



T.C.
ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

BİR UÇAK KANADI ÜZERİNDEKİ AKIŞIN PLAZMA SENTETİK
JET AKTÜATÖRÜ İLE KONTROLÜNÜN DENEYSEL
İNCELENMESİ

RAFET GÜNAYDIN

Nisan 2017

T.C.
ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİR UÇAK KANADI ÜZERİNDEKİ AKIŞIN PLAZMA SENTETİK JET
AKTÜATÖRÜ İLE KONTROLÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ

RAFET GÜNAYDIN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Nisan 2017

Rafet GÜNAYDIN tarafından **Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU**'nun danışmanlığında hazırlanan "**Bir Uçak Kanadı Üzerindeki Akışın Plazma Sentetik Jet Aktüatörü İle Kontrolünün Deneysel İncelenmesi**" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan : Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU, Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU, Karadeniz Teknik 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.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

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.

Rafet GÜNAYDIN

ÖZET

BİR UÇAK KANADI ÜZERİNDEKİ AKIŞIN PLAZMA SENTETİK JET AKTÜATÖRÜ İLE KONTROLÜNÜN DENEYSEL İNCELENMESİ

GÜNAYDIN, Rafet

Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Nisan 2017, 50 Sayfa

Bu tez çalışmasında aktif akış kontrol yöntemlerinden biri olan plazma jet aktüatörler çeşitleri incelenmiş ve farklı yöntemlerle sentetik plazma jet akışları oluşturulmuştur. Bu jetlerin akış karakteristikleri üzerine incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemeler ve literatürde dielektrik bariyer deşarj yöntemi ile oluşturulan plazma sentetik jetinin önemli bir yere sahip olması neticesiyle DBD (Dielektrik Bariyer Deşarj) yöntemi kullanılarak NACA0015 model uçak kanadı üzerine plazma aktüatörü yerleştirilmiş, Reynolds sayısı 5.0×10^4 değerinde aktif ve pasif olduğu durumlarda model uçak kanadı üzerine etki eden kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerindeki değişim incelenmiştir. Dielektrik bariyer deşarj yöntemi kullanılarak oluşturulan plazma akışa dik konumdan $\Delta\beta=30$ derecelik artışla akışa paralel olacak şekilde dört farklı pozisyona ayrı ayrı konumlandırılmış ve her bir konumda hücum açısı 0 ile 18 derece arasında 2'şer derecelik artışla ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonunda kaldırma kuvvet katsayısı artarken sürüklenme kuvvet katsayısının azaldığı ve bu sayede stol açısının 2 derece ötelendiği görülmüştür. Yapılan ölçümlerin yanında duman-tel yöntemi ile akış görüntülemesi yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Plazma sentetik jet, plazma aktüatör, NACA0015, akış kontrolü, kaldırma kuvveti, akış görüntülemesi

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW AROUND AIRCRAFT WING MODEL CONTROLLED BY PLASMA SYNTHETIC JET ACTUATOR

GÜNAYDIN, Rafet
Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Yahya Erkan AKANSU

April 2017, 50 pages

In this thesis study, plasma jet actuators which are one of the active flow control methods have been investigated and synthetic plasma jet has been formed by different methods. Also, the flow characteristics of the generated jets have been experimented. Due to the fact that the plasma synthetic jet generated by the dielectric barrier discharge method has an importance in the literature and this experimental study, the plasma actuators were placed on the NACA0015 model aircraft wing. The changes in lift and drag forces acting on the model aircraft wing were investigated when the plasma actuators were activated/deactivated at Reynolds number of 5.0×10^4 . Using of the dielectric barrier discharge method is generated the plasma were positioned at four different positions. Also, the measurements were performed for angle of attack in the range of 0° to 18° with an increment of 2° . As a result of performed measurement, lift coefficient increased, while drag coefficient decreased. It was observed that stall angle was shifted 2° . Flow measurements were made by using smoke-wire method.

Keywords: Plasma Synthetic Jet, Plasma actuator, NACA0015, flow control, lift force, flow visualization

ÖN SÖZ

Aktif akış kontrol yöntemlerinin istenilen zamanda ve şekilde akışa etki edebilmeleri, sürüklenme kuvvetinin ve akış kaynaklı titreşimlerin azaltılması ve kaldırma kuvvetinin artırılması veya cisim etrafındaki akış yapısının değiştirilmesine yönelik akış kontrol uygulamalarındaki önemini her geçen gün artırmaktadır. Plazma sentetik jetlerinin hareketli parçalarının olmaması, bakım gerektirmemesi ve uygulamalarda kolay kullanılması gibi özellikleri sayesinde aktif akış kontrol yöntemleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bu tez çalışmasında plazma sentetik jet oluşturmak için çeşitli parçaların tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Yapılan modeller üzerinde plazma oluşturularak çeşitli ölçümler yapılmış ve ayrıca model uçak kanadı üzerine plazma aktüatörü konumlandırılarak aerodinamik karakteristiklerinin iyileştirilmesine çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sentetik jet yardımı ile aktif akış kontrolü yapılarak plazma sentetik jetin akışa olan etkisi incelenmiş, kullanılan yöntem ile oluşturulan plazmanın etkisi kuvvet ölçümleri ve akış görüntülemesiyle ortaya konulmuştur.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, deneyimlerini, yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Bu tezin hazırlanması esnasında yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Arş. Gör. Hürrem AKBIYIK, Arş. Gör. Aytaç ŞANLISOY, Arş. Gör. Muhammed Arif ŞEN, Arş. Gör. Mehmet SEYHAN ve Arş. Gör. Tekmile AYDOĞDU'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamı; bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim Şerife Argun GÜNAYDIN'a, babam Necdetin GÜNAYDIN'a, annem Refiye GÜNAYDIN'a ve kardeşlerime ithaf ediyorum.

Ayrıca, bursiyer olarak görev aldığım 110M056 numaralı proje kapsamında finansal destek sağlayan TUBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Tezin Önemi	3
1.3 Literatür Özeti.....	3
1.4 Sentetik Jet (ZNMF) Çeşitleri.....	6
1.4.1 Piston silindir mekanizmalı sentetik jetler	7
1.4.2 Piezoelektrik diyaframlı sentetik jetler.....	8
1.4.3 Akustik diyaframlı sentetik jetler	9
1.4.4 Plazma sentetik jetler (PSJA).....	10
1.4.5 Plazma sentetik jetin aerodinamik akış kontrolünde kullanılması	13
BÖLÜM II DENEYSEL KURURLUM.....	18
2.1 Rüzgâr Tüneli.....	18
2.2 Plazmanın Oluşturulması	19
2.3 Plazma Sentetik Jet Test Modelleri.....	23
2.4 NACA0015 Tipi Uçak Kanadı Modelinin Üretilmesi	25
2.5 Uçak Kanadı Modeli Üzerine Plazma Aktuatörlerinin Yerleştirilmesi	26
2.6 Kuvvet Ölçüm Sistemi	31
2.7 Aerodinamik Kuvvet Katsayıları	33
BÖLÜM III BULGULAR ve DENEYSEK SONUÇLAR.....	34
3.1 Kapalı Hacim Plazma Sentetik Jet Aktuatörleri ile Hız Ölçümü.....	34
3.2 Açık Yüzey Plazma Sentetik Jet Aktuatörleri ile Hız Ölçümü.....	36
BÖLÜM IV SONUÇLAR	44
KAYNAKLAR	46
ÖZ GEÇMİŞ	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Sentetik jet oluşumunun şematik diyagramı (Erler vd., 2008).....	2
Şekil 1.2.	(DFE) Jetinin şematik görünümü (Lu vd., 2012).....	5
Şekil 1.3.	Dielektrik bariyer deşarjı plazma jetinin şematik görünümü (Lu vd., 2012).....	5
Şekil 1.4.	Tek elektrot plazma jet oluşturma yöntemlerinin şematik görünümü (Lu vd., 2012).....	6
Şekil 1.5.	Piezoelektrik sentetik jet aktuatörün kesit görünümü (Mane vd., 2007)..	7
Şekil 1.6.	Piston silindir mekanizması ile sentetik jet üretimi (Bolat, 2010).....	8
Şekil 1.7.	Piezoelektrik diyafram ile sentetik jet üretimi (Cattafesta ve Sheplak, 2010).....	9
Şekil 1.8.	Akustik diyafram yardımı ile sentetik jet elde üretimi (Cattafesta ve Sheplak, 2010).....	9
Şekil 1.9.	Shin' in çalışmasındaki deneysel kurulumun şematik gösterimi (Shin, 2010).....	11
Şekil 1.10.	DBD ile Sentetik jet oluşumunun şematik gösterimi (Wang vd., 2013)..	11
Şekil 1.11.	(DBD) Plazma sentetik jet aktuatörleri (Che vd., 2011).....	12
Şekil 1.12.	Plazma sentetik jet aktuatörünün çalışma döngüsü (Caruana vd., 2013)..	12
Şekil 1.13.	Ark deşarjı plazma sentetik jet aktuatörü (Belinger vd., 2011).....	13
Şekil 1.14.	Dairesel silindir üzerine farklı yapıdaki DBD aktuatörleri düzenlemesi (Akbıyık vd., 2017).....	14
Şekil 1.15.	DBD Plazma ile türbülans oluşumu (Wang vd, 2013).....	15
Şekil 1.16.	NACA 0015 Uçak kanadı üzerinde X/C yerleşimi.....	16
Şekil 2.1.	Rüzgâr tüneli ve bileşenleri.....	19
Şekil 2.2.	Plazma sentetik jet aktuatörlerinin üç boyutlu tasarımı.....	23
Şekil 2.3.	NACA 0015 model uçak kanadının bir parçası.....	25
Şekil 2.4.	Uçak kanadı profilinin bir araya getirilmesi.....	25
Şekil 2.5.	Test modeli.....	26
Şekil 2.6.	Test modeli üzerinde elektrotların konumlandırılması.....	26
Şekil 2.7.	Elektrotların 90° açıyla yerleştirilmesi.....	27
Şekil 2.8.	Elektrotların 60° açıyla yerleştirilmesi.....	27
Şekil 2.9.	Elektrotların 30° açıyla yerleştirilmesi.....	28
Şekil 2.10.	Elektrotların 0° açıyla yerleştirilmesi.....	28
Şekil 2.11.	DBD yöntemi ile plazma oluşumu.....	29
Şekil 2.12.	Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta=0$ derece konumda yerleştirilmesi.....	29
Şekil 2.13.	Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta=30$ derece konumda yerleştirilmesi.....	30

Şekil 2.14.	Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta=60$ derece konumda yerleştirilmesi.....	30
Şekil 2.15.	Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta=90$ derece konumda yerleştirilmesi.....	30
Şekil 2.16.	Kuvvet ölçüm sisteminin ara yüzü.....	31
Şekil 2.17.	Rüzgar tüneli test bölgesinin ve deney sisteminin şematik görünümü....	32
Şekil 3.1.	Duty cycle döngüsü kullanılarak oluşturulan plazma sentetik jeti hız ölçümü.....	35
Şekil 3.2.	Duty cycle frekansı değiştirilerek kare dalga ile oluşturulan plazma sentetik jeti hız ölçümü.....	36
Şekil 3.3.	Lineer plazma aktüatörün kullanıldığı durumda (0°) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı.....	38
Şekil 3.4.	Lineer plazma aktüatörün kullanıldığı durumda ($\beta=30^\circ$) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı.....	38
Şekil 3.5.	Lineer plazma aktüatörün kullanıldığı durumda ($\beta=60^\circ$) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı.....	39
Şekil 3.6.	Lineer plazma aktüatörün kullanıldığı durumda ($\beta=90^\circ$) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı.....	40

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1.1.	Dairesel silindir etrafındaki akış görüntülenmesi (a) silindir etrafındaki akış çizgileri (b) akış ayrılmasından önceki sentetik jetin etkisi (c) akış ayrılmasındaki sentetik jetin etkisi (d) akış ayrılmasından sonraki sentetik jetin etkisi (Glezer ve Amitay, 2002).....	2
Fotoğraf 1.2.	DBD Aktuatörün iz bölgesi akış yapısı üzerine etkisi (Akbıyık vd., 2017).....	14
Fotoğraf 1.3.	DBD Plazma ile girdap oluşumu (Wang vd., 2013).....	15
Fotoğraf 2.1.	Deney düzeneğinin genel görünümü.....	18
Fotoğraf 2.2.	TREK 20/20C-HS Model yüksek voltaj güç kaynağı.....	20
Fotoğraf 2.3.	FPGA tabanlı olarak geliştirilen bilgisayar programının arayüzü.....	21
Fotoğraf 2.4.	Deneyde kullanılan yüksek voltaj amfisi.....	21
Fotoğraf 2.5.	Osiliskop ile sinyal şeklinin görüntülenmesi.....	22
Fotoğraf 2.6.	Yüksek voltaj probu.....	22
Fotoğraf 2.7.	Plazma sentetik jet aktuatör modelleri.....	24
Fotoğraf 2.8.	Dairesel ve düz elektrotlu plazma sentetik jet aktuatör modellerinin imalat sonrası görünümü.....	24
Fotoğraf 3.1.	DBD yöntemi ile hacim plazmalı sentetik jet aktuatörü.....	34
Fotoğraf 3.2.	$\beta=0^\circ$ plazma aktuatörün kullanıldığı durumda NACA0015 etrafındaki akışın görselleştirilmesi.....	41
Fotoğraf 3.3.	$\beta=60^\circ$ plazma aktuatörün kullanıldığı durumda NACA0015 etrafındaki akışın görselleştirilmesi	42
Fotoğraf 3.4.	NACA0015 etrafındaki akışın ($\beta=0^\circ$), ($\beta=30^\circ$), ($\beta=60^\circ$) durumlarında görselleştirilmesi.....	43

SİMGE VE KISALTMALAR

Kısaltmalar	Açıklama
AC	Alternatif Akım
Ar	Argon
APNP	Atmosferik Basıncılı Plazma Jetleri
OAUGDP	Atmosferik Üniform Parıltı Deşarj Plazması
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarjı
DFE	Dielektriksiz Elektrot
DC	Doğru Akım
EHD	Elektro Hidro Dinamik
He	Helyum
LIPCA	Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator
ZNMF Jet	Zero Net Mass Flux Jet (Net Kütle Akılı Jet)
CNC	Computer Numerical Control
L-PSJA	Lineer Plazma Sentetik Jet Aktüatörü
MHD	Magneto Hidro Dinamik
PSJA	Plazma Sentetik Jet Aktüatörü
ZNMF	Sıfır Net Kütle Akısı
SE	Tek Elektrot Deşarjı
K	Kelvin
C	Santigrad Derece
THUNDER	Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor
POD	Uygun Ortogonal Bileşimi
UAV	Unmanned Air Vehicle
İHA	İnsansız Hava Aracı
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
X/C	Uçak kanadı Üzerindeki Aktüatör Konumunun Uçak Kanadı Uzunluğuna Oranı

P	Basınç
P_{atm}	Atmosfer Basıncı
Re	Reynolds Sayısı
C_D	Sürüklenme Kuvveti
C_L	Kaldırma Kuvveti Katsayısı
$A_{ön}$	Ön Bakış Alanı
$A_{üst}$	Üst bakış Alanı
F_D	Sürüklenme Kuvveti
F_L	Kaldırma Kuvveti
T	Sıcaklık
ρ	Yoğunluk
t	Zaman
β	Model Uçak Kanadı Üzerindeki Elektrotlar İle Kanat Üzerinde Oluşan Hava Akışı Arasındaki Açısı
α	Model Uçak Kanadı Hücüm Açısı

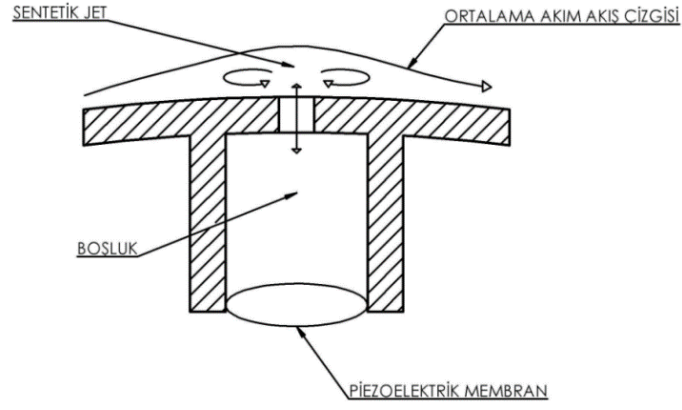
BÖLÜM I

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte aktif akış kontrol yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. Akışa enerji vermeden sadece kontrol yüzeyini değiştirerek yapılan pasif akış kontrol yöntemleri yerine, istenilen zamanda devreye sokulması nedeniyle akışa enerji transfer ederek yapılan aktif akış kontrol yöntemleri daha etkili olabilmektedir. Aktif akış kontrol yöntemleri ile helikopter, roket, insansız hava aracı (İHA), otomobil vb. araçlar üzerinde yapılan test amaçlı çalışmalar yaygınlaşmaktadır.

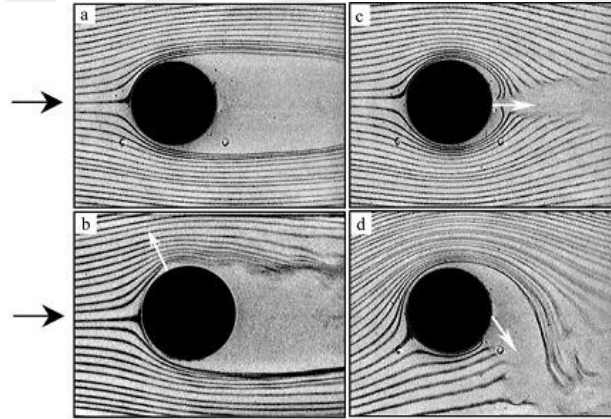
Jet ile yapılan aktif akış kontrolünde akışın sürekli olarak emilmesi, sürekli olarak üflenmesi, üfleme/emme hareketinin periyodik olarak sürekli yapılması yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tür yöntemlerde geometrik yapı değişmemesine rağmen cisim etrafındaki akış yapısı değiştirildiği için geometrinin sanal olarak değiştiği söylenebilir. Aerodinamik kaldırma kuvvetinin artırılması, akışın tutunma kaybının (stall) geciktirilmesi, sürüklenme kuvvetinin azaltılması gibi konular aktif akış kontrolünün amaçları arasındadır.

Havanın akış içerisine sürekli olarak üflenmesi veya emilmesi suretiyle yapılan aktif akış kontrolünde, havanın iletilebilmesi için gerekli olan borular motor gibi parçaların ağırlığından dolayı uygulamada güçlükler yaşanmakta, daha kolay ve hafif yöntemler aranmaktadır. Aktif akış kontrol yönteminde sentetik jetler, uygulanması kolay ve hafif oldukları için yaygınlaşmaktadırlar. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi sentetik jet bir piezoelektrik diyaframın titreşmesi sonucu akış içerisindeki havanın periyodik olarak üflenmesi/emilmesi sayesinde oluşmaktadır (Erler vd., 2008). Erler vd., (2008), sentetik jetin önemini şu şekilde vurgulamaktadır: “Günümüzde sentetik jet ile yapılan çalışmalar giderek yaygınlaşmaktadır ve bunlardan en ilgi çekici olanı insansız hava aracı (İHA) üzerinde sentetik jetin kullanılmasıdır. Bu sayede insansız hava aracı üzerindeki hücum kenarında oluşan akış ayrılması kontrol edilerek aracın dönüş hızı iyileştirilmiş ve diğer akış kontrol mekanizmalarına göre sentetik jetlerin daha hafif olması sayesinde insansız hava aracının ağırlığı azaltılmıştır”.



Şekil 1.1. Sentetik jet oluşumunun şematik diyagramı (Erler vd., 2008)

Glezer ve Amitay (2002), dairesel silindir üzerinde sentetik jet kullanarak yaptıkları deneyler sonucunda akış ayrılmasından önce uygulanan sentetik jetin akış ayrılmasını arttırdığını, ayrılma bölgesi üzerinde uygulanan sentetik jetin akışın yeniden yüzeye bağlanmasını sağladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca jet frekansı üzerinde yapılan çalışma sonucunda, jet frekansının yeterince yüksek olması durumunda aerodinamik kuvvetlerin frekanstan bağımsız hale geldiği ifade etmişlerdir. Fotoğraf 1.1’de dairesel silindir etrafındaki akış ayrılmasına plazma sentetik jetinin etkisi görülmektedir.



