

HELİKOPTER KANADINDA OLUŞAN AŞINMANIN CFD İLE 3D OLARAK MODELLENMESİ

İsmail ÖZEN¹, Hasan GEDİKLİ²

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

ÖZET

Bu çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak bir helikopter kanadı yüzeyinde meydana gelen katı parçacık erozyon hasarı sayısal olarak belirlenmiştir. Katı parçacık erozyon hasarının modellenmesi, Euler-Lagrange yaklaşımı ile ANSYS Fluent paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde dönen helikopter kanadı üzerindeki hız dağılımı, akış ortamındaki katı parçacıkların yörüngeleri ve kanat yüzeyindeki erozyon hasar değerleri elde edilmiştir. Analizler neticesinde helikopter kanat ucundaki çizgisel hız ve erozyon hasar değerleri maksimum olarak belirlenmiştir.

GİRİŞ

Yüksek hıza sahip katı parçacıkların Şekil 1' de görüldüğü gibi helikopter kanadı yüzeyinde oluşturduğu erozyon hasarı önemli miktarda malzeme kaybına neden olmakta ve kanadın kullanım performansını düşürmektedir. Bundan dolayı, helikopter kanadı yüzeyinde meydana gelen erozyonun doğru bir şekilde araştırılması kanat ömrü, tamir ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemlidir. Kanat üzerindeki erozyonun iyi anlaşılması ve hesaplanması kanat malzemesinin erozyona karşı dayanımının artırılması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Kanatlar üzerinde erozyonun belirlenmesi fiziksel durumun karmaşıklığı ve literatürdeki sınırlı çalışmalardan dolayı hala araştırma konusudur. Katı parçacık erozyon aşınmasına maruz kalan yüzeylerdeki hasarın azaltılması üzerine son yıllarda çok sayıda araştırma yapılmaktadır [Shin, 2010]. Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte erozyon hasarının belirlenmesi üzerine yapılan deneysel çalışmaların yanında sayısal çalışmalara da olan ilgi sürekli artmaktadır. Bunun nedeni deneysel çalışmaların sayısal çalışmalara nazaran fazla zaman alması, daha maliyetli ve zahmetli olmasıdır. Bu nedenle, son yıllarda bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesine paralel olarak katı parçacık erozyon oranının belirlenmesi için ANSYS, LS DYNA, ABAQUS gibi paket programları kullanılmakta ve bu paket programları araştırmacılar tarafından sürekli olarak geliştirilmektedir. Katı cisimler mekaniğinde küçük bir bölgede yerel deformasyonlar, gerilme ve erozyon oranı hesaplanırken akışkanlar dinamiğinde erozyon hızı ve oranı daha büyük bir bölge için kolay ve hızlı bir şekilde hesaplanmaktadır. Bu çalışmada helikopter kanadı yüzeyinde oluşan katı parçacık erozyon hızı ve oranını hesaplamak için ticari ANSYS Fluent paket programı kullanılmıştır. Simülasyonlarda parçacık hızı ve parçacık çarpma açısına bağlı olarak paslanmaz çelik malzemesi yüzeyindeki erozyon hızı ve oranı hesaplanmıştır.

¹ Araştırma Görevlisi, Mühendislik Fakültesi, Makina Müh. Böl., e-posta: ismailozen@ktu.edu.tr

² Doç. Dr., Mühendislik Fakültesi, Makina Müh. Böl., e-posta: hgedikli@ktu.edu.tr

