

DÜZ DIŞLİLERDEKİ HAVA SÜRTÜNME GÜÇ KAYBININ İKİ FAZLI ORTAMDA NUMERİK ANALİZİ

Mehmet Ali YAVUZ¹
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii
A.Ş., Ankara
TOBB Ekonomi ve Teknoloji
Üniversitesi, Ankara

Ali Kıvanç ERSAN²
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii
A.Ş., Ankara
TOBB Ekonomi ve Teknoloji
Üniversitesi, Ankara

Murat Kadri AKTAŞ³
TOBB Ekonomi ve Teknoloji
Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Hava sürtünme (Windage) güç kayıpları, dişli kutusundaki dişlilerin dönen yüzey ve yan kısımları nedeniyle oluşan hava – yağ damlacığı akışındaki viskoz kayıplar nedeniyle oluşur. Literatürdeki teorik araştırmalar çoğunlukla tek fazlı (hava) akıştaki kayıplara yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, dişlilerin arasındaki akış, yüksek türbülanslı akıştaki yağ parçacıklarının etkisi de göz önünde bulundurularak açıklanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı dişlilerdeki hava sürtünme kaybının aerodinamiğine dair fiziksel kavrayışı geliştirmektir. Bu amaçla, açık literatürde deneysel ve teorik hava sürtünme güç kaybı verileri hali hazırda bulunan bir dişli geometrisi incelenmiştir. Sayısal hesaplamaların gerçekleştirilmesi amacıyla ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği algoritması (CFD++) kullanılmıştır. Dişli geometrisinin serbest veya farklı muhafazalar içinde farklı rotasyon hızlarında dönüşü çalışılmıştır. Yağ damlacıklarının hava sürtünme kayıplarına olan etkisi hesaplanmıştır.

GİRİŞ

Hava sürtünme güç kayıpları, dişli üzerinde etki eden aerodinamik kuvvetler nedeniyle oluşmaktadır. Bu kuvvetler, rotasyona karşı tork yaratmakta ve dişli yüzey sıcaklıklarını artırmaktadır. Artan yüzey sıcaklıkları uygun soğutma yapılmadığı takdirde dişli kutusu ve motor zarar görebilir. Ayrıca, motorun harcadığı yakıt ve dişliyi soğutmak için kullanılan yağ miktarını artırır. Bu durum, döner kanatlı hava araçlarında bulunana transmisyon sistemlerine yönelik ağırlık sınırlamalarına karşı ek zorluklar çıkarabilir. Bu yüzden, bu araçlardaki hava sürtünme kayıpları detaylı bir şekilde analiz edilmeli ve mümkün olduğunca azaltılmalıdır.

Hava sürtünme güç kayıplarını azaltma amacıyla yapılan çalışmalar büyük çoğunlukla dişli çevresini bir muhafaza yardımıyla kapatmak üzerine kurulmuştur. Radyal ve eksenel yönde yerleştirilen muhafazalar yardımıyla dişli çevresindeki akış düzenlenerek kayıplar azaltılır. Literatürde, muhafaza kullanımı sayesinde kayıplar %80 oranına kadar azaltılabilmektedir [Hill,2011]. Hava sürtünme kayıplarını azaltabilmek için bir diğer yöntem, dişli geometrisinde değişiklikler yapılmasıdır. Fakat dişli geometrisinin değiştirilmesi güç aktarımını etkileyeceğinden, hava sürtünme kaybını azaltmak için yapılan çalışmalarda daha geri plandadır.

Hava sürtünme güç kayıpları, deneysel, teorik ve sayısal teknikler kullanılarak ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Bununla birlikte, bu araştırmalar çoğunlukla hava ortamında dönen dişliler üzerinde yoğunlaşmıştır. İki fazlı (hava-yağ buharı) çalışma koşullarındaki dişlilerdeki hava sürtünme güç kaybını ön planda tutan çalışma sayısı oldukça azdır. Literatürde yer alan, hava ortamında yapılmış çalışmalar şu şekilde sıralanabilir. Dawson, tek dişli veya diskin hava ortamında yavaşlamasını ölçerek hava sürtünme kaybını hesaplayacak bir model sunmuştur [Dawson, 1984].

¹ Proje Mühendisi & Yüksek Lisans, TOBB ETU Makine Müh. Böl. , E-posta: mehmetali.yavuz@tai.com.tr

² Proje Mühendisi & Yüksek Lisans, TOBB ETU Makine Müh. Böl. , E-posta: alikivanc.ersan@tai.com.tr

³ Doçent, TOBB ETU Makine Müh. Böl. E-posta: maktas@etu.edu.tr

Daha sonrasında, hava sürtünme güç kaybı kinetik enerji teoremi kullanılarak hesaplanmıştır. Diab vd. , farklı dişli geometrileri için deneyler yapmış ve elde ettikleri sonuçları teorik korelasyonlarla karşılaştırmıştır [Diab vd. , 2005]. Hill vd. , muhafazasız ve muhafazalı dişlilerdeki tek fazlı akışı analiz etmek için geliştirdikleri bir HAD metodunu kullanmışlardır[Hill vd. , 2011]. Ayrıca, hava sürtünme güç kaybını düşürmek için dişli geometrisinde yapılabilecek değişikliklerden bahsedilmiştir.

