

DÖNER KANATLAR İÇİN YER ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Göktuğ Koçak¹ ve Volkan Nalbantoğlu²
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, A.Ş., Ankara

Mehmet Metin Yavuz³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, döner kanatlar için yer etkisinin genel akış yapısını nasıl değiştirdiği deneysel akışkanlar dinamiği çalışmaları ile incelenmiştir. Rotor, askı durumunda yer etkisinde tam, kısmi ve eğik olmak üzere ve yer etkisinin dışında olarak test edilmiştir. Disk boyunca olan aşağı akış, Laser Doppler Anemometry (LDA) tekniğiyle farklı konumlarda ölçülmüştür. Bunun yanı sıra, her senaryo için lazer aydınlatmalı duman görüntüleme yapılmıştır. Deneylerin amacı rotorun çalıştığı durumda oluşan karmaşık akış yapıları hakkında hem nicel hem de nitel olarak bilgi edinmektir. Sonuçlar, yer etkisinde çalışan rotorun, etki dışında çalışan rotora göre daha düşük hızlarda aşağı akış oluşturup pal ucunda daha küçük boyutlarda girdaplara sahip olduğunu göstermektedir.

GİRİŞ

Yer etkisi yere yakın çalışma koşullarında ortaya çıkan aerodinamik bir olaydır. Sadece hava araçları değil yere yakın uçan her şey bu etkiyi hisseder. Yer etkisi sırasında oldukça karmaşık etkileşimler görülür. Bu etkileşimler girdapların birbiriyle olan etkileşimleri, yere yaklaşan aşağı akışın hem nicel hem de nitel yönden değişmesi ve doğası itibarıyla 3 boyutlu olan akış rejiminin etkisiyle gerçekleşir. Helikopterlerin askı durumunda uçabilmesi onları özel kılan başlıca sebeplerden biridir. Neticede askı durumunda uçan bir helikopter yere yakın konumdayken yer etkisine maruz kalmaktadır. Literatüre baktığımızda yer etkisinin doğasını anlamaya yönelik hem deneysel hem de hesaplamalı birçok çalışma bulunmaktadır [Griffiths & Leishman, 2002], [Iboshi, Itoga, Prasad, & Sankar, 2008]. Helikopterlerin yer etkisine maruz kalması için yüksekliğinin (h), rotor diski yarıçapı (R) cinsinden $2xR$ 'dan düşük olması genel kabuldür [Cheeseman & Bennett, 1957], [Leishman, 2006]. Yer etkisi dışında ve yer etkisi içinde sırasıyla OGE (out of ground effect) ve IGE (in ground effect) ile kısaltılır.

Şekil 1'de rotor pali üzerindeki bir elemanın hızları, bu hızların oluşturduğu açılar ve de oluşan kuvvetler gösterilmiştir [Seddon & Newman, 2011]. Pal elemanı üzerindeki açılar θ , α ve ϕ sırasıyla pilotun kontrol ettiği geometrik pal açısı, etkin hücum açısı ve de aşağı akış açısını temsil etmektedir. dT , dL , dD ve dH sırasıyla itki, taşıma, sürüklenme ve H kuvvetlerini, dQ ise torku göstermektedir. Son olarak V_C ve V_i hızları sırasıyla tırmanma ve aşağı akış hızlarını göstermektedir. Askı durumunda helikopterlerin tırmanma hızı olmadığı için V_C hızı sıfırdır.

Aşağı akan havanın önünde yer katı ve geçilemez bir sınır olarak bulunmaktadır. Bu katı sınır, akışın karakterini değiştiren başlıca etkendir. [Griffiths & Leishman, 2002]'de özetlendiği gibi bu sınırdan geçemeyen havanın hızı yere yaklaştıkça azalmaktadır. Aşağı akışın azalmasıyla, aşağı akış açısı (ϕ) da azalmaktadır. Sabit geometrik pal açısı (θ) için bu açının (ϕ) azalması pallerin etkin hücum açısını (α) arttırmaktadır. Dolayısıyla rotor diski daha düşük aşağı akış gücüne ihtiyaç

