

GAZ DEBİSİ ÖLÇÜMLERİNDE SONİK NOZULLARIN KULLANIMI VE KALİBRASYONLARI

Bülent ÜNSAL*
Hakan KAYKISIZLI
Sevim CEVAHİR ŞENLİKÇİ

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü PK. 54 41470 Gebze/KOCAELİ
Tel: 0262 679 50 00
E-Mail*: bulent.unsal@tubitak.gov.tr

ÖZET

Sonik nozullar daralan ve artan kesit alanından oluşmaktadır ve nozul giriş gaz basıncı yeteri kadar artırıldığında, en küçük kesit alanındaki akış hızı ses hızına eşit olur. Nozul giriş basıncının daha da artırılması ve nozul çıkışındaki basınç değişimleri en küçük alandaki (İng. Throat) ses hızını etkilemez ve dolayısıyla kütleli debi sadece nozul girişindeki basınç ve sıcaklığa bağlıdır. Bu basit çalışma prensibi, hareketli parça içermemesi ve debinin sadece nozul giriş koşullarına ve kesit alanına bağlı olmasından dolayı, sonik nozul debimetrelerinde üstün seviyede tekrarlanabilirlik ve yüksek doğruluk derecesi elde etmek mümkün olmaktadır. Bu nedenle endüstride çeşitli alanlarda uygulanan sonik nozullar, metrolojide gaz debimetrelerin kalibrasyonlarında ve referans sistem olarak dünyada başarı ile kullanılmaktadır. Bu bildiride sonik nozulların çalışma prensibi, kullanım alanları ve kalibrasyonları konularında bilgiler verilmektedir.

GİRİŞ

Debimetrelerin kalibrasyonlarında kullanılacak referans sistemlerin düşük belirsizlik özelliği yanında aynı zamanda çok iyi kısa ve uzun dönem kararlılığına sahip olmaları gerekmektedir. Bu özelliği sağlayan referans gaz debi ölçüm sistemleri Tablo 1 de özetlenmiştir.

Birincil seviye standartları temel SI birimleri ile doğrudan ilişkilendirilebilen sistemlerdir. Yani bu sistemlerin başka bir debimetre ölçer ile kalibrasyonları yapılmaz. Bell-prover, kuru piston ve PVT sistemleri hacimsel debinin doğrudan ölçülebilmesini sağlayan sistemlerdir ve bunların izlenebilirliği hacimsel debinin birimi gereği boyutsal ve zaman/frekans kalibrasyonlarına dayalıdır. Örneğin bell-prover sisteminde, çan şeklindeki metal geometrinin boyutsal ölçümleri neticesinde hacmi belirlenir ve zaman ölçümünde kullanılan sayacın kalibrasyonu zaman/frekans laboratuvarları tarafından yapılır.

İkincil seviye referans sistemlerin (çalışma ya da transfer standardı olarak da adlandırılabilirler) izlenebilirliği başka bir debi ölçüm sistemi tarafından yapılır. Yani bu sistemlerin kalibrasyonları ya bir birincil seviye referansı ile ya da başka bir ikinci seviye standardı kullanılarak yapılır.

Tablo 1: Referans gaz debi ölçüm sistemleri.

Birincil Seviye Referans Sistemler	Bell-prover	Kapalı ve değişken bir hacimde biriktirilen gazın hacminin zamana bağlı ölçümüne dayalı.
	Kuru piston	
	Gravimetrik ölçüm esaslı sistemler	Sabit bir hacimde toplanan gazın kütesinin zamana bağlı ölçümüne dayalı.
	PVTt sistemleri	Belli bir zaman aralığında sabit hacimdeki bir tanka doldurulan gazın başlangıç ve bitiş zamanlarındaki basınç ve sıcaklık ölçümlerine dayalı.
İkincil seviye referans sistemler	Laminer akış debimetreleri (İng. Laminar flow elements)	Laminer akış neticesindeki basınç düşüşü ve debi arasındaki doğrusal ilişkiye dayalı.
	Sonik nozul sistemleri	Azalan bir kesit alanında hızlandırılan gazın, en küçük kesit alanında ses hızına ulaşmasına bağlı.
	Islak tip gaz sayaçlar (İng. Wet Gas Meters)	Akışın momentum etkisiyle dönen mekanik sistemlerin dönme hızına bağlı.
	Türbinmetreler	

