# LABİRENT KEÇELERDE DİKDÖRTGEN VE KONİK DİŞ PROFİLLERİNİN KAÇAK DEBİYE ETKİLERİNİN HAD ANALİZLERİYLE İNCELENMESİ

Kayhan DAĞIDIR<sup>1</sup> Tarsus Üniversitesi, MERSİN Yahya DOĞU<sup>2</sup> Kırıkkale Üniversitesi, KIRIKKALE

## ÖZET

Turbomakinalarda rotor-stator arasında dinamik sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan labirent keçede diş geometrisi kaçak debiyi etkilemektedir. Bu çalışmada; bu etkinin miktarı, yaygın kullanılan dikdörtgen, konik ve 75°, 90° ve 100° eğimli konik diş profilleri için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile incelenmiştir. Uygulamada birçok diş profilinin kullanıldığı bilinmektedir. HAD analizleri ile aynı geometrik çerçevede ve aynı şartlarda farklı diş profillerinin sızdırmazlık performansı karşılaştırılmıştır. Uygulama yeri olarak uçak motorları dikkate alınmıştır. Dişler rotora yerleştirilmiş ve stator düz olarak alınmıştır. HAD analizleri; 0,508 mm ve 0,254 mm açıklıklar için 1,5 basınç oranında ve sabit rotor durumunda yapılmıştır. HAD analizleri, 2 boyutlu eksenel simetrik koordinatlarda Ansys-Fluent v.15 paket programında yapılmıştır. HAD analizlerinde hava akışı sıkıştırılabilir olarak dikkate alınmış ve yoğunluk değişimi için ideal gaz denklemi kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak, programdaki "k-epsilon, realizable, enhanced wall treatment" tanımları kullanılmıştır. Analizler sürekli rejimde yapılmıştır. HAD analizlerinden elde edilen sonuçlarda, en fazladan aza doğru kaçak debi sıralaması 0,254 mm açıklık için; 100° eğimli konik, 90° eğimli konik, 75° eğimli konik, konik, ve dikdörtgen diş profilleri şeklinde olmaktadır. Bu sıralama 0,508 mm açıklık için ise konik, 100° eğimli konik, dikdörtgen, 90° eğimli konik ve 75° eğimli konik diş profilleri şeklindedir. İncelenen diş profilleri için akış alanları kaçak debi açısından detaylı olarak değerlendirilmiştir.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Arş. Gör., Makine Müh. Böl., E-posta: kayhandagidir@tarsus.edu.tr

