

GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR İÇİN SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI TEST SİSTEMİ TASARIMI ve VALİDASYONU

| | | | |
|--------------------------------------|---|---|-----------------------------------|
| Yahya Doğu* | Mustafa Kocagül M. Cem Sertçakan | E. Tolga Duran | Murat S. Özmuşul |
| Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale | TEI, TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş., Eskişehir | Türbin ArGe ve Mühendislik A.Ş., İstanbul | Pro Solutions USA LLC, NY, USA |

ÖZET

Gaz türbinli motorlarda dönen ve sabit parçalar arasında kullanılan sızdırmazlık elemanları, motor performansı, verimi ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Sızdırmazlık elemanları tasarımında ilk olarak, sızdırmazlık performansı ve yapısal dayanım sayısal yöntemler kullanılarak incelenmektedir. Sayısal analizler sonrasında bileşen testleri ile tasarım doğrulama faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Ardından, sızdırmazlık elemanı motora takılmaya hazır hale gelmektedir. Bu çalışmada, öncelikle sızdırmazlık elemanlarına yönelik test sistemleri incelenmiştir. Sonrasında, gaz türbinli motorlarda kullanılan labirent, fırça ve kombine keçe gibi sızdırmazlık elemanları testlerini gerçekleştirmek üzere kurulumu gerçekleştirilen, soğuk dinamik test sistemi ve sıcak statik test sisteminin tasarım, imalat, test ve validasyon süreci anlatılmıştır.

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

| | |
|-------|--|
| Π | : Basınç oranı |
| C_d | : Kısılma katsayısı ($\dot{m}_{test}/\dot{m}_{ideal}$) |
| C_r | : Sızdırmazlık elemanı radyal açıklığı |
| HAD | : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |

GİRİŞ

Gaz türbinli motorlarda verim ve performansı artırmanın en efektif ve ekonomik yollarından birisi; sabit ve döner parçalar arasındaki basınçlı hava kaybını asgari seviyede tutmak amacı ile kullanılan sızdırmazlık elemanlarının tasarımlarının geliştirilmesi ve bu sayede kaçak hava debisinin kontrol altında tutulmasıdır. Doğru tasarlanmış bir sızdırmazlık elemanı, motor verimini %1-2 seviyelerinde arttırabilmektedir. Tüm verim ve performans limitlerinin daha fazla zorlandığı günümüz teknolojisinde, dünya üzerindeki bütün gaz türbinli motorlar düşünülürse, bu verim artışının ekonomik açıdan önemli olduğu görülmektedir. Sızdırmazlık elemanları, gaz türbinli motorlardaki verim artışının yanı sıra, kullanım ömrünün uzatılması, güvenilirliğinin artırılması ve bakım aralıklarının uzatılarak maliyetlerin azaltılması gibi konularda da önemli katkı sağlamaktadır. [Chupp, 2010]

Gaz türbinli motorlarda kullanılan sızdırmazlık elemanları, dinamik (labirent, fırça, parmak keçe) ve statik (şerit, halat, örgü keçe vb.) olarak sınıflandırılabilir. Sızdırmazlık elemanları tasarımında ilk olarak, sızdırmazlık performansı ve yapısal dayanım, sayısal yöntemler kullanılarak incelenmektedir. Tasarlanan sızdırmazlık elemanları motorlarda kullanılmadan önce, motordaki çalışma şartları altında laboratuvar testlerine tabi tutulmaktadır. Bu aşamada analizler sırasında yapılan kabullerin geçerliliği, kullanılan yöntemlerin doğruluğu ve en önemlisi tasarlanan sızdırmazlık elemanının görevini hangi oranda yerine getirdiği gözlenmektedir.

Aşağıda literatürdeki başlıca test sistemlerinden bahsedilerek kurulumu yapılan test sistemleri tanıtılmıştır.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürdeki sızdırmazlık elemanları test sistemleri incelendiğinde genel olarak

- Düzlemsel / dairesel,
- Statik / dinamik,
- Sıcak / soğuk

olmak üzere birçok farklı tipinin olduğu görülmektedir. Bu test sistemleri aşağıda sırası ile örneklendirilerek tanıtılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 1’de literatürdeki test sistemlerinin teknik özellikleri listelenmiştir.

Düzlemsel Test Sistemleri:

Türbinde kullanılan sızdırmazlık elemanlarının çevresel bir bölümünü test edecek şekilde tasarlanmışlardır. Dinamik ve statik sızdırmazlık elemanlarının statik şartlarda ısı/akış karakteristiklerinin incelenmesi, temel modelleme tekniklerinin doğrulanması ve ısı/akış analiz modellerine veri üretmek amacı ile kullanılmaktadır. Değişken basınç ve sıcaklık değerlerinde keçe performans testleri ve akış görüntüleme testleri gerçekleştirilebilecek şekilde farklı tasarımları mevcuttur [Denecke, 2003; Wittig, 1985; Schramm, 2002; Collins, 2007; NASA, 2016].