Birincil seviye standartları genellikle metroloji enstitüleri tarafından kullanılır ve bu sistemler genellikle ticari olarak piyasada bulunmamaktadırlar. Ancak bell-prover sistemlerini ticari ürün olarak üreten firmalar bulunmakta ve kalibrasyon laboratuvarları (özellikle doğal gaz sayaçlarının kalibrasyonlarında) kullanılmaktadır.

İkincil seviye standartları arasında kullanım kolaylığı ve uzun dönem kararlılığı açısından laminer akış debimetreleri ve sonik nozul sistemleri en avantajlı olanlarıdır. Çünkü ıslak tip sayaçlarda ve türbinmetrelerde mekanik döner sistemler uzun dönem kararlılığını etkilemektedirler. Ayrıca ıslak tip sayaçlarda kullanılan sıvının miktarının hassas bir şekilde ayarlanması zorunluluğu pratik kullanımda zorluklar doğurmaktadır. Laminer akış debimetreler boyutsal gereksinimlerden dolayı sadece düşük gaz debilerinde kullanılmaktadır. Sonik nozulların kullanım avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Geniş debi aralığı
- Mekanik döner aksamların olmaması
- Sürekli akış koşulunda kesintisiz ölçüm
- Yüksek tekrarlanabilirlik ve iyi uzun/kısa dönem kararlılığı

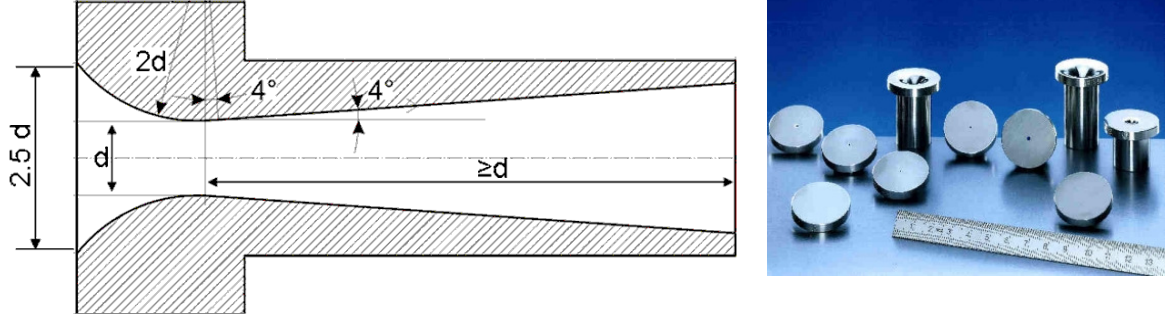
Yukarıdaki nedenlerden dolayı dünyada başta metroloji enstitüleri, ikinci seviye gaz debisi laboratuvarları, gaz debimetresi üreticileri ve doğal gaz dağıtıcı firmalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Türkiye de bilindiği kadarıyla sonik nozul sistemleri üreten bir firma bulunmamaktadır. Ancak bazı doğal gaz sayacı üreticileri ve doğal gaz sayacı test laboratuvarları tarafından bu sistemlerin referans olarak kullanıldığı bilinmektedir.

Türkiye de şu anda kullanımı çok yaygın olmayan sonik nozulların gelecekte daha yaygınlaşacağını düşünerek, Ulusal Metroloji Enstitüsü Akışkanlar Laboratuvarları tarafından 2013 yılı içerisinde sonik

nozulların kalibrasyonlarının yapılabilmesi için çalışmalar tamamlanmıştır. Bu çalışmalar neticesinde edinilen sonik nozulların kullanımı ve kalibrasyonları konusundaki bilgiler bu bildiriye verilmektedir.

