

KISA ÇEVİRİMLİ YORULMA ÇATLAKLARININ TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Mehmet ŞİMŞİR^a, Alpay ANKARA^b

^a Cumhuriyet Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Sivas, Türkiye

^bOrta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, tahribatsız muayene metodu kullanılarak kompresör disklerinde bulunan cıvata deliklerinde oluşan kısa çevrimli yorulma çatlakları incelendi. Kısa çevrimli yorulma çatlaklarını tespitinde Sıvı Penetrant ve El kumandalı Girdap Akımı metotları uygulandı. Elde edilen veriler Hasar Toleranslı Ömür Tahmin metodunda kullanılmaktadır. Hasar Toleranslı Tasarım Metodunun başarılı bir şekilde uygulanması, uygulanan Tahribatsız Muayene Metodunun hassaslığına ve güvenilirliğine son derece bağlıdır. Bu çalışmanın sonunda, el kumandalı Girdap Akımları Yöntemi kompresör disklerindeki en küçük çatlaklarının tespitinde Sıvı Penetrant Yönteminden daha hassas ve daha güvenilir olduğu ortaya konuldu.

Anahtar Kelimeler: Girdap akımları muayenesi, Hasar toleranslı tasarım, Sıvı penetrant muayenesi, Tahribatsız muayene teknikleri.

DETECTION OF LOW CYCLE FATIGUE CRACKS BY NON DESTRUCTIVE INSPECTION

ABSTRACT

In this study, the tie bolt holes of a compressor disc were examined for low cycle fatigue cracks using non-destructive inspection methods (NDI). Liquid Penetrant Inspection (LPI) and Manual Eddy Current Inspection (ECI) methods have been applied to detect low cycle fatigue cracks. Data is presented by Damage Tolerance Life Prediction. The successful applicability of Damage Tolerance Design Method strongly depends on the sensitivity and reliability of applied NDI method. Results were revealed that, Manual Eddy Current Inspection Method is more reliable and more sensitive than the Liquid Penetrant Inspection Method in terms of detection of smallest cracks in the compressor discs.

Key Words: Damage tolerance design, Eddy current inspection, Liquid penetrant inspection, Non destructive inspection techniques.

1. GİRİŞ

Kritik koşullarda çalışan malzeme tasarımında en fazla kullanılan yöntem ‘Güvenli Ömür Tahmin’ metodu olmuştur. Bu tasarım metoduna göre, malzeme için belirli bir ömür tayini hesaplanır ve servis sırasında malzemede bulunan hataların kritik boyutlara erişemeyeceği kabul edilir [1]. Malzeme çalışırken, hataların kritik boyuta ulaşması söz konusu olmadığı için, herhangi bir muayeneye de gereksinim duyulmaz. Malzeme güvenli ömrünün sonuna ulaştığı zaman, diğer bir deyişle malzeme içindeki hataların kullanım nedeni ile kritik boyutlara yaklaştığı zaman parça servisten alınır. Ancak, servisten alınan malzemenin halen daha kullanılabilir ömürleri olabilir. Çünkü malzeme muayene edilmediği için, kritik hata boyutuna ulaşmamış olabilir. Bu durum, hem malzeme sarfiyatını hem de bakım onarım maliyetlerini artırmaktadır. Bundan dolayı, malzemeleri daha etkin bir şekilde kullanmak için, alternatif olarak ‘Hasar Toleranslı Ömür Tahmin’, tasarım metodu geliştirilmiştir.