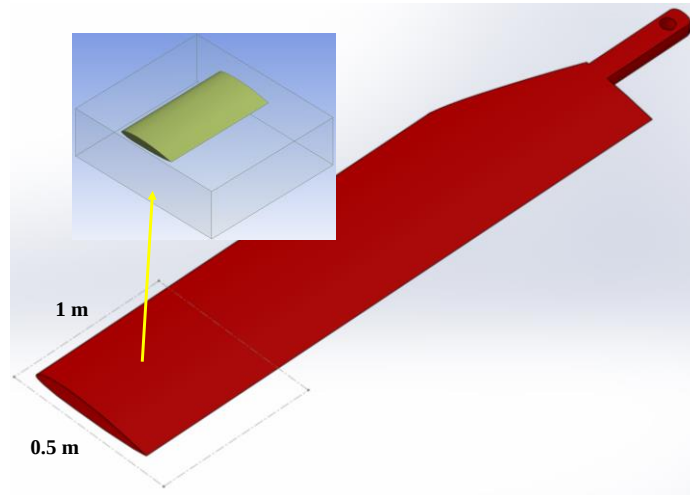


Şekil 1. Bir helikopter kanadı yüzeyindeki erozyon hasarı [URL_1]

YÖNTEM

Geometri ve Malzeme Özellikleri

Helikopter kanadının üç boyutlu katı parçacık/akış erozyon analizinde kullanılan referans geometrik model Şekil 2’ de verilmiştir [Li, 2008]. Analiz süresini kısaltmak için tek bir kanadın 1m uzunluğundaki uç kısmı, Şekil 2’ de gösterildiği gibi yatayla aç yapacak şekilde modellenmiştir. Analizlerde, kanadın dış yüzeyinin çelik malzemeyle kaplandığı ve kanat yüzeyine çarpan katı parçacıkların keskin köşeli kuvarz kumundan oluştuğu kabul edilmiştir.



Şekil 2. Simülasyonlarda kullanılan referans geometrik model

Sayısal Model

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile erozyonun modellenmesi üç adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda akış ortamıyla ilgili hareket denklemleri çözülerek akışkanın hız, basınç dağılımı, türbülans derecesi gibi verileri elde edilir. Bu adımda meydana gelebilecek herhangi bir hata veya fiziksel olmayan bir durum daha sonraki adımları önemli derecede etkileyebilmektedir. Hesaplanan akış alanı, parçacık yörüngelerini belirlemek için kullanılan parçacık takibi için bir veri girişi sağlar. Akış alanıyla ilgili verilerin (basınç, hız bileşenleri, türbülans kinetik enerjisi vs.) hesabı için Navier-Stokes eşitliklerinin çözülmesi gerekir. Fluent, akışkanın hareketini modellemek için Navier-Stokes

eşitliklerini çözen bir sonlu hacim yazılımı kullanır. Mühendislik uygulamalarında, momentum ve enerji denklemlerinin çözümü için genellikle Navier-Stokes eşitliklerinin Reynolds ortalama formaları kullanılır. Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin genelleştirilmiş halleri aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

Reynolds ortalama Navier-Stokes eşitlikleri ile çözüm yapılırken küçük ölçekli türbülans dalgalanmaları filtrelendir. Bu süreçte, Reynolds gerilmeleri olarak adlandırılan bilinmeyen değişkenler ortaya çıkar ve bu değişkenlerin belirlenmesi için kapalı eşitliklere ihtiyaç duyulur. Kapalı eşitlikler olarak, k-ε, k-ω SST gibi farklı türbülans modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, helikopter kanadı etrafındaki hava akışıyla ilgili verileri hesaplamak için kapalı eşitlik olarak k-ω SST türbülans modeli kullanılmıştır. Akış ayrılmasının meydana geldiği bölgelerde diğer türbülans modellerine göre daha esnek davranarak daha doğru sonuçlar vermesinden dolayı k-ω SST türbülans modeli tercih edilmektedir [Menter vd., 2003]. k-ω SST türbülans modeliyle ilgili eşitlikler aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (4)$$