İki fazlı ortamda yapılmış bazı çalışmalar ise şu şekilde sıralanabilir. Anderson vd., yağa batırılmış şekilde dönen düz dişli setlerindeki güç kayıplarının tahmin edilmesi amacıyla analitik bir formül önermiştir [Anderson, Loewenthal ve Black, 1986]. Seetharaman ve Kahraman, iki fazlı ortamda dişli dönüşü nedeniyle oluşan kayıpların tahmin edilmesi amacıyla fizik temelli bir akışkanlar dinamiği metodu üzerinde çalışmışlardır [Seetharaman ve Kahraman, 2010]. Kunz vd. , Hill vd. 'nin çalışmasını genişleterek, yağ damlacıklarının etkisini de göz önünde bulundurmıştır [Kunz vd. , 2012]. Sonuç olarak, hava sürtünme kayıplarının daha hassas bir şekilde tahmin edilmesi için, yağ buharının etkisinin de katılması gerektiği görülmüştür. Simmons ve Johnson, ayna dişlilerdeki hava sürtünme kayıplarına etkisini araştırmak adına bir takım deneyler düzenlemiş ve bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli oluşturmuşlardır [Simmons ve Johnson 2014]. Bu çalışmanın üzerinekonik ayna dişli üzerindeki iki fazlı akışı modellemek amacıyla bir Euler Çoklu Faz modeli kullanmış ve deneylerle karşılaştırılmıştır [Al, Simmons, ve Morvan, 2015]. Arisawa vd. , konik aynalı dişliler için iki fazlı ortamda (hava-yag buharı) sayısal analizler gerçekleştirmiştir [Arisawa vd. , 2014]. Analizler sonucunda, muhafaza kullanılması durumunda hava sürtünme ve yağ çalkalanma kayıpları önemli oranda azaltılmıştır. Arisawa vd. , ayrıca iki fazlı akışta akışkanlar nedeniyle oluşan kayıpları anlamak amacıyla konik ayna dişliler üzerinde deneyler yapmış ve bu deneyleri sayısal analizler ile doğrulamışlardır [Arisawa vd. , 2017].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, düz dişliler için iki fazlı ortamda hava sürtünme güç kayıplarını ön planda tutan çalışmaların eksikliği göze çarpmaktadır. Bu makalede, düz dişlilerdeki hava sürtünme güç kayıpları tek fazlı akış (hava) ve iki fazlı akış (hava ve yağ) yaklaşımları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Hava sürtünme güç kayıplarına neden olan fiziksel mekanizmalar detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Dişlilere radyal ve eksenel yüzeylerde uygulanan muhafazanın güç kaybına etkisini araştırmak amacıyla, farklı muhafaza aralıklarına sahip dişliler iki fazlı ortamda sayısal olarak analiz edilmiştir.

YÖNTEM

Diab vd. tarafından hava ortamında deneylere tabi tutulmuş ve Hill vd. tarafından hava ortamında serbest ve muhafazalı durumlar için sayısal simülasyonları yapılmış Diab Dişli 1 geometrisi, HAD modelini doğrulamak amacıyla yapılacak sayısal analizlerde kullanılmıştır. Bu dişlinin geometrik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu dişli için, 400 - 700 rad/s arasındaki rotasyon hızlarında, tek fazla ve iki fazlı ortamlarda, serbest veya muhafaza içerisinde döndüğü durumlar için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Eksenel ve radyal yönde kullanılan muhafaza aralıkları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Dişli Özellikleri

Diş Çapı (mm)	Diş Genişliği (mm)	Modül (mm)	Diş Sayısı
288	30	4	72

Tablo 2: Muhafaza Aralıkları (Hill vd. , 2011)

	Dar (mm)	Geniş (mm)
Eksenel	0.6	25.6
Radyal	0.6	14.3

Sayısal analizler sırasında daimi rejim için akım alanları hesaplanmıştır. Tablo1’de verilen dişli geometrisi ve rotasyon hızları için dişli çevresindeki ve dişli ile muhafaza arasındaki akış türbülanslıdır. Bu yüzden, problemin çözümünde sıkıştırılmaz üç boyutlu Navier – Stokes denklemlerinin yanı sıra $k - \omega$ (SST) türbülans modeli de uygulanmıştır. Simülasyonlarda Metacomp CFD++ ticari kodu kullanılmıştır. İki fazlı akış için ise Eulerian Dağınık Faz (EDP) modeli kullanılmıştır. Bu modelde, ikincil fazlar için akış denklemleri ayrı olarak çözümlenmekte, bu sayede iki faz arasındaki göreceli hareket modellenenbilmektedir. Akış ve türbülans denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{u}_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (3)$$

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

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (SST \text{ modeli}) \quad (5)$$

