

## PLAZMA DIELEKTRİK BARIYER DEŞARJ (DBD) HAREKETE GEÇİRİCİLERİN AERODİNAMİĞE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan ÖZDAR<sup>1</sup>, Numan ZEYREK<sup>2</sup>  
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi,  
Ankara

Taylan SİPAHİ<sup>4,5</sup>  
TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayii,  
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi,  
Ankara

Bünyamin BAYRAK<sup>3</sup>  
TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayii,  
Ankara

### ÖZET

DBD plazma harekete geçiriciler; son yıllarda üzerlerinde çalışmaların yoğunlaştığı, gelecek vadeden önemli bir teknolojidir. Bu çalışmada, DBD plazma harekete geçiricilerin havacılık uygulamalarındaki kullanımına değinilmiş ve avantajlarından bahsedilmiştir. Plazma harekete geçiricilerin matematiksel modellenmesi irdelenmiş, uygulanan gerilim ve gerilim frekansı ile ilişkisi ortaya konulmuştur. Özellikle akış üzerinde oluşturduğu gövde kuvveti üzerinde durulmuştur. Mevcut çalışmalarda yapılmış modellemeler ve simülasyonlar sonucu sunulan; basınç ve hız değişimleri, kuvvet dağılımları ve akış karakteristikleri incelenmiş, analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda harekete geçirici yapısının özellikle düşük Reynolds sayılarında; akışın kanat yüzeyinden ayrılmasını geciktirdiği, akışı kanat yüzeyine yapıştırdığı ve düzenli duruma getirdiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Hava araçları için büyük öneme sahip olan taşıma katsayısını artırdığı, bazı durumlarda sürüklenme katsayısını azalttığı gözlemlenmiştir.

### GİRİŞ

DBD plazma harekete geçiriciler akışın kontrolünde önemli bir aktif akış kontrol elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Plazma harekete geçiriciler; tamamen elektronik yapıda olmaları, düşük güç tüketimleri, istenildiğinde devreye kolay bir şekilde alınmaları ya da devre dışı bırakılabilmeleri, hareketli parçalara sahip olmamaları dolayısıyla geometriyi değiştirmemeleri ve hızlı cevap süreleri sayesinde sisteme hızlı müdahale imkânı sağlamaları gibi önemli avantajlara sahiptirler [Wang ve Fang, 2019]. Bu sebeple bu teknoloji üzerinde yapılan çalışmalar giderek artmaktadır.

Bir DBD plazma harekete geçirici yapısı, birisi hava ile temas eden diğeri ise gömülü iki elektrottan ve bunların arasına yerleştirilmiş, genellikle kapton, cam, kuvars veya seramik olan bir dielektrik malzemeden oluşmaktadır. Bu elektrotlara AC gerilim uygulanması takibinde harekete geçiriciler üzerinde iyonize gaz oluşmaktadır. AC gerilimin yanı sıra DC gerilim esaslı plazma harekete geçiriciler de kullanılmaktadır. Ancak, AC uygulamaların DC uygulamalara kıyasla elektrot korozyonuna daha az maruz kalması ve iyonize gaz oluşumunda daha az güç gerektirmesi avantajlarından dolayı aerodinamik akış kontrolünde daha çok tercih edilmektedir [Corke, Enloe ve Wilkinson, 2009].

Aktif akış kontrolünde kullanılan bu harekete geçiriciler sayesinde üretilen iyonize gazın hızı akışın kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Yani akış kontrolünün etkinliği harekete geçirici performansı ile doğrudan ilişkilidir. Bu noktada; sürüm frekansı ve gerilim tipi, dielektrik malzemenin katman kalınlığı ve çeşidi, harekete geçiricinin geometrisi ve harekete geçirici elektrotları arası boşluk önemli rol oynamaktadır [Akbiyık, Yavuz ve Akansu, 2017].

<sup>1</sup> Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: 22110111026@aybu.edu.tr

<sup>2</sup> Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: 21110111039@aybu.edu.tr

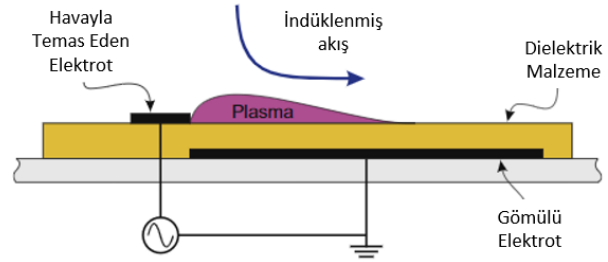
<sup>3</sup> Teknoloji Yönetimi Mühendisi, E-posta: bunyamin.bayrak@tai.com.tr

<sup>4</sup> Teknoloji Geliştirme Kıdemli Lider Mühendisi, E-posta: taylan.sipahi@tai.com.tr

<sup>5</sup> Misafir Dr. Öğr. Üyesi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: taylan.sipahi@aybu.edu.tr



Şekil 1: DBD Plazma Harekete Geçirici Deneyi  
[Ogawa vd., 2022]



Şekil 2: Plazma Harekete Geçirici Şeması  
[Erfani vd., 2013]

