



**T. C.  
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ FARKLI GEOMETRİK YAPILARIN AKIŞ  
YAPISI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ferhat KOCA  
(201592092412)**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖZTÜRK**

**SIVAS  
OCAK 2020**

Ferhat KOCA'nın hazırladığı ve "SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ FARKLI GEOMETRİK YAPILARIN AKIŞ YAPISI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	<b>Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖZTÜRK</b> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	<b>Doç. Dr. Cahit GÜRLEK</b> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	<b>Dr. Öğr. Üyesi Doğan Engin ALNAK</b> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	<b>Prof. Dr. Beşir ŞAHİN</b> Çukurova Üniversitesi	
Jüri Üyesi	<b>Prof. Dr. Coşkun ÖZALP</b> Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından DOKTORA TEZİ olarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Özlem Pelin CAN**  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



*Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-728 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.*



Bütün hakları saklıdır.  
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Ferhat KOCA, 2020

## ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

16/01/2020

Ferhat KOCA

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, doktora çalışmalarındaki danışmanlığı ve desteği için, bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, araştırmalarım hakkında birçok farklı bakış açısıyla düşünmemde bana yardım eden ve geri bildirimleri büyük bir rehberlik ve destek kaynağı olan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Doğan Engin ALNAK'a şükranlarımı sunuyorum. Görüşmelerimizdeki detaylı analizi ve tutarlı araştırma metodolojisi profesyonel becerilerimi geliştirmeme yardımcı oldu.

Tez çalışmam süresince, özellikle deneysel verilerin işlenmesi boyunca yardımını esirgemeyip zaman ayıran ve bana her türlü desteği sağlayan, kıymetli hocam Doç.Dr. Cahit GÜRLEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Ekip çalışmasına ve topluluğa inanan bir kişi olarak, bu tezde deneysel çalışma fırsatı sunan Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümüne ve değerli hocam Prof.Dr. Coşkun ÖZALP'e, deneyler boyunca bana yardımcı olan değerli arkadaşım Arş.Gör. Mustafa SÖYLER'e teşekkür ederim.

M-728 nolu proje kapsamında maddi destek ile çalışmalarımı tamamlamamı sağlayan Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (CÜBAP)' ne teşekkür ederim.

Son olarak ailenin hayatımdaki öneminden ve özellikle de doktora çalışmalarındaki rolünden bahsetmek zorundayım. Ailem, özellikle annem koşulsuz desteğin ne olduğunu bana öğretti. Bana olan inancınız için çok teşekkür ederim.

## ÖZET

### SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ FARKLI GEOMETRİK YAPILARIN AKIŞ YAPISI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ferhat KOCA

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖZTÜRK

2019, 129+xvi sayfa

Bu çalışmada, dairesel bir silindir yüzeyindeki sarmal yapı için akış kontrol mekanizması Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemiyle deneysel olarak incelenmiştir. Silindir yüzeyinde, 44 mm çapında, başlangıç ve bitiş noktaları aynı düzlem üzerinde olacak şekilde, adım sayıları değiştirilerek adım mesafeleri ( $p$ ) farklı olan; tek sarmal ( $p=440$  mm), çift sarmal ( $p=220$  mm) ve dört sarmal ( $p=110$  mm) yapı oluşturulmuştur. 440 mm uzunluğundaki silindir üzerine 44 mm çapındaki yarım dairesel sarmallar spiral şeklinde sarılmıştır. Akış özellikleri, sarmal yapı açısız konumunun, silindirin durma noktasından  $0^\circ - 180^\circ$  'de açının bir fonksiyonu olarak ( $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  ve  $180^\circ$ ) 6 farklı düzlemde incelenmiştir. Silindir çapı ve ortalama kanal hızına bağlı olarak hesaplanan Reynolds sayısının  $10^4$  değeri için elde edilen zaman-ortalama akım çizgisi  $\langle \psi \rangle$ , vortisite  $\langle \omega \rangle$ , türbülans kinetik enerji  $\langle TKE \rangle$  ve akış yönündeki  $\langle U_{rms} \rangle$  ile akışa dik yöndeki  $\langle V_{rms} \rangle$  RMS değerleri sunulmuştur. Ayrıca, Strouhal sayıları, tek nokta spektral analizinden elde edilen Karman vorteks frekansı  $\langle f \rangle$  kullanılarak hesaplanmıştır. 3 farklı sarımdaki silindirlerin akış yapısı üzerine etkisi hem birbirleri ile hem de boş (düz) silindir akış yapısı ile karşılaştırılmıştır. Sarmalın kritik açısız pozisyonunun  $\theta = 90^\circ$  olduğu sonucuna varılmıştır. Akış ayrılmasının  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  aralığında kontrol edilebilir olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel olarak incelenen akış yapıları hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemiyle de analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sarmal silindir, akış kontrolü, PIV, HAD.

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT GEOMETRIC STRUCTURES ON CYLINDER ON FLOW STRUCTURE

**Ferhat KOCA**

**Ph.D. Thesis,**

**Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖZTÜRK**

**2019, 129+xvi pages**

In this study, the flow control mechanism for the helical structure on a circular cylinder surface is presented experimentally by using Particle Image Velosimetry (PIV). On the surface of the cylinder, a single-helix ( $p = 440$  mm), a double-helix ( $p = 220$  mm) and a four-helix ( $p = 110$  mm) structures with a diameter of 44 mm were formed by changing the number of steps of the helixes so that the starting and ending points of these helixes are on the same plane. On the cylinder with a length of 440 mm long, half-coils with a diameter of 44 mm are wound in a circular spiral shape. The flow properties were examined for 6 different planes ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ , and  $180^\circ$ ) determined as a function of the angular position ( $0^\circ$ - $180^\circ$ ) of the helical structure according to the stagnation point of the cylinder. In the experimental study conducted for a Reynolds number of 10000 based on cylinder diameter and channel flow speed, streamline  $\langle \psi \rangle$ , vorticity  $\langle \omega \rangle$ , turbulent kinetic energy  $\langle \text{TKE} \rangle$ , straight  $U_{\text{rms}}$  and transverse  $V_{\text{rms}}$  with RMS values are presented. In addition Strouhal numbers were calculated using Karman vortex frequency  $\langle f \rangle$  obtained from single point spectral analysis. The effect of the cylinders having three different helix structure on the flow was compared with each other and with flow structure on the plain (bare) cylinder. It is concluded that the critical angular position of the helix is  $\theta=90^\circ$ . It has been shown that flow separation is controllable for  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ . Also, the flow structures examined experimentally were analyzed by computational fluid dynamics (HAD) method.

**Key Words:** Spiral cylinder, flow control, PIV, CFD.



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Amaç ve Kapsam .....	2
1.2 Yöntem .....	2
1.3 Çalışma ve Değerlendirme Yöntemleri.....	5
1.4 Önceki Çalışmalar.....	8
1.3.1 Sayısal Çalışmalar .....	8
1.3.2 Deneysel Çalışmalar .....	11
<b>2. MATERYAL VE METOD</b> .....	<b>22</b>
2.1 Su Kanalları.....	22
2.2 Modeller.....	24
2.3 Görüntüleme Teknikleri.....	27
2.3.1 PIV .....	27
2.3.1.1 PIV Sistemi Kabiliyetleri .....	29
2.3.1.2 PIV Sistem Çözümleri .....	29
2.3.1.3 Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) Tekniğinin İlkeleri ..	30
2.3.1.4 PIV Sistemleri ve Bileşenleri.....	31
2.4 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD).....	46
2.4.1 HAD Analiz Süreci.....	46
2.4.1.1 Geometri ve Akış Alanının Modellenmesi .....	47
2.4.1.2 Mesh (Ağ) Yapısının Oluşturulması .....	47
2.4.1.3 Fiziksel Tanımlama.....	48
2.4.1.4 Çözümleme .....	49
2.4.1.5 Sonuçları Almak İçin Simülasyon Sonrası İşlem.....	50
2.4.1.6 Sonuçların Karşılaştırılması .....	50

<b>3. BULGULAR .....</b>	<b>51</b>
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>118</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>121</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>129</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 1.1</b>	Silindir üzerindeki akışın Re sayısına göre gruplandırılması ..... 3
<b>Şekil 1.2</b>	Girdap salınımını azaltmak için kullanılan pasif kontrol yöntemleri; (a) bölücü plaka, (b) şerit kablo, (c) kılavuz kanat, (d) spoyler plakası, (e) helisel (sarmal) çıtalar, (f) örtü, (g) boyuna kanal, (h) aerodinamik kaplama ..... 4
<b>Şekil 2.1</b>	Su kanalı görünümü ..... 22
<b>Şekil 2.2</b>	Su kanalı temel bileşenleri ..... 23
<b>Şekil 2.3</b>	Deney düzeneği şematik görünümü ..... 24
<b>Şekil 2.4</b>	Deney malzemeleri a) Modeller b) Platform ..... 25
<b>Şekil 2.5</b>	Silindir modelleri boyutsal gösterimi ..... 26
<b>Şekil 2.6</b>	Tipik PIV deney düzeneği ..... 31
<b>Şekil 2.7</b>	Sistem bileşenleri ve PIV sisteminin bağlantısı ..... 31
<b>Şekil 2.8</b>	PIV ölçümü akış şeması ..... 32
<b>Şekil 2.9</b>	PIV sisteminin şematik gösterimi ..... 33
<b>Şekil 2.10</b>	Su kanalına eklenen parçacıklar ..... 35
<b>Şekil 2.11</b>	Deney cihazları ve dijital PIV cihazlarının şeması ..... 38
<b>Şekil 2.12</b>	Deney kurulumunun şematik görünümü a) yandan görünüş b) üstten görünüş ..... 39
<b>Şekil 2.13</b>	Temel PIV analiz süreci ..... 40
<b>Şekil 2.14</b>	Çapraz korelasyonun ilkeleri ..... 42
<b>Şekil 2.15</b>	Görüntü işleme genel prosedürü ..... 43
<b>Şekil 2.16</b>	Ham hız vektörleri ile temizlenmiş vektör gösterimi ..... 44
<b>Şekil 2.17</b>	HAD analiz süreci ..... 46
<b>Şekil 2.18</b>	HAD analizi için oluşturulan geometri ..... 47
<b>Şekil 2.19</b>	Mesh (ağ) yapısı görünümü ..... 48
<b>Şekil 3.1</b>	Art izi bölgesi akım çizgileri ve önemli noktalar ..... 51
<b>Şekil 3.2</b>	Farklı sarmal yapılardaki silindirlere akış düzlemine dik konum için (0°) PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarım düzlem görünümü b) çift sarım düzlem görünümü c) dört sarım düzlem görünümü ..... 53
<b>Şekil 3.3</b>	Farklı sarmal yapılardaki silindirlere akış düzlemine 30° konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarım düzlem görünümü b) çift sarım düzlem görünümü c) dört sarım düzlem görünümü ..... 54
<b>Şekil 3.4</b>	Farklı sarmal yapılardaki silindirlere akış düzlemine 60° konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarım düzlem görünümü b) çift sarım düzlem görünümü c) dört sarım düzlem görünümü ..... 56
<b>Şekil 3.5</b>	Farklı sarmal yapılardaki silindirlere akış düzlemine 90° konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarım düzlem görünümü b) çift sarım düzlem görünümü c) dört sarım düzlem görünümü ..... 57

<b>Şekil 3.6</b>	Farklı sarmal yapılarıdaki silindirlerde akış düzlemine 120° konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarım düzlem görünümü b) çift sarım düzlem görünümü c) dört sarım düzlem görünümü .....	58
<b>Şekil 3.7</b>	Farklı sarmal yapılarıdaki silindirlerde akış düzlemine 180° konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarım düzlem görünümü b) çift sarım düzlem görünümü c) dört sarım düzlem görünümü .....	59
<b>Şekil 3.8</b>	Sarmal konum açısı-kritik nokta değer grafikleri .....	61
<b>Şekil 3.9</b>	Sarmalların çeşitli açısız $\theta$ konumları için zamana göre ortalama ( $\omega$ ) girdap eşdeğer eğrileri .....	63
<b>Şekil 3.10</b>	Düz silindir türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ ) .....	64
<b>Şekil 3.11</b>	Tek sarmal yapı silindir türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ ) .....	66
<b>Şekil 3.12</b>	Çift sarmal yapı silindir türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ ) .....	68
<b>Şekil 3.13</b>	Dört sarmal yapı silindir türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ ) .....	69
<b>Şekil 3.14</b>	Tek sarmallı yapıda sarmalın açısız pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki ayrılma-kayma tabakasının yapısı.....	70
<b>Şekil 3.15</b>	Çift sarmallı yapıda sarmalın açısız pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki ayrılma-kayma tabakasının yapısı.....	71
<b>Şekil 3.16</b>	Dört sarmallı yapıda sarmalın açısız pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki ayrılma-kayma tabakasının yapısı.....	72
<b>Şekil 3.17</b>	TKE, $U_{rms}$ , $V_{rms}$ için değerlendirilen mesafeler .....	73
<b>Şekil 3.18</b>	Tek sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları.....	74
<b>Şekil 3.19</b>	Tek sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri .....	75
<b>Şekil 3.20</b>	Çift sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	76
<b>Şekil 3.21</b>	Çift sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri .....	77
<b>Şekil 3.22</b>	Dört sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	78

<b>Şekil 3.23</b>	Dört sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri .....	79
<b>Şekil 3.24</b>	Farklı modellerde sarmalın $0^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	82
<b>Şekil 3.25</b>	Farklı modellerde sarmalın $0^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri.....	83
<b>Şekil 3.26</b>	Farklı modellerde sarmalın $30^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	84
<b>Şekil 3.27</b>	Farklı modellerde sarmalın $30^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri.....	85
<b>Şekil 3.28</b>	Farklı modellerde sarmalın $60^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	86
<b>Şekil 3.29</b>	Farklı modellerde sarmalın $60^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri.....	87
<b>Şekil 3.30</b>	Farklı modellerde sarmalın $90^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	88
<b>Şekil 3.31</b>	Farklı modellerde sarmalın $90^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri.....	89
<b>Şekil 3.32</b>	Farklı modellerde sarmalın $120^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	90
<b>Şekil 3.33</b>	Farklı modellerde sarmalın $120^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri.....	91
<b>Şekil 3.34</b>	Farklı modellerde sarmalın $180^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi $U_{rms}$ dağılımları .....	92
<b>Şekil 3.35</b>	Farklı modellerde sarmalın $180^\circ$ konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi $V_{rms}$ ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri.....	93
<b>Şekil 3.36</b>	FFT analizi spektrum noktaları.....	95
<b>Şekil 3.37</b>	Strouhal sayısı-konum grafikleri a) A noktası b) B noktası .....	97
<b>Şekil 3.38</b>	Sarmal yapılı silindirlerin x ve y eksenleri boyunca St-Girdap genişliği-konum arasındaki değişiminin üç boyutlu gösterimi .....	98
<b>Şekil 3.39</b>	Düz silindir frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri.....	100
<b>Şekil 3.40</b>	Tek sarmal $30^\circ$ konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri.....	101

<b>Şekil 3.41</b>	Tek sarmal 60° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	102
<b>Şekil 3.42</b>	Tek sarmal 90° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	103
<b>Şekil 3.43</b>	Tek sarmal 120° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	104
<b>Şekil 3.44</b>	Tek sarmal 180° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	105
<b>Şekil 3.45</b>	Çift sarmal 0° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	106
<b>Şekil 3.46</b>	Çift sarmal 30° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	107
<b>Şekil 3.47</b>	Çift sarmal 60° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	108
<b>Şekil 3.48</b>	Çift sarmal 90° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	109
<b>Şekil 3.49</b>	Çift sarmal 120° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	110
<b>Şekil 3.50</b>	Çift sarmal 180° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	111
<b>Şekil 3.51</b>	Dört sarmal 0° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	112
<b>Şekil 3.52</b>	Dört sarmal 30° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	113
<b>Şekil 3.53</b>	Dört sarmal 60° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	114
<b>Şekil 3.54</b>	Dört sarmal 90° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	115
<b>Şekil 3.55</b>	Dört sarmal 120° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	116
<b>Şekil 3.56</b>	Dört sarmal 180° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri .....	117

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo 1</b>	Model silindirler için düzlem noktaları.....	27
<b>Tablo 2</b>	Parçacık Çeşit ve Özellikleri [62] .....	34
<b>Tablo 3</b>	Kritik noktaların aksenal mesafeleri .....	60
<b>Tablo 4</b>	Frekans, periyod ve Strouhal değerleri .....	97



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\theta$	Açı
$\Psi$	Akım çizgileri
$\omega$	Vortisite
$A$	Kesit alanı (m <sup>2</sup> )
$\mu$	Dinamik viskozite (Ns/m <sup>2</sup> )
$\nu$	Kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$V$	Y eksenli boyunca hız (m/s)
$U$	Serbest akış hızı (m/s)
$St$	Strouhal sayısı
$Re$	Reynolds sayısı
$P$	Basınç (Pa)
$D$	Çap (m)
$t$	Zaman (s)
$H$	Kanal yüksekliği (m)
$W$	Kanal genişliği (m)
$\rho$	Yoğunluk (kg/ m <sup>3</sup> )
$x, y, z$	Kartezyen koordinatları
$u, v, w$	x, y ve z bileşenlerindeki hızlar (m/s)
$T$	Sıcaklık (K)
$g$	Yerçekimi ivmesi (m/sn <sup>2</sup> )
$p$	Sarmal adım uzunluğu (m)
$\tau$	Kayma gerilmesi (N)
<b>PIV</b>	Parçacık görüntülemeli hız ölçme tekniği
<b>HAD</b>	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
<b>AFC</b>	Aktif akış kontrolü
<b>VIV</b>	Girdap kaynaklı titreşim
<b>LES</b>	Nümerik eddy simülasyonu
<b>RMS</b>	Root mean square-Karekök ortalamalı hız
<b>2B</b>	2 boyut-2D
<b>3B</b>	3 boyut-3D



## 1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında; yüksek binalar, köprüler, soğutma kuleleri, bacalar, ısı eşanjörlerindeki tüp sıraları gibi nesnelere üzerindeki akış alanlarına yoğun olarak rastlanmaktadır. Normal şartlar altında genellikle aşağı akım bölgesi oluşturan bu nesnelere küt cisim denir. Denizaltılar, gemiler ve arabalar gibi nesnelere akışkan boyunca hareketi, bu tür küt cisimlerin endüstriyel uygulamalardaki önemli rollerine örnek olarak verilebilir. Bu nesnelere şekli nedeniyle, arkalarında akışın yavaşladığı kayda değer büyüklükte bir bölge vardır. Bu bölgeye art izi bölgesi denir ve bu alanlarda basınç düşüşü yaşanır. Bazen, büyük girdaplar gövdeden periyodik olarak koparak ayrılır. Bu olaya girdap dökülmesi denir. Küt cismin titreşmesine neden olan ve yapısal bozulmaya yol açabilecek dengesiz, periyodik bir kuvvet oluşturur. Bu nedenle, bu yapılar etrafındaki akış alanının bilgisi inşaat mühendisliği, makine mühendisliği, enerji dönüşümü ve yapısal tasarım ile ilgili teknik problemler gibi birçok uygulamada büyük öneme sahiptir. Bu tür akış genellikle, akış ayrılması, art izi akışı, girdap dökülmesi, kavisli serbest kayma tabakaları, baskın büyük ölçekli yapılar ve yüksek türbülans gibi birçok karmaşık olayı içerir. Bu yapının iyi anlaşılması rezonans olaylarını engellemenin yanı sıra salınım genliğini sınırlandırmak için de önemlidir. Girdap dökülme sıklığının yapının doğal frekansından daha yüksek olduğu 1940'taki Tacoma Narrows Bridge'in rezonans olayı, neredeyse tüm Fizik kitaplarının bir bölümünün konusudur. Bu tür olayların meydana gelmemesi için akış yapılarının bilinmesi ve kontrol edilmesi önemlidir. Küt cisim etrafındaki akışı kontrol etmek için iki çeşit yöntem uygulanabilir. Bunlardan birincisi yüzey geometrisinin yüzeye sekmeler, çizgiler veya çukurlar koyarak değiştirildiği pasif kontrol olarak adlandırılan yöntemdir. Diğer ise, belirli koşullarda üfleme, emme, sentetik jetler ve plazma aktüatörleri gibi uygulamalarla akış alanına harici enerjinin sağlandığı aktif kontrol yöntemleridir.

Bu tür cisimler etrafındaki akışta Reynolds sayısı ( $Re$ ) arttıkça akışın davranışı da değişir. Bu noktada, dairesel ve kare yapılara dikkat çekmek uygun olabilir. Dairesel ve dikdörtgen silindireler gibi cisimlerin temel akışkanlar dinamiği problemleri, özellikle farklı Reynolds sayılarında hem sayısal hem de deneysel olarak yoğun bir şekilde incelenmiştir [1]–[10].

## 1.1 Amaç ve Kapsam

Akış karakteristiklerini incelemek, enerji üretim ve dönüşüm verimini artırmak için birçok deneysel çalışma yapılmaktadır. Bunun yanında pek çok alanda olduğu gibi mühendislikte de gittikçe artan bir şekilde, sayısal yöntemler artık vazgeçilemeyen bir araç haline gelmiş durumdadır. Kullanılan yöntemler, analitik çözümü bulunmayan problemlere bir çözüm bulmakla birlikte, deneysel metotlara alternatif olarak yeni bir simülasyon ve modelleme aracı olarak kullanılmaktadır.

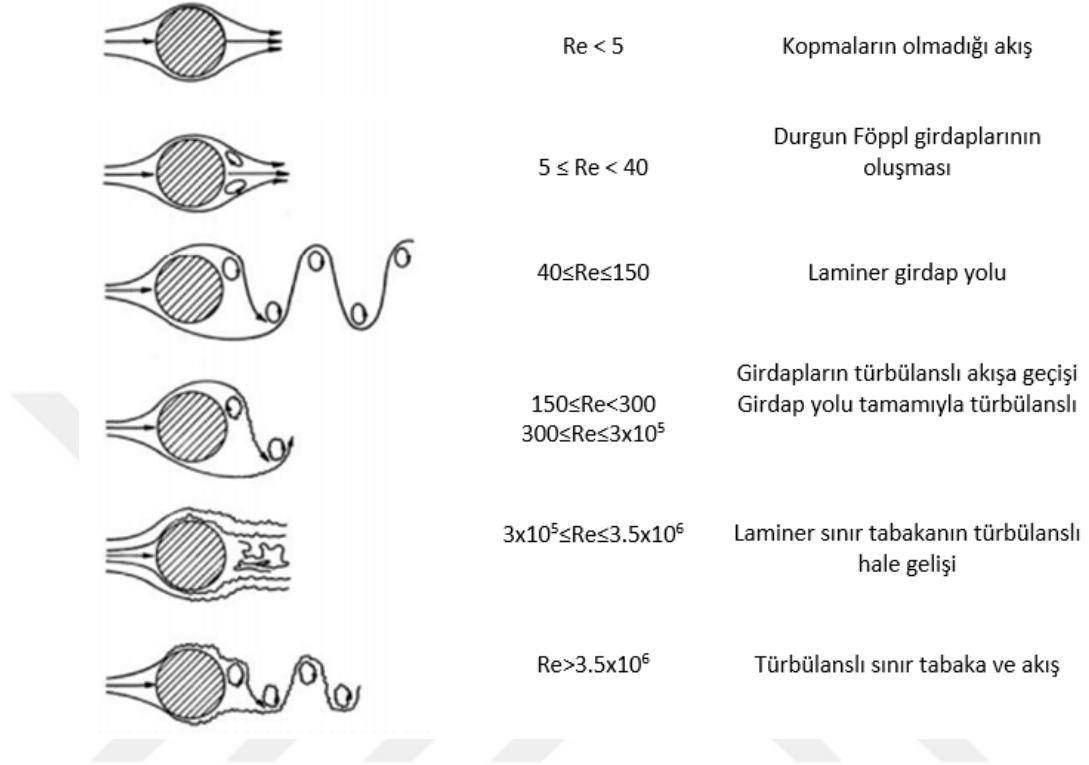
Bu çalışmanın amacı, sonlu hacimler yöntemini ve PIV sistemini kullanarak kanal içerisine yerleştirilmiş silindir şeklindeki geometriler üzerine tasarlanan sarmal yapıların akışa olan etkisini incelemektir. Hesaplamalar silindir üzerine farklı adımlar şeklinde işlenerek sarmalın yerleştirilmesi ve belirli Reynolds sayısı için yapılacak, akış ve türbülans dağılımları verilerek, titreşim kontrolünde etkili olan girdap salınımları incelenecek, önemli akış parametreleri hesaplanacaktır. Elde edilecek değerlerle literatürdeki sonuçlara genişlik kazandırılması amaçlanmıştır.

Ayrıca elde edilecek sonuçlar yaygın etki olarak, ülkemizde özellikle makine ve elektronik sanayisinde uygulama alanı bulacaktır. Bu ve benzeri modeller istenildiğinde herhangi bir üretim sistemine adapte edilebilecek ya da yeni tasarlanacak bir sisteme kaynak olabilecektir. Bu sebeple bu çalışma ülkemiz bilimine katkıda bulunacaktır.

## 1.2 Yöntem

Bu çalışmada bir silindir üzerinde farklı adım sayılarındaki sarmal yapıların akış alanına olan etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Silindir üzeri akış uygulamalarında silindir arkasında (aşağı akım bölgesi) oluşacak girdap salınımlarının yorumlanması çok önemlidir. Belirli Re sayısı değerlerinde akışa maruz kalan bir küt cisim etrafındaki akış, periyodik girdap salınımı ile cismin üzerinden ayrılır. Bu durum, cismin arka yüzeyinde önemli bir basınç düşüşüne neden olur. Küt cismin arka kısımlarında (aşağı akım bölgesi) meydana gelen girdap salınımları ciddi yapısal titreşimlere, akustik gürültü ve rezonansa neden olur. Ayrıca daha iyi ısı transferi için avantajlı olan gelişmiş karışım, kaldırma ve direnç kuvvetlerinde artış

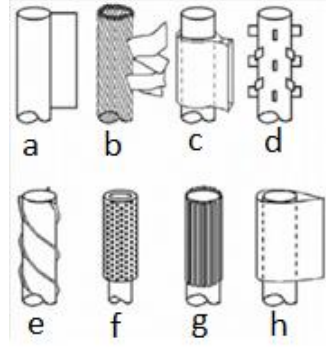
yaratır. Dolayısıyla, birçok mühendislik uygulamasında girdap salınımlarının etkili kontrolü çok önemlidir. Şekil 1.1’ de Reynolds sayısının artmasıyla silindir üzeri akış uygulamasında meydana getirdiği etkiler yer almaktadır.



**Şekil 1.1** Silindir üzerindeki akışın Re sayısına göre gruplandırılması

Roshko [11] önce 1955'de küt cisim aşağı akım bölgesinde Karman vorteksinin periyodunu ölçmüş ve buluşundan sonra araştırmacılar girdap salınımlarını ve iz akışları araştırmaya başlamıştır. Araştırmacılar, birçok birçok mühendislik uygulamasında ciddi problemlere sebep olduğu için girdap salınımlarının bastırılmasına odaklanmışlardır. Silindir etrafındaki akış uygulamaları gibi küt cismin aşağı akım yönünde oluşan vorteks salınımlarını kontrol etmek için; akım çizgili geometri oluşturulması, bölücü plaka kullanılması, emme ve üfleme, akustik uyarılma, elektromanyetik kontrol gibi birçok aktif ve pasif kontrol yöntemi gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol yöntemlerini pasif ve aktif akış kontrolü olmak üzere iki kategoriye bölerek bir sınıflandırma yapılabilir.

Şekil 1.2’de bir silindir etrafındaki girdap salınımlarını azaltmak için kullanılan pasif kontrol tekniklerinin bazıları gösterilmektedir [12].



**Şekil 1.2** Girdap salınımını azaltmak için kullanılan pasif kontrol yöntemleri; (a) bölücü plaka, (b) şerit kablo, (c) kılavuz kanat, (d) spoyler plakası, (e) helisel (sarmal) çitalar, (f) örtü, (g) boyuna kanal, (h) aerodinamik kaplama

Bu çalışmada, üç farklı sarmal yüzeyli adım mesafesine sahip sonlu-silindir etrafındaki akış yapısı, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği (PIV) kullanılarak kapalı devre açık yüzeyli su kanalında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel serbest akış hızı ve sonlu-silindir çapına bağlı Reynolds sayısının belirli ( $10^4$ ) değerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler bilgisayar ortamında işlenerek aşağı akım bölgesi incelenen silindir yüzeyinin akış alanı üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Bu çalışmada ayrıca HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) bilgisayar simülasyonu kullanılarak, kanal içerisine yerleştirmiş silindir etrafındaki akış etkisi deneysel koşullarla aynı sınır şartları için incelenmiştir. Reynolds sayısı belirli bir değerde sabit tutulmuş ve silindir üzeri sarmalların adım sayısı değiştirilmiştir. Simülasyonda k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Deneysel kullanılan giriş parametrelerine bağlı olarak sınır şartları girilerek akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada temel değişken farklı yüzey geometrisine sahip silindirlerdir.

Ansys-Fluent paket programında, hem ayrık hem de birleşik çözücüde lineer olmayan akış denklemleri, bütün hesaplanabilir hücrelerde bağımlı parametrelerden oluşan denklem gruplarına dönüştürülmesi için lineer hale getirilir. Bu işlem Fluent'te formülasyon olarak isimlendirilir ve iki şekli vardır: Implicit ve Explicit. Bu çalışmada Implicit formülasyonu kullanılmıştır. Bu formülasyona göre herhangi bir değişkene göre, her bir hücredeki bilinmeyen değer, sadece var olan değerlerin yer aldığı bir

bağıntı ile hesaplanabilir. Bu yüzden, her bilinmeyen sistemde birden çok denklem içinde yer alır ve bilinmeyen değerleri bulmak için bu denklemler eşzamanlı bir şekilde çözülmektedir.

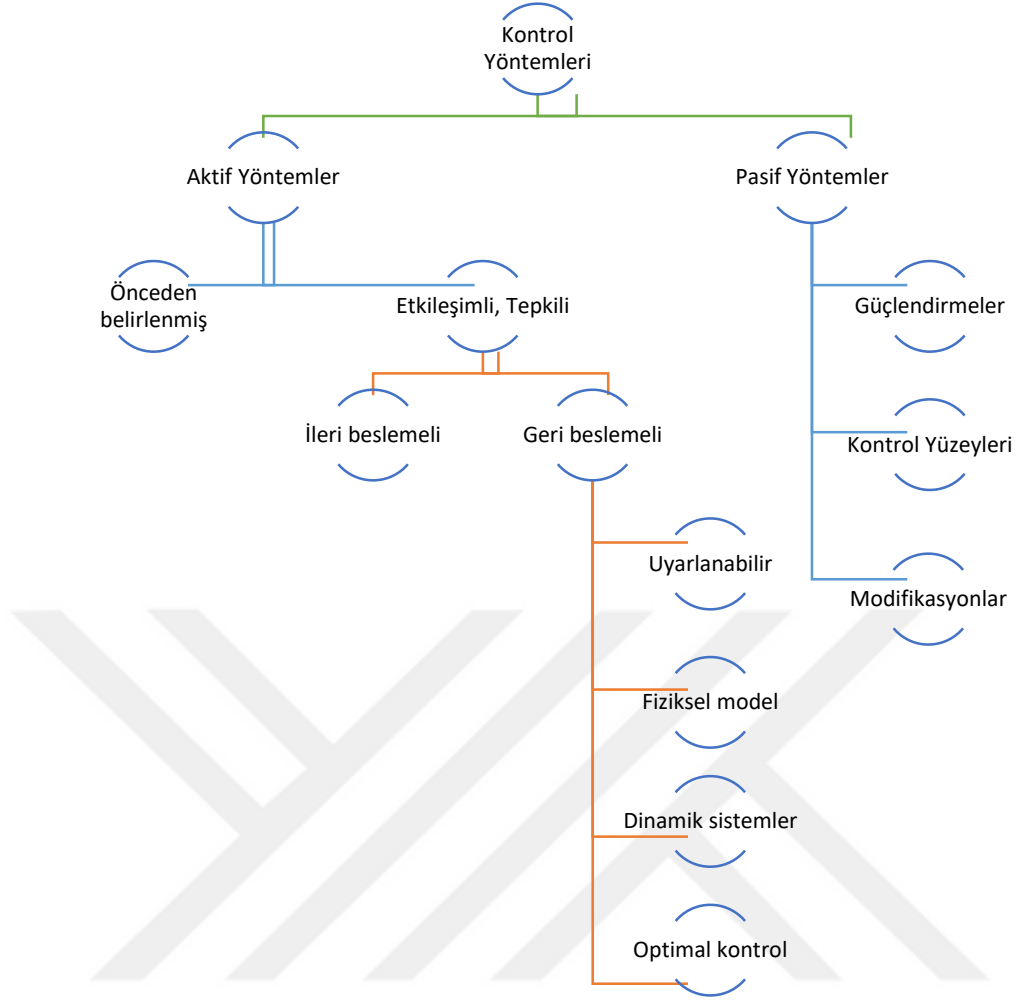
### **1.3 Çalışma ve Değerlendirme Yöntemleri**

Yeterli derecede yüksek Reynolds sayısına sahip olan deneyler ve simülasyonlar için, bir kanaldaki veya bir sınırın yakınındaki akış, türbülanslı olabilir. Bu durum, akış yönünde yüzeye yakın bölgede girdapların ortaya çıkması, yüzeye doğru yüksek hızlı akışı ve yüzeylerden uzakta düşük hızlı akışı zorlaması anlamına gelir. Pratik uygulamalarda akışı belirli bir hızda tutmak için daha fazla enerji gerektiren bu yüksek ve düşük hızlı çizgilerin varlığıdır. Akış kontrolü fikri, bu etkiyi ve sürtünmeyi belirli bir mekanizma ile azaltmak için ortaya çıkmıştır.

Akış kontrol yöntemleri, uzun yıllardır kullanılmakla birlikte son yıllarda çok farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bir akışı pasif veya aktif olarak manipüle etme kabiliyeti çok büyük teknolojik öneme sahiptir. Bu yöntemler; geçiş gecikmesi, sürtünme (drag) azaltma, kaldırma (lift) geliştirme, türbülans yönetimi, ayrılma erteleme, gürültü azaltma vb. işlemlerinde büyük ölçüde kullanılır. Akış kontrolünün potansiyel faydaları arasında gelişmiş performans, uygun fiyat, yakıt tüketimi ekonomisi ve çevresel uygunluk sayılabilir [13].

Akış kontrol tekniklerini iki ana kategoriye ayırabiliriz: açık döngü ve kapalı döngü mekanizmaları. Açık döngü sistemler, akış kontrol miktarını ayarlamak için herhangi bir geri bildirim kullanmazlar. Bu konu, tezdeki ana çalışma alanımızdır, çünkü bu sistemler herhangi bir karmaşık sensöre veya mekanizmanın kontrol süreci boyunca uyarlanmasına ihtiyaç duymazlar. Tersine, kapalı döngü kontrolü, bir algılama cihazında bazı ölçümlere bağlı olan kontrol yöntemini değiştirmek için bir geri besleme döngüsü kullanır.

Akış kontrol stratejileri ayrıca pasif ve aktif kontrol planlarına ayrılabilir. Pasif mekanizmalarda sürtünmeyi azaltmak için enerji girişi gerekmez. Bu stratejiler için sisteme herhangi bir enerji eklemek zorunda olunmadığından sağlanan fayda güçteki net artış anlamına gelmektedir. Şekil 1.3'teki grafik akış kontrol yöntemlerinin sınıflandırılmasını göstermektedir.



**Şekil 1.3** Akış kontrol yöntem sınıflandırması

Aktif akış kontrolü (AFC) yöntemleri, doğal bir akış durumunu veya gelişim yolunu daha arzu edilen bir duruma (veya yola) değiştirmeyi amaçlayan hızlı büyüyen, çok disiplinli bir bilim ve teknoloji alanıdır. Akış kontrolü araştırması, sınır tabakanın 20. yüzyılın başlarında Prandtl [14] tarafından keşfedilmesine dayanmaktadır. II. Dünya Savaşı'na kadar olan ve aynı zamanda soğuk savaş yıllarını da kapsayan dönemde, başta askeri akış sistemleri olmak üzere, akış kontrolü kapsamlı bir şekilde incelenip uygulanmıştır. Lachman [15] ve daha yakın zamanda Gad-el-Hak ve arkadaşları [16], tarafından kapsamlı bir inceleme ve analiz sağlanmıştır. Schubauer ve Skramstad'ın [17] öncü çalışmalarından önceki bilinen tüm akış kontrolü çalışmaları için sabit durumlu araçlar ve mekanizmalar kullanmıştır. Bunlar doğası gereği düşük değerli güç verimliliğine sahiptir ve bu nedenle ortaya çıkan sistemlerin operasyonel uygulamalardaki kullanılabilirliğini sınırlandırmaktadır. Akış ayrılmasının kontrolü

gibi doğal akış dengesizliği olaylarından [18] faydalanan periyodik uyarımlı kararsız akış kontrol yöntemleri, verimlilik bariyerini aşma potansiyeline sahiptir. Örnek olarak, Seifert ve ark. [19], doğal vorteks kopma sıklığından daha yüksek bir frekansta, periyodik momentum ilavesi kullanan ayırma kontrolünün, sürekli üfleme kullanarak performansta benzer kazanımlar elde etmek için gereken momentumun % 90-99' unu kurtarabildiğini göstermiştir. Verimliliğin artırılması ve akışkanla ilgili sistemlerin (örneğin yüksek kaldırma kuvvetine sahip sistemler) basitleştirilmesi, dünyadaki jet yakıtı tüketiminde yüzde 1' lik bir tasarrufun günlük işletme maliyeti yaklaşık 1.25 milyon dolar azalttığı düşünülürse çok caziptir [20]. Ayrıca, bu tür yakıt tasarrufları, çevresel etkilerin azaltılmasına da yol açacaktır. Sistem entegrasyonu, minyatürleştirme, aktüatörler, sensörler ve hesaplama tekniklerindeki ilerleme; hızlı yanıt veren, kararsız, akış kontrol yöntemlerinin kapalı devre bir sistemde kullanılmasını sağlar. Bununla birlikte, teknolojideki gelişmeler umut verici olsa da, teori, hesaplamalar ve gerçek dünya uygulamaları arasındaki boşlukları kapatmak için kapsamlı deneyler gerekmektedir. Bu deneyler zaman alıcı ve pahalıdır ve birçok durumda beklenen veya tekrarlanabilir sonuçlar vermez. Dahası; ilerleme, yenilikçilik, tecrübe ve tamamen şansla gerçekleşir (bu nedenle AFC bazen "Akış Kontrol Sanatı" olarak adlandırılır). AFC teorisi, önde gelen fiziksel süreçlerin doğası gereği ve doğrusal olmayan yapısı nedeniyle sınırlı bir kapsamdadır. Yine de kararsız mekanizmaların belirlenmesine yardımcı olan birinci dereceden bir yaklaşım olarak dikkate alındığında, basitleştirilmiş problemlerin lineer stabilite analizi dikkate alınarak; içsel performansın iyileştirilmesine, optimum öncü parametre aralıklarının izole edilmesine ve verimliliğin artırılmasına önemli katkı sağlayabilir. Yapıların yeterince doğru ve verimli bir modelini veren AFC sistemlerine uygulanabilen kapalı devre kontrol cihazlarının optimum ve otomatik tasarımı için kontrol teorisinde önemli ilerleme kaydedilmiştir. Benzer şekilde, bilgisayar yeteneklerinde (işlem hızı, bellek, depolama ve paralel işleme) kaydedilen ilerlemeye, modelleme sorunlarını (türbülans ve algoritmaların) çözmek için benzer çabalar eşlik etmiş ve ilgili Reynolds sayısında kararsız akış hesaplamaları için verimli ve onaylanmış sayısal araçlara varılmıştır. Bununla birlikte, bu çabalar hala gerçek dünya mühendisliğinin ihtiyaç duyduğu şeylerden uzak olsa da kısa süre içerisinde gerçekçi konfigürasyonlarda kararsız akış kontrolü problemlerinin doğru çözümünü sağlama ve son teknoloji ürünü bir PC veya iş istasyonunda yine kısa bir süre içerisinde yepyeni bir problem kurma açısından

güvenilir kabul edilmektedir. AFC'nin temel kavramları tartışılmadan önce, akış kontrol yöntemlerinin genel sınıflandırmasını kısaca açıklayabiliriz. Şekil 1.3, enerji harcamasına ve ilgili kontrol döngüsüne göre akış kontrol yöntemlerinin sınıflandırılmasını göstermektedir [21]. Şekilden görülebileceği gibi akış kontrolü pasif veya aktif yöntemler içermektedir. Ancak son on yıl boyunca, enerjinin veya yardımcı gücün akışa sokulduğu aktif kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine daha fazla önem verilmiştir. Aktif kontrol şemaları önceden belirlenmiş veya etkileşimli yöntemlere ayrılabilir. Önceden belirlenmiş bir kontrol yöntemi, akış alanının durumunu göz önünde bulundurmadan sabit veya kararsız enerji girdilerinin kullanılmasını içerir. Buna karşın pasif yöntemlerin uygulanabilirliği daha kolay ve maliyeti düşüktür.

#### **1.4 Önceki Çalışmalar**

Silindirik geometriler, imalat ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilen yapılardır. Bu nedenle silindir etrafında akış veya boru içerisindeki akış sıkça karşılaşılan problemlerdir.

##### **1.3.1 Sayısal Çalışmalar**

Yüksek hızlı bilgisayarların varlığı, temel denklemleri sayısal olarak çözerek bir dizi sayısal deneyi hızlı bir şekilde gerçekleştirmeyi ve sadece tasarımın son aşamasında pahalı ve zaman alıcı testlere ve deneylere başvurmayı mümkün kılmıştır [22]. Bu tür uygulamalarla literatürde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Birçok uygulamada serbest akım hızlarında silindir üzerinde akış ayrılmaları görselleştirilmiş, farklı tasarımlar için silindir üzerindeki akış yapısı akım çizgili hale getirilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında farklı yüzey pürüzlülük değerleriyle ve silindir üzerine yerleştirilen farklı geometrilerle çalışmalar yapılmış, direnç kuvveti ve direnç katsayısının istenen aralıklara düşürülmesi amaçlanmıştır. Çalışmaların çoğunda silindir bir kanal içerisine yerleştirilmekte ve akış analizi için sayısal veya deneysel yöntemler kullanılmaktadır.

Ranjith ve arkadaşları [23] sarmal kaplamalarla donatılmış dairesel bir silindir üzerindeki akış yapısını HAD yöntemiyle incelemişlerdir. Helisel kaplamaların vorteksle indüklenen titreşimi (VIV) baskılama etkinliği iki farklı Reynolds sayısında



( $Re=100$  ve  $Re=2000$ ) araştırılmıştır. Çalışmalarında,  $10d$  adım boyutlarında ve  $0.15d$  yüksekliğinde üç başlangıç noktalı sarmal ile kaplanan  $d = 40\text{mm}$  çaplı rijit bir dairesel silindir kullanılmıştır. Daimi olmayan akış kullanılarak ağ (mesh) sayısı bağımsızlığı kaldırma katsayısı çıkış parametresi alınarak sağlanmıştır. Statik basınç, hız ve vortisite konturları ile hidrodinamik katsayılar  $C_D$  ve  $C_L$  elde edilmiştir. Sonuç olarak, sarmal kaplamalı silindirin, düz silindire kıyasla daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahip olmakla birlikte sarmal kaplamaların VIV'yi yaklaşık %99 oranında azaltabileceğini raporlamışlardır.

Yeo ve Jones [24] vorteksle indüklenen titreşimleri anlamak için sarmal kaplamalı dairesel silindir yüzeyler etrafındaki akış yapısını sayısal olarak araştırmışlardır. Çeşitli sarmal düzene sahip yivli silindirin etrafındaki akışı, serbest akış hızı  $U$  ve silindir çapı  $D'$  ye bağlı olarak hesaplanan Reynolds sayısının  $1.4 \times 10^5$  değeri için üç boyutlu ayırık girdap simülasyonu (DES) kullanarak incelemişlerdir. Simülasyonlar,  $10D$  uzunluğundaki  $40$  derece sarmal silindir için gerçekleştirilmiştir.  $25D \times 10D \times 35D$  olarak belirledikleri kanal içerisine silindiri giriş kısmından  $15D$  mesafede merkezi olarak yerleştirmişlerdir. Ağ yapısını  $1.2 \times 10^6$  eleman kullanarak oluşturmuşlardır.  $0.01$  zaman aralığında çözümleme yapmışlardır. Sonuç olarak, sarmal modellerin, bir silindirin etrafındaki akış yapılarını ve dolayısıyla silindir üzerindeki ilgili kuvvetlerin oluşumunu büyük oranda etkilediğini göstermişlerdir. Uygun silindir yüzeylerinin, akışla indüklenen geniş çaplı ve düşük frekanslı titreşimleri azaltabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca sarımların en uygun sayısını, büyüklüğünü ve eğimini bulmak için sarmal performansının daha fazla araştırılması gerektiğini, çukurlu yüzeylerin etkinliği gibi diğer tip yüzey modifikasyonlarının da incelenmesi gerektiğini önermişlerdir.

K. Lam ve arkadaşları [25]  $3900$  Reynolds sayısında  $0^\circ$ 'dan  $60^\circ$ 'a kadar olan eğik açılı dalgalı silindir etrafındaki türbülanslı akışın üç boyutlu özelliklerini incelemek için büyük eddy simülasyonu (LES) sayısal yöntemini kullanmışlardır. Hem dalgalı silindirler hem de dairesel silindirler için kuvvet katsayıları ve girdap frekansı ile dalga açıları arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Dalgalı silindir ile dairesel silindir arasındaki vorteks yapılarındaki farklar dalga açısının küçük olduğu durumlarda etkin

iken, büyük açılar için etkinin önemsiz olduğunu vurgulamışlardır. Kritik açı değerini  $45^\circ$  olarak belirtmişlerdir.

Islam ve Rakibul Hassan [26] sabit silindir üzeri akışta Navier-Stokes denklemlerini çözmek için sonlu hacimler yöntemini kullanarak  $Re = 10^5$  te sayısal hesaplamalar gerçekleştirmişlerdir. 2B (2 boyut) sayısal hesaplama, direnç ve sınır tabaka kararsızlığını öngörmek için hayati önem taşıyor olsa da, 3B (3 boyut) sayısal hesaplamaların gerçek akış olayları hakkında genel fikirler verdiğini vurgulamışlardır. Yüzey pürüzlülüğü ve türbülans yoğunluğu, bir katı yüzey gövdesi üzerindeki akışın doğasını kontrol eder. Çalışmalarında, sürtünme katsayısındaki yüzey pürüzlülüğü etkisi ve nispi pürüzlülüğün dolaylı kritik Reynolds sayısının kayması 2B sayısal hesaplamalar ile gösterilmiştir. Vortisite dağılımını, paralel ve dik akış yönlerinde, titreşime ve kaldırma veya çekme kuvvetine neden olabilecek şekilde asimetrik olarak elde etmişlerdir. Düz silindir durumunda, 2B veya 3B sayısal hesaplama için ayrılma açıları, silindir yukarı yönde durma noktasından yaklaşık  $80 \sim 90^\circ$  civarında elde etmişlerdir. Düzgün yüzey için sürüklenme katsayılarını 2B ve 3B sayısal hesaplama için sırasıyla 0.771 ve 0.533 olarak bulmuşlardır. Kritik yüzey pürüzlülüğünü 0,004 sürtünme katsayısını ise yaklaşık 0.43 olarak elde etmişlerdir.

Daneshi [27] yaptığı sayısal çalışmada dairesel bir silindir üzerindeki zamana bağlı, sıkıştırılmaz akışta, laminer ve türbülanslı dalgaların basınç ve hız alanlarına ait dinamik karakteristikleri simüle etmiştir. Hız, basınç alanlarına ait temel denklemler 2B sonlu hacimler yöntemi kullanarak çözdürmüştür. Çalışma silindir çapına bağlı olarak hesaplanan Reynolds sayısının  $10^2$  ile  $10^5$  aralığında gerçekleştirilmiştir. Basınç ve sürüklenme katsayılarını hesaplayarak deneysel ve diğer sayısal sonuçlarla karşılaştırmış sonuçların uyum içerisinde olduğunu belirtmiştir.

Karadağ [28] yaptığı çalışmanın amacını hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) açısından düzensiz ağların ve Büyük Eddy Simülasyon yönteminin alt ağ yöntemi kullanmadan laminerden türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayılarına denk gelen bir akış rejimi için kullanılabilirliğini test etmek olarak belirtmiştir. Üç boyutlu silindir çapına göre Reynolds sayısı 20,000 olan silindir üzerindeki zamana bağlı değişen

türbülanslı akışı sayısal olarak incelemiştir. Sonuçları literatürdeki deneysel çalışmalarla kıyaslamıştır. Sayısal sonuçlara dikgen ayrıştırma yöntemi uygulayarak elde ettiği türbülanslı akışın enerji dağılımı ve akış özelliklerini ayrıntılı olarak incelemiştir. Analiz sonuçlarının literatürdeki deneysel çalışmaların sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğunu belirtmiştir.

Kanaris ve arkadaşları [29] düzlem bir kanala simetrik olarak yerleştirilen dairesel bir silindir etrafındaki akışın iki ve üç boyutlu sayısal simülasyonlarını yapmışlardır. Analizleri, 0.2'lik bir blokaj oranı (silindir çapının kanal yüksekliğine oranı) için 10 ila 390 olan Reynolds sayı aralığında (silindir çapına ve merkez çizgisi hızına göre) gerçekleştirmişlerdir. Uygun ağ yapısı oluşturularak var olan çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Strouhal (St) sayısı ve Re ile basınç katsayısı  $C_p$ ' nin değişimlerinde bir süreksizlik gözlemlemişlerdir.

### 1.3.2 Deneysel Çalışmalar

Çelik ve arkadaşları [30] yaptıkları deneysel çalışmada  $D=40$  mm çap,  $h=120$  mm yükseklik (yükseklik çap oranı,  $h/D=3$ ) değerlerine sahip sonlu-dairesel silindir üzerinde oluşan akış yapısını, serbest akış hızı ve silindir çapına bağlı olarak hesaplanan Reynolds sayısının  $Re_D = 1000$  ile  $7000$  değerleri arasında, PIV tekniği kullanılarak incelemiştir. Deneyler neticesinde, öncelikle anlık hız alanları,  $V$  elde edilmiş, bu veriler kullanılarak zaman ortalama hız alanları,  $\langle V \rangle$ , akım çizgileri  $\Psi$  ve girdap eş düzey eğrileri  $\omega$  çizilmiştir. Sonuç olarak, sonsuz-silindir üzerindeki iki boyutlu akış yapısından farklı olarak, sonlu-silindir, üç boyutlu (3-B) karmaşık bir akış yapısına sahip olduğu ve sonlu-silindir üzerinde oluşan akışın; birçok girdap sistemlerinin birleşmesinden meydana geldiği görülmüştür.

Zhou ve arkadaşları [31] yüzey pürüzlülüğünün direnç katsayısı üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması amacıyla  $6 \times 10^3 < Re < 8 \times 10^4$  ( $Re$ , silindir çapı  $D$ 'yi temel almaktadır) aralığında, farklı yapay yüzey pürüzlülüğüne sahip dairesel silindirlerin kuvvet ve akış özelliklerini ölçmek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Silindir yüzey pürüzlülüğünü, silindir dış yüzeyini (1) zımpara kâğıdı, (2) ağ ve (3) çukurlarla kaplayarak oluşturmuşlardır. Pürüzlülük katsayısı,  $k / D = 0.0028$  ila  $0.025$  arasında

değiştirilmiş ( $k$ , pürüzlülük yüksekliği), parçacık görüntülemeli hız ölçme (PIV) tekniği kullanılarak silindir etrafındaki akış alanının ayrıntılı nicel bir ölçümü gerçekleştirilmiştir. Pürüzlü silindirlerin hidrodinamik kuvvet katsayıları (sürüklenme ve kaldırma), aynı akış koşulları altında ölçülen pürüzsüz silindirlerin katsayılarıyla karşılaştırılmış ve özellikle yüksek Reynolds sayılarında, belirli pürüzlülük yapılarının silindirin ortalama sürüklenme katsayısını önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur.

Yüzey modifikasyonlarının, dairesel bir silindir için titreşimi değiştirmesi amacıyla kullanılması, çok çeşitli araştırmalarda incelenmiştir. Bu modifikasyonlar, düz ve sarmal teller, kademeli ayırma telleri, yakalar, halkalar, vb. kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlara ek olarak, yüzeyden uzakta monte edilmiş kabloların desenlerinin yanı sıra delikli ve eksenel-plakalı muhafaza çeşitleri de kullanılmıştır [32],[33].

Chyu ve Rockwell [34] çalışmalarında, yüzeyi etrafında sarmal bir tel bulunan dairesel bir silindir üzeri akışa ait art izi bölgesini, yüksek görüntülü hız ölçme tekniğini kullanarak karakterize etmişlerdir. Üç ortogonal düzlemdeki vortisitasyon modelleri, silindir çapından küçük bir çapa sahip bir telin önemli etkisini göstermiştir.

Korkischko ve Meneghini [35] bir silindir üzerindeki sarmal geometrik yapıların girdaptan kaynaklı titreşim (VIV) üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bir su kanalı içerisine yerleştirilen farklı adım sayılarında ( $p=5,10,15d$ ) ve yüksekliklerinde ( $h=0.1,0.2,0.25d$ ) yerleştirilen sarmal yapıları Reynolds sayısının 1000 ila 10000 aralığında incelemişlerdir.  $h=0.1d$  sarmal yapılarının, düz silindire kıyasla genlik tepkisini azalttığını, ancak salınımın hala devam ettiğini belirtmişlerdir.  $h = 0.2d$  ve  $h=0.25d$  sarmal yapılarının ise VIV'i neredeyse tamamen bastırdığını göstermişlerdir.

Öner ve arkadaşları [36] yaptıkları çalışmada tabana yakın dairesel silindir etrafındaki akış yapısını üç farklı Reynolds sayısında;  $Re=840, 4150, 9500$  ve beş farklı boşluk oranında;  $G/D= 0.2, 0.3, 0.6, 1.0, 2.0$  PIV tekniğini kullanarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarını sayısal sonuçlarla kıyaslamışlardır  $G/D$  ve  $Re$  arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) ve Yapay Sinir Ağları

(YSA) modellerini kurmuşlardır. YSA modelinin sonuçları ÇDR'nin verdiği sonuçlara göre çok daha küçük belirlemişlerdir. YSA modelinin hız değerlerini ÇDR modeline göre daha iyi tahmin ettiğini belirtmişler ve YSA modelinin kullanılabilir olduğunu savunmuşlardır.

Kunze ve Brücker [37] yaptıkları çalışmada, dairesel silindir arkasında hareketli ince plakalar kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada plakaların hareketini ve akış dinamiğini PIV tekniğini kullanarak araştırmışlardır. PIV deneyleri  $5000 < Re < 31000$  aralığında gerçekleştirilmiş ve ince plakaların hareketi anlık olarak kayıt edilmiştir. Plakaların girdap kopmasını değiştirdiğini ve akış yapısındaki salınımın plakasız duruma göre akış yönünde %42 ve akışa dik yönde %35 oranında azaldığını ifade etmişlerdir.

Gozmen ve arkadaşları [38] PIV yöntemini kullanarak, 8000x1000x750 mm boyutlarında bir su kanalı kullanmışlardır. Silindir üzerine yerleştirilen bölücü plaka pasif kontrol yöntemiyle, 6250 Reynolds değerinde akış karakteristiğini incelemişler. Düz silindir ile akış farklılıklarını yorumlamışlardır. Bölücü plakanın uzunluğunun artmasıyla, girdap dökülmesinin baskılanması üzerindeki etkisinin arttığını belirlemişlerdir.

Fang ve arkadaşları [39] yüzer elemanlar ve sarmal yapı ile çeşitli kapsama sahip esnek bir silindirin (VIV-vortex induced vibrations ) girdap kaynaklı titreşim etkisini araştırmışlardır. 192m x 10m x 4.2m boyutlarında bir çekme tankında gerçekleştirdikleri deneylerde test silindiri; 7.9 m uzunluğunda, 30 mm'lik bir çapta ve yaklaşık 263'lük bir uzunluk-çap oranındadır. Silindir malzemesi 1960 N düşük gerilim ve 2940 N yüksek gerilim kılıfı ile başa çıkmak için yeterli olacak şekilde H65 pirinç malzeme olarak seçilmiştir. Seçilen veri kümeleri için çekme hızları 0.4, 0.8, 1.6 ve 2.0 m / s olarak belirlenmiştir. Hızların her biri 0.4'ün bir katıdır ve çarpanlar 2, 4 ve 5' tir. Dönüşümlü olarak ilk üç hız bir önceki hızın iki katını temsil eder. Çalışmada, iki ilginç bulguya odaklanan ardışık bir dizi deneysel veriyi analiz etmişlerdir. Birincisi, birbirine yakın mesafeli fakat farklı spektral tepki sonucunun, modal bilgi üzerinde ve mod şeklinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır. İkincisi ise, test

silindiri uzunluğu boyunca asimetrik bir konfigürasyonda, yüzdürme elemanları ve sarmal yapı yerleştirildiğinde, ilginç tepki davranışı durumlarını kapsamaktadır. 1.6 m/s ve 2.0 m/s'lik akım hızları için test silindiri üzerinde gerilme mukavemetinin neredeyse eşit bir seviyeye indirilmesindeki etkinliğin bir sonucu olduğunu ilginç bir bulgu olarak belirtmişlerdir.

