

PASİF AKITMA TEKNİĞİNİN İNCE OLMAYAN BİR DELTA KANADIN AERODİNAMİK PERFORMANSINA ETKİSİNİN YER ETKİSİ DURUMUNDA İNCELENMESİ

Oğuzhan Yılmaz
TOBB Ekonomi ve Teknoloji
Üniversitesi, Ankara/ Orta Doğu
Teknik Üniversitesi, Ankara¹

Murat Kadri Aktaş
TOBB Ekonomi ve Teknoloji
Üniversitesi, Ankara²

Mehmet Metin Yavuz
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara³

ÖZET

Bu çalışmada, 45 derece ok açısına sahip ince olmayan delta kanatların yer etkisindeki aerodinamik parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Geçtiğimiz yıllarda, kanadın basınç ve emme tarafları arasındaki basınç farkından yararlanarak momentum transferi sağlayan pasif akıtma tekniğinin, akış yapılarını kontrol etmede etkili bir kontrol metodu olabileceği gösterilmiştir. Herhangi bir akıtma açıklığı uygulanmamış temel kanadı ve iki farklı akıtma açıklık oranı "bleed opening ratio", $bor = 0.85$ & 1.00 kanatları hem yer etkisi altında hem de yer etkisi dışında kıyaslanmıştır. Deneyler, düşük hızdaki bir rüzgar tüneline Reynolds sayısı, $Re = 90,000$ 'de, $0^\circ \leq \alpha \leq 29^\circ$ hücum açısı aralığında ve $13\% \leq h/c \leq 110\%$ boyutsuz yer yüksekliği aralığında yapılmıştır. Kanatlar, serbest akış alanından yer etkisi alanına doğru girdikçe aerodinamik katsayıları artmaktadır. Ancak, akıtma açıklık oranı arttıkça, aerodinamik katsayılar yer etkisinin daha zayıf birer fonksiyonu haline gelmektedir. Temel, $bor = 0.85$ & 1.00 kanatlarının üçü de her durumda boylamsal statik kararsızdırlar. Dahası, akıtma açıklık oranının artışı bu kararsızlığı daha da artırmaktadır. Serbest akış bölgesinde bor kanatları perdövides hücum açısını ötelemektedir ve bu ötelenme miktarı yer etkisiyle değişim göstermemektedir.

GİRİŞ

Delta kanat adlandırması kanat şeklinin Yunan alfabesindeki delta (Δ) harfine benzerliğinden gelmektedir. Delta kanatların sınıflandırılması ok açısına göre yapılmaktadır. Ok açısı, $\Lambda \leq 55^\circ$ ise ince olmayan delta kanat olarak, $\Lambda > 55^\circ$ ise ince delta kanat olarak adlandırılmaktadır [Gürsul vd., 2005a].

İnce olmayan delta kanatlar, manevra kabiliyetleri ve sistem entegrasyonu için geniş bir yüzey sağlaması gibi sebeplerden ötürü İnsansız Hava Araçları (İHA), Silahlı İnsansız Hava Araçları (SİHA), Mikro Hava Araçları (MHA) ve savaş uçaklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla ince olmayan delta kanatların aerodinamiği ve akış yapıları oldukça ilgi duyulan bir araştırma alanıdır.

İnce ya da ince olmayan delta kanat olması fark etmeksizin, hücum açısındaki delta kanatlar ters yönlerde dönen iki adet öncü kenarı girdabı oluşturmaktadır [Gürsul vd., 2005b]. Kanadın öncü kenarından ayrılan kesme tabakası daha sonra ayrık küçük girdaplar halinde kanadın üstünde birleşip, kıvrılarak bahsedilen öncü kenarı girdaplarını oluşturmaktadır [Gad-el-Hak ve Blackwelder,

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: ogyilmaz@etu.edu.tr
Araştırma Görevlisi, Makine Müh. Böl., E-posta: oguzhany@metu.edu.tr

² Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: maktas@etu.edu.tr

³ Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: ymetin@metu.edu.tr

1985; Gordnier ve Visbal, 2003]. Girdap merkezindeki zaman ortalaması alınmış aksenel hız, serbest akış hızının 3 ila 5 katı kadar olabilmektedir. Bu durum kanat yüzeyinde düşük basınç bölgeleri oluşturmaktadır ve girdap kaldırma kuvveti adı verilen ek bir kaldırma kuvveti sağlamaktadır. Ok açısı azaldıkça, girdap kaldırma kuvveti etkisi de azalmaktadır. Hem ince hem de ince olmayan delta kanatlar üzerindeki akış yapıları girdap sistemleri ile tanımlansa da ince ve ince olmayan delta kanatların akış yapıları ciddi farklılıklar göstermektedir. İnce delta kanatlarda, yüksek hücum açılarında öncü kenarı girdabının merkezinin aniden durmasıyla ortaya çıkan girdap çökmesi, kanadın arka kenarında oluşmaya başlayıp, kanadın tepe noktasına ilerlemesiyle kaldırma kuvveti giderek düşmektedir. Girdap çökmesi kanadın tepe noktasına ulaştığında da kanat perdövites durumundadır. İnce olmayan delta kanatlarda, kanat üzerinde girdap çökmesinin görülmesiyle kaldırma kuvveti değişimi arasında belirgin bir bağlantı bulunmamaktadır [Lee ve Ho, 1990]. Girdap çökmesi özellikle ince delta kanatlarda savurma kuvvetlerine sebep olmaktadır. Bu kuvvetler, kanat üzerinde ve hava aracındaki kuyruk vb. diğer yüzeylerde metal yorulmalarına sebep olabilmektedir. İnce olmayan delta kanatlarda ise savurma kuvvetinin asıl sebebinin girdap çökmesi değil, kesme tabakasının kanat yüzeyine yeniden bağlanması olduğu anlaşılmaktadır. İnce delta kanatların daimî ya da daimî olmayan akış yapılarını anlamak ve kontrol etmek için literatürde pek çok çalışma olmasına karşın ince olmayan delta kanatlar son yıllarda ilgi kazanmaktadır [Zharfa vd., 2016; Çetin vd., 2018; Ghazijahani ve Yavuz, 2019].

