

KALINLIK-VETER ORANININ DÜŞÜK OK AÇILI DELTA KANAT ÜZERİNDEKİ AKIŞ YAPISINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ

İsmail Sadi Cesur¹
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

Mehmet Metin Yavuz²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

Kahraman Albayrak³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Bu çalışmada 35 derece ok açısına sahip delta kanadın kalınlık-veter oranının akış yapısına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Analizler çalışmanın ilk safhalarında kalınlık-veter oranları $t/C = 0.0475$ ve 0.19 , Reynolds sayısı $Re = 35000$ ve hücum açıları $\alpha=4$ ve 10 derecelerde yapılmış olup rüzgar tüneli testleri sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda test kanatlarının üzerinde $x/C = 0.44$ pozisyonundan alınan basınç ölçümlerinin boyutsuz basınç katsayısı, $-C_p$, ve yakın-yüzey parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) sonuçları kullanılmıştır. Analizlerin deneysel sonuçlarla uygunluğu görülmüş, basınç, girdap, kanat üstü eksenel hızlar ve kanatların aerodinamik karakteristikleri detaylı incelenmiştir. Analiz ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasından sonra kanatlar hücum açısı $\alpha=40$ dereceye kadar belirli aralıklarda incelenmiş ve kalınlık-veter oranının aerodinamik karakteristikler Cl , Cd ve Cl/Cd üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Sonuçlar t/C oranındaki artışın kanadın akış yapısında büyük değişikliklere neden olduğunu ve Cl_{max} değerinin kalın kanatta daha erken hücum açılarında yakalandığını ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda, perdövites durumunun kalın kanatta çok daha düşük hücum açılarında oluştuğu ve Cl/Cd değerinin kalınlık-veter oranı arttıkça belirgin bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir.

GİRİŞ

Son dönemde artan insansız hava araçları (İHA) ve mikro hava araçlarına (MHA) yönelik çalışmalarda, düşük ok açılı delta kanatlar performans ve manevra kabiliyetleri açısından önemli bir yer tutar. Bu sebepten dolayı çeşitli delta kanat planformlarında akış fiziğinin incelenmesi, performansını etkileyen parametrelerin anlaşılması ve iyileştirmeye yönelik çalışmaların yapılması gerekmiştir.

Delta kanatlar, ok açıları farketmeksizin hücum kenarından oluşmaya başlayarak, kanat üst yüzeyi boyunca hareket eden girdap yapıları ile karakterize edilir. Girdap merkezlerindeki eksenel hızlar, düşük ok açılı kanatlarda uçuş hızının 2 katına, yüksek ok açılı delta kanatlarda ise uçuş hızının 5 katına kadar çıkabilmektedir [Gursul et al., 2005]. Girdap çekirdeğinde oluşan bu yüksek hız alanı, kanat üst yüzeyinde düşük basınç alanı oluşturur ve kanadın ekstra taşıma kuvveti kazanmasını sağlar. Ok açısındaki azalma kanatlar üstünde oluşan girdapların eksenel hızlarında azalmaya sebep olduğundan, girdap sebebiyle kazanılan taşıma kuvveti de azalmaktadır.

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, ODTÜ Makina Mühendisliği Böl., E-posta: cesur.sadi@metu.edu.tr

² Doç. Dr., ODTÜ Makina Mühendisliği Böl., E-posta: ymetin@metu.edu.tr

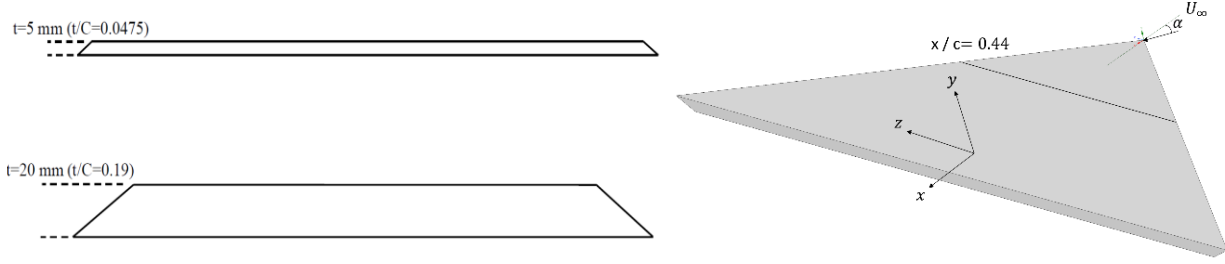
³ Prof. Dr., ODTÜ Makina Mühendisliği Böl., E-posta: albayrak@metu.edu.tr