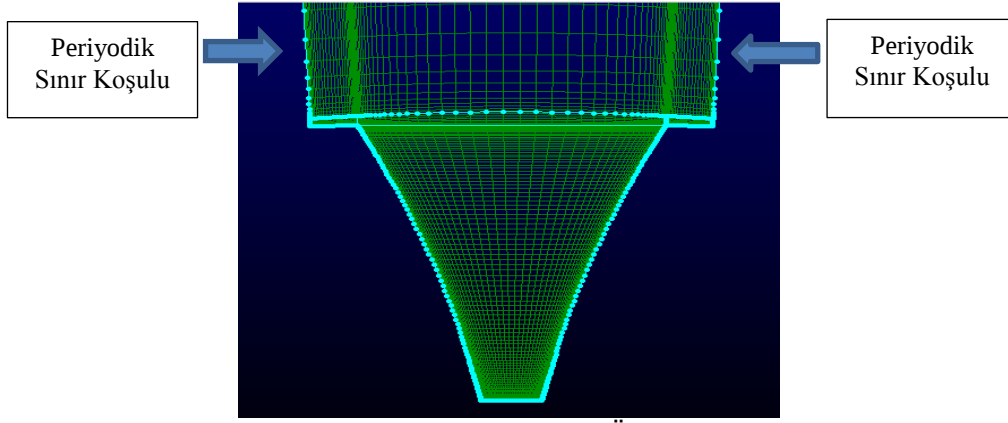
Duvar yakınlarında oluşan sınır tabaka oluşumlarının yakalanabilmesi adına, CFD++ ticari kodunda bulunan bir duvar işleme fonksiyonu kullanılmış ve bu fonksiyonun gerekliliklerine uyacak şekilde bütün sayısal analizler için $y^+ < 12$ koşulu sağlanmıştır.

$$y^+ = \frac{\rho y u_\tau}{\mu} \quad (6)$$

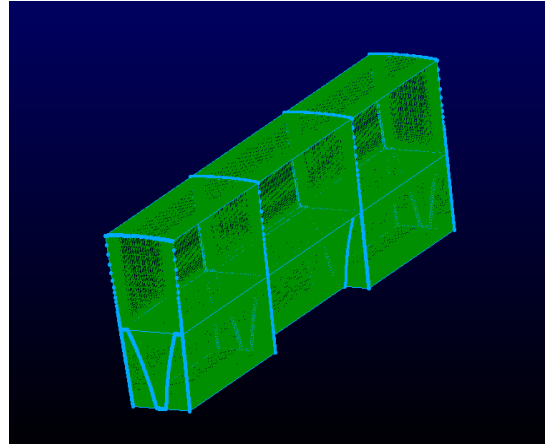
Ağ yapısının hareketini modellemek için Hareketli Referans Düzlemi (MRF) Metodu kullanılmıştır. MRF metodu sayesinde akış ve türbülans denklemleri sabit bir atalet düzlemi yerine hareketli bir referans düzlemi üzerinde çözülebilir. Dişli duvarları bu özellik kullanılarak ağ yapısına göre sabit kabul edilip ağ yapısı ile aynı hızda dönmesi sağlanmıştır.

$$\left. \frac{D \vec{u}_{abs}}{Dt} \right|_{abs} = \left. \frac{D \vec{u}_{abs}}{Dt} \right|_{rel} + \vec{\Omega} \times \vec{u}_{abs}, \quad (7)$$

Simülasyonların hesaplama maliyetinin düşürülmesi amacıyla bütün geometri yerine yalnızca tek bir diş boşluğu hesaplama alanı olarak modellenmiştir. Periyodik sınır koşulları Şekil 1’de de gösterildiği gibi, diş boşluğunun üst tarafında iki tarafta bulunan sınır koşullarında tanımlanmıştır. Katı duvarlara kaymaz sınır koşulları uygulanmıştır. Muhafazasız dişli yapısındaki serbest çıkış sınır koşulu diş boşluğundan yeterince uzağa yerleştirilmiş ve çevre koşullarına göre hava akışı olmayacak şekilde tanımlanmıştır. Şekil 1’de örnek 2D yapı bir ağ yapısı ve bu ağ yapısının üzerinde periyodik sınırlar gösterilmiştir. Toplam hücre sayısı 2D analizler için 5000 ile 20000, üç boyutlu analizler için 600000 ile 2000000 arasında değişmektedir. Ağ yapısı yoğunluğu dişli duvarlarına yaklaşıldıkça artmaktadır.



