

ROTOR TEST KULESİNDE HAFİF SINIF HELİKOPTER ANA ROTORU AKUSTİK ÖLÇÜM TESTLERİ ve PAL KALINLIK GÜRÜLTÜSÜ ANALİZ ARACI GELİŞTİRİLMESİ

Arda YÜCEKAYALI¹, Ufuk BAŞLAMİŞLİ², Erdem AYAN³
TUSAŞ
Ankara

ÖZET

Toplam kalkış ağırlığı 300-500kg arası helikopterler için tasarlanmış, 6 metre çapındaki ana rotor için TAI Rotor Test Kulesinde akustik ölçümler yapılmıştır. Çeşitli test senaryolarında toplam 8 adet mikrofon ile ölçüm alınmış, farklı gürültü tiplerinin baskın yayılım yönleri ve frekansları incelenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında ölçülen rotor toplam gürültü ve gürültü frekans spektrumunun, sıfır rotor itkisinde değişen dönüş hızı, sabit dönüş hızında değişen kolektif açıları ve sabit dönüş hızı ile sabit kolektif açısında değişen ölçüm mesafesi ile değişimleri incelenmiştir. Farklı senaryo test sonuçlarından pal kalınlık gürültüsü ayrıştırılmaya çalışılmış ve karakteri incelenmiştir. Ffowcs Williams-Hawkings denklemini pal kalınlık gürültü tipinin tahmini için çözen bir analiz aracı geliştirilmiş, Rotor Test Kulesi test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın asıl amacı, helikopter ana rotor toplam gürültüsünün ve kaynaklarının daha iyi anlaşılabilmesi, pal kalınlık gürültüsü karakterinin incelenebilmesi, tahmini için bir analiz aracı geliştirilmesi ve akustik ölçüm kabiliyeti kazandırılan TAI bünyesindeki Rotor Test Kulesinde yapılan testler ile geliştirilen analiz aracının doğrulanmasıdır.

GİRİŞ

Helikopter dış gürültüsü incelendiğinde, motor, farklı hızlarda çalışan dişli kutuları, ana ve kuyruk rotor gibi alt bileşenlerden oluşan hemen hemen her frekans değerinde gürültülerin birleştiği gözlemlenmektedir [Magliozzi, 1975]. Bu kapsamda motor gürültüsünün ana rotor gürültüsü yanında ihmal edilebilir olduğu [Gounet, Lewy, 2012], dişli kutu gürültülerinin aero-akustik gürültüsü olmadığı [George, 1977] kabul edildiğinde, helikopter toplam dış gürültüsünün baskın kaynaklarının ana ve kuyruk rotorlar oldukları değerlendirilmektedir [Schmitz, 2007]. Dolayısıyla, rotor gürültü karakterinin incelenebilmesi ve belirlenebilmesi için uygun test ve analiz kabiliyetlerinin elde edilmesi önemli değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada hafif sınıf helikopterler için tasarlanmış ana rotor, gürültü karakterinin incelenebilmesi için Rotor Test Kulesinde test edilmiştir. Helikopter ana rotorlarının geniş bir frekans aralığında aerodinamik gürültü ürettiği bilinmektedir [Snider, 2013]. Bu kapsamda, farklı frekans bantlarında baskın olan gürültü tiplerinin incelenebilmesi için çeşitli test senaryolarında gürültü ölçümleri alınmıştır. Oluşturulan mikrofon sırası ile belirli gürültü tiplerinin baskın yayılım yönleri incelenmeye çalışılmıştır. Farklı senaryo ve mikrofon ölçüm sıraları ile pal kalınlık gürültüsü ayrıştırılmaya çalışılmış, baskın yayılım yönü ve dönüş hızı, mesafe ve dinleyici pozisyonu ile nasıl değiştiği incelenmiştir.

¹ Tasarım Uzmanı, E-posta: ayucekayali@tai.com.tr

² Tasarım Mühendisi, E-posta: ubaslamisli@tai.com.tr

³ Tasarım Uzmanı, E-posta: eayan@tai.com.tr

Ffowcs Williams-Hawkings denklemini, pal kalınlık gürültüsü için modelleyen ve çözen bir analiz aracı geliştirilmiştir. Geliştirilen analiz aracı, integral çözüm metotlarından formülason 1 ve formülasyon 1A ile pal kalınlık gürültü tahmini yapmaktadır. Bu çalışma kapsamında, farklı dönüş hızı, mesafe ve dinleyici pozisyonları için analiz sonuçları, rotor test kulesi test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

TEST SİSTEMİ ve ÖLÇÜM METODU

Rotor gürültü testleri TAI Akıncı tesislerinde bulunan Rotor Test Kulesinde yapılmıştır. Farklı dönüş hızlarında ve kolektif açılarında test kabiliyeti sunan test sistemi 630kW'lık elektrik motoruna sahip olmakla beraber yarıçapı 8 metreye kadar olan rotorların test edilmesine olanak vermektedir. Aski uçuş koşulunda rotor performansının değerlendirilmesi için sıklıkla kullanılan rotor test kulelerinin [Straub 2004, Lorber2011, Hasegawa 2001] gürültü rotor gürültü karakterinin belirlenmesi için uygun oldukları ön görülmüştür. Testlerde kullanılan rotor sistemi ile birlikte test kulesinin görüntüsü Şekil 1'de sunulmuştur.



