

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

DBD PLAZMA AKTÜATÖR İLE KARE KESİTLİ KÜT CİSİM ETRAFINDAKİ
AKIŞ KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ

CİHAN YEŐILDAĐ

Temmuz 2013

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

DBD PLAZMA AKTÜATÖR İLE KARE KESİTLİ KÜT CİSİM ETRAFINDAKİ
AKIŞ KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ

CİHAN YEŞİLDAĞ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL

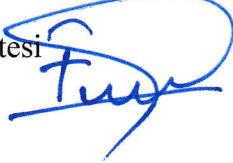
Temmuz 2013

Cihan YEŞİLDAĞ tarafından **Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL** ve **Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU** danışmanlığında hazırlanan “DBD Plazma Aktüatör ile Kare Kesitli Küt Cisim Etrafındaki Akış Kontrolünün İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Osman ÖZCAN, Muş Alparslan Üniversitesi 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL, Niğde Üniversitesi 

Üye : Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU, Niğde Üniversitesi 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fuat KARAKAYA, Niğde Üniversitesi 

Üye : Yrd. Doç. Dr. S. Okan KARA, Niğde Üniversitesi 

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../07/2013

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Cihan YEŞİLDAĞ

ÖZET

DBD PLAZMA AKTÜATÖR İLE KARE KESİTLİ KÜT CİSİM ETRAFINDAKİ AKIŞ KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ

YEŞİLDAĞ, Cihan
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Ana Bilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL
İkinci Danışman : Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Temmuz 2013, 79 sayfa

Bu yüksek lisans çalışmasında, kare model üzerine yerleştirilen plazma aktüatörün, akış ayrılması üzerine etkisi araştırılmıştır. Kare model üzerindeki plazma aktüatörün açık veya kapalı olduğu durumda, Reynolds sayılarının 3500 - 8500 aralığındaki, etkileri rüzgar tüneline incelenmiştir. Plazma aktüatörün, sinüzoidal sinyalin farklı modülasyonları ile uyarılmasının akış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Rüzgar tüneline içerisindeki, kare modele etki eden sürüklenme kuvveti yük hücresi yardımıyla ölçülmüş, kızgın tel probu ile iz bölgesinde hız ölçümleri alınmıştır. Plazma açık iken, sürüklenme kuvvetinin azaldığı ve iz bölgesinde oluşan girdap yapısının düzenli hale geldiği görülmüştür. Düşük Reynolds sayılarında, kare model etrafında plazma aktüatör kullanılması ile etkili bir akış kontrolü sağlanmıştır. Ayrıca çalışma döngüsü oranı ve uyarılma frekansı parametrelerinin akış üzerine etkileri de incelenmiştir. Ek olarak, duman-tel yöntemi kullanılarak, plazma aktüatörün akışa etkisi görsel hale dönüştürülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Kare prizma, kütle cisim, aerodinamik, akış kontrol, plazma aktüatör, çalışma döngüsü oranı, sürüklenme kuvveti, akış görüntüleme.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FLOW CONTROL AROUND SQUARE BLUFF BODY USING DBD PLASMA ACTUATOR

YESILDAG, Cihan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assistant Professor Dr. AKSAKAL, Hüsni

Co-Advisor : Associate Professor Dr. AKANSU, Yahya Erkan

July 2013, 79 pages

In this MSc-thesis, we are investigated on flow-separation effect of plasma actuator, which is replaced on square model. The effects of the plasma actuator on flow-separation is analyzed in the wind tunnel in case of the actuator, which is on/off, and Reynolds numbers which is defined between 3500 and 8500. The effect of plasma actuator on flow-separation, which is excited by different modulation of sinusoidal signal, is investigated. Drag force affecting on square model has been measured using force balance system and velocity has been measured with hot-wire probe in the wake region. When the actuator is on, it has been seen that the drag force decreases and the vortex in the wake region acts regularly. The effective flow control has been obtained around square model in the low Reynolds numbers by using plasma actuator. Furthermore, the influence of parameters of the duty cycle and excitation frequency on the flow is examined. Moreover flow affected by plasma actuators visualised by using smoke-wire method.

Keywords: Square prism, bluff body, aerodynamic, flow control, plasma actuators, duty cycle, drag force, flow visualization

ÖN SÖZ

Aktif akış kontrol yöntemlerinden biri olan plazma aktüatörler hiçbir hareketli parçasının bulunmaması ve basit geometrisi nedeniyle son yıllarda yapılan aerodinamik çalışmalarda karşımıza çıkmaktadır ve daha çok sayıda ki bilimsel araştırmaya konu oluşturmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında, plazma aktüatörlerin kare model üzerindeki akışa etkileri araştırılmıştır. İlk önce, DBD olarak oluşturulan plazma aktüatörlerin çeşitli çalışma parametreleri denenerek uygun çalışma aralıkları tespit edilmiştir. Daha sonra aktif akış kontrolü yapmak üzere plazma aktüatörün farklı elektriksel parametrelerinde ve farklı Reynolds sayılarında kare modelin sürüklenme kuvveti katsayısına etkisi araştırılmıştır. Düşük Reynolds sayılarında sürüklenme kuvvetinde önemli azalmalar elde edilmiştir. Özellikle, akış ayrılma noktası sabit olan kare modelde, plazma aktüatörün girdap oluşum bölgesinin yapısının değiştirilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Karşılaştığım her türlü zorluğu yenmek için desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü konuda görüşünü benimle paylaşarak bilimsel çalışma yöntemlerini öğretmekte ısrak tutan ve önerilerini esirgemeyen çok değerli danışman hocam Sayın **Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL**'a ve bu çalışmada bilimsel desteklerini üzerimden esirgemeyen değerli hocalarım Sayın **Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU** ve Sayın **Yrd. Doç. Dr. Fuat KARAKAYA**'ya bana verdikleri titiz bilimsel çalışma disiplini ve şevkenden dolayı teşekkürlerimi sunuyorum. Bu tezin hazırlanması esnasında yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım, **Arş. Gör. Aytaç ŞANLISOY**, **Arş. Gör. Hürrem AKBIYIK**, **Adem Arif GÜLER**, **Rafet GÜNAYDIN** ve **Tekmile AYDOĞDU**'ya teşekkür ederim.

Bütün yaşantım süresince maddi ve manevi desteklerini asla benden esirgemeyen çok değerli ailem, anneciğim **Gülay** ve babacığim **Cevdet YEŞİLDAĞ**'a, çok kıymetli hayat arkadaşım ve biricik eşim **Çiğdem YEŞİLDAĞ**'a bu tezi ithaf eder, bana göstermiş oldukları üstün sabır ve destekten dolayı minnet ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca, bursiyer olarak görev aldığım 110M056 numaralı proje kapsamında finansal destek sağlayan **TÜBİTAK**'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖN SÖZ	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SİMGE VE KISALTMALAR	x
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Plazmanın Sınıflandırılması	4
1.2 Plazmanın Özellikleri.....	5
1.2.1 Doğal plazma yapıları	6
1.3 Plazma Aktüatör ve Akış Kontrolü Üzerindeki Etkisi	8
1.4 Çalışmanın Bilimsel Amacı ve Önemi.....	16
BÖLÜM II.....	17
AKIŞ KONTROLÜ VE PLAZMA AKTÜATÖRÜN ÖZELLİKLERİ	17
2.1 Akış Kontrolündeki Temel Kavramlar.....	18
2.2 Akış Kontrol Yöntemleri.....	19
2.2.1 Pasif akış yöntemleri	20
2.2.2 Aktif akış yöntemleri.....	20
2.3 Plazma Aktüatör Tarafından Oluşturulan Cisim Kuvveti	21
2.4 Plazmanın Akışkanlık Özelliği	28
BÖLÜM III	34
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
3.1 Cihazlar ve Ekipmanlar.....	34
3.1.1 Rüzgar tüneli	34
3.1.2 Yüksek voltaj güç kaynağı	36
3.1.3 Elektriksel ölçüm cihazları.....	39
3.1.4 Test modeli.....	40
3.1.5 Ölçüm sistemleri	41
3.1.6 Laboratuvar güvenliği	46
BÖLÜM IV	48
BULGULAR VE TARTIŞMA	48

4.1 Tek Kare Model Etrafındaki Akış Karakteristiği.....	48
4.2 Plazma Aktüatörün Kare Model Sürüklemeye Kuvveti Üzerine Etkisi.....	48
4.2.1 Tam sürüm sinüzoidal sinyal durumu	49
4.2.2 Çalışma döngüsü oranlı sinüzoidal sinyal sürümü.....	51
4.3 Plazma Aktüatörün Kare Model İz Bölgesi Akış Karakteristikleri Üzerine Etkisi.....	54
BÖLÜM V	64
SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	66
EKLER.....	72
ÖZ GEÇMİŞ	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1 Gaz ile plazmanın fiziksel yapısı (Url-2).	2
Şekil 1. 2 Plazmayı oluşturan temel parçacıklar (Nehra, 2008).	3
Şekil 1. 3 Plazma aktüatörün yapısı (Akansu ve Karakaya, 2013).	9
Şekil 1. 4 NACA 0015 model uçak kanadı etrafındaki akışta plazma aktüatörün kapalı ve açık olduğu durumlardaki akış görüntüleri ve kaldırma kuvvetinin hücum açısı ile değişimi (Thomas, 2009).	12
Şekil 1. 5 (a) Dairesel silindir üzerindeki aktüatör konumları (b) Plazma kapalı iken akış görüntülemesi (c) Plazma açık iken akış görüntülemesi (Flint, 2008).	12
Şekil 2. 1 Elektrik alan içerisindeki parçacıkların hareket yönü.	23
Şekil 2. 2 Plazma aktüatörün elektrotlarının ayırdığı bölgeler.	27
Şekil 2. 3 Plazma aktüatör tarafından uygulanan cisim kuvvetinin yönü.	28
Şekil 2. 4 DBD plazma aktüatörün hava akışını ivmelendirmesi.	30
Şekil 3. 1 $V_p=8$ kV, $f_p=3.5$ kHz ve sinüsoidal tam sürüm durumunda sinyal yapısı.	38
Şekil 3. 2 $V_p=8$ kV, $f_p=3.5$ kHz ve $f_e=8.9$ Hz frekansında iken çalışma döngüsü oranı yüzdesinin sinyal yapısındaki etkisi.	38
Şekil 3. 3 $V_p=8$ kV, $f_p=3.5$ kHz ve $f_e=70$ Hz frekansında iken çalışma döngüsü oranının sinyal yapısına etkisi.	39
Şekil 4. 1 $Re=4752$ iken RF 3.5 kHz'de sürükleme (Drag) kuvveti katsayısının voltaj ile değişimi.	49
Şekil 4. 2 Farklı Reynolds numaraları için RF frekansı 3.5 kHz'de sürükleme kuvveti katsayısının voltaj ile değişimi.	50
Şekil 4. 3 Farklı Reynolds numaraları için Voltaj 7.2 kV _{pp} 'de sürükleme kuvveti katsayısının RF frekansı ile değişimi.	51
Şekil 4. 4 $Re=6049$ ve uyarılma frekansı $f_e=70$ Hz iken sürükleme kuvveti katsayısının çalışma döngüsü oranına göre değişimi.	52
Şekil 4. 5 $Re=6049$ ve uyarılma frekansı $f_e=8.9$ Hz iken sürükleme kuvveti katsayısının çalışma döngüsü oranına göre değişimi.	53
Şekil 4. 6 $Re=6049$ iken ve %10 çalışma döngüsü oranı durumunda, sürükleme kuvveti katsayısının uyarılma frekansına göre değişimi.	53

Şekil 4. 7 $f_p=3.5$ kHz, $V_p=8$ kV _{pp} ve sinüzoidal tam sürüm olması durumunda hız profiline Reynolds sayılarına göre değişimi.....	55
Şekil 4. 8 $Re=6049$, $U=2.8$ m/s, $f_p=3.5$ kHz sinüzoidal tam sürüm olması durumunda hız profiline farklı voltaj değerlerindeki profili.....	56
Şekil 4. 9 $Re=6049$ ($U=2.8$ m/s), $V_p=7.2$ kV sinüzoidal tam sürüm olması durumunda farklı frekans değerlerindeki hız profili.....	56
Şekil 4. 10 Güç spektrumunun frekansa bağlı değişimi.....	57
Şekil 4. 11 Plazma kapalı iken güç spektrumunun frekansa bağlı değişimi.....	58
Şekil 4. 12 Plazma açık iken güç spektrumunun frekansa bağlı değişimi.....	58
Şekil 4. 13 Farklı uyarım frekanslarında güç spektrumunun frekansla değişimi.....	59
Şekil 4. 14 $Re=6049$ ($U=2.8$ m/s), $f_p=3.5$ kHz, $V_p=8.0$ kV _{pp} , sinüzoidal %10 çalışma döngüsü oranı sürümünde, Strouhal sayısının uyarılma frekansına göre değişimi. 60	60
Şekil 4. 15 $Re=6049$ ($U=2.8$ m/s), $f_p=3.5$ kHz, $V_p=8.0$ kV _{pp} , uyarılma frekansı $f_e=70$ Hz ve $f_e=8.9$ Hz değerleri için Strouhal sayısının çalışma döngüsü oranına göre değişimi.....	61

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3. 1 Rüzgar tünelinin genel görünümü.....	35
Fotoğraf 3. 2 Trek Model 20/20C yüksek voltaj kaynağı.....	36
Fotoğraf 3. 3 Yüksek voltaj kaynağı sürücü programı ara yüzü.....	37
Fotoğraf 3. 4 (a) Yüksek akım probu, (b) Yüksek voltaj probu, (c) Osiloskop.....	39
Fotoğraf 3. 5 (a) ATI yük hücresi programının ara yüzü, (b) Kuvvet-moment ölçüm sisteminin kare test modeline düşey bağlantılı görünümü.....	42
Fotoğraf 3. 6 İki boyutlu hareket (Traverse) mekanizması.....	43
Fotoğraf 3. 7 Dinamik basıncın ölçümünde kullanılan (a) Mikromanometre, (b) Pitot tüpü.....	45
Fotoğraf 3. 8 (a) Rüzgar tüneli test bölgesinin altına yerleştirilen ozon metre, (b) Ölçüm alınan bölgeye yakın yerleştirilen ozon metre (Akansu ve Karakaya, 2013).	46
Fotoğraf 4. 1 Plazma kapalı ve tam sürüm durumunda farklı voltaj sinyalleri sürümünde akış görüntülemesi.	62
Fotoğraf 4. 2 Plazma kapalı, $V_p= 8.0 \text{ kV}_{pp}$, $f_p=3.5 \text{ kHz}$ tam sürüm ve çalışma döngüsü oranı %10 durumunda iken akış görüntülemesi.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1 Plazmanın sınıflandırılması (Nehra, 2008).....	4
---	---

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Γ	Yüklü parçacık akısı
μ_e	Mobilite terimi
D_e	Difüzyon terimi
T_e	Elektron sıcaklığı
T_g	Gaz sıcaklığı
T_i	İyon sıcaklığı
T_p	Plazma sıcaklığı
Z_k	Pozitif iyonların yükü
f_s	Etkin girdap kopma frekansı
n_e	Elektron yoğunluğu
\bar{U}	Ortalama hız
u_t	Çalkantı hızı
ϵ_0	Serbest uzayın elektrik geçirgenliği
λ_D	Debye uzunluğu
μ_0	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
ν_{ef}	Elektron çarpışma frekansı
ρ_c	Yük yoğunluğu
B	Manyetik alan
C_D	Sürüklenme kuvveti katsayısı
D	Deplasman vektörü
E	Elektrik alan
F_D	Sürüklenme kuvveti
j	Akım yoğunluğu
k_B	Boltzmann sabiti
\emptyset	Elektriksel potansiyel
Re	Reynolds sayısı
S	Kaynak terimi

St	Strouhal numarası
T	Sıcaklık
U	Anlık hız
U_0	Serbest akış hızı
μ	Dinamik viskozite
ν	Kinematik viskozite
P	Akışkanın basıncı
f	Frekans
g	Yerçekimi ivmesi
u	Akışkanın hızı
Λ	Plazma parametresi

Kısaltmalar

Açıklama

AC	Alternatif Akım
DBD	Dielectric Barrier Discharge (Dielektrik Bariyer Yük Boşaltımı)
DC	Doğru Akım
EHD	Elektrohidrodinamik
MHD	Manyetohidrodinamik
OAUGDP	One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (Atmosferik Düzgün Parıltılı Yük Boşaltımlı Plazma)
PIV	Particule Image Velocimetry (Parçacık görüntülemeli hız ölçüm cihazı)
RF	Radyo Frekansı

BÖLÜM I

GİRİŞ

Akışkanları ustalıkla kullanabilme ve kontrol edebilme teknolojiye çok sayıda yarar sağlamaktadır. Son yıllarda, akış kontrolü, teorik ve deneysel akışkanlar dinamiğini kapsayan disiplinler arası (akustik, kontrol teorisi, fizik, kimya, biyoloji ve matematik v.b.) araştırma faaliyetlerini oluşturmaktadır.

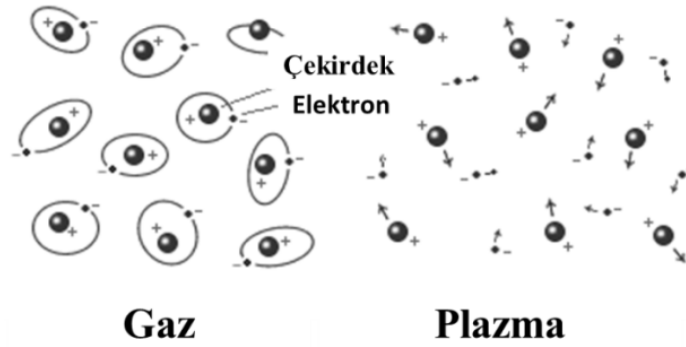
Akış kontrol teknolojilerinde elde edilen gelişmeler ve yenilikler havacılık ve uzay mühendisliğinde (sivil ve askeri havacılık araçlarının aerodinamik tasarımında), jet motorlarının giriş kısmında, egzoz sistemlerinde, jet motorlarının ve roketlerin akustik yapısında, jet motorlarının gürültülerinin azaltılmasında, fırlatma cihazlarında ve silah yuvalarında büyük ölçüde kullanılmaktadır. Akış kontrol yöntemleri, akış yapılarını değiştirerek kayma tabakalarının ve akış ayrılmasının kontrolünü sağlayabilmektedir. Alternatif enerji teknolojileri alanında, rüzgar türbün kanatları üzerindeki akış kontrolü gibi sistemlerin daha yüksek verimlilikte çalışması, enerji üretiminde fosil yakıtların tüketiminin azalmasını sağlayarak çevreye verdikleri zararları da önemli ölçüde hafifletmektedir.

Akış kontrol yöntemi için akış kontrolü sağlanacak sisteme enerji uygulanıyorsa bu yöntem aktif akış kontrol yöntemi olurken, enerji verilmeden akış kontrolü sağlanırsa bu yöntem ise pasif akış kontrol sistemi olmaktadır. Bu çalışmada, aktif akış kontrol yöntemi incelenmiştir.

Herhangi bir hareketli parça olmaksızın elektriksel olarak akış kontrolünün sağlanmasında iki yöntem vardır. Bunlardan biri manyetohidrodinamik (MHD) (magnetohydrodynamic) diğeri ise elektrohidrodinamiktir (electrohydrodynamic). Manyetohidrodinamik, temel olarak elektriksel iletken akışların manyetik alan içindeki davranışını incelerken, elektrohidrodinamik ise elektriksel olarak yüklenmiş akışkanların ya da parçacıkların elektrik alanı altındaki davranışlarıyla ilgilenir. Bu çalışmada, yapılacak olan tüm işlem ve deneyler elektrohidrodinamik (EHD) yöntemleri içerisinde ele alınacaktır.

Plazma aktüatör kullanılarak akışa bir indükleme etkisi verilerek akış yapısı kontrol edilebilmektedir. Bu yöntemle akış kontrolünü daha anlaşılır hale getirmek için plazmanın tanımından ve fiziksel özelliklerinden bahsetmemiz gerekmektedir. Plazma, fizik ve kimyada "iyonize olmuş gaz" anlamına gelmektedir. İyonize gaz için kullanılan plazma kelimesi 1920'li yıllardan beri fizik literatüründe yer almaya başlamıştır. Kendine özgü niteliklere sahip olduğundan, plazma hali maddenin katı, sıvı ve gaz halinden ayrı olarak incelenmektedir (Url-1).

Teknik anlamda plazma, pozitif ve negatif yüklerin toplam miktarları eşit olmasına karşın, elektriksel nötrlüğünü koruyabilen düşük yoğunluklu bir gazdır. Başka bir tanımlama ise eşit sayıda pozitif yüklü iyon ve elektron içeren gazların birtakım özelliklerine sahip fakat gazlardan farklı olarak iyi bir elektriksel iletkenliğe sahip olan ayrıca elektrik alandan ve manyetik alandan etkilenen, elektriksel yüklü parçacıklar bütünüdür. Plazmanın iyonları ve elektronları serbest şekilde hareket ederler ve aynı zamanda birbirleriyle de sürekli etkileşim halindedirler (Url-2). Şekil 1.1'de gaz ve plazma arasında ki fark görülmektedir.

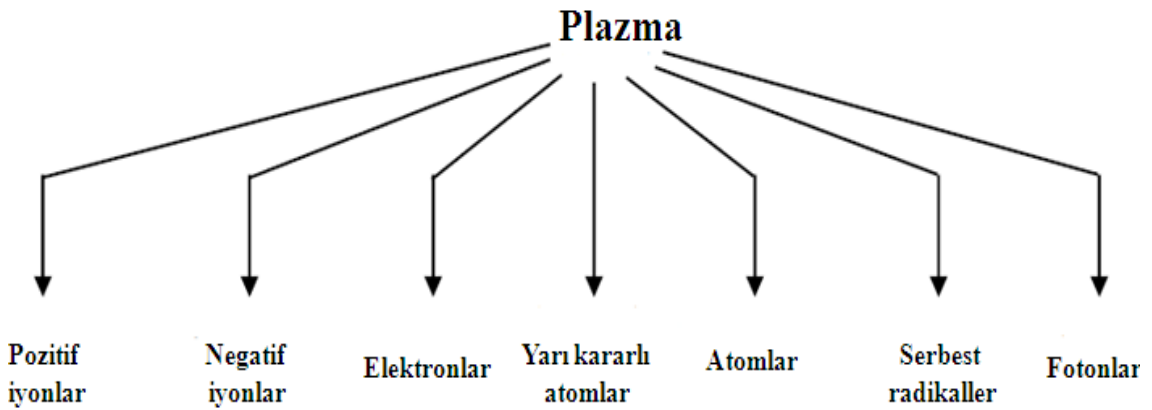


Şekil 1. 1 Gaz ile plazmanın fiziksel yapısı (Url-2).

Bunun yanında plazma kelimesi ilk olarak tıp bilimcisi Johannes Purkinje (1787-1869) tarafından akyuvar ve alyuvarlardan temizlenmiş kan için kullanılmıştır, 1879 yılında Sir William Crookes tarafından ilk defa "maddenin dördüncü hali" olarak tanımlanmıştır. Aynı terim 1927'de Amerikalı fizik ve kimya uzmanı olan Dr. Irving Langmuir (1881-1957) tarafından iyonlaşmış gazlar içinde kullanılmaya başlanmıştır (Avcı, 2006). Langmuir iyonlaşmış gazlara dayanan elektronik aletler üzerine

çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar sırasında iyonlaşmış gazların yüksek hızlardaki elektron iyon ve diğer katkıları taşıma şeklini gözlemlemiştir. Bunun kan plazmasının akyuvar ve alyuvarlarla mikropları taşıma şekline benzediğini fark ederek iyonlaşmış gazları plazma olarak adlandırmıştır. Bu bakımdan, düşük sıcaklıklardan başlayarak katı maddeye ısı verildikçe madde katı halden sıvı hale, ısı verilmeye devam edildikçe madde sıvı halden gaz haline, ısı verilmeye devam edildiğinde artık madde plazma haline yani atomlar birden elektronlara ve pozitif yüklü iyon haline dönüşürler. Böylece maddenin dördüncü hali olan plazma oluşmuş olur. Fakat bu yolu kullanarak plazma elde etmek birtakım sorunları da beraberinde getirir. İçerisinde gaz bulunan bir kaba ısı vererek plazma elde etmek sanıldığı gibi basit bir işlem değildir. Çünkü kabın her tarafı yeteri kadar ısıtılsa da bu ısı, kabın içerisindeki gazı iyonlaştırmaya yani plazma haline çevirmeye yetebilecek kadar fazla olmayabilir ve hatta gazın bulunduğu kap da eriyebilir. Belli bir miktarda gaz kontrollü olarak ısıtıldıktan sonra üzerine yüksek potansiyel fark uygulanarak elektrik akımı geçmesi sağlanmasıyla ya da radyo dalgalarına maruz bırakılmasıyla da plazma elde edilebilir (Avcı, 2006).

Plazma, pozitif ve negatif yüklü iyonlar, elektronlar, gaz atomları, yarı-kararlı atomlar, serbest radikaller, yüksek enerji seviyesine uyarılmış moleküller gibi çeşitli maddelerin çok geniş sıcaklık ve basınç altında kalmaları durumunda oluşmaktadır ve evrenin %99'u plazma yapısındadır (Nehra, 2008). Plazmayı oluşturan temel parçacıklar Şekil 1.2'de görülmektedir.



Şekil 1. 2 Plazmayı oluşturan temel parçacıklar (Nehra, 2008).

1.1 Plazmanın Sınıflandırılması

Genel olarak plazmalar, yüksek sıcaklık (füzyon) plazması ve düşük sıcaklık (gaz) plazması olarak iki grupta incelenebilirler. Düşük sıcaklık (gaz) plazması ise kendi içerisinde iki dala ayrılabilir. Bunlardan birincisi termal (yarı-kararlı) plazma, diğeri ise soğuk (kararsız) plazmadır (Aksakal, 2011). Plazmaların sınıflandırılması plazma parametreleri ve çeşitli örnekleri Tablo 1.1’de verilmiştir. Burada T_e , elektron sıcaklığı, T_i , iyon sıcaklığı, T_g , gaz sıcaklığı, T_p , plazma sıcaklığı ve n_e , elektron yoğunluğudur.

Çizelge 1. 1 Plazmanın sınıflandırılması (Nehra, 2008).

Plazma	Fiziksel Durumu	Örnek
Yüksek sıcaklık plazması (kararlı plazma)	$T_e \approx T_i \approx T_g, T_p = 10^6 - 10^8 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Lazer (LASER) füzyon plazması
Düşük sıcaklık plazması		
Termal plazma (yarı-kararlı plazma)	$T_e \approx T_i \approx T_g \leq 2 \times 10^4 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Ark (arc discharge) plazması, meşale (torch) plazması, RF tarafından indüklenmiş deşarj çiftlenimi
Soğuk plazma (termal olmayan, kararsız plazma)	$T_e \gg T_i \approx T_g = 300 - 10^3 K$ $n_e \approx 10^{10} m^{-3}$	Parıltı (Glow) deşarjı, Elektrik deşarjı (Corona), Plazma aktüatör (DBD), Atmosferik düzgün parıltılı yük boşaltımlı plazma (OAugDP), Plazma iğnesi (plasma needle)

Termal plazmalarda elektronlar, iyonlar ve nötr parçacıklar arasında bir denge durumu ya da denge durumuna yakın bir eşitlikle karakterize edilirler. Yaygın olarak kullanılan termal plazma üreten kaynaklar; plazma meşalesi (plasma torch) cihazlarıdır. Bu cihazlar yüksek bir ısı akısı elde etmemizi sağlarlar. Malzeme işleme ve atık maddelerin dezenfektasyonunda ağırlıklı olarak kullanılırlar.