ÇALIŞMA PRENSİBİ

ISO 9300 standardı tarafından belirlenen sonik nozul geometrisi Şekil 1 de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, sonik nozullar önce daralan sonrada artan kesit alanından oluşmaktadır. Şekilde d en küçük kesit alanının (boğaz) çapıdır.



Şekil 1: ISO 9300 toroidal inlet sonik nozul geometrisi (solda) ve örnek nozullara ait resim (sağda).

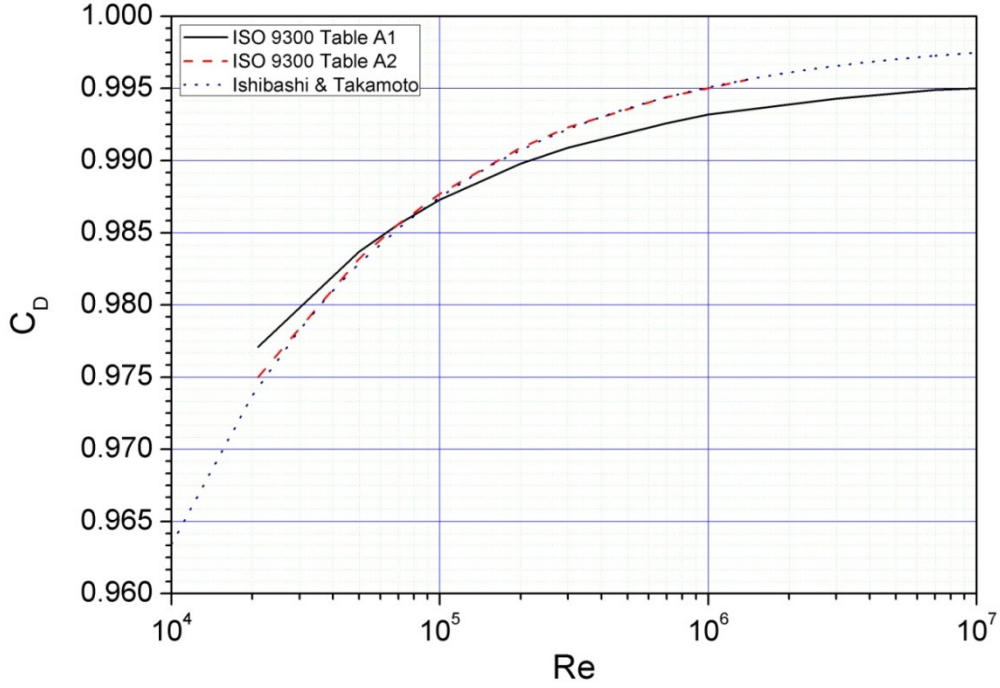
Sıkıştırılabilir gaz akışlarında, nozul giriş basıncı yeterince yüksek olduğunda (hava için çıkış ile giriş basınçları arasındaki teorik oran yaklaşık 0,525), en küçük nozul kesit alanında akış boğulur (Ing. Choked) ve kütleli debi maksimum seviyesine ulaşır. Bu durumda kütleli debi sadece kesit alanına, girişteki basınca ve sıcaklığa bağlıdır ve bir boyutlu sıkıştırılabilir gaz dinamiği teorisine göre aşağıdaki denklem ile ifade edilir [1];

$$\dot{m}_{teo} = \frac{P_0 A C^*}{\sqrt{T_0}} \Rightarrow C^* = \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \quad (1)$$

Bu denklemde A , kesit alanı, P_0 giriş basıncı, T_0 giriş sıcaklığı, C^* isentropik katsayı ve κ özgül ısı oranı orandır. Gerçek koşullarda elde edilebilecek kütleli debi sürtünme ve ısı transferi gibi etkilerden dolayı denklem 1 ile elde edilebilecek debiden daha azdır ve aşağıdaki denklem ile gösterilebilir;

$$\dot{m} = \frac{P_0 A C^* C_D}{\sqrt{T_0}} = \dot{m}_{teo} C_D \quad \text{veya} \quad C_D = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{teo}} \quad (2)$$

Bu denklemdeki C_D , literatürde deşarj (İng. discharge) katsayısı olarak adlandırılır ve ideal olmayan koşulların etkisini içermektedir. ISO 9300 de deşarj katsayısının değişimi Re sayısına göre tablolar halinde verilmiştir ve Şekil 2 de gösterilmektedir. Bu şekilde gösterilen değerler düşük belirsizliğin önemli olmadığı ve standartta belirtilen toleranslar ve yüzey pürüzlülüğüne uygun üretilen nozullar için kullanılabilir. Ancak nozulların kalibrasyon standardı olarak kullanılmaları durumunda deşarj katsayılarının kalibrasyon sonuçlarına göre belirlenmeleri gerekmektedir.



