

HELİKOPTER PAL UCU ŞEKİLLERİNİN AERODİNAMİK PERFORMANSA VE UÇ GİRDABINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Sinem ULUOCAK¹

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.,
Ankara
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Hooman Amiri HAZAVEH²

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

Mustafa PERÇİN³

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

M. Tuğrul AKPOLAT⁴ ve Oğuz UZOL⁵

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, farklı rotor pal ucu şekillerinin (düz, anhedral, ok açılı-tapered ve ok açılı-tapered-anhedral) askı durumundaki rotor performansına ve uç girdap karakteristiğine etkisi incelenmektedir. Performans ölçümleri için itki ve tork sensörlerinin bağlı olduğu pal ucu Mach sayısı benzerliğine göre ölçeklendirilmiş model rotor düzeneği, uç girdabı karakteristiğini incelemek içinse iki boyutlu Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme tekniği (PIV) kullanılmaktadır. Farklı kolektif ve itki değerlerinde en iyi performansı anhedral geometrisi göstermektedir. Test edilen bütün geometriler referans (düz) palden daha düşük girdap hızı, girdaplılık ve vortisite değerlerine sahiptir. Bu çalışma sonucu performans ile girdap gücü arasında ilişki olduğu görülmüştür.

GİRİŞ

Taşıma kuvvetinin oluşmasını sağlayan kanadın alt yüzeyi ile üst yüzeyi arasındaki basınç farkı, kanadın uç kısımlarında “uç girdabı” diye adlandırılan dönen hava akımları yaratır. Bu yapı, kanadın etkin alanını buna bağlı olarak oluşan taşıma kuvvetini azaltır. Sabit kanatlı hava araçlarında uç girdapları aracın gerisinde kalır. Ayrıca kanadın uç kısımlarına dik olarak yerleştirilen kanatçıklar ile girdap oluşumu ve performans kaybı azaltılır. Fakat döner kanatlı hava araçlarında girdaplar, kanatların dönme hareketini takip eder ve takip eden kanadın aerodinamik akış alanında güç gereksinimini artıran kararsız, karışık hava akımları yaratır. Bunun yanında özellikle ileri ve alçalan uçuş sırasında girdaplar hem dönme hem ilerleme hareketinden dolayı takip eden kanatlara çarpar ve girdap-kanat etkileşimi diye adlandırılan aerodinamik gürültüye sebep olur. Bu sebeplerden dolayı özellikle döner kanatlı hava araçları için uç girdabının etkilerini anlamak ve farklı pal ucu geometrileri deneyerek etkisini azaltmaya çalışmak önemli bir araştırma konusu olmuştur.

Askı durumu için yapılan performans ve sıcak tel anemometresi deneyleri ile ok açılı pal ucunun düz pal ucuna göre en az %3 performans iyileştirmesi sağladığı; ikili ok açısı verilmiş pal ucunun ise en düşük girdap hızına ve en geniş girdap çapına sahip olduğu görülmüştür [Tangler vd., 1973]. Düz, ok açılı, taper, anhedral ve bunların kombinasyonu ile yapılan performans testleri sonucu,

¹ Proje Mühendisi & Yüksek Lisans, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: sinem.ulucak@tai.com.tr, ulucak.sinem@metu.edu.tr

² Doktora Adayı, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: hooman.hazaveh@metu.edu.tr

³ Yardımcı Doçent, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: mpercin@metu.edu.tr

⁴ Doktora Adayı, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: tugrul.akpolat@metu.edu.tr