Düşük sıcaklık plazması ise, gaz üzerine elektrik alan ya da manyetik alan uygulanarak oluşturulurlar. Oluşan plazma iyonları ve nötr parçacıklar oda sıcaklığında ya da oda sıcaklığına yakın bölgede kalmaktadır. Isıya duyarlı malzemelerin dezenfektasyonunda ve akış kontrolünde kullanılmaktadırlar (Nehra, 2008).

Gazın iyonlaşma oranına göre iki tür plazma vardır (Yeniçay, 1970).

- Tam ya da yarı iyonlaşmış plazmalar: Döteryum ve Trityum gibi hafif çekirdeklerin Helyum çekirdekleri vermek üzere kaynaştıkları, termonükleer sıcaklıkta karşılaşılan bu tür plazmalarda sıcaklık bir kaç milyon derecedir. Yıldızlar ve güneş buna örnektir.
- Kısmi iyonlaşmış plazmalar: İyonlaşma oranı ancak %10'u bazen aşan plazmalardır. Sıcaklıkları, oda sıcaklığından 10000 dereceye kadar çıkabilen plazmalardır. Kısmi iyonlaşmış plazmalar sanayide kullanılır. Gazlar yalıtkan olmalarına rağmen plazma iletkenidir. Buda sanayi için çok önemlidir. Sanayide kullanılan plazma şu şekilde elde edilir;

- i) Elektrik alan metodu: Elektrotları doğru akımla beslenen bir sistem ve bu elektrotlar arasında oluşturulan sürekli bir elektrik alandan, yüksek basınç altında geçirilen bir gaz, plazma haline dönüştürülür. Elektrotları, RF alanıyla beslenen ve arasına dielektrik malzeme konularak oluşturulan sistem çevresindeki gazları plazma haline dönüştürür.

- ii) Yüksek frekans plazması: Çok yüksek frekanslı elektrik akımı ile elde edilir. Plazma oluşturulması istenen gaz, çok şiddetli gerilim kaynağı ile beslenen bir bobinin sarımları arasından geçirilir ve gaz plazma haline dönüştürülür.

1.2 Plazmanın Özellikleri

- Plazma dış ortama karşı elektriksel olarak nötrdür. Yani plazma içerisindeki pozitif yüklerin (iyonların) sayısı, negatif yüklerin (elektronların ve iyonların) sayısına eşittir.
- Plazma içerisindeki ayrışma, iyonizasyon ve bu olayların tersi olan birleşme olayları sürekli olarak meydana gelir. Adı geçen bu olaylar kendi aralarında plazma içerisinde bir dinamik denge halinde bulunurlar.
- Plazma iyi bir elektrik ve ısı iletkenidir. Plazma içerisindeki parçacıklar bir enerji taşıyıcısıdır. Dolayısıyla elektrik ve ısı enerjisini de iletirler (taşınırlar). Plazma içerisindeki hızlarının yüksek oluşu nedeniyle özellikle elektronlar elektrik ve ısı iletiminde esas rolü oynarlar.

- Plazma yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Plazmanın sıcaklığı, enerji yoğunluğu, iyonizasyon derecesi (iyonize olmuş atom sayısının toplam atom sayısına oranı) ve plazma çıkış hızı (elektron hızı) plazma ekseninde maksimumdur.

Plazmalar elektriksel olarak yüklü parçacıklardan oluştuklarından, elektrik ve manyetik alanlardan etkilenmektedir. Plazmaya elektrik ve manyetik alan uygulandığında plazmada bir takım değişikliklere sebep olabilir. Plazma içerisindeki parçacıklara

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (1.1)$$

Lorentz kuvveti etki eder.

Her iyonlaşmış nötr gaz kümesine plazma diyemeyiz bu nedenle incelediğimiz plazmaya ait parametreleri şu şekilde sınıflandırabiliriz;

- Plazma Sıcaklığı ya da Elektron sıcaklığı.
- Plazma Yoğunluğu
- İyonizasyon Derecesi
- Debye Uzunluğu
- Plazma Frekansı

yukarıdaki parametreleri kapsayan iyonlaşmış gaz kümesi plazma olarak ele alınabilir (Brodin, 2012).

1.2.1 Doğal plazma yapıları

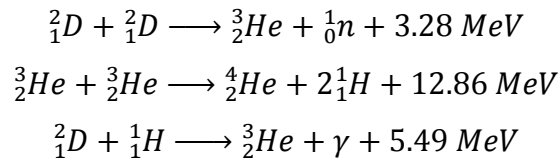
İyonosfer

Dünya üzerindeki görülen doğal plazma yapı atmosferin iyonosfer tabakasıdır. Yerden hava koşullarına bağlı olarak 50-80 km yukarisından başlar, üst sınırı kesin olarak bilinmemekle beraber He^+ ve H^+ gibi hafif iyonların O^+ iyonu gibi ağır iyonlara göre atmosfere hakim oldukları yükseklik olarak kabul edilmektedir. Bu da yaklaşık 500-900 km arası değişir. Burada elektronlar, güneşten gelen kısa dalgaboyuna (ultraviyolede)

X-ışınlarına kadar olan aralıktaki) sahip ışınların etkisiyle atomlardan ayrılırlar (Aksakal, 2000). Atmosferin yere yakın bölgelerinde kozmik ışınların etkisiyle aynı elektron kopuşları meydana gelse de bu bölgede atmosfer daha yoğun olduğundan, kopan elektron hemen birleşir. Atmosfer yukarılara çıkıldıkça seyrekleştiği için iyonosferde kopan elektronun tekrar birleşme ihtimali daha düşüktür. Dolayısıyla, serbest elektronlardan ve iyonlardan oluşan bir bölge meydana gelir. İyonosferin üst kısımları magnetosferde katılarak uzayın derinliklerine kadar uzanır.

Güneş

Evrende görülen doğal plazma yapı güneş ve tüm yıldızlardır. Güneşten gelen ışığın yapılan spektroskopik incelenmesi sonucunda yapısında bol miktarda Helyum bulunduğu sonucuna varılmıştır. Güneş enerjisinin kaynağı nükleer füzyon ve füzyon reaksiyonlarıdır. Füzyon reaksiyonuna giren çekirdeklerin serbest haldeki durgun kütlelerin toplamı, reaksiyon sonucu oluşan çekirdeğin külesinden daha büyüktür. Aradaki kayıp kütle, açığa çıkan nükleer füzyon enerjisine eşdeğerdir. Bu olay sırasında çekirdek kütlelerinin bir kısmı enerjiye dönüşür. Nükleer füzyonda Hidrojen ve Helyum 15-20 milyon Kelvin gibi çok yüksek sıcaklıklarda kaynaşarak çok büyük enerji meydana getirirler. Güneşin merkezinde meydana gelen bu reaksiyonlar;



denklemleri ile ifade edilmektedir (Url-3; Yeniçay,1970).

Yukarıda verilen denklemleri verilen reaksiyonlar sonunda, güneş çekirdeğinde $20 \cdot 10^6 \text{ Kelvin}$ mertebesinde bir sıcaklık meydana gelir. Bu sıcaklıktaki maddeleri, oluşturan atom ve moleküller tanecik yapısında kalamaz. Elektronlarını salan atomlar iyon haline dönüşürler ve ortamda doğal bir şekilde plazma oluşur. 616 Milyon ton H atomu, Güneş'te 1saniyede 612 Milyon ton He dönüşür. 4 Milyon tonluk kütle farkı ise $E = 0,007mc^2$ eşitliğine göre enerjiye dönüşerek ısı radyasyonu şeklinde uzayın derinliklerine yayılır. Güneş çekirdeğinden çıkan ısı radyasyonu, güneş yüzeyine yakın bölgelerde bulunan H iyonları tarafından soğurulur. Oluşan bu ısı radyasyonunu

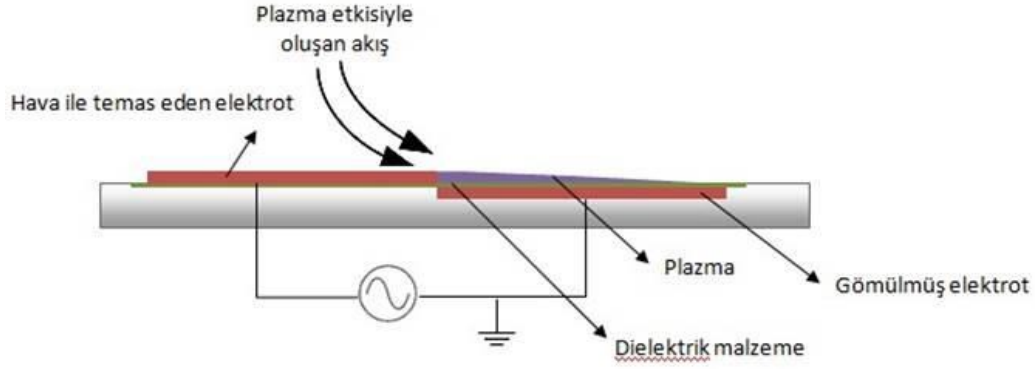
soğurarak parlak, beyazımsı olarak görünen Güneş'in katmanına fotosfer denir. Fotosfer tabakası da 6000 *Kelvin* sıcaklıkta devamlı elektromanyetik radyasyon yayar. Elektromanyetik dalgalar dünyaya 8 dakika 18 saniyede ulaşır (Url-3).

1.3 Plazma Aktüatör ve Akış Kontrolü Üzerindeki Etkisi

Bizi ilgilendiren temel kavram akış kontrolüdür. Bir akış alanında ilgilendiğimiz bir bölgenin karakterini veya şeklini uygun bir biçimde değiştirme girişimine akış kontrolü denilmektedir. Genellikle sürüklenme kuvvetinin azaltılması, kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesi, akış sebepli gürültünün önlenmesi için akış kontrol yöntemlerini kullanırız. Akışı etkileyen yüzey parametreleri pürüzlülük, geometrik şekil, kavislenme, rijit-duvar hareketi, sıcaklık ve gözenekliliktir. Yüzeyin soğutulması veya ısıtılması, yüzeye yakın yerlerdeki viskozite ve yoğunluk gradyanlarında değişikliğe yol açarak akışa etki edebilir. MHD ve EHD akış kontrolü için kullanılan yöntemlerdendir (Gad-El-Hak, 1998). Özellikle sınır tabaka üzerindeki akış yapısının çeşitli metotlarla düzenlenmesi sonucunda sürüklenme kuvvetinde, akış kaynaklı titreşim ve gürültüde önemli derecede azalmalar sağlanabilmektedir.

Elektrohidrodinamik cisim kuvvetleri aynı zamanda durgun haldeki akışı belirli bir hıza kadar ivmelendirebilmektedirler. Artan bir araştırma alanı olarak son yıllarda incelenen elektrohidrodinamik akış kontrolü yöntemi, insansız hava aracı geliştirmesinde bulunan araştırmacılar için de yeni bir yöntem olmuştur. Düşük Reynolds sayılarındaki akışlarda uçak kanadı üzerindeki tutunma kaybının daha yüksek hücum açılarında taşınmasını ve kaldırma kuvvetinde önemli bir artışı sağlayabilmektedir.

Plazma aktüatör; iki elektrot ve bu elektrotlar arasına yerleştirilmiş dielektrik malzemedir oluşmuştur. Bu elektrotlardan açık olana, yani havayla direk temas eden elektrota yüksek potansiyel uygulanırken, gömülü elektrot yani dielektrik malzeme ile kaplı olan ise topraklanmıştır. Yeterince büyük genliğe sahip RF voltajı elektrotlara uyguladığında hava iyonlaşır ve plazma deşarj bölgesi elde edilir. Plazma aktüatör hava akışının ivmelenmesine neden olarak akışın yüzey üzerine yapışmasını sağlar. Bu sayede de kontrollü bir akış elde etmemize yardımcı olmaktadır. Şekil 1.3'de plazma aktüatörün yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. 3 Plazma aktüatörün yapısı (Akansu ve Karakaya, 2013).

Stanford üniversitesi, fizik bölümünde, Chirayath, Alanson danışmanlığında (Chirayath, 2012) elektrodinamik akış hareketlendirme ünitesini aktif hale getirebilecek sistem parçalarını yeteri kadar küçük ve hafif hale getirilerek, aynı zamanda da yeterli bir hareketlendirme hızı vererek, model uçak üzerine plazma aktüatörler yerleştirerek ilk kez plazma kontrollü uçuş gerçekleştirmişlerdir.

Literatürde elektrohidrokinematik cisim kuvvetlerin akış kontrolüne etkisinin incelendiği birçok yayın mevcuttur. Roth vd. (1998), atmosferik düzgün parıltılı yük boşaltımlı plazma (OAUGDP) kullanarak düşük hızlı bir rüzgar tüneli içerisinde sınır tabaka üzerinde akış kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada bakır elektrotları farklı geometrik dizilimlerle, dielektrik levha üzerine yerleştirerek plazmanın akışa etkisini incelemişlerdir. Laminar akış, geçiş akışı ve türbülanslı akış durumu için akış kontrolünü sağlamak amacıyla deneysel olarak elde edilen verileri grafik olarak sunmuşlardır. Paraelektrik, radyo frekanslı sistemin sınır tabaka kalınlığını etkilediğini açıklamış ve duman tel metodu yöntemiyle görsel olarak da bunu sergilemişlerdir. Yine Roth vd. (2003), atmosferik düzgün parıltılı yük boşaltımlı plazma (OAUGDP) kullanarak uçak kanadı üzerine etkiyen serbest akışa paraelektrik etkileri kullanarak akış kontrolünü sağlamayı denemişlerdir. Değişen hücum açlarına sahip uçak kanadı üzerinden geçen serbest akışı yönlendirerek kanat yüzeyine yapışarak geçmesini sağlamışlar ve oluşan akış karakteristiğini incelemişlerdir. Aynı çalışmada bir levha üzerine peristaltik akış hareketlendirici sistemi kurarak değişen voltaj ile durgun havaya ne kadarlık bir hız kazandırılabilceğini deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun sonucunda ise durgun havanın hızını 6 m/s kadar hızlandırmayı başarmışlardır.

Chun ve Hyun (2003), dairesel silindir etrafına yerleştirdikleri belirli mesafeye ve açıya sahip elektrotlardan silindire doğru iyon rüzgarı oluşturarak bunun akışı kontrolü üzerine etkisini incelemişlerdir. $4 \times 10^3 \leq Re \leq 8 \times 10^3$ olan deneysel çalışmalarını duman tel metodu yöntemiyle görselleştirmişlerdir.

Leger vd. (2001), düz bir levha ucuna tel elektrot, levha üzerine plaka elektrot ve bu plakalar arasında DC korona boşaltımıyla oluşturulan iyon rüzgarının akış kontrolü üzerine etkisini araştırmışlardır. Rüzgar tüneli içerisinde gerçekleştirmiş oldukları deneylerinde duman göndererek ve parçacık görüntülemeli hız ölçüm cihazı (Particle Image Velocimetry, PIV) kullanarak levha çevresinde oluşan akım çizgilerini yani bir nevi hız vektörlerini bu yöntemlerle görsel hale getirmişlerdir. alışmaları sonucunda düşük Reynolds sayıları için, DC korona boşaltımının sınır tabaka üzerinde büyük etkileri olduğunu ve akışın iz bölgesini daralttığı için sürüklenme kuvvetini düşürdüğünü bulmuşlardır.

Boeuf vd. (2007), hareketlendirici olarak yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj plazmayı (DBD) incelemişlerdir. alışmaları sonucunda gaz molekülleri üzerinde yük boşaltımıyla uygulanan elektrohidrokinamik kuvvetlerden sorumlu temel mekanizmanın nasıl oluştuğunu araştırmışlardır. Plazma dinamiğini tanımlamak için iki boyutlu DBD modeli kullanmışlardır. Elektrohidrokinamik kuvvetleri ile ilişkili temel fiziği anlamak üzere basitleştirilmiş modeller kullanarak oluşan kuvvetin sayısal analizini belirlemek için birtakım bilgiler vermişlerdir.

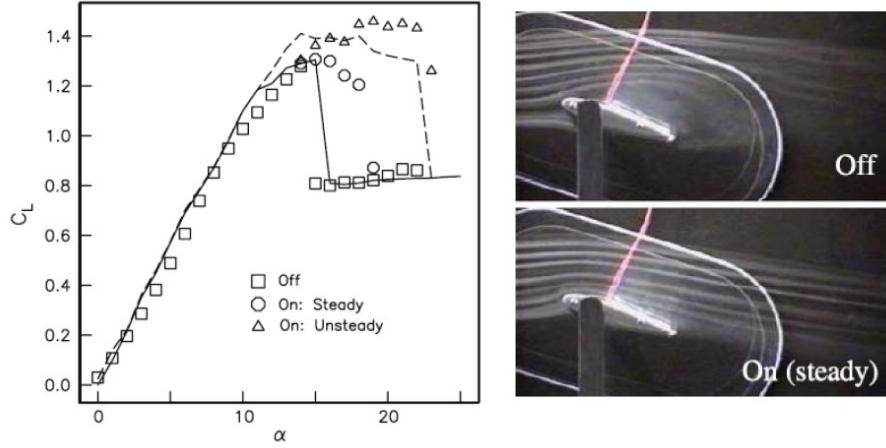
Starikovskii vd. (2009), DBD plazma aktüatöre uygulanan giriş voltajı nanosaniyelik atmalar halinde uygulamış ve aktüatörün akış üzerine etkisini incelemiştir. Nanosaniyelik atmalar halinde voltaj uygulanan aktüatörün oluşturduğu akış mekanizması fiziksel olarak açıklanmıştır. Yapılan ölçümlerde plazma deşarj bölgesinde uygulanan giriş enerjisinin atmalar halinde verilmesinden dolayı ani ve aşırı şekilde sıcaklık artışı olduğu gözlemlenmiştir. Uygulanan periyodik atmaların girdap akımı hareketini uyardığı ve ana akımın momentumunun yüzeyde eşit şekilde dağılarak uygulanmasının sağlandığı gösterilmiştir.

Thomas vd. (2008), tek bariyerli DBD (Single DBD) plazma aktüatörün etkilerini incelemiştir. Akış ayrılmalarını ve kararsız girdap akımlarını kontrol etmek amacıyla

dairesel silindir bir model üzerine aktüatör yerleştirilerek deney sonuçları gözlemlenmiştir. Kararlı ve kararsız DBD aktüatörler kullanılarak türbülanslı akışta önemli ölçüde azalmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca ses basıncı seviyesinde önemli ölçüde düşüşler gözlemlenmiştir.

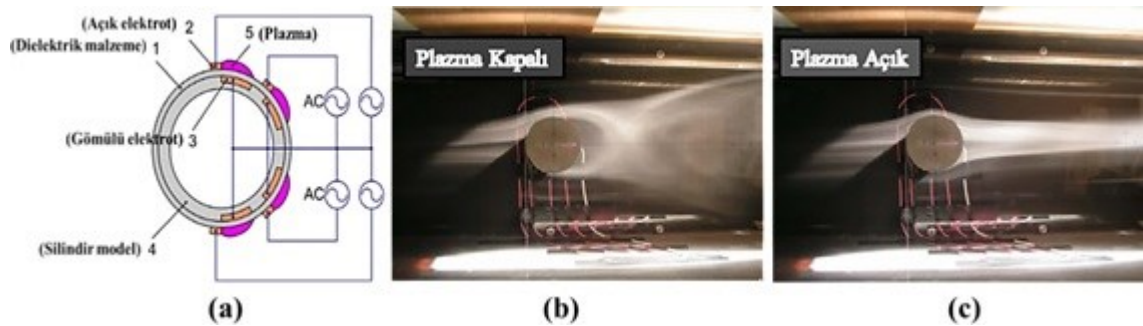
Güleç vd. (2011), DBD plazma aktüatörün optik karakteristiğini incelemek ICCD fotoğraflama ve optik yayım spektroskopisi yöntemi (Optical Emission Spectroscopy) ölçüm metodu olarak kullanılmıştır. 1 kHz frekanslı üçgen biçimli yüksek voltaj uygulayarak tel-plaka elektrot kombinasyonları deneyerek oluşturulan yüzey deşarjlı DBD plazma aktüatörün optik karakteristiği incelenmiştir. Güç uygulanmış tel elektrottan alttaki topraklanmış düzlemsel elektroda ark şeklinde deşarjın olduğu ilk kez gözlemlenmiştir. Plazmayı oluşturan nitrojen moleküllerinin ikinci ve birinci pozitif uyarım bant çizgileri ve deşarj sıcaklığı hem deneysel hem de teorik hesaplamalarla eşleştirilmiştir. Elektron sıcaklığı 6800 ± 400 K olarak SPECAIR bilgisayar programıyla bulunmuştur.

Thomas vd. (2009), plazma aktüatörde kullanılan dielektrik materyalin cinsi ve kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Uygulanan voltajın genlik ve frekansını, voltajın dalga formunu, açık elektrotun geometrisini, kapalı elektrotun genişliğini ayrıca elektrot diziliminin etkilerini incelemişlerdir. Quartz, teflon, delrin (polyoxymethylene), ve macor seramik dielektrik materyal olarak kullanılarak farklı kalınlıktaki malzemelerin etkileri incelemişlerdir. Yüksek elektriksel dayanım için düşük elektrik sabiti ve dielektrik materyalin kalınlığının artırılması sonucunun çıkarılacağını göstermişlerdir. Kapton'a kıyasla Quartz'ın cisim kuvvetini artırıcı etkisini göstermişlerdir. Cisim kuvvetinin, uygulanan voltajla artırılıp, frekansın azaltılması ile lineer olarak artacağını da ifade etmişlerdir. özellikle plazma aktüatörünün daha önce uygulanması mümkün olmayan yüksek Reynolds sayılarında da akış kontrolünün sağlanmasına çalışmışlardır. Bu çalışmada, NACA 0015 model uçak kanadı etrafındaki akışta plazma aktüatörün kapalı ve açık olduğu durumlardaki akış görüntüleri ve kaldırma kuvvetinin hücum açısı ile değişimi incelenmiştir. Şekil 1.4'de uçak kanadı üzerine yerleştirilmiş aktüatörler ve kanada etki eden kaldırma kuvvetinin hücum açısına bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 1. 4 NACA 0015 model uçak kanadı etrafındaki akışta plazma aktüatörün kapalı ve açık olduğu durumlardaki akış görüntüleri ve kaldırma kuvvetinin hücum açısı ile değişimi (Thomas, 2009).

Flint vd. (2008), küt cisim olarak dairesel silindir model ve tek bariyerli DBD (Single DBD) plazma aktüatör kullanmışlardır. Akış ayrılmalarını ve kararsız girdap akımlarını kontrol etmek amacıyla dairesel silindir bir model üzerine aktüatör yerleştirilerek deney sonuçlarını incelemişlerdir. Kararlı (steady) ve kararsız (unsteady) sinyaller DBD aktüatörlere sürülerek türbülanslı akışta önemli ölçüde azalmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, ses basıncı seviyesinde önemli ölçüde düşüşler gözlemlenmiştir. Şekil 1.5 (a)'da dairesel silindir ve üzerine yerleştirilmiş aktüatörler (b)'de plazma kapalı iken duman – tel akış görüntülemesi ve (c)'de ise plazma açık iken yapılan duman – tel akış görüntülemesi ve akışa olan etkisi görülmektedir.



Şekil 1. 5 (a) Dairesel silindir üzerindeki aktüatör konumları **(b)** Plazma kapalı iken akış görüntülemesi **(c)** Plazma açık iken akış görüntülemesi (Flint, 2008).

Jayaraman vd. (2008), DBD plazma aktüatörü olarak Helyum gazı kimyasal süreçlerini kullanarak simülasyonunu yapmışlardır. Bu çalışmalarında kapalı elektrotun

büyükliğini artırarak uygulanan voltaj ve dielektrik sabitini birinci faktör olarak ele almışlardır. Uygulanan voltaj ve frekansı ikinci faktör olarak alarak cisim kuvvetini artıran etkilerini incelemişlerdir.

Rafatov vd. (2012), parıltılı deşarj (Glow discharge) için basit bir model geliştirip test etmişlerdir. Bu modelde Argon gazı baz alınarak plazma için hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesapların doğruluğu Monte Carlo simülasyon yöntemi ile kıyaslayarak önerilen modelin etkinliği ortaya konulmuştur. Argon gazının plazma halindeki uyarım durumları ve enerjileri verilerek, Comsol Multiphysics programı ile simülasyonu yapılmıştır.

Durscher ve Roy (2010), yeni bir aktüatör yapısı olan çok bariyerli plazma aktüatör (Multi Barrier Plasma Actuator-MBPA) performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çok katmanlı ve farklı malzemelerden oluşmuş dielektrik malzemenin cisim kuvveti üzerine olan etkisi incelenmiştir. MBPA çeşitli konfigürasyonlarda elde edilmiş ve DBD aktüatöre göre cisim kuvvetini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu devrelerin güç tüketimleri de analiz edilerek MBPA ve DBD plazma aktüatör güç karakteristiği kıyaslanmıştır. Aktüatörün etkinliğini belirleyen cisim kuvvetinin artması ile güç tüketim oranının artması arasındaki ilişki açıklanmıştır.

Likhanskii v.d. (2008), DBD plazma aktüatörü modellemesini hava kullanarak yaparak, DBD aktüatörün temel fizik kuralları ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Model üzerine sinüzoidal voltaj uygulanmış etkileri incelenmiştir. Uygulanan sinüzoidal voltajın pozitif ve negatif yarım döngüleri sırasındaki DBD plazma aktüatörde meydana gelen fiziksel değişimleri incelemişlerdir.

Rigit ve Dakek (2010), çeşitli geometrik yapılardaki aktüatörler üzerine farklı elektriksel karakterleri uygulayarak DBD aktüatörün uygun çalışma koşullarını belirlemeye çalışmışlardır. Elektriksel özellikleri, tasarım parametreleri ve kaynak voltajı özellikleri incelenerek, bunların yanında etkin kaynak voltajı ve frekansı geliştirilmiştir. DBD plazma aktüatörün, teorik ve matematiksel modellemeler ile uyumu gösterilmiştir. DBD aktüatörün etkinliğinin tasarım parametreleri ve sinüzoidal giriş sinyal voltajı karakteristiği ile ilişkili olduğu bulunmuştur.

Jukes vd. (2009), Reynolds sayısı 15000 olan dairesel silindir üzerine DBD plazma aktüatör yerleştirilerek DBD aktüatöre kısa süreli biaslanmış kare dalga atmaları oluşturup göndererek kararsız akış ayrılması davranışının önemli ölçüde değiştirilebileceği gösterilmiştir.