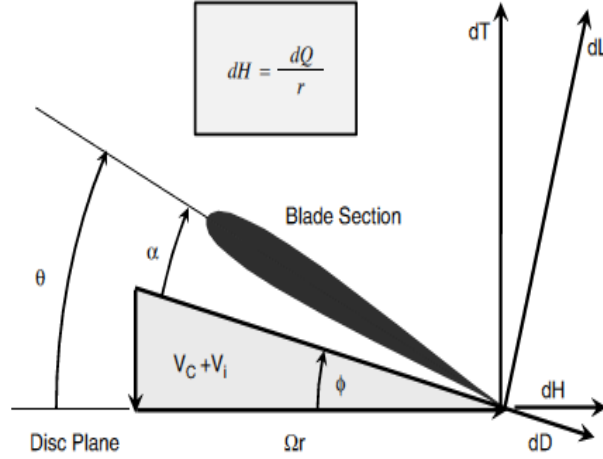
¹ Tasarım Mühendisi, Helikopter Grubu, Uçuş Mekaniği ve Otopilot Sistemleri Müdürlüğü, goktug.kocak@tai.com.tr

² Direktör, Helikopter Grubu, volkan.nalbantoglu@tai.com.tr

³ Doçent, Makine Müh. Bölümü, ymetin@metu.edu.tr

duymaktadır. Ayrıca pallerin kendi profil güç ihtiyaçları artmaktadır. Ancak toplamda rotor diskinin askı durumunda ihtiyaç duyduğu güç ihtiyacı düşmektedir. Özetle helikopterler yere yakın konumda daha verimli uçmaktadır.

Bunun yanı sıra yer etkisi içinde olan rotor diskinin çalıştığı bölgenin etrafındaki duvarların performans etkisi [Iboshi, Itoga, Prasad, & Sankar, 2008]'de detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, rotor yer etkisindeyken yanal ve boylamsal duvar aralığının $6xR$ 'den düşük olması halinde, rotor performans değerlerinin değiştiği rapor edilmiştir. Bu bilgiyi referans alarak bu deneysel çalışmada kullanılan askı odasının boyutları belirlenmiş ve rotor performansının duvar etkisinden etkilenmemesi için yanal ve boylamsal duvar aralıkları $10xR$ 'ye yakın olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 1: Pal elemanı hızları ve oluşan kuvvetler [Seddon & Newman, 2011]

