

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK BASINÇ ÖLÇÜMLERİNDE BORULAMANIN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ege Gökhan HASDAL

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Ekim 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK BASINÇ ÖLÇÜMLERİNDE BORULAMANIN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ege Gökhan HASDAL
(511131108)**

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS

Ekim 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 51131108 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ege Gökhan HASDAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DİNAMİK BASINÇ ÖLÇÜMLERİNDE BORULAMANIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. N. L. Okşan ÇETİNER YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İlyas KANDEMİR
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 20 Eylül 2019
Savunma Tarihi : 17 Ekim 2019





Eşim'e,



ÖNSÖZ

Bana olan desteğini ve güvenini hiçbir zaman esirgemeyen, tezimin yazımı süresince beni motive eden değerli Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS'e teşekkürü bir borç bilirim. Lisans eğitimimden bu yana yanımda olup bana inandığı, gerekli desteği sağladığı ve yardımlarını asla esirgemediği için kendisine minnettarım.

Benim bu noktalara gelmemde çok büyük emeği olan ve desteklerini benden bir an olsun esirgemeyen kıymetli aileme ve hayat arkadaşım İstem'e çok özel teşekkürlerimi iletirim.

Eylül 2019

Ege Gökhan HASDAL



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Literatür Araştırması	4
2. BORULAMA ETKİLERİNİN HESAPLANMASI.....	7
2.1 Borulamanın Etkileri	7
2.1.1 Rezonans	7
2.1.2 Genlik bozulması	9
2.1.3 Faz gecikmesi.....	12
2.2 Borulama Sistemleri Etkilerinin Hesaplanması	12
2.2.1 Havanın özelliklerinin hesaplanması	12
2.2.2 Bozulma hesaplama yazılımı	13
2.2.3 Kısıtlayıcı uygulamasının optimizasyonu	13
3. DİNAMİK BASINÇ ÜRETECİ.....	15
3.1 Tasarım İsterleri	15
3.1.1 Teorik modelleme	15
3.1.2 Sistem komponentlerinin seçilmesi	17
3.1.3 CAD modeli	17
3.2 Sistemin Üretimi ve Kurulumu	18
4. DENEYSEL ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ	19
4.1 Borulama Etkisinin Ölçüm Sistemi.....	19
4.1.1 Basınç tarayıcısı	20
4.2 Deney Sonuçlarının İşlenmesi.....	20
4.2.1 FFT analizi	20
5. BORULAMA SİSTEMLERİNİN ETKİLERİ	23
5.1 Parametrelerin Etkisi	23
5.1.1 Boru uzunluğu ve çapı.	23
5.1.2 Kademeli borulama sistemleri	26
5.1.3 Ortam değişkenleri	28
5.2 Ölçüm Sistemi Geometrisinin Etkisi.....	31
5.3 Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Referans Borular	32
5.4 Kısıtlayıcılı Borulama Sistemlerinin Belirlenmesi	34
6. BORU SİSTEMLERİNİN ETKİLERİNİN ÖLÇÜLMESİ	37

6.1 Dinamik Basınç Üretici Ölçümleri	37
6.2 Farklı Boru Tipleri için Ölçümler.....	38
6.2.1 Ölçüm sonuçlarının teori ile karşılaştırılması	39
6.2.2 Farklı çap, uzunluk ve malzemelerin karşılaştırılması.....	50
6.2.3 Kısıtlayıcı borulama sistemleri	53
7. SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59



KISALTMALAR

FFT	: Fast Fourier Transform
RBS	: Referans Boru Sistemi
KBS	: Kısıtlayıcılı Boru Sistemi





SEMBOLLER

A_d	: Diyafram Alanı
AR	: Giriş ve Sensördeki Sinüzoidal Basıncın Genlik Oranı
c	: Ses Hızı
C_p	: Özgül Isı
D_t	: Boru İç Çapı
D_d	: Diyafram Çapı
f_n	: Doğal Frekans
G_k	: Üretilen sinüzoidal çalkantılı basıncın k. frekansına ait genlik
G_L	: Frekansa göre Test Edilen Boru Ölçüm Genlikleri
G_{port_i}	: Frekansa göre Basınç Tarayıcı Sensör i'deki Genlik
G_{ref}	: Frekansa göre Referans Boru Ölçüm Genlikleri
$h_{t,j}$: Termal Difüzyon
$J_\eta(x)$: η Mertebeden Birinci Tür Bessel Fonsiyonu
k	: Termal iletkenlik
k_p	: Boru j Politropik parametre
$L_{t,j}$: Boru j Uzunluğu
m_d	: Diyafram kütlesi
n	: Örnek uzunluğu
n_j	: Boru j Politropik Sabit
P	: Ortam Basıncı
P_0	: Sinüzoidal Giriş Basıncının Genliği
P_N	: N hacmindeki Bozulmuş Basıncın Genliği.
Pr	: Prantl Sayısı
R	: İdeal Gaz Sabiti
$R_{t,j}$: Boru j İç Yarıçapı
RH	: Bağlı Nem
T	: Ortam Sıcaklığı
V_d	: Diyafram Önündeki Kapalı Hacim

V_j	: Sensör j Hacmi
$V_{t,j}$: Boru j Hacmi
W_n	: n. Birim Kökü
α_j	: Boru j Kayma Dalgası Sayısı
γ	: Özgül Isı Oranı
θ_{lag}	: Faz Gecikmesi
$\theta_{port,i}$: Frekansa göre Basınç Tarayıcı Sensör i'deki Faz Gecikmesi (i=1,2,3)
κ	: Adyabatik indeks
μ	: Dinamik Viskozite
ρ	: Havanın Yoğunluğu
σ_j	: Sensör j Boyutsuz Diyafram Sapması
ϕ_j	: Boru j İndirgenmiş frekans
ω	: Basınç Dalgasının Açısız Frekansı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Hoparlör özellikleri.	16
Çizelge 5.1 : Ortam parametreleri.	23
Çizelge 5.2 : Havanın farklı sıcaklara göre sabit basınçtaki özellikleri.	28
Çizelge 5.3 : Havanın farklı basınçlara göre sabit sıcaklıktaki özellikleri.	29
Çizelge 5.4 : Havanın farklı bağıl neme göre özellikleri.	30
Çizelge 5.5 : RBS-2 optimizasyon sınır şartları.	33
Çizelge 5.6 : KBS-1 optimizasyon sınır şartları ve sonuçları.....	34
Çizelge 5.7 : KBS-2 optimizasyon sınır şartları ve sonuçları.....	35
Çizelge 6.1 : Test edilen boruların özellikleri.	38



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dinamik basınç ölçümlerinin kullanıldığı alanlar; a)Roket testleri [1], [2] , b)Plastik enjeksiyon ile üretim [3].	1
Şekil 1.2 : Rüzgar tüneli testi örnekleri [5], [6].	2
Şekil 2.1 : Basit borulama sistemi.	7
Şekil 2.2 : Farklı uzunluktaki boruların frekansa göre genlik oranındaki değişimi. ...	8
Şekil 2.3 : Helmholtz rezonatör sistemi.	8
Şekil 2.4 : Çapa göre boruların uzunluk ile rezonans frekansı(Hz) değişimi.	9
Şekil 2.5 : N sayıda boru ve hacime sahip borulama sistemi.	10
Şekil 2.6 : Politropik parametrenin frekansa göre değişimi.	11
Şekil 3.1 : Hoparlörün piston - silindir benzeşimi.	15
Şekil 3.2 : Üretcin doğal frekansı ve hacim değişimi.	16
Şekil 3.3 : Amplifikatör ve güç kaynağı.	17
Şekil 3.4 : Osiloskop.	17
Şekil 3.5 : Dinamik basınç üretici CAD modeli gösterimi.	18
Şekil 3.6 : Dinamik basınç üretici.	18
Şekil 4.1 : Ölçüm sistemi şeması.	19
Şekil 4.2 : Basınç tarayıcısı.	20
Şekil 5.1 : Borulama sistemi ölçüleri.	23
Şekil 5.2 : Farklı boru uzunluklarının karşılaştırılması (D=1,0 mm).	24
Şekil 5.3 : Farklı boru uzunluklarının karşılaştırılması (D=1,5 mm).	24
Şekil 5.4 : Farklı boru uzunluklarının karşılaştırılması (D=2,0 mm).	25
Şekil 5.5 : Farklı boru iç çaplarının karşılaştırılması (L=0,6 m).	25
Şekil 5.6 : Kademeli borulama sistemi ölçüleri.	26
Şekil 5.7 : Kademeli borulama sistemlerinin karşılaştırılması (D ₁ =1,0 mm).	26
Şekil 5.8 : Kademeli borulama sistemi ölçüleri.	27
Şekil 5.9 : Kademeli borulama sistemlerinin karşılaştırılması (D ₁ =1,5 mm).	27
Şekil 5.10 : Sıcaklık değişiminin etkisi.	28
Şekil 5.11 : Basınç değişiminin etkisi.	29
Şekil 5.12 : Bağıl nem değişiminin etkisi.	30
Şekil 5.13 : Sensörün iç ölçüleri ve hacimleri.	31
Şekil 5.14 : Basınç sensörünün frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.	31
Şekil 5.15 : RBS-1 geometrik özellikleri.	32
Şekil 5.16 : RBS-1 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.	32
Şekil 5.17 : RBS-2 geometrik özellikleri.	33
Şekil 5.18 : RBS-2 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.	33
Şekil 5.19 : KBS-1 ölçüleri.	34
Şekil 5.20 : KBS-1 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.	34
Şekil 5.21 : KBS-2 ölçüleri.	35
Şekil 5.22 : KBS-2 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.	35
Şekil 6.1 : Basınç tarayıcı port 1-2 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.	37

Şekil 6.2 : Basınç tarayıcı port 1-3 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.....	37
Şekil 6.3 : Deneylerde kullanılan borular ve kısıtlayıcılar.	39
Şekil 6.4 : Deney-1 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).....	39
Şekil 6.5 : Deney-2 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).....	40
Şekil 6.6 : Deney-3 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).....	40
Şekil 6.7 : Deney-4 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).....	41
Şekil 6.8 : Deney-5 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).....	41
Şekil 6.9 : Deney-6 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).....	42
Şekil 6.10 : Deney-7 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).....	42
Şekil 6.11 : Deney-8 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).....	43
Şekil 6.12 : Deney-9 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).....	43
Şekil 6.13 : Deney-10 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).	44
Şekil 6.14 : Deney-11 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).	44
Şekil 6.15 : Deney-12 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).	45
Şekil 6.16 : Deney-13 ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).	46
Şekil 6.17 : Deney-14 ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).	46
Şekil 6.18 : Deney-15 ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).	47
Şekil 6.19 : Deney-16 ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).	47
Şekil 6.20 : Deney-17 ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).	48
Şekil 6.21 : Deney-18 ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).	48
Şekil 6.22 : Deney-19 ile teorinin karşılaştırması (D=2,0 mm).	49
Şekil 6.23 : Deney-20 ile teorinin karşılaştırması (D=2,0 mm).	49
Şekil 6.24 : Deney-21 ile teorinin karşılaştırması (D=2,0 mm).	50
Şekil 6.25 : Deney-4, 7, 10, 13, 16 ve 19'un karşılaştırması (L=0,6 m).	51
Şekil 6.26 : Deney-5, 8, 11, 14, 17 ve 20'nin karşılaştırması (L=0,8 m).	51
Şekil 6.27 : Deney-6, 9, 12, 15, 18 ve 21'in karşılaştırması (L=1,0 m).	52
Şekil 6.28 : Deney-22 ile teorinin karşılaştırması.....	53
Şekil 6.29 : Deney-23 ile teorinin karşılaştırması.....	53

DİNAMİK BASINÇ ÖLÇÜMLERİNDE BORULAMANIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Dinamik basınç ölçümleri, sensör teknolojisindeki gelişimin artmasıyla beraber, basıncın zamana bağlı olarak incelendiği alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Dinamik basınç ölçümlerinin kullanıldığı ve önem kazandığı alanlardan biri de rüzgar tüneli testleridir. Bina, stadyum, gökdelen gibi yapıların cepheleri ve taşıyıcı sistemleri üzerindeki rüzgar yükünün belirlendiği rüzgar tüneli testlerinde basınç ölçümleri zamana bağlı olarak yapılmaktadır. Rüzgar tüneli testi çalışmalarında model ile ölçüm sistemi arasında kullanılan boru sisteminin uzunluğu, iç çapı gibi değişik parametreler sebebiyle farklı frekansta çalkantı içeren havanın dinamik basınç ölçümü sonuçları üzerinde oluşan bozulmalar deney sonuçlarının doğruluğunu etkilemektedir.

Dinamik basınç ölçümlerinde kullanılan borulama sisteminin farklı frekanslardaki çalkantılı basınç üzerinde yaratacağı bozulmalar rezonans, genlik bozulması ve faz gecikmesi olarak sıralanabilir. Boru sisteminin özelliklerine göre rezonans frekansı değişmektedir. Frekanslara göre genlik bozulma oranı rezonans frekansına doğru artış gösterirken sonrasında sönümleme eğiliminde olabilir.

Frekansa bağlı genlik oranı ve faz gecikmesi, akışkan denklemleri yardımıyla oluşturulmuş özyineleme formülü kullanılarak hazırlanan yazılım ile farklı borulama seçenekleri için hesaplanabilir. Bu hesaplama ile borulama sisteminin girişine uygulanan farklı frekanslardaki sinüzoidal bir basıncın genliğinin sensörde ölçülen değerine oranı elde edilir. Dinamik basınç ölçümlerinde kullanılan borulama sisteminin uzunluğu, iç çapı, özelliklerine ilave olarak ortam sıcaklığı, basıncı gibi çevresel faktörlerin de genlik oranında bozulma üzerine etkisi olduğu görülmüştür.

Farklı frekanslarda çalkantılar içeren havanın basınç ölçümünde borulama kaynaklı genlikteki bozulmanın giderilmesi için uygulanan yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri; borulama sisteminin uzunluğu boyunca uygun konumda ve borunun çapına oranla daha küçük çapta kısıtlayıcı eklenmesidir. Boru sisteminin ölçülerinin isterleri doğrultusunda, belirli çaptaki kısıtlayıcının uzunluğu ve boru uzunluğu boyunca konumu optimizasyon yazılım sonucundan belirlenmiş ve dinamik basınç üretici ile yapılan deneyler ile sonuçları incelenmiştir.

Borulama sistemlerinin basınç ölçümleri sonuçları üzerinde yarattığı bozulmanın incelenmesi ve istenilen seviyeye gelmesi için kullanılan yöntemlerin araştırılmasında dinamik basınç üretici kullanılmıştır. Tasarımı ve üretimi yapılmış olan dinamik basınç üreticinde, basınç üretici için hoparlör kullanılması maliyeti düşük ve diğer üreteçlere oranla üretim süresi kısa olan bir çözüm olmasından dolayı tercih edilmiştir. Üreteç, kapalı bir hacimde dairesel kesit içerisinde çok küçük yer değiştirme ile salınan bir diyafram yardımıyla sinüzoidal bir basınç üretimi olarak tanımlanabilir. Üreteç sisteminde hoparlör, sinüzoidal sinyal üretici ve sinyali

güçlendirmek için amplifikatör yardımıyla oluşturulan sinüzoidal basıncın frekansı belirlenen adım değeri ile 10'dan 400 Hz değerine kadar ayarlanmıştır. Farklı uzunluk, çap ve malzemede test edilen borular ve referans bir boru üreteç ile basınç tarayıcısı arasına bağlanmıştır. Referans boru ve test borulama sisteminin farklı frekanslarda sensörde ölçülen genlikleri oranlanarak bozulmanın cevabı aranmıştır.



STUDY OF TUBING EFFECT IN DYNAMIC PRESSURE MEASUREMENTS

SUMMARY

Dynamic pressure measurements are used extensively in areas where the pressure is studied depending on time with the development of sensor technology. One of the areas where dynamic pressure measurements are used and gained importance is wind tunnel tests. In the wind tunnel tests where the wind load on the façades of the buildings, stadiums, skyscrapers and carrier systems are determined, pressure measurements are made depending on time.

The test model of the structure is used in the wind tunnel tests where the façade load and structural load created by the wind on the structure are examined. Pressure taps are opened to the regions where dynamic pressure measurement is performed on the model. With the help of standards and scientific studies, the measurement requirements for wind tunnel tests are determined. The frequency and sampling time for the pressure measurement are calculated by similarity relations between the model and prototype. After the parameters such as frequency and sampling time to be used for the tests are determined by general assumptions that are necessary for experimental studies, the measurement system can be selected.

Sensors commonly used in dynamic pressure measurements vary according to their application areas. Various parameters play a role in the selection of sensors. Parameters such as the size of the sensor, the type of pressure measurement, the pressure range, the measuring frequency affect the sensor selection. In many experiments, it is necessary to use a system called pressure scanner in the experiments which requires simultaneous measurement. The pressure scanners use piezoresistive sensors based on MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology, which allows high frequency sampling.

The small dimensions of the tested model cause the systems used in the pressure measurements to not be inserted into the model. This constraint required a tubing between the point to be measured on the model and the pressure sensor. The distortions on the results of dynamic pressure measurement of flow containing different frequency fluctuations due to different parameters such as length and internal diameter of the tubing system used between the model and the measurement system in the wind tunnel test studies affect the accuracy of the test results.

The distortions caused by the tubing system used in dynamic pressure measurements on turbulent pressure at different frequencies can be listed as resonance, amplitude distortion and phase delay. Resonance frequency varies according to the characteristics of the tubing system. The amplitude distortion rate relative to the frequencies may increase towards the resonance frequency, which may then tend to damp.

Frequency-dependent amplitude ratio and phase delay can be calculated for different tubing options by using the recursion formula created with the help of fluid equations. With this calculation, the ratio of the amplitude of a sinusoidal pressure at the different frequencies applied to the input of the tubing system to the value measured in the sensor is obtained. In addition to the length, inner diameter and characteristics of the tubing system used in dynamic pressure measurements, environmental factors such as ambient temperature and pressure also had an effect on the amplitude ratio.

There are methods for eliminating the distortion of the amplitude caused by tubing in the measurement of pressure of air containing fluctuations at different frequencies. One of these methods is a smaller diameter restrictor is added than the diameter of the tubing along the appropriate position in the length of the tubing system. In accordance with the requirements of the tubing system, the length and position of the restrictor of a certain diameter along the length of the tubes were determined from the optimization software and the results of the experiments with dynamic pressure generator were examined.

Dynamic pressure generator was used to investigate the distortions caused by the pressure measurement results of tubing systems and to investigate the methods used to reach the desired level. In the dynamic pressure generator, which was designed and manufactured, the use of loudspeakers for the pressure generator is preferred because it is low cost having short production time compared to other generators. The generator can be defined as the generation of a sinusoidal pressure by means of a diaphragm oscillated by very small displacement in a closed volume in a circular cross-section. In the generator system, the frequency of the sinusoidal pressure generated by the loudspeaker, sinusoidal signal generator and amplifier to amplify the signal is adjusted from 10 to 400 Hz with the determined step value. The tubes tested in different lengths, diameters and materials and a reference tube are connected between the generator and the pressure scanner. The amplitude of the reference tube and test tubing system measured at the sensor at different frequencies was proportional and the response of the distortion was sought.

Since the pressure sensor cannot be directly connected to the dynamic pressure generator to investigate the effects of the tested tubing systems, the restrictor determined by optimization in the reference tube is used and the amplitude ratio of the reference tube is very close to 1 between 0-400 Hz.

By connecting tubes of equal length to certain ports of the pressure scanner used in the apparatus to test the tubing system, amplitude ratio and phase delays according to the frequency between the ports are measured and presented.

The results obtained with the tubing systems with high production precision used in the experiments are consistent with the theory. In the case of tubes with low production precision, when the $\pm 5\%$ of the diameter is taken, the compatibility with the theory increases. It is seen from the experimental results that the properties of the tube should be known and used with high accuracy in order to calibrate the tubing systems used in dynamic pressure measurements using theory.

Measurements were made with 20 different tubing systems in dynamic pressure generator. Experimental results of tubes of different diameters of 0.6 m, 0.8 m and 1.0 m were compared and the diameter, length and effect of the material produced were examined. Reduction of tube diameter and length increases the amplitude ratios according to frequency. In order to reduce the distortion of the frequency amplitude

ratio of 0.6 m and 0.8 m tubes, it is seen in the experimental results that the use of restrictors whose properties are determined as a result of optimization with theory is an accurate method.

In order to investigate the changes in the amplitude ratios of the tubes of different materials with the same diameter and length, it was concluded that more tubes with high precision production and different materials of the same diameter should be examined experimentally.

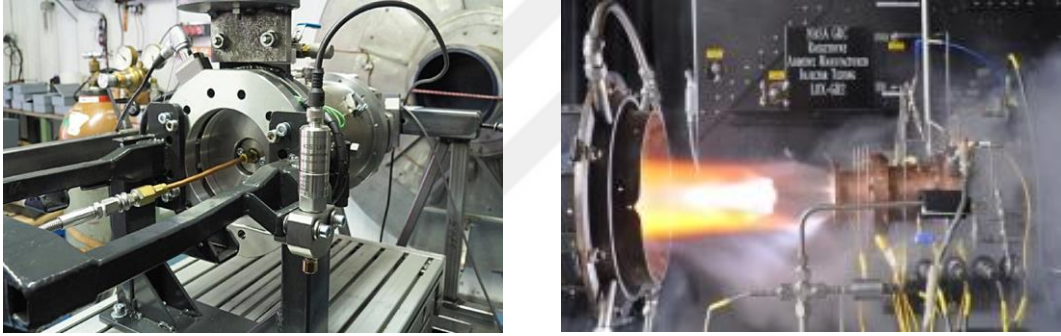




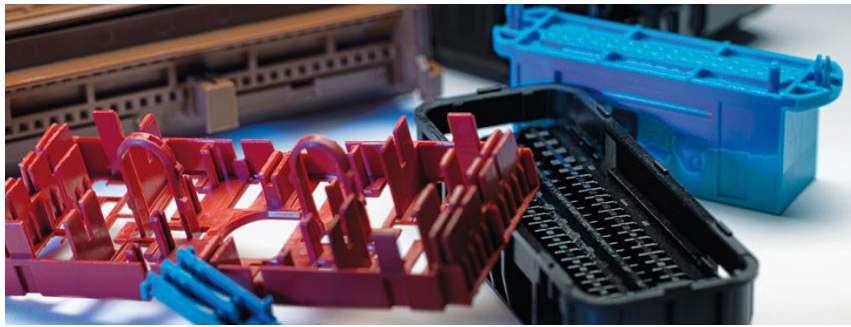
1. GİRİŞ

Basınç ölçümlerinde kullanılan deney cihazları, teknolojinin gelişmesine ve bilimsel çalışmalara paralel olarak sensör teknolojisi içermekte ve zamana bağlı olarak yüksek frekans ve doğrulukta ölçüm yapmaya imkan sağlamaktadır.

Basıncın zamana bağlı olarak değişiminin gözlemlendiği ölçümler, dinamik basınç ölçümleri olarak adlandırılmaktadır. Dinamik basınç ölçümleri havacılık-uzay çalışmaları, turbomakinalar ve rüzgar tüneli deneyleri içeren araştırma alanlarının dışında üretim, kontrol sistemleri gibi sanayi uygulamalarında da tercih edilmektedir (Şekil 1.1).



(a)



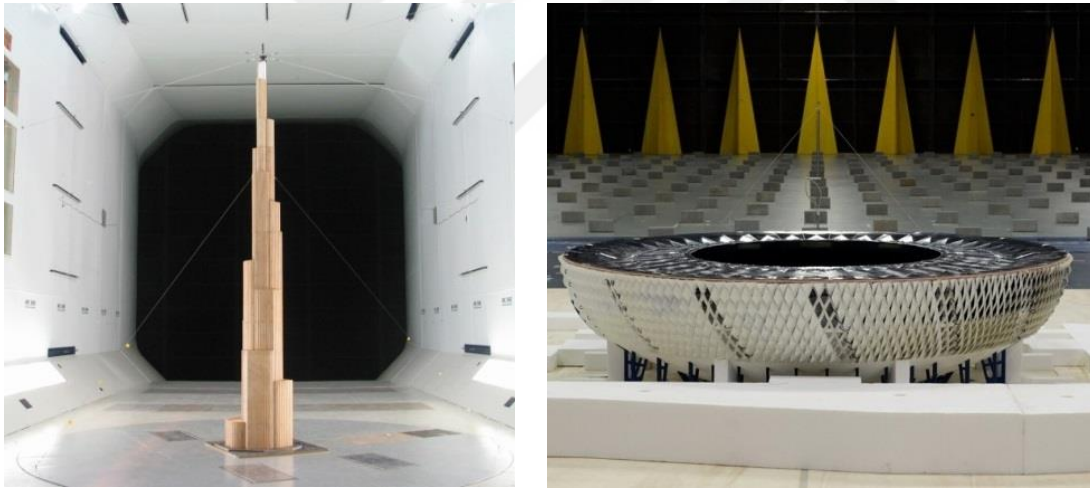
(b)

Şekil 1.1 : Dinamik basınç ölçümlerinin kullanıldığı alanlar; a)Roket testleri [1], [2] , b)Plastik enjeksiyon ile üretim [3].