Goeksel vd. (2007), akış ayrılmasını kontrol amacıyla plazma aktüatörün kararlı ve kararsız uyarımın etkilerini Eppler E338 uçak kanadı üzerinde, Reynolds sayısı $20500 \leq Re \leq 50000$ aralığında, akış ayrılmasına ve aerodinamik performansa etkisini araştırmıştır. Düşük Reynolds sayıları kullanılarak Eppler E338 kanat modeli üzerine uygulanan aktüatöre giriş potansiyeli kararlı şekilde ve atmalar oluşturularak uygulanmıştır. Yüksek frekanslı plazma uyarma gerilimi modüle edilmiş atmalar yardımıyla elde edilmiştir. Aktüatörlerin, akışın momentumunu artırma yeteneği kararlı ve kararsız bileşenler arasındaki çalışma döngüleri arasındaki büyük farklılıklar direk ve varyasyonlar denenerek kalibrasyonu sağlamışlardır. Ayrılma kontrolü için her metre başına 500 mW'a karşılık gelen çalışma döngüsü oranının (Duty Cycle) %3'ü civarında olduğu görülmüş ve bu yeterli bir güç oluşturmuştur. Kaldırma katsayısının, çalışma döngüsü oranının yüzdesinin azaltılması ile artırıldığını göstermişlerdir. Plazma aktüatörün yaklaşık düşük çalışma döngüsü oranı %0.66 olduğu yüzdelerde bile, etkili akış ayrılması kontrolü için yeterli olmuştur.

Labergue vd. (2007), çalışmalarında ısısal olmayan dikdörtgensel bölgede plazma aktüatör kullanılarak hava akışının etkin bir biçimde kontrolü sağlamışlardır. Ayrıca DC korona deşarj ile dielektrik bariyer deşarj (DBD) etkileri karşılaştırmışlardır. Birkaç m/s'lik iyon rüzgar hızı duvar yüzeyine teğet olacak şekilde oluşturulmuş ve harekete geçirilen aerodinamik etki menteşeli tablo boyunca hava akışını ayırmak için uygulanmıştır. Akış ayrılmasına aktüatörlerin etkisi PIV yöntemi ile 30 m/s'ye kadar ölçülmüştür. Sonuç olarak DBD plazma aktüatörün DC korona deşarj aktüatöre göre daha etkili olduğu görülmüştür. Fakat bu etki jet hızını azaltmamaktadır. Ayrıca 1500 Hz'e çıkarılan deşarj frekansı, ayrılma akış hızının 30 m/s olmasını mümkün kıldığını gösterilmiştir.

Kriegseis vd. (2011), DBD plazma aktüatörün sığası ve güç tüketiminin nasıl hesaplanacağı üzerinde durmuşlardır. Aktüatörün güç tüketiminin uygulanan giriş potansiyeli ve giriş frekansı ile nasıl ilişkilendirileceğini hesaplamışlardır. Bu

çalışmada, uygulanan giriş voltajının yaklaşık olarak $V^{7/2}$ ve giriş frekansın yaklaşık olarak $f^{3/2}$ ile orantılı bir güç tüketiminin olduğu gösterilmiştir.

Li vd. (2008), sıkıştırılmış kaskad kambur modelin üzerine akış ayrılması kontrol yeteneğini gösterebilmek amacıyla plazma aktüatör yerleştirilmiştir. Voltaj, serbest akış hız değerleri gibi parametreler değiştirilerek plazma aktüatörün etkinliği incelenmiştir. Kambur model arkasında oluşan akış ayrılması görsel hale getirilmiştir.

Balcon vd. (2009), pozitif ve negatif testere dişi sinyalleri tarafından üretilen elektrik rüzgarı etkisi PIV yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Pozitif testere dişi sinyali aktif elektrot üzeri açık elektrot yakınında flament oluşturduğu bunun da çevresinde maksimum değerde bir hıza neden olduğu gösterilmiştir. Diğer taraftan ise DBD plazma aktüatöre sürülen negatif testere dişi sinyalinin aktüatör yüzeyi üzerinde daha homojen dağılmış yüksek hızlı bir akışa neden olduğu gösterilmiştir.

Orlov, vd. (2008), aerodinamik akış kontrolü için kullanılan plazma aktüatörün deşarj sırasındaki pozitif ve negatif yarım döngülerde sürülen voltaj özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmişlerdir. Yapılan simülasyonlarda nitrojen gazının performansı baz alınmıştır. Plazma aktüatörde oluşturulan plazmanın özelliği; pozitif yarım döngü sırasında flament (Streamer) tipinde, negatif yarım-döngü sırasında ise parıltı (Glow) tipinde çalıştığı gösterilmiştir. Deneysel optik ölçümlerle, simülasyon sonuçları iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Srivastava ve Prasad (2010), açık atmosfer basıncı altında düşük frekansta iyonizasyona neden olan Helyum gazı kullanarak yüzey deşarj plazma elde edilmişlerdir. Uygulanan gerilimin artırılmasıyla deşarj bölgesinin salınım frekansının da artmakta olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir. Uygulanan alçak gerilimde salınımlar eş fazlı, yüksek gerilimde ise salınımlar türbülanslı hale geldiği ve sonunda da homojen deşarj formunun kaybolduğu gözlemlenmiştir. Helyum deşarjı, yüksek enerjili kararsız atomların iyonizasyona uğramasıyla oluşmuştur. Uygulanan voltaj deşarj bölgesindeki salınım frekansını ve genliğini artırdığı, voltajın daha da artırılması ise oluşan salınımın sönümlenmesine neden olduğu gözlemlenmiştir.

Little vd. (2010), plazma aktüatörü uçak kanadının hareketli kısmı (flap) üzerine yerleştirerek ve plazma aktüatöre modüle edilmiş sinyaller sürerek, plazmanın akışa etkilerini Reynolds sayısı 25000 - 75000 arasında incelemiştir. Plazma aktüatöre sürülen genlik modülasyonlarını karşılaştırmışlardır. Aktüatörün etkisinin ve veriminin düşük frekanslarda kare dalga modülasyonunun sinüs sinyal modülasyonu ile karşılaştırıldığında daha iyileştirdiğini belirtilmiştir. Hareketli parçanın açılarını değiştirerek, oluşan girdap ve kararsızlıkların modüle dalga formları ile giderilebileceğini, kaldırma kuvvetlerinin artırılacağını belirtmişlerdir.

Taleghani vd. (2012), plazma aktüatörün NLF0414 uçak kanadı etrafındaki akış yapısına etkisini incelemiştir. Ayrıca sinyallerin frekans ve çalışma döngüsü oranının yüzdeleri gibi parametrelerini değiştirerek plazma aktüatörün performansına ve dolaylı olarak akış yapısına etkisini incelemiştir.

Daha birçok araştırmacının akış kontrolü için EHD kuvvetlerden faydalandığı pek çok çalışmaları mevcuttur.

1.4 Çalışmanın Bilimsel Amacı ve Önemi

Akış kontrol yöntemlerinden bir tanesi olan DBD plazma aktüatör kullanılarak küt cisimler etrafındaki akış kontrolünü sağlamak son yıllarda üzerinde birçok araştırma yapılan ve akış karakteristiğini düzenli hale getirmede kullanılan önemli bir yöntemdir. Küt cisim yüzeyine yerleştirilerek akışın kontrol edilmesini sağlayan DBD plazma aktüatörün fiziksel yapı ve işleyişi hakkında detaylı bilgi birikiminin oluşturulmasının sağlanması temel amacımızdır.

Küt cisim olarak kare kesitli cisim ve bu cisim yüzeyi üzerine yerleştirilen DBD plazma aktüatöre farklı voltaj, frekans parametreleri uygulanarak, akışın farklı hızlardaki etkisi, ayrıca çalışma döngüsünün ve uyarılma frekansının farklı parametreleri için plazma aktüatör tarafından oluşturulan akış kontrolünün, akış karakteristiğine etkisi bu çalışmada deneysel olarak incelenecektir.

BÖLÜM II

AKIŞ KONTROLÜ VE PLAZMA AKTÜATÖRÜN ÖZELLİKLERİ

Günlük hayatımızda karşılaştığımız tüm yapı sistemleri, araçlar, ayrıca mühendislik uygulamalarında kullanılan cisimler belli bir akış ortamı içerisinde bulunmaktadır. Bu nedenle bu gibi cisimler buldukları akış ortamından etkilenirler. Bu etkileşim sonucunda birçok akış kaynaklı problemler de ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerin başında cismin akış içerisinde ilerlemesine karşı koyan direnç kuvveti (drag force) yani sürüklenme kuvveti ve akış kaynaklı titreşimler gelmektedir. Bu problemler ise cisimler etrafında ki akışın kontrol edilerek düzenlenmesi ihtiyacını gerektirmektedir. Eğer doğru bir aerodinamik tasarım yapılmazsa kara, deniz ve hava taşıtlarının yakıt tüketimlerinin önemli bir kısmı cismin akış içerisinde ilerlemesine karşı koyan sürüklenme kuvvetinin karşılanmasına giderek, yanma sonucu oluşan atık gazlarda da önemli derecede bir artış meydana gelebilmektedir. Ayrıca bina ve yapıların yıkılmasına ya da titreşimler sonucu hasar görmesine de neden olmaktadır. Cisme etki eden çalkantı kuvvetleri ve sürüklenme kuvveti, cismin arkasında oluşturduğu iz bölgesi yapısına ve buradaki girdap oluşumuna önemli ölçüde bağlıdır.

Bir cisim etrafında ki akışta, akış çizgileri cismin yüzeyini takip etmiyor ve ayrıca akışın yüzeyden ayrılmasına dolayısıyla da cismin arkasında geniş bir iz bölgesi oluşmasına neden oluyorsa, bu cisim aerodinamik açıdan küt cisim olarak adlandırılır (Cook, 1986). Küt cismin bir başka tanım ise, hareket veya akış doğrultusuna göre oldukça büyük bir dik kesit alanı olan ve akışkanı yüzeyden ayrılmaya zorlayan cisimler olarak ifade edilmektedir (Akansu, 2004).

Cisimler etrafındaki akış karakteristiğinin iyileştirilmesi hem akış kaynaklı problemlerin çözümü hem de enerjinin daha verimli kullanılmasının sağlanarak atık gazların salınımının azaltımı açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, küt cisim olarak kare prizma kullanılarak plazma aktüatörün akış ayrılması ve akış yapısı üzerine etkisi incelenmiştir.

2.1 Akış Kontrolündeki Temel Kavramlar

2.1.1 Temel Kavramlar

Hareket halindeki akışkan, iki temel tipten biri ile karakterize edilir. Akışkanın her bir parçası düzgün bir çizgi boyunca akıyorsa akış kararlı olup, akışkanın herhangi bir noktadaki hızı zamanla sabittir ve bu tür akışlar laminar akış olarak adlandırılmaktadır. Boru içindeki akış için, kritik bir hızın üzerindeki akış kararsız ya da çalkantılı olup bu tür akışlar türbülanslı akış olarak tanımlanmaktadır. Akışın laminar mı yoksa türbülanslı mı olduğunu boyutsuz bir parametre olan Reynolds sayısı belirler. Reynolds sayısı 2000'nin altında ise, bu tip akışın laminar Reynolds sayısı 3000'nin üzerinde ise, akışın girdaplı olduğunu göstermektedir ikisinin arasında ise geçiş bölgesi olarak adlandırılır (Serway, 2000). Bununla beraber Reynolds sayısı için alt ve üst limit kullanılan cisim geometresi ve akışkanın özellikleri göre değişmektedir.

Reynolds sayısı; atalet kuvvetlerinin, viskoz kuvvetlere oranı olarak,

$$Re = \frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{viskozite kuvvetleri}} = \frac{\rho U_0 H}{\mu} = \frac{U_0 H}{\nu} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2008). Bu denklemdaki, ρ akışkanın yoğunluğu, U_0 serbest akış hızı, H model çapı veya cismin akışa dik kenar uzunluğu, μ dinamik viskozite, ν akışkanın kinematik viskozitesidir.

Sürüklenme kuvvet katsayısı; cisme etki eden sürüklenme kuvvetinin, cismin iz düşüm alanına etki eden akışkanın dinamik kuvvetine oranları sürüklenme kuvvet katsayısı olarak;

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2008). Buradaki F_D cisme etki eden sürüklenme kuvvetleridir, A hareket doğrultusundaki maksimum yüzey alanıdır. Bu kuvvet sürtünme ve basınç kuvvetleri nedeniyle oluşan toplam kuvvetlerdir.

Navier-Stokes Denklemi; akışkan içerisindeki birim kütleye etki eden momentum değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerinin toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin, verilen akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvetler dengesinin dinamik ifadesi olduğu söylenebilir. Denklem 2. 3’de verilen denklem Navier-Stokes denklemidir (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_b \quad (2.3)$$

Burada \mathbf{F}_b akışa dışardan indüklenen cisim kuvvetidir ve elektrohidrodinamik aktif akış kontrolünde etkindir.

Strouhal sayısı; boyutsuz girdap kopma frekansı olarak tanımlanır (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$St = \frac{f_s H}{U_0} \quad (2.4)$$

Bu denklemde, f_s etkin girdap kopma frekansı, H model çapı veya cismin akışa dik kenar uzunluğu, U_0 serbest akış hızıdır. Strouhal sayısının kullanılması ile girdap kopma frekansına bağlı olarak, akış yapısında meydana gelen değişimler karakterize edilebilmektedir.

Bu çalışmada incelenen plazma aktüatörün farklı Reynolds sayılarında kare modelin sürüklenme kuvveti ve Strouhal sayısı üzerine etkisi Bölüm 4’de sunulmuştur.

2.2 Akış Kontrol Yöntemleri

Akış kontrolü, bir akış alanının, doğal şeklini veya karakterini uygun şekilde değiştirme girişimidir (Gad-el-Hak, 2000). Bu değiştirme girişimleri ile sürüklenme kuvvetinde düşüşler, kaldırma kuvvetinde artışlar, ısı transferi ve kütle transferinde iyileştirmeler, ses seviyesi ve titreşim miktarında azaltmalar elde edilebilmektedir. Bunun yanında bir akış kontrol tekniğinin kullanılması ile bu pozitif katkıların biri veya birkaçı bir arada

sağlanabilir (Akansu, 2011). Akış kontrol yöntemleri enerji harcanmasının olup olmamasını hesaba katarak aktif ve pasif olarak iki gruba ayrılmaktadır.

2.2.1 Pasif akış yöntemleri

Pasif akış kontrol yöntemlerinde, ilave bir güç kullanılmaksızın sisteme çeşitli düzeneklerin dahil edilmesi söz konusudur ve herhangi bir enerji harcanmamaktadır ve bu özelliği onu aktif akış kontrol mekanizmalarından üstün kılan özelliğidir. Bununla birlikte, pasif akış kontrol yöntemi içerisinde yer alan bileşenler genellikle sabit bir şekilde bulunmaktadır. Pasif akış kontrol yöntemleri ile cisimlerin akış karakteristiklerinde dikkate değer iyileşmeler görülebilmektedir (Akansu, 2011).

Bu yöntemlerden bazıları aşağıdaki maddelerde verildiği gibidir.

- Cisim önüne yerleştirilen bir kontrol çubuğu ile akışın kontrol edilmesi
- Cisim arkasına yerleştirilen bir ayırıcı plaka ile akışın kontrol edilmesi
- Yüzey pürüzlüğü veya yüzeye yerleştirilen akış bozucu tel vb. elemanlar ile sınır tabakanın kontrolü
- Cisim geometrisinin uygun hale getirilmesi (keskin köşelerin yuvarlatılması, belirli kısımlara yarıklar açılması vb.)

2.2.2 Aktif akış yöntemleri

Aktif yöntemlerde ise harici olarak bir enerji girişi gereklidir. Akış içine yapılan üfleme ve emme, mikro-kabarcık ya da parçacık gönderme, akustik uyarma, dönen veya salınım yapan cisim, hareketli duvar ve elektriksel kuvvetlerin oluşturulması gibi ek mekanizmalar aktif akış kontrolüne örnek olarak verilebilir. Aktif akış kontrol yöntemi bileşenlerinin ihtiyaca veya isteğe bağlı olarak açılıp kapatılabilmesi ve şiddetinin ayarlanabilir olması, bu tekniğin öne çıkan özelliklerindedir. Yüzey ısıtılması veya soğutulması, hareketli duvar, sisteme salınım yapan veya dönen parçalar ekleme, üfleme, emme veya her ikisini bir arada yapma (sentetik jet), akışa mikro-kabarcık veya partikül enjeksiyonu, akustik dalga bombardımanı, manyetohidrokinamik (MHD) ve elektrohidrokinamik (EHD) cisim kuvvetlerinin uygulanması ve benzeri birtakım teknikler aktif akış kontrol yöntemi içerisinde yer almaktadırlar (Akansu, 2011). Akış

ortamına ilave enerji veya güç transferinin yapıldığı aktif akış kontrol yöntemlerinden “Elektrohidrodinamik (EHD) akış kontrolü” yöntemi bizim ilgi alanımız olacaktır.

EHD yöntemlerin aktif akış kontrol yöntemi olarak kullanılabilirliği, herhangi bir hareketli mekanik parçaya gerek duyulmaksızın direkt olarak elektrik enerjisini kinetik enerjiye dönüştürüyor olmasından gelmektedir. Cisim üzerinde oluşturulan plazma akış hareketlendiricisi, akışın sınır tabaka gelişimini, yüzeyden ayrılmasını, yeniden tutunmasını ve girdap oluşum bölgesindeki akış yapılarını içine alan akış özelliklerinin, istenilen yönde kontrollerinin sağlanmasını mümkün kılabilir. Literatürde, yeni yöntemlerin geliştirilmesine bağlı olarak ısı olmayan ve atmosfer basıncı altında elde edilebilen EHD plazma akış hareketlendiricilerinin, cisimler etrafındaki akış kontrolü için kullanılmasına yönelik çalışmaların son yıllarda yoğunluk kazandığı görülmektedir. Bu yöntemle, düz plaka üzerindeki sınır tabakanın gelişiminin, dairesel silindir etrafındaki akışta yüzeyden akış ayrılmasının, uçak kanadı etrafındaki akışlarda ise akış yapısının kontrolü sağlanmaktadır. Düşük hızlarda sağlanan etkin akış kontrolünün daha yüksek hızlarda da uygulanabilmesi için yeni yöntemler geliştirmeye yönelik çeşitli araştırmalar yapılmaktadır (Akansu, 2011).

2.3 Plazma Aktüatör Tarafından Oluşturulan Cisim Kuvveti

Plazma gazı iyonize olmuş spinsiz nötr bir gaz bütünüdür. Genel durumda sistemi Maxwell denklemleri ile temsil etmemiz mümkündür. Maxwell denklemlerinin diferansiyel formu SI birim sisteminde aşağıdaki gibi verilir (Griffiths, 2003).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (2.5a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.5b)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.5c)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.5d)$$

Burada ϵ_0 Serbest uzayın elektrik geçirgenliği ve değeri $\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \text{farad.m}^{-1}$ ($A^2.s^4.kg^{-1}.m^{-3}$) olarak verilir. \mathbf{E} elektrik alan vektörü, μ_0 serbest uzayın manyetik geçirgenliği ve değeri $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N.A^{-2}$ ($H.m^{-1}$) olarak verilir. \mathbf{B} manyetik alan vektörü, \mathbf{j} ise akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Plazma gazı için manyetik alanın sıfır olduğunu kabul ederek işlemlerimizde yalnızca elektrik alanı kullanacağız. Bu durumda plazmayı temsil eden Maxwell denklemi;

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_c \quad (2.6)$$

2.6 denklemi, genel olarak bilinen adıyla Gauss denklemidir (Griffiths, 2003). Bu denklemde \mathbf{D} deplasman vektörü ve ρ_c yük yoğunluğu olup,

$$\rho_c = q[\sum_{k=1}^N Z_k n_k - n_e] \quad (2.7)$$

şeklinde tanımlanır (Griffiths, 2003). Burada Z_k iyonların yükü, n_k iyonların sayısı, n_e ise elektronların sayısıdır. Elektrik deplasman vektörü \mathbf{D} , elektrik alan vektörü \mathbf{E} , ile ilişkilidir ($\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$ burada ϵ dielektrik katsayısı veya ortamın dielektrik geçirgenliğidir). Dielektrik katsayısı ortamın genel özelliğine bağlıdır. Şayet elektrik alan vektörü ifadesini, elektrik potansiyeli ile ilişkilendirecek olursak, elektrik potansiyeli, \emptyset , biliniyorsa elektrik alanı hesaplamak mümkündür.

$$\mathbf{E} = -\nabla\emptyset \quad (2.8)$$

denklem (2.6) ve ($\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$) denklemlerini (2.5a) denkleminde yerine yazacak olursak,

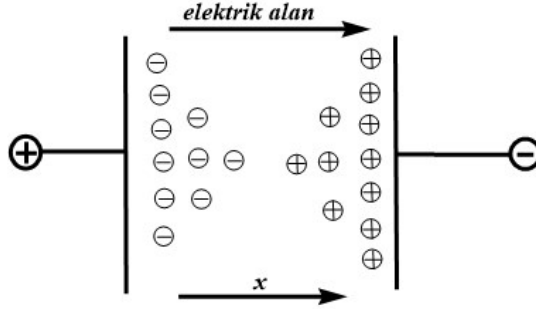
$$\nabla \cdot (\epsilon\nabla\emptyset) = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

Poisson denklemi son halini alır (Griffiths, 2003).

Elektrik alan içerisinde bulunan yüklü parçacıklar elektrik alanın oluşturduğu kuvvet etkisiyle harekete geçeceklerdir ve negatif yükler elektrik alana zıt, pozitif yükler ise elektrik alanla aynı yönde harekete geçeceklerdir. Bu durumda plazma gazının hareket denklemini şu şekilde yazabiliriz.

$$mn_e \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = qn_e \mathbf{E} - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.10)$$

Şeklindedir. m parçacığın kütlesi, n plazma gazındaki parçacık sayısı, \mathbf{u} plazma gazının hızı, q parçacığın yükü, \mathbf{E} elektrik alan ve P plazma gazının basıncıdır (Chen, 1974).



Şekil 2. 1 Elektrik alan içerisindeki parçacıkların hareket yönü.

Tek boyutlu elektrik alan içerisinde hareket eden yüklü parçacıkların hareket yönü şekil 2.1’de verilmiştir.

Plazmanın hareket denklemi,

$$mn_e \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = qn_e \mathbf{E} - \frac{\partial P}{\partial x}$$

olarak verildiğinde eşitliğin sol tarafındaki kapalı türev ifadesinin genel hali,

$$\frac{d\mathbf{u}(x,t)}{dt} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \mathbf{u}_x$$

Olarak gösterilir ve bu denklem,

$$\frac{d\mathbf{u}(x,t)}{dt} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \quad (2.11)$$

Şeklindedir. 2.11’de gösterilen denklem ‘konvektif türev’ ifadesidir (Chen, 1974).

Difüzyonu göz önüne almayarak, ayrıca sistemin kararlı bir durumda olduğunu varsayarak, hızdaki gradyentleri ihmal edebiliriz ve böylece (2.10) eşitliğinin sol tarafı

yok olur. Plazmayı oluşturan parçacıkların termal etkilerini göz önüne alındığında, basınç etkisini de göz önüne almak gerekir. İzotermal yani yerel sıcaklık değişimleri çok küçük olan plazma gazının basınç gradyenti ∇P yerine $\nabla P = k_b T \nabla n$ 'yi yazabiliriz ve bu denklemden k_b Boltzman sabiti, T plazma gazının sıcaklığı, n ise plazma gazındaki parçacık sayısıdır.

Hızdaki değişimleri göz önüne almazsak denklem 2.10 aşağıdaki şekli alır.

$$0 = qn\mathbf{E} - \nabla P$$

Basınç gradyentinin, $\nabla P = k_b T \nabla n$ olduğunu bildiğimize göre,

$$qn\mathbf{E} = k_b T \nabla n$$

$$qn\mathbf{E} = k_b T \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.12)$$

Parçacık sayısının x yönündeki değişimini göz önüne aldığımızda 2.9 denklemini elde ederiz.

Plazmayı göz önüne aldığımızda, iyonlar yalnızca bir elektronlarını kaybederler. Bu nedenle q yükünü yerine elektronun yükünü alabiliriz. $q = -e$ 'yi denklem 2.8'de tek boyutlu durumlar için uygularsak, $\mathbf{E} = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$ halini alır.

$$-en \left(-\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = k_b T \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$e \frac{\partial \phi}{\partial x} \partial x = k_b T \frac{\partial n}{n}$$

$$n = n_0 \exp\left(\frac{e\phi}{k_b T}\right) \quad (2.13)$$

2.13 denklemini elde ederiz (Roth, 2001). Bu denklemde n_0 , elektrik alan tarafından moleküllerin iyonlarına ve elektronlarına ayrıldığı durumdaki sayısıdır. n_0 , plazmanın arka fon yoğunluğu olarak adlandırılır.

Yüklü parçacıkların yüksek elektrik potansiyel bölgesinde konsantrasyonu daha büyüktür ve konsantrasyon logaritmik olarak azalır. Genel kayıpları almaksızın bu sonuçları iki boyutlu duruma da genişletebiliriz.

Plazmanın herhangi bir noktasında ki net yük yoğunluğu iyonlar tarafından oluşan net pozitif yük, elektronlar tarafından oluşan net negatif yük arasındaki fark olarak tanımlanır.

$$\rho_c = e(n_i - n_e) \approx e(n_0 \exp \frac{e\phi}{k_b T_i} - n_0 \exp \frac{e\phi}{k_b T_e})$$

Yarı-kararlı durumlar göz önüne tutulursa, yeterince uzun zaman ölçeği ile birlikte yük yoğunluğu için, $e\phi \ll k_b T$ olduğu için eksponansiyel fonksiyonları Taylor serisine açabiliriz.

$$\rho_c = e(n_i - n_e) \approx -en_0 \left(\frac{e\phi}{k_b T_i} + \frac{e\phi}{k_b T_e} \right) \quad (2.14)$$

Taylor serisine açılmış yük yoğunluğu ifadesini elde ederiz. T_i , iyon sıcaklığı ve T_e , elektron sıcaklığıdır.

Yük yoğunluğu ifadesini Poisson (2.9) denkleminde yerine yazacak olursak,

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} = \frac{en_0}{\epsilon_0} \left(\frac{e\phi}{k_b T_i} + \frac{e\phi}{k_b T_e} \right)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = \frac{e^2 n_0}{\epsilon_0 k_b} \left(\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_e} \right) \phi$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = \frac{1}{\lambda_D^2} \phi \quad (2.15)$$

Şeklini alır. 2.15 denklemindeki, λ_D , Debye uzunluğu olarak adlandırılır. Debye uzunluğu elektrostatik durumda oluşmuş plazma için karakteristik bir uzunluktur. Debye uzunluğu,

$$\frac{1}{\lambda_D^2} = \frac{e^2 n_0}{\epsilon_0} \left(\frac{1}{k_b T_i} + \frac{1}{k_b T_e} \right) \quad (2.16)$$

olarak tanımlanır (Chen, 1974; Boyd, 2003; Bellan, 2006; Goldston, 1995).

