

# SES BASINÇ BİRİMİ STANDARDININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Enver Sadıkhov, Baki Karaböce

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), P.K.21, 41470, Gebze, Kocaeli

## Özet

Ses basınç biriminin standardı, referans standard mikrofonların karşılıklık (reciprocity) kalibrasyon yöntemi ile gerçekleştirilir. Bu kalibrasyonda kullanılan üç mikrofon ikili kombinasyon şeklinde birisi alıcı, diğeri ise verici olarak bir kapalı hacim içinde birleştirildiğinde alıcı mikrofonun açık devre voltajının verici mikrofondan geçen akıma oranı ölçülür. Karşılıklık kalibrasyonun tanımına göre böyle bir kombinasyonda kullanılan iki mikrofonun hassasiyet değerlerinin çarpımı  $U/i$  oranına doğru orantılı olmasıdır. Böylece üç mikrofonla mümkün olan altı kombinasyon için  $U/i$  oranı ölçülerek, her bir mikrofonun mutlak hassasiyet değeri 0.05 dB'lik belirsizlikle hesaplanır.

## 1. Giriş

Ses basınç biriminin birincil standardı ya referans düzeyde ses dalgası üreten kaynak [1], ya da ses alıcısı üzerinden gerçekleştirilir [2,3]. Son yıllarda dünyanın bir çok metroloji merkezinde ikinci yol tercih edilmektedir. Bunun nedeni de alıcı üzerinden standart gerçekleştirilirken belirsizliğin çok daha düşük seviyede olmasıdır. Böylece bir alıcının (örneğin, mikrofon) bilinen ses basıncı etkisinde kaldığında elektriksel çıkışı ölçülerek hassasiyet değeri bulunur. Bu yöntemde de mikrofonun maruz kaldığı ses basıncının hassas ölçümleri zor olduğundan yeni bir teknik, karşılıklık kalibrasyon tekniği, geliştirilmiştir [4-7]. Karşılıklık kalibrasyonunda iki mikrofon alıcı-verici kombinasyonunda kullanılır ve verici mikrofondan geçen akım ile alıcı mikrofonun çıkış gerilimi ölçülür. Üç adet mikrofonla böyle ölçümler yapılırken basit matematiksel ifadelerle mikrofonların hassasiyeti bulunur.

Ulusal Metroloji Enstitüsü, Akustik ve Titreşim Laboratuvarında ses basınç birimi referans mikrofonların karşılıklık kalibrasyonu yoluyla gerçekleştirilmiştir. Üç adet mikrofon karşılıklık kalibrasyon yöntemi ile 63 Hz - 2.5 kHz arasında 1/3 oktav bant merkez frekanslarında kalibre edilerek akustik alanında Türkiye'nin birincil standardı oluşturulmuştur.

## 2. Karşılıklık Kalibrasyon Tekniği

Günümüzde ses basınç biriminin standardı kapasitif mikrofonların karşılıklık kalibrasyonu yolu ile gerçekleştirilir. Kapasitif mikrofonun (Şekil 1) diyaframı ses basıncına maruz kaldığında, ses dalgasının genliğine orantılı olarak mikrofonun kapasitesi ve dolayısıyla elektriksel çıkışı değişir. Eğer ses basıncının değeri biliniyorsa, mikrofonun açık devre gerilimi ölçülür ve bu iki değer oranı hesaplanır. Bu şekilde elde edilen değer, mikrofonun

hassasiyetidir. Kapasitif mikrofonların kalibrasyonları, insan kulağının duyabildiği frekans aralığı olan 20 Hz ile 20 kHz aralığında yapılır. Pratikte kalibrasyon aralığı 1" çapındaki mikrofonlar için 20- 10000 Hz, 1/2" çapındakiler için ise 20-20000 Hz'dir

Genellikle iki elektro-akustik hassasiyet değeri söz konusudur ve her ikisi de verilen uyarma frekansında mikrofonun çıkışındaki açık devre gerilimi cinsinden ifade edilir. Hassasiyet mikrofonların elektriksel çıkışının ses basıncına oranı olarak hesaplandığından dolayı, kullanılan

birim V/Pa'dır. Elektro-akustik hassasiyet değerlerinden biri basınç diğeri ise, serbest alan hassasiyeti değeridir. Burada sadece basınç hassasiyeti değerinden bahsedeceğiz. Basınç hassasiyeti dünyada en çok kabul görmüş olan ve UME'de de kullanılan kapalı bağlaşım (coupler) karşılıklı tekniği ile belirlenir.