‘Hasar Toleranslı Ömür Tahmin’, metodu, belirli bir kullanım periyodu için, malzemede bulunan çatlakların kırılmaya karşı direnci olarak ifade edilmektedir. İlk olarak Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri’nde kullanılmaya başlanmış olan Hasar Toleranslı Ömür Tahmin, metodu 1970 yılından beri de sivil havacılıkta kullanılmaktadır. Bu metotta, hata veya çatlakların parçanın kritik yerlerinde olabileceği-ilerleyebileceği varsayılır ve belirli kullanım periyodundan sonra malzeme muayene edilip, çatlakların ilerleyip ilerlemediği kontrol edilerek, çatlakların ‘Çalışmama Sınırı’na (‘Dysfunction Limit’) ulaşmış olup olmadığı tespit edilir. Çalışmama Sınırı, tasarım parametrelerine göre mevcut çatlakların yük altında ilerleme ve kırılma riskinin olduğu çatlak boyutudur. Ulaşmamış ise malzeme tekrar servise konulur. Böylelikle malzeme çok daha etkin olarak kullanılır. Muayene aralıkları maksimum kabul edilebilir çatlak boyutu dikkate alınarak hesaplanır[2-6].

Güvenli Ömür Tahmin metodunun aksine, Hasar Toleranslı Ömür Tahmin metodu çatlak uzunluğu temeline dayandığı için, malzemeyi tahrip etmeden çatlak boyutunun doğru, güvenilir ve hassasiyetle ölçülmesi gerekmektedir. Bu anlamda, Tahribatsız Muayene Metotları temel rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, tahribatsız muayene metotlarından Sıvı Penetrant Muayene ve El Kumandalı Girdap Akımları Muayene metotları kullanılarak uçak motor disklerinde oluşmuş kısa çevrimli çatlakların muayenesi yapılarak hangi metodun daha güvenilir ve hassas olduğu incelenmiştir.

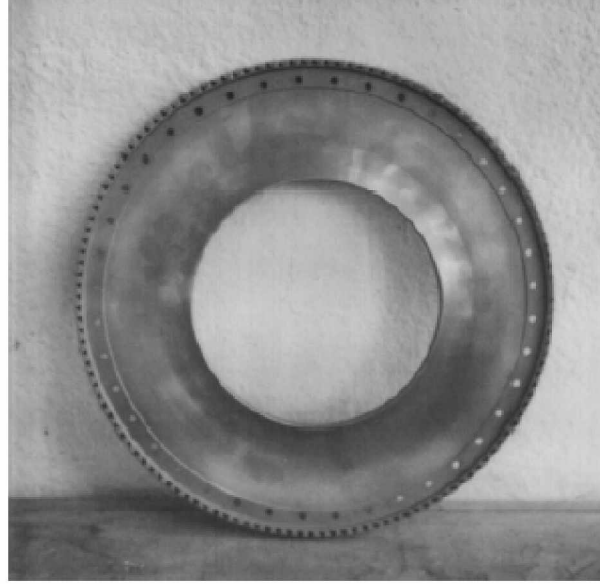
2. MALZEME VE METOT

Bu çalışmada AM 355 kalite çökelti ile sertleştirilmiş paslanmaz çelikten yapılmış, uçak motorlarında kullanılan diskler incelenmiştir. Disklerin kimyasal bileşimi çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. Diskin kimyasal bileşimi

Malzeme	Bileşim (%)								
	C	Si	P	S	Cr	Ni	Mn	Mo	Fe
AM355	0.1	0.5	0.04	0.03	15-16	4-5	0.5-1.25	2.5-3.25	Kalan

Deneysel için deliklerde kısa çevrimli yorulma çatlakları bulunan ve Güvenli Ömür Tahmin metoduna göre ömrünü tamamlamış, türbinden çıkarılmış diskler kullanıldı. Çalışmada 2 adet disk kullanılmış olup, her bir diskte 40 adet civata deliği bulunmaktadır. Disk üzerindeki civata deliklerinin çapları 4.8 mm dir. Şekil 1’de kullanılan disk görülmektedir. Toplam 80 adet civata deliklerine El Kumandalı Girdap Akımları ve Sıvı Penetrant Muayene testleri uygulanarak incelendi.