Dinamik basınç ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan sensörler kullanım alanlarına göre farklılık göstermektedir. Sensörlerin seçilmesinde çeşitli değişkenler rol oynamaktadır. Sensörün boyutu, basınç ölçümünün tipi, basınç aralığı, ölçüm

frekansı gibi değişkenler sensör seçimi etkilemektedir. Birçok noktadan eş zamanlı olarak ölçüm yapılması istenilen deneylerde basınç tarayıcı adı verilen sistem kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan basınç tarayıcılarında yüksek frekansta örneklemeye imkan sağlayan MEMS (Mikro elektro mekanik sistemler) teknolojisine dayalı, piezoresistive tipinde sensörler kullanılmaktadır [4]. Sensörde kullanılan silikon malzemeye basınç uygulandığında gerilmekte ve direnci değişmektedir. Uygulanan basınca göre Wheatstone köprüsü yardımıyla malzemenin değişen direnci belirlenmektedir. Bu tip sensörler, basınç büyüklüğünü voltaj sinyaline çevirerek çalışmaktadırlar. Ölçümlerde toplanan analog voltaj değerleri, bir dönüştürücü yardımıyla dijital veriye daha sonrasında ise sensöre ait kalibrasyon eğrisine ait fonksiyon yardımıyla basınç verisine dönüştürülmektedir.

Rüzgar tüneli deneyleri, havacılık ve otomotiv gibi aerodinamik araştırmaların yapıldığı alanlar dışında bina, stadyum, gökdelen gibi yapı grupları üzerinde oluşan rüzgar etkilerini inceleyen alanlarda da yoğun olarak tercih edilmektedir (Şekil 1.2).



(a)

(b)

Şekil 1.2 : Rüzgar tüneli testi örnekleri [5], [6].

Rüzgarın yapı üzerinde oluşturduğu cephe yükü ve yapısal yükün incelendiği rüzgar tüneli testlerinde, belirli bir ölçeklendirme yapılarak yapının test modeli oluşturulmaktadır. Oluşturulan model üzerinde dinamik basınç ölçümü yapılmak istenilen bölgelere basınç prizleri açılmaktadır. Standartlar ve yapılan bilimsel çalışmalar yardımıyla rüzgar tüneli testleri için gereken ölçüm isterleri belirlenir. Basınç ölçümünün yapılması için gereken frekans ve ölçüm süresi değerleri, model ve prototip arasındaki benzeşim ilişkileri ile hesaplanmaktadır. Testler için kullanılacak frekans değerleri ve ölçüm süresi gibi parametreler, deneysel ölçümlerin

gerekliliği olan genel kabuller ile belirlendikten sonra ölçüm sisteminin seçimi yapılabilir.

Uluslararası standartlardan olan ASCE'nin yayınladığı 49/12 standartında [7] rüzgar yükünün ölçülmesi için gereklilikler tanımlanmaktadır. Bu standarttaki model ve prototip arasındaki frekans oranı ilişkisi kullanılarak, yaygın modelleme ölçekleri ve rüzgar tüneli özellikleri seçildiğinde ölçüm frekansı belirlenebilir.

Sinüzoidal çalkantılı basınçların incelendiği deneysel çalışmalarda örtüşme hatası (Aliasing) etkisinin göz önünde bulundurulması gereklidir. Örtüşme hatası etkisi, verinin içerdiği en yüksek frekanstaki sinüzoidal basıncın uygun olmayan bir örnekleme frekansı seçiminde ortaya çıkmakta ve deneysel çalışmanın sonuçlarında bozulmaya sebep olmaktadır. Bu durumun önlenmesi için Nyquist teoremi kullanılmaktadır. Bu teoreme göre örnekleme frekansı, örneklenen sinüzoidal basıncın içerdiği en yüksek frekansın değerinin en az iki katı olarak alınması gerektiğini göstermektedir. 400 Hz frekansı olan sinüzoidal basınç için en az 800 Hz'lik bir örnekleme frekansı seçilmelidir.

Test edilen modelin küçük boyutları, basınç ölçümlerinde kullanılan sistemlerin model içine yerleştirilememesine neden olmaktadır. Bu kısıt, model üzerinde ölçümü yapılacak nokta ile basınç ölçer arasında bir borulama gereksinimi doğurmuştur.

Yaygın olarak dar çaplı borular rüzgar tüneli deneylerinde kullanılmaktadır. Ölçüm sırasında boruların içindeki hava hareket etmektedir. Dar çaplı boru içinde havanın hareketi üzerinde vizkoz, termal ve akustik etkiler rol oynamaktadır. Bu etkiler, basınç ölçümü yapılan noktadan toplanan sonuçların içerdiği farklı frekanslardaki çalkantılı havanın basınç genliklerini bozmaktadır. Bu bozulma, farklı frekanslarda genlikte düşüş veya artış olarak gözlemlenir. Genlik bozulmasına ek olarak sinüzoidal çalkantılı basıncın periyodunda da gecikme görülmektedir. Faz gecikmesi, model üzerinde eşit uzunlukta boru kullanılarak çözülebilmektedir.

Dinamik basınç ölçümünde kullanılan farklı özellikteki boruların genlik bozulmasına yönelik literatürde teorik ve deneysel olarak incelemeler yapılmıştır. Dinamik basınç üretici yardımıyla deneysel çalışmalarda kullanılan borulama sisteminin frekanslara bağlı olarak genliğindeki bozulma araştırılmış ve bozulmanın azaltılması için yöntemler bulunmuştur.

Genlik bozulmasının düzeltilmesi ve azaltılması için farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerden biri de kısıtlayıcı uygulamaktır. Bu uygulama, borulama kaynaklı genlik bozulmasının belirli frekans aralığı için kabul edilebilir bir seviyeye gelmesini sağlamaktadır. İlgilenilen frekans aralığında ölçüm noktasındaki frekanslara bağlı genliğin sensördeki genliğe oranının $\pm\%5$ olması, rüzgar tüneli testlerinde yaygın olarak kabul görmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında dinamik basınç ölçümlerinde kullanılan farklı özellikteki borulama sistemlerinin frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi üzerindeki etkisinin anlaşılması, hesaplanması, azaltılması için uygulanan mekanik yöntem olan kısıtlayıcı özelliklerinin optimizasyon yardımıyla belirlenmesi, deneysel olarak incelenmesi ve yapılan ölçümlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Iberall 1950 yılında [8] tek bir borunun ucuna uygulanan sinüzoidal çalkantılı basıncın, Navier-Stokes denklemleri ile süreklilik, hal ve enerji korunum denklemlerinden borunun sonundaki basıncın genliğindeki değişim ve gecikmesi hakkında hesaplamalar yapmıştır. Yapmış olduğu çalışma Bergh ve Tjrdeman [9] çalışmasında genişletilerek birbirine seri bağlı borular ve hacimler için borulama sisteminin farklı frekanslardaki sinüzoidal çalkantılı bir basınç dalgasının genliğindeki bozulma cevabı özyineleme formülü ile ifade edilmiştir. Çalışmada dinamik basınç üretici kullanarak 200 Hz'e kadar oluşturduğu farklı frekanslardaki sinüzoidal çalkantılı basıncın genliğindeki değişimi ve faz gecikmesini teorik sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Teorik hesaplamaların genlikteki bozulmanın tahmin edilmesi ve girişte uygulanan sinüzoidal basınç sapmalarının ihmal edilebilir olduğu sonucuna varmıştır. Deneylerde kullandığı boruların iç çapının hesaplanmasında farklı yöntemler denemiştir. Sonuç olarak teorik hesaplarda kullandığı ortalama boru iç çapının %2-5 oranında azaltıldığında teorinin deneysel sonuçlara uyum gösterdiğini açıklamıştır. Ortaya çıkardığı teorik özyineleme formülü sonraki yıllarda yapılan deneysel araştırmalarda karşılaştırma yapılmak üzere kullanılmıştır.

Irwin ve diğ. [10] yürüttüğü deneysel çalışmada borulama kaynaklı bozulmanın azaltılması için; farklı frekanslara göre genlik oranının transfer fonksiyonunu hesaplayarak bir gürültü üzerine bu fonksiyonu uygulamıştır. 0,61 m'lik borunun 0-100 Hz arasındaki genlik oranlarının 1'e yaklaşması mekanik olarak boruya bir kısıtlayıcı eklenmesinin faydalı olduğunu deneysel olarak gözlemlemiştir. İç çapları 1,35 mm olan farklı boru uzunlukları (0,61 m-3 m) için yaptığı deneylerin sonucunda transfer fonksiyonu uygulamasının 3 m uzunluğunda kullanılan borularda bile bozulmayı azaltabileceğini ve örnekleme hızının artırılarak transfer fonksiyonu yönteminin doğruluğunun artacağını belirtmiştir.

Holmes ve Lewis [11] çalışmasında boru boyunu (0,5m) ve girişteki borunun iç çapını (1,5mm) sabit tutarak, bozulmanın en az olduğu borulama çeşidini araştırmıştır. Kısıtlayıcı kullanarak iki, üç ve dört kademeli borulama sistemlerinde farklı frekanslardaki sinüzoidal çalkantılı havanın genliğindeki bozulmanın en az olduğu optimum konfigürasyonu bulmaya çalışmış ve deneysel çalışmalarda üreticinin borulama sisteminin frekansa göre genliğindeki bozulma cevabının bulunmasında güvenilir bir yol olduğundan bahsetmiştir.

Yoshida ve diğ. [12] rüzgar tüneli testlerinde ölçümü yapılacak noktaların modelin getirdiği kısıtlamadan dolayı bükülmesini araştırmıştır. Boru kıvrımının ölçümlerdeki bozulmaya etkisinde bükülme noktasının konumunun ve farklı sayıda büküm çeşitlerinin etkisinin çok küçük olduğu deneylerle göstermiştir. Bükülme noktasındaki kesit alanının boru kesit alanının yarısının altına düşmemesi durumunda bükülme etkisinin ihmal edilebilir olduğunu ve boru bükme işleminde pirinç çubuk benzeri bir aletin kullanılmasının faydalı olacağını önermiştir. Çalışmasında 0-400Hz frekans aralığında çalışan hoparlör sisteminden oluşan dinamik basınç üretici kullanmıştır.

Wang ve diğ. [13] önceki çalışmalara göre düşük bir frekansta (165 Hz'e kadar) boru sisteminin uzunluk, çap, büküm, kalınlık malzeme gibi değişken boru parametreleri ile beraber kısıtlayıcı uygulamasını kapsayan bir inceleme yürütmüştür. Farklı malzeme ve boru kalınlığının etkisinin yüksek olduğu gösterilmiştir. Borulamadaki bozulmanın düzeltilmesi ve boruların kalibrasyonu için yaygın kullanılan FFT ve IFFT metotlarını kullanmıştır.

Rofail ve diğ. [14] yürüttüğü çalıştay raporunda 1 ve 1,5 m'lik farklı malzeme tipindeki boruların dinamik basınç ölçümü sonuçları üzerindeki etkisini korna içeren bir basınç üretici kullanarak göstermiştir. Yumuşak malzemelerin sert malzemelere göre sönümlemesinin fazla olduğunu ve 25 mm'lik kısa borularla yapılan çalışmalarda uzun borulardaki gibi çelik borunun en yüksek rezonans cevabına sahip olduğunu ancak PVC kısa borularda yumuşak malzemenin sert malzemeye göre rezonans frekansının daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

Kovaerk ve diğ. [15] 2018 yılında NIST tarafından yayınlanan teknik notta bozulmanın incelenmesini teorik, deneysel ve optimizasyon başlıklarında toparlayarak farklı boru tipleri için kapsamlı bir rapor hazırlamıştır. Özyineleme fonksiyonunda Bergh ve Tijdeman'ın [9] teorisinde politropik parametre, spesifik ısı oranına eşit kabul edilirken bu çalışmada fonksiyon olarak tanımlamıştır. Teori, bir başka teori olan akustik için toplu eleman iletim modeli ile kıyaslanmış ve 0-300Hz arasındaki genlik oranındaki hatanın iki teori arasında %1 civarında olduğu gösterilmiştir. Rapor kapsamında yapılan deneysel çalışmalardaki metodlar ve kullanılan deney sistemi uygulaması literatürde bulunan diğer benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir.

Ştefe ve diğ. [16] tarafından hoparlör sistemine dayalı tasarlanan dinamik basınç üreticinin dinamik sistem modellemesini yaparak sistem parametrelerine göre üreticinin çalışabileceği en yüksek frekans hesaplanmıştır. Üreticinin istenilen en yüksek frekans değerine yaklaştıkça mekanik titreşimden dolayı ölçüm hatasını arttığı görülmüş ve bunun sistemin rijitliğinden dolayı olduğu sonucuna varılmıştır.

2. BORULAMA ETKİLERİNİN HESAPLANMASI

2.1 Borulamanın Etkileri

2.1.1 Rezonans

Borulama sisteminde oluşan rezonans, girişe uygulanan sinüzoidal çalkantılı basıncın frekansının doğal frekansına yaklaştıkça sistemin sonundaki basıncın genliğinin artması olarak tanımlanabilir. Boru sisteminin rezonans frekansı, ölçümü yapılacak olan çalkantılı basıncın frekansından yüksek olması genlikteki bozulmayı azaltmaktadır.

Rezonansın oluştuğu frekanslar denklem 2.1'deki gibi olmaktadır. Şekil 2.1'de basit borulama sistemi gösterilmiştir.

$$f_n = \frac{c}{4L}, \frac{3c}{4L}, \frac{5c}{4L}, \dots \quad (2.1)$$



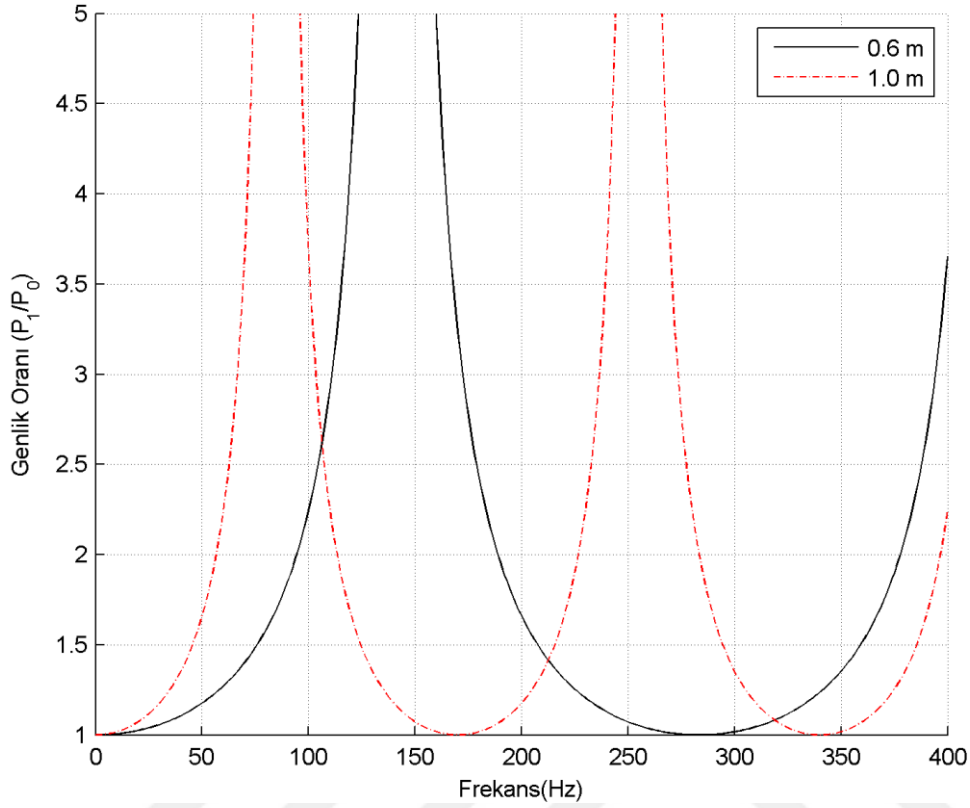
Şekil 2.1 : Basit borulama sistemi.

Rezonans frekansının hesabında viskozite, ısı iletkenliği ve sensör hacmi ihmalleriyle basit org borusu yaklaşımı ele alınabilir. Borunun girişine sinüzoidal basınç uygulandığında (P_0) borunun sonunda oluşan basıncın (P_1) genlikleri oranını basit şekilde denklem 2.2 ile hesaplanabilir [10].

$$\frac{P_1}{P_0} = \sec\left(\frac{wL}{c}\right) \quad (2.2)$$

Boru uzunluğu 0,6 m ile 1,0 m ve ses hızı 340 m/s olarak alındığında oluşan frekansa bağlı basınçların genlikleri oranındaki değişim Şekil 2.2'de verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere uygulanan sinüzoidal basıncın frekansı rezonans frekansına

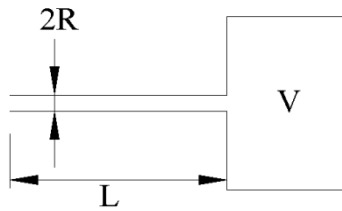
yaklaştıkça boru sonundaki genlik çok hızlı şekilde artmaktadır. Boru uzunluğu arttıkça incelenen frekans aralığında rezonansın sıklığının arttığı da görülmektedir.



Şekil 2.2 : Farklı uzunluktaki boruların frekansa göre genlik oranındaki değişimi.

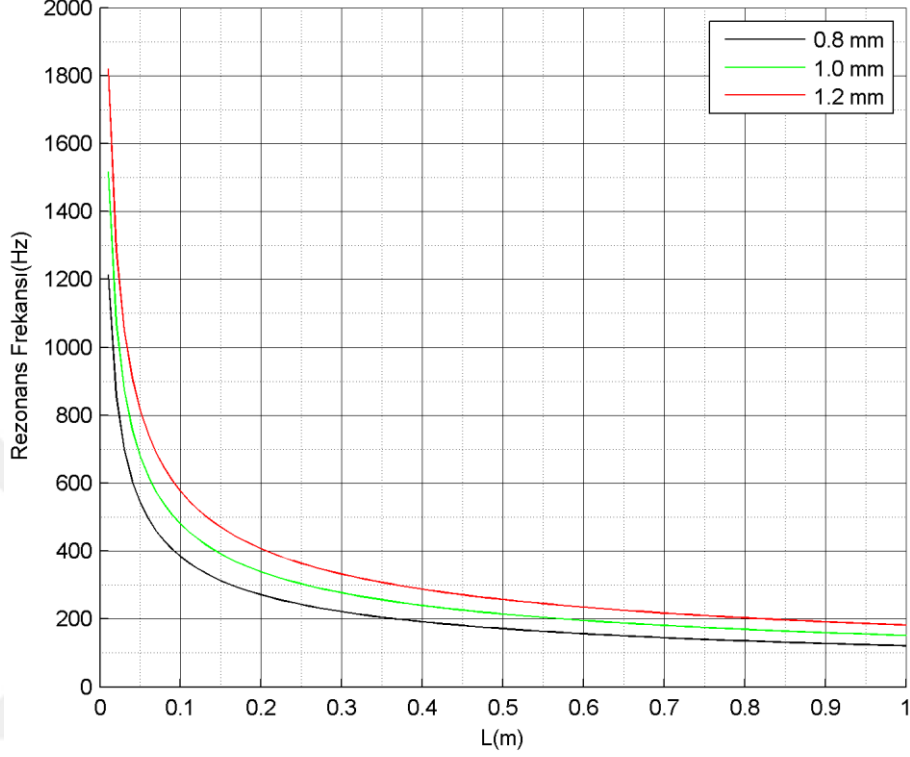
Borulama sistemi (Şekil 2.3) helmholtz rezonatörü olarak düşünüldüğünde denklem 2.3 ifade edilebilir. Sensör hacminin ve boru uzunluğunun azaltılması ile boru yarıçapının artırılması rezonans frekansının artmasını sağlamaktadır. Ancak borulama sisteminde ince çaplı boru kullanıldığında genlik oranındaki artışın sönümlendiği literatürde incelenen çalışmalarda görülmektedir.

$$f_n = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi R^2}{LV}} \quad (2.3)$$



Şekil 2.3 : Helmholtz rezonatör sistemi.

Sensör hacmi (100 mm^3) sabit alınarak farklı çaplardaki (0,8 mm, 1,0 mm ve 1,2 mm) boruların uzunluk ile rezonans frekansındaki değişimi Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Boru uzunluğu azaldığında ve yarıçap arttığında sistemin rezonans frekansı artmaktadır.



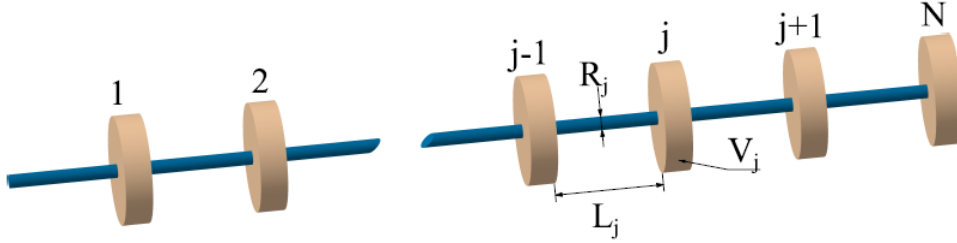
Şekil 2.4 : Çapa göre boruların uzunluk ile rezonans frekansı(Hz) değişimi.

2.1.2 Genlik bozulması

Girişte uygulanan farklı frekanslardaki sinüzoidal basıncın genliği ve boru sistemi sonundaki genliği oranlandığında ortaya çıkan bozulmanın hesaplanması için Navier-Stokes denklemleri ile süreklilik, hal ve enerjinin korunum denklemlerinin belirli kabuller ve sınır şartları ile çözümleri bulunabilir [9].

Genlik bozulmasının birbirine seri bağlı N tane boru ve hacim (Şekil 2.5) için teorik olarak hesaplanmasında sinüzoidal bozulmaların az olduğu, borunun iç yarıçapının uzunluğuna oranla küçük ve akış sistem boyunca laminar olarak kabul edilmiştir. Toplam basınç, yoğunluk ve sıcaklıkla beraber eksenel ve radyal hız komponentleri sinüzoidal çalkantılı bir hava için yukarıda belirtilen denklemlere yerleştirilerek ifadeler basitleştirilmiştir. Genel çözüm denklemlerindeki bilinmeyenler için sınır şartları, boru duvarında hız bileşenleri ve duvarın ısı iletkenliği büyük olduğu için sıcaklık duvarda sıfır alınmıştır. Problemin eksenel simetrik olmasından dolayı borunun merkez ekseninde radyal hızda sıfır olarak varsayılmıştır. Genel çözüm

formülünde bulunan katsayıların bulunması için borunun her iki ucundaki basınç ve yoğunluk sadece zamana bağlı kabul edilmiştir. Boru sonundaki hacimde basınç genişlemesi politropik varsayılarak borunun içindeki akış için genlik oranı bozulmasının özyineleme formülü denklem 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.5 : N sayıda boru ve hacime sahip borulama sistemi.

$$\frac{P_j}{P_{j-1}} = \left\{ \cosh(\phi_j L_j) + \frac{V_j}{V_{t,j}} \left(\sigma_j + \frac{1}{k_{p,j}} \right) n_j \phi_j L_j \sinh(\phi_j L_j) + \frac{V_{t,j+1}}{V_{t,j}} \frac{\phi_{j+1}}{\phi_j} \frac{L_j}{L_{j+1}} \frac{J_0(\alpha_j)}{J_0(\alpha_{j+1})} \frac{J_2(\alpha_{j+1})}{J_2(\alpha_j)} \frac{\sinh(\phi_j L_j)}{\sinh(\phi_{j+1} L_{j+1})} \right\} \left[\cosh(\phi_{j+1} L_{j+1}) - \frac{P_{j+1}}{P_j} \right]^{-1} \quad (2.4)$$

Özyineleme denklemi içindeki terimlerin formülleri sırasıyla boru hacmi, boru j için politropik sabiti, kayma dalgası sayısı ve indirgenmiş frekans için denklem 2.5 - 2.8 arasında verilmiştir.

$$V_{t,j} = \pi R_{t,j}^2 L_j \quad (2.5)$$

$$n_j = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{J_2(\alpha_j \sqrt{Pr})}{J_0(\alpha_j \sqrt{Pr})} \right]^{-1} \quad (2.6)$$

$$\alpha_j = i^{3/2} r_{t,j} \sqrt{\frac{\rho \omega}{\mu}} \quad (2.7)$$

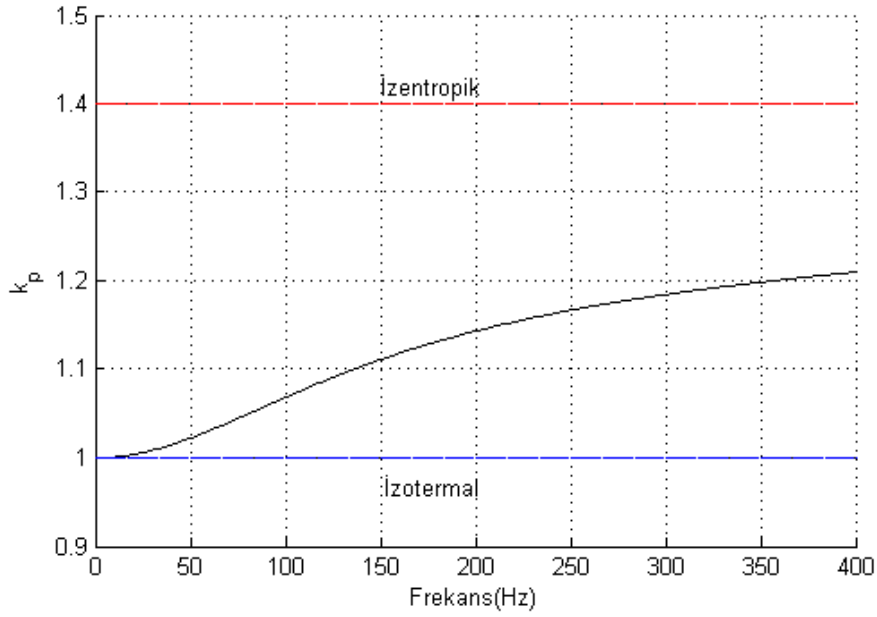
$$\phi_j = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\gamma}{n_j}} \sqrt{\frac{J_0(\alpha_j)}{J_2(\alpha_j)}} \quad (2.8)$$

Özyineleme formülündeki politropik parametre her frekansta izentropik ($k_p=1,4$) veya izotermal ($k_p=1,0$) sabit olarak alındığında genlik oranındaki değişim farklılaşmaktadır. Politropik parametrenin frekansa bağlı değişimi denklemler 2.9, 2.10 ile hesaplanabilir[15].

$$k_{p,j} = \left| \frac{\gamma}{1 + 3(\gamma - 1)(\beta_j^{-2} r_{t,j}^{-2})(\beta_j r_{t,j} \coth(\beta_j r_{t,j}) - 1)} \right| \quad (2.9)$$

$$\beta_j = \frac{(1 + i)}{\sqrt{2h_{t,j}/\omega}} \quad (2.10)$$

Boru iç çapı 1 mm ve termal difüzyon değeri standart deniz şartlarında alındığında Şekil 2.6'daki politropik parametrenin frekansa göre değişimi grafiği elde edilmektedir. Düşük frekanslarda politropik parametre 1'e yakın değerler alırken yüksek frekanslarda izentropik sınıra doğru yaklaşmaktadır.