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: yahya.dogu@hotmail.com

## GIRİŞ

Labirent keçeler üzerine bilimsel çalışmalar uzun yıllardır devam etmektedir. Literatürde rastlanan ilk çalışmalar genellikle kaçak debinin belirlenmesi için debi korelasyonlarının geliştirildiği, analitik ve deneysel çalışmalardan oluşmaktadır [Martin, 1908; Vermes, 1961; Zimmerman, 1987]. Geliştirilen debi korelasyonları sıkıştırılabilir akış için düz dişli labirent keçelerde kullanılmaktadır. Daha sonraları HAD analizinin yaygınlaşmasıyla deneysel ve analitik çalışmalarla desteklenen sayısal çözümler yaygın yapılmaya başlanmıştır. HAD analizleri ile geometrik tüm detayların dikkate alınması, farklı parametrelerin kolaylıkla incelenebilmesi ve akışın görsellenebilmesi birçok gelişim için faydalı olmuştur. Chougule vd. [Chougule, 2015] labirent keçe diş uç geometrisinin kaçak debideki etkisini HAD analizi ile incelemişlerdir. İncelemelerde; düz ve 75° eğik dişli labirent kecenin hem düz stator hem de bal peteği ile uygulanması dikkate alınmıştır. Avrıca bu uygulamalar diş uçlarına basamaklar ilave edilerek de tekrar edilmiştir. İncelemede tüm uvgulamalar icin dis savısı dört olarak alınmıstır. Genel olarak, eğik disli labirent kece akıs fonksiyonu düz dişten küçük çıkmıştır. Doğu vd. [Doğu, 2016] düz dişli labirent keçede dişin mantar şeklinde aşınması durumunu HAD analizi ile inceleyerek, aşınmış diş geometrisinin sızdırmazlık performansına etkisini belirlemişlerdir. Analizler Ansys-Fluent programında, 2 boyutlu eksenel simetrik koordinatlarda yapılmıştır. Türbülans modeli olarak k-epsilon, realizable ve duvar fonksiyonu olarak enhanced wall treatment kullanılmıştır. HAD analizi sonuçları literatürde yer alan debi korelasyonları ile ve FlowMaster programı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, HAD analizi sonuçları deneysel sonuçlar ile de karşılaştırılmış ve yakın değerler elde edilmiştir. Çalışmada; temel alınan düz dişli labirent keçe için farklı açıklıklarda (0,254 mm, 0,508 mm, 1,016 mm ve 2,032 mm) analizler gerçekleştirilmiş ve artan açıklık değerlerinde kaçak debinin artış oranı belirlenmiştir. Ayrıca; farklı basınç oranları (1,5-3,5), diş sayıları (1-12), rotor dönme hızları (0-80 krpm) için analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Artan basınç oranı ile kaçak debinin artma oranı, artan dis sayısı ve rotor dönme hızları ile kacak debinin azalma oranı belirlenmistir. Doğu vd. [Doğu, 2017(1); Doğu, 2017(2)] rotordaki düz dişin yuvarlanmış şekilde aşınması ve farklı formlarda aşınma oyuğu oluşması durumundaki kaçak debi değişimini de HAD analizi ile incelemişlerdir. Böylece aşınmış diş ve statorun kaçak debideki etkisi belirlenmiştir.

Literatürde labirent keçelerin sızdırmazlık performansına ilişkin çok sayıda çalışma mevcuttur. Özellikle düz ve eğik dişli labirent keçelerin sızdırmazlık performansını içeren çalışmalara bakıldığında HAD analizleri yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu çalışmada da diş profillerinin kaçak debiye etkileri HAD analizleriyle belirlenmiştir.

## YÖNTEM

Bu çalışmada labirent keçe diş profillerinin kaçak debiye etkileri HAD analizleriyle incelenmiştir. Labirent keçelerde diş profillerinin kaçak debiye etkisinin incelendiği geometriler Millward ve Edwards [Milward, 1994] tarafından yapılan çalışma referans alınarak oluşturulmuştur. Böylece HAD analizi modelinin doğrulama çalışmaları da sağlıklı bir şekilde yapılabilmiştir. İncelenen labirent keçe geometrileri Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'deki geometrik gösterimde açıklık 0,508 mm olarak gösterilmiştir. Açıklığın 0,254 mm olarak incelendiği elemanlarda da diğer bütün özellikler sabit tutularak sadece açıklık değiştirilmiştir.

İncelenen beş farklı geometri de kaçak debi açısından sağlıklı bir değerlendirme yapılabilmesini amaçlayarak oluşturulmuştur. Dikdörtgen diş profiline sahip keçe geometrisi en temel diş profili olarak dikkate alınmıştır. Daha sonra diş üstünden diş dibine doğru kalınlığı artıracak şekilde 20°'lik bir koniklik açısı ile geleneksel konik diş profili elde edilmiştir. Bu iki keçenin incelenmesini daha da zenginleştirmek için konik diş profilinin diş ön açısı 75°, 90° ve100° olacak şekilde eğimli hale getirilerek eğimli konik diş profilleri oluşturulmuştur. Burada eğimli konik profiller için yararlanılan kaynaktaki 145°'lik diş arkası açısı temel alınmıştır [Milward, 1994]. Elde edilen farklı diş profilleri Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Labirent Keçe Geometrileri