Burada,

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{C_{D_{K\omega}} y^2} \right] \right\}^4 \right\}$$

$$C_{D_{K\omega}} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}$$

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega)$$

İkinci adımda, akışkan içerisinde hareket eden katı parçacıkların hızı ve yüzey ile yaptığı açı gibi çarpma verilerinin elde edilmesi için akış ortamındaki her parçacık için hareket denklemleri çözülür. Euler-Lagrange yaklaşımıyla sürekli akış alanının çözümü yakınsadıktan sonra ayırık faz yöntemi kullanılarak akış ortamındaki katı parçacıkların hızları ve yörüngeleri hesaplanır. Fluent, Lagrange formüllerini kullanarak ayırık faz elemanlarının yörüngelerini hesaplar. Bunun için, parçacıklar üzerine etki eden sürüklenme kuvvetini, basınç gradyan kuvvetini ve kaldırma kuvvetini hesaba katarak parçacığın hareketiyle ilgili eşitlikleri çözer. Parçacık üzerinde etkili olan kuvvetlerin denge eşitliği integre edilerek parçacığın yörüngesi ve hızı hesaplanır. Akış ortamı içerisindeki herhangi bir parçacığa etki eden kuvvetlerin dengesiyle ilgili eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$\frac{dV_P}{dt} = F_D(U - V_P) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (5)$$

Burada,

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d Re_{sph}}{24}$$

$$Re_{sph} = \frac{\rho_p d_p (V_P - U)}{\mu}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} (1 + b_1 Re_{sph}^{b_2}) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}}$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3)$$

$$\phi = \frac{s}{S}$$

V_P , ρ_p , d_p sırasıyla parçacık hızı, yoğunluğu ve çapını temsil etmektedir. F_D , parçacığın birim kütlesi başına sürüklenme kuvvetini, U , akışkan hızını, ρ , akışkan yoğunluğunu, μ , akışkanın dinamik viskozitesini, Re_{sph} , küresel parçacıklı akış ortamındaki Reynolds sayısını, C_D , sürüklenme katsayısını, F ise yer çekimi, kaldırma, basınç gibi ilave kuvvetleri temsil etmektedir. ϕ , parçacık şekil faktörü, s akış ortamındaki parçacığın hacmine karşılık gelen küresel parçacığın yüzey alanı ve S akış ortamındaki parçacığın gerçek yüzey alanıdır [Fluent 6.3, 2006].

Akış ortamındaki parçacıkların çarptıkları yüzeylerdeki erozyon hasarının belirlenmesi, HAD ile yapılan erozyon analizlerinde üçüncü ve son adımdır. Katı parçacık erozyonuna maruz kalan yüzeylerdeki erozyon hasarı, parçacıkların çarpma açıları ve hızları, yüzey malzemesi ve parçacıkların çaplarına bağlıdır [Finnie, 1960]. Bu çalışmada, sürekli akış ortamındaki aşınma kalkanının birim yüzey alanındaki erozyon hızının hesabı için Eşitlik 6 kullanılmıştır [DNV, 2007].

$$E_R = \sum_{p=1}^{N_p} \frac{\dot{m}_p e_r}{A_F} \quad (6)$$

Burada,

$$e_r = K V_P^n f(\gamma)$$

Yukarıdaki eşitlikte, N_p , aşınma kalkanı yüzeyinde herhangi bir elemana çarpan parçacık sayısını, $\dot{m}_p$, hava ortamındaki katı parçacıkların debisini (kg/s), e_r , erozyon oranını, A_F , aşınma kalkanı yüzeyindeki herhangi bir elemanın yüzey alanını (m^2), V_P , parçacık çarpma hızını (m/s), K , katı parçacık ve kalkan malzemesiyle ilişkili olan malzeme sabitini ve n ise katı parçacık ve kalkan malzemesine bağlı olup katı parçacığın hız üssünü temsil etmektedir. Keskin köşeli kuvarz kumunun çelik yüzeyde oluşturduğu erozyonun hesabı için kullanılan malzeme sabitleri literatürden elde edilmiş olup Çizelge 1’ de verilmişlerdir [Aquilar vd., 2011].