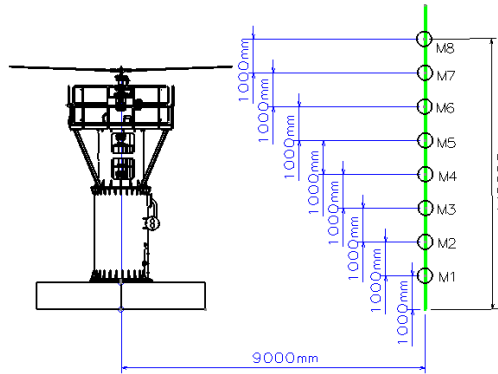
Şekil 1 TAI Rotor Test Kulesi

Testlerde kullanılan 2 palli hafif sınıf helikopter rotoru 300-500 kg arası helikopterler için tasarlanmış ve 2013 yılı sonu itibari ile Rotor Test Kulesinde toplamda 100 saati aşkın süre test edilmiştir. Akustik ölçüm çalışması kapsamında da kullanılan pallerin teknik özellikleri Tablo 1 ile verilmiştir.

Tablo 1 Test Pali Teknik Özellikleri

Pal Boyu	3 m
Nominal Dönüş Hızı	540 rpm
Pal Ucu Mach Aralığı	0.5-0.8
Burulma Açısı (lineer)	16°
Koniklik Açısı	2°
Pal Kök Uzunluğu	10%

Farklı dönüş hızlarında ve kolektif açılarında ölçüm alınan mikrofon yerleşimi temsili çizimi Şekil 2'de sunulmaktadır. 8 mikrofon ile aynı anda 20 kHz veri sıklığında ölçümler alınmış, toplam rotor gürültüsü ve gürültünün frekans spektrumunda dağılımı incelenmiştir.

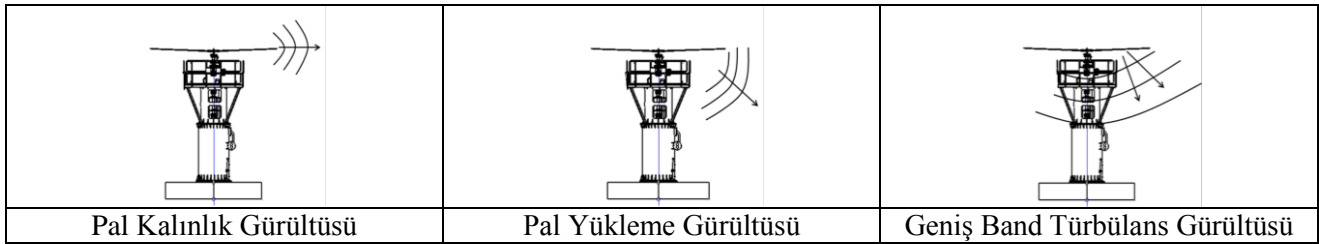


Şekil 2 Mikrofon Yerleşimi

ROTOR GÜRÜLTÜSÜ

Helikopter rotoru aerodinamik gürültüsü ayırık (discrete) ve geniş bant (broadband) olarak iki ana başlık altında tanımlanabilir [Snider, 2013]. Pal kalınlık ve yükleme gürültüleri düşük frekans aralığında ayırık ve uzak dinleyiciler için belirgin gürültü oluşturmaktadır [Yang 2013, Lee 1977]. Buna karşılık orta ve geniş frekans bandı aralığında pal ucu girdap, art akış etkileşimleri, türbülans gibi etkenler yakın dinleyiciler için belirgin gürültü oluşturmaktadır [Kim 1982, Lee 1977].

Bu çalışma ile pal ucunda hava hızının azami 0.5 Mach olduğu, düzenli askı uçuş koşulu test edilmiştir. Dolayısıyla, yüksek ileri hız ve alçalış uçuş koşullarında gözlemlenen pal – pal ucu girdabı etkileşimleri kaynaklı gürültülerin olmayacağı değerlendirilmektedir [Snider, 2013, Cox 1972]. Bu kapsamda düşük frekans aralığında pal kalınlık ve pal yükleme gürültülerinin baskın olacağı değerlendirilmektedir. Buna karşılık uçuş koşulundan bağımsız geniş frekans bandında gözlemlenebilen türbülanslı sınır tabaka, art akış etkileşimleri ve pal öz gürültülerinin mevcut olacağı ve artan itki kuvveti ile artacağı ön görülmektedir [Kim 1982, George 1984]. Yapılan akustik test çalışmaları sonucu, baskın olacağı değerlendirilen gürültü tipleri ve bu gürültü tiplerinin baskın yayılım yönleri Şekil 3 ile sunulmuştur.