Şekil 2.6: Politropik parametrenin frekansa göre değişimi.

Giriş ve sensördeki basınç genlik oranı denklem 2.11 yardımıyla hesaplanabilir. $j=N, N-1, \dots, 2, 1$ için;

$$AR = \left| \frac{P_N}{P_0} \right| = \left| \frac{P_1}{P_0} \frac{P_2}{P_1} \dots \frac{P_N}{P_{N-1}} \right| \quad (2.11)$$

Şekil 2.1’de verilen düz borulama için sensörde ölçülen sinüzoidal P_1 basıncının girişteki P_0 basınç genliğine oranı denklem 2.12’de verilmiştir.

$$\frac{P_1}{P_0} = \left\{ \cosh(\phi_1 L_1) + \frac{V_1}{V_{t,1}} \left(\sigma_1 + \frac{1}{k_{p,1}} \right) n_1 \phi_1 L_1 \sinh(\phi_1 L_1) \right\}^{-1} \quad (2.12)$$

2.1.3 Faz gecikmesi

Borulama kaynaklı olan bozulmalardan biri olan faz gecikmesi denklem 2.13 ile hesaplanabilir.

$$\theta_{lag} = \theta_N - \theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(P_N/P_0)}{\text{Re}(P_N/P_0)} \right) \quad (2.13)$$

2.2 Borulama Sistemleri Etkilerinin Hesaplanması

2.2.1 Havanın özelliklerinin hesaplanması

Borulama sistemlerinin genlik bozulmasının teorik hesaplanmasında yoğunluk, dinamik viskozite, termal difüzyon, Prandtl sayısı ve ses hızından oluşan havanın özellikleri ortam parametrelerine göre belirlenmelidir. Bu termodinamik özelliklerin bulunmasında kuru hava için ideal gaz denklemleri ve korelasyon yapılarak türetilmiş formüllere dayalı denklem 2.14 - 2.20 kullanılmıştır[17].

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2.14)$$

$$\mu = \frac{1,4592 \times 10^{-6} T^{1,5}}{T + 109,10} \quad (2.15)$$

$$k = \frac{2,3340 \times 10^{-3} T^{1,5}}{T + 164,54} \quad (2.16)$$

$$C_p = 1030,5 - 0,19975T + 3,9734 \times 10^{-4} T^2 \quad (2.17)$$

$$h = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.18)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (2.19)$$

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.20)$$

2.2.2 Bozulma hesaplama yazılımı

Dinamik basınç ölçümlerinde kullanılan boru sistemleri farklı çeşitlerde olabilir. Bu sistemler basınç okunan noktadan sensöre kadar sabit çapta devam eden borular olduğu gibi, farklı çaplarda kademeli olarak değişen şekillerde de görülebilir. Boru sisteminin özellikleri dışında deneyin yapıldığı ortamın değişkenlerinden olan sıcaklık, basınç ve nem sonuçları etkilemektedir.

Farklı borulama sistemlerinin genlik oranı ve faz gecikmesinin hesaplanması için teorik olarak açıklanmış özyineleme fonksiyonu yazılım koduna dönüştürülmüştür. MATLAB programında istenilen frekans aralığında oluşturulan kod çözdürülerek ortaya çıkan genlik oranı değişimi ve faz gecikmesi belirli bir frekans aralığında ve istenilen frekans adımı için hesaplanabilmektedir.

2.2.3 Kısıtlayıcı uygulamasının optimizasyonu

Borulama sistemlerinin ölçülerine uygun olarak kısıtlayıcı kullanılması, frekansa göre genlik oranını belirli bir frekans aralığı için 1 değerine yaklaştırabilir. Bunun için boru sisteminin geometrik sınırları ve kısıtlamaları belirlenerek optimizasyon programı yardımıyla kısıtlayıcının ve boru sisteminin geometrik özellikleri belirlenebilir.

Optimizasyonda kullanılacak amaç fonksiyonunda; belirlenen aralıktaki her frekansa ait genlik oranlarının ulaşılmak istenilen 1 değerine göre hata karelerinin minimizasyonundan faydalanılır. Özyineleme fonksiyonu yardımıyla bulunan genlik oranı belirlenen adım değeri ile ilgilenilen frekans aralığında çözdürülür. Bu sayede 1'e göre hatanın yüksek olduğu frekansların amaç fonksiyonunun hesaplanmasındaki

etkisi artmıştır. Denklem 2.21’de optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonu verilmiştir [15].

$$fun_{obj} = \sum_{f=0}^{f_{max}} (AR_f - 1)^2 \quad (2.21)$$

Boru sistemi kısıtlamaları ile sınır değerleri arasında amaç fonksiyonunun minimizasyonunu sağlayarak geometrik sonuçları verecek yazılım için MATLAB programındaki optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır.



3. DİNAMİK BASINÇ ÜRETECİ

3.1 Tasarım İsterleri

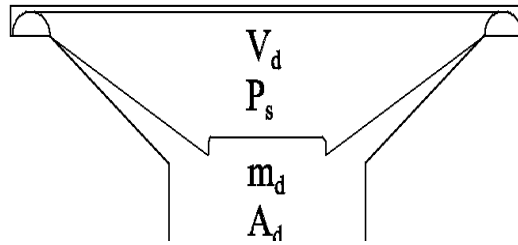
Dinamik basınç üreticinde oluşturulan sinüzoidal basınç dalgasının oda içerisinde homojen bir dağılım göstermesi istenmektedir. Bunun yanında basınç üreticinin rijitliği ve kullanılacak olan malzemelerin doğal frekansının üretilen basınç frekansına göre yüksek olması üretilen şartları sağlamada yeterli olacaktır.

3.1.1 Teorik modelleme

Dinamik basınç üreticinde oluşturulacak olan sinüzoidal çalkantılı basıncın en yüksek frekans değeri üreticinin tasarımında ilk ister olarak seçilmelidir.

Hoparlör diyaframı bir piston-silindir benzeşimi ile kapalı hacim içinde homojen basınç dağılımı, diyafram yer değiştirmesinin küçük olduğu kabul edilerek ideal gaz, ısı transferi ihmal ve adyabatik proses ($\gamma=\kappa$) varsayımları sonucunda denklem 3.1 ile üreticinin doğal frekansı hesaplanabilir [18]. Şekil 3.1’de hoparlörün piston-silindir benzetimi gösterilmiştir.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa P_s A_d}{V_d m_d}} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 : Hoparlörün piston - silindir benzeşimi.

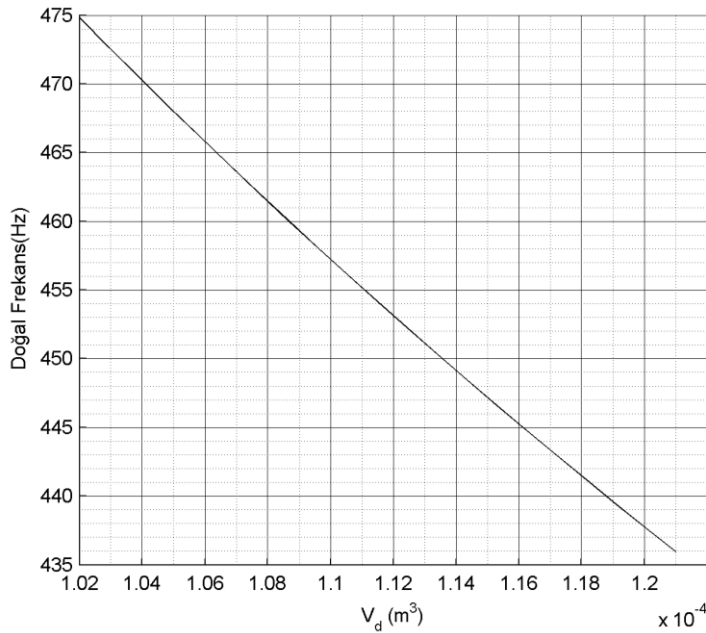
Dinamik basınç üreticinin tasarımında kullanılan 5 inç hoparlörün özelliklerinin belirlenmesi için hoparlörün üzerinde ölçümler yapılarak 3 boyutlu CAD modeli çıkartılmıştır. Diyafram kütlesi benzer boyutlara sahip ve teknik özellikleri belirtilmiş 5 inç’lik hoparlörler araştırılarak en yüksek diyafram kütlesi referans

alınarak seçilmiştir. Diyafram kütlelerinin artması kutunun rezonans frekansının düşmesi yönünde bir etkiye sebep olmaktadır. Hoparlör özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Hoparlör özellikleri.

Parametreler	Değer
m_d	0,01 kg
A_d	0,008 m ²
$V_d(\text{min})$	0,000102 m ³
P	101325 Pa
κ	1,4

Dinamik basınç üretende kullanılan hoparlörün sızdırmazlık elemanının sıkıştırıldığında oluşan kalınlıktan dolayı üretcin kapalı hacim tam olarak hesaplanamamıştır. Bu sebepten dolayı üretcin doğal frekansı ile kalınlığa bağlı hacimsel değişim ilişkisi grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir. Hacimsel değişimde 0 - 2 mm aralığında kalınlık değişimi incelenmiştir. Bu hacime deneylerde incelenen en yüksek çap ve uzunluktaki boru ve referans borunun hacmi eklenmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere hesaplanan doğal frekans deneysel çalışmada ilgilenilen en yüksek değer olan 400 Hz değerinden yüksektir. Sonuç olarak dinamik basınç üretende kullanılan hoparlör ile oluşturulan kapalı hacmin deneyler için uygun olduğu görülmüştür.



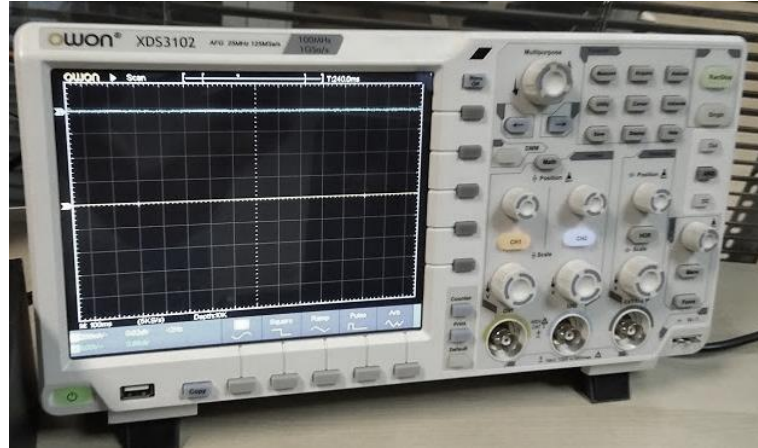
Şekil 3.2 : Üretcin doğal frekansı ve hacim değişimi.

3.1.2 Sistem komponentlerinin seçilmesi

Kapalı hacim içinde üretilecek basıncın genliğini istenilen değer aralığına ulaştırmak için sinüzoidal sinyali uygun bir amplifikatör yardımıyla güçlendirmek gerekmektedir. Bunun için amplifikatörün girişini uygun güç kaynağı ile besleyerek hoparlörün kapalı hacim içinde oluşturduğu sinüzoidal basıncın genliğinin istenilen değerde olması sağlanabilir. Amplifikatör olarak TPA3116DA modeli çıkış genliği manuel olarak ayarlanabilir bir devre kartı ve HP firmasına ait 6205B DC modeli güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 3.3). Sinüzoidal sinyal üretimi için OWON XDS3102 osiloskop kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.3: Amplifikatör ve güç kaynağı.

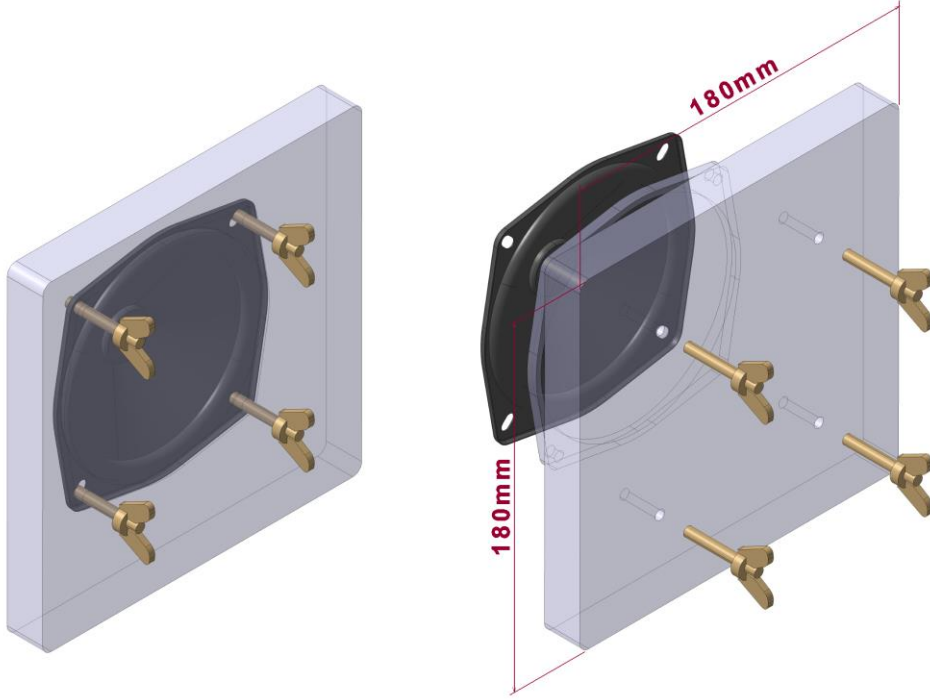


Şekil 3.4 : Osiloskop.

3.1.3 CAD modeli

Teorik olarak modellenen basınç üreticinde kullanılan hoparlöre uygun olarak kapalı ve sızdırmaz bir hacim oluşturmak için sızdırmazlık elemanın üzerine 5 mm kalınlığında ara flanş tasarlanmıştır.

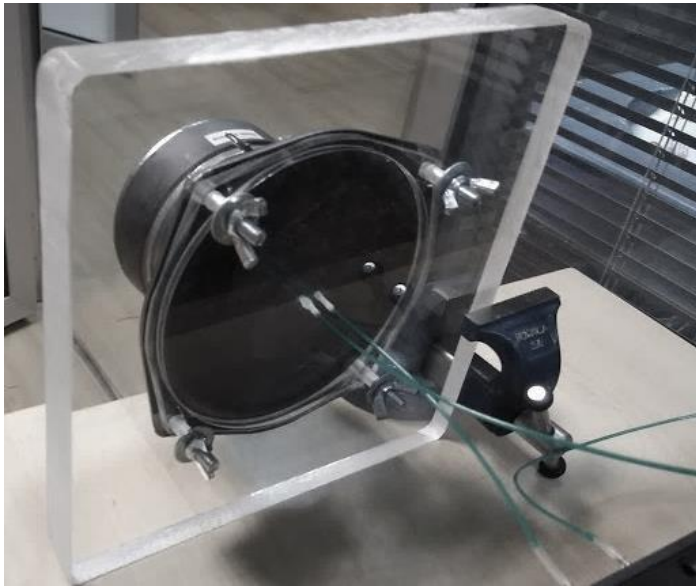
Basınç üretici kutusunun CAD tasarımı Şekil 3.5 gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Dinamik basınç üretici CAD modeli gösterimi.

3.2 Sistemin Üretimi ve Kurulumu

Basınç üreticinin üretimi için pleksi malzemeler kullanılmıştır. Oluşurulan kutunun önünde 20 mm kalınlığında pleksi levha kullanılarak yüksek frekansta kutunun rijitliğinin sağlanması amaçlanmıştır (Şekil 3.6).

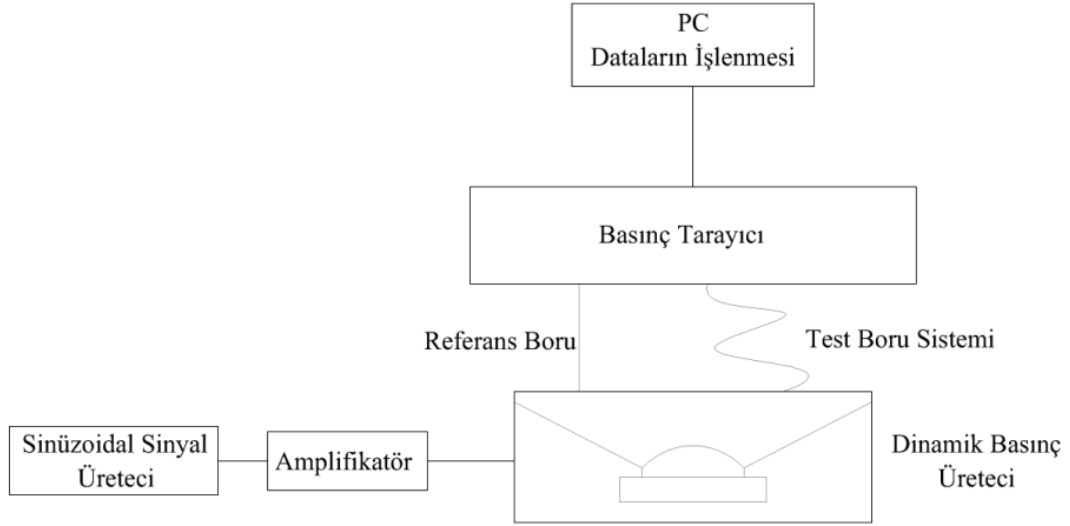


Şekil 3.6 : Dinamik basınç üretici.

4. DENEYSEL ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ

4.1 Borulama Etkisinin Ölçüm Sistemi

Deneyde kullanılacak olan ölçüm sistemi şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Dinamik basınç üreticinde genlik oranındaki bozulmanın test edileceği borulama sistemlerinin ve referans borunun sızdırmaz bir şekilde dinamik basınç üreticine ve basınç tarayıcısına bağlantısı yapılmalıdır. Osiloskop aracılığı ile üretilecek olan sinüzoidal sinyal amplifikatör yardımıyla güçlendirilerek hoparlöre aktarılacaktır. Dinamik basınç üreticinin frekansı 10 Hz’den 400 Hz’e kadar 10 Hz’lik adımlarla ayarlanarak basınç tarayıcısından borulama sistemi için 40 set, 3’er kez tekrarlı deney datası toplanacaktır. Her set için ölçüm süresi 6 sn ve örnekleme frekansı 800 Hz olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1 : Ölçüm sistemi şeması.

Deneyler sırasında ortamın sıcaklık, basınç ve bağıl nem değerleri Sensor Tech markasına ait cihaz ile deney başlangıcı ve sonunda ölçülmüştür.

4.1.1 Basınç tarayıcısı

Basınç ölçümünde kullanılacak olan basınç tarayıcısı (Şekil 4.2) ± 2 kPa gösterge basıncını 800 Hz örnekleme süresi ile data toplayabilmektedir.



Şekil 4.2 : Basınç tarayıcısı.

4.2 Deneysel Sonuçlarının İşlenmesi

4.2.1 FFT analizi

Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) algoritması ile zamana bağlı alınan ölçüm sonuçları zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüştürülebilir. FFT analizi sonucunda deney datasının içerdiği frekansa göre genlikler , üretilen sinüzoidal basınçların referans ve test boruları sonundaki sensörde ölçülen genlik oranı bulunmuştur.

Deneysel sonuçlarının işlenmesinde MATLAB programının FFT fonksiyonu kullanılmıştır (Denklem 4.1 - 4.2). 10Hz aralıkla üretilen sinüzoidal basıncın k. frekans değerine ait genlik denklem 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P(k) = \sum_{j=1}^n P(j)W_n^{(j-1)(k-1)} \quad (4.1)$$

$$W_n = e^{(-2\pi i)/n} \quad (4.2)$$

$$G_k = \frac{2}{n} |P_k| \quad (4.3)$$

FFT sonucunda üretilen sinüzoidal basınca ait faz gecikmesi Denklem 4.4 ile bulunabilir.

$$\theta_{lag} = \tan^{-1} \left(\frac{Im(P_k)}{Re(P_k)} \right) \quad (4.4)$$

Deney sonuçlarının her bir frekansa ait genlik oranları, test borusunun referans boruya oranı denklem 4.5 ile hesaplanmıştır. Faz gecikmesi ise denklem 4.6 ile bulunmuştur.

$$AR = \frac{G_L}{G_{ref}} \quad (4.5)$$

$$\theta_{lag} = \theta_{lag_L} - \theta_{lag_{ref}} \quad (4.6)$$





5. BORULAMA SİSTEMLERİNİN ETKİLERİ

Teoriye dayalı oluşturulmuş olan yazılım yardımıyla farklı boru uzunlukları, çapları ve ortam değişkenleri sonucundaki borulama sistemlerinin genlik oranı ve faz gecikmesi etkilerinin incelenmesi yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan kuru havanın özellikleri sırasıyla sıcaklık, basınç, yoğunluk, özgül ısı oranı, dinamik viskozite, termal difüzyon ve ses hızı için Çizelge 5.1'deki değerler alınmıştır. Sensör hacmi 100 mm^3 ve sensör diyafram sapması ihmal edilerek hesaplamalar yapılmıştır.

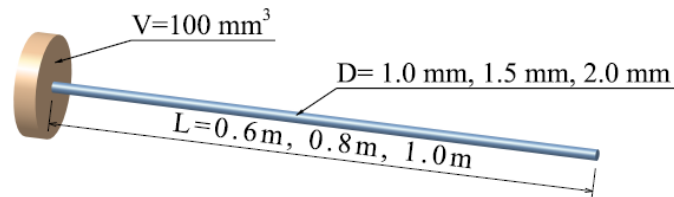
Çizelge 5.1 : Ortam parametreleri.

