# GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDAKİ RADYAL İÇE DOĞRU AKIŞLI ROTOR-STATOR BOŞLUKLARININ HAD ANALIZI İLE İNCELENMESİ

Mustafa Cem Sertçakan<sup>1</sup>, Erinç Erdem<sup>2</sup>, Sinan Şal<sup>3</sup>

TEI TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş., Eskişehir

Yahya Doğu⁴

Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale

### ÖZET

Gaz türbinli motorlarda bulunan rotor-stator boşlukları, motorun performansı, verimi ve güvenirliliği bakımından kritik öneme sahiptir. Rotor-stator boşlukları, rulman ömrünü belirleyen parametrelerden biri olan eksenel yük hesaplarında, türbin disk bölümüne sıcak gaz girişinin engellenmesinde ve soğutma havasının transfer edilmesinde önemli görev alır. Bu nedenle rotor-stator boşlukları üzerinde basınç, sıcaklık, teğetsel hız oranı değişiminin doğru hesaplanması önemlidir. Bu çalışma kapsamında radyal içe doğru akışlı rotor-stator boşluklarındaki, giriş teğetsel hız oranın (xK1), rotor dönüş hızının ve akış debisinin, boşluk boyunca teğetsel hız oranına (xK) etkisi HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ile incelenmiştir. Teğetsel hız oranının (xK) doğru belirlenmesi ve etkileyen parametrelerin tespiti, rotor-stator boşluklarındaki akışkanın basınç, sıcaklık gibi parametrelerindeki değişimi anlayabilmek adına önemlidir. HAD analizleri 2-Boyutlu eksenel simetrik olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak k–∞ SST kullanılmıştır. HAD analizinden elde edilen veriler, literatürde bulunan boyutsuz test verileri ile karşılaştırılmıştır.

### SEMBOLLER

Cw = m/µr, boyutsuz debi	s = eksenel mesafe
G = s/r2, eksenel boşluk oranı	xK = Vθ/ωr, teğetsel hız oranı
L = 100/t, ölçeklendirilmiş türbülans akış	xK1 = Vθ1/ωr, giriş teğetsel hız oranı
parametresi	Vθ = teğetsel hız
m = debi	Vcθ = çekirdek akışın teğetsel hızı
p = statik basınç	λI = CwReθ <sup>-0.5</sup> , laminer akış parametresi
r = yarıçap	$\Lambda t = CwRe\theta^{-0.8}$ , türbülanslı akış parametresi
r1 = iç yarıçap	$\mu$ = viskozite
r2 = dış yarıçap	ρ = yoğunluk
Reθ = $\rho\omega r2/\mu$ , teğetsel Reynolds sayısı	$\omega$ = teğetsel hız

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Kıdemli Mühendis, E-posta: mustafacem.sertcakan@tei.com.tr

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Şef Mühendis, E-posta: erinc.erdem@tei.com.tr

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Şef Mühendis, E-posta: sinan.sal2@tei.com.tr

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Prof. Dr., Makine Mühendisliği Böl. E-posta: yahya.dogu@hotmail.com

## GİRİŞ

Güvenilir bir ikincil hava sistemi tasarımı, gaz türbinli motorların performansı ve güvenliği için kritik öneme sahiptir. Gaz türbinli motorların tasarımının artan taleplerini karşılayabilmesi, çeşitli çalışma koşullarında ikincil hava sistemi (İHS) davranışını doğru tahmin etmekten geçmektedir. Gaz türbinli motorlarda ikincil hava sisteminin görevleri üç ana başlıkta sıralanabilir. Bunlar; gerekli olan bileşenler için soğutma havasının sağlanması, türbin disk bölgelerine sıcak gaz girişinin engellenmesi için gerekli olan havanın sağlanması, yatak bölgelerinde sızdırmazlığın sağlanması ve eksenel yük yönetiminin yapılması şeklindedir. İkincil hava sistemleri, fonksiyonlarını yerine getirirken motor çalışma zarfı boyunca değişikliklerden az etkilenen –gürbüz– tasarım felsefesine sahip bir anlayış ile tasarlanmalıdır. Gürbüz bir tasarım yapabilmek için sistemi etkileyen parametrelerin etkilerinin belirlenmesi gereklidir. Aşağıda Şekil 1'de Örnek türbin ikincil akış ağı görülmektedir.