Şekil 3 Gürültü Tipleri ve Baskın Yayılım Yönleri [Yücekayalı 2014]

ANALİZ METODU

Ffowcs Williams-Hawkings Denklemi

Aeroakustik problemi aerodinamik kaynaklı gürültü olmak ile birlikte kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri ile temsil edilmektedir. Ffowcs William – Hawkings (FW-H) denklemi, Navier-Stokes denklemlerinin tekrar düzenlenmesi ile elde edilmiş, hızı olan herhangi bir yüzey için Lighthill akustik denkleminin'in genelleştirilmiş formunu vermektedir. FW-H denklemi karmaşık helikopter aerodinamiği kaynaklı gürültünün tahmini için en genel ve uygun metot olduğu değerlendirilmektedir [Brentner 2003]. FW-H yaklaşımının diğer bir akustik modelleme metodu olan ve dalga denklemi çözümüne dayanan Kirchoff yaklaşımına göre en büyük avantajının, farklı gürültü tiplerinin (monopole, dipole, quadropole) ayrıştırılmış bir şekilde formulüze edilmiş olduğu değerlendirilmektedir [Brentner 1997]. Buna ek olarak lineer bir denklem olduğundan, analiz edilecek problem tanımına göre, gerekli görülen terimler ihmal edilebilir veya kullanılabilir. Literatürde FW-H denkleminin tercih edilen çözüm metotlarına göre tekrar düzenlenmiş çeşitli formları bulunmaktadır. Bu çalışmada, Denklem (1) ile verilen FW-H denklemi ortam içerisinde bulunan bir yüzeyin, mevcut çalışmada bu yüzey pal yüzeyi ile temsil edilmektedir, akışkan içerisindeki hareketinden kaynaklanan gürültünün modellenmesine olanak sağlamaktadır.

$$\square^2 p'(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \{[\rho_0 v_n] \delta(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{[\Delta P_{ij} \hat{n}_j] \delta(f)\} + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] \quad (1)$$

FW-H denkleminde pal yüzeyi $f(x,t)=0$ ile temsil edilmektedir. Denklemde bulunan birinci ve ikinci terim matematiksel yapılarından dolayı monopole ve dipole kaynakları temsil etmektedir [Brentner 2003]. Rotor gürültü tiplerinden kalınlık gürültüsünün monopole olduğu göz önünde bulundurulduğunda, birinci terim kalınlık gürültüsü, rotor gürültü tiplerinden yükleme gürültüsünün dipole olduğu göz önünde bulundurulduğunda, ikinci terim yükleme gürültüsü ile ilişkilendirilebilmektedir. FW-H denkleminin üçüncü terim quadropole kaynakları temsil etmekte ve Lighthill'in stres tensörünü içermektedir. Denklem (2) ile verilen Lighthill stres tensörü çözüm

alınacak ortam içerisindeki akış hızı komponentlerini, kompresif basınç komponentlerini içermekte ve geniş bant türbülans ve impulsive gürültü tiplerini temsil etmektedir [Brentner 2003].

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - c^2 p' \quad (2)$$

Bu kapsamda pal kalınlık gürültüsü FW-H denkleminde birinci terim ile temsil edilmekte ve matematiksel olarak çözülebilmesi için yüzey geometrisinin, ortam fiziksel özelliklerinin ve yüzeyin hareket tanımı yeterli olmaktadır. Bu durumda pal kalınlık gürültüsü, pal yüzeyinin source ve sink gibi davranması ile modellenmekte ve pal dönüşünden kaynaklı basınç dalgalanmasının (akustik basınç) tahmini mümkün olmaktadır. Buna karşılık pal yükleme gürültüsü FW-H denkleminde ikinci terim ile temsil edilmekte ve matematiksel olarak çözülebilmesi için pal yüzeyinde basınç dağılımının ve rotor dönüşü ile değişiminin tanımlanması gerekmektedir. Geniş bantta gürültü yayılımına sebep olan türbülans gürültüsü ise FW-H denkleminde üçüncü terim ile temsil edilmekte, matematiksel olarak çözülebilmesi için öncelikle hacim içerisinde Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi ve hacim integrali alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada FW-H denkleminin birinci terimi integral çözüm metodu ile modellenmiş ve pal kalınlık gürültüsünün tahmin edildiği bir analiz aracı oluşturulmuştur.

Formulation 1 ve Formülasyon 1A İntegral Çözüm Metodları

FW-H denkleminde mevcut ortam yoğunluğu, momentum ve basınç dağılımı ve Lighthill stres tensörü hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metotları ile çözülebilmektedir. Buna karşılık FW-H denkleminin lineer olması, numerik metotlar ile çözülebilir olması, HAD metotlarında sayısal kayıpların olması ve dolayısıyla geniş bantta yayılan gürültünün çözümü için yüksek yoğunlukta sayısal ağ oluşturulması gerekmesi ve aeroakustik analizler kullanılacak ortam boyutlarının tipik HAD analizlerinde kullanılan ortam boyutlarından çok daha büyük olma gereksinimlerinden dolayı FW-H denklemlerinin çözülebilmesi için integral çözüm metotları geliştirilmiştir. Bu çalışmada Farasat'ın Formulation 1 ve Formülasyon 1A yaklaşımları kullanılmıştır. Formülasyon 1 yaklaşımında quadropole terimler ihmal edilmekte, gürültü kaynağı geçirgen olmayan bir yüzey olarak tanımlanmakta ve \square^2 operatörü lineer kabul edilmektedir. Denklem (3) ile verilen bu yöntemin dezavantajları olarak; birinci integral teriminin türevinin alınmasının gerekmesi ve çözümün sabit dinleyici için geçerli olması sayılabilir. Bu yöntem üzerine detay bilgi Farasat ve Brentner'in çalışmalarında bulunabilir [Brentner 1997, Brentner 2003].