Fotoğraf 1.1. Dairesel silindir etrafındaki akış görüntülenmesi (a) silindir etrafındaki akış çizgileri (b) akış ayrılmasından önceki sentetik jetin etkisi (c) akış ayrılmasındaki sentetik jetin etkisi (d) akış ayrılmasından sonraki sentetik jetin etkisi (Glezer ve Amitay, 2002)

Sentetik jetlerin özellikleri, jeti oluşturan yapının geometrik özelliklerine (jetin olduğu boşluğun hacmi, jetin çıkış yaptığı orifisin çapı vb.), sentetik jetin oluşturma şekline (piston silindir yöntemi, piezoelektrik diyafram, akustik titreşim vb.), sentetik jetin olduğu dış ortamın şartlarına (ortamda akışın olup olmaması, ortamın sıcaklığı vb.)

gibi özelliklere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Sentetik jetin uygulanacağı alandaki ihtiyaçlar temel alınarak bu parametreler belirlenmesi ve en uygun değerlerin seçilmesi gerekmektedir (Fırat, 2010).

1.1 Tezin Amacı

Plazma aktüatörler; hafif olmaları, kolay uygulanabilmeleri, bakım gerektirmemeleri gibi özellikleri sayesinde akış kontrol uygulamalarında, mikro kanallarda, küt cisimler üzerinde vb. çok geniş bir alanda kullanılabilirler. Son yıllarda literatürde yapılan çalışmalar, plazmanın akış kontrol uygulamalarında önemli bir yerinin olduğunu göstermektedir. Bu tezin amacı; farklı plazma sentetik jet türlerinin incelenmesi ve bu inceleme sonucunda uygun bir plazma sentetik jet aktüatörünün model uçak kanadı etrafındaki akışın kontrolünde kullanılmasıdır. Bu bağlamda çeşitli jet oluşturma yöntemleri incelenmiş ve literatürde önemli yer tutan DBD tipi sentetik plazma jet aktüatörü kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

1.2 Tezin Önemi

Sistem çalışırken enerji kullanması sebebiyle sentetik jetler aktif akış kontrol yöntemi olarak kabul edilebilmektedir. Yüzeyin 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, magnetohidrodinamik (MHD), elektrohidrodinamik (EHD) cisim kuvvetlerinin uygulanması ve benzeri bir takım teknikler aktif akış kontrol yöntemi içinde yer almaktadır (Fırat, 2010). Bu yöntemde plazma yardımıyla sentetik jet oluşturulup bu jetin akışa doğrudan etki etmesi sebebinden dolayı literatürde çok önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda, bu çalışmada çeşitli sentetik jet oluşturma yöntemleri incelenmiş ve literatürde önemli bir yer tutan DBD tipi sentetik jet ile bir NACA0015 model uçak kanadı etrafındaki akışın kontrolü deneysel olarak incelenmiştir.

1.3 Literatür Özeti

Mühendislikte sentetik jetler, akış kontrolünde, sınır tabaka geçişleri/ayrılmaları, kaldırma kuvvetini artırma, sürüklenme kuvvetini azaltma işlemlerini iyileştirme ve

sistemdeki akışlara tahrik sağlama gibi pratik uygulamalara sahiptir. Plazma sentetik jetleri kullanımının kolay ve hafif olması, sistemde herhangi hareketli parçanın olmaması gibi sebeplerden dolayı sentetik jet oluşturmada etkili bir yöntem olmaktadır. Atmosferik basınçlı plazma jetleri (APNP) sınırlandırılmış boşluk içerisinde oluşturulan plazmaya göre açık alanda oluşturulan plazma jet çeşidir. Akışkan gazın atmosferik basınçta ark deşarjı veya dielektrik bariyer deşarjı yardımı ile plazma oluşturulmasına dayanmaktadır. Akışkan gazın sürekli akması sebebiyle oluşan plazma jet şeklinde dđnüşür. Bu tür jetler, plazma oluşturma yöntemine göre oda sıcaklığında ya da daha yüksek sıcaklıklarda olabilmektedir (Hong vd., 2013).

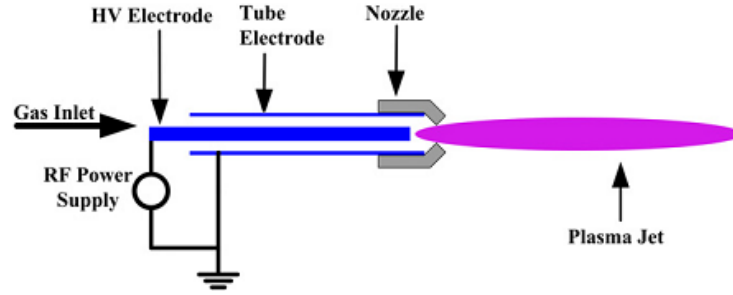
Atmosferik basınçlı plazma jetleri; ince film kaplama, yüzey modifikasyonu, sterilizasyon gibi gelişmekte olan uygulama alanları sayesinde büyük bir öneme sahiptir. Plazmayı oluşturan gazın sıcaklığının oda sıcaklığında olmasına rağmen plazma sıcaklığı oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda olabilmektedir. Bazı kapsamlı çalışmalarda 20.000K'in üzerindeki sıcaklıklara çıkılmıştır. Bu tür plazmalar corona deşarjı gibi farklı deşarj yöntemleri ile oluşturulabilmektedir (Hong vd., 2013).

Atmosferik basınçlı plazma jetlerinin plazma oluşturma voltajları çok yüksektir, bu yüzden deşarj boşluğu birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişebilmektedir. Plazmanın kararlılığını sağlayabilmek için akışkan gaz içerisine noble adı verilen genellikle oksijen ya da havadan oluşan az miktarda gaz karıştırılır (Hong vd., 2013).

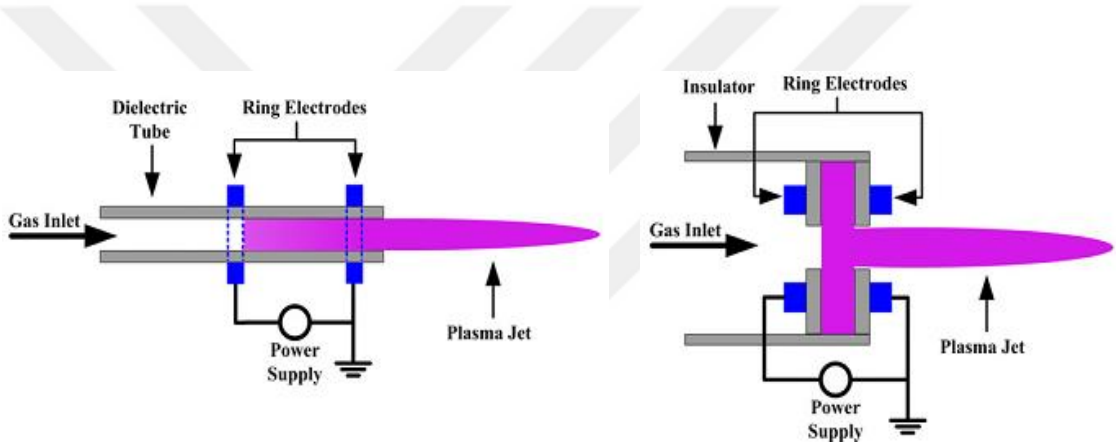
Lu vd. (2012), yaptıkları çalışmalarda, dielektriksiz elektrot (DFE), dielektrik bariyer deşarjı (DBD), tek elektrot deşarjı (SE) gibi farklı deşarj yöntemlerini incelemişlerdir. Dielektriksiz elektrot yöntemi atmosferik basınçlı denge dışı plazma jet oluşturma yöntemlerinden biridir. Plazma jeti bir radyo frekanslı güç kaynağı yardımı ile oluşturulmuştur. İç elektrot yüksek voltaja dış elektrot ise topraklamaya bağlanmıştır. İki elektrot arasındaki dairesel boşluk, helyum ve reaktif gaz karışımı ile beslenmiştir. Oluşan plazmanın sıcaklığı güç kaynağının gücüne bağlı olarak 50°C ile 300°C arasındadır.

Dielektrik bariyer deşarjı yönteminde pek çok konfigürasyon mevcuttur. Plazma jeti; dielektrik tüp ve tüpün dışına konumlandırılmış iki adet metal elektrottan meydana

gelmektedir. Akışkan gaz (He, Ar) tüp içerisinde akmaya başladıktan sonra elektrotlara yüksek voltaj uygulandığında plazma oluşur. Oluşan plazma jeti oda sıcaklığındadır ve sadece birkaç Watt'lık enerji tüketir.



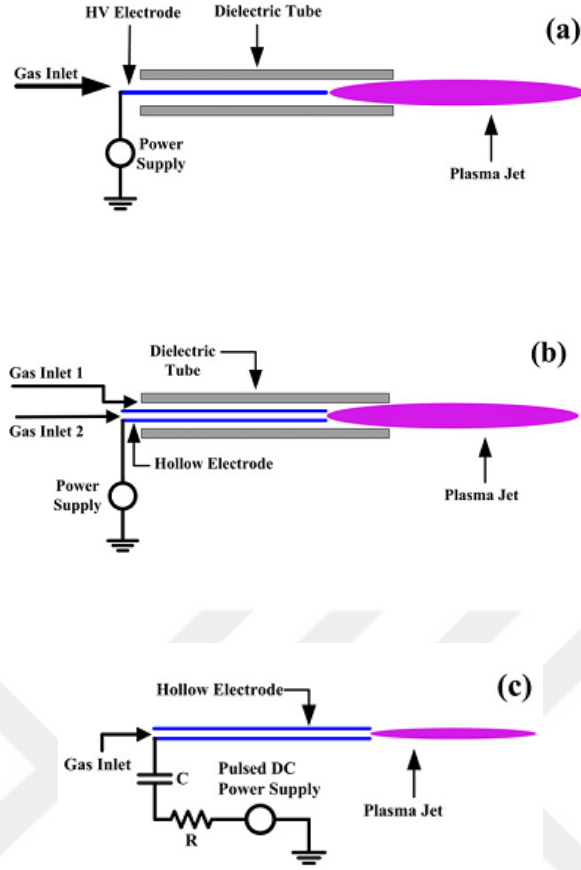
Şekil 1.2. (DFE) Jetinin şematik görünümü (Lu vd., 2012)



Şekil 1.3. Dielektrik bariyer deşarjı plazma jetinin şematik görünümü (Lu vd., 2012)

Şematik olarak tek elektrot deşarj yöntemi ve dielektrik bariyer deşarj yöntemi birbirlerine benzemektedir. Aradaki fark; tek elektrot yönteminde dielektrik tüp üzerinde elektrot bulunmamaktadır. Dielektrik tüp sadece akışkan gaza yön vermek için kullanılmaktadır. Tek elektrot yönteminde plazma doğru akım, alternatif akım, darbeli doğru akım güç kaynağı ile oluşturulabilmektedir. Ark oluşma riski yüzünden dielektriksiz ve dielektrik bariyer deşarjı yöntemleri biyomedikal uygulamalarda güvenli değildir. Bunun üstesinden gelebilmek için tek elektrot yöntemi geliştirilmiştir.

Bu yöntemde plazma oluşumunda kapasitör ve direnç kullanılmıştır, bunlar akımı ve voltajı ayarlamak için kullanılmaktadır. Tek elektrot deşarj yönteminin en büyük avantajı yaralanma riski olmadan plazma jetine dokunulabilmesidir. Bu sayede tek elektrotlu plazma jetlerini medikal uygulamalarda kullanmak uygun hale gelmektedir.

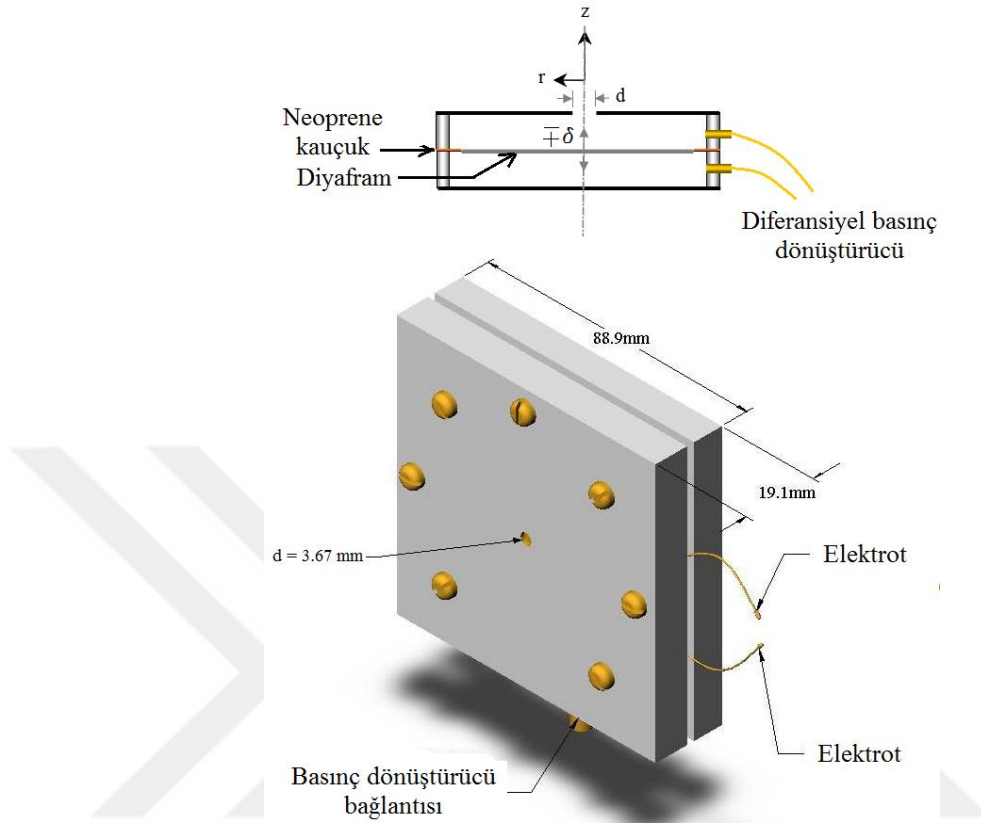


Şekil 1.4. Tek elektrot plazma jet oluşturma yöntemlerinin şematik görünümü (Lu vd., 2012)

1.4 Sentetik Jet (ZNMF) Çeşitleri

Sentetik jet, üfleme ile emme işlemini arka arkaya gerçekleştirdiği jet tipidir. Sentetik jetin en önemli avantajı düşük enerji harcayarak akış yüzeyindeki değişimlere çok çabuk cevap verebilmesidir. Sentetik jetlerin oluşturulmasında esas olarak kullanılan üç yöntem vardır. Bunlar; silindir piston mekanizması, salınımlı diyafram (piezoelektrik) mekanizması ve hoparlör kullanılarak akustik titreşim sayesinde sentetik jet oluşturulmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar neticesinde, bu yöntemlere yeni eklenen plazma sentetik jeti de bulunmaktadır. Plazma aktüatörleri, dielektrik bariyer deşarjı (ya da OAUGDP yani atmosferik üniform parıltı deşarj plazması) iki elektrot arasında dielektrik malzeme yerleştirilerek yüksek voltaj uygulanan aktüatörlerdir. Bu çalışmada sentetik jet oluşturmak için kullanılan plazma yardımıyla sentetik jet akışı sağlanacaktır. Genel olarak sentetik jetler salınım yapan bir diyafram, boşluk ve bir orifisten meydana gelirler diyafram salınım yapması ile boşluk içerisindeki havanın

orifisten dışarıya doğru jet oluşturarak çıkmasını sağlar. Salınım yapan diyafram genellikle mekanik ya da elektriksel olarak tetiklenmektedir (Mane vd., 2007).



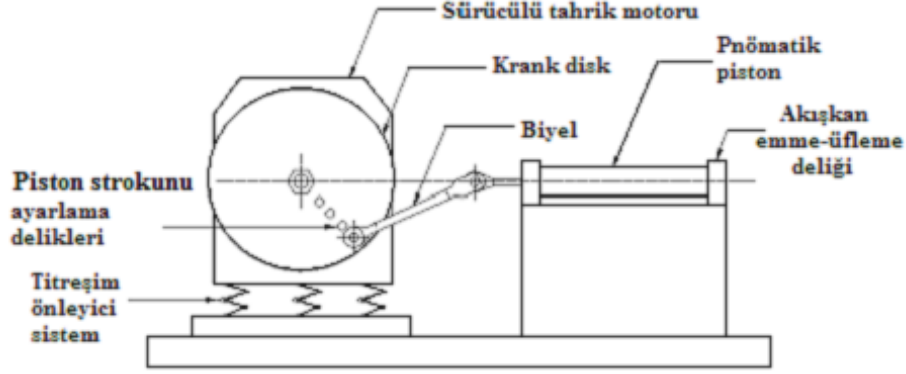
Şekil 1.5. Piezoelektrik sentetik jet aktuatörünün kesit görünümü (Mane vd., 2007)

1.4.1 Piston silindir mekanizmalı sentetik jetler

Piston silindir mekanizmalı sentetik jetler genel olarak bir piston/silindir mekanizması ve bu sisteme hareket aktaran motor/krank sisteminden meydana gelirler. Elektrik motoruna bağlı olan krank diskinin bir tur dönmesi neticesinde krank diskinde meydana gelen dairesel hareket biyel mekanizması sayesinde doğrusal harekete dönüştürülerek piston silindir mekanizmasında bir periyotluk emme ve üfleme hareketi meydana getirilir. Krank diski üzerindeki ayarlama delikleri sayesinde istenilen çaptaki dairesel hareket doğrusal harekete dönüştürülerek piston/silindir mekanizmasındaki ön ölü hacim ve strok hacmi istenilen değerlerde ayarlanmış olur (Bolat, 2010).

Şekil 1.6’da piston-silindir mekanizmasıyla elde edilen sentetik jet görülmektedir. Pistonun ileri-geri hareketiyle silindir içerisindeki boşluğun hacmi değişmekte ve

dolayısıyla silindir içerisindeki akışkanın basıncı değişmektedir. Silindir üzerindeki delikten akışkanın piston içerisine ve dışarısına akması sağlanarak sentetik jet üretilmiş olur (Bolat, 2010).

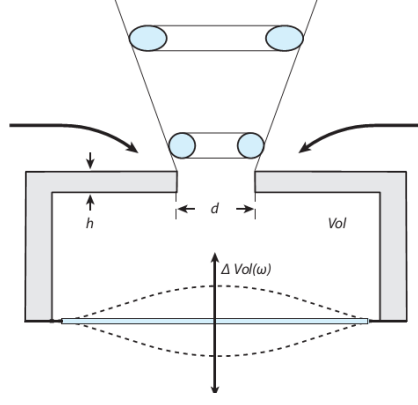


Şekil 1.6. Piston silindir mekanizması ile sentetik jet üretimi (Bolat, 2010)

Piston silindir mekanizmalı sentetik jetler çok yüksek hızlarda sentetik jet üretimine müsait sistemlerdir. Fakat üfleme ve emme frekansı bakımından elektrik motoruna bağımlı oldukları için uygulamalarda bu durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

1.4.2 Piezoelektrik diyaframlı sentetik jetler

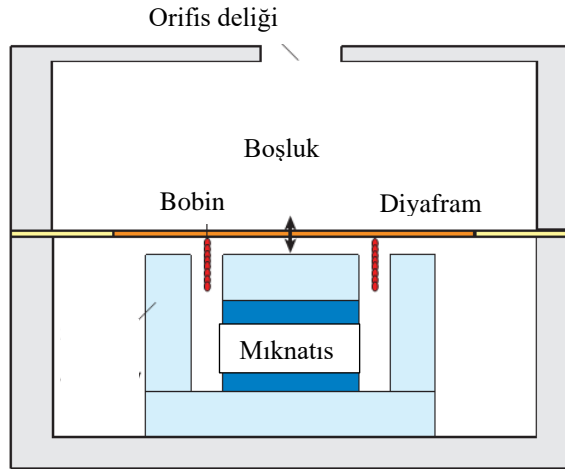
Diğer bir yöntem olarak piezoelektrik diyafram kullanılarak sentetik jet elde etmek mümkündür. Piezoelektrik diyaframa elektrik akımı gönderildiğinde, diyafram belirli bir düzeyde hareket etmeye ve şekil değiştirmeye başlar. Şekil değiştirme işleminin süresi yani diyaframın akıma cevap süresi genellikle milisaniye düzeyinin altındadır. Salınım yapmaya başlayan diyafram kısa bir sürede havayı boşluğa çekme ve dışarıya gönderme işlemini yapar. Buna ek olarak bir diyafram, pistonu nazaran daha hafiftir ve daha az enerji ile çalışabilir. Günümüzde piezoelektrik diyafram olarak kullanılan birçok malzeme mevcuttur. Elektrik alan uygulanarak şekil değişimi sağlanan Bimorph, malzemeler arasındaki ısıl genişleme katsayısı uygunsuzluğundan faydalanılarak üretilmiş Thunder® (Thin layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor) ve katmanların ısıl genişleme katsayılarındaki farklılıklardan yola çıkılarak üretilmiş Lipca (Lightweight piezo-composite curved actuator) bu diyafram tiplerine birer örnekler (Fırat, 2010).