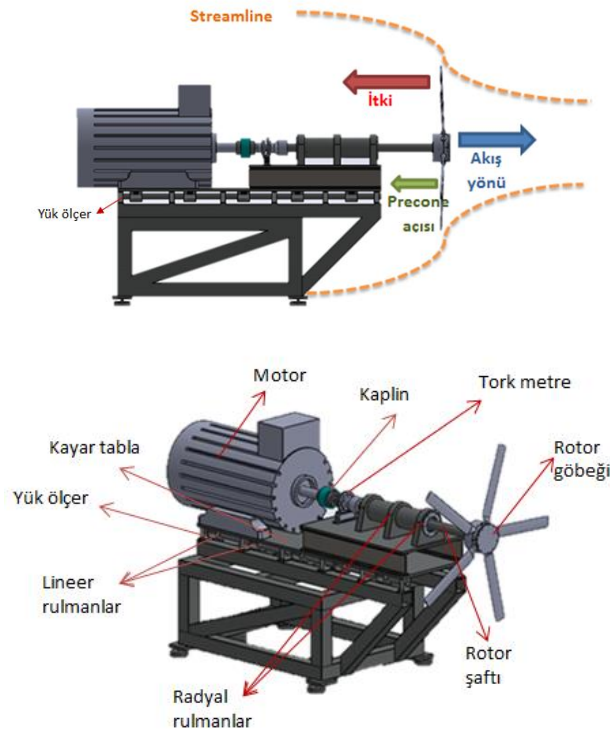
⁵ Doçent Doktor, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: uzol@metu.edu.tr

anhedral pal ucunun, askı durumunda ve düşük hızdaki ileri uçuş durumunda en iyi sonucu verdiği görülmüştür [Weller, 1979]. Farklı geometrilere sahip sabit kanatlar ile transonik rüzgar tüneline yapılan basınç ölçümleri sonucu en iyiden en kötüye performans gösteren geometriler, ok açılı+taper, ok açılı, düz ve taper olarak bulunmuştur. Ayrıca, ok açılı ve ok açılı+taper uçların girdap difüzyonunu diğerlerinden daha fazla artırdığı gözlemlenmiştir [Mullins vd.,1996]. Lazer Doppler anemometresi (LDV) ile yapılan girdap ölçümlerinde ok açılı pal ucunun eksenel ve radyal taşınım hızını azalttığı, taper geometrinin ise radyal taşınım hızını artırdığı, eksenel hızı azalttığı gözlemlenmiştir [Martin ve Leishman, 2002]. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte akış ve girdap özellikleri bütün hız alanını görmeyi sağlayan parçacıklı görüntüleme tekniği (PIV) kullanılarak gözlemlenmeye başlamıştır. Son yıllarda bu metot ile ayrıntılı girdap karakteristiği incelemeleri girdap merkezinin hareketleri [Kindler vd. 2011], [Mula vd., 2013], dinamik stall karakteristiği [Mula vd., 2013] ve aktif burulma sırasında girdap özellikleri [Bauknecht vd., 2015] gibi konularda kullanılmıştır. Bu çalışma, farklı pal ucu geometrilerinin hem performans hem girdap özelliklerine etkisini incelemektedir.

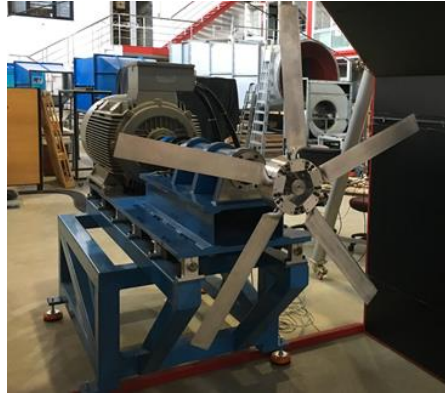
TEST DÜZENEGİ

Deney Düzeneginin Tasarımı

Bu çalışma için, açık alanda çalıştırılacak olan yatay model rotor test düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. 1.3 m çapa sahip olan 5 kanatlı rotor 200 kW gücündeki elektrik motoru ile çalışmakta ve uç Mach sayısını 0.6 yapan 3000 RPM'e kadar çıkabilmektedir. Kanat profili olarak VR-7 kodlu profil seçilmiştir. Tork ölçümü şaft üzerine takılan HBM T40B modeli torkmetre ile yapılmaktadır. İtke ölçümü için motor, şaft, rotor dahil bütün sistem kayan bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. HBM S9M model yük ölçe bu kayan tabla ile düzeneğin sabit parçası arasına monte edilmiştir. Bu şekilde rotorun oluşturduğu itke kuvveti kayan tabla ile yük ölçere iletilmekte ve kuvvet ölçümü alınmaktadır. Düzeneğin çizimi ve üretilmiş hali Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmektedir.