$$4\pi p'(x, t) = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 c v_n + l_r}{r[1 - M_r]} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{l_r}{r^2[1 - M_r]} \right]_{ret} dS \quad (3)$$

Buna karşılık, Formülasyon 1 yaklaşımında, türev terimi geciktirilmiş (retarded) zaman tanımı kullanılarak elimine edilebilmekte, hesaplama süresi ve denklemin basitleştirilmesi konusunda iyileştirilme sağlanabilmektedir. Bu kapsamda, denklem 4 ile verilen geciktirilmiş zaman tanımı kullanılarak, türev teriminde ayrıştırılan yaklaşım literatürde Formülasyon 1A yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır. Formülasyon 1 analizlerinde türev teriminin doğruluğunu arttırmak ve sonuçlardaki dalgalanmayı azaltmak için, zaman adımının çok küçük alınması gerektiği gözlenmiştir. Bu durumda hesaplama süresi artmakta ve analiz verimliliği düşmektedir. Bu kapsamda, analizlerde formülasyon 1A yaklaşımı tercih edilmiştir. Formülasyon 1A yaklaşımının kalınlık gürültü terimi denklem 5 ile sunulmaktadır. Bu yöntem üzerine detay bilgi Farasat ve Brentner'in çalışmalarında bulunabilir [Brentner 1997, Brentner 2003].

$$\frac{\partial}{\partial t} \Big|_x = \left(\frac{1}{1 - M_r} \frac{\partial}{\partial \tau} \Big|_x \right)_{ret} \quad (4)$$

$$4\pi p'_T(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0(\dot{v}_n + v_n)}{r|1 - M_r|^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 v_n (r\dot{M}_r + cM_r - cM^2)}{r^2|1 - M_r|^3} \right]_{ret} dS \quad (5)$$

Analiz Metodu

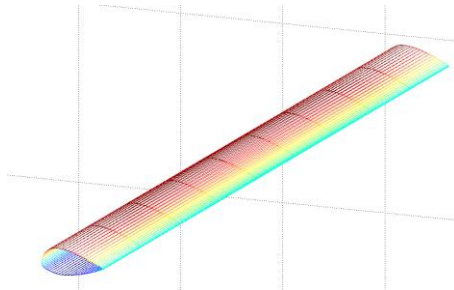
Bu çalışmada literatürde bulunan analitik akustik araçlarının çoğunda kullanılan Formülasyon 1 ve Formülasyon 1A metotları uygulanmıştır. Formülasyon 1 metodunun doğruluğunun artırılabilmesi için zaman adımı çözünürlüğünün çok küçük olması gerektiği gözlenmiştir. Bu kapsamda FW-H denklemi hem formülasyon 1 hem de formülasyon 1A metotları modellenmiş ve pal kalınlık gürültü tahmini için bir analiz aracı geliştirilmiştir. Buna karşılık bu çalışma ile sunulan sonuçlar formülasyon 1A metodu ile alınan sonuçlardır. Denklem 5 ile verilen metot ile ve Denklem 6 ile verilen genelleştirilmiş model oluşturulmuştur. Denklem 5 de mevcut $p'(x, t)$ terimi basınç dalgalanmasını (akustik basınç) temsil etmektedir ve oluşturulan modelde korunmuştur. Bunun yanı sıra $\rho_0 c v_n$ terimi ortamda source veya sink olarak davranmakta ve oluşturulan modelde $Q(y, \tau)$ olarak adlandırılmaktadır.

$$4\pi p'(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{Q(y, \tau)}{r[1 - M_r]} \right]_{ret} dS \quad (6)$$

Yapılan analizlerden, akustik ölçümlerin uzak mesafelerden yapıldığında (far-field) pal geometrisinin önemini kaybettiği, dolayısıyla temsili bir silindirik geometri kullanılabileceği değerlendirilmiştir [Francescantonio 1997]. Buna karşılık bu çalışmada, Rotor test kulesi ölçümleri rotor göbeğinden 3 ile 5 yarıçap mesafeden yapıldığından, pal geometrisinin analiz sonuçları üzerinde önemli etkisinin olduğu, pal geometrisinin doğru bir şekilde tanımlanması gerektiği değerlendirilmektedir. Bu kapsamda oluşturulan analiz aracı pal kesitini girdi olarak almakta ve analizlerde gerçek pal geometrisini kullanmaktadır.

Oluşturulan analiz aracı, pal'i veter ve yarıçap boyunca panellere bölmekte (Şekil 4) ve her bir paneli source veya sink olarak kabul etmekte, her bir panelin sabit izleyici pozisyonunda oluşturduğu pozitif veya negatif basınç dalgalanmalarını hesaplamakta ve rotorun bir dönüşü boyunca zamana bağlı tüm panellerin akustik basınca katkılarının integralini almaktadır.

Rotorun bir tur dönüşünü için akustik basıncın zamanla değişiminin elde edilmesinin ardından 10 saniyelik bir zaman dilimi için rotor dönüşü simüle edilmekte, sabit izleyici pozisyonunda toplanan basınç dalgalanması için FFT (Fast Fourier Transfrom) dönüşümü uygulanmaktadır. 20×10^{-6} Pa referans basınç değeri kullanılarak gürültü basınç seviyesi frekans spektrumunda dB birimi ile analiz edilmektedir.