Şekil 1'de detaylı olarak verilen geometrilerin HAD analizleri, 2 boyutlu eksenel simetrik koordinatlarda ANSYS-Fluent v.15 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Analizler sürekli rejimde yapılmıştır. HAD modeli bölgesi, sınır şartı uygulanan sınırlar ve sınır şartı tanımlamaları Şekil 2'de gösterilmiştir. Labirent dişler öncesi ve sonrası eksenel yönde tam gelişmiş akışın oluşumu için, model geometrisi yaklaşık olarak diş yüksekliğinin dört katı kadar uzatılmıştır. Şekil 2'de gösterilen sınır tanımlamaları ve sınır şartları aşağıda açıklanmıştır.

**A. Inlet:** Akışkanın labirent keçeye yönlendiği giriş bölgesidir. Burada basınç ve sıcaklık tanımlamaları yapılmıştır. Sıcaklık 298 K olarak tanımlanmıştır. Basınç ise bu çalışma için uygulanan 1,5 basınç oranına göre belirlenmiştir.

**B. Outlet:** Akışkanın labirent keçe bölgesini terk ettiği sınırdır. Akışkan çıkışı atmosferik şartlar olarak kabul edilerek burada statik basınç, atmosfer basıncı (101,325 kPa) olacak şekilde tanımlanmıştır.

C. Stator: Sabit stator yüzeyleri kaymamazlık şartı ile adyabatik duvar olarak tanımlanmıştır.

**D. Stationary\_rotor:** Sabit rotor yüzeyleri kaymamazlık şartı ile adyabatik duvar olarak tanımlanmıştır.

**E. Rotational\_rotor:** Labirent dişlerin de yerleştirildiği rotor, eksenel simetrik silindirik koordinatlarda dönen duvar olarak tanımlanmıştır. Devir sayısı tanımlaması bu duvara yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamındaki incelemelerdeki amaç diş profilinin kaçak debi üzerindeki etkisini belirlemek olduğu için analizler sabit rotor için yapılmıştır. Ancak doğrulama çalışmalarında 13000 devir/dakika ile dönen rotor dikkate alınmıştır.

HAD analizlerinde hava akışı sıkıştırılabilir olarak dikkate alınmış ve yoğunluk değişimi için ideal gaz denklemi kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak, Ansys-Fluent programındaki "k-epsilon, realizable, enhanced wall treatment" tanımları kullanılmıştır. Programda tanımlanan hava özellikleri ise Tablo 1'de listelenmiştir.



#### Şekil 2. HAD Model Bölgesi ve Sınır Şartı Tanımları

Sembol	Değeri	Birim	Açıklamalar
ρ	İdeal gaz denklemi	kg/m <sup>3</sup>	Yoğunluk
c <sub>p</sub>	1007	J/(kg K)	Özgül ısı
k	0.02551	W/(m K)	Isı iletim katsayısı
μ	1,849 x 10 <sup>-5</sup>	Pa∙s	Dinamik viskozite

Tablo 1. HAD Analizinde Tanımlanan Hava Özellikleri

HAD analizi modeli bölgesinin çözüm ağı (mesh) oluşturulmasında, tüm duvar yüzeyler üzerine ağların sık yerleştirildiği bir tabaka (inflation layer) yerleştirilmiştir. Kısılmanın olduğu diş üstü bölgelerde ağ yapısı yerel olarak (sphere of influence) sıklaştırılmıştır. Optimum mesh sayısının belirlenmesi için 75° eğimli konik dişli profil referans alınarak 0,508 mm açıklıkta ve sabit rotor durumunda analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen kaçak debiler mesh sayısına bağlı olarak Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3'de görüldüğü gibi mesh sayısı 400.000 elemanı aştığında kaçak debideki değişim çok çok düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu sebeple tüm analizlerde mesh sayısı ortalama 500.000 elemandan oluşacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca sıkıştırılabilir akış modeli için aynı geometri üzerinde rotor ve stator arasındaki açıklığın ortasından geçen çizgi boyunca Mach sayısı, eksenel pozisyona bağlı olarak elde edilmiştir. Akış boyunca Mach sayısının 0,35 değerlerine kadar çıktığı ve sıkıştırılabilir akış modelinin yerinde olduğu görülmektedir. Oluşturulan tipik ağ yapısı görüntüleri ve Mach sayısı değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 3. Kaçak Debinin Mesh Sayısına Bağlı Değişimi