YÖNTEM

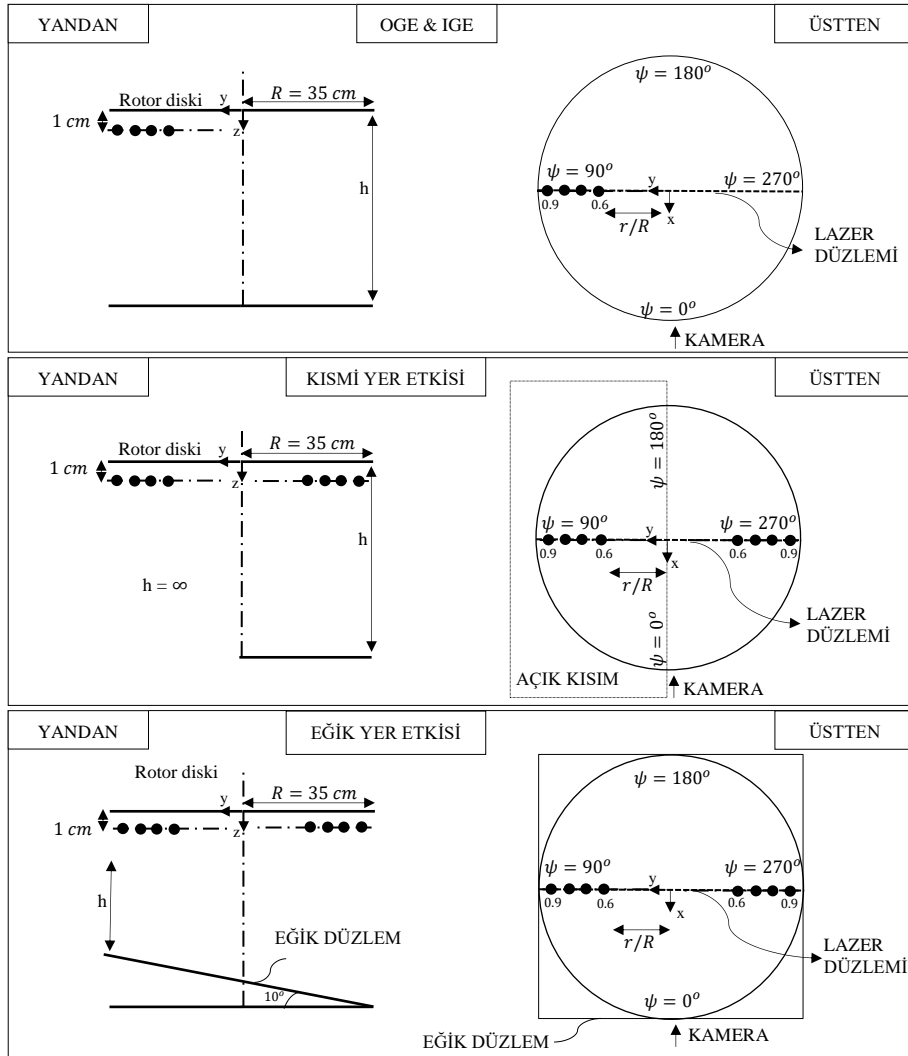
Deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında kurulan bir düzenekte yapılmıştır. Deney düzeneği askı odası ve bu odanın tam ortasında askı durumunda çalışan model rotordan oluşmaktadır. Rotor özellikleri ile ilgili olan parametreler, test koşulları ve de düzeneğe ilgili olan diğer parametreler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Tüm pallerin açısı 5 dereceye ayarlanmıştır. Dijital açı ölçer yardımıyla pallerin kolektif açıları kontrol edilmiştir. Model parçaları rotor, paller, oynar disk ("swashplate"), linkler, fırçasız ("brushless") ve servo motorlar, dişliler ve rulmanlar olarak özetlenebilir. Çatıdan etkilenmemek adına test düzeneğinin üstü açık bırakılmıştır.

Çizelge 1: Test düzeneği parametreleri ve detay bilgileri

| | |
|---------------------------|-------------------|
| Pal Sayısı | 4 |
| Rotor Yarıçapı (R) | 35 cm |
| Pal Yunuslama Açısı | 5 derece |
| Rotor Hızı | 927 rpm |
| Rotor Mafsalı | Menteşesiz |
| Kanat tipi | Simetrik |
| Oda Boyutları | 3 x 3 x 2.2 metre |
| LDA Ölçüm Noktaları (r/R) | [0.6 0.7 0.8 0.9] |
| Dönüş Yönü | Saat yönünde |

Rotor şaftı, düzeneğin ortasında yer alan ve düzeneğe kenetli olan bir başka şaftta 3 farklı vida ile sıkıca tutturulmuştur. İstenilen yükseklik, vidaların sökülmesiyle serbest kalan rotor şaftının düz bir oluk içerisinde yukarı ve aşağı hareketi ile ayarlanmaktadır. Kısmi yer etkisi deneyleri için yer düzleminde çıkarılabilen bir plaka bulunmaktadır. Eğik yer etkisi rotorun altına 10° eğimi sağlayacak şekilde başka bir plakanın yerleştirilmesiyle canlandırılmıştır. Deneyler rotor göbeği yüksekliği yer etkisi içi $1xR$ ve yer etkisi dışı $2xR$ olacak şekilde yapılmıştır. Bu çalışmada nicel ve