Uçuş hızının ve hücum açılarının artması, kanat üst yüzeyinde oluşan girdap yapılarını kırıma uğratar. Kırımdan sonra girdap merkezindeki eksenel hızlar ciddi şekilde düşerek, kanat üst yüzeyindeki basınçların artmasına sebep olur. Girdap kırılımı bu sebepten dolayı kanatlardaki taşıma kuvvetini azaltmaktadır. Hücum açısının daha fazla artırılması, girdap kırılmalarının kanadın ön ucuna taşınmasını sağladıktan sonra kanat yüzeyinde üç boyutlu akış ayrılmasının oluşmasına neden olmaktadır. Bu üç boyutlu akış ayrılmaları kanadın aerodinamik performansını bozmaktadır. Bu kapsamda, literatürde çalışmalar genelde üç boyutlu akış ayrılmalarının engellenmesi veya girdap kırılımının ötelenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalar aktif ve pasif yöntemler olarak iki grupta sınıflandırılır. Aktif yöntemler içerisinde bulunan, kanatların firar kenarlarından üfleme yöntemi ile girdap yapılarının kırılımının ertelenmesi, bu sayede taşıma kapasitelerinin artırılması sağlanmıştır. [Yakinthos et al., 2012]. Aynı sonuç bir başka çalışmada, girdap merkez hattı boyunca hava üflenerek sağlanmıştır [Mitchell et al., 2000]. Pasif kontrol çalışmaları ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Kanat uçlarının flaplandırılması [Lee, Ko, 2016], hücum kenarındaki geometri değişiklikleri [Veerhaagen, 2012] ve kanatların basınç yüzeylerinden kaldıra yüzeylerine pasif hava akıtması yöntemiyle kanat üstü akış yapısının kontrol altına alınması [Çelik et al., 2017] gibi çalışmalar yapılmıştır. Bahsedilen çalışmaların yanı sıra, kalınlık-veter oranının etkilerini inceleyen az sayıda çalışmalar da bulunmaktadır. Kalınlık-veter oranı ve hücum kenarı kesim açılarının 50 derece ok açısına sahip delta kanadın aerodinamik performansına etkisi [Lu, Wang, 2005], değişen uzunluk-genişlik ve kalınlık-veter oranlarının, normal yöndeki kuvveti (C_n) ne şekilde etkilediği [Berndt, 1949], 45 derece ok açısına sahip delta kanatlardaki kalınlık oranlarının ve hücum kenarı geometri değişimlerinin basınç dağılımlarına ve aerodinamik performansa etkisi [Kawazoe et al., 1994], farklı hücum açılarında kanat kalınlıklarındaki azalışın girdap kırılım noktasını ötelemesine [Lowson, Riley, 1995] ve kanat kalınlıklarının kırılmış delta kanadın düşük hızlardaki salınım ve aeroelastik yapısını üzerindeki etkilerine [Golparvar et al., 2015] ilişkin çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmada ise kalınlık-veter oranının akış fiziğine ve kanadın aerodinamik performansına etkisi incelenmiştir. Dört farklı kalınlık veter oranına, $t/C = 0.0475$ ve 0.19 , sahip kanatlar Reynolds sayısı $Re = 35000$ ve iki farklı hücum açısı, $\alpha = 4, 10$, derece olmak üzere nümerik incelenmiş ve sonuçlar deneysel veriler ile doğrulanıp karşılaştırılmıştır.

SAYISAL YÖNTEM

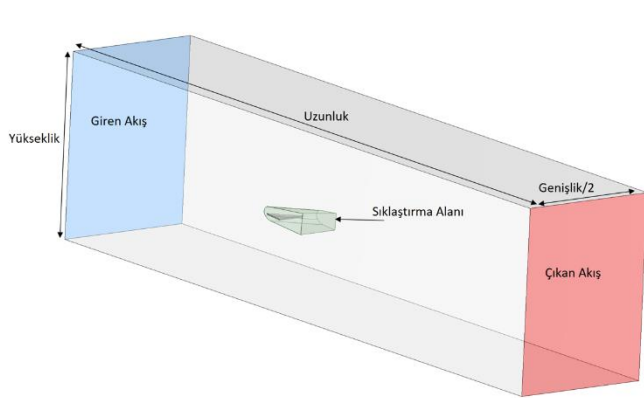
Kalınlık-veter oranının kanat üstündeki akış yapısına etkisinin nümerik incelendiği bu çalışmada, kanadın CAD geometrisinin hazırlanması, HAD çözümü için gereken sayısal ağı oluşturulması ve akışın çözülmesi için ticari yazılımlar kullanılmıştır. Gülsaçan (2017) da detayları verilen deney düzeneğinin test kesitinin geometrik olarak modellenmesi SolidWorks programı kullanılarak yapılmıştır. Sayısal ağılar ANSYS Mesher kullanılarak yapılmış olup, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çözücü yazılımı olan FLUENT'te SST k-w türbülans modeli ile birlikte Curvature-Correction uzantısı [Küçükyılmaz, 2016], girdapların yakalanmasındaki başarısı sebebiyle kullanılmıştır. Kanat üstünde oluşan güçlü girdaplı yapılar, özellikle yüksek hücum açılarında, daha erken kanat istasyonlarında bozunuma uğrar. Girdap bozunumu yaşandıktan sonra kanat üstünde ve akış alanının geri kalanında oluşan küçük girdaplı yapılar, Reynolds sayısı düşük olmasına karşın, türbülanslı akışa sebep olmaktadır. Bu yüzden, CFD analizinde, Reynolds sayısının, $Re = 35000$, laminar sınır değerinin altında olmasına rağmen akış alanında türbülans olduğu için SST k-w türbülans modeli kullanılmaktadır. Analiz sonuçlarının görüntülenmesi esnasında ise TecPLOT yazılımı tercih edilmiştir.

Modellenen deney kesiti, iki ucu açık dikdörtgenler prizması ve analizlerde sınır koşulu olarak verilen simetri eksenine şekildedir. Test kesitinin 510 mm yüksekliği, 750 mm genişliği ve 2000 mm uzunluğu bulunmaktadır. Modellenen delta kanat geometrisi, 35 derece ok açısına, 105 mm veter uzunluğuna ve 300 mm kanat açıklığına sahiptir. İki farklı kalınlıkta kanatlar analiz edilmiş olup, bu kalınlıklar 5 ve 20 milimetre, ve buna bağlı olan kalınlık veter oranları $t/C = 0.0475$ ve 0.19 dir. Kanatların çizimleri Şekil-1'de verilmiştir.

