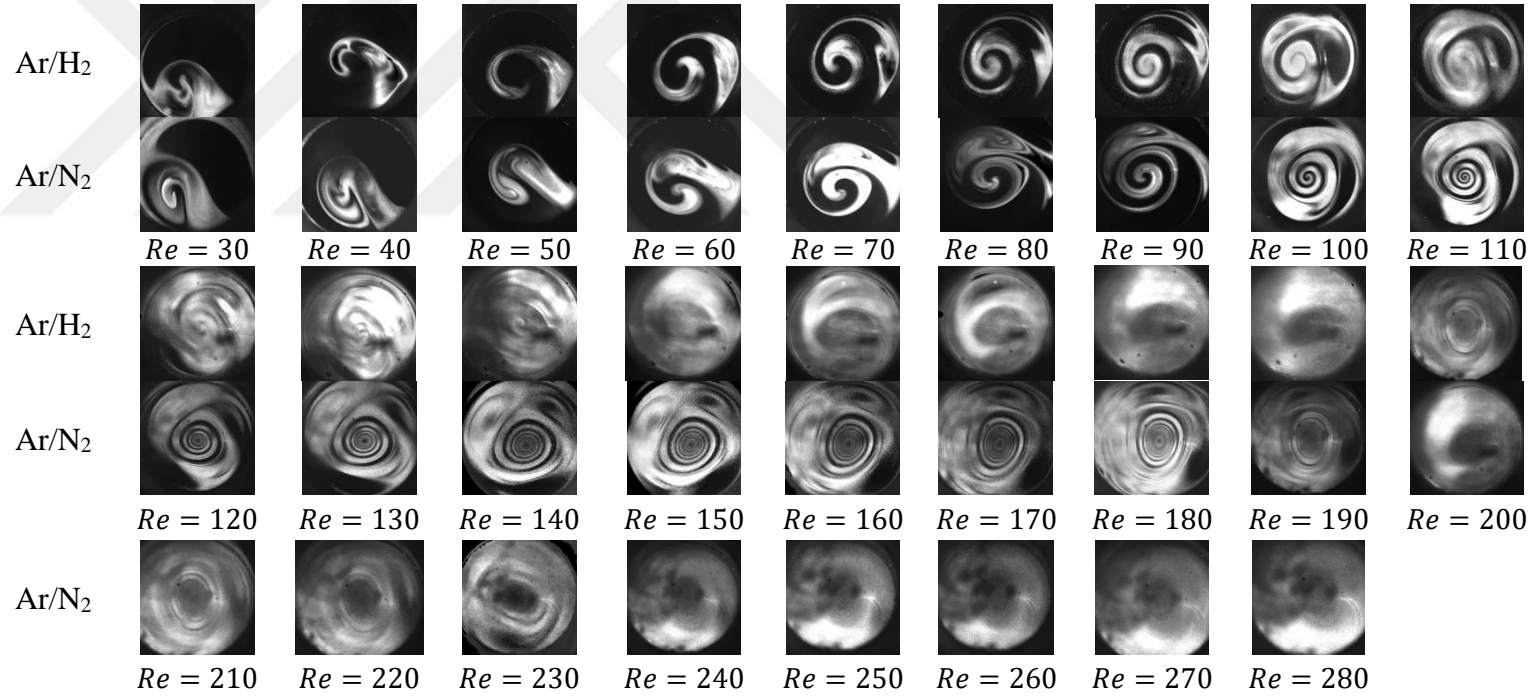
## EK C



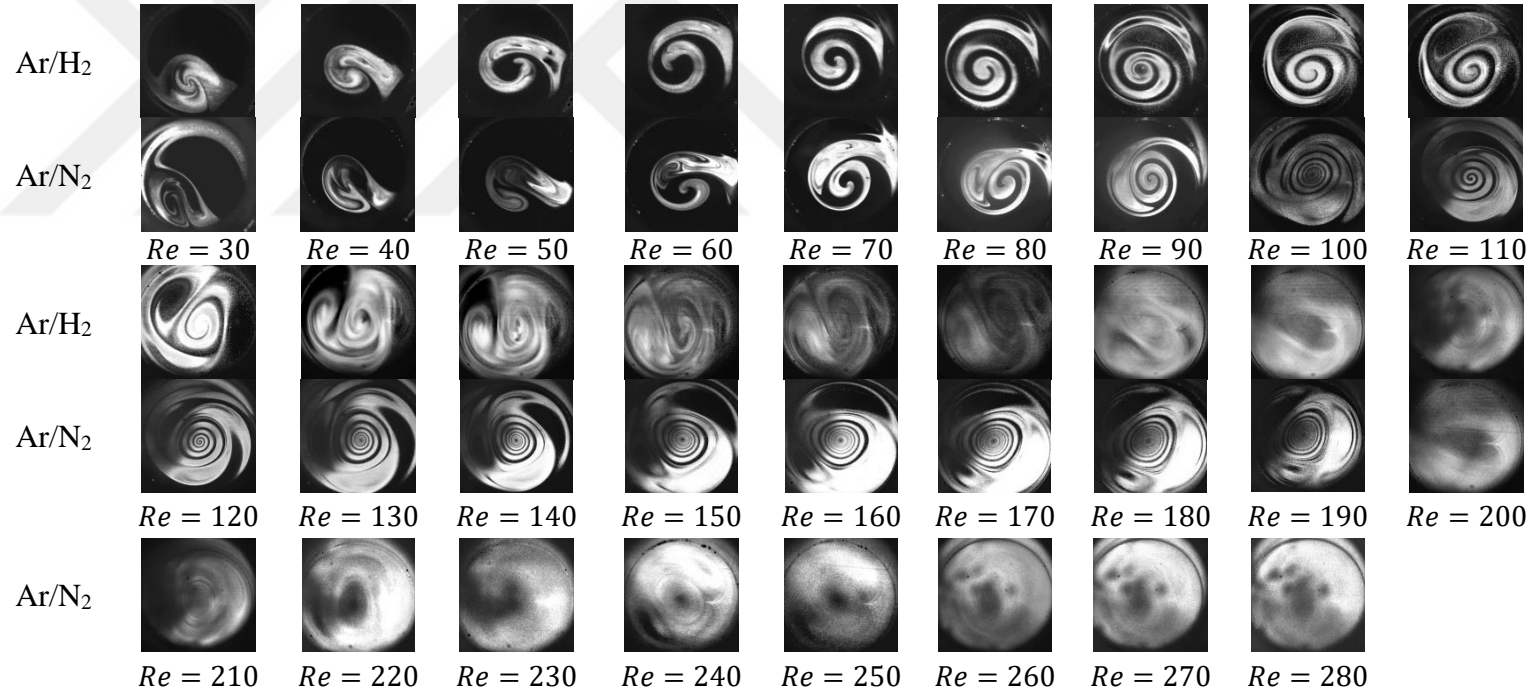
**Şekil A.16** : Düzlem-1'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (*rms*) *Re* = 20 ve *Re* = 280 aralığında karşılaştırılması.



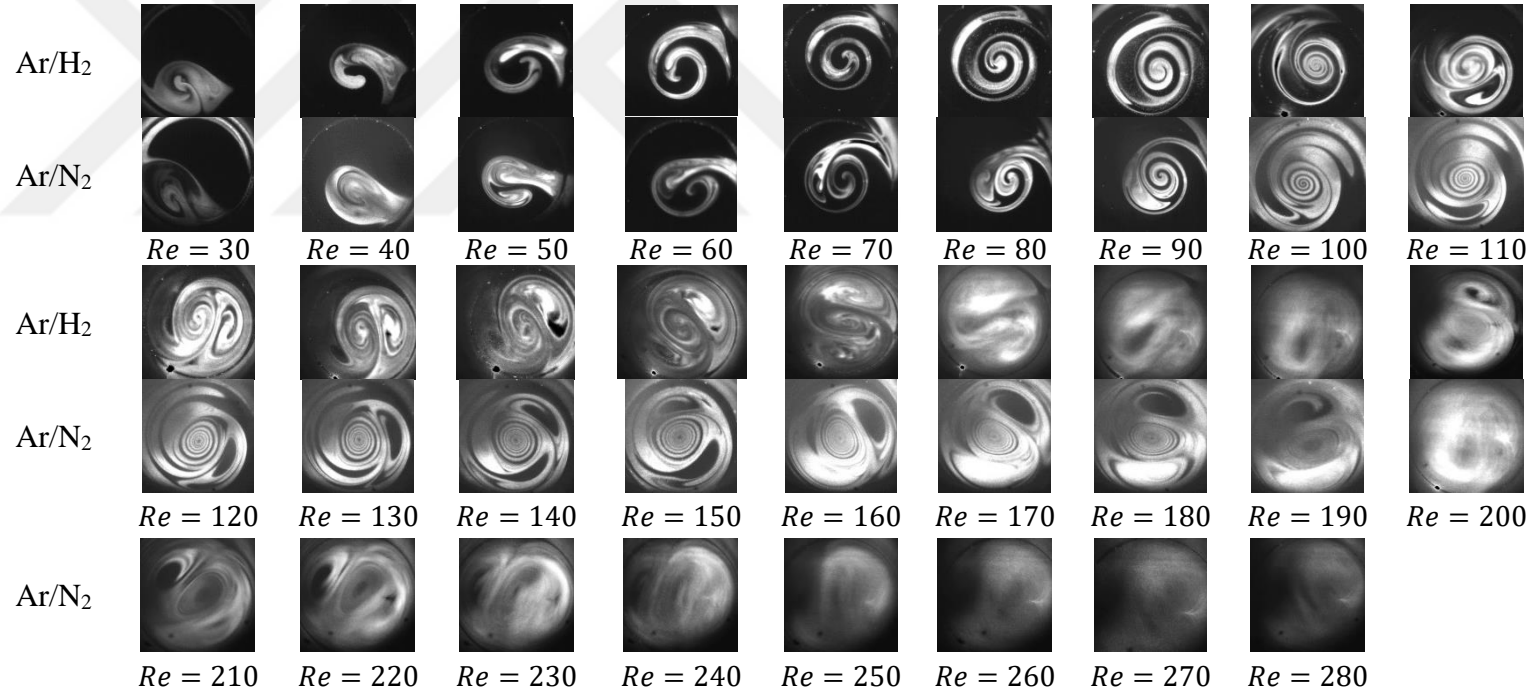
**Şekil A.17** : Düzlem-2'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



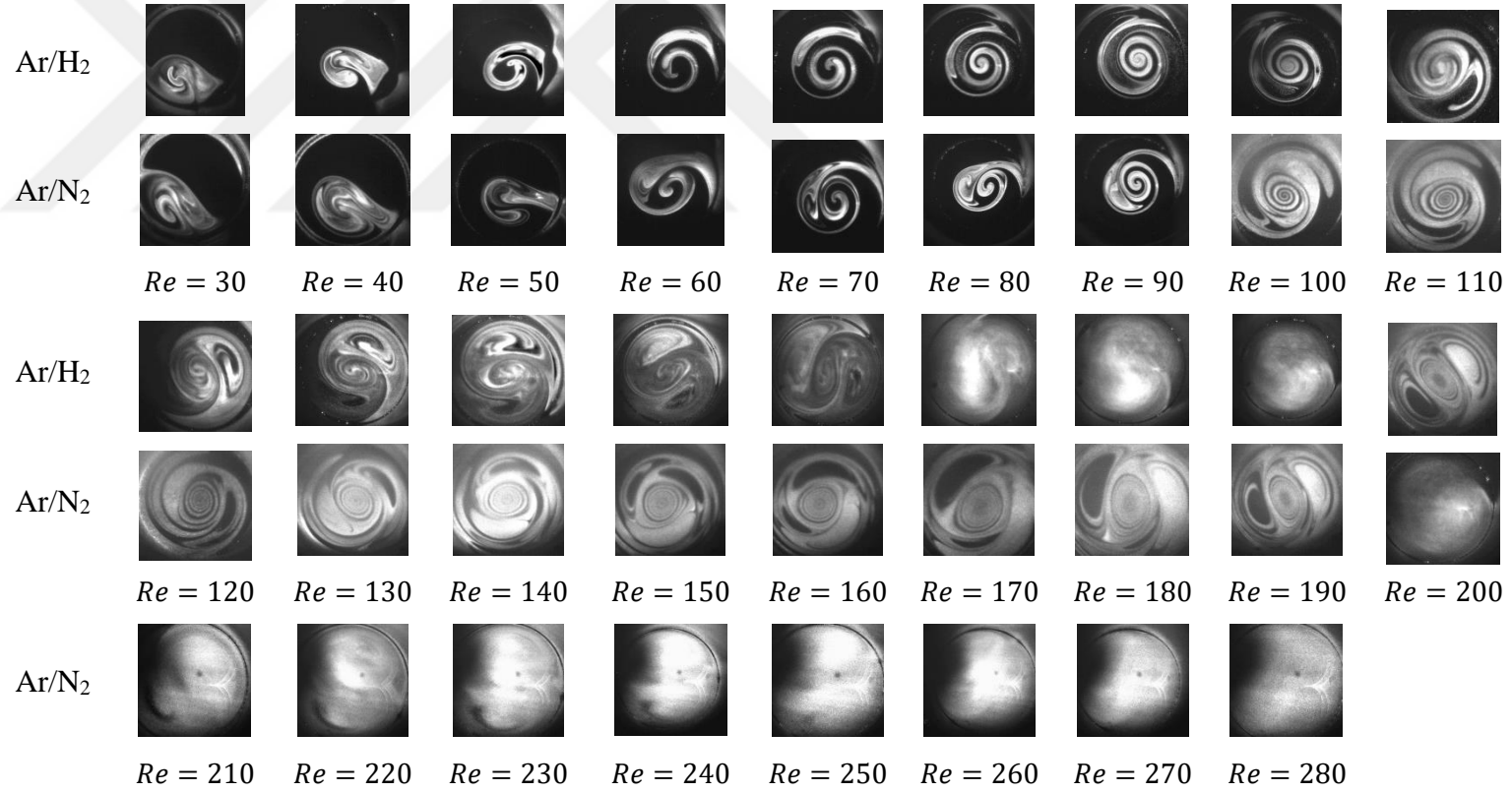
**Şekil A.18** : Düzlem-3'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



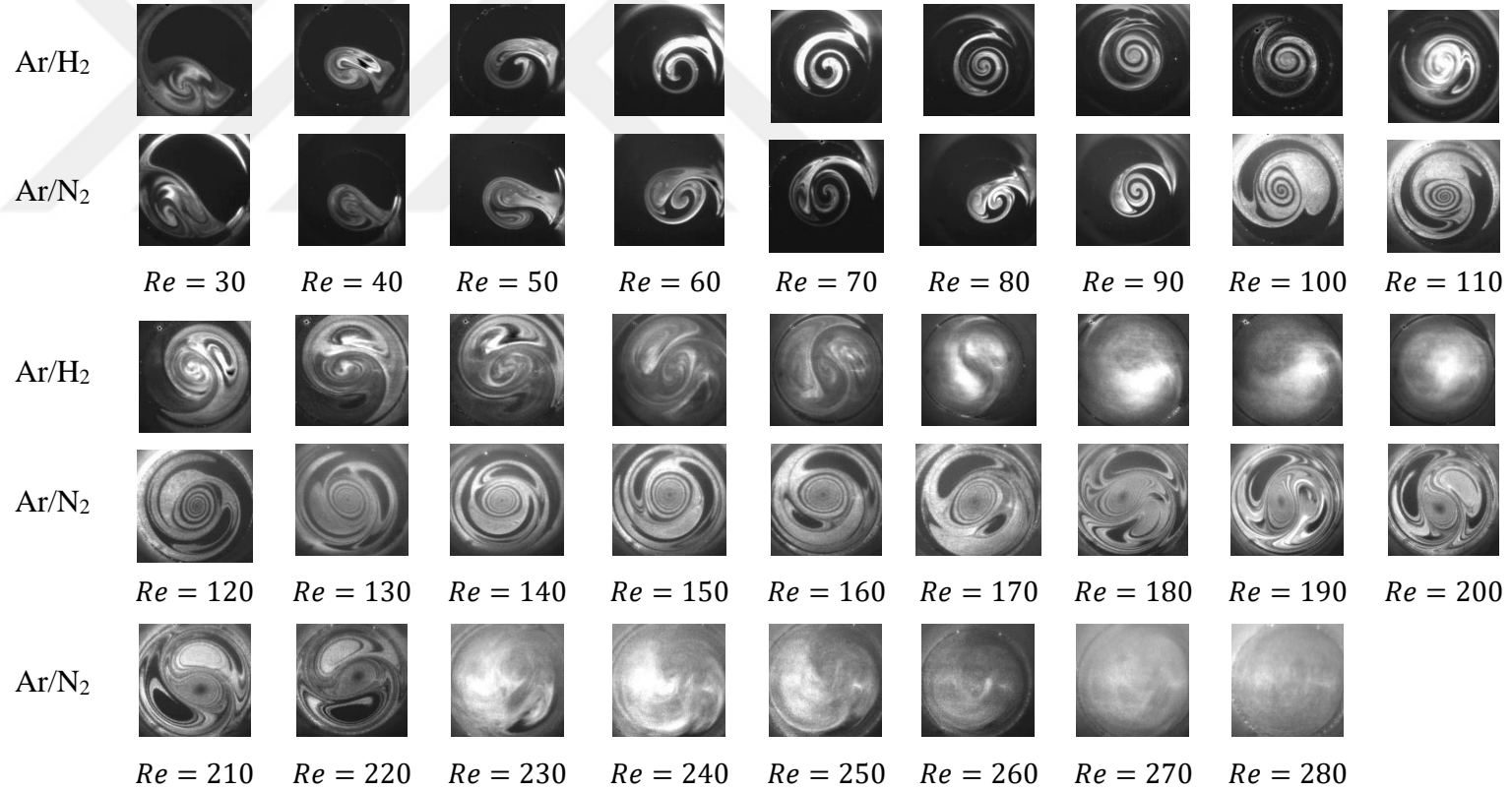
Şekil A.19 : Düzlem-5'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.



**Şekil A.20** : Düzlem-10'daki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms) *Re* = 20 ve *Re* = 280 aralığında karşılaştırılması.

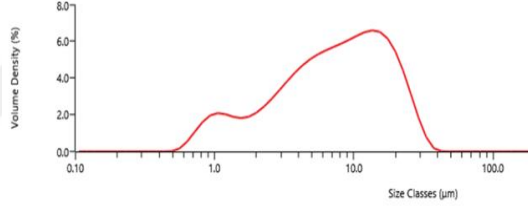


Şekil A.21 : Düzlem-15'teki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

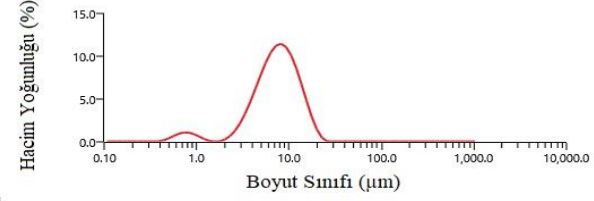


Şekil A.22 : Düzlem-20'deki zaman ortalamalı akış görüntülerinin (rms)  $Re = 20$  ve  $Re = 280$  aralığında karşılaştırılması.

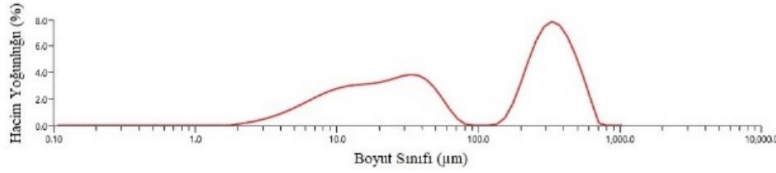
# EK D



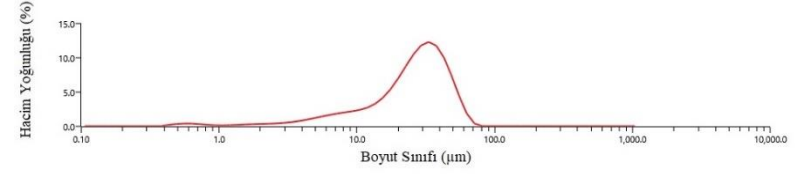
a) ZnO-1



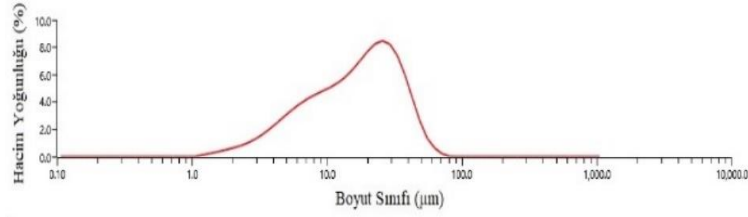
b) ZnO-2



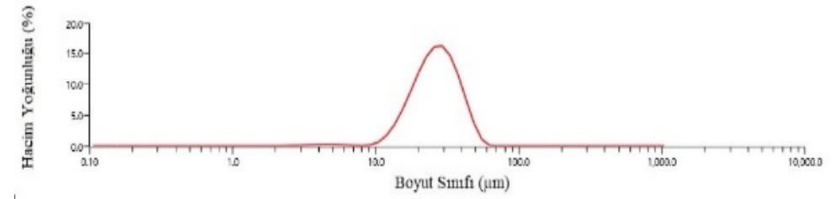
c) SiO<sub>2</sub>-1



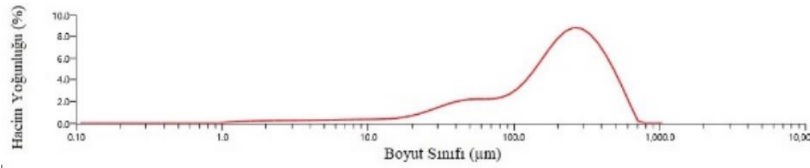
d) SiO<sub>2</sub>-2



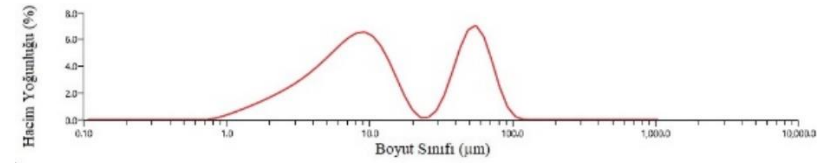
e) SiO<sub>2</sub>-3



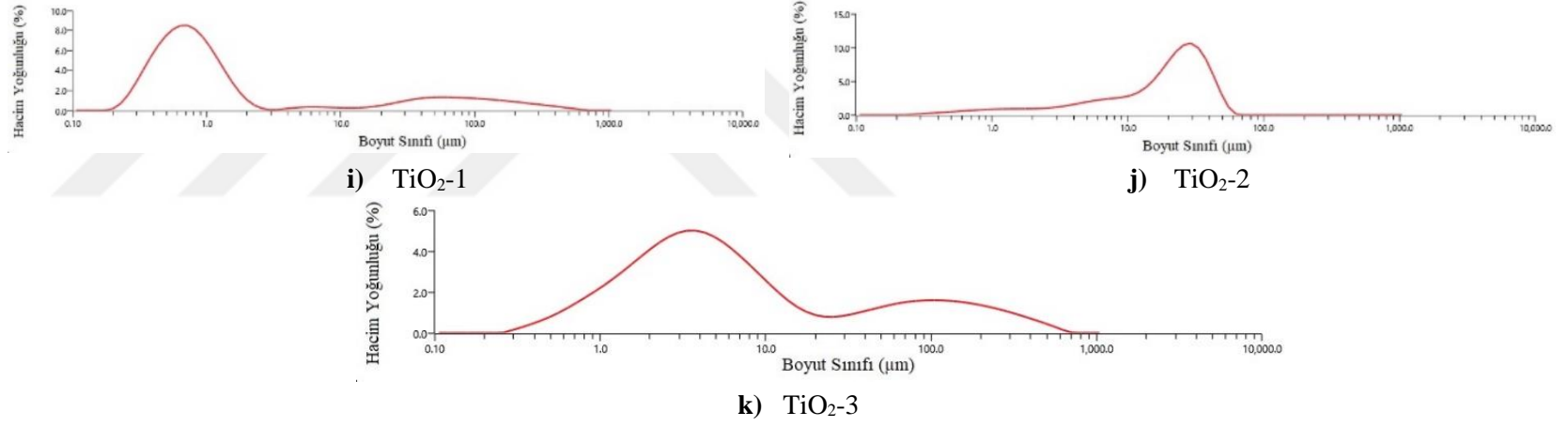
f) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1