Şekil 1: 2D Ağ Yapısı Örneği

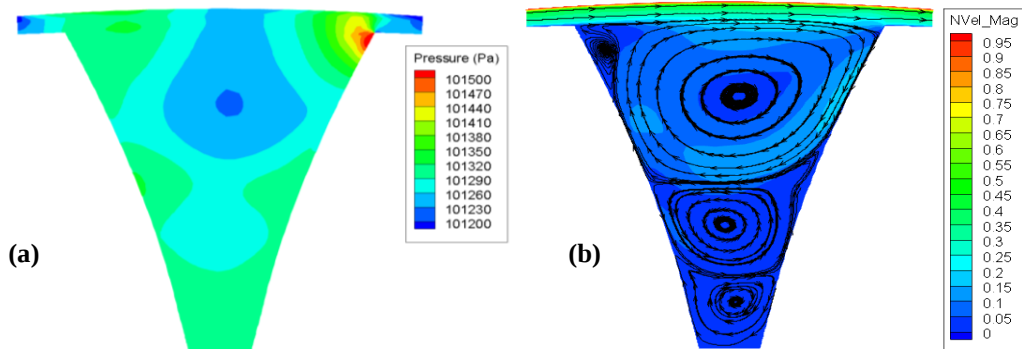


Şekil 2: 3D Ağ Yapısı Örneği

UYGULAMALAR

Tek fazlı (hava) ortamdaki analizler

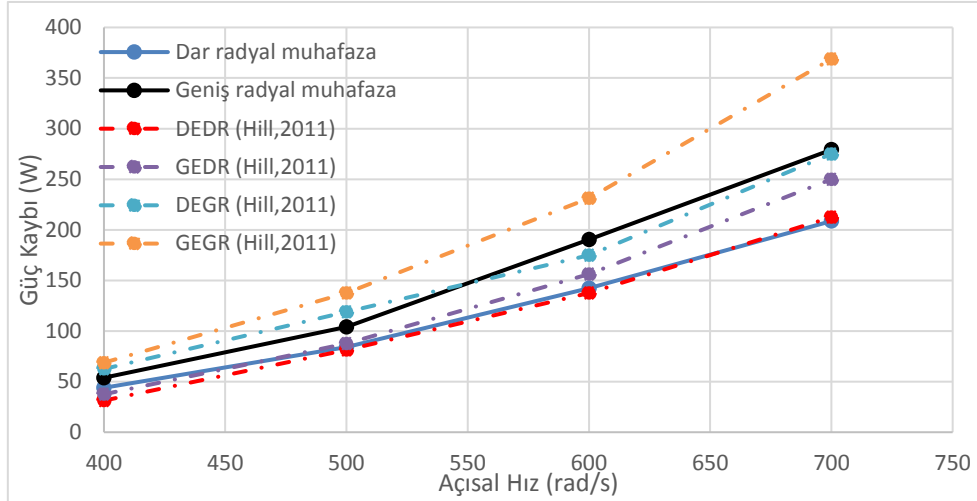
İlk olarak, sayısal modelin doğrulanması için hava ortamında dönen düz dişliler için simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 2'de dar radyal muhafazalı dişli için 300 rad/s'de diş boşluğundaki akım çizgileri, boyutsuzlaştırılmış göreceli hız büyüklükleri ve basınç dağılımı gösterilmiştir. Boyutsuzlaştırmada maksimum teğet hız kullanılmıştır. Sırasıyla birbirlerine ters yönde dönen üç farklı girdap yapısı tahmin edilmiştir.



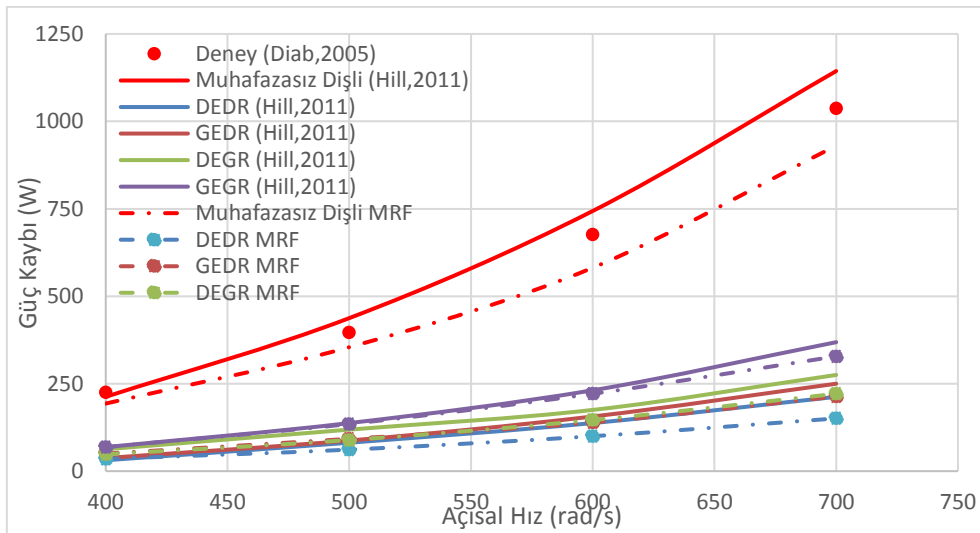
Şekil 3: Hava ortamındaki sayısal analizler için (a) Akım çizgileri ve normalize edilmiş göreceli hız büyüklükleri, (b) Basınç dağılımı (@ 300 rad/s)

Analizlerdeki akış alanları ile Hill vd. çalışmasında tahmin edilen akış alanları arasında benzerlikler bulunmaktadır. Diş boşluğundaki maksimum basınç değişimi 300 Pa bulunmuş olup maksimum basınç değeri dişlinin sağ yüzünün üst kısmında gözlemlenmiştir. 2D ve 3D ağ yapıları üzerinde

yapılan analizler sonucunda elde edilen hava sürtünme güç kayıpları Şekil4 ve Şekil5 'te verilmiştir.