DBD plazma harekete geçiricilerin kanat akış özellikleri üzerindeki etkisi, rüzgâr tüneli deneyleri yoluyla kapsamlı bir şekilde incelenebilir. Oluşan kuvvetleri ve hızları ölçmek ve harekete geçirici performansını izlemek ve kontrol etmek için çeşitli ekipmanların ve sinyal modülasyon tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Böylece, farklı sinyal modülasyonları ve Reynolds sayıları altında plazma harekete geçiricinin etkinliği ve enerji tüketiminin azaltılması incelenebilir. Düşük türbülans yoğunluğuna ve kare bir test bölümüne sahip açık, düşük hızlı bir rüzgâr tüneli kullanılabilir. Bunun için 0-15 m/s serbest akış hızı aralığı kullanılabilir ve serbest akış türbülans yoğunluğu çalışma Reynolds sayısı aralığında 0.5% civarında olabilir. Rüzgâr tüneli egzozu güvenlik için açık atmosfere bağlanmalı ve sabit statik basıncın sağlanması için sapma açısı korunmalıdır. Plazma harekete geçiricinin çalışmasını izlemek için yüksek gerilimli güç yükselteçi, osiloskop, akım probu ve yüksek gerilim probu gereklidir. Sinyal toplamak için veri toplama kartı ve sinyal modülasyonu ve kontrolü için ise LabVIEW yazılımı kullanılabilir. Belirli boyutlara ve malzemeye sahip kanat profili, kuvvet ve tork ölçümü için altı eksenli bir yük hücresine bağlanmalıdır. Hücum açısı, yük hücresine bağlı bilgisayar destekli bir döner ünite ile kontrol edilebilir. Ardından harekete geçirici, akış ayrılmasını kontrol etmek üzere kanat yüzeyinde en uygun konumlara yerleştirilebilir (Şekil 1). DBD plazma harekete geçirici, Kapton bant gibi bir dielektrik ile ayrılmış iki bakır elektrottan oluşur (Şekil 2). Harekete geçirici, elektrotlar arasında uygulanan yüksek AC gerilim ile plazma üretir. Plazma, kanat yüzeyindeki akış ayrılmasını kontrol etmek için kullanılır. Ancak, plazma sonucu açığa çıkan ozon gazı güvenli bir şekilde laboratuvar dışına çıkarılmalıdır. Akış ayrılma bölgesinde plazma üretmek için plazma harekete geçiriciye farklı modüle edilmiş sinyaller uygulanabilir. Akışın görselleştirilmesi için duman kullanılabilir. Rüzgâr tüneli test bölümünde duman üretmek için güç kaynağına bağlı bir tel, ışık kaynağı ve kamera kullanılabilir. Duman üretimi için telin içine parafin enjekte edilmesi gerekir. Akış görselleştirilmesi bir ışık altında aydınlatılarak kamera kullanılarak yakalanabilir. Buna paralel olarak, serbest akış hızı bir pitot tüpüne bağlı bir mikromanometre veya bir sıcak tel anemometresi kullanılarak ölçülebilir. Bu yaklaşım ile plazma harekete geçiricinin; akış üzerindeki etkisi, etkinliği, enerji tüketiminin azaltılması için sinyal etkilerinin araştırılması ve hız, kuvvet ve akış görselleştirme olmak üzere çeşitli ölçümler yapılabilir ve aerodinamik kontrol sistemlerinde uygulanabilirliği incelenebilir [Güler, Seyhan ve Akansu, 2018; Şanlısoy ve Akansu, 2020].

## YÖNTEM

DBD plazma harekete geçiricinin kanat profili üzerindeki akışa uyguladığı gövde kuvvetini incelemek için öncelikle Lorentz kuvveti ve Maxwell denklemlerinden bahsedilmelidir. Lorentz kuvveti, elektromanyetik alanların noktasal yük üzerinde oluşturduğu elektrik ve manyetik kuvvetlerin bileşkesidir. Eğer  $q$  yük içeren bir parçacık, bir elektriksel  $E$  ve manyetik  $B$  alanının var olduğu bir ortamda  $\vartheta$  hızında ilerliyor ise bir kuvvet hissedecektir. Bu kuvvet Denklem (1) ile bulunabilir.

$$F = q \cdot (E + \vartheta \times B) \quad (1)$$

Denklem sonsuz küçüklükte bir yük ile incelenip sonsuz küçüklükte bir hacme bölünür.  $\rho_c$  birim hacme düşen yük yoğunluğunu belirtir. Gövde kuvveti Denklem (2) ile bulunabilir.

$$f_{gövde} = \rho_c \cdot (E + \vartheta \times B) \quad (2)$$

Maxwell denklemleri, Lorentz kuvveti yasası ile klasik elektrodinamik, klasik optik ve elektrik devrelerine kaynak oluşturan bir dizi kısmi diferansiyel denklemlerden oluşur.

Maxwell denklemleri, elektrik ve manyetik alanların, elektrik yükleri ve akımları tarafından nasıl üretildiğini ve değiştirildiğini açıklar. Denklemlerde  $\epsilon_0$  boş uzayın elektriksel geçirgenliğini,  $\epsilon_r$  bağlı geçirgenliği ifade eder.  $\epsilon$  ise,  $\epsilon_0$  ve  $\epsilon_r$  ifadelerinin çarpımından oluşan genel bir elektriksel geçirgenlik katsayısıdır.  $\nabla$  nabla sembolü olup üç boyutlu yönlü türev işlemcisidir.  $\nabla \cdot$  yayılım işlemcisi,  $\nabla \times$  ise burkulma işlemcisidir. Ayrıca  $\mu_0$ , boş uzayın manyetik geçirgenliğini temsil eder. Maxwell denklemleri Denklemler (3)-(6) gibidir.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_c / \epsilon \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (6)$$

Elektrik alandan dolayı oluşan gövde kuvvetini hesaplamak için Lorentz kuvvet denklemiyle, Denklem (2) ile başlanır. Manyetik alan ve hızdan kaynaklanan manyetik kuvvet ihmal edilirse gövde kuvveti Denklem (7) ile bulunabilir.

$$\mathbf{f}_{gövde} = \rho_c \mathbf{E} \quad (7)$$

Çözülmesi gereken Denklem (7) olmalıdır. Elektrik alan, yüksek potansiyelden alçak potansiyele doğru oluşur. Bunun sonucunda elektrik alan Denklem (8) ile elde edilebilir.

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (8)$$

Burada  $V$  elektriksel potansiyeli temsil eder. Gauss yasasından yararlanılarak Denklem (9) gibi yazılır.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \mathbf{E}) = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (9)$$

Hava parçacıklarının bir kısmı iyonlaşacağından toplam potansiyel, harici elektrik alanından kaynaklı ve plazmanın kendi içerisindeki yük dağılımından kaynaklı olarak ikiye ayrılır.  $\emptyset$  harici elektrik alanından kaynaklı potansiyeli,  $\varphi$  ise plazmanın kendi içerisindeki yük dağılımından kaynaklı potansiyeli temsil eder.

$$V = \emptyset + \varphi \quad (10)$$

Diverjans operatörünün toplama ve çıkarma işlemleri üzerine dağılıma özelliği kullanılarak Denklem (10) aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \emptyset + \epsilon_r \nabla \varphi) = \frac{-\rho_c}{\epsilon_0} \quad (11)$$

Denklem (11), gövde kuvvetini bulmaya yarayacak olan  $\rho_c$  ve  $\emptyset$  ifadelerini ayrı ayrı çözmek üzere iki denkleme ayrılır.  $\emptyset$  ifadesi, dış voltaj kaynaklarından gelen potansiyel fark olduğundan dolayı havadaki serbest yükler ihmal edilip Denklem (12)'deki şekliyle Laplace denklemi olarak ifade edilir.  $\varphi$  ifadesi, plazma içerisindeki yük dağılımından kaynaklanan potansiyel fark olduğundan yük yoğunluğuna bağlıdır ve Poisson's denklemi ile Denklem (13) gibi ifade edilir.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \emptyset) = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \varphi) = \frac{-\rho_c}{\epsilon_0} \quad (13)$$