Şekil 2: ISO 9300 de belirtilen deşarj katsayısının Re sayısı ile değişimi.

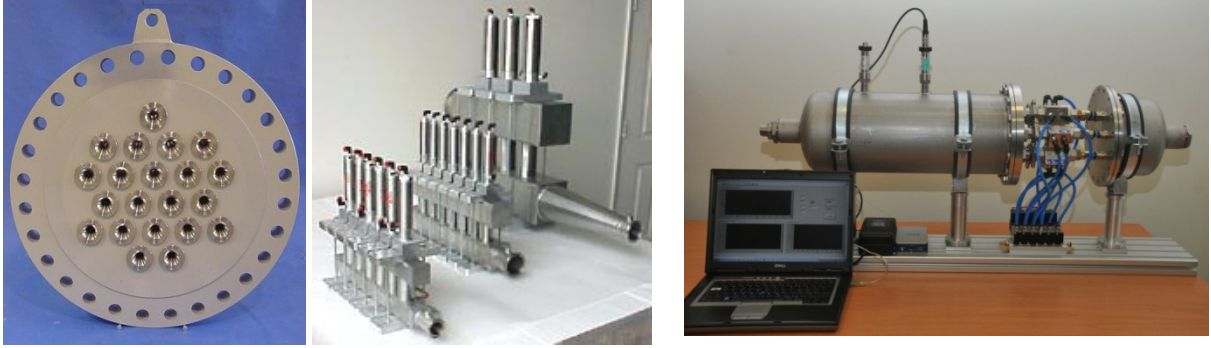
KULLANIM ALANLARI

Sonik nozul istemlerinin başlıca kullanım alanları şunlardır;

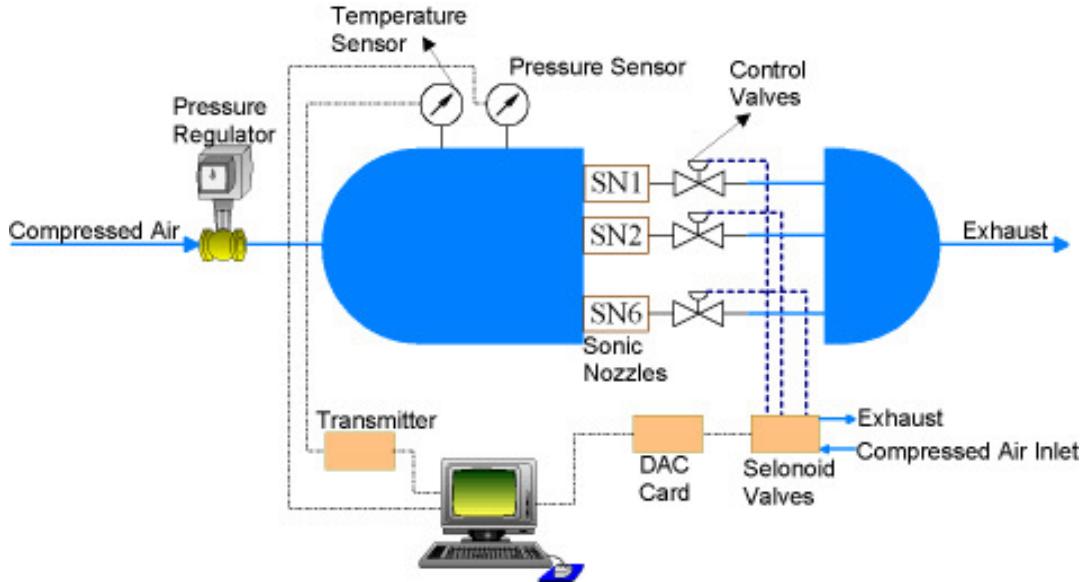
- Debi ölçümü
- Debimetrelerin kalibrasyonlarında referans standardı
- Türbin motorların hava yolu parçalarının kalibrasyonları
- İçten yanmalı motorların hava yolu parçalarının kalibrasyonları
- Emisyon testleri
- Pnömatik vanaların akış katsayısı (C_V) ölçümleri