Şekil 4: Tek Fazlı 2-D Simülasyonların Literatür ile Karşılaştırılması



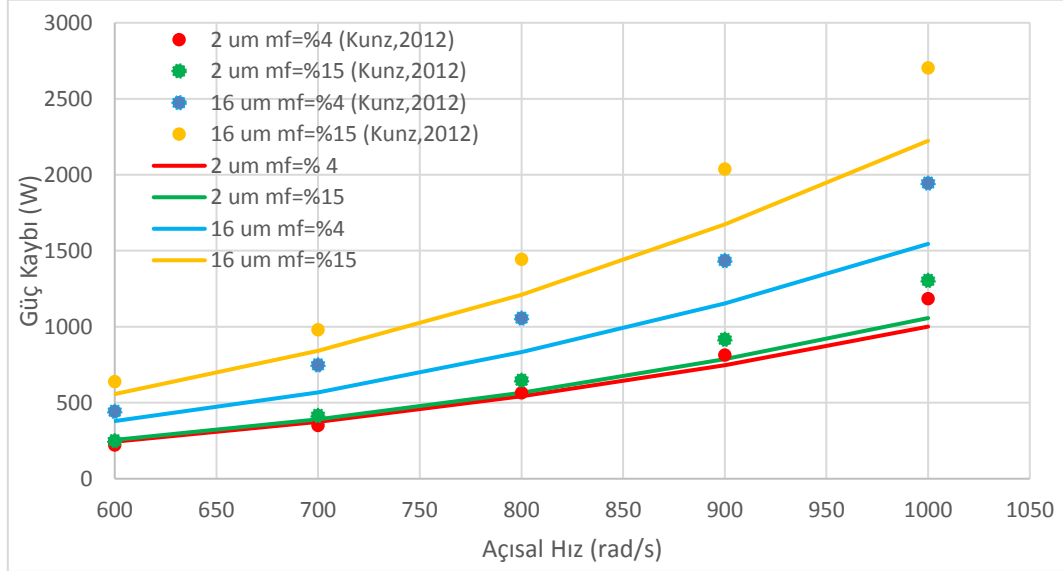
Şekil 5: Tek fazlı 3-D Simülasyonların Literatür ile Karşılaştırılması

Hava sürtünme güç kayıpları, basınç ve kayma kuvvetleri nedeniyle dişliye etki eden tork değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. CFD++ yazılımından alınan bu tork değerleri, rotasyon hızı ile çarpılarak güç kaybı değerleri elde edilmiştir. Muhafazasız dişli için yapılan analizler, Diab vd. tarafından yapılan deney sonuçları ile oldukça yakın bulunmuştur [Diab, 2005]. Muhafaza kullanımı sayesinde, hava sürtünme kayıplarında büyük miktarda azalma gözlemlenmiştir. Analizlerde sonuçlar, içeren muhafazalı analizlerde ise Hill vd. analizleri sonucu bulunduğu güç kaybı değerlerine oldukça yakın değerler elde edilmiştir [Hill,2011]. Bununla birlikte, sayısal analizler sonucu bulunan güç kaybı değerleri literatürdeki sayısal analiz sonuçlarından genelde daha düşüktür.

İki fazlı (hava- yağ damlacığı) ortamdaki analizler

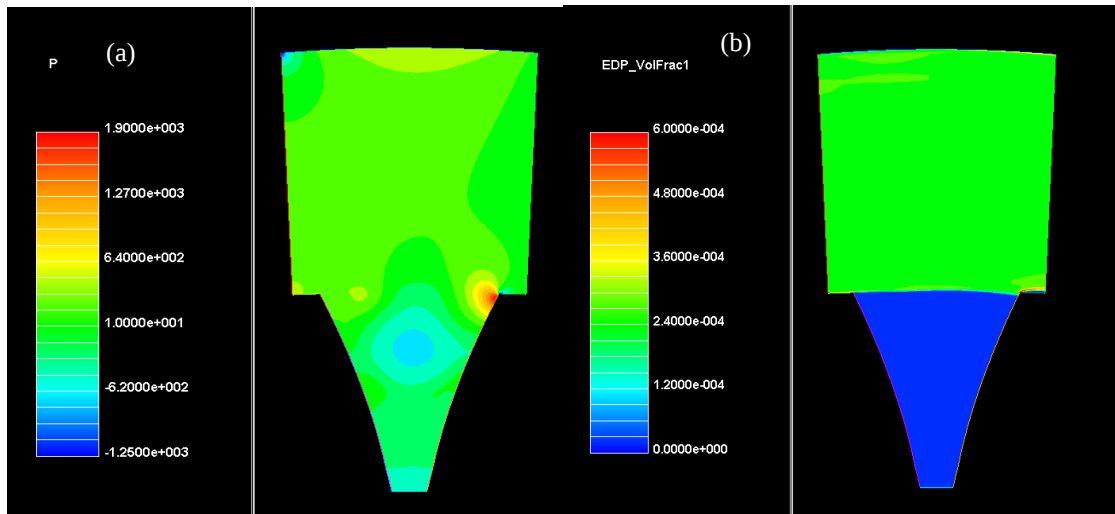
Yağ buharının hava sürtünme güç kaybına olan etkisi incelenmiştir. Euler Dağınık Faz (EDP) modeli kullanılarak, hava ve yağ parçacıkları arasındaki göreceli hareket nedeniyle kaynaklanan akış alanı değişikliklerinin hava sürtünme kayıplarına etkisi modellenmiştir. Bu doğrultuda 2D, literatürdeki gibi $0.101R_{tip}$ muhafaza aralığı kullanılarak iki fazlı analizler gerçekleştirilmiştir [Kunz,2012]. Analizlerde eksenel yöndeki değişimler ihmal edilmiştir. İki farklı çapta ($2\ \mu\text{m}$, $16\ \mu\text{m}$) yağ parçacığı kullanılmıştır. Hava- yağ karışımındaki yağ parçacık miktarları ise %4 ve %15'tir. Şekil 6'da iki fazlı sayısal analizler sonucu bulunan hava sürtünme kayıpları, Kunz vd. tarafından