nitel deneyler, akışkanlar mekaniği ölçüm tekniklerinden olan lazer aydınlatmalı duman görüntüleme ve LDA ile yapılmıştır. Sınır tabakası, akış gelişimi, uçta ve pal boyunca oluşan girdaplar gibi akış alanında oluşan yapıların görüntülenmesi amacıyla seçilen düzlemler lazer ile aydınlatılmıştır. Akış görüntüleri, bu düzleme bakan Nikon d90 marka bir kamerayla alınmıştır. Şekil 2’de akış görüntüleme şematigi, rotor boyutları ve azimut açıları özetlenmiştir. Ayrıca lazer düzlemi ve kamera pozisyonu gösterilmiştir. Nicel ölçümlerde kullanılan LDA, akış alanına müdahale etmeyen, mutlak ve tek noktada ölçüm yapan bir hız ölçme tekniğidir. Bu teknik “Doppler etkisi (kayması)” prensibini kullanmaktadır. Eşit yoğunlukta ve frekansları arasındaki fark bilinen 2 farklı lazer ışını ölçüm alınmak istenen noktada kesiştirilir. Aynı zamanda ortam duman ile beslenir. Duman içerisindeki tanecikler ölçüm noktasından geçerken lazer ışınlarını dağıtmaktadır. Dağılan lazer Doppler frekans bilgisini taşımaktadır. Frekansta oluşan kayma bilgisi hıza orantılı olduğu için, hızı mutlak olarak ölçmek mümkündür. LDA tekniği ile ilgili daha fazla bilgi ve detaylar [Dantec Dynamics, 2016]’da bulunabilir. Şekil 2’de ayrıca LDA ölçüm noktaları gösterilmiştir. Tüm senaryolar için ölçümler radyal uzaklık $0.6xR$ ve $0.9xR$ noktaları arasında $0.1 xR$ aralıklarla yapılmıştır. Rotor akış izinin diskten geçtikten sonra çok hızlı bir şekilde büzülmesinden ötürü tutarlılık anlamında ölçüm noktaları her radyal konum için daima pallerin 1 cm altında olacak şekilde yapılmıştır. Minimum 2 kHz de veri toplanmıştır. Duman, askı odasının yan al açıklığı ve de Şekil 2’de görülen $\psi = 90^\circ$ ve $\psi = 270^\circ$ azimut açıları boyunca uzanan bir boru ile odaya beslenmiştir. Boru üzerinde açılan deliklerden duman, rotorun çalışmasıyla birlikte diske doğru sızmaktadır. Bu haliyle duman besleme sırasında oluşması muhtemel türbülansın ve akışa dışarıdan müdahalenin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Her deneyden önce daimi olan akış şartlarına ulaşmak için rotorun çalışmasından itibaren 15-30 saniye süreyle beklenmektedir.



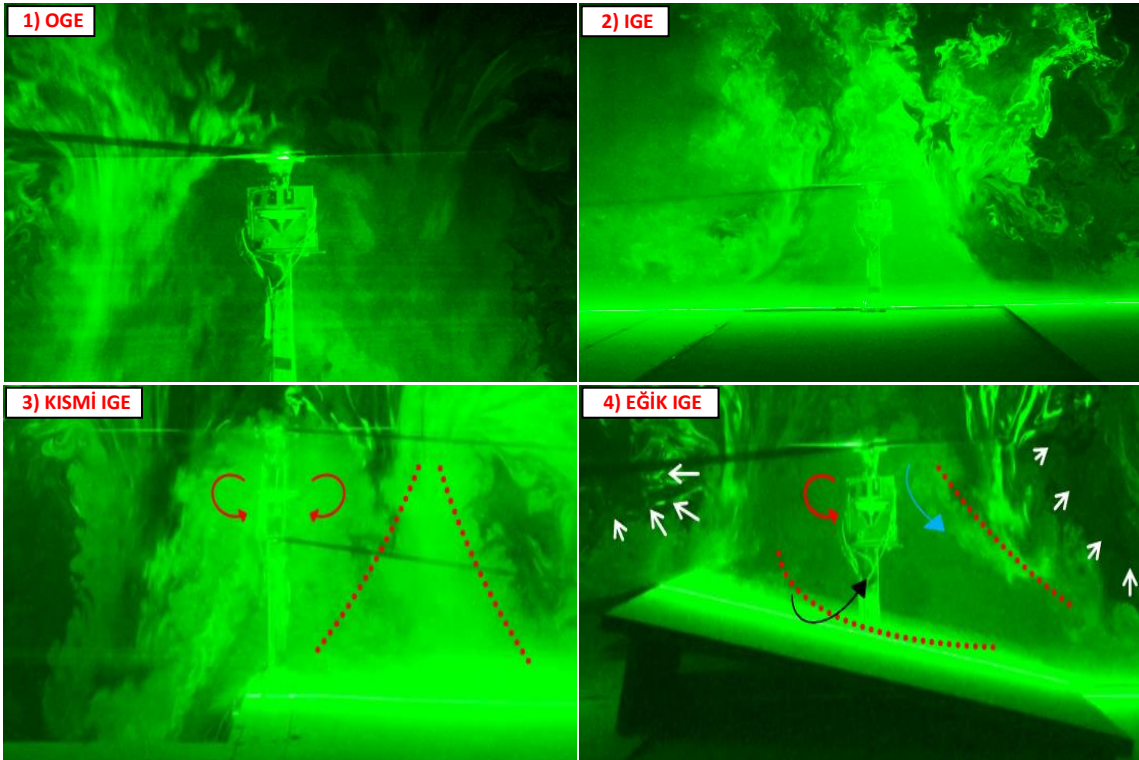
Şekil 2: Akış görüntüleme ve LDA ölçüm şematikleri