Şekil 1: Örnek Türbin İkincil Akış Ağı [Sultanian, 2018]

İHS'nin görevlerini gürbüz bir şekilde yerine getirilmesinde rotor-stator boşluklarındaki akışın basıncının, sıcaklığının, teğetsel hız oranının ve rotor diski üzerinden pompalanan debi miktarının mümkün olduğunca doğru belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Tasarım esnasında bu parametrelerin belirlenmesine yönelik kullanılan yöntemler 3 grupta kategorize edilebilir. Bu yöntemler aşağıda listelenmiştir:

- Deneysel yöntem
- Sayısal yöntem
- Analitik yöntem

Deneysel yöntem; en gerçekçi sonuçları veren yöntemdir. Bununla birlikte, masraflı, zaman alıcı, emek yoğun ve zor bir uygulamadır. Bu yöntemde, boşluklar test edilerek kritik parametreler ölçülmektedir. Her geometrik farklılık için imalatın ve testin yapılma gerekliliği, türbin şartlarındaki özellikle basınç-sıcaklık-yüzey hızı değerlerinin test ortamında oluşturulmasının zorluğu ve akış alanın görsellenmesinin oldukça emek-masraf yoğun olması deneysel yöntemin başlıca zorluklarıdır.

Sayısal yöntem (HAD analizi); tasarım çalışmaları esnasında rotor-stator boşluklarının kritik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan etkili bir yöntemdir. HAD analizi; analitik yönteme göre geometri tam olarak temsil edildiği ve özellikle akış fiziğine yönelik daha az kabul barındırdığı için deneysel yönteme daha yakın sonuçlar vermektedir. Boşlukların geometrik özellikleri ile çalışma şartlarında analiz edilmesi, analiz sonucunda akış alanının tamamının görsellenmesi, istenilen

yerde istenilen değerlerin okunabilmesi, geometri üzerinde değişiklik yapılması halinde tekrar analiz etmenin kolay olması, bu yöntemin en büyük üstünlüklerindendir. HAD analizinde; akış fiziğine en uygun türbülans ve çözüm metotları kullanılarak, akış alanı yeterli miktarda çözüm ağına bölünerek ve sayısal hatalar en aza indirgenerek çözüm yapılması ile deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde edilmesi sağlanır.

Analitik yöntem; ön tasarım esnasında kritik parametrelerinin belirlenmesinde oldukça hızlı bir yöntemdir. Daha önceden geliştirilmiş olan yarı-ampirik bağıntılar yardımıyla boşlukların kritik parametreleri belirlenebilir. Yöntemin en büyük dezavantajı korelasyonların belli bir aralıkta geçerli olması ve belli bir doğruluk değerine sahip olmasıdır. Fakat buna rağmen özellikle ön tasarım aşamalarında oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Rotor-stator boşluklarında genel olarak Batchelor [Batchelor, 1951] ve Stewartson [Stewartson, 1953] olmak üzere iki tip akış görülmektedir. Batchelor tarzı akış genel olarak çekirdek dönüşün bulunduğu ve rotor ve stator yüzeyinde ayrı sınır tabakaların oluştuğu akış tipidir. Stewartson tarzı akış ise genel olarak çekirdek dönüşün bulunmadığı ve rotor ve stator yüzeyinde birleşik sınır tabakaların oluştuğu akış tipidir. Aşağıda Şekil 2'de Rotor-stator boşluklarındaki karakteristik teğetsel, radyal ve eksenel hız profilleri gösterilmiştir.