Plazma içerisindeki serbest yükler Debye uzunluğu kadar mesafe içerisinde hareket edebilir. Böylece plazma parçacıkları arasındaki Coulomb kuvveti (yükü parçacıklar arasındaki etkileşim kuvveti) serbest yüklerin hareketliliğini sağlar ve bu aralık Debye uzunluğundan sonsuza gittikçe azalır. Parçacıkların yüksek sıcaklığı daha fazla hareketli olmalarına dolayısıyla da Debye uzunluğunun büyümesine neden olur. Elektron sayısı artarsa Debye uzunluğu azalır. Debye uzunluğu yük bulutu içerisinde yeteri kadar parçacık varsa geçerli olur (Aksakal, 2011).

Plazma için başka bir kriter Λ 'dır. Manyetik olmayan plazma sistemini karakterize eder.

$$\Lambda = \frac{4}{3} \pi \lambda_d^3 n_e \quad (2.17)$$

olarak ifade edilir.

Plazma parametresi, $\Lambda \gg 1$, plazmanın zayıf-çiftlenimli olduğu ve Debye uzunluğunun geçerli olduğunu gösterir.

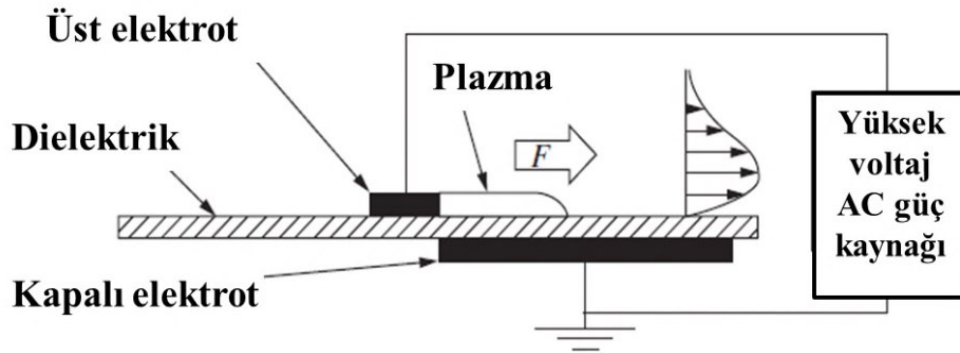
Plazma için konsantrasyonu, Debye uzunluğunu yaklaşık 0,00017m ve yükü parçacık ve yükü parçacık yoğunluğu $10^{16} \text{ partikül}/m^3$ olarak verildiği durumda, plazma kriteri $\Lambda = 3.5 \cdot 10^5$ olarak bulunur. Böylece $\Lambda \gg 1$, (2.17) eşitliği sağlanmış olur.

Plazma aktüatörde, elektrik potansiyelinin değeri elektrot yakınında

$$\phi_{\text{elektrot}} = \pm \phi_0 \quad (2.18)$$

$$\mathbf{F}_b = \rho_c \mathbf{E} = -\frac{\epsilon_0}{\lambda_d^2} \nabla \Phi \mathbf{E} \quad (2.21)$$

bu kuvvete cisim kuvveti (elektrodinamik kuvvet, body force) denir ve plazmanın birim hacmine etki eder. Bu kuvvet nötr yüklü hava üzerine etki ederek havanın akışını ivmelendirir. Plazma tarafından uygulanan temel kuvvet cisim kuvvetidir (Roth, 2001; Roth, 1995). Havayı ivmelendiren bu kuvvetin yönü, elektrik alan vektörü ile aynı yöndedir. Şekil 2.3’de bu kuvvetin yönü gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 Plazma aktüatör tarafından uygulanan cisim kuvvetinin yönü.

2.4 Plazmanın Akışkanlık Özelliği

Plazma ve akışkanlar farklı etkileşim karakteri göstermektedirler, fakat plazma genel özellikleri açısından akışkan yapısında olduğu için akışkanlar mekaniğinde kullanılan tüm eşitlikleri plazmanın akış yapısını açıklamak için de kullanabiliriz. Plazma içerisindeki parçacıklar arasında güçlü elektromanyetik etkileşimler sürekli olarak gerçekleşmektedir. Ancak elektrik ve manyetik alanların oluşturduğu elektromanyetik momentlerin etkisi parçacıkların yüklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir ve bu nedenle de plazmanın etkileşimlerinden bu alanlar sorumludur. Plazmanın akışkanlık özelliğini ise plazmayı oluşturan yüklü parçacıkların bütününe akışkan bir sıvı kabul edilerek ve aynı yüke sahip parçacıklar bütününe göz önüne alarak çözümleri kolaylaştırabiliriz (Bellan, 2006; Goldston, 1995). Plazmayı oluşturan negatif yüklü elektronları ve pozitif yüklü iyonları iki ayrı akışkanmış gibi düşünerek ve her birinin plazmayı oluşturan diğer bir parçacık olan nötr atomlarla ilişkisini de göz önüne alarak çözümleri kolaylaştırmak mümkündür. Bu nedenle süreklilik (kütlenin korunumu) ve

momentumun korunumunu elektronlara ve iyonlara ayrı ayrı uygulayabiliriz (Brodin, 2012; Chen, 1974).

Süreklilik denklemi, elektronlar ve iyonlar için,

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot n_e \mathbf{u}_e = S \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot n_i \mathbf{u}_i = S \quad (2.23)$$

Bu denklemlerde ki S kaynak terimidir.

Momentumun korunumu denklemi, elektronlar ve iyonlar için,

$$m n_e \frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} = -e n_e \mathbf{E} - \nabla P_e + \mathbf{F}_{ei} \quad (2.24)$$

$$m n_i \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} = -e n_i \mathbf{E} - \nabla P_i + \mathbf{F}_{ie} \quad (2.25)$$

Bu denklemlerde \mathbf{F} elastik çarpışmalar sonucunda oluşan kuvvet terimidir.

Plazma içerisindeki parçacıklar arasında iki tip çarpışma gerçekleşmektedir. Bu çarpışmalardan birinci tip çarpışma elastik çarpışmalardır. Elastik çarpışmalar sonucunda momentum ve enerji korunur, plazmayı oluşturan parçacıklar arasında yalnızca momentum transferi sağlanmaktadır. İkinci tip olan çarpışma ise inelastik (elastik olmayan) çarpışmadır. İnelastik çarpışmalar sonucunda ise momentum korunur fakat enerji korunmaz ve kayıp enerjiden dolayı da plazmayı oluşturan parçacıkların yapısı değişmektedir. Bu tip çarpışmalar sonucunda meydana gelen enerji kaybı sonucu plazmayı oluşturan atomlar iyonlaşabilir, uyarılabilir, ya da uyarılmış durumdan temel duruma geçebilirler (Brodin, 2012; Boyd, 2003; Bellan, 2006).

Plazmayı oluşturan parçacıklara etki eden termal etkileri göz önüne aldığımızda parçacığa etki eden basıncı da göz önüne almamız gerekmektedir. Plazmanın oluştuğu noktada basınç plazmanın oluşmadığı ortamdaki noktalardan daha fazladır. Oluşan bu

basınç plazmanın bulunduğu bölgede bir kuvvetin doğmasına yol açar. Oluşan bu kuvvetin büyüklüğü basıncın büyüklüğüne bağlıdır. Kuvvetin yönü ise yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğrudur. Bu kuvvet,

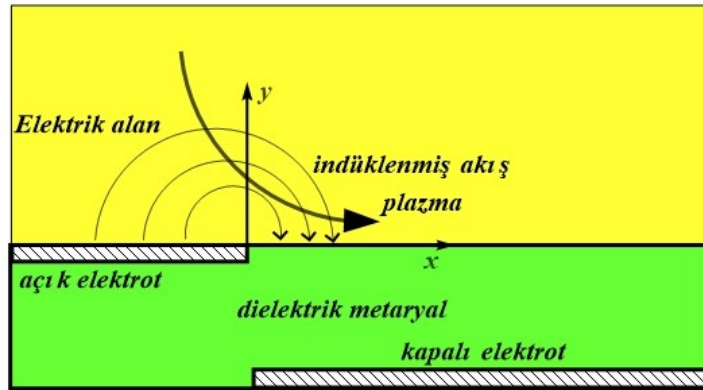
$$\mathbf{F}_p = -\nabla P = -k_b T \nabla n \quad (2.26)$$

olarak verilir.

Sonuç olarak momentum değişimleri ve elastik çarpışmalarda eklenerek plazmaya etki eden kuvvet denklemi şu şekilde yazılabilir,

$$\mathbf{F}_{ei} = -mn_e v_{ef} (\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_f) \quad (2.27)$$

Burada v_{ef} çarpışma frekansı, \mathbf{u}_f ise diğer parçacıkların hızıdır. Şekil 2.4' de DBD plazma aktüatörün hava akışına kuvvet uygulayarak, ivmelendirmesi görülmektedir.



Şekil 2. 4 DBD plazma aktüatörün hava akışını ivmelendirmesi.

Akışkana etki eden momentumun korunumu denklemi,

$$mn_e \frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} = -en_e \mathbf{E} - \nabla P_e - mn_e v_{ef} (\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_f) \quad (2.28)$$

Şeklinde verilir. Bu denkleme akışkanlar için kullanılan (2.11)'de verilen konvektif türev ifadesini eklersek,

$$mn_e \frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} + (\mathbf{u}_e \cdot \nabla) \mathbf{u}_e = -en_e \mathbf{E} - \nabla P_e - mn_e v_{ef} (\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_f) \quad (2.29)$$

Momentum korunumu denklemi şeklini alır.

Nötr parçacıkların etkisini de göz önüne alarak elektronlar için,

$$m_e n_e \frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} + (\mathbf{u}_e \cdot \nabla) \mathbf{u}_e = -en_e \mathbf{E} - \nabla P_e - m_e n_e v_{en} (\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_n) - m_e n_e v_{ei} (\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_i) \quad (2.30)$$

İyonlar için ise,

$$m_i n_i \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} + (\mathbf{u}_i \cdot \nabla) \mathbf{u}_i = -en_i \mathbf{E} - \nabla P_i - m_i n_i v_{in} (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_n) - m_i n_i v_{ie} (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_e) \quad (2.31)$$

Şeklinde en genel formda yazabiliriz. Bu denklemlerde e elektronları, i iyonları ve n ise nötr parçacıkları temsil etmektedir. Bu eşitlikler kuvvet terimi hariç Navier-Stokes denklemine benzemektedir.

Kararlı durumda hızların zamanla değişimi sabittir dolayısıyla hızın konuma bağlı olan kısmı, yani konvektif türev ifadesi yok olur. Bununla birlikte çarpışma sıklığı büyük veya hız yeterince küçük olduğu durumda konvektif türev ifadesinin yok olması, çözüm için iyi bir yaklaşım oluşturur (Brodin, 2012; Chen, 1974).

Elektronların hızları iyon ve nötr atomların hızları ile karşılaştırıldığında daha büyüktür ($\mathbf{u}_e \gg \mathbf{u}_n$, $\mathbf{u}_e \gg \mathbf{u}_i$). Ayrıca elektronların nötr parçacıklarla çarpışma frekansı, iyonlarla karşılaştırıldığında çok daha büyüktür ($v_{en} \gg v_{ei}$). Bu nedenle yalnızca elektronları göz önüne alarak aşağıdaki yaklaşımı yapabiliriz.

$$0 = -en_e \mathbf{E} - \nabla P_e - m_e n_e v_{en} \mathbf{u}_e$$

$$m_e n_e v_{en} \mathbf{u}_e = -en_e \mathbf{E} - k_b T_e \nabla n_e$$

$$n_e \mathbf{u}_e = \frac{-en_e \mathbf{E}}{m_e v_{en}} - \frac{k_b T_e \nabla n_e}{m_e v_{en}}$$

D_e difüzyon terimi $D_e = \frac{k_b T_e}{m_e v_{en}}$ olarak adlandırılır, mobilite (hareketlilik) terimi $\mu_e = \frac{e}{m_e v_{en}}$ olarak adlandırılır. Difüzyon ve mobilite arasındaki ilişki, Einstein ilişkisi olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklemde verildiği gibidir.

$$\mu_e = \frac{e D_e}{k_b T_e} \quad (2.32)$$

Difüzyon ve mobilite terimlerinin, hareket denkleminde yazılmasıyla da, 2.34 denklemi elde edilir.

$$n_e \mathbf{u}_e = -\mu_e n_e \mathbf{E} - D_e \nabla n_e \quad (2.33)$$

Benzer şekilde iyonlar için hareket denkleminde, difüzyon terimi $D_i = \frac{k_b T_i}{m_i v_{in}}$, ve mobilite terimi $\mu_i = \frac{e}{m_i v_{in}}$, kullanılmasıyla da,

$$n_i \mathbf{u}_i = -\mu_i n_i \mathbf{E} - D_i \nabla n_i \quad (2.34)$$

yukarıdaki denklem elde edilir.

Plazma içerisindeki hareketli elektronların ve iyonların hızları akı olarak alınır. Elektronlar ve iyon için aşağıdaki denklemlerde verildiği gibidir.

$$\Gamma_e = n_e \mathbf{u}_e = -\mu_e n_e \mathbf{E} - D_e \nabla n_e \quad (2.35)$$

$$\Gamma_i = n_i \mathbf{u}_i = -\mu_i n_i \mathbf{E} - D_i \nabla n_i \quad (2.36)$$

Mobilite teriminin sıfır olması durumunda ya da elektrik alanın sıfır olması durumunda akı ifadesi Fick kanunu olarak adlandırılır (Chen, 1974).

$$\Gamma_e = n_e \mathbf{u}_e = -D_e \nabla n_e \quad (2.37)$$

Bu durumda süreklilik ya da kütlenin korunumu denklemi elektronlar ve iyonlar için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = \mathcal{S} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_i = \mathcal{S} \quad (2.39)$$

Süreklilik denklemlerinde akı teriminin yerine konulmasıyla aşağıdaki forma dönüşür.

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \nabla \cdot (\mu n \mathbf{E} + D \nabla n) = \mathcal{S} \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \mu n \nabla \cdot \mathbf{E} - D \nabla^2 n = \mathcal{S} \quad (2.41)$$

En genel halde süreklilik denklemi ise,

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = \mathcal{S} \quad (2.42)$$

şeklinde verilmektedir (Brodin, 2012; Chen, 1974). Bu denklem plazmanın akış karakteristiğini belirleyen temel denklemdir.

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

DBD plazma aktüatör ile kare model etrafındaki akış kontrolünün incelendiği bu tez çalışması, Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Aerodinamik Akış Kontrol Laboratuvarında kurulan deney düzeneği ve cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın deneysel kısmı, bursiyer olarak görev aldığım ve aerodinamik yapılı cisimlerde akış kontrolünün incelendiği **110M056** numaralı **TÜBİTAK** projesinin iş paketleri içerisinde olmamakla birlikte, plazmanın akış kontrol yöntemi olarak etkinliğini daha fazla ortaya koyabilmek amacıyla keskin köşeli cisimlere uygulanması, proje çalışmalarına ilave olarak bu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde deney düzeneğinde kullanılan her bir eleman teker teker ele alınıp ayrıntılı olarak özellikleri açıklanacaktır.

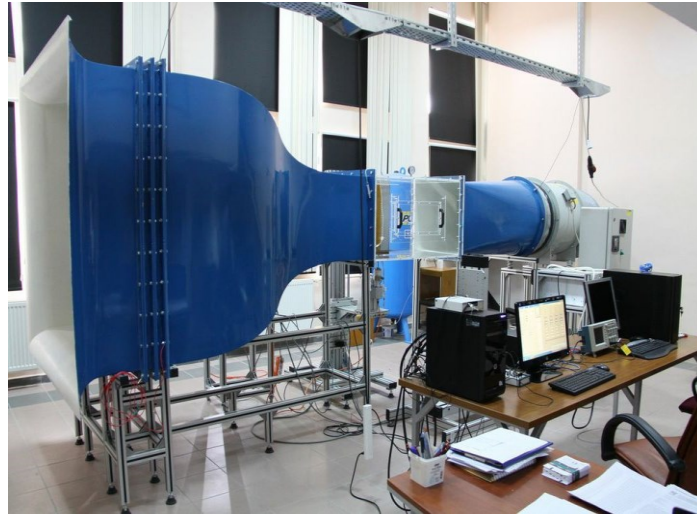
3.1 Cihazlar ve Ekipmanlar

Deney düzeneğinde kullanılan temel cihazlar ve ekipmanlar başlıklar halinde sıralanıp, deneydeki görevleri açıklanacaktır. Yardımcı cihazlar ve ekipmanlar ise bağlantılı olduğu temel cihaz veya ekipmanın başlığı altında verilmiştir.

3.1.1 Rüzgar tüneli

Deneyler ses altı, emmeli tip ve açık çevrimli rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Rüzgar tüneli temel olarak üç ana kısımdan meydana gelmiştir. İlk kısmı daralma konisi oluşturmaktadır. Daralma konisi, serbest akışın türbülans şiddetini azaltmak için, emilen havanın $1425 \times 1425 \text{ mm}^2$ 'lik alandan geçip $570 \times 570 \text{ mm}^2$ 'lik bir alan içerisine aktarıldığı kısımdır. Bu rüzgar tüneline daralma oranı 6,25:1'dir. Bu kısım içerisinde üç adet elek (screen) bulunmaktadır. Bu eleklerin amacı ise akışı düzenli bir hale getirmektir. Daralma konisi giriş kesit alanına giren düzensiz hava akışı, bu alana girdikten sonra ağ sıklığı 100 ağ (mesh) olan yüksek sıklıkta iki adet elekten geçerek hız profiline düzgün hale dönüşmesi sağlanır. İkinci kısım ise test bölgesidir. Giriş kısmı $570 \times 570 \text{ mm}^2$ alana sahip bu bölge rüzgar tüneline en önemli kısımdır. Testi yapılacak olan tüm materyaller bu kısma yerleştirilerek, gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra

ölçümler alınır. Test bölgesinin uzunluğu 1000 mm olup test bölgesinin çıkışı $580 \times 580 \text{ mm}^2$ alanlı kare kesitten dairesel kesite dönüşümü sağlayan difüzöre bağlanmıştır. Giriş ve çıkış arasındaki alan farklılığı, sınır tabaka gelişimine bağlı olarak meydana gelen basınç azalışını telafi etmek için yapılmıştır. Test bölgesindeki yapılan deneyleri gözlemleyebilmek için test bölgesi saydam bir malzeme olan pleksiglas (Plexiglass) malzemeden üretilmiştir. Rüzgar tünelinin son kısmı ise difüzör ya da yayıcı oluşturmaktadır. Yayıcının görevi ise, test bölgesine gelen havayı herhangi bir yüzeyden ayrılmayacak şekilde fan kısmına aktarmaktır. Rüzgar tüneline yapay hava akışını istenilen hızda oluşmasını sağlayan 4 kW gücünde elektrik motoruna sahip aksel bir fan kullanılmıştır. Test bölgesinde istenilen şartlardaki hava akışının elde edilebilmesi ve hassas bir şekilde hız ayarının yapılabilmesi için motorun belirlenen bir devirde sabit olarak çalışması gerekmektedir. Bu ise fan motorunun frekansını değiştirerek ve ayarlanan bir frekansa karşılık gelen devir sayısında motorun döndürülmesi ile mümkün olmaktadır. Bu şekilde hız ayarını yapmak için Telemecanique marka Altivar 71 model 11 kW'lık frekans ayarlı hız kontrol ünitesi kullanılmıştır.



Fotoğraf 3. 1 Rüzgar tünelinin genel görünümü.

Hız kontrol ünitesi motoru 0-50 Hz arasında 0,1 Hz adımlarla istenilen frekansta çalışabilmekte ve devir sayısı frekansla doğru orantılı olarak değişerek 50 Hz'de maksimum devir değeri olan 1500 dev/dk'lık dönme hızına ulaşmaktadır. Fan frekansı değiştirilerek rüzgar tüneli test bölgesindeki serbest akış hızı 0-25 m/s arasında istenilen değere ayarlanabilmektedir. Test bölgesi giriş kısmında ölçülen türbülans şiddeti %1'in

altındadır. Rüzgar tüneli 105M241 proje kapsamında tamamen yerli malzemeler kullanılarak yapılmıştır.

Deneyler esnasında rüzgar tüneli, zararlı olabilecek yüksek voltaj etkilerinden kaçınmak amacıyla şehir toprak hattı üzerinden sürekli topraklanarak güvenlik sağlanmıştır.

3.1.2 Yüksek voltaj güç kaynağı

Plazmayı elde edebilmek için gerekli olan AC yüksek voltajı ve kararlı sinyalleri oluşturabilmek amacıyla Trek marka 20/220C-HS (Trek Model 20/20C-HS high-speed high-voltage power amplifier) model, 400 W (1.2 kW max) gücüne sahip 20 kHz frekansa kadar ± 20 kV aralığında gerilim üretebilen voltaj yükseltici güç kaynağı kullanılmıştır.

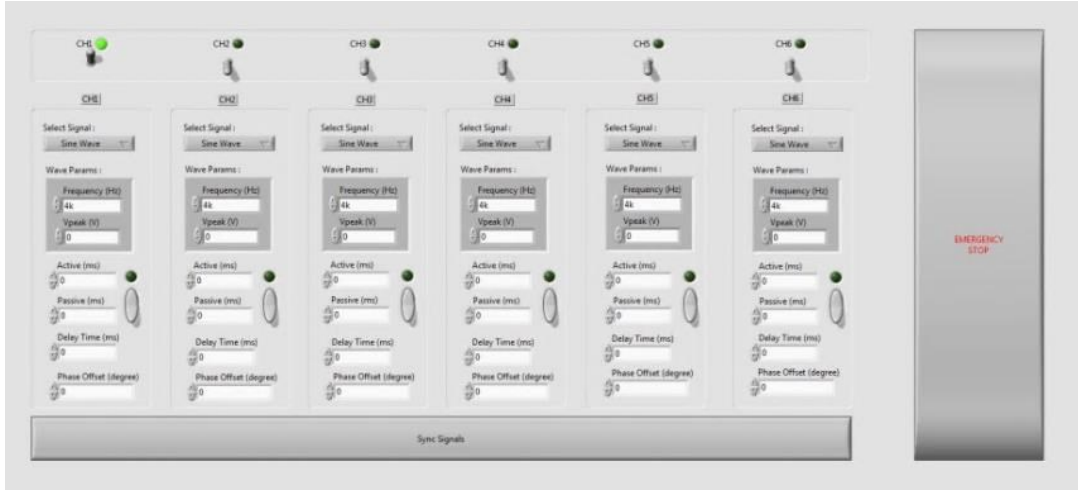
Yüksek voltaj eldesinin yanı sıra DC ya da AC çıkış akımını kararlı hale getirmek ve yüksek hızlı sinyaller elde edebilmek için ayrıca istenilen aralıkta yüksek frekans ve voltajı kararlı bir şekilde elde etmek için tasarlanmıştır.



Fotoğraf 3. 2 Trek Model 20/20C yüksek voltaj kaynağı.

Fotoğraf 3.3'de arayüzü görülen yüksek voltaj güç kaynağında oluşturulacak olan yüksek voltaj ve frekansı, Labview programı ile elde edilmiş bir yazılımla istenilen çalışma aralığındaki giriş voltajı ve frekansı oluşturularak NI PCIe-7841R model veri dönüşüm kartının analog çıkışından plazma aktüatöre sürerek plazmanın oluşturulması sağlanmıştır. İstenildiğinde her bir kanaldan farklı dalga formu ve farklı yüzdelik çalışma döngüsü oranlarında elde edilen sürücü sinyalleri, her bir kanaldan farklı zaman

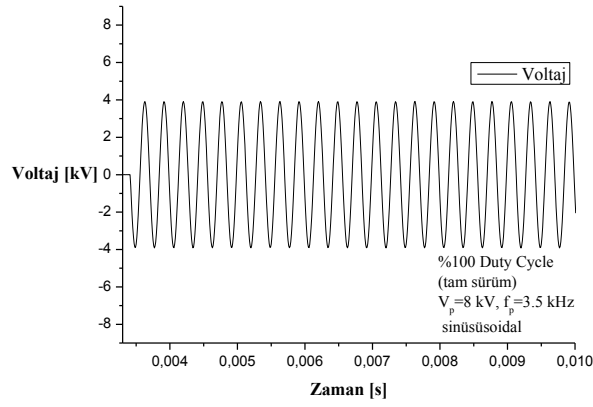
gecikmesi (time delay) veya faz açısı (phase angel) ile elektrotlara gönderilmesi bu programla sağlanabilmektedir.



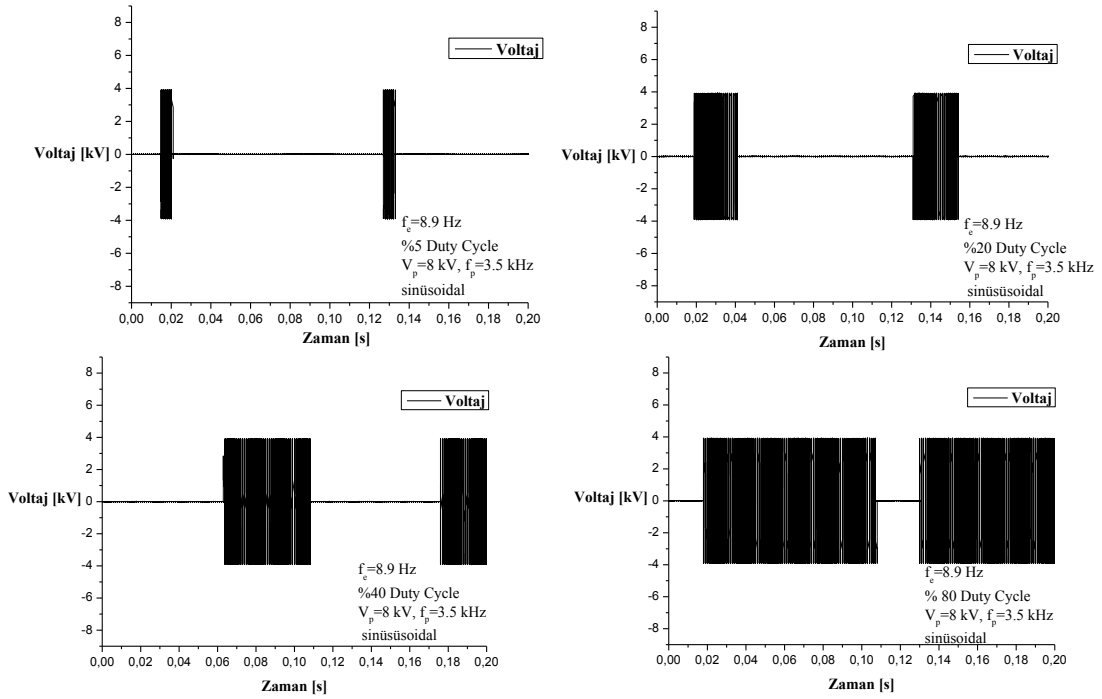
Fotoğraf 3. 3 Yüksek voltaj kaynağı sürücü programı ara yüzü.