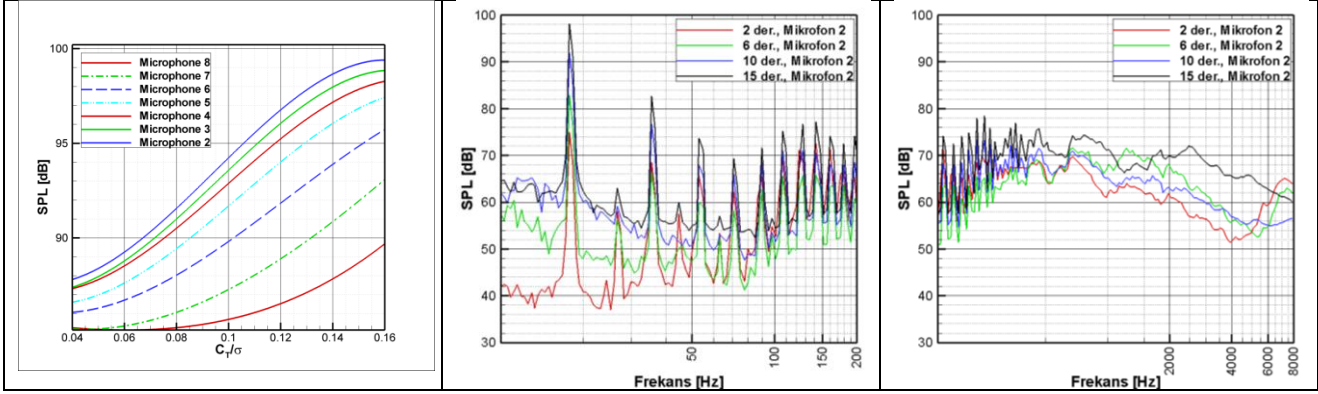


Şekil 4 Pal Üzerindeki Temsili Mesh

TEST SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME

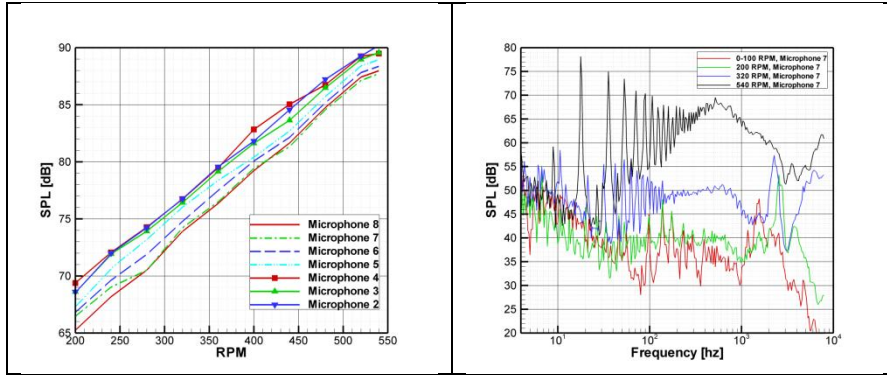
Şekil 2 ile sunulan ölçüm konfigürasyonunda, farklı test senaryoları belirlenmiştir. Birinci senaryo olarak rotor nominal dönüş hızında, 0-15 derece kolektif aralığında her kolektif açısında gürültü ölçümleri alınmış, rotorun toplam gürültü değeri ve frekans spektrumunda gürültü değişimleri incelenmiştir. Bu kapsamda, artan kolektif açısı ile rotor toplam gürültü ve frekans spektrumundaki

değişimleri Şekil 5'de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, artan pal yüklemesi ile gürültü artışının en yüksek mikrofona 2, en düşük artışın mikrofona 8'de olduğu gözlemlenmiştir. Bu karakteristik, pal yükleme gürültüsünün baskın yayılım yönü ile ilişkilendirilmiştir. Bu kapsamda, düşük frekans aralıklarında, rotor dönüş frekansı ve katlarında önemli gürültü artışları, yüksek frekans aralığında ise, geniş bant bütün frekanslarda gürültü artışı gözlemlenmiştir.



