Fan Tanım Eğrileri Deneyi İçin Belirsizlik Analizi Uygulaması

Yrd. Doç. Dr. Samim DÜNDAR, Arş. Gör. Dr. Utku ŞENTÜRK, Pena CHARYKULIYEV
samim.dundar@ege.edu.tr, utku.senturk@ege.edu.tr, penacarikuliyev@gmail.com
Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Diğer tüm akım makinaları gibi, fanların da performansını ifade etmek için tanım eğrilerinden yararlanılır. Bu eğriler, uluslar arası standartlar ile ana hatları belirlenmiş olan fan tanım eğrileri deneyi ile bulunur. Bu deneyde yapılan çeşitli ölçümler ile farklı hava debilerinde fanın akışkana kazandırdığı basınç ve fan verimi hesaplanmaktadır. Dolayısıyla ölçümlerdeki belirsizlik, bu çıktılara da yansımaktadır. Bu çalışmada, fan tanım eğrileri deneyinde ölçüm belirsizliğinin saptanması, bir uygulama ile sunulacaktır.

GİRİŞ

Fan; kanatlı yapıda, bir ya da daha fazla döner çarkı aracılığıyla akışkana enerji aktaran makinadır. Fan içinden geçen çalışma akışkanının (hava ya da bir diğer gaz) basıncı arttırılır. Bir uluslar arası standart olan AMCA 205-10'da yer alan tanıma göre, basınç artışının 30 kPa değerini aşmadığı makinalar fan olarak sınıflandırılır [1]. Bu genel tanım, akışkan yoğunluğundaki değişimi dikkate alarak, fan ve kompresörleri ayırt etmek amacıyla yapılmıştır. Söz konusu basınç artışı, belli bir debide hava akışını sağlamak istendiğinde, bu sistemde oluşacak basınç kayıplarının karşılanması için gereklidir. Bir fanın aerodinamik performansı, tanım eğrileri ile ifade edilir. Bu eğriler, sabit devirde çalışan bir fan için deneysel olarak elde edilir. Fan basınç artışı (ΔP_t), fan verimi (η), ve mil gücü ($\dot{W}_{mil}$), hacimsel debinin (Q) bir fonksiyonu olarak verilir.

Deneysel araştırmalardaki ölçüm süreci bir belirsizlik barındırır. Bu belirsizliğin tayininde başvurulan yöntemler ve genel tanımlar, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) standartları [2] ile verilmiş olup, bu hususlardan 2. Bölüm'de kısaca bahsedilecektir. Güneş toplayıcılarının performans deneyleri için belirsizlik analizi çalışmaları, Müller-Schöll ve Frei [3] ve Sabatelli vd. [4] tarafından verilmiştir. Fan tanım eğrileri deneyi için ISO tarafından yayınlanan standartta [5], fan hacimsel debisi, basınç artışı ve verimi için izin verilen en yüksek bağıl belirsizlikler, sırasıyla;

$\pm\%2$, $\pm\%1{,}4$ ve $\pm\%3{,}2$

olarak ifade edilmiştir. Fan tanım eğrileri deneyinde belirsizliğin saptanması bu çalışmanın konusu olup, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde yapılan bir fan performans deneyi uygulaması ele alınmaktadır. Deneyde ölçülen büyüklükler, statik basınç, dinamik basınç, voltaj, akım ve faz farkıdır. Deneydeki parametreler için gerçekleştirilen belirsizlik analizi 3. Bölüm'de, ilgili sonuçlar ve değerlendirme ise 4. Bölüm'de verilmiştir.

ÖLÇÜM BELİRSİZLİKLERİNİN İFADE EDİLMESİ

Çoğu fiziksel büyüklüğün ölçümü doğrudan yapılmaz. Bunun yerine, doğrudan ölçülebilen büyüklükler ölçülür, bu veriler yardımı ile merak edilen büyüklük hesaplanır. Dolayısıyla her ölçümdeki belirsizliğin, merak edilen büyüklükte yol açacağı belirsizlik saptanmalıdır. Hemen her ölçüm, önceden işaretli bir ölçeğin üzerindeki ibrenin ya da bir dijital göstergenin okunmasını kapsar. Böylece deneysel araştırmalarda ölçülen tüm büyüklükler hata barındırır. Ölçülen x büyüklüğünün gerçek değeri x_g ve ölçülen değeri x_l olmak üzere, bağıl hata,