UYGULAMALAR

Çalışmadaki deneylerde yükseklik yer etkisi dışındakiler için $h = 2xR$, yer etkisi içindkiler içinse $h = 1xR$ olarak ayarlanmıştır. Şekil 3'de rotor yer etkisi dışında (1), tamamen yer etkisi içinde (2), kısmi yer etkisi içinde (3) ve de eğik yer etkisi içinde (4) yakalanan lazer aydınlatmalı duman görüntüleri bulunmaktadır.

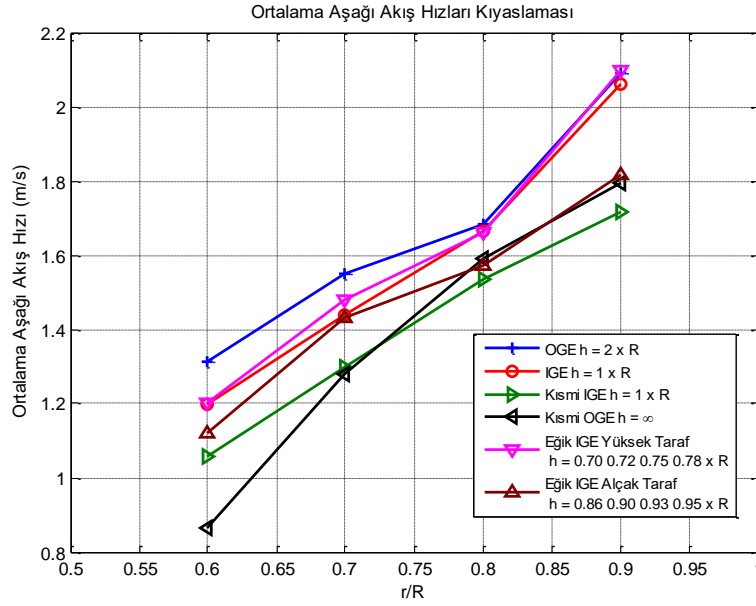
Uçta oluşan girdaplar performansı oldukça etkileyen yapılardır. Bunun sebebi girdapların oluştuğu radyal noktadan sonra palin taşıma kuvveti üretememesi ve yüksek sürüklenme kuvvetine maruz kalmasıdır. Yer etkisi içerisinde bu girdapların büyüklüğünde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, yer etkisi dışındaki senaryo (1) için, uçta oluşan girdapların dikey bir yol izlerken, yer etkisi içerisindeki senaryoda (2) girdapların, yerin oluşturduğu geçilmez katı sınır nedeniyle kavisli bir yol izlediği görülmektedir. Yere çarptıktan sonra rotorun akış izi sınır tabakaları yaratmakta ve radyal olarak dışarı doğru hareket etmektedir. En nihayetinde bu sınır tabakalarının yer yüzeyinden koptuğu görülmektedir. Kısmi yer etkisi senaryosu (3) akış izinin hem yer etkisi dışında (1) hem de tamamen yer etkisi içinde (2) oluşan akış izlerinin özelliklerini taşıdığı görülmüştür.