[Gad-el-Hak, M., 2001], akış kontrolünü şu şekilde tanımlamaktadır: “Bir akış alanını, aktif ya da pasif olarak, arzu edilen değişimi elde edebilecek şekilde manipüle edebilmektir.” Literatürde akış kontrol teknikleri aktif ve pasif kontrol olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif akış kontrol teknikleri sisteme dışarıdan bir enerji girdisi gerektirmektedir. Ancak, pasif akış kontrol teknikleri gerektirmemektedir ve uygulanışları göreceli olarak daha kolaydır.

[Çelik vd., 2017], 45 derece ok açısındaki ince olmayan delta kanatlar üzerinde farklı açılar tanımlayarak pasif akıtma açıklıkları uygulamışlardır. Bu açılar Arka (B), Kenar (E) ve Arka-Kenar (BE) olarak tanımlanmışlardır. Bahsedilen çalışmada Arka (B) konfigürasyonunun akış alanında en etkili olduğu gözlemlenmiştir. [Kestel vd. 2020], Arka (B) konfigürasyonunu farklı Arka açısı, θ değerleri için incelemişlerdir ve $\theta = 23^\circ$ açısının akış alanında en etkili olduğunu bulmuşlardır. Daha sonra, yine aynı çalışmada, B konfigürasyonu ve $\theta = 23^\circ$ açısını sabit tutarak, akıtma açıklığının boyutunu ifade eden akıtma açıklık oranı “bleed opening ratio, bor” parametresini tanımlanmışlardır. Bor parametresi, bir kanadın akıtma açıklık alanının maksimum açıklık alanı uygulanmış kanat olan bor = 1.00 kanadına oranı olarak tanımlanmıştır. Pasif akıtma tekniğinin doğru oryantasyonda uygulanması ile üç boyutlu akış ayrılmasının önlenemediğini, kesme tabakasının yeniden bağlanabildiğini ve perdövites hücum açısının geciktirilebildiğini göstermişlerdir.

Yer etkisi, yer düzlemine yakın hareket eden kanatların akış alanına ek bir sınır koşulu ortaya çıkaran aerodinamik bir fenomendir. Hava araçları yer etkisine girdikçe akış yapıları ve aerodinamik katsayıları serbest akış koşuluna kıyasla önemli ölçüde etkilenmektedir [Cui ve Zhang, 2010; Qu vd., 2014; Qu vd., 2015a]. Doğada albatros gibi göçmen kuşlar enerji tasarrufu sağlamak ve uçuş mesafelerini uzatmak için yer etkisinin aerodinamik faydalarını kullanmaktadırlar. Aynı şekilde, yer etkisindeki kanat “wing-in-ground effect, WIG” araçları özellikle kara ya da su yüzeyine yakın uçarak yer etkisinin aerodinamik kazançlarından faydalanılması için tasarlanmaktadır [Rozdestvensky, 2006; Ko vd., 2020]. Manevra kabiliyeti yüksek savaş uçaklarında, insansız hava araçlarında, insansız muharebe hava araçlarında ve Tu-144 gibi ses üstü uçan hava nakliye araçlarında delta kanat konfigürasyonları kullanılmaktadır. Dahası, askeri hava araçları, uçak gemileri gibi platformlardan kısa mesafelerde kalkış ve iniş yapabilmek gereksinimi duymaktadırlar ve bunu yüksek hücum açılarında yer etkisinde gerçekleştirmektedirler. Bu sebeple, delta kanatların yer etkisi altındaki aerodinamik davranışlarının etraflıca anlaşılması, iniş ve kalkış sırasında yaşanabilecek kazaların önlenmesi hem de iniş/kalkış sistemlerinin geliştirilebilmesi açısından önem kazanmaktadır.

Literatürde ince delta kanatların yer etkisi fiziği ile ilgili az sayıda çalışma olmasına karşın bu sayı ince olmayan delta kanatlarda çok daha azdır [Tumse vd., 2021; Lee ve Ko, 2018; Qin vd., 2015; Qu vd., 2015b; Qin vd. 2016;]. [Tumse vd., 2021], $\Lambda = 40^\circ$ ok açısındaki ince olmayan bir delta kanadı Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV), boya akış görüntülüne ve bir kuvvet ölçüm

sistemi ile yer etkisi altında incelemişlerdir. Sonuç olarak öncü kenarı girdabının yer etkisi ile kanadın simetri merkezinden uzaklaştığını ve girdap çapının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca aerodinamik katsayıların da yer etkisi ile artış eğiliminde olduğunu raporlamışlardır.

Yer etkisinin kanadın alt yüzeyindeki statik basıncı artırdığı ve pasif akıtmanın kanadın alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkından yararlandığı göz önüne alınarak, 45 derece ok açısındaki temel kanadı (akıtma açıklığı olmayan) ve akıtma açıklığı uygulanmış kanatların yer etkisindeki aerodinamik parametreleri deneysel olarak incelenmiştir.

YÖNTEM

Deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan, açık çevrim, emme tipi rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Test bölümü optik açıdan şeffaf plexiglass malzemeden yapılmıştır. Test bölümü 750 mm genişlik, 510 mm yükseklik ve 2000 mm uzunluğa sahiptir. Tünelin ölçülen en yüksek türbülans yoğunluk değeri %1'in altındadır.

Bu çalışmada kullanılan temel, bor = 0.85 & 1.00 kanatlarının üçü de 8 mm kalınlıkta, 45 derece ok açısında ve 45 derece basınç tarafından keskin kenarlı olacak şekilde pah açılıdır. Bütün kanatların ana veter uzunluğu 135 mm olarak belirlenmiştir ve 270 mm kanat açıklığındadır. Bu çalışmada kullanılan kanatlar ODTÜ-BİLTİR Merkezi'nde eklemeli imalat yöntemi ile 0.15 mm kalınlığındaki PA2200 tozları kullanılarak üretilmiştir.

Deneyler Reynolds sayısı, $Re = 90,000$ 'de, hücum açısı aralığı, $0^\circ \leq \alpha \leq 29^\circ$ ve boyutsuz yer yüksekliği aralığı, $\%13 \leq h/c \leq \%110$ 'da gerçekleştirilmiştir. En yüksek hücum açısında ölçülen maksimum blokaj oranı $\%2.3$ 'ün altındadır.