Assi ve arkadaşları [40] serbest dönuşlü kontrol plakaları ile tandem silindirlerin rüzgar kaynaklı titreşiminin bastırılması üzerine çalışmışlardır. Titreşim genliğini ve ortalama sürtünme ölçümlerini, çapraz akış yönünde tepki vermeksizin, kütle oranı 2 ve sönümlenme seviyesi %0.7 olan bir dairesel silindir için sunmuşlardır. Deneyler, serbest yüzeyli ve 0.6m x 0.7m x 8.0m test kesit alanına sahip bir su kanalı içinde gerçekteşirilmiştir. Akışı görselleştirmek amacıyla modellerin tam bir görünümünü sağlamak için kesitlerin yan duvarları ve alt kısmı camdan yapılmıştır. Serbest akış hızını (U) sürekli değiştirmişler ve türbülans yoğunluğu %3'ten az olan akışın en az 0.6 m/s' ye kadar elde edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Dairesel silindir modellerini, 50 mm çaplı bir pleksi (akrilik) tüpünden elde etmişler, yaklaşık 30000 değerinde bir Reynolds sayısı hesaplamışlardır (silindir çapına D ve serbest akışkan hızı U değerlerine göre). Modelleri dikey olarak monte etmişler ve serbest su yüzeyinden hemen hemen tam derinliğe kadar geçirmişlerdir. Aşağı akış silindirini, silindirin alt ucu ile testin cam tabanı arasında 2 mm' lik bir boşluk olacak şekilde monte etmişlerdir. Islak uzunluğu 650 mm olan (su seviyesinin altında toplam uzunluk) modelin ortaya çıkan en boy oranını 13 olarak belirtmişlerdir. Sonuç olarak plakaların etkili olması için minimum uzunluk gerektirdiğini belirtmişlerdir. Çalışmada paralel plakalara dayanan baskılayıcıların VIV ve WIV' yi önemli bir sürtünme düşüşüyle ile bastırmak için büyük bir potansiyele sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Huang ve Sworn [41] çeşitli kademeli ve ardışık düzenlemelerde sarmal kaplama ile donatılmış iki sabit dairesel silindirin hidrodinamik katsayıları üzerine çalışmışlardır. Deney sonuçları, bir su kanalında sabit düzgün çapraz akışa maruz bırakılan üçlü helezonik kaplamalarla donatılmış iki özdeş sabit silindirden oluşan yapı için elde edilmiştir. İki silindiri çeşitli kademeli ve ardışık pozisyonlarda yerleştirmişlerdir. Toplam olarak, 32 nispi pozisyon, 2 ila 15 çapları arasında değerlen aralıklar ve 0 ila

7.5 çapları arasındaki enine aralıklar için testler gerçekleştirilmiştir. Hidrodinamik yüklemeleri, her bir silindir için hem hat içi hem de çapraz akış yönlerinde ölçmüşlerdir. Silindir çapına göre nominal Reynolds sayısı  $1.40 \times 10^4$  ila  $4.21 \times 10^4$  arasındadır. Aynı çapa sahip ve üzeri helisel kaplamalı bir çift rijit silindirden oluşan sistem için deneyleri 35m x 3m x 0.79 m boyutlarındaki su kanalında gerçekleştirmişlerdir. Maksimum akış hızı yaklaşık olarak 0.7 m/s'dir ve testler ortalama giriş hızları 0.2, 0.4 ve 0.6 m/s için gerçekleştirilmiştir. Kaplamalı silindirin pürüzsüz silindire göre daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Niteliksel olarak, iki kaplamalı silindir arasındaki etkileşimin, iki düz silindir arasındaki ortalama hidrodinamik katsayılar açısından benzer olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sarmal kaplamaların yukarı akış silindirindeki dalgalanan kuvvetleri azaltırken, aşağı akışlı silindir için indirgemenin önemli ölçüde daha küçük olduğunu belirtmişlerdir.

Huang [42] üç fazlı helisel olukların sabit dairesel silindirlerin sürtünmesi üzerindeki etkilerini ve elastik olarak desteklenen silindirlerin girdap kaynaklı titreşimlerini incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Deneyleri, su derinliği ayarlanabilir 77m x 4.6m x 2.5 m boyutlarında ve maksimum taşıma hızı yaklaşık 3 m/s olan su tankında gerçekleştirmiştir. Deneysel silindirini 0.075 m çap, 1 m uzunluk, 2 m kütle oranı olarak belirlemiş ve silindir üzerine 12mm genişliğinde, 15 mm derinliğinde, 6 adım sayısında ve 3 sarmal şeklinde oyuklar oluşturmuştur. Elastik olarak desteklenen silindir için, Reynolds sayısı  $1.3 \times 10^4$  ila  $4.6 \times 10^4$  arasında değişirken, sabit silindir için  $3.1 \times 10^4$  ila  $3.75 \times 10^5$  aralığında yer almıştır. Sonuçların doğrudan karşılaştırılmasına izin veren bir yaklaşım benimsemiş, aynı boyuttaki ve fiziksel özellikteki helezonik yüzey olukları olan veya olmayan iki silindiri aynı deney düzeneklerinde test etmiştir. Elastik olarak desteklenen silindir testlerinde, silindirler dikey bir destek çubuğuna bağlanmış ve bir çekme tankına çekilmiştir. Hem aynı eksenli hem de çapraz akış titreşimlerini gözlemlemiştir. Sabit silindir testlerinde, silindirler dikey destekler üzerine bağlanmış ve aynı çekme tankına yatay olarak yerleştirilmiştir. Shan Huang, sarmal olukların, girdap kaynaklı çapraz akış titreşim genliklerinin bastırılmasında etkili olduğunu ve tepe genliğinin %64 oranında azaldığını vurgulamıştır. Sabit silindirler için yapılan çalışmada test edilen subkritik Reynolds sayı aralığında % 25'e varan sürtünme yükü azaltımları sağlandığını belirtmiştir.

Senga ve Larsen [43] sarmal kaplamalı silindirleri kullanarak zorlanmış hareket deneyleri üzerine çalışmışlardır. Deneyleri, boyu 40 m, genişliği 6.45 m ve su derinliği 1.5 m olan su tankında gerçekleştirmişlerdir. Çapı ve uzunlukları 0.0761m x 2.015m olan sarmal adım uzunlukları 17.5D ve 5D, genişlikleri 0.25D ve 0.14D olan iki farklı silindiri düz silindir ile karşılaştırmışlardır. Sarmal yapıların, vorteks dökülmelerini engelleyerek bu dökülmelerin uzunluklarını kısaltabileceğini belirtmişlerdir. Genel olarak, sarmal bir silindir üzerindeki statik sürükleme kuvvetinin, düz bir silindirden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, eğer VIV başarılı bir şekilde bastırılırsa, sarmal kaplamalı bir silindir üzerindeki sürükleme kuvvetini, VIV' nin sürtünmeyi geliştirdiği bilindiğinden, titreşimli bir düz silindirdekenden daha küçük olabileceği tezini ortaya atmışlardır.

Zeinoddini ve arkadaşları [44] eğik helisel kaplamalı dairesel silindirlerin çapraz akışlı girdap kaynaklı titreşimlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, dikey ve eğimli düzenlemelerde, düz ve helisel olarak kaplanmış silindirlerin girdap kaynaklı çapraz akış titreşimleri üzerindeki etkileri deneysel olarak sunulmuştur. İncelenen eğim açıları  $\theta=0^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $45^\circ$  olarak belirlenmiştir. Reynolds sayısı aralığı 4000-45000 olarak seçilmiştir. Tüm testlerde kütle oranı ve kütle sönümlenme parametrelerini sabit tutmuşlardır. Üniorm akış formunda bütün durumlar için dış çapı  $D=50$  mm ve uzunluğu  $L=500$  mm olan alüminyum silindir tüpler kullanmışlardır. Helisel kaplamalarda adım  $P=10D$  ve yükseklik  $H=0.10D$  olarak belirlenmiş ve 4 eksenli CNC tezgâhlarda alüminyum silindirlerden elde etmişlerdir. Deneyleri, 25m x 2.5m x 1.7m boyutlarındaki su kanalında gerçekleştirmişlerdir. Deney düzeneğini; bir veri toplama sistemi, bir yük hücresi, bir sinema kamerası ve diğer ilgili araçları destekleyen hareketli bir araba ile donatmışlardır. Taşıyıcının maksimum 4 m/s hıza sahip olduğunu ve 0.001 m/s hassasiyetle bir PC tarafından kontrol edildiğini belirtmişlerdir. Tepki genlikleri, salınım frekansları, kaldırma kuvveti katsayıları ve kuvvet ile yer değiştirme arasındaki faz kaymalarını ölçmüş, rapor etmiş ve tartışmışlardır. Düz silindirler için eğim açısının  $0^\circ$  dan  $20^\circ$  ye artmasıyla salınım genliğinin %26 oranında azaldığını,  $20^\circ$  den  $45^\circ$  e artırılmasıyla %6 lık bir düşüşle genliğin azalmaya devam ettiğini belirtmişlerdir. Helisel kaplamalı silindirler için ise salınımların maksimum genliği  $20^\circ$  için %51,  $45^\circ$  için %62 oranında azaldığını raporlamışlardır.



Xu ve arkadaşları [45] helisel kaplamalarla donatılmış eğimli bir esnek silindir için aksenal açının VIV bastırma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyle,  $137.0\text{m} \times 7.0\text{m} \times 3.3\text{m}$ 'lik (uzunluk  $\times$  genişlik  $\times$  derinlik) su tankında gerçekleştirmişlerdir. Su tankı içerisine ortagonal olarak 0, 15, 30, 45 açılarında helisel kaplamalı silindirler yerleştirmişlerdir. 0.05 m/s aralıklarla 0.05 ila 1 m/s akış hızları ve buna karşılık gelen 800- 16000 Reynolds sayıları kullanılmıştır. 350'lik bir en boy oranına (uzunluk/çap, L/D) sahip esnek düz silindirin uzunluğunu 5.60 m ve çapını 16 mm olarak belirlemişlerdir. Suda esnek bir silindirin VIV bastırma işlemi için en etkili konfigürasyon olarak kabul edildiğini belirttikleri silindirler üzeri helisel kaplamalar için, 17.5D'lik bir adım sayısı ve 0.25D'lik bir yükseklik seçmişlerdir. Helisel kaplı silindirin  $\alpha=0^\circ$  sinde ortalama sürtünme katsayısında büyük bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca eğimli bir esnek silindirin VIV'sini baskılamak amacıyla en iyi helisel kaplama konfigürasyonlarını teyit etmek için daha fazla deneysel araştırma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Gao ve arkadaşları [46] helisel yapıların kapsamının esnek bir yükselticinin girdap kaynaklı titreşim tepkisi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, girdap kaynaklı titreşimlerin helisel yapıların kapsama miktarına büyük ölçüde bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Akar ve Küçük [47] silindir arkasındaki daimi olmayan akış yapısının pasif yöntemle kontrolü üzerine inceleme yapmışlardır. Bu deneysel çalışmayı, iki adet depo ve bu iki depo arasında bulunan boyutları 750 mm x 1000 mm x 8000 mm olan kapalı devre açık su kanalında gerçekleştirmişlerdir.  $D_i = 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  mm olan yedi farklı çapta silindir arkasında meydana gelen akış yapısını, bu silindir etrafına yerleştirilen  $\beta=0.5$  geçirgenlik oranına sahip silindirle kontrol etmeye çalışmışlardır. Dış silindirin çapı  $D_d = 100$  mm olarak seçilmiştir. Silindir üzerine açılan deliklerin çapı  $d=10$  mm'dir. Deneyler süresince su yüksekliği  $h_w = 400$  mm'de sabit tutulmuştur. Suyun hızı  $U=100$  mm/s ve buna karşılık dış çapa bağlı Reynolds sayısı  $Re_D=10000$ 'dir. Silindir arkasında meydana gelen akış yapısını PIV tekniği kullanarak incelemişlerdir. PIV deneylerini 200 mm'de orta düzlemde gerçekleştirmişlerdir. Delikli silindirin, farklı çaplardaki silindir ( $D_i = 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  mm)

arkasında meydana gelen girdap kopmalarını azalttığını gözlemlemişlerdir. Yüksek çap oranlarında ( $D_i/D_d \geq 0.7$ ) delikli dış silindirin akış kontrolü üzerindeki etkinliğini kaybettiğini belirtmişlerdir.

Oğuz ve arkadaşları [48] derin suda dairesel silindir arkasında meydana gelen akış yapısının örgü teller ile kontrol edilmesi üzerine çalışmışlardır. Çapı  $D=50$  mm olan ve dairesel silindir etrafına sarılan farklı kalınlık ve geçirgenlik oranına sahip paslanmaz çelik malzemeden yapılmış örgü tellerin etkisi  $Re_D = 5000$  değerinde araştırılmıştır. Geçirgenlik oranları  $\beta = 0.5 - 0.8$  aralığında  $0.1$  artımlarla dört farklı değer kullanmışlardır. Silindir üzerine sarılmış tellerin kalınlıklarını  $b = 1$  mm,  $2$  mm,  $3$  mm ve  $4$  mm olarak belirtmişlerdir. Çukurova Üniversitesinde yaptıkları deneyleri PIV tekniği kullanılarak yürütmüşlerdir. Deneyler boyunca, su seviyesini ( $h$ )  $550$  mm'de sabit tutmuşlardır. Türbülans Kinetik Enerji (TKE) ve Reynolds kayma gerilmesi değerlerinin değişimini değerlendirmişlerdir. Silindir arkasındaki akışı, en iyi geçirgenlik oranı  $\beta = 0.6$  ve kalınlığı  $b = 4$  mm olan tel örgü yapısının kontrol ettiğini açıklamışlardır.

Zhou ve arkadaşları [49] direnç ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki üzerinde çalışmışlardır. Silindir çapına bağlı olarak  $6 \times 10^3 < Re < 8 \times 10^4$  değerlerinde farklı tiplerde yapay yüzey pürüzlülüğü olan dairesel bir silindirin kuvvet ve akış özelliklerini ölçmek için deneyler yapmışlardır. Silindir üzeri pürüzlülüğü, silindirin dış yüzeyine düzgün bir şekilde dağıtılmış (1) zımpara kağıdı, (2) örgü ve (3) çukurlarla kaplayarak oluşturmuşlardır.  $k$  pürüzlülük yüksekliği olmak üzere pürüzlülük katsayısını  $k/D = 0.0028$  ila  $0.025$  arasında ele almışlardır. PIV tekniği kullanılarak oluşturdukları silindirler etrafındaki akış alanını ayrıntılı bir şekilde görüntülemişlerdir. Yüzey pürüzlü silindirlerin hidrodinamik kuvvet katsayılarını (sürüklenme ve kaldırma), aynı akış koşulları altında ölçülen düz bir silindirinki ile karşılaştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün belirli konfigürasyonunun, özellikle büyük Reynolds sayılarında, silindirin ortalama sürüklenme katsayısını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Bu azalmanın  $2 \times 10^4 \leq Re \leq 8 \times 10^4$  değerleri için, çukur gövdeli silindirde yaklaşık %30 ( $r/D = 0.1$ ,  $d/D = 0.025$ ) ve pürüzlü silindir için yaklaşık %20 ( $k/D = 0.02$ ) olduğunu raporlamışlardır. Ayrıca, yüzey pürüzlü

silindirlerin kök-ortalama-kare (RMS) kaldırma katsayısının, düz bir silindirinkinden önemli ölçüde daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Sang-Joon Lee ve Jung-Yeop Lee [50] nispeten yüksek bir zorlama frekansı ile rotasyonel salınım hareketine maruz kalan dairesel bir silindir arkasındaki akış karakteristiğini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyleri zorlanma frekansı  $f_f$  'nin doğal girdap dökülme frekansı  $f_n$  'ye oranının 0.0 ila 1.6 olduğu aralıkta, 30 derece salınım genliği ve  $4.14 \times 10^3$  Reynolds değerinde gerçekleştirmişlerdir. Frekans oranına bağlı olarak farklı akış yapıları için 3 farklı rejim bölgesi oluşturmuşlardır. Deneyleri, 0.72m (genişlik) - 0.6m (yükseklik) - 6.75m (uzunluk) test kesitli kapalı çevrim bir subsonik rüzgâr tüneline gerçekleştirmişlerdir. Deneysel model olarak  $L=400$  mm uzunluğunda ve  $D=30$  mm dış çaplı bir akrilik boru parçası kullanmışlardır. Serbest akış hızını  $U = 2$  m/s' de sabitlemiş ve silindir çapına göre karşılık gelen Reynolds sayısını 4140 olarak belirlemişlerdir. Dairesel bir silindirin rotasyonel salınım hareketinin, art izi bölgesindeki akış yapısını kontrol etmek için etkili ve ümit verici bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak, elde ettikleri sonuçların, geçici olarak çözülmüş niceliksel ve niteliksel akış bilgisinin, vorteks yapısının döngüsel varyasyonunu anlamada ve açık-döngü aktif akış kontrolünün, art izi bölgesi akış yapısı üzerindeki etkisini analiz etmede yararlı olduğunu savunmuşlardır.

Oruç [51] yaptığı çalışmada aerodinamik bir şekle sahip bir elekle (dairesele bir dış kontrol elemanı) çevrelenmiş dairesel bir silindirin aşağı akım akışı için PIV ölçümlerinin sonuçlarını sunmuştur. Deneysel ölçümleri 8000mm x 1000mm x 750mm boyutlarında dolaşan bir su kanalında gerçekleştirmiştir. PIV tekniği, kanala düşey yerleştirilen silindir etrafındaki hız vektörü alanlarının elde edilmesi için kullanılmıştır. Kanaldaki ortalama akış hızı  $U$ 'yu,  $D=50$  mm silindir çapına bağlı olarak 5200 Reynolds sayısına karşılık gelen 103.5 mm/s olarak belirlemiştir. Kontrol elemanının  $L/D$  değerleri 2, 2.4, 2.8 ve 3.2 olarak seçilmiştir. Silindirden ayrılan sınır tabakalarının zorla yeniden birleştirilmesinin, silindirin etrafındaki elek ayarlanarak sağlandığını kaydetmiştir.  $L/D$  değişken parametresinin, akışa paralel ve dik yönler boyunca türbülans istatistiklerinin dağılımını baskın olarak etkilemediğini, ancak daha küçük  $L/D$  değeri için türbülans seviyesinin hafifçe azaldığını belirtmiştir. Bu  $Re$  için,

dairesel silindir etrafındaki akış tamamen geliştirilmiş ve türbülans yoğunluğu yaklaşık %0.5 olmuştur. Sonuç olarak, türbülansın yoğunluğu, Reynolds kayma gerilmesi ve türbülans kinetik enerji büyüklüklerinin, sadece kayma tabakalarında değil, aynı zamanda, düz silindire kıyasla hem enine hem de akıntı yönleri boyunca azaldığını belirtmiştir. L/D parametresinin, türbülans istatistiklerinin dağılımını önemli ölçüde etkilemiyor gibi görünmekte olduğunu, ancak deneylerde daha küçük bir L/D durumu için türbülans seviyesinin kademeli olarak azaldığının doğrulandığını belirtmiştir.

Zhou ve arkadaşları [52] yaptıkları çalışmada, 10d adım boyutunda ve 0.12d yüksekliğinde üç sarmal kaplamalı  $d=80\text{mm}$  çaplı dairesel bir silindiri rüzgar tüneline test etmişlerdir. Sarmal kaplamaların VIV'yi yaklaşık %98 oranında azalttığını belirtmişlerdir. Deneyleri, test kesitinin boyutlarını 2230mm x 2870 mm (yükseklik x genişlik) olarak belirtilen rüzgar tüneline düşük hız kesitinde gerçekleştirmişlerdir. Çapı 80 mm ve uzunluğu 1600 mm olan alüminyum silindir modelleri, öncelikle düz bir silindir olarak daha sonrasında bir sarmal kaplamalı silindir olarak kullanmışlardır. VIV bastırmada en etkili üç-başlangıçlı sarmal kaplamalar, 10d'lik adım uzunluğuna ve 0.12d'lik adım yüksekliğe sahiptir. Silindirin L/d (en/boy) oranı 20'dir. Düz silindirin kütlesini 3.035 kg ve sarmal kaplamalı silindirin kütlesini ise 3.496 kg olarak belirlemişlerdir. Sarmal silindir art izi bölgesindeki çapraz korelasyon katsayısı, düz silindir art izindekinden çok daha küçüktür. Sarmal silindire ait vortikal yapıların korelasyon uzunluğu, düz silindirin 1/8'i kadardır. Sonuç olarak, sarmal silindir art izindeki izotropinin (yönden bağımsızlık) düz silindir art izindekinden daha anlaşılır olduğunu belirtmişlerdir. Bunu, ölçtükleri enine hız spektrumlarını izotropiye dayanan hesaplamalar ile karşılaştırarak göstermişlerdir.

Ekmekci [53] dairesel silindir yüzeyine sarılan tek bir düz ve üç sarmal telin üniform çapraz akışta kritik akışa olan etkilerini incelemek için deneysel bir araştırma gerçekleştirmiştir. Açık yüzey su kanalında parçacık görüntülemeli hız ölçme tekniği kullanmıştır. Ana silindir olarak, dış çapı  $D = 50.8\text{ mm}$  olan dairesel bir kesite sahip, PIV ölçümleri sırasında kullanılan lazer ışığının yansımalarını azaltmak için içi su ile doldurulmuş olan 3.175 mm kalınlığındaki pleksiglas tüpler kullanmıştır. Tüm

deneyler,  $U_o=197$  mm/s' lik bir serbest akış hızında ve kritik altı Reynolds sayısı  $Re_d=10000$ ' de (silindir çapına bağlı olarak) gerçekleştirilmiştir. Tellerin çapı silindirin çapının % 1,2'si olarak belirlenmiştir. Silindir üzerine yerleştirilen teller akış eksenine göre  $60^\circ$  açıyla konumlandırılmıştır. Ekmekçi elde ettiği sonuçlarda, hem silindir üzeri açılı düz tel için hem de telin kritik konumda olduğu düzlemde silindir-sarmal konfigürasyonları için tutarlı eğilimler gösterdiğini belirtmiştir. Her iki durumda da, hemen hemen aynı büyüklükteki art izi, akış yönünde genişlediği ve her iki konfigürasyon için, genlik tepe noktalarında ve RMS hız çalkantılarında azalma gösterdiği belirtilmiştir.

Kai Liu ve arkadaşları [4] bir splitter (ayırıcı) plakanın, kapalı bir kanalda simetrik olarak yerleştirilmiş dairesel bir silindir etrafındaki akış alanına olan etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. 30 mm çapında pleksiglas malzemeden elde ettikleri dairesel silindiri, 0.3 blokaj oranında kanal içerisine yerleştirmişlerdir. Ayırıcı plaka uzunluğunu,  $L/D$  (L plaka uzunluğu, D silindir çapı) 0 ile 1.5 arasında değiştirmişler ve Reynolds sayısını silindir çapına bağlı olarak, 2400 ve 3000  $Re_D$  kabul etmişlerdir. Deneysel sonuçlarla, ayırıcı plakanın aşağı akım türbülanslarının stabilizasyonu üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir. Kısa plaka uzunlukları için akış yapısının düz silindire göre belirgin şekilde değiştiğini, vorteks dökülme sıklığının azaldığını, uzun plakalar için ise ikincil girdapların oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca  $Re=3000$  değerinde ayırıcı plakanın stabilize etkisinin  $Re=2400$  değerine göre daha belirgin olduğunu görmüşlerdir.

Gündem ve arkadaşları [54] çalışmalarında, boru dış yüzeyine yerleştirilen boyuna yivli pürüzlülüğün, boruya etkileyen sürüklenme (direnç) kuvveti üzerindeki etkisini deneysel olarak incelenmiş ve üniform kum pürüzlülük ile karşılaştırmışlardır. Boruya etkileyen sürüklenme kuvvetinin borunun tabanla olan mesafesi ve pürüzlülük elemanlarının yüksekliği arttıkça arttığı, yiv genişliği azaldıkça azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca aynı yükseklikteki boyuna yivli pürüzlülük ve üniform kum pürüzlülük elemanlarına sahip boruya etkileyen sürüklenme kuvvetleri arasında bir miktar fark olduğunu tespit etmişlerdir.

## 2. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde üzerinde farklı geometrik yapıların bulunduğu bir silindir etrafındaki akış alanını analiz etmek için kullanılan deneysel ve sayısal yöntem teknikleri açıklanmaktadır. Kullanılan su kanalının tanıtımı, incelenen modeller ve bu modellerin su kanalına yerleştirilmesi, sisteme adapte edilen cihazlar, görüntü elde etme ve bu görüntülerin işlenerek hız vektörleri ve buna bağlı olarak akım çizgileri, türbülans kinetik enerji konturları vb. son işlem adımlarına kadar olan süreci kapsamaktadır. Ayrıca sayısal yöntemde kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz süreci, kullanılan ağ yapısı ve çözüm modülü verilmektedir.

### 2.1 Su Kanalları

Su kanalları akademik çalışmalar ve endüstriyel amaçlı kullanılmak üzere su akışının üstü açık veya kapalı kanallarda modellendiği kapalı çevrim akış döngüsüne sahip deney düzenekleridir. Şekil 2.1’de Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarında bulunan su kanalı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Su kanalı görünümü

Deneysel giriş ve çıkışında iki adet su haznesi, test odası ve su akışını sağlayan aksel pompaların bulunduğu 2 boru hattından oluşan bu su kanalında gerçekleştirilmiştir. Su kanalı serbest yüzeyli (üst kapakları olmayan) bir test bölümüne sahiptir.

Su kanalının temel bileşenleri Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Su hazneleri ve boru hattında çelik malzeme kullanılmıştır. Test odası iskeleti çelik, duvarları ise pleksiglas malzemeden imal edilmiştir. Ayrıca yapı, sigma profiller ile güçlendirilmiştir. Kanalda maksimum akışkan hızı 0.4 m/s’dir. Test odası kesiti 800x800 mm yüksekliği 1000 mm ve uzunluğu 6000 mm’dir. Sistemin toplam uzunluğu 11 m olarak oluşturulmuştur. Sistem üzerindeki motor 380 V, 50 Hz, aksel pompa ise 11kW, 23.2 A özelliklere sahiptir.



**Şekil 2.2** Su kanalı temel bileşenleri

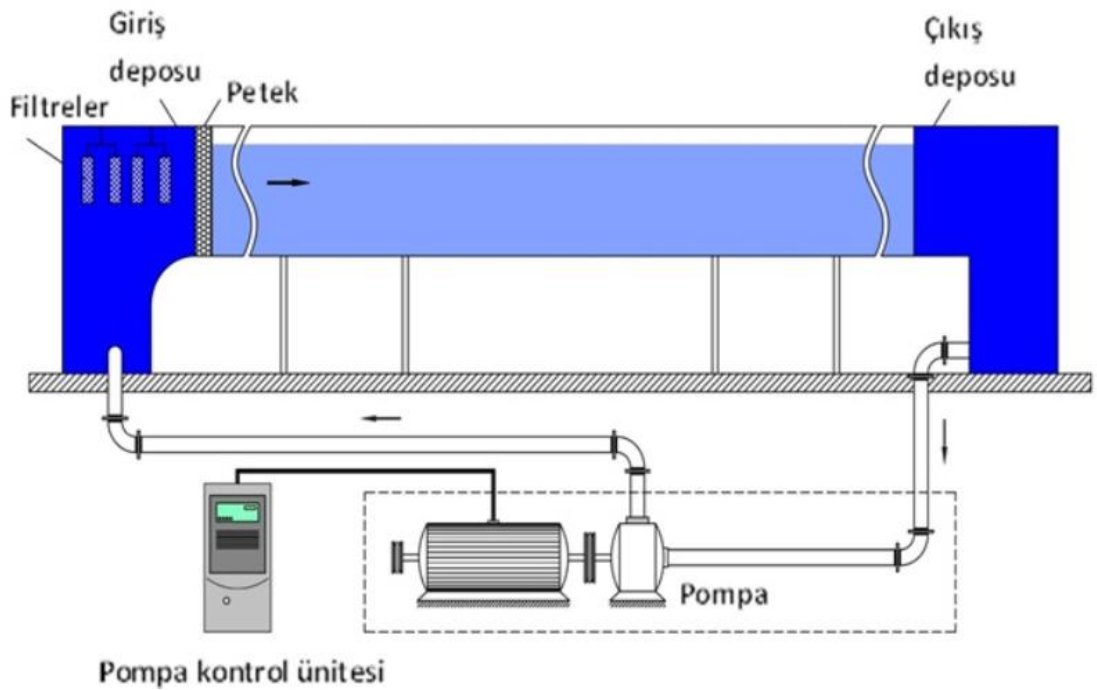
Akım yönüne göre su besleme olarak adlandırılan hazne, içinde akımı düzenleyecek petek (honeycomb) ve ağ sistemini barındırır. %80 geçirgenlik özelliğindeki tel ağ ve silindirik delikli levha suyun homojen olarak kanala girişini sağlar. Petek ve tel ağ, akışın türbülansını düşürerek düzenli ve düşük türbülanslı akış sağlar. Özellikle çelik ağ tipleri değiştirilerek kanalın türbülans değerleri kontrol edilir.

Test odası, deneysel çalışmaların yapıldığı bölümdür. Pleksiglas malzemeden üretilen bu bölüm besleme haznesinden gelen homojen akışın, toplama haznesine iletilmesi

görevini de gerçekleştirir. Ayrıca basınç altında sistem yapısal olarak sağlamlaştırmak adına sigma profillerle üstten de güçlendirilmiştir.

Toplama haznesi, akışkanın toplandığı ve döngüyü tamamlamak adına tekrar motorların bağlı olduğu borulara akışkanın iletiminin sağlandığı haznedir. Toplama haznesinde motorlara yabancı cisim kaçmasını engellemek için boru hattı girişinde tel ağ bulunmaktadır.

Kontrol paneli, su tüneline bağlı motorların kontrolünün sağlandığı paneldir. Sistemin çalışma hızının ayarlanması bu panel üzerindeki dijital göstere yardımıyla sağlanır. Tünel hız kalibrasyonu boş ve %80 dolulukta  $V=0.01$  m/s için 1 Hz'dir.



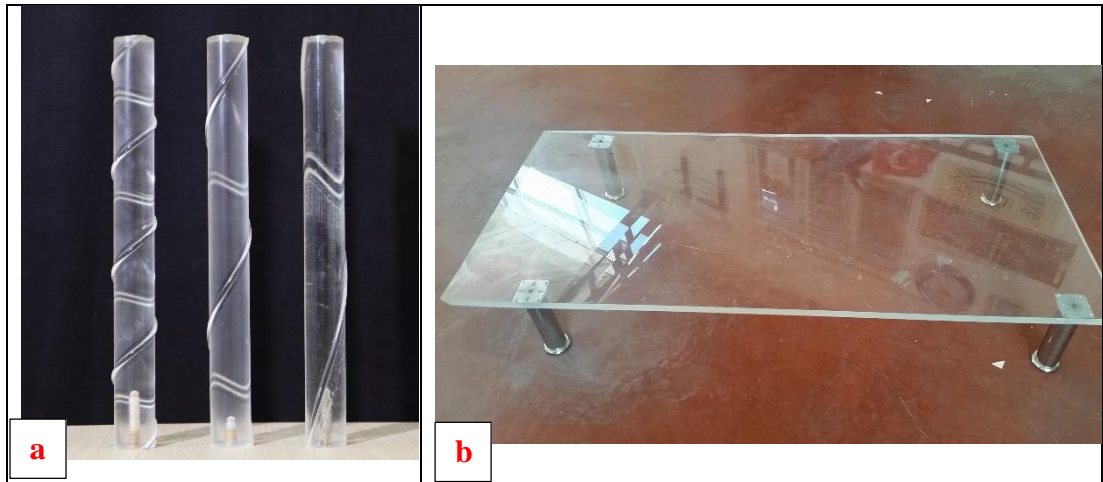
Şekil 2.3 Deney düzeneği şematik görünümü

## 2.2 Modeller

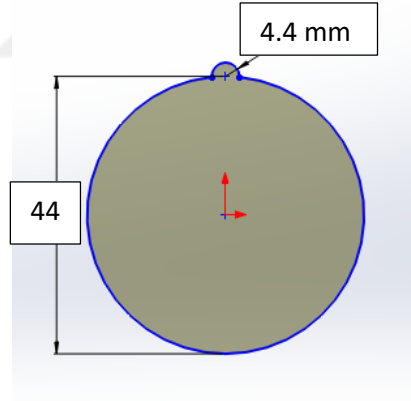
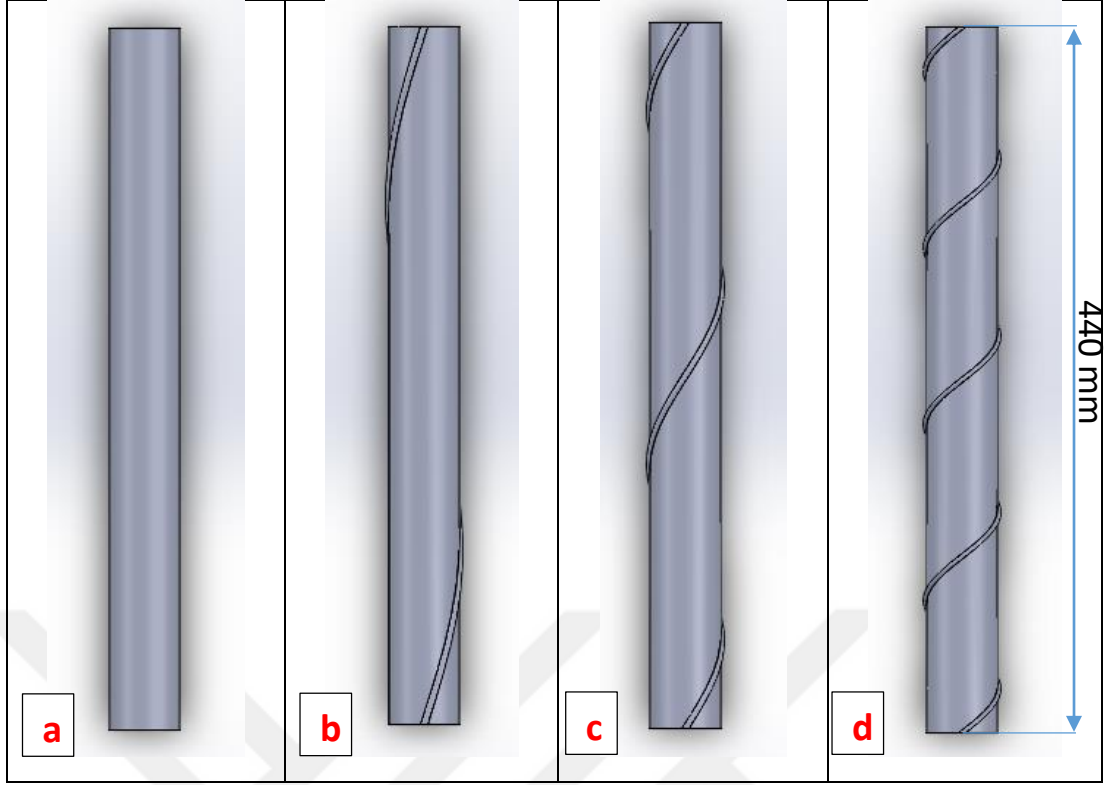
Deneyleerde kullanılan silindir modelleri Şekil 2.4' te ve Şekil 2.5' te gösterilmektedir. Silindirler üzerine işlenen sarımların yapısı ve sayısı katı model programıyla çizilerek belirlenmiştir. Tek, çift ve dört sarım sayısından oluşan 3 model ile düz silindir olmak üzere toplam 4 adet deney modeli oluşturulmuştur. Modeller pleksiglass malzemeden



imal edilmiştir. 50 mm çapındaki pleksi tüpler, yüksek hassasiyetli CNC freze tezgahı kullanılarak işlenmiştir. Silindirlerin L/D (boy/çap) oranı ve silindir yüzeyindeki yarım silindir şeklindeki spiral sarımların D/d (silindir çapı/ sarım çapı) oranı 10 olacak şekilde işlenmiştir. İşleme sırasında malzemenin yapısında bozulmayı önlemek için silindirin uzunluğu 440 mm ile sınırlandırılmıştır. Deneyler su kanalına yerleştirilen bir platform üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4'te platform gösterilmiştir. Platformun uzunluğu 1500 mm, genişliği 700 mm ve platformun üst yüzeyinin platformun kanal tabanından yüksekliği 220 mm olarak ayarlanmış, platform yüzeyi ile su yüzeyi arasındaki mesafe 600 mm olarak seçilmiştir. Silindirlerin bir ucu, test kanalına yerleştirilen sehpaye montajlanması için 10 mm çapta 10 mm uzunluğunda delinmiştir. Bu montajlama ile silindir rijit hale getirilmiştir. Silindir çapına ve kanal hızına bağlı Reynolds sayısı 10000 olarak hesaplanmıştır. Deneyler, açısal pozisyonun etkisini araştırmak için sarımların silindir durma noktasına göre  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$  'lik açısal pozisyonunda yapılmıştır. Deneyler süresince her bir açısal pozisyon için 1000 adet anlık görüntü kayıt edilmiştir. Elde edilen görüntülerin prosesleri gerçekleştirilerek hız vektörleri hesaplanmıştır. Bu verilerden yararlanılarak akış karakteristikleri belirlenmiştir.



Şekil 2.4 Deney malzemeleri a) Modeller b) Platform



**Şekil 2.5** Silindir modelleri boyutsal gösterimi

Şekil 2.5’ te katı modellemesi yapılan silindirler gösterilmektedir.  $0^\circ$  konumları a, c ve d silindir modelleri için orta nokta (220 mm mesafesi), tek sarım olan b modeli için deney ve analiz şartları göz önünde bulundurularak kanala sayfa düzlemine göre dik yerleştirildiği için  $0^\circ$  konumu 330 mm mesafesi olarak ayarlanmıştır. Sarım adım sayıları 1, 2 ve 4 olan b, c, d modellerinde, sarmalın ileri durma noktasına göre  $30^\circ$  lik konum değişikliği için hesaplanan mesafeler sırasıyla tek sarımda 36.67 mm, çift

sarımda 18.33 mm ve dörütlü sarımda 9.17 mm'dir. Bu mesafe değerleriyle deney görüntü düzlemleri belirlenmiştir. Belirlenen düzlem noktaları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1** Model silindirler için düzlem noktaları

Düzlem Derecesi	Düz Silindir (mm)	Tek Sarım (mm)	Çift Sarım (mm)	Dört Sarım (mm)
0	220	330	220	220
30		293.33	238.33	229.17
60		256.66	256.66	238.34
90		220	275	247.51
120		183.32	293.33	256.65
180		110	330	275

### 2.3 Görüntüleme Teknikleri

Akışkana eklenen parçacık hızlarını ölçerek farklı düzlem, boyut veya fazdaki akış alanlarını incelemek için çeşitli deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler; parçacık çizgi hız ölçümü (PSV), lazer benek hız ölçümü (LSV), parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) ve parçacık izlemeli hız ölçümü (PTV) olarak sıralanabilir. Esasen bu yöntemlere veya küçük varyantlarına dayanan darbeli ışık hız ölçümü (PLV), parçacık görüntü yer değiştirme hızı ölçümü (PIDV), parçacık yer değiştirme hız ölçümü (PDV), dijital parçacık görüntülemeli hız ölçümü (DPIV), vb yöntemler de türetilmiştir. Bunların yanı sıra holografik parçacık görüntülemeli hız ölçümü (HPIV) ve fotogrametrik parçacık izlemeli hız ölçümü (PPTV); LSV, PIV veya PTV olarak uygulanabilen üç boyutlu yöntemlerdir.

#### 2.3.1 PIV

Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV), belirli bir akış alanında anlık hız ölçümleri sağlayan ve akışkanlar dinamiği uygulamalarının birçoğunda başvuru alan önemli modern deneysel yöntemlerden birisidir. Akış alanının nicel ölçümünü sağlayan bu tekniğin esas amacı belirlenen bölgedeki akış davranışının incelenmesidir. Dolayısıyla birçok araştırmacı tarafından çok küçük akış hızlarından yüksek akış hızlarına kadar hız ölçümleri sağlanarak akış davranışları incelenmiştir.

Pitot tüpü, sıcak tel anemometresi ve lazer doppler velosimetre gibi bir nokta ölçümleri için kullanılan geleneksel yöntemlerin aksine, PIV tekniğiyle tam akış alanının ölçümleri sadece birkaç mikro saniye sürer. Genel ölçüm maliyeti, kısa ölçüm süresiyle önemli ölçüde azaltılabilir ve sayısal çalışmalara referans olması için kabul edilebilir bir doğrulukla kararsız yüksek hızlı akışlardaki uygulamalar için çok uygundur.

Son yıllarda teknolojiyle birlikte modernize olarak hızla gelişen PIV tekniğinin kökeni geleneksel nicel parçacık akışı görselleştirmelerine dayanmaktadır; ancak 1983'te Meynard'ın yaptığı çalışmayla bugünkü formunun temelleri atılmıştır [55].

PIV teorisi için ilk derleme 1980'lerin sonunda Adrian (1988) tarafından yapılmış, bundan kısa bir süre sonra ise ilk deneysel uygulamalara geçilmiştir[56], [57]. Bu aşamada, donanım kısıtlamaları nedeniyle, tek bir fotoğraf görüntüsü birden çok pozlanmış ve bir otomatik korelasyon tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Bununla birlikte, artan fotoğraf kaydı hızı, çapraz korelasyonla analiz için görüntülerin ayrı karelerde yakalanmasına olanak sağlamıştır [58]. Dijital kamera teknolojisinin PIV'e dahil edilmesi [59], düşük çözünürlük pahasına, dijital PIV'in (DPIV) gelişmesiyle sonuçlanan parçacık görüntülerinin doğrudan kaydedilmesini sağlamıştır [60]. Bu donanım gelişmelerinin yanı sıra, son on yılda, PIV analizinin doğruluğunu ve hızını artıran birçok yeni algoritma geliştirilmiştir.

PIV sistemi kullanılarak istenilen hacim veya düzlemdeki hız bileşenleri ölçülebilir. Akışkanın hız bileşenleri, lazer ile aydınlatılan yüzeyden art arda iki görüntünün kaydedilmesi ile hesaplanır. Kaydedilen iki görüntü arasında çapraz-korelasyon (cross-correlation) yöntemi uygulanarak hız bileşenlerine ulaşılır.

Akışın görünür olması için havayla yapılan ölçümlerde sis veya duman, suyla yapılan ölçümlerde ise mikron boyutunda küresel parçacıklar kullanılır. Tek kamera ile bir yüzeyden iki hız bileşeni hesaplanabildiği gibi, ikinci bir kamera kullanılarak, üçüncü hız bileşeni de hesaplanabilir.

### 2.3.1.1 PIV Sistemi Kabiliyetleri

PIV temassız (non-intrusive) bir akışkan dinamiği tekniği olup, akışkan içerisine katılan akışkanla neredeyse aynı yoğunlukta mikron boyutundaki parçacıkların hızlarını ölçmektedir.

Mikroskopik seviyedeki yavaş akışlardan, süpersonik derecelerine varan akışlara kadar geniş bir uygulama alanına sahip PIV sistemleri ile şu karakterize değerler elde edilir:

- Akım çizgileri (Streamline)
- Vektörel hız alanı (Vectors)
- Girdap eşdeğer eğrileri (Vorticity)
- Türbülans ve kinetik enerji ölçümleri
- Zamana bağlı değerler.

Bu değerler; tasarlanan model geometri, bağımsız ağ (grid) yapısı ve hesaplanan sınır şartları girdisi ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz sonuçlarıyla benzerlik gösterir.

### 2.3.1.2 PIV Sistem Çözümleri

- 2D & 3D Stereoskopik PIV

İki veya üç boyutlu akış analizleri için kullanılan standart PIV sistemleridir.

- İki Fazlı Akış

Sistem ana PIV sistemlerinin üzerine bazı aksesuarlar ve yazılımların eklenmesi ile iki fazlı akışlar (örnek olarak kaynayan su için ölçüm) üzerinde çalışmayı mümkün kılmaktadır.

- Zaman Çözümlemeli PIV (Time Resolved PIV- TR PIV)

TR-PIV sistemleri ilk olarak Dantec Dynamics tarafından sunulmuştur. Sistem hızlı kamera ve lazerden oluşmaktadır. Bu yöntem dinamik davranışların zaman çözünürlüklü olarak daha derinlemesine analiz edilmesine ve akışın animasyon haline getirilmesine olanak sağlamaktadır.

- Mikro PIV

Mikro PIV sistemi, mikroskopik akış araştırmalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Özellikle HAD yazılımlarının, mikroskopik kanallarda doğru sonuç vermemesi nedeni ile bu tip çalışmalarda deneysel sonuçlar oldukça önemlidir.

- Lazer Kaynaklı Floresans (Laser Induced Fluoresence-LIF)

LIF sistemleri özellikle sıcaklık ve yoğunluk ölçümlerinde kullanılır. Araçlarda yakıt tüketiminin azaltılması ve yakıt verimliliğinin artırılması için yapılmakta olan ölçümlerde kullanılmaktadır.

- İnterferometrik Parçacık Görüntüleme (Interferometric Particle Imaging-IPI)

Damla (Sprey) ve saydam parçacıkların boyut, hız ve dağılım ölçümlerinde kullanılır.

- Yanma LIF (Combustion, C-LIF)

Yanma analizlerinde kullanılan sistemlerdir.

- Volumetrik PIV

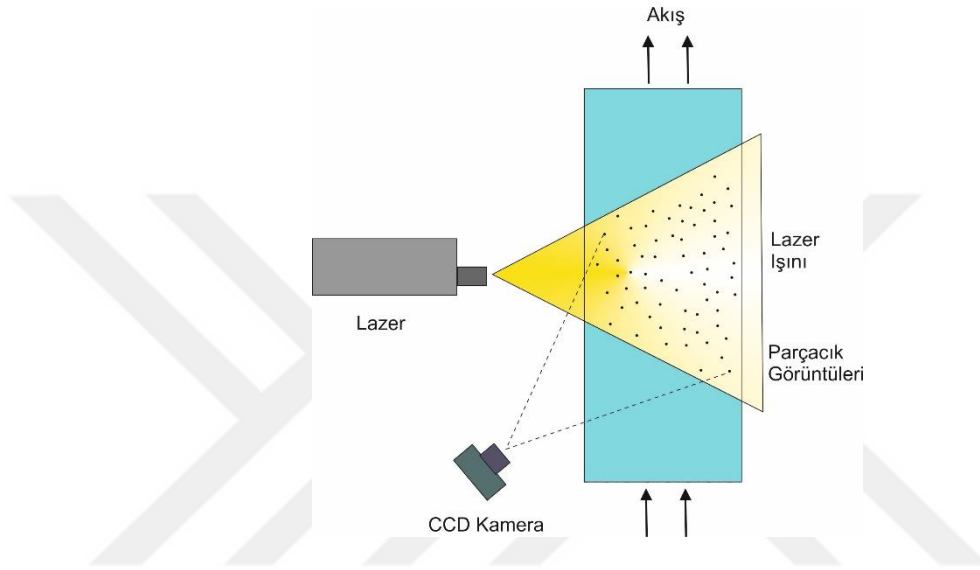
Üç veya daha fazla kamera kullanımı ile bir hacim içerisindeki akış alanı incelenebilir.

### **2.3.1.3 Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) Tekniğinin İlkeleri**

Günümüzde farklı tip PIV yöntemleri bulunsa da, genel itibariyle hemen hemen bütünü baştan sona bir takım benzer işlemler içerirler. Bu işlemlerden birincisi akışkan içerisine akışkanla aynı yoğunluk derecelerinde parçacık eklenmesidir. Parçacıkların izledikleri yol belirli bir alan içerisinde incelenir. Akışkan içerisinde incelenecek olan bu bölge görüntü elde edilebilmesi için bir lazer kaynağı ile aydınlatılmaktadır. Aydınlatma için kullanılan lazer frekansı elde edilecek görüntü adedi ve süresi ile belirlenir. Eş zamanlı lazer aydınlatma ve pozlama işlemi ile ilk görüntü elde edildikten kısa bir süre sonra ikinci görüntü de yakalanarak bu iki görüntü arasında parçacık hareketi elde edilir. İki pozlama ile alınan görüntüler arasındaki süre farkı çok kısa olduğundan parçacıkların yer değiştirme hareketi neredeyse düz bir çizgi halinde yakalanmış olur. Görüntüler arası zaman farkı ve parçacıkların ilk andaki konumu ile son andaki konumu arası yer değiştirmesinin bilinmesiyle hız vektör alanları hesaplanabilir ve böylece çizilebilir. Elde edilen görüntülerle anlık bir hız vektör haritası çıkarılır. PIV tarafından çıkarılan bu hız vektör haritası sayesinde, akım

çizgileri, girdap eş değer eğrileri, Reynolds gerilimi ve türbülans alanı gibi fiziksel bilgiler elde edilebilir.

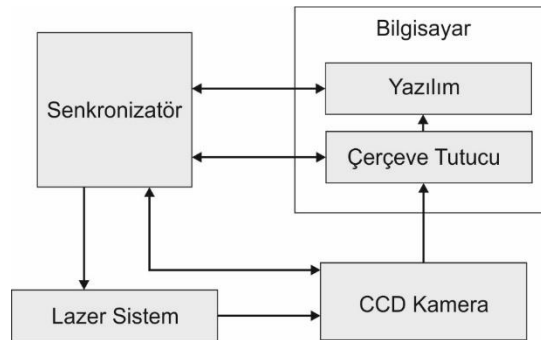
Şekil 2.6, PIV ölçümlerini gerçekleştirmek için tipik bir deneysel düzenlemeyi göstermektedir. İncelenmekte olan akışa eklenen izleyici parçacıklar bir lazer levha ile aydınlatılır ve aydınlatılmış akış alanının görüntüleri yakalanır ve daha sonra analiz için saklanır.



Şekil 2.6 Tipik PIV deney düzenneği

#### 2.3.1.4 PIV Sistemleri ve Bileşenleri

Mevcut deneylerde Dantec Dynamic PIV sistemi kullanılmıştır. PIV için kullanılan deney düzenneği bir CCD (Şarj Bağlantılı Cihaz) dijital kamera, bir lazer sistemi, bir senkronizatör, bir görüntü kaydedici ve bir bilgisayardır. Bu bileşenler arasındaki bağlantılar Şekil 2.7' de gösterilmiştir.

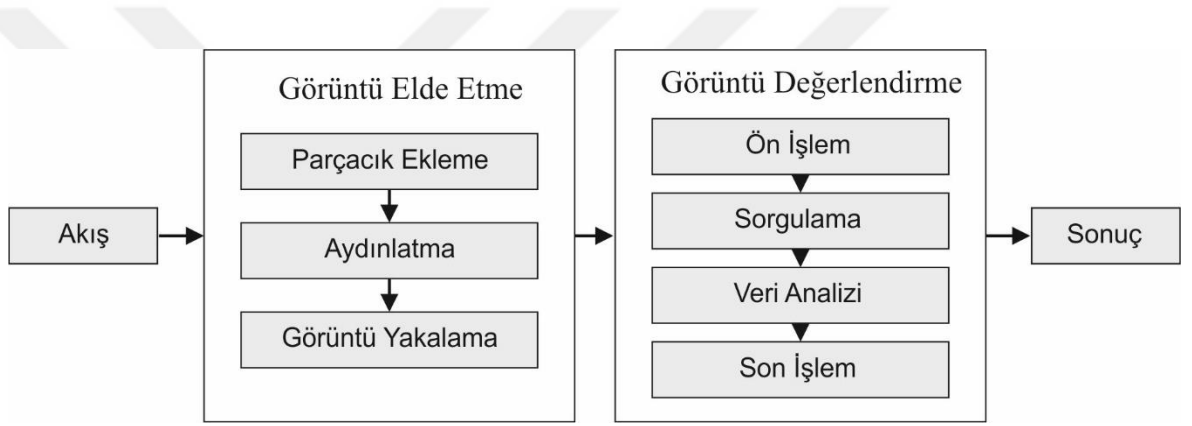


Şekil 2.7 Sistem bileşenleri ve PIV sisteminin bağlantısı

PIV tekniği görüntü elde etme ve görüntü değerlendirme olarak iki aşamadan oluşuyor denebilir; (şekil 2.8).

PIV kamera, bilgisayar kontrollü senkronize edici ve görüntü yakalama ve analiz yazılımı ile birlikte, PIV görüntü yakalama ve analizi için son teknoloji yetenekleri sağlar.

Geliřtirilen PIV enstrümantasyon serisinde, PIV kameralar olarak CCD tabanlı kayıt sistemi sečilmiřtir, çünkü çevrimiçi görüntü haritaları neredeyse gerçek vektör harita iřlemesi için bir ön kořuldur [61].



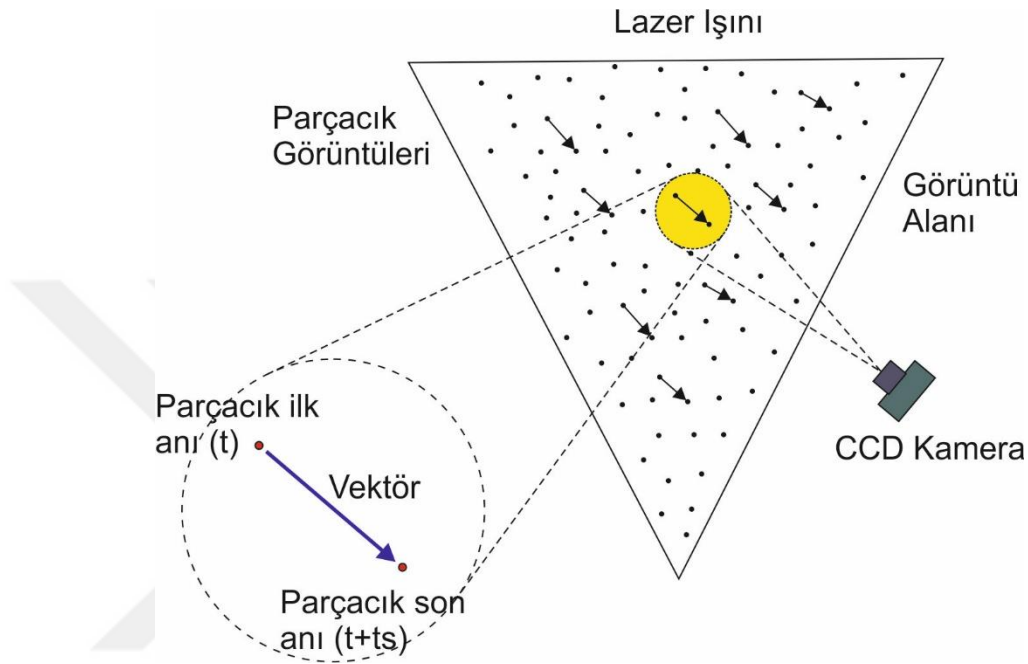
şekil 2.8 PIV ölçümü akış şeması

Senkronizatör, sistem bileşenlerinin doğru senkronizasyonunu sağlamak için gereken hassas görüntü kaydedici için olanlar da dahil olmak üzere hassas kontrol ve aktivasyon sinyalleri sağlar. Ayrıca PIV sistemlerindeki tüm aktivitelerin senkronize edilmesinden sorumludur ve bu nedenle aydınlatma sistemi ve kamera ile birlikte kullanıcının kendi cihazlarına bağlantılar ve iletişim bağlantıları sağlar. Uygun darbe gecikmeli senkronizatör, akış alanının zaman sıralı görüntü yakalanmasına izin verir. PIV kamera ve senkronizatör kombinasyonu, görüntü çiftlerinin tam kamera kare hızında yakalanmasına ve aktarılmasına olanak sağlar. Görüntü haritalarını CCD kameradan okumak ve saklamak için bir giriş tamponu kullanılır. Bilgisayardaki bir çerçeve tutucusu CCD kameradaki kamera görüntülerini okur ve bilgisayarın RAM'inde dijital görüntü olarak saklar.



## Görüntü Elde Etme

Bu çalışmada kullanılan PIV sisteminin şeması Şekil 2.9' da gösterilmiştir. Teknik, akış alanına parçacıkların eklenmesini, iki boyutlu inceleme alanlarını aydınlatmasını ve bu bölgenin iki görüntüsünü hızlı bir şekilde art arda yakalanmasını içerir.