Denklem (14), Poisson denkleminin plazma fiziğinde kullanılan özel bir hâlidir. Terimlerden;  $n_i$  iyon yoğunluğunu,  $n_e$  elektron yoğunluğunu,  $\varphi$  plazmadan kaynaklanan elektrik potansiyeli,  $T_e$  elektron sıcaklığını,  $T_i$  iyon sıcaklığını,  $e$  elementer yükü,  $k$  ise Boltzmann sabitini ifade eder.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} = \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0} \quad (14)$$

Boltzmann ilişkisi, elektron ve iyon yoğunluğu ifadelerini Denklem (15) gibi ifade etmeye yarar.  $n_0$ , plazma içerisindeki serbest elektronların veya iyonların belirli bir referans durumdaki yoğunluğunu ifade eder.

$$n_{i,e} = n_0 \exp\left(\pm \frac{e\varphi}{kT}\right) \quad (15)$$

Poisson denklemindeki elektron ve iyon yoğunluğu Boltzmann ilişkisi ile ifade edilir. Yüklerin kendilerini yeniden dağıtmaları için yeterince uzun bir zaman ölçeğinde yarı-kararlı bir durum varsayarak aşağıdaki ilişki yazılabilir [Abdollahzadeh, Páscoa ve Oliveira, 2012].

$$\frac{\rho_c}{\epsilon_0} = \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0} = -\frac{en_0}{\epsilon_0} \left[ \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_i}\right) + \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right) \right] \quad (16)$$

Denklem,  $\varphi \ll T$  için Taylor serisi ile  $\varphi/T$  ifadesinin en düşük mertebesinde açılır. Debye uzunluğu, Denklem (17) ile bağdaştırılmak üzere Denklem (18)'deki şekliyle ifadeye dahil edilir.

$$\frac{\rho_c}{\epsilon_0} = -\frac{e^2 n_0}{\epsilon_0} \left[ \left(\frac{1}{kT_i}\right) + \left(\frac{1}{kT_e}\right) \right] \varphi \quad (17)$$

$$\frac{1}{\lambda_D^2} = \frac{e^2 n_0}{\epsilon_0} \left[ \left(\frac{1}{kT_i}\right) + \left(\frac{1}{kT_e}\right) \right] \quad (18)$$

Debye uzunluğu, uygulanan voltaj ve frekans değerlerine göre Denklem (19) ile yaklaşık bir değer hesaplanabilir [Tehrani, Abdizadeh ve Noori, 2022].

$$\lambda_D(m) = 0.2(0.5611 \times \tan^{-1}(-170.3 \times f(kHz)^{-5.124}) + 1.768) \times (0.3 \times 10^{-3} \times V_{uyg}(kV) - 7.42 \times 10^{-4}) \quad (19)$$

Denklem (17) ve (18) sonucunda  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  ifadesi Debye uzunluğu ile ilişkilendirilerek Denklem (20) elde edilir.

$$\frac{\rho_c}{\epsilon_0} = \left(\frac{-1}{\lambda_D^2}\right) \varphi \quad (20)$$

$$\varphi = -\frac{\rho_c \lambda_D^2}{\epsilon_0} \quad (21)$$

Denklemler (13) ve (21) sonucunda yük yoğunluğu ve Debye uzunluğuna bağlı olan Denklem (22) elde edilir.

$$\nabla(\epsilon_r \nabla \rho_c) = \frac{\rho_c}{\lambda_D^2} \quad (22)$$

Denklem (12) ve Denklem (22), Şekil 3'teki sınır koşulları uygulanarak çözülür.  $\emptyset$  ifadesi, dış kaynaklardan uygulanan voltaja bağlı potansiyel olduğundan havada ve dielektrik malzemede Laplace denklemiyle sınır koşulu olarak uygulanır. AC kaynaktan üst elektroda sinüzoidal voltaj verilir. Verilene voltaj, havanın plazma hâline gelebilmesi için en az plazma bozunma gerilimi değerinde olmalıdır. Plazma bozunma gerilimi, Denklem (23)'teki gibidir.  $t_d$ , gömülü elektrodun üst yüzeyi ile üst elektrodun alt yüzeyi arasında kalan dielektrik malzemenin kalınlığını simgeler [Abdollahzadeh, Páscoa ve Oliveira, 2014].

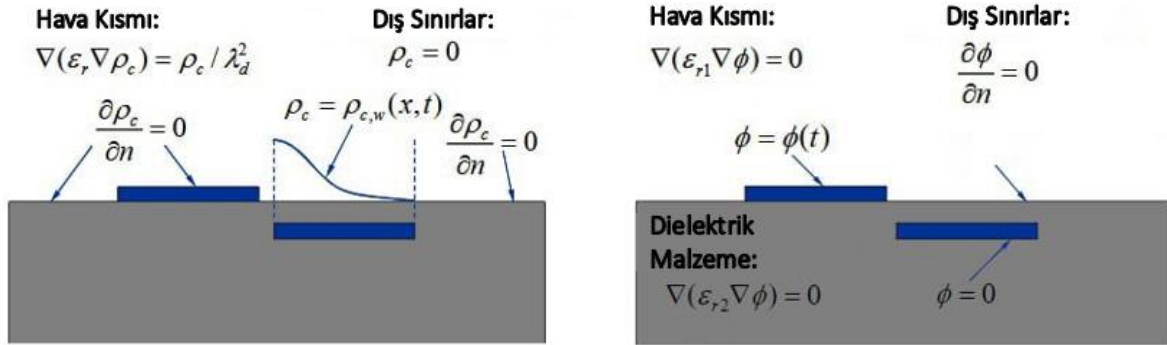
$$V_{boz}(kV) = 4.8289 + (8.063145 \times 10^2 t_d) \quad (23)$$

Üst elektroda uygulanan AC voltaj,  $\emptyset(t)$  ifadesi ile temsil edilir.  $\emptyset_{max}$  uygulanan voltajın büyüklüğü,  $\omega$  frekans,  $f(t)$  ise dalga formu fonksiyonudur. Verilen AC voltaj, sinüzoidal formdadır.

$$f(t) = \sin(2\pi\omega t) \quad (24)$$

$$\phi(t) = \phi_{max} f(t) \quad (25)$$

Üst elektroda uygulanan voltaja karşılık gömülü elektrot topraklanmıştır. Dış sınırlarda uygulanan voltajın yüzey normali yönündeki değişimi sıfır kabul edilmiştir.