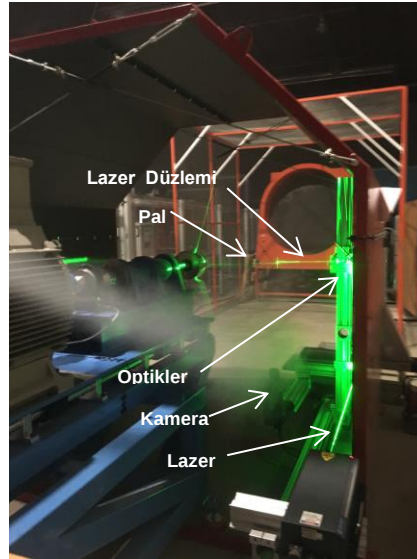
Şekil 1: Test Düzeneginin Tasarımı ve Çizimi



Şekil 2: Düzeneğin Üretilmiş Hali

PIV Düzeneğinin Kurulumu ve Özellikleri

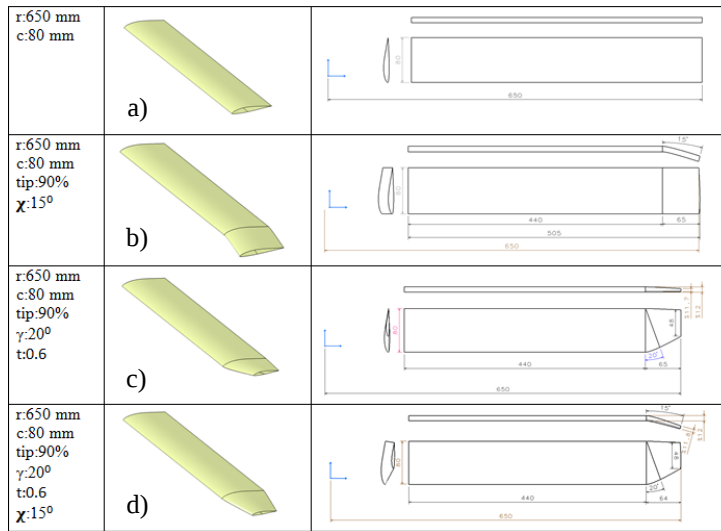
2-Boyutlu PIV düzeneği, 120 mJ/kavite enerjiye, 532 nm dalga boyuna, ve 15 kHz tekrarlama frekansına sahip Nd:YAG lazer sistemi; 2560×1600 pixels² çözünürlüğe ve tam çözünürlükte 1.5 kHz kaydetme frekansına sahip Phantom v640 kameradan oluşmaktadır. Lazer ışığını, kanadın uç kısmındaki çeyrek veterinden kesecek bir lazer düzlemine dönüştürmek için uygun optikler ve aynalar kullanılmıştır (Şekil 3). Ölçümler faz kilitleme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntem için rotor şaftına yerleştirilmiş olan "Hall-effect" sensörü kullanılarak lazer ve kamera senkronize edilmektedir. Yani lazer düzlemini yansıttığımız kanadın her geçişinde kamera görüntü almakta ve böylece aynı kanadın farklı geçiş anlarında hız alanı elde edilebilmektedir. Bu yöntem ile faz açıları değiştirilerek girdap hareketi gözlemlenebilmektedir.



Şekil 3: PIV Düzeneği

TEST MATRİSİ

Bu deney kapsamında, "anhedral", ok açısı ve taper içeren 4 farklı pal ucu test edilmiştir. (Şekil 4). 650 mm yarıçapa sahip, 80 mm veter boyu olan paller için, "anhedral" açısı aşağı yönde 15°, ok açısı geriye doğru 20° ve "taper" oranı %60 kullanılmıştır. Tasarım modifikasyonları pallerin uç %10'luk bölgesine yapılmıştır.



Şekil 4: Pal Ucu Çizimleri a)Düz b)Anhedral c)Taper d)Taper+Anhedral

Performans ölçümleri iki farklı uç Mach sayısında, beş farklı kolektif açısında her kanat ucu için yapılmıştır. (Tablo 1). Her ölçüm için 2400 örnekleme hızı ile 1 dk boyunca veri kaydedilmiştir ve her deney 5 kez tekrarlanarak ortalaması alınmıştır. Performans ölçümlerinin belirsizlik değeri %0.5'nin altındadır. PIV ölçümleri dört farklı pal ucu geometrisi için, uç Mach sayısı 0.4, kolektif açısı 16 derece iken yapılmıştır. Kanadın çeyrek veterine yansıtılan laser düzleminde oluşan girdap görüntüleri 0°-72° rotor faz açıları boyunca 6°şar derece aralıklarla, her faz için 1000 görüntü çifti alınarak kaydedilmiştir. Görüntü alanına giren ve aralarında 72° bulunan ikinci ve üçüncü palden çıkan girdaplar ile birlikte girdap özellikleri 150° faz açısına kadar takip edilebilmiştir.