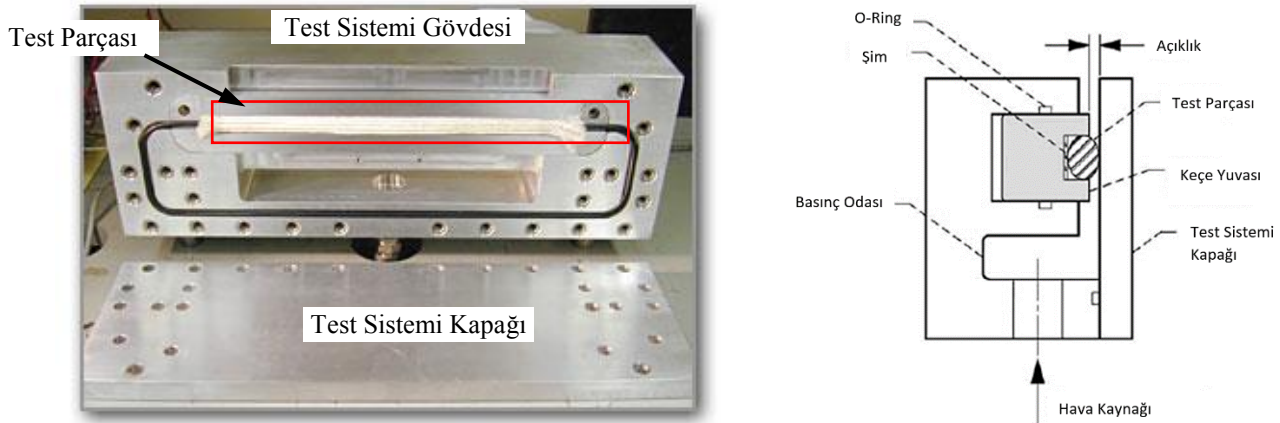
Düzlemsel test sistemlerinin statik keçe performans testlerinde kullanımına örnek olarak, NASA Glenn Araştırma Merkezi’nde bulunan, Sızdırmazlık Elemanı Akış Test Fikstürü (LLF1) verilebilir [NASA, 2016]. Test sisteminin genel görünüşü ve kesiti Şekil 1’de gösterilmiştir. Test sisteminde, oda sıcaklığında hava ile 0-8bar basınç aralığında testler yapılabilmekte ve açıklık miktarı, dolayısıyla keçe ezilme miktarı kontrol edilebilmektedir. Bu test sistemi metalik sızdırmazlık yüzeyine sahiptir. Yine aynı araştırma merkezi bünyesinde bulunan LLF2 test sisteminde ise farklı sızdırmazlık yüzeyleri kullanılarak akış performans testleri gerçekleştirilebilmektedir.

Cranfield Üniversitesi'nde bulunan ve detayları Şekil 2'de gösterilen bir diğer düzlemsel test düzeneğinde ise, labirent keçe testleri, oda sıcaklığındaki farklı basınçlarda gerçekleştirilebilmektedir [Collins, 2007]. Bu test sisteminde labirent keçe karşı yüzeyine balpeteği yapısı da yerleştirilebilmektedir.

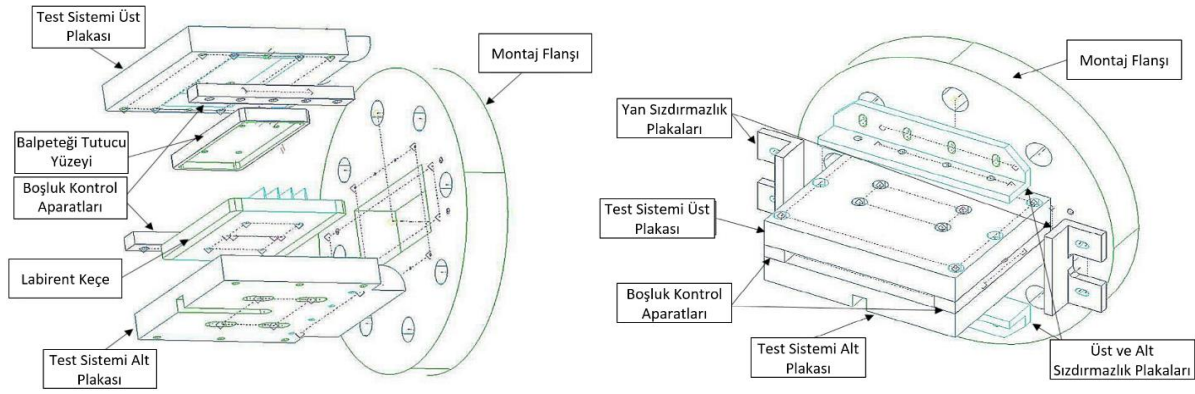
Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü'nde bulunan düzlemsel test düzeneği ise, sızdırmazlık elemanlarında ısı-akış karakteristiklerinin araştırılmasında kullanılmaktadır [Denecke, 2003; Wittig, 1985]. Bu test düzeneğinde, labirent keçeler 1–4 arasındaki basınç oranlarında ve 400°C'ye kadar sıcaklıklarda test yapılabilmektedir.