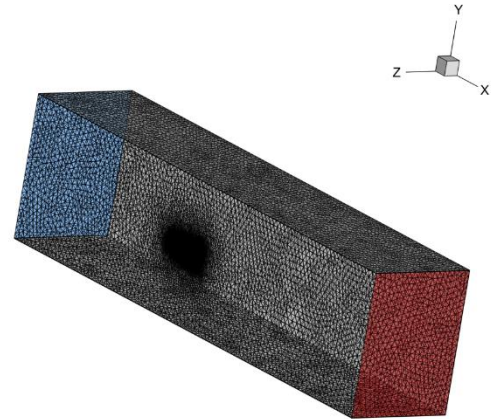


Şekil 1: Kanat Geometrileri

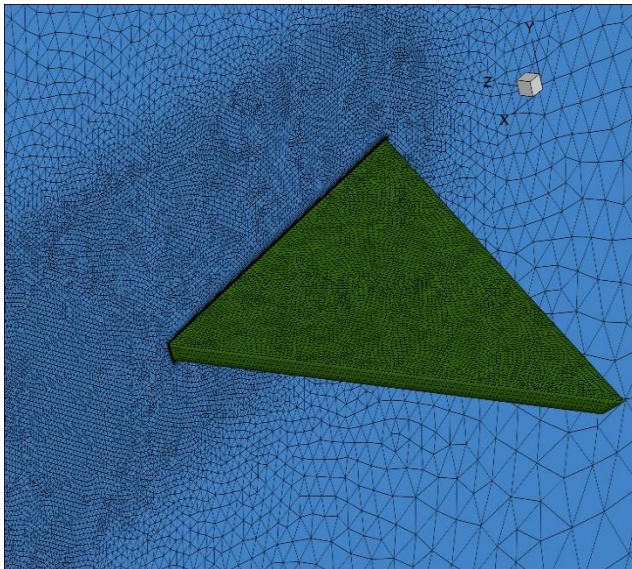
Analizler için yapısal olmayan yüzey ve hacim sayısal ağı oluşturulmuştur. Sonuçların isabetli ve çözünürlüklerinin yüksek olması adına kanat etrafına bir sıkıştırma alanı tanımlanmıştır. Kanat yüzeylerinden çıkan prizma tabaka sayısal ağı, analizler sırasında y-plus değerini yaklaşık 1 verecek şekilde hazırlanmıştır. Akış hacminin ve sıkıştırma alanının görüntüsü (Şekil-2a), sayısal ağ görüntüsü (Şekil-2b), kanat yüzeyinin (Şekil-2c) ve simetri eksenindeki prizma katmanlarının yakından görüntüsü (Şekil-2d) aşağıda sunulmuştur. Yüzeyden çıkan ilk prizmanın yüksekliği 0.035 mm olarak belirlendikten sonra, 18 prizma katman çıkmıştır. Sayısal ağdan bağımsızlık çalışması, sıkıştırma alanındaki hücreleri küçülterek yapılmış ve bunun sonucunda toplam 16×10^6 hücre elemanlı bir sayısal ağ üretilmiştir.



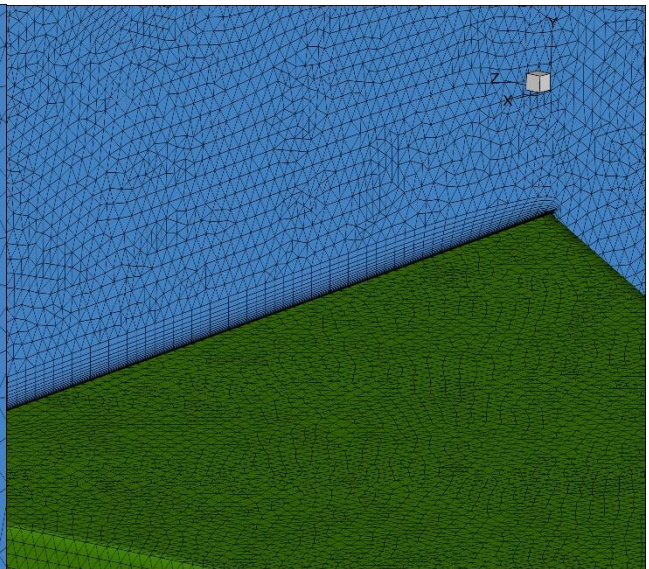
Şekil 2a: Akış Hacmi ve Sıkıştırma Alanı



Şekil 2b: Yüzey ve Hacim Ağ Yapısı



Şekil 2c: Kanat Yüzey Ağı

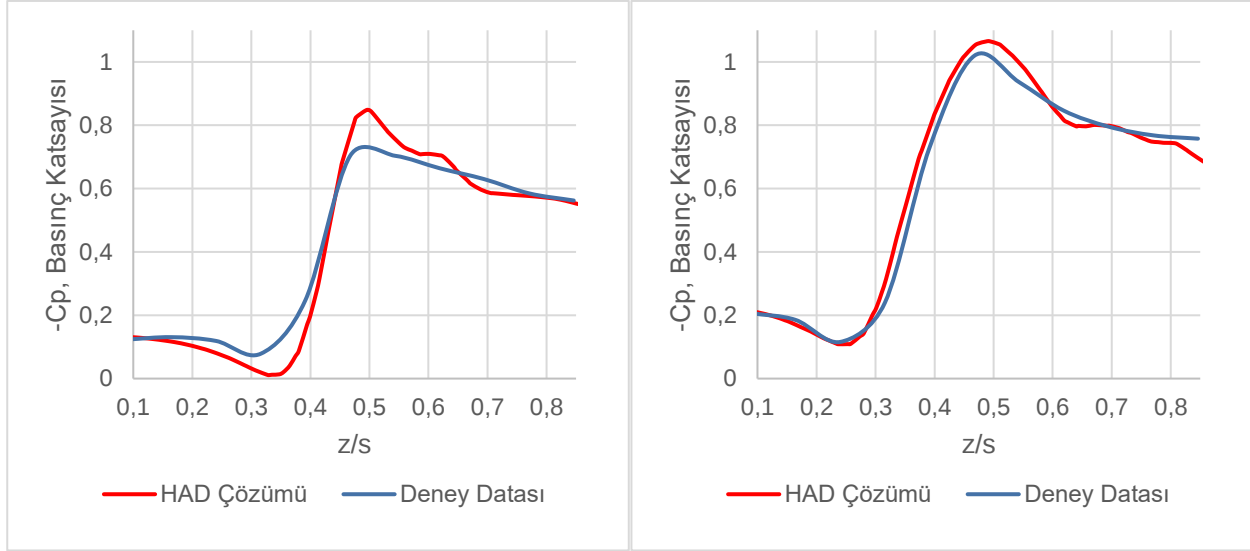


Şekil 2d: Prizma Tabakaları

Ağ yapıları hazırlandıktan sonra FLUENT yazılımı kullanılarak akış çözümü başlatılmıştır. Çözücü Pressure Based seçilip, SST k- ω türbülans modeli ve Curvature Correction (CC) uzantısı kullanılmıştır. Çözüm şeması SIMPLE olup tüm diskretizasyonlar 2. Seviyedendir. Gradient ayarı Green-Gauss Node Based olarak alınmıştır. Analizlerde, residual değerleri için en az 10^{-5} yakınsama kriteri belirlenmiş ayrıca kanat üst yüzeylerindeki maksimum basınç katsayısı değişimleri takip edilmiştir.