Şekil 2.9 PIV sisteminin şematik gösterimi

## Parçacık Ekleme

PIV prensibi, konum ve zaman olan hızın iki temel boyutunun doğrudan belirlenmesine dayanmasına rağmen, bu teknik başlangıçta akış alanına eklenen parçacıkların hızını ölçer. Bu nedenle, parçacıkların özelliklerinin, sıvı ve parçacık hareketi arasındaki önemli farklılıkları önlemek için kontrol edilmesi gerekir. Parçacıklar, kayıt edilmesi için yeterli ışığı saçarken sıvının hareketini tam olarak takip ettikleri zaman idealdir. Akış ya da akışkan özelliklerini değiştirmezler. Çünkü parçacıkların ataleti, akışkan hızındaki değişimlere ne kadar iyi tepki verdiklerini etkiler ve parçacıklar birbirleriyle etkileşime girmez.

Bu parçacıklar, akışı tam olarak izleyebilecek kadar küçük, kamera için algılanabilmesi için yeterli ışık saçacak kadar büyük olmalıdır. İdeal olarak,

parçacıklar ayrıca sıvı içinde yani nötr olarak yüzer olmalıdır; sıvının kendisi ile yaklaşık olarak aynı yoğunluğa sahip olmalıdırlar.

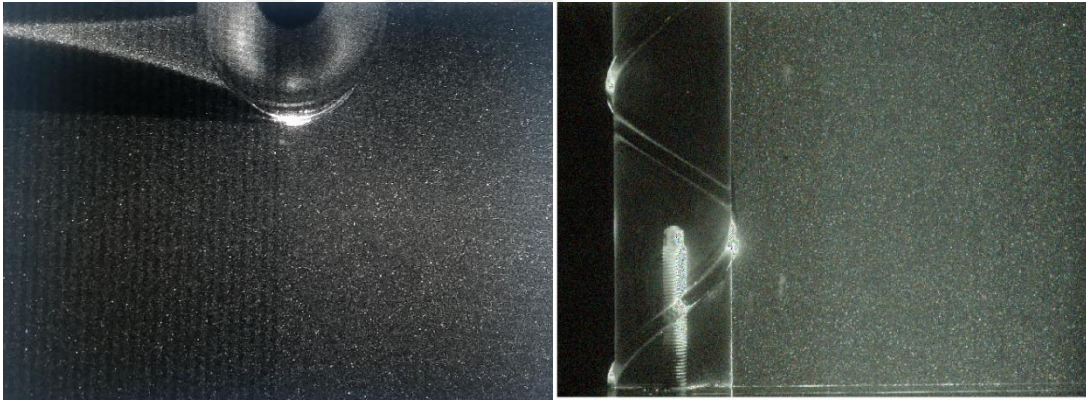
Parçacık seçimi bir dizi parametreye bağlıdır. Öncelikle, parçacık malzemesi ölçülecek akış ve mevcut aydınlatma sistemi göz önüne alınarak seçilmelidir. Doğru PIV ölçümleri elde etmek için parçacıkların boyutunun yeterince büyük olması gerekir. Parçacıklar mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır, ancak diğer taraftan da çok küçük olmamalıdır, çünkü çok küçük parçacıklar yeterince ışık üretmez. Genel olarak, izin verilen maksimum parçacık büyüklüğü artan akış hızı, türbülans ve hız gradyanları ile azalır. Tohumlama parçacıklarının kamera görüntülerinin en az 2 piksel, tercihen 3 piksel veya daha fazla bir çapa sahip olması gerektiğinden söz etmek gerekir. Bu, sistemin parçacık konumlarını ve yer değiştirmelerini alt piksel hassasiyetine göre tahmin etmesine ve böylece çözünürlük tekniğini etkili bir şekilde arttırmasına olanak sağlayacaktır.

**Tablo 2** Parçacık Çeşit ve Özellikleri [62]

	<b>PSP (Poliamid Parçacıklar)</b>	<b>HGS (İçi boş cam küreler)</b>	<b>S-HJE (Gümüş kaplı oyuk cam küreler)</b>	<b>FPP (Floresan polimer parçacıkları)</b>
<b>Ortalama parçacık büyüklüğü (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	5, 20, 50	10	10	10, 30
<b>Parçacık şekli</b>	Küresel olmayan ama yuvarlak	Küresel	Küresel	Küresel
<b>Yoğunluk (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	1.03	1.1	1.4	1.19
<b>Erime noktası (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	175	740	740	125
<b>Kırılma indisi</b>	1.5	1.52	-	1.47+
<b>Malzeme</b>	Poliamid 12	Borosilikat camı	Borosilikat Camı	Poli (Metil metakrilat) (Rodyum B ile Etiketlenmiş)

Tablo 2’de PIV sistemlerinde akışkan içerisine eklenen parçacık çeşitleri ve özellikleri verilmiştir. Parçacık özelliklerine ait en önemli parametreler ortalama parçacık büyüklüğü, parçacık şekli, yoğunluk ve malzeme yapısıdır. Deneyler için uygun parçacık seçimi yapılırken bu özellikler dikkate alınmalıdır. Akışları tatmin edici bir şekilde izleyen ve CCD kamera tarafından yakalanacak kadar ışık saçan herhangi bir parçacık kullanılabilir.

Bu deneysel çalışmada, akışkan olarak kullanılan suya, 10 mikron çapında, içi boş cam küreler eklenmiştir (HGS-10). İçi boş parçacıklar öncelikle bir litrelik bir kaptaki karıştırılmış, daha sonra su kanalına dökülmüştür. Ardından, su içerisinde parçacıkların eşit bir şekilde dağılmasını sağlamak için su kanalı birkaç dakika süreyle maksimum hızda çalıştırılmıştır. Akıştaki parçacıkların sayısı, çapraz korelasyonda iyi bir sinyal tepe noktası elde etmek için önemlidir. Bir kural olarak, her sorgulama alanında 10 ila 25 parçacık görülmelidir. Su kanalı içerisine eklenen ve akışkanla hareket eden parçacıkların lazer ışını ile aydınlatılmış görüntüsü Şekil 2.10’da görülebilir.



**Şekil 2.10** Su kanalına eklenen parçacıklar

### **Aydınlatma**

Aydınlatma, akıştaki parçacıkların görüntülerini elde etmek için yeterli enerji yoğunluğu sağlar. Aydınlatma için, bir lazer kullanılması tercih edilir, çünkü lazer ışını silindirik bir mercekle tarafından düzlemsel bir tabaka haline getirilmesi kolaydır. Lazer, kameraya dik pozisyonda entegre edilmiştir. Lazer ve ışın yolu normal çalışma koşulları altında tamamen çevreye karşı korumalıdır. Lazerler, bir-iki milimetreden bir

santimetre kalınlığa kadar lazer hüzmesi (tabakası) sağlar. Deneylerde 532nm dalga boyunda, maksimum 120mj / pulse enerji çıktısı olan, çift atımlı Nd: YAG (Neodim: Yttrium-Alüminyum-Garnet kristalleri) lazer ünitesi kullanılmıştır. Çok kısa zaman aralığı (tipik olarak bir Nd: Yag lazer için 5 ns) parçacık görüntülerinin yüksek hızlarda (> 100 m / s) bile pratikte dondurulacağı anlamına gelir. Bir Nd: Yag lazerin tekrarlama hızı tipik olarak 30Hz'dir ve bu, çok düşük hızlar (<1 cm / s) dışında çok düşüktür.

PIV tekniğinde, akış alanında hareket eden parçacıkların lazerle aydınlatılmasıyla saçılan ışık, dijital bir kameraya kaydedildiğinde bir sinyal verir. Nano parçacıkların hem başlangıç hem de son konumları yakalanmalıdır, böylece aralarındaki yer değiştirme ölçülebilir. Bu nedenle, PIV aydınlatma yöntemi aşağıdaki temel kriterleri yerine getirmelidir:

- Işık yoğunluğu, nano parçacıklardan saçılan ışığın yoğunluğunun, sistemin optik gürültü seviyesinin üzerinde PIV kamerada görüntülerinin kaydedileceği şekilde olmasını sağlamak için yeterince yüksek olmalıdır.
- Işık atımının süresi, parçacık ışık atımı sırasında belirgin bir şekilde hareket etmeyecek şekilde olmalıdır.
- Ardışık ışık darbeleri arasındaki süre, akış alanının önemli bir şekilde hareket etmeyeceği şekilde olmalıdır.
- Ölçüm düzleminin yeri ve boyutları iyi tanımlanmalıdır.

### **Görüntü yakalama**

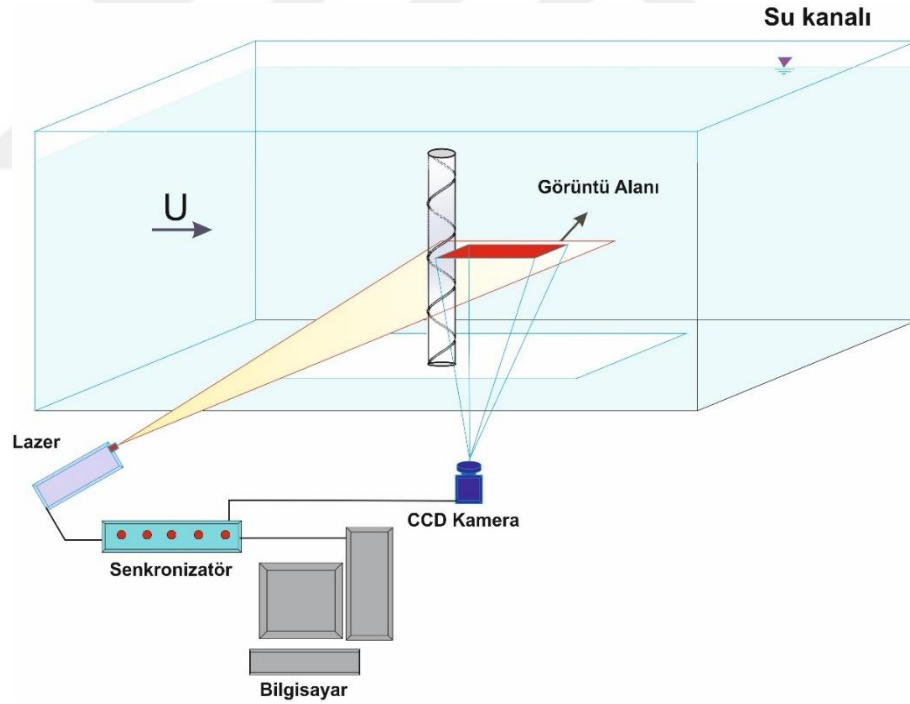
Anlık bir akış alanının PIV aracılığla kaydedilmesi şu şekilde gerçekleştirilir: akışkana parçacık eklemesi yapılır buna akış tohumlanması denir. Bir ift darbeli lazer sistemi kullanılarak ışık tabakası içindeki parçacıklar tarafından yayılan ışık görüntülenir ve son olarak bir CCD kamera tarafından kaydedilir. Çift lazer darbesi nedeniyle, her parçacığın görüntüsü kayıttaki iki kez belirir. İzleyici parçacıkların lazer aydınlatma ve görüntü yakalama süreçleri, Şekil 2.6' da şematik olarak gösterilmektedir. Geçici olarak ayrılmış iki ayrı lazer tabakası vardır, ancak bu iki sayfa fiziksel alanda çakışmaktadır. Lazer tabakaları inceleme altındaki belirli bir düzlemi gösterir. Görüntü yakalama bölgesi, kamera tarafından yakalanan alandır. Bir yer değiştirme vektörünün belirlendiği başlangıç parçacık pozisyonu ve son parçacık pozisyonları da Şekil 2.9' da

gösterilmektedir. Çapraz korelasyon modunda, senkronizatör, ilk lazer darbesini ilk görüntü karesinin en ucuna ve ikinci lazer darbesini ikinci karenin başlangıcına doğru konumlandırarak darbe gecikmesini sağlar. Flow Manager yazılımı, kameraya lazer atıldığında bir çift kare çekmesi için sinyal gönderir.

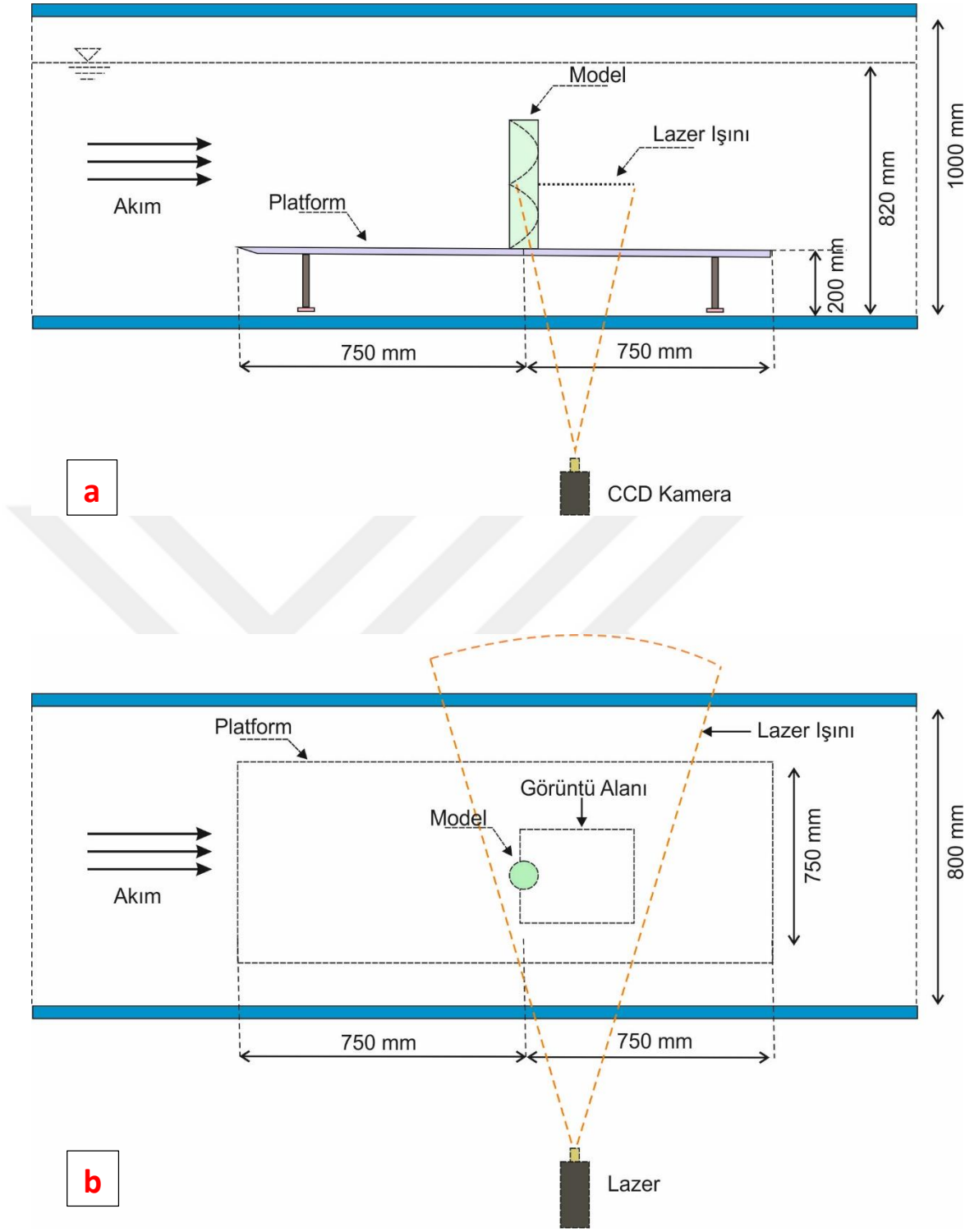
Interline olarak adlandırılan transfer aşamalı tarama ile mikrosaniye zaman aralığına sahip, tek tek açıktaki kalan biri tam kare iki görüntü elde edebilmek için, bir tane CCD kamera kullanır. Temel fikir, ilk lazer atımının maruz kaldığı görüntünün CCD çipindeki ışıkla gizlenmiş alanlara çok hızlı bir şekilde aktarılmasıdır. Bu, piksel bazında bir piksel üzerinde yapılır. Her piksel, ışığa duyarlı piksel alanının hemen yakınında kendi depolama alanına sahiptir. İkinci pozlamadan sonra, her iki resim de bilgisayara aktarılır. Çok fazla veri aktarılması gerektiğinden, saniyede yalnızca birkaç çift görüntü çekmek mümkündür. Genel olarak, akışın zamansal çözünürlüğü bu teknikte çok kötüdür. Parçacık görüntülemeli hız ölçüme sahip bir akış alanı görüntüsü yakalamak için, lazer darbesi ve kameranın inceleme altındaki akış koşulları için doğru sıra ve zamanlamayla tetiklenmesi gerekir. Bilgisayar kontrollü lazer darbe eşleyici, PIV görüntüleme ve görüntü yakalama bileşenlerini entegre ve otomatik bir sistem olarak birlikte yazarak bu görevi gerçekleştirir. Parçacık görüntülerinin desenleri bir model FlowSense EO serisi şarj bağlı cihaz (CCD) kamera ile elde edilmiştir. Kamera, ışık plakasına dik açılarda yerleştirilmiştir. CCD kameranın çözünürlüğü, görüntü kaydı için 1600x1200 piksel ve kamera ayrıca 50 mm odak uzaklığına sahip bir mercek ile donatılmıştır. Çoğu standart PIV sistemi, 15Hz CCD kamera kullanır. Bu, çözülmesi gereken frekans aralığının çok daha yüksek olabileceği türbülans ölçümleri için engelleyici olabilir. CCD kamera, harici tetikleyici bir sinyalden sonra 1.5 ms'den daha az bir kare çift görüntü çekimi sağlayan Asenkron Çift Pozlama moduna sahiptir.

Bu çalışmada kullanılan PIV sisteminin şeması Şekil 2.11' de gösterilmektedir. Görüntü elde etme deneyleri sırasında, çift darbeli bir Nd: Yag lazer ünitesi tarafından akış, alanı akışa dik bir düzlemde aydınlatılmıştır. İki darbe arasındaki zaman aralığı tüm ölçümler için 83 ms olarak ayarlanmıştır. Ölçüm düzlemini aydınlatan lazer tabakasının kalınlığı, 2 mm'dir. Sorgu penceresinde maksimum miktarda parçacık yer değiştirmesi elde edecek şekilde, zaman aralığı ve lazer levha kalınlığı seçilmiştir. Su

akışı, 10 mikron çapındaki izleyici parçacıkları ile tohumlanmıştır. İzleyici parçacıklarının hareketi, CCD kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Kaydedilen görüntüler Dantec Flow Manager Yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Görüntü haritaları bir giriş tamponu kullanılarak okunmuş ve saklanmıştır. Görüntüleri kameradan bilgisayara aktarmak için yüksek hızlı bir dijital görüntü kaydedici kullanılmıştır. Akış alanı görüntülerini yakalamak için lazer darbesi ve kamera doğru sıra ve zamanlamayla tetiklenmelidir. Bu nedenle, gereken anda başlatılan tüm bileşenleri kontrol etmek için bir senkronizatör kullanılmıştır. İki veya üç yüz kare, sürekli devam eden her çalışma için 15Hz'lik bir alım frekansıyla bir dizi görüntü yakalama için art arda kaydedilmiştir. Burada birçok farklı ölçüm görüntüsü alınmış, ölçüm bölümlerinin boyutları ilgili bölümlerde belirtilmiştir. Sorgulama penceresinin boyutu, tüm görüntü alanı boyunca 3844 (62x62) hız vektörü sağlayan % 50 örtüşme ile 32x32 pikseldir.



Şekil 2.11 Deney cihazları ve dijital PIV cihazlarının şeması

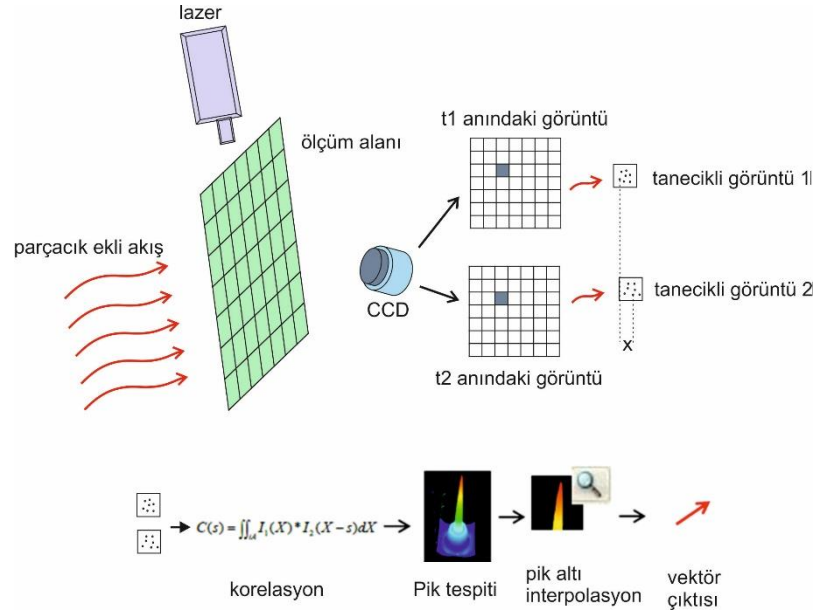


**Şekil 2.12** Denei kurulumunun şematik görünümü a) yandan görünüş b) üstten görünüş

## Görüntü değerlendirme

Veri değerlendirme prensibi oldukça basittir. İlk PIV görüntü değerlendirme yöntemlerinin tanıtılmasından bu yana, PIV yönteminin hızını ve doğruluğunu artırmak için tasarlanmış hata düzeltme analiz algoritmaları geliştirilmiştir. Bununla birlikte hala klasik PIV analiz yöntemi en sık kullanılan birçok diğer algoritmaların temelini oluşturur. Modern bir PIV sisteminin ana düzeni Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Dijital PIV kaydı, sorgu alanı (pencere) adı verilen küçük alt alanlara bölünmüştür. Değerlendirme türü, parçacıkların akıştaki konsantrasyonuna bağlıdır [63]. Deneylerde küçük girdapların çözülmesi için yüksek parçacık konsantrasyonu kullanılmıştır.

Birinci ve ikinci aydınlatmadaki parçacık görüntüleri için yerel yer değiştirme vektörü, her sorgulama alanı için, otomatik ve çapraz korelasyon yöntemleriyle belirlenir. Bir sorgulama alanındaki tüm parçacıkların iki aydınlatma arasında homojen hareket ettiği varsayılmaktadır. Yerel hız vektörünün ışık tabakasının düzlemine projeksiyonu (iki bileşenli hız vektörü), iki aydınlatma ile görüntüleme sırasındaki büyütme arasındaki zaman gecikmesi dikkate alınarak hesaplanır.



Şekil 2.13 Temel PIV analiz süreci



Korelasyon tekniği çoklu pozlanmış tek bir kare (otomatik korelasyon) veya çoklu pozlanmış çoklu kare (çapraz korelasyon) için kullanılabilir. İşlemi hızlandırmak için, her bir sorgulama alanı çiftinin korelasyonu, Fourier uzayında gerçekleştirilir. Görüntüleri bu şekilde sorguladıktan ve vektör haritasını oluşturduktan sonra, verileri doğrulamak, vektör haritası çözünürlüğünü ve doğruluğunu geliştirmek için işlem sonrası kontrol gerçekleştirilir. Bu vektör haritası kullanılarak, akım çizgileri, girdap konturları, Reynolds gerilim konturları gibi akış özellikleri elde edilebilir.

### **Çapraz Korelasyon Süreci**

Parçacık görüntülemeli hız ölçme işlemi temel olarak, lazer darbeleri arasındaki sürede parçacıkların hareket ettiği mesafeyi belirler. Bu mesafeyi belirlemeye yönelik en yaygın yöntemler parçacık izleme veya korelasyondur. Burada, otomatik korelasyon, bir kare çapraz korelasyon ve iki kare çapraz korelasyon kısaca açıklanacaktır. Bu korelasyon tekniklerindeki farklılıklar, birinci ve ikinci görüntüler için resim penceresi alanlarıdır. Otomatik korelasyonda, aynı görüntü penceresi hem birinci hem de ikinci görüntü penceresi için kullanılır. Bir kare çapraz korelasyonda, ikinci görüntü penceresi, aynı penceredeki ilk görüntüden akış yönünde kaydırılır. Bir kare çapraz korelasyonun işlenmesi, birinci ve ikinci görüntü pencereleri arasındaki örtüşme miktarına bağlıdır. İki kare çapraz korelasyonda, ilk karede bulunan ilk görüntü penceresi ve ikinci görüntü penceresi, ikinci karede bulunur. Zaman gecikmeli her iki sorgu penceresi de aynı koordinatlara sahiptir.

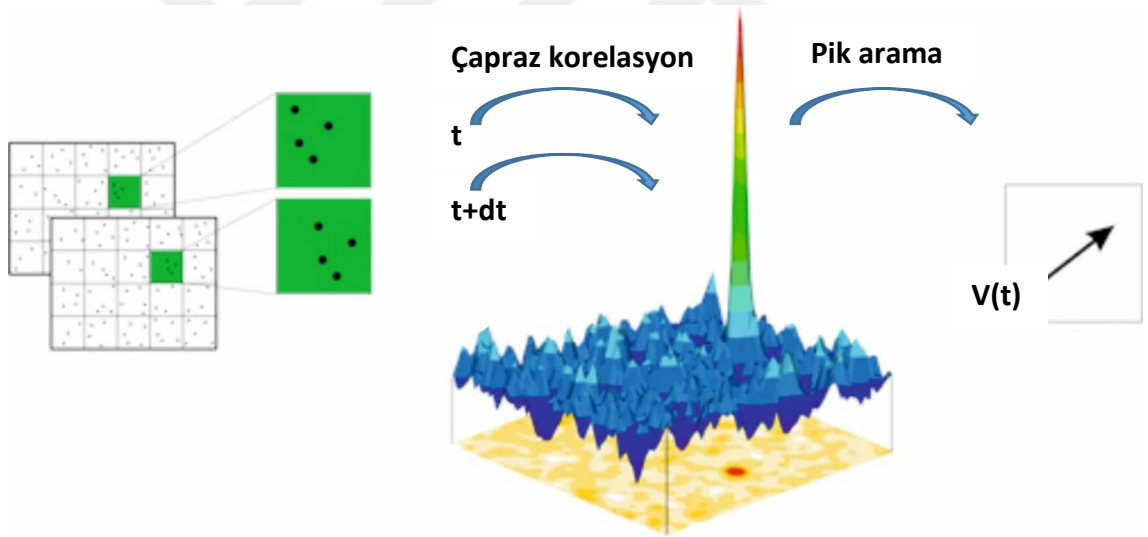
Korelasyon alanı, her bir parçacık ve sorgulama noktası içindeki diğer her parçacık arasındaki baskın mesafeyi gösterir. Her parçacık görüntünün kendisinin korelasyonunu temsil eden maksimum yoğunluk noktası baskın parçacık aralığına karşılık gelen pozitif yer değiştirme tepesi adı verilen ikinci bir tepe merkezde bulunur. Otomatik korelasyon işlevi simetriktir, böylece her yer değiştirme zirvesi, ters yönde eşit boyutta bir zirveye sahiptir. Bir tepe, birinci ve ikinci parçacık görüntüleri arasındaki mesafeyi, diğeri ikinci ve birinci parçacık görüntüleri arasındaki mesafeyi temsil eder. Şekil 2.14, PIV tekniklerinin çapraz korelasyon sürecinin prensiplerini göstermektedir.

Çapraz korelasyon yaklaşımının oto-korelasyona göre temel avantajları:

- Yer değiştirme, herhangi bir yön belirsizliği olmadan elde edilir.
- Korelasyon tepe sinyali daha fazla sinyal gücü taşır ve bu nedenle gürültüye karşı daha direnç kazanır.

Çapraz korelasyonun ana dezavantajları:

- Hesaplama zaman içinde daha kapsamlıdır, çünkü otomatik korelasyon için iki yerine üç boyutlu Fourier dönüşümü gerekir.
- Görüntü toplama sistemi (kamera), lazer aydınlatma darbeleriyle senkronize edildiğinde hızlı bir şekilde art arda iki görüntü çerçevesinin alınması gerekliliğiyle başa çıkmalı ve akışa göre mutlak hassasiyetle çerçeve konumunu kaydetmelidir.

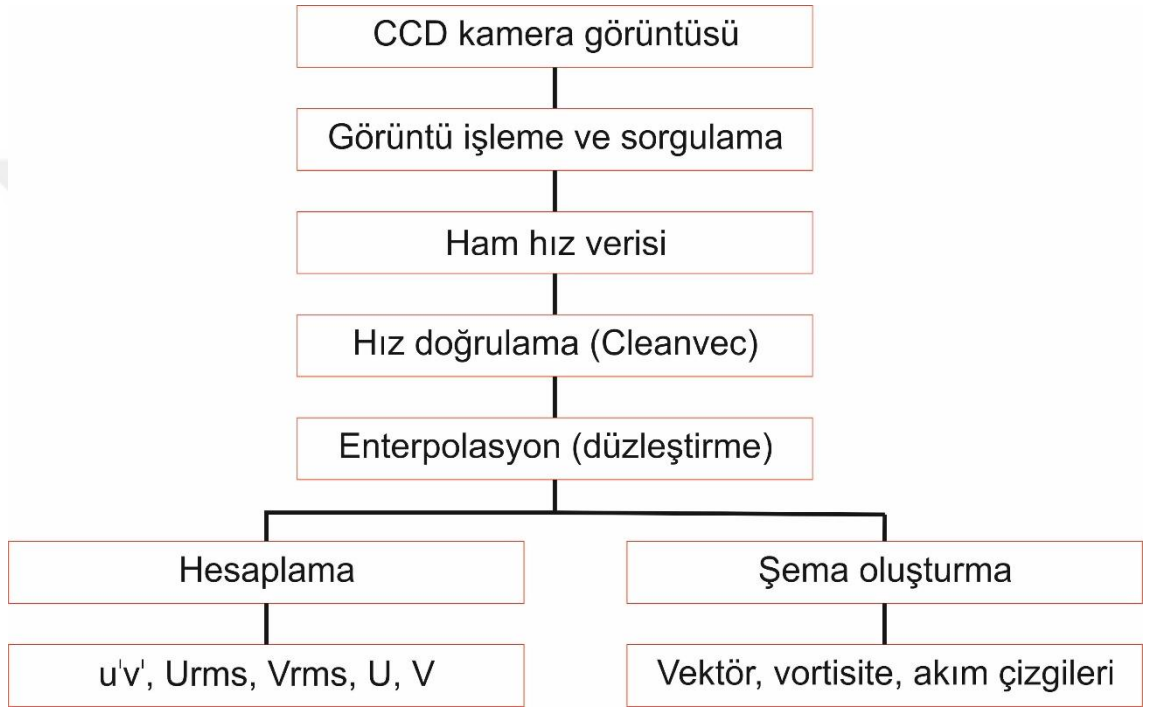


Şekil 2.14 Çapraz korelasyonun ilkeleri

### Görüntü Son İşlemesi

Ham hız alanının işlenmesinden sonra, bozuk vektörlerin vektör doğrulaması/çıkarılması, çıkarılan vektörlerin değiştirilmesi, verilerin düzgünleştirilmesi ve filtelenmesi yer alır. Vektör alanları belirlendikten sonra, zaman ortalaması, faz ortalaması kullanılabilir.

Görüntü işleme için genel prosedür Şekil 2.15' te sunulmuştur. İşlem sonrası vektörler, komşu vektörlerle karşılaştırılır. Alan ortalamasından, doğrulama toleransından daha fazla değişen vektörler kaldırılır. Boş kalan yerler, bu noktadaki hızı en iyi şekilde tahmin etmek için komşu vektörleri araya sokarak doldurulabilir. Vektör onaylandıktan ve eksik noktalar doldurulduktan sonra, akışın anlık hız alanı hesaplanabilir. Bu hesaplamadan sonra, akışların diğer özellikleri anlık hız alanı verilerinden hesaplanabilir.



Şekil 2.15 Görüntü işleme genel prosedürü

Parçacık çiftlerinin yanlış eşleşmesinden dolayı PIV ölçümlerinin hız vektörü alanında bozuk vektörler görünebilir. Bu durumda, ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliği azalır. Bu nedenle, görüntü işlemeden önce, bozuk vektörler tespit edilir ve çıkarılır. Böylece bozuk vektörlerin doğru olanlarla değiştirilmesi, dijital görüntülerin iyileştirilmesi ve alan ortalama tekniği ile düzeltilmesi yapılmış olur [64], [65].

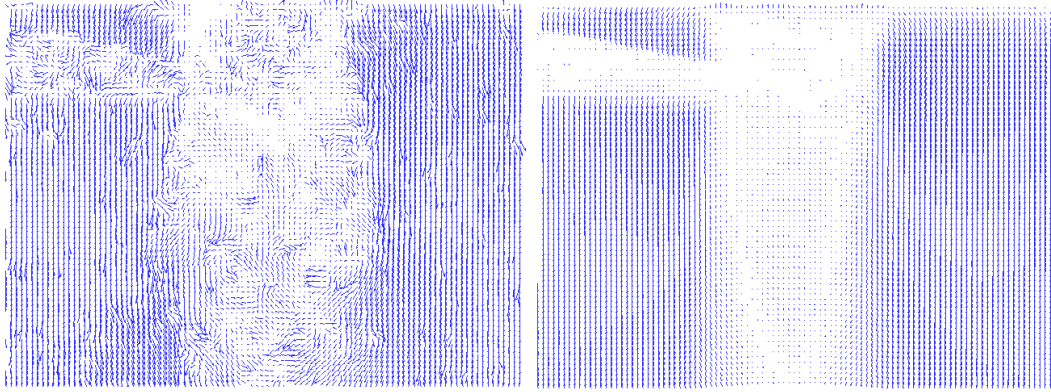
CLEANVEC adlı vektör doğrulama yazılımı, hatalı değeri olan bozuk vektörleri kaldırmak için kullanılmıştır. Bu yazılım Türbülanslı Illinois Urbana-Champaign Laboratuvarı ve Türbülanslı Akışlar Laboratuvarından edinilebilir [66]. CLEANVEC

yazılımı hatalı vektörlerin kaldırılması için tasarlanmış Fourier istatistik filtrelerini içerir:

- Mutlak aralık filtresi
- RMS tolerans filtresi
- Büyüklük farkı filtresi
- Kalite filtresi

Bu dört filtreden üçü, bozuk vektörleri ortadan kaldırmak amacıyla kullanılmıştır.

Ortalama kare hız ve vortisite çalkantılarının desenleri, örneklenmiş ortalama hız alan bilgisi kullanılarak hesaplanır. İki tür ortalama yöntem vardır. Bunlardan biri zaman ortalaması, diğeri faz ortalaması yöntemidir. Çalışmada zaman ortalaması yöntemi kullanılmıştır.



**Şekil 2.16** Ham hız vektörleri ile temizlenmiş vektör gösterimi

### **PIV Görüntülerinin Zaman Ortalaması**

PIV görüntülerinin zaman ortalaması, aşağıdaki formülasyon kullanılarak yapılır.

Zaman ortalamalı akış yönündeki hız bileşeni:

$$\langle u \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n(x, y) \quad [2.1]$$

Zaman ortalamalı akışa dik yöndeki hız bileşeni:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(x, y) \quad [2.2]$$

Zamana ortalamalı vortisite:

$$\langle \omega \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \omega_n(x, y) \quad [2.3]$$

Akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi:

$$u_{rms} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u_n(x, y) - \langle u(x, y) \rangle]^2 \right\}} \quad [2.4]$$

Akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi:

$$v_{rms} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [v_n(x, y) - \langle v(x, y) \rangle]^2 \right\}} \quad [2.5]$$

Reynolds gerilme korelasyonunun ortalama değeri:

$$\langle u^t v^t \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u_n(x, y) - \langle u(x, y) \rangle] [v_n(x, y) - \langle v(x, y) \rangle] \quad [2.6]$$

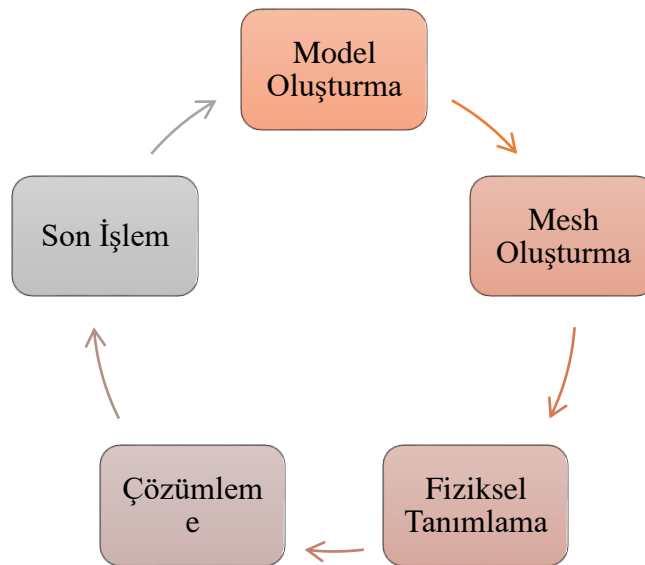
Burada N, ortalama zaman değerleri için kullanılan anlık görüntülerin toplam sayısıdır ve n, anlık görüntüye karşılık gelir. RMS ve Reynolds gerilme korelasyonu, sırasıyla serbest akış hızı ve karesi ile boyutsuzlaştırılmıştır.

## 2.4 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği; yüksek işlem maliyeti olmayan, problemlere hızlı çözüm sağlayabilen, karmaşık olmayan çözümler ile problemler üzerinde yeni eklemeler yapılarak tekrarlama imkânı sunan bir analiz yöntemidir. HAD kullanarak, sıvı-sıvı, sıvı-katı ya da sıvı-gaz etkileşimi içeren karmaşık sorunlar analiz edebilir. HAD analizlerinin sıklıkla kullanıldığı mühendislik alanları olan aerodinamik ve hidrodinamikte kaldırma ve sürükleme gibi değerler veya basınç ve hız gibi alan özellikleri elde edilir. Akışkan dinamiği, kısmi diferansiyel denklemler şeklinde fiziksel yasalarla ilgilidir. Gelişmiş HAD çözümler bu yasaları cebirsel denklemlere dönüştürür ve bu denklemleri sayısal olarak verimli bir şekilde çözebilir. HAD analizleri, tasarım sürecinde zaman kazanmak için büyük bir potansiyele sahiptir ve bu nedenle veri toplama için yapılan geleneksel testlere kıyasla daha ucuz ve daha hızlıdır. Ayrıca, gerçek yaşam testlerinde, bir süreçte sınırlı miktarlar ölçülürken, bir HAD analizinde istenen tüm miktarlar bir analizde aynı alan ve zamanda yüksek çözünürlükte ölçülebilir. HAD analizi gerçek bir fiziksel çözüme yaklaştığından, doğrulama amacıyla testler hala yapılmalıdır.

### 2.4.1 HAD Analiz Süreci

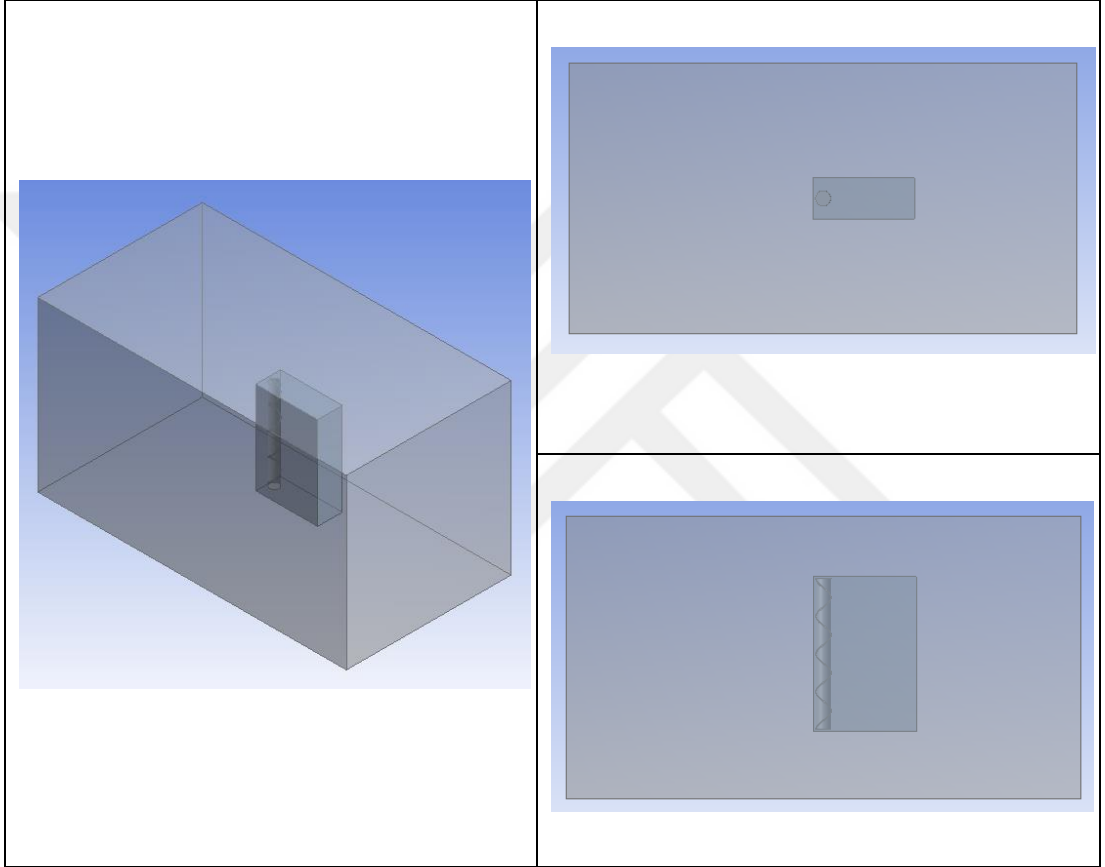
Bir HAD analizini gerçekleştirmek ve HAD simülasyonunun çeşitli yönlerini anlamak için genel işlem, Şekil 2.17' de ana hatlarıyla belirtilmiş süreci içerir.



Şekil 2.17 HAD analiz süreci

### 2.4.1.1 Geometri ve Akış Alanının Modellenmesi

Akışın analiz edileceği alan, modelleme gerektirir. Bu genellikle geometriyi bir CAD yazılım paketi ile modellemeyi içerir. Öncelikle 1D, yarı-1D, 2D, eksenel simetrik veya 3D boyutsallığı belirlenmelidir. Makul bir çabayla bir analize izin vermek için geometri ve sadeleştirmelere yaklaşımlar gerekebilir. Aynı zamanda, akışın simüle edileceği sonlu akış alanının kapsamı hakkında kararlar verilir. Şekil 2.18’ de HAD analizi gerçekleştirilen geometri yapısı verilmiştir.

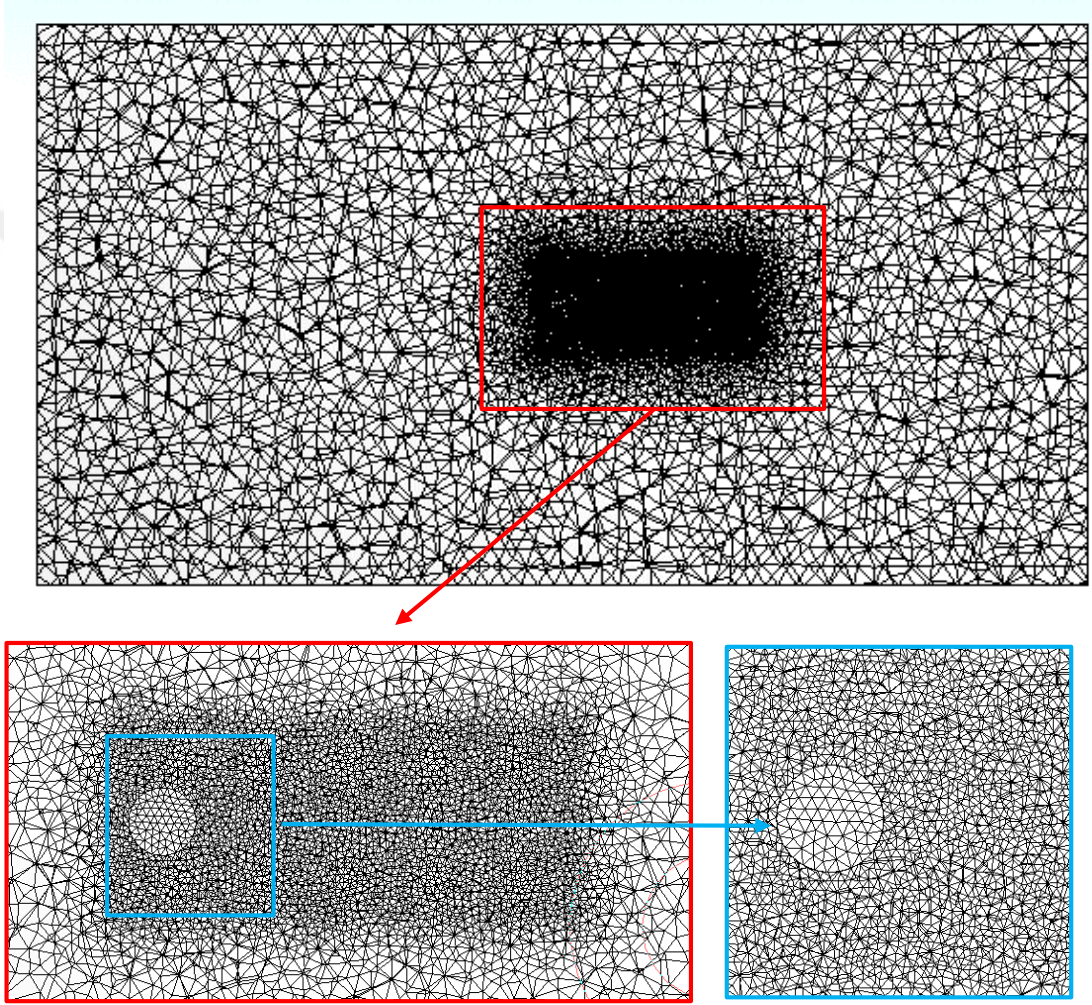


Şekil 2.18 HAD analizi için oluşturulan geometri

### 2.4.1.2 Mesh (Ağ) Yapısının Oluşturulması

Meshin amacı, karmaşık bir hacmi, simülasyonunun yürütüleceği küçük parçalara ayırmaktır. Tanım gereği, mesh hücrelerden ve noktalardan oluşan bir ağdır. Herhangi bir boyutta hemen hemen her şekle sahip olabilir. Kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılır. Mesh yapısına dayalı hatalar, simülasyonun başarısız olmasına neden olan sık karşılaşılan bir sorundur. Bunun nedeni, meshin çok kaba olması ve bu tek unsurda meydana gelen tüm etkleri birer birer kapsamaması değil, daha çok mesh

geliştikçe değişen çoklu etkileri kapsamasıdır. Bu nedenle bağımsızlığın araştırılması gerekmektedir. Çözümün doğruluğu, ağ yapısına bağlıdır. Doğru çözümler üretmek ve güvenilir sonuçlar elde etmek için, hücre türüne, hücre sayısına ve hesaplama süresine son derece dikkatli olmalıdır. Bu optimizasyon, mesh bağımsızlığı (grid independency) olarak tanımlanır. Çözümlemeler için mesh bağımsızlığı sağlanmışır. Şekil 2.18’ de oluşturulan mesh yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.19 Mesh (ağ) yapısı görünümü

#### 2.4.1.3 Fiziksel Tanımlama

HAD analiz sürecine geçilirken akışın türbülanslı mı laminar mı, kararlı mı kararsız mı olduğu belirlenmelidir. Bu noktada bazı boyutsuz sayıların hesaplanması gerekir.



Reynolds sayısı (Re) akışkan dinamiğinde en önemli boyutsuz sayıdır ve herhangi bir yeni HAD modelleme projesine başlamadan önce hesaplanması önerilir. Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere boyutsuz oranı olarak tanımlanır ve öngörülen akış koşuluyla alaka düzeyini belirler:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} \quad [2.7]$$

$U_{\infty}$  ve  $L$  problemin karakteristik hız ve uzunluk skalasında,  $\rho$  sıvı yoğunluğu ve  $\mu$  dinamik viskozitedir. Reynolds sayısının kullanımı, boyutsal bir analiz yapılırken sıklıkla ortaya çıkar ve Reynolds'un benzerlik prensibi olarak bilinir.

Re aynı zamanda bir akışın laminer mi yoksa türbülanslı mı olduğunu tanımlamamızı sağlar. Laminer akış, düşük Re ve konveksiyon üzerinde yüksek difüzyon ile karakterize edilir. Öte yandan, çalkantılı akış, atalet kuvvetlerinin önemli ölçüde baskın olduğu ve büyük ölçüde kaotik akışa neden olduğu daha yüksek Re ile karakterize edilir. Akış ayrıca, akış tam olarak laminer ya da tamamen türbülanslı özellikler göstermeyen bir geçiş evresinden de geçebilir.

Sınır ve başlangıç şartları eklenerek simülasyona uygun akış modeli seçilir. Burada k-epsilon akış modeli seçilmiştir.

#### 2.4.1.4 Çözümleme

Çözümleme 3 boyutlu kararsız Navier-Stokes denklemlerinin çözümüyle elde edilir.

Çözümleme için kullanılan süreklilik ve momentum denklemleri Denklem 2.8, Denklem 2.9, Denklem 2.10 ve Denklem 2.11'de verilmiştir.

#### Süreklilik

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [2.8]$$

### **X-Momentum**

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x \quad [2.9]$$

### **Y-Momentum**

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g_y \quad [2.10]$$

### **Z-Momentum**

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z \quad [2.11]$$

Simülasyon, etkileşimli veya toplu işleme ve dağıtılmış işleme seçenekleriyle mümkün olan çeşitli seçeneklerle gerçekleştirilir. Simülasyon ilerledikçe, çözüm yinelemeli birleşme olan "birleştirilmiş" bir çözümün elde edilip edilmediğini belirlemek için izlenir.

#### **2.4.1.5 Sonuçları Almak İçin Simülasyon Sonrası İşlem**

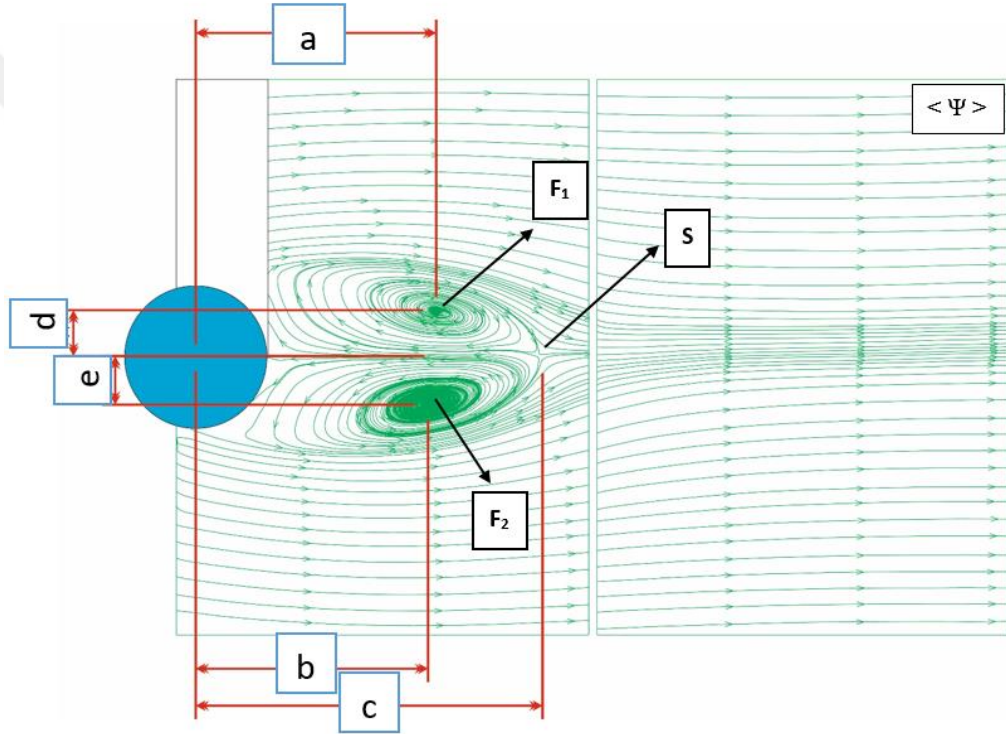
İşlem sonrası, istenen akış özelliklerinin (baskı, kaldırma, sürükleme vb.) hesaplanan akış alanından çıkarılmasını içerir.

#### **2.4.1.6 Sonuçların Karşılaştırılması**

Hesaplanan akış özellikleri daha sonra hesaplanan sonuçların geçerliliğini belirlemek için analitik, hesaplamalı veya deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılır. Çalışmada HAD analizleriyle elde edilen akım çizgileri PIV' den elde edilen görüntülerle bulgular kısmında verilmiştir. PIV ve HAD arasında oluşan farklılıklar HAD'de kullanılan silindir yapıları pürüzsüz iken, PIV'de kullanılan 50 mm silindir tüplerden işlenerek elde edilen 44 mm çapındaki deney silindirlerinin pürüzlülük oranının sıfır olmamasından kaynaklanmaktadır.

### 3. BULGULAR

Düz silindir etrafındaki zaman-ortalamalı akış yapısı (pürüzsüz) akış yönüne göre simetriye sahiptir [67], [68]. Zaman ortalamalı akım çizgisi ( $\psi$ ) desenleri, karşıt dolaşım yönlerine sahip bir çift odak (Focus) noktasının ( $F_1$  ve  $F_2$ 'nin) dairesel bir silindirin art izi bölgesinde oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu dolaşım bölgesi, akış alanının aşağı akımında bir eyer noktasından (Saddle point, S) ayrılan serbest akışlı akımla sınırlandırılmıştır. Elde edilen bulguların gösterimi açık literatür ile [69]–[71] uyumludur.