Şekil 3: Çözüm için Gerekli Sınır Koşulları [Suzen ve Huang, 2006]

Benzer şekilde, yük yoğunluğu gömülü elektrodun üstünde belli bir dağılıma sahiptir. Bu dağılım, Denklem (26)'da gösterilmiştir.  $\rho_c^{maks}$ , domain içerisindeki maksimum yük yoğunluğunu temsil eder.  $G(x)$  ise gömülü elektrot üstündeki plazma dağılımını gösteren fonksiyondur. Dış sınırlardaki yük yoğunluğu sıfır kabul edilmiştir. Aynı şekilde dielektrik malzeme ve üst elektrot yüzeylerinde, yük yoğunluğunun yüzey normali yönündeki değişimi sıfır kabul edilmiştir.

$$\rho_{c,w}(x, t) = \rho_c^{maks} \cdot G(x) f(t) \quad (26)$$

Tüm bu sınır koşulları ışığında; çözmek istenilen asıl denklem, Denklem (7) olarak karşımıza çıkmaktadır. İstenilen gövde kuvveti denklemi, son olarak Denklem (27) olarak ifade edilir. Denklem (27), Denklem (7)'nin problemin niteliklerine bağlı olarak uygulanan sınır koşullarıyla ifade edilmiş ve uygulanan gerilim ile doğrudan ilişki kurulabilecek hâlidir. Bu denklem, harekete geçirici tarafından üretilen ve havaya aktarılan itme kuvvetinin dağılımını ve yönünü doğru şekilde tahmin edecektir.

$$f_{gövde} = \rho_c \cdot (-\nabla\phi) \quad (27)$$

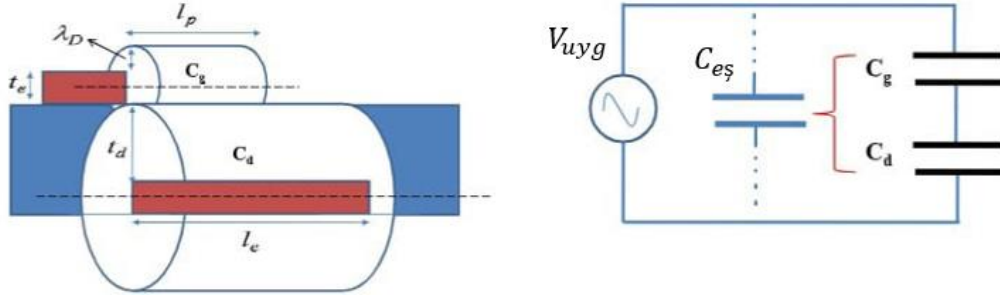
Denklemler (7)-(27) için aksi belirtilmedikçe Suzen, Huang ve Jacob (2005) tarafından yapılan çalışmadan yararlanılmıştır.

Oluşturulan itme kuvvetinin yalnızca büyüklüğünü bulmak için farklı bir yöntem de Yoon ve Han tarafından geliştirilmiştir. Plazma harekete geçiricinin ürettiği itme kuvveti, harekete geçirici sisteminin güç tüketimiyle orantılıdır. Güç tüketiminin ölçeğini tahmin etmek için dielektrik bariyer deşarj harekete geçirici, kapasitöre sahip bir AC devresi olarak kabul edilir. Çalışmada iki silindirik kapasitör dikkate alınır (Şekil 4). Bu kapasitörlerin kapasitans değeri, Denklem (28) ve (29)'daki formüllerle ifade edilir [Yoon ve Han, 2014].

$$C_d = 2\pi\epsilon_d \frac{l_e}{\ln\left(\frac{0.5t_e + 2t_d}{0.5t_e}\right)} \quad (28)$$

$$C_g = 2\pi\epsilon_0 \frac{l_p}{\ln\left(\frac{0.5t_e + \lambda_D}{0.5t_e}\right)} \quad (29)$$

Denklemlerde  $C_d$  gömülü elektrodu ve dielektrik materyali kapsayan kapasitörün kapasitans değerini,  $C_g$  üst elektrodu ve oluşan plazmayı kapsayan kapasitörün kapasitans değerini,  $l_e$  gömülü elektrodun uzunluğunu,  $l_p$  plazma bölgesinin uzunluğunu,  $t_e$  üst elektrodun kalınlığını,  $t_d$  üst elektrodun alt yüzeyi ile gömülü elektrodun üst yüzeyi arasında kalan dielektrik materyalin kalınlığını,  $\epsilon_d$  ise dielektrik materyalin elektriksel geçirgenliğini ifade eder.



Şekil 4: Harekete Geçiricinin Kapasitör Olarak Modellenmesi  
[Abdollahzadeh, Páscoa ve Oliveira, 2014]

$C_d$  ve  $C_g$  kapasitörleri, birbirlerine seri şekilde bağlı kabul edilir. Bu sebeple, plazma harekete geçiricinin eşdeğer kapasitansı Denklem (30) ile hesaplanır.

$$C_{eş} = \frac{C_d C_g}{C_g + C_d} \quad (30)$$

Plazma harekete geçiricinin etkisi, toplam enerji tüketimi olarak yorumlanabilecek elektrostatik basınç yoluyla ortaya çıkar. Plazma harekete geçirici,  $C_{eş}$  değerinde kapasitansa sahip bir devre olarak düşünülür. Dolayısıyla harekete geçiricinin  $\tau$  periyodu boyunca olan enerji tüketimi, eşdeğer kapasitansın enerji tüketimi,  $W$ , ile ilişkilidir [Abdollahzadeh, Páscoa ve Oliveira, 2014].

$$W = \int_0^{\tau} V I dt = C_{eş} \int_0^{\tau} V \frac{dV}{dt} dt \quad (31)$$

Plazma; yalnızca uygulanan elektrik alan kuvveti,  $V_{uyg}$ , iyonizasyonun gerçekleşmesi için gereken elektrik alanının kritik değerinden,  $V_{boz}$ , daha büyük olduğunda deşarj olur. Böylece kapasitans tarafından tüketilen güç, efektif plazma periyodunun integre edilmesi ile bulunur.

$$W = \frac{1}{2} C_{eş} (V_{uyg} - V_{boz})^2 \quad (32)$$

$$\Delta t \approx \frac{1}{4f} \quad (33)$$

$$P = \frac{W}{\Delta t} = 2f C_{eş} (V_{uyg} - V_{boz})^2 \quad (34)$$

Dielektrik bariyer deşarj harekete geçirici tarafından üretilen itme kuvveti, harekete geçiricinin güç tüketimi ile doğru orantılıdır. Böylelikle itme kuvveti, Denklem (35) gibi olur.

$$T \cong 2\alpha f C_{eş} (V_{uyg} - V_{boz})^2 \quad (35)$$

Denklemden  $\alpha$ , modelin doğruluğunu artırmak için kullanılan bir düzeltme faktörüdür. Burada değeri "1 (bir)" olarak kabul edilmiştir.