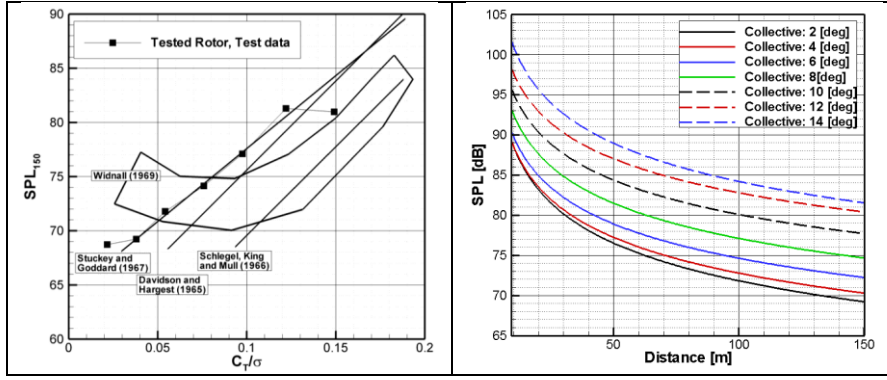
Şekil 5 Rotor Toplam Gürültü Değişimi

İkinci test senaryosu olarak 200-540 RPM dönüş hızlarında, rotor toplam itki kuvveti sıfır tutularak, akustik ölçümler alınmış, rotor toplam gürültü değeri ve frekans spektrumunda gürültü değişimleri incelenmiştir. Bu kapsamda artan dönüş hızı ile rotor toplam gürültü ve frekans spektrumundaki değişimler Şekil 6 ile sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, artan dönüş hızı ile rotor toplam gürültüsünün arttığı ve bu artışın pal dönüş düzleminde bulunan mikrofonlar ile daha yüksek ölçüldüğü gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, düşük frekans bölgesinde gürültünün rotor dönüş harmoniklerinde belirgin bir şekilde arttığı, yüksek frekans bölgesinde ise artan dönüş hızı ile her frekansta gürültü artışının olduğu gözlemlenmiştir. Rotor yükleme gürültüsünün ihmal edilebilir olduğu değerlendirilen bu test senaryosunda, gözlemlenen rotor gürültü değişim karakteri, pal kalınlık gürültüsü ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen pal kalınlık tahmin analiz aracı sonuçlarının, ikinci test senaryo sonuçları ile karşılaştırılması uygun değerlendirilmiştir.



Şekil 6 Rotor Pal Kalınlık Gürültü Değişimi

Yapılan akustik ölçümlerin doğruluğunun ve rotor toplam gürültüsünün mesafe ile değişiminin incelenmesi için üçüncü test senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryo ile farklı mesafelerden, farklı kolektif ve rotor yüklemelerinde akustik ölçümler alınmış, literatürde bulunan ve rotor test kulesi akustik testleri için geliştirilmiş olan ampirik rotor gürültü tahmin modelleri ile test sonuçları karşılaştırılmış ve mesafe ile rotor toplam gürültüsünün nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu kapsamda, rotor toplam gürültüsünün 150m mesafe ölçüm sonuçlarının literatürde bulunan modeller ile karşılaştırılması ve rotor toplam gürültüsünün, farklı rotor yüklemelerinde mesafe ile değişimi Şekil 7 ile sunulmuştur.

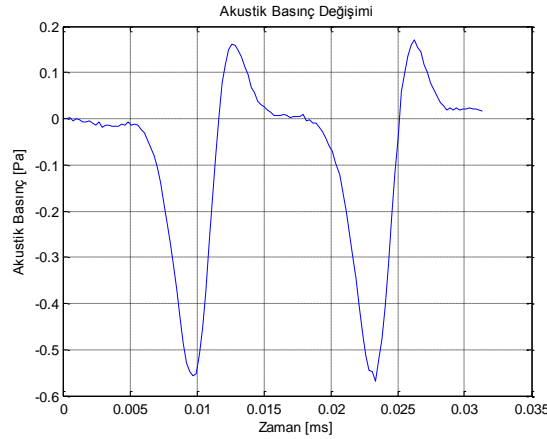


Şekil 7 Mesafe ile Rotor Toplam Gürültü Değişimi

Senaryo 2 ile elde edilen gürültü test sonuçlarının frekans spektrumunun düşük frekans aralıklarında pal yükleme ve türbülans gürültü katkılarından ayrıştığı veya bu gürültü tiplerinin katkılarının ihmal edilebilir olduğu değerlendirilmiştir [Brentner 1997]. Bu kapsamda, pal kalınlık gürültüsü tahmin analiz aracı ile elde edilen analiz sonuçları, senaryo 2 ile ölçülen gürültü değerleri ile farklı dönüş hızları ve mikروفon pozisyonları için karşılaştırılmış.

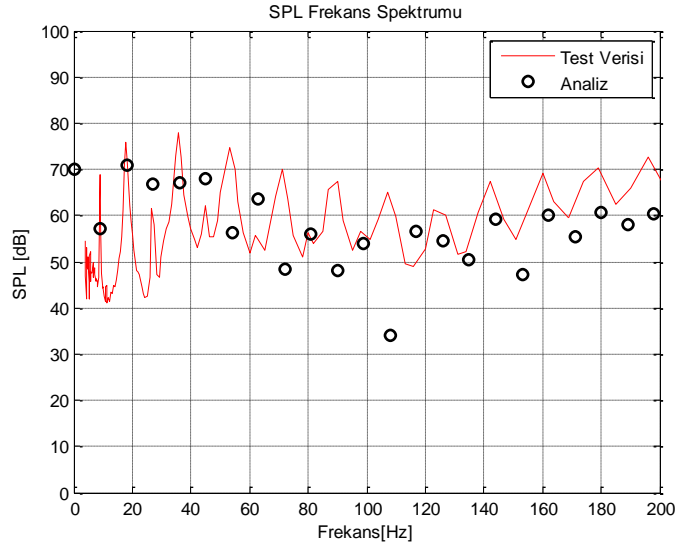
ANALİZ SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME

Geliştirilen pal kalınlık gürültüsü tahmin analiz aracı ile alınan sonuçlar, Rotor Test Kulesinde senaryo 2 ile ölçülen gürültü değerleri ile karşılaştırılmış, pal kalınlık gürültü tahmininin uygun olduğu değerlendirilmiştir. Geliştirilen analiz aracı, pal üzerinde bulunan her bir panelin dinleyici pozisyonunda oluşturduğu akustik basınç dalgalanma şiddetini hesaplamakta, basınç wavefront'unun dinleyiciye ulaşma zamanını hesaplamakta, gecikme zamanını hesaba katmakta ve dinleyici zamanında akustik basınç hesabı yapmaktadır. Bu kapsamda Senaryo 2 ile verilen mikروفon yerleşiminde mikروفon 7 pozisyonunda bulunan bir dinleyici için, rotor nominal dönüş hızında, sıfır rotor yüklemesinde hesaplanan akustik basınç değişimi Şekil 8 ile sunulmuştur.