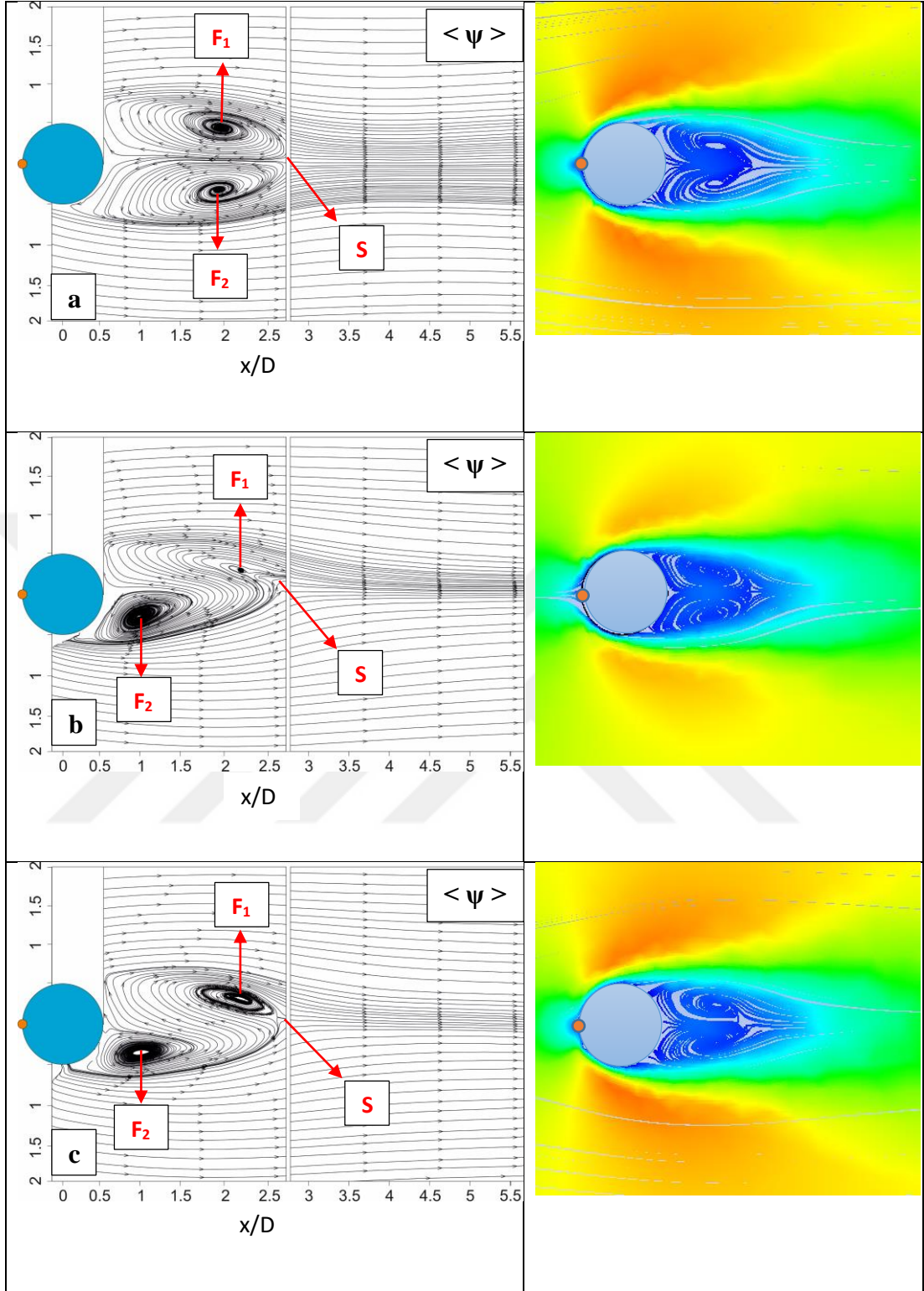
Şekil 3.1 Art izi bölgesi akım çizgileri ve önemli noktalar

Şekil 3.1’de art izi bölgesi akım çizgileri ve bu bölgedeki önemli noktalar gösterilmektedir. PIV’ den alınan 1000 görüntünün işlenmesi sonucu elde edilen bu akım çizgilerindeki önemli noktaların ( $F_1$ ,  $F_2$  ve S ) X ve Y eksenine göre konumları (a, b, c, d, e) çıkarılmıştır. Zaman ortalamalı akım çizgisi topolojisi, öncelikle üzerinde sarmal yapı olmaksızın imal edilen düz bir silindir için ( $\psi$ ), Şekil 3.1’de, daha sonra da farklı sarmal adımlarında imal edilen silindirler için çıkarılmıştır. Serbest akış eksenine göre  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  ve  $180^\circ$  açısal konumları için kritik noktalar

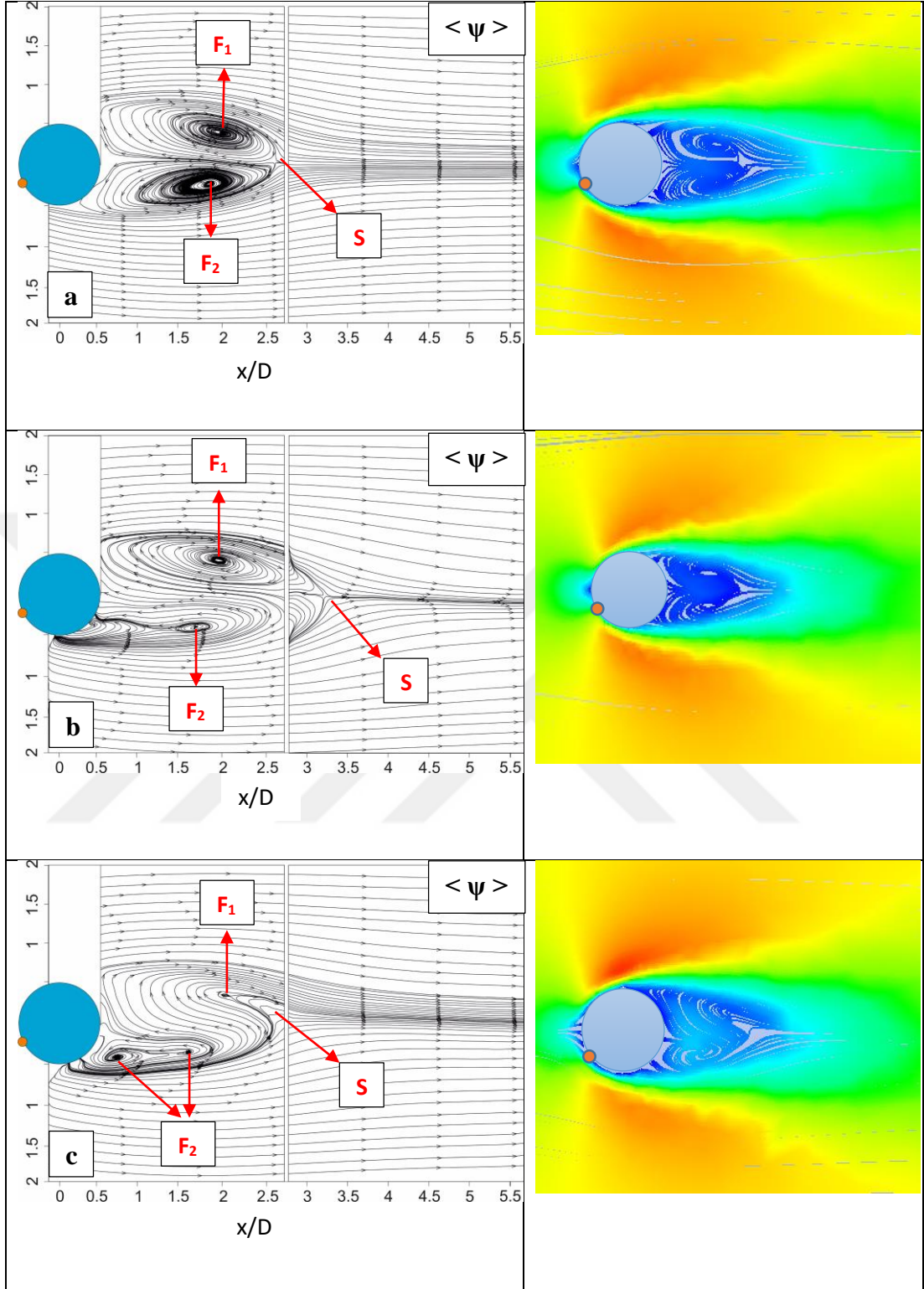
( $F_1$ ,  $F_2$  ve  $S$ ) boyutsuz (ana gövde silindir çapı  $D$ 'ye bağlı)  $x/D$  ve  $y/D$  olarak elde edilmiştir. Bazı düzlemlerde kritik noktalar görüntü alanına sığmadığı için deneyler sırasında CCD kamera kaydırılarak aşağı akım bölgesi yan yana iki görüntü ile elde edilmiştir. Bu görüntülerden silindire yakın olan kısım birinci bölge, uzak olan ise ikinci bölge olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, bir çift odak,  $F_1$ ,  $F_2$ , ardından bir eyer,  $S$  noktası tüm incelenen durumlarda gözlenmektedir. Odak noktası, akış topolojisi üzerindeki karşılık gelen akış çizgilerinin merkezini temsil eder. Fiziksel bir şekilde, silindir yüzeyinden ayrılan akışın girdap merkezidir. Bu girdap alanları, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi birbirine göre ters yönde dönmektedir. Eyer noktası,  $S$ , komşu düzlemlerin ayrılmasını belirtir. Başka bir deyişle, eyer noktası, bir silindirin arkasındaki dolaşım bölgesinin sona erdiği bir işaretidir. Bu nedenle, bu noktaların konumları son derece önemlidir.

Şekil 3.2'de farklı sarmal yapılarına sahip silindirlerde akış düzlemine dik konum için ( $0^\circ$ ) akım çizgileri sunulmuştur. Sarmal silindirlerin serbest akış düzlemine dik konumu ( $0^\circ$  düzlemi) silindirlerin dikey uzunluklarının orta noktası olan  $z/H=0.22$  olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.1'de verilen düz silindir ile karşılaştırıldığında, tek sarmallı silindir için art izi bölgesinde oluşan kritik noktalar  $F_1$  ve  $F_2$ , yine birbirine göre simetrik fakat  $x$  eksenini boyunca ileri noktada konumlanmıştır. Eyer noktasının ise ikinci bölgeye taşındığı görülmektedir. Çift ve dört sarmallı silindirler için  $0^\circ$  düzlemindeki  $F_1$  odak noktası ileri taşınırken  $F_2$  noktası silindir yüzeyine yakın kısımda belirmiştir. Bu farklılık sarım açılarının değişmesinden ileri gelmektedir. Özellikle çift sarmallı silindir için üst girdap alanının küçülmesi nedeniyle tek bir girdap merkezinin ( $F_2$ ) daha belirgin olduğu gözlenmektedir. Konumlarına bakıldığında  $F_1$  için  $a$  uzaklığı  $x/D=2.20$ ,  $F_2$  için  $b$  uzaklığı  $x/D=0.95$  olarak hesaplanmıştır. Bu değerler tek sarmal için  $a=1.97D$  ve  $b=1.94D$  iken dört sarmalde  $a=2.25D$  ve  $b=0.98D$ 'dir. Odak noktalarının konumlarının farklı çıkması girdap frekans değerlerini etkileyerek akışkanlar mekaniği uygulamalarında önemli boyutsuz sayılardan biri olan Strouhal sayısının farklı değerlerde ortaya çıkmasına neden olmaktadır.



**Şekil 3.2** Farklı sarmal yapıdaki silindirlerde akış düzlemine dik konum için ( $0^\circ$ ) PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarmal düzlem görünümü b) çift sarmal düzlem görünümü c) dört sarmal düzlem görünümü

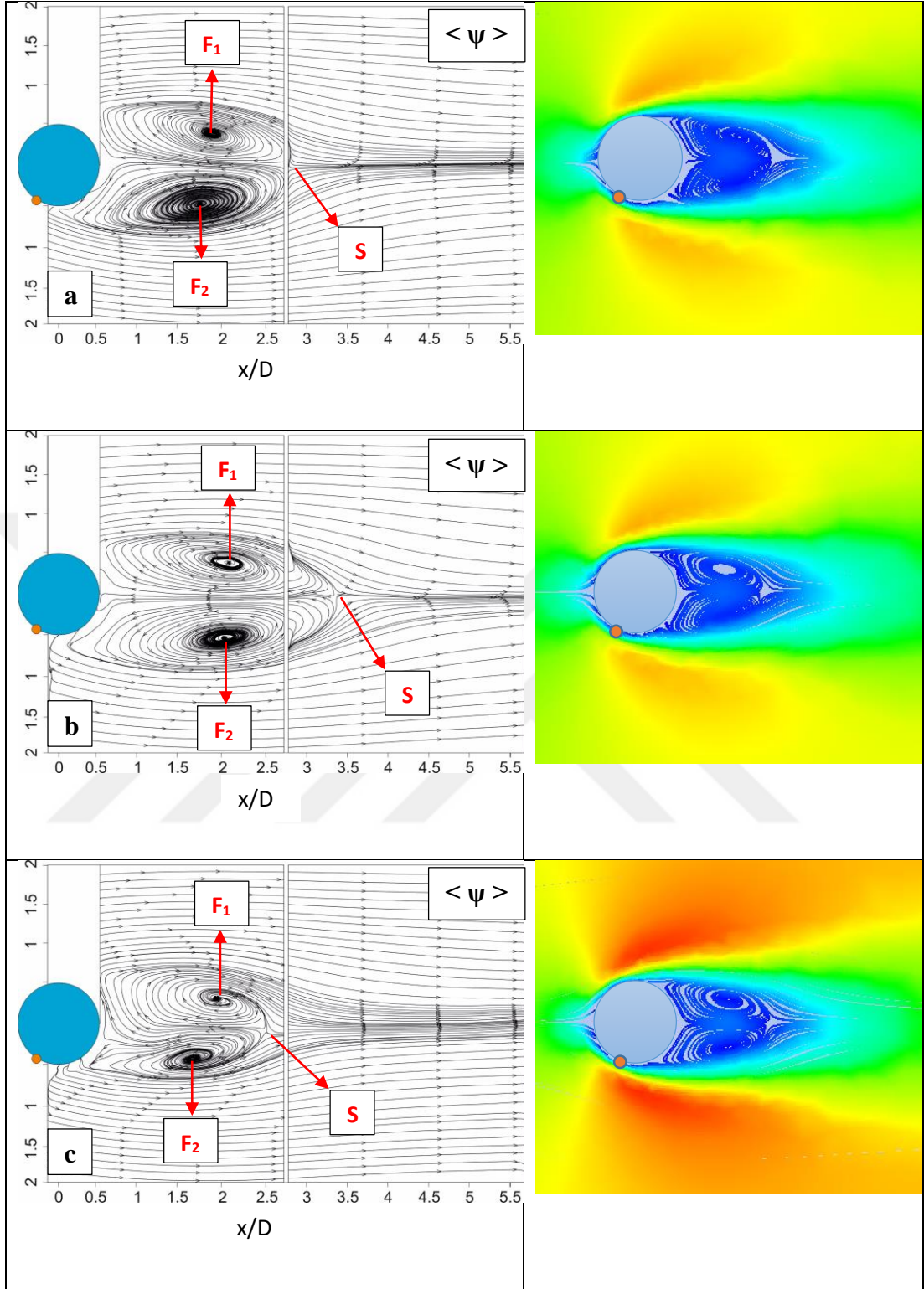


**Şekil 3.3** Farklı sarmal yapılarıdaki silindirlere akış düzlemine  $30^\circ$  konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarmal düzlem görünümü b) çift sarmal düzlem görünümü c) dört sarmal düzlem görünümü

Şekil 3.3'te farklı sarmal yapıya sahip silindirlerde akış düzlemine göre 30° açılı konum için akım çizgileri görülmektedir. Sarmal yapıdaki silindirlerin serbest akış düzlemine 30° konumu (30° düzlemi) silindirlerin dikey uzunluklarının farklı z mesafelerine denk gelmektedir. Bu noktalar tek sarmal yapı için  $z/H=0.037$ , çift sarmal için  $z/H=23.83$ , dört sarmal için  $z/H=22.92$  olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.1'de verilen düz silindir ile karşılaştırıldığında, tek sarmallı silindire ait akış alanlarında  $F_1$  ve  $F_2$  odak noktaları açıkça görülmekle birlikte bu noktaların akım yönünde  $a=2.02D$  ve  $b=1.84D$  eğer noktasının ise  $c=2.82D$  mesafesine taşındığı görülmektedir. Çift sarmallı ve dört sarmallı silindirler için 30° düzleminde özellikle  $F_2$  odak noktalarındaki farklılıklar göze çarpmaktadır. Akışkan çift sarmalde  $F_2$  noktası da iki farklı vorteks merkezi oluşumuna zorlanırken bu etki dört sarmalde belirgin hale gelmiş ve  $0.7D$  ve  $1.50D$  mesafelerinde ortaya çıkmıştır.  $F_1$  konumlarına bakıldığında çift sarmallı yapıda  $1.97D$  mesafesinde düz silindirde olduğu gibi tam merkezli vorteks oluşumu varken,  $2.035D$  mesafesinde dört sarmallı yapıdaki vorteks daha küçük yapıya dönüşmektedir.

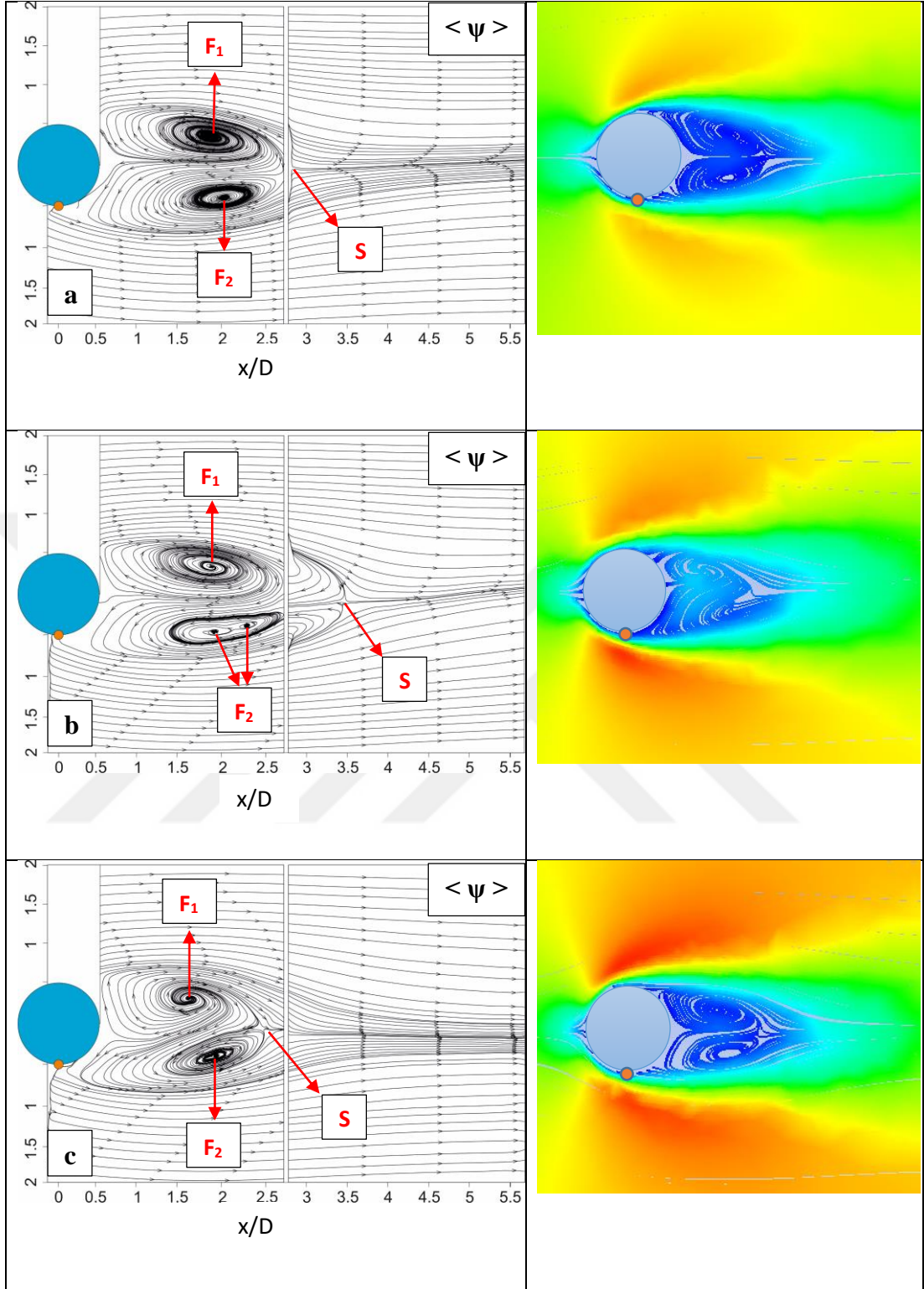
Şekil 3.4'te farklı sarmal yapılarıdaki silindirler için akış düzlemine 60° konumdaki akım çizgileri verilmiştir. Tek sarmallı yapı için elde edilen akım çizgileri düz silindir ile benzerlik gösterirken çift sarmalde akış yönünde ileri taşınmış, dört sarmallı yapıda ise odak noktaları  $F_1$  ve  $F_2$  sırasıyla  $1.94D$  ve  $1.64D$  mesafelerinde yer almıştır.

Sarmal silindirlerin akış düzlemine 90° konumu için akım çizgileri Şekil 3.5' te, 120° konumu için Şekil 3.6'da ve 180° konumu için Şekil 3.7'de verilmiştir. Elde edilen kritik nokta aksenal mesafe değerleri Tablo 3'te bütün düzlemler için oluşturulmuştur. Sarmal konum açılarına bağlı kritik nokta grafikleri Şekil 3.8'te sunulmuştur. Kritik konum açı değerlerinin 60° ve 90° olduğu açıkça görülmektedir.

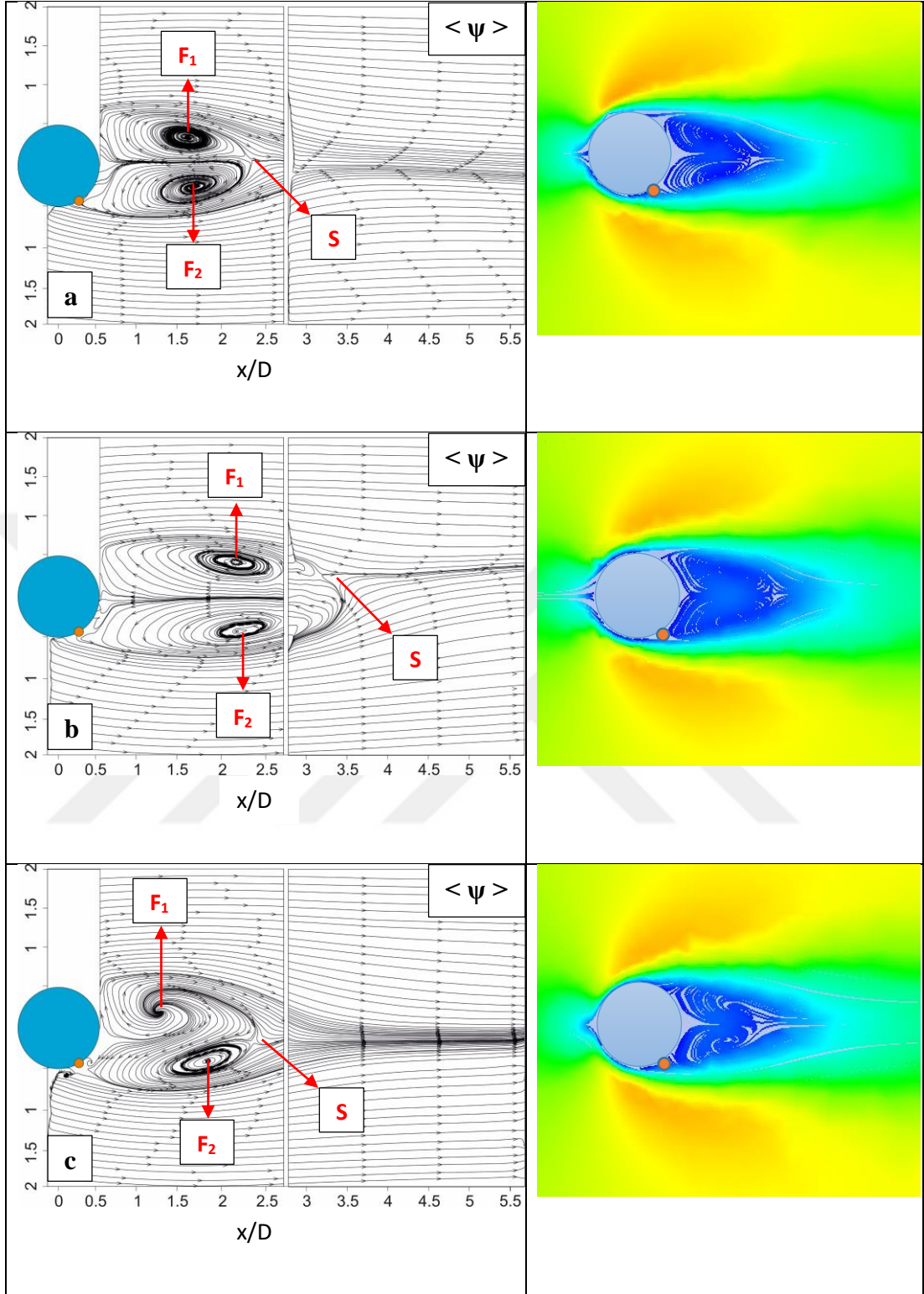


**Şekil 3.4** Farklı sarmal yapılarıdaki silindirlere akış düzlemine  $60^\circ$  konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarmal düzlem görünümü b) çift sarmal düzlem görünümü c) dört sarmal düzlem görünümü

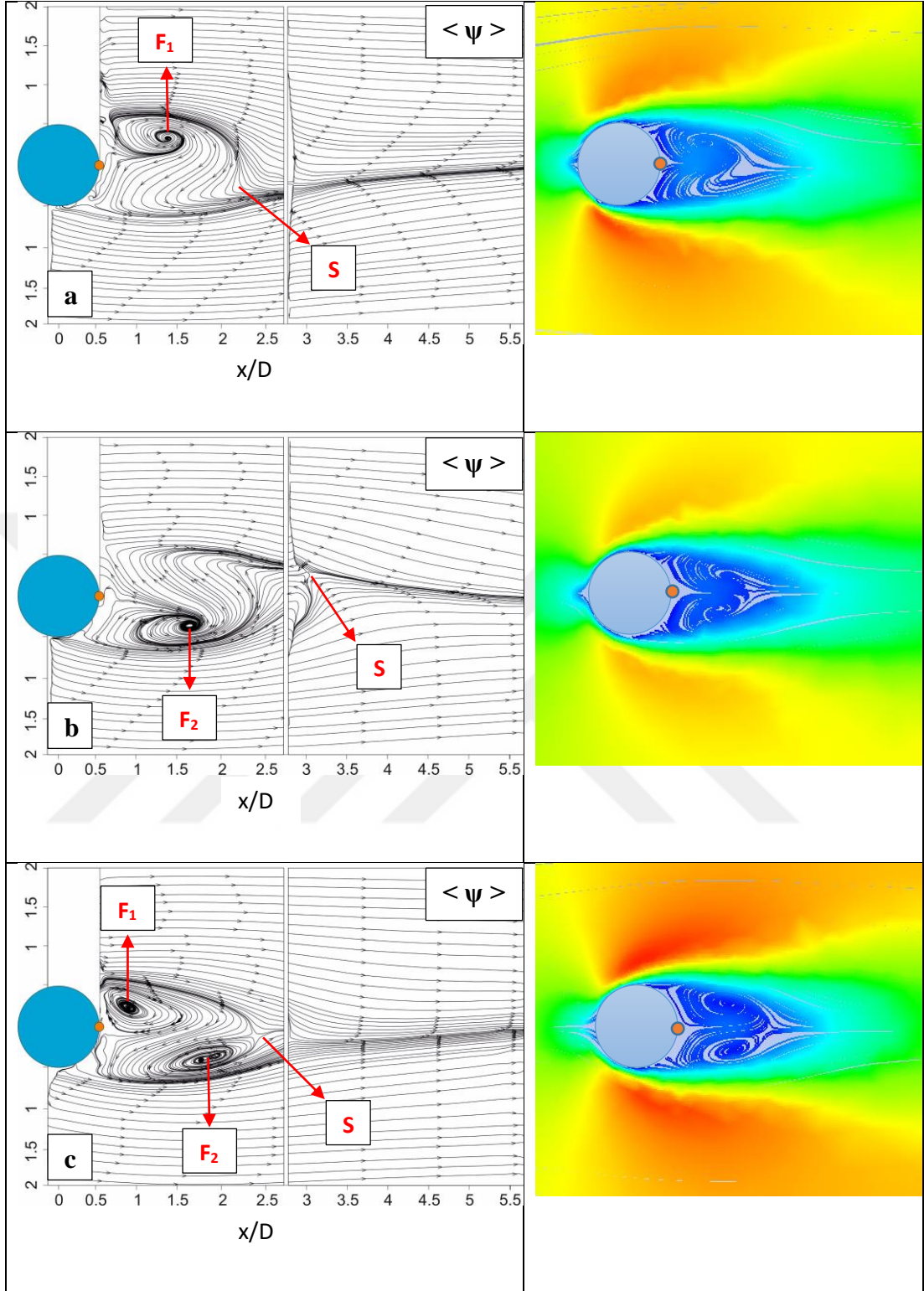




**Şekil 3.5** Farklı sarmal yapılarıdaki silindirelerde akış düzlemine  $90^\circ$  konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarmal düzlem görünümü b) çift sarmal düzlem görünümü c) dört sarmal düzlem görünümü



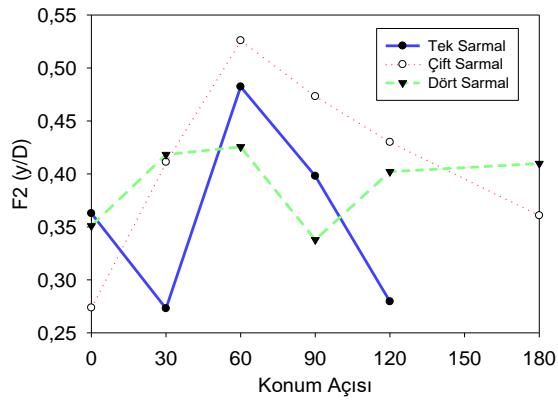
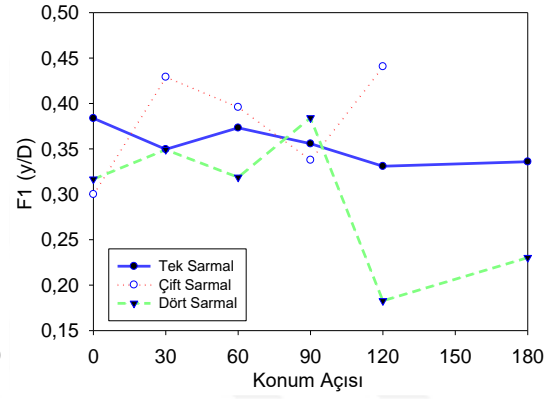
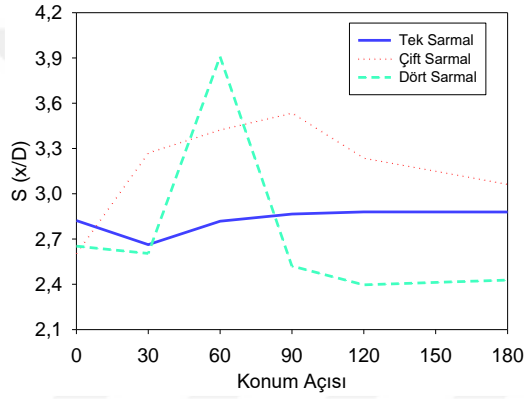
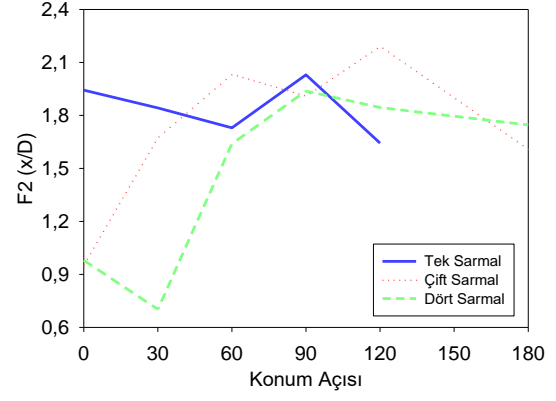
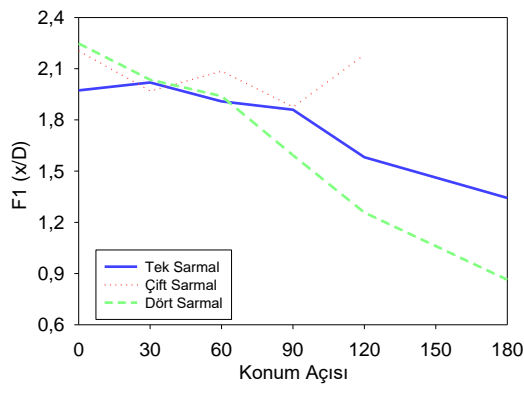
**Şekil 3.6** Farklı sarmal yapıdaki silindirlerde akış düzlemine  $120^\circ$  konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarmal düzlem görünümü b) çift sarmal düzlem görünümü c) dört sarmal düzlem görünümü



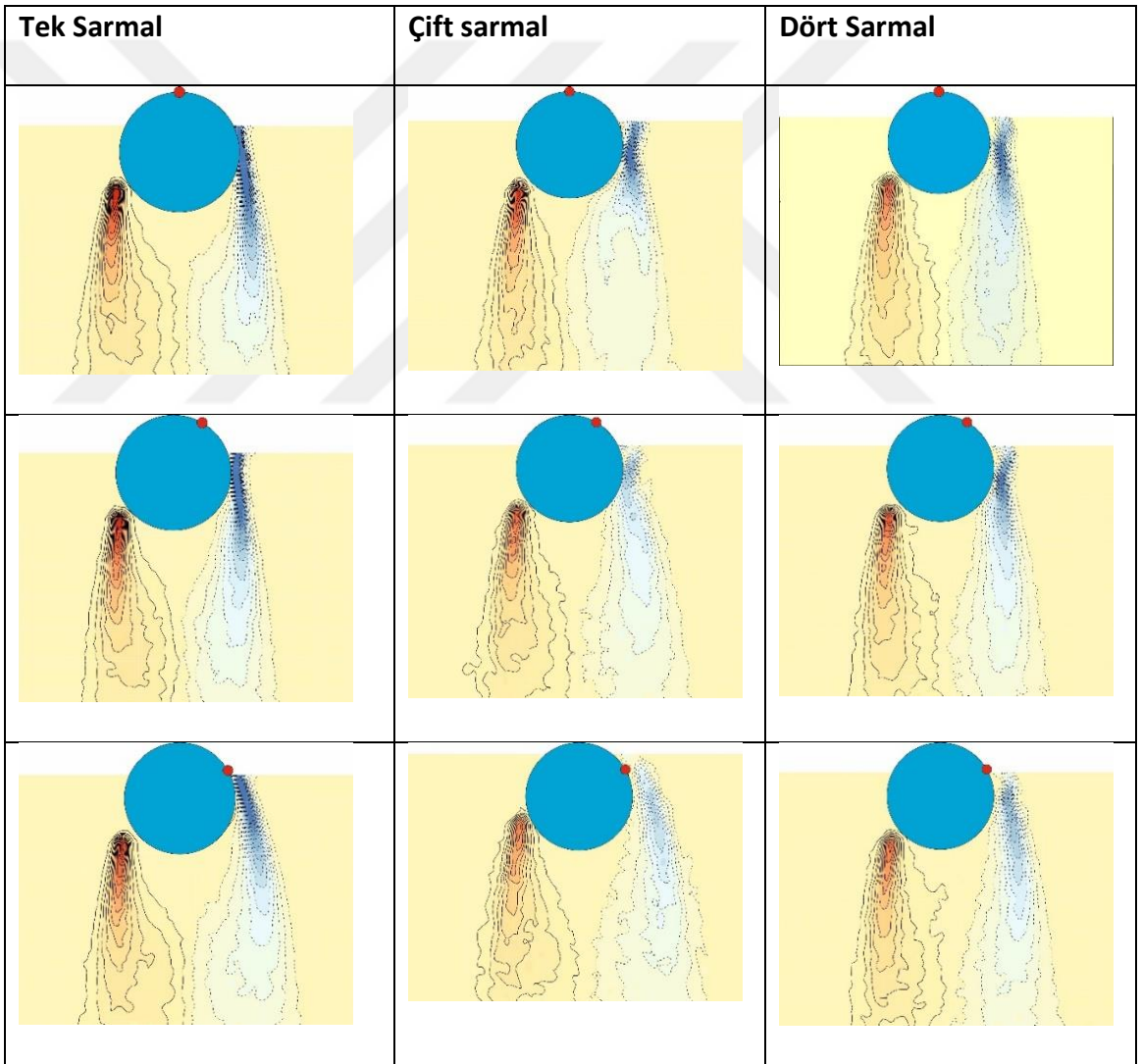
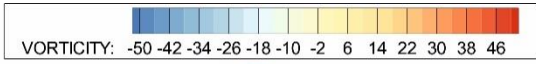
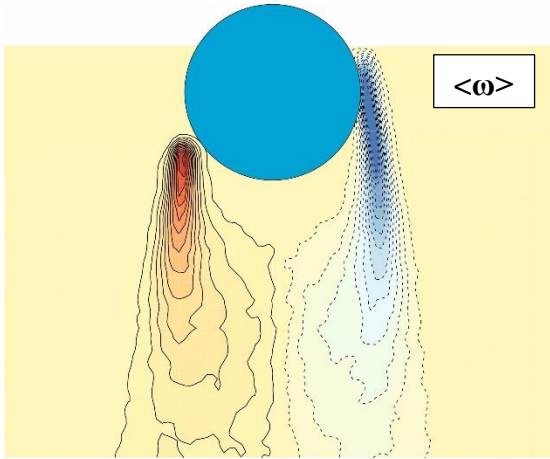
**Şekil 3.7** Farklı sarmal yapıdaki silindirlerde akış düzlemine  $180^\circ$  konum için PIV ve HAD yöntemleriyle elde edilen akım çizgileri a) tek sarım düzlem görünümü b) çift sarım düzlem görünümü c) dört sarım düzlem görünümü

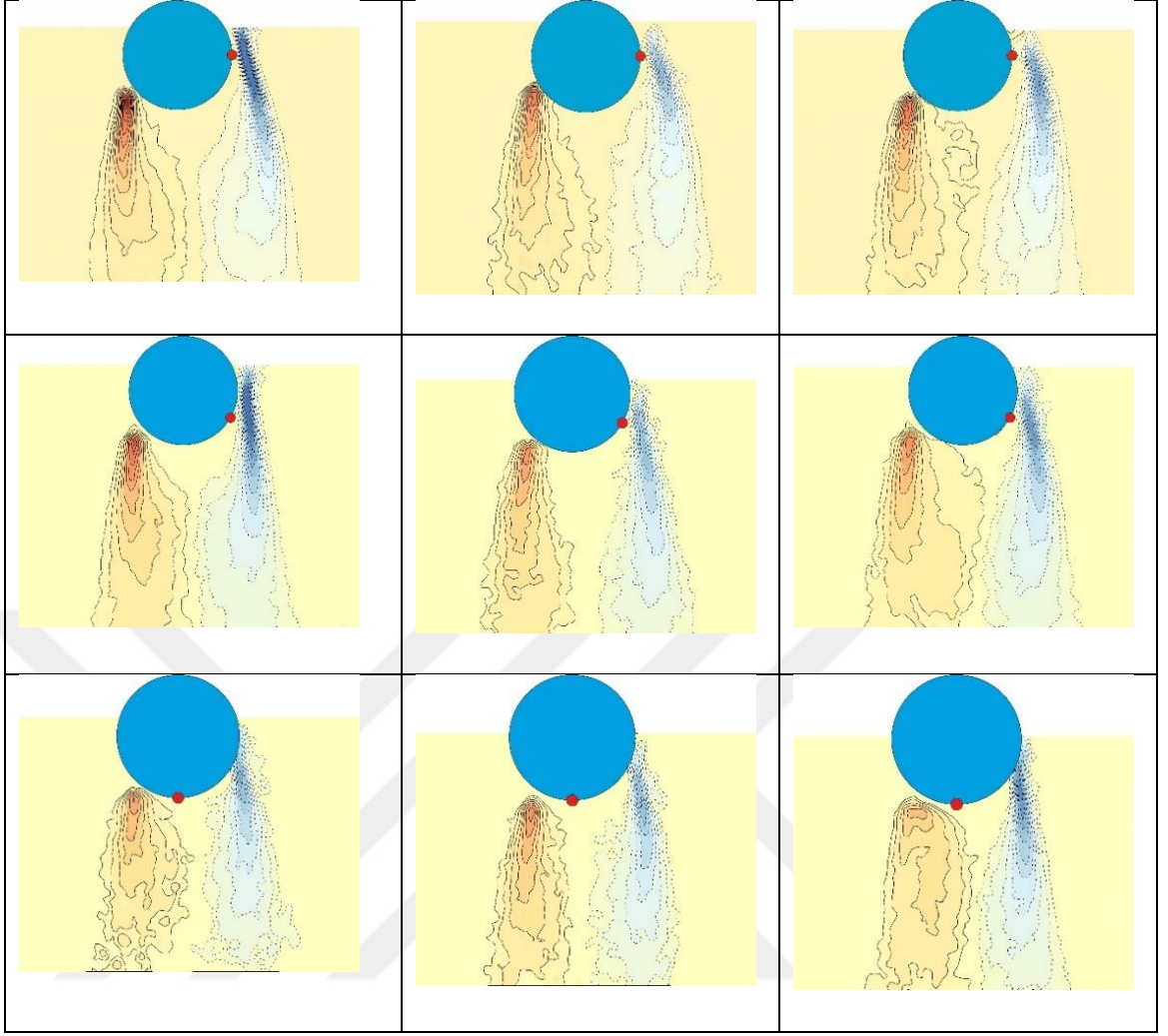
**Tablo 3** Kritik noktaların aksel mesafeleri

	<b>F<sub>1</sub>X (a)</b>	<b>F<sub>2</sub> X (b)</b>	<b>F<sub>1</sub> Y (d)</b>	<b>F<sub>2</sub> Y (e)</b>	<b>S (c)</b>
<b>Düz Silindir</b>	1,715682	1,648409	0,312273	0,315909	2,422955
<b>1s0</b>	1,972955	1,943182	0,383636	0,362727	2,8225
<b>1s30</b>	2,019318	1,8425	0,349545	0,272955	2,662955
<b>1s60</b>	1,908409	1,729773	0,373182	0,482273	2,818182
<b>1s90</b>	1,859773	2,029773	0,355682	0,397955	2,865227
<b>1s120</b>	1,581136	1,643409	0,330909	0,279545	2,879545
<b>1s180</b>	1,342955	-	0,335909	-	2,878864
<b>2s0</b>	2,204773	0,955455	0,3	0,273636	2,606136
<b>2s30</b>	1,970227	1,675682	0,429091	0,411136	3,272273
<b>2s60</b>	2,086818	2,033409	0,395909	0,525909	3,424545
<b>2s90</b>		1,910682		0,473182	3,535
	1,877045	2,310227	0,337727	0,393182	
<b>2s120</b>	2,184545	2,192045	0,440682	0,43	3,236818
<b>2s180</b>	-	1,608182	-	0,360682	3,063182
<b>4s0</b>	2,2475	0,979545	0,316591	0,350909	2,652955
<b>4s30</b>		0,701818		0,418182	
	2,035	1,582045	0,349091	0,350909	2,604318
<b>4s60</b>	1,939318	1,639091	0,318636	0,425455	3,908864
<b>4s90</b>	1,592955	1,937955	0,384091	0,337727	2,520682
<b>4s120</b>	1,257045	1,844318	0,182727	0,402045	2,396136
<b>4s180</b>	0,863636	1,745682	0,230227	0,409773	2,427955



Şekil 3.8 Sarmal konum açısı-kritik nokta değer grafikleri





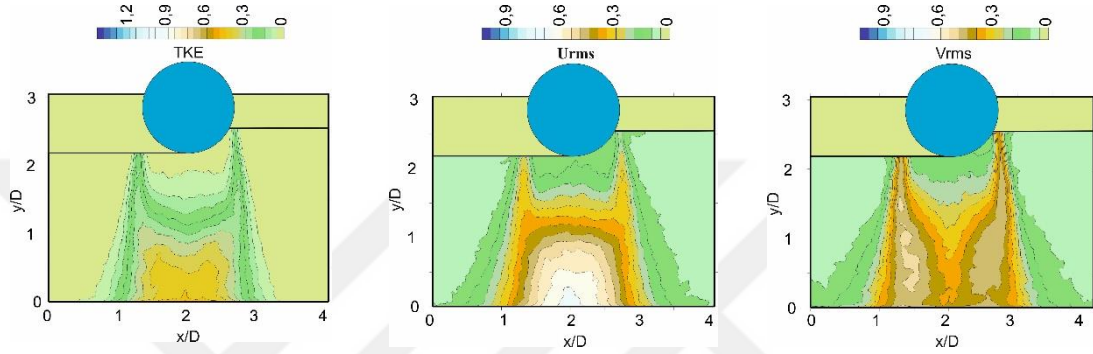
**Şekil 3.9** Sarmalların çeşitli açısai  $\theta$  konumları için zamana göre ortalama ( $\omega$ ) girdap eşdeğer eğrileri

Çevrinti (girdaplık, vortisite), matematiksel olarak hız alanının kıvrılması (curl) olarak tanımlanır ve bu nedenle akışkanın lokal rotasyonunun bir ölçüsüdür.

Öte yandan, sirkülasyon, kapalı alan boyunca hız alanının çizgi integrali olarak tanımlanan skaler bir niceliktir. Stoke teoremini kullanarak, kapalı alan boyunca hız alanının çizgi integrali, normal olarak hız alanının kıvrımının, yolla sınırlanmış bir rasgele alana yüzeyel bir entegrali olarak ifade edilebilir.

Şekil 3.9’da tek, çift ve dört sarmallı silindireler üzerindeki sarmalların çeşitli açısai  $\theta$  konumları için zaman ortalama ( $\omega$ ) girdap konturları verilmiştir. Girdap konturlarının pozitif değerleri sürekli çizgi ile ve negatif değerleri ise kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Doğrudan karşılaştırma yapmak için, şeklin en üstünde düz silindir için elde edilen girdap konturu sunulmuştur. Silindirin bir yarısı sarmal taraf olarak adlandırılırken,

diğer yarısı düzgün taraf olarak adlandırılır. Şekilde görüldüğü gibi, düz silindir için zaman-ortalama konturlar, silindirin art izi bölgesinde farklı değerlerde (pozitif ve negatif) fakat iki simetrik girdap dağılımına sahiptir. Bununla birlikte, bu konturlar  $\theta$  için sarmal silindir yüzeyindeki çeşitli açılarda farklılık göstermektedir. Sarmal,  $\theta=0^\circ$ 'den başlayan zaman ortalama girdap oluşumu üzerinde derin bir etkiye sahiptir. Sarmalın açısai pozisyonunun zaman ortalama girdap dağılımını etkilediği görülmektedir.

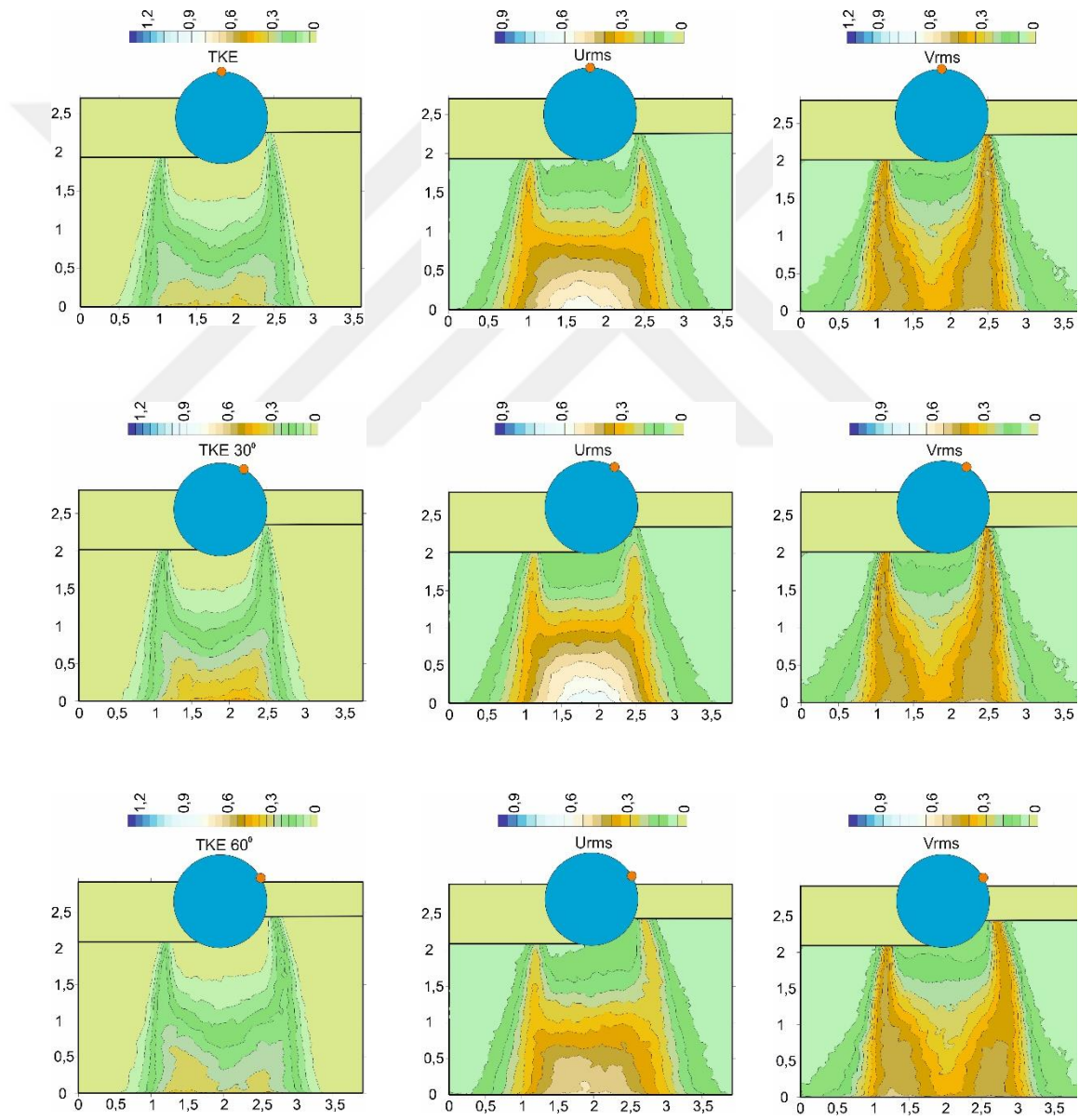


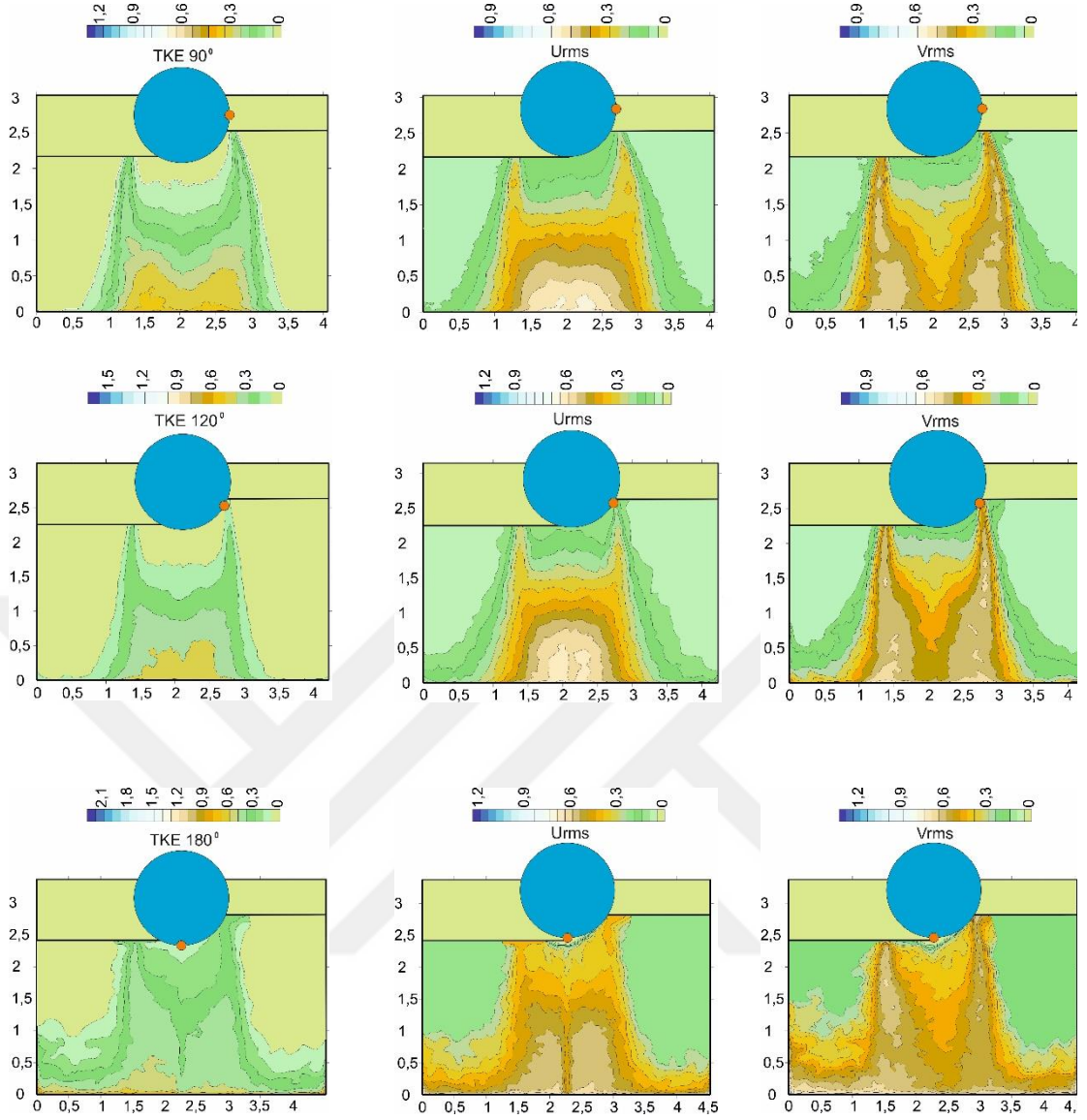
**Şekil 3.10** Düz silindir türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ )

Düz silindir için türbülans kinetik enerji, TKE, hızın akış yönündeki,  $U_{rms}$  ve akışa dik yöndeki,  $V_{rms}$  çalkantı konturları Şekil 3.10'da sunulmuştur. Minimum değerler  $[TKE]_{min} = [U_{rms}]_{min} = [V_{rms}]_{min} = 0$  ve artan değerler  $\Delta[TKE] = \Delta[U_{rms}] = \Delta[V_{rms}] = 0.30$ 'dur. TKE değerleri ortalama akış hızının karesine ( $u^2$ ), RMS değerleri ise ortalama akış hızına ( $u$ ) bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. TKE, bileşenini belirlemek için izotropik akış koşulları varsayımıyla hızın akış yönünde ve akışa dik yönde Reynolds normal gerilmeleri kullanılarak hesaplanabilir. Mevcut PIV verilerinden TKE'nin hesaplama yöntemi Ozkan ve arkadaşları (2012) ile Sheng ve arkadaşlarının (2000) çalışmalarında kapsamlı olarak verilmiştir [72][73]. Şekil 3.10' da görüldüğü gibi, TKE, silindirin merkezinden belirli uzaklıkta bulunan tek bir tepe sergiler. TKE'nin, maksimum konturlarının, silindirin her iki tarafından yayılan kayma noktalarının bulunduğu bölgede oluştuğu görülmektedir. Akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  hız çalkantılarının konturları tek maksima



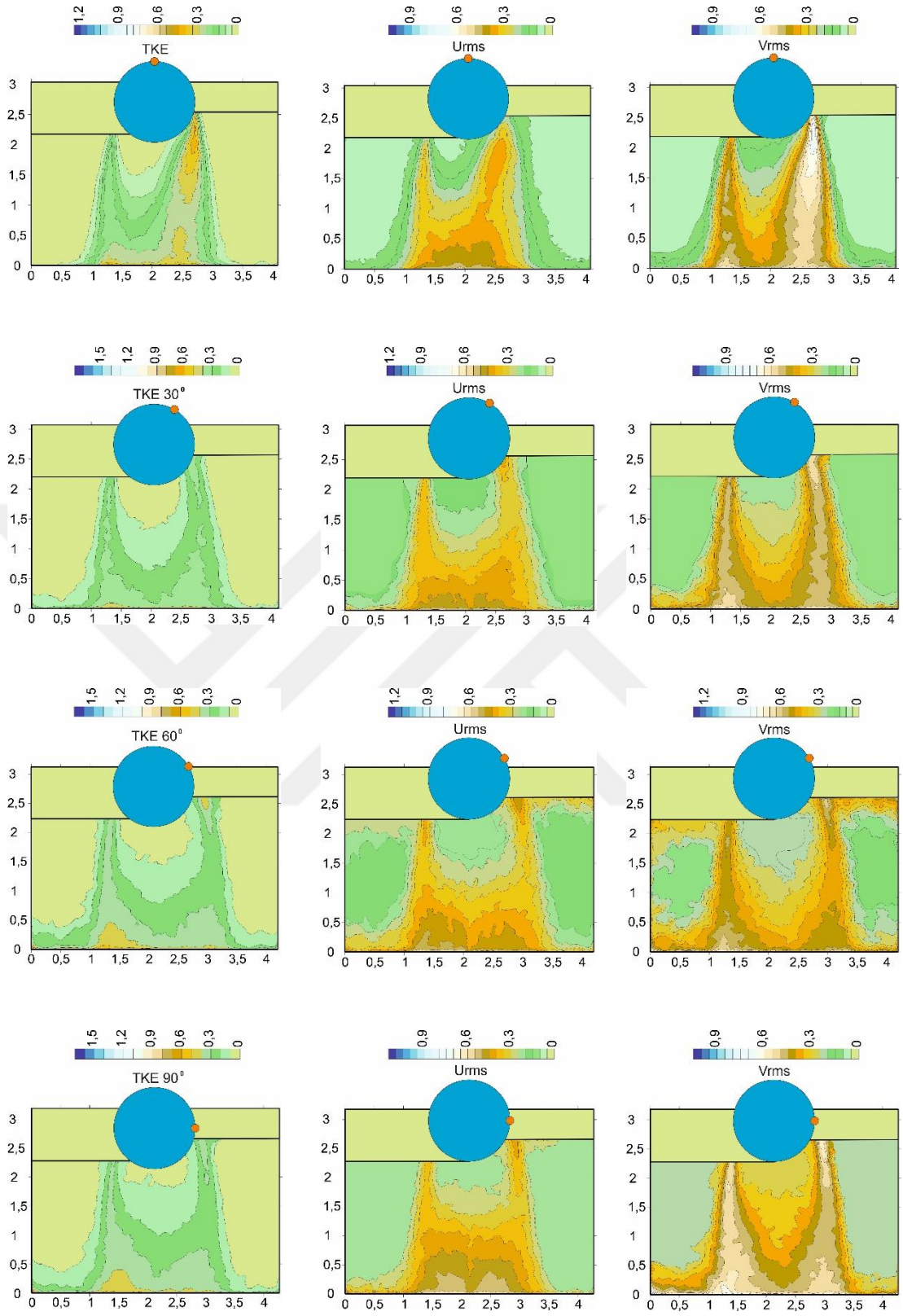
gösterirken, akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  hız çalkantılarının konturları iki tepe sergiler.  $U_{rms}$ 'nin maksima yeri eyer noktasının yakın bölgesinde iken  $V_{rms}$ 'nin maksima yerleri odak noktaları civarındadır. Akış yönünde hız çalkantı konturlarının simetrik dağılımı Şekil 3.10 düz silindirde olduğu gibi sadece Şekil 3.11'de gösterilen tek sarmallı yapı için  $\theta=0^\circ$ 'de gözlenir. Ayrıca,  $\theta$  açısı değişirken hız çalkantılarının dağılımında hafif bir asimetri oluşmaktadır. Sarmalların varlığının, TKE,  $U_{rms}$  ve  $V_{rms}$  dağılımları üzerindeki etkileri Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmektedir.