Çizelge 1. Erozyon modeli için kullanılan malzeme sabitleri

Malzeme	K	n	$\rho_{\text{çelik}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\rho_{\text{kum}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Çelik	2×10^{-9}	2.6	7800	2650

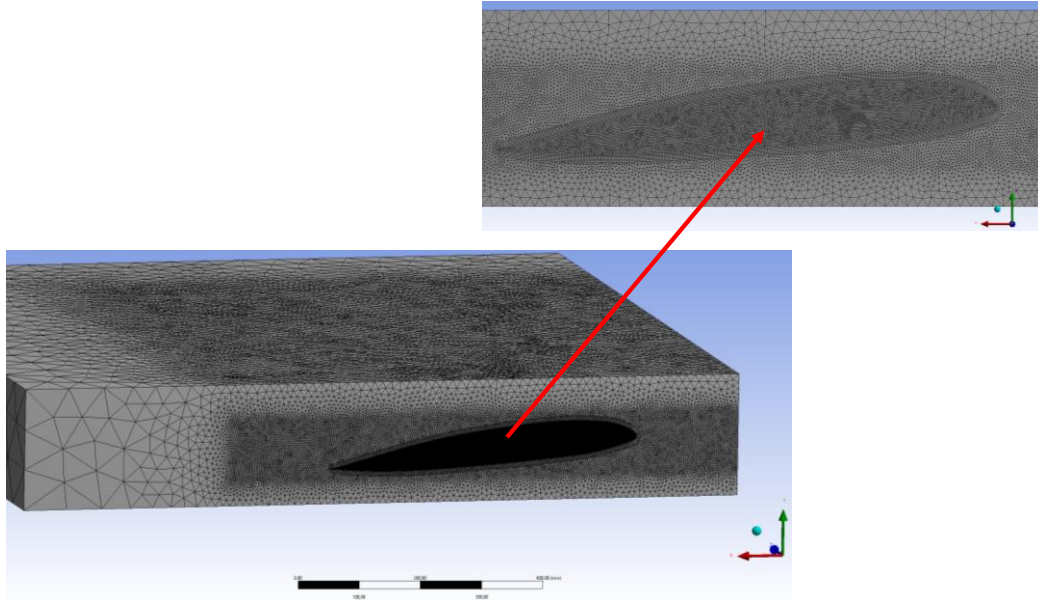
Çarpma açısına bağlı fonksiyon sabiti olan $f(\gamma)$ ' nın, çarpma açısına göre değerlerini hesaplamak için eşitlik 7 kullanılmıştır. Eşitlikteki açı birimi radyan ($0 - \pi/2$ arasındaki açı değerleri için) cinsinden olup eşitlikte yer alan A_i katsayısı değerleri Çizelge 2' de verilmiştir.

$$f(\gamma) = \sum_{i=1}^{i=8} A_i (\gamma)^i \quad (7)$$

Çizelge 2. Erozyon eşitliğinde kullanılan A_i katsayısı değerleri [DNV, 2007]

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
9.37	-42.295	110.864	-175.804	170.137	-98.398	31.211	-4.170

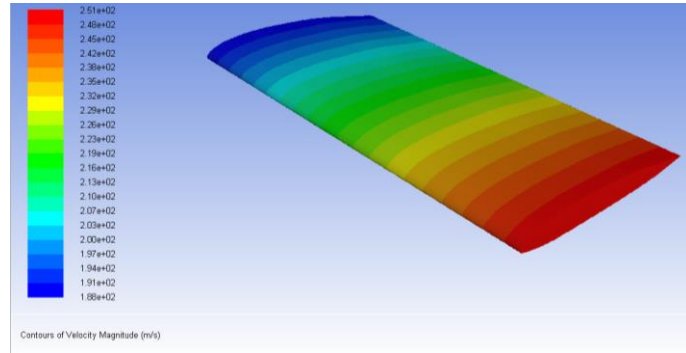
Kuvarz parçacıkların çelik yüzey üzerinde oluşturduğu erozyon hasarını sayısal olarak modellemek için ANSYS Fluent paket programı kullanılmıştır. Modelde akış-katı parçacık yüzey etkileşimi, türbülans ve ayırık faz yöntemini içeren bir Euler-Lagrange yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Modelde helikopter pervanesinin dakikada 600 devir ile döndüğü, $250 \mu\text{m}$ çaplı katı parçacıkların ortamda bulunduğu çalışma şartları ele alınmıştır. Kanadın çalıştığı ortamdaki havanın yoğunluğu ve basıncı sırasıyla 1.225 kg/m^3 ve 1 atm, katı parçacıkların debisi 2.5 g/dk olarak kabul edilmiştir. Şekil 3' te yatayla 5° açı yapan kanadın 32 milyon ağ örgülü sayısal modeli görülmektedir.