Şekil 2: Rotor-stator boşluklarındaki karakteristik hız profilleri [ESDU, 2007]

Katı disk yüzeyinin yakınlığının bir fonksiyonu olmasının yanı sıra, bir rotor-stator sistemindeki akış karakteristikleri de akışın laminer veya türbülanslı olmasına bağlıdır. Üzerinden akıp giden akışı olmayan, kapalı rotor-stator boşluğu için yapılan ölçümler, boşluk oranının ve teğetsel Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak kategorize edilmiştir. Aşağıda Şekil 3'te boşluk oranı ve teğetsel Reynolds sayısına göre kategorize edilmiş akış rejim tablosu gösterilmiştir. [Daily ve Nece, 1960]

- Rejim 1: laminer akış, küçük açıklık, birleşik sınır tabaka
- Rejim 2: laminer akış, büyük açıklık, ayrık sınır tabaka
- Rejim 3: türbülanslı akış, küçük açıklık, birleşik sınır tabaka
- Rejim 4: türbülanslı akış, büyük açıklık, ayrık sınır tabaka



Şekil 3: Kapalı rotor-stator boşluklarındaki akış rejimleri [Daily ve Nece, 1960]

Helikopter, hafif uçaklar veya ticari jet tahriki için kullanılan küçük gaz türbinli motorlar, sağlamlıkları ve göreceli üretim kolaylıkları nedeniyle sıkıştırma işleminin tamamı olmasa da kısmen santrifüj kompresörleri içermeye meyillidir. Kompresör çarkı arka boşluklarında yeterli soğutma, sızdırmazlık ve eksenel yük kontrolü sağlama ihtiyacı nedeniyle tasarımlarında büyük farklılıklar olabilir. Şekil 4'te kompresör çarkı arka boşluğu için tipik konfigürasyonlar gösterilmiştir. Genel olarak motorun ikincil hava sistemi tasarımına bağlı olarak, boşluktan geçen hava akışı miktarı tipik olarak radyal olarak içeriye doğru kompresör giriş havasının %1.0'i ile radyal olarak dışarıya doğru kompresör giriş havasının % 1.0 arasında değişebilir. Yine motor tasarımına bağlı olarak bazı motorlarda hiç hava gönderilmeyebilir. [Hart, 1994]



Şekil 4: Kompresör çarkı arka boşluğu için tipik konfigürasyonlar [Hart, 1994]

Gaz türbinli motorlardaki kompresör çarkı arka boşluğu genel olarak radyal olarak içe doğru akış şekline sahiptir. Bazı durumlarda bu akış ters yöne doğru da olabilir. Türbin bölgesindeki rotorstator boşlukları ise radyal olarak dışa doğru akış şekline sahiptir. Çalışma kapsamında kompresör çarkı arka yüzeyinde yer alan ve radyal olarak içe doğru akışa sahip olan rotor-stator boşlukları kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 5'te rotor-stator boşluk geometrisi gösterilmiştir. Gaz türbinli motorlardaki kompresör çarkı arka boşluğu eksenel yük ve soğutma havası transferi bakımından kritik öneme sahiptir. Motor üzerinde genelde net eksenel yüke en büyük katkı sağlayan rotor-stator boşluğu, bu boşluktur. Ayrıca, üzerinden geçen havanın, türbin disk-kanatçık soğutma ve sıcak gaz girişini engellemek gibi görevleri bulunmaktadır. Bu nedenler ile kompresör çarkı arka boşluğu üzerinden geçen havanın basınç, sıcaklık, teğetsel hız oranı değişiminin doğru belirlenmesi oldukça önemlidir.