- Kompresörlerin deşarj kapasitesi ölçümleri
- Debi kontrol ve farklı gazların karışımlarının oluşturulması için tasarlanan cihazlar

Uygulama alanlarından anlaşılacağı üzere sonik nozul sistemleri oldukça geniş bir debi aralığında kullanılabilirler. Ancak denklem 1 de belirtildiği üzere nozul kütleli debisi sabit giriş gaz basıncı ve sıcaklığı durumunda sadece nozul boğaz alanına göre değişmektedir. Bu durumda tek bir nozul ile belli bir debi aralığını kapsamak için nozul giriş basıncı değiştirilmelidir. Basıncın geniş bir aralıkta (örneğin 100 kat) değiştirilmesi pratik olmadığından dolayı genellikle çoklu nozul sistemleri kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerde arzu edilen debi aralığına ve çalışma şartlarına göre farklı çaplardaki nozullar aynı giriş koşullarına tabi olacak şekilde bir araya getirilmişlerdir. Bazı örnek çoklu nozul sistemleri Şekil 3 ve 4 de gösterilmektedir.



Şekil 3: Çoklu sonik nozul sistemlerinden [2-3] bazı örnekler.



Şekil 4: UME sonik nozul sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 4 de UME tarafından geliştirilen sonik nozul sistemi şematik olarak gösterilmektedir. Sistemde maksimum 6 adet sonik nozul bulunmaktadır. Her bir nozulun bulunduğu ölçüm hattı için bir adet kontrol vanası bulunmaktadır. Kontrol vanaları üç yollu pnömomatik solenoid vanalar aracılığıyla ölçüm

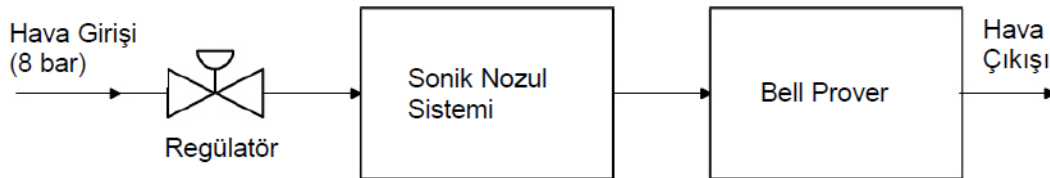
hattının açık ya da kapalı olmasını sağlamaktadırlar. Seloniod vanalar bilgisayar üzerinden bir DAC (digital to analog converter) kartı vasıtasıyla kontrol edilmektedirler. Şekil 4'de görüleceği üzere bir adet basınç ve bir adet sıcaklık sensörü hava girişinde bulunan kolektör tankın basınç ve sıcaklık değerlerini ölçmektedir. Basınç sensörü kendi içerisinde bulunan transmitterin dijital çıktı vermesinden dolayı doğrudan bilgisayarın USB girişine bağlıdır. Sıcaklık sensörü bir transmitter aracılığıyla bilgisayara bağlantısı sağlanmıştır. Sisteme gerekli olan basınçlı havanın basıncını kontrol edebilmek için girişte bir basınç regülatörü bulunmaktadır. Bu sistem ile farklı nozulları aynı anda çalıştırmak mümkün olduğundan dolayı geniş bir debi aralığına ulaşmak mümkün olmaktadır. UME sisteminin çalışma aralığı yaklaşık 0,1 ile 120 m³/h.