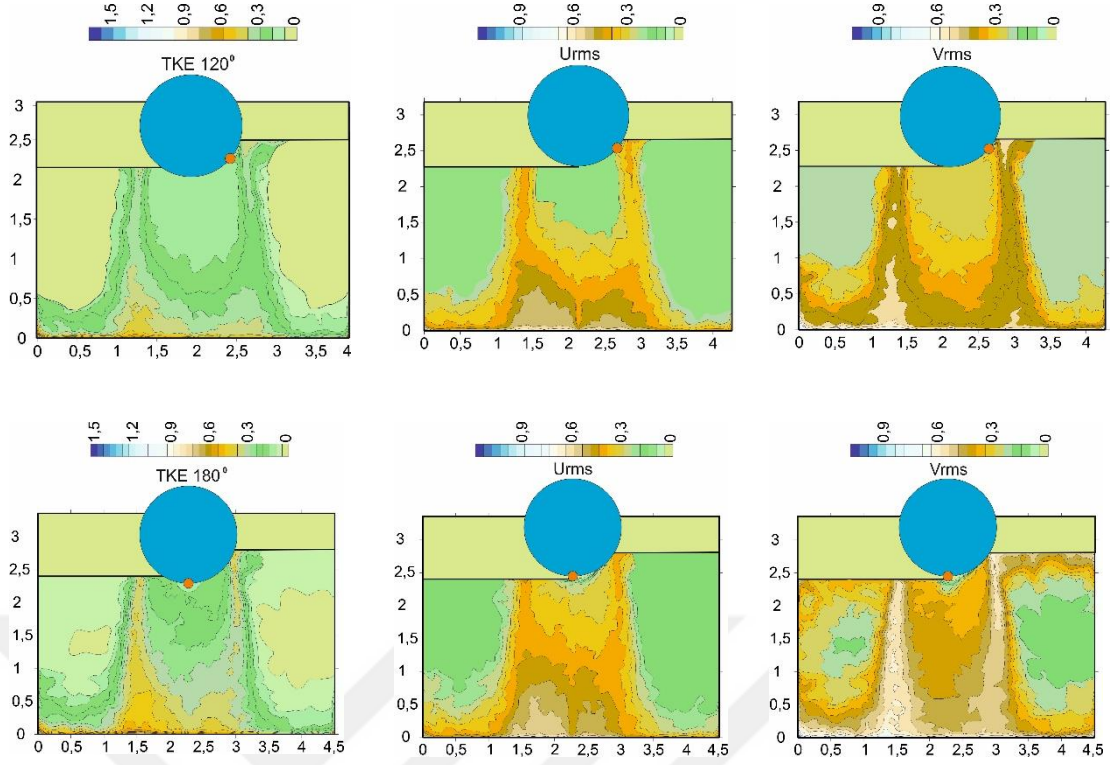




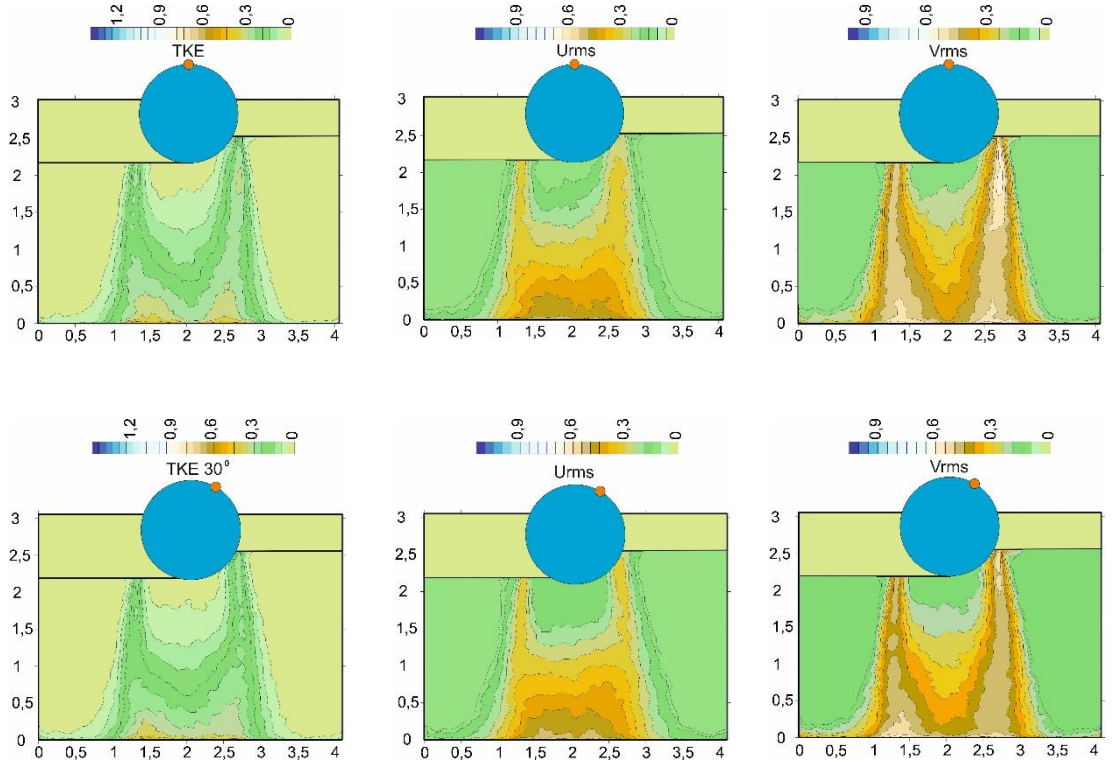
**Şekil 3.11** Tek sarmal yapılı silindir türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ )

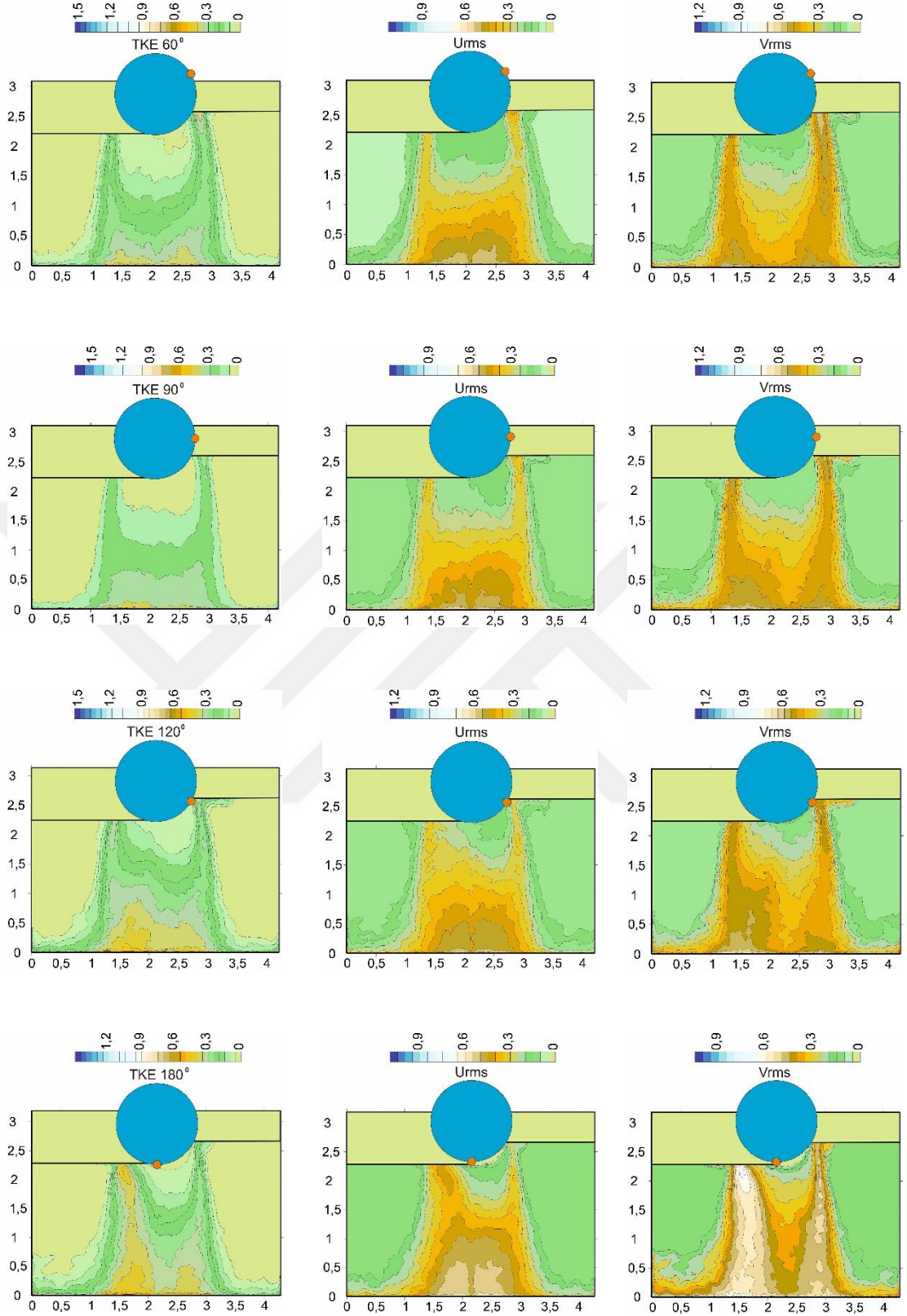
Türbülans kinetik enerji TKE hatları, sarmal yapının çeşitli açısall konumları için akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  ve sarmal yapının çeşitli açısall pozisyonları için akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$ , tek sarmal yapılı silindir için Şekil 3.11' de, çift sarmal yapılı silindir için Şekil 3.12' de, dört sarmallı silindir için Şekil 3.13' te gösterilmektedir.



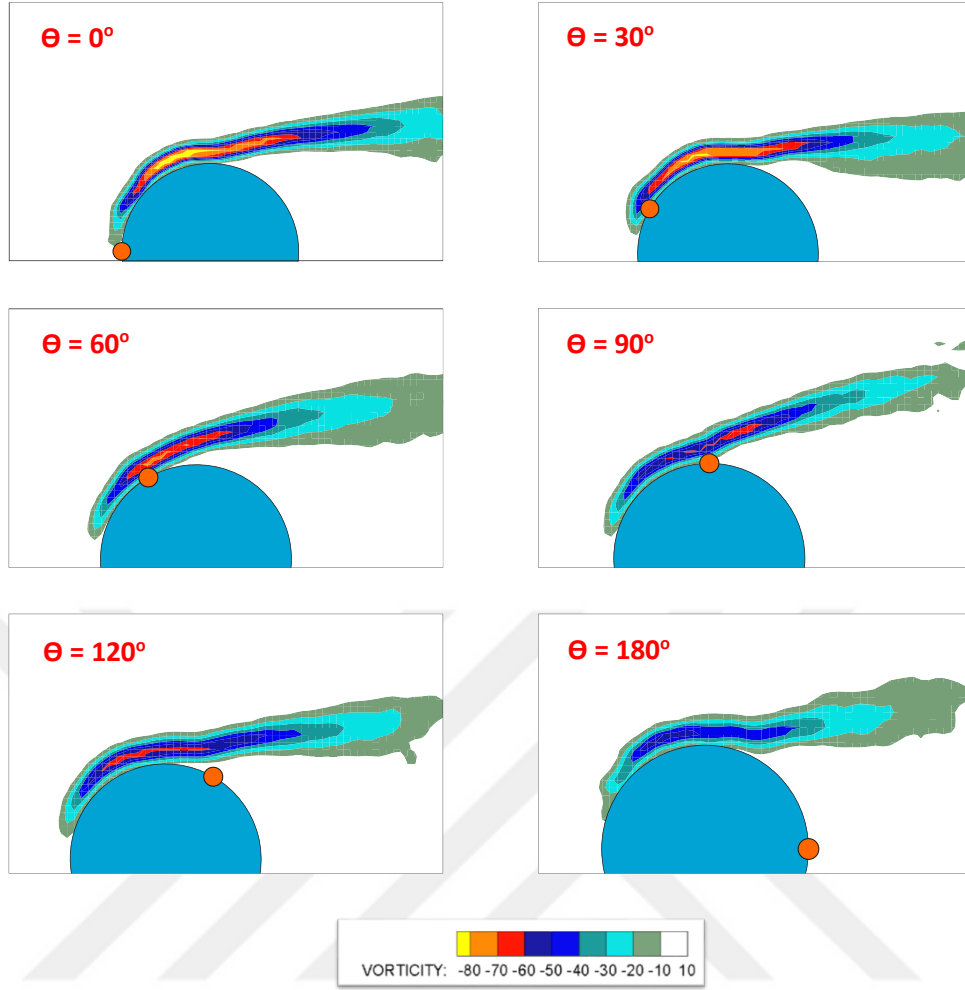


**Şekil 3.12** Çift sarmal yapılı silindirin türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ )





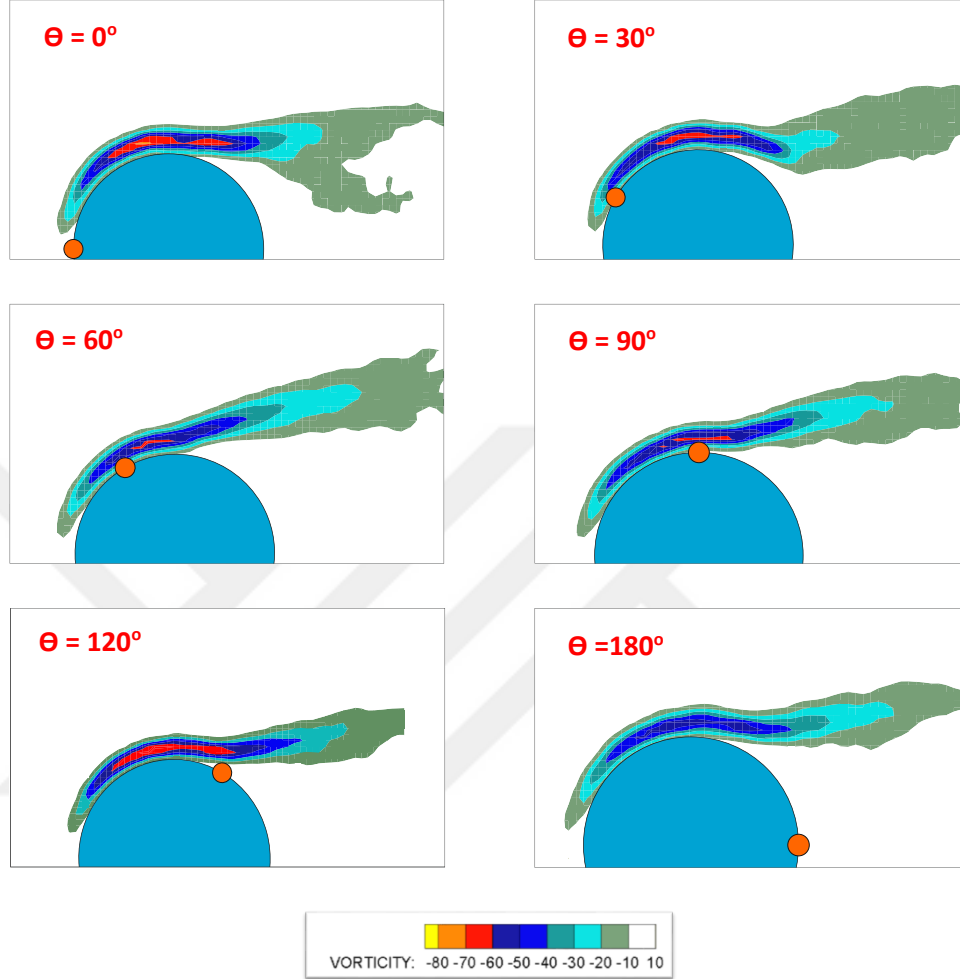
**Şekil 3.13** Dört sarmal yapılı silindir türbülans kinetik enerji (TKE) konturları, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ )



**Şekil 3.14** Tek sarmallı yapıda sarmalın açısall pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki ayrılma-kayma tabakasının yapısı

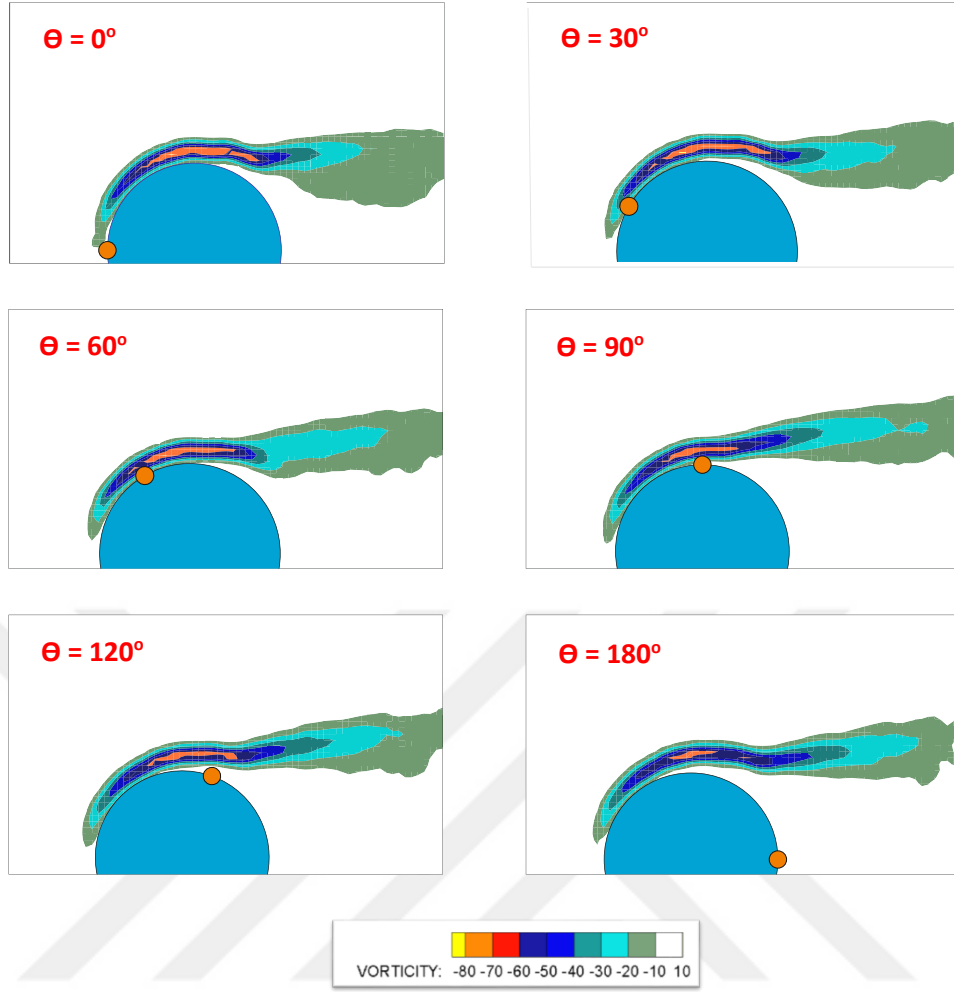
Katı cisim gövdelerindeki yüzey modifikasyonlarının önemi, sınır tabakası veya kayma tabakası içindeki değişim ile anlaşılabilir. Bu amaçla, zaman ortalama akım yönünde genel salınım eğilimini göstermek üzere sarmalın çeşitli açısall konumları için kayma tabakaları çıkarılmıştır. Şekil 3.14'te tek sarmallı yapıda sarmalın açısall pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki kayma tabakasının yapısı gösterilmektedir. Ayrılma tabaka katmanı, kontur çizgilerinin yoğun alanından tanınabilir. İlgili önceki çalışmaların ışığında [74][75], laminer sınır tabakasının mevcut akış koşulları için, akış ayrılmasının düz silindirin ileri durgunluk konumundan yaklaşık  $88^\circ$  de oluştuğu bildirilmiştir. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi, kayma tabakası erken ve geç / gecikmeli ayrılma gibi iki duruma sahiptir. Kayma tabakası ayrılması  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  içinde

geciktirilir.  $0^\circ$  konumu için düz silindir ile yaklaşık aynı ayrılma noktasına sahipken  $60^\circ$  için en ileri noktada çıkmıştır.



**Şekil 3.15** Çift sarmallı yapıda sarmalın açısal pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki ayrılma-kayma tabakasının yapısı

Şekil 3.15'te çift sarmallı yapıda sarmalın açısal pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki kayma tabakasının yapısı verilmiştir.  $\theta = 90^\circ$  'de, akış ayrılması yukarı yönde hareket etmeye başlar ve erken ayrılma (silindir merkez dikey ekseninden önce)  $90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  içinde gerçekleşir. Bu nedenle, sarmalın  $\theta = 90^\circ$  açısal konumu, mevcut akış koşulları, sarmalın boyutu ve tipi için kritik açıdır. PIV görüntülerindeki anlık kayma tabakası dağılımları incelendiğinde, ayrılma sonrasında kayma tabakasının tekrar bağlanması söz konusu değildir. Ayrıca, kayma tabakasında önemli bir dalgalanma enine yönde gözlenmez.

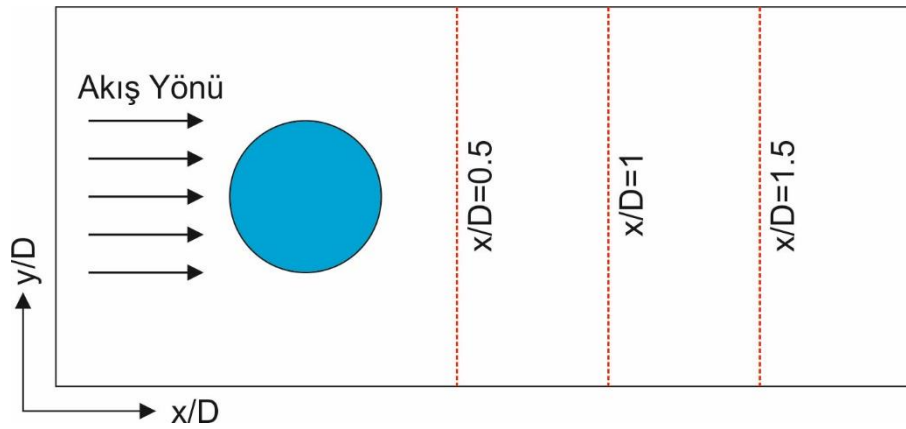


**Şekil 3.16** Dört sarmallı yapıda sarmalın açisal pozisyonu için silindirin sarmal tarafındaki ayrılma-kayma tabakasının yapısı

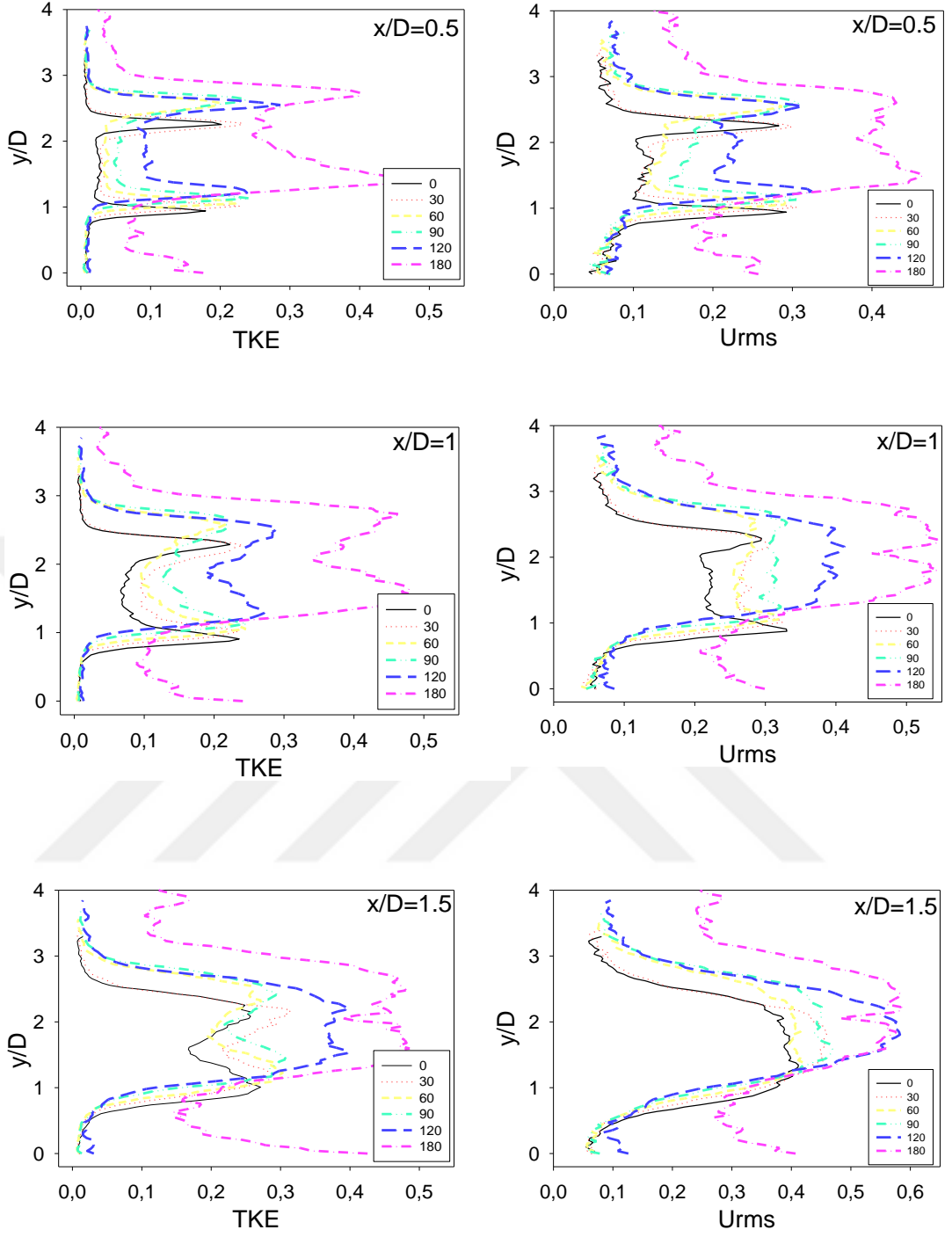
Kayma tabakasının dört sarmallı dairesel silindirin durma noktasından itibaren yapısı, Şekil 3.16' da gösterilmektedir. Çizim, sarmalın varlığının  $\theta = 90^\circ$  'den önce geç / gecikmeli ayrılmaya neden olduğunu açıkça gösterirken, erken açılı akış ayrılması bu açıdan önce gözlenir. Silindirin sınır tabakasını rahatsız etmek için çapı  $d = 0.44$  mm olan yarım silindir şeklindeki sarmalın  $0 \leq \theta < 90^\circ$  içerisinde kontrol elemanı olarak kullanılabileceği görülmüştür.



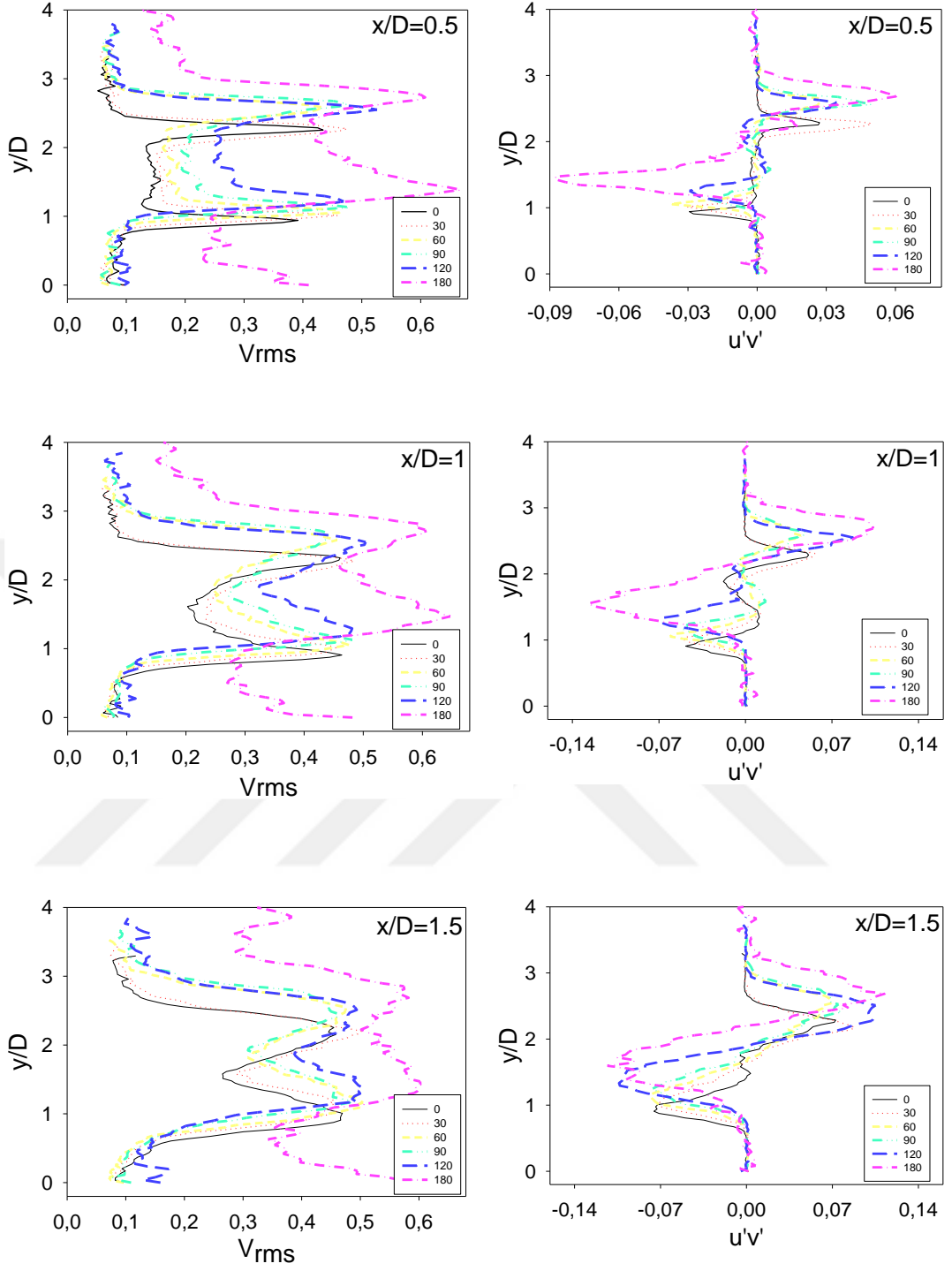
Tüm  $\theta$  (0, 30, 60, 90, 120 ve 180) durumları için çeşitli konumlardaki türbülans kinetik enerji değişimi TKE, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $U_{rms}$ ), ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi ( $V_{rms}$ ) ile Reynolds gerilme korelasyonları  $u'v'$  bu kısımda gösterilmektedir. Silindir çizgisi ile x eksenini arasındaki grafik çizgilerinin akışsal olarak konumlandırılması, silindir D çapı kullanılarak boyutsuz hale getirilmiştir.  $x/D=0.5$  konumu silindirin hemen ardından türbülans istatistiklerinin gelişimini ortaya çıkarmak için rastgele seçilmiştir.  $x/D=1$  aerodinamik topolojide dikey odak noktalarına,  $x/D = 1.5$  boyutsuz konumu ise, eyer noktasının konumuna yaklaşık olarak belirlenmiştir. Şekil 3.17' de bu noktaların silindire mesafeleri açıkça gösterilmiştir.  $U_{rms}$  ve TKE'nin büyüklükleri başlangıçta silindirin her iki tarafından olan mesafe ile artmakta, kayma tabakası içinde lokal bir maksimum değer elde ederek ardından düşmektedir. Bununla birlikte,  $x / D = 0.5$ 'te lokal maksimalden sonra büyüklüklerin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Dahası, TKE'nin grafikleri, karşılık gelen akım hattının sınır dolaşım çizgisi çevresinde göreceli olarak zayıf büyüklükte ikincil lokal zirveye sahiptir. TKE'nin her iki tarafındaki yerel zirvelerinin, akış çizgisi uzadıkça birbirine olan mesafesi azalmaktadır.  $U_{rms}$  ve TKE grafiklerinde görünen her iki tarafındaki maximum noktalar, akış yönünde artan mesafe ile birbirine yaklaşmaktadır.  $V_{rms}$  grafikleri başlangıçta artar, ilgili akıntı çizgisinin dolaşım çizgisi sınırındaki yerel zirvesine ulaşır, sonra düşer. Reynolds gerilme korelasyon grafiklerine bakıldığında, boyutsuz  $x/D$  mesafesi arttıkça sinüsoidal dağılım gösterdiği görülmektedir. Silindirin yakınında akım çizgisi dolaşım hattının hemen üzerinde ve altında ortaya çıkan iki yerel tepe noktası dikeylikten daha eğimli yapıya dönüşmektedir.



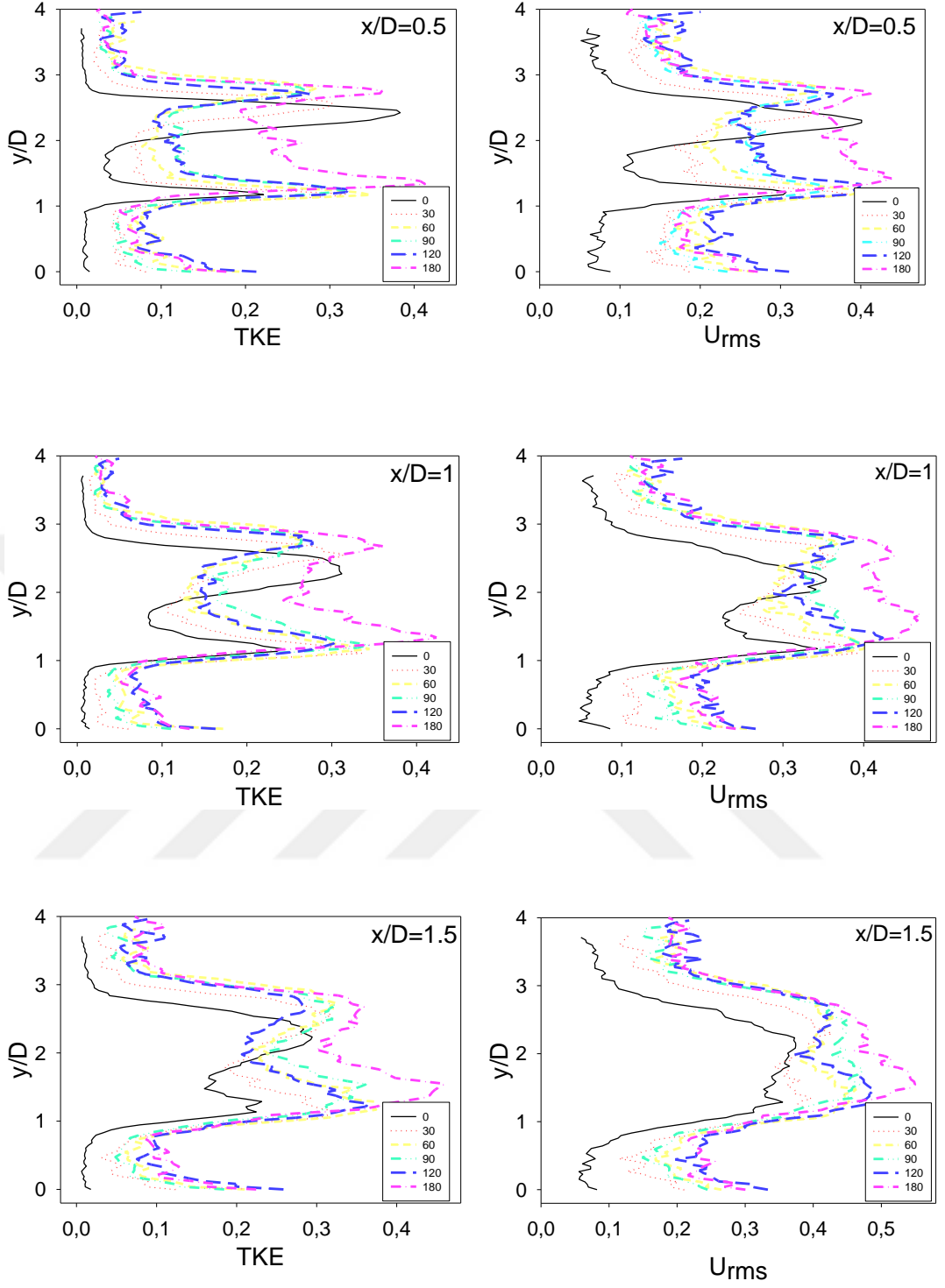
Şekil 3.17 TKE,  $U_{rms}$ ,  $V_{rms}$  için değerlendirilen mesafeler



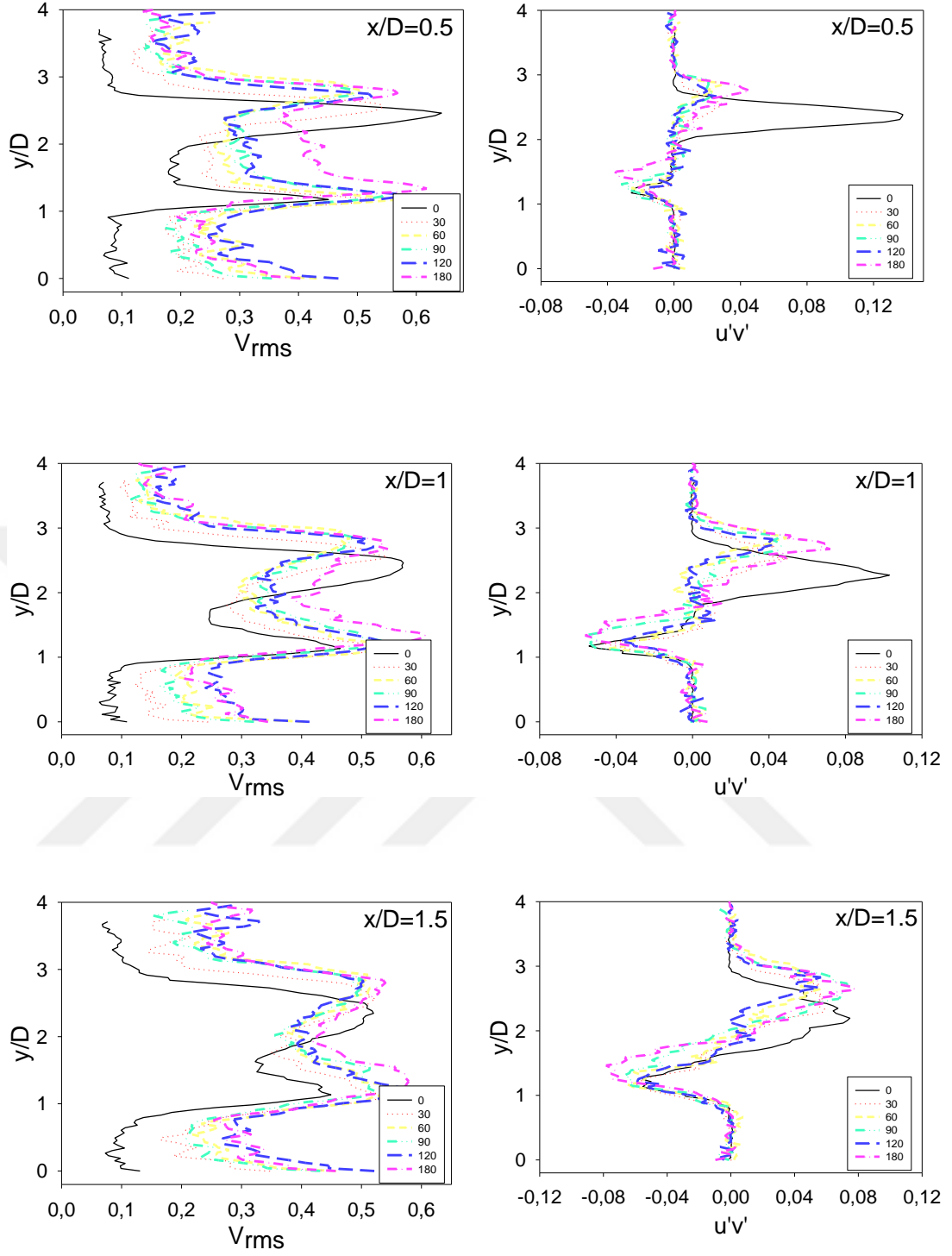
**Şekil 3.18** Tek sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları



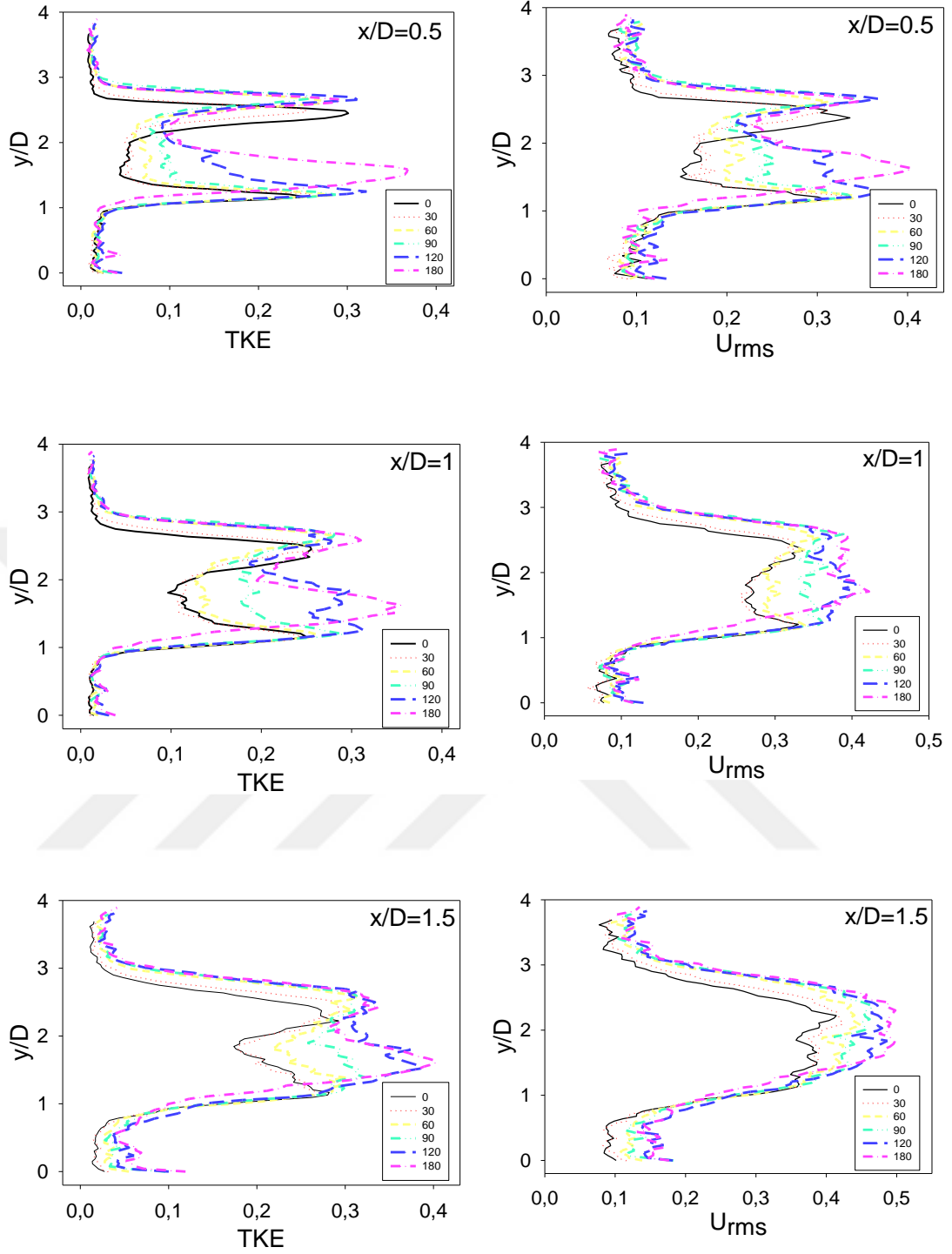
**Şekil 3.19** Tek sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlardaki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri



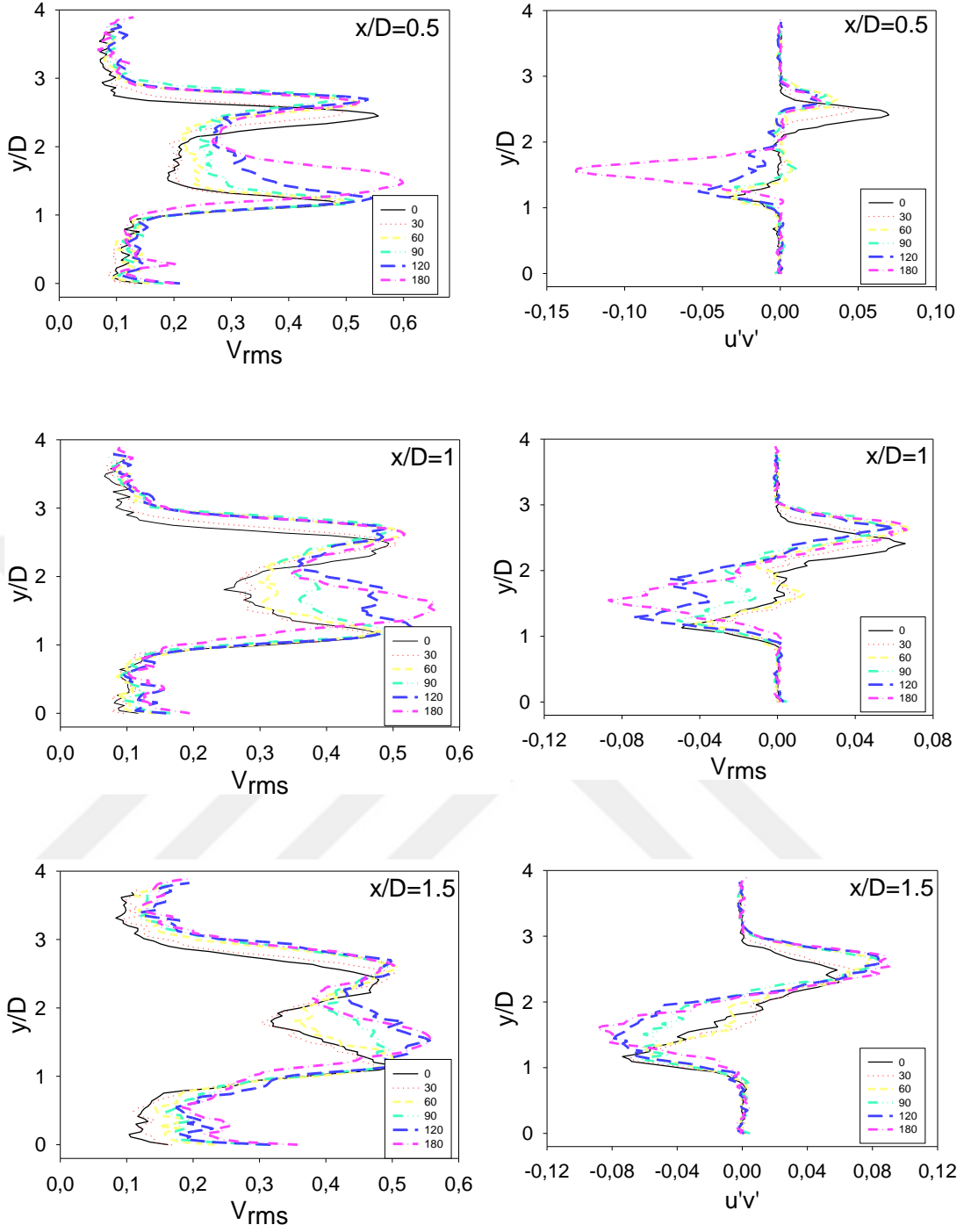
**Şekil 3.20** Çift sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlarıdaki türbülans kinetik enerjisi TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları



**Şekil 3.21** Çift sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlarıdaki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri



**Şekil 3.22** Dört sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlarıdaki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları



**Şekil 3.23** Dört sarmal yakın art izi içindeki çeşitli akışkan konumlarıdaki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri

Akışkan dinamiğinde türbülans kinetik enerji ( TKE ), çalkantılı akışta eddies ile ilişkili birim kütle başına ortalama kinetik enerjidir . SI birim sisteminde  $J/kg=m^2/s^2$  olarak ifade edilir. Fiziksel olarak türbülans kinetik enerji, kök-ortalama-kare (RMS) hız çalkantıları ile karakterize edilir. Genel olarak, TKE, hız bileşenlerinin varyanslarının (standart sapmaların karesi) toplamının yarısı olarak Denklem 3.1'deki gibi tanımlanır:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}) \quad [3.1]$$

Burada türbülanslı hız bileşeni anlık ve ortalama hız arasındaki farktır ( $u' = u - \bar{u}$ ).

Karşıt yönlerde hareket eden parçacıklar, karşıt işaretlerin hızlarına sahiptir. Akışkan parçacıkları rasgele hareket halinde olduğu için, bir yönde hareket ettiği gibi ters yönde de hareketin olması olasıdır, yani bir akışkan parçacıkları topluluğunun ortalama hızının sifıra eşit olduğu anlamına gelir; Bu değer yararsız olduğu için, hızların ortalaması alternatif bir yöntem kullanılarak belirlenebilir.

Hızların kareleri ve karekökü alınıp “yön” bileşenlerinden bağımsız olarak parçacıkların ortalama hızı elde edilir. Elde edilen değer parçacıkların yönü dahil edilmeyen veya hariç tutulan, ortalama hız değeri olarak adlandırılır. Kök ortalama kare hızı, bir akışkan molekülünün ortalama karesinin karekökü olarak tanımlanan bir akışkandaki parçacıkların hızının ölçüsüdür.

Şekil 3.18 ile Şekil 3.23 arasındaki TKE ve RMS grafikleri bu bilgiler dahilinde elde edilmiştir. Hız çalkantılarının sonucu olarak elde edilen TKE grafikleri incelendiğinde maksimum TKE değerlerinin sarım sayısı arttıkça düştüğü görülmektedir. Şekil 3.18'de verilen tek sarmal yapı için maksimum TKE değeri  $x/D=1.5$  mesafesinde 0,5 olarak elde edilirken, Şekil 3.20'de verilen çift sarmal yapı için maksimum 0,45 ve Şekil 3.22'de verilen dört sarmal yapı için maksimum 0,4 olarak elde edilmiştir.  $x/D$  mesafesinin değışmesiyle elde edilen diğer bir bulgu ise  $x/D=0.5$  mesafesinde iki tepe noktalı TKE dağılımı oluşurken,  $x/D=1.5$  mesafesine gelindiğinde TKE dağılımının tek tepe noktasına dönüşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Sarmalların konumu

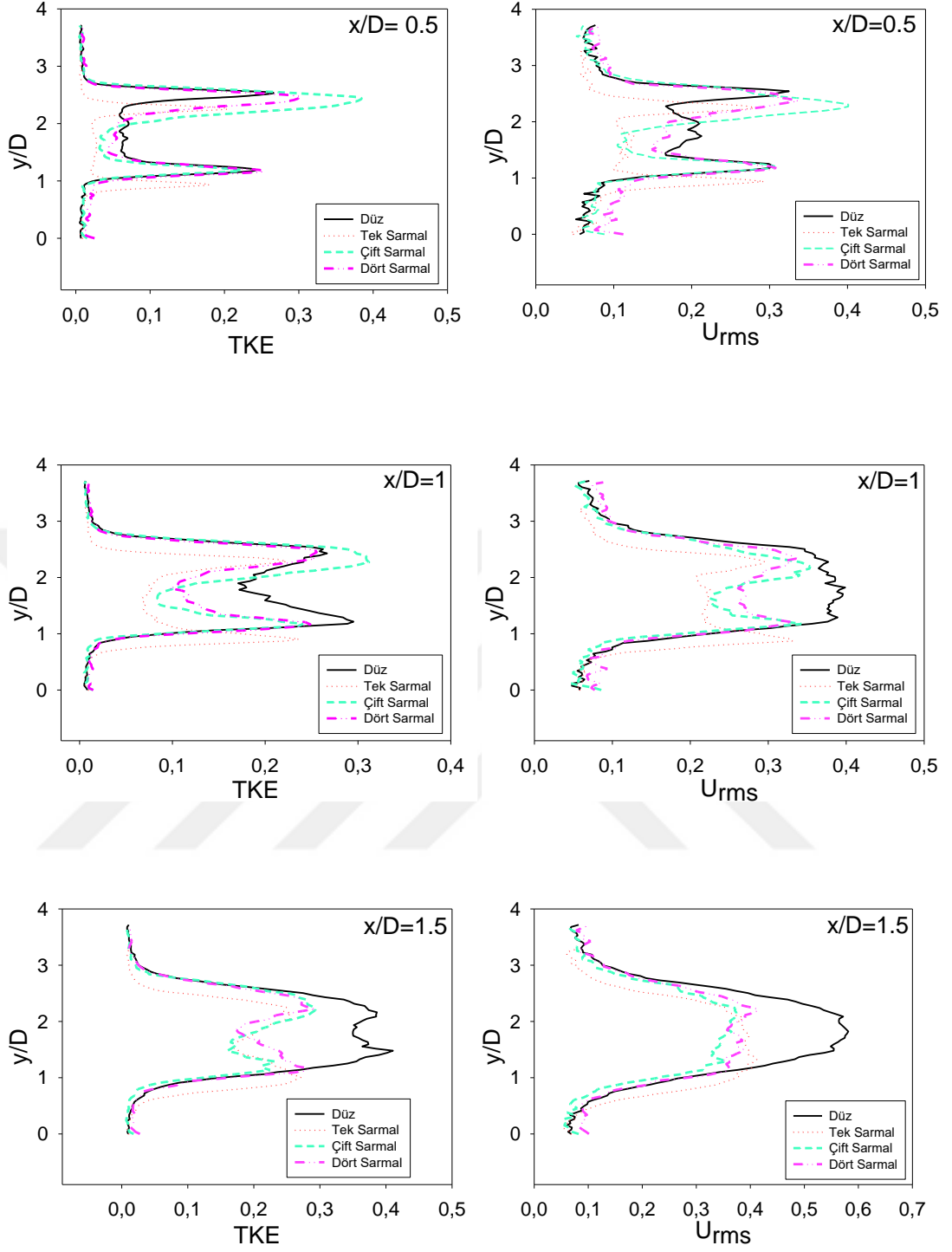


bakımından irdelendiğinde ise tek sarmallı yapı için  $180^0$  düzlemindeki TKE değerlerinin diğer konumlara göre bariz bir farklılığa sahip olduğu görülmektedir. Bu etki çift sarmallı yapıda daha az, dört sarmallı yapıda ise çok azdır.