Çizelge 1: Sızdırmazlık elemanları test sistemleri karşılaştırılması

| | Bulunduğu Yer | Statik | Dinamik | Dairesel | Düzlemsel | Keçe Tipi | Azami Basınç [bar] | Sıcaklık [°C] | Hız [rpm]/Yüzey Hızı [m/s] | Debi (kg/s) | Çap (mm) | Akış kan | Referans |
|---|--|--------|---------|----------|-----------|-----------------------|--------------------|-----------------|----------------------------|-------------|----------|----------|---------------------------|
| 1 | LLF-1, LLF-2 NASA Glenn Araştırma Merkezi, USA | | | | X | Statik | 8 | Ortam Sıcaklığı | - | 0,042 | 38 | Hava | NASA 2016 |
| 2 | Cranfield Üniversitesi, UK | | | | X | Labirent | 3 | Ortam Sıcaklığı | - | 1.4 | - | Hava | Colins 2007 |
| 3 | Karlsruhe Üniversitesi, Almanya | | | | X | Labirent | 4 | 400 | - | 4,5 | - | Hava | Denecke 2003; Wittig 1985 |
| 4 | General Elektrik, USA | | X | X | | Labirent | 34,5 | 60 | 2000/- | - | 170 | Hava | Collins 2007 |
| 5 | Karlsruhe Üniversitesi, Almanya | | X | X | | Fırça | 10 | Ortam Sıcaklığı | 12000/190 | 0,7 | - | Hava | Pfefferle 2011 |
| 6 | NASA Glenn Araştırma Merkezi, USA | | X | X | | Labirent Fırça Parmak | 17 | 650 | -/370 | - | 215 | Hava | NASA 2016 |
| 7 | Ulusal Araştırma Merkezi, Hollanda | | X | X | | Labirent | 24 | 815 | -/365 | 0,8 | 254 | Hava | Kool 2006 |



Şekil 1: Düzlemsel statik keçe test sistemi [NASA, 2016]



Şekil 2: Düzlemsel labirent keçe performans test sistemi [Collins, 2007]

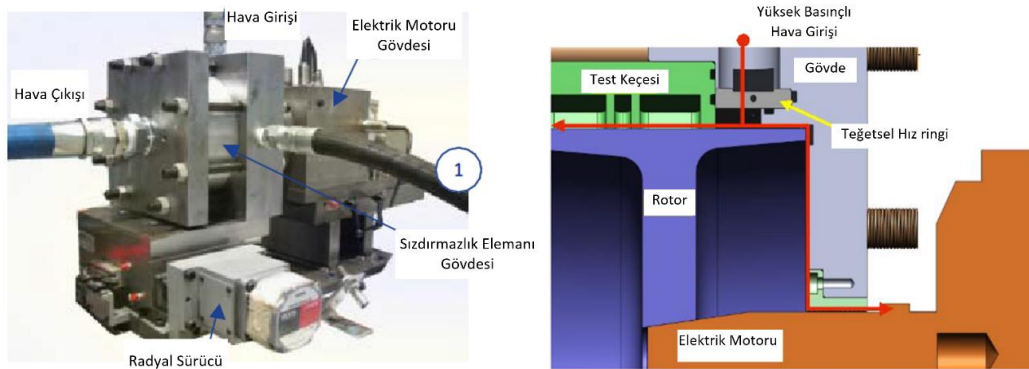
Dairesel Test Sistemleri:

Bu test sistemleri sızdırmazlık elemanları geometrilerinin motorda kullanıldığı hali ile aynı boyutlarda veya ölçeklendirilmiş olarak test edilebildiği sistemlerdir. Keçe geometrilerinin bire bir veya ölçeklendirilmiş olarak test edilebilmesi, bu test sistemlerini tasarım doğrulama için daha uygun hale getirmektedir. Ayrıca, türbin operasyonel şartlarındaki, sıcaklık-basınç, basınç-devir sayısı etkileri ayrı ayrı uygulanabildiği gibi, sıcaklık-basınç-devir sayısı etkilerini bir arada uygulama yeteneğine sahip tasarımlar da bulunmaktadır.