Şekil 1. Kompresör disk

2.1 Girdap Akımları Muayenesi

Girdap Akımları Muayenesi için 2.832/foersted girdap akımları üreteç cihazına bağlı 4.7 mm çapında döner prob kullanıldı. Çatlakların daha iyi tespit edilebilmesi için, gürültü sinyallerini azaltmak amacıyla filtre değeri yüksek tutuldu ve böylelikle çatlak sinyallerinin daha belirgin olması sağlandı. Girdap akımları muayenesi için cihazın set değerleri şu şekilde ayarlanmıştır; Filter= HP5, Preamplifier= -6, Current+Ddive= 2, Phase= 23, Sensitivity= 32 dB, Frequency= 500 kHz. Malzemeden gelen sinyal, cihaz üzerindeki ekrana aktarılarak, çatlak yeri tespit edildi.

2.2 Sıvı Penetrant Muayenesi

Sıvı penetrant muayene testi oda sıcaklığında yapıldı. İlk olarak incelenecek yüzey NaOH çözeltisi ile yağdan, kirden vb. yüzey pisliklerinden temizlendi. İkinci olarak, çatlak tayininde çok hassaslığa sahip, ticari ismi Beta NT sprej olan, floresan penetrant sıvı ile yüzey boyandı. Penetrant sıvının yüzeyi tam olarak ıslattıktan sonra. Penetrantın çatlakların içine nüfuz etmesi için 10 dakika bekleme süresinden sonra, yüzeydeki fazla penetrant sıvı, su ile yıkandı ve kurutuldu. Üçüncü olarak, ticari ismi BT 70 olan yüksek emiciliğe sahip ince taneli kuru toz geliştirici yüzeye püskürtüldü, ince bir film tabakası olacak şekilde dağıtıldı ve çatlaklar içine nüfuz etmiş bulunan penetrantın toz geliştirici tarafından emilerek, görüntü oluşması sağlandı. Son olarak, floresan penetrant sıvısı kullanıldığı için, diskler karanlık odada ultra violet ışığı (UV) altında incelendi. Çatlağın bulunduğu yerlerde yeşil renkte görüntü oluştu.

2.3 Optik Mikroskop Çalışması

Kompresör diski üzerindeki cıvata deliklerinde bulunan çatlakların yerleri optik mikroskop altında 50x büyütmede incelenerek tahribatsız muayene metotlarındaki bulunan yerlerle karşılaştırılarak tahribatsız muayene sonuçları teyit edildi.

2.4 Çatlak Boyutu Ölçümü

Çatlak boyutu ölçümü için her bir cıvata deliğini içine alan bölge, kompresör diskten kesilerek çıkartıldı. Bu amaçla önce plazma kesme cihazı ile disklerin iç ve dış kısımları kesilerek, 20x30 mm ebatlarında ve cıvata deliği ortada olacak şekilde numuneler elde edildi. Çatlağın bulunmadığı bölgelerden çapı boyunca makasla kesilerek ikiye ayrıldı. Diskin iç kısmına denk gelen bölgeye (yani cıvata deliğinin karşısına gelen bölgeye) çentik açıldı. Çentik açılan kısma basma kuvvetleri uygulayarak, eğme momenti etkisiyle var olan çatlağın ilerlemesi ve parçanın kırılması sağlandı. Kırılma yüzeyleri tarama elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak incelendi ve çatlak uzunluğu ölçüldü. Yorulma sonucu oluşan çatlaklar hem düzgün bir yüzeye sahip olmasından hem de oksitlenmesinden dolayı TEM altında kolayca ayır edildi.

3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Çatlak tespiti için yapılan tahribatsız muayene sonuçlarda üç olasılık olabilmektedir. Birinci olasılık; gerçekte var olan bir çatlağın tahribatsız muayene metodu tarafından ‘Tespit edilmesi (vurdu)’ durumu, ikinci olasılık; gerçekte çatlak olup ‘Tespit edilememesi (kaçırdı)’ durumu, üçüncü olasılık ise gerçekte çatlak olmadığı halde muayene metodu tarafından çatlak varmış gibi cevap vermesi ‘Yanlış alarm’ durumu. Bu üç olasılığa ait oranlar ise aşağıdaki gibi hesaplandı;