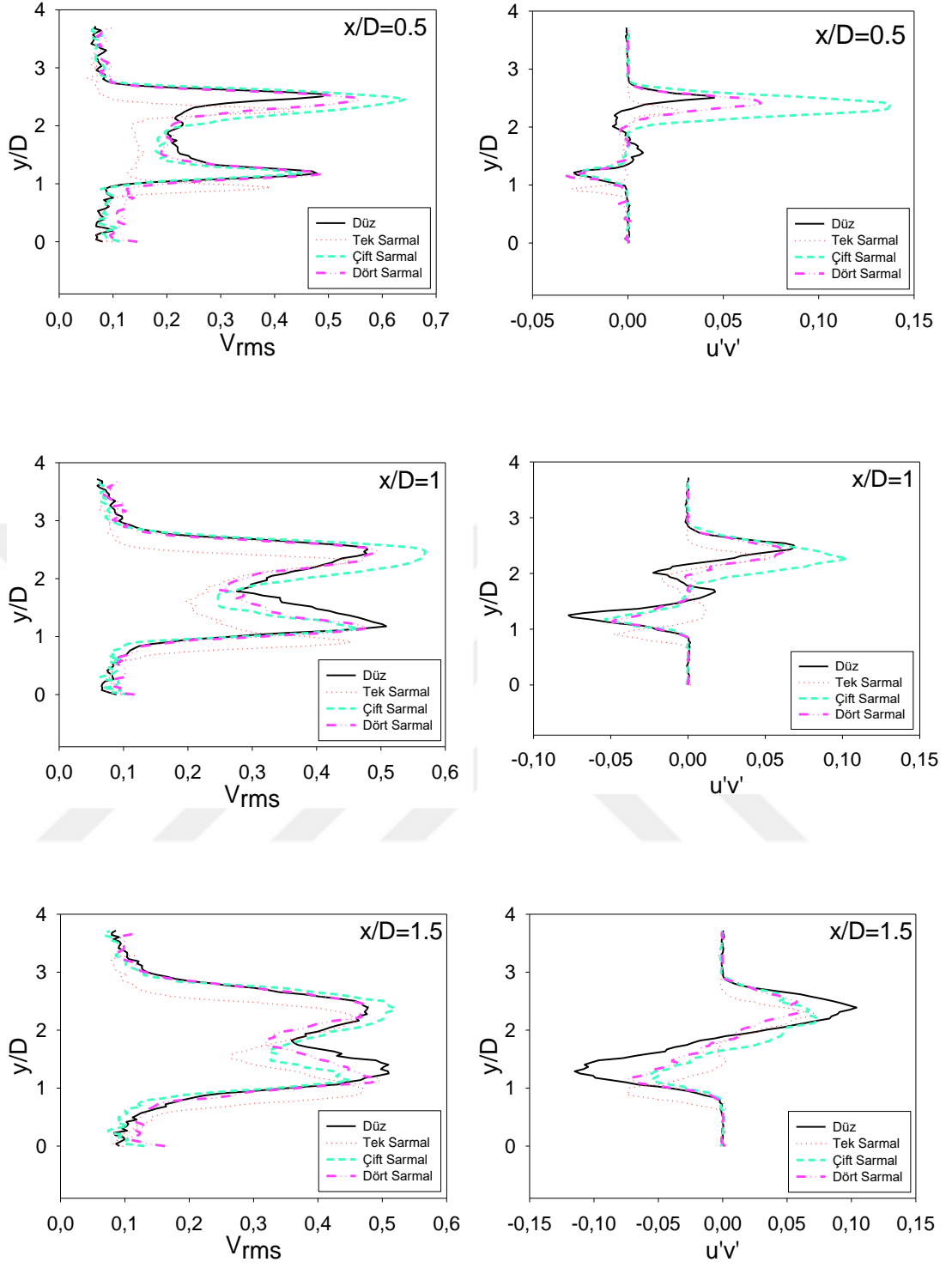
RMS değerleri için akış yönünde hız bileşenlerinin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  grafikleri incelendiğinde maksimum değerlerin artan  $x/D$  mesafesiyle artmakta olduğu görülmektedir. Şekil 3.18’de tek sarmal için verilen grafiklerde  $x/D=0.5$  için maksimum  $U_{rms}$  değerleri sarmal yapının  $180^0$  konumunda en fazla ve 0.45 değerine ulaşırken,  $x/D=1$  mesafesinde 0.55,  $x/D=1.5$  mesafesinde ise 0.6 değerlerine ulaşmaktadır. Yine  $0^0$  düzlemlerinde minimum değerlerin oluştuğu ifade edilebilir. Şekil 3.20’de verilen çift sarmallı yapı için maksimum  $U_{rms}$  değerlerinin  $x/D=1.5$  mesafesinde 0.55 mertebesinde iken, Şekil 3.22’de verilen dört sarmallı yapı için aynı  $x/D$  mesafesinde 0.5 civarında olduğu görülmektedir. Sarmal yapıdaki sarım sayısının artması sonucu  $U_{rms}$  değerlerinin artmakta ve  $x/D$  mesafesinin artması sonucu  $U_{rms}$  değerlerinin azaltmakta olduğu yargısına ulaşılmaktadır.

RMS değerleri için akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  dağılım grafikleri (Şekil 3.19, Şekil 3.21, Şekil 3.23) incelendiğinde tek sarmal yapıda sarım düzleminin  $180^0$  konumu ile diğer düzlemler arasında fark oluşurken (0.65 değerleri ile 0.45 değerleri arası), çift sarmal ile dört sarmal yapılarda sarım düzlemleri arasında ve  $x/D$  mesafe değişimlerinde ciddi farklılıklar göze çarpmamaktadır.

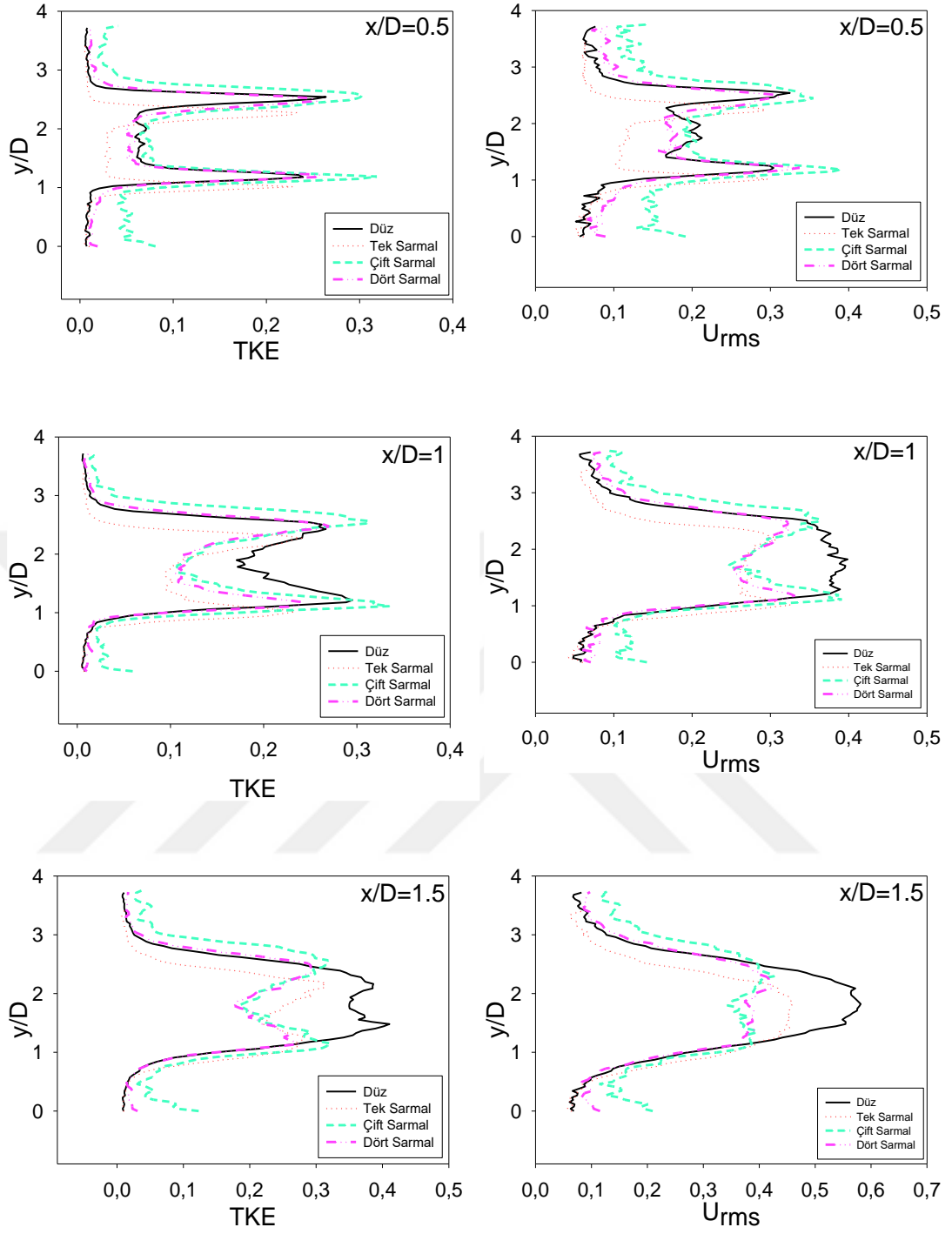
Ayrıca Şekil 3.19, Şekil 3.21 ve Şekil 3.23’te, akışkan momentumundaki türbülans çalkantılarını hesaba katarak Navier-Stokes denklemleri üzerinden yapılan ortalama işlemde elde edilen bir akışkandaki toplam gerilme tensörünün bileşeni olarak ifade edilen Reynolds gerilmeleri de verilmiştir. Reynolds gerilmeleri aşağı akım bölgesinde paralel ve dikey akış hız bileşenleri arasındaki korelasyon sonucu elde edilmektedir. Fiziksel olarak, momentumun türbülans ile taşınmasını temsil ederler. Şekiller incelendiğinde pozitif ve negatif değerlerin oluştuğu görülmektedir.  $x/D$  mesafesi arttıkça farklı yönlerde oluşan çoklu pik çizgileri yine farklı yönlerde oluşan iki pik şekline dönüşmektedir. Şekil 3.21’de çift sarmal için verilen grafiklerde  $x/D=0.5$  mesafesinde  $0^0$  sarım konumunda 0,14 değerlerinde karşımıza çıkmaktadır.



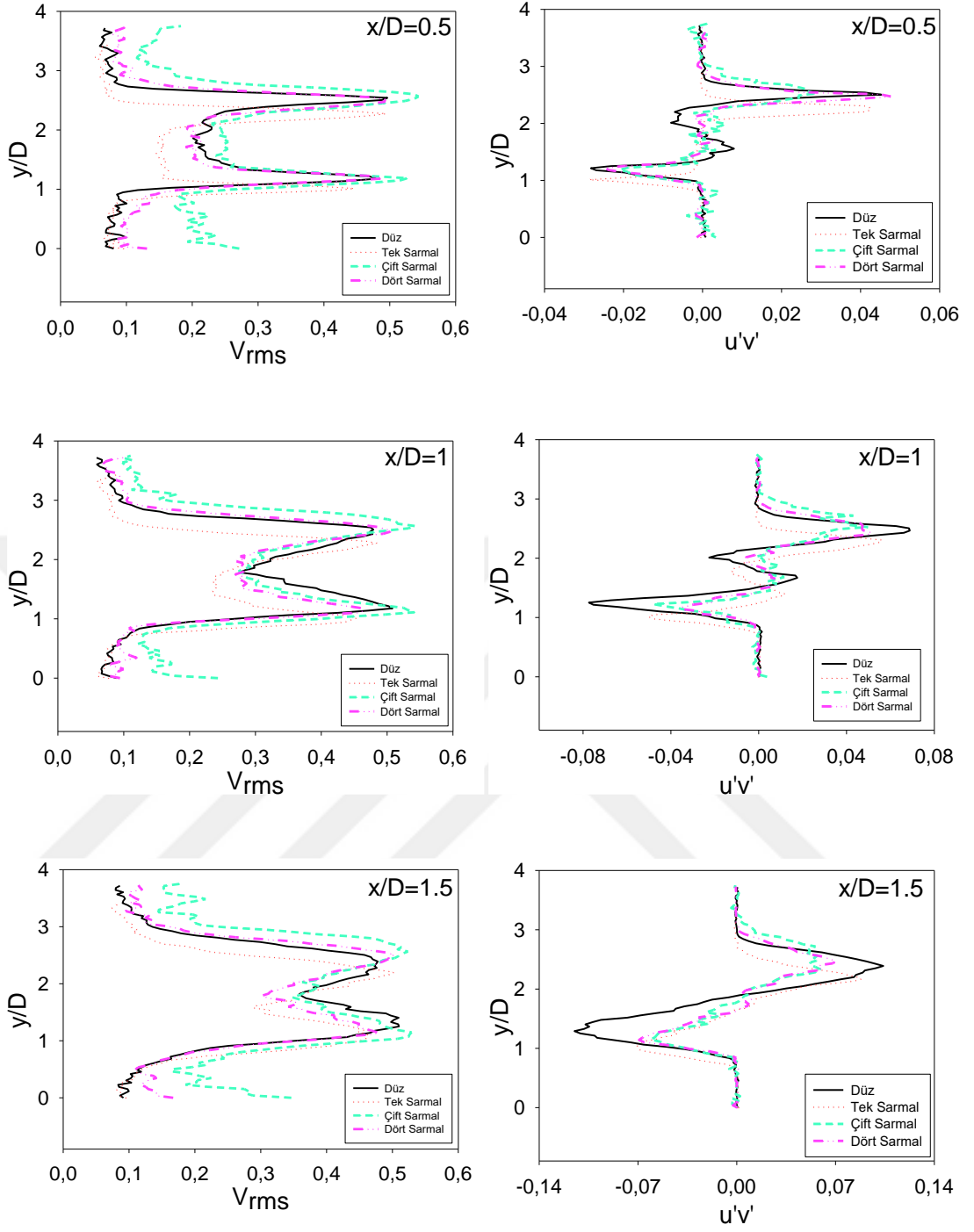
**Şekil 3.24** Farklı modellerde sarmalın  $0^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları



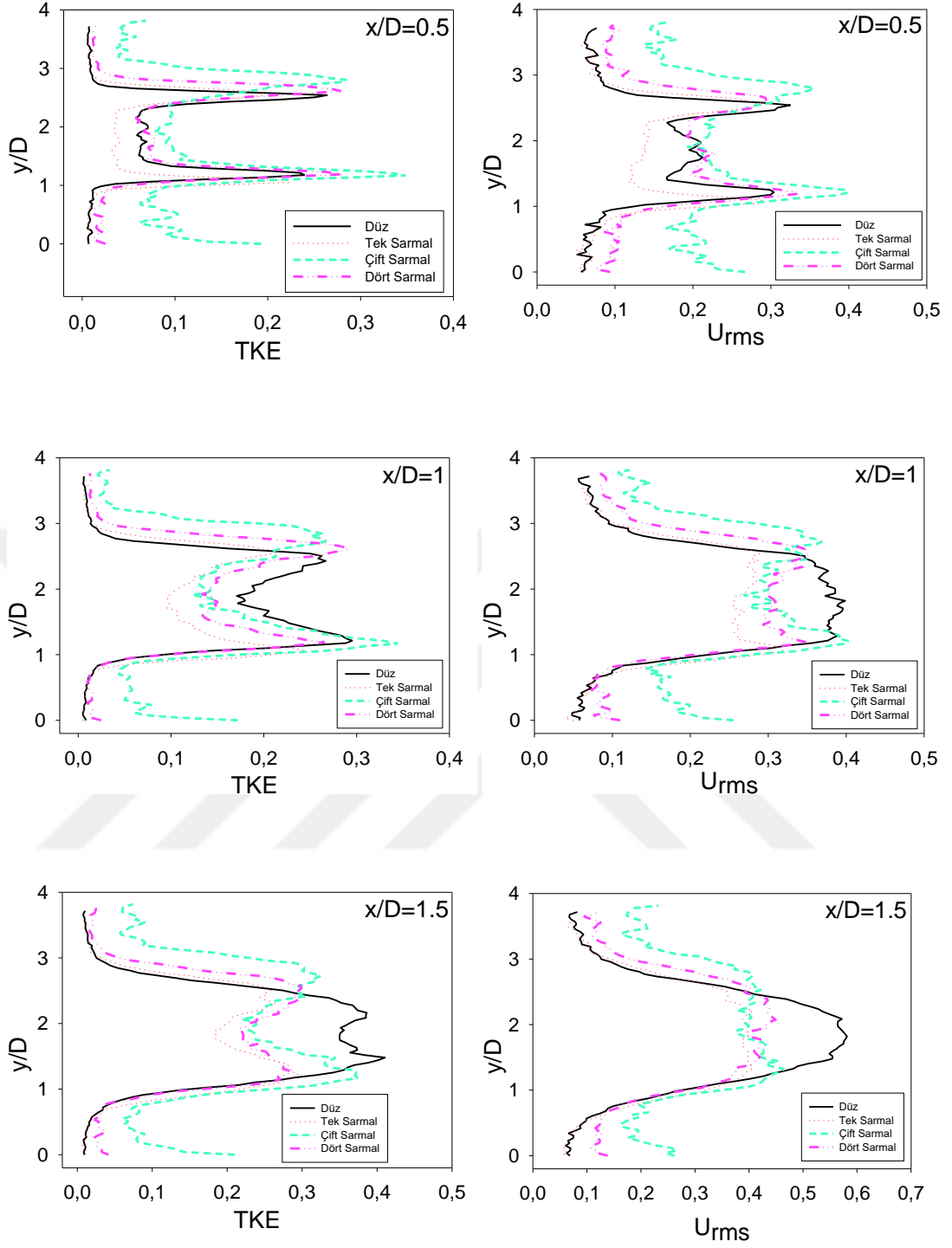
**Şekil 3.25** Farklı modellerde sarmalın  $0^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri



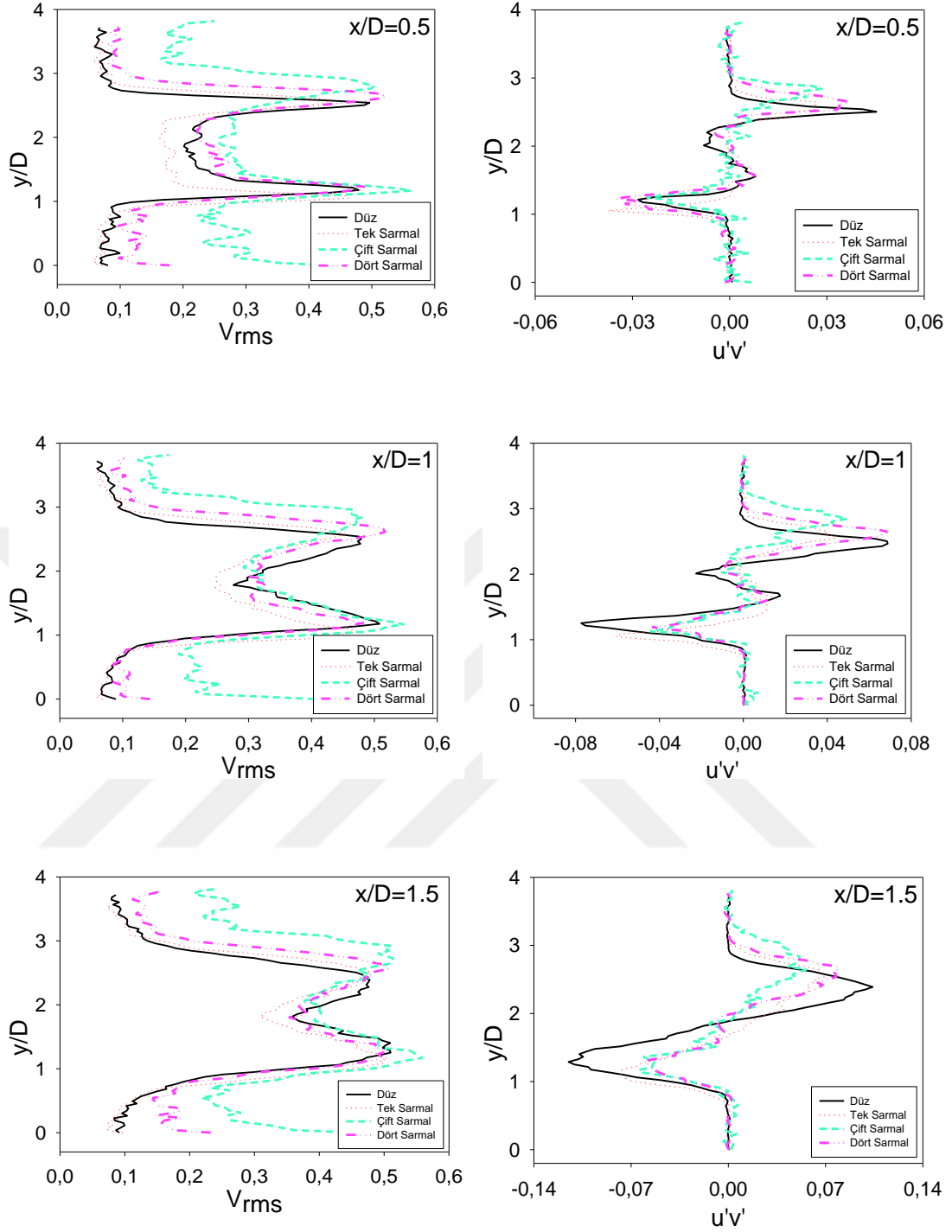
**Şekil 3.26** Farklı modellerde sarmalın  $30^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları



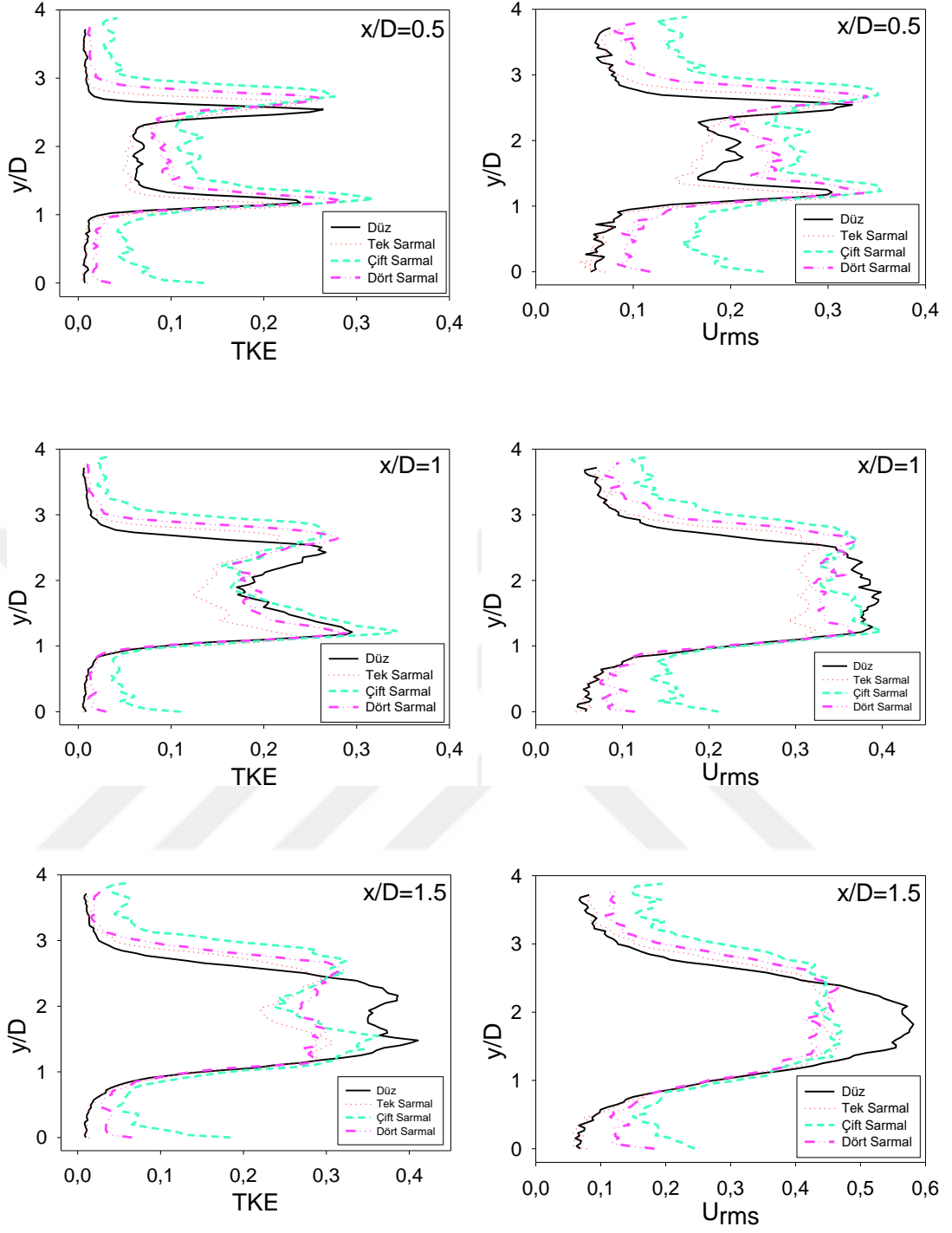
**Şekil 3.27** Farklı modellerde sarmalın  $30^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri



**Şekil 3.28** Farklı modellerde sarmalın  $60^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları

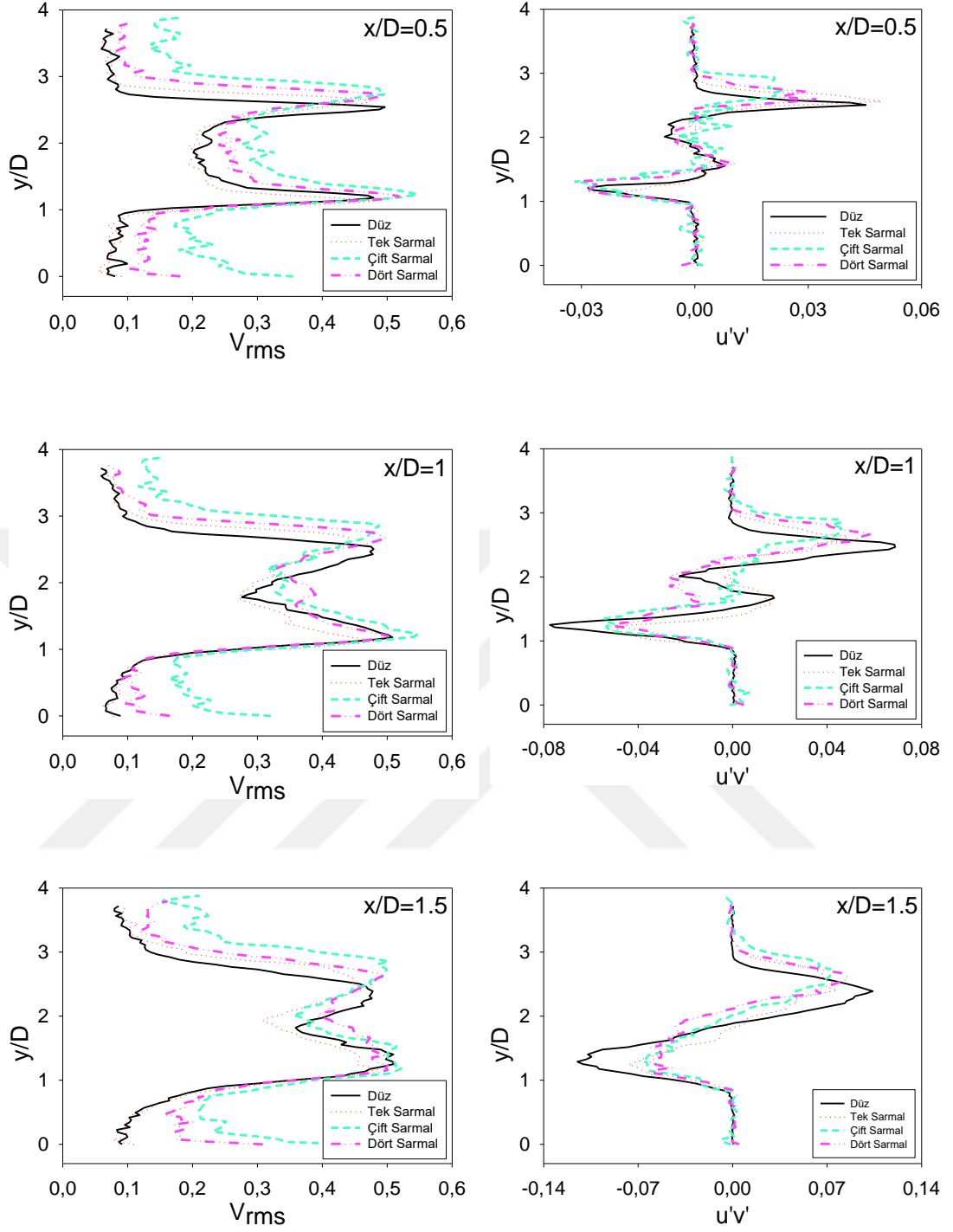


**Şekil 3.29** Farklı modellerde sarmalın  $60^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri

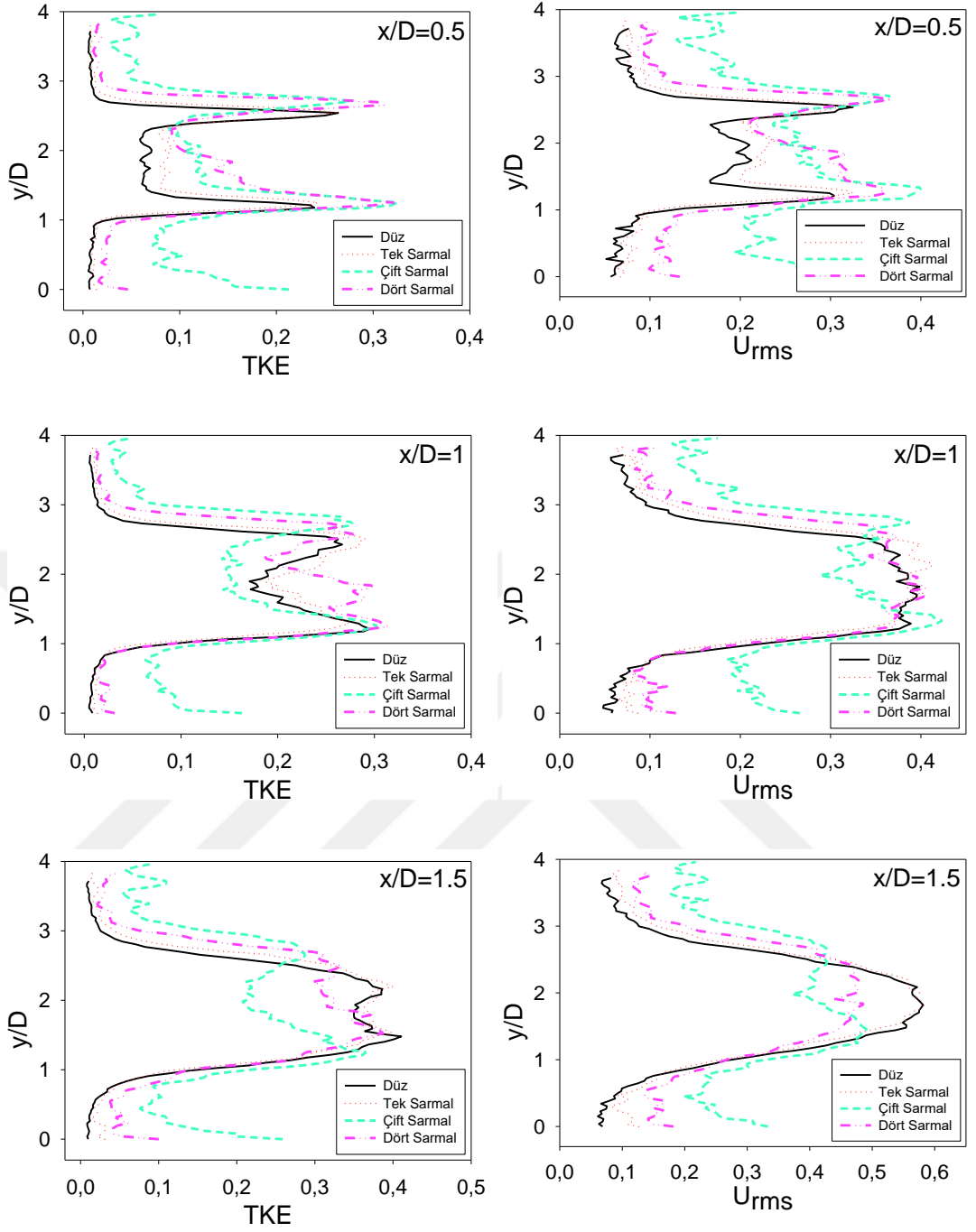


**Şekil 3.30** Farklı modellerde sarmalın  $90^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları

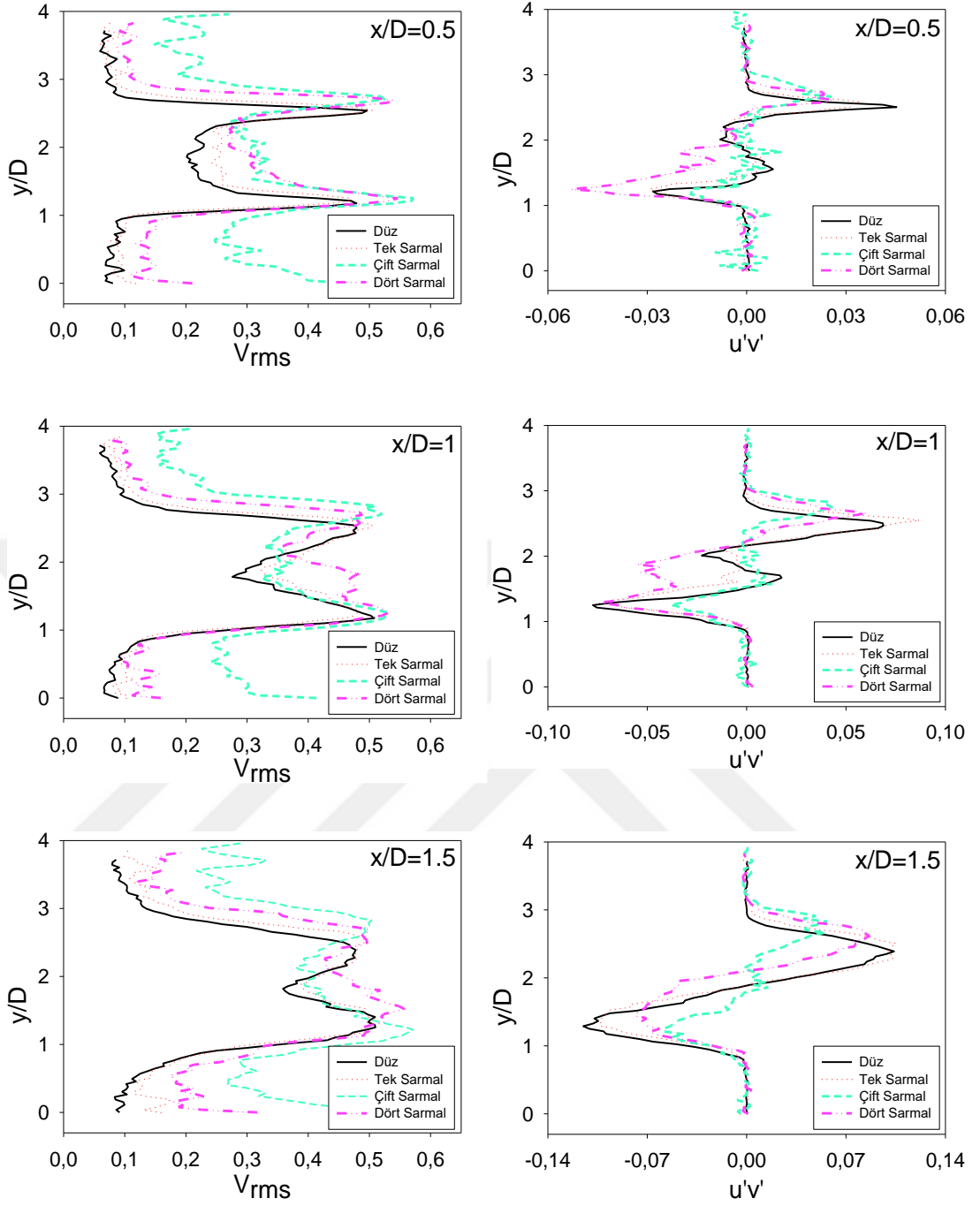




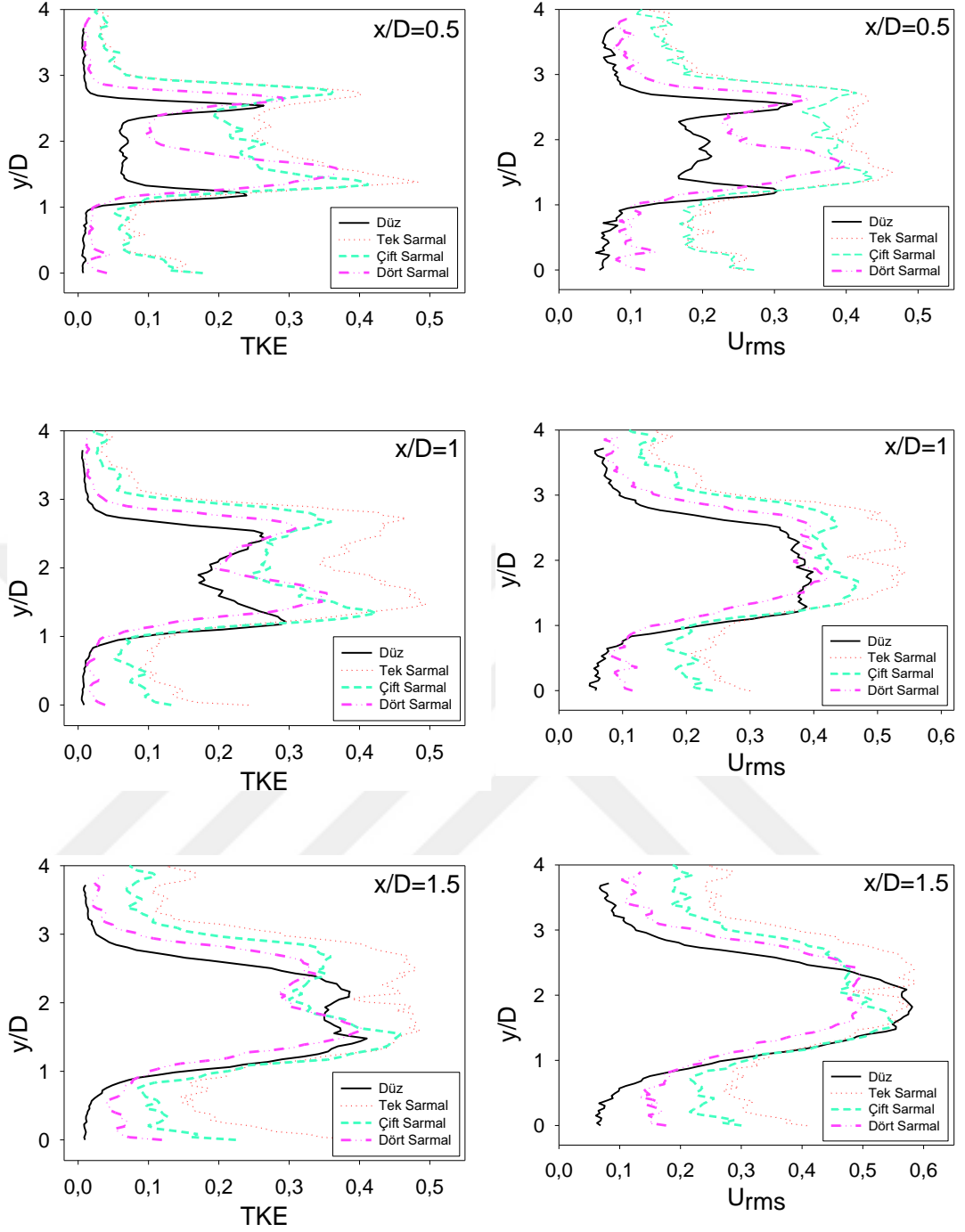
**Şekil 3.31** Farklı modellerde sarmalın  $90^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri



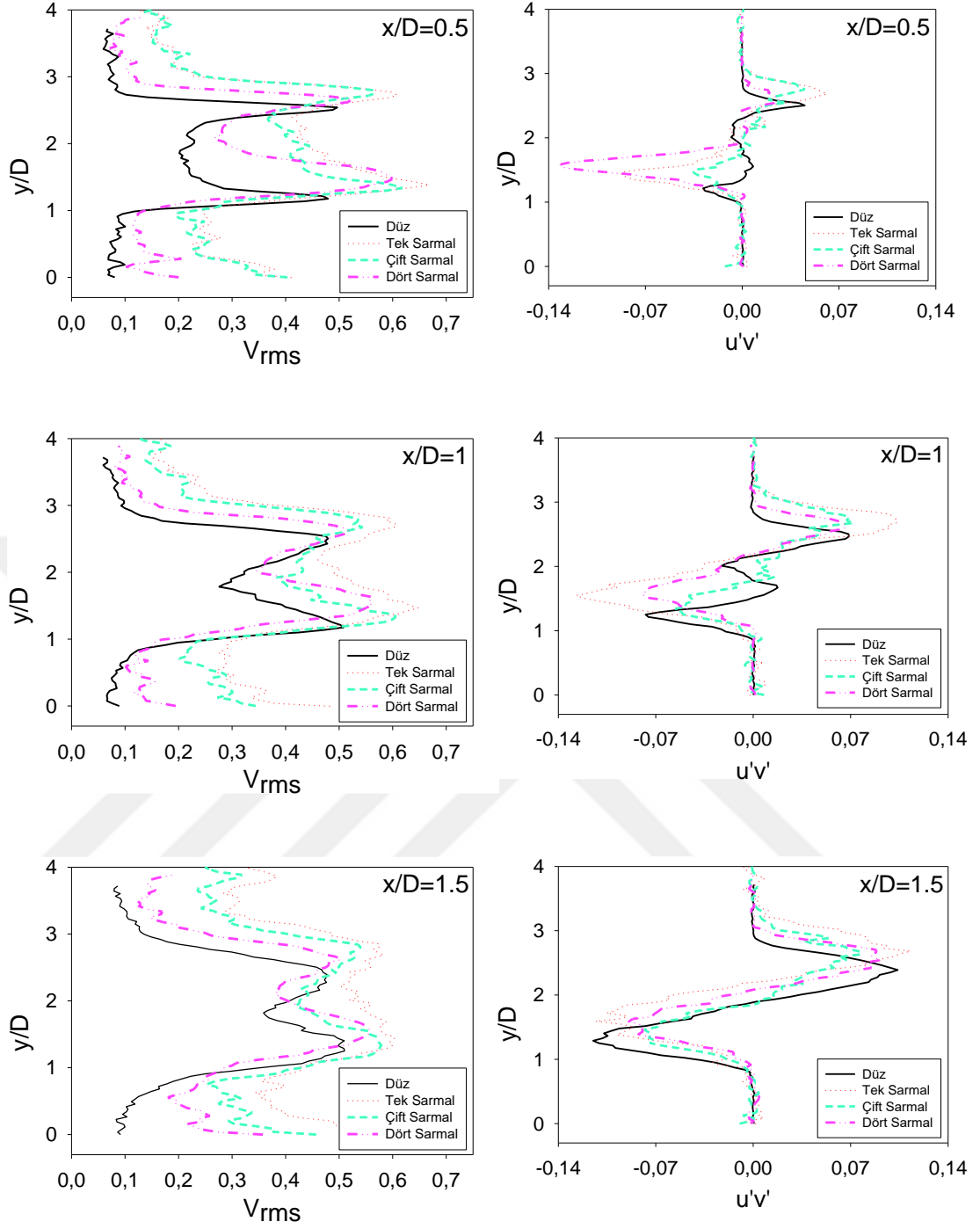
**Şekil 3.32** Farklı modellerde sarmalın  $120^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları



**Şekil 3.33** Farklı modellerde sarmalın  $120^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri



**Şekil 3.34** Farklı modellerde sarmalın  $180^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları



**Şekil 3.35** Farklı modellerde sarmalın  $180^\circ$  konumundaki yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  ile Reynolds gerilme korelasyon grafikleri

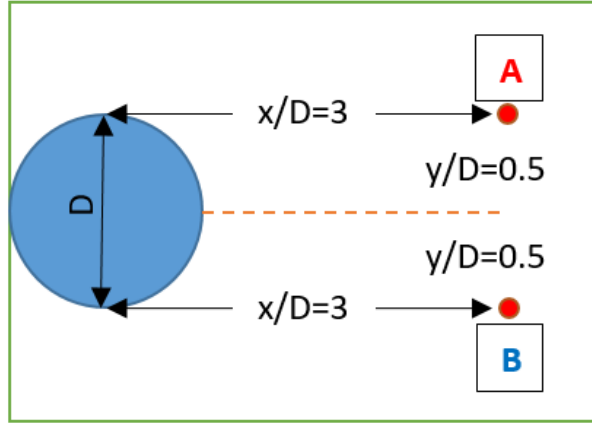
Farklı modellerde sarmalın çeşitli açısall konumlardaki ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  ve  $180^\circ$ ) yakın art izi bölgesinde belirli mesafelerdeki ( $x/D=0.5$ ,  $x/D=1$  ve  $x/D=1.5$ ) türbülans kinetik enerji TKE, akış yönünde hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$  dağılımları ve akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$  dağılımları ile Reynolds gerilme korelasyonları grafikleri Şekil 3.24 – Şekil 3.35’ de verilmiştir. Her bir konum için düz silindir ile sarmal yapıll silindirlerden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Bütün silindir yapılarında artan  $x/D$  mesafeleri için TKE değerleri karşılaştırıldığında, 0.3’den itibaren düz ve tek sarmal silindirlerde TKE değerlerinin artış gösterdiği, çift sarmal ve dört sarmal yapılarında özellikle  $120^\circ$  sarmal konum seviyesine kadar 0.35 civarlarında değiştiği görülmektedir. TKE değerleri  $x/D=0.5$  konumunda iki tepe noktası oluşturmuş,  $x/D$  arttıkça bu tepe noktaları arasındaki mesafe kapanarak tek bir tepe noktalı profil şeklini almıştır. Bu durum sarmalın açısall konumuna göre  $0^\circ$  için Şekil 3.24,  $30^\circ$  için Şekil 3.26,  $60^\circ$  için Şekil 3.28,  $90^\circ$  için Şekil 3.30,  $120^\circ$  için Şekil 3.32 ve  $180^\circ$  için Şekil 3.34’ te verilen TKE grafiklerinde açıkça gösterilmektedir. Yine düz silindire göre sarmalların  $90^\circ$  konumuna kadar TKE dağılımları daha düşük değerlerde kalırken, bu konum açısından sonra özellikle tek sarmalde TKE profili daha etkindir.

TKE verilerinin  $U_{rms}$  ve  $V_{rms}$  değerlerinin bir sonucu olarak elde edilmesinden dolayı sarmal yapıların konumsal olarak  $x/D$  mesafesinin değişimi için benzer yorum yapılabilir. Farklılık  $U_{rms}$  dağılımlarında iki tepe noktalı görünümünden tek tepe noktaya  $x/D$ ’nin kısa mesafe değişiminde gerçekleşirken,  $V_{rms}$  için bu geçiş değerlendirilen noktalarda ( $x/D=0.5$ , 1, 1.5) tamamlanamamaktadır.

Reynolds gerilme korelasyonlarında  $x/D=0.5$  mesafesinde pozitif-negatif döngülü çoklu değişim gözlenirken,  $x/D=1$  mesafelerinde yine pozitif-negatif döngülü fakat tepe noktaları belirgin ve 4 adet oluştuğu,  $x/D=1.5$  mesafesinde ise tepe noktası belirginliği artarak iki adet yine pozitif-negatif döngülü gerçekleştiği Şekil 3.27 ile Şekil 3.35 aralığında gösterilmektedir.

Bu bölümde, çeşitli durumlar için girdap dökülme sıklığının değerlendirilmesi amacıyla Fourier Dönüşümü (FFT) tekniği kullanılmıştır. Girdap dökülme frekansının belirlenmesi, akışkan-yapı etkileşimi ve dolayısıyla girdap kaynaklı titreşimler (VIV) nedeniyle yapılardaki titreşim sıklığı hakkında bilgi verir. Bu nedenle, sarmal yapıların, silindir aşağı akım bölgesindeki girdap dökülme frekansını azaltma veya ortadan kaldırma üzerindeki etkisini araştırmak önemlidir.



Şekil 3.36 FFT analizi spektrum noktaları

Karman girdap dökülme sıklığı  $f$  ve kayma tabakasındaki düzensizlikleri belirlemek amacıyla, akış alanına ait Şekil 3.36'da gösterilen noktalar için, hızın güç spektrumu araştırılmıştır. Öncelikle, silindirin her iki tarafındaki, baskın frekansları belirlemek için A ve B olarak gösterilen iki nokta tanımlanmıştır. A noktası  $x$  eksenine  $D$  silindir çapına bağlı olarak boyutsuz 3 ve  $y$  eksenine 0.5 mesafelerinde, B noktası ise silindir merkez çizgisine A noktasına göre simetrik olarak yine  $x / D = 3$  ve  $y / D = 0.5$  olarak belirlenmiştir. Düz silindir için elde edilen spektral grafikler, baskın bir Karman girdap dökülmesinin,  $f = 1.096$  Hz frekansında hem A hem de B noktaları için belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 3.39, Blevins'in (1990) sonuçları ile iyi bir uyum içinde olan Strouhal sayısına  $St = 0.21$  ( $St = fD / U$ ) karşılık gelen  $f = 1.096$  baskın frekansına sahip düz silindiri göstermektedir.

Şekil 3.39' de gösterilen net ve belirgin bir frekans tepe noktası, girdap dökülmesine ve girdapların titreşimlerine bağlı olarak baskın bir girdap yapısının varlığının bir göstergesidir.

Bu nedenle, girdap kaynaklı titreşimleri elimine etmek için silindirin aşağısında meydana gelen baskın girdap dökülme frekansını azaltmak veya ortadan kaldırmak esastır.

Tablo 4'te düz silindir ve sarmal yapılı üç model silindir için A ve B noktalarında elde edilen frekans, periyod ve Strouhal sayısı değerleri verilmiştir. Tabloda tek sarmallı model için, 1s, çift sarmallı model için, 2s, ve dört sarmallı model için 4s gösterimi kullanılmış ve düzlem dereceleri yanlarında belirtilmiştir. A ve B noktaları için Şekil 3.39 ile Şekil 3.55 grafik aralığında verilen frekans-genlik değişimlerindeki baskın frekans olarak tepe noktaları belirlenmiş ve bu değerler tabloya  $f_A$  ve  $f_B$  olarak eklenmiştir. Matematiksel dönüşümlerle ( $1/f_A$  ve  $1/f_B$ ) A ve B noktaları için periyod değerleri ve Strouhal ( $fD/U$ ) değerleri elde edilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde A noktası için minimum frekans 0.878 değeri çift sarmallı yapıda sarmal konumunun  $120^\circ$  olduğu (2s120) durum için elde edilmiştir. Frekans değerinin Strouhal sayısı hesabında etkin parametre olması sebebiyle minimum Strouhal sayısı değeri de yine bu durum için elde edilmektedir. A noktası için maksimum frekans ve Strouhal sayısı değerleri tek sarmallı yapıda sarmal konumunun  $180^\circ$  olduğu (1s180) noktada sırasıyla 1.184 ve 0.22851 olarak elde edilmiştir. B noktası için minimum frekans ve Strouhal sayısı değerleri çift sarmallı yapıda sarmal konumunun  $60^\circ$  olduğu (2s60) durum için sırasıyla 0.913 ve 0.1762 olarak elde edilmiştir. Maksimum frekans değerleri çift sarmal yapının  $180^\circ$  konumunda elde edilmiştir.

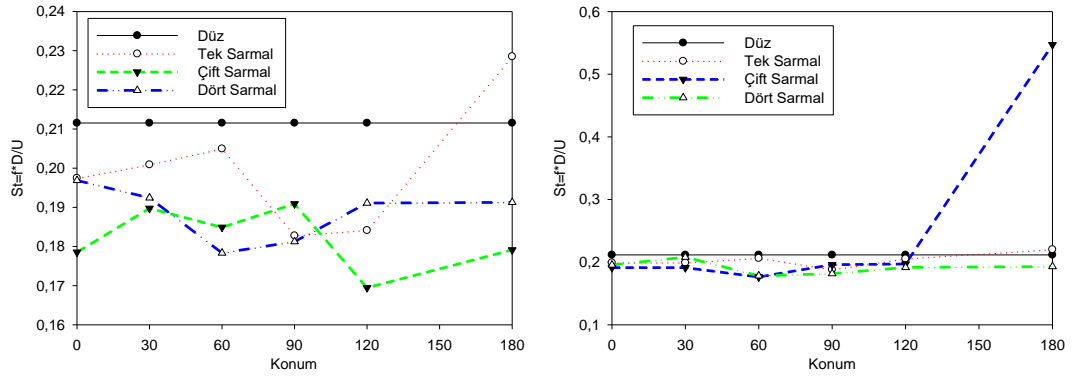
Tablo 4'teki verilerin daha iyi anlaşılması adına girdap titreşimleri için en önemli boyutsuz sayı olan Strouhal sayısının silindir modelleri ve bu modellerdeki sarmal konumlarına göre değişimi Şekil 3.37' de A ve B noktaları için sunulmuştur. Şekil 3.37'den düz silindire göre sarmal yapılı silindirlerin St değerlerinin daha düşük olduğu, bu nedenle titreşim sönmüleyici olarak sarmal yapıların kullanılabileceği net bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca sarmalların  $90^\circ$  konumları bütün modeller için St değişimlerinin meydana geldiği düzlem olarak belirtilebilir.

Sarmal yapılar için bütün açısal konumlardaki A ve B noktaları için elde edilen spektra sonuçları değerlendirildiğinde en büyük değişimin  $120^\circ$  açısal konumunda olduğu söylenebilir. Sarmallar arası değişim farkının en yüksek çift sarmallı silindirde olduğu açıkça görülmektedir.