Kuvvet ve moment ölçümleri için ATI Gamma Series 6-Eksen Kuvvet ve Moment sensörü kullanılmıştır. Veri toplanması National Instruments'ın NI-PCle-6321, 16 bit DAQ kartı ve LabVIEW yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm noktasında 10 kHz frekansta 15 saniye veri toplanmıştır.

Aerodinamik katsayılar Denklem 1 ve Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemlerdeki kanat alanı, "A" ve referans uzunluğu, "L" sırasıyla, temel kanadın yüzey alanı ve tüm kanatların ana veter uzunluğudur. $A = 0.0182 \text{ m}^2$ ve $L = 0.135 \text{ m}$ olarak katsayı hesaplarına dahil olmaktadır.

$$C_L, C_D = \frac{F_L, F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad 1$$

$$C_M = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 AL} \quad 2$$

Yunuslama aerodinamik merkezi, X_α 'nın ağırlık merkezi, $X_{c.g}$ 'nin gerisinde, kanadın arka kenarına doğru olması statik kararlılık açısından istenen bir durumdur. Ancak, yer etkisi altında statik kararlılık irdemesinin doğru olarak yapılması için yükseklik aerodinamik merkezi, X_h 'in da değerlendirilmesi önemlidir. X_α 'nın tanımı şudur: belirli bir h/c yüksekliğinde kanat üzerinde öyle bir nokta bulunmaktadır ki hücum açısı değişimi ile moment katsayısı, C_M değişiklik göstermemektedir. Benzer bir şekilde X_h 'in tanımı şudur: belirli bir hücum açısında kanat üzerinde öyle bir nokta bulunmaktadır ki h/c değişimi ile C_M değişmemektedir. Bahsi geçen aerodinamik merkezler taşıma ve moment katsayılarının hücum açısı ve boyutsuz yer yüksekliği eğrileri kullanılarak hesaplanabilir. Denklem 3'te matematiksel formülleri verilmiştir. Burada pozitif "x" yönü kanadın tepe noktasından arka kenarındadır.

$$X_{\alpha,h} = \frac{C_{M_{\alpha,h}}}{C_{L_{\alpha,h}}} \quad 3$$

[Irodov, 1970]'a göre yükseklik statik kararlılık kriteri şudur:

$$H.S. = \frac{C_{M_\alpha}}{C_{L_\alpha}} - \frac{C_{M_h}}{C_{L_h}} = X_\alpha - X_h \geq 0 \quad 4$$

Denklem 4'te ağırlık merkezi hesaba dahil değildir. Ancak, literatürde $X_{c.g}$ 'nin Denklem 5'te de verildiği gibi X_h ve X_α 'nın ortasında ve X_h 'a tercihen daha yakın olması statik kararlılık açısından istenen bir durum olarak kabul edilmektedir.

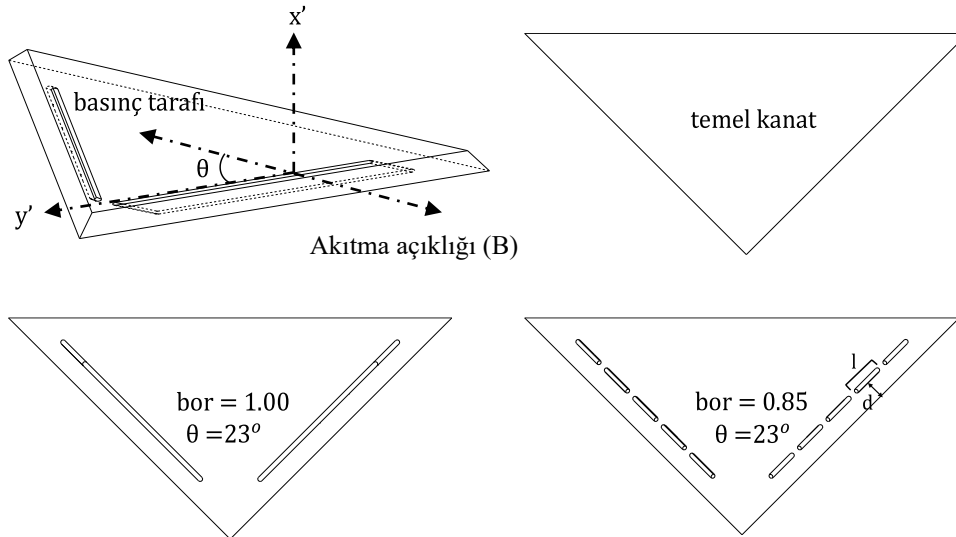
$$X_h \leq X_{c.g} \leq X_\alpha \quad 5$$

Aerodinamik kuvvet ve moment katsayılarının tüm kanatlar için her ölçüm noktasındaki maksimum belirsizlik katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.

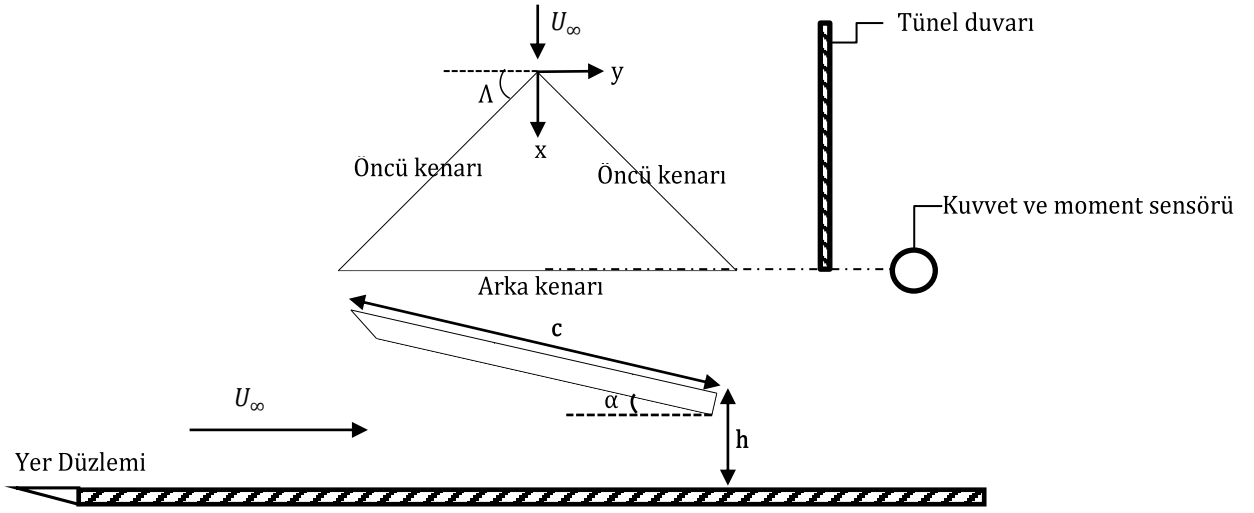
Tablo 1: Aerodinamik kuvvet ve momentlerin maksimum belirsizlik değerleri.