Şekil 1.7. Piezoelektrik diyafram ile sentetik jet üretimi (Cattafesta ve Sheplak, 2010)

1.4.3 Akustik diyaframlı sentetik jetler

Akustik diyaframlı sentetik jetler hoparlörlerin çalışma mekanizması ile benzerlikler taşımaktadır. Hoparlörler bir sabit mıknatıs ve birde hareket edebilen bobinden meydana gelen elektromıknatıstan oluşmaktadır. Bobin üzerinden alternatif akım geçmekte ve bu sayede bobin üzerinden geçen akımın yönüne bağlı olarak farklı yönlerde elektromanyetik alan oluşmaktadır. Mıknatısın manyetik alanı ile aynı yönde oluşan elektromanyetik alan bir birini iterken zıt yönde oluşan manyetik alan birbirini çekmekte bu sayede hoparlörün üzerindeki diyafram hareket etmektedir. Şekil 1.8’de gösterildiği gibi diyaframın salınım yapması sayesinde boşluk içerisindeki havanın basıncı değişmekte ve bu sayede havanın orifisten üfleme/emme şeklinde çıkarak sentetik jet oluşturması sağlanmaktadır.



Şekil 1.8. Akustik diyafram yardımı ile sentetik jet elde üretimi (Cattafesta ve Sheplak, 2010)

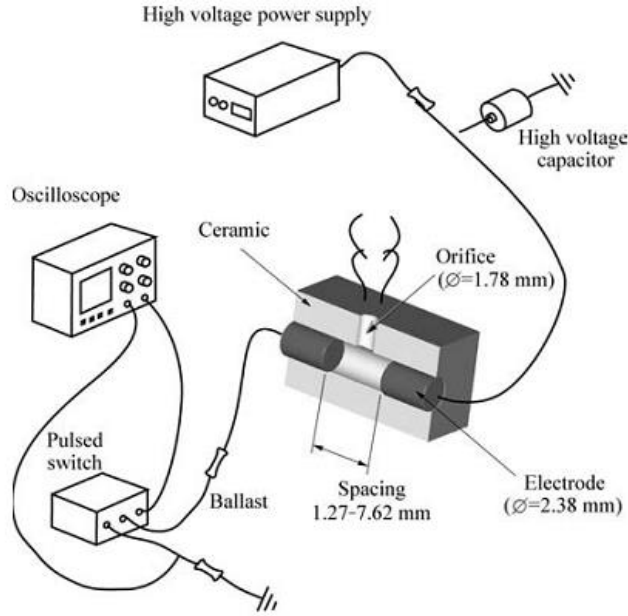
1.4.4 Plazma sentetik jetler (PSJA)

Plazma aktüatörleri, atmosferik basınçta elektriksel deşarjı kullanan, çok geniş çeşitliliğe sahip olan cihazlardır. Elektriksel deşarj olarak corona discharge, dielectric barrier discharge (DBD), glow discharge gibi farklı plazma çeşitleri de plazma aktüatörlerine dahil edilebilir. DBD plazma aktüatörleri asimetrik olarak dizilmiş; biri atmosfere açık, diğeri uygulama yüzeye gömülü olan ve bir dielektrik malzeme tarafından birbirinden ayrılmış iki adet elektrot dan oluşur. Yüksek voltaj ve RF frekans uygulanması neticesinde plazma oluşturulur. Plazma aktüatörleri herhangi bir hareketli parçaya sahip olmaması ve kullanımlarının kolay olması nedeniyle aktif akış kontrol cihazı olarak kolaylıkla kullanılabilir (Santhanakrishnan vd., 2009). Akışa kattıkları momentum sayesinde sınır tabaka ayrılmalarının kontrolünde aktif rol oynadıkları görülmüştür.

Benard vd. (2008), çalışmalarında termal olmayan plazma aktüatör kullanılarak, küçük bir açı dağıtıcı egzoz ile donatılmış bir aksenel simetrik hava jeti kontrolünü stereoskopik PIV sistemi yardımı ile incelenmişlerdir. Dielektrik Bariyer Deşarj (DBD) aktüatörü akışı ayırmak için veya ayrılmış bir akışı yeniden birleştirmek için kullanmışlardır. Deney düzeneği dağıtıcının eğiminde meydana gelen akış değişikliklerini ölçmeyi sağlamıştır. Aktüatör, merkezi hızları 10, 20 ve 30 m/s olan aksenel simetrik hava jetlerini değiştirmek için kullanılan 6 m/s'lik bir yerel akış (elektrik rüzgârı) üretebilmiştir. Aktüatör altındaki akış değişiklikleri zamana göre ortalama, aşamalı-ortalama alanları yanı sıra girdap lokalizasyonu açısından incelemişlerdir. Analiz, yüksek verimlilik sunan düşük birincil jet hızı üzerine odaklanmıştır. Sonuçların ortaya koyduğuna göre; bir plazma aktüatör birkaç düzine milisaniyede akışın ayrılmasına ve birleştirilmesine neden olmuştur.

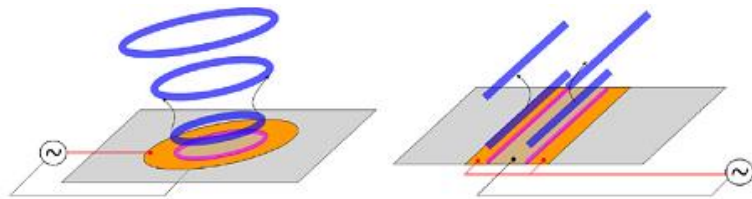
Jichul (2010) yaptığı çalışmada, darbeli doğru akım (DC) deşarjı tarafından üretilen sentetik jetin deneysel çalışmasını sunmuştur. Küçük boşluktaki yüksek frekans salınımlı DC deşarjı ile yüksek hızlı jet oluşturmuştur. Dairesel elektrot 2.38 mm çapındaki seramik plakadan oluşan bir boşluk ve 1.78 mm çapındaki boşluğun ortasında küçük bir delikten meydana gelmiştir. Yüksek frekans salınımlı DC deşarjı (boşalması) anında boşluktaki havayı kırmış ve deliğin çıkışında yüksek hızlı plazma jet akımı üretilmiştir. Schlieren, 100 kHz kare hızında görüntülemesiyle ilk süpersonik

şokun orifisten çıkan jet tarafından takip edildiği ortaya konmuştur. Jetin hızı 300 m/s'lere kadar ulaşmıştır. Bu çalışmada geliştirilen jetin süpersonik sınır tabaka derinliklerine nüfuz edecek kadar güçlü olduğu gösterilmiştir.

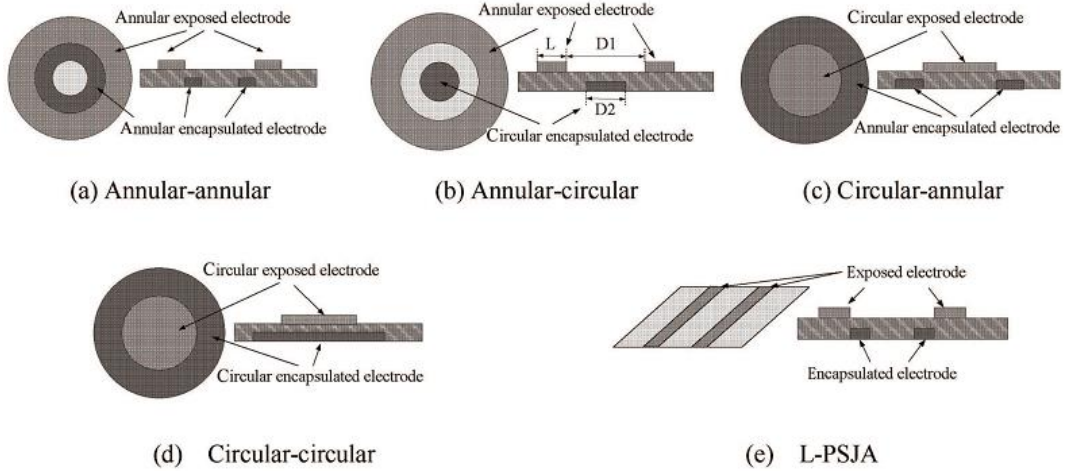


Şekil 1.9. Shin' in çalışmasındaki deneysel kurulumun şematik gösterimi (Shin, 2010)

Dielektrik bariyer deşarjı (DBD); yeni bir kavram olan sentetik plazma jet oluşturulmasında kullanılabilen önemli bir atmosferik plazma aktüatör çeşitlerindedir. Plazma sentetik jet aktüatörleri (PSJA) dielektrik malzeme tarafından bir birinden ayrılmış olan elektrotların şekline ve dizilişine göre dört ayrı guruba ayrılır. Bunlar: çembersel- çembersel, çembersel- dairesel, dairesel- çembersel, dairesel- dairesel'dir. Plazma sentetik jet aktüatörü akışı üç boyutlu dikey jet oluşturarak uyarırken elektrotların düz bir şekilde dizilmesi sayesinde (L-PSJA) iki boyutlu dikey sentetik jet oluşturulur (Che vd., 2011). Şekil 1.10'da DBD ile iki boyutlu ve üç boyutlu sentetik jet oluşumu gösterilmiştir. Şekil 1.11'de ise dielektrik bariyer deşarj yöntemi ile oluşturulabilen sentetik jet çeşitleri gösterilmiştir.

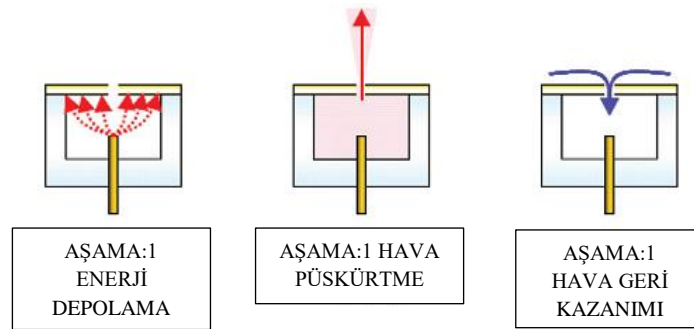


Şekil 1.10. DBD ile Sentetik jet oluşumunun şematik gösterimi (Wang vd., 2013)



Şekil 1.11. (DBD) Plazma sentetik jet aktüatörleri (Che vd., 2011)

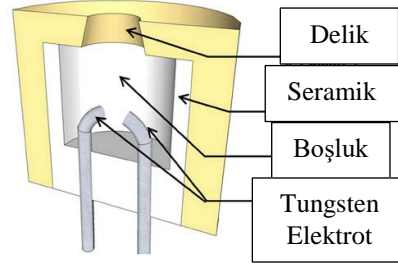
Diğer bir plazma sentetik jet aktüatörü ise ark deşarjı oluşturularak yapılan plazma sentetik jetleridir. Ark deşarjı kullanılarak yapılan plazma sentetik jetleri ile çok yüksek hızlarda üç boyutlu dikey jet oluşturulabilmektedir. Bu tür jet aktüatörleri; küçük seramik malzeme tarafından çevrelenen küçük bir boşluğa sahiptir. Boşluk içerisinde iki adet tunsten elektrot bulunmaktadır ve bu boşluk jet hızını artırmak için küçük bir orifisi bulunan kapak yardımı ile kapatılmıştır. Elektrotlara, boşluk içerisindeki gazı kırarak kadar yeterli voltaj farkı uygulandığında iki elektrot arasında ark meydana gelir. Bu sayede boşluk içerisindeki havanın sıcaklığı aniden yükselir. Plazma sentetik jet aktüatörlerinin çalışma mekanizması döngüselidir. Bu döngü üç aşamadan oluşur; enerji depolama, hava püskürtme ve püskürtülen havanın geri kazanımı. Şekil 1.12’de bu döngü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Plazma sentetik jet aktüatörünün çalışma döngüsü (Caruana vd., 2013)

Döngünün başlangıcında elektrotlara verilen voltaj yardımı ile deşarj oluşturulur bu sayede boşluk içerisindeki hava aniden ısınır ve ısınan havanın basıncı artar. Isınan hava boşluk üzerindeki orifisin deliğinden yüksek hızlı jet olarak dışarı püskürtülür.

Döngünün sonunda boşluk içerisindeki havanın yoğunluğu dış ortamdaki havanın yoğunluğundan azdır bu sayede dış ortamdan boşluk içerisine hava akışı sağlanır ve aktüatör yeni bir döngüye hazır hale gelir. Dolayısı ile plazma sentetik jet aktüatörleri akışa sıfır net kütle akışı (ZNMF) ile momentum eklerler (Caruana vd., 2013). Şekil 1.13’de ark deşarjı kullanılarak yapılan plazma sentetik jet aktüatörü görülmektedir.



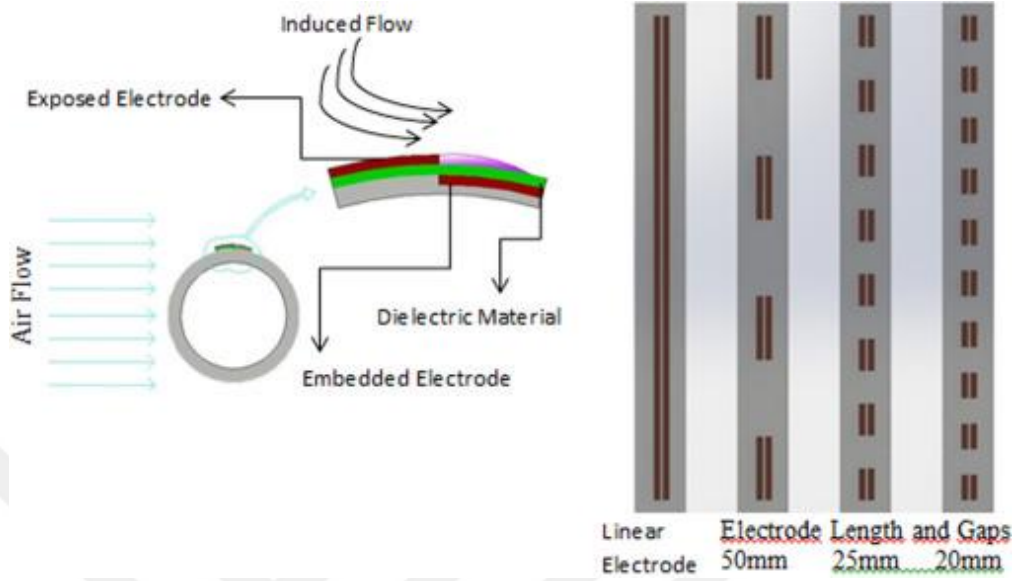
Şekil 1.13. Ark deşarjı plazma sentetik jet aktüatörü (Belinger vd., 2011)

1.4.5 Plazma sentetik jetin aerodinamik akış kontrolünde kullanılması

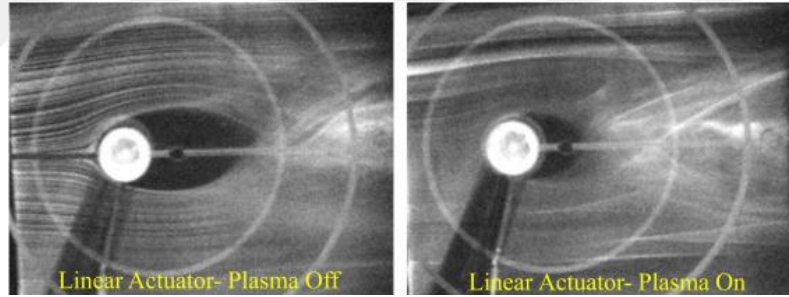
Son yıllarda, aerodinamik performansın geliştirilmesi bakımından aktif akış kontrol yöntemlerinden birisi olarak plazma aktüatörler kullanılmaktadır. Sahip oldukları avantajlardan dolayı araştırmacıların dikkatini çeken bu yöntem havacılık uygulamalarındaki birçok uygulamada yer alabilmektedir. Kaldırma kuvvetindeki artış ve sürükleme kuvvetindeki azalma (Jukes ve Choi, 2009; Benard vd., 2009; Jukes vd., 2013, Bouremel vd., 2013), iz bölgesinde daralma (Jukes ve Choi, 2009; Benard vd., 2009; Sosa vd., 2007; Sosa ve Artana-2006), girdap kopmasının baskılanması (Benard vd. 2009) ve stol açısının kontrolü (Jukes vd. 2013; Sosa vd., 2007) gibi iyileştirmeler bu uygulamaları oluşturmaktadır. Benard vd. (2009), NACA0015 uçak kanadının aerodinamik performansını geliştirmek için plazma aktüatörleri sürekli ve belirli aralıklarla çalıştırarak sürükleme ve kaldırma kuvvetini iyileştirmişlerdir. Reynolds sayısının 2.6×10^5 olarak belirledikleri deneysel çalışmalarında, uygulama voltajının artırılmasının kaldırma kuvvetinin arttırdığını ve sürükleme kuvvetini azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, bu çalışmada sinüs sinyal türünün frekansının uçak kanadının aerodinamik performansı değiştirdiğini belirtmişlerdir.

Akbyık vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada bir dairesel silindir etrafındaki akış, DBD tipi aktüatörler Şekil 1.14’de görülen düzenlemedeki gibi farklı uzunluklarda boşluklu olarak yerleştirilerek test edilmiştir. Oluşturulan yüzey jetinin etkisi ile

Fotoğraf 1.2’de görüldüğü üzere silindir arkasındaki iz bölgesinin daraltılması ve buna bağlı olarak sürüklenme kuvvetinin önemli oranda azaltılması sağlanmıştır.



Şekil 1.14. Dairesel silindir üzerine farklı yapıdaki DBD aktuatörleri düzenlemesi (Akbiyık vd., 2017)



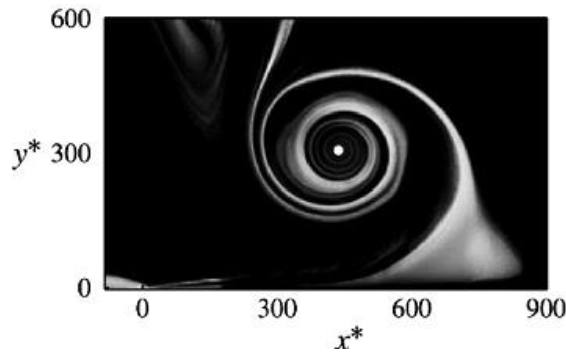
Fotoğraf 1.2. DBD Aktuatörün iz bölgesi akış yapısı üzerine etkisi (Akbiyık vd., 2017)

Aono ve Okada (2014), 2.6×10^5 Reynolds sayısında sDBD plazma aktüatör kullanarak momentum katsayısının stol açısını kontrol etmedeki etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalarında momentum katsayısındaki artışın aerodinamik performans katsayısını arttırdığını ortaya koymuşlardır.