Başka bir deyişle sol tarafta oluşan akış alanı girdapların yapısı da dahil olmak üzere (1)'in özelliklerini taşımaktadır. Kırmızı kesik çizgilerle kısmi yer etkisindeki akış izi canlandırılmıştır. Sağ tarafta yere çarpan akışla birlikte girdapların yok olup sınır tabakasına katıldıkları saptanmıştır. Ayrıca bu senaryo (3) için rotor merkezinde birbirine ters yönde dönen kırmızı oklar ile gösterilmiş olan 2 büyük girdap oluşmaktadır. Senaryo 4'te eğik yer etkisi içinde uç kısımlarında oluşan girdaplar beyaz oklarla gösterilmiştir. Eğik yer etkisinin en belirgin özelliği girdapların yönünün etkilenmesi olarak belirtilebilir. Sol taraftaki yüksek kısım yüzünden girdaplar sağ taraftaki alçak kısma göre daha eğik bir akış çizgisi takip etmektedir. Bu senaryoda (4) merkezde kırmızı ok ile gösterilen sadece bir tane büyük girdap oluşmaktadır. Sol tarafta merkeze yakın siyah ok ile gösterilen akış yere çarptıktan sonra sağ tarafta mavi ile gösterilen aşağı akışla birleşmekte ve kesik çizgilerle gösterilen akış modelini oluşturmaktadır.



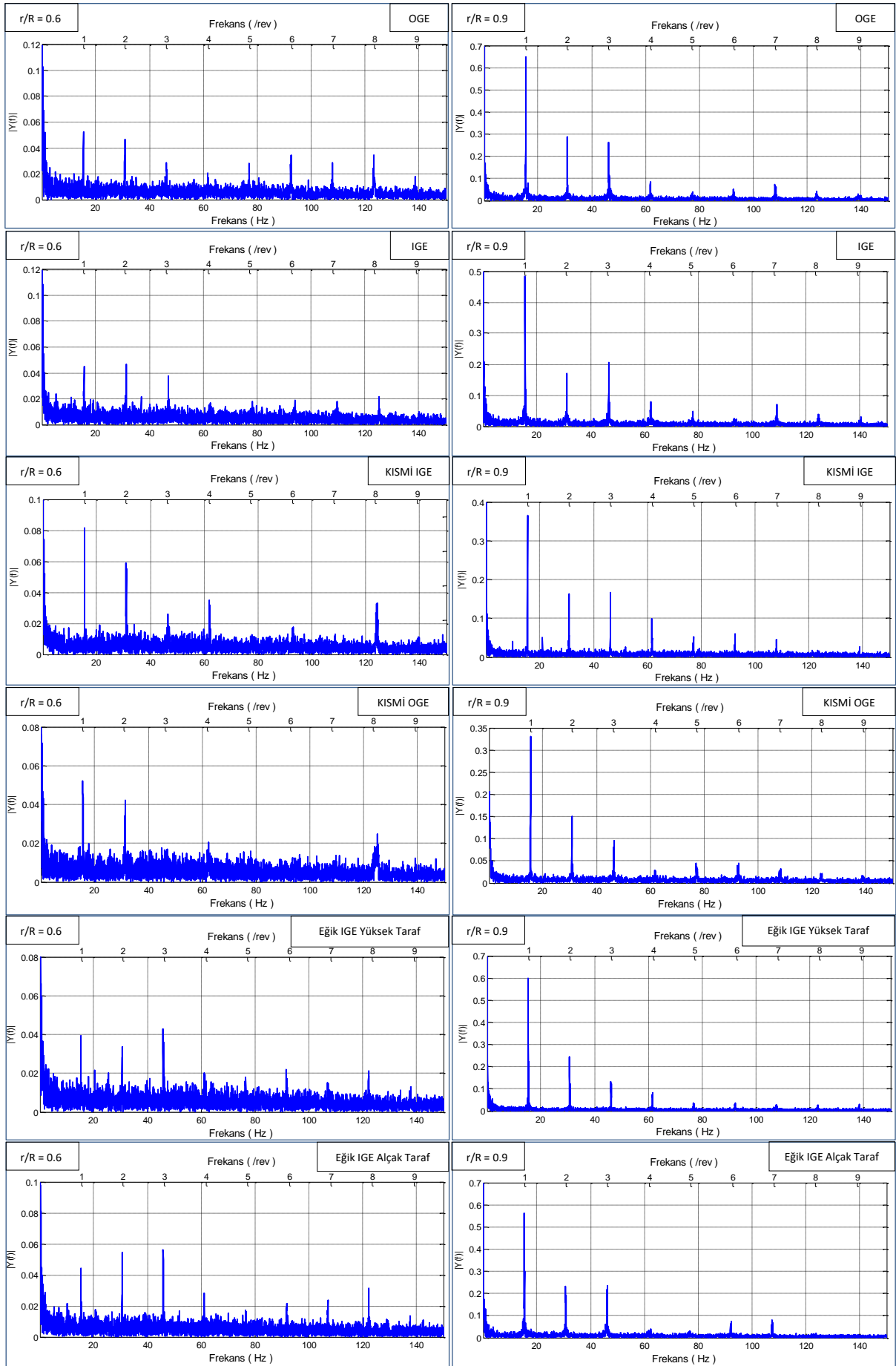
Şekil 3: Akış görüntüleri ve uçta oluşan girdapların izlediği yol 1) $2xR$ rotor yüksekliğinde tamamen yer etkisi dışında, 2) $1xR$ rotor yüksekliğinde tamamen yer etkisi içinde 3) $1xR$ rotor yüksekliğinde kısmi yer etkisi içinde, 4) $1xR$ rotor yüksekliğinde eğik yer etkisi içinde