yapılmış sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [Kunz, 2012]. Hesaplama süresindeki kazanç da düşünüldüğünde, iki boyutta yapılan simülasyonlar sonucunda hava sürtünme kaybının açılal hızla bağılı olarak değişimi oldukça başarılı bir biçimde hesaplanmıştır. Açılal hız yükseldikçe, akışın sıkıştırılabilir akış etkilerine maruz kalması sebebiyle hata miktarı artmaktadır. Özellikle, 16 μm çaplı yağ parçacıkları ile yapılan analizler sonucunda yapılan analizler sonucunda hava sürtünme kayıplarında ciddi bir artış elde edilmiştir.



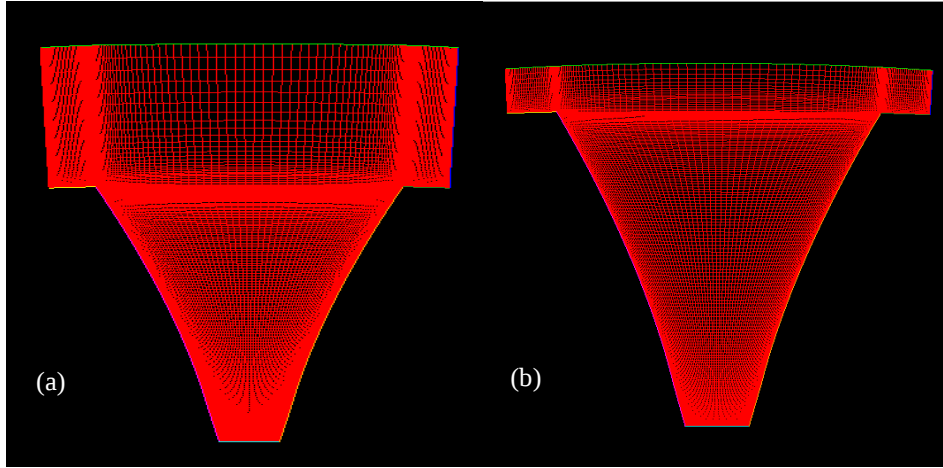
Şekil 6: İki fazlı ortamda yapılan 2D analizlerin literatür ile karşılaştırılması

Şekil 7'da ise $0.05R_{tip}$ aralıklı muhafaza kullanılan dişlide 600 rad/s'de, 2 μm tanecik çapı ve %15 kütle fraksiyonuna sahip durumda yapılan simülasyon için basınç konturu (a) ve ikincil faz hacim konsantrasyonu (b) gösterilmiştir. Basınç dağılımı incelendiğinde, Şekil 3'te tek fazlı durum için verilmiş basınç dağılımı ile hemen hemen aynı özellikleri taşıdığı görülmektedir. Bu durumun nedeni, merkezci kuvvet etkileri nedeniyle diş boşluğu üst kısmına kaçan yağ taneciklerin diş boşluğundaki akışın niteliğini değiştirememesidir. Bu durumla beraber, üst kısımda toplanan yağ parçacıkları, diş boşluğundaki havayı sıkıştırdığından basınç değerleri ciddi bir biçimde artmaktadır. Yağ parçacıklarının dağılımı Şekil 7(b)'de görülebilir. Görüldüğü gibi yağ büyük çoğunlukla üst tarafta toplanmaktadır. Diş boşluğunun sağ üst kısmında akışın ayrıldığı kısımda ise bir ince yağ filmi oluşumu gözlemlenmektedir.