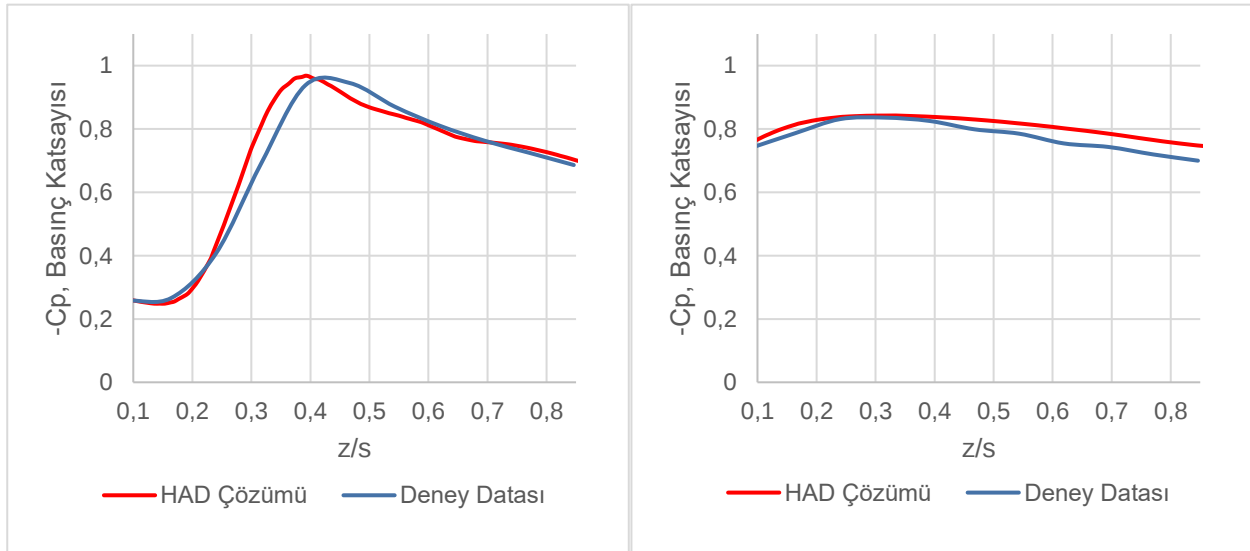
HESAPLAMA SONUÇLARI

Analiz sonuçları, her kanat üzerindeki, $x/C = 0.44$ istasyonuna (Şekil-1) kanat açıklığı boyunca yerleştirilmiş yüzey basınç deliklerinden elde edilen basınç değerleriyle karşılaştırılmıştır [Gülsaçan (2017)]. Kalınlık-veter oranları $t/C=0.0475$ ve 0.19 da, 4 ve 10 derece hücum açıları için HAD analizleri ve deneylerden elde edilen çıktılar karşılaştırılması Şekil-3 ve Şekil-4'te verilmiştir.



Şekil 3a: Hücum Açısı, $\alpha=4^\circ$, $t/C = 0.0475$
Basınç Katsayısı Dağılımları

Şekil 3b: Hücum Açısı, $\alpha=4^\circ$, $t/C = 0.19$
Basınç Katsayısı Dağılımları



Şekil 4a: Hücum Açısı, $\alpha=10^\circ$, $t/C = 0.0475$
Basınç Katsayısı Dağılımları

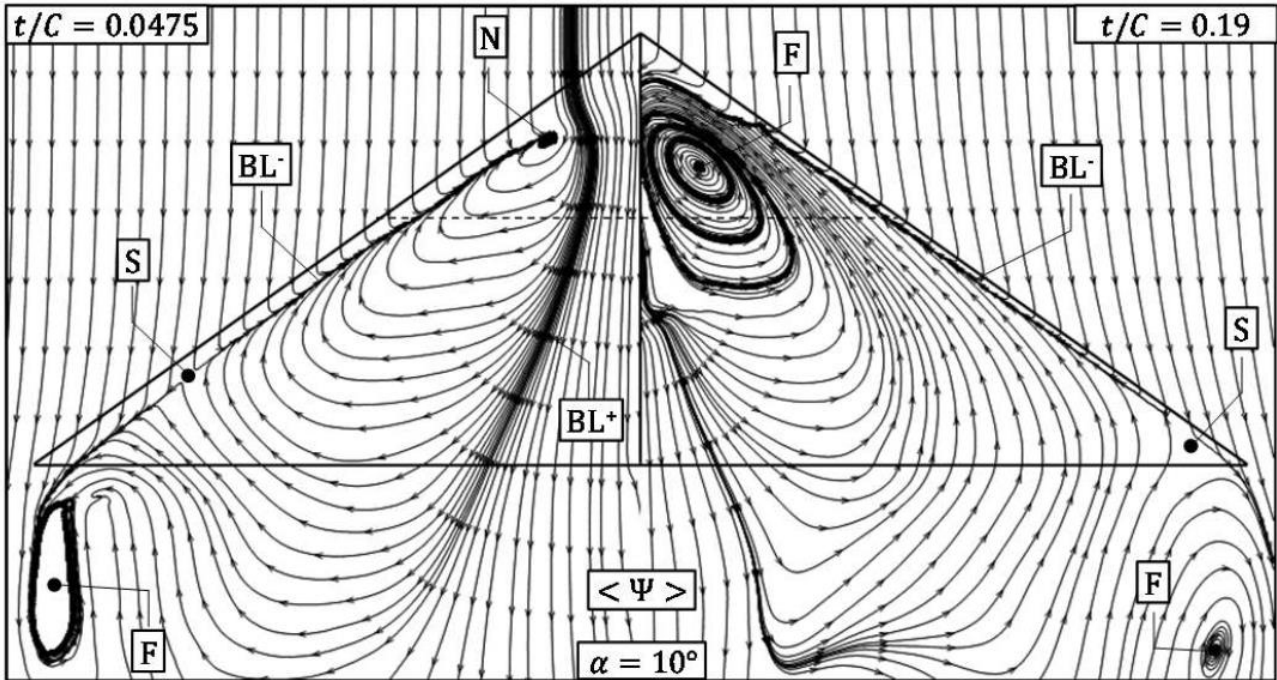
Şekil 4b: Hücum Açısı, $\alpha=10^\circ$, $t/C = 0.19$
Basınç Katsayısı Dağılımları