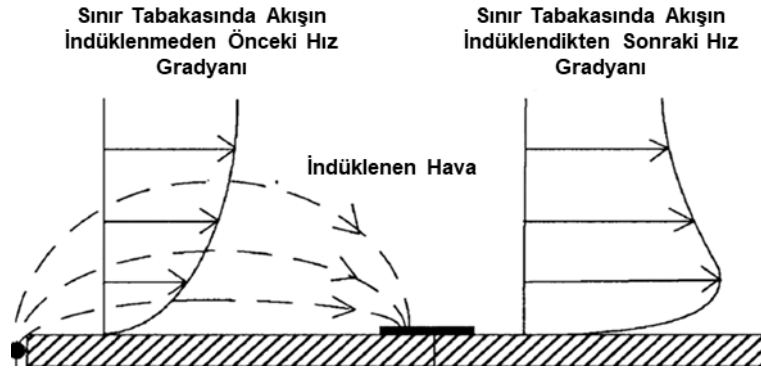
Denklemler (30)-(35) için aksi belirtilmedikçe Abdollahzadeh, Páscoa ve Oliveira (2014) tarafından yapılan çalışmadan yararlanılmıştır.

İtme kuvvetinin etkili olduğu plazma bölgesi, itme kuvvetine bağlı Denklem (36) ve (37) ile ifade edilmiştir [Yoon, 2013].

$$l_p = 0.005 \left( \frac{T}{0.04} \right)^{0.5} \quad (36)$$

$$h_p = 0.0018 \left( \frac{T}{0.04} \right)^{0.5} \quad (37)$$

Denklemden verilen  $l_p$  ve  $h_p$  ifadeleri, oluşan plazma bölgesinin metre cinsinden uzunluğu ve yüksekliğini verir. İtme kuvveti ise Newton/metre cinsinden verilmiştir.



Şekil 5: İndüklenen Akışın Hız Gradyanı [Awada, Younes ve Ilinca, 2021]

Şekil 5'te, Denklem (27) ile ifade edilen gövde kuvvetinin sınır tabakasındaki akışa etkisi gözlemlenmiştir. Elde edilen gövde kuvveti; kanat yüzeyine yakın bölgedeki hava akışına momentum kazandırmış, daha fazla havanın kanat yüzeyine yapışmasını sağlamıştır. Oluşan gövde kuvveti, Navier-Stokes denklemleri üzerinde gösterilebilir. Navier-Stokes denklemleri, bir akışkanın hareketini tanımlayan temel denklemlerdir. Bu denklemler; bir akışkanın hızını, basıncını, sıcaklığını ve yoğunluğunu belirleyen diferansiyel denklemlerdir. Denklemler sırasıyla kütle korunumu ve momentum korunumu olarak Denklemler (38) ve (39) olarak ikiye ayrılır [Hofkens, 2016].

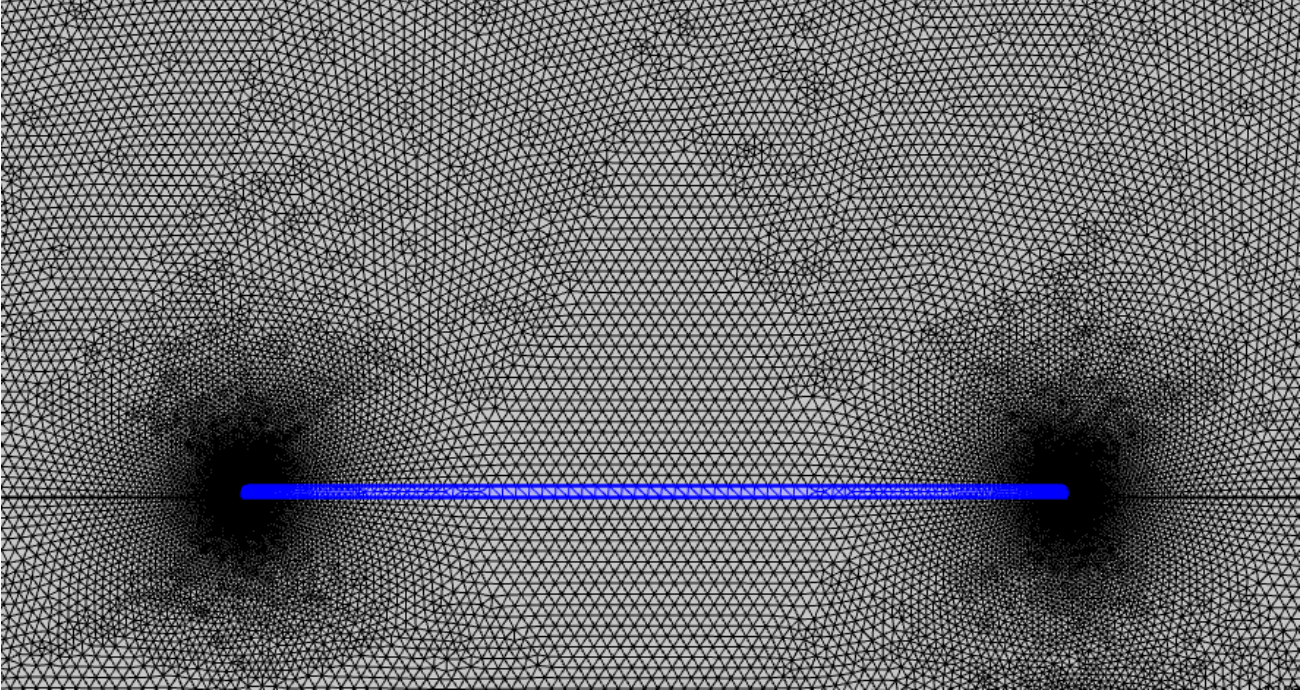
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{\vartheta}) = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_{gövde} \quad (39)$$