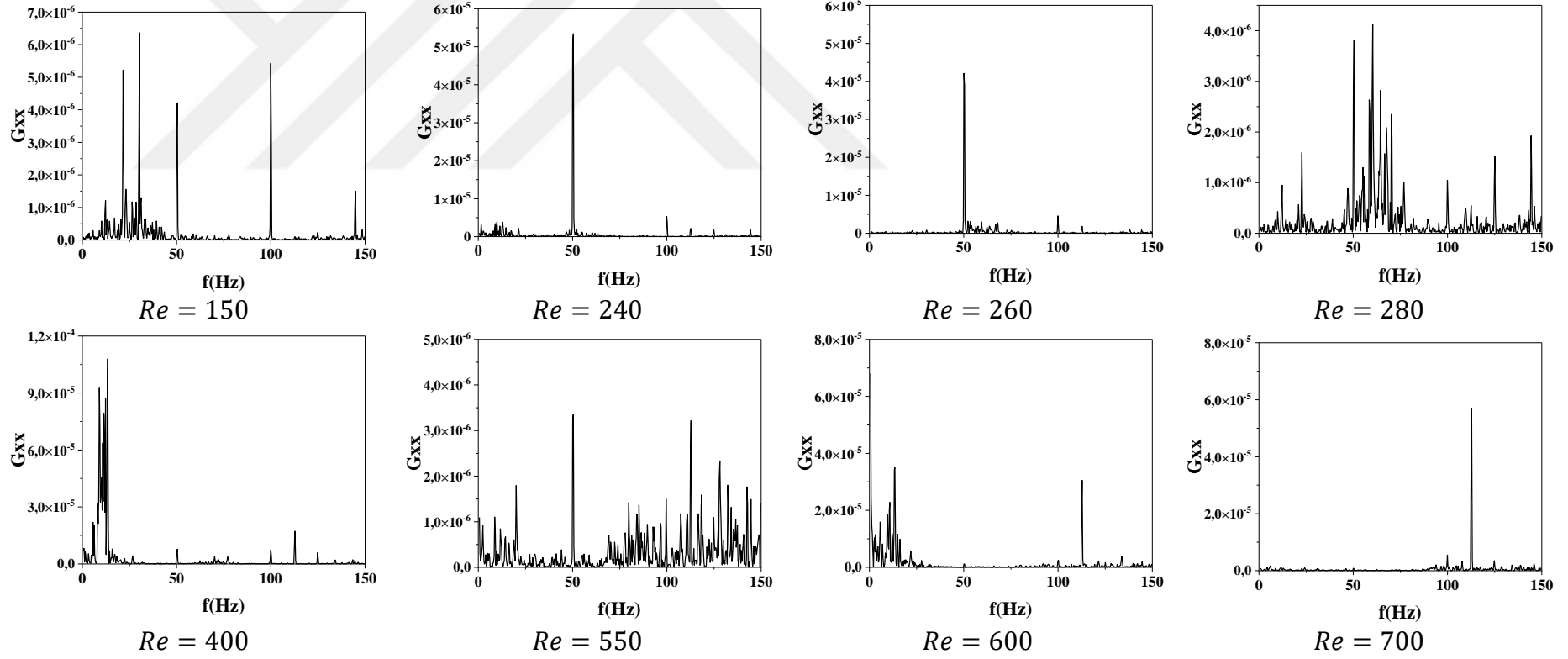
g) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2



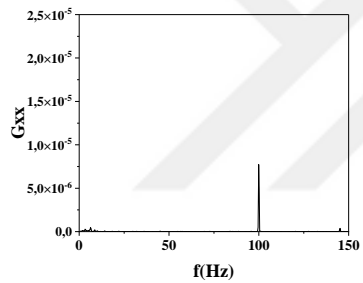
h) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3



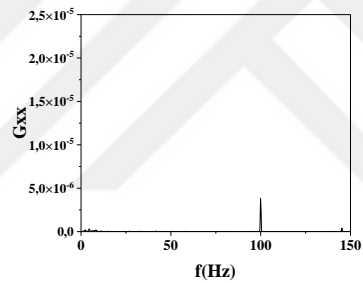
Şekil A.23 : Partikül boyut dağılımı



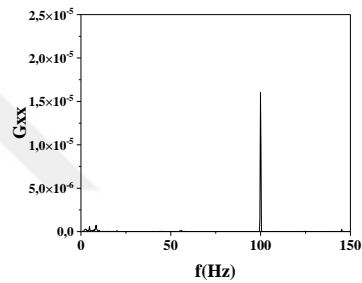
Şekil A.24 : ZnO-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



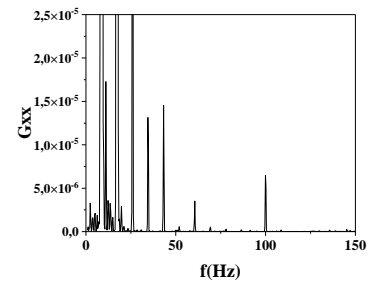
*Re = 20*



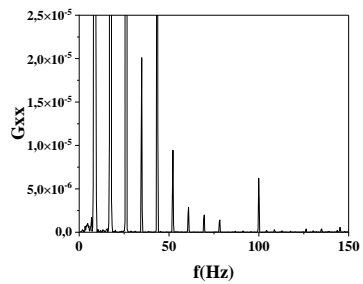
*Re = 40*



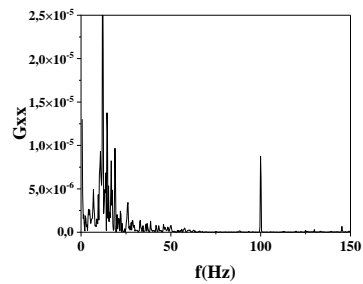
*Re = 50*



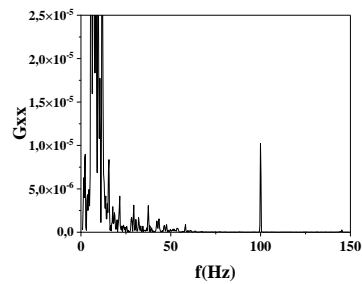
*Re = 60*



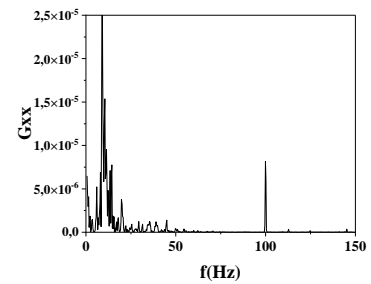
*Re = 70*



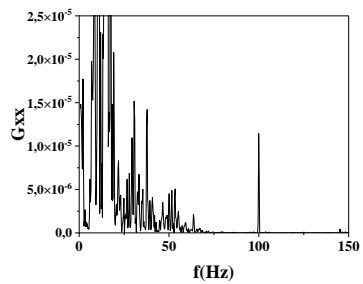
*Re = 80*



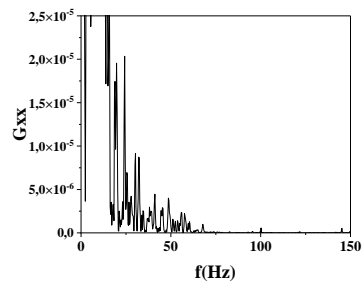
*Re = 90*



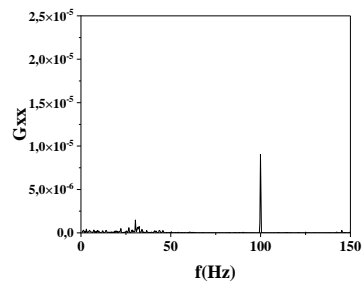
*Re = 100*



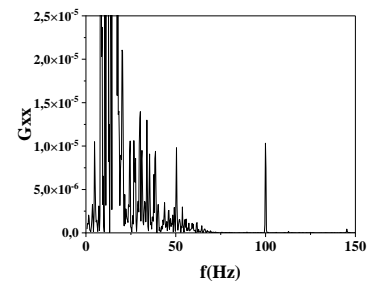
*Re = 120*



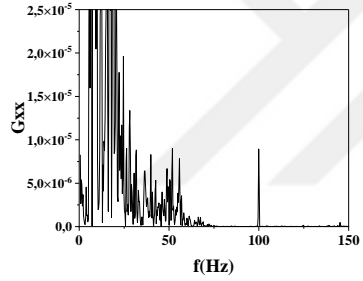
*Re = 140*



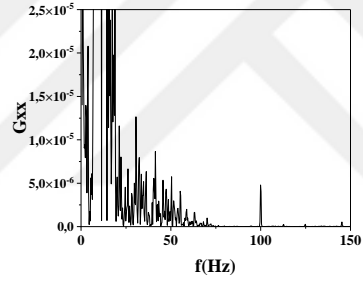
*Re = 150*



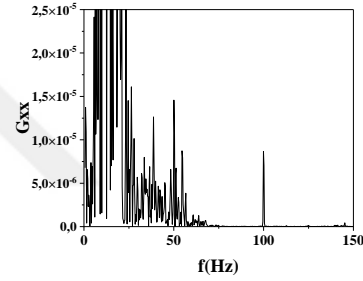
*Re = 160*



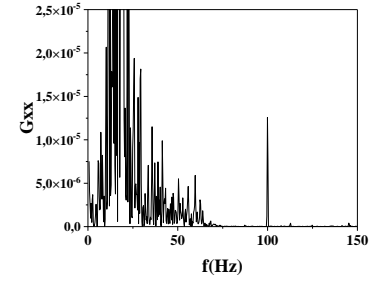
*Re = 170*



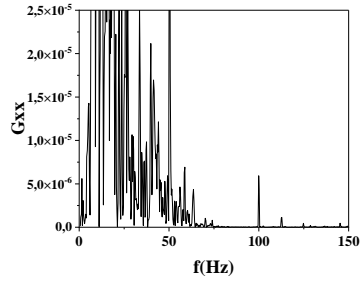
*Re = 180*



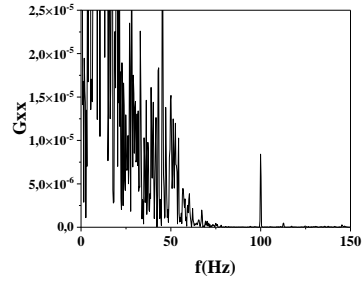
*Re = 190*



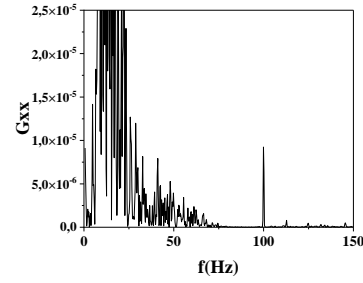
*Re = 200*



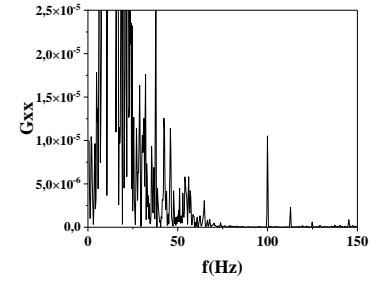
*Re = 220*



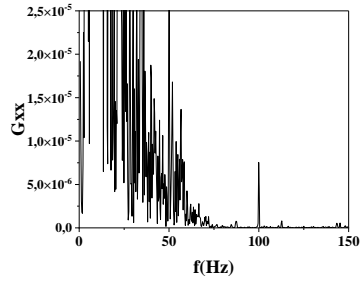
*Re = 240*



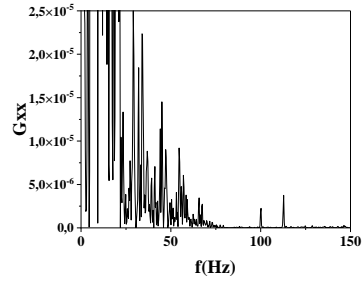
*Re = 260*



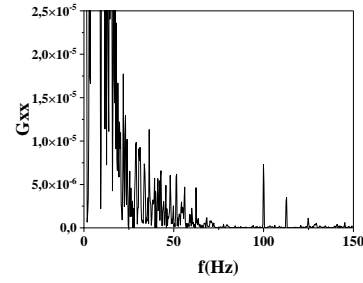
*Re = 280*



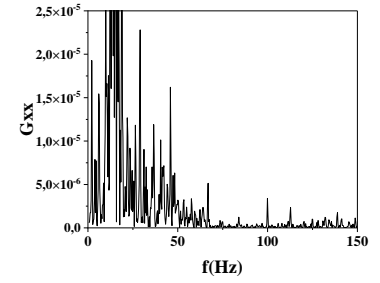
*Re = 300*



*Re = 350*

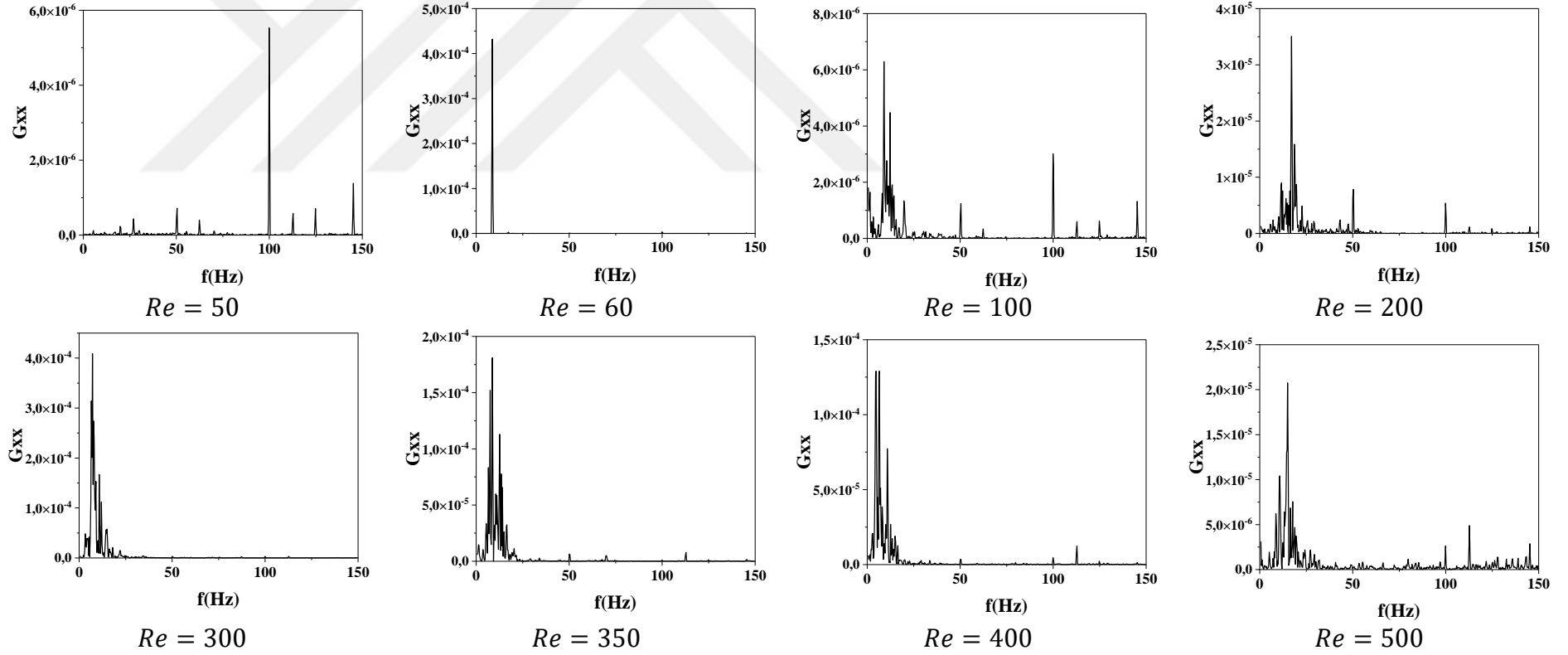


*Re = 400*

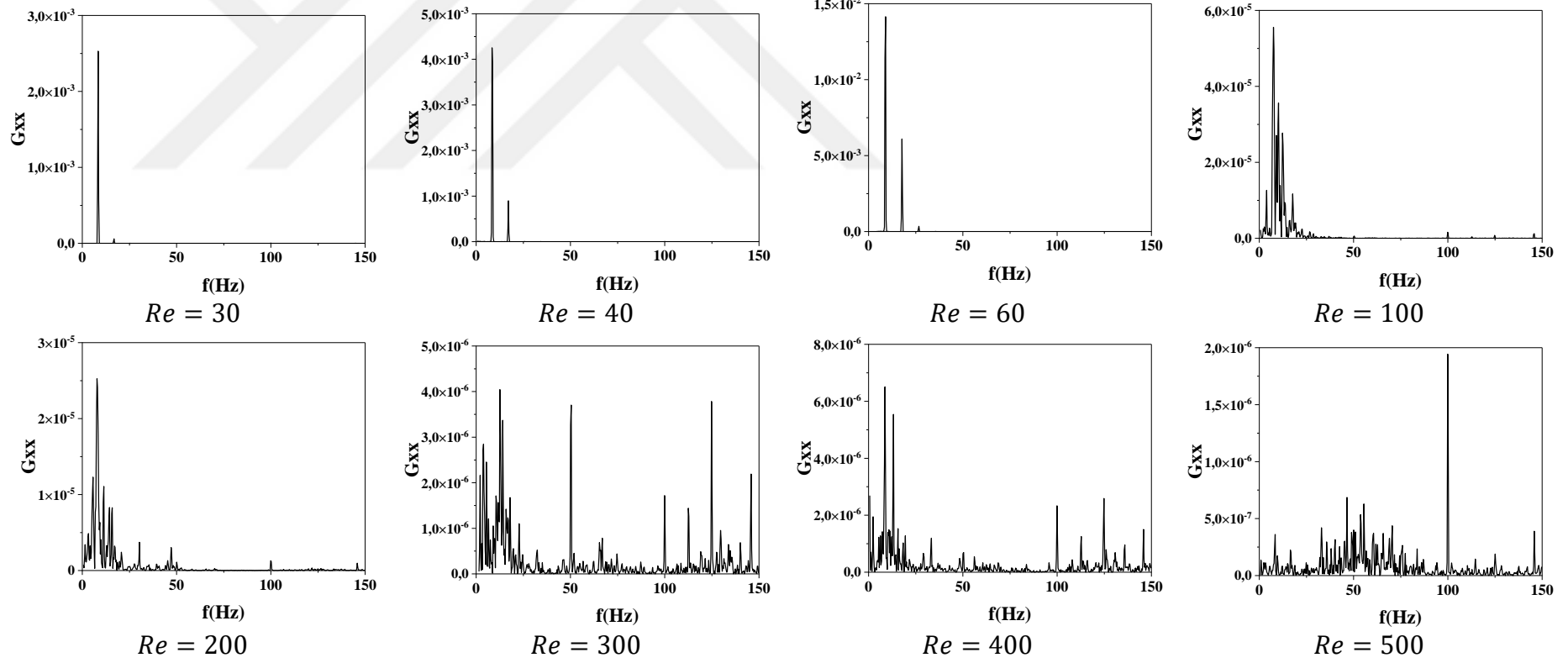


*Re = 500*

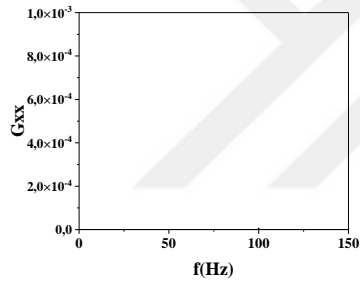
Şekil A.25 : ZnO-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



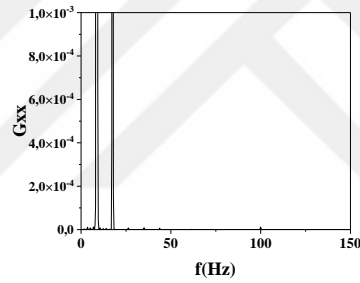
Şekil A.26 : ZnO-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



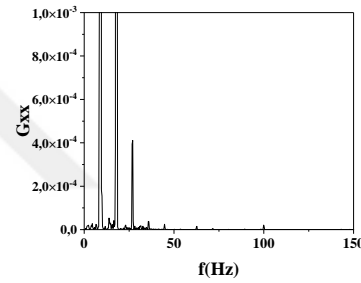
Şekil A.27 : SiO<sub>2</sub>-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