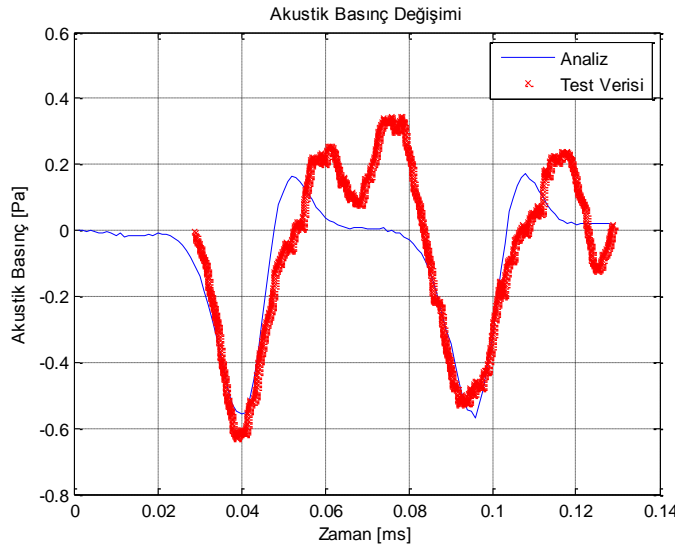
Şekil 8 Tahmin edilen akustik basınç değişimi

Aynı koşul için frekans spektrumunda gürültü basınç seviye analizi test sonuçları ile karşılaştırılmış ve Şekil 9 ile sunulmuştur. Analizlerde sadece pal kalınlık gürültüsünün hesaplanmasına karşılık, testlerde çok düşük seviyede pal yükleme ve türbülans gürültüsünün mevcut olduğu değerlendirilmektedir. Test-analiz karşılaştırmasında, pal kalınlık gürültüsünün baskın olacağı öngörülen 200Hz'den düşük frekanslarda, analiz sonuçlarının test sonuçları ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.



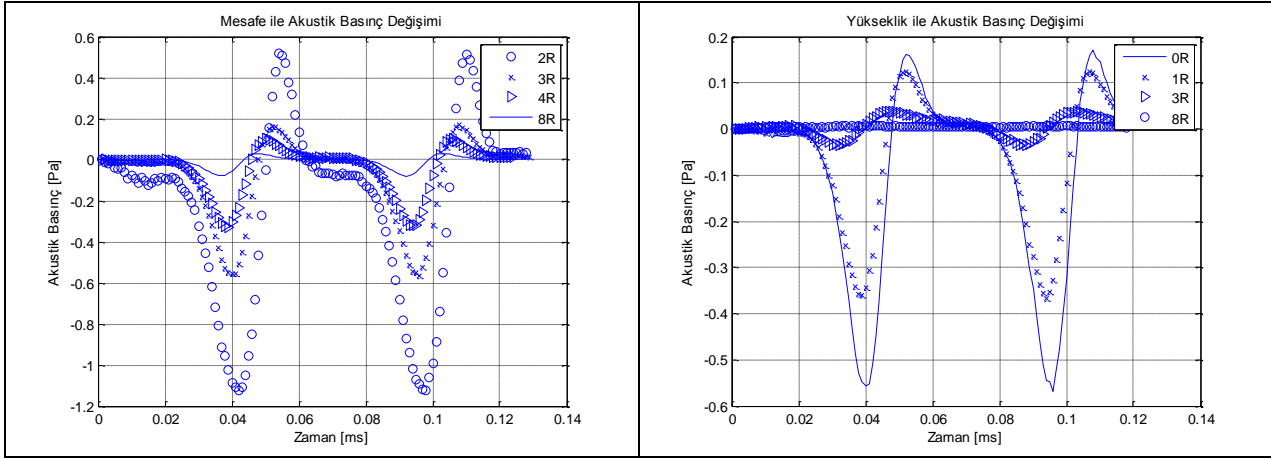
Şekil 9 Test – Analiz Frekans Spektrumu Karşılaştırması

Aynı koşul için testlerden ölçülen akustik basınç değişimi, analiz sonucu ile karşılaştırılmış ve Şekil 10 ile sunulmuştur. Akustik basıncın zaman ile değişimi incelendiğinde, eksi yönde dik basınç rahatsızlıklarının, rotorun dönüş düzleminde dinleyiciye dik yaklaşan pal'den kaynaklandığı değerlendirilmiş ve analiz sonuçlarından gözlemlenmiştir. Test ile analiz basınç değişiminin birbirleri ile uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Akustik basınç değişiminde test ile analizin örtüşmediği bölgelerin, pal'in dinleyiciye en yakın geçtiği bölgeler olduğu, bu bölgelerde kalınlık gürültüsünün yanı sıra türbülans gürültüsünün de önem kazandığı değerlendirilmiştir.