Mikrofonların karşılıklı kalibrasyonu, karşılıklı üç mikrofon kullanılarak, ya da karşılıklı iki mikrofon ve bir yardımcı ses kaynağı kullanılarak yapılır. UME'de karşılıklı (reciprocal) üç mikrofon karşılıklı kalibrasyon tekniği ile kalibre edilmiş ve oluşan üçlü birincil setin kontrolü ise yardımcı bir ses kaynağı kullanılarak yapılmaktadır.

Karşılıklı kalibrasyonunda iki mikrofon bir bağlaşım ile akustik olarak bağlanır. Mikrofonlardan birisi verici, diğeri de alıcı olarak kullanılır. Karşılıklı mikrofonlar için aşağıda gösterilen denklemler yazılabilir.

$$z_{11}i + z_{12}q = U \quad (1)$$

$$z_{21}i + z_{22}q = p \quad (2)$$

Bu ifadelerde,

$p$  : mikrofon diyaframına uygulanan ses basıncı,

$U$  : mikrofonun çıkış gerilimi,

$q$  : mikrofon diyaframı boyunca hacim hızı,

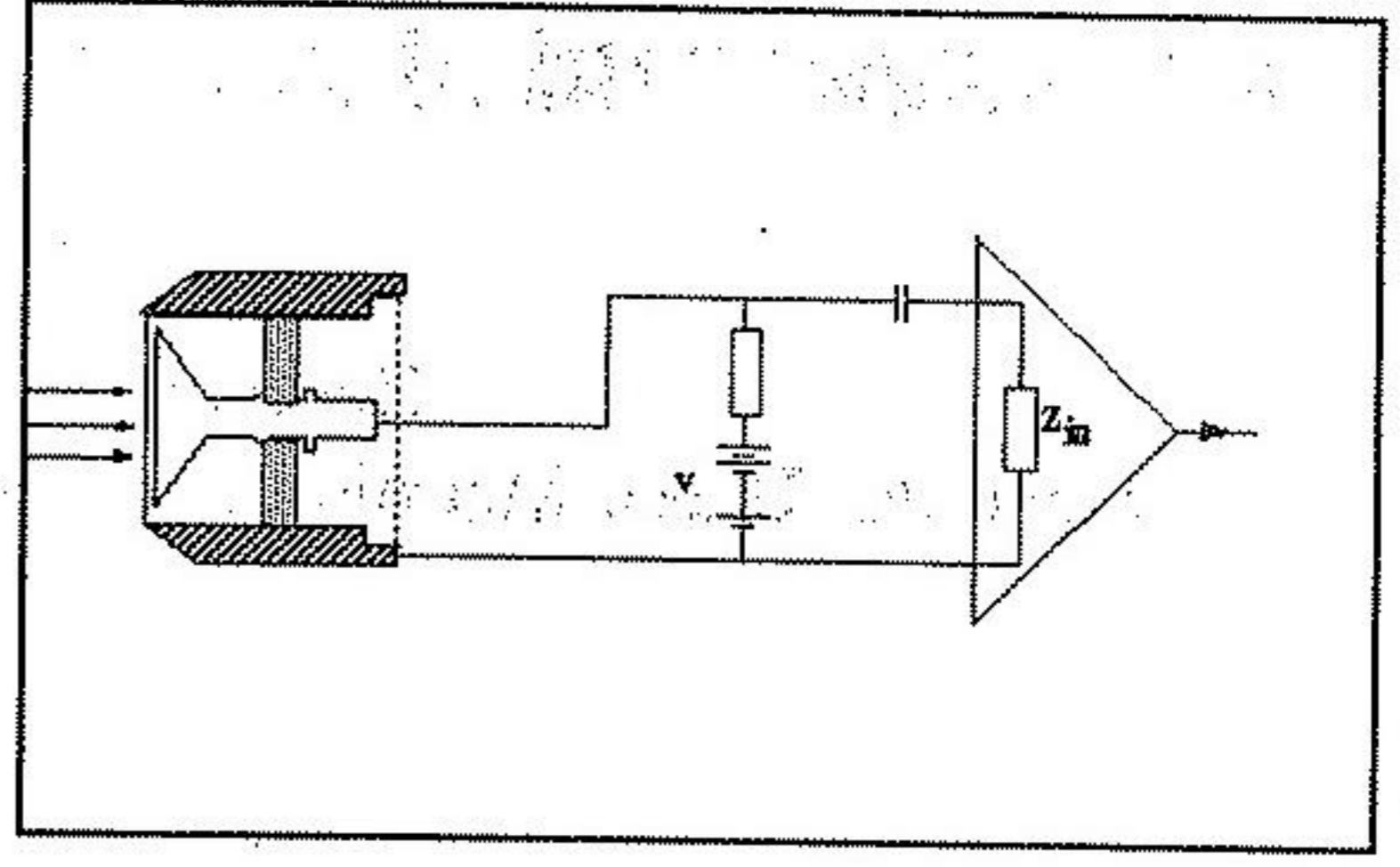
$i$  : mikrofondan geçen akım,

$z_{11}=Z_e$  : diyafram kapatıldığında mikrofonun elektriksel empedansı

$z_{22}=Z_a$  : elektrik terminalleri boşaltıldığında mikrofonun akustik empedansı

$z_{12}=z_{21}=M_p Z_a$ :  $M_p$  mikrofonun basınç hassasiyetidir.

Yukarıdaki denklem tekrar düzenlendiğinde, mikrofonun karşılıklı eşitlikleri yazılabilir.



Şekil 1. Kapasitif mikrofon