Şekil 4. Ağ Yapısı



Şekil 5. Açıklık Ortasındaki Mach Sayısı Dağılımı

## UYGULAMALAR

HAD modelinin doğrulanmasında Doğu ve ark. [Doğu, 2016] tarafından verilen labirent keçe geometrisi kullanılmıştır. Bu makalede verilen ve doğrulama analizlerinde kullanılan geometri Şekil 6'da verilmiştir. Doğrulama analizleri, 4 dişli konik profilli labirent keçe için 1,5 basınç oranında 3 farklı açıklıkta sabit rotor durumu için yapılmıştır. Hesaplanan kaçak debiler aynı zamanda analitik debi korelasyonları ile de hesaplanmış ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi Doğu ve ark. [Doğu, 2016] tarafından verilen sonuçlarla HAD analizleriyle elde edilen sonuçlar neredeyse birebir örtüşmektedir. Bu örtüşme de bu çalışma kapsamında kullanılan HAD modelini doğrulamaktadır.







Şekil 7. HAD Modeli Doğrulama Sonuçları

HAD modeli doğrulandıktan sonra bu çalışmada incelenen geometrilerin oluşturulmasında yararlanılan Millward ve Edwards [Milward, 1994] tarafından yayımlanan makale verileri karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Geometrisi ve sonuçları açık olarak verilen bu makale oluşturulan HAD modeli ile tekrarlanmıştır. Bu makalede labirent keçe kaçak debisi bir test düzeneğinde ölçülmüştür. Ancak, makalede elde edilen test sonuçlarının güvenilirliği konusunda olumsuz bilgiler verilmiştir. Yine de tekrarlama çalışmalarının yapılması uygun bulunmuştur. Tekrarlama analizleri için 3 ve 5 dişli olan iki farklı konik dişli labirent keçe geometrisi seçilmiştir. Ayrıca, eğimli konik dişli olarak 5 dişli 75° eğimli labirent keçe geometrisi seçilmiştir. Şekil 8'de seçilen geometriler gösterilmiştir.

Şekil 8'deki 5 dişli labirent keçeler, 1,1 ve 1,3 basınç oranlarında 13000 devir/dakika rotor dönme hızında analiz edilmişlerdir. Sonuçlar Şekil 9'da gösterilmiştir. 3 dişli labirent keçe için de 1,1–1,5 basınç oranlarında 13000 devir/dakika rotor dönme hızındaki rotor için analizler yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Verilen karşılaştırmada, HAD analizleri ile Millward ve Edwards tarafından verilen ölçümler arasındaki farkların düşük olmadığı görülmektedir. Ancak aradaki farkın korunması doğrulama çalışmalarının güvenilirliği açısından önemlidir. Millward ve Edwards'ın debi ölçümünün güvenilir olmadığı konusundaki ifadeleri de göz önünde bulundurulduğunda doğrulama çalışmaları ile başarılı bir model oluşturulduğunu kanaati oluşmuştur.



Şekil 8. HAD Modeli Tekrarlama Geometrileri



Şekil 9. 5 Dişli Labirent Keçeler İçin HAD Modeli Karşılaştırma Sonuçları



Şekil 10. 3 Dişli Labirent Keçe HAD Modeli Karşılaştırma Sonuçları

Bu karşılaştırma sonuçlarına göre genel olarak bakıldığında, HAD modelinin literatürdeki diğer HAD modelleri ve korelasyonlarla uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Deneysel kaçak debi ölçümünün güvenilir olmadığı vurgulanan çalışmanın sonuçları ile HAD modeli arasında faklar görülmektedir. Güvenilir sonuçlar ile HAD modeli arasındaki uyum, HAD modelinin doğruluğu için yeter seviyede değerlendirilmiştir.