Parametre	Değer
T	20 °C
P	101325 Pa
R	287
ρ	1,204 kg/m ³
γ	1,4
μ	$1,821 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
h	$2,113 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Pr	0,716
c	343,24 m/s

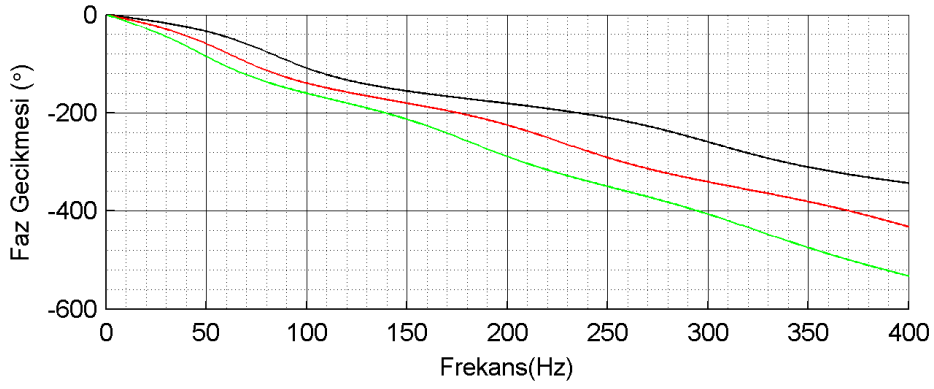
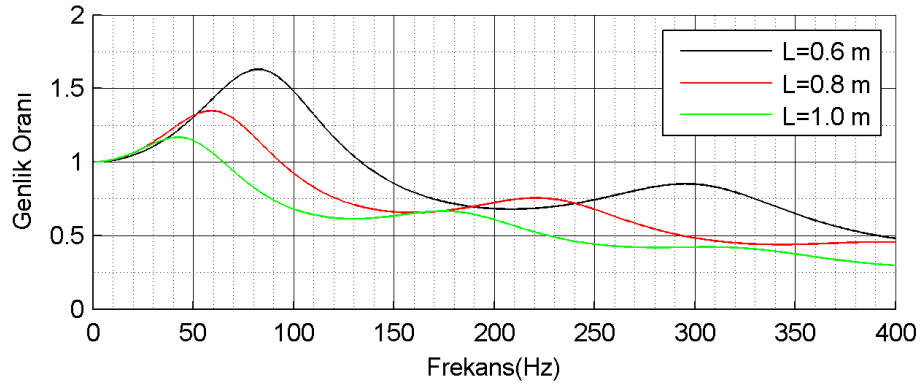
5.1 Parametrelerin Etkisi

5.1.1 Boru uzunluğu ve çapı.

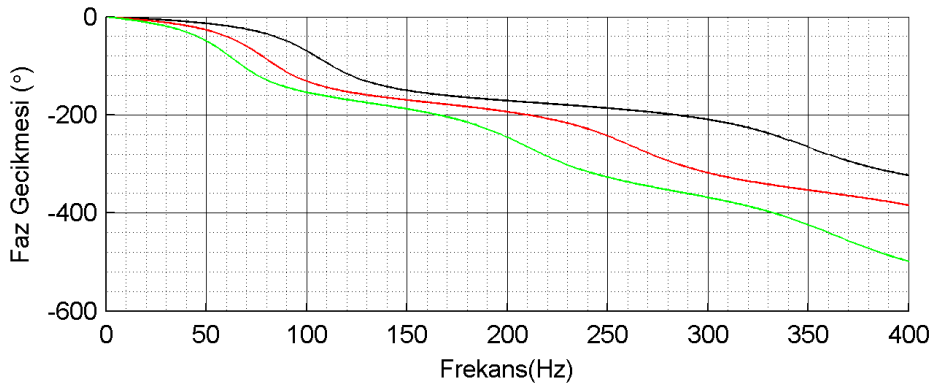
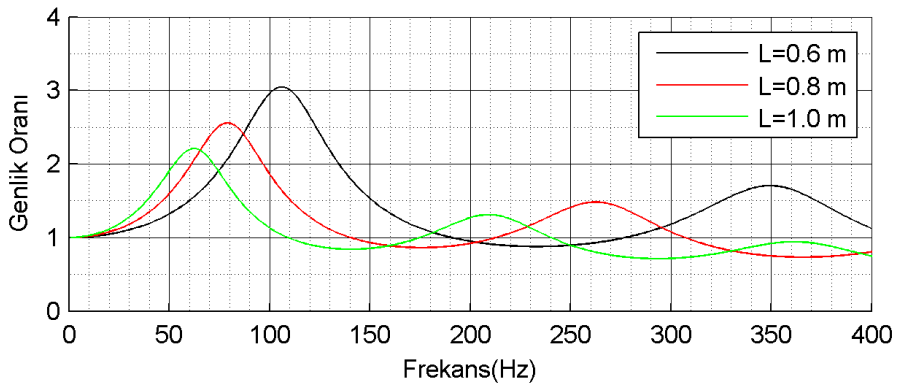
Farklı uzunluk ve çaplardaki borulama sistemleri (Şekil 5.1) için frekansa göre genlik oranı ve fazdaki gecikme Şekil 5.2 - Şekil 5.5 arasında sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde; boru uzunluğu arttığında ve boru çapı azaldığında rezonans frekanslarının sönümlendiği ve genlik oranının azaldığı görülebilir.



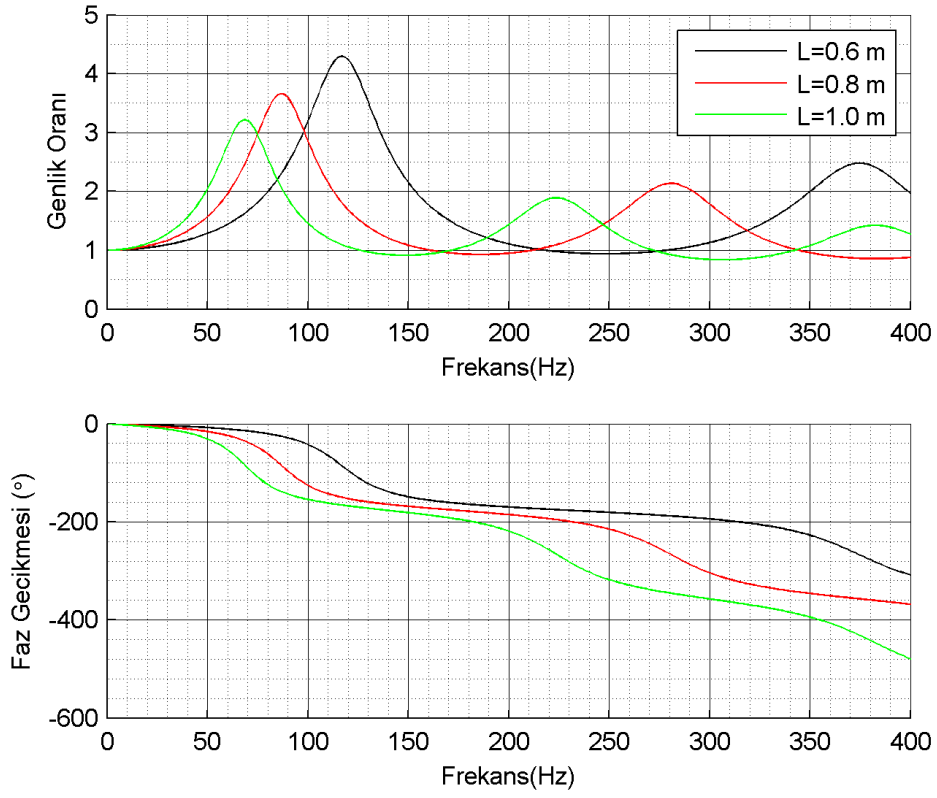
Şekil 5.1 : Borulama sistemi ölçüleri.



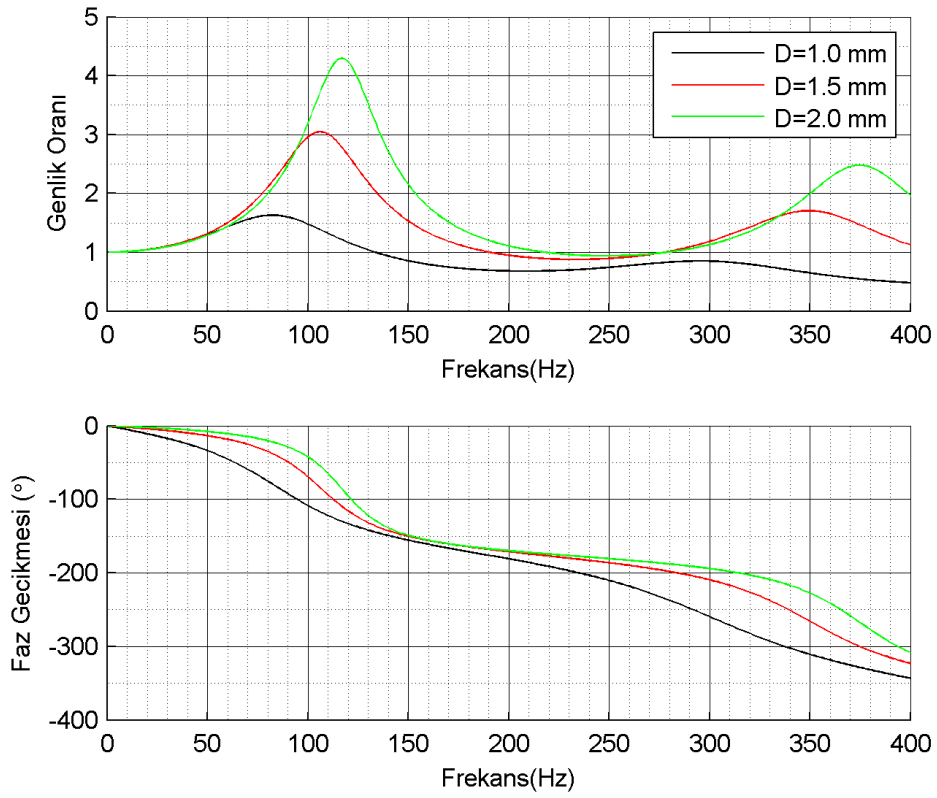
Şekil 5.2 : Farklı boru uzunluklarının karşılaştırılması (D=1,0 mm).



Şekil 5.3 : Farklı boru uzunluklarının karşılaştırılması (D=1,5 mm).



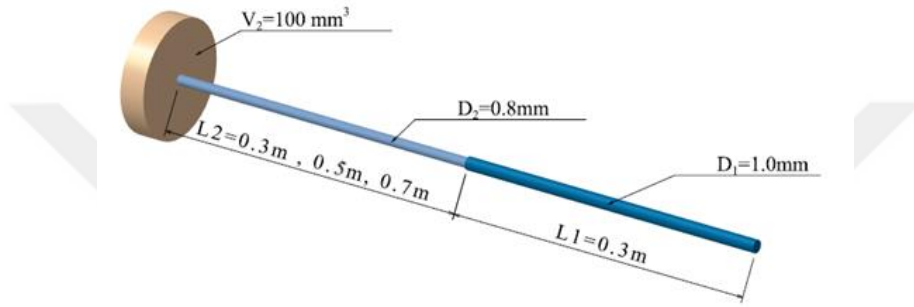
Şekil 5.4 : Farklı boru uzunluklarının karşılaştırılması (D=2,0 mm).



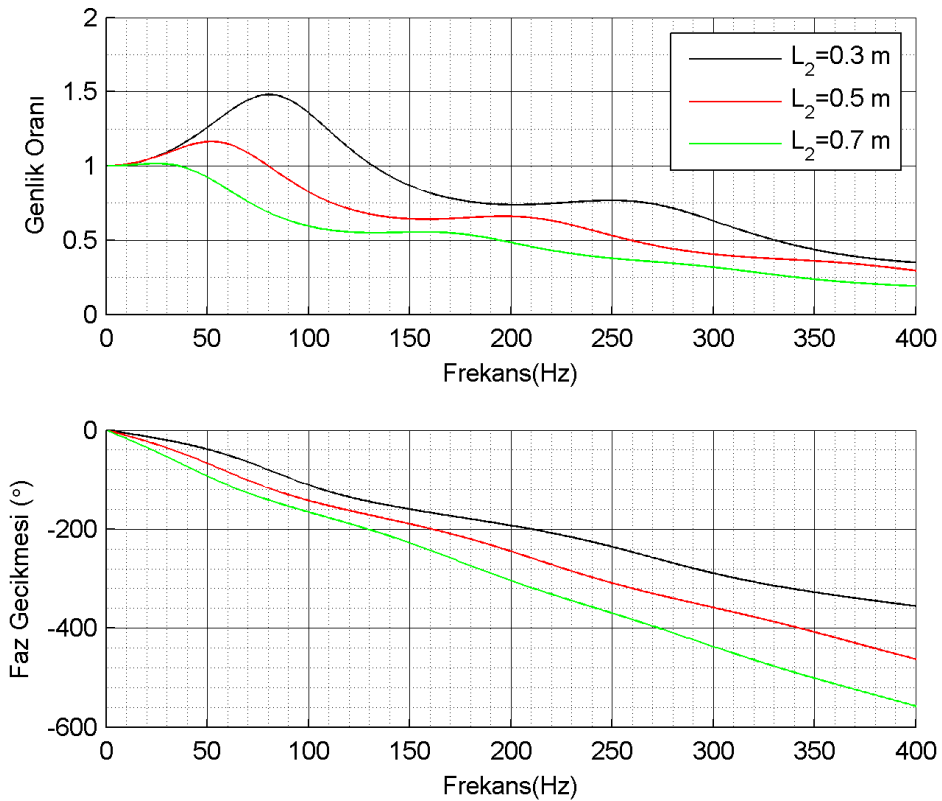
Şekil 5.5 : Farklı boru iç çaplarının karşılaştırılması (L=0,6 m).

5.1.2 Kademeli borulama sistemleri

Dinamik basınç ölçümlerinde; ölçümü yapılacak olan modelin ölçülen noktadan ölçüm sistemi girişine kadar borulama sisteminde kullanılan boruların çapları ve uzunlukları değişkenlik gösterebilmektedir. Boruların uzunluğunun ve çaplarının değişimi için örnek olarak seçilen sistemlerin ölçüleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Farklı özellikteki kademeli borulamanın genlik oranı ve faz gecikmesi Şekil 5.7 ve Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

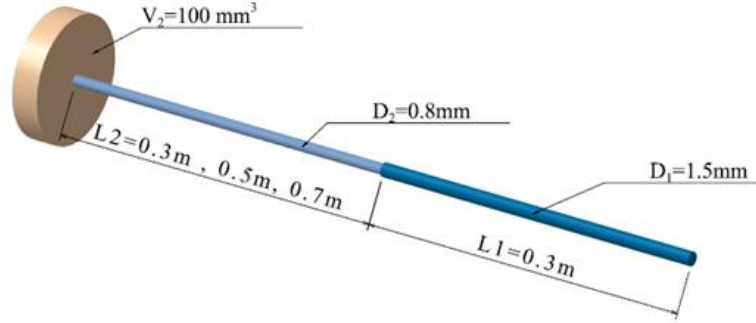


Şekil 5.6: Kademeli borulama sistemi ölçüleri.

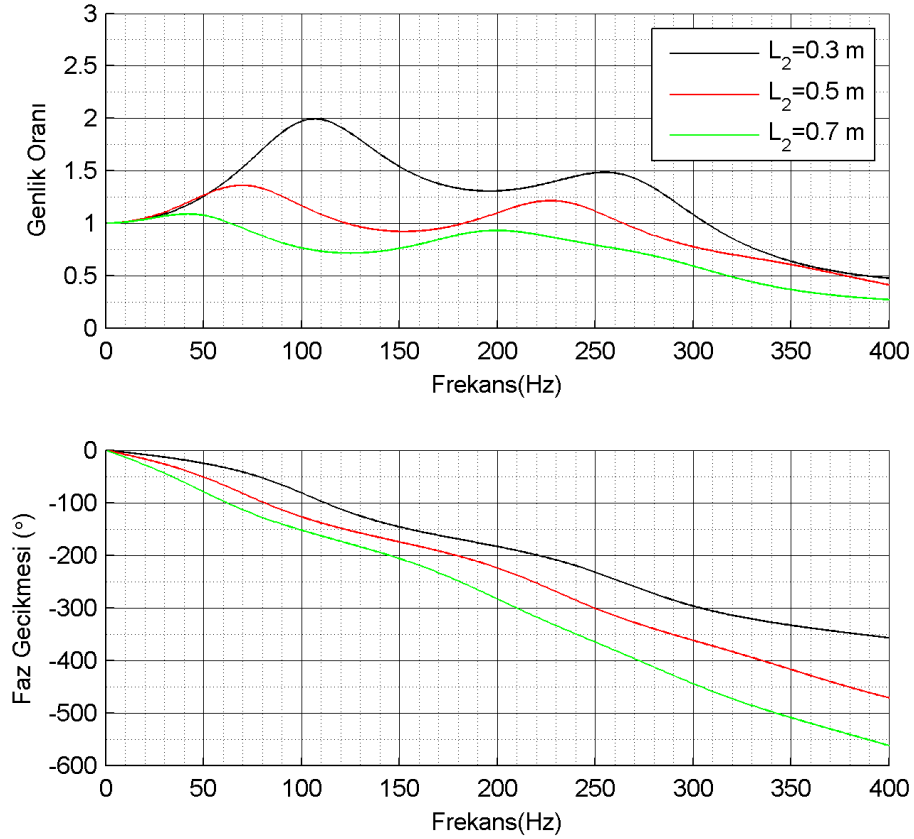


Şekil 5.7: Kademeli borulama sistemlerinin karşılaştırılması (D₁=1,0 mm).

Borunun 2. kademesinde girişine göre daha küçük iç çapta boru kullanılması sabit çapta devam eden boruyla karşılaştırıldığında frekansa göre genlik oranlarını azalttığı görülmektedir.



Şekil 5.8 : Kademeli borulama sistemi ölçüleri.



Şekil 5.9 : Kademeli borulama sistemlerinin karşılaştırılması ($D_1=1,5$ mm).

Borunun girişinde daha geniş iç çapta boru kullanılması 150 Hz ve sonrasındaki frekanslarda genlik oranlarında azalmayı yükseltme yönünde etkilediği grafiklerden görülmektedir. Faz gecikmesi uzunluğa daha fazla bağlı olduğu için kademeli iki boru sistemi içinde çok fazla değişmediği görülmektedir.

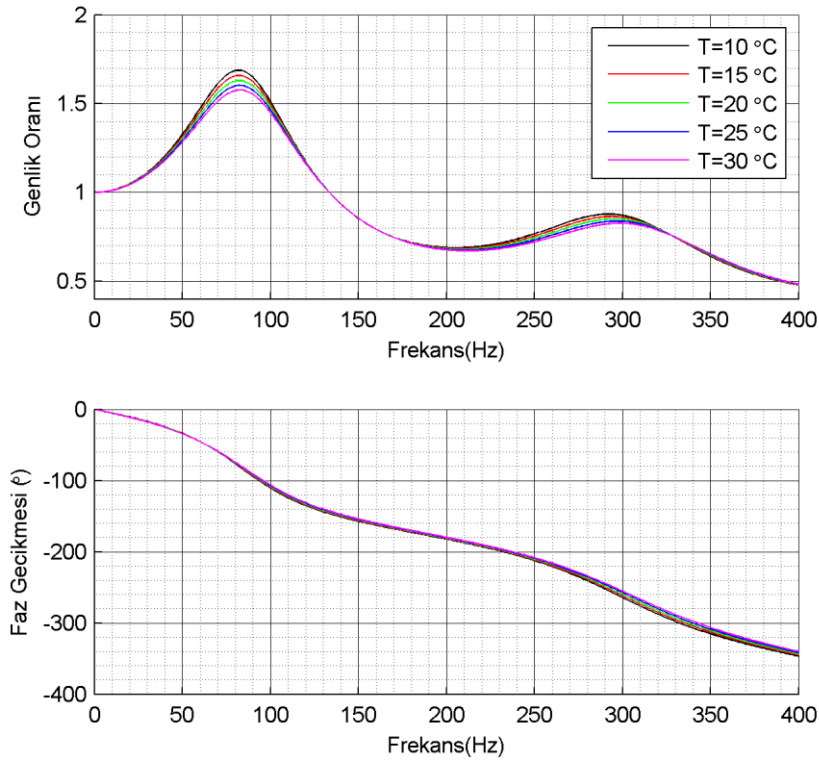
5.1.3 Ortam değişkenleri

Dinamik basınç ölçümünün yapıldığı ortamdaki havanın sahip olduğu sıcaklık ve basınç gibi değişkenlerin genlik oranındaki bozulma üzerindeki etkisi bozulmanın hesaplandığı yazılımdaki ortam parametreleri değiştirilerek gösterilebilir. Hesaplamalarda boru uzunluğu 0,6 m, boru iç çapı 1 mm ve sensör hacmi 100 mm³ olarak alınmıştır.

Sıcaklık değişimine bağlı olarak hesaplamada kullanılan kuru havanın özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Farklı sıcaklıkların genlik oranı ve faz gecikmesi üzerindeki etkisi Şekil 5.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Havanın farklı sıcaklara göre sabit basınçtaki özellikleri.

T (°C)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m·s)	h (m ² /s)	Pr	c (m/s)
10	1,247	$1,772 \times 10^{-5}$	$1,981 \times 10^{-5}$	0,718	337,33
15	1,225	$1,797 \times 10^{-5}$	$2,047 \times 10^{-5}$	0,717	340,30
20	1,204	$1,821 \times 10^{-5}$	$2,113 \times 10^{-5}$	0,716	343,24
25	1,184	$1,845 \times 10^{-5}$	$2,180 \times 10^{-5}$	0,715	346,15
30	1,164	$1,868 \times 10^{-5}$	$2,248 \times 10^{-5}$	0,714	349,04



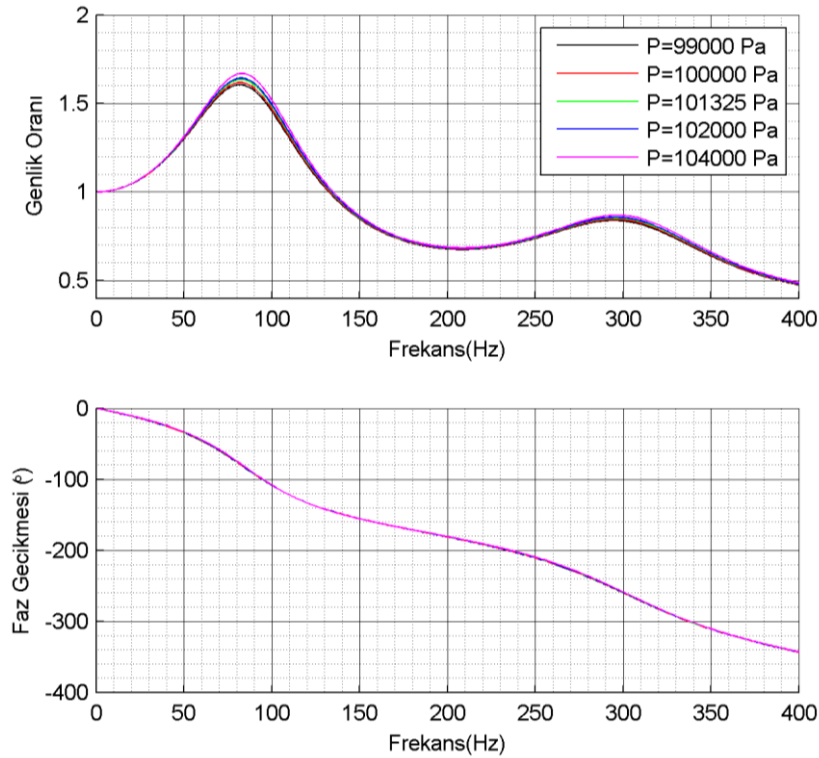
Şekil 5.10 : Sıcaklık değişiminin etkisi.

Sıcaklık değişiminin genlik oranını üzerinde etkisi incelendiğinde, düşük sıcaklıkların rezonans frekanslarındaki genliği arttırdığı görülmektedir. Ortam sıcaklığı düştükçe 200 Hz üzerindeki frekanslardaki faz gecikmesi de artmaktadır. Sabit basınçta farklı sıcaklıklarda frekansa göre genlik oranları incelendiğinde genlik oranındaki değişim 20°C göre bağıl olarak en yüksek %4'tür.

Sabit sıcaklıkta açık hava basıncının değişimine bağlı olarak hesaplamada kullanılan kuru havanın özellikleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Farklı sıcaklıklardaki borulamanın etkisi Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Havanın farklı basınçlara göre sabit sıcaklıktaki özellikleri.

P (Pa)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m·s)	h (m ² /s)	Pr	c (m/s)
99000	1,176	$1,813 \times 10^{-5}$	$2,162 \times 10^{-5}$	0,713	343,24
100000	1,188	$1,813 \times 10^{-5}$	$2,141 \times 10^{-5}$	0,713	343,24
101325	1,204	$1,813 \times 10^{-5}$	$2,113 \times 10^{-5}$	0,713	343,24
102000	1,212	$1,813 \times 10^{-5}$	$2,099 \times 10^{-5}$	0,713	343,24
104000	1,236	$1,813 \times 10^{-5}$	$2,059 \times 10^{-5}$	0,713	343,24



Şekil 5.11 : Basınç değişiminin etkisi.