ω_R	temel	bor = 0.85	bor = 1.00
C_L	± 0.0508	± 0.0495	± 0.0539
C_D	± 0.0576	± 0.0571	± 0.0631
C_L/C_D	± 0.3120	± 0.2950	± 0.3624
C_M	± 0.0332	± 0.0325	± 0.0392

Yer düzlemini oluşturan plexiglass levha 540 mm uzunluğunda, 475 mm eninde, 9 mm kalınlığında ve 26.25 derece pah açısındadır. Kanatların geometrik detayları Şekil-1'de verilmiştir. Şekil-2'de delta kanat geometrisinin adlandırılmaları, yer etkisi tanımları ve kuvvet sistemi şematiği verilmiştir. Şekil-1'de gösterilen "p" mesafesi bor = 0.85 & 1.00 kanatlarının ikisinde de 11.5 mm olarak alınmıştır. Bor = 0.85 kanadında "l" uzunluğu 21 mm ve bor = 1.00 kanadında 121 mm olarak belirlenmiştir.



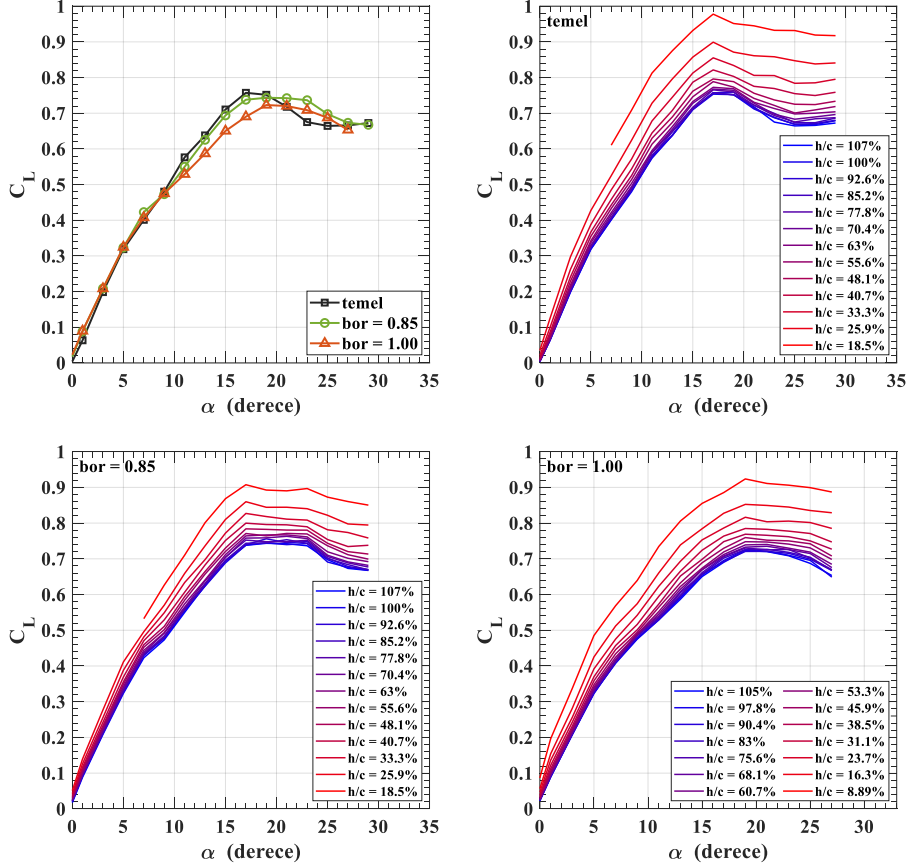
Şekil 1: Deneylerde kullanılan modellerin geometrik bilgileri.



Şekil 2: Yer mesafesi ve kuvvet sistemi tanımları şematigi.