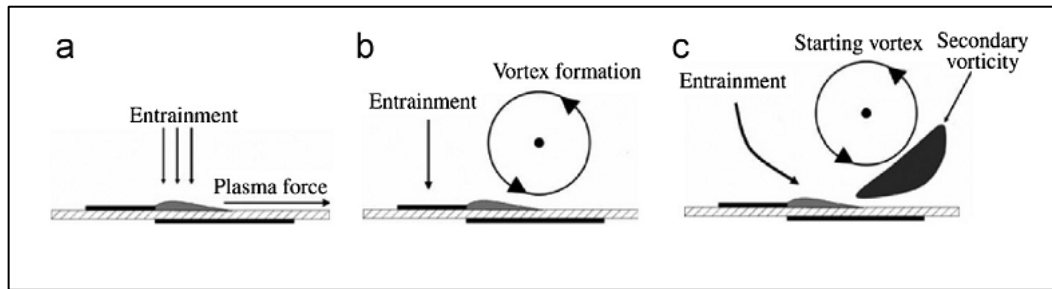
Asada vd. (2009), NACA0015 uçak kanadı etrafındaki akışın kontrolünde Reynolds sayısı 4.4×10^4 ile 1.0×10^5 aralığında duty cycle uygulanmış plazma aktüatörlerin etkisini incelemiştir. Uygulama voltajının artışının etkili bir şekilde stol açısının kontrolünü sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, plazma aktüatörlerin daha küçük tetiklenme oranlarında daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduklarını ortaya koymuşlardır. DC

korona plazma aktüatörlerini NACA0015 uçak kanadının burun kısmına yerleştiren Magnier vd. (2007), indirgenmiş akışın sınır tabakaya hız eklediğini böylelikle akış ayrılmasının önlendiğini açıklamışlardır. Jukes ve Choi (2009) ise akışın etkin bir şekilde kontrolünün sağlanmasının plazma aktüatörlerin konumlarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Wang vd. (2013), yaptıkları çalışmada, DBD (Dielektrik bariyer deşarjı) plazma aktüatörleri, plazma sentetik jet aktüatörleri, plazma spark jet aktüatörleri, üç-boyutlu plazma aktüatörleri ve üç boyutlu akışları duvardan uzaklaştıran tahrik eden plazma girdap jeneratörleri gibi yeni plazma aktüatörlerini incelemişlerdir. Dielektrik plazma aktüatörlerinin insansız (İHA) hava araçlarında kanat yapısının arka kenarına konumlandırıldığında flap gibi davranarak hareketli akış kontrol parçalarının yerine kullanılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca kanat üzerinde kullanılan dielektrik plazma aktüatörünün kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesinde etkili olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte plazma aktüatörlerinin kullanımıyla, hareketli kontrol parçaları olmadan yeni insansız hava araçlarının tasarlanabilmesinin mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.



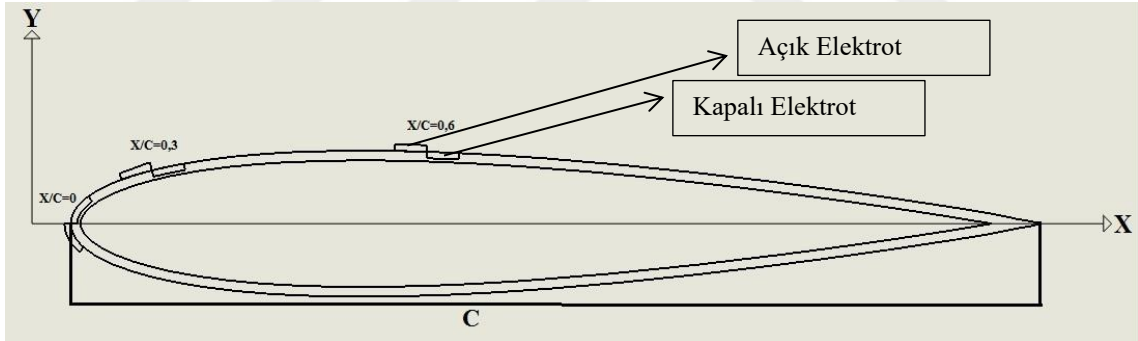
Fotoğraf 1.3. DBD Plazma ile girdap oluşumu (Wang vd., 2013)



Şekil 1.15. DBD Plazma ile türbülans oluşumu (Wang vd, 2013)

Ramachandran vd. (2016), Naca 0015 model uçak kanadı üzerine (DBD) plazma aktüatör yerleştirilerek yaptıkları çeşitli deneyler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada model uçak kanadı üzerine $X/C=0,25$, $X/C=0,5$, $X/C=0,75$ olacak şekilde ölçümler yapmışlardır. Plazmanın kapalı olduğu duruma göre $X/C=0,25$ olduğu durumda kaldırma kuvvet katsayısında %40'a varan iyileşme görmüşler, $X/C=0,5$ olduğu durumda bu iyileşmenin %70'e kadar ulaştığını, $X/C=0,75$ olduğu durumda ise bunun %60'ye kadar ulaştığını görmüşlerdir.

Bouremel vd. (2013), Yaptıkları çalışmalarında NACA 4415 uçak kanadı üzerine farklı noktalara konumlandırılmış (DBD) plazma aktüatör yardımı ile kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerindeki değişimi incelemişlerdir. Plazma aktüatörleri uçak kanadı üzerine $X/C=0$, $X/C=0,3$ ve $X/C=0,6$ olacak şekilde yerleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda hücum açısı arttıkça, uçak kanadı üzerinde oluşan akış ayrılmasına daha yakın yerleştirilen plazma aktüatörün kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesine daha çok etki ettiğini, akış ayrılmasının olduğu bölgeye yerleştirilen plazma aktüatörünün sınırlı bir etki gösterdiğini belirtmişlerdir.



Şekil 1.16. NACA 0015 Uçak kanadı üzerinde X/C yerleşimi

Feng vd. (2010), yaptıkları çalışmada, dairesel silindir etrafındaki akış için sentetik jetin kontrol etkilerini incelemiş ve yeni bir yöntem olan sentetik jetin emme duty döngüsünden üfleme duty döngüsüne değişimi neticesinde yeni tahrik sinyaline ulaşılmıştır. Emme duty döngüsü k , emme ve üfleme zaman aralığı arasındaki oran olarak tanımlanmıştır ve Akış alanındaki simetrik karışıklığı gidermek için sentetik jet ayrılma noktasına yerleştirilmiştir. Akış yönündeki girdap alanının analizi için POD (Uygun Ortogonal Bileşimi) tekniği uygulanmıştır. Emme duty döngüsü faktörünün artışı momentum katsayısını arttırmıştır, bunun neticesinde daha güçlü ve daha büyük

ölçekli sentetik jet girdap çiftleri (yüksek hız aktarımı ile) üretilmiştir. Sentetik jet girdap çiftleri silindirin arkasındaki girdap tabakalarıyla etkileşim göstermiştir $k = 0.25$, $C_m = 0.148$ için $Re = 950$ de girdap oluşum modları çeşitli varyasyonlarla sonuçlanmıştır. Dairesel silindirin girdap oluşumunda kullanılan sentetik jetin kontrol etkileri emme duty döngüsündeki artış ve buna bağlı olan momentum katsayısı artışı nedeniyle artmıştır. Bu aynı zamanda daha yüksek Reynolds sayılarına kadar geçerli olmuştur.

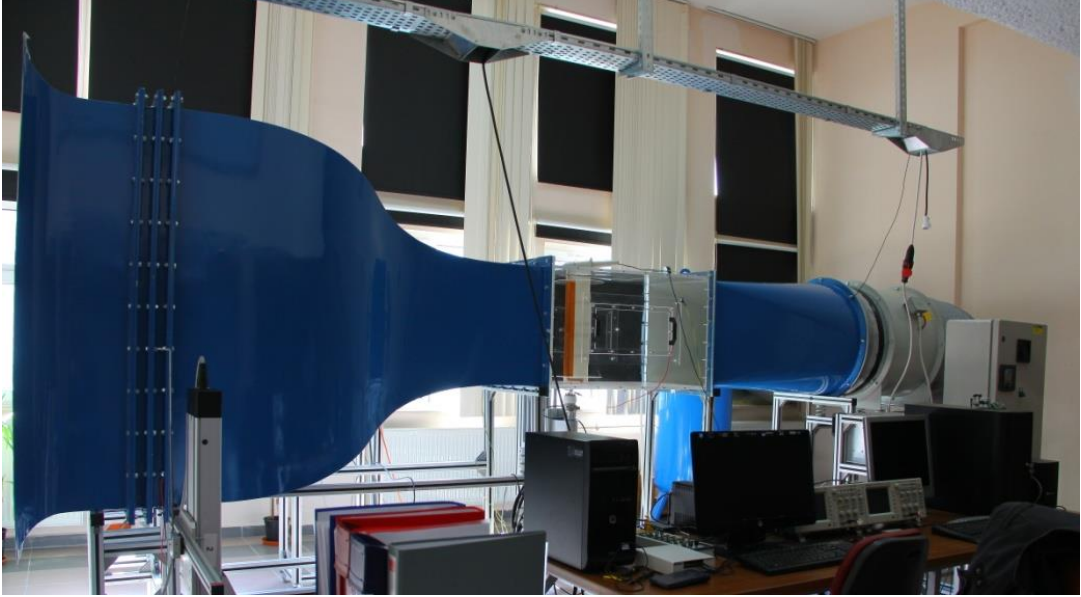


BÖLÜM II

DENEYSEL KURULUM

Plazma Sentetik Jet Akışının Deneysel Olarak incelendiği bu çalışma, Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aerodinamik Akış Kontrol Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzeneği (Fotoğraf 2.1) aşağıda görüldüğü gibi dört bölüm olarak ele alınmıştır.

- Rüzgâr tüneli
- Plazma üretim cihazı
- Modelin hazırlanması ve eyleyicinin konumlandırılması
- Ölçüm sistemleri, veri toplama ve analiz işlemleri

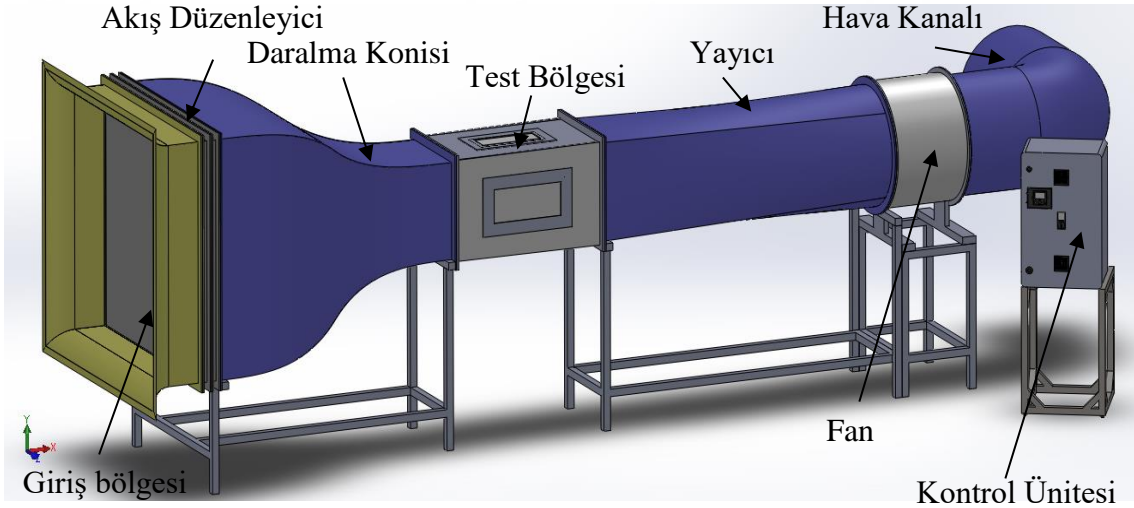


Fotoğraf 2.1. Deneysel düzeneğin genel görünümü

2.1 Rüzgâr Tüneli

Çalışılan rüzgâr tüneli emmeli tip ve açık çevrimli olup ses altı hızlarda çalışan rüzgâr tünelidir. Rüzgâr tüneli genel olarak giriş kısmı, akış düzenleyicisi, daralma konisi, test bölgesi, yayıcı, titreşim önleyici, fan, kontrol ünitesi ve çıkış hortumundan oluşmaktadır. Giriş bölgesinde akış toplanarak akış düzenleyiciye gönderilmektedir.

Hava akışı, akış düzenleyici elekler ve 6,25:1 oranında daralma konisinden geçerek akışın türbülans şiddeti düşürülmekte ve test bölgesi girişindeki serbest akışın üniform olması sağlanmaktadır. Daha sonra hava akışı test modellerinin ve ölçüm elemanlarının konumlandırıldığı 570mm x 570mm kare kesite ve 1000mm uzunluğa sahip test bölgesinden geçmektedir. Test bölgesinde akışın yığılmadan devam edebilmesi için 580x580mm kare kesiti 700mm çapa dönüştüren yayıcı bulunmaktadır. Titreşim önleyici kullanılarak hem yayıcı ile fanın bağlantısı yapılmakta hem de fandan meydana gelen titreşimler bertaraf edilmektedir. Tünelde akışı sağlayan fan 4kW gücünde olup, 700 mm çapa sahiptir. Tünelin içerisindeki hava, çıkış hortumundan atmosfere atılmaktadır. Rüzgar tüneli ve kısımları Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Rüzgâr tüneli ve bileşenleri

Test bölgesinde istenilen hızı elde etmek için fan motorunun devir sayısı elektrik akımı frekans dönüştürücüsü aracılığıyla kontrol edilmektedir. İstenilen hızın elde edilmesi için 0-50 Hz aralığında ve 0,1 Hz adımı sahip Telemecanique Altivar 71 model frekans inverter kontrol ünitesi kullanılmıştır. Rüzgar tünelinin test bölgesindeki akışın türbülans şiddetinin yapılan kızgın tel anemometresi ölçümleri sonucu % 1'in altında olduğu gözlemlenmiştir.

2.2 Plazmanın Oluşturulması

Bu çalışmada, farklı plazma sentetik jet oluşturma yöntemleri incelenmiş ve DBD yöntemi kullanılarak, bir model uçak kanadı üzerine plazma aktüatör konumlandırılarak

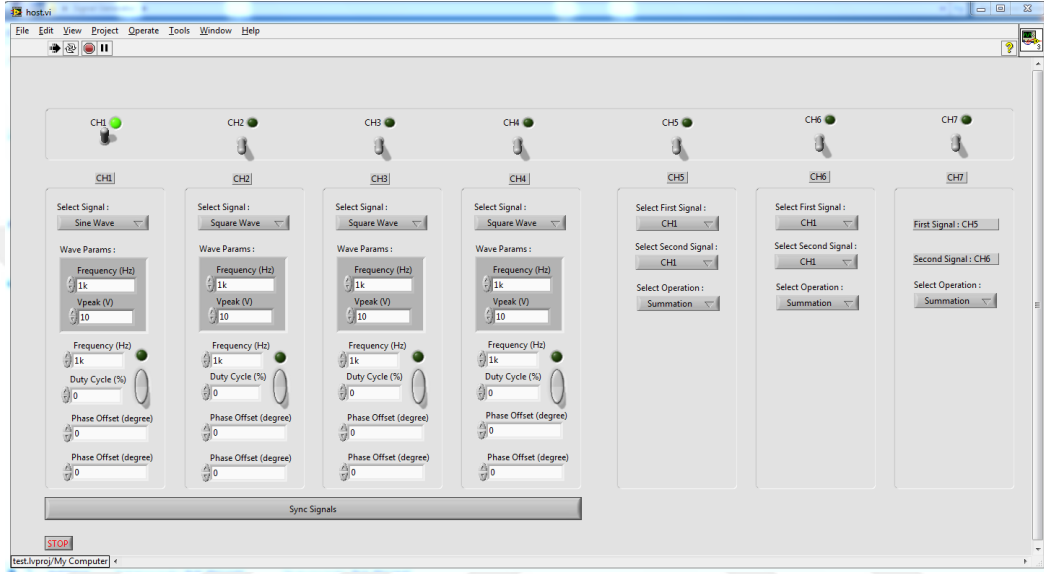
model uçak kanadı üzerinde oluşan akışın aktif olarak kontrol edilmesi sağlanmıştır. DBD yönteminde; bir elektrot topraklanıp diğer elektrota yüksek voltaj uygulanarak bu iki elektrot arasına dielektrik malzeme yerleştirilmesi ile ortamda bulunan gazın iyonize olması sonucunda plazma oluşturulur. Burada oluşturulan plazma atmosferik soğuk plazmadır.

Plazma sentetik jeti oluşturabilmek için plazma oluşumuna etki eden parametrelerin kontrol altında tutulması büyük önem arz etmektedir. Plazma aktüatörlerindeki elektrotlara gönderilen sinyal modülü, güç, frekans, voltaj değerlerinin istenilen değerlerde olması gerekmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında plazma oluşturmak için iki farklı yüksek voltaj güç kaynağı kullanılmıştır. Fotoğraf 2.2’de TREK marka yüksek voltaj güç kaynağı görülmektedir. Cihaza gönderilen elektrik sinyali 2000V/V’luk çarpan ile yükseltilmektedir. Çıkış voltajının yükselme kabiliyeti ise 800 V/ μ s değerinde olup, 20 kHz’e kadar 0 ile ± 20 kV arasında DC ya da pik AC olarak yüksek voltaj elde edilebilmektedir.



Fotoğraf 2.2. TREK 20/20C-HS Model yüksek voltaj güç kaynağı

TREK marka yüksek voltaj güç kaynağına gönderilen sinyal formu FPGA tabanlı olarak geliştirilen bilgisayar programı (Fotoğraf 3.4) ile oluşturularak 16bit çözünürlüğe ve 200kHz örnekleme frekansına sahip National Instrument firmasının PCIe-7841R model veri dönüşüm kartının analog çıkışından güç amfisine gönderilmiştir. Güç amfisine gönderilen sinyal yapısında değişiklik olmaksızın istenilen oranlarda yükseltilebilir voltaj plazma aktüatöre gönderilebilmektedir.



Fotoğraf 2.3. FPGA tabanlı olarak geliştirilen bilgisayar programının arayüzü

Fotoğraf 2.4'de ise özel olarak tasarlanmış yüksek voltaj güç kaynağı görülmektedir. Cihaz özel olarak tasarlanmış bir yüksek voltaj güç kaynağıdır. 220 volt 50 Hz şehir şebeke gerilimini 10 kV 10 kHz değerlerine kadar çıkarabilmektedir. Çıkış voltajı ve frekansı manuel olarak ayarlanabilmektedir. Çıkış voltajı ve frekans değerlerinin okunabilmesi için bir yüksek voltaj probu ve bir osiloskoptan faydalanılmıştır.



Fotoğraf 2.4. Deneyde kullanılan yüksek voltaj amfisi

Literatür çalışmalarına bakıldığında dielektrik bariyer deşarj yöntemi kullanılarak üretilen plazmanın dielektrik malzeme özelliklerine ve elektrot geometrisine bağlı olarak 3,5 kHz değerindeki frekansta en iyi şekilde oluştuğu görülmektedir. Bu yüzden yapılan çalışmada yüksek voltaj güç amfisi sisteminden 7 kV peak to peak değerinde voltaj ve 3,5 kHz frekans sabit değerlerde alınmıştır.

Yüksek voltaj güç amfisine gönderilen sinyal şekli Tektronix TDS2012B osiloskop ile kontrol edilmiştir. Fotoğraf 2.5'te sinyal şeklinin osiloskopa kontrol edilmesi gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.5. Osiloskop ile sinyal şeklinin görüntülenmesi

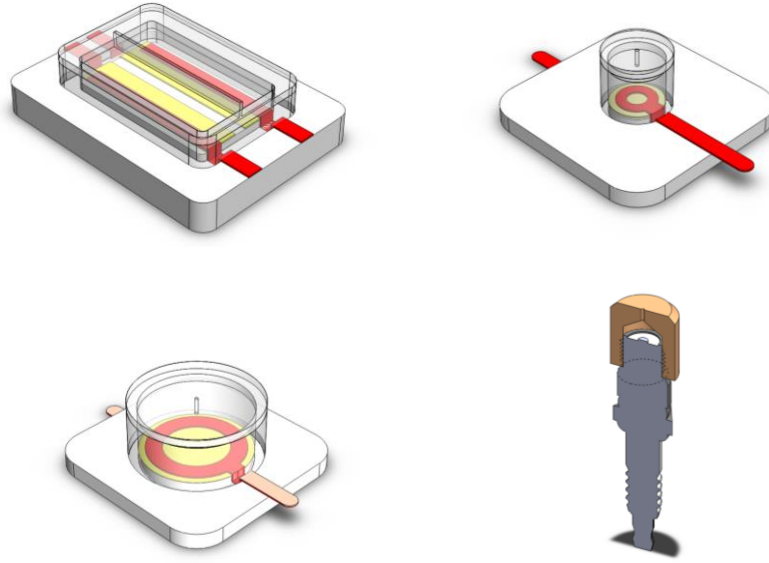
Plazma aktüatörlerine gönderilen yüksek voltajın istenilen değerlerde olup olmadığı Tektronix P6015A yüksek voltaj probu kullanılarak ölçülmüştür. Fotoğraf 2.6'da deneyde kullanılan yüksek voltaj probu gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.6. Yüksek voltaj probu

2.3 Plazma Sentetik Jet Test Modelleri

Sentetik jet uyarıcılar akış kontrol uygulamalarında, mikro kanallarda, küt cisimler üzerinde vb. birçok alanda kullanılabilirler. Plazma sentetik jeti sıfır net kütle akısı oluşturarak akışa etki etmektedir. Bu jet akışının üfleme debisi, frekansı ve jet çıkış karakteristikleri; plazma oluşum voltajı, dielektrik malzeme kalınlığı, jetin çıkış yaptığı boşluğun çapı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Plazma sentetik jet modelleri hazırlanırken bu parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan çalışmalarda ilk olarak DBD yöntemi ile kapalı hacim içerisinde plazma oluşturularak sentetik jet oluşturulmuştur. Bunun için dört çeşit plazma sentetik jet modeli hazırlanmıştır. Üç modelde dielektrik bariyer deşarj yöntemi bir modelde de ark deşarj yöntemi için tasarımlar yapılmıştır.