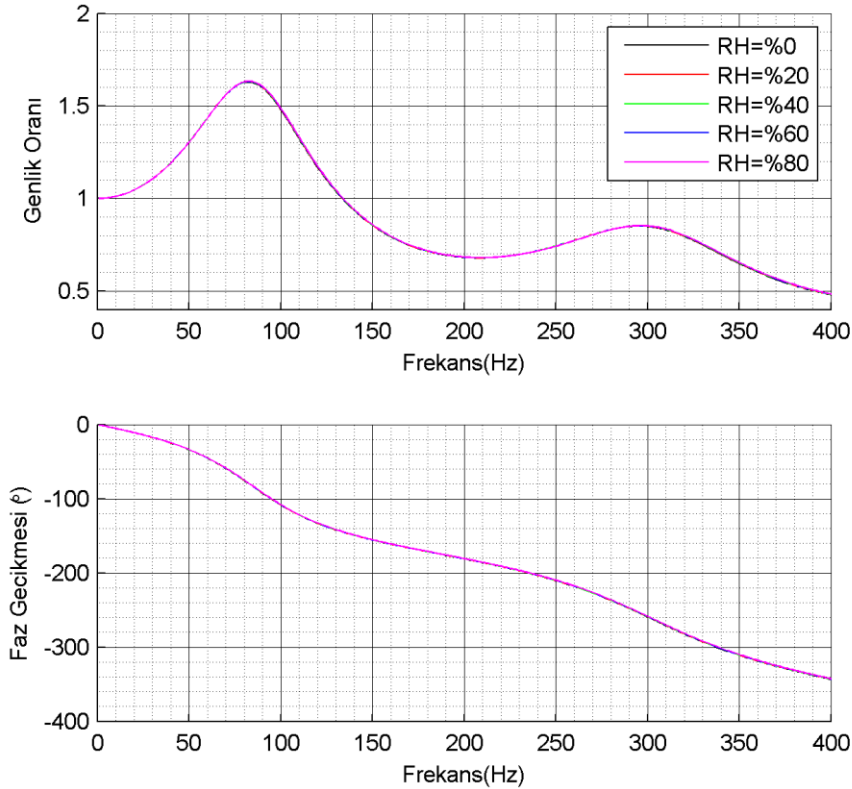
Sabit sıcaklıkta incelenen aralıktaki açık hava basıncının azalması sonucunda rezonans frekanslarındaki genliğin azaldığı ve faz gecikmesindeki ortam basıncının etkisinin az olduğu grafikte görülmektedir. Basınç değişiminin frekansa göre genlik

oranındaki değişimi incelendiğinde 101325 Pa'a göre bağıl olarak genlik oranındaki değişim en yüksek %2,3'tür.

Sabit sıcaklıkta ve basınçta farklı bağıl nem değişimine bağlı olarak hesaplamada kullanılan havanın özellikleri izelge 5.4'te verilmiştir. Değerlerin hesaplanmasında Tsilingiris, P. [19] çalışmasındaki katsayılar kullanılmıştır. Farklı bağıl neme göre borulamannın etkisi Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 : Havanın farklı bağıl neme göre zellikleri.

RH (%)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m·s)	h (m ² /s)	Pr	c (m/s)
0	1,204	$1,821 \times 10^{-5}$	$2,113 \times 10^{-5}$	0,716	343,24
20	1,202	$1,817 \times 10^{-5}$	$2,108 \times 10^{-5}$	0,716	343,49
40	1,200	$1,814 \times 10^{-5}$	$2,103 \times 10^{-5}$	0,717	343,74
60	1,197	$1,810 \times 10^{-5}$	$2,098 \times 10^{-5}$	0,718	343,99
80	1,195	$1,807 \times 10^{-5}$	$2,094 \times 10^{-5}$	0,718	344,24

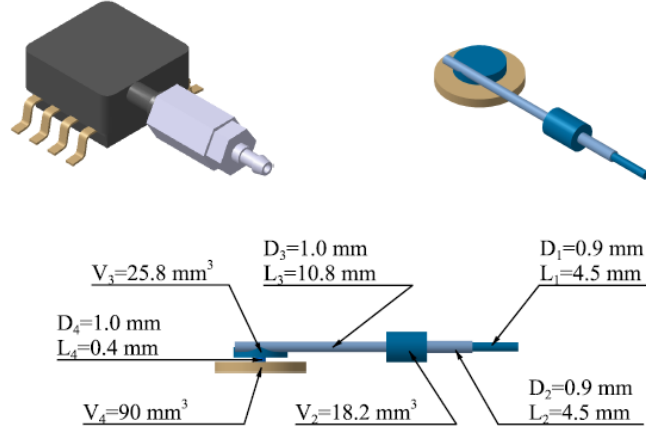


Şekil 5.12 : Bağıl nem değişiminin etkisi.

Sabit sıcaklıkta ve basınçta %80 bağıl nemli havadaki frekansa göre genlik oranı incelendiğinde kuru havaya göre bağıl olarak %1,1'e kadar değişmektedir.

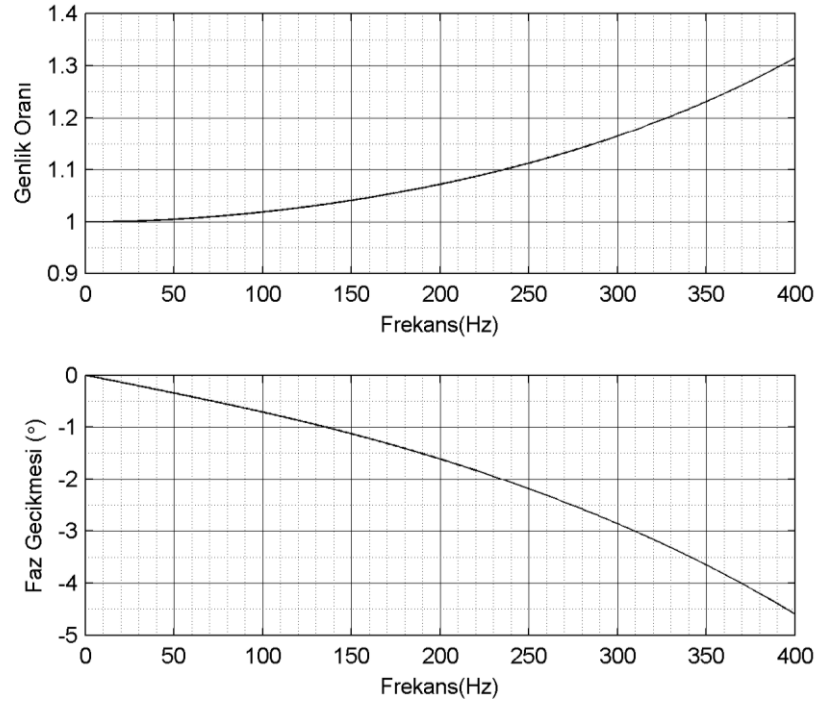
5.2 Ölçüm Sistemi Geometrisinin Etkisi

Basınç tarayıcı sisteminde kullanılan sensörün geometrisinden kaynaklı bozulmanın deneyler öncesi incelenmesi ve deneysel çalışmada karşılaştırma olarak kullanılacak olan teorik sonuçlarına dahil edilmesi gerekmektedir. Basınç tarayıcısında kullanılan sensörün girişinden çıkışına kadar olan hacimdeki değişimin geometrik özellikleri Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : Sensörün iç ölçüleri ve hacimleri.

Basınç tarayıcısının sensörün iç geometrisinden kaynaklı frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi Şekil 5.14'te verilmiştir ($T=20^\circ\text{C}$, $P=101325 \text{ Pa}$, $RH=\%0$).



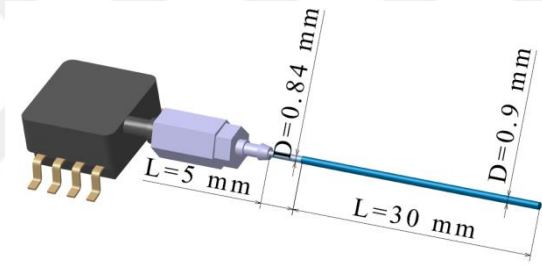
Şekil 5.14 : Basınç sensörünün frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.

Grafiğe göre frekans yükseldikçe genlik oranının %32'ye kadar yükseldiği görülmektedir. Faz gecikmesi ise uzunluğa bağlı olduğundan faz değişimi azdır.

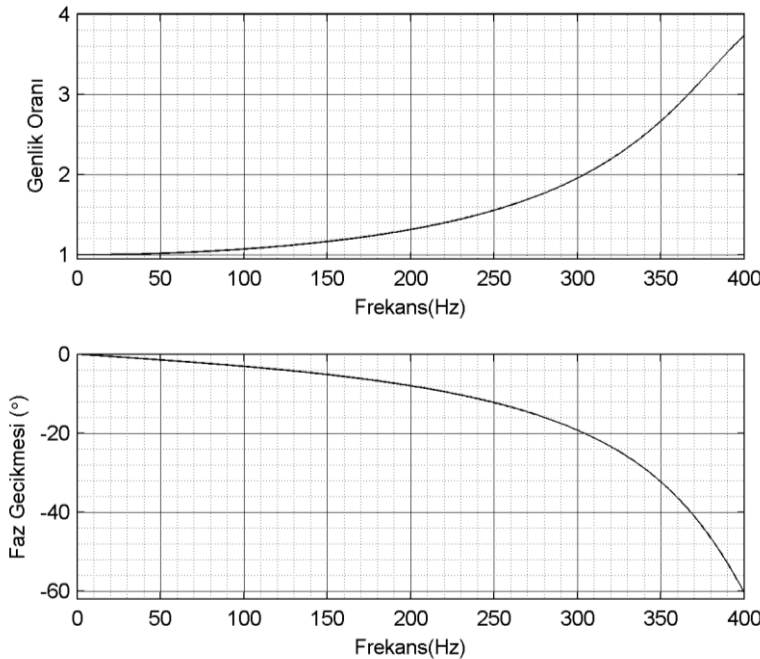
5.3 Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Referans Borular

Dinamik basınç üretici kullanılan deneylerde test edilecek olan borulama sistemlerinin genlik oranındaki bozulma ve faz gecikmesinin karşılaştırılması için farklı özellikte referans borular kullanılmıştır. Referans boru-2'de optimizasyon sonucunda özellikleri bulunan kısıtlayıcı kullanılarak genlik oranındaki bozulma azaltılmıştır. Test edilen boruların etkilerinin araştırılması için dinamik basınç üreticisine basınç sensörü direk olarak bağlanamadığından bu yöntem tercih edilmiştir.

Referans boru-1'in, geometrik özellikleri Şekil 5.15'te ve frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi Şekil 5.16'da verilmiştir ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=101325\text{ Pa}$, $\text{RH}=\%0$).



Şekil 5.15 : RBS-1 geometrik özellikleri.



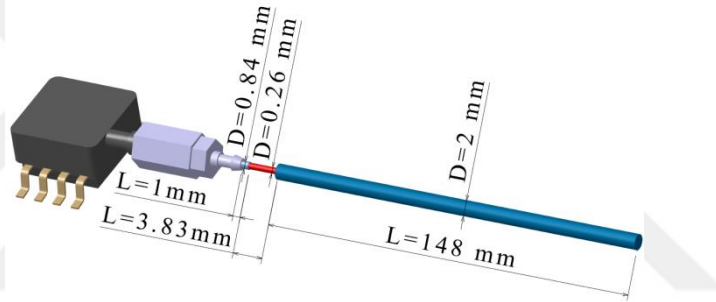
Şekil 5.16 : RBS-1 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.

Referans boru sistemi-2 için verilen geometrik sınır şartları ve optimizasyon sonuçları Çizelge 5.5’te verilmiştir ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=101325$ Pa, $\text{RH}=\%0$).

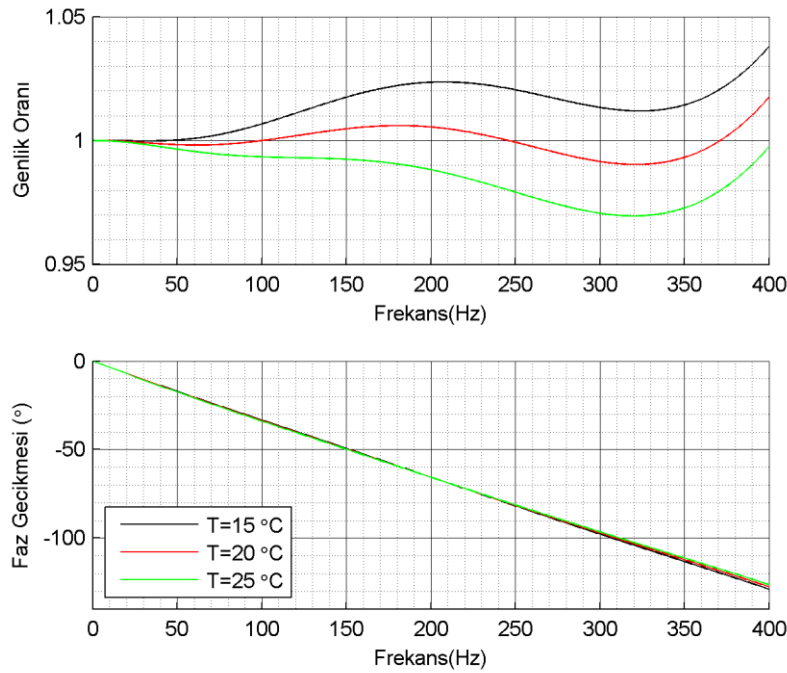
Çizelge 5.5 : RBS-2 optimizasyon sınır şartları.

Boru Kademesi	D	L_{\min}	L_{\max}	L_{opti}
1	2,00 mm	30 mm	200mm	148 mm
Kısıtlayıcı	0,26 mm	1 mm	10 mm	3,83 mm
2	0,84 mm	1 mm	5 mm	1 mm

RBS-2 üretime uygun özellikleri Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Referans borunun optimizasyonu ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=101325$ Pa, $\text{RH}=\%0$) sonucundaki frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesin farklı sıcaklıklara göre değişimi Şekil 5.18’de verilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda uzunluğu belirlenen kısıtlayıcının farklı sıcaklıklarda da genlik bozulmasını 1,05-0,95 aralığında tuttuğu görülmektedir.



Şekil 5.17 : RBS-2 geometrik özellikleri.



Şekil 5.18 : RBS-2 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.

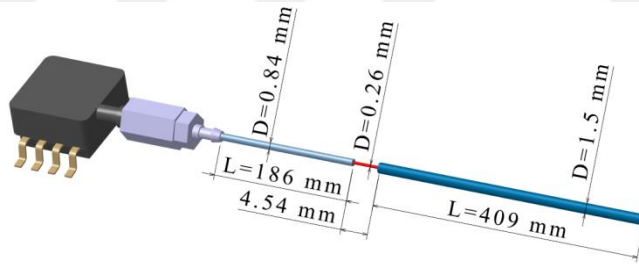
5.4 Kısıtlayıcı Borulama Sistemlerinin Belirlenmesi

0,6 m ve 0,8 m'lik borulama sistemi için 1,5 mm'lik iç çapa sahip boru sisteminin 1. kademesi için seçilmiştir. 2. kademe ise 0,84 mm iç çapa sahip silikon boru seçilmiştir.

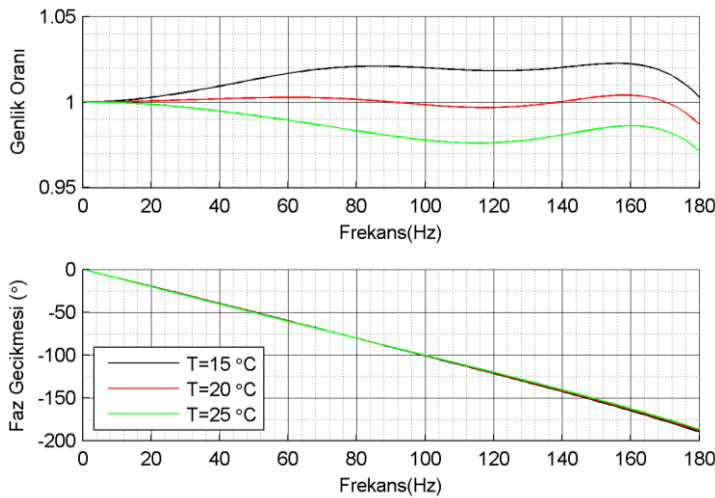
Kısıtlayıcı boru sistemi-1 0-180 Hz ve toplam boru uzunluğunun 0,6 m olması için optimize edilmiştir ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=101325$ Pa, $\text{RH}=\%0$). Boru sistemi geometrik sınır şartları ve optimizasyon sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Optimizasyon sonucunda kısıtlayıcı ve borunun ortaya çıkan uzunluk değerleri üretime uygun olarak özellikleri Şekil 5.19'da verilmiştir. Bu ölçü değerleri kullanılarak KBS-1'in frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesinin farklı sıcaklıklara göre değişimi Şekil 5.20'de verilmiştir.

Çizelge 5.6 : KBS-1 optimizasyon sınır şartları ve sonuçları.

Boru Kademesi	D	L_{\min}	L_{\max}	L_{opti}
1	1,50 mm	50mm	550mm	408,84 mm
Kısıtlayıcı	0,26 mm	1 mm	10 mm	4,54 mm
2	0,84 mm	50mm	550mm	186,62 mm



Şekil 5.19 : KBS-1 ölçüleri.

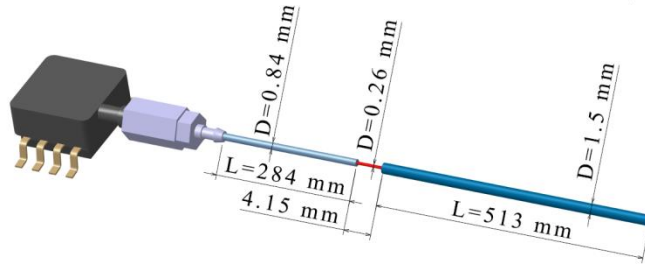


Şekil 5.20 : KBS-1 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.

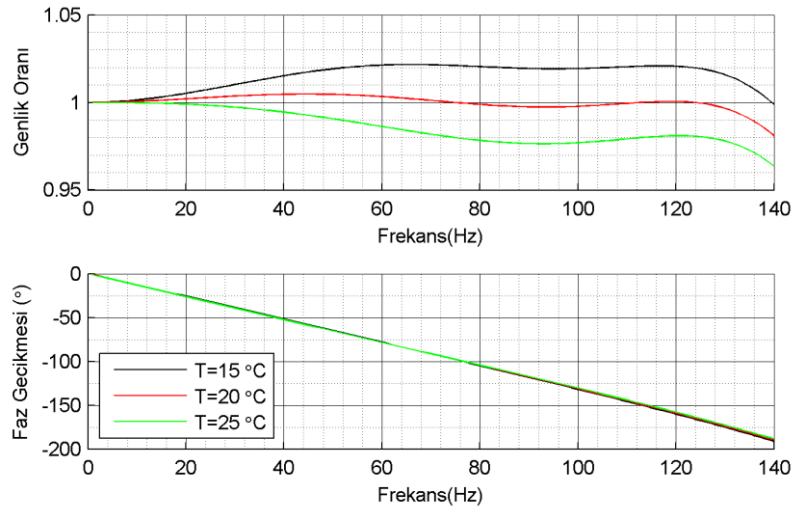
Kısıtlayıcı boru sistemi-2 0-140 Hz ve toplam boru uzunluğunun 0,8 m olması için optimize edilmiştir (T=20°C, P=101325 Pa, RH=%0). Boru sistemi geometrik sınır şartları ve optimizasyon sonuçları Çizelge 5.7’de verilmiştir. Optimizasyon sonucunda kısıtlayıcı ve borunun ortaya çıkan uzunluk değerleri üretime uygun olarak Şekil 5.21’de verilmiştir. KBS-2’nin frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesinin farklı sıcaklıklara göre değişimi Şekil 5.22’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : KBS-2 optimizasyon sınır şartları ve sonuçları.

Boru Kademesi	D	L _{min}	L _{mak}	L _{opti}
1	1,50 mm	50mm	750mm	512,75 mm
Kısıtlayıcı	0,26 mm	1 mm	10 mm	4,15 mm
2	0,84 mm	50mm	750mm	283,1 mm



Şekil 5.21 : KBS-2 ölçüleri.



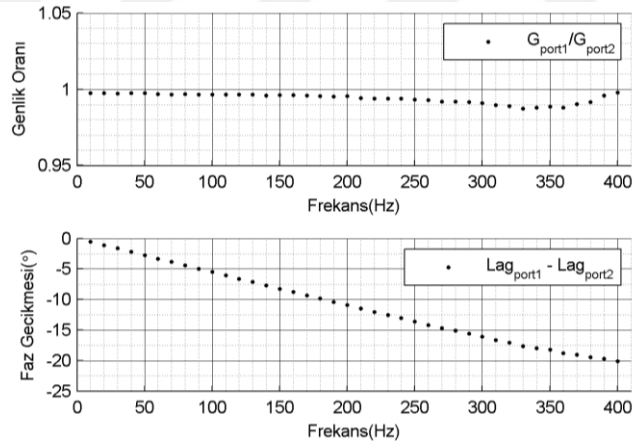
Şekil 5.22 : KBS-2 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.



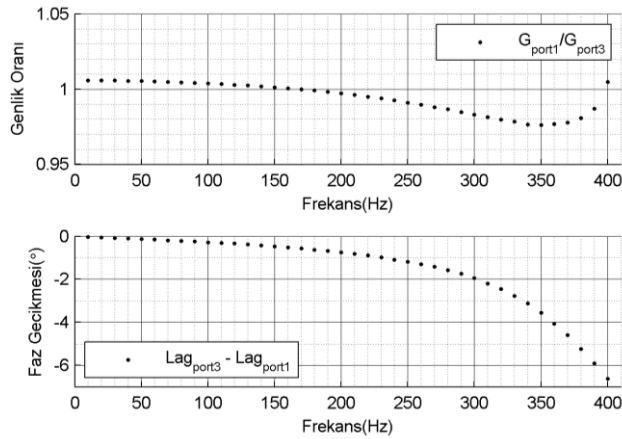
6. BORU SİSTEMLERİNİN ETKİLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

6.1 Dinamik Basınç Üretici Ölçümleri

Dinamik basınç üreticinin çıkışları eşit olarak 35 mm uzunlukta iki boru ile basınç tarayıcının girişleri port 1-2 ve port 1-3'e bağlanarak 3'er kez 6 sn'lik ölçüm yapılmıştır. Basınç tarayıcının portları arasındaki genlik oranı ve faz gecikmesi ölçüm ortalamaları Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verilmiştir. Portlar arasındaki frekansa göre genlik oranı en düşük 0,976 en yüksek 1,006 olarak ölçülmüştür. Port 1-2 arasında faz gecikmesi 400 Hz'de 20°'ye kadar çıkarken Port 1-3'te 6,6°'de kalmıştır. Basınç tarayıcının kanalları arasındaki faz gecikmesi boru sistemlerinin test edildiği deney sonuçlarında düzeltilerek sunulmuştur.



Şekil 6.1 : Basınç tarayıcı port 1-2 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.



Şekil 6.2 : Basınç tarayıcı port 1-3 frekansa göre genlik oranı ve faz gecikmesi.

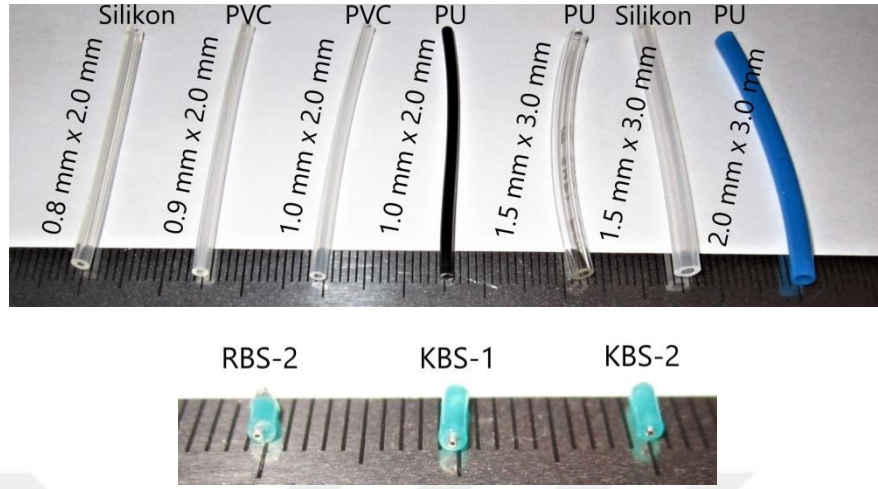
6.2 Farklı Boru Tipleri için Ölçümler

Dinamik basınç üreticisine bağlanan referans ve farklı özellikteki test borularının ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 6.1’de test edilen boruların özellikleri verilmiştir. Borulara verilen tahmini malzeme sertlik derecelendirmesinde 1 değeri yumuşak ve 5 değeri ise rijit olduğunu göstermektedir. Deney-1 - Deney-21’de test edilen tüm borular 5 mm uzunluğunda ve 0,84 mm çapında silikon boru ile basınç tarayıcı portuna bağlanmıştır. Deneyler 1-3 için RBS-1, deneyler 4-23 için RBS-2 kullanılmıştır. Deneyler 1-3 basınç tarayıcı port 1-2’ye, deneyler 4-23 basınç tarayıcı port 1-3’e bağlanarak yürütülmüştür.

Çizelge 6.1 : Test edilen boruların özellikleri.