Kanat üst yüzeylerinde oluşan güçlü girdap yapıları, hareket ettikleri hat boyunca kanat yüzeylerine emme kuvveti uygular ve ani basınç değişikliklerine sebep olur. Bu basınç değişikliklerinin incelenmesinde kanat açıklığı boyunca alınan boyutsuz basınç katsayısı, $-C_p$ grafikleri, özellikle girdap merkezlerinin yerlerinin belirlenmesinde kullanılan faydalı bir uygulamadır. Girdap

merkezleri, $-C_p$ değerinin maksimum olduğu noktaya tekabül ederken, akışın yüzeye tekrar bağlandığı kısım $-C_p$ değerinin minimum olduğu noktalara denk gelmektedir. Girdap kuvvetinin azalması bu $-C_p$ değerlerindeki farkın azalması ile doğru orantılıdır. Gerek hücum açısındaki gerekse uçuş hızındaki artış girdap merkez hatlarının kanat simetri eksenine doğru kaymasına ve yüzeyden üç boyutlu akış ayrılımlarına sebep olur [Özalp, Yanıktepe, 2016]. Üç boyutlu akış ayrılımları, girdap kuvvetinin azalmasına, $-C_p$ değerlerindeki farkın azalmasına bu kapsamda basınç katsayısı profillerinin düzleşmesine yol açar.

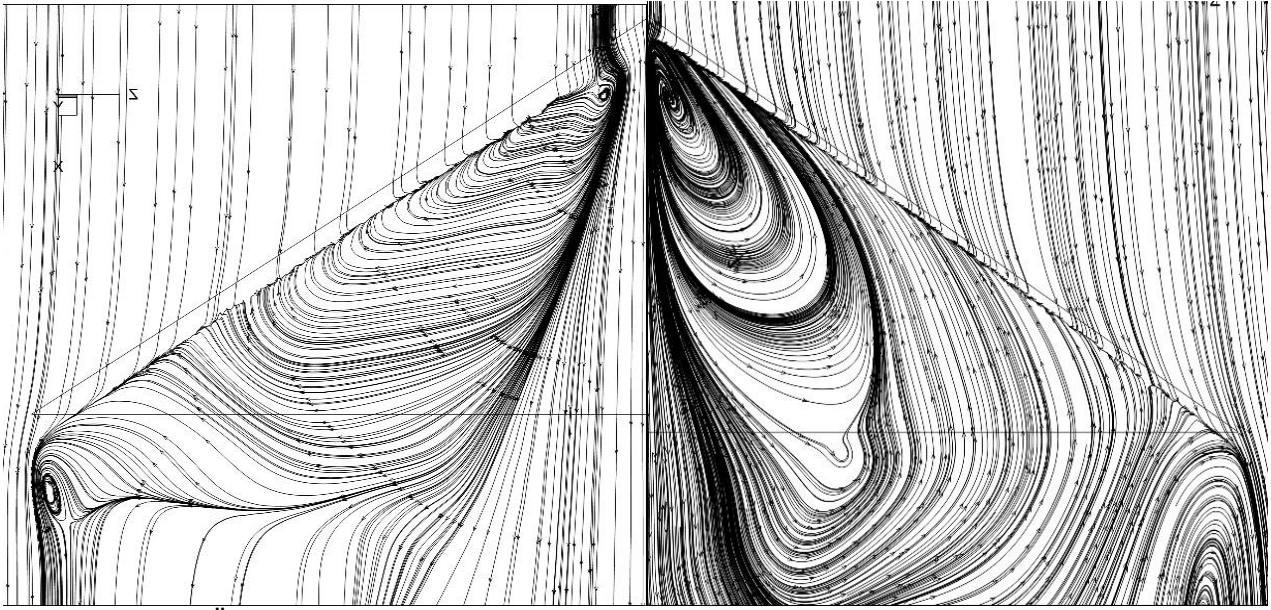
Sunulan çalışmada test verileri, kanat açıklığı boyunca $t/C = 0.44$ hattına yerleştirilmiş yüzey basınç deliklerinden toplanmıştır. Analiz sonuçlarında ise yine aynı konum boyunca $-C_p$ değerleri okunmuş ve tüm grafikler incelendiğinde genel olarak deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil-3'e bakıldığında, $t/C = 0.44$ hattı üzerinde girdap merkezinin yerinin görebilmek mümkündür. Üç boyutlu akış ayrılması henüz yaşanmamıştır. Kalınlık-veter oranındaki artış girdap kuvvetini artırmış, maksimum $-C_p$ değerini $\alpha=4$ derece hücum açısında yükseltmiştir. Şekil-4 ele alındığında, kalınlık-veter oranındaki artışın, girdap yapısında belirgin bir değişikliğe yol açtığını görebilmek mümkündür. Şekil-4a'da görülen girdap merkezi yeri ve ani basınç değişiminin kanat kalınlığı ile Şekil-4b'de ortadan kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi, kalınlığın artışı ile beraber $\alpha=10$ derece hücum açısında üç boyutlu akış ayrılmasının yaşanmasıdır. Girdap kuvvetini kaybetmiş ve daha düz bir basınç dağılımı ortaya çıkmıştır.