Şekil 5: Rotor-stator boşluk geometrisi

# YÖNTEM

HAD analizleri, 2-Boyutlu eksenel simetrik olarak yapılmıştır. Türbülans modeli olarak k –ω SST kullanılmıştır. Sürekli rejimde analiz yapılmıştır. Yoğunluk, ideal gaz olarak modellenmiştir. Viskozite, Sutherland denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Giriş bölgesinde toplam basınç ve sıcaklık değerleri tanımlanmıştır. Türbülans yoğunluğu: %5 olarak ve hidrolik çap ise açıklık miktarının iki katı olarak tanımlanmıştır. Çıkış bölgesinde kütle debisi tanımlaması yapılmıştır. Dönen rotor yüzeyi için açısal hız (devir sayısı) tanımlanmıştır. Sabit stator yüzeyi için durağan, adyabatik ve kaymamazlık şartını sağlayan duvar tanımlaması yapılmıştır.

HAD analizlerinde kullanılan ağ yapısı Şekil 6'da gösterilmiştir. Analizlerde düzgün dörtgen (quadrilaterals) ağ yapısı kullanılmıştır. Bazı özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Özellikle sınır tabakaya yakın bölgelerdeki değişimin yakalanabilmesi ve y+ değerlerinin kabul edilebilir seviyede olabilmesi için rotor-stator yüzeylerinde ince katmanlar şeklinde giderek incelen ağ yapısı kullanılmıştır. Asgari eleman sayısı ~7x10<sup>5</sup> seviyesindedir. Bu ağ yapısı tüm analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 6: Sayısal ağ görüntüsü

Aşağıda Tablo 1'de Sayısal ağ özellikleri gösterilmiştir. Düzgün dörtgen (structured) ağ yapısı kullandığı için Eğrilik değeri ~0 ve dikey kalite değeri ise ~1 şeklindedir. En-Boy Oranı en fazla ~72 seviyesindedir.

	Min.	Ort.	Maks.
En-Boy Oranı	1.0	5.5	71.6
Eğrilik (Skewness)	0.0	0.0	0.0
Dikey Kalite (Orthogonal)	1.0	1.0	1.0

Şekil 7'de dönüş oranı, teğetsel hız oranının, sayısal ağ eleman sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Beta, rotor-stator boşlukları için kritik bir ortalama parametredir. Böylesine büyük yarıçaplı rotorstator boşluklarındaki teğetsel hız oranındaki %5 değişim, Rulmanın eksenel yük kapasitesinin büyük kısmını oluşturmaktadır ve rulman ömrünü ciddi anlamda azaltmaktadır. Analizler için ~7x10<sup>5</sup> eleman sayısı yeterli görülmüştür.



Şekil 7: Sayısal ağdan bağımsızlık analizleri

Şekil 8 ve Şekil 9'da literatürden alınmış [Hart, 1995] test dataları ile HAD analizi sonucu elde edilen teğetsel hız oranının (xK) yarıçap ile değişiminin karşılaştırılması gösterilmiştir. Giriş xK ve türbülans akış parametresi ( $\Lambda$ t) değiştirilerek gerçekleştirilen analizlerde literatür tabanlı test verisinin ve HAD analiz sonuçlarının uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8'de Giriş xK=0, Reθ=1e6 durumu için ve Şekil 9'da Giriş xK=1, Reθ=1e6 durumu için karşılaştırmalar sunulmuştur.

Grafiklerde görüldüğü üzere türbülans akış parametresi (*k*t) arttıkça yerel teğetsel hız oranının (xK) artmaktadır. Yarıçap oranı (r/r2) azaldıkça yerel teğetsel hız oranının (xK) artmaktadır. Boşluğun aşağı yarıçaplarında üst taraflara göre tork görece daha düşük olduğu için akış serbest vorteks yapısına daha yakın davranmaktadır. Dolayısıyla serbest vortekse benzer şekilde yarıçap azaldıkça yerel teğetsel hız oranının (xK) artmaktadır. Üst taraflarda ise tork değeri fazla olduğu için zorlanmış vorteks yapısına daha yakın davranmaktadır. Dolayısıyla zorlanmış vortekse benzer şekilde yarıçap azaldıkça yerel teğetsel hız oranını (xK) artmaktadır. Dolayısıyla zorlanmış vortekse benzer şekilde yarıçap azaldıkça yerel teğetsel hız oranını (xK) artmaktadır.