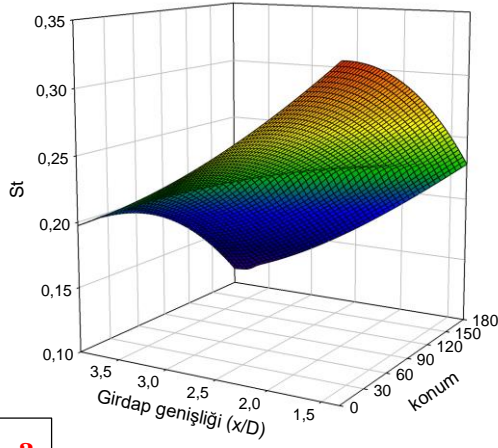


**Tablo 4** Frekans, periyod ve Strouhal değerleri

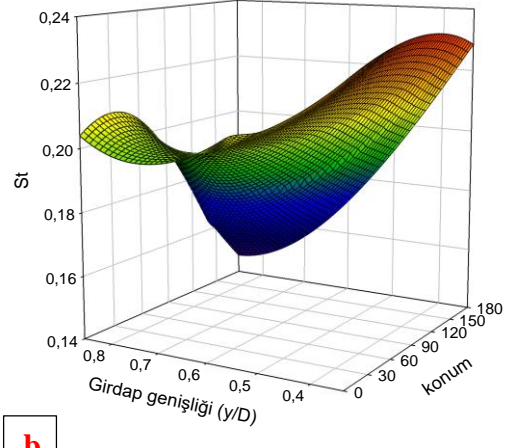
	$F_A$	$F_B$	$T_A$	$T_B$	$T_A/sn$	$T_B/sn$	$St_A=fD/U$	$St_B=fD/U$
<b>Düz</b>	1,096	1,096	0,912	0,912	10,992	10,992	0,21152	0,21152
<b>1s0</b>	1,023	1,032	0,977	0,968	11,777	11,674	0,19743	0,19917
<b>1s30</b>	1,041	1,031	0,960	0,969	11,573	11,685	0,20091	0,19898
<b>1s60</b>	1,062	1,069	0,941	0,935	11,344	11,270	0,20496	0,20631
<b>1s90</b>	0,947	0,974	1,055	1,026	12,722	12,369	0,18277	0,18798
<b>1s120</b>	0,954	1,064	1,048	0,939	12,629	11,323	0,18412	0,20535
<b>1s180</b>	1,184	1,141	0,844	0,876	10,175	10,559	0,22851	0,22021
<b>2s0</b>	0,925	0,991	1,081	1,009	13,025	12,157	0,17852	0,19126
<b>2s30</b>	0,983	0,99	1,017	1,010	12,256	12,169	0,18971	0,19107
<b>2s60</b>	0,958	0,913	1,043	1,095	12,576	13,196	0,18489	0,17620
<b>2s90</b>	0,989	1,015	1,011	0,985	12,182	11,870	0,19087	0,19589
<b>2s120</b>	0,878	1,021	1,138	0,979	13,722	11,800	0,16945	0,19705
<b>2s180</b>	0,928	2,834	1,077	0,352	12,982	4,2513	0,17910	0,54696
<b>4s0</b>	1,02	1,013	0,980	0,987	11,811	11,893	0,19686	0,19550
<b>4s30</b>	0,997	1,077	1,003	0,928	12,084	11,186	0,19242	0,20786
<b>4s60</b>	0,924	0,923	1,082	1,083	13,039	13,053	0,17833	0,17813
<b>4s90</b>	0,939	0,941	1,064	1,062	12,830	12,803	0,18122	0,18161
<b>4s120</b>	0,99	0,992	1,010	1,008	12,169	12,145	0,19107	0,19145
<b>4s180</b>	0,991	1	1,009	1	12,157	12,048	0,19126	0,193



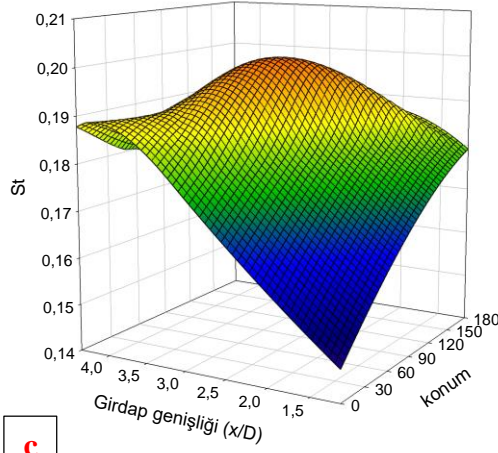
**Şekil 3.37** Strouhal sayısı-konum grafikleri a) A noktası b) B noktası



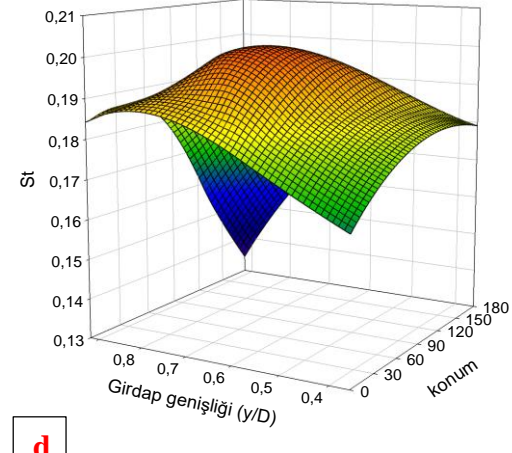
**a**



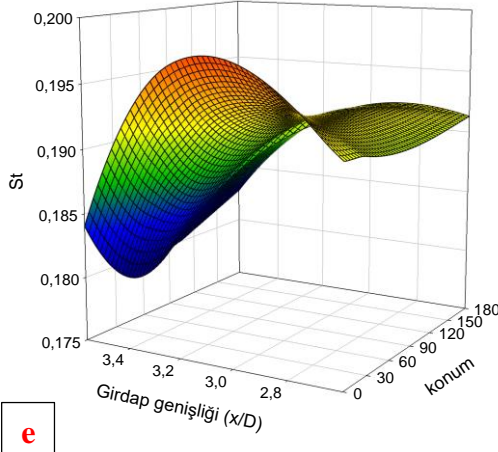
**b**



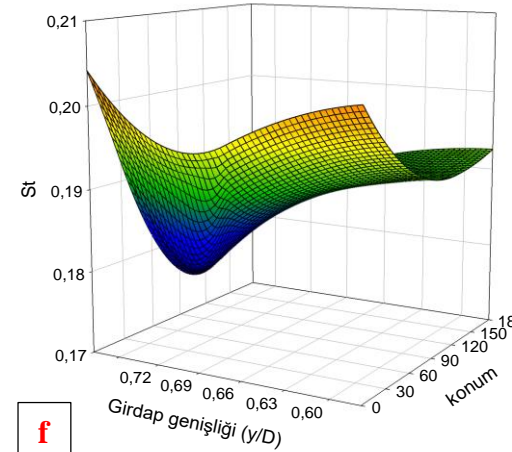
**c**



**d**



**e**



**f**

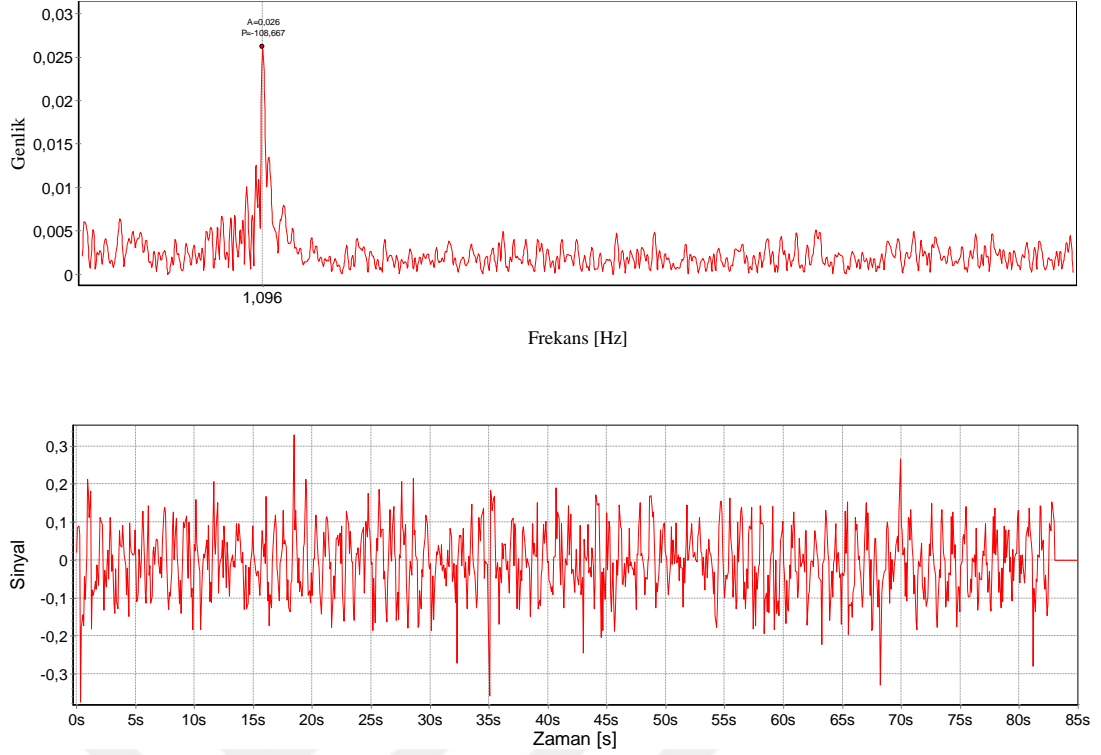
**Şekil 3.38** Sarmal yapılı silindirin x ve y eksenleri boyunca St-Girdap genişliği-konum arasındaki değişiminin üç boyutlu gösterimi

Şekil 3.38'de farklı sarmal yapıları silindirler için sarmal yapının açısal konumuna bağlı olarak girdap noktaları (F1 ve F2) arasındaki mesafenin Strouhal sayısı ile değişimi gösterilmektedir. Girdap durgunluk noktaları arasındaki mesafelerin x ve y eksenleri boyunca silindir çapı D'ye oranları boyutsuz girdap genişlikleri  $x/D$  ve  $y/D$  olarak tanımlanmıştır.

Şekil 3.38a' da tek sarmal için x ekseninde girdap noktaları arası genişlik grafiği incelendiğinde değişimin  $x/D=1$  ile  $x/D=4$  arasında olduğu görülmektedir. Strouhal sayısının silindir üzeri sarmal yapının açısal olarak  $90^\circ$  konumunda maksimum değerlere ulaştığı elde edilen diğer bir bulgudur. Şekil 3.38b'de ise tek sarmalın y eksenini boyunca girdap genişliğine bağlı Strouhal sayısının değişimi verilmiştir.  $y/D=0.34$  girdap genişliği için maksimum Strouhal sayısının 0.23 değerinde sarmalın  $180^\circ$  konumunda olduğu görülmektedir.

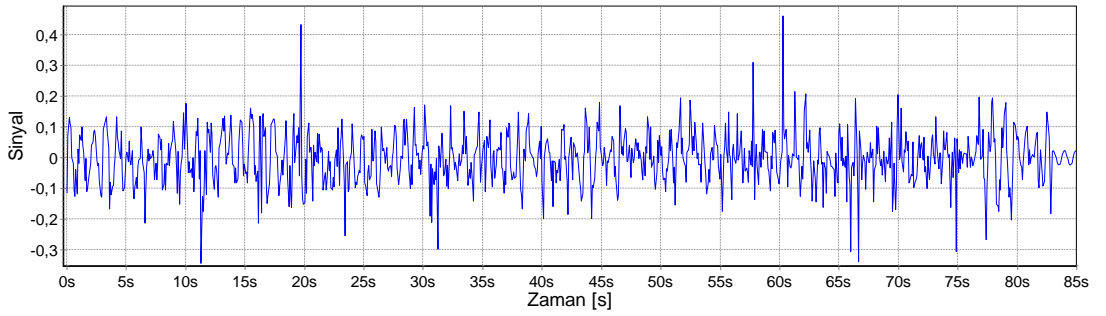
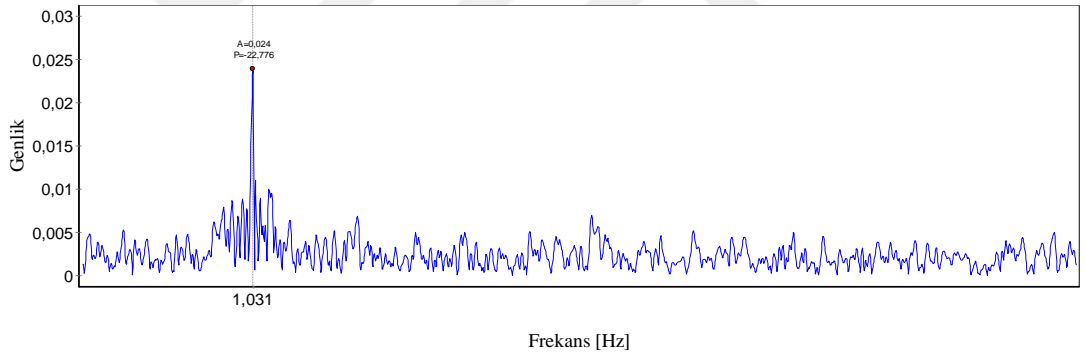
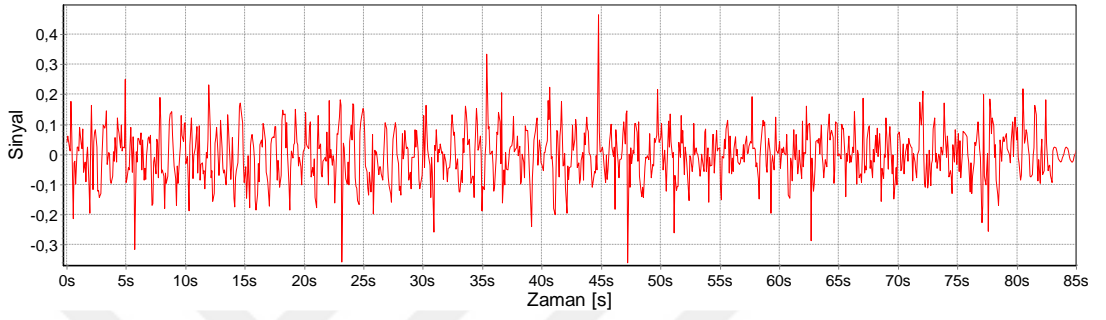
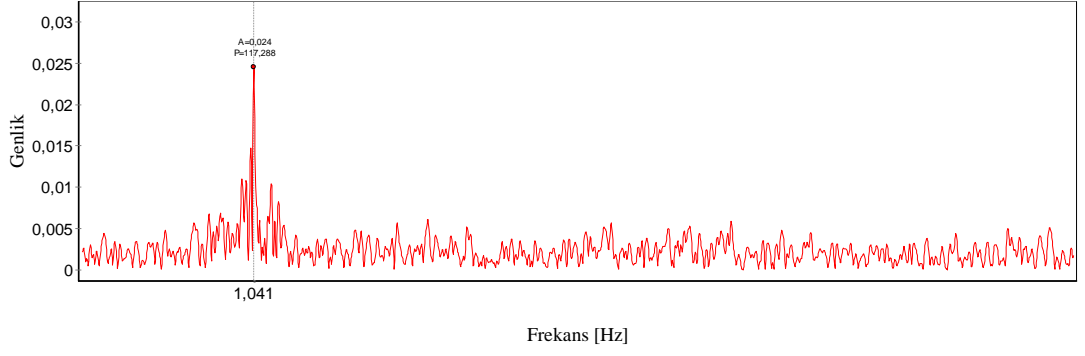
Çift sarmal yapıdaki silindir için Şekil 3.38c'de x eksenini boyunca, Şekil 3.38d'de ise y eksenini boyunca girdap genişliğine bağlı olarak elde edilen Strouhal sayısı dağılımı verilmiştir. Her iki grafik için de sarmalın  $90^\circ$  konumlarında maksimum Strouhal sayılarının olduğu görülmektedir. Grafiklerin maksimum olduğu kısımlarda girdap genişlikleri  $x/D=3.5$  ve  $y/D=0.8$  değerlerinde elde edilmektedir.

Şekil 3.38e ve Şekil 3.38f grafikleri dört sarmal yapıdaki silindir için oluşturulmuştur. Farklı girdap genişlikleri için sarmal konum açılarına göre St sayısı dağılımı dalgalı bir değişim göstermiştir. Konum açısının  $90^\circ$  ve girdap genişliğinin x eksenine göre mesafesi  $x/D=3.6$  değerinde maksimum Strouhal sayısının elde edildiği görülmektedir. y eksenini için minimum St sayısı girdap genişliğinin 0.72, sarmal konumun  $60^\circ$  olduğu durum için elde edilmiştir.

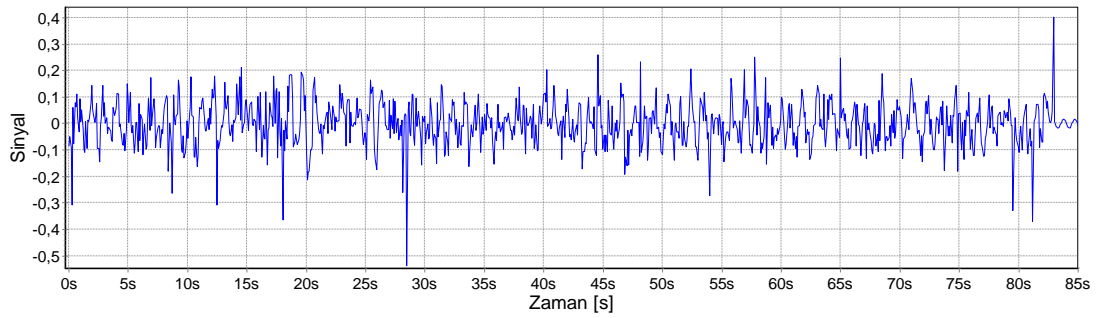
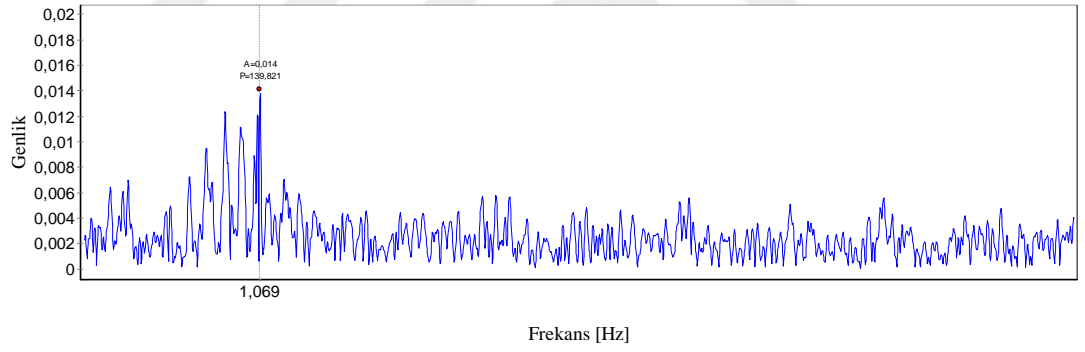
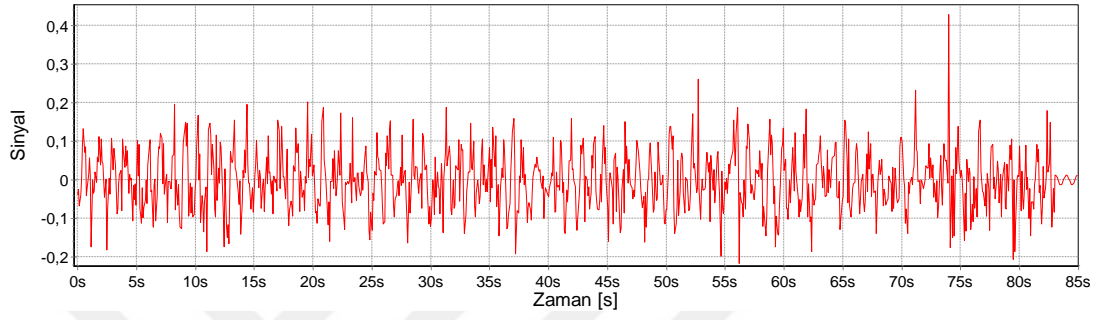
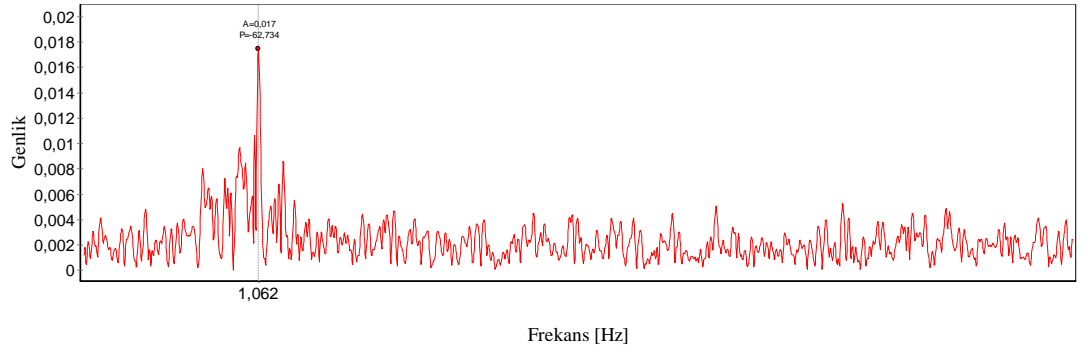


**Şekil 3.39** Düz silindir frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

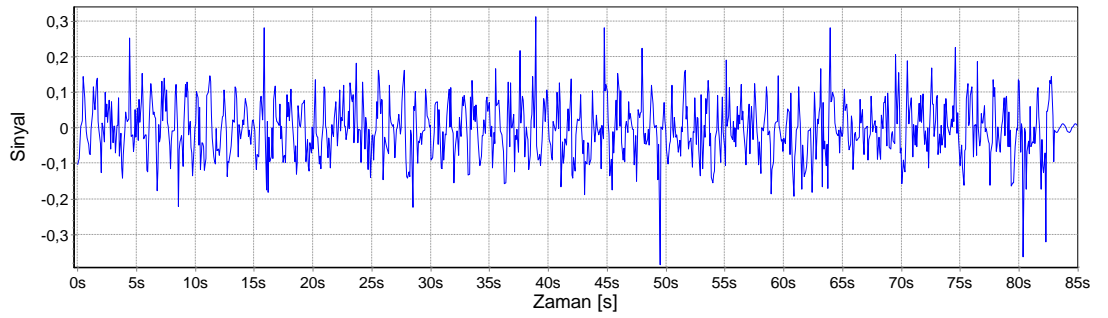
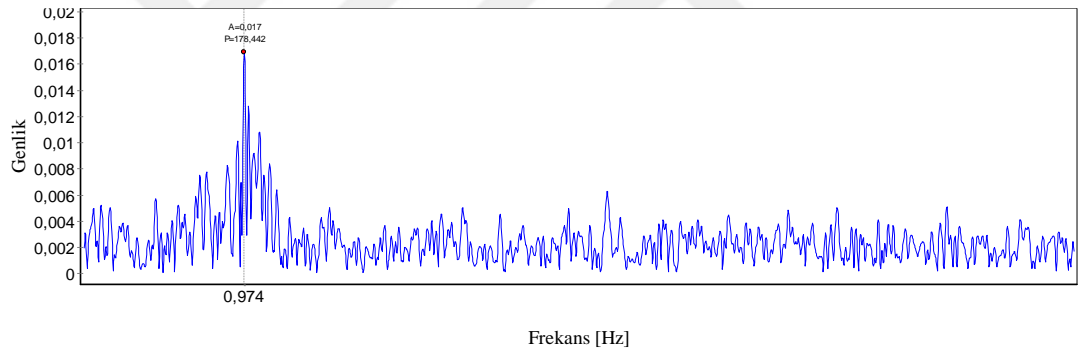
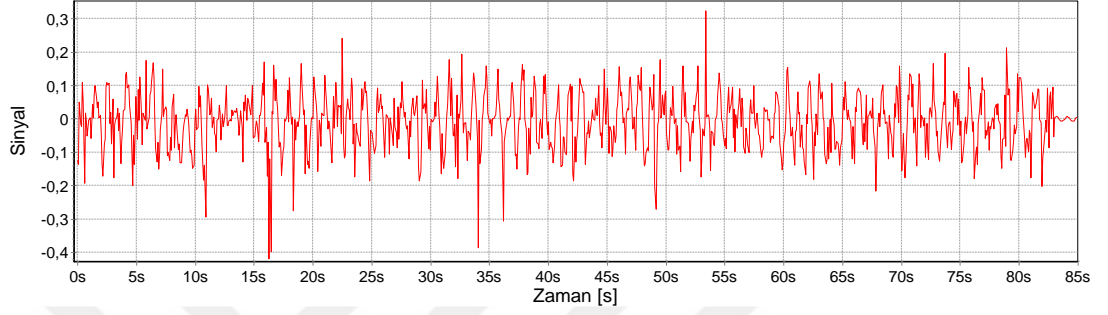
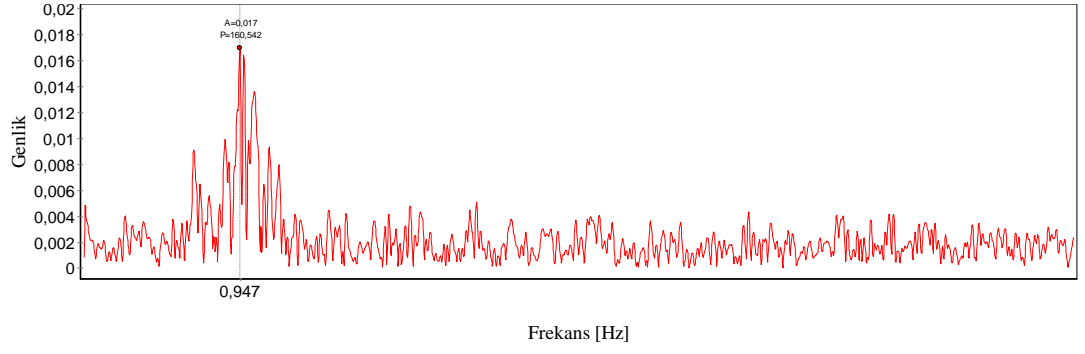
Şekil 3.39’ da düz silindir için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri verilmiştir. PIV sisteminden elde edilen 1000 adet anlık görüntünün yanı sıra bu görüntüleri almak için geçen süre (83 saniye) boyunca sinyal verileri de kaydedilmiştir. Bu sinyallerin Fourier dönüşümü olarak ifade edilen frekans ve genlik grafiği bu çalışma kapsamında incelenen önemli parametreleri içermektedir. Frekansın tepe yaptığı nokta silindirlerin baskın frekansı olarak belirlenmiş ve birbirleri arasında kıyaslama bu değerlerle yapılmıştır. Düz silindir aşağı akım bölgesindeki daha önce belirtilen A ve B noktaları için aynı frekans değeri elde edilmiş dolayısıyla tek bir zaman-sinyal ve frekans-genlik grafiği verilmiştir. Sarmal yapılu diğer modeller için bu noktadaki frekans değerleri farklılık göstermektedir. Bu nedenle her iki nokta için ayrı grafikler çıkarılmış, ayırımın kolay yapılabilmesi amacıyla A noktası için kırmızı renk, B noktası için mavi renk kullanılmıştır. Elde edilen tepe noktası frekans değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Şekil 3.40 – Şekil 3.56 aralığında verilen frekans grafiklerinde sarmal yapıdaki sarmalın konum derecesi arttıkça tepe noktası belirginliğinin azalmakta olduğu görülmektedir.



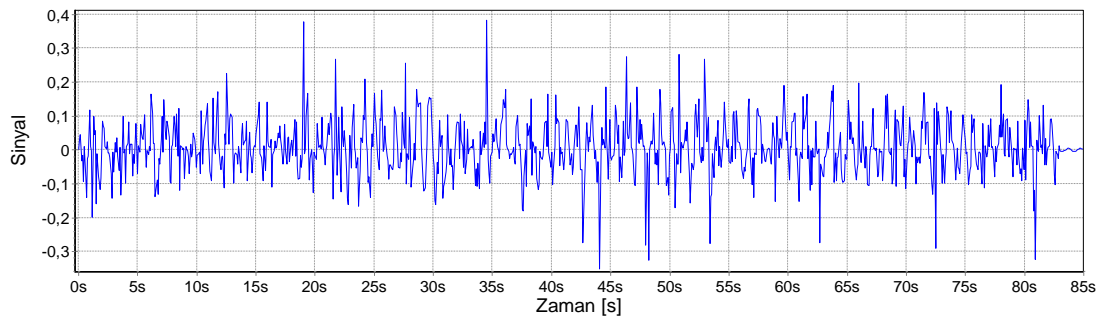
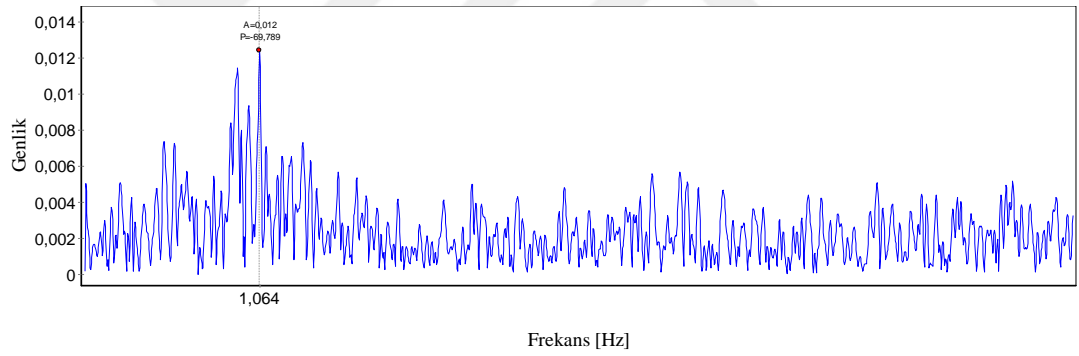
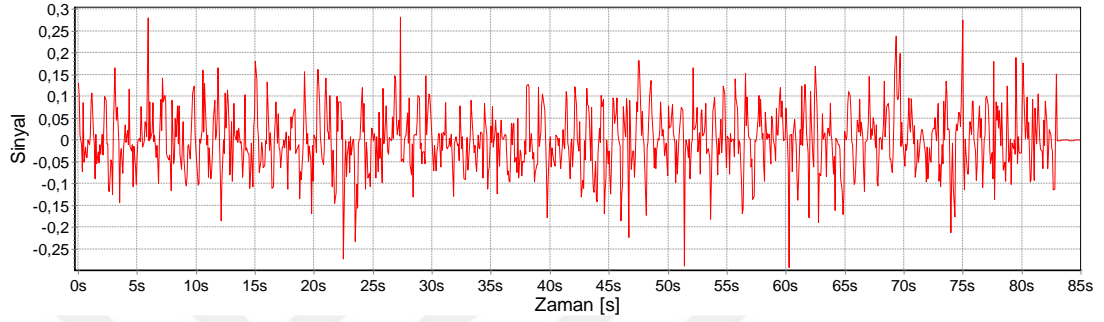
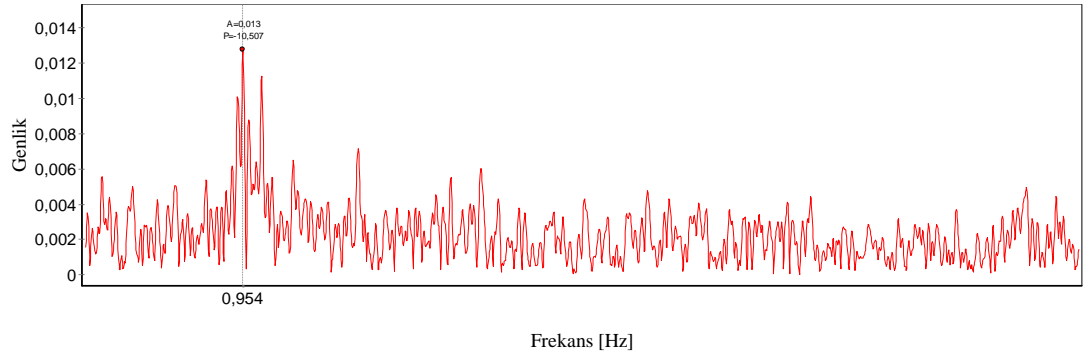
**Şekil 3.40** Tek sarmal 30° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



Şekil 3.41 Tek sarmal 60° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

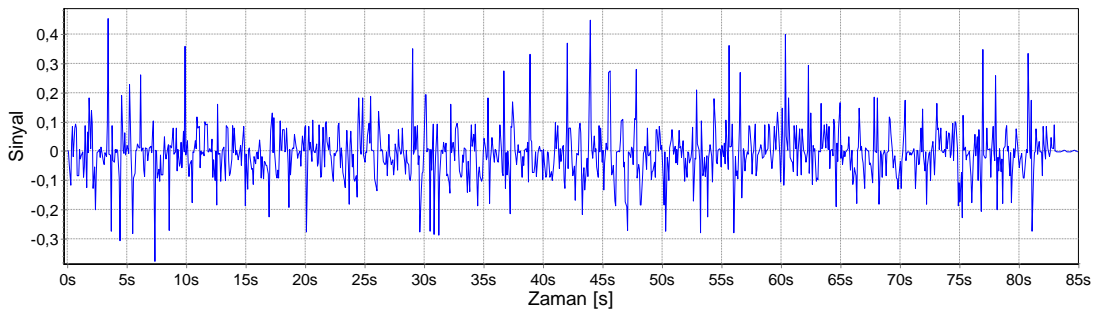
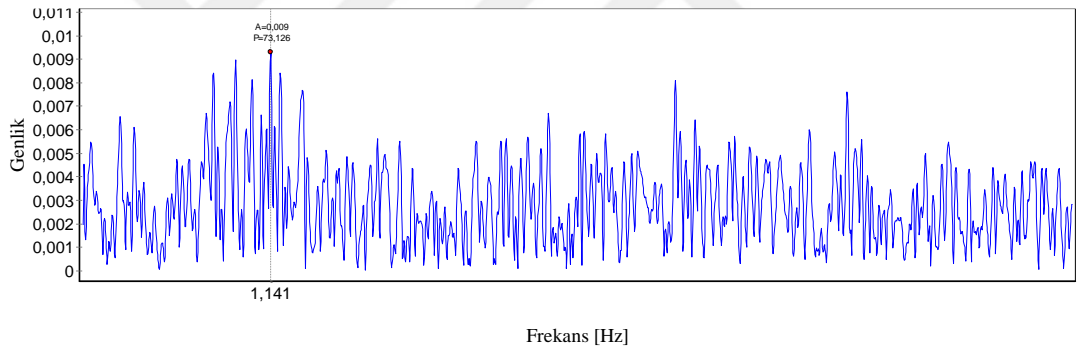
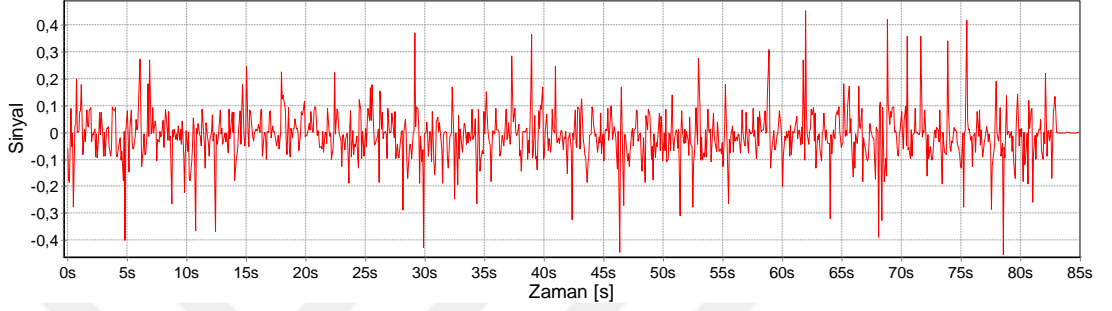
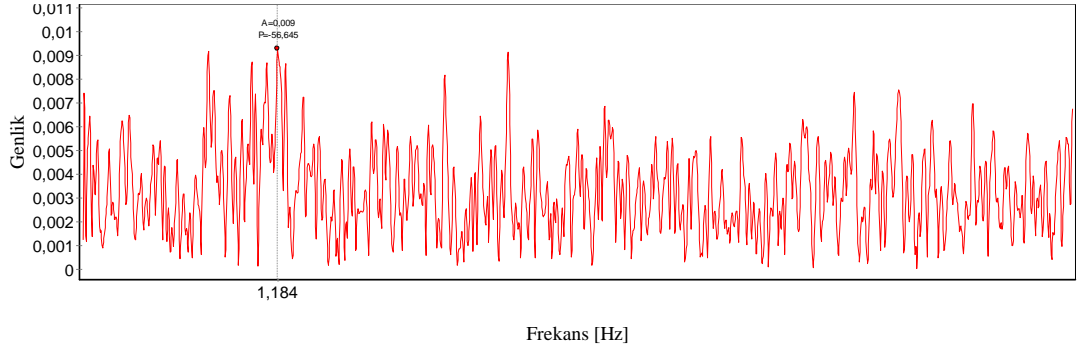


Şekil 3.42 Tek sarmal 90°konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

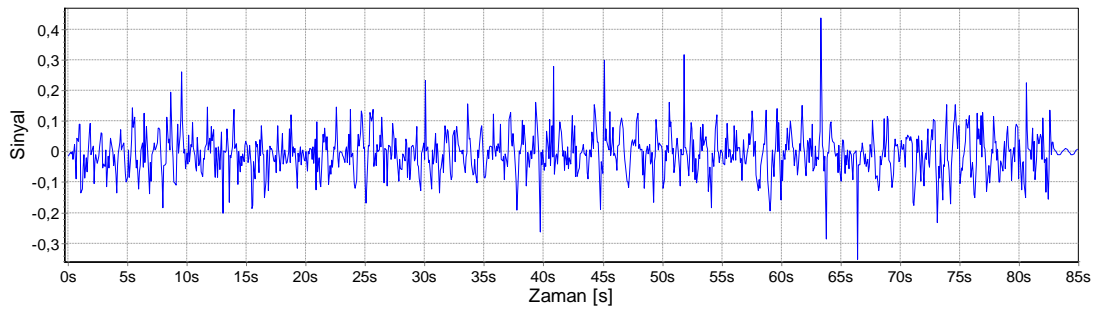
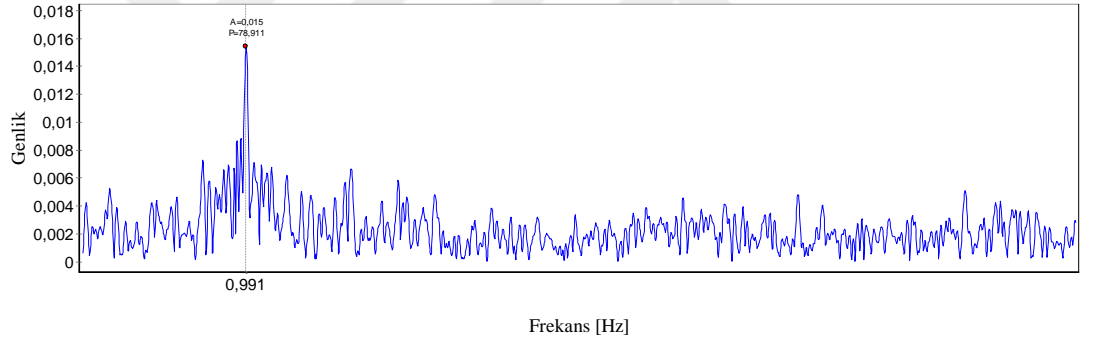
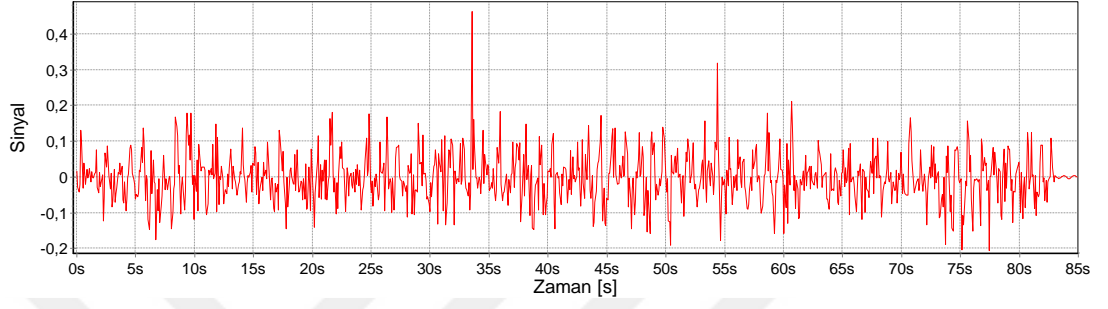
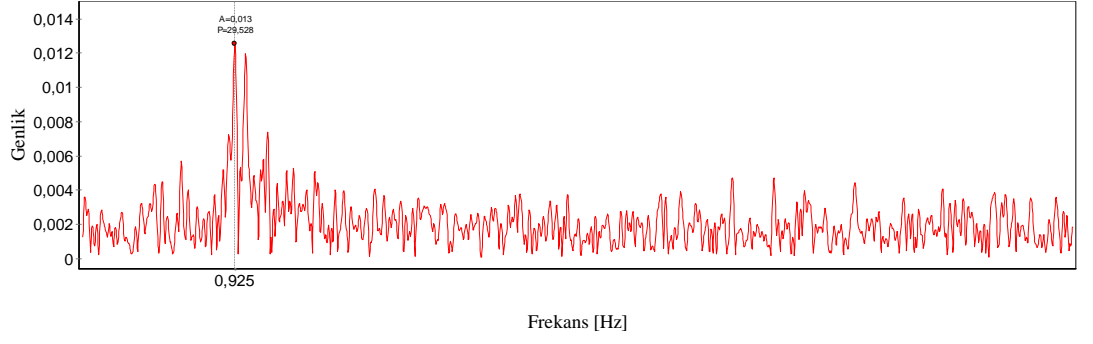


Şekil 3.43 Tek sarmal 120° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

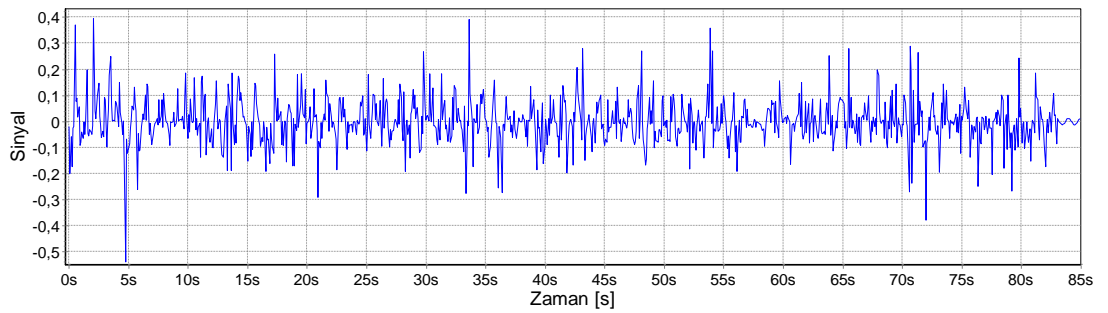
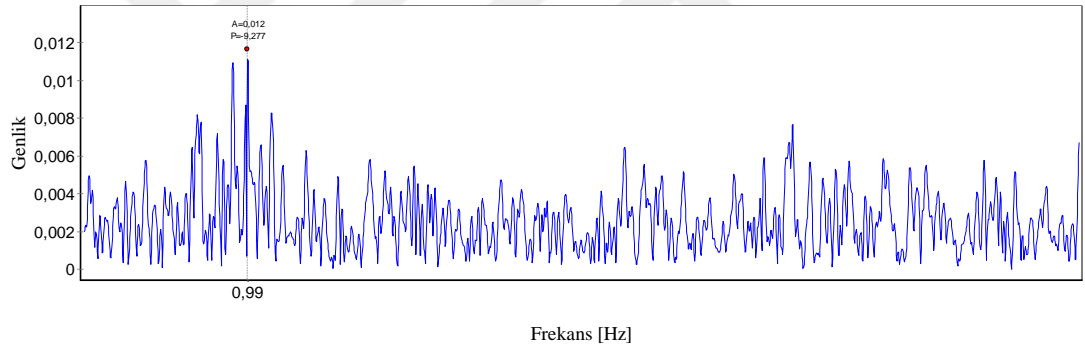
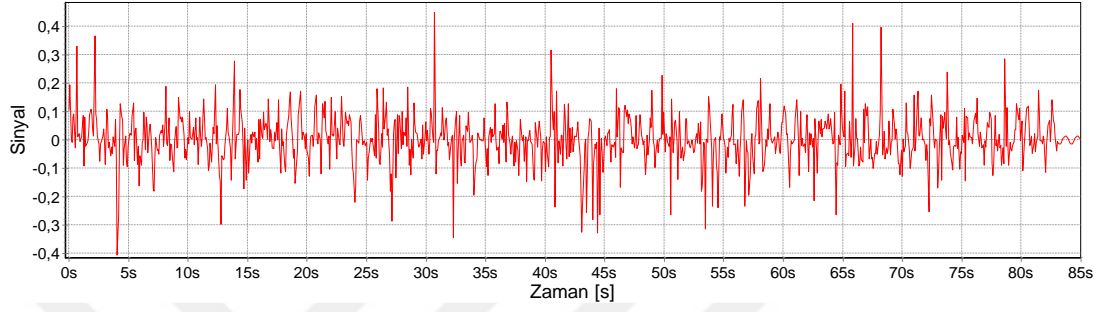
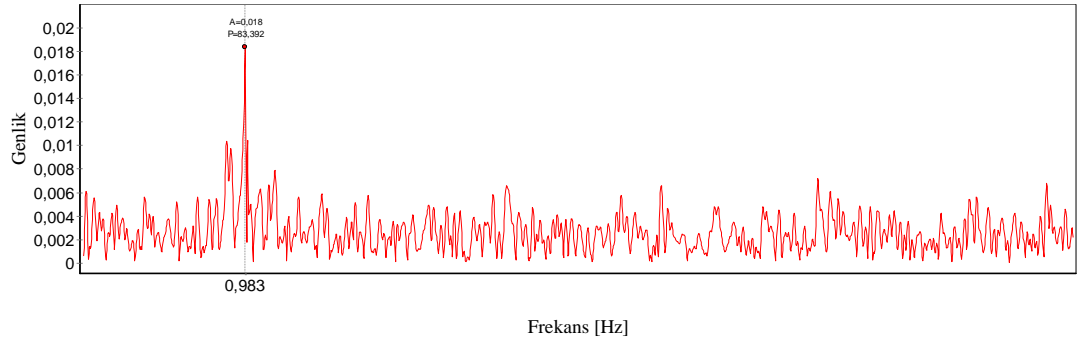




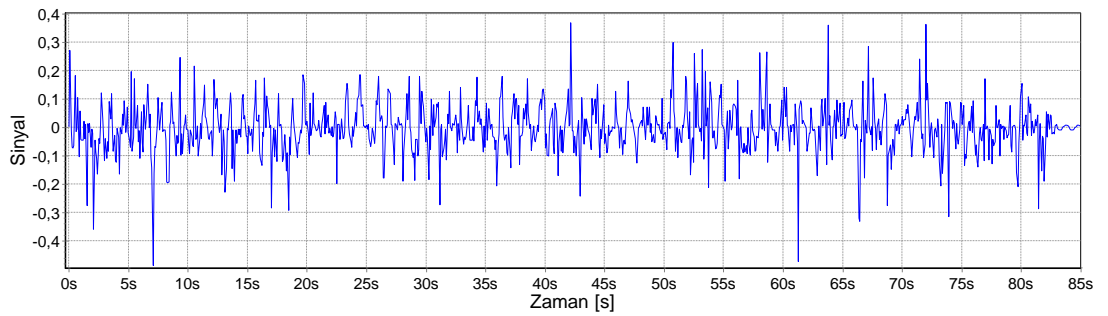
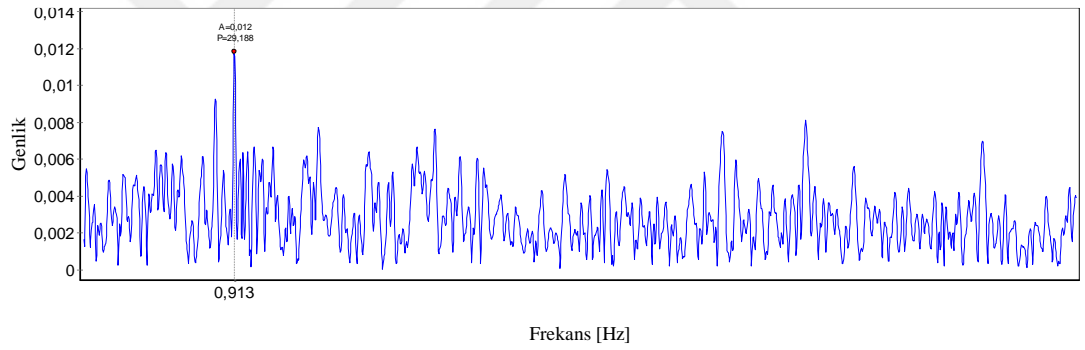
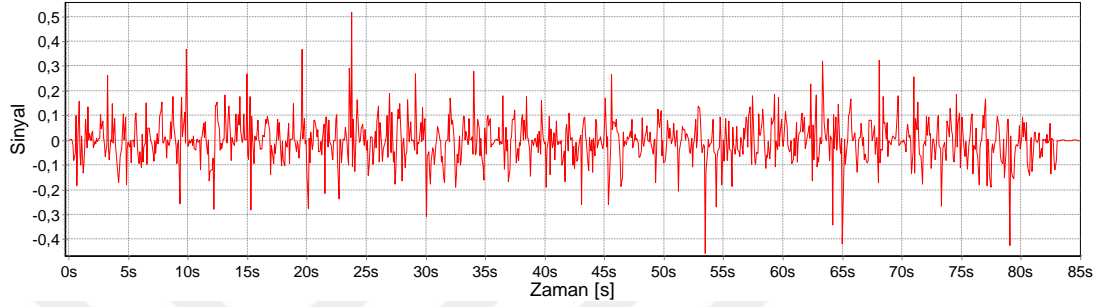
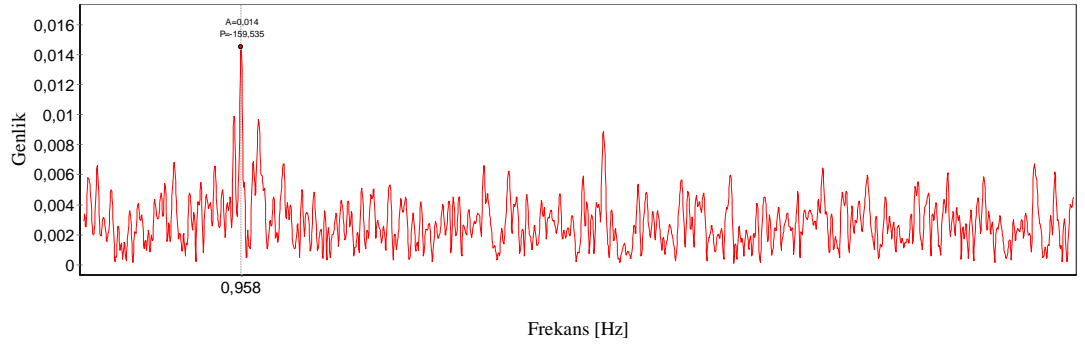
Şekil 3.44 Tek sarmal 180° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



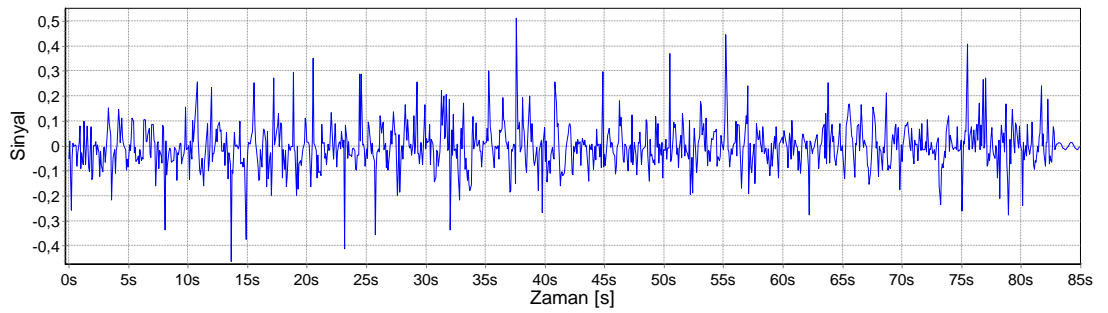
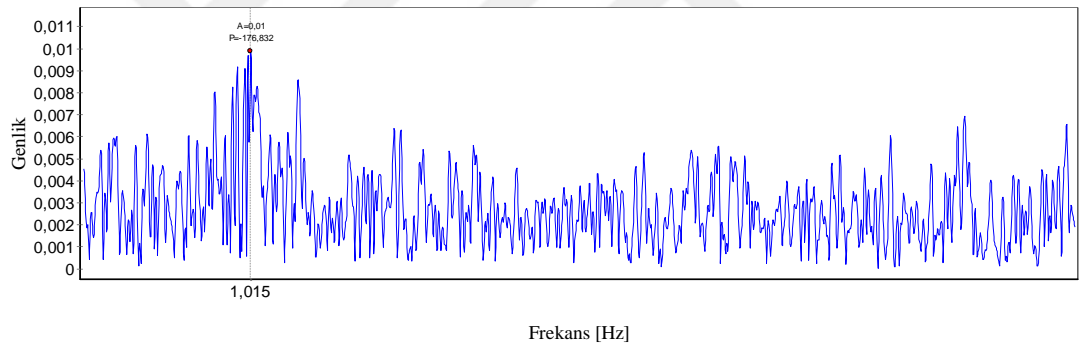
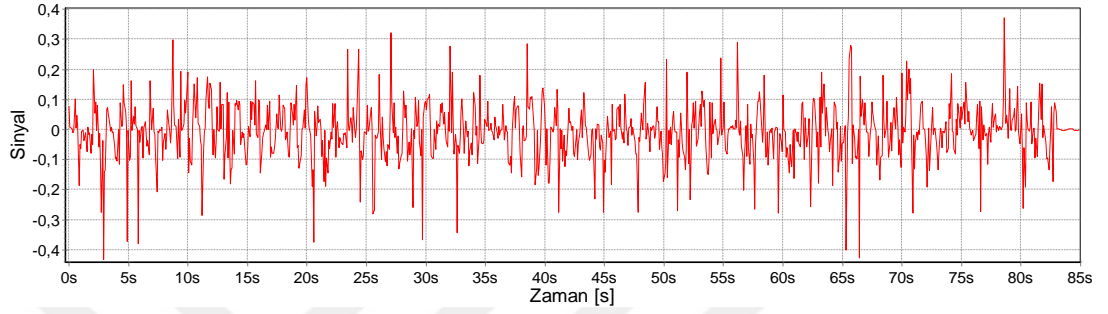
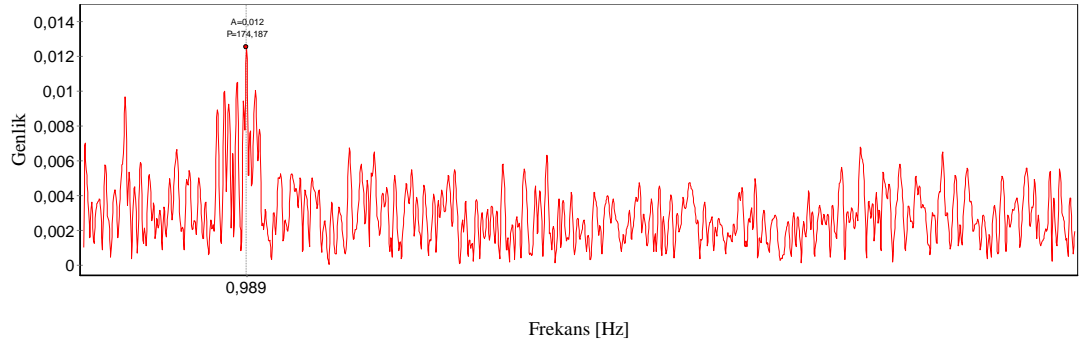
Şekil 3.45 Çift sarmal  $0^\circ$  konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



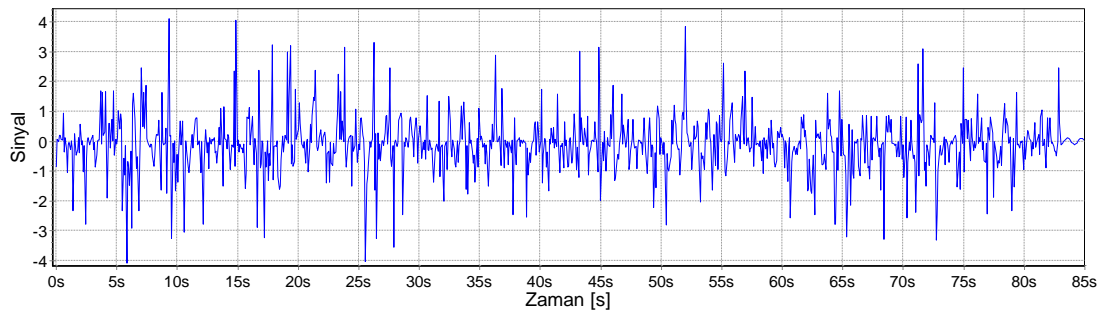
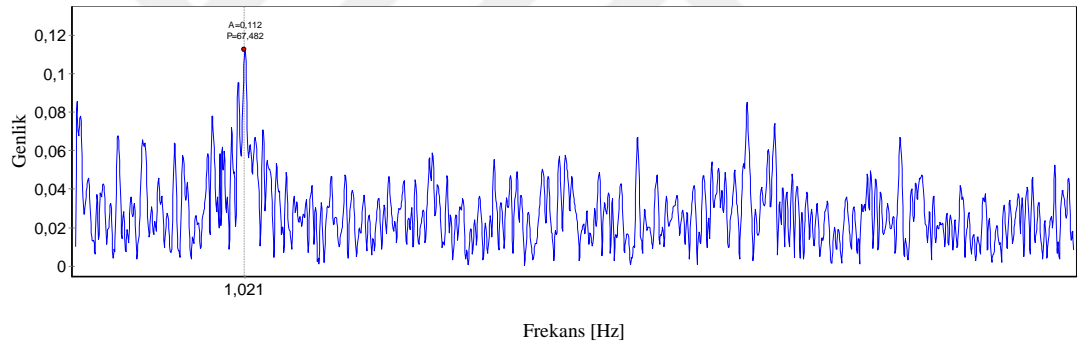
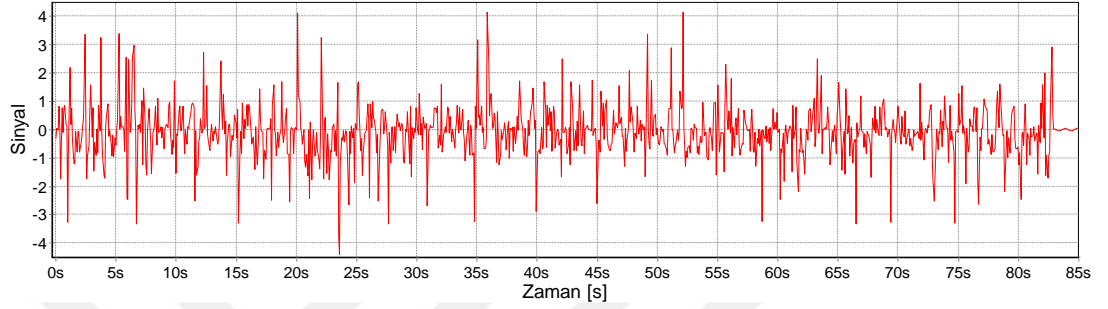
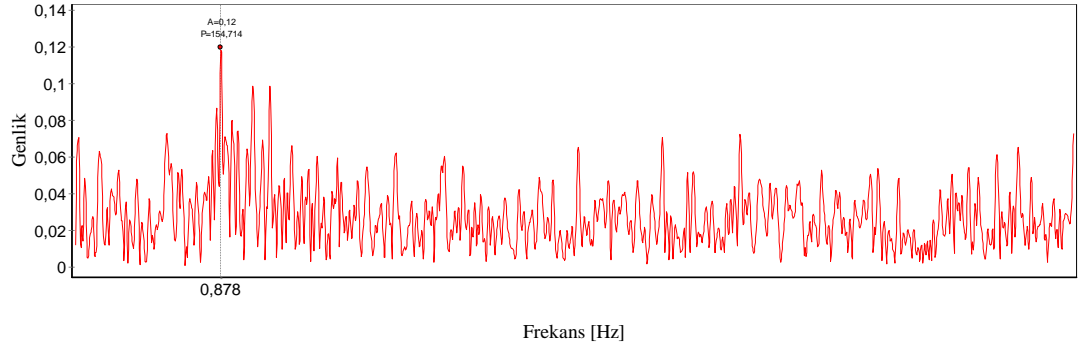
**Şekil 3.46** Çift sarmal  $30^\circ$  konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