$$Z_i + M_p Z_a q = U \quad (3)$$

$$M_p Z_a i + Z_a q = p \quad (4)$$

$M_{p,1}$  ve  $M_{p,2}$  basınç hassasiyetlerinde iki mikrofonun akustik olarak bağlandığında (3) ve (4)'den, verici mikrofonun elektrik terminalleri üzerindeki  $i_1$  akım bir kısa devre ( $p=0$ ) hacim hızı  $M_{p,1}i_1$ 'e neden olacaktır, dolayısıyla alıcı mikrofonun diyaframı  $p_2 = Z_{a,12} M_{p,1}i_1$  ses basıncı etkisinde kalacaktır. Böylece ses basıncı etkisinde alıcı mikrofonun açık devre voltajı

$$U_2 = M_{p,2} p_2 = M_{p,1} M_{p,2} Z_{a,12} i_1 \quad (5)$$

Diğer bir değişle, basınç hassasiyetlerinin çarpı için aşağıdaki ifade geçerlidir.

$$M_{p,1} M_{p,2} = \frac{1}{Z_{a,12}} \frac{U_2}{i_1} \quad (6)$$

Son ifadelerde gösterilen  $Z_{a,12}$  sistemin akustik transfer empedansıdır.

Sistemin akustik transfer empedansı biliniyorsa, iki mikrofonun basınç hassasiyetlerinin çarpımı  $U_2/i_1$  oranı ölçülerek hesaplanabilir. Akustik transfer empedansı ölçümlerde kullanılan geometriye göre hesaplanır. Üç mikrofonun ikili kombinasyonları kullanılarak yapılan ölçümlerin sonucunda birbirinden bağımsız benzer üç adet çarpım elde edilir. Bu üç çarpım ile yapılan hesaplamalardan sonra üç mikrofonun her birinin basınç hassasiyeti hesaplanır.