**Şekil 3.** Problemin sayısal analizinde kullanılan ağ örgüsü

UYGULAMALAR

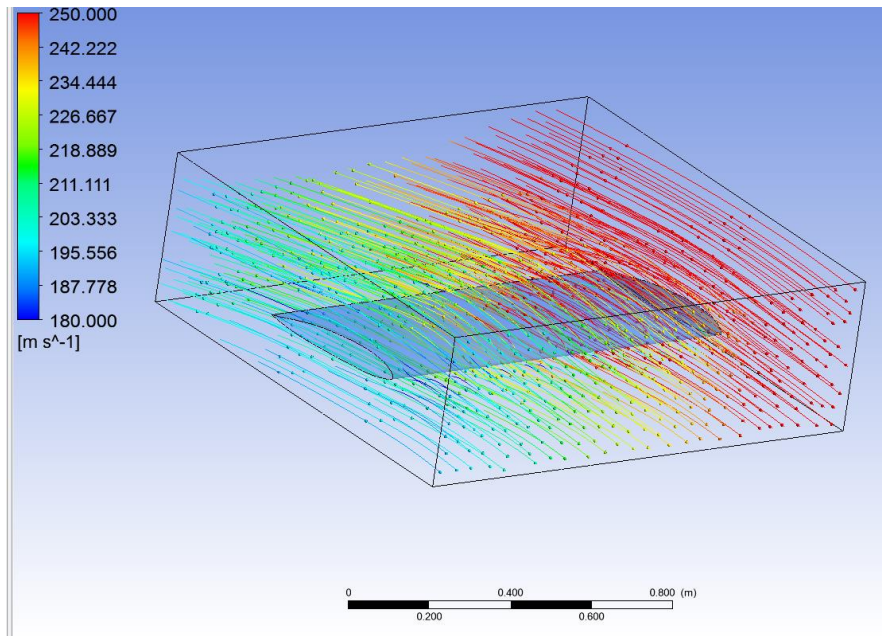
Bulgular ve İrdelemeler

Klasik mekanikten dakikada 600 devirle dönen ve dönme merkezinden dört (4m) metre uzunluğundaki kanadın üzerindeki hız dağılımı doğrusal değişimli olup, kanadın ucunda maksimum 251.33 m/s olarak hesaplanır ($v_{\text{mak}}=w.r_{\text{mak}}=\frac{2.\pi.n.r}{60}=\frac{2.\pi.600.4}{60}=251.33\text{ m/s}$). Analiz neticesinde helikopter kanadı üzerindeki parçacıkların hız dağılımı Şekil 4' te verilmiştir.