Soğuk dinamik test sistemlerinde, sızdırmazlık elemanları çalışma şartlarındaki devir sayısı ve basınçlarda test edilmektedir. Bu sayede sızdırmazlık elemanlarının farklı devir sayısındaki ve basınçlardaki debi değişimi incelenebilmektedir. Böylece, soğuk dinamik test sisteminden elde edilen sonuçlar, devir sayısının sızdırmazlık elemanlarının kaçak debi karakteristiğine etkisinin belirlenmesinde kullanılabilir. Şekil 3'de soğuk dinamik test sistemlerine örnek bir test sistemi gösterilmiştir [Sheng, 2011].

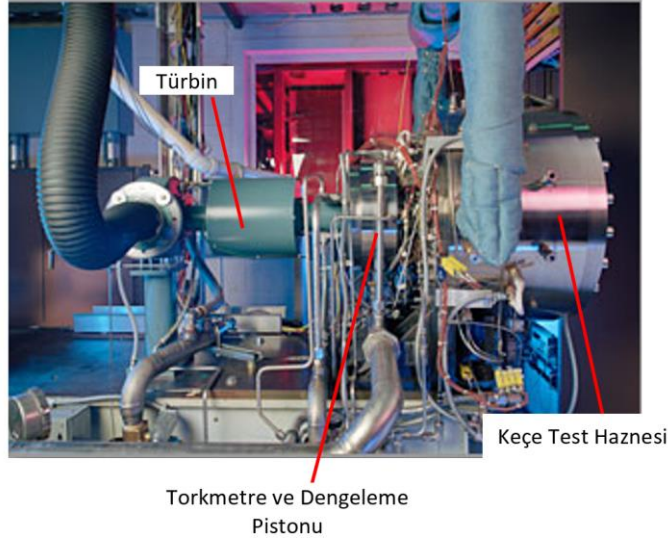
Soğuk dinamik test sistemlerine diğer bir örnek ise Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü'nde bulunan, fırça keçe sürtünme karakteristiğinin incelenmesi amacı ile kullanılan test sistemidir [Pfefferie, 2011]. Bu test sistemi, 1-10bar basınç farkı, 0-190m/s çizgisel hız ve 0-0,5mm aralığındaki değerlerde fırça keçe-rotor girişim testleri gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Sıcaklık, basınç ve devir sayısı etkilerinin bir arada test edilebildiği test sistemlerine ilk örnek olarak NASA Glenn Araştırma enstitüsünde kullanılan Türbin Keçeleri Test Sistemi verilebilir [NASA, 2016]. Bu test sisteminde, yüksek sıcaklık (~650°C), yüksek basınç (~17bar), yüksek yüzey hızı (~370m/s) değerlerinde labirent, fırça ve parmak keçe sızdırmazlık performansı ve dayanım testleri gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3: Soğuk dinamik test sistemi genel yapısı [Sheng, 2011]

İkinci olarak Hollanda Ulusal Havacılık ve Uzay Laboratuvarı'nda bulunan test sistemi, yüksek sıcaklık, basınç ve devir sayısını etkilerini bir arada test edebilme yeteneğine sahiptir [Kool, 2006]. Bu test sistemi gelişmiş aktif açıklık kontrol sistemi ile donatılmış olup, açık literatürde tespit edilen en gelişmiş sızdırmazlık elemanları test sistemidir. Teknik özellikleri; giriş sıcaklığı $\sim 815^{\circ}\text{C}$, giriş basıncı $\sim 24\text{bar}$, dönme hızı 365m/s şeklindedir.



Şekil 4: Sıcak dinamik test sistemi genel yapısı [NASA, 2016]

TEST SİSTEMLERİ TASARIMI

Günümüzde analitik tasarım araçları oldukça gelişmiş olmasına rağmen, gaz türbinli motor tasarım sürecinde, labirent ve fırça keçe gibi mevcut sızdırmazlık elemanları konseptleri motora takılmadan önce fonksiyonel, performans ve dayanım testlerine tabi tutulmak zorundadır. Bu gerekçe ile başlatılan çalışma kapsamında, gaz türbinli motorlar için labirent ve fırça keçe gibi mevcut sızdırmazlık elemanlarının tasarlanması ve kurulacak test sistemlerinde tasarım doğrulama testlerine tabi tutularak, motor projelerinde kullanıma hazır hale getirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, bu test sistemleri yeni sızdırmazlık elemanları konseptlerinin denenmesi ve geliştirilmesinde de kullanılacaktır.