Kanat üst yüzeyinde oluşan girdaplı yapı ve akım ayrılımlarının anlamlandırılmasında akış çizgilerinin çıkarılması faydalı bir uygulamadır. Kanat üst yüzeyinde oluşan akış çizgilerinin deneysel data ile karşılaştırılması Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, 10 derece hücum açısında, kalınlık-veter oranı arttıkça, kanat üst yüzeyinde üç boyutlu akım ayrılması (F noktası) meydana gelmiş ve kanadın büyük kısmında ters akıma sebebiyet vermiştir. Akış çizgilerinin deneysel veri ile karşılaştırılmasında benzer özellikler ortaya çıkmış ve deneysel veri ile analiz sonuçlarının uyumu görülmüştür.



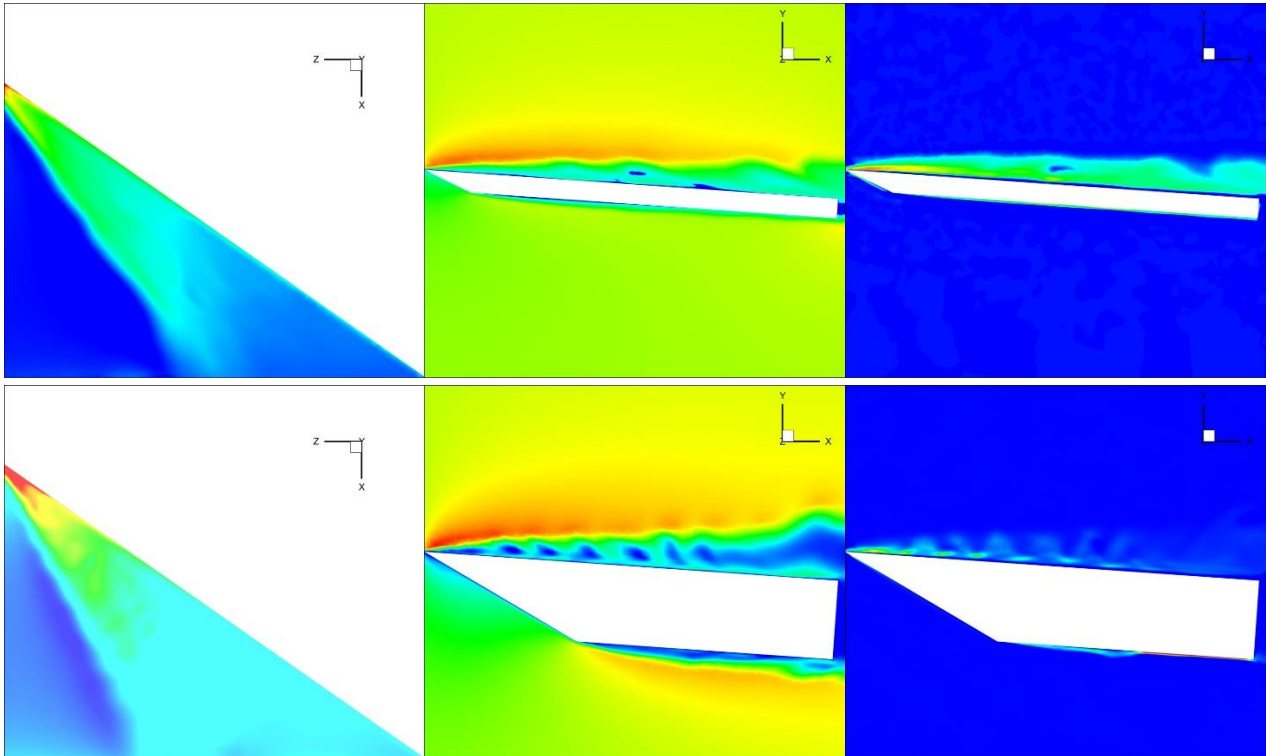
Şekil 5a: Kanat Üst Yüzey Akış Çizgileri Karşılaştırılması, $\alpha=10^\circ$, $t/C = 0.0475$ (sol) ve $t/C = 0.19$ (sağ)