Şekil 4. Helikopter kanadı yüzeyindeki hız dağılımı

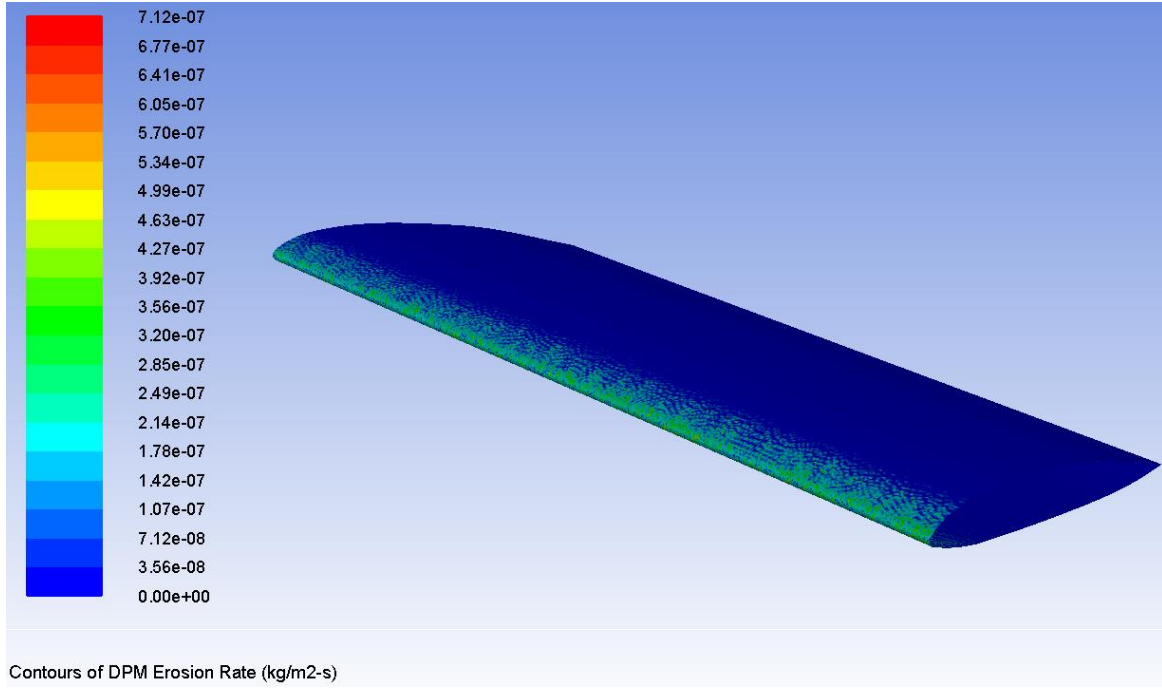
Şekil 5' te ise akış ortamındaki katı parçacıkların yörüngeleri ve hız değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi, dönme merkezine en uzak mesafede olan kanadın uç kısmında katı parçacıkların hızı maksimum 250 m/s olarak elde edilmiştir.



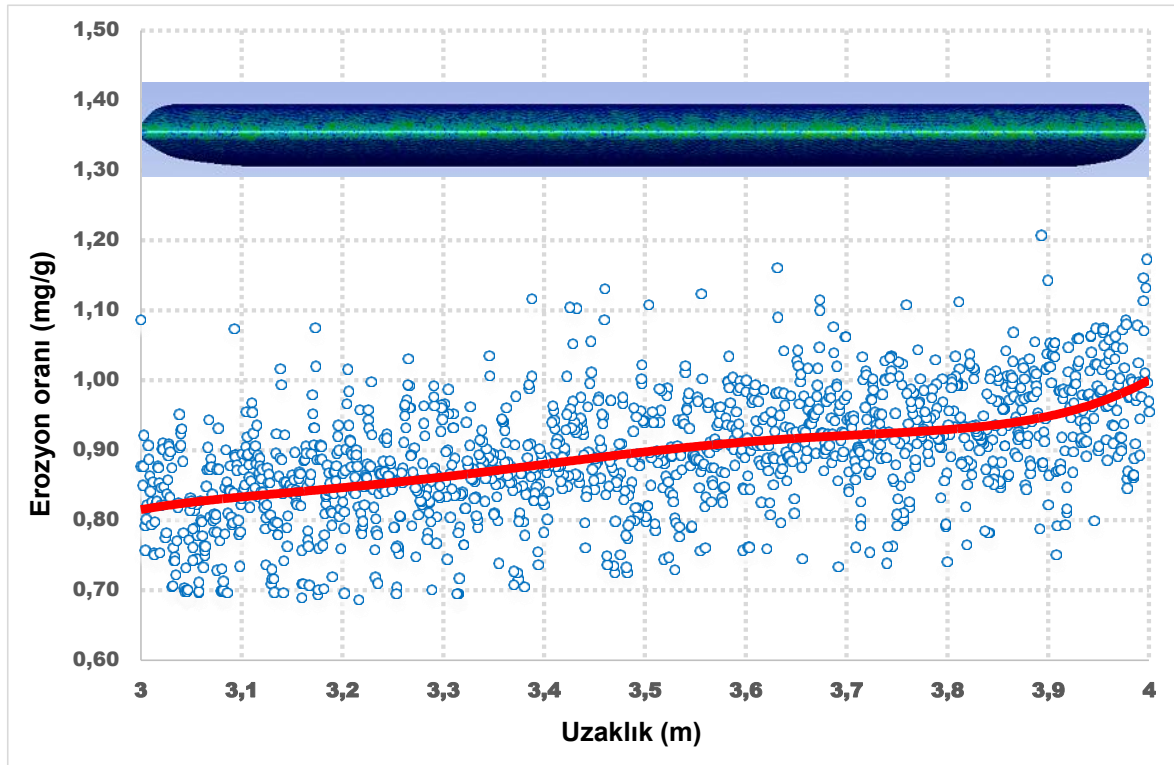
Şekil 5. Helikopter kanadı etrafındaki katı parçacıkların yörüngeleri