Şekil 4 LDA tekniği ile elde edilmiş tek nokta hız ölçümlerinin ortalama değerlerinin radyal uzunluk boyunca nasıl değiştiğini her bir yer etkisi durumu için göstermektedir. Şekil 4 detaylı incelendiğinde aşağı akış ortalama hızlarının pal ucuna doğru artmakta olduğu görülmektedir. Bu istikrarlı yükselişin her bir yer etkisi durumu için geçerli olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra rotor yer etkisine maruz kaldığında aşağı akışının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu düşüş miktarı pal ucuna doğru gittikçe azalmaktadır. Tüm senaryolar içerisinde sadece eğik IGE senaryosunun yüksek tarafında (pembe) yer etkisine bağlı olarak aşağı akışın azalması tespiti geçersiz gözükmemektedir. Uca doğru gittikçe eğik düzlemin yüksekliğinin artmasıyla pallerin yüksekliği düşmektedir. Dolayısıyla aşağı akışın düşmesi beklenmektedir. Ancak radyal yöndeki aşağı akış artışı yer etkisine baskın gelmekte ve de aşağı akışın yükseklik düşmesine rağmen artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4: Ortalama aşağı akış hızı kıyaslaması

Şekil 5'de sırasıyla yer etkisi dışında ve içinde yapılan LDA ölçümlerinin spektral analiz sonuçları pal üzerindeki en içteki ve en uçtaki ölçüm noktalarından $0.6xR$ ve $0.9xR$ için verilmiştir. Farklı radyal konum noktaları arasındaki karşılaştırmalar yapılırken spektral analiz sonuçlarının skalalarının farklı olduğu göz önüne alınmalıdır. Genel olarak tüm senaryolar için de en baskın frekansın 1/rev frekansı olduğu ve pal ucuna doğru ilerlerken baskın frekanslardaki spektral büyüklüklerin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. 1/rev, 2/rev ve 3/rev frekansları farklı güçlerde de olsa yine tüm senaryolar için en baskın frekanslardır. OGE ve IGE koşullarının spektral analiz sonuçları dağılım olarak benzer olup IGE koşulunda 1/rev frekansının büyüklüğünde bir miktar düşme görülmektedir. Kısmi IGE koşulu IGE koşulu ile karşılaştırıldığında 1/rev ve 2/rev frekanslarının kısmi IGE için $r/R = 0.6$ noktasında güçlendiği $r/R = 0.9$ noktasında ise zayıfladığı görülmüştür. Kısmi OGE koşulu OGE koşulu ile $r/R = 0.6$ noktasında karşılaştırıldığında 1/rev ve 2/rev frekansları büyüklük olarak benzerdir ancak OGE koşulunda görülen 3/rev frekansı kısmi OGE koşulunda etkisini kaybetmiştir. Bu iki senaryo $r/R = 0.9$ noktasında kıyaslandığında frekansların büyüklüklerinde kısmi OGE koşulunda ciddi bir düşüş yaşanmıştır. Örneğin 1/rev frekansının büyüklüğü yarı yarıya azalmaktadır. Eğik IGE yüksek tarafta $r/R = 0.6$ noktasında IGE koşulu ile oldukça benzerdir. 1/rev ve 2/rev frekansları $r/R = 0.9$ noktasında IGE koşuluna göre bir miktar güçlenirken 3/rev frekansı zayıflamıştır. Yine bu nokta da eğik IGE alçak tarafta ise 1/rev, 2/rev ve 3/rev frekanslarının hepsi IGE koşuluna göre güçlenmiştir.