Sonik nozul sistemleri gaz giriş koşullarına göre iki türlü çalışma şekli vardır. Birincisi Şekil 4 de gösterilen örnekte olduğu gibi basınçlı hava ile çalışanlar. İkincisi ise nozul çıkışında vakum oluşturularak çalışanlardır. Vakum durumunda nozul girişi yaklaşık olarak atmosfer basıncı koşullarındadır ve böylece nozul girişi basıncı, dolayısıyla nozul debisi, salınım ve değişimlerinden etkilenmemektedir. Özellikle debilerin küçük olduğu doğal gaz sayaçlarının test ve kalibrasyonları için vakumlu çalışma türü yaygın olarak kullanılır.

KALİBRASYONLARI

Basınçlı hava ile çalışan sonik nozulların kalibrasyonunda deşarj katsayısı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır;

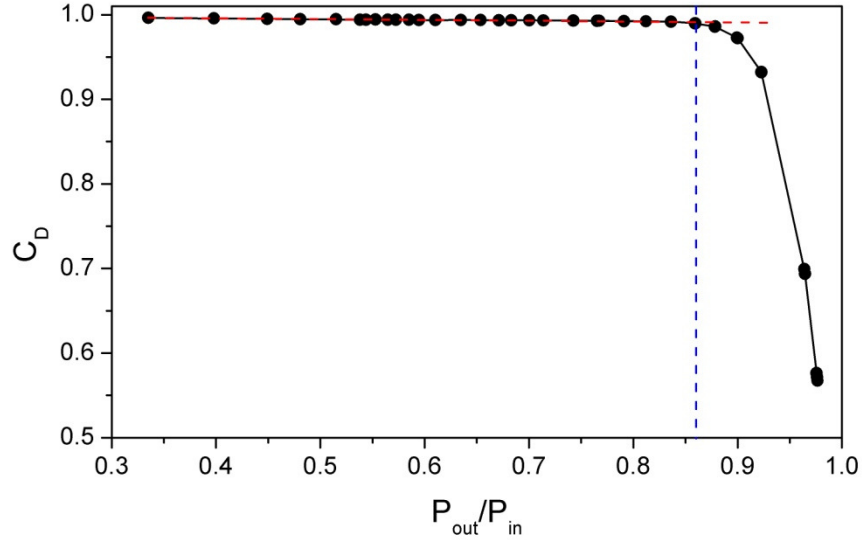
$$C_D = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{teo}} \quad (3)$$



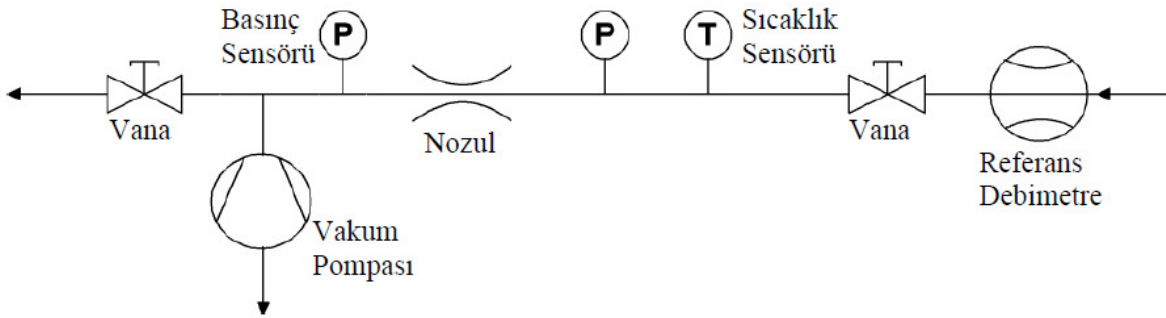
Şekil 5: Basınçlı hava ile çalışan bir sonik nozulun örnek kalibrasyon düzeneği şeması.