:

$$\text{Tespit – edebilme – oranı} = \frac{\text{tespit – edilen – çatlak – adedi}}{\text{toplam – çatlak – adedi}} \quad (1)$$

$$\text{Tespit – edilememe – oranı} = \frac{\text{tespit – edilemeyen – çatlak – adedi}}{\text{toplam – çatlak – adedi}} \quad (2)$$

$$\text{Yanlış – alarm – oranı} = \frac{\text{yanlış – alarm – adedi}}{\text{çatlak – olmayan – delik – adedi}} \quad (3)$$

Bu tür çalışmalarda, yanlış alarm oranı %5’in altında olması durumunda istatistiksel değerlendirme yapılırken ‘Çatlak belirti olasılığı (probability of indication POI)’ hesaplanmıştır [3]. Yanlış alarm oranı %5’ten fazla olması durumunda, POI değerlerini çok fazla etkilemesi, yanlış değerlendirmelere sebep olmaktadır. Bu durumlarda Yanlış alarm oranı çatlak uzunluğundan bağımsız olduğu için POI yerine ‘Tespit edebilme olasılığı (Probability of detection, POD)’ hesaplanmaktadır. Bu çalışmada yanlış alarm oranı %5’in üstünde olduğu için istatistikî değerlendirme yapılırken yanlış alarm oranı dikkate alınmamıştır. Muayene sonuçları istatistikî olarak değerlendirilerek POI yerine POD değerleri hesaplandı ve çatlak boyunun bir fonksiyonu olarak çizildi. Buna bağlı olarak %95 güvenlik tespit limiti belirlendi.

Beren ve Hovey [4] çatlak boyunu üç değişik kategoride sınıflandırdıktan sonra, her bir kategori için istatistiksel analiz yapmışlar. Bu çalışmada Kategori 2' ye göre sınıflama yapıldı yani çatlaklar boyutlarına göre 0.4 mm aralıklarla, 5 grupta (0.0–0.4, 0.4–0.8, 0.8–1.2, 1.2–1.6, 1.6–2.0 mm aralıklarında) toplandı. Her bir aralıktaki çatlak uzunluğuna ait tespit edebilme olasılığı (POD) eşit kabul edildi. Beren ve Hovey en iyi POD analiz sonucunu verebilecek birçok dağılım metotlarını (Weibull, Probit, Logodds-linear scale, Log-logistic gibi) kullanarak istatistikî analiz yapmışlardır. Bu dağılım metotlarının uyumluluğu belirlemek için lineer regresyon analizi uygulanmış ve anlamlılık seviyesi olarak 0.1 kabul edilmiş, en iyi uyumluluk (tutarlılık) Log-logistic dağılımı ile sağlandığı tespit edilmiştir.

Log-logistic dağılımı fonksiyon olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [4];

$$P_i = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 \ln(a_i))}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln(a_i))} \quad (4)$$

P_i =tespit edebilme olasılığı

a_i = çatlak boyu

β_0 =çatlak konum parametresi

β_1 = eğim

$i=1 \dots n$, n =toplam çatlak uzunluğu aralık sayısı

Çatlak uzunluğu olarak çatlak aralık uzunluğunun orta noktası olarak alındı [4]. Lineer regresyon için n adet a_i , P_i veri kullanıldı ve Log-logistic dönüşümü sağlandı [4].

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X \quad (5)$$

$$Y_i = \ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) \quad (6)$$

$$X = \ln(a_i) \quad (7)$$

β_0 =x-eksenini kestiği nokta, β_1 =doğrunun eğimi

β_0 ve β_1 değerleri bulunduktan sonra Log-logistic dağılım fonksiyonunda yerine konularak POD eğrisi çizildi. Çatlak tespit edilememesi durumu için $1/(n+1)$, çatlak aralığında bulunan çatlakları tespit edebilme durumu için $n/(n+1)$ değerleri olarak alınmıştır [4].

POD eğrisi çizildikten sonra, %95 güvenilirlik eğrisi çizildi. %95 güvenilirlik eğrisi, Bellinger ve ark [5] tarafından, normal dağılım kullanılarak tespit edilmiş.