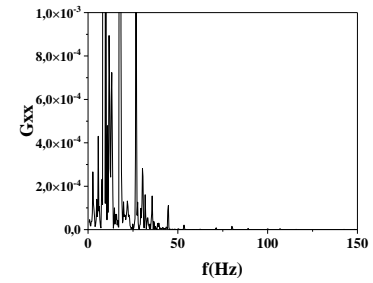
*Re = 40*



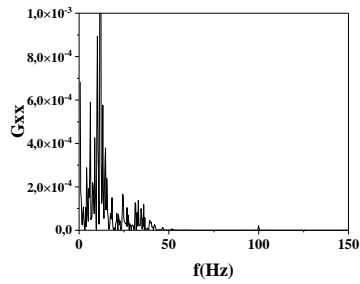
*Re = 50*



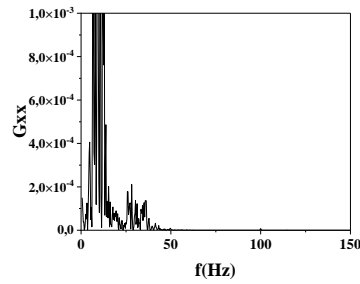
*Re = 60*



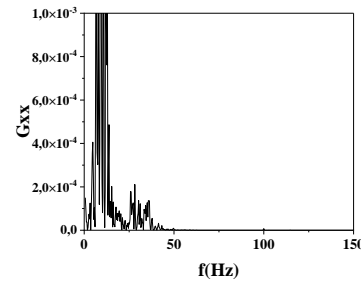
*Re = 70*



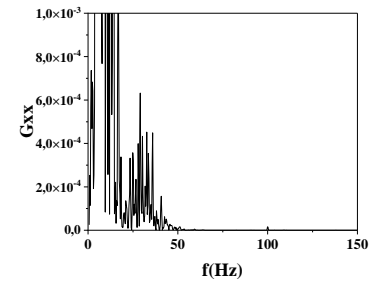
*Re = 80*



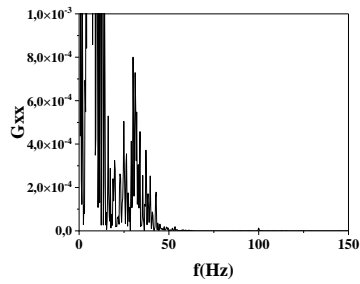
*Re = 90*



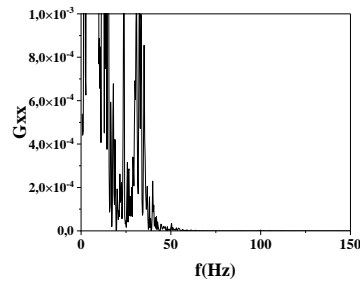
*Re = 100*



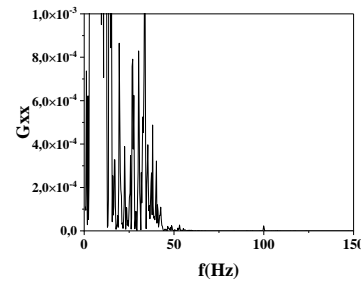
*Re = 120*



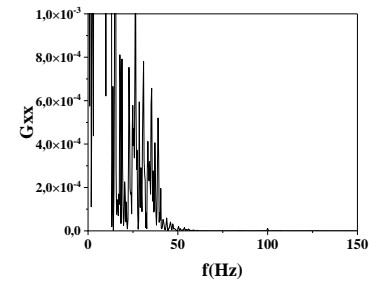
*Re = 140*



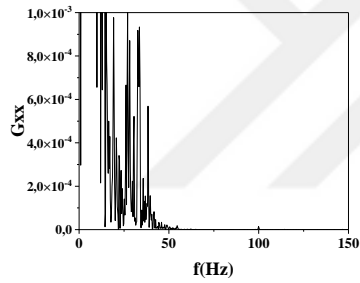
*Re = 150*



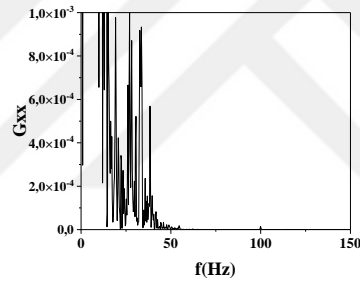
*Re = 160*



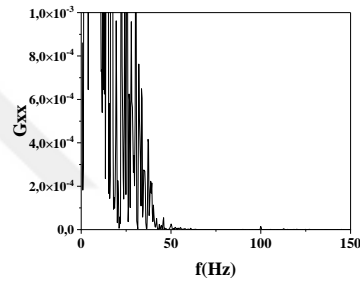
*Re = 170*



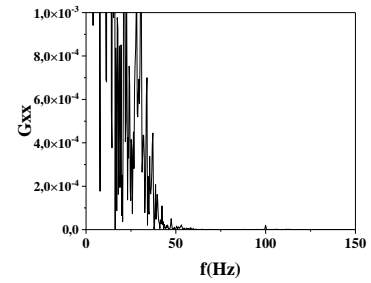
*Re = 180*



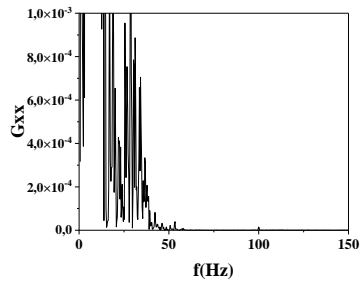
*Re = 200*



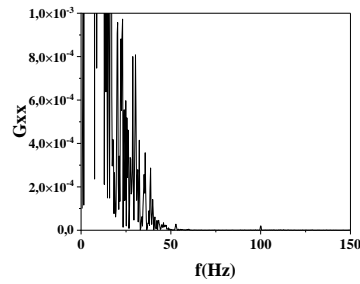
*Re = 220*



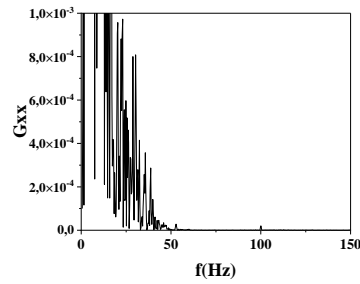
*Re = 240*



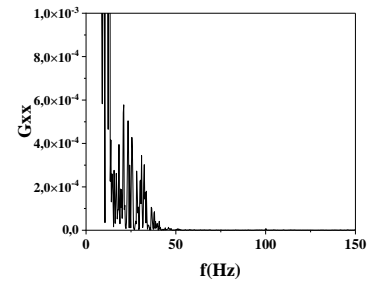
*Re = 260*



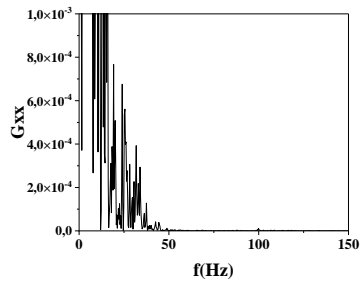
*Re = 280*



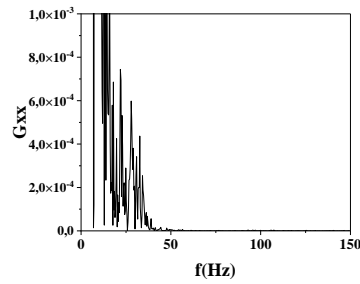
*Re = 300*



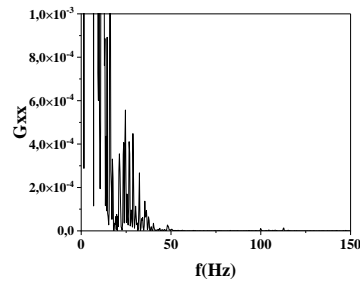
*Re = 320*



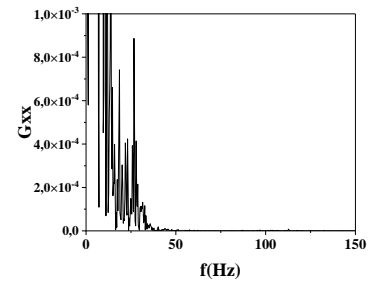
*Re = 340*



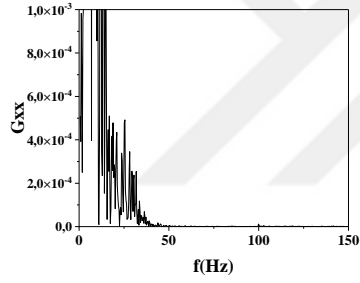
*Re = 360*



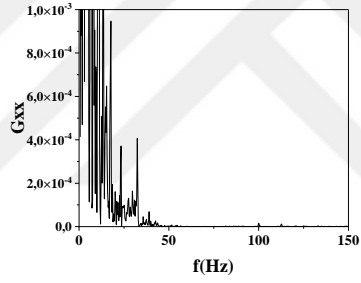
*Re = 380*



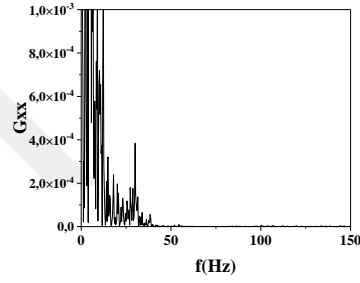
*Re = 400*



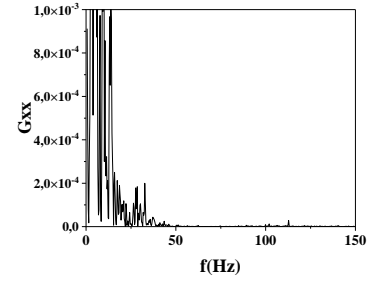
$Re = 450$



$Re = 500$

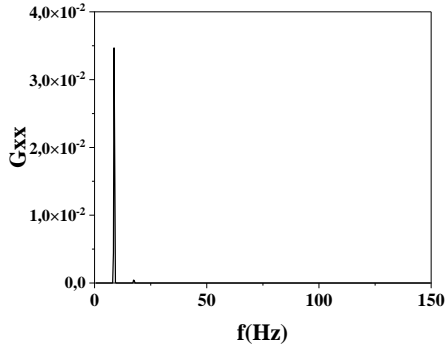


$Re = 550$

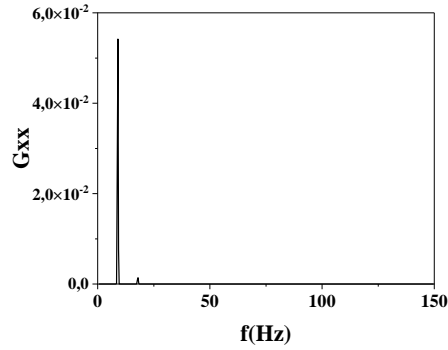


$Re = 600$

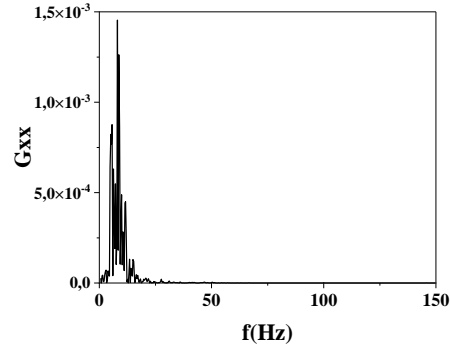
Şekil A.28 : SiO<sub>2</sub>-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



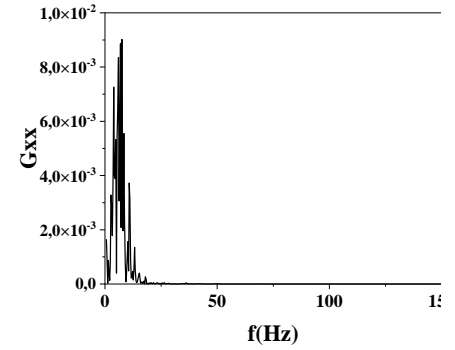
$Re = 50$



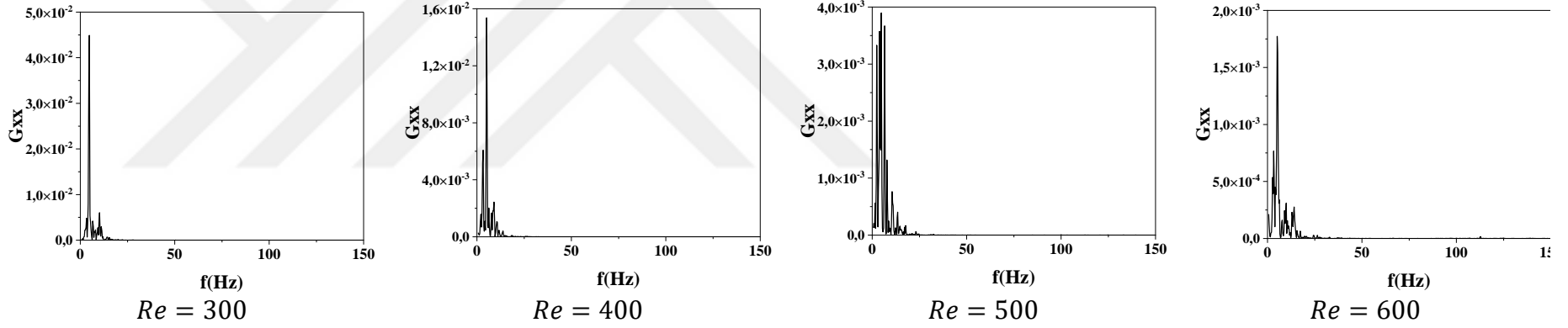
$Re = 60$



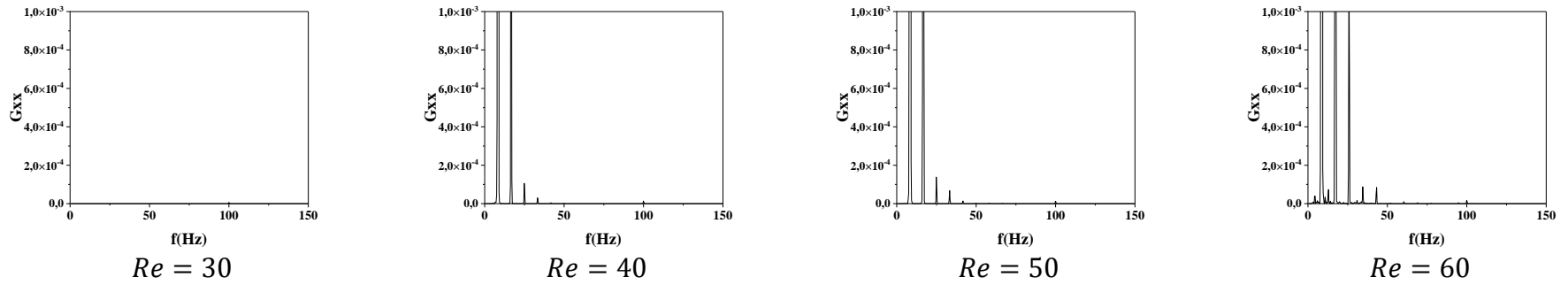
$Re = 100$

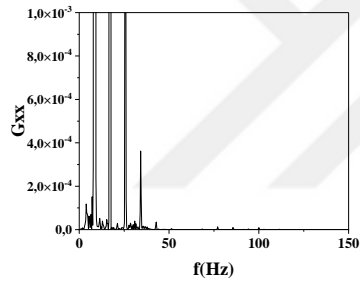


$Re = 200$

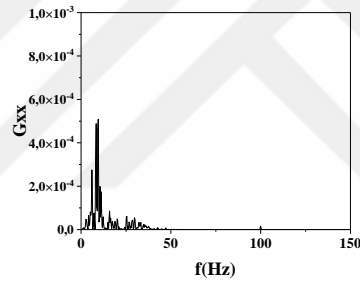


Şekil A.29 : SiO<sub>2</sub>-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).