Çalışma döngüsü oranı (Duty cycle): AC gerilimin uygulandığı plazma aktüatörlerde, elektrotlara verilen gerilimin frekansının, gerilimin genliğinin ve dalga formunun plazma oluşumu üzerine önemli etkisi vardır. Burada AC akım belirli bir frekansta verilebileceği gibi (steady), fasıllı (unsteady) olarak da uygulanabilmektedir. Plazma aktüatöre sürülen sinyalin belirli bir süre için açık ve kapalı olduğu durumlar daha çok yüzdesel olarak çalışma döngüsü oranı değeriyle ifade edilmektedir. Alt ve üst elektrotlara verilen gerilime belirli bir faz farkı eklenerek asimetric dalga formu oluşturulabilmektedir (Akansu ve Karakaya, 2013). Plazma aktüatöre farklı yüzdelerde çalışma döngüsünün sürülmesi ve uyarım frekansının değiştirilmesi’ de plazma aktüatörün tükettiği gücü azaltarak oluşan plazmanın performansını etkilemektedir. Çalışma döngüsü oranı ile sürülen sinyal sürücü ve uyarıcı sinyalden oluşmaktadır. Sürücü sinyal sinüs sinyal frekansı ile aynı veya benzer frekanslarda sürülmekte iken, uyarıcı sinyal akışın girdap kopma frekansına bağlı olarak, farklı frekanslarda sürülebilmektedir. Çalışma döngüsü oranı sinyalin periyodunun yüzde olarak açık kalacağı oranı belirtmektedir. Şekil 3.1’de plazma voltajı 8 kV, plazma frekansı 3.5 kHz ve tam sürüm durumundaki plazma aktüatöre sürülen sinyal görülmektedir. Şekil 3.2’de plazma voltajı 8 kV, plazma frekansı 3.5 kHz ve uyarım frekansı 8.9 Hz olan farklı yüzdelere sahip çalışma döngüsü sinyalleri görülmektedir. Şekil 3.3’de ise plazma voltajı 8 kV, plazma frekansı 3.5 kHz ve uyarım frekansı 70 Hz durumunda aktif

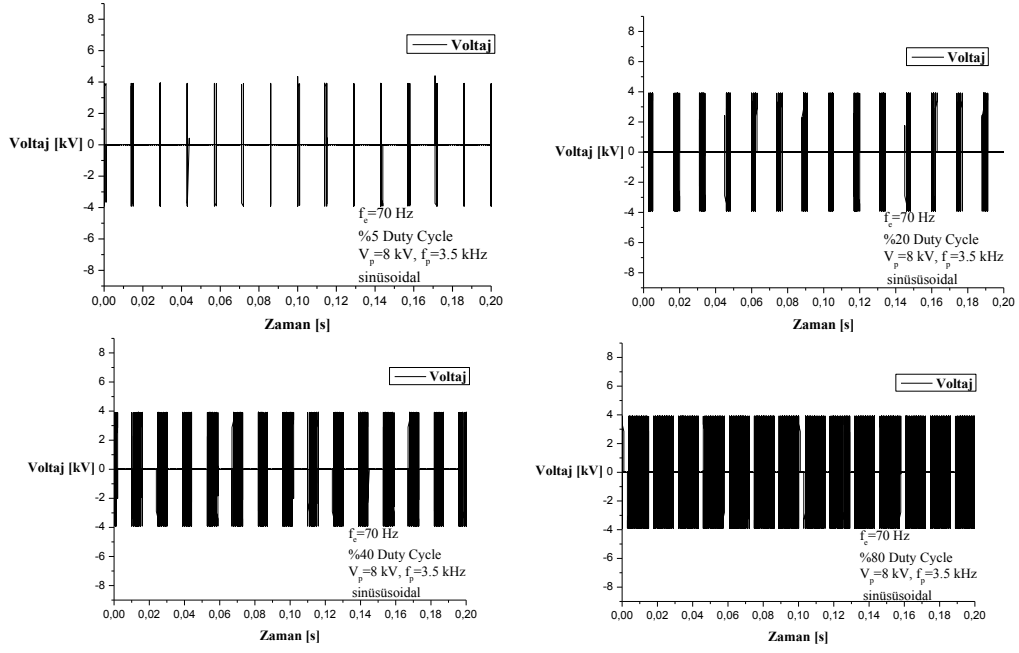
çalışma döngüsü sinyalin farklı uyarım frekanslarında sinyal yapısındaki değişim görülmektedir.



Şekil 3. 1 $V_p=8$ kV, $f_p=3.5$ kHz ve sinüsoidal tam sürüm durumunda sinyal yapısı.



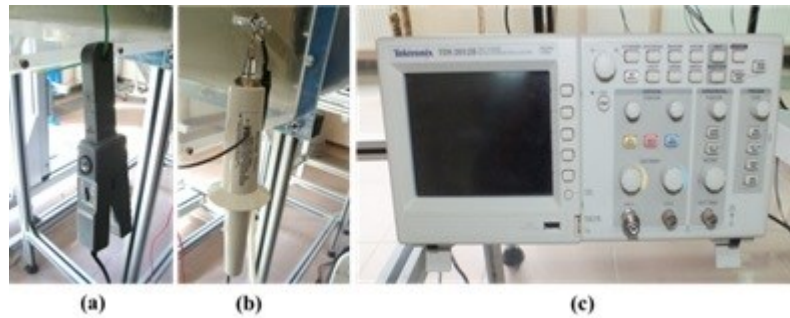
Şekil 3. 2 $V_p=8$ kV, $f_p=3.5$ kHz ve $f_c=8.9$ Hz frekansında iken çalışma döngüsü oranı yüzdesinin sinyal yapısındaki etkisi.



Şekil 3. 3 $V_p=8$ kV, $f_p=3.5$ kHz ve $f_e=70$ Hz frekansında iken çalışma döngüsü oranının sinyal yapısına etkisi.

3.1.3 Elektriksel ölçüm cihazları

Plazma aktüatöre sürülen voltaj, akım ve frekans değerlerini kalibre ederek, değerlerini belirlemek için birinci olarak Fluke 80i-110s model kısaçallı tip AC/DC yüksek akım ölçüm probu kullanılmıştır. Yüksek akım probunun çalışma aralığı geniş olup 50 mA ile 100 A arasındaki değerleri ölçebilmektedir. İkinci olarak Tekronix P6015 model kancalı tip yüksek voltaj probu kullanılmıştır. Yüksek voltaj probunun çalışma aralığı 20 kV DC/RMS ve 40 kV pik ölçüm aralığını ölçebilmektedir. Son olarak Tekronix TDS 2012B model 100 MHz bant genişlikli renkli ekran çift kanallı dijital tip osiloskop sürülen elektrik sinyallerinin ölçümü için kullanılmıştır. Fotoğraf 3.4'de sırasıyla yüksek akım, yüksek voltaj ve osiloskop görünümü verilmiştir.



Fotoğraf 3. 4 (a) Yüksek akım probu, (b) Yüksek voltaj probu, (c) Osiloskop.

3.1.4 Test modeli

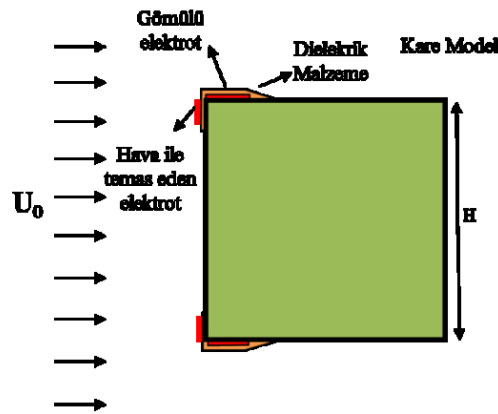
Akış ayrılma noktasının belirli olduğu kare model test modelimiz olmakla birlikte, üzerine plazma aktüatör yerleştirilerek, kare model üzerindeki etkinliği belirlenecektir. Kare model pleksiglas malzeme işlenerek oluşturulmuştur. Kare model 40 mm (H) karakteristik uzunluğa sahiptir. Şekil 3.4’de deneylerde kullandığımız kare model görülmektedir.



Şekil 3. 4 Kare kesitli test modeli.

Kare kesitli test modeli, test bölgesinin giriş kısmından 285 mm geriye yerleştirilmiştir. Kare model uzunluğu 400 mm olmakla birlikte duvardan gelen negatif etkilerden kaçınmak için test modeline iki adet uç plaka takılmıştır. Dış plakalar 260 mm dış çapa sahiptirler ve çevresinde 30⁰’lik pah açılmıştır.

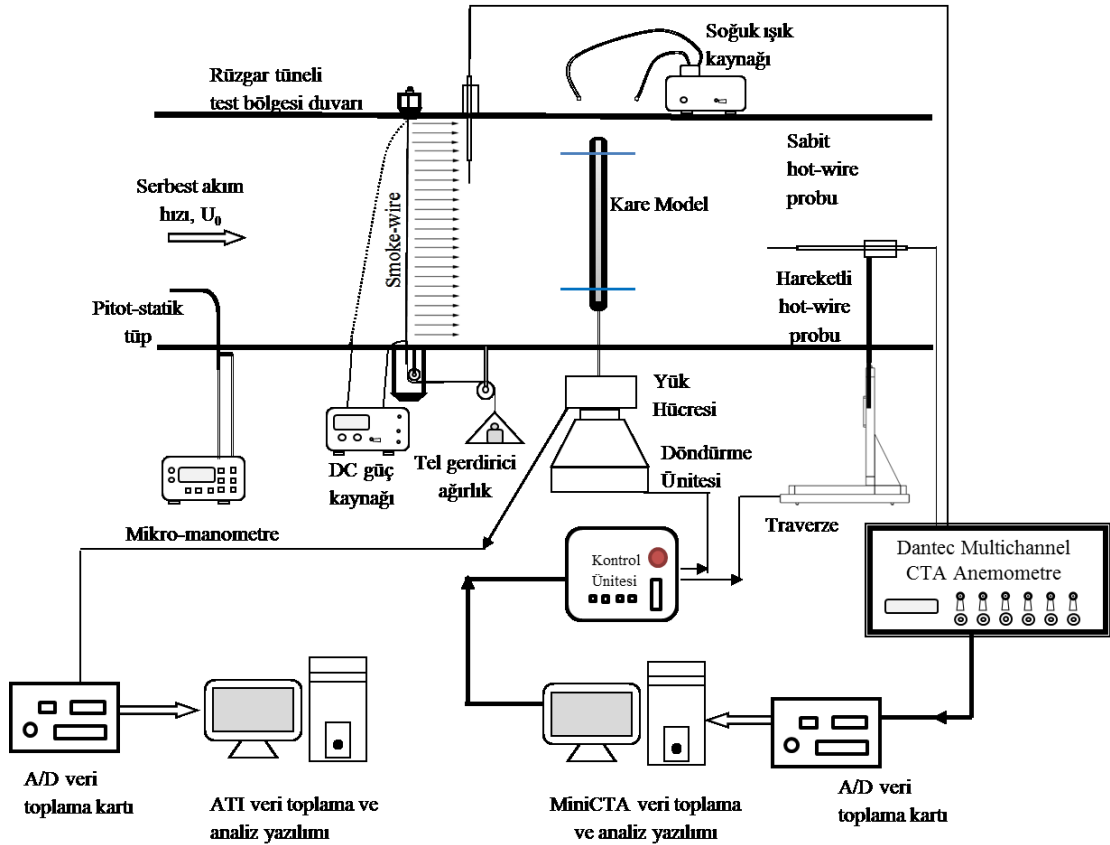
Kare model üzerine yerleştirilen plazma aktüatörler ise, 0.50 µm kalınlığında bakır elektrotlardan ve çift katlı kapton dielektrik malzemeden oluşturulmuşlardır. Kapalı (gömülü) elektrot genişliği 8 mm, açık elektrot genişliği ise 4 mm’dir. Şekil 3.5’de kare model ve üzerine yerleştirilmiş plazma aktüatörlerin konumu görülmektedir.



Şekil 3. 5 Kare model ve üzerindeki plazma aktüatörler.

3.1.5 Ölçüm sistemleri

Plazma aktüatörlerin aerodinamik akış kontrolüne etkisini incelemek için iki farklı yöntem ile deneyler gerçekleştirilecektir. Bunlar; yük hücresi kullanılarak aerodinamik sürüklenme kuvvet katsayılarının tespiti ve kızgın tel anemometresi kullanılarak modelin etrafındaki akış alanın belirlenmesi. Deney düzeneğinde kullanılan sistemlerin genel şeması Şekil 3.6’da verilmiştir.

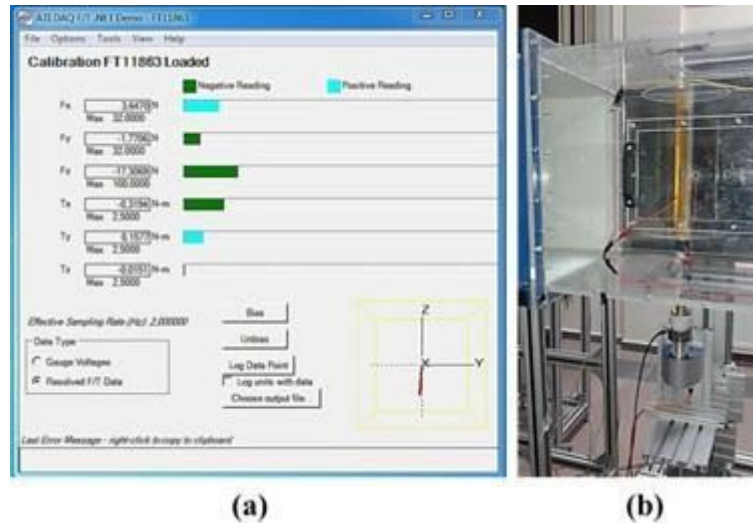


Şekil 3. 6 Rüzgar tüneli test bölgesindeki kare modele ait akış karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan deney sisteminin şematik görünümü (Akansu ve Karakaya, 2013).

3.1.5.1 Kuvvet-moment ölçüm sistemi

Kuvvet moment (Yük hücresi) ölçüm sistemi, F_x ve F_y kuvvetlerini ± 32 N'a ve F_z kuvvetini ± 100 N'a kadar ölçebilmektedir. M_x , M_y ve M_z dönme momentlerini (tork) ise ± 2.5 Nm aralığında ölçebilmektedir. Sistem, 6 adet dönel gerilim kuvveti ölçer'li (strain-gauge) yük hücresi (ATI marka Gamma model), CNC controller tarafından kontrol edilen hücum açısını ayarlamak için kullanılan döndürme mekanizması (ISEL marka ZD30 model) ve test modeli ile sistemin eksenlerinin eşitlenmesi için kullanılan

manuel traverse sisteminden oluşmaktadır. Döndürme aparatı, mevcut sıcak tel (hot-wire) anemometre sistemi ile uyumlu olup miniCTA yazılımının traverse kontrol programı ile kontrol edilebilmektedir. Kuvvet ölçümü yük hücresinin yazılımı tarafından yapılmakta ve hücum açısına bağlı olarak koordinatlardaki değişim program tarafından hesaplanarak sürüklenme kuvveti verileri elde edilmektedir (Akansu ve Karakaya, 2013). Fotoğraf 3.5’de ATI yük hücresi programının ara yüzü ve kare modelin düşey olarak yerleştirildiği yük hücresinin görünümü verilmiştir.



Fotoğraf 3. 5 (a) ATI yük hücresi programının ara yüzü, **(b)** Kuvvet-moment ölçüm sisteminin kare test modeline düşey bağlantılı görünümü.

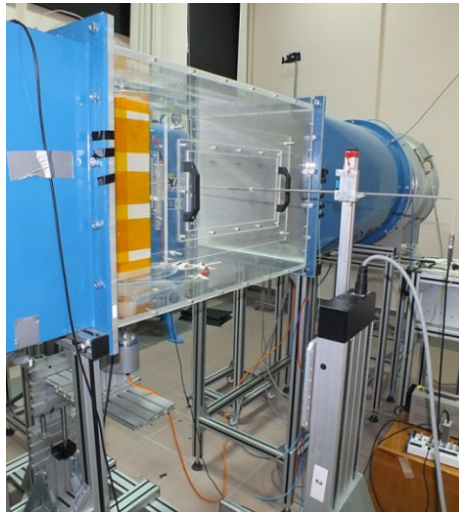
Kuvvet moment sistemi yazılımı olan ATI programında verilerin toplanması istenilen frekansta ve süre boyunca yapılabilmektedir. Ölçümler 800 Hz frekansta alınmış olup her 4 ölçümün ortalaması alınarak saniyede 200 ölçüm alınmış olup her bir ölçüm ise 15 saniye sürmüştür ve her bir deney için 3000 veri alınmıştır. Her durum için 3 defa ölçüm alınarak deneylerde meydana gelebilecek hata payı en aza indirmek için çalışılmıştır.

3.1.5.2 Kızgın tel anemometresi

Kızgın tel (hot-wire) anemometresi yöntemi yardımıyla test modeli olarak kullanılan cisimlerden kopan girdapların frekanslarının ve akış alanının hız ve türbülans karakteristiklerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Kızgın tel anemometresi hız ölçümünde ve türbülans şiddeti ölçümünde kullanılan bir yöntemdir. Deneylerimizde kullandığımız kızgın-tel anemometresi Dantec marka 54N81 model çok kanallı bir sabit sıcaklık

anemometresidir. Altı adet hız ölçüm kanalı ve bir adet sıcaklık ölçüm kanalı bulunan cihazın algılama frekansı 10000 Hz'e kadar çıkabilmektedir. Deneylede biri test bölgesinin üst noktasında serbest akış hızını ölçmek amacıyla sabit konumda ve test modelin önünde, diğeri ise test modelinin arkasında hareket edebilen ve türbülans şiddetini ölçümünü sağlamak üzere iki adet kızgın tel probu kullanılmıştır. Ölçümlerde hareketli ve sabit prob olarak Dantec 55P11 model kızgın tel probu kullanılmış olup, hareketli prob iki-boyutlu hareket (traverse) mekanizması ile test bölgesi içerisinde test modeli arkasında istenilen konumlarda hassas bir şekilde sabitlenerek ölçümler yapılmıştır.

İstenilen konumda hız ölçümlerini elde edebilmek için **DANTEC** marka 41T32 model bilgisayar kontrollü iki boyutlu hareket (traverse) mekanizması kullanılmıştır. İki boyutlu hareket mekanizması bir kontrol ünitesi yardımıyla bilgisayar yardımıyla kontrol edilmektedir. Hareket hızı 25 mm/s ve hareket çözünürlüğü 6,25 µm olup hareket aralığı 610×610 mm² ile sınırlıdır. Fotoğraf 3.6'da traverse mekanizmasının görünümü verilmiştir. Hareket mekanizmasını kontrol etmek amacıyla RS232 ara birimi ile bilgisayar bağlantısı yapılmıştır. Hareket mekanizması kontrol cihazı hareket mekanizmasına bağlı ölçüm probunun konumunu MiniCTA cihazının paket programına girilen koordinatlara konumlanmasını ve ölçüm esnasında belirtilen sürede konumunun sabit kalmasını sağlamaktadır. MiniCTA programı hareket komutlarını kontrol etme, veri alma veri analizi sağlamada kullanılan bir paket programıdır.



Fotoğraf 3. 6 İki boyutlu hareket (Traverse) mekanizması.

Kare model arkasında hız taraması yapılarak model arkasında oluşan hız alanı profili oluşturulmuştur. Bunun için modelin 155 mm arkasından traverse sistemi ile hareket eden kızgın tel anemometresi probu (330 mm'lik aralıkta) 10 mm adımlar ile hareket ederek hız ölçüm verileri alınmıştır. Bu çalışmada, örnekleme frekansı 2 kHz olarak seçilmiş olup, her bir ölçüm istasyonunda 8 saniye süre ile ölçüm alınmış ve en az 16384 veri alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.1.5.3 Basınç ölçümü

Basınç en basit ifade ile birim alana uygulanan kuvvet olarak bilinmektedir. Toplam basınç ise akışkanın hareketi nedeni ile sahip olduğu dinamik basınç ve akışkanın durağan halde tüm yüzeylere uyguladığı toplam basıncın toplamıdır. Dinamik basınç akışkanın hareketi nedeni ile sahip olduğu basınç olması nedeni ile hız ile ilişki kurmak mümkündür. Dinamik basıncı ölçmek için pitot tüpleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde akışa paralel konumlandırılan delikten toplam basınç ölçülürken, akışa dik olarak konumlandırılan delikten statik basınç ölçülmekte ve toplam basınç ile statik basınç arasındaki fark denklem 3.1'de verildiği gibi dinamik basıncı vermektedir.

$$P_{dinamik} = P_{toplam} - P_{statik} \quad (3.1)$$

Bernolli denklememinden hareket ederek $P_{dinamik}$ basıncı denklem 3.2'deki gibi ifade edebiliriz.

$$P_{dinamik} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (3.2)$$

Pitot tüpü rüzgar tünelinin içersine akışa paralel olacak şekilde ve akışa ters yönde konumlandırılarak hortumlar ile dijital mikromanometre' ye bağlanmış, dijital mikromanometre ile atmosfer basıncı, ortam sıcaklığı, dinamik basınç ve dinamik basıncın karşılığı olan tünel içerisindeki serbest akış hızı ölçülmüştür. Deneyde kullanılan pitot tüpü ve mikromanometre Fotoğraf 3.7'de görülmektedir. Pitot tüpü ile ölçülen dinamik basınç ve dönüştürülen hız, kızgın tel anemometresinin kalibrasyon dosyasının oluşturulmasında kullanılmıştır.



Fotoğraf 3. 7 Dinamik basıncın ölçümünde kullanılan (a) Mikromanometre, (b) Pitot tüpü.

3.1.5.4 Duman-tel yöntemi ile akış görüntülemesi

Duman-tel (smoke-wire) yöntemi, direnci yüksek iletken bir tel üzerine düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen bir sıvının damlatılmasıyla elektrik akımı verilerek sıvının buharlaşması prensibine dayanmaktadır. Tele önceden damlatılan duman sıvısı tel üzerinde çok küçük tanecikler halinde asılı kalmakta ve telin ısınmasıyla birlikte buharlaşarak akışın izlemiş olduğu yolu takip etmektedir. Böylece buharlaşan sıvı (duman) test bölgesi içerisindeki model eleman etrafındaki hava akımının karakteristiği hakkında bilgi vermektedir. Yapılan deneyler sırasında duman teli olarak 250 μm çapında direnç teli, duman sıvısı olarak da sıvı parafin kullanılmıştır. Buharlaştırılan sıvı parafinin görüntülenmesinde Fujifilm HS20EXR fotoğraf makinesinin video çekme özelliği kullanılmıştır (Akansu ve Karakaya, 2013).

3.1.5.4 Kuvvet ve hız ölçümünden elde edilen akış karakteristikleri ve fiziksel büyüklükler

Ölçümler ve onların analizlerinden elde edilecek olan akış karakteristikleri ve boyutsuz sayılar aşağıda verilmiştir.

Anlık, ortama ve çalkantı hızları: Akış yönünde (x-yönünde) herhangi bir noktadaki anlık hız $\mathbf{U} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u}_t$ olarak ifade edilir. Buradaki $\bar{\mathbf{U}}$ ortalama hızı, \mathbf{u}_t ise çalkantı hızını ifade etmektedir. Ortalama hızın elde edilmesinde, T toplam ölçüm süresi olmak üzere;

$$\bar{\mathbf{U}} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{U}(\mathbf{x}, t) dt \quad (3.3)$$

ifadesi kullanılır (Çengel ve Cimbala, 2008).

Türbülans şiddeti: Çalkantı hızının karesinin ortalamasının karekökü olarak ifade edilen U_{rms} hızının ortalama hıza oranı şeklindedir. Bu durumda türbülans şiddeti;

$$T_u = \frac{U_{rms}}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\overline{U^2}}}{\bar{U}} \quad (3.4)$$

şeklinde elde edilir (Çengel ve Cimbala, 2008).

3.1.6 Laboratuvar güvenliği

Kare model üzerine uygulanan plazma aktüatör ile yapılan deneylerde başta ozon olmak üzere insan sağlığına zararlı NO_x, SO_x, vb. gaz türevlerinin oluşumu söz konusu olabilmektedir. Ayrıca yüksek voltajda çok büyük risk oluşturmaktadır. Bu nedenle deney sırasında ve ortamın güvenliği açısından iki adet ozon metre kullanılmıştır. Ozon metreler ile ortamdaki ozon seviyesi sürekli olarak ölçülerek kontrol altında tutulmaktadır. Uluslararası ilgili otoriteler tarafından (Occupational Safety and Health Administration) emniyetli ozon seviyesi 0.1 ppm olarak verilmekte olup ozon metrenin anlık, ortalama, maksimum, minimum ölçüm ve alarm özellikleri sayesinde bu seviyenin üzerine çıkılmasına izin verilmemektedir. Fotoğraf 3.8’de görülen ozon metrelerden biri rüzgar tüneli altına test bölgesine yakın bir konumdan, diğeri ise deneyler esnasında ölçüm aldığımız bölgeye yakın bir konuma yerleştirilerek, tüm deneyler süresince güvenlik amacıyla ölçüm alınmaktadır (Akansu ve Karakaya, 2013).



Fotoğraf 3. 8 (a) Rüzgar tüneli test bölgesinin altına yerleştirilen ozon metre, (b) Ölçüm alınan bölgeye yakın yerleştirilen ozon metre (Akansu ve Karakaya, 2013).

Test modeli üzerindeki plazma aktüatörler tarafından tünel içerisinde ozon üretilmesi nedeniyle laboratuvar içerisinde insan sağlığına zararlı bir ortam oluşabilmektedir. Bu zararlı etkileri en aza indirmek amacıyla, rüzgar tünelinin çıkışı, tünel çıkışı ile aynı çaptaki esnek plastik (PVC) boru ile laboratuvar dışına alınmıştır. Bu iş için yaklaşık 4m uzunluğunda boru ve tünel çıkışına bağlamak için açma kapama metal perdesi kullanılmıştır. Bu sayede laboratuvar içerisine olan ozon salınımı dış ortama verilmiştir. Böylece çalışma ortamındaki ozonun insan sağlığını tehdit etmesi de önlenerek, ozon seviyenin çok alt bir seviyede kalması sağlanmıştır.

Test modeli üzerindeki plazma aktüatörler tarafından tünel içerisinde ozon üretilmesi nedeniyle laboratuvar içerisinde insan sağlığına zararlı bir ortam oluşabilmektedir. Bu zararlı etkileri en aza indirmek amacıyla, rüzgar tünelinin çıkışı, tünel çıkışı ile aynı çaptaki esnek plastik (PVC) boru ile laboratuvar dışına alınmıştır. Bu iş için yaklaşık 4m uzunluğunda boru ve tünel çıkışına bağlamak için açma kapama metal perdesi kullanılmıştır. Bu sayede laboratuvar içerisine olan ozon salınımı dış ortama verilmiştir. Böylece çalışma ortamındaki ozonun insan sağlığını tehdit etmesi de önlenerek, ozon seviyenin çok alt bir seviyede kalması sağlanmıştır.