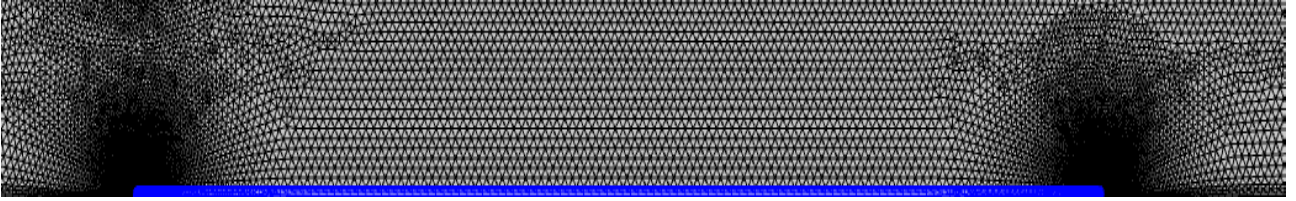
Denklemlerde;  $\mathbf{u}$  hız vektörünü,  $\nu$  kinematik viskoziteyi,  $\boldsymbol{\vartheta}$  akışkanın hızını,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $p$  basıncı temsil etmektedir. Mevcut durumda harekete geçiriciden kaynaklanan gövde kuvveti, denklemlerde dış kuvvet yani  $\mathbf{f}_{gövde}$  olur. Bu denklemlerin çözümünden harekete geçirici yapısının akış üzerinde oluşturduğu etkilere ulaşılır. Harekete geçirici yapısı, düşük Reynolds sayılarında kaldırma katsayısında yüksek oranda bir artış sağlar. Ayrıca stol durumunu daha yüksek bir hücum açısına ötelir. Profilin üst yüzeyindeki akış bağlantısı nedeniyle girdap bölgesini de daha ileriye ötelir [Şanlısoy ve Akansu, 2020]. Kaldırma katsayısının sürtünme katsayısına oranını artırarak daha verimli bir performans sağlar [Wang ve Fang, 2019].

## UYGULAMALAR VE SONUÇ

Aşağıdaki çalışmada, iki elektrot arasında oluşan elektrik potansiyel ve elektrik alan incelenmiştir. Analiz 2 boyutta yapılmıştır. COMSOL uygulaması ile yapılan çalışmada üst elektrot 0.07 mm yüksekliğinde ve 5 mm genişliğindedir. Gömülü elektrot ise 0.07 mm yüksekliğinde ve 10 mm genişliğindedir. 12 mm yüksekliğinde ve 35 mm genişliğinde hava, 2 mm yüksekliğinde ve 35 mm genişliğinde dielektrik malzeme alanı modellenmiştir. Elektrotların üst kısımlarında kalan köşelerine 0.035 milimetrelilik radyuslar atanmıştır. Dielektrik malzeme olarak kapton, elektrot olarak bakır kullanılmıştır. Analiz için oluşturulan ağ yapısı, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Maksimum element büyüklüğü 0.0804 milimetre, minimum element büyüklüğü  $2.4 \times 10^{-4}$  milimetredir. Oluşturulan ağ yapısı, akışkanlar dinamiği için kalibre edilmiş olup maksimum 1.05 değerinde bir büyüme oranı kullanılmıştır. Keskin kenarlar ve sivri uçlar, yüklerin birikmesi için uygun alanlar oluşturur. Yükler, yüzey alanını azaltarak enerjiyi minimize etme eğilimindedirler. Dolayısıyla sivri uçlarda birikme eğilimindedirler. Bu nedenle oluşan potansiyel farkın daha doğru şekilde incelenebilmesi için elektrotların kenar bölgelerinde daha sık bir ağ yapısı oluşturulmuştur.