$$\varepsilon = \frac{x_l - x_g}{x_g} \qquad (2)$$

ile verilir. Hata, ideal bir kavram olup, değeri tam olarak bilinemez. Bir diğer deyişle, hatanın bilinmesi için gerçek değerin bilinmesi gerekir ki böyle bir durumda da ölçüme gerek kalmazdı. Hata, rastgele ve sistematik olmak üzere iki bileşenden oluşur. Rastgele hata, etkin büyüklüklerin öngörülemez değişimlerinden doğar. Bir büyüklüğün ölçümü tekrar edildiğinde gözlenen değişim, rastgele hata ile ilişkilidir. Tekrarlanabilirlik koşulları olarak adlandırılan [2],

**Aynı ölçüm prosedürü,*
**Aynı gözlemci,*
**Aynı koşullar altında, aynı ölçüm cihazı,*
**Aynı konum,*
**Tekrarın kısa zaman aralığında gerçekleştirilmesi*

koşullarını sağlamak kaydıyla, gözlem sayısı arttırılarak rastgele hata azaltılabilir. Sistematik hatanın oluşumu ise daha farklıdır.

Belirli bir büyüklüğün ölçümü yukarıda verilen koşullara uygun olarak tekrarlansa dahi, sistematik hatanın değeri ve işareti aynı olarak kalır. Bu tanımlara bir örnek olarak, bir şerit metre ile bir masanın boyunun ölçümü verilebilir [6]. Gözlemci, şerit metre üzerindeki değeri okuduğu sırada ölçeğe tam karşıdan bakmayı ihmal edebilir. Ya da şerit metrenin ortam sıcaklığından etkilenerek boyunda bir miktar uzama (ya da kısalma) gerçekleşebilir. Bu gibi durumlar, rastgele hata sınıfına girmektedir. Tam değerini bilmek mümkün olmasa da, yapılan ölçümün yukarıda verilen kriterlere uygun olarak tekrar edilmesi ile ölçümdeki belirsizliği azaltmak mümkün olmaktadır. Diğer taraftan, kullanılan şerit metrenin bir üretim hatası dolayısıyla yaptığı tüm ölçümlerde fazla değer göstermesi söz konusu olabilir. Bu da sistematik hata tanımına uygundur. Böylece, sistematik hatanın belirlenmesi daha zor olup, araştırmacının muhtemel sistematik hata kaynaklarını tahmin edebilmesi önemlidir.

Denklem 1'de verilen hata yerine, belirsizlik kavramı önerilmektedir. Belirsizlik, ölçülen büyüklükle ilgili değerlerin dağılımı hakkında bilgi veren bir parametredir. GUM ile ana hatları verilmiş olup, deneysel araştırmalarda yürütülecek bir belirsizlik analizi ile saptanır. Buna göre, $X_1, X_2, \dots, X_N$ büyüklüklerine bağlı bir Y parametresi ele alınsın.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \tag{2}$$

Ölçümlerden elde edilen tahmini değerler $x_1, x_2, \dots, x_N$ olmak üzere, y tahmini değeri belirlenir.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \tag{3}$$

Böylece, X_i büyüklüğü için belirsizlik $(i = 1,2, \dots, N)$

$$x_i \pm u_{x,i} \tag{4}$$

gösterimi ile ifade edilir. Burada, ilk terim tahmini değeri, ikincisi ise, ölçüm belirsizliğini simgeler. Buna ek olarak bağıl belirsizlik $\frac{u_{x,i}}{|x|}$ gösterimi da yaygın olarak kullanılır.

Deneylerdeki ölçüm belirsizliğin tayini, A tipi ve B tipi olmak üzere iki farklı değerlendirme ile gerçekleştirilebilir. A tipi değerlendirmede, belirsizlik, bir istatistiksel analiz ile saptanır. Buna göre, tekrarlanabilirlik koşulları altında, X_i büyüklüğüne ait n _det bağımsız gözlemde aritmetik ortalama, x_i tahmini değerini verir.

$$x_i = \bar{X}_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} X_{i,k} \tag{5}$$

$$s^2(X_{i,k}) = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(X_{i,k} - \bar{X}_i)^2 \tag{6}$$

$$s^2(\bar{X}_i) = \frac{s^2(X_{i,k})}{n} \tag{7}$$

ile tanımlıdır. Burada $s(\bar{X}_i)$ aritmetik ortalamanın standart sapması olup, A tipi değerlendirmede ölçüm belirsizliğine eşittir.

$$u_{x,i} = s(\bar{X}_i) \tag{8}$$

B tipi değerlendirmede ise, $u_{x,i}$ ifadesinin değeri, bilimsel temellere ve X_i 'nin değişimi hakkında tüm mevcut bilgilere dayalı bir yargı sürecinin ardından belirlenir.