Katı parçacık içeren hava ortamında bulunan kanat yüzeyindeki erozyon hızı dağılımı ve erozyon oranı sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7' de verilmiştir. Şekil 7' den anlaşılacağı gibi katı parçacıkların

kanat yüzeyine çarpma hızının yüksek olduğu yerlerdeki (kanat ucuna doğru) erozyon oranı yüksek seviyelerde iken, düşük çarpma hızına sahip yerlerde (kanat merkezine doğru) erozyon oranı daha düşük elde edilmiştir.



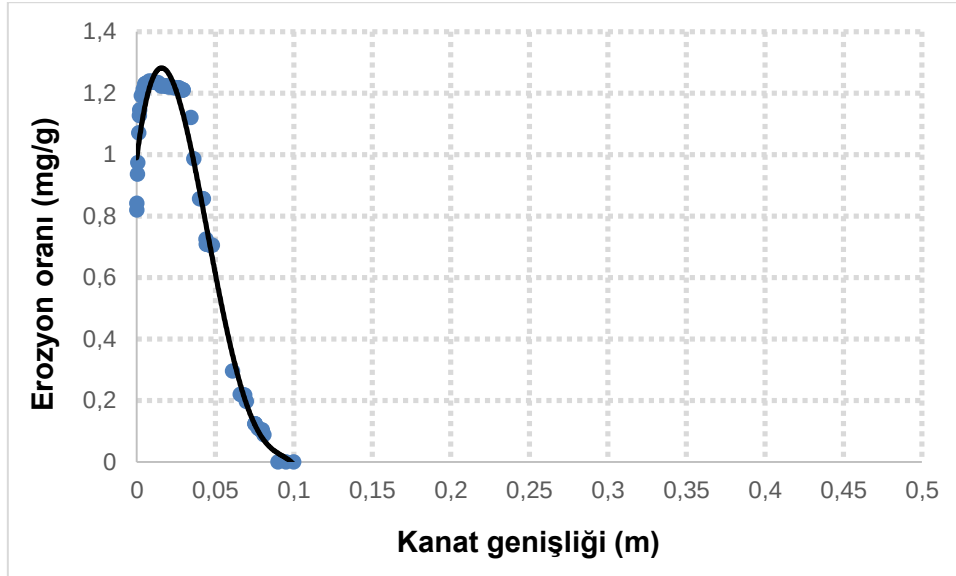
Şekil 6. Helikopter kanadı yüzeyindeki erozyon hızı dağılımı