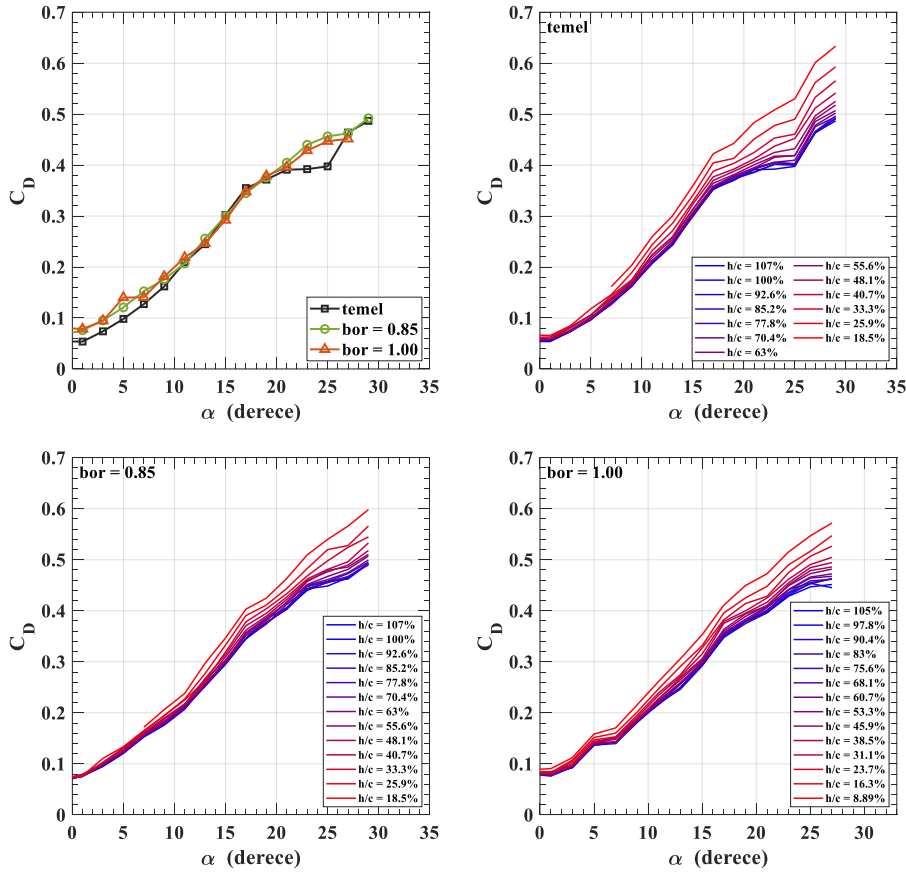
UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Şekil-3'te sol üst grafikte, temel ve bor kanatlarının yer etkisi dışındaki “*out of ground effect, OGE*” taşıma kuvveti katsayısı eğrileri verilmiştir. Diğer grafiklerde temel ve bor kanatlarının yer etkisi altında “*in ground effect, IGE*” taşıma kuvveti katsayısı eğrileri verilmiştir. Şekil-3, sol üst grafik incelendiğinde, pasif akıtma açıklığı uygulanan bor kanatlarının perdövites hücum açısını ötelemekte olduğu görülmektedir. Örneğin bor = 0.85 kanadı perdövites hücum açısını 17 dereceden 21 dereceye, 4 derece kadar ötelemektedir. Ancak, maksimum taşıma kuvvetini temel kanadına kıyasla azaltmaktadır. Yer etkisine girildikçe taşıma kuvveti katsayısı ve eğrilerin eğimi artış göstermektedir ve OGE koşulunda bahsedilen bor kanatlarındaki perdövites hücum açısındaki ötelenme miktarının yer etkisi ile değişmediği görülmektedir.



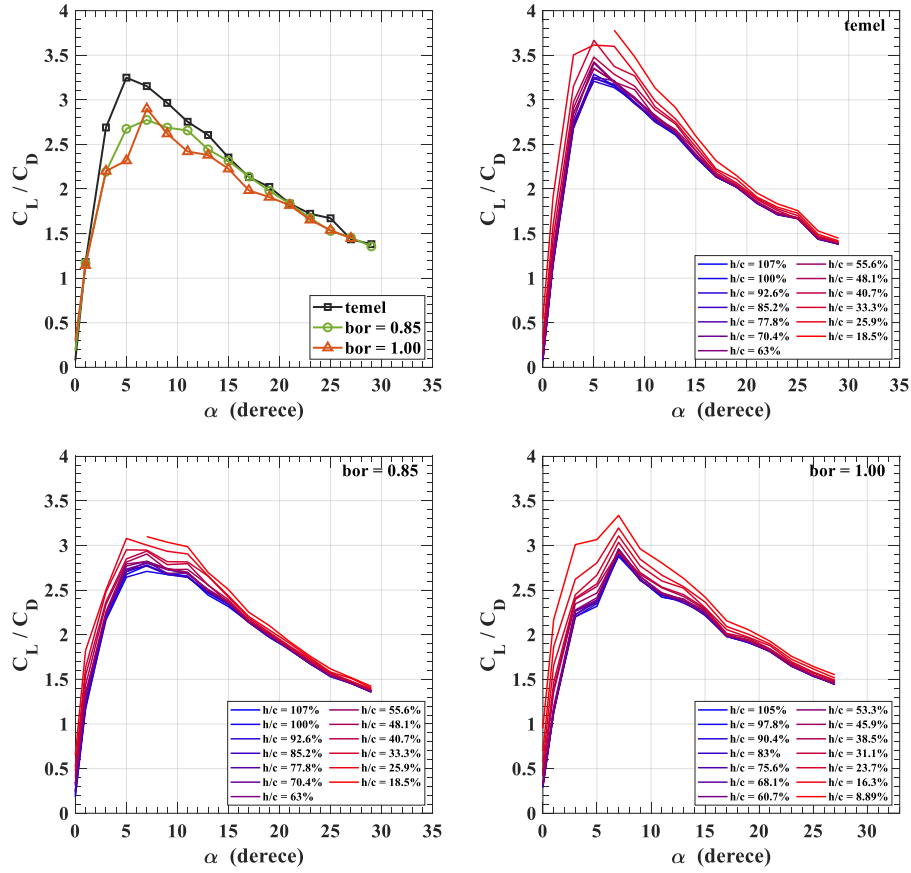
Şekil 3: Sol üst grafikte temel, bor kanatlarının OGE koşulundaki taşıma kuvveti eğrileri ve diğer grafiklerde temel ve bor kanatlarının IGE koşulundaki taşıma kuvveti eğrileri.

Şekil-4'te sol üst grafikte kanatların OGE koşulundaki ve diğer grafiklerde IGE koşulundaki sürüklenme kuvvet katsayısı eğrileri verilmiştir. Sol üst grafik OGE eğrileri incelendiğinde yaklaşık 13 derece hücum açısına kadar bor = 0.85 & 1.00 kanatlarının daha yüksek sürüklenme kuvvet katsayısı oluşturdukları görülmektedir. 13 derece ve 19 derece hücum açılarında eğriler üst üste gelmektedir ve 19 dereceden hücum açısından sonra yine bor kanatları daha fazla sürüklenme katsayısına sahiptirler. Pasif akıtma tekniğinin kanat üzerinde sürtünme için ek yüzeyler oluşturması ve kanadın emme tarafındaki akış yapılarıyla arasında oluşabilecek kesme gerilmeleri sürüklenme kuvvetindeki artışın nedeni olabilir. IGE eğrileri incelendiğinde sürüklenme kuvveti katsayısının tüm kanatlarda monoton olarak artış gösterdiği ve eğrilerin eğimlerinin artış gösterdiği söylenebilir. Sürüklenme kuvvetindeki artış, genel olarak kanadın basınç tarafındaki statik basıncın yer etkisiyle artışından ve ince olmayan delta kanat olması sebebiyle, daha az oranda, öncü kenarı girdabının gücünün artışı temelli olabilir. Akıtma açıklığı uygulanan bor kanatlarında yer etkisiyle sürüklenme kuvvetindeki artış temel kanadına kıyasla daha az olmaktadır. Bu azalma, akıtma açıklıklarının kanadın basınç tarafında yer etkisine bağlı olarak oluşan statik basıncı azaltması kaynaklı olabilir.