#### 4. Ölçümler

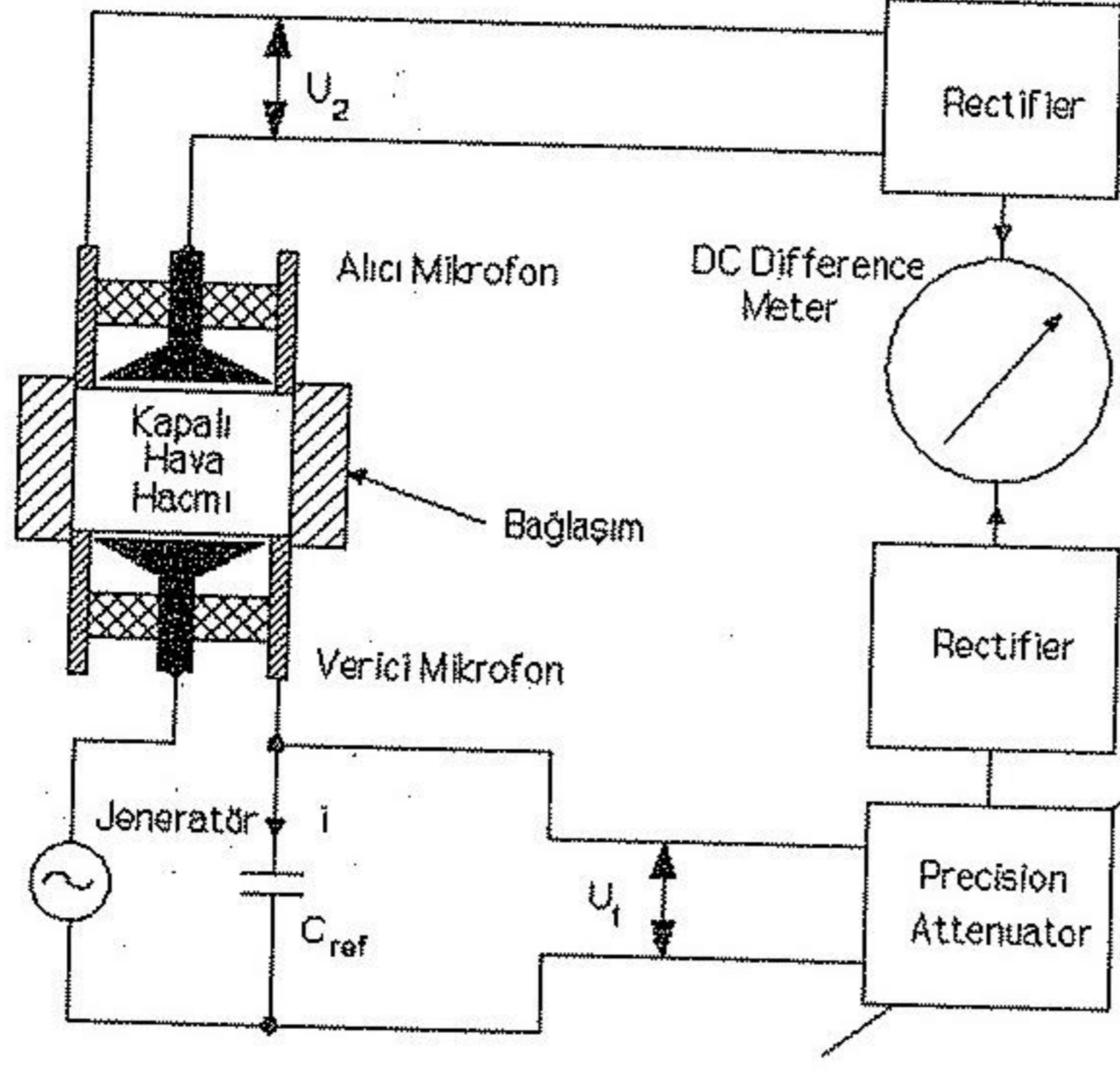
Ölçümler Şekil 2'deki ticari Brüel & Kjaer Tip 4143 Reciprocity Calibration Apparatus ile yapılmıştır. Ölçüm düzeneği, ortam şartlarından en az etkilenmesi için 10 mm kalınlığında plexi-glass malzemedan yapılmış kapaklı kutunun içinde korunmuştur.