Deney No.	Uzunluk	İç Çap	Dış Çap	Referans Boru	Malzeme	Sertlik 1-5
1	600 mm	0,9 mm	2,0 mm	RBS-1	PVC	3
2	800 mm					
3	1000 mm					
4	600 mm	0,9 mm	2,0 mm	RBS-2		
5	800 mm					
6	1000 mm					
7	600 mm	1,0 mm	2,0 mm	RBS-2	PVC	3
8	800 mm					
9	1000 mm					
10	600 mm	1,0 mm	2,0 mm	RBS-2	Polüretan(PU)	2
11	800 mm					
12	1000 mm					
13	600 mm	1,5 mm	3,0 mm	RBS-2	Polüretan(PU)	2
14	800 mm					
15	1000 mm					
16	600 mm	1,5 mm	3,0 mm	RBS-2	Silikon	1
17	800 mm					
18	1000 mm					
19	600 mm	2,0 mm	3,0 mm	RBS-2	Polüretan(PU)	2
20	800 mm					
21	1000 mm					
22	600 mm	1,5 mm	3,0 mm	RBS-2	Polüretan-Silikon	-
23	800 mm	0,8 mm	2,0 mm			

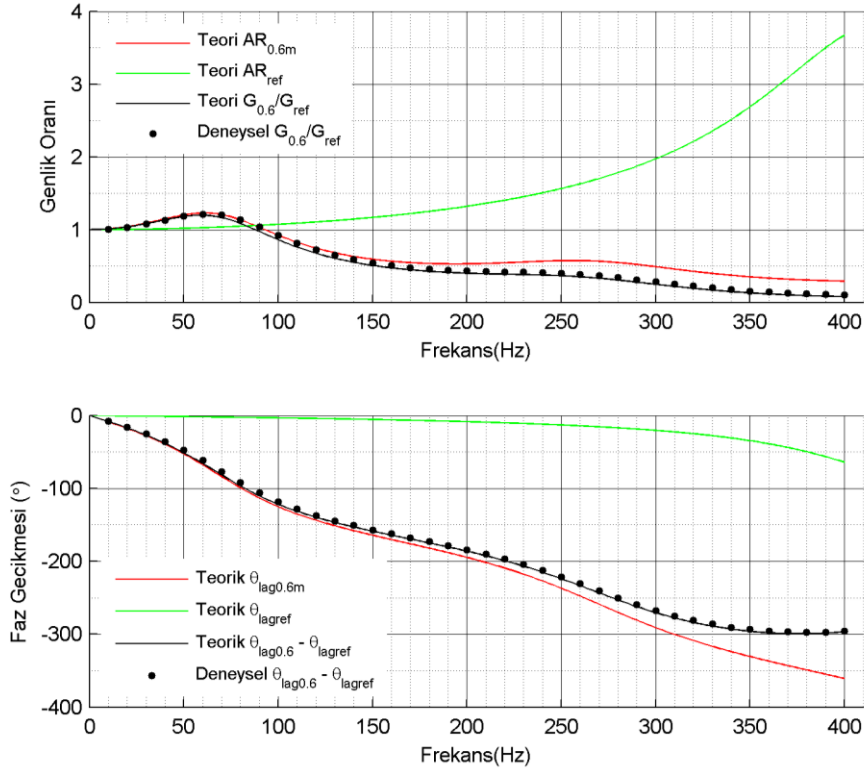
Deneysel olarak kullanılan borular ile referans boru sistemi 2, kısıtlayıcı boru sistemi 1 ve 2’de kullanılan kısıtlayıcılar Şekil 6.3’te verilmiştir.



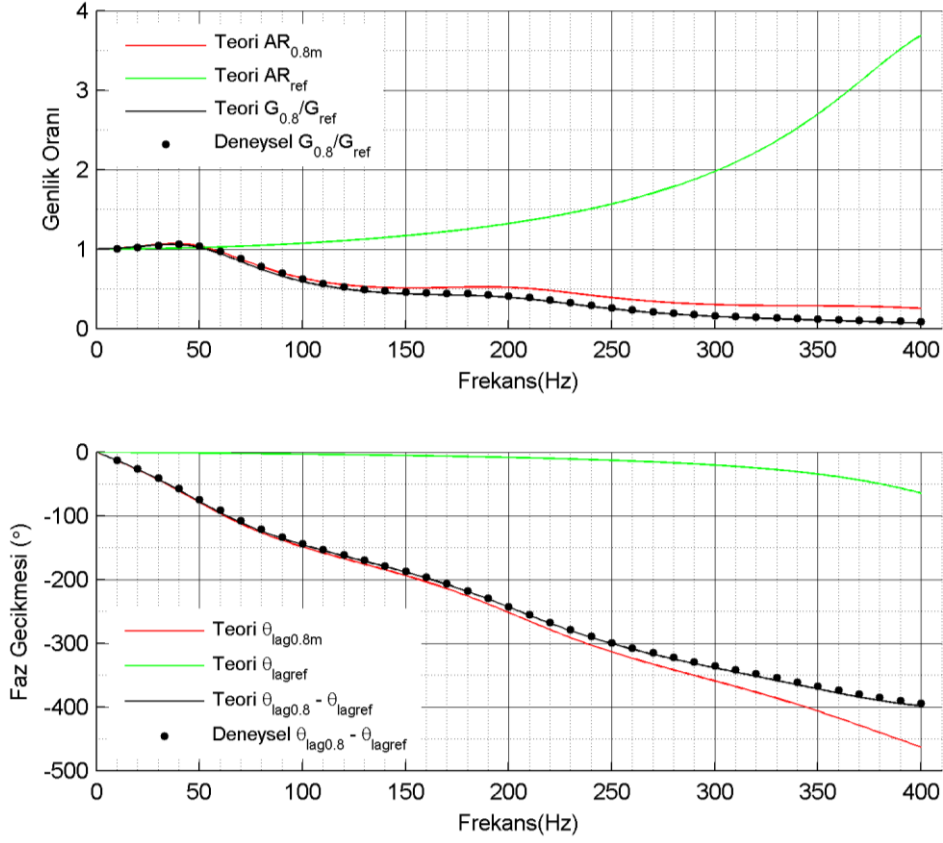
Şekil 6.3 : Deneysel olarak kullanılan borular ve kısıtlayıcılar.

6.2.1 Ölçüm sonuçlarının teori ile karşılaştırılması

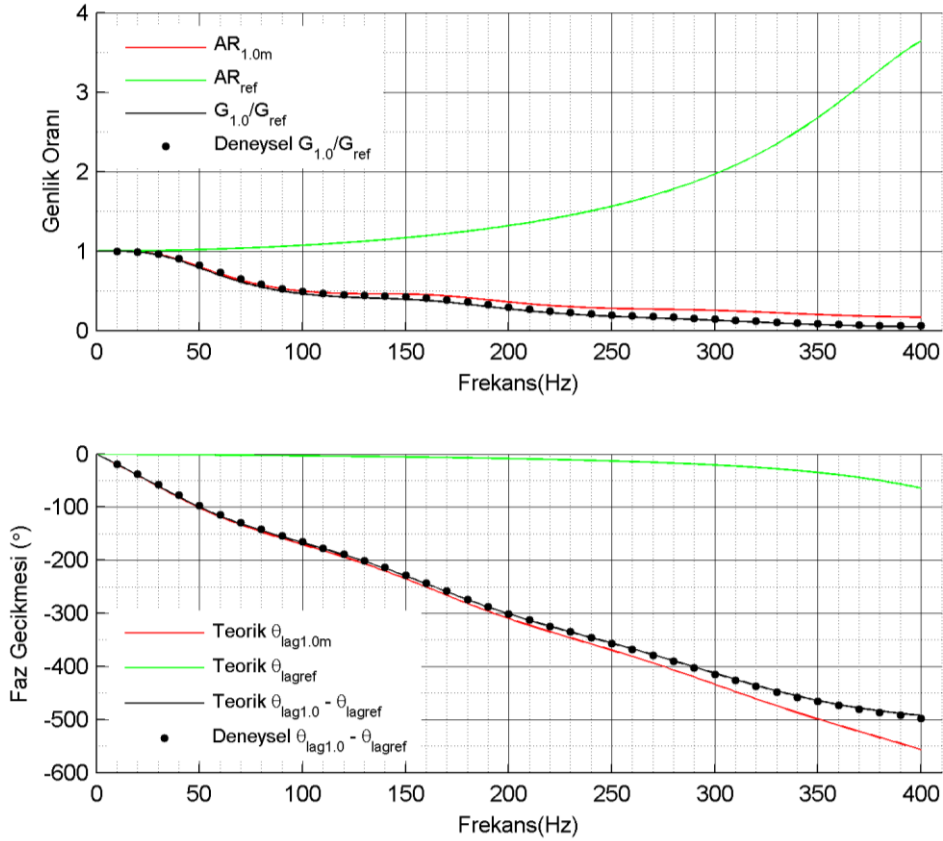
Farklı borulama sistemleri için yapılan deneylerin sonuçlarının teori ile karşılaştırılması Şekil 6.4 - Şekil 6.24 arasında yapılmıştır. Teori kullanılarak yapılan hesaplamalarda her deneye ait ortamın sıcaklık ve basınç ölçümü sonuçları kullanılmıştır.



Şekil 6.4 : Deneysel sonuçların teori ile karşılaştırılması (D=0,9 mm).

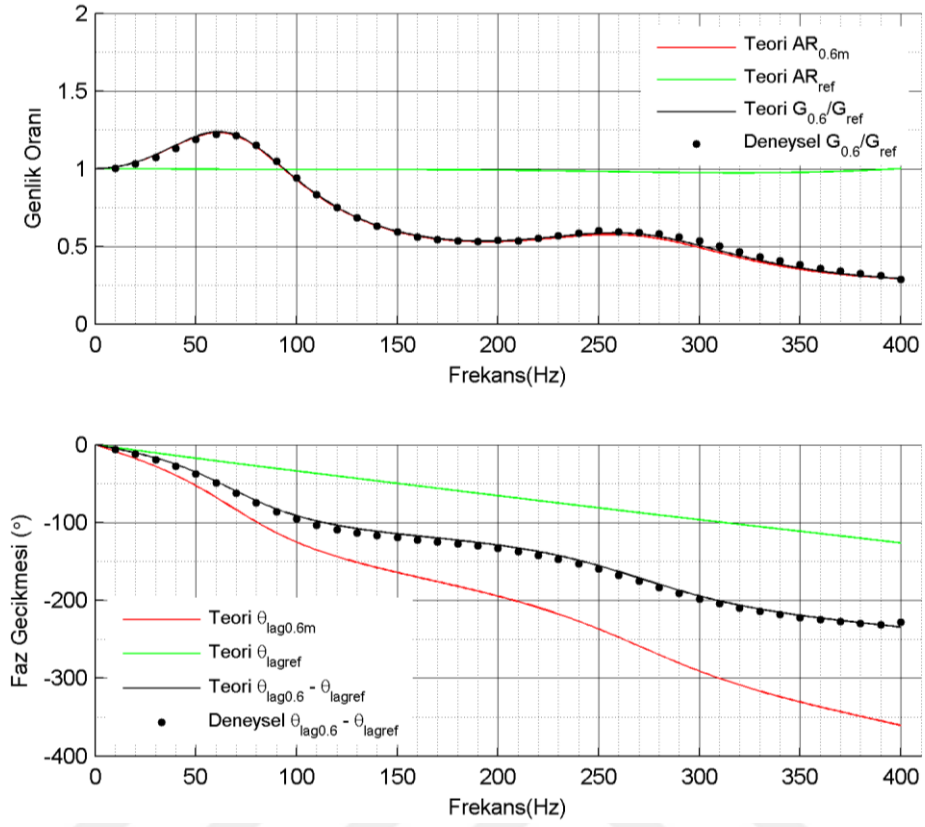


Şekil 6.5 : Deneysel-2 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).

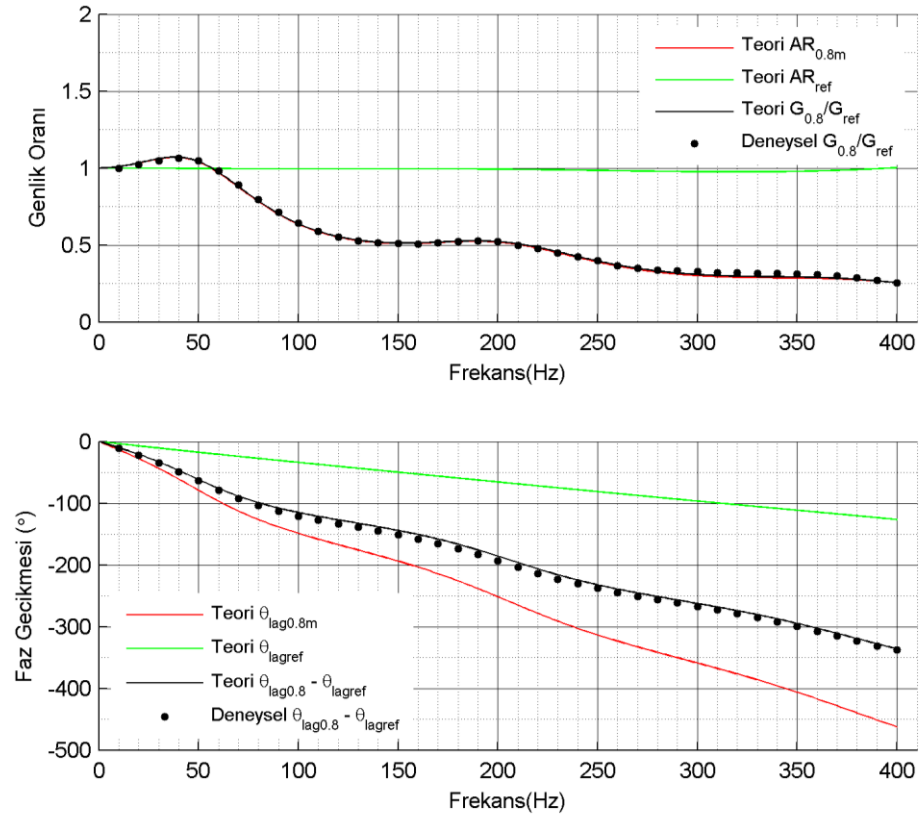


Şekil 6.6 : Deneysel-3 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).

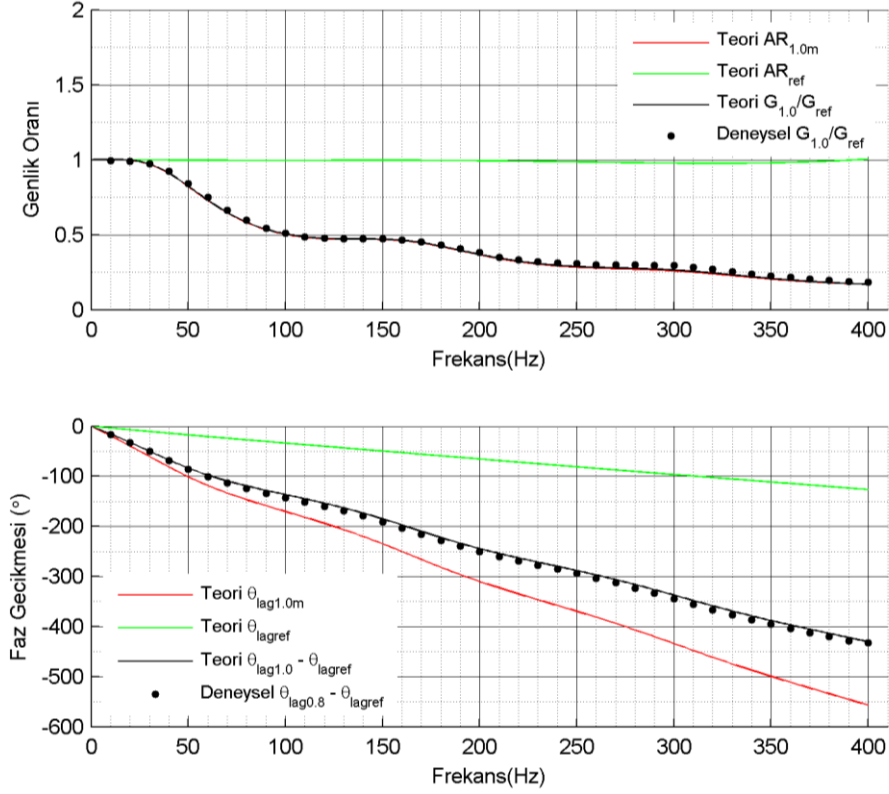
Deney-1,2,3'te teori ile yapılan hesaplamaların uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.7 : Deney-4 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).

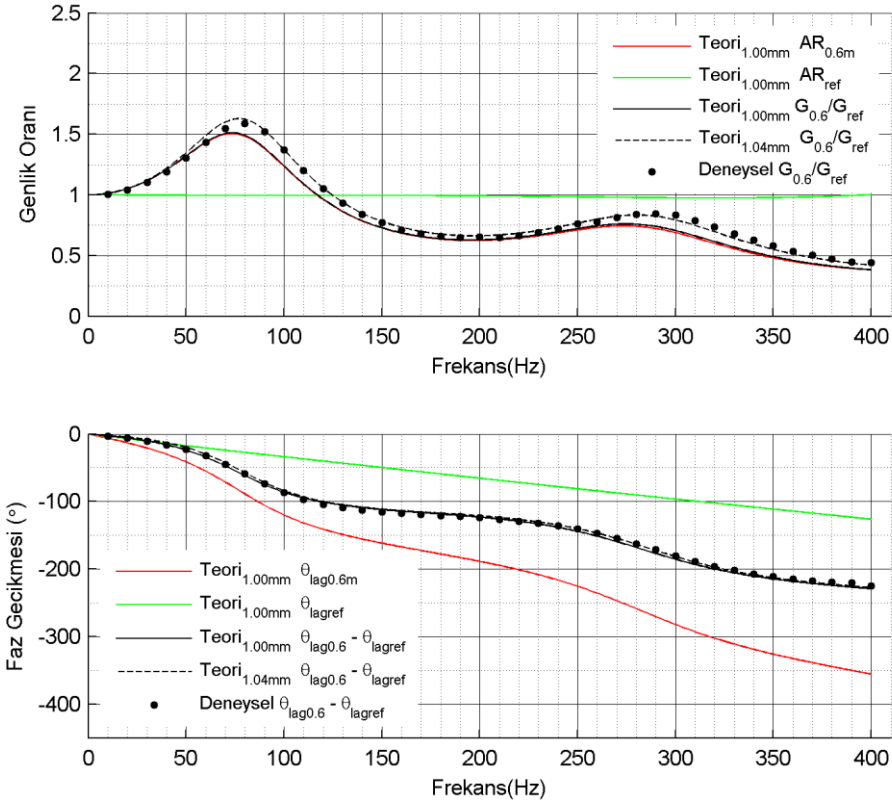


Şekil 6.8 : Deney-5 ile teorinin karşılaştırması (D=0,9 mm).

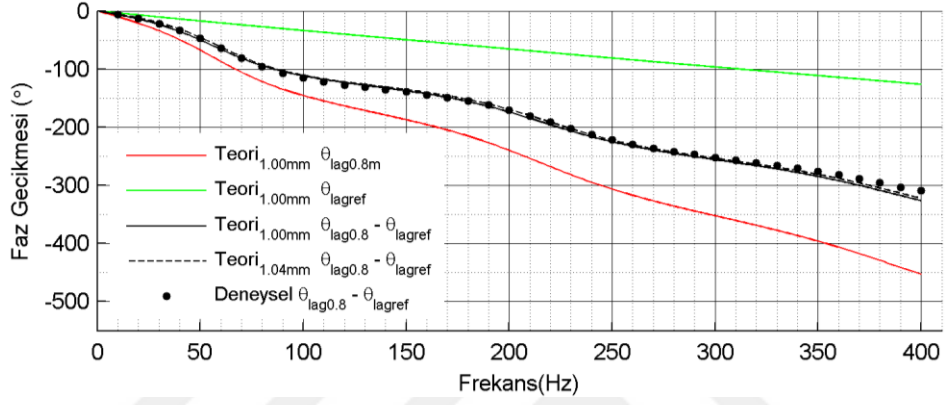
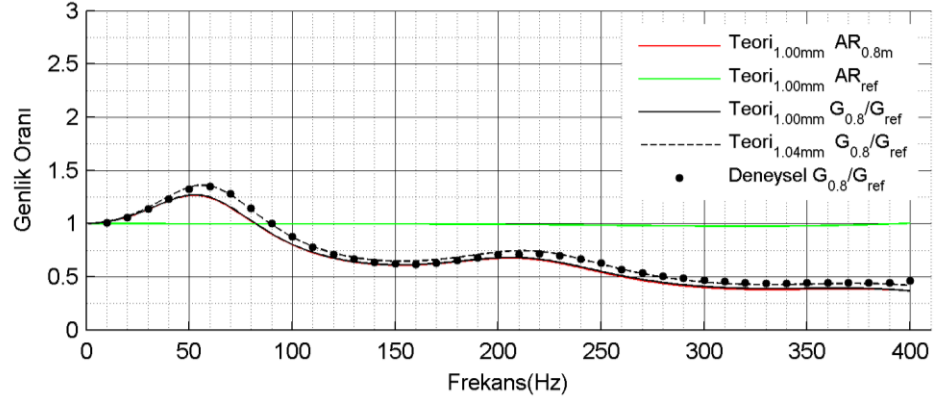


Şekil 6.9 : Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırılması (D=0,9 mm).

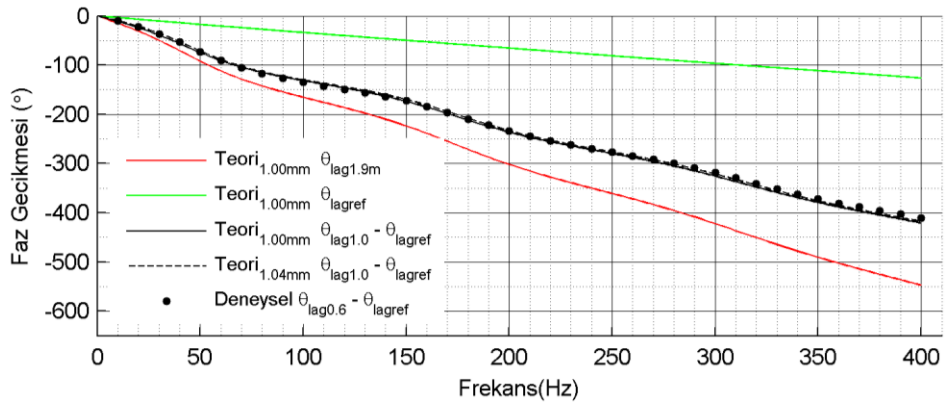
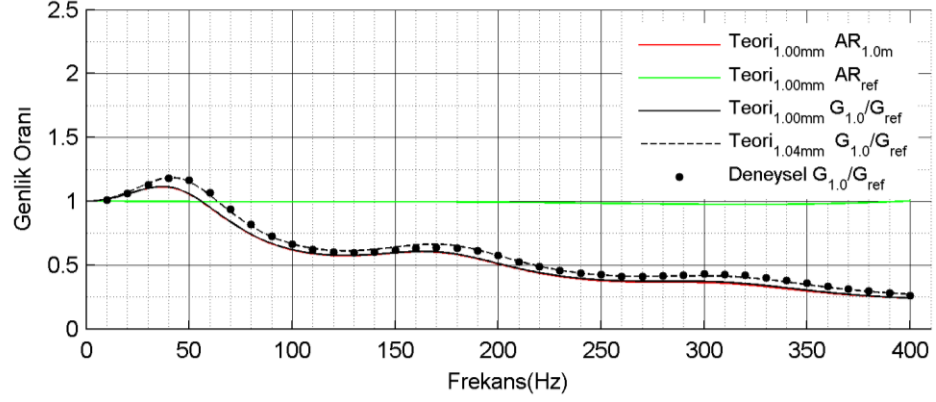
Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırılması ile deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir.



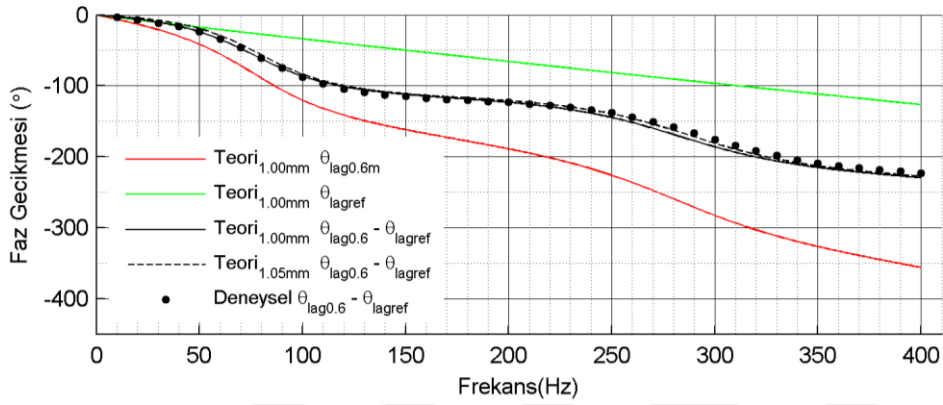
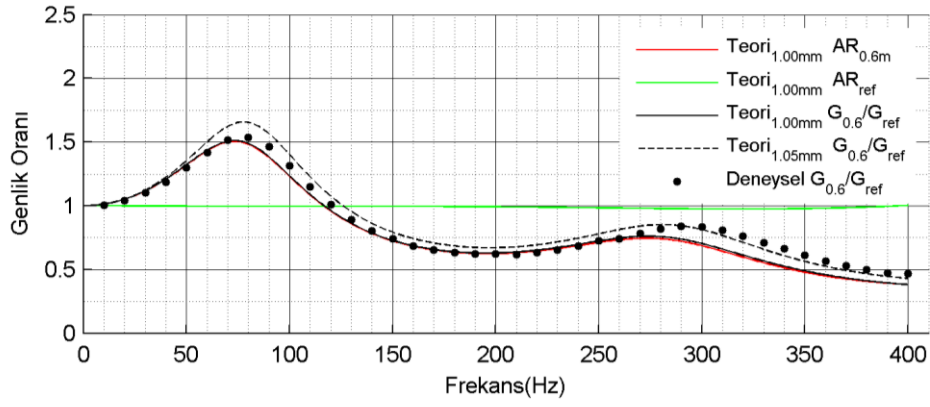
Şekil 6.10 : Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırılması (D=1,0 mm).