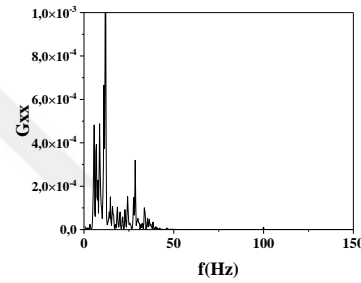




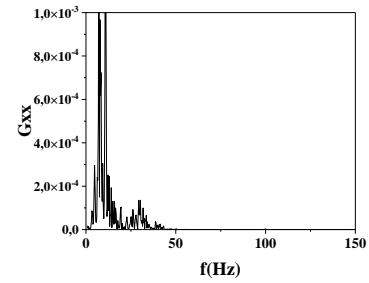
*Re = 70*



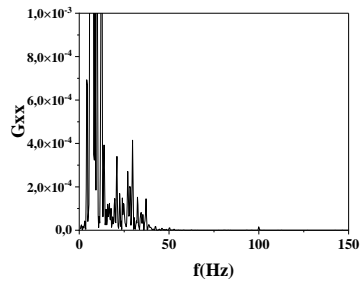
*Re = 80*



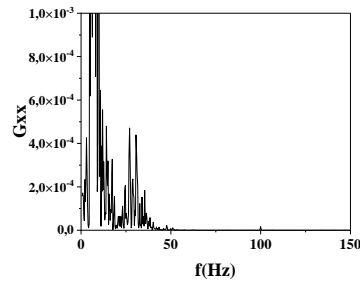
*Re = 90*



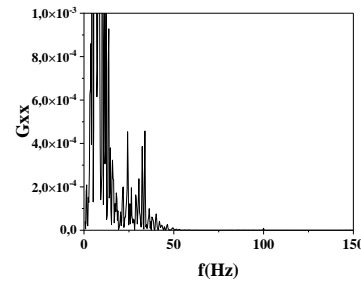
*Re = 100*



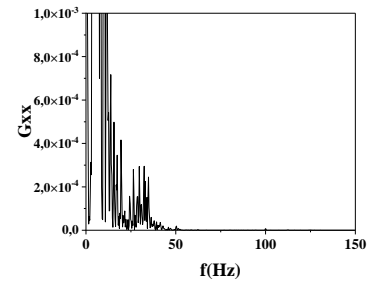
*Re = 120*



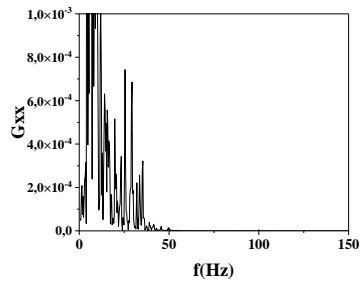
*Re = 140*



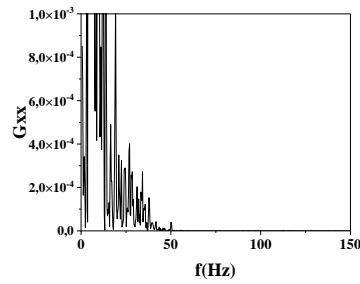
*Re = 160*



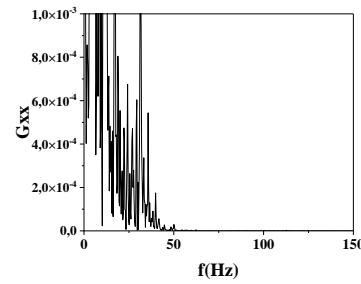
*Re = 180*



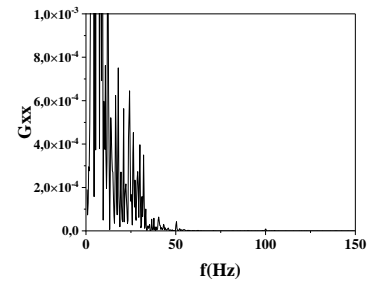
*Re = 200*



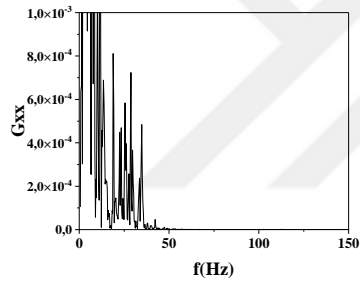
*Re = 200*



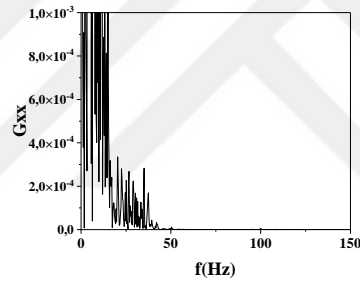
*Re = 220*



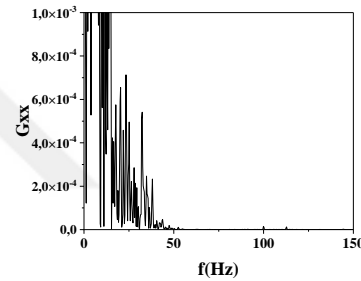
*Re = 240*



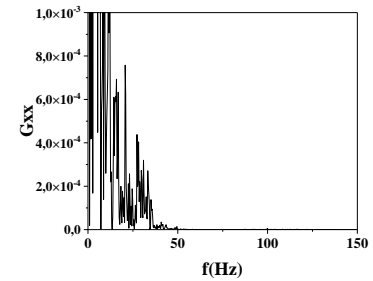
*Re = 260*



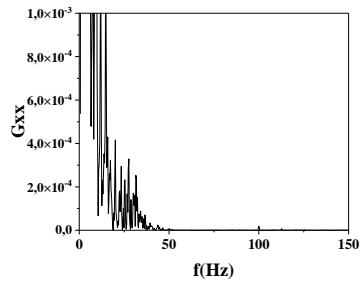
*Re = 280*



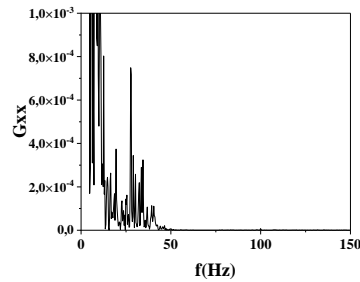
*Re = 300*



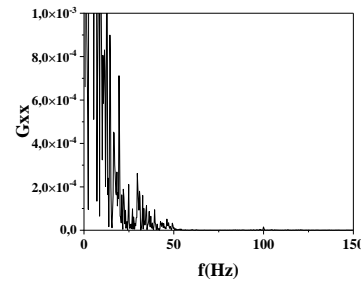
*Re = 320*



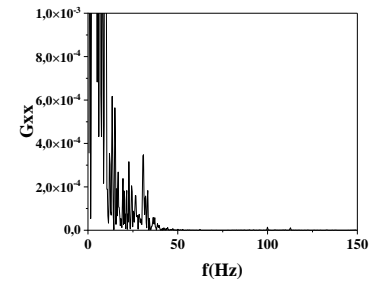
*Re = 340*



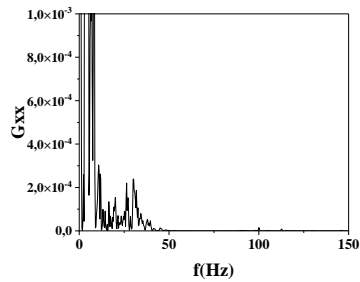
*Re = 360*



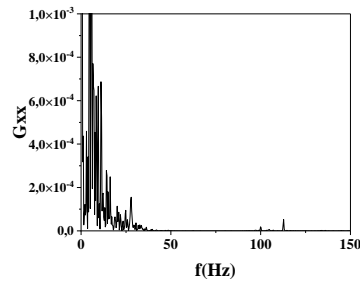
*Re = 380*



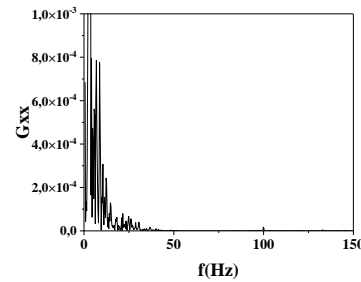
*Re = 400*



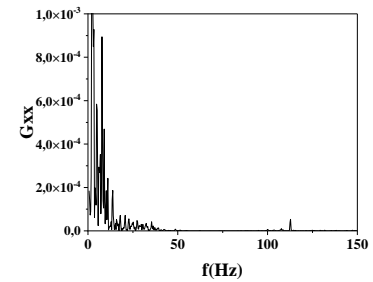
*Re = 425*



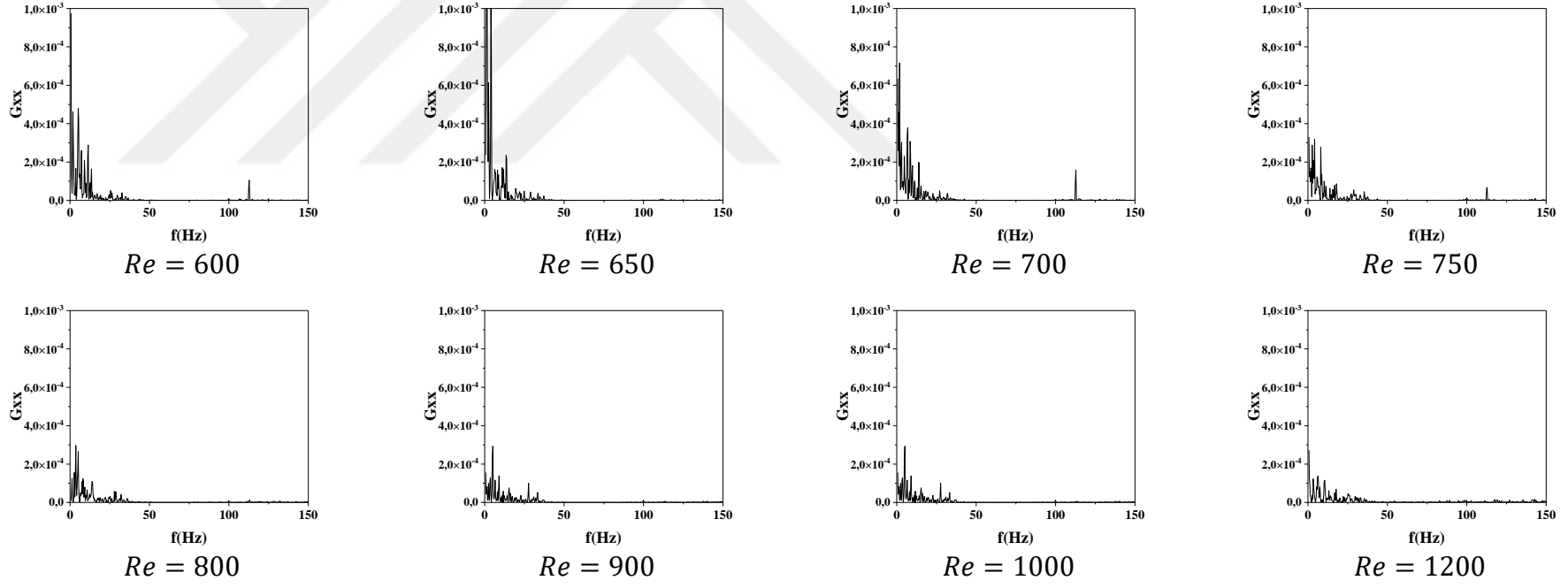
*Re = 450*



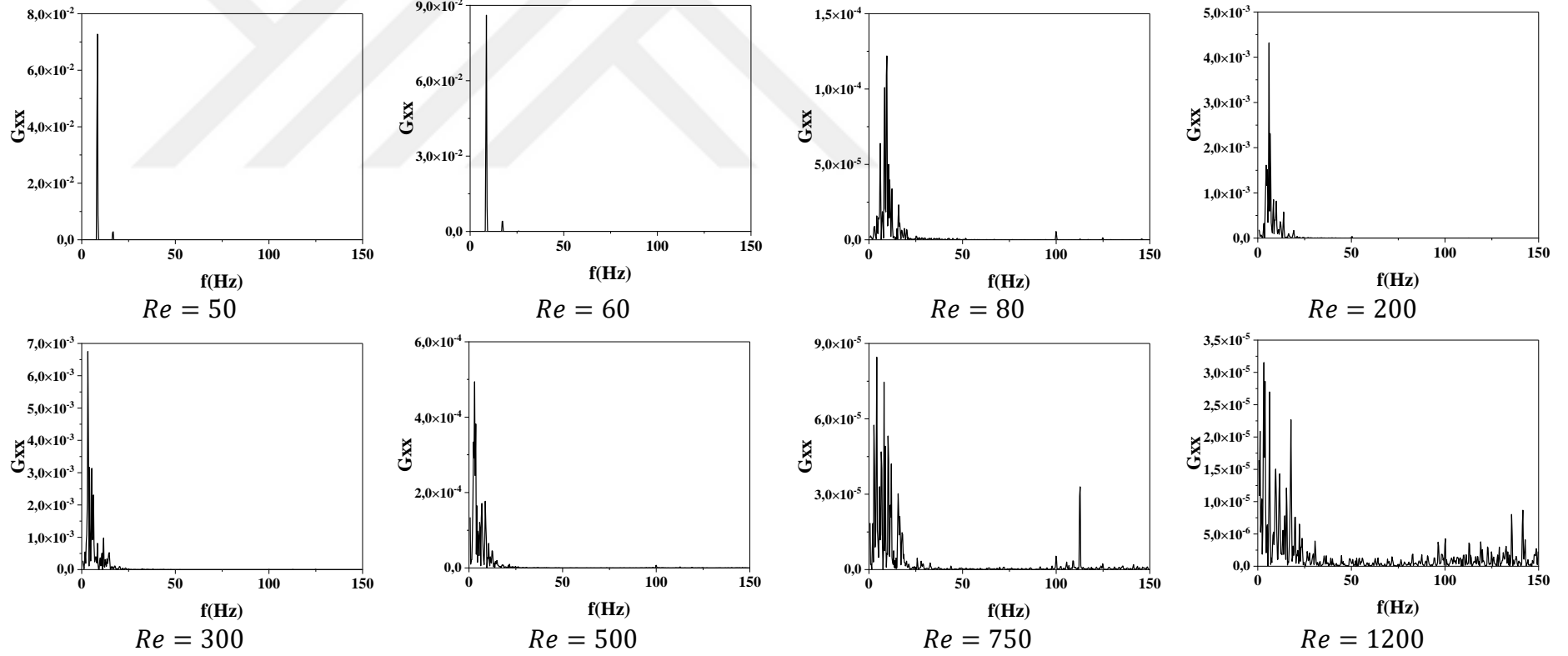
*Re = 500*



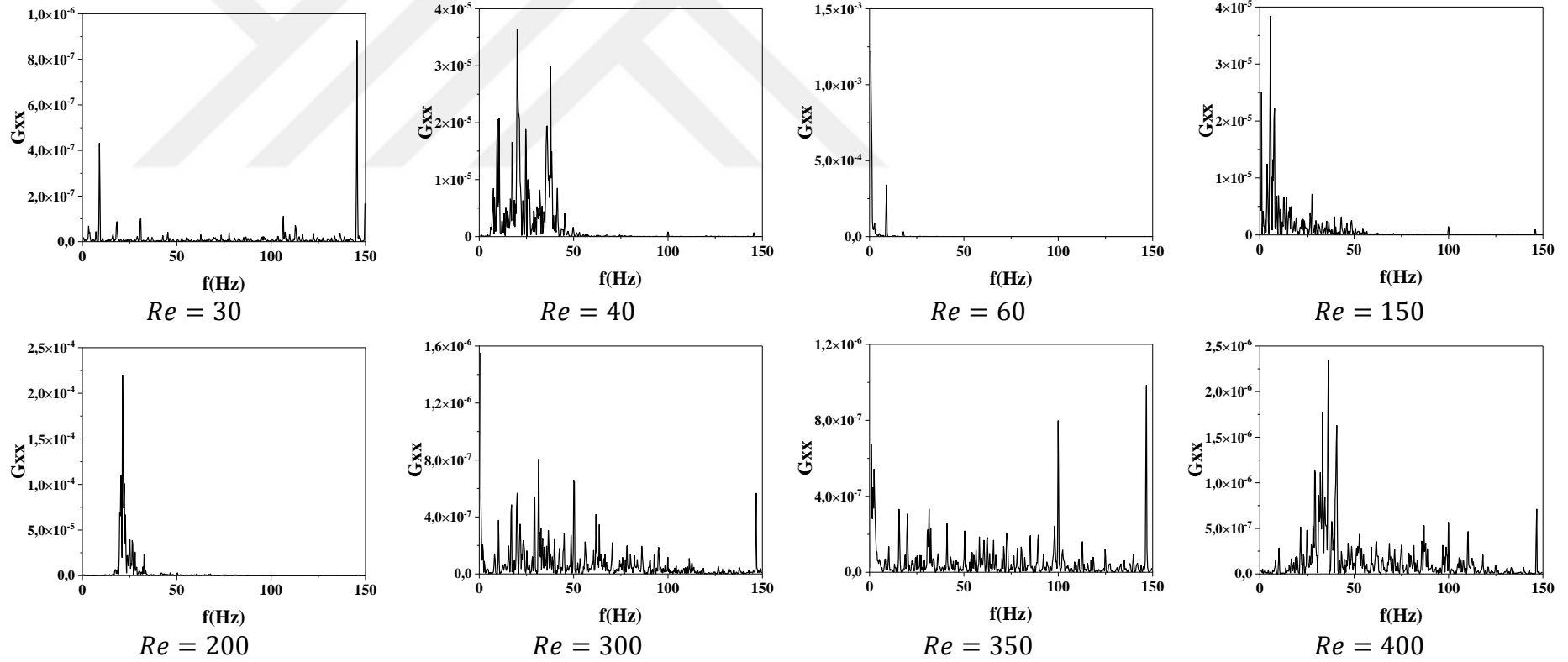
*Re = 550*



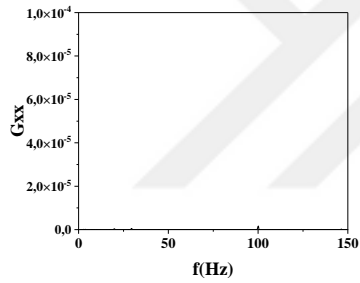
Şekil A.30 : SiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



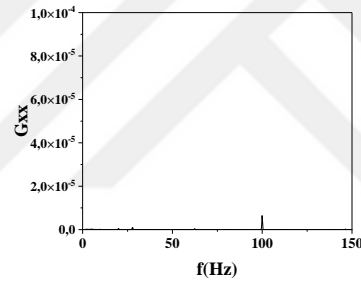
Şekil A.31 : SiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



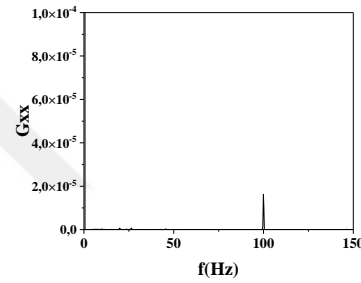
Şekil A.32 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