İki 1" çapında mikrofon (Brüel & Kjaer Tip 4160) 20 cm<sup>3</sup>'lük hava ile doldurulmuş hacimde bağlanır. Jeneratörden verici mikrofonu sinüs şeklinde bir sinyal uygulandığında mikrofonun diyaframının yerdeğiştirmesi kapalı hacim içinde ses dalgası oluşturur. Ses basıncının etkisinde kalan alıcı mikrofonun çıkış gerilimi ( $U_2$ ) ve verici mikrofonla bağlanmış olan referans kapasitör  $C_{ref}$  üzerindeki gerilimi ( $U_1$ ) ölçülerek  $U_2/i_1$  oranı bulunur.

Düşük frekans bölgesinde ( $f < 3000$  Hz) akustik transfer empedansı mikrofonların ve kapalı hacmin toplam hacmi cinsinden ifade edilir. Diğer taraftan, kullanılan sistemde verici mikrofondan geçen akımın referans kapasitör üzerindeki gerilimi ölçme yolu ile ölçüldüğünü göz önünde bulundurursak eşitlik (6) aşağıda gösterilen hale indirgenmiş olacaktır.

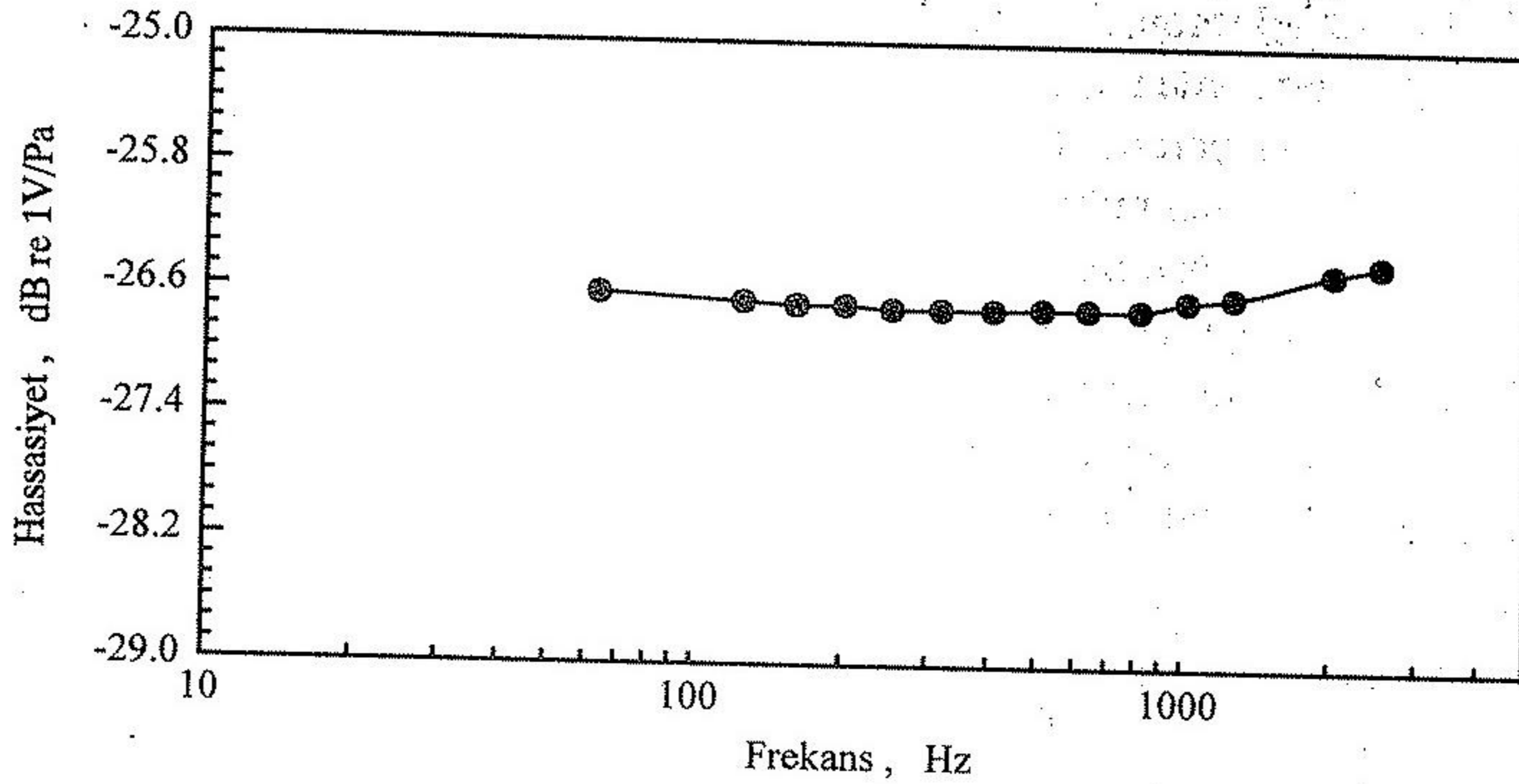
$$\frac{U_2}{U_1} = M_{p,1} M_{p,2} \frac{k p_s C_{ref}}{V} \quad (7)$$