Deney ortamında bulunan metal aksama sahip düzenekler (rüzgar tüneli ve kullanılan cihazların bazılarının metal dış aksamaları) deney süresince topraklanmıştır. Deney sonrasında test modeli ve ortamdaki diğer malzemelerde birikebilecek statik yükü boşaltmak için topraklanmış bir yük boşaltım çubuğu hazırlanmıştır. Deneyler sırasında yüksek voltaj kaynakları açıldığı anda güvenlik tedbiri amacıyla kaynağın açık olduğu sesli bir biçimde söylenerek, ortamda ki çalışanlar uyarılmıştır (Akansu ve Karakaya, 2013).

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda test bölgesinde bulunan kare model ile yapılan deneylerin sonuçları sunulmuştur. Literatürde yer alan veriler ve yapılan ön çalışmalar neticesinde plazma parametrelerinin uygun çalışma aralıkları belirlenerek, kare model etrafında plazma ile akış kontrolü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada öncelikle plazma aktüatörün kare model sürüklenme kuvvetine daha sonrada akış alanı üzerine etkileri alt başlıklar halinde sunulmuştur.

4.1 Tek Kare Model Etrafındaki Akış Karakteristiği

Kare model etrafında akışta cisim geometrisinin keskin köşeli olması nedeniyle akış ayrılması cismin ön tarafındaki alt ve üst köşelerden gerçekleşmektedir. Akışın durma noktası cismin ön yüzeyinin ortasında en yüksek pozitif basınç seviyesinde gerçekleşmektedir. Akış ayrılması nedeniyle diğer kenarlardaki basınçlar negatif değer almaktadır. Cismin hem ön yüzeyindeki pozitif basınç dağılımı hem de arka yüzeyindeki negatif basınç dağılımı cisme etki eden basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, plazma kapalı iken sürüklenme kuvvet katsayısı $C_D=2.3$ civarında elde edilmiştir. Literatürde sürüklenme katsayısı Reynolds sayısının 10^4 'den büyük olduğu durumlarda 2.2 civarı olarak verilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2008). Bu çalışmada Reynolds sayısının daha düşük olması nedeniyle bir miktar yüksek çıkmakla birlikte literatürle uyum içerisindedir. Benzer şekilde plazma kapalı durumda 0.123 değerinde elde edilen Strouhal sayısı literatürde verilen 0.12-0.13 aralığı (Obasaju, 1983) içerisinde kalmaktadır.

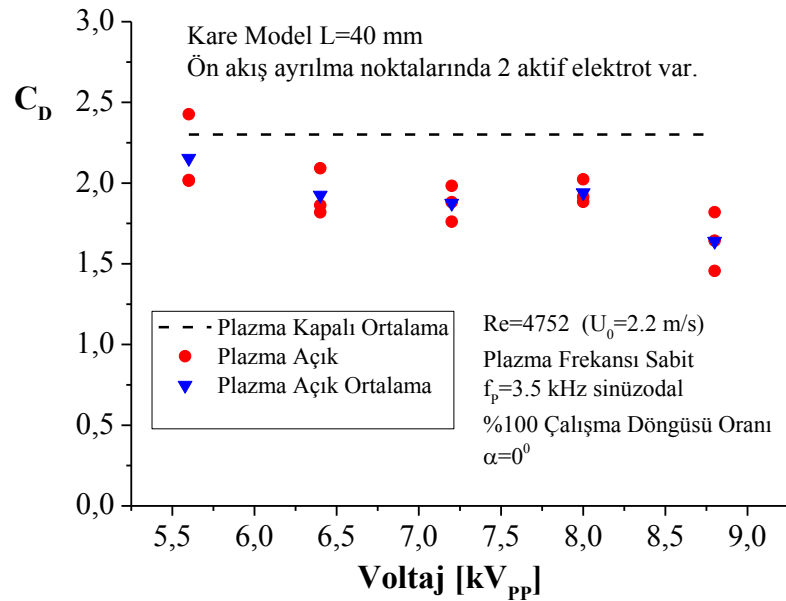
4.2 Plazma Aktüatörün Kare Model Sürüklenme Kuvveti Üzerine Etkisi

İncelenen her bir parametre değerinde plazma açık ve kapalı iken üçer defa kuvvet ölçümü alınmıştır. Kuvvet ölçümleri sırasında yük hücresinin sıfır ayarında ölçüm süresince bir miktar sapmalar (bias) oluşabilmektedir. Bu etki cihaz yazılımında rüzgar tüneli kapalı iken bias yapılarak düzeltilmektedir. Ancak plazma ölçümlerinde rüzgar tüneli çıkışının dışarıya bağlı olması nedeniyle fan kapalı durumdayken bile bir miktar hava akışı oluşabilmektedir. Damperin açılıp kapanmasının uzun zaman alması

nedeniyle bias işlemi her bir ölçümden önce yapılamamıştır. Bu nedenle, plazma kapalı iken ölçüm alındıktan hemen sonra plazma açık durumu için ölçüm alınmıştır. Plazma kapalı iken elde edilen sürüklenme kuvvet katsayısı $C_D=2.3$ değerine dengeleme (offset) yapılarak plazma açık durumdaki değişim kaydırılmış ve plazma kapalıya göre net fark olarak elde edilmiştir.

4.2.1 Tam sürüm sinüzoidal sinyal durumu

Burada plazma aktüatöre çalışma döngüsü oranı %100 olarak sürülen sinüzoidal sinyalin kare model sürüklenme kuvvetine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.1’de Reynolds sayısının $Re=4752$ (2.2 m/s) değerinde rüzgar tünelinin test bölgesine yerleştirilmiş olan kare model üzerine etki eden sürüklenme kuvvetindeki değişimler görülmektedir. RF frekansının 3500 Hz’de sabit olduğu bu durumda sürüklenme kuvveti ölçümleri üçer defa alınmış ve ortalamaları ile birlikte sunulmuştur. Burada artan voltajla sürüklenme kuvvetindeki azalmalar görülmektedir. En yüksek voltaj değerinde ($8.8kV_{pp}$) sürüklenme kuvvet katsayısı 2.3 değerinden 1.6’ya kadar düşerek %30 azalmıştır.

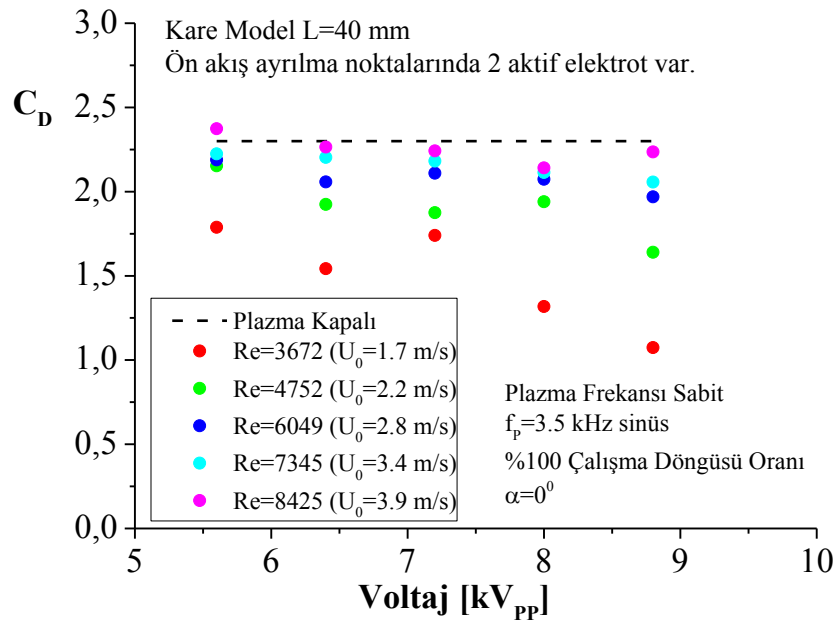


Şekil 4. 1 $Re=4752$ iken RF 3.5 kHz’de sürüklenme (Drag) kuvveti katsayısının voltaj ile değişimi.

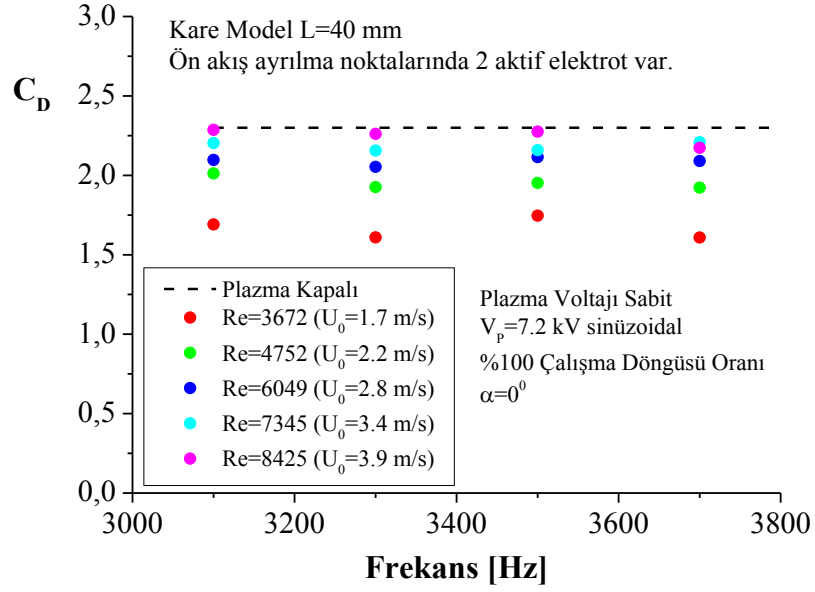
Kare model üzerine farklı akış hızları verilerek elde edilen farklı Reynolds sayılarında plazma aktüatörün voltaj ve frekansının sürüklenme kuvvet katsayısı üzerine etkileri Şekil 4.2 ve 4.3’de sunulmuştur. Buradaki plazmanın aktif olduğu durumdaki değerler

üçer ölçüm sonuçlarının ortalamalarını göstermektedir. Şekil 4.2’de frekans 3.5 kHz değerinde iken farklı Reynolds sayılarında, sürüklenme kuvvet katsayısının voltajla değişimi görülmektedir. En düşük Reynolds sayısında voltajın 5.6 kV_{pp} değerinde yaklaşık %23’lük, 8.8 kV_{pp} gerilim durumunda ise sürüklenme kuvvetinde %53’lük bir azalış elde edilmiştir. Reynolds sayısının artması ile birlikte plazma aktüatörün sürüklenme kuvvetindeki azaltma etkisi de giderek ortadan kalkmaktadır. Reynolds sayısının 8425 değerinde plazmanın etkisi artık görülmemektedir.

Şekil 4.3’de ise plazma aktüatöre sürülen sabit 7.2 kV_{pp} değerinde ve farklı RF sinüzoidal sinyallerin sürüklenme kuvveti üzerine etkisi verilmiştir. Burada görüldüğü üzere ele alınan aralık olan 3100-3700 Hz aralığında frekans değişiminin kaldırma kuvvet katsayısı üzerine etkisi bulunmamaktadır. Plazma aktüatör en düşük Reynolds sayısında yaklaşık %30’luk bir azalma sağlanmış olmasına rağmen frekansının artışı önemli bir değişime neden olmamıştır.



Şekil 4. 2 Farklı Reynolds numaraları için RF frekansı 3.5 kHz’de sürüklenme kuvveti katsayısının voltaj ile değişimi.



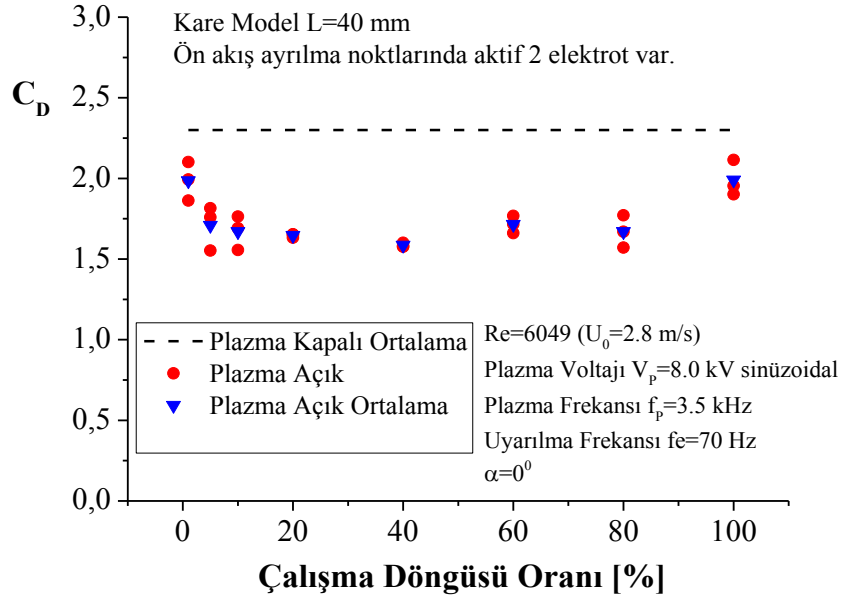
Şekil 4.3 Farklı Reynolds numaraları için Voltaj 7.2 kV_{pp}'de sürüklenme kuvveti katsayısının RF frekansı ile değişimi.

4.2.2 Çalışma döngüsü oranlı sinüzoidal sinyal sürümü

Çalışma döngüsü oranlı bu deneylerde sinüzoidal sinyalin RF frekansı ve voltaj, sırasıyla 3.5 kHz ve 8.0 kV_{pp} değerlerinde sabit tutulmuştur. Bu çalışmada plazma aktüatörün akış kontrol etkisi üzerinde durulmuş olup güç tüketiminin iyileştirilmesi üzerine optimizasyon yapılmamıştır. Bununla birlikte sinyalin çalışma döngüsü oranı yüzdesindeki azalma aynı zamanda güç tüketimindeki bir azalma olarak da karşımıza çıkmaktadır.

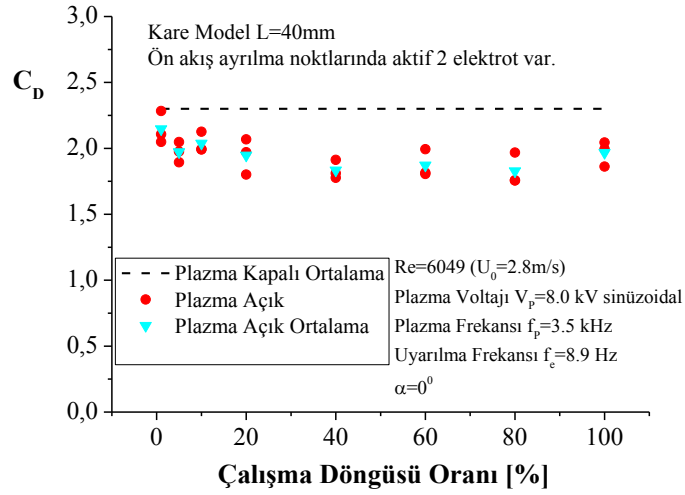
Şekil 4.4'de Reynolds sayısının 6049 değerinde plazma aktüatöre sürülen uyarılma frekansının (excitation frequency) sabit 70 Hz değerinde sürülen sinüzoidal sinyalin çalışma döngüsü oranının sürüklenme kuvvetine etkisi incelenmiştir. Çalışma döngüsü oranının başlangıç değerinde, %0-20 aralığında iken, artan oranla sürüklenme kuvvetinde bir azalış gözlemlenmiştir. Çalışma döngüsü oranının %20-80 aralığında iken sürüklenme kuvvetindeki azalma miktarı yaklaşık sabit olup %32 civarında elde edilmiştir. %10'luk doluluk oranında sürüklenme kuvvetindeki elde edilen azalma miktarı, %100 doluluk oranındaki yani tam sürüm sinüzoidal durumundakine göre daha fazla olmuştur. Burada güç tüketimi onda bire düşmesine rağmen, kuvvetteki azalma miktarı %14'ten %27'ye çıkmıştır. Burada kare modelin on köşeleri üzerinde akış ayrılma noktasında bulunan plazma aktüatörlerin kayma tabakasını yönlendirme

etkisinin yanı sıra, bir nevi uyarılma frekansında titreşim vermek suretiyle ayrılan akış tabakalarını etkileyerek iz bölgesi ve girdap oluşum yapısını daha fazla değiştirdiği anlaşılmaktadır. Reynolds sayısının 6049 değerinde kullanılan test modeline ait girdap kopma frekansı 8.9 Hz olarak elde edilmiştir.



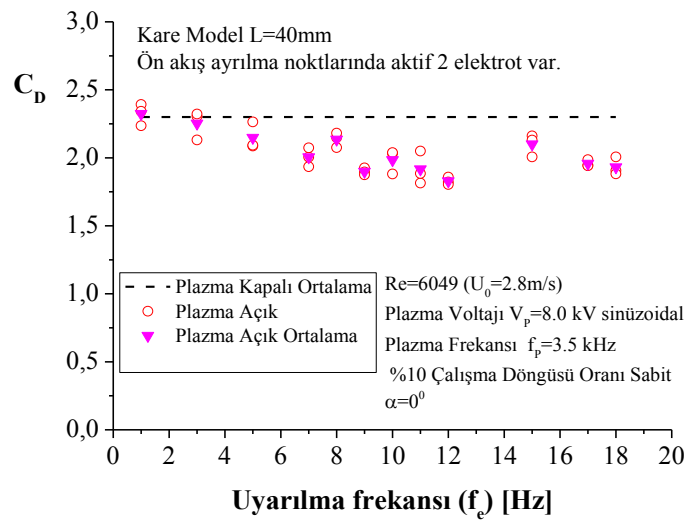
Şekil 4. 4 Re=6049 ve uyarılma frekansı $f_c=70$ Hz iken sürüklenme kuvveti katsayısının çalışma döngüsü oranına göre değişimi.

Şekil 4.5’de ise uyarılma frekansı, girdap kopma frekansı ile aynı değerde girilerek sürüklenme kuvvetine etkisi incelenmiştir. Burada doluluk oranının %40-80 aralığında en fazla azalma oranları elde edilmiş olup, %20 civarındadır. Bununla birlikte tam sürümdekine göre azalmadaki artış miktarı fazla olmamıştır. Tam sürümdeki azalma oranı ise %14 olarak elde edilmiştir. Bu durum girdap kopma frekansındaki sürümün, akış kayma tabakalarını rahatsız etmekle birlikte, yeterince frekans bozucu etki oluşturmadığını göstermektedir. Bu durumun daha iyi anlaşılması için, farklı uyarım frekanslarının etkisini incelemek üzere Şekil 4.6’da sunulan sabit %10’luk doluluk-boşluk oranındaki değişimler elde edilmiştir.



Şekil 4. 5 Re=6049 ve uyarılma frekansı $f_c=8.9$ Hz iken iken sürüklenme kuvveti katsayısının çalışma döngüsü oranına göre değişimi.

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere uyarılma frekansının küçük değerleri olan 1 ve 3 Hz durumlarında %10'luk sürümün akış kontrol etkisi oluşturmak için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Artan uyarılma frekansıyla, 12 Hz'e kadar sürüklenme kuvvetindeki azalma giderek artmıştır. Ancak uyarılma frekansının 8 Hz değerinde ve onun yaklaşık iki katı olan 15 Hz değerinde elde edilen sonuçlarda azalma etkisi daha küçük olmuştur. Bu durum girdap kopma frekansına yakın değerlerdeki uyarılma frekansının, girdap kopma frekansında bir kilitleme etkisi oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bunlardan farklı frekanslarda yapılan uyarımlar kare modelden ayrılan akış tabakasını bozarak sürüklenme kuvvetinde daha fazla azalma sağlamaktadırlar.

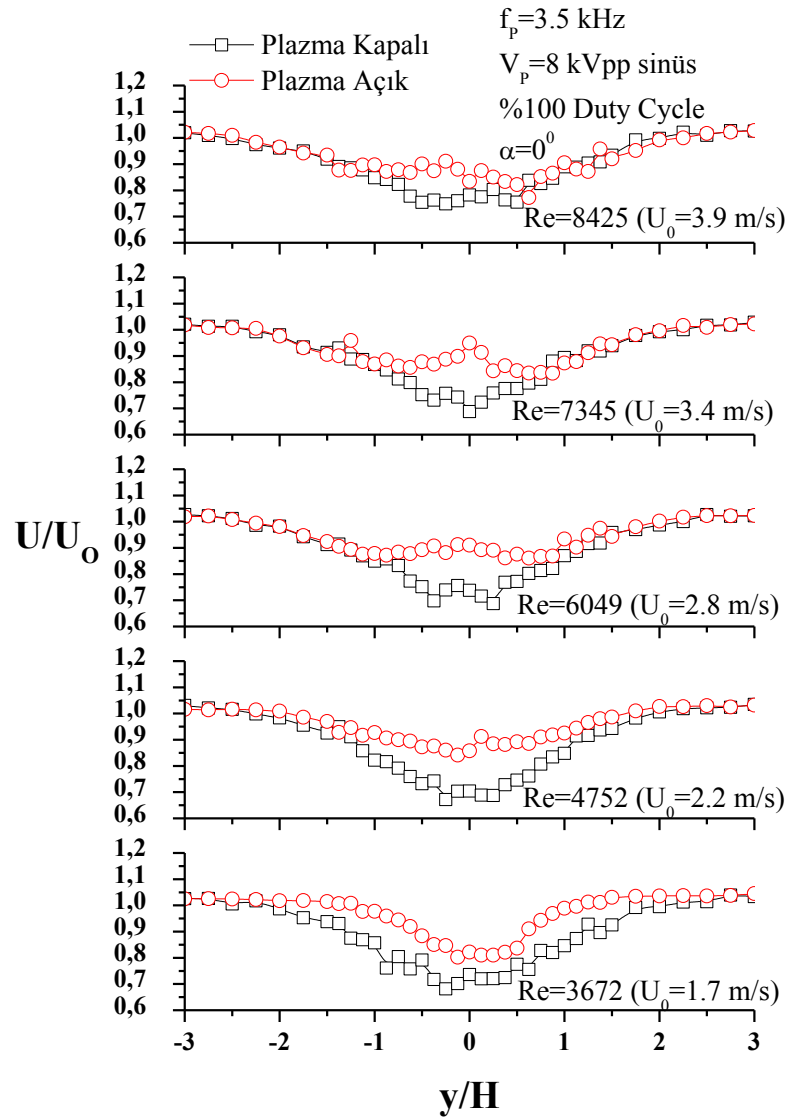


Şekil 4. 6 Re=6049 iken ve %10 çalışma döngüsü oranı durumunda, sürüklenme kuvveti katsayısının uyarılma frekansına göre değişimi.

4.3 Plazma Aktüatörün Kare Model İz Bölgesi Akış Karakteristikleri Üzerine Etkisi

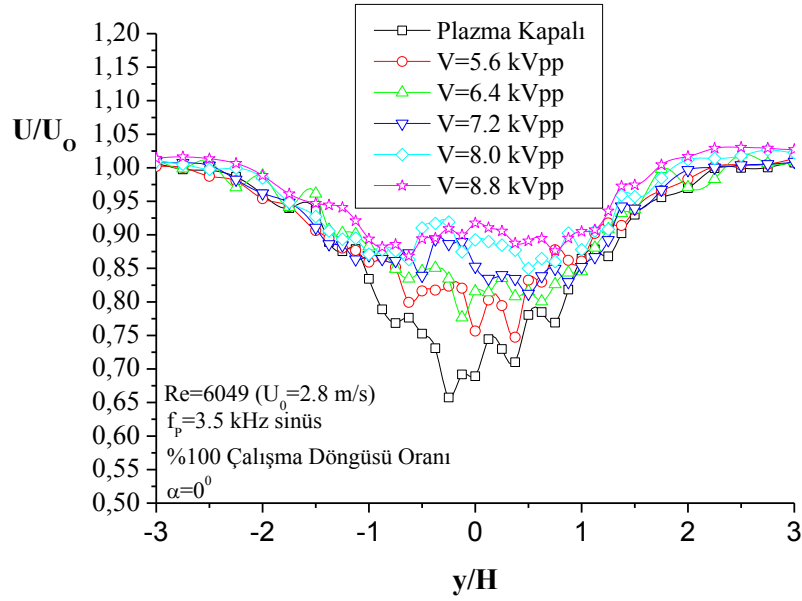
Kare model arkasında kızgın tel anemometresi ile iz bölgesi hız taraması yapılmış ve hızın spektral analizinden girdap kopma frekansları elde edilmiştir. Hız taramalarında prob model ekseninden, $x/H=3.75$ geriye yerleştirilmiş olup düşey yönde $-3.5 \leq y/H \leq +4.75$ aralığında ölçümler yapılmıştır.

Şekil 4.7’de Reynolds sayısının farklı değerleri için kare modelin iz bölgesindeki hız profilinin değişimi görülmektedir. Çalışmada kullanılan modelin kare modelin bir küt cisim olması nedeni ile model arkasında geniş bir iz bölgesi oluşmaktadır. Düşük Reynolds sayılarında plazma aktüatörün aktifleştirilmesi ile iz bölgesi genişliği daralmaktadır. Ancak Reynolds sayısının artırılması ile beraber plazma aktüatörün etkisinin giderek azalmakta ve hız profili plazmasız durumla neredeyse aynı seviyelerde gerçekleşmektedir. Reynolds sayısının en küçük değerinde hem iz bölgesi genişliğinde daralma hem de cisim arkasındaki hızdaki düşüş seviyesinde azalma etkisi elde edilmiştir. Bu durum kare modelden ayrılan akış tabakasının kare model yüzeyine daha yakın olarak ayrıldığını ve girdap oluşum mesafesinin artarak iz bölgesinde oluşan girdapların küçüldüğünü göstermektedir. Reynolds sayısının 4752 ve daha büyük değerlerinde iz bölgesi genişliğinin plazmasız durumla neredeyse aynı olduğu ancak model arkasındaki düşük hız bölgesi seviyesinde bir miktar artış olduğu görülmektedir. Bu durum kare model yüzeyinden ayrılan akış tabakalarının plazma kapalı durumdaki ile yaklaşık aynı açı ile yüzeyden ayrıldığını, ancak plazmanın kayma tabakası üzerine yapmış olduğu bozma etkisi nedeniyle girdap oluşum bölgesinin bir miktar geriye kaydığı anlaşılmaktadır.



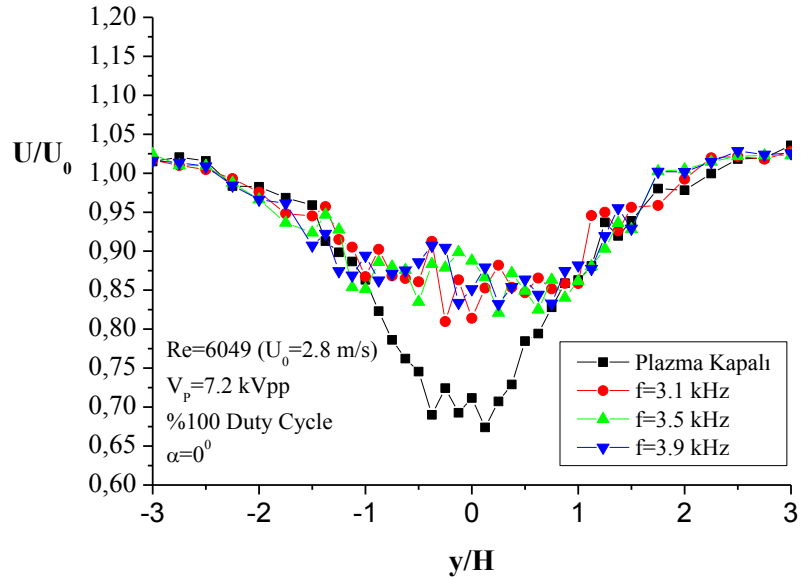
Şekil 4. 7 $f_p=3.5 \text{ kHz}$, $V_p=8 \text{ kV}_{pp}$ ve sinüzoidal tam sürüm olması durumunda hız profilinin Reynolds sayılarına göre değişimi.