Şekil 5: LDA spektral analiz sonuçları

SONUÇ

Yürütülen çalışma sonucunda yer etkisine giren rotorun aşağı akışında hem nicel hem de nitel yönden değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Nicel yönden yer etkisi içinde pal uç kısmında oluşan girdapların büyüklük olarak küçüldüğü ve de rotor diskinin altında izlediği yolun değiştiği ayrıca yer etkisi dışında akış izinin büzülerek nispeten dikey bir yol izlediği, yer etkisinde ise katı yer sınırı nedeniyle radyal yönde dışarıya doğru itilerek sınır tabakaları oluşturduğu görülmüştür. Kısmi yer etkisi durumu hem yer etkisi dışı hem de yer etkisi içi akış izlerinin özelliklerini taşımaktadır. Eğik yer etkisi içerisinde düzlemin eğimi girdapların izlediği yolu ciddi şekilde değiştirmektedir. Tüm senaryolarda akış daimi olmayıp oldukça karmaşık bir yapıdadır. Nitel olarak aşağı akışın uç kısmına doğru hem yer etkisi içerisinde hem de dışında arttığı doğrulanmıştır. İç kısımda elde edilen akış frekanslarının spektral büyüklükleri uç kısımdakilerin değerlerine göre oldukça düşüktür. Aşağı akış dinamikleri incelendiğinde en baskın frekansın 1/rev olduğu saptanmıştır.

Kaynaklar

- Cheeseman, I. C., & Bennett, W. E. (1957). *The Effect of the Ground on a Helicopter Rotor in Forward Flight*. London: Ministry of Supply Aeronautical Research Council Reports and Memoranda.
- Dantec Dynamics. (2016, 5 5). Dantec Dynamics Web Site: <http://www.dantecdynamics.com/laser-doppler-anemometry> adresinden alındı
- Griffiths, D., & Leishman, J. (2002). A Study of Dual-Rotor Interference and Ground Effect Using a Free-Vortex Wake Model. *American Helicopter Society International*. Montréal.
- Iboshi, N., Itoga, N., Prasad, J., & Sankar, L. (2008). Ground effect of a Rotor Hovering above a Confined Area. *American Helicopter Society*.
- Leishman, J. G. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics 2nd ed.* Cambridge University Press.
- Padfield, G. (2007). *Helicopter Flight Dynamics*. Blackwell Publishing.
- Peters, D. A., & He, C. J. (1995). Finite State Induced Flow Models Part II: Three-Dimensional Rotor Disk. *Journal of Aircraft*, 323-333.
- Seddon, J., & Newman, S. (2011). *Basic Helicopter Aerodynamics*. John Wiley & Sons Ltd.