Şekil 8 ve Şekil 9'daki sonuçlar beraber değerlendirildiğinde giriş teğetsel hız oranının (xK1) etkisi incelenebilir. Düşük türbülans akış parametresinde ( $\Lambda$ t), giriş teğetsel hız oranının (xK1) etkisi görülmezken, yüksek türbülans akış parametresinde ( $\Lambda$ t), giriş teğetsel hız oranının (xK1) daha etkili olmaktadır. Boşluk içerisindeki akış fiziği açısal momemtum ile tork dengesinden

anlaşılmaktadır. Boşluk içerisinde akışkan miktarı arttıkça bunu dengeleyecek tork farkı teğetsel hız oranının (xK) değişimi ile elde edilmektedir.



Şekil 8: Teğetsel hız oranının yarıçap ile değişiminin karşılaştırılması, Giriş xK=0, Re0=1e6



Şekil 9: Teğetsel hız oranının yarıçap ile değişiminin karşılaştırılması, Giriş xK=1, Re0=1e6

### UYGULAMALAR

Analizi yapılan geometri için kritik geometrik parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur. r1/r2, yarıçap oranı olarak 0.333, G=s/r2, eksenel boşluk oranı olarak 0.117 seçilmiştir. Literatür'de geometrik ölçüler bu şekilde boyutsuz olarak verilmektedir. Geometrik parametreler gerçek motor geometrisinden benzer şekilde oluşturulmuştur.

Tablo 2:	Geometrik	Parametreler
----------	-----------	--------------

Geometrik Parametreler		
r1/r2 [-]	0.333	
/r2 [-]	0.117	

Tablo 3'te analiz matrisi gösterilmiştir. Analizlerde Turbülans Akış Parametresi, Giriş Teğetsel Hız Oranı ve Teğetsel Re Sayısı olmak üzere 3 boyutsuz parametre incelenmiştir. Parametreler, motor çalışma koşulları düşünülerek seçilmiştir. Analizlerde 3 farklı Turbülans Akış Parametresi, 2 farklı Giriş Teğetsel Hız Oranı ve 3 farklı Teğetsel Re Sayısı incelenmiştir. Toplamda 18 adet analiz gerçekleştirilmiştir.

#	Parametreler		Değerler		
1	Turbülans Akış Parametresi [-]	٨t	0.01	0.03	0.05
2	Giriş Teğetsel Hız Oranı [-]	xK1	0.0	-	1.0
3	Teğetsel Re Sayısı [-]	Reθ	1.0E+06	4.0E+06	9.0E+06

### Akış Alanının İncelenmesi

Şekil 10'da teğetsel hız oranı, boyutsuz toplam basınç, boyutsuz statik basınç, boyutsuz toplam sıcaklık, akış fonksiyonu dağılımı gösterilmiştir. Boyutsuz statik basınç dağılımı incelediğinde radyal yönde aşağıya doğru boyutsuz statik basınç kademeli bir şekilde azalmaktadır. Boyutsuz toplam basınç dağılımında ise hızın etkisi de gözlemlenmektedir. Boşluk içerisinde akış incelendiğinde rotor yüzeyinde radyal olarak yukarı yöne doğru akış basılırken, stator yüzeyinde akış radyal olarak aşağı yönde hareket etmektedir. Bu durum boşluk içerisinde bir sirkülasyona neden olmaktadır. Dolayısıyla boyutsuz toplam sıcaklık dağılımında rotor yüzeyi daha sıcakken, stator yüzeyi göreceli olarak daha soğuktur. Boşluk içerisinde toplam sıcaklık seviyesi sirkülasyondan kaynaklı olarak benzerdir.



Şekil 10: Boyutsuz toplam basınç, boyutsuz statik basınç, boyutsuz toplam sıcaklık, akış fonksiyonu dağılımı

Şekil 11'de boyutsuz hız, boyutsuz radyal hız, teğetsel hız oranı (xK), boyutsuz eksenel hız dağılımı gösterilmiştir. Boyutsuz radyal hız dağılımında bahsi geçen rotor yüzeyinde radyal olarak yukarı yöne doğru akış basılırken, stator yüzeyinde akış radyal olarak aşağı yönde hareket gözlemlenmektedir. Boyutsuz eksenel hız incelendiğinde boşluk giriş ve çıkışlarındaki hızlanmalar gözlemlenmektedir. Teğetsel hız oranı (xK) incelendiğinde boşluk giriş hızının rotorun dönmeye başladığı ilk yerden sonra boşluk ortalama teğetsel hız oranına yaklaştığı gözlemlenmiştir. Zorlanmış girdap yapısına yakın akış fiziğine sahip olmasından dolayı tüm boşluk içerisinde nerdeyse aynı teğetsel hız oranı (xK), rotor dönüş hızı seviyelerine çıktığı gözlenmemiştir.



Şekil 11: Boyutsuz hız, boyutsuz radyal hız, teğetsel hız oranı (xK), boyutsuz eksenel hız dağılımı

Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te sırasıyla Reθ=1e6, Reθ=4e6 ve Reθ=9e6 için teğetsel hız oranının (xK) yarıçap oranı ile değişimi gösterilmiştir. Giriş teğetsel hız oranının boşluk içerisindeki ortalama ve yarıçap ile teğetsel hız oranı değişimine etkisi sınırlıdır. Giriş teğetsel hız oranı 0 ve 1 için grafiklerin trendi benzerdir. Giriş teğetsel hız oranı etkisi, boyutsuz debi (Cw) ve türbülanslı akış parametresinin (*λ*t) artması ile artmaktadır. Yani yüksek Cw ve *λ*t değerlerinde Giriş xK etkisi daha baskındır. Boşluk içerisinde akışkan miktarı arttıkça bunu dengeleyecek tork farkı teğetsel hız oranının (xK) değişimi ile elde edilmektedir. Giriş teğetsel hız oranının etkisi, teğetsel Re sayısının artması ile (Reθ) azalmaktadır. Bu durum, açısal momemtum ile tork dengesinden açıklanabilmektedir. Yüksek Reθ ve düşük *λ*t değerlerinde giriş teğetsel hız oranından bağımsız olarak boşluk ortalama teğetsel hız oranına yakınsamaktadır.

Yarıçap oranı (r/r2) azaldıkça yerel teğetsel hız oranı (xK) artmaktadır. Yüksek Cw ve *A*t değerlerinde düşük yarıçap oranında (r/r2) daha yüksek yerel teğetsel hız oranı (xK) gözlemlenmektedir. Boşluğun aşağı yarıçaplarında üst taraflara göre tork görece daha düşük olduğu için akış serbest vorteks yapısına daha yakın davranmaktadır. Dolayısıyla serbest vortekse benzer şekilde yarıçap azaldıkça yerel teğetsel hız oranının (xK) artmaktadır. Üst taraflarda ise tork değeri fazla olduğu için zorlanmış vorteks yapısına daha yakın davranmaktadır. Dolayısıyla zorlanmış vortekse benzer şekilde yarıçap azaldıkça yerel teğetsel hız oranının (xK) artmaktadır. Dolayısıyla



Şekil 12: Re0=1e6 için teğetsel hız oranının (xK) yarıçap oranı ile değişimi



Şekil 13: Re0=4e6 için teğetsel hız oranının (xK) yarıçap oranı ile değişimi



Şekil 14 Re0=9e6 için teğetsel hız oranının (xK) yarıçap oranı ile değişimi

Şekil 15'te boşluk içindeki ortalama teğetsel hız oranının (xK) Re $\theta$  sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Giriş teğetsel hız oranının (xK1) boşluk ortalama teğetsel hız oranına (xK) etkisi, düşük teğetsel Reynolds sayısında (Re $\theta$ ) daha fazladır. Giriş teğetsel hız oranının (xK1) boşluk ortalama teğetsel hız oranına (xK) etkisi, düşük türbülans akış parametresinde ( $\Lambda$ t) daha azdır. Düşük türbülans akış parametresine ( $\Lambda$ t) sahip akışkan teğetsel Reynolds sayısı (Re $\theta$ ) ile değişmezken, yüksek türbülans akış parametresine ( $\Lambda$ t) sahip akışkan oldukça fazla değişmektedir.

Teğetsel hız oranı, açısal momentumun korunumundan (açısal momentum değişiminin net torka eşit olması) elde edilmektedir. Tork hesaplamalarında teğetsel hız oranı, teğetsel Re sayısı, yarıçap, rotor dönüş hızı ve yoğunluk kullanılmaktadır. Reθ'nın artışı torku düşürmektedir. Bu durum açısal momentum korunumundan teğetsel hız oranı (xK)'nın artışına neden olmaktadır.



Şekil 15 Ortalama teğetsel hız oranının (xK) teğetsel Re sayısı (Re0) ile değişimi

### SONUÇ

Radyal kompresöre sahip gaz türbinli motorlarda oldukça yaygın şekilde görülen radyal içe doğru akışlı Rotor-Stator boşluklarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analiz modeli literatürde bulunan test verileri ile doğrulanmıştır. HAD analizleri, Türbülans Akış Parametresi [-], Giriş Teğetsel Hız Oranı [-] ve Teğetsel Re Sayısı [-] değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda listelenmiştir.

- Rotor yüzeyinde radyal olarak yukarı yöne doğru akış basılırken, stator yüzeyinde ise radyal olarak aşağı yönde hareket gözlemlenmektedir. Rotor yüzeyindeki basma debi miktarına bağlı olarak statordan hava çalınabilir. Bu durum boşluk içerisinde sirkülasyona neden olmaktadır.
- Rotorun uyguladığı tork miktarına bağlı olarak akışkanda rüzgarlanma kaynaklı ısınma meydana gelmektedir.
- Boşluk içerisinde kademeli bir statik basınç düşümü gözlemlenmektedir. Radyal olarak yukarı yöne gidilirken rotor basmasından kaynaklı olarak statik basınçta artış gözlemlenmektedir.
- Giriş teğetsel hız oranı etkisi, boyutsuz debi (Cw) ve türbülanslı akış parametresinin (λt) artması ile artmaktadır.
- Giriş teğetsel hız oranının etkisi, teğetsel Re sayısının (Reθ) artması ile azalmaktadır.
- Yarıçap oranı (r/r2) azaldıkça yerel teğetsel hız oranı (xK) artmaktadır.

#### Kaynaklar

- Batchelor, G. K., 1951, Note on the class of solutions of the Navier-Stokes equations representing steady rotationally symmetric flow. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 4, pp. 29-41.
- Daily, J. W., and Nece, R. E., 1960, *Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating discs*, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 82, pp. 217-232.
- ESDU 07004, 2007, *Flow in rotating components -discs, cylinders and cavities,* The Institution of Mechanical Engineers.
- Hart, K., Turner, A. B., 1994. Influence of radial inflow on rotor-stator cavity pressure distributions, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, The Hague, Netherlands, June 13-16.
- Hart, K., Turner, A. B., 1995. Simple Design Methods for the Prediction of Radial Static Pressure Distributions in a Rotor-Stator Cavity With Radial Inflow, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Houston, Texas - June 5-8.
- Peter R.N. Childs, 2010, Rotating Flow, Butterworth-Heinemann.
- Stewartson, K., 1953, On the flow between two rotating coaxial discs. Proceedings Cambridge Philosophical Society, Vol. 49, pp. 333-341.
- Sultanian, B., 2018. Gas turbines internal flow systems modeling, Cambridge Aerospace Series.