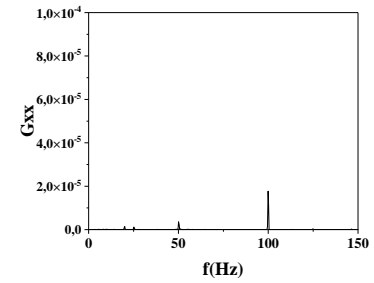
*Re = 40*



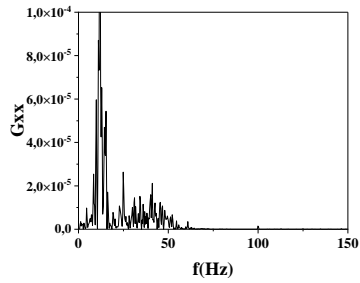
*Re = 50*



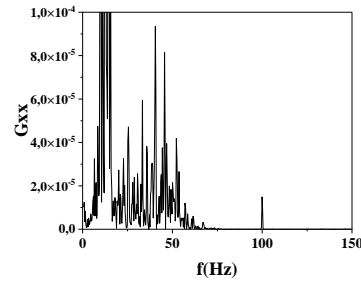
*Re = 60*



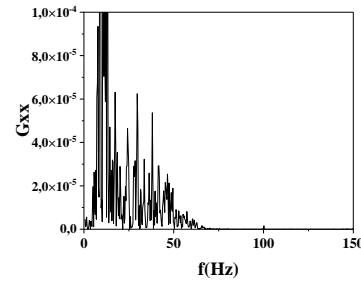
*Re = 70*



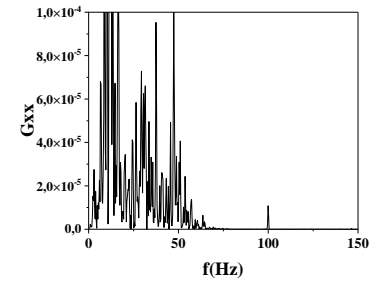
*Re = 80*



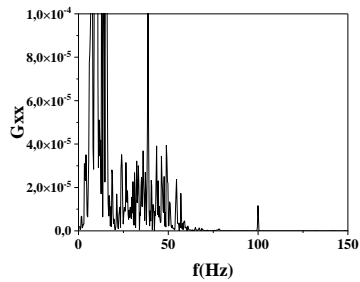
*Re = 90*



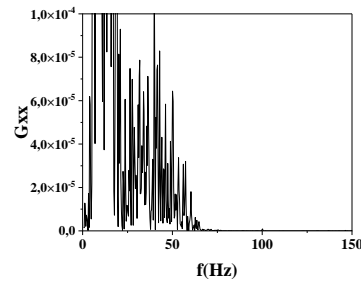
*Re = 100*



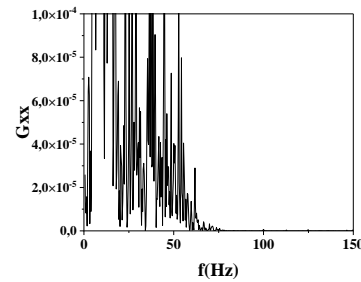
*Re = 110*



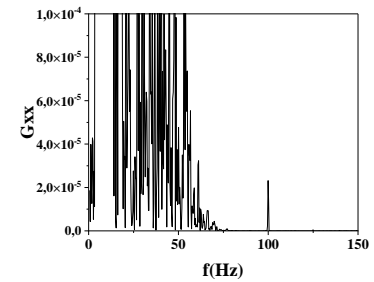
*Re = 120*



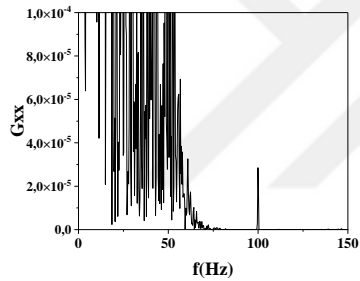
*Re = 140*



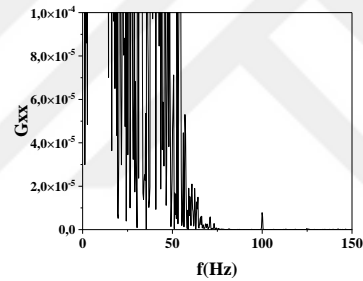
*Re = 160*



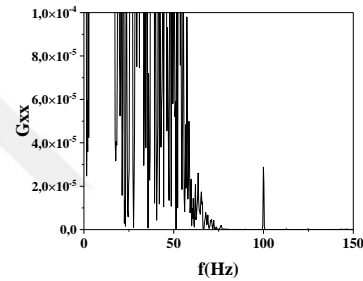
*Re = 180*



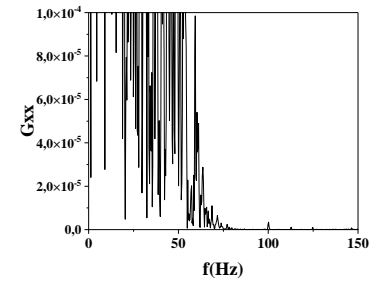
*Re = 200*



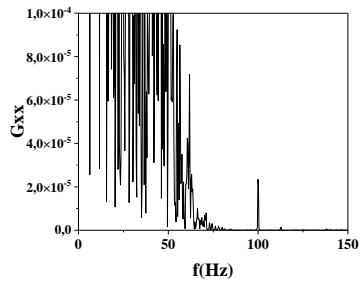
*Re = 220*



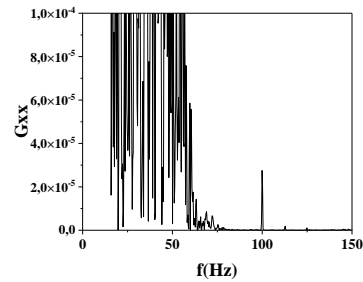
*Re = 240*



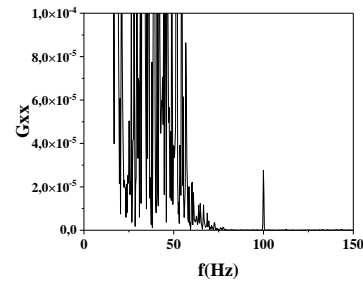
*Re = 260*



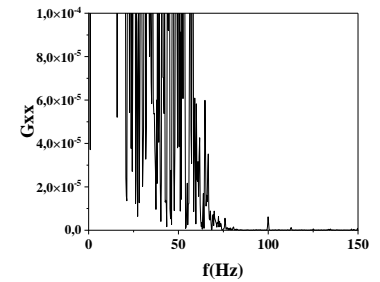
*Re = 280*



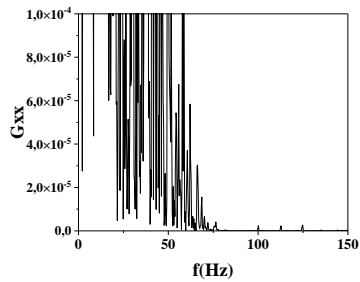
*Re = 300*



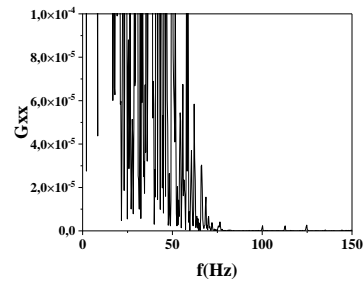
*Re = 320*



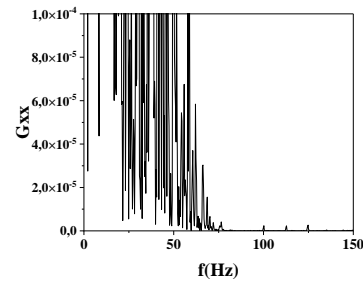
*Re = 340*



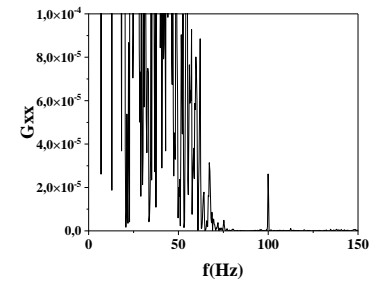
*Re = 360*



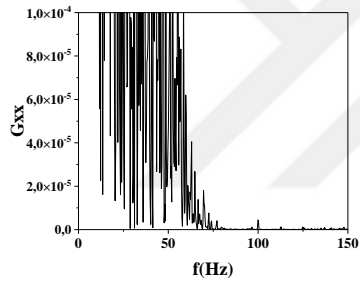
*Re = 380*



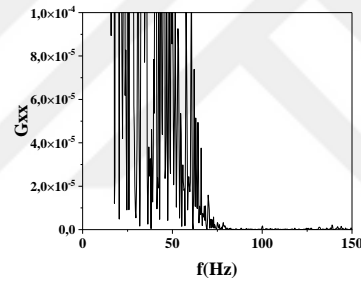
*Re = 400*



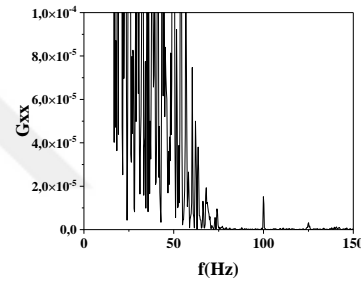
*Re = 420*



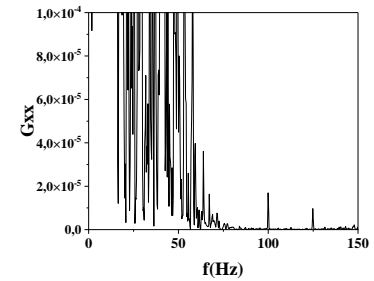
$Re = 440$



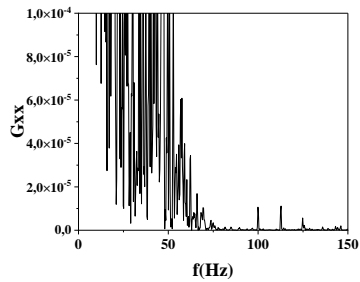
$Re = 460$



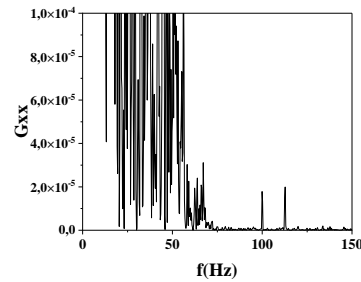
$Re = 480$



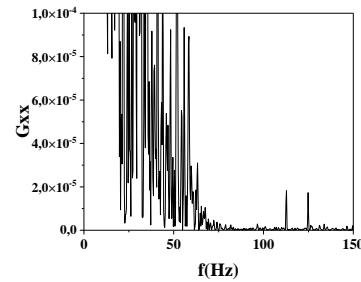
$Re = 500$



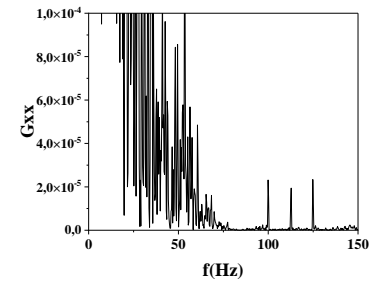
$Re = 550$



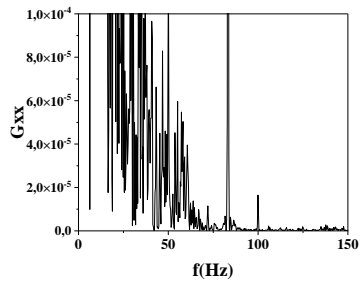
$Re = 600$



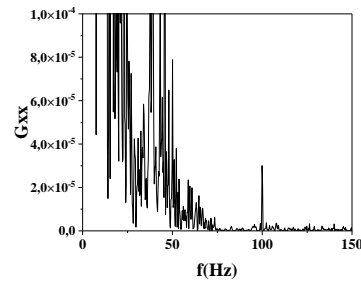
$Re = 650$



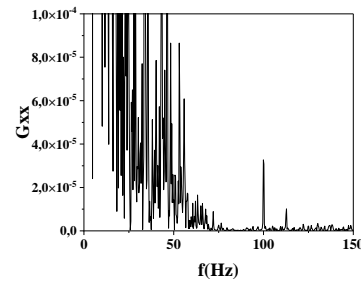
$Re = 700$



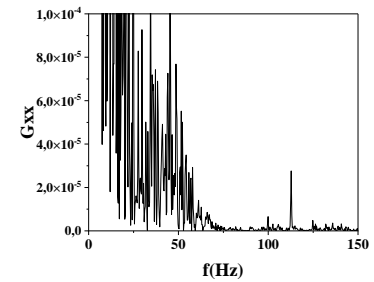
$Re = 750$



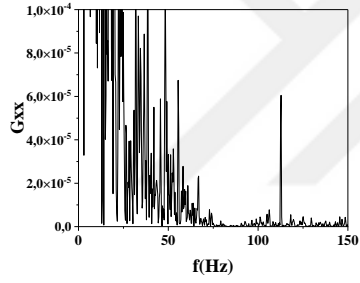
$Re = 800$



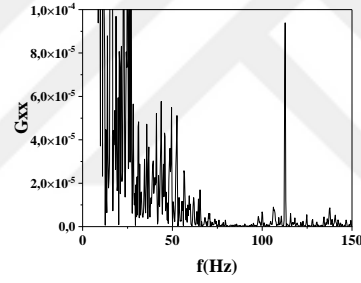
$Re = 850$



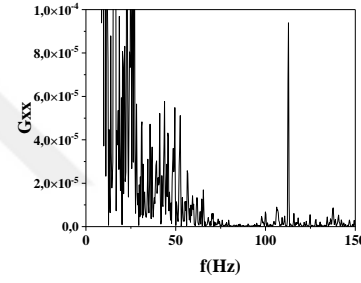
$Re = 900$



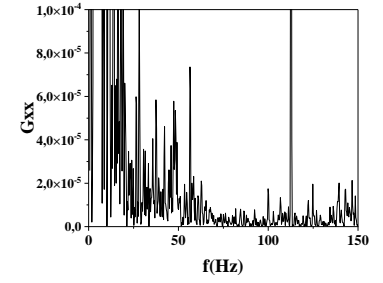
$Re = 950$



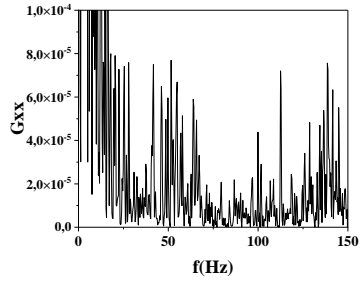
$Re = 1000$



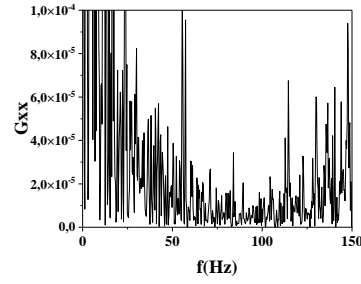
$Re = 1100$



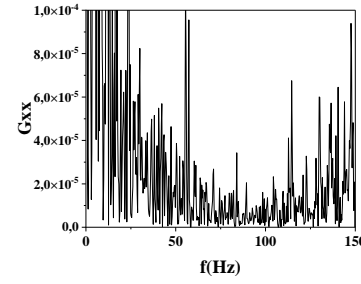
$Re = 1200$



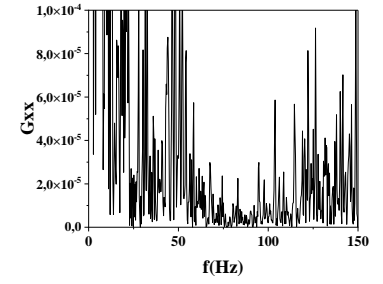
$Re = 1300$



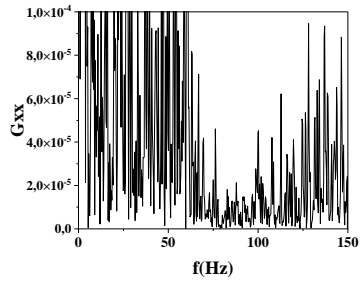
$Re = 1400$



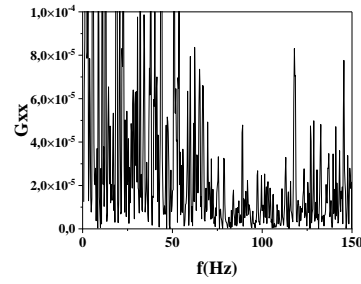
$Re = 1500$



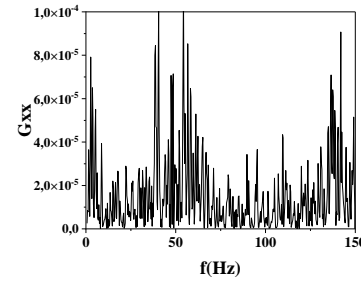
$Re = 1600$



$Re = 1800$

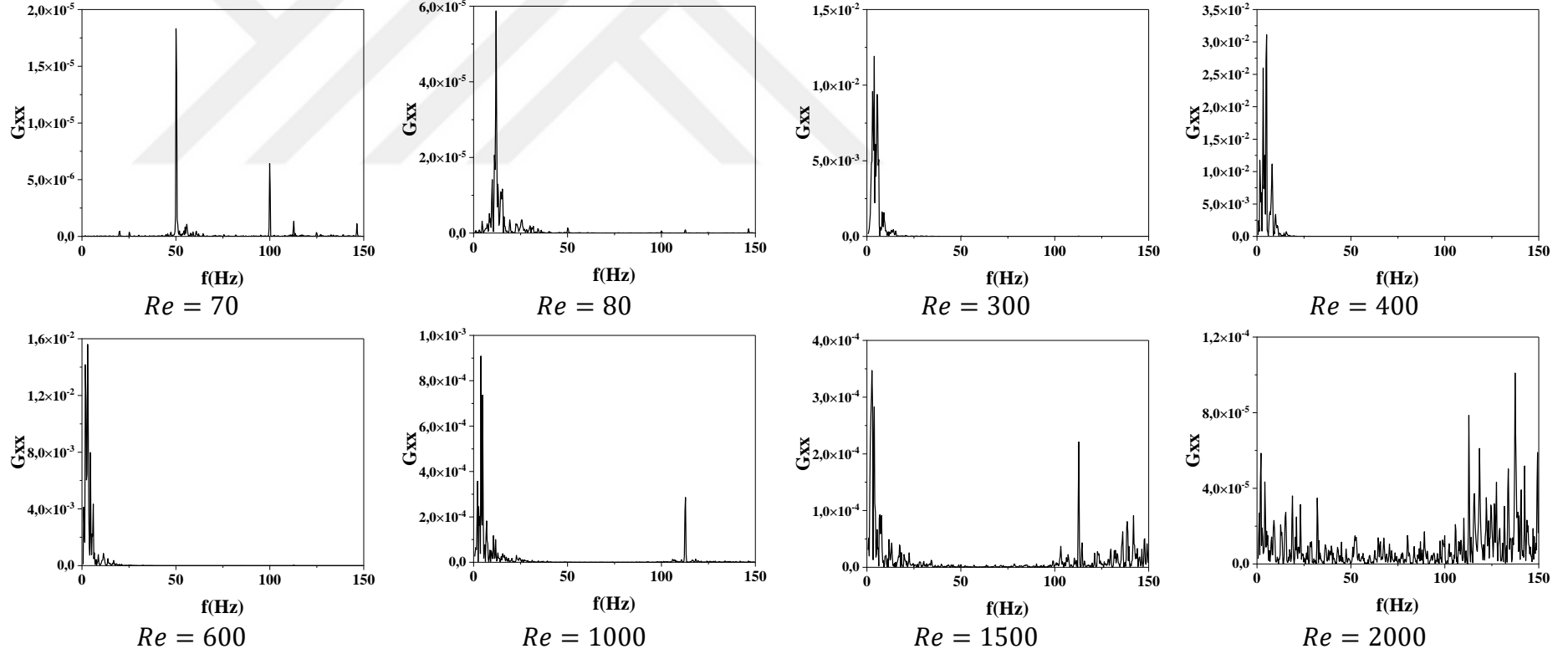


$Re = 2000$

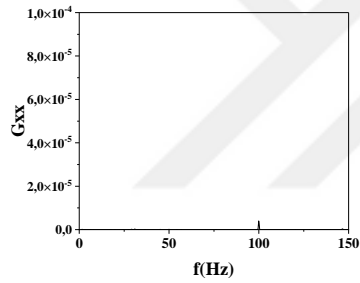


$Re = 2200$

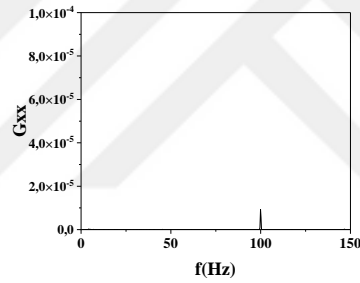
Şekil A.33 :  $Al_2O_3$ -2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



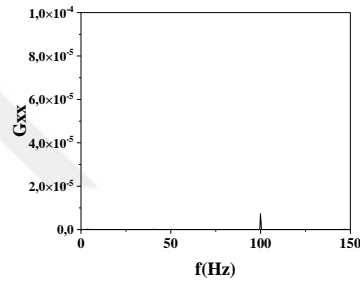
Şekil A.34 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



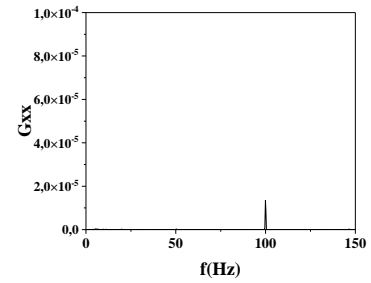
*Re = 20*



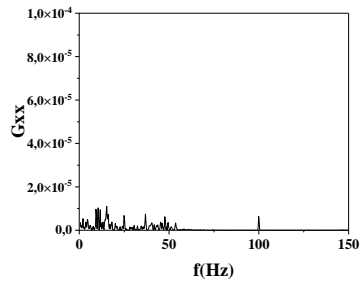
*Re = 30*



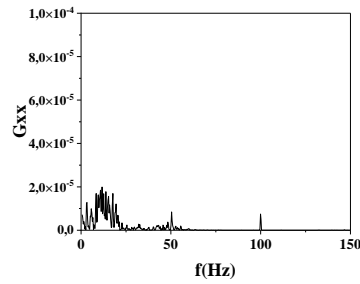
*Re = 40*



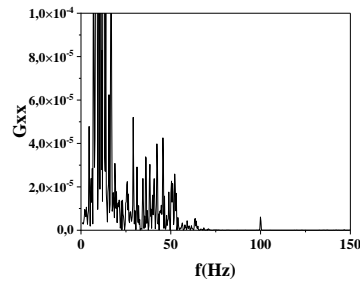
*Re = 50*



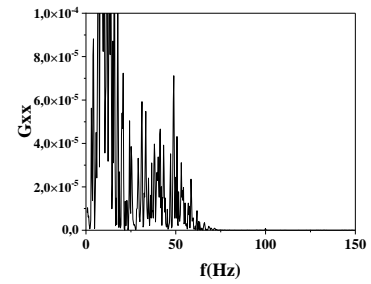
*Re = 60*



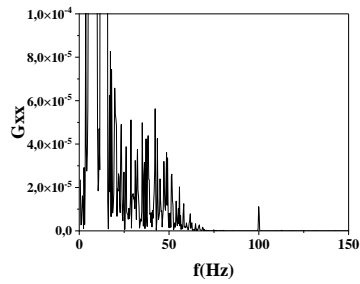
*Re = 70*



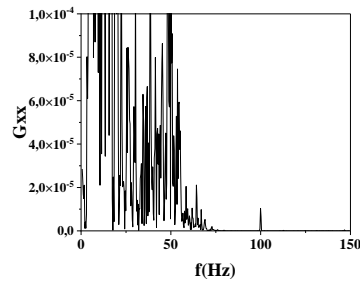
*Re = 80*



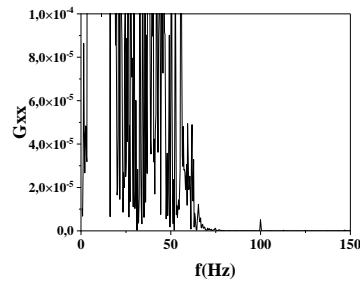
*Re = 90*



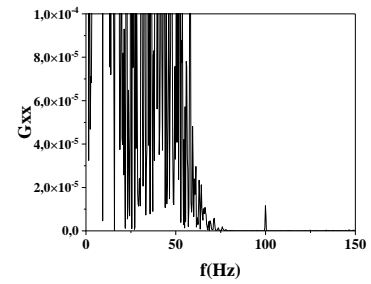
*Re = 100*



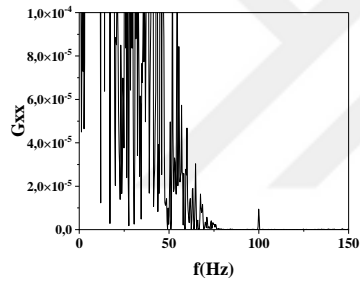
*Re = 120*



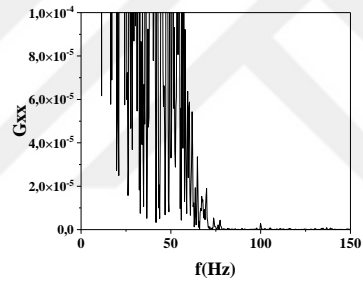
*Re = 140*



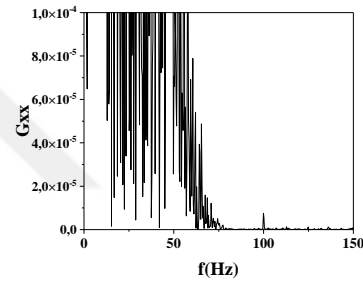
*Re = 160*



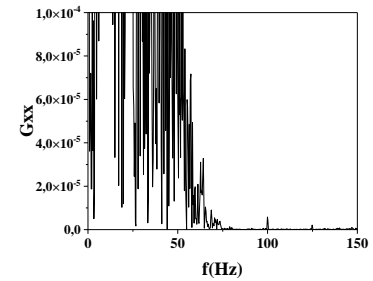
*Re = 180*



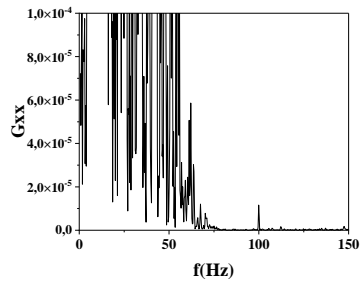
*Re = 200*



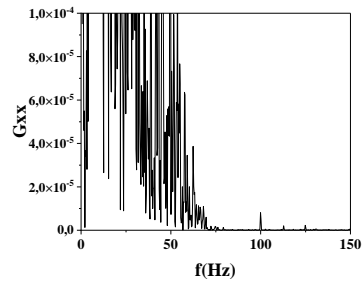
*Re = 220*



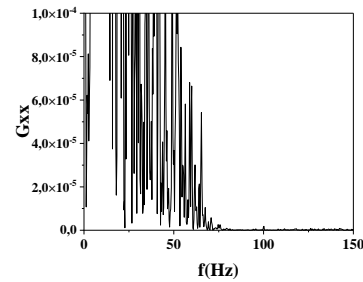
*Re = 240*



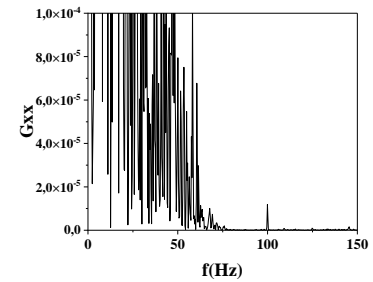
*Re = 260*



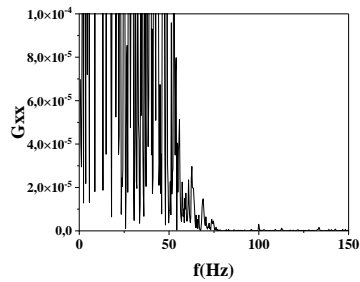
*Re = 280*



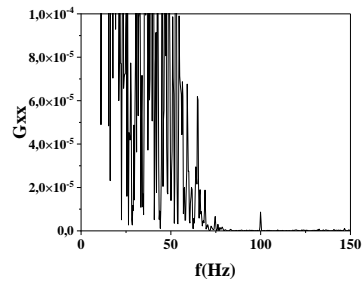
*Re = 300*



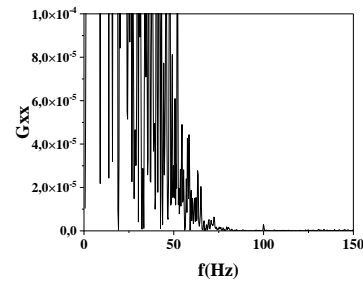
*Re = 320*



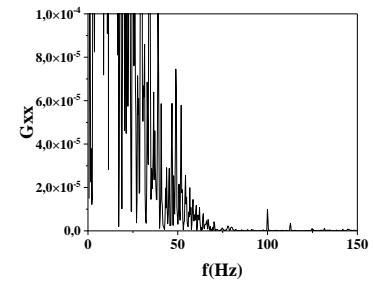
*Re = 340*



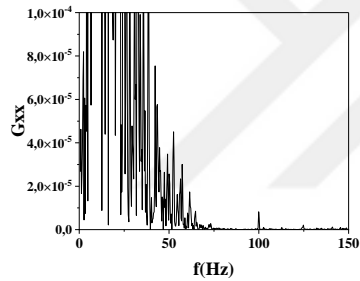
*Re = 360*



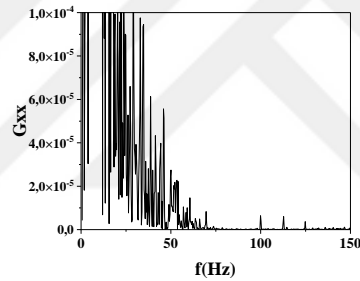
*Re = 380*



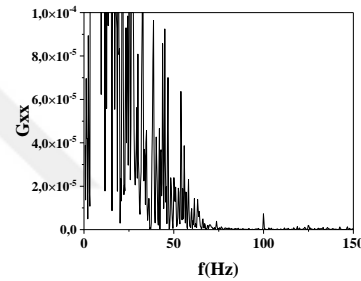
*Re = 400*



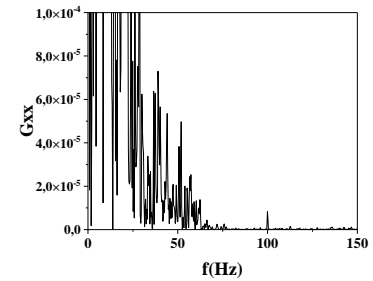
*Re = 420*



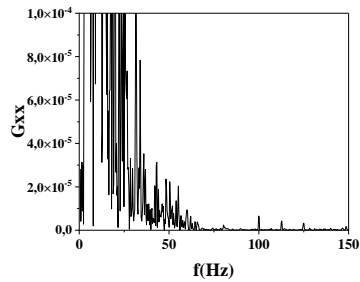
*Re = 440*



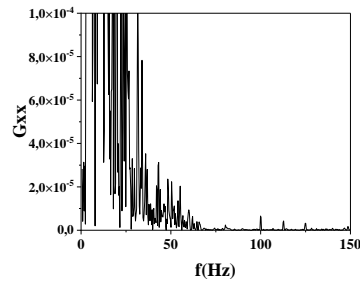
*Re = 460*



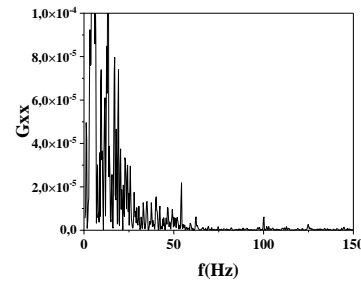
*Re = 480*



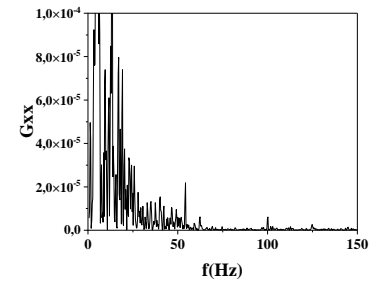
*Re = 500*



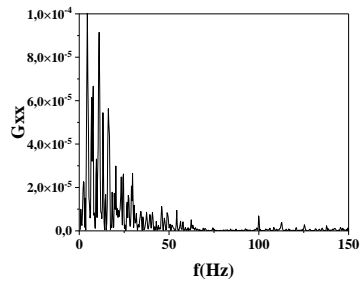
*Re = 550*



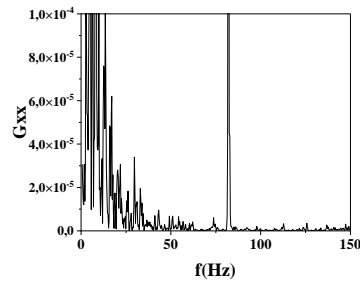
*Re = 600*



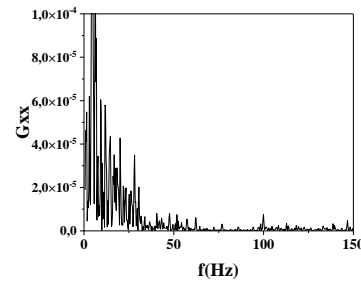
*Re = 650*



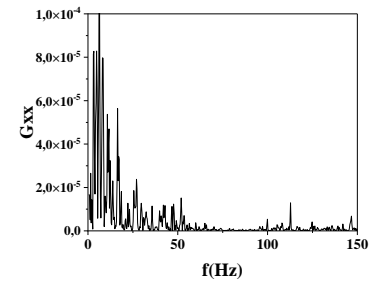
*Re = 700*



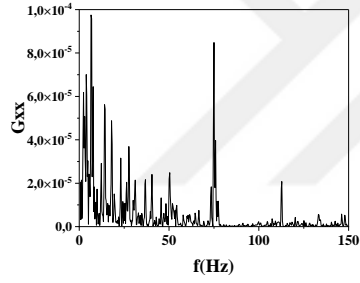
*Re = 750*



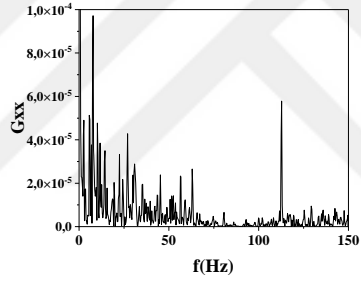
*Re = 800*



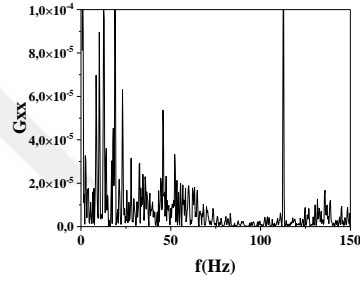
*Re = 850*



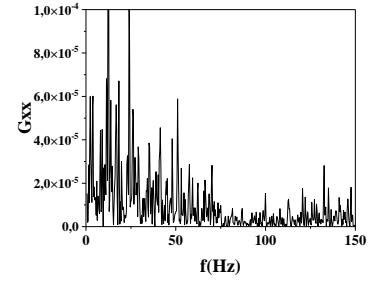
$Re = 900$



$Re = 1000$

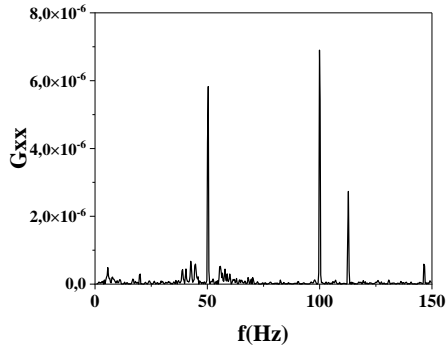


$Re = 1100$

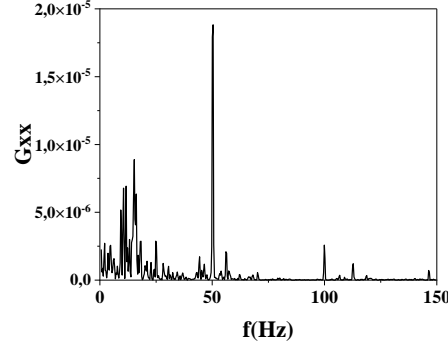


$Re = 1200$

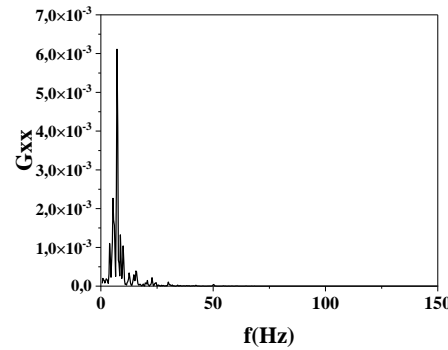
Şekil A.35 :  $Al_2O_3$ -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