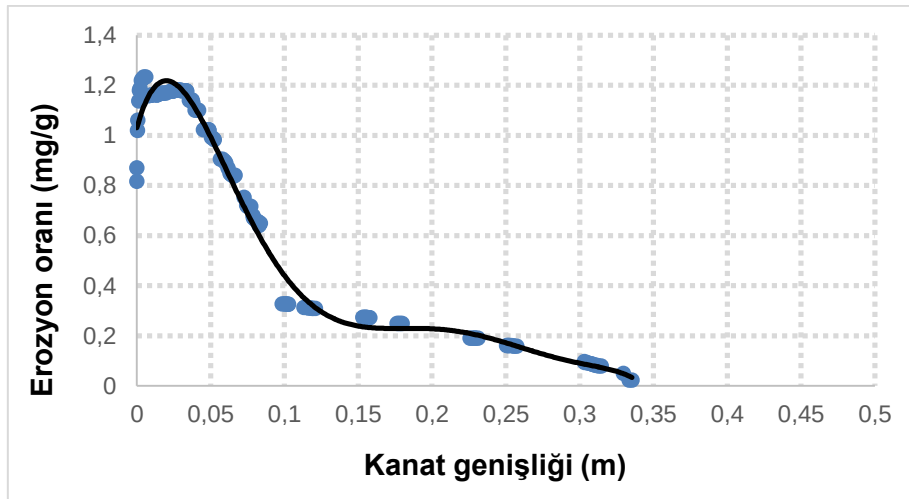
Şekil 7. Helikopter kanadının ön yüzey profilindeki erozyon oranı değişimi

Helikopter kanadının üst ve alt yüzeylerindeki erozyon oranının değişimi sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9' da verilmiştir. Şekillerden görülebileceği gibi kanat üzerinde oluşan erozyon hasarı, kanadın ön

yüzeyinde yüksek olmakta ve arkaya doğru ilerledikçe azalmaktadır. Kanadın ön kısmında erozyon oranı 1.2 mg/g gibi yüksek bir değer elde edilmiştir. Düşük çarpma açılı yerlerde erozyon oranı değerinde azalma ve çarpma açısının orta seviyelerinde (30° civarında) artış olmuş olup literatürü desteklemektedir [Shin, 2010]. Kanat, yatayla yukarıya doğru 5° açı yaptığından kanadın alt yüzeyi daha fazla katı parçacığa maruz kalmakta ve erozyon hasarının daha uzun bir bölgede meydana geldiği Şekil 9'dan anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Kanat genişliğine göre kanat üst yüzeyindeki erozyon oranı değişimi



Şekil 9. Kanat genişliğine göre kanat alt yüzeyindeki erozyon oranı değişimi

SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir helikopter kanadı yüzeyinde katı parçacıkların oluşturduğu erozyon hasarı HAD yöntemi kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Yapılan analiz neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Katı parçacıkların çarpma hızı, erozyon hasarını etkilemekte ve yüksek çarpma hızı yüksek erozyon hasarı oluşturmaktadır.
- 2) Parçacık çarpma açısı ve kullanılan kalkan malzeme özelliklerine bağlı olarak düşük ve yüksek çarpma açılarında erozyon oranı düşük iken, yaklaşık 30° derece çarpma açılarında erozyon oranı yüksek olmaktadır.
- 3) Katı parçacık-akış etkileşimli metalik bir yüzeydeki erozyon hasarı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak kolay, hızlı ve etkili bir şekilde belirlenebilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya vermiş oldukları desteklerden dolayı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ) Döner Kanat Teknoloji Merkezine (DKTM) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Aguilar, H. A. L., Gómez, J. A., Merino, M. A., Möller, A. D., Borunda, E. O., Hernández, A. P., 2011. *Erosion case study by Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling and optimization in situ of clinker sampler probe design*, *Applied Mathematics, Computational Science and Engineering*, 13-25.

Det Norske Veritas, 2007. Recommended Practice RP 0501: *Erosive Wear in Piping Systems*.

Finnie, I., 1960. *Erosion of surfaces by solid particles*, *Wear* 3: 87–103.

FLUENT 6.3 User's Guide, 2006. Inc., FLUENT.

Li, L., 2008. *Structural design of composite rotor blades with consideration of manufacturability, durability, and manufacturing uncertainties*, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, ABD.

Menter, F. R., Kuntz, M. ve Langtry, R., 2003. *Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*. Begell House, Inc.

Shin, B. G., 2010. *Prediction of sand particle trajectories and sand erosion damage on helicopter rotor blades*, PhD Thesis, The Pennsylvania State University, ABD.

URL_1: <http://www.talkingproud.us/Military/CH47/CH47HappyHooker.html>