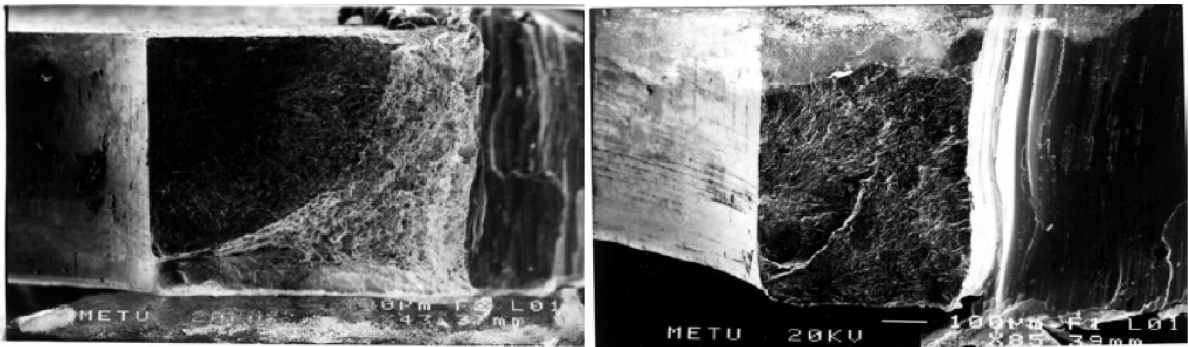
$$\%95 \text{ Güvenilirlik} = \text{POD} \pm 1.96 S_{y/x} \quad (8)$$

%95 güvenilirlik için normal standart değişken olarak 1.96 olup, $S_{y/x}$ koşullu standart değişkeni göstermektedir. Bu kabullenme, güvenilirlik alt sınırını ifade etmekle birlikte POD eğrisine paralel ancak x-eksenini kestiği nokta farklı olmasını sağlamıştır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

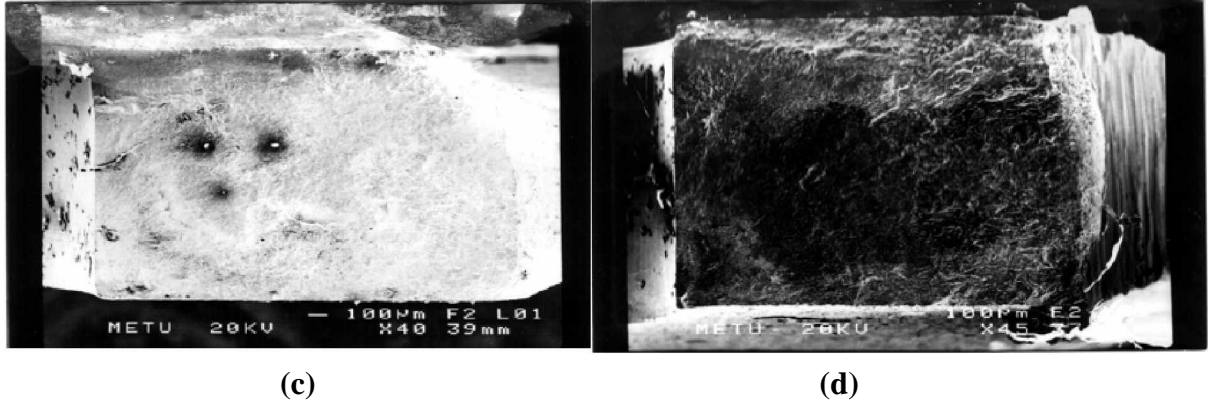
Tahribatsız muayene yöntemlerince incelenen cıvata deliklerinde bulunan çatlakların boyutları ile çatlak yüzeylerinin açılmasıyla elde edilen çatlak boyut ölçümleri her iki sonuç için karşılaştırıldı. Eğer çatlak tahribatsız muayene metodunca doğru olarak belirlenmiş ise 1, gerçekte çatlak var olup tahribatsız muayene metodunca belirlenememişse 0 ve çatlak olmadığı halde tahribatsız muayene metodunca belirlenmiş gibi cevap alınmış ise F (false) harfi ile tanımlandı.