Deneysel Veri

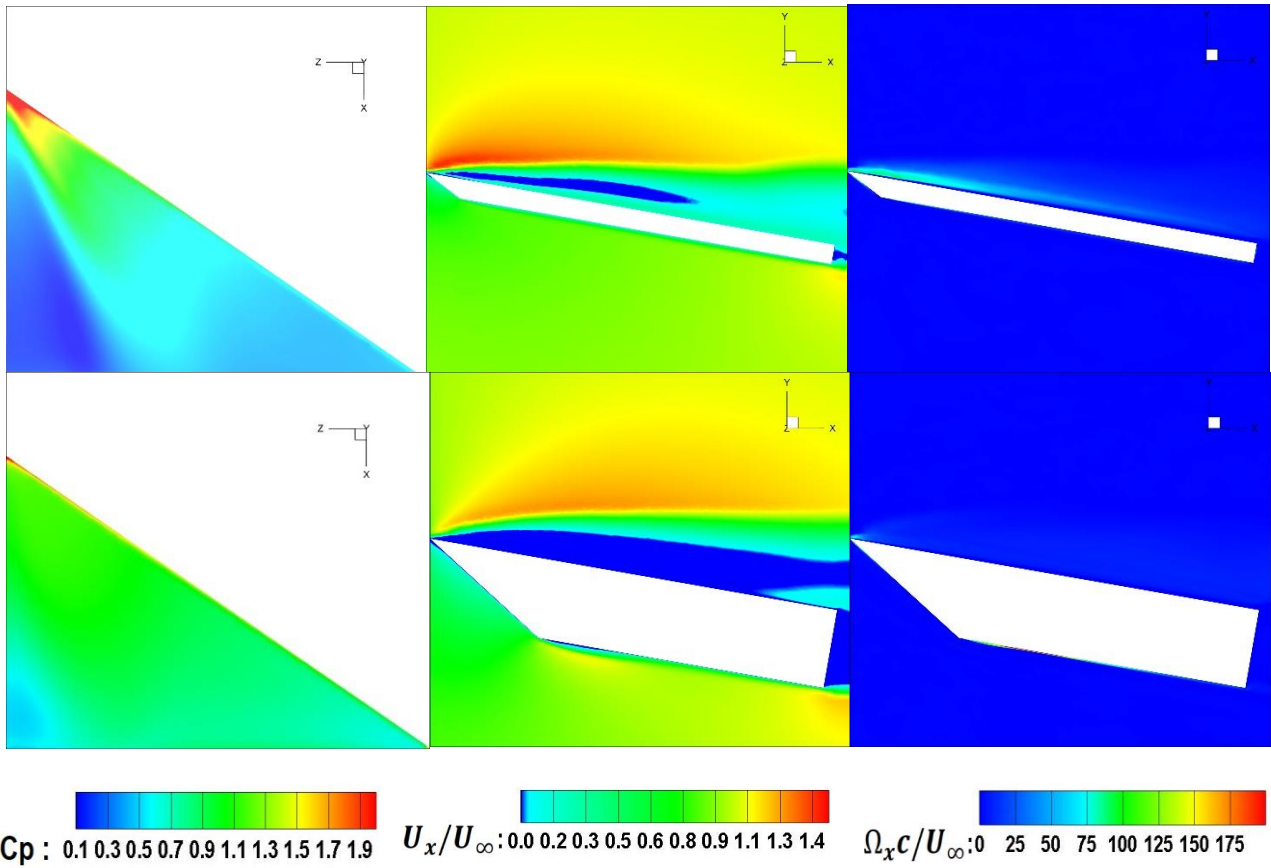


Şekil 5a: Kanat Üst Yüzey Akış Çizgileri Karşılaştırılması, $\alpha=10^\circ$, $t/C = 0.0475$ (sol) ve $t/C = 0.19$ (sağ)
Analiz Verisi

Yapılan HAD analizlerinde, kanatların üst yüzeylerindeki basınç katsayılarının dağılımları, girdap merkezlerini birleştiren düzlemdeki aksel hız ve girdap değerleri incelenmiştir (Şekil-7 ve Şekil 8).



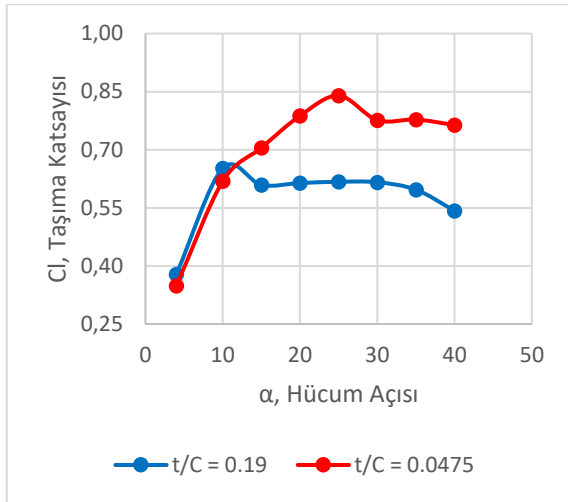
Şekil 7a: Üst Yüzey -Cp Dağılımı Şekil 7b: Aksel Hız Bileşeni Şekil 7c: Aksel Girdap bileşeni
Yukarıdan Aşağı, $t/c = 0.0475$ ve 0.19 , $\alpha=4^\circ$



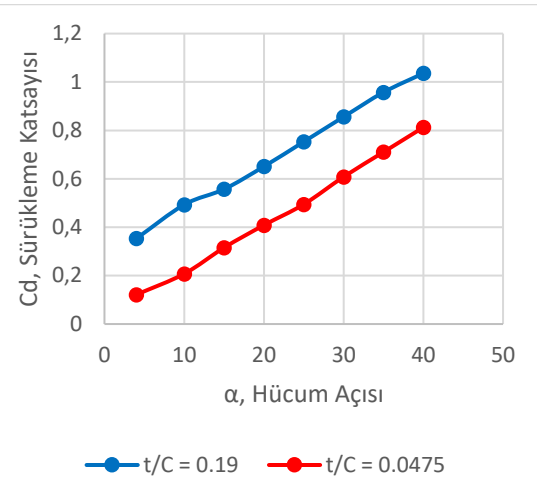
Şekil 8a: Üst Yüzey -Cp Dağılımı Şekil 8b: Eksenel Hız Bileşeni Şekil 8c: Eksenel Girdap bileşeni
Yukarıdan Aşağı, $t/c = 0.0475$ ve 0.19 , $\alpha = 10^\circ$

Şekil-7’de gözüktüğü üzere, dört derece hücum açısında halen güçlü girdaplı yapının bozulmadığını görmek mümkündür. Basınç dağılımlarına dikkatli bakıldığında girdaplı yapının oldu hattın basınç dağılımını iki farklı kısma ayırdığı görülmektedir. Aynı zamanda, eksenel hız ve girdap bileşenlerinin grafiklerine bakıldığında da girdaplı yapının henüz bozunuma uğramamış olduğu ortaya çıkmaktadır. Şekil-8 incelendiğinde ince kanat için 10 derece hücum açısında yine girdaplı yapının bulunduğu ve üst yüzey basınç dağılımında ciddi şekilde etkili olduğu farkedilebilmektedir. Ancak kanat kalınlığının bu hücum açısındaki artışta girdap bozunumuna yol açtığı ortaya çıkmıştır. Bu durum aynı zamanda Şekil-3 ve Şekil-4 karşılıklı olarak incelendiğinde de görülebilmektedir. Şekil-3 ve Şekil-4a görünen basınç dağılımlarındaki piklerden güçlü girdap yapısının halen varolmakta olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Şekil-4b’de kanat kalınlığındaki artışın, girdap bozunumuna sebebiyet vermesi nedeniyle basınç dağılımları daha düz bir hal almıştır.

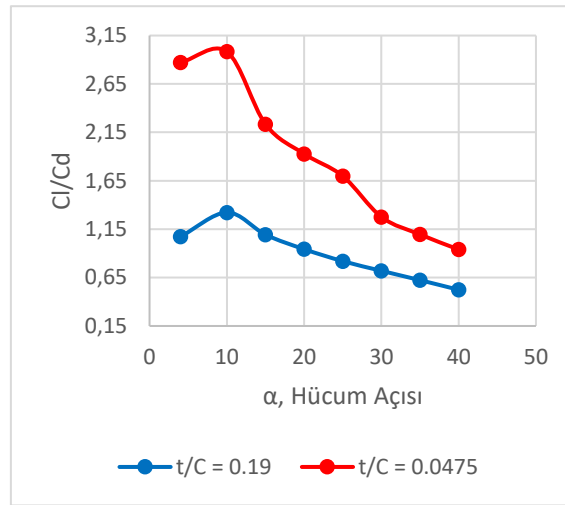
Yapılan çalışmalara ek olarak, kanatlar daha yüksek hücum açılarında analiz edilmiş ve aerodinamik katsayıların C_l , C_d ve C_l/C_d değerleri elde edilmiştir (Şekil-9).