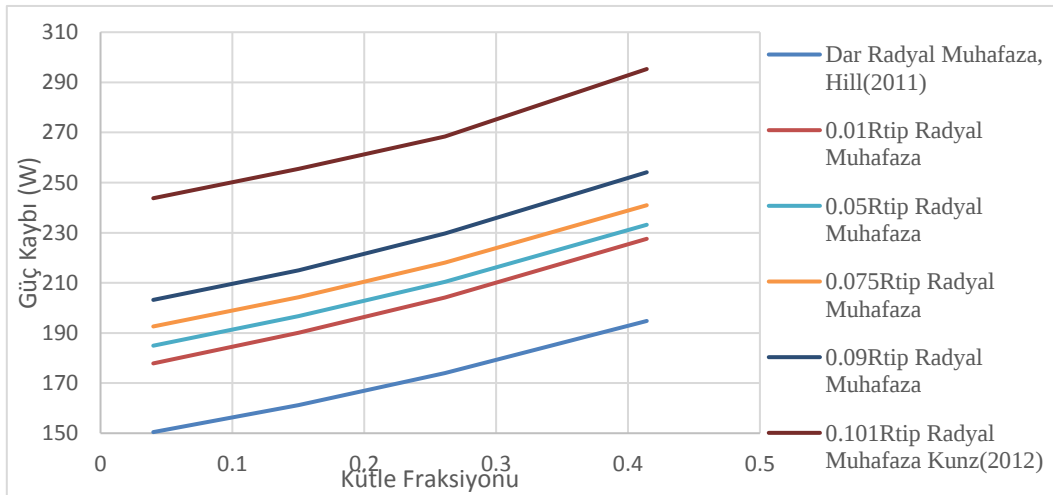
Şekil 7: $0.101 R_{tip}$ muhafaza aralıklı dişlideki (a) basınç konturu (b) ikincil hacim konsantrasyonu dağılımı

Muhafaza boşluk boyutunun iki fazlı ortamda hava sürtünme güç kaybına etkisini araştırmak adına dar radyal muhafaza ve Kunz(2012) makalesindeki radyal muhafaza boşluk boyutu arasında çeşitli muhafaza durumları incelenmiştir. Şekil 5'te, bu durumlara örnek olarak (a) $0.05R_{tip}$ muhafaza aralıklı dişli ve (b) $0.01R_{tip}$ muhafaza aralıklı dişli gösterilmiştir.



Şekil 8: (a) $0.05R_{tip}$ aralıklı muhafazalı dişli (b) $0.01R_{tip}$ aralıklı muhafazalı dişli

Şekil 9'da, çeşitli radyal muhafaza aralıklarına sahip durumlar için farklı yağ kütle oranlarında yapılan simülasyonlar için ortaya çıkan güç kayıpları gösterilmiştir. Analizler sonucunda, radyal muhafaza aralığı arttıkça güç kaybının da arttığı görülmüştür. Fakat bu artışın aralık boyutuyla doğru orantılı olmadığı özellikle düşük ve yüksek aralık durumlarında değişimin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

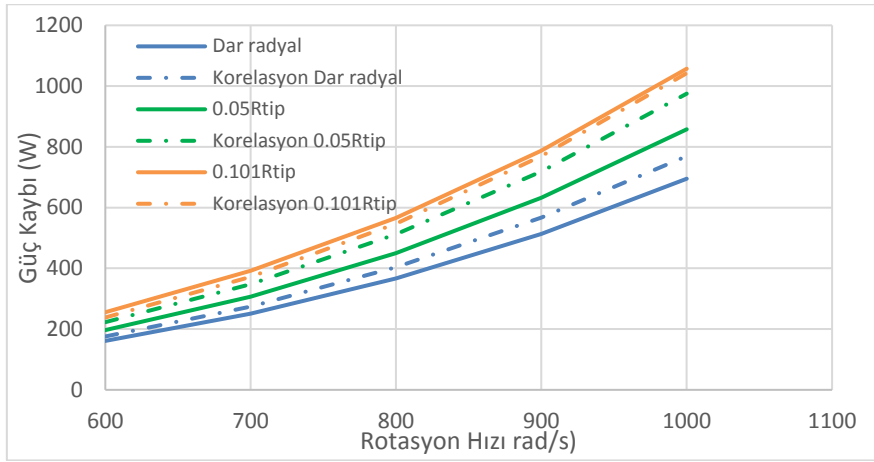


Şekil 9: Muhafaza aralığının güç kaybına etkisi (2 µm tanecik çapı, @ 600 rad/s)

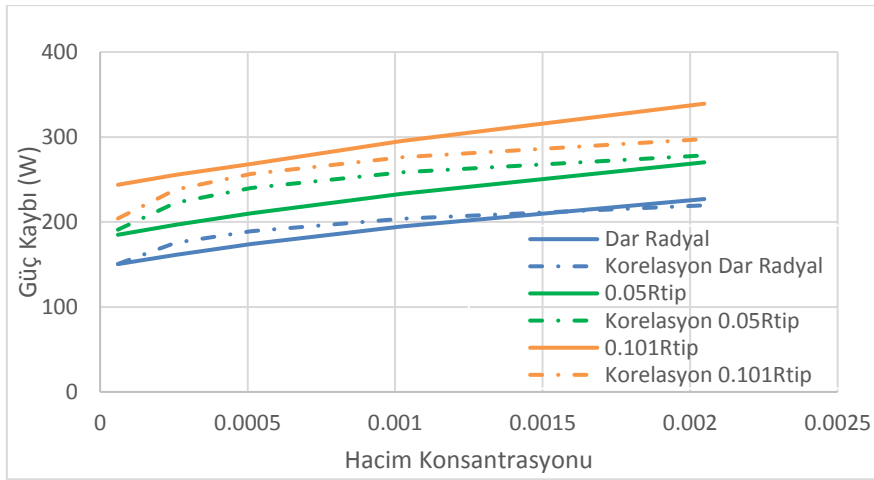
İki fazlı, 2D sayısal analizlerden yararlanılan ve rotasyon hızı, yağ miktarı ve muhafaza aralığının etkisini barındıran bir korelasyon aşağıda verilmiştir. Bu korelasyon, Diab dişli 1'de yapılan iki fazla sayısal analizleri maksimum %10 hata payında tahmin edebilmektedir.