Tasarım faaliyetleri, test sistemleri isterlerinin belirlenmesi ile başlamış ve alternatif test sistemlerinin değerlendirilmesi ile devam etmiştir. Literatür bölümünde bahsedildiği üzere, sızdırmazlık elemanları testlerinde tercih edilen yöntem, sızdırmazlık elemanının çevresel bir bölümünün veya ölçeklenmiş bir modelinin test edilmesi şeklindedir. Buna göre test sistemi boyutları değerlendirilirken, gerçek motor üzerindeki sızdırmazlık elemanları boyutları göz önüne alınmıştır. Test sistemleri, basınç, sıcaklık ve devir sayısı gibi özellikleri ise, sızdırmazlık elemanının türbindeki çalışma şartlarına uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Ancak türbin şartlarındaki tüm çalışma değerlerinin, özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek hız test sistemlerinin, tasarım, imalat ve işletme maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca, yüksek hızlarda mekanik etkilerle eş zamanlı olarak yüksek sıcaklığında etkimesiyle oluşacak mekanik-ısı genleşme ve gerilmeleri ciddi tasarım problemlerine neden olmaktadır.

Türbin çalışma şartlarının test sisteminde oluşturulmasında karşılaşılan problemler ve test sistemleri tasarım, imalat ve işletme maliyetleri göz önüne alınarak, iki adet sızdırmazlık test sistemi kurulmuştur. Bu test sistemleri;

- Sıcak statik test sistemi (STR)
- Soğuk dinamik test sistemi (DTR)

şeklinde. Test sistemleri detayları ilerleyen bölümlerde sırası ile anlatılacaktır.

Her iki sızdırmazlık elemanları test sistemi de, ASME basınçlı kaplar standartlarına uygun olarak danışman firma desteği ile tasarlanmış ve imalat sonrasında hidrostatik teste tabi tutulmuştur. STR sisteminin çalışma şartlarına uygunluğu termo-mekanik analizler ile değerlendirilmiştir. Termo-mekanik analizler sonucunda keçe açıklığı değişim miktarı incelenmiştir. Ayrıca HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile STR sistemi akış yapısı incelenmiş ve enstrumantasyon için uygun konumlar belirlenmiştir. DTR sistemi ana gövdesinde gerçekleştirilen yapısal analizler ile tasarım şartlarına uygunluğu değerlendirilmiş ve darbe analizleri gerçekleştirilerek rotor parçalanma durumundaki davranışı incelenmiştir. Rotor grubunun çalışma koşullarında gerçekleştirilen yapısal analizler ile yüksek devir sayısı ve basınç altındaki açıklık miktarının değişimi ve gerilme değerleri incelenmiştir.

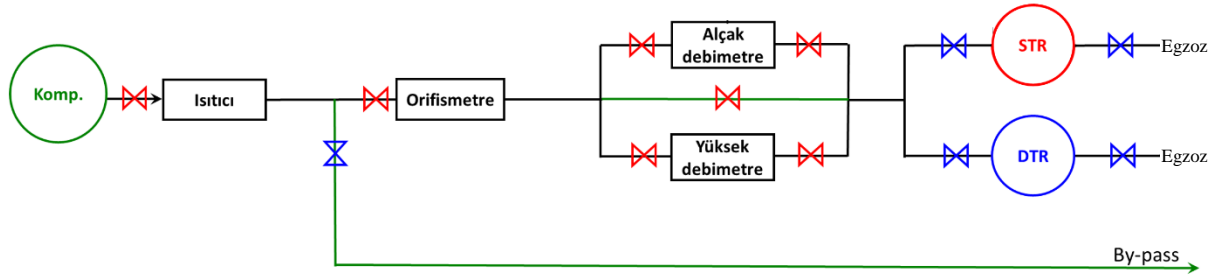
Boru hatlarında yüksek sıcaklık etkileri ile termal genleşme miktarı değerlendirilmiştir. Termal genleşme miktarı ihmal edilebilir seviyede olduğu için kompensator veya aksel dengeleyici kullanımına gerek duyulmamıştır. Sistem üzerinde açma kapama ve ayar amaçlı yüksek sıcaklığa dayanıklı globe valfler kullanılmıştır. Bu valfler yardımı ile test sistemleri yüksek basınç bölgesinde istenilen basınç değerleri ayarlanacaktır. Tüm boru hatları, valfler ve STR test sistemi yüksek sıcaklığa maruz kalacağı göz önüne alınarak yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır.

Isıtıcı seçimi esnasında, elektrikli ve yakıtlı tipte ısıtıcılar değerlendirilmiştir. Hassas sıcaklık kontrolüne imkan vermesi, yanma sonucu açığa çıkan gazların doğrudan akışa verildiği ısıtıcılara göre temiz hava sağlaması ve yakıt depolamaya ihtiyaç duyulmaması nedeniyle, 190 kW gücünde bir elektrikli ısıtıcı seçilmiştir.