Son ifadede,



Şekil 2. Karşılıklık kalibrasyonu için düzenek

Karşılıklık kalibrasyonundaki toplam belirsizlik düşük frekanslarda 0.05 dB'dir. Bu değer, kalibrasyon 3000 Hz ile 20000 Hz frekans aralığında yapılırken, 0.1-0.2 dB'ye kadar yükselir. Ölçüm sonuçlarını en çok etkileyen faktörler ortam şartlarıdır. Örneğin, ortam basıncının değişiminden kaynaklanan hata 0.02-0.03 dB'dir. Aynı zamanda elektriksel ölçümlerdeki hata sadece 0.005 dB'dir.



Şekil 3. Karşılıklık kalibrasyon sonuçları

- $k$  : özgül ısı oranı,
- $p_s$  : statik basınç,
- $V$  : mikrofonların ve kapalı bağlaşımın toplam hacmi.

Akustik ve Titreşim laboratuvarında bulunan beş adet B&K Tip 4160 referans standart mikrofon, üçlü kombinasyonlar halinde on adet sete ayrılmıştır. Her bir set karşılıklık kalibrasyonuna sokularak mikrofonların hassasiyet değerleri bulunmuştur. Bağlaşım düzeltmeleri ve ortam şartlarından kaynaklanan düzeltmeler tek tek hesaplanarak [8], hassasiyet değerlerine eklenmiştir.

Bu kalibrasyonlar, 63 Hz ile 2.5 kHz arasında 1/3 oktav bant merkez frekanslarındaki on dört frekansta yapılarak beş mikrofondan her birinin hassasiyetleri hesaplanarak Şekil 3'deki (Seri No.1698029) gibi grafikler elde edilmiştir.

## Kaynaklar

1. D.Z.Lopashev, A.V.Konkov, V.T.Masyukov, Primary state standard for unit sound pressure in air, *Measurement Technique*, 1974, 17, 981-984
2. A.J.Rennie, A laser pistonphone for absolute calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 0.1 to 100 Hz, NPL Acoustics Report Ac. 82, 1977, England
3. Per V. Bruel, The accuracy of condenser microphone calibration methods, Part 1, *Tech.Rev.*, Brüel & Kjaer, 1965, 1
4. Urpalainen J., An application for the calibration of condenser microphones by the closed- coupler reciprocity technique, *Acustica*, 1989, 68, 209-213.
5. International Electrotechnical Commission: Precision method for pressure calibration of one-inch standard condenser microphones by the reciprocity technique. Publication 327, 1971.
6. International Electrotechnical Commission: Measurement microphones, part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique. Secretariat 29/189, Publication 1094, 1992.
7. Jarvis D.R., A Coupled-microphone simulator for verifying apparatus used for the reciprocity calibration of microphones, *Metrologia*, 1991, 28, 425-427
8. Wong G.S.K., Speed of sound in standard air, *J.Acoust.Soc.Am.*, 1986, 7, 1359-1366