$$P_w = 8.05 * 10^{-6} w^{2.89} (\Delta r)^{0.095} v_f^{0.107}$$

Şekil 10 ve Şekil 11'de değişen rotasyon ve yağ miktarlarına göre sayısal analizlerin korelasyon tarafından tahmin edilen güç kaybı değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil10: Korelasyonun sayısal analizlerle karşılaştırılması (2 µm tanecik çapı, @ $v_f = 6.04 \cdot 10^{-4}$)



Şekil10: Korelasyonun sayısal analizlerle karşılaştırılması (2 µm tanecik çapı, @600 rad/s)

Şekil 10 ve Şekil 11’de görülebildiği gibi rotasyon hızının etkisi muhafaza boşluğu ve yağ miktarına göre daha etkilidir. Fakat dişli kutularındaki rotasyon hızları güç aktarımı için önemli olduğundan, muhafaza boşluk aralığı ve ortamdaki yağ miktarı kolay değiştirilebilen parametrelerdir ve hava sürtünme kaybının azaltılmasında daha ön planda tutulmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, tek fazlı ve iki fazlı ortamda, muhafazalı ve muhafazasız düz dişlilerde hava sürtünme güç kaybı modellenmiş ve hesaplanmıştır. Elde edilen güç kaybı değerleri literatürle doğrulanmıştır. Ayrıca, muhafaza boyutlarının değişiminin akış alanına ve hava sürtünme güç kaybına etkisi, Euler Dağınık Faz modeli kullanılarak çalışılmıştır. İki fazlı sayısal analizlerden yararlanılarak bir korelasyon önerilmiştir. Şu ana kadarki çalışmaların sonucunda;

- Hava sürtünme kayıplarının açılal hızla arttığı,
- Muhafaza kullanımı sayesinde kayıpların ciddi ölçüde azaltılabileceği,
- Ortamda yağ bulunmasının hava sürtünme kayıplarını artırdığı,
- Yağ tanecik boyutu arttıkça, hava sürtünme kayıplarının da arttığı,
- Muhafaza boyunun azaltılmasının hava sürtünme kayıplarını azalttığı,

görülmüştür.

İki fazlı ortamda, 3D analizler üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir. 3D analizler dişlinin eksenel düzleminde gerçekleşen kayıpların modellenmesi açısından önemlidir. Gelecekte, farklı

tür dişli geometrileri (konik ayna dişli, helisel dişli vs.) için de benzer HAD modelleri oluşturulması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma DKTM/2015/14 numaralı proje kapsamında yapılmaktadır. Bu doğrultuda, bu çalışmaya katkılarından dolayı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. - Döner Kanat Teknoloji Merkezi'ne (DKTM) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Al, Baydu C., Kathy Simmons, and Hervé P. Morvan. 2015. "Two-Phase Computational Modelling of a Spiral Bevel Gear Using a Eulerian Multiphase Model." (56734):V05CT15A030
- Anderson, N. E., S. H. Loewenthal, and J. D. Black. 1986. "An Analytical Method to Predict Efficiency of Aircraft Gearboxes." *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design* 108(3):424–32.
- Arisawa, H., Nishimura, M., Imai, H., Goi, H., 2014 Computational Fluid Dynamics Simulations and Experiments for Reduction of Oil Churning Loss and Windage Loss in Aeroengine Transmission Gears, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 136, pp. 092604-1-9.
- Arisawa, Hidenori et al. 2017. "CLASSIFICATION OF FLUID DYNAMIC LOSS IN AEROENGINE." 1–10.
- Dawson, P. H., *Windage Losses in Larger High-Speed Gears*, 1984, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part A: Power and Process Engineering*, Vol. 198A, pp. 51–59.
- Diab, Y., Ville, F., Changenet, C., Velez, P., 2004, *Windage Losses in High Speed Gears—Preliminary Experimental and Theoretical Results*, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 126, pp. 903-908.
- Hill, M. J., Kunz, R. F., Medvitz, R. F., Handschuh, R. F., Long, N. L., Noack, R. W., Morris P. J., 2011, *CFD Analysis of Gear Windage Losses: Validation and Parametric Aerodynamic Studies*, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 133, pp. 031103-1-10.
- Kunz, R. F., Hill, M. J., Schmehl K. J., McIntyre S. M., 2012, *Computational Studies of the Roles of Shrouds and Multiphase Flow in High Speed Gear Windage Loss*, *American Helicopter Society 68th Annual Forum*, Fort Worth, TX, May 1-3, 2012.
- Seetharaman, Satya and Ahmet Kahraman. 2010. "A Windage Power Loss Model for Spur Gear Pairs." *Tribology Transactions* 53(4):473–84.
- Simmons, Kathy and Graham Johnson. 2014. "EFFECT OF PRESSURE AND OIL MIST ON WINDAGE POWER LOSS OF A." 1–9.