Burada tamamı bahsedilmeyen birçok tasarım adımı ve iterasyonları ile test sistemleri tasarımları tamamlanmıştır.

SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI TEST SİSTEMLERİ TANITIMI

Her iki test sistemini (STR ve DTR) içeren şema Şekil 5'de gösterilmiştir. Buna göre STR ve DTR test düzeneklerine gelen basınçlı hava ilk olarak ısıtıcıya ulaşmaktadır. Burada test düzeneklerinden STR test sistemi kullanılacak ise, hava istenen sıcaklık değerine kadar ısıtılmakta ve sonrasında debimetrelere yönlendirilmektedir. DTR test sistemi kullanılacak ise hava ısıtıcı çalıştırılmadan, kompresör çıkış sıcaklığında doğrudan debimetrelere gönderilmektedir. Fazla hava debimetrelere gelmeden önce ana by-pass hattından dışarı atılmaktadır. Isıtıcıdan gelen ve orifis tipi debi ölçere ulaşan hava, debi değerine göre alçak debi ölçere ya da yüksek debi ölçere yönlendirilmektedir. Daha sonra vanalar kullanılarak test sistemleri girişinde istenen basınç değeri ayarlanmaktadır. Son olarak gerekli ölçümler yapıldıktan sonra kullanılan hava egzoz hattından dışarı atılmaktadır.



Şekil 5: Test sistemi şematik gösterimi

Sıcak Statik Test Sistemi (STR)

Sıcak statik test sisteminde (Şekil 6) sızdırmazlık elemanları dönme etkileri olmadan, motordaki çalışma şartlarında maruz kalacağı sıcaklık ve basınç değerlerindeki hava ile test edilmektedir. Bu sayede sızdırmazlık elemanlarının farklı basınç ve sıcaklıklardaki basınç-sıcaklık-debi ilişkisi çıkarılmaktadır. Özellikle fırça tipi sızdırmazlık elemanlarının sıcak hava ile test edilmesi ile sızdırmazlık elemanı üzerindeki ısıl etkiler değerlendirilmekte, yüksek sıcaklık ve basınç altında fırçanın davranışı ve yük kapasitesi belirlenmektedir. Sonuç olarak, sıcak statik test sisteminde gerçekleştirilen testler ile keçe tasarımının istenilen sıcaklık ve basınç şartları altında görevini yerine getirip getirmediği tespit edilmekte ve sızdırmazlık elemanlarının kaçak debi karakteristiği değerlendirilmektedir.

STR test sisteminde, labirent, fırça, kombine (fırça + labirent), parmak keçe gibi dinamik keçelerin yanı sıra şerit, halat, örgü sızdırmazlık elemanları gibi statik keçe performans testleri de gerçekleştirilebilmektedir.

STR test sistemi genel olarak ana gövde, üst kapak, alt kapak, montaj aparatı ve keçe tabanından oluşmaktadır (Şekil 6). Test parçası, boşluk kontrol aparatı ve montaj aparatının montajı, keçe tabanı üzerine yapılmaktadır. Yüksek basınç bölgesine hava iki farklı girişten ulaşmakta, test parçasından geçtikten sonra alçak basınç bölgesine geçmektedir. Düşük basınç bölgesine ulaşan hava bir adet egzoz çıkış hattından dışarıya atılmaktadır.

Sıcak statik test sisteminde üç noktadan giriş basıncı ve sıcaklığı, iki noktadan çıkış basıncı ve sıcaklığı ve giriş bölgesinden debi değerleri ölçülmektedir.



Şekil 6: STR test sistemi

Soğuk Dinamik Test Sistemi (DTR)

Soğuk dinamik test sistemlerinde (Şekil 7), sızdırmazlık elemanları sıcaklık etkileri olmadan motor çalışma şartlarındaki dönme hızı ve basınç değerlerinde test edilmektedir. Bu şartlar altında sızdırmazlık elemanının görevini yerine getirip getirmediğinin tespit edilmesinde, farklı devir sayısı ve basınçlardaki debi değişiminin sızdırmazlık performansına etkisinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Ayrıca fırça keçe gibi temaslı çalışan keçelerde, aşınma-sürtünme etkilerinin incelenmesinde ve rotor-stator teması sonucunda oluşan kuvvetlerin değerlendirilmesinde kullanılabilir.

DTR test sistemi genel olarak, test parçalarının bulunduğu ana gövde, arka ve ön kapak, elektrik motoru ve elektrik motoru tutucularından oluşmaktadır. Elektrik motoru x-eksenine paralel harekete izin veren bir kızak üzerinde oturmaktadır. Ana gövde ise y-eksenine paralel yönde hareket edecek şekilde kızak üzerinde yer almaktadır.

