DİELEKTRİK BARİYER DEŞARJ PLAZMA AKTÜATÖRÜN NACA 4412 KANAT PROFILI AERODINAMIĞINE ETKILERI

Burak Karadağ¹, Cem Kolbakır² ve Ahmet Selim Durna³ Elektrik Deşarj ve Plazma Laboratuvarı (EDEP Lab) Samsun Üniversitesi, Samsun

ÖZET

Bu çalışmada bir plazma aktüatörün NACA 4412 kanat profiline sahip 3-B baskı ile üretilmiş bir modelin aerodinamik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Küçük ölçekli ve kapalı çevrimli bir rüzgar tünelinde 35000 Reynolds sayısında dumanla hava akımı görselleştirmesi gerçekleştirilmiştir. Dielektrik bariyer deşarj (DBD) plazma aktüatörünün akım ayrılmasına etkisi üç farklı elektrot konfigürasyonu için 10°, 20° ve 30° hücum açılarında plazmanın açık ve kapalı olduğu durumlarda karşılaştırılmıştır. Plazma aktivasyonunun akım ayrılma başlangıcını geciktirdiği, sınır tabaka kalınlığını azalttığı ve hücum açısı arttıkça bu etkilerin azaldığı gözlenmiştir.

GİRİŞ

Termal olmayan plazmalar girdap üretimi, akım ayrılması kontrolü, uçuş yönelim kontrolü ve uçaklarda buzlanma önlenmesi olmak üzere çok çeşitli aktif akış kontrol uygulamaları için gelecek vaadeden bir teknolojidir. Örneğin plazma aktüatörleri ölçülebilir yalpa momentleri üretebilirler ve bu da onların hareketli uçuş kontrol yüzeylerinin yerini alabileceği veya mevcut kontrol yüzeylerini iyileştirebileceği anlamına gelir [Vorobiev vd., 2008; Boesch vd., 2010]. Plazma aktüatörler akım ayrılma alanının önüne yerleştirildiğinde ise taşıma-sürükleme oranında dikkate değer bir artışa neden olurlar [He vd., 2009]. Duman akım çizgilerinden, dumanla görselleştirilen bir kanat modeli etrafındaki akım çizgileri, belli olduğu üzere plazma aktüatörleri yüksek hücum açılarında akım ayrılmasını geciktirebilir ve kanat profilinin tutunma kaybının gerçekleştiği açıyı (stall angle) birkaç derece değiştirebilir [Akansu vd., 2013]. Dahası plazmanın etkinleşmesi tutunma kaybının oluştuğu açı sonrasındaki taşıma katsayısını (post-stall lift coefficient) ve V-kuyruk insansız hava araçlarının (İHA) yan rüzgar altındaki kalkış ve iniş kontrol kabiliyetlerini önemli ölçüde artırabilir [Keisar vd., 2018]. Literatürdeki bu bulgular, plazma aktüatörleri ile özellikle düşük Reynolds sayılı uçuşlar için önemli bir yakıt ekonomisi kazancı ve artırılmış manevra kabiliyeti elde edilebileceği anlamına gelmektedir.

En basit konfigürasyonunda, dielektrik bariyer deşarj (DBD) plazma aktüatörü, yalıtkan bir tabaka ile ayrılmış açık ve gömülü elektrotlardan oluşur. Şekil 1 DBD plazma aktüatörün bir şemasını göstermektedir. Elektrotlara yüksek frekanslı yüksek voltaj alternatif akımı uygulandığında, gömülü elektrot üzerindeki hava molekülleri iyonize olur ve iki elektrot arasındaki elektrik alanı tarafından hızlandırılır. Hızlandırılmış yüklü parçacıklardan yüksüz parçacıklara momentum aktarımı sonucunda iyonik veya diğer bir adıyla elektrik rüzgarı oluşur. Örneğin, Şekil 1'de verilen geometri

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: burak.karadag@samsun.edu.tr

² Dr. Araştırma Görevlisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: cem.kolbakir@samsun.edu.tr

³ Dr. Öğretim Üyesi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ahmetselim.durna@samsun.edu.tr

sarı oklarla işaret edilen firar kenarına doğru yüzeye teğet bir jet akışı indükler. Termal olmayan plazma aktüatörlerinin detayları literatürde bulunabilir [Moreau 2007; Corke vd., 2010].