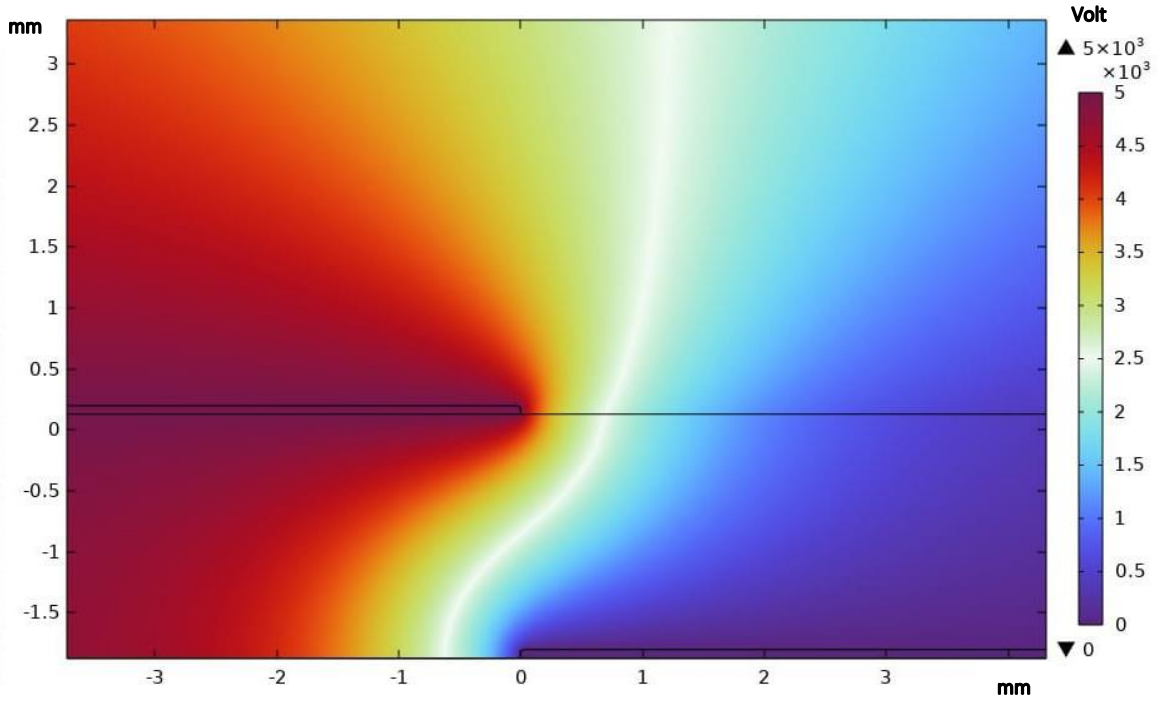


Şekil 6: Üst Elektrotta Oluşturulan Ağ Yapısı



Şekil 7: Gömülü Elektrotta Oluşturulan Ağ Yapısı

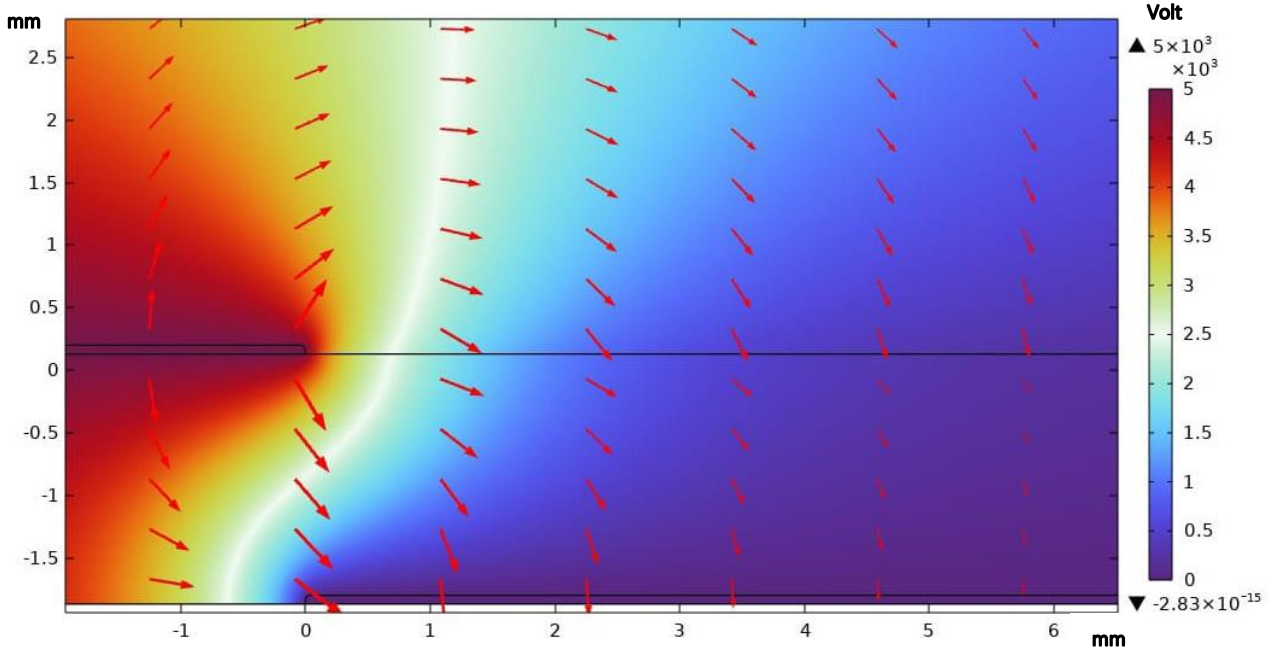
Üst elektroda 5kV değerinde voltaj uygulanmış, gömülü elektrot ise topraklanmıştır. Oluşan elektrik potansiyel dağılımı, Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8: Elektrotlar Arasında Oluşan Potansiyel Dağılımı

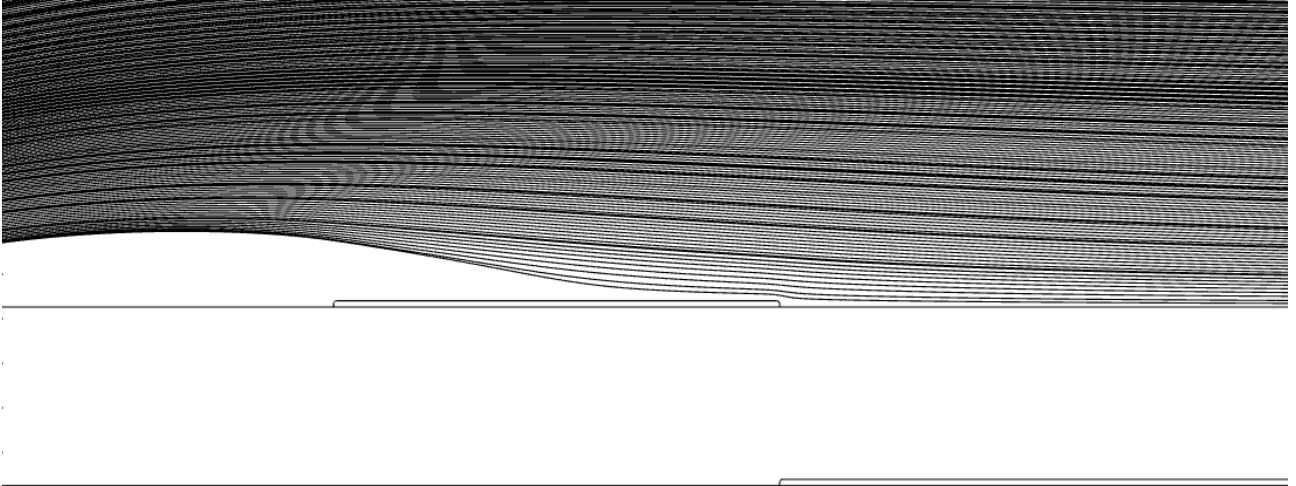


Üst elektroda verilen voltajdan kaynaklı oluşan elektrik alan, geometri üzerindeki akışın hareketine momentum katar. Şekil 9, elektrotlar arasında oluşan elektrik alanı göstermektedir. Gösterimde kullanılan oklar, elektrik alan büyüklüğünün logaritmik değerleriyle orantılı büyüklüktedir.



Şekil 9: Oluşan Elektrik Alanın Vektörel Gösterimi

Şekil 10, oluşan elektrik alanın akışa etkisini göstermektedir. Harekete geçiricinin akışa olan etkisini en iyi şekilde gözlemlemek için bölgeye 30 derecelik açıyla 500 milimetre/saniye büyüklüğünde hava akışı gönderilmiştir. Geometrinin giriş kısmından giren hava akışı, kaymazlık şartından ötürü dielektrik malzemenin yüzeyinden geç ayrılmıştır. Geç ayrılan hava, ayrılmaya başladığı noktadan sonra harekete geçiricinin etkisine girmiş ve üst elektroda uygulanan 5 Voltluk voltajın etkisiyle oluşan elektrik alandan etkilenip geometri yüzeyine doğru momentum kazanmıştır.