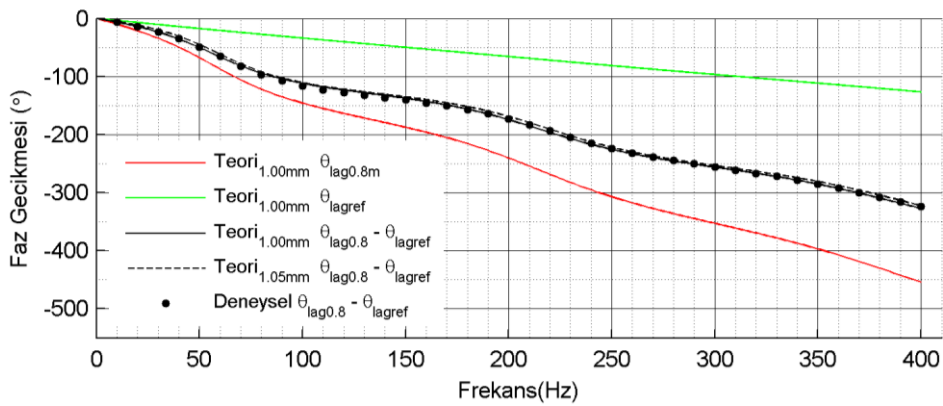
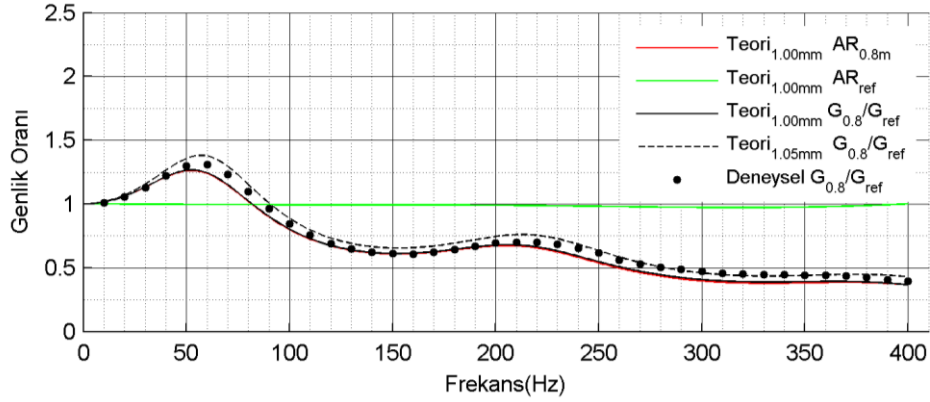
Şekil 6.11 : Deney-8 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).



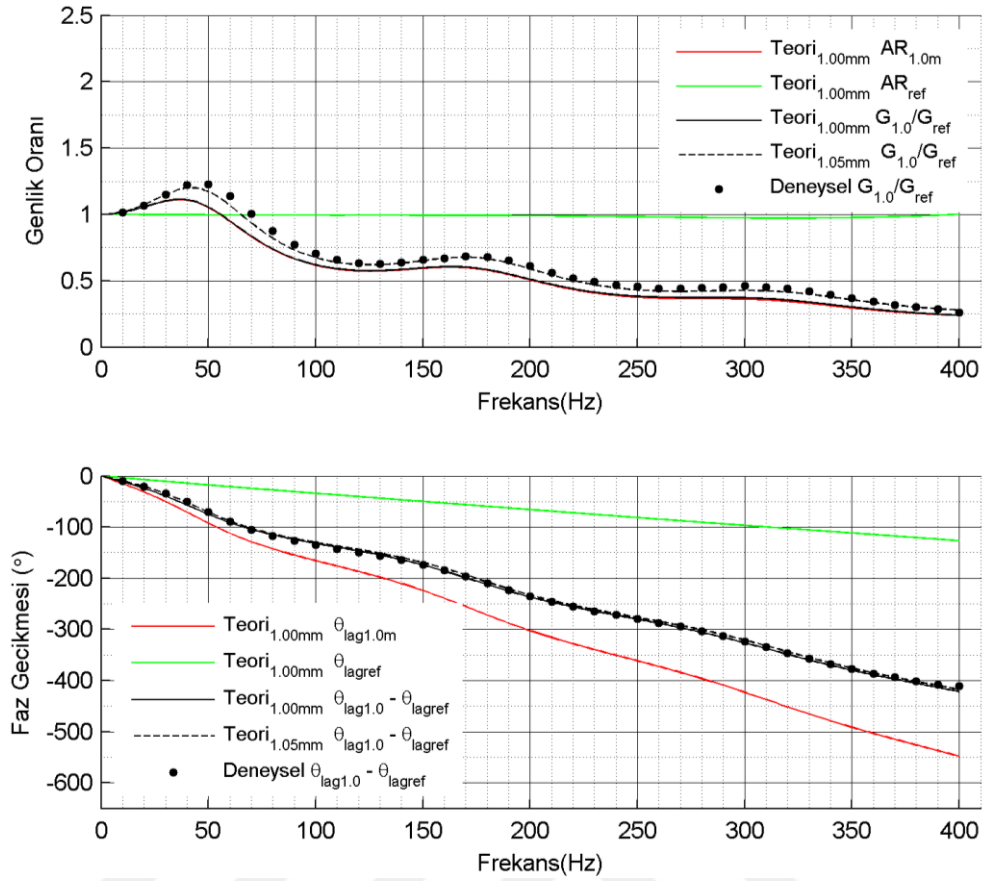
Şekil 6.12 : Deney-9 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).



Şekil 6.13 : Deneysel-10 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).



Şekil 6.14 : Deneysel-11 ile teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).



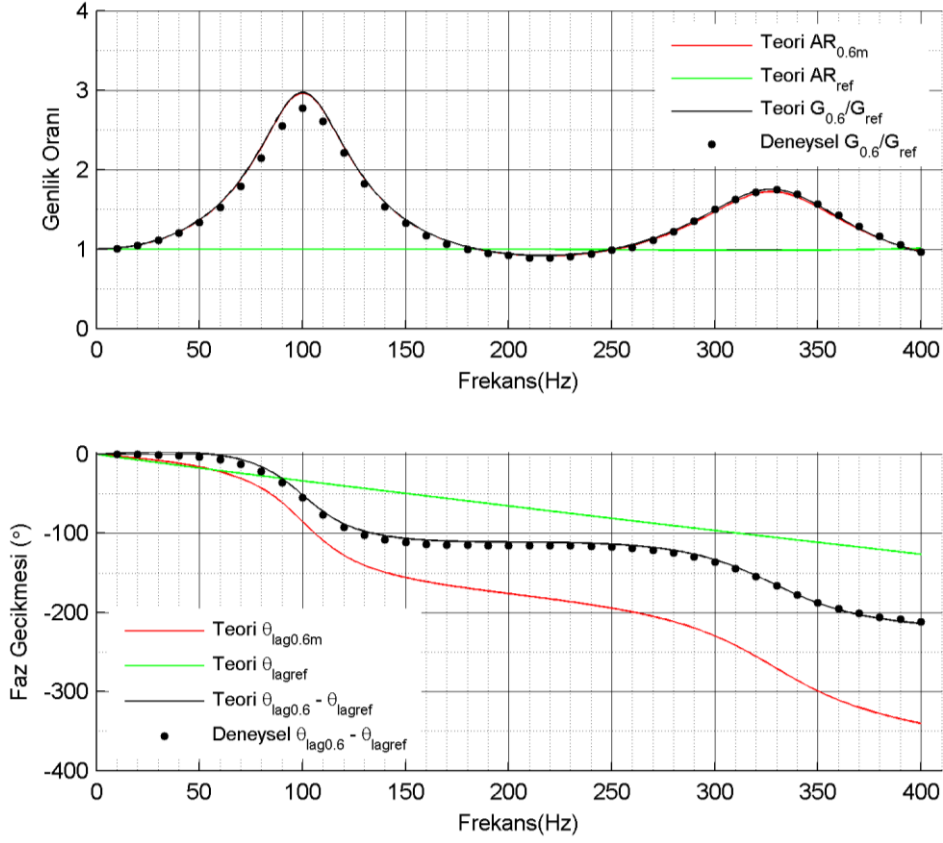
Şekil 6.15 : Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırması (D=1,0 mm).

Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırılması için D=1,0 mm için yapılan deneyler, farklı malzemeden üretilmiş borular kullanılmıştır. Boruların çapları 1,00 mm alınarak teori ile karşılaştırıldığında farkın olduğu gözlemlenmiştir.

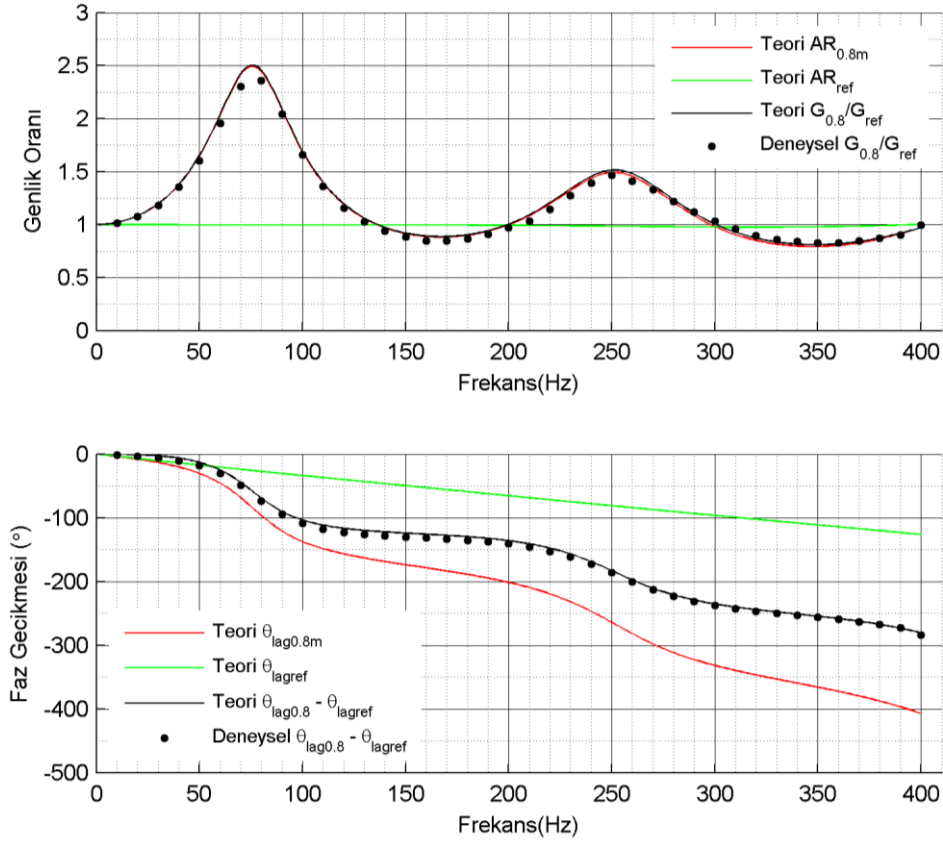
Boru çapı Deneysel sonuçlar için 1,04 mm alındığında teori ile deney sonuçları arasındaki fark azalmaktadır.

Deneysel sonuçlar için boru çapı 1,05 mm alındığında 0,6 m'lik boru için teori ile deney sonuçları arasındaki fark 200 Hz'in altındaki oranlarda artarken, 200 Hz üstündeki oranlarda azalmaktadır. Boru incelendiğinde malzemesinin esnek olduğu ve uzunluğu boyunca sabit bir çap ve dairesellik hassasiyetinin düşük olduğu görülmüştür. Teori ile olan farkın değişken olması bu sebeplerden kaynaklanmaktadır.

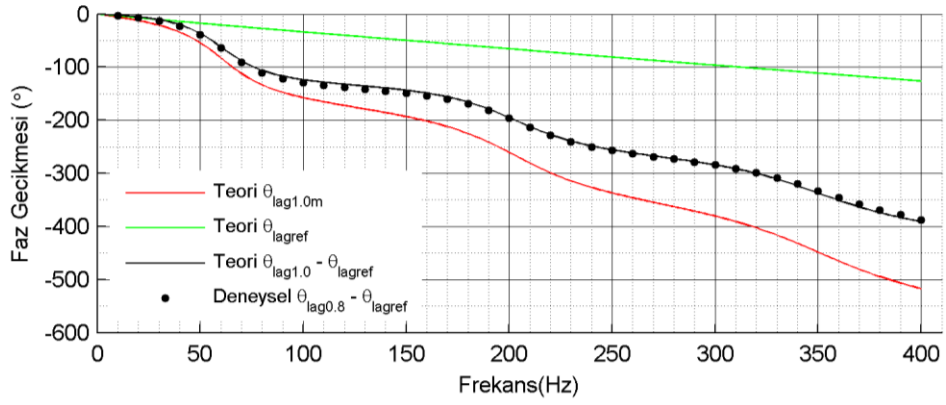
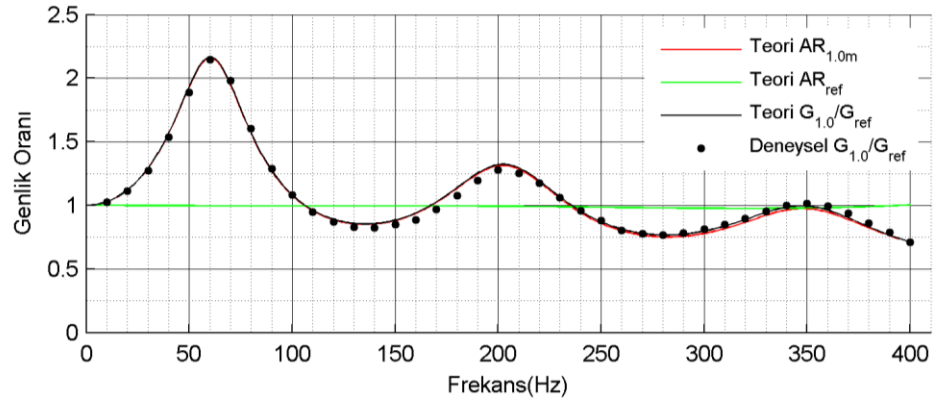
1,00 mm çaplı PVC ve PU boruların frekansa göre genlik oranlarının malzeme özelliklerine göre doğru bir şekilde karşılaştırılması için aynı ve yüksek hassasiyete sahip çapa sahip olması gerekmektedir.



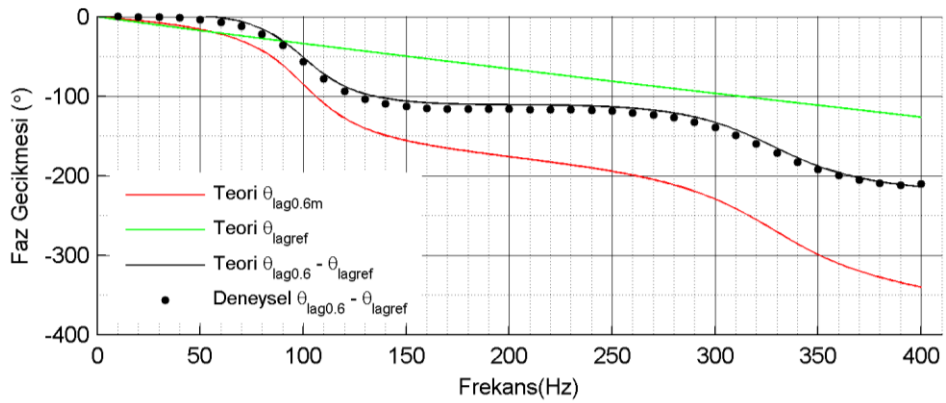
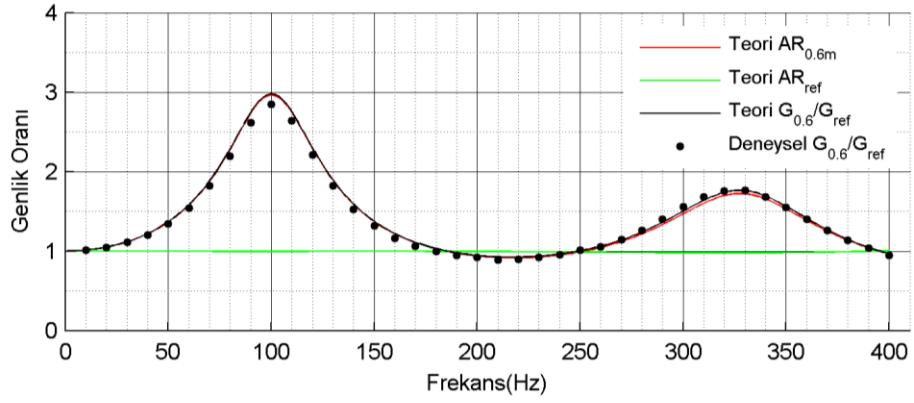
Şekil 6.16 : Deneysel-13 ile teorisinin karşılaştırması (D=1,5 mm).



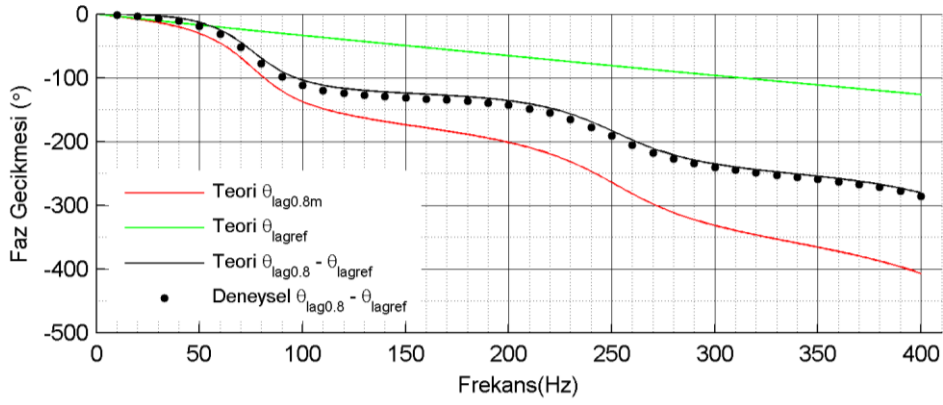
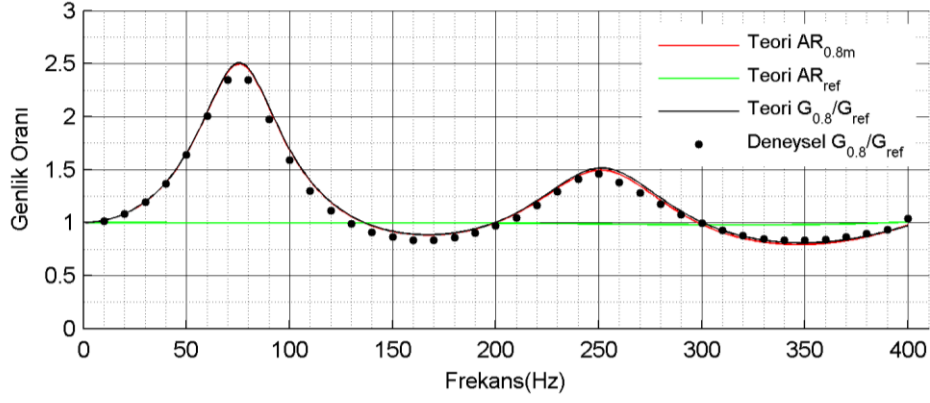
Şekil 6.17 : Deneysel-14 ile teorisinin karşılaştırması (D=1,5 mm).



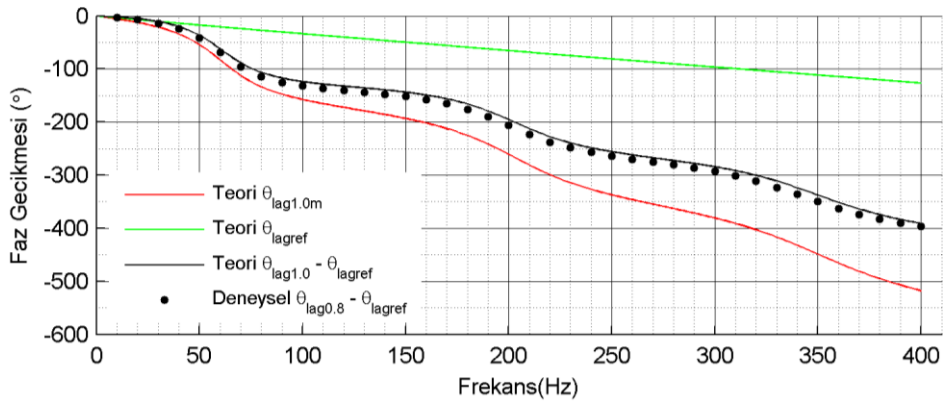
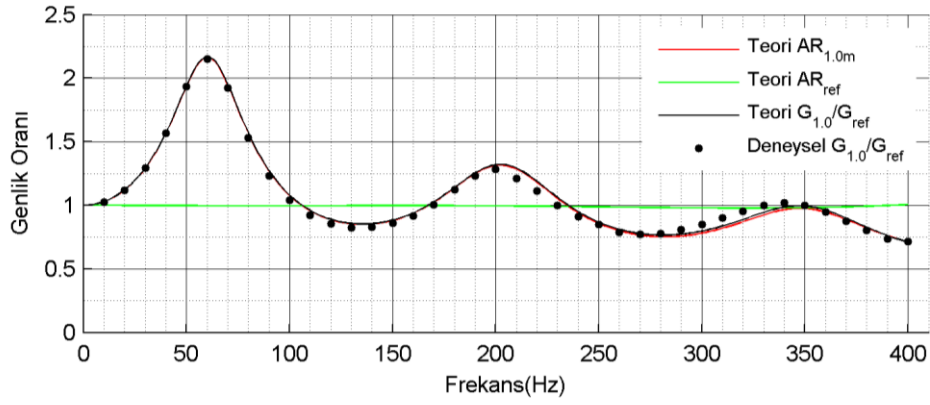
Şekil 6.18 : Deneysel ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).



Şekil 6.19 : Deneysel ile teorinin karşılaştırması (D=1,5 mm).

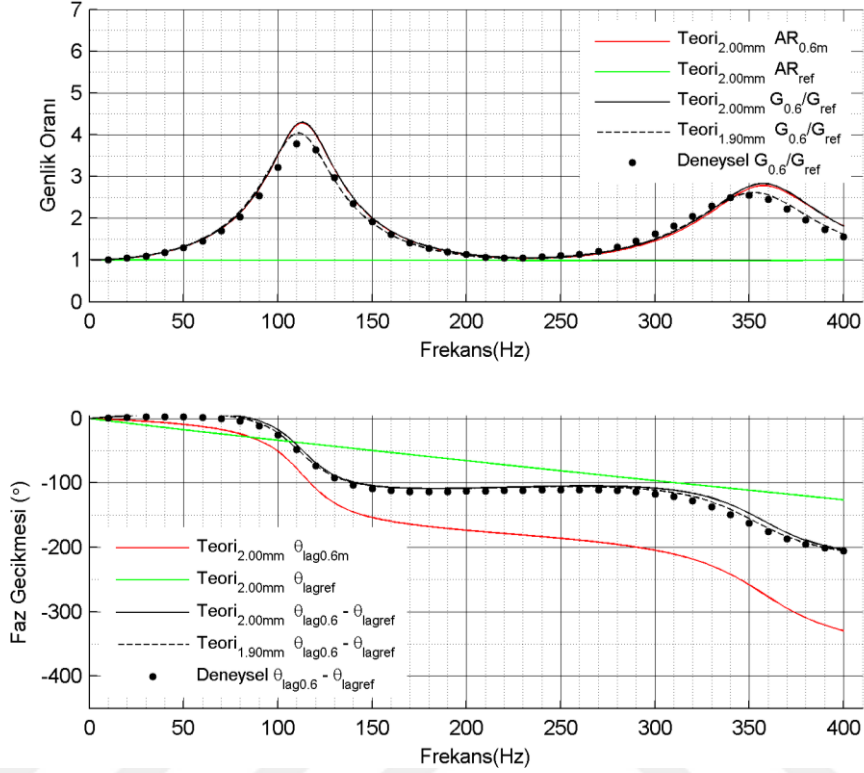


Şekil 6.20 : Deneysel-17 ile teorisinin karşılaştırması (D=1,5 mm).