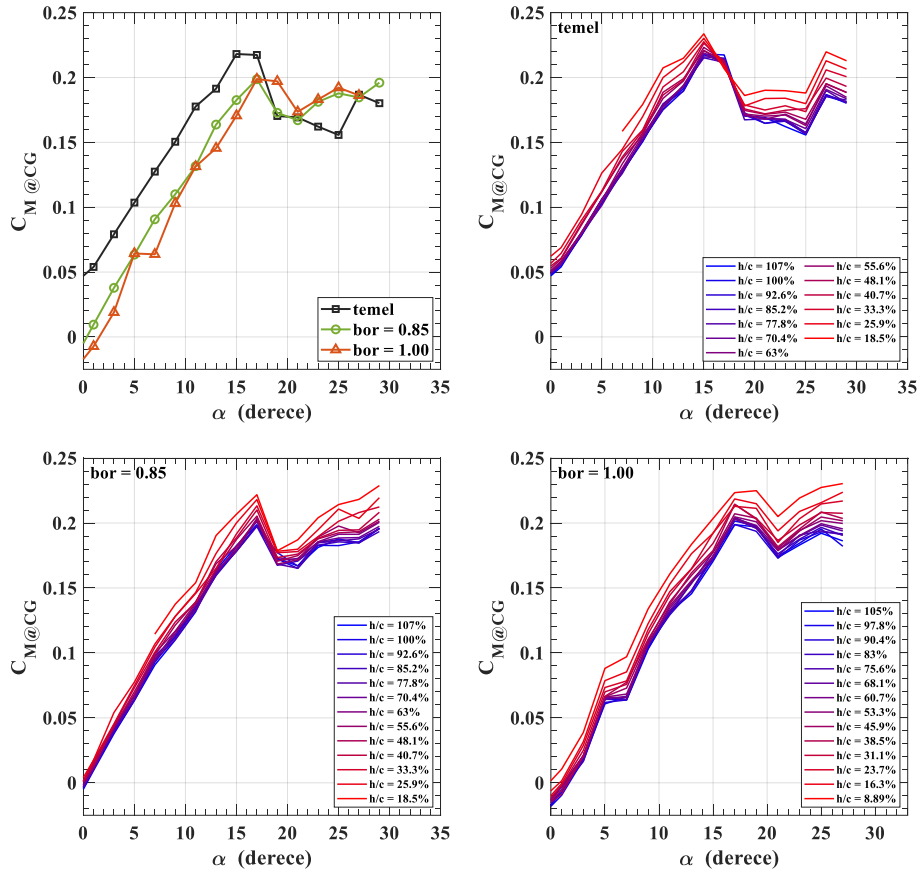
Şekil 4: Sol üst grafikte temel, bor kanatlarının OGE koşulundaki sürüklenme kuvveti eğrileri ve diğer grafiklerde temel ve bor kanatlarının IGE koşulundaki sürüklenme kuvveti eğrileri.

Aerodinamik performansı ifade eden taşıma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı eğrileri Şekil-5'te sol üst grafikte OGE koşulu için ve diğer eğrilerde IGE koşulunda verilmiştir. OGE sonuçlarına bakıldığında akıtma açıklığı olan bor kanatlarının temel kanadına kıyasla aerodinamik performanslarında azalma olduğu görülmektedir. Ancak, eğrilerin maksimum noktasının görüldüğü hücum açısı bor kanatlarında 2 derece kadar ötelenmektedir. IGE sonuçları incelendiğinde tüm kanatlarda yer etkisiyle taşıma kuvveti katsayısındaki artışın sürüklenme kuvveti katsayısındaki artışa üstün geldiği ve sonuç olarak ikisinin oranlarının arttığı görülmektedir. Burada, bor = 0.85 kanadında görülen eğrinin pik noktasının olduğu hücum açısı, yer mesafesi azaldıkça 7 derece hücum açısından temel kanadında olduğu gibi 5 derece hücum açısına doğru kaymaktadır. Ancak, bor = 1.00 kanadında bu anlamda bir değişim gözlemlenmemektedir.