Testler ve kırılma yüzeylerinin incelenmesi sonucunda cıvata deliklerinin kenarlarında olduğu ve açılı olarak malzemenin içine doğru büyüdüğü görüldü. Çatlaklar şekline göre 4 sınıfta toplandı. Sadece kenarda oluşan çatlaklar yani ‘köşe çatlağı’ (I) , delik yüzeyinde oluşan çatlak ve genişliği diskin alt ve üst yüzeyine ulaşmamış, yani ‘orta çatlak’ (II) ve çatlağın genişliği diskin alt ve üst yüzeyine ulaşmış ve diskin içine doğru ilerlemiş olan ‘boyunca çatlak’ (III), aynı kırılma yüzeyinde birden fazla çatlak bulunuyor ise ‘çoklu çatlak’ (IV) olarak sınıflandırıldı. Şekil 2a-d çatlak çeşitlerini göstermektedir. Köşe çatlakları çeyrek daire, orta çatlağı yarım eliptik ve boyunca çatlak ise dikdörtgen şeklinde olduğu görüldü. Çatlağın şekli bulunduğu yere göre değişmekte olup tahribatsız muayene metotlarınca belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Toplam 80 adet cıvata deliğinde yapılan inceleme sonucunda, toplam 33 adet çatlak tespit edildi. Bu çatlaklardan; 17 adet köşe çatlağı, 11 adet orta çatlağı ve 5 adet boyunca çatlağı görüldü. 13 adet çoklu çatlak görüldü ancak hangi tür çatlak daha büyük ise o sınıfa dâhil edildi. Tarama elektrom mikroskobu ile çatlak uzunlukları ve alanları ölçüldü. Çizelge 2’de tahribatsız muayene sonuçları görülmektedir. Çizege 2 ‘ye baktığımızda, toplam 33 adet çatlağın %48.5’ini girdap akımları tespit edebilmişken, sıvı penetrant muayenesi ancak %18.2’sini tespit edebildi. Tespit edilen en küçük çatlak boyu olarak, girdap akımları 0.08 mm iken, sıvı penetrant muayenesinde ise 1.26 mm olarak ölçüldü. Tespit edilemeyen en büyük çatlak boyu olarak girdap akımları 0.95 mm, sıvı penetrant ise 1.7 mm uzunluğundaki çatlakları tespit edilemedi. Girdap akımları %6.4, sıvı penetrant %2.1 yanlış alarm vermiş yani çatlak olmadığı halde çatlak varmış gibi sinyal vermişlerdir. Bu sonuçlara göre girdap akımları metodunun çatlak tespit performansının daha iyi olduğu ortaya konulmuştur. Yanlış alarm oranının fazla olması istenmez veya mümkün olduğunca az oranda olmalıdır. Çünkü yanlış alarm oranı arttıkça, doğru çatlak tespit oranı azalmaktadır. Literatürde kabul edilebilir yanlış alarm oranı azami %5 dir [3]. Bu çalışmada bu oran girdap akımları muayene metodu için %9.1 olduğu için ve tespit edebilme olasılık eğrisini etkileyeceği için, istatistiki hesaplamalarda yanlış alarm oranı dikkate alınmadı.



(a)

(b)



Şekil 2. Çatlak çeşitleri; a) köşe, b) orta, c) boyunca, d) çoklu

Çizelge 2. Tahribatsız muayene sonuçları

Tahribatsız muayene metodu	Tespit edilen çatlak #		Tespit edilemeyen çatlak #		Yanlış alarm #		Tespit edilen en küçük çatlak		Tespit edilemeyen en büyük çatlak	
	top.	%	top.	%	top.	%	uzunluk mm	alan mm ²	uzunluk mm	alan mm ²
Girdap akımları	16	48.5	17	51.5	3	6.4	0.08	0.006	0.95	0.14
Sıvı penetrant	6	18.2	27	81.8	1	2.1	1.26	1.29	1.7	1.6