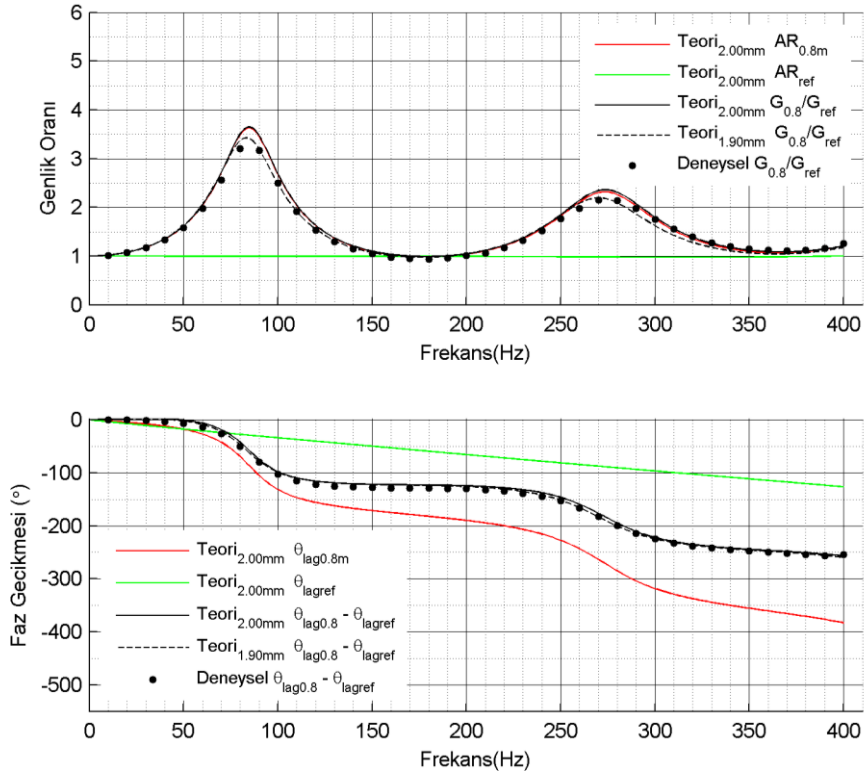


Şekil 6.21 : Deneysel-18 ile teorisinin karşılaştırması (D=1,5 mm).

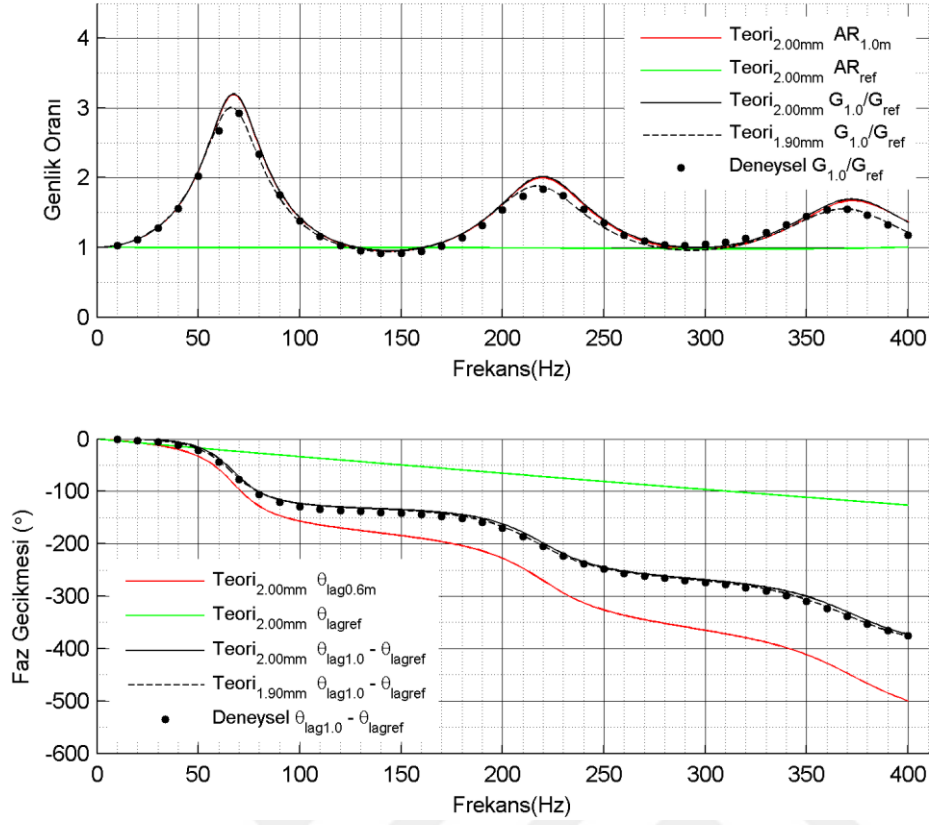
Deney-13, 14, 15 ve Deney-16, 17, 18 sonuçları incelendiğinde teori kullanılarak yapılan hesaplamalar ile deney sonuçlarının uyumunun yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6.22 : Deney-19 ile teorinin karşılaştırması (D=2,0 mm).



Şekil 6.23 : Deney-20 ile teorinin karşılaştırması (D=2,0 mm).

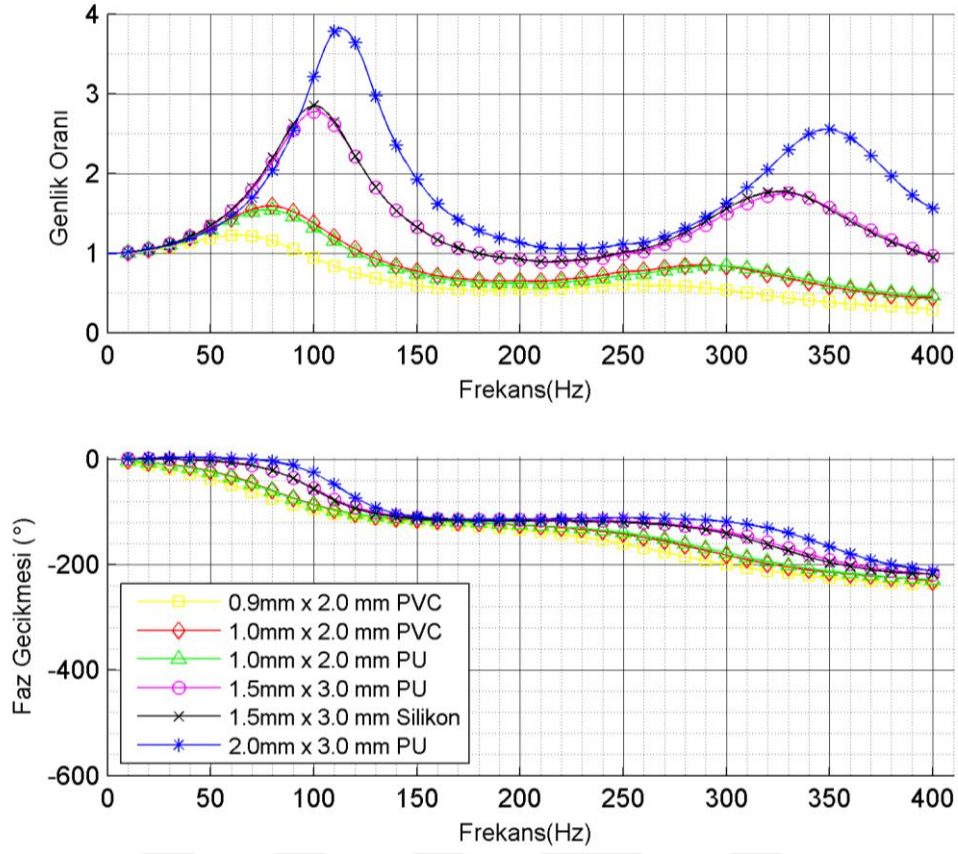


Şekil 6.24 : Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırması (D=2,0 mm).

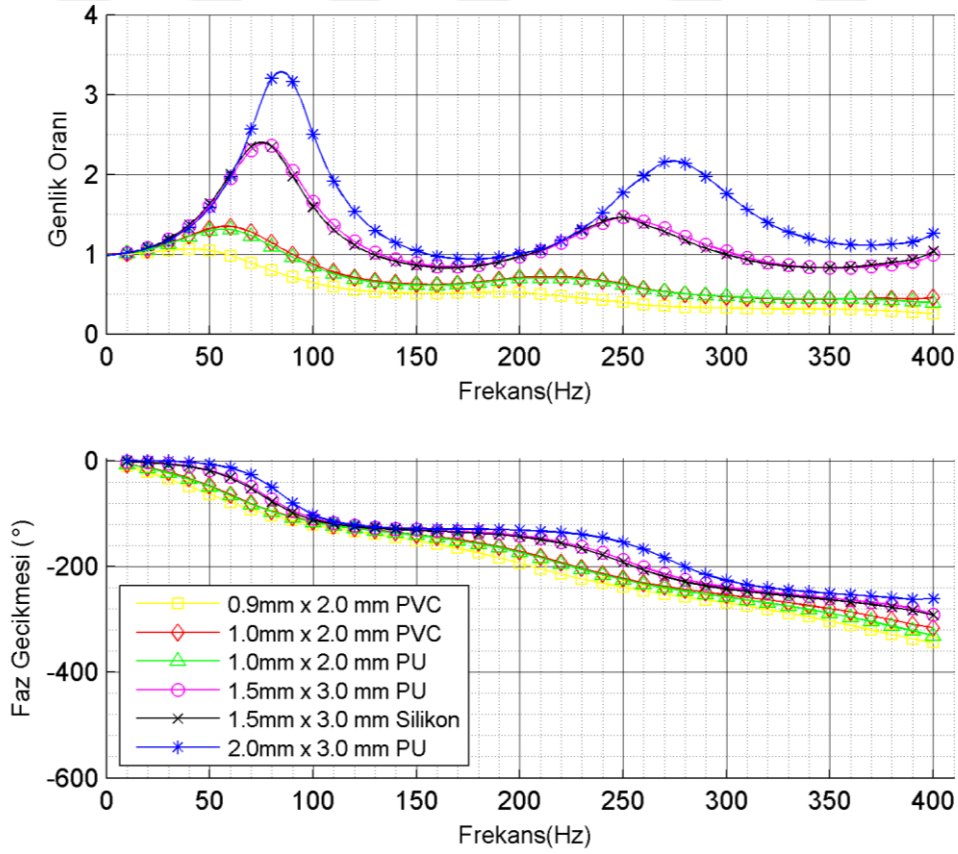
Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırılması (D=2,0 mm). Deneysel sonuçları incelendiğinde teori kullanılarak yapılan hesaplamalarda çap 1,9 mm alındığında teori ile uyumunun arttığı görülmektedir.

6.2.2 Farklı çap, uzunluk ve malzemelerin karşılaştırılması

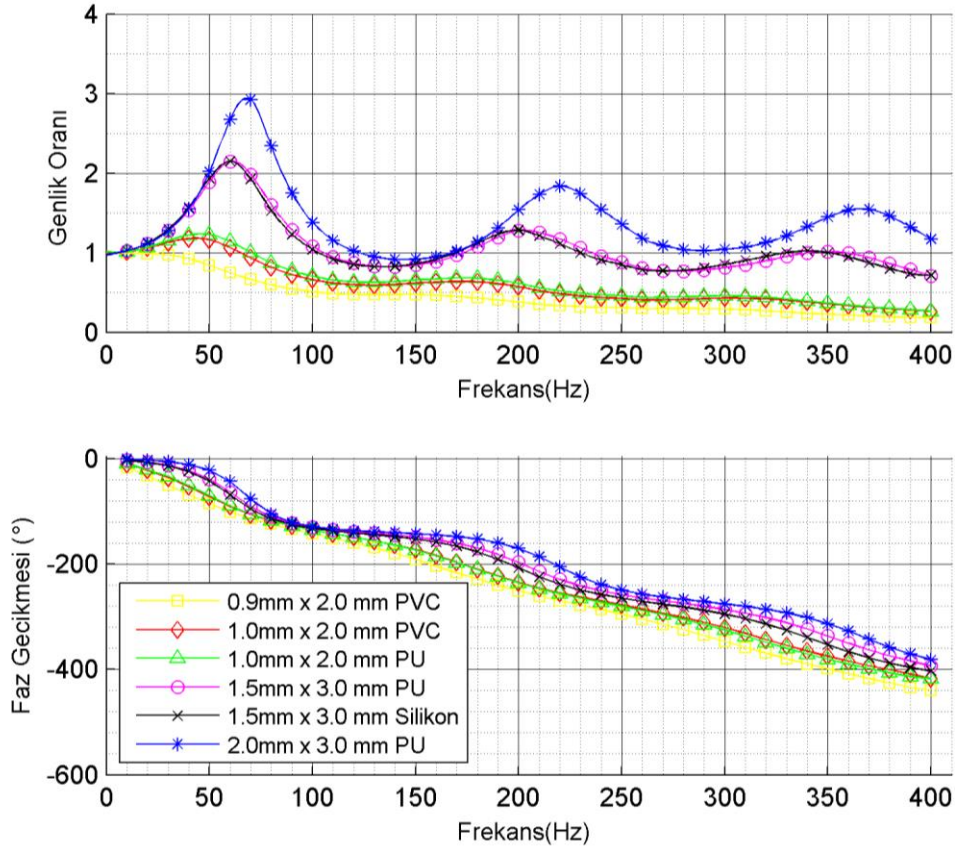
Farklı çaplarda aynı uzunluktaki boruların RBS-2 ile yapılan ölçüm sonuçları Şekil 6.25 - Şekil 6.27 arasında verilmiştir.



Şekil 6.25 : Deney-4, 7, 10, 13, 16 ve 19'un karşılaştırması (L=0,6 m).



Şekil 6.26 : Deney-5, 8, 11, 14, 17 ve 20'nin karşılaştırması (L=0,8 m).



Şekil 6.27 : Deney-6, 9, 12, 15, 18 ve 21'in karşılaştırması (L=1,0 m).

Uzunluğu 0,6 m olan farklı çaptaki borular incelendiğinde boru çapı azaldıkça rezonans frekanslarının azaldığı ve boru çapı 1,0 mm ve altındaki borularda genliğin frekans yükseldikçe 1'in altına düştüğü deney sonuçlarından görülmektedir.

1,0 mm iç çaplı farklı malzemeli ve uzunluktaki boruların rezonans frekansları arasındaki değişim incelendiğinde, yumuşak olan polüretan borunun sönümlenmesi PVC boruya göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak boruların iç çaplarının üretim hassasiyetinin düşük olması bu karşılaştırma için uygun değildir.

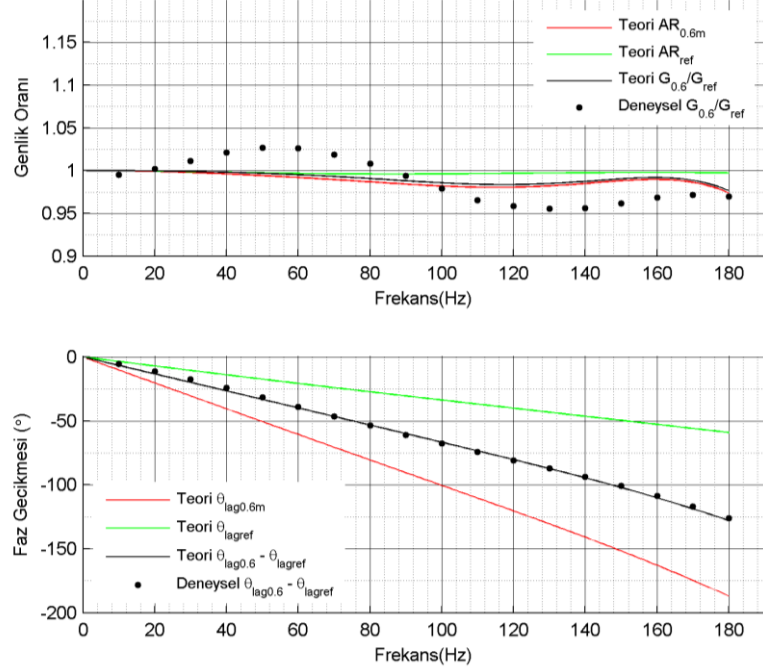
Uzunlukları 0,8 m boruların frekansa göre genliklerindeki azalmakta 0,6 m'lik borulara göre daha fazladır. Ancak 1,0 m uzunluğundaki borularda ise frekansa bağlı genlik oranındaki azalmaya ek olarak oluşan rezonans sıklığı sayısı iç çapları 2,0 mm ve 1,5 mm olarak borulardaki artışı belirgin olarak grafiklerden fark edilmektedir.

0,8 m ve 1,0 m'lik 1,5 mm çaplı silikon ve polüretan boruların rezonans frekanslarında değişimi arasında fark gözlenmemektedir.

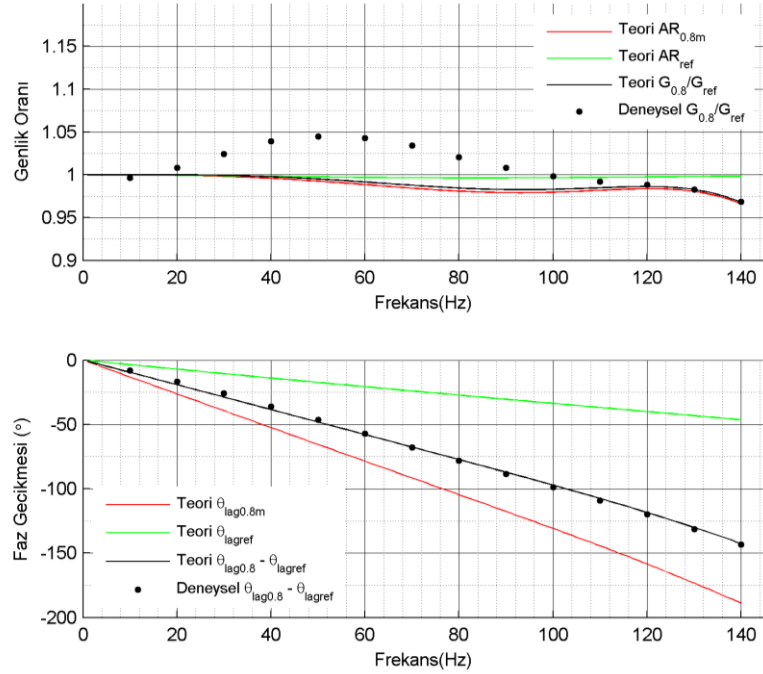
Faz gecikmesi boru uzunluğuna daha fazla bağlı olduğu ve uzunluk arttıkça faz gecikmesinin arttığı grafiklerden görülmektedir.

6.2.3 Kısıtlayıcı borulama sistemleri

Teori kullanılarak özellikleri hesaplanmış kısıtlayıcıların 0,6 m ve 0,8 m'lik boru uzunluklarına göre deney sonuçları Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da verilmiştir.



Şekil 6.28 : Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırılması.



Şekil 6.29 : Deneysel sonuçların teorinin karşılaştırılması.

Kısıtlayıcının boru sisteminin frekansa bağlı olarak genlik oranını istenilen 0,95 - 1,05 değerleri arasında tuttuğu grafiklerden görülmektedir.



7. SONUÇ

Boru sistemlerinin girişine uygulanan sinüzoidal basıncın frekansa göre genlik ve faz gecikmesinin değişiminin teori ile hesaplanması için yazılım yardımıyla kod oluşturulmuştur. Frekansa bağlı genlikteki değişimin farklı boru sistemleri için incelemesi bu kod yardımıyla yapılmıştır. Ortam şartlarından sıcaklık, basınç ve nemin genlik oranı üstündeki etkisi de bu incelemeye dahil edilmiştir. Ortamın sıcaklık ve basıncının rezonansın olduğu frekans üzerindeki etkisi neme göre daha yüksek olduğu teori kullanılarak yapılan hesaplamalarda görülmüştür. Genlik oranının 0,95 - 1,05 arasına getirilmesi için uygulanan kısıtlayıcıların özellikleri teori kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda belirlenmiştir.

Borulama sistemlerindeki frekansa göre genlik oranları ve faz gecikmelerinin deneysel inceleme için dinamik basınç üretici sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Farklı özellikteki boru sistemlerinin frekansa bağlı genlik ve faz gecikmesindeki etkileri teori ile beraber dinamik basınç üretici kullanılarak yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan üretim hassasiyeti yüksek olan borular ile elde edilen sonuçlar teori ile uyum göstermektedir. Üretim hassasiyetleri düşük olan borularda ise çapın yaklaşık olarak $\pm\%5$ 'i alındığında teori ile uyumu artmaktadır. Teori kullanılarak dinamik basınç ölçümlerinde kullanılan borulama sistemlerinin kalibrasyonunun yapılması için borunun özelliklerinin yüksek doğrulukta bilinmesi ve kullanılması gerektiği deney sonuçlarından görülmüştür.

Uzunlukları 0,6 m, 0,8 m ve 1,0 m'lik farklı çaptaki boruların deney sonuçları karşılaştırılmış ve boruların çap, uzunluk ve üretildiği malzemenin etkisi incelenmiştir. Boru çapının azalması ve uzunluğunun artması frekansa göre genlik oranlarını düşürmektedir.

Aynı çapa ve uzunluğa sahip farklı malzemedeki boruların frekansa göre genlik oranlarındaki değişiminin araştırılması için daha fazla sayıda aynı çapta farklı malzemedeki boruların deneysel olarak incelenmesi gerekmektedir.

0,6 m ve 0,8 m'lik boruların frekansa göre genlik oranlarındaki bozulmasının azaltılması için teori ile yapılan optimizasyon sonucunda özellikleri belirlenen kısıtlayıcıların kullanılmasının doğru bir yöntem olduğu deney sonuçlarında görölmektedir.

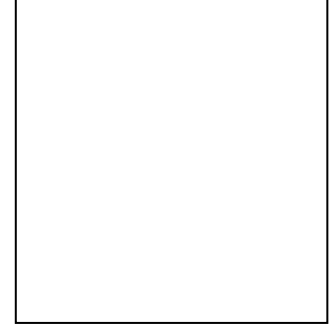


KAYNAKLAR

- [1] **Url-1**, <https://www.kistler.com/uploads/tx_owlslider/prt--pressure-sensor-type-406xa-control-propellant-pressures.jpg>, alındığı tarih: 29.04.2019.
- [2] **Url-2**, <https://www.nasa.gov/sites/default/files/styles/226xvariable_height/public/dsc_3074_1.jpg?itok=e48xC5G2>, alındığı tarih: 29.04.2019.
- [3] **Url-3**, <https://www.kistler.com/fileadmin/_processed_/csm_934-608_web_8-3_ebcd2e0331.jpg> , alındığı tarih: 29.04.2019
- [4] **Hjelmgren , J.**, (2002). Dynamic measurement of pressure - A literature survey (SP Report 2002:34).
- [5] **Url-4**, <https://rwdi.com/assets/site/Burj_Khalifa-2.jpg>, alındığı tarih: 29.04.2019.
- [6] **Url-5**, <<http://www.windtunnel.polimi.it/wp-content/uploads/2016/12/new14.jpg>>, alındığı tarih: 29.04.2019.
- [7] **ASCE** (2012). Wind tunnel testing for buildings and other structures (ASCE/SEI 49-12).
- [8] **S Iberall, A.** (1950). Attenuation of Oscillatory Pressures in Instrument Lines. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol.45(1).
- [9] **Bergh, H. ve Tijdeman, H.** (1965). Theoretical and Experimental Results for The Dynamic Response of Pressure Measuring Systems, National Aero And Astronautical Research Institute Technical Report, NLR-TR F.238.
- [10] **Irwin, H. P. A. H., Cooper, K. R., ve Girard, R.** (1979). Correction of distortion effects caused by tubing systems in measurements of fluctuating pressures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.5(1-2), pp. 93-107.
- [11] **Holmes, J. D., ve Lewis, R. E.** (1987). Optimization of dynamic-pressure-measurement systems. I. Single point measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.25(3), pp. 249-273.
- [12] **Yoshida, A., Tamura, Yukio., Kurita, T.** (2001). Effects of bends in a tubing system for pressure measurement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.89., pp. 1701-1716.
- [13] **Wang, X., Wang, X., Ren, X., Yin, X., Wang, W.** (2018). Effects of tube system and data correction for fluctuating pressure test in wind tunnel. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol.31(4)., pp. 710-718.

- [14] **Rofail, A.W., Tonin, R., ve Hanafi D.** (2004). Sensitivity of frequency response to type of tubing. 11th Australasian Wind Engineering Society Workshop.
- [15] **Kovaerk, M. , Amatucci, L., A Gillis, K., A Potra, F., Ratino, J., Levitan, M., Yeo, D.** (2018). Calibration of dynamic pressure in a tubing system and optimized design of tube configuration: a numerical and experimental study, *National Institute of Standards and Technology Technical Note*, NIST.TN.1994.
- [16] **Štefe, M., Svete, A., ve Kutin, J.** (2018). Development of a dynamic pressure generator based on a loudspeaker with improved frequency characteristics. *Measurement*, Vol. 122, pp. 212-219.
- [17] **McQuillan, F.J. and Culham, J.R. and Yovanovich, M.M.**(1984). Properties of dry air at one atmosphere. Microelectronics Heat Transfer Lab, University of Waterloo.
- [18] **Blevins, R.D.** (1979). *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, New York, Van Nostrand Reinhold Company.
- [19] **Tsilingiris, P.** (2008). Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 °C. *Energy Conversion and Management*, Vol.49, pp.1098–1110.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ege Gökhan HASDAL

Doğum Tarihi ve Yeri : Ankara 1988

E-posta : hasdal@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İTÜ, Uçak Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** :