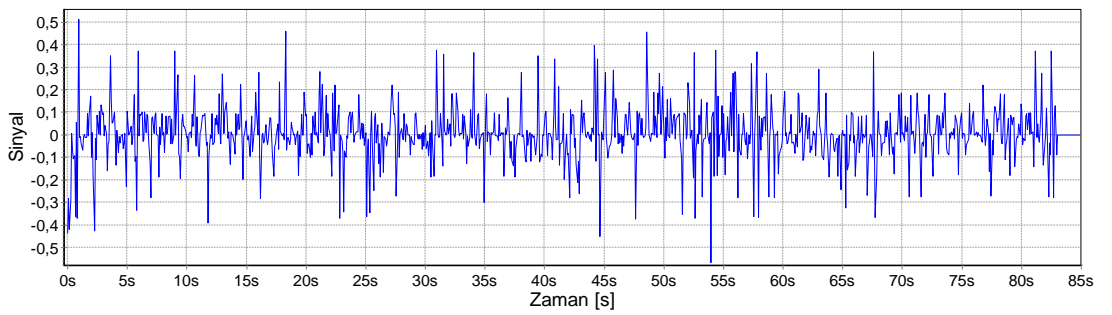
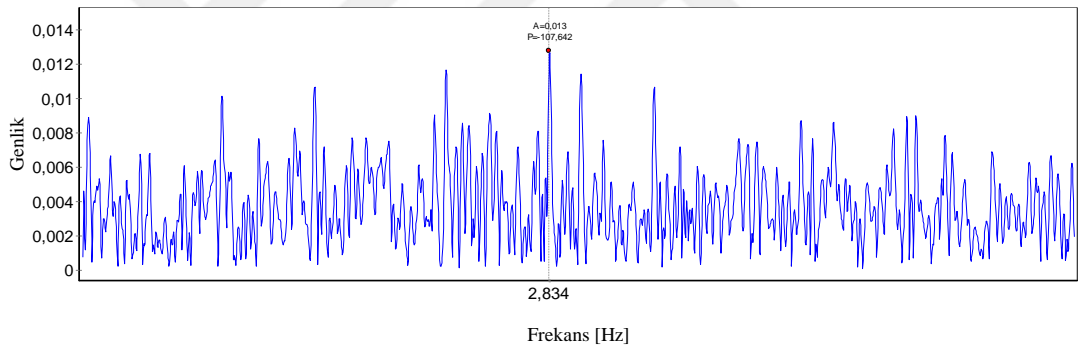
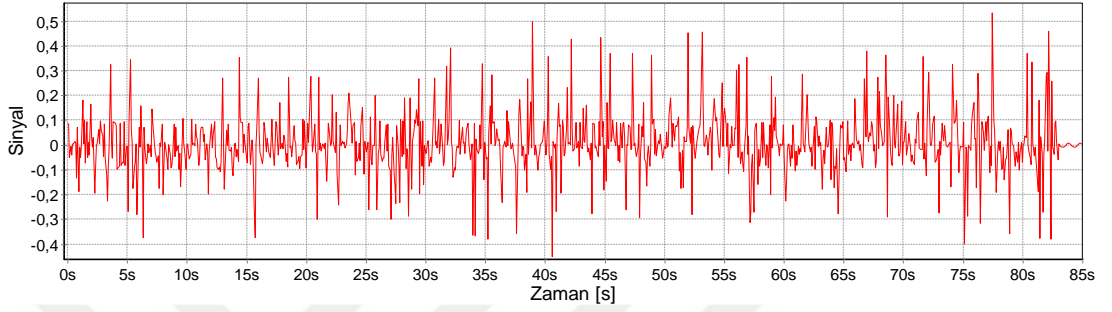
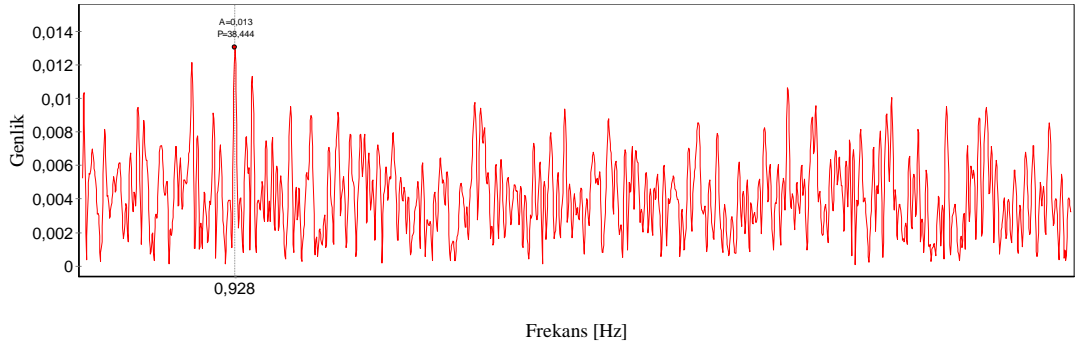
Şekil 3.47 Çift sarmal 60° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



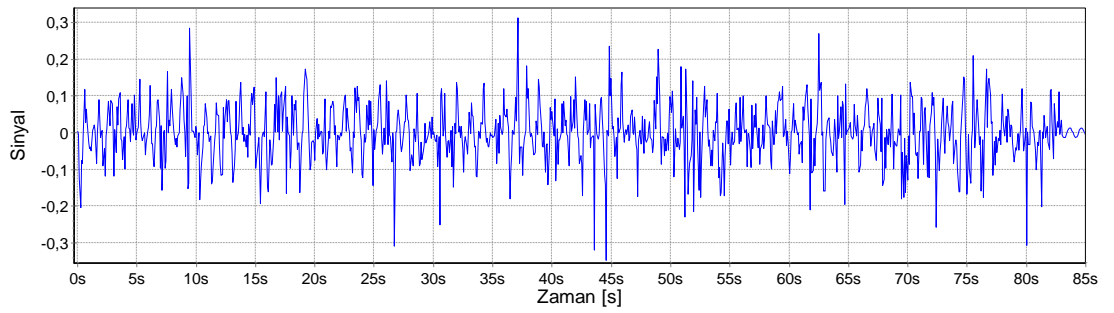
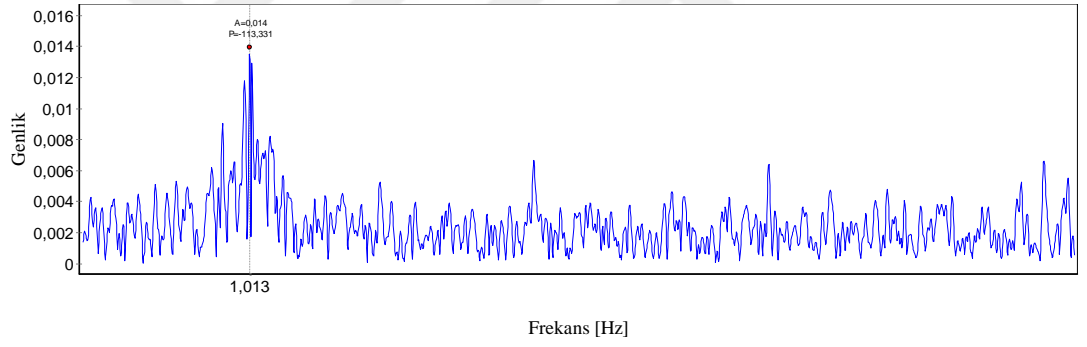
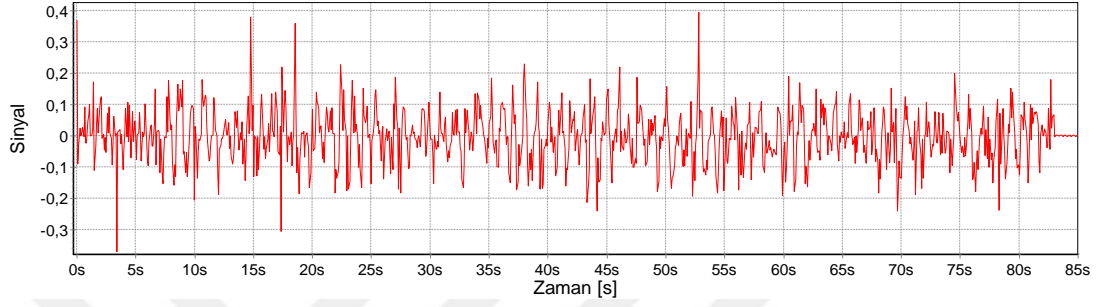
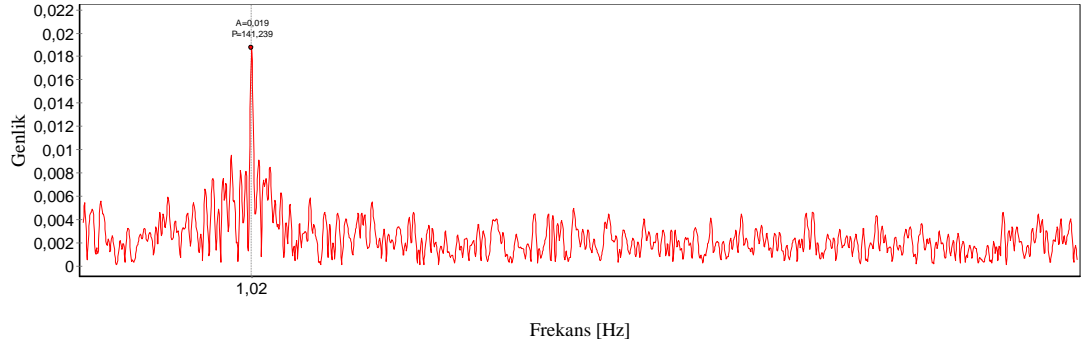
Şekil 3.48 Çift sarmal 90° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



Şekil 3.49 Çift sarmal 120° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

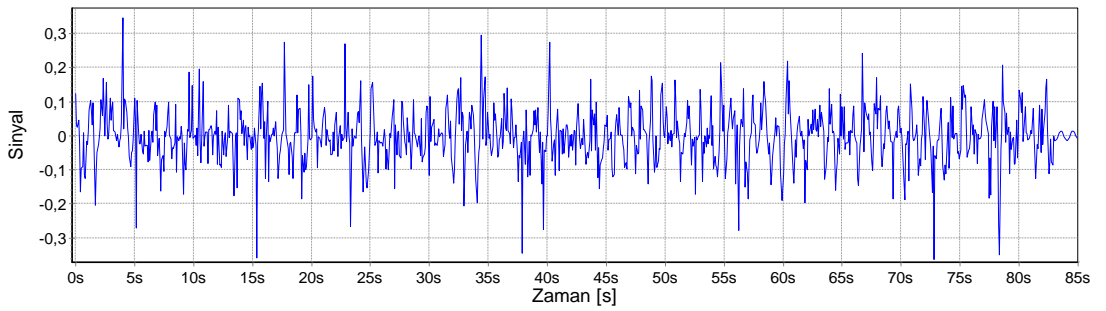
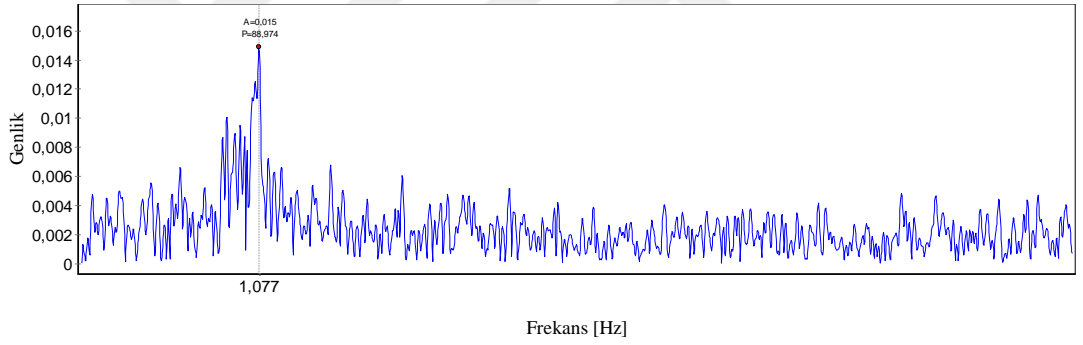
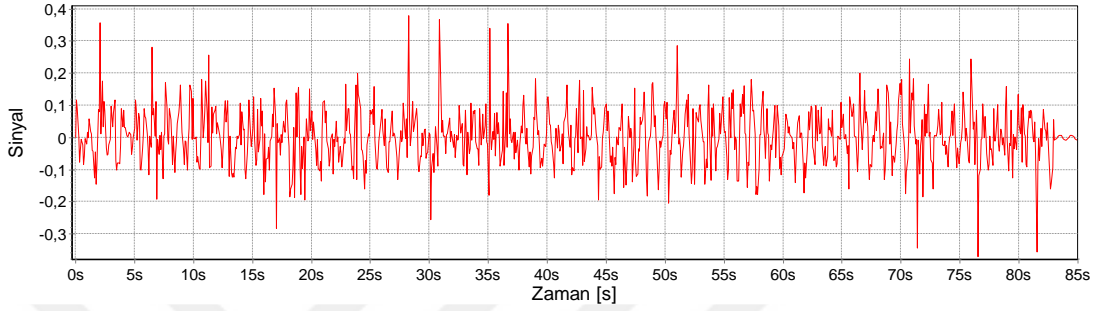
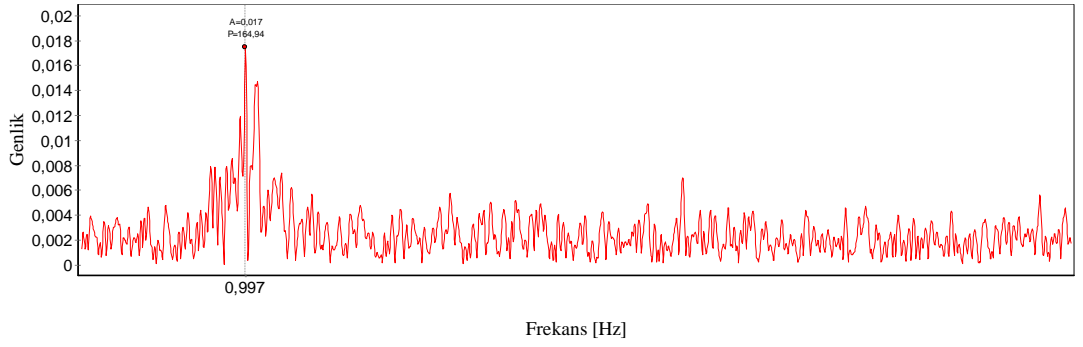


Şekil 3.50 Çift sarmal 180° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

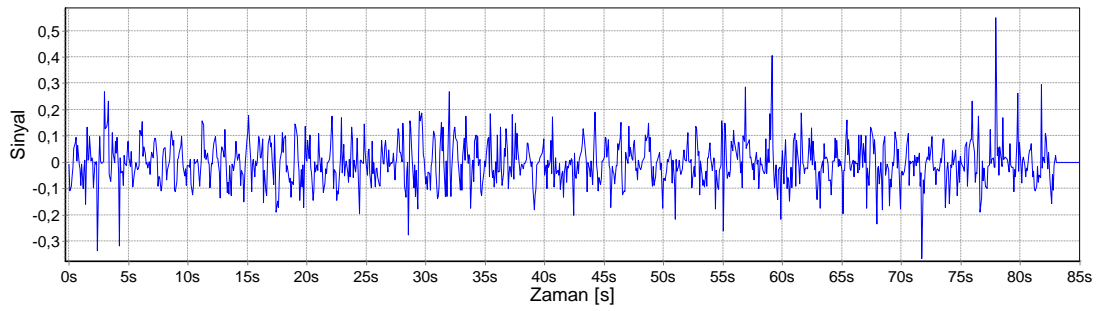
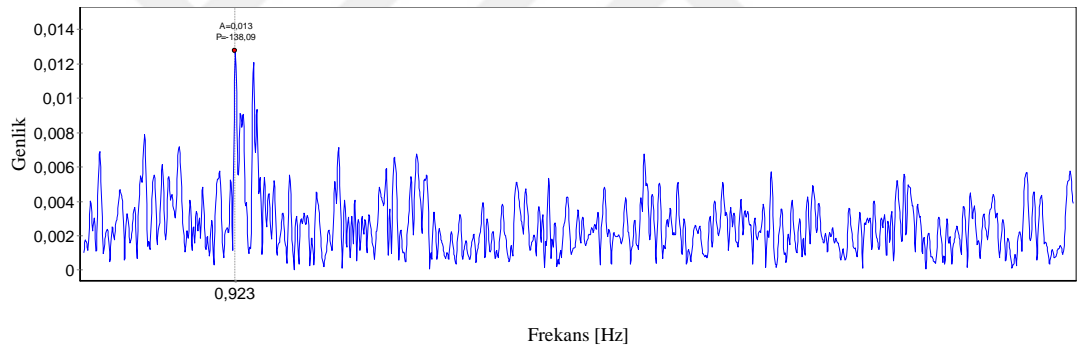
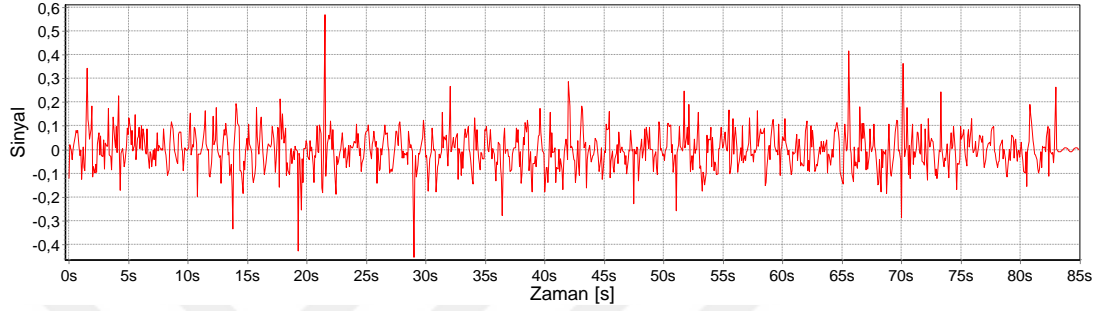
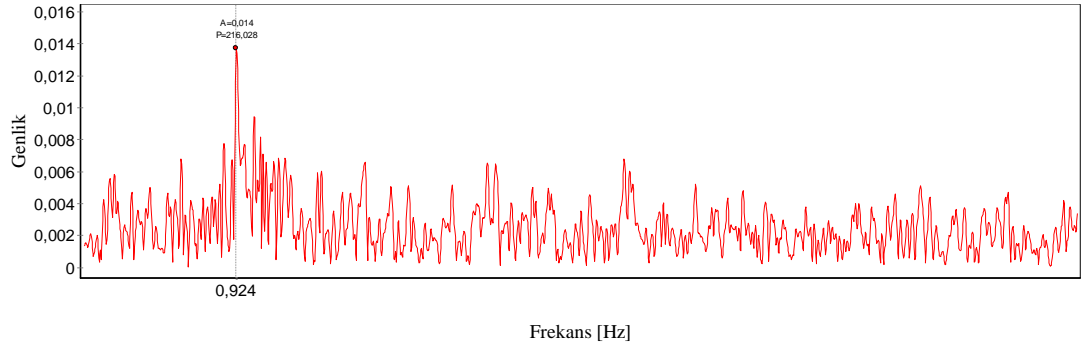


Şekil 3.51 Dört sarmal  $0^\circ$  konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

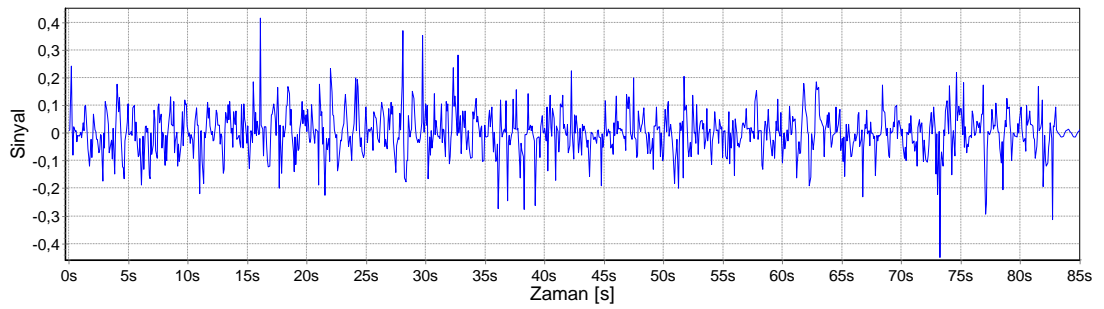
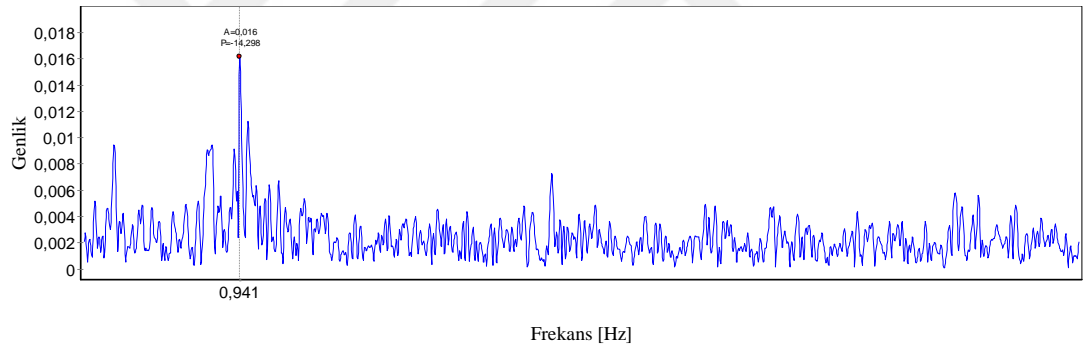
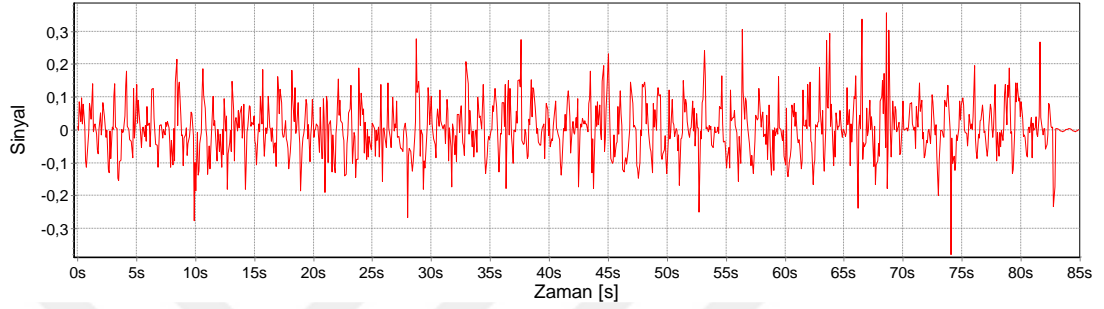
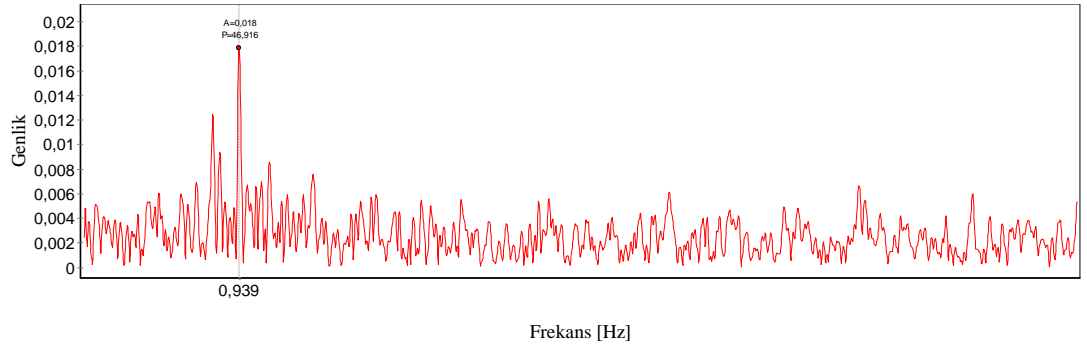




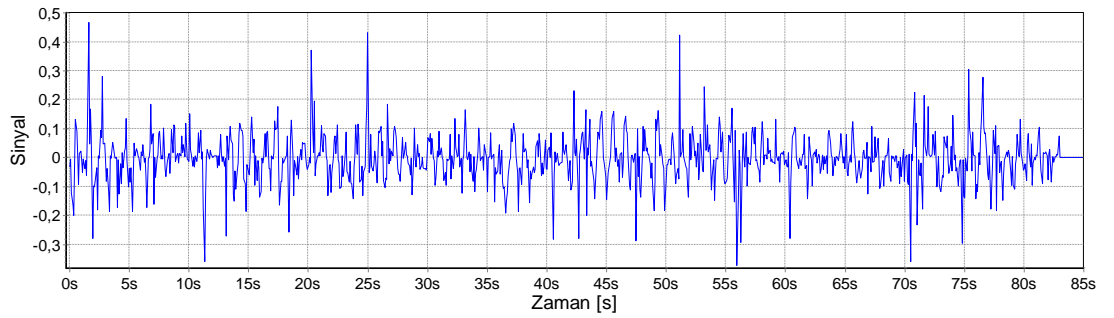
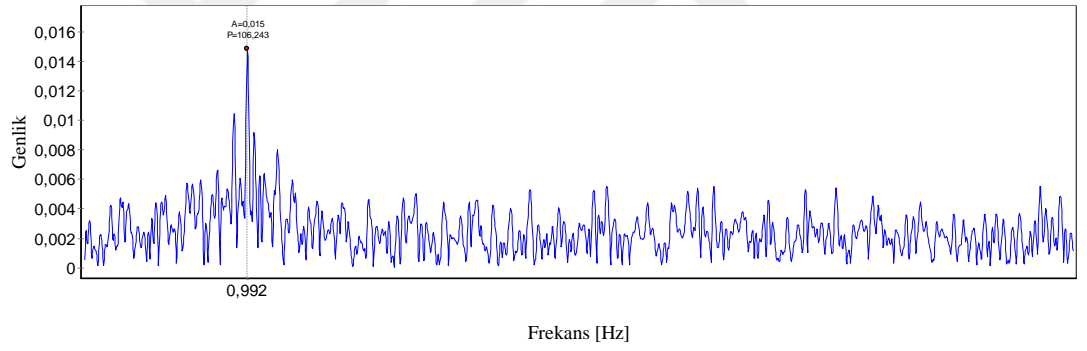
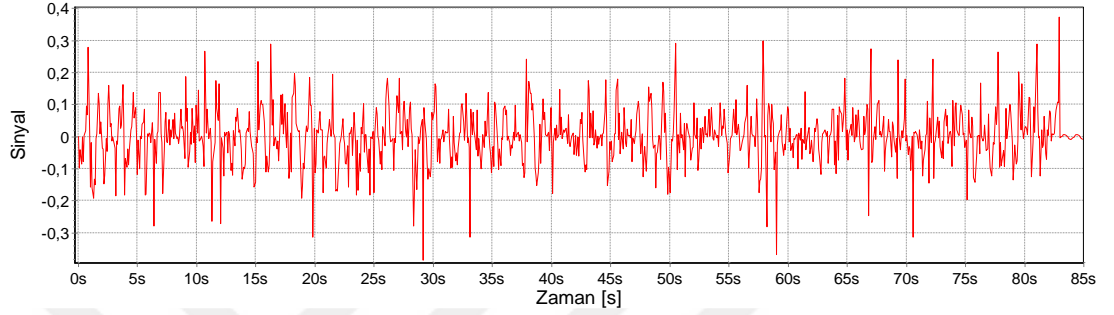
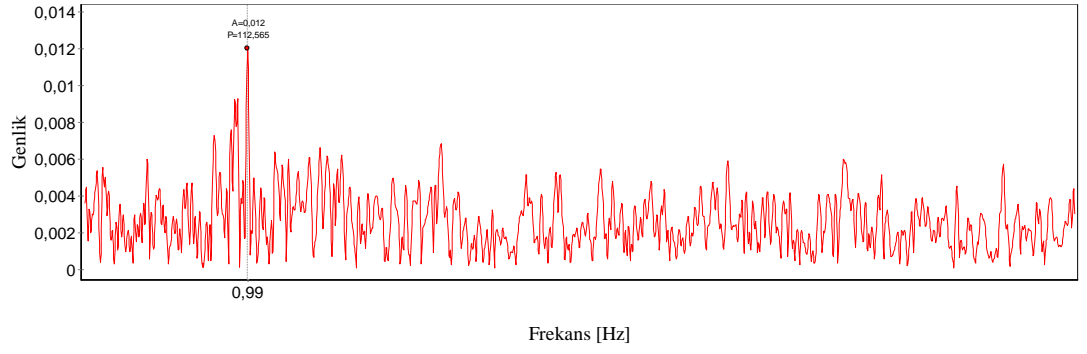
Şekil 3.52 Dört sarmal 30° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



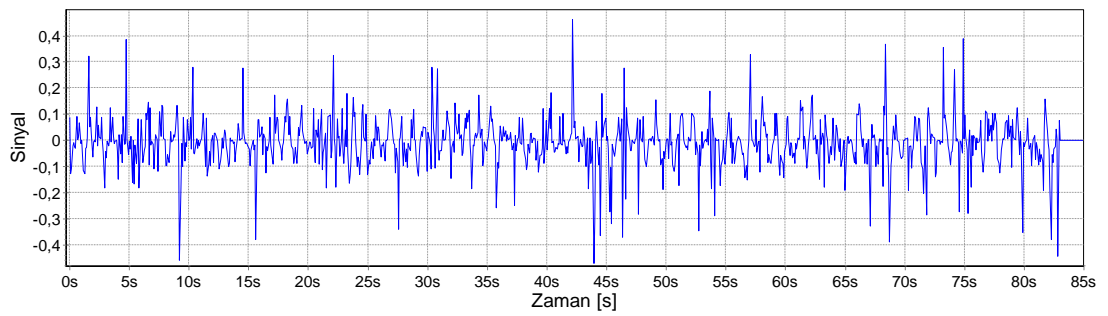
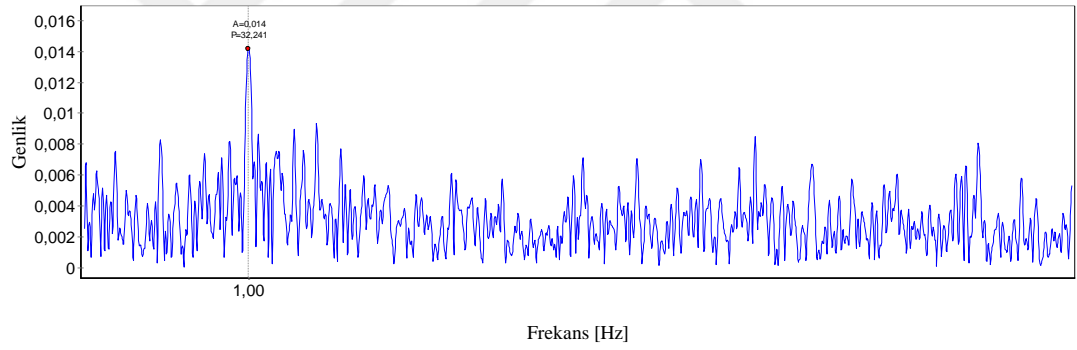
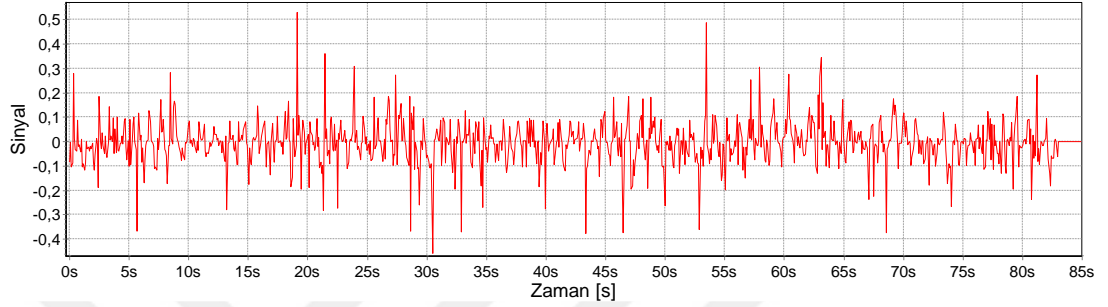
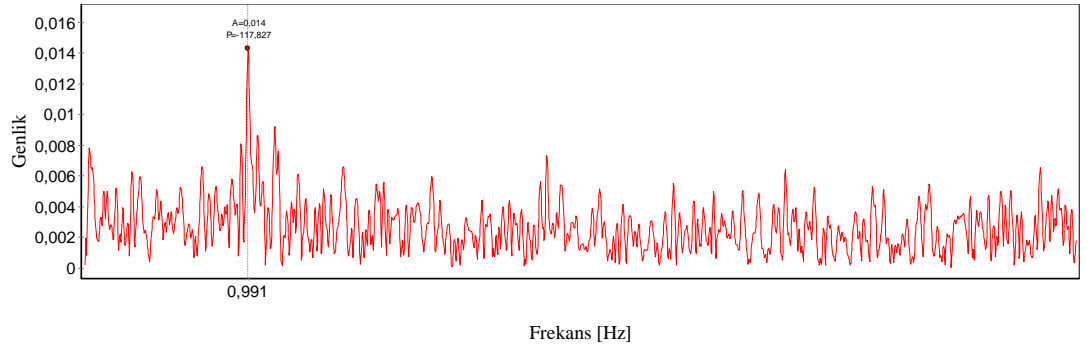
Şekil 3.53 Dört sarmal  $60^\circ$  konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



Şekil 3.54 Dört sarmal  $90^\circ$  konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



Şekil 3.55 Dört sarmal 120° konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri



Şekil 3.56 Dört sarmal  $180^\circ$  konumu için frekans spektrumu ve zaman sinyali grafikleri

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dairesel bir silindir etrafındaki akış yapısı, parçacık görüntülemeli hız ölçme (PIV) tekniği kullanılarak, silindir üzeri sarmalın açısız konumunun silindirin ileri durma noktasının bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Tek, çift ve dört sarım sayısından oluşan 3 model ile düz silindir olmak üzere toplam 4 adet deney modeli kullanılmıştır. Deneyler; Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarında bulunan su tüneline gerçekleştirilmiştir.

Silindirlerin L/D (boy/çap) oranı ve silindir yüzeyindeki yarım silindir şeklindeki spiral sarımların D/d (silindir çapı/ sarım çapı) oranı 10 olacak şekilde işlenmiştir. Silindir çapına bağlı Reynolds sayısı 10000 olarak hesaplanmıştır.

Deneyler, açısız pozisyonun etkisini araştırmak için sarımların silindir durma noktasına göre  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$  'lik açısız pozisyonunda yapılmıştır. Deneyler süresince her bir açısız pozisyon için 1000 adet anlık görüntü kayıt edilmiştir. Kayıt edilen görüntülerin prosesleri gerçekleştirilerek hız vektörleri hesaplanmıştır. Bu verilerden yararlanılarak akım çizgileri, vektörel hız alanları, girdap eş değer eğrileri, türbülans kinetik enerji, TKE, akış yönündeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $U_{rms}$ , akışa dik yöndeki hız bileşeninin kök ortalama karesi  $V_{rms}$ , Reynolds gerilme korelasyonu  $u'v'$  gibi akışa ait özellikler elde edilmiştir.

Düz silindir (sarmal olmaksızın) ile ilgili deneysel sonuçlar açık literatür ile uyumludur.  $\theta$ ' nin akış yapısının, türbülans istatistikleri ve girdap kopma sıklığı üzerinde derin bir etkisi olduğu görülmüştür. Ana negatif zaman ortalama girdap kontürleri başlangıç açısı ilk önce artar, bir miktar düşüşten sonra  $\theta = 90^\circ$  'de maksimuma çıkar. Düz silindir üzeri akışın kritik noktaları  $F_1$ ,  $F_2$  ve S'nin yerleri daima, silindirin akış yönüne göre, sarmallı silindirinkinden daha ileridedir. Kayma katmasının yapısını gösteren deneysel sonuçlardan, sarmalın kritik açısız pozisyonu  $\theta = 90^\circ$  olarak tespit edilmiştir. Akış ayrılması  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  içinde geciktirilirken, erken kayma tabakası ayrılması  $\theta = 90^\circ$  'den başlayarak gerçekleşmektedir. Ayrıca, art izi akış yapısında asimetri gözlenmekte ve bu da türbülanslı istatistik hatlarının dağılımını etkilemektedir. Vorteks kopma frekansının güç spektralleri incelendiğinde, silindirin

sarmal tarafında ek frekanslar belirgindir. Strouhal sayısı ( $St$ ) ayrıca  $\theta$  ile değişmekte ve  $St$  değeri  $90^\circ$  'de maksimum değerini almaktadır. Bu nedenle, dairesel yapı üzerine sarılarak şekillendirilmiş tek yarım dairesel silindir, akış-yapı etkileşimini ve akış kontrolünü azaltmak için kullanılabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca aşağı akım bölgesi belirli mesafelerde ( $x/D=0.5, 1$  ve  $1.5$  için) TKE,  $U_{rms}$ ,  $V_{rms}$  ve Reynolds gerilme grafikleri elde edilmiştir.  $U_{rms}$  ve TKE değerlerinin başlangıçta silindirin her iki tarafından olan mesafe ile arttığı, kesme tabakası içinde lokal bir maksimum değer elde ettiği ve ardından düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte,  $x/D = 0.5$ 'te lokal maksimalden sonra büyüklüklerin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Dahası, TKE grafikleri, karşılık gelen akım hattının sınır dolaşım çizgisi çevresinde göreceli olarak zayıf büyüklükte ikincil lokal zirveye sahiptir. TKE'nin her iki tarafındaki yerel zirveler, akış çizgisi uzadıkça birbirini hareket ettirir.  $U_{rms}$  ve TKE grafiklerinde görünen her iki taraftaki maximum noktalar, akış yönünde artan mesafe ile birbirine yaklaşmaktadır.  $V_{rms}$  grafikleri başlangıçta artmakta, ilgili akıntı çizgisinin dolaşım çizgisi sınırındaki yerel zirvesine ulaşarak daha sonra düşmektedir. Reynolds gerilme değerlerinin, boyutsuz  $x/D$  mesafesi arttıkça sinüzoidal dağılım sergilediği görülmektedir. Silindirin yakınında akım çizgisi dolaşım hattının hemen üzerinde ve altında ortaya çıkan iki yerel tepe noktası dikeylikten daha eğimli yapıya dönüşmektedir.

Silindir üzeri sarmal yapıların aşağı akım bölgesini önemli ölçüde etkilediği, hız çalkantı büyüklüklerini azalttığı, dolayısıyla akış frekansını ve buna bağlı  $St$  sayısını düşürdüğü sonucuna varılmıştır.  $St$  sayısının daha küçük değerler alması da daha küçük doğal frekans değerleri neticesinde titreşim sönümlenme kabiliyetini artırdığı sonucu çıkarılmaktadır.

Bunun yanı sıra bu çalışmaya ek olarak gelecek çalışmalarda şu yöntemlere başvurulabilir:

- Farklı  $Re$  sayısı: Tez kapsamında tek bir Reynolds sayısında çalışılmıştır. Reynolds sayısı şüphesiz türbülansa etki eden en önemli parametreler arasındadır. Bu nedenle farklı Reynolds sayıları kullanılarak akış karakteristiğine olan etkisi incelenebilir ve yorumlanabilir.

- Farklı boyutlar: Literatüre uyumlu olarak seçilen silindir ve sarmal boyutları değiştirilerek ( $d/D$ ) akışa olan etkisi araştırılabilir.
- Farklı sarım sayısı: Yapılan çalışmada silindir üzeri sarmallar bir noktadan başlayarak sonu aynı düzlem üzerinde olmak şartıyla adım sayısı değiştirilerek sarılmış tek bir spiralden meydana gelmektedir. Bu spirallerin sayısı artırılarak (2 ve daha fazla spiralin) akışa olan etkisi araştırılabilir.
- Dönme etkisi: Çalışmada rijit olan silindirler üzeri akış yapısı incelenmiştir. Buna ek olarak silindir merkezi kanal üzerine adapte edilecek elektrikli bir motora bağlanarak belirli devirde dönme yaratılabilir. Dolayısıyla silindir üzerindeki sarmalların dönme etkisiyle akış yapısını nasıl etkileyeceği incelenebilir. Böylece hem pasif hem de aktif metod bir arada çalışma yapılmış olunur.





## KAYNAKLAR

- [1] **K. Chutkey, P. Suriyanarayanan, and L. Venkatakrisnan**, “Near wake field of circular cylinder with a forward splitter plate,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 173, no. November 2017, pp. 28–38, 2018.
- [2] **S. Liang, J. Wang, B. Xu, W. Wu, and K. Lin**, “Vortex-induced vibration and structure instability for a circular cylinder with flexible splitter plates,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 174, no. December 2017, pp. 200–209, 2018.
- [3] **V. Oruç, H. Akilli, and B. Sahin**, “PIV measurements on the passive control of flow past a circular cylinder,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 70, pp. 283–291, 2016.
- [4] **K. Liu, J. Deng, and M. Mei**, “Experimental study on the confined flow over a circular cylinder with a splitter plate,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 51, pp. 95–104, 2016.
- [5] **T. Durhasan, M. M. Aksoy, E. Pinar, G. M. Ozkan, H. Akilli, and B. Sahin**, “Vortex street suppression of a circular cylinder using perforated semi-circular fairing in shallow water,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 79, pp. 101–110, 2016.
- [6] **H. Ren, Y. Xu, M. Zhang, S. Fu, Y. Meng, and C. Huang**, “Distribution of drag coefficients along a flexible pipe with helical strakes in uniform flow,” *Ocean Eng.*, vol. 184, no. May, pp. 216–226, 2019.
- [7] **H. Zhang and W. Shi**, “Numerical simulation of flow over a circular cylinder with a splitter plate near a moving wall,” *Ocean Eng.*, vol. 122, pp. 162–171, 2016.
- [8] **Y. Xing, P. Liu, H. Guo, and L. Li**, “Effect of helical cables on cylinder noise control,” *Appl. Acoust.*, vol. 122, pp. 152–155, 2017.
- [9] **E. Firat, G. M. Ozkan, and H. Akilli**, “PIV measurements in the near wakes of hollow cylinders with holes,” *Exp. Fluids*, vol. 58, no. 5, pp. 1–19, 2017.
- [10] **L. Li, P. Liu, Y. Xing, and H. Guo**, “Experimental investigation on the noise reduction method of helical cables for a circular cylinder and tandem cylinders,”

- Appl. Acoust.*, vol. 152, pp. 79–87, 2019.
- [11] **A. Roshko**, “On the Wake and Drag of Bluff Bodies,” *J. Aeronaut. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 124–132, Feb. 1955.
- [12] **R. D. Blevins**, *Flow-induced vibration*. Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [13] **M. Jahanmiri**, “Active Flow Control: A Review,” Göteborg, Sweden, 210AD.
- [14] **L. Prandtl**, “Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung,” in *Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung*, 1904, pp. 484–491.
- [15] **W. Albring, G. V. Lachmann**, “Boundary Layer and Flow Control. Its Principles and Application. Volume 1: XII + 600 S. m. 417 Abb. Volume 2: VI + 730 S. Oxford/London/New York/Paris 1961. Pergamon Press. Preis geb. £ 10.10 s. net (2 Volumes),” *ZAMM - Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.*, vol. 42, no. 6, pp. 264–265, Jan. 1962.
- [16] **M. Gad-el-Hak and A. Pollard**, Eds., *Flow Control*, vol. 53. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [17] **G. B. Schubauer**, “Laminar Boundary-Layer Oscillations and Stability of Laminar Flow,” *J. Aeronaut. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 69–78, Feb. 1947.
- [18] **D. Greenblatt and I. J. Wygnanski**, “The control of flow separation by periodic excitation,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 36, no. 7, pp. 487–545, Oct. 2000.
- [19] **A. Seifert, A. Darabi, and I. Wygnanski**, “Delay of airfoil stall by periodic excitation,” *J. Aircr.*, vol. 33, no. 4, pp. 691–698, Jul. 1996.
- [20] **A. Seifert and L. G. Pack**, “Active Flow Separation Control on Wall-Mounted Hump at High Reynolds Numbers,” *AIAA J.*, vol. 40, no. 7, pp. 1363–1372, Jul. 2002.
- [21] **L. D. Kral, M. I. The, and C. Classification**, “Points: Retinal detachment in pregnancy,” *Br. Med. J. (Clin. Res. Ed.)*, vol. 291, no. 6489, p. 219, 1985.
- [22] **Y. A. Çengel and J. M. Cimbalk**, *Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları*. Güven Bilimsel, 2008.
- [23] **E. R. Ranjith, A. S. Sunil, and L. Pauly**, “Analysis of Flow over a Circular

- Cylinder Fitted with Helical Strakes,” *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 452–460, 2016.
- [24] **D. Yeo and N. P. Jones**, “Computational study on aerodynamic mitigation of wind-induced, large-amplitude vibrations of stay cables with strakes,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 99, no. 4, pp. 389–399, Apr. 2011.
- [25] **K. Lam, Y. F. Lin, L. Zou, and Y. Liu**, “Investigation of turbulent flow past a yawed wavy cylinder,” *J. Fluids Struct.*, vol. 26, no. 7–8, pp. 1078–1097, 2010.
- [26] **T. Islam and S. M. R. Hassan**, “Experimental and Numerical Investigation of Flow over a Cylinder at Reynolds Number 100000,” *J. Mod. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 52–60, 2013.
- [27] **M. Daneshi**, “Numerical Investigation of the Fluid Flow around and Past a Circular Cylinder by Ansys Simulation,” *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 92, pp. 49–58, 2016.
- [28] **S. Karadag**, “Unsteady turbulent vortex structure downstream of a three dimensional cylinder,” *Isi Bilim. Ve Tek. Dergisi/ J. Therm. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 91–98, 2009.
- [29] **N. Kanaris, D. Grigoriadis, and S. Kassinos**, “Three dimensional flow around a circular cylinder confined in a plane channel,” *Phys. Fluids*, vol. 23, no. 6, 2011.
- [30] **C. Karakus, H. Akilli, and B. Sahin**, “Sonlu-Silindir Üzerindeki Akış Yapısının Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Tekniği ( PIV ) ile İncelenmesi,” *Tesisat Mühendisliği sayı 125*, pp. 33–51, 2011.
- [31] **B. Zhou, X. Wang, W. Guo, W. M. Gho, and S. K. Tan**, “Control of flow past a dimpled circular cylinder,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 69, pp. 19–26, Dec. 2015.
- [32] **M. M. Zdravkovich**, “Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 7, no. 2, pp. 145–189, Mar. 1981.

- [33] **E. Naudascher and D. Rockwell**, *Flow-induced vibrations : an engineering guide*. .
- [34] **C.-K. Chyu and D. Rockwell**, “Near-Wake Flow Structure Of A Cylinder With A Helical Surface Perturbation,” *J. Fluids Struct.*, vol. 16, no. 2, pp. 263–269, Feb. 2002.
- [35] **I. Korkischko and J. R. Meneghini**, “Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes,” *J. Fluids Struct.*, vol. 26, no. 4, pp. 611–625, May 2010.
- [36] **A. A. Öner, M. Çobaner, M. S. Kırkgöz, and M. S. Aköz**, “Yatay bir dairesel silindir etrafındaki akımda maksimum hızın yapay sinir ağları ile tahmini,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Fen Bilim. Derg.*, vol. 26, no. 1, pp. 63–70, Feb. 2010.
- [37] **S. Kunze and C. Brücker**, “Control of vortex shedding on a circular cylinder using self-adaptive hairy-flaps,” *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 340, no. 1–2, pp. 41–56, Jan. 2012.
- [38] **B. Gozmen, H. Akilli, and B. Sahin**, “Passive control of circular cylinder wake in shallow flow,” *Measurement*, vol. 46, no. 3, pp. 1125–1136, Apr. 2013.
- [39] **S. M. Fang, J. M. Niedzwecki, S. Fu, R. Li, and J. Yang**, “VIV response of a flexible cylinder with varied coverage by buoyancy elements and helical strakes,” *Mar. Struct.*, vol. 39, pp. 70–89, 2014.
- [40] **G. R. S. Assi, P. W. Bearman, N. Kitney, and M. A. Tognarelli**, “Suppression of wake-induced vibration of tandem cylinders with free-to-rotate control plates,” *J. Fluids Struct.*, vol. 26, no. 7–8, pp. 1045–1057, 2010.
- [41] **S. Huang and A. Sworn**, “Hydrodynamic coefficients of two fixed circular cylinders fitted with helical strakes at various staggered and tandem arrangements,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 43, pp. 21–26, 2013.
- [42] **S. Huang**, “VIV suppression of a two-degree-of-freedom circular cylinder and drag reduction of a fixed circular cylinder by the use of helical grooves,” *J. Fluids Struct.*, vol. 27, no. 7, pp. 1124–1133, 2011.

- [43] **H. Senga and C. M. Larsen**, “Forced motion experiments using cylinders with helical strakes,” *J. Fluids Struct.*, vol. 68, no. April 2015, pp. 279–294, 2017.
- [44] **M. Zeinoddini, A. Farhangmehr, M. S. Seif, and A. P. Zandi**, “Cross-flow vortex induced vibrations of inclined helically straked circular cylinders: An experimental study,” *J. Fluids Struct.*, vol. 59, no. 1346, pp. 178–201, 2015.
- [45] **W. Xu, Y. Luan, Q. Han, C. Ji, and A. Cheng**, “The effect of yaw angle on VIV suppression for an inclined flexible cylinder fitted with helical strakes,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 67, pp. 263–276, 2017.
- [46] **Y. Gao, J. Yang, Y. Xiong, M. Wang, and G. Peng**, “Experimental investigation of the effects of the coverage of helical strakes on the vortex-induced vibration response of a flexible riser,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 59, pp. 53–64, 2016.
- [47] **M. A. Akar and M. Küçük**, “Control of the Unsteady Flow Structure Behind the Cylinder with Passive Control Method,” *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 123–128, 2016.
- [48] **B. Oğuz, M. A. Akar, E. Pınar, H. Akılı, and B. Şahin**, “Control of flow structure in the wake region of circular cylinder with meshy wire in deep water,” *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 280–284, 2017.
- [49] **B. Zhou, X. Wang, W. M. Gho, and S. K. Tan**, “Force and flow characteristics of a circular cylinder with uniform surface roughness at subcritical Reynolds numbers,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 49, pp. 20–26, 2015.
- [50] **S. J. Lee and J. Y. Lee**, “PIV measurements of the wake behind a rotationally oscillating circular cylinder,” *J. Fluids Struct.*, vol. 24, no. 1, pp. 2–17, 2008.
- [51] **V. Oruç**, “Passive control of flow structures around a circular cylinder by using screen,” *J. Fluids Struct.*, vol. 33, pp. 229–242, 2012.
- [52] **T. Zhou, S. F. M. Razali, Z. Hao, and L. Cheng**, “On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes,” *J. Fluids Struct.*, vol. 27, no. 7, pp. 903–917, 2011.
- [53] **A. Ekmekci**, “Circular cylinders fitted with small-scale straight and helical

- wires: A comparative study on the wire-induced critical effects,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 53, pp. 179–189, 2014.
- [54] **O. Gündem, İ. Kerem, and Tan Tas**, “Effects Of Longitudinal Groove-Roughness Elements On The Drag Force Exerted By The Flow On A Pipe,” vol. 23, no. 3, pp. 637–644, 2008.
- [55] **R. Meynard**, “Mesure de champs de vitesse d’écoulements fluides par analyse de suites d’images obtenues par diffusion d’un feuillet lumineux,” Université Libre de Bruxelles, 1983.
- [56] **R. J. Adrian**, “Particle-Imaging Techniques For Experimental Fluid Mechanics,” 1991.
- [57] **R. D. Keane and R. J. Adrian**, “Theory of cross-correlation analysis of PIV images,” 1992.
- [58] **R. D. Keane and R. J. Adrian**, “Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems Flow noise View project Structure of Wall Turbulence View project,” *Artic. Meas. Sci. Technol.*, 1992.
- [59] **C. E. Willert and M. Gharib**, “Digital particle image velocimetry,” *Exp. Fluids*, vol. 10, no. 4, pp. 181–193, Jan. 1991.
- [60] **J. Westerweel**, “Fundamentals of digital particle image velocimetry,” 1997.
- [61] **A. Tondast-Navaei and D. B. Sharp**, “The Use Of Particle Image Velocimetry In The Measurement Of Sound Fields,” in *Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics*, 2001, pp. 379–382.
- [62] “Particle Image Velocimetry (PIV) Measurement Systems.” [Online]. Available: <https://www.dantecdynamics.com/particle-image-velocimetry>. [Accessed: 26-Jun-2019].
- [63] **R. Adrian and C. S. Yao**, “Development Of Pulsed Laser Velocimetry (Plv) For Measurement Of Turbulent Flow,” in *8th Symp. On Turbulence (University of Missouri-Rolla)*, 1984, pp. 170–186.
- [64] **J. Westerweel**, “Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data,” *Exp. Fluids*, vol. 16–16, no. 3–4, pp. 236–247, Feb. 1994.

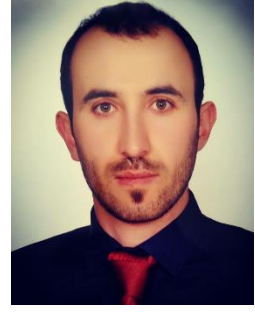
- [65] **P. Veber, J. Dahl, and R. Hermansson**, “Study of the phenomena affecting the accuracy of a video- based particle tracking velocimetry technique,” *Exp. Fluids*, vol. 22, no. 6, pp. 482–488, Apr. 1997.
- [66] **C. C. Landreth and R. J. Adrian**, “Measurement and Refinement of Velocity Data Using High Image Density Analysis in Particle Image Velocimetry,” in *Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989, pp. 484–497.
- [67] **H. Akilli, B. Sahin, and N. Filiz Tumen**, “Suppression of vortex shedding of circular cylinder in shallow water by a splitter plate,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 16, no. 4, pp. 211–219, Aug. 2005.
- [68] **S. Dong, G. E. Karniadakis, A. Ekmekci, and D. Rockwell**, “A combined direct numerical simulation–particle image velocimetry study of the turbulent near wake,” *J. Fluid Mech.*, vol. 569, p. 185, Dec. 2006.
- [69] **C. Canpolat and B. Sahin**, “Influence of single rectangular groove on the flow past a circular cylinder,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 64, pp. 79–88, 2017.
- [70] **S. Yagmur, S. Dogan, M. H. Aksoy, I. Goktepe, and M. Ozgoren**, “Comparison of flow characteristics around an equilateral triangular cylinder via PIV and Large Eddy Simulation methods,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 55, no. April, pp. 23–36, 2017.
- [71] **M. Ozgoren, A. Okbaz, S. Dogan, B. Sahin, and H. Akilli**, “Investigation of flow characteristics around a sphere placed in a boundary layer over a flat plate,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 44, no. 8, pp. 62–74, 2013.
- [72] **G. M. Ozkan, V. Oruc, H. Akilli, and B. Sahin**, “Flow around a cylinder surrounded by a permeable cylinder in shallow water,” *Exp. Fluids*, vol. 53, no. 6, pp. 1751–1763, 2012.
- [73] **J. Sheng, H. Meng, and R. O. Fox**, “A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 55, no. 20, pp. 4423–4434, Oct. 2000.
- [74] **P. Parnaudeau, J. Carlier, D. Heitz, and E. Lamballais**, “Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at Reynolds number

3900,” *Phys. Fluids*, vol. 20, 2008.

- [75] **M. Ozgoren, E. Pinar, B. Sahin, and H. Akilli**, “Comparison of flow structures in the downstream region of a cylinder and sphere,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 32, no. 6, pp. 1138–1146, 2011.







## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel bilgiler**

Adı Soyadı	Ferhat KOCA
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 01.08.1989
Medeni Hali	Bekâr
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü
E-posta Adresi	ferhatkoca@cumhuriyet.edu.tr ferhatkocaa@gmail.com

### **Eğitim ve Akademik Durumu**

Lise	Sivas Lisesi, 2007
Lisans	Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 2011
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Enerji Anabilim Dalı, 2015
Doktora	Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020