Bu eşitlikte m_{teo} (teorik nozul debisi) denklem 1'e göre hesaplanır. Eşitlikteki m ise referans debimetre tarafından ölçülen gerçek debidir. Şekil 5 de basınçlı hava ile çalışan sonik nozulların kalibrasyonunda kullanılabilecek örnek bir kalibrasyon düzeneğinin şeması gösterilmektedir. Sonik nozulun çıkışında hemen hemen her türlü birinci ve ikinci seviye standartları referans olarak kullanılabilirler. Kalibrasyonlarda dikkat edilmesi gereken en önemli nokta giriş basıncının çıkış basıncında yeteri kadar yüksek olması gerektiğidir. Çünkü eğer giriş basıncı yeteri kadar yüksek değil ise nozulun boğaz kısmında ses hızı koşullarına ulaşamaz ve bu durumda burada verilen denklemler geçerli değildir. Eğer kalibrasyon öncesinde nozulun hangi basınç oranlarında kullanılması gerektiği bilinmiyorsa bunun deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için nozul giriş basıncı atmosfer basıncında başlanarak kademeli olarak artırılır ve her giriş basıncı için denklem 3'e göre deşarj katsayısı hesaplanır. Şekil 6 da örnek bir nozul için ölçülen deşarj katsayısının çıkış giriş basınç oranı ile

değişimi gösterilmektedir. Denklem 1 gereği deşarj katsayısı basınç ile doğru orantılıdır. Buna göre basınç oranı arttıkça belirli bir noktada bu doğrusallık bozulacaktır. Şekil 6 da deşarj katsayısının doğrusal olarak değişimi kesikli kırmızı çizgi ile gösterilmektedir. Şekildeki mavi çizgide doğrusal ilişkinin kaybolduğu basınç oranını göstermektedir. Şekil 6 gösterilen sonuçlara göre bu nozul doğru çalışabilmesi için çıkış basıncı ile giriş basıncı arasındaki oran yaklaşık 0,86 olmalıdır. Çıkış basıncının 1 bar (yaklaşık atmosfer basıncı) olması durumunda giriş basıncının en az 1,163 bar ve daha yüksek olması gerekmektedir.



Şekil 6: Örnek bir nozul için deşarj katsayısının çıkış giriş basıncı oranı ile değişimi.



Şekil 7: Vakum altında ile çalışan bir sonik nozulun örnek kalibrasyon düzeneği şeması.

Şekil 7'de nozul çıkışı vakum durumunda çalışan sonik nozulların kalibrasyonu için kullanılabilecek örnek bir kalibrasyon düzeneğinin şeması gösterilmektedir. Kalibrasyon düzeneğinde iki adet vana kullanılmalıdır. Hava girişinde bulunan vana giriş basıncının ayarlanması ve nozul çıkışındaki vana ise nozulun arkasında oluşturulan vakum basıncının ayarlanması için kullanılır. Nozul arkasındaki vakum basıncı Şekil 7'de gösterilen basınç sensörü aracılığıyla kontrol edilir.

Vakum ile çalışan sonik nozullarda giriş basıncı atmosfer basıncına eşit olduğu için belirli bir çaptaki nozul sadece tek bir değerinin ölçümünde kullanılabilir. Bu nozulların kalibrasyonlarında deşarj katsayısı hesabı yerine nominal bir debi değeri hesabı yapılır [4].

Vakum ile çalışan nozulların kalibrasyon sertifikasında verilmesi gereken iki değer vardır, bunlar $Q_{V,20,tr,1000}$ 1000 mbar nozul giriş basıncındaki referans debi değeri (ya da nominal debi) diğeri c_{pE} giriş basıncı bağımlılığı katsayısıdır. Bu değerler aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.

$$Q_{V,20,tr,1000} \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitlikte $Q_{V,20,tr}$ nozul referans debisidir ve sadece nozul debisinin sıcaklığa ve neme olan bağımlılığını belirtir. Nozul referans debisi giriş basıncından bağımsızdır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$Q \quad (5)$$

Bu eşitlikte verilen yoğunluklar ρ_{ref} ve ρ_N sırasıyla referans debimetredeki ve nozul girişindeki havaya ait değerlerdir. x_v nemli havadaki su buharının mol oranıdır. Nemli havanın yoğunlu için kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir [5].