Hareket eden parçalarının bulunmaması, yapısal basitlik, hızlı tepki süreleri ve diğer avantajları nedeniyle plazma aktüatörlerine ilgi son yirmi yılda hızla artmıştır. Bununla birlikte, ticari uygulamalardan önce teknoloji hazırlık seviyesini arttırmak için plazma deşarjı ve yüksüz gaz akışı arasındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışmada, hava-uzay laboratuvarında geliştirdiğimiz bir DBD plazma aktüatörün tasarımı gösterilmiş, elektrik rüzgarı altında bir NACA 4412 kanat modelinin aerodinamik davranışını incelenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.



Şekil 1: DBD Plazma Aktüatörün NACA 4412 Kanadı Üzerindeki Bir Şeması.

YÖNTEM

Bir DBD plazma aktüatörünün en önemli bileşeni yüksek voltaj alternatif akım (AC) güç kaynağıdır. Bir sinyal üreteci yüksek voltaj güç amplifikatöri ile birleştirilerek farklı dalga şekli, frekans ve genlikte AC gerilimi oluşturabilmektedir. Bununla birlikte yüksek voltaj güç amplifikatörlerinin maliyeti onbinlerce doları bulabilmektedir. Hızlı prototipleme ve ultra düşük maliyet için ilk aşamada plazma aktivasyonu 10 kV, 30 kHz ve 110 W'lık bir neon lambası traformatörü kullanılarak PTFE (Teflon) düz bir plaka üzerinde durağan (rüzgarsız) atmosfer içerisinde oluşturuldu. Dielektrik tabakası poliimid bant (Kapton) ile oluşturuldu ve elektrot olarak 5 mm eninde bakır bant kullanıldı. Kararlı plazma deşarjı yaklaşık 0.9 mm kalınlığında elde edildi. Dielektrik tabakasının kalınlığının bu değerden az olduğu durumlarda deşarj açık elektrot ile gömülü elektrot arasında direncin en az olduğu bölgede yoğunlaşarak poliimid bandın yanmasına neden oldu. Dielektrik tabakasının kalınlığının bu değerden fazla olduğu durumlarda ise yeterince güçlü bir elektrik rüzgarı gözlenmedi. Bu yüzden elektrotlara uygulanan her AC gerilimine karşılık optimum bir dielektrik tabakası kalınlığı vardır denilebilir. Sekil 2-a'da bu düz plakada desari sırasında olusan flamalar (streamer) dive adlandırılan ince plazma kanalları görünmektedir. Bir DBD plazma aktüatörü tarafından üretilen cisim kuvveti flama (kıvılcım da denir) oluşumu başlayınca doygunluğa ulaşır ve flamalar oluştuktan sonra elektrotlara uygulanan gerilimin yükseltilmesi cisim kuvvetinden ziyade termal güç kaybını arttırır yani itki-güç oranını (enerji verimliliğini) düşürür [Thomas vd., 2009]. Flama oluşumunu önlemek için temelde iki şey yapılabilir: 1) Daha düşük dielektrik sabitli veya daha kalın dielektrik tabaka kullanılarak deşarj akım yoğunluğu azaltılabilir, ve 2) uygulanan AC gerilimin frekansı düşürülebilir. Düz plaka deşarjında dielektrik tabaka kalınlığını arttırmak flama oluşumunu önlediyse de gözle görülebilir bir hacim deşarjı elde edilemedi. Literatüre bakıldığında plazma aktüatörlerin 1-5 kHz arası bir AC gerilim frekansında verimli çalıştığı görülmektedir. Neon lambası trafosunun sağladığı alternatif akım frekansının bu referans frekans aralığına kıyasla yüksek olduğu söylenebilir.



(10 kV 30 kHz)

Ozon ureteci tratos
(15 kV 3 kHz)

Şekil 2: Neon lambası trafosu ve ozon üreteci trafosu ile oluşturulan plazma aktivasyonunun karşılaştırması.