Tablo 1: Performans Ölçümleri İçin Test Matrisi

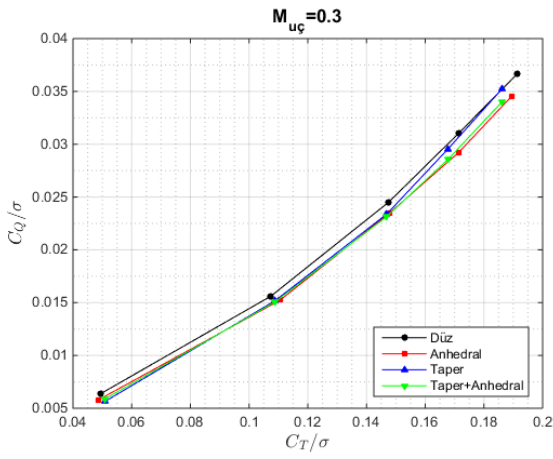
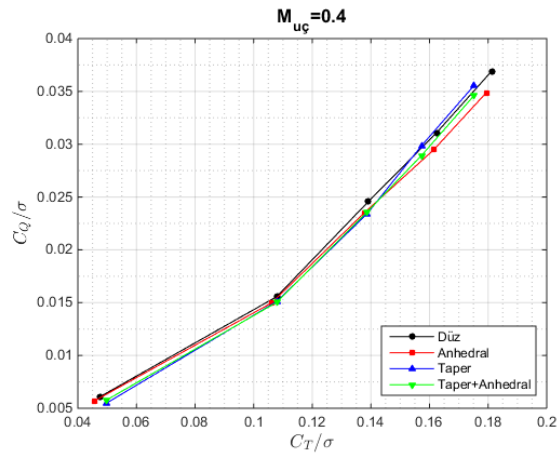
Test Modeli	Pal ucu MACH sayısı	Kolektif Açısı
“Düz”	0.3 0.4	5.8, 12, 16, 18, 20
“Anhedral”		
“Taper”		
“Taper + Anhedral”		

DENEYSEL SONUÇLAR

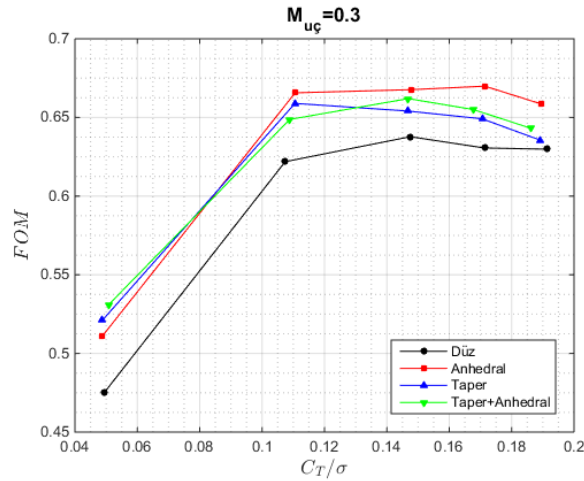
Performans Sonuçları

Grafikler, farklı geometrilerin pal alanında oluşturduğu farklılıkları ortadan kaldırmak için itki ve tork katsayılarının katılık değerine(σ) oranı şeklinde sunulmuştur. Performans grafikleri itki katsayısının tork katsayısına göre değişimi olarak verilmiştir.