Bu bilgilerden bazıları;

**Önceki ölçüm verileri,*
**İlgili malzeme ve cihazların davranış ve özellikleri hakkında tecrübeler,*
**Üretici tarafından sağlanan kılavuzlar,*
**Kalibrasyon ya da diğer sertifikalardan gelen veriler,*
**El kitaplarından alınan referans verilerine dair belirsizlikler* olarak sayılabilir [2]. Genel bir ifadeyle, B tipi değerlendirmede belirsizlik, ya bir dış kaynaktan elde edilir ya da X_i büyüklüğüne ait bir olasılık dağılımı kabulünden yararlanarak bulunur [7].

A ya da B tipi değerlendirme ile $u_{x,i}$ 'nin bulunmasının ardından, Denklem 3'teki y tahmini değerindeki belirsizliğin u_y saptanması için, birleşik belirsizlik tanımından yararlanılır.

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_{x,i}^2 \tag{9}$$

Bu ifadenin, yüksek mertebeden terimleri ihmal edilen Taylor serisi açılımdan türetilmiş olup, x_i girdilerinin birbirinden bağımsız olduğu durum için geçerli olduğu vurgulanmalıdır.

FAN TANIM EĞRİLERİNİN BELİRSİZLİK ANALİZİ

Fan tanım eğrilerinin deney yoluyla belirlenmesi için, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde bir deney düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 1).

Şekil 1: Deney Düzeneği

Fan performans testi standardı ISO5801'e göre C sınıfına giren test düzeneğinde, üfleme ağzı atmosfere açıktır.

Emme borusu girişine bağlanan ayarlanabilir bir klape ile fan debisi değiştirilebilmektedir. Emme borusu üzerinde bir ölçüm düzleminde, Pitot-Statik tüpü yardımıyla ölçümler yapılarak, akışkanın debisi ve statik basıncı belirlenmektedir. Pitot-Statik tüpü, çok amaçlı dijital bir ölçere bağlıdır. Bu cihazın bağıl belirsizliği, cihaz kılavuzundan $\pm\%1$ olarak okunmuştur [8]. Fanın şebekeden çektiği gücün belirlenmesi için, dijital göstergeli bir voltmetre, bir ampermetre ve bir $\cos\phi$ metre ile ölçüm yapılmıştır. Bu cihazların $\pm\%1$ irinin bağıl belirsizliği de cihaz kılavuzlarından okunmuştur [9,10,11]. Fan çarkına dönme hareketini sağlayan elektrik motorunun verimi ise, η_m =0,85 olarak verilmektedir. Buna göre fanın içerisinden geçen akışkanın hacimsel debisi (Q), fanın akışkana kazandırdığı toplam basınç (ΔP_t), şebekeden çekilen elektriksel güç ($\dot{W}_{şeb}$) ve fan verimi (η),

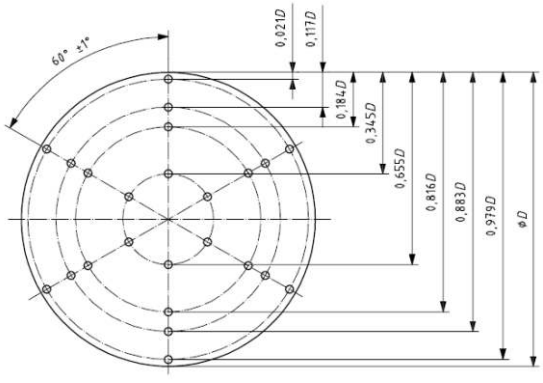
$$Q = A_1\sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} \tag{10}$$

$$\Delta P_t = P_{atm} - P_s + P_d\left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right) \tag{11}$$