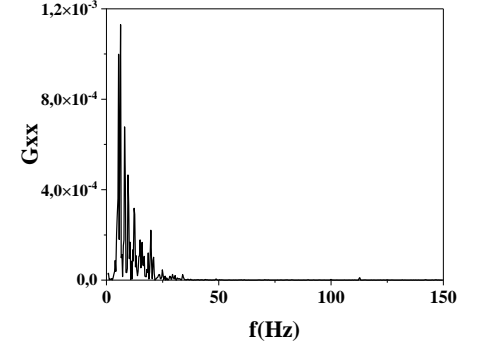
$Re = 50$



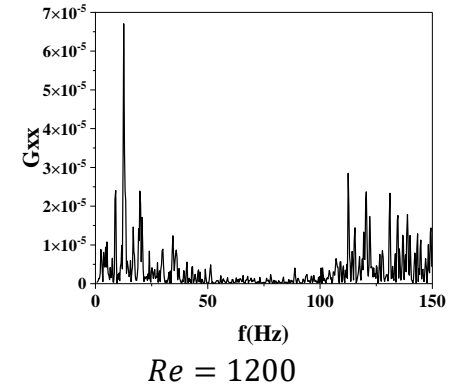
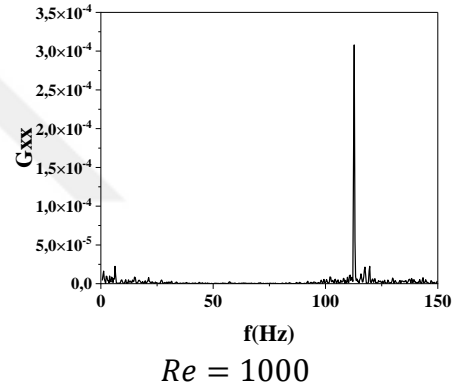
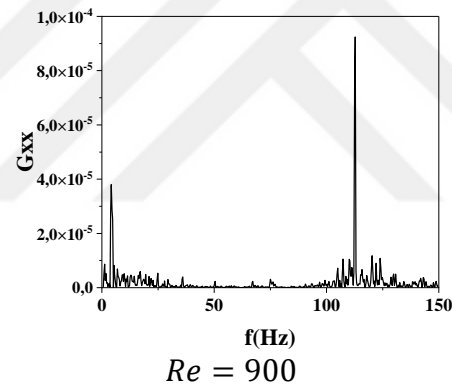
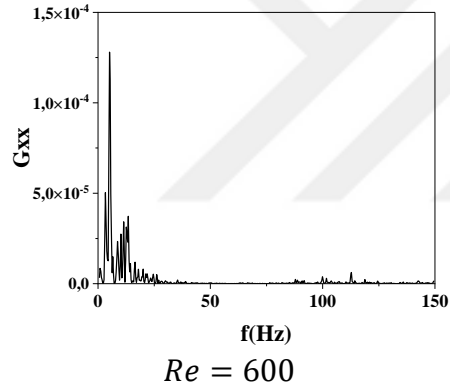
$Re = 60$



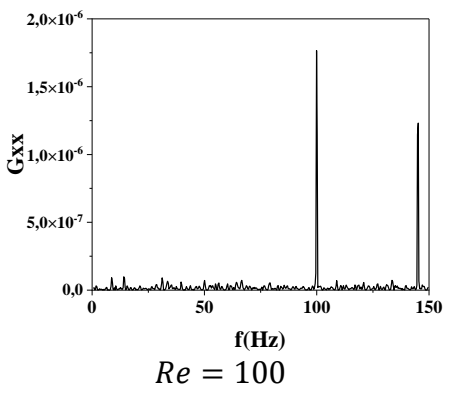
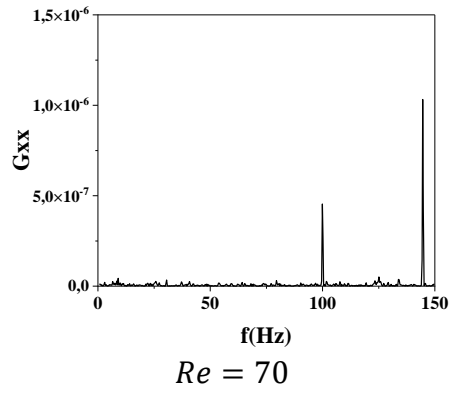
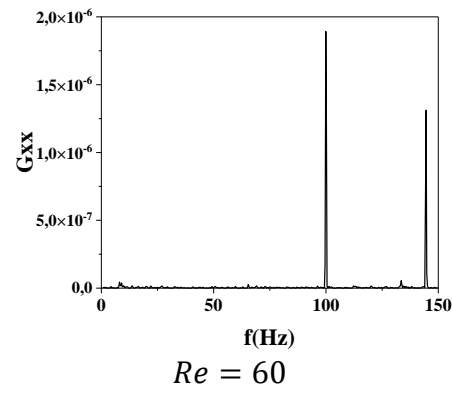
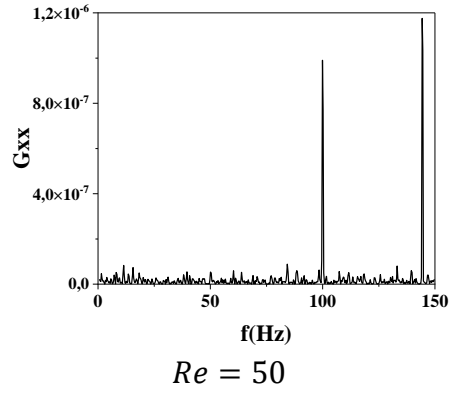
$Re = 200$

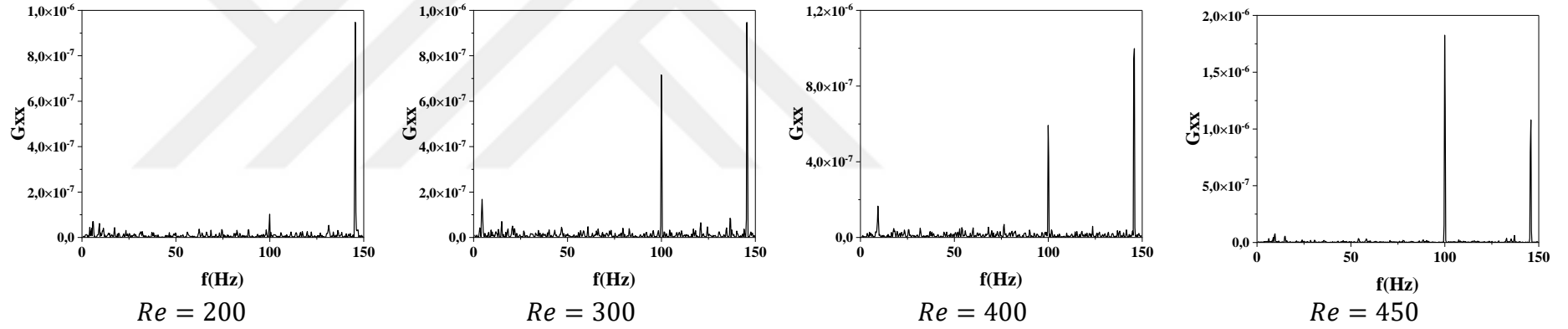


$Re = 400$

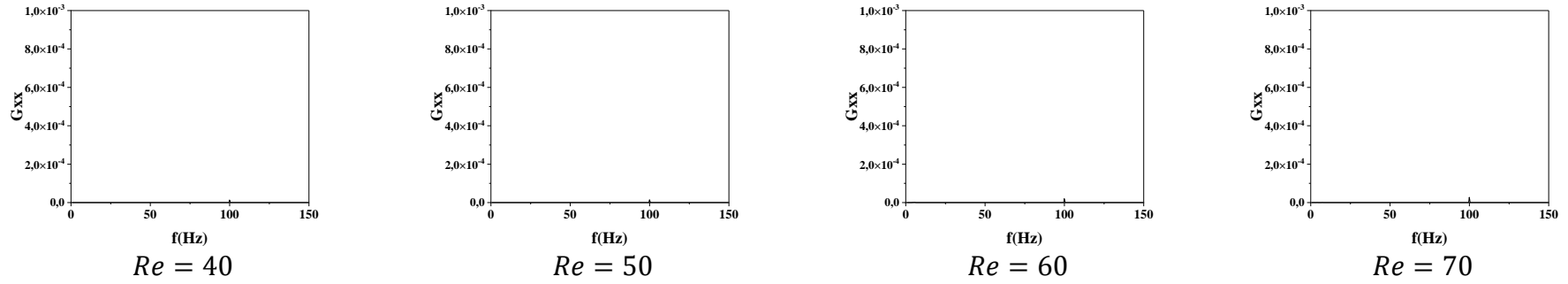


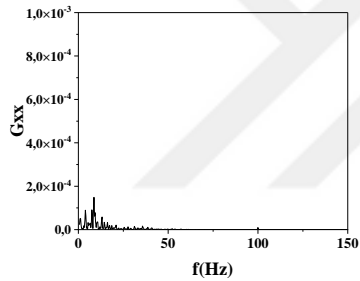
Şekil A.36 :  $Al_2O_3$ -3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



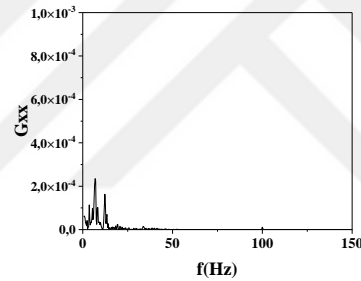


Şekil A.37 :  $\text{TiO}_2$ -1 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).