Şekil 5'te farklı pal geometrilerinin performans davranışının düşük itki kuvvetlerinde birbirine çok yakın ve referans palden daha iyi olduğu görülmektedir. Yüksek itki kuvvetlerine yaklaştıkça taper geometrinin performansı düşmekte ve referans pal ile eşit konuma gelmektedir. Mach sayısı arttıkça (Şekil 6) geometrilerin itki vs. tork eğrisi referans pale yaklaşmaktadır yani genel olarak bütün pallerde performans düşüşü gözlemlenmiştir. Bu düşüşün VR-7 profilinin Mach sayısı ile ilgili karakteristiğinden dolayı olduğu düşünülmektedir. Taper profile görülen yüksek itki değerlerindeki performans düşüşü burada da görülmekte olup referans palden daha kötü bir performans sergilemektedir. İki grafiğe de bakarak bütün kolektif açılarında yani pal yüklemelerinde anhedral geometrisinin performansının en iyi olduğu görülmektedir.

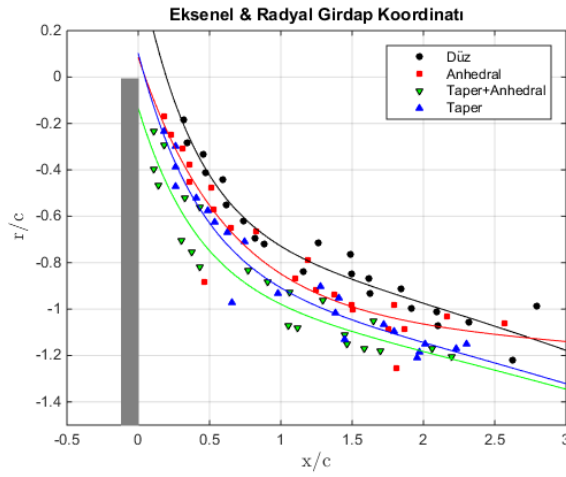
Şekil 5: C_T/σ vs. C_Q/σ , $M_{uç} = 0.3$ Şekil 6: C_T/σ vs. C_Q/σ , $M_{uç} = 0.4$

Aynı pal yüklemesine sahip rotorlar için karşılaştırma parametresi olarak kullanılan Figure of Merit (FOM), bütün geometriler birbirine yakın itki (C_T/σ) değerlerinde olduğu için hesaplanabilmektedir. Buradan da yaklaşık 0.03 FOM artışı ile en fazla performans artışını anhedral geometrinin sağladığı görülmektedir. (Şekil 7). FOM değerlerindeki belirsizlik ortalama %0.3 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 7: C_T/σ vs. FOM , $M_{uç} = 0.3$

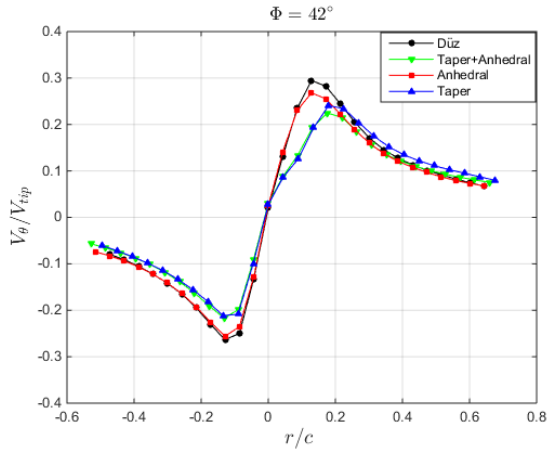
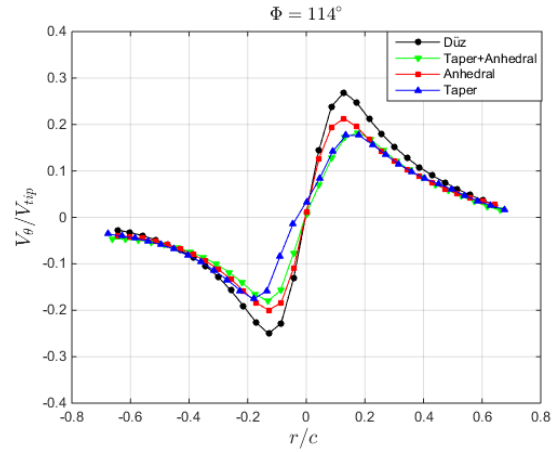
PIV Sonuçları

Her pal geometrisi için çizdirilen girdap pozisyonları grafiğinden (Şekil 8), girdapların düşük faz açılarında daha çok radyal ekseninde, yüksek faz açılarında ise daha çok aksel yönde ilerlediği gözlemlenmektedir. Uç modifikasyonlarının ise girdap pozisyonunu önemli ölçüde değiştirdiği Şekil 8'de görülmektedir. Modifikasyonlar sonucu girdap radyal taşıma hızı artarken, aksel taşıma hızı azalmıştır.