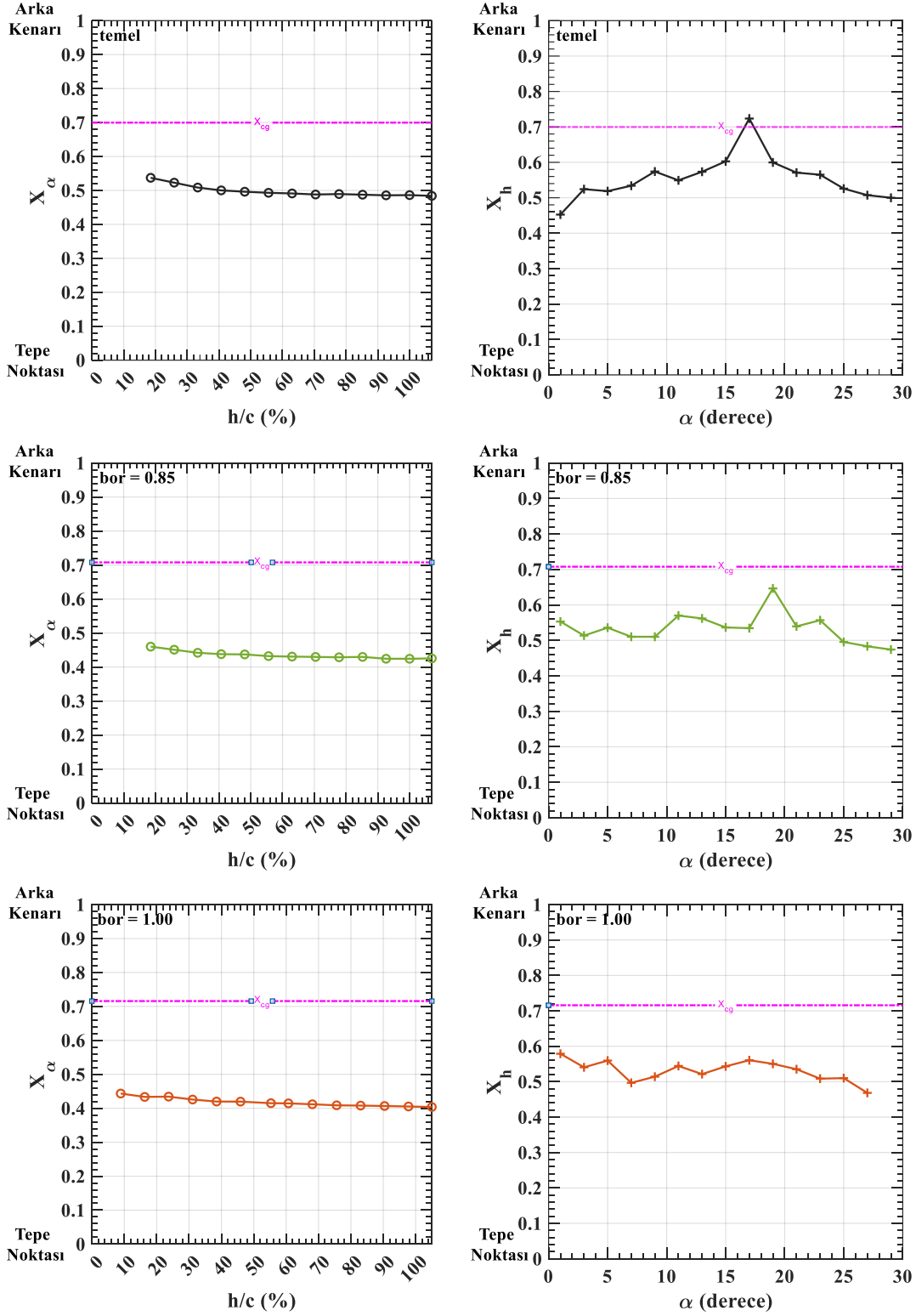
Şekil 5: Sol üst grafikte temel, bor kanatlarının OGE koşulundaki taşıma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı eğrileri ve diğer grafiklerde temel ve bor kanatlarının IGE koşulundaki taşıma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı eğrileri.

Şekil-6'da kanatların OGE ve IGE koşulunda ağırlık merkezinde hesaplanan yunuslama momenti katsayıları verilmektedir. OGE koşulu grafiği incelendiğinde bütün kanatlarda eğrilerin eğiminin pozitif olması ($C_{M\alpha} > 0$) sebebiyle kanatlar serbest akış durumunda boylamsal statik kararsızdırlar. Ancak, bor kanatlarında kanadın ağırlık merkezinin kanatlara açılan akıtma açıklıkları sebebiyle kanadın arka tarafına doğru kayması ve yunuslama aerodinamik merkezi, X_{α} 'nın tepe noktasına kaymasıyla kanatlar daha da statik kararsızlaşmaktadır. İstenilen manevra kabiliyetine ve kontrol edilebilirlik seviyesine göre kontrol yüzeyleri ile bu durumu değiştirmek mümkündür. IGE eğrileri incelendiğinde, yer etkisi ile eğrilerin dikey ekseninde yukarıya doğru ötelendiği görülmektedir ve eğrilerin eğimlerinin arttığı görülmektedir. Burada kanatların trim hücum açısı ($C_{M_{CG}} = 0$ olduğu nokta) irdelendiğinde bor kanatlarının trim hücum açısının temel kanadına kıyasla arttığını görmek mümkündür. Yer etkisi artışı ile trim açısı eksenin sol tarafına doğru kaymaktadır. Eğer kanatlarda pozitif hücum açısı artıracak bir manevra yapılmak istenirse bor kanatlarının kontrol yüzeylerinin daha düşük açılarda saptırılması mümkün olacaktır. Temel kanadı ve bor = 0.85 kanadından farklı olarak, bor = 1.00 kanadında 5 derece hücum açısında eğrilerin eğiminde sıfıra doğru keskin bir düşüş gözlemlenmektedir. Eğrilerin eğimindeki bu keskin düşüş, yer etkisi ile biraz azalmaktadır.



Şekil 6: Sol üst grafikte temel, bor kanatlarının OGE koşulundaki ağırlık merkezi yunuslama momenti eğrileri ve diğer grafiklerde temel ve bor kanatlarının IGE koşulundaki ağırlık merkezi yunuslama momenti eğrileri.

Şekil-7'de kanatların yunuslama ve yükseklik aerodinamik merkezleri verilmektedir. X_{α} 'nın üç kanatta da $h/c = \% 40 \sim 50$ civarına kadar yer etkisi ile pek fazla değişmediği yorumunu yapmak mümkündür. Ortak bir eğilim olarak üç kanatta da X_{α} yer etkisi ile kanadın arka kenarına doğru hareket etmektedir ve bu hareket etme miktarı bor kanatlarında temel kanadına kıyasla azalmaktadır. X_{α} 'nın kanadın arka kenarına doğru hareketi statik kararlılık açısından olumlu olsa da her durumda ağırlık merkezinin önünde konumlanmaktadır. Bu durumda statik kararlılık kriteri sağlanamamaktadır. X_h eğrileri tüm kanatlar için incelendiğinde, eğrilerin zikzaklı bir yapıda olduğunu ve açıkçası X_{α} eğrilerine kıyasla oldukça doğrusal olmayan bir davranış sergilediğini söylemek mümkündür. Akıtma açıklık oranı, bor arttıkça X_h hücum açısına bağlılığını temel kanadına göreceli olarak kaybetmektedir. Örneğin, temel ve bor = 0.85 kanatlarında görülen perdövites hücum açısı etrafında X_h 'in pik değerine ulaşması durumu bor = 1.00 kanadında gözlemlenememektedir. X_h 'in temel kanadı için perdövites hücum açısına doğru kanadın arka kenarına doğru kayması yükseklik statik kararlılık kriteri açısından istenmeyen bir durumdur. Bu durum bor kanatlarında daha yumuşak bir karaktere sahiptir. Genel olarak, tüm kanatlar iki aerodinamik merkez de ele alınarak Irodov'un yükseklik statik kararlılık kriteri açısından irdelendiğinde, üç kanadında her ölçüm noktasında (farklı hücum açısı ve yer yükseklikleri) statik kararsız olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7: Yunuslama ve yükseklik aerodinamik katsayıları. Dikey eksen kanatların ana veter uzunluğu ile normalize edilmiştir. Dolayısıyla, $X = 0$ kanatların tepe noktasını ve $X = 1$ kanatların arka kenarını ifade etmektedir.