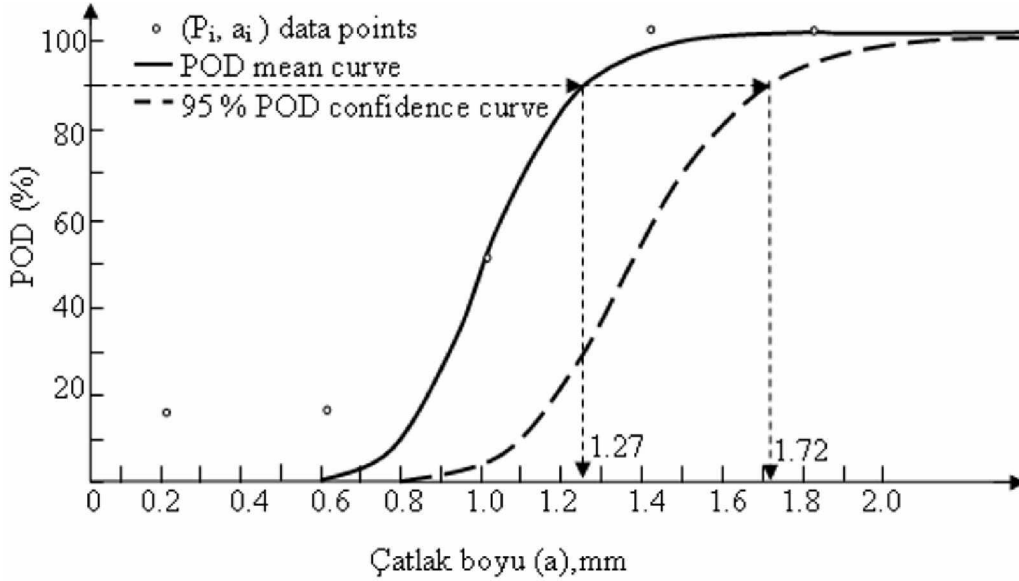
Tahribatsız muayene metoduyla tespit edilen çatlaklar, 0.4 mm çatlak uzunluk aralıklarına bölünerek gruplandırıldı. Çatlak aralığındaki her bir çatlak aynı tespit edilme olasılığına sahip olduğu kabul edildi. Her bir aralık için, tespit edilme oranı (tespit edilen çatlak # / toplam çatlak #) hesaplandı ve ortalama çatlak boyutu-tespit edilme oranı veri çifti, çatlak tespit edilme olasılığı hesabında kullanıldı. Ancak sıvı penetrant yönteminde yeterince veri elde edilemediğinden dolayı, tespit edebilme olasılık (POD) eğrisi elde edilemedi.

Çizelge 3. Çatlak boyutunun gruplandırılması

Ortalama çatlak boyutu (çatlak boyut aralığı)	Toplam çatlak #	Sıvı penetrant muayenesi		Girdap akımları muayenesi	
		Tespit edilen çatlak #	Tespit edilemeyen çatlak #	Tespit edilen çatlak #	Tespit edilemeyen çatlak #
0.2 (0.0-0.4)	13	0	13	2	11
0.6 (0.4-0.8)	6	0	6	1	5
1.0 (0.8-1.2)	2	0	2	1	1
1.4 (1.2-1.6)	7	2	5	7	0
1.8 (1.6-2.0)	5	4	1	5	0