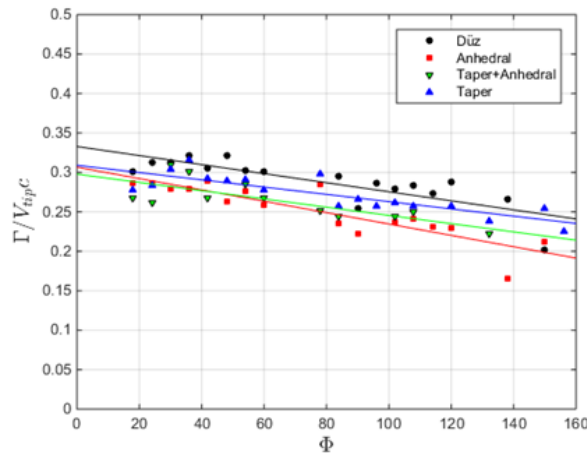


Şekil 8: Eksenel ve Radyal Girdap Koordinatları

Girdap hız profilleri iki farklı faz açısı için (42° ve 114°) çizdirilmiştir. Beklendiği gibi bütün geometriler için faz açısı arttıkça girdap difuz olmakta ve maksimum girdap hızı azalmaktadır (Şekil 9 ve Şekil 10). Pal ucu etkilerini incelediğimizde ise anhedral profilin maksimum girdap hızını %20'ye, taper ve taper+anhedral geometrilerin ise %30'a kadar azalttığı görülmektedir.

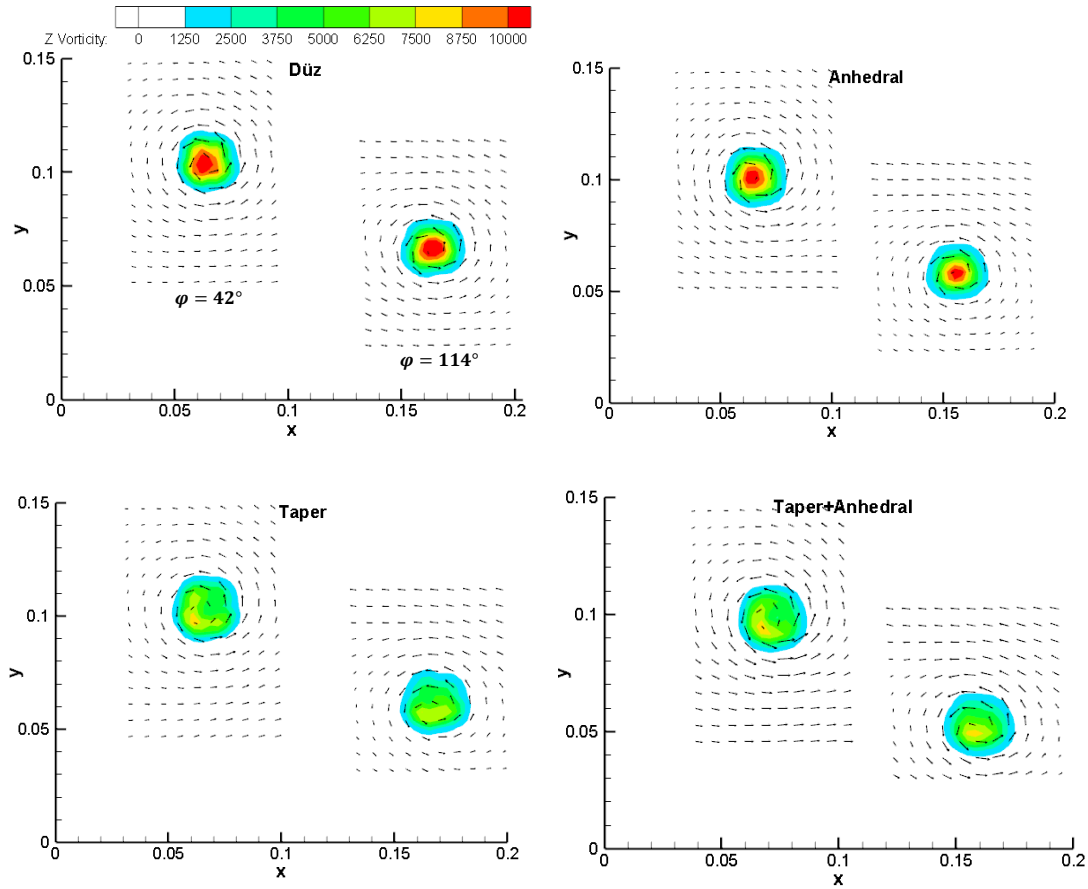
Şekil 9: Girdap Hız Profilleri, $\varphi = 42^\circ$ Şekil 10: Girdap Hız Profilleri, $\varphi = 114^\circ$