Şekil 2.2. Plazma sentetik jet aktüatörlerinin üç boyutlu tasarımı

Modeller $60 \times 60 \text{ mm}^2$ ebatlarında ve $80 \times 60 \text{ mm}^2$ ebadında pleksiglass levhadan imal edilmiştir. Dairesel olanlar ise $40 \times 36 \text{ mm}$ çapında ve $20 \times 16 \text{ mm}$ çapında pleksiglass borudan imal edilmiştir. Pleksiglass boruların kapakları 5 mm kalınlığında olup sentetik jetin çıkış yaptığı orifisin çapı 1 mm dir. Modellerin oluşturulmasında pleksiglass kullanılmasının sebebi; pleksiglass' ın şeffaf olması sayesinde oluşan plazmanın rahatlıkla gözlemlenebilmesi, işlenebilirliğinin kolay olması ve dielektrik bariyer deşarj

yönteminde çok fazla ısının meydana gelmemesidir. Tasarım aşaması tamamlandıktan sonra CNC makinesi ile pleksiglasslar istenilen ölçülerde işlenmiştir.



Fotoğraf 2.7. Plazma sentetik jet aktüatör modelleri

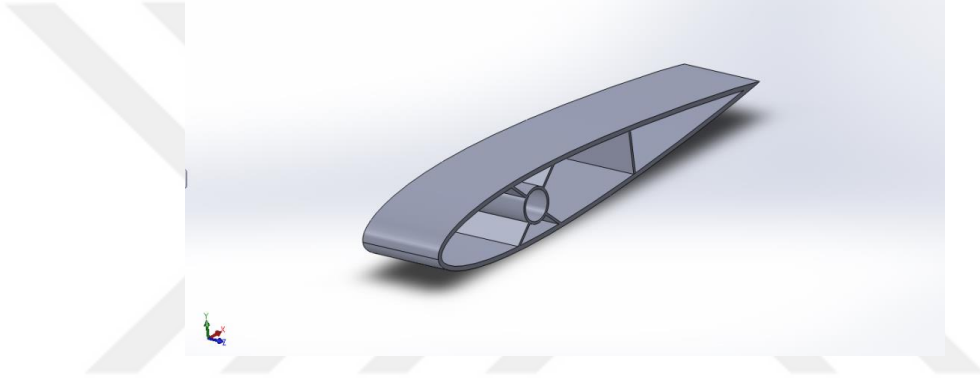
Parçalar arasındaki gaz kaçaqlarını önlemek için silikon conta kullanılmıştır. Ark deşarj yöntemi için otomobillerde kullanılan performans bujisi kullanılmıştır. Bujinin uç kısmına çelik malzeme kullanarak belirli bir boşluk oluşturulmuş ve bu boşlukta plazmanın oluşması sağlanmıştır. Fotoğraf 2.5'te modellerin imalat sonrası şekilleri gösterilmiştir.



Fotoğraf 2.8. Dairesel ve düz elektrotlu plazma sentetik jet aktüatör modellerinin imalat sonrası görünümü

2.4 NACA0015 Tipi Uçak Kanadı Modelinin Üretilmesi

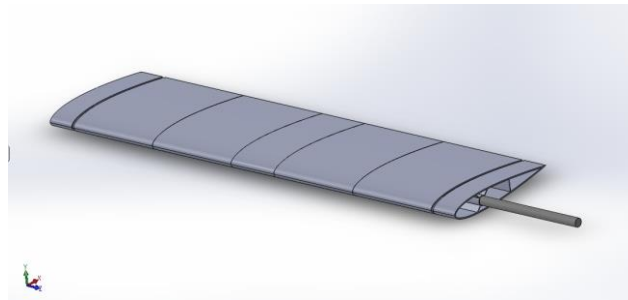
Yapılan çalışmada ikinci olarak NACA0015 profilinin tasarımı ve uçak kanadının imalatı gerçekleştirilmiştir. NACA0015 uçak kanadı profilinin iki boyutlu çizimi, 1000 adet noktanın bilgisayar programı kullanılarak birleştirilmesiyle boyu 150mm olacak şekilde elde edilmiştir. Elde edilen bu iki boyutlu çizim Solidworks programı yardımı ile üç boyutlu olarak toplam boyu 560 mm olacak şekilde 7 parça halinde çizilmiş ve üç boyutlu yazıcı kullanılarak parçalar elde edilmiştir. Aşağıda tasarlanan NACA0015 uçak kanadının bir parçası görünmektedir. Test modelleri Zortrax M200 model 3D yazıcıda ultrat model malzeme kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 2.3. NACA 0015 model uçak kanadının bir parçası

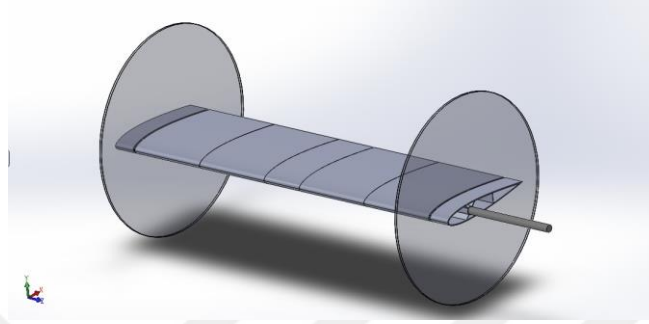
Üç boyutlu yazıcıdan çıkan parçaların yüzeyleri çok az da olsa pürüzlü olduğundan asetona ıslatılarak ve sıfır zımpara ile zımpara yapılarak yüzeylerin pürüzsüz olması sağlanmıştır.

Tasarımı ve imalatı tamamlanan parçalar modelin dönme ekseninden geçen çelik bir çubuk kullanılarak kalıcı olarak bir araya getirilmiştir.



Şekil 2.4. Uçak kanadı profilinin bir araya getirilmesi

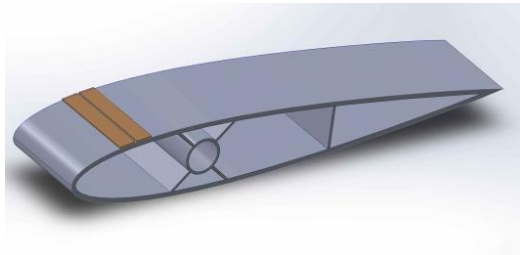
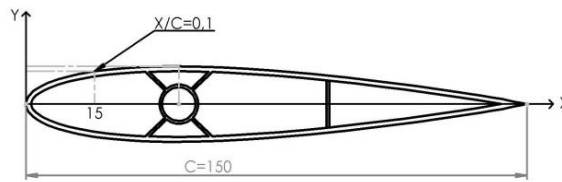
Test bölgesi içerisinde uçak kanadı iki boyutlu olarak test edileceğinden, iki boyutlu akışın bozulmaması için uçak kanadının her iki tarafına da 280mm çapında pleksiglass malzemeden iki adet uç plaka konulmuştur. Uç plakaların kenarları 30°'lik açı ile torna tezgahında işlenmiştir. Bu sayede uç plakalar arasındaki akışın plaka yüzeyine paralel olarak akması sağlanmıştır.



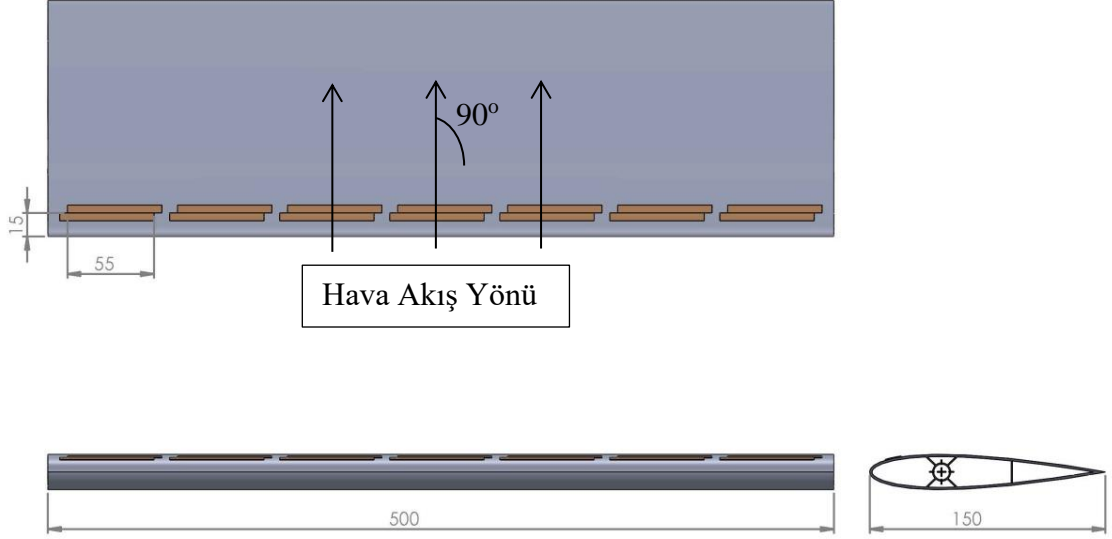
Şekil 2.5. Test modeli

2.5 Uçak Kanadı Modeli Üzerine Plazma Aktuatörlerinin Yerleştirilmesi

Dielektrik bariyer deşarj yöntemi ile plazma oluşturulurken iki elektrottan birisi olan yüksek voltajın uygulandığı elektrot; test modeli üzerinde açık bir şekilde, diğeri ise kapton tipi dielektrik malzeme ile kapatılmış ve topraklanmıştır. Elektrotlar model uçak kanadı üzerinde x eksenindeki uçak kanadı uzunluğunun %10'na ($x/C = 0,1$) olduğu bölgeye yerleştirilmiştir. Şekil 2,6'da $x/C = 0,1$ olduğu görülmektedir.

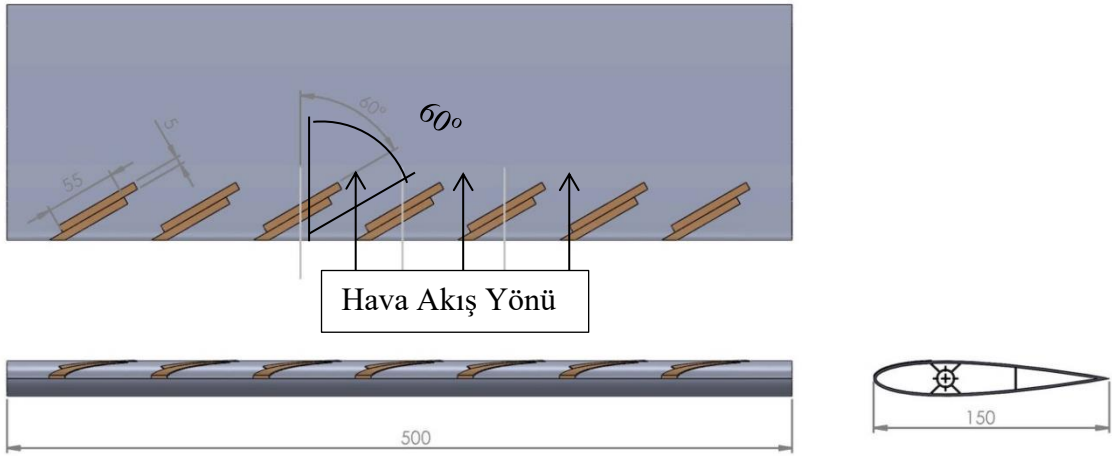


Şekil 2.6 Test modeli üzerinde elektrotların konumlandırılması



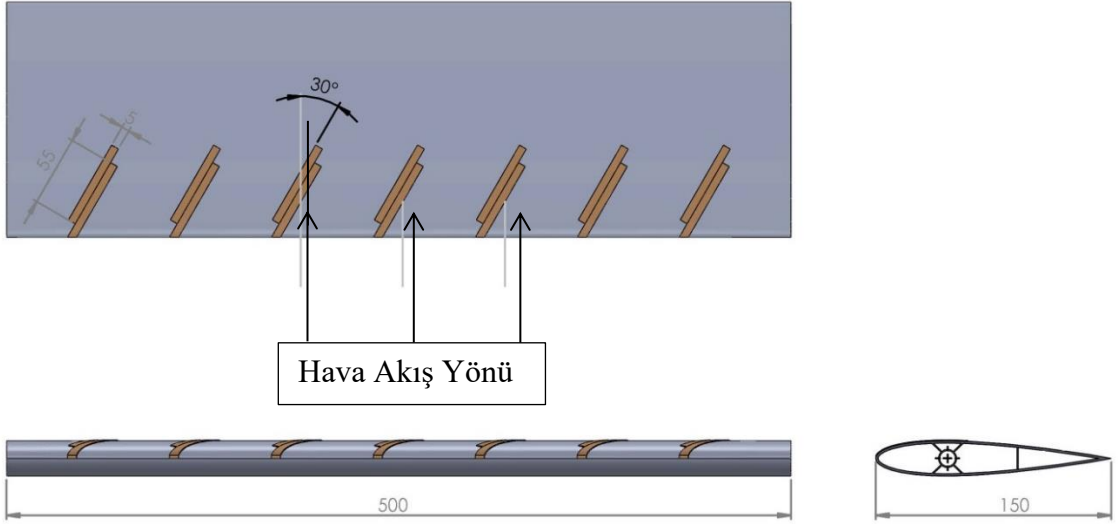
Şekil 2.7. Elektrotların 90° açıyla yerleştirilmesi

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi test model uçak kanadı üzerine elektrotlar ilk olarak uçak kanadına etki eden hava akışı ile 90° açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır her bir elektrot uzunluğu 60mm x 5mm’dir ve 7 adet elektrot çifti bulunmaktadır. Uçak kanadı üzerine $x/C=0,1$ konumuna yerleştirilmiştir.



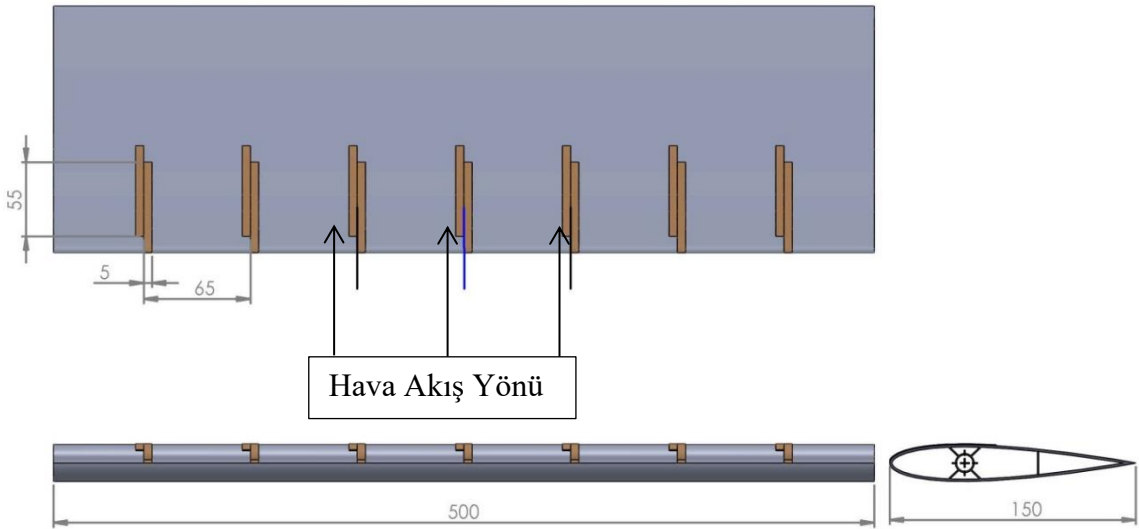
Şekil 2.8. Elektrotların 60° açıyla yerleştirilmesi

İkinci olarak şekil 2.8’de görüldüğü gibi elektrotlar hava akışı ile 60° lik açı yapacak şekilde şablon kullanarak yerleştirilmiştir. Her bir elektrotun uzunluğu 60mm x 5mm dir ve 7 elektrot çifti bulunmaktadır. Elektrotlar döşenirken uçak kanadı üzerine elektrotların merkez noktası $X/C=0,1$ konumuna denk gelecek şekilde yerleştirilmiş ve elektrotlar arası mesafe eşitlenmiştir.



Şekil 2.9. Elektrotların 30° açıyla yerleştirilmesi

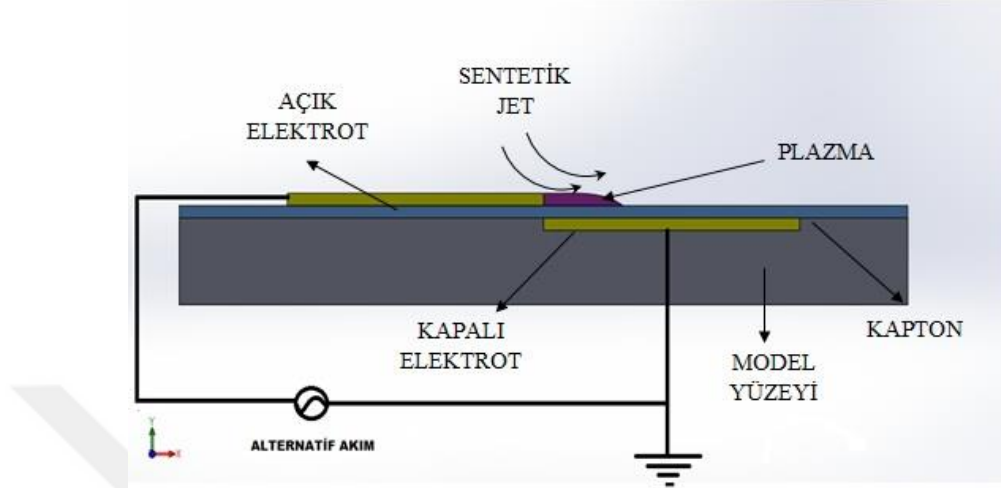
Şekil 2.9’da elektrotlar hava akış yönü ile 30° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Elektrotların merkez noktası, uçak kanadı üzerinde $X/C=0,1$ noktasına denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Elektrotlar arası mesafe eşit ve elektrot ölçüleri diğer çalışmalardakilerle aynıdır.