DTR test sisteminde, labirent, fırça, kombine (fırça + labirent), parmak keçe gibi dinamik keçe sızdırmazlık performans testleri gerçekleştirilebilmektedir.

Soğuk dinamik test sisteminde, iki noktadan giriş basıncı ve sıcaklığı, bir noktadan çıkış basıncı ve sıcaklığı, giriş boru hattında debi değeri ve devir sayısı ölçülebilmektedir.



Şekil 7: DTR test sistemi

Ölçüm Ekipmanları ve Veri Toplama Sistemi

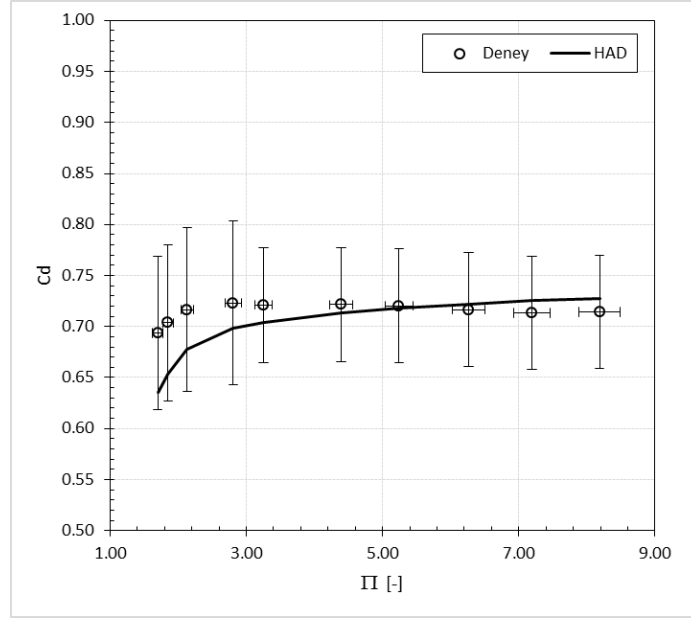
DTR ve STR test sistemlerinde kullanılan ısı çiftleri, basınç sensörleri ve dijital debimetreler her test öncesinde profesyonel kalibrasyon ekipmanları ile kalibre edilmektedir. Elektrik motoru devir sayısı ise motor kontrol ünitesi üzerinden ölçülmektedir.

Veri toplama donanımı olarak, National Instruments Compact veri toplama sistemi ile ısı çift ve basınç sensörleri için uygun 4 adet modül kullanılmaktadır. Veri toplama yazılımı olarak Labview programı kullanılmaktadır. Ayrıca, Labview programı yardımı ile oluşturulan veri toplama ara yüzü yardımı ile veri kaydı gerçekleştirilmektedir. Arayüz yardımı test sırasındaki, her bir konumdaki basınç, sıcaklık değerleri ile bunların ortalamaları ve debi değerleri sürekli olarak takip edilebilmektedir. Bunun yanı sıra ölçüm yapılacak debi aralığına göre kullanılacak debimetrenin seçimi de Labview ekranından yapılabilmektedir.

TEST SİSTEMLERİ VALİDASYONU VE TESTLER

Dinamik ve statik test sistemlerinin kurulmasının ardından ilk olarak basınç, sıcaklık ve kütleli debi ölçerlerin kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Test sistemlerinin kurulum sonrası görüntüleri Şekil 6 ve Şekil 7’de görülmektedir. İlk test verilerinin alınmasının ardından, sonuçlar HAD modelleri ve literatürdeki test verileri ile karşılaştırılmış ve test sisteminin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. HAD analiz yöntemine ait tüm detaylara literatürdeki makalelerden [Doğu, 2015; Doğu, 2016] ulaşılabilir.

Şekil 8’de testlerden ve HAD analizlerinden elde edilen kısılma katsayıları görülmektedir. Test ve analiz sonuçlarının büyük oranda uyumlu olduğu ve belirsizlik aralığı [Moffat, 1988] içinde olduğu görülmektedir. Düşük açıklıklarda test ile analiz sonuçları arasındaki fark bir miktar artmaktadır.



Şekil 8: Örnek test sonuçları ve HAD analizi karşılaştırılması

SONUÇ

Sızdırmazlık elemanları performanslarının motor testleri öncesinde, laboratuvar ortamında kontrollü sıcaklık, basınç, devir sayısı ve açıklık değerleri ile belirlenmesi, motor performansı ve emniyetinin garantiye alınması açısından kritik önem taşımaktadır. Ayrıca test sistemleri, yeni sızdırmazlık elemanları tasarımlarının geliştirilme aşamasında aktif olarak kullanılmaktadır.