Şekil 3 Girdap akımları muayene metodu için, tespit edebilme olasılığı (POD) ve %95 güvenilirlik, çatlak uzunluğunun bir fonksiyonu olarak görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, %90 olasılıkla tespit edilen çatlak büyüklüğü 1.27 mm olarak belirlendi. Aynı şekilde %90 olasılıkla ve %95 güvenilirlikte tespit edilen çatlak boyutu 1.72 mm olarak belirlendi. Bellinger ve ark [5] el kumandalı girdap akımları muayene metodu için, yanlış

alarm oranını da dikkate alarak yaptıkları benzer bir çalışmada,%90 POD için 1.25 mm ve %90/%95 güvenilirlik için 1.75 mm çatlak boyu olarak hesaplamışlar. Bu çalışmada elde edilen değerler literatürle uyum içinde olduğu göstermiş ve aynı zamanda küçük çatlakların tespit edebilme kabiliyeti (hassasiyeti) el kumandalı girdap akımları muayene metodunun çok iyi olduğu sonucuna varılabilir. Bu çalışmada yanlış alarm oranını dikkate almak için daha fazla verinin olması gerekmektedir. Ayrıca tespit edebilme olasılığının (POD) artırılması için sinyal/ gürültü oranının artırılması gerekmektedir.



Şekil 3. Girdap akımları muayenesi için tespit edebilme olasılığı (POD).

5. SONUÇLAR

El kumandalı girdap akımları muayene metodu ile sıvı penetrant muayene metodu uçak motorlarında bulunan kompresör disklerindeki civata deliklerinde oluşmuş kısa yorulma çatlakları hassasiyet ve güvenilirlik açısından incelendi. Aşağıdaki sonuçlar elde edildi.

1. Kullanılan el kumandalı girdap akımları muayene metodu yüksek hassasiyetle ve çatlak tespit edebilme oranı (%48) ile daha iyi sonuç vermektedir. Ancak tespit edilemeyen çatlak boyu(0.95 mm) yüksek olup ve yanlış alarm oranı yüksek çıkmıştır (%6.2). Yanlış alarm oranını düşürmek için daha gelişmiş cihazlar kullanmak ve sinyal/gürültü oranı daha yüksek tutulabilmesi durumunda, daha iyi sonuçlar alınacağı beklenilmektedir.
2. El kumandalı girdap akımları çatlak tespit edebilme hassasiyeti açısından çok iyi bir metot olmasına karşılık problemler elle değiştirildiği için, hassasiyeti ve güvenilirliği son derece etkilemektedir. Bu çalışmada el becerisini geliştirmek amacıyla birçok defa başlangıç deneyleri yapılmış olup, deneyim elde edildikten sonra, yani tekrarlanabilir sonuçlar elde edildikten sonra esas deneysel çalışmaya başlandı.
3. Sıvı penetrant muayene metodu daha az sayıda çatlak tespit etmiştir (%18). Tespit edilemeyen en büyük çatlak boyu 1.7 mm olup oldukça yüksektir. Ancak, yanlış alarm oranı (%2.1) el kumandalı girdap akımları metoduna göre daha iyi sonuç vermektedir.

Tespit edebilme olasılığının hesaplanabilmesi için daha fazla sayıda diske ve deney sayısına ihtiyaç olduğu orta konmuştur.

KAYNAKLAR

1. Satter SA, Sundt CV. 'Gas Turbine Engine Disc Cyclic Life Prediction', **J. Aircraft**, 12 (4), 3601975.
2. Cook CE, Spaeth DT, Hunter DI, Hill R.J., 'Damage Tolerance Design of Turbine Engine Discs', **ASME 82-GT-311**, 1982.
3. Annis C. A. Jr, Simms D. L., Harris J. A., 'Concept Definition: Retirement for Cause of F 100 Rotor Components', **AFWAL-TR-80**, 4118, 1980.
4. Berens A. P., Hovey P. W., 'Statistical Methods for Estimation Crack Detection Probabilities, Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Applications for Structural Design and Maintenance', **ASTM STP 798**, 1983.
5. Bellinger A., Fahr A. K., Koul G., Stoute P., 'The Reliability and Sensitivity of NDI Techniques to Detect LFC Cracks in Fastener Bolt Holes of Compression Discs', **NAE Report LTR-ST-1651**, National Research Council of Canada, May 1988
6. Fahr A., Forsyth D., Bullock M., Wallace W., 'NDI Techniques for Damage Tolerance Based Life Prediction of Aero-Engine Turbine Discs', **Report LTD-ST-1961**, Institute for Aerospace Research. February 1994.