Şekil 4.8’de Reynolds sayısının 6049 değerinde farklı voltaj seviyelerinde sürülen plazma aktüatörün iz bölgesi hız profili üzerine etkisi görülmektedir. Bu Reynolds sayısında plazma aktüatör iz bölgesi genişliğini daraltma etkisi gösterememekle birlikte iz bölgesi hız seviyesinde artışa neden olmuştur. Voltajdaki artışla birlikte hız profili minimum seviyesi giderek artmıştır. Artan voltajla plazma aktüatörün girdap oluşum mesafesini ve buna bağlı olarak girdap büyüklüğünü ve iz bölgesindeki konumunu etkilemektedir. İz bölgesi genişliğinin değişmemesi akış ayrılmasının yaklaşık aynı açı ile olduğunu ancak girdapların daha geride oluştuğu sonucunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 8 $Re=6049$, $U=2.8$ m/s, $f_p=3.5$ kHz sinüzoidal tam sürüm olması durumunda hız profilinin farklı voltaj değerlerindeki profili.

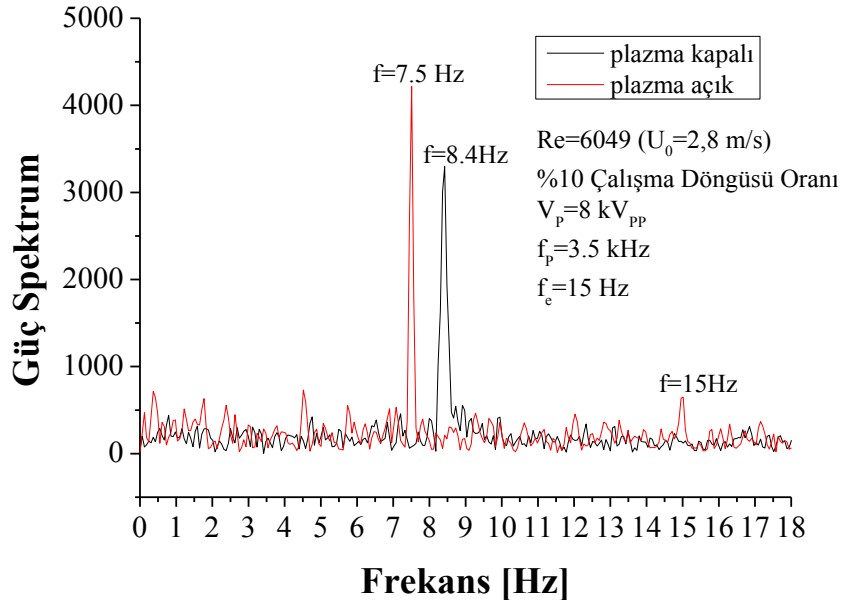
Şekil 4.9’da plazma RF frekansının iz bölgesi hız profili üzerine etkisi verilmiştir. Burada ele alınan frekans değerleri için frekansın önemli etkisi görülmemiştir.



Şekil 4. 9 $Re=6049$ ($U=2.8$ m/s), $V_p=7.2$ kV sinüzoidal tam sürüm olması durumunda farklı frekans değerlerindeki hız profili.

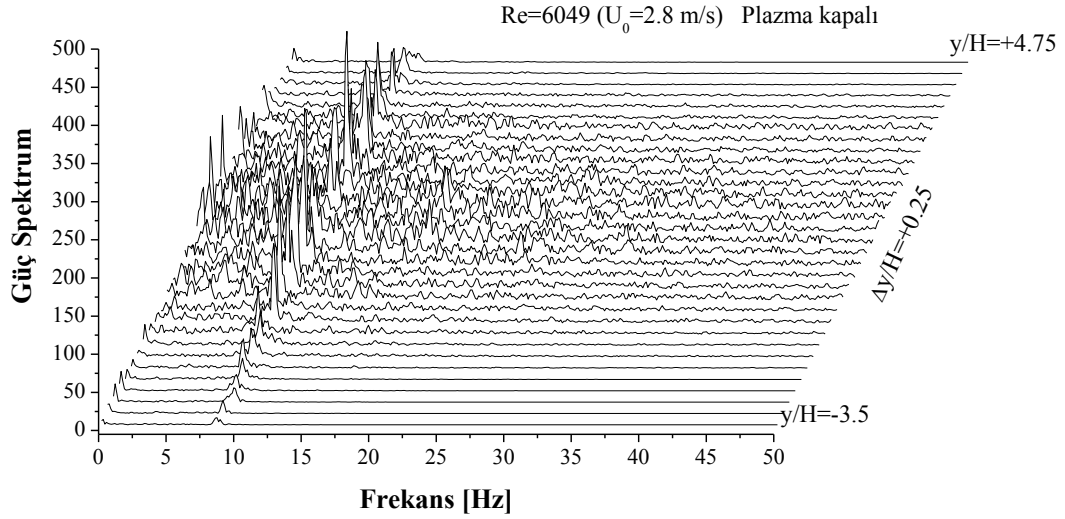
Hız ölçümlerinin spektral analizlerinden hızda zaman verilerinde tekrarlanan değişimler frekans boyutunda elde edilmiştir. Girdap kopma frekansında güç spektrum grafiğinde pik değerleri oluşmaktadır. Şekil 4.10’da plazma kapalı ve plazma açık durumda elde

edilen spektral dağılımlar görülmektedir. Plazma kapalı iken 8.4 Hz’de girdap kopma frekansı elde edilirken. Çalışma döngüsü oranının %10 ve uyarım frekansının 15 Hz olduğu durumda girdap kopma frekansı 7.5 Hz olarak elde edilmiştir. Bu değer uyarım frekansının yarısına karşılık gelmekte olup plazma açık iken birincil girdap kopmalarının 7.5 Hz değerine sabitlediğini göstermektedir.

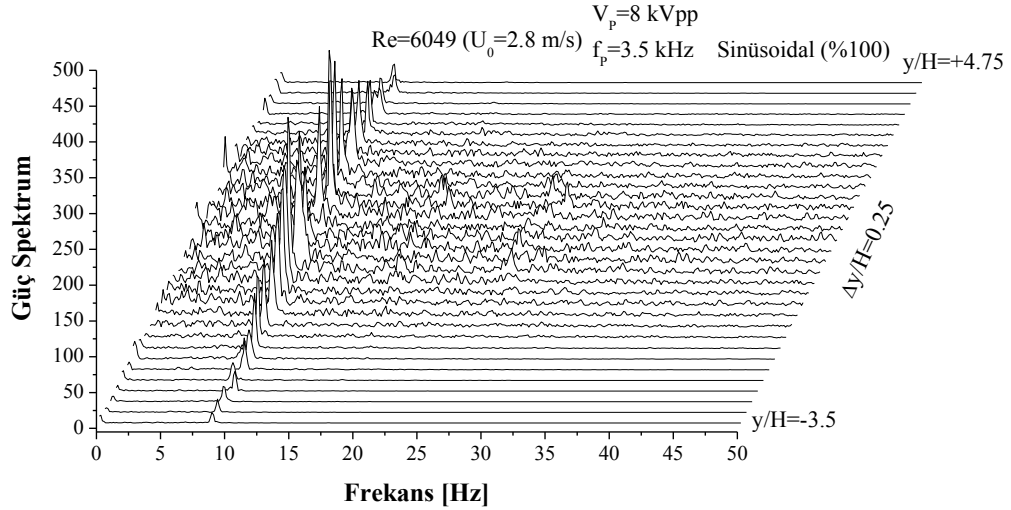


Şekil 4. 10 Güç spektrumunun frekansa bağlı değişimi.

Şekil 4.11 ve 12’de $Re=6049$ değerinde plazma kapalı ve açık durumdayken $x/H=3.75$ istasyonunda iz bölgesi genişliği boyunca yapılan hız taramasının spektral dağılımları görülmektedir. Her iki durumdaki girdap kopma frekansları birbirine yakın çıkmış olmakla birlikte, iz bölgesi genişliği boyunca spektral dağılımların kalitesi bir miktar farklılık arz etmektedir. Plazma kapalı iken düşük frekanslarda düzensiz değişimler görünmekteyken plazma açıkken çok daha az olarak elde edilmiştir. Bu durum plazmanın girdap kopmalarını belirli bir frekansa kilitleyerek daha düzenli girdapların oluşmasını sağladığını göstermektedir.

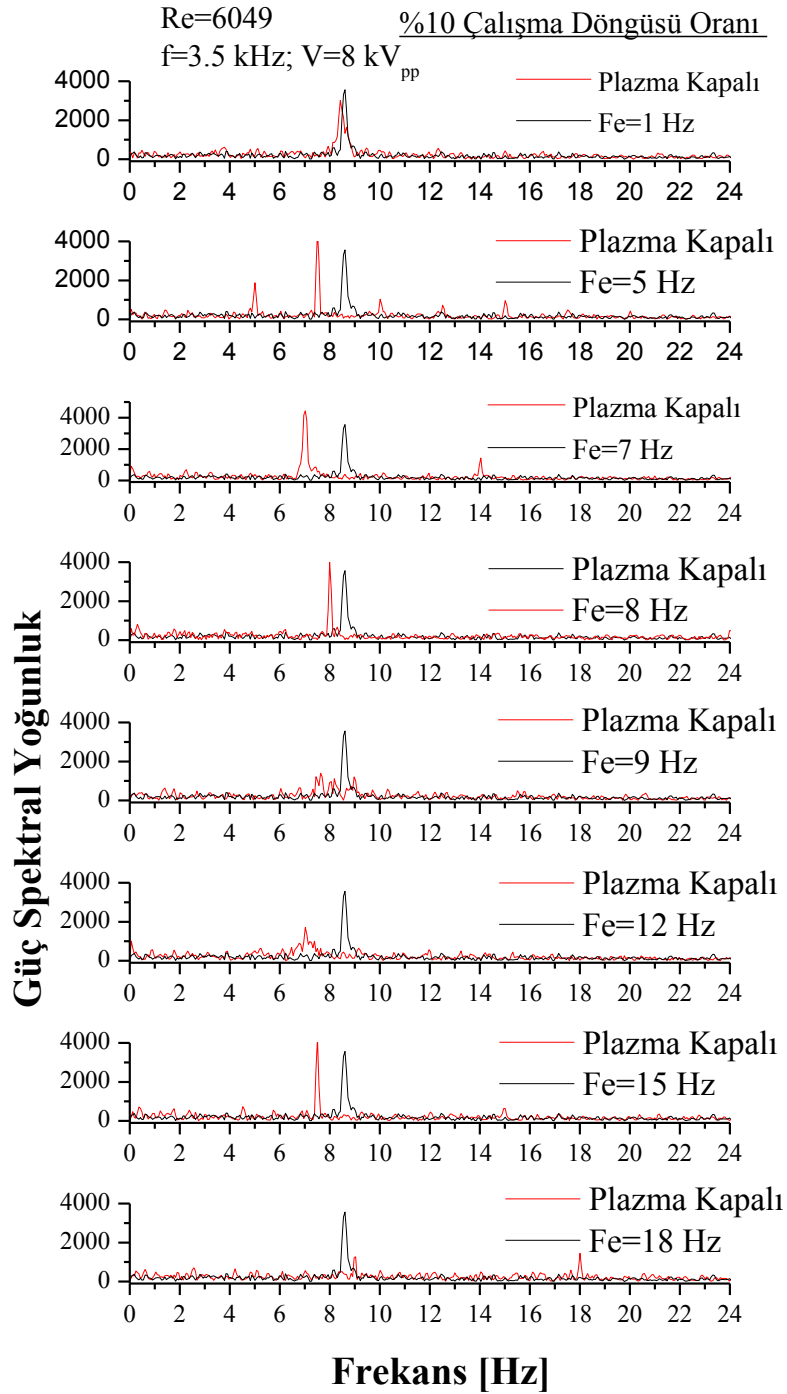


Şekil 4. 11 Plazma kapalı iken güç spektrumunun frekansa bağlı değişimi.



Şekil 4. 12 Plazma açık iken güç spektrumunun frekansa bağlı değişimi.

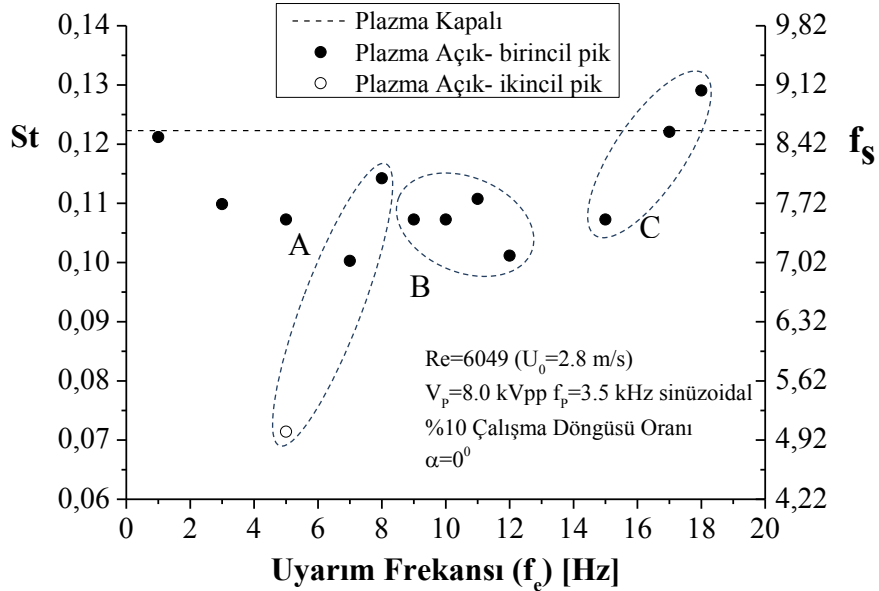
Şekil 4.13'de Reynolds sayısının 6049 değerinde, çalışma döngüsü oranının %10 olduğu durumda farklı uyarım frekanslarının girdap kopma frekansları üzerine etkileri görülmektedir. Burada en küçük uyarım frekansı olan 1 Hz durumunda, plazmanın kontrol etkisi oluşmamıştır. Uyarım frekansının 5 Hz olması durumunda, spektral dağılımda 5, 7.5, 10, 12.5 ve 15 Hz değerlerinde pik değerlerin olduğu görülmektedir. Burada esas olarak girdap kopmalarının 7.5 Hz değerinde olduğu ancak uyarım frekansı olan 5 Hz değerinde de aralıklarla girdap kopmalarının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Daha büyük frekanslarda görülen pikler bu iki kararlı girdap kopmalarının katlarındaki yansımalar olarak oluşmaktadır.



Şekil 4. 13 Farklı uyarım frekanslarında güç spektrumunun frekansla değişimi.

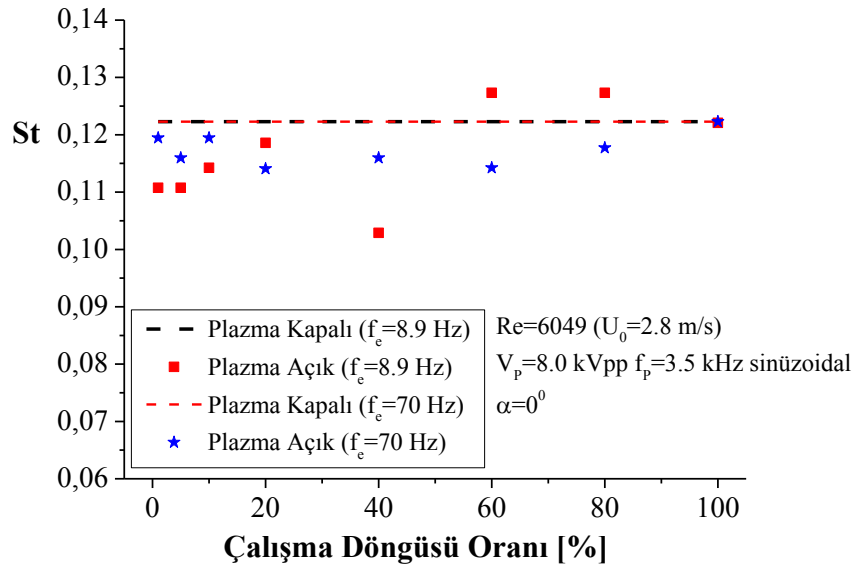
Uyarım frekansının 7 ve 8 Hz olması durumunda girdap kopma frekansları 7 ve 8 Hz değerlerine kitlenmektedir. Uyarımın, kapalı durumdaki girdap kopma frekansının civarındaki daha büyük bir değer olan 9 ve 12 Hz'e ayarlanması durumunda girdap kopma frekansının ayarlanan değere sabitlenemediği ve düzensiz girdap kopmalarının olduğu görülmektedir. Frekansın 15 Hz olması durumunda ise yeniden kilitlenme etkisi görülmekte ve düzenli girdap yapısı oluşmaktadır. Bu durumda girdap kopmaları

uyarım frekansının yarısında oluşmaktadır. Uyarım frekansının 18 Hz olarak uygulanması durumunda girdap kopmalarının 9 ve 18 Hz değerlerinde olduğu görülmektedir. Burada girdapların 18 Hz’de oluşmasına bağlı olarak girdap boyutlarının küçülmesi spektral yoğunluktaki piklerin şiddetinin de küçülmesine neden olmaktadır. Şekil 4.13’de uygulanan uyarım frekanslarının kare model girdap yapılarını önemli ölçüde değiştirebildiği ve akış kontrolünün sağlanmasında etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu grafiklerdeki birincil piklerin frekans değerleri kullanılarak elde edilen Strouhal sayısı dağılımları Şekil 4.14’de sunulmuştur. Plazma kapalı durumdaki girdap kopma frekansı olan 8.5 Hz değeri civarında uygulanan %10 çalışma döngüsü oranlı sinyal uyarım frekansının etkisi ile girdap kopma frekansları daha düşük değerlere taşınmıştır. Uyarım frekansının 17 Hz olduğu durumda girdap kopma frekansı plazma kapalı durum ile aynı olarak elde edilmiştir. Burada görüleceği üzere bu uyarım frekansı girdap kopma frekansının iki katındadır. Girdap kopma frekansının uyarım frekansı ile değişimini daha iyi sınıflandırmak için şekil üzerinde görüleceği üzere A, B ve C gruplarına ayrılmıştır. A modunda iken uyarım frekansı girdap kopma frekansını kendi frekansına kilitlemiştir. B modunda uyarım frekansı girdap kopma frekansını daha kararsız hale sokarak düzensiz girdapları oluşturmuştur. C modunda ise girdap kopma frekansı uyarım frekansının yarısına kilitlemiştir.



Şekil 4. 14 $Re=6049$ ($U=2.8$ m/s), $f_p=3.5$ kHz, $V_p=8.0$ kV_{pp}, sinüzoidal %10 çalışma döngüsü oranı sürümünde, Strouhal sayısının uyarılma frekansına göre değişimi.

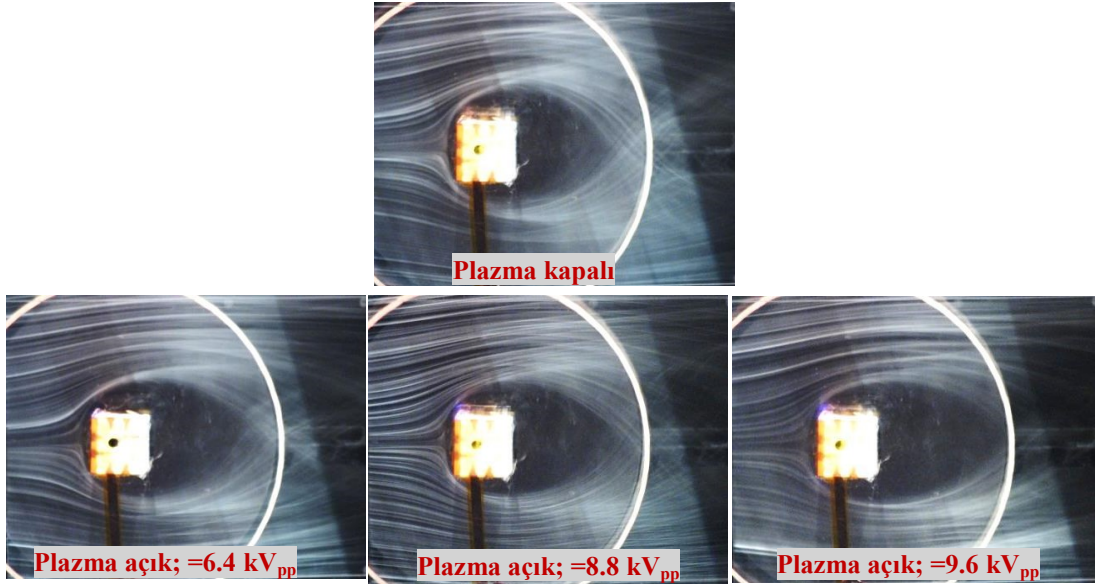
Şekil 4.15’de uyarım frekansının 8.9 ve 70 Hz olduğu durumlarda farklı çalışma döngüsü oranları için Strouhal sayısı değişimleri verilmiştir. Burada görüleceği üzere tam sürüm durumunda (%100) elde edilen girdap kopma frekansı plazma kapalı durumla aynı değerdedir. 70 Hz de yapılan uyarım durumunda bütün çalışma döngüsü oranları için plazma kapalı durumdaki değer altında girdap kopma frekansları elde edilmiştir. Uyarım frekansının 8.9 Hz olması durumunda ise %50 oranına kadar plazma kapalı durumdakinin altında ve daha büyük oraklarda ise üzerinde girdap kopma frekansları elde edilmiştir. Burada en etkili uyarımın %40 çalışma döngüsü oranında elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.15 $Re=6049$ ($U=2.8$ m/s), $f_p=3.5$ kHz, $V_p=8.0$ kV_{pp}, uyarılma frekansı $f_e=70$ Hz ve $f_e=8.9$ Hz değerleri için Strouhal sayısının çalışma döngüsü oranına göre değişimi.

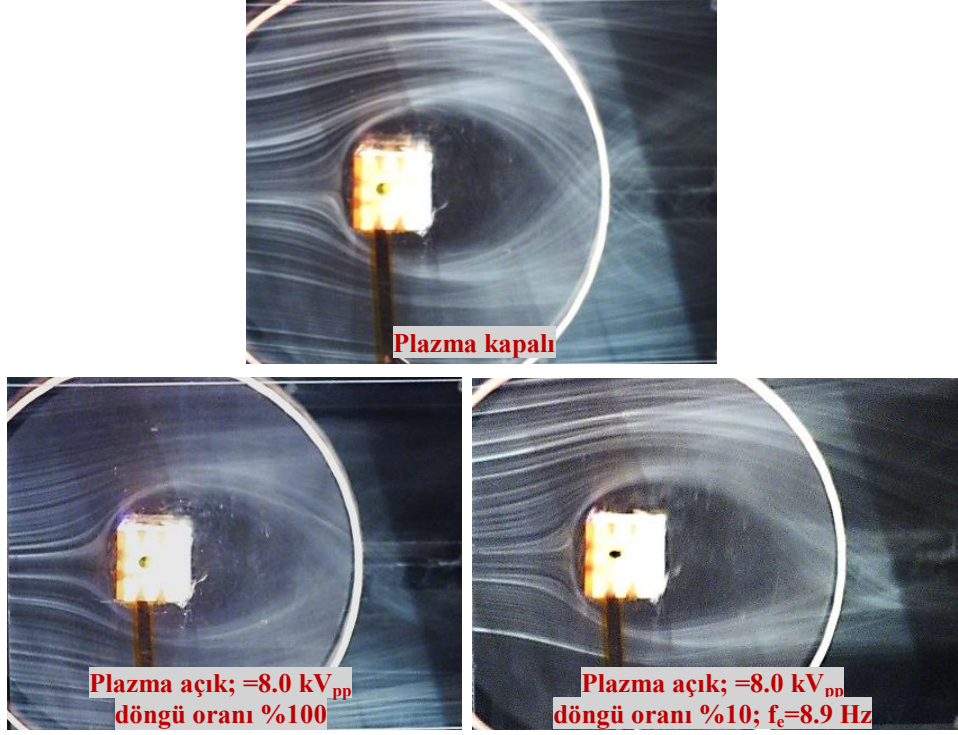
Bu çalışma da kullanılan kare model üzerine yerleştirilen plazma aktüatörler tarafından sağlanan akış kontrolünün etkisini ortaya koyabilmek için duman-tel yöntemi ile $Re=6049$ değerinde akış görüntülemesi yapılmış ve Fotoğraf 4.1 ve 4.2’de sunulmuştur. Fotoğraf çekimlerinde diyaframın açık kalma süresi (exposure time) 1.5 s olarak tutulmuştur. Oluşturulan duman ise yaklaşık 0.5 – 0.8 s arasında cisim etrafındaki akışı görünür hale getirmiştir. Bu süre zarfında oluşan yaklaşık 4-5 tane girdabın üst üste iz düşümü sağlanmıştır. Böylece iz bölgesi genişliği ve girdap oluşum bölgesi uzunluğu görsel olarak elde edilmiştir.

Fotoğraf 4.1’de plazma aktüatöre sürülen sinyalin RF frekansı 3.5 kHz değerinde sabit tutularak yalnızca voltajın oluşan akış yapısı üzerine etkisi incelenmiştir. Voltaj değeri arttıkça girdap oluşum mesafesinin artarak kare modelin daha arkasına kaydığı görülmüştür. Bununla birlikte, akışın yüzeyden ayrılma noktası sabit olup iz bölgesi genişliği yaklaşık aynı kalmaktadır.



Fotoğraf 4. 1 Plazma kapalı ve tam sürüm durumunda farklı voltaj sinyalleri sürümünde akış görüntülemesi.

Fotoğraf 4.2’de ise plazma aktüatöre sürülen sinyalin RF frekansı 3.5 kHz’de ve voltaj değeri 8.0 kV’da sabit tutulmuştur. Plazma kapalı, plazma açık (tam sürüm) ve 8.9 Hz’de uyarım frekansına sahip %10 çalışma döngülü sürüm olarak üç durum karşılaştırılmıştır. Burada tam sürüm durumunda elde edilen akış yapısında girdap oluşum mesafesinin kapalı duruma göre bir miktar arttığı ancak iz bölgesi genişliğinin yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir. Plazmanın aktif olduğu durumda cismin arkasına yuvarlanan kayma tabakalarının eğiminin azalması bu akış tabakalarının akış yönündeki hız bileşenlerinin bir miktar artmasına nedene olmaktadır. Bu durum Şekil 4.7’deki hız profilinden elde edilen sonuçları da desteklemektedir. Nitekim $Re=6049$ değerinde elde edilen hız profilinde iz bölgesi genişliği yaklaşık plazma kapalı durumla aynı iken, iz bölgesi hız bileşeninde bir miktar artış elde edilmiştir. Fotoğraf 4.2’de çalışma döngüsü oranı %10’da iken de tam sürüm uygulanan sinyaldekine benzer etki gözlemlenmiştir. Böylece daha az güç tüketimi ile akış yapısının kontrolünün sağlanabileceği ortaya konmuştur.