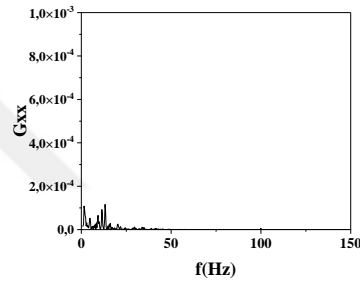




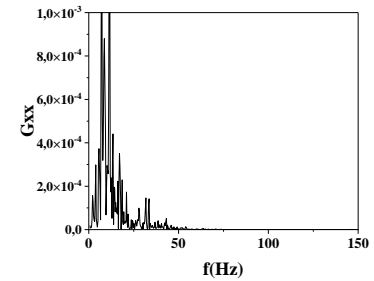
*Re = 80*



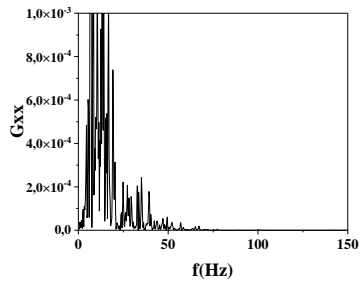
*Re = 90*



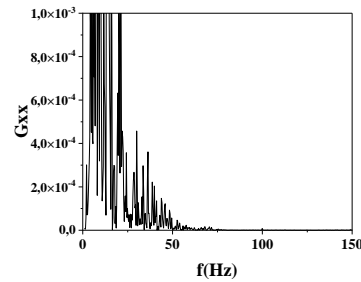
*Re = 100*



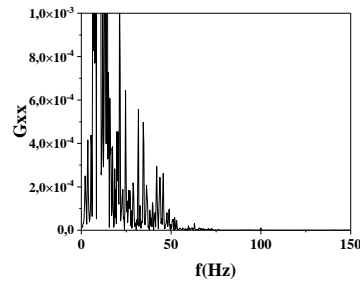
*Re = 120*



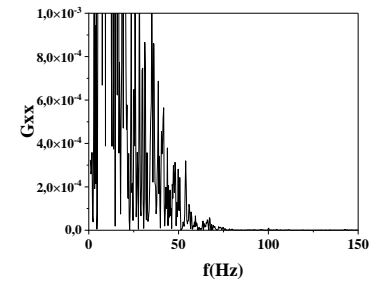
*Re = 140*



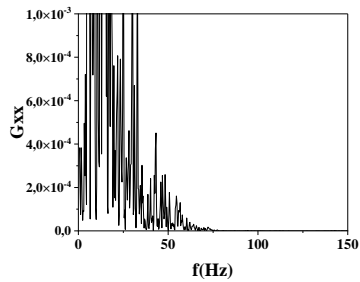
*Re = 160*



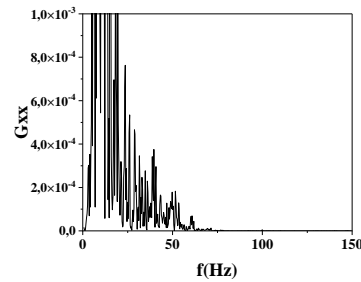
*Re = 180*



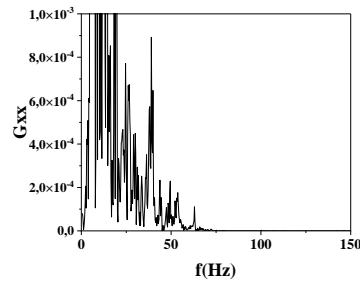
*Re = 200*



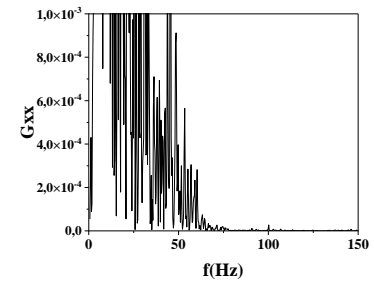
*Re = 220*



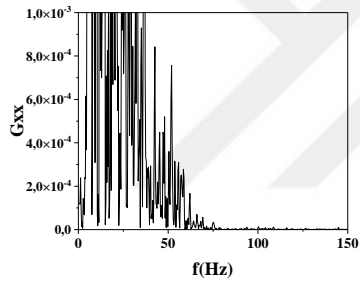
*Re = 240*



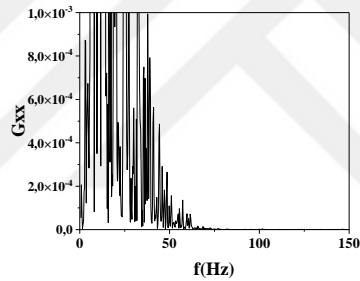
*Re = 260*



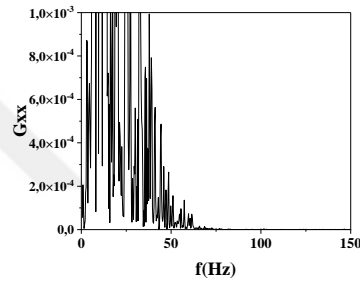
*Re = 280*



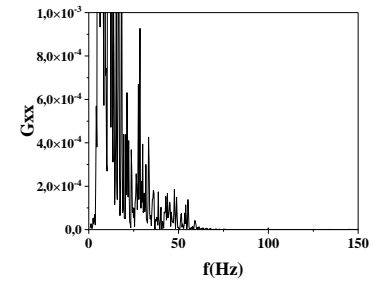
*Re = 300*



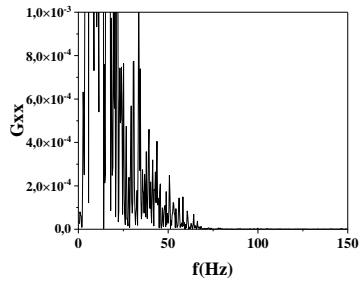
*Re = 320*



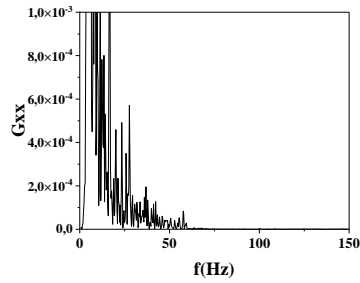
*Re = 340*



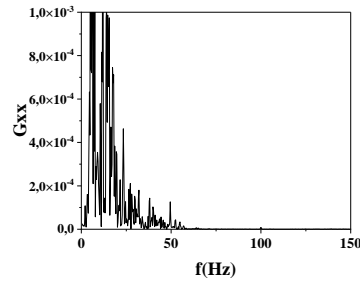
*Re = 360*



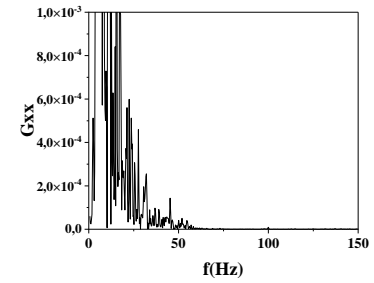
*Re = 380*



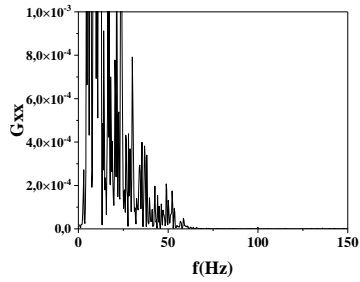
*Re = 400*



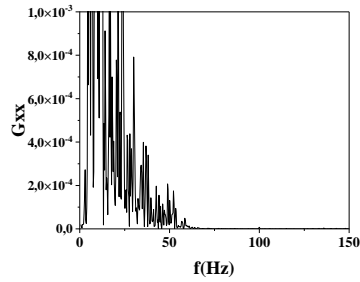
*Re = 450*



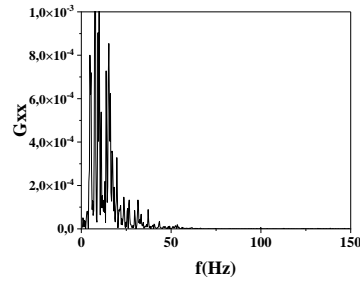
*Re = 500*



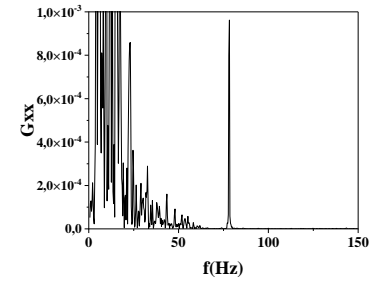
*Re = 550*



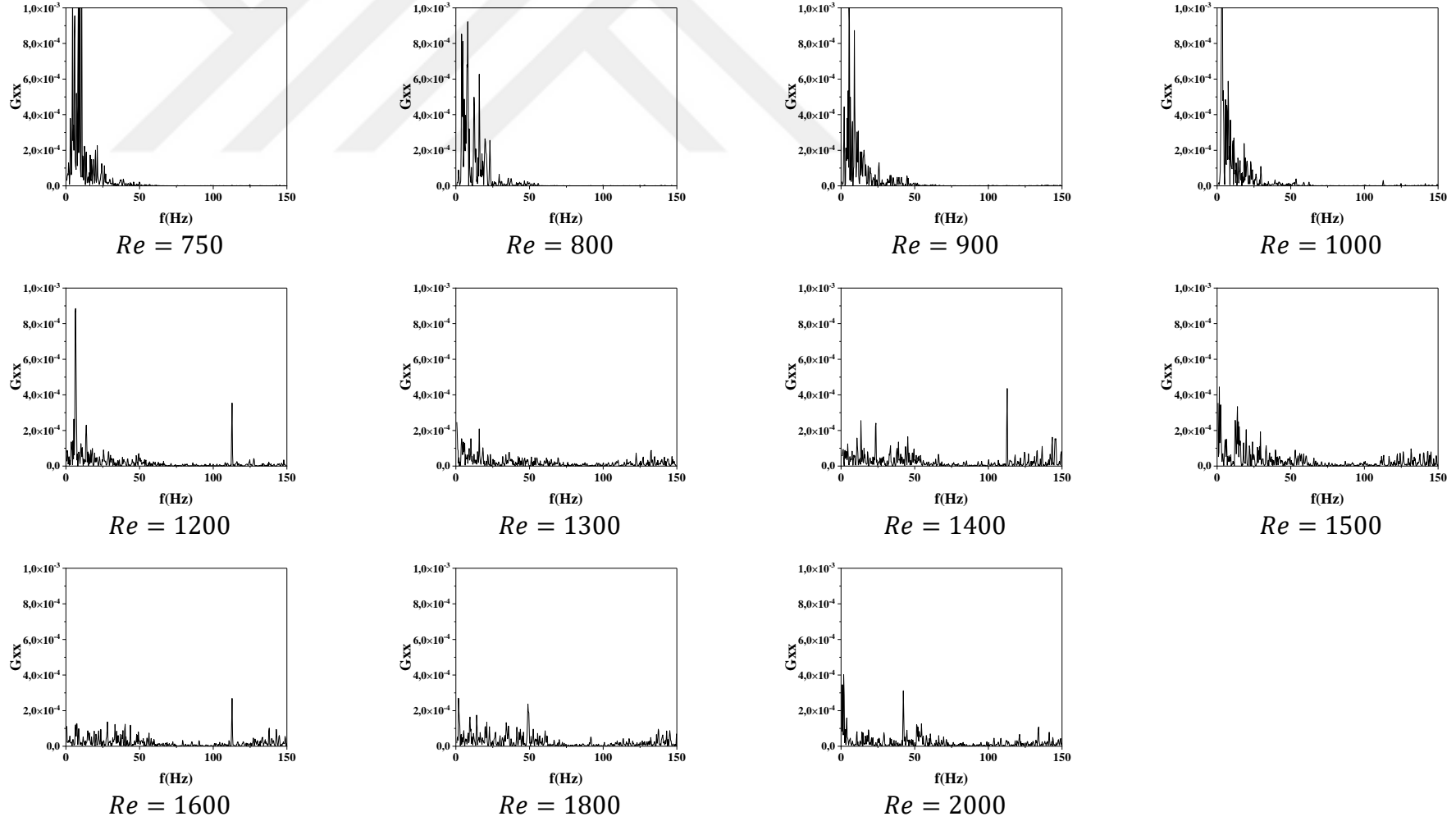
*Re = 600*



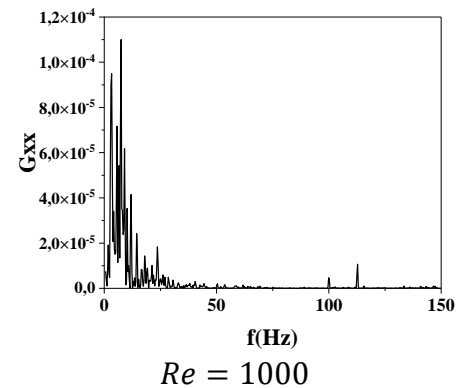
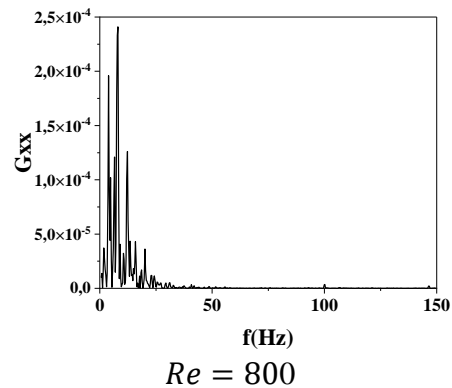
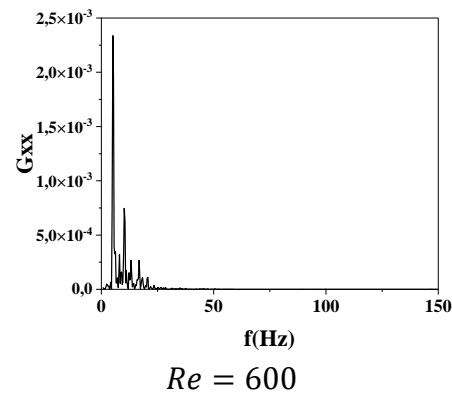
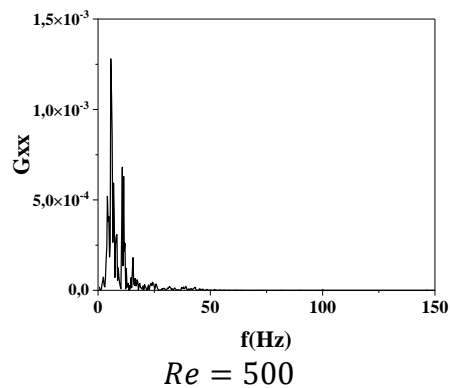
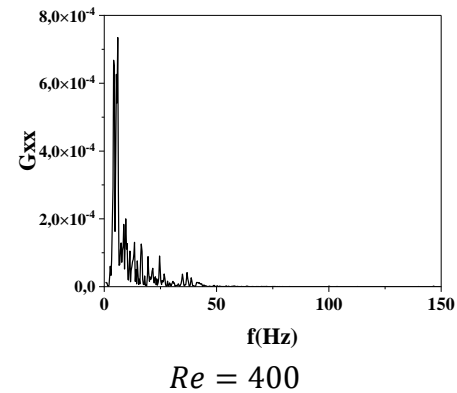
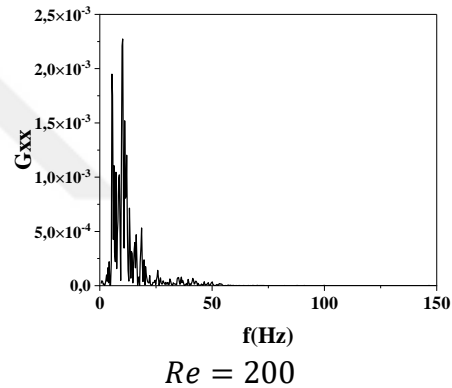
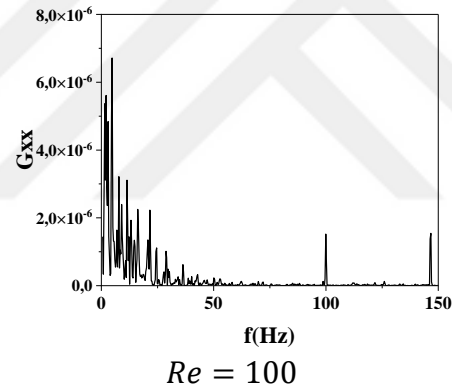
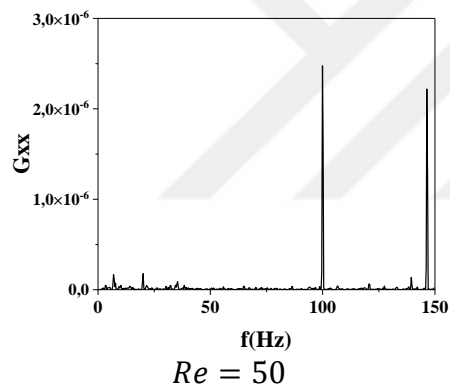
*Re = 650*

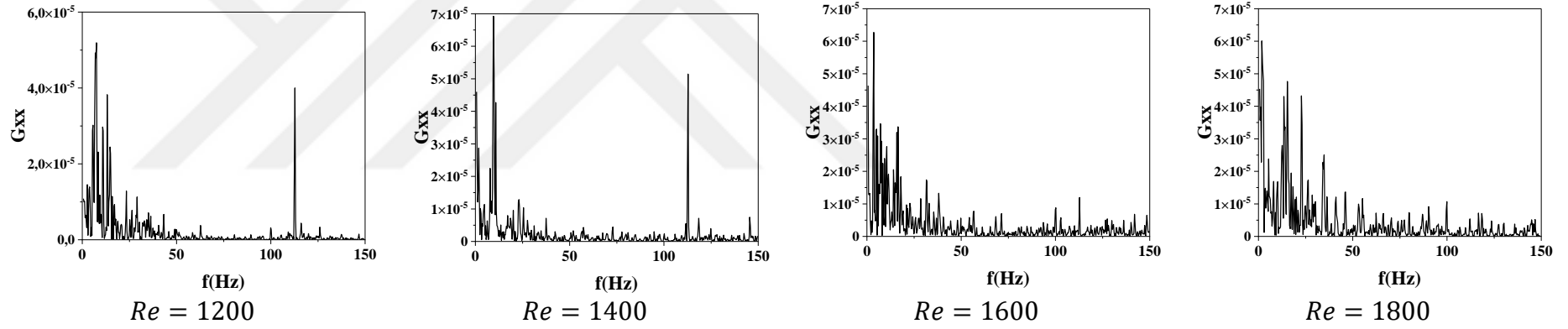


*Re = 700*

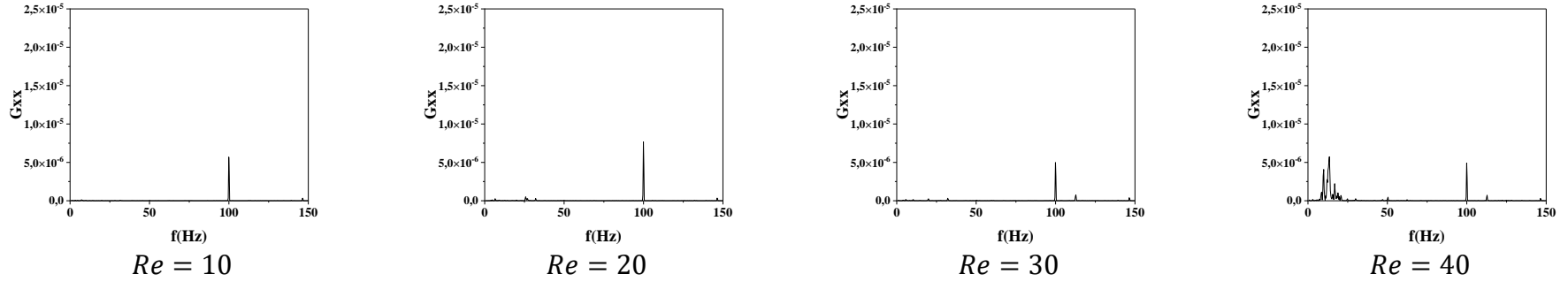


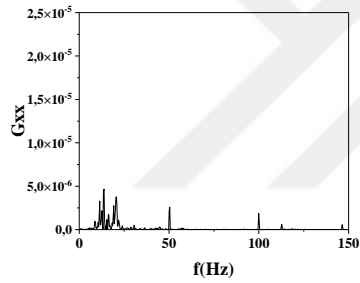
Şekil A.38 : TiO<sub>2</sub>-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



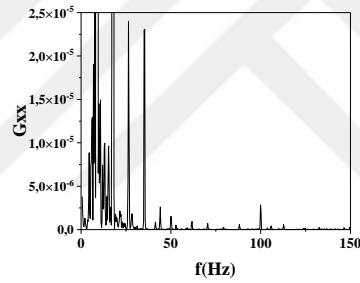


Şekil A.39 : TiO<sub>2</sub>-2 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).

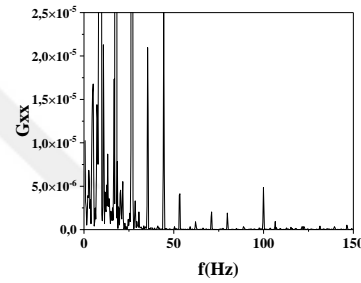




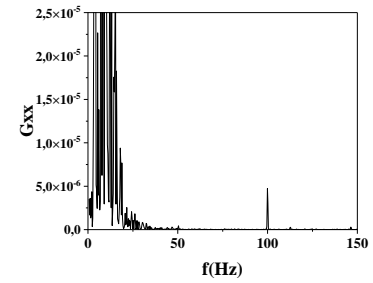
*Re = 50*



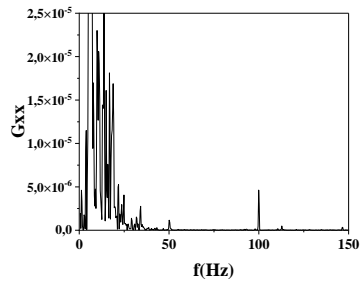
*Re = 60*



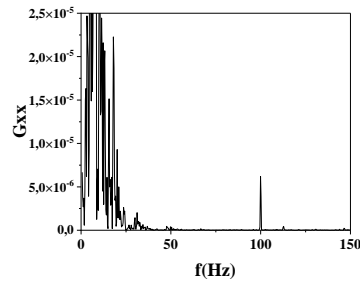
*Re = 70*



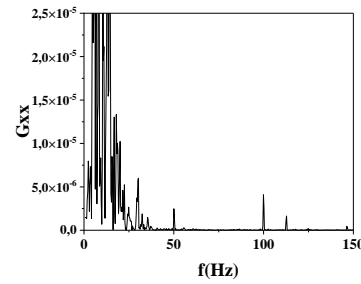
*Re = 80*



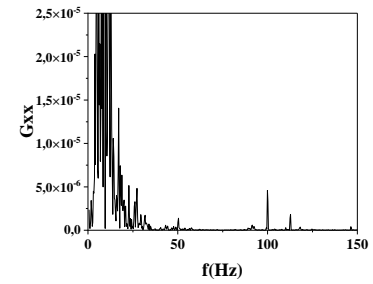
*Re = 90*



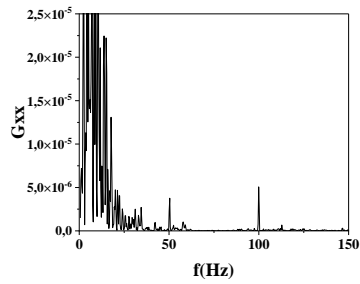
*Re = 100*



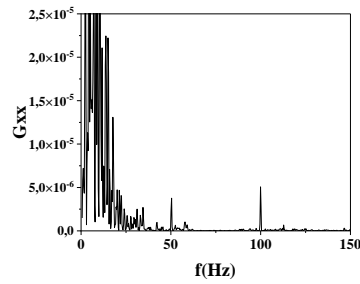
*Re = 120*



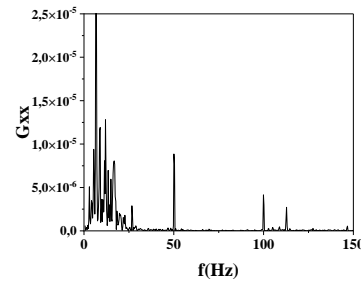
*Re = 140*



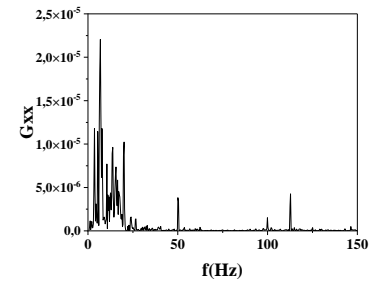
*Re = 160*



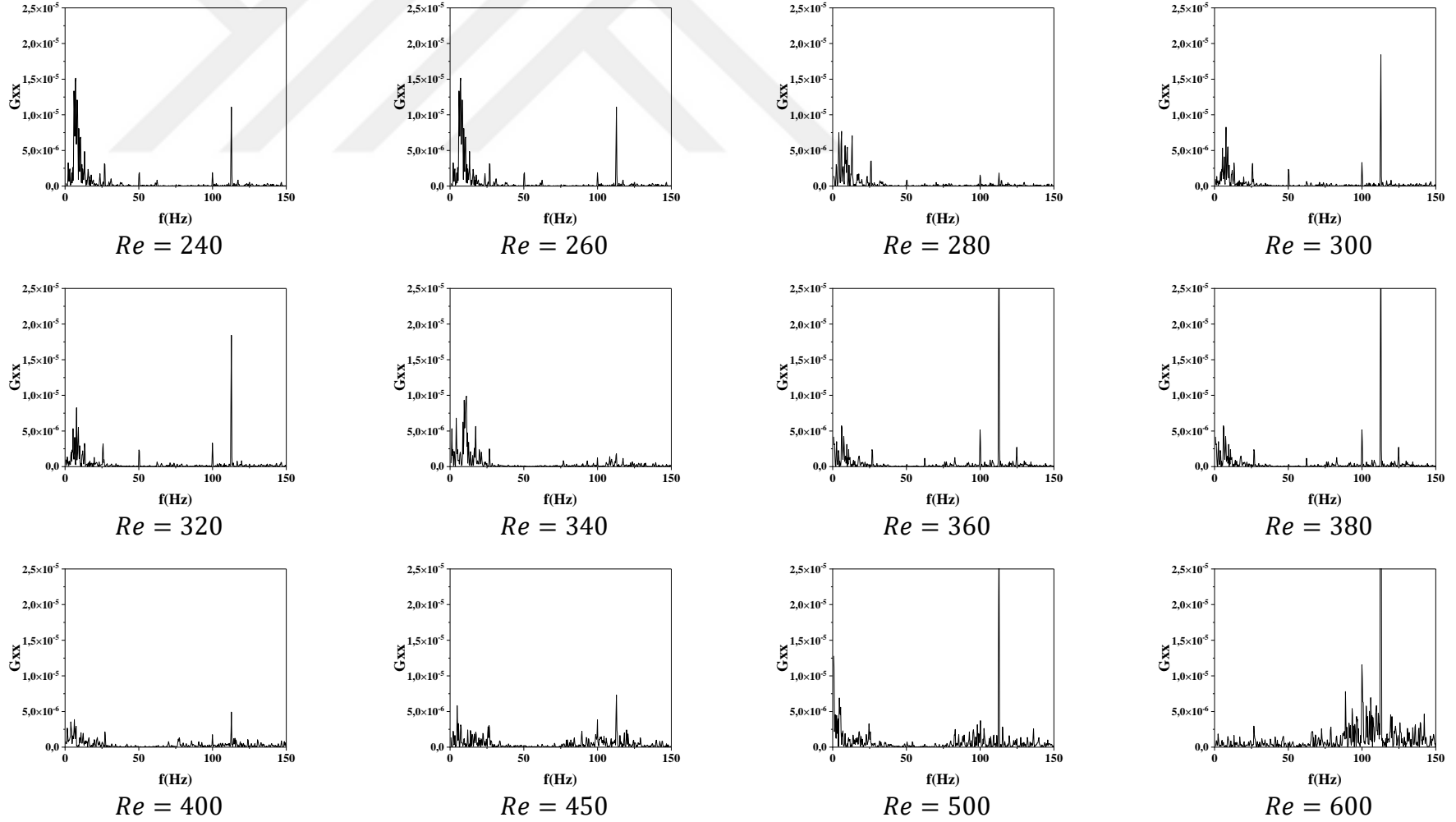
*Re = 180*



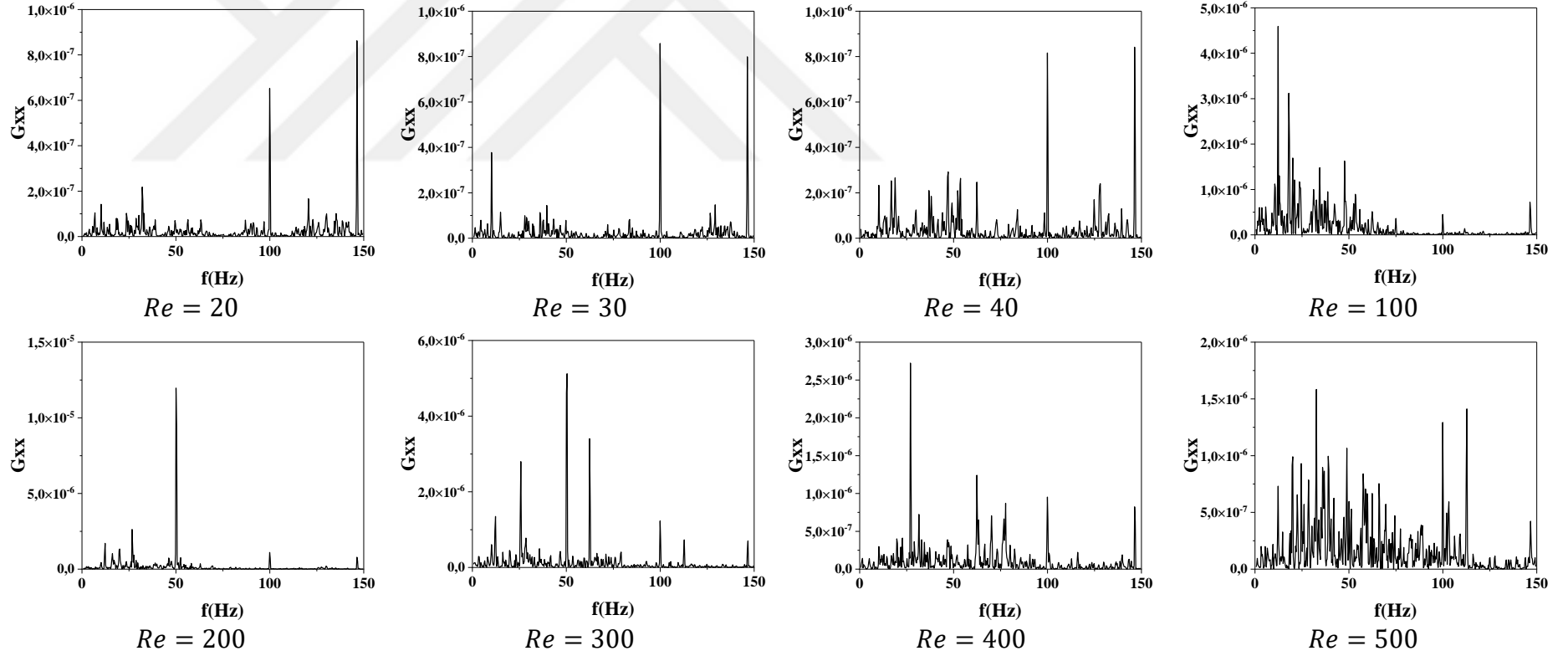
*Re = 200*



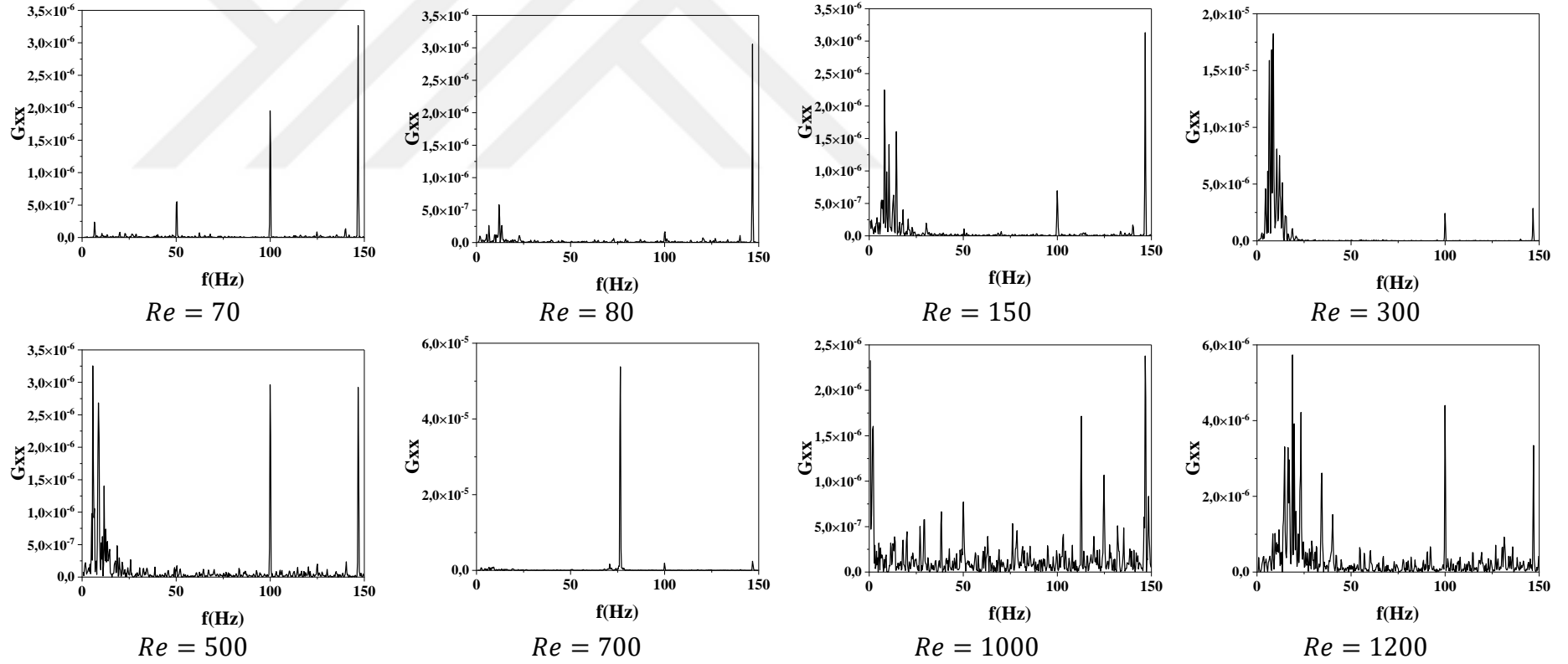
*Re = 210*



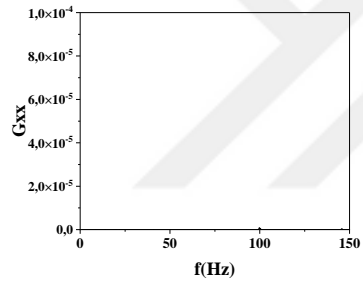
Şekil A.40 : TiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



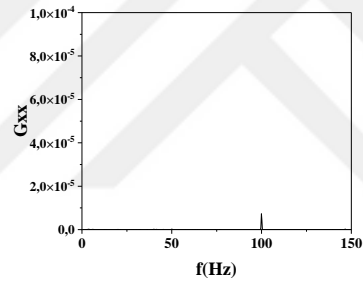
Şekil A.41 : TiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



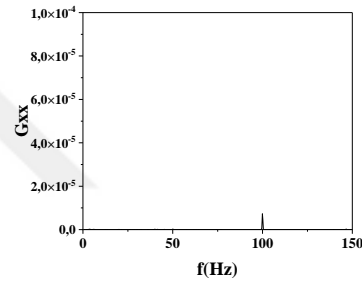
Şekil A.42 : R2-TiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).