Şekil 9a: Taşıma Katsayıları



Şekil 9b: Sürüklenme Katsayıları



Şekil 9c: Cl/Cd Değerleri

Şekil-9'da görüldüğü üzere kanat kalınlığındaki artışın kanadın taşıma katsayısını, yaklaşık hücum açısı $\alpha = 10^\circ$ 'ye kadar arttırdığı saptanmıştır ancak kalınlık-veter oranındaki artış kanadın daha erken perdöviteye girmesine sebep olduğu da görülmüştür. Sürüklenme katsayıları karşılaştırıldığında her hücum açısında, kalınlık-veter oranı yüksek olan kanadın her zaman daha fazla sürüklenme kuvvetine maruz kaldığı görülmektedir. Cl/Cd oranlarının göz önüne alındığında ise, ince olan kanadın her hücum açısında daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüş olup, hücum açısı arttıkça performanstaki azalmadan daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir.

SONUÇ

35 derece ok açısına sahip, kalınlık-veter oranları $t/C = 0.0475$ ve 0.19 olan iki farklı kanat, hücum açıları $\alpha = 4$ ve 10 derece, Reynolds sayısı, $Re = 35000$ koşulları altında nümerik incelenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçların deneysel bulgular ile uyumlu olduğu görülmüş ve kanatlar $\alpha = 40$ dereceye kadar analiz edilip aerodinamik katsayıları incelenmiştir. Kalınlık-veter oranındaki artışın akış fiziğinde ciddi değişiklikler yarattığı görülmektedir. Hücum açısı 4 derece iken kanat üst yüzeyinde basınç dağılımları değişmiş, girdap kuvveti artmıştır. Ancak 10 derece hücum açısında ise kalınlık artışının kanattan üç boyutlu akış ayrılmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun yanı sıra kalınlık-veter oranındaki artışın, tüm hücum açılarındaki kanatların sürüklenme katsayılarını artırdığı, taşıma katsayısı ile Cl/Cd değerlerini ise düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bununla beraber kanatlar daha yüksek hücum açılarındaki incelendiğinde, kalınlıktaki artışın yüzeyden üç boyutlu akım ayrılmasına daha erken sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, perdövitesin kalın kanatta daha düşük hücum açılarındaki oluşmasına sebep olmuştur.

Kaynaklar

- Çelik, A., Çetin, C., Yavuz, M., 2017. *Effect of Passive Bleeding on Flow Structure of a Nonslender Delta Wing*, AIAA Journal, Cilt 55, No. 8, s.23-30.
- Gülsaçan, B., 2017. *Effect of Thickness-to-Chord Ratio on Flow Structure of a Low Swept Delta Wing*, METU Mechanical Engineering Thesis, s.32-49.
- Küçükyılmaz, İ.C., 2016. *Control of Flow Structure on 70 Degrees Swept Delta Wing With Along the Core Blowing Using Numerical Modelling*, METU Mechanical Engineering Thesis, s.58-66.
- Özalp, C., Yanıktepe, B., 2016. *Aerodynamics and Flow Characteristics of X-45 Delta Wing Planform*, KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 19, No.1 s.5-8.
- Ko, L.S., Lee, T., 2016. *Aerodynamics and Vortex Flowfield of a Slender Delta Wing with Apex Flap and Tip Flap*, ASME, Cilt 139, No. 5 s.21-27.
- Golparvar, H., Irani, S., Sani, M. M., 2015. *Experimental Investigation of Linear and Nonlinear Aeroelastic Behavior of a Cropped Delta Wing with Store in Low Subsonic Flow*, J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng., Cilt 38, No. 4, s. 1113-1130.
- Goulas, A., Missirlis, D., Vlahostergios, Z., Yakinthos, K., 2012. *Computational Modelling of Vortex Breakdown Control on a Delta Wing*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Cilt 39, s.6-8.
- Verhaagen, N. G., 2012. *Leading-Edge Radius Effects on Aerodynamic Characteristics of 50-Degree Delta Wings*, Journal of Aircraft, Cilt.49-2, s.521-531
- Fluent Theory Manual*, Version 2009, ANSYS, Inc., April 2009
- Gordnier, R., Gursul, I., Visbal, M., 2005. *Unsteady Aerodynamics of Nonslender Delta Wings*, Progress in Aerospace Sciences, Cilt.41-7, s.515-557
- Barberis, A., Gobert, J., Mitchell, A., Molton, P., 2000. *Control of Vortex Breakdown by Along-the-Core Blowing*, AIAA-2000-2608, s.8-10.
- Lu, S. F., Wang, J. J., 2005. *Effects of Leading-Edge Bevel Angle on the Aerodynamic Forces of a Nonslender 50 Degree Delta Wing*, Aeronaut. J., Cilt 109, No. 1098, s.403-407.
- Lowson, M. V., Riley, A. J., 1995. *Vortex Breakdown Control by Delta-Wing Geometry*, Journal of Aircraft Cilt 32, No. 4, s.838-838.
- Kawazoe, H., Nakamura, Y., Ono, T., Ushimaru, Y., 1994. *Static and Total Pressure Distributins Around a Thick Delta Wing with Rounded Leading Edge*, AIAA 94-2321, 24th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, s.3-11.
- Berndt, S. B., 1949. *Three Component Measurements and Flow Investigations of Plane Delta Wings at Low Speed and Zero Yaw*, K.T.H. Aero. TN 4.
- Grid spacing calculator, <http://geolab.larc.nasa.gov/APPS/YPlus/>