Şekil 2.10. Elektrotların 0° açıyla yerleştirilmesi

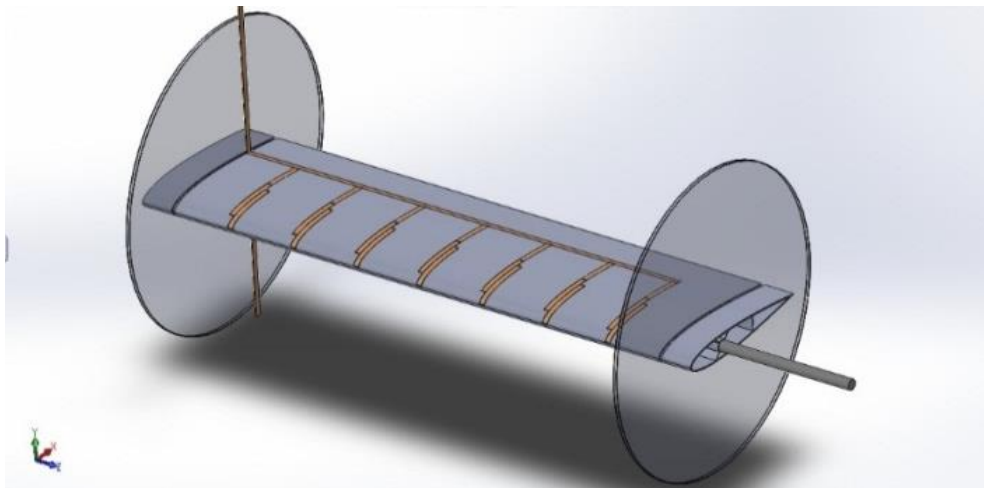
Son olarak şekil 2,10’da görüldüğü gibi elektrotlar hava akışı ile paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Elektrot ölçüleri ve elektrotlar arası mesafe eşittir.

Aşağıda elektrotların yapısı ve plazma oluşumu şematik olarak gösterilmektedir. Bu iki elektrot arasında boşluk neredeyse yoktur. Burada oluşan yüksek elektromanyetik alan sayesinde ortamda bulunan gazın atomları iyonlaşarak plazma oluşur.

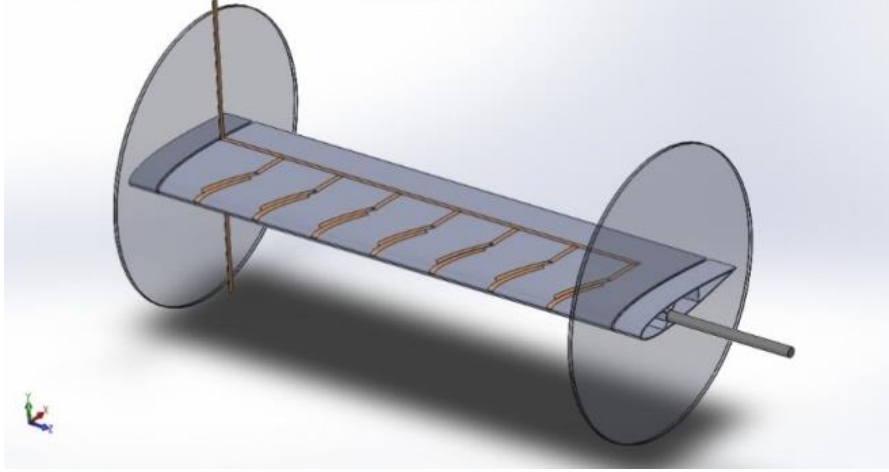


Şekil 2.11. DBD yöntemi ile plazma oluşumu

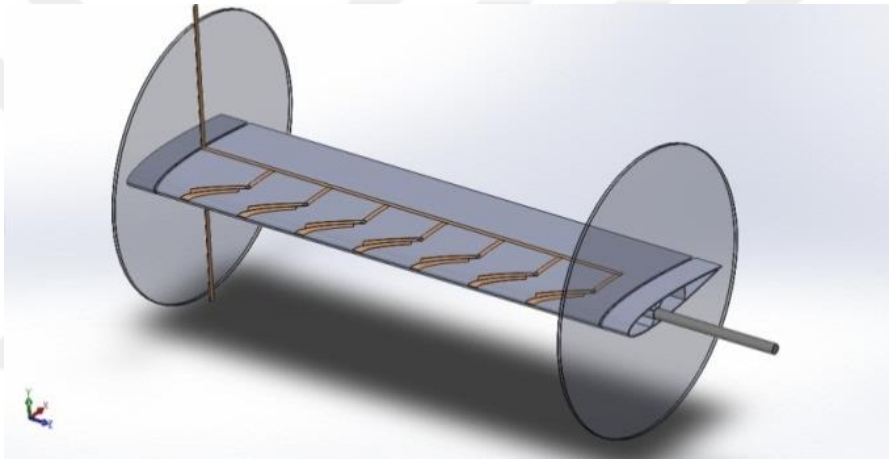
Yapılan deneysel çalışmada oluşturulan sentetik jetin test modele etki eden hava akışına paralel konumdan dik konuma gelinceye kadar $\beta = 30$ derecelik artışlarla 4 farklı pozisyonda kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerindeki değişim incelenmiştir. Aşağıda test modelinin son hali ve üzerine düşenen dört farklı pozisyonun elektrotların tamamlanmış vaziyetleri görünmektedir.



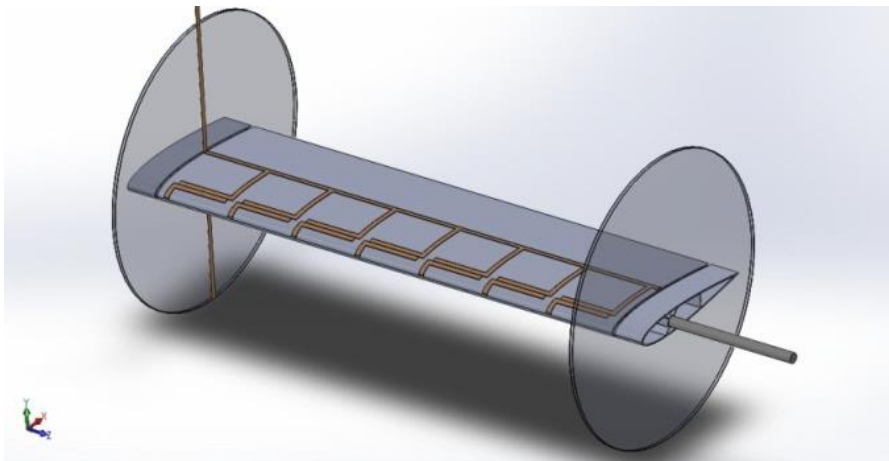
Şekil 2.12. Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta = 0$ derece konumda yerleştirilmesi



Şekil 2.13. Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta=30$ derece konumda yerleştirilmesi



Şekil 2.14. Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta=60$ derece konumda yerleştirilmesi



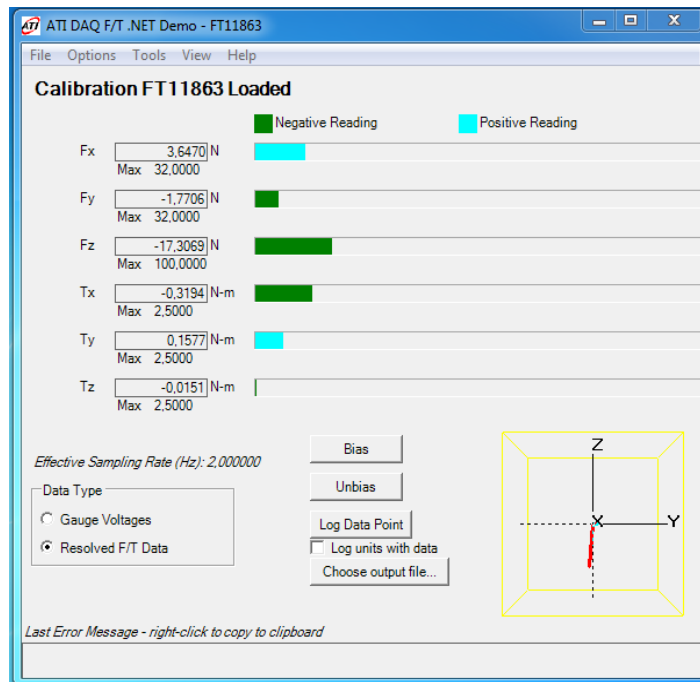
Şekil 2.15. Test modeli üzerindeki elektrotların $\beta=90$ derece konumda yerleştirilmesi

Her bir pozisyonda test modelinin hücum açısı 0 dan 20 dereceye kadar $\alpha=2$ şer derecelik artışla değiştirilmiştir.

2.6 Kuvvet Ölçüm Sistemi

Plazma sentetik jet aktüatörlerinde oluşturulan plazmanın deneysel olarak incelendiği bu çalışmada model üzerine etki eden kuvvetler plazmanın açık ve kapalı olduğu durumlarda üç eksenli hassas ölçüm yapabilen ATI marka Gamma model yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Yük hücresi, x, y, z eksenlerine etki eden kuvvetleri ve bu eksenlerde oluşan momentleri hassas bir şekilde ölçebilmektedir. F_x ve F_y eksenlerinde oluşan eksenel kuvvetleri $\pm 32\text{N}$, F_z kuvvetini $\pm 100\text{ N}$ ve M_x , M_y ve M_z momentlerini ise $\pm 2.5\text{Nm}$ aralığında ölçebilmektedir. Bu kuvvet ve momentlere ait belirsizlik değerleri tam skala üzerinden sırasıyla $\pm 0.75\%$, $\pm 1\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1\%$, $\pm 1.25\%$ ve $\pm 1\%$ olarak kalibrasyon değerleri olarak verilmektedir.

Yük hücresi 0,05 derece hassasiyetle dönebilen, bilgisayar kontrollü bir döndürme aparatının üzerine monte edilmiştir. Bu sayede model uçak kanadı hücum açısı istenilen değerde ve hassasiyette kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Şekil 2.16'da ATI yük hücresi kuvvet ölçüm sisteminin ara yüzü görünmektedir.



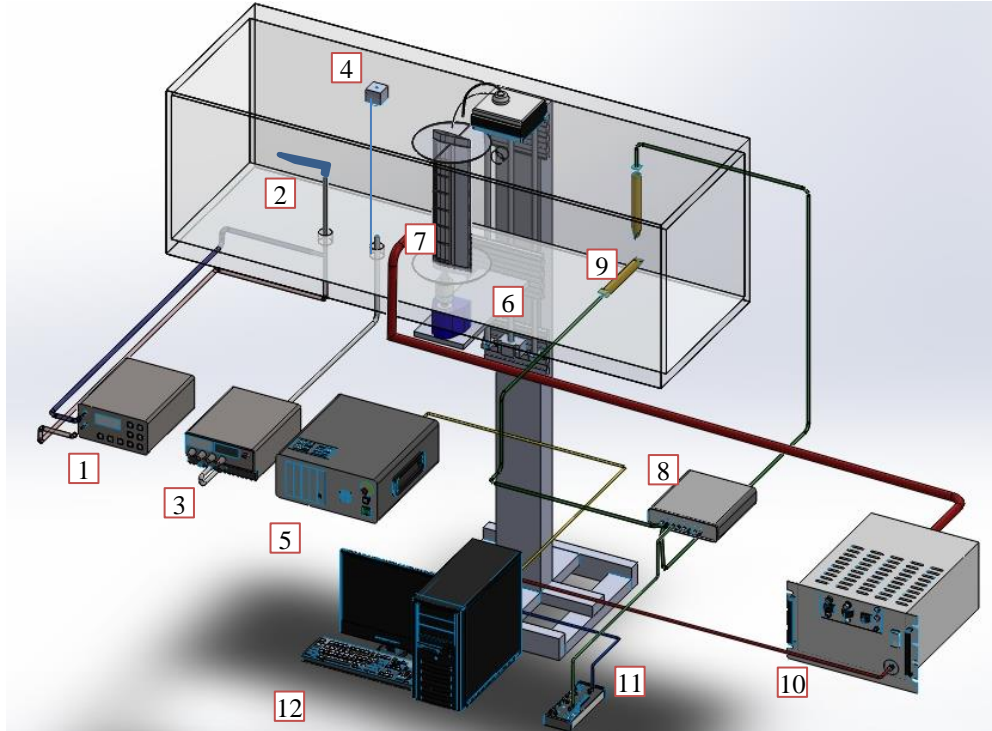
Şekil 2.16. Kuvvet ölçüm sisteminin ara yüzü

Kuvvet ölçümünde her bir ölçüm için 500Hz örnekleme oranı ile 6000 veri elde edilmiş olup ölçüm süresi 12s olarak belirlenmiştir. Ölçümlerin iki defa tekrarı yapılarak her bir parametre için yapılan toplam 3 ölçümün ortalaması alınarak grafiklerin çiziminde bu değerler kullanılmıştır. Şekil 2.17’de test bölgesini şematik görünümü verilmiştir.

Buradaki cihazlar sırası ile;

- 1- mikromanometre,
- 2- pitot tüpü,
- 3- DC güç kaynağı,
- 4- duman-tel akış görüntüleme sistemi,
- 5- açısız döndürme aparatı kontrol ünitesi,
- 6- yük hücresinin üzerinde bulunduğu traverse ve açısız döndürme aparatı sistemi,
- 7- test modeli
- 8- multichannel sabit sıcaklık anemometresi
- 9- anemometre probları
- 10- yüksek voltaj güç kaynağı
- 11- veri toplama kartı
- 12- hız ve kuvvet ölçümünde kullanılan bilgisayar yazılımı

olarak verilmiştir.



Şekil 2.17. Rüzgar tüneli test bölgesinin ve deney sisteminin şematik görünümü

2.7 Aerodinamik Kuvvet Katsayıları

Çengel ve Cimbala (2008), Aerodinamik olarak cisim üzerine etki eden kuvvetleri: bir akışkanın katı bir cisim üzerinde hareket ettiğinde yüzeye dik yönde oluşan kuvvetlerin bileşkesine kaldırma kuvveti (lift), yüzeye paralel yönde oluşan kuvvetlerin bileşkesini de sürüklenme kuvveti (Drag) olarak tanımlamışlardır. Bu kuvvetler yoğunluk, hız ve alana bağlı olarak ifade edildiğinden bunların boyutsuz ifade edilebileceği boyutsuz katsayılar tanımlanmıştır. Kaldırma kuvveti katsayısı (2-1) numaralı denklemde kaldırma kuvveti F_L , yoğunluk ρ , serbest akış hızı U_0 ve üst bakış alanı $A_{üst}$ parametreleri ile ifade edilmiştir.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A_{üst}} \quad (2-1)$$

Sürüklenme kuvveti katsayısı ise aynı şekilde sürüklenme kuvveti F_D , yoğunluk ρ , serbest akış hızı U_0 ve ön bakış alanı $A_{ön}$ parametreleri ile ifade edilmiştir.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A_{ön}} \quad (2-2)$$

Bu çalışmada her iki kuvvette ölçülmüş olmakla birlikte sadece kaldırma kuvvet katsayılarının hesaplanması yapılarak bulgular kısmında sunulmuştur.

BÖLÜM III

BULGULAR VE DENEYSEL SONUÇLAR

3.1 Kapalı Hacim Plazma Sentetik Jet Aktüatörleri ile Hız Ölçümü

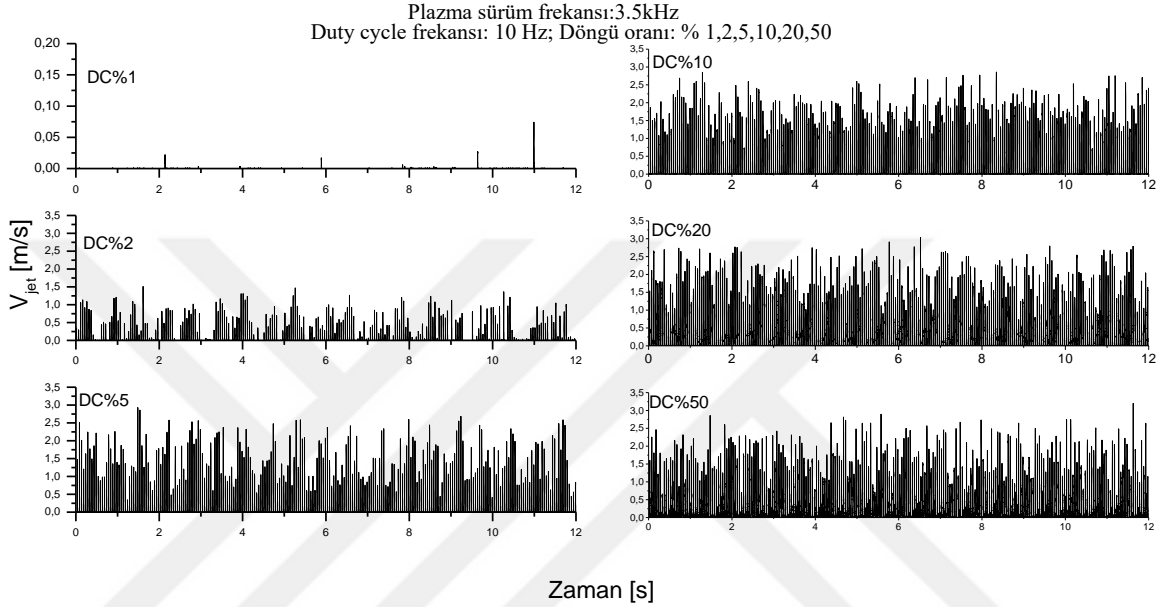
Yapılan çalışmalarda ilk olarak imalatı tamamlanmış plazma sentetik jet aktüatörleri ile kapalı ortamda plazma oluşturularak sentetik jet elde edilmeye çalışılmıştır. Fotoğraf 3.1’de görüldüğü gibi iki elektrot Kapton® tipi dielektrik malzeme ile kaplanmış ve aralarında 2 mm boşluk kalacak şekilde paralel vaziyette bir biri üzerine kapatılarak kapalı bir hacim oluşturulmuştur. Kapalı hacmin kenarında açılan 2 mm çapındaki orifis deliğinden plazmanın aktif hale gelmesi ile sentetik jet elde edilmiştir. Jet hızları orifisin 20 mm yukarısına yerleştirilen kızgın tel probu ile 5 kHz örnekleme frekansında 60000 veri alınarak gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçüm için ölçüm süresi yaklaşık 12 s olarak elde edilmiştir.



Fotoğraf 3.1. DBD yöntemi ile hacim plazmalı sentetik jet aktüatörü

Oluşturulan hacim içerisinde plazma sürekli olarak değil 10 Hz’lik bir periyotta ve her bir periyotta plazma oluşturma sıklığı (duty cycle) %1, 2, 5, 10, 20, 50 olarak değiştirilmiştir. Yani duty cycle frekansı 10 Hz ve %50’lik duty cycle döngüsüyle aktüatöre saniyede 10 defa sinyal gönderilmiş ve gönderilen sinyalin %50’lik kısmı plazmaya dönüştürülmüştür. Duty cycle döngüsü sayesinde daha düşük enerji kullanılarak plazma sentetik jet oluşturulmuştur. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere %1’lik Duty cycle döngüsünde hız-zaman grafiğinden plazmanın sentetik jet oluşturabilmesi için yeterli zamanının kalmadığı, oluşturulan sentetik jet hızının çok düşük olduğu

gözlemlenmektedir. Bu durum %50'lik duty-cycle döngüsüne doğru azalmış ve ölçümlerden oluşan plazma sentetik jetinin 3m/s hıza kadar çıkabildiği görülmüştür. Döngü oranının %10 ve yukarısında sentetik jetin istenilen düzeyde elde edilebildiği görülmüştür. Daha düşük değerlerinde sentetik jetin oluşumun yetersiz olduğu görülmüştür. Döngü oranının %10 civarında kullanılması ile sürekli sürümün %10'u kadar enerji harcanmaktadır.