$$\rho = \quad (6)$$

Bu eşitlikte Z sıkıştırılabilirlik katsayısıdır ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$Z = 1 - \frac{P}{10^5} [1,58123 \cdot 10^{-6} - 2,9331 \cdot 10^{-8} t + 1,1043 \cdot 10^{-10} t^2 + (5,707 \cdot 10^{-6} - 2,051 \cdot 10^{-8} t)x_v + (1,9898 \cdot 10^{-4} - 2,376 \cdot 10^{-6})x_v^2] + \frac{P^2}{10^{10}} (1,83 \cdot 10^{-11}) \quad (7)$$

Bu eşitlikte T ve t ile gösterilen sıcaklıkların birimleri sırasıyla K ve °C dir.

Mol oranı aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$(8)$$

$$f(p,t) = 1 \quad (9)$$

$$p_{sat}(t) = \exp(1,2378847 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,9121316 \cdot 10^{-2} T + 33,93711047 - 6,3431645 \cdot 10^3 / (10) \quad (10)$$

Daha önce belirtildiği gibi nozul girişi atmosfere açık konumda ve nozul basıncı atmosfer giriş durumundan en az 50 mbar altında olmak üzere iki noktada ve her nokta için en az ikişer defa ölçümler alınır. Alınan bu ölçümlerden nozul referans debisi $Q_{V,20,tr}$ denklem 5'e göre hesaplanır. Her bir nokta için alınan iki debi ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri hesaplanır. Bu ortalama referans debi değerleri;

$Q_{V,20,tr,Pmax}$: $P_{N,max}$ basınçta yani nozul giriş basıncı atmosfere açık durumdaki referans debi

$Q_{V,20,tr,Pmin}$: $P_{N,min}$ basınçta yani atmosfer durumundan en az 50 mbar düşük basınçtaki referans debi

Bu iki referans debi değerinden $Q_{V,20,tr,1000}$ "1000 mbar nozul giriş basıncındaki referans debi" değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$Q_{V,20,tr,1000} = Q_{V,20,tr,Pmax} \cdot \frac{P_{N,max} - P_0}{P_0} \quad (11)$$

Eşitlik 4 ve 11 kullanılarak c_{pE} giriş basıncı bağımlılığı katsayısı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır.

$$c_{pE} \quad (12)$$

Sonik nozulların belirsizliği genellikle % 0,25 den daha iyidir. Uzun dönem kararlılıkları % 0,1 seviyelerindedir.

REFERANSLAR

1. ISO 9300. Measurement of gas flow by means of critical flow venturi nozzles, (2005)
2. <http://www.flowsystemsinc.com>
3. www.jain.co.kr
4. PTB Testing Instructions Volume 25
5. P. Giacomo, "Equation for the determination of the density of moist air", Metrologia 18, 33-40 (1982)

ÖZGEÇMİŞ

Bülent ÜNSAL makine mühendisliği lisans eğitimini 1995-1999 yılları arasında Çukurova üniversitesinde tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini Kimya Mühendisliği alanında Almanya'da bulunan Erlangen-Nürnberg Üniversitesinde 1999-2002 yılları arasında yapmış ve hemen sonrasında aynı üniversitenin Akışkanlar Mekaniği Enstitüsünde doktora çalışmalarına başlamıştır. 2008 yılında tamamladığı doktora çalışmalarına paralel olarak aynı zamanda tam zamanlı araştırmacı olarak çalışmış ve birçok endüstriyel projelerde görev almıştır. 2007-2009 yılları arasında Almanya'da bulunan ve 2007 yılında kurulan FMP-Technology GmbH şirketinde çalışmış ve bu şirketin kurulumunda rol almıştır. 2009 yılında Türkiye ye geri dönerek önce TÜBİTAK SAGE de bir yıl çalışmış ve sonra TÜBİTAK UME de çalışmaya başlamıştır. 2012 yılından itibaren Akışkanlar laboratuvarlarının sorumluluğunu yürüten Bülent Ünsal'ın akışkanlar mekaniği alanında bir kitabı, üç patenti ve 25 adet uluslararası yayını bulunmaktadır.