$$\dot{W}_{şeb} = VI\cos\phi \tag{12}$$

$$\eta = \frac{\Delta P_t Q}{W_{şeb}\eta_m} \tag{13}$$

ile verilir. Burada, A_1 ve A_2 ölçüm düzlemi ve fan çıkışındaki kesit alanlarını (m2); P_s ve P_d akışkanın ölçüm düzlemindeki ortalama statik ve dinamik basınçları (Pa), V , potansiyel farkı (volt), I , akımı (amper) ve $\cos\phi$ faz farkını simgelemektedir. Basınç artışı ve fan veriminin, hacimsel debinin bir fonksiyonu olarak belirlenmesi için, ayarlanabilir klape yardımıyla debi değiştirilerek 15 farklı çalışma noktasında deneyler tekrarlanmıştır. Ölçüm düzlemindeki boru kesit alanı boyunca statik ve dinamik basıncın ortalama değerinin belirlenmesi için, ISO 5801'e uygun olarak, 24 farklı noktada ölçüm yapılmıştır. Bu konumların belirlenmesindeki ölçümlerin bağıl belirsizlikleri çok küçük kabul edilerek mevcut analizde ihmal edilmiştir. Dairesel kesitli kanallarda ölçüm noktaları Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Dairesel Kesitli Kanallarda Ölçüm Noktaları [5]

Ortalama değer hesabı için,

$$P_s = \frac{1}{24}(P_{s,1} + P_{s,2} + \cdots + P_{s,24}) \tag{14}$$

$$P_d = \left[\frac{1}{24}\left(P_{d,1}^{\frac{1}{2}} + P_{d,2}^{\frac{1}{2}} + \cdots + P_{d,24}^{\frac{1}{2}}\right)\right]^2 \tag{15}$$

formülleri kullanılmıştır. Böylece, her bir deneyde, 24'er adet P_s ve P_d ile birer adet V, I ve $\cos\phi$ ölçümü yapılmakta, dolayısıyla,

$$\Delta P_t = f(P_{s,1}, P_{s,2}, \ldots, P_{s,24}, P_{d,1}, P_{d,2}, \ldots, P_{d,24}) \tag{16}$$

$$Q = g(P_{d,1}, P_{d,2}, \ldots, P_{d,24}) \tag{17}$$

$$\eta = h(P_{s,1}, P_{s,2}, \ldots, P_{s,24}, P_{d,1}, P_{d,2}, \ldots, P_{d,24}, V, I, \cos\phi)$$

olmaktadır.

$$u_1(\Delta P_1 t)^2 = (\partial f/(\partial P_1(s,1)))^2 u_1(P_1(s,1))^2 + (\partial f/(\partial P_1(s,2)))^2 u_1(P_1(s,2))^2 + \cdots + (\partial f/(\partial P_1(s,24)))^2 u_1(P_1(s,24)) \quad (19)$$

$$u_Q^2 = \left(\frac{\partial g}{\partial P_{d,1}}\right)^2 u_{P_{d,1}}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial P_{d,2}}\right)^2 u_{P_{d,2}}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial g}{\partial P_{d,24}}\right)^2 u_{P_{d,24}}^2 \quad (20)$$

$$u_\eta^2 = \left(\frac{\partial h}{\partial P_{s,1}}\right)^2 u_{P_{s,1}}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial P_{s,2}}\right)^2 u_{P_{s,2}}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial h}{\partial P_{s,24}}\right)^2 u_{P_{s,24}}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial P_{d,1}}\right)^2 u_{P_{d,1}}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial P_{d,2}}\right)^2 u_{P_{d,2}}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial h}{\partial P_{d,24}}\right)^2 u_{P_{d,24}}^2 \quad (21)$$

ile bulunabilir. Burada işlem kolaylığı için,

$$\frac{\partial h}{\partial P_{s,j}} = \frac{\partial h}{\partial f}\frac{\partial f}{\partial P_{s,j}}, \qquad j = 1,2,\ldots,24 \quad (22)$$

$$\frac{\partial h}{\partial P_{d,j}} = \frac{\partial h}{\partial f}\frac{\partial f}{\partial P_{d,j}} + \frac{\partial h}{\partial g}\frac{\partial g}{\partial P_{d,j}}, \qquad j = 1,2,\ldots,24 \quad (23)$$

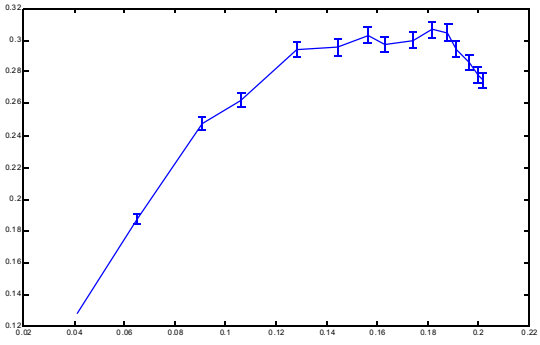
kullanılabilir.

SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

15 farklı çalışma noktası için tekrar edilen deneylerden elde edilen veriler Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1: Deneyde Ölçülen Değerler ve Hesaplanan Bağıl Belirsizlikler

Deney No	$Q\left(\frac{m^3}{s}\right)$	ΔP_t (Pa)	η	$\frac{u_Q}{Q}$	$\frac{u_{\Delta P_t}}{\Delta P_t}$	$\frac{u_\eta}{\eta}$
1	0,04093	1048,724	0,128125	4,69E-08	0,00203	0,017668
2	0,064992	1024,678	0,187542	6,89E-08	0,001967	0,017148
3	0,090772	981,9573	0,247486	9,57E-08	0,001859	0,017134
4	0,106079	929,2438	0,262339	1,12E-07	0,001738	0,017124
5	0,128027	892,3716	0,294102	1,35E-07	0,001635	0,017105
6	0,144269	830,5422	0,295327	1,51E-07	0,001488	0,017085
7	0,156027	784,1712	0,302908	1,64E-07	0,001378	0,017067
8	0,162622	752,6843	0,297275	1,73E-07	0,001307	0,017055
9	0,174235	714,619	0,299829	1,83E-07	0,001211	0,017032
10	0,181705	687,7311	0,306529	1,91E-07	0,001146	0,017014
11	0,187934	671,4519	0,304691	1,97E-07	0,001103	0,017
12	0,191204	649,2314	0,294339	2,01E-07	0,001055	0,016988
13	0,196544	643,7242	0,286205	2,06E-07	0,001034	0,016976
14	0,199685	633,1027	0,278229	2,09E-07	0,001009	0,016967
15	0,201636	626,6997	0,274842	2,12E-07	0,000993	0,016961



Şekil 3: Fanın Verim Eğrisi Üzerinde Belirsizlikler

Bölüm 2 ve 3'te detaylandırılan belirsizlik analizi sonucunda, hacimsel debi, fan basınç artışı ve fan verimindeki bağıl belirsizlikler de burada yer almaktadır. Buna göre, fan verim eğrisi üzerinde gösterilen belirsizlikler Şekil 3'te verilmiştir.

Deneydeki belirsizliğin hesaplanması için B tipi değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Yapılan belirsizlik analizi sonucunda, hesaplanan belirsizliklerin, 1. Bölüm'de ifade edilen sınırların altında kaldığı görülmektedir. Buna göre yapılan deneylerin geçerliliği ISO 5801'e göre onaylanmıştır.❄

KAYNAKLAR

[1] AMCA Standard 205-10: Energy Efficiency Classification for Fans, Air Movement and Control Association International Inc., 2011.
[2] JCGM 100:2008, Evaluation of Measurement Data- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Joint Commitee for Guides in Metrology, 2008.
[3] Müller-Schöll, C. ve Frei, U., Uncertainty Analyses in Solar Collector Measurement, Proceedings of the Eurosun Congress, Kopenhag, Danimarka, 2000.
[4] Sabatelli, V., Marano, D., Braccio, G. ve Sharma, V.K., Efficiency Test of Solar Colllectors: Uncertainty of Regression Parameters and Sensitivity Analysis, Energy Conversion and Management, 43, 2002, pp. 2287-2295.
[5] ISO 5801:2008, Industrial Fans-Performance Testing Using Standardized Airways, International Organization for Standardization, 2008.
[6] Taylor, J.R., An Introduction to Error Analysis, University Science Books, ABD, 1997.
[7]http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/basic.html, Erişim Tarihi:01.02.2012.
[8] TESTO 350 M/XL Çok Amaçlı Dijital Ölçer Kullanım Kılavuzu Sürüm 1.30, Testo Inc.
[9] KAEL DV-72 Dijital Voltmetre Kullanım Kılavuzu.
[10] KAEL DAM-A-72 Dijital Ampermetre Kullanım Kılavuzu.
[11] KAEL DC-96 Dijital $\cos\phi$ metre Kullanım Kılavuzu.