Şekil 10 Test – Analiz Akustik Basınç Karşılaştırması

Dinleyici mesafesi ile akustik basınç değişimi ve dinleyici dilek mesafesi ile akustik basınç değişimi analiz edilmiş ve Şekil 11 ile sunulmuştur. Bu kapsamda, rotor dönüş düzleminde, uzaklaşan dinleyici için akustik basınç değeri mesafe ile üssel azalmakta olduğu değerlendirilmiştir. Rotor düzleminde, merkezden 3R uzaklıkta bulunan ve rotor düzleminde dikey yönde aşağı uzaklaşan bir dinleyici için ise akustik basınç değişiminin negatif yöndeki doruk noktası hızla azalırken, pozitif yöndeki doruk noktasının daha yavaş azaldığı gözlemlenmiştir. Dikey yönde 3R mesafeden sonra ise, pal kalınlık gürültüsünün etkisinin ihmal edilebilir olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 11 Akustik Basıncın Dinleyici Mesafesi ve Yükseklik ile Değişimi

Son olarak yapılan çalışmalardan, pal boyunca yerleştirilen panel genişlik değerleri için bir üst limit gereksinimi oluşturulmuştur. Bu kapsamda yapılan analizlerden, yanyana yerleştirilen iki panelden yayılan akustik basınç rahatsızlığının, gecikmeli süre tabanında dinleyiciye ulaşma süreleri arasındaki farkın, gürültü kaynak periyodundan en az 1 hane küçük olması gerektiği gözlemlenmiştir ($\Delta\tau \ll \omega(Q)$). Yapılan araştırmada, literatürde buna benzer kriterler bulunmuş ve bu çıkarım desteklenmiştir [Brentner 2003]. Panel genişliğinin daha da küçültülmesinin ise sonuç çözünürlüğüne etkisinin olmadığı, sadece analiz süresini uzattığı belirlenmiştir.

Kaynaklar

Brentner K.S., Farassat F., 2003, *Modeling Aerodynamically Generated Sound of Helicopter Rotors*, Progress in Aerospace Sciences, vol 39, pp.83-120.

Brentner K. S., Farassat F., 1997 *An Analytical Comparison of the Acoustic Analogy and Kirchhoff Formulation for Moving Surfaces*, 53rd AHS Forum, Virginia Beach, April 29-May 1, 1997.

Ezertas A., Yucekayali A., Ortakaya Y., 2013, *Hover Performance Assessment of 3 Meter Radius Rotor on Whirl Tower*, 39th European Rotorcraft Forum, Moskova, Rusya.

Cox C.,R.,1972, *Aerodynamic Sources of Rotor Noise*, 28th Annual National V/STOL Forum.

di Franciscantonio, P., 1997, *A New Boundary Integral Formulation for the Prediction of Sound Radiation*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 202, No. 4, 1997, pp. 491 -509.

George A.R., 1977, *Helicopter Noise: State-of-the-Art*, AIAA 4th Aeroacoustics Conference, VOL. 15, No. 11, Atlanta, GA.

George A.,R., Chou S.,T., 1984, *Comparison of Broadband Noise Mechanisms, Analyses, and experiments on Rotors*, J.Aircraft, Vol.21, No.8, pg:583.

Gounet H., Lewy S., 2012, *Three-Dimensional Sound Directivity Around a Helicopter Turboshaft Engine*, Journal of the American Helicopter Society 57.

Hasegawa, Y., 2001, *Experimental and Analytical Results of a Whirl Tower Test of ATIC Full Scale Rotor System*, American Helicopter Society 57th Annual Forum, Washington.

Kim Y.N, George A.R.,1982, *Trailing-Edge Noise from hovering Rotors*, AIAA Journal, Vol.20, No.9, pg:1167.

Lee A.,Harris W.L., Widnall S.E., 1977, *A Study of Helicopter Rotor Rotational Noise*, J.Aircraft, Vol.14, No.11, pg:1126.

Lorber, P., O'Neil, J., Hein, B., Isabella, B., Andrews, J., Brigley, M., Wong, J., LeMasurier, P. and Wake, B., 2011, *Whirl and Wind Tunnel Testing of the Sikorsky Active Flap Demonstration Rotor*, American Helicopter Society 67th Annual National Forum, Virginia Beach, VA.

Magliozzi B., 1975, *A Comprehensive Review of Helicopter Noise Literature*, FAA-RD-75-79, Federal Aviation Administration, Washington DC.

Schmitz F.H., 2007, *Measurement and Characterization of Helicopter Noise in Steady-State and Maneuvering Flight*, AHS Annual Forum, Virginia Beach, VA.

Snider R., 2013, *Full-Scale Rotorcraft Broadband Noise Prediction and Its Relevance to Civil Noise Certification Criteria*, 69th AHS Annual Forum, Phoenix, Arizona.

Straub F.K., 2004, *Development and Whirl Tower Test of the SMART Active Flap Rotor*, Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA.

Yang T., Brentner K.S., 2013, *Loading Schedule Design for Rotor Thickness Noise Reduction*, 69th AHS Annual Forum, Phoenix, Arizona.

Yücekayalı A., Ayan E., Ortakaya Y., 2014 *Acoustic Assessment of 3 Meter Radius Rotor with Whirl Tower Test and Analysis* AHS 70th Forum, Montreal, Quebec, Canada May. 20-22, 2014.