Şekil 10: Harekete Geçiricinin Hava Akışına Etkisi

Çalışma kapsamında, matematiksel modellemelerle profil üzerindeki akışa etki eden gövde kuvveti incelenmiş ve uygulanan gerilim ile değişimi gözlemlenmiştir. Teknolojinin bugüne kadar dayandığı matematiksel ve fiziksel modellemeler incelenmiş ve ilerideki çalışmalarda geliştirilmek amacıyla derinlemesine üzerine çalışılmıştır. Mevcut çalışmalarda yapılmış simülasyonlar ve analizler değerlendirilmiş ve harekete geçiricinin özellikle düşük Reynolds sayılarında etkili olduğu gözlemlenmiştir. Yapının, akışın kanat yüzeyinden ayrılmasını geciktirdiği ve akışı kanada yaklaştırdığı sonucuna varılmıştır. Böylece, kanat profili üzerindeki akışın düzenli hâle geldiği anlaşılmıştır. Ayrıca bu yapının, taşıma katsayısını artırırken sürüklenme katsayısını azalttığı tespit

edilmiştir. Harekete geçiriciyi oluşturan iki elektrot arasındaki elektriksel potansiyel dağılımı ve elektrik alanının yönü COMSOL üzerinden analiz edilmiştir. Aynı şekilde belirli bir açıyla gelen hava akışına olan etkisi ve hava akışının yönelimi COMSOL üzerinden gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucunda, DBD plazma harekete geçiricilerin havacılık uygulamalarındaki potansiyeli ve önemi anlaşılmıştır. Bu bağlamda bir sonraki aşamada, teknolojiye ilişkin derin teorik anlayışın elde edilmesi için özgün verilere dayalı olarak açık kaynaklı yazılımlar ve gerekli programlar üzerinde modellemelerin ve nümerik simülasyonların yapılması planlanmaktadır. Ayrıca gerekli analiz programları üzerinden; basınç ve hız gradyanları, kanat profili üzerindeki akışın davranışı, sayısal olarak  $C_L$  ve  $C_D$  değerlerinin plazma harekete geçirici ile nasıl değiştiğinin anlaşılması amacıyla gerekli analizlerin ve deneylerin tamamlanması hedeflenmektedir.

### Kaynaklar

- Abdollahzadeh, M., Páscoa, J. C., Oliveira, P.J., 2014. *Modified Split-Potential Model for Modeling the Effect of DBD Plasma Actuators in High Altitude Flow Control*, Current Applied Physics, Cilt.14, Sayı.8, s.1160-1170.
- Abdollahzadeh, M., Páscoa, J. C., Oliveira, P.J., 2012. *Numerical Modeling of Boundary Layer Control Using Dielectric Barrier Discharge*, IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia, 28-29 Mayıs, Lizbon, Portekiz.
- Akbıyık, H. ve Yavuz, H., 2020. *DBD Plazma Aktüatör Sürüm Frekansının Uçak Kanadı Etrafındaki Akışın Kontrolüne Etkisinin İncelenmesi*, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt.8, Sayı.3, s.522-528.
- Awada, A., Younes, R. ve Ilinca, A., 2021. *Review of Vibration Control Methods for Wind Turbines*, Energies, Cilt.14, Sayı.11, s.3058.
- Corke, T. C., Enloe, C. L. ve Wilkinson, S. P., 2010. *Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control*, Annual Review of Fluid Mechanics, Cilt.42, Sayı.1, s.505-529.
- Erfani, R., Erfani, T., Utyuzhnikov, S. V. ve Kontis, K., 2013. *Optimisation of Multiple Encapsulated Electrode Plasma Actuator*, Aerospace Science and Technology, Cilt.26, Sayı.1, s.120-127.
- Güler, A., Seyhan, M. ve Akansu, Y., 2018. *Effect of Signal Modulation of DBD Plasma Actuator on Flow Control Around NACA 0015*, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt.38, Sayı.1, s.95-105.
- Hofkens, A., 2016. *Determination of the Body Force Generated by a Plasma Actuator Through Numerical Optimization*, Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Delft, Hollanda.
- Kumar, V. M. ve Wang, C.-C., 2020. *OpenFOAM Analysis Over a Flat Plate Using Plasma Actuation*, CFD Letters, Cilt.12, Sayı.2, s.1-10.
- Ogawa, T., Asada, K., Sato, M., Tatsukawa, T. ve Fujii, K., 2022. *Computational Study of the Plasma Actuator Flow Control for an Airfoil at Pre-Stall Angles of Attack*, Applied Sciences, Cilt.12, Sayı.18, s.9073.
- Omidi, J. Ve Mazaheri, K., 2020. *Differential Evolution Algorithm for Performance Optimization of the Micro Plasma Actuator as a Micro Electromechanical System*, Scientific Reports, Cilt.10, Sayı.1.
- Suzen, Y. B. ve Huang, P. G., 2006. *Simulations of Flow Separation Control using Plasma Actuators*, 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 Ocak, Reno, Nevada.
- Suzen, Y. B., Huang, P. G. ve Jacob, J. D., 2005. *Numerical Simulations of Plasma Based Flow Control Applications*, 35<sup>th</sup> Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 6-9 Haziran, Toronto, Ontario.
- Şanlısoy, A. ve Akansu, Y. E., 2020. *Investigating the Effects of Plasma Actuator on The Flow Control Around NACA2415 Airfoil*, Journal of Thermal Science and Technology, Cilt.40, Sayı.1, s.131-139.
- Tehrani, D. S., Abdizadeh, G. R. ve Noori, S., 2022. *Numerical Modeling of Dielectric Barrier Discharge Actuators Based on the Properties of Low-Frequency Plasmons*, Scientific Reports, Cilt.12, Sayı.1, s.10378.

- Touchard, G., 2008. *Plasma Actuators for Aeronautics Applications - State of Art Review*, International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, Cilt.2, Sayı.1.
- Wang, J. ve Fang, L., 2019. *Flow Control Techniques and Applications*. İngiltere: Cambridge University Press.
- Yazdani, H. ve Ghorbanian, K., 2016. *Numerical Simulation of Plasma Actuator Using OpenFOAM*, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, Cilt.10, Sayı.10, s.1809-1814.
- Yoon, Jae-San, 2013. *Semiempirical Thrust Model of Dielectric Barrier Plasma Actuator for Flow Control*, Journal of Aerospace Engineering, Cilt.28, Sayı.1.
- Yoon, Jae-San ve Han, Jae-Hung, 2014. *One-equation Modeling and Validation of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Thrust*, Journal of Physics D: Applied Physics, Cilt.47, Sayı.40.