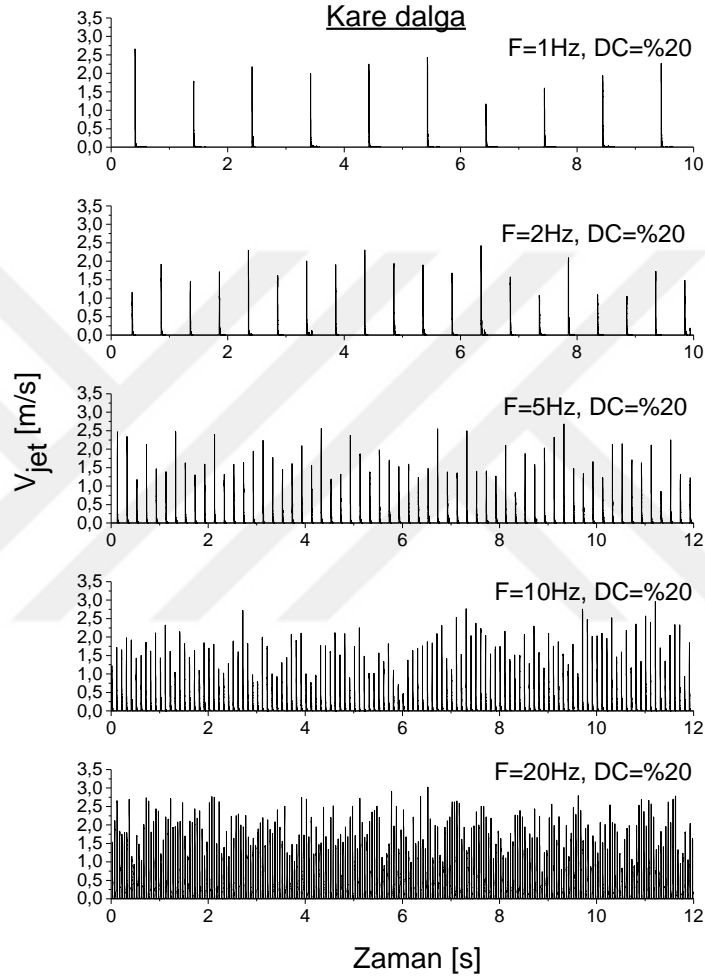


Şekil 3.1. Duty cycle döngüsü kullanılarak oluşturulan plazma sentetik jeti hız ölçümü

Şekil 3.2'de aktuatörün 3.5 kHz değerinde kare dalga ile sürülmesi durumunda yapılan çalışmadan elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Burada, %20'lik duty cycle döngüsü sabit tutularak duty cycle oluşum frekansı 1, 2, 5, 10 ve 20 Hz değerlerinde değiştirilmiştir. Kare dalga ile sürümde 1Hz durumunda her bir duty cycle periyotunda sentetik jet oluşumu elde edilmiştir. Frekansın artması ile oluşan jetin sayısı da artmaktadır. Frekansın 1 Hz olduğu durumda 10s'lik ölçüm süresince 10 adet jet oluşumu sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen 6 farklı aktuatör dış geometrisi içerisine çok sayıda farklı genişlik ve büyüklüklerde elektrot döşemesi gerçekleştirilerek test edilmiştir. Özellikle yüzeye dōşeli DBD plazma aktuatörlerinden her ne kadar aktuatör içerisinde plazma üretimi sağlanmış olsa bile kayda değer bir sentetik jet oluşumu sağlanamamıştır. Fotoğraf 3.1'de verilen hacim plazması ile çalışılması durumunda ise yaklaşık 3 m/s mertebelerinde jet hızı elde edilebilmiştir. Bu değerde düz levha üzerine DBD elektrotların yerleştirilmesi ile elde edilen açık yüzey

plazma tarafında oluşturulan duvar jetinin seviyesi mertebelerinde kalmaktadır. Bu nedenle bir uçak kanadı üzerinde plazma sentetik jet ile akış kontrolü uygulaması için literatürde yaygın olarak kullanılan kanat üzerine doğrudan yerleştirilen açık yüzey aktuatörleri ile çalışılmasına karar verilmiştir.

Plazma sürüm voltajı: 8.0 kV
Plazma sürüm frekansı:3.5kHz



Şekil 3.2. Duty cycle frekansı değiştirilerek kare dalga ile oluşturulan plazma sentetik jeti hız ölçümü

3.2 Açık Yüzey Plazma Sentetik Jet Aktuatörleri ile Hız Ölçümü

Bu çalışmada uçak kanadı üzerine yerleştirilen elektrotların parçalı olmasının ve akış ile $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90° olacak şekilde yerleştirilmeleri durumundaki aktif akış kontrolünün etkisi incelenmiştir. Aerodinamik kuvvet ölçümleri 5.0×10^4 Reynolds sayısında plazma aktuatörlerin elektrotları $x/C=0.1$ konumu ($\beta = 90^\circ$ durumunda), referans alınarak yerleştirilmiştir. NACA0015 uçak kanadının kaldırma katsayısı (C_L)

hesaplanmıştır ve hücum açısına (α) bağlı olarak grafik değerleri çizilmiştir. Plazma aktüatörün yerleştirilme konumu oldukça önemlidir.

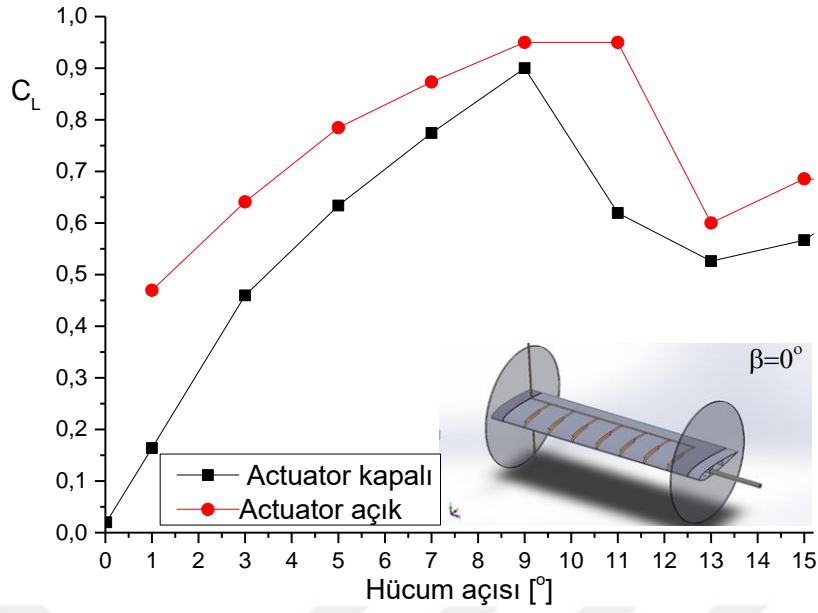
Post vd. (2004), çalışmalarında NACA663-018 uçak kanadı etrafındaki akışın kontrolünde en iyi etkinin sağlanması için plazma aktüatörlerin ön kısma (leading edge) yerleştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Plazmanın daha verimli olabilmesi ve akış kontrolündeki etkisinin artırılması için akış ayrılmasının olduğu bölgeye daha yakın yerleştirilmesi gerekmektedir ve arka kısma doğru kaydırılan ayrılma tabakasının daha etkin kontrolü için daha ileri x/C konumuna plazma aktüatörler konumlandırılmalıdır.

Erfani vd. (2015), maddenin 4. hali olan plazmanın uçakların performanslarını geliştireceğini belirtmişlerdir. Aerodinamik uygulamalarda plazmanın stol açısının ötelenmesinde ve kaldırma kuvvetinin artırılacağını raporlarında ortaya koymuşlardır. Ayrıca plazma aktüatörlerin mekanik flaplar yerine kullanılmaya başladığını belirtmişlerdir.

Huang vd. (2006), plazma aktüatörleri akış yönünde akış ayrılmasının olduğu noktaya yerleştirmek yerine ayrılma noktasının üst kısmına doğru yerleştirilmesi ile daha etkili olacağını belirtmişlerdir.

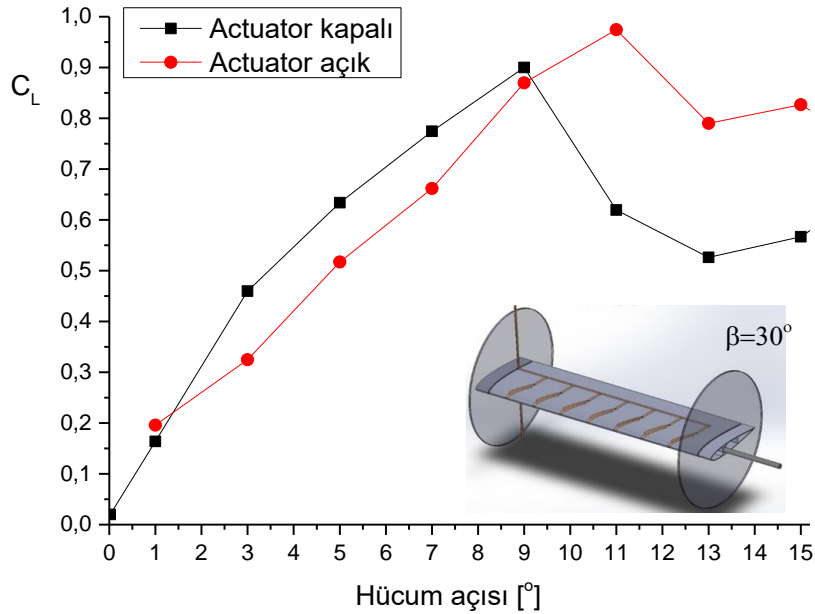
Şekil 3.3'de elektrot açısının akışa göre $\beta = 0^\circ$ durumunda parçalı elektrotların etkisi görülmektedir. Buradaki amaç elektrotların akışa paralel yerleştirilmesi ile oluşan akışın kanat üzerinde türbulator gibi etki oluşturması ve akışın yüzeye tutunmasının artırılmasıdır. Burada görüldüğü gibi kaldırma kuvvetinin ani azalması ile NACA0015 uçak kanadının aktüatör kapalı iken 11° 'de stola girdiği gözlemlenmektedir. Kanat üzerine plazma aktüatör yerleştirildiğinde ve aktif edildiğinde stol açısının 2° geciktirildiği gözlemlenmiştir.

Plazma aktüatörün parçalı olarak yerleştirildiği bu modelde kaldırma kuvveti katsayısındaki iyileştirme miktarı stol açısından önce bir miktar yükselme sağlarken hücum açısının 11° değerinde kaldırma kuvvet katsayısı 0.62'den 0.95 değerine çıkarak yaklaşık %50'lik bir artış sağlamıştır.



Şekil 3.3. Linear plazma aktüatörün kullanıldığı durumda (0°) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı

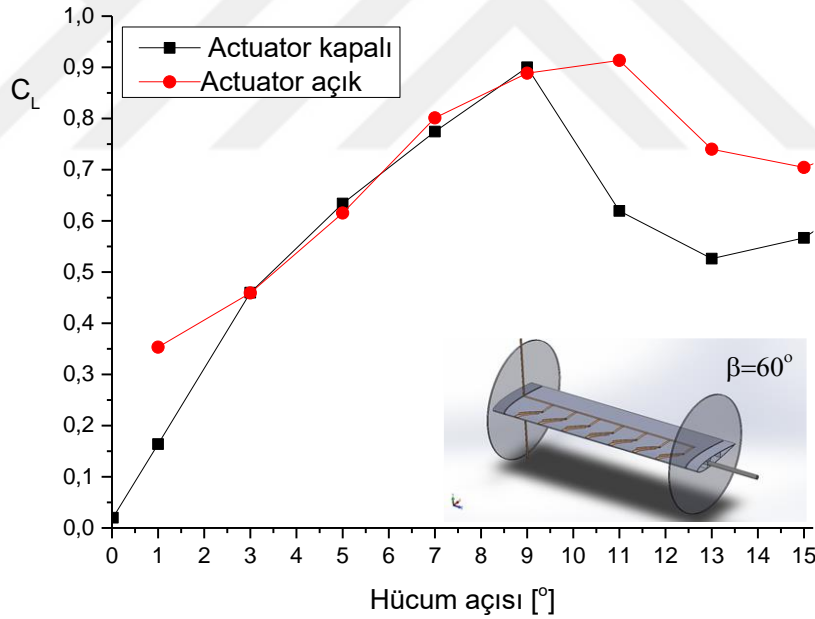
Şekil 3.4.'de plazma aktüatörler NACA0015 uçak kanadı üzerine $x/C=0.1$ konumunda ortalı olacak şekilde 30° açı ile konumlandırılmıştır. Plazmanın kapalı olduğu durumda uçak kanadı stola 11° 'de girerken plazmanın aktif edilmesi ile yine stol açısı 13° 'ye ötelenmiştir.



Şekil 3.4. Linear plazma aktüatörün kullanıldığı durumda ($\beta=30^\circ$) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı

Plazma aktüatörler 30° açı ile kanat yüzeyine yerleştirildiğinde kaldırma kuvvetindeki stol öncesin bir artışın olmadığı hatta kaldırma kuvveti değerini bir miktar azalttığı görülmektedir. Bunun nedeni plazma aktüatörler yardımıyla oluşturulan indirgenmiş akış düşük açılarda ters yönde etki ederek akışı yüzeyden uzaklaştırmıştır. Buna karşın kanat yüzeyi üzerindeki akış bozucu etkinin akışın yüzeye tutunma kabiliyetini arttırdığı ve stol açısını yine 2° olarak arttırdığı görülmektedir. Buradaki 11°'deki iyileşme miktarı ise %57 civarında gerçekleşmiştir.

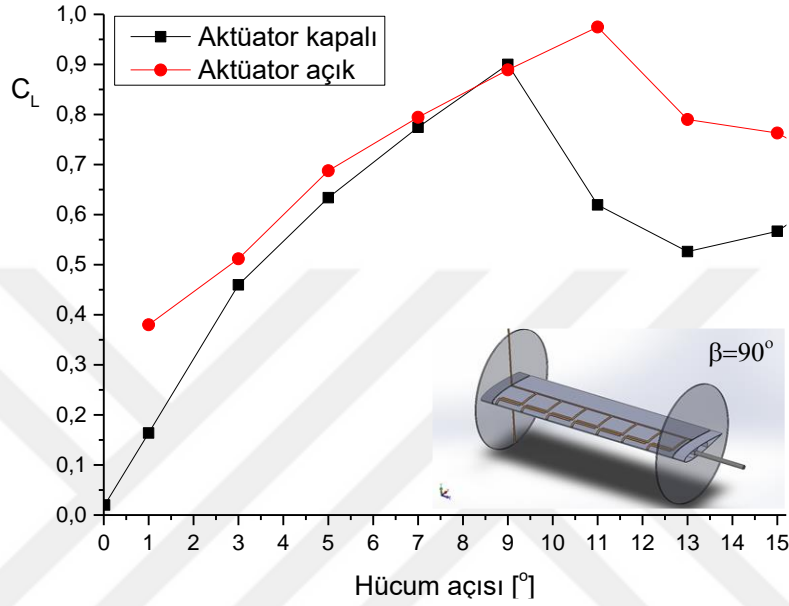
Şekil 3.5.'de plazma aktüatörler NACA0015 uçak kanadı üzerine $x/C=0.1$ konumunda ortalı olacak şekilde 60° açı ile konumlandırılmıştır. Bu açı değerinde stol açısının geciktirilmesindeki iyileşme yine aynı açıda elde edilmiştir. Plazma aktüatörler 60 derece açı ile kanat yüzeyine yerleştirildiğinde stol öncesi açılarda sadece 1°'de kaldırma kuvvetini arttırmıştır ve yaklaşık olarak %115 civarındadır. $\alpha=11^\circ$ konumunda ise iyileşme %47 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Lineer plazma aktüatörün kullanıldığı durumda ($\beta=60^\circ$) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı

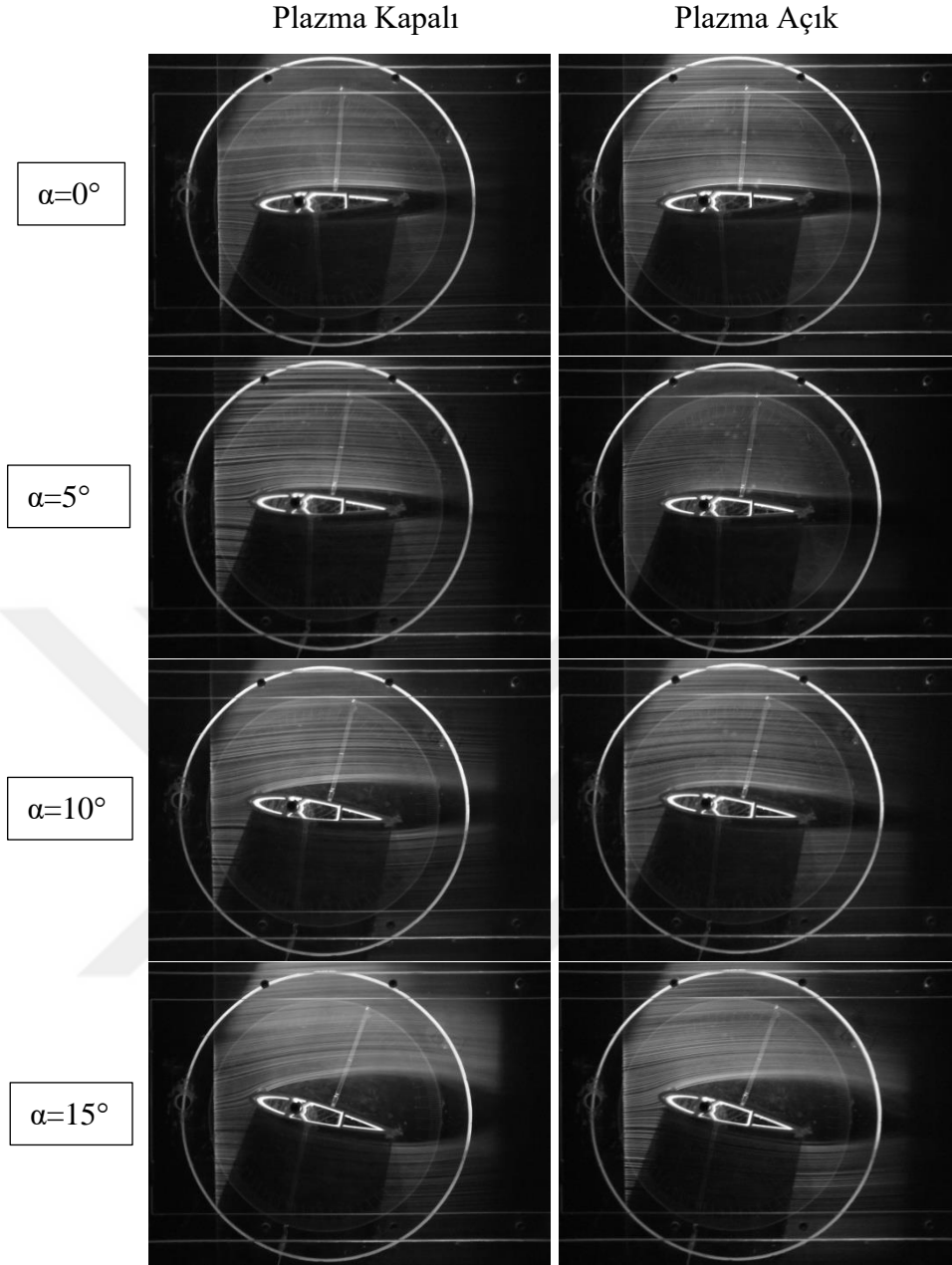
Şekil 3.6.'da plazma aktüatörler NACA0015 uçak kanadı üzerine $x/C=0.1$ konumunda ortalı olacak şekilde 90° açı ile konumlandırılmıştır. Plazma aktüatörlerin yerleştirildiği bu açı değerinde de lineer aktüatörlerin yerleştirildiği 0°'deki gibi kaldırma kuvvetinde ve stol açısının ötelenmesindeki etkiler görülmektedir. Ancak 0°'ye göre kaldırma

kuvvetindeki iyileştirmenin bu açı değerinde daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni dikey konuma yerleştirilen aktüatörlerin ürettiği indirgenmiş akışın etkinliğinin alanının 0° 'ye göre daha az olmasındandır. Hücum açısı 1° 'de iken kaldırma kuvvetindeki artış yaklaşık olarak %132 civarındadır. Stol açısının ötelendiği hücum açısının 10° olduğu durumda ise kaldırma kuvveti %57 civarında iyileştirilmiştir.