Diğer bir girdap parametresi olan girdaplılık değerleri incelendiğinde, faz açısı arttıkça girdaplılık değerinin azaldığı görülmektedir. En fazla anhedral geometride olmak üzere pal ucu modifikasyonlarının girdaplılık değerini azalttığı görülmektedir (Şekil 11).



Şekil 11: Girdaplılık Değerleri

Şekil 12’de ise bütün geometriler için vortisite konturları iki faz açısı için çizdirilmiştir. Taper ve Taper+Anhedral profillerin önemli ölçüde vortisiteyi azalttığı, daha difuz yapıda bir girdap oluşturduğu görülmektedir. Bu bulgular maksimum girdap hızının azalması ile aynı doğrultudadır.



Şekil 12: $\varphi = 42^\circ$ ve 114° için Vortisite Konturları

SONUÇ

Bu çalışmada farklı pal ucu geometrilerinin rotor performansına ve girdap karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Bütün geometriler düşük itki kuvvetlerinde referans palden daha iyi performans göstermekle birlikte, yüksek itki değerlerinde en iyi performansa sahip pal geometrisi anhedral olarak bulunmuştur. Farklı geometrilerin girdap ilerleyişini değiştirdiği, girdap hızını, girdaplılık ve vortisite değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. En iyi performans sonucunu veren anhedral profilin aynı zamanda en düşük girdaplılık değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma DKTM/2015/13 nolu proje kapsamında yapılmaktadır. Katkılarından dolayı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ) -Döner Kanat Teknoloji Merkezine (DKTM) ve TUSAŞ-Helikopter grubuna teşekkür ederiz.

Kaynaklar

James L Tangler, Robert M. Wohlfeld, and Stan J Miley.,1973.An Experimental Investigation Of Vortex Stability, Tip Shapes, Compressibility, And Noise For Hovering Model Rotors.

W. H. Weller., 1979. Experimental Investigation of Effects of Blade Tip Geometry on Loads and Performance for an Articulated Rotor System William.

- Baxter R Jr Mullins, Dudley E Smith, Curtis B Rath, and Sherry L Thomas.,1996. Helicopter Rotor Tip Shapes For Reduced Blade-Vortex Interaction - An Experimental Investigation.
- Preston B Martin, Moffett Field, and J Gordon Leishman. 2002. Trailing Vortex Measurements In The Wake of a Hovering Rotor Blade.
- K. Kindler, K. Mulleners, H. Richard, B. G. Van Der Wall, and M. Raffel, 2011 “Aperiodicity in the near field of full-scale rotor blade tip vortices,” pp. 1601–1610.
- S. M. Mula, J. H. Stephenson, C. E. Tinney, and J. Sirohi, ,2013. “Dynamical characteristics of the tip vortex from a four-bladed rotor in hover”.
- A. Bauknecht, B. Ewers, O. Schneider, and M. Raffel, 2015. “Aerodynamic results from the STAR hover test: An examination of active twist actuation,” Proc. 41st Eur. Rotorcraft Forum.
- M. R. C. Christian Wolf, Johannes N. Braukmann, Wolfgang Stauber, Till Schwermer, 2018. “The Tip-Vortex System of a Four-Bladed Rotor in Dynamic Stall Conditions,” Ahs.