SONUÇ

Pasif akıtma tekniğinin perdövites hücum açısını öteleyebildiği görülmektedir ve yer etkisi bu öteleme miktarını etkilememektedir. Kanatlar yer etkisine girdikçe taşıma kuvveti katsayılarında serbest akış durumuna kıyasla önemli ölçüde artış görülmektedir. Kısa mesafede kalkış durumu değerlendirildiğinde, bor = 0.85 kanadının perdövites hücum açısını 4 derece kadar öteleyebildiği ve yer etkisiyle taşıma kuvveti katsayısının artıyor olması, bor = 0.85 kanadını kısa mesafede kalkış için ön plana çıkarmaktadır. Hiçbir durumda verilen kararlılık kriteri sağlanamamıştır ve uç kanatta her durumda boylamsal statik kararsızdır. Ortak bir sonuç olarak, pasif akıtma açıklığı uygulanması, yer etkisinin katsayılar üzerindeki etkisini azaltan yönde davranış göstermektedir. Bu durumu aerodinamik katsayılarda ve X_h , X_α aerodinamik merkezlerinde gözlemlenmek mümkündür.

Kaynaklar

- Cui, E., & Zhang, X. (2010). Ground Effect Aerodynamics. In *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae022>
- Çelik, A., Çetin, C., & Yavuz, M. M. (2017). Effect of passive bleeding on flow structure over a nonslender delta wing. *AIAA Journal*, 55(8). <https://doi.org/10.2514/1.J055776>
- Çetin, C., Çelik, A., & Yavuz, M. M. (2018). Control of flow structure over a nonslender delta wing using periodic blowing. *AIAA Journal*, 56(1). <https://doi.org/10.2514/1.J056099>
- Gad-El-Hak, M., & Black welder, R. F. (1985). The discrete vortices from a delta wing. *AIAA Journal*, 23(6). <https://doi.org/10.2514/3.9016>
- Gursul, I., Gordnier, R., & Visbal, M. (2005). Unsteady aerodynamics of nonslender delta wings. In *Progress in Aerospace Sciences* (Vol. 41, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.09.002>
- Gursul, I., Allan, M. R., & Badcock, K. J. (2005). Opportunities for the integrated use of measurements and computations for the understanding of delta wing aerodynamics. *Aerospace Science and Technology*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.08.007>
- Irodov, R.D. (1970). Criteria of longitudinal stability of ekranoplan. *Ucheniye Zapiski TSAGI*, 1(4), pp. 63-74.
- Kestel, K., Ramazanlı, B., & Yavuz, M. M. (2020). Control of flow structure over a non-slender delta wing using passive bleeding. *Aerospace Science and Technology*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106136>
- Ko, L. S., Tremblay-Dionne, V., & Lee, T. (2020). Impact of Ground Proximity on an Inverted Delta Wing. *Journal of Aerospace Engineering*, 33(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0001163](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0001163)
- Lee, M., & Ho, C. M. (1990). Lift force of delta wings. *Applied Mechanics Reviews*, 43(9). <https://doi.org/10.1115/1.3119169>
- Lee, T., & Ko, L. S. (2018). Ground Effect on the Vortex Flow and Aerodynamics of a Slender Delta Wing. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 140(7). <https://doi.org/10.1115/1.4039232>
- Qin, Y., Qu, Q., Liu, P., Tian, Y., & Lu, Z. (2015). DDES study of the aerodynamic forces and flow physics of a delta wing in static ground effect. *Aerospace Science and Technology*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.04.004>
- Qin, Y., Liu, P., Qu, Q., & Guo, H. (2016). Numerical study of aerodynamic forces and flow physics of a delta wing in dynamic ground effect. *Aerospace Science and Technology*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.02.007>
- Qu, Q., Jia, X., Wang, W., Liu, P., & Agarwal, R. K. (2014). Numerical simulation of the flowfield of an airfoil in dynamic ground effect. *Journal of Aircraft*, 51(5). <https://doi.org/10.2514/1.C032452>
- Qu, Q., Wang, W., Liu, P., & Agarwal, R. K. (2015). Airfoil aerodynamics in ground effect for wide range of angles of attack. *AIAA Journal*, 53(4). <https://doi.org/10.2514/1.J053366>
- Qu, Q., Lu, Z., Guo, H., Liu, P., & Agarwal, R. K. (2015). Numerical investigation of the aerodynamics of a delta wing in ground effect. *Journal of Aircraft*, 52(1). <https://doi.org/10.2514/1.C032735>

- Rozhdestvensky, K. V. (2006). Wing-in-ground effect vehicles. In *Progress in Aerospace Sciences* (Vol. 42, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2006.10.001>
- Sharifi Ghazijahani, M., & Yavuz, M. M. (2019). Effect of thickness-to-chord ratio on aerodynamics of non-slender delta wing. *Aerospace Science and Technology*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.03.033>
- Tumse, S., Tasci, M. O., Karasu, I., & Sahin, B. (2021). Effect of ground on flow characteristics and aerodynamic performance of a non-slender delta wing. *Aerospace Science and Technology*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106475>
- Visbal, M. R., & Gordnier, R. E. (2003). On the structure of the shear layer emanating from a swept leading edge at angle of attack. *33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*. <https://doi.org/10.2514/6.2003-4016>