Literatürde, düzlemsel/dairesel boyutlu, statik/dinamik, sıcak/soğuk olmak üzere farklı sızdırmazlık test sistemleri bulunmaktadır. Bu test sistemleri, ısı-akış analiz modellerine veri üretmek, sızdırmazlık elemanlarını motor çalışma şartları altında, fonksiyonel, performans ve dayanım testlerine tabi tutmak amacı ile kullanılmaktadır.

Proje kapsamında, sıcak statik test sistemi ile soğuk dinamik test sistemleri kurulumu gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ilk testlerde analiz sonuçları ve test sonuçlarını uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, SAN-TEZ programı kapsamında Bilim, Sanayii ve Teknoloji Bakanlığı ve TEI-TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. tarafından finanse edilmiştir. Proje kapsamında, test sistemi tasarımı, imalatı ve devreye alınması çalışmalarında, TEI, Kırıkkale Üniversitesi ve Türbin ArGe Mühendislik A.Ş. ortak çalışma yürütmektedir. Son olarak, yazarlar projede görev alan TEI Mühendislerinden, Akın Orhangül ve Ercan Eken'e, test sistemi kurulumunda görev alan ve büyük bir özveri ile çalışan TEI test personeli, Feridun Kuşçu ve Emrah Daşık'e, son olarak özverili ve uyumlu işbirlikleri nedeniyle tüm Türbin Arge Mühendislik çalışanlarına teşekkür eder.

Kaynaklar

- Collins, D., 2007. *The Effect of Wear on Abradable Honeycomb Labyrinth Seals*, Cranfield University School of Engineering, Department of Power, Propulsion and Aerospace Engineering, UK
- Denecke, J., Schramm, V., Kim, S., ve Wittig, S., 2003. *Influence of Rub Grooves on Labyrinth Seal Leakage*, Journal of Turbomachinery, Cilt.125, s. 387–393
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Bahar, A. S., Pişkin, A., Arıcan, E., ve 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, Cilt.138, No. 3, s. 032503-1, 032503-10, (<http://dx.doi.org/10.1115/1.4031369>).
- Dogu, Y., Bahar, A. S., Sertçakan, M. C., Pişkin, A., Arıcan, E., ve Kocagül, M., 2016. *Computational Fluid Dynamics Investigation of Brush Seal Leakage Performance Depending On Geometric Dimensions and Operating Conditions*, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Cilt.138, No. 3, s. 032506-1, 032506-13, (<http://dx.doi.org/10.1115/1.4031370>).
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Gezer, K., Kocagül, M., Arıcan, E., ve Ozmusul, M. S., 2016. *Leakage Degradation of Straight Labyrinth Seal due to Wear of Round Tooth Tip and Acute Trapezoidal Rub-Groove*, Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition, Seoul, South Korea, June 13-17, ASME Paper No. GT2016-57928.
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Gezer, K., Arıcan, E., Kocagül, M., ve Ozmusul, M. S., 2016. *Labyrinth Seal Leakage Degradation due to Various Types of Wear*, Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition, Seoul, South Korea, June 13-17, ASME Paper No. GT2016-57944.
- Chupp, R. E., Hendriks, R. C., ve Steinetz, B. M., 2010. *Gas Turbine Engines: Seals*, Encyclopedia of Aerospace Engineering, Wiley.
- Kool, G.A., ve diğerleri, 2006. *Advanced Seal Test Rig Validation and Operation*, ASME Turbo Expo 2006, Barcelona, Spain, May 8–11, 2006, ASME Paper No. GT2006-90915.
- Moffat J. R.;1988. *Describing the Uncertainties in Experimental Results*, Experimental Thermal and Fluid Science, 0894-1777.
- NASA Glenn Research Center, 2016. *Aerospace Seals Facilities and Oil-Free Turbomachinery Facilities*, web: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/StructuresMaterials/TribMech/facilities.html>, 09/08/2016.
- Pfefferle, D.,K., Dullenkopf, K., ve Bauer, J.H., 2011. *Design and Validation of a New Test Rig for Brush Seal Testing Under Engine Relevant Conditions*, Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, Canada, ASME Paper No. GT2011-45107.
- Schramm, V., Willenborg, K., Kim, S., ve Wittig, S., 2002. *Influence of a Honeycomb Facing on the Flow Through a Stepped Labyrinth Seal*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Cilt.124, s. 140-146.
- Sheng, N., Ruggiero, E. J., Devi, R., Guo, J., ve Cirri, M., 2011. *Experimental and Analytical Leakage Characterization of Annular Gas Seals: Honeycomb, Labyrinth and Pocket Damper Seals*, ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, British Columbia, Canada, June 6–10, 2011, ASME Paper No. GT2011-45217.
- Wittig, S. L. K., Dörr, L., ve Kim, S.,1983. *Scaling Effects on Leakage Losses in Labyrinth Seals*, Journal of Engineering and Power, Cilt.105, s. 305-309.