Fotoğraf 4. 2 Plazma kapalı, $V_p= 8.0 \text{ kV}_{pp}$, $f_p=3.5 \text{ kHz}$ tam sürüm ve çalışma dögüsü oranı %10 durumunda iken akış görüntülemesi.

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu çalışmada, literatürde uçak kanadı profili ve dairesel kesitli küt cisimler etrafındaki akış kontrolünde kullanılan DBD plazma aktüatörleri, keskin köşelere sahip kare kesitli küt cisme uygulanmıştır. Diğer iki geometride cisim üzerindeki sınır tabaka gelişiminin plazma tarafından manipüle edilmesi düşük Reynolds sayılarında önemli akış kontrolü sağlarken, akış ayrılma konumu sabit olan kare modelde akış kontrolü daha zor olmakla birlikte, kullanılan çalışma aralığında etkili bir akış kontrolü sağlanabilmiştir.

Kare model etrafındaki çalışma deneysel olarak rüzgar tüneline sağlanan akış ortamında Reynolds sayısının 3672 - 8425 aralığında gerçekleştirilmiştir. Cisme etki eden sürüklenme kuvveti ölçümlerinin yanı sıra iz bölgesi hız dağılımı, hız spektral dağılımı ve akış görüntülemesi deneyleri yapılmıştır. Sinüzoidal yüksek gerilim sinyalinin, RF frekansının 3.1 - 3.9 kHz aralığında ve yüksek voltajın 5.6 - 9.6 kV_{pp} aralığında plazma aktüatörün akış kontrol etkisi hem tam sürüm hem de farklı uyarım frekanslarına sahip çalışma döngüsü oranlarında elde edilmiştir.

Plazmanın sürüklenme kuvveti üzerine etkisine bakıldığında, en fazla azalma en düşük Reynolds sayısında elde edilmiştir. Bu Reynolds sayısında 8.8 kV_{pp} değerinde yapılan tam sürümde sürüklenme kuvveti %53 azalmıştır. Bununla birlikte, en yüksek Reynolds sayısı olan 8425 değerinde, voltajın kullanılan en yüksek değerlerinde bile dikkate değer bir iyileştirme sağlanamamıştır. Daha düşük Reynolds sayılarında Reynolds sayısı azaldıkça, voltajdaki artış ile sürüklenme kuvvetindeki azalma giderek artmıştır.

Çalışılan RF frekans aralığında bütün Reynolds sayılarında frekans değişiminin sürüklenme kuvvetinin azalmasında etkili olmadığı görülmüştür.

Çalışma döngüsü oranının ve uyarım frekansının sürüklenme kuvvetinin azaltılmasında tam sürüme göre daha fazla etkili olduğu ortaya konulmuştur. Uyarım frekansının 8.9 ve 70 Hz olduğu durumda, sürüklenme kuvvetindeki en fazla iyileşme çalışma döngüsü oranının %40 olduğu durumda elde edilmiştir. Bu durum daha fazla akış kontrolünün sağlanmasına rağmen tam sürüme göre %60 daha az güç tüketiminin olduğunu ifade etmektedir. Hatta, çalışma döngüsünün %5 (%95 daha az güç tüketimi) olduğu durumda

bile elde edilen sürüklenme kuvvetindeki azalma tam sürüm durumunda elde edilenden daha fazla olmaktadır.

Plazmanın akış alanı üzerine etkisine bakıldığında iz bölgesi hız profili üzerinde önemli değişim oluşturduğu görülmektedir. Özellikle düşük Reynolds sayılarında iz bölgesi minimum hız seviyesinde bir miktar artış sağlandığı görülmüştür. Bu durum plazmanın iz bölgesini daha yuvarlatılmış bir cismin iz bölgesine benzer bir yapıya dönüştürdüğünü ortaya koymaktadır.

Spektral dağılımlara bakıldığında plazmanın aktif olduğu durumda girdap kopma frekansının oluşturduğu piklerin daha yalın olması, girdapların daha düzenli olarak koptuklarını göstermektedir. Tam sürüm durumunda girdap kopma frekansında önemli bir değişim görülmezken, çalışma döngülü durumda girdap kopma frekanslarının uyarım frekanslarından etkilendikleri görülmüştür. Bu da çalışma döngülü durumda elde edilen akış kontrolünün girdap oluşum frekansı üzerinde de etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, belirli frekanslarda yapılan uyarımlar girdap kopma frekansını uyarım frekansına kilitlemiştir.

KAYNAKLAR

Akansu, Y. E., “Ardışık Olarak Yerleştirilen Farklı Geometrilere Sahip Küt Cisimlerin Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 2004.

Akansu, Y. E., Karakaya, F., “Elektrohidrodinamik Yöntemler ile Aerodinamik Yapılı Cisimler Etrafındaki Akış Kontrolü”, **TÜBİTAK Proje Sonuç Raporu, Proje numarası: 110M056**, Niğde, 2013.

Aksakal, H., “İyonküredeki Termoküresel Rüzgarlar”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 2000.

Aksakal, H., Plazma Fiziği Ders Notları, Niğde Üniversitesi, Niğde, 2011.

Avcı, D. E., Budak, M., Ünlü, P., Ingeç, Ş. K., “Fen Bilgisi Öğretmenliği İçin Modern Fizik 4”, **Anı Yayıncılık**, Ankara, Eylül 2006.

Balcon, N., Benard, N., Lagmich, Y., Boeuf, J. P., Touchard, G., Moreau, E., “Positive and Negative Sawtooth Signals Applied to a DBD Plasma Actuator Influence on the Electric Wind”, **Journal of Electrostatics**, 67, 140–145, 2009.

Bellan P. M., “Fundamentals of Plasma Physics”, 1-69, **New York Cambridge University**, 2006.

Boeuf, J. P., Lagmich, Y., Unfer, T., Callegari, T., Pitchford, L. C., “Electrohydrodynamic Force in Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators”, **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 40, 652-662, 2007.

Boyd, T. J. M., Sanderson, J. J., “The Physics of Plasmas”, 48-76, **New York: Cambridge University**, 2003.

Brodin, G., Plasma Physics Lecture, Umea University, Umea, Sweden, 2012.

Chen, F. F., “Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion”, 53-285, **New York: Plenum**, 1974.

Chirayath, V., Alanson, J. J., “Plasma Actuated Unmanned Aerial Vehicle the First Plasma Controlled Flight in History Single Dielectric Discharge Devices as an Efficient and Novel Means of Aircraft Control”, **Stanford University**, 2012.

Coleman, H. W., Steele, W. G., “Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers”, 2nd ed., **John Wiley&Sons**, New York, 1998.

Cook, N. J., “The Designer Guide to Wind Loading on Building Structures: Part 1”, **Butterworths**, London, England, 1986.

Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., “Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları”, **Güven Kitapevi**, İzmir, 2008.

Durscher, R., Roy, S., “Novel Multi-Barrier Plasma Actuators for Increased Thrust”, **AIAA, 48 st Aerospace Science Meeting and Exhibit**, Orlando, Florida, 2010.

Flint O. T., Kozlov, A., Corke, T. C., “Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction”, **AIAA JOURNAL**, 46, 8, 2008.

Gad-el-Hak, M., “Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management”, **Cambridge University Press**, New York, 2000.

Gad-El-Hak, M., “Introduction to Flow Control”, **Springer-Verlag**, Berlin Heidelberg, 1-107, 1998.

Goeksel, B., Greenblatt, D., Rechenberg, I., Bannasch, R., Paschereit, C. O., “Plasma Flow Control at MAV Reynolds Numbers”, **Conferance and Flight Competition (EMAV)**, 2007.

Goldston, R. J., “Rutherford P. H., “Introduction to Plasma Physics”, 85-180, **Bristol IOP**, 1995.

Griffiths, D. J., “Introduction to Electrodynamics”, *Prentice-Hall International*, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.

Güleç, A., Öksüz, L., Hershkowitz, N., “Optical Studies of Dielectric Barrier Plasma Aerodynamic Actuators”, *IOP Publishing Plasma Sources Science And Technology*, 20, 045019, 2011.

Hyun, K. T., Chun, C. H., “The Wake Flow Control Behind a Circular Cylinder Using Ion Wind”, *Experiments in Fluids*, 35, 541-552, 2003.

Jayaraman, B., Cho, Y. C., Shyy, W., “Modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator”, *Applied Physics*, 103, 053304, 2008.

Jorgensen, F. E., “How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers”, Dantec Dynamics, Skovlunde, Denmark, 2002.

Jukes, T. N., Choi, K. S., “Control of Unsteady Flow Separation Over a Circular Cylinder Using Dielectric-Barrier-Discharge Surface Plasma”, *Physics of Fluids*, 21, 094106, 2009.

Kriegseis, J., Möller, B., Grundmann, S., Tropea, C., “Capacitance and Power Consumption Quantification of Dielectric Discharge (DBD) Plasma Actuators”, *Journal of Electrostatics*, 69, 302-312, 2011.

Labergue, A., Moreau, E., Zouzou, N., Touchard, G., “Separation Control Using Plasma Actuators: Application to a Free Turbulent Jet”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40, 674–684, 2007.

Leger, L., Moreau, E., Artana, G., Touchard, G., “Influence of a DC Corona Discharge on the Airflow Along an Inclined Flat Plate”, *Journal of Electrostatics*, 51-52, 300-306, 2001.

Li, G., Nie, C., Li, Y., Zhu, J., Xu, Y., “Experimental Investigation of Flow Separation Control Using Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators”, *Plasma Science and Technology*, 10, 5, 2008.

Likhanskii, A. V., Shneider, M. N., Macheret, S. O., Miles, R. B., “Modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator in Air”, *Journal of Applied Physics*, 103, 5, 2008.

Little, J., “High-lift Airfoil Separation With Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuation”, *AIAA*, 48, 12, 2010.

Nehra, V., Kumar, A., Dwivedi, H. K., “Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources”, *International Journal of Engineering*, 2, 1, 53-68, 2008.

Obasaju, E. D., “An Investigation of the Effects of Incidence on the Flow Around a Square Section Cylinder”, *Aeronautical Quarterly*, 34, 243-259, 1983.

Orlov, M. D., Font, G. I., Edelstein, D., “Characterization of Discharge Modes of Plasma Actuators”, *AIAA JOURNAL*, 46, 12, 2008.

Rafatov, I., Bogdanov, E. A., Kudryavtsev, A. A., “Account of Nonlocal Ionization by Fast Electrons in the Fluid Models of a Direct Current Glow Discharge”, *Phys. Plasmas*, 19, 093503, 2012.

Rigit, A. R. H., Dakek, I., “Performance of a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator”, *Second International Conference on Computer Research and Development*, IEEE Computer Society, 2010.

Roth, J. R., “Industrial Plasma Engineering Volume 1”, *IOP Publishing, Bristol and Philadelphia*, 1995.

Roth, J. R., “Industrial Plasma Engineering Volume 2”, *IOP Publishing, Bristol and Philadelphia*, 2001.

Roth, J. R., Sherman, D. M., Wilkinson, S. P., “Boundary Layer Flow Control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma”, *AIAA, 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, NV, 12-15, January, 1998.

Roth, J. R., Sin, H., Madhan, R. C. M., Wilkinson, S. P., “Flow Re-Attachment and Acceleration by Paraelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic (EHD) Effects”, *AIAA, 41st Aerospace Science Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 2003.

Serway, R. A., “Physics for Scientists and Engineers With Modern Physics”, *Brooks Cole*, 5 edition, 2000.

Srivastava, A. K., Prasad, G., “Low Frequency Ionization Waves in Helium Surface Barrier Discharge at Atmospheric Pressure”, *Physics Letters A*, 374, 3960–3966, 2010.

Starikovskii, A. Y., Nikipelov, A. A., Nudnova, M. M., Roupassov, D. V., “SDBD Plasma Actuator with Nanosecond Pulse-periodic Discharge”, *Plasma Sources Science and Technology*, 034015, 2009.

Şanlısoy, A., “Plazma Aktüatörün NACA2415 Model Uçak Kanadı Etrafındaki Akış Kontrolü Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2013.

Taleghani A. S., Shadaram A., Mirzaei M., “Effects of Duty Cycles of the Plasma Actuators on Improvement of Pressure Distribution Above a NLF0414 Airfoil”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40, 1434-1440, 2012.

Thomas, F. O., Corke, T. C., Iqbal, M., Kozlov, A., Schatzman, D., “Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control”, *AIAA Journal*, 47, 9, 2009.

Thomas, F. O., Kozlov, A., Corke, T. C., “Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction”, *AIAA JOURNAL*, 46, 8, 2008.

Url-1, “Plasma (physics)”, Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics)) , 2013.

Url-2, “Fusion21 Plasma”, Max Planck Institut für Plasmaphysik, <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/fusion21/plasma/index.html> , 2013.

Url-3, “Sun”, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun> , 2013.

Yeniçay, F., “Plazma Fiziği”, *İstanbul Üniversitesi Yayınları*, İstanbul, 1970.

EKLER

Ek-A Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada ölçülen ve hesaplanan parametrelerin belirsizlik değerleri Coleman ve Steele (1998) tarafından sunulan yöntemler ile belirlenmiştir. Deneysel parametreleri denklem E-1 formunda fonksiyonlardır.

$$r = kX_1^a X_2^b X_3^c \dots \quad (\text{E- 1})$$

Bu formdaki fonksiyonun belirsizlik ifadesi denklem E-2’de ifade edilmiştir.

$$u_r = \frac{w_r}{r} = \left[a^2(u_{x_1})^2 + b^2(u_{x_2})^2 + c^2(u_{x_3})^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (\text{E- 2})$$

Bu çalışma kapsamında deneysel olarak basınç, hız, kuvvet, yoğunluk, sıcaklık vb. parametreler ölçülmüş olup bu ölçüm sonuçları kullanılarak Reynolds sayısı, sürüklenme kuvveti katsayısı ve Strouhal sayısı hesaplanmıştır.

Kullanılan parametrelerin belirsizliğinin tespiti

Burada kullanmakta olduğumuz diğer bağımlı ve bağımsız değişkenler, Atmosfer basıncı (P_{atm}), sıcaklık (T), karakteristik uzunluk (H), model uzunluğu (L), sürüklenme kuvveti (F_D), dinamik viskozite (μ), kızgın tel anemometresi ile ölçülen hız (U_{CTA}), dinamik basınç (P_{dinamik}), girdap kopma frekansının (f_s), belirsizlik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Burada bağımsız değişkenlere ait belirsizliklerin tespitinde kullanılan ölçüm cihazlarının kullanım kılavuzları ve benzer belirsizlik analizlerini çalışmalarında kullanan Jorgensen (2002), Akansu ve Karakaya (2013) ve Şanlısoy’un (2013) çalışmalarından faydalanılmıştır.

- 85 kPa atmosfer basıncının ölçümünde 1 kPa hata oluşabilmektedir. Bu durumda atmosfer basıncının belirsizliği %1.1 olarak elde edilir.

$$\left(u_{P_{\text{atm}}} = \frac{w_{P_{\text{atm}}}}{P_{\text{atm}}} \cong \frac{1000}{85000} = 0.011 = \%1.1 \right)$$

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

- Sıcaklık ölçümünde ölçüm sisteminden kaynaklanan veya deney süresince sıcaklık değişimine bağlı olarak 2°C hata oluşabilmektedir. Bu durumda 25°C'deki sıcaklığın ölçümünde, sıcaklığa ait belirsizlik %0.671 olarak elde edilir.

$$\left(u_T = \frac{w_T}{T} \cong \frac{2}{298} = 0.00671 = \%0.671\right)$$

- 40 mm karakteristik uzunluğun ölçümünde oluşan 1 mm'lik hata nedeni ile oluşan belirsizlik %2.5'dir. $\left(u_H = \frac{w_H}{H} \cong 0.025 = \%2.5\right)$

- 400 mm kare model uzunluğunun ölçümünde oluşan 1 mm'lik hata nedeni ile oluşan belirsizlik %0.25'dir. $\left(u_L = \frac{w_L}{L} \cong 0.0025 = \%0.25\right)$

- 25°C sıcaklığındaki havanın 2°C değişimi ile dinamik viskozitesindeki oluşan belirsizlik, %0.51'dir. $\left(u_\mu = \frac{w_\mu}{\mu} \cong 0.00508 = \%0.51\right)$

- Girdap kopma frekansının ölçümünde oluşan belirsizlik %1.25 seviyesindedir. $\left(u_{f_s} = \frac{w_{f_s}}{f_s} \cong 0.0125 = \%1.25\right)$

Yoğunluğun belirsizliğinin hesaplanması

$\rho = \frac{P_{atm}}{RT}$ olarak tanımlanan yoğunluk için belirsizlik değeri, atmosfer basıncı ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişmektedir. Yoğunluk için belirsizlik denklemi,

$$u_\rho = \frac{w_\rho}{\rho} = \left[(1)^2 \left(\frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_T}{T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (E-3)$$

olarak bulunur ve yoğunluğun belirsizliği denklem E-3 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

Denklem E-3'de atmosfer basıncının ve sıcaklığın belirsizliğinin değerlerinin yazılması ile yoğunluğun belirsizliği $u_p \cong 0.012$ veya %1.2 olarak elde edilir.

Ön bakış alanının belirsizliğinin hesaplanması

$A_{\text{ön}} = H \times L$ olarak tanımlanan ön bakış alanının değeri karakteristik uzunluk ve kare model uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Ön bakış alanının bağlı belirsizliği denklem E-4' de verilmiştir.

$$u_{A_{\text{ön}}} = \frac{w_{A_{\text{ön}}}}{A_{\text{ön}}} = \left[\left(\frac{w_H}{H} \right)^2 + \left(\frac{w_L}{L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E- 4})$$

Denklem E-4'de karakteristik uzunluk ve kare model uzunluğunun belirsizliğinin yerine koyulması ile ön bakış alanının belirsizliği $u_{A_{\text{ön}}} \cong 0.0251$ veya %2.5 olarak elde edilir.

Sürüklenme kuvvetinin ölçümünde oluşan belirsizlikler

Sürüklenme kuvvet katsayısına etki eden belirsizlik değerleri $U_0=2.8$ m/s ($Re= 6049$) değeri için elde edilmiştir.

X₁-) Kuvvet ölçümünde yük hücresinin belirsizlik değeri y-yönünde %1'dir. $(u_{X_1} = \frac{w_{X_1}}{X_1} \cong 0.01 = \%1)$

X₂-) Hücum açısındaki 1°'lik hata nedeni ile kuvvet ölçümünde oluşan belirsizlik %0.6'dir. $(u_{X_2} = \frac{w_{X_2}}{X_2} \cong 0.006 = \%0.6)$

X₃-) Veri toplama kartı çözünürlüğü nedeni ile oluşan belirsizlik %0.34'dür. $(u_{X_3} = \frac{w_{X_3}}{X_3} \cong 0.0034 = \%0.34)$

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

X₄-) Kalibrasyon işleminde 0.2 N'luk kuvvet için oluşan belirsizlikler %0.7'dir.

$$\left(u_{X_4} = \frac{w_{X_4}}{X_4} \cong 0.007 = \%0.7\right)$$

Bu belirsizlikler dikkate alınarak sürüklenme kuvveti ölçümünde oluşan toplam belirsizlik;

$$\frac{w_{F_D}}{F_D} = \left[\left(\frac{w_{X_1}}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_2}}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_3}}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_4}}{X_4} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{F_D} = \frac{w_{F_D}}{F_D} = [(0.01)^2 + (0.006)^2 + (0.0034)^2 + (0.007)^2]^{1/2} \cong 0.014$$

%1.4 olarak elde edilir.

Kızgın tel anemometresi ile hız ölçümünde oluşan belirsizlikler

Kızgın tel anemometresi ile hız ölçümüne etki eden belirsizlik değerleri $U_0 = 2.8$ m/s ($Re=6049$) değeri için elde edilmiştir.

X₅-) Anemometreye ait belirsizlikler; gürültü, tekrarlanabilirlik ve frekans algılamasından oluşan belirsizlikler %0.5 mertebesindedir. $\left(\frac{w_{X_5}}{X_5} \cong 0.005 = \%0.5\right)$

X₆-) Kalibrasyon işleminde, 2.8 m/s'lik hız değerinde, kalibrasyon cihazında oluşan belirsizlik %5.1'dir. $\left(\frac{w_{X_6}}{X_6} \cong 0.051 = \%5.1\right)$

X₇-) Linearleştirme veya kalibrasyon eğrisi işleminden oluşan belirsizlik %0.4'dür. $\left(\frac{w_{X_7}}{X_7} \cong 0.004 = \%0.4\right)$

X₈-) 2.8 m/s hızda $\frac{\partial U}{\partial E} = \frac{19,3 \text{ m/s}}{\text{volt}}$ luk değişim için 10V aralığında 16 bit'lik A/D

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

dönüştürücü kartın çözünürlüğünden oluşan belirsizlik %0.087'dir. $\left(\frac{W_{X_8}}{X_8} \cong 0.00087 = \%0.087\right)$

X₉-) Prob pozisyonunda 1°'lik hata nedeniyle hızda oluşan belirsizlik %0.009'dur. $\left(\frac{W_{X_9}}{X_9} \cong 0.00009 = \%0.009\right)$

X₁₀-) Prob çalışma sıcaklığındaki 2°C'lik sıcaklık değişimi nedeni ile hızda oluşan belirsizlik %1.6'dır. $\left(\frac{W_{X_{10}}}{X_{10}} \cong 0.016 = \%1.6\right)$

X₁₁-) Hava yoğunluğundaki 2°C'lik sıcaklık değişimine bağlı olarak hızda oluşan belirsizlik %0.39'dur. $\left(\frac{W_{X_{11}}}{X_{11}} \cong 0.0039 = \%0.39\right)$

X₁₂-) Atmosfer basıncındaki 1 kPa'lık değişim nedeni ile hızda oluşan belirsizlik %0.68'dir. $\left(\frac{W_{X_{12}}}{X_{12}} \cong 0.0068 = \%0.68\right)$

Bu belirsizlikler dikkate alınarak hız ölçümünde oluşan toplam belirsizlik;

$$u_{U_{CTA}} = \frac{W_{U_{CTA}}}{U_{CTA}} = \left[\left(\frac{W_{X_5}}{X_5}\right)^2 + \left(\frac{W_{X_6}}{X_6}\right)^2 + \left(\frac{W_{X_7}}{X_7}\right)^2 + \left(\frac{W_{X_8}}{X_8}\right)^2 + \left(\frac{W_{X_9}}{X_9}\right)^2 + \left(\frac{W_{X_{10}}}{X_{10}}\right)^2 + \left(\frac{W_{X_{11}}}{X_{11}}\right)^2 + \left(\frac{W_{X_{12}}}{X_{12}}\right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{U_{CTA}} = \frac{W_{U_{CTA}}}{U_{CTA}} = [(0.005)^2 + (0.051)^2 + (0.004)^2 + (0.00087)^2 + (0.00009)^2 + (0.016)^2 + (0.0039)^2 + (0.0068)^2]^{1/2} \cong 0.0544 = \%5.44$$

%5.44 olarak elde edilir.

Boyutsuz sayıların belirsizlik değerlerinin hesaplanması

Reynolds sayısının belirsizlik değerinin hesaplanması:

$Re = \frac{\rho U_{CTA} H}{\mu}$ şeklinde tanımlanan Re sayısı için belirsizlik değeri, ρ , U_{CTA} , H ve μ değerine bağlı olarak değişmektedir. Denklem E-2 kullanılarak Re sayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir (Denklem E-5).

$$u_{Re} = \frac{w_{Re}}{Re} = \left[(u_{\rho})^2 + (u_{U_{CTA}})^2 + (u_H)^2 + (u_{\mu})^2 \right]^{1/2} \quad (E-5)$$

Reynolds sayısının belirsizlik değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; yoğunluk, hız, karakteristik uzunluğun ve dinamik viskozitenin belirsizliğinin denklem E-5'de yerine yazılması ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} u_{Re} &= \frac{w_{Re}}{Re} = [(0.012)^2 + (0.0544)^2 + (0.025)^2 + (0.00508)^2]^{1/2} = 0.0613 \\ &= \%6.13 \end{aligned}$$

Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizlik değerinin hesaplanması:

$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}(\rho)(U_{CTA})^2 \cdot (A_{\text{ön}})}$ denklemi ile hesaplanan sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğini belirlemek için benzer şekilde denklem E-2 kullanılmaktadır. Denklem E-2 kullanılarak Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir (Denklem E-6).

$$u_{C_D} = \frac{w_{C_D}}{C_D} = \left[(u_{F_D})^2 + (u_{\rho})^2 + 4(u_{U_{CTA}})^2 + (u_{A_{\text{ön}}})^2 \right]^{1/2} \quad (E-6)$$

Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğinin değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; sürüklenme kuvveti, yoğunluk, hız, ön bakış alanının belirsizliğinin denklem E-6'da yerine yazılması ile sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliği hesaplanmaktadır.

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

$$u_{C_D} = \frac{w_{C_D}}{C_D} = [(0.014)^2 + (0.012)^2 + 4(0.0544)^2 + (0.0251)^2]^{1/2} = 0.113$$
$$= \%11.3$$

Strouhal sayısının belirsizlik değerinin hesaplanması:

$St = \frac{f_s H}{U_{CTA}}$ Denklemi ile hesaplanan Strouhal sayısının belirsizlik değeri girdap kopma frekansı (f_s), karakteristik uzunluk (H) ve serbest akış hızına (U_{CTA}) bağlı olarak değişmektedir. Denklem E-2 kullanılarak Strouhal sayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir (Denklem E-7).

$$u_{St} = \frac{w_{St}}{St} = [(u_{f_s})^2 + (u_H)^2 + (u_{U_{CTA}})^2]^{1/2} \quad (E-7)$$

Strouhal sayısının belirsizliğinin değeri daha önce tespit yukarıda tespit edilen; girdap kopma frekansı, karakteristik uzunluk ve serbest akış hızının belirsizlik değerlerinin denklem E-7’de yerine yazılması ile hesaplanmaktadır.

$$u_{St} = \frac{w_{St}}{St} = [(0.0125)^2 + (0.025)^2 + (0.0544)^2]^{1/2} = 0.0611$$
$$= \%6.11$$

ÖZ GEÇMİŞ

Cihan YEŞİLDAĞ 22.08.1978 tarihinde Isparta' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Niğde'de tamamladı. 2000 yılında girdiği Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümünden Temmuz 2006'da dereceyle mezun oldu. 2010 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2010-2013 yılları arasında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde proje asistanı olarak görev aldı. 2011-2012 döneminde kazandığı ERASMUS bursu kapsamında Umea Üniversitesinde (İSVEÇ) Yüksek Lisans çalışmalarına devam etti. Bilim dalındaki ilgi alanı Plazma Fiziğidir.