Bu yüzden ikinci denemede AC güç kaynağı olarak frekansı çok daha düşük bir ozon üreteci trafosu (15 kV, 3 kHz ve 15 W) kullanıldı. Bu sefer kararlı plazma deşarjı yaklaşık 0.2 mm poliimid bant kalınlığında elde edildi. Şekil 2-b'de görüldüğü gibi filamenter yapıya sahip olmayan ve açık elektrotun gömülü elektrota bakan kenarı boyunca nispeten homojen dağılan hacimsel bir deşarj elde edildi. İkinci aşamada NACA 4412 kanat profiline sahip bir model üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA (Polilaktik asit) malzemesiyle üretildi. Kanadın veter uzunluğu 10 cm ve kanat genişliği 4 cm'dir. DBD plazma aktüatörünün akım ayrılmasına etkisini incelemek için üç farklı elektrot konfigürasyonu hazırlandı. Bu konfigürasyonların şematikleri Şekil 3'de verilmiştir.



(c) Konfigürasyon III: Akım boyunca çift elektrot

Şekil 3: Dielektrik bariyer deşarj (DBD) plazma aktüatörü elektrot konfigürasyonları. *Gömülü* elektrot gösterilmemiştir.

Dumanla görüntüleme tekniği için TecQuipment firmasının küçük ölçekli ve 0.8-35 m/s rüzgar hızı aralığında çalışan dikey rüzgar tüneli (AF17) kullanıldı. Tünelin deney odasının ölçüleri 26 x 26 x 4 cm (en x boy x derinlik)'dir. Duman akım çizgilerini daha iyi görüntüleyebilmek için tünelin deney odasının iç kenarlarına 12 V şerit LED yerleştirildi. Hücum açıları çekilen fotoğraflardan görüntü işleme ile hesaplandı (Hata payı tahminen ± 1.0°). Deneyde serbest akım hızı 5 m/s olup, Reynolds sayısı 35000'dir.

UYGULAMALAR VE SONUÇ

Birinci ve ikinci elektrot konfigürasyonları için elde edilen akım çizgileri Şekil 4'de 10°, 20° ve 30° hücum açıları için karşılaştırılmıştır. 10° hücum açısında her iki elektrot konfigürasyonunun da gelen akımı yüzeye yaklaştırdığı görülmektedir. Yüzeye yakın akım çizgisi aktüatörün kapalı olduğu durumda hücum kenarına yakın bir bölgede yüzeyden ayrılırken Konfigürasyon I'de yaklaşık x/c=0.5'den sonra ayrıldığı görülmektedir. Konfigürasyon II'de ise akım çizgisi tamamıyla yüzeye yapışmaktadır. Hücum açısı 20°'ye çıkarıldığında birinci elektrot konfigürasyonunda akım sadece elektrotların konulduğu hücum kenarına yakın lokal bir bölgede yüzeye yaklaşmaktadır. İkinci elektrot konfigürasyonu birinci elektrot konfigürasyonunda akım sadece of konfigürasyonu birinci elektrot konfigürasyonunda akım sadece elektrot konfigürasyonu birinci elektrot konfigürasyonuna kıyasla daha geniş bir alanda etki göstermektedir. 30° hücum açısında ise her iki elektrot konfigürasyonu da hücum kenarına yakın lokal bir bölge dışında etki göstermemektedir. Özetle, plazma aktivasyonunun akım ayrılmasını geciktirdiği ve ayrılan akımı yüzeye yaklaştırdığı/yapıştırdığı görülmektedir. Plazmanın akım ayrılmasını geciktirme/önleme etkisi hücum açısı arttıkça azalmaktadır.

Güç kaynağı sabit olduğu için kanat açıklığı boyunca çoklu elektrot konfigürasyonunda akım yoğunluğu, birim alana düşen akım, kanat açıklığı boyunca çift elektrot konfigürasyonuna kıyasla daha düşüktür. Yine de kanat açıklığı boyunca yerleştirilen elektrot sayısı arttıkça plazma aktivasyonunun arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4: Konfigürasyon I ve II için 10°, 20° ve 30° hücum açılarında akım görselleştirmesi.