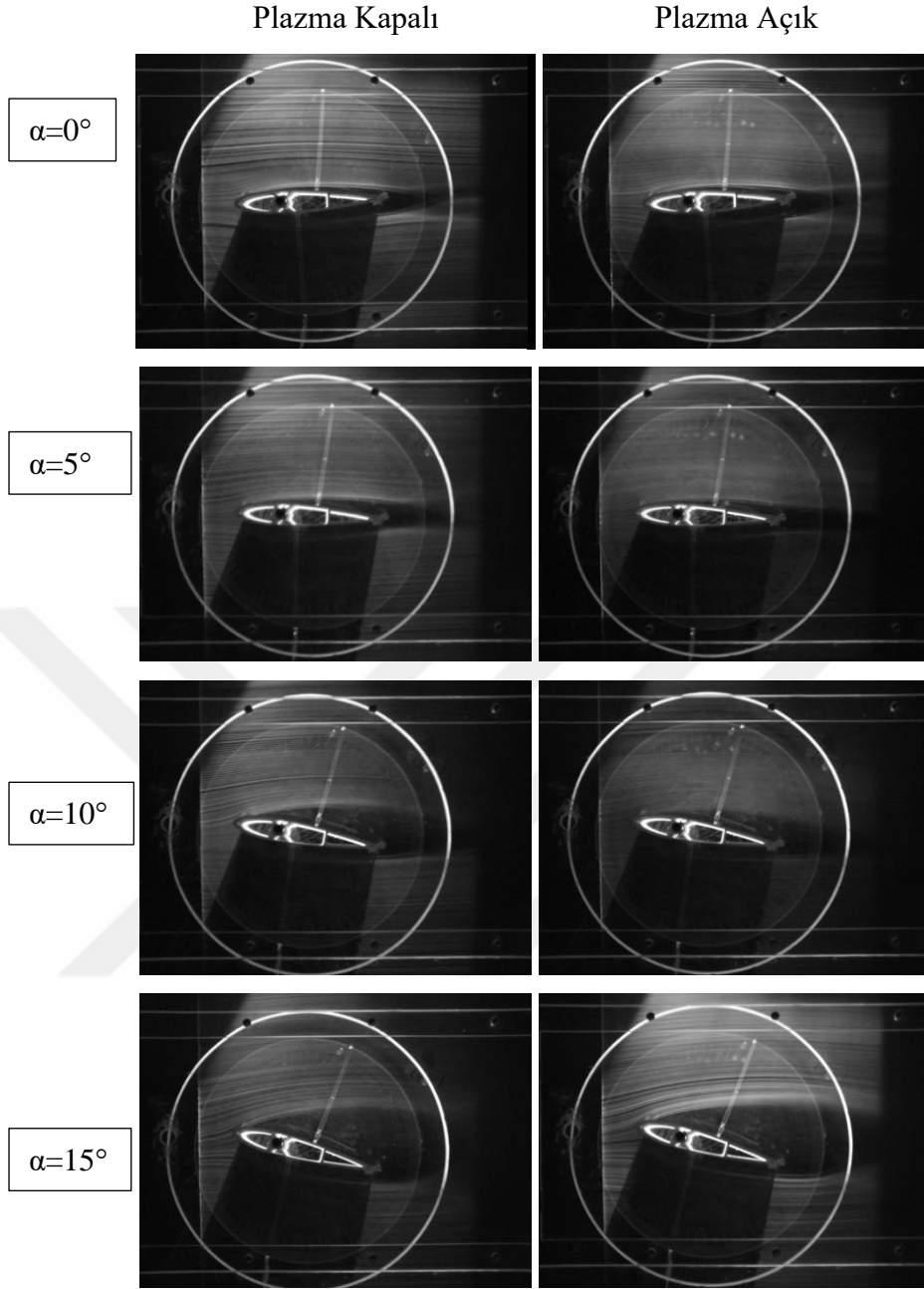
Şekil 3.6. Lineer plazma aktüatörün kullanıldığı durumda ($\beta=90^\circ$) NACA0015 uçak kanadının lift katsayısı

Fotoğraf 3.2-3.4'de farklı elektrot açılarında NACA0015 uçak kanadı etrafındaki akışın $Re=20000$ değerinde iken duman-tel yöntemi ile akış alanına duman gönderilmesi ile elde edilen akış görüntülemesi sonuçları verilmiştir. Fotoğraf 3.2'de $\beta=0^\circ$ plazma aktüatörün kullanıldığı durumda NACA0015 etrafındaki akışın görselleştirilmesi görülmektedir. Burada hücum açısının 0° ve 5° olduğu değerlerde akış kanat yüzeyini takip etmektedir. Plazma aktüatörün aktif edilmesi ile bu açılardaki iz bölgesinde önemli daralma oluşmazken, hücum açısının 10° ve 15° olduğu durumda akışın yüzeyden ayrıldığı gözlemlenmektedir. Plazma aktüatörün aktif edildiği andan itibaren 10° derecedeki hücum açısı için yüzeyden ayrılan kayma tabakası tekrar yüzeye yaklaştırılmıştır. Bununla birlikte iz bölgesinde daralma meydana gelmektedir. Stol açısının ötelenmesi ve iz bölgesinin daralması ile birlikte plazmanın kapalı olduğu durumdaki iz bölgesi merkez ekseninin plazmanın açık olduğu duruma göre aşağı yönde kaydığı görülmektedir. Hücum açısı 15° 'ye ayarlandığında yüzeyden ayrılan akışın tekrar yüzeye yaklaştırılması mevcut çalışılan değerler için mümkün olmamıştır.



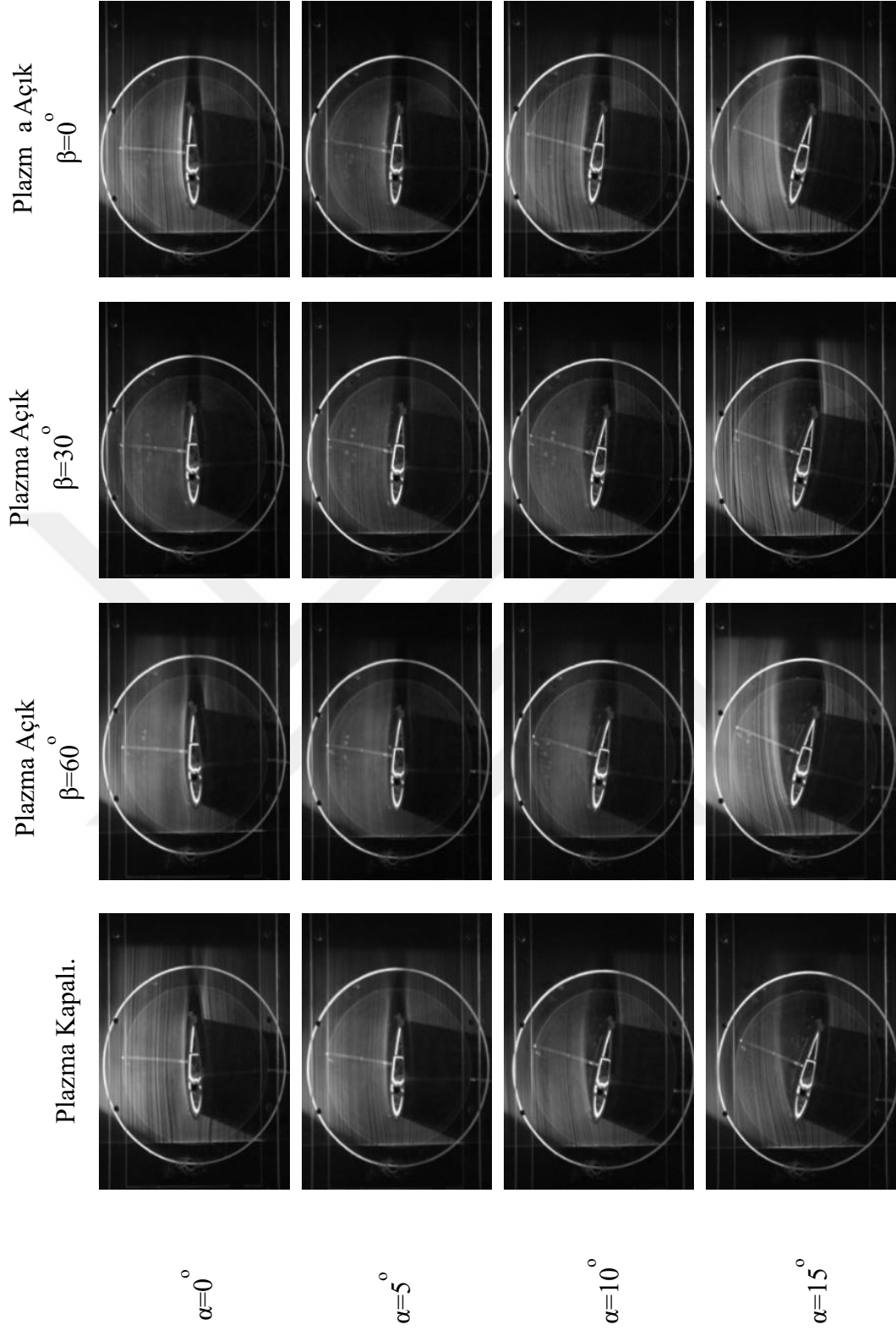
Fotoğraf 3.2. $\beta=0^\circ$ plazma aktüatörün kullanıldığı durumda NACA0015 etrafındaki akışın görselleştirilmesi

Fotoğraf 3.3’de NACA0015 uçak kanadı etrafındaki akışın $Re=20000$ değerinde iken alınan görüntüleridir ve plazma aktüatörler $\beta =60^\circ$ açı ile yerleştirilmiştir. Hücüm açısının 0° ve 5° olduğu değerde akış kanat yüzeyini takip etmektedir ve 10° derecede yüzeyden ayrılan akış tekrar yüzeye yaklaştırılmaktadır. Kanat etrafındaki akışın görselleştirilmesi ve elde edilen sonuçlar kuvvet ölçümünden alınan değerlerle örtüşmektedir. Kuvvet ölçümlerinde stol açısı 9° ’den 11° ’ye geçişte elde edilen burada 10° ’deki akış görüntülemesi olarak elde edilmiştir.



Fotoğraf 3.3 $\beta=60^\circ$ plazma aktüatörün kullanıldığı durumda NACA0015 etrafındaki akışın görselleştirilmesi

Fotoğraf 3.4'de $\beta = 0, 30$ ve 60° olarak uygulandığı durumda elde edile akış görüntülemeleri karşılaştırma yapmak için bir arada sunulmuştur. Kullanılan aktüatör düzenlemelerinin hepsinin yaklaşık aynı etkiyi yaptığı görülmektedir. Hücum açısını 15° olduğu durumda $\beta = 0^\circ$ ve 30° durumlarındaki plazma aktüatörlerin plazmanın kapalı olduğu ve $\beta = 60^\circ$ durumundaki ne göre bir miktar iz bölgesi genişliğini daralttığı görülmektedir.



Fotoğraf 3.4. NACA0015 etrafındaki akışın ($\beta=0^\circ$), ($\beta=30^\circ$), ($\beta=60^\circ$) durumlarında görselleştirilmesi

BÖLÜM IV

SONUÇLAR

Bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci kısımda farklı geometrik özelliklere sahip plazma sentetik jet aktüatörleri geliştirilerek, jet akış özellikleri incelenmiştir. Bu bağlamda dairesel ve dikdörtgen geometrili aktüatör geometrileri içerisinde farklı kalınlık ve genişliklerde dairesel ve doğrusal elektrotlar kullanılarak plazma sentetik jet aktüatörleri üretilmiştir. Bu aktüatör geometrileri içerisinde DBD yüzey ve DBD hacim plazmaları oluşturularak dairesel veya slot orifis kanalından genişleyen gazın sentetik jet akışı olarak çıkması sağlanmıştır. Bu aktüatörlerde DBD yüzey plazması sentetik jet oluşumunda yetersiz olmakla birlikte DBD hacim plazması (soğuk plazma) ile üretimlerde 3 m/s civarında jet hızlarına ulaşılmıştır. Bu jetlerin sıcak plazma ark deşarj yöntemi ile elde edilen yüksek hızların altında kaldığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmanın ikinci kısmında açık yüzey sentetik jet olarak tabir edilen DBD yüzey jeti ile aktif akış kontrolü yapılmıştır. Bu bağlamda NACA0015 model uçak kanadı üzerine aktüatörler yerleştirilerek, Reynolds 5.0×10^4 değerinde aktüatörün aktif ve pasif olduğu durumlarda model uçak kanadı üzerine etki eden kaldırma kuvvetlerindeki değişim incelenmiştir. Dielektrik bariyer deşarj yöntemi kullanılarak oluşturulan plazma akışa dik konumdan $\Delta\beta = 30^\circ$ artışla akışa paralel olacak şekilde dört farklı konumda ($\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90°) 50mm uzunluğundaki parçalı elektrotlar kullanılarak aktüatörler oluşturulmuş ve her bir konumda hücum açısı $\alpha = 0^\circ$ ile 18° arasında 2° 'lik artışla ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

Plazmanın daha verimli olabilmesi ve akış kontrolündeki etkisinin artırılması için akış ayrılmasının olduğu bölgeye daha yakın yerleştirilmesi gerekmektedir ve arka kısma doğru kaydırılan ayrılma tabakasının daha etkin kontrolü için daha ileri x/C konumuna plazma aktüatörler konumlandırılmalıdır.

Plazma aktüatörlerin tüm yerleşme açı değerleri için stol açısı yaklaşık 2° ötelenmiştir. Test modeli $\alpha = 11^\circ$ civarında stola girerken aktüatörlerin etkisi ile $\alpha = 13^\circ$ 'ye taşınmıştır.

Plazma aktüatörün $\beta=0^\circ$ 'de yerleştirilmesi ile kaldırma kuvveti katsayısındaki iyileştirmenin yanı sıra stol açısında da 2° lik bir öteleme sağlanmıştır. Plazma aktüatörün parçalı olarak yerleştirildiği bu modelde kaldırma kuvveti katsayısındaki iyileştirme miktarı stol açısından önce bir miktar yükselme sağlarken hücum açısının 11° değerinde kaldırma kuvvet katsayısı 0.62'den 0.95 değerine çıkararak yaklaşık %50'lik bir artış sağlamıştır. Bu artış $\beta=30^\circ$, 60 ve 90 için sırası ile %57, %47, %57 olarak elde edilmiştir.

Duman tel yöntemi ile akış görselleştirilmesi yapılmış olup $\alpha = 10^\circ$ civarında aktüatörlerin etkisi ile kanadın üst kenarından ayrılan kayma tabakasının yüzeye yaklaştırıldığı ve iz bölgesinde önemli bir daralmanın sağlandığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Akbıyık, H., Akansu, Y. E. and Yavuz, H., “Active control of flow around a circular cylinder by using intermittent DBD plasma actuators”, *Flow Measurement and Instrumentation* 53, 215-220, 2017.

Aono, H. and Okada, K., “Effects of burst frequency and momentum coefficient of DBD actuator on control of deep-stall flow around NACA0015 at $Re = 2.6 \times 10^5$ ”, *AIAA SciTech, 52nd Aerospace Sciences Meeting*, National Harbor, Maryland, USA, s.1073–1080, 13-17 January, 2014.

Asada, K., Nomomiya, Y., Oyama, A. and Fujii, K., “Airfoil flow experiment on the duty cycle of DBD plasma actuator”, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, USA, 531, s.1-14, 5-8 January, 2009.

Belinger, A., Hardy, P., Gherardi, N., Naudé, N., Cambronner, J. P. and Caruana, D., “Influence of the Spark Discharge Size on a Plasma Synthetic Jet Actuator”, *IEEE Transactions on Plasma Science* 39, 2334-2335, 2011.

Benard, N., Braud, P., Touchard, G. and Moreau, E., “Detachment and attachment of an axisymmetric non-reactive jet with turbulent shear layer: control by plasma actuator”, *Experimental Thermal and Fluid Science* 38, 1193-1203, 2008.

Benard, N., Jolibois, J. and Moreau, E., “Lift and drag performances of an axisymmetric airfoil controlled by plasma actuator”, *Journal of Electrostatics* 67, 133-139, 2009.

Bolat, S., Piston silindir mekanizmalı sentetik jet akışının deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s.1-6, 2010.

Bouremel, Y., Li, J.M., Zhao, Z. and Debiasi, M., “Effects of AC dielectric barrier discharge plasma actuator location on flow separation and airfoil performance”, *Procedia Engineering* 67, 270–278, 2013.

Caruana, D., Barricau, P., Hardy, P., Cambronne, J.P. and Belinger, A., “The “Plasma Synthetic Jet” actuator. Aero-thermodynamic characterization and first flow control applications”, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, USA, s.1-16, 5 - 8 January, 2009.

Caruana, D., Rogier, F., Dufour, G. and Gleyzes, C., “The plasma synthetic jet actuator, physics, modeling and flow control application on separation”, *Journal Aerospacelab*, 6, 1-13, 2013.

Cattafesta, III L. N. and Sheplak, M., “Actuators for active flow control”, *Annual Review of Fluid Mechanics* 43, 247-272, 2010.

Che, X. K., Nie, W.S. and Hou, Z.Y., “Research on plasma synthetic jet actuator”, *American Institute of Physics Conf. Proc.* 1376, 527-530, 2011.

Erler, E., Akçayöz, E. ve Tuncer İ.H., “Sentetik jet parametrelerinin eliptik profil ve kanat kesiti üzerindeki akışın kontrolü için yanıt yüzeyi yöntemi ile eniyileştirilmesi”, *II. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı*, İTÜ, İstanbul, s.1-16, 15-17 Ekim, 2008.

Feng, L.H., Wang, J.J. and Pan, C., “Effect of novel synthetic jet on wake vortex shedding modes of a circular cylinder”, *Journal of Fluids and Structures* 26, 900-917, 2010.

Fırat, E., Kare prizma etrafındaki akışın sentetik jet ile kontrolünün deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s.9-17, 2010.

Glezer, A. and Amitay, M., “Synthetic jets”, *Annual Review of Fluid Mechanics* 34, 515-529, 2002.

Hong, Y., Pan, J., Lu, N., Shang, K., Li, J. and Wu, Y., “Low temperature air plasma jet generated by syringe needle–ring electrodes dielectric barrier discharge at atmospheric pressure”, *Thin Solid Films* 548, 470-474, 2013.

Jukes, T.N. and Choi, K.S., “Control of unsteady flow separation over a circular cylinder using dielectric-barrier-discharge surface plasma”, *Physics of Fluids* 21, 1-15, 2009.

Jukes, T.N., Segawa, T. and Furutani, H., “Flow control on a NACA4418 using Dielectric-Barrier-Discharge vortex generators”, *AIAA Journal* 51, 452–464, 2013.

Lu, X., Laroussi, M. and Puech, V., “On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets”, *Plasma Sources Science And Technology* 21, 1-17, 2012.

Magnier, P., Hong, D., Leroy-Chesneau, A., Bauchire, J.M. and Hureau, J., “Control of separated flows with the ionic wind generated by a DC corona discharge”, *Experimental Fluids* 42, 815–825, 2007.

Mane, P., Mossi, K. and Braynt, R., “Experimental design and analysis for piezoelectric circular actuators in flow control applications”, *Smart Materials and Structures* 17, 1-12, 2007.

Ramachandran, T., Balaji, G., Pillai, S.N. and Prasath, M.S., “Enhancement of aerodynamic performance by using DBD plasma actuator”, *International Conference on Current Research in Engineering Science and Technology*, Trichy, Tamilnadu, India, s.8-14, 1-5 May, 2016.

Santhanakrishnan, A., Reasor, D.A. and Lebeau, R.P., “Characterization of linear plasma synthetic jet actuators in an initially quiescent medium”, *Physics of Fluids* 21, 1-18, 2009.

Shin, J. “Characteristics of high speed electro-thermal jet activated by pulsed DC discharge”, *Chinese Journal of Aeronautics* 23, 518-522, 2010.

Sosa, R. and Artana, G., “Steady control of laminar separation over airfoils with plasma sheet actuators”, *Journal of Electrostatics* 64, 604–610, 2006.

Sosa, R., Artana, G., Moreau, E. and Touchard, G., “Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators”, *Experimental Fluids* 42, 143–167, 2007.

Wang, J.J., Choi, K.S., Feng, L.H., Jukes, T.N. and Whalley, R.D., “Recent development in DBD plasma flow control”, *Progress in Aerospace Sciences* 62, 52-78, 2013.



ÖZ GEÇMİŞ

Rafet Günaydın Konya’da 08.04.1987 tarihinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Konyada tamamladı. Ardından 2007 yılında Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı, Haziran 2012’de mezun oldu. 2010-2011 döneminde kazandığı LLP-ERASMUS bursu kapsamında Kecskemet Üniversitesinde (Macaristan) bir dönem eğitim aldı. 2012 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2012-2013 yılları arasında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde TÜBİTAK 110M056 nolu projede proje asistanı (bursiyeri) olarak görev aldı. 2013 yılında makine imalat sektöründe çalışmaya başladı. Şu an tasarım mühendisi olarak çalıştığı özel firmada çikolata paketleme makine ve ekipmanlarının tasarımı ve imalatı ile görevlidir.