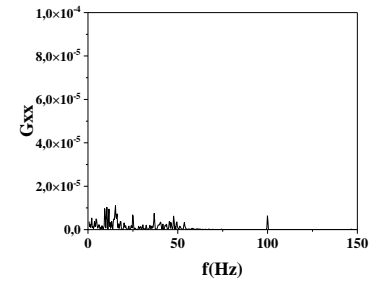
*Re = 30*



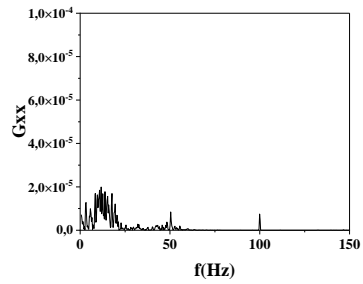
*Re = 40*



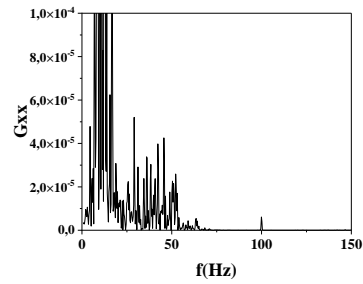
*Re = 50*



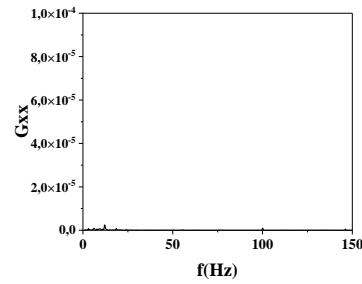
*Re = 60*



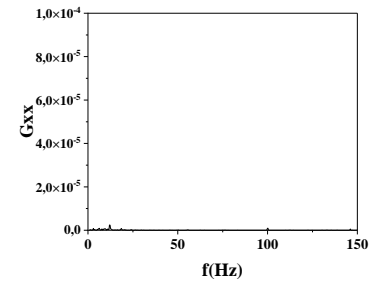
*Re = 50*



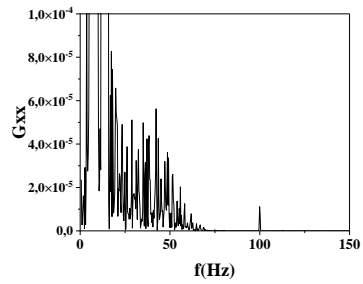
*Re = 60*



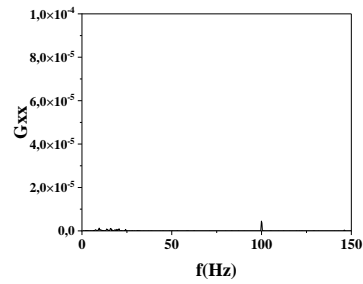
*Re = 70*



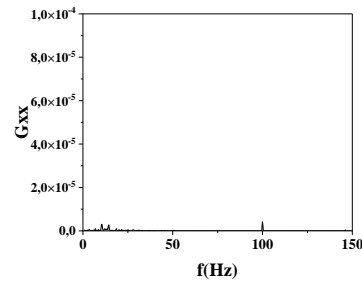
*Re = 80*



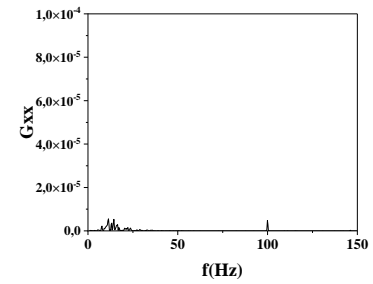
*Re = 100*



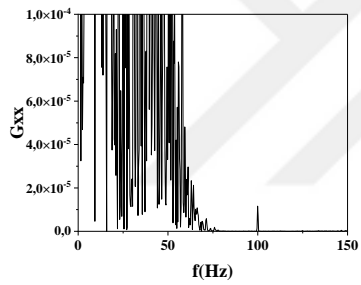
*Re = 110*



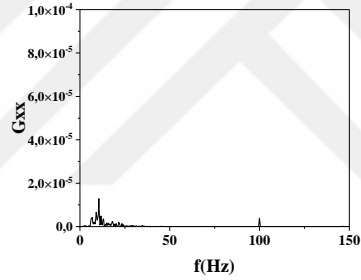
*Re = 120*



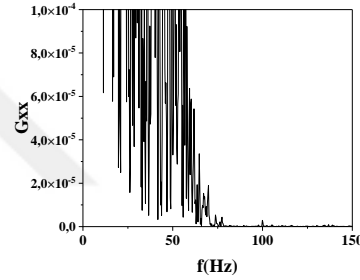
*Re = 120*



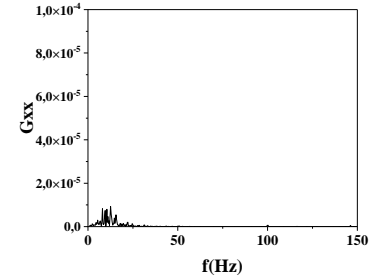
$Re = 160$



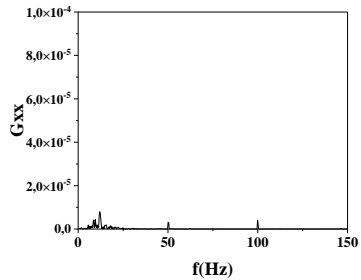
$Re = 180$



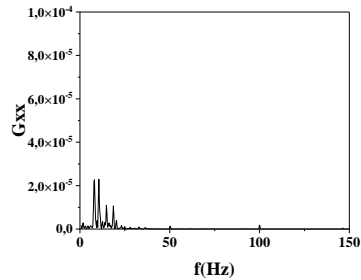
$Re = 200$



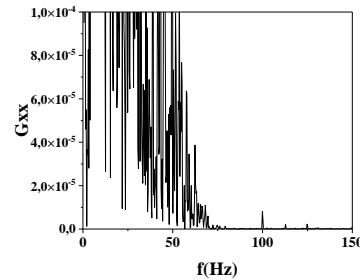
$Re = 220$



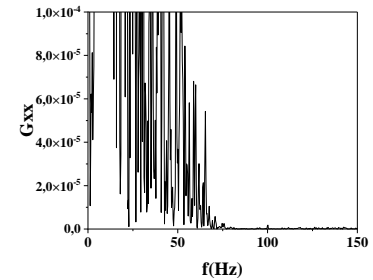
$Re = 240$



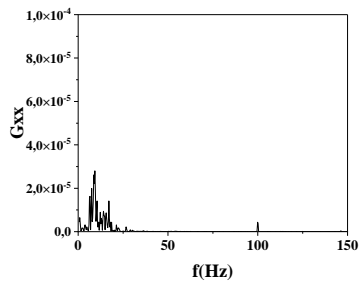
$Re = 260$



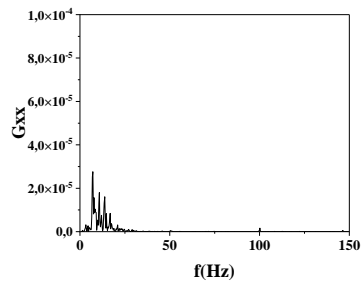
$Re = 280$



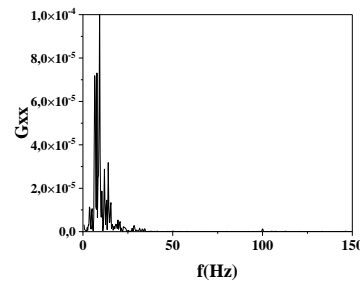
$Re = 300$



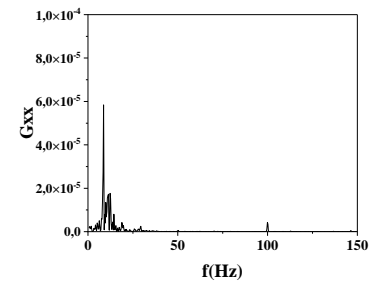
$Re = 320$



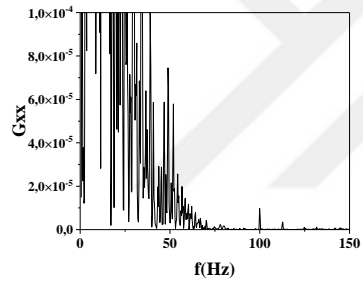
$Re = 340$



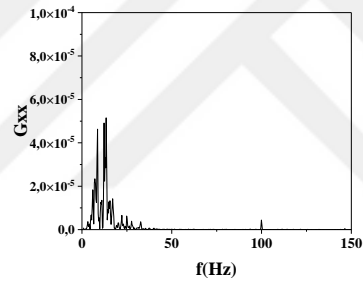
$Re = 360$



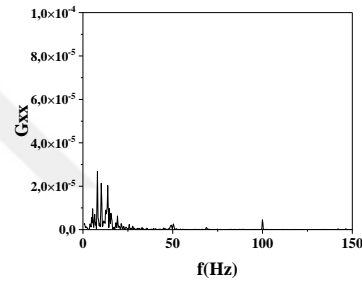
$Re = 380$



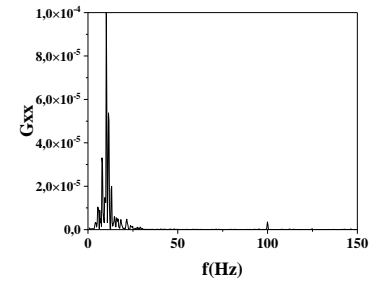
*Re = 400*



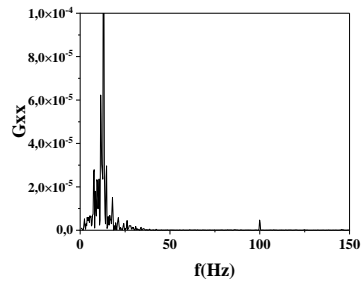
*Re = 420*



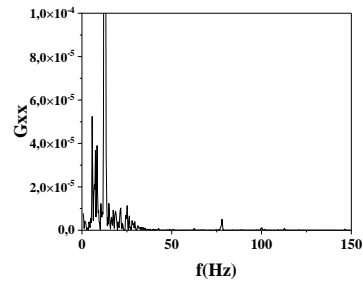
*Re = 440*



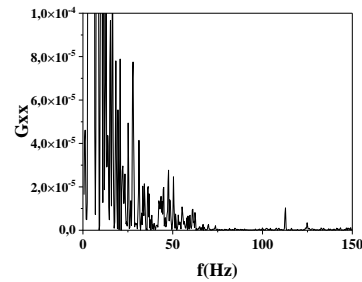
*Re = 460*



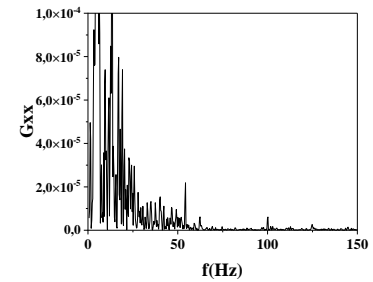
*Re = 480*



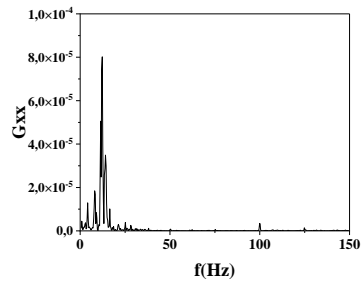
*Re = 500*



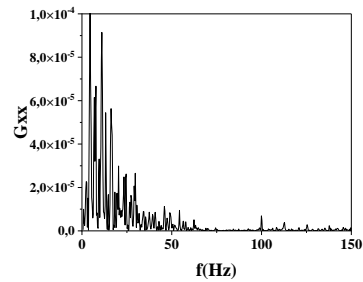
*Re = 550*



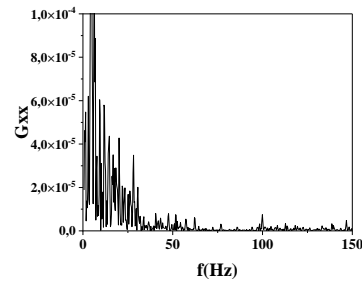
*Re = 600*



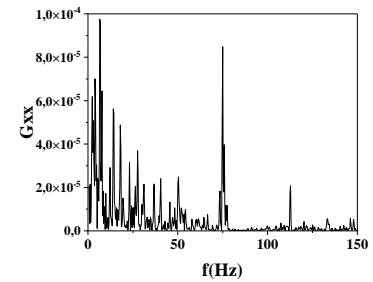
*Re = 650*



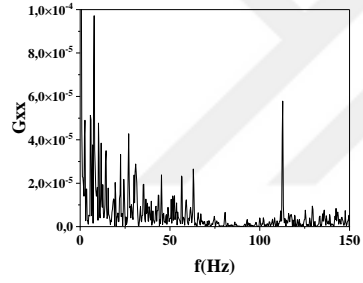
*Re = 700*



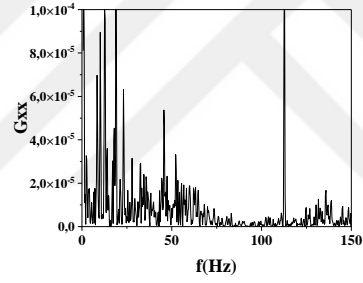
*Re = 800*



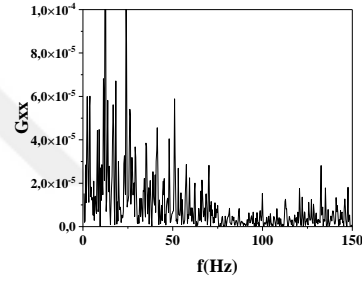
*Re = 900*



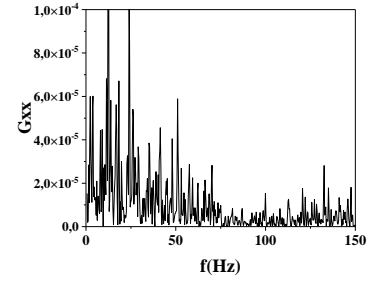
$Re = 1000$



$Re = 1100$

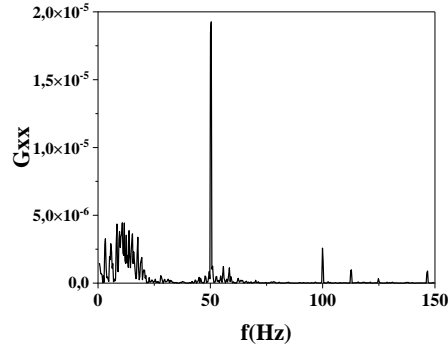


$Re = 1200$

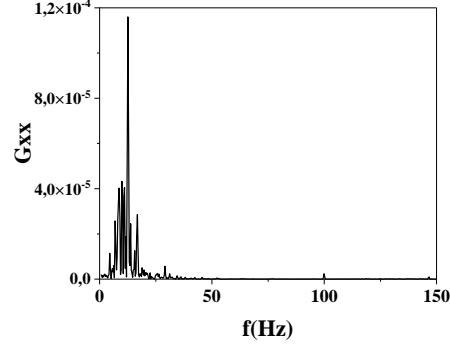


$Re = 1300$

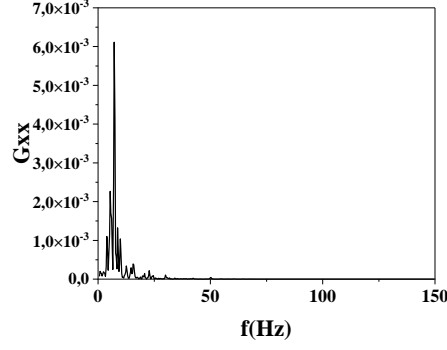
Şekil A.43 : R3-TiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (0-80 cm).



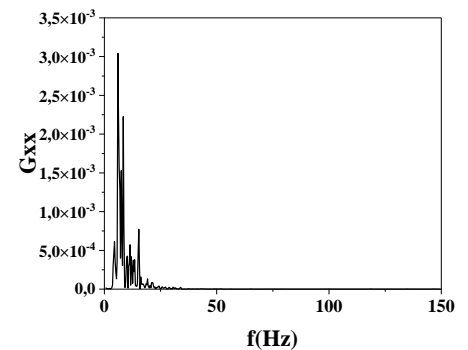
$Re = 70$



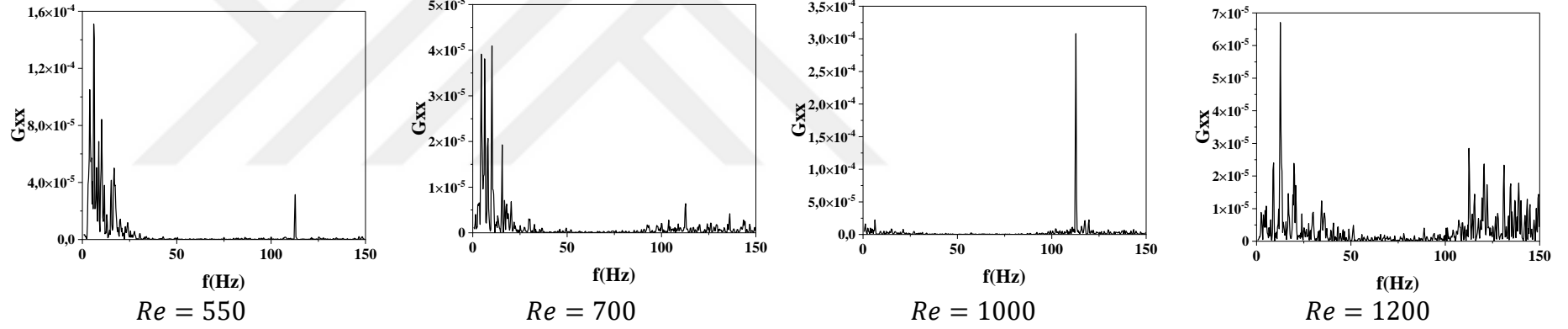
$Re = 80$



$Re = 200$



$Re = 300$



Şekil A.44 : R3-TiO<sub>2</sub>-3 fark basınç verilerinin güç spektral analizi (jet-2).

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Gözde GEÇİM

### **TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

#### **Makaleler**

- **Gecim, G. & Erkoc, E.** (2022). Hydrodynamics of Similar Gases in Vortex Mixers: Effect of Physical Properties on the Onset of Instability. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(2), 1192-1206.
- **Gecim, G. & Erkoc, E.** (2021). Gas Flow Hydrodynamics in Vortex Mixers: Flow Visualization and PIV Flow Field Characterization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(15), 5674-5687.

### **DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

#### **Makaleler**

- **Gecim, G., Ouyang, Y., Roy, S., Heynderickx, G. J. & Van Geem, K. M.** (2022). Process Intensification of CO<sub>2</sub> Desorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- **Gecim, G. & Ozekmekci, M.** (2021). A density functional theory study of molecular H<sub>2</sub>S adsorption on (4, 0) SWCNT doped with Ge, Ga and B. *Surface Science*, 711, 121876.
- **Gecim, G., Aydin, G., Tavsanoglu, T., Erkoc, E. & Kalemteş, A.** (2021). Review on extraction of polyhydroxyalkanoates and astaxanthin from food and beverage processing wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101775.
- **Gecim, G., Dönmez, S. & Erkoc, E.** (2021). Calcium deficient hydroxyapatite by precipitation: Continuous process by vortex reactor and semi-batch synthesis. *Ceramics International*, 47(2), 1917-1928.
- **Geçim, G. & Erkoç, E.** (2020). Gas phase polymerization of ethylene towards UHMWPE. *Turkish Journal of Chemistry*, 44(3), 695-711.

- **Gecim, G., Ozekmekci, M. & Fellah, M. F.** (2020). Ga and Ge-doped graphene structures: A DFT study of sensor applications for methanol. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1180, 112828.
- **Ozekmekci, M., Salkic, G. & Fellah, M. F.** (2015). Use of zeolites for the removal of H<sub>2</sub>S: a mini-review. *Fuel Processing Technology*, 139, 49-60.

#### **Kitap Bölümleri**

- **Gecim, G. & Kalemantas, A.** (2021). *Processing and applications of ceramic microspheres*. In Gupta K. And Davim J. P., *Advanced Welding and Deforming, Handbooks in Advanced Manufacturing* (1st ed., pp: 615-646). Elsevier, ISBN 978-0-12-822049-8.

#### **Kongre/Sempozyum Sunumları**

- **Dönmez S., Geçim G., Erkoç E.** (2019). Photocatalytic Degredation Of Rhodamin 6g Dye Under Uv Irradiation Using Ce Doped Zno Particles. 5th Anatolian School Of Catalysis, İzmir, Türkiye.
- **Geçim G., Dönmez S., Aytakin Aydın M. T., Erkoç E.** (2018). Investigation Of Dopants On Band Gap Of Zinc Oxide Nanoparticles. 3rd International Conference On Material Science And Technology In Cappadocia, Nevşehir, Türkiye.
- **Geçim G., Uzunlar S., Erkoç E.** (2017). Production Of Uhmwpe By Using Ziegler-Natta Andmetallocene Catalysts In Solvent Free Process. 4th Anatolian Catalysis School, İzmir, Türkiye.
- **Geçim G. & Erkoç E.** (2017). Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. European Polymer Federation Congress 2017, Lyon, Fransa.
- **Geçim G. & Erkoç E.** (2016). Development Of Semi Batch Mini Reactor System For Solvent Free Olefin Polymerization. International Congress On Natural And Engineering Sciences, Üsküp, Makedonya.
- **Geçim G. & Erkoç E.** (2016). Optimization Of Gas Phase Ethylene Polymerization A Micro Mini Reactor Study. Iupac World Polymer Congress (Macro 2016), İstanbul, Türkiye.
- **Geçim G. & Erkoç E.** (2016). Katma Değeri Yüksek Polimerizasyonlarda Yeni Teknolojiler Mikro Reaktör Teknolojisi İle Gaz Faz Etilen Polimerizasyonu. 12. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.