Şekil 5'de üçüncü elektrot konfigürasyonu için artan hücum açılarında akım çizgilerinin değişimi gösterilmiştir. Hücum açısının 8°, 12° ve 16° olduğu durumlarda akım çizgilerinin neredeyse tamamıyla yüzeye yapıştığı görülmektedir. 20° hücum açısında ise (Bkz. Şekil 4'ün ikinci satırı ve Şekil 5 son sütun) üçüncü elektrot konfigürasyonun diğer iki konfigürasyona kıyasla akım ayrılmasını önlemede daha etkili olduğu söylenebilir. Bu ilginç bir gözlemdir çünkü literatürde plazma aktüatörleri kanat açıklığı boyunca yerleştirilmekte (Burada Konfigürasyon I ve II'de olduğu gibi) ve plazma aktivasyonu etkisi aktüatörün yüksüz hava üzerinde oluşturduğu cisim kuvvetine yani akıma paralel yönde oluşan elektrik rüzgarına bağlanmaktadır [Corke vd., 2009]. Lakin Konfigürasyon III'de elektrotlar akım boyunca yerleştirilmiş ve oluşan elektrik rüzgarı kanat yüzeyinden geçen akıma dik doğrultudadır.



Şekil 5: Konfigürasyon III için artan hücum açılarında Re = 35000'de akım görselleştirmesi.

NACA 4412 kanat profilinin maksimum taşıma katsayısına yani tutunma kaybına 14°'de ulaştığı rapor edilmiştir [Abbot vd., 1945]. Akım çizgileri görsellerinden tutunma kaybını belirlemek mümkün olmasa da kabaca bir tahminde bulunabiliriz. Plazma OFF olduğu durumda 14°'de gözlenen akım çizgilerine benzer çizgiler plazma ON olduğu durumda 20°'den sonra gözlenmektedir. Bu yüzden plazma aktivasyonunun tutunma kaybı açısını 6° civarında ötelediğini tahmin ediyoruz.

Özetlemek gerekirse, plazma aktüatörlerin üç farklı konfigürasyonunun NACA 4412 kanat profili üzerine etkilerinin incelendiği bu çalışmada, bütün plazma aktüatörlerinin akım ayrılmasını geciktirdiği görülmüştür. Konfigürasyon III'ün diğerlerine kıyasla akım ayrılmasında en yüksek gecikmeyi sağladığı tespit edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda aerodinamik kuvvet katsayılarını ölçerek tutunma kaybı açısı vb. nicel değerlendirmeleri yapmayı planlamaktayız.

Kaynaklar

- Abbott, I. H., Doenhoff, V., Albert, E., ve Stivers, L. S., 1945. *Summary of airfoil data*, NACA Report 824.
- Akansu, Y. E., Karakaya, F. ve Şanlısoy, A., 2013. Active control of flow around NACA 0015 airfoil by using DBD plasma actuator, EPJ Web Conf. 45, 01008.
- Boesch, G., Vo, H. D., Savard, B., Wanko-Tchatchouang, C., ve Mureithi, N. W., 2010. *Flight control using wint-tip plasma actuation,* Journal of Aircraft 47:6, pp.1836–1846.
- Corke, T. C., Enloe, C. L. ve Wilkonson, S. P., 2010. *Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control,* Annu. Rev. Fluid Mech. 42, pp. 505–529.
- Corke, T. C., Post, M. L. ve Orlov, D. M., 2009. *Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: Physics, modeling and applications.,* Experiments in Fluids 46(1):1–26.
- He, C., Corke, T. C., ve Patel, M. P., 2009. *Plasma flaps and slats: an application of weakly-ionized plasma actuators*, Journal of Aircraft 46:3, pp. 864-873.
- Keisar, D., Hasin, D., ve Greenblatt, D., 2018. *Plasma actuator application on a full-scale aircraft tail*, AIAA Journal, 57:2, pp. 616–627.
- Moreau, E., 2007. *Airflow control by non-thermal plasma actuators,* J. Phys. D: Appl. Phys. 40, pp. 605–636.
- Thomas, F. O., Corke, T. C., Iqbal, M., Kozlov, A., and Schatzman, D., 2009. Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control, AIAA Journal 47, pp. 2169–2178.
- Vorobiev, A. N., Rennie, R. M., Jumper, E. J., and McLaughlin, T. E., 2008. Experimental investigation of lift enhancement and roll control using plasma actuators, Journal of Aircraft 45:4, pp. 1315–1321.