Tüm bu doğrulama çalışmalarının ardından, Şekil 1'de verilmiş olan keçe geometrilerinin analizleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

## SONUÇ

Diş profillerinin kaçak debide oluşturduğu değişim HAD analizleriyle incelenmiş ve farklı diş profilleri için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapmak üzere, verilen diş profilleri için aynı şartlarda HAD analizleri yapılmıştır. Kendi içinde genel diş profilinin karşılaştırması için dikdörtgen, konik, 75° eğimli konik, 90° eğimli konik ve 100° eğimli konik diş profilleri dikkate alınmıştır. Karşılaştırılan bu diş profilleri Şekil 1'de gösterilmişti. HAD analizleri; 0,508 mm ve 0,254 mm açıklıklar için 1,5 basınç oranında ve sabit rotor durumu için yapılmıştır.

Şekil 11'de elde edilen kaçak debiler gösterilmiştir. En fazladan aza doğru kaçak debi sıralaması 0,254 mm açıklık için; 100° eğimli konik, 90° eğimli konik, 75° eğimli konik, konik ve dikdörtgen diş şeklinde olmaktadır. Bu sıralama 0,508 mm açıklık için ise konik, 100° eğimli konik, dikdörtgen, 90° eğimli konik ve 75° eğimli konik diş şeklindedir. Bu kaçak debi sıralamalarına göre küçük açıklıkta konik ve düz diş profilleri, eğimli diş profillerinden daha iyi sızdırmazlık performansı göstermektedir. Ancak açıklık büyüyünce durum değişmekte, eğimli diş profillerinin performansı artmaktadır. Burada, her iki açıklıkta da dikdörtgen dişin konik dişe göre bir miktar az kaçırdığı görülmektedir. Ayrıca, yine her iki açılıkta da 90° eğimli konik diş 100° eğimli konik dişe göre bir miktar az kaçırdığı görülmektedir.

Konik diş profili ile 100° eğimli konik diş profilinin ilk dişlerinin akışı karşılayan yüzeyleri her iki profil için de aynı, yani 100° eğiktir. İlk dişlerin yüksek basınç tarafında oluşturdukları akış alanları benzer özellikler göstermektedir. İlk dişin sızdırmazlık performansı bakımından kritik önemde olduğunu da göz önünde bulundurarak konik ve 100° eğimli konik diş profillerindeki kaçak debilerin birbirine yakın olmasını açıklamak mümkündür. Ancak analiz sonuçları bu durumu küçük açıklık değerlerinde (0,254 mm) desteklememektedir.

Tüm diş profillerine birlikte bakıldığında yüksek basınç bölgesindeki ilk dişin akışı karşılama yüzeyi konik ve 100° eğimli konik diş profillerinde geniş açılı, dikdörtgen ve 90° eğimli konik diş profillerinde dik açılı ve 75° eğimli konik diş profilinde dar açılıdır. Bu yüzeylerin kaçak debiye etkilerinin 0,508 mm açıklık için elde edilen sonuçlara göre açı değeriyle doğru orantılı olduğu

görülmektedir. Yani az kaçak debi dar açılı profilde, çok kaçak debi de geniş açılı profillerde hesaplanmıştır. Ancak bu durum küçük açıklık değerlerinde geçerli değildir.

Genel diş profilinin akış oluşumundaki etkisini görsellemek amacıyla, sabit rotor için 0,508 mm açıklıktaki statik basınç ve hız dağılımları Şekil 12'de, ilk dişteki hız vektörleri Şekil 13'de gösterilmiştir.

Akış özelliklerine ilişkin açıklık ortasındaki eksenel basınç ve hız değerleri de sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15'de gösterilmiştir.

Statik basınç ve hız dağılımları incelendiğinde, tüm diş profilleri için yüksek basınç tarafındaki ilk dişte oluşan kinetik enerji kırılmasının diğer dişlere kıyasla daha etkin olduğu görülmektedir. Bu farklılık, özellikle ilk dişin yüksek basınç bölgesinden gelen akışı karşılayan yüzeylerindedir. Bu yüzeylerde oluşan hız vektörleri incelendiğinde akışkan yüksek basınç bölgesindeki ilk dişin açısına bağlı olarak yönlenmektedir. Bu yönelim dar açılarda akışı zorlayan yönde iken geniş açılarda akış doğrultusundadır. İlk dişte oluşan hız vektörleri incelendiğinde bu durum gözlemlenebilmektedir.

Diş profilleri akış özellikleri bakımından ele alınırsa konik ve dikdörtgen profiller kendi aralarında, 75°, 90° ve 100° eğimli konik profiller kendi aralarında benzerlikler göstermektedir. Dikdörtgen ve konik profiller eğimli konik profillerden özellikle iki diş arasındaki kavitelerde hem eksenel basınç hem de eksenel hız için bariz olarak ayrışmaktadırlar. Bu durumdan hareketle kaçak debilerdeki farkı oluşturan bir diğer etken de diş kavitelerindeki akışkan davranışının ve akış özelliklerinin farklı gelişmesinin olduğu söylenebilir.

Diş eğim açısının kaçak debide etkin olduğu belirlenmiştir. Her bir dişin farklı açılarda eğimlendirilmesi dişler arasındaki kavitelerdeki girdap yapısını değiştireceğinden kaçak debi etkilenebilir. Bu etkinin incelenmesi planlanmaktadır.







Şekil 11. Genel Diş Profilinin Kaçak Debiye Etkisi



Şekil 12. Genel Diş Profilleri İçin Sabit Rotorda 0,508 mm Açıklık İçin Statik Basınç ve Hız Dağılımları



Şekil 13. Genel Diş Profilleri İçin Sabit Rotorda 0,508 mm Açıklık İçin İlk Dişteki Hız Vektörleri



Şekil 14. Farklı Diş Profilleri İçin Açıklık Ortasındaki Eksenel Basınç



Şekil 15. Farklı Diş Profilleri İçin Açıklık Ortasındaki Eksenel Hız

## Kaynaklar

- Chougule, H. H., Mirzamoghadam, A., 2015. CFD Simulation of Lab Seal Tooth Tip Geometry Variations to Reduce Leakage. Proceedings of ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Montreal, Canada, June 15-19.
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Bahar, A. S., Pişkin, A., Arıcan, E., and Kocagül, M., 2016. Computational Fluid Dynamics Investigation of Labyrinth Seal Leakage Performance Depending on Mushroom-Shaped Tooth Wear. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper no. 032503, 10 pages.
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Gezer, K., Kocagül, M., Arıcan, E., and Ozmusul, M. S., 2017. Leakage Degradation of Straight Labyrinth Seal due to Wear of Round Tooth Tip and Acute Trapezoidal Rub-Groove. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper no. 072506, 12 pages.
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Gezer, K., Arıcan, E., Kocagül, M., Ozmusul, M. S., 2017. Labyrinth Seal Leakage Degradation due to Various Types of Wear. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper no. 062504, 11 pages.
- Millward, J, A., Edwards, M, F., 1994. Windage Heating Of Air Passing Through Labyrinth Seals. Presented at the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, The Hague, Netherlands, Transactions of the ASME, Paper No. 94-GT-56.

Martin, H., 1908. Labyrinth Packings. The Engineer, pp. 35-36.

- Vermes, G., 1961. A Fluid Mechanics Approach to Labyrinth Seal Leakage Problem. Journal of Basic Engineering, vol. 83, pp. 161 169.
- Zimmerman, H. and Wolff, K. H., 1987. Comparison between Empirical and Numerical Labyrinth